目錄

核能與除役安全科技 1

01-長回歸期地震之地盤反應分析與特性之探討 3
02-數位雙生技術在核能電廠除役之應用經驗與安全管制導則之研議 7
03-核電廠消防設備於除役階段之維護管理策略研究 11
04-小型模組化反應器發展現況與安全性探討 15
05-壓水式核電廠除役拆除策略之管制研析 18

放射性物料安全科技 23

01-利用 UDEC-Voronoi 模擬處置隧道之開炸損傷區研究 25
02-用過核子燃料最終處置場生物圈生態系統模型建立之研究 29
03-用過核子燃料/高階放射性廢棄物深層地質處置熱-水-力-化(THMC)耦合效應數值模式發展 33
04-放射性廢棄物最終處置場址 CAV 耐震設計準則 37
05-以物理模型試驗模擬緩衝材料縫隙的自癒行為 41
06-功能性梯度水泥基材固化放射廢棄物可行性研究 46
07-低污染放射性廢棄物表面劑量率與核種活度之特性研究 50
08-除役容器超厚熱浸鍍鋅層的安定性評估： 鋼底材矽含量對熱浸鍍鋅鍍層破裂及腐蝕行為的影響 53
09-放射性廢棄物處置場主要核種傳輸動態管柱試驗與參數最佳化之研究 60

輻射防護與放射醫學科技(I) 65

01-設計具有邊緣運算能力之微型機動輻射偵檢器 67
02-建立移動式高風險輻射源使用物聯網及大數據分析技術於輻射安全管制系統或模組可行性評估及設計之研究 71
03-濕氧化碳-14 難測核種分析技術開發 75
04-病人協助者與生醫研究參與者之醫療輻射曝露劑量約束 79
05-高能中子通量劑量轉換因子的研究與量測系統的開發(1/2) 84
06-既存曝露情境之工業及民生應用調查與輻防管制措施精進研析(II) 88

輻射防護與放射醫學科技(II) 93

01-標靶α-突觸核蛋白的正子斷層造影藥物開發(II) 95
02-發展嶄新卵巢癌治療模式:同位素標誌特異性抗體藥物合併化學治療與標靶藥物 99
03-加速器質子射束特性量測與分析技術開發 103
04-質子射束成形與劑量調控研究 108
05-分析 F-18 α-syn-3 於神經毒劑及 PFFs 誘發之 PD 動物腦中之分佈 112
06-使用自動分子影像分析及機器學習來進行類澱粉生物標記暨失智轉化預測 116
07-真實世界的失智診療：核子醫學的角色 120

08-建置 70 MeV 中型迴旋加速器之產業應用評估及核醫資料分析與趨勢研究 123
09-建立非侵入性影像平台以評估人類神經母細胞瘤經硼中子捕獲治療後細胞程式死亡配體-1 之表現量 125
10-應用於 CZT 感測器之四通道訊號讀取電路設計 129

跨域合作與風險溝通(I) 133

01-培力民眾正確面對非核家園之核電廠除役素養觀整合計畫： 新媒體溝通策略之解構與建構（2/2） 135
02-提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識及其成效 144
03-當代原子能法重要法律議題及訴訟案例研析 151
04-原子能訴訟案例探討與研析: 聚焦各國訴訟與國際核能法規間之關聯 155
05-化學遊樂趣 – 從貴重氣體到原子能科學 159
06-『原』來是這樣！ 原子能科普桌遊教材研發與活動推廣 163
07-科展用核能與輻射知識之跨平台電玩遊戲 168
08-以性別平等與跨文化視角進行原子能科普傳播之研究 170
09-科技與藝術人文互融的跨域探究 174

跨域合作與風險溝通(II) 179

01-以珊瑚骨骼硼及鉛同位素探討台灣海域之海洋酸化及鉛汙染史 181
02-以顆粒床堆積與 X 光影像建立虛擬地質三維結構 185
03-以 X 光成像地質結構分析地下水滲透性質 189
04-放射誘變在毛豆適應極端氣候育種之研究 193
05-新型耐火高熵合金應用於高輻射場域之特性分析研究 197
06-發展極紫外光干涉儀與精密複數折射率量測之應用 208
07-應用深度學習建構微尺度孔隙通道非結構網格 212
08-金屬與陶瓷氧化物材料的中子與X光散射/繞射的結構分析與物性研究 217
09-可在輻射區域不平地面的自主巡航機器人研發 221

跨域合作與風險溝通(Ⅲ) 225

01-具有高靈敏度與高可靠度雙閘極氧化銦鎵鋅光電感測薄膜電晶體元件製程開發 227
02-於可撓式基板進行 P 型 Cu 摻雜 CrOx 透明導電氧化物與紫外光偵測器之研製 232
03-使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台培育前瞻原子科學人才 239
04-具半導體準線上整合能力之 X 光技術開發 243
05-極紫外光及以下波段光學元件之保護膜材料開發與微影製像應用 247
06-以磊晶鍺層整合種子層、應力層與新穎結晶回火技術實現抗輻射之鐵電記憶體元件 251
07-中子轉化摻雜技術於氮化鎵磊晶式異質基板之應用可行性評估 255
08-先進矽鍺場效電晶體元件之製程與抗輻射特性研究 260
09-X 光、電子等量子束於氧化亞銅異質奈米結構光電化學產氫膜層之材料分析研究與人才培育 264

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會議程

時間：113 年 09 月 05 日（星期四）

地點：國立政治大學公共行政及企業管理教育中心 (台北市大安區金華街 187 號)

各領域場地：

報到	6 樓大廳	09:30~10:00
開 幕 典 禮	6 樓：A646 廳	10:00~10:30

領域	場地（地點）	時間
核能與除役安全科技（N1）	9 樓：A903 室	10:40~12:20
放射性物料安全科技（N2）	9 樓：A904 室	10:40~15:00
輻射防護與放射醫學科技 I（N3）	9 樓：A903 室	13:00~15:10
輻射防護與放射醫學科技 II（N3）	9 樓：A938 室	10:40~15:00
跨域合作與風險溝通 I（N4）	6 樓：A646 廳	10:40~14:50
跨域合作與風險溝通 II（N4）	9 樓：A901 室	10:40~15:00
跨域合作與風險溝通III（N4）	9 樓：A902 室	10:40~15:00

閉幕典禮（優良計畫頒獎）	6 樓：A646 廳	15:30~16:00

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 1：核能與除役安全科技（N1)					
會場地點：9 樓 A903 室（上午）					
場序	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
1	10:40~11:00	高斌*、廖俐毅、吳文方、單秋成	郭安妮	國立臺灣大學土木工程學系暨研究所	長回歸期地震之地盤反應分析與特性之探討
2	11:00~11:20		丁鯤	龍華科技大學化工與材料工程系	數位雙生技術在核能電廠除役之應用經驗與安全管制導則之研議
3	11:20~11:40		黃育祥	中央警察大學消防學系	核電廠消防設備於除役階段之維護管理策略研究
4	11:40~12:00		葉宗洸	國立清華大學工程與系統科學系	小型模組化反應器發展現況與安全性探討
5	12:00~12:20		許文勝	國立清華大學原子科學技術發展中心	壓水式核電廠除役拆除策略之管制研析
--	12:20~13:00		午餐及綜合討論		
	15:30~16:00		閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）		

*會議主持人

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 2：放射性物料安全科技（N2）					
會場地點：9 樓 A904 室					
場序	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
1	10:40~11:00	李彥良*、謝榮春、鄭武昆、魏聰揚	楊長義	淡江大學學校財團法人淡江大學土木工程學系	利用 UDEC-Voronoi 模擬處置隧道之開炸損傷區研究
2	11:00~11:20		林文勝	國立臺灣大學水工試驗所	用過核子燃料最終處置場生物圈生態系統模型建立之研究
3	11:20~11:40		陳瑞昇	國立中央大學應用地質研究所	用過核子燃料/高階放射性廢棄物深層地質處置熱-水-力-化(THMC)耦合效應數值模式發展
4	11:40~12:00		王瑞斌	國立中央大學土木工程學系	放射性廢棄物最終處置場址 CAV 耐震設計準則
--	12:00~13:00		**午餐及意見交換**		
5	13:00~13:20		洪汶宜	國立中央大學土木工程學系	以物理模型試驗模擬緩衝材料縫隙的自癒行為
6	13:20~13:40		陳君弢	國立臺灣科技大學營建工程系	功能性梯度水泥基材固化放射廢棄物可行性研究
7	13:40~14:00		吳杰	國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系	低污染放射性廢棄物表面劑量率與核種活度之特性研究
--	14:00~14:20		**中場休息**		
8	14:20~14:40		王朝正	國立臺灣科技大學機械工程系	除役容器超厚熱浸鍍鋅層的安定性評估
9	14:40~15:00		田能全	國立清華大學原子科學技術發展中心	放射性廢棄物處置場主要核種傳輸動態管柱試驗與參數最佳化之研究
--	15:00~15:30		**綜合討論（6 樓供應點心）**		
	15:30~16:00		**閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）**		

*會議主持人

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 3：輻射防護與放射醫學科技 I（N3）					
會場地點：9 樓 A903 室（下午）					
場序	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
1	13:00~13:20	蔡親賢*、施建樑、王信二、邱志宏	姚書農	國立臺北大學電機工程學系	設計具有邊緣運算能力之微型機動輻射偵檢器
2	13:20~13:40		簡儀欣	逢甲大學材料科學與工程學系	建立移動式高風險輻射源使用物聯網及大數據分析技術於輻射安全管制系統或模組可行性評估及設計之研究
3	13:40~14:00		謝玲鈴	中臺科技大學醫學影像暨放射科學系	濕氧化碳-14 難測核種分析技術開發
--	14:00~14:10		中場休息		
4	14:10~14:30		蔡惠予	國立清華大學核子工程與科學研究所	病人協助者與生醫研究參與者之醫療輻射曝露劑量約束
5	14:30~14:50		許榮鈞	國立清華大學核子工程與科學研究所	高能中子通量劑量轉換因子的研究與量測系統的開發
6	14:50~15:10		許芳裕	國立清華大學原子科學技術發展中心	既存曝露情境之工業及民生應用調查與輻防管制措施精進研析
--	15:10~15:30		綜合討論（6 樓供應點心）		
	15:30~16:00		閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）		

*會議主持人

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 4：輻射防護與放射醫學科技 II（N3）					
會場地點：9 樓 A938 室					
場序	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
1	10:40~11:00	林武智*、魏孝萍、江啟勳、黃文彥	邱創新	國防醫學院核子醫學科	標靶α-突觸核蛋白的正子斷層造影藥物開發
2	11:00~11:20		江盈澄	國立臺灣大學醫學院婦產科	發展嶄新卵巢癌治療模式:同位素標誌特異性抗體藥物合併化學治療與標靶藥物
3	11:20~11:40		藍貫哲	國立清華大學核子工程與科學研究所	加速器質子射束特性量測與分析技術開發
4	11:40~12:00		趙自強	長庚大學醫學影像暨放射科學系	質子射束成形與劑量調控研究
--	12:00~13:00		**午餐及意見交換**		
5	13:00~13:20		翁啓昌	長庚大學醫學影像暨放射科學系	分析 F-18 α-syn-3 於神經毒劑及 PFFs 誘發之 PD 動物腦中之分佈
6	13:20~13:40		林昆儒	長庚醫療財團法人核子醫學科	使用自動分子影像分析及機器學習來進行類澱粉生物標記暨失智轉化預測
7	13:40~14:00		白明奇	國立成功大學醫學系神經科	真實世界的失智診療：核子醫學的角色
--	14:00~14:10		**中場休息**		
8	14:10~14:30		許世明	國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系	建置 70MeV 中型迴旋加速器之產業應用評估及核醫資料分析與趨勢研究
9	14:30~14:50		吳駿一	國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系	建立非侵入性影像平台以評估人類神經母細胞瘤經硼中子捕獲治療後細胞程式死亡配體-1 之表現量
10	14:50~15:10		盧志文	國立陽明交通大學光電系統研究所	應用於 CZT 感測器之四通道訊號讀取電路設計
--	15:10~15:30		**綜合討論（6 樓供應點心）**		
	15:30~16:00		**閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）**		

*會議主持人

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 5：跨域合作與風險溝通 I（N4）					
會場地點：6 樓 A646 廳					
場序	**時間**	**評審委員**	**計 畫 主持人**	**執行機關**	**計畫名稱**
1	10:40~11:00	李綺思*、饒大衛、張自立、周桂田	林承宇	世新大學廣播電視電影學系	培力民眾正確面對非核家園之核電廠除役素養觀整合計畫：新媒體溝通策略之解構與建構
2	11:00~11:20		宋大崙	龍華科技大學化工與材料工程系	提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識及其成效評估研究
3	11:20~11:40		高銘志	國立清華大學科技法律研究所	當代原子能法重要法律議題及訴訟案例研析
4	11:40~12:00		楊宗翰	國立清華大學環境與文化資源學系	原子能訴訟案例探討與研析:聚焦各國訴訟與國際核能法規間之關聯
--	12:00~13:00		**（9 樓午餐 A914 室）及意見交換**		
5	13:00~13:20		陳曜鴻	淡江大學學校財團法人淡江大學化學系	化學遊樂趣 － 從貴重氣體到原子能科學
6	13:20~13:40		潘愷	國立臺北護理健康大學嬰幼兒保育系（所）	『原』來是這樣！ 原子能科普桌遊教材研發與活動推廣
7	13:40~14:00		陳彥均	龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系	科展用核能與輻射知識之跨平台電玩遊戲
--	14:00~14:10		**中場休息**		
8	14:10~14:30		單文婷	國立臺灣藝術大學影音創作與數位媒體產業研究所	以性別平等與跨文化視角進行原子能科普傳播之研究
9	14:30~14:50		林玫君	國立臺南大學戲劇創作與應用學系（所）	科技與藝術人文互融的跨域探究
--	14:50~15:30		**綜合討論（6 樓供應點心）**		
	15:30~16:00		**閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）**		

*會議主持人

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 6：跨域合作與風險溝通 II（N4）					
會場地點：9 樓 A901 室					
場序	時間	評審委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
1	10:40~11:00	杜若婷*、尹學禮、傅昭銘、薛人愷	黃國芳	中央研究院地球科學研究所	以珊瑚骨骼硼及鉛同位素探討台灣海域之海洋酸化及鉛汙染史
2	11:00~11:20		郭修伯	國立臺灣大學化學工程學系暨研究所	以顆粒床堆積與 X 光影像建立虛擬地質三維結構
3	11:20~11:40		黃安婉	長庚大學綠色科技研究中心	以 X 光成像地質結構分析地下水滲透性質
4	11:40~12:00		楊靜瑩	國立中興大學農藝學系（所）	放射誘變在毛豆適應極端氣候育種之研究
--	12:00~13:00		**午餐及意見交換**		
5	13:00~13:20		梁正宏	國立清華大學核子工程與科學研究所	新型耐火高熵合金應用於高輻射場域之特性分析研究
6	13:20~13:40		林明緯	國立清華大學核子工程與科學研究所	發展極紫外光干涉儀與精密複數折射率量測之應用
7	13:40~14:00		李奕賢	國立中央大學環境研究中心	應用深度學習建構微尺度孔隙通道非結構網格
--	14:00~14:20		**中場休息**		
8	14:20~14:40		杜昭宏	淡江大學學校財團法人淡江大學物理學系	金屬與陶瓷氧化物材料的中子與 X 光散射/繞射的結構分析與物性研究
9	14:40~15:00		杜國洋	國立高雄科技大學電機與資訊學院電機工程系	可在輻射區域不平地面的自主巡航機器人研發
--	15:00~15:30		**綜合討論（6 樓供應點心）**		
	15:30~16:00		**閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）**		

*會議主持人

112 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會
議程

場 地 7：跨域合作與風險溝通 III（N4）					
會場地點：9 樓 A902 室					
場序	**時間**	**評審委員**	**計 畫 主持人**	**執行機關**	**計畫名稱**
1	10:40~11:00	賴弘智*、陳孝輝、曾建凱、蘇炎坤	李憶興	明新學校財團法人明新科技大學半導體與光電科技系	具有高靈敏度與高可靠度雙閘極氧化銦鎵鋅光電感測薄膜電晶體元件製程開發
2	11:00~11:20		劉維昇	元智大學電機工程學系（所）	於可撓式基板進行 P 型 Cu 摻雜 CrOx 透明導電氧化物與紫外光偵測器之研製
3	11:20~11:40		李佳翰	國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所	使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台培育前瞻原子科學人才
4	11:40~12:00		曾院介	國立陽明交通大學材料科學與工程學系	具半導體準線上整合能力之 X 光技術開發
--	12:00~13:00		**午餐及意見交換**		
5	13:00~13:20		李昭德	財團法人國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心	極紫外光及以下波段光學元件之保護膜材料開發與微影製像應用
6	13:20~13:40		巫勇賢	國立清華大學工程與系統科學系	以磊晶鍺層整合種子層、應力層與新穎結晶回火技術實現抗輻射之鐵電記憶體元件
7	13:40~14:00		趙得勝	國立清華大學原子科學技術發展中心	中子轉化摻雜技術於氮化鎵磊晶式異質基板之應用可行性評估
--	14:00~14:20		**中場休息**		
8	14:20~14:40		張廖貴術	國立清華大學工程與系統科學系	先進矽鍺場效電晶體元件之製程與抗輻射特性研究
9	14:40~15:00		劉文仁	義守大學材料科學與工程學系	X 光、電子等量子束於氧化亞銅異質奈米結構光電化學產氫膜層之材料分析研究與人才培育
--	15:00~15:30		**綜合討論（6 樓供應點心）**		
	15:30~16:00		**閉幕典禮（優良計畫頒獎）（6 樓：A646 廳）**		

*會議主持人

核能與除役安全科技

長回歸期地震之地盤反應分析與特性之探討
A Study on the Ground Response Modeling for Seismic Events with Long Return Period

計畫編號：112-2623-E-002-005-NU
計畫主持人：郭安妮
e-mail：annieonleikwok@ntu.edu.tw
計畫參與人員：周昕成、黃譯賢、王顓沂、游耀中、洪光志
執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

摘要

台灣位處地震頻仍的地區，每逢數年即有強震的發生，因此對於重要關鍵基礎設施的耐震能力需要有更高的安全餘裕。依目前常用的線彈性方法進行地盤反應分析僅適用於小應變至中應變等級下的模擬。若超過中應變等級的材料動力性質則會有顯著的改變，因此較適合使用能夠考慮非線性材料性質的時間域非線性或頻率域等值線性分析方法。本研究就數個虛擬與實際場址，分析採用兩種不同分析方法在長回歸期地震下的特性與差異。分析結果可以觀察到當波速剖面的深度愈大時，非線性與等值線性的差異就會愈顯著，並且在實際場址的模擬中尤為顯著。評估結果亦顯示非線性特徵曲線的選擇最為關鍵，特別是在長回歸期地震有可能引致大應變等級的情形下，若欲在特定場址進行非線性地盤反應分析，需確保使用的非線性特徵曲線能夠代表現地材料的動力特性，方能有合理妥適的結果供後續設計使用。

關鍵詞：地盤反應分析，時間域分析，頻率域分析，長回歸期地震，非線性

Abstract

In practice, ground response analyses are often performed using frequency-domain framework. However, time-domain ground response analyses have the potential to model the soil behavior more accurately, especially when the geomaterials are subjected to medium to large strain. Ground motions consistent with such long return periods tend to be strong enough to induce large strain. In this study, frequency-domain and time-domain ground response analyses were performed for several hypothetical sites and unanimous sites in Taiwan. Large input ground motions (consistent with long return periods) were used. The predicted ground response from both analyses were compared to identify the conditions at which the differences in the predictions were the largest. It's observed that as the site goes deeper, the differences in the predicted ground response would become distinct. In addition, the choice of modulus reduction and damping curves for describing the nonlinear soil behavior is the main cause for the difference in the predicted ground response (especially when large input motion is used) from time-domain and frequency-domain analyses, hence the target material curves and the constitutive models must be carefully selected.

Keywords: ground response analysis, time-domain analysis, frequency-domain analysis, long-return period earthquake, nonlinear

I. 前言

現行法規規定一般建築物的耐震能力為 475 年回歸期的設計地震，對於核電廠等特殊且重要的結構物通常需要有額外的安全考慮，因此需考慮比 475 年更長回歸期的地震動強度，例如：2500 年回歸期的最大考量地震。以往實務上常應用的線彈性(Elastic linear)方法進行地盤反應分析僅適用於小應變至中應變等級下的模擬，由於長回歸期地震代表具有更大的加速度，以土壤/岩石材料的應力應變角度而言，有機會產生中等至大應變等級。在此狀態下的材料性質會因為應變的增加而有顯著的改變，因此能夠考慮非線性材料性質的時間域非線性或頻率域等值線性分析方法較適合該情形下的地盤反應模擬。目前頻率域分析為實務領域常採用之地盤反應分析方法，但在材料產生大應變下的非線性行為時，時間域分析較能準確地盤受震行為。故本研究係透過數個虛擬場址與實際場址，評估使用時間域非線性與頻率域等值線性在長回歸期地震下的地盤反應特性與差異。

II. 等值線性與非線性地盤反應分析

地盤反應分析主要有兩大類別，分別是頻率域分析(Frequency-domain analysis, FD)與時間域分析(Time-domain analysis, TD)。由於所需的材料參數較少以及模型建立簡單，實務上常使用頻率域為地盤反應分析方法。反之，時間域分析在納入較完整材料模型的前提下，能更準確地模擬土壤受震行為。

頻率域分析是基於波傳理論，並使用波動方程式的解，建立波速剖面在上下兩個深度的轉換函數(Transfer Function)。常用的頻率域分析為一維模型，意即土層在水平方向為無限延伸，同時地震波為垂直入射至土壤剖面的底部。由於轉換函數僅受到兩層土壤材料的剪力模數(shear modulus)、單位重(Unit Weight)、阻尼比(Damping Ratio)以及地震本身的頻率含量所影響，且材料參數並不隨著地震歷時引致的土壤應變大小而改變，因此僅需給定上述參數即可進行頻率域線性分析。惟從試驗數據中可以發現不論是土壤或岩石材料的剪力模數、阻尼均會隨著應變等級而改變。因此才有改良的等值線性分析方法，係根據輸入地震大小隨時間的改變，迭代出土壤在動態反應下的平均剪應變以評估相對應的剪力模數與阻尼值。因此在頻率域等值線性分析中，還需要指定描述非線性特徵的剪力模數衰減曲線與阻尼比曲線。

以一維分析而言，時間域分析方法通常會將地層簡化成為彈簧(Spring)、阻尼器(Damper)與集中質量

(Lumped mass) 組成多自由度系統，例如DEEPSOIL(Hashash et al., 2020)，一般若要考量現地土壤變異性影響則需透過評估變異係數(COV)產生大量的一維波速模型。此外，時間域分析亦可分為線性與非線性分析。在進行線性分析時，土壤勁度在受震過程中為定值，其結果通常與頻率域線性分析的結果類似。而在非線性分析模式時，土壤勁度則會隨受震過程中剪應變的增加而降低，因此稱之非線性的行為。與頻率域等值線性分析不同，時間域非線性分析的參數會隨著受震強度而不同，因此在每個時間步的土壤性質都會根據應變狀態而改變。本研究使用 DEEPSOIL 時，採用 Pressure-Dependent Hyperbolic modified Kondner and Zelasko (MKZ) 為描述土壤骨架曲線的模型。阻尼則是採用 Masing's Rules 為描述土壤受反覆荷載時的加載-卸載行為。但由於此種描述方式在小應變等級下的阻尼幾乎為零，顯不符合土壤的行為，因此一般會透過設置黏滯阻尼(viscous damping)模擬真實土壤在小應變下的消能行為，例如：雷利阻尼(Rayleigh damping)。

III. 虛擬場址地盤反應分析

虛擬場址地盤反應係分別以等值線性與非線性方法進行分析，並考量不同的土層厚度、波速剖面分布形與非線性材料參數。其中土層厚度分為 30m、50m 以及 100m ，並以每 5m 為一層以利時間域非線性分析的進行。材料性質分別有砂土與黏土，砂土部分的剪力波速剖面均為單一土層的 Vs=200 m/s，黏土部分除單一土層的 Vs=200 m/s，另有自地表 Vs=200 m/s 每 10m 增加 Vs=20 m/s 的遞增剖面以及自地表 Vs=200 m/s 每 10m 增加 Vs=50 m/s 的遞增剖面，如圖 1 所示意。

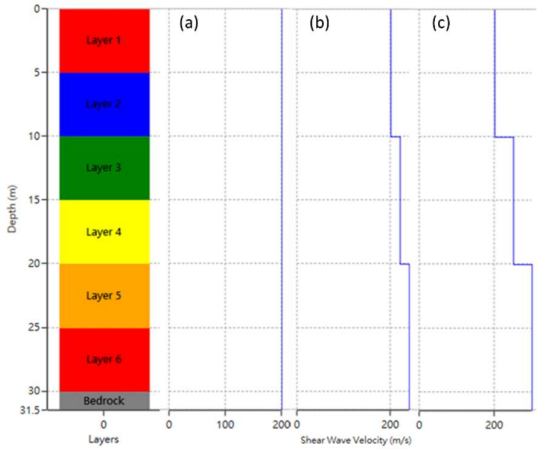


圖 1 虛擬場址波速剖面分布形式示意圖(a)單一土層 Vs=200 m/s、(b)自地表 Vs=200 m/s，每 10m 增加 20 m/s、(c)自地表 Vs=200 m/s，每 10m 增加 50 m/s

根據現行的建築物耐震設計規範，一般建物的設計地震考量為回歸期 475 年，即 50 年內發生機率約為 10%，最大考量地震的回歸期則是 2500 年，為 50 年內發生機率約 2%。惟目前並沒有針對長回歸期有明確的定義，一般需視評估對象的重要性而定，除特定場址有特別建立符合現地的設計地震反應譜外，本研究原則上採用 2500 年為長回歸期之定義，由於耐震設計規範中對於不同區域的設計地震有加以考慮當地的淺層地質條件以及 GMPE 本身既有的區域劃分，因此虛擬場址的設計地震採用台北二區 2500 年回歸期為目標反應譜進行擬合。擬合之地震紀錄為 DEEPSOIL 軟體內建提供之 Imperial Valley (IMV)、Kocaeli (KOC)與 ChiChi (CHI)的加速度歷時紀錄。擬合方法係使用 SeismoMatch 軟體將多個地震紀錄採用 Al Atik & Abrahamsom (2010)演算法將整段反應譜調整為目標(設計)譜型，擬合之週期範圍為 0.05 s 至 2 s，結果如圖 2。擬合完成之地震紀錄視為 Outcrop motion 輸入至邊界條件為順應底部 Compliant base 之模型底部。

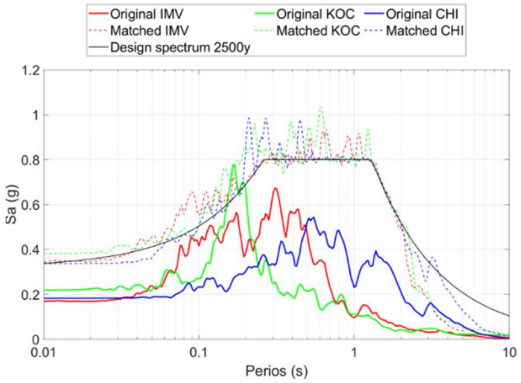


圖 2 虛擬場址之目標反應譜擬合

本研究依據不同的土層深度、波速分佈形式以及材料性質等條件，進行 12 個虛擬場址的地盤反應分析。根據圖 3(a)可以觀察到在相同剪力波速下(Vs = 200 m/s)，但材料性質不同的砂土(藍線)與黏土(橘線)中，非線性參數的選擇對於結果有顯著的影響，較軟的砂土地表反應譜加速度值約為黏土的 1/4~1/3，地盤放大係數亦類似。並且不同分析方法導致的差異(EQL 與 NL)也與材料參數有關，以同一案例(前述之砂土與黏土)而言，雖然在地表位置的反應譜上已有些許差異，但若以地盤放大係數觀察則更為明顯。其中砂土的 EQL 和 NL 最大差異出現在長週期 1 s ~ 2 s，黏土則出現在短週期 0.08 s ~ 0.4 s 之間。不同波速剖面下使用不同分析方法(NL 與 EQL)的分析結果則未有非常顯著的差異，不論是單一土層或線性遞增土層，NL 與 EQL 在地盤放大係數中最大的差異均出現在週期 0.08 s ~ 0.4 s 之間，意即土層波速剖面的複雜程度並不會改變採用 NL 與 EQL 進行分析的差異，而是材料的動力參數本身的影響較大。

NL 與 EQL 的差異在 2500 年設計地震反應譜的高原區之間(0.26 s ~ 1.3 s)較小。並且 EQL 在反應譜上有低估的趨勢，並且隨著土層厚度增加而變得更顯著，像是在 100 m 厚度的模型中，其差異明顯較 50 m 和 30 m 更大。因此土層愈厚或波傳經過的土層愈長，NL 與 EQL 的差異就會愈顯著。

各個波速模型隨深度的最大剪應變變化中，NL 分析所激發的剪應變等級普遍較 EQL 更高一些。使用砂土非線性曲線的單一土層，其最大剪應變約為 2%；採用黏土非線性曲線最大剪應變約為 1%；遞增剖面最大剪應變則約為 0.5%。並且在剪力波速不變的前提下，當模型採用的非線性曲線有較軟弱的特性時，最大剪應變會相對較大。綜上所述，模型使用 Vs=200 m/s 代表較低的地盤剪力波速，並輸入 2500 年回歸期的設計地震，進行非線性分析時呈現出的最大剪應變可能達到 2%，屬於大應變行為。然目前常使用於建立非線性曲線的試驗方

法為共振柱或動力三軸，適用於小應變至中應變等級，一般最大僅能做到 0.3%~0.5%的應變等級。

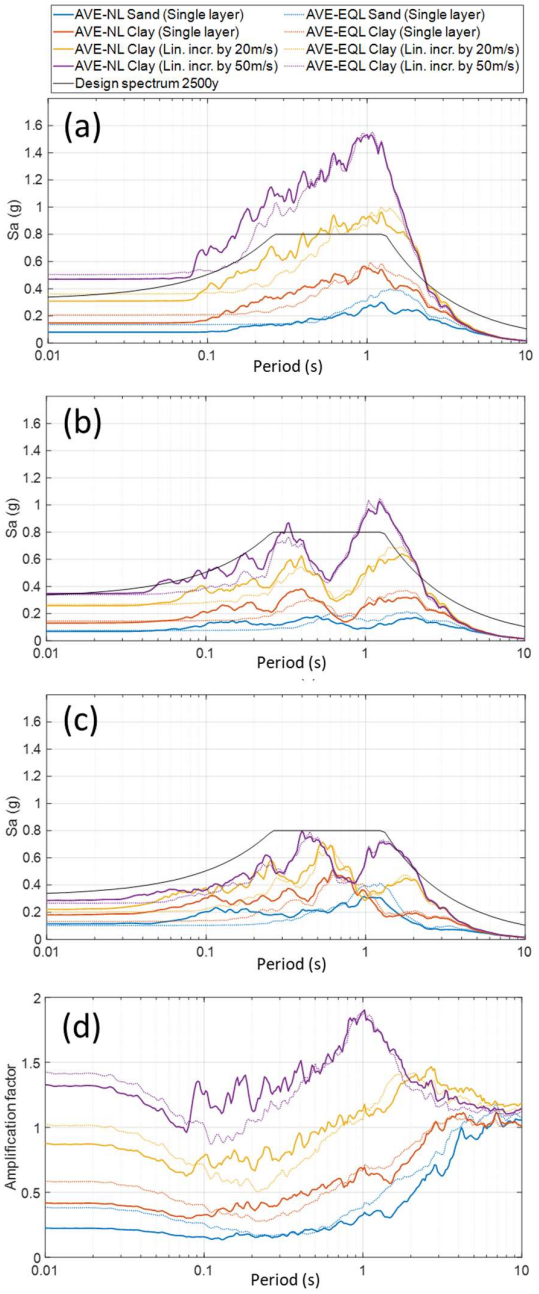


圖 3　100 深度模型之地盤反應分析結果(a)地表反應譜、(b)地下-30m 反應譜、(c)地下-50m 反應譜、(d)地盤放大係數

IV. 實際場址地盤反應分析

實際場址的地盤反應分別是 UN2 以及 UN3。兩個場址的地震危害與篩選報告(SPID report)(台電公司 a, b，2022)當中分別有提供參考岩盤均佈危害度反應譜(Uniform Hazard Response Spectrum for Reference Rock Condition, UHRSref)以及基於台灣通用岩盤(Taiwan Generic Rock, TWGR) 五公里波速剖面模型進行反捲積(Deconvolution)的 SAinput 輸入地震反應譜，因此本研究的分析模型亦對應分為兩種做法。第一種是引用自兩個場址 SPID 報告提供的土壤波速剖面最佳估計(Best Estimated, BE)剖面，並以 SAinput(代表剪力波速大於 3000 m/s 的虛擬 Outcrop 場址)為目標反應譜，輸入至邊界條件為 compliant base 的模型底部。另一種則是依據現地 P-S logging 的波速量測結果，建立自地表到波速超過 760 m/s 的深度位置的波速剖面，以 UHRSref(參考岩盤 Vs30=760 m/s 之均佈危害度反應譜)為目標反應譜，並輸入至邊界條件為 compliant base 的模型底部。

用於目標反應譜擬合地震紀錄為現地井下地震儀觀測到的數筆地震紀錄，其中 UN2 場址為 20160512 與 20190418，UN3 場址則為 20170430 與 20190308，以及選擇 PEER NGA-West2 地震事件資料庫(Ancheta et al., 2013)的 5 筆地震進行擬合，分別為 Tottori (2000)、Landers (1992)、Cape Mendocino (1992)、Imperial Valley (1979)以及 Corinth (1981)。其中 UN2 場址的擬合結果如圖 4。

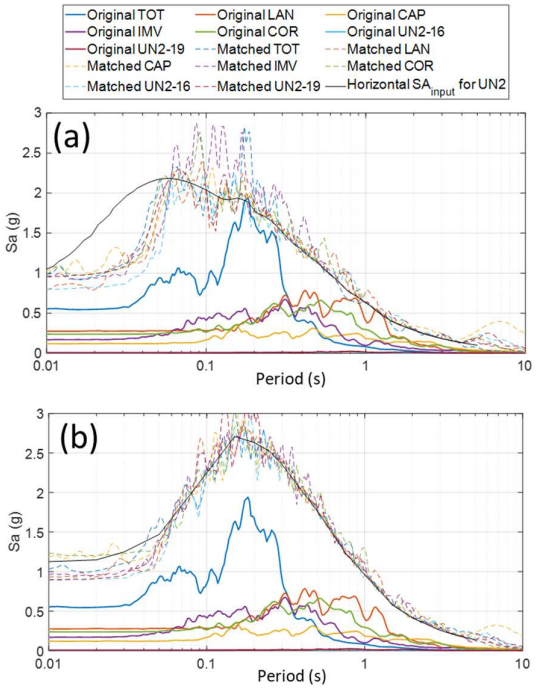


圖 4 實際場址 UN2 之目標反應譜擬合(a)SA_{input} 反應譜、(b)$UHRS_{ref}$ 反應譜

UN2 場址的分析結果如圖 5。UN2 與 UN3 根據 SPID Report 建立之最佳估計剖面厚度達 5000 m，就結果而言可以發現在相同條件下(土壤非線性曲線、波速剖面)，使用 NL 與 EQL 進行地盤反應分析的結果有相當顯著的差異。兩個場址的地表反應譜在 NL 分析的結果，自週期 2 以下都較 EQL 更低，顯著週期/頻率也有明顯的位移(往短週期移動)，地盤放大曲線當中的 EQL 也較 NL 更大。但不論是 UN2 或 UN3，採用相同分析方法下的地盤放大係數頻率範圍均類似，例如：UN2 與 UN3 使用 NL 分析的結果，在大於週期 1 s 後有放大的現象(地盤放大係數大於 1)，其餘範圍的地盤放大係數均小於 1。反之，EQL 則是大約在週期 0.6 s 以上就有放大的現象。配合 UHRSref 反應譜擬合建立的波速模型地盤反應結果部分，相對而言則沒有觀察到 NL 和 EQL 之間有明顯的差異。

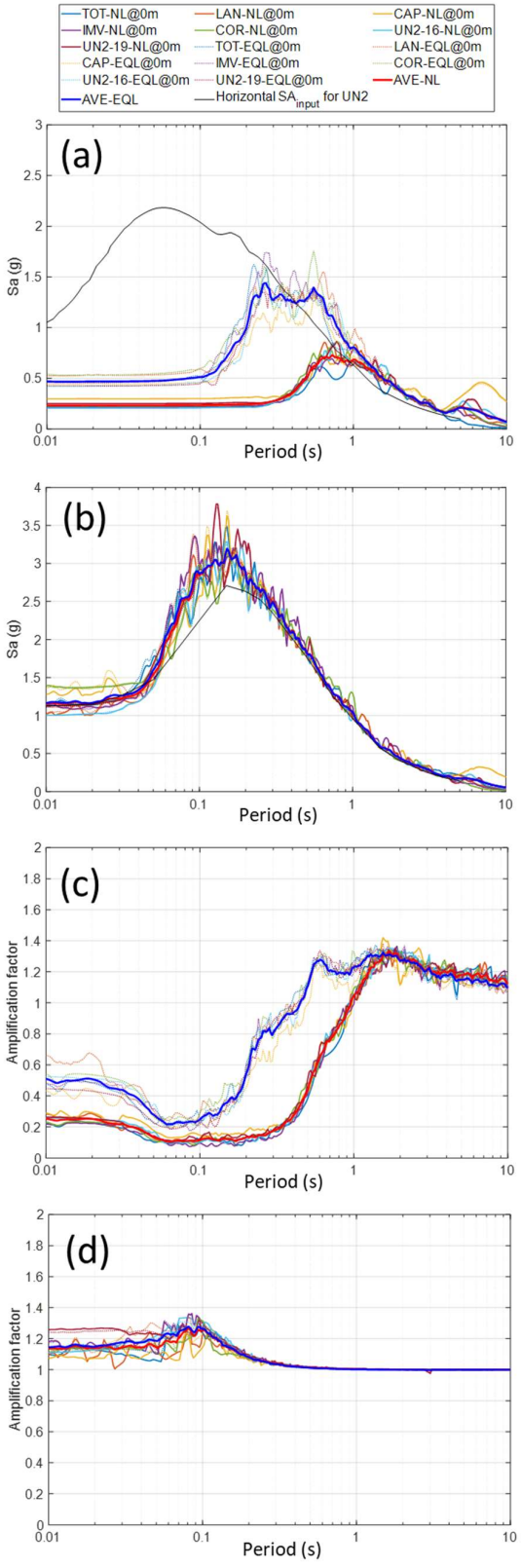


圖 5 UN2 場址地盤反應分析結果(a)地表反應譜 with SAinput、(b)地表反應譜 with UHRSref、(c)地盤放大係數 with SAinput、(d)地盤放大係數 with UHRSref

有關記錄到的最大剪應變不超過 0.4%，且 5 公里模型的以 SAinput 為輸入運動的模型較 UHRSref 更小，屬於中應變範圍的原因有幾個可能，其一是實際場址 UN2 與 UN3 的 4 個模型的剪力波速較虛擬場址更高，因此本身的材料勁度較高而不易形變；另一種可能則是由於五公里模型的阻尼設定並不適當所致，由於目前有關岩石類的動力試驗較少進行，加上岩石樣本不易取得，亦難以重現地底的試驗條件，因此許多參數大多為推論的結果，以本研究 UN2 場址使用的 G2C 曲線為例，該阻尼曲線在小硬變已有 4%左右，或是依 SPID 報告中提及的 TWGR 岩石材料，其不同材料的小應變阻尼也介於 0.6%～1.4%之間。在這種狀態下，輸入運動自五公里的波速剖面底部經層層的阻尼消能後，到達地表的能量有可能已被大量削減，以致在 10000 年回歸期地震的作用下鄰近地表的剪應變仍維持在中應變等級。然目前以地球物理領域調整過阻尼或訊號衰減的方法大多是依靠線性分析進行，而線性分析本身僅適用於小應變狀態，若將相同的調整應用的中應變或大應變時則有可能高估其值，如同線性分析得到的地盤反應結果通常會高估一般，進一步使用在時間域非線性分析時就可能有較大的差異。

V. 結論

在虛擬與實際場址的分析結果均觀察到，在其他條件不變的情形下，當模型深度/厚度愈高時，非線性與等值線性分析結果的差異就會愈顯著。若在相同的土層厚度下，模型的平均剪力波速愈低，則差異愈明顯。

整體而言，若假定使用之非線性曲線能代表現地的材料性質，則採用非線性與等值線性進行地盤反應分析的結果在建立之波速剖面愈深的模型下會有相當顯著的不同，且波速較低的剖面也會反應出較大的差異。

並且對於相同剪力波速所選擇的非線性曲線對於結果也有相當大的影響，在虛擬場址當中，採用砂土或黏土非線性曲線的結果，非線性與等值線性差異較大的週期範圍也相當不同，應與材料採用的特徵曲線影響有關，特別是在長回歸期地震下，虛擬場址會出現大應變等級的結果。因此若欲在特定場址進行長週期地震的非線性地盤反應分析，使用能確實代表現地材料的非線性特徵曲線至關重要。

參考文獻

[1] 台電公司 a，2022 地震危害與篩選報告-國聖核能發電廠。

[2] 台電公司 b，2022 地震危害與篩選報告-馬鞍山核能發電廠。

[3] Al Atik L., Abrahamson N. (2010). An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. Earthquake Spectra. 26(3), 601-617.

[4] Ancheta T.D., Darragh R.B., Stewart J.P., Seyhan E., Silva W.J., Chiou B.S.J., Wooddell K.E., Graves R.W., Kottke A.R., Boore D.M., Kishida T., Donahue J.L. (2013). PEER NGA-West2 Database. PEER Report No. 2013/03, University of California, Berkeley, California.

[5] Hashash Y.M.A., Musgrove M.I., Harmon J.A., Ilhan O., Xing G., Numanoglu O., Groholski D.R., Phillips C.A., Park D. (2020). DEEPSOIL 7.0 User Manual. Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

數位雙生技術在核能電廠除役之應用經驗與安全管制導則之研議
Studies on the Application of Digital Twin in Nuclear Decommissioning and the Formulation of Regulation Guide

計畫編號：NSTC 112-NU-E-262-002-NU
計畫主持人：丁鯤講座教授
e-mail：kuenting2012@gmail.com
計畫共同主持人：沈志陽助理教授
計畫參與人員：葉思淇、張宸愷、林欣穎、魯孟廉
執行單位：龍華科技大學機械工程系

摘要

2014 年德國推出工業 4.0 以後，隨著物聯網、OT/CT/IT、人工智慧、雲端/邊緣運算、5G 專網、機器人、XR 的迅速推動，在智慧製造業發展數位雙生(Digital Twin, DT)的熱潮。面臨核能電廠的除役市場的增長，歐盟與英國已經開始投入數位除役技術的開發，就面臨到數位雙生(Digital Twin, DT)虛實整合的應用。在英國與歐盟的數位雙生技術則是以建築資訊建模(Building Information Modelling, BIM)為基礎，英國核能法規辦公室(Office of Nuclear Regulation, ONR)訂定出相關 BIM 審查導則。美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)迄今為止還沒有 DT 應用於核能的法規導則。台灣已進入核能除役的階段，因此數位雙生平台未來可能成為除役的重要工具。本計畫將參考 ONR 的 BIM 審查導則，以及台灣人工智慧數位雙生技術的發展，擬定數位雙生應用於核能除役審查導則草案，以做為管制單位之參考。

關鍵詞：數位雙生、建築資訊模型、BIM 審查導則

Abstract

Since Germany launched Industry 4.0 in 2014, driven by the rapid development of IoT, OT/CT/IT, AI, cloud/edge computing, 5G private networks, robotics, and XR, the digital twin (DT) has become a hot topic in the development of intelligent manufacturing. Faced with the growing decommissioning market for nuclear power plants, the EU and the UK have begun to invest in the development of digital decommissioning technologies, which involves the application of digital twin (DT) virtual-real integration. In the UK and EU, digital twin technology is based on Building Information Modeling (BIM), and the UK Office of Nuclear Regulation (ONR) has established relevant BIM review guidelines. To date, the US Nuclear Regulatory Commission (NRC) has not yet issued regulatory guidelines for the application of DT in nuclear energy. As Taiwan has entered the nuclear decommissioning phase, the digital twin platform may become an important tool for decommissioning in the future. This project will refer to the ONR's BIM review guidelines and the development of Taiwan's AI-based digital twin technology to draft a guideline for the application of digital twins in nuclear decommissioning for reference by regulatory agencies.

Keywords: Digital Twin (DT), Building Information Model(BIM), Regulation Guide of BIM.

I. 前言

1.核能除役市場的成長

截至 2024 年 3 月，全球有 415 座核反應器在運轉，但這些機組正在老化接近生命週期的終點。其中，有 298 座或將近 65% 的壽命超過 30 年以上，其中 26%的壽命超過 40 年，且目前已有 201 座反應器已經處於永久停機狀態[1]。這產生了對除役服務的巨大需求，從而促進核能除役市場的增長。

2021 年核能役市場規模為 41 億美元。核除役市場產業預計將從 2022 年的 43 億美元成長到 2030 年的 61 億美元，期間複合年增長率（CAGR）為 5.10%預測期（2022 - 2030 ）[2]。人們對環境問題的敏感度不斷提高，以及民眾對核事故危險後果的日益擔憂，推動市場長的關鍵市場驅動力。

2.前瞻性數位科技於核能除役的推動

近年來物聯網[3]、大數據雲端運算/邊緣運算[4]、人工智慧[5]結合到機器人與 5G 的發展，使工業 4.0 在智慧製造方面大步邁進[6]。工業 4.0 的精髓在於虛實整合，有效融合資訊科技(Information Technology, IT)、營運科技(Operation Technology, OT)與通訊科技(Communication Technology, CT)，結合開放式數據平台(實體層、網路層與應用/服務層)，形成智慧製造整合架構，鏈結雲端與資料分析應用，有效邁進工業 4.0 核心領域[7]。本計畫主持人於 2024 年 3 月提出將智慧工廠的數位發展概念應用於核能除役之規劃如圖 1[8]。

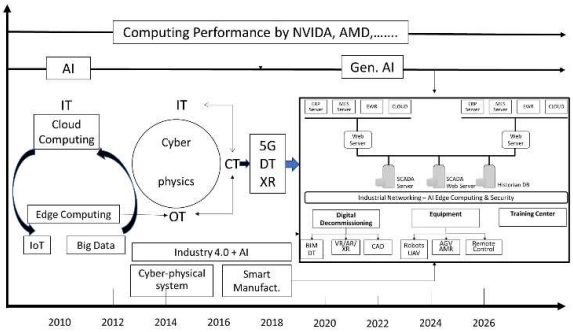


圖 1 工業 4.0 智慧製造的數位發展應用於核能除役之規劃[10]

歐盟與 IAEA 都注意到這種數位技術(Digital Technologies)已被公認為是核能工業的一個讓人興奮的

議題[9]。英國政府代表商業、能源和工業策略部(Business, Energy, Industrial Strategy, BEIS)和國家核能實驗室(National Nuclear Laboratory, NNL)更推動工業4.0 的設計、建造、運轉、除役與維護概念，建立前瞻性核能技術(Advanced Nuclear Technologies, ANTs)，來進行核能設施資產的生命週期管理。並逐漸形成以數位雙生為主的議題[10]。

3.數位雙生於核能除役的推動

數位雙生在核能應用上，在歐盟、英國推動所謂建築資訊模型(Building Information Model, BIM)，在美國核能界推動的是數位雙生(Digital Twin, DT)，本節將針對此兩項定義與在核能應用的發展進行說明。

(1)歐盟與英國推動 BIM 技術

英國核能研究所(Nuclear Institute, NI)於 2018 年開始加速數位技術在核能上的應用，這些前瞻性的數位技術包括機器人運作、遠端遙控、數位雙生等。歐盟與英國推動的數位雙生就是 BIM。於 2020 年加入英國 BIM 聯盟。希望開始圍繞核電和建造這兩個部門調整合作機會，並利用正在發生的各種措施，特別是在圍繞 BIM 和數位資訊管理的建設方面。NI 希望鼓勵數位化進入核電部門的三個關鍵領域[11]：(1)新核電建設(包括小型模組化)；(2)希望將其投入除役，因為核能除役管理局（Nuclear Decommissioning Authority, NDA）下有 1000 億英鎊的除役規劃，將 BIM 技術用於 Magnox 核能電廠的除役，並全面實施核能除役數位化策略；(3)廢料管理關鍵推動因素是回收、包裝和處置放射性廢料，在場景、選址以及數位資訊和複製機會的實時使用。

(2)美國核能管制委員會推動 DT 技術

美國核能管制委員會 (NRC) 的核能管制研究辦公室(Office of Nuclear Regulatory Research, NRR)已開始努力評估核電廠數位雙生技術的管制可行性。由愛達荷州國家實驗室(Idaho National Laboratory, INL)主持，與橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory)合作。NRC 對數位雙生計畫的目標是識別和評估與在反應器中應用數位雙生相關的技術挑戰，這些挑戰會否會影響到管制的結果，以做為管制方案的參考[12-13]。

NRC 第一階段先行評估影響管制的技術問題；闡述了數位雙生在非核能工業與核能工業應用的最新評論。此報告說明了可用數位雙生技術在核能管制上的挑戰與差距[14]。第二階段發展以數位雙生作為管制基礎架構，對核電廠運轉的監督和合規性管制。 NRC 有興趣確定數位雙生如何協助其管制的角色[15]。

II. 主要內容-擬議 BIM 核能除役審查導則草案

1. 前言

英國核能管制局 (ONR) 對於 BIM 在核能除役中的應用，必定會提出嚴格的安全要求，以確保除役過程的安全、有效且符合規範[16]。

(1)目的：本導則明確制定為了確保核能設施除役的 BIM 應用，能滿足的核能安全要求[17]。

(2)範圍：建築資訊建模是使用專有軟件處理大量數據以創建除役專案的三維模型 (3D) 的過程。然後將模型用作平台，在結構、建築物或設施的整個除役期內協作共享、添加和管理資訊。

(3)定義：BIM 是一種協作的工作方式，可以促進早期供應鏈參與，並以數位技術為基礎，開放更有效的設計、創建和維護資產的方法。BIM 提供一個設施的實體與功能特徵之數位表示，為一種設施資訊的共享資源，在其除役期內形成可靠決策和資訊管理的基礎[18-19]。

(4)層級 (Level of BIM)[20]：(A)Level 0-傳統的 2D 圖紙設計。(B)Level 1- 3D 模型，但資訊仍以獨立檔案形式存在。(C)Level 2- 3D 模型與相關資訊整合，並使用共同的資料環境。(D)Level 3- 更進一步的整合，實現資訊的完全互操作性。

(5)現行參考的相關法規與標準

(A) 核安全法規： 各國的核安全法規對核設施的設計、建造、運營和除役提出了嚴格的要求，這些要求也適用於 BIM 在核能除役中的應用。

(B) 輻射防護法規： 輻射防護法規對核設施的輻射水平、放射性廢物的管理等方面提出了具體要求，BIM 可以幫助更好地管理這些資訊。

(C) 環境保護法規： 環境保護法規對核設施的環境影響提出了要求，BIM 可以幫助評估和管理環境影響。

(D) BIM 國際標準： ISO 19650 系列標準為 BIM 的應用提供了全面的架構，這些標準可以為核能除役中的 BIM 應用提供參考。

2. BIM 模型的安全審查要求

(1) 資訊完整性與準確性：BIM 模型應包含核電廠整個生命周期的資訊，從電廠設計、建造、運營到除役的所有階段的資訊，確保資訊的完整性。模型中的幾何資訊應與實際情況高度一致達成準確性，包括結構、系統、設備的精確尺寸和位置。對於非幾何資訊要達成充分性，應包含材料屬性、輻射水平、設備參數等，為後續分析提供數據支持。

(2) 數據的安全性、保密性：對 BIM 模型中的敏感數據進行加密，防止洩漏。嚴格控制對 BIM 模型的訪問權限，確保只有授權人員才能訪問。定期對 BIM 模型進行備份，並建立完善的數據恢復機制。

(3) 模型的層級結構：BIM 模型應具有清晰的多層級結構，方便管理與維護。此外，模型應具備可定制性，以滿足不同階段與不同專業的需求。

(4) 模型的動態更新：BIM 模型應能隨著工程進度的變化而實時更新，保持模型與實際情況的一致性。應建立有效的版本控制機制，方便追溯模型的變化。

(5) 與其他系統的整合：BIM 模型應採用開放性的數據格式，方便與其他軟體進行數據交換。並 應遵循相關的 BIM 標準化，確保數據的相互操作性。BIM 模型應能與地理資訊系統（GIS）整合，實現空間數據的共享和分析。並應能與結構分析軟體、輻射劑量

評估軟體等其他工程軟體進行整合。

(6) 協同工作：規定 BIM 參與方（設計師、承包商、運營商等）之間的協同工作流程。

(7) 符合相關標準與規範：BIM 模型應符合 ISO 19650 等國際 BIM 標準、核工業相關的 BIM 標準和規範。

(8) 加強 BIM 技術人員培訓：對參與核能除役項目的 BIM 技術人員進行專業培訓，使其熟悉核能行業的特殊要求和 BIM 技術的應用。另建立 BIM 技術人員認證體系，確保人員具備足夠的專業能力。

(9) 品質管控：建立嚴格的模型審核機制，確保模型的品質。定期對 BIM 模型進行校驗，確保模型與實際情況一致。

3. BIM 的審查流程

BIM 在核能除役中的應用流程是一個迭代的過程。從最初的數據收集到最終的資訊管理，BIM 貫穿整個除役過程。透過 BIM，可以實現資訊的整合、共享和可視化，提高除役工作的效率和安全性，同時降低成本，減少對環境的影響。

需要注意的是， BIM 在核能除役中的成功應用需要多方協同，包括業主、設計單位、施工單位、管制與品管單位等。此外，需要具備專業的 BIM 軟體和熟練的 BIM 技術人員。

(1) 現有資訊的蒐集與整合：(A)收集數據-收集核電廠的設計圖紙、施工圖、運營記錄、設備資料等所有相關資訊。(B)建立基礎模型-基於收集到的數據，建立核電廠的初始 BIM 模型，包含建築結構、設備系統、管路等。(C)數據校驗與修正- 對比實地測量數據，校驗模型的準確性，並對錯誤的數據進行修正。

(2) 詳細模型的建立：(A)模型深化-將初始模型進一步深化，增加更多的細節，如設備的材質、管道的規格、電纜的走向等。(B)屬性賦予-為模型中的各個元素賦予相應的屬性，如輻射水平、材料特性、維護記錄等。(C)模組化設計-將複雜的系統分解為模組，方便管理和修改。

(3) 風險評估與分析：(A)風險識別-透過 BIM 模型，識別核電廠除役過程中潛在的風險，如結構風險、輻射風險、廢物處理風險等。(B)風險評估-根據專家經驗和歷史數據，對風險進行定性評估，判斷風險的高低。利用 BIM 模型和相關軟體，對風險進行定量評估，計算風險發生的概率和後果。涵蓋劑量評估、結構安全評估、拆除模擬、火災風險評估等。(C)風險分級-將識別出的風險按照嚴重程度和發生概率進行分級，以便針對性地採取措施。(D)風險管控-針對高風險項目，制定相應的風險管控措施，如加強監控、制定應急預案等。(E)風險可視化-將風險以圖形化的方式呈現，方便理解和溝通。(F)衝突檢測-檢測出設計、施工過程中可能存在的衝突，提前預防安全風險事故。

(4) 拆除規劃與模擬：(A)拆除順序規劃-基於風險評估結果，制定合理的拆除順序，確保安全。(B)拆除模擬-利用 BIM 進行拆除模擬，預測拆除過程中可能出現的問題，並制定應對措施。(C)物流規劃-規劃廢物的運輸和處理路線，確保安全。

(5) 施工進度管理：(A)4D 模擬-將施工進度與 BIM 模型結合，實現 4D 模擬，直觀地展示施工進度。(B)進度監控-透過 BIM 模型，實時監控施工進度，及時發現並解決問題。(C)量測比較- 將實際施工情況與 BIM 模型進行比較，評估施工質量。

(6) 廢料管理：(A)廢料追蹤-利用 BIM 模型追蹤放射性廢物的產生、儲存和處置過程，確保廢物的安全管理。(B)廢料量估算-根據 BIM 模型，估算拆除產生的廢棄物量，為廢棄物處理提供數據支持。

(7) 文件生成：(A)應用生成式 AI 自動生成文件- BIM 能自動生成各種所需的工程文件，如拆除計劃、安全評估報告等。(B)資訊共享-將 BIM 模型中的資訊轉換為可視化報告，方便與相關方共享。

(8) 資訊管理與更新：(A)數據庫建立-建立 BIM 模型的數據庫，方便查詢和管理。(B)定期更新- 定期對 BIM 模型進行更新，確保模型與實際情況一致。

III 結果與討論-BIM 在核能除役審查導則之應用

BIM 在核能除役安全中扮演著不可或缺的角色。它能提供更全面、更準確的資訊，支持更科學、更安全的除役作業。隨著 BIM 技術的持續發展，其在核能除役中的應用將會更加廣泛和深入。核能除役是一項高度複雜且具有挑戰性的工程，BIM 的應用能顯著提高工作的安全性、效率和透明度。

1.BIM 在核能除役中的優勢

(1) 資訊整合與可視化：BIM 能將核電廠從設計、建造到運營、除役的所有階段的資訊整合到一個模型中，實現資訊的集中管理和共享。並可提供三維可視化功能，讓工程師和管理人員能夠更直觀地了解核電廠的結構、系統和設備，方便進行分析和決策。BIM 模型中的數據能夠驅動各種分析和模擬，例如結構分析、輻射劑量評估、拆除模擬等。

(2) 風險評估與管理：透過 BIM 模型，可以更準確地識別與評估核電廠除役過程中潛在的風險，已進行相應的風險管理措施，提高除役工作的安全性。如結構風險、輻射風險、拆除工序風險、廢料處理風險等。

(3) 施工規劃與管理：BIM 可以協助規劃拆除順序、拆除方法，優化拆除工序，減少對周圍環境的影響。執行施工進度管理，透過 BIM 模型，可以實時監控施工進度，及時發現並解決問題。可以幫助管理拆除過程中產生的廢料，確保廢料的安全處理和處置。

(4) 成本控制與績效評估：BIM 可以根據模型中的資訊，進行精確的成本估算，為決策提供支持。根據 BIM 能夠比較實際施工情況與規劃數據，評估施工進度和品質，實現精益化管理，達成績效評估。

(5) 協同作業：BIM 能夠支持不同專業團隊（設計、施工、

監管等）之間的多方協同作業，提高工作效率。所建置的 BIM 平台能夠實現資訊共享和協同，減少溝通誤解，提高工作效率。

(6) 法規遵循：BIM 能夠幫助核電廠更有效地滿足核安全法規、輻射防護法規和環境保護法規的要求。BIM 可以自動生成各種所需的工程文件，如拆除計劃、安全評估報告等。

2.BIM 在核能除役安全中的具體應用

(1) 輻射劑量評估： 透過 BIM 模型，能精確計算人員在不同作業區域的輻射劑量，並制定相應的防護措施。

(2) 廢料管理： BIM 能追蹤放射性廢物的產生、儲存和處置過程，確保廢物的安全管理。

(3) 拆除模擬： BIM 能模擬拆除過程，預測可能出現的問題，並制定應對措施。

(4) 結構安全評估： BIM 能評估核電廠結構的安全性，確保拆除過程中不會發生意外。

IV.結語

台灣在物聯網、AI 與製造業基礎良好的情形下，推動工業 4.0，將製造業走向智慧化，結合 VR/AR/XR、5G，更帶動 AI 與 DT 迅速地開展新的能量，進而結合機器人、AMR、無人機遠端遙控等。若能加這些前瞻性技術移轉到核能電廠的除役，可降低輻射暴露風險、提高作業效率、降低作業成本、提升作業安全性。並可開創核能除役創新技術的發展，涵蓋開發具有輻射耐忍度的機器人、AMR、無人機；開發核能除役的 AI 解決方案。可推動核能除役智慧化產業，開拓國際合作的新藍海。

參考文獻

[1] IAEA PRIS, Power Reactor Information System https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalByAge.aspx (accessed on 18 March, 2024).

[2] Mandaokar A, Nuclear decommissioning market research report information, by reactor type, by strategy, by capacity, and by region-industry size, share, trends and forecast to 2032, Market Research Future, https://www.marketresearchfuture.com/reports/nuclear-decommissioning-market-2526

[3] Ben-Daya M, Hassini E and Bahroun Z, Internet of things and supply chain management: A literature review, International Journal of Production Research, Vol. 57, no. 15-16, pp. 4719-4742, 2019.

[4] Abbasi AA, Abbasi A, Shamshirband S, Chronopoulos AT, Persico V, Pescape A, Software-defined cloud computing: A systematic review on latest trends and developments, IEEE Access, Vol.7, pp.93294-93314, 2019.

[5] Yang T, Zhao L and Wang C, Review on application of artificial intelligence in power system and an integrated energy system, Automation of Electric Power Systems, Vol.43, no. 1, pp.2-14, 2019.

[6] Yang S, Kaminski MRJ, Pepin H, Opportunities for industry 4.0 to support remanufacturing, Applied Sciences, Vol.8, no.7 pp.1177, 2018.

[7] https://www.digiwin.com/tw/blog/7/index/2781.html

[8] Tu CY, Chen KT, Ting K, Sheng CY, The planning strategy of robotics technology for nuclear decommissioning in Taiwan, Nuclear Engineering and Technology, Vol. 56, pp. 64-69, 2024.

[9] Mondal K, Martinez O, Jain P, Advanced manufacturing and digital twin technology for nuclear energy, Frontiers, Energy Res, Vol. 12, 2024.

[10] Jharko E, Meshcheryakov R, Promyslov V, Aspects of nuclear power plant digital dcommissioning, International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2021.

[11] BIMPLUS, Digital Twins set to Revolutionise Nuclear Decommissioning, 2020. https://www.bimplus.co.uk/digital-twins-revolutionise-nuclear-decommission (accessed on 28 March, 2024)

[12] Yadav, V., et al, 2021, Proceedings of the Workshop on Digital Twin Applications for Advanced Nuclear Technologies,. ML21083A132, U.S. Nuclear Regulatory Commission. https://www.nrc.gov/docs/ML2108/ML21083A132.pdf.

[13] Carlson, J., et al., 2021, Proceedings of the Workshop on Enabling Technologies for Digital Twin Applications for Advanced Reactors and Plant Modernization, ML21348A019, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Virtual Workshop, September 14-16, 2021. https://www.nrc.gov/docs/ML2134/ ML21348A019.pdf.

[14] Yadav, V et al., 2021, Technical Challenges and Gaps in Digital Twin Enabling Technologies for Nuclear Reactor Applications, Letter Report TLR/RES-DE-REB-2021-17.

[15] Djysrv, 2022, Challenge and opportunities for nuclear digital twins, Neutron Bytes, https://neutronbytes.com/2022/02/14/challenges-and-opportunities-for-nuclear-digital-twins

[16] ONR GUIDE, 2020, Civil engineering – building information modelling (BIM), Nuclear Safety Technical Assessment Guide Annex, NS-TAST-GD-017 Annex 2 Revision 0. https://www.onr.org.uk/operational/tech_asst_guides/ns-tast-gd-017-annex-2.pdf

[17] ONR, ' Safety Assessment Principles for Nuclear Facilities', 2014 Edition, Rev 0, November 2014, www.onr.org.uk/saps/saps2014.pdf.

[18] Centre for Digital Built Britain, 2020, [Online]. Available: https://www.cdbb.cam.ac.uk/BIM

[19] National Institute of Building Sciences BIM Standard, 2014. https://web.archive.org/web/20141016190503/http://www.nationalbimstandard.org/faq. php#faq1

[20] Centre for Digital Built Britain, A report for the Government Construction Client Group Building Information Modelling (BIM) Working Party Strategy Paper, 2011. [Online]. Available: https://www.cdbb.cam.ac.uk/Resources/ResoucePublications/BISBIMstrategyReport.pdf

核電廠消防設備於除役階段之維護管理策略研究
Research on maintenance management strategy of fire fighting equipment in nuclear power plant during decommissioning stage

計畫編號：NSTC112-NU-E015-001-NU
計畫主持人：黃育祥
e-mail：una459@mail.cpu.edu.tw
計畫共同主持人：沈子勝
計畫參與人員：郭孟庭、曾佑皓
執行單位：中央警察大學消防系

摘要

核電廠除役期間，消防設備的有效性和完整性對於確保安全運行至關重要，由於除役期間電廠結構和操作的變化，火災風險和火載量都與運行中核電廠有所不同。永久停機後，消防防護目標不再是安全停機而轉變成保護用過燃料池中的剩餘用過核燃料，以防止火災造成放射性物質的釋放或擴散。火災風險分析應考慮可能增加的易燃物、使用明火及可能產生火花的施工作業及臨時結構及支持系統的變動。

除了消防防護計畫的制定，除役期間的消防防護目標為：快速偵測、控制和撲滅可能導致放射性危害的火災，本次研究藉由實地探勘核一廠、對照國外的法規及模擬進行研究，最終給予結論及建議。

關鍵詞：核電廠、除役、消防設備

Abstract

During the decommissioning of nuclear power plants, the effectiveness and integrity of fire protection equipment are crucial for ensuring safe operations. Due to structural and operational changes during decommissioning, fire risks and fire loads differ from those in operational nuclear power plants. After permanent shutdown, the objective of fire protection shifts from ensuring safe shutdown to protecting the spent nuclear fuel in the spent fuel pool, preventing the release or spread of radioactive materials caused by fires. Fire risk analysis should consider the potential increase in flammable materials, the use of open flames, spark-producing activities, and changes in temporary structures and support systems.

In addition to developing fire protection plans, the goals of fire protection during decommissioning are to quickly detect, control, and extinguish fires that could lead to radioactive hazards. This study involves on-site inspections of the fire protection equipment at the First Nuclear Power Plant, references international regulations, and conducts simulations. Based on these findings, conclusions and recommendations are provided.

Keywords: nuclear power plant、decommission、fire protection equipment

I. 前言

核電廠除役為臺灣核電廠必經的一條路，亦是一項困難艱辛的工作，要面臨核電廠輻射管控、廢棄物處理等，且民眾對核電廠的環境安全予以高度重視，核電廠除役涉及建管、消防、勞安等面向，不論災難發生或僅僅是異常事件，人員一旦有所疏忽，都將可能造成不可挽回的憾事。

II. 主要內容

本計畫針對其中的消防面向，又以消防設備為主軸，探討其在除役期間之維護管理方式，核電廠屬台電公司所負責經營，不大可能要求台電公司不顧成本的使用各種新式的昂貴消防設備，而是思考在現有消防設備下是否能因應核電廠除役面臨拆除所產生的各種危險，以及防護未完全之問題。

除役期間所需要的安全防護是否低於運轉期間之安全防護，以臺灣現階段尚未有任何一座核電廠完成除役所有階段下，很難直言究竟是安全防護等級需要高於運轉中或是低於運轉中之核電廠。本研究透過文獻蒐集及案例分析等方法，給予臺灣核電廠除役下消防設備之維護管理策略參考。

文獻蒐集法：

本研究中蒐集了核電廠除役期間國外的法規對於消防設備之相關規範、國內外與核電廠除役相關之文獻討論除役期間的火災風險因子、國內外除役之情形及曾發生火災之案例進行分析。其中法規研究整理如下:

1. 10 CFR 50.48(2022 年 1 月 1 日修訂)

美國核管理委員會 (NRC)訂定了法規 10 CFR，作為商業核電廠之規範指引使達到防火的目標：防止火災的發生；迅速偵測、控制和撲滅火災；對安全重要的結構、系統和部件提供保護。核電廠無論處於營運或除役停機期間，皆須訂定消防防護計畫，且在除役過程的各個階段適當修改計劃。

2. RG 1.185(2013 年 6 月修訂)

RG 1.185 是對於停機後除役活動報告 (PSDAR)必須包含信息種類的指南。停機後除役活動報告(PSDAR)應包含除役的方法，須具體描述準備拆除時的活動及工作以維護設施和場地的儲存安全，包含為除役而重新配置的通風系統及消防系統。

3. RG 1.191(2021 年 1 月修訂)

監管指南 (RG) 描述了美國核管理委員會 (NRC)

工作人員可接受的方法，用於遵守 NRC 的消防防護計畫規定，適用於受 10 CFR 50 和 10 CFR 52 約束的反應器許可證持有者。永久停機電廠的主要防火問題是保護用過燃料池中剩餘用過核燃料的完整性，並防止或最大限度地減少因受污染工廠的 SSC 或放射性廢棄物發生火災而導致放射性物質的釋放。目前常見有二種除役方法，分別為 DECON（立即拆除）、SAFSTOR（長期安全儲存）。除役方法不同其防火要求可能會有很大差異，因此，所需的消防防護計畫將隨著火災隱患的變化而發展。其中對於消防設備:偵測及警報設備、滅火設備、手動滅火設備、滅火器及用過燃料池之消防設備要求有詳細說明。

4. RG1.189(2021 年 5 月修訂)

監管指南(RG)描述了美國核管理委員會(NRC)工作人員可接受的方法，規定了民用核電廠消防防護計畫 Civilian nuclear power generating plant's fire protection program (FPP)的要求。

5. NFPA805(2020 年)

本標準規定了輕水反應爐核電廠在運行各個階段（包括停機、降級條件和除役）的最低消防要求，以保護反應爐運能安全運轉及公眾、環境和工作人員的安全免受電廠火災的影響。

參考國內外文獻，核電廠除役分為多階段，以已除役的核一廠及核二廠為例，分為除役過渡階段、除役拆廠階段、廠址最終狀態偵測階段及廠址復原階段。每階段需確保安全並進行危害評估以防事故，除役期間的設施特徵包括：設施頻繁變更、無法有很好表徵、放射性危害減少凸顯施工安全、庫存移除對廠外影響、工作環境多變。

由上述可知，除役期間的火災風險不同於營運期間，需重新評估消防設備，如自動撒水設備、排煙設備等。主要火災因子包括拆除設備或表面淨化作業、臨時可燃材料及廢棄物堆積、除汙化學試劑爆炸、施工粉塵、早期建材不符防火性能。

核一廠及核二廠使用沸水式反應爐，除役期間最危險的事故為火災。根據 Hettiarachchi [1]的研究，火災探測及警報系統在維護除役期間的放射安全中扮演重要角色，需靈敏度高且適合不同火災風險。除役期間需維持運轉的系統包括電力、冷卻、輻射偵測及淨化、廢棄物處理、消防、監控、保安系統。Walaa El-Kattan et al.的研究指出，電纜老化及狀態監測成為核電廠電纜須注重的問題，尤其是主控室的電纜完整性攸關消防系統的正常運作[2]。

根據綠色和平法國辦公室[3]，核廢料儲存區域易引起火災的風險有氫氣及可燃性廢料包材。用過核燃料儲存策略分為濕式儲存、乾式儲存及最終處置。目前國際上常見的乾式儲存方式有混凝土貯存窖、金屬護箱、混凝土護箱、混凝土模組、地下貯存系統，我國核一廠室外乾式儲存設施尚未啟用。台電表示乾式儲存技術不會發生氫氣爆炸，但乾式儲存設施火災風險仍存在，如燃油火災或氫爆。運送區域及貯存區域需設計防火空間及消防設備，以降低火災可能造成的輻射外洩危害。

根據統計，截至 2022 年 8 月全球已有 17 座核電廠以 DECON 法除役完成，分別有美國 13 座、德國 3 座、日本 1 座。除役中之核電廠則不乏有火災案例傳出，經本研究統計，有蘇格蘭 1 件、日本 10 件、立陶宛 1 件、荷蘭 1 件、俄羅斯 1 件。

現場勘查法：

本研究於研究過程於研究過程中亦實地勘察國內除役中之核一廠，經實地勘查，本研究認為核一廠的風險因子主要可分為三類，分別是:

1. 廠內各區電纜

在核一廠除役過程中，部分設備仍在運作狀態，當廠內開始進行拆除作業時，施工可能造成電線斷線或短路，且部份設備有持續運作需求，因此廠內大量電纜皆可能成為除役期間火災風險因子。除了因電氣原因起火，施工期間可能有動火作業或其他的遺留火種，電纜的可燃部份會造成火勢擴大。

2. 易燃液體

廠內有較多易燃液體的地方為汽機廠房的電機及氣機運轉所需燃料、汽機廠房一樓的潤滑油室、聯合廠房內的柴油儲存區及反應器廠房的 M-G SET，為因應除役，汽機廠房之燃料、潤滑油室及 M-G SET 運轉所需油料皆已清空，餘柴油儲存區，因廠內柴油儲存區與室外儲槽相連，又除役期間可能有動火作業或防火區劃破壞之情形，若與油氣接觸可能造成火勢擴大。

3. 易燃物

此次參訪發現反應器廠房五樓及汽機廠房為因應除役所需，有塑料包材存放之情形，因汽機廠房日後開始除役施工時，預計會於場地內進行切割作業，切割產生的火花與易燃材料接觸，可能引發火勢，因此切割時須注意環境易燃物的淨空，且切割後材料可能有熱蓄積情形，應將切割後材料及施工所需易燃物確實分類分區置放。

模擬分析法：

本次研究為了模擬煙層於火災中擴散及流動情形，甚至進一步模擬人員避難情形，因此我們根據軟體模擬特性選用了兩種模擬軟體進行模擬，分別是 Pyrosim 軟體及 Pathfinder 軟體。Pyrosim 軟體，該軟體便於觀察模擬煙層、火流的擴散與流動情形，研究中分為四個情境，分別是:

1. 情境一：場所無排煙設備，火源為電纜
2. 情境二：場所無排煙設備，火源為柴油
3. 情境三：場所有排煙設備，火源為電纜
4. 情境四：場所有排煙設備，火源為柴油

火源為電纜是以聚氯乙烯(PVC)設定火源為 10 分鐘達到最大熱釋放率 2MW，火勢並以 T 平方曲線公式成長，10 分鐘後維持熱釋放率 2MW 穩態燃燒，火點位於 5 公尺高電纜上，位置約空間正中心；火源為柴油則採用柴油做為燃料由，設定最大熱釋放率為 1.5MW，火勢以 T 平方曲線公式成長，50 秒後維持 1.5MW 穩態燃燒，位置為空間靠牆之地面；模擬情境納入排煙設備考量，排煙量每分鐘 120m^3，並於火點附近高度

6 公尺處設置偵煙式離子式探測器(靈敏度為 4.2%/m)；模擬空間(長 26.8 公尺、寬 21.2 公尺、高 6.8 公尺)內有小房間(長 9.4 公尺、寬 9.2 公尺、高 6.8 公尺，門為鏤空格柵)，模擬時間 15 分鐘。

經由模擬結果，比較情境一與情境二，發現熱釋放率部分，皆符合設定；溫度部分(高度 6.5 公尺處)，由模擬結果得知高度 6 公尺之測定點雖情境一之電纜最大熱釋放率高達 2000kW，然花費時間較長(10 分鐘)，較情境二的 50 秒達到最大熱釋放率 1500kW 的柴油於模擬時間結束時之溫度低(情境一、二於分別為攝氏 136 度、148 度)。

能見度部分(高度 1.8 公尺之中央處)，情境二約 129 秒時能見度測定點驟降至小於 10 公尺，遠比情境一的 461 秒快速，經比對模擬情形發現係情境二熱釋放率 50 秒即達到峰值 1500kW，亦導致發煙量較大使煙氣更快速地使能見度下降；情境一、二的一氧化碳達嚴重危害人體安全的指標 1400ppm、偵煙式探測器動作時間'情形亦同，發煙量較大使煙氣情境二使一氧化碳能度更迅速地升高(情境二 176 秒快於情境一 479 秒)、偵煙設探設器作動(情境二 48 秒快於情境一 63 秒)。

情境三與情境四比較則發現，加入排煙設備後，原熱釋放率受排煙設備影響，火源燃燒之熱釋放率整體下降，原 10 分鐘達熱釋放率峰值 2MW 的電纜，於設有排煙設備的情境三中，熱釋放率於 10 分鐘左右達峰值 650kW 並開始下降；原 50 秒達熱釋放率峰值 1500kW 的柴油，於設有排煙設備的情境四中，約 50 秒達峰值約後開始下降，無法維持穩定至約 200kW。

危險指標 1.8 公尺之一氧化碳 1400ppm、能見度小於 10 公尺部分，有設置排煙設備之情境三、四皆較情境一及二達到時間花費時間較長。

探測器動作部分，由於設計係偵煙式探測器動作後連動排煙設備動作，故相同燃燒物電纜的情境一、三皆為 63 秒；相同燃燒物柴油的情境二、四偵煙式探測器動作時間皆為 48 秒。

溫度部分(高度 6 公尺處)，情境三及情境四於模擬時間結束時約達攝氏 70 度，皆低於無排煙設備的情境一及二，因排煙管排出的煙帶有熱氣，須維持排煙設備的管道使其能順利地將煙排放至安全的室外或其他適當空間。

本次研究情境總避難時間項目如下：

1. 火警探測器發報時間 63 秒(由 PyroSim 模擬結果情境一得知)
2. 中控室人員接收火警訊息並確認，至廣播火警發生請人員避難之時間：假設為 1 分鐘
3. 避難準備時間：2 分鐘
4. 避難逃生時間：111 秒。

加總上述時間得知總避難所需花費時間約為 6 分鐘，與 PyroSim 模擬結果比對得知，人員尚能順利進行避難。

III. 結果與討論

核電廠除役分為多階段，除役期間應確定的危害評估目標包含 1.確定拆除作業對鄰近區域的影響 2.確定停機後與設備中殘留物相關的火災、爆炸或毒害危險。核電廠在其營運期間已有完整的消防系統，但前述已知除役期間火災風險與營運期間不盡相同，且施工期間會面臨區劃的變更，因此針對火災預防或初期應變所設置之消防安全設備也可能因除役期間不同的火災風險因子而略有差異(自動撒水設備、排煙設備等)而必須進行重新評估，控制這些因子變成為火災防護的重要工作，除役期間火災因子包含[4]:

1.拆除設備或表面淨化的施工作業。
2.拆除期間臨時可燃材料及廢棄物的堆積
3.除汙過程中化學試劑可能引起爆炸
4.施工產生的粉塵
5.早期建材與現代防火性能不符(如:石棉)

原則上營運期間既有的設備繼續使用，臨時的隔間或設施則必須考慮:

1.新增火警探測及警報設備
2.若臨時設施使用時間較長，考慮擴建現有的消防系統。
3.新增手動滅火設備[5]。

在選擇探測器種類時應注意與該區可燃物種類、燃燒特徵、安裝環境是否相符[6]，避免無法正常作動或誤動作。

經由災例我們可以發現在除役或停機中核電廠的火災災例中，雖部分起火原因未知，但其中 6 件與電器火災有關、其中 3 件與廢棄物管理及人為疏失有關，電器火災仍佔多數。在核電廠中最重要的是核電廠的主控室，其為核電廠安全運作的中心，內部有許多控制及監視設備，皆須仰賴電纜電力及訊號供應，當電纜老化會增加電氣火災的發生率，又當主控室發生火災時，其功能完整性攸關消防系統的正常運作，因此除役期間核電廠主控室(MCR)電纜的完整性及消防系統的功能及應變仍須重視[2]，然而發生火災時除了火災溫度對電纜及內部設備產生影響，滅火藥劑也可能對設備產生二次損害。

為了避免火災對主控室產生破壞，滅火系統應達到幾點目標:1.避免產生 HF、2.使電纜溫度維持在 200℃以下、3.降低電纜產生的燃燒熱釋率。根據前述，相較於氣體滅火系統，細水霧滅火系統更適合主控室或核電廠內其他具電纜及電子設備之場所，如：電氣開關室、電氣設備室、電纜分配室等場所[7]。

經由模擬可知對於可燃物管控的重要性，移除非必要存在於核電廠的可燃物，將使火災發生時之危險性下降；排煙設備的增加除排煙外，對於熱影響亦有所影響，使人員有更為充足之時間避難。本次研究情境總避難時間顯示人員尚能順利進行避難。

然而情境模擬主要係以火災發生狀況之危險度作為維護管理及相關策略之評估，在實務上尚有合理分配有限資源以達最大化防護場所之考量，且需於建築物安全面整體為之，爰就除役核電廠消防設備維護管理長達 25 年而言，定期或不定期審視消防設備及防火

管理與整體安全之關係，實屬不可或缺；且除役核電廠的安全並非僅達到現場人員初期避難即可，必須就空間、從消防設備、人員管理、預防及應變等整體考量，使核電廠除役順利進行。

IV. 結論

我國運行的核電廠共有三座，核一廠、核二廠、核三廠，其中核一廠、核二廠皆已停機進入除役階段，核三廠依照運轉執照，廠內兩台反應器也將分別於明、後年到期，進入除役。除役期間耗時長，總共約需 25 年，雖核電廠運行期間與除役期間防護重點不同，由達成安全停機轉變成防止放射性物質的釋放或擴散，且依據災例，火警是造成放射性物質釋放或外洩的主要威脅，考量除役期間火災因子與運行期間不同，因此除了平時的預防工作，當火災發生時，該如何減災，也是除役期間須重視的。為了達成減災，通常需要依靠防火區劃、消防設備及消防防護計畫對災時應變的規劃；在除役期間的火災因子，包括:拆除設備或表面淨化的施工作業、拆除期間臨時可燃材料及廢棄物的堆積、除汙過程中化學試劑可能引起爆炸、施工產生的粉塵，而目前我國除役中的核電廠，核一廠、核二廠，用過燃料也都存放於核電廠內，輻射外洩風險仍大，因此考量防火區劃已固定無法變動或甚至因施工需求有被破壞的情況，除役期間更須注重消防設備及消防防護計畫的重要性，以達成及早發現火災並進行控制，避免因火災引起輻射外洩。

因我國尚未有完整的除役經驗，因此參考國外相關法規及文獻進行研究。以核一廠為例，依據實際探勘，核一廠內的消防設備種類有火警自動警報設備、滅火器、二氧化碳滅火設備、移動式泡沫滅火設備、自動撒水設備、室內消防栓及潔淨氣體滅火設備，且持續檢修維持於可使用狀態，就現有設備與國外法規 NFPA805、10 CFR 50.48 、RG 1.185、 RG 1.191 歸納出除役期間核電廠內須維持的設備火警探測器、滅火器、自動滅火系統、消防栓設備進行對照，目前核一廠的消防設備種類與國外法規建議相符。

核一廠因廠內用過核燃料尚未移出，因此目前尚無明顯施工作業，經由實際參訪歸納，廠內目前的火災風險可分為三類:電纜、易燃液體、易燃物。核電廠內有許多電纜及電子設備，因除役期間仍有設備運作及工作人員工作需求，因此電纜為除役期間的火災風險，且根據災例，電氣為除役期間發生火災的多數原因，因此電氣為核電廠除役期間最須注重的風險因子；易燃液體為廠內作為燃油的柴油，於廠內的柴油儲存區仍有油料儲存，且與廠外油槽相連，根據資料容量可達 4500 公升以上，同樣具火災高度風險。易燃物為廠內為廠內除役準備工作新增之塑料包材，雖目前尚未動工，無明火作業進行，但仍需注重管理，避免日後有明火施工作業進行時，誤點燃易燃物。

由模擬結果可知，可燃物管控及消防設備設置對於火災發生的警示有密切關係，使場所人員即時瞭解火災發生處所，初期滅火及有效避難，並等待消防隊抵達現場進行救災活動，另核電廠部分空間為挑高或挑空設計，使火災發生時之煙氣蓄積、災害處所附近人員把握時間儘速逃生，煙氣控管部分，以場所從運轉至除役尚無因設備不足而導致重大災害發生卻無法抵禦而言，尚難謂此部分不足而有另行新設置消防排煙設備之必要；蓋消防設備之防護與災害預防、生命安全息息相關而不可不慎，爰場所於消防設備維護管理仍須有充足的經費及編排或委託人員定期執行檢修，為防災重要之一環。

參考文獻

[1] Hettiarachchi, S. BWR Decommissioning General Information and Experiences. A.N.T. INTERNATIONAL; 2017. [cited 2023 Oct 26]. Available from: https://antinternational.com/handbooks-and-reports/bwr-decommissioning-general-information-and-experiences/

[2] El-Kattan, W., Kandil, M., Said, E. S. A., & Hussein, A. E. R. Evaluation of the Cables Types during the Fire Conditions in Nuclear Power Plants. International Journal of Computing and Network Technology. 2015 Jan; 3(01) :25 – 30.

[3] 綠色和平法國辦公室,全球核廢料危機報告;2019,取自 https://www.greenpeace.org/static/planet4-taiwan-stateless/2020/02/18633934-%E5%85%A8%E7%90%83%E6%A0%B8%E5%BB%A2%E6%96%99%E5%8D%B1%E6%A9%9F%E5%A0%B1%E5%91%8A.pdf

[4] Jeong, K., Choi, B., Moon, J., Hyun, D., Lee, J., Kim, I., ... & Kang, S. Establishment of the hazard reduction methodology to be taken into account for safety assessment during decommissioning of nuclear facilities. Annals of Nuclear Energy. 2016 Jan; 87:7-15.

[5] HEADQUARTERS, DEPARTMENT OF THE ARMY. GENERAL DESIGN CRITERIA TO FACILITATE THE DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES. TECHNICAL MANUAL; 1992. [cited 2023 Oct 28]. Available from: https://armypubs.army.mil/epubs/DR_pubs/DR_a/pdf/web/tm5_801_10.pdf

[6] Chen, H. To enhance fire safety of nuclear power plant by improving fire alarm system. IAEA; 2012. [cited 2023 Nov 13]. Available from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1362_CD/htm/pdf/Poster%20Session/042P.pdf

[7] 邱士榮、簡賢文，細水霧滅火系統應用於核電廠電氣開關室之初探，災害防救學報，2008；9(1)。

小型模組化反應器發展現況與安全性探討
Development Status and Safety Features of Small Modular Reactors

計畫編號： 112-NU-E-007-009-NU
計畫主持人：葉宗洸
e-mail：tkyeh@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：王美雅
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

蒐集全球各國正在發展的各類型 SMR 的相關資料文獻與國際案例，針對其設計類型與特性進行整理與分析，包含以部署、設計、類型、應用面來分。分析全球各國對於 SMR 執照申請許可的規範與要求，也會針對各類型 SMR 相關的安全評估與環境影響的部分進行資料蒐集與整理。最後，對於各類型的 SMR 安全性與管制技術進行研析，掌握其關鍵特性與安全議題。

關鍵詞：小型模組化反應器、微小型反應器、低碳能源、彈性發電。

Abstract

We would collect the relevant documents and the international cases about the status of SMRs around the world. The design and characteristics of SMRs were classified and analyzed according to the issues of deployment, design type, application. The specification and requirement for SMR license application in various countries around the world were also investigated. In addition, collecting and sorting data was also be carried out for the safety assessment and environmental impact of various types of SMRs. Finally, the security and regulation issue for the SMRs was studied in detail to understand the key characteristics and safety aspect.

Keywords: Small Modular Reactor, Microreactor, Low-carbon Energy, Flexible Power Generation.

I. 前言

為了要將全球暖化溫度限制在遠低於 2ºC 以下，需要在全球各國改變能源的生產與消費的方式，也需要廣泛地使用低碳能源技術，包含各種再生能源、能源效率措施、先進車輛、碳補獲與儲存、以及核能等。小型模組化反應器(Small Modular Reactor, SMR)是先進的核子反應器，其單模組可以產生的電功率在 300 MWe 以下，約為傳統核反應器發電功率的三分之一，可以產生大量的低碳電力，為實現全球氣候目標與能源供應安全做出重要的貢獻。目前有 18 個國家正在發展超過 70 個以上的 SMR 設計，包含尚未獲得執照的創新型反應器與模組化製造的新方法。

SMR 可以更廣泛的滿足用戶與應用的選擇來取代老舊的火力電廠，因其具有既有的被動式安全特性來強化安全性能，且可滿足靈活的電力需求。SMR 的規模僅有大型反應器的一小部分，且前期資本成本更低，模組化的設計可以使系統與組件預先在工廠組裝成一個單元後運送至現場安裝，可部署為單模組或是多個模組，也可以用於非電力應用，例如工業製熱與產氫等。此外，對於基礎設施不發達的偏遠地區提供了一種選擇，並且可以更靈活的與其他潔淨能源(包含再生能源)整合使用，提供了混合能源系統的可能性。SMR 在效率、經濟性與靈活性方面具有獨特的屬性，可以根據電力需求調整輸出，像風能與太陽能等再生能源是屬變動能源，取決於天氣與每天的時間階段，SMR 可以與再生能源搭配形成混合能源系統來提高其效率，可以使 SMR 在潔淨能源轉型中發揮關鍵作用。

II. SMR 設計類型與特性

SMR 目前發展的反應器型式包含水冷式反應器(Water Cooled Reactor)、高溫氣冷式反應器(High Temperature Gas Cooled Reactor, HTGR)、液態金屬(Liquid Metal)與鈉冷快中子反應器、氣冷式反應器、熔鹽式反應器(Molten Salt Reactor, MSR)，以及微小型反應器(Micro reactor)。部分水冷式 SMR 是採用輕水式或是重水式的設計，因現行運轉的發電廠大都是水冷式反應器，此設計技術上較為成熟。

SMR 的部署目前已達到幾個重要的里程碑，像是俄羅斯 Akademik Lomonosov 浮動式 SMR 配置兩個模組 KLT-40S 於 2019 年 12 月並聯發電，2020 年 5 月開始商轉。中國大陸的 HTR-PM 示範點於 2021 年 12 月併入電網，為兩個核反應器配置一個渦輪機，2022 年 12 月達到全功率運轉。阿根廷 CAREM25 正在建造，預計 2026 年達到第一次臨界。中國大陸 ACP100 於 2021 年 7 月開始興建，目標為 2026 年開始商轉。美國 NuScale Power Module™標準設計於 2020 年 9 月已經 NRC 批准，後續 NuScale SMR 設計可以在美國使用[1]。

陸上水冷式 SMR 包含輕水式反應器(Light Water Reactor, LWR)與重水式反應器(Heavy Water Reactor, HWR)，目前現行反應器大都是屬於水冷式反應器，所以此技術相當成熟。目前 IAEA 12 個會員國約有 25 種水冷式 SMR 的設計，包含 Integral-PWR、PHWR、compact-PWR、loop-PWR、BWR 與區域供熱的 loop-PWR 等。船用水冷式 SMR 可以利用駁船作為浮動動力裝置或是浸入式水下動力裝置，有些船用水冷式 SMR 可作為核動力破冰船，用作核動力的推進與浮動式核電廠，對於維護海上安全、開發海洋資源、為偏遠沿海區域供電具有重要的價值。俄羅斯第一座連至電網的浮動式 SMR 為 Akademik Lomonosov 屬於此類，KLT-40S(35 MWe)已在 2020 年 5 月開始商轉，可以停泊在任何沿海位置，可為沒有集中供電的偏遠者提供電力與熱能，也可以作為海水淡化與海上石油生產平台的電力。HTGR 可以提供 ≥750 ºC 的高溫熱能，可用於更高效率的發電、工業應用與汽電共生。中國大陸的 2 座 HTR-PM 於 2021 年臨界，

其中 1 號機於 9 月達到臨界，2 號機於 11 月達到臨界，2021 年 12 月併入電網開始發電。快中子式 SMR 使用不同冷卻劑的設計，包含鈉、液態重金屬(例如:鉛或鉛鉍)和氦氣。俄羅斯正在發展鉛冷式快中子反應器 BREST-OD-300，預計在 2026 年運轉。產生的電力為 300MWe，是用於實驗與示範目的的電力裝置，經過運轉測試後會併入電網供電。熔鹽式 SMR，採用熔鹽式的燃料與冷卻劑作為設計的 SMR，具有多項優點，因鹽本身的特性而提高的安全性、無需大型圍阻體的低壓單相冷卻劑系統、可實現高效率的高溫系統與彈性的燃料循環。微小型 SMR 主要是指產生的電力高達 10MWe，可以使用不同的冷卻劑，像是 HTGR 與利用熱管進行熱傳的設計。2019 年 Global First Power 提出現場申請，在 Chalk River 實驗室場址建造一小型微小型模組化反應器，希望透過微小型反應器的發展來取代現行使用柴油發電機的區域，像是偏遠地區、採礦、工業與漁業等的未來電力與供熱市場。日本東芝公司發展一微型反應器 MoveluX，是 10MWt 的多用途微型反應器[1]。

III. SMR 環境影響評估

SMR 具有各種獨特的特徵，例如產生的電力、SMR 場址佔地面積、模組化設計、非電力應用、場址位置、建造、燃料更新、輻射源與廢棄物管理。SMR 具有單獨的模組，每個模組通常都有一個核反應器，用於提供功率，模組可以在工廠製造，並在需要時運送核電廠廠址進行安裝。在監管制度下，環境影響評估(Environmental Impact Assessment, EIA)報告是獲得執照的先決條件並且也是確認潛在場址是否適合建造 SMR 與運轉的重要工具。環境影響評估過程的另一個重要部分是公眾參與，確保能考慮到各個利害相關人對於項目影響的看法。SMR 的特性可能具有特定的環境影響，這部分會反應在 EIA 的報告。與大型反應器相似，現今的 SMR 設計，採用的冷卻劑可為水、氣體、液態金屬與熔鹽等，依賴核分裂中產生的熱中子或快中子，但因其特定的特徵，如發電量、場址的佔地面積、模組化設計、非電力應用、場址位置、地下建造、燃料更新、輻射源與廢棄物管理等，可能會使 EIA 與大型反應器有所不同，再者，如果場址部署多個 SMR，這影響可能比單個 SMR 更大，EIA 也須考慮此種影響，同樣地，如果隨著時間而在同一場址增建多個 SMR，EIA 也應相對應的修正[2]。

從 SMR 與 LR 對於環境影響的性質上並無太大差異，預計會是幅度上的不同。與陸地 SMR 相比，海上的 SMR 結構的建造可能較少，會在場外建造然後放置於水面上或水下。模組化的設計會可能產生作用，在異地生產然後移至現場裝設，可以減少一些現場施工活動。在運轉階段，SMR 與 LR 並無顯著差異，除了影響的程度，無論是初始階段或是分階段模組化建設。在除役階段也是一樣，除了影響的程度有差異外。針對廢棄物管理的部分，需要對非放射性廢棄物進行管理，這部分 SMR 與 LR 並無不同，只有潛在的數量部分。而對於放射性廢棄物部分，用過核燃料與中低階放射性廢棄物的成分與數量是與設計方面相關，例如爐心尺寸(燃料數量)、反應器技術、燃料濃度度與 SMR 燃耗速率，用過核燃料的儲存可能在現址或是單獨的處置庫，跟政策相關，就與 LR 一樣，如果 SMR 採用模組更換或是異地更換燃料，這將排除現場儲存[2]。

IV. 各國對小型化模組反應器的法規現況

美國核能管制委員會 (U.S. NRC) 在 2023 年 1 月 19 日於聯邦公報頒布 NuScale 公司設計的小型模組化反應器 (Small Module Reactor, 簡稱 SMR) 通過法規認證，依據的法規和過往傳統第二代反應器的設計申請為同一條法規[3]。

在英國，新的核能發電廠成功建造及運轉之前，除了要通過 GDA 以外，營運商還需要取得以下幾個核可：從 ONR 獲得場址許可證和開始核可相關建設的同意、從環境署（Environment Agency）或威爾士自然資源署（Natural Resources Wales）獲得環境許可證。

加拿大核能安全委員會 (Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)根據《核安全與控制法》（Nuclear Safety and Control Act, NSCA）第 24(2)條的規定，進行執照申請的審查，然而在 CNSC 能夠作出 NSCA 許可決定之前，根據《加拿大環境評估法》2012 年版（Canadian Environmental Assessment Act 2012, CEAA 2012），需要進行環境評估（Environmental Assessment, EA）程序。CNSC 也提供了一項選擇性服務，其名為 A Pre-Licensing Vendor Design Review (VDR)，根據反應器供應商的反應爐設計，在其設計早期就提供技術性的意見，第一階段預計耗時 12-18 個月，第二階段預計 24 個月[4]。

2023 年 4 月，南韓核能管制機關(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)發布了 SMR 部屬的相關法規與指南，名為 Policy Statement on the Regulation of Small Modular Reactors (SMRs)，旨在重申 SMR 須遵守適用任何核能安全法規的基本安全原則，確保最高水準的安全，如因創新設計而無法適用時可採用各種評估方法來驗證反應器的安全性，透過密切監管的合作來建立國際公認的監管標準，創建適用於 SMR 新設計特徵的監管框架[5]。

中國國家核安全局(National Nuclear Safety Administration, NNSA)為了審查並訂定 SMR 安全的相關規範，發布了「SMR 示範計畫的安全審查原則」以提供製造商與審查單位的審查基準指南[6]。考慮 SMR 的特性與現行的核能安全要求來建立 SMR 的安全要求。SMR 的審查流程與基本的安全要求與大型的商業 PWR 一樣，考慮到 SMR 設計的不同，有些安全要求可能不同。

V. SMR 緊急應變計畫區

SMR 的設計特性使得開發單位與人員認為此類型的緊急應變計畫區應與傳統核電廠所涵蓋的緊急應變計畫區要有所不同。低功率的 SMR 代表著分裂產物以及衰變熱的產生相對較少。因此若有事故造成輻射物種外釋到大氣中相對傳統的 LWR 來說應較輕微，這些都是可以作為支持縮減 EPZ 範圍的論點。然而，一個廠址可能一次建造多個 SMR 機組，倘若多個機組在同一個時間共同失效造成事故，所造成的輻射源項可能就會和傳統大型核電廠一樣多。一個良好的緊急應變計畫區(EPZ) 確定方法 (適用於 SMR 或更一般的情況) 應該具有可追溯性 (可以追蹤結果生成的過程)、靈活性 (可

以提供不同的解決方案，因不同國家的差異而異)、技術中立性 (對於 LWR、HTGR 等可以使用相同的方法)並反映最新的國際要求。表 1 為現今幾個 SMR 機型個別的熱功率以及其目前 EPZ 的劃定範圍[7]。

縮減 EPZ 的範圍可以帶來以下幾點好處：

1. 可使 SMR 的廠址選擇更具彈性，甚至可以蓋在靠近城市的地方。
2. 若該 SMR 的用途為供熱給工業區，可以有效減少過長距離傳輸造成的熱損失。
3. 較簡單且經濟的緊急準備計畫。
4. 對申請者及監管機構來說都有更直觀的執照核可程序。

SMR 廠址的緊急應變計劃應該考慮到較少輻射源項和被動設計特徵的影響而調整為相應的水準。採取的方式為將廠外緊急應變計畫的要求根據 SMR 的輻射源項、分裂產物釋放和相關劑量特性 (這些都是根據反應器的功率) 而調整為相應的水平。這些因素都是基於廠外劑量而得出，並使用 EPA PAG 報告中的值作為確立標準 EPZ 範圍的主要依據。在這樣的方法下，可以為不同的劑量限制確定不同的 EPZ 邊界。例如，考慮四個不同的區域邊界或類別規劃出廠址邊界、2 英里、5 英里和 10 英里的 EPZ。如果預計事故引起的廠外劑量在邊界處小於 1 侖目 (人體侖琴當量，roentgen equivalent man, rem)，則不需要超出邊界的 EPZ。如果預計廠外劑量大於 1 rem，但在 2 英里處小於 1 rem，則 EPZ 的要求將僅限於 2 英里區域。同樣，如果預計離廠劑量大於 2 英里處的 1 rem，但在 5 英里處小於 1 rem，EPZ 的大小將為 5 英里。如果預計離廠劑量大於 5 英里處的 1 rem，則 EPZ 的大小將預設為目前的 10 英里 EPZ[7]。

表 1 目前各 SMR 之 EPZ 劃定範圍

Parameter	Reactor				
	BWRX-300	NuScale	IMSR	MMR	UK SMR
Developer	GE-Hitachi Nuclear Energy	NuScale Power ILLC	Terrestrial Energy Inc	Ultra Safe Nuclear Corporation	Rolls Royce
Thermal power (MW)	870	200	400	10	1300
Safety systems	Hybrid (passive + active)	Passive	Passive	Hybrid (passive + active)	Hybrid (passive + active)
Source term	Conservative appr: scaled large BWR	Conservative appr: scaled large PWR	Molten fuel, only noble gases released	Robust PRISM	Conservative appr: scaled large PWR
EPZ claim (m)	1000 (site boundary)	500 (site boundary)	< 500 (site boundary)	30/50	TBD

表 2 可調整的 EPZ

Plume Exposure EPZ		Ingestion Exposure EPZ	Offsite EP Plan
Site Boundary	Projected dose at site boundary is < 10 mSv (1 rem)	None. EPZ can expand based on event, if determined to be necessary	All hazards – license condition
2 miles (3.2 km)	Dose at site boundary is ≥ 10 mSv, and ≤ 10 mSv at 2 miles	Yes. (NUREG-0396 and FDA PAGs)	Yes.
5 miles (8 km)	Dose at site boundary is ≥ 10 mSv, and ≤ 10 mSv at 5 miles	Yes. (NUREG-0396 and FDA PAGs)	Yes.
10 miles (16 km)	Dose at 5 miles is ≥ 10 mSv	Yes. (Current regulations)	Yes.

VI. 結論

隨著對於可靠、潔淨與靈活的基載電力需求增加，全球對於 SMR 的興趣也愈來愈高，可能在不久的將來，需要 SMR 來替代大量基載電力，因為 SMR 具有更便宜的前期資本成本，並且可與再生能源結合的靈活性，以及廢棄的化石燃料發電廠場址提供重新發電的機會，當無碳電力的需求上升，SMR 將會變得愈來愈重要。SMR 除了產生電力外，在非電力應用上也相當廣泛，包含海水淡化、製程加熱、產氫與其他工業用途。

大型核電廠(Large Reactor, LR)與 SMR 放射性環境影響(例如對於人的健康影響與對野生動物的影響)的確定方法是相同。現今的 SMR 設計，採用的冷卻劑可為水、氣體、液態金屬與熔鹽等，依賴核分裂中產生的熱中子或快中子，再如發電量、場址的佔地面積、模組化設計、非電力應用、場址位置、地下建造、燃料更新、輻射源與廢棄物管理等，可能會使環境影響與 LR 有所不同，場址部署多個 SMR 影響可能比單個 SMR 更大。

在 SMR 法規上，基本上還是與過往傳統反應器設計申請的法規並無太大差異。南韓發布了 SMR 部屬的相關法規與指南，旨在重申 SMR 須遵守適用任何核能安全法規的基本安全原則，確保最高水準的安全。中國發布了「SMR 示範計畫的安全審查原則」以提供製造商與審查單位的審查基準指南。SMR 的審查流程與基本的安全要求與大型的商業反應器一樣，考慮到 SMR 設計的不同，有些安全要求可能不同，如選址、建造、運轉要求、緊急應變等。

SMR 廠址的緊急應變計劃應該考慮到較少輻射源項和被動設計特徵的影響而調整為相應的水準。具有低功率的 SMR 代表著分裂產物以及衰變熱的產生相對較少。因此若有事故造成輻射物種外釋到大氣中相對傳統的 LWR 來說應較輕微，但如單一廠址建造多個 SMR 機組，倘若多個機組在同一個時間共同失效造成事故，所造成的輻射源項可能就會和傳統大型核電廠一樣多。

參考文獻

[1] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) (http://aris.iaea.org), 2022 Edition.

[2] IAEA, “Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors,” IAEA-TECDOC-1915, VIENNA, 2020.

[3] https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part052/index.html.

[4] Pre-Licensing Vendor Design Review - Canadian Nuclear Safety Commission.

[5] Nuclear Safety and Security Commission News - Press Releases (nssc.go.kr).

[6] https://gnssn.iaea.org/NSNI/SMRP/Shared%20Documents/TM%204%20-%208%20September%202017/Development%20and%20Related%20Regulation%20Practice%20of%20SMR%20in%20China.pdf.

[7] U. S. NRC, "Development of an Emergency Planning and Preparedness Framework for Small Modular Reactors,” SECY-11-0152," October 28, 2011.

壓水式核電廠除役拆除策略之管制研析
Regulatory Research on Dismantling Strategy of Pressurized Water Reactor Plants during Decommissioning

計畫編號：NSTC 112-NU -E-007-008 -NU
計畫主持人：許文勝
e-mail：wshsu@ess.nthu.edu.tw
計畫參與人員：李宜娟
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

核能電廠進入除役期間，經輻射特性調查並將組件、系統、結構物除污後，執行受放射性污染之設備、結構及物質之拆除作業，在確認廠址輻射劑量符合法規限值後，可以將廠址解除除役管制。拆除作業要將人員輻射曝露之防護、技術適宜性及有效性、放射性物質清除能力、二次廢棄物管理、空間管理等議題納入考量。本研究蒐集、研析國際間壓水式機組拆除時機與時序之資訊，以及所考量之關鍵要項，研議相關管制要項及作法之建議，以持續精進並提昇我國除役管制之量能。

關鍵詞：除役、壓水式機組、拆除

Abstract

During the decommissioning period of a nuclear power plant, site characterization is the initial step conducted to determine the extent and magnitude of contaminants. Then, the contaminated equipment, structures and buildings will be decontaminated until radiation dose meets the criteria. The major part of a dismantling plan involves dismantling, removal, and size reduction of concrete structures and metal components, such as vessels, conduit, pipes, and structural steel. There may be some important issues need to be considered, such as dismantling timing, radiation exposure, technical efficiency, the capability of radioactive material removal, secondary waste management, and space management, etc..

This project is to collect the experiences of decommissioning nuclear power plants of PWR in order to better understand the timing and key considerations relative to dismantling, such as radiation protection and secondary waste. The results will be integrated to provide regulatory recommendations for AEC regarding the dismantling of PWR nuclear power plants.

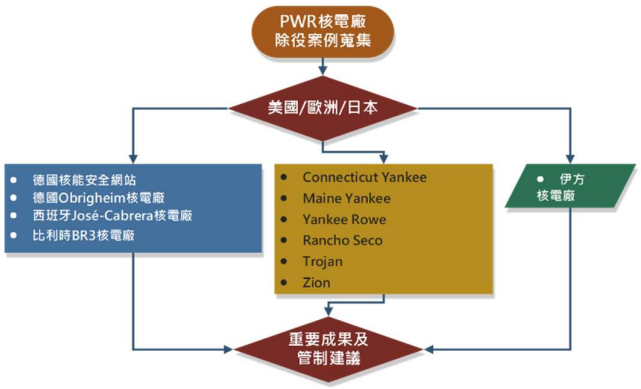
Keywords: decommissioning, PWR, dismantling

I. 前言

為達成我國 2025 年非核家園之目標，台電公司已陸續向管制機關提交國內 3 座核電廠之除役計畫，其中，核一、二廠均為沸水式反應器，故在正式除役前，管制機關及台電公司已針對該類型電廠除役的相關議題，進行資料蒐集與研析，考量核三廠為國內唯一的壓水式核電廠，反應器型式及廠房組件配置有別於沸水式電廠，其相應之拆除規劃可能有所差異，故透過本研究蒐集研析國際案例，以獲取其經驗回饋，並研議相關管制要項及作法之建議，以提供管制機關參考。

II. 主要內容

本研究廣泛蒐集國外核電廠除役拆除的相關經驗，包括美國(6 個)、歐洲(3 個)及日本(1 個)除役核電廠在拆除階段的相關作法，並研析篩選出其中的重要資訊，彙整相關成果作為管制建議。



III. 結果與討論

美國是 D&D (Decontamination and Decommissioning) 領域中最先進、最活躍的國家之一，截至 2022 年中旬，在美國已有 41 座反應器被關閉其中 PWR 有 21 座、BWR 有 14 座、HTGR 有 2 座、FBR 有 1 座、PHWR 有 1 座、其他有 2 座 17 座已經完成除役，目前有 11 個機組正在進行除役作業。其中較著名的壓水式(PWR)反應器案例包括(但不限於)：

電廠簡稱	CY	MY	YR	RS	TR
全名	Connecticut Yankee	Maine Yankee	Yankee Rowe	Rancho Seco	Trojan
裝置容量(MWe)	560	860	167	873	1095
運轉年限(年)	28	25	30	14	16
D&D開始時間	1998	1997	2003	1997	1993
D&D結束時間	2007	2004	2005	2009	2005
費用(百萬)	871	858	636	518	409

美國壓水式電廠除役的重要作業及其時序如下表，在反應器壓力槽(RPV)、蒸汽產生器(S/G)及調壓槽等一次側要系統中，由於 RPV 的尺寸較大且具高放射性，故 S/G 及調壓槽比 RPV 更早被拆除。

重大事項	CY	MY	YR	RS	TR
停機	Dec. 1996	Aug. 1997	Feb. 1991	June 1989	Nov. 1992
拆除 RCP	2000	June 1999	1994	2002	1996
拆除 S/G	Fall 1999	April 2000	1993	Mar. 2004	Nov. 1995
拆除調壓槽	Fall 1999	April 2000	1993	Mar. 2004	Nov. 1995
拆除 RPV	2003	Aug. 2002	Nov. 1996	July 2005	Dec. 1998
提交執照終止計畫	July 2000	Oct. 2002	May 1997	April 2006	Aug. 1999
移除用過燃料	May 2005	Feb. 2004	Feb. 2000	April 2001	April 1999
[D&D 結束] 執照終止	Nov. 2007	Spring 2005	2005	Oct. 2009	2005

此外，RPV 的高劑量率及周圍的伽馬熱，使這部份的拆除作業深具挑戰。美國電廠在拆除 RPV 的程序，主要可分為 2 種：第一種方式是在移除 RPV 及其內部組件前，先將其分段，Connecticut Yankee、Maine Yankee、Yankee Rowe 及 Rancho Seco 核電廠均採用該選項；第二種方式是將 RPV 連同內部組件，在沒有分段及分離的情況下一起移除。Trojan 核電廠即採用這種程序，將完整的放射性廢棄物視為一體，運往處置場。

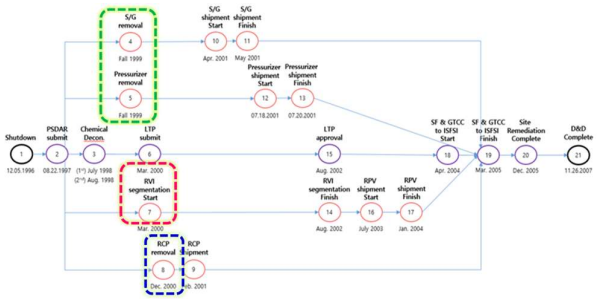
為了安全進行 D&D 作業，應對一次側系統進行詳細的活度分析，然而，收集並移除受輻照的小而散落的碎片，是美國許多除役計畫都遇到的挑戰性問題，這就是為何要實施封閉切割，以限制碎片擴散到燃料更換爐穴的其他區域。此外，要吊起包括 RPV、RVI 及內部低密度混凝土在內的一次側系統 (總重量約 1,000,000 公斤)非常重，且 RVI 釋放出的伽馬熱約為 175˚C，故必須先預冷，以防止沸騰低密度多孔混凝土(Low Density Cellular Concrete, LDCC)。

各電廠研析成果重點如下：

(一) Connecticut Yankee 核電廠(美國)：



蒐集其停機除役各階段的重要計畫時程(如下圖)，例如除污及重要大型組件的拆除時序(蒸汽產生器、調壓槽、壓力槽內部組件及循環水泵)：

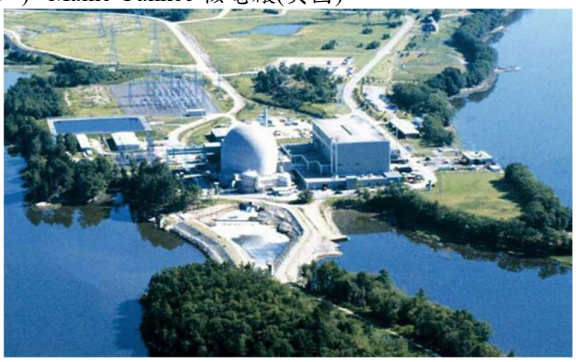


蒸汽產生器的拆除分為 2 步驟進行。首先，每個蒸汽產生器都先作切割，以便將蒸汽圓頂與下部組件分開，才能利用圍阻體內的設備開口(hatch)將之移除。每個圓頂經切割後，都準備好進行運輸，並以液體(liquid)”“封鎖(lockdown)”材料作為預防措施，以防止鬆散的表面污染擴散，一旦將圓頂從圍阻體廠房內移除，接著會以平板卡車從現場運到鐵路支線，然後用火車運到田納西州的 Memphis，作進一步的切割，切下的部分，再被送到田納西州的 Bear Creek 進行熔化。

第二步是先將下部組件在原地覆蓋好，以防止潛在的鬆散表面污染擴散，再將其從圍阻體廠房內移出，並將其存放在大型組件儲存區的獨立屏蔽中，等待運輸，調壓槽移出的時機是在發電機之後，從圍阻體廠房移除後，會與大型組件一起存放。

RPV 及 S/G 會用駁船運到 Barnwell 處置場掩埋，但由於該地點的限制，壓力槽的內部組件無法與壓力槽一同運輸，故管理單位後來決定在反應器爐穴的水下進行切割，使用的是磨料水噴射系統，該系統使用時所遭遇的問題，包括維護系統所需的時間、捕獲系統的失效，以及材料比預期的更難切割，所以切割內部組件所花的時間，比預估的要長得多；進行切割時，因為水的能見度太低，而必須頻繁地停工，直到能見度提高才能重新進行切割。

(二) Maine Yankee 核電廠(美國)：



是美國第一個除役與拆除的核電廠，其執照終止計畫(License Termination Plan, LTP)中，將拆除作業規劃分成 4 個階段進行：(1)場地預備及未受影響區外釋、(2)拆除物品(Commodities)並進行結構除污、(3) 拆除廠房並復原場址，及(4)建立乾式貯存設施。

在切割技術運用方面，建議包括使用遠端操作的封蓋工具，在高完整性容器襯裡上安裝蓋子，將有助於減少輻射曝露、(2)改進設計以提高吸塵及清除碎屑的操作效率、(3)所有水下系統都需模組化及快速斷開功能，及(4)迴路若有除污必要時，完成後必須對一次側迴路進行

全面沖洗及驗證。

由於除役是與運轉階段截然不同的工作環境，且多數作業人員沒有核能方面的工作經驗，可能會有輻射防護問題，建議電廠保持輻射防護管制及擬定對作業人員關注的方案，任何授權都必須經過電廠員工的仔細監督。

(三) Yankee Rowe 核電廠(美國)：

自 1961 年開始商轉以來，一直位列全球營運最佳的商業核電廠之一，其於 1993 年進行的第 1 期組件拆除計畫 CRP 1(Component Removal Projects, CRPs)，主要拆除一次圍阻體內的石棉絕熱材料、拆除並處置 4 台蒸汽產生器及 1 台調壓槽，另切割、拆除及處置反應器爐心內部組件，以及移除先前儲存的放射性物質；1994 年下半年則進行第 2 期組件拆除計畫 CRP 2，此階段拆除並處置許多安全系統、圍阻體內的主蒸汽與飼水管路、含石棉的受污染材料，以及 4 個主冷卻水泵。

由於除役期間，常會有許多典型的建築相關作業，特別是挖掘及需要防止墜落的高空作業，需要經常進行再培訓及提醒，以保持溝通與專注。為了確保現場符合設計規劃、作業程序及法規，所有監督人員均應嫻熟相關標準。

(四) Rancho Seco(美國)：

除了蒐集廠房及重要大型組件的拆除時序外及，根據其除役經驗回饋，建議拆除作業以逐區分配除役工作許可證來進行，許可證會明確定義要拆除的項目、拆除的順序，並記載該區內的任何危險或有害物質，以及處理的方式；除役期間，最重要的是工業安全及保健物理人員需管理階層持續關注，以盡量減少在核能拆除環境上，增添額外的施工環境危險拆除作業以逐區分配除役工作許可證來進行，許可證會明確定義要拆除的項目、拆除的順序，並記載該區內的任何危險或有害物質，以及處理的方式；除役期間，最重要的是工業安全及保健物理人員需管理階層持續關注，以盡量減少在核能拆除環境上，增添額外的施工環境危險；此外，由於電廠運轉及維護的程序與管制方式，其最初的目的或要求，可能已不存在，或不適用於除役拆除階段，故應簡化或盡可能刪除過多的程序。

(五) Trojan(美國)：

其於 1995 年 11 月成功完成圍阻體內 4 組蒸汽產生器及調壓槽的拆除，並以自身作為運輸容器，經哥倫比亞河送往華盛頓州里奇蘭附近的生態低階放射性廢棄物處置設施，基於該拆除計畫的成功經驗，電廠營運單位提出並實施了一種創新的反應器容器及內部組件處置方式(Reactor Vessel and Internals Removal, RVAIR)，在 RPV 及其內部組件沒有分段及分離的情況下，一同移除，並將整體視為放射性廢棄物，一次性運往處置場，此亦為美國少數採用這種拆除方式的核電廠。

由於 RPV 的獨特性、一次性運輸，以及為確保安全運輸所採取的特殊預防措施，故需採用其它替代的運輸條件，故有其特定的背景及適用條件，在得到管制機關之相關豁免後，該方案在廢棄物減量、劑量減少與成本效益等方面，均獲得顯著之益處。

另在其執照終止計畫中提到，移除順序可能受到人員進出、材料處理限制或人員劑量曝露等因素所影響，改善除役作業的廠內物流，並保留具電廠知識的員工，能為除役相關作業提供寶貴經驗；在切割受污染的管路時，應先移除管槽及水平管道中未受污染的管路，若實務上有困難，則可使用其他預防措施(例如：遮蔽物)來盡量減少污染擴散。

(六) Obrigheim 核電廠(德國)：

分 4 階段拆除重要大型組件，第 1 階段先拆除電廠監控區內的組件，例如：汽機、發電機、水槽、飼水泵及一般設備；第 2 步拆除熱區內受污染的組件，例如：蒸汽產生器、一次側管路、主蒸汽及飼水管路；第 3 步拆除被活化的組件，例如：反應器壓力槽及其內部組件、生物屏蔽；第 4 步拆除剩餘組件，例如：通風系統、通風管路、反應器廠房吊車、起重機、控制室、變壓器及輔助設備。

根據德國核能安全網站的公開資訊，核電廠的拆除步驟依序為：(1)先拆除裝置內不再需要用到的零件、(2)移除污染或活性較高的組件，例如蒸汽產生器及主迴路、(3)拆除最後一個一次側組件，此時高活度的反應器壓力槽輻射強度通常會遞減、(4)拆除所有至目前為止所需的組件，例如起重機及過濾系統。而 Obrigheim 核電廠亦依該原則分 4 階段拆除重要大型組件，第 1 階段先拆除電廠監控區內的組件，例如：汽機、發電機、水槽、飼水泵及一般設備；第 2 步拆除熱區內受污染的組件，例如：蒸汽產生器、一次側管路、主蒸汽及飼水管路；第 3 步拆除被活化的組件，例如：反應器壓力槽及其內部組件、生物屏蔽；第 4 步拆除剩餘組件，例如：通風系統、通風管路、反應器廠房吊車、起重機、控制室、變壓器及輔助設備。

另根據德國學者發表的論文，電廠除役時，首先會針對過程所產生的拆解量進行詳細評估，並確定輻射情況，然後再訂定除役作業的主要流程，選擇立即拆除的 PWR 電廠，拆除順序都是從低污染到高污染或被活化的組件。

(七) 西班牙 José-Cabrera 核電廠

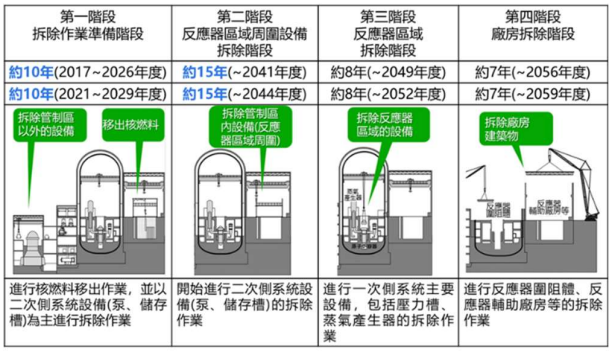
於 1996 年關閉，西班牙國營放射性廢棄物管理機構（Empresa Nacional de Residuos Radioactivos, ENRESA）決定從 2010 年開始立即除役，是西班牙第一個拆除的壓水式反應器，ENRESA 在優化廢棄物管理方面，以從源頭進行廢棄物分類、廢棄物除污、增加包裝密度、設計新的容器，以達到最佳的裝填成效等四方面著手。

(八) 比利時 Belgian Reactor 3 (BR3)核電廠

是歐洲第一個壓水式反應器，於 1987 年關閉，BR3 在 1989 年被歐盟選為 4 個示範拆除計畫之一。其 RPV 在拆除階段的重要議題，包括現場狀況與竣工圖不符，導致無法正確定位密封裝置(用以保持反應器水池的水密性)，而被迫停工，以及燃料更換池水質渾濁，必須額外安裝過濾及淨化設施。典型的拆除工作步驟中，以分類(sorting)最為關鍵，必須在拆卸(切割)後盡快進行，以確保其可追溯性。

(九) 日本伊方核電廠

其 1、2 號機除役工程的整體概要(如下圖)，該電廠為確保充足的事前調查時間，並考量到減少工作人員的輻射曝露風險，故延長了第一、二階段的時間，使除役總期程也延長至 40 年。



IV. 結論

本研究旨在深入探討 PWR 核電廠除役拆除作業的關鍵議題，主要集中於以下幾個面向：

(一) 拆除順序的選擇：在選擇立即拆除策略的情境下，最佳的拆除順序是由低污染到高污染或活化程度較高的組件，這有助於最小化輻射風險並提高拆除效率。

(二) RPV 拆除程序：針對美國 PWR 核電廠 RPV 的拆除程序，我們發現存在兩種主要方法，即分段拆除和一體拆除。多數核電廠均選擇分段拆除，而一體拆除則以 Trojan 核電廠的 RPV 及內部組件拆除計畫為例，並深入研析其特殊背景及優勢，尤其在廢棄物減量、劑量減少與成本效益方面的表現。

(三) 主要系統拆除順序：考慮到尺寸及放射性，蒸汽產生器及調壓槽通常先於 RPV 被拆除。這反映了在除役過程中的實際操作需求。

(四) 除役作業許可證分配：拆除作業透過逐區分配除役工作許可證，能確保拆除項目明確，順序合理，並應詳細記載區內潛在的危險及有害物質，以及其處理方式。

(五) 工業安全及保健物理人員的重要性：在除役期間，工業安全及保健物理人員扮演著至關重要的角色。建議對現場監督人員進行專業培訓，並將建築標準納入安全手冊及電廠程序書中，以確保遵守職業安全衛生法則。

(六) 簡化除役程序：建議簡化或刪除過多的除役程序，以提高操作效率。

(七) 分類的重要性：在拆除工作步驟中，強調"分類"的重要性。這需要在拆卸或切割後盡早進行，確保可追溯性，提前準備好材料分類，亦可加速作業速度。

整體而言，本研究針對國外 PWR 核電廠除役拆除案例作深入的資料蒐集、彙整與研析，透過其經驗與建議的總結，期為國內核電廠除役管制方面，提供實務方面的重要參考依據，本研究成果亦為國內核電廠除役領域的發展，提供了全面而系統性的資訊。

參考文獻

[1] https://www.iaea.org/newscenter/news/digital-tools-virtual-reality-and-robots-to-help-in-accelerating-dismantling-of-retired-nuclear-facilities-iaea-survey-shows

[2] “核三廠除役計畫”，行政院原子能委員會網站，110 年 8 月。

[3] Anibal L. Taboas, A. Alan Moghissi and Thomas S. LaGuardia, “ The Decommissioning Handbook,” ASME, New York, 2004.

[4] Preprint “Global Status of Decommissioning of Nuclear Installations,” Report of an International Collaborative Project, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.16, 2022.

[5] Ben Wealer, Jan Paul Seidel, and Christian von Hirschhausen “Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste,” The Technological and Economic Future of Nuclear Power, 2019.

[6] https://manafort.com/project/maine-yankee-nuclear-power-plant-decommissioning-demolition/

[7] Dennis E. Gardiner, John M. Newey, Michael W. Snyder, ” Rancho Seco－ Planning for Large Components,” WM’ 02 Conference, February 24-28, 2002, Tucson, AZ

[8] https://www.worldnuclearreport.org/The-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2022-HTML.html#_idTextAnchor117

[9] Hyosub Kim, Daesun Son, Jaeyong Lee, Kyungmin Kim, Yong-soo Kim, “Experience Review on Dismantling Procedure for American Decommissioned NPPs,” Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 7-8, 2015

[10] EPRI, Connecticut Yankee Decommissioning Experience Report － Detailed Experiences 1996-2006, Nov., 2006.

[11] https://www.bmuv.de/en/topics/nuclear-safety-radiological-protection/nuclear-safety/decommissioning-of-nuclear-facilities/decommissioning-strategies-and-dismantling-techniques

[12] https://www.nuklearesicherheit.de/en/science/decommissioning-of-nuclear-facilities/stepwise-dismantling-of-nuclear-facilities/

[13] https://www.nuklearesicherheit.de/en/science/decommissioning-of-nuclear-facilities/decommissioning-techniques/dismantling-and-disassembly-techniques/

[14] https://www.nuklearesicherheit.de/en/science/decommissioning-of-nuclear-facilities/decommissioning-techniques/alternatives-to-on-site-disassembly/

[15] Ralf Versemann, “Decommissioning nuclear plants: experiences in Germany,” Energy 161, August 2008.

[16] https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Decommissioning-milestone-at-German-reactor

[17] J. Shang, S. Kirsch, ” TÜV SÜD Experiences from Decommissioning of Nuclear Facilities in Germany, Part 1,” Seminar of decommissioning and dismantling of nuclear facilities, May 29th~30th, 2013 in Taipei

[18] Juan Luis Santiago, “Dismantling large components at the Jose-Cabrera NPP (CNJC) in Spain, ENRESA, Spain, NEA/RWM/R(2012)

[19] Dadoumont, J., Massaut, V., Klein, M., Demeulemeester, Y., “Decommissioning of a Small Reactor (BR3 reactor, Belgium),” Decommissioning techniques for research reactors.

Final report of a co-ordinated research project 1997-2001, 2002
[20] EPRI, "Yankee Rowe Decommissioning Experience Record," vol. 2, Final Report, December 1998.
[21] Yankee Nuclear Plant Station License Termination Plan, Revision 1, Nov. 19, 2004
[22] EPRI, "Maine Yankee Decommissioning - Experience Report," Detailed Experiences 1997-2004.
[23] MYAPC License Termination Plan, Revision 4 Feb. 28, 2005.
[24] Trojan Nuclear Plant Decommissioning Plan and License Termination Plan (PGE-1078), Revision 9, Mar. 2001.
[25] https://www.yonden.co.jp/energy/atom/ikata/decommissioning.html
[26] EPRI, "Trojan Nuclear Power Plant Reactor Vessel and Internals Removal," 1000920, Final Report, October 2000.

放射性物料安全科技

利用 UDEC-Voronoi 模擬處置隧道之開炸損傷區研究
Modelling the blasting EDZ of deposition tunnel using UDEC-Voronoi method

計畫編號：NSTC 112-NU-E-032-003-NU
計畫主持人：楊長義
e-mail：yang@mal.tku.edu.tw
計畫參與人員：陳思涵、黃勗庭
執行單位：淡江大學土木系

摘要

本研究利用 UDEC 程式內可將岩塊自動分割為更小的 Vononoi 多邊形塊體之功能，模擬處置隧道開炸時完整岩石受爆壓作用所引致之破裂發展與連結行為，以探討高放處置坑道 EDZ 之開挖損傷問題。主要獲知隧道圍岩的開炸破裂縫主要是沿著 Voronoi 塊體的邊界開裂，故與生成 Voronoi 塊體幾何參數有關。在隧道底面的開炸破裂 EDZ 深度約為側壁及頂拱兩倍。

關鍵詞：處置隧道、光面開炸、開炸損傷區、UDEC-Voronoi、破裂連結。

Abstract

This study utilizes the automatic rock segmentation function of UDEC to generate Voronoi polygonal blocks, simulating the development of fracturing or interconnection behavior induced by blasting pressure during tunnel disposal, aiming to investigate the EDZ problem in high-level radioactive waste repositories. It found that the opening blasting cracks around the disposal tunnel perimeter mainly occur along the boundaries of Voronoi blocks and thus are related to the geometric parameters of the generated Voronoi blocks. The depth of EDZ at the tunnel bottom is approximately twice that of the sidewalls and crown, possibly due to the constraint of cracking by gravity.

Keywords: Deposition tunnel, smooth-wall blasting, excavation damage zone, UDEC-Voronoi, crack coalescence.

I. 前言

在核廢料處置先進國家瑞典 SKB 要求對處置隧道的開挖損傷區(EDZ)須限制開挖導致的岩石損傷，不可使處置隧道沿一重要區段(20~30 m)及跨越隧道地面之有效流通係數高於 10^{-8}m^2/s。但誠如所知，不論以鑽炸法(D&B)或坑道鑽掘機(TBM)進行處置坑開挖，常造成坑道壁附近母岩新生破裂與損傷，EDZ 區滲透係數可能比原本母岩高出 100~ 1000 倍。

1.1 開挖損傷

在瑞典 ZEDEX 實驗室曾分別以 D&B 及 TBM 工法挖掘二平行隧道，並量測比較 EDZ 範圍得知：以 D&B 導致之 EDZ 範圍最遠可達 1.5m、大於 TBM 之 30cm。在鑽炸法中若利用光面開炸(smooth blasting)技巧(Zhou *et al*., 2019)後，特別設計配置孔距較小的周邊孔後，確可減少開炸之 EDZ 範圍(見圖 1.1-1)。

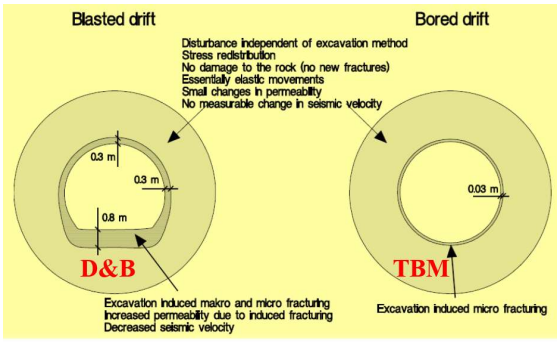


圖 1-1 瑞典 SKB 以 D&B 及 TBM 開挖之 EDZ 損傷範圍比較(Stephansson *et al*.,2008)

1.2 爆炸孔產生之破裂方向

當裝在岩石鑽孔中的炸藥爆炸時，強烈爆炸產生的高壓氣體擠壓孔壁，並產生向外岩石傳播的壓力波，其應力可能超過岩石的抗壓強度導致岩石破碎崩解(crushed zone)。隨與距炸孔距離之增加，爆炸引起的應力迅速減小，在超過岩石抗壓強度的這個區域之外，岩石將從塑性變形逐漸變到脆性斷裂，由爆炸引起的切向切線拉伸應力形成一圈沿徑向的輻射破裂裂縫(radial cracks)；只要裂縫尖端的拉張應力超過岩石抗張強度，裂縫將繼續沿徑向伸長傳播，一些裂縫會增長成主要裂縫 (primary cracks)，但變得較為稀疏(Hoek & Brown,1980)，見圖 1-2。

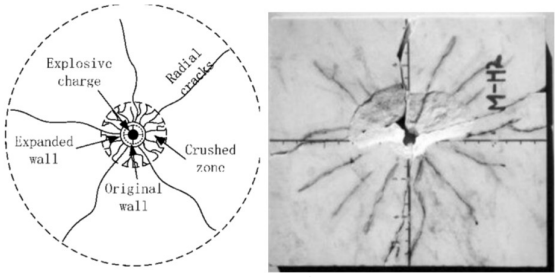


圖 1-2 炸孔周邊岩石破裂型態

另一方面，主要裂縫延伸方向亦會沿平行於最大主應力方向破裂傳播。據此理路，可獲知在隧道壁附近爆破，因切向應力(tangential stress)很高、而徑向應力(radial stress)近於 0，適形成此一單壓應力狀態，故主要張裂縫會最優先沿著隧道輪廓線之切向破裂發展，見圖 1-3。

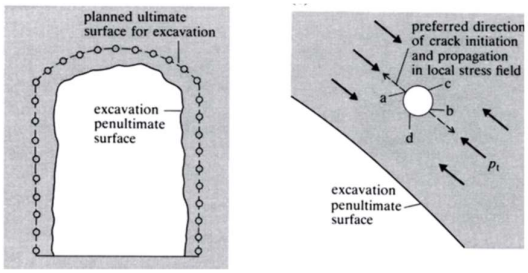


圖1-3 周邊孔開炸之切向張裂優先破裂方向

一般鑽炸岩盤時常配置相隔較小孔距的炸孔並減少其裝填藥量，以減小岩石開炸損傷範圍。其中以光面開炸(smooth-wall blasting)常沿著設計輪廓線鑽較密的炸孔(一般要求兩孔孔距須低於 10 倍孔徑)，因為隧道中心已開炸好，形成自由面後最後一輪周邊孔最後開炸，以利用開炸爆震波的反射作用拉裂圍岩，形成較光滑面的開炸，並降低對圍岩的損傷。

圖 1-4 為 SKB (Olsson *et al.*, 2004)在 ASPO 硬岩實驗室，以鑽炸法(D&B)開挖一條試驗隧道 TASQ，探討光面開炸(smooth blasting)是否可有效降低 EDZ 範圍；開挖完成並切開岩壁以檢視 EDZ 內之裂隙破裂特徵。規劃炸藥孔長度 4.5m、周邊孔間距 0.4m，每孔炸藥量 1.01kg，開炸完成後之壁面情況；並切割壁面深入 50cm 岩塊以檢視 EDZ 區的破裂隙。



圖 1-4 鑽炸開挖後 SKB 切開隧道壁面觀察之裂隙狀

該研究指出：在開炸新生破裂之 EDZ 區內主要包含兩類破裂：(1)開炸破裂隙(blast fractures)— 主要由炸藥爆破氣壓造成破裂，裂隙源自炸藥孔呈向外輻射狀傳遞；(2)開炸引致裂隙(blast-induced fractures)— 主要由爆炸過程的高應力作用或開挖應力重整造成之破裂，裂隙不是自炸藥孔邊但常朝向炸孔方向，其方向可能平行於隧道壁或靠近隧道壁在既有天然裂隙間發展呈短的新破裂。開炸引致裂隙(blast-induced crack)最長 22cm (平均 14cm)，側壁開炸引致破裂之方向多數斜向上。

II. 主要模擬方式

本研究利用 UDEC 之結合 Vononoi 多邊形塊體之功能後(見圖 2-1)，可以更有效模擬硬岩之破裂軌跡發展，以探討鑽炸法(D&B)開挖處置隧道時，因開炸高爆氣壓引致 EDZ 區之破裂行為，俾利瞭解如何安排炸藥孔距，以減少開炸 EDZ 範圍。其中，將於開炸孔內施加等向的徑向壓力方式來模擬開炸的氣壓作用，探討炸孔間破裂軌跡之發展與炸孔間的導引關係。

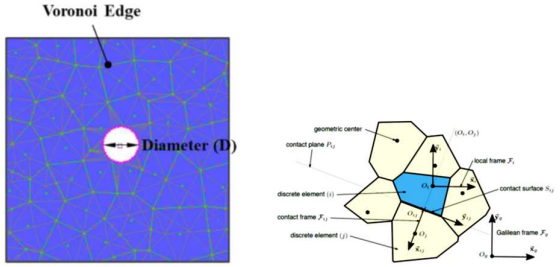


圖 2-1 於 UDEC 處置坑道 EDZ 區結合以 Voronoi 多邊形塊體以利微觀力學破壞探討

本文先建立一尺寸為 2m*2m 之岩石模型，試體上皆鋪設上 Voronoi 塊體，並設置三個直徑 D= 0.048m 圓型的炸孔、各孔孔距 S= 0.45m，如圖 2-2 所示，以模擬鑽炸破裂行為、炸孔間破裂之交互影響行為。初步模擬一個在現地應力比 K=1（$\sigma_v = \sigma_H$ = 13.5 Mpa)例子，孔內施加靜態爆壓 P= 750MPa (大約等於 0.68kg 硝化甘油炸藥量)，並利用給定不同的運算次數 Cycle，以間接觀察孔與孔間破裂紋路的發展或相牽引過程，直至以 Solve 指令完成整體力平衡為止。

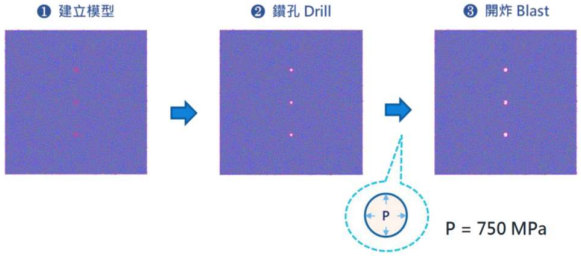


圖 2-2 鑽炸法模擬步驟圖

模擬結果，見圖 2-3 可觀察到三個炸孔之裂隙發展行為：(1)初始先各自發生沿徑向的輻射破裂裂縫(radial cracks)，破裂範圍約為 2 倍孔徑(即 9cm)，在各方向上損傷程度類似，鄰孔間尚未發生相互干擾，僅現單孔獨立破裂行為。(2)隨後破裂線長度持續增長且數量增多，破裂損傷範圍大於 5 倍孔徑，特別長的主裂紋發生的方向不定，但各孔的力學效應已涵蓋及鄰孔。上下二孔在外側發生的裂紋較長且較多；中間孔則較無此發散現象，且裂縫有朝向上下兩孔發展的現象，亦即受到上下兩孔的牽引。 (3) 最終在兩兩孔間之某些主要較長的裂縫有機會發生連結。

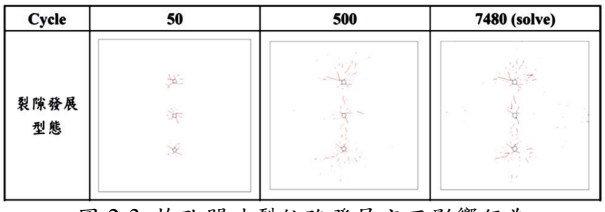


圖 2-3 炸孔間破裂紋路發展交互影響行為

III. 模擬結果與討論

在光面開炸(Smooth Blasting)中佈孔設計主要因素包括孔徑、孔間距等參數的選擇，大多數隧道作業都是採用孔徑在 38 至 51mm 間的尺寸。

3.1 炸孔之孔距因素

本研究採用炸孔孔徑 D=0.048m，分別模擬孔距為

S=0.3m、0.45m、0.6m、0.8m 四種，以探討孔距對開炸裂隙發展之影響。其中，又分成(a)三個炸孔同時開炸及(b)中間孔沒填炸藥的啞孔等兩種狀況以資比較。

結果比較如下：(1) 三個炸孔同時開炸時，見圖 3-1(a)，S=0.3m 因炸孔太靠近，各孔破裂應力影響相互重疊，對整體岩石損傷最嚴重；孔間破裂縫之連結行為則以 S=0.45、0.6 及 0.8m 三者最佳；S=0.8m 則中間孔破裂範圍略大，但 S=0.45、S=0.6 m 二者在上下兩孔破裂範圍略比中間孔大，可能是靠近模型邊界有應力返回效應引起。 (2)若當中間孔是空孔時，見圖 3-1(b)，則可以藉減壓減低S=0.3m炸孔太靠近對整體岩石損傷的程度；也會使 S=0.45、0.6 及 0.8m 三者炸孔間之破裂縫數量減少，但連結程度減低，其中對較遠的 S=0.8m 及 S=0.6m 幾乎不發生連結。故孔距遠近及中間啞孔(dummy hole)之有無，均對光面開炸效果有明顯影響。本文建議採用 S=0.45m，即 S/D=9.375，不配置啞孔對坑道光面開炸效果較佳，EDZ 損傷範圍較小。

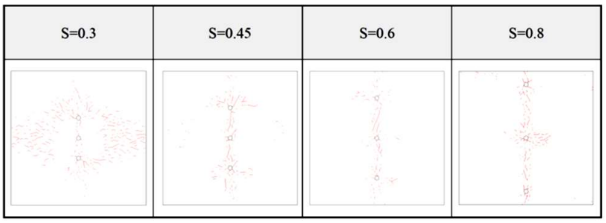


圖 3-1(a) 三個炸孔同時開炸之裂隙發展

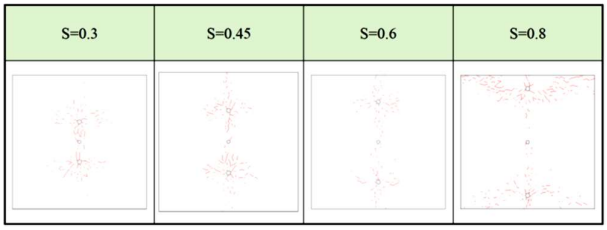


圖 3-1(b) 中間空孔之開炸裂隙發展

3.2 隧道開炸損傷 EDZ 區

本文隧道模型建立過程概為(見陳思涵(2023))：(1)建立岩體模型尺寸為 10m×10m，而處置隧道尺寸依台電設計為寬度 4.2m、高 4.8m 之馬蹄形隧道。 (2)模型配置 Voronoi 塊體的邊長 Edge=0.1m，塊體內部有限差分網格(zone)平均邊長 0.01m； (3)輸入岩石材料性質則是根據我國離島花崗岩 UDEC 率定參數(呂艾明，2021)。(4)模型邊界條件：設立四個邊界都設置滾支座(即上下邊界 y 方向速度邊界=0、左右邊界 x 方向速度邊界=0)，且受有重力作用；並假設處置深度 Z=500m，先施加 K=1 狀態之現地應力(13.5Mpa)進行 UDEC 運算應力位平衡後； (5) 先挖除周邊孔內部之炸藥孔區域，經 UDEC 力位平衡運算。(6)再在已預設間距 S=0.45m、直徑 D=0.048m 的 31 個周邊炸孔同時施加開炸壓力 P=750MPa 作用力(P 約為岩石單壓強度的 5.4 倍、及張力強度的 100 倍) ，如圖 3-2 所示，進行整體 UDEC 力位平衡運算，以觀察各炸孔及孔間開炸破裂損傷結果，並計算所造成的破裂損傷的深度範圍與方位。

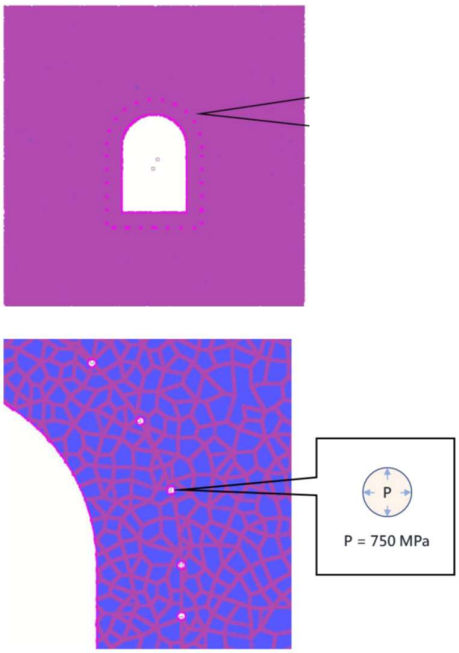


圖 3-2 隧道剖面輪廓線上周邊孔之配置型態

經模擬隧道周邊孔同時開炸引致的破裂縫發展，整理如圖 3-3 所示，可以發現隧道左右側的爆破裂分布隙相似，頂拱、底面及轉角處之裂隙略較長。 裂縫主要被侷限密集於炸孔連接線附近，偶爾有較長橫向裂縫出現則會傷及外圍母岩。 若局部放大觀察，可見到破裂發展是沿著 Voronoi 塊體間接觸邊界開裂延伸，因此數值上，在 Voronoi 塊體幾何參數(大小塊、形狀)之選用與裂隙發展模擬型態有密切關係。

並可將隧道四周輪廓線外側母岩之裂隙長度、數量分別統計(見圖 3-4)，獲知頂拱開炸的破裂總長度與數量最多、但損傷深度以底面約 0.2m 略大於頂拱及兩側壁(大約 0.12m)，見圖 3-5~圖 3-6)；破裂方位多沿斜交於隧道邊界發展，判斷頂拱有 57%破裂方向受到鄰孔所牽引、底面受牽引的數量則較少(47%)、兩側壁破裂分別為 64%及 26%，其比例左右不均與預設圓炸孔邊 voronoi 塊體規則度有關。

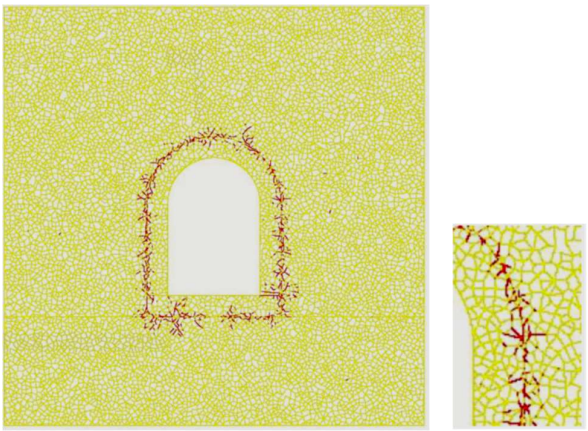


圖 3-3 處置隧道周邊孔開炸裂隙分布型態及沿塊體邊界開裂

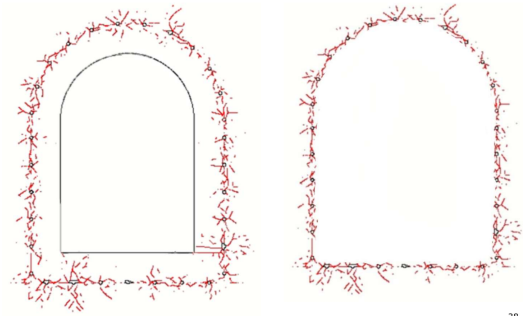


圖 3-4 離島處置隧道周邊模擬開炸損傷區破裂狀

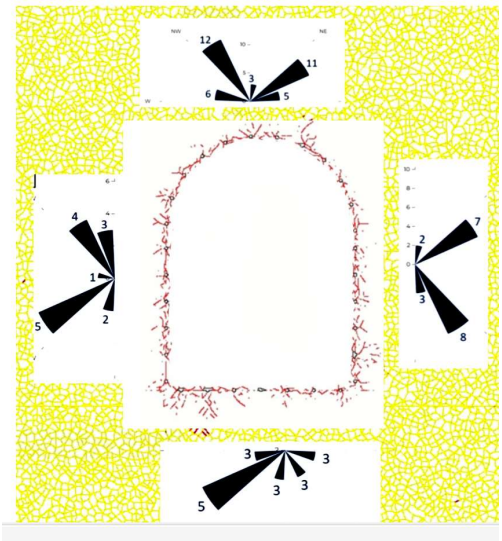


圖 3-5 模擬隧道開炸裂隙發展方向分布與數量

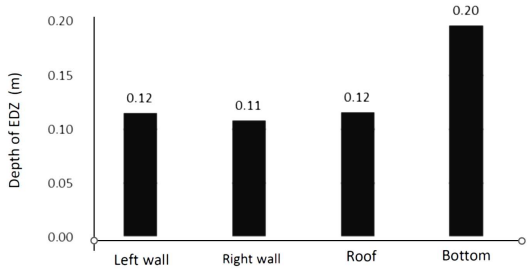


圖 3-6 隧道各部位開炸損傷之裂隙 EDZ 深度

IV. 結論

在高放坑道處置設施建造上，以鑽炸法開挖處置隧道勢必造成之坑道壁周圍現場母岩的破裂損傷，因而常使開挖損傷區(EDZ)滲透係數增高，長期則易形成地下水之優勢流通管道，可能造成提高核種外釋的風險。本研究模擬方式是利用在 UDEC 內結合 vononoi 多邊形塊體元素功能之技術，在處置隧道壁附近母岩自動配置多邊形塊體狀元素，可更有效模擬觀察硬岩之破裂發展軌跡，該經驗可提供我國對坑道開炸爆壓引致之處置母岩破裂之行為模擬，進一步增進對處置隧道之開挖損傷問題之瞭解；亦可提供未來於處置安全評估或驗證設計中，針對地質處置坑道開炸損傷的一平行驗證工具。

參考文獻

[1] 李宏輝、楊長義(2021)，以離散元素法探討岩體裂隙對開挖引致處置母岩損傷範圍之影響，科技部專題計畫成果報告，MOST 109-2623-E-606-004-NU。

[2] 呂艾明(2021)，以 UDEC 探討處置坑道開挖引致圍岩損傷之研究，碩士論文，淡江大學。

[3] 陳思涵(2023)，以 UDEC-Voronoi 模擬處置隧道之開炸損傷研究，碩士論文，淡江大學。

[4] Emseley S, Olsson O, Stenbenberg L, Alheid HJ, Falls S. ZEDEX- A study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring. SKB TR-97-30.1997.

[5] Hoek E, Brown ET. Underground Excavations in Rock. IMM, London; 1980.

[6] Olsson M, Niklasson B, Teknik S, Wilson B, Andersson C, Christiansson R. Aspo HRL-Experiences of blasting of the TASQ tunnel. SKB report R-04-73.

用過核子燃料最終處置場生物圈生態系統模型建立之研究
Establishment of biosphere ecosystem model for spent fuel final repository

計畫編號：112-2623-E-002-006-NU
計畫主持人：林文勝
e-mail：wslinlin@ntu.edu.tw
計畫參與人員：梁書嚴、鳳擎
執行單位：國立臺灣大學水工所

摘要

本研究綜合國際文獻，探討生物圈生態系統建立及安全評估相關議題。研究分析國際原子能總署與世界各國提出之放射性廢棄物處置管理生物圈安全評估技術和生態系統模型建立方法，以及有關生物圈建模和評估技術。研究聚焦於生態系統描述技術、環境分析以及生態系統模擬技術。透過建立生物圈生態系統描述模型，研究分析 34 個關鍵核種在生態系統中的遷移以及對人體輻射劑量的影響。研究提出四種生物圈概念模型，包括淡水水域、水井灌溉農業、陸域及淡水水域、海洋水域，並建立放射性核種遷移傳輸交互作用矩陣和遷移途徑。特別選取陸域及淡水水域生物圈概念模型，分析核種經由生態系統遷移造成人類體外直接曝露輻射、呼吸進入人體的體內曝露輻射及經由食物、水進入人體的體內曝露輻射等傳輸途徑之輻射劑量評估。本研究的分析技術和程序為放射性廢棄物的最終處置場之釋出核種在生物圈生態系統中的傳輸及劑量評估提供完整的方法，並且可以用於提升用過核子燃料處置場生物圈安全評估與情節審驗技術。

關鍵詞：生物圈、安全評估、放射性核種、劑量評估、處置場。

Abstract

This study integrates international literature to explore issues related to the establishment and safety assessment of biosphere ecosystems. It examines and analyzes biosphere safety assessment techniques and ecosystem modeling methods for radioactive waste disposal management as proposed by the International Atomic Energy Agency and various countries around the world. The research delves into biosphere modeling and evaluation techniques, focusing on ecosystem description methods, environmental analysis, and ecosystem simulation techniques. By analyzing techniques for describing biosphere ecosystems, examining water and land environments, and simulating biosphere ecosystems, the study establishes a model for describing biosphere ecosystems. It evaluates the migration of 34 key nuclides within the ecosystem and assesses their impact on radiation dose to human health. The study proposes four conceptual models of the biosphere based on potential future climate and terrain scenarios, highlighting the interaction matrix and migration pathways of radioactive nuclides for each model. In-depth analysis is conducted on the land and freshwater biosphere models, including the assessment of radiation doses from nuclide migration through various exposure pathways. The research contributes techniques and procedures for analyzing the transport and dose of radioactive nuclides in the biosphere ecosystem of a final disposal repository. It provides advanced technology for biosphere safety assessments and scenario verifications in repositories for spent nuclear fuel disposal.

Keywords: biosphere system, safety assessment, radionuclide, dose assessment, repository

I. 前言

生物圈安全評估技術對於放射性廢棄物能安全處置至為重要，建立完整的生物圈生態系統模型將可提供核種於生物圈生態系統傳輸及劑量評估之基礎。藉由分析核種由近場釋出遷移至生物圈，以及評估釋出核種濃度對於人體造成之輻射劑量影響，將可評價處置設施功能及處置環境是否能滿足安全功能之要求。因此處置設施核種外釋至生物圈過程必須能有效分析，並評估釋出至生物圈環境之核種，經由傳輸途徑進入人體所造成的輻射劑量能滿足法規限值(0.25 mSv/year)，並應合理抑低。

II. 主要內容

本研究研析生物圈生態系統描述、核種傳輸之水域與陸域環境以及生態系統區塊模型(Compartment model)。建立生物圈生態系統描述模型，與研析核種在生態系統中的遷移以及經由傳輸途徑進入人體造成輻射劑量的影響。

III. 結果與討論

本研究研究成果及討論包括以下七大項。

1. 資料蒐集及文獻回顧

本計畫蒐集國際有關生物圈生態系統建立及安全評估文獻，與瑞典、芬蘭、英國、法國、美國、西班牙、加拿大及日本已提出放射性廢棄物處置管理之生物圈安全評估技術方法和生物圈生態系統模型建立等，以及 IAEA 有關安全評估計畫和 BIOMASS 生物圈建模和評估技術方法等。

2. 研析生物圈生態系統描述技術

本計畫提出 BIOMASS 2020(SKB, 2018)針對生物圈安全評估技術，針對(A)評估目的，包括開展評估的監管制度或評估目的；(B)評估終點；(C)評估理念；(D)處置場系統和場址背景；(E)時間框架範圍；(F)假設的社會型態等進行說明。在確定評估背景後，利用 BIOMASS 2020 方法提出代表的生物圈系統。對於外部因素，如全球氣候變化、地球作用過程和人類活動相關的因素，通常作

為全系統總體安全評估參考和替代演化情節。生物圈需要與全系統總體評估情節和相關的邊界條件保持一致。

生物圈的識別及其發展的特徵，需選擇要描述的生物圈系統並進行定義，在某些評估環境中，生物圈為一個或多個系統可由法規規定。描述預先定義的生物圈系統，需要收集和分析大量特定場址的資訊，以確保可詳細描述場址當前狀況。生物圈系統若未預先定義，則需識別和描述生物圈系統的主要特徵，列出生物圈系統的主要特徵，包括：氣候和大氣組成、生物圈系統的地理位置和範圍、生物圈系統的地形學、近地表岩石地層學、地下和地表水體、生物圈系統的陸域和水域生物群、生物圈系統中人類群體之人類行為與技術發展水準和生活方式。可藉由生物圈的廣泛特徵，發展生物圈系統或核種在生物圈系統中遷移的概念模型，並評估這些核種污染物對人類健康和環境的潛在不利影響。針對生物圈描述，可先利用交互作用矩陣和影響圖，進行生物圈描述的解釋。發展建立概念和數學模型以提供生物圈的基礎描述，這些描述係對潛在場址生物圈系統進行廣泛特徵說明，從特徵、事件與作用進行相關性分析，以及進一步分析這些特徵狀態之間的轉換。BIOMASS 方法提供生物圈系統及其演變的完整描述，該方法可作為封閉後安全評估分析，得到定量支援模型的輸出，例如：包括氣候特徵預測、地景發展模型、近地表水文地質和地表水文模型。

3. 生物圈生態系統之水域與陸域環境分析

假設未來的氣候可能會因為冰川-間冰期循環和全球暖化而發生變化，可能是熱帶、溫帶、大陸性和極地等四種類型，其中極地氣候是指沒有冰層覆蓋的北極環境。假設處置設施將位於陸地或沿海地區。因此，除了水井抽水做為飲用水、農業和畜牧業用水之外，地表水(河流、水庫和湖泊)和海洋也將假設為包含地下水流之生物圈生態系統。根據 IAEA 之 BIOMASS 和 ICRP-101(ICRP, 2006)並考慮現在和未來可能的氣候和地形，針對處置設施生物圈生態系統包含陸域及水域(淡水及海洋)生物圈概念模型組成，配合未來可能的氣候和地形提出四種分類：1.淡水水域 2.水井灌溉農業 3.陸域及淡水水域 4.海洋水域。根據 IAEA 之 BIOMASS 建立 FEP 清單，針對生物圈組成部分的區塊概念構建概念模型，以利後續進一步利用生物圈概念模型建立數學模型。依據四種分類之生物圈概念模型組成，建立放射性核種遷移傳輸的交互作用矩陣以及遷移途徑。本研究選取第三種陸域及淡水水域生物圈概念模型，建立假設之陸域、水域地景模型，以及水井灌溉農業之生態系統模型，分析核種於該生態系統模型內之遷移及輻射劑量評估。

4. 研析生物圈生態系統之模擬技術

對於生物圈生態系統可利用區塊模型進行分類，該區塊可以生物圈地景單元作為代表，並建置放射性核種於生物圈遷移模型。在每個區塊內的核種假定為充分混合及具均勻性，並假設為獨立的均勻實體，有其自己的屬性和子模型狀態。採取區塊模型作為生物圈地景單元，亦有模式應用地下水平流-延散方程式計算核種遷移量，結合區塊模型作為生物圈系統單元，以建立生物圈生態系統模型(如 RESRAD-OFFSITE)。本研究蒐集整理 RESRAD-OFFSITE 模式技術及理論，針對(1)主要污染和源項(包括：主要污染的概念化、主要污染概念化模式之數學方程式推導、主要污染層之程式建置)、(2)地下水傳輸模式(包括：地下水傳輸概念化、概念化地下水傳輸模型之數學表示)、(3)RESRAD-OFFSITE 之曝露情境、(4)大氣傳輸模式、(5)核種遷移至生物圈系統單元位置及食物中之核種累積(包括：生物圈系統表土累積、核種於地表水體累積、於植物體之累積、於肉類或乳製品類之累積、魚或水域食物之累積)進行研究。並利用 RESRAD-OFFSITE 模式建立生物圈生態系統及核種於生態系統遷移與輻射劑量評估之模擬技術。

5. 生態系統描述模型建立

研析 BIOMASS 2020 之生物圈安全評估方法，提出生態系統描述模型建立技術流程。可利用場址特徵的資訊來描述生物圈的主要特徵，並使用氣候和地景模型(可在全系統總體評估背景下進行)來預測這些生物圈系統單元組成部分於未來如何隨時間變化。在實際執行過程中，如果進行氣候和地景研究，應該有一個定量的說明，說明外部過程(主要是與氣候有關的過程，如侵蝕和海平面變化，以及地球系統作用過程)將如何隨著時間的推移影響生物圈系統。

在確定演變的原因時，需先區分生物圈系統內部和外部的變因。外部變因可能是自然作用過程或人類活動的結果，包括土地使用的地景變化、氣候變化(可能是自然或人為引起的)和地球作用過程。外部 FEPs 可以多種方式影響生物圈的內部特徵，說明外部作用演變對於生物圈系統特徵及發展評估。

BIOCLIM(2004)計畫已探討聯合國政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)國際氣候變化研究成果，將全球氣候預測縮小到區域和場址尺度規模的概念。依據 TCCIP 針對 IPCC 於 2022 年公布第六次評估報告（IPCC Sixth Assessment Report, AR6 ）出版「臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版」(TCCIP, 2023)，分析氣候變遷造成降雨量增加及海平面上升。依據 BIOMASS 的方法，考慮氣候變化及地景演變方式，利用所建立之四種分類生物圈生態系統：(1)淡水水域(2)水井灌溉農業(3)陸域及淡水水域(4)海洋水域，可針對降水量的變化影響區域地下水補注率和流量，潛在影響深層和近地表水文系統交界處的水流狀態與海平面變化，以及影響地下水的流動等外部變因，我國未來應納入該四種生物圈生態系統包含陸域及水域(淡水及海洋)以建立處置設施生物圈生態系統模型。建議後續應持續根據 BIOMASS 計畫，研析氣候和地景演變環境變化影響，以建立完整的生態系統描述模型(含地景演變分析)。

6. 核種於生態系統遷移及輻射劑量評估分析

本研究針對國內現行核能電廠產生用過核子燃料主要核種。根據主要核種種類、地質圈-生物圈交界面(GBI)核種釋出率(如圖 1)及曝露途徑，建立核種釋出進入生物圈生態系統，及對人體造成輻射劑量進行評估。利用處置場 GBI 處之核種釋出率與 RESRAD-OFFSITE 模式串接，分析核種釋出進入生物圈生態系統及對人體造成輻射劑量之評估。

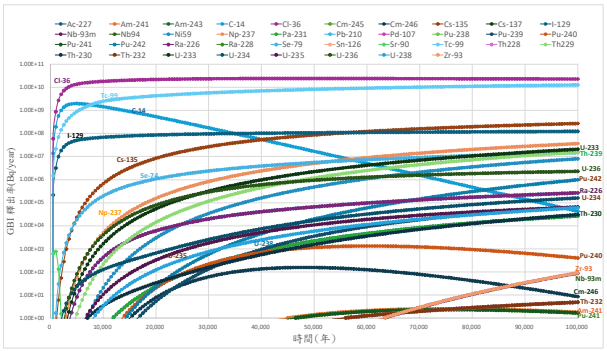


圖 1 從地質圈-生物圈交界面外釋之核種釋出率

假設核種進入生物圈形成污染土層，生物圈模型對於未飽和層厚度假設為 4 公尺、飽和層厚度為 100 公尺，GBI 位置之地下水含水層及生物圈生態系統配置，包括：地表水體、地下水流線、水井抽水、農業灌溉區、牲畜飼養區、畜牧區及人類居住區等。並於 RESRAD-OFFSITE 設定相關參數及 RESRAD-OFFSITE 模式建議值。以二種降雨量(2,386mm/year 及 3,889mm/year)作為降雨量變化對於核種於生態系統遷移及輻射劑量評估分析。應用 RESRAD-OFFSITE 模式進行假設場址生物圈模擬，分析核種傳輸至生物圈後，經由體外直接曝露輻射、呼吸進入人體的體內曝露輻射及藉由食物、水進入人體的體內曝露輻射等曝露傳輸途徑之輻射劑量，模擬結果發現依目前設計之生態系統參考生物圈，以二種降雨量(分別是 2,386mm/year 及 3,889mm/year)於各種曝露傳輸途徑造成人體之輻射劑量總和，差異微小且幾乎相同，發現於 15,000 至 20,000 年間輻射劑量開始超過 0.25 mSv/year，但小於 1 mSv/year。表示核種經由各種曝露途徑和食物鏈傳遞過程造成的核種累積量，經由傳輸途徑進入人體的輻射劑量與降雨量無多大關係。由於人體的輻射劑量主要來源係由於人類生活習慣，經由攝食食物、飲用水進入人體的體內輻射曝露的途徑有關。建議降雨量變化應納入外部水文條件影響近場、遠場之地下水流場變化評估，並納入全系統安全評估及可能影響釋出率及 GBI 位置之分析。

劑量來源來自 Np-237 核種於各種曝露傳輸途徑之總輻射劑量所造成(圖 2)，對於釋出率較大之幾個核種(如 Cl-36、C-14、Tc-99、I-129)均遠小於 0.25 mSv/year。

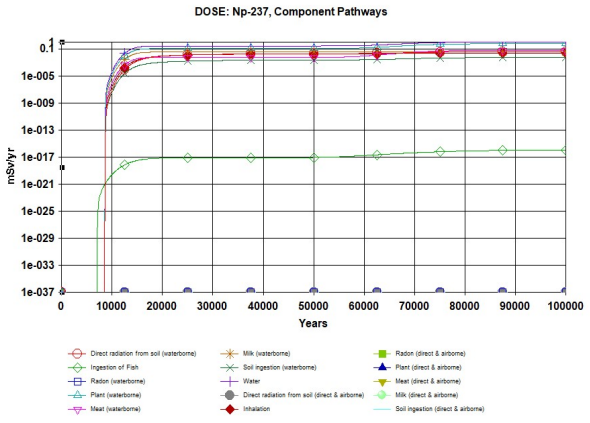


圖 2 Np-237 核種於各種曝露傳輸途徑之輻射劑量

比較主要核種劑量係數(表 1)，發現 Np-237 之劑量係數較其他釋出率較大之主要核種，約大三個級數以上，所以造成 Np-237 核種呈現較大的輻射劑量，並於 15,000 至 20,000 年之間開始超過 0.25 mSv/year。建議未來處置設施興建多重障壁系統須對 Np-237 阻滯進行更多設計，或降低 Np-237 核種於處置系統固化桶內的盤存量，以防止 Np-237 核種釋出後超過 0.25 mSv/year 輻射劑量。

表 1 Np-237 與釋出率較大之主要核種(Cl-36、C-14、Tc-99、I-129)之攝食劑量係數比較

核種	RESRAD-OFFSITE 模式使用之攝食劑量係數(Sv/Bq)	ICRP 劑量係數(ICRP Publication 119)(Sv/Bq)
C-14	5.65×10^{-10}	2.0×10^{-9}
Cl-36	8.19×10^{-10}	7.3×10^{-9}
Tc-99	3.95×10^{-10}	4.0×10^{-9}
I-129	7.46×10^{-8}	1.5×10^{-8}
Np-237	1.20×10^{-6}	2.3×10^{-5}

7. 氣候與環境變化下放射性廢棄物處置設施長期安全評估

根據 MODARIA 計畫第 6 工作組(WG6)開展「制定固體放射性廢棄物處置封閉後輻射評估應對氣候和環境變化的共同框架」（IAEA, 2016），提出應對固體放射性廢棄物處置封閉後輻射評估中的氣候和環境變化，包括：處置設施背景的環境變化、掌握長期氣候變化、全球氣候建模、縮小全球氣候尺度規模、區域性小尺度氣候的影響、代表性環境變化並建立對劑量建模的信心。建議考慮氣候變化和地景模式發展之可行性評估，步驟包括：

A. 建立一個框架，以考慮安全和功能評估中的環境變化。
B. 管理與環境變化和放射性核種釋出相關的不確定性。
C. 使用替代情節和/或變異情節計算來幫助建立對評估結果的信心。
D. 使用最新的國際共識來考慮長期氣候變化，以制定和證明需要考慮的情節的重要性。
E. 透過與背景濃度和劑量以及其他風險進行比較，以提供評估結果之環境背景。
F. 獨立建模的價值在於建立對結論不受意外偏見影響的信心。
G. 利益相關者參與的作用在於確保明確地處理特定感興趣和關注的環境和/或習慣。
H. 現代生物圈特徵化的重要性在於建立對需要在模型中表示過程的理解，以及建立對情節、描述、概念化和數據的可信度的信心。

生物圈安全評估係定量化分析及計算放射性核種釋出至生物圈及核種在生物圈地景單元之變化，利用發展概念模型的交互作用矩陣方法，分析生物圈各種 FEPs 之交互作用矩陣，以瞭解存在生態系統需要關注的情節分析。利用系統方法檢查潛在的 FEPs 是否需要包含或合理排除，並進行生物圈生態系統調查，以瞭解生物圈生態系統潛在傳輸途徑，再利用場址特性描述及生態調查數據，進行放射性核種在不斷演變之生物圈系統內遷移分析。所以生物圈劑量評估需先完成生態系統特徵化

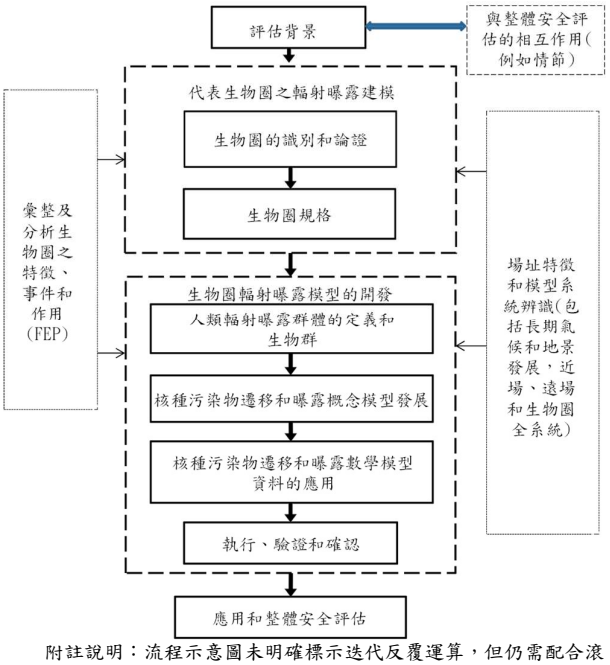
與模型建置，包括：生態系統資料調查及場址描述模型，並以有或無考慮全球氣候變遷及地景演變情況下之場址特性與生物圈參數納入評估模式內，進行核種釋出後於生物圈地景單元傳輸之模擬分析。

對於考慮全球氣候變遷和地景演變以建立生物圈模型的過程，IAEA 已提出 BIOMASS 和生物圈氣候資訊，並再持續的累積國際發展現況評估經驗。將生物圈描述分成生物圈狀態和轉變的序列，再描述當地的生物圈狀態，而評估模型通常著重於可能出現最高潛在曝露的區域。因此，建立評估模式分析之生物圈描述應該傾向著重於局部尺度，以確定局部規模的空間範圍，並考慮放射性核種釋出和人類活動的空間位置和範圍，以及相關非人類生物群的數量。最後再進行核種於生態系統遷移及輻射劑量評估分析，以評估對於人類的曝露劑量是否符合法規限值(0.25mSv/year)以及再進一步評估其風險和對非人類生物群之影響。

IV. 結論

本研究探討國際上有關放射性廢棄物處置管理之生物圈安全評估及模型建立技術和方法。建立地質圈和生物圈交界處的核種釋出在生態系統中的遷移及其對人類輻射劑量影響。研究結果顯示，透過食物鏈和各種曝露途徑對人體輻射劑量與降雨量變化的影響不大。由於人體接收的輻射劑量主要來自於食物和水的攝入，這與生活習慣有密切關係。建議降雨量變化應納入外部水文條件影響近場、遠場地下水流場變化評估，並納入全系統安全評估及可能影響釋出率及 GBI 位置之分析。研究結果再指出，在 15,000 至 20,000 年間，輻射劑量會開始超過 0.25 mSv/年的法規限值，但仍低於 1 mSv/年。其原因係 Np-237 劑量係數遠高於其他重要核種，因此成為輻射劑量的主要來源。針對 Np-237 核種，研究建議未來在設計處置場之多重障壁系統時，應更多考慮如何阻滯 Np-237 的釋出，或者減少處置系統固化桶內 Np-237 的存量，以避免其釋出後的輻射劑量超過法規限值。

生物圈系統之生態調查及場址外在環境變化(如氣候變化和海平面變化)對於評估生物圈生態系統演變具有實質性影響關聯，且影響各種生物圈重要性作用和潛在相關曝露途徑，及水文循環過程之水流時變性等。建議未來研究對於生物圈系統描述應先定義生物圈系統以及確認生物圈系統描述，包括：氣候和大氣組成、生物圈系統的地理位置和範圍、生物圈系統的地形學、近地表岩石地層學、地下和地表水體、生物圈系統的陸域和水域生物群、生物圈系統中的人類群體等特徵再進行完整描述。生物圈安全評估分析流程建議可參照 BIOMASS 2020 程序方法(圖 3)，根據評估背景從概念、模型建立和資料輸入，考慮場址特徵和模型系統辨識(包括長期氣候和地景發展，處置場全系統變化)，與生物圈之特徵、事件和作用等。建立代表生物圈之輻射曝露概念模型，並進一步發展為數值模型，評估核種於生物圈遷移及對於人類輻射曝露與非人類生物群之影響。本研究發展放射性廢棄物最終處置場核種於生物圈生態系統傳輸及劑量評估分析技術及程序，可做為精進用過核子燃料處置生物圈安全評估與情節審驗技術。



附註說明：流程示意圖未明確標示迭代反覆運算，但仍需配合滾動修正及不確定性分析。

圖 3 更新 BIOMASS 2020 方法之生物圈安全評估分析流程示意圖(修改自 SKB, 2018)

參考文獻

[1] SKB, 2018, BIOPROTA, BIOMASS 2020: Interim report. BIOPROTA report, produced in association with IAEA MODARIA II working group 6, SKB report series R-18-02 (Stockholm, Sweden: Svensk Kärnbränslehantering AB) (available at: www.skb.se).

[2] ICRP, 2006, Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of Radiation Protection of the Public, ICRP(INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION) Publication 101, Part 1, 2006.

[3] BIOCLIM, 2004, Deliverable D10-12: development and application of a methodology for taking climate-driven environmental change into account in performance assessments, Andra, Parc de la Croix Blanche, 1/7 rue Jean Monnet, 92298 Châtenay-Malabry, France (available at: www.andra.fr/bioclim/)

[4] IAEA, 2016, Development of a common framework for addressing climate change in post-closure radiological assessment of solid radioactive waste disposal. IAEA-TECDOC-1904 (Vienna: International Atomic Energy Agency) (available at: www.iaea.org)

[5] TCCIP, 2023, 臺灣氣候變遷關鍵指標圖集：AR6 統計降尺度版，國科會「臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫」編撰，國家災害防救科技中心出版。

用過核子燃料/高階放射性廢棄物深層地質處置熱-水-力-化(THMC)耦合效應數值模式發展

Development of Numerical Models for Thermal-Hydraulic-Mechanical-Chemical (THMC) Coupled Effects in Deep Geological Disposal of Spent Nuclear Fuel/High-Level Radioactive Waste

計畫編號：112-2623-E-008-003-NU
計畫主持人：陳瑞昇
e-mail：jschen@geo.ncu.edu.tw
計畫參與人員：林禹昇
執行單位：國立中央大學應用地質研究所

摘要

深層地質處置被認為是長期阻隔高階放射性廢棄物遠離生物圈的方法。高階放射性廢棄物的深層地質處置場通常會發生耦合的熱-水-力-化(THMC)過程，由於THMC 過程在建立安全評估的信賴度是不可或缺，因此應該藉由最先進的數值工具去了解 THMC 過程。

本計畫將建立一高階放射性廢棄物的深層地質處置場 THMC 過程的全新數值模式，本計畫發展的模式是完全耦合所有 THMC 在單一計算程式，不是結合兩個不同的計算程式序列執行模擬 THMC 過程。利用 THMC7.1 數值模式模擬了通過異質壓實膨潤土緩衝層注入氣體期間的耦合多相流和粘彈性力學，成功展示了氣壓積聚和突破事件的變化，凸顯了異質性對於氣體通道內氣體速度和壓力的顯著影響。

關鍵詞：
高階放射性廢棄物；深層地質處置；耦合的熱−水−力−化(THMC)過程；數值模式；多相流

Abstract

Deep geological disposal is being considered as a long-term solution for isolating high-level radioactive waste (HLW) from the biosphere. Within deep geological repositories for HLW disposal, coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes occur. Since THMC processes are indispensable for establishing the reliability of safety assessments, they should be understood using state-of-the-art numerical tools.

This project aims to utilize a novel numerical code to predict coupled THMC processes in HLW disposal. Specifically, the developed numerical model will fully integrate THMC processes within a single computer code, eliminating the need to combine multiple codes for sequential simulation. The THMC7.1 numerical model will simulate coupled multiphase flow and viscoelastic mechanics during gas injection through a heterogeneous compacted bentonite buffer. The results will successfully illustrate variations in gas pressure accumulation and breakthrough events, highlighting the significant impact of heterogeneity on gas velocity and pressure within preferential gas pathways.

Keywords: high-level radioactive waste; deep geological disposal; coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes; numerical model; multiphase flow

I. 前言

深地層處置場通常會發生耦合熱-水-力-化(coupled Thermo-Hydro-Mechanic-Chemical，THMC)過程，相關的 THMC 過程的研究發展對於建立安全評估(safety assessment)的信賴就非常重要，許多研究者進行了用過核子燃料的深層地質處置系統耦合 THMC 過程研究。

近年來較常使用研究用過核子燃料的深層地質處置系統 THMC 過程的工具為 TOUGH/FLAC3D 兩個不同軟體的耦合(Rutqvist, 2011)，TOUGH/FLAC3D 可用以進行模擬耦合的多相流(multiphase flow)、熱傳(heat transport)與地質力學(Geomechenics)。TOUGH2 相關軟體為 Lawrence Berkley National Laboratory(LBNL)所開發(Pruess, 1999)，主要用來求解多相流與熱傳方程式，而 FLAC3D 則為 ITASCATM 所開發(Itasca, 2012)，主要用來求解地質力學的應力-應變(stress-strain)方程式 。TOUGH2 與 FLAC3D 兩個不同的計算程式可依序耦合在電腦上完整銜接執行。但須特別注意的是 TOUGH/FLAC3D 只能是用來執行 THM 過程，並未包含 C 過程。TOUGHREACT/FLAC3D 也可結合用來進行 THMC 模擬(Zheng et al., 2017)。TOUGHREACT 主要用來求解多相流、熱傳與化學反應傳輸方程式，FLAC3D 則用來求解地質力學的應力-應變(stress-strain)方程式。

除了上述模式工具外，有限元素法(finite element method，FEM)的 COMSOL Multiphysics 也可用來進行耦合的 THMC 過程模擬，Nasir et al. (2014)利用 COMSOL Multiphysics (Comsol, 2009) 結合 PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999)地化模式進行 THMC 模擬，首先 COMSOL Multiphysics 用來是求解 THMC，但 C 只能限定溶質傳輸，接著 PHREEQC 用來進行地化反應計算，兩個不同計算程式的耦合運算主要藉由 MATLAB 撰寫一個特別的程式達成。Chang et al. (2021)則利用 PFLOTRAN (Lichtner and Hammond, 2012)進行相關 THMC 過程的模擬，PFLOTRAN 主要是模擬 THC 過程，三個力學造成的應力-滲透係數關係(1.exponential; 2.modified cubic; 3. Two-part Hook’ s law) 連結至 PFLOTRAN 以進行 THMC 模擬。

上述獻回顧可目前很少有 THMC 全耦合的計算程式，許多數值計算大都只能做 THM 或 THC。國立中央大學高等模式研發應用中心(計畫主持人擔任中心主任)，

研發完成一個全耦合 THMC((Thermal-Hydrology-GeoMechanic-Reactive Chemical Transport Model)傳輸四大功能的模擬軟體，THMC 模擬軟體是由國際水文模擬軟體領航者葉高次講座教授所發研發三維有限元素數值模式。

葉高次講座教授於西元 1981 年起美國發展了以有限元素法為基礎的 FEMWATER 模式，FEMWATER 模式為商業軟體 GMS 的核心程式，雖然 FEMWATER 模式可模擬 HC 過程，但 C 僅限於溶質傳輸。FEMWATER 模式的基礎下，葉高次講座教授教接續發展了 HYDROGEOCHEM 模式，用於模擬 THC 過程，可以考慮複雜的地球化學反應及熱傳功能，葉高次講座教授回到台灣中央大學後再再加入的值力學 M 與多相流 **H** 功能。本計畫利用 THMC7.1 數值模式模擬了通過異質壓實膨潤土緩衝層注入氣體期間的耦合多相流和粘彈性力學，成功展示了氣壓積聚和突破事件的變化，凸顯了異質性對於氣體通道內氣體速度和壓力的顯著影響。

II. 主要內容

本計畫採用 THMC7.1 版本 (Yeh and Tsai, 2015)，具有全耦合熱傳、多相流、地質力學及反應化學傳輸功能，相較於其他版本之 THMC 模式，將單相地下水流模組拓增為多相流體流動模組，力學模組採用非線性黏彈性力學，和過往線性彈性力學能夠更全面考慮材料的彈性效應，和時間相關的黏性效應，這對於研究長時間尺度的地質變形或處理大規模變形具有重要的應用價值。

THMC7.1 的(1) **H** 多相流體流動控制方程式遵循質量守恆定律與相關多相流體流動理論；(2)**T** 熱傳控制方程式考量熱延散(dispersion)、擴散(diffusion)、對流(convection)、源匯項等機制，根據能量守恆原理；(3)**M** 力學在平衡條件下主要考慮固體質量守恆是和動量方程式，質量守恆方程式由固體質量變化率與固體產生位移量的速度達守恆，而動量方程式考慮了熱傳、多相流、力學、化學四個效應，利用固體有效應力、流體壓力、溫度、固體物種濃度及流體物種濃度對於固體的影響；(3)**C** 反應化學傳輸之控制方程式考量移流(Advection)、延散、擴散、源匯項、生物地化反應(biogeochemical reactions)等機制，根據質量守恆及化學反應等原理，控制方程式。

關於 THMC7.1 相關控制方程式與有線元素法離散過程請參考 Yeh and Tsai (2015)。

III. 結果與討論

(1)THMC 模式介面發展與案例建置

計畫主持人帶領國立中央大學高等模式研發應用中心的同事們開發了一個商業軟體工具，軟體工具名稱為，該軟體結合了葉高次講座教授開發的先進數值模擬器的 FORTRAN 可執行文件以及 GUI 和網格生成模組。THMC 軟體工具包的 GUI 使其易於應用於各種實際問題。

- 下載 THMC 試用版和用戶手冊：[THMC 試用版](https://camrdaprod.ncu.edu.tw/products-landing/thmc/)

- YouTube 上的 THMC 介紹視頻：[THMC 介紹](https://youtu.be/Ol7G9nU_MHU?si=B7qulcY4kFkKxYXN)

THMC 軟體在面對全球實現淨零排放挑戰中有多元應用，包括核能除役、核廢料處置、地下水管理、監測式自然衰減整治、滲透性反應牆整治、碳封存評估與、地熱開發。目前，THMC 軟體已經完成了向多個產官學研組織的技術轉移，也製作了 THMC 介紹影片，並在國際上引起了極大關注，介紹視頻獲得了近 1,900 次觀看，也在 2023 年美國地球物理聯盟秋季會議（舊金山）設立了展示攤位，展示台灣在地下環境模擬工具方面的領先專業知識。

在 YouTube 上推廣 AGU 2023 年年會上的 MUSt 和 THMC 軟件包：[AGU 2023 推廣](https://www.youtube.com/watch?v=-gE0NKwr0t4)

(2)THMC 模式應用

THMC 模式應用案例考慮英國地質調查所(British Geological Survey)實驗室氣體灌入實驗資料，利用 THMC7.1 數值模式進行耦合多相流及力學模組，模擬水與氣體於膨潤土中遷移及氣體突破行為。

實驗利用夯實 MX-80 膨潤土進行氣體灌入實驗(Daniels et al, 2017)。MX-80 膨潤土切割為直徑為 59.59 mm、長度為 119.88 mm 的圓柱體，重量為 671.65g，乾密度為 1.56 g/m3，孔隙率為 0.437，含水量為 0.266。為了模擬地層深處三百公尺的高壓環境，夯實 MX-80 膨潤土置於壓力容器內，並灌入氦氣作為實驗氣體。壓力容器是一個剛性容器，因此膨潤土體積不會膨脹，但應力會受到影響，故在壓力容器的外部裝置了設備進行量測(包括 2 個軸向感測器用於量測軸向總應力、3 個徑向感測器用於量測徑向總應力、2 個軸向過濾器(前端過濾器和背端過濾器)，以及 12 個徑向過濾器，用於注入氣體或水，同時量測孔隙壓力。氣體從前端過濾器注入，並由背端過濾器偵測氣體的流出。

實驗分為 3 個階段：水合過程(第 1~39 天)、氣體注入過程(第 39~71 天)、氣體停止注入過程(第 71~121 天)。第 1 階段由徑向過濾器及背端過濾器注入水於膨潤土中，進行水合過程，使膨潤土飽和並產生膨脹壓力。經過 7.3 天形成足夠的膨脹壓力，再施加 1 MPa 的外部孔隙壓力維持，前端過濾器中的氣體壓力保持恆定在 1MPa，以防止水進入前端過濾器，持續到第 39 天。第 2 階段為加氦氣至前端過濾器，將氣體壓力增加到 3 MPa，該值保持恆定 7 天。第 46 天，透過泵注入 500 µl/hr 的恆定氣體流量(Flow rate)，接下來的 8 天內，氣體壓力逐漸從 3 MPa 增加到 5 MPa，氣體體積從 235 ml 減少到 139.7 ml。第 54 天，氣體壓縮速率降低至 375 µl/hr。第 61 天，再添加 59.95 ml 的氦氣，同時保持系統中恆定的氣體壓力。氣體壓力持續累積，直到超過進入壓力，於第 63.8 天時，發生氣體突破事件，氣體進入膨潤土中，並在背端過濾器偵測到氣體流出，觀察到氣體壓力急遽增加到 10.5 MPa；第 3 階段第 71 天時泵停止注入，因氣體突破所產生擴張通道及裂隙，氣體通過通道及裂隙流出膨潤土，隨後系統中氣體壓力逐漸減少，相關氣體注入時誠如表 1。

表 1 氣體注入時程

開始時間	注入氣體流量($\mu l/$	註解

	hr)	
第 39 天	0	氣體壓力：3000 kPa
第 46 天	500	由泵注入
第 54 天	375	氣體壓力：5000 kPa
第 61 天		注入氦氣 59.95ml，同時氣體壓力保持恆定
第 71 天	0	泵停止注入

研究利用 THMC 模式建立過濾器與膨潤土兩種材料(如圖 2)，前後兩端藍色為過濾器，中間灰色為膨潤土，膨潤土的尺寸與實驗相同，產生一個 3 維的 4 角柱網格。

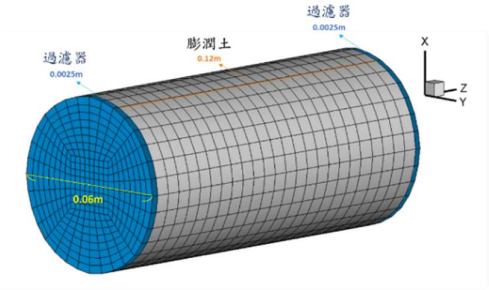


圖 1 模擬網格示意圖。

首先進行了網格收斂性測試，來決定最適的網格數，將 0.12 m 的膨潤土分別劃分為 12 層、20 層、24 層與 30 層，經網格收斂性測試後，膨潤土採 24 層，前背端過濾器各採 2 層，因此，總層數為 28 層，總元素數為 8960 個，總節點數為 9773 個。

多相流及力學模組各自需設定材質參數，包括土壤滲透率、乾密度、Young's modulus、Poisson's ratio 等。實驗室實驗數據無提供氣體可壓縮性、過濾器滲透率和膨潤土滲透率的參數值，本研究利用不同組合的參數值進行參數率定，由於多相流的邊界條件是利用 Cauchy 設定不同時間點下氣體灌入的質量通量，因此主要將前端過濾器截面上的氣體進入流率(gas inflow rate)和氣體灌入壓力(gas injection pressure)之模擬結果與實驗數據進行比對。

試了許多不同的參數值組合後，考慮表 2 的 6 組參數組合

表 2 不同組合的參數率定

Case	氣體可壓縮性, β_g [m day^2/kg]	過濾器滲透率 k_f [m^2]	膨潤土滲透率 k_b [m^2]
1	3.0×10^{-17}	6.0×10^{-17}	5.0×10^{-19}
2	3.0×10^{-17}	4.0×10^{-17}	5.0×10^{-19}
3	6.0×10^{-17}	8.0×10^{-18}	5.0×10^{-19}
4	6.0×10^{-17}	4.0×10^{-17}	5.0×10^{-19}
5	8.0×10^{-17}	4.0×10^{-17}	5.0×10^{-19}
6	9.0×10^{-17}	3.0×10^{-17}	5.0×10^{-19}

將其模擬結果所得的氣體進入流率和氣體灌入壓力，與實驗數據進行比對(如圖 4.17 和圖 4.18)，灰色線條為實驗數據，其餘顏色線條為模擬結果。

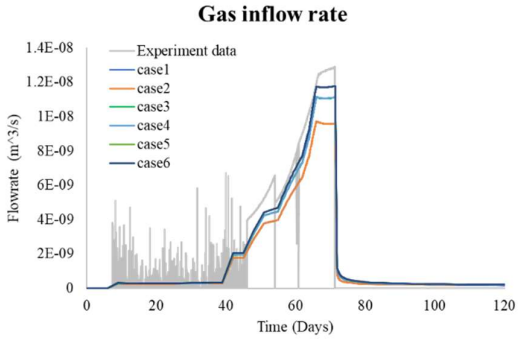


圖 2 氣體進入流率的實驗數據和模擬結果比較。

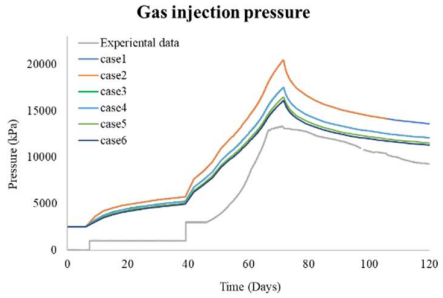


圖 3 氣體灌入壓力實驗數據和模擬結果比較。

從圖 3 氣體進入流率的結果來看，主要受到氣體可壓縮性的影響，其值越大越接近實驗數據，接著從圖 4. 氣體灌入壓力結果來看，氣體可壓縮性值越大也越接近實驗數據。因此，經率定後，選用 Case6 的參數值。

為了進一步瞭解異質性膨潤土對氣體遷移的影響，考慮膨潤土為異質性分佈，分別為異質性材質 1 和異質性材質 2(如圖 2)。膨潤土層數為 24 層，每 4 層會設定其異質性分佈(如圖 3)。分別考慮不同滲透率與不同的孔隙率兩種異質性。

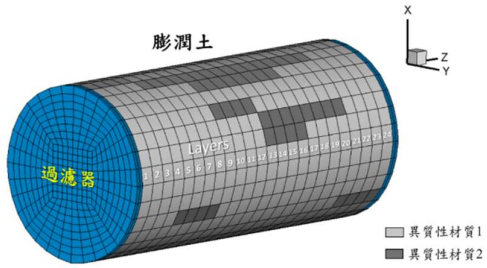


圖 4 異質性膨潤土設定網格圖。

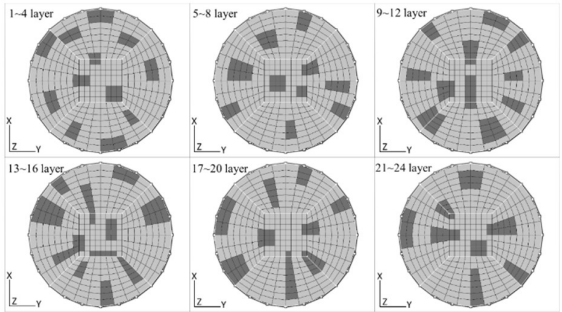


圖 5 每 4 層設定之異質性分佈。

為比較異質性的影響，均質性質膨潤土的滲透率為 5.0×10^{-19}m^2 和孔隙率為 0.43，滲透率異質性質膨潤土材

質 1 考慮與均質膨潤土的滲透率相同($5.0\times10^{-19}m^2$)，滲透率異質性材質 2 設定較快的滲透率，為 $9.0\times10^{-19}m^2$，但材質 1 與材質 2 的孔隙率皆為 0.43。孔隙率異質性膨潤土材質 1 考慮與均質膨潤土的孔隙率相同 0.43，孔隙率異質性材質 2 設定較大的孔隙率 0.48，但材質 1 與材質 2 的滲透率皆為為 $9.0\times10^{-19}m^2$。

圖 4 比較均質膨潤土、滲透率異質性膨潤土與孔隙率異質性膨潤土於第 0、42、71 和 121 天軸向氣體流速，滲透率異質性質膨潤土可以觀察到，在高滲透率的地方氣體流速較大，得知氣體會優先遷移至高滲透率的地方。孔隙率異質性膨潤土模擬結果也可以明顯觀察到在高孔隙率的地方有更高的氣體流速，同樣地，因這個地方容易形成氣體通道，優先讓氣體移動，造成氣體流速有更快且更明顯的現象

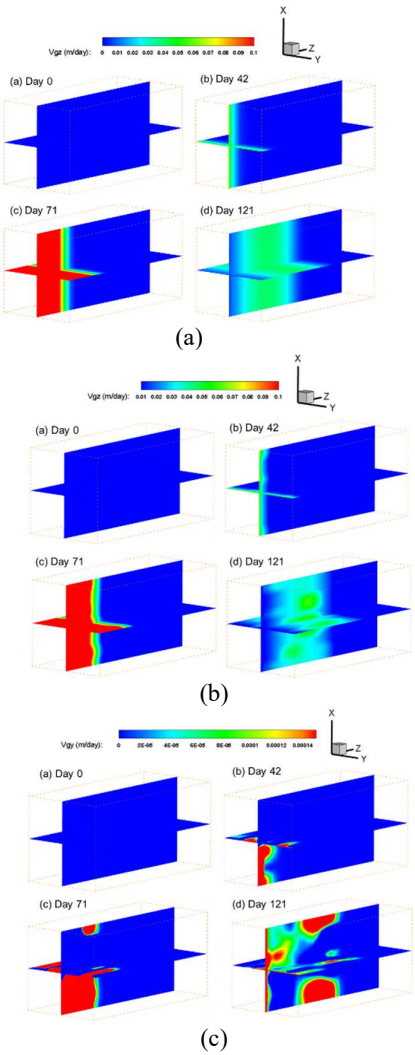


圖 6 比較均質膨潤土、滲透率異質性膨潤土與孔隙率異質性膨潤土於第 0、42、71 和 121 天軸向氣體流速

IV. 結論

計畫以國立中央大學葉高次講座教授所研發的THMC的Fortran執行檔為基礎，發展互動式圖形使用者介面的THMC軟體，並建置相關模擬的案例提供使用者免費下載，並於全球最多地球科學領域科研人員參加的美國地球物理聯盟會議的2023年會展示區設立攤位進行全球推廣，展現我國在地下環境熱水力化模擬工具開發的領先實力以提升台灣的國際學術地位。接續利用THMC7.1數值模式耦合多相流和力學模組模擬實驗室氣體灌入實驗數據，模擬為水和氣體於膨潤土內遷移，模擬結果與實驗室數據比較，有相當吻合，但仍有部分無法重現實驗數據。本研究考慮膨潤土異質性對氣體流動的影響性，結果顯示，異質性會影響氣體速度和氣體壓力，優先通道的存在會加速氣體的流動。本計畫所使用的本土THMC數值解模式可以做為更貼近真實放射性廢料地質處置候選場址安全評估使用。

參考文獻

[1] Chang, K.W., Nole, M., Emily R. Stein, E.R., 2021. Reduced-order modeling of near-field THMC coupled processes for nuclear waste repositories in shale. Comput Geotech. 138, 104326

[2] Daniels, K.A., Harrington, J.F., Cuss, R.J., 2018, The Response of Compact Bentonite during a 1-D Gas Flow Test, DECOVALEX PROGRAMME OPEN REPORT OR/17/067, BRITISH GEOLOGICAL SURVEY.

[3] Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G., 1999. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.

[4] Yeh, G.T., Tsai, C.H.P., 2015. HYDROGEOCHEM 7.1 A Three-Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, HYDROGEOCHEMical Transport, and Geomechanics through Multiple Phase Systems Version 7.1 (A Three Dimensional THMC Processes Model)，National Central University.

[5] Rutqvist, J., 2011. Status of the TOUGH-FLAC simulator and recent applications related to coupled fluid flow and crustal deformations. Comput Geosci. 37, 739 – 750.

[6] Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's Guide to PHREEQC (Version 2): A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations Water-Resources Investigations Report 99-4259, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.

[7] Comsol Multiphysics 3.5a, 2009.

[8] Itasca. FLAC3D, 2012. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Version 5.0.

[9] Zheng, L., Rut qvist, J., Xu, H., Birkholzer, J.T., 2017. Coupled THMC models for bentonite in an argillite repository for nuclear waste: Illitization and its effect on swelling stress under high temperature. Eng Geol. 230, 118-129.

[10] Lichtner, P.C., Hammond, G.E., 2012. Quick Reference Guide: PFLOTRAN 708 2.0: Multiphase-Multicomponent-Multiscale Massively Parallel Reactive 709 Transport Code. LA-CC-09-047, Los Alamos National Laboratory, Los 710 Alamos, NM, USA.

放射性廢棄物最終處置場址 CAV 耐震設計準則
CAV-based earthquake resistant design for nuclear waste disposal sites

計畫編號：112-2623-E-008-001-NU
計畫主持人：王瑞斌
e-mail：jpwang@ncu.edu.tw
執行單位：國立中央大學土木工程系(所)

摘要

精簡報告範例，原子能科技學術研討暨成果發表會年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式，年度原子能科技學術研討暨格式，年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報會精簡報告範例格式，年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式。

關鍵詞：

Abstract

CAV (cumulative absolute velocity) has been considered a better indicator of structural damage than PGA (peak ground acceleration). As a result, this study is to develop new CAV-based earthquake-resistant designs for the facilities built at the potential permanent nuclear water disposal sites in Taiwan. From this study, first we developed a new CAV ground motion prediction equation using the earthquake data in Taiwan. Then, respective CAV seismic hazard curves for developed for two potential sites where nuclear waste disposal facilities where be located. Based on this study, we recommend Site 1 in Wuchu over Site 2 in Taitung as the permanent nuclear waste disposal site in Taiwan. As to the acceptable risk level, i.e., which annual rate of CAV exceedance is used for design, it is still an on-going debate and needs further studies. But as long as it is determined by the governing agency, the proposed CAV seismic hazard curve can be used for obtaining the design CAV value for the facilities at the recommended site.

Keywords:

I. 前言

This project is about proposing a new design concept for developing earthquake-resistant designs for the facilities at nuclear waste disposal sites. In short, the new concept uses CAV (cumulative absolute velocity) as the fundamental design parameter, instead of PGA (peak ground acceleration) that is currently used in most earthquake-resistant designs, to the best of our knowledge.

Unlike PGA that only considers the maximum magnitude of an earthquake ground motion, CAV considers all the magnitudes of the motion. Fig. 1 shows the relatively new ground motion intensity measure. The highlighted area is the CAV of the hypothetical motion.

From Fig. 1, we can realize that CAV is like an energy-based ground motion intensity measure. As a result, the higher the CAV is, the greater the destructive force of the earthquake motion to the facilities. Again, it is different than the concept of PGA, because an earthquake motion with a larger PGA might be less distractive as Fig. 2 is showing.

In fact, we are not the first one coming up with the idea using CAV as the fundamental parameter for new earthquake-resistant design. In the late 1980s, the Electric Power Research Institute (EPRI) conducted a research collecting a lot of earthquake data, i.e., earthquake ground motions and induced earthquake Modified Mercalli intensities (MMI), and found that the CAV of the motion has a stronger correlation with MMI than PGA. Given that MMI is indicative of structure damage, so that they concluded that CAV is a better indicator of structural damage than PGA, which can be utilized in the next-generation earthquake-resistant design.

Due to the climate change mainly caused by CO_2 emission, we have been motivated and encouraged to develop and use “green” energy, such as the nuclear power. However, although nuclear power can reduce CO_2 emission, the wastes are radioactive, and how to dispose and storage them is an important issue when it comes to the debate on the use of nuclear energy. The recent, infamous example is the Fukushima incident in Japan. The nuclear facilities were ruined by the tsunami induced by a major earthquake, and the then radioactive wastes emitted to our surrounding.

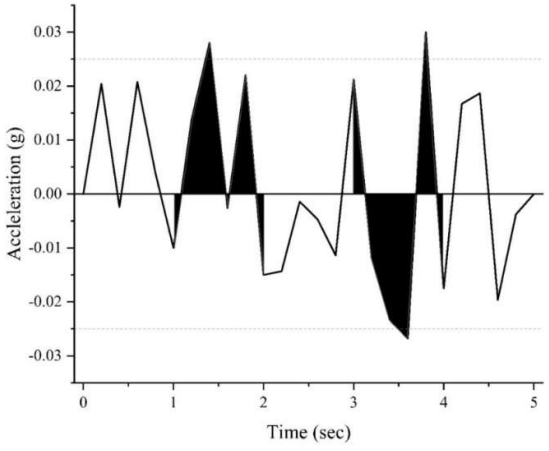


Fig. 1 The definition of CAV.

II. 主要內容

2.1 PGA-based PSHA

Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) is to estimate the annual rate of the ground motion exceedance at a target site based on the geological and seismological data in the surrounding, e.g., earthquake catalogs. This method has been prescribed by the U.S. Nuclear Regulatory

Commission (USNRC) to develop the design PGA and ground motion for the facility at a nuclear power plant in the U.S. From the title, we can realize the method is probabilistic but not deterministic. In other words, some parameters are treated as random variables in PSHA. Specifically, three variables are considered as random variables in PSHA, which are earthquake magnitude, location, and the error term of ground motion prediction equations.

Since the algorithm of PSHA is well-known, it is not shown here. Readers can refer to the textbook *Geotechnical Earthquake Engineering* by Prof. Kramer for the detailed calculation of PSHA. To our knowledge, the above reference is one of the best textbooks or documents that explain the every detail of PSHA and its calculation very clearly.

Since the framework of PSHA was proposed in the 1960s, many PSHA case studies have been conducted and reported (Mucciarelli et al., 2008; Purvance et al., 2008; Roshan and Basu, 2010; Stirling et al., 2011; Stevens et al., 2018; Peñarubia et al., 2020). However, it must be noted that the PSHA studies are all PGA-based, estimating the annual rate of PGA exceedances for the target sites or regions.

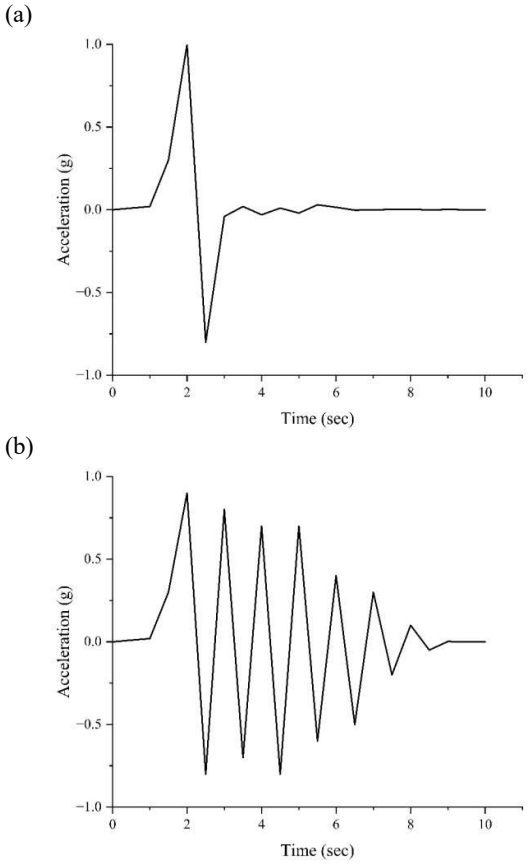


Fig. 2 Two earthquake motions with the same PGA but with a different CAV: (a) larger CAV; (b) smaller CAV.

2.2 Proposed method: CAV-based PSHA

As mentioned previously, some research has shown that CAV is a better indicator of structure damage than PGA. Therefore, the proposed idea and method are to use CAV-based PSHA to develop CAV design parameters for nuclear waste disposal sites. Although the idea sounds simple, it is needed to develop CAV-based ground motion prediction equations, and then we can use it to estimate CAV at the target sites under the same framework of PSHA. In short, the difference between the "old" and the "new" PSHA is to use CAV ground motion prediction equations in the calculation.

2.3 Data

Like any ground motion prediction equations, the CAV one developed by this study is also data-driven or empirical. As a result, the first step is to collect earthquake data for the development. "Luckily," there are many earthquakes around Taiwan and therefore a lot of earthquake data are available. In this research, we went to the website of the Central Weather Bureau, on which they provide the ground motions induced by recent major earthquakes.

2.4 Sites

Based on the data released by the Nuclear Safety Commission (Taiwan), the tentative nuclear waste disposal sites are shown in Fig. 3.

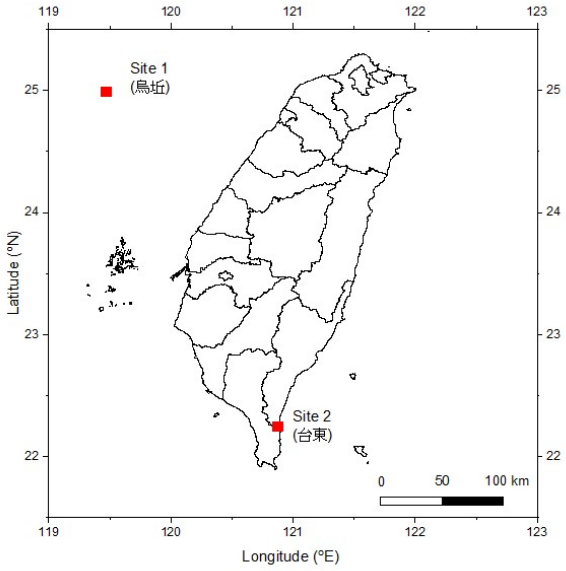


Fig. 3 The nuclear waste disposal site or the study site.

III. 結果與討論

3.1 CAV ground motion prediction equation

The CAV ground motion prediction equation developed by this research is as follows:

$$\log_{10}(CAV_{STD}) = -7.577+1.732M-2.008\log_{10}\sqrt{D^2+H^2}-0.066S\pm0.758 \quad (1)$$

where CAV is in unit of m/s, D is the source-to-site distance in km, H is the focal depth in km, and M is the earthquake moment magnitude, and the term +-0.758 is the standard deviation of the error term of the regression model.

As other ground motion prediction equation developments, we plotted the residuals against the explanatory variable (e.g., distance) to see whether the residuals are random and are not showing some conspicuous pattern. The figures below are the diagnostic plots. It shows that the residuals were randomly distributed, and no clear pattern can be found in the plots. Therefore, the CAV ground motion prediction equation developed is robust based on the fundamentals of regression analysis.

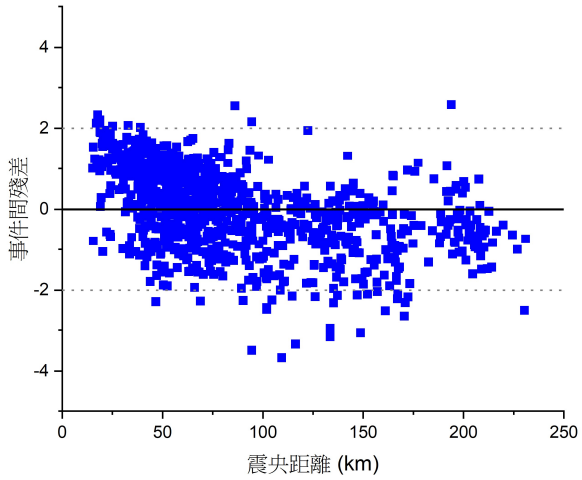


Fig. 4 Residual versus distance for inter-events.

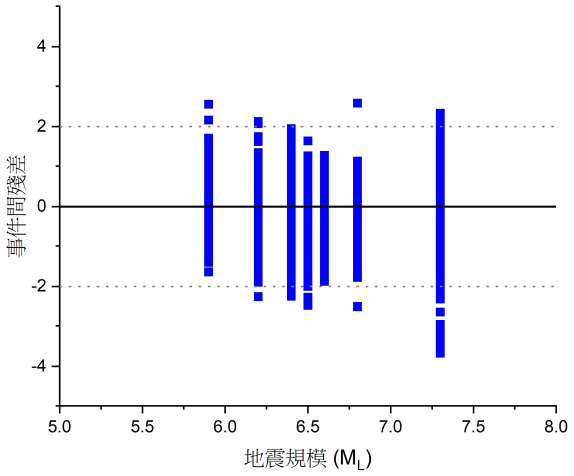


Fig. 5. Residuals versus magnitude for intra-events.

3.2 CAV hazard curves

Fig. 6 shows the CAV hazard curve for Site 1 (in 烏坵). It shows that under the annual rate of CAV exceedance as 0.0001 (return period = 10000 year), the CAV exceedance is about 1.5 g-s (g = 9.8 s/m^2). By contrast, when the annual rate of CAV exceedance = 0.0021 (return period = 475 year), the CAV exceedance is about 1.5 g-s (g = 9.8 s/m^2) is about 0.6 g-s.

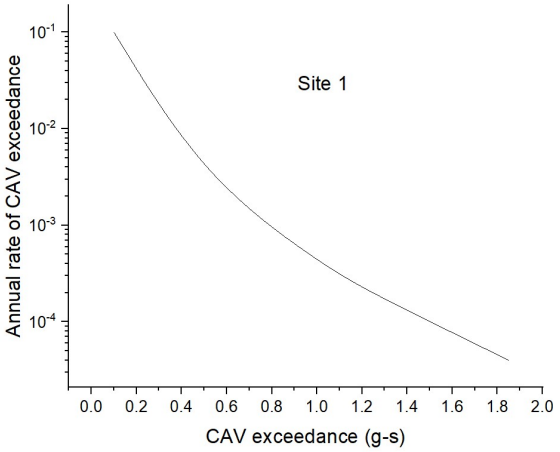


Fig. 6 The CAV hazard curve for Site 1.

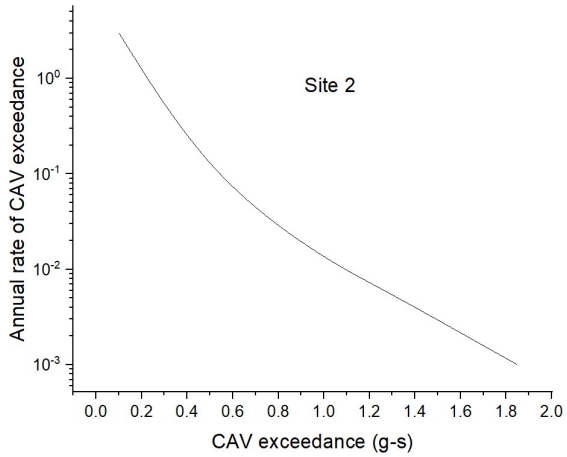


Fig. 7 CAV seismic hazard curve for Site 2.

IV. 結論

A new CAV ground motion prediction equation was developed for the region around Taiwan using the earthquake data in Taiwan. Respective CAV seismic hazard curves for developed for Sites 1 and 2, which are the potential permanent nuclear waste disposal locations; under the annual rate of CAV exceedance at 0.0021, the respective CAV exceedance values are about 0.6 and 0.9 g-s. Based on this study, we recommend Site 1 over Site 2 as the permanent nuclear waste disposal site in Taiwan. As to the acceptable risk level, i.e., which annual rate of CAV exceedance is used for design, it is still an on-going debate and needs further studies. But as long as it is determined by the governing agency, the proposed CAV seismic hazard curve can be used for obtaining the design CAV value for the facilities at the recommended site.

參考文獻

[1] Mucciarelli, M., Albarello, D., and D' Amico, V. (2008). "Comparison of probabilistic seismic hazard estimates in Italy." Bulletin of the Seismological Society of America, 98(6), 2652-2664.

[2] Purvance, M. D., Brune, J. N., Abrahamson, N. A., and Anderson, J. G. (2008). “Consistency of precariously balanced rocks with probabilistic seismic hazard estimates in southern California.” Bulletin of the Seismological Society of America, 98(6), 2629-2640.

[3] Roshan, A. D., and Basu, P. C. (2010). “Application of PSHA in low seismic region: A case study on NPP site in peninsular India.” Nuclear Engineering and Design, 240(10), 3443-3454.

[4] Stirling, M., Litchfield, N., Gerstenberger, M., Clark, D., Bradley, B., Beavan, J., McVerry, G., Dissen, R. V., Nicol, A., Wallace, L., Buxton, R. (2011). “Preliminary probabilistic seismic hazard analysis of the CO2CRC Otway Project Site, Victoria, Australia.” Bulletin of the Seismological Society of America, 101(6), 2726-2736.

[5] Stevens, V. L., Shrestha, S. N., and Maharjan, D. K. (2018). “Probabilistic seismic hazard assessment of Nepal.” Bulletin of the Seismological Society of America, 108(6), 3488-3510.

[6] Peñarubia, H. C., Johnson, K. L., Styron, R. H., Bacolcol, T. C., Sevilla, W. I. G., Perez, J. S., Bonita, J. D., Narag, I. C., Solidum, R. U. Jr., Pagani, M. M., and Allen, T. I. (2020). “Probabilistic seismic hazard analysis model for the Philippines.” Earthquake Spectra, 36(1_suppl), 44-68.

[7] Kramer, S. L. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall Inc., New Jersey, USA.

以物理模型試驗模擬緩衝材料縫隙的自癒行為
Physical Modeling on the Self-Healing Behavior of Buffer Material with Fractures

計畫編號：NSTC 112-2623-E-008-002-NU
計畫主持人：洪汶宜
e-mail：wyhung@ncu.edu.tw
計畫參與人員：古明正、王怡琇
執行單位：國立中央大學土木工程學系

摘要

台灣位於環太平洋地震帶，地震發生頻率相當的高，因此若考量深層處置場之興建與處置，必須考量地震對於處置場整體安全性之影響。本研究以離心模型試驗與 1 g 物理模型試驗探討處置坑內緩衝材料受震的破裂行為及裂縫分佈情形，瞭解當地下水入侵時，有裂縫之緩衝材料的自癒行為。離心模型試驗結果顯示：當地下水入侵時，緩衝材料破裂產生垂直與水平裂縫；1 g 物理模型試驗結果顯示：表面裂縫癒合時間與裂縫寬度呈現正相關，其癒合時間隨裂縫寬度之上升趨勢為指數型增加。

關鍵詞：廢棄物罐、緩衝材料、地震、裂縫、自癒行為、離心模型。

Abstract

Taiwan is located in the circum-Pacific seismic belt, where earthquakes occur frequently. Therefore, when considering the construction and disposal of deep geological repositories, it is crucial to evaluate the impact of earthquakes on the overall safety of the repository. This study investigates the crack behavior and fractures distribution of buffer materials in disposal pits during earthquakes through centrifuge modeling and 1 g physical model tests. It also looks into the self-healing behavior of cracked buffer materials when groundwater infiltrates. The results of the centrifuge model tests show that vertical and horizontal cracks occur in the buffer material when groundwater infiltrates. The 1 g physical model tests indicate that the healing time of the cracks is positively correlated with the crack width, with the healing time exponentially increasing as the crack width increases.

Keywords: Canister, Buffer Material, Earthquake, Crack, Self-Healing Behavior, Centrifuge Modeling.

I. 前言

核廢料可根據放射性強度分為高放射性廢棄物和低放射性廢棄物，目前國際上一般認為深層地質處置是較可行的方式，透過多重障壁的概念，將用過的燃料置於廢棄物罐中，外層以緩衝材料(膨潤土)包覆，組成工程障壁，並將其埋置於深度 300 至 1000 公尺的堅硬地質構造(岩體)中封存。台灣位於環太平洋地震帶，地震發生頻率相當的高，因此若考量深層處置場之興建與處置，必須考量地震對於處置場整體安全性之影響。為了解緩衝材料受地下水浸潤的回脹自癒行為，本研究以離心模型試驗與 1 g 物理模型試驗探討處置坑內緩衝材料受震的破裂行為及裂縫分佈情形，瞭解當地下水入侵時，有裂縫之緩衝材料的自癒行為。

II. 主要內容

本研究分為兩部分，第一部分為離心模型試驗，中模型模擬之處置孔原型係根據 KBS-3V 之處置概念設計，透過地工離心機提供 10 g 的穩定離心加速度場，輸入不同頻率、振幅之基盤振動，模擬緩衝材料受震後的破裂行為以及裂縫分布情形，接著以受震引致之裂縫分布情形作為地下水入侵及入侵初期的初始條件，以觀察緩衝材料的自癒行為。第二部分為 1 g 物理模型試驗，模擬處置孔內受到深層地下水之浸潤，觀察具不同裂縫深度(Depth, D)、寬度(Width, W)及水流路徑(Rroutes, R)條件下緩衝材料的自癒行為。

2.1 離心模型試驗

本研究使用中央大學地工離心機暨離心模型振動台，離心機有效旋轉半徑為 3 m，乘載容量為 100 g-ton，離心機掛台搭載一維伺服油壓振動台，振動台可輸出頻率範圍為 0~250 Hz，最大檯面位移為±6.4 mm，振動台之乘載容量為 32 g-ton。研究選用鋁合金圓桶試驗箱，該試驗箱可分為三個部分，包括底板、試驗箱體及頂蓋，完整組裝完之後內部具有直徑 175 mm、高度 847 mm 之圓柱空間，其中之廢棄物罐以 1/10 比例縮小成縮尺模型，其高度為 490 mm、直徑 105 mm、外層為 2 mm 厚度之銅管。本研究以 SPV-200 膨潤土製作三種緩衝材料塊，Type A 和 Type C 分別為處置孔上、下方之膨潤土塊，Type B 則環繞於廢棄物罐周圍，試驗選用之緩衝材料含水量為 15%，其統體單位重為 1885 kg/m^3。利用油壓千斤頂搭配加壓軸桿，將緩衝材料塊壓實至預定高度後脫模，壓製完成之緩衝材料塊如圖 2-1 所示。離心模型試驗配置如圖 2-2 所示，第一組為無地下水入侵試驗，第二組為地下水入侵試驗。研究中以鋁合金圓桶試驗箱模擬處置孔周圍之花崗母岩盤，依序於基盤(Box- Bottom Acceleration, BBA)、廢棄物罐底部(Canister-Bottom Acceleration, CBA)、廢棄物罐頂部(Canister-Top Acceleration, CTA)及試驗箱頂部(Box-Top Acceleration, BTA)安裝加速度計，以紀錄試體之受震行為，並計算其加速度放大倍率與系統主頻，輸入振動事件列於表 2-1。

2.2 1 g 物理模型試驗

1 g 物理模型試驗透過 1 g 裂縫觀察箱的視窗與攝影設備，記錄地下水入侵處置孔中的緩衝材料在不同裂縫深度(D)、寬度(W)及水流路徑(R)條件下的自癒行為。本研究進行裂縫癒合試驗之分析時，判斷裂縫開始癒合

的時間點為水填滿裂縫的時候，透過比例尺計算裂縫癒合時的寬度變化，當無法清楚分辨裂縫寬度的時候來判斷裂縫是否癒合。此外，試驗箱僅上方有壓克力視窗可觀測裂縫癒合之變化，因此研究中所提及之癒合定義為裂縫表面癒合。1 g 裂縫觀察箱主要由三個部分構成分別是壓克力視窗、中碳鋼壓條及鋁合金試驗槽。在試驗槽旁設有水閥連接水管後可以將水通入槽內進行試驗。組裝後外徑長度為 253 mm、寬度為 253 mm、高度為 50 mm，鋁合金試驗槽有 8 個圓柱空間可放入試體，如圖 2-3 所示，試體高度為 25 mm、直徑為 51 mm。緩衝材料塊係利用油壓千斤頂搭配加壓軸桿把模具墊高後利用加壓設備再把模具壓出，取出試體後，以夾鏈袋將其包封存放。緩衝材料塊之裂縫以三種不同寬度之替刃寬度製作，替刃寬度分別為 0.45 mm、0.80 mm 與 1.45 mm，裂縫深度分別為 4 mm、6 mm、8 mm、10 mm 與 12 mm。1 g 物理模型試驗試驗有三種不同裂縫寬度及五種不同裂縫深度，共 15 組試驗；另外，改變水流路徑探討裂縫寬度(0.45 mm)與深度對緩衝材料癒合之影響，共計 5 組試驗，試驗條件及水流路徑如圖 2-4 所示。

表 2-1 離心模型試驗振動事件表

事件	波形	頻率 (Hz)	作用週數 (cycles)	延時 (sec)	基盤加速度 (g)
S1	白噪波	-	-	3	-
S2	正弦波	1	15	15	0.02
S3	正弦波	1	15	15	0.04
S4	正弦波	1	15	15	0.05
S5	正弦波	1	15	15	0.07
S6	正弦波	2	15	7.5	0.06
S7	正弦波	2	15	7.5	0.06
S8	正弦波	2	15	7.5	0.22
S9	正弦波	3	15	5	0.09
S10	正弦波	3	15	5	0.04
S11	正弦波	3	15	5	0.01
S12	白噪波	-	-	5	-

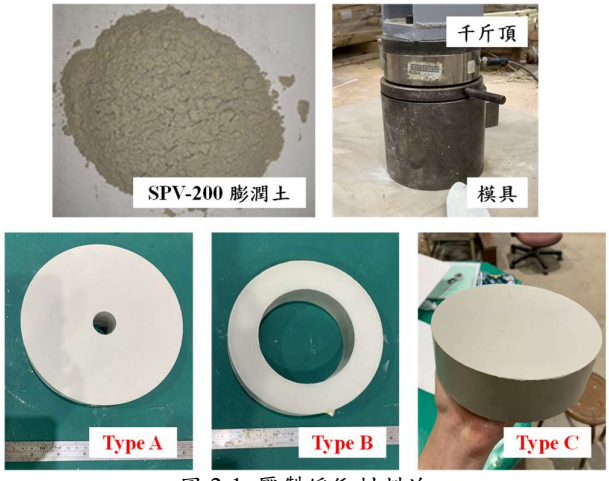


圖 2-1 壓製緩衝材料塊

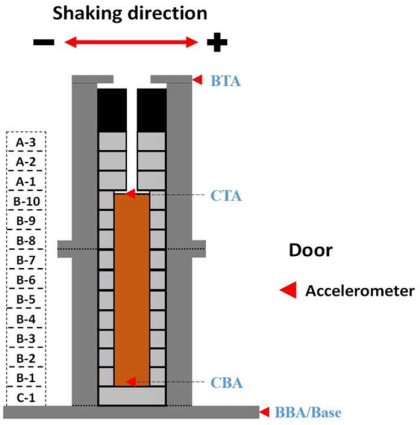


圖 2-2 離心模型試驗配置圖

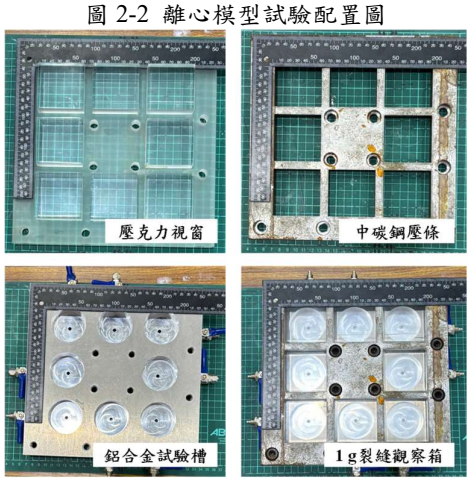


圖 2-3 1g 裂縫觀察箱

試驗編號及裂縫條件

深度(mm) / 寬度(mm)	4	6	8	10	12
0.45	W45-D4	W45-D6	W45-D8	W45-D10	W45-D12
0.8	W80-D4	W80-D6	W80-D8	W80-D10	W80-D12
1.45	W145-D4	W145-D6	W145-D8	W145-D10	W145-D12

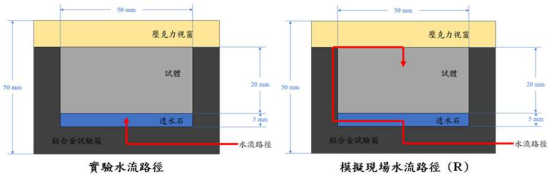


圖 2-4 1 g 物理模型試驗條件與水流路徑示意圖

III. 結果與討論

3.1 無地下水入侵之離心模型試驗

初始條件為處置初期且無地下水入侵、含水量 15%、初始單位重 1885 kg/m^3，總共輸入 12 次振動，廢棄物罐頂部(CTA)之加速度振幅最大，圓桶試驗箱頂部(BTA)次之，廢棄物罐底部(CBA)與輸入基盤加速度振幅相近。當基盤最大加速度為 0.01~0.22 g，圓桶試驗箱頂部(BTA)加速度為 0.03~0.45g，放大倍率為 1.93~3.42 倍；廢棄物罐頂部(CTA)加速度為 0.03~0.86 g，放大倍率為 1.58~9.21 倍；廢棄物罐底部(CBA)加速度為 0.01~0.24 g，放大倍率為 0.91~1.11 倍，如表 3-1 所示。當試體受到 S9

振動事件(3 Hz、15 cycles、PBA=0.14 g)時，廢棄物罐頂部(CTA)之加速度放大倍率達 9.21 倍，係可能因無地下水浸潤使得廢棄物罐與緩衝材料間受振搖晃無緩衝，且與輸入振動頻率發生共振所導致，不同高程之加速度歷時如圖 3-1 所示。透過白噪(White noise)訊號進行快速傅立葉轉換(Fast Fourier transform, FFT)計算轉換函數(Transfer function, TR)求得系統主要頻率，初始系統主要頻率為 5 Hz、廢棄物罐主要頻率為 2 Hz，緩衝材料受振破裂後系統主要頻率為 6.2 Hz。試驗結束後拆除試體可觀察到緩衝材料產生垂直向之裂縫，如圖 3-2 所示。

表 3-1 無地下水入侵條件下之加速度放大倍率

Event	F	PBA	CBA/BBA	CTA/BBA	BTA/BBA
Unit	Hz	g	-	-	-
S2	1	0.02	1.09	1.80	1.93
S3	1	0.04	1.05	1.78	2.18
S4	1	0.05	1.12	1.58	2.28
S5	1	0.07	1.07	1.96	2.08
S6	2	0.06	1.11	2.75	2.38
S7	2	0.06	1.11	2.75	2.38
S8	2	0.22	1.07	3.57	2.02
S9	3	0.09	0.91	9.21	3.42
S10	3	0.04	0.91	8.11	2.61
S11	3	0.01	1.07	3.75	3.10

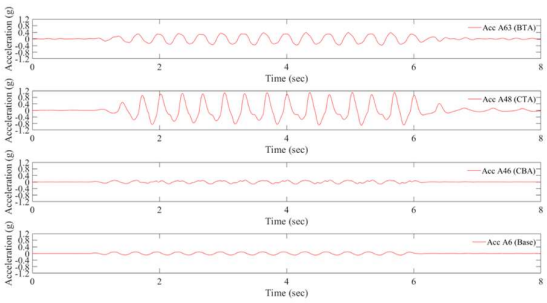


圖 3-1 無地下水入侵條件下不同高程之加速度歷時圖

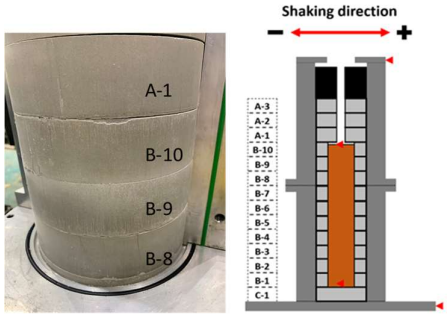


圖 3-2 無地下水入侵條件下緩衝材料破裂之裂縫分佈

3.2 地下水入侵之離心模型試驗

初始條件為處置初期且無地下水入侵、含水量 15%、初始單位重 1885 kg/m^3，總共輸入 12 次振動，圓桶試驗箱頂部(BTA)之加速度振幅最大，廢棄物罐頂部(CTA)次之，廢棄物罐底部(CBA)與輸入基盤加速度振幅相近。當基盤最大加速度為 0.01~0.22 g，圓桶試驗箱頂部(BTA)加速度為 0.03~0.45 g，放大倍率為 1.55~5.08 倍；廢棄物罐頂部(CTA)加速度為 0.05~0.31 g，放大倍率為 1.39~3.74 倍；廢棄物罐底部(CBA)加速度為 0.01~0.24 g，放大倍率為 0.93~1.26 倍，放大倍率為 0.91~1.11 倍，如表 3-2 所示。當試體受到 S9 振動事件(3 Hz、15 cycles、PBA=0.14 g)時，可以觀察到廢棄物罐頂部(CTA)之加速度振幅與系統相近，係可能是因為地下水浸潤使緩衝材料膨脹成糊狀，填滿廢棄物罐與緩衝材料間的縫隙，從系統頻率也可以觀察到相同現象，初始與試驗後系統主要頻率分別為 4.5 Hz 與 4.7 Hz，頻率接近，不同高程之加速度歷時如圖 3-3 所示。試驗結束後拆除試體可觀察到緩衝材料產生垂直向與水平向之裂縫，如圖 3-4 所示，隨後鎖上壓克力視窗觀察緩衝材料裂縫之自癒行為。然而，因回脹壓力過大使壓克力視窗破裂，因此 1 g 物理模型試驗改以直徑 50 mm、高 20 mm 之緩衝材料圓柱試體與不同寬度之鋸子進行，模擬現地緩衝材料塊因受震導致產生之裂縫，並觀察裂縫寬度與裂縫深度對癒合時間的影響。

表 3-2 地下水入侵條件下之加速度放大倍率

Event	F	PBA	CBA/BBA	CTA/BBA	BTA/BBA
Unit	Hz	g	-	-	-
S2	1	0.02	0.95	2.69	3.70
S3	1	0.04	0.98	2.01	3.36
S4	1	0.05	0.94	1.53	2.46
S5	1	0.07	0.93	1.48	2.06
S6	2	0.06	1.06	1.83	2.48
S7	2	0.06	1.10	1.88	2.85
S8	2	0.22	1.06	1.39	1.88
S9	3	0.09	1.26	2.09	1.55
S10	3	0.04	1.11	1.54	2.55
S11	3	0.01	1.04	3.74	5.08

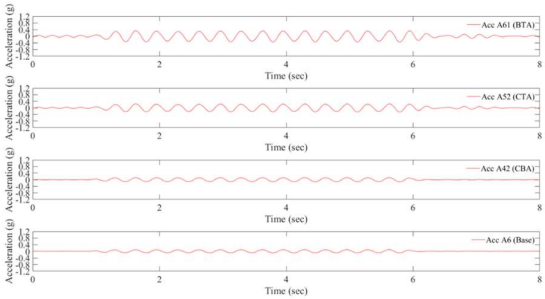


圖 3-3 地下水入侵條件下不同高程之加速度歷時圖

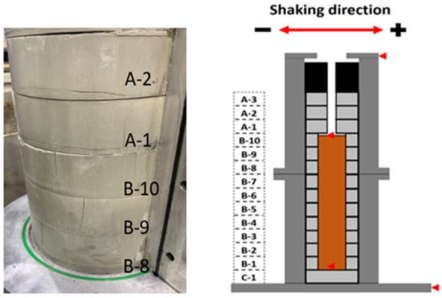


圖 3-4 地下水入侵條件下緩衝材料破裂之裂縫分佈

3.3 1 g 物理模型試驗結果

首先探討相同裂縫寬度(0.45 mm)條件下，不同水流

路徑與裂縫寬度對癒合時間之影響，試驗結果如圖 3-5 所示。W45-D4、W45-D6、W45-D8、W45-D10 及 W45-D12。W45-D4 之癒合時間為 20 秒，W45-D6、W45-D8 及 W45-D10 之癒合時間為 25 秒，W45-D12 癒合時間為 30 秒；W45-D4-R、W45-D6-R、W45-D8-R 及 W45-D12-R 試驗中裂縫癒合時間皆為 15 秒，在試驗 W45-D10-R 中為 20 秒。試驗結果顯示模擬現地水流路徑(R)的緩衝材料塊裂縫所需癒合時間較短，但差異不大。拆除試體後可發現膨潤土膨脹成糊狀使表面癒合，深層裂縫並沒有癒合仍清晰可見，如圖 3-6 所示。

相同實驗水流路徑條件下：(1) 裂縫寬度為 0.45 mm 時，不同裂縫深度之表面癒合時間介於 20 至 30 秒；(2) 裂縫寬度為 0.80 mm 時，不同裂縫深度之表面癒合時間介於 45 至 70 秒；(3) 裂縫寬度為 1.45 mm 時，不同裂縫深度之表面癒合時間介於 60 至 180 秒，其中 W145-D4 與 W145-D6 兩組試驗中，可觀察到表面裂縫並沒有完全癒合，不同裂縫寬度與癒合時間之關係如圖 3-7 所示。將 15 組 1 g 物理模型試驗數據進行迴歸分析，可以發現裂縫寬度與癒合時間具有正相關，為一指數性增加的曲線，如圖 3-8 所示。

IV. 結論

1. 在地下水入侵之離心模型試驗條件下，緩衝材料產生垂直向與水平向之裂縫；無地下水入侵之離心模型試驗條件下，緩衝材料產生垂直向之裂縫。
2. 在無地下水入侵之離心模型試驗條件下，系統初始及試驗後主要頻率分別為 5 Hz 及 6.2 Hz，廢棄物罐為 2 Hz；地下水入侵之離心模型試驗條件下，系統初始及試驗後主要頻率分別為 4.5 Hz 及 4.7 Hz。
3. 透過 1 g 物理模型試驗可知，裂縫癒合時間與裂縫寬度呈現正相關，本研究中不同寬度之裂縫在 180 秒內表面都已經癒合。
4. 在 1 g 物理模型試驗模擬現地水流路徑的條件下，即使裂縫表面已癒合，拆除試體後內部仍可見明顯裂縫。當裂縫深度較小與寬度較大的試驗中較容易發生癒合不完全的情況。

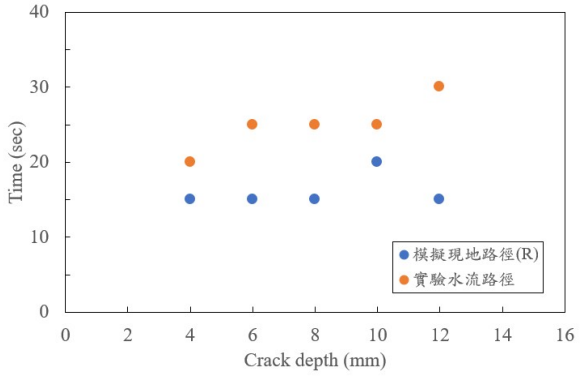


圖 3-5 不同水流路徑條件下，裂縫寬度為 0.45 mm 時之裂縫深度(D)與癒合時間關係圖

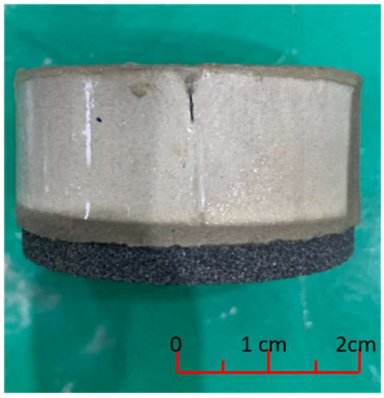


圖 3-6 現地水流路徑(R)試驗試體之側視圖

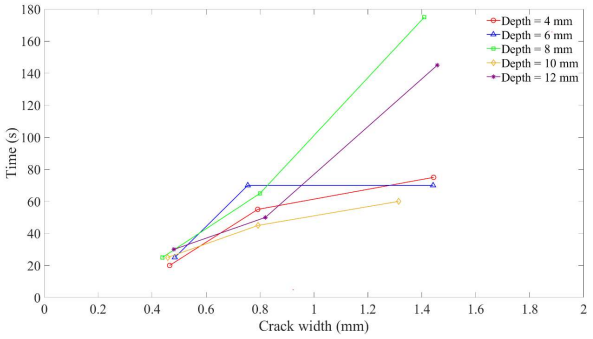


圖 3-7 裂縫寬度(W)與癒合時間之關係圖

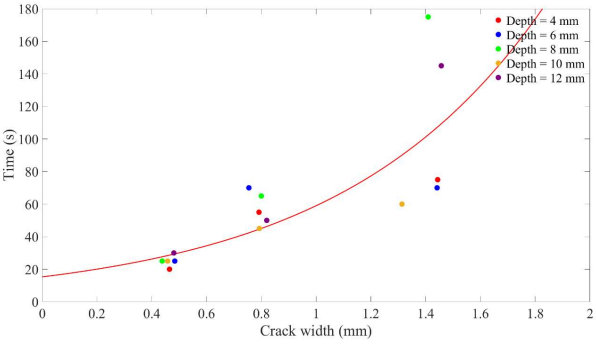


圖 3-8 裂縫寬度(W)與癒合時間之回歸分析

參考文獻

[1] Åkesson, M., Kristensson, O., Börgesson, L., Dueck, A., and Hernelind, J., "THM modelling of buffer, backfilland other system components," SKB TR-10-11, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Sweden (2010).

[2] Hung, W.H., Chen, W.C., "Swelling behavior of a potential buffer material under simulated near field environment," Journal of nuclear science and technology, Vol 41, No.12, pp. 1271-1279 (2004).

[3] Neall, F., Pastina, B., Smith, P., Gribi, P., Snellman, M., Johnson L., "Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto," POSIVA 2007-10, Posiva Oy, Olkiuoto, Finland (2007).

[4] Svensk Kärnbränslehantering AB., “Design, production and initial state of the canister,” TR-10-14, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Sweden (2010).

功能性梯度水泥基材固化放射廢棄物可行性研究
Feasibility Study on Solidifying Radioactive Waste by Functionally Graded Cementitious Materials

計畫編號：NSTC 112-2623-E-011-003-NU
計畫主持人：陳君弢
e-mail：chuntaoc@mail.ntust.edu.tw
計畫參與人員：周廷霖、董采薇
執行單位：國立臺灣科技大學營建工程系

摘要

核能安全一直為社會大眾所關注的議題，尤其核廢料的處理更是關鍵環節。目前，低階放射性廢棄物通常以混凝土固化後存放於金屬容器中。混凝土作為一種良好的隔離材料，因為其由天然材料製成、易於獲取、成型、耐腐蝕且成本低廉等特點而被廣泛使用。然而，隨著時間推移，放射性廢棄物衰變所產生的熱量可能導致水泥漿體產生微裂紋，同時釋放的γ射線可能破壞水泥水化產物的鍵結，進而產生氫氣。因此，水泥漿體中的C-S-H膠體分解後降低混凝土的強度和隔離能力，同時氫氣積聚所產生的內部壓力可能進一步導致裂縫的產生。有鑒於此，本研究旨在透過電滲法改質水泥基材料，製作出具有漸變性質的功能性梯度材料，期能延長容器的使用壽命。研究過程中，主要製作直徑 400 mm 和 600 mm 的圓盤狀砂漿試體，並在其周圍和中心分別埋入鈦網和銅棒作為陽極和陰極。通電後，在特定的齡期進行鑽心取樣，以測試其抗壓強度、吸水率和吸水速率等性能。結果顯示，在水灰比 0.6、通電電流 0.1A、通電時間 8 小時的條件下，試體的抗壓強度呈現從周圍到中心逐漸降低的趨勢，而吸水率則沒有顯著變化。此結果說明電滲過程可能促使孔隙水溶液移動，從而改變了膠結材料的性質，X 光繞射分析亦顯示成分相有所改變。未來，這項技術有潛力被應用於低階放射性廢棄物的固化處理，甚至可拓展到其他類型廢棄物的固化。

關鍵詞：電滲、混凝土、功能性材料、抗壓強度、吸水率、吸水速率

Abstract

Nuclear safety has always been a concern for the general public, especially the treatment of nuclear waste, which is a critical issue. Currently, low-level radioactive waste is typically solidified with concrete before being stored in metal containers. Concrete is widely used as an effective barrier material due to its natural composition, ease of procurement, moldability, corrosion resistance, and low cost. However, over time, the heat generated by the decay of radioactive waste may cause microcracks in the cement paste, and the emitted γ-rays can damage the bonding in the cement hydrates, thereby generating hydrogen gas. Consequently, the decomposition of the C-S-H gel in the cement paste reduces the strength and barrier capabilities of the concrete, and the accumulation of hydrogen gas may further lead to cracking. In light of this, this study aims to modify cement-based materials through electroosmosis to produce functional gradient materials (FGM) with gradational properties, hoping to extend the lifespan of containers. During the research process, disc-shaped mortar specimens with diameters of 400 mm and 600 mm were primarily produced, with titanium mesh and copper rods embedded around and at the center as anodes and cathodes, respectively. After charging, the core samples were taken at specific ages to test their compressive strength, water absorption rate, and rate of water absorption. The results showed that under conditions of a water-to-cement ratio of 0.6, an electric current of 0.1A, and an electrification time of 8 hours, the compressive strength of the specimens showed a gradual decrease from the periphery to the center, while the water absorption rate did not change significantly. These results suggest that the electrophoresis process may promote the movement of pore solution, thereby altering the properties of the cementitious materials. X-ray diffraction analysis also showed changes in phase composition. In the future, this technology has the potential to be applied to the solidification treatment of low-level radioactive waste and may even be expanded to the solidification of other types of waste.

Keywords: electroosmosis, concrete, functionally graded material (FGM), compressive strength, water absorption, water absorption rate

I. 前言

核能科技全球快速發展，尤其在俄烏戰爭後，化石燃料供應不穩定加上減碳需求，促使世界各國重新檢視核能發電的重要性。歐盟更是將核能定義為綠色能源之一。然而，發展核能不可避免地帶來了核廢料的處理問題。目前對於核廢料的再利用方法相對有限，其中固化是一種常見的處理方式，它能將放射性廢棄物與環境隔離。固化過程中主要使用的材料是卜特蘭水泥，因其具有優異的力學性質、低氣體和液體滲透性、製作容易、成本低廉且有效阻隔輻射而被廣泛應用[1]。使用水泥固化高放射性廢料，可以減少廢料體積和所需儲存空間[2]。不過，多項研究顯示，核廢料釋放的γ射線會破壞水泥漿中的水分子，釋出氫氣，進而導致材料本身裂解和因氫氣累積產生的壓力破壞漿體[3, 4]。如何改善此問題，為處理核廢料面臨的挑戰之一。

另一方面，功能性梯度材料(FGM, functionally graded materials)係指一種具有連續性性質變化的材料，因此可依應用需求，設計依方向所需的性質改變[5]。與傳統單相材料相較，FGM 有許多優點[6]，包括：

(1) FGM 可用來接合兩種不同的材料，由於性質漸

變故可增加結合力。

(2) FGM 接合或披覆可用來降低材料的殘餘應力及熱應力。

(3) FGM 披覆可用來降低材料的表面應力及端點應力(endpoint stress)。

(4) FGM 披覆可降低開裂應力。

另一方面，電滲法自 1930 年代起即用於大地工程來排除黏土層的水以改善地質[7]。由於水本身為極性分子，在外加直流通電的過程中，土壤中的水分子受到電場的牽引往負極移動，最終的效果即是排水，造成土壤壓密，增加承載力[8]。然而，過去的研究發現，於水泥基材中，使用電滲法並不能造成排水，但仍可造成漸變性質[9]。於水泥漿體中，微弱的外加直流電流可促使兩電極附近的離子移動，因而改變兩電極附近的水化反應，造成兩端強度高而中間低的漸變性質[9, 10]。

另一方面，混凝土普遍用於固化核廢料，尤其低放射性核廢料桶內須澆置混凝土。放射性核素在高鹼性環境中容易被水泥表面吸附[11]。無機化合物，如氯化物和硫酸鹽等，可影響水泥的水化反應並進而影響漿體長期穩定性。這些交互作用會受到廢料組成、水泥類型、固化條件以及添加劑等因素而影響，突顯了廢料固化與穩定性的重要性[12]。我國核能電廠營所產生的低階放射性固體廢棄物可概分為濕性與乾性廢棄物兩類，前者包括廢樹脂、廢液濃縮液以及淨化水系統所產生的過濾殘渣，皆採與水泥混合進行固化的方式處理，而後者為維護、輻防、除污作業或運轉等過程中受污染之廢紙、衣物、手套、工具、零組件與設備等，皆以焚化或壓縮方式處理[13]。因此，若能使用具漸變性質的水泥基材，開發新型容器，甚至用於高放射性核廢料儲存，則因外層具有較高的強度及較低的孔隙率，因此可能具有較高的耐久性，抵禦因金屬外殼腐蝕而入侵的有害離子。內部則因具有漸變性質，可容納長時間核衰變所釋放的熱與氫氣所造成的壓力。整體而言，應可有效延長使用壽命，降低使用成本與風險。

本研究旨在探討利用功能性梯度水泥基材固化放射性廢物的可行性，研究目標可進一步細分為以下幾點：

(1) 探討製作功能性梯度水泥基材所需的電滲條件。

(2) 測試功能性梯度水泥基材的抗壓強度。

(3) 探討功能性梯度水泥基材的滲透性。

與以往研究中僅製作小型長柱試體不同，本研究首次嘗試製作大型圓盤型試體，以模擬未來可能的實際應用。

II. 主要內容

本研究之試驗參數，依電滲灌漿的原理來推估可能的效果並訂定各項變數，如表 1 所示，分為材料變數及量測變數。過程中主要製作水灰比 0.6 之水泥砂漿試體，細粒料之用量是以 ACI 配比設計法計算出普通混凝土配比後，再以細粒料體積取代全部粗粒料。後續為探討電滲於混凝土的成效，使用混凝土配比，估算粗粒料體積為 59.6 %，試驗配比如表 2 所示。

本研究利用電滲原理，使試體於水化早期階段改變結構，以此達到功能性梯度效果。試體的拌合步驟參考 CNS 61，灌製試體後，通電所埋入的電極，通電至預定時數後，斷電並於灌漿後 24 小時內拆模取出，並將試體放置於飽和石灰水中養護。

為進行電滲試驗，本研究將鈦網放置於圓盤模具內緣，鈦網與水管距離 2.5 cm，銅棒放置於漿體正中心，鈦網連接正極，銅棒連接負極，如圖 1 所示。漿體拌合完成後，將鈦網以不織布包覆並放置於水管模具內緣，並將漿體倒入模具，把銅棒插於試體正中央後通電，如圖 2 所示。矩形長柱試體通電時，則兩端皆為鈦網，如圖 3 所示。

後續依照 ASTM C109 進行抗壓試驗，於預定齡期，將試體鑽心取樣，總共取樣 9 顆，取樣位置分成內、中、外各 3 組，內圈試體圓心距離圓盤試體中心 45 mm，外圈試體圓心距離圓盤試體中心 155 mm，中圈試體距離圓盤試體中心 100 mm，如圖 3 所示。

本研究亦參考 ASTM C1585 量測鑽心試體之吸水率與吸水速率，使用熱燈絲掃描式電子顯微鏡進行微觀分析，使用 BRUKER 公司所生產之 D2 PHASER X 光繞射儀(D2 PHASER X-ray Diffractometer)進行 X 光繞射分析，以感應電漿層析法(ICP, inductively coupled plasma mass spectrometry)測定樣品水溶液中的離子種類與濃度。

表 1 試體變數表

試驗變數	變數值
水灰比	0.5、0.6
試體尺寸	柱狀(長度 300 mm)、圓盤(直徑 400 mm、600 mm)
粗粒料體積比	0%、59.6%
外加電流	0.05 A、0.10 A、0.10 A
通電時間	4 hrs、8 hrs、12 hrs

表 2 砂漿及混凝土配比設計(SSD，kg/m^3)

水灰比	拌合水	水泥	粗粒料	細粒料	強塑劑
0.6	217	333	0	1700	2.0
0.6	218	333	1034	701	0
0.5	217	400	0	1644	2.5

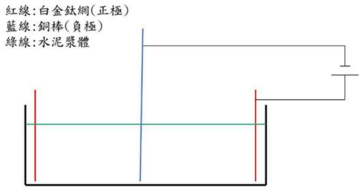


圖 1 試體製作示意圖



圖 2 圓盤試體實際通電架設圖

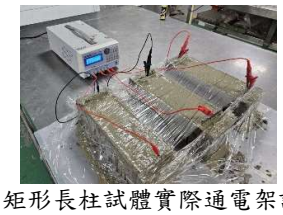


圖 3 矩形長柱試體實際通電架設圖

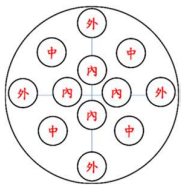


圖 4 試體鑽心位置示意圖

III. 結果與討論

在不同外加電流條件下，抗壓強度的變化如圖 5 所示。結果顯示，外加電流確實能夠改變試體不同部位的抗壓強度，進而形成功能性梯度材料，後續以 0.1 A 作為通電電流並進行多數各項試驗。

在通電 0.1 A 時，抗壓強度與通電時間的關係如圖 6 所示。結果顯示，通電時間的長短亦影響強度的差異。大致而言，通電時間越長，兩極間的強度差異越大，但同時各極處的試驗值變異性也增加，因此判斷通電時間 8 小時為較佳的選擇。綜合結果，以通電電流 0.1 A、通電時間 8 小時為適當，可兼顧平均強度的要求、兩極強度的變化及通電的操作性。

不同水灰比下的試驗結果如圖 7 所示，當水灰比 0.5 時，平均抗壓強度高於水灰比 0.6，通電亦可造成兩極強度高、中間強度的效果。然而，在低水灰比下，試驗值的變異性增加。

比較長柱狀與圓盤狀試體的試驗結果。如圖 8 所示，可發現兩者皆可造成功能梯度的效果，雖長柱狀的強度較為明顯，但若相較於整體抗壓強度而言，圓盤試體較有效率。於圓盤試體中，由於電流由外環側向中心集中，電流密度高，因此推測可加強通電的效果，但有待進一步探討該通電造成強度下降的原因。

吸水率試驗的結果如圖 9 所示，可發現，不論是空白組或是實驗組，陰陽極及中間段的吸水率皆差異不大，亦即此時抗壓強度的變化與孔隙率似乎並無相關性。換言之，孔隙率並非控制通電試體強度的主要因素。另一方面，吸水速率可反應試體的連通孔隙。結果如圖 10 所示，兩極的吸水速率明顯高於中間段的鑽心試體，大約於浸置 3 小時後，吸附速率趨於穩定，其後隨著浸置時間的增加，吸水量緩慢增加。吸水速率與吸水率試驗的結果不完全一致，亦即吸水率的試驗結果顯示兩極與中間段並無明顯差異，但吸水速率的試驗結果顯示兩極的吸水速率及吸水量高於中間。整體而言，孔隙率與孔隙率試驗的結果並無法說明為何兩極的抗壓強度較中間段高，抗壓強度與孔隙的量與分布似乎無明確關係。

掃描式電子顯微鏡觀測僅反應相當小區域的微觀結構，因此無法據此判斷整體孔隙的多少，但由兩極照片中出現的水化產物可判斷，似乎電滲改變水化過程，亦即改變膠結材的性質。X 光繞射試驗可分析試體各處的成分相，結果如圖 11 所示。兩極與中間段皆含有多量的二氧化矽和碳酸鈣，兩者來自於細粒料。在繞射峰 2θ=8.9°及 12.5°，陰極呈現較中間段較高的峰值。陽極的繞射峰強度雖然與中間段的差不多，但若以二氧化矽強度當作參考，可以推測兩峰高的比例較中間段高。此兩繞射峰與水泥水化有關，因此電滲應可改變水化過程，進而改變漿體的成分。

由於電滲作用在非常早期水化的漿體，主要影響孔隙水溶液中離子的移動，因此於通電後，將漿體不同部位的漿體取樣，檢測其中離子的濃度，試驗結果如表 3 所示。就通電漿體而言，離子的分布發生變化。相對於中間段，在陽極處，具有較低的鉀、鈉、鋁、矽離子，但具有較高的鈣離子。在陰極處，具有最高的鉀、鈉離子，較低的鈣、鋁離子。說明電滲可改變膠體的組成，進而造成強度的變化。進一步而言，兩極處的水化產物變化不盡相同。

表 3 離子濃度表

Sampling Location	Elements (ppm)				
	K	Na	Ca	Al	Si
未通電試體					
Anode	146.5	25.13	31.77	0.45	2.85
Middle	148.3	24.67	32.29	0.43	2.80
Cathode	149.18	26.11	33.16	0.58	2.94
通電試體 (w/c=0.6、0.10 A、8 小時)					
Anode	24.44	17.72	47.99	1.04	2.78
Middle	148.62	28.61	33.8	1.67	3.78
Cathode	193.22	30.94	29.36	1.28	3.12

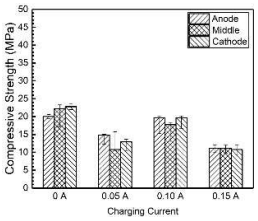


圖 5 抗壓強度與通電電流之關係圖(水灰比 0.6、通電時間 8 小時、養護 7 天)

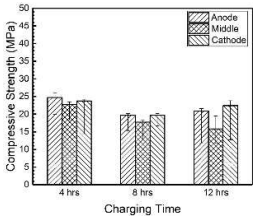


圖 6 抗壓強度與通電時間之關係圖(水灰比 0.6、通電電流 0.10 A、養護 7 天)

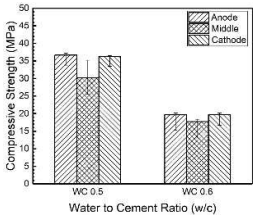


圖 7 抗壓強度與水灰比之關係圖(通電電流 0.10 A、通電時間 8 小時、養護 7 天)

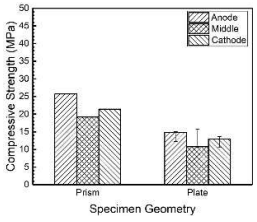


圖 8 抗壓強度與試體幾何形狀之關係圖(水灰比 0.6、通電電流 0.05 A、通電時間 8 小時、養護 7 天)

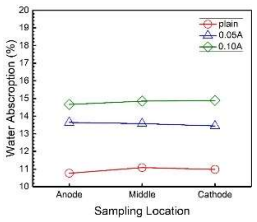


圖 9 吸水率與試體取樣位置之關係圖(水灰比 0.6、通電電流 0.10 A、通電時間 8 小時、養護 7 天)

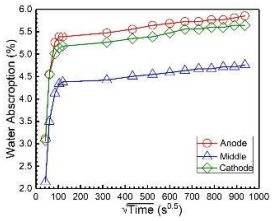


圖 10 吸水量與時間之關係圖(水灰比 0.6、通電電流 0.10 A、通電時間 8 小時、養護 7 天)

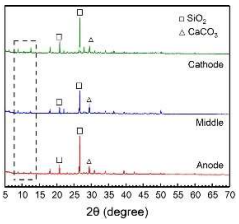


圖 11 X 光繞繞射圖譜(水灰比 0.6、通電電流 0.10 A、通電時間 8 小時、養護 7 天)

IV. 結論

本研究利用電滲改質水泥基材料，主要測試圓盤砂漿試體。根據試驗結果，所得的主要結論包括：

(1) 通電降低平均抗壓強度。

(2) 在水灰比 0.6、通電電流 0.10 A、通電時間 8 小時的通電條件時，可得到兩端抗壓強度高、中間強度的性能漸變試體，且強度較未通電時下降不多。

(3) 水灰比降低至 0.5 時，雖然兩端與中間段仍有強度差異，但變化的比例較小。

(4) 試體的幾何尺寸亦是影響強度差異的重要因子，圓盤試體的平均強度較長柱狀試體低,但強度差異與平均抗壓強度的比值較高。當圓盤尺寸由直徑 400 mm 提高到 600 mm 時，在前述的通電條件下則未見強度差異。

(5) 若添加粗粒料時，則未見強度差異。

另一方面，本研究亦嘗試探討造成強度漸變的機理。結果發現，吸水率與吸水速率並無法解釋強度變化，說明該強度漸變並非源於孔隙的變化。相對而言，根據 X 光繞射分析及孔隙水溶液的離子種類與濃度分析的結果，在試體的兩端有較多的水化成分相，同時推測強度與鈣、鋁離子的變化有關。

本研究的結果說明，透過電滲法能夠製造出尺寸至少可達 400 mm 以上的水泥基功能性梯度材料。後續研究可探討更大尺寸試體適用的通電條件，亦可探討應用方向，如實際測試其抗輻射能力。除了可用於固化低階放射性固體廢棄物外，也可應用於其他廢棄物的固化處理。特別當所需固化的廢棄物可能分解而釋放有害物質或具有膨脹性質時，該材料的漸變特性可望減緩這些物質的擴散速率和抑制膨脹，從而提高整體的耐久性。

參考文獻

[1] Li, J., Chen, L. and Wang, J. (2021). "Solidification of radioactive wastes by cement-based materials." Progress in Nuclear Energy 141: 103957.

[2] Varlakov, A. P., Kapustin, V. V., Varlakova, G. A., Zherebtsov, A. G., Petrov, V. A., Shirshin, E. N. and Kalmykov, S. N. (2018). "The effect of radiation doses typical for high-level waste on the properties of the cement matrix." Radioact. Waste: 63-68.

[3] Bykov, G. L., Gordeev, A. V., Yurik, T. K. and Ershov, B. G. (2008). "Gas formation upon γ-irradiation of cement material." High Energy Chemistry 42(3): 211-214.

[4] Chartier, D., Sanchez-Canet, J., Bessette, L., Esnouf, S. and Renault, J. P. (2018). "Influence of formulation parameters of cement based materials towards gas production under gamma irradiation." Journal of Nuclear Materials 511: 183-190.

[5] Liu, G. R., Han, X., Xu, Y. G. and Lam, K. Y. (2001). "Material characterization of functionally graded material by means of elastic waves and a progressive-learning neural network." Composites Science and Technology 61(10): 1401-1411.

[6] Erdogan, F. and Wu, B. H. (1997). "The Surface Crack Problem for a Plate With Functionally Graded Properties." Journal of Applied Mechanics 64(3): 449-456.

[7] Bruell, C. J., Segall, B. A. and Walsh, M. T. (1992). "Electroosomotic removal of gasoline hydrocarbons and TCE from clay." Journal of Environmental Engineering 118(1): 68-83.

[8] Mohamedelhassan, E. and Shang, J. (2001). "Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis." Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement 5(1): 3-11.

[9] 陳君弢 (2019). "以電滲法製作功能性梯度水泥基膠結材研究." 科技部補助專題研究計畫成果報告.

[10] Chen, C.-T. and Wang, Y.-S. (2022). Cement-based cementitious material and its formation method, US Patent no.: 11,492,297.

[11] Spence, R. D. (1992). Chemistry and microstructure of solidified waste forms, CRC Press.

[12] Shajan, A. M., Piska, R. and Natarajan, S. (2024). "Study of mixed-mode fracture in functionally graded material using an adaptive phase-field fracture model." Composite Structures 327.

[13] 林竑修 (2008). "核二廠低放射性固體廢棄物減量措施與成效." 臺電核能月刊 302: 44-52.

低污染放射性廢棄物表面劑量率與核種活度之特性研究
Study of surface dose rate and radionuclide activity of low-contaminated radioactive waste

計畫編號：NSTC　112－2623－E－A49－009－NU
計畫主持人：吳杰
e-mail: iamjaywu@gmail.com
計畫參與人員：吳昌蔚
執行單位：國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

核電廠除役的過程中會產生大量的低污染放射性廢棄物，建立準確的低污染放射性廢棄物表面量測技術，可對廢棄物進行分流管理，發揮資源再利用，以減少核能後端廢棄物處置的社會成本與環境影響。本計畫第二年延續第一年完成的低活度廢棄物表面污染快篩量測程序之成果，進一步精進量測不確定度，透過加入現場量測的需求條件，綜合性考量輻射種類與能量、污染物質種類、材質、厚度與面積、以及度量儀器之幾何、效率等影響因子，完成建立具特異性的絕對效率校正因子，可達到更具精準性的量測品質。研析國際間輻射量測作業與廢棄物分類檢整技術之原理與方法，提供主管機關作為解除管制量測技術與品質保證之參考依據。

關鍵詞：除役、放射性廢棄物、解除管制、蒙地卡羅模擬。

Abstract

During decommissioning of nuclear power plants, a large amount of low-contaminated radioactive waste will be produced. To achieve resource reuse and reduce the social cost and environmental impact of nuclear back-end waste disposal, it is necessary to confirm that the clearance level is met before the waste is released. In the second year of this project, the rapid screening measurement procedure for surface contamination of low-activity waste is further improved for accuracy. By adding the requirements for on-site measurement, comprehensive consideration of the influence factors such as radiation type and energy, contaminated waste type, material, thickness, and area, as well as the geometry and efficiency of the measuring instrument is added to decrease the measurement uncertainty. The specific absolute efficiency database can be established, which can achieve more accurate measurement quality. The results of this project can be applied to waste sorting and measurement operations in decommissioning, providing a reference for regulatory measurement techniques and quality assurance.

Keywords: decommission, radioactive waste, clearance, Monte Carlo simulation.

I. 前言

國內核電廠紛紛進入除役階段，需要安全可靠的方法來處置放射性廢棄物及復原場址，又因放射性物質處理與最終處置的成本昂貴，且目前國內仍無法找到低放射性廢棄物最終處置場址，故透過精準的偵檢儀器量測以進行除役廢棄物的分類管理是核電廠除役所需面對的重要技術課題。國際原子能總署(IAEA) TSR-462 號報告[1]提供了除役低活度廢棄物的物流管理技術細節，建議除役廢棄物之可忽略劑量安全標準為每年 0.01 毫西弗，在此安全原則下，可無限制條件釋出廢棄物，以進行再循環、再利用或送往掩埋；以德國的除役案例經驗為例，可無條件外釋的廢棄物數量高達全部除役廢棄物的 90%以上[2]。惟考量除役所面臨的複雜量測條件，以及現今輻射污染偵測儀器的日新月異，不同污染偵檢器偵測效率的差異可達六倍以上，實有必要深入研究更具特異性的量測程序與更具精準性的量測品質。

II. 主要內容

基於探討低污染放射性廢棄物表面劑量率與核種活度之特性研究，本計畫研究除役低污染廢棄物現地量測作業程序與國際案例，探討國際案例如何依據欲達成的離廠解除管制標準、儀器量測的行動水平，研訂各項污染偵檢作業方式，並研析在量測過程中如何設定量測程序，以及建立 DQO 以處理量測不確定度的方法準則。接著使用電腦斷層(Computed Tomography, CT)獲取表面污染偵檢器的詳細幾何與材質，並透過 MCNP 程式建立表面污染偵檢器之模型，以評估光子與電子連續能量下的絕對效率，並與實際表面污染假體的量測值進行比對，降低偵檢器的固有不確定度，透過蒙地卡羅模擬技術，建立不同輻射種類與能量、射源體種類、材質、厚度與面積、以及不同量測幾何的絕對效率，對於快速且準確的計算除役廢棄物活度並與外釋清潔標準進行比對，建立一套更具精準性量測品質的偵檢器特異性量測程序，並利用本實驗室所具備的 RadEye-B20 表面污染偵檢器為技術成果展示，建立除役低污染廢棄物現地量測之絕對效率資料庫，如此，可擴展表面污染偵檢器絕對效率的廣泛性與通用性，使偵檢器的量測程序更具精準的品質。

III. 結果與討論

在偵檢器模型建立上，我們使用超高解析度 CT (AquilionPrecision, Canon Medical Systems, Otawara, Japan)以獲取表面污染偵檢器(RadEye B20)的幾何，所使用的管電壓為 135 kVp、管電流為 450 mA、掃描一圈時間為 0.35 s、掃描螺距為 0.5，並利用疊代影像重建法進行影像重組，XY 解析度為 0.25 mm × 0.25 mm、矩陣大小為 2048 × 2048、切片厚度為 0.234 mm，擷取一台

表面污染偵檢器的 CT 影像可產生共約 5000 張影像。接著利用體積描繪法進行三維成像，如圖 1，利用 CT 影像工作站分析偵檢器各元件的尺寸，包括：濾片、偵檢窗、氣腔、電極、屏蔽等，並利用化學計量校準法將 CT 值轉換為有效原子序與密度。有了上述的參數後，依據各元件的尺寸建立 MCNP 輸入檔中的表面卡與體積卡，以完成表面污染偵檢器的模型建置。

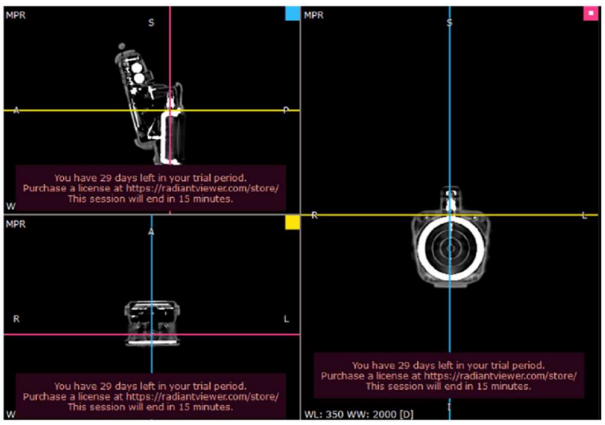


圖 1 本計畫以 UHRCT 進行表面污染偵檢器的幾何擷取與建模，並使用化學計量校準法評估偵檢器材質的有效原子序與密度

以蒙地卡羅方法進行 RadEye B20 表面污染偵檢器之模型建立如圖 2，其中偵檢器氣腔的厚度為 1.2 cm、填充氖氣，濾片為 6 μm 雲母，氣腔周圍包覆 0.6 cm 的鎢，基材分別為空氣、水、鋁、水泥、鐵、銅，尺寸為 20 × 20 cm2 、厚度為 1 cm。表面污染射源位於表面 0.1 mm 之區域，體污染射源則均勻分布於 1 cm 的基材之中。

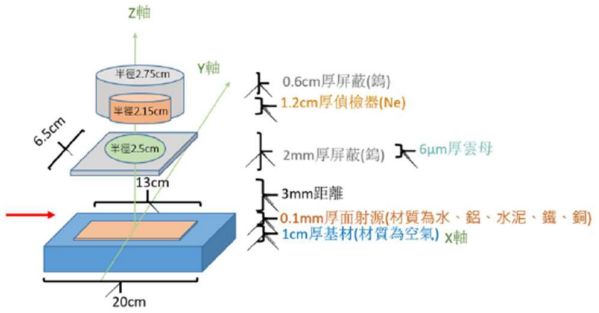
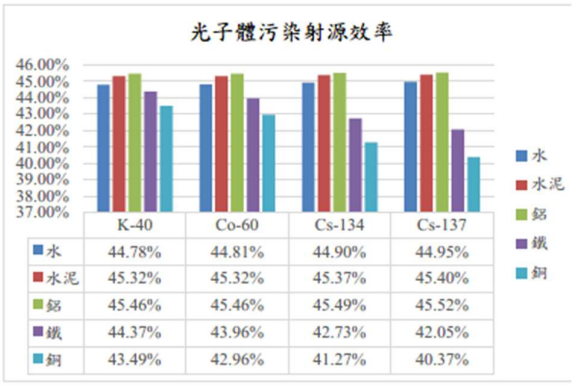
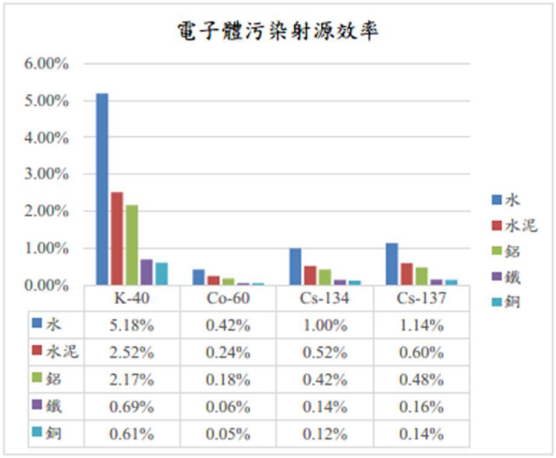


圖 2 以蒙地卡羅方法進行 RadEye B20 表面污染偵檢器之模型建立

我們利用 RADAR 資料庫，建構了 K-40、Co-60、Cs-134、Cs-137 的射源項，除了考慮核種所發出的瞬發加馬光子，亦考慮其貝他衰變時所放出連續能量的電子能譜。表面污染的射源效率、儀器效率與儀器反應結果請見期末報告。在體污染的射源效率方面，如圖 3，由於射源體對於高能光子的作用與衰減較少，因此，僅在 Cs-134、Cs-137 與高原子序的基材下，如鐵、銅，才能觀察到顯著射源效率的降低。在貝他粒子的射源效率方面，射源效率都低於 5%，主要的原因為貝他輻射的射程無法穿過 1 cm 的基材，隨著貝他粒子能量的上升射源效率逐漸上升，而隨著基材原子序的上升射源效率逐漸下降。



	K-40	Co-60	Cs-134	Cs-137
水	44.78%	44.81%	44.90%	44.95%
水泥	45.32%	45.32%	45.37%	45.40%
鋁	45.46%	45.46%	45.49%	45.52%
鐵	44.37%	43.96%	42.73%	42.05%
銅	43.49%	42.96%	41.27%	40.37%



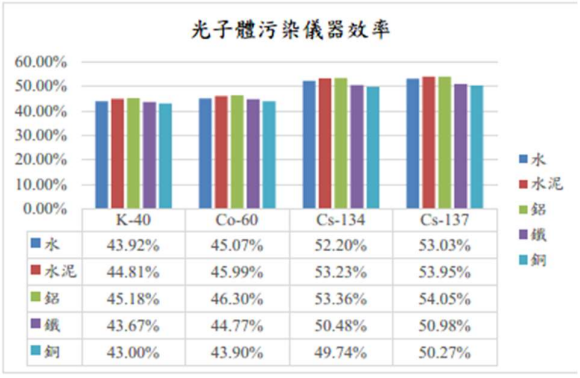
	K-40	Co-60	Cs-134	Cs-137
水	5.18%	0.42%	1.00%	1.14%
水泥	2.52%	0.24%	0.52%	0.60%
鋁	2.17%	0.18%	0.42%	0.48%
鐵	0.69%	0.06%	0.14%	0.16%
銅	0.61%	0.05%	0.12%	0.14%

圖 3 水、水泥、鋁、鐵、銅的射源效率，所模擬之射源項包括：K-40、Co-60、Cs-134、Cs-137

體污染的儀器效率如圖 4，基材的原子序對於儀器效率沒有顯著的影響，而光子能量越高則儀器效率越低，主要的原因為高能光子與偵檢器腔的作用機率下降所致。而在電子的儀器效率方面，隨著貝他粒子能量的上升，儀器效率隨之上升，主因為高能電子的射程較長，進入氣腔的粒子數上升所導致。體污染的儀器反應如圖 5，在考量了貝他與光子的貢獻後，可以發現 Co-60 所造成的絕對效率最低，約為 45%，而 Cs-134 與 Cs-137 的絕對效率最高，約為 52%。總體而言，除役期間常見貝它衰變且會放出瞬發光子的放射性同位素其體污染的絕對效率約為 50%，差異並不顯著。

為了確認所模擬儀器反應的正確性，我們分別使用 3 g、5 g、7 g 的 KCl 進行表面污染的實務驗證，我們將 KCl 均勻平鋪於 13x13cm^2 的木板上，K-40 的標準活度分別為 48 Bq、80 Bq、112 Bq，如圖 6，所量測的記數率分別為 2.4、3.25、3.55 cps，並使用 60%做為儀器反

應，所求得的射源活度與標準活度如表 1，三者的比值分別為 0.98、0.79、0.62，可以發現隨著 KCl 的活度增加，量測結果逐漸低估，可能的原因為 KCl 射源表面平鋪不均勻，導致 KCl 相互堆疊而產生自衰減，此外，實驗時為了避免偵檢器與 KCl 顆粒產生接觸，量測距離會隨著 KCl 的增加逐漸大於 3 mm，進而造成低能量貝他粒子被大幅衰減，而無法貢獻於計數率。因此未來實有必要針對不同的量測距離進行儀器反應的優化。



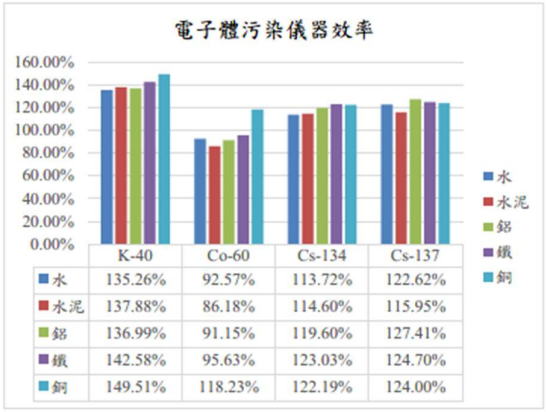


圖 4 水、水泥、鋁、鐵、銅的儀器效率，所模擬之射源項包括：K-40、Co-60、Cs-134、Cs-137

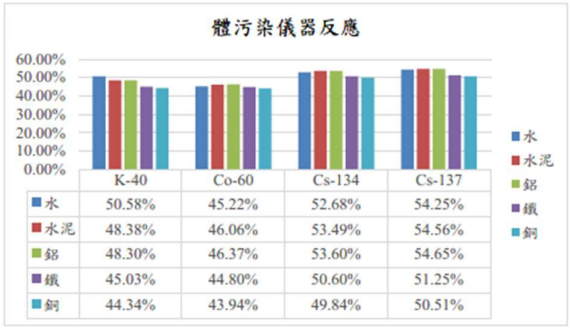


圖 5 水、水泥、鋁、鐵、銅的儀器反應，所模擬之射源項包括：K-40、Co-60、Cs-134、Cs-137



圖 6 表面污染實驗驗證

表 1 表面污染實驗驗證結果

KCl (克數)	標準活度(Bq)	計算活度(Bq)
3	48	47
5	80	63
7	112	69

IV. 結論

本計畫延續第一年完成的低活度廢棄物表面污染快篩量測程序之成果，基於探討低污染放射性廢棄物表面劑量率與核種活度之特性研究，進一步探討除役低污染廢棄物量測作業程序與國際案例研究，協助建立除役計畫應考量解除管制的輻射特性技術指導，以及如何實際執行量測，並具備紀錄文件完成量測報告，以獲取監管機關的許可批准。本計畫亦參考國際文獻，考量實務面量測所面臨的條件與環境，使用電腦斷層獲取表面污染偵檢器的詳細幾何與材質，並透過 MCNP 程式建立表面污染偵檢器之模型，以評估光子與電子連續能量下的絕對效率，並與實際表面污染假體的量測值進行比對，降低偵檢器的固有不確定度。同時亦建立放射性廢棄物表面量測之絕對效率分析技術，擴展表面污染偵檢器絕對效率的廣泛性與通用性，透過蒙地卡羅模擬技術，建立不同輻射種類與能量、射源體種類、材質與厚度，以及不同量測幾何的絕對效率，並利用本實驗室所具備的 RadEye-B20 表面污染偵檢器為技術成果展示與實務驗證，希冀本計畫發展之除役低污染廢棄物現地量測之絕對效率資料庫，可擴展表面污染偵檢器絕對效率的廣泛性與通用性，使偵檢器的量測程序更具精準的品質。

參考文獻

[1] Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA Technical Reports Series No.462, International Atomic Energy Agency (IAEA), March 2008.

[2] The EnBW Strategy for Decommissioning and Dismantling of Nuclear Power Plants, 40th MPA seminar, Stuttgart, 6th & 7th October 2014.

除役容器超厚熱浸鍍鋅層的安定性評估：鋼底材矽含量對熱浸鍍鋅鍍層破裂及腐蝕行為的影響
The effect of silicon content in steel substrates on the cracking and corrosion behavior of the galvanized coatings

計畫編號：NSTC 112-2623-E-011-002-NU
計畫主持人：王朝正
e-mail：cjwang@mail.ntust.edu.tw
計畫參與人員：謝祐原、曾佩馨
執行單位：國立臺灣科技大學機械工程學系

摘要

本研究使用含矽 0.17 wt. %的 A36 低碳鋼和極低矽(0.001 wt. %)的 SPCC 低碳鋼為底材，於 450 °C 進行熱浸鍍鋅，搭配不同熱浸鍍時間獲得 50 μm 及 100 μm 之鍍層。透過 SEM 和 EDS 分析不同鍍層結構截面形貌，並透過微硬度測試各相的硬度。試片進行 5° ~ 20°的彎曲試驗。以 OM 分析鍍層結構的裂紋生長機制和鍍層厚度對裂紋生長的影響。最後，進行腐蝕試驗比較並觀察鍍層經彎曲後的腐蝕特性。結果顯示，增加 Delta 相厚度能承受更高殘餘應力，降低初始裂紋密度。當受力應變量超過降伏，將以擴張原有裂縫之方式達成變形。A36 鋼的鍍層附著性差，裂紋易偏轉至底材與鍍層界面，成為腐蝕通道，導致鍍層剝落。

關鍵詞：熱浸鍍鋅、彎曲試驗、破裂機制、耐蝕性。

Abstract

This study utilized silicon-containing A36 low-carbon steel (0.17 wt.% Si) and extremely low-silicon SPCC low-carbon steel (0.001 wt.% Si) as substrates, subjected to hot-dip galvanizing at 450 °C with varying coating thicknesses of 50 μm and 100 μm based on different immersion times. The cross-sectional morphology of the coatings was analyzed through SEM and EDS, and the hardness of individual phases was assessed using microhardness testing. Bending tests were conducted at 5° to 20°, and optical microscopy (OM) was employed to analyze the crack propagation mechanisms and the influence of coating thickness on crack growth. Finally, corrosion tests were conducted to compare the corrosion resistance of the coatings after bending. The results revealed that increasing the thickness of the Delta phase enhanced the ability to withstand higher residual stresses and reduced initial crack density. When the strain exceeds the yield point, deformation is achieved through the expansion of existing cracks. The adhesion of the A36 steel coating was poor, with cracks tending to deflect towards the substrate-coating interface, serving as corrosion pathways and leading to coating delamination.

Keywords: hot-dip galvanized; bending test; crack mechanism; corrosion resistance.

I. 前言

臺灣位於亞熱帶地區，所處的氣候特徵為高溫、高濕，並且受到海島型氣候的影響，同時伴隨著高度的鹽分，又因為工業發展蓬勃以及車輛數量的急劇增加，使環境更為惡劣。根據國際標準組織的 ISO 9223 大氣腐蝕環境分類準則，依照腐蝕率由慢至快分為 C1 至 CX 等級。臺灣多數沿海地區已經達到了年腐蝕率介於 80 μm/yr 與 200 μm/yr 之間的 C5 等級，一些區域甚至到達了年腐蝕率超過 200 μm/yr 的 CX 等級。這些極端環境條件使得金屬結構和設施更容易受到腐蝕，從而降低結構的強度、耐久性和安全性。保護金屬材料免受腐蝕損害對於確保台灣的建築、運輸、工業等領域的可持續發展至關重要。

由於鋅的電位低於鐵，在鐵鋅的加凡尼組合中，鋅為陽極，擔任犧牲陽極的角色，即便鋅發生了腐蝕，在一般環境中可以生成具保護性的鹼性碳酸鋅，因此鋼構件鍍鋅後的防蝕效能變優於裸鋼。鋅可以透過多種方法於鋼材表面防蝕，常見以鋅為防蝕方式的工法有熱浸鍍鋅 (hot dip galvanized)、熱噴塗鋅 (thermal spray)、電鍍鋅 (electro galvanizing)以及冷鍍鋅 (cold galvanizing)，每種工法都有適用的情況。對於大型的鋼構，熱浸鍍鋅製程最常被使用。

一般大型的鋼構會依照設計形狀製造完成後再予以熱浸鍍鋅，鋼捲等形狀簡單的工件則會在鍍鋅後，依照所需的形狀在條件範圍內加工彎曲[1]。若在加工過程中導致鍍層開裂，腐蝕因子得以沿破裂處侵入，進而影響到耐蝕性，會使鍍鋅鋼構的使用年限下降。

然而，在一般鍍鋅產業中，鋼種的選擇通常並非由鍍鋅廠所決定，而是取決於原材料供應商所提供的鋼材，而鋼材中微量元素又會影響到鍍鋅層的品質，其中影響最大的為鋼材中的矽。碳鋼中的矽，會造成介金屬化合物急遽增長[2, 3]，影響後續加工性。在熱浸鍍完成後鍍層中就已存在裂紋[3,4]，承受應力時裂紋向鍍層外擴展，如果在加工過程中導致鍍層中出現貫穿裂紋，進而影響到耐蝕性，會使鍍鋅鋼構的使用年限下降，甚至可能造成工安意外。

為了評估熱浸鍍鋅鋼的加工性和加工後的耐蝕性，本研究選用含 0.17 wt.%矽之 ASTM A36 低碳鋼以及極低矽之 0.001 wt.%矽 SPCC 作為底材，採批次式熱浸鍍鋅工法，探討熱浸鍍鋅鍍層在彎曲應力下的破裂機制，以及彎曲後鍍層的腐蝕特性。

II. 主要結果與討論

2.1 鍍鋅層顯微結構

本研究所使用之鋼材經光譜分析儀之成分分析表1。圖 1 為 SPCC 低碳鋼經熱浸鍍鋅 3 分鐘之截面形貌。透過 EDS 成分分析與搭配鐵鋅相圖比對分析，SPCC 低碳鋼之鍍層組成由鍍層往鋼底材方向可分為 Eta (η)相、Zeta (ζ)相、Delta (δ)相與 Gamma (Γ)相。SPCC 低碳鋼鍍層之 Delta 相與 Zeta 相的硬度經量測分別為 285 ± 5 HV 以及 118 ± 4 HV 圖 2(a)為 SPCC 低碳鋼經熱浸鍍鋅 3、15 與 30 分鐘之鍍層各相厚度折線圖，由於 Gamma 相極薄，通常只有 1～2 μm 且厚度不隨時間增加，因此 Gamma 相的厚度未予量測。鍍層中的 Delta 相與 Zeta 相的厚度均隨熱浸鍍時間而增加，由圖中可以觀察到 Zeta 相在 15 分鐘到 30 分鐘的熱浸鍍鋅時間，厚度只有些微增加；而 Delta 相則呈現較線性的成長，因此在長時間的熱浸鍍鋅時間，Delta 相為主要成長相。此外，Delta 相又被分成兩種形貌，靠近 Zeta 相為柵欄狀 的 $Delta_{1p}$ 相以及靠近底材為緻密的 $Delta_{1k}$ 相[5]。

圖 3 為含 0.17 wt. %矽之 A36 低碳鋼經熱浸鍍鋅 3 分鐘之截面形貌。透過 EDS 成分分析與搭配鐵鋅相圖比對分析，A36 低碳鋼之鍍層組成由鍍層往鋼底材方向可分為 Eta (η)相、Zeta (ζ)相、Delta (δ)相，但沒有 Gamma (Γ)相。A36 低碳鋼鍍層之 Delta 相與 Zeta 相的硬度經量測分別為 309 ± 18 HV 以及 138 ± 22 HV，相比於 SPCC 鋼鍍層，硬度有些增加。圖 2(b)為 A36 低碳鋼經熱浸鍍鋅 3、15 與 30 分鐘之鍍層各相厚度折線圖，由圖中可以觀察到 A36 鋼鍍層中 Zeta 相的厚度比起 SPCC 鋼鍍層的 Zeta 相成長更快，而 Delta 相的厚度則與 SPCC 鋼鍍層之 Delta 相厚度相近。根據對含矽合金鋼熱浸鍍鋅的文獻指出[3]，矽原子會在熱浸鍍過程中，與鐵同時外擴散並聚積於底材表面，底材表面矽的濃度隨熱浸鍍時間增加而上升。因 Zeta 相無法於矽濃度較高的底材表面成核，此一現象使 Zeta 相於矽濃度較低之熔融液態鋅中成核生長。隨著矽持續溶出，矽原子從 Delta 相擴散至 Zeta 相，因 Zeta 相對矽的溶解度非常低，過飽和的矽排出於晶界處，因固/液表面能的變化，使得外部的液態鋅滲入 Zeta 相之中。因此 Zeta 相變為柱狀晶粒的形貌，柱狀晶粒之間的間隙成為液態鋅流入的通道，液態鋅可以直接與底材反應，加快交互擴散的速率，使得 Zeta 相成長加速。

根據文獻提及，鋼底材熱膨脹係數為 11.3 (10^{-6} K^{-1})，各鐵鋅介金屬相熱膨脹係數分別為：Zeta 相為 23.0 (10^{-6} K^{-1})、$Delta_{1k}$ 相為 21.8 (10^{-6} K^{-1})、Eta 為 29.3(10^{-6} K^{-1})[6]。因此鋼底材與鐵鋅介金屬相之熱膨脹係數存在差異，於鍍層中產生殘留張應力。造成試片於空冷過程，在殘餘張應力作用下，鍍層中較硬脆的 Delta 相無法塑性變形而破裂，於鍍層中產生初始裂紋，如圖 4。因 Delta 相的硬度最高，當它的厚度增加，更能夠承受殘餘應力而不至開裂。因此當 SPCC 鍍層的 Delta 相厚度由 9.1 μm 增加至 50.7 μm 時，初始裂紋密度由 11 mm^{-1} 降至 8.5 mm^{-1}；A36 鍍層的 Delta 相厚度由 6 μm 增加至 9.5 μm 時，初始裂紋密度則由 21 mm^{-1} 降至 11.5 mm^{-1}。故 Delta 相厚度增加，熱浸後的初始裂紋密度較低。

2.2 彎曲試驗

2.2.1 鍍層破裂行為觀察

根據 2.1 節，鍍層在熱浸鍍完成冷卻過程中，因為熱膨脹係數的差異原始就存在初始裂紋，如圖 4。在承受彎曲應力後，這些初始裂紋受到微小變形量時，會快速擴展。為研究裂紋早期擴展的行為，觀察更小角度彎曲的鍍層變形量。鍍層承受應力彎曲 1°後，SPCC 鋼鍍層與 A36 鋼鍍層中初始裂紋會垂直於施力方向往底材擴展，並且停留在底材與鍍層界面處，如圖 5 所見。此時，底材/鍍層界面處生長出新裂紋，如圖 6 所見。彎曲角度 3°時，擴展至底材之初始裂紋與新生成之裂紋受到更大的變形量皆會再朝向 Zeta 相方向擴展，如圖 7 與圖 8 所示。而受到 A36 鋼鍍層中 Zeta 柱狀結構與柱狀結構間夾雜之 Eta 相的軟硬界面，裂紋會如圖 9 中所呈現的沿 Zeta/Eta 相界面擴展。

2.2.2 SPCC 鋼鍍層破裂形貌

SPCC 鋼鍍層經彎曲後的破裂形貌如圖 10，在當彎曲 5°時，SPCC-3 與 SPCC-30 鍍層內之裂紋，均已垂直於施力方向擴展至 Zeta/Eta 界面。而 Eta 相具有延展性，因此裂紋尚未穿透 Eta 相，停留在 Eta/Zeta 界面，並且在 Delta 相產生更多微裂紋。隨著彎曲角度增加至 10°，成長至 Eta/Zeta 界面的裂紋擴寬，SPCC-3 之裂紋平均寬度為 3.6 μm，SPCC-30 之裂紋平均寬度為 5.5 μm，裂紋擴寬程度較大的 SPCC-30 鍍層表面純鋅層受張力拉扯已向下凹陷，使得表面變得不平整。當彎曲角度增加至 15°，SPCC-3 鍍層表面純鋅層凹陷，而 SPCC-30 鍍層之純鋅層斷裂使裂紋貫穿鍍層。彎曲 20°時，SPCC-3 凹陷的純鋅層也斷裂，使得裂紋最終貫穿鍍層。

因 Delta 相為長時間熱浸鍍鋅之主要成長相，SPCC-30 中強度較高的 Delta 相厚度增加至 50.7 μm，在變形時較厚的 Delta 相能承受更多的應力，新裂紋不易生成，因此如圖 11 所見 SPCC-30 的裂紋密度增加趨勢相較於 SPCC-3 來的更為緩慢。彎曲 20 度時 SPCC-30 之裂紋平均寬度為 9.5 μm，SPCC-3 之裂紋平均寬度為 6.6 μm，顯示 SPCC-30 鍍層以擴寬原有裂紋的變形方式承受應力。

2.2.3 A36 鋼鍍層破裂形貌

A36 鋼鍍層經彎曲後的破裂形貌如圖 12，當彎曲 5°時，A36-1 鍍層中 Delta 層的初始裂紋尚未向外擴展，裂紋僅停留在 Delta 相中，A36-3 鍍層中之微裂紋已迅速往 Zeta 相方向擴展並停止於 Eta 相。彎曲 10°時，A36-1 中因 Zeta 相排列的不緻密，裂紋生長至 Eta/Zeta 界面，而純鋅層被覆不均處之裂紋已貫穿鍍層。A36-3 中受到鍍層與底材界面結合性較差之影響，裂紋無法穿透延性底材而偏轉至鍍層與底材界面。彎曲 15°時，A36-1 鍍層與 A36-3 鍍層之破裂形貌與上階段相同，所有的變形均以擴寬裂紋的方式達成。A36-1 裂紋平均寬度由彎曲 10°時的 3.6 μm 擴寬至 5.8 μm；A36-3 裂紋平均寬度則由 10°時的 8 μm 擴寬至 10.1 μm。在彎曲 20°時，A36-1 鍍層與底材間出現縱向裂紋，鍍層已失去附著性，開始剝落。

因 A36-1 與 A36-3 的 Delta 相的厚度差異僅有約 3 μm，因此如圖 13 所見，裂紋密度增加趨勢上呈現相似的增加幅度。而 A36-3 的 Zeta 相晶粒有粗化的現象，會降低鍍層的韌性，加快了 A36-3 的裂紋擴展。顯示鍍層厚度提升，會加速鍍層的劣化。

2.3 鍍鋅層破裂機制

鍍層破裂受到不同因素的影響，將鍍層的破壞分為兩種，一是冷卻後產生之初始裂紋，二是承受應力後產生的新裂紋。根據破裂行為的觀察，本研究提出 SPCC 鋼熱浸鋅鍍層與 A36 鋼熱浸鋅鍍層受彎曲變形的破裂機制，如圖 14 與圖 15 所示。

在 SPCC 鋼鍍層與 A36 鋼鍍層完成熱浸鍍後，因鍍層與鋼底材之熱膨脹係數差異而導致 $Delta_{1p}$ 相中產生初始裂紋，如圖 4 所見，示意如圖 14(a)與圖 15(a)。

當試樣受外力作用彎曲後，初始裂紋不會穿透具有塑性變形能力的 Zeta 相，因此如圖 5 所見，裂紋垂直於施力方向，往沒有塑性變形能力的 $Delta_{1k}$ 相方向擴展，並停止於鍍層與底材界面，示意如圖 14(b)與圖 15(b)。在鍍層與底材的界面處，為延性與脆性的兩種材料之結合，承受應力後易於此界面處應力集中。根據對鍍鋅層中各相破裂韌性的研究，鍍層中 Gamma 相的破裂韌性為 0.42 ($MPa \cdot m^{0.6}$)，Delta1k 相為 0.40 ($MPa \cdot m^{0.5}$)，皆低於 $Delta_{1p}$ 相的 0.97 ($MPa \cdot m^{0.5}$) 與 Zeta 相的 0.70 ($MPa \cdot m^{0.5}$)[7,8]。受到底材與鍍層界面接合處的應力集中效應，如圖 6 所見，Gamma 相與 Delta 相破裂於底材與鍍層界面結合處產生新裂紋，示意如圖 14(b)與圖 15(b)。

底材相對於 Zeta 相是更有延性的，裂紋不會進入底材，因此彎曲變形時，裂紋均垂直於施力方向往 Zeta 相擴展，如圖 7 至圖 9 等，在 SPCC 鋼鍍層與 A36 鋼鍍層中均能夠觀察到此一現象，其示意如圖 14(c)與圖 15(c)。其中，A36 鋼鍍層中的 Zeta 相排列鬆散，並且中間夾雜 Eta 相，形成一個軟硬界面，因此裂紋容易沿著 Zeta/Eta 界面擴展。此外，A36 鋼鍍層中 Zeta 相的厚度不均勻，局部之 Zeta 相生長至表面，此處之 Eta 相厚度較薄，倘若裂紋剛好沿此處的 Zeta/Eta 界面擴展，則裂紋更容易貫穿至表面。而在 Zeta 相平整處之 Eta 相厚度相對厚，裂紋則停留於鍍層內，示意如圖 15(c)。

隨著施加的變形量提升，在 SPCC 低碳鋼鍍層中，由於表面被覆一層均勻的延性純鋅層，當裂紋擴展至 Zeta/Eta 界面時，裂紋僅會在純鋅層內擴寬，受到張力拉扯的純鋅層則形成圖 10 所見的表面凹陷，使得表面變得不平整，示意如圖 14(d)與圖 14(e)。隨後由於純鋅層無法承受施加的應力而斷裂，裂紋最終貫穿至表面，至此鍍層與底材之間仍附著良好，示意如圖 14(f)。

相對於 SPCC 鋼鍍層，A36 鋼鍍層中的裂紋一旦貫穿表面後，因為鍍層與底材之間沒有 Gamma 相，附著性較差如圖 12 所見，裂紋容易偏轉至鍍層與底材的界面，造成鍍層嚴重的剝落，示意如圖 15(d)。

2.4 腐蝕特性

以 SPCC-30 與 A36-3 兩種相近厚度之鍍層經彎曲 20°後進行 G31M 腐蝕試驗 72 小時。試片未沖洗外觀如 16 (a)與圖 16 (b)所示，SPCC 低碳鋼鍍層被紅銹覆蓋，A36 鋼鍍層表面佈滿白色的腐蝕產物。試片經過沖刷洗後，A36 鋼鍍層表面的白色腐蝕產物成塊狀脫落並未緊密貼附於鍍層表面，無法形成隔絕保護。SPCC 低碳鋼與 A36 鋼鍍層表面已經佈滿紅銹，判定鍍層失效，外觀如圖 17 (a)與圖 17 (b)所示。

根據第 2.3 節，由於 A36 鋼之鍍層附著性不佳，彎曲時會出現底材與鍍層之間的橫向裂紋，因此在腐蝕試驗時，阻斷了底材的鐵原子擴散至表面，從外觀上不會出現明顯紅銹。以短時間的腐蝕試驗可以明顯觀察到 SPCC 低碳鋼鍍層中的裂紋雖成為腐蝕因子侵入之路徑，但仍附著良好，如圖 18(a)所示。而 A36 鋼鍍層內界面結合處的橫向裂紋中已充滿腐蝕產物。由於界面結合處為能量較高的地方，會使得腐蝕因子沿著此裂紋侵入，導致鍍層於腐蝕試驗中剝落，如圖 18(b)所示。

綜合以上論述，當鍍層受到應力，SPCC 鋼鍍層與 A36 鋼鍍層在彎曲後均會產生裂紋，但裂紋的擴展路徑和結果不同。SPCC 鋼鍍層中的裂紋停留在鍍層內，而 A36 鋼鍍層中的裂紋則容易貫穿至表面並沿界面擴展。這是由於 SPCC 鋼鍍層與底材附著性較好，即使裂紋擴展至表面，鍍層仍能保持附著，而 A36 鋼鍍層附著性較差，裂紋容易沿界面擴展，導致鍍層剝落。在腐蝕試驗中，SPCC 鋼鍍層中的裂紋雖成為腐蝕因子的侵入路徑，但鍍層仍能保持附著性，而 A36 鋼鍍層因為底材/鍍層界面處的橫向裂紋，造成腐蝕因子沿裂紋侵入，導致鍍層剝落。因此，SPCC 鋼鍍層在破裂後仍能保持良好的附著性和耐蝕性，而 A36 鋼鍍層則因附著性差，在腐蝕環境中侵蝕更嚴重。

IV. 結論

1. 由於鍍層與底材之熱膨脹係數存在差異，會於鐵鋅相中殘留張應力，導致硬脆之 Delta 相破裂形成初始裂紋。Delta 相厚度增加，能提升鍍層承受殘餘張應力的能力，初始裂紋密度較低。
2. 增加 SPCC 鋼鍍層厚度，強度高之 Delta 相厚度增加，更能承受應力，減少新裂紋的生成，造成裂紋密度低，但受力後會以擴大(寬)原有裂紋的方式承受變形，裂紋擴張更快；而增加 A36 鋼的鍍層厚度，Zeta 相有晶粒粗化的現象，會降低鍍層韌性，同樣導致裂紋快速擴展。
3. A36 鋼鍍層受足量彎曲變形後鍍層與底材界面處裂紋發生偏轉，成為腐蝕因子侵入的路徑。腐蝕試驗過程中腐蝕因子直接侵蝕底材，底材受腐蝕後產生的紅銹體積膨脹使鍍層剝落。

參考文獻

[1] 莊秋明，〝考察日本熱浸鍍鋅鋼橋防蝕工程報告書〞，防蝕工程，第 5 卷第 4 期，1991，第 57～85 頁。

[2] "Damage micromechanisms in a hot dip galvanized steel", V. Di Cocco, F. Iacoviello, L. D'Agostino, and S. Natali, Procedia Structural Integrity, 3(2017), pp. 231-236.

[3] "Damaging micromechanisms in hot-dip galvanizing Zn based coatings", V. Di Cocco, F. Iacoviello, and S. Natali, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 70(2014), pp. 91-98.

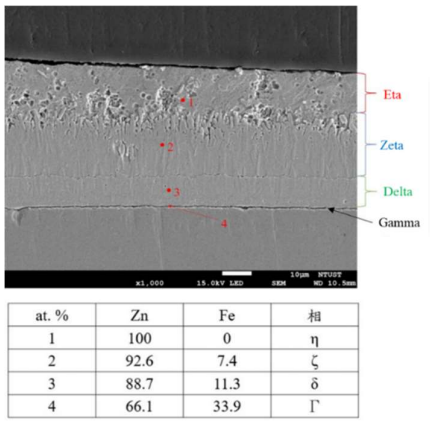
[4] "Damage micromechanisms in a hot dip galvanized steel", V. Di Cocco, F. Iacoviello, L. D'Agostino, and S. Natali, Procedia Structural Integrity, 3(2017), pp. 231-236.

[5] "Formation and growth behavior of intermetallic compound phases in the interfacial reaction of solid Fe/liquid Zn at 450 °C", K. Han, I. Lee, I. Ohnuma, and R. Kainuma, Journal of Alloys and Compounds, 888(2021), pp. 161562.

[6] "The effects of an Fe－Zn intermetallic-containing coating on the stress corrosion cracking behavior of a hot-dip galvanized steel", G. Reumont, J. B. Vogt, A. Iost, and J. Foct, Surface and Coatings Technology, 139(2001), pp. 265-271.
[7] "Fracture Toughness of the Fe－Zn Intermetallic Compounds Measured by Bend Testing of Chevron-Notched Single-Crystal Microbeams", N. L. Okamoto, S. Michishita, Y. Hashizume, and H. Inui, Isij International, 58(2018), pp. 1569-1577.
[8] "Crystal structures and mechanical properties of Fe－Zn intermetallic compounds formed in the coating layer of galvannealed steels", H. Inui, N. L. Okamoto, and S. Yamaguchi, Isij Internationa, 58(2018), pp. 1550-1561.

表 1 本研究使用鋼種之化學成分。(wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Fe
SPCC	0.001	0.001	0.148	0.015	0.001	Bal.
A36	0.21	0.17	0.62	0.017	0.026	Bal.



at. %	Zn	Fe	相
1	100	0	η
2	92.6	7.4	ζ
3	88.7	11.3	δ
4	66.1	33.9	Γ

圖 1 SPCC 低碳鋼 450°C 熱浸鍍鋅 3 分鐘鍍層之 SEI 形貌與 EDS 成分分析。

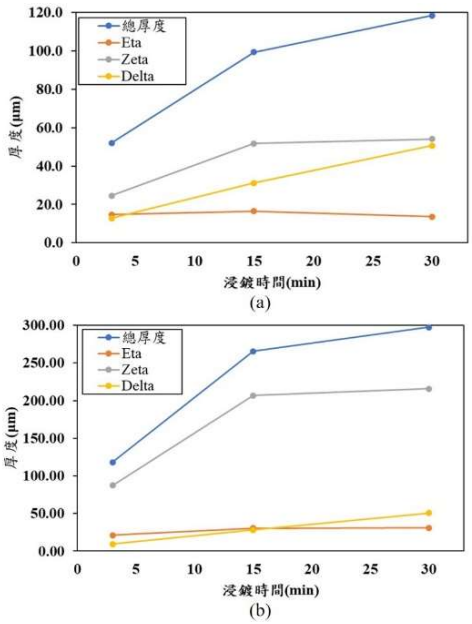
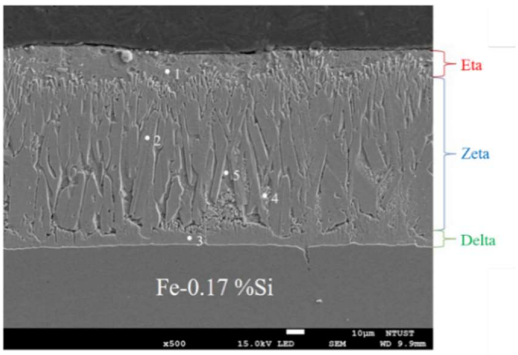
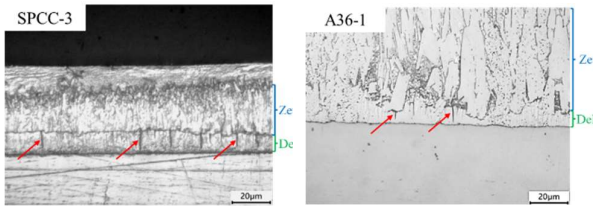


圖 2 熱浸鍍時間對於 SPCC 鋼鍍層與 A36 鋼鍍層各相厚度的影響 (a) SPCC，(b) A36。



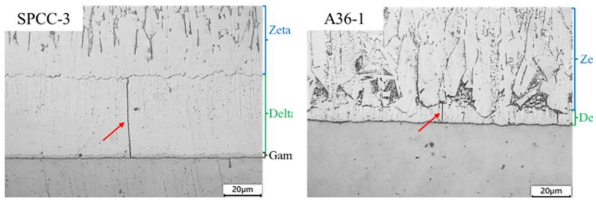
at. %	Zn	Fe	Si	相
1	100	0	0	η
2	90.7	9.3	0	ζ
3	85.0	14.6	0.4	δ
4	91.9	7.8	0.3	ζ
5	100	0	0	η

圖 3　A36 鋼 450°C 熱浸鍍鋅 3 分鐘鍍層之 SEI 形貌與 EDS 成分分析。



(a)　(b)

圖 4　未彎曲 0°，原始鍍層初始裂紋形貌 (a) SPCC，(b) A36。



(a)　(b)

圖 5　彎曲 1°，鍍層初始裂紋擴展至底材界面 (a) SPCC，(b) A36。

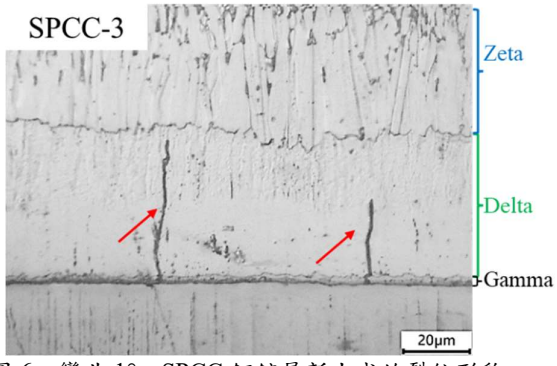


圖 6　彎曲 1°，SPCC 鋼鍍層新生成的裂紋形貌。

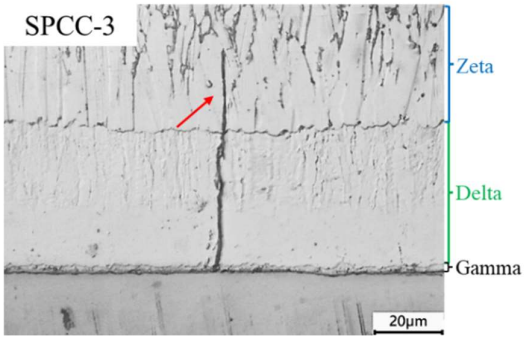


圖 7　彎曲 3°，SPCC 鋼鍍層裂紋朝 Zeta 相擴展。

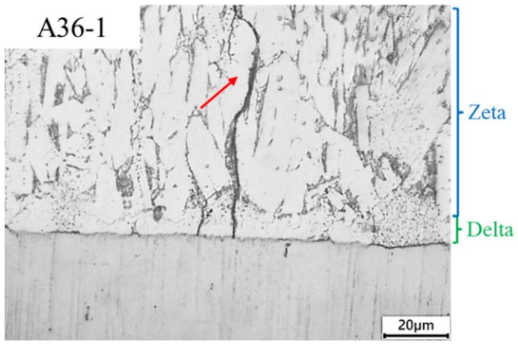
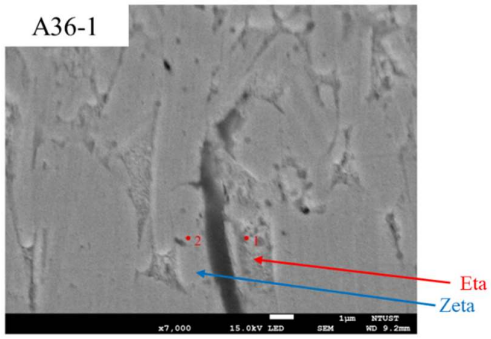


圖 8　彎曲 3°，A36 鋼鍍層裂紋朝 Zeta 相擴展。



at. %	Zn	Fe	Si	相
1	100	0	0	η
2	90.5	9.2	0.3	ζ

圖 9　彎曲 3°，A36 鋼鍍層裂紋朝 Zeta 相擴展路徑與 EDS 成分分析。

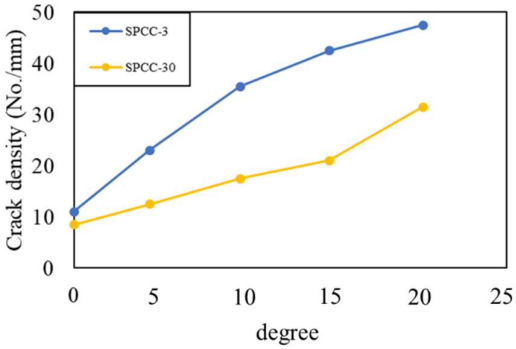


圖 11　SPCC 低碳鋼鍍層之彎曲角度與裂紋密度。

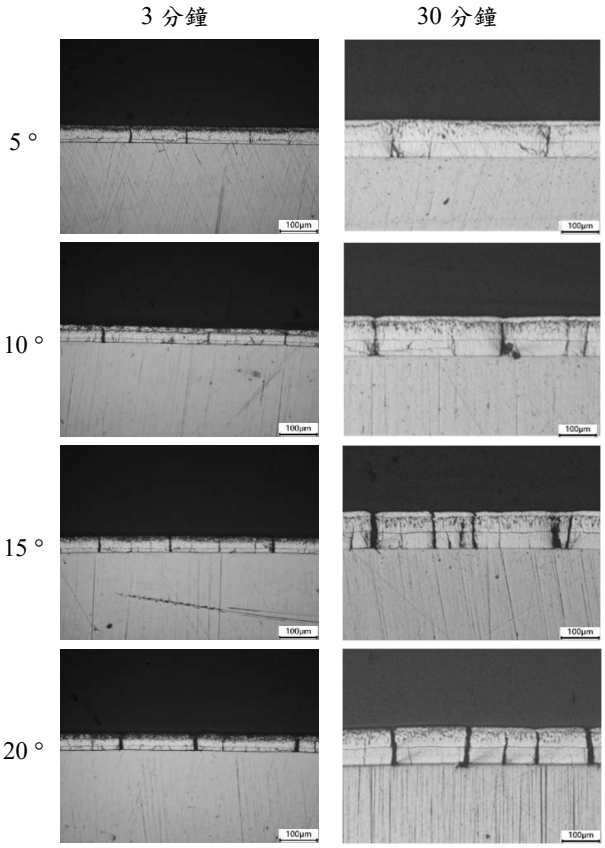


圖 10　不同熱浸鍍時間之 SPCC 低碳鋼鍍層破裂形貌。

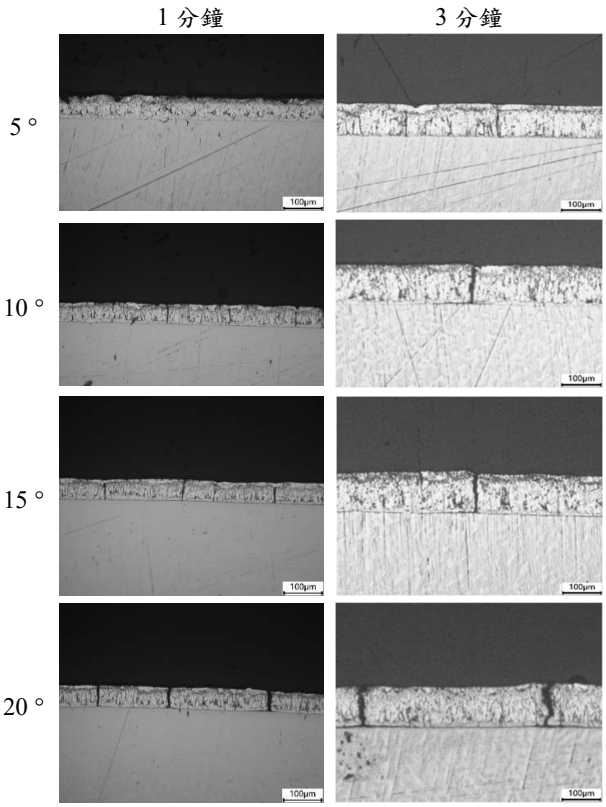


圖 12　不同熱浸鍍時間之 A36 低碳鋼鍍層破裂形貌。

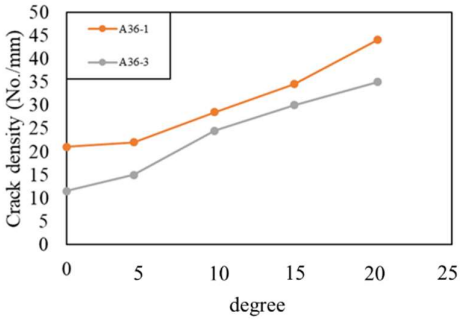


圖 13　A36 低碳鋼鍍層之彎曲角度與裂紋密度。

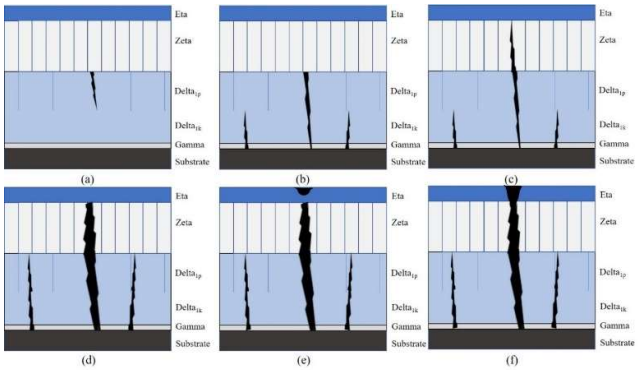


圖 14　SPCC 鋼鍍層之破裂行為示意圖。

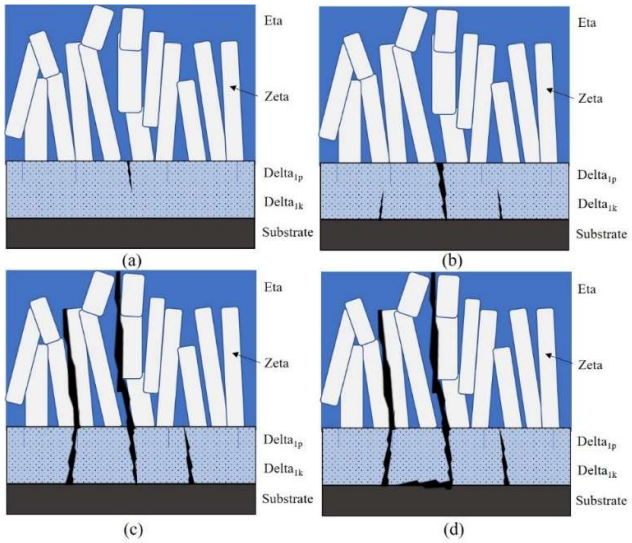


圖 15　A36 鋼鍍層之破裂行為示意圖。



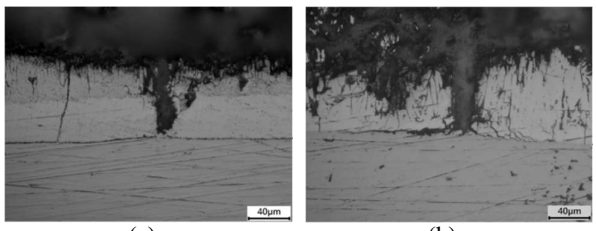
(a) (b)

圖 16　經腐蝕試驗 72 小時之未刷洗的試片 (a) SPCC-30，(b) A36-3。



(a) (b)

圖 17　經腐蝕試驗 72 小時之刷洗後的試片(a) SPCC-30，(b) A36-3。



(a) (b)

圖 18　腐蝕因子侵入路徑 (a) SPCC-30，(b) A36-3。

放射性廢棄物處置場主要核種傳輸動態管柱試驗與參數最佳化之研究
Experimental and numerical studies of critical radionuclides transport in radwaste repositories through a dynamic column method

計畫編號：NSTC 112-2623-E-007-006-NU
計畫主持人：田能全
e-mail：nctien@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

Abstract
Cesium, and nickel are important elements in radioactive waste disposal. They play a crucial role in determining the behavior and fate of radioactive materials in the environment. Experimental studies have been conducted to investigate the transport and migration of tritium, cesium, and nickel in various environmental systems. In this study, tritium is applied to calibrate the properties of the column packing materials, while cesium and nickel are used to determine their sorption and diffusion characteristics. The CXTFIT fitted results are agree well with the experimental data, indicating the accuracy of the model in predicting the behavior of these elements. Cesium and nickel both have a high affinity for adsorption onto the granitic column packing, with cesium showing particularly strong sorption. Moreover, non-equilibrium can better explain the experimental data for cesium and nickel transport in the column, indicating that sorption kinetics should be considered.

Keywords: cesium, nickel, column, granite

I. Introduction

Granite, a type of crystalline rock, has been considered a viable host rock for the geological disposal of HLW in various countries. This study examined the sorption behaviors of cesium (Cs) and nickel (Ni) in Taiwan's local granite. Experiments were conducted using a column with a diameter of 1.6 cm and length of 30 cm to minimize physical non-equilibrium during the sorption process.

The chemical nonequilibrium (CNE) or two-region model (Gamerdinger et al., 1990; van Genuchten, 1981) embedded in the CXTFIT code was used to investigate and determine the transport parameters through a calibration process for data obtained from ADE experiments involving H3, Cs and Ni. Based on the dispersivity, distribution coefficients (K_d), retardation factors (R) and kinetic parameters of radionuclide transport models, it would be effective for us to provide confidence in various scales from laboratory- to field-scale experiments in the next period.

The findings from the experiments conducted using the column with Taiwan's local granite have significant implications for the geological disposal of high-level radioactive waste. The utilization of the chemical nonequilibrium or two-region model, embedded in the CXTFIT code, allowed for a comprehensive investigation and determination of the transport parameters for cesium and nickel sorption.

The calibration process for the data obtained from the advection-dispersion equation experiments involving tritium, cesium, and nickel, provided crucial insights into the dispersivity, distribution coefficients, retardation factors (R), and kinetic parameters of radionuclide transport models. These results not only enhance our understanding of the sorption and transport behavior of the radionuclides but also provide a foundation for safety assessment in radioactive waste disposal scenarios.

The exportation of parameter fittings to safety assessment results underscores the practical significance of this study. These findings have the potential to instill confidence in the various scales of experiments, ranging from laboratory-scale to field-scale, in the context of radioactive waste disposal. The comprehensive nature of the experimental and data fitting results enhances our understanding of how tritium, cesium, and nickel behave in various environmental systems, thereby contributing to the body of knowledge essential for the safe disposal of HLW. The research findings highlight the importance of conducting laboratory-to-field-scale experiments in order to accurately determine the transport parameters and behavior of radionuclides in order to ensure the long-term safety of repositories for high-level radioactive waste (Zhang et al., 2022). Based on the research findings, it is evident that understanding the sorption and transport behavior of tritium, cesium, and nickel in different environmental systems is crucial for the safe disposal of high-level radioactive waste. This information can be used to improve safety assessment techniques for the disposal of high-level radioactive waste. The comprehensive investigation and determination of transport parameters for cesium and nickel sorption in local granite from Taiwan have significant implications for the geological disposal of high-level waste disposal.

II. Method

2.1 Theory of advection and dispersion

The popular software CXTFIT can be used to deal with nonequilibrium ADE models caused by physical (PNE or two-region model) or chemical (chemical nonequilibrium (CNE) or two-site model) factors. The PNE model can be used to quantify the transport of sorbing and non-sorbing solutes, while the CNE model is usually used to describe the transport of sorbing solutes. Solutes investigated in this study were less sorptive, and hence, the PNE model was used to analyze and calibrate our experimental data.(Chandel & Swami, 2021).

2.2 Experiments

Since granite is made of volcanic rocks, there are crystalline particles in it, as evident in the polar microscope images in **Figure 1**. Furthermore, biotite in granite has a hue that is black or dark, and it is easy to identify quartz, which is somewhat white or grey-white, and feldspar, which is slightly brown. Matching images obtained through elemental mapping analysis and SEM-EDS were acquired and contrasted. Quartz, felspar, plagioclase, and biotite were the principal mineral components of granite, based on a comparison of different areas and the minerals that contribute to it. This information has also been reported in earlier research, which used other analysis tools (i.e., X-ray diffraction analysis and Rutherford backscattering spectrometry analysis)

In general, laboratory studies are preferred for studying radionuclide transport because radiation restriction and experimental conditions can be much better controlled in the laboratory compared with in situ field tests. The ADE experimental apparatus (see Figure 2) in this work followed the guidelines and review in previous pieces of literature to provide practical recommendations (Palágyi & Štamberg, 2014). **T**he classical, common, and dynamic devices employing a flow column system (Shi et al., 2021) that are used to obtain experimental breakthrough curves (BTCs), and it qualitatively estimated the dispersivity, retardation factor, and kinetic exchange coefficient.

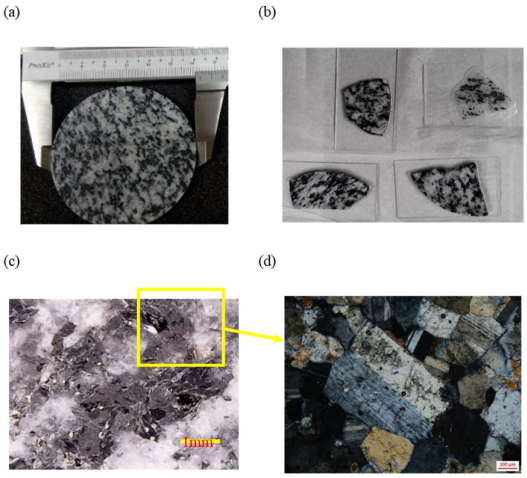


Figure 1. Images of the testing of granite for mineral distribution obtained by polar microscopy: (a) intact samples and (b) polished sample.

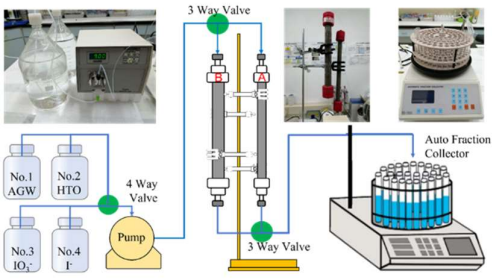


Figure 2 Experimental devices.

III. Results

Figure 3a showcases a graph that compares the experimental data with the fitting results for cesium. This comparison demonstrates a strong agreement, indicating the accuracy of the model in predicting the behavior of cesium. Furthermore, the high coefficient of determination of 0.99 and a mean square error of 8.2E-4 provide confidence in the fitted model. The retardation factor for cesium is approximately 27.5, with respective values for β and ω being 0.224 and 1.211. These values suggest that cesium experienced a non-equilibrium sorption process within the column study area.

Similarly, Figure 3b presents a graph that compares the experimental data with the fitting results for nickel. The strong agreement between the two indicates the accuracy of the model in predicting the behavior of nickel. The high coefficient of determination of 0.95 and a mean square error of 2.82E-3 further support the confidence in the fitted model. The retardation factor for nickel is approximately 2.3, with respective values β and ω being 0.432 and 0.305. This suggests that nickel also underwent a non-equilibrium sorption process within the column study area.

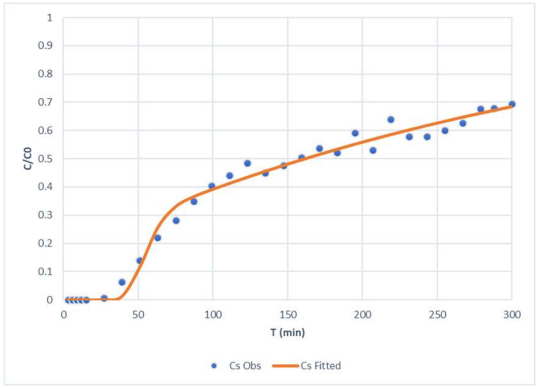


Figure 3a Comparison graph of experimental data and fitting results for Cs.

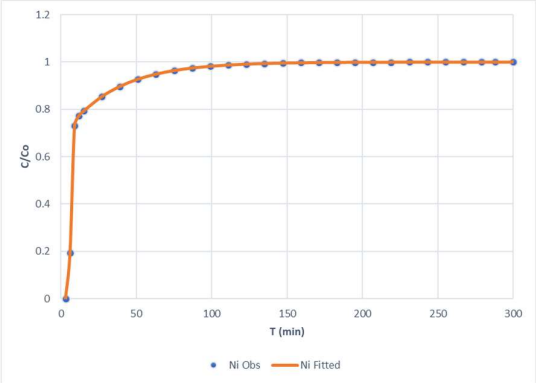


Figure 3b Comparison graph of experimental data and fitting results for Ni.

IV. Conclusions

The results of the study provide valuable insights into the sorption and transport behavior of tritium, cesium, and nickel in various environmental systems, particularly in relation to the geological disposal of high-level radioactive waste. The findings indicate that cesium and nickel exhibit significant sorption onto the granitic column packing, with cesium showing particularly strong sorption behavior. This suggests that the geological disposal of HLW in granitic formations should consider the potential retention of these radionuclides due to their affinity for adsorption onto the host rock.

The use of the chemical nonequilibrium model in the CXTFIT code to analyze and calibrate the experimental data for cesium and nickel transport has provided valuable insights into the kinetics of sorption and the behavior of these elements within the column study area. The high coefficient of determination and low mean square error obtained from the fittings demonstrate the accuracy and reliability of the developed model in predicting the sorption and transport behavior of cesium and nickel. These findings contribute to the understanding of the transport parameters and can inform safety assessments for geological disposal scenarios.

Furthermore, the experimental setup adopted for this study, including the ADE experimental apparatus, followed established guidelines and previous literature to ensure the validity and reliability of the results. The use of laboratory studies for radionuclide transport allowed for better control of experimental conditions, leading to accurate and reproducible findings. The practical recommendations derived from this work, especially in relation to the sorption kinetics of cesium and nickel in granitic formations, can contribute to the development of effective strategies for the geological disposal of HLW.

In conclusion, the study's comprehensive examination of the sorption behaviors of tritium, cesium, and nickel in granitic formations has provided valuable insights into the potential implications for the geological disposal of HLW. The high affinity of cesium and nickel for adsorption onto the granitic column packing, along with the consideration of non-equilibrium sorption processes, emphasizes the importance of understanding the transport behavior of these radionuclides in geological disposal scenarios.

The insights gained from this study open several avenues for future research in the field of radionuclide transport and geological disposal of high-level radioactive waste. One potential area for further investigation is the evaluation of long-term sorption behavior and the impact of environmental factors on the transport of cesium and nickel in granitic formations. Understanding the persistence and stability of sorption processes over extended periods can provide crucial information for long-term safety assessments of geological disposal sites.

Additionally, exploring the potential interactions between radionuclides and other components present in granitic formations could enhance our understanding of the overall behavior of these elements in a geological disposal environment. Investigating the influence of varying geochemical conditions and the presence of competing ions on the sorption and transport of cesium and nickel can contribute to more comprehensive models for predicting their fate in a repository setting.

Furthermore, considering the dynamic nature of natural systems, the development of predictive models that incorporate transient conditions and variations in flow regimes could provide valuable insights into the long-term transport behavior of radionuclides in granitic formations. This could involve the integration of hydrogeological models with transport models to simulate the complex interactions between water flow, geochemical processes, and radionuclide migration in the subsurface.

Lastly, the application of advanced characterization techniques, such as in situ spectroscopic and imaging methods, to directly observe and quantify the sorption behavior of cesium and nickel at the mineral scale in granitic materials could offer detailed insights into the mechanisms governing their retention and release in geological disposal scenarios. This microscopic perspective could help elucidate the specific surface reactions and binding mechanisms that influence the fate of radionuclides in the subsurface environment.

Overall, the future research directions outlined above have the potential to deepen our understanding of radionuclide behavior in granitic formations and contribute to the development of robust strategies for the safe and efficient disposal of high-level radioactive waste. By addressing these avenues for future investigation, we can continue to advance the scientific knowledge and technical capabilities required for the responsible management of radioactive materials in geological repositories.

參考文獻

[1] Chandel, A., & Swami, D. (2021). Review of non-equilibrium flow and transport models in saturated porous media. 228–245. https://doi.org/10.32438/wpe.222021

[2] Gamerdinger, A., Wagenet, R., & Van Genuchten, M. (1990). Application of Two-Site/Two-Region Models for Studying Simultaneous Nonequilibrium Transport and Degradation of Pesticides. Soil Science Society of America Journal, 54, 957–963. https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400040003x

[3] Hedin, A. (2011). Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project (R-11-01). SKB.

[4] Palágyi, Š., & Štamberg, K. (2014). Transport parameters of I− and IO3− determined in crushed granitic rock columns and groundwater system under dynamic flow conditions. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 302(1), 647–653. https://doi.org/10.1007/s10967-014-3267-y

[5] Shi, Y., Lee, C.-P., Yu, H., Hu, Y., Liu, H., Tien, N.-C., Wang, Y., Liu, W., Kong, J., Hua, R., & Zhang, A. (2021). Study on advection–dispersion behavior for simulation of HTO and Se transport in crushed granite. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 328(3), 1329–1338. https://doi.org/10.1007/s10967-021-07750-8

[6] van Genuchten, M. Th. (1981). Non-Equilibrium Transport Parameters from Miscible Displacement Experiments. In Research Report 119.

[7] Zhang, X., Ma, F., Dai, Z., Ju, W., Chen, L., Ling, H., & Soltanian, M R. (2022, February 1). Radionuclide transport in multi-scale fractured rocks: A review. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127550

輻射防護與放射醫學科技(I)

設計具有邊緣運算能力之微型機動輻射偵檢器

Edge Computing Platform for Mobile Radiation Detection Systems

計畫編號：112-2623-E-305 -001 -NU
計畫主持人：姚書農
e-mail：snyao@gm.ntpu.edu.tw
計畫參與人員：王昱翔
執行單位：國立臺北大學電機工程學系

摘要

本研究計畫開發了一款微型機動輻射偵檢器，此裝置使用蓋格計數器進行輻射數據收集，並以樹莓派(Raspberry pi)作為處理中心，功能包含：總電源供應、數據運算、與資料儲存，且透過 Arduino 當作傳輸介面，將數據顯示在液晶螢幕上。外殼部分以同時以 3D 列印技術與電腦數值控制(Computer Numerical Control, CNC)切割實現體積縮小和客製化達到微型與機動的目的。為應付供電不穩定的惡劣環境，採用高容量鋰電池，並且搭配太陽能供電。在物聯網方面，利用 Arduino 進行數據收集與顯示，並將數據透過樹莓派上傳至雲端伺服器，開發人員利用雲端儲存的資料進行深度學習和輻射監控。此研究旨在提供一個便攜、高效、省電、精確、且具備學習能力的輻射監測系統解決方案。

關鍵詞：蓋格計數器、物聯網、輻射偵檢器、太陽能供電。

Abstract

This research project developed a miniature mobile radiation detector. The device contains a Geiger counter for radiation data collection, with a Raspberry Pi serving as the processing hub. The functions of the Raspberry Pi include providing power, performing data computations, and storing data. The level of radiation is displayed on a liquid crystal display screen via an Arduino interface. The device casing was created using a combination of 3D printing and Computer Numerical Control (CNC) cutting techniques to achieve a compact and customizable design, making the device both small and mobile. To handle unstable power supply conditions in harsh environments, the system is powered by high-capacity lithium batteries, supplemented by solar power. For the Internet of things functionality, data collection and display are managed by Arduino, while the data is uploaded to a cloud server via the Raspberry Pi. Developers can then utilize the data stored in the cloud for deep learning and radiation monitoring. The aim of this research is to provide a portable, efficient, energy-saving, accurate, and learning-capable radiation monitoring system solution.

Keywords: Geiger counter, Internet of things, radiation detector, solar power.

I. 前言

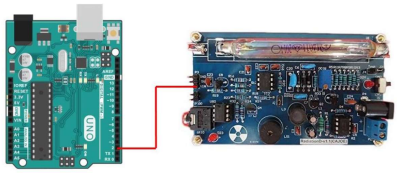
在當今高度技術化的世界中，輻射偵測的重要性日益凸顯，特別是在動態且多變的環境中。我國核能電廠陸續進入除役階段，各廠房系統設備將隨除役工作的進展於停用隔離後進行拆除，對於可發生游離輻射的設備與核廢料，應有嚴密的輻射劑量監測，以能在安全的前提下，如期如質完成除役作業。

再者，臺灣周邊國家如日本共 33 座核能電廠機組，中國大陸共 55 座核能電廠機組，另外還有 15 座正在興建中。面對潛在的境外核災與輻射汙染，我們更需要適時提出預警。隨著 6G 衛星通訊受到日益關注，個人和小型團隊對於便攜式的太空輻射偵檢器的需求也越來越高[1-5]。傳統的大型輻射監測設備雖然準確，但昂貴且不易設置。本項目目標是設計並製造一款小型、便攜、且精度高的輻射偵檢裝置，滿足使用者在多種環境下的輻射監測需求。

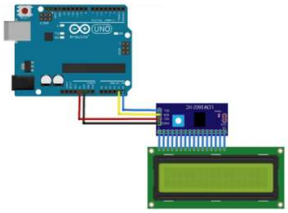
II. 主要內容

硬體電路方面選用 Geiger Counter Radiation-D v1.1 電路板如圖一右，因為電路板相容於多款蓋格管如：M4011、J305、J315、及 SBM-20。其偵測到的數值以 Counts Per Minute (CPM)為單位，不同蓋格管對於吸收輻射能量產生電脈衝的次數不一樣，所以每更換一種蓋格管就需要經過輻射校正室找出 CPM 與微西弗間的關係。Geiger Counter Radiation-D v1.1 電路板會傳輸到 Arduino 開發版，如圖一左，連接液晶顯示器如圖二，顯示所偵測到的輻射值。為了讓前端的偵檢器具有邊緣運算能力，Arduino 開發版還會透過 USB 傳輸將數值傳到樹梅派微電腦如圖三，所以所有的輻射值都會記錄在微電腦的資料夾內。在供電方面，因為所使用的電路系統皆是 5V 電壓，以市售的行動充電裝置即可，本裝置亦可連接太陽能板使用再生能源如圖四。

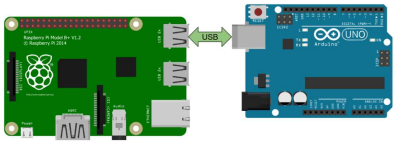
在外殼設計上，初版使用一般塑膠盒進行組裝，如圖五，另外有搭配風扇冷卻系統，簡單且成本低，但體積較大，從圖五右方可見預留的空間，且電線外露與外殼較軟，無法為落摔或擠壓提供完善的保護。



圖一 Geiger Counter 作為輻射數據收集的核心元件，能夠探測環境中的輻射水平，並將其轉換為數據信號。



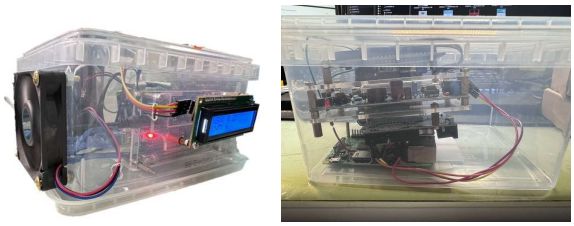
圖二 Arduino 用於接收 Geiger counter 1.1 的數據，並將處理後的數據顯示在黑白像素的 LCD 顯示螢幕上。這使得使用者可以實時觀察到環境中的輻射水平。



圖三樹莓派擔任主機角色，不僅提供電源，還進行數據的存儲和處理。其小巧的體積和強大的處理能力非常適合便攜式裝置。

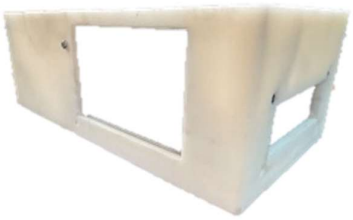


圖四 太陽能面板供電

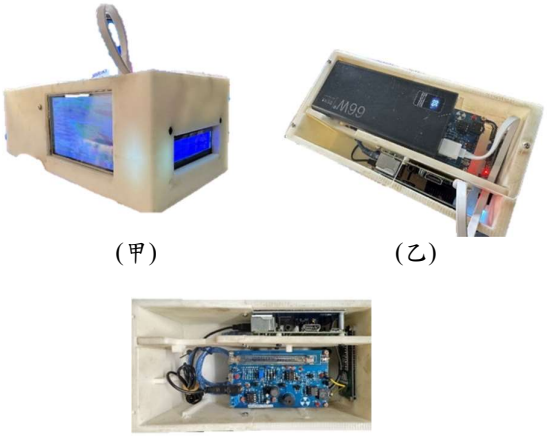


圖五為第一版裝置外觀，以成本考量為基礎將所有硬體設備安裝在其中

在第二版中，利用光固化的 3D 列印技術，根據元件的具體形狀和擺放位置設計更加緊湊的外殼，如圖六，並且採用雙螢幕，除了保留單色的 LCD 螢幕，另外新增彩色的 LCD 觸控螢幕，如圖七(甲)，便於控制樹梅派主機，提供手動開關機與簡單的故障排除。鋰電池置於最上方，如圖七(乙)，上方蓋板使用 CNC 作壓克力切割，透明蓋板的優點是可以顯示電量，與便於未來電池老化的更換。由內裝圖七(丙)所見，空間利用上實現了體積最小化和美觀化。外觀設計考量了便攜性與操作性，讓使用者能夠輕鬆攜帶並靈活運用於各種環境中。更為精巧的外觀設計，提供了良好的攜帶體驗，並融合了各項即時數值顯示的功能。



圖六 使用 3D 建模技術製造輻射偵檢器的外殼



(甲) (乙)

(丙)

圖七 第二版裝置外觀，外觀及內部裝置及配置，相對初版，體積較小，更便利。

這款具有邊緣運算能力的微型機動輻射偵檢器不僅是硬體技術上的突破，重要的特色在於開發了一套自動上傳數值的機制，使得偵測到的資訊能夠即時轉化並傳輸至指定雲端平台，無需經由外部設備或介面。這項功能大大地提高了數據收集的效率和即時性，讓使用者能夠迅速獲取最新的輻射偵測資訊，有助於快速做出應對與決策。軟體設計與實現包含：

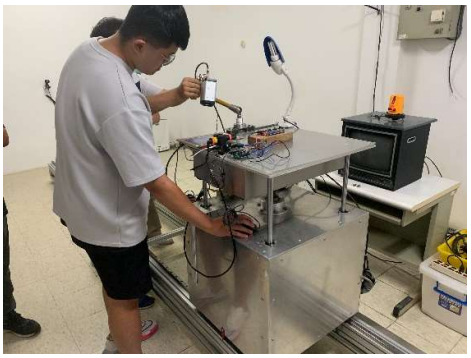
1. **數據收集與處理**：使用 Arduino 程式收集來自 Geiger counter 1.1 的輻射數據，並進行初步處理，如計算每分鐘計數（CPM）轉換成微西弗（uSv）。
2. **數據儲存**：處理後的數據通過樹莓派儲存在本地的文字檔中，為後續的數據分析和長期監測提供依據。
3. **實時顯示**：數據即時顯示在黑白像素的 LCD 顯示螢幕，顯示內容包括當前的輻射水平（uSv）和每分鐘計數（CPM）。
4. **自動上傳數值機制**：開發了一套自動上傳數值的機制，使得偵測到的資訊能夠即時轉化並傳輸至指定雲端平台，無需經由外部設備或介面。這項功能極大地提高了數據收集的

效率和即時性。

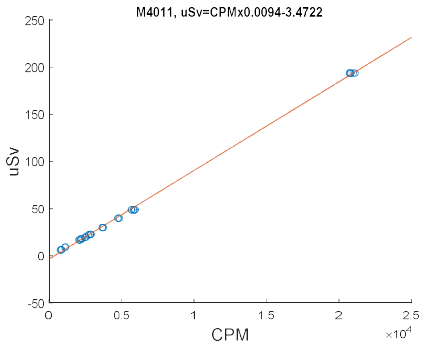
5. **雲端存儲與訪問**：我們利用 Google Developer 工具將數據上傳到 Google Drive 中。這一過程透過樹莓派上的 Python 程式介面實現，程式開發使用 Google Drive API 確保數據的自動上傳和同步。這樣，數據不僅能夠在本地端進行分析，還可以在雲端存儲和訪問，提供了一個可靠且便捷的數據管理方案。使用者可以通過任何有網路連接的設備擷取這些數據進行機器訓練，確保數據的長期可用性和便捷性，並能夠及時進行監測和分析。

III. 結果與討論

微型輻射偵檢器雛型組合完成後，已攜帶至輻射偵測中心校正室以 Cs-137 輻射源量測，如圖八，由於所設計的輻射偵檢器以 CPM 為單位，必須以線性回歸找出 CPM 與微西弗之間的單位轉換係數，在校正室內輻射劑量從 6 微西弗量測到 200 微西弗，以蓋格管型號 M4011 為例，經回歸之後的轉換公式如圖九，可見線性度良好。因此在本研究中，我們利用了 Geiger Counter Radiation-D v1.1 進行輻射檢測站的監測。這款儀器以其高靈敏度和穩定性，成功捕捉到不同的輻射變化，提供了即時、準確的數據輸出。



圖八 團隊於核安會輻射偵測中心的校正室進行蓋革管校正



圖九 使用線性回歸將每分鐘計數（CPM）轉為輻射劑量單位微西弗。

除了儀器的精確度外，此系統相較核能安全委員會目前使用的舊型輻射偵檢器還有以下優勢：

硬體外型與成本

- **便攜性**：改進後的 3D 列印外殼顯著減小了裝置的體積，提升了便攜性。同時，客製化設計提高了硬體的穩定性和耐用性。體積大約是核安會現型款偵檢器的一半。因裝置體積小巧，便於攜帶，適合裝配在各式機器人[6-9]在各種環境中進行輻射監測。
- **低成本**：硬體僅包含蓋格管模組、Arduino 模組、及樹梅派微電腦，與軟體間的整合測試顯示，整個系統在實驗環境運行穩定，數據收集均能滿足設計要求。核安會現型款偵檢器採用閃爍體探測器，需另外搭配放大器模組、工業電腦模組、及無線通訊模組，成本高昂，且一旦零件故障，需要從國外訂購，曠日廢時，因此新型系統不只節省金錢成本也節省時間成本。

數據顯示與存儲

- **顯示準確性**：Arduino 能夠穩定地將輻射數據顯示在黑白像素的 LCD 顯示螢幕上，即使是在 200 微西弗的高輻射環境下，數據仍顯示準確且反應靈敏。
- **數據存儲可靠性**：每一台偵檢器由自身樹莓派成功存儲了長期的輻射數據，為進一步的數據分析和研究提供了備份資料，而核安會現型款偵檢器只有透過網路上傳數據，機子本身不具備儲存數據的功能。

供電系統

- **通用的電壓模式**：本次開發的新型偵檢器用的是 5 伏特的供電電壓，而核安會現型款偵檢器需要 24 伏特的供電電壓，相較之下，新型偵檢器的電力來源較易取得，因為 5 伏特電壓為現今電子產品的通用規格。
- **再生能源的利用**：核安會現型款偵檢器僅能使用市電供給電力，團隊開發的新型偵檢器可以加裝太陽能板對鋰電池進行充電，搭配大容量的儲能設備，足以應付市電中斷的情況發生。

邊緣運算能力與雲端連線的應用

- **邊緣運算**：偵測器能夠在本地即時處理和分析數據，減少了數據傳輸延遲，提高了偵測器的即時性和效率，而核安會現型款偵檢器不具運算功能。
- **雲端連線**：將蒐集到的數據即時傳輸到雲端平台進行儲存和分析，提升了輻射監測的遠程監控能力。使用者可以透過雲端平台隨時隨地查看、管理數據，及時掌握輻射值的變化情況。我們利用 Google Developer 工具將數據上傳到 Google Drive 中，以確保數據的

長期可用性和便捷性。核安會現型款偵檢器則是傳送至承包業者的網路後台，資料取得不便。

由此可見，本研究以革新性地設計一款微型機動輻射偵檢器，不僅體積小巧、便攜、省電，同時具備聯網能力。更為重要的是，我們引入了雲端與邊緣運算技術，旨在實現數據處理和分析，進一步提升偵測器的效率和即時性。

IV. 結論

本計畫發展了一款微型、機動、低成本、低功耗且有具學習能力的即時輻射監測儀器，增加輻射監測密度，未來可以應用於輻射異常的緊急事故，提升預警能力，進而達到輻射防護之效能。現有監測站造價昂貴，所以數量有限，本計劃開發的微型機動偵檢器，因為成本較低，可以大量布放，雲端伺服器統整所有偵檢器的資料，可以對各新型偵檢器作校正。這種能力對於在災害現場、工業檢測或醫療應用中快速偵測輻射情況至關重要。透過這種新型設計，我們的目標是提供一個全新且高效的解決方案，以應對不斷變化和多樣化的輻射偵測需求，同時確保即時且準確的數據收集和分析。

未來的工作將集中在進一步提升雲端連線的穩定性和數據傳輸的安全性，因為所蒐集的資料將會是機器學習的訓練資料，由於訓練過程運算量龐大，會以雲端伺服器完成，並將訓練後的模型植入邊緣裝置，也就是樹梅派，如此有助於提高每一個偵檢器對不同程度輻射的敏感度和準確性，使其能夠應用於更多樣化的場景中。我們期待這款輻射偵檢器能夠在更多實際應用中發揮重要作用，為輻射安全提供更多保障。

參考文獻

[1] Insoo Jun, Henry Garrett, Wousik Kim, Yihua Zheng, Shing F. Fung, Claudio Corti, Natalia Ganushkina, Jingnan Guo, "A review on radiation environment pathways to impacts: Radiation effects, relevant empirical environment models, and future needs," Advances in Space Research, In Press. https://doi.org/10.1016

[2] Rositsa Miteva, Susan W. Samwel, and Stela Tkatchova, "Space Weather Effects on Satellites," astronomy, vol.2, no. 3, pp. 165-179, August 2023. https://doi.org/10.3390

[3] Yihua Zheng, Insoo Jun, Weichao Tu , Yuri Y. Shprits, Wousik Kim, Daniel Matthia , Matthias M. Meier, W. Kent Tobiska, Yoshizumi Miyoshi, Vania K. Jordanova, Natalia Y. Ganushkina, Valeriy Tenishev, T.P. O' Brien, Antoine Brunet, Vincent Maget, Jingnan Guo, Dedong Wang, Richard B. Horne, Sarah Glauert, Bernhard Haas, Alexander Y. Drozdov, "Overview, progress and next steps for our understanding of the near-earth space radiation and plasma environment: Science and applications," Advances in Space Research, In Press. https://doi.org/10.1016

[4] A. D. P. Hands, K. A. Ryden, N. P. Meredith, S. A. Glauert, R. B. Horne, "Radiation Effects on Satellites During Extreme SpaceWeather Events," Space Weather, Vol. 16, no. 9, Sep 2018, pp. 1171-1450. https://doi.org/10.1029

[5] Victor U. J. Nwankwo, Nnamdi N. Jibiri and Michael T. Kio, "The Impact of Space Radiation Environment on Satellites Operation in Near-Earth Space," Satellites Missions and Technologies for Geosciences, June 2020. https://doi.org/10.5772

[6] Md. Sifatul Muktadir, Sarker Islam, Shakerul, Salahuddin M.A. Rashid, Abu Zafor Mohammad, "Development of a radiation detection measuring and monitoring mobile facility with wireless autonomous robots," in Proc. International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), Dec. 2019

[7] Sabiha Sattar, Mohammad Jahangir Alam, Yasmeen Mawla, Md. Atiar Rahman and Md. Abdullah Al Mamun, "Design and Development of a Wireless Robotic System for Radiation Detection and Measurement," in Proc. the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), Dec. 2019.

[8] Matoļin Šálek, O., M.; Gryc, L. "Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry," J. Environ. Radioact. 2018, 182, 101–107.

[9] D.T. Connor, K. Wood, P.G. Martin, S. Goren, D. Megson-Smith, Chyzhevskyi Verbelen, Y., I., N.T. Kirieiev, S., Smith,; Richardson, T. et al. "Radiological Mapping of Post-Disaster Nuclear Environments Using Fixed-Wing Unmanned Aerial Systems: A Study From Chornobyl," Front. Robot. AI 2020, 6, 149.

建立移動式高風險輻射源使用物聯網及大數據分析技術於輻射安全管制系統或模組可行性評估及設計之研究

Establishing a Feasibility Study and Design for a Mobile High-Risk Radiation Source Management System or Module Using IoT and Big Data Analytics for Radiation Safety Control.

計畫編號：NSTC 112-2623-E-035-001 -NU
計畫主持人：簡儀欣
e-mail：yhchien@fcu.edu.tw
計畫共同主持人：劉子瑜
計畫參與人員：詹皓宇
執行單位：逢甲大學/材料科學與工程學系

摘要

近年物聯網技術(IoT)及人工智慧(AI)蓬勃發展，物聯網技術應用於輻射源安全管制已成為國內輻射源主管機關之重要研究課題。本計畫根據過去研究成果釐清移動式高風險輻射源之管制需求與實場狀況，設計與建立輻射安全管制系統雛形。而本年度執行重點針對可行性評估/驗證階段的端網雲系統進行研究，包含功能電路設計與建立、機構/外型設計與建立、網頁系統設計與建立、功能模組實場測試。

關鍵詞：輻射管制、輻射源、物聯網

Abstract

In recent years, the rapid development of IoT (Internet of Things) and AI (Artificial Intelligence) technologies has made the application of IoT in radiation source safety control a key research topic for domestic radiation source regulatory authorities. This project aims to clarify the regulatory needs and real-world conditions of mobile high-risk radiation sources based on previous research findings, and to design and establish a prototype for a radiation safety control system. The focus for this year is on the feasibility assessment/verification phase of the edge-cloud system, including the design and development of functional circuits, mechanical/structural design, web system design, and functional module field testing.

Keywords: Radiation safety control、Radiation source、Internet of Things

I. 前言

隨著經濟的蓬勃發展，輻射源的使用量持續攀升，然而這些輻射源所帶來的健康風險不容忽視。更甚者，輻射源的意外遺失或失竊更可能導致環境汙染，引發社會的廣泛擔憂。為了因應這些挑戰，許多國家已投入大量資源發展基於 GPS 技術的監控系統。這些系統結合 IoT 技術和 GPS 定位模組，能夠即時追蹤輻射源的輻射位置並監測其狀態。所有這些資訊通過 GPS 無線傳輸到伺服器中心，以實現對輻射源的有效監控。一旦出現異常情況，系統將即時發出警報，通知相關人員及時處理，從而確保輻射源使用的安全性和可追溯性。因此建立移動式高風險輻射源使用物聯網及大數據分析技術於輻射安全管制系統，對於移動式輻射源管制非常重要。

II. 主要內容

本計畫依據移動性輻射源追蹤管理之需求，進行實際場域之功能模組數據整合評估，並建立輻射安全管制系統雛形，詳細成果如下:

1. 功能電路設計與建立

此功能是根據實際需求所定義出 3 個功能項目(儲存輻射源相關資訊、輻射源於運送之定位、輻射源碰撞之偵測)進行設計與建立，如圖 1 所示，電路中的模組分別為接收 GPS 訊號之天線、提供資訊傳輸之 4G 網路天線與 SIM 卡、電池與其充電孔、事故偵測模組。而此電路板功能為依照移動性輻射源安全管制需求設計，如省電設計(事故偵測模組以機械式碰撞偵測、MCU 休眠設計)、資安設計(防火牆加密功能)。

其中各模組的尺寸如下:

- 主板: 約 8cm*4cm*1cm
- 電池: 約 5cm*2cm*1cm
- LTE: 約 4.5cm*1.5cm*0.1cm
- GPS: 約 2.5cm*2.5cm*0.7cm

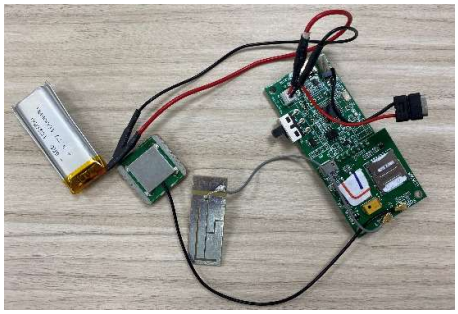


圖 1、移動性輻射源安全管制功能電路模組

2. 機構/外型設計與建立

因輻射源模型的形狀較不規則，所以選用 3D 列印方式印出。如圖 2 所示，外殼功能分別為開關孔、充電頭架、電路固定架、GPS 天線架、GPS 天線孔、LTE 天線孔/架、卡榫。其中電路固定架的功能為穩固電路板，降低電路板因為碰撞而移動導致損壞的

機率；GPS 天線架與天線孔、 LTE 天線孔/架的功能為穩固天線，並使天線可以露出外殼，提升收訊品質；卡榫的功能為將外殼固定於移動式輻射源上，且較不會因為輻射源的外型些微差異導致無法安裝。安裝於輻射源如圖 3 所示，裝置安裝於輻射源把手的空隙間，且仍有一隻手可以拿的空間。

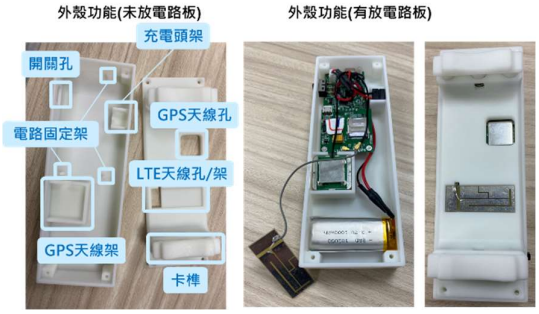


圖 2、機構、外型製作實體示意圖



圖 3、監測裝置裝設於輻射源模型示意圖

3. 網頁系統設計與建立

依據移動性輻射源追蹤管理之需求及功能模組所蒐集之數據進行系統管制平台功能架構設計，追蹤管理需求與其對應之平台功能如下:

a. 平台權限

平台權限可分為主管機關與輻射源使用廠商，因此本計畫先設計登入功能頁面(如圖 4)，可作為未來由帳號登入進行權限管理的參考。



圖 4、系統管制平台設計: 登入功能示意圖

b. 輻射源追蹤

輻射源追蹤的功能需求可分為歷史軌跡、即時追蹤、施工通報，而本計畫優先設計即時追蹤功能(如圖 5)，平台系統會依據接收的 GPS 位置，於 Google Map 上呈現目前輻射源之即時位置(圖中黑點)，並可點擊查看詳細資訊。



圖 5、系統管制平台設計: 移動輻射源即時位置示意圖

c. 輻射源資訊

輻射源資訊的需求為輻射源基本資訊(輻射源名稱、終端機型號、通訊訊號(S/N)、終端機狀態資訊、抵達時間、電池狀態、無線電波數量、RF 狀態、輻射劑量)、地理資訊、主管機關管理資訊(證照號碼、執照狀態、廠牌、型號、序號、核種、活度、活度單位、數量、標定日期)、施工通報(施工日期、施工時間、施工地點、施工座標、工作人員、施工日誌、施工照片)，而本計畫優先以輻射源名稱、輻射源位置訊號取得時間(含出發與抵達時間)、輻射源即時位置(經緯度、海拔)、電池狀態(電量)、訊號狀態(是否有連線)進行規劃與設計(如圖 6)。



圖 6、系統管制平台設計: 移動輻射源功能列表

d. 資料下載

雖資料下載功能並非原先主管機關提出之需求，但依照過去 IoT 監管經驗應會需要資料下載功能，因此額外設計資料下載功能(如圖 7)。資料下載功能根據時間顆粒度可進行相對應的資料下載，其中時間顆粒度分別為月、日、小時；此外也能夠設定資料的時間範圍，下載特定時間範圍的資料。

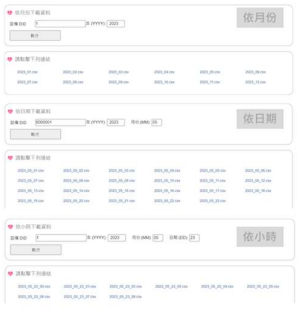


圖 7、系統管制平台設計: 資料下載功能

4. 示範場景可行性驗證

a. 移動測試

移動測試分為特定範圍短距離測試與長距離測試，其中短距離測試測試是將裝置放置於運送車輛之儲存箱內，並分別判斷有蓋鉛板、沒有蓋鉛板之運送是否有 GPS 訊號，其中有蓋鉛板狀況下 GPS 皆無訊號，而沒有蓋鉛板的情況下，結果如圖 8 所示，於經過高速公路附近時，無 GPS 訊號；而長距離測試路線如圖 9 所示，以 15 分鐘為間隔進行定位確認，確認結果為定位皆準確。



圖 8、短距離測試結果



圖 9、長距離測試路線

b. 定點測試

定點測試為分別將裝置放置於儲存室內、室內(非儲存室)、室外，並靜置 10min 後確認是否有 GPS 訊號，結果如表一所示，儲存室內皆無訊號；室內(非儲存室)有些微訊號但不穩定；室外皆有訊號。

表九、定點測試結果

	儲存室內	室內(非儲存室)	室外
A 廠商	無訊號	有訊號(不穩定)	有訊號
B 廠商	無訊號	有訊號(不穩定)	有訊號

III. 結果與討論

1. 功能電路設計與建立

此設計根據實際需求所定義出 3 個功能項目(儲存輻射源相關資訊、輻射源於運送之定位、輻射源碰撞之偵測)進行設計與建立，其中主板功能模組是以數據傳輸、處理及整合功能作為主要評估與設計準則，而此主板確實能夠與 GPS、加速規模組串接；GPS 功能模組是以接收 GPS 位置資訊(輻射源於運送(室外)之定位) 作為主要評估與設計準則，而此 GPS 確實能夠即時接收 GPS 位置資訊(經緯度)；加速規功能模組是以偵測加速度(輻射源碰撞(事故)之偵測)作為主要評估與設計準則，而此加速規模組確實能夠即時偵測加速度。此外，省電設計(事故偵測模組以機械式碰撞偵測、MCU 休眠設計)、資安設計(防火牆加密功能)能夠有效符合移動式輻射源之管制需求。

2. 機構/外型設計與建立

此機構/外型是依照實際輻射源容器進行設計，為符合不規則形狀之輻射源容器，採用 3D 掃描與列印技術，先對輻射源模型進行 3D 掃描與列印，再根據實際場域使用情境設計相關機構/外型，如功能裝置裝設位置的設計考量為盡量不影響實際工作執行；功能裝置的防耗損的設計考量為工作時以較不易損壞；功能裝置的裝設機構的設計考量為方便裝設、裝設後的穩固性；同時考量到訊號接收強度、電路板(電池)調整與更換、充電插孔。此外，為將機構放置於輻射源容器把手下方，設計彈簧卡榫功能結構，同時也能確保安裝與拆卸的方便性。

3. 網頁系統設計與建立

網頁系統根據平台權限、輻射源追蹤、輻射源資訊、資料下載等功能需求進行設計與建立，提供主管機關作為後續建立網頁系統之參考，而後續需再考量資安及與現有平台整合之問題。

4. 示範場景可行性驗證

經由移動測試與定點測試結果可知，在運送過程若蓋上鉛板會使 GPS 訊號無法傳出、經過高速公路或較大建築物時會也會影響 GPS 訊號；而在儲存室內皆無訊號，但在儲存室之室內有微弱訊號，室外訊號皆正常。因此後續需針對建築物對 GPS 訊號干擾進行模組改進。

IV. 結論

本計畫進行建立移動式高風險輻射源使用物聯網及大數據分析技術於輻射安全管制系統或模組可行性評估及設計之研究，蒐集相關資訊與評估建議可行性方案，包含實際場域之功能模組數據整合評估、系統管制平台功能架構建議、系統管制平台功能架構建議、場域驗證流程規劃與設計、示範場域可行性驗證、實際場域 RFID 產品輻射耐受性測試等內容。

本計畫成果為根據實際場域之功能模組數據整合評估與設計，建立應用於示範場域之功能電路，並包含接收經緯度訊號(GPS)、傳送訊息至 Server(LTE)、可充電(Type C 充電孔)、可偵測是否碰撞(碰撞偵測 Sensor)等功能，同時進行機械式碰撞偵測、MCU 休眠設計的省電設計與 firmware 加密功能的資安設計；建立可裝置於移動式輻射源的機構，包含開關孔、充電頭架、電路固定架、GPS 天線架、GPS 天線孔、LTE 天線孔/架、卡榫等功能，並以 3D 列印出成品供後續評估規劃；設計並建立網頁系統，包含平台權限、輻射源追蹤、輻射源資訊、資料下載等功能；最後進行實場的移動測試與定點測試，作為主管機關後續開發輻射源追蹤裝置的參考依據。

參考文獻

[1] 民生公共物聯網-資料服務平台：https://ci.taiwan.gov.tw/dsp/index.aspx

[2] 民生公共物聯網-空氣品質監測網：https://airtw.epa.gov.tw/

[3] 民生公共物聯網-民生示警公開資料平台：https://alerts.ncdr.nat.gov.tw/indexHome.aspx

[4] Kurt Silvers (Pacific Northwest National Laboratory), Mobile Source Tracking Projects (Global Threat Reduction Initiative)

[5] Ki-Won Jang, KINS-IAEA Workshop on Radiation Safety and Emergency Response in the Medical or Industrial Use of Radiation, 10-14 Jun. 2019

[6] 韓國 KINS-IERNET 網站：https://iernet.kins.re.kr/second_index.asp?sido=1&ke_flag=E

[7] Sok Chul KIM (Ph.D), Response Supporting System for Deterring Illicit Trafficking of Nuclear and Radioactive Materials, Korea Institute of Nuclear Safety

[8] MicroStep-MIS 公司網頁：https://www.microstep-mis.com/web/frontpage

[9] 平台建置流程：https://www.cadiis.com.tw/blog/web-design-workflow-process

[10] 輻射源頻段對應：https://www.met.nps.edu/~psguest/EMEO_online/module2/module_2_5.html

濕氧化碳-14 難測核種分析技術開發
Development of Analytical Technique of Carbon-14 in Radwastes by Wet Oxidation-Acid Stripping Method

計畫編號：NSTC-112-2623-E-166-001-NU
計畫主持人：謝玲鈴
e-mail：llhsieh@ctust.edu.tw
計畫共同主持人：黃蜂運
執行單位：中臺科技大學醫學影像暨放射科學系

摘要

碳-14 的來源可為天然產生與人為因素產生，屬於一長半化期的難測核種。因此，建立其環境及低放射性廢棄物中的碳-14 分析方法有其必要，及可作為法規上低放射性廢棄物分類時之限值依據。本研究完成濕氧化碳-14 難測核種分析技術之系統開發，並建立最佳化的放射分析程序及其標準作業程序。研究中評估連續萃取法及化學試劑因子對化學回收率之影響，找出其最佳化的碳-14 分析條件及程序。最佳化後的放射分析方法可得化學回收率大於 90%，液態閃爍計數儀進行碳-14 分析的最小可測量活度為 0.79 Bq/L。此外，本研究案亦已將所建立之「碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取技術」技術轉移給政府計畫之需求單位；同時，完成其相關教育訓練及提供標準作業程序書供參考。此碳-14 分析系統的特色，能有效較低操作成本及方便性等優勢；同時，具備系統零組件替換方便性及容易維持系統可用率等，大大降低記憶效應及污染問題的排除難度。本研究案所建立之系統及測試結果，預期可作為未來在環境及低放射性廢棄物試樣中之例行性碳-14 分析使用。

關鍵詞：碳-14；環境輻射監測；低放射性廢棄物；濕氧化（酸）剝離連續萃取法；液態閃爍計數儀

Abstract

Carbon-14, a long half-life nuclide, belongs to a difficult-to-measure nuclide and can be produced from both naturally occurring and artificial production. Its long half-life and pure beta decay characteristics make it a critical nuclide during radwaste disposal and management. Therefore, the development of an analytical method of ^{14}C for environmental and low-level radwastes is needed. The wet oxidation-acid stripping technique is one of the major and common analytical methods for ^{14}C. In order to develop the optimal analytical method of ^{14}C, evaluation of chemical yield during the chemical separation influenced by sequential extraction technique and various chemical parameters were investigated. In this study, the wet oxidation-acid tripping sequential extraction method for analysis of ^{14}C has been established; meanwhile, the optimal analytical condition and standard operation procedure have also been carried out. The chemical yield obtained by the established system is larger than 90%, and the minimum detectable activity of the liquid scintillation counter for analysis of 14C is 0.79 Bq/L. In addition, the established Carbon-14 analytical method has been transferred to the related government institute, as well as the education training and standard operation procedures. In summary, the current established wet oxidation-acid stripping sequential extraction system can provide several benefits, including easy solving the problem of memory effect and contamination, as well as low cost for replacing components and simple and easy-to-keep system's availability. The established system was expected to be capable of routinely used for analysis of ^{14}C in the environmental and low-level radwaste samples in the future.

Keywords: Carbon-14; environmental radiation monitoring; low-level radwastes; wet oxidation-acid stripping sequential extraction; liquid scintillation counter

I. 前言

自然界碳元素的同位素主要為碳-12（^{12}C）與碳-13（^{13}C）分別佔有 98.89 與 1.11%，另有具放射性的碳-14（^{14}C）則僅佔有約 1.5×10^{-10}%。碳-14 的來源可為天然產生與人為因素產生，天然產生的碳-14 主要是因外層大氣中氮氣（N-14）受宇宙射線撞擊而發生核反應而產生碳-14，至於人為因素則主要來自於過往的核武器大氣試爆，產生約 2.2×10^{17} Bq 的全球積存量。此值約為自然產生量的 2%，但近年因核能電廠運轉與排放，以每年約 3×10^{14} Bq 的排放量逐年增加。由於碳-14 的半衰期很長（$t_{1/2}$ = 5730 y）且在環境中移動性大，因此，加強核能設施放射性排放與固體放射性廢棄物的處理，始能減少碳-14 進入環境與對人類造成的輻射影響。有鑑於此，放射性廢棄物中 ^{14}C 的測定也成為放射性廢棄物分類時之依據，均應符合 10 CFR 61(NRC,1982)對長半化期核種於低放射性廢棄物中之分類標準與限值規定。原子能委員會參照 10 CFR61(NRC, 1982)報告，訂定「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，列出某些關鍵放射性核種，碳-14 則是其中之一。低放射性廢棄物依這些關鍵放射性核種的特性、半衰期與濃度可分類為 A、B、C 與超 C 類。

表 1 與**表 2** 中所列之放射性核種中多為長半化期且不易直接測量，由於其半化期長，在低放射性廢棄物最終處置的管理上愈顯重要。近年來國內(包括國家原子能科技研究院與國立清華大學等單位)針對這些難測放射性核種如 ^{99}Tc、^{129}I、^{14}C、^{63}Ni 與超鈾放射性核種已進行分析技術的發展，其目的乃為提高分析靈敏度或降低分析低限值。如此，可以準確的評估低放射性廢棄物最終處置場所的核種活度與所需要的工程障壁，減少不必要的資源浪費。由於國內目前對於 ^{14}C 的分析有必要進行技術開發，此為本計畫的主要目的。

表 1：單一長半化期核種濃度值

核種	濃度值
^{14}C	0.30 TBq/m^3
^{14}C（活化金屬內）	3.0 TBq/m^3
^{59}Ni（活化金屬內）	8.1 TBq/m^3
^{94}Nb（活化金屬內）	0.0074 TBq/m^3
^{99}Tc	0.11 TBq/m^3
^{129}I	0.0030 TBq/m^3
TRU(半化期大於 5 年之超鈾阿伐放射核種)	3.7 TBq/g
^{241}Pu	130 TBq/g
^{242}Cm	740 kBq/g

表 2：單一短半化期核種濃度值

核種	濃度值(TBq/m^3)		
	第一行	第二行	第三行
半化期小於 5 年之所有核種總和	26	註一	註一
^{3}H	1.5	註一	註一
^{60}Co	26	註一	註一
^{63}Ni	0.13	2.6	26
^{63}Ni(活化金屬內)	1.3	26	260
^{90}Sr	0.0015	5.6	260
^{137}Cs	0.037	1.6	170
註一：	B 類廢棄物及 C 類廢棄物並無此核種濃度值之限制。可從實際執行運送、吊卸與最終處置作業時，考量體外輻射與衰變熱，而限制這些核種之濃度。除非由本表內其他核種決定廢棄物歸於 C 類廢棄物，否則應歸於 B 類廢棄物。		
註二：	多核種之分類： 若低放射性廢棄物中含有多核種時，其分類應案下式判斷。 $$\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{C_{i,x}}\le 1$$ 式中 C_i：第 i 個核種之濃度 $C_{i,x}$：第 i 個核種第 X(X=A、B、C)類之濃度值 N：所含核種之數目 若滿足上式，則可歸為第 X(X=A、B、C)類廢棄物。		

II. 主要內容

2.1. 研究方法簡介與規劃：本研究旨在建立及發展「濕氧化(酸)剝離連續萃取方法(wet oxidation-acid stripping sequential extraction method)」進行環境或低放射性廢料液態試樣中碳-14 之分離與收集，並對碳-14 活性濃度進行測定。設計之之濕氧化酸碳-14 分析系統主要利用強氧化劑 $K_2S_2O_8$ 及 $AgNO_3$ 將試樣中 C-14 轉化成 $^{14}CO_2$，分離後的 $^{14}CO_2$ 以 CARBO-SORB® E 進行捕獲吸收，接著再加入 PERMAFLOUR® E+閃爍液，配製成計測樣品，並以液態閃爍計數儀進行計測程序。其研究內容規劃主要如下述：

(1). 參考及比較文獻上之分析方法及程序，擬自製建立濕氧化（酸）剝離法為 ^{14}C 進行分離與捕獲，組裝後完成系統測試並擬定分離程序、計測程序及效率校正之程序等。

(2). 評估連續萃取法及使用之化學試劑因子對回收率之影響。

(3). 利用建立之濕氧化（酸）剝離連續萃取方法進行環境或低放射性廢棄物試樣之碳-14 分析；同時，完成 $^{14}C/^{60}Co$ 比例因素評估及儀器最小可測量活度（Minimum Detectable Activity; MDA）計算。

2.2. 儀器設備：液體閃爍計測儀（Perkin-Elmer™ Tri-Carb® 2910; PerkinElmer Quantulus GCT 6220）、列表機、數字型溫控器、硬殼加熱包（Glas-colTM）、蛇形冷凝管套件（30 公分）、三頸圓底反應瓶（250 毫升）、氮氣鋼瓶（N2）、超音波振盪器（DC-150）、烘箱（DO30）、計時器（24 小時）、微量吸管套組（VITLAB）、天秤（FX-300i）、閃爍計數瓶（20 毫升）、橡膠氣送管、鐵氟龍氣送管（白管）、樣品試管架（30 毫米 x 30 毫米）。

2.3. 藥品試劑：Carbon-14 standard（9.12 x 10^5 dpm/mL, May 29, 1990; 3442 Bq/mL, Aug 15, 2023）、CARBO-SORB® E（Perkin-Elmer™；organic amines; dissolved in toluene and xylenene; 1 mL of CARBO-SORB® E can absorb 4.8 mM of carbon dioxide）、PERMAFLOUR® E+（Cocktail; Perkin-ElmerTM; primary matrixes as toluene）、$K_2S_2O_8$（Merck®; oxidizer）、Na_2CO_3（SigmaAldrich®; CO_2 supplier）、$AgNO_3$（Merck®; catalyst）、HNO_3（for washing）。

2.4. 分離程序：**圖 1** 為利用碳-14 濕氧化（酸）剝離系統進行分離程序及計測示意圖。原理為利用強氧化劑在 150℃下將試樣中無機碳轉化為二氧化碳（$^{14}CO_2$），並利用碳捕捉液將其收集後以液態閃爍計測儀計測碳-14 活度。分離程序在透過連續萃取法及不同試劑化學因子評估其對化學回收率之影響，以發展出最佳化的分離程序與計測方式。

2.5. 計測與效率校正程序：使用 LSC 進行試樣的絕對定量分析時。首先，必須先完成建立該核種之校率效正。確認 Quench-Standard 建立後，於 QuantaSmart 電腦畫面中，按以下路徑完成碳-14 試樣「Assay Protocol」設定：File→New Assay→DPM（single） Type→Radionuclide Name 中，建立試樣條件→按 Save As 並輸入 File Name。確認此「Assay Protocol」連結上先前設定之 Quench-set。接著，將滑鼠移動到螢幕左邊欲使用的旗標號碼(例如：Flag 2)，按下右鍵點選 Associate Assay→選擇要分析的 File Name，點選後進行連結。完成上述「Assay Protocol」相關設定及連結後，依序放入待測碳-14 試樣於卡夾中，

並插入所連接的號碼旗標（例如：Flag 2），待樣品放置於機槽內平衡 1 小時後，按下綠色旗標開始進行碳-14 試樣計測。計測完後，分析報告由列表機列印輸出。

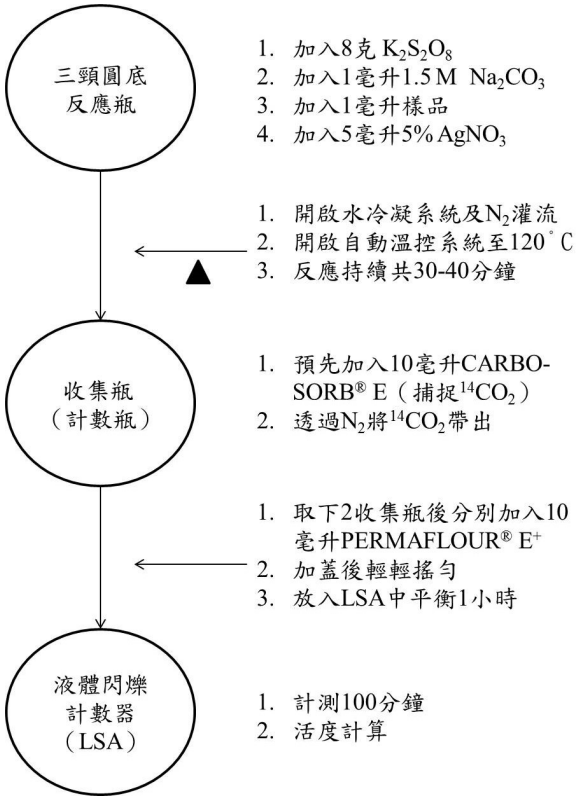


圖 1：碳-14 濕氧化（酸）剝離系統進行分離程序及計測示意圖。

2.6. 連續萃取及化學回收率因子評估、分析活度及儀器最小可測量活度計算：

連續萃取及化學回收率因子評估：本實驗以濕氧化（酸）剝離連續萃取方法在不同化學試劑因子中對碳-14 化學回收率影響評估。其中，不同化學試劑因子參數包括：試樣中有機物質含量；氧化劑；催化劑；碳酸鈉。透過系統分別進行萃取一次、兩次及三次實驗，接著對化學回收率評估。在化學分離程序前試樣加入放射性碳-14 標準品與經由濕氧化酸剝離法分離並經由液態閃爍計數儀測得碳-14，其分離後碳-14 活度值與最初添加標準碳-14 活度值之比值即為化學回收率。

分析活度計算：試樣分析活度及標準差計算如下。

$$DPM = A_s - A_b = \frac{R_s - R_b}{E_{ff}}$$

$$A\ (Bq/L) = \frac{A_s - A_b}{60} \times \frac{1}{V}$$

$$\sigma\ (cpm) = \sqrt{\frac{R_s}{t_s} + \frac{R_b}{t_b}}$$

$$\sigma\ (Bq/L) = \frac{\sigma\ (cpm)}{E_{ff} \times 60} \times \frac{1}{V}$$

上述各名詞定義如下：DPM：每分鐘衰變率、A_s：試樣衰變率（dpm）、A_b：背景衰變率（dpm）、R_s：試樣計數率（cpm）、R_b：背景計數率（cpm）、E_{ff}：計算效率、A：放射活度（Bq/L）、V：試樣體積（L）、t_s：試樣計測時間（min）、t_b：背景計測時間（min）。

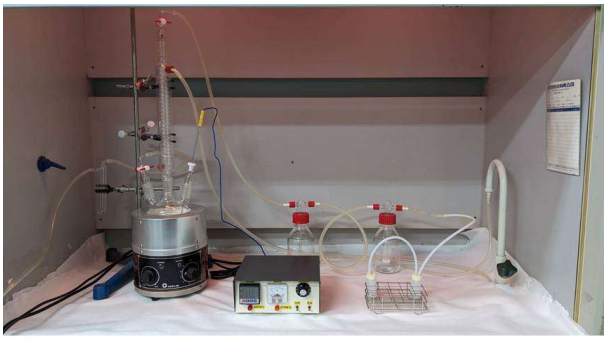
最小可量測活度計算：此濕氧化（酸）剝離連續萃取方法進行碳-14 分析，其液態閃爍計數儀對碳-14 的儀器最小可測量活度（minimum detectable activity; MDA）計算，其公式所列如下：

$$MDA\ \left(\frac{Bq}{V(L)}\right) = \frac{4.65 \times \sqrt{B} + 2.71}{60 \times E \times R \times V \times T}$$

其所得單位為：活度／體積（Bq/L）。式中各名詞定義如下，T：適當之空白試樣計數時間（min）、E：待測核種的計數效率、R：化學回收率、V：試樣量（L），以體積或質量為單位表示、B：適當之空白試樣的計數值（$B = R_b \times t_b$；R_b 為背景計數率（cpm），t_b 為背景計測時間（min），適宜空白試樣含合適物質與雜質（或干擾物質）；化學處理程序、計測方法、計測時間及幾何形狀均與待分析之試樣相同。

III. 結果與討論

3.1.碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取系統建立：完成建置的碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取系統如**圖 2** 所示。其系統主要涵蓋四大部份包括：（一）水循環冷凝系統；（2）氣送及流速系統；（3）加熱及控溫系統；（4）收集及緩衝系統確認。系統組裝後，依序完成各部份功能測試，使進行後續相關實驗及分析。



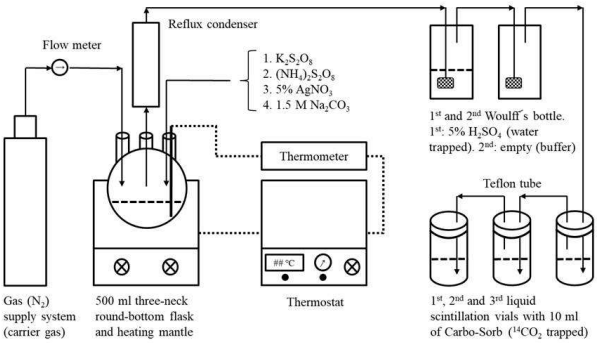


圖 2：碳-14 濕氧化（酸）剝離系統。圖（上）為建置之實體設備，圖（下）為系統結構示意圖。

3.2. 碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取方法之操作程序：碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取方法之樣品分析流程如**圖 3** 所示。前置作業部份，確認「碳-14 濕氧化（酸）剝離系統」裝置及連接正常，包括加熱暨溫度監控系統、水冷凝系統、氣送系統、水蒸氣捕捉暨緩衝系統（包含 2 個 500 毫升玻璃瓶；第 1 個含 200 毫升的 5%硫酸；第 2 個為空瓶當作緩衝瓶使用）、二氧化碳（$^{14}CO_2$）收集系統（包含 2 個 20 毫升閃爍計數瓶，分別裝填 10 毫升 CARBO-SORB® E 溶液）。

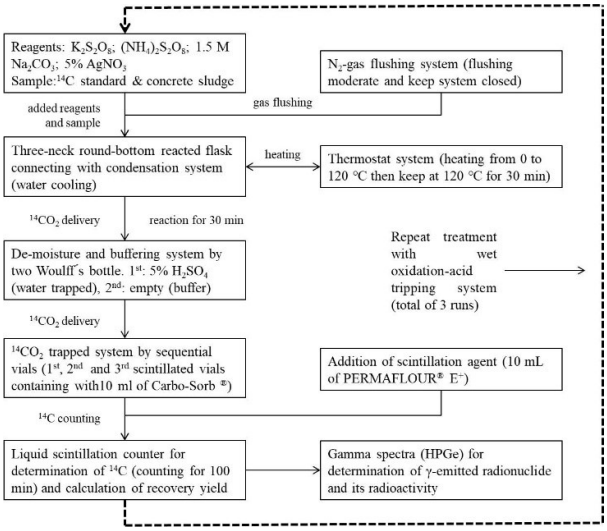


圖 3：碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取法之分析流程圖。

3.3. 化學回收率因子評估：碳-14 濕氧化（酸）剝離連續萃取方法在不同反應條件下之碳-14 化學回收率結果如**表 3** 所示。結果顯示除了第 3、4、5、8 組其化學回收率未達 90%外，其餘組別在經過連續三次的濕氧化（酸）剝離萃取反應後，其化學回收率皆可高於 90%。

表 3：濕氧化（酸）剝離連續萃取方法在不同條件下之碳-14 化學回收率結果。

Group	Recovery yield of ^{14}C (%)			
	Run 1	Run 2	Run 3	Total
1	69.3	20.6	0.1	90.1
2	46.5	44.0	2.7	93.2
3	22.8	57.9	7.7	88.3
4	6.6	23.7	24.5	54.7
5	18.5	54.2	10.7	83.3
6	46.5	44.0	2.7	93.2
7	50.7	37.9	1.6	90.2
8	13.1	56.3	8.1	77.5
9	46.5	44.0	2.7	93.2
10	32.2	55.1	5.5	92.8
11	54.4	38.4	2.8	95.5
12	46.5	44.0	2.7	93.2
13	44.9	45.5	2.1	92.5
14	53.4	38.2	3.3	94.9
15	55.2	38.0	1.2	94.4
16	17.0	70.6	7.7	95.4

Note: Concentration of silver nitrate: 5% (w/w). Concentration of sodium carbonate: 1.5 M

3.4. 最小可測量活度：本研究中，利用碳-14 標準射源（添加射源活度為 6.884 Bq）作為示蹤劑以濕氧化（酸）剝離連續萃取系統進行碳-14 的三次連續萃取收集其轉化之二氧化碳，並連同背景空白試樣以液態閃爍計數儀 PerkinElmer Quantulus GCT 6220 進行計測 500 分鐘。其三次分別收集到測得之碳-14 活度為 2.938、2.164 及 1.269，加總為 6.371 貝克；故其系統之化學回收率為 0.925（RY = 6.371/6.884）。在 10 毫升 Carbo-Sorb 與 10 毫升閃爍液的 LSC 計測配方其偵測效率為 83.1%。因此，儀器的最小可測量活度（minimum detectable activity; MDA）經公式計算後得 MDA 為 0.79 Bq/L（此值與國際間現行利用 LSC 量測碳-14 之 MDA 相當）。其 MDA 計算式列出如下：

$$\mathrm{MDA}\ \left(\frac{\mathrm{Bq}}{\mathrm{V}}\right) = \frac{4.65 \times \sqrt{\mathrm{B}} + 2.71}{60 \times \mathrm{E} \times \mathrm{R} \times \mathrm{V} \times \mathrm{T}}$$

$$= \frac{4.65 \times \sqrt{2.95 \times 500} + 2.71}{60 \times 0.831 \times 0.925 \times 0.01 \times 500} = 0.79\ \mathrm{Bq/L}$$

IV. 結論

本研究完成濕氧化（酸）剝離連續萃取方法進行碳-14 分析之技術開發。研究中利用連續萃取法及化學試劑因子對化學回收率之影響評估，找出其最佳化的碳-14 分析條件及程序，此方法可得化學回收率在大於 90%，液態閃爍計數儀之最小可測量活度為 0.79 Bq/L。同時，此研究案所建立的碳-14 分析技術亦完成技術轉移給研究案之需求政府相關單位，包括協助需求單位建立該分析系統、提供相關教育訓練及撰寫標準作業程序書供參考等。另外，本研究所建立並優化之「濕氧化（酸）剝離連續萃取方法」進行碳-14 分析，有較低成本及操作方便等優勢；同時，其系統替換零組件方便，容易維持系統之可用率，容易排除放射性核種分析時所造成的記憶效應及污染等問題。未來，此系統可作為諸多碳-14 分析相關研究之基本設備工具，或進一步結合管式燃燒爐之碳-14 分析方式開發，在環境或低放射性廢棄物試樣進行應用。

參考文獻

[1] J.C. Evans, E.L. Lepel, R.W. Sanders, C.L. Wilkerson, W. Silker, C.W. Thomas, K.H. Abel, D.R. Robertson, August 1984. Long-lived activation products in reactor materials, NUREG/CR-3474.

[2] NRC(1982) Licensing requirements for land disposal of radiactive waste. Final rule 10 CFR61, Federal Register 47.

[3] NRC (1980) Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station. NUREG/CR-0672.

[4] A.A. Moghssi, H.W. Godbee, S.A. Hobart (1986) Radiactive Waste Technology. The American Society of Mechanical Engineers..

[5] Hou et al. Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples. Analytica Chimica Acta 2008;608:105-139

病人協助者與生醫研究參與者之醫療輻射曝露劑量約束
Dose Constraints for Carers and Comforters and Individuals Participating in Medical and Biomedical Research Involving Medical Exposures to Ionizing Radiation

計畫編號：NSTC 112-2623-E-007-002-NU

計畫主持人：蔡惠予
e-mail：huiyutsai@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：陳昱瑄、廖珈瑋、何佩珊
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

這篇研究旨在探討病人協助者與生醫研究參與者在接受醫療曝露時的劑量約束問題，特別關注於如何最佳化這些群體的輻射防護策略。研究背景基於國際放射防護委員會(ICRP)及其他國際組織的相關報告，系統性地回顧了國際及各國現行的輻射防護法規與指引。本文首先分析了針對病人協助者與生醫研究參與者的不同醫療曝露情境下的劑量約束設定，並提出了具體的管理措施。研究結果顯示，針對這些特殊群體，應依據年齡、曝露風險以及醫療程序的特性來調整劑量約束值，以達到合理抑低(ALARA)的最適化原則。此外，本文亦強調了在制定劑量約束時，需考量不同醫療曝露類型的風險-效益比，並建議進一步完善輻射風險評估方法，以確保病人協助者與生醫研究參與者的健康安全。研究結果對於未來制定相關輻射防護政策具有重要參考價值。

關鍵詞：劑量約束; 最適化; 病人照顧者; 自願者;醫療曝露

Abstract

This study aims to explore the dose constraints for carers and comforters, as well as individuals participating in biomedical research involving medical exposure to ionizing radiation, with a focus on optimizing radiation protection strategies for these groups. The research is grounded in reports from the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and other international organizations, providing a systematic review of current radiation protection regulations and guidelines worldwide. The study first analyzes the setting of dose constraints under different medical exposure scenarios for carers and biomedical research participants, proposing specific management measures. The results indicate that dose constraints for these special populations should be adjusted according to age, exposure risk, and the characteristics of medical procedures to achieve the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) optimization principle. Additionally, the study highlights the need to consider the risk-benefit ratio of different types of medical exposures when establishing dose constraints. Further improvement in radiation risk assessment methods is recommended to ensure the health and safety of carers and biomedical research participants. The findings of this study provide valuable insights for future policy-making in radiation protection.

Keywords: dose constraints; optimization; carers and comforters; volunteers; medical exposures

I. 前言

劑量約束是醫療曝露最適化的一種具體實踐，為利於醫療曝露劑量約束管理應用技術順利引進國內實施，鑑於醫療輻射曝露的劑量約束，乃涵括兩類人員：病人協助者、生醫研究參與者，因此本計畫將依據核安會計畫需求與研究重點，擴展至病人協助者與生醫研究參與者都一併納入考慮且微調其研究重點。因此，本計畫的研究題目更新為「病人協助者與生醫研究參與者之醫療輻射曝露劑量約束」，研究目的則為：(1)針對病人協助者探討劑量約束值的設立與管理辦法，依據診療情境(核醫診療、介入性診療、放射腫瘤治療)研析病人協助者之劑量約束法規、措施指引；(2) 針對生醫研究參與者之劑量約束值的設立與管理辦法，並針對人體試驗委員會審查相關研究案之輻射防護考量，研析措施指引。

II. 研究資料的來源與架構

A. 研究資料來源

本計畫研究資料來源之蒐集程序如下：首先盤點現有國際重要文獻，研析國際組織的相關報告，以建構整體架構，再者探討其他國家對劑量約束的管理政策與指引，最後聚焦於劑量約束之劑量評估研究方法與結果彙整。

首先，我們由國際組織的輻射防護系統開始整理，且將提及醫療輻射曝露且涉及病人協助者與生醫研究參與者的文獻內容納入，包括：國際放射防護委員會所提出的 ICRP 103 號報告 (ICRP, 2007a)與 105 號報告 (ICRP, 2007b)；國際原子能總署提出的 IAEA GSR Part 3 報告 (IAEA, 2014) 與 SSG-46 報告 (IAEA, 2018d)；歐盟下的歐洲原子能共同體 (EURATOM) 提出的理事會指令 (EU, 2014)；英國與愛爾蘭的游離輻射法(Ireland, 2019a; UK, 2018)，與醫用游離輻射法(Ireland, 2019b; UK, 2017)。透過研析國際組織的專業報告，以了解國際組織與重要單位，對於醫療曝露的規劃設計。

其次則針對英國的法規架構中對於病人協助者與生醫研究參與者之醫療輻射曝露劑量約束 (HIQA, 2020)，研析其所提出的具體指引。針對美國 NCRP 185

報告 (NCRP, 2020) 就涉及使用游離輻射的醫療研究方案之輻射風險管理，研析其指導原則與相關指引，以提供給 IRB，讓 IRB 可以有所依據去制定審查方案和審查涉及人體受試者的研究計畫。

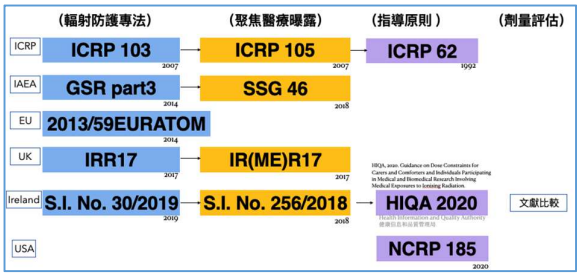
再者，計畫主持人透過個人所建立的研究關聯管道，向國際放射防護委員會 Committee 3 (醫療輻防)、Committee 4 (輻防應用)的專家請益，了解國際放射防護委員會在醫療曝露劑量約束上的未來規劃與相關實務策略。

接著，研究團隊會在 PubMed 資料庫與 Scopus 資料庫進行關鍵字搜尋，目前擬採用的關鍵字是「dose constraints for carers and comforters」與「comforters and carers, radiation」，定時持續搜尋。本計畫已有找到 11 篇相關文獻，提者的劑量分佈，因此將仔細研讀這些初始文獻，以作為關鍵字選定的修正參考，以期找到更多具體相關的研究數據。

最後，本計畫回顧以上所提之重要文獻，並持續蒐集相關文獻以進行研析。此外，也研析各國落實這些建議的實際作為，包括法規、指引與管理方法，並於計畫完成後提出將劑量約束納入台灣輻射防護體系之具體建議。

B. 研究資料的架構

回顧所有文獻，將國際及國家輻射防護標準與報告間的相互關係以圖一作系統化概覽。圖一顯示的法規和報告之間，存在層次分明的關聯，由國際專業組織 (如國際放射防護委員會 ICRP)，聯合國組織 (如國際原子能總署 IAEA)，區域組織(如歐盟 EU)，乃至於國家組織(如英國 UK、愛爾蘭 Ireland)，反映出相關規範的國際協調一致性。本計畫將之分為輻射防護專法、聚焦醫療曝露、指導原則、與劑量評估，當論及病人協助者與生醫研究參與者之醫療輻射曝露劑量約束時，這個關係圖的設計有助於輻射防護專業人員與監管機構準確理解不同規範間的對應關係，以及這些規範在全球範圍內實施的一致性與互操作性。



圖一、本計畫的文獻資料分析架構

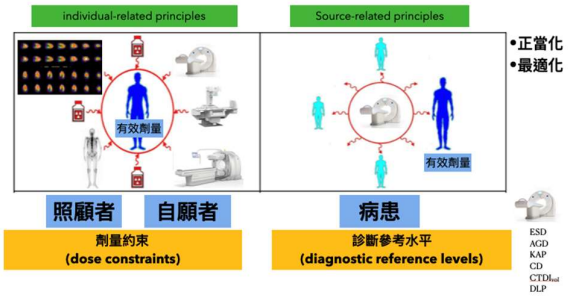
III. 輻射防護系統之醫療曝露劑量約束

A. 國際輻射防護委員會的設計架構

根據 ICRP 103 號報告 (ICRP, 2007a) 所建議的輻射防護系統，應就曝露情節、曝露類型、與輻射防護原則等三個面向，來了解醫療曝露劑量約束所位在的層級。在輻射防護系統中，曝露情境以曝露發生的狀況，可分為計畫曝露(planned exposure)、緊急曝露 (emergency exposure)、既存曝露 (existing exposure)；曝露類型則以人員的身份可區分為職業曝露 (occupational exposure)、公眾曝露 (public exposure)、醫療曝露 (medical exposure)；輻射防護原則所闡述的理念則分為正當化、最適化、限制化。醫療曝露下，需遵行正當化、最適化，但沒有限制化的劑量限度，醫療曝露主要涉及病患，採用參考水平來達成最適化輻射防護原則，但醫療曝露也可能涉及病人的照顧者與安慰者，和醫學研究中的自願者，這部分則用劑量約束來管理之，以實踐最適化輻射防護原則。

若將曝露情境與曝露類型作為兩個維度來分析輻射防護原則之適用性(ICRP, 2007；IAEA, 2014)，輻射防護原則中的正當性適用於所有曝露情境與所有曝露類型；最適化則可用劑量約束與參考水平來實踐之；限制化則僅有計畫曝露情境下的職業曝露與公眾曝露才適用，醫療曝露並不適用。三種曝露情境下，另可用劑量約束來管理，而劑量約束都是以有效劑量(effective dose, E)表示之，至於醫療曝露的劑量約束，國際放射防護委員會與國際原子能總署建議可介於 1～20 mSv。

輻射防護原則中的限制化與最適化都是以有效劑量來規範，ICRP 103 號報告指出，限制化與最適化原則下人員與輻射源之關係，區別是劑量限度以人員為管制對象，最適化則是以輻射源為管制對象。將這個概念延伸，用來解釋醫療曝露的最適化，圖二右側呈現「與輻射源相關原則」，對病患的最適化是使用診斷參考水平（diagnostic reference levels），這涉及對輻射源（醫療輻射設施）的規範，以合理抑低對病患造成醫療輻射劑量。以下列舉作為輻射源的醫療輻射設施所管制的劑量指標 (dose index)，入射表面劑量（entrance surface dose, ESD）、平均乳腺劑量（average glandular dose, AGD）、空氣克馬面積乘積（air kerma area product, KAP）、累積劑量（cumulated dose，CD）、體積電腦斷層劑量指標（volume CTDI, $CTDI_{vol}$）及劑量長度乘積（dose-length product, DLP），這些指標有助於量化評估醫療輻射過程中患者所受的實際輻射劑量。



圖二、輻射防護之概念架構：個體相關原則與輻射源相關原則

圖二左側呈現「與個體相關原則」，個體是指對病人的照顧者與安慰者，和醫學研究中的自願者，對這些個體的最適化是使用劑量約束（dose constraints），配以醫療影像指向圖中的個體，表達出劑量管理應關注個體所受到的劑量，是以有效劑量來管理個體的輻射風險。整體而言，圖二為醫療輻射防護領域中的專業人士提供了一個視覺化工具，協助理解並實施相關防護措施。

針對病人的照顧者與安慰者，和醫學研究中的自願者，醫療曝露的最適化原則劑量約束通常介於 1 ~ 20 mSv。

B. 醫療曝露之個體與知情同意

醫療曝露所涉及的個體，包括病患、照顧者與安慰者、醫學研究的自願者。**病患**是指，接受診斷、介入和治療等目的之醫療曝露的個人，也包括對懷孕或哺乳的患者，進行醫療曝露時對胚胎/胎兒或嬰兒的曝露；**照顧者與安慰者**是指，家庭成員、親密朋友或其他安慰者等個人，在明瞭且自願的情況下參與的非職業性曝露行為，即在醫院或家中協助進行診斷或治療的病患，為他們提供支持與安慰；**醫學研究的自願者**是指，作為生物醫學研究計畫的一部分而自願承擔的曝露，該計畫不為自願者提供直接利益。

歐盟所提出的歐洲指令 (European Directive) **(EU, 2014)**，將照顧者和安慰者定義為「……通過幫助（而不是作為其職業的一部分）正在經歷或曾經經歷過醫療照射的個人的支持和舒適，而有意並自願受到游離輻射照射的個人」。對於因這種狀況而受到醫療曝露的照顧者，規定這類的醫療曝露必須對病患的健康、或照顧者、或被照顧者的利益存在足夠的淨收益（當考慮到潛在的接觸風險時），以證明接觸的合理性。

這些個體都具備一個重要特徵是**自願接受醫療曝露**。對於病患而言，使用放射線進行醫療，本質上病患是自願的，並結合了對病患對自身健康的期望，這對病患而言是直接的益處(benefit)。作出自願曝露的決定，會是在不同程度的知情同意 (inform consent) 下所做的決定，需包括預期的益處，與潛在風險（包括放射線）。

為了獲得知情同意，提供的信息量之多寡會有所不同，通常是基於曝露水平（例如是診斷性、介入性、還是治療性），和基於可能由於放射線曝露而出現的緊急醫療情況。一般而言，對低風險程序(如胸部 X 光程序)所需取得的知情同意較少，介入性程序則需要獲得更多的知情同意，而大多數放射線治療之前，通常會獲得高水平的知情同意。

自願接受醫療曝露通常是使個體有直接的個人醫療益處，但此概念的例外是在生物醫學研究中使用輻射曝露，此時的自願曝露通常是為了社會利益而不是個人利益，因此這部分的知情同意是必要的。

C. 醫療曝露劑量約束之設定值

為了達成最適化原則所倡導的合理抑低 (as low as reasonable achievable, ALARA)，國際原子能總署在《醫用游離輻射的輻射防護與安全》(Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation) (IAEA, 2018d)，特別闡述對照顧者與安慰者、以及參與生物醫學研究的自願者，應建立醫療曝露的劑量約束。參與生物醫學研究的個體所涉及醫療輻射曝露的研究，預期這照射不會對個人產生直接的醫療益處，而是對社會群體有益處。依據自願者所參與的研究類型之益處區分為四類，參見表一，隨著生物醫學研究對社會利益的程度愈高，則自願者的劑量約束值亦隨之放寬 (ICRP, 2007a)。

表一、自願參與生物醫學研究者之劑量約束

自願參與生物醫學研究者對社會利益程度	ICRP 60 號及後續報告	ICRP 103 號	輻射風險（曝露所引起的危害機率）
低	< 0.1 mSv	< 0.1 mSv	$<10^{-6}$
中	~ 1 mSv	~ 1 mSv	$\sim 10^{-5}$
適度	1 ~ 10 mSv	1 ~ 10 mSv	10^{-4}
高 （顯著）	> 10 mSv	> 10 mSv	10^{-3}

近年生物醫學研究的趨勢，亦會探討醫療曝露程序或臨床檢查的相關研究，然而公眾和醫學界對游離輻射、醫療程序中涉及的輻射以及輻射的潛在不利影響的了解程度差異很大，因此美國輻射防護與度量委員會 (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP) 提出 NCRP 185 報告(NCRP, 2020)，針對美國許多學術機構為開展人類研究（包括涉及輻射的研究）提供了指導方針，但這些指導方針缺乏統一性，國家輻射防護委員會認為有必要就使用游離輻射的研究方案的輻射風險，給予全面、一致和準確的指導，以提供給人體試驗委員會 (Institutional Review Board, IRB)，讓 IRB 可以有所依據去制定審查方案和審查涉及人體受試者的研究計畫。NCRP 185 號報告提供以下資訊與策略：(1)提供有關游離輻射和輻射生物學的基本信息，包括涉及輻射的醫學成像和治療；(2)確定監督研究和輻射的政府機構；(3)引用相關監管要求；(4)就研究方案中的輻射劑量和風險估計提供指導；(5)討論人體研究中涉及的倫理考慮；(6) 詳細介紹，確保和獲得真正知情同意的要求。

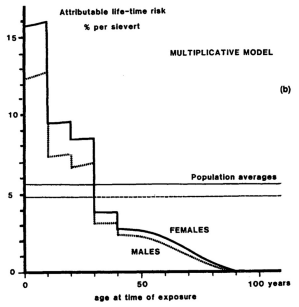
以有效劑量設定劑量約束時，應考慮年齡與風險。由於國際放射防護委員會開發的風險估算值，如表二所示(ICRP, 1991)，成人群體之輻射風險平均值為 5.6×10^{-2} Sv^{-1}，適用於工作人口，全年齡群體平均值為 7.3×10^{-2} Sv^{-1}，適用於全年齡人口，涵蓋風險較高的小兒群體，這兩種風險值是針對年齡和性別的**平均**人口群體所評估出的風險值，可用於建立輻射防護指引。

由於輻射風險會根據曝露年齡和曝露的器官和組織，對不同年齡群組而有所不同，如圖三所示(ICRP, 1991)，當接受輻射曝露的年紀愈大時，可歸因終生輻射風險就隨之變小。對於年幼兒童的曝露，可歸因的終身死亡風險（所有類型的癌症）會更高，可能高出 2 到 3 倍。對於許多常見的診斷檢查，每單位劑量的較高風險可能被成人所接受劑量的相對減少所抵消。對於大約 60 歲的曝露年齡，風險會較低，可能低 3 倍。曝露年齡愈高時，風險就更低，因此設置劑量約束時，是採用有效劑量，故考慮年齡因素，則年長者的劑量約束可放寬。

表二、以有效劑量推算輻射風險之估算值

	Detriment (10^{-2} Sv^{-1})[1]			
Exposed population	Fatal cancer[2]	Non-fatal cancer	Severe hereditary effects	Total
Adult workers	4.0	0.8	0.8	5.6
Whole population	5.0	1.0	1.3	7.3

[1] Rounded values.
[2] For fatal cancer, the detriment coefficient is equal to the probability coefficient.



圖三、單一小劑量曝露之可歸因終身(attributable life-

time)輻射風險

將醫療曝露的劑量與人類其他曝露源的劑量進行比較時，很難應用有效劑量的概念，因為其他來源的有效劑量值是針對年齡和性別平均的人口。有效劑量可用於比較來自不同診斷程序的劑量，以及比較不同醫院和國家使用類似技術和程序的情況，以及為相同的醫學檢查使用不同技術的情況，前提是參照對象，與病患或病患群體在年齡和性別方面相似。對於規劃病患曝露和風險-效益評估，相關的量是被照射組織的等價劑量或吸收劑量。

D. 實用的輻射防護方法

協助病患的朋友和親人也是自願者，但對病患和照顧者都有直接的益處。他們的曝露被定義為醫療曝露，然而另一種狀況需有進一步的考量，當核醫病患出院後，對於他們的家庭訪客和家庭成員應該要制定曝露約束，以確保病患的家庭成員與訪客之輻射防護原則，這些群體也可能包括兒童。

國際放射防護委員會以前未曾提出這類劑量約束值之建議，但成年人曝露的約束值為 5 mSv/療程（即病患治療後特定釋放的持續時間）**(ICRP, 2007b)**，國際放射防護委員會認為此值是合理的。然而約束需要以靈活的方式使用，例如，對於時常生病的兒童之父母，可能需要更高的劑量約束。年幼的兒童、嬰兒和未參與直接安慰或護理的訪客應被視為公眾的一員（受公眾每年劑量限制的約束，即 1 mSv/年）。若照顧者是較為年老的長者，則年長者對病患進行照顧的劑量約束則可放寬。劑量約束的調整，可源自於可歸因輻射風險是取決於受曝露的年紀**(**ICRP, 1991)，如圖三所示，年長者的輻射風險較低，因此可放寬劑量約束值。

自願者在生物醫學研究中的使用對醫學和人體放射生物學做出了重大貢獻。一些研究對疾病的調查具有直接價值，而其他研究則提供了有關製劑和放射性核種代謝的訊息，這些製劑和放射性核種可能被從工作場所或環境的污染中吸收。並非所有這些研究都在醫療機構進行，但國際放射防護委員會將所有這些自願者的曝露納入醫療曝露的範疇。

ICRP 62 報告(ICRP, 1992)中解決了在生物醫學研究中使用自願者的道德和程序性方面。主要方面包括需要保證自願者的自由和知情的選擇，採用與研究的社會價值相關聯的劑量約束，以及使用可以影響研究設計和進行的倫理委員會。ICRP 62 報告還討論了在生物醫學研究中使用兒童和精神病病患或缺陷者的情況。倫理委員會應該輕鬆獲取放射防護建議是很重要的。

在許多國家，生物醫學研究中的孕婦輻射曝露並未明確禁止。但是，他們參與這類研究的情況非常罕見，除非懷孕是研究的組成部分，否則應該加以阻止。為了保護胚胎/胎兒，應該對這些情況中的輻射使用進行嚴格控制。

在設定參與生物醫學研究計劃的自願者進行的診斷放射學程序的劑量約束時，意圖是政府透過與衛生機構、相關專業機構和輻射防護監管機構協商，為倫理委員會提供廣泛的指導（參見附錄），然後倫理委員會將根據考慮中的生物醫學研究計劃調整劑量約束。設定此類劑量約束需要考慮典型的病患劑量和國家參考水平(National Diagnostic Reference Level, NDRL)。

關於醫療曝露的受眾所應考量要點，對病患的照顧者與安慰者而言，病患是受益者，而照顧者會承受輻射風險，劑量約束可設定為每次療程為 5 mSv，或以公眾的每年 1 mSv 來約束之。對生物醫學研究計劃的自願參與者而言，社會是受益者，而自願者會承受輻射風險，應注意自願者的知情同意，確保自願者可自由選擇，避免自願者是懷孕婦女，且整個研究計畫需通過人體試驗委員會的審查，並設立合宜的劑量約束。

IV. 照顧者與安慰者的劑量量測/評估範例

參考近期的發表文獻，對於照顧者與安慰者的劑量量測或評估方法：針對一般放射學檢查，乃以假體與劑量計量測，取得照射場的散射輻射量，再佐以臨床照射條件與照顧者位置去推算劑量；針對核子醫學的兒童照顧者，則以配戴全身個人劑量計以進行量測。以下將此兩篇文獻摘錄如下，以供作為評估照顧者與安慰者的劑量之範例。

A. 陪同一般放射學檢查時，安慰者和照顧者所接受的輻射曝露低

Perdomo 等人(Perdomo et al., 2021)發表《在一般的放射學檢查中，照顧者和安慰者是否需要穿鉛圍裙呢？》，探討在小兒一般放射學檢查期間，照顧者和慰問者經常陪伴孩子，這不僅可以提高檢查的整體成功率，還可以減少孩子的壓力和焦慮，但當考慮輻射風險時，穿鉛圍裙可能會增加照顧者和孩子對檢查的焦慮，這對放射師在現場與家屬溝通，造成具體的實際挑戰。該研究量化了照顧者在小兒一般放射學檢查期間，留在孩子身邊幫助定位或安慰他們時受到的散射輻射曝露。方法：在照顧者可能站立的四個常見位置測量了不同管電壓（40 kVp 到 100 kVp）和 PMMA 厚度（2.5–22.5 cm）的散射輻射。然後將這些數據與我們的臨床方案匹配，以估算照顧者在協助病患進行小兒一般放射學檢查期間可能受到的輻射劑量。結果：站在距離病患中心 20 cm 處的照顧者接收到的有效劑量因病患體重和檢查類型而異，從對體重小於 3 公斤的病患進行手指放射線攝影，照顧者的劑量約等同於在澳大利亞自然背景輻射下 11 分鐘，到對體重大於 70 公斤的病患進行游泳姿勢攝影(swimmers view radiograph)，照顧者的劑量約等同於在天然背景輻射下待長達 62 小時。結論：這些劑量測定數據允許根據 ALARA 原則對照顧者的輻射保護要求進行基於證據的評估。研究人員 Perdomo 所在的醫療機構，決定如果照顧者不太可能接收超過 2 μSv 的輻射劑量，則無需穿戴鉛圍裙。

B. 兒童分子放射治療中的安慰者和照顧者輻射曝露

Gains 等人**(Gains et al., 2015)**針對兒童進行分子放射治療的安慰者和照顧者所接收到的偶發輻射曝露，探討該診療程序是否已盡量保持在合理範圍內？是否在該國(英國)的國家劑量限制內？研究方法為在孩子住院期間，成人安慰者和照顧者的輻射曝露，受到全身個人劑量計的例行監測。收集了碘-131 甲基碘苯胍（^{131}I-mIBG）、鎦-177 DOTATATE（^{177}Lu-DOTATATE）和碘

-131 碘化鈉（^{131}I-NaI）治療的數據。研究結果共有 50 例高劑量雙輸液 ^{131}I-mIBG 治療和 12 例單次給藥；15 例 ^{177}Lu-DOTATATE 治療和 28 例 ^{131}I-NaI 給藥。年齡中位數為 7 歲（1-18 歲）。^{131}I-mIBG 的平均給藥劑量為 16.2 GBq（6.8-59 GBq）（對於雙輸液病患）和 8.1 GBq（5.26-16.25 GBq）（對於單次給藥）；^{177}Lu-DOTATATE 的平均給藥劑量為 7.2 GBq（2.5-7.5 GBq）；^{131}I-NaI 的平均給藥劑量為 3 GBq（甲狀腺殘餘消融）和 5.5 GBq（癌症治療）。所有給藥的安慰者和照顧者的平均人數為 2 位（範圍 1-9 位）。高劑量 ^{131}I-mIBG 給藥的安慰者和照顧者的平均有效劑量為 302 μSv（0-5282 μSv）；單次給藥的 ^{131}I-mIBG 為 163 μSv（3-3104 μSv）；^{177}Lu-DOTATATE 為 6 μSv（1-79）μSv；和 ^{131}I-NaI 為 37 μSv（0-274）μSv。只有一名安慰者和照顧者超過了 5 mSv 的劑量約束。結論：除一例案例外，安慰者和照顧者的劑量都在英國公共衛生英格蘭衛生保護局（現已併入英國公共衛生）建議的劑量約束內。新的證據表明，在例行臨床實踐中，兒童分子放射治療的照顧者和安慰者的輻射曝露水平是可以接受的低。

V. 結論

在核醫治療領域，照顧者與安慰者的輻射曝露劑量值是一項重要關注點。這些個體有潛在超過劑量約束的風險，尤其是在實施新型治療方法時，因此，應優先考量此類風險，並針對照顧者與安慰者提供專門的研究與評估數據。在診斷放射學、核醫診斷等領域，照顧者與安慰者所接受的劑量較低，目前的數據顯示，劑量約束的風險尚未超過安全界限。

為保障所有涉及的個體，包括照顧者、安慰者以及醫學研究自願者的安全與權益，必須嚴格遵守正當化和最適化的原則。任何可能導致輻射曝露的程序都需有充分的理由，且應採取所有合理抑低措施來最小化劑量，同時不損害治療效果。在此過程中，知情同意是不可或缺的一環，所有參與者必須充分理解其可能面臨的風險並願意接受。對於自願參與醫學研究的人員，研究程序必須獲得倫理委員會(人體試驗委員會)的批准，並確保醫療曝露的劑量不會超過類似醫療程序的國家診斷參考劑量水平。

總結而言，本計畫強調對於輻射曝露個體進行全面評估的重要性，尤其是在引入新的治療方法時。同時，必須持續關注和改進知情同意的過程，以及持續將倫理考量作為醫學研究中不可或缺的一部分。

參考文獻

[1] EC, 1998. Guidance on medical exposures in medical and biomedical research. Publications Office.

[2] EU, 2014. COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM.

[3] Gains, J.E., Walker, C., Sullivan, T.M., Waddington, W.A., Fersht, N.L., Sullivan, K.P., Armstrong, E., D' Souza, D.P., Aldridge, M.D., Bomanji, J.B., Gaze, M.N., 2015. Radiation exposure to comforters and carers during paediatric molecular radiotherapy. Pediatr Blood Cancer 62, 235–239. https://doi.org/10.1002/pbc.25250

[4] HIQA, 2020. Guidance on Dose Constraints for Carers and Comforters and Individuals Participating in Medical and Biomedical Research Involving Medical Exposures to Ionising Radiation.

[5] IAEA, 2018a. Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities (No. General Safety Guide No. GSG-10).

[6] IAEA, 2018b. Establishing the Infrastructure for Radiation Safety (No. Specific Safety Guide No. SSG-44).

[7] IAEA, 2018c. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment (No. General Safety Guide No. GSG-9).

[8] IAEA, 2018d. IAEA Safety Standards: Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation (No. No. SSG-46).

[9] IAEA, 2014. IAEA Safety Standards: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (No. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3).

[10] ICRP, 2007a. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. (No. ICRP Publication 103), Annals of the ICRP. Elsevier Ltd.

[11] ICRP, 2007b. ICRP Publication 105: Radiological Protection in Medicine (No. ICRP Publication 105).

[12] ICRP, 1992. ICRP publication 62: Radiological Protection in Biomedical Research.

[13] ICRP, 1991. ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. (No. ICRP Publication 60), Annals of the ICRP. Elsevier Ltd.

[14] Ireland, 2019a. S.I. No. 30 of 2019 - Radiological Protection Act 1991 (Ionising Radiation) Regulations 2019.

[15] Ireland, 2019b. S.I. No. 256/2018 - European Union (Basic Safety Standards for Protection Against Dangers Arising from Medical Exposure to Ionising Radiation) Regulations 2018.

[16] NCRP, 2020. Evaluating and Communicating Radiation Risks for Studies involving Human Subjects: Guidance for Researchers and Institutional Review Boards (No. NCRP Report 185).

[17] Perdomo, A., McMahon, S., Wilkie, T., Fox, N., Rao, P., 2021. Do carers and comforters require lead aprons during general radiographic examinations? J Med Imag Radiat On 66, 25–33. https://doi.org/10.1111/1754-9485.13304

[18] UK, 2018. The Ionising Radiations Regulations 2017.

[19] UK, 2017. The Ionising Radiation (Medical Exposure) Regulations 2017.

高能中子通量劑量轉換因子的研究與量測系統的開發(1/2)
Studies on the fluence-to-dose conversion coefficients of high-energy neutrons and related measurement techniques(1/2)

計畫編號：MOST 112-2623-E-007-003-NU
計畫主持人：許榮鈞
e-mail：rjsheu@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：張詠涵、陳立軒
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

通量劑量轉換因子在輻射安全與劑量評估扮演核心關鍵的角色，國內目前最常用的數據庫是基於 ICRP-60 報告產生的 ICRP-74 轉換因子，觸發本研究之動機有二點：一是 ICRP 所使用的假體是以歐美人的平均體型為考量，明顯與台灣人的平均體型有所差異；二是 ICRP-74 報告的中子轉換因子最高能量只到 180 MeV，無法滿足國內各式高能量加速器的輻射環境所需。本研究第一年(112 年)深入探討高能中子通量劑量轉換因子的問題，建立了國內自主的評估技術，替未來相關實務應用建議札實基礎，也可擴展延伸各式相關應用。另外，雖然國內目前輻防系統以 ICRP-60 報告為基礎，本研究也延伸探討基於 ICRP-103 報告產生的 ICRP-116 轉換因子，此一部分的成果與經驗也相當重要，因為 ICRP-103 報告將是未來國內輻射防護法規的基礎。本研究第二年(113 年)將探討不同參考人假體模型對於體外暴露劑量評估的量化影響，檢視 ICRP 報告中使用的歐美參考人與台灣參考人的差異，及其對於不同能量中子通量劑量轉換因子的影響程度，計畫全期的研究成果與相關技術發展有利於未來國內各式加速器的延伸應用與輻射防護技術的精進。

關鍵詞：高能中子、通量劑量轉換因子、參考人假體模型、蒙地卡羅模擬。

Abstract

The fluence-to-dose conversion coefficients of neutrons and gamma rays play a central role in radiation dose assessment. The ICRP-74 coefficients based on the ICRP-60 recommendations are the most common dataset and widely used in Taiwan. The proposed study is motivated by two observations: (1) The reference computational phantoms used in ICRP are built based on the average body size of Caucasians, which is obviously different from that of Taiwanese. (2) The highest neutron energy in ICRP-74 dose coefficients is only 180 MeV, which cannot cover the whole spectra of radiation encountered in high-energy accelerator environments. In the first year of this research, we focused on the generation of fluence-to-dose conversion coefficients for high-energy neutrons to facilitate various related applications in the future. Dose coefficients based on ICRP-60 and the new ICRP-103 recommendations were calculated and compared. In the second year of this study, we intend to investigate the effects of various phantoms on the resulting fluence-to-dose conversion coefficients. The computational phantoms of Taiwanese reference man and woman will be used to generate domestic conversion coefficients and the results will be compared with those reported in the ICRP reports. In addition, measurement techniques for high-energy neutrons will be reviewed and evaluated from several perspectives, including their characteristics, limitations, and best practices. The results of this study will be beneficial to a better understanding of high-energy neutrons and related dose assessment, which in turn strengthens radiation protection at high-energy accelerator facilities in Taiwan.

Keywords: High-energy neutrons, fluence-to-dose conversion coefficients, computational phantoms, Monte Carlo simulations.

I. 前言

伴隨加速器輻射的多樣應用，近年國內新建的高能量輻射設施有持續增加的趨勢，至少包括國家同步輻射研究中心的 1.5 GeV 與 3 GeV 二座電子同步加速器、林口長庚與高雄長庚以及其他數座運行中或興建中的醫用~250 MeV 的質子癌症治療機和台北榮總的~400 MeV/A 碳離子癌症治療機，單就粒子癌症治療的設備，台灣的設施密度預期將是世界第一；從粒子加速與應用以及輻射產生的原理來看，上述這些加速器的特性各有不同，但其運轉皆不可避免會有射束損失，以及後續作用伴隨大量二次輻射的產生。加速器能量越高伴隨二次輻射場的特性也就越複雜，其包含的輻射種類更多且能量範圍也更廣，這些因素會導致設施周遭劑量評估與度量的困難及其不確定性的增加，相關議題值得設施業主與主管機關持續注意並精進研發。

通量劑量轉換因子在輻射安全與劑量評估扮演核心關鍵的角色，國內目前最常用的數據庫是基於國際輻射防護組織(ICRP)第 60 號報告[1]產生的第 74 號報告[2]轉換因子，報告內所使用的假體是以歐美人的平均體型為考量，明顯與台灣人的平均體型有所差異，如何量化此一差異有助於提升國內輻射防護水平；另外，ICRP 提供之中子轉換因子最高能量只到 180 MeV，如前所述，明顯無法滿足國內各式高能量加速器的輻射環境所需，因此如何建立完整且自主的技術能力，產生一系列適合國人平均體型的通量劑量轉換因子，並延伸其能量範圍至涵蓋國內現有與未來考慮興建之加速器應用所需，這也為本研究計畫的主要目的。

II. 主要內容

本研究並非以擬人假體的開發為重點，而是想利用假體探討高能輻射與物質作用核物理模型的適用性，以

及作用後粒子遷移的能量分布與詳細器官劑量的評估。目的是延伸 ICRP-74 通量劑量轉換因子的能量應用範圍，同時也藉機檢視歐美參考人與台灣參考人的差異，以及此差異對於不同能量範圍中子與光子通量劑量轉換因子的影響。因此有關本研究假體模型的選擇，我們規劃先以橡樹嶺國家實驗室(ORNL)系統的為基礎的 PIMAL 數學假體為起點[3]，主要原因在於台灣參考人也是數學假體，同樣類型假體的比較將易於討論並確定各項差異來源。本研究接續以 ICRP 系統的體素假體為探討與比對重點，因 ICRP 假體及其產出之通量劑量轉換因子為目前國內輻防應用的核心。另外，絕大部分假體是固定的幾何結構，不能用於標準照射姿態以外的情況，選擇 PIMAL 假體則有機會彌補此一限制，它是由 ORNL 研發建立具有可自由移動的手臂與腿部的假體模型，可由使用者自行定義手臂與腿部的位置而產生所需假體姿態的對應程式輸入碼，亦允許手動修改其所產生的程式輸入碼，讓使用者可更彈性地定義所需之複雜射源與假體姿態的配置。至於在射源項則至少涵蓋 0.01 MeV 至 10 GeV 的光子與 10^{-9} MeV 至 10 GeV 的中子由前向(AP)和均向(ISO)入射，因這兩個方向之射源在實務上最常使用。

以本研究的目的而言，第一年研究工作的最大挑戰在於如何正確模擬高能輻射與擬人假體的作用，因超過 20 MeV 的中子作用沒有完整的 Evaluated Nuclear Data File (ENDF)數據，無法進行 MCNP [4]內所謂依照反應截面表格(Table Physics)的可靠輻射遷移模擬，而必須透過核物理作用模型(Model Physics)進行高能量輻射遷移的計算。在 Model Physics 的輻射遷移範疇，使用者必須選擇模型並設定適當參數，且要有能力判斷模型與參數的適用性以及最後結果的正確性。本研究有系統地探討了 MCNP 不同核物理模型對於劑量評估的影響，以利後續大量製造基於台灣參考人的全能量範圍中子與光子通量劑量轉換因子。

III. 結果與討論

1、文獻研析

擬人假體模型的應用對於有效劑量的評估非常關鍵，此一領域 ICRP 在 2009 年發表的第 110 號報告(Adult Reference Computational Phantoms) [5]最為眾人引用。該報告描述了一組成年男性和女性參考人假體模型的開發與預期用途，模型是基於真人的醫學影像數據並參考解剖與生理特性所建立，如圖 1 所示。為方便讀者引用，完整模型的數據亦包含在出版物隨附的電子檔案內。此外，為了說明這些模型的使用，報告中亦提供一些體外曝露與體內對應的劑量轉換因子做為參考或比對。

有關擬人假體的發展與演進，Xu 等人[6]在 2015 年所發表的論文做了一個詳細的回顧。使用數學假體的優點因其使用數學方程式組成，因此呈現方法簡單且易改變尺寸，因此耗費的計算資源較少，但其的缺點為幾何描述能力有限且不易分辨區域內部的組成差異。體素假體在 1980 年代被開發並大量應用，體素假體是由名為體素之幾何單元所建構而成的數值假體。透過電腦斷層或磁振造影等醫學影像重建器官位置、形狀及大小，使假體的器官形狀更符合真實人體。另外，為了考量不同種族與國家之間人體形態上的差異，以國家為特異性的參考人假體也常見於國際文獻。



圖 1：ICRP-110 男性與女性參考人假體。

2、測試參考人假體

一般常見的假體因為剛性的物理結構與限制，不能用於標準照射條件以外的情況，ORNL 為了彌補此缺點而欲建立具有可自由移動的手臂與腿部的假體模型，因此研發團隊修訂 ORNL-UF 模型，將手臂和腿部與軀幹分離，並可在關節處彎曲，手臂區分為上手臂與下手臂，腿部也分為上下部分，於是手臂部分可旋轉肩膀與手肘，腿部則可旋轉臀關節與膝蓋；除此之外，團隊也建立了圖形用戶介面，將其命名為 PIMAL (Phantom with Moving Arms and Legs)，該程式可由使用者自行定義手臂與腿部的位置而產生對應之假體姿態的 MCNP 輸入，如圖 2 所示。

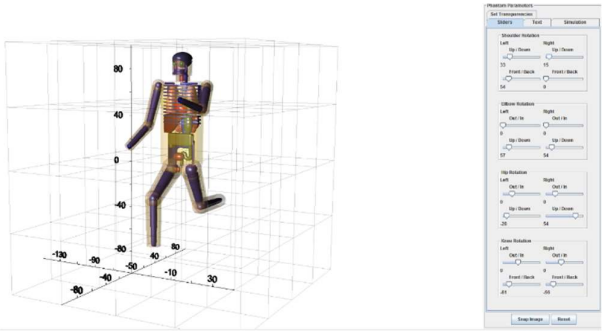
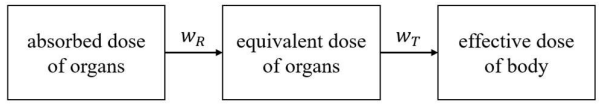


圖 2：PIMAL 介面下的假體模型與姿態操作示範。

3、建立轉換因子評估技術

有效劑量的定義是為了量化輻射對人體造成的健康風險，它的定義合理考量了不同輻射種類與能量的差異以及不同組織器官對輻射傷害敏感度的差異。根據其定義，有效劑量本質上是無法直接經由量測獲得，而是必須透過擬人假體的模擬計算來評估。在實際應用上，不論是設施輻射安全分析或保健物理的實務上，要評估有效劑量最方便的做法是透過計算先得到空間中輻射通量(Fluence)或通率(Flux)的估計值，再直接乘上能量依存的通量劑量轉換因子，因此通量劑量轉換因子在輻射安全與劑量評估實務應用上是不可或缺的。針對體外輻射曝露全身有效劑量的評估，圖 3 顯示其對應之通量劑

量轉換因子的大致計算流程。首先必須評估個別器官在特定輻射照射下所造成的吸收劑量(D_T)，若要強調其中輻射成分 R 的貢獻則可表示為 $D_{T,R}$，實務上 $D_{T,R}$ 可利用包含擬人假體的蒙地卡羅模擬求得，其單位為戈雷(Gy)；其次為評估個別器官的等價劑量(H_T)，等價劑量考量了輻射場中不同輻射成分(種類與能量)差異的貢獻，基本上是透過輻射加權因數(w_R)與 $D_{T,R}$ 的乘積總和來代表，其單位為西弗(Sv)；最後再評估全身有效劑量(E)，有效劑量考量了不同組織器官對輻射傷害敏感度差異的貢獻，透過組織加權因數(w_T)與等價劑量的乘積總和來代表，其單位也為西弗(Sv)。在體外輻射曝露下，一旦獲得了擬人假體全身有效劑量的估計值，若能明確量化特定照射條件下的中子或光子的通量(ϕ)，其單位為面積倒數(cm^{-2})，最後即可得到該特定條件下的通量劑量轉換因子(E/ϕ)，根據定義其單位為西弗面積($Sv{\cdot}cm^2$)。



$$D_T = \frac{\int_{m_T} D \cdot dm}{m_T} \qquad H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \qquad E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

$$\text{effective dose} = \text{conversion coefficient} \times \text{fluence}$$

$$E(Sv) \qquad CF(Sv \cdot cm^2) \qquad \phi(\frac{1}{cm^2})$$

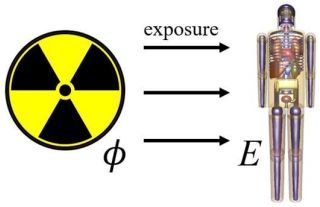


圖 3：體外曝露下通量有效劑量轉換因子的計算流程。

4、探討高能中子作用模型

使用蒙地卡羅方法建立擬人假體模型並模擬上述流程相當直接，但若是牽涉到高能量的輻射則必須特別注意，因為蒙地卡羅程式可能沒有對應能量所需的 ENDF 截面，模擬結果是仰賴核物理作用模型的適用性與參數選擇。本研究利用 MCNP 模擬高能量中子的案例時，經有系統的測試與驗證，我們進行以下設定：Data card 中的模式(Mode)追蹤中子、光子、質子、氘、氚、氦-3、阿伐粒子和其他重離子，各別粒子的截止能量皆使用程式預設值；計分方式的選擇 F6 Tally，但須考量所有上述提及的粒子之貢獻；此外，由於程式內建中子截面資料多數只涵蓋到 20 MeV，僅少數截面資料有到 150 MeV，因此還需啟用核物理反應模型的事件產生器來輔助模擬，我們選擇 CEM 與 LAQGSM 模型。本研究將 MCNP 搭配 ENDF 截面的預設計算方式稱為 method 1，而如上所述考慮多樣二次粒子遷移並開啟核物理反應模型的計算方式稱為 method 2，兩者的比較結果呈現於圖 4，圖中顯示各種計算模式下中子通量劑量轉換因子的比較，以 ISO 照射條件為例。在此我們選擇文獻中多人使用的 Pellicconi 等人[7]的數據做為參考標的，圖 4 比較結果顯示預設 method 1 計算所得之轉換因子嚴重低估高能中子的劑量貢獻，使用上須特別注意；method 2 與 Pellicconi 等人建議的數據較為相似，至於二者的差異程度不算大，可能原因來自不同程式與核物理反應模型的不同，在無實驗數據決定孰優孰劣之前，此一差異在實務應用上應可接受。

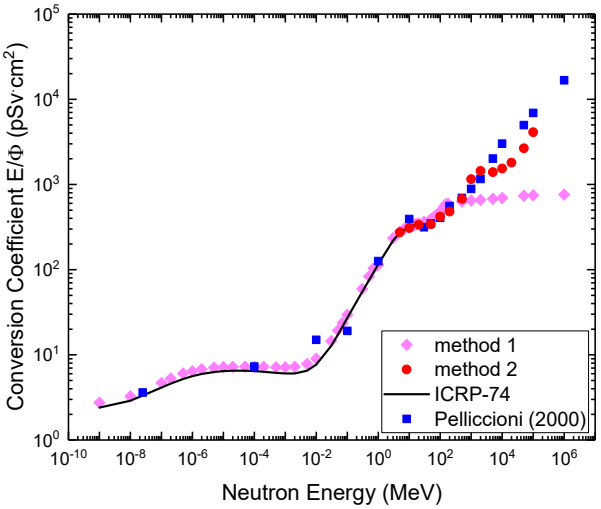


圖 4：各種計算模式下中子通量劑量轉換因子的比較。

5、建立全能量範圍數據庫

為了求出正確的劑量轉換因子，勢必要先計算出正確的器官吸收劑量，而經過一系列的測試與驗證，本研究對於 MCNP 的劑量計算進行了彙整，其中光子劑量 Tally 設定也須注意：10 MeV 以下的劑量使用 F6:p,e 的結果不正確，因程式重複記錄到光子和電子分別沉積的能量；10 GeV 範圍的劑量計算只有 F6:e 以及*F8:p,e 兩種方式能計算正確，其他計算方式由於是基於克馬近似法，因此計算出的劑量轉換因子遠高於正確數值。另外，追蹤電子的*F8 tally 比起克馬近似法需要多花約 150 倍的運算時間。至於中低能量中子 F6:n,p,e 的結果也不正確，因在低能量中子的照射下，二次光子貢獻的佔比高，因此在光子和電子重複計數後會導致錯誤結果。高能量中子計算的設定則可參考前一節的說明。

本研究根據使用 MCNP 正確計算劑量的經驗，將研究所得之建議的程式設定彙整於下表，另將所有計算結果彙整如圖 5 與圖 6。圖 5 為基於 ICRP-60 報告以及 PIMAL 可調動姿態擬人假體為模型的全能量中子與光子通量劑量轉換因子；圖 6 則為基於 ICRP-103 報告以及 ICRP 參考人假體為模型的全能量中子與光子通量劑量轉換因子，此一結果可與 ICRP-116 建議的轉換因子進行比較。

表 1：MCNP 計算器官吸收劑量的建議設定。

中低能量光子 (≤ 10 MeV)	高能量光子 (> 10 MeV)
mode P F6:P	mode P E *F8:P,E
中低能量中子 (≤ 20 MeV)	高能量中子 (> 20 MeV)
mode N P F6:N,P	mode N P H D T S A # F6:N,P,H,D,T,S,A,# MPHYS on LCA 8J 1 1

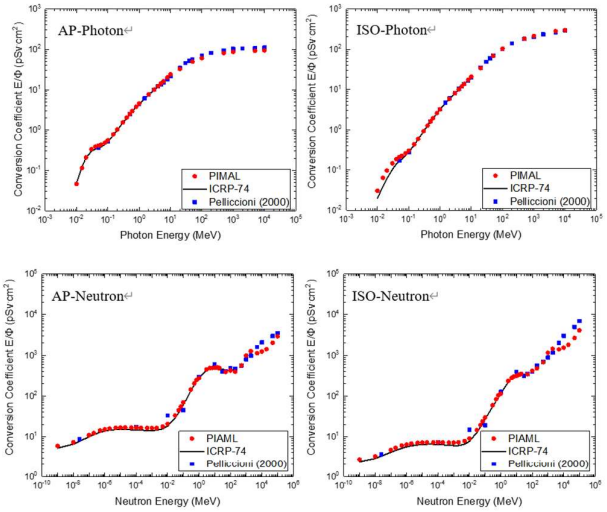


圖 5：PIMAL 假體的全能量中子與光子劑量轉換因子。

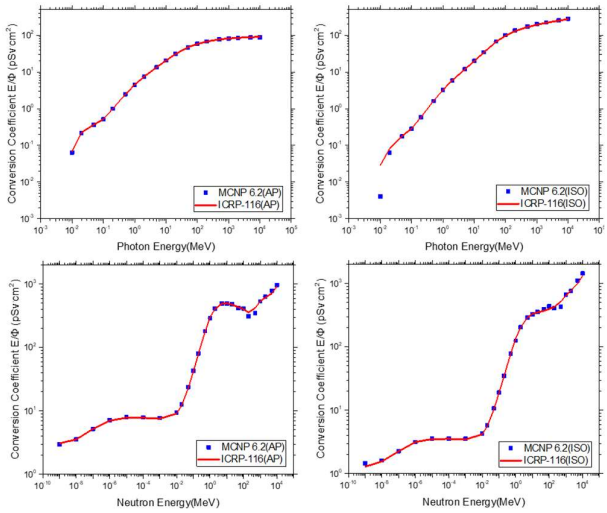


圖 6：ICRP 假體的全能量中子與光子劑量轉換因子。

IV. 結論

輻射防護量依其定義不能直接經由量測獲得，因此劑量轉換因子的建立成為一種常見的劑量評估工具。多數文獻在建立劑量轉換因子時採用標準直立姿態的假體，然而這不一定符合輻射作業人員在接受曝露時的實際姿態，因此本研究引進 PIMAL 程式，透過程式輔助在 MCNP 中建立不同姿態的數值假體，且台灣參考人假體和 PIMAL 同樣為數學假體，因此使用同樣類型的假體進行比較會易於後續的討論並確定各項差異來源。本研究彙整在光子或中子射源照射下，各能量範圍正確使用 MCNP 計算器官吸收劑量的方式：10 MeV 以下的光子和 20 MeV 以下的中子建議採用克馬近似法，計算更高能量光子造成的劑量須追蹤電子，而更高能量中子造成的劑量須追蹤帶電粒子並開啟核物理反應模型輔助。考慮到高能中子引發的作用較為複雜，本研究設定模式需追蹤中子、光子、質子、氘、氚、氦-3、阿伐粒子和其他重離子，核物理反應模型則依能量選用 CEM 與 LAQGSM，一系列有系統的測試比較顯示此一設定是本案例最佳模型的選擇。20 MeV 以下本研究計算所得之中子通量劑量轉換因子與 ICRP-74 一致性良好，20 MeV 以上高能中子的結果則與文獻中 Pelliccioni (2000)建議之轉換因子的差異落在合理範圍。透過與文獻中多人建議之轉換因子的比對與差異分析，應可確認本研究所建立之通量劑量轉換因子評估技術是合理可靠。最後則整理出全能量範圍的劑量轉換因子，並且能將此經驗用於計算其他參考人假體的劑量。

由於台灣目前在進行劑量評估時大多使用 ICRP 所發表的體素假體，因此第二年的工作重點在於比較 ICRP 與台灣參考人假體的不同，並使用台灣參考人假體建立完整的劑量轉換因子，以提供台灣輻射工作人員更為合適的劑量評估工具，另外也可探討高能中子量測技術的特性與限制。

參考文獻

[1] International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60 (1990).

[2] International Commission on Radiological Protection, Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, ICRP Publication 74 (1996).

[3] H. Akkurt and K. F. Eckerman, Development of PIMAL: mathematical phantom with moving arms and legs, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA (2007).

[4] J. T. Goorley, M. James, T. Booth, F. Brown, J. Bull, L. Cox, et al., Initial MCNP6 Release Overview-MCNP6 version 1.0, LA-UR-13-22934, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA (2013).

[5] International Commission on Radiological Protection, Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110 (2009).

[6] X. G. Xu, An exponential growth of computational phantom research in radiation protection, imaging, and radiotherapy: a review of the fifty-year history, Physics in Medicine & Biology, 59, R233-302 (2014).

[7] M. Pelliccioni and M. Pillon, Comparison between anthropomorphic mathematical phantoms using MCNP and FLUKA codes, Radiation Protection Dosimetry, 67, 253-256 (1996).

[8] International Commission on Radiological Protection, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116 (2010).

既存曝露情境之工業及民生應用調查與輻防管制措施精進研析(II)
Investigation on existing exposure situations in industrial and people's livelihood applications and research on advanced radiation control measures (II)

計畫編號：112-2623-E-007-005-NU
計畫主持人：許芳裕
e-mail：fyhsu@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：許皓翔、林俊廷
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

為了解 ICRP 及 IAEA 等國際組織對天然放射性物質(NORM)之輻防與管理做法，以及掌握國內 NORM 相關行業之現況及影響程度，本計畫自 111 年起分二年期進行，蒐集、研析與彙整國際組織之相關報告、管制作法建議等文獻資料，提出具體建議，作為後續核能安全委員會法規精進之參考。本年(112 年)為延續性計畫第二年，持續研析 NORM 相關行業及建築材料等產品管制具體作法，並就受輻射曝露之相關工作人員、公眾和環境，提出輻射防護管理建議或業者之自主管理作法及相應的參考基準作法建議。

關鍵詞：天然放射性物質、既存輻射、輻射防護、輻射管制

Abstract

To understand the radiation protection and management practices of naturally occurring radioactive material (NORM) by international organizations such as ICRP and IAEA, and to grasp the current situation and influence of domestic NORM-related industries in Taiwan, this project is planned to be carried out in two years since 2022 and collect, analyze, and compile relevant reports of international organizations, suggestions on management methods and other literature materials, and put forward specific suggestions as a reference for the subsequent improvement of regulations by the Nuclear Security Commission. This year (2023) is the second year of this continuous project. The main tasks planed in 2023 includes study of the specific control practices of NORM related industries and building materials, and the propose of radiation protection management recommendations or self-management practices and corresponding reference level practices for the relevant workers, the public and the environment exposed to radiation.

Keywords: exited radiation, radiation protection, radiation control.

I. 前言

含有天然存在的放射性核種的材料被回收、加工、使用或移動，可能導致輻射曝露增強。導致這些增強曝露的過程中涉及的材料即被認為是天然放射性物質(naturally occurring radioactive material，簡稱 NORM)。ICRP 將涉及 NORM 的許多行業產生的曝露視為既存曝露情況[1]。對於大多數涉及 NORM 行業而言，在工業過程中不會有意引入輻射源，多是因其使用原材料中的 NORM 濃縮，導致產生較一般天然環境稍高的放射性。

近年 ICRP 及 IAEA 等國際組織對 NORM 問題日益重視，對從事 NORM 相關行業工作人員或可能受影響之公眾、環境之輻射曝露進行全面檢視及調查研究[2,3]。我國核能安全委員會(簡稱核安會)近年亦對 NORM 議題極為重視，擬遵循國際輻射防護組織建議，規劃深入研析 NORM 之輻防管制，就民生應用進行調查，以確保人員與環境之輻射安全。本計畫規劃分二年期進行，蒐集、研析與彙整國際組織之相關報告、管制作法建議等文獻資料，提出具體建議，作為後續核能安全委員會法規精進之參考。第一年(111 年)已執行蒐集與彙整國際組織及各國對可能導致工作人員，公眾和環境的輻射曝露的 NORM 相關行業的輻防與管理做法，並對國內進行 NORM 相關行業進行調查，評估後續建築材料等產品之輻射影響；第二年(112 年)則規劃研析 NORM 相關行業及後續建築材料等產品管制具體作法，並就受輻射曝露之相關工作人員、公眾和環境，提出輻射防護管理建議或業者之自主管理作法及相應的參考基準 (reference level)作法建議。

II. 主要內容

本年度(112 年)之研究方法說明如下：

2.1. 持續對國內進行 NORM 相關行業調查

ICRP 及歐盟 EURATOM 報告中所列出之可能導致工作人員、公眾和環境受到 NORM 相關輻射曝露的行業彙整如表 1。當工業副產品包含在建築材料中並且有理由懷疑它們含有高水平的天然放射性核種時，最終產品中這些核種的活度濃度應從所有成分的活度中可靠地測量或評估材料。

本計畫持續參考國際文獻所列出能導致工作人員、公眾和環境受到 NORM 相關輻射照射的行業(如表 1)，逐一檢視與查詢國內是否有相關行業，並藉由網路搜尋及透過核安會協助，對國內 NORM 相關行業進行市場調查。初步評估國內建築材料(包括天然石材、磁磚業)，以及煤粉煤灰、鋼鐵熔爐業者所產生之高爐礦渣等副產品之應用等，均為與 NORM 相關的行業，探討其工作人員、公眾和環境受到輻射之影響程度。

2.2 研析與彙整國際組織及各國對 NORM 相關行業及建築材料等產品管制作法

本計畫 112 年研析國際組織與各國對 NORM 相關行業及建築材料等產品之管制精神、作法與管理趨勢，彙整國際現行管制或管理建議與作法， NORM 相關行業及後續建築材料等產品之管制建議有關文獻如下：

- 歐盟 EC (Radiation Protection 112) Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials.《關於建築材料天然放射性的放射防護原則》(1999 年)[4]
- 日本 Guideline for Ensuring Safety of Raw Materials and Products Containing Uranium or Thorium《含鈾、釷原材料及產品安全保障指引》(2009 年)[5]
- 韓國 Act on Protective Action Guidelines Against Radiation in The Natural Environment《自然環境輻射防護行動指引》(2014 年)[6]
- 澳洲 Radiation Protection Series G-2, Guide for Radiation Protection in Existing Exposure Situations《既存曝露情況下的輻射防護指南》(2017 年)[7]
- 英國 The Ionising Radiations Regulations 2017 (IRR17)《游離輻射防護法》(2017 年)[8]
- ICRP (ICRP-142), Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes《工業用天然放射性物質之輻射防護》(2017 年)[2]
- IAEA (IAEA SRS 117), Regulatory Control of Exposure due to Radionuclides in Building Materials and Construction Materials《建築材料和建築材料中放射性核種曝露的監管控制 》 (2023 年)[3]

相關文獻內容要點彙整概述於後續(3.2 國際組織及各國對 NORM 相關行業及建築材料等產品管制作法彙整)章節。

表 1. ICRP 及 EU 舉例能導致工作人員、公眾和環境受到 NORM 相關輻射曝露的行業[2][9]

國際文獻	ICRP 142	EU COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/ EURATOM
可能受到 NORM 相關輻射照射的行業	● 稀土元素的提取 ● 金屬鈾及其化合物的生產和使用（金屬性、非易裂性或可增殖性、放射性） ● 礦石的開採和加工（用於核燃料循環的鈾或釷除外） ● 油氣回收過程 ● 二氧化鈦(titanium dioxide)顏料的製造 ● 磷酸鹽開采和加工業 ● 鋯石(zircon)和氧化鋯(zirconia)工業 ● 金屬生產(錫、銅、鐵、鋼、鋁、鈮/鉭、鉍等)(tin, copper, iron, steel, aluminium, niobium/tantalum, bis- muth, etc.) ● 化石燃料（主要是煤炭）的燃燒 ● 水處理 ● 地熱能生產 ● 水泥熟料爐生產與維修 ● 建築材料（包括用殘渣或副產品製造的建築材料）	● 從獨居石中提取稀土 ● 鈦化合物的生產和含鈦產品的製造 ● 鈮/鉭礦石(niobium/tantalum)的加工 ● 石油和天然氣生產 ● 地熱能生產 ● TiO2 顏料生產 ● 熱磷生產 ● 鋯石及鋯業 ● 磷肥生產 ● 水泥生產、熟料爐維護 ● 燃煤電廠、鍋爐維修 ● 磷酸生產 ● 初級鐵生產 ● 錫/鈷/銅冶煉 ● 地下水過濾設施 ● 鈾礦以外的礦石開採

2.3 提出輻射防護管理建議或業者之自主管理作法及相應的參考基準作法建議

除了前述對 NORM 相關行業及後續建築材料等產品輻射劑量影響評估外，本計畫亦彙整前述相關文獻之國際現行管制或管理建議與作法，提出國內 NORM 相關行業可行之輻射防護管理建議及業者之自主管理作法及相應的參考基準作法之具體建議，作為游離輻射主管機關(核能安全委員會)後續法規精進之參考。

III. 結果與討論

3.1 持續對國內進行 NORM 相關行業調查結果

本計畫於 112 年依據 ICRP142 報告中列出可能導致工作人員、公眾和環境受到 NORM 相關輻射曝露的行業，延續 111 年之成果，持續進一步利用網路搜尋相關關鍵字及相關政府機關網站資訊，以及電話聯繫詢問方式進行調查，彙整國內可能涉及 NORM 之行業彙整之結果如下：

- 礦石的開採與加工(包括石油/天然氣開採)
  現存礦業權數計 142 礦(含海域 5 礦、陸上 137 礦) ，礦場型態可分為露天礦場、地下礦場、石油及天然氣礦場。
- 金屬生產
  國內具鋼鐵熔爐業者計有 17 家，其他金屬(如錫、銅、鋁、鈮、鉍等)的生產或販售亦有約 5 家業者。
- 化石燃料(煤炭)的燃燒
  國內進行化石燃料(煤炭)的燃燒業者，主要為台電公司火力發電廠。
- 水泥熟料生產
  國內業者包括台灣區水泥工業同業公會等計有 10 家以上主要水泥熟料生產公司。
- 二氧化鈦(titanium dioxide)顏料的製造
  111 年原調查國內有一家業者，惟其業於 112 年 8 月停業；故國內已無相關工業。
- 鋯石(zircon)和氧化鋯(zirconia)工業
  111 年原調查有 2 家業者宣稱有進行氧化鋯製造加工，經 112 年電話訪查確認，其使用量均為惟量或已停止加工作業；故國內已無相關工業。
- 稀土元素提取工業
  111 年原調查有 2 家業者宣稱有進行稀土永久磁鐵的產品販售，經 112 年進一步電話訪查，均為非稀土元素提取(挖採)之業者。
- 水處理與淨化
  國內進行浸水或沉澱淨化水質之業者，主要為自來水淨水處理業者。
- 地熱能生產
  國內有一家地熱發電廠。
- 建築材料
  - 預拌混凝土或生產混凝土業者(台灣區預拌混凝土工業同業公會)約有 404 家；
  - 磚瓦業者(台灣區磚瓦工業同業公會)約有 26 家；
  - 建築用陶瓷業者(台灣陶瓷同業公會)約 63 家；
  - 天然石材加工與銷售業者(台灣區石礦製品同業公

會、台北市石材商業同業公會)約 2 百多家。

表 2. ICRP 142 對涉及 NORM 相關行業類別可能造成其工作人員之劑量評估結果(僅體外曝露和粉塵之體內曝露，不包括接觸氡造成之曝露)[2]

作業類別	活度濃度最高的放射性核種	年有效劑量(mSv)		
		最小值	平均值	最大值
礦石的開採(鈾礦以外)	^{238}U系與^{232}Th系	1.3	3	5
石油和天然氣生產	^{226}Ra (水垢/污泥)			0.5
石油生產/管路清洗			0.6	3
二氧化鈦顏料生產	^{232}Th (原料) ^{226}Ra, ^{228}Ra (水垢)			0.27
磷礦石儲存	^{238}U系			0.28
磷肥生產	^{238}U (原料與產品) ^{226}Ra (殘留物)			0.5
耐火陶瓷的製造和使用		~0.01		1.5
錫、鋁、鈦、鈮礦石加工	^{232}Th(原料、產品和爐渣 ^{226}Ra (殘留物)	0		3.2
銅冶煉	^{226}Ra (爐渣)			<1
採煤	^{238}U, ^{226}Ra		2.75	
燃燒煤炭	^{210}Po (灰垢)	0		<1
飲用水處理	^{226}Ra (污泥)			<1

表 2 為 ICRP (ICRP 142)對可能涉及 NORM 相關行業類別之工作人員僅考慮體外曝露和粉塵之體內曝露劑量評估結果(不包括氡氣的曝露)，其中年有效劑量最大者，為以鈾礦以外的礦石開採作業類別之工作人員劑量評估結果較大，最大年劑量值為 5 mSv/y(平均年劑量值為 3 mSv/y)；此外，尚有石油生產/管路清洗、耐火陶瓷的製造和使用(金屬生產業)以及採煤業者之工作人員年劑量值可能超過 1 mSv/y。

彙整國內涉及 NORM 調查情形及表 2 之 ICRP 142 相關行業工作人員劑量及相關 NORM 產品等對公眾之劑量評估結果，國內較可能受到 NORM 之劑量影響(人員劑量>1 mSv/y)之需進一步關注的NORM行業類別為：礦石開採與加工業者、石油生產/加工業者、金屬生產業者。

此外，雖有 ICRP 的初步劑量評估可供參考，作為判斷相關作業對人員的劑量影響，但 ICRP 亦指出該結果為其抽樣評估結果，考量各國天然資源分布不同，建議各國仍須自行評估國內狀況取得各國之數據做為是否進行管制依據；因此，本研究建議後續可規劃持續對國內礦石開採與加工業者、石油生產/加工業者、金屬生產業者等作進一步現場訪查或抽樣調查、評估其可能之曝露情況與實際影響程度。

3.2 國際組織及各國對 NORM 相關行業及建築材料等產品管制作法彙整

本計畫蒐集研析國際組織及各國對 NORM 相關行業及建築材料等產品管制作法之相關文獻，內容要點彙整於完整期末報告，節錄部分重要文獻彙整如下：

歐盟於 1999 年提出其輻射防護 112 號報告(RP 112)(關於建築材料天然放射性的放射防護原則)[4]供會員國參考，做為建議指導；RP 112 報告亦建議，如果源自建築材料的加馬輻射使公眾成員的體外曝露年有效劑量最多增加 0.3 毫西弗，則建築材料應免於對其放射性所有限制，即可予以豁免管制。該原則建議年輻射劑量率限值為 0.3~1 mSv/y（不含背景值）。因鐳會衰變產生氡氣，建議限制室內氡氣年平均活度濃度在 200 Bq/m3 以下。活度濃度指數為：

$$I = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000}$$

其中C_{Ra}、C_{Th}、C_K：建築材料中鐳、釷、鉀之活性濃度(Bq/kg)，活度濃度指數(I)不得超過以下值：

劑量標準	0.3 mSv/y	1 mSv /y
大量使用的材料，例如 混凝土	I ≤0.5	I ≤ 1
表層及其他限制使用的材料：瓷磚、板材等	I≤ 2	I≤ 6

日本文部科學省(MEXT)於 2009 年提出此「含鈾、釷原材料及產品安全保障指引」，生產消費性產品或工業產品的標的製造商須依此指引管理[5]，要求其採取下列措施：確定標的製造商、測量輻射劑量率、評估曝露劑量、採取減少輻射曝露的措施、提供產品資訊、製作紀錄並進行必要的教育訓練。如工作人員的曝露劑量估計超過 1 mSv/年，應採取措施將其曝露劑量保持低於 1 mSv/年；生產場所及其周邊居民的受曝露劑量估計超過 1 毫西弗/年時，應採取以下措施將其受曝露劑量控制在低於 1 毫西弗/年。

韓國 Act on Protective Action Guidelines Against Radiation in The Natural Environment《自然環境輻射防護行動指引》(2014 年)[6]規定下列人員應向核安全與安保委員會登記含 NORM 原材料或加工副產品的種類和數量以及其他相關細節：

(1)有意開採、出口、進口或銷售含 NORM 原材料的人；
(2)含 NORM 加工副產品出口、進口、銷售者；
(3)經營生產含 NORM 加工副產品的設施的人；
(4)有意處理、處置或回收含 NORM 加工副產品的人。

澳洲 RPS G-2, Guide for Radiation Protection in Existing Exposure Situations《既存曝露情況下的輻射防護指南》(2017 年)[7]闡述了澳大利亞在“既存曝露情況”下防護職業曝露人員、公眾和環境的方法；當確定既存曝露情況時，應分配防護和安全責任，並應建立適當的參考水平。參考基準 1 mSv/y 用於每種商品中被認為是適合的。對於劑量影響超過 1 mSv/y 的既存曝露情況，雇主應與相關監管機構一起制定並實施保護策略，以確保任何補救措施都是合理的。

英國 The Ionising Radiations Regulations 2017 (IRR17)《游離輻射防護法》(2017 年)[8]，適用範圍主要為使用游離輻射源以及在含有氡氣體且空氣中年平均活度濃度超過 300 Bq/m^3 的環境中進行的任何計劃曝露情境之職業曝露、公眾曝露即醫療曝露之管制與管理；對於使用含有 NORM 的原材料或作業管理，目前參考並依據 EC、ICRP 及 IAEA 對涉及 NORM 的行業與作業的建議執行管理。

ICRP 於 2019 年出版其第 142 號報告(ICRP 142)，此報告指出 NORM 可能會因轉移或技術增強以導致工作人員或公眾曝露的工業(如表 1) [2]。ICRP 建議之重點如下：

(1) 涉及天然放射性物質 (NORM) 的工業活動造成的輻射曝露，可通過採取正當化和最適化防護行動來達

成合理抑低輻射曝露的目標。
(2) NORM 不存在立即危及生命的緊急情況。
(3) 工作人員和公眾的輻射防護措施應考慮長期體外曝露、放射性物質攝入以及氡氣吸入的曝露途徑。
(4) 建議採用分級管理的方法來保護工作人員、公眾和環境，並採取最適化的輻射防護行動。
(5) ICRP 建議各國依各自情況設定保護工作人員的參考基準，並建議工作人員的參考基準一般約為數毫西弗(mSv)的年有效劑量(如 5 mSv，通常< 20 mSv)。
(6) 建議各國依各自情況設定保護公眾所的參考基準，建議設定為< 1 mSv/y 的年有效劑量)。
(7) 氡氣曝露建議使用 ICRP 126 的分級方法進行管理。

IAEA SRS 117 報告[3]建議各國政府可對使用的建築和建築材料產生的輻射曝露進行有代表性的調查，並確定有可能引起高於參考基準的輻射之基本材料。調查需要涵蓋用於生產建築和建築材料的原材料、再利用和回收材料。放射性核種 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的最大活度濃度定為 1 Bq/g；建立建築和建築材料的監管參考基準(不超過 1 mSv/y)，在超過參考基準的情況下應採取糾正措施。參考基準以 1 mSv 的年有效劑量值為基礎。

3.3 提出輻射防護管理建議或業者之自主管理作法及相應的參考基準作法建議

整體而言，依據 ICRP、IAEA 等國際組織及各國目前對於涉及 NORM 行業之管理做法彙整，一般以年劑量小於 1 mSv 作為管理分野，年劑量小於 1 mSv 之行業可不列為需優先管理者，年劑量大於 1 mSv 以上者，則須予以關注、評估是否須由主管機關納入管理，或要求業者進行自主管理。涉及天然放射性物質(NORM)產業及建材業者輻射安全自主管理措施要點建議(重點彙整)如下：

- 涉及之 NORM 有影響公眾安全之虞者，為其所含核種活度濃度大於參考基準值(鉀-40：10 Bq/g，鈾系列、釷系列及其他非鉀或釷、鈾系列天然放射性核種：1 Bq/g)，且造成一般人之年有效劑量大於 1 mSv 者。
- 於執行涉及 NORM 之作業，需評估其輻射劑量，對工作人員之有效劑量參考基準為每年 10 毫西弗；對公眾之效劑量參考基準為每年 1 毫西弗。
- 輻射劑量評估包括：
  (1) 工作人員的劑量評估：對工作場所（包括廢棄物存放場所）的輻射劑量率進行測量，考量工作時間、計算工作人員可能的年劑量。
  (2) 生產/作業場所附近居民的劑量評估：對生產場所邊界進行輻射劑量率測量，計算附近居民可能接受的年劑量。
- 每年至少一次輻射劑量率的測量和曝露劑量的評估；但有下列情況之一者，應額外進行測量：
  (1) 原材料使用量較平常增加。
  (2) 設備或產品的工法和規格變更。
  (3) 原材料的營業時間、工作場所或保管場所的變更。
  (4) 原材料的種類、產地、供應商等有改變。
  (5) 生產、加工設施或作業場所邊界有改變。
  (6) 含有原材料之廢棄物處理方法改變。
- 如果估計工作人員的劑量超過參考基準(如 10 mSv/年)，應採取包括以下或其他 可降低劑量措施，以確保將工作人員曝露之有效劑量保持在參考基準以下：
  (1) 選擇替代(NORM 濃度較低)原料，或改變方法(防止放射性核種意外積累或濃縮)。
  (2) 區域劃分(可在同一設施中劃定不同管制或管理層級的區域，以確定需要額外不同的安全措施(如工作程序、通風要求、個人防護裝備的使用、進入限制等)。
  (3) 採取特定的工程措施來限制體外曝露(使用或增加屏蔽)。
  (4) 減少含 NORM 原材料的庫存量。
  (5) 分散貯存將含 NORM 原材料或廢棄物存放在多處，以降低單一處所位置劑量。
  (6) 縮短營業/作業的時間。
- 如果作業場所及其周邊居民的受劑量估計可能超過公眾參考基準(1 mSv/年)時，應採取包括以下或其他降低劑量措施，將其居民可能接受的劑量控制在 公眾參考基準以下：
  (1) 減少原材料在作業場所的庫存量。
  (2) 將儲存或使用場所遠離作業場所的邊界。
  (3) 使用適當屏蔽隔離。
- 在塵土飛揚的 NORM 工作場所中，應提供工作人員適當的保護措施(如穿工作服、戴口罩、手套等)，並評估吸入粉塵引起的體內曝露，必要時得進行粉塵監測程序。
- 建材表面 0.1 公尺處之輻射劑量率每小時超過 0.2 微西弗者（不含背景值），應實施活度濃度分析；其活度濃度指數及使用範圍，依國內天然放射性物質管理辦法[10]之規定辦理。

IV. 結論

本研究於 112 年持續利用網路搜尋相關關鍵字及相關政府機關網站資訊，以及電話聯繫詢問方式，對國內涉及 NORM 相關行業調查，經篩選國內較可能受到 NORM 之影響(人員劑量>1 mSv/y)之 NORM 行業類別為：礦石開採與加工業者、石油生產/加工業者、金屬生產業者；此外，研析彙整 ICRP、IAEA 等國際組織及各國對 NORM 相關行業及建材業者的輻防與管理作法，亦針對國內 NORM 相關行業及建材等產品，提出輻射防護管理建議或業者之自主管理作法及相應的參考基準作法建議。整體而言，本計畫依原規劃進度執行，並達成原規劃之計畫目標。

參考文獻

[1] ICRP, 2007a. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2 – 4).
[2] ICRP, 2019. Radiological protection from naturally occurring radioactive material (NORM) in industrial processes. ICRP Publication 142.

[3] IAEA, 2023., Regulatory Control of Exposure due to Radionuclides in Building Materials and Construction Materials. IAEA SRS 117. International Atomic Energy Agency, Vienna.
[4] EC, 1999b. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Brussels.
[5] (日本) Japan, Guideline for Ensuring Safety of Raw Materials and Products Containing Uranium or Thorium (2009)
[6] (韓國) Korea, Act on Protective Action Guidelines against Radiation in the Natural Environment (2014)
[7] (澳洲) Arpansa, Guide for Radiation Protection in Existing Exposure Situations (2017)
[8] (英國) HSE, Working with ionising radiation. Ionising Radiations Regulations (2017)
[9] EURATOM, 2013. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. Off. J. Eur. Union. 13: 1 – 73.
[10] 核能安全委員會，天然放射性物質管理辦法，2017年9月。

輻射防護與放射醫學科技(II)

標靶α-突觸核蛋白的正子斷層造影藥物開發(II)
Developing a PET imaging agent targeting α-synuclein(II)

計畫編號：112WFE0110003
計畫主持人：邱創新
e-mail：treasure316@gmail.com
計畫共同主持人：馬國興、鄭澄意
計畫參與人員：李紜漪
執行單位：國防醫學院核子醫學科

摘要

巴金森氏症（Parkinson's Disease, PD）是僅次於阿茲海默症的常見神經退化性疾病，隨著全球人口老化，其發病率逐年上升。該疾病以多巴胺神經元的逐漸退化為特徵，特別是在黑質-紋狀體路徑中，並且與α-突觸核蛋白的異常堆積密切相關。這種異常堆積形成了路易氏體和路易氏神經突，並引發運動功能障礙及非運動症狀，如焦慮、憂鬱和睡眠障礙。儘管目前已經有多種藥物可用於巴金森氏症的診斷和治療，但針對α-突觸核蛋白的正子示蹤劑尚待開發，以提高疾病的早期診斷準確度。本研究的主要目的是建立一個穩定的魚藤酮誘發巴金森氏症小鼠模型，並評估新型α-突觸核蛋白正子示蹤劑[^{18}F]α-syn-3 的效果。研究使用 8 週大的雄性 C57BL/6 小鼠，通過皮下注射和管餵的方式持續給予魚藤酮，以誘發巴金森氏症。為了觀察模型的運動行為變化，我們進行了滾輪運動測試，這項測試用於評估小鼠的運動功能。在影像學檢測方面，本研究結合了[^{18}F]FE-PE2I 多巴胺轉運體正子造影和[^{18}F]α-syn-3 正子造影來評估魚藤酮對多巴胺系統的影響。[^{18}F]FE-PE2I 正子造影用於檢測多巴胺系統的功能狀態，而[^{18}F]α-syn-3 則用來觀察α-突觸核蛋白的分佈情況。最後以免疫染色法則被確認影像學結果，通過標記酪氨酸羥化酶（TH）陽性細胞來評估多巴胺神經元的存活率。研究結果顯示，在 84 天的魚藤酮管餵期間，雖然在滾輪運動測試中未觀察到顯著的行為差異，但正子影像學結果顯示[^{18}F]FE-PE2I 的攝取量顯著下降，顯示多巴胺系統受到了明顯損害。同時，[^{18}F]α-syn-3 的最佳造影時間為注射後 60-80 分鐘，並且在魚藤酮誘發的小鼠中，[^{18}F]α-syn-3 的積累呈上升趨勢，顯示該示蹤劑對α-突觸核蛋白具有良好的結合特性。免疫染色結果也進一步證實了魚藤酮小鼠中紋狀體和黑質中的酪氨酸羥化酶陽性細胞存活率較低，與影像學結果一致。基於這些結果，未來的研究計劃將擴展到非人類靈長類動物模型中，使用 MPTP 建立巴金森氏症獼猴模型，並評估[^{18}F]α-syn-3 的造影效能。這些研究將有助於確定該正子示蹤劑在臨床診斷中的應用潛力，並進一步優化巴金森氏症的動物模型，以更準確地模擬疾病的病理特徵。

總的來說，本研究不僅成功建立了長期魚藤酮誘發的巴金森氏症小鼠模型，還證實了[18F]α-syn-3 在α-突觸核蛋白成像中的潛力，為未來的診斷和治療研究奠定了基礎。。

關鍵詞： α-突觸核蛋白，巴金森氏症，魚藤酮，正子斷層造影

Abstract

Parkinson's Disease (PD) is a common neurodegenerative disorder, second only to Alzheimer's disease, with its prevalence increasing as the global population ages. This disease is characterized by the progressive degeneration of dopamine neurons, particularly in the nigrostriatal pathway, and is closely associated with abnormal accumulation of α-synuclein. This abnormal accumulation leads to the formation of Lewy bodies and Lewy neurites, resulting in motor dysfunction and non-motor symptoms such as anxiety, depression, and sleep disturbances. Although various drugs are available for diagnosing and treating Parkinson's disease, there remains a need for a PET imaging agent targeting α-synuclein to enhance early diagnosis accuracy. The primary goal of this study was to establish a stable mouse model of Parkinson's disease induced by rotenone and to evaluate the effectiveness of a novel α-synuclein PET imaging agent, [^{18}F]α-syn-3. Eight-week-old male C57BL/6 mice were used, and Parkinson's disease was induced through subcutaneous injections and gavage administration of rotenone over an 84-day period. To assess the model's motor behavior, rotarod tests were conducted. This test is a common behavioral assessment method used to evaluate motor function in mice.In terms of imaging, the study combined [^{18}F]FE-PE2I dopamine transporter PET imaging and [^{18}F]α-syn-3 PET imaging to evaluate the impact of rotenone on the dopamine system. Specifically, [^{18}F]FE-PE2I PET imaging was used to assess the functional status of the dopamine. Finally, immunohistochemical staining was used to confirm the imaging results and assess the survival rate of dopamine neurons by labeling tyrosine hydroxylase (TH)-positive cells. The study results showed that during the 84-day rotenone treatment period, although no significant behavioral differences were observed in the rotarod test, PET imaging results indicated a significant decrease in [^{18}F]FE-PE2I uptake, demonstrating substantial damage to the dopaminergic system. Additionally, the optimal imaging time for [^{18}F]α-syn-3 was 60-80 minutes post-injection, and in rotenone-induced mice, there was an increasing trend in [18F]α-syn-3 accumulation, indicating good binding characteristics of this tracer to α-synuclein. The results of immunohistochemical studies further confirmed that the survival rate of TH-positive cells in the striatum and substantia nigra was lower in rotenone-treated mice, consistent with the imaging results. Based on these findings, future research plans will extend to non-human primate

models, using MPTP to establish Parkinson's disease monkey models and assess the imaging efficacy of [^{18}F]α-syn-3. These studies will help determine the potential clinical application of this PET tracer and further refine Parkinson's disease animal models to more accurately mimic the pathological features of the disease.

Keywords: α-synuclein, Parkinson's Disease, Rotenone, Positron Emission Tomography

I. 前言

隨著全球高齡人口逐年增加，神經系統疾病的發病率也在上升，其中巴金森氏症（Parkinson's disease, PD）的罹患率增長速度最快。根據統計，過去三十年間，受巴金森氏症影響的人數已達 620 萬，且預測未來三十年內，其盛行率將呈指數增長，進一步對醫療系統造成嚴重負擔[1]。巴金森氏症於 1817 年由詹姆斯·巴金森博士首次系統性描述，至今已有超過 200 年的歷史[2]。研究顯示，巴金森氏症可分為 5-10%的家族型（Familial Parkinson's disease），其餘大部分則是散發性巴金森氏症（Sporadic Parkinson's disease）[3][4]。

巴金森氏症的臨床表現可分為運動性和非運動性症狀。運動性症狀包括靜止性震顫（Resting Tremor）、肌肉僵硬和運動遲緩（Bradykinesia and Rigidity），而非運動性症狀則包括情緒障礙、睡眠障礙和感覺障礙[5][6][7]。巴金森氏症的典型病理特徵是黑質緻密部的多巴胺神經元喪失，而近 20 年的研究指出，α-突觸核蛋白（α-synuclein）也是其關鍵病理特徵之一。α-突觸核蛋白錯誤摺疊後形成具有神經毒性的路易氏體，導致多巴胺神經元的退化，從而引發巴金森氏症的症狀。

正子斷層造影（Positron emission tomography, PET）是一種使用放射性標記藥物觀察生理功能的非侵入性核醫學檢測方式。PET 能夠評估血流、新陳代謝、神經傳導物質等生理狀況，並且可以利用放射性同位素如氧-15、氟-18、碳-11 或氮-13 標定的示蹤劑來進行影像檢測[8]，。在檢測過程中，示蹤劑會與生物體內的目標結合，產生伽瑪射線，這些射線會被 PET 掃描儀偵測並進行影像重組，以推算生理狀態和疾病嚴重度。針對巴金森氏症，使用[^{18}F] FE-PE2I 正子示蹤劑可專門檢測黑質紋狀體路徑中的多巴胺轉運體，評估多巴胺神經纖維末梢的功能狀態[9]。

在動物模式的建立方面，巴金森氏症的研究通常選用囓齒類動物、非人靈長類或非哺乳動物，其中囓齒類動物因其行為測試的便利性和易於飼養而最為常用。這些動物模型包括基因轉殖模型和神經毒素誘導模型。基因轉殖鼠主要用於研究家族性巴金森氏症。神經毒素誘導模型包括 6-羥基多巴胺（6-OHDA）、1-甲基-4-苯基-1,2,3,6-四氫吡啶（MPTP）、巴拉刈及魚藤酮。6-OHDA 需直接顱內注射，雖可大量破壞多巴胺神經元，但不會產生路易氏體[10]。MPTP 能穿過血腦障壁，轉化為有毒的 MPP+，最終導致多巴胺神經元喪失[11][12]。巴拉刈為劇毒除草劑，已知會引起腦損傷[13]，而魚藤酮則在動物模式中導致黑質紋狀體路徑變性，並可觀察到α-突觸核蛋白的產生[14][15]。

II. 主要內容

本研究利用滾輪運動測試與[^{18}F]FE-PE2I 正子示蹤劑來驗證魚藤酮誘導的巴金森氏症動物模型，並在這一模型上評估新型正子造影劑[^{18}F]α-syn-3 對於檢測α-突觸核蛋白的有效性。

III. 結果與討論

本研究旨在使用魚藤酮誘導巴金森氏症小鼠模型。我們對魚藤酮的使用劑量和給藥時間進行了不同階段的前期測試，根據每一階段的結果進行調整，以確定最佳參數設定。此外，利用這一慢性誘導的動物模型，我們配合正子造影技術觀察並檢測新開發中的正子示蹤劑。

在先前的實驗中我們已經找到開發中的正子示蹤劑[^{18}F] α-syn-3 在小鼠適合的造影時間為 60-80 分鐘。我們嘗試以不同的方式來給予小鼠魚藤酮，分別使用了皮下注射的方式以及管餵給藥的方式。

在滾輪運動測試中，正常組、管餵給藥組以及皮下注射給藥組之間未見統計學上的顯著差異（圖 1）。然而，[^{18}F]FE-PE2I 正子影像顯示，管餵給藥組和皮下注射給藥組的[^{18}F]FE-PE2I 攝取量呈下降趨勢（見圖 2）。在[^{18}F]α-syn-3/PET 動態造影中，正常小鼠和皮下注射給藥組在注射後 60-80 分鐘內達到最佳影像顯示(見圖 3)，後續靜態造影（static）將基於此時間區間進行。

此外，對正常組、管餵給藥組以及皮下注射給藥組的小鼠進行犧牲後的 TH 免疫組織化學染色（見圖 4）分析顯示，管餵給藥組和皮下注射給藥組的小鼠在紋狀體中的 TH 陽性細胞數量及黑質中的多巴胺神經細胞存活量均低於正常組。相比之下，管餵給藥組的小鼠顯示出更為明顯的多巴胺損傷。

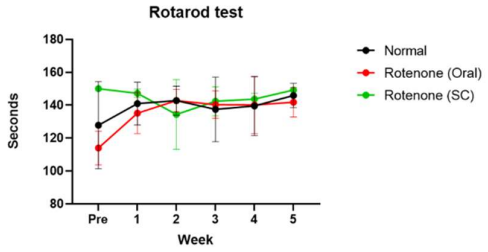


圖 1、滾輪運動測試。將滾輪運動測試儀器設置為在 150 秒內將轉速從 5 rpm 逐步提高至 50 rpm，並記錄三組小鼠在滾輪上持續行走的時間。統計分析結果顯示，正常組、管餵給藥組及皮下注射給藥組之間的行走時間無顯著差異。

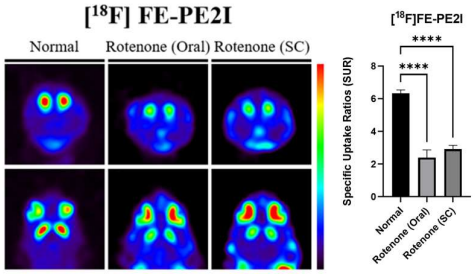


圖 2、管餵及皮下注射魚藤酮 28 天後[^{18}F] FE-PE2I 正子影像及統計結果。給藥 28 天後，使用[^{18}F]FE-PE2I

示蹤劑對正常小鼠、管餵給藥組以及皮下注射給藥組的小鼠進行正子造影。影像顯示，正常小鼠的[^{18}F]FE-PE2I 攝取量顯著高於管餵給藥組和皮下注射給藥組的小鼠。在給藥 28 天後，我們進行了專一攝取率的量化分析，結果顯示，管餵給藥組和皮下注射給藥組的小鼠在紋狀體區域的專一攝取率顯著低於正常小鼠。

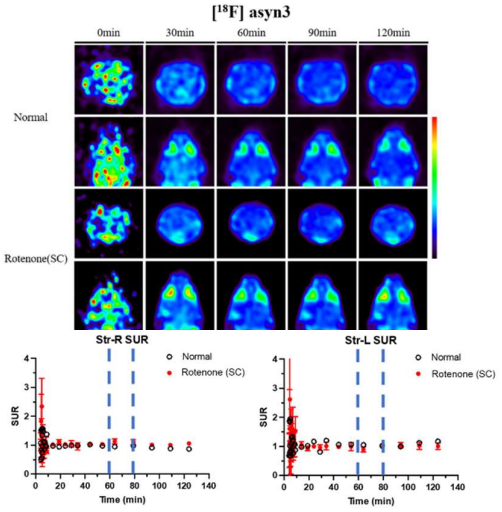


圖 3、連續給藥 28 天後之小鼠[^{18}F] α-syn-3 統計結果。在給予藥物 28 天後，使用[^{18}F]α-syn-3 示踪劑對正常組和皮下注射給藥組小鼠進行了動態正子成像。影像顯示在 0、30、60、90 及 120 分鐘時段，無法觀察到正常組與給藥組小鼠之間對藥物攝取量的顯著差異。進一步的統計分析顯示，[^{18}F]α-syn-3 在 60 至 80 分鐘之間達到平衡，但在正常組和皮下注射給藥組之間，攝取量仍未顯示出顯著差異。



圖 4、連續給藥 84 天後之小鼠黑質 TH 染色。在連續給藥 28 天後，使用管餵或皮下注射方式給予魚藤酮的小鼠進行黑質的 TH 免疫組織化學染色。結果顯示，相較於正常小鼠，連續給予魚藤酮 28 天後的小鼠多巴胺神經細胞存活數量顯示出減少的趨勢。此外，與皮下注射給藥的小鼠相比，使用管餵方式給予魚藤酮的小鼠在多巴胺神經細胞的損失上更為明顯。

在上述實驗中我們成功找出小鼠適合造[^{18}F] α-syn-3 的時間並且發現以管餵方式給予魚藤酮可以有效減少小鼠的多巴胺神經細胞，但在行為上面看不出明顯效果因此我們再更改行為測試方式並且延長給藥時間，我們使用滾輪運動測試來評估小鼠的運動能力。每組實驗小鼠在給藥前 1 週、給藥後 1 至 12 週及給藥後 1 週進行了滾輪運動測試。測試中，滾輪的運動速率以 120 秒內由 5 rpm 升至 40 rpm 的方式進行，每週進行一次測試。結果顯示，正常小鼠與管餵組之間的運動能力無顯著差異（圖 5）。

在正子造影檢測方面，我們在給藥後第 4 週、第 8 週和第 12 週使用[^{18}F] FE-PE2I 示踪劑進行造影。統計分析結果顯示，相較於正常小鼠，給予魚藤酮後的小鼠對[^{18}F] FE-PE2I 示踪劑的攝取量顯著下降（圖 6）。此外，[^{18}F] α-syn-3 正子影像結果顯示，在給藥後第 8 週和第 12 週，給予魚藤酮後的小鼠對[^{18}F] α-syn-3 的攝取量有上升趨勢 (圖 7)。TH 免疫組織化學染色結果也顯示，給予魚藤酮後的小鼠在黑質區的多巴胺神經細胞存活量較低（圖 8）。

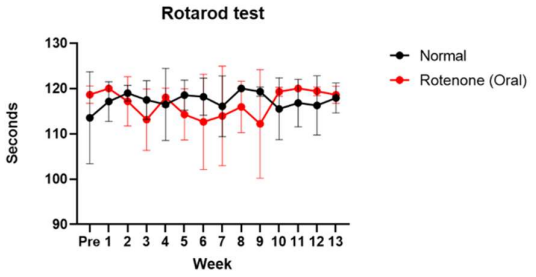


圖 5、滾輪運動測試。將滾輪運動測試儀器設置為在 120 秒內以 5 rpm 的速率逐漸增加至 40 rpm 進行測試，並記錄兩組小鼠在滾輪上持續行走的時間。統計分析結果顯示，正常組與給藥組之間的行走時間無顯著差異。

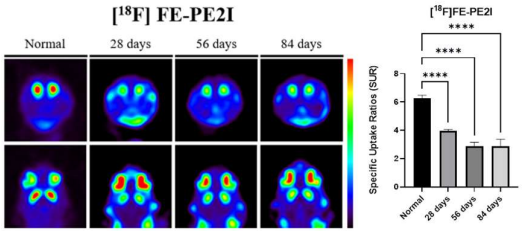


圖 6、管餵魚藤酮 84 天後[^{18}F] FE-PE2I 正子影像及統計結果。在管餵給藥後的 28 天、56 天和 84 天，使用[^{18}F] FE-PE2I 進行小動物正子造影。影像結果顯示，正常小鼠的[^{18}F] FE-PE2I 攝取量顯著高於在 28 天、56 天和 84 天管餵給藥的小鼠，在量化圖中可以看到正常組和給藥 28、56 及 84 天皆有著顯著差異，且與給藥 2 8 天相比，給藥 56 天及 84 天對[^{18}F] FE-PE2I 攝取量有再下降的趨勢。

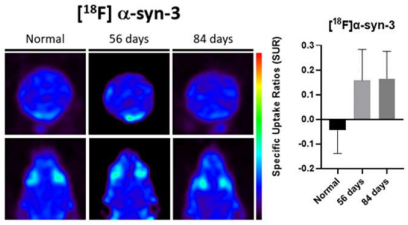


圖 7、管餵魚藤酮 84 天後[^{18}F] α-syn-3 正子影像及統計結果。在管餵給藥後的 56 天和 84 天，我們使用[18F]α-syn-3 進行了小動物正子造影。影像分析顯示，正常組和給藥組小鼠之間的攝取量沒有顯著差異。此外，對紋狀體區域的[18F]α-syn-3 專一攝取率進行量化分析顯示，雖然給藥組的專一攝取率相較於正常組有上升的趨勢，但此差異尚未達到統計學上的顯著性。

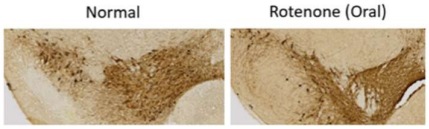


圖 8、連續給藥 84 天後之小鼠黑質 TH 染色

在連續給藥 84 天後，使用管餵方式給予魚藤酮的小鼠進行了黑質部位的 TH 免疫組織化學染色。結果顯示，與正常小鼠相比，接受魚藤酮連續給藥 84 天的小鼠顯示出多巴胺神經細胞存活數量減少的趨勢。

在本研究中，我們使用魚藤酮誘導巴金森氏症小鼠，並以滾輪運動測試動物行為。結果顯示，正常小鼠與魚藤酮處理小鼠在滾輪運動行為上無顯著差異。這一結果與少數已發表文獻（如 Niederberger, Wilken-Schmitz 等，2022）的發現一致，但與其他研究（如 Barone, Antonini 等，2009；Inden, Kitamura 等，2011；Miyazaki, Isooka 等，2020）的結果相悖。我們推測，行為表徵的改變可能需要超過 90%的多巴胺神經元損傷。本研究段延長了給藥時間至 84 天，但仍未達到足夠程度的多巴胺神經元損傷以顯示顯著的行為變化。

為了進一步觀察給藥後小鼠多巴胺神經元相關腦區的變化，我們使用了兩種正子示蹤劑。[^{18}F] FE-PE2I 影像結果顯示，魚藤酮處理組的小鼠相比於正常對照組在多巴胺神經元/轉運體的表現上有顯著下降，顯示長期給予魚藤酮的小鼠中確實會引起多巴胺神經元及轉運體的損傷。此外，我們還確定了新型正子造影劑[^{18}F] α-syn-3 的最佳成像時間窗口，並觀察到在長期給予魚藤酮的小鼠中，[^{18}F] α-syn-3 的吸收趨勢有所增加。

免疫染色結果進一步證實了長期給予魚藤酮的小鼠中導致的紋狀體和黑質中的 TH 陽性細胞存活量減少，與正子造影結果一致。

IV. 結論

在本研究中，我們使用魚藤酮誘導巴金森氏症小鼠，並通過滾輪運動測試動物行為。結果顯示，正常小鼠與魚藤酮處理小鼠在滾輪運動行為上無顯著差異，這與部分文獻的發現一致，但與其他研究的結果相悖。我們推測，顯著的行為變化可能需要超過 90%的多巴胺神經元損傷。儘管將給藥時間延長至 84 天，但仍未達到足夠的損傷程度以顯示顯著行為變化。但在免疫染色結果證實了魚藤酮長期處理導致紋狀體和黑質中 TH 陽性細胞存活量減少，與正子影像結果一致。由於在行為測試中魚藤酮誘導的小鼠疾病模式尚未顯示明顯的行為變化，我們計劃在後續研究中調整實驗設計和參數，以期成功建立巴金森氏症的行為檢測模型。。

參考文獻

[1] Dorsey, E. R. and B. R. Bloem (2018). "The Parkinson Pandemic—A Call to Action." JAMA Neurology 75(1): 9-10

[2] Parkinson, J. (2002). "An essay on the shaking palsy." The Journal of neuropsychiatry and clinical neurosciences 14(2): 223-236.

[3] Farrer, M. J., et al. (2007). "Lrrk2 G2385R is an ancestral risk factor for Parkinson's disease in Asia." Parkinsonism & related disorders 13(2): 89-92.

[4] Tomiyama, H., et al. (2015). Familial Parkinson’s disease/parkinsonism, Hindawi. 2015.

[5] Barone, P., et al. (2009). "The PRIAMO study: A multicenter assessment of nonmotor symptoms and their impact on quality of life in Parkinson's disease." Mov Disord 24(11): 1641-1649.

[6] Katunina, E. and N. Titova (2017). "The Epidemiology of Nonmotor Symptoms in Parkinson's Disease (Cohort and Other Studies)." Int Rev Neurobiol 133: 91-110.

[7] Cong, S., et al. (2022). "Prevalence and clinical aspects of depression in Parkinson's disease: A systematic review and meta‐analysis of 129 studies." Neurosci Biobehav Rev 141: 104749.

[8] Berger, A. (2003). "How does it work?: Positron emission tomography." BMJ: British Medical Journal 326(7404): 1449.

[9] Lameka, K., et al. (2016). "Positron emission tomography." Handbook of clinical neurology 135: 209-227.

[10] Schober, A. (2004). "Classic toxin-induced animal models of Parkinson’s disease: 6-OHDA and MPTP." Cell and tissue research 318(1): 215-224.

[11] Goloborshcheva, V. V., et al. (2022). "Synuclein Proteins in MPTP-Induced Death of Substantia Nigra Pars Compacta Dopaminergic Neurons." Biomedicines 10(9): 2278.

[12] Santoro, M., et al. (2023). "Neurochemical, histological, and behavioral profiling of the acute, sub‐acute, and chronic MPTP mouse model of Parkinson’s disease." Journal of Neurochemistry 164(2): 121-142.

[13] Shimizu, K., et al. (2003). "Paraquat induces long-lasting dopamine overflow through the excitotoxic pathway in the striatum of freely moving rats." Brain research 976(2): 243-252.

[14] Inden, M., et al. (2011). "Parkinsonian rotenone mouse model: reevaluation of long-term administration of rotenone in C57BL/6 mice." Biological and Pharmaceutical Bulletin 34(1): 92-96.

[15] Chia, S. J., et al. (2020). "Historical perspective: models of Parkinson’s disease." International journal of molecular sciences 21(7): 2464.

發展嶄新卵巢癌治療模式:同位素標誌特異性抗體藥物合併化學治療與標靶藥物
Develop novel treatment strategy of epithelial ovarian cancer: Isotope specific labeled antibodies in combination with chemotherapeutic and target drugs

計畫編號：NSTC 112-2623-E-002-004-NU
計畫主持人：江盈澄
e-mail：yingchengchiang@ntu.edu.tw
執行單位：國立臺灣大學醫學院婦產科

摘要

根據衛生福利部國民健康署癌症登記報告，卵巢癌發生率逐年升高，其死亡率在婦科惡性腫瘤中名列第一。由於缺乏有效的診斷工具，大部分病人確診時已是晚期。發展卵巢癌治療藥物及其伴隨式早期診斷工具，正確地篩選目標加以特異性地進行治療，是很有潛力的精準醫療策略。

CHI3L1 基因位於第一號染色體 1q32.1 位置，與慢性發炎、組織重塑和腫瘤形成有關。我們先前的研究發現，在卵巢癌病患癌組織中，CHI3L1 的高度表現有較差的預後，*CHI3L1* 會促進 Mcl-1 蛋白表現，使卵巢癌細胞對紫杉醇有抗藥性。*CHI3L1* 會調控 Akt 與 Erk 訊息傳遞路徑活化，促進β-catenin 與 SOX2 蛋白表現，使細胞具有癌症幹細胞的特性。由此可見，*CHI3L1* 在卵巢癌的發展扮演相當重要的角色。

我們在先前的計畫建立鎦-177 標誌特異性 *CHI3L1*(YKL40)抗體藥物，初步發現在卵巢癌小鼠實驗顯示出相當的治療效果。在本年度的計畫中，我們研究鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併化療藥物(包括紫杉醇或順鉑)所產生的抑制腫瘤效應，結果顯示低劑量放射治療 (LDRT)輻射藥物治療聯合化療，能夠有效抑制腫瘤生長，並增加轉移性卵巢癌動物模型的整體存活率。本計畫所發展的鎦-177 標誌特異性 *CHI3L1*(YKL40)修飾抗體藥物，將有助於發展以 *CHI3L1* 為治療標的之策略，促使卵巢癌治療獲得突破性的發展，並實際應用在腫瘤病患的治療。

關鍵詞：卵巢癌、鎦-177 標誌特異性 *CHI3L1*(YKL40)抗體藥物、同位素應用

Abstract

According to the cancer registration reports of the Heal According to the cancer registration reports of the Health Promotion Administration, Ministry of Health and Welfare, the incidence of epithelial ovarian cancer increases in recent years and the mortality rate is highest in all gynecologic malignancies in Taiwan. The majority of the patients are diagnosed at advanced stage due to lack of effective diagnostic tools. It is the potential strategy of precision medicine to develop the therapeutic drugs of epithelial ovarian cancer and the companion diagnostic tools which will select the target population correctively to manage the malignant tumors specifically.

CHI3L1 is located on chromosome 1q32.1, and associated with chronic inflammation, tissue remodeling and formation of solid tumors. Our previous studies showed the epithelial ovarian cancer patients with high *CHI3L1* expression had a poor prognosis, and *CHI3L1* promotes chemoresistance via inhibition of drug-induced apoptosis by up-regulating Mcl-1. *CHI3L1* induces both the Akt and Erk signaling pathways, through the expression of β-catenin followed by SOX2, to promote the properties of ovarian cancer stem-like cells. It shows that *CHI3L1* plays an important role in the tumorigenesis of the epithelial ovarian cancer.

We developed the specific Lu-177 labeled *CHI3L1* (YKL40) antibodies in our previous project. We found that the antibodies showed considerable therapeutic efficacy in ovarian cancer mice model. In this proposal, we combined the specific Lu-177 labeled *CHI3L1* (YKL40) antibodies with the current chemotherapeutic drugs in the animal experiments to investigate whether the therapeutic effects can be enhanced in the ovarian cancer bearing mice. The results showed combination of low dose radiotherapy (LDRT) of Lu-177 labeled *CHI3L1* (YKL40) antibodies and chemotherapy would inhibit tumor growth efficiently and increase the overall survival rate of the mice. Our study contributes to the development of ovarian cancer treatments and practical applications in the treatment of ovarian cancer patients.

Keywords: Epithelial ovarian cancer, Lu-177 labeled *CHI3L1*(YKL40) antibodies, Isotope application

I. 前言

癌症是國人十大死因之首，在婦癌的領域中，卵巢癌逐漸成為一個愈來愈重要的疾病(1-3)，患者通常在晚期 (第三或四期) 被診斷，接受治療後雖然初期反應不錯，但是許多患者會復發，平均五年存活率僅 19－30%，上皮性卵巢癌患者初期症狀不明顯、缺乏有效的診斷工具以至不易早期診斷治療、對於腫瘤形成機制未能全盤了解及對化學治療容易產生抗藥性，這些因素都造成卵巢癌患者的預後不佳(6-8)。理想的癌症治療模式應能同時清除全身轉移或侵犯的腫瘤，同時也能特異性的區分腫瘤和非腫瘤細胞。因此發展出卵巢癌早期診斷的篩檢方式，並特異性的針對腫瘤進行治療，將會是非常有潛力的嶄新腫瘤診療策略。

我們在先前的計畫建立以鎦-177 同位素標幟 *CHI3L1*(YKL40)抗體藥物，初步發現經過修飾後的鎦-177 同位素標幟 *CHI3L1*(YKL40)抗體藥物在血清中展現高度穩定性。由於 *CHI3L1*(YKL40)抗體藥物本身不具有引起卵巢癌細胞凋亡的能力，但經過鎦-177 標誌後的

CHI3L1(YKL40)抗體，在卵巢癌小鼠實驗顯示出相當的治療效果。由於目前傳統影像導引的放射治療在卵巢癌臨床使用有限，又卵巢癌主要藥物治療方式為化學治療與標靶藥物，因此，在本年度的計畫中，我們研究鎘-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併化療藥物(包括紫杉醇或順鉑)所產生的抑制腫瘤效應，實驗結果顯示儘管鎘-177-DTPA-YKL40 輻射藥物聯合化療能夠有效抑制腫瘤生長，但與單獨接受放射治療或化療的轉移性卵巢癌動物相比，這種聯合治療策略無法提高整體存活率。於是我們進一步評估低劑量放射治療 (LDRT)的治療策略，結果顯示 LDRT 輻射藥物治療聯合化療能夠有效抑制腫瘤生長並增加轉移性卵巢癌動物模型的整體存活率。本計畫所發展的鎘-177 標誌特異性 *CHI3L1*(YKL40)修飾抗體藥物，將有助於發展以 *CHI3L1* 為治療標的之策略，促使卵巢癌治療獲得突破性的發展，並實際應用在腫瘤病患的治療。

II. 主要內容

(一)**研究目的**:測試鎘-177 標誌特異性 *CHI3L1*(YKL40)修飾抗體藥物合併化學治療藥物進行腫瘤動物模式試驗，找出何種藥物合併型式最具有治療效果。

(二)實驗設計

A.動物體系

I.品種 (週齡)：Female BALB/c mice (4~5 週齡)。

II.供應來源：樂斯科生物科技股份有限公司

III.週齡：試驗開始時動物週齡約為 5~7 週齡。

IV.識別方法：動物採用尾部做記號編號，每飼育籠附有識別卡，分別記載籠號、組別、性別及動物號碼，以茲識別。

V.數量：BALB/c mice 9 隻

VI.動物隨機分組: 試驗前進行秤重及臨床觀察，從其中挑選體重相近之動物，依體重大小，分成適當重量群，進行隨機分組。

試驗項目: BALB/c mice 定性造影實驗

以 CA5171(6×106)細胞種殖於 ASID 之動物模式定量造影實驗根據定性實驗之結果，進行動物模式定量分析

B.試驗設計

1. 實驗動物

I.動物隔離檢疫及適應: 三隻一籠，飼養於小鼠籠具中。飼育室設定溫度為 21 2℃、溼度 50 20%，光照 12 小時亮，12 小時暗(早上六點亮，下午六點暗)。動物經過隔離及適應期，並進行觀察。

II.動物飼料及飲水供應: 動物自接收至試驗終結期間，飼料與飲水無限制供應。

III.動物隨機分組: 試驗前進行秤重及臨床觀察，從其中挑選體重相近之動物，進行隨機分組。

2.試驗觀察及記錄

I.每日觀察

II.動物秤重: 試驗動物試驗當天進行秤重並紀錄體重。

III.數據分析:實驗結果數據以平均值(Mean)標準誤差(SEM)來表示。

3.鎘-177 同位素標幟抗體藥物

I.首先將購買的鎘-177 首先溶解在 0.1 M 鹽酸中，使最終體積為 1 mL。

II.接著將已接合螯合劑的抗體 DTPA-YKL-40 以 20 μg/μL 的濃度溶解在二甲基亞碸 (Dimethyl sulfoxide，簡稱 DMSO)溶液中。

III.對於鎘-177 標誌之步驟，是將 1 μL 之已接合螯合劑的抗體 DTPA-YKL-40 和 82.5 MBq 177LuCl3 在 1 M 無水醋酸鈉(pH 4.0)溶液中混合至最終體積為 600 μL。

IV.在 37°C、500 rpm 的加熱控制器中以搖動的條件下培養 30 分鐘。

V.將溶液通過 Vivaspin® (Sartorius, Goettingen, Germany)進一步純化已經標誌好的放射藥物並去除上述未結合的鎘-177。

VI.最後移除 Vivaspin®的滲濾杯，並通過生理食鹽水進行回收、濃縮和純化放射藥物鎘-177-DTPA-YKL-40。

VII.鎘-177-DTPA-YKL-40 的比活性須高於 4.1 GBq/mg。

4.鎘-177 同位素標幟抗體藥物合併化學治療藥物實驗

鎘-177 同位素標幟抗體藥物，其給藥途徑為靜脈注射，給予藥物比活度為 0.1~10 μCi/μg，每隻動物給予 0.1-2 mg/kg 之標幟抗體藥物(視實際標誌實驗結果做適當調整)，另合併化療藥物的劑量紫杉醇 (6 mg/kg)或順鉑 (75 mg/m2)治療。用 PBS 治療的小鼠將作為陰性對照組。將監測小鼠，定期測量和記錄腫瘤直徑。

5. 統計分析: 數據將以 Statistical Package of Social Studies 軟體(SPSS 22.0，SPSS Inc.)進行分析。Student t 檢驗將用於連續變數，Fisher 精確檢定將用於分類變數。在多組的實驗，將使用單因素方差分析（ANOVA）進行分析。P 值<0.05 將被視為具有統計顯著性。

III. 結果與討論

1. 接受鎘-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併化療藥物對轉移性卵巢癌實驗動物之治療效果

為了確定鎘-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併化療藥物包括紫杉醇或順鉑後產生的抑制腫瘤效應，我們首先評估了鎘-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併紫杉醇是否能夠產生比單獨使用鎘-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物或單獨使用紫杉醇或順鉑具有更好的抑制腫瘤作用。放射抗體藥物合併化療藥物不同治療策略如圖一所顯示。單獨接受鎘-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物 (40 μCi)治療的轉移性卵巢癌 CA5171 細胞之實驗動物腫瘤大小明顯小於 PBS 處理組(圖二)。單獨接受紫杉醇 (6 mg/kg)或順鉑 (75 mg/m2)治療的小鼠的腫瘤大小並未明顯小於其他組 (D28)的皮下腫瘤體積 (mm3)，(PBS：3814.5±1027.1，鎘-177-DTPA-YKL40 單獨：1247.8±255.9，紫杉醇：3006.2±843.1，順鉑：2720.5±1066.3，p=0.67，圖二)。另一方面，接受鎘-177-DTPA-YKL40 聯合紫杉醇或順鉑等化療藥劑治療的轉移性 CA5171 腫瘤帶有小鼠顯示出明顯減小的腫瘤大小 (鎘-177-DTPA-YKL40 合併紫杉醇：1032.7±304.9，鎘-177-DTPA-YKL40 合併順鉑：1354.1±241.7)。這些結果表明鎘-177-DTPA-YKL40 與化療藥劑能夠有效抑制 CA5171 腫瘤的生長和進展。

我們也對各組小鼠的存活狀態進行評估。接受單獨使用鎦-177-DTPA-YKL40 (400 μCi) 放射抗體藥物治療的轉移性 CA5171 腫瘤小鼠模式中，有 30%在腫瘤挑戰後 28 天仍然存活。另一方面，接受紫杉醇 (6 mg/kg) 或順鉑 (75 mg/m2)治療的小鼠，仍有 20%在腫瘤挑戰後 28 天仍然存活 (圖三)。然而在聯合治療組中，接受鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物與化療藥劑的小鼠未能顯示與單獨使用鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物或化療藥劑單獨相比的明顯存活效益 (鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇為 10%，鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑為 0%)。這些結果表明，儘管鎦-177-DTPA-YKL40 輻射藥物聯合化療能夠有效抑制腫瘤生長，但與單獨接受放射治療或化療的轉移性卵巢癌動物相比，這種聯合治療策略無法提高整體存活率。

2. 接受低劑量鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併化療治療之轉移性腫瘤小鼠模式的抗腫瘤效應，並增加存活率

我們進一步評估了低劑量放射治療 (LDRT)的治療策略，探討放射抗體藥物合併化療是否能夠產生更強大的抗腫瘤效應和增加整體存活率。小鼠首先通過靜脈內、腹腔內和皮下注射 CA5171 腫瘤細胞，如材料和方法中所述。轉移性小鼠接受各種輻射藥物治療方案後，腫瘤大小在不同的治療方案之間相似 (400 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 單次劑量：1571.6±301.4；200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 一周兩次：1438.5±335.6；100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 一周四次：1606.2±320.7)。另一方面，接受各種放射抗體藥物合併紫杉醇或順鉑在內的化療藥劑的轉移性 CA5171 腫瘤帶有小鼠的腫瘤大小 (mm3) 也明顯減小 (單次 400 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇：977.7±210.7；一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇：1374.5±348.1；一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇：1456.8±326.5；單次 400 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑：1657.5±350.2；一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑：1572.8±269.7；一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑：1754.4±323.5，圖五)，與接受 PBS 處理的組相比都顯著減小。這些結果表明，包括 LDRT 在內的各種輻射藥物與化療藥劑也能有效抑制 CA5171 腫瘤的生長和進展。

我們進一步評估了不同組別小鼠接受不同治療策略後的存活狀態。只有 30%接受單一劑量鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物 (400 μCi)的轉移性 CA5171 腫瘤小鼠在接受治療後 28 天仍然存活。相較於高劑量的鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物治療，接受 LDRT 的小鼠在腫瘤挑戰後的 28 天存活率也更高 (一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物為 50%，；一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物為 40%)。另一方面，LDRT 與化療的結合治療策略，與單獨接受 400 μCi 的鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物相比，明顯增加了整體存活率。超過 50%的接受 LDRT 合併化療的小鼠在腫瘤挑戰後 28 天仍然存活 (一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇 60%，一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇為 60%，一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併聯合順鉑為 50%，一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑為 60%，圖六)。而且 LDRT 合併化療組中僅有 12.6%的體重損失 (單次 400 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物為 19.7%，一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物為 13.5%，一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物為 10.5%，單次 400 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇為 22.5%，一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇為 15.6%，一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併紫杉醇為 15.1%，單獨接受 400 μCi 的鎦-177-DTPA-YKL40 合併順鉑為 23.7%，一周兩次 200 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑為 14.2%，一周四次 100 μCi 鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體藥物合併順鉑為 12.6%，圖七)。這些結果表明，LDRT 輻射藥物治療聯合化療能夠有效抑制腫瘤生長並增加轉移性卵巢癌動物模型的整體存活率。

在本計畫，我們研究鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併化療藥物(包括紫杉醇或順鉑)所產生的抑制腫瘤效應，首先評估鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併紫杉醇或順鉑，是否能夠產生比單獨使用鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物，或單獨使用紫杉醇或順鉑，更好的抑制腫瘤作用,同時我們也對小鼠的存活狀態進行評估。實驗結果顯示儘管鎦-177-DTPA-YKL40 輻射藥物聯合化療能夠有效抑制腫瘤生長，但與單獨接受放射治療或化療的轉移性卵巢癌動物相比，這種聯合治療策略無法提高整體存活率。於是我們進一步評估低劑量放射治療 (LDRT)的治療策略，探討放射抗體藥物合併化療是否能夠產生抗腫瘤效應和增加整體存活率。結果顯示，包括 LDRT 在內的各種輻射藥物與化療藥劑能有效抑制小鼠腫瘤生長。進一步評估小鼠存活狀態，結果顯示 LDRT 輻射藥物治療聯合化療能夠有效抑制腫瘤生長並增加轉移性卵巢癌動物模型的整體存活率。

IV. 結論

鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物是卵巢癌的具潛力的放射性診斷與治療藥物。本計畫研究結果顯示低劑量放射治療 (LDRT)的鎦-177-DTPA-YKL40 放射抗體治療藥物合併化療藥物(包括紫杉醇或順鉑)能夠有效抑制腫瘤生長並增加轉移性卵巢癌動物模型的整體存活率。本數據可提供一個具有價值之研究模式，將來有機會應用在卵巢癌的診治。

參考文獻

[1] Siegel, R. L. Miller, K. D. Wagle, N. S. Jemal, A.. Cancer statistics, 2023. CA Cancer J Clin. 2023 Jan;73(1):17-48.

[2] Chiang YC, Chen CA, Chiang CJ, Hsu TH, Lin MC, You SL, et al. Trends in incidence and survival outcome of epithelial ovarian cancer: 30-year national population-based registry in Taiwan. J Gynecol Oncol. 2013;24(4):342-51.

[3] 衛生福利部國民健康署癌症登記年度報告.

http://www.hpa.gov.tw/Bhpnet/Web/Stat/Statistics.aspx.
[4] Banerjee S, Kaye SB. New strategies in the treatment of ovarian cancer: current clinical perspectives and future potential. Clin Cancer Res. 2013;19(5):961-8.
[5] Romero I, Bast RC, Jr. Minireview: human ovarian cancer: biology, current management, and paths to personalizing therapy. Endocrinology. 2012;153(4):1593-602.
[6] Pignata S, Cannella L, Leopardo D, Pisano C, Bruni GS, Facchini G. Chemotherapy in epithelial ovarian cancer. Cancer Lett. 2011;303(2):73-83.

加速器質子射束特性量測與分析技術開發
Development of techniques for proton beam characterization and measurement

計畫編號：112-2623-E-007-004-NU
計畫主持人：藍貫哲
e-mail：kclan@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：林明緯
計畫參與人員：林哲璋、戴嘉智、詹維倫、劉昆妮、
陳慶丞、劉博維
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

質子加速器在質子治療和材料輻射損傷研究中具廣泛且重要的應用，徹底了解質子射束特性，可提高實驗和分析結果的可靠性。藉由本研究發展出針對 30 MeV 迴旋加速器產生質子束特性之量測方法，以了解加速器質子射束的基本參數，奠定質子射束品質監測技術的基礎。在質子橫向截面分佈量測，以相機拍攝質子束與螢光屏作用產生的二維空間放光分佈，可快速解析質子射束的橫向截面分佈。質子中心能量與能散的測量則使用兩種方法。方法一，基於湯木生拋物線法之質子能譜儀，透過磁鐵偏轉質子射束，量測施加磁場前後質子射束在螢光屏上偏折距離與光強度分佈變化，推算出質子中心能量為 27.6 MeV，能散為 0.6 MeV。方法二，使用體積閃爍體量測法分析質子在閃爍體內隨深度的放光強度分佈，結合柏克斯公式和蒙地卡羅粒子模擬，推算出質子中心能量為 28.0 MeV，能散為 0.8 MeV 與前一方法推算之結果相近。質子縱向脈衝時寬與時間分布同樣進行兩種量測。方法一，藉由分析質子轟擊靶材產生之瞬發加馬輻射訊號與加速器射頻系統觸發訊號的時間差，計算出質子縱向脈衝時間分佈為 0.945 ns。方法二，設計一薄型閃爍體偵檢器，量測質子在閃爍體內產生的放光強度時間分布，並與偵測器響應函數進行反摺積運算，結果顯示質子縱向脈衝時間分佈為 0.96 ns，與前者量測結果吻合。本研究成果可應用於發展質子特性量測技術及質子加速器設施射束品保，提升材料輻射效應和太空元件測試實驗準確性，並有助於開發基於質子加速器的中子射源，確保快中子能譜量測的正確性與可靠度。

關鍵詞：質子射束、加速器、閃爍體

Abstract

Proton accelerators have significant applications in proton therapy and material radiation damage research. Understanding proton beam characteristics can enhance the reliability of experimental and analytical results. This study developed methods for characterizing a 30-MeV proton beam with the goal of enabling the measured beam properties to contribute to future advances in proton beam quality control and proton-related research. For measuring the transverse beam profile of the proton beam, a camera was used to capture the light distribution produced by the interaction of the proton beam with a phosphor screen, enabling rapid analysis of the transverse distribution. A Thomson parabola spectrometer, along with a dedicated analytical model for data processing, was constructed to identify the mean energy and energy spread of the proton beams as 27.6 MeV and 0.6 MeV, respectively. In addition, by analyzing the longitudinal intensity distribution of scintillation light produced when protons propagate inside a scintillator, the mean energy and energy spread were estimated to be 28.0 MeV and 0.8 MeV, based on the resolved proton depth dose acquired with related Monte Carlo simulations and Birks' formula for light yield. The measurement of the proton bunch duration, involving statistical analysis of the time difference between the trigger signal of the RF system for the cyclotron and the measured prompt gamma-rays emitted after protons interact with a target, indicates that the proton bunch duration was estimated to be 0.945 ns. Moreover, proton bunches were induced to interact with a thin, fast scintillator to produce short light pulses; in this way, the proton bunch duration can be determined as 0.96 ns by implementing a deconvolution of the temporal profile of the measured scintillation light with the response function of the scintillator. The findings of this study can be applied to developing proton characteristic measurement technologies, enhancing beam quality assurance in proton accelerator facilities, improving the accuracy of material radiation effects and space component testing, and aiding in the development of neutron sources based on proton accelerators, ensuring the accuracy and reliability of fast neutron spectrum measurements.

Keywords: Proton beam, accelerator, scintillator

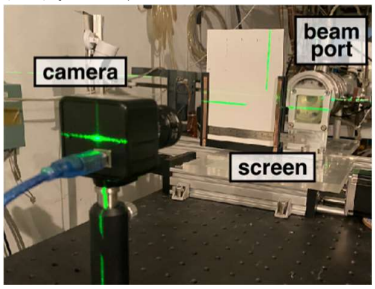
I. 前言

現今先進核子反應器材料開發及太空元件性能輻射測試等領域上，質子射束為試驗工具，用以針對核反應器與太空高輻射環境，其可能遭遇輻射影響進行模擬測試，因此，為了精確討論材料內部特定區域內的質子照射後成分與性質變化，優良質子射束品質乃極為關鍵之研究根基。若能精確掌握質子射束的「橫向截面通量率分佈」及「中心能量與能散」兩類關鍵基本參數，將有助於提升質子射束品質，進而提升質子照射實驗精確度。唯有取得高品質的質子射束，才能精確判斷材料受到輻照期間的演變。「質子減速架設」量測經衰減後較低能量的質子，可應用於探討及分析低能量質子對於材料或電子元件造成的輻射效應。量測「質子縱向脈衝時寬與時間分佈」，將有助於未來臨場觀察材料變化實驗的發展，並且精確量測質子的時間分布將有助於提升並改善加速器中子能譜的解析。因此，建立與發展質子射束

測量技術可將質子束之特性參數帶入實驗分析中並提升研究品質，不僅能幫助核能領域突破材料開發之技術瓶頸，對於質子治療與相關元件開發以及太空環境對材料輻射效應技術探討，都將帶來關鍵影響，而良好的質子射束也可應用於發展基於加速器之中子射源，應用於中子相關研究。本計畫將彙整多項質子束特性量測方法以建立自主的量測技術，完整地解析質子束之能量、空間與時間等特性，作為未來前瞻性研究之基礎。

II. 主要內容

本計畫針對質子射束的「質子橫向截面分佈」、「中心能量與能散」「質子減速架設」以及「質子縱向脈衝時寬與時間分佈」等特性進行量測，以下將針對各項特性分別描述。首先，在質子橫向截面分佈量測中，利用閃爍體與質子作用後放光原理，在質子射束軸向上擺放 Green 400 閃爍體螢光屏，並將相機放置於閃爍體後，對質子與閃爍體作用後產生之放光分佈進行分析，即可量測射束之橫向截面分佈。

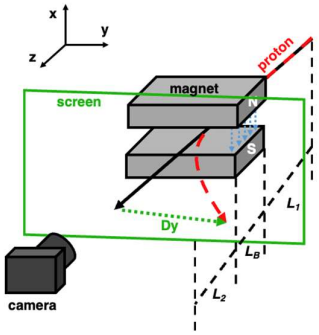


圖一，質子橫向截面分佈量測之實驗架設圖。

在質子中心能量與能散的量測上，先使用湯木生拋物線法(Thomson parabola method)建立質子能譜儀[1,2]，實驗架設如圖二所示，在質子射束行進的 z 方向上擺放長度為 4 公分的磁鐵(L_B=4 cm)，此磁鐵在 x 方向上產生 0.77 T 的磁場(B_x=0.77 T)，質子行經磁鐵時受到勞倫茲力在 y 方向上產生加速度，因此質子將往 y 方向上偏折，最終入射放置距離磁鐵 28 公分處(L_2=28 cm)的螢光屏，藉由 CCD 相機觀測在施加磁場前後質子射束在目標平面上的偏移量 D_y，可推算出質子速度v_z，計算公式如下式(1)所示，

$$D_y = \frac{QB_xL_B}{Mv_z}\left[\frac{L_B}{2} + L_2\right] \qquad (1)$$

其中 Q 為粒子電量，M 為粒子質量，計算出質子速度後即可進而推算出質子中心能量，並可藉由射束形狀在水平方向造成的光強度分佈變化估算質子能量分佈



圖二，湯木生拋物線法質子能譜儀示意圖。

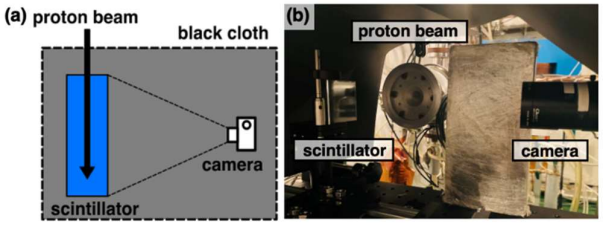
在質子中心能量量測中，亦使用體積閃爍體量測法對質子能量與能散進行量測，當高能帶電荷之粒子入射有機閃爍體時可激發材料分子放射出閃爍光，閃爍光強度主要由此粒子在物質內遷移時的阻擋本領(stopping power)或線性能量轉移(linear energy transfer, LET, $\frac{dE}{dx}$)所決定，然而重粒子較高的阻擋本領將游離部分與此粒子作用的閃爍體材料分子，使遷移路徑上的受激態分子數量下降，進而減少閃爍光產量，隨重離子增加的阻擋本領反而使得閃爍體光產量下降的機制稱為焠熄效應(quenching effect)，可用伯克斯公式(Birks formula)描述:

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S\frac{dE}{dx}}{1 + kB\frac{dE}{dx}} \qquad (2)$$

其中 S 為放光效率常數，kB 數值為焠熄效應常數，用以代表粹熄效應的影響程度，$\frac{dL}{dx}$ 表示單位距離內的光產量(1/cm)，$\frac{dE}{dx}$為單位距離內帶電荷粒子於閃爍體沉積之能量(MeV/cm)。因此基於式(2)，藉由量測所得之閃爍光強度分佈 $L(d)$可推估出劑量隨深度之變化$D(d)$，即百分深度劑量，如下式(3)所示

$$L(d) = \frac{S \times LET(d) \times \phi(d)}{1 + kB \times LET(d)} \propto \frac{D(d)}{1 + kB \times LET(d)} \qquad (3)$$

其中$\phi(d)$為於深度 d 的質子通量，將量測推算之劑量分布$D_L(d)$與 Geant4 蒙地卡羅模擬程式所模擬之百分深度劑量$D_{R,E}(d)$進行比較，可準確推算入射質子的能量。實驗架設如圖三所示，閃爍體使用 EJ-200 有機閃爍體其 kB 值為 0.154 mm/MeV[3]，厚度為 2 mm，並在射束行徑方向 90 度方向上架設相機拍攝閃爍光放光分布。



圖三，體積閃爍體量測法(a)實驗示意圖(b)實驗架設圖

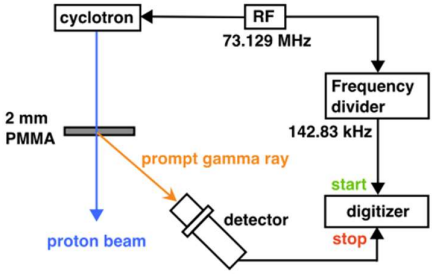
在質子減速架設上，基於前項使用質子能譜儀量測質子中心能量與能散的結果，在射束出口架設 1.2、2.1 及 2.7 mm 厚的鋁片衰減質子能量，量測經過減速後的質子中心能量與能散，並與 Geant4 蒙地卡羅模擬之中心能量進行比較，驗證量測結果是否正確。

最後，質子縱向脈衝時寬與時間分佈的量測上，首先使用瞬發加馬輻射時間差量測法，實驗架設如下圖四所示，使用加速器之 73.129 MHz 射頻訊號源作為觸發訊號，並以除頻器衰減 512 倍射頻訊號頻率，輸出 142.83 kHz 之觸發訊號至數化器，提供觸發訊號時間點 t_{tri}。另一方面，由射頻訊號源觸發並經由迴旋加速器產生的質子團入射進入射束前方 2 mm 厚的 PMMA 材料，質子將與 PMMA 材料作用產生瞬發加馬輻射，並使用 EJ-309 閃爍偵檢器量測，並傳輸至數化器紀錄下偵檢器訊號時間點 t_{det}，經由統計數化器輸出之兩訊號間的時間差 $t_{diff}=t_{det}-t_{tri}$ 後，並以高斯擬合時間差分布後即可得到測量之脈衝

時寬ΔT_{meas}，而此脈衝時寬ΔT_{meas}與實際質子脈衝時寬ΔT_{bunc} 的關係如下式(4)所示[4]:

$$(\Delta T_{meas})^2 = (\Delta T_{bunch})^2 + (\Delta T_{system})^2 + (\Delta T_{target})^2 \quad (4)$$

其中偵檢器系統的時間誤差ΔT_{system}經量測為 2.062 ns，因質子可能在靶材上不同深度產生瞬發加馬輻射所產生之時間誤差ΔT_{target}為 0.028 ns。因此，可藉由量測所得之脈衝時寬ΔT_{meas}推算質子脈衝時寬ΔT_{bun} 。



圖四，瞬發加馬輻射時間差量測法之示意圖。

在質子縱向脈衝時寬與時間分佈中，亦使用閃爍體響應反摺積法對質子縱向脈衝時寬進行量測，使用示波器紀錄質子直接與閃爍體所產生的閃爍光的響應 *M(t)*，其為質子縱向脈衝時間分佈 *N(t)*與單一閃爍光脈衝之系統響應函數 *I(t)*之摺積，此摺積關係式為

$$N(t) * I(t) = M(t) \quad (5)$$

本實驗使用薄閃爍體偵檢器，此閃爍體為長度 3 cm、寬度 1 cm、厚度 1 mm 的 EJ-232-0.5% 閃爍體，其具有 360 ps 極短的放光時寬，盡可能地減少質子在閃爍體內造成光訊號的疊加。使用薄閃爍體偵檢器量測鈷六十射源，紀錄量測光子時產生之閃爍光波形，即可得知單一閃爍光脈衝之系統響應函數 I(t)。實驗中使用示波器紀錄偵檢器量測質子射束的量測時間響應$M_{measure}(t)$後，採用參數化方法(parameterization method)進行反摺積[5]，首先假設質子縱向脈衝時間分布為高斯分佈與指數衰減分佈所組成之混合分佈$N_{mix}(t, A_0, t_c, \sigma, r)$:

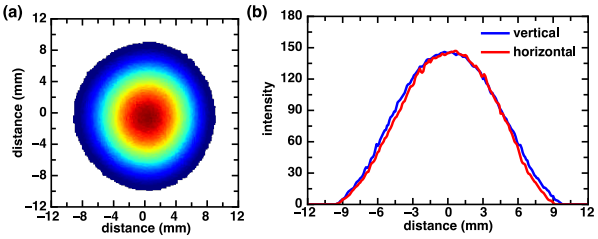
$$N_{mix}(t, A_0, t_c, \sigma, r) = \begin{cases} A_0 \times e^{\frac{-(t-t_c)^2}{2\sigma^2}} & t < t_c, \\ A_0 \times e^{-\frac{t}{r}} & t \geq t_c. \end{cases} \quad (6)$$

其中A_0, t_c, σ為高斯分佈之係數，r 為指數衰減分佈之係數，此混合分佈表示在時間小於高斯分佈之中心點t_c時為高斯分佈，時間大於等於t_c時則為指數衰減分佈。並引入 L-BFGS-B 演算法[6]，找到混合分佈中最佳的A_0, t_c, σ,r 係數，可以使$N_{mix}(t)$與 *I(t)*之折積$M_{mix}(t)$ 和量測時間響應$M_{measure}(t)$差異最小，如下式(7)所描述，即可推算出質子脈衝時寬 N(t)。

$$\underset{A_0, t_c, \sigma, r \in \mathbb{R}}{\operatorname{argmin}} [M_{mix}(t) - M_{measure}(t)]^2 \quad (7)$$

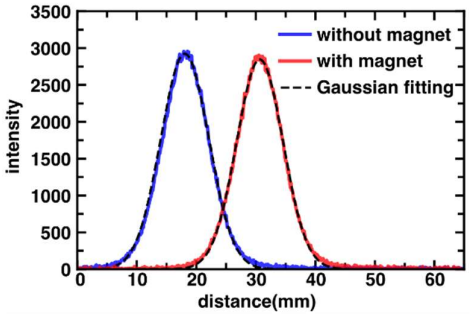
III. 結果與討論

質子橫向截面分佈中，以相機紀錄質子與螢光屏所產生的放光分佈如下圖五所示，可以觀察到射束形狀為直徑約 1.8 公分的圓形，近似於二維高斯分佈，中心點水平及垂直方向上的質子數量分佈之半高全寬分別是 9.34 mm 與 9.79 mm。



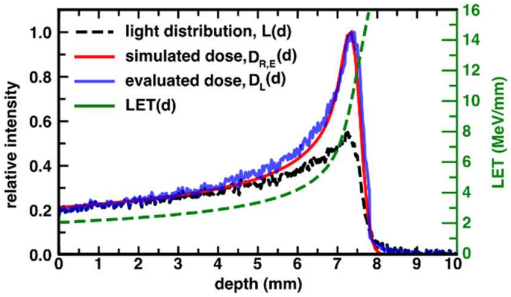
圖五，(a)質子橫向截面分佈 (b)水平與垂直方向的放光強度分佈。

在質子中心能量與能散的量測上，質子能譜儀使用相機拍攝磁鐵偏轉前後的射束形狀的位移變化，結果如圖六，射束中心的偏移量為 12.47 mm，對應質子能量為 27.6 MeV，而射束形狀之半高全寬偏轉前後分別為 3.85 mm 及 3.9 mm，可推算質子能量約在 27.1-27.7 MeV 之間，具有約 0.6 MeV 的能散。



圖六，施加磁鐵前後，質子射束中心水平分佈變化。

使用體積閃爍體量測法量測質子能量時，質子入射閃爍體後產生閃爍光，使用相機所拍攝到閃爍光隨深度之光強度分佈，並取射束中心處進行分析，繪出質子進入閃爍光後隨深度的放光分佈 L(d)，如圖七中黑色虛線所示。閃爍光放光分佈與線性能量轉移(圖七綠線)可經式(3)計算出質子百分深度劑量(圖七藍線)，經由蒙地卡羅模擬不同能量與能散之質子射束比較後，推算出質子中心能量為 28 MeV，能散約為 0.8 MeV，其百分深度劑量如圖七中紅線所示，模擬與實驗結果吻合，此結果與質子能譜儀量測所量測之 27.6 MeV 十分接近。



圖七，實驗量測與模擬所得之劑量分佈。L(d)為質子射束在閃爍體內放光強度分佈，D_L(d)為經閃爍體放光推算之深度劑量。$D_{R,E}$(d)為模擬計算中心能量 28 MeV 能散為 0.8 MeV 的質子在閃爍體內的百分深度劑量，LET(d)為 Geant4 模擬相應中心能量與能散的質子在閃爍體內的線性能量轉移深度分佈，其單位對應右側綠色 Y 軸。

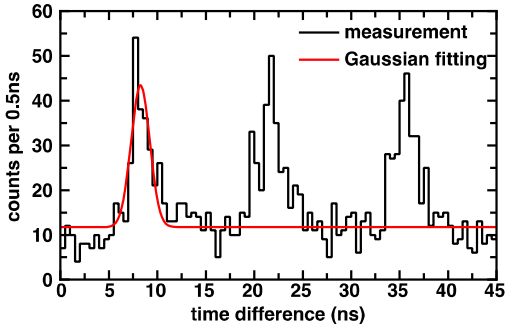
在質子減速架設中，基於質子能譜儀加上不同厚度的鋁片後，實驗結果如下表二所示，經由實驗量測出的質子中心能量與模擬結果相近，但隨能量降低差異越

大，原因可能為水平分佈隨能量降低而發散，使高斯擬合時有所誤差，此結果可驗證實驗的正確性並提供後續實驗使用不同能量之質子束時作為參考。

表二，使用不同厚度的鋁片衰減之放光水平分佈變化，計算質子中心能量與能散，並與模擬結果比較。

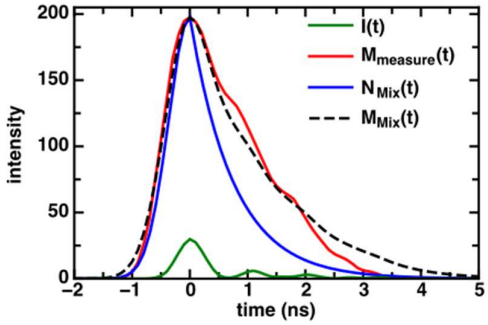
鋁片厚度	0 mm	1.2 mm	2.1 mm	2.7 mm
偏移距離 (mm)	12.47	13.86	15.56	17.19
中心能量 (MeV)	27.4	22.0	17.3	13.8
模擬之中心能量(MeV)	27.4	22.03	17.2	13.3
能量分佈 (MeV)	27.1-27.7	21.6-22.4	16.8-17.9	13.3-14.6

在質子縱向脈衝時寬與時間分布的量測中，使用瞬發加馬輻射量測法量測之時間差如圖八所示，其中經高斯擬合所得之半高全寬為 2.268 ns，藉由式(4)計算後，質子脈衝時寬 ΔT_{bunch} 為 0.945 ns。



圖八，瞬發加馬輻射量測法所量測之瞬發加馬輻射與射頻觸發訊號時間差分佈圖。

閃爍體上升時間微分法量測質子脈衝時寬的實驗中，加馬射源在偵檢器中所產生的單一閃爍光脈衝之系統響應函數 I(t)如圖九綠線所示，質子直接與閃爍體作用產生閃爍光之量測時間響應 $M_{measure}(t)$ 為圖九紅線，進行如式(6)-(7)反摺積之運算後，推算出質子縱向脈衝時間分布 $N_{Mix}(t)$ (圖九藍線)，其與系統響應函數摺積的結果 $M_{Gaussian}(t)$ (圖九黑色虛線)十分接近，而質子縱向脈衝時間分布的半高全寬為 0.96 ns，與瞬發加馬輻射量測法之結果十分接近，驗證結果的正確性。



圖九，使用混合分佈進行參數化反摺積後所得之結果。*I(t)*為單一閃爍光之系統響應函數，$M_{measure}(t)$ 為量測而得的時間響應，$N_{Mix}(t)$ 為混合分佈反摺積後所得到的質子脈衝分佈， $M_{Mix}(t)$ 則為 $N_{Gauaaisn}(t)$ 與 I(t) 摺積後所得之時間響應。

IV. 結論

本計畫發展出針對質子橫向截面分布、質子中心能量與能散、質子減速架設、質子縱向脈衝時寬與時間分佈的量測技術皆有達到目標。針對質子橫向截面分佈，本計畫提供了一個快速對質子位置與方向進行量測的方法，並且以簡單的架設閃爍體與相機即可完成量測目標，未來將可用於質子實驗前的對位與調整射束形狀的品保程序，以確保實驗時質子的射束形狀正確。在質子中心能量與能散量測上，基於湯木森拋物線法所發展的質子能譜儀與體積閃爍體量測法雖有差異，仍在合理的誤差範圍內，儘管體積閃爍體量測法在實驗上需花費較多時間與蒙地卡羅模擬結果比較以推算質子能量，但體積閃爍體量測法簡易的架設未來在品保上相當有潛力，可結合質子橫向截面分布量測方法，建立同時量測質子射束能量與形狀的品保系統，減少研究用與醫用質子束的品保時間，而質子減速架設則提供了衰減質子能量的相關數據，建立使用低能量質子照射實驗研究的基礎，同時驗證了質子能譜儀的結果。在質子脈衝時寬與時間分佈的量測上，瞬發加馬輻射量測法與閃爍體響應反摺積法皆可成功解析質子縱向脈衝時寬且結果十分相近，驗證了結果的正確性，此結果將有助於未來臨場觀察材料變化實驗，以及質子治療中以瞬發加馬輻射進行質子射程驗證的應用，此外，解析質子縱向脈衝時寬可用於計算中子飛行時間的時間不確定性，進而推算中子能譜的能量解析度，有助於加速器中子源的發展。

總體而言，本計畫發展的各項量測技術及量測數據將可用於確保加速器質子射束的品質，並增進射束的穩定性。完整且全面地了解質子射束的各項特性，為建立質子射束相關研究的基礎，將可增進質子束在質子治療、材料輻射損傷研究與太空電子元件損傷等應用的成果，也有助於量測加速器中子源的能譜，進一步幫助加速器中子源的建立，發展中子相關研究。

參考文獻

[1] J. J. Thomson, “XXVI. Rays of positive electricity,” Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci., vol. 21, no. 122, pp. 225 – 249, Feb. 1911.

[2] F. Schillaci et al., “Calibration and energy resolution study of a high dispersive power Thomson Parabola Spectrometer with monochromatic proton beams,” J. Instrum., vol. 9, p. T10003, Oct. 2014.

[3] M. Almurayshid, et al., “Quality assurance in proton beam therapy using a plastic scintillator and a commercially available digital camera,” J. Appl. Clin. Med. Phys., vol. 18, no. 5, pp. 210 – 219, Sep. 2017.

[4] J. Petzoldt et al., “Characterization of the microbunch time structure of proton pencil beams at a clinical treatment facility,” Phys. Med. Biol., vol. 61, no. 6, Art. no. 6, 2016.

[5] T.-H. Lin, et al., “A deconvolution method for estimating proton range from measured intensity distribution of prompt gamma rays,” Radiat. Phys. Chem., vol. 218, p. 111617, 2024

[6] J. L. Morales and J. Nocedal, “L-BFGS-B: Algorithm

778: L-BFGS-B, FORTRAN routines for large scale bound constrained optimization," ACM Trans. Math. Softw., vol. 38, no. 1, p. 7:1-7:4, 2011

質子射束成形與劑量調控研究
The Study on Proton Beam Modulation and Dose Simulation

計畫編號：NSTC 112-NU-E-182-002-NU
計畫主持人：趙自強
e-mail：chaot@gap.cgu.edu.tw
計畫共同主持人：林志勳
計畫參與人員：林倩妤、卓奕均、Ameer Farük、陳梓睿
執行單位：長庚大學醫放系

摘要

爾來，國原院將建立一個具有高通量、高輻射品質、無臨床負擔的研究用質子設施。目前台灣缺乏高通量的30-70 MeV質子設施，然而這個能量範圍的質子在放射治療、生物研究、電子可靠度測試等方面非常重要。國原院的計畫將填補這一空白，為設置之前，建立蒙地卡羅模擬系統將對未來的採購、研究、技術發展、以及應用帶來巨大幫助。在放射治療、生物研究、電子可靠度測試中，相同的輻射劑量可能會導致不同的游離輻射損傷，需要考慮到不同品質。不同能量和深度的質子可能具有不同的輻射品質，這些品質通常不能直接由偵檢器測量，而需要透過電腦模擬得知。本計畫的目標是建立一個散射式機頭模擬系統，建置不同能量/照野射束特性資料庫。透過蒙地卡羅模擬運算，希望發展質子射束側向與軸向擴展的射束成型技術，以利後續放射治療、生物研究、電子可靠度照射應用。

關鍵詞：蒙地卡羅模擬、法拉第杯、質子、相空間檔、雙散射系統。

Abstract

In the future, the National Atomic Research Institute (NARI) will establish a proton facility for research with high throughput, high radiation quality, and no clinical burden. Currently, Taiwan lacks a high-throughput 30-70 MeV proton facility. However, protons in this energy range are crucial in radiation therapy, biological research, electron reliability testing, and other fields. The project of the NARI will fill this gap. Before the establishment, the development of a Monte Carlo simulation system will greatly assist in future procurement, research, technical development, and applications. In radiation therapy, biological research, and electron reliability testing, the same radiation dose may lead to different ionizing radiation damage, requiring consideration of different qualities. Protons of different energies and depths may have different radiation qualities, which are often not directly measurable by detectors and require computer simulation. The goal of this project is to establish a scatter nozzle simulation system, and build a database of different energy/field beam characteristics.Through Monte Carlo simulation calculations, the development of proton beam's lateral and axial expansion shaping technology is hoped to facilitate subsequent radiation therapy, biological research, and electron reliability irradiation applications.

英文關鍵詞： Monte Carlo simulation, proton, phase space file, double scattering system

I. 前言

質子射束具有優異的物理特性，能提供更佳的劑量分佈，因此成為癌症精準治療的重要工具之一。研究其生物效應至關重要。近年來，台灣設立了許多質子治療機構。除了生物和臨床研究蓬勃發展外，本地的半導體輻射可靠度測試也因此興盛。隨著半導體製程進展至奈米時代，這些微小體積內的信號控制著我們生活中的各種資訊與事務。然而，人類生活的環境中充滿了游離輻射，尤其是在高空和太空中的宇宙射線，當中含有大量高能的質子和中子。這些輻射粒子能輕易改變半導體的信號，導致無法挽回的損失。因此，對微電子元件進行輻射效應測試至關重要。

國內的質子電子元件抗輻射研究在台灣半導體界已經有數年的歷史。許多廠商必須前往美國或加拿大進行中子射束測試，但這些測試時間有限且價格昂貴。目前，國內唯一擁有高能質子基礎實驗室的機構是長庚紀念醫院的放射研究實驗室。然而，該實驗室的射束時間需要與臨床治療共用，且其能量範圍偏高（110-230 MeV），可能不適用於所有質子研究範疇。爾來國原院計劃建立一個70 MeV以下的質子設施，該設施將具有高通量、高輻射品質，且無臨床負擔等優勢。在正式設置之前，若能先建立一個蒙地卡羅模擬系統，將對未來的採購、研究、技術發展和應用提供極大的幫助。

II. 主要內容

在放射治療、生物研究以及電子可靠度測試中，相同的輻射劑量可能會導致不同程度的游離輻射損傷，因此需要考慮不同輻射品質的影響。不同能量或深度的質子射束可能具有不同的輻射品質，而這些品質通常無法直接透過偵測器測量，必須依靠電腦模擬來獲得。此外，質子射束在離開加速器時呈現點狀劑量分佈，必須經過橫向和軸向的擴展才能具備實用價值。因此，為了滿足放射治療、生物研究以及半導體測試的需求，必須對射束進行整形、劑量調控、射束限制以及劑量校正等操作。

由於先進實驗參數設計與臨床使用的射束存在很大差異，因此我們需要建立一個能夠描述實驗用質子射束特性的模擬系統。此系統應具備以下功能：(1) 射束特性的模擬；(2) 照射射束的特性參數，如質子射束強度分佈、能量分佈、沉積劑量分佈等；(3) 粒子輻射基礎研究所需的射束特性資料庫（相空間文件），以便後續基礎醫學物理研究使用。

近年來，本團隊已發表數篇 SCI 論文，涵蓋了質子射束軸向擴展[1]、側向擴展[2, 3]、小照野劑量模擬與測量[4]、質子射束在半導體測試中的應用[5, 6]、偵測器的應用與發展等領域[7-9]。

- 蒙地卡羅模擬

本計畫採用以 Geant4 為計算核心的 TOPAS 套裝模組，來建立研究用射束的完整射束傳播模擬系統。TOPAS 可以直接模擬射束傳播過程中的強度分佈、角度分佈及能譜分佈等基礎射束特性，其功能完整，適合用於模擬基礎研究的射束特性。為了使用 TOPAS 建構蒙地卡羅模擬系統，需要輸入射束機頭元件的幾何和物質組成資訊，並透過與大量的水假體內量測數據進行比對，調整模擬參數設定，以建立準確的射束特性模擬系統，這個過程稱為射束調適。本計畫將建置 70 MeV 射束，並對相關的射束線元件進行完整的蒙地卡羅射束傳播模擬，然後建立所需的射束特性資料庫。

- 射束特性資料庫

本研究使用 TOPAS 模擬建立的 70 MeV 射束特性資料庫，可對未來的研究工作提供極大幫助。該資料庫可以供研究人員在進行放射治療、生物研究和電子可靠度測試時使用，不僅有助於縮短研究所需的時間，還能促進研究的順利進行。此外，TOPAS 還能生成 Phase Space file，提供給其他進階使用者使用。這些使用者可以將其與其他粒子模擬工具，如 PTSim、MCNPX、GATE、PHITS 和 FLUKA 等進行整合，從而結合不同模擬軟體的優勢，為放射治療、生物研究及電子可靠度測試等領域展開個別的研究工作。

III. 結果與討論

- 30、50、70 MeV 之深度劑量模擬

30、50、70 MeV 的深度劑量模擬示意圖和模擬結果可見於圖 1。單能質子射束先入射到 0.1/0.3 mm 厚度的散射箔片，然後在水假體中記錄深度劑量。其模擬結果如圖 2 所示。70 MeV 質子在水中的射程少於 7 cm，50 MeV 質子在水中的射程少於 5 cm，30 MeV 質子在水中的射程少於 3 cm。不論是 30、50 還是 70 MeV 的質子射束，其軸向半高全寬約為 1 mm，這不足以作為標準照射源，需進一步進行軸向劑量擴展。

30、50、70 MeV 的側向劑量模擬結果見於圖 3，其半高全寬僅為 2-4 cm，同樣不足以作為標準照射源，因而也需要進一步進行側向劑量擴展。然而，由於 30 MeV 和 50 MeV 質子的射程過短，本研究的軸向和側向劑量擴展僅針對 70 MeV 進行。

- 70 MeV 之側向劑量擴展

本計畫的側向劑量擴展最終設計為類散射（quasi scattering）系統，該系統由一個初級散射箔片（primary scatterer，0.3 mm 鎢片）、一個擋塊（insert，1 cm 鎢片）以及一個準直儀（collimator，1 cm 鎢片）組成，具體設計詳見圖 4。我們使用蒙地卡羅模擬來評估這個系統的效能，模擬結果見圖 5 和圖 6。從模擬結果可以看出，當擋塊與準直儀之間的距離設置為 75 公分時，能夠獲得 5 cm × 5 cm 的側向劑量分布，表明該系統在側向劑量擴展方面達到了預期效果。

圖 6 也顯示了在不同設定下的蒙地卡羅模擬結果。當沒有使用擋塊時，質子通過 0.3 mm 的散射箔片後，側向劑量分布呈現半高全寬為 10 cm 的高斯分布。然而，當加入 1 cm 厚的擋塊和 1 cm 厚的準直儀後，側向劑量分布變得趨於平整。其中，當擋塊距離準直儀 75 cm 時，側向劑量分布最為平整，顯示此設置在側向劑量均勻性方面的最佳效果。

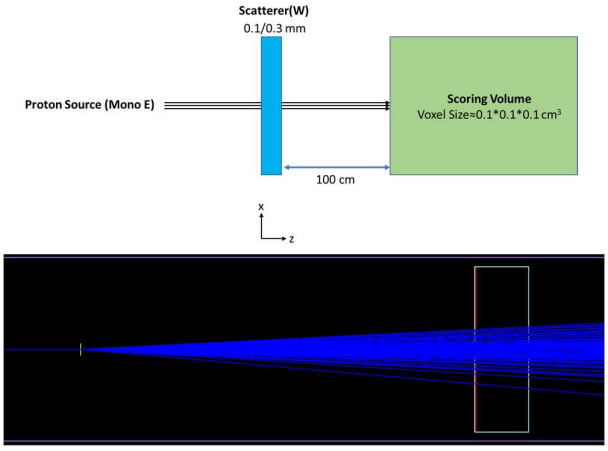


圖 1：30、50、70 MeV 之深度劑量模擬

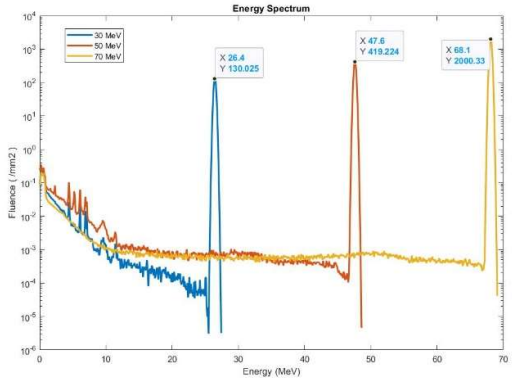


圖 2：30、50、70 MeV 之深度劑量模擬結果

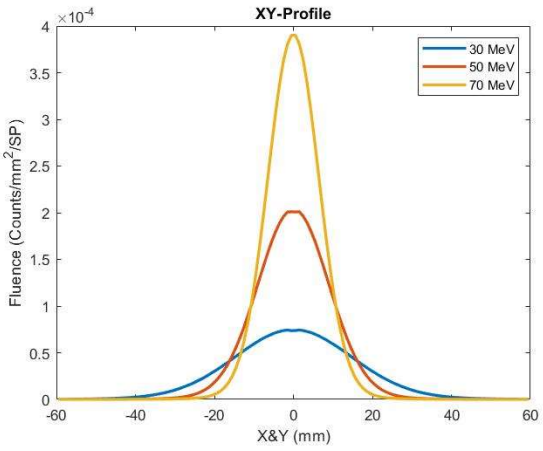


圖 3：30、50、70 MeV 之側向劑量模擬結果

- 70 MeV 之軸向劑量擴展

本計畫的軸向劑量擴展最終設計為脊型濾片（Ridge Filter）系統，設計詳見圖 7。使用蒙地卡羅模擬進行的二維與三維視圖結果分別見於圖 8 和圖 9。模擬結果顯

示，不同的散射片厚度對軸向劑量的平坦度有顯著影響。根據圖 9 的結果，可以觀察到，適當調整散射片的厚度有助於優化軸向劑量分布的平坦度，從而達到更均勻的劑量擴展效果。

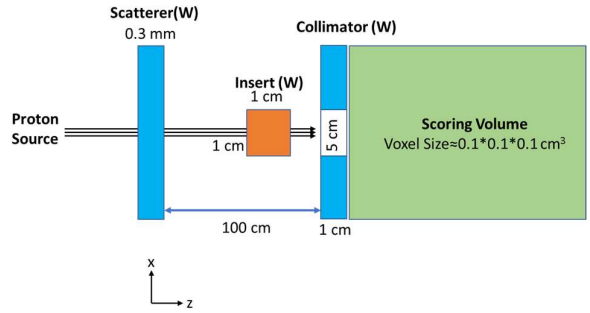


圖 4：劑量側向劑量分布類散射(quasi scattering)系統



圖 5：劑量側向劑量分布之類散射(quasi scattering)系統之蒙地卡羅模擬

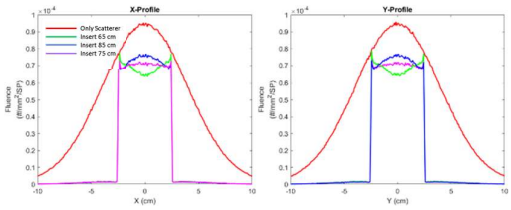


圖 6：類散射(quasi scattering)系統之側向劑量分布蒙地卡羅模擬

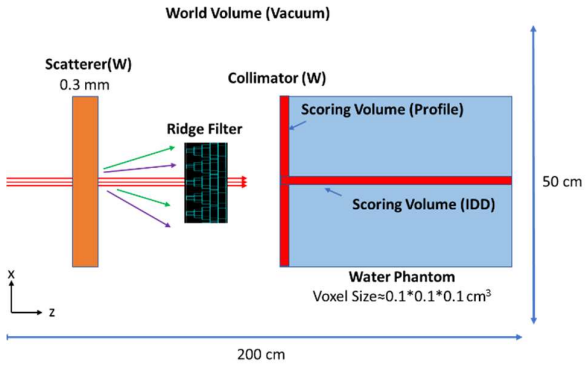


圖 7：劑量軸向劑量分布之脊型濾片系統

- 70 MeV 之軸向與側向劑量擴展完整設計

圖 10 展示了在將所有組件整合後的等劑量曲線、側向劑量分布和軸向劑量分布。這些模擬結果基於理想狀態的質子輻射源，未來的實際設計將會基於測量所得的質子源進行調整。然而，本研究所開發的蒙地卡羅模擬、擴束系統和分析方法可以應用於未來的真實射源設計中，為實際應用提供重要的基礎。

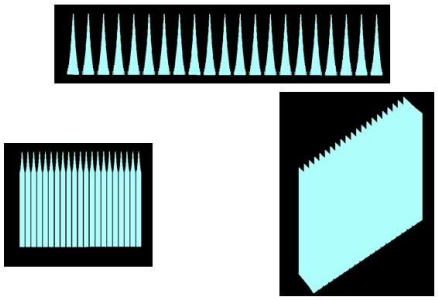


圖 8：脊型濾片(Ridge Filter)系統在模擬中之二維與三維視圖

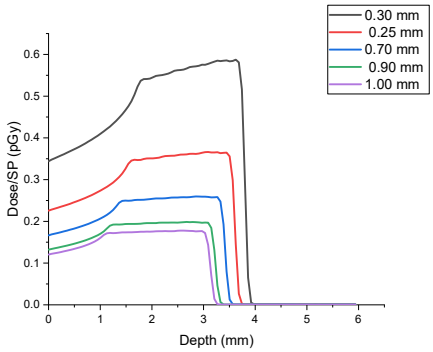


圖 9：不同散射片厚度之脊型濾片系統之劑量軸向劑量分布模擬

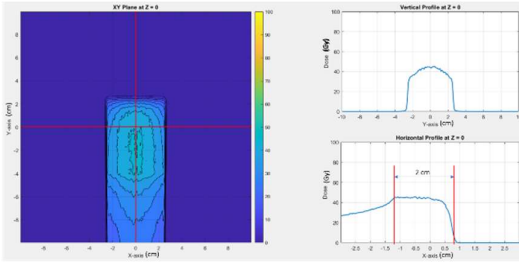


圖 10：將所有組件都模擬的等劑量曲線、側向劑量分布、與軸向劑量分布

IV. 結論

國原院計劃在三至五年內建立的 70 MeV 以下質子設施，具有高通量、高輻射品質和無臨床負擔等優勢。在實際設置之前，構建一套蒙地卡羅模擬系統將對未來的採購、研究、基礎建設和應用方面產生極大的助益。

在放射治療、生物研究和電子可靠度測試中，相同的輻射劑量可能會引起不同的游離輻射損傷，因此必須考慮不同輻射品質的影響。質子在不同能量和深度下會有不同的輻射品質，這些品質通常無法直接由儀器測量，而需透過電腦模擬來獲得。此外，質子射束離開加速器時呈現點狀劑量分佈，需要經過側向和軸向擴展才能具備實際應用價值。因此，為了滿足放射治療、生物研究和半導體測試的要求，需要進行射束成形、劑量調控、射束限制和劑量校正等操作。

本計畫的研究成果與貢獻包括：

1. 深入了解質子射束特性： 通過蒙地卡羅模擬，本研究提供了對質子射束特性深入的了解，包括軸向和側向劑量擴展等，這對設計和優化質子射束成形非常重要，能提高射束的精確性。
2. 設計可用的射束擴展器件： 成功設計了一種能夠擴展 70 MeV 質子射束至至少 5 cm × 5 cm × 2 cm 均勻劑量區間的系統，這可用於基礎劑量校正。
3. 建立射束特性資料庫： 創建了包含不同照射條件下射束特性的資料庫，其他研究人員和醫療專業人員可以利用這個資料庫來節省時間並提高研究效率。
4. 應用蒙地卡羅模擬工具： 將蒙地卡羅模擬工具應用於射束設計，提供未來不同研究的橋接，有助於放射治療、生物研究和電子可靠度測試等領域的研究。
5. 促進相關領域的進步： 研究結果和建立的資料庫將推動質子相關領域的科學進步，協助其他研究者進行進一步探索和創新。

國原院的 70 MeV 高通量質子設施在放射治療、生物研究和電子可靠度測試等領域將具有重大價值，尤其考慮到國內多家醫院正在計劃建置質子或重離子治療設施。未來這些設施的儀器校正將仰賴國原院的質子設施。因此，質子的模擬和測量成為值得深入研究的議題。此外，通過培育相關人才，也有助於提升我國質子研究的學術水平。(例)年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式， 年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式。

參考文獻

[1] Oanh, L.D.H., et al., Decomposition of the weight fractions for modelling ridge filters in a proton wobbling nozzle. Radiation Physics and Chemistry, 2022: p. 110324.

[2] Lee, C.C., et al., Dose impact of a brass aperture on low dose tails for a proton wobbling nozzle with a multileaf collimator—A Monte Carlo study. Radiation Physics and Chemistry, 2020. 167: p. 108367.

[3] Chang, K.-P., et al., Effects of modulation materials for lung dose distribution in proton therapy. Radiation Physics and Chemistry, 2020. 167: p. 108264.

[4] Balaji, S., et al., Investigation of the effects of the step size of Geant4 electromagnetic physics on the depth dose simulation of a small field proton beam. Radiation Physics and Chemistry, 2022. 195: p. 110050.

[5] Chiang, Y., et al., Lineal energy of proton in silicon by a microdosimetry simulation. Applied Sciences, 2021. 11(3): p. 1113.

[6] Chiang, Y., et al., Investigate the equivalence of neutrons and protons in single event effects testing: A Geant4 study. Applied Sciences, 2020. 10(9): p. 3234.

[7] Hsing, C.H., et al., MOSFET dose measurements for proton SOBP beam. Physica Medica, 2021. 81: p. 185-190.

[8] Chiang, Y., et al., Silicon equivalent gas in silicon equivalent proportional counter-Monte Carlo simulations. Radiation Physics and Chemistry, 2020. 167: p. 108259.

[9] Chao, T.C., et al. Measurements of Microdosimetric Spectra for Particle Therapy. in Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology. 2019. Wiley 111 River St, Hoboken 07030-5774, NJ USA.

分析 F-18 α-syn-3 於神經毒劑及 PFFs 誘發之 PD 動物腦中之分佈
Characterize the brain distribution of F-18 α-syn-3 on neurotoxin and PFFs induced PD animal models

計畫編號：112-2623-E-182-001-NU
計畫主持人：翁啓昌
e-mail：ccweng@mail.cgu.edu.tw
計畫共同主持人：鍾宜秀
計畫參與人員：簡心潔、何奕霈
執行單位：長庚大學 醫學影像暨放射科學系

摘要

帕金森氏症為全球第二常見之神經退化性疾病，病患常見之臨床異常表現為靜顫、步態不穩等行為之症狀。根據研究指出其行為異常與病患腦部多巴胺神經元損傷有關，然而目前病因仍不清楚。因此許多相關之動物模型利用神經毒劑或基因轉殖之方式來進行相關病因之探討，如其中 6-OHDA 所誘發之動物模型因其能單獨誘發半腦產生多巴胺神經損傷而受到廣泛之使用。近年來根據屍檢結果發現沉積在病患腦部死亡多巴胺神經元內之 α-synuclein 很有可能為導致多巴胺神經元退化之主因，然而目前針對該蛋白異常所導致之神經元傷害之長期觀察結果仍相當匱乏，為了協助該研究之進行，目前國內及全球皆致力於開發可結合至 α-synuclein 之放射性試劑，並期望其未來可用於探討其導致多巴胺神經元退化之影響。本研究計劃主要為評估國內由國家原子能研究院所自行開發之 F-18-α-syn-3 是否具備偵測病變 α-synuclein 之潛力。今年度主要之發現有以下三點，其一為已透過了添加 PEG350 解決了該示蹤劑於先前研究中所發現進腦比率不足之問題，其二為添加 PEG350 之步驟並不會影響其放射化學特質，最後則是透過體外自動輻射顯影以及免疫組織染色方式，確認上述之放射性示蹤劑應具備不錯之病變 α-synuclein 偵測潛力。

關鍵詞：帕金森氏症、6-烴基多巴胺、α-突觸核蛋白、F-18-α-syn-3、PFFs、PEG350

Abstract

Parkinson's disease (PD) is the second most common neurodegenerative disease worldwide. The most typical abnormalities of patients are resting tremor, gait instability and other behavioral symptoms. To date, lots of research reports have concluded this abnormal behavior should be related to the gradually loss of dopamine neuron function in the PD patient's brain, however, the pathogenesis mechanism is still poorly understood. As such reason, several neurotoxin-induced or transgenic PD animal models have been applied for delineating the possible pathogen factor of PD. For example, the 6-OHDA one is one of the widely used neurotoxin because of the advantage to construct the hemiparkinosnism model. Recently, according to results from postmortem of PD patients, it has been found that α-synuclein deposition within the aberrant dopamine neurons should be the mainly possible cause of its degeneration. However, the data of longitudinal observation of DA neuronal damage versus the abnormal accumulation of α- synuclein is still quite limited. For the better understanding of this relationship, couples of groups including NARI are working on developing the novel in vivo α-synuclein-targeting radiotracers and hope these tracers can be used in the future to demonstrate the impact of α-synuclein dysfunction on dopamine neurons. This project focuses on evaluating the potential of domestically developed F-18-α-syn-3 by NARI to detect α-synuclein pathology. Key findings this year include successfully enhancing brain uptake of the radiotracer by incorporating PEG350 into the final solution of F-18-α-syn-3. Importantly, the addition of PEG350 does not compromise the radiopharmaceutical properties of the tracer. Furthermore, through in vitro autoradiography and immunofluorescence staining methods, the radiotracer has demonstrated promising capabilities in detecting α-synuclein pathology.

Keywords: Parkinson's Disease, 6-OHDA, α-synuclein, F-18-α-syn-3, PFFs, PEG350

I. 前言

帕金森氏症（PD）是全球第二常見的神經退化性疾病，主要特徵包括肌肉僵硬、顫抖和運動協調障礙等症狀。雖然其病因尚未完全明瞭，近年研究顯示，一種名為 α-synuclein（α-syn）的蛋白質在帕金森氏症患者的腦部多巴胺神經元中異常堆積，可能與疾病的發病機制密切相關。α-syn 是一種常見於神經元突觸的蛋白質，其主要功能是調節神經元之間的信號傳遞。然而，過量的 α-syn 可能形成聚集體，稱為 Lewy 小體，這是帕金森氏症和其他神經退行性疾病的典型特徵之一。

近年來，研究人員對 α-syn 的作用機制進行了廣泛研究，探索其在帕金森氏症發病中的角色。這些研究成果有助於深入了解帕金森氏症的病因和治療，並為開發潛在治療方法提供了基礎。因此，進一步研究 α-synuclein 與帕金森氏症之間的關聯性，將對我們理解和治療這種疾病產生重要啟示。在探討帕金森氏病的病理機制和可能的治療方法方面，已開發出一些針對多巴胺神經元的放射性藥品，並已應用於相關研究或臨床評估。例如，在歐洲，常用於 PD 患者檢查的 DaTscan（也稱為 Ioflupane 或 I-123-FP-CIT），是一種核醫學放射性示蹤劑。DaTscan 經靜脈注射後能穿過血腦屏障進入患者的大腦，與多巴胺神經元表面的轉運蛋白結合，同時結合單光子發射電腦斷層掃描（SPECT）成像技術，從而評估患者的多巴胺神經元損傷情況。

除了 DaTscan 外，還有一些其他的放射性示蹤劑，如 F-18-FDOPA 和 Tc-99m-TRODAT，它們能針對多巴胺神經元內不同標的進行評估，用於評估多巴胺神經元的功能。然而，目前尚無有效的臨床治療方法能有效治療多巴胺神經元的退化或凋亡現象。因此，這些放射性示蹤劑目前主要用於追蹤帕金森氏病患者腦內多巴胺神經元持續惡化的程度。近年來，由於 α-syn 被認為可能是導致多巴胺神經元退化的早期原因之一，一些研究團隊正投入研發針對 α-syn 的新型活體放射性示蹤劑，期望能找出其與 PD 發病機制的關聯性，並為未來的治療研發提供新的方向。

II. 主要內容

為確認針對 α-syn 為標的之放射性示蹤劑於 PD 研究上之可行性，計畫本年度主要目的為持續開發及確認該放射性示蹤劑之放化標幟及生物分佈特性。所試驗之放射性示蹤劑為經由國內國原院自行研發之 F-18-α-syn-3。前年之計畫執行過程中發現該示蹤劑經靜脈注射後，活度累積於實驗動物腦部之比率偏低，因此本年度將測試是否可藉由改良藥物之製程以解決此問題，除此之外亦須進一步確認改良後之示蹤劑最終產物其放化特質改變情況，並且於最終分別採用 PD 動物活體造影、自動輻射顯影、病理組織染色等方式，確認其對病變 α-syn 蛋白之結合特質及潛力。

放射性示蹤劑 F-18-α-syn-3 之製備方式主要按照去年計畫所得之結果進行準備並針對部分步驟進行調整。實驗當天將標幟用之 H18F (初始活度為 20mCi, 購自 GMS, Taiwan) 以 Sep-Pak Accell Plus QMA Plus Light Cartridge (Waters, USA)捕捉後，隨即以 2mL 流洗液 (79.2mg K.2.2.2 及 23mg K_2CO_3，溶解於 10mL 85% 乙腈水溶液) 進行掏洗。掏洗液隨後透過通氮氣及加熱方式 (100°C) 吹乾。隨後將 4mg 之 F-18-α-syn-3 標幟反應前驅物(INER)溶於無水之 600μL DMSO 後移入反應瓶內進行放射性標幟作業，條件為 95。C 下反應 10 分鐘。反應結束後，將反應瓶移出加熱器冷卻至約 40 度後加入 4mL HPLC 分析之移動相溶液(乙腈/ddH_2O (內含 0.1% TFA) (7:3, v/v))。隨後將其通過 Sep-Pak Alumina N Plus Light Cartridge (Waters, USA)移除 F-18 離子，最後採用半製備級 HPLC 系統進行粗產物之純化。實驗所採用之 HPLC 系統為 Waters 1527 幫浦，UV 偵檢器為 W2489 (吸光值設定為 264/360nm)，輻射偵檢器為 B-FC-1000 (Bioscan, USA)。純化過程所使用之管柱為 HiQ sil C18HS 5μ 250x10mm (A100-250-05-100HS, Sun International)，移動相為乙腈/ddH_2O (內含 0.1% TFA) (7:3, v/v)，流速為 5mL/min，反應產物之滯留時間約為 12min。將自 HPLC 純化系統蒐集內含反應最終產物之溶液加入 40mL ddH_2O 稀釋後，將其通過 Sep-Pak C18 Plus Light Cartridge (Waters)，並隨後以 0.3mL 酒精將最終產物洗出。

為提升 F-α-18-syn-3 於活體動物研究過程中之藥物進腦比率，本研究發現可透過於最終產品內添加 PEG350(M6768-250G, Sigma, Steinheim, Germany)之方式，提升其效率。更新之示蹤劑準備方式如下: 首先將上述透過酒精洗出之產物以氮氣吹乾 10 分鐘，此時體積約剩 50μL，隨後依序加入 200μL PEG350 以及 250μL 食鹽水後，即得最終可用於後續實驗之產品。該藥品於使用前將以品質確效用之 HPLC 系統進行放化純度分析。該系統所使用之幫浦、UV 及放射性訊號偵檢器以及與移動相溶液皆與上述純化用之儀器相同。分析所使用之管柱為 Eclipse XDB-C18 5μm 150 x 4.6mm (Agilent, USA)，流速為 0.7mL/min。

將自廠商端購入的基因重組人類的 α-syn PFFs (GeneTex, GTX17669-pro)於使用前快速地以超音波震盪器震盪後，將含有 4μg 之 PFFs 溶液(1μg/μL)經穿顱注射手術，將其注入動物左側之黑質區(substantial nigra) (AP -2.9, ML +1.3, DV −4.5)；控制組則僅注射生理鹽水作為對照組；動物於手術後照光和給予抗生素與補充糖水。為確認經超音震盪器震盪後之 PFFs 處理結果，於進行動物模型製備前使用長庚大學顯微鏡中心之電子顯微鏡(JEM-2100Plus)進行拍攝。

因本實驗有調整放射性示蹤劑製備步驟，因此先使用了未經處理之小鼠施行為時 1 小時之動態攝影，藉此確認經調整後之放射性示蹤劑於活體動物腦內之分布情形以及後續可應用於靜態攝影之合適時段。小動物動態照影實驗流程如下，實驗動物首先將於氣體麻醉 (2.5% isoflurane 混合 100% 氧氣)之狀態下完成其體重量測，隨後同樣於氣麻狀態下經尾靜脈注射活度約為 0.3mCi 之 F-18-α-syn-3，示蹤劑注射完成後快速地將其採趴勢固定於小動物造影床上，之後使用小動物正子造影機台 MicroPET (Inveon, GE, USA)進行連續 60 分鐘之影像蒐集作業，掃描期間持續進行氣體麻醉並以保溫燈避免動物於實驗期間失溫。

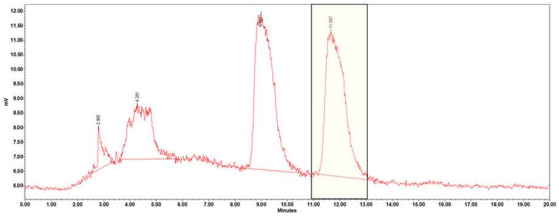
為方便後續影像分析作業，待動物之正子影像蒐集完畢後，該小鼠將連同其造影床一併移至另一小動物單光子電腦斷層掃描機台(NanoSPECT/CT, Mesido, USA)進行頭部電腦斷層造影，以作為活體影像分析對位資訊參考。實驗動物之活體影像皆使用 PMOD 軟體 (3.7 version, PMOD Technologies Ltd, Zurich, Switzerland) 進行影像讀取以及後續分析。待求得理想之造影時間後，所有經 PFFs 處理後之動物皆以此條件進行正子影像之靜態攝影，相關之影像對位用電腦斷層影像以及影像分析方式皆與上述相同。

為確認經過改良之 F-18-α-syn-3 是否能偵測堆積於實驗動物腦部組織內之 α-synuclein，將使用經免疫組織染色確認具α-synuclein 表現之動物組織進行體外之自動輻射顯影測試。步驟簡述如下，首先將組織自 -80°C 冰箱拿出並置於室溫下回溫，隨後以冰丙酮溶劑進行組織固定，且於固定完成後快速地以冰 Tis 緩衝液(50mM, pH 7.4) 浸洗數次。然後將組織切片與 F-18-α-syn-3(約 2x106cpm/100μL)於室溫下進行 1 小時之結合反應，此外，為確認該放射性示蹤劑之結合特異性，其中一組將加入 10μM 之 F-19-α-syn-3 進行特異性結合訊號之抑制。反應完成後，使用含有 40%乙醇之 Tris 緩衝液洗去未結合至腦部組織切面之 F-18-α-syn-3 訊號，隨後待其切面乾燥後曝光至數位磷光板(BAS 2040, Fuji, Japan)上進行自動輻射影像訊號蒐集。隔天使用高階分子成像應用多功能雷射掃描儀(Amersham Typhoon phosphor imager, GE)進行儲存於數位磷光板上之自動輻射顯影影像資訊，隨後使用 MultiGauge ver 3.0 軟體進行該動物組織影像之分析。

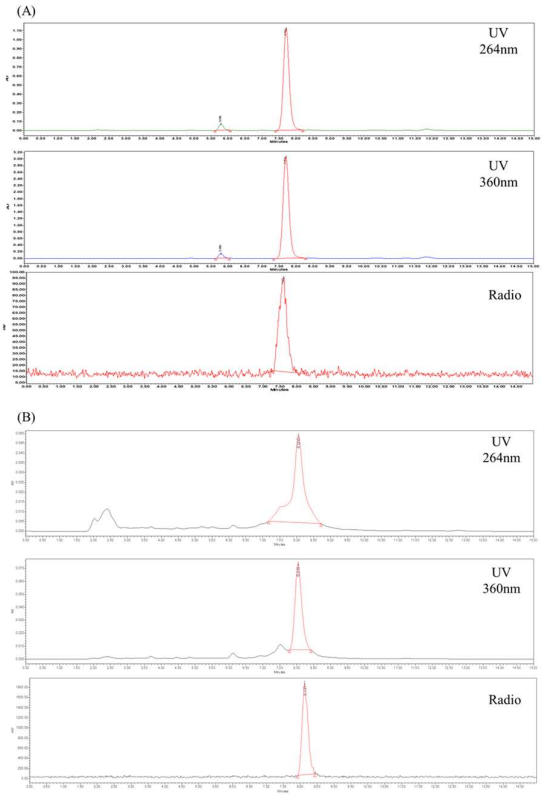
將玻片置於-20°C 丙酮進行固定及以冰 PBS 移除組織包埋液後，依序和 5% BSA 與 10% Normal Goat Serum 混和液以及 1% BSA 與 2% anti-mouse IgG 混和液分別在室溫阻斷 (Blocking) 60 分鐘，接著讓組織與初級抗體 Anti-pS129 (abcam, ab51253)共孵育，條件為濃度 1:200 在 1% BSA；溫度 4°C 反應過夜。以冰 PBST (0.2% Tween-20) 洗滌 5 分鐘 3 次後再次使用二級抗體 Alexa Fluor 488 濃度 1:100 在 1% BSA 室溫下反應 1 小時，隨後再以冰 PBST (0.2% Tween-20) 洗滌 5 分鐘 3 次後使用 Mounting medium with DAPI(H-1500, VECTASHIELD, Newark, CA 94560 USA)覆蓋組織並封上蓋玻片至封片膠定型，以 ZEISS AXIO IMAGER M2 顯微鏡進行螢光影像拍攝。

III. 結果與討論

本計畫中所生產該藥品之標幟產率為 6.43±1.58% (n=8)，此外，**圖一**為標幟初產物經 HPLC 進行純化分析之示意圖譜。經與標準品比對，確認時間約為 11.6 分鐘之滯留鋒為最終產品，有鑑於此本實驗採用手動方式蒐集，蒐集時間為 2 分鐘(11-13 分，如**圖一**中以黃色區塊所示)。後續產物經氮氣濃縮以及添加 PEG350、生理鹽水後，為確認其放射化學純度未受影響，將其以品質卻效用之 HPLC 進行分析，該結果亦同時與經 HPLC 純化後所蒐集未經處理之產物進行比較。比較結果如**圖二**所示，從該結果中可以明顯看到，經過 HPLC 純化後之產物滯留時間約於 7.6 分鐘左右，而將過後續濃縮、添加步驟之最終產物其滯留時間略為延長至 8.1 分鐘左右，且未見其他放化之不純物，足見後續之處理程序並不會對該產物造成不良之影響，可保證後續實驗所得數據之正確性。

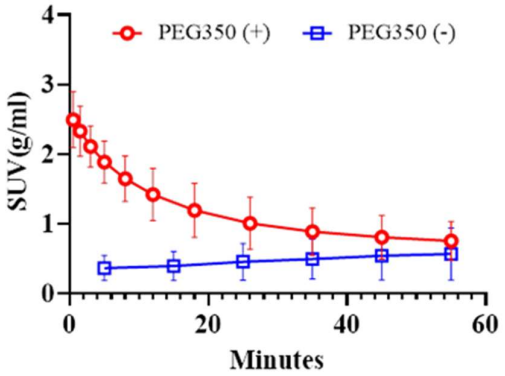


圖一、F-18-α-SYN-3 經 HPLC 純化之圖譜，黃色標示區域為進行產品蒐集之時間範圍。



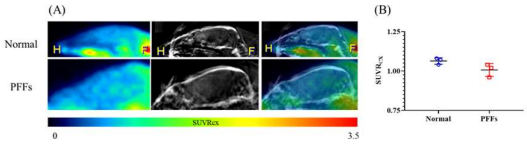
圖二、F-18-α-syn-3 經 HPLC 純化之品質確認圖譜。(A)為產品未經濃縮及添加 PEG、食鹽水之 UV 及放射性訊號分析圖譜；(B)為經濃縮及添加藥品後之分析結果。

為確認經過添加 PEG350 處理之放射性示蹤劑 F-18-α-syn-3 是否能提升該藥品之進腦比率，本計畫首先採用了 3 隻未經任何處理之正常 C57BL/6 小鼠進行為時 60 分鐘之動態正子影像蒐集，結果如**圖三**所示。從該結果中可以明顯發現，經過添加 PEG350 之放射性示蹤劑能有效地提升該藥品之進腦比率，該組前 10 分鐘之腦部藥物攝取 SUV 數值達近 1.5(g/mL)。反觀未添加之組別其數值皆低於 0.5(數值為去年計畫所得)；此外亦可明顯觀察到添加 PEG350 組別之示蹤劑約於注射 30 分鐘後曲線趨緩，代表該藥物於注射 30 分鐘後應能用於後續之靜態攝影實驗中。該結果與部分文獻報導採用 PEG 增進該團隊所使用之藥物於實驗動物腦部累積情形相符，如 Al Ahmady 團隊於 2022 年的一篇報導中指出，其所使用之 In-111-Liposome 藥物，經過 PEG 修飾後，能大幅提升該藥物於實驗動物腦部出血位置之訊號以及提早可觀察到之時間點(從原先 48-72 小時提早至 3-24 小時) (1)。



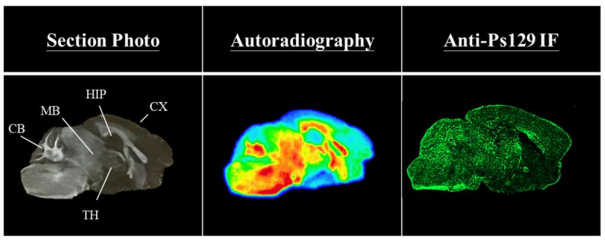
圖三、有無添加 PEG350 之 F-18-α-syn-3 於正常小鼠之腦部時間活度曲線分析圖。

有鑑於從動態攝影所得，於藥物注射 30 分鐘後應為合適之靜態攝影時間區段，後續本計畫持續採用該條件操作有無經 PFFs 處理之活體動物造影試驗。實驗結果如**圖四**所示，**圖四(A)**為兩組之代表性活體造影影像，從兩組之影像中皆可明顯觀察到經過加入 PEG350 之 F-18-α-syn-3，相較於去年所得之影像結果其藥物進入腦部之比率呈現相當顯著之提升，可惜的是目前根據初步的活體影像較難判斷該示蹤劑所累積之區域為哪幾個腦區，此外，目前也無法明顯地從影像上觀察到經 PFFs 處理後之動物組別影像結果與未處理組別間之差異，此結果與**圖四(B)**藉由對全部腦部影像定量後所得知結果類似，亦無法觀察到顯著之差異。



圖四、F-18-α-syn-3 於(A)不同動物別之代表 PET 活體影像以及(B)其全腦之影像定量分析結果。

為確認添加 PEG350 後之 F-18-α-syn-3 是否具備偵測 α-syn 病變蛋白堆積之能力，本研究採用體外自動輻射顯影方式於經 PFFs 處理過之動物組織切片上進行測試。進行自動輻射顯影研究前，本團隊首先將預計採用之組織相鄰片進行免疫螢光染色，藉由 anti-Ps129 抗體之幫助下，先行確認該腦組織上是否具有病變 α-syn 蛋白之堆積表現情形，以利後續自動輻射顯影之實驗數據之正確性。從**圖五**最右側之染色結果中可以明顯觀察到，該病變蛋白主要累積於海馬迴、視丘、中腦以及部分小腦皮質區域；有趣的是，受益於自動輻射顯影相對於活體造影所能達到之高解析度，在活體影像蒐集程序中難觀察到的示蹤劑分布情形可於自動輻射顯影之結果中，明顯觀察到該藥物主要分布於海馬迴、視丘、中腦、腦幹以及部分小腦區塊。將自動輻射顯影影像與螢光染色結果相比發現，大致上分佈之腦區極為類似，但可惜的於腦幹的區域分布情況明顯不同，詳細原因仍需留待後續研究進行釐清。此外，於進行自動輻射顯影時我們所採用之清洗緩衝液內含 40%之乙醇，此為參考所報導之文獻中，用於開發阿茲海默氏症造影劑過程中常見用於移除影像之高背景值之手段(2)，相較於正常組織系統內之微環境能相當程度地移除掉高脂溶性結合處所造成之背景值，此亦可能為於本計畫執行之活體影像成果中，造成兩組影像無法辨別差異之另一重要原因。



圖五、F-18-α-syn-3 於經 PFFs 注射之鼠腦組織之體外自動輻射顯影影像以及使用 anti-Ps129 於相鄰腦切片進行免疫螢光組織染色結果。

IV. 結論

本年度之研究計畫成功地透過添加 PEG 之方式提高了 F-18-α-syn-3 於實驗動物之腦部攝取數值，在活體動物測試過程中顯著地觀察到該改良之製程相較於固有方式約能提升 3 倍左右。此外亦透過 HPLC 分析確認該處理方式並不會影響該示蹤劑之放化特質。最後則是使用體外自動輻射顯影以及免疫螢光染色之實驗方式，確認該改良製備方式之 F-18-α-syn-3 應具備用於偵測病變 α-synuclein 之潛力；然而，該示蹤劑之脂溶性較高亦有可能對活體影像之應用造成高背景值之影響，因此，後續仍需投入更多之研究以釐清該系列小分子示蹤劑未來應用之價值。

參考文獻

[1] Al-Ahmady ZS, Dickie BR, Aldred I, Jasim DA, Barrington J, Haley M, et al. Selective brain entry of lipid nanoparticles in haemorrhagic stroke is linked to biphasic blood-brain barrier disruption. Theranostics. 2022;12(10):4477.

[2] Choi SR, Golding G, Zhuang Z, Zhang W, Lim N, Hefti F, et al. Preclinical properties of 18F-AV-45: a PET agent for Aβ plaques in the brain. Journal of Nuclear Medicine. 2009;50(11):1887-94.

使用自動分子影像分析及機器學習來進行類澱粉生物標記暨失智轉化預測
The utilization of automatic molecular imaging analysis and machine learning for the prediction of amyloid biomarkers and dementia conversion

計畫編號：112-2623-E-182A-001-NU
計畫主持人：林昆儒
e-mail：kunjulin@gmail.com
計畫共同主持人：蕭穎聰、白明奇、黃國倫、徐榮隆
執行單位：長庚醫療財團法人核子醫學科

摘要

本研究旨在開發一種利用常規核醫影像預測阿茲海默症早期病理變化的創新方法。利用 ADNI 資料庫收集了 1,650 例 FDG PET 影像，同時獲取了相應的類澱粉蛋白沉積資訊。通過對影像進行標準化預處理後，應用多種機器學習模型，包括支援向量機(Support Vector Machine, SVM)、K 近鄰(K Nearest Neighbors, KNN)、判別分析(Discriminant Analysis)、神經網路(Neural Network)以及核迴歸(Kernel Regression)，來分析 86 個腦區的代謝特徵。研究結果顯示，結合多個模型的投票分類法顯著提高了預測準確度，達到 83.94%。特別是在角回(angular)、海馬旁迴(parahippocampal)、後扣帶回(posterior cingulum)以及下顳葉(inferior temporal)等區域的代謝特徵與類澱粉蛋白沉積呈現高度相關性。這一發現不僅提供了阿茲海默症早期診斷的新思路，也為開發更精準的影像生物標誌物奠定了基礎。

關鍵詞：腦血流影像，腦代謝影像，類澱粉蛋白影像，分子影像，機器學習

Abstract

The aim of this study is to develop an innovative method for predicting early pathological changes of Alzheimer's disease using routine nuclear medicine imaging. We collected 1,650 FDG PET images from the ADNI database, along with corresponding amyloid deposition information. After performing standardization preprocessing on the images, various machine learning models, including SVM, KNN, discriminant analysis, neural networks, and kernel regression, were applied to analyze the metabolic features of 86 brain regions. The results indicate that a voting classifier, which combines multiple models, significantly improved the prediction accuracy, reaching 83.94%. In particular, the metabolic features of regions such as the angular gyrus, parahippocampal gyrus, posterior cingulate, and inferior temporal lobe showed a high correlation with amyloid deposition. This finding not only provides a new approach for the early diagnosis of Alzheimer's disease but also lays the foundation for the development of more precise imaging biomarkers.

Keywords: Cerebral perfusion image, brain metabolic image, amyloid PET, molecular image, machine learning

I. 前言

失智症，尤其是阿茲海默症(Alzheimer's disease, AD)，已然成為全球性的公共衛生挑戰，在台灣更是隨著人口老化而日益嚴重的社會問題[1-4]。早期識別高風險失智症患者對於疾病預防和控制至關重要。近年來，神經退行性病變的檢測方法不斷進步，包括類澱粉蛋白、tau 蛋白、血流及代謝減少或腦組織萎縮等生物標記的應用[5, 6]。然而，目前高特異性的分子影像檢查，如類澱粉蛋白或 tau 蛋白 PET 掃描，成本高昂且可及性有限，難以廣泛應用於臨床篩查[7-9]。

相比之下，腦血流灌注掃描（如 ECD SPECT）或葡萄糖代謝 PET 掃描（FDG PET）等常規核醫檢查雖然普及度高，但在識別早期 AD 病理學變化方面缺乏高特異性。近期研究顯示，利用深度學習技術分析這些常規影像可能提高早期診斷的準確性[10]。特別是，結合臨床資料和影像特徵的機器學習模型在預測類澱粉蛋白陽性和疾病進展方面展現出潛力[11-14]。

II. 主要內容

本研究旨在利用 ADNI（Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative）資料庫的大量 FDG PET 影像和臨床資料，開發一個能夠準確預測類澱粉蛋白陽性的機器學習模型。透過探索不同機器學習算法的效能，並以投票分類(Voting Classifier)等方法提高預測準確度。此外，將該國際資料庫所建立的模型，應用於台灣本土數據，以開發更適合國人的預測工具。通過這項研究，期望能夠提供一種成本效益高、可廣泛應用的方法，用於早期識別高風險 AD 患者，為未來的預防和治療策略提供重要依據。

2.1 ADNI 資料庫研究: FDG PET 與類澱粉蛋白沉積資訊的整合與處理

(1) 數據收集：從 ADNI 資料庫獲取 1,650 例 FDG PET 影像，包括 472 例認知正常(CN)、987 例輕度認知障礙(MCI)以及 191 例阿茲海默症(AD)受試者，詳如表 1。

Characteristic	CN	MCI	AD
Number of subjects for image Classification (MMSE ≧15 for MMSE score prediction)	472 (465)	987 (940)	191 (180)
Age at the time of PET (years)	76.67 ± 6.80	73.722 ± 7.97	75.16 ± 8.31
Sex (F:M)	233 : 239	432 : 555	80 : 111
MMSE	28.82 ± 1.59	27.18 ±3.31	22.27 ± 3.17
CDR	0.084 ± 0.23	0.532 ±0.31	0.837 ± 0.34

表 1、ADNI 資料庫之 FDG 影像數量與臨床資料

(2) 類澱粉蛋白陽性判定：根據 ADNI 的 UC Berkeley - AV45 分析數據集，每個 FDG 影像對應 6 個月內最近的類澱粉蛋白沉積資訊。使用全腦 SUVR 歸一化後的皮質 SUVR，閾值 1.11 作為類澱粉蛋白陽性判斷標準。最終識別 884 例陽性(Positive)和 766 例陰性(Negative)病例。

(3) 影像預處理：使用 PMOD 軟體進行空間標準化和強度歸一化，參考區域為小腦。

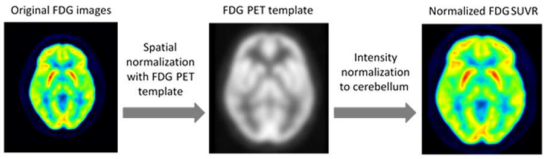


圖 1、FDG 影像預處理流程

(4) 特徵選擇：基於 AAL 腦圖譜(Anatomical Automatic Labeling, AAL)，選擇 86 個腦區域的標準攝取值比(Standardized uptake value ratio, SUVR)作為機器學習特徵。通過該 SUVR 矩陣，觀察每個腦區與類澱粉蛋白陽性或陰性狀態的相關性。並為了優化特徵選擇，採用最小冗餘最大相關性(minimum-Redundancy-Maximum-Relevance, mRMR)算法對分類特徵進行處理與轉換。

2.2 機器學習模型的建立與訓練

為利用 FDG PET 影像預測類澱粉蛋白陽性率，本研究採用了機器學習方法。首先，將收集的 1,650 例 FDG PET 數據隨機分為訓練集與測試集，其中 80% (1,320 例)作為模型訓練，剩餘 20% (330 例)作為獨立測試集，用以評估模型在新數據上的泛化能力。

在模型選擇方面，選用了多種機器學習算法，包括支持向量機(SVM)、K 近鄰(KNN)、判別分析(Discriminant Analysis)、神經網絡(Neural Network)和核迴歸(Kernel Regression)。另外，引入了投票分類(Voting Classifier)(如圖 2)來整合這些模型的預測結果，以期進一步提高預測準確性。

對於 FDG SUVR 數據集，進行特徵選擇與分類分析。這一過程旨在識別 FDG 影像中與類澱粉蛋白沉積相關的特定腦區，並評估使用 FDG 影像預測類澱粉蛋白沉積程度的可行性。

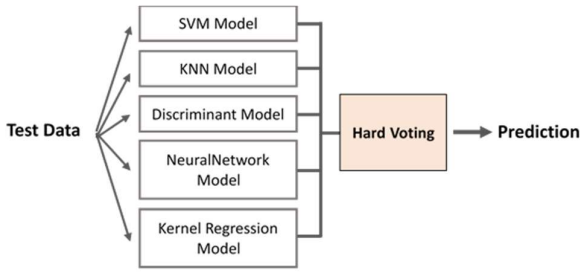


圖 2、投票分類(Voting Classifier)之模型架構

III. 結果與討論

3.1 特徵選擇與分類結果

經最小冗餘最大相關性(mRMR)優化特徵選擇後，排序結果如圖 3 所示，於角回(angular)、海馬旁迴(parahippocampal)、後扣帶回(posterior cingulum)以及下顳葉(inferior temporal)等特定腦區的 FDG 代謝特徵與類澱粉蛋白陽性狀態具有較高的相關性，這些區域的代謝特徵在預測類澱粉蛋白陽性方面表現突出。

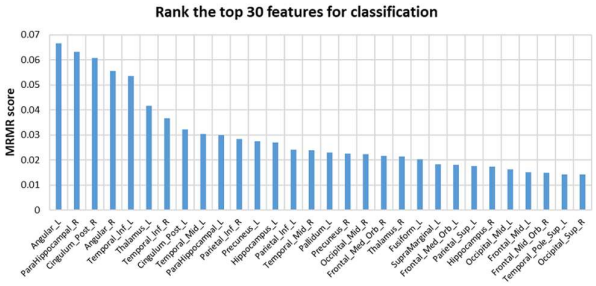


圖 3、經 mRMR 之 FDG 影像特徵擷取

3.2 五種機器學習模型訓練結果

本研究共使用了五種機器學習模型：SVM、KNN、Discriminant Analysis、Neural Network 以及 Kernel Regression，對訓練集中 86 個腦區域的 FDG PET 特徵值進行訓練並優化模型參數。各模型在測試集上的表現如下：

(1) SVM model：真陽性(true positive, TP) 為 85.1%、真陰性(true negative, TN)為 71.8%、準確度(accuracy, ACC)為 79.39%，ROC 曲線下面積(area under the ROC curve, AUC)為 0.8326。

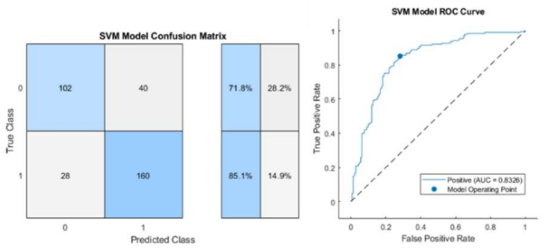


圖 4、SVM 模型預測結果

(2) KNN model：TP 為 77.7%、TN 為 81%、ACC 為 79.09%，AUC 為 0.8631。

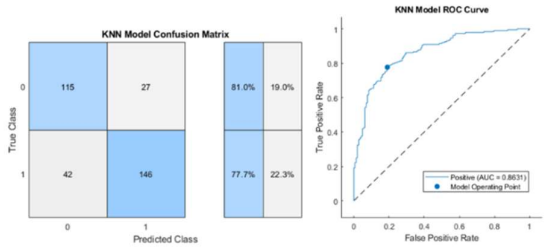


圖 5、KNN 模型預測結果

(3) Discriminant Analysis model：TP 為 78.2%、TN 為 74.6%、ACC 為 76.67%，AUC 為 0.8335。

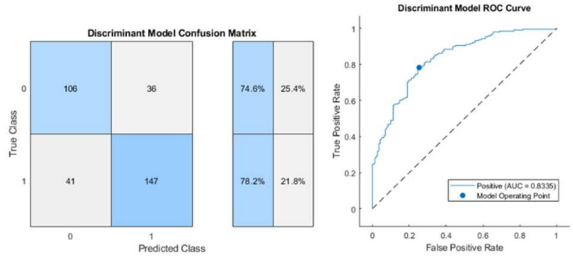


圖 6、Discriminant Analysis 模型預測結果

(4) Neural Network model：TP 為 73.9%、TN 為 78.2%、ACC 為 75.76%，AUC 為 0.8133。

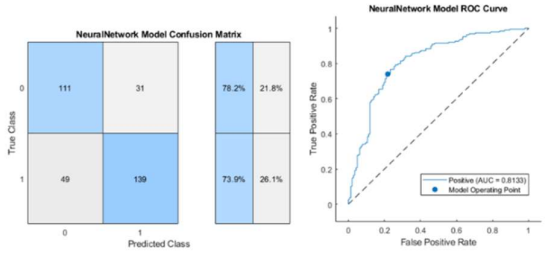


圖 7、Neural Network 模型預測結果

(5) Kernel Regression model：TP 為 76.6%、TN 為 71.8%、ACC 為 74.55%，AUC 為 0.7678。

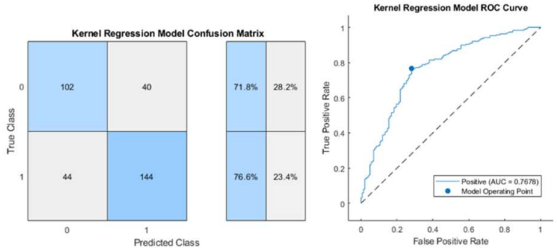


圖 8、Kernel Regression 模型預測結果

從結果可見，SVM 模型在 ACC 和 TP 方面表現最佳，而 KNN 模型則在 AUC 和 TN 方面表現最優。總體而言，這五種模型都展現出良好的預測能力，如圖 9 所示，AUC 值均在 0.76 以上，顯示它們在區分阿茲海默症類澱粉蛋白沉積陽性率方面具有潛力。

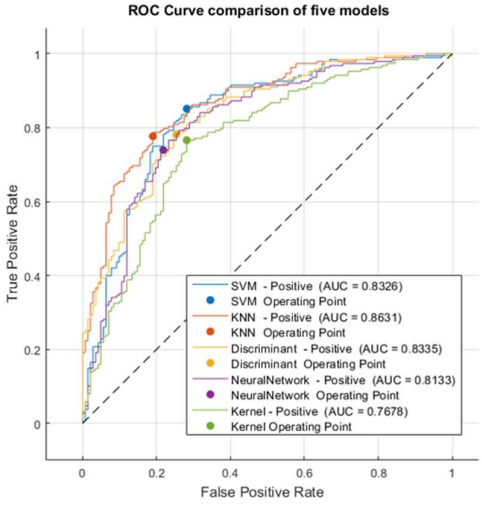


圖 9、五種模型之 ROC 曲線比較

3.3 投票分類(Voting Classifier)

鑑於上述五種分類模型的平均 AUC 值達到 0.822，顯示其具有一定的鑑別預測能力。因此，本研究團隊依投票分類(Voting Classifier)方法整合該五種機器學習模型的預測結果，通過結合多個模型的預測結果進行投票，以提高類澱粉蛋白陽性率的預測準確度。

經多數投票分類法對測試數據進行預測，如圖 10 結果顯示 TP 達到 84.6%，TN 為 83.1%，整體準確度達到 83.94%。這一結果明顯優於單個模型的表現。

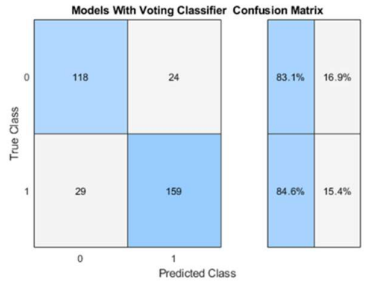


圖 10、結合五種模型經多數投票分類法的預測結果

為避免過度擬合，本研究使用未參與訓練的獨立測試集來驗證各個模型以及投票分類方法的性能。如圖 11 結果顯示，五個單一模型(SVM、KNN、Discriminant、Neural Network、Kernel Regression)的平均預測準確度為 77.09%，其中 SVM 模型表現最佳，準確度為 79.39%。此外，結合這些模型的投票分類方法在預測類澱粉蛋白陽性率方面表現更為出色，準確度達到 83.94%。

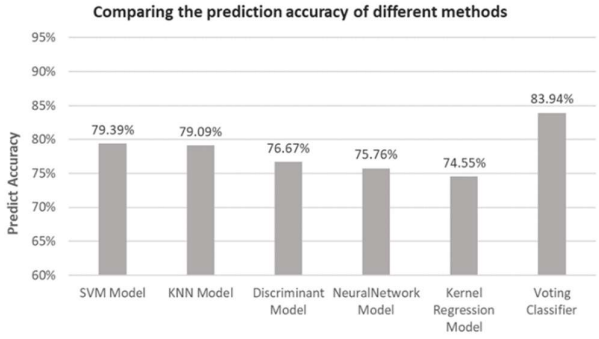


圖 11、五種模型及投票分類之預測準確度比較 (ADNI 資料庫)

這些結果表明，在核醫學影像分析中，特別是在預測阿茲海默症相關的類澱粉蛋白陽性率時，採用多模型集成的方法可以顯著提高預測準確性。這種方法不僅整合了各個模型的優勢，還能在一定程度上減少單一模型可能帶來的偏差，為臨床診斷和研究提供更可靠的工具支持。

3.4 模型驗證與評估: 應用於台灣本土數據

為評估不同資料集對於預測模型穩定性的影響，回溯收集台灣歷史醫學影像資料庫中，同時有腦血流或代謝影像，以及類澱粉蛋白共 533 例。將其 FDG PET 影像數據應用於依 ADNI 所建立出的模型中。

結果顯示，當使用台灣歷史醫學影像資料庫中的 FDG PET 測試數據時，相較於 ADNI 自身的測試集，模型的預測準確度下降為六成。這一發現突顯了一個重要問題：在進行多中心研究或應用預測模型時，需要考慮數據來源的差異性，不同來源的 FDG 影像可能會對預測準確度產生影響。

3.4 台灣歷史醫學影像資料庫研究: FDG PET 與類澱粉蛋白沉積資訊的整合與處理

由於 ADNI 訓練模型在外部數據集上的表現不盡理想，故本研究團隊使用台灣歷史醫學影像資料庫的影像數據重新訓練模型。如圖 12 結果所示，該獨立測試集在五種單一模型（SVM、KNN、Discriminant、Neural

Network 和 Ensemble)中，平均預測準確度達到 77.83%。其中，Ensemble 模型表現最為出色，準確度高達 83.70%。然而，出乎意料的是，應用投票分類法後，準確度只達到 80.43%，並未如預期般顯著提升模型性能。

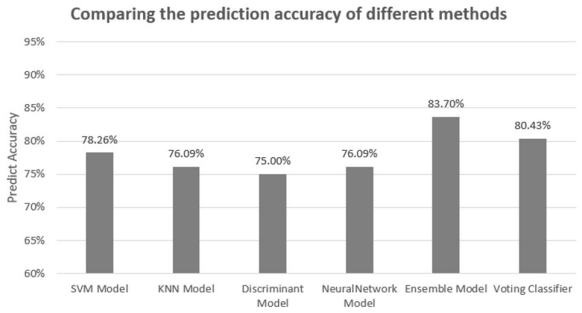


圖 12、五種模型及投票分類之預測準確度比較
(台灣歷史醫學影像資料庫研究)

IV. 結論

本研究透過對 ADNI 資料庫中的 FDG PET 影像進行深入分析，探討了使用機器學習方法預測類澱粉蛋白陽性率的可行性。研究結果顯示，結合多種機器學習模型的方法在預測類澱粉蛋白陽性方面具有顯著優勢；此外，所識別出與類澱粉蛋白陽性高度相關的特定腦區，如角回、海馬旁迴、後扣帶回和下顳葉等，這些發現不僅有助於提高預測模型的準確性，也為理解阿茲海默症的病理機制提供了新的線索。

總的來說，FDG PET 影像中的代謝模式確實包含了與類澱粉蛋白沉積相關的重要信息，透過本研究也展示了利用機器學習方法分析 FDG PET 影像來預測類澱粉蛋白病理的潛力。該套個人化類澱粉蛋白影像陽性預測模型有望在未來成為一種非侵入性、成本效益高的阿茲海默症早期篩查工具，為臨床診斷和治療決策提供重要參考。

然而，在 FDG PET 影像中，類澱粉蛋白陽性與陰性之間的特徵差異較小，因此在臨床上處理來自不同來源的 FDG PET 影像以穩定地提高預測準確度是一項挑戰。在此情況下，應用標準化的影像處理技術和先進的分析工具，如深度學習和機器學習模型，可能是提高預測性能的有效策略。這需要對各種影像數據進行嚴格的預處理和特徵提取，以確保模型的泛化能力和臨床應用的可靠性。進一步的研究仍需在更大規模的樣本數中驗證，並探索將該方法整合到臨床實踐中的可行性。

參考文獻

[1] MOON H. E., KAHOLOKULA J. K. et al. Prevalence of Dementia in American Indians and Alaska Natives Compared to White, Black, and Hispanic Medicare Beneficiaries: Findings from the National Health and Aging Trends Study, J Racial Ethn Health Disparities 2022.

[2] KASAJIMA M., EGGLESTON K., KUSAKA S. et al. Projecting prevalence of frailty and dementia and the economic cost of care in Japan from 2016 to 2043: a microsimulation modelling study, Lancet Public Health 2022: 7: e458-e468.

[3] KAO Y. H., HSU C. C., YANG Y. H. A Nationwide Survey of Dementia Prevalence in Long-Term Care Facilities in Taiwan, J Clin Med 2022: 11.

[4] COLLABORATORS G. B. D. D. F. Estimation of the global prevalence of dementia in 2019 and forecasted prevalence in 2050: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, Lancet Public Health 2022: 7: e105-e125.

[5] HARDY J., SELKOE D. J. The amyloid hypothesis of Alzheimer's disease: progress and problems on the road to therapeutics, science 2002: 297: 353-356.

[6] DELAERE P., DUYCKAERTS C. et al. Tau, paired helical filaments and amyloid in the neocortex: a morphometric study of 15 cases with graded intellectual status in aging and senile dementia of Alzheimer type, Acta neuropathologica 1989: 77: 645-653.

[7] SEVIGNY J., SUHY J., CHIAO P. et al. Amyloid PET Screening for Enrichment of Early-Stage Alzheimer Disease Clinical Trials: Experience in a Phase 1b Clinical Trial, Alzheimer Dis Assoc Disord 2016: 30: 1-7.

[8] PAPP K. V., ROFAEL H., VEROFF A. E. et al. Sensitivity of the Preclinical Alzheimer's Cognitive Composite (PACC), PACC5, and Repeatable Battery for Neuropsychological Status (RBANS) to Amyloid Status in Preclinical Alzheimer's Disease -Atabecestat Phase 2b/3 EARLY Clinical Trial, J Prev Alzheimers Dis 2022: 9: 255-261.

[9] BOADA M., ANAYA F., ORTIZ P. et al. Efficacy and Safety of Plasma Exchange with 5% Albumin to Modify Cerebrospinal Fluid and Plasma Amyloid-beta Concentrations and Cognition Outcomes in Alzheimer's Disease Patients: A Multicenter, Randomized, Controlled Clinical Trial, J Alzheimers Dis 2017: 56: 129-143.

[10] LANGFORD O., RAMAN R., SPERLING R. A. et al. Predicting Amyloid Burden to Accelerate Recruitment of Secondary Prevention Clinical Trials, J Prev Alzheimers Dis 2020: 7: 213-218.

[11] NI Y. C., TSENG F. P., PAI M. C. et al. Detection of Alzheimer's disease using ECD SPECT images by transfer learning from FDG PET, Ann Nucl Med 2021: 35: 889-899.

[12] NI Y. C., TSENG F. P., PAI M. C. The Feasibility of Differentiating Lewy Body Dementia and Alzheimer's Disease by Deep Learning Using ECD SPECT Images, Diagnostics (Basel) 2021: 11.

[13] BAE J., STOCKS J., HEYWOOD A. et al. Transfer learning for predicting conversion from mild cognitive impairment to dementia of Alzheimer's type based on a three-dimensional convolutional neural network, Neurobiol Aging 2021: 99: 53-64.

[14] AGARWAL D., MARQUES G. et al. Transfer Learning for Alzheimer's Disease through Neuroimaging Biomarkers: A Systematic Review, Sensors (Basel) 2021: 21.

真實世界的失智診療：核子醫學的角色
Dementia diagnosis in a real-world scenario: the role of nuclear medicine

計畫編號：NSTC 112-2623-E-006-003 -NU
計畫主持人：白明奇
e-mail：pair@mail.ncku.edu.tw
計畫共同主持人：張雅婷、林昆儒、邱百誼
執行單位：國立成功大學醫學院神經學科

摘要

本案合作的四間醫院之主持人(PI) 透過實體或線上討論會議的方式進行討論。開始執行前召開了共識會議，主持人們在後續會議中每季召開一次。

截至 2023 年，這四間醫院已完成 229 例登錄。從數據統計結果顯示，其診斷變更率非常低，顯示 PI 具有優異的診斷能力。TRODAT 和 ECD SPECT 在臨床診斷中的作用正在進行評估。

另外，我們也與日本松田教授共同研究 ECD SPECT 在預測 MCI 進展與否的能力，2017.01 至 2022.06，我們進行了 2200 例 ECT SPECT 研究。透過這項研究，我們有機會檢驗 eZIS 在與日本文化相似但教育背景不同的國家應用的可行性。我們預期與其他組別相比，eZIS 因 AD 導致的 MCI 會以更具顯著性的模式發展。這與前驅型阿茲海默症以較高的發生率進展為失智症一致 (Plassman 2008)。

關鍵詞：失智症、前驅型阿茲海默症、影像、診斷能力。

Abstract

Investigators of four sites are to meet by face-to-face or webinar for discussion. A consensus meeting has been held before kick-off and the PIs have met in the follow-up meetings once per season.

By July 2023, the four sites have retrieved 229 cases, the rates of changed diagnosis are very low among the four groups of condition, indicating an excellent diagnostic ability of the PIs. The role of TRODAT and ECD SPECT on the clinical diagnosis will be assessed in the following months.

From 2017.01 to 2022.06, we have performed 2200 cases of ECT SPECT studies. Via this study, we have an opportunity to check the feasibility of eZIS when applied in a country with similar culture but different educational background with Japan. We expected that eZIS-favored MCI due to AD progressed in a more vicious pattern compared to the other group. It is consistent with prodromal AD progressed to dementia at a higher annual rate (Plassman 2008).

Keywords: Dementia, Prodromal AD, Imaging, Diagnostic ability

I. Introduction

In the very early stages of primary degenerative dementia, such as Alzheimer's disease (AD), Lewy body diseases (LBD, including dementia with Lewy bodies, Parkinson disease dementia and multiple system atrophy), or frontotemporal lobar degeneration, to make a timely diagnosis of dementia is important. To make a diagnosis is not enough sometimes, because both patients and their family wish to know which subtype of dementia they might have, and the possibility of progression as well as its speed in the following years. Via multiple suitable ways and social resources, deterioration of their disease can be slowed down and behavioral and psychological symptoms can be relieved, both of which are the origin of burdens their care providers and family members may suffer.

Moreover, to recruit candidates for clinical trials is critical to facilitate for a cure for primary degenerative dementias. Over the past two decades, FDA to treat AD has approved only one compound, and it is controversial for the process (Cummings 2021). People cannot wait any longer for the cure for AD and related dementia.

II. Data prior the start of current study

Pair I (for aim 1): Reappraisal of our previous INER study on 699 cases

From Aug 2018 to Aug 2020, as sponsored by the INER, together with all investigators, we have collected 699 cases from National Cheng Kung University Hospital, Lin-Ko Chang Gung Memorial Hospital, Kaohsiung Chang Gung Memorial Hospital and Show Chwan Memorial Hospital. These 699 cases included 243 cognitively unimpaired (CU), 178 AD continuum, 129 vascular dementia, and 149 PD/DLB continuum. The severity of the three most frequently seen dementia subtypes is very mild to mild (CDR 0.5 or 1.0). All the patients had complete cognitive assessments, blood tests, brain MRI, and some of them had ECD SPECT and TRODAT when feasible. See Table 1 and Table 2. These data are the basis of Taiwanese Nuclear Medicine Brain Image database constructed by the INER.

Recently, the four PI and co-PIs checked these 699 index cases to see whether having been followed up at each dementia clinic. The answer is about 200, including 82 CU, 35 AD, 18 LBD and 65 VaD. We realized that we need to call out to know the details.

Table 1. Demographic data of the 699 cases(1/2)

	Normal (n=243)	AD (n=178)	VaD (n=149)	DLB/PDD (n=129)	*P*-value
Age(y), mean(SD)	68.6(8.4)	76.1(6.9)	70.9(7.3)	77.2(6.7)	.000***
55-64(y), n(%)	103(42.4)	16(9.0)	34(22.8)	5(3.9)	
65-74(y), n(%)	78(32.1)	55(30.9)	73(49.0)	45(34.9)	
75-84(y), n(%)	62(25.5)	107(60.1)	42(28.2)	79(61.2)	
Sex(Male), n(%)	89(36.6)	88(49.4)	90(60.4)	80(62.0)	.000***
Education(y), mean(SD)	10.5(4.0)	7.8(4.2)	8.2(4.6)	7.9(3.6)	.000***
FM with Dementia, n(%)	35(14.4)	34(19.1)	8(5.4)	14(10.9)	.001***
FM with PD, n%)	8(3.3)	2(1.1)	4(2.7)	8(6.2)	.004**
FM with Stroke, n%)	37(15.2)	7(3.9)	12(8.1)	7(5.4)	.000***
Right hander, n(%)	239(98.4)	176(98.9)	148(99.3)	129(100.0)	.473

Notes:
Data are analyzed with ANOVA and Pearson's chi-squared test; FM= family history; *p ≤ .05; **p ≤ .01; ***p ≤.001.

Table 2. Demographic data of the 699 cases(2/2)

	Normal (n=243)		AD (n=178)		VaD (n=149)		DLB/PDD (n=129)		*P*-value	
Height(cm), mean(SD)	159.7	(7.5)	158.4	(8.3)	161.6	(8.4)	161.3	(8.3)	.005	**
Weight(kg), mean(SD)	63.2	(10.5)	58.7	(9.9)	68.6	(63.9)	61.8	(11.0)	.045	*
Blood pressure(mmHg)										
Systolic, mean(SD)	134.9	(17.6)	130.8	(15.6)	132.9	(16.0)	131.6	(16.0)	.067	
Diastolic, mean(SD)	78.7	(11.9)	75.7	(9.9)	74.6	(10.3)	73.7	(11.5)	.000	***
Pulse(bpm), mean(SD)	75.8	(10.3)	75.5	(11.5)	80.6	(13.0)	76.7	(11.0)	.000	***
MMSE, mean(SD)	27.4	(2.5)	18.7	(5.4)	19.4	(7.0)	18.7	(6.2)	.000	***
CASI, mean(SD)	90.5	(7.6)	62.6	(18.0)	65.6	(22.2)	63.3	(18.7)	.000	***
CDR, mean(SD)	0.2	(0.3)	0.8	(0.4)	0.8	(0.5)	0.8	(0.5)	.000	***

Notes:
Data are analyzed with ANOVA and Pearson's chi-squared test; FM= family history; *p ≤ .05; **p ≤ .01; ***p ≤.001.

Aim 1: To reappraise of the previously studied 699 cases in Taiwanese Nuclear Medicine Brain Image

Aim 2: To check the predictive power of eZIS (developed by experts in Japan) the conversion from MCI due to AD to Alzheimer's dementia

III. Results

Data retrieval

Through the approval of local IRBs as a retrospective data analysis, the investigators will review the state of the 699 index cases in each site via chart review and/ or phone calls. They will record any information or diagnosis changes carefully for those having adhered to clinic over the past years. For those who has been lost to follow-up, we will contact them by either surface mails or phone calls.

Preliminary results

Investigators of four sites are to meet by face-to-face or webinar for discussion. A consensus meeting has been held before kick-off and the PIs have met in the follow-up meetings once per season.

By July 2023, the four sites have retrieved 229 cases, Table 3. Their demographic data and items of interested are shown in Table 3-1. As shown, the rates of changed diagnosis are very low among the four groups of condition, indicating an excellent diagnostic ability of the PIs. The role of TRODAT and ECD SPECT on the clinical diagnosis will be assessed in the following months.

Table 3. The 699 cases to be followed up

	Number by July 2023	To be out-reached
CU	35	208
AD	86	92
VaD	44	105
LBD	64	65
Total	229	470

Note: CU: cognitively unimpaired; AD: Alzheimer's dementia; LBD: Lewy body dementia; VaD: vascular dementia

Table 3-1. Demographic data of the 229 cases to be followed up (by July 2023)

	Normal (n=35)	AD (n=86)	VaD (n=44)	DLB/PDD (n=64)	*P*-value
Dx_changed, n(%)	1(2.9)	6(7.3)	3(6.8)	5(7.8)	.814
Age(y), mean(SD)	70.5(9.0)	79.1(7.4)	73.3(8.3)	77.8(6.0)	.000***
Education(y), mean(SD)	9.4(4.1)	7.4(4.8)	7.1(3.5)	6.7(4.6)	.028*
Sex(Male), n(%)	15(44.1)	39(47.6)	31(70.5)	38(59.4)	.042*
eZIS_Severity, mean(SD)	0.9(0.4)	1.2(0.5)	2.2(2.8)	1.4(0.5)	.001**
eZIS_Extent, mean(SD)	6.5(9.7)	14.4(13.7)	22.5(20.6)	17.4(15.2)	.003**
eZIS_Ratio, mean(SD)	1.4(1.6)	2.2(2.2)	2.1(2.0)	2.0(1.4)	.340
CDR, mean(SD)	0.3(0.3)	1.1(0.7)	1.0(0.7)	1.0(0.6)	.000***
MMSE, mean(SD)	27.1(3.3)	15.7(6.4)	15.1(6.7)	19.9(6.0)	.000***
CASI, mean(SD)	89.2(8.9)	54.1(23.8)	59.1(21.6)	62.4(19.7)	.000***

Notes:
Data are analyzed with ANOVA and Pearson's chi-squared test; FM= family history; *p ≤ .05; **p ≤ .01; ***p ≤.001.

More comments

The core project is unreplaceable, because the data are precious in quality and quantity. All investigators are experts in clinical practice in Taiwan and have long-term history of collaboration. The reappraisal of these cases are believed to be a facilitator for the accompaniment of the ECDaim.

Part II (for aim 2): The power of prediction of conversion from mild cognitive impairment due to AD to mild Alzheimer's dementia by using Easy Z-score Imaging System for ECD SPECT

eZIS is an AI system that helps clinician to make a diagnosis of AD and related dementia. Basically, the eZIS can compare a subject with age-matched cognitive unimpaired and indicate the areas of hypoperfusion. Three major areas of interest indicating AD will be clearly shown. Via careful calculation, three indices can help nuclear medicine experts to make a diagnosis favor or not favor of AD. This is of especially useful in the early stage of AD, namely, MCI due to AD or mild AD dementia.

A diagnosis of MCI was made by a senior behavioral neurologist, MCP, according to Petersen's criteria: (1) Memory complaint, preferably corroborated by an informant (2) Impaired memory function for age and education (3) Preserved general cognitive function (4) Intact activities of daily living (5) Not demented.

Cognitive progression was assessed by deterioration in MMSE score, CDR sum of boxes (SB), and CASI total score. MCI conversion to dementia was defined by global CDR 1.0 or greater.

Follow-up duration was at least 3 years. Those who progressed to dementia were categorized as progressive MCI.

In contrast, patients who did not convert to dementia were categorized as stable MCI.

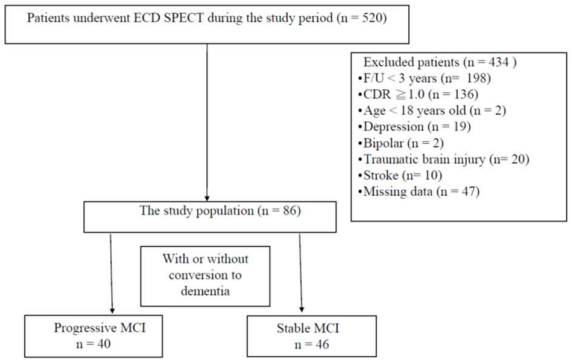


Table 8. The characteristics of three eZIS indicators under ROC curve analysis to predict the conversion from MCI to dementia.

	AUC	P value	Cut-off value	SEN	SPE
Severity	0.719	<0.01	1.22	0.700	0.696
Extent	0.712	<0.01	10.475	0.725	0.696
Ratio	0.698	<0.01	1.005	0.850	0.522

AUC: area under curve; SEN: sensitivity; SPE: specificity

The result revealed positive correlation between conversion and MTA, eZIS severity and baseline SB. ROC curve was performed to evaluate the ability of eZIS indicators to predict MCI progressing to dementia (Table 8). The optimal cut-off values with largest AUCs were 1.22 for severity (AUC=0.719), 10.48 for extent (AUC=0.712) and 1.01 for ratio (AUC=0.698), See Table 8 and Figure 5.

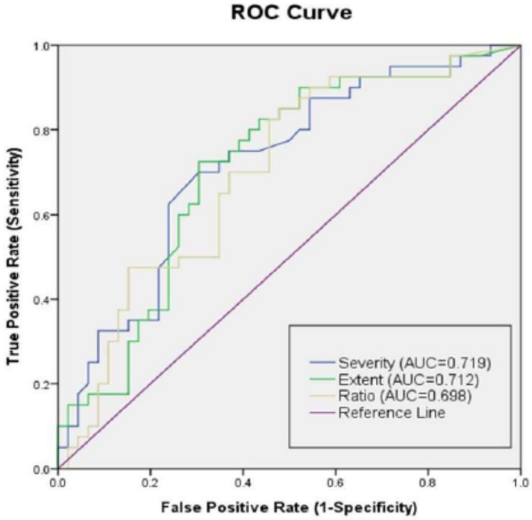


Figure 5. The ROC curves for eZIS in this study.

IV. Conclusion

1. In part 1, Problem with outreach the cases lost to follow-up.

2. In part 2, since eZIS is based on Japanese data, a possibility of educational bias must be taken into consideration. Fortunately, most of the patients with MCI due to AD are younger and with higher education attainment, which may reduce the aforementioned bias. Regarding this issue, we have met Professor Matsuda on 28 Apr 2023 and he told us the possible is low. We will invite Professor Matsuda to visit Taiwan in 2024 and have a round table discussion with local investigators dependent on the pandemics. Via the interactions with Professor Matsuda, the application of AI system to aid dementia diagnosis will be promoted.

5. References

[1] Ni YC, Hsieh HH, Tseng FP, A Method for Linking Tc-99m-ECD Brain SPECT Image and Dementia Questionnaires, 58th Japanese Society of Nuclear Medicine, Okinawa, Japan, November 15-17, 2018.

[2] Ni YC, Tseng FP, Pai MC, et al. Deep learning model to predict Alzheimer's disease using a small number of Tc-99m-ECD SPECT Images. Annals of Nuclear Medicine and Molecular Imaging 2020; 33: 231-243.

[3] Ni YC, Tseng FP, Pai MC, et al. Detection of Alzheimer's disease using ECD SPECT images by transfer learning from FDG PET. Annals of Nuclear Medicine 2021; 35: 889.

[4] Ni YC, Tseng FP, Pai MC, et al. The feasibility of differentiating Lewy body dementia and Alzheimer’s disease by deep learning using ECD SPECT images. Diagnostics 2021; 11: 2091.

[5] Pai MC, Wu CC, Hou YC, et al. Evidence of plasma biomarkers indicating high risk of dementia in cognitively normal subjects. Scientific Report 2022; 12: 1192.

[6] Plassman BL, Langa KM, Fisher GG, et al. Prevalence of cognitive impairment without dementia in the United States. Ann Intern Med 2008; 148: 427.

建置 70 MeV 中型迴旋加速器之產業應用評估及核醫資料分析與趨勢研究
Industrial Application Assessment of the Construction of a 70 MeV Medium-sized Cyclotron and Nuclear Medicine Trend Study

計畫編號：NSTC 112-2623-E-A49-008 -NU
計畫主持人：許世明
e-mail：smhsu@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：劉仁賢
計畫參與人員：馮真如、鄧中鑫
執行單位：國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

本計畫因應國內 70 MeV 迴旋加速器建置計畫之推動，未來可支援放射性核種生產之穩定來源與核種多樣性。放射性核種在核子醫學應用為最主要之領域，核醫藥物的發展因各種疾病發生率的改變而逐年不同，故本研究以問卷形式調查我國核醫單位及藥物生產商，其 SPECT 或 PET 核醫藥物使用情形。並蒐集我國健保局資料庫近五年核藥用藥之數據，分析各類核醫藥物之需求與應用趨勢。研究結果將協助規劃未來核醫藥物生產之預期方向，提升迴旋加速器商業模式及學術研究發展之效益。依據本研究結果，對未來放射性核種生產規劃的建議：SPECT 為 Tc-99m、Tl-201、Ga-67 及 I-123；PET 為 F-18、Ga-68、Ga-67；治療用核種則以 Ra-223、Ac-225 兩核種有發展潛力。

關鍵詞：迴旋加速器，健保局資料庫，放射性核種。

Abstract

Due to the project of 70 MeV cyclotron established in Taiwan, the stable source and variations that can support the production of radionuclides in the future. The application of radionuclides in nuclear medicine is the most important field. The development of nuclear medicine varies year by year are dependent on the changes of incidence in various diseases. Therefore, this study will design a series questionnaire to investigate the SPECT or PET radiopharmaceutical usages among clinical nuclear medicine departments and radiopharmaceutical providers. Then, we will collect the data of nuclear medicine use in the database of the National Health Insurance Bureau in the past five years and analyze the trend of application within radionuclides. The research results will assist in planning the expected direction of future nuclear medicine production, and enhance the efficiency of the cyclotron business model and academicals research development. According to the results from this study, the recommendations for future radionuclide production is: Tc-99m, Tl-201, Ga-67, and I-123 are prioritized choices for SPECT; F-18, Ga-68, and Ga-67 are prioritized choices for PET; Ra-223, Ac-225 has development potential for therapeutic radionuclide production.

Keywords: 70 MeV cyclotron, nuclear medicine, questionnaire survey, health insurance database

I. 前言

1896 年 H. Becquerel 發現放射線物質後，開始使用放射性核種做為醫學診斷工具的應用；核子醫學診斷設備，包含單光子發射電腦斷層掃描及正子發射斷層掃描的檢查，亦可使用放射性核種作為放射治療使用。

迴旋加速器之能量及電流參數，將影響生產的核種種類、核種產率及產物純度。20 MeV 以下主要製造 PET 正子核種；20-35 MeV 用於製造多數之 SPECT 光子核種；35 MeV 以上則用於製造具治療性質的放射性核種。國內擁有迴旋加速器的機構包含醫院、核醫藥物商及國家原子能科技研究院。多數醫院之迴旋加速器能量為 20 MeV 以下，故部分 SPECT 核種需依賴國家原子能科技研究院或核醫藥物商供應。

70 MeV 迴旋加速器可大規模生產放射性核種，供應核子醫學臨床需求，或是應用在科學研究及工業領域。核子醫學放射性核種的製造選擇，其物理特性評估包含衰變性質、釋放能量及半衰期。考量核種自生產完成至送達目的地過程，在時間花費上的適當性，最理想狀況是將迴旋加速器設置在醫療機構。

然而迴旋加速器造價昂貴，非多數之醫療機構能自行負擔，故可採用中央化製造模式發展，由獨立迴旋加速器機構統一生產放射性核種，再配送至鄰近地區之臨床核醫機構。70 MeV 迴旋加速器可提升初始產量，對於 PET 所使用短半衰期正子釋放源核種，盡可能減少配送時間對 PET 藥物活度衰減的影響。此外，70 MeV 迴旋加速器亦有利於製造滋生器模式之放射性核種，對於有特定短半衰期核種需求的核醫機構，可先提供該核種之母核至目的地，待衰變成子核時即可用於臨床放射診斷或治療。

II. 主要內容

本研究將研析現行核醫單位之常規性檢查核種種類、使用人次、生產來源，及新穎核種研究發展之意向，並分析國內外核醫藥物生產商，其核種生產種類、數量、迴旋加速器性能參數及服務地區，另分析健保資料庫之核醫用藥紀錄，進行臨床常用之核種藥物種類、次數統計，藉此評估 70 MeV 中型迴旋加速器之放射性核種生產策略。

國內已長期投入原子能與輻射應用相關領域之研究發展，如，國家原子能科技研究院之迴旋加速器所開發的核醫藥物，提供國內臨床核醫機構應用於心臟、腫瘤、甲狀腺、神經/精神、腦血流造影…等方面，協助疾病病程的診斷或治療處置評估，並平穩進口核醫藥物價格。因應 70 MeV 迴旋加速器之升級計畫實施，本研究將協助分析國內醫療機構之現行臨床需求，學術價值方面，將整合國內外核醫藥物應用種類與市場評估，進行個別核種之統計比較，並初步調查國內對新穎核種治療，在臨床醫療機構實際發展意向

III. 結果與討論

本研究為調查國內臨床核醫機構，於核醫診療藥物的使用趨勢與數量分析，以及對學術研究應用的發展方向。文獻分析將分為亞洲、歐洲、北美及大洋洲的國家來進行調查。亞洲部分調查的國家為中國、韓國、印尼、俄羅斯及伊朗；歐洲部分為英國、瑞士、西班牙及荷蘭；北美部分以美國及加拿大為調查；大洋洲部分則是調查澳大利亞及紐西蘭。

國內臨床單位之 SPECT 核種的單週使用人次最多的是 Tc-99m 與 Tl-201，PET 核種的單週使用人次最多的是 F-18，治療型核種的單週使用人次最多的是 Ra-223 及 I-131。國內臨床單位之核種需求優先性排名，SPECT 核種方面於 Tc-99m、Tl-201、I-131 及 Ga-67 各有超過 2 成的比例之優先需求，此結果與前述之使用比例可相互對應。PET 核種方面以 F-18 及 Ga-68 為主要優先需求，F-18 因其可配置多種檢查藥物而有超過 5 成的比例。治療型核種以既有使用的 Ra-223、Lu-177 及 Y-90 為前三排名，其中 Ra-223 治療藥物用於治療癌症骨轉移，且近年通過健保給付申請，致使其在臨床單位有最高比例的優先需求。

IV. 結論

本計畫統整全球各地域之核醫用放射性核種，包含亞洲、歐洲、北美及大洋洲的國家。另外透過問卷調查及健保資料庫統計國內的核種使用現況。對於 70 MeV 迴旋加速器建置之核種生產方向規劃建議，在 SPECT 方面以 Tc-99m、Tl-201、Ga-67 及 I-123 為參考；在 PET 方面以 F-18、Ga-68、Ga-67 為考量；治療用核種可考慮 Ra-223、Ac-225 兩核種。

參考文獻

[1] Lagunas-Solar MC. Radionuclide production with > 70-MeV proton accelerators: current and future prospects. Nucl Instrum Methods Phys Res B. 1992;69:452-462.

[2] International Atomic Energy Agency. Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods. Technical Report Series No.468. 2009.

[3] Kassis AI, Adelstein SJ. Radiobiologic Principles in Radionuclide Therapy. J Nucl Med. 2005;46:4S-12S.

[4] Yordanova A, Eppard E, Kürpig S. Theranostics in nuclear medicine practice. Onco Targets Ther. 2017;10:4821–4828.

[5] Hao G, Mastren T, Silvers W, et al. Copper‐67 radioimmunotheranostics for simultaneous immunotherapy and immuno‐SPECT. Sci Rep. 2021;doi:10.1038/s41598-021-82812-1.

[6] Vereshchagin YI, Zagryadskiy VA, Prusakov VN. Cyclotron 82Sr production for medical applications. Nucl Instrum Methods Phys Res A. 1993;334:246-248.

[7] Hu J, Li H, Sui Y, Du J. Current status and future perspective of radiopharmaceuticals in China. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2022;49:2514-30.

[8] Holik HA, Ibrahim FM, Elaine AA, Putra BD, Achmad A, Kartamihardja AHS. The Chemical Scaffold of Theranostic Radiopharmaceuticals: Radionuclide, Bifunctional Chelator, and Pharmacokinetics Modifying Linker. Molecules. 2022;27.

建立非侵入性影像平台以評估人類神經母細胞瘤經硼中子捕獲治療後細胞程式死亡配體-1 之表現量

Establishment of noninvasive molecular imaging platform for monitoring the PD-L1 expression level of human GBM xenograft after boron neutron capture therapy

計畫編號：NSTC112-2623-E-A49-006-NU
計畫主持人：吳駿一
e-mail：chunyiwu@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：陳一瑋、張文議
計畫參與人員：蔡依婷、謝昕樺、呂濰廷
執行單位：國立陽明交通大學醫放系

摘要

近年免疫檢查點抑制劑療法被視為末期癌症患者的救星，然若以其單獨治療多形性膠質母細胞瘤，療效相當有限，意指有極大多數的患者虛擲了寶貴的治療時間與金錢。本研究的目標係建立可忠實反映腫瘤細胞程式死亡配體-1(PD-L1)表現量的影像平台，以找尋合併其他治療方式做為治療手段的可行性。根據我國臨床經驗，合併硼中子捕獲治療或許是一個好選擇。本研究第一年已成功製備放射性標誌之傳統隨機式與特異性位點修飾抗體，然活體造影結果發現放射性標誌抗體似乎無法通過血腦障壁，難以評估原位腦腫瘤 PD-L1 表現量。因此，今年本計畫成功建立放射性 F-18 標誌標靶細胞程式死亡配體-1 之小分子示蹤劑製程，並與 In-111 專一性或傳統隨機標誌之 anti-PD-L1 進行生物分佈比較，以最理想之影像平台觀測並探討硼中子捕獲治療合併 anti-PD-L1 治療之可行性。合併治療明顯有效，且成功引發腫瘤免疫反應，阻止肺臟轉移生成，此結果無疑為病患帶來一道曙光。

關鍵詞：免疫檢查點抑制劑療法、多形性膠質母細胞瘤、死亡配體-1(PD-L1)、硼中子捕獲治療

Abstract

Immune checkpoint blockade therapy has become the last option for patients with late-stage cancer. However, most clinical results showed the therapeutic efficacy of anti-PD-L1 monotherapy against recurrent glioblastoma multiforme (GBM) is limited, suggesting a lot of patients waste valued time and money receiving invalid treatment. This study aims to develop a reliable noninvasive imaging platform to reflect the PD-L1 expression level of GBM xenograft. Hopefully, the results of this study can be used to predict the feasibility of combining immune checkpoint blockade therapy with another treatment strategy. Boron neutron capture therapy (BNCT) demonstrated its effectiveness to treat GBM patients. In our initial year of investigation, we encountered challenges with radiolabeled anti-PD-L1 antibod-ies failing to penetrate the blood-brain barrier, impeding the assessment of PD-L1 expression in orthotopic GBM. Therefore, this year, the project successfully established a small molecule tracer process for radioactive ^{18}F-labeled cell-programmed death ligand-1 and compared it with In-111-specific or conventional randomly labeled anti-PD-L1 for biodistribution, so as to use the most optimal imaging platform to observe and explore the feasibility of combining boron neutron capture therapy with anti-PD-L1 therapy. The combination therapy effectively triggers an immune response against the tumor and mitigates the risk of lung metastasis, offer-ing a beacon of hope for patients.

Keywords: Immune checkpoint blockade therapy, glioblastoma multiforme, PD-L1, Boron neutron capture therapy

I. 前言

隨著快速進步的醫療科技，國人平均餘命也隨之增加，然而，癌症始終是威脅健康的頭號兇手，根據我國統計資料，惡性腫瘤已連續三十幾年位居十大死因首位，腦瘤雖非十大癌症之一，但預後極差，又以多形性膠質母細胞瘤(glioblastoma multiforme, GBM)為最，近半數患者存活時間只有九到十二個月，兩年內死亡率達七成以上。目前多形性膠質母細胞瘤的治療方式係以外科手術為主，然初期症狀不明顯，發現時常已惡化，加上膠質瘤屬浸潤性腫瘤，難以清楚分辨邊界或因無法過度切除腦組織，導致極易復發，即便術後可輔以放射或化學(標靶)治療，整體而言，對於整體存活率沒有明顯助益。蒂盟多(temozolomide, TMZ)是少數可有效延長多形性膠質母細胞瘤病人存活期的藥物，口服後，蒂盟多會被轉化為 5-(3-methyltriazen-1-yl) imidazole-4-carboximide (MTIC)，最後再裂解形成 methyldiazonium cation 與 5-aminoimidazole-4-carboxamide (AIC)，可抑制腫瘤 DNA 合成致使腫瘤凋亡。然而極大多數的患者在治療後都會過度表現 O6-methylguanine-DNA-methyltransferase (MGMT)，此酵素會移除 DNA 上被修飾的甲基，而產生對蒂盟多的抗藥性[1]。此外，復發腫瘤的 MGMT 表現量明顯高於原發者[2]，顯示針對復發多形性膠質母細胞瘤復發或是已產生抗藥性患者的治療實刻不容緩。

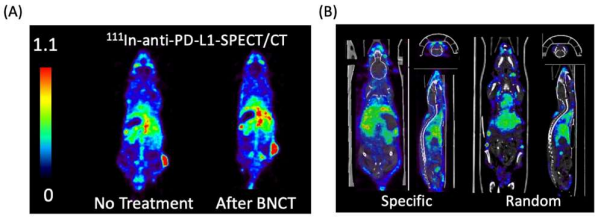
硼中子捕獲治療(boron neutron capture therapy, BNCT)是一種二元性標靶放射治療，需將足量的含硼(B-10 佔天然硼元素的 20%)藥物送到腫瘤細胞內，再給予熱中子照射後，才可利用 B-10 的高中子截面(3888 邦)成功捕捉中子產生核反應，放出具高線性轉移能量

(linear energy transfer, LET)但射程範圍短(5-9 μm)之氦核(^{4}He, α)及鋰核(^{7}Li)，達到顯著的殺傷效應，由於射程小於細胞大小(10-100 μm)，因此不造成周圍組織損傷的目的。若細胞僅攝取含硼藥物或是僅接受熱中子射束照射，都不會擁有此殺傷效應，因此最理想的情況是將 10B 原子選擇性地送至腫瘤病灶，即可以達到夢想中只治療腫瘤而不造成正常組織傷害的目的，完美詮釋精準醫療。即使硼中子捕獲治療擁有如此優勢，限於早期中子源多來自核反應爐，於醫院設置核反應爐不切實際，全世界最多曾有 10 座可提供適合熱中子的反應爐，但現今只剩 3-4 座反應爐仍在執行臨床治療(台灣、日本、阿根廷及中國)，因此，得益於硼中子捕獲治療的患者人數在這 70 年間僅有不到三千人。所幸近期已有多家公司已開發出可設置於醫院以提供熱中子的直線加速器機型，往後對於硼中子捕獲治療的研究必定持續增加。國立清華大學開放式水池反應器(Tsing Hua open pool reactor, THOR)由 2004 年起即開始進行超熱中子束的建置，經過多年努力，於 2010 年與台北榮民總醫院癌病中心合作正式執行國內第一位復發性頭頸癌患者的臨床試驗，目前已完成 280 餘名患者的治療，其中包含 120 餘名多形性膠質母細胞瘤患者，甚至有多名國外患者經由外交管道至台治療，由整體存活率來看，治療效果頗佳[3, 4]。我國目前是除日本之外仍持續進行臨床治療的國家，已累積許多實績及經驗，是少數台灣領先世界各國的癌症治療研究領域。再者，日本已於今年將硼中子捕獲治療列為復發性頭頸癌患者的正式醫療選項治療，但多形性膠質母細胞瘤並不在適應症之列，是一個可擴大領先優勢的研究方向。

近年免疫檢查點抑制療法(immune checkpoint blockade)被視為末期癌症患者的最後希望，透過「活化」身體內的免疫細胞而戰勝腫瘤，因為腫瘤為了規避身體內免疫細胞的作用，表面會過度表現細胞程式死亡配體-1(programmed cell death protein-1, PD-L1)與免疫細胞上免疫檢查點受體(PD-1)結合而抑制免疫細胞(如: T 細胞)的活性，達成免疫逃脫(immune escape)的目的。免疫檢查點抑制療法即是使用會特異性與 PD-1 或 PD-L1 之單株抗體阻擋免疫檢查點受體與腫瘤特化物質的結合，使免疫細胞不會接受到壓制免疫活性的信號，現今美國食品藥物局已核准 Atezolizumab 作為針對 PD-L1 的抑制劑。但 Atezolizumab 本身並無腫瘤毒殺效果，其殺傷作用還是來自人體免疫系統作用。 然相較於其他腫瘤，膠質母細胞瘤的免疫療法應用備受挑戰，首先由於中樞神經系統本就屬於免疫特權區，其具有血腦障壁限制免疫細胞進入，又缺乏淋巴引流系統協助抗原傳遞，同時膠質母細胞瘤及其周邊的微膠細胞更會釋放各種細胞激素使腫瘤趨於免疫抑制的微環境當中[5]。被釋放之細胞激素包含介白素-6 (interleukin-6)[6]、介白素-10 (interleukin-10)[7]、轉化生長因子 (transforming growth factor-beta，TGF-β)以及前列腺素 (prostaglandin-E)，以上將共同造成 NK 細胞被抑制、T 細胞凋亡、MHC 表達下降，且巨噬細胞趨向於 M2 極化[8]。即便如此，PD-L1 的表現量仍被指出與腫瘤分級有關，更和膠質母細胞瘤的生存率低有關[9, 10]，若抑制腫瘤 PD-L1 的表現，仍有機會提升整體治療效果 ，故以非侵入性影像動態觀察 PD-L1 表現量至關重要。

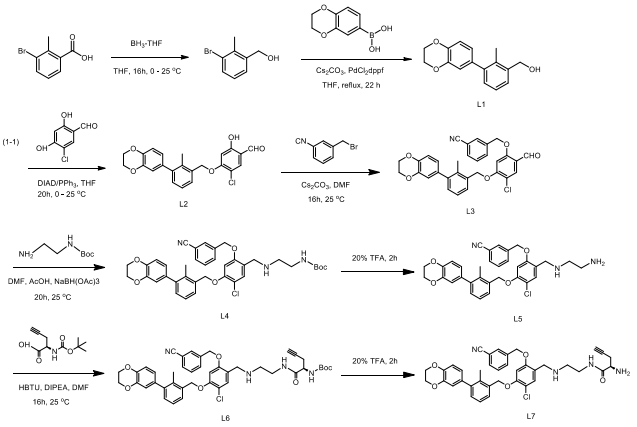
II. 主要內容

於本計畫主題之第一年研究，已成功建立 In-111 標誌 anti-PD-L1 抗體之免疫核醫影像應用於皮下腫瘤模型(下圖 A)，可作為免疫檢查點抑制療法篩選平台，並且成功比較傳統隨機以及專一性標誌於動物分佈差異。然而在小鼠原位腦瘤模型當中，未能有效看到血腦障壁受到破壞的情況，以至於放射性標誌抗體無法順利抵達腫瘤(下圖 B)。而雖然於第一年研究中即時轉換模型為皮下腫瘤，仍可達到傳統隨機與專一性標誌比較的目的，但恐皮下腫瘤與原位腫瘤的腫瘤微環境不同，又與臨床患者腫瘤有所差異，或使皮下腫瘤研究結果不具代表性。鑒於多篇期刊已證實許多小分子抑制劑具有靶向腫瘤 PD-L1 並阻止其與免疫細胞上 PD-1 接合的能力[11-13]，故第二年計畫致力於開發標靶 PD-L1 之小分子藥物，搭配上短半衰期之核種 F-18，擬於第二年計畫建立可動態觀測原位腦瘤經 BNCT 造成 PD-L1 表現量變化之影像平台，並進一步探討 BNCT 合併 PD-L1 治療之可行性。

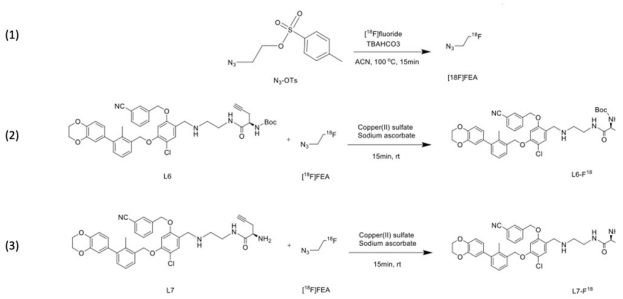


III. 結果與討論

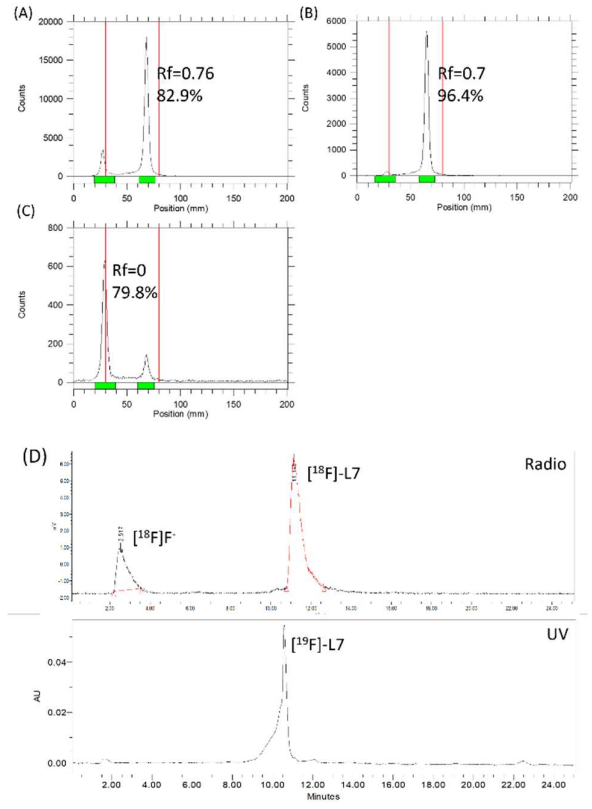
前驅物合成方法參考 Miao 等人的方法[11]，合成步驟如下圖，將 3-溴-2-甲基苯甲酸經由還原反應、宮浦耦合反應(Suzuki-Miyaura coupling reaction)、光延反應(Mitsunobu reaction)、烷基化(alkylation)、還原胺化反應(reductive amination)、水解及醯胺鍵合成(amide bond formation)前驅物，用於製備氟標誌小分子 PD-L1 藥物。



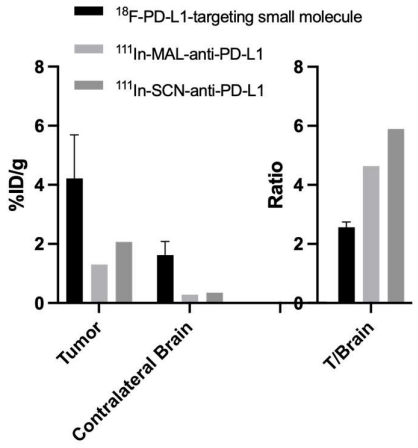
使用上述前驅物已成功製備氟標誌標靶 PD-L1 之小分子藥物，合成步驟如下圖



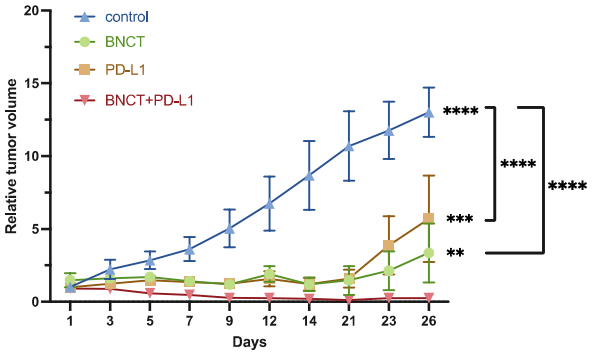
製備過程須先將 F-18 標誌於 1-疊氮基-2-氟乙烷([^{18}F]FEA)上，再以 click chemistry 反應將其與前驅物 L6 或 L7 接上。測試結果發現使用前驅物 L6 結果較為理想。 [^{18}F]FEA 標誌效率為 82%(下圖 A)，粗產物在氮氣流(5mL/min)下於 50℃將[^{18}F] FEA 蒸餾至冰浴下含有乙腈(0.1mL)的捕集瓶中，收集到的化合物[^{18}F] FEA 的放射化學產率為 68.7%(經過衰變校正)，蒸餾效率為 72.9%，純度為 98.6%(下圖 B)。將純化後之[^{18}F]FEA 與 L7 進行 click chemistry 獲得最終產物，反應效率約為 70%(下圖 C)，並以 HPLC 分出氟標誌標靶 PD-L1 之小分子藥物(下圖 D)。

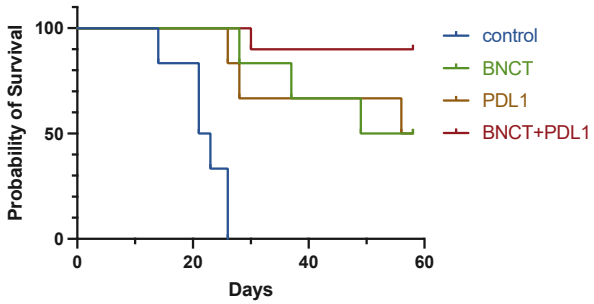


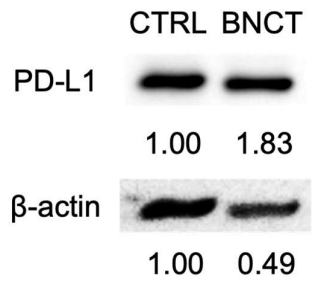
^{111}In-MAL-anti-PD-L1 與 ^{111}In-SCN-anti-PD-L1 分別為採用專一性與傳統隨機標誌，雖然可見 Tumor-to-Contralateral Brain Ratio(T/Brain)較高，但於腫瘤積聚量較低，即為第一年研究所觀察之小鼠原位腦腫瘤未能如同過往文獻所述破壞血腦障壁，致使放射性抗體無法到達腦腫瘤處，甚至在影像當中可視度降低。故於今年第二年計畫成功開發氟標誌標靶 PD-L1 之小分子藥物，可見其於腫瘤積聚量明顯提升。



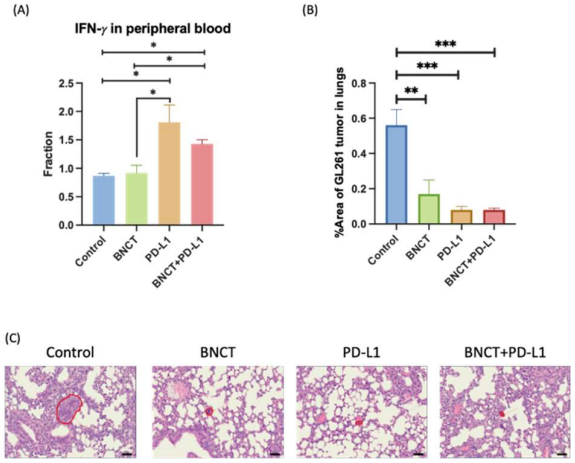
於第零天進行硼中子捕獲治療(500 mg/kg BPA-Fr)，隔日開始每隔三天注射一劑 anti-PD-L1 抗體(10F.9G2, 10mg/kg)，以腫瘤體積與存活率評估療效。控制組腫瘤體積隨時間持續增長，大約於 20 天超過人道犧牲大小，而單一治療組 BNCT 或 PD-L1 皆能有效達到腫瘤抑制，其痊癒率分別為 50%和 33%。合併治療組更可見加乘效果，痊癒率達到 90%，說明若以前述之免疫影像平台篩選硼中子捕獲治療後高表現 PD-L1 的病患，再給予 anti-PD-L1 合併治療，可為病患帶來新的治療希望。經 BNCT 治療後之原位腦神經膠質母細胞瘤，其 PD-L1 表現量較控制組增加 1.83 倍。







免疫分析觀察周邊血液之 IFN-γ含量，以及經尾靜脈注射 GL261 腦瘤細胞進行 rechallenge 試驗。透過 ELISA assay 測得 IFN-γ於 BNCT 單一治療中未能大量釋放，然 PD-L1 單一治療大量釋放 IFN-γ (下圖 A)，說明合併治療時釋放的 IFN-γ主要是受到 PD-L1 支配。而後續 rechallenge 試驗亦顯示與 IFN-γ相關，當 IFN-γ含量高的組別，有較小面積的腫瘤結節生成在肺臟(下圖 B 和 C)，或可說明周邊血液的 IFN-γ含量可代表全身免疫反應活化程度，並且誘發之免疫反應具有長期記憶能力。



IV. 結論

本研究成功開發氟標誌標靶 PD-L1 之小分子藥物，能穿透血腦障壁進入腦中以評估腫瘤 PD-L1 表現程度，且展示在 BNCT 後，使用放射性標記的抗 PD-L1 分子影像，顯示 GBM 腫瘤中 PD-L1 表達的上調。此外，與僅接受單一療法的組相比，結合抗 PD-L1 免疫檢查點阻斷(ICB)療法與 BNCT 的療效在治癒率方面明顯更高。這些結果有望成為未來制定臨床治療策略的重要參考。然而，近 70% 的患者對 PD-L1 免疫檢查點阻斷（ICB）治療無反應，且 PD-L1 的表達在腫瘤發展和治療過程中會發生變化，因此分子影像技術能夠非侵入性地評估腦腫瘤中 PD-L1 的表達量顯得更為重要，能有助於在 BNCT 後選擇合適的患者進行組合治療。

參考文獻

[1] Moon, B.S., et al., Epigenetic modulator inhibition overcomes temozolomide chemoresistance and antagoniz-es tumor recurrence of glioblastoma. J Clin Invest, 2020. 130(11): p. 5782-5799.
[2] Wang, J., et al., Clonal evolution of glioblastoma under therapy. Nat Genet, 2016. 48(7): p. 768-76.
[3] Lin, K.H., et al., Nuclear Theranostics in Taiwan. Nucl Med Mol Imaging, 2019. 53(2): p. 86-91.
[4] Chen, Y.W., et al., Salvage Boron Neutron Capture Therapy for Malignant Brain Tumor Patients in Compli-ance with Emergency and Compassionate Use: Evaluation of 34 Cases in Taiwan. Biology (Basel), 2021. 10(4).
[5] Quail, D.F. and J.A. Joyce, The Microenvironmental Landscape of Brain Tumors. Cancer Cell, 2017. 31(3): p. 326-341.
[6] Lamano, J.B., et al., Glioblastoma-Derived IL6 Induces Immunosuppressive Peripheral Myeloid Cell PD-L1 and Promotes Tumor Growth. Clin Cancer Res, 2019. 25(12): p. 3643-3657.
[7] Ravi, V.M., et al., T-cell dysfunction in the glioblastoma microenvironment is mediated by myeloid cells re-leasing interleukin-10. Nature Communications, 2022. 13(1): p. 925.
[8] Razavi, S.-M., et al., Immune Evasion Strategies of Glioblastoma. Frontiers in Surgery, 2016. 3.
[9] Xue, S., G. Song, and J. Yu, The prognostic significance of PD-L1 expression in patients with glioma: A me-ta-analysis. Scientific Reports, 2017. 7(1): p. 4231.
[10] Berghoff, A.S., et al., Programmed death ligand 1 expression and tumor-infiltrating lymphocytes in glioblas-toma. Neuro-Oncology, 2014. 17(8): p. 1064-1075.
[11] Lin, X., et al., Progress in PD-1/PD-L1 pathway inhibitors: From biomacromolecules to small molecules. Eur J Med Chem, 2020. 186: p. 111876.

應用於 CZT 感測器之四通道訊號讀取電路設計
Four-Channel Electronic Readout Circuit Design for CZT Detector Applications

計畫編號：NSTC 112-2623-E-A49-007 -NU
計畫主持人：盧志文
e-mail：cwlu@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：林伯昱
計畫參與人員：顧穎捷
執行單位：國立陽明交通大學

摘要

本研究計畫旨在為了符合矩陣式半導體輻射感測器專用之訊號讀取電路研究，一直以來提高輻射偵測靈敏度為輻射影像感測器之重要需求，且因為使用成矩陣式偵檢器可提供大面積範圍之有效輻射偵檢，而本研究所使用之 CdZnTe 半導體偵檢器(CZT)可獲得超高能量解析度與低輻射劑量辨識之技術優勢，故需建立矩陣式半導體輻射感測技術為開發高能量解析性能與高靈敏輻射偵檢系統之基礎。

在於此次研究中有設計了相關電路，電路是對於從輻射偵檢器(CZT)中所捕捉到的微小輻射訊號，會產生微小的電流，放大其微小的電流訊號轉換成電壓訊號，並對於其電壓訊號進行二次放大，且濾波去除雜訊，以得到想要之清楚及放大的輻射訊號，好進行後續的訊號處理轉換的進行。以提升訊號的清晰度和穩定性。這些技術不僅有助於改進偵測系統的性能，還為相關應用領域帶來了新的技術進展和應用潛力。因此，這種先進的信號處理系統有望在醫學影像、核能安全等領域中推動技術的發展和應用。

關鍵詞：CdZnTe 半導體偵檢器、CZT、碲化鋅鎘偵檢器、半導體輻射感測器、輻射影像感測器、輻射訊號。

Abstract

The purpose of this research is to study the signal reading circuits dedicated to matrix semiconductor radiation sensors. Improving the sensitivity of radiation detection has always been an important need for radiation image sensors, and because the use of matrix detectors can provide effective radiation detection over a wide range of areas, and the CdZnTe semiconductor detector (CZT) used in this research can obtain ultra-high energy resolution and low radiation dose recognition technology advantages, it is necessary to establish a matrix semiconductor radiation detection technology as the basis for the development of high energy resolution performance and high sensitivity radiation detection system. The CdZnTe semiconductor detector (CZT) used in this research can obtain the advantages of ultra-high energy resolution and low radiation dose recognition. Therefore, it is necessary to establish the matrix semiconductor radiation sensing technology as the basis for the development of a high-energy resolving performance and high-sensitivity radiation detection system.

In this research, the author has designed a related circuit; the circuit is from the radiation detector (CZT) to capture the small radiation signal, generate a small current, amplify the small current signal into a voltage signal, and the voltage signal for the second amplification, and filtering to remove noise, in order to get the desired clear and amplified radiation signal, so as to carry on the subsequent signal processing and conversion. This improves the clarity and stability of the signal. These technologies not only help to improve the performance of the detection system, but also bring new technological advances and application potential for related applications. Therefore, this advanced signal processing system is expected to promote the development and application of the technology in the fields of medical imaging and nuclear energy security.

Keywords: CdZnTe semiconductor detector, radiation image sensor, Cadmium Zinc Telluride detector, semiconductor radiation sensor, CZT, radiation signal.

I. 前言

在早期最常使用的輻射感測器為閃爍體探測器（scintillation detector）是一種通過利用電離輻射在閃爍體材料中產生的閃光來檢測輻射的裝置。這種技術被廣泛應用於物理學、醫學、核能和環境科學等領域，並在輻射探測器中佔有重要地位。早在 1903 年，威廉·克魯克斯便首次使用硫化鋅（ZnS）螢光材料來觀察鐳衰變產生的輻射，這一發現標誌著人們對輻射探測技術的初步探索。同時，盧瑟福在他的盧瑟福散射實驗中，也採用了硫化鋅螢光屏來觀測 α 粒子。

儘管早期的螢光材料在實際應用中面臨諸多挑戰，導致閃爍體探測器的技術進展一直緩慢。然而，1947 年時 Coltman 和 Marshall 的突破性工作—利用光電倍增管（Photomultiplier Tube, PMT）測量閃爍體內微弱的螢光光子，為現代閃爍體探測器的發展奠定了基礎。隨著光電倍增技術和相關電子學技術的不斷進步，各類新型閃爍體材料層出不窮，使得閃爍體探測器在性能和應用範疇上得到了顯著提升。

閃爍體探測器因其高計數效率、短分辨時間、操作簡便和廣泛適用性等優點，已經在多種應用中超越了傳統的氣體離子化探測器，並在 γ 射線譜的研究中展現了卓越的能力。無論是在核物理、醫學影像、環境監測還是基礎物理實驗中，閃爍體探測器都扮演了不可或缺的角色。

而在近代新發明的材料鎘鋅碲 CZT（CdZnTe）數位式探測器則代表了輻射探測技術的最新進展。這種探測器以其快速掃描、低輻射和高精確度的特性，為各類應用提供了卓越的影像品質。CdZnTe，即碲化鎘鋅，是由鎘（Cd）、鋅（Zn）和碲（Te）組成的化合物，實際上是一種碲化鎘（CdTe）和碲化鋅（ZnTe）的合金。作為一種直接帶隙半導體，CdZnTe 的帶隙範圍約為 1.4 至 2.2 eV，具體取決於其成分比例。

與需要冷卻的半導體材料（如鍺）不同，CdZnTe 探測器能在室溫下以直接轉換（或光電導）模式運行，這一特性顯著提高了其應用靈活性。得益於鎘和碲的高原子序數，CdZnTe 探測器對 X 射線和伽馬射線具有出色的靈敏度，並且其能量解析度通常優於閃爍體探測器。這些探測器可以被製作成各種形狀，以滿足不同的輻射檢測需求，並且已經開發出多種電極幾何結構，如共面網格和小像素探測器，以實現單極（僅電子）操作，從而進一步提升了能量解析度。

例如，一個 1 cm^3 的 CdZnTe 晶體在 30 keV 至 3 MeV 範圍內展現出良好的靈敏度，並在 662 keV 能量下達到 2.5% FWHM 的能量解析度。這些特性使得 CdZnTe 探測器在精確輻射檢測和高質量影像成像中具有顯著的應用潛力，也因此進行了相關放大訊號電路及元件的研究與應用。

II. 主要內容

如圖 1 則是本計畫所設計的單通道輻射訊號放大電路,其可以把從 CZT 感測器所感測到的輻射訊號進行放大並濾波的動作，使我們可以得到較為乾淨的輻射放大訊號，且為了放大其訊號藉由加入耦合電容來隔絕直流準位，僅讓交流訊號通過並進行放大。

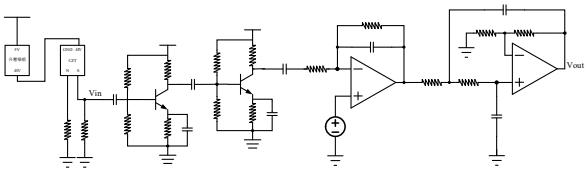


圖 1.輻射訊號放大電路

而此輻射訊號放大電路則是由五個部分所組成的，第一部分為高壓模組配 CZT 感測器，第二部分為 CE 共射極放大器，第三部分為 CE 共射極放大器，第四部份為 CR-RC 帶通濾波器，第五部分則是為二階 Sallen-Key 低通濾波器。其中在訊號在流經第二第三第五部分的電路會進行訊號放大，訊號在流經第四及第五部分的電路則是做濾波去除雜訊的作用。如下圖 2 所示的整體電路架構分解介紹。

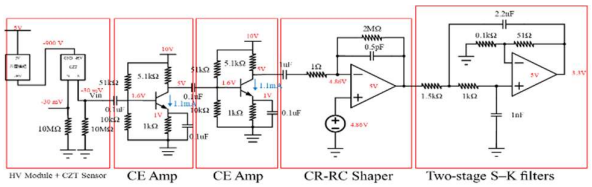


圖 2.輻射訊號放大電路各電路分解介紹



圖 3.高壓模組與 CZT 電路圖及實體圖

圖 3 為第一部分電路高壓模組配 CZT 感測器，其利用高壓模組供給高電壓給予 CZT 感測器工作，並於 CZT 感測器兩端陽極端接上大電阻 10M 歐姆，使其感測器所捕捉輻射粒子產生的電流可以藉由經過大電阻來產生一個電壓，方便使後面的電路進行處理。

第二及第三部分電路則是介紹 CE 共射極放大器 (Common Emitter Amplifier)，電路圖為圖 4 所示，其是主要負責整個放大電路訊號放大的關鍵，為了使其訊號被放大，需要設定其偏壓以及其放大倍率，以達到所想要的功能及效果，而為了放大倍率大又盡量不失真，且為了獲取較佳的輸出擺幅，設定其輸出的直流準位在 5V，再經由耦合電容來隔絕直流，放大其交流訊號，以得到想要的放大訊號，訊號經由利用二級 CE 放大器，訊號的經過共射極放大器電壓放大增益 Av ≈ RC/RE = 5.1K/1K 倍，約略為五倍一級，經過兩級會放大約 25 倍，可以獲得較為明顯之訊號來進行處理及分析。

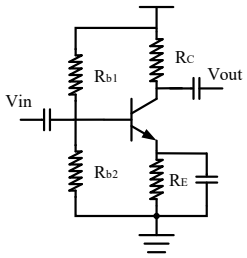


圖 4.CE 共射極放大器電路圖

第三部分則為 CR-RC Active shaper 帶通濾波器,其轉移函數如下圖 5

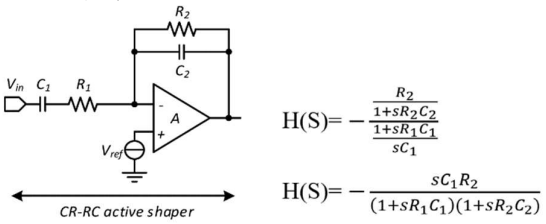


圖 5.CR-RC Active shaper 帶通濾波器電路圖及轉移函數

CR-RC Active shaper 帶通濾波器其主要的作用即是消除低頻及高頻不要之訊號,只擷取所需訊號通過,可以盡量消除所設計之高低頻雜訊。

第五部分電路則是二階 Sallen-Key 低通濾波器，其 Sallen-key filter 特點：1.高輸入阻抗，2.增益容易配置(利用 R5 和 R6 比例來進行增益調節),若無 R5.R6 則為單純之濾波器無增益，3.操作模式為電壓隨耦器(Voltage Follower)此次設計之 Q 值為 2.22，來使電路輸出盡量不震盪。

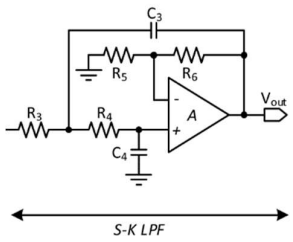


圖 6. 二階 Sallen-Key 低通濾波器電路圖

$$H(S)=\frac{K}{s^2(R_3R_4C_3C_4)+s(R_3R_4+R_4C_4+R_3C_3(1-K))+1} \qquad K=\frac{R_5+R_6}{R_5}$$

圖 7. 二階 Sallen-Key 低通濾波器轉移函數

並利用其以上電路來設計訊號放大電路，並佈局洗 PCB 單通道如下圖

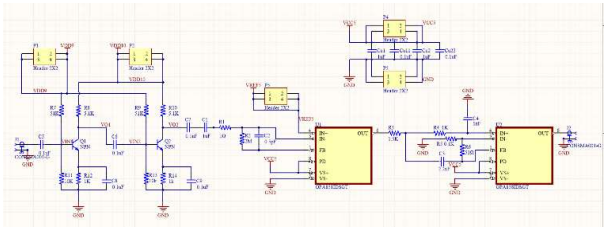


圖 8.單通道 PCB 原理圖

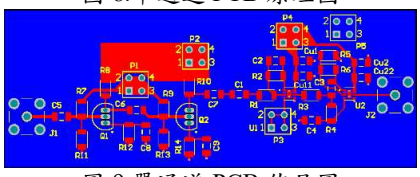


圖 9.單通道 PCB 佈局圖

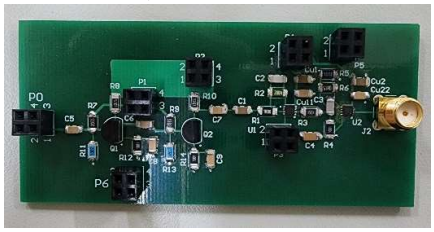


圖 10.單通道 PCB 實體並焊上元件照

雙通道之後的原理圖皆相同如下圖(本次設計共有 PCB 洗版 1、2、4、8 通道

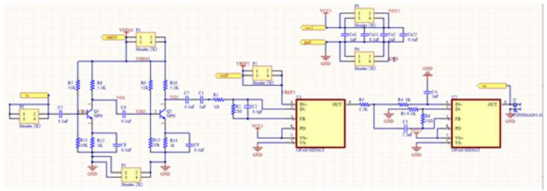


圖 11.雙通道 PCB 以上之原理圖(皆相同)

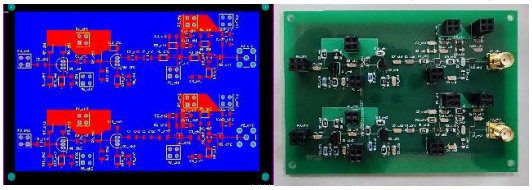


圖 12.雙通道 PCB 佈局圖及實體焊上元件照

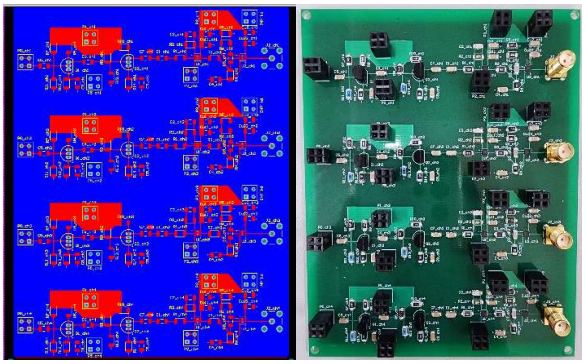


圖 13. 四通道 PCB 佈局圖及實體焊上元件照

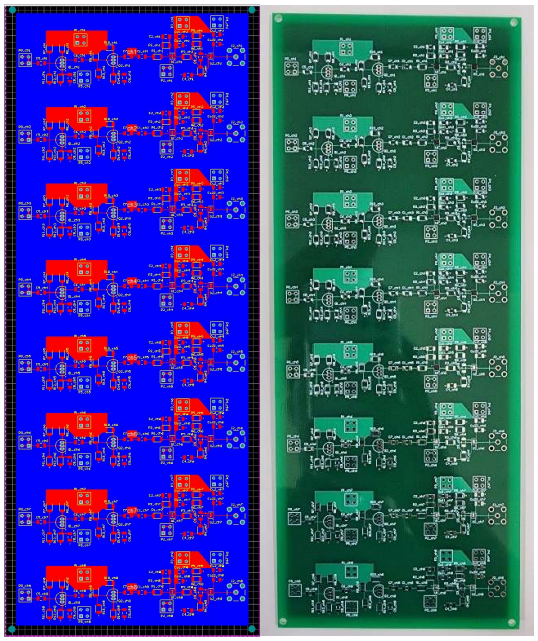


圖 14. 八通道 PCB 佈局圖及實體照

並再使用其設計好的 PCB 板，來焊上電路元件來進行量測，因其是為了作多通道的模組，所以電路接相同。

III. 結果與討論

用各種輻射量測 CZT(給予-850V)用於輻射訊號時之表現結果,無外接其他電路時,可以看到 CZT 感測器對各種輻射,接收到輻射訊號後的反應訊號樣貌。

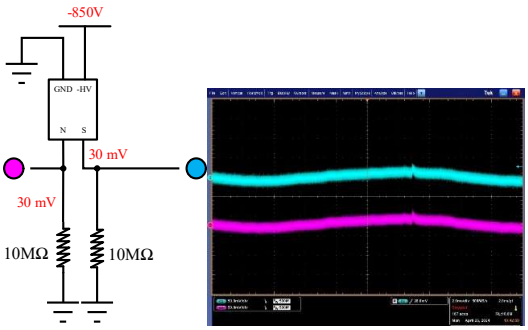


圖 15.(左)CZT 量測示意圖(右) CZT 偵測宇宙射線

並且可以明顯發現對於強輻射源波型，和其他輻射源的明顯差異，對於 CZT 感測能力有更為直觀的感受。

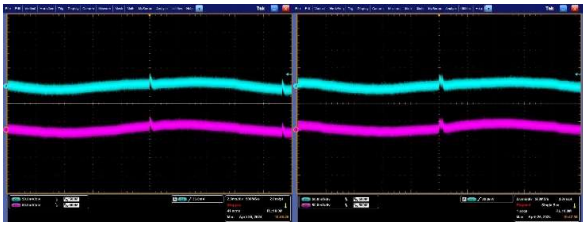


圖 16.(左) CZT 偵測弱輻射源(右) CZT 偵測強輻射源

確認 CZT 感測器無問題之後，再來設計訊號放大電路如下圖 15 所設計的參數，再來進行訊號輸出的量測。

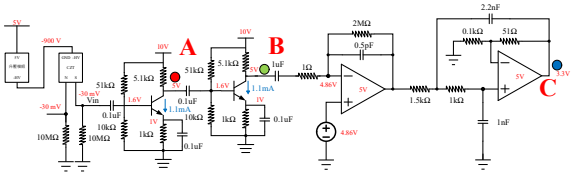


圖 17.單通道量測訊號輸出電路圖

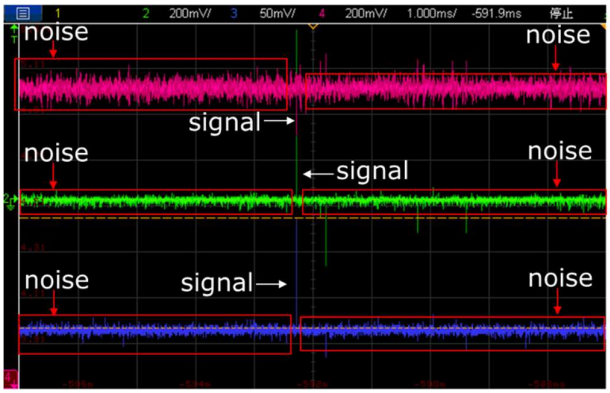


圖 18.量測訊號結果 1

Point	Asignal	Anoise	SNR(dB)
A	300mV	160mV	5.46
B	780mV	40mV	25.8
C	130mV	15mV	18.7

表 1. 圖 18 量測訊號各點 SNR

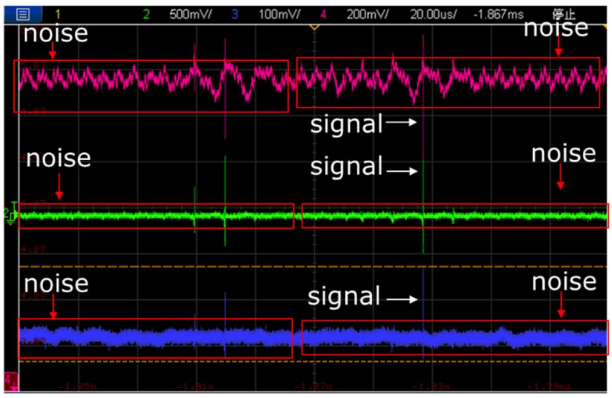


圖 19.量測訊號結果 2

Point	Asignal	Anoise	SNR(dB)
A	500mV	200mV	7.96dB
B	1V	100mV	20dB
C	200mV	40mV	13.9dB

表 2. 圖 19 量測訊號各點 SNR

$$SNR = \frac{Psignal}{Pnoise} = \left(\frac{Asignal}{Anoise}\right)^2$$

$$SNR(dB) = 10\log\left(\frac{Psignal}{Pnoise}\right) = 20\log\left(\frac{Asignal}{Anoise}\right)$$

SNR 計算公式

根據 SNR 公式計算，從表一及表二可以明顯發現到，原始訊號的 SNR 有著極大的變化，改善許多雜訊的干擾，其從圖 18 及圖 19 也可以明顯發現對於初始訊號是有顯著放大且去除雜訊之作用,在最後的輸出訊號中可以發現對於反向的放大訊號有進行抑制的作用。所以使用此架構進行設計是可以繼續優化且應用於多通道使用來作為訊號放大且濾波的電路。

IV. 結論

通過量測結果，計算其 SNR 可以明確地發現，本研究所設計之訊號放大電路，有著顯著的訊號放大及優化訊號之作用，這樣的效果對於訊號其後續設計應用讀取電路會更加的好處理及量測。

參考文獻

[1] K. T. Z. Oo, E. Mandelli and W. W. Moses, “A High-Speed Low-Noise 16-Channel CSA With Automatic Leakage Compensation In 0.35-um CMOS Process for APD-Based PET Detectors,” in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 54, no. 3, pp. 444-453, June 2007

[2] W. Gao, X. Li, H. Liu, Y. Hu, “Design and performance of a 16-channel radiation-hardened low-noise front-end readout ASIC for CZT-based hard X-ray imager,” Microelectronics Journal, Volume 48, 2016

[3] W. Gao et al., “Design and Characterization of a Low-Noise Front-End Readout ASIC in 0.18-um CMOS Technology for CZT/Si-PIN Detectors,” in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 65, no. 5, pp. 1203-1211, May 2018

[4] W. Gao, H. Liu, B. Gan, T. Wei, D. Gao and Y. Hu, “Design of a Multichannel Low-Noise Front-End Readout ASIC Dedicated to CZT Detectors for PET Imaging,” in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, no. 5, pp. 2532-2539, Oct. 2014

[5] W. Gao, H. Liu, B. Gan, Y. Hu, “Characteristics of a multichannel low-noise front-end ASIC for CZT-based small animal PET imaging,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 745, 2014

跨域合作與風險溝通(I)

培力民眾正確面對非核家園之核電廠除役素養觀整合計畫：新媒體溝通策略之解構與建構（2/2）

Empowering people to have the proper attitude towards the decommission of nuclear power plants: An integrated plan of construction and deconstruction of new media communication strategy (2/2)

計畫編號：NSTC 112-NU-E-128-001-NU
計畫主持人：林承宇
e-mail：cyou.lin@msa.hinet.net
計畫參與人員：張皓婷、劉偉俊、何佳蓉
執行單位：世新大學廣播電視電影學系(所)

摘要

本年度研究計畫（2/2）係根據前期（1/2）研究成果，針對五大社群媒體（PTT、Dcard、FB、IG、YouTube；含 PTT 主文、PTT 回文、Dcard 主文、Dcard 回文、其他討論區、Facebook 主文、Facebook 回文、Instagram 主文、Instagram 回文、YouTube 主文、YouTube 回文、其他社群網站、問答網站、部落格、新聞、新聞回文等）在「核電廠除役」議題上的討論數、聲量、與正負情緒比例的統計分析後，據以執行本年度研究計畫所聚焦的社群媒體上不同分眾使用者的質化研究深度訪談分析，將所設定的不同分眾予以態樣化後，採取不同分眾的「行為事例訪談法」（Behavioral event interview, BEI）與「重要事件訪談法」（Critical Behavior Interviews, CBI）進行細部訪談結果的整理與解構，作為原能會（現更名為「核安會」，本研究計畫執行期間仍以「原能會」作為本研究計畫之統稱）未來在運用社群媒體與民眾溝通核電廠除役議題時，能有效針對不同分眾，採取不同溝通模式與內容，促使原能會具備培力臺灣民眾正確面對非核家園的核電廠除役訊息，進而達到原能會未來在新媒體（社群媒體）上建構核電廠除役訊息時，有效發聲且有效分眾溝通。研究結果發現，為提升臺灣民眾正確理解核電廠除役的社群媒體訊息，首先須以建構「培力式」核電廠除役內容，促使臺灣民眾明瞭「台電」與「原能會」對於除役工作上的「職責不同」，並融入「素養導向式」的新媒體溝通策略，方能有效且精準地達到原能會未來在核電廠除役議題上的社群媒體溝通成效。其次，原能會在運用社群媒體發布核電廠除役訊息時，必須針對不同分眾（含性別、年齡、族群、教育程度、鄰近設施居民與否等五大變項），設計屬於原能會應有的核電廠除役新媒體溝通策略，將正確且有效的核電廠除役訊息與安全把關的機關形象，精準定位並傳達於新媒體上的不同臺灣分眾使用者。最後，本年度研究成果已為原能會建構適用新媒體（社群媒體）溝通的原則，針對核電廠除役議題的「分眾」溝通內容，擬定溝通策略與溝通準則，提供原能會未來在與不同新媒體分眾溝通核電廠除役議題時，能有效且正確地讓不同分眾正確理解原能會「確保核能安全」與「原子能民生應用永續發展」為主體的核電廠除役新媒體分眾溝通模式，作為未來原能會新媒體政策溝通策略的藍圖。

關鍵詞：核電廠除役、社群媒體、政策溝通、素養導向。

Abstract

The research for this year (2/2) is based on the research findings from the previous phase (1/2). After conducting statistical analysis on the discussions, volume, and ratio of positive and negative sentiments regarding the topic of “decommission of nuclear power plants” across five major social media platforms in Taiwan (PTT, Dcard, FB, IG, and YouTube: including their post & reply contents, other social networking sites, Q&A sites, blog, news and news reply content), qualitative method is conducted through in-depth interviews focusing on different user segments on these social media platforms, as per the objectives set forth in this year’s research. After characterizing the different user segments, the results of the detailed interviews are organized and deconstructed using “Behavioral Event Interview” (BEI) and “Critical Behavior Interviews” (CBI). This served as a basis for the AEC (now renamed as “Nuclear Safety Commission”, NSC. but this research still referred to as AEC during the execution of this research) to effectively communicate with different user segments on social media regarding the topic of nuclear power plant decommissioning, adopting various communication modes and content to empower Taiwanese citizens to correctly understand the messages about nuclear power plant decommissioning and thus enable effective communication and voice projection by the AEC in the future when constructing messages about nuclear power plant decommissioning on new media (social media) platforms, ensuring effective communication with different user segments. The research findings indicate that to enhance Taiwanese people’s correct understanding of nuclear power plant decommissioning messages on social media, it is firstly necessary to construct an “empowerment-oriented” content regarding the decommission of nuclear power plants. This aims to help Taiwanese people understand the “different responsibilities” of “Taipower” and “AEC” in decommissioning work, integrating a “competency-based literacy” new media communication strategy to effectively and accurately achieve the AEC’s future social media communication effectiveness on nuclear power plant decommissioning issues. Secondly, when the AEC disseminates messages about nuclear power plant decommissioning through social media, it must design nuclear power plant decommissioning new media communication strategies that belong to the commission and are aimed at different segments (including gender, age,

ethnicity, education level, proximity to facilities, etc.). This ensures that correct and effective nuclear power plant decommissioning messages and the image of safety oversight institutions are accurately positioned and conveyed to different Taiwanese user segments on new media platforms. Finally, this year's research results have laid out principles applicable to new media (social media) communication for the AEC, formulated communication strategies and guidelines for segmented communication content on "decommission of nuclear power plants" issues. These provide the commission with effective and accurate means to ensure that different segments correctly understand the AEC "ensuring nuclear safety" and "sustainable development of atomic energy applications for people's livelihoods" as the main themes of nuclear power plant decommissioning new media segmented communication models. This serves as a blueprint for the AEC's future new media policy communication strategies.

Keywords: decommissioning nuclear power plants, social media, political communications, competency-based literacy.

I. 前言

本研究計畫延續前一年「培力民眾正確面對非核家園之核電廠除役素養觀整合計畫：新媒體溝通策略之解構與建構（1/2）」計畫之研究設計軸線，研究核心首在「解構」我國能源轉型下的原子能安全管制重點業務在新媒體（尤其是社群媒體平台）如何被討論與再現；透過對臺灣新媒體中的五大主流社群媒體（PTT、Dcard、FB、IG、YouTube；含 PTT 主文、PTT 回文、Dcard 主文、Dcard 回文、其他討論區、Facebook 主文、Facebook 回文、Instagram 主文、Instagram 回文、YouTube 主文、YouTube 回文、其他社群網站、問答網站、部落格、新聞、新聞回文等）在「核電廠除役」議題上的討論數、聲量、與正負情緒比例的細部統計與分析後（請參見前一年的結案報告），在原設計二年研究期程的本年度研究計畫中，即以著重於「建構」原能會應如何將核電廠除役議題運用新媒體／社群媒體再現模式正確發聲，並為原能會建構新媒體／社群媒體聲量、對不同分眾的正確核電廠除役素養觀等不同面向訊息，以促進原能會在核電廠除役議題的新媒體／社群媒體再現正確形象。蓋配合國家能源轉型政策與「核安守護」的跨世代工程與責任，核電廠除役的公共事務議題，實有必要考量不同群體的不同分眾溝通策略，尤其當前新媒體（尤其是社群媒體）已是國人接近使用最高的主要媒體，在解構不同的分眾民意動態後，確有必要以此基礎進一步建構不同分眾的新媒體溝通策略，以增進多元群體正確理解原子能有關公共事務的機會，並促使不同分眾群體參與該公共議題的討論與近用媒體訊息能力，以為原能會在公共政策與媒體溝通上達到事半功倍的政策溝通效果。而核電廠除役的安全議題，正是能源轉型中不可或缺的政策溝通議題。

綜觀過去原能會為了落實核電廠除役資訊公開透明的原則，曾嘗試運用各種親身接觸的傳播方式，也透過官方網站資訊公開、公眾參與平台或相關文宣等，期望以多元且快速的方式與民眾做有效的政策溝通；惟從原能會在核電廠除役工作主司「安全管制」的核心主軸看來，過去原能會與民眾溝通的成效似乎並沒有將原能會把關的核電廠除役「安全形象」建構得很清楚，反而在許多核廢料汙染議題上糾纏不清（橘報，2019；風傳媒，2019；關鍵評論，2018），此即造成原能會並沒有回歸「安全把關」的政府組織本質上，甚為可惜；尤其任何政府的公共政策若無法在「媒體」載具上取得發聲優勢，除了容易產生民眾的誤解外，更會造成未來政策施行的種種障礙。檢視「核電廠除役」的既定公共政策議題，未來核一廠在 25 年的除役工作期間，原能會勢必需要因應新媒體載具的普及，思考如何透過新媒體溝通的新命題等，都是必要且迫切深入探究的政策溝通議題。之所以必須著重新媒體的溝通策略，主要原因在於核一廠作為第一座除役電廠，未來還有核二、核三等核電廠除役（分別為 2023 與 2025 年使用期限到期除役）緊接在後，如何將核電廠除役的新媒體有效溝通方式進行系統式的建構，實應「超前部屬」以有效且正確的溝通訊息作為核電廠除役的政策溝通重點。而檢視核電廠除役二大工作流程，前置作業的第一工作階段 2012-2018 年係由經營的公司台電進行核電廠址歷史及特性調查、除役策略及作業研究等，並進行除役規劃、提報除役計畫書；在進入 2019-2043 年的第二階段除役執行工作時期，則由負責該除役期間各項核能安全檢查的原能會職掌包括將核子反應器內的用過核子燃料移出至用過核子燃料池、全系統除污與個別系統除污、將用過核子燃料自用過核子燃料池移除（移至暫貯中心或乾式貯存設施）、反應器壓力槽及大型組件拆除、切割與移除、廠區混凝土表面的除污與廠房的拆除、有害及放射性廢棄物之貯存與清運、執行廠址環境輻射偵測並完成廠址復原等。而原能會在除役工作期間主要的任務猶如其 1955 年設立時的主要目的：「以輻安核安民眾心安、日新又新專業創新」作為完善國家核能及輻射安全監督機制的單位，將執行各項核電廠除役作業的查核，以確保除役工作的安全為要務。

而本研究計畫在第一年（1/2）以「多元資料蒐集法」中「文件分析法」的具體操作模式，將 OpView 社群媒體平台完整撈取近 3 年（2019-2021）關於核電廠除役在新媒體上的 46849 筆文件再現內容，進行邏輯性且有意義的編號，以文件的樹狀關係圖「解構」新媒體在核電廠除役議題的再現狀況後發現，「核電廠除役」議題的在新媒體／社群媒體平台上的討論數、聲量、與正負情緒比例的統計大致為：社群媒體對於核電廠除役議題的「負面情緒比例」比「正面情緒比例」高（33.16% vs. 6.96%；中立情緒發言為：59.88%）；主要的負面聲量以清楚的「擁核」與「反核」立場的「指責」為主（以不同立場的相互指責內容為主）；而主要的「正面聲量」則以活動公關稿為主；「中立聲量」主要環繞於國內事實與國際核電廠除役狀況的事實討論；第一年研究成果透過大數據文字雲的模式處理亦與上述發現吻合。基此，從提升臺灣民眾正確理解並參與核電廠除役的公共議題角度著手，培力民眾充分掌握台電與原能會對於除役工作的「職責不同」外，若欲進一步以素養導向的溝通模式建構原能會在核電廠除役安全管制的訊息建構，以最有效、最正確的溝通模式產製新媒體溝通訊息內容，則有必要針對不同新媒體受眾設計屬於原能會應有的核電廠除役新媒體溝通策略，以正確、有效地建構原能會

在核電廠除役安全把關的形象定位。因此，本年度延續前一年研究計畫的理路，確有必要為原能會「建構」適用「新媒體」核電廠除役安全管制「分眾」溝通訊息，以促進原能會與不同新媒體分眾的正確建構核電廠除役有效政策溝通，以開創原能會建構正確核能安全與原子能民生應用永續發展為主體的核電廠除役新媒體分眾訊息。

為有效地掌握臺灣閱聽眾在新媒體上如何討論核電廠除役議題狀況，本年度研究計畫延續了第一年的具體研究操作模式，除了將持續透過社群口碑平台（如 OpView 等）資料庫分類、輔以研究人員的細部人工資料整理，以區分出不同分眾類型與討論內容的類別外，本年度運用文件分析法將資料類型化（patterns）之後，區分不同對象（分眾）進行深入的質化訪談與解析，以區別過去原能會多以仰賴量化／民調模式瞭解民眾對原能會形象認知與態度的調查。本年度研究計畫持續整理了過去五年（2019-2023）新媒體中的五大主流社群媒體（PTT、Dcard、FB、IG、YouTube；含 PTT 主文、PTT 回文、Dcard 主文、Dcard 回文、其他討論區、Facebook 主文、Facebook 回文、Instagram 主文、Instagram 回文、YouTube 主文、YouTube 回文、其他社群網站、問答網站、部落格、新聞、新聞回文等）在「核電廠除役」議題上的討論數，區分不同分眾（以人口學變項、社群分類等：依據過去原能會委託民調研究與本研究計畫所運用的社群口碑平台分類予以交叉比對）進行質化的深度訪談後詳細分析，據此以呈現本研究計畫「建構」原能會在核電廠除役議題上，如何運用新媒體／社群媒體再現模式的正確發聲模式，並為原能會擬訂不同分眾的新媒體載具溝通策略內容，提供原能會相關處室未來在運用新媒體溝通時之參考。實際進行的訪談進行方式係以突破過去傳統的「深度訪談法」或「焦點團體法」的訪談框架，除了先以社會學門領域經常運用的「詮釋現象學」（hermeneutic phenomenology）作為分析與擘劃原能會的新媒體傳播內容態樣（communication patterns），在對應出不同的分眾態樣後，本研究計畫針對不同的受眾採取「行為事例訪談法」（Behavioral event interview, BEI）與「重要事件訪談法」（critical behavior interviews, CBI）進行細部探討原能會有效社群媒體溝通推廣效益，以達本研究計畫欲以建構原能會未來在新媒體政策溝通、宣傳、議題推廣等新媒體發聲的依據與參考。

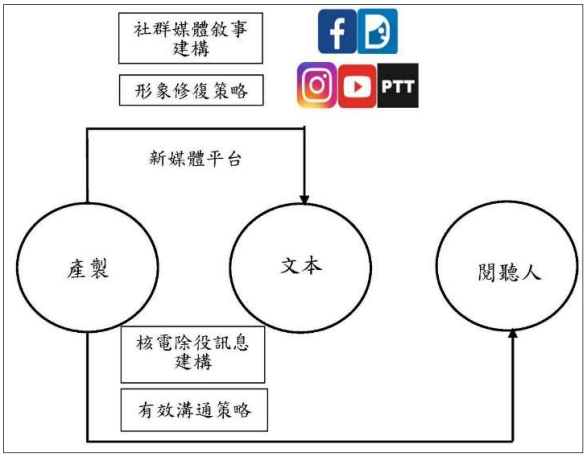
II. 主要內容

聚焦本研究計畫原始所欲探究與解決的命題「核電廠除役議題」究竟在新媒體上是如何被再現的、以及面對這樣的新媒體再現實情，原能會應如何就現有核電廠除役的新媒體再現實情，規劃並具體產製出未來是項議題的新媒體應對方式與再現內容，此即為本年度研究計畫的核心。根基於這樣的命題框架，若欲以實踐研究目標並具可行性，首先從傳播研究中最常運用的 HUB 傳播模式予以檢視便可明瞭公部門媒體溝通的梗概。早在 1967 年即有傳播學者經由相關的傳播研究發現在傳播結構中，至少包含了 15 項明顯與具體的傳播結構成份（conceptual components），分別為（1）意念／語文表達；（2）瞭解／達成；（3）互動／關係／社會交往過程；（4）去除不確定狀態；（5）過程／傳輸；（6）移轉／交換；（7）連鎖／聯接；（8）建構共有；（9）載具／通路；（10）重現回憶；（11）反應行為的驅使／對應行為的修正；（12）刺激；（13）一種意識行為；（14）時空／情境；（15）權力等（Dance, 1967），此即說明傳播的再現模式有其複雜性。後又因傳播研究的日趨發展，相關傳播模式的研究討論亦有將傳播過程修正為 12 項結構因素，即（1）內容（content）；（2）傳播者（communicators）；（3）符碼（code）；（4）媒介守門人（gatekeepers）；（5）大眾媒介（mass media）；（6）管理者（regulators）；（7）濾器（filters）；（8）閱聽人（audience）；（9）效果（effects）；（10）噪音／干擾（noise / distortion）；（11）媒介的擴大作用（media amplification）；（12）回饋（feedback）等（Mcquail, 2010），仔細分析與整理傳播歷程的要件，不論是 15 項或 12 項影響傳播過程的元素，大致可以 HUB 傳播模式的三大面向「產製面」、「文本面」與「閱聽人面」來理解傳播的構成與效果，而此即為本年度研究計畫設計模式的必要性：根據本研究計畫所欲處理的「新媒體再現命題」需要同時兼顧「文本面」與「閱聽人面」進行核電廠除役的新媒體再現態樣，才能進一步深入探討其更細部的內容特點，例如文本面著重於製碼與解碼的過程；閱聽人面著重於接收分析的效果反映等，均須就文本面與閱聽人面的細項深入為之，方能精準探究其傳播溝通模式的變化，也才能進一步設計出不同的產製內容。尤其新媒體載具相較於過去傳統媒體「由上而下」的單向傳播模式，其多向、互動、即時、打破時空的新傳播態樣，從文本面與閱聽人面雙向同時交叉切入本命題有其必要。

其次，有關「核電廠除役」的新媒體呈現內容，過去已有相關研究整理出過 2015-2018 年核電廠除役的重大事件的輿情聲量後發現，民眾對於是項議題的「關鍵字」討論的聲量係以聚焦「原能會」與「台電」分屬第一、二名（黃東益、董祥開、傅凱若，2020）。就這樣的趨勢顯示看來，民眾對於核電廠除役這個議題的理解大多會直接與這兩個單位有所連結，這似乎是一個正確的方向，因為原能會與台電正是核電廠除役這個議題最直接相關的單位。然而，從過去的文獻中卻無法精準呈現民眾到底能否掌握原能會與台電兩單位雖與核電廠除役雖有直接相關，惟其負責的任務與範圍卻大不相同。透過前一年度的研究發現，民眾在訊息的理解上確實已經產生「台電」與「原能會」二者權責不同所發生的「文不對題」、或「錯誤權責」的理解。而核電廠除役主要包含停機過渡階段、除役拆廠階段、廠址最終偵測階段、以及廠址復原階段等四個過程，總共需耗時 25 年時間才能夠完成除役的正確流程，前一年的研究一顯示，民眾確實無法正確理解各階段所屬單位的權責與具體運作上的不同；又原能會雖於 2019 年大力倡導「核能一廠除役之安全管制」內容，包括「核一廠除役安全管制作業規劃」、「確保機組從運轉期間安全轉換至除役」、「確保除役期間核子燃料安全」、「核發除役許可後之安全管制」和「公眾參與及資訊公開」等權責內容試圖與民眾充分溝通，也就是，原能會自民國 44 年（1955 年）成立以來，這個以「輻安核安民眾心安、日新又新專業創新」作為完善國家核能及輻射安全監督機制的單位，從對核能相關業務的厚植專業人力、強化意外事故應變能力、確保原子能和平用途並資訊公開透明、為民眾核能安全

嚴格把關等方針當作願景，不論就其單位對核能相關業務的專業性、嚴謹度與透明度，甚或是對於國內核能電廠、核子設施及輻射作業場所的安全監督，毫無疑問係以「增進民生福祉」的核能安全與原子能民生應用的永續發展盡最大努力為職志；與民國 35 年（1946 年）成立的台電對於核電廠主責營運績效的管理，事實上兩單位對於核電廠的專責大相逕庭。從第一年的研究成果上發現，新媒體（社群媒體）使用者對於上述權責問題的發表主文、回文、其他社群網站主回文、問答網站、部落格、新聞與新聞回文等，呈現負面（情緒）聲量與不正確的主文與回文內容，比正面（情緒）聲量與正確的主人與回文內容高出三倍之多。因此本年度研究計畫從具體的媒體「文本面」與「閱聽人面」不同面向進行深入整理與研究，瞭解傳播文本包含什麼態樣（pattern）、製碼（coding）如何敘事、內容如何形成（content）；受播的閱聽人（受眾）如何分類、如何產生效果、回饋了什麼、透過什麼傳播管道等，予以類型化之後，進一步規劃與擘劃出更貼近民眾（不同分眾）的核電廠除役訊息產製，以達到更具效果的新媒體政策溝通。整體研究設計與執行內容如下圖 1 所示。

圖 1：本年度研究計畫聚焦之研究脈絡



資料來源：作者創建與整理

據此，本年度研究計畫聚焦新媒體再現，主要係為區別過去研究多著重於傳統媒體的媒體溝通策略。而在當前媒體匯流的社會現實下，任何政策溝通顯然有必要調整、並能以開創且瞭解不同世代閱聽人的不同可能性為主軸，因此以新媒體／社群媒體作為文本面與閱聽人面的訊息管道，除可彌補過去以來不管是原能會在訊息設計上的盲點，更可提供未來更具多元產製核電廠除役新媒體訊息的可能性。過去不管是原能會（即使是台電），在與民眾進行政策溝通時，大多嘗試運用像是說明會、聽證會、現場參訪、校園宣導與園遊會等；或是後來運用官方網站資訊公開、公眾參與平台、社群網站、電子文宣等，即是期望透過多元而快速的方式，與民眾搭起連結與信任關係，試圖讓民眾更了解核電廠除役的內容與程序。然而，隨著時代進展，溝通方式的傳播載具（channels）多了，若無法從上述文本面與閱聽人面進行深入抽絲剝繭，任何所為的溝通內容可能都會事倍而功半；反之，如能從文本面與閱聽人面進行訊息、不同分眾的盤點與分類（如本年度研究計畫之規劃），後續的新媒體訊息產製方式（criterions）才有辦法進一步獲得最佳的政策溝通效力。這正是本年度研究計畫以培力不同分眾正確面對非核家園之核電廠除役素養觀為目標的主因。總此，依循前所論述脈絡，本年度研究計畫已涵蓋以下不同層面的探討：其一，全面盤點完過去原能會於新媒體（尤其是社群媒體）中對於核電廠除役安全把關議題的再現狀況，以及原能會對於現有的社群媒體內容所再現的內容應有的反應為何，深入分析與解構原能會對於核電廠除役議題所處的社群媒體訊息建構的 SWOT 實況，作為未來擬定原能會正確產製核電廠除役政策溝通新媒體載具宣傳內容的依據；同時，藉此形塑與建立原能會回歸原子能專業、安全把關的政府單位，以達「撥亂反正」核能除役知識正確性的目標。此新媒體溝通策略作為促使原能會回歸科學中立、核能安全把關、依法行政的政府單位，不會隨著政治立場的質疑、社群媒體再現的偏頗、抑或因核電除役議題不同發展的質疑而有所流動。其二，不同的分眾在新媒體載具中對於核電廠除役的看法，與不同分眾本身對於核能的知識素養觀（competence）有密切相關性；而對於原能會的屬性理解也是一項非常重要的「中介變項」。此係不同分眾對於新媒體再現的訊息分析與評估素養觀（competency-based literacy），也是對核電廠除役議題是否轉變為決定該議題／該政府單位如何被理解的成熟度（林承宇，2014）；易言之，原能會必須從新媒體屬性的敘事架構下，作為倡導民眾正確獲取核電廠除役的訊息，同時培力不同分眾對核電廠除役相關的健康識能養成，促使不同分眾對核電廠除役不再有錯誤疑慮，並能建構原能會成為政府客觀中立的安全把關原子能「專業形象」的概念才有可能達到事半功倍的傳播效果。

因此，本年度研究計畫之所以從培力民眾正確面對非核家園之核電廠除役素養觀出發，聚焦「新媒體溝通策略之建構」這個較為宏觀的命題基礎，即是為將上述二個層面處理所設定的新媒體文本再現分析與閱聽眾接收分析促使研究更具成效，藉此解決上述所提的問題意識，期待為原能會精準重新建構核能安全把關的正確形象與促進不同分眾的政策溝通雙贏、多贏局面。

III. 結果與討論

延續第一年研究成果，本年度研究計畫將採用以下的研究方法與具體研究步驟予以完成。從第一年研究內容所預設的核電廠除役在新媒體上的再現命題看來，係以「多元資料蒐集方法」為主要研究方法。從研究方法文獻的討論可得知 Wolcott 的觀點所提出的質性研究樹狀圖，主要係強調質性研究的資料來自於日常生活，資料蒐集的技術大致可以歸類為體驗（experiencing）、探索（enquiring）和檢視（examining）三種類型，也就是觀察、訪談與檔案研究（檔案文件、研究文物），在質性的研究方法中，訪談、觀察和文件資料的蒐集資料是常用的方法（李政賢譯，2011）。簡單地說，Wolcott 認為研究人員如果要尋求最廣角的視野，不會只依賴研究單一策略，為了站在研究的有利位置，研究者可以視需要混合數種主要策略，採取廣義的參與觀察以蒐集足夠的資料，達到所謂的厚實描述（thick description）及理論飽和（theoretical saturation）（李政賢譯，2011）。因此，本研究計畫的質性研究確有必要採取多元資料蒐集方法，以進行較為全面與廣泛的方式尋得有關原能會近 5

年來如何在新媒體，尤其是社群媒體的再現全面性搜尋、分類與整理。更細緻的具體研究方法的操作，本研究計畫前一年度藉由「文件分析法」（document analysis）作為資料蒐集的研究方法，並運用社群口碑分析平台意藍資料庫（以下簡稱 OpView），將最近的 3 年（2019-2022）所撈取的社群媒體資訊，進行系統性分析。宜說明者在於，本研究於此階段係以第一手資料調查，且係以質性研究方法為主，惟針對本研究所選定的研究命題觀之，本研究計畫除了對原能會過去的發展脈絡以歷史性的統計方式整理外，亦會輔助以必要的量化研究方法為之，例如內容分析法的採用即係為方便理解過去的媒體再現文件的蒐集與分析，特此說明。有關 OpView 撈取社群媒體資料的具體作法主要著重於快速蒐集社群、討論區動向，OpView 資料庫涵蓋 2 萬個來源，OpView Insight 觀測服務方案是一款社群網路動向分析的雲端服務，可協助蒐集、分析本研究所設定的五大社群媒體 PTT、Dcard、FB、IG、YouTube 等網路社群媒體資訊，並內建語意分析與報表統計等功能。而按照 Altheide（1996）所指出的質性文件分析法中，研究者可以透過挖掘歷史文件或日常生活的紀錄、筆記圖片、印刷品、報紙、雜誌等，勾勒及傳遞研究者內心圖像與文件本身所賦予深層意義的方法，因此有關核電廠除役在新媒體再現的實際狀況，本研究計畫透過詳實回應所設定的研究主軸，並呼應 Altheide 認為文件分析法得以一種重視概念發展、結合尋找、確認、恢復和分析文件的關聯性、重要性及其意義的方法、程式及技巧，進而完整呈現研究命題的內容。完成文件分析後，再以所整理分析的文件進行脈絡分析（pattern analysis），解構有關原能會在新媒體再現的形式，作為本年度新媒體文本建構的具體依據（蔡素琴、洪雅鳳、劉淑慧，2014），同時也作為本年度培力不同分眾正確核電廠除役素養觀新媒體溝通策略的主要依據。

具體的研究方法操作方式，主要係為詳實反應調查與分析臺灣民眾對於核電廠除役知識素養觀的實情，根據 Ritchie & Lewis (2003) 的看法，以不超過 50 人的訪談為要；而 Lincoln & Guba (1985) 亦認為訪談取樣人數最少 12 位，最多不超過 20 位，就可以達到飽和點。本年度研究計畫為避免遭遇質疑，例如：樣本取樣少、如何類推、以及如何知道個案具有代表性等，係以不同典範的思維詢問其問題，就是所謂的「第三類型錯誤」（高淑清，2008）；因此在研究計畫中實際進行的訪談法係以突破過去「深度訪談」或「焦點團體法」的訪談模式，以運用「詮釋現象學」（hermeneutic phenomenology）作為分析傳播態樣（communication patterns）後，針對不同受眾採取「行為事例訪談法」（Behavioral event interview, BEI）與「重要事件訪談法」（critical behavior interviews, CBI）進行更深入的探討原能會本質屬性的推廣效益，以供未來原能會在新媒體／社群媒體宣傳、議題推廣的重要依據與參考。實際對象係根據前一年度所完成的成果與接續的社群口碑平台資料庫的具體內容（實際訪談前所進行的嚴謹分析與區分），訪談對象區分為：

(1)第一類型差異對象：人口學變項的受眾，包括性別、年齡（依據新媒體使用習慣分類）、群體（不同族群，分原住民與非原住民等變項）；

(2)第二類型差異對象：學歷（依據國民教育、高中、大學、研究所等變項）、居住地點（城鄉差距等變項）；

(3)第三類型差異對象：其他新媒體社群等變項（依據社群口碑平台資料庫之分類）等。

另根據上述研究設計所提及質化研究，本年度研究計畫選用行為事例訪談法（BEI）與重要事件訪談法（CBI）的分眾訪談運用，主要乃為促使本議題更多活化的可能性。本研究計畫實際 BEI 與 CBI 訪談對象係依據前一年研究成果所接續的社群口碑平台資料庫的具體內容，總計訪談對象共計 22 位，已符合 Lincoln & Guba (1985) 所提出的訪談取樣人數最少 12 位為標準。訪談時間為 2023 年 3 月到 9 月底之間，全數完成 22 位受訪者，並於 10-11 月二個月中全數完成逐字稿。實際訪談名單如下：

表 1：本年度研究計畫訪談對象與編碼說明之整理

編號	性別	變項：性別、教育程度、族群、年齡、鄰近區	訪談方式與逐字稿編碼
1.	女	大學、一般住民、52 歲、非鄰近區居民	BEI20230324FUNb52Non-01
2.	男	碩士、一般住民、58 歲、非鄰近區居民	BEI20230412MGNb58Non-02
3.	男	國中、一般住民、62 歲、非鄰近區居民	BEI20230413MJNb62Non-03
4.	女	國中、一般住民、61 歲、非鄰近區居民	BEI20230419FJNb61Non-04
5.	女	碩士、一般住民、27 歲、非鄰近區居民	BEI20230428FGNb27Non-05
6.	男	大學、一般住民、29 歲、非鄰近區居民	BEI20230504MUNb29Non-06
7.	女	碩士、一般住民、38 歲、非鄰近區居民	BEI20230508FGNb38Non-07
8.	男	博士、一般住民、40 歲、非鄰近區居民	BEI20230516MGNb40Non-08
9.	男	大學、一般住民、24 歲、非鄰近區居民	BEI20230529MUNb24Non-09
10.	女	大學、一般住民、22 歲、非鄰近區居民	BEI20230607FUNb22Non-10
11.	女	高中、一般住民、35 歲、非鄰近區居民	BEI20230620FSNb35Non-11
12.	男	高中、一般住民、32 歲、非鄰近區居民	BEI20230629MSNb32Non-12
13.	男	大學、原住民、28 歲、非鄰近區居民	CBI20230705MUNa28Non-13
14.	女	大學、原住民、26 歲、非鄰近區居民	CBI20230711FUNa26Non-14
15.	女	高中、原住民、45 歲、非鄰近區居民	CBI20230719FSNa45Non-15
16.	男	高中、原住民、48 歲、非鄰近區居民	CBI20230726MSNa48Non-16
17.	男	國中、一般住民、63 歲、鄰近區居民	CBI20230807MJNb63Ned-17
18.	女	國中、一般住民、60 歲、鄰近區居民	CBI20230819FJNb60Ned-18
19.	女	大學、一般住民、21 歲、鄰近區居民	CBI20230831FUNb21Ned-19
20.	男	大學、一般住民、23 歲、鄰近區居民	CBI20230904MUNb23Ned-20
21.	男	高中、一般住民、43 歲、鄰近區居民	CBI20230920MSNb43Ned-21
22.	女	高中、一般住民、47 歲、鄰近區居民	CBI20230926FSNb47Ned-22

資料來源：作者創建之研究編碼與統整

根據上表所整理訪談對象所採用的訪談方式，宜說明者在於雖然 BEI 與 CBI 訪談法均屬於深度訪談的類似模式，惟二者在實際的訪談操作上仍與傳統的深度訪談有些許的不同，尤其在針對不同「群體」的深度訪談上，CBI 訪談法更能彰顯受訪者更細微的深度意見，並能更有效地回應研究所需要的不同面向觀點。因此，在本研究計畫所設定的「族群」中，「原住民」與「核電廠範圍居民」二種類型的對象，以 CBI 訪談法進行訪談，會比傳統的深度訪談與 BEI 訪談法更為貼切。而本研究計畫所謂的「鄰近核設施區」，根據研究設定與樣本選定，同時兼顧方便取樣與可行性，具體訪談對象的範圍係指新北市貢寮區、萬里區、石門區、金山區、三芝區等四個里；基隆市中山區五個里、安樂區四個里、七堵區三個里為主要方談對象的來源。而「原住民族」的訪談取樣範圍係以原住民族委員會公告的五十五個原住民族鄉鎮市區為主要範圍。取樣方式及標準為：1.典型個案取樣：選擇具代表性的不同類型對象；2.最大變異取樣：兼顧訪談者性別、教育程度、工作背景、年齡、族群等不同屬性；3.效標取樣：對核電廠除役議題有使用新媒體（社群媒體）經驗的對象；4.滾雪球取樣：在研究過程中，經受訪者推薦，足以呈現或代表不同類型的樣本。依據上述四項標準取樣結果，參與者編號方式為訪談模式+時間+變項（性別 M、F；教育程度 J、S、U、G；族

群 Na、Nb；年齡數字；鄰近區 Ned、Non）+序號，詳如上表 1 整理所示。

有關 BEI 與 CBI 訪談問題並未涉及過於敏感的議題，訪談所涉及的內容全部是核電廠除役的公共性問題，因此所訪談的 22 位同意接受訪談對象在受訪前均填寫「知情同意書」，並由本人親自詳細說明本研究計畫訪談目的、訪談涉及內容、以及未來訪談資料的運用狀況，讓受訪者完全明瞭訪談僅供研究使用，不另他途。本研究計畫所設定的 22 位受訪者數量，符合 Lincoln 與 Guba（1985）所提出訪談取樣人數最少 12 位即可以達到飽和點的標準，確保本研究計畫蒐集足夠及飽和的研究資訊。本研究計畫在實際訪談前，均事先提供訪談題綱給受訪者瞭解訪談內容，並配合受訪者可受訪談時間，梳理其對使用新媒體（社群媒體）上有關核電廠除役議題的媒體再現經驗與感受；訪談地點為受訪者方便接受訪談的所在地，訪談時間約 1~1.5 小時，建構一友善和對等的訪談環境氛圍。在為期將半年多的訪談期間（因為配合受訪者受訪時間實在難度非常高，因此延續了一段時間），本研究計畫所提問的訪談內容，受訪者大致均皆能暢所欲言，論述其寶貴經驗且無保留或顧忌。

本研究計畫已完成的 22 位訪談者 BEI & CBI 訪談內容，除了每一份原始訪談資料全部予以謄寫成逐字稿後，進一步將所有訪談資料與文件資料的編號與編碼交叉比對與整理後，以人工方式串聯其資料間的關係。研究結果分析係參照 Patton（2002, 2005）所提出的主題內容分析進行之：第一階段以「核能廠除役」、「核電廠停機」、「除役計畫」、「除役補償」、「核電廠運轉」、「放射性廢棄物」、「核廢料貯存」、「核廢料選址」、「輻射安全」、「除役宣傳」、「能源」、「電力」、「利害關係人」、「疏散方式」、「新媒體」、「社群媒體」、「公民團體」、「環保團體」、「反核」、「擁核」、「健康」等 21 組編碼碼號後；第二階段旋以交叉比對並取其訊息意義精華後將其歸類為「核電廠除役」、「除役安全與補償」、「核廢料貯放」、「輻射安全」、「除役訊息再現」、「核廢料選址」、「新媒體使用」、「健康風險」等 8 個意義單元；最後階段在經過研究同儕間的交叉反覆推敲思考，將研究議題歸納為：①核電廠除役、②核廢料貯存安全、③除役選址與補償、④除役新媒體訊息再現、與⑤健康風險意識等五個主要子題，並整合資料、脈絡及理論，與文獻進行討論及對話，提出研究結論及建議。

為建立本年度研究計畫的信實度，除了詳述研究過程使研究步驟可以複製及檢核外，藉由訪談不同類型的 22 位受訪者已獲取豐富且達到飽和程度的原始資料後，再進行三角檢證。每個分析段落至少引述三位以上受訪者看法，加上研究者對於研究議題省思的見解，再融以相關文獻對話，藉此達到厚實描述的要求，以確保研究的信實度。此外，研究者將不同現象放入括號，避免先入為主的弊病，並促使研究結果係透過互動與交叉比對所達成的共識結果。研究結果同時送請研究參與者協助檢核，以確認忠實呈現其訪談者的本意。在研究倫理方面，研究參與者均以匿名呈現，充分保護研究參與者並簽署知情同意書，避免研究執行後的困擾或任何傷害可能。

IV. 結論

根據已訪談的 22 份逐字稿內容，本研究計畫係以研究者熟悉的 N-Vivo 14 質性分析軟體進行深度解析獲得結論與建議如下（以下內容僅呈現摘要；完整訪談原始逐字稿、原分析過程文字稿，均交付原能會相關業務單位。主要內容為聚焦何種新媒體再現內容→針對何種對象→產生何種效果的傳播溝通循環進行細項溝通策略的建構。

1.有關各行政單位所司職權的新媒體溝通方式與建議

回歸本議題的核心，臺灣核一廠自 2018 年起已正式進入除役程序，臺灣的核能發電也已邁入新階段；簡單地說，核電廠除役計畫主要核心任務便是移除「核能設施」、「放射性與非放射性」等危險物質，以保障國人的生活及權益。然而，以臺灣在核電廠除役的政策上，不同行政機關其實是扮演不同的除役角色的，像是：「台電公司」乃為營運單位，在核電廠除役的角色定位為核能設備運轉與核廢料貯放選址執行者，其主管機關「經濟部」更是核廢料處置規劃者、核廢料貯放地址溝通者；「原能會」主司核能安全監督者，為上開台電公司執行的安全問題把關；「新北市政府」係扮演核能安全守護者；而鄰近核設施區域的「區公所」更是在地的意見傳遞者。從上述各行政單位所應扮演的公共角色，其主司職責與定位上應屬明確且清晰，可惜的是這樣的明確分工，各單位在透過媒體與民眾的溝通中，一直沒有很清楚。尤其作為核電廠除役議題最受台灣民眾重視與在乎的「核廢料處置」與「核廢料貯放地址」規劃的「經濟部」，在議題的媒體溝通上，從溝通主體、溝通模式、溝東對象的設定上並不清楚，主要乃透過「行政院國家永續發展委員會非核家園催動專案小組」進行議題整合、溝通與協調。而上述推動小組的組成，僅是諮詢角色，只能建議政策走向與非核議題執行的方向，而且並無實質權力，便導致核電廠除役議題大多呈現歧異，無法達成共識的狀態。這就非常容易產生議題混淆，民眾搞不清楚各權責單位的職責為何，很容易對核電廠除役議題產生錯誤的理解與不必要的批評。在 BEI & CBI 的訪談內容統整中即有相同的發現，幾乎所有受訪者對於核電廠除役議題的政府行政單位職權與主司範圍表示不清楚或不知道，僅有 3 位受訪者大致了解，然而，此 3 位受訪者亦非全然掌握明確各行政單位的職責。因此，就原能會這端，如何闡明原能會所司職權即是本議題媒體溝通的第一要件，而此部分是本議題中不分新媒體與否的宣傳策略。亦即，本研究計畫認為在闡明核電廠除役的行政權責上，原能會應在不同媒體（不管是新媒體或是傳統媒體）上運用，清楚將自身的「核能安全監督者、為核電廠除役執行的安全問題把關」這個清楚定位，隨時且不斷地重複溝通，以避免民眾產生不必要的誤解與錯誤認知。也就是就行政職權上，原能會不僅應具備專業的技術服務，更應在除役過程中規劃充分告知本身職權範圍的溝通模式，並設計開放民眾互動的新媒體溝通方式，充分讓媒體溝通達到最高效益，以獲取民眾對原能會的支持與信任。

2.不同性別變項的新媒體溝通策略與建議

針對核電廠除役議題的訪談中，將「性別」變項作為分析要件後發現，不管是不是核電廠範圍居民、不同學

歷或年齡差異，女性受訪者呈現的受訪意見相對於男性大致呈現對核電廠除役議題的較不關心，也比較不願意談論或分享對這個議題的個人看法；同時，對核電廠除役這個議題的核廢料貯存安全性存在比較大的疑慮。可以這樣說，女性民眾對於核電廠除役的安全性相較於男性，比較沒有安全感，也比較不願意表達支持核電廠除役相關的公共參與。根據這樣的現實，本研究計畫建議針對女性民眾的新媒體溝通策略，除了首先必須區別出新媒體如 PTT、Dcard、FB、IG、YouTube 等社群媒體女性常用的管道（如 PTT 女性版 Women Talk 等）進行溝通的管道外，針對女性常用的社群媒體在建構核電廠除役訊息時，應以較為軟性或感性式的敘事手法建構核電廠除役訊息，並以淺顯易懂的「口號式」或「標題式」訊息建構作為與女性溝通的方式，如此比較容易達到核電廠除役正確認知的溝通效果。

3.不同年齡層變項的新媒體溝通策略與建議

在前一年的社群媒體大數據分析下發現，「年齡」的變項也是影響對核電廠除役有不同認知與看法，同時對此議題在社群媒體上的發表也不相同。尤其若將年齡分為 40 歲以下的年齡層，可以發現年輕世代對於核電廠除役的公共議題較為消極，反而年紀越長者，尤其是 55 歲以上的年齡層，同時也使用新媒體，對於核電廠除役的議題反而更為關注，尤其是男性較高年齡者對於核電廠除役的意見表達除了比較踴躍外，對於該項議題的自身看法亦會勇於發表於社群媒體的意見中。這樣的現實表示較高年齡者（55 歲以上男性群體）在社群媒體上係扮演某種意見領袖（Key Opinion Leader; KOL）的角色，其對核電廠除役所關注的面向、提問、意見表達，就傳播有效的角度，在原能會這端建議有必要予以理性且正面回應。尤其在較高年長的社群媒體或群組當中，如有發現與原能會相關業務的核電廠除役議題內容，建議原能會都必須給予直接且立即性的回覆或留言。如此才能避免更多不必要的揣測、安全顧慮、負面情緒發酵的可能性；同時亦可以為原能會呈現「播亂反正」的訊息建構，增加不同受眾接觸正確訊息的機會。

4.不同教育程度者變項的新媒體溝通策略與建議

從 BEI 深度訪談的資料，再與過去文獻、前年度大數據資料交叉分析後發現，教育程度越高，尤其是碩士以上對於核電廠除役支持、以及除役安全的信任度，都相對低很多；同時教育程度越高者，也相對不支持公民參與核電廠除役的過程，包括大學教育程度以上者。綜觀其訪談內容所表達的主要理由在於認為核電廠除役涉及多面向的專業問題，其大部分認為應交由專業負責人員來統籌決定，民眾的參與反而會干擾或破壞核電廠除役所面臨的核廢料貯放或核廢料選址的決定。但從高教育程度者的訪談中亦可發現，其在社群媒體上所發表的核電廠除役議題的意見與看法，其負面情緒較多，雖然不覺得一般民眾可以監督政府處理核電廠除役，但卻對政府相關單位處理核電廠除役的種種事項抱持負面或悲觀的看法。如此，對於較為理性的高教育程度的民眾，原能會在面對這樣的受眾時，必須以「直接透明」清楚陳述政府單位依法行政、公開透明的方式揭露核電廠除役的訊息，以較為理性的訊息建構方式與高教育程度者溝通。這類的受眾大多接觸比較多的「論壇類」的社群媒體，也會在類似的社群媒體中談論自身的看法與發表意見。因此建議面對以教育程度較高的受眾為主要對象的新媒體或社群媒體時，建議可以採取比較多的知識性內容與之溝通，也可以運用較長的文本內容建構進行溝通。在與高教育程度的受眾進行新媒體政策溝通時，只要秉持有根據的消息來源，以公開透明的論述手法與之進行溝通，相信可以達到相對有效的新媒體溝通成效。

5.不同族群變項的新媒體溝通策略與建議

比對過去文獻與前年度大數據族群聲量在核電廠除役議題的再現狀況得知，男性、教育程度較高、年齡較長者的受眾在核電廠除役議題的訊息接收上愈高；相對於女性、教育程度較低、年齡較輕者的受眾在核電廠除役議題的訊息接收上則較低。融合上述變項再把「族群」變項作為核電除役議題的訊息分析對象時，可發現「原住民」群體相對於一般住民的群體，對核電廠除役議題相對比較沒有興趣，接觸情形也相對較低。而傳統媒體是該群體相對比較依賴的媒體；然而，仍有許多原住民群體非常依賴原住民的社群媒體群組。因此，在與原住民群體進行溝通時，仍有必要運用新媒體（社群媒體）的方式溝通。面對具有主體性的原住民群體，在新媒體的溝通策略上，建議應以簡單敘事培力的概念進行訊息建構。亦即，對於原住民群體，新媒體溝通的運用方式不宜呈現太過複雜、知識密度過高的訊息內容；而新媒體溝通的方式，建議可以使用核電廠除役必要的知識觀直接鑲入訊息的傳遞中，敘事手法必須簡單，如能將迷因手法、幽默闢謠方式、輕鬆建構正確核電廠除役知識的模式直接運用於核電廠除役訊息中，將可達到更佳的溝通成效，也能讓原住民群體對這個議題有更多的理解與參與。

6.不同鄰近核設施區居民變項的新媒體溝通策略與建議

本研究計畫最後將「鄰近核設施區居民」這個變項作為新媒體溝通策略項目，主要係核電廠除役議題，「鄰近性」確實是這項議題不可忽略的對象，尤其地方政府與行政單位的溝通成效與當地居民有直接相關。過去的文獻與新媒體的聲量表現狀況可以瞭解，鄰近核設施區的居民相較全國一般民眾及原住民族接收到更多的核電廠除役相關訊息。從訪談的 CBI 資料整理可以發現，鄰近核設施區居民相對於一般非鄰近核設施區居民，更關注居住地是否「安全」，以及回饋金的具體落實狀況、以及自身是否有更多工作機會與在地發展的機會。從原能會端所負責的行政範圍看來，讓鄰近核設施區居民充分瞭解原能會在「安全性把關」這塊做了什麼、如何做、現行執行狀況等，都有必要透過新媒體溝通模式清楚地讓鄰近核設施區居民充分掌握。此部分溝通方式除了可以運用社區相關社群媒體群組既有資源外，亦應與區（鄉）公所或當地縣市政府合作，充分讓鄰近核設施區居民充分掌握安全性資訊。至於鄰近核設施區居民所關注的「回饋金」與「在地工作發展」的項目，因為並不是原能會權責項目，亦可藉此溝通機會，讓鄰近核設施區居民以及非鄰近核設施區居民瞭解，核電廠除役議題的不同政府單位不同權責的實質內容，藉以培力民眾對核電廠除役的正確素養觀，以收有效的政策溝通效益，發揮原能會確保核能安全與原子能民生應用永續發展的功能。

整體而言，本研究計畫針對核電廠除役議題在移除過程中，需要同時顧及不同對象進行有效的溝通（如不同性別、不同年齡層、不同學歷、不同族群、不同居住鄰近性等）所為之分析，本研究計畫成果報告期望透過上述解構與建構新媒體訊息的過程，對原能會未來在運用新媒體（社群媒體）與民眾溝通時，產生更大的傳播效益。本研究計畫成果同時交付原能會新媒體溝通參考守則給予原能會相關業務單位，提供未來實際面對與操作新媒體訊息時參考使用。本研究計畫除了建議新媒體（社群媒體）的運用外，面對受眾的多元性，雖然新媒體溝通方式是民眾瞭解原能會主司核能安全的重要來源；然而，各種的策展、活動、座談會等亦有助於民眾瞭解核電廠除役議題的相關內容。惟建議透過策展、活動、座談會的現場溝通方式，仍應整合成新媒體再現模式、與媒體充分結合，方能達成更有效的漣漪效應，讓相關活動效益形成加乘效果。

參考文獻

[1] Alexander, E. R. (2000). Rationality revisited: Planning paradigms in a post-postmodernist perspective. *Journal of planning education and research*, *19*(3), 242-256.

[2] Altheide, D. L. (1996). Qualitative media analysis. Thousand Oaks, CA: Sage.

[3] Babrow, A. S., & Mattson, M. (2011). Building health communication theories in the 21st Century. In T. L. Thompson, R. Parrott, & J. F. Nussbaum (Eds.), The routledge handbook of health communication (2nd ed., pp. 18-35). New York, NY: Taylor & Francis.

[4] Berglund, H. (2007). Researching entrepreneurship as lived experience. In J. H. Neergaard & P. Ulhoi (Eds.), Handbook of qualitative research methods in entrepreneurship (pp. 75-93). Cheltenham, UK: Edward Elgar.

[5] Bernhardt, J. M., & Cameron, K. A. (2003). Accessing, understanding, and applying health communication: The challenge of health literacy. In T. L. Thompson, A. Dorsey, K. I. Miller, & R. Parrott (Eds.), (2003). Handbook of health communication. (pp. 583-605). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

[6] Buckingham, D. (1991). Teaching about the media. In Lusted, D. (Ed.), The media studies book: A guide for teachers (pp. 12-35). London, UK: Routledge.

[7] Buckingham, D. (2000). The making of citizens: Young people, news, and politics. London, UK: Routledge.

[8] Dance, F. (1967). Speech Communication Theory and Pavlov'S Second Signal System. *Journal of communication, 17(1)*, 13-24.

[9] Gostin, L., & Mann, J. M. (1994). Towards the development of a human rights impact assessment for the formulation and evaluation of public health policies. Health and Human Rights: An International Quarterly Journal, 1, 58-80.

[10] Green, J., & Britten, N. (1998). Qualitative research and evidence based medicine. British Medical Journal, 316, 1230-1232.

[11] Hofrichter, R. (Ed.). (2003). Health and social justice: Polities, ideology, and inequity in the distribution of disease. San Francisco, CA: Jossey-Bass.

[12] Kubey, R. W. (Ed.). (1997). **Media literacy in the information age: Current perspectives.** NJ: Transaction Publishers.

[13] Leary, V. A. (1994). The right to health in international human rights law. Health and Human Rights: An International Quarterly Journal, 1, 24-56.

[14] Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). Naturalistic inquiry. Newbury Park, CA: Sage.

[15] Lichtman, M. (2006). Qualitative research in education: A user’s guide. London, England: Sage.

[16] Livingstone, S. (2002). Young people and new media. London: Sage.

[17] Mann, J. M., Gostin, L., Gruskin, S., Brennan, T., Lassarini, Z., & Fineberg, H. (1994). Health and human rights. Health and Human Rights: An International Quarterly Journal, 1, 6-23.

[18] Marx, K. (1976). Capital: a critique of political economy. (B. Fowkes, Trans.) London, UK: Penguin. (Original work published 1867)

[19] Masterman, L. (1985). Teaching the media. London, UK: Routledge.

[20] Mcquail, D. (2010). Mcquail’s mass communication theory (6th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

[21] Meeds, R.(2004). Cognitive and attitudinal effects of technical advertising copy: the roles of gender, self-assessed and objective consumer knowledge. International Journal of Advertising , *23*(3), 309-335.

[22] Meehan, E. R. (1984). Ratings and the institutional approach: A third answer to the commodity question. *Critical Studies in Mass Communication*, *1*(2), 216-225.

[23] Menon, A. M., Deshpande, A.D., Zinkhan, G.M., & Perri III, M. (2004). A model assessing the effectiveness of Direct-To-Consumer advertising: integration of concepts and measures from marketing and healthcare. International Journal of Advertising, 23(3), 91-118.

[24] Miller, W. L., & Crabtree, B.F. (2005). Clinical research. In N. Denzin & Y. Lincoln (Eds.), Handbook of qualitative research (3rd ed.) (pp. 605-639). Thousand Oaks, CA: Sage.

[25] Miller, K. E., & Waller, D. S. (2004). Attitudes towards DTC advertising in Australia: an exploratory study. International Journal of Advertising, 23(3), 389-404.

[26] Moriarty, S., Mitchell, N., & Wells, W. D. (2012). Advertising & IMC principles and practices (9th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

[27] Patton, M. (2002). Qualitative research & evaluation methods (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

[28] Patton, M. (2005). Qualitative research. In B. Everitt & D. How ell (Eds.), *Encyclopedia of statistics in behavioral science* (pp. 1633-1636). Chichester, England: John Wiley & Sons.

[29] Postman, N. (1992). Technopoly: The surrender of culture to technology. New York, NY: Knopf.

[30] Ramana, M. V. (2011). Nuclear power and the public, Bulletin of the Atomic Scientists, 67(4), 43-51.

[31] Ritchie, J., & Lewis, J. (2003). Qualitative research practice a guide for social science students and researchers. London, UK: Sage.

[32] Roth, M. (2003). Media and message effects on DTC prescription drug print advertising awareness. *Journal*

*of Ad*vertising Research, 43(2), 180-192.
[33] Rosa, E. A. & Freudenberg, W. R. (1993). The Historical Development of Public Reactions to Nuclear Power: Implications for Nuclear Waste Policy. In: Dunlap, R.E., Kraft, M.E., Rosa, E.A. eds. Public Reactions to Nuclear Waste: Citizens' Views of Repository Siting. Durham: Duke University Press: 32–63.
[34] Sanghi, S. (2007). The handbook of competency mapping: Understanding, designing and implementing competency models in organizations (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
[35] Semali, L., &. Pailliotet, A. (Eds.). (1999). Intermediality: The teachers' handbook of critical media literacy. Boulder, CO: Westview/Harper Collins.
[36] Share, J., Thoman, E., & Jolls, T. (2005). Five key questions that can change the world: Classroom activities in media literacy. Los Angeles, CA: Center for Media Literacy.
[37] Slovic, P. (2001). Perception of risk from radiation. In: Slovic, P. eds. The Perception of Risk. London: Earthscan PublicationsLtd: 264–274.
[38] Smythe, D. W. (1977). Communications: Blindspot of Western Marxism. Canadian Journal of Political and Social Theory, 1(3), 1-27.
[39] Smythe, D. W. (1978). Rejoinder to Graham Murdock. Canadian Journal of Political and Social Theory, 2(2), 120-127.
[40] Spencer, L. M., & Spencer, S. M. (1993). Competence at work: Models for superior performance. New York, NY: Wiley.
[41] Thoman, E., & Jolls, T. (2005). Media literacy education: Lessons from the center for media literacy. In G. Schwartz & P. U. Brown (Eds.), Media literacy: Transforming curriculum and teaching (pp. 180-205). Malden, MA: National Society for the Study of Education.
[42] Tyler, F. (2001). Cultures, communities, competence and change. New York, NY: Kluwer Academic.
[43] Vos, P., Ceukelaire, W., Malaise, G., Pérez, D., Lefèvre, P., & Stuyft, P. (2009). Health through people's empowerment: A rights-based approach to participation. Health and Human Rights: An International Quarterly Journal, 11(1), 23-35.
[44] Wolcott, H. F. (2001). Writing up Qualitative Research. Newbury Park, CA: Sage.
[45] 工商時報（2022），〈就是不要核！核三廠 2025 年除役範圍界定〉。參考網站：https://www.ctee.com.tw/news/20220104700276-430104#google_vignette。（上網日期：20230131）
[46] 太報（2023），〈核能若延役要過幾關？核電運轉 80 年可能嗎？〉。參考網站：https://today.line.me/tw/v2/article/8n8Z5RE。（上網日期：20231231）
[47] 李政賢譯（2011），《質性研究寫作》。台北：五南。（原書 Wolcott, H. F. [2001]. Writing up qualitative research. Thousand Oaks, CA: Sage.）。
[48] 李原玫（2002）。〈以問題解決才能為基礎的結構式面談問題設計-以 C 公司 Fab 工程師為例〉，第八屆企業人力資源管理實務專題研究成果發表會論文。桃園：國立中央大學。
[49] 李芳齡譯（2002）。《績效躍進：才能評鑑法的極致運用》。台北：城邦文化。（原書 Dubois, D. D. [1993]. Competency-based performance improvement: a strategy for organizational change. Amberst, MA: HRD.）。
[50] 周典芳、陳國明（2005），《媒介素養概論》。臺北：五南。
[51] 林昱廷（2014），《台灣核能的科技溝通：以（台電核能月刊 1983-2013）爲案例》。國立成功大學歷史學系碩士論文。
[52] 林承宇（2014），〈傳播跨領域研究的方法論習題：以「健康素養」為例〉。《傳播與管理研究》，13(2)：3-37。
[53] 林承宇（2017），〈藥品廣告規範之傳播政治經濟學取徑分析：跨領域議題規範新思維〉。《傳播與社會學刊》，第 42 期，頁 189-223。
[54] 胡毓青（2008），《國內核能電廠除役方式評選之研究》。中原大學企業管理研究所碩士論文。
[55] 高淑清（2008），《質性研究的 18 堂課：首航初探之旅》。高雄：麗文文化。
[56] 高淑清（2000）。《現象學方法及其在教育研究上的應用－質的研究法》。高雄：麗文文化。
[57] 教育部（2002），《媒體素養教育政策白皮書》。臺北：教育部。
[58] 陳憶寧（2014），〈福島危機中台灣民眾對核能的風險感知與態度：政黨傾向、核能知識、信任與科學傳播的角色〉。《中華傳播學刊》，26：223-265。
[59] 陳穎峰（2017），〈地方問責與核能安全治理：以新北市核能安全監督委員會為例〉。《民主與治理》，4(2)：109-150。
[60] 張寧、黃崑峰（2015），〈嫌惡性設施的風險知覺〉。《中國行政評論》，21(3)：21-47。
[61] 梁世武（2014），〈風險認知與核電支持度關聯性之研究：以福島核能事故後台灣民眾對核電的認知與態度為例〉。《行政暨政策學報》，58：45-86。
[62] 梁世武（2014），〈風險認知與核電支持度關聯性之研究：以福島核能事故後台灣民眾對核電的認知與態度為例〉。《行政暨政策學報》，58：45-86。
[63] 黃東益、傅凱若、董祥開（2017），《核電廠除役及核廢料處理議題公眾溝通機制之研究》，科技部專題研究：106-2623-E-004-001-NU。
[64] 黃東益、董祥開、傅凱若（2020），《核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行 II》，科技部專題研究：108-NU-E-004-001-NU。
[65] 蔡素琴、洪雅鳳、劉淑慧（2014），〈敘事分析方法：由 Labov 敘事結構與隱喻故事取徑〉。《臺灣諮商心理學報》，2(1)：77-96。
[66] 蕭瑞麟（2006）。《不用數字的研究－鍛鍊深度思考力的質性研究》。台北：台灣培生教育。

提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識及其成效
The Study of Enhancement of Nuclear Security Organizational Management and Crisis Awareness of Nuclear Facilities in Decommissioning Stage

計畫編號：NSTC 112-NU-E-262-003 -NU
計畫主持人：宋大崙
e-mail：tlsung@gm.lhu.edu.tw
計畫共同主持人：李九龍
計畫參與人員：鄔承穎、陳昕澤
執行單位：龍華科技大學機械工程(系)所

摘要

核子保安的目的是保護核子設施和核子物料，以免遭受破壞或盜竊而造成大眾生命及核能電廠安全的威脅。除役階段的核能電廠，因為無反應器運轉，運轉時可能發生的許多核子事故將不會發生。除役階段的核能電廠，其保護的對象由運轉時的反應器、反應器冷卻水管路及供電系統等，改變為：用過核子燃料及維持用過核子燃料於安全冷卻狀態的相關設備。雖對象改變，但管理人員將持續執行核子保安，加強核子保安組織管理與提升危機意識，防止核設施被破壞或核子物料被盜竊。核子保安文化(nuclear security culture)是強化核子保安重要的一環，核子保安文化整合所有個人，組織和機構的特徵，態度和行為，以作為支持並加強核子保安的手段。強化組織管理與提升危機意識，藉由保安人員克盡職責及管理組織與全體員工的保安意識提升，進而成為核子保安文化，確保核子保安的績效。參考國際原子能總署核子保安系列叢書（Nuclear Security Series）IAEA 核子保安系列第 7、28 及 38 號文件，國際推動核子保安組織文化、自我評估及強化的指引，本計畫探討強化核設施除役階段之組織管理與提升危機意識的方法，並提出適合我國國情的推動方案，及自我評估方法的建議。

關鍵詞：核子保安文化，除役

Abstract

The purpose of nuclear security is to protect nuclear facilities and nuclear material to prevent the human safety threat by the sabotage or the theft. However, many nuclear accidents that may occur during operation will not occur during the decommissioning stage because there are no operations. In this stage, spent nuclear fuels and the facilities to maintain these spent nuclear fuels staying cool become the most important targets to protect. The managers should enhance nuclear security and enhance awareness to prevent nuclear facilities from being damaged or nuclear materials being stolen. This project studies the nuclear security culture to strengthen the organization of nuclear facilities, and to enhance crisis awareness, by referring the IAEA Nuclear Security Series Documents Nos. 7, 28 and 38 (which are the guidelines for the promotion of nuclear security organizational culture, self-assessment and strengthening). And the promotion plans and self-assessment methods of nuclear security culture suitable for Taiwan will be discussed.

Keywords: Nuclear Security Culture, decommissioning

I. 前言

台灣在核能電廠運轉階段，培養工作人員隨時保有核能安全與核子保安的思維，並融入平日工作習慣之中，定期進行行政規定宣導及教育訓練，讓員工培養出隨時的安全觀念，建立廠區安全維護警戒共識，提升設施安全成效卓著，有效減少意外及增進核能安全。除核能安全外，核子保安則是保護核子材料(nuclear material)和核子設施(nuclear facilities)，以免遭受破壞或盜竊，導致核電廠安全遭受威脅而造成員工及民眾生命安全的危險。如今台灣核能電廠陸續除役，除役階段的核能電廠，因為無運轉的活動，反應器運轉可能發生的許多核子事故將不會發生，因此核能安全及核子保安的環境及考量將會變動，本研究針對除役階段核子保安的組織管理與危機意識的提升進行分析探討。本研究分為三部分：(1)討論除役階段的環境變化(2)參考核子保安文化，提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識。

除役階段保護的重點對象將為：用過核子燃料及維持用過核子燃料於安全冷卻狀態的相關設備 [1]，除此之外，除役過程長達 25 年，在廠址內會有各種設施的改變，如放射性污染設備、結構或物質拆除或移出及貯存，以及人員變動，如減少運轉人員及增加除役人員，核子保安可能因除役階段的不同，而有不同的措施，但核子保安的績效不容降低。因此強化組織管理與提升危機意識，並由核子保安人員負責督導敦促組織與全體員工的核子保安意識提升，進而成為組織文化，確保核子保安的績效。國際組織如 IAEA 重視各國核子保安的組織管理與危機意識提升，提出數項指引文件，(IAEA 核子保安系列第 7、28、38 號文件) [2, 3, 4]，對於各國推動核子保安組織文化、自我評估及強化提出相關的建議。核子保安文化(nuclear security culture)是強化核子保安重要的一環。國際原子能總署核子保安系列叢書（Nuclear Security Series）第 7 號文件 [2]，所有參與實體防護(physical protection)的組織，應重視核子保安文化，以確保其有效運行在整個組織中實施；及對於各國推動核子保安文化之建議。核子保安文化的定義，在文件 [2]中提到：“The assembly of characteristics, attitudes and behavior of individuals, organizations and institutions which serves as a means to support and enhance nuclear security.”

翻譯成中文是整合所有個人，組織和機構的特徵，態度和行為，以作為支持並加強核子保安的手段。

IAEA 積極推動核子保安文化。2014 年核子保安會議上，核子保安文化成為會議上重要議題 [5]第 28 號文件 [3]就是討論自我評估核子保安文化施行成效的導則，並對應第 7 號文件的 30 個特徵，說明核子保安文化不是一個單一特性或態度，而是”整合所有個人，組織和機構的特性，態度和行為，以作為支持並加強核子保安的手段”。WINS 的 1.4 Practice 的文件 [6]，是依據 IAEA 第 7 號文件及第 28 號文件，而設定一個評估導則。IAEA 第 38 號文件[4]則是提供如何有系統地去強化核子保安文化，如管理的技巧及強化相關組織文化等，以強化其核子保安文化。IAEA 分別在 3 個國家及核子設施進行自我的核子評估 [7, 8, 9, 10]：印尼研究用反應器(2012-2013)；保加利亞核能電廠(2014)及馬來西亞的醫院(2014-2016)，韓國(2016-2018)以問卷調查評估其核子保安文化 [11, 12]，其問卷分為 4 個面向:信條與態度(beliefs and attitudes)、運行的制度(operation systems)、領導者的行為(leadership behavior)及工作人員的行為(staff behavior)，每個面相會有 8-23 個問題。除自我評估外，文獻 [13]則是依據政策及文化來討論東亞國家的核子保安文化，並比較東北亞國家(中國、韓國及日本)與東南亞國家的核安全與核子保安文化。顯然文化差異也是核子保安文化的研究課題 [14]。

本研究將針對除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識及成效，以核子保安文化的指標加以討論，提出相關的意見。本研究分為三部分：(1)討論除役階段的環境變化(2)參考核子保安文化，提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識。

II. 除役階段特性對核子保安的影響

核安會(112 年 9 月 27 日改制前為原能會)於 108 年 7 月核發核一廠除役許可，109 年 10 月 20 日審查通過核二廠除役計畫，目前核一廠及核二廠的機組皆處於停機狀態，但由於目前核子用過燃料仍在爐心，因此核子保安計畫及應變計畫，皆依照核能電廠運轉階段，並未降低其核子保安人力或縮減應變計畫範圍，因此本研究並不是針對核子保安的防護系統、管理組織、資通安全、或核子保安文化改進的問題，進行討論。而是由於核電廠運轉與除役性質的不同，要持續維持核子保安方面，必須了解除役與運轉的不同對於核子保安的影響。

報告 [1]中提出，在除役執行階段，通常預期核設施的安全性，也就是對於環境及大眾人身安全的威脅會降低。IAEA 的報告 [15](IAEA, ” Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities”, Specific Safety Guide No. SSG-47)也提到，因為用過核燃料被移往貯存設施，因此除役過程中，對於核子保安有關的要求以及對核物料的料帳管理會逐漸降低或減少。會依據核設施狀況和核子保安威脅，作為進入核設施及核子保安相關的保安要求考量。以下是相關的說明：

1. 保安計畫：美國 NRC 則是依照電廠的狀況審查，可提出保安計畫部分條文的豁免申請，或可依據 10CFR50.90 法規申請執照條件的變更申請。IAEA 則依據其核設施壽命期之保安執行導則草案 [16] (IAEA 核子保安序列編號 NST051,草案,Dec.2016)內容(第 26 頁)「第 8 階段:除役階段」第 3.30 節(除役階段行動)，管制機構應審查持照者除役階段的保安組織、保安計畫、保安應變計畫等。這部分所謂豁免，就是考量環境變化而減少或降低保安的資源或範圍；並不是核子保安的標準降低。因此保安武力及崗哨部屬，在實體防護校能維持下，可予以豁免。

2. 緊要區範圍及緊急應變計畫區：緊急應變計畫區，會因為環境條件，如天氣、民眾及風險因素，而須更新檢視，台灣規定每三年進行一次緊急應變計畫區評估，如果除役環境風險的降低改變，可能使緊急應變計畫區縮小至廠內。

3. 適職方案與保安人員：適職性方案的藥檢及酒測應該繼續適用，但是適用的人員及場所，可能因除役過程的需求而有所修正。由於除役期間，包商人員增加，且需求能力不同，人員更替的頻率增加，須注意適職性方案的執行。美國在 10CFR73 法規附錄 B『保安人員通用標準』內對保安人員之訓練和資格有具體明確規定。IAEA: 在其技術導則第 12 號文件『核子保安教育』有具體的規劃內容。

電廠除役階段除核子保安法規及核子保安要求的考量外，考量所處的環境特性對於核子保安的影響，例如資源、人員及環境等。首先因為由於運轉時發電會有收益，而營運資金無虞，而除役階段營運資金常受限固有的後端處理基金，或緊要區的縮減，保安人員因此縮減。核子保安環境在電廠除役中，主要是資源(人力資源、及資金資源)、員工(士氣及危機意識)、以及環境變動(除役狀態變化頻率、及環境變動)等。因此本研究提出可能在電廠除役階段，所產生的核子保安環境特色及影響：

1. 人力資源：人力資源減少，當核能電廠進入除役階段時，通常會減少營運人力資源，包括核子保安人員。原因是電廠不再營運，所以減少營運人力資源。核子保安人員減少是因為用過燃料的緊要區的縮減，相同的保安要求，但所需人數降低之故，導致核子保安團隊的規模減小。人力資源的減少，可能在適職方案中，其疲勞管理很重要，必須確保避免降低保安人員的警覺性或執行識別和迅速應變的能力。除人員減少外，人員的特性也在改變，除原有的運轉人員減少外，其他包商人員則是增加(圖 1)。由廠址人員的減少，可以看出保安人員數量在除役階段，也有減少(圖 2)。對於核子保安的影響：(a)廠外包商人員增加，訓練及適職性需求增加 (b)廠內人員減少且知識任務改變，可能會影響廠內人員士氣。(c)廠區文化的建立與維護，包含核子保安文化及核安文化。

2. 資金來源：後端基金取代營運資金，成為有限資金而非成長式基金；當一個核能電廠進入除役階段，它不再產生電力收益，而是進行除役工作，將核設施安全地拆除並處理核廢料。營運資金會因運轉發電量而增加，而後端基金是受限的。雖然除役工作通常需要大量的資金和資源，但除役預算往往有限，因此無法因應環境變化而成長的費用。

3. 核子保安系統效能：除役核能電廠在拆除設施和設備的過程中，核子保安系統可能需要重新規劃，因此在規劃時，必須注意其核子保系統效能。除役過程中，一些區域可能會被拆除或改變用途，這可能需要重新調整監視系統的位置和覆蓋範圍；例如原本的出入口位置可能

發生變化，需要重新配置門禁系統，一些入侵偵測設備可能需要被移除或更換，以適應設施變化的情況。這樣的環境特色，導致核子保安系統效能變得過時或不可靠，或導致一些區域沒有適當的監控覆蓋，或者監視系統的視野不再完整，或者入侵偵測系統的覆蓋範圍受到限制，從而影響保安監控的效能，導致核子保安系統效能降低。

4. 員工士氣和動機：除役階段的工作性質和挑戰性與運轉期間存在很大的差異，可能導致員工的動機降低和工作士氣下降。首先，除役階段通常涉及複雜的工程和拆除工作，而不是日常營運和維護。這種轉變可能讓員工感到不熟悉或缺乏興趣，從而影響他們對工作的動機。除役階段包商人員的增加，這些人員與原有的營運人員具有不同的特性和工作文化。這種人員結構的變化可能導致團隊合作和協調方面的挑戰，進一步影響員工的士氣和動機。

5. 環境變更的節奏：節奏是指從一個活動轉移到另一個活動的速度，而在營運環境中，速度和變化可能會更慢、更審慎。在除役階段，這種節奏更快且更頻繁，變化也更加頻繁。除役階段工作環境不確定性和模糊性，將影響到勞動力，可能因處理不當產生潛在的弱點，例如在內部人為的惡意活動等。

6. 不確定性及波動性的增加：除役電廠充滿著不確定性，工期、計畫期程順序、及花費金額可能會有極大的波動性。

表 1 除役的環境與影響

環境特色項目	現象	影響
人力資源	(a)營運人員減少 (b)核子保安人員減少 (c)除役包商人員增加 (d)知識任務需求不同	(a)適職性及疲勞管理 (b)人員士氣 (c)文化建立與維護
資金來源	(a)有限	(a)保安設備更新維護 (b)保安培訓教育訓練
核子保安系統	(a)區域規劃移動或拆除 (b)區域用途改變	(a)保安系統空窗期 (b)保安設備覆蓋性及效能
員工士氣及動機	(a)降低	(a)不積極態度，不完全遵從程序的指示以及緊急情況下的反應延遲 (b)團隊合作和協調
變更的節奏	(a)更快且更頻繁 (b)工作環境的複雜性高於營運時平穩狀態	(a)勞動力 (b)在內部人為的惡意活動
不確定性及波動性	(a)工期、計畫期程順序、及花費金額可能會有極大的波動性	(a)風險接受度

III. 核子保安文化

提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識，需執行核子保安文化，所以參考 IAEA 保安叢書第 7、第 28-T、第 38-T 號文件，參酌國情現況，提出執行核子保安文化作為。由 IAEA 的文件來看，推動核子保安文化，須從制定核子保安政策，制定核子保安文化計畫，而制定核子保安文化計畫時，所需的依據則是核子保安文化的自我評估。而我國在核安文化有多年推動的經驗，且成效卓著，可以沿用核安文化推動的方式，在考慮核安文化與核子保安文化的差異下，進行核子保安文化推動，可以事半功倍。核安文化以安全為首要，因此報告事項是透明的；但核子保安文化具有機敏的訊息，必須考慮機敏訊息不可外漏，只有被授權者才能獲得；但宣傳教育建立文化的方法，核安文化及核子保安文化類同。主要精神是領導力，借助管理系統及管理層領導能力帶領員工建立核子保安文化，其中重要做法就是教育及訓練，教育員工核子保安的理論及需求，訓練員工使用技能工具強化核子保安，員工在持續的教育訓練並使用核子保安的技能工作環境中，改變態度及信念以致具備危機意識及對核子保安工作的承諾，建立起核子保安文化。

在最高管理層的承諾(核子保安政策)下使用 PDCA(P 計畫-D 執行-C 審查-A 修正)的四部步驟，持續改善。建議的推動方案為 (1)建立除役階段核子保安政策、(2)核子保安文化自我評估、(3)評估結果分析、(4)建立核子保安文化計畫、(5)施行核子保安計畫 並定期檢視，然後重複(2)-(5)持續改善核子保安文化。

IV. 提升除役階段之核設施核子保安組織管理與危機意識

參考 IAEA 保安叢書第 7、第 28-T、第 38-T 號文件，針對除役階段所發生的環境變化，選擇一些相關的核子保安文化特徵，作為說明。根據前述了解除役階段的電廠，面臨的可能是核子保安等級降低(相較運轉階段)、人員減少且專業領域不同、包商人員增加、後端經費固定(資源有限)、環境變化大…等因素。首先，注意的是本研究不是因為除役階段核子保安有問題，而是研究如何因應除役階段特性而予以強化，因此監管單位在除役期間針對電廠所進行的核子保安相關措施，持續監督，電廠持續遵守核子保安的相關規定，維持核子保安。但是規定是因環境而變動，強化核子保安文化，才能因應除役階段的特性而予以強化。以下根據除役階段之各項特徵及對應，進行說明：

1. 核子保安等級降低迷思(相較運轉階段)：核子保安等級降低迷思(相較運轉階段)，由字面意思好像是核子保安的重要性降低，實質不然，所謂等級降低，是指核子保安的範圍及風險程度。核子保安主要目的是保護核物料，因此核物料變動，就需要修正核子保安，而等級降低是保護的範圍縮小或更動區域，以及評估威脅風險所調整。如用過核燃料已經搬運至乾貯設施，其保護範圍移動至乾貯設施，及根據風險縮小其區域。整體核子保安目的不變，核子保安的功能也不變。如果迷思影響人員的認知(Awareness)並降低(1)警覺性，則會影響到(2)核子保安的效能。提高除役階段員工的警覺性，緩解迷思影響，可施行：

(1)電廠除役階段之核子保安政策：建立及張貼除役階段核子保安政策，持續的培訓和宣傳讓員工熟悉政策內容遵守行為準則，保持警惕以及報告任何異常活動。政策內容說明核子保安的重要及優先性，及維持核子保安績效的承諾。

(2) 核子保安文化自我評估監測，防止劣化：建立核設施

除役階段之核子保安自我評估監測，使用指標評估分析結果原因，藉由經驗教訓和糾正行動，實施改進並防止核子保安文化劣化。

(3) 注重警覺性，提高危機意識：宣傳海報及培訓課程強調保持警覺的重要性，員工了解除役階段的內部威脅及核子保安失效的嚴重後果，避免自滿於運轉階段的核子保安成就。

2. 核設施人員減少，且包商人員增加；需求之專業領域不同：在除役階段，人員工作由運轉維護轉為拆除，員工因環境變動而產生壓力，需避免產生壓力調適問題；工作需求改變使得核設施人員逐漸減少，須注意核子保安程序不被視為過度負擔，影響人員遵守行為準則；包商人員增加及變動影響。相關核子保安的特徵機相對應的做法為：

(1) 除役階段工作環境：良好的工作環境，容易讓人員遵守核子保安文化的要求。因此如及時提供設備工具，核子保安相關導則易於取得及閱讀，執行保安任務時不會成為過度負擔。工作負擔部分，特別重視加班監控機制，防範加班影響核子保安效能，要求員工及承包商回饋，定期審視和更新程序。

(2) 培訓和資格：承包商增加，且由於工作環境改變而需求人員之技能不同，因此人員需要具備按照所需標準履行其核子保安職責所需的技能和知識，這時需要全面的核子保安培訓計畫，為此制定並記錄要求和資格標準。如缺乏所需技能和知識，員工不可從事該項工作。建立並監測適當的身體健康體能標準。培訓人員基本核子保安意識，指導人員正確的工作場所保安規定以及報告保安違規行為的要求。

(3) 可信度：依據風險和威脅制定員工篩選流程，嚴格遵守篩選流程及監督和稽查，可信度計畫適用於所有人員，包括臨時人員、承包廠商及訪客。

(4) 管理視察：管理視察員工及承包廠商之表現，檢查他們是否明顯壓力或疲勞；鼓勵員工尋求輔導幫助應對壓力，如人力資源的員工援助方案，相應地批准休假。

3. 核後端基金有限，資金運用受限：除役階段，無發電之營收，只能運用有限的核後端基金，為了確保核子保安效能，**(1) 核子保安政策：**明確展示核子保安的優先性，除此之外，**(2) 領導者的決策**：決策過程需展示保安決策的重要性，決策時應考慮成本和風險降低，讓資金的運用有效率，但不會損壞核子保安功能。核子保安、除役及安全等優先事項考量時，公開討論問題，在保護機敏訊息的條件下，儘量向員工解釋其決策。

4. 核子保安系統效能：除役階段，系統設備因拆除工程影響系統校能，或增加出入口，可能使得保安系統不足的現象，**(1) 運作和維護**：依照預定計畫實施，可確保核子保安系統效能。如需增加出入口，則利用**(2) 變更管理**來強化保安系統，緩解核子保安系統效能下降。

5. 變更節奏增快：除役階段，拆除工程，存儲及運送，程序變更，會因拆除工程而變化，較運轉階段影響核子保安的節奏變快，這時核子保安文化的特徵之(1)變更管理及(2)管理視察，可以有效的強化核子保安。

6. 員工士氣：除役階段，員工因工作性質變更，而導致士氣降低，或是環境變更而導致核子保安意識降低，除了之前提過的**(1) 核子保安政策**及**(2)自我評估**外，重要的是管理者激勵員工使員工產生**(3)動機**及鼓勵**(4)員工參與**強化核子保安。

7. 除役階段的不確定性：除役階段因為社會及資源的影響，項目及工期常會改變。例如乾貯設備及時程，影響爐心燃料的移除…..等。在不確定性高的情形下，核子保安政策及核子保安文化自我評估，可以給予相當的核子保安的基礎，而變更管理、及工作管理，則可以強化核子保安，降低不確定性的影響。

(1)變更管理：除役階段，實施與規劃常會改變，遵守變更管理的程序，做到變更前的評估及變更實施後的評估，確保核子保安的效能，才能降低不確定性的影響。

(2)工作管理：要求在安排任何可能危及子保安系統的維護工作之前，制定實施補償措施；制定應變計畫，員工遵守既定計畫，如偏離計畫，須獲得適當的批准。因此雖然實施工作有其不確定性，事前的準備安排及工作管理可以緩解不確定性造成子保安系統效能的降低。

除役階段發現核子保安等級降低迷思、人員專業改變、包商增加、資金有限、變更節奏、及除役工期計畫不確定性等因素可能會影響，產生危機意識、適職性及核子保安效能等核子保安的挑戰，本研究在保安政策及強化核子保安文化下，提出建議緩解以上的挑戰(如圖 1)

1. 危機意識：

核子保安等級降低迷思、人力的變動、及工作變更節奏會造成危機意識低落，為提升危機意識以下提出幾項建議並以 SMART 原則方式說明：

(1) 核子保安威脅認知：危機意識來自其威脅認知，因此必須由培訓來達成，培訓部門必須將除役階段威脅納入培訓計畫以去除核子保安等級降低迷思，通過討論、海報、視頻和實際案例，強調可信的威脅。表 2 為 SMART 原則之建議內容；

表 2 核子保安威脅認知的建議內容

SMART 原則	建議內容
明確目標(S)	人員對於除役電廠的威脅認知。
衡量方法(M)	測驗及管理視察人員認知程度。
實現方式(A)	將除役階段威脅納入培訓。(培訓與資格)
相關目標(R)	人員了解潛在內部威脅及後果。(警覺性)
目標期限(T)	季度培訓人數及認知測驗成績。

(2) 警覺性：重視核子保安威脅，人員須保持其警覺性，注意並質疑異常事件依循作業流程報告，如不確定異常事件的保安重要性時，可尋求指導了解保安漏洞及重要性。報告錯誤時，不會受到報復，鼓勵人員隨意報告。除役階段因任務變更修改程序且修改頻率增加，避免人員不熟悉程序降低其警覺性，人員必須能輕易取得最新版本程序且實施程序時不走捷徑。表 3 為 SMART 原則之建議內容；

表 3 警覺性的建議內容

SMART 原則	建議內容
明確目標(S)	人員警覺性，異常事件報告。
衡量方法(M)	異常事件報告程序效率、保護報告人之政策以及異常報告之比率。
實現方式(A)	培訓觀察技能識別保安程序違規行為、異常報告流程培訓、因報告而改善核子保安效能獲得的獎勵。(警覺性)

相關目標(R)	最新版本程序的更新與使用及遵守保安程序避免捷徑。(遵守程序)
目標期限(T)	季度異常報告比率及異常報告流程熟悉程度。

2. 適職性：在人力需求變動、工作變更及環境的不確定，人員的適職性受到挑戰，包含人員可信度、及疲勞程度。除役階段人員及包商的可信度計劃，使用分級方式評估篩選。在疲勞程度上，首重改善工作環境，確保核子保安程序不致成為過度負擔、及建立加班監控機制包含員工與包商；並強化管理視察人員的表現壓力及疲勞程度。

(1)可信度：除役階段可信度計劃分級實施，依據風險和威脅制定篩選流程，定期進行篩選，表 4 為 SMART 原則之建議內容；

表 4 可信度的建議內容

SMART 原則	建議內容
明確目標(S)	確保人員的可信度。
衡量方法(M)	依據風險和威脅，分級可信度評量。
實現方式(A)	可信度計劃分級篩選、適用於所有人員、訪客及包商。針對可能導致可信度下降的因素進行篩選(如藥物濫用、工作場所暴力、犯罪或異常行為)。(可信度)
相關目標(R)	人員了解潛在的內部威脅及減輕內部威脅 (警覺性)
目標期限(T)	定期(每年一次)審查可信度計劃及評量。

(2) 工作環境：確保核子保安程序不至於過度負擔，要求分析員工及包商回饋。表 5 為 SMART 原則之建議內容；

表 5 工作環境的建議內容

SMART 原則	建議內容
明確目標(S)	確保核子保安程序不至於過度負擔，造成疲勞。
衡量方法(M)	員工及包商回饋。
實現方式(A)	定期討論，說明保安程序的制定，員工就程序的有效性及明確性提供意見。(工作環境)
相關目標(R)	1. 建立加班監控機制防止加班影響核子保安效能。(工作環境) 2. 管理人員觀察員工及包商是否明顯壓力或疲勞程度。(管理視察)
目標期限(T)	定期回饋討論，或包商完成任務時回饋。

3. 核子保安系統效能：除適職性及危機意識外，整體核子保安系統效，還受到資源減少及除役工作變動影響；在資源少時，決策仍需合理考量核子保安系統效能、變更管理可強化核子保安系統效能在高頻率除役工作變動時不會劣化。表 6 為 SMART 原則之建議內容；

表 6 核子保安系統效能的建議內容

SMART 原則	建議內容
明確目標(S)	確保核子保安系統效能。
衡量方法(M)	核子保安系統效能評估指標，如核子保安管制紅綠燈。
實現方式(A)	建立核子保安自我評估計劃及效能測試。(自我評估)
相關目標(R)	1. 根據分配的資源評估核子保安預算，執行成本風險分析，評估資源是否能足以達到可以接受的風險。(決策) 2. 影響核子保安功能的變更，必須有變更管理，評估影響及確認評估之欲其結果。(變更管理)
目標期限(T)	定期(每月)追蹤及報告糾正計劃。

V. 案例探討

根據 IAEA 的導則 38 號文件，提供案例參考，提升除役階段核設施核子保安組織管理與危機意識。

例 1：核設施保安

在進行走動視察時，設施管理人員注意到緊急出口門偶爾會被撐開，以便工作人員可以在建築外抽菸休息並將設備移入或移出建築物；進一步審查發現核子保安人員不會對來自門被撐開的警報做出反應，因為他們知道授權人員正在該區域工作，並認為這是正常活動的一部分。管理人員意識到打開緊急出口門可為內部人員提供繞過門禁管制和檢查的機會，並為外部人員提供直接、暢通無阻的進入關鍵區域的通道。

核設施管理人員採取以下糾正措施：

(1)制定了一個程序，要求核子保安人員調查和記錄來自重要區域的所有意外警報的原因，無論授權人員是否在該區域工作。所有監測重要區域警報系統的核子保安人員都接受了新程序下的職責培訓。

(2) 制定了一個程序，以便在門打開提供非緊急使用（例如設備移動），開啟期間在緊急出口門處設置警衛。

(3) 在非緊急情況下打開之前，在緊急出口門上放置了通知並聯繫保安人員。

(4) 立即向設施或活動人員簡要介紹在沒有設置守衛的情況下，撐開緊急出口門對於重要區域的核子保安和核子保安影響，以及緊急出口門的非緊急使用程序。簡要介紹內容納入年度核子保安培訓並提供所有人參考。糾正後沒有再發現誤用緊急出口門的情況。

這個例子，展示核子保安文化的以下特徵：

(1) 可見的核子保安政策：在緊要區緊急出口門張貼告示，明確傳達非緊急使用門的核子保安政策。

(2) 明確的角色和責任：設施營運者在新程序中明確規定了非緊急使用緊急出口門的責任。

(3) 培訓和資格：初次和年度進修培訓使人員對非緊急使用緊急出口門的核子保安政策有所了解。

(4) 營運和維護：設施營運者針對緊急出口門的非緊急使用情況制定了有效的補償措施（派駐警衛）。

(5) 視察管理：識別需要糾正之問題並消除其漏洞。

(6) 遵守程序：隨後的評估表明，人員遵守了為使用緊急出口門而制定的程序。

由此例衍生，如除役階段，因除役需求而增加出入口或改變出入口，或保安設備因拆除或移轉時，其處理程序，並評估風險制定相關程序及培訓，在處理上可以依照上例。

例 2：運輸保安

除役階段，經常會有運輸的需求，運輸部門人員發現其中一家經批准的運輸公司已經改變了處理機敏貨物的程序，但是處理貨物的新程序降低核子保安效能。因此向核子保安管理部門提出了警告，核子保安管理部門將承運人從批准的名單中刪除，直到它糾正其處理機

敏貨物的程序。

這個例子展示核子保安文化的以下特徵：

(1)培訓和資格：運輸部門人員經過培訓所以能發現處理貨物的新方法提供的核子保安不足。

(2)決策：核子保安管理部門迅速作出反應，將承運人從批准名單中刪除，直到處理貨物的程序得到糾正。

(3)人員參與：核子保安管理部門聽取了運輸部門人員的關切，並採取行動糾正問題。

(4)警覺性：運輸部門人員注意到並質疑承運人處理貨物程序的變化。

由此例衍生，除役階段運輸需求大增，需評估運輸機敏貨物的程序對核子保安效能影響，及注意承包廠商機敏貨物處理的程序變更。

VI. 結論

核設施除役階段，因為人員減少及工作人員技能專業需求不同，且承包廠商增加，在核子保安執行上將有所挑戰，本研究計畫搜尋國際資料，發現核子保安文化的建立，可以強化除役階段核設施核子保安組織管理與危機意識，提升核子保安成效。參考 IAEA 相關核子保安文化的資料，對於除役階段所面臨的變化，提出相關的核子保安文化推動方案。除役階段發現核子保安等級降低迷思、人員專業改變、包商增加、資金有限、變更節奏、及除役工期計畫不確定性等因素可能會影響，產生危機意識、適職性及核子保安效能等核子保安的挑戰，本研究提出以核子保安文化特徵建議緩解以上的挑戰。

參考文獻

[1] 宋大崙, “除役中核能電廠之核子保安管制要求與國際實施現況研究,” 科技部補助專題研究計畫成果報告, 台北, 2018.

[2] IAEA, “Nuclear security culture,” IAEA Nuclear Security Series No. 7, 2008.

[3] IAEA, “Self-Assessment of Nuclear Security Culture in Facilities and Activities: Technical Guidance, IAEA Nuclear Security Series No.28-T,” IAEA, Vienna, 2017.

[4] IAEA, “Enhancing Nuclear Security Culture in Organizations Associated with Nuclear and Other Radioactive Material, IAEA Nuclear Security Series No.38-T,” IAEA, Vienna, 2021.

[5] A. S. Gill, The 2014 Nuclear Security Summit at The Hague, Springer International Publishing, 2020, pp. 119-146.

[6] “Nuclear Security Culture 1.4, WINS International Best Practice Guide,” WINS, 2019.

[7] I. Khripunov, S. Z. Kutchesfahani and K. and Khairul, "Security Culture and its Self-Assessment as Supplementary Tools," International Journal of Nuclear Security, vol. 2, no. 1, p. article 11, 30 11 2016.

[8] A. R. Antariksawan, K. Khairul, H. Umbara, E. Kristuti and B. and Purnomo, International Journal of Nuclear Security, vol. 4, no. 1, p. article 4, 13 6 2018.

[9] A. R. Antariksawan, "Nuclear Security Culture and BATAN’s Assessment: BATAN’s Experience," International Journal of Nuclear Security, vol. 2, no. 2, p. article 4, 2016.

[10] R. D. Atyanti Dyah Prabaswari, "The Survey on the Perception of Safety and Security Culture," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 528, p. 012017, 2019.

[11] J.-H. L. J. C. Hosik Yoo, "An analysis of the survey results on nuclear security culture for personnel at nuclear facilities," Progress in Nuclear Energy, vol. 112, pp. 75-79, 2019.

[12] J.-H. L. Hosik Yoo, "Results of nuclear security culture survey on personnel at nuclear power plants," Annals of Nuclear Energy, vol. 85, pp. 398-402, 2015.

[13] Julius Cesar Imperial Trajano, "A policy analysis of nuclear safety culture and security culture in East Asia: Examining best practices and challenges," Nuclear Engineering and Technology, vol. 51, no. 6, pp. 1696-1707, 2019.

[14] I. Iarema, “Restating the fundamental principle of nuclear security culture and the importance of cultural differences,” ESARDA BULLETIN, 第 冊 54, pp. 97-107, 2017.

[15] IAEA, “Decommissioning of Nuclear Power Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities Specific Safety Guide No. SSG-47,” IAEA, Vienna, 2008.

[16] IAEA, “Security during the lifetime of a Nuclear Facility, IAEA Nuclear Security Series No. XX, Draft,” IAEA, Vienna, 2016.

[17] Hosik Yoo,Jeong-Ho Lee, Jinho Chung, "An analysis of the survey results on nuclear security culture for personnel at," Progres in Nuclear Energy, vol. 112, pp. 75-79, 2019.

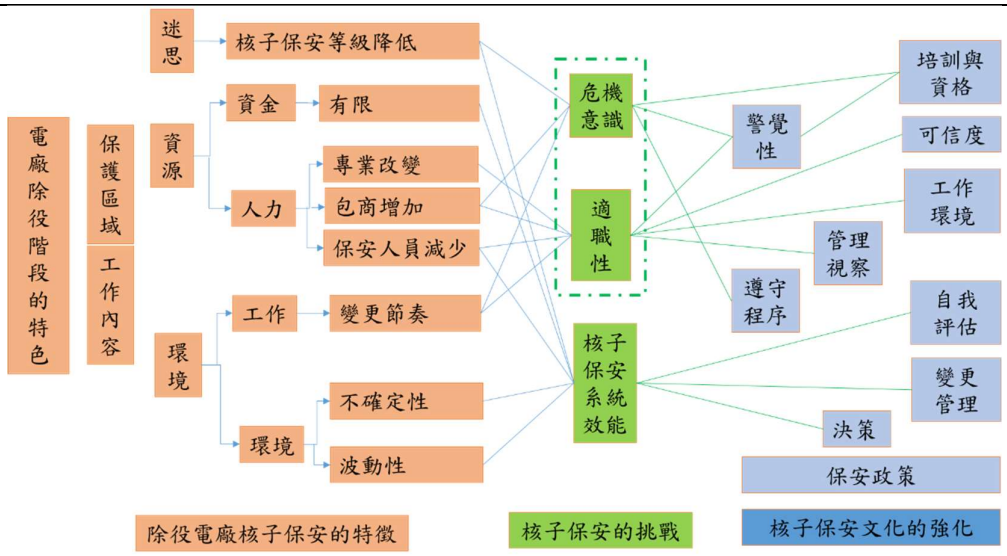


圖 1 除役電廠特色、核子保安挑戰及核子保安文化強化建議

當代原子能法重要法律議題及訴訟案例研析
Critical Legal Issue and Litigation Practice Investigation of Contemporary Atomic Energy Law

計畫編號：NSTC 112-NU -E-007-002 -NU
計畫主持人：高銘志
e-mail： antongao@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：翁曉玲、紀和均
計畫參與人員：謝友仁、張藝蘞
執行單位：國立清華大學科技法律研究所

摘要

本研究旨在探討原子能及核安相關法律及訴訟實務。透過彙整國內外重大原子能訴訟案件之爭訟重點，比較各國性質相似案件之異同，分析原子能暨核安主管機關在案件之權責以及法院之實務見解，並提供相關爭訟策略之建議。

關鍵詞：原子能法、核能安全、行政裁量權、判斷餘地、風險行政

Abstract

This study means to discuss legal issue and litigation practice related to Atomic Energy Law and nuclear safety. By summarizing several significant sue cases and comparing similar cases between different major countries, this study investigates and integrates the authorities of Atomic Energy and Nuclear Safety agencies in each case and legal interpretation made by courts, in purpose to provide litigation strategies and suggestion.

Keywords: Atomic Energy Law, Nuclear Safety, Administrative Discretion, Authorized Discretion, Risk Administrative

I. 前言

2016 年 5 月 25 日經濟部宣布之 2025 年能源轉型目標，預計於 2025 年達成燃氣發電 50%、燃煤發電 30%及再生能源發展 20%之目標，達成 2025 年「非核家園」之目標，後續《2017 年能源發展綱領》、《2020 年能源轉型白皮書》均重申該政策立場。而非核家園之推動過程仍舊面臨許多爭議，如 2017 年電業自由化修法，增修《電業法》第 95 條 2025 非核家園條款，隔年遭逢「以核養綠」公投之挑戰，以及後續核電延役公投之爭訟。此外蘭嶼低階核廢料遲未遷移、台電未能 105 年 3 月底前依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」提出最終處置場址，遭原子能委員會陸續開罰等案。

台灣未來核電利用之爭議，將隨著各機組接近除役或除役後陸續發生，各方利益團體（包括政府機關）預期亦將尋求體制內的法律訴訟途徑來解決爭議。本研究計畫之目的，係先從比較法角度，蒐集整理世界主要國家過去十年間主要之原子能相關判決。其次，則是彙整分析我國歷年來的核能訴訟和訴願態樣，探討核能行政管制實務的問題與司法實務之見解，最後，則是希望從原子能主管機關之角度，提供相關爭訟策略之建議。

II. 主要內容

2.1 國外案例研析

德國、日本、法國、美國等國，因民營電力公司體制，核能訴訟案件則相當常見，訴訟爭議類型亦十分多元。法律爭議可能發生於核能計畫、興建、營運、延役、除役、核廢料處置、環評、核子損害賠償等各項階段中。可提起訴訟者，除了核電業者外，亦有民眾、環團和地方政府機關等。

各國核能發展情況與重視程度有別，故各國關注的核能議題有所差異。各國核電發展不同時期，所遇到的核能爭議亦不盡相同。為有系統整理外國重要核能訴訟，並擴大蒐集之對象與範疇，擬以國際核能法領域研究最重要的也最權威之經濟發展合作組織（OECD）下之核能署（nuclear energy agency）所定期出版之法學刊物核能法學學報（Nuclear Law Bulletin (NLB)）為各國重要判決（Case law）資料蒐集來源。

2.2 我國原能會管制業務訴訟和訴願爭議案件研析

原子能委員會負責國內核能電廠、核子設施及輻射作業場所的安全監督，主管法律包括有原子能法、核子損害賠償法、核子反應器設施管制法、游離輻射防護法、核子事故緊急應變法、低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例和放射性物料管理法等。經搜尋司法院裁判書系統結果顯示，原子能相關法律的行政訴訟案件約 30 到 40 件，案件類型多為核子反應器設施管制法和放射性物料管理法之訴訟案件，少數為游離輻射防護法和核子損害法之訴訟案件，及核電相關的環境影響評估法案件。歸納前二大類訴訟案件，主要涉及幾項法律爭點，包括：

1. 訴訟當事人適格問題：例如環團或位處核災應變區範圍內外之居民得否提起訴訟。
2. 原能會所為處分適法與否、有無判斷餘地的問題：例如同意核電廠大修後重新啟動之審查處分有無違法判斷。
3. 原能會裁罰核電廠未依規定辦理變更設計作業之處分是否適法。
4. 低放射性廢棄物最終處置設施之選址爭議。
5. 興建核廢料貯存設施等。

本研究將通盤檢視所有訴訟案件，分析訴訟爭點與判決理由，再參酌國內外核能法學和行政法學研究文獻，研擬作成處分之法律注意事項和修法建議。

III. 結果與討論

3.1 聽證權與訴訟權能之保障

美台兩國核安主管機關作成行政處分，相對人以外之利害團體或利害關係人，若主張該行政處分損及公共利益或個人利益時，一國之法律是否保障其採取訴願、訴訟之權利或合理取得資訊之權利，值得加以審視。以台電核一廠乾貯設施建造執照案為例，核子事故緊急應變法第 13 條及相關公告已明訂核一、二、三廠緊急應變計畫區為 8 公里範圍之行政區，在此範圍之居民倘因主管機關所作行政處分損害其等生命、身體及財產之安全，為維護其等受法律保障之該等權利，自得依循相關程序提起行政爭訟。

聽證權（Hearing）係為英美法的自然正義原則，即「兩造兼聽」之概念，立法機關、司法機關、行政機關在進行立法、爭訟與行政裁量時，為相對人、利害關係人、學者專家提供陳述意見機會之權利 。

主管機關透過訴願、聽證程序賦予利害關係人陳述意見之機會，係為國家保障人民主張自身利益所賦予之權利，縱使主管機關作成行政處分所依憑者為法律所賦予之裁量權以及相關領域之專家意見，亦不可加以剝奪。

3.2 核安檢驗標準之公信力

以台電核一廠乾貯設施建造執照案為例，台電須提交一系列試運轉計畫，經核安主管機關原能會及專家委員逐層審查，確認計劃書內容符合安全標準方可准予執行熱測試及後續之發照，相關程序與美國核電廠向美國原能會申請換照基本相同。訴願人(原告)主張相關檢驗標準不足以應對更極端的災害情形，因此以現有標準進行審查所作成之發照、換照核准，不符合核安之最高要求。法院見解認為，原告主張之核電廠設施是否足以應對特定災害情境(如飛機墜毀、載具油箱破損引發火災)屬主觀之臆測，無法做為評斷核電廠設施是否達成安全標準之依據。

美國牡蠣溪核電站換照案中利害關係人組織認為乾井殼腐蝕之檢測方式不足，並主張美國原能會未同意重啟行政調查下之換照之決定有瑕疵，法院未採納利害關係人組織之主張維持美國原能會之決定，並指出福島核災之發生無法作為請願之依據。

核安主管機關相關審查意見均以科學數據及參數為基礎，由專業人士審查計畫內容評估設施之運作是否合乎安全標準，以張核安審查工作公信力，如利害關係人等未能依據實據說明評估方式或結果有何瑕疵或未納入特定情境之考量，主張換發執照違法即屬無據。

3.3 行政處分之合法性

概行政處分之作成在遵守依法行政原則下，行政機關根據法律之授權對案件之判斷擁有一定裁量權，核電廠之發照與換照，牽涉核安工作之專業領域，作為主管機關之原能會自得根據原子能相關法規之授權要求相對人提交運轉計畫書或設施檢測資料，並召集核安領域之專家進行審查，並要求相對人依專家及主管機關之意見修正，始得做成准予換發執照之處分，審查之標準事項或應考量之核安事故風險，係為主管機關裁量權之範圍，在法律有授權者範圍內由主管機關自行決定，法律所未授權之事項不得恣意作為判斷之依據，如行政處分之作成不違背上述原則與程序，即屬合法。

3.4 環評是否應採用較專家意見更廣泛之評估基準

以加拿大達靈頓核電廠申請案為例，聯邦法院之意見認為環評結果就有害物質排放和現場化學品清單、用過核燃料管理以及嚴重共因事故之分析不足，認定環評結果尚不完整，上訴法院則認為評估事故發生之機率以及對環境影響，屬專家小組之裁量權範圍，法院不應以自身意見替代專家小組意見認定環評分析不完整，故判定環評結果合法。本案上下級法院意見之分歧點，在於雙方對風險認知的差異，此一節引用風險行政與預防原則之觀念進行論述。

基於環境法上科學之不確定性，決策者作成政策決定時，除考量該風險所可能引起之疑慮，並應以「預防性措施」，將該風險消除或降至可接受之程度。在風險行政之下，風險調查與風險評價之責任應屬行政機關，不應由法院以自己之評價加以取代，亦非行政法院事後可以審查之事項。縱使環評與核安之有其至高重要性，罕見災害或事故情境，自應由環評委員會召集之專家評估此類災害發生之機率或頻率是否屬於可接受之風險，而非就風險因素無限上綱壓縮建設及公共利益之討論空間。

3.5 計畫變更是否為要求重新環評之理由

台電核二廠環評案中，系爭貯存計畫之環評計畫業經環保署環評會議修正通過後備查。嗣後系爭計畫變更，台電向環保署呈核變更內容對照表，環保署指示台電將設施安全分析報告送原能會審查後通過，後再行審查。台電安全分析報告、計畫變更內容對照表經原能會審查通過後，變更對照表經環保署審查會議決議通過(系爭處分)。本案程序上有爭議者，若系爭計畫內容有變更，台電僅須就變更部分向核安主管機關提交變更項目報告與安全分析報告進行審查，後經環評主管機關同意，系爭計畫之核備程序上即已完備？或者應基於計畫內容變更之事實，系爭計畫應向環評主管機關重新提交並辦理環評程序？

本案一、二審法院均指出，法院對主管機關行政處分之審理，原則上尊重主管機關之判斷僅進行低密度之審查，然本案系爭處分之作成乃基於系爭計畫通過環評後又變更之內容所為，變更之內容涉及設施貯存容量變更、計畫廠址位置及範圍變更、屏蔽條件變更及計畫時程更新等項目，與變更前相比已有事實基礎上之不同，構成環評法施行細則「計畫變更對影響範圍內之生活、自然、社會環境或保護對象，如有加重影響之虞」、「對環境品質之維護，有不利影響者」，應就申請變更部分，重新辦理環境影響評估。環保署作成系爭處分所基於之事實，係未經環評程序而變更之內容，導致系爭處分之判斷系爭處分之作成有「出於錯誤之事實認定或不完全之資訊」之嫌，故撤銷環保署系爭處分，並駁回台電之上訴。綜上觀點，計畫內容變更應重新辦理環評與否，在於變更是否有加重不利益之情形，致使主管機關判斷所基於之事實發生質變。

3.6 放射性作業操作監督標準之裁量

以英國賽拉菲爾德核能廠區熱氧化物再處理廠洩漏事故案為例受處分企業發生長達 8 個月放射性液體洩漏事故，違反「確保安全系統運作正常」、「確保放射性材料被包裝」、「洩漏事故須檢測並上報」三項規定，導致，遭英國衛生安全局開罰 50 萬英鎊。

台灣以三軍總醫院違反游離輻射防護法案為例，院內(原告)發生正子中心放射製藥官因放射作業所受輻射劑量超標遭原能會罰款，法院指出原告本身負有注意人員受曝射情形之責任，當自動作業改以手動作業致使人員遭受輻射劑量曝露有增加之危險，本即應加強注意人員之累積劑量，原告消極採取例行常態性之自動作業之監測方式，有違積極注意監測作為義務，過失甚明。

比較兩國處置游離輻射事件之細節，各國核安機構對於游離輻射物質之儲存、運輸、作業及紀錄之規範均採取最嚴厲標準，除定期性監測，更仰賴人員於日常作業中善盡積極注意之義務，對於非常規之作業程序，作業人員須具備更積極之防範意識與舉措，以杜絕游離輻射事故之風險與災害，而非以通常標準之監測與防護程序為足矣。

3.7 主管機關之判斷餘地

所謂判斷餘地，涉及法律規範構成要件中不確定法律概念的解釋與適用，而法律授權行政機關對於不確定法律解釋及適用，行政機關擁有最後決定權，行政法院必須尊重行政機關之判斷。除非行政處分有違反以下情形者：「基於錯誤之事實」、「法律概念涉及事實關係時涵攝有誤」、「法律概念解釋違背解釋法則或牴觸上位規範」、「行政機關之判斷違反公認之價值」、「違反不當連結之禁止」、「違反法定之正當程序」、行政機關無合法作成判斷之權限」、「違反法治國家原理如平等原則、公益原則」，法院原則尊重行政機關之行政處分，進行有限度審查。

以德國康拉德礦場作為低中放射性核廢料儲存場案為例，下薩克森州環境部已完整評估之安全性，經法院審查確認行政程序無誤。台電核二廠一號機大修計畫聲請撤銷同意准予備查案中，原能會基於「完成機組臨界前工作項目之大修作業品質報告及稽查報告」結果判斷核二廠設施經修復後可安全運作無虞，法院均做成「大修計畫同意備查」之處分合法之裁決。

3.8 不確定法律概念之判斷

不確定法律概念涉及高度屬人性、科技性、計畫性政策之判斷者，基於尊重主管機關之專業及法律授權，行政法院一般承認行政機關有判斷餘地，並採取較低之審查密度，僅於行政機關之判斷有恣意濫用及其他違法情事時，得予撤銷或變更 。

援引瑞士 Beznau 核電廠針對地震重為安全評估案，鑒於福島核電廠事故，聯邦核安監察局要求審查 Beznau 核電廠設計，是否足以應對強震時確保反應爐及燃料存儲池安全，評估結果認為系爭電廠安全驗證符合規定無須暫時停用，並將福島核災等級之強震定性為極端性事故。原告環團人等主張 Beznau 核電廠係非法運作，系爭評估對核災等級之評級與災害輻射容許標準有誤，系爭評估決議應廢除。聯邦行政法院認為核安監察局鎖訂地震等級與輻射容許值洵屬合適，立即關閉 Beznau 核電廠之請求為無理由。

再以德國康拉德礦場及台電核二廠一號機大修計畫案為例，提起訴訟之原告方均指控核安主管機關未將特定之重大災害情境納入考量，作為評估中低核廢料儲存設施及反應爐設施維修後是否符合安全標準之依據，核安主管機關所作成處分陷原告人等處於核災威脅不利益之不確定法律狀態，主張撤銷或停止執行原處分。台電核二廠案部分，臺北高等法院認為核二廠一號機定期大修後運轉之原處分，係為高度科技專業性之風險評估，原能會有判斷餘地，根據其外聘審查委員所做成之審查做成處分。德國下薩克森州高級行政法院之觀點，則指出長期安全性並非保證永無風險，諸如墜機意外及恐怖攻擊等不確定因素之防範，權責在其他國家機構，市民無權要求採取特定的具體防護措施，核安主管機關就法律授權之範圍，對於法律不確定性所涉事項及應採取何種相對應措施擁有判斷餘地。

3.9 中央與地方見解不一致

援引法國撤銷比熱核電廠 ICEDA 建設許可案，爭點在於地方核廢料儲存設施的部分空間，若用於處理並儲存非本地核電廠產生之核廢料，是否構成「土地用於非比熱核電廠所需」之情形，進而可撤銷該 ICEDA 設施許可？地方政府、地方法院、行政法院均持「有用於比熱核電廠作業以外之情形，即非比熱核電廠所需」之意見，撤銷 ICEDA 許可，最高行政法院則認為，該 ICEDA 設施係維持比熱核電廠運作所必要，縱然有用於儲存其他核電廠核廢料之事實，亦無法基於地方發展規劃條例內容認定有排他條件之適用。

又以台電核一廠用過核燃料中期貯存計畫之水土保持計畫第 2 次變更設計不予核定案為例，台電就核一廠中期儲存計畫中水土保持計畫部分，向新北市政府提交第 2 次變更設計，新北市政府以系爭計畫修正仍不符水土保持技術規範相關規定，且相關水土保持法律均未針對「用過核燃料中期貯存計畫」有所規範，違反法律保留原則，系爭水土保持計畫未採取更嚴格標準措施，做成不予核定之處分，台電公司遂向行政院農委會提起訴願，嗣經高等法院提出見解，認為義務人(台電即原告)依規定擬定水土保持計畫送請主管機關審查，主管機關有義務依規定進行審查、核定，不得以法無明文之要件，限制或剝奪人民進行土地開發的財產權利，是以台電公司主張系爭申請依水土保持法進行審查無違反法律保留原則，做成原處分撤銷判決。

台電核一廠案與法國撤銷 ICEDA 案相近之處，在於中央主管機關與地方主管機關對核電廠相關設施所在土地之利用見解不一致。判決結果兩國最高審級行政法院均不認為地方政府對於系爭核電設施之土地利用內容或應適用之土地規範，有擅自擴張或限縮解釋之權力，故中央與地方主管機關均需根據雙方所約定之內容執行計畫，或根據現有之土地水土保持法規，有依職權行使計畫審查之責任。

IV. 結論

自 2013 年福島核災後，核安問題廣泛受到各國政府、民間與環保團體之重視，要求以更高標準審視國內核電廠之安全性與核災風險，並主導輿論對核電廠設施或相關計畫之態度。綜觀各國原子能訴訟之代表性案件，

爭點大致可歸納如下五類：一、核安機關行政處分是否有瑕疵；二、相關行政處分是否損害當事人利益；三、行政處分之審查是否有足夠專業性；四、核安規範與措施是否應採更嚴格之標準；五、公共利益之權衡；上述爭點類型均圍繞在各國核電廠面對風險及應變能力之爭辯。

各國訴訟中，利害關係人普遍主張核電廠相關設施之計畫與興建，對當地居民之健康、生活與人身安全帶來危害，當事人之利益即受有損害之風險，主管機關及審查委員未將導致核安意外之災害風險納入評估，面對極端災害之風險卻未提高核安檢測之標準，其做成相關設施核准之處分即屬違法。

核安主管機關基於法律保留原則，根據法律之授權對核電設施管理者所提交之興建、維修、延役、退役計畫負有依法審查之權力及義務，並且在法律授權之範圍內，針對核安評估項目、檢測標準、風險評估之內容擁有業務上之行政裁量權，並於必要時得召集核安領域專家就核電廠相關設施之計畫內容執行審查。對於意外事故與極端災害之風險評估，主管機關及專家委員擁有判斷餘地，在風險行政之下，風險調查與風險評價屬行政機關之職權，亦非司法機關可於事後以自身評價取代，並且在訴訟中僅做低強度之審查，對於行政機關依職權做成之決定，司法機關原則尊重。

但凡針對核電相關設施所做成之行政處分，均為主管機關考量核電安全、用電穩定、經濟發展、民生必需、環境保護等議題並取得平衡之結論，並仰賴相關領域之專業意見與科學實據，就核電相關設施之啟用、關閉、興建、評估做出判斷，而非基於特定災害之發生或風險等不確定法律概念而恣意准否。除非有事實之錯誤、法律概念涵攝錯誤、法律解釋違背解釋法則或牴觸上位規範、不當連結、違反正當程序、判斷違背法理之情形，導致行政處分之作成有重大瑕疵者，其他機關或第三方均應尊重行政機關之判斷，不宜任意推翻或過度爭訟以維持法之安定性，核電設施相關處分，在經過嚴格審查與評估之後更應正確落實，以減少政策上不確定性之影響，確保核電設施運作之穩定性及安全性。

參考文獻

[1] NEA (2000), Nuclear Law Bulletin No. 105 – Volume 2020/2, OECD, P90-92.

[2] NEA (2000), Nuclear Law Bulletin No. 65 – Volume 2000/1, OECD, P23-24.

[3] NEA (2003), Nuclear Law Bulletin No. 72 – Volume 2003/2, OECD, P40-41.

[4] NEA (2006), Nuclear Law Bulletin No. 77 – Volume 2006/1, OECD, P42.

[5] NEA (2006), Nuclear Law Bulletin No. 78 – Volume 2006/2, OECD, P38.

[6] NEA (2007), Nuclear Law Bulletin No. 79 – Volume 2007/1, OECD, P57.

[7] NEA (2007), Nuclear Law Bulletin No. 80 – Volume 2007/2, OECD, P67.

[8] NEA (2011), Nuclear Law Bulletin No. 86 – Volume 2010/2, OECD, P70-73.

[9] NEA (2012), Nuclear Law Bulletin No. 88 – Volume 2011/2, OECD, P72-74.

[10] NEA (2012), Nuclear Law Bulletin No. 90 – Volume 2012/2, OECD, P101.

[11] NEA (2013), Nuclear Law Bulletin No. 91 – Volume 2013/1, OECD, P105.

[12] NEA (2014), Nuclear Law Bulletin No. 92 – Volume 2013/2, OECD, P89-91.

[13] NEA (2014), Nuclear Law Bulletin No. 94 – Volume 2014/2, OECD, P115-116.

[14] NEA (2015), Nuclear Law Bulletin No. 94 – Volume 2014/2, OECD, P113-115.

[15] NEA (2020), Nuclear Law Bulletin No. 105 – Volume 2020/2, OECD, P87-88.

[16] 李建良(2008)，行政法思維方法與案例研究-基礎篇(一):問題模式與思考層次，台灣法學雜誌，200802(103 期)，第 59-61 頁。

[17] 李建良(2017)，行政法基本十講，元照出版公司，第 299-300 頁。

[18] 姚其聖(2023)，論我國絕對法律保留實踐的崩潰情形，全國律師，第 27 卷第 2 期，第 113 頁。

[19] 莊國榮(2015)，行政法(第 3 版)，元照出版社，第 334-335 頁。

[20] 許宗力(2012)，論法律明確性之審查：從司法院大法官相關解釋談起，臺大法學論叢第 41 卷第 4 期，2012 年 12 月，1688 頁。

[21] 郭祥瑞(2009)，公務員行政法－行政法基礎教材，元照出版公司，第 67 頁。

[22] 陳春生(2020)，以預警（防）原則檢視我國行政管制中對於風險行政之「識」與「不識」，如沐法之春風—陳春生教授榮退論文集，元照出版公司，2020 年 12 月，第 301-318 頁。

[23] 陳敏(2011)，行政法總論，新學林出版股份有限公司，第 7 版，第 201-202 頁。

[24] 傅玲靜(2015)，判斷餘地、行政裁量與計畫形成自由－以最高行政法院 102 年度判字第 757 號判決為例，104 年度雙北訴願實務研討會，2015 年 7 月 24 日，第 8 頁。

[25] 詹鎮榮(2022)，行政法傳統學理的反思與開展—行政處罰、裁罰性不利處分與管制性不利處分，月旦法學雜誌 329 期，第 25 頁。

[26] 劉建宏(2009)，課予義務訴訟之訴訟標的與裁判之既判力—最高行政法院九七年十二月份第三次庭長法官聯席會議決議簡評，台灣法學雜誌 125 期，第 214 頁。

[27] 瑞士聯邦法庭判決 2C_206/2019，https://www.bger.ch/ext/eurospider/live/de/php/aza/http/index.php?highlight_docid=aza%3A%2F%2F25-03-2021-2C_206-2019&lang=de&type=show_document&zoom=YES&。

[28] 經濟部核能發電後端營運基金管理會，核一／二／三除役計畫，https://www.nbef.org.tw/page.php?level1_id=6&level2_id=50。

[29] 聽證程序是什麼？焦點事件，https://www.eventsinfocus.org/issues/893。

原子能訴訟案例探討與研析: 聚焦各國訴訟與國際核能法規間之關聯
Nuclear Energy Litigations and Disputes: Interactions between Nuclear Litigation and the International Nuclear Legal System

計畫編號：112-NU-E-007-010-NU
計畫主持人：楊宗翰
e-mail：chunghan.yang@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：
計畫參與人員：陳皇毓、杜育儒
執行單位：國立清華大學環境與文化資源學系(所)

摘要

2023 年 9 月我國原子能委員會已改制為核能安全委員會，標誌國內原子能監管體系與行政任務之轉型。綜觀近年國際原子能訴訟與爭端，以及臺灣政府對於重要輿情事件之回應趨勢，如: 福島核電廠排放含氚廢水、國際原子能總署與中國大陸及日本的地緣政治關係、俄烏戰爭對核電廠安全的威脅、核廢料之跨境運送等，均顯示當代原子能事件之高度跨國特質。在此轉型時刻，臺灣亟需在原子能法制、行政法和憲法等領域進行超國界法之思考和全觀的法制因應。在具體作法上，本研究指出，臺灣可考慮通過多邊條約國內法化，將氣候變遷、環境、能源領域國際公約之內涵納入我國內法制。同時，也可參考國際行政法之理念、國際行政合作之實踐途徑，以加強行政程序中法治國原則和民主正當性。

關鍵詞：原子能訴訟、國際核能法、《阿胡斯公約》、《跨境環境影響評估公約 (Espoo 公約) 》、氣候變遷、臺灣。

Abstract

In September 2023, Taiwan's Atomic Energy Council was reorganised into the Nuclear Safety Commission, marking a shift in the nation's nuclear regulatory framework and administrative functions. Recent international nuclear disputes and the Taiwanese government's responses to major public events—such as the Fukushima tritiated water discharge, geopolitical dynamics involving the International Atomic Energy Agency, China, and Japan, the Russia-Ukraine conflict's impact on nuclear safety, and the transboundary transport of nuclear waste—highlight the transnational nature of contemporary nuclear issues. At this critical juncture, Taiwan must adopt a transnational legal perspective in nuclear, administrative, and constitutional law. This study suggests Taiwan incorporate international conventions on climate change, environmental protection, and energy into its domestic legal framework through the domestication of multilateral treaties. Additionally, adopting principles of international administrative law and cooperation could strengthen the rule of law and democratic legitimacy in administrative procedures.

Keywords: Nuclear Energy Litigation, International Nuclear Law, The Aarhus Convention, Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context (Espoo Convention), Climate Change, Taiwan.

I. 前言

首先要感謝核能安全委員會（核安會）與國家科學及技術委員會（國科會）設立這一極具意義的原子能科技學術合作計畫。此計畫為臺灣學者提供了寶貴的機會，使他們能就當前各類重要的原子能議題提出研究申請，並對所選主題進行深入學術研究，從而提升我國在原子能科技、產業與政策方面的發展能力。在此過程中，特別感謝核安會與國科會的領導和同仁所付出的努力及提供的支持，謹此表達深切的敬意與感謝之意。

從俄烏戰爭、以哈武裝衝突到日本福島核廢水排放，當代原子能議題的範疇已經擴展至國際層面，成為全球政經變遷的重要議題之一。因此，在研究原子能政策、法規與訴訟案件時，除了國內法院的觀察視角，更應關注國際原子能法規與案件的發展，並思考國際能源法規與國內法規之間的互動，從而培養全球視野。

在全球核能治理體系中，國際原子能總署（International Atomic Energy Agency, IAEA）發揮了主導作用，致力於制定一系列關於核能安全的多邊公約，並引起國際社會的廣泛關注。值得一提的是，不僅僅是IAEA，還有其他國際能源組織，如歐洲原子能共同體、經濟合作與發展組織核能署（OECD Nuclear Energy Agency）、國際勞工組織等，通過歷年來的國際條約，共同成為全球核能領域的重要規範。

20 世紀的核能發展代表了人類的重大成就，主要體現在核能的和平利用方面。然而，這種成就也伴隨著巨大的風險。核能事故引發的跨境污染責任問題，如美國三哩島、蘇聯車諾比爾和日本福島等事件，彰顯了核能的潛在威脅，對人類生命、財產以及自然生態造成重大傷害。

近年來，國際上關於核能的訴訟與爭端不斷增加，並呈現逐漸複雜化的趨勢，這使得對此議題的深入研究變得尤為重要。為了全面了解核能案件，本研究以國際核能相關組織（例如國際原子能總署、經合組織核能法律研究所等）所建立的核能訴訟案件資料庫為基礎，並使用最新且持續更新的版本進行分析。此外，本研究將特別強調國際核能法制與各國核能相關訴訟案件之間的互動關係。

本研究的目標不僅在於對核能訴訟案例進行細緻分析，更希望從每一個案例中汲取智慧，整理並提煉出重要的個別爭點，逐步升華至制度和法制改革的層面。在臺灣積極推進低碳能源轉型並實踐非核家園的過程

中，對原子能可能引發的後續爭端進行預防和深入研究，具有重要的實踐價值。

以下將針對本研究的進行過程進行摘要說明，包括文獻回顧、研究過程與主要內容、司法案例蒐集與分析、研究結果與討論，以及後續論文發表成果、國際團隊合作與人員培訓情況。

II. 研究過程與主要內容

本研究聚焦於具有跨域性的近期原子能訴訟或爭端案件，主要依據經濟合作暨發展組織核能署（OECD/NEA）的訴訟個案資料庫。截至 2022 年 6 月，NEA 已登錄全球共 162 件原子能相關訴訟案例。

這些案例涵蓋多個方面，並被歸納為不同類別。其中，環境保護相關案件佔了 49 件。運轉執照相關案件則有 50 件，突顯了核能領域中的運營和執照爭議。在核能廢棄物管理方面，NEA 資料庫中記錄了 14 件相關案例，反映了處理核能廢棄物時的法律挑戰。此外，輻射防護案件佔 7 件，而責任與賠償相關案件共有 20 件，涉及核能事故引發的損害責任問題。禁止核能運輸與擴散案件有 3 件，還有 19 件一般性質的核能訴訟案例，顯示了這一領域的多樣性和複雜性，而且涵蓋核能運轉的整個生命週期 (life cycle)。通過對這些案例的初步分析，可以初步了解各國原子能訴訟的主要議題、爭議課題和趨勢。

為了全面理解這些案例，本研究不僅關注 OECD 原子能法律通訊所提供的案例更新，還積極收集來自國際原子能總署及其他來源的資料，例如國際 NGO 的訴訟資料和奧地利環境非營利組織聯盟 Okoburo 的資料。這樣做旨在提供對當前原子能訴訟或爭端的全面分析，而非僅依賴單一資料來源或國際組織的官方說法。

鑒於全球範圍內核能相關訴訟與爭端案例眾多，本研究進行了篩選，專注於分析國際環境法與國際核能法之間的互動，以了解在原子能領域中環境民主原則的適用。為了深入探討環境影響評估程序和公眾參與的不同決策方法，本研究挑選了 10 件近年來具有代表性的國際案例。透過對相關國際公約、法律和程序問題的理解，以及對法律實務解決方案的討論，研究旨在觀察國際核能公約對各國法制的影響，促進國際合作，並推動原子能的和平利用。

此外，本研究主要以歐洲地區，即聯合國歐洲經濟委員會（UNECE）區域，作為比較法研究的主要對象。所篩選的案例包括英國欣克利角 C 核電廠的跨境環境影響評估案、日本排放含氚核廢水案，以及歐盟對永續活動的分類等案例，對這些案例進行了初步俯瞰與分析。本研究從超國界法的角度探討這些案例在國際層次上及國際與國內法之間可能的法規互動。

III. 研究結果與討論

除了對國際原子能訴訟案件趨勢的分析外，本研究還從近期數件原子能跨域爭端案件出發，整理並分析爭端案件中所呈現的事實特質與法律爭點，以探討國際核能法體系與其他國際法領域（如國際環境法）之間的規範互動。

鑒於所涉議題的廣泛性，本研究在有限篇幅內，專注於國際環境法中環境民主原則（公民參與）在原子能活動中的適用性，並以核能活動密集的歐盟地區法制及主要公約（如阿胡斯公約和 Espoo 跨境環評公約）作為比較分析的核心。

本研究發現，無論是在核電廠建設過程中，還是歐盟整體核能政策的制定中，環境影響評估、風險溝通和公眾參與權利等因素，在跨國背景下變得愈加重要。然而，核能領域的法制及相關規範的適用仍存在諸多不確定性。因而，在這些原子能跨境訴訟中，國際環境法和國際核能法之間存在著緊密的交錯適用關係，其中公眾參與和環境影響評估實際上成為核能法與環境法的交匯點。能源法和環境法在國際層面的互動，一方面加強了國際核能活動中環境民主原則的應用，另一方面，國際環境公約遵循委員會對大量核能案件的審查，也強化了阿胡斯公約和 Espoo 公約的地位。值得注意的是，本研究的焦點集中於阿胡斯公約和 Espoo 公約，這兩大公約主要適用於 UNECE 地區。

然而，考慮到核能在其他地區（如亞洲和中東）的增長，國際公眾參與機會的相關公約仍存在重要的適用議題，這需要更廣泛的討論和研究。在國際法與國內法的互動層面，本研究探討了國際法在國內法體系中的地位，以及多邊公約的國內法化理論，並回顧了學界近年來對國際行政法的研究和討論。此外，本研究對臺灣主管機關在核能安全領域的多邊合作（例如《核能安全公約》和核子保防事務）及雙邊協議（例如《台日核能管制資訊交流備忘錄》、《海峽兩岸核電安全合作協議》等）的運作情況進行了初步考察。

由於臺灣在國際政治現實中的特殊地位，並鑑於近年來國際上原子能訴訟和爭端的高度跨國和區域性，臺灣在原子能國際合作和國內核能法制方面亟需升級。臺灣應將國際環境公約、公眾參與、資訊請求與分享、以及跨境環境評估（包括政策環境評估）等環境民主原則整合到原子能法制中。雖然目前臺灣在核能雙邊和多邊合作實踐中已有資訊分享與通報的基礎，但對於更高水準的國際行政合作機制仍幾乎空白。

具體而言，臺灣可以考慮通過多邊條約的國內法化，將氣候變遷、國際環境與能源領域的國際公約內容納入國內法制。這將有助於臺灣加速與國際公約體系的廣泛連結。關於跨境核能合作，本研究建議臺灣基於《核能安全公約》、《台日核能管制資訊交流備忘錄》和《海峽兩岸核電安全合作協議》，提升核能跨境合作的實踐現況與法制設計。此外，未來臺灣應考慮遵循國際行政法的發展理念，調整國內核能法制，以便更好地參與全球能源治理體系，處理垂直與水準的國際行政合作，並加強行政程序中的法治原則和民主正當性。

IV. 結論: 研究發表、跨國合作與人才培育

本研究於計畫開始，即確立目標以重要國內外會議發表與學術期刊的寫作，作為主要成果方向。在期中之前，計劃主持者先就目前國際能源治理的整體架構，特別是在全球淨零與低碳化的脈絡下，原子能與核能發電的角色，相關的訴訟與爭端個案，以及國際能源合作之現狀，加以梳理與研析。相關成果，均已發表在國內月旦法學之連載，分別為國際能源法制與實務: 氣候世代與能源律師（月旦法學教室 245 期, p.52-68）、能源法的低碳化與 ESG 浪潮（月旦法學教室 247 期, p.38-54）、

科技創新、能源效率與國際能源治理(月旦法學教室 249 期, p.33-50)與爭端解決與國際能源氣候合作(月旦法學教室 251 期, p.55-71)。此部分四篇論文，共約 5 萬字，為對於國際能源法與其他國際法規範之初步考察，適合作為深入原子能規範與個案研究之基礎。

本研究於 2023 年 9 月提送期中進度報告，並由需求單位提供意見回饋。當時回應為：一、計畫已完成原子能訴訟相關之國內外文獻蒐集與分析，並將研究成果投稿至 2023 ILA-ASIL Asia-Pacific Research Forum，符合原訂之預期目標。二、本計畫除選定特定訴訟個案進行深入研析外，亦同步藉由廣泛蒐集 OECD 訴訟案例，觀察內國判決與國際爭端平台之態度及互動，歸納整合提出問題意識，另藉由司法全球化之影響，探討他國判決是否已內化於我國司法，期作為近期日本排放氚廢水可能造成國際仲裁議題之濫觴，並將研究成果回饋於國內法制。此二點於期末時完成，並透過多篇論文研究與發表的方式，使影響力延續至 2024 年。

期中報告後，本研究團隊更持續努力朝對外發表之目標前進，2023 年 6 月底已將本計畫前期研究成果，投稿至國際法學會 International Law Association 主辦之研討會，並已於年底發表。內容著重於台美雙邊以及與 IAEA 在核能與其他能源氣候之國際合作案例（兼論可能爭端）。此外，本計畫主持人於 2023 年 7 月 3 日受邀參與「世界主要國家原子能判決對臺灣啟示」之專家座談會，並進行與談。該會議由原子能委員會、國科會共同指導，並由陳春生前大法官主持。與會者來自學術與實務界，就日本、法國、臺灣之原子能訴訟進行研討，交換意見，收穫豐富。經由與各界專家學者對談，本計畫確立研究重點為：國際原子能法體系與各國判決、內國法與區域核安機制等之互動，並著重於跨國界核能議題（如日本福島核廢水），而與其他計畫相互補。

本計畫主持人於 2023 年 7 月中至 8 月赴英、美參與國際研討會，也計畫藉此就相關原子能判決、國際原子能法之新進展，就教於國際能源法律與實務專家，並將所學所思帶回臺灣。相關之研究成果，也於東吳大學法學院 2023 國際研討會（氣候變遷與能源轉型法制爭議與建議）、以及清華大學與核能安全委員會合辦之「當代原子能重要法律議題及訴訟案例」法學研討會中發表，兩者均舉辦於 2023 年 11 月初，關於各篇論文之相關摘要內容請見期末成果報告。

在促進研究團隊的跨國合作方面，本研究通過與國際合作夥伴的協作，與英國劍橋大學環境、能源與自然資源治理中心，以及英國諾丁漢大學法學院的 Maria Augusta Paim 教授密切合作。我們將研究成果提交至《劍橋國際法期刊》（CILJ），並受邀參加 2024 年該期刊的年度研討會，進行發表和討論。

Maria Augusta Paim 教授專注於國際環境法與能源法，曾與計畫主持人共同發表有關核能除役的文章。她目前在英國諾丁漢大學法學院任教，未來可以協助我國核能安全委員會的同仁赴英國進行考察、研究及進修相關議題。

Maria Augusta Paim 教授的研究涵蓋多個領域，包括氣候變遷戰略中的永續轉型法律、新技術對海洋治理的影響等。她目前擔任邓迪大學能源、石油和礦業法律與政策中心（CEPMLP）的研究員，參與由英國國際發展部（DFID-UK）資助的“釋放採礦對經濟發展的轉型潛力”援助計劃。

在此之前，她曾在劍橋大學擔任研究員，參與了“BRIDGE – Building Resilience in a Dynamic Global Economy”項目。該項目是一個跨學科的合作平台，匯聚了律師、經濟學家及環境/氣候科學家，旨在為水能食物關係創建社會和環境政策評估方法。作為該項目的主要研究論文作者之一，她在建立學術界與利益相關者之間的網絡，促進合作和知識交流方面發揮了關鍵作用。在研究期間，她還擔任了國際環境法課程的召集人，以及環境政策碩士課程中能源與氣候變遷的講師。

她的學術背景包括在倫敦瑪莉皇后大學擔任海洋國際法領域的訪問研究員，並擔任國際環境法課程的客座講師，涵蓋本科和研究生層級。瑪麗亞·奧古斯塔擁有圣保羅大學的國際公法博士學位，以及南安普敦大學的海事法碩士學位（由英國文化委員會頒發的 Chevening 獎學金）。她在學術界之外的專業經驗包括在能源法及法規領域擔任爭端解決（訴訟和仲裁）律師。

在我國青年人才培育方面，本研究計劃培養了兩位碩士級研究助理，兩位均為國立清華大學環境與文化資源學系碩士班的研究生（或已畢業）。他們在研究期間積極協助資料搜集，並與各自的碩士研究論文相互融合進行學習與思考。其中，陳皇毓同學的碩士論文由本計畫主持人指導，專注於能源正義課題。在碩士學習及計畫執行期間，陳同學曾獲得清華大學國際事務處獎助，前往北京人民大學能源研究中心交流，協助蒐集中國大陸核能政策、兩岸核能合作、氣候合作及能源投資等資料。另一位杜育儒同學主要負責行政庶務與聯繫工作，目前已完成碩士學位，計劃進入新竹科學園區的企業從事 ESG 永續相關工作。

本研究案在執行過程中，也與上述英國學術機構進行了合作。未來，希望能在臺灣與英國討論雙邊投資協定時，對於雙邊的能源與氣候合作有更多深入探討，例如英國核能電廠的核安全、除役規範及技術等。

本研究在執行過程中，特別感謝核安會、清華大學、英國劍橋大學與諾丁漢大學、以及 OECD 核能署 NEA 的全力協助。在結論上，本研究認為對於原子能訴訟的探討僅為起點，因為它提供了一個從個案出發觀察國際法規及各國核能法規影響爭端案件的機會。未來對於原子能訴訟與爭端的研究應當持續進行，尤其應加強國際面向的分析。具體而言，應深入研究國際能源法、國際環境法、國際人權法及國際經貿法在各個案件中的原則與規範如何相互對話與影響。

此外，在我國脫離國際能源組織的脈絡下，未來如何妥善處理具有跨境影響的原子能訴訟，以及因應具有跨境效應的原子能事件（如日本核廢水排放、核子保防問題、兩岸核電廠安全通報等），可能將是值得持續研究的重要方向。

重要參考文獻

中文部分

[1] 陳春生著：核能利用與法之規制，元照出版社，1995 年 11 月。

[2] 葉俊榮，氣候變遷治理與法律，臺大出版中心，2015 年 3 月。

[3] 葉俊榮, 張文貞, 施文真, 許耀明, 汪信君, & 林春元. (2014). 氣候變遷的制度因應: 決策, 財務與規範 (Vol. 1). 國立臺灣大學出版中心.

[4] 周桂田，風險社會典範轉移：打造為公眾負責的治理模式，遠流，初版一刷，2014 年 9 月。杜文苓，環境風險與公共治理：探索臺灣環境民主實踐之道，五南，2015 年 4 月。

[5] 吳庚，行政法之理論與實用，行政法之理論與實用，三民書局，增訂 16 版，2020 年 10 月。

[6] 宮文祥. (2022). 從氣候變遷到能源轉型—— 幾點爭議問題初探. Taiwan Law Review, (330). 潘俊良. (2022). 歐盟永續金融法制發展對我國之借鏡. 科技法律透析, 34(10), 52-71.

[7] 王韻茹. (2019). 接近司法之權利內涵的擴張-以歐洲環境法與德國環境救濟法作為觀察. 中正大學法學集刊, (62), 171-249.

[8] 柯澤東著：核能安全與核子損害賠償 ，經社法制論叢，1989 年 1 月。

英文部分

[1] Blix, H. (1989). The role of the IAEA in the development of international law. Nordic Journal of International Law, 58(3-4), 231-242.

[2] Cameron, P., & Harcher, L. (1988). Nuclear energy law after Chernobyl.

[3] Davies, L. L. (2011). Beyond Fukushima: Disasters, nuclear energy, and energy law. BYU L. Rev., 1937.

[4] Elbaradei, M., Nwogugu, E., & Rames, J. (1995). International law and nuclear energy: Overview of the legal framework. IAEA Bulletin, 37(3), 16-25.

[5] Handrlica, J. (2019). Nuclear law revisited as an academic discipline. The Journal of World Energy Law & Business, 12(1), 52-68.

[6] Heffron, R. J. (2021). What Is Energy Law?. In Energy Law: An Introduction (pp. 1-13). Springer, Cham.

[7] Hsiao, H. H. M., Stone, R. A., & Chi, C. C. (2001). Taiwan environmental consciousness: indicators of collective mind toward sustainable development. Research for Sustainable Taiwan, 4, 1-33.

[8] Jenkins, K., Heffron, R. J., & McCauley, D. (2016). The political economy of energy justice: A nuclear energy perspective. In The palgrave handbook of the international political economy of energy (pp. 661-682). Palgrave Macmillan, London.

[9] Lamm, V. (1984). The utilization of n*uclear energy and international law*.

[10] Molodstova, E. (1994). Nuclear Energy and Environmental Protection: Responses of International Law. Pace Envtl. L. Rev., 12, 185.

[11] Murray, R., & Holbert, K. E. (2014). Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. Elsevier.

[12] Nick, K. (2018). International Nuclear Law Essentials in Singapore. *N*EA News, 35(2), 19-19.

[13] Pelzer, N. (1987). The impact of the Chernobyl accident on international nuclear energy law. Archiv des Völkerrechts, 25(3), 294-311.

[14] Putra, N. A. (2017). The dynamics of nuclear energy among ASEAN member states. Energy Procedia, 143, 585-590.

[15] Salimi Turkamani, H. (2019). Interaction and contrast of international environmental law and international nuclear energy law in nuclear accident in Fukushima power plant. Research Letter of International Relations, 12(46), 177-205.

[16] Viñuales, J. (2022). The International Law of Energy (Vol. 164). Cambridge University Press.

[17] Wildermuth, A. J. (2011). The Next Step: The Integration of Energy Law and Environmental Law. *Utah Envtl. L. Rev.*, 31, 369.

資料庫、網頁或其他新聞資料

[1] 行政院，本院新聞，核能安全委員會揭牌成立 陳揆期許與全民共享核安、輻安管制及原子能民生應用成果 2023.9.27 https://www.ey.gov.tw/Page/9277F759E41CCD91/89202d8a-2157-42a4-a933-d595dddf92c7 (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[2] 核能安全委員會，關於本會，沿革與任務 https://www.nusc.gov.tw/%E9%97%9C%E6%96%BC%E6%9C%AC%E6%9C%83/%E6%B2%BF%E9%9D%A9%E8%88%87%E4%BB%BB%E5%8B%99/%E6%B2%BF%E9%9D%A9--1_10_60.html (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[3] 核能安全委員會，新聞稿: 核能安全委員會揭牌成立 以獨立、專業與客觀提升我國核安管制效能 2023.9.27 (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[4] 核能安全委員會，焦點專區，輿情回應 https://www.nusc.gov.tw/news/publicopinion.html (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[5] ACCC/C/2013/91 United Kingdom, UNECE

[6] Chinese official slams Japan's nuke wastewater dumping, State Council Information Office PRC http://english.scio.gov.cn/m/chinavoices/2023-09/27/content_116714999.htm (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[7] EDF, The reactor at Hinkley Point C https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects/hinkley-point-c/reactor (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[8] EU taxonomy for sustainable activities, EU Commission, Finance https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[9] Platform on Sustainable Finance, European Commission https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/overview-sustainable-finance/platform-sustainable-finance_en (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

[10] United Nations, Global Issues, Atomic Energy, https://www.un.org/en/global-issues/atomic-energy (最後瀏覽日期: 2023.10.30)

化學遊樂趣 － 從貴重氣體到原子能科學
Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號：NSTC 112-Nu-E-032-002-NU
計畫主持人：陳曜鴻
e-mail：123551@o365.tku.edu.tw
計畫參與人員：高憲章、林佑燐、吳勇慶、范靜怡、施佳妤
執行單位：淡江大學理學院科學教育中心

摘要

本計畫由化學角度介紹貴重氣體，引入游離輻射的偵測、防護及其應用等等，並搭配碘元素相關的實驗及以蓋格計數器為基礎的科普實驗，分析環境輻射值並進行討論。

所有活動所需的設備將搭載於化學遊樂趣的科普服務資源中，透過車輛載具將活動帶入教育資源缺乏的地區，以提高偏鄉或弱勢地區學子對基礎科學的興趣，並為各地教師帶來補充的教學內容，在計畫時程內，化學遊樂趣巡迴了 73 場次。

化學遊樂趣活動以表演、故事 、動手做及分析實驗的單元組合，透過化學車及分析車的單元區分來因應不同程度的學生，傳遞科普知識，希望學生能輕鬆快速的學習到正確的能源相關知識，在未來面對原子能議題時，能夠以科學的角度分析與判斷。

關鍵詞：化學遊樂趣、原子能科學、輻射實驗、輻射防護、輻射應用

Abstract

The project continued the achievements aiming to enable school students, teachers, and the general public to learn about radiation and atomic science through experiments. The Science Education Center, organized the "Chemistry On the Go" activities, hoping to promote radiation education based on chemical knowledge to various sectors of society through the implementation of this activity.

Two modified trucks as mobile lab and analyst lab carried radiation and chemistry course plans to schools and regions in Taiwan with relatively scarce educational resources. This provided opportunities for students and teachers participating in the activities and experiments to learn about atomic science knowledge. Additionally, by setting up stands at science fairs, the program facilitated multifaceted exchanges and cooperation, connecting more students, teachers, and schools with potential needs. This aimed to expand the person and regions receiving radiation science education, achieving a broader dissemination of atomic science education. Through the design and development of course plans such as "Scientists' Stories," "Stage Performances," "Radiation Measurement," and "Chemistry Experiments," suitable popular science materials and resources were provided to students and teachers in different regions to help them further engage in self-directed learning. It is anticipated that this teaching method and its goals will increase the reach of atomic science knowledge and enhance the public's understanding of basic radiation knowledge.

Keywords: Chemistry On the Go、Atomic Science、Radiation Experiment、Ionizing Radiation、Radioactive Elements、Radiation Protection.

I. 前言

現今科技與媒體發展快速，生活中已極易透過各式主流及自媒體取得資訊，但科學知識的取得卻變得更加零碎及片面。對於社會民眾而言，能源及輻射相關議題，在沒有意願耐心自主學習或透過適合管道了解的情況下，容易演變成謾罵聲或視為不安全的代名詞，因此社會大眾對於原子能知識的認識，常透過各種網路文章的轉傳，會從具有爭議的歷史角度進入，以較負面看法來詮釋原子能。但原子能在基礎科學領域及科技發展的影響，廣泛深入地遍及能源、醫學、農業、工商及學術研究之中，對人類社會發展扮演非常重要，因此需要將原子能科普知識推廣於社會民眾，為輻射重新樹立正確的價值觀。

「化學遊樂趣」活動是臺灣國內重要的化學領域科普活動之一，由淡江大學理學院科學教育中心主辦，長期深耕於臺灣的化學科普及教育的推廣，活動利用改裝的貨車做為行動載具，過去十多年來將各種化學科普教育資源持續不斷地帶入臺灣各地教學資源缺乏的地區及學校，舉辦了共超過七百場的大小科普活動，所接觸的國中小、高中生及一般民眾超過十萬名以上。本計畫以化學遊樂趣活動為基礎，將一系列從化學角度詮釋的惰性氣體及其電子組態教案帶入活動之中，與輻射、放射性元素及輻射防護概念做連結，順便帶入原子能在能源、醫學等應用知識，以輕鬆活潑的角度進入原子能科普知識，我們將活動帶入臺灣各地，為年輕學子們建立地正確的原子科學知識。

科普活動一直以來在社會之中，扮演著讓民眾有更多機會認識科學知識的角色，並提高民眾對於科學的好感與興趣，可有效拉近政府政策與民生活動之間的距離，也降低了學術研究在人們心中的困難程度，因此適合且正確的科普教材及活動辦理就顯得更為重要。原子科學是種橫跨物理、化學、生命科學等基礎科學的知識，若能透過計畫常年且有效地持續執行，將知識擴及臺灣各地，那未來年輕學子一輩成為社會活動主力時，就能以更客觀的角度對相關議題做出討論及給出適當的判斷。

II. 主要內容

計畫執行期間，化學遊樂趣以化學車活動將原子能科學相關的教案與實驗帶入各地校園內，活動前置作業包含：與參與學校聯繫討論需求、實驗教案設計、化學車車況及實驗器材整備、工讀生及學程生募集與培訓等作業，準備完成後即開著化學車至學校辦理包含三個節目的一日活動課程。活動單元簡述如下:

(1)化學魔術秀：透過將化學車單側開啟歐翼而變形的舞台做為活動的表演中心，以主持人表演脫口秀及魔術的方式，吸引同學們的注意，讓學生能在輕鬆歡樂之餘認識化學及體驗它的樂趣。

(2)化學的故事：設計講座介紹化學家的故事，從諾貝爾獎開始介紹到瑪麗居禮的故事，衍生出游離輻射與非游離輻射的區別，並介紹到輻射的應用與防護，講座知識也會結合諸多時事、議題等，分析生活中所碰到原子能科學相關時事，正確的解說給參與的同學。

(3)實驗動手做：化學車所巡迴的地區以偏遠地區及化學教育資源缺乏的都市邊陲地帶學校為主，受限於校內科學教師缺乏、實驗器材不完備或實驗課程時間不易取得等因素，讓學生無法透過實驗進行學習，其中原子能科學相關實驗更為少見，我們設計知輻習輻與三碘一課兩個實驗，用於化學遊樂趣實驗動手做的環節，指導學生從操作中學習步驟背後所代表的輻射及化學知識。

本年度的計畫中由化學的角度介紹貴重氣體，設計四頁的四格漫畫從貴重氣體介紹到游離輻射的特性及防護的方式，除了漫畫之外，每一幅漫畫後都會有淺顯的文字詳細解說漫畫的核心概念，介紹如下：

(1) 究極防禦、絕對安定



這幅漫畫的主角是氦氣，在貴重氣體一族中，原子量最小的元素，原子序為 2，惰性氣體在常溫常壓下是無色無味的單原子氣體，很難與其他物質進行化學反應，因此惰性氣體化合物非常罕見。在原子結構理論中，惰性氣體原子外圍的電子數達到滿編，難以取走或是加入額外的電子，所以惰性氣體非常安定。氦的原子核中有 2 個質子、2 個中子、再加上最外層已經填滿了 2 個電子，形成結構非常穩定的元素。

宇宙中，恆星產生能量的方式是核融合反應，新的氦原子核就是在核融合反應中產生的，是可觀測的宇宙中含量最多的元素之一。此外，很大質量的原子核會自發性的放出輻射線，其中的 α 射線為一種放射性粒子，此種粒子組成即為氦的原子核。

(2) 完美組態，多重放射



第二幅漫畫的主角是氖，很常見的霓虹燈填充氣體，會發出橘紅色的光，氬則是地球大氣層中第三多的氣體，也是地殼中含量最多的惰性元素。用來偵測輻射的蓋格計數器中，填充的氣體通常就是非常安定的氬氣。此外也介紹到原子序 86 的氡氣，是惰性氣體中非常特別的存在，自然界的氡氣通常是釷和鈾在釋放輻射線後衰變所產生，常溫常壓下每一種氡氣的同位素都具有放射性，使得氡氣變成我們生活環境中，最主要的背景輻射來源，在不同的場所，氡氣濃度會有顯著的差異，在地下室或密閉空間中，氡氣的濃度比較高，如果常常居住在這些氡氣濃度比較高的地方，氡氣可能會被吸入肺中後產生衰變，因而提高得到肺癌的機率。

(3) 高能領域、電磁游離



第三張是在解釋電磁波的特性並引入到輻射，以波的形式傳遞能量和動量，電磁波的強度，依據波長和頻率來決定，波長越短頻率越高能傳遞的能量就越大，又被稱為輻射。波長比較長的輻射，可能會造成分子震動或轉動，因此照在身體上可能就會覺得身體在發熱，而波長短的輻射，就有可能把原子或分子上的電子游離化，讓這個電子被激發或是飛去無限遠的地方，這種輻射照在身上就可能造成有些分子發生肉眼看不見的改變。這些具有游離電子的高能量電磁波，被稱為游離輻射，而能量低的、不會讓電子被游離的輻射就稱為非游離輻射。在我們常聽到的電磁波中，無線電波、微波、紅外線都是非游離輻射，而 X 射線、β 射線或是 γ 射線都是游離輻射。

(4) **時空阻隔、一瞬永恆**



最後一頁的漫畫介紹的核心是時間、屏蔽與距離的關係，輻射照射人體的過程，稱為輻射暴露，分為體內和體外兩種。放射性物質攝入體內就無解，比方說吃了放射性物質或是被放射線污染的物質。但若是體外暴露，原則上暴露時間越短越安全，若能迅速遠離輻射源，當距離拉開到原先距離的兩倍，基本上輻射劑量就能被降低到四分之一。用鋁製材料可以吸收β射線或是更弱的游離輻射，而需使用足夠厚度的鉛板才能對阻隔γ射線或 X 射線產生效果。

常用游離輻射劑量單位是西弗(ㄒㄧˊ)，坐飛機來回飛一趟台北紐約會接收到約 0.0001 西弗的游離輻射，照一次胸部 X 光則會接受到 0.00002 西弗，台灣人每年接受到的天然背景游離輻射劑量約 0.00016 西弗。

化學遊樂趣活動以這四幅漫畫為核心，在活動的故事單元及動手做實驗的環節中，由貴重氣體出發，用最淺顯易懂的方式帶領國中同學進入原子能科學的領域。

III. 結果與討論

化學遊樂趣活動的舉辦地點在計畫年限內分佈於全臺數個縣市，以淡江大學為出發點，進行高度的產官學研合作活動，將此教育服務資源推送至全台各地。在計畫執行期間，化學遊樂趣巡迴的場次如 (表一)，其中約有 45%的活動地點屬(極)偏遠或非山非市學校，總共約有 8944 位師生及民眾（男性：4518 位、女性 4426 位）參與化學遊樂趣活動。化學遊樂趣的主要服務對象是國中生，我們也鼓勵參與活動的學校教師參與活動，參考化學遊樂趣所設計出的教學方式與內容，在日後有機會可以將這些素材教給更多學生。化學遊樂趣的活動中，另外提供專業的輻射及化學實驗課程給高中生，同時也支援全臺不同地區舉辦之大型科普教育推廣活動，以協助民眾及社會中不同族群有機會認識原子能與輻射知識。

化學遊樂趣活動要求參與活動學員至少一定要在活動日中參與實驗動手做的單元。這個單元在每場活動中至少使用一個半小時，安排三個不同的實驗，計畫中所設計的三碘一課及知輻習輻及安排在實驗動手做的環節中進行操作，實驗中的講師及助教皆由科教中心助理或由接受過教育訓練的義工團隊成員所擔任，指導同學從操作中了解實驗背後所隱藏的科學知識。

「知輻習輻」實驗利用含有貴重氣體「氪氣」做為填充氣體的蓋格管，進行游離輻射偵測。將蓋格管與電子零件組裝成輻射偵測器，並從生活中及自然界取得輻射源、屏蔽板材等物品做為偵測目標，貴重氣體的漫畫輔助學習輻射偵測與輻射種類的概念，學生可以在學習完整課程之後，重新以正確的觀念認識輻射及原子能科學。

「三碘一課」實驗從碘元素的三態：固態、液態、氣態做為知識出發點，利用生活中易取得的熱水、優碘及去漬油等材料，搭配團隊設計出碘元素三態變化的同時，進而接觸到與原子能歷史故事中會出現的碘片、碘131、日常飲食缺乏碘元素易造成的疾病、核子事故及輻射汙染等科學知識及社會議題，另外食安問題也常見於社會事件之中，這就需要讓學員知道化學實驗常用到的碘酸鉀(KIO3)與加碘鹽的關係，以碘元素知識做為啟始點，配合貴重氣體的漫畫延伸同學認識生活中常見的放射性元素(如氡氣)、物質及輻射防護三要素。

臺灣國高中校園裡，具有原子科學專長的老師數量稀少，在非山非市或偏遠地區，更有因師資不足而使理科老師並非專業學系畢業的問題，而原子科學教案的設計、準備及教學，比起物理及化學學科更需具有一定的認知，例如：偵測儀器的選擇、放射性物質的取得、實驗操作方式等教學內容，皆是國高中端理化課程裡很難執行原子科學教育的原因。另外，維護學生實驗安全、處理及保存實驗廢棄物等事情，在正常的校務運作、學習與考試之後，難有足夠的時間或空間讓學生充份體驗實驗課程。因此，化學遊樂趣活動招募由理科學系畢業的人才，組成行動團隊，將活動內容設計成提升學生接觸科學意願、引起自主學習興趣、並在校內能與同學合作探索與學習，將課本裡提到的科學知識及國內外科技產業現況，以簡單明瞭、容易操作的型式傳播於許多校園社區之中，補足理化、原子科學教育在國內非山非市或偏遠地區的相對缺少的教育資源。

表一，2023/01/01-2024/03/31 化學遊樂趣巡迴表

場序	日期	地點	學校/單位
1	1/18	高雄市	一甲國中
2	1/19	高雄市	甲仙國中
3	2/22	桃園市	興南國中
4	2/24	桃園市	大園高中
5	3/1	宜蘭縣	羅東高中
6	3/2	台北市	內湖高中
7	3/11	台中市	成功國中
8	3/14	新北市	土城國中
9	3/15	新北市	桃子腳國中小
10	3/17	新北市	達觀國中小
11	3/20	新北市	平溪國中
12	3/23	新北市	秀峰高中
13	3/28	新北市	樹林高中
14	3/31	新北市	石碇高中
15	4/7	新竹市	博愛國中
16	4/11	新北市	自強國中

17	4/18	新北市	安溪國中
18	4/20	桃園市	內壢國中
19	5/4	桃園市	福源國小
20	5/22	新北市	石碇高中
21	5/23	新北市	萬里國中
22	5/24	新北市	三峽國中
23	5/25	新北市	三芝國中
24	5/30	新北市	中山國中
25	6/1	新北市	金山高中
26	6/7	桃園市	新屋高中
27	6/14	南投縣	仁愛國中
28	6/15	南投縣	魚池國中
29	6/16	南投縣	旭光高中
30	6/27	新竹市	水源國小
31	7/21	新北市	淡水國中
32	8/21	花蓮縣	玉里高中
33	8/22	花蓮縣	瑞穗國中
34	8/23	花蓮縣	鳳林國中
35	9/13	嘉義縣	民和國中
36	9/14	高雄市	田寮國中
37	9/15	高雄市	前鎮國中
38	9/22	苗栗縣	南和國中
39	9/23	苗栗縣	致民國中
40	10/17	桃園市	觀音高中
41	10/20	高雄市	科工館
42	10/23	雲林縣	林內國中
43	10/24	雲林縣	石榴國中實驗學校
44	10/25	雲林縣	東勢國中
45	10/28	新竹縣	博愛國中
46	11/9	高雄市	興仁國中
47	11/10	高雄市	大社國中
48	11/14	高雄市	金竹國小
49	11/15	高雄市	道明高中
50	11/21	台南市	安順國中
51	11/22	台南市	新興國中
52	11/23	台南市	下營國中
53	11/30	台中市	東新國中
54	12/1	台中市	和平國中
55	12/6	雲林縣	口湖國中
56	12/7	雲林縣	水林國中
57	12/8	雲林縣	虎尾國中
58	12/14	新北市	北港國小
59	12/20	台南市	海佃國中
60	12/21	台南市	大橋國小
61	12/21	高雄市	五甲國中
62	12/22	台南市	永康國中
63	1/18	高雄市	甲仙國中
64	1/19	高雄市	五甲國中
65	1/30	彰化縣	二林高中
66	1/31	彰化縣	員林高中
67	3/4	新北市	欽賢國中
68	3/8	新北市	永和國中
69	3/12	新北市	鶯歌國中
70	3/14	新北市	清水高中
71	3/15	新北市	中正國中
72	3/29	新北市	大觀國中

IV. 結論

目前臺灣數位學習方式已逐漸並行或取代傳統紙本教育，在大量數位資訊及方便行動載具充斥的時代，越來越多知識可以快速取得，然而對於教育資源及師資提供缺乏、學習意願低落或家境狀況有條件的學生而言，若沒有足夠的機會正確並適當引導學生對於科學產生興趣及啟發，那真是很可惜的事情。新冠病毒疫情、核四公投，皆是社會中常見充斥著許多似是而非的言論及報導，讓社會民眾在沒有背景知識下容易產生誤解及恐慌的最好例子，因此科學知識推廣的立即與急迫性，正確科學資訊及觀念的建立，才有助於民眾提升自我判斷事件是非的能力。透過辦理科普活動提高學生學習科學的意願、刺激校園自主探究研習的氛圍並啟發年輕學子進入科學領域工作，是化學遊樂趣重要的任務與使命，我們希望持續結合社會各界力量與支援，提高此教育方式在各界的影響力，讓自主學習、認識科學、探索與實做、學術與應用透過最普及的方式帶給與科學有緣的不同族群。

參考文獻

[1] 110 年度原子能科技學術合作研究計畫成果發表會論文集。

[2] 111 年度原子能科技學術合作研究計畫成果發表會論文集。

『原』來是這樣！ 原子能科普桌遊教材研發與活動推廣
The Project to Develop Board Game Teaching Material and Activities for Atomic Energy Popular Science

計畫編號：112-NU-E-227-001-NU
計畫主持人：潘愷
e-mail：kaipan@ntunhs.edu.tw
計畫共同主持人：方文熙
計畫參與人員：莊宜倫、洪儷華、陳筠晴、潘韋如
執行單位：國立臺北護理健康大學 嬰幼兒保育系(所)

摘要

我們身處的自然環境中，本就存在著各式能量大小不同的「輻射」；惟多數民眾的科學知識普遍不足，再加上某些主觀意識型態的非理性態度，進而對「輻射」或「原子能」等相關的議題，往往省略檢視與查證的科學步驟而以訛傳訛。但是，七～九年級的國中階段學生將自然領域理化課程中的原子相關知識視為考試內容，而非日常生活中所需要理解的常識；實際上，這些與生活息息相關的「輻射」或「原子能」知識，應該被大家理解與正確認識。

鑒於青少年學習的被動性與著重有趣性的特質，本計畫係以國中學生現有理化知識為基礎，融合生活科技與健康教育範疇的應用，研發目標族群學生適用的「原子少年學堂」系列桌上遊戲：「『原』來是這樣！中學生的 24 堂原子課」與「青蛙王子變身記」及「原子少年學堂」1 小時課程簡報進階學習教材，同時辦理有 39 場次，每場 2 小時的「原來是這樣！」研習活動（包括桌遊競賽與輻射儀器環境檢測），共有 595 位（女性：324 人，54.5%，男性：271 人，45.5%）師生共同參與，科普推廣活動辦理總時數累積計有 60 小時；活動結束後對學習者進行科學桌遊學習成效評量均達 4.13 分以上（滿級分 5 分），原子能知識的正確率達 87%以上。本計畫研發之「原子少年學堂」系列桌上遊戲與簡報教材，除可提供給國中自然科教師作為原子能相關課程之補充教材外，也適用於學生在非制式教學管道外，自學原子能應用與環境輻射知能之自學教材。

關鍵詞：原子能科普知識、國中學生、桌上遊戲

Abstract

In our environment, there are various kinds of "radiation" with different energy levels. Most people do not have enough scientific knowledge, and because of the irrational attitude of certain subjective ideologies, they often omit the scientific steps of examining and verifying "radiation" or "atomic energy" and pass on falsehoods. However, middle school students in grades 7-9 regard atomic-related knowledge in science and chemistry courses in the natural world as test content, rather than as common knowledge to be understood in daily life. In fact, this knowledge of "radiation" or "atomic energy" should be valued and understood for everyone.

Therefore, in view of the passive nature of learning and the emphasis on fun for teenager, we integrate the application of life science and technology and health education for the junior high school students, compile the atomic energy science teaching materials for the target group of students, and develop the "Atomic Junior Academy" series of tabletop games. There were thirty-nine 2-hour "So That's It!" training activities (including board game competitions and radiation equipment environmental testing) held at the same time, with a total of 595 (females: 324 people, 54.5%, men: 271 people, 45.5%) teachers and students jointly participated, and the total hours of science popularization activities totaled 60 hours. After the activity, the learners' scientific board game learning effectiveness evaluation was over 4.13 points (full score is 5 points), and the correct rate of knowledge about atomic energy test is over 87%. The "Atomic Youth School" series of board games and presentation teaching materials developed by this project can not only be provided to junior high school natural science teachers as supplementary teaching materials for atomic energy-related courses, but are also suitable for students who want to self-study atomic energy applications through non-standard teaching model.

Keywords: popular science of atomic energy, junior high school student, board game.

I. 前言

行政院於 1991 年發布我國原子能應用發展方針，即明定我國秉持原子能和平用途的一貫政策；歷經多年發展，原子能在國內醫、農、工業界都有相當普遍的應用，其中由以核能發電對經濟發展的貢獻最為顯著（行政院臺八十科字第 17871 號函，1991）。另，行政院於 2010 年頒布環境教育法（環境保護署，2010），祈能促進國民瞭解個人及社會與環境的相互依存關係，增進全民環境認知、環境倫理與責任，進而維護環境生態平衡、尊重生命、促進社會正義，培養環境公民與環境學習社群，以達到永續發展。環境教育所涉獵範疇很廣，大至

全球性議題，如能源耗竭、全球暖化，小至個人所處環境的空氣品質、家庭、社區的垃圾廢棄物等；而通常最讓學習者感興趣，願意主動去探索的，往往是與其切身生活經驗最有關聯的議題（陳志欣，2002）。科技進步以後，在各行各業等領域也都廣泛應用各式原子能相關的設備，包括醫療、工業、研究、國家安全以及環境保護各方面。惟，近年來，國內由於某些族群意識型態或政治因素的影響，讓某些與民生相關的公共議題，無法客觀的根據專業科學證據做決策，加上社群媒體刻意炒作下，原本應該是專業與科學的議題，往往卻由非科學專業背景的政論家意見，成為一般民眾的學習教材。多數民眾科學知識普遍不足，對於輻射或核能議題，通常感到陌生與不安，每當有重大核安事件發生，如烏克蘭車諾比電廠核災、日本福島電廠核災，國內核電廠存廢爭議、核災區進口食品安全等，再加上某些主觀意識型態的非理性態度，往往就省略檢視與查證的科學步驟而以訛傳訛（林群智，2006；施佩蓉，2016）。

審視現行國內正規教育歷程，對於和我們生活相關的「原子能應用」或「輻射」主題，並未見到有充分或完整的論述；國內原子能教育推行僅見於大專層級，而基層的能源教育也多著重於節約能源及再生能源教育方面，原子能教育並未被深入的探討及重視，使得民眾在原子能方面的知識嚴重不足。故當面對原子能範疇議題，包括食品中是否含有放射性物質的認知及是否可能會造成危害，抑或是在醫療過程中需經歷放射線診斷或治療的可能風險，甚至面對極端氣候與世界動亂，國內能源政策調整時的公民態度，往往會因道聽塗說，以訛傳訛，造成過度恐慌的疑慮。原子能與輻射存在於我們的周遭，其應用的領域又如此廣泛，它絕非洪水猛獸，只要能妥切的運用與適當的防護，我們就不會受到過多輻射曝露的危害。為減少無謂的焦慮，原子能教育需要向下紮根，有系統有計畫對青少年教導與推廣原子能相關知識與應用。透過規劃設計生動活潑的教學活動，培養青少年對於原子能的好奇心並對相關能源議題發生興趣，「原子能」科普教育之推廣普及有其必要性。因此，有鑑於：A. **國內各級學校原子能或輻射教育不足**：1991年行政院所發布的「原子能應用發展方針」中提到，加強各級學校之原子能知識教育，培養學生正確的認識。透過大眾傳播媒體及其他宣導活動，傳播原子能相關知識，建立社會大眾對原子能之共識。然國內中、小學課程中並無輻射教育教材與相關課程，平日之防災教育亦只包括地震、颱風、火災、水災，卻獨缺核安相關宣導；直自 2011 年因日本福島核電廠爆炸產生的輻射外洩問題，再掀核能安全問題，始讓臺灣重新審視核安教育，並祈在中小學課程裡加強輻射核能教育，讓中小學生了解核能面貌與核安資訊。教育部為建構學生正確核能觀念與輻射防護資訊，研訂「核能與輻射教育」教學模組，供學校下載使用（教育部，2011）。教育部曾鼓勵未設有核能相關科系之大學院校，開設「核能、輻射與生活」之通識課程，另在補助「大專院校安全衛生通識課程及教育訓練要點」中也明定內容應包括：游離輻射、非游離輻射及電腦作業危害與預防等。惟上項不論是對中小學或大專校院之措施，皆為鼓勵性質而未有強制性，事實上，各級學校中原本輻射相關學理背景之師資就不足，所以真正實施的成效並不彰或僅曇花一現而無延續性。B. **國中階段理化教學應有更多元面向的策略**：原子能或輻射科學的基礎原理源自於元素的原子結構，係屬物理、化學學習的範疇；而在科學學習的歷程中，國中階段（七～九年級）學生是最早開始接觸到元素、原子結構、波動、能量守恆等基礎理化的學理知識。從學生的學習面來討論，當學生學習動機愈高，通常更易有顯著的學習效果。只是在面對各學科教學的要求與各類考試的壓力下，臺灣中學生學習現況是「愈學，愈不想學」，而《親子天下》雜誌的調查更發現，國中生隨著年級愈高，學習的動機是愈低（許芳菊，2010），而且學生多半是對自己有興趣的科目才有較高的學習動機（沈雅惠等，2020），而張芳全（2018）更指出：國中生自然科的學習動機，更是隨著年級提高而逐年下降。國中階段的學習成效會影響到後續進入高中、職就讀時，類組或科別的選擇，當學生理、化科目學習成效不彰，避開自然類組或理工科別，是可以預見的結果，但若失去對問題探究的好奇與對事實求證科學態度，恐怕就是科學教育的隱憂。

II. 主要內容

鑒於國中階段學生學習的被動性與著重有趣性的特質，本計畫擬針對國中族群學生的理化知識程度與生活常識背景，融合生活科技與健康教育範疇的應用，研發系列桌上遊戲來彙編其所適用的原子能基礎與科普教材；同時辦理「『原』來是這樣！」科普推廣活動，讓學生藉由參與原子能科普桌遊活動，進一步活化其原子知識基礎學習，提升對原子能應用範疇理解的深度與廣度。教材彙編擬採跨域學門協同合作及 ADDIE 系統教學設計模式，並結合科普推廣活動，除導入理化基礎學理知識外，並強化原子能應用於環境生活議題的敏感度，進而提昇學生對原子能科學探索的興趣。

本計畫目標有二：一、研發「原子少年學堂」系列桌上遊戲；二、辦理「『原』來是這樣！」科普推廣活動

III. 結果與討論

本計畫先針對七～九年級國中生實施「原子能評量問卷」之調查，以瞭解目標對象對原子能應用的態度與知識能力；總共發出 1050 份問卷，共回收 817 份有效資料。其中性別比為男性 50.8%及女性為 49.2%；級別則以七年級學生最多，佔 51.7%，八年級學生次之，佔 25.7%，而九年級學生最少，佔 22.6%；問卷設計內容包含三種主題，分別為認識原子、認識輻射、輻射防護。在**認識原子**的題目中，對於「我害怕 X 光會有副作用的問題」，有 6.5%的受訪者非常同意，21.1%同意，而 51.3%表示沒有意見。在「我對原子能釋放高能量感到不安」題目上，有 10.0%的受訪者非常同意，23.4%同

意。在**認識輻射**的題目中，針對「我在意生活環境中的輻射」有最高的同意度，有 13.6%的受試者表示非常同意，25.9%的受試者表示同意。關於「我擔心手機基地台的電磁波」,只有 6.9%非常同意,但 56.4%沒有意見，顯示出受訪者在這個問題上持較為中立的態度。關於「我擔心用微波加熱後的食品會影響健康」，13.5%不同意，11.0%非常不同意，顯示出一定程度的擔憂。對於「我煩惱使用智慧型手機會接觸到電磁波」,有 14.0%非常不同意，顯示出一些擔憂。在**輻射防護**的題目中，針對「我對住在核能發電廠附近地區而感到焦慮。」本題有 20.4%的受試者表示非常同意，25.0%的受試者表示同意，而針對「我對新聞上出現核災、輻射等關鍵字會感到緊張。」本題有 16.2%的受試者表示非常同意，30.2%的受試者表示同意。

整體而言,國中生對原子能應用和輻射有不同程度的認知和擔憂（以 5 分量表計算,其平均值約 3.2 分)。對輻射的擔憂和核能發電廠附近地區的焦慮,引起了相對較高的關注。然而，在其他問題上，如手機基地台的電磁波，受訪者的態度相對較為中立。這些結果表明了國中生在科學知識和科學傳媒方面的不同程度的敏感性和認知。

另有針對原子能知識的問卷共有十題。問卷設計內容包含四種主題，分別為認識原子、認識輻射、原子能運用、輻射防護。

在原子能應用的題目中，針對「原子變化所產生的能量，可運用在醫療檢查、治療（胸部 X 光）或能源科技（核能發電）上。」本題正確率 88.0%，為十題中正確率最高且正確率達 80.0%以上，大多數的受試者能夠正確理解，原子能在醫療、能源及科技領域的應用。

在認識輻射的題目中，針對「到醫院接受 X 光照射檢查後,身體裡就會存留有輻射」。本題正確率 55.8%，為十題中正確率最低，近一半的受試者可能對輻射的概念理解不深，誤以為接受 X 光後會在身體內存留輻射

綜上,國中生在原子能和輻射領域有一定的認知和感受，但在一些方面仍存在一些誤解和擔憂。然而，他們對原子能知識的整體表現良好，也有較高的知識得分。這些結果可以為未來的科學教育和科普活動提供有益的參考，以進一步提高學生對原子能和輻射的理解和認知水準。

基於以上「原子能評量問卷」調查的統計結果，本計畫針對國中學生，編寫有「原子少年學堂－青少年原子能科普推廣教案」簡報教材，共 50 頁（適用於國中教師於課堂授課或學生個人自學用），內容包括「認識原子」、「認識輻射」、「原子能應用」、「輻射防護」及「生活實例」等五個部分，（簡報檔案全文如雲端連結：https://drive.google.com/drive/folders/1hLR1VJlC5cW4jjAB7iK_xSKGX3AHgULF?usp=drive_link；路徑→原子少年學堂原子能科普推廣→進階學習→ 112 原子能科普教案（國中生）-20230425.pdf

另設計有兩套科學桌上遊戲:原子少年學堂科學桌遊系列 1–『青蛙王子變身記』及原子少年學堂科學桌遊系列 2–『「原」來是這樣：中學生的 24 堂原子課』等兩套桌上遊戲，可提供給國中理化、健康教育科目教師，作為課程上介紹原子科學主題學理外的輔助教材，另外也可作為國中學生，在非制式教學管道外，自學原子科學與原子能應用之科普教材。桌遊簡介如雲端連結：https://drive.google.com/drive/folders/1hLR1VJlC5cW4jjAB7iK_xSKGX3AHgULF?usp=drive_link； 路徑→原子少年學堂原子能科普推廣→ 科學桌遊

針對「『原』來是這樣：中學生的 24 堂原子課」科學桌遊實施成效評量：共回收 284 份有效資料。其中性別比為男性 136（47.9%）及女性為 148（52.1%）；級別則以七年級學生最少，有 82 人（28.9%），八年級學生次之 97 人(34.2%)，而九年級學生最多，佔 105 人(37.0%)

評量結果顯示，參與原子能科學桌遊「原來是這樣！中學生的 24 堂原子課」活動的國中生普遍對桌遊的效果給予正面的評價。大多數受訪者認為這個桌遊養成他們對原子能或輻射的興趣,並表示在遊戲中學到相關名詞和新知。此外，受訪者也認為遊戲成功呈現原子能或輻射知識的因果關係，內容有邏輯且連貫，並能促使思考解決問題的方法。參與者在遊戲中能體會原子能或輻射的重要性，且認為遊戲目標、情境、和操作與相關內容有密切的關聯。結論中亦顯示，大多數受訪者對於再次參與、擁有、以及與他人一起玩這個遊戲的意願都表現出正面的態度。這個桌遊在提升國中生對原子能科學的關心與認識上取得良好的效果。在開放式的問題，讓學生提出他們的建議與想法。在「原來是這樣！中學生的 24 堂原子課」桌遊的整體評價普遍是正向，學生認為遊戲很有趣，且能夠從中學到關於輻射的知識。有些學生提到元素卡牌中 H、O 元素數量偏少，使得有些分子比較難組。此外，學生們也提到遊戲中出現原子能或輻射相關的名詞，但希望能夠更深入地了解相關知識。

整體而言,這些建議為桌遊的進一步改進提供有益的方向,這些正面評價反映桌遊滿足學生們對於娛樂和歡樂的期待。學生們也注意到桌遊教育的性質，希望在遊戲中同時獲得娛樂和知識。

另後測調查問卷中有關原子能應用的知識題共有 3 題。第 1 題「某些原子因為原子核不夠穩定，所以會將過多的能量釋放出來，這就是輻射。」正確率百分比：90.1%，表示學生對於原子因核不穩定而釋放能量形成輻射的認識相對正確，達到 90.1%的正確率。這顯示大多數學生對這一概念有較好的理解。第 2 題「環境中有各種能量不同的輻射，其中，游離輻射（X 光）的能量比非游離輻射（微波、電磁波）的能量高。」正確率百分比：81.3%，透露出學生對於環境中不同輻射的能量水平有一定的理解，正確率達到 81.3%。這顯示學生對游離輻射和非游離輻射之間的能量差異有較為清晰的認識。第 3 題「保護自己免於受到游離輻射傷害的基本要件，包括：減少與輻射源接觸的時間（Time）、遠離輻射

源（Distance）以及有適當的防護措施（Shielding）。」正確率百分比：92.6%，學生對於避免游離輻射傷害的基本要件有相當高的認識，達到 92.6%的正確率。這顯示學生對於減少接觸時間、保持距離和使用適當防護措施等基本原則有清晰的理解。

整體而言，學生對於環境輻射相關知識的正確理解程度高，雖然第二題百分比較低，但是也有八成的學生答對。這表明這個問卷有助於評估學生在這一領域的知識水平，並有助於指導未來教學的方向。

綜上，針對國中生參與「原來是這樣！中學生的 24 堂原子課」科學桌遊活動後的感知與原子能認識進行調查，結果顯示，本科學桌遊活動對國中生的原子能和輻射知識有正面影響，大多數受訪學生對桌遊的興趣、學習效果以及對原子能科學的關心與認識都給予正面評價。特別是在知識方面，學生對原子能的認識有顯著提升，正確率達到相對高的水平。學生提供對桌遊改進的建議，包括增加部分化學原子卡牌的數量，讓遊戲在進行過程中可以更順暢，也需要更多的基礎知識，才可以將科學桌遊活動掌握得更好。這些建議為未來改進桌遊設計提供有益的參考。

針對「青蛙王子變身記」科學桌遊實施成效評量共回收 297 份有效資料。其中性別比男性為 135(45.5%)及女性為 162 （54.5%）；級別則以七年級學生最少，有 13 人（44%），八年級學生次之 88（29.6%），而九年級學生 196 人最多（66.0%）

評量結果顯示：參與原子能科學桌遊「青蛙王子變身記」活動的國中生普遍對桌遊的效果給予正面的評價。大多數受訪者認為這個桌遊養成他們對原子能或輻射的興趣，並表示在遊戲中學到相關名詞和新知。此外，受訪者也認為遊戲成功呈現原子能或輻射知識的因果關係，內容有邏輯且連貫，並能促使思考解決問題的方法。參與者在遊戲中能體會原子能或輻射的重要性，且認為遊戲目標、情境、和操作與相關內容有密切的關聯。結論中亦顯示，大多數受訪者對於再次參與、擁有、以及與他人一起玩這個遊戲的意願都表現出正面的態度。這個桌遊在提升國中生對原子能科學的關心與認識上取得良好的效果。在開放式的問題，讓學生提出他們的建議與想法。對於青蛙王子變身記卡牌遊戲，學生對這個桌遊的意見多半是好的。一些學生也提出改進點。其中學生提到可以延長遊戲時間，以便更深入地體驗遊戲樂趣。此外，學生們希望增加卡牌的多樣性，使遊戲更富有變化和挑戰性。一些學生建議在遊戲前可以更詳細介紹卡牌功能，以幫助初學者更好地理解遊戲機制。除此之外，學生們提及在遊戲中可能產生衝突，建議分組時可以考慮和較為熟悉的人一起，以減少可能的矛盾。最後，一些學生注意到遊戲中出現原子能或輻射相關的名詞，但希望能夠更深入地了解相關知識。

整體而言，這些建議為桌遊的進一步改進提供有益的方向，以滿足不同學生的需求和期望。學生普遍認為遊戲非常有趣且娛樂性高。遊戲的機制讓他們在玩的過程中感到開心，並且桌遊的設計使得整體氛圍充滿歡笑。這些正面評價反映桌遊滿足學生們對於娛樂和歡樂的期待。學生們也注意到桌遊教育的性質，希望在遊戲中同時獲得娛樂和知識。

後測調查問卷中有關原子能應用的知識題共有 3 題。第 1 題「某些原子因為原子核不夠穩定，所以會將過多的能量釋放出來，這就是輻射。」正確率百分比：83.5%，表示學生對於原子因核不穩定而釋放能量形成輻射的認識相對正確，達到 83.5%的正確率。這顯示大多數學生對這一概念有較好的理解。第 2 題「環境中有各種能量不同的輻射，其中，游離輻射（X 光）的能量比非游離輻射（微波、電磁波）的能量高。」正確率百分比：83.8%，透露出學生對於環境中不同輻射的能量水平有一定的理解，正確率達到 83.8%。這顯示學生對游離輻射和非游離輻射之間的能量差異有較為清晰的認識。第 3 題「保護自己免於受到游離輻射傷害的基本要件，包括：減少與輻射源接觸的時間（Time）、遠離輻射源（Distance）以及有適當的防護措施（Shielding）。」正確率百分比：92.3%，學生對於避免游離輻射傷害的基本要件有相當高的認識，達到 92.3%的正確率。這顯示學生對於減少接觸時間、保持距離和使用適當防護措施等基本原則有清晰的理解。

整體而言，學生對於環境輻射相關知識的正確理解程度較高。這表明這個問卷有助於評估學生在這一領域的知識水平，並有助於指導未來教學的方向。報告的結果還顯示出有必要繼續加強學生對輻射知識的深入理解，以提高整體的認識水平。

綜上，國中生參與原子能科學桌遊「青蛙王子變身記」活動後的感知與原子能認識進行調查。結果顯示，「青蛙王子變身記」桌遊活動對國中生的原子能和輻射知識有正面影響，大多數受訪學生對桌遊的興趣、學習效果、以及對原子能科學的關心與認識都給予正面評價。特別是在知識方面，學生對環境輻射的認識有顯著提升，正確率達到相對高的水平。學生提供對桌遊改進的建議，包括增加遊戲時間、提升卡牌多樣性、更詳細介紹卡牌功能等。這些建議為未來改進桌遊設計提供有益的參考。

本計畫的桌遊推廣活動係針對全省各地區國中學生，辦理 39 場次，每場 2 小時的「『原』來是這樣！」研習活動（包括桌遊競賽與輻射儀器環境實務檢測），讓學生藉由參與原子能科學桌遊活動，進一步活化其原子知識基礎學習，提升對原子能應用範疇理解的深度與廣度；本期程總共有 595 位（女性：324 人，54.4%，男性：271 人，45.6%）師生共同參與，科普推廣活動辦理總時數累積計有 78 小時。

IV. 結論

本計畫所研發的兩套桌遊教案，評估其施作成效後，從相關數據分析上可得出幾項結論及後續調整方向：

一、「原來是這樣！中學生的 24 堂原子課」桌遊設計旨在原子能科普知識的傳達，從遊戲過程中來瞭解與自身

安全有關的知識或釐清相關的迷思，學生普遍覺得學習效果優於課堂講授（科學桌遊實施成效評量為 4.07，原子能知識評量正確率：88.0% ）；遊戲結束後擬將元素卡牌結合成分子物質的結算模式，對國中生而言似乎難度偏高，建議教師可介入指導為佳。

二、「青蛙王子變身記」桌遊設計在功能卡牌說明中輔以輻射防護知識的傳達；惟學生多專注於遊戲的競賽，自主學習的動機較弱（科學桌遊實施成效評量為 4.18，原子能知識評量正確率：86.5%）；本桌遊活動趣為卡牌競賽型式，樂趣性較高，但所能傳遞的知識量較少，本桌遊活動滿意度較高於前項桌遊，但知識的正確率就較低。建議若由教師先介紹原子能基本知識，再讓學生分組操作桌遊教案；桌遊活動結束後，可請學生綜整競賽心得，並將桌遊內容與課堂知識再次連結，強化學生再原子能知識學習上的成效。

三、從桌遊施作的成效評量（4.13）與知識正確率（87.25% > 前測 71.5%）數據來看，桌遊教案的遊戲規則簡單、知識概念易懂且趣味性高，學生也能從遊戲過程中理解到簡單的原子能知識與輻射防護原則，適合作為原子能應用的入門教材。

四、科學桌遊在原子能教育中具有明顯的潛在價值，不僅可以提高學生對科學知識的理解，還能激發他們對科學探究的興趣。然而，如何持續加強學生對原子能應用或輻射知識的深入理解，仍然是未來原子能科學教育的挑戰。

參考文獻

[1] 王佩瑜（2020）。磨課師影片式課程之設計、製作與實施：以通識「數位內容輕鬆做」為例。大學教學實務與研究學刊，4 (1) , 77-112。

[2] 王榮德、詹長權（1985）。核能電廠真的百分之百安全嗎？。健康世界。114，3-7。

[3] 王筱妮、梁淑坤（2018）。桌遊融入國小三年級數與計算課程之設計與反思。臺灣數學教師，39（2），23-49。

[4] 呂年振（2009）。青少年原子能教學活動設計暨數位學習應用之研究（未出版之碩士論文）。國立高雄應用科技大學，高雄。

[5] 吳建忠（2001）。環境放射性的認識之調查分析。化學。59（2），189-198。

[6] 林光賢（2012）。深耕核能教育之我見。核能資訊中心核能簡訊雙月刊。135，20-23。

[7] 林佳蓉（2009）。教學設計理論基礎與重要模式。載於台灣教育傳播暨科技學會（主編），教育科技理論與實務〔下冊〕（頁 89-119）。臺北市：學富文化

[8] 林進材（2018）。教學理論與**方法**（再版）。臺北：五南。

[9] 林群智（2006）。由核電爭議談核科學主軸之通識教育。**通識教**育與跨域研究。1(1)，19-26。

[10] 施佩蓉（2016）。日本三一一地震後臺灣反核輿論的解析：問卷調查研究。國際與公共事務。3，51-111。

[11] 徐照麗（2000）。教學媒體：系統化的教學設計、製作與運用。臺北市：五南。

[12] 財團法人核能科技協進會（2008）。核能、輻射與生活通識教材。教育部 95 年度委辦大專校院核能、輻射與生活通識課程推動工作計畫（案號：0950186706）。臺北市：教育部。

[13] 郭品君（2020）。福島核災事故發生 9 年後的食品風險感知：以臺灣食品安全相關研究所為例（未出版之碩士論文）。臺灣大學，台北。

[14] 莊閔盛（2004）。淺談核能教育。生活科技教育月刊。37(4)，73-77。

[15] 許芳菊（2015）。搶救國中生—失落的國中三年。親子天下。臺北市

[16] 盧秀琴、余岱瑾（2021）。開發「昆蟲仿生學桌遊」融入昆蟲單元教學以培養國小學生科學與科技素養。中等教育，72（4），30-49。https://doi.org/10.6249/SE.202112_72（4）.0028

[17] 盧秀琴、林毓哲（2018）。國小教師開發「昆蟲桌遊教具」以增強學童「沈浸經驗、科學過程技能」。課程與教學，21（1），105-131。https://doi.org/10.6384/CIQ.201801_21（1）.0005

[18] 盧秀琴、施慧淳（2016）。玩「昆蟲大富翁」遊戲培養國小學童的科學過程技能。科學教育學刊，24(1)，1-30。

[19] Jones, J. S., Tincher, L., Odeng-Otu, E., & Herdman, M. (2015). An educational board game to assist PharmD students in learning autonomic nervous system pharmacology. American Journal of Pharmaceutical Education, 79(8), 114. doi:10.5688/ajpe798114

[20] Johnson, M. M. (2015). Directed Reading. Radiation Protection Education in Fluoroscopy. Radiologic Technology, 86 (5), 511-528.

[21] Su, C.-H. (2016). The effects of students' motivation, cognitive load and learning anxiety in gamification software engineering education: A structural equation modeling study. Multimedia Tools and Applications, 75(16), 10013-10036. doi:10.1007/s11042-015-2799-7

科展用核能與輻射知識之跨平台電玩遊戲
Multi-Platform Game of Nuclear and Radiation Knowledge for Science Fairs

計畫編號：NSTC 112-NU -E-262-001 -NU
計畫主持人：陳彥均
e-mail：chen.mg.lhu@live.com
執行單位：龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系

摘要

對於兒童和青少年，電玩遊戲具有極高的吸引力。適合應用於科展等活動，向民眾宣傳科學知識。本計畫以核電廠除役為主題，開發互動電玩遊戲，並且在科展中展出。藉此，吸引民眾的興趣，前來了解核能和輻射的相關知識。因應網路線上科展的需求，本計畫使用跨平台的程式開發技術，讓民眾在各種不同的硬體設備上，都能夠執行本計畫所開發的電玩遊戲。

關鍵詞：電玩遊戲、核電廠、除役、科展。

Abstract

Computer games are attractive to children and teenagers. It is suitable to propagate knowledge in science fairs. This project developed a computer game of decommissioning of nuclear reactor facility. The game will be exhibited in science fairs. The public will learn nuclear and radiation knowledge through this game. A multi-platform programming technology will be applied to develop the game. This will make the game can be executed on different hardware and can be used in online science fairs.

Keywords: Computer games, nuclear reactor facility, decommission, science fair.

I. 前言

核能與輻射知識，是一般人比較不熟悉的領域。然而，核能與輻射具有許多應用，和民眾的日常生活相關。如果民眾缺乏正確的知識，則容易被坊間流傳的錯誤觀念誤導。因此，向民眾傳遞正確的核能與輻射知識，是一件相當重要的事情。在 2018-2019 年的開發與展出經驗之中，發現互動式電玩遊戲對於兒童和青少年，具有極高的吸引力。非常適合應用於科展等活動，向民眾宣傳科學知識。過去，本團隊已經針對核電廠事故、核電廠除役、輻射的民生應用三個主題，製作了 VR 程式。

在本計畫之中，以核電廠除役為主題，製作了一款知識型電玩遊戲。其中，具有核電廠除役的整個流程，還有三個互動小遊戲，包含了吊出核燃料棒、核電廠除汙與乾式貯存三個關卡。透過這個遊戲，讓民眾了核電廠除役的完整流程，以及相關知識。

II. 主要內容

本計畫所開發的電玩遊戲，取名為「核電廠除役大作戰」，遊戲的開頭畫面如圖 01。其中，包含了核電廠除役的完整過程，如圖 02 所示，以及三個互動小遊戲關卡。在第 1 個關卡之中，讓民眾操作吊車，把核燃料棒吊出冷卻池，如圖 03。在第 2 個關卡之中，介紹用過核燃料的處理方法，需要先運到乾式貯存廠，如圖 04。在第 3 個關卡之中，讓民眾操作汙染偵測，檢測核反應爐的汙染狀況，如圖 05。

因應後疫情時代，部分科展改成網路線上型式。因此，本計畫也將這款電玩遊戲，轉製成網頁版本。舉辦線上科展時，只需要租用網路伺服器，來架設這款遊戲。再將超連結放置在線上科展網頁。如此，民眾就可以透過網路瀏覽器，來遊玩本計畫所開發的遊戲。

除了開發新的電玩遊戲之外，本計畫也維護了過去幾年所開發的電玩遊戲。例如更新題庫，加入日本氚廢水的相關問答題目（圖 06）等等。

III. 結果與討論

本計畫的成果，授權給核能安全委員會免費使用。本計畫與先前計畫所開發的電玩遊戲，在核能安全委員會所參與的科展之中，進行實際進行展出，並且開放給民眾體驗使用。

IV. 結論

本計畫利用民眾有興趣的電玩遊戲技術，以核電廠除役為主題，開發了知識型電玩遊戲。藉此，吸引民眾了解核電廠除役的相關知識。本遊戲開發完成之後，授權給核能安全委員會使用。本計畫的整體成果，與原先的規劃大致相符。

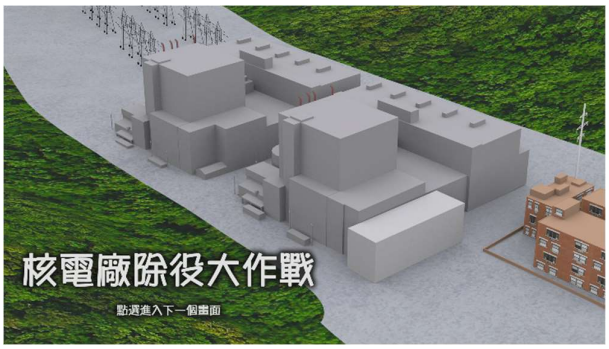


圖 01：遊戲開頭畫面



圖 02：核電廠除役流程

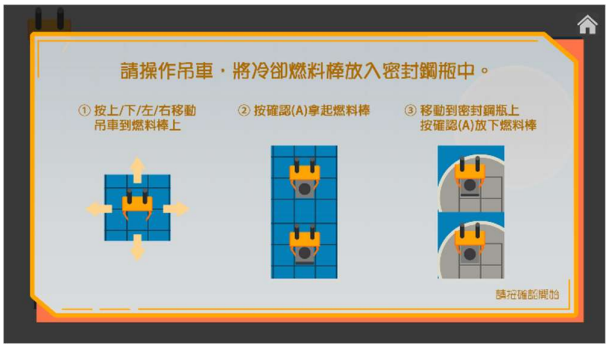


圖 03：關卡 1 之遊戲畫面



圖 04：關卡 2 之遊戲畫面

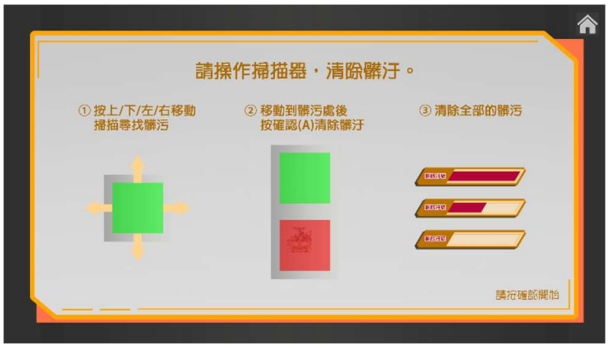


圖 05：關卡 3 之遊戲畫面



圖 06：舊有電玩遊戲維護更新

以性別平等與跨文化視角進行原子能科普傳播之研究

計畫編號：NSTC 112-NU-E-144-001-NU
計畫主持人：單文婷
e-mail：wenting@ntua.edu.tw
執行單位：國立臺灣藝術大學影音創作與數位媒體產業研究所

摘要

近期因我國奧運代表隊拳擊女將林郁婷在國際競技場上遭遇性別爭議攻擊引起國人憤慨，與此同時也讓學界反思全球倡議多年的性別平等究竟有帶來多大改變。無論在體育界、科學領域甚至各重要產業、前瞻研究等，不可諱言性別偏見問題仍然存在。本研究關心的議題除了原子能科普內容、以及持續發展的原子能領域中的性別平等現況外，也從包容性科學傳播這個新興領域視角思考原子能科普的內容製作。本研究目的盼持續推動原子能領域性別平等，鼓勵職場中的女科學家知覺性別平等的重要，並從舉辦相關座談、拍攝與訪談女科學家，紀錄職場中實踐性別平等之挑戰。另方面本研究也希望拋磚引玉嘗試從包容性科學傳播視角製作原子能科普內容，實踐包容性科學傳播，也為原子能科普傳播開啟跨文化新的篇章。

關鍵詞：原子能科普傳播、性別平等、跨文化、包容性科學傳播

Abstract

Recently, Yu-ting Lin, a female boxer on my country's Olympic team, was sexually assaulted during a competition, causing public outrage. This also made everyone reflect on how much change has been made after years of advocacy for gender equality? Whether in sports, science, industry, forward research, etc., the problem of gender bias still exists. In addition to the topics of atomic energy science popularization content, the continuing development of the atomic energy field, and the current status of gender equality, this study will also consider the content production of atomic energy science popularization from the emerging field of inclusive science communication. The purpose of this study is to continue to promote gender equality in the field of atomic energy and to encourage female scientists in the workplace to feel the importance of gender equality. From symposia, filming and interviews, we discuss the gender equality challenges faced by female scientists in the workplace.In addition, this study also attempts to produce atomic energy science popularization content from the perspective of inclusive science communication, practice inclusive science communication, and also open a new cross-cultural chapter in atomic energy science popularization communication.

Keywords: Atomic Energy Science communication, gender equality, cross-cultural, inclusive science communication

I. 前言

在撰寫此篇成果報告之際恰巧發生本次代表我國參與巴黎奧運並奪下金牌的拳擊選手林郁婷在國際運動場上以及社群媒體中遭遇性別攻擊事件。國際媒體斗大的報導英國女權團體「Fair Play For Women」在 X 媒體（原推特）上發文攻擊林郁婷，指出國際奧會辜負了女性運動員，並且表示林郁婷身高很高是必然的，因為他是男生[1]。這樣公然歧視我國女性運動員外貌身材的言論不僅讓國人憤慨，更遺憾的是在此事件中我們幾乎沒接收到任何體育相關團體、性別平等團體或是科學團體透過媒體斥責或出聲支持以平衡攻擊林郁婷性別的相關資訊。性別平等議題不會因為林郁婷奪下金牌就停止，在體育界如此，在科學界也是如此。值此之際研究與討論科學中的性別平等問題也顯得格外有意義。

近二十年來，科學中的性別平等問題持續再被討論，包括知名的國際科學理事會（International Council for Science, ICS）、世界科學院（TWAS）、發展中國家科學界婦女組織（OWSD）、世界工程組織聯合會（WFEO）等機構均起身倡議，呼籲全球政府要重視科學領域的性別平等，此必須起身行動而非口號，例如透過政策制定來提高女性在科學界的地位，或是提高女性參與科學決策、參與科學研究的人數等。另外，隨著社會更多元化發展，歐美國家科學傳播界出現比性別平等面向更深廣的「包容性科學傳播」（Inclusive Science Communication）概念，依據學者 Canfield 等人看法【1】，包容性科學傳播是指對不同族群、性別、宗教、教育程度、社會階級等群體，以包容的態度、公平的立場進行科學傳播。更進一步來說，包容性科學傳播也是一種有意識的、動態的傳播過程，需要隨時檢視自我以及調整【2】（Smith et al., 2020）。本研究目的一方面從性別平等視角，觀察與協助製作原子能科普內容，使其更符合性別平等精神。同時也嘗試從包容性科學傳播角度，討論原子能科普傳播內容除了性別平等外，還可以如何製作出符合包容性科學傳播的內容，藉此促進原子能科普走向更包容性、公平性的方向發展。

[1] X(原推特)上的原文為：RETWEET! The IOC has failed women A SECOND male boxer is now a female Olympic champion..Lang Yu-ting (XY) beats Julia Szeremeta (XX) Male power smashes female talent AGAIN

II. 主要內容

此次研究主軸分別從兩個方向出發：一、檢視近期性別視角下的科學傳播的發展方向。二、包容性科學傳播的概念意義與國際上的實踐情形。

首先梳理近十年以性別平等角度討論科學傳播發展方向的研究，幾乎結論都呈現出「革命尚未成功，同志仍須努力」之感慨，例如 Tucker-McLaughlin（2013）觀察媒體對科學家和 STEM 職業人員的報導發現，多數科學媒體報導充滿男性化認知，媒體報導的性別偏見不只加劇科學領域的性別鴻溝，也影響女性追求科學成就的潛在動力，降低她們選擇 STEM 工作的意願【3】。後續像是學者 Amarasekara(2019)調查發現，女性在科學、技術、工程和數學 （STEM）領域的工作經歷還是被邊緣化，這種結構性偏見包括獲得的獎項比男性少、薪水較低、被聘用的機會低、發表期刊被引用的次數較少【4】。儘管全球科學組織如前述的呼籲或倡議各界正視女性在科學領域的優秀表現，以及儘可能從制度上提高女性在科學領域的地位，但似乎成效有限。土耳其大學教授 Doğan（2022）在疫情期間進行調查研究，她希望了解大眾對女性科學家的偏見會不會影響其接種 COVID-19 疫苗的意願，結果發現新聞報導中強調疫苗發明者是女性或男性科學家確實會影響民眾對 BioNTech 疫苗的接種態度，尤其是對性別角色有刻板印象的受訪者，他們對女性發明疫苗、甚至對女性醫學家的專業是充滿疑慮的【5】。當然，學界鼓勵我們毋須太過悲觀，科學領域倡議性別平等的行動仍必須持續下去。另方面，本研究也好奇對於概念意義更寬廣的包容性科學傳播的實踐情形又是如何呢？

「包容性科學傳播」（ISC）的主要論點有兩個關鍵要素：其一是科學傳播不應區分性別、種族、階級、教育、宗教等，所有公眾都應該是科學傳播的對象。其二是應該要做到讓所有公眾「公平且實質」的參與科學討論，這個步驟必須有跨文化的融入整合來協助，例如文化、語言等。那麼實踐或研究結果又是如何？

Martin (2015)的研究發現提出三個面向：一、不應以個人為中心，減少使用模型或框架以便探索更多科學傳播中跨文化交流的樣貌。二、必須認知文化概念是流動的、動態的，甚至可能有爭議、多重身份等特質，因此科學傳播的表現也應該如是，具有動態特質。三、跨文化無可避免會遇上權力關係，如何公平對待跨文化科學傳播，也是包容性科學傳播會面臨的挑戰【6】。Dudo 等學者(2020)擴大解釋包容性科學傳播應該是「集中不同聲音和身分」，包括但不限於種族、區域、年齡、科學能力、社會階級、性別認同和公民身份」。但 Márquez & Porras (2020)的研究則指出，儘管越來越多的科普傳播者正在探討如何實踐包容性科學傳播，但此仍為一個新興概念，無論在理論或實務上都仍顯不足，學界必須持續探索與紀錄【7】。

III. 結果與討論

本計畫原預定之目標說明如下：

1.辦理性別與科學傳播相關講座，探討女性科學家如何覺知性別平等意識、以及科學領域中的性別平等情況。

2.配合原子能科普展，協助辦理以女性角色、或以女學生為主要受眾的原子能科學、科普相關活動。藉此鼓勵女學生理解原子能科學，提高女學生對學習科學的興趣。

3.拍攝短影片宣導原子能科學中的性別平等，提高公眾對科學領域性別平等概念。

4.首次以新住民公眾為研究對象，討論如何製作跨文化科學傳播內容，從包容性科學傳播的視角討論原子能科普之實踐情形。

5.從本研究執行過程中紀錄、檢視原子能科學傳播中可能存在的性別偏見、包容性科學傳播的推動情形等。並將紀錄以科學傳播之性別平等及包容性科學傳播等新興議題為主題進行研究論文撰寫與發表。

根據上述目標，本研究實際執行內容說明如下：

1.跟隨原能會科普展前進花蓮後山，在 112 年 4 月 30 日至 5 月 1 日配合原能會舉辦「原子探險趣行動科教館」活動，本計畫預先籌備製作科普展預告短片，以科普來到偏遠地區為主題進行宣傳片拍攝。而在活動當日，計畫團隊也跟隨來到後山拍攝、記錄偏遠地區孩子們參與科普展的感想與對未來的期盼(圖一)。



圖一　花蓮科普展現場側拍

2.計畫團隊在 112 年 6 月 1 日跟隨原能會來到新北市萬里的金山高中，金山高中位置較為偏遠，多數學生都是家住附近就近就讀，因此也較無機會接觸或參與科普展。此次原子能在金山高中舉辦科普闖關活動，讓偏遠區域的高中孩子們有機會近距離接觸原子能科普內容，尤其，團隊也注意女同學們對科普活動的參與興趣高，藉由拍攝過程，也鼓勵女學生們破除傳統「男理工、女人文」的刻板印象，鼓勵女生同學增加對原子能或各種科學領域的認識或閱讀相關資料，尤其數位媒體時代，也可以藉由參與各種線上的科普傳播活動認識科學更多元面貌(圖二)。



圖二　金山高中科普闖關活動側拍

3.112 年 8 月團隊前往台中拍攝與記錄原子能委員會與台中瑪麗亞基金會合作，帶著身障與弱勢孩子參與科普活動(圖三)。過程中也與家長討論經濟弱勢學生、身障學生、或是教育弱勢學生在接觸科學傳播的困難與挑戰，同時也記錄下原子能委員會同仁們如何藉由科普展實踐科普平權，讓外界看見公部門實踐包容性科學傳播的努力。



圖三 與台中瑪麗亞基金會合作讓科普傳播無障礙

4.為檢視與反思科學中的性別平等實踐情況，本計畫團隊在 112 年 7 月中旬拍攝訪問核能婦女學會 WIN TAIWAN 現任黃茹絹會長、以及清大原子能核子工程與科學研究所蔡惠予教授，以訪談方式採訪兩位對原子能科學領域中女性角色的看法以及對年輕女性加入原子能或科學領域的鼓勵(圖四)。



圖四　採訪清大蔡惠予教授側拍照

5.本計畫團隊在 112 年 10 月 31 日與核能安全委員會(前原子能委員會)合作共同辦理「科學領域 VS 女性角色」座談會，邀請到行政院性別平等委員也是女科技人薛文珍委員、前原子能委員會主委張靜文女士、台灣電力公司核能管制處王亭懿工程師等七位原子能領域女性分享自身經驗與探討女性、性別角色在科學領域的變化與感想，活動紀錄(圖五、六)。



圖五　行政院性平委員薛文珍委員演講



圖六 前原能會主委張靜文演講

6.本計畫團隊嘗試從新住民女性角度探討原子能科普傳播之跨文化意義。於 112 年 7 月邀請四位新住民老師(柬埔寨語孫雅雯老師、泰語呂曉昭老師、緬甸語李艷

菁老師、菲律賓語陳嘉絲老師等進行訪問討論、紀錄新住民老師如何看待科普傳播，分別從性別、族群、區域等角度討論之(圖七)。112 年 12 月再邀請三位新住民科普種子老師，包括越南武芳恆老師、印尼慕雅妮老師、泰國德秀老師，一方面邀請其協助翻譯核能安全委員會文宣手冊，再者也從翻譯過程中與其討論轉譯的觀點角度。



圖七 訪問四位新住民老師討論包容性科普傳播(側拍)

IV. 結論

隨著社會觀念開放與進步，尊重多元、性別平等、平權傳播等幾乎可說是普世價值。而檢視科學傳播領域，各組織倡議多年的科學性別平等在各界共同努力下也有明顯成果，雖然國內外學者的研究結論仍認為科學領域的性別平等還有成長的空間，但持續不斷的努力即是成功的保證，在各方致力倡議與推動下，相信科學領域中的性別平等將是朝向更包容、更公平的方向發展。

112 年本計畫團隊有幸與原子能委員會(後改制核能安全委員會)一同參與偏遠區域、特殊族群與身障孩子的科普傳播，並記錄下這些珍貴的過程，此也表示原子能委員會(後改制核能安全委員會)無論在推動原子能領域的性別平等或是實踐不分族群、不分區域、不分階級等包容性科學傳播之努力是值得肯定的，期盼往後能持續發展與實踐各面向的包容性原子能科學傳播，不僅是強調性別平等，更擴及到跨文化的族群平等、區域平等、不分身心障礙或教育弱勢的平權科普，都是未來可繼續努力的方向。

參考文獻

[1] Canfield KN, Menezes S, Matsuda SB, Moore A, Mosley Austin AN, Dewsbury BM, Feliú-Mójer MI, McDuffie KWB, Moore K, Reich CA, Smith HM and Taylor C.(2020).Science Communication Demands a Critical Approach That CentersInclusion, Equity, and Intersectionality Front, Commun. 5(2).

[2] Smith, H., Menezes, S., Canfield, K., Guldin, R., Morgoch, M., and McDuffie, K. (2020).Moving toward inclusion: participant responses to the inclusive, SciCo*mm symposium. Front Commun*.,4(77)

[3] Tucker-McLaughlin, M (2013).YouTube’s most-viewed videos: Where the girls aren’t, Women and Language, 36(1):43-54

[4] Amarasekara I, Grant WJ.(2019) “Exploring the YouTube science communication gender gap: A sentiment analysis”. Public Understanding of Science. 28(1):68-84. doi:10.1177/0963662518786654

[5] Do□an, □., Baruh, L., Cemalcilar, Z., Kuru, O., Y□ld□r□m, K., & Çarko□lu, A. (2022). Biased perceptions against female scientists affect intentions to get vaccinated for COVID-19. Public Understanding of Science, 31(2), 239–251. https://doi.org /10.1177/ 09636625211060472

[6] Martin, J.(2015).Revisiting intercultural communication competence: Where to go from here, Int. J. Intercult. Rel., 48, 6–8, https://doi.org/10.1016/j.ijintrel.

[7] Márquez, M.C. & Porras, A.M. (2020). “Science communication in multiple languages is critical to its effectiveness”. Frontiers in Communication, 5: 31. DOI: 10.3389/fcomm.2020.00031

科技與藝術人文互融的跨域探究
Interdisciplinary Inquiry of the Combination of Technology, Arts and Humanities

計畫編號：112-NU-E-024-001-NU
計畫主持人：林玫君
e-mail：meichun@mail.nutn.edu.tw
計畫共同主持人：林大偉
計畫參與人員：臨時工 藍于棠
執行單位：國立臺南大學戲劇創作與應用學系

摘要

在當今全世界的發展變得更加緊密下，導致全球的重大議題已不是屬於單一領域可以瞭解與處理之，必須搭配不同專業領域的觀點，才能針對問題進行完善的分析，研議出一有效的解決方式，在這樣的世界發展趨勢下，跨領域學習的必要性也就越顯得重要。本計畫主要是針對藝術學院學生，進行核電基礎與核安處置方面之科普教育與人才培育，規劃科技藝術工作坊，內容將著重於核能後端處置、燃煤減碳、零碳排等能源科技相關議題，並於國立臺南大學藝術學院院核心課程「運算思維與程式設計」，藉由積木式程式語言的教學設計，規劃核電與核安科普教育內容，搭配 Kebbi Air 凱比機器人進行實務技術培育，並安排核電廠訪視，以學習核能安全相關知識，實際融入培育與推廣應用，強化學生核安防護資訊，及面對核電廠除役、核廢料處理時在核安輻安的管制，以提升全民原子能科普之核心素養並培育跨領域之人才。本計畫規劃透過工作坊、課堂分組，建立團隊之間的核心價值凝聚力，攜手共同設計出藝術人文與科技跨領域的做中學（Learning by Doing）模式，在對問題的追尋、反饋修正的過程中，藉由適時適性的引導，提升自信及成就感，享受學習跨領域事物的新鮮感，透過動手做、生活應用、解決問題、五感學習，以促進藝術人文與科技互融的方式，訓練學生解決社會問題之知識、能力和態度，及核心素養的培育。

關鍵詞：核能後端處置、核安處置、跨域教學與整合、人才培育。

Abstract

Nowadays, we need to observe things through different perspectives to understand its true nature and corresponding strategy. Interdisciplinary learning is a very important trend in this rapidly changing world. In this study, designed for arts background students, will have the talent cultivation of atomic energy based on the foundation of the atomic energy council to enhance the knowledge of nuclear safety and back end management. Through the arrangement of the visit of Taipower Exhibit Center in Southern Taiwan, the Arts and Technology Workshop assisted with the programming and manipulating Kebbi Air Robot, learning the knowledge of nuclear energy, and practicing the engineering application combined with creation of arts and technology, this study will bring the science to these students, to disseminate scientific knowledge and to foster a scientific way of thinking. During the teamwork of learning by doing, students cooperate together to find out problems, share feedback, overcome obstacles and seek their own core value. By the timely and adaptive guiding, they would have less frustration and more confidence to enjoy learning and accepting new subject, moreover, to develop interdisciplinary multiple achievement based on their own department expertise. Students will be learned how to confront social issues with appropriate ability and attitude in this combination between technology, arts and humanities.

Keywords: nuclear back-end management, nuclear safety management, interdisciplinary teaching and integration, talent cultivation

I. 前言

在當今的現實社會裡，由於網路的發達，來自四面八方的訊息量與日俱增，造成全世界的發展變得更加緊密，看似各自精采卻是環環相扣的依賴關係，也導致全球的重大議題已不是屬於單一領域可以瞭解與處理之，必須搭配不同專業領域的觀點，才能針對問題進行完善的分析，研議出一有效的解決方式，在這樣的世界發展趨勢下，跨領域學習的必要性也就越顯得重要。近年來，臺灣積極推廣跨領域的學習模式，讓學生不再僅侷限於本科系的專業修讀，而是實務性地將數個領域應用面進行搭配結合互融，當掌握的背景知識越豐富，看待新事物的角度也就越廣闊，對於未來新興事物的挑戰也就能夠更快速的了解其本質，透過跨領域學習，來培養因應未來多變世界的能力。

藝術學院之運算思維教育

跨領域的學習，主要在於如何突破學生在學術背景上的思維差距，而本計畫旨在增進學生跨域思維與整合能力、多元溝通，以及核心素養的培育。藝術學院運算思維教育及傳統程式教育實務的教學法間存在顯著的鴻溝（Hadeel Mohammed, & Samir, 2021），在高等教育及相關教學法中，教學的真實性與臨場感儼然已成為實務教學的趨勢，更是有效學習及教學的要素（Chavez, 1994; Newmann, Marks, & Gamoran, 1996）。由於專業技術與知識主要是藉由學習與經驗的逐步累積，對於跨領域教育而言，研究不同的教學方法協助學生發展專業的實務技術及知識，但應避免過度吹毛求疵於鑽研專業問題。一位相關藝術工作者能依不同實際問題而適應且組織自己的專業知識結合多元多媒體程式應用，尋求較佳解決問題的方法（Israel et al. 2021; Tan, 2021）。Atman 等人在他們過去有關以設計為導向教學法之深入研究指出（Atman et al., 2007）學生的學習可分為膚淺學習（Surface Approach）、策略學習（Strategic Approach）、

及深層學習（Deep Approach）（Marton & Saljo, 1997），而發展學生專業稱職的技術，問題導向結合引導式教學法（Inductive Method）可促使學生放棄膚淺學習、策略學習的學習法，並採取深層學習法（Prince & Felder, 2006），此教學方式亦應可適用於本計畫所進行的藝術人文與科技互融的跨領域人才培育。

理工學院之積木式程式教育

程式是運算思維教學方式能否成功之關鍵因素之一。對於非工程之藝術學院學生而言，一則教學中需加入展演與創客元素（Lu, 2021）、二則需將過度的數學與邏輯內含於程式中。許育嘉（2021）在高等教育程式設計課程之困境與挑戰中亦提及積木式程式於初入門學習者較為適合。而積木式語法於非工程領域學生之學習具有易學、多元化與彈性設計之優點（Hoebeke et al. 2021）。

II. 主要內容

本計畫主要是針對藝術學院學生，進行核電基礎與核安處置方面之科普教育與人才培育，規劃科技藝術工作坊，內容著重於能源科技相關議題，並於國立臺南大學藝術學院院核心課程「運算思維與程式設計」，藉由積木式程式語言的教學設計，規劃核電與核安科普教育內容，搭配 Kebbi Air 凱比機器人進行實務技術教學，並安排核電廠電力展示館參訪，以加深核能安全相關知識，實際融入培育教學與推廣應用，強化學生核安防護資訊，及面對核電廠除役、核廢料處理時在核安輻安的管制，以提升全民原子能科普之素養，培養學生思考問題解決方法、解決問題能力與實務技術能力。

1. **核電廠電力展示館參訪**：提供學生各項電力建設、各項節能省電方法及核能發電資訊，參觀電廠內核三廠風力、太陽能發電機組發電狀況的即時顯示，以及核三廠進水口，海底珊瑚保育實況，藉此引領學生跨域思考，提升學生對原子能知識的興趣與認知，強化對於社會的責任感。
2. **科技藝術工作坊**：內容將著重於核能後端處置、燃煤減碳、零碳排等能源科技相關議題，規劃二個看似毫無交集的學術領域，透過跨域結合進行藝術人文與科技互融的對話，利用混合引導方式，帶領藝術背景的學生去體驗現今台灣在強化核安防護資訊，及面對核電廠除役、核廢料處理時在核安輻安上管制的困境，培育學生解決社會問題的能力及核心素養。
3. **程式設計與機器人應用**：進行團隊分組，分配各組筆電及 Kebbi Air 凱比機器人來進行程式設計實作應用訓練與相關設計作品的成果呈現，檢視本研究方法之成效是否有效提供學生適當的工具及賦予足夠的能力進行跨域思考及多元溝通，並在同儕合作關係下學習分享與自我調整，勇於嘗試、樂在其中。

本計畫將主要採用的研究方式為 PBL，透過工作坊、課堂分組，建立團隊之間的核心價值凝聚力，攜手共同設計出藝術人文與科技跨領域的做中學(Learning by Doing)模式，在對問題的追尋、反饋修正的過程中，藉由適時適性的引導，逐步排除跨領域學習過程可能遭遇到的困境，進而將核電基礎與核安處置方面之科普知識，產生潛移默化的學習加乘成效。

III. 結果與討論

本計畫蒐集核電基礎與核安處置之發展現況及科普內容，並於 111 學年度第 2 學期與 112 學年度第 1 學期的藝術學院院核心課程「運算思維與程式設計」，針對藝術學院學生進行核電基礎與核安處置方面之科普教育與人才培育，兩門課程共計有 92 名藝術學院學生修課（111-2 男生 18 名，女生 34 名；112-1 男生 15 名，女生 25 名），課程大綱如圖 1。

週次	111-2課程大綱
1	課程介紹，運算思維 vs 程式設計
2	運算思維淺論1
3	運算思維淺論2
4	Kebbi 機器人應用操作介紹
5	科技藝術參訪
6	運算思維工作坊
7	運算思維應用
8	科技藝術參訪併第五周進行
9	運算思維應用
10	認識 Micro:bit 設計計步器和指南針
11	Micro:bit 設計紅綠燈
12	Micro:bit 設計生日賀喜卡片
13	認識 Kebbi 機器人：設計自我介紹程式
14	與 Kebbi 機器人一起跳舞
15	與 Kebbi 機器人猜拳
16	設計 Kebbi 機器人點餐程式
17	運算思維工作坊
18	期末 Kebbi 機器人成果展

週次	112-1課程大綱
1	課程介紹，運算思維 vs 程式設計
2	運算思維淺論
3	科技淺論
4	科技藝術工作坊1
5	科技藝術工作坊2
6	參賓揚邏輯思考1
7	科技藝術工作坊3
8	科技淺論（機器人篇1）
9	機器人應用操作介紹1
10	科技淺論（機器人篇2）
11	參賓揚邏輯思考2
12	機器人應用操作介紹2
13	參賓揚邏輯思考3
14	機器人應用操作介紹3
15	科技淺論（電影篇1）
16	科技淺論（電影篇2）
17	期末報告
18	期末報告

圖 1 運算思維與程式設計課程大綱

在跨領域教學課堂上，向藝術學院學生進行科普素養說明與介紹，並且引導瀏覽文化部獎補助資訊網、國科會全球資訊網，以及核能安全委員會網站。藝術背景的學生幾乎鮮少會有人主動去接觸搜尋後兩者的網站資訊，然而，現代社會的思維是需藉由有溫度的藝術人文去包裝以往是冷冰冰形象的科技資訊，科技與人文互融的訊息模式更容易被接受。因此，透過這些網站的瀏覽介紹，以及各部會所開放的計畫申請補助機會，引導學生要如何將自己的創作理念或是欲推廣的社會需求，將想法化成行動，實際規劃成可以執行的一個計畫。同時，在瀏覽網頁相關資訊時，簡述臺灣核電的發展狀況及未來擬執行方向、核能後端處置作業，提供學生對於核能的科普知識，引領學生學習核能安全相關觀念，進而思考社會問題，強化自身的社會責任，培育解決問題的能力與核心素養。

在計畫執行期間總共進行 1 次校外參訪、2 場核能科普/科技藝術工作坊，以及 3 場科普素養/科技藝術專題講座，各項活動一覽表整理如下：

序號	活動日期/地點	活動主題	活動類型	參與人數
1	112 年 3 月 22 日 台電南部展示館 高雄駁二藝術特區	實際現地參觀以觸發引導跨域動機及創意應用回饋	校外參訪	51 人
2	112 年 3 月 29 日 10:00-12:00 南大榮譽校區 ZA108	題目：核能如何發電? 核能發電原理介紹 講者：國立中正大學機械工程系任春平教授 題目：離你最近的輻射-環境輻射 講者：國立清華大學原科中心田能全博士/三等核能師	核能科普工作坊	49 人
3	112 年 6 月 14 日 10:00-12:00 南大榮譽校區 ZA108	題目：科技與人文藝術域互融的策展呈現 講者：國立故宮南院賴芷儀博士/助理研究員 題目：光的無限可能 講者：威作劇團林翰生藝術總監	科技藝術工作坊	42 人
4	112 年 10 月 4 日 10:00-12:00 南大榮譽校區 ZA108	題目：淺談地熱應用與發電 講者：國立勤益科技大學機械工程系謝瑞青副教授	科普素養專題講座	29 人
5	112 年 10 月 11 日 10:00-12:00 南大榮譽校區 ZA108	題目：影響・新劇場的跨界展演—劇場與科技對話 講者：影響・新劇場呂毅新團長暨藝術總監	科技藝術專題講座	33 人
6	112 年 10 月 25 日 10:00-12:00 南大榮譽校區 ZA108	題目：綠色水續工程 講者：國立中山大學機械與機電工程學系汪正祺教授	科普素養專題講座	36 人

1. 校外參訪

112 年 3 月 22 日赴屏東台電核三廠南部展示館與高雄駁二藝術特區校外參訪(圖 2),藉由核三廠現地參訪,實際汲取各項電力建設、節能省電方法及核能發電資訊,並瞭解當地特色及生態保護發展;透過駁二導覽活動,深入了解藝術背後的涵意,以及與科技之間的互融結合,引領學生跨域思考與創意應用。


導覽員說明核能發電原理及過程
(台電南展館參訪)


導覽員解說園區藝術作品
(駁二參訪)

圖 2 112/3/22 校外參訪活動

2. 核能科普工作坊

112 年 3 月日 29 日於國立臺南大學榮譽校區舉辦核能科普主題工作坊(圖 3),邀請國立中正大學機械工程系任春平教授「核能如何發電?核能發電原理介紹」,與國立清華大學原子科學技術發展中心田能全博士/三等核能師「離你最近的輻射-環境輻射」,以輕鬆詼諧的演說口吻及平易近人的用詞來讓學生接觸核能的簡易原理,並瞭解日常生活中常見的輻射。



與會師生合照



活動海報

圖 3 112/3/29 核能科普工作坊活動

3. 科技藝術工作坊

112 年 6 月 14 日於臺南大學榮譽校區舉辦科技藝術主題工作坊(圖 4),邀請國立故宮南院賴芷儀博士/助理研究員「科技與人文藝術域互融的策展呈現」,與貳作劇團林翰生藝術總監「光的無限可能」,分享科技與藝術互融的無限演譯方式,讓藝術更讓人身歷其境,讓科技更容易體驗到溫度。


講者講述科技與藝術互融的作品呈現方式



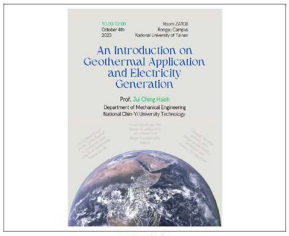
活動海報

圖 4 112/6/14 科技藝術工作坊活動

4. 科普素養專題講座

112 年 10 月 4 日於國立臺南大學榮譽校區舉辦科普素養主題演講(圖 5),邀請國立勤益科技大學機械工程系謝瑞青副教授「淺談地熱應用與發電」,解說氣候變遷對全球影響的概述,並討論地熱應用,簡易說明形成原理及發電利用方式,讓藝術背景的學生接觸再生能源議題,藉由所學專長,與科普知識進行搭配結合互融,激發學生跨域創意表現。


講者進行地熱應用與發電的科普素養教學,與學生討論再生能源的相關爭論議題



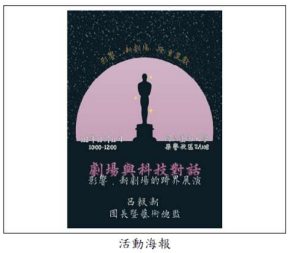
活動海報

圖 5 112/10/4 科普素養專題講座活動

5. 科技藝術專題講座

112 年 10 月 11 日於國立臺南大學榮譽校區舉辦科技藝術主題演講(圖 6),邀請影響・新劇場呂毅新團長暨藝術總監「影響・新劇場的跨界展演—劇場與科技對話」。影響・新劇場藉由跨界與跨域的應用來打破傳統藝術表演的框架,並且成為推動社會行動的媒介。跨域的演出,需排除更多非預期性的突發狀況,以及與各領域的相關專業知識進行搭配互融,透過劇場的活動影片,與會師生討論相關議題及經驗分享,例如 2021 年新冠肺炎的居隔影響,如何藉由多媒體科技持續發揮藝術量能的表演,身歷其境,感同身受,開拓多元化的視野角度。


Incubating 3.0 述,結合實景拍攝及數位劇場的互動形式,展現科技與藝術完美無瑕的合作關係
https://nyvytheatre.com/incubating3.0/



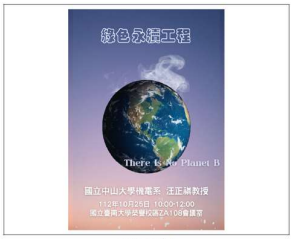
活動海報

圖 6 112/10/11 科技藝術專題講座活動

6. 科普素養專題講座

112 年 10 月 25 日於國立臺南大學榮譽校區舉辦科技藝術主題演講(圖 7),邀請國立中山大學機械與機電工程學系汪正祺教授「綠色永續工程」。面對緊迫逼近的氣候劇烈變遷,綠色永續工程是人類刻不容緩的首重任務,2015 的巴黎協定(COP21)促使全世界各國領袖紛紛表態支持且對友善地球有所行動,此次演講內容說明淨零碳排的策略方案,讓學生在升溫 1.5 度的關鍵 10 年內能夠共同響應,為所居住的地球盡一份心力。


講者進行淨零碳排的科普素養教學,與學生討論綠色能源的相關議題



活動海報

圖 7 112/10/25 科普素養專題講座活動

112 年 11 月 22 日在國立臺南大學府城校區誠正大樓 308 會議室舉辦國立臺南大學藝術學院創意機器人競賽，進行 Kebbi Air 凱比機器人程式設計應用成果發表。該競賽分別有戲劇系、視設系，以及音樂系的學生報名參加，共有 5 組參賽隊伍。參賽隊伍的相關資料一覽表整理如下：

序號	參賽班級	表演題目	主題特色	
1	戲劇一	舞林人	與凱比機器人的同步對話、舞蹈動作同步之相關程式設計 榮獲「最佳台風獎」	
2	視設一	藝術之旅：時光學院	與凱比機器人的機智問答、情緒行為反饋設計 榮獲「實務生活獎」	
3	戲劇一	小愛面試趣	與凱比機器人的互動對話、動作及表情搭配故事內容規劃呈現設計 榮獲「潛力無窮獎」	
4	音樂一	逃出雅音樓	對凱比機器人載入需要的資料庫內容，規劃對應的邏輯反饋，以及螢幕觸控互動作答設計 榮獲「潛力無窮獎」	
5	戲劇一	純愛少女戰隊	以兩臺凱比機器人進行互動對話，搭配動作情緒反饋，進行話劇表演的程式設計規劃 榮獲「創意滿點獎」	

本計畫培育 12 名戲劇系學生進行初階 Scratch 機器人程式語言的訓練，並組成 3 個隊伍參加比賽。透過這樣的機器人競賽活動，引導學生接近在藝術領域鮮少觸及的程式設計，嘗試縮短跨領域範疇的距離，實際花費寶貴時間動腦激盪、創想應用進行排練（圖 8），並且藉由分組競賽的共同努力，拉近團隊同儕之間的距離，搭配 Kebbi Air 凱比機器擬人化的互動反饋，塑造輕鬆愉悅的學習氣氛，讓學生瞭解工程並不是一貫地為冷冰冰的數字與硬梆梆的軟硬體，透過工程與藝術的剛柔並濟，將會是一個有趣且實用的跨領域學習模式。



圖 8 賽前排練

賽後，將該程式設計機器人競賽進行特色成果影片剪輯上傳分享網頁，分享跨領域的人才培育方式及引導修正過程。競賽活動影片 https://youtu.be/HEyYO5_TkRQ。

IV. 結論

人文與科技互融的過程，最艱鉅的障礙是兩者之間思維模式的差距。本計畫旨在進行核電基礎與核安處置方面之科普教育，藉由適時適性的引導與修正，進行科技藝術跨領域之人才培育。

此科技與藝術互融跨域人才培育計畫承核能安全委員會的支持得以順利進行。雖然大家都常常聽到原子能這三個字，但事實上真正嘗試接觸瞭解的人少之又少，透過計畫的執行，讓培育學生耳聞不如目見，發現原子能的普遍應用，早就間接直接地深入我們的日常生活作息，而且還能與自身的藝術專業領域進行跨域發展，對於原子能應用的接受度則會逐漸增加，有效提升原子能科普教育推廣的量能。本計畫持續以科技藝術為主軸，進一步規劃於 113 學年度第 1 學期（113.9~114.2）國立臺南大學藝術學院開設跨領域課程「當代偶戲與科普」，協同無獨有偶工作室劇團培育學生在原子科普與舞台藝術互融結合的實現與內化，以原子科普與舞台藝術的課程教學引出動機，繼而利用劇場藝術展現科技與人文跨域應用，最後以跨域演釋主題發表激發學生創意表現，利用成果巡演回饋與修正，帶領學生進行科技與藝術的跨域學習，將邏輯與情感進行整合，從心發掘自我認同、文化傳承與創新。

參考文獻

[1] Atman, C. J., Adams, R. S., Cardella, M. E., Turns, J., Mosborg, S., & Saleem, J. (2007), Engineering design processes: a comparison of students and expert practioners, Journal of Engineering Education, 96(4), 359-379.

[2] Chavez, M. M. (1994), Learner’s perspectives of authenticity. Paper presented at the American Council on the Teaching of Foreign Languages.

[3] Hoebeke, S., Strand, I., Haakonsen, P. (2021), Programming as a new creative material in art and design education, Techne Series, 28(2), 233-240.

[4] Hadeel Mohammed, J., Samir, T. (2021), Gamifying Computer Science Education for Z Generation, Information, 12(11), 453.

[5] Israel-Fishelson, R., Hershkovitz, A., Eguiluz, A., Garaizar, P., Guenaga, M. (2021), Journal of Educational Computing Research, 59(5), doi.org/10.1177/0735633120973429.

[6] Lu, Y. (2021), Scratch Teaching Mode of a Course for College Students, International Journal of Emerging Technologies in Learning, 15(5), 186-200.

[7] Marton, F., & Saljo, R. (1997), The Experiences of Learning (2nd ed.), Edinburgh: Scottish Academic Press.

[8] Newmann, F. M., Marks, H. M., & Gamoran, A. (1996), Authentic pedagogue and student performance, American Journal of Education, 104(4), 280-312.

[9] Prince, M. J., & Felder, R. M. (2006), Inductive teaching and learning methods: definitions, comparisons, and research bases, *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123-138.

[10] Tan, C.R. (2021), The nascent case for adopting Jupyter notebooks as a pedagogical tool for interdisciplinary humanities, social science, and arts education, Computing in Science & Engineering , 23(2), 107-113.

[11] 許育嘉 (2021)，高等教育程式設計課程教學之多元化發展與變革，台灣教育評論月刊，10(1)，68-75.

跨域合作與風險溝通(II)

以珊瑚骨骼硼及鉛同位素探討台灣海域之海洋酸化及鉛汙染史
Decadal trends in ocean acidification and marine lead pollution around Taiwan: *Constrained by coralline boron and lead isotopes*

計畫編號：NSTC 112-NU-E-001-001-NU
計畫主持人：黃國芳
e-mail：kfhuang@earth.sinica.edu.tw
計畫共同主持人：游鎮烽
計畫參與人員：陳洪毅
執行單位：中央研究院 地球科學研究所

摘要

人為活動排放的過量二氧化碳造成海洋酸化，同時也降低海水碳酸鈣飽和度（Ω），對海洋中鈣化生物的生長有極大的威脅。此外，工業活動排放大量汙染物進入海洋，特別是邊緣海地區，而重金屬汙染的程度則隨著經濟與工業活動興起而日益嚴重。南中國海地區因同時受自然與人類活動之影響，是研究大氣－海洋－人為活動交互作用及近期環境變遷重要且關鍵的區域。

本研究分析取自東沙環礁的多孔珊瑚（*Porites spp.*），應用多重地球化學代用指標重建 1993 至 2010 年南海北部海洋環境變遷記錄。研究結果顯示南海北部海水 *pH* 值自 1993 年以來有顯著的酸化趨勢（-0.0035 ± 0.0027 *pH* unit/year），預期南海中的鈣化生物未來將面臨更為艱困的環境。而在重建珊瑚鈣化液 *pH* 值方面則呈現輕微酸化（-0.0004 ± 0.0033 *pH* unit/year），鈣化液中 Ω 與 $[CO_3^{2-}]$的重建結果也皆保持穩定，表明東沙的珊瑚可能受外部（如：南海內波）或自身調控機制而具有抵禦海洋酸化的能力。

另一方面，珊瑚的 Pb/Ca 自 1993 年來呈現逐漸上升的趨勢，並在 2000 年後尤為明顯，對應到中國與東南亞地區經濟快速發展的時段。珊瑚骨骼鉛同位素則指示出 2000 年後來自於中國地區燃油燃煤的貢獻增加，也可能提供關於南海中漏油事件的記錄。由於地理位置孤立，受陸源輸入影響較小，東沙珊瑚提供一個更全面、具代表性的南海北部海洋環境變遷記錄。

關鍵詞：海洋酸化、硼同位素、海洋鉛汙染、鉛同位素、珊瑚記錄

Abstract

Increasing anthropogenic CO_2 from fossil fuel combustion and land-use practices is reducing surface ocean *pH* (i.e. ocean acidification, OA), leading to the reduction of marine carbonate saturation state (Ω). The associated decline in Ω (and seawater carbonate ion concentration, $[CO_3^{2-}]$) could substantially impact marine calcifying organisms, such as scleractinian corals, and potentially threaten coral calcification and the existence of these unique reef ecosystems. Marginal seas are particularly susceptible to the influence of natural variability and human activities and are thus critical areas for studying the response of coral reef ecosystems to environmental changes. Additionally, metal pollutant emitted from industrial activities, such as lead (Pb), has become severe due to rapid developments of industries and populations in Southeast Asia. The South China Sea (SCS) is under the influence of the East Asia monsoon system and can serve as an ideal location for investigating interactions between the atmosphere, ocean, and anthropogenic influences.

Here we present multi-proxy coral records of *Porites spp.* collected from the Dongsha Atoll (DSA) in the northern SCS (NSCS) on a seasonal basis from 1993 to 2010 CE. Coralline $\delta^{11}B$ and B/Ca are used as a proxy for calcifying fluid pH (pH_{cf}) and $[CO_3^{2-}]$, respectively, to better constrain aragonite saturation state (Ω_{arag}). The coralline $\delta^{11}B$-based surface ocean *pH* (pH_{sw}) exhibits a secular trend of decreasing *pH* (-0.0035 ± 0.0027 *pH* unit $year^{-1}$) since 1993 CE, implying a progressively difficult marine environment for marine calcifiers in the foreseeable future of the NSCS. In contrast, the reconstructed pH_{cf} only exhibits a slight decreasing trend over the last 20 years (-0.0004 ± 0.0033 *pH* unit $year^{-1}$). The reconstructed Ω_{arag} and $[CO_3^{2-}]$ also remain relatively constant, suggesting that Dongsha corals are resistant to OA, most likely by buffering from internal waves or self-regulation on the carbonate system of the calcifying fluid.

On the other hand, our results show a gradual increase in skeletal Pb/Ca since 1993 CE, indicating an elevated pollution of Pb, particularly after Year 2000, coincident with the period of rapid development of the economy in China and Southeast Asia. The coralline Pb isotopic composition clearly exhibits an increase in the contribution of Chinese petrol/coal after Year 2000. Compared to the other published SCS coral records that are influenced by terrestrial inputs, our record from DSA provides more representative and comprehensive information about the change in the ocean environment in the NSCS.

Keywords: Ocean acidification, boron isotope, marine lead pollution, Pb isotope, coral record

I. 前言

海洋為世界上最主要的碳儲庫，可吸收近 30%的人為二氧化碳，因此海洋碳酸鹽系統在調節全球氣候以及研究過去氣候變遷皆扮演十分重要的角色。由於化石燃料的大量使用，人為排放的二氧化碳在大氣中不斷累積並進入海洋，海洋酸化已成為人類活動對海洋環境所產生的影響中最為顯著的，對海洋生態系統同時產生重大衝擊，特別是海洋中的鈣化生物，如珊瑚、有孔蟲等。

由於海水酸鹼值（*pH*）改變時，會導致海水中的碳酸根離子濃度降低，碳酸鹽飽和度（□）下降、不利於鈣化生物製造骨骼或殼體，進而抑制其生長，影響海洋的生態系及食物鏈。本研究選定南海北部之東沙環礁的珊瑚，南海作為全球三大邊緣海之一，位於珊瑚金三角（Coral Triangle）的北緣，有相當豐富的珊瑚礁生態系及生物多樣性。然而隨著近期氣候變遷，南海中珊瑚礁生態系統的多樣性正在降低，大規模的白化事件愈發頻繁，因此瞭解海洋酸化對珊瑚的生長及生態系之影響十分重要且迫切（Dai, 2004; DeCarlo et al., 2017）。南海緊鄰陸地且深受東亞季風系統影響，在自然及人為活動共同影響之下，為當前全球環境變遷中重要且關鍵的研究區域。此外，前人文獻也發現世界上各海域的海洋酸化速率相當不一致，特別是南海缺乏長期連續的觀測記錄，需進一步建立台灣附近海域之環境變遷史，以瞭解西太平洋海洋酸化的長期趨勢及其主要的控制因子。

另一方面，南海周遭圍繞許多高人口密度國家，由於工業發展起步較晚，近代汙染的程度開始隨著經濟與工業活動興起而日益嚴重，已成為近年來環境鉛汙染的主要來源。鉛是對人體神經系統有嚴重毒性的重金屬元素，和工業活動緊密關聯（如：燃煤、採礦、汽油），時常伴隨工業活動排放至環境中。因此，針對南海北部鉛汙染之研究，有助於追蹤其汙染源並了解其主要傳輸途徑。Chen et al （2016）發現人為鉛汙染進入越南沿海的證據：並根據珊瑚鉛同位素數據進一步指出該研究區域之鉛汙染主要源自中國的燃油燃煤排放。由於東亞地區受季風氣候系統主導，長程傳輸的氣膠影響範圍將不侷限於沿岸地區，特別是冬季季風期間，季風系統輸送大量中國東北工業區、東部沿海城市上空的氣膠至南海沉降而造成影響。因此高時間解析鉛汙染史之重建，將有助於系統性評估南海鉛汙染程度、擴散範圍與其主要來源，以及瞭解鉛汙染源在東亞季風系統的影響之下，可能產生之季節性變化。

II. 主要內容

根據目前所收集的文獻以及所獲取之初步結果，本研究試圖解決兩個主要的科學問題：

1. 東沙島的珊瑚 $\delta^{11}B$ 及 B/Ca 比是否可忠實反映南海北部海洋酸化之變化趨勢？珊瑚礁生態系統(如：海草床)或年際間氣候事件(如：ENSO)是否對南海北部珊瑚生長及海洋酸化之影響有所調控？南海北部近二十年來是否有較其他海域更為快速的酸化速度？以及海洋酸化對熱帶淺水珊瑚礁生態系之影響。
2. 以珊瑚骨骼的鉛同位素及 Pb/Ca 比建立南海北部近二十年來鉛的汙染程度及可能來源，並探討冬夏季季風盛行時，鉛汙染程度及來源是否存在著年際間氣候事件或季風系統變化的關係。此外，相較於世界上其他海域之記錄，緊鄰東亞及東南亞的南海北部是否有較為嚴重的人為鉛汙染？

計畫之分工及主要工作內容如下：

將取自東沙環礁北礁台之現生微孔珊瑚（*Porites spp.*）作為主要研究材料。該珊瑚岩心樣品之年代學已由台大地質系任昊佳教授完成（Ren et al., 2017），可提供 1992 年至 2012 年間之連續記錄。本計畫將首次結合珊瑚骨骼微量元素比（B/Ca 及 Pb/Ca）及鉛-硼同位素，分別針對台灣附近海域之海洋酸化與環境鉛汙染源追蹤及傳輸路徑兩個面向深入研究。此外，本計畫也將試圖對東沙環礁之珊瑚骨骼硼同位素及新興[CO_3^{2-}]代用指標-B/Ca，與東沙島現有之水文資料及 SEATS 時間序列測站之歷史數據進行現地校正，以建立南海北部海域之專屬經驗關係式，取得更為精準的海洋酸化記錄。目前也利用本研究所重建之珊瑚鈣化液內 *pH* 及[CO_3^{2-}]計算出碳酸鈣飽和度 □，並配合珊瑚生長速率的資料及數值模式（與 Woods Hole Oceanographic Institution 的 Drs. Anne Cohen 及 Weifu Guo 合作），系統性瞭解海洋酸化對珊瑚生長速率及珊瑚礁生態系之影響。共同計畫主持人游鎮烽教授則提供過去多年研究珊瑚岩心的經驗（Wang et al., 2011; Liu et al., 2014; Goodkin et al., 2015; Yu et al., 2015; You et al., 2022），協助完成珊瑚骨骼微量元素比及鉛同位素分析，同時也提供台灣其他海域（如：綠島、蘭嶼）之珊瑚微量元素記錄，與計畫主持人共同完成珊瑚骨骼 B/Ca 比作為[CO_3^{2-}]代用指標之評估。藉此瞭解南海北部與整個西北太平洋海洋酸化的關聯性，以及人為鉛汙染對南海北部之影響。

研究方法及步驟

取得之珊瑚岩心（圓柱形），先以線切割機將岩心對切，再切成約一公分厚的試片，再拍攝 X 光片，以獲取珊瑚的生長輪及主要生長方向。初步清洗後，以手持式鑽機（鍍鑽石之鑽頭），沿主要生長軸，以間隔 3 mm 取珊瑚粉末，再以下列之步驟進行珊瑚樣品清洗、溶解、分析其微量元素比及同位素。

樣本前處理

為了使測量結果真實反映珊瑚骨骼化學成分，樣本需經過進一步清洗，以去除樣品中非碳酸鈣之部分（如：有機質、沈積物、鐵錳氧化物等）。特別是珊瑚骨骼中鉛的含量極低（Pb/Ca ~ 10 x 10^{-9} mol/mol），背景值汙染對於測量影響尤其明顯。本研究參考 Shen and Boyle（1988）提出的樣品前處理方法，步驟及處理流程如下：

A. 加入 DIW，置於超音波震盪 10 分鐘

B. 加入 0.1N HNO_3 置於超音波震盪 30 秒，靜置 1.5 分鐘

C. 加入氧化劑（15%H_2O_2-0.1N NaOH）置於熱水浴 30 分鐘，每 5 分鐘以超音波震盪 1 分鐘

D. 加入還原劑（Hydrazine: NH_3: citric acid=1:6:3）置於熱水浴 30 分鐘，每 1.5 分鐘震盪 30 秒

A*3 >> B >> C >> A*2 >> D >> B >> C >> B >> C >> B*3

最後將清洗完成之珊瑚樣品溶於 400 μL 0.3N HNO_3，取出 10 μL，使用 HR-ICP-MS 進行微量元素分析 （Huang et al., 2008）；20 μL 進行微昇華並完成硼同位素分析（Liu et al., 2018）；其餘 370 μL 則進行鉛管柱化學並完成鉛同位素分析（Wu and Huang, 2021）。

III. 結果與討論

本研究分析取自東沙環礁北礁台之現生微孔珊瑚（*Porites spp.*），分別針對南海北部之海洋酸化與海洋鉛汙染源追蹤及傳輸路徑兩個面向深入研究。首先根據珊瑚骨骼 B/Ca 與硼同位素重建珊瑚體內鈣化液碳酸鹽系統以及周遭海水 *pH* 值（pH_{sw}）。根據 McCulloch et al.（2017）所提出的珊瑚體內鈣化作用模型，冬季較高的鈣化液 *pH*（pH_{cf}）以及較低的碳酸根離子濃度（$[CO_3^{2-}]_{cf}$）是珊瑚主動調控鈣化液 pH_{cf} 的結果。依此在生長環境更為惡劣的冬天透過珊瑚生理機制主動調控，維持體內適合鈣化作用進行的微環境。此外，根據 1998 到 2009 年間 SEAT 觀測資料顯示，南海北部正以每年 0.0021 ± 0.0013 *pH* unit 速度逐年下降；然而珊瑚體內鈣化液之 pH_{cf}、$[CO_3^{2-}]_{cf}$、碳酸鹽飽和程度（Ω_{cf}）仍保持相對穩定，特別是在環境較不利於鈣化的冬季，體內的鈣化環境並未明顯受到影響，表明珊瑚的生理調控機制不僅有助於適應環境的季節變化，也協助珊瑚抵抗長期的海洋酸化。本研究的 pH_{sw} 重建分別比較三條已發表並適用於 *Porites spp.* 的經驗公式，結果顯示 D'Olivo et al.（2019）所提出之 pH_{cf}-pH_{sw} 經驗公式在考慮海水表面溫度影響後，重建結果最符合 SEATS 的觀測結果。此結果可作為往後以珊瑚骨骼硼同位素重建季節性解析度的海水 pH_{sw} 時重要的參考依據。而將此公式延伸重建南海過去近二十年來的記錄發現 1993 到 2010 年間南海北部正以 0.0035 ± 0.0027 *pH* unit 速度逐年下降。受限於重建時長度及有限的資料點，目前觀測到的酸化趨勢雖尚不具統計意義（$p < 0.05$），但已經確立應用東沙珊瑚骨骼中硼系統重建南海北部海洋環境的可行性。未來若可將重建時間進一步回推至工業革命以前，將有機會完整地觀察到南海北部海洋受到人為活動影響之記錄。

珊瑚骨骼 Pb/Ca 的分析結果則顯示南海北部在 1993 至 2010 年間近 20 年的鉛汙染逐漸累積，其海洋鉛的汙染程度增加將近一倍，顯示南海北部的鉛汙染已超出預期。同時，珊瑚骨骼 Pb/Ca 呈現鮮明季節性對比，珊瑚於冬季季風期間（11 月~4 月）記錄到較高的 Pb 濃度，約是夏季（6 月~9 月）的 2-3 倍，表示鉛汙染的傳播與東亞季風系統之間存在可能的連結。鉛同位素分析結果顯示冬季季風期間，珊瑚骨骼所記錄到的鉛同位素有較大的變化，而整體與東亞各個城市所排放的氣溶膠具有相似的同位素特徵。此結果說明南海北部鉛汙染的可能傳播途徑如下：陸地上的汙染源排放鉛進入大氣後吸附於氣溶膠上，經由大氣傳輸擴散，特別是東北季風將帶有中國燃煤或燃油鉛同位素訊號的鉛汙染長距離傳輸，影響範圍擴及南海北部中心。

IV. 結論

本研究的主要成果為利用東沙環礁北礁台現生微孔珊瑚（*Porites spp.*）之微量元素及同位素記錄探討過去近二十年南海北部海洋酸化和環境鉛汙染之變遷。透過對珊瑚骨骼 B/Ca 和硼同位素的分析，我們成功重建了珊瑚體內鈣化液碳酸鹽系統以及周遭海水 *pH* 值（pH_{sw}）。根據 MuCulloch et al. (2017)所提出之鈣化模型，我們發現東沙環礁之珊瑚能主動調控鈣化液 *pH*（pH_{cf}），以維持適合鈣化的微環境，顯示南海北部的珊瑚於全球海洋快速酸化下可藉由生理調控的方式來維持其骨骼之生長。例如：在南海北部 pH_{sw} 逐年下降的情形下，珊瑚體內的鈣化液微環境在冬季並未受到明顯影響，顯示珊瑚對海洋酸化具有一定程度的耐受性。深入研究這種主動調控的生理機制在不同海域的響應機制、對於海洋酸化承受極限…等，不僅有助於理解珊瑚如何應對環境與氣候之劇變，也更能夠針對全球長期海洋酸化下，珊瑚的保育及復育制定策略。

除此之外，在缺乏長期連續器測資料的南海及台灣周遭海域，地球化學代用指標記錄的應用尤為重要，然而在南海或台灣周圍海域中關於環境變遷對海洋生物地球化學影響的研究仍十分缺乏，但做為世界上三大邊緣海之一，南海獨特的地理位置與複雜的季風氣候系統，是研究當今全球氣候變遷下，大氣-海洋-人為活動交互影響最為重要的地點之一。本研究首次提供寶貴的數據於未來研究參考，除了成功評估應用珊瑚骨骼 B/Ca 與硼同位素於重建南海海水之碳酸系統的可行性，亦發現 D'Olivo et al.（2019）提出的 pH_{cf}-pH_{sw} 經驗公式在重建 pH_{sw} 的長期變化趨勢方面與器測資料相比具有較高的準確性，可能是未來使用珊瑚骨骼 B/Ca 與硼同位素進行季節性解析度環境重建時的較佳選擇。

另一方面，也發現了南海北部鉛汙染的問題。透過分析珊瑚骨骼中的 Pb/Ca 和鉛同位素，我們發現鉛汙染程度逐年增加、且存在顯著的季節性變化，其擴散範圍也超出預期。進一步利用鉛同位素分析的結果揭示了鉛汙染的來源及主要傳輸途徑。此結果提供了對南海北部鉛汙染現狀的瞭解，並確認鉛汙染的來源（具季節性變化）與東亞季風系統之間具關聯性。對於鉛汙染排放的管制與健康風險評估提供重要資訊，同時更能有效針對未來鉛及其他相關的重金屬汙染防治管理制定相關策略。

參考文獻

[1] Chen, M., Goodkin, N.F., Boyle, E.A., Switzer, A.D., Bolton, A., 2016. Lead in the western South China Sea: Evidence of atmospheric deposition and upwelling. Geophysical Research Letters 43, 4490-4499.

[2] D'Olivo, J.P., Ellwood, G., DeCarlo, T.M., McCulloch, M.T., 2019. Deconvolving the long-term impacts of ocean acidification and warming on coral biomineralisation. Earth and Planetary Science Letters 526, 115785.

[3] Dai, C.-F., 2004. Dong-sha Atoll in the South China Sea: Past, present and future, Islands of the world VIII international conference, Kinmen Island, Taiwan.

[4] DeCarlo, T.M., Cohen, A.L., Wong, G.T., Davis, K.A., Lohmann, P., Soong, K., 2017. Mass coral mortality under local amplification of 2℃ ocean warming. Scientific reports 7, 1-9.

[5] Goodkin, N.F., Wang, B.-S., You, C.-F., Hughen, K.A., Grumet-Prouty. N., Bates, N.R., Doney, S.C., 2015. Ocean circulation and biogeochemistry moderate inter-annual and decadal surface water pH changes in the Sargasso Sea. Geophysical Research Letters 43, 4490-449

[6] Huang, K.-F., You, C.-F., Lin, H.-L., Shieh, Y.-T., 2008. In situ calibration of Mg/Ca ratios in planktonic foraminiferal shell using time series sediment trap: A case study of intense dissolution artifact in the South China Sea. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 9-4.

[7] Liu, Y., Peng, Z., Zhou, R., Song, S., Liu, W., You, C.-F., Lin, Y.-P., Yu, K., Wu, C.-C., Wei, G., 2014. Acceleration of modern acidification in the South China Sea driven by anthropogenic CO2. Scientific Reports 4, 1-5.

[8] Liu, Y.-H., Huang, K.-F., Lee, D.-C., 2018. Precise and accurate boron and lithium isotope determinations for small sample-size geological materials by MC-ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry 33, 846-855.

[9] McCulloch, M.T., D’ Olivo, J.P., Falter, J., Holcomb, M., Trotter, J.A., 2017. Coral calcification in a changing world and the interactive dynamics of pH and DIC upregulation. Nature Communications 8, 1-8.

[10] Ren, H., Chen, Y.C., Wang, X.T., Wong, G.T., Cohen, A.L., DeCarlo, T.M., Weigand, M.A., Mii, H.-S., Sigman, D.M., 2017. 21st-century rise in anthropogenic nitrogen deposition on a remote coral reef. Science 356, 749-752.

[11] Shen, G.T., Boyle, E.A., 1988. Determination of lead, cadmium and other trace metals in annually-banded corals. Chemical Geology 67, 47-62.

[12] Wang, B.-S., Goodkin, N.F., Angeline, N., Switzer, A.D., You, C.-F., Hughen, K., 2011. Temporal distributions of anthropogenic Al, Zn and Pb in Hong Kong Porites coral during the last two centuries. Marine Pollution Bulletin 63, 508-515.

[13] Wu, P.-C., Huang, K.-F., 2021. Tracing local sources and long-range transport of PM10 in central Taiwan by using chemical characteristics and Pb isotope ratios. Scientific Reports 11-1, 7593.

[14] Yu, T.-L., Wang, B.-S., You, C.-F., Burr, G.S., Chung, C.-H., Chen, Y.-G., 2015. Geochemical effects of biomass burning and land degradation on Lanyu Islet, Taiwan. Limnology and Oceanography 60, 411-418.

[15] You, C.-F., Lin, P.-Y., Huang, K.-F., Chung, C.-H., Liu, Z., 2022. Ocean acidification record in the Northwestern Pacific: Boron isotopic composition of a massive tropical coral core. Frontier in Marine Science 9.

以顆粒床堆積與 X 光影像建立虛擬地質三維結構
Construct the three-dimensional sandstone internal structure by DEM packed bed and X-ray scanning

計畫編號：112-NU-E-002-001-NU
計畫主持人：郭修伯
e-mail：hsiupokuo@ntu.edu.tw
計畫共同主持人：張家豪
計畫參與人員：李承恩、任威翰、黃少廷、賴柏良
執行單位：國立臺灣大學化學工程學系

摘要

本計畫重建由電腦斷層掃描得到的陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心內部之三維影像結構，利用閾值分割方法可以良好的還原岩心內各個物質的特徵。結構顯示，在不同深度的兩種岩心具相似的孔洞深度分布圖和孔洞體積分布圖，最大孔洞深度約 4 mm，而孔洞體積中位數落在 1E-5 ~ 1E-4 mm^3 之間。岩心的複雜幾何結構則利用虛擬拓撲技術實現網格的劃分以利後續流體力學計算，截取岩心上、下兩部分的開孔結構生成的網格，網格數量落在 1 千萬至 2.5 千萬之間，最大網格傾度為 0.966，平均網格傾度為 0.10 ~ 0.13。

關鍵詞：岩心孔洞、電腦斷層掃描、孔隙結構

Abstract

Images obtained from micro-computed tomography scanning of two rock cores at different depths at Ewei Mountain, Yangmingshan National Park are utilized. These images are processed and analyzed using image smoothing techniques and analytical methods. Two types of rock cores show similar pore depth distribution charts and pore volume distribution charts, with a maximum pore depth of approximately 4 mm and a median pore volume between 1E-5 and 1E-4 mm^3, respectively. It is worth noting that the threshold segmentation method effectively restores the characteristics of various substances inside the rock cores. The meshes of the complex geometric structure of the rock cores can be implemented by the virtual topology technique. The upper and lower parts of the open pore structures are selected to generate the meshes. The element number ranges from 10 million to 25 million, with the maximum and average skewness of 0.966 and 0.10 to 0.13, respectively.

Keywords: Rock core pore, Micro-computed tomography, Pore structure

I. 前言

土壤、岩心的孔隙結構影響地下水的滲透率，而飽和與非飽和的水文學滲透係數對於天然洪水氾濫的災害防治與預測，或是農業灌溉工程的基礎建設等國家級政策，為重要的參考資訊。但土壤、岩心等地質孔隙微結構的分析，在應用傳統鑽採樣本時，容易在鑽採過程中破壞其孔隙結構而造成取樣誤差。歐美先進國家相關研究團隊，近來應用微米級 X 光電腦斷層掃描(micro-Computed Tomography, μ-CT)，非破壞性地直接觀察土壤、岩心等地層孔隙結構，並分析該孔隙結構的滲透水文學。相關研究成果也落實於地下水汙染整治、地質安全、強化石油開採等農業、環境與能源領域。

岩心孔隙結構對模擬流體流經介質的滲透率影響十分巨大，因此如何忠實的呈現岩心中的孔洞分布關係到模擬結果的良莠。【以 X 光成像技術建立三維地質結構與應用於地下水輸送特性之分析】的計畫中，利用微米級 X 光電腦斷層掃描岩心結構得到的影像，結合影像平滑處理及分析技術，試還原岩心內部的孔洞結構，供進行計算流體力學之模擬。

II. 主要內容

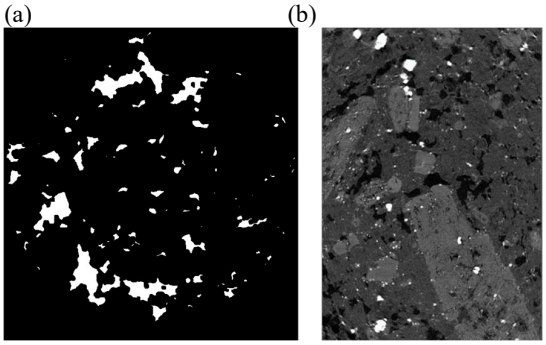
在獲得高品質二維 CT 影像後，本計畫將二維斷層影像進行影像處理，建立三維化立體土壤岩心結構。預計使用體積像素資訊(voxel data)，生成三維幾何結構。三維圖像體積(3D image volumes)成像時，需先沿 axial-transverse, frontal-coronal, 或 longitudinal-sagittal 某方像性上獲得連續的二維圖像切片。再將二維 CT 圖像切片的標準二維圖像格式(如 TIFF 或 JPEG 檔案)依序排列，以適當的灰階辨識為閾值，對於每張 CT 圖像進行圖像辨識、切割後堆疊，即可呈現的該灰階辨識閾值的三維結構。在三維結構的呈現上，也有不同的成像邏輯，如適合後續計算流體力學數值模擬的圖像體積(image volumes)、幾何表面(geometrical surfaces)、或是網格(grids)。考慮三維成像的解析度和處理速度，一般常用三角形表面(triangular surface)於幾何表面，和體積四面體(volumetric tetrahedral)於網格。在此領域的的影像處理軟體中，以 Zuse Institute Berlin 開發的 Amira 視覺化與資料分析軟體最為廣知，早期使用於醫療用途，並可匯入醫學影像常用的 ACR-NEMA 或 DICOM 格式，應用 Amira 軟體成三維影像後，可觀察不同方向的正交切片。該軟體智慧財產權後續移轉至 Thermo Fisher Scientific 公司，並以 Avizo 命名，更擴充供能，除將三維資料視覺化、更可應用於醫學、生物學、工程的三維建模。而由於 CT 影像解析度的提升，micro-CT to 3D structure 更成為土壤地層結構的創新應用開發。

灰階閾值切割圖像後，可將二維切片圖像堆疊成三維幾何結構。但受限二維影像的取像間距，三維堆疊結構非連續性的表面，且內部孔隙分布、大小與結構將會因取像間距而影響其解析度。此外，三維結構表面的非連續幾何，可透過不同的平滑化手法達到表面的修飾：

1) 在圖像切割後的體積像素，透過高斯過濾(Gauss filter)增加外加權重(additional weight)，連接連續的邊界以平滑化表面；2) 由局部地形(local topography)設計，在標地的純量場(scalar field)附近生成一組相鄰於該純量場頂點的距離，尋求該組距離的最小化以平滑化局部地形。然而，如同方法 1)，兩方法都使一小部分局部的圖像數據消失。3) 將圖像數據在「可變形表面」進行上的約束(constrained)平滑的迭代，尋求該可變形表面的最小化表面積數值。然而，該變形表面常因最小化表面積，導致表面在進行數值誤差的伸展，可能在原本高曲率的表面反而產生褶皺。

本計畫利用數據可視化軟體 Amira 將岩心的顯微電腦斷層的影像資料進行數據分析，並將多張二維影像轉換成三維的立體結構，輸出成能以電腦輔助設計(CAD)軟體開啟的檔案。之後，利用 ANSYS SpaceClaim 軟體透過自編寫腳本獲得分析區域內岩心的空間資訊，並移除分析區域內所有封閉的孔洞。最後，利用 ANSYS Meshing 軟體進行網格的劃分，並將劃分結果提供計算流體力學之模擬。

(a) (b)



圖一、某截面下(a)鵝尾山之岩心(深度一)及(b)鵝尾山之岩心(深度二)影像

研究的樣本來源有二，一為台北市士林區鵝尾山之岩心(深度一)影像，二為台北市士林區鵝尾山之岩心(深度二)影像。鵝尾山之岩心(深度一)的整體影像邊界範圍為 6.04x6.44x4.99 mm^3，解析度為 10 μm，共 500 張影像，圖一(a)為鵝尾山之岩心(深度一)之某截面下的影像，提供團隊已將影像進行二值化處理，白色區域為岩心中的孔洞結構，黑色區域則為岩石結構；鵝尾山岩心(深度二)整體影像的邊界範圍為 11.24x11.09x12.29 mm^3，解析度為 6 μm，圖一(b)為某截面下鵝尾山(深度二)之原始岩心影像，經由選定特定的閾值，可以觀察到影像中可分成四種不同灰階值的影像，對應到四種密度不一的物質，因此鵝尾山的岩心中大約有四種物質，其中顏色最黑的為岩心中的孔洞。

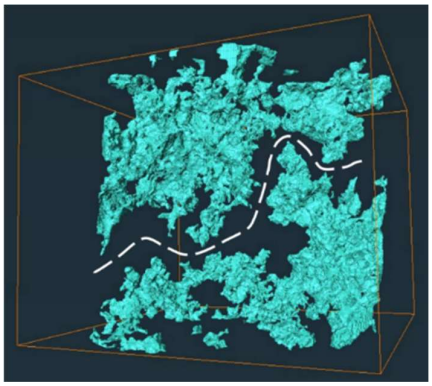
在 Amira 軟體中，會先經過影像的灰階值分布圖分割出影像中的各個組成，鵝尾山之岩心(深度一)影像由於已經經過二值化處理，可省略此步驟；接著，會將二維的影像疊合成三維的結構，過程中會使用非約束平滑化(Unconstrained smoothing)加以修飾結構表面，避免階梯狀的影像疊合結果對後續模擬產生不良影響，最後將影像輸出成.stl 檔案，方便匯入後續 ANSYS SpaceClaim 軟體進行處理。在 ANSYS SpaceClaim 中，會先經由自編寫腳本分析區域中的孔洞尺寸分布及體積分布，接著會移除區域中所有封閉的孔洞，最後再將剩餘的所有孔洞從表面網格轉換成實體，並導入 ANSYS Meshing 進行下一階段的網格劃分。

由於岩心幾何形狀複雜，使得直接進行網格劃分不易實現，因此幾何形狀需經過虛擬拓撲，將龐大複雜的網格結構分割成數個小區域的虛擬拓鋪面，才可獲得良好的網格並將網格數量控制在一定的計算資源下，而虛擬拓撲的劃分方式採用人工的方式手動調整劃分區域。網格劃分的方法採用四面體劃分法(Tetrahedron method)生成非結構四面體網格，選用的網格尺寸介於 0.01~0.02 mm 之間，並盡可能地提高最後的網格品質結果，以偏度(Skewness)為基準。

III. 結果與討論

鵝尾山之岩心(深度一)

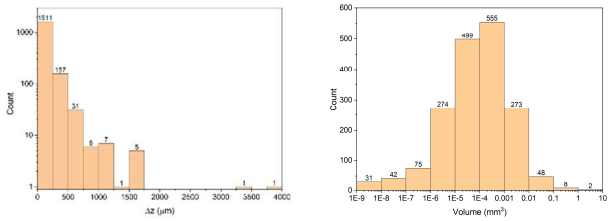
在使用 Amira 軟體獲得鵝尾山之岩心(深度一)孔洞結構時，發現當選取 500 張影像作分析時，在 z 軸方向上未有連通的孔洞，圖二為清除部分閉孔後得到的孔洞立體結構，發現孔洞被圖二中的白色虛線區分為上半部及下半部。



圖二、以 500 張 X 光斷層影像重建之鵝尾山之岩心(深度一)結構(已清除部分閉孔)

圖三為鵝尾山之岩心(深度一)中所有孔洞的深度及體積分布圖，總共擷取 1807 個孔洞，可以發現所有的孔洞的深度都很淺，最大孔洞深度僅約為 4 mm，不足以貫穿岩心。因此，後續分析選取岩心上半部及下半部各 180 張影像，即深度各為 1.79 mm 的範圍進行研究，以確保分析範圍內的孔洞結構必有開孔。

(a) (b)

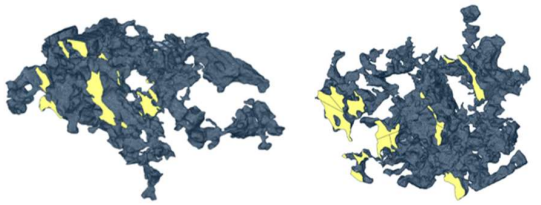


圖三、鵝尾山之岩心(深度一)所有內部孔洞之(a)深度分布圖、(b)體積分布圖

在移除閉孔孔洞後，鵝尾山之岩心(深度一)之上、下

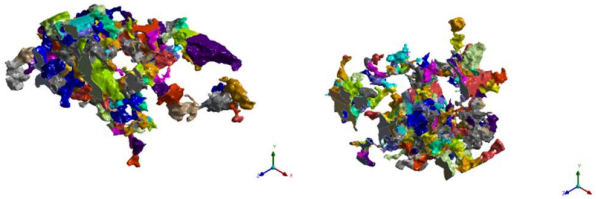
部分孔洞結構幾何模型分別呈現於圖四(a)、(b)。虛擬表面(Virtual face)技術能使網格在虛擬表面上良好的生成，圖五為鵝尾山之岩心(深度一)上、下半部岩心經過虛擬拓撲後的結果，分別劃分成 215 與 384 個虛擬表面。最終的網格品質顯示最大網格傾度為 0.966，平均網格傾度為 0.10 ~ 0.13。

(a) (b)



圖四、鵝尾山岩心(深度一)之(a)上、(b)下部分孔洞結構

(a) (b)



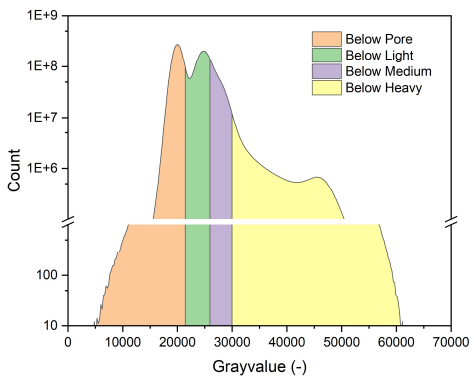
圖五、鵝尾山岩心(深度一)之(a)上、(b)下部分孔洞幾何之虛擬拓撲

鵝尾山岩心(深度二)

圖六為鵝尾山岩心(深度二)的影像灰階度分布圖，利用閾值分割(Threshold segmentation)技術將岩心影像分成四個區域，分別是孔洞(Pore)、輕密度物質(Light)、中密度物質(Medium)和重密度物質(Heavy)，分割的閾值範圍於表二所示。分割進行的順序為孔洞、重密度物質、中密度物質、輕密度物質，在每次進行分割後隨即進行區域平滑處理，後將該區域鎖定，可以避免過多零散區域的小點出現。

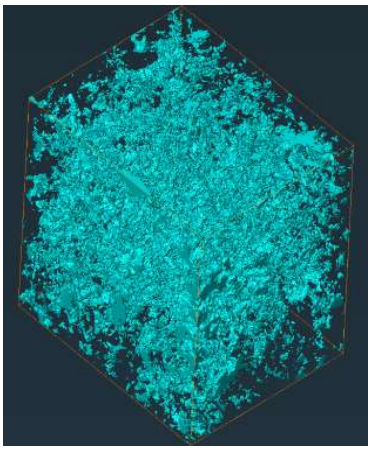
表二、鵝尾山(深度二)各區域之閾值範圍。

區域	灰階度範圍
孔洞	Min. (2203) ~ 21400
輕密度物質	21400 ~ 25990
中密度物質	25990 ~ 30000
重密度物質	30000 ~ Max. (57636)



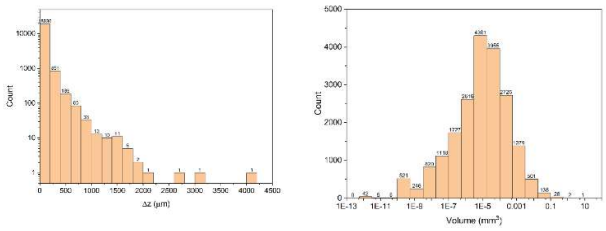
圖六、鵝尾山(深度二)岩心灰階度分布圖

圖七為鵝尾山岩心(深度二)孔洞之 3D 電腦斷層影像，而圖八則為其所有孔洞的深度及體積分布圖，共分析 20133 個孔洞。與鵝尾山之岩心(深度一)的孔洞比較，其最大孔洞深度及體積中位數的數值相近，分布情形也十分類似。深度二岩心內的孔洞無明顯的連通情形，造成計算流體力學無法有效的計算水流從入口流至出口的滲透率，本計畫輸出鵝尾山之岩心(深度一)孔洞的上下部分網格結構供計算流體力學上的分析。



圖七、鵝尾山岩心(深度二)孔洞之 3D 電腦斷層影像

(a) (b)



圖八、鵝尾山岩心(深度二)內部孔洞之(a)深度分布圖、(b)體積分布圖

IV. 結論

近年來，各國致力於減少二氧化碳排放進行多項研究及規劃，減少大氣中二氧化碳的其中一個方式即為二氧化碳封存，而欲將二氧化碳封存於地底，需要嚴格檢視地層的各種資訊，以防洩漏。本研究提供了真實岩心內部的孔隙度分布模型，未來希冀能以數值模擬判斷岩盤是否可作為碳封存的選址。此外，研究岩心中的孔隙度分布對於水文學、地質學、農業皆有所應用，本研究於多個領域皆可發揮重要的價值。

計畫利用軟體重建由電腦斷層掃描得到的兩種岩心內部之三維影像結構。本次研究分析的鵝尾山岩心兩種深度具相似的孔洞深度分布圖和孔洞體積分布圖，最大孔洞深度約 4 mm，而孔洞體積中位數落在 1E-5 ~ 1E-4 mm^3 之間。利用閾值分割方法可以良好的還原岩心內各個物質的特徵。岩心複雜幾何結構可以利用虛擬拓撲技術實現網格的劃分，但由於岩心孔洞的深度有限，因此截取岩心上、下兩部分的開孔結構生成網格，網格數量落在 1 千萬至 2.5 千萬之間，最大網格傾度為 0.966，平均網格傾度為 0.10 ~ 0.13。

參考文獻

[1] Goldman, L.W. (2007). “Principles of CT and CT technology”, Journal of nuclear medicine technology, 35(3), 115-128.

[2] Jung, H. (2021). “Basic physical principles and clinical applications of computed tomography”, Progress in Medical Physics, 32(1), 1-17.

[3] Caldemeyer, K.S., Buckwalter, K.A. (1999). “The basic principles of computed tomography and magnetic resonance imaging”, Journal of the American Academy of Dermatology, 41(5), 768-771.

[4] 楊仁宗 (2022). “嘉義長庚手術中即時影像導航系統及電腦分析定位新技術簡介”，長庚醫訊, 43, 148-149.

[5] An, R., Kong, L., Zhang, X., Li, C. (2022). “Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography”, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 14(3), 851-860.

[6] Amira (2021) User Guide. Thermo Scientific Amira™

[7] Spradley, J.P., Pampush, J.D., Morse, P.E., Kay, R.F. (2017). “Smooth operator: The effects of different 3D mesh retriangulation protocols on the computation of Dirichlet normal energy”, American Journal of Physical Anthropology, 163(1), 94-109.

[8] Whitaker, R.T. (2000). “Reducing aliasing artifacts in iso-surfaces of binary volumes”, 2000 IEEE Symposium on Volume Visualization (VV 2000).

[9] Fam, Y., Sheppard, T. L., Diaz, A., Scherer, T., Holler, M., Wang, W., Wang, D., Brenner, P., Wittstock, A., & Grunwaldt, J. D. (2018). Correlative Multiscale 3D Imaging of a Hierarchical Nanoporous Gold Catalyst by Electron, Ion and X‐ray Nanotomography. ChemCatChem, 10(13), 2858-2867.

[10] Peyton, R. L., Haeffner, B. A., Anderson, S. H., & Gantzer, C. J. (1992). Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores. Geoderma, 53(3), 329-340.

[11] Stalling, D., Westerhoff, M., & Hege, H.-C. (2005). Amira: A highly interactive system for visual data analysis. The visualization handbook, 38, 749-767.

[12] Zhang, H., He, H., Gao, Y., Mady, A., Filipović, V., Dyck, M., Lv, J., & Liu, Y. (2023). Applications of Computed Tomography (CT) in environmental soil and plant sciences. Soil and Tillage Research, 226, 105574.

以 X 光成像地質結構分析地下水滲透性質
Groundwater Permeability Calculation through X-Ray Imaged Geological Structures

計畫編號：112-NU-E-182-001-NU
計畫主持人：黃安婉
e-mail：anhuang@mail.cgu.edu.tw
計畫共同主持人：張家豪
計畫參與人員：李承恩、陳靖茹
執行單位：長庚大學綠色科技研究中心

摘要

土壤地質結構依不同地區與形成歷史，其微結構與地下水滲透率全然不同。此計畫以 X 光成像技術建立三維地質結構與應用於地下水輸送特性之分析，由微觀非破壞性三維孔隙結構直接進行地下水流力輸送現象模擬。技術上，以計算流體力學方法結合 X 光成像技術重建三維地質結構，模擬地下水流經此結構之滲透率，並細部分析地下水流於地質內的流速及壓力分布。計畫以陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心的內部之三維影像結構地質進行滲透率計算，該岩心上半部的滲透率介於 4.90×10^{-13} 至 9.76×10^{-13} m^2，以均勻速度或壓力作為滲透起始條件設定，其所獲得的滲透率值差異性相似。該岩心下半部的滲透率則介於 3.81×10^{-14} 至 6.26×10^{-12} m^2，以均勻速度或壓力作為滲透起始條件設定所獲得的滲透率值差異性較大。探討其原因為該岩心下半部幾何結構中，具有局部細頸酒瓶狀孔洞所致。

關鍵詞：地質、三維孔隙結構、地下水、滲透率

Abstract

Depending on the geographical region and formation history, the microstructure and permeability of soil and rock exhibit significant variation. In this project, we employ computational fluid dynamics (CFD) to model the groundwater transport within the non-destructive three-dimensional pore structure of rock cores, utilizing micro-computed tomography. Our simulation aims to characterize the permeability of groundwater flow through this intricate structure, offering detailed analyses of velocity and pressure distributions. The permeability of the groundwater flowing through the pore structure of rock cores from Ewei Mountain, Yangmingshan National Park is simulated, with detailed analyses of the velocity and pressure distribution of groundwater flow provided in this project. The permeability of the upper rock core segment ranges from 4.90×10^{-13} to 9.76×10^{-13}, showing minimal variation across different boundary conditions, such as uniform velocity inlet or pressure inlet. The permeability of the lower rock core segment varies significantly, ranging from 3.81×10^{-14} to 6.26×10^{-12} under different boundary conditions. This variance may be attributed to localized narrow-necked, bottle-shaped pores within the geometric structure of the lower rock core.

Keywords: Geology, Three-dimensional pore structure, Groundwater, Permeability

I. 前言

子計畫【以 X 光成像地質結構分析地下水滲透性質】為整合型計畫【以 X 光成像技術建立三維地質結構與應用於地下水輸送特性之分析】的子計畫四。計畫應用 X-ray 偵測器建立非破壞性的土壤岩心三維孔隙結構，並進行流體力學的水文滲透研究。本計畫由子計畫二所提供的陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心的內部之三維影像結構地質進行滲透率計算。由計算流體力學進行地下水滲透模擬試驗，分析地下水於岩心之流動情形，並分析岩心結構的滲透率。

研究成果已建立標準分析流程，該岩心上半部的滲透率介於 4.90×10^{-13} 至 9.76×10^{-13} m^2；下半部的滲透率則介於 3.81×10^{-14} 至 6.26×10^{-12}。在下半部幾何結構中，具有局部細頸酒瓶狀孔洞，導致以均勻速度或壓力作為滲透起始條件設定所獲得的滲透率值差異性較大。本計畫所建立得岩心地下水滲透率計算方法可作協助大型地下水汙染整治、地質碳封存、強化石油開採等後續應用型研究，應用範疇可涵蓋農業、環境與能源等相關領域。

II. 主要內容

本計畫利用計算流體力學分析水流通過岩心孔洞之情形，使用商用計算流體力學軟體(Ansys Fluent)解器，模擬地下水於土壤孔隙間滲流情形。假設水為一不可壓縮之連續體，符合質量守恆、動量守恆及能量守恆方程式，在穩態時：

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla\bar{\bar{\tau}} + \rho\vec{g} \tag{2}$$

$$\nabla\left(\vec{u}(\rho E + p)\right) = \nabla\left(k_{eff}\nabla T - \sum_j h_j\vec{J_j} + \left(\bar{\bar{\tau}}_{eff}\cdot\vec{u}\right)\right) \tag{3}$$

其中，$\vec{u}$為地下水流速度，ρ 為地下水密度，p 為地下水靜壓，$\bar{\bar{\tau}}$為應壓張力(stress tensor)，$\vec{g}$為重力加速度，k_{eff} 為有效熱傳導係數，$\vec{J_j}$為成分 j 之擴散通量(可分別用運水相、油相、氣相等多成分模擬)。式(3)右側三項分別為熱傳導、熱擴散及黏性消散造成的能量傳遞。在動量守恆方程式式(2)中，應壓張力為

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T) - \frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{u}I\right] \tag{4}$$

其中，μ為 molecular viscosity，I 為 unit tensor。

若將土壤結構視為多孔介質，可透過在方程式(2)中加入另一個動量來源項(source term, S_i 計算動量平衡，動量來源項包含黏滯損失項與慣性損失項：

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}u_i + C_2\frac{1}{2}\rho|u|u_i\right) \quad (5)$$

其中 α 為滲透性；C_2 為慣性阻力係數。

計畫進行時擬合「多孔材料之滲透率」。在流體滲透多孔材料的研究中，傳統上將多孔材料之滲透分為四個區間[1]：

(1) 達西區間(Re < 1)，此層流區間的滲透流由黏滯力主導通過多孔介質，忽略對流加速度和擴散，局部的孔洞幾何結構影響甚劇，流動行為大致遵守達西定律，壓降和流速成正比，而式(5)的慣性阻力係數 C_2 為零，多孔介質滲流模型可簡化成 Darcy's Law：

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\alpha}\vec{v} \quad (6)$$

(2) 穩態慣性層流區間(1 < Re < 10)，此區間邊界層影響加大，造成壓力降與流速不呈現線性關係，但呈現巨觀的穩態流動，直到 Re 接近 200。

(3) 非穩態的層流區間(200 < Re < 350)，此區間部分的層流拖曳(wake)震盪，形成渦流(vortices)。

(4) 非穩態的混流區間(Re > 350)，此混流區間的流體呈現與更大尺度、非多孔的紊流類似流態，生成大量與多尺度的渦流。

在非達西區間的(2)(3)(4)區間，因為曲折孔隙體積內的局部加速度導致多孔材料的流動阻力超出 Darcy's Law 預測的阻力。此時，多以 Forchheimer Equation[2]表示壓力梯度：

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{\alpha}v + C_2\rho v^2 \quad (7)$$

因此，在土壤滲透流研究領域，地下水通過多孔材料區域的壓力損失，隨著流速(Re 雷諾數)不同，其壓降損失漸增[3]。

由以上分析，在低流速(或 Re)時，可簡單由式(6)，模擬不同水流速度的壓力降，分析壓力梯度，求得該多孔性土壤結構的滲透性 α。在高流速(或 Re)時，式(7)中的慣性阻力係數 C_2 提供流體流經多孔介質時，高流速下的慣性損失校正。C_2 可視為沿流動方向每單位長度的損失係數。而 C_2 的求得，可以參考填充床的研究 Ergun equation[4]分析，該式為適用於大範圍的雷諾數和多種堆疊形式的半經驗式：

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu}{d_p^2}\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}v + \frac{1.75\rho}{d_p}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}v^2 \quad (8)$$

其中 d_p 為顆粒平均粒徑、L 為填充床高，ε 為空隙率。比較式(7)、(8)，則高 Re 時的滲透性 α、慣性阻力係數 C_2 為可由顆粒粒徑、多孔材料療空隙率分析求得：

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150}\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{3.5}{d_p}\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (10)$$

本計畫執行時，由 X-ray 所建立的三維非破壞性地層孔隙結構，應用 CFD 模擬在不同流速(Re)下，不同地區地層的多孔材料的壓力損失圖再分段解析，在大規模尺度上，使用達西定律(Darcy's law)計算其滲透率：

$$Q = \frac{kA}{\mu L}\Delta P \quad (11)$$

其中 Q 為流體流量、k 為滲透率(Permeability)、A 為整體岩心結構的截面積、μ 為流體黏度、L 為岩心深度、ΔP 為介質兩端的壓力差。經**子計畫一**量測陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心(直徑約為 6.02 mm，截面積為 28.46 mm^2、孔洞深度為 1.792 mm)的內部三維影像結構地質進行滲透率計算。方程式(11)可改寫為式(12)直接計算滲透率：

$$k = \frac{Q}{A}\frac{\mu L}{\Delta P} \quad (12)$$

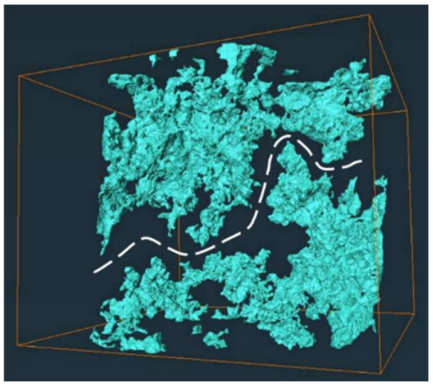
幾何模型及網格劃分由**子計畫一**提供，為鵝尾山梯田岩心部分區域之岩心孔洞結構，模擬的入口邊界條件使用**速度入口**及**壓力入口**兩種，出口邊界條件皆使用壓力出口，使用的地下水流體假設為純水，詳細的設定列於表一。

表一、計算流體力學邊界條件設定

Boundary condition		
Inlet	1. Velocity inlet [mm/s]	1, 10
	2. Pressure inlet (Gauge) [Pa]	1, 10
Outlet	Pressure outlet (Gauge) [Pa]	0
Viscous		
Laminar		
Pressure-velocity coupling		
Scheme	SIMPLE	
Discretization		
Gradient	Least square cell based	
Pressure	Second order	
Momentum	Second order upwind	

III. 結果與討論

本計畫由子計畫一的電腦斷層掃描影像得到的陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心內部之三維影像結構，如圖一。結構顯示，此深度分為上下兩半部，本計畫即以此上半部和下半部岩心結構分別進行流體力學分析。

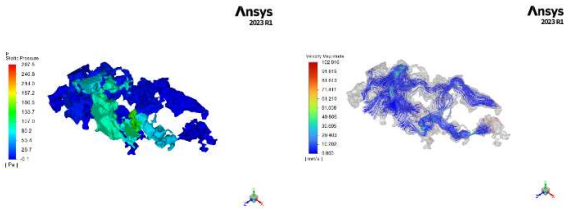


圖一、以 500 張 X 光斷層影像重建之鵝尾山之岩心結構(已清除部分閉孔)

鵝尾山之岩心上半部

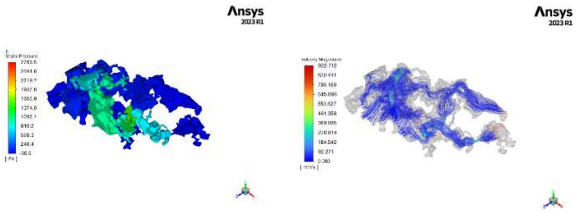
圖二、圖三是使用陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心孔洞上半部幾何模型，並使用 1 和 10 mm/s 作為進口條件得到的壓力分佈等值線圖及流速的流線分布圖。發現當水的進口速度增加為 10 倍時，壓力分佈等值線圖及流速的流線分布圖的數值約等量放大 10 倍。模型中的最大流速約為進口流速的 100 倍，是因為水流流經岩心中細小的連接處所導致，同時伴隨著局部顯著壓降。

(a) (b)



圖二、進口條件為 1 mm/s 下，岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖

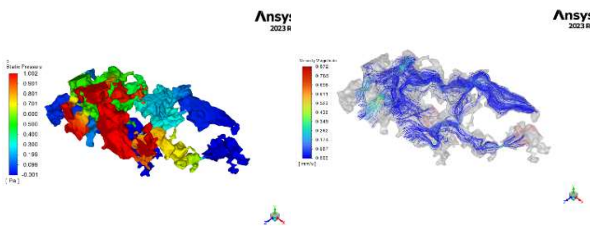
(a) (b)



圖三、進口條件為 10 mm/s 下，岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖

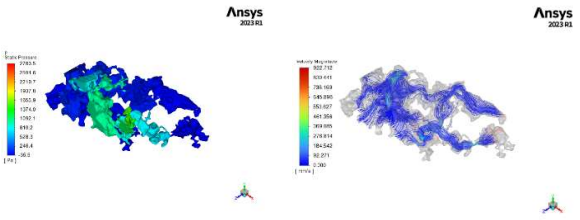
圖四、圖五則是使用 1 和 10 Pa 作為進口條件得到的壓力分佈等值線圖及流速流線分布圖。發現當水的進出口壓差增加為 10 倍時，壓力分佈等值線圖及流速的流線分布圖的數值約等量放大 10 倍。以壓力作為進口邊界條件得到的壓力分佈等值線圖的分布情形與以流速作為進口邊界條件得到的圖有明顯的不同，使用壓力作為進口邊界條件的壓力分佈圖顏色分布鮮明，壓力在流體流過瓶頸(Bottleneck)處發生明顯變化，而以速度作為進口邊界條件的壓力變化在此岩心構造中較不明顯。圖六分析了使用不同進口條件下得到的滲透率數值，在上半部岩心孔洞結構內，利用不同進口方式及數值計算獲得的滲透率數值差異不大，皆保持在相同的數量級下，我們成功陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心孔洞的滲透率介於 4.90E-13 至 9.76E-13 m^2 之間。

(a) (b)

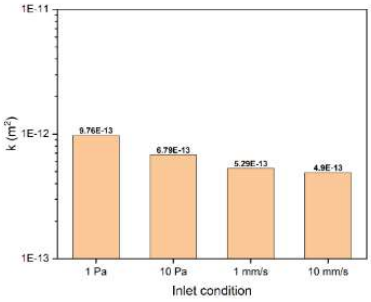


圖四、進口條件為 1 Pa 時，岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖

(a) (b)



圖五、進口條件為 10 Pa 時，岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖

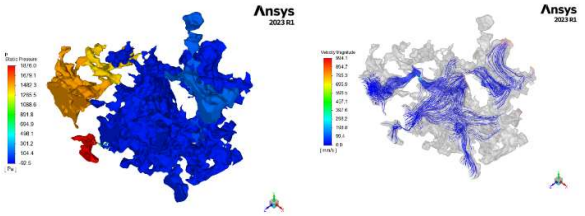


圖六、不同進口條件，上半部岩心孔洞滲透率

鵝尾山之岩心下半部

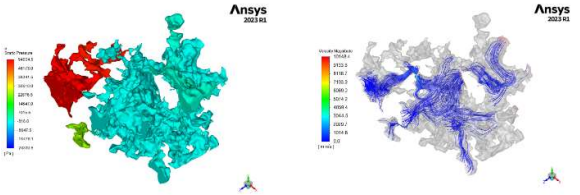
圖七、圖八是使用下半部岩心孔洞幾何模型，並使用 1 和 10 mm/s 作為進口條件得到的壓力分佈等值線圖及流速的流線分布圖。可以從壓力分佈等值線圖上發現岩心的左側壓力遠大於右側，這是因為此處的岩心的局部幾何結構具極小的瓶頸，當設定均質流速進口時，為了使水成功流經瓶頸，需施加極大的壓力。

(a) (b)



圖七、進口條件為 1 mm/s 下，下半部岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖

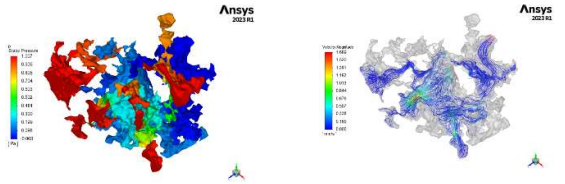
(a) (b)



圖八、進口條件為 10 mm/s 下，下半部岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖。

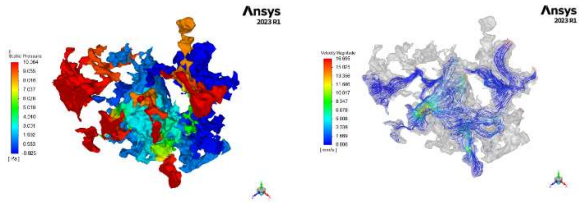
圖九、圖十則是使用 1 和 10 Pa 作為進口條件得到的壓力分佈等值線圖及流速流線分布圖。依然可以發現使用壓力作為進口邊界條件的壓力分佈圖具明顯的分布情形。

(a) (b)



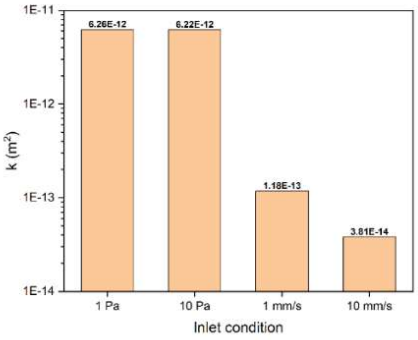
圖九、進口條件為 1 Pa 下，下半部岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖。

(a) (b)



圖十、進口條件為 10 Pa 下，下半部岩心孔洞之(a)壓力分佈等值線圖及(b)流速流線分布圖。

圖十一分析了使用不同進口條件及數值下得到的滲透率數值，從圖上可以發現使用壓力和速度進口條件得出的滲透率有明顯的差異，滲透率的數值介於 3.81E-14 至 6.26E-12 m^2 之間，這是因為使用速度入口作為進口條件，會使得水流均勻地從入口流入，即使面對幾乎是封閉的孔洞(有很小的通道連接主體)依然會強制流通，導致此區計算出的壓力極高，進而得出較低的滲透率。觀察上、下半部岩心孔洞之滲透率結果，可以發現**滲透率高度依賴孔洞幾何形狀**。



圖十一、不同進口條件，下半部岩心孔洞滲透率

IV. 結論

本子計畫成功地以計算流體力學方法模擬地下水流經岩心結構之滲透率，並細部分析地下水流於土壤內的流速及壓力分布。岩心的滲透率與岩心的結構非常相關，不同截面下的滲透率亦有所不同，在此計畫中分析以陽明山國家公園鵝尾山梯田岩心之上、下半部。該岩心上半部的滲透率介於 4.90×10^{-13} 至 9.76×10^{-13} m^2，不同計算方法上得到的數值十分接近，該岩心下半部的滲透率則介於 3.81×10^{-14} 至 6.26×10^{-12} m^2，使用不同的計算方法得到的結果差異較大。原因為其幾何結構中的局部瓶頸所致。透過進行微觀三維孔隙結構模擬地下水輸送情形，可以了解地質結構中的中尺度滲透度，以期後續應用於大尺度地下水流模擬研究中。

本研究結合 X-ray 影像分析技術與 CFD 模擬技術，利用 X-ray 影像分析將土壤微觀結構三維立體化，並由 CFD 模擬技術顯示分析灣不同地區土壤結構，探討孔隙的大小、類型、分布均勻性以及方向對於地下水流的影響，並進一步細部分析地下水流於土壤內的流速分布及流線。透過此模擬獲取之資訊可提供國家土地開發時，水利工程、地下工程和環境保護等領域的專家更多參考資訊。

參考文獻

[1] Dybbs A., Edwards R.V. Department of Fluid, Thermal and Aerospace Sciences report, FTAS/TR (Case Western Reserve University) No. 75-117, Workshop on Heat and Mass Transfer in Porous Media (PB-252 387) (NTIS: Springfield, VA) 1975.

[2] Huang H., Ayoub J.A. Applicability of the Forchheimer equation for non-Darcy flow in porous media. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro. 2006.

[3] Fand R.M., Kim B.Y.K., Lam A.C.C., Phan R.T. Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres. ASME Journal of Fluid Engineering, 109 (1987) 268-274.

[4] Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns. Chemical Engineering Progress, 48 (1952) 89-94.

[5] Liu, Y., Chen, S. J., Sagoe-Crentsil, K., & Duan, W. (2021). Predicting the permeability of consolidated silty clay via digital soil reconstruction. Computers and Geotechnics, 140, 104468.

[6] Masad, E., Muhunthan, B., & Martys, N. (2000). Simulation of fluid flow and permeability in cohesionless soils. Water Resources Research, 36(4), 851-864.

[7] Tracy, S. R., Daly, K. R., Sturrock, C. J., Crout, N. M. J., Mooney, S. J., & Roose, T. (2015). Three-dimensional quantification of soil hydraulic properties using X-ray Computed Tomography and image-based modeling. Water Resources Research, 51(2), 1006-1022.

放射誘變在毛豆適應極端氣候育種之研究
Research on Radiation Mutagenesis in Edamame Adaptation to Extreme Climate Breeding

計畫編號：112-NU-E-005-001-NU
計畫主持人：楊靜瑩
e-mail：emiyang@dragon.nchu.edu.tw
計畫協同主持人：陳文亮
計畫參與人員：廖子喬、賴昱仁、邱子耘
執行單位：國立中興大學農藝學系(所)

摘要

全球氣候變遷所帶來的極端氣候，對臺灣重要外銷農產品－毛豆之產值產生衝擊，使其植株生長受影響導致產量下降或品質低落，進而使得毛豆外銷產值下降。本計畫選用臺灣栽培面積最廣的毛豆品種-高雄 9 號，將種子送至原子科學技術發展中心進行鈷-60 輻射誘變，而得 150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h 等四種誘變程度的毛豆種子，透過輻射誘變導致作物的遺傳物質產生變異，進一步蒐集外表型生理性狀資料，進而欲選育出具優良生理性狀且抗氣候逆境之誘變品系。試驗結果顯示經由輻射劑量 300 Gy/h 處理後之毛豆種子萌發率低於對照組，此結果可作為未來豆科種子進行輻射誘變時輻射劑量之決策重要參考資訊。為建構毛豆品種高雄 9 號誘變庫，於栽培管理期間進行毛豆之株高、始花日、始莢日、特殊性狀和產量等資料調查蒐集，結果顯示於 300 Gy/h 鈷-60 處理下，誘變品系之株高較其他處理組低，且於生殖生長期於 300 Gy/h 誘變處理下，亦呈現較多誘變品系無法順利開花和結莢之現象，甚至結莢後出現籽實不充實或無籽實的情況。除了誘變庫之建立亦初步篩選出株高較低、始花日和始莢日較早或產量高等優良特徵之誘變品系，未來將進一步選育出抗氣候逆境之優良毛豆品種，以降低臺灣面臨極端氣候下之農業損失，為農產業發展做出貢獻。

關鍵詞：大豆、高雄 9 號、鈷-60 輻射誘變、育種

Abstract

The extreme weather brought about by global climate change has impacted the export value of Taiwan's important agricultural product, edamame. The growth of the plants is affected, leading to reduced yields and lower quality, which in turn causes a decline in the export value of edamame. This project selected Taiwan's most widely cultivated edamame variety, Kaohsiung No. 9. The seeds were sent to the Nuclear Science & Technology Development Center for cobalt-60 radiation mutagenesis, resulting in four levels of mutagenesis: 150 Gy/h, 200 Gy/h, 250 Gy/h, and 300 Gy/h. Through radiation mutagenesis, genetic variations in the crops are induced. We aim to collect data on phenotypic and physiological traits, to ultimately develop mutant lines with superior physiological traits and resistance to climatic stress. The experimental results showed that the germination rate of edamame seeds treated with a radiation dose of 300 Gy/h was lower than that of the control group. This outcome can serve as an important reference for determining the appropriate radiation dose in future radiation mutagenesis of legume seeds. To construct a mutant library for the edamame variety Kaohsiung No. 9, data on plant height, days to flowering, days to podding, specific traits, and yield were collected during the cultivation period. The results showed that under the 300 Gy/h cobalt-60 treatment, the mutant lines had shorter plant heights compared to those in other treatment groups. Additionally, during the reproductive growth stage under the 300 Gy/h mutagenesis treatment, many mutant lines exhibited difficulties in flowering and podding, with some even producing poorly developed or seedless pods. In addition to establishing the mutant library, the preliminary screening has identified mutant lines with desirable traits such as shorter plant height, earlier days to flowering and podding, or higher yields. Future efforts will focus on further breeding to develop superior edamame varieties that are resistant to climatic stress. This will help mitigate agricultural losses in Taiwan under extreme weather conditions and contribute to the development of the agricultural industry.

Keywords: *Glycine max* L., Kaohsiung No. 9, ^{60}Co radiation mutagenesis, breeding

I. 前言

大豆 (*Glycine max* L.)屬豆科一年生草本的自交作物，其種子富含植物性蛋白質、必需胺基酸和油脂等營養成分，不僅是良好的飼料來源亦是油料作物，根據聯合國糧食及農業組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)報告指出，大豆列於含油種子之中，與花生、向日葵及油菜並稱世界四大油料作物。衛生福利部資料指出大豆具有降低心血管疾病的功能，亦含有異黃酮 (isoflavones)的成分，可作為抗氧化劑，因此近年來大豆多作為健康食品推廣。大豆廣泛栽種於世界各地，根據 2022 年 FAO 之統計資料結果顯示，大豆於全球的栽培面積約 14,403 萬公頃，主要栽培國家為巴西、美國、阿根廷、印度及中國；全球產量共達 36,914 萬公噸，主要生產國家為巴西、美國、阿根廷、中國及印度。

農業為典型受氣候影響之產業，亦為臺灣傳統產業。由於臺灣農地面積狹小且勞動成本較高，以致於無法大面積栽培管理，因此在外銷競爭力層面上較弱勢，為提升農產業競爭力，近年來政府積極推動生產高品質、高

科技與高附加價值的農產品，其中臺灣毛豆在高屏地區透過擴大農場規模及提升自動化管理模式，有效降低生產成本，外銷產值屢創新高，建立獨樹一格的臺灣「綠金」產業，每年以穩定輸出 3 萬噸的外銷量銷售至日本，成為臺灣重要外銷農產品之一。臺灣現行毛豆栽培品種－高雄 9 號，佔毛豆契作面積的 68.7%，成為最主要的栽培品種，其具有產量高且適應性廣的特性，於春、秋兩作之每公頃合格莢產量為 8.9-9.8 公噸，種子產量則為 2.3-2.7 公噸，合格莢率可達 8 成且單株三粒莢數較多，其鮮莢果大且莢色綠，抗倒伏，適合以機械的方式進行大面積收穫。此外，鮮籽粒富含異黃酮總量，兼顧外觀品質與食味風味佳，殺菁後莢色仍保持鮮綠，因而對外市場的接受度較高，為主要生鮮豆香毛豆外銷品種[1]。

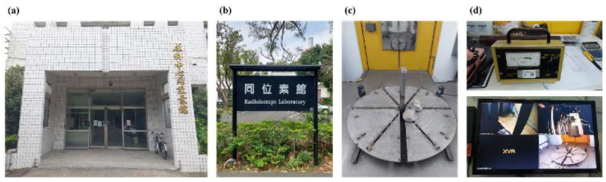
隨著全球氣候變遷造成極端天氣，例如熱浪、乾旱、暴雨等頻率增加，根據 2022 年聯合國政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)公布之氣候變遷第六次評估，第二工作小組「衝擊、調適與脆弱度」報告指出，2040 年前全球溫度增加幅度可能達攝氏 1.5 度，對人類和生態系統的風險將大幅提升。臺灣在全球暖化下將會出現豐水期降雨增多，枯水期降雨減少的降雨不均與極端化現象，同時全臺各區的溫度亦將逐漸升溫，導致作物未來可能面臨高溫、乾旱與淹水等氣候逆境，亦是乾旱/高溫或淹水/高溫等複合式氣候逆境，使作物生長發育受阻，造成農業重大損失，因而透過品種選育方式來增強作物自身的抗氣候逆境特性尤為重要。

II. 主要內容

誘變可藉由物理、化學或生物等方式來進行，使得植物體內之核苷酸、胺基酸、蛋白質、脂質、植物荷爾蒙、二次代謝產物和光合作用等機制產生變異，以達到作物體產生遺傳物質上的變異，使發生突變之比例增加[2][3][4]。隨著全球氣候變遷導致農作物生產環境逐漸嚴峻，本計畫以採用鈷-60 物理輻射誘變方式，促進臺灣優良外銷農產品毛豆品種－高雄 9 號產生遺傳物質變異，欲藉由輻射誘變毛豆以尋找有利於抵抗氣候逆境的生理特徵，進而提升其抗逆性，以因應未來全球氣候變遷所帶來的危機，並建立高雄 9 號誘變庫，從中篩選進而培育出具優良食味、品質之耐氣候逆境之新品系，以降低臺灣面臨極端氣候逆境之農產業與經濟衝擊。

誘變方法：至國立清華大學原子科學技術發展中心之同位素館進行鈷-60 輻射誘變，輻射誘變劑量分別為 150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h 等四種程度。

試驗材料：毛豆品種－高雄 9 號，為臺灣毛豆契作面積最主要的栽培品種。



圖一、毛豆品種高雄 9 號之種子於國立清華大學原子科學技術發展中心同位素館進行不同程度的鈷-60 輻射誘變。(a)、(b)國立清華大學原子科學技術發展中心同位素館。(c)高雄 9 號之種子進行鈷-60 輻射誘變。(d)偵測器和螢幕顯示種子進行鈷-60 輻射誘變現況。

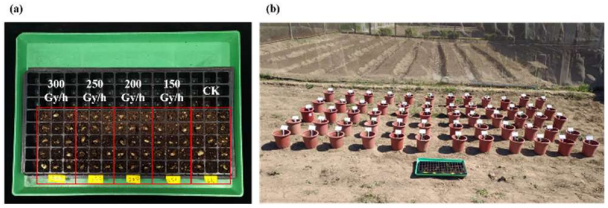
III. 結果與討論

(一) 毛豆品種高雄 9 號及其誘變品系於營養生長時期之生理性狀

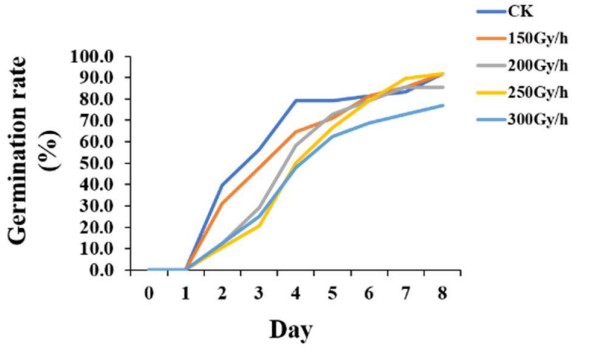
將毛豆品種高雄 9 號的種子進行鈷-60 輻射誘變，促使毛豆品種高雄 9 號的種子產生不同程度之物理誘變，透過穴盤種植的方式進行約一週的育苗後，再移植至國立中興大學農藝學系實習田栽培留種 (圖二)。期間為觀察監測高雄 9 號於不同輻射誘變劑量下的差異性，進行種子萌發率測定，並於生長發育期間蒐集植株株高、始花日、始莢日和產量等生理性狀資料，且在田間試驗栽培管理期間觀察不同輻射誘變品系的特異性。

種子萌發率試驗結果顯示對照組 (未經輻射誘變)的種子萌發率為 91.7%，而在 300 Gy/h 輻射誘變處理組之種子萌發率為 77.1% (圖三)。結果顯示高雄九號種子於較高輻射劑量 (300 Gy/h)處理下之種子萌發率低於對照組，由此結果顯示高雄九號於較高輻射劑量 (300 Gy/h)處理下影響種子萌發率較大，此試驗結果可提供未來毛豆種子輻射誘變劑量篩選條件之參考。

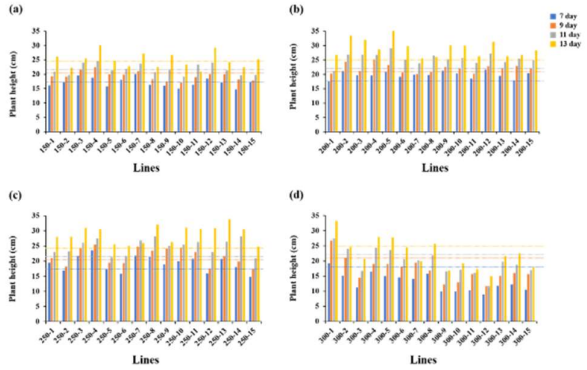
於營養生長時期 (Vegetative Stages 1~6)調查株高和觀察特殊性狀，株高試驗結果顯示調查期間植株株高隨生長時期而遞增，而 300 Gy/h 處理組之株高影響較劇烈，於各處理下於不同品系株高之影響程度不同 (圖四)。從試驗材料中可透過觀測不同輻射誘變處理對植物生長速率之影響，可能因遺傳物質受誘變進而影響其生長調控機制導致植株生長速率加速或減緩，後續可進一步挑選出株高較對照組矮小或莖桿粗壯等特徵，以作為未來抗倒伏、抗非生物逆境的育種篩選條件之一。



圖二、毛豆品種高雄 9 號之種植紀錄。(a)以穴盤育苗的方式種植於生長箱進行種子萌發率觀測。(b)將發芽的毛豆種子以盆栽的方式種植於田間並進行後續外表型性狀調查和留種。對照組 (control check, CK)、輻射誘變劑量 150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h。



圖三、毛豆品種高雄 9 號種子於不同輻射誘變劑量下之種子萌發率。對照組 (control check, CK)、輻射誘變劑量 150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h。

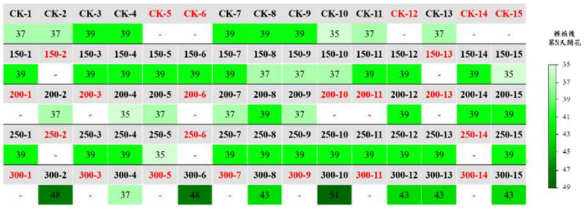


圖四、毛豆品種高雄 9 號於營養生長期間之株高。(a) 輻射誘變劑量 150 Gy/h、(b) 200 Gy/h、(c) 250 Gy/h 和 (d) 300 Gy/h 的株高，橫線為對照組 (control check, CK) 之平均株高。

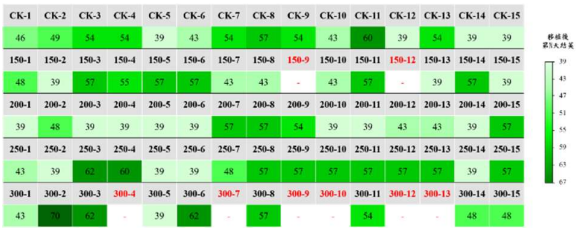
(二) 毛豆品種高雄 9 號及其誘變品系於生殖生長時期之性狀

於生殖生長期間 (Reproductive Stages 1~5)進行始花日、始莢日和產量之觀測，試驗結果顯示高雄 9 號種子受到較高輻射劑量 (300 Gy/h)誘變後，具有較多誘變品系出現未開花和未結莢的現象，甚至結莢後出現籽實不充實或無籽實的情況 (圖五、六)，因此從試驗中可得知高雄 9 號進行 300 Gy/h 的鈷-60 輻射誘變後，其花期和莢期的生長受到嚴重的損害和抑制。

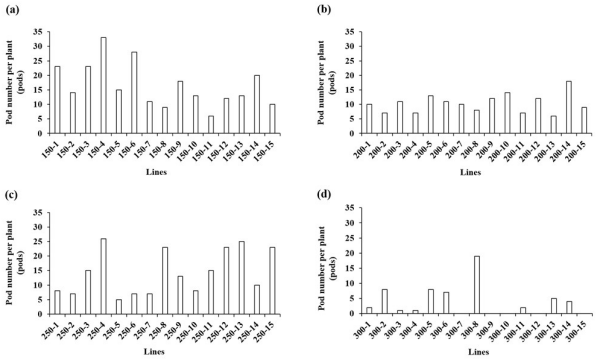
於綠莢成熟期 (Reproductive Stages 6)觀測豆莢成熟程度後，以人工方式進行單株採收，透過烘箱來降低種子含水率 (至 11~12%)後進行考種和留種，蒐集單株莢數和合格莢數的產量資料數據，試驗結果顯示高雄 9 號受 300 Gy/h 的輻射劑量誘變後，具有較多誘變品系出現單株莢數較對照組少的現象，且各誘變品系的合格莢數亦受到嚴重的生長影響 (圖七、八)。



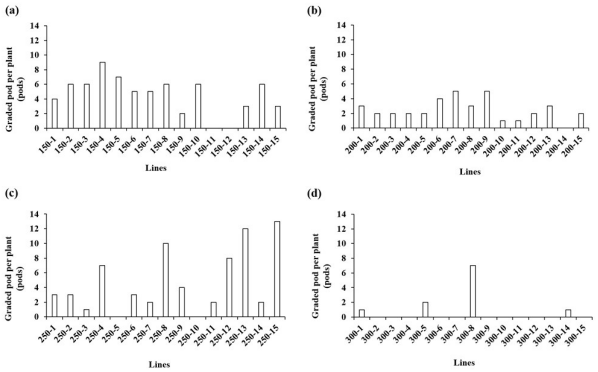
圖五、毛豆品種高雄 9 號之始花日。對照組 (control check, CK)、輻射誘變劑量 150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h，日數以播種當日為第 0 天以此按日計算，紅字代表植株死亡或無開花，綠色淺至深代表移植後第 N 天開花日數。



圖六、毛豆品種高雄 9 號之始莢日。對照組 (control check, CK)、輻射誘變劑量 150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h，日數以播種當日為第 0 天以此按日計算，紅字代表植株死亡或無結莢，綠色淺至深代表移植後第 N 天結莢日數。



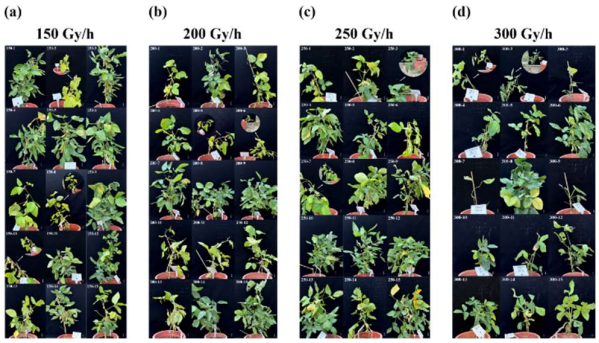
圖七、毛豆品種高雄 9 號之單株莢數。(a)輻射誘變劑量 150 Gy/h、(b) 200 Gy/h、(c) 250 Gy/h 和(d) 300 Gy/h。



圖八、毛豆品種高雄 9 號之合格莢數。(a)輻射誘變劑量 150 Gy/h、(b) 200 Gy/h、(c) 250 Gy/h 和(d) 300 Gy/h，以單莢內含有兩顆以上的籽實作為合格莢。

(三) 初步建立毛豆品種高雄 9 號誘變庫及篩選優良誘變品系

透過將毛豆種子進行不同程度的鈷-60 輻射誘變劑量處理後，蒐集毛豆全生長發育時期的外表型生理性狀和產量性狀的調查資料，包含株高、始花日、始莢日、單株莢數、合格莢數等，並於栽培管理期間觀測各誘變品系的生長勢差異，以初步建構毛豆品種高雄 9 號的誘變庫 (圖九)。透過上述外表型生理性狀和產量性狀的調查資料，與對照組進行對比分析，欲篩選出具有株高較低、始花日和始莢日較早或產量較高等優良特徵，將優良誘變品系 M_0 的種子持續進行下一世代 (M_1)的種植和性狀調查，欲篩選出可穩定遺傳至下一世代 (M_2)的優良性狀並持續留種。



圖九、毛豆品種高雄 9 號於鈷-60 輻射誘變下所建立之誘變庫。輻射誘變劑量(a) 150 Gy/h、(b) 200 Gy/h、(c) 250 Gy/h 和(d) 300 Gy/h 的植株外觀型態。Bar=3.5 公分。

IV. 結論

因應全球氣候變遷，極端氣候頻度發生率增加，可能導致農作物面臨各項氣候逆境，進而影響農作物的產量和品質。毛豆為臺灣重要的外銷農作物之一，每年為臺灣帶來龐大產值及外匯，為因應氣候變遷可能導致毛豆生產風險提高，產量和品質降低的問題，本計畫藉由鈷-60 輻射誘變的方式對毛豆種子進行四種不同程度(150 Gy/h、200 Gy/h、250 Gy/h 和 300 Gy/h)的輻射誘變，約近 8,000 顆誘變種子，透過種子萌發率試驗**得到最佳鈷-60 輻射照射建議劑量為 150~250 Gy/h，種子經 300 Gy 輻射後顯著抑制萌發和生長之重要資訊**。此外，於植株的營養生長期和生殖生長期進行外表型生理性狀調查，目前**已初步建立臺灣毛豆品種高雄 9 號的誘變庫，約近百株的毛豆生理資料，並亦初步篩選出具有優良生理性狀的誘變品系**。

參考文獻

[1] 周國隆。2006 年。[專題報導] 毛豆新品種『高雄 9 號（綠晶）』問世。高雄區農情月刊，101 期。

[2] 陳姿翰。2012。誘導突變在作物育種上之利用。台中區農業改良場一〇一年專題討論專集，p.225-229。

[3] Hollósy, F., 2002. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. Micron 33: 179-197.

[4] Oladosu, Y., Rafii, M.Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H.A., Miah, G., Usman, M., 2016. Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: A review. Biotechnol. Biotechnol. Equip. 30: 1-16.

新型耐火高熵合金應用於高輻射場域之特性分析研究
Characteristic analysis of novel refractory high-entropy alloys applied to high-radiation field

計畫編號：112-NU -E-007 -005 -NU
計畫主持人：梁正宏 教授
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

中文摘要

析出強化（precipitation strengthening）是金屬最為常見的強化機制之一，並廣泛應用於高熵合金中以獲致更高的降伏強度。為了得到最佳的強化效果，通常會讓材料施以特定溫度的尖峰時效時間，以期在材料內部均勻析出第二相。有鑑於此，本研究旨於釐清輻射損傷對於施以不同時效溫度製程的高熵合金的影響。試片係為具有不同析出粒徑的 FCC 結構 $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$。其係在相同製程時間下，施以 750 以及 900 度時效溫度以獲得不同的微結構，分別在母相中析出了不同大小及形貌的整合型析出相（coherent precipitates）。此外，還準備了一組單獨的冷軋試片作為對照組。

為了評估在常溫下，經由不同時效溫度製得的試片對於輻射的耐受性，特在 300 K 的輻照溫度下對試片照射 190 keV 的氬離子，離子通量為 $8.5x10^{15}$ cm^{-2}。然後比較了原始試片和受輻射試片之間的機械性能、成分分佈和微結構，以確定氬離子照射對於該析出行為的影響。結果顯示，所有試片的結晶性因輻照而下降，較細小的析出相會因受到輻照而重新溶回母相。同時，因輻照腫脹造成的體積膨脹率，則受到析出物的釘扎效應影響，最後歸納出析出相在經過輻照後具有兩階段的變化，分別為無序化（disorder）和溶回母相（dissolution）。另，析出物的尺寸大小與試片的抗輻照性能也有正相關的效應。

關鍵字：高熵合金、時效強化、氬離子輻照、輻射損傷

Abstract

Precipitation strengthening stands out as one of the most prevalent mechanisms for enhancing metal strength, which is also extensively applied to high-entropy alloys in order to increase their yield strength. In particular, to achieve optimal strengthening outcomes, materials are usually subjected to specific peak aging temperatures, facilitating uniform precipitation of a secondary phase within the material matrix. This study aimed to elucidate the impact of radiation damage on the strengthening of high-entropy alloys under various aging temperatures. In this study, specimens of FCC-structured $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ with diverse precipitate sizes, distinct microstructures were attained through aging at temperatures of 750 and 900°C, resulting in coherent precipitates of differing dimensions and morphologies dispersed within the parent phase. Additionally, a separate set of cold-rolled specimens was prepared as a control group.

To assess the radiation tolerance of specimens underwent different aging temperatures, they were irradiated with 190 keV argon ions at room temperature of 300 K, with a fluence of $8.5 x10^{15}$ cm^{-2}.

Subsequently, the mechanical properties, composition distribution, and microstructure of the original the irradiated specimens were compared to determine the effects of argon ion irradiation on precipitation behavior. The results showed that the crystallinity of all specimens decreased due to irradiation, and smaller precipitates re-dissolved back into the matrix due to irradiation. The volume swelling rate caused by irradiation was influenced by the pinning effect of precipitates. Finally, it was concluded that precipitates underwent two stages of change after irradiation: disorder and dissolution back into the matrix. Additionally, the size of the precipitates was positively correlated with radiation resistance of the specimens.

Keywords:
High-entropy alloys, aging strengthening, argon ion irradiation, radiation damage

研究背景

第四代核能反應器的發展，主要為了因應現代化社會不斷增長的能源需求，這是一項具有挑戰性的能源科技發展目標。然而這些反應器在運轉時需面對極端的條件，包括高溫環境和高強度的中子轟擊，這使得其所需的結構材料必須具備更高規格的特性要求[1, 2]。為了確保該等反應器的高效運轉、提高安全性以及減少核廢料的產生等嚴苛要求，反應器材料在面對反應器運轉時所面臨的問題包括輻射腫脹、硬化、輻照誘發偏析以及氣泡生長在材料內部 [3-7] 等課題至關重要。是以，這挑戰性任務的成功與否，也對未來核能領域的是否能永續發展密不可分。

有鑑於此，高熵合金，以其特殊的組成使其擁有與一般合金不同的四大效應[7-9]，成為引起廣泛興趣的研究方向。而其卓越性能在高溫、高輻射環境下，

是否依然？這也使得它們是否成為第四代核能反應器結構材料的有望候選者，特別是在提高反應器安全性和效率等方面具有潛在優勢，引發更高的關注。同時，它們的高強度、耐磨耗和耐腐蝕等特性，是否在極端條件下也同樣表現出色，亟待深入研究。

為了讓它們獲致更好的降伏強度，目前 具有 FCC 結構的高熵合金，普遍都會透過時效處理，使其在材料內部均勻地析出第二相。這樣一來，便可有效地加大當差排在晶格內部移動時所需的能量。而該析出相對於輻射損傷的耐受性即是一個值得探討的議題 [5]。

因此，本研究不僅針對它們的材料性能進行一般性的評估，更針對特定環境中的極端條件，進行深入研究，以確保它們當實際應用中能夠發揮最大的效益。這包括了針對它們在高溫、高輻射環境中的微觀結構和晶體缺陷的理解，以及對它們在反應器運轉期間可能面臨的輻射損傷研究。

總結而言，本研究試圖深入探討這些問題，以期更深入瞭解這些合金在實際應用中的表現，並為未來的核能技術提供關鍵的材料支持。

研究方法

為了減少不必要的變數，我們依據文獻中先使用模擬軟體 Thermo-Calc 找出 $Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y$ 在各 x, y 比例間的相組成如圖 1 [10]，排除 η 相與 β 相之後，最終選定落在 700 至 1100 度間的相組成，只有 γ 與 γ' 的 $Al_{0.2}Ti_{0.3}$ 最為適合作為本研究的實驗對象。接下來參考 $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 在各溫度區間的相組成，詳如圖 2 [10] 所示，理想的狀況是材料中只有 γ 與 γ' 兩相存在，所以後續實驗將選用 750 與 900 度作為時效溫度，以便獲得最佳的析出相尺寸。

本研究透過真空電弧融煉進行高熵合金的製備，希望能熔煉出 180 g 的高熵合金，分兩批進行，各組成元素如表 1 所示。取純度 99.5 wt% 以上的金屬顆粒及片狀材料，依合金設計比例之 Al、Cr、Co、Fe、Ni、Ti，待秤完重後，置於水冷銅模中，將熔點最高的金屬置放在最頂層，熔點最低者則置放在最底層，堆疊成尖端形狀，以利電弧反應。接著關閉腔體，並抽真空至 2×10^{-2} torr，填入純 Ar 至 150 torr 進行清潔。以上的抽氣步驟，反覆操作三次，最後一次通 Ar 至 450 torr，並需在熔煉以前，先熔一次鈦錠，吸取剩餘氮氣、氧氣，其目的是為了確保腔體內的具有足夠的真空度，以利熔煉製得的試片能擁有良好的純度。然後使用高壓電在操作栓和坩堝之間產生電弧，利用電弧所產生的熱量來加以熔化試片。在其過程中，試片受到真空保護可免於氧化。同時，在製作過程中，需將鑄錠的底部翻轉，並反覆熔煉四次，以確保試片內的材料均勻混合。之後將鑄造態的試片，冷滾形成滾壓態，冷滾量約為 70%，以便更貼近試片於實際應用上的真實狀況。

熔煉完成後的試片，進行兩種不同溫度的熱處理，熱處理分為固溶處理與時效兩部分，詳如圖 3 所示。目的是為了在試片材料內部析出不同大小的奈米析出物，分別為 750、900°C 皆持續 50 小時 [10]。先將高溫爐設定至目標溫度，待高溫爐上的溫度顯示器達到目標溫度後，利用溫度探針檢查高溫爐內的實際溫度和溫度顯示器上的數值是否一致，並進行校準，確認爐內溫度達到目標溫度後，將試片置於高溫爐內直到時效時間結束，取出之後，接續進行水淬。另外製備了另一組僅經過冷滾處理的式片作為對照組，本研究茲將冷滾；750°C；900°C 的試片依序簡稱為 CR、750、900。並切割成適合於實驗用的大小。

經切割完成的試片，在拋光過程中確認所有的刮痕已被清除，以利後續的氫離子輻照實驗以及各項的材料分析實驗。在本研究中，氫離子輻照實驗委託美國 Kroko 公司代工。使用的離子束電流大小為 40 微安培、Ar 離子能量為 190 keV、Ar 離子通量為 $8.5x10^{15}$ cm^{-2}、輻照溫度為 300 K。後續再利用 SEM、XRD、nanoindenter 等材料分析技術，加以觀察與量測試片在經輻照後的微結構與機械性質變化。

結果與討論

本研究使用 SEM 掃描式電子顯微鏡，觀察各試片在輻射前（圖 4 (a)、(b)、(c)）後（圖 4 (d)、(e)、(f)）的表面影像。如圖 4 (a)、(b)、(c) 所示，可觀察到 CR 試片的表面並無析出物析出；750 試片則是有著均勻且緻密的樹枝狀析出結構，使用圖像計算軟體 ImageJ 得出的平均析出物尺寸，樹枝狀析出大小約為直徑 70 nm；900 試片也有觀察到析出物，但 900 試片觀察到的析出物尺寸落在 200 nm 以上，且有部分的析出物呈現粗大化。而在圖 4 (d)、(e)、(f) 中，可以觀察到經輻照後，CR 試片並無新的析出相生成，跟輻照前的變化差異並不大；750 試片的表面在輻照後與輻照前呈現明顯的對比，佈植後的表面已無緻密的樹枝狀析出物，剩下細小且不明顯的簇集在表面，這有可能是因為輻照誘發偏析後，從母相析出的跡象，過往的研究表明在特定的能量劑量時是有可能發生因為輻照而引起的析出；900 試片的表面仍然維持與輻照前一樣的析出顆粒分布。

圖 5 為本研究 SRIM 理論模擬所得的輻射損傷與摻雜 Ar 離子的縱深分布。針對 750 試片內摻雜 Ar 離子的縱深分布，SRIM 理論模擬與 SIMS 實驗量測的比較如圖 6 SRIM 理論模擬係基於假設試片為處於 0 K 的狀態。因此，室溫的輻照實驗，基本上，會因熱擴散與輻射增強擴散效應，導致摻雜 Ar 離子縱深分布深入試片內部（並較 SRIM 理論模擬分布更深）。值得一提的是，有序的晶格排列的試片，因摻雜 Ar 離子的穿隧效應（channeling effect），會加強此一深入試片內部的行為。如 SEM 的觀測結果

顯示，輻照前，擁有相當多小而密的 γ'，即使輻照後，沒有可見的 γ' 留存以捕獲摻雜 Ar 離子，致使相當可觀的 Ar 離子深入試片內部。同時，因 Ar 為鈍氣，可預期有為數不少的 Ar 離子，會從試片表面逸散。致使留存在試片內部的 Ar 離子的量偏低。圖 7 所示為 CR 試片輻照後 SIMS 與 SRIM 結果比較，輻照期間，大量的 Ar 離子可深入試片內部（並較 SRIM 理論模擬分布更深）。但因 Ar 為鈍氣，絕大部分的 Ar 離子，已在輻照後，從試片表面逸散。致使留存在試片內部的 Ar 離子的量比 750 試片更低。

圖 8 所示為 900 試片經輻照植後 SIMS 與 SRIM 結果的比較。對於摻雜 Ar 離子縱深分布在接近試片表面而言：SIMS 量測結果與 SRIM 理論模擬結果相去甚多，而且前者在接近試片表面區域，更呈現近乎平坦的分布現象。針對本研究的離子能量與劑量、輻照溫度，並不足以因熱擴散與輻射增強擴散效應致此。而高離子劑量之下，因濺射現象所導致的平坦飽和 Ar 濃度值遠大於本研究的實驗結果，也非成因。因大量留存的 γ' 捕獲了摻雜 Ar 離子，抑制了它們深入試片內部。進而致使它們於接近試片表面區域，大量堆積，進而呈現近乎平坦的分布，似乎更能解釋此一現象。

900 試片在輻照後的 STEM 分析，詳如圖 9 所示，在表面部損傷層的範圍內觀測到了來自母相 FCC 的訊號如圖 9 (c) 所示，證實 900 試片在歷經 Ar 離子輻照後，依然存有 $L1_2$ 析出相的繞射點，亦即仍保有有序析出相的結構。

各試片輻照腫脹的量測分析結果，詳如圖 10 所示。結果顯示：因輻照導致試片腫脹的程度依序為：CR > 750 > 900。γ' 在輻照環境中，有穩定基體和捕獲點缺陷的作用。γ' 能有效捕獲輻照產生的點缺陷（如空位和間隙原子），從而減少這些缺陷的移動和聚集，降低了空孔的成核率。γ' 的存在增加了缺陷的湮滅機會，減少了差排環和其他輻照誘導缺陷的形成。γ' 能顯著提高材料的機械強度和硬度，這有助於抵抗輻照引起的形變和損傷，間接減少了孔隙膨脹的傾向。強度的提高也使得材料在輻照環境下仍能保持良好的結構完整性。

為了消除金屬在奈米壓痕機械性質分析儀（nanoindenter）上常見的尺寸壓痕效應，本研究特別使用了 Nix and Gao model 修正量測所得的硬度，表 2 為修正後的硬度。結果顯示：CR 試片在經輻照後的硬度下降現象，推測造成的原因為：輻照帶來的能量，使得因為冷滾而生成的差排重新排列，又輻照生成的大量點缺陷與差排複合，造成其硬度下降。750 試片在經輻照後，其軟化情形最為顯著，推測造成的原因為：析出物的無序化以及溶回母相所致，損失了原有的強化機制。900 試片在經輻照後，擁有最小的軟化現象，推測造成的原因為材料內部尺寸擁有較大的 L12 析出物，當承受相同的輻照劑量，仍保持相當的有序結構。

結論

製作 $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 高熵合金過程中，若施以適宜的時效處理，可有效生成 γ'，並進而藉由控制溫度，可獲致不同尺寸的析出物及數量，達到不同的抗輻照效果。時效處理的溫度越高，可生成大而疏的 γ'，具有因釘扎效應，阻止間隙原子向試片內部及表面行進的能力，易於與鄰近的空位因互毀（mutual annihilation）而消弭輻射損傷，獲致較佳的抗輻照性。$Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 高熵合金當面對輻照，因析出相的無序化以及溶解，會造成硬度下降的問題，可藉由控制析出物尺寸來加以緩解。本研究所探討的 $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 高熵合金，因輻照誘發的腫脹問題，可以藉由在材料內部析出 γ' 來減緩腫脹程度。綜合各項分析結果，本研究所探討的 $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 高熵合金，以施以 900 ºC 時效溫度者，擁有最佳的抗輻照性。

參考文獻

[1] W. Dong, Z. Zhou, M. Zhang, Y. Ma, P. Yu, P.K. Liaw, G. Li, "Applications of high-pressure technology for high-entropy alloys: A review," Metals, 9(8) (2019) 867.

[2] K.L. Murty, I. Charit, "Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: Challenges and opportunities," Journal of nuclear materials, 383(1-2) (2008) 189-195.

[3] L. Yang, H. Ge, J. Zhang, T. Xiong, Q. Jin, Y. Zhou, X. Shao, B. Zhang, Z. Zhu, S. Zheng, X. Ma, "High He-ion irradiation resistance of CrMnFeCoNi high-entropy alloy revealed by comparison study with Ni and 304SS," Journal of Materials Science & Technology, 35(3) (2019) 300-305.

[4] E. Getto, K. Sun, A.M. Monterrosa, Z. Jiao, M.J. Hackett, G.S. Was, "Void swelling and microstructure evolution at very high damage level in self-ion irradiated ferritic-martensitic steels," Journal of Nuclear Materials, 480 (2016). 159-176.

[5] Y.L. Zhao, F.L. Meng, T. Yang, J.H. Luan, S.F. Liu, G.M. Yeli, W.T. Lin, W.H. Liu, X.J. Liu, C.T. Liu, J.J. Kai, "Enhanced helium ion irradiation tolerance in a Fe-Co-Ni-Cr-Al-Ti high-entropy alloy with L12 nanoparticles," Journal of Materials Science & Technology, 143 (2023) 169-177.

[6] G.S. Was, Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys. Edition 1st, Springer (2007).

[7] K. Jin, C. Lu, L.M. Wang, J. Qu, W.J. Weber, Y.

Zhang, H. Bei, "Effects of compositional complexity on the ion-irradiation induced swelling and hardening in Ni-containing equiatomic alloys," *Scripta Materialia*, 119 (2016) 65-70.

[8] J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, "Nanostructured high−entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes," Advanced engineering materials, 6(5) (2004) 299-303.

[9] J.W. Yeh, "Recent progress in high entropy alloys," Ann. Chim. Sci. Mat. 31(6) (2006) 633-648.

[10] C. Lu, L. Niu, N. Chen, K. Jin, T. Yang, P. Xiu, Y. Zhang, F. Gao, H. Bei, S. Shi, M.R. He, I.M. Robertson, W.J. Weber,C., L. Wang, "Enhancing radiation tolerance by controlling defect mobility and migration pathways in multicomponent single-phase alloys," *Nature communications*, 7(1) (2016) 13564.

7. 圖表

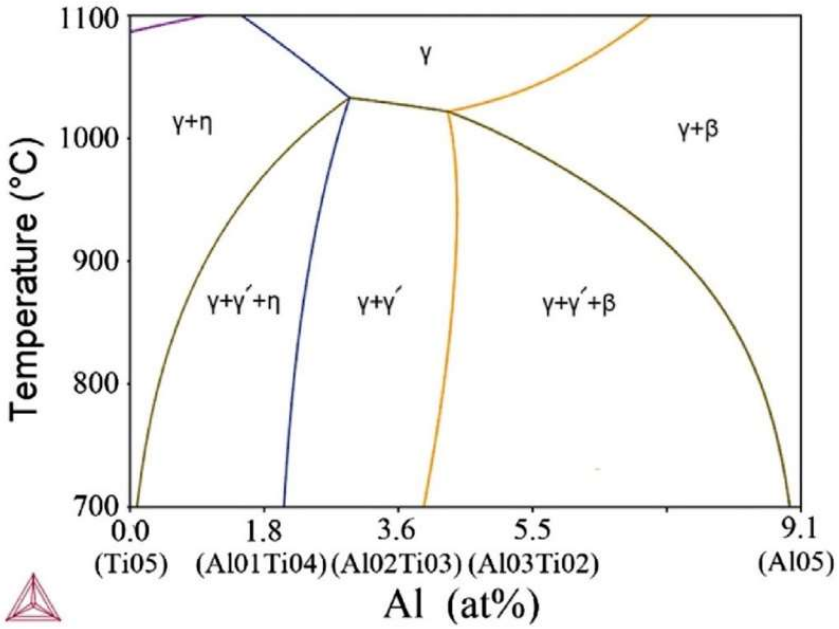


圖 1　溫度對不同 Al,Ti 含量的 $Al_xCo_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_y$ 相圖 [18]

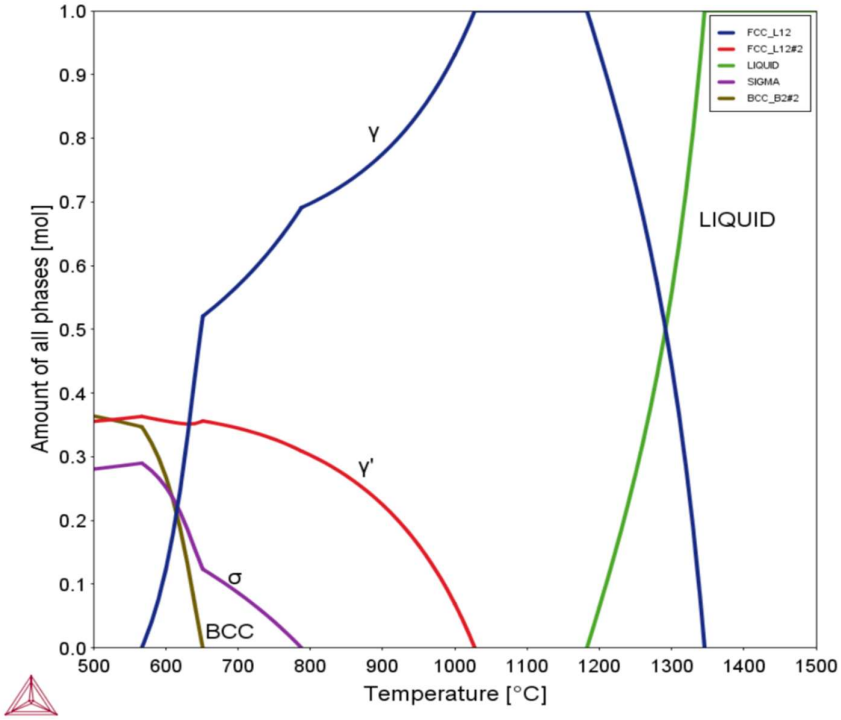


圖 2　$Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 平衡相的莫耳分率對溫度的相圖 [18]

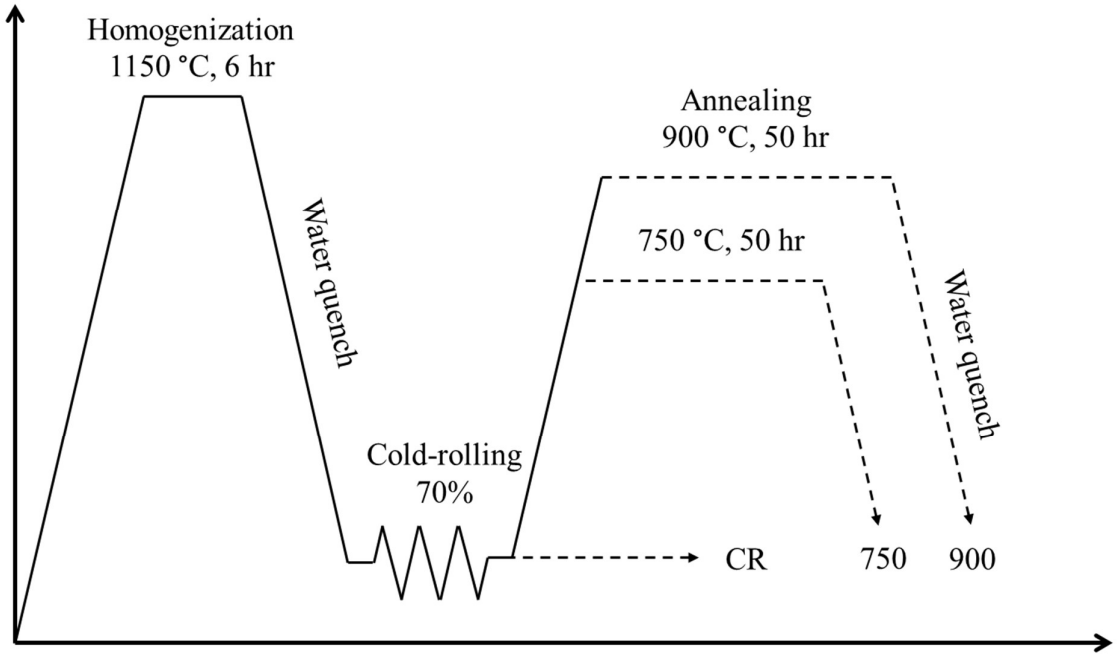

Homogenization
1150 °C, 6 hr
Water quench
Cold-rolling
70%
Annealing
900 °C, 50 hr
750 °C, 50 hr
Water quench
CR
750
900

圖 0　熱處理過程示意圖

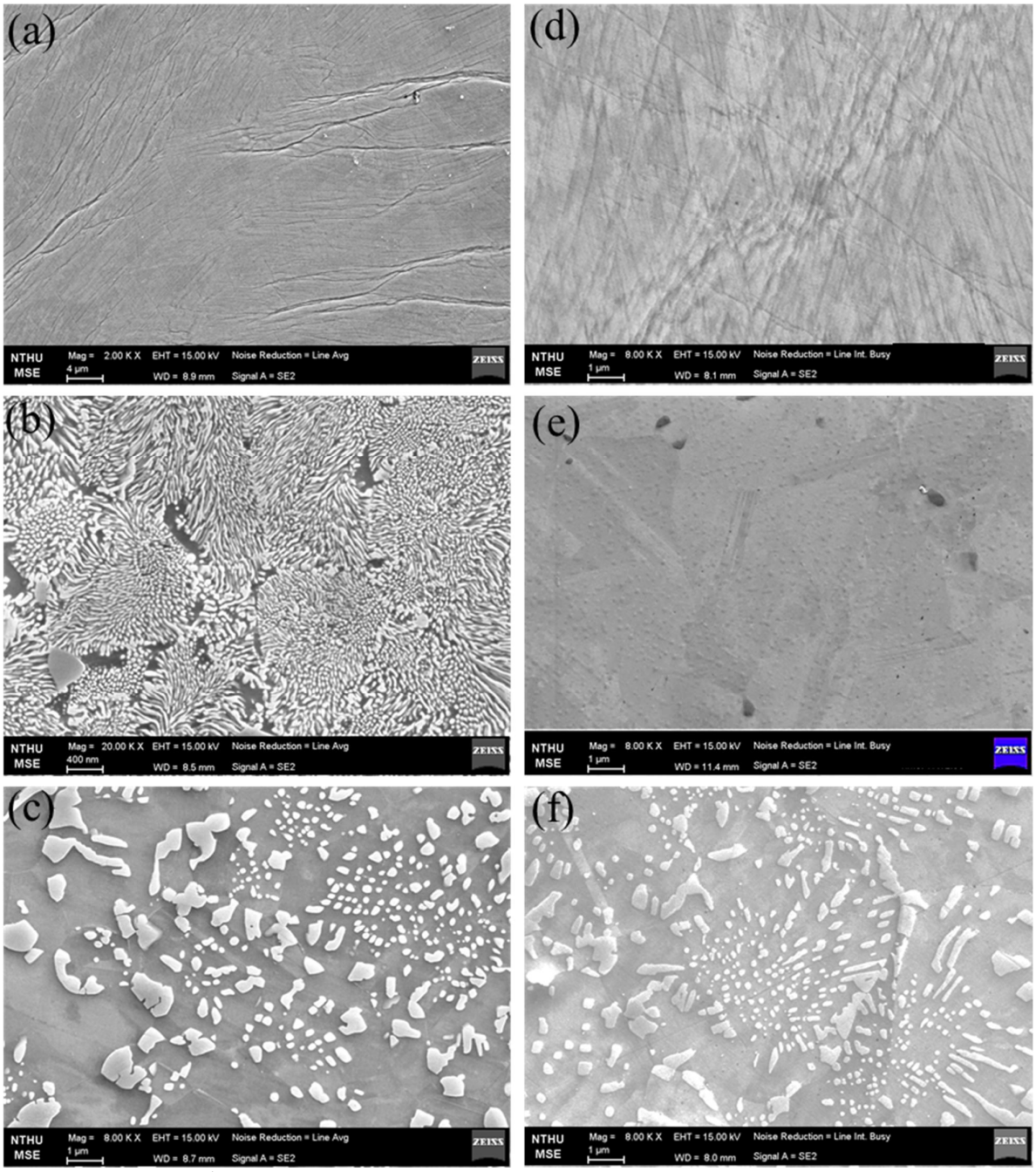


圖 01　掃描式電子顯微鏡的二次電子影像；(a) CR 試片輻照前；(b) 750 試片輻照前；(c) 900 試片輻照前；(d) CR 試片輻照後；(e) 750 試片輻照後；(f) 900 試片輻照後

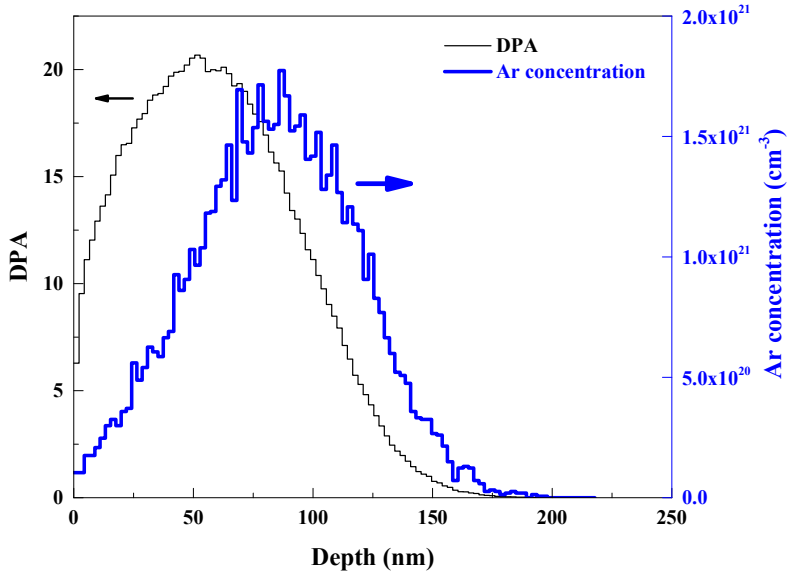


圖 5　SRIM 理論模擬所得的輻射損傷與摻雜 Ar 離子的縱深分布

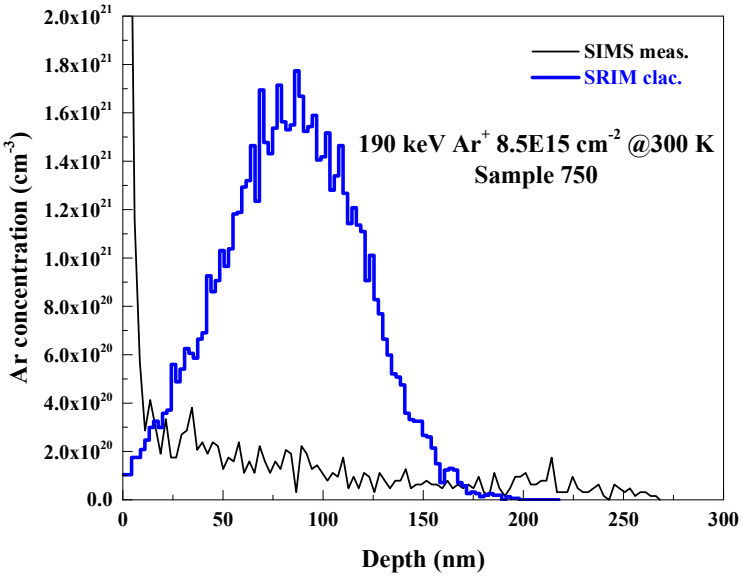


圖 6　750 試片佈植後 SIMS 與 SRIM 結果比較

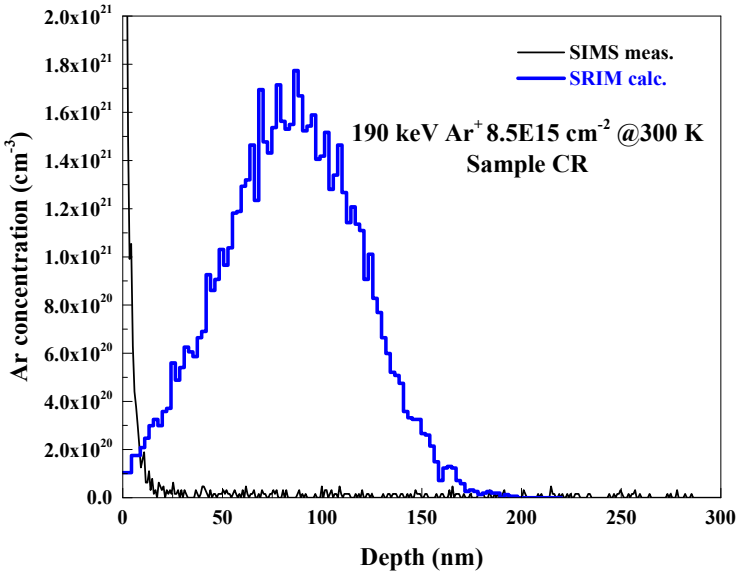


圖 7　CR 試片佈植後 SIMS 與 SRIM 結果比較

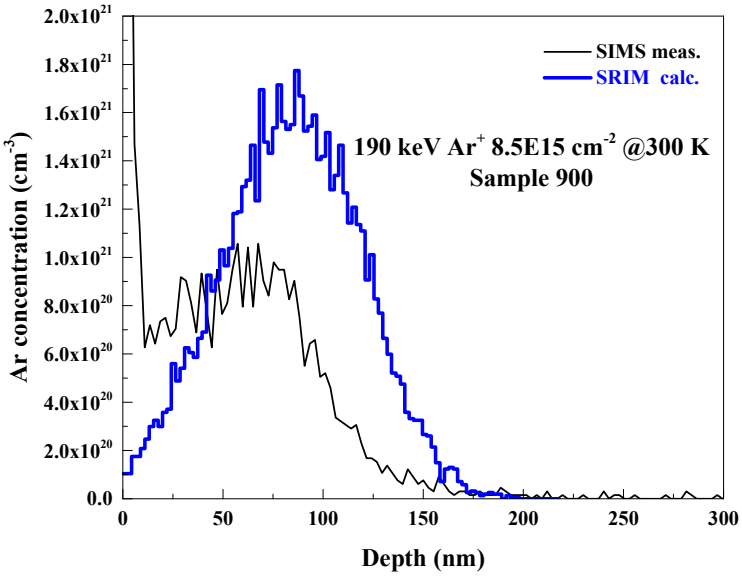


圖 8　900 試片佈植後 SIMS 與 SRIM 結果比較

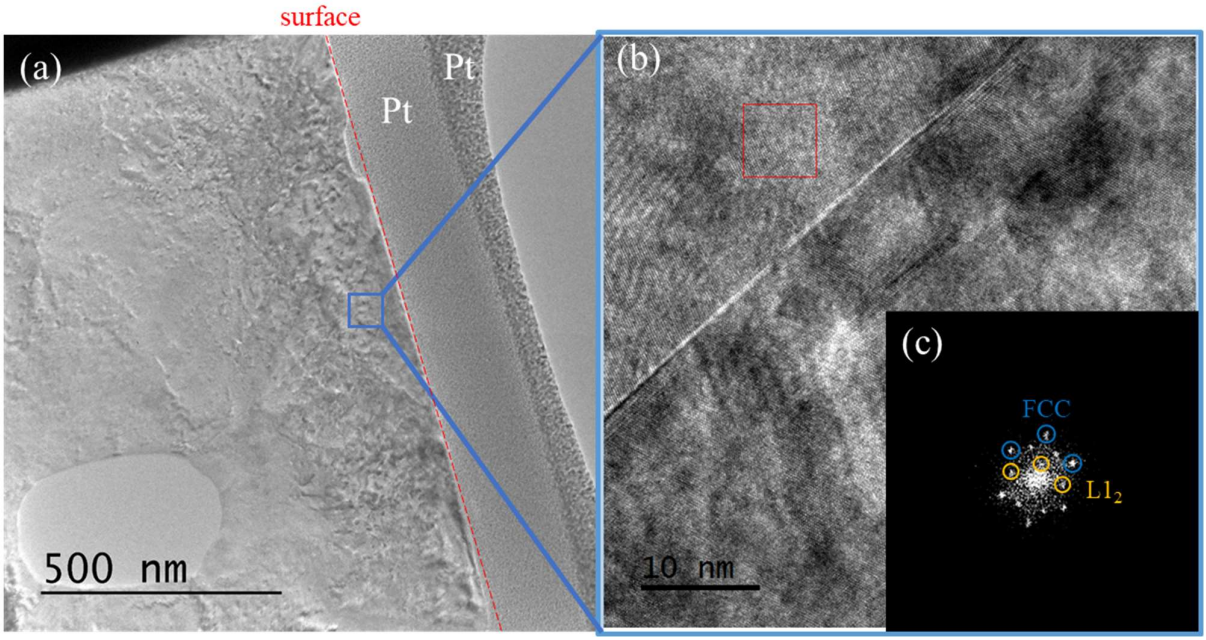


圖 9　900 試片佈植後的 STEM 影像 (a) 試片佈植層的明場影像 (b)藍色方框區域的 HRTEM 影像 (c) 紅色方框區域的 SADPs

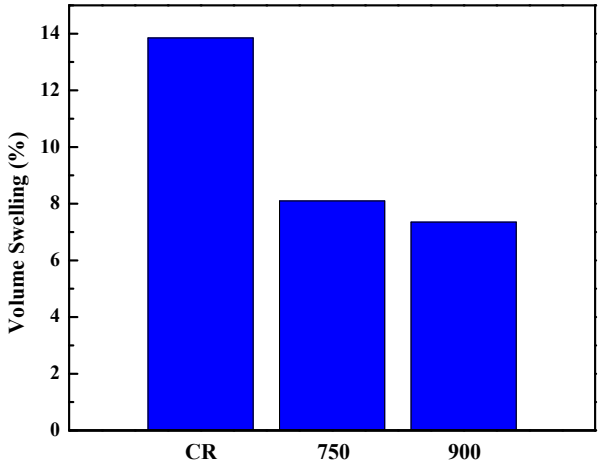


圖 10　各試片輻照後體積膨脹之趨勢圖

表 1 $Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3}$ 配料成份表

合金種類	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti	total
mol	0.2000	1.5000	1.0000	1.0000	1.5000	0.3000	5.5000
at%	0.0364	0.2727	0.1818	0.1818	0.2727	0.0545	1.0000
理論重量(g)	1.6766	27.4656	16.1550	17.3509	27.3538	4.4616	94.4635
實際(g)	1.6873	27.3910	16.1519	17.3207	27.3538	4.4718	94.3765
誤差	0.0064	-0.0027	-0.0002	-0.0017	0.0000	0.0023	-0.0009

合金種類	Al	Co	Cr	Fe	Ni	Ti	total
mol	0.2000	1.5000	1.0000	1.0000	1.5000	0.3000	5.5000
at%	0.0364	0.2727	0.1818	0.1818	0.2727	0.0545	1.0000
理論重量(g)	1.5985	26.1859	15.4024	16.5425	26.0794	4.2538	90.0625
實際(g)	1.6081	26.1011	15.4318	16.6029	26.0794	4.2301	90.0534
誤差	0.0060	-0.0032	0.0019	0.0037	0.0000	-0.0056	-0.0001

表 2 Nix and Gao model 修正後硬度

H_0			
	CR	750	900
Pristine	6.76	7.13	5.97
irradiated	6.16	5.98	5.56
softening	-8.85%	-16.16%	-6.91%

發展極紫外光干涉儀與精密複數折射率量測之應用
Measuring complex refractive index by interferometer using ultraviolet light source

計畫編號：NSTC 112-NU-E-007-006-NU
計畫主持人：林明緯
e-mail：mwlin@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：陳明彰
計畫參與人員：傅毓智、簡佑恩、蕭世裕、李奕學、蔡尚哲、鄭全翊、陳士銘、劉宏達
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

本計畫研究利用數週期飛秒雷秒脈衝所產生的高次諧波連續極紫外光源所發展的干涉儀技術。模擬工作發展了一個基於菲涅耳繞射近似的干涉條紋數值模型並實現一個可用於分析馬赫-岑得極紫外光干涉儀所量測之二維空間-頻率干涉圖譜的傅立葉分析演算法以解析試片之折射率實部色散項與虛部項數值。實驗上則是架設了一個紫外光馬赫-岑得干涉儀搭配錐面繞射光柵產生干涉圖譜。此研究工作培養學生在光學干涉原理與數值分析的知識，也提升其操作雷射系統、架設光學元件與控制精密平移台之基礎研究能力。

關鍵詞：極紫外光雷射、干涉儀、複數折射率

Abstract

This project aims to investigate interferometer technique applicable with extreme ultraviolet (EUV) from high-order harmonic generation driven by few-cycle femtosecond laser pulses. The simulation work first developed a numerical model of Fresnel diffraction to resolve the properties of EUV wave propagation and interference. In addition, a Fourier transform-based algorithm was developed for analyzing 2-D spatial-spectral interferograms acquired from an EUV Mach–Zehnder (M-Z) interferometer and retrieving the real (dispersive) and imaginary parts of the refractive index of a sample. In experiments, an EUV M-Z interferometer was constructed to achieve interferograms with a conical grating. This project also helps enhance students' knowledge regarding optical interference and numerical analyses in simulation studies, as well as training them to operate laser systems, set up optical components, align beams, and control instruments.

Keywords: extreme ultraviolet, interferometer, complex refractive index

I. 前言

具備光子能量約 10 至 120 電子伏特或波長介於 10 至 120 奈米之極紫外光在工程與科學應用上有相當高的需求。代表性技術如基於 13.5 奈米光源所發展的極紫外光微影製程(lithography)[1,2]或使用同步輻射極紫外光所來分析材料表面元素與電子結構的光電子能譜儀(photoelectron spectroscopy)[1]。

近年來，由飛秒雷射脈衝所驅動的高次諧波(high harmonic generation, HHG)[1,3]漸成為實現同調軟 X 光與極紫外光光源的主要技術並應用於科學與工業界的技術發展。此種具備高空間與時間同調性的極紫外光源可應用於同調光繞射顯微術(coherent diffraction imaging, CDI)[4]以快速量測尺度小於 100 奈米之結構，也用於發展光學散射量測術(scatterometry)以檢測極紫外光微影光罩[5]。而建立一套適用於極紫外光波段的干涉儀系統即可藉由量測試片之折射率(refractive index)來解析極紫外對不同材料的折射率變化與色散曲線[6]並用以開發極紫外光元件與提升紫外光材料分析技術。

極紫外光於物質中傳播時的複數折射率$n(\omega)$可表示為

$$n(\omega) = 1 - \delta(\omega) + i\beta(\omega), \quad (1)$$

在此之$\omega = 2\pi c_0/\lambda_0$為光波的角頻率、$c_0$與$\lambda_0$分別為真空下的光速與光波長，而不同頻率(波長)之光波於物質中折射率$n(\omega)$的實部與虛部項則可分別定義為$1-\delta(\omega)$與$\beta(\omega)$兩項。當光波於物質中傳播時，其波長$\lambda = \lambda_0/n(\omega)$會依折射率數值而改變。一個平面光波的電場 E 可表示為

$$\mathbf{E}(\omega, \mathbf{r}, t) = E_0(\omega)\exp[-i(\omega t - \mathbf{k}\cdot\mathbf{r})]，(2)$$

其中向量波數(wave number) $\mathbf{k}$ 定義光波傳播的方向、$\mathbf{r}$ 為傳播距離而 t 為時間。由於波數 $\mathbf{k}$ 為折射率$n(\omega)$之函數，其數值為可表示為

$$k(\omega) = |\mathbf{k}(\omega)| = \frac{\omega}{c_0}n(\omega) = \frac{2\pi}{\lambda_0}n(\omega) = \frac{2\pi}{\lambda_0}[1 - \delta(\omega) + i\beta(\omega)]。(3)$$

在向量波數 $\mathbf{k}$ 與 $\mathbf{r}$ 平行($\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}$=kr)的情況下，光波傳播|$\mathbf{r}$|=d 之距離後其電場 E 變為

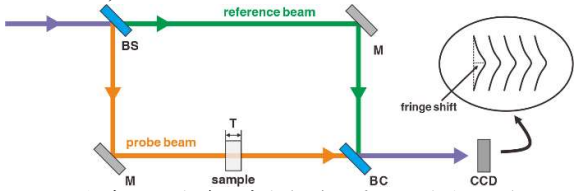
$$E(\omega, d, t) = E_0(\omega)\exp[-i(\omega t - kd)] = E_0(\omega)\exp\{-i\{\omega t - \frac{2\pi}{\lambda_0}[1 - \delta(\omega) + i\beta(\omega)]d\}。(4)$$

經整理後電場E可表示為

$$E(\omega, d, t) = E_0(\omega)\exp\{-i[\omega t - (2\pi/\lambda_0)d]\}\exp\{-i[2\pi\delta(\omega)/\lambda_0]d\}\exp\{-[2\pi\beta(\omega)/\lambda_0]d\}，(5)$$

在式(5)中之第一項$\exp\{-i[\omega t - (2\pi/\lambda_0)d]\}$代表光波傳播間距後的相位變化，第二項$\exp\{-i[2\pi\delta(\omega)/\lambda_0]d\}$為物質折射率$n(\omega)$實部項中的$\delta(\omega)$變化對光波造成的相位偏移(phase shift)，而第三項$\exp\{-[2\pi\beta(\omega)/\lambda_0]d\}$則代表

物質折射率n(ω)虛部項β(ω)對電場所造成的衰減(attenuation)。



圖一: 馬赫-岑得干涉儀之基本架構以量測干涉條紋。重要組件為分光鏡(BS)，反光鏡(M)、試片(sample)、合光鏡(BC)與感測相機(CCD)。

實驗上光波的波前(wavefront)與相位偏移可使用干涉儀(interferometer) [1]量測。圖一為馬赫-岑得干涉儀(Mach–Zehnder interferometer)之基本結構。其原理為使用分光鏡(beam splitter, BS)將雷射光束分成通過待測試片(sample)的探測光束(probe beam)與另一道參考光束(reference beam)，後續透由一個合光鏡(beam combiner, BC)將兩道光束於時間與空間上重合在感測相機(charge-coupled device, CCD)上以擷取具明顯干涉條紋(interference fringes)的影像。當探測光束與參考光束在分光後經相同的時間t抵達相機時，式(5)中與時間有關之變量便可忽略，故可簡化影響干涉條紋的參數為試片折射率中δ(ω)和β(ω)兩項。當探測光束通過厚度為T之試片後，試片的實部折射率變化δ(ω)、亦即色散(dispersion)即使其電場帶有一個相比參考光束電場之相位偏移(phase shift)

$$\Delta\phi(\omega,T) = (2\pi/\lambda_0)\delta(\omega)T\text{，}(6)$$

並使干涉條紋偏移(fringe shift)。

在使用干涉儀量測具調變的干涉條紋後，即可以數值法分析干涉條紋的偏移量[7]來回解出相位偏移$\Delta\phi(\omega)$，並再代入光波長λ_0與試片厚度T後推算出材料的折射率實部色散δ(ω)。

折射率n(ω)之虛部項β(ω)對電場的衰減則會使原來強度為I_0的探測光束強度在經過試片後衰減成為

$$I(\omega,T) = |\mathbf{E}(\omega,d) * \mathbf{E}'(\omega,d)| = I_0\exp\{-[4\pi\beta(\omega)/\lambda_0]T\}\text{。}(7)$$

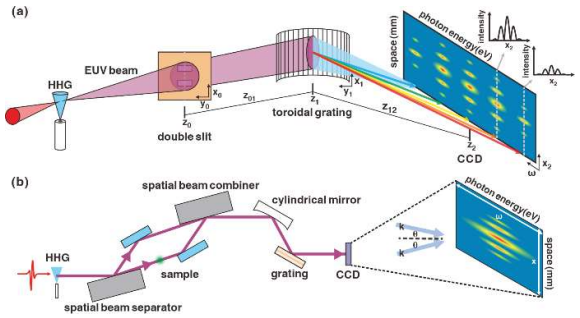
因此實驗上量測試片折射率n(ω)虛部項β(ω)則可簡單的透由探測光束通過試片後強度穿透率(transmittance)

$$\alpha(\omega) = I(\omega,T)/I_0 = \exp\{-[4\pi\beta(\omega)/\lambda_0]T\}\text{，}(8)$$

再依光波長λ_0與試片厚度T之數值計算試片材料之β(ω)數值。

本研究之目的為發展極紫外干涉儀技術與相關演算方法並培育新一代X光與雷射的科學人才。研究的模擬工作發展一套基於光繞射模型、適用於雙狹縫極紫外光干涉架構的模擬程式與建立一個可回解干涉儀探測脈衝相位變化並估算試片之實部折射率色散δ(ω)和虛部項β(ω)的傅立葉演算分析方法。實驗部分主要為設計與製作紫外光束之準直、分光與成像元件，並整合奈米級平移台控制系統來精準調控參考光脈衝之光程以在所製作的馬赫-岑得干涉儀中實現探測脈衝與參考脈衝的時間重合來獲得干涉條紋。

I. 主要內容



圖二: (a)依文獻[8]以高次諧波產生極紫外光與雙狹縫干涉法產生干涉圖形之實驗中重要光學元件與相應之幾何關係。(b)具備高反射率、適用於極紫外光波段的馬赫-岑得干涉儀示意圖。

模擬工作首先建立基於菲涅耳繞射(Fresnel diffraction)近似下點光源傳播的干涉條紋數值模擬以了解極紫外光干涉圖形的特性與重要空間參數。圖二(a)為基於文獻[8]所建構、利用高次諧波產生極紫外光並藉由雙狹縫干涉法產生干涉圖形以分析試片折射率之模型。在此雷射產生之高次諧波極紫外光傳播至位於z_0之雙狹縫時其縱向位置(x_0)的波前分佈為

$$g_\lambda(x_0) = \exp[-i\pi\frac{x_0^2}{R(\lambda)\lambda}]\text{，}(9)$$

其中R(λ)為波長為λ之極紫外光波的波前曲率半徑。以$f_{slit}(x_0)$函數描述的雙狹縫遮罩將紫外光分為兩道光束，並以$\exp[i\pi(x_0-x_1)^2/(z_{01}\lambda)]$的真空脈衝響應函數(impulse response function)傳播z_{01}之距離到達位於z_1的曲面光柵上的個別縱向位置(x_1)。光柵反射而帶入的光波前相位變化為$\exp[iW_\lambda(x_1)]$，其中

$$W_\lambda(x_1) = \frac{2\pi\xi(\lambda)x_1}{z_{12}\lambda} - \frac{\pi x_1^2}{F(\lambda)\lambda}\text{，}(10)$$

內的ξ(λ)和F(λ)為針對光波造成的波前傾斜(wavefront tilt)與彎曲(wavefront curvature)效應之量化數值，最後光波由光柵傳播z_{12}之距離至位於z_2的感測相機的效應以$\exp[i\pi(x_0-x_1)^2/(z_{01}\lambda)]$函數描述。總結於位置$z_2$依縱向$x_2$位置的一維干涉圖形分佈可表示為[8]

$$I_\omega(x_2,x') = C\left|\int\int_{-\infty}^{\infty} dx_0 dx_1 g_\lambda(x_0 + x')f_{slit}(x_0)\exp[i\pi\frac{(x_0-x_1)^2}{z_{01}\lambda}]\exp[iW_\lambda(x_1)]\exp[i\pi\frac{(x_1-x_2)^2}{z_{12}\lambda}]\right|^2\text{，}$$

(11)

其中x'為極紫外光波產生時的指向變動(pointing fluctuation)，如此即可進一步推估在具有高斯分佈$\exp[-x'^2/P_\sigma^2(\lambda)]$(特徵寬度為$P_\sigma(\lambda)$)的光波指向變動下產生的平均干涉圖形

$$I_\omega^{avg}(x_2) = C'\int_{-\infty}^{\infty} dx' \exp[-\frac{x'^2}{P_\sigma^2(\lambda)}]I_\omega(x_2,x')\text{。}(12)$$

研究上即依文獻[8]之實驗參數與式 9-12 之數值模型建立一個極紫外光干涉圖形模擬程式，並用以了解干涉圖形依試片帶入折射率實部色散δ(ω)所造成的干涉圖形變化。

第二個模擬工作重點為發展如圖二(b)所示、馬赫-岑得干涉儀架構下適用分析其所量測之二維空間(x)-頻率(ω)干涉圖的傅立葉演算法[7]以回解試片對極紫外光造成的相位偏移$\Delta\phi(\omega)$與強度穿透率α(ω)之模擬。在此極紫外光束以無縫式極紫外光分光鏡(spatial beam

separator)分為探測光束與參考光束後以和光鏡(spatial beam combiner)調整兩道光束的空間重合，而後再藉柱狀反射鏡與光柵成像於相機感測面，並因兩道光束間所夾的交錯角 2θ(crossing angle)形成空間-頻譜干涉(spatial-spectral interferometry)之二維圖譜。在無試片的情況下，探測光束之電場$E_{pb} = E_{pb}(\omega)\exp\{i[\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + \phi_{pb}(\omega)]\}$與參考光束之電場$E_r = E_r(\omega)\exp\{i[\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + \phi_r(\omega)]\}$以交錯半角θ干涉($|E_{pb} + E_r|^2$)產生的參考干涉圖譜為

$$I_b(\omega, x) = I_{pb}(\omega) + I_r(\omega) + 2\sqrt{I_{pb}(\omega)I_r(\omega)}\cos[2kx\sin\theta + \phi_{pb}(\omega) - \phi_r(\omega)], \quad (13)$$

如此可定義在無試片時探測與參考光束干涉所得的參考相位差

$$\Delta\phi_b(\omega) = \phi_{pb}(\omega) - \phi_r(\omega)。(14)$$

在置放試片後，經過試片之探測光束電場$E_{ps} = E_{ps}(\omega)\exp\{i[\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} + \phi_{ps}(\omega)]\}$與參考光束電場的量測干涉圖譜即成為

$$I_s(\omega, x) = I_{ps}(\omega) + I_r(\omega) + 2\sqrt{I_{ps}(\omega)I_r(\omega)}\cos[2kx\sin\theta + \phi_{ps}(\omega) - \phi_r(\omega)]，(15)$$

如此即可獲得有試片時探測與參考光束干涉所得的量測相位差

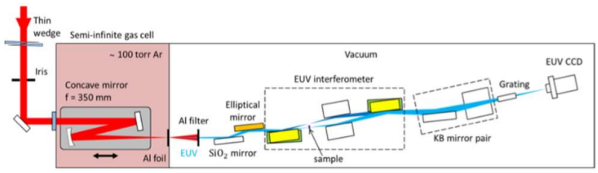
$$\Delta\phi_s(\omega) = \phi_{ps}(\omega) - \phi_r(\omega)。(16)$$

將在有試片時所得之式(16)量測相位差$\Delta\phi_s(\omega)$減去無試片時式(14)參考相位差$\Delta\phi_b(\omega)$即可得到單純因試片對探測光波造成的相位偏移

$$\Delta\phi(\omega) = \Delta\phi_s(\omega) - \Delta\phi_b(\omega)，(17)$$

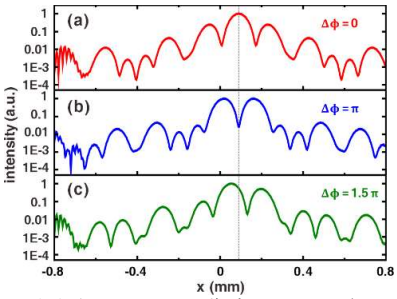
其後根據式(6)配合上試片厚度T即可推算試片折射率實部色散項δ(ω)。針對折射率需部項β(ω)部分需藉由算穿透率$\alpha(\omega) = [|E_{ps}(\omega)|/|E_{pb}(\omega)|]^2$後配合式(8)即可推算得知。

於實驗部份，本團隊使用清華光電所建置的桌上型超連續高次諧波極紫外光源建構干涉儀。實驗使用一台具備波包相位穩定(carrier envelope phase stabilization, CEP)的商售摻鐿雷射系統產生中心波長為 1030 奈米、脈衝時寬為 157 飛秒、重複頻率為 4 kHz 的 1.34 毫焦耳的初始雷射脈衝。藉由本團隊所開發之脈衝展頻壓縮技術 CASCADE[9]，驅動雷射脈衝的時寬可壓縮至 3.5 飛秒並保有 530 微焦耳的脈衝能量。後續將該 3.5 飛秒之紅外光驅動脈衝聚焦至充滿約 100torr 的氬氣(Ar)、氖氣(Ne)或氦氣(He)之半無限氣室(semi-infinite)中以產生極紫外光如圖三左半部所示。所產生的極紫外光經石英反射鏡(SiO2 mirror)與鎳的橢圓反射鏡(elliptical mirror)以 6 度的掠射角反射與聚焦後會通過一個分光鏡在空間上分成上下兩道，其中由下半部分光鏡表面反射的極紫外光會聚焦在試片作為探測光束，另一道則成為參考光束。在通過對應的反射鏡反射後，兩道光束後由合光器實現空間重合而後此共線光束將會被 KB 鏡組(Kirkpatrick–Baez mirror)與光柵分別聚焦與繞射，其對應之極紫外光干涉圖形即可成像在感測相機上。



圖三: 本研究團隊所建構之極紫外光馬赫-岑得干涉儀。

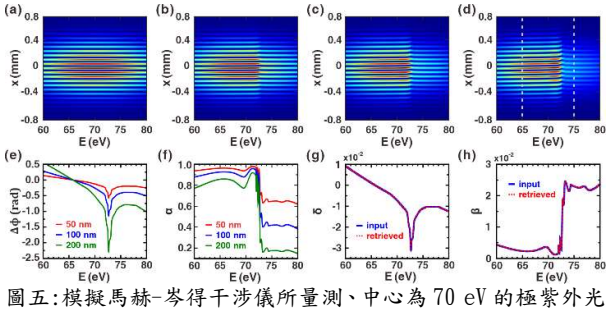
III. 結果與討論



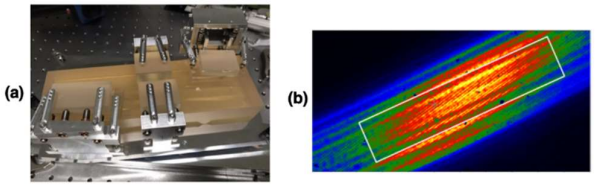
圖四：模擬高次諧波產生 74 eV 極紫外光之一維雙狹縫干涉圖形。圖形分佈分別為(a)無試片($\Delta\phi = 0$)與含試片並帶入相位偏移(b)$\Delta\phi = 1\pi$與(c)$\Delta\phi = 1.5\pi$之條紋。

模擬研究首先參照上一章節所介紹的菲涅耳繞射數值模型(式 9-12)建立模擬程式以了解紫外光干涉圖形之特性。模擬中帶入之參數主要參照文獻[8]中針對 74 eV(波長 16.7 奈米)極紫外光之設定而結果摘要於圖四。紫外光光波前$g_\lambda(x_0)$函數之曲率半徑$R(\lambda) = 0.31$ 公尺。位於z_0的雙狹縫縫$f_{slit}(x_0)$和光波前$g_\lambda(x_0)$沿縱向位置x_0的空間解析格點尺寸為$\Delta x_0 = 0.2$ 微米。雙狹縫的兩開口寬為 20 微米而間距為 10 微米。光波在雙狹縫後傳波$z_{01} = 0.72$ 公尺至位於z_1的光柵，而光柵$W_\lambda(x_1)$函數以$\Delta x_1 = 2$ 微米的空間格點解析並帶入波前傾斜$\xi(\lambda) = 90$ 微米和彎曲$F(\lambda) = 300$ 毫米之數值。光波再經$z_{12} = 0.3$ 公尺之傳播距離位於z_2的感測面，其上之干涉圖形$I_\omega^{avg}(x_2)$空間解析度為$\Delta x_2 = 4$ 微米，光束的指向變動函數寬度$P_\sigma(\lambda) = 11.2$ 微米。由圖四之結果可知當試片帶入額外相位差$\Delta\phi = \pi$時，圖四(b)之干涉條紋亮區即會移至圖四(a)無試片時干涉圖形的條紋暗區位置，驗證了干涉條紋分佈會隨試片帶入相位差$\Delta\phi$而逐步平移的特性。圖四(c)所示則展示出隨著試片帶入相位差增加至$\Delta\phi = 1.5\pi$(4.71 rad)時干涉條紋亮區(或暗區)會進一步平移。

第二個模擬工作重點為驗證用於分析馬赫-岑得極干涉儀所量測的二維空間-頻率干涉圖譜之演算程式的正確性。此部分之模擬結果如圖五所示，模擬帶入文獻[10]所列、厚度為 50-200 奈米等級之鋁材料對 60-80 eV 範圍光波的折射率實部色散項δ(ω)與虛部項數值β(ω)，並考慮以 600 微米寬之探測光束照射試片並與參考光束以$\theta = 8\times10^{-3}$之交錯半角形成干涉圖形。依據圖五之(g)與(h)之不同厚度之鋁試片之折射率變化$\Delta\phi$與穿透率α(ω)分別經過式(6)與式(8)所計算的折射率之δ(ω)與β(ω)數值與引入之文獻[10]給予之數值高度吻合，此證明了此演算法的正確性。



圖五:模擬馬赫-岑得干涉儀所量測、中心為 70 eV 的極紫外光在(a)無試片與帶入(b)50 奈米、(c)100 奈米與(c)200 奈米厚鋁試片時的干涉圖譜。以傅立葉法分析(b)-(d)干涉圖譜所回解之探測光(e)相位偏移 $\Delta\phi(\omega)$與(f)穿透率 $\alpha(\omega)$變化，並進一步回解鋁試片的(g)折射率實部色散項 $\delta(\omega)$與(h)折射率虛部項 $\beta(\omega)$曲線。(g)與(h)中 input 曲線為依文獻[10]給予之輸入參數數值。



圖六: (a)極紫外光馬赫-岑得干涉儀架設圖，由左至右分別為無縫極紫外光分光鏡、掠射反射鏡與合光器。(b)未放樣品時，極紫外干涉儀重合後的繞射條紋，橫軸為極紫外光能量。

圖六(a)為實驗所架設的馬赫-岑得干涉儀。由圖左側向右入射的極紫外光被分光鏡的上側反射面以 7 度掠射角反射成為可與試片作用的探測光束，而分光鏡的下側反射面則以 3 度掠射角反射部分入射光成為參考光束，最終兩道光束會分別被和光鏡相應的上下反射面反射實現空間校準，並入射光柵後於感測相機上形成二維空間-頻率干涉圖譜。在使用 100 torr 氬氣填充半無限氣腔產生介於 55 - 72 eV 的極紫外光的條件下，圖六(b)為未放樣品時之干涉圖譜，白色方框內斜度較大、密度較高的條紋是由探測與參考光束干涉的條紋圖形。然而由於目前架設中干涉儀前的導光橢圓面鏡焦距僅 20 公分，致使紫外光束在聚焦後發散過快讓光束投影面積大於後續的反射鏡，進而造成如圖六(b)中的邊緣繞射條紋，使實驗尚無法從此含額外繞射條紋之區域中取出正確的干涉條紋相位資訊。

實驗中考量極紫外光以掠射形式照射光柵時對光柵面積的需求以及實現光柵閃耀條件以增加極紫外光偵測效率，因此選擇使用錐面繞射光柵產生圖六(b)所示、頻率軸呈曲線彎曲分佈的二維干涉圖譜，而非如圖五所示使用傳統光柵取得頻率軸近線性分佈之二維干涉圖譜。此結果進一步導致目前模擬工作所發展之傅立葉分析二維干涉圖譜演算法不適用於處理如圖六(b)實驗所得之圖譜。後續工作可藉由發展適當的空間轉換程式將圖六(b)含方位角 $\beta_G(\lambda)$分佈之能譜先被轉換至傳統的正向二維空間-頻率空間後，再應用已發展之干涉圖譜分析程式分析干涉圖譜之相位偏移 $\Delta\phi(\omega)$和穿透率 $\alpha(\omega)$並推算試片之折射率 $\delta(\omega)$與 $\beta(\omega)$數值。

IV. 結論

本研究發展了極紫外光干涉的基礎數值模型與可用以分析干涉儀所量測之干涉圖形的演算法以回解試片造成的折射率實部色散項 $\delta(\omega)$與虛部項 $\beta(\omega)$之數值。實驗上則發展了一套極紫外光馬赫-岑得干涉儀，其中以錐面繞射光柵獲得之含方位角分佈之二維干涉圖譜為相對新穎的實驗嘗試，讓所使用的光柵有足夠的等效面積來與掠射的極紫外作用並實現光柵閃耀條件以增加極紫外光偵測效率。然而由於極紫外光束投影面積超過部分使用的光學元件面積，使得量測結果除干涉條紋外尚含邊緣繞射條紋，致使實驗結果尚無法準確回推干涉條紋所含之相位變化訊號。本計畫使參與實驗的學生累積操作雷射系統、架設光學元件、校準光束與控制精密平移台之經驗。而模擬工作也讓學生成員對光學干涉原理與數值分析有進一步的磨練，有助培養新一代雷射系統與極紫外光源的輻射科學人才。

參考文獻

[1] D. Attwood, “X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications,” (Cambridge University Press, New York, ed. 2, 2017).

[2] H. J. Levinson, “High-NA EUV lithography: current status and outlook for the future,” Jpn. J. Appl. Phys. 61, SD0803 (2022).

[3] T. Brabec and F Krausz, “Intense few-cycle laser fields: frontiers of nonlinear optics,” Rev. Mod. Phys. 72, 545 (2000).

[4] R. Manser, “EUV microscopy: a unique approach for materials characterization,” Photonics View 16, 42 (2019).

[5] Y. Nagata, T. Harada, T. Watanabe, et al., "At wavelength coherent scatterometry microscope using high-order harmonics for EUV mask inspection,” Int. J. Extrem. Manuf. 1 032001 (2019).

[6] G. S. M. Jansen, X. Liu, K. S. E. Eikema, et al., “Broadband extreme ultraviolet dispersion measurements using a high-harmonic source,” Opt. Lett. 44, 3625 (2019).

[7] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” J. Opt. Soc. Am. 72, 156 (1982).

[8] D. Hirano, Y, Nagakubo, J. Omachi, et al., “Measurement of complex refractive index with tunable extreme ultraviolet high harmonic source,” Opt. Express 28, 15148 (2020).

[9] M.-S. Tsai, A.-Y. Liang, C.-L. Tsai, et al., “Nonlinear compression towards high-energy single-cycle pulses by cascaded focus and compression,” Science Advances 8, eabo1945 (2022).

[10] C. Chang, E. Anderson, P. Naulleau, et al., “Direct measurement of index of refraction in the extreme-ultraviolet wavelength region with a novel interferometer,” Opt. Lett. 27, 1028 (2002).

應用深度學習建構微尺度孔隙通道非結構網格
Application of Deep Learning to Construct Micro-scale Pore-channel Unstructured Meshes

計畫編號：112-NU-E-008-001-NU
計畫主持人：李奕賢
e-mail：ihsienlee@ncu.edu.tw
協同主持人：張家豪
計畫參與人員：陳湘雯、蕭善彧、馮孟彬
執行單位：國立中央大學環境研究中心

摘要

人工智慧(深度學習, deep learning)，已廣泛分析大量數位資訊，推估未知領域與現象。深度學習進而也讓影像辨識、偵測技術得以快速進步。而 X-ray 影像 CT (Computed Tomography)自問世以來，便被大量運用在多個領域。在地球科學領域中，常利用 X-ray CT 進行地質結構的研究與調查，並加以分析岩石密度、孔隙率以及滲透率等重要參數。藉由 CT 影像推估滲透率(permeability)與孔隙率(porosity)等重要參數皆需透過影像處理，降噪、平滑化與分割等階段。引進創新科技，透過新興深度學習技術，建立神經網路模式學習軟體分析 CT 影像，創建孔隙網路分析資料庫，開發具有自動分析砂岩 CT 影像模式，自動生成砂岩二值化影像。二值化影像計算 Kozeny - Carman Equation 參數，獲得岩體滲透率與孔隙率空間分佈。 開發三維非結構化微尺度孔隙通道網格模式。

關鍵詞：深度學習、X 光 CT 影像、非結構化網格生成

Abstract

The techniques of AI (Artificial Intelligence), including deep learning are often used to explore the unknown fields and make accurate analysis and prediction. The deep learning technique also makes a huge progress in image classification and detection. The important imaging tool, X-ray CT, plays an important role in different fields. In the field of earth science, X-ray CT is often used to investigate geological structure, analyze the density, porosity, permeability, and other important features of rocks. To analyze the important features of the conventional CT images (digital information), it need some steps including image processing, noise reduction, smoothing, segmentation. We use the deep learning technique to construct the neural network model to learn to analyze CT images in commercial software and build a database of porosity feature analysis. Also, we develop the model of analyzing the sandstone CT images which can generate the binary images automatically. Through the binary images, we calculate the parameters in Kozeny - Carman Equation to get the spatial distribution of permeability and porosity of rock. The development of the microscale unstructured mesh generation model.

Keywords: Deep learning, X-ray computed tomography image, Unstructured mesh generation

I. 前言

推估地下流體在岩層中流動或是傳輸行為，皆主要由地質材料孔隙率和滲透率所控制，沉積岩之孔隙率和滲透率為必定成為關鍵物理參數(De Silva and Ranjith, 2012; Jacobs et al., 2007; Medina et al., 2011; Scheidegger, 1958)。過去針對固結性較好的岩層，常透過高圍壓孔隙率/滲透率儀進行室內試驗完成量測，然而岩層若受構造作用影響輕微，要取得垂向試體常因試體鬆散而無法完成取樣，更不易完成取得水平向試體。

數位岩石物理學(Digital rock physics, DRP)意指對天然岩石孔隙空間與礦物基質進行成像與數位化，然後經由數位資訊對於各種物理特性進行數值模擬，進而獲得滲透率(permeability)、孔隙率(porosity)、電導度(electrical conductivity)和彈性模數(elastic modulus)等重要參數。DRP 工作流程主要涉及三個步驟(Andrä et al., 2013a, b)：（1）對小塊岩石進行數字成像（如高分辨率三維 CT 掃描）以解決其孔隙尺度特徵；（2）處理原始圖像（灰度或強度圖像）以從礦物基質相分離孔並獲得分割的圖像；（3）模擬微觀結構圖像中的物理過程，以確定其有效性質，如滲透性，電阻率和彈性模量。這些 3D 數據立方體然後用於模擬物理過程。DRP 方法需要高分辨率 3D 成像機器，輔以圖像重建，處理和分割方法，以及精確的過程模擬計算引擎。其主要關鍵技術在於處理原始影像的技術。

「影像與電腦計算」意涵著對天然岩石孔隙空間與礦物基質進行成像與數位化，然後經由數位資訊對於各種物理特性進行數值模擬，進而獲得滲透率(permeability)、孔隙率(porosity)、電導度(electrical conductivity)和彈性模數(elastic moduli)等重要參數。DRP 工作流程主需要經由 4 個重要步驟(Andrä et al., 2013a, b)。(1) 影像擷取(acquisition)、(2) 影像處理(processing)、(3) 設定數值實驗，物件尺寸(object size)、解析度(resolution)、邊界條件(B.C.)、(4) 最後經由計算結果推估宏觀特性。

此整合型計畫涵蓋 4 個研究團隊，協同國家原子能科技研究院保健物理組所鏈結而成，共同藉由不同研究成果形成上下資訊游關係，逐步統整研究過程經驗，回饋於國原院團隊，作為改善與精進本土化 X 光電腦斷層掃描主機元件開發。

應用深度學習計算技術，結合 CT 影像數據與分析技術，完成此領域的創新研究。本計畫規劃 1 年期的研

究工作，研究目的包括(1)開發深度學習 FCN 模式，具有自動學習與辨識微尺度孔隙通道功能，完成深度學習模式建立、修正、驗證與預測。(2)應用子計畫二執行不同解析度土體掃描影像，分析影像孔隙通道幾何構造。(3) 建構微尺度孔隙通道非結構化網格，並提供子計畫四作為流體力學計算基礎輸入資訊。

II. 主要內容

為完成微尺度孔隙通道地下水流體傳輸模擬，主要所需完成研究技術開發，包含製作合適大小岩石試體(子計畫二)、掃描試體之 X-ray CT 影像(子計畫二)、影像分析(本計畫)、三維網格建構(本計畫)、孔隙率分析(本計畫)及孔隙通道流體力學模擬(子計畫四)。

藉由子計畫一與子計畫二提供試體 CT 影像，應用影像分析系統建構三維孔隙結構(表面三角形與四面體網格)，研究流程如圖 2。

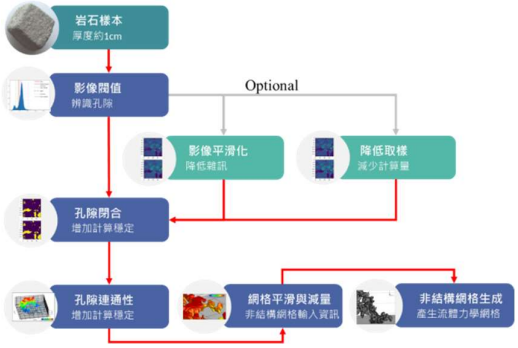


圖 2、微孔隙通道溶質傳輸模擬研究流程圖

(1) 斷層掃描影像分析

CT 影像中的灰度值是取決於試體對 X-ray 的吸收力(或稱阻射率，Radio density)，影像顏色越白，代表該區密度越大；影像顏色越黑，則密度越小。因此透過以上的灰度值顯示特性，數值較大則代表為岩體顆粒，反之則為孔隙通道。

子計畫二提供台北鵝尾山取樣深度 13.54~13.57 m 岩石樣本，試體大小為13mm × 11mm × 8mm，如圖 3。經由 X 光 CT 掃描獲得共計 180 張 CT 影像，解析度為 10μm，以下將利用此影像作為本計畫測試演算法範例。

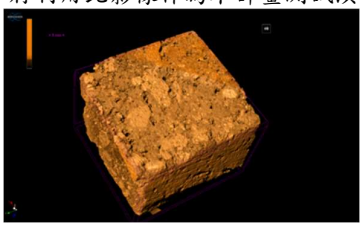


圖 3、鵝尾山水田測試土壤樣本

(2) Fully Convolutional Networks(FCN)

FCN 技術由 LONG 等人(2015)所提出的圖像分割方式，辨識影像中每個像素所屬的類別。執行流程包括卷積化(Convolutionalization)概念，結合反池化、轉置卷積與跳躍結構等。FCN 和 CNN 之間唯一的不同就是卷積層中的神經元只與輸入資料中一個局部區域鍊結，並且在一個卷積核中的神經元共用權重參數。然而在 CNN 和 FCN，神經元都是計算內積，所以他們的函數形式是一樣的。

(3) 國家原子能科技研究院 X 光多功能造影平台

此主機是由國家原子能科技研究院團隊研發與自製，藉由不同模組組件與構置，平台如圖 4，具有全機研發與客製化拍攝的能力。具有以下功能(1)提供 2D/3D 掃描模式(6 軸運動機構)、(2)平台關鍵組件可彈性置換、(3)自行開發之數據擷取、影像校正與影像重建演算法。

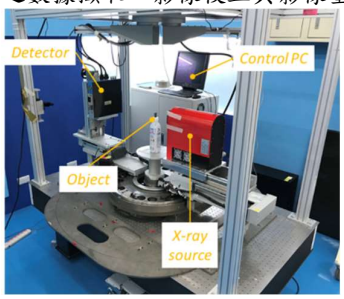


圖 4、X 光多功能造影平台關鍵組件

III. 結果與討論

本年度研究主要成果在於分析微尺度孔隙介質，建立非結構網格通道提供子計畫四進行 Ansys Fluent 軟體計算流體力學分析。

(1)Ansys Fluent 網格檔案格式

本研究團隊獲得商用或國原院掃描的影像，藉由本研究開發「微尺度孔隙介質非結構網格生成與優化技術」，辨識連通孔隙通道，建構 3D 非結構四面體網格。此網格空間資訊須傳遞至子計畫四，持續進行微尺度孔隙率與滲透率推估，以及二氧化碳灌注遷移模擬。此章節重點在於介紹本研究網格資訊，須計算網格幾何資訊，符合 Ansys Fluent 流體模擬軟體網格檔案格式，以下將詳述檔案格式與幾何資訊計算過程。

a. 概要：於 Ansys 可執行網格檔案，內容需要包含通常須包含以下元件，如「Comment」、「Dimensions 」、「Nodes 」、「Cells 」與「Faces 」，每個元件的內容都須置放於括號()之中，以上 5 種元件都有特定的 10 進位整數編號。

b. Comment：此元件指數編號為「0」，其意義在於說明此檔案的註釋，可以寫下此檔案包含元件與意義。

c. Dimensions：該元件的指數編號為「2」，此元件代表網格幾何維度，此元件只有 2 種輸入方式，(2 2)與(2 3)，分別代表二維與三維，此元件將會影響後續網格節點座標輸入格式，是否包含垂直(Z)方向座標。

d. Nodes：此元件可包含次元件，編寫的格式如圖 5，包含 3 組括號，藍色括號內具有紅色與綠色括號，元件指數編號為「10」。首先介紹紅色括弧內的部份，zone-id、first-index、last-index 與 type 為 16 進位整數。zone-id 代表節點區域編號，若等於「0」，則代表整體網格的節點總數。反之，若大於「0」則代表節點所屬特定區域。first-index 與 last-index 則代表該區域內節點編號的起始與中止編號。type 數值始終等於「1」，ND 為可選參數，代表計算域維度(2 或 3)。綠色括弧部份，代表每個節點座標，若 ND 為 2，則每列僅須紀錄 x 與 y 座標。

```
(10 (zone-id first-index last-index type ND)
 (x1 y1 z1
  x2 y2 z2
   …  ))
```

圖 5、Nodes 元件輸入格式

e. Cells：此元件的指數編號為「12」，此元件的說明與 Nodes 相似，其元件元素編寫方式為，(12 (zone-id first-index last-index type element-type))。同樣 zone-id 等於 0 時，紀錄完整網格 celle 個數。type 代表該區域內的 cell 是否參與計算，無論固體或流體，當 type=1 時代表參與計算，反之 type=32 則代表非參與計算區域。其 cell 類別包含多種基本元素類型，如表 2。

表 2、Ansys Fluent Cell 類別

Cell type	描述	節點個數	面/邊個數
0	混合型		
1	三角形	3	3
2	四面體	4	4
3	四邊形	4	4
4	六面體	8	6
5	金字塔	5	5
6	三角柱	6	5
7	polyHedral	不定	不定

f. Faces：

此元件為構成 Ansys 網格最為重要且複雜的部份，元件的指數編號為「13」，此元件內元素編寫方式如圖 6，(13 (zone-id first-index last-index type element-type))。同理 zone-id 等於 0 時，紀錄完整網格所有 face 的個數。first-index 與 last-index 為 16 進位整數格式，代表此區域內 face 編號起始與結束編號。

```
(13 (zone-id first-index last-index type element-type)
 (n1 n3 n2 cR cL
  …
  …  ))
```

圖 6、Faces 元件輸入格式

此元件第四個部份「type」，代表 Ansys 模擬環境有效邊界條件類別，其類別輸入值型態為 16 進位整數，其意義與編號如表 3。

表 3、Ansys Fluent Face type 類別

B.C.類別	編號
interior	2
wall	3
pressure-inlet, inlet-vent, intake-fan	4
pressure-outlet, exhaust-fan, outlet-vent	5
symmetry	7
periodic-shadow	8
pressure-far-field	9
velocity-inlet	10
periodic	12
fan, porous-jump, radiator	14
mass-flow-inlet	20
interface	24
parent (hanging node)	31
outflow	36
axis	37

element-type 代表 face 的類別，其類別與節點個數關係如表 4。若 face 類別為 mixed，則需要依照以下格式輸入，(type n0 n1 n2 … cR cL)，意指需每一行紀錄其 face 的類別，依據不同類別的 face 輸入特定個數的 node 編號，若 face 為三角形，則需輸入 3 個 node 編號其輸入。

表 4、Ansys Fluent Face element-type 類別

element-type	face type	node 個數
0	mixed	
2	linear	2
3	triangular	3
4	quadrilateral	4

本元件最為複雜部份為需要紀錄 face 的節點編號，以及此 face 相鄰的 2 個元素編號，以下將利用圖 7 簡易網格說明。圖 7 為 2 個四面體網格(tetrahedral mesh)，共計 5 個節點(node)，7 個面(face)，2 個網格中心(cell)。5 個節點編號分別為 n0, n1, n2, n3,n4。2 個網格中心則為 e1 與 e2。

圖 7 特別呈現 2 個四面體網格共面的部份，其 face 的節點編號順序為 n1→n3→n2 透過右手定則，拇指方向指向 e1，因此 CR 則等於 e1，反之 CL 則為 e2。特例則發生於 face 位於模擬外側邊界，則 face 僅只有一個接鄰 cell，但節點編號須遵守右手定則，將 CR 指向僅存的 cell 編號。

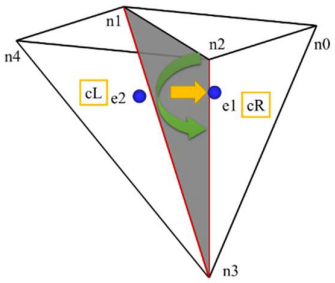


圖 7、face 元件關係範例

(2)影像閥值分析

子計畫二所提供每張 CT 影像皆由605 × 645個體素組成，將每個體素的灰階值進行次數統計，即可獲得如圖 8 灰階值次數分佈圖。經由分析不同深度 CT 影像灰階值，可以發現個別影像灰階機率分佈有所差異，無論在雙峰最高值、凹谷低點皆有些差異。

若僅分析單張影像則可能會獲得不同影像閥值，例如圖 8 呈現 4 個不同深度影像，雖利用相同 Otsu(Otsu, 1979)演算法，但獲得閥值(紅色實線)則不相同。

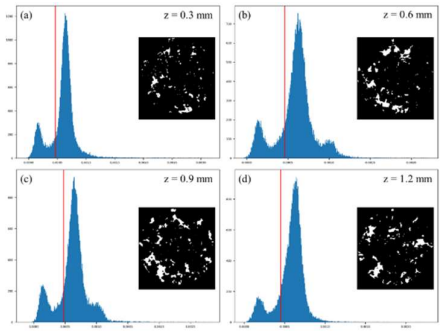


圖 8、測試樣本 CT 影像灰階值分布圖

若使用不同影像閥值演算法，必然也獲得不同結果，

如圖 9 為利用 6 種不同演算法針對圖 8(d)影像分析(Glasbey, 1993; Otsu, 1979; Ridler and Calvard, 1978; Yen et al., 1995; Zack et al., 1977)。

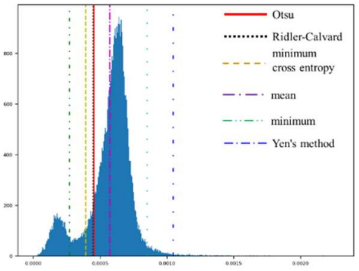


圖 9、不同影像閥值計算結果

a. 影像平滑化

由於原始 CT 影像經常因為高能量 X 光，造成雜訊產生，此演算法主要目的在於去除影像雜訊。利用 filter 矩陣對影像卷積，其 filter 矩陣計算基於中央極限定理(Chung, 2020)，達到降低圖像失真、濾除雜訊、低通、模糊化的效果，但此演算法則會使影像細節消失，如圖 10。

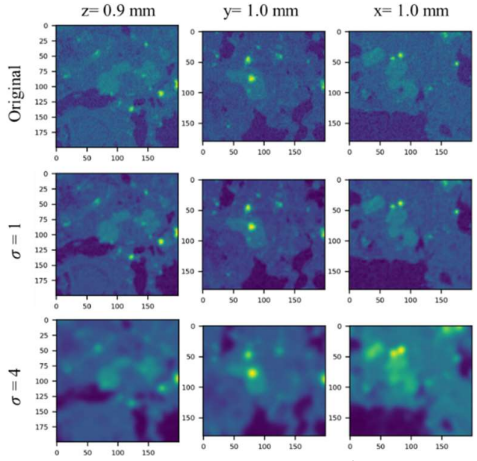


圖 10、不同平滑度計算結果

b. 降低取樣(downsample)

此演算法的用途在於降低影像數據量，演算的原理可區分 2 類，在於是否平均取樣的數據。Resample 個數意義在於間隔幾張 CT 影像取樣一次，或是將幾張影像平均，如圖 11。(Cui et al., 2015; Jin et al., 2021)

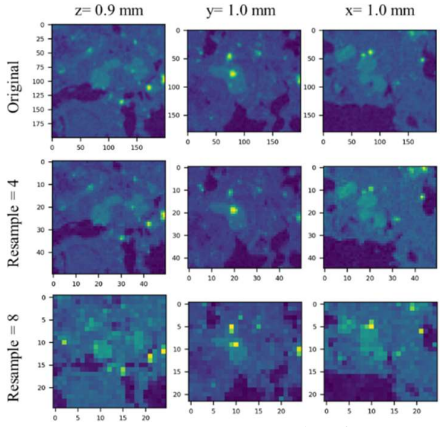


圖 11、不同取樣張數結果

c. 孔隙閉合

經由影像閥值計算後，經常會導致閥值刪除的體素，造成孔隙通道過於分散，圖 12 為經由 Otsu 閥值演算，去除岩體顆粒體素後，產生二值化影像(binarized image)以及進行形態學閉合(morphology closing)運算。此演算可對於提高計算流體力學穩定，否則會有太多不連通孔隙，以及孔隙通道具有過於尖銳邊角外型，造成流體力學不易收斂(Burger and Burge, 2022; Zhou et al., 2010)。

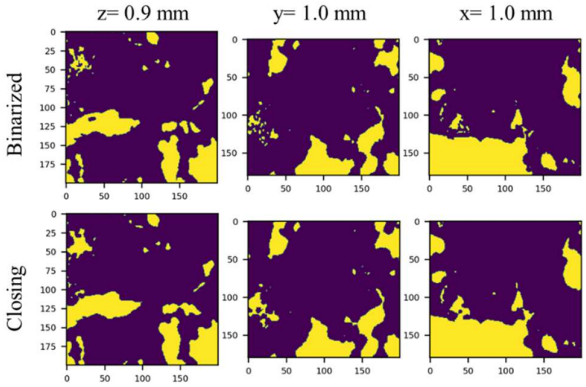


圖 12、閥值影像孔隙閉合分析

d. 孔隙通道連通性

此步驟在於計算每個體素網格周圍鄰居網格，是否是孔隙，標示每一群孔隙通道網格並計算其體積，此演算法主要目的在於留下較大體積孔大通道，刪除獨立孔隙或因雜訊產生孔隙。圖 13 為綜合 180 張 CT 影像藉由「平滑化」、「閥值」、「閉合」與「孔隙連通性」運算後產生孔隙通道分佈。圖 13(a)(b)(d)為不同視角側視圖，圖 13(c)則為俯視圖，其中圖 13(d)部份為所有孔隙通道中體積最大的部份，其餘孔隙通道則用半透明呈現。完成此步驟亦可獲得孔隙通道三維表面網格，作為非結構四面體網格生成模組幾何邊界。

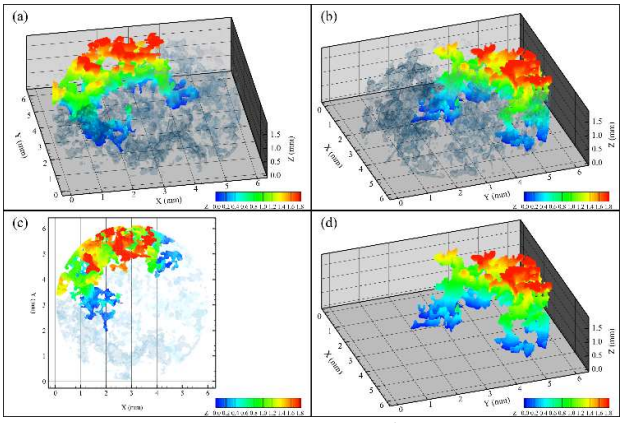


圖 13、孔隙通道連通性

e. 表面網格平滑與減量

此步驟主要目的在於提高孔隙通道邊角平滑化，以及減少表面網格的數量。基於圖 13(d)擷取孔隙通道表面網格如圖 14(a)(b)，本研究挑選 2 種網格平滑化的演算法，包含 Laplacian (Field, 1988)與 Taubin(Taubin, 1995)，其演算成果分別如圖 14(c)(d)，其中每種演算法皆有其參數需要調整，因篇幅關係簡略。

經由平滑化演算後，利用網格邊緣角度，預設 45 度，與三角形兩個邊所鄰近三角形網格的法向量角度，預設 75 度。以上若有一個角度超過，則不進行三角形合併(Schroeder et al., 1992)。作為三角形網格減量演算法啟動

關鍵，因為圖 14(c)(d)的平滑度程度不同，造成邊角與法向量差異，故其表面網格減量成果有所差異如圖 14(e)(f)。

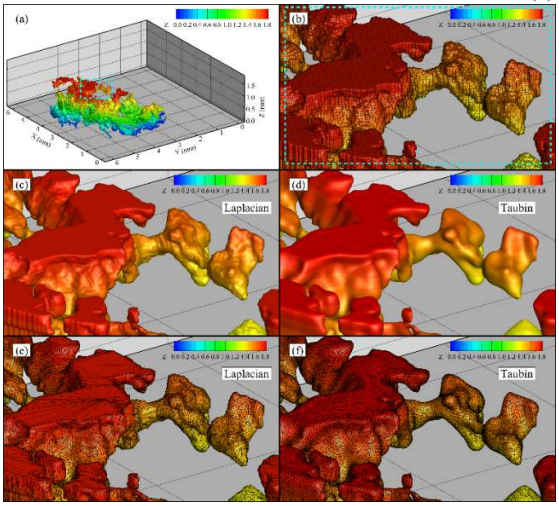


圖 14、表面網格平滑化與減量

IV. 結論

本計畫為整合型計畫，共計 4 個子計畫，主要目的為完成岩體微尺度孔隙二氧化碳灌注模擬，各子計畫間的技術與關聯，包含製作合適大小岩石試體(子計畫二)、掃描試體之 X-ray CT 影像(子計畫一、二)、數位影像處理、三維網格建構（本計畫）及二氧化碳灌注模擬（子計畫四）。本年度已建制 CT 影像分析模組，完成三維非結構化網格自動生成技術，並經由開發符合 Ansys 網格輸入格式，提供子計畫四，後續將優化網格生成品質，提昇二氧化碳灌注模擬效能。

參考文獻

[1] Andrä, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., Keehm, Y., Krzikalla, F., Lee, M., Madonna, C., Marsh, M., Mukerji, T., Saenger, E.H., Sain, R., Saxena, N., Ricker, S., Wiegmann, A., Zhan, X., 2013a. Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation. Computers & Geosciences 50, 25-32.

[2] Andrä, H., Combaret, N., Dvorkin, J., Glatt, E., Han, J., Kabel, M., Keehm, Y., Krzikalla, F., Lee, M., Madonna, C., Marsh, M., Mukerji, T., Saenger, E.H., Sain, R., Saxena, N., Ricker, S., Wiegmann, A., Zhan, X., 2013b. Digital rock physics benchmarks—part II: Computing effective properties. Computers & Geosciences 50, 33-43.

[3] Burger, W., Burge, M.J., 2022. Morphological Filters, Digital Image Processing: An Algorithmic Introduction. Springer International Publishing, Cham, pp. 167-193.

[4] Chung, M.K., 2020. Gaussian kernel smoothing. arXiv preprint arXiv:2007.09539.

[5] Cui, Z., Montanaro, M., Gerace, A., Schott, J.R., Markham, B., 2015. Requirement sensitivity studies for a future Landsat sensor, Earth Observing Systems XX. SPIE, pp. 204-210.

[6] De Silva, P.N.K., Ranjith, P.G., 2012. A study of methodologies for CO2 storage capacity estimation of saline aquifers. Fuel 93, 13-27.

[7] Glasbey, C.A., 1993. An Analysis of Histogram-Based Thresholding Algorithms. CVGIP: Graphical Models and Image Processing 55, 532-537.

[8] Jacobs, W., Van Kesteren, W., Winterwerp, J., 2007. Permeability and consolidation of sediment mixtures as function of sand content and clay mineralogy. International Journal of Sediment Research 22, 180-187.

[9] Jin, C., Tanno, R., Mertzanidou, T., Panagiotaki, E., Alexander, D.C., 2021. Learning to downsample for segmentation of ultra-high resolution images. arXiv preprint arXiv:2109.11071.

[10] Medina, C.R., Rupp, J.A., Barnes, D.A., 2011. Effects of reduction in porosity and permeability with depth on storage capacity and injectivity in deep saline aquifers: A case study from the Mount Simon Sandstone aquifer. International Journal of Greenhouse Gas Control 5, 146-156.

[11] Otsu, N., 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 9, 62-66.

[12] Ridler, T., Calvard, S., 1978. Picture thresholding using an iterative selection method. IEEE Trans. Syst. Man Cybern 8, 630-632.

[13] Scheidegger, A., 1958. The physics of flow through porous media. University Of Toronto Press: London.

[14] Yen, J.-C., Chang, F.-J., Chang, S., 1995. A new criterion for automatic multilevel thresholding. IEEE Transactions on Image Processing 4, 370-378.

[15] Zack, G.W., Rogers, W.E., Latt, S.A., 1977. Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. Journal of Histochemistry & Cytochemistry 25, 741-753.

[16] Zhou, H., Wu, J., Zhang, J., 2010. Digital image processing: part II. Bookboon.

金屬與陶瓷氧化物材料的中子與X光散射/繞射的結構分析與物性研究

Study of the physical properties and modulated structures of some metallics and oxides using x-ray and neutron scattering/diffraction

計畫編號： 112-2623-E-032-001-NU
計畫主持人：杜昭宏
e-mail： chd@gms.tku.edu.tw
計畫參與人員：梁喻惠、賴君豪、謝文鈺、張智凱、張承恩、王進威、雍敦元、陳威廷
執行單位：淡江大學物理系

摘要

晶體結構，包含原子結構、電子結構、及磁結構，影響著材料的物理特性，對材料的應用或是基礎科學研究都是首要知道的訊息．我們透過X光與中子繞射及散射、及磁性量測來研究介金屬材料 Ir_2In_8Se、鈣鈦礦氧化物 $PrFe_{0.5}Cr_{0.5}O_3$ (PFCO)、$YBa(Cu,Fe)O_5$ 的電子結構與物性的關聯性，及鋁合金水解產氫過程中的微結構變化．在此報告，我們摘錄部分有關 PFCO 及鋁合金水解產氫的成果報告．

關鍵詞：中子繞射、X光繞射、電子結構、磁結構、磁電效應、磁相變

Abstract

The structural information, including atomic, electronic and magnetic structures, of materials is essential and important for the applications and the understanding of the physical properties of materials. We report the study of intermetallic compound Ir_2In_8Se, perovskites $PrFe_{0.5}Cr_{0.5}O_3$, and $YBa(Cu,Fe)O_5$ and the changes of microstructure of the Al-based-alloys in the process of hydrolysis and hydrogen evolution reaction using X-ray and neutron diffraction/scattering. Through these studies, we have also cultivated students and young researchers familiar with X-ray and neutron diffraction and scattering. Here, we report some results regarding to the study of PFCO and Al-based-alloy using neutron and x-ray diffraction.

Keywords: Neutron diffraction, x-ray diffraction, magnetoelectricity, magnetic phase transition

I. 前言

材料的物理特性主要是由材料中的原子、電荷與電子自旋在晶體中不同的空間自由度（如電子軌道與晶格）的交互作用所決定．中子與X光散射技術(彈性與非彈性散射)可提供此類交互作用的重要物理參數，如向量轉換(wavevector transfer)與能量轉換(energy transfer)的物理參數，也是目前研究材料物性的重要研究技術．本計畫透過使用中子與X光散射及繞射技術來研究金屬材料與鈣鈦礦氧化物材料的原子、電子、與磁結構的物性研究，並藉此來培育中子與X光散射技術相關的專業人才。

II. 主要內容

本計畫規劃研究的子系統為粉末樣品的X光與中子粉末繞射(X-ray and neutron powder diffraction)．所選定的系統為雙層鈣鈦礦氧化物的物理特性與結構探討．雙層鈣鈦礦氧化物（$A_2(BB')O_6$)具有豐富的相圖，藉由調控 A- 及B-site 原子的種類可得到不同的物理特性，如超導體(superconductivity)、多鐵性(multiferroics)、熱電特性(thermoelectric)、高效率的能源電池．如稀土元素R與錳形成稀土錳礦 $RMnO_3$ 屬於正交晶系(orthorhombic)， 空間群與 $PrCrO_3$ 同為 *Pbnm*，在低於相變溫度時會從順磁轉為反鐵磁，相變溫度及反鐵磁的類型皆會依稀土元素的半徑而有所變化; $PrMnO_3$ 會在 T_N ~100 K 以下時形成 A-type 的反鐵磁 [1]，此外，由於 Mn^{3+}的電子組態為[Ar] $3d^4$，考慮 Mn^{3+}為 high spin state 則 d 電子會先填入三個能量比較低的 t_{2g} 軌域，此時第四顆電子若是填入 $d_{x^2-y^2}$會使得八面體沿 z 軸收縮，反之若是填入 d_{Z^2}則會使得八面體沿 z 軸拉伸，此效應稱為 Jahn-Teller effect (簡稱 J-T effect) [2]，因此在討論正交晶系錳礦時會額外談討晶格常數之間的關係，若晶體屬於正交晶系中的 Pbnm 且滿足$a < c\sqrt{2} < b$， 稱此系統為 O-orthorhombic structure，表示晶體內的八面體沒有明顯形變;若晶體屬於正交晶系

中的 Pbnm 且滿足$c\sqrt{2} < a < b$，稱此系統為 O'-orthorhombic structure，表示晶體內的八面體可能受 J-T effect 影響有著較明顯的形變[3]，這些變化與電子結構及磁結構有很大的關係，也導致不同的物理特性。

此鈣鈦礦氧化物系列 $RFe_{0.5}Cr_{0.5}O_3$(R= 稀土元素)的磁結構已有很多的文獻報導[4-5]，這些氧化物的在低溫下的磁結構與原子結構相變行為跟稀土元素的種類有關，例如，如果 R 是磁性的稀土元素，R= Yb, Tm, Tb, Dy, Ho, 或是 Er，Fe/Cr 的磁晶格(magnetic sublattice)首先會形成長程有序(long-range order, with a space group $Pb'n'm$)的磁結構，接著在更低溫時會產生自旋重組(spin reorientation)的磁相變，這個自旋重組磁相變也連帶著產生不同的物理特性變化， 文獻報導 $PrCr_{0.5}Fe_{0.5}O_3$ 除了且具有複雜的磁相變外，也是第一型的多鐵性材料(type-I multiferroic material)。在這一部分的研究，我們透過以 Fe^{3+}取代 $PrCrO_3$ 中的 Cr 來研究此系統由於 B-site 電子結構的改變所造成的磁交換偏壓(exchange bias, EB) 及磁反轉(magnetization sign reversal, MR)效應，

此計畫的第二部分，我們則聚焦在探討以鋁合金當作電池陽極材料所產生的店化學反應過程對鋁合金微結構的影響，高效率的能源電池是能源科技發展的重點，作為一高效率且安全的電池能源需具有下列屬性： (1) 長儲存壽命：惰性狀態儲存時無自腐蝕性，可長期保存，且必須沒有安全問題；(2)良好的低溫特性：電瓶啟動時，發生化學副反應產生熱能，使電池的本體溫度升高高於環境溫度；因此，電池不應該受環境溫度限制； (3)高比能和特定功率。具有鋁燃料陽極的電池剛好符合這些優點。此外，地球表面鋁含量豐富（約佔 8.3%），這在商業使用上具有極大的優點，儘管鋁陽極材料具有作為電氣材料的潛在用途，但在化學反應產氫的過程中會造成 Al 的自腐蝕效應，進而降低電池效能，本研究計畫，就是希望透過尋找新的鋁合金材料來製作電池德陽及材料，以降低電極的自腐蝕效應，進而提升燃料電池的使用效率，在實驗計畫中，我們團隊透過在純 Al(2N) 基體中添加不同比例的金屬元素 Zn、Sn、In 和 Bi 以形成鋁合金，再以此鋁合金來製作電池應用的陽極材料。

III. 結果與討論

針對第一部分的實驗，我們先以固態反應法合成高純度的 $PrFe_{0.5}Cr_{0.5}O_3$ 粉末樣品，樣品先以實驗室的 X 光粉末繞射儀確認樣品的純度，接著以 PPMS 量測樣品的磁性行為， 如圖一所示，在高溫時 χ_{FC} 及 χ_{ZFC} 曲線重合再一起，表現出順磁性的行為，在溫度約等於 T_{irr}~210 K 時，χ_{FC} 及 χ_{ZFC} 開始分離，接著 χ_{FC} 隨著溫度降低呈現非線性的增加，但 χ_{ZFC} 在 T~ 185 K 時呈現一峰值，並且在 T< 164 K 時轉變為負值，此現象稱為磁反轉(magnetization reversal, MR)或是負磁化，為了進一步了解此磁相變行為，中子粉末繞射是理想的技術，

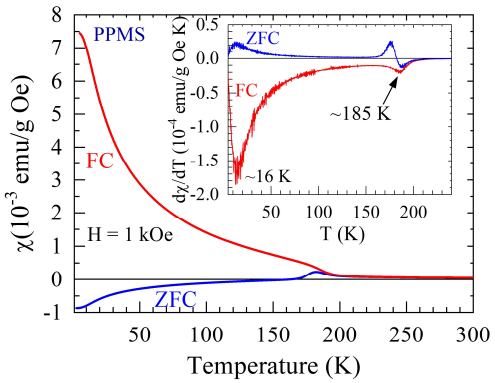


Figure 1: $PrFe_{0.5}Cr_{0.5}O_3$ 的磁化率數據，插圖為磁化率對溫度一次微分$d\chi/dT$的數據，

中子粉末繞射實驗室使用澳洲中子科學與技術中心(ANSTO)的高解析度粉末繞射儀 ECHIDNA 及高輝度的繞射儀 WOMBAT，從分析高解析度的粉末繞射圖譜，如圖二，我們得知 PFCO 的詳細原子結構，而且 Fe^{3+}及 Cr^{3+}是隨意地佔據在晶體結構的 B-site，隨著溫度降低，T_{N1}～270 K，Fe^{3+}/Cr^{3+}的自旋排列行程 G_x-type 的反鐵磁相(antiferromagnetic phase)，

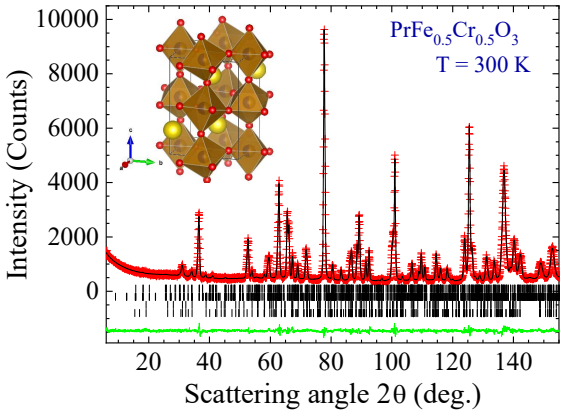


Figure 2: $PrFe_{0.5}Cr_{0.5}O_3$ 的中子粉末繞射圖譜，T= 300 K，插圖為 PFCO 的原子結構，

PFCO 的磁結構溫度變化圖則透過使用 WOMBAT 的繞射儀取得，量測溫度從 4～300 K，如圖三所示，在低溫時，新的繞射峰(011)/(101)產生，2θ~31.3°，這是由磁結構形成的繞射峰，透過使用 BasIreps 程式針對 Cr/Fe 及 Pr 在原子結構中的對稱性分析，我們得知 PFCO 在低溫下的磁結構主要為 G-type 的反鐵磁結構，但自旋組態的排列則隨著溫度變化而改變，可區分為 G_x 及 F_xG_z，如圖 3(a)及 3(b)所示，以自旋組態排列對溫度作圖，我們可得 PFCO 磁結構在低溫下的相圖，如圖 3(c)，從分析中可得知 Fe^{3+}/Cr^{3+} 自旋排列沿著 G_x 與 G_z 分量在溫度區間~170~210 K 共存，這個自旋翻轉(spin-flip)的相變也加強了 O-Fe/Cr-O 之間的 DM 偶合(Dzyaloshinskii–Moriya coupling)，這也解釋了在磁化率量測中所觀察到的磁反轉現象(MR effect) [6-8]，

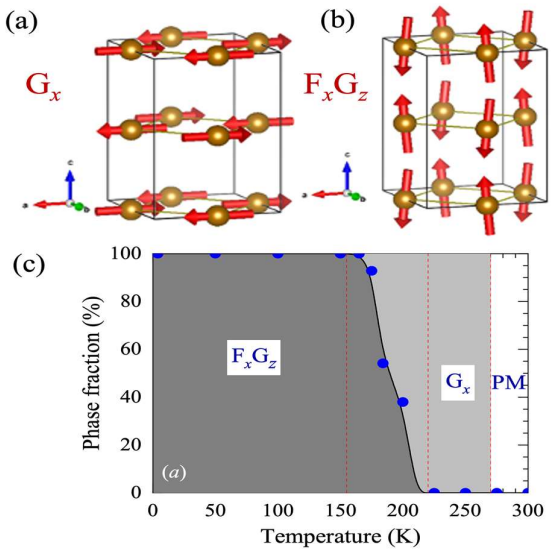


Figure 3: PFCO 磁結構的自旋組態(a) G_x-type，(b)F_xG_z-type，(c) 的中子粉末繞射圖譜，溫度從 4～300 K.

第二部分的研究則是探討以三元鋁合金材料作為電池陽極的水解產氫過程，在電化學電池中使用鋁合金陽極作為金屬燃料在許多方面具有獨特的優勢，也是近幾年來在綠色能源中的言就中點項目[9-10]. 在此研究計畫中，我們透過添加不同比例的 In 和 Bi 進鋁三元合金 Al-Zn-Sn，以形成的新型鋁合金陽極，Al-5Zn-0.1Sn、Al-5Z-0.1Sn-0.1In 和 Al-5Zn-0.1Sn-0.1In-0.1Bi，並使用不同的實驗技術來研究新型合金的產氫效率，如使用電子探針顯微分析儀來獲取合金的組成元素，使用塔菲爾分析，電化學阻抗譜和恆流計時電位法來分析合金材料的電化學反應，使用 X 光繞射分析來檢測合金材料的原子結構變化，此外，為了了解此陽極金屬在產氫化學反應中的耐用性，我們也研究了此合金電極的自腐蝕和陽極放電穩定性。如圖 4 所示，使用掃描電子顯微鏡對不同比例的合金材料做產氫後的形貌分析，及結合產氫效率分析，我們得知 Al-5Zn-0.1Sn-0.1In-0.1Bi 具有最佳的陽極性能。另外，透過透射電子顯微鏡的微觀結構分析，我們提出 Bi 所引起的溶解與沉降過程奈米沉澱物可以活化鈍化的鋁表面，顯著提高放電效率。

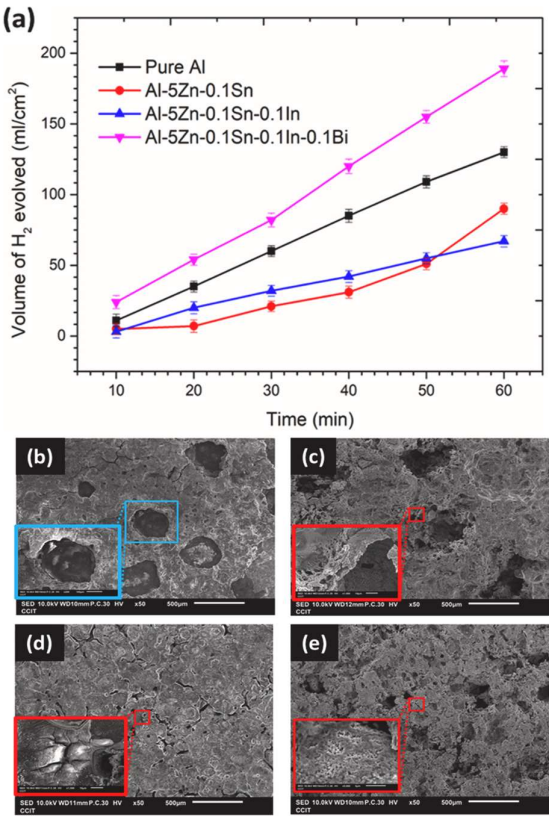


Fig.4: (a) 不同鋁合金的產氫效率，產氫之後鋁合金的電子顯微鏡的形貌圖(b)純鋁，(c)Al-5Zn-0.1Sn，(d) Al-5Zn-0.1Sn-0.1In, (e)Al-5Zn-0.1Sn-0.1In-0.1Bi.

IV. 結論

首先要感謝原子能委會的支持讓我們可以進行此計畫所提出的研究項目，

在第一年的研究計畫，我們執行了三個子計畫項目；一:研究介金屬材料 Ir_2In_8Se 的電子結構與物理特性的關聯性，使用 X 光散射技術，我們觀察到 Ir_2In_8Se 有一複雜的電子結構所形成的電荷調制結構(charge modulated structure)，且此一調制結構的形成應該跟聲子擾動（phonon vibration）有很大的關聯性，為了完整此一項目的研究，我們正在進行包含 X 光非彈性散射、拉曼光譜、及理論計算等研

究・二:鈣鈦礦氧化物的電子結構與物理特性的關聯性・透過合成一系列的鈣鈦礦氧化物 $Pr(Fe,Cr)O_3$, $Pr(Mn,Cr)O_3$ 的粉末樣品，並使用磁化率量測、X 光粉末繞射、及中子粉末繞射，我們探討了此一系統的磁結構由於 B-stie 電子結構改變所導致的的相變化・此子項目的部分結果也已發表・三:研究鋁合金材料水解產氫過程中的微結構變化・在這項目中，我們發現透過參雜一點 Bi 可提昇鋁合金材料的產氫效率，而且可增加抗腐蝕性及增加陽極放電穩定性・此部分結果也已發表・

材料結構的檢測與分析是材料科學研究的必要知識與能力・透過此計畫我們不僅整合了國內數個研究團隊的研發能量，也培育了大學部學生、碩士生、及博士生在材料科學研究上的知識與能力，包含了基礎的固態物理知識、固態樣品的製備、電性及磁性檢測，基本的材料結構檢測到高階的散射技術・這些人力均能即刻進入職場及研究單位從事材料科學相關工作・

參考文獻

[1] M. Tachibana, T. Shimoyama, H. Kawaji, T. Atake, and E. Takayama, Jahn-Teller Distortion and Magnetic Transitions in Perovskite RMnO3 (R = Ho , Er, Tm, Yb, and Lu), Phys. Rev. B 75, 144425 (2007)。

[2] N. Ortiz-Vitoriano, N. E. Drewett, E. Gonzalo, and T. Rojo, High Performance Manganese-Based Layered Oxide Cathodes: Overcoming the Challenges of Sodium Ion Batteries, Energy & Environmental Science 10, 1051 (2017)。

[3] D. Sánchez, J. A. Alonso, and M. J. Martínez-Lope, Neutron-Diffraction Study of the Jahn‐Teller Transition in PrMnO3, J. Chem. Soc., Dalton Trans. 4422 (2002)

[4] Fernando Pomiro, Rodolfo D. Sánchez, Gabriel Cuello, Antoine Maignan, Christine Martin, and Raúl E. Carbonio, Spin reorientation, magnetization reversal, and negative thermal expansion observed in RFe0.5Cr0.5O3 perovskites (R = Lu,Yb,Tm), Phys. Rev. B 94, 134402 (2016)

[5] Juan P. Bolletta, Fernando Pomiro, Rodolfo D. Sánchez, Vladimir Pomjakushin, Gabriela Aurelio, Antoine Maignan, Christine Martin, and Raúl E. Carbonio, Spin reorientation and metamagnetic transitions in RFe0.5Cr0.5O3 perovskites (R = Tb, Dy, Ho, Er), Phys. Rev. B 98, 134417 (2018)

[6] S. J. Yuan, W. Ren, F. Hong, Y. B. Wang, J. C. Zhang, L.Bellaiche, S. X. Cao, and G. Cao, Spin switching and magnetization reversal in single-crystal NdFeO3, Phys. Rev. B 87, 184405 (2013).

[7] J. Y. Moon, M. K. Kim, Y. J. Choi, and N. Lee, Giant Anisotropic Magnetocaloric Efect in Double-perovskite Gd2CoMn*O₆ Single Crystals*, Sci Rep. 7, 16099 (2017)

[8] R. Yanes, J. Jackson, L. Udvardi, L. Szunyogh, and U. Nowak, Exchange Bias Driven by Dzyaloshinskii-Moriya Interactions, Phys. Rev. Lett. 111, 217202 (2013)

[9] Y. Hu, D. Sun, B. Luo, L. Wang, Recent progress and future trends of aluminum batteries, Energy Technol. 7, 86 (2019)

[10] J. Fu, Z. P. Cano, M. G. Park, A. Yu, M. Fowler, Z. Chen, Electrically rechargeable zinc-air batteries: progress, challenges, and perspectives, Adv. Mater. 29, 1604685 (2017)

可在輻射區域不平地面的自主巡航機器人研發
Research and Development of Autonomous Cruise Robots in Radiation Area with Uneven Ground

計畫編號：MOST 112-NU-E-992-001-NU
計畫主持人：杜國洋
e-mail：tuky@nkust.edu.tw
計畫參與人員：博士生：林紘宇、洪哲斌，碩士生：趙俊堯、陳楷森、王烜燁、郭芳岑、張淳旭
執行單位：國立高雄科技大學電機系(所)

摘要

本研究計畫實驗 AMR 在輻射場域導航與定位能力，並開發攝影機在輻射場域中利用雜訊點密度估測輻射強度與發生源距離，評估利用光達與電腦視覺在輻射場域定位的可行性，照射實驗是前往清華大學原科中心同位素館照射廠進行的鈷 60 照射分為 29000Ci 與 1000Ci 兩種強度並利用滑軌帶動攝影機移動距離發生源 300 到 700mm 紀錄攝影機的雜訊點影像，其劑量率不大於 46.64Gy/h 並依據距離公式遞減，最後透過雜訊密度與距離發生源關係建立預測模型。本研究計畫研發一套進行動態測試設備，使模組在照射時可量測其運轉情況。本研究規劃一台 AMR 與一套滑軌攝影機組，同時在場域中上午以 1000Ci 下午以 29000Ci 兩種發生源照射，實驗各持續 3 個小時，實驗結果發現 1000Ci 的劑量率可能持續衰減而不能夠利用建模，29000Ci 的劑量率穩定可以建立攝影機雜訊點與輻射強度估測模型，AMR 的光達定位系統在兩種照射中都會被癱瘓。

關鍵詞：輻射測試、自主移動機器人、同時定位與地圖建立。

Abstract

In this research, the capability of navigation and localization of an Autonomous Mobile Robot (AMR) in radiation environment is tested. And the camera to measure radiation dose is researched and developed. For the evaluation of measure capability, the distance between the camera and radiation source is formulated. The experiment tool is developed and exactly tested at National Tsing Hua University Isotope Center. Two experiments are conducted in the radiation source 1000Ci and 29000Ci, respectively by 3 hours. The radiation dose is estimated by time trajectories to formulate the capability of camera to measure radiation. In the experiment, the Lidar of AMR is failure in two radiation source.

Keywords: Radiation Test, Autonomous Mobile Robots, Simultaneous Localization And Mapping (SLAM).

I. 前言

自主移動機器人(Autonomous Mobile Robots; AMR)主要的技術是利用 SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)，SLAM 的信號源是來自 Sensor Model 與 Motion Model，Senor Model 主要來自光達或攝影機，Motion Model 主要來自機器人本身馬達編碼器，在不平地面中運動的機器人，Motion Model 是無法使用的，因此在災後的環境中只能使用 Sensor Model，這部分已有研發 Hector SLAM [1]可以應用，本計畫已成功應用 Hector SLAM 在 AMR 上。另外已有研究報告針對電子與通訊模組進行抗輻射測試[2]，因此本計畫只針對機器人的相關模組進行輻射照射實驗。

本研究計畫將評估 AMR 在照射場中定位與導航的可行性，由於光達可能受輻射影響而失效，需要開發出能夠避開強力輻射區域的感測器作為迴避的資訊，避免 AMR 在照射場中失去定位能力，本研究計畫設計滑軌馬達模組來建立輻射劑量率與發生源距離的估測模型，用來做為 AMR 避開較強輻射區域的感測器，該模組因攝影機在照射中會有小白點雜訊而成，其雜訊密度會受發生源距離影響，從而實現估算距離的感測器。計畫中前往清華大學原科中心同位素館照射廠，採集攝影機的實驗數據、AMR 受輻射照射的運轉過程，本研究計畫的成果包括，攝影機雜訊點用於估測發生源距離之建模，AMR 在輻射場域中以光達定位的可行性。

II. 實驗場所佈置與規劃

本研究計畫在照射場中設置滑軌攝影機模組與 AMR(圖 2-1)，其前置作業包含評估尺寸、布置設備、拉線並測試線路通訊 (圖 2-2)，其中 AMR 透過 WIFI 路由器橋接，馬達控制以 RS485 架構通訊，在照射場內的小電腦可以正常讀取攝影機畫面與控制馬達，並透過網路線傳遞到照射場外，實現遠端監控，設計用滑軌攝影機建立輻射發生源距離模型 (圖 0-15)，其中滑軌馬達至於最外側，用滑軌載台帶動攝影機模組包含色卡(圖 2-4)，其中攝影機採用羅技 C310 馬達採用 ROBOTIS RX28，透過螺桿驅動滑軌載台。



圖 0-15 設置在輻射場中的滑軌攝影機模組與 AMR

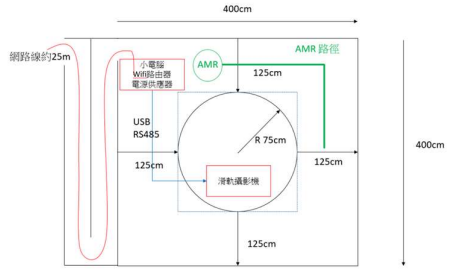


圖 0-2 輻射場中的布置、設備與尺寸連接圖

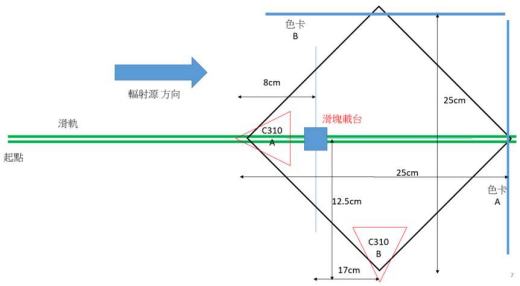


圖 0-3 滑軌攝影機模組構造圖

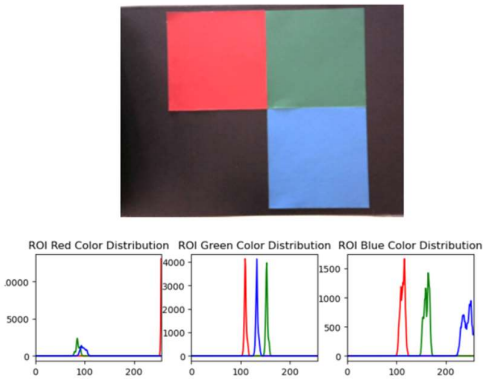


圖 0-4 色卡與直方圖分布

III. 輻射照射實驗

實驗方法

本實驗利用清華大學原科中心同位素館照射廠，將待測平台(圖 3-16)放置在照射平台上，透過滑軌帶動攝影機往返運動並記錄距離發生源之雜訊點強度，其雜訊由影像處理經過傅立葉變換將照射中色卡(圖 3-2)與照射前色卡(圖 2-4)在頻域中相減後反轉換回原來圖像空間得到雜訊點圖像，然後計算白點數量作為雜訊強度。

透過清華大學原科中心同位素館照射廠提供的輻射劑量率與距離校正點如表 3-1 所示，並透過公式 3-1 來回歸距離與劑量率的關係，決定實驗滑軌的運動範圍其校正點如圖 3-1 所示，最後決定滑軌攝影機組的運動範圍為距離發生源 300 到 700mm 之間來做實驗。

表 3-1 輻射劑量率與距離校正點

射源	29000Ci	1000Ci
距離	劑量率 Gy/h	劑量率 Gy/h
6.75	614	29.77
8	515	24.84
20	101.8	4.05
25	77.8	2.76
30	46.6	1.94
35	41.4	1.55
40	24.8	1.05
50	17.1	0.65

$$R = R_0 e^{-\lambda t} \qquad 3\text{-}1$$

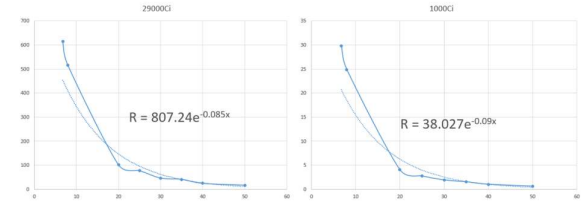


圖 3-16 輻射劑量率與距離校正點，虛線為公式回歸曲線，藍色點為校正點，左圖為 29000Ci 發生源，右圖為 1000Ci 發生源

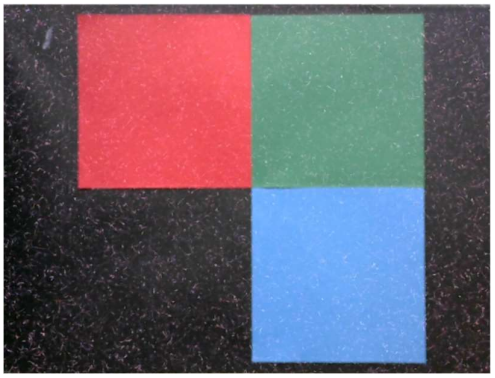


圖 3-17 受照射影響之色卡影像(29000Ci)

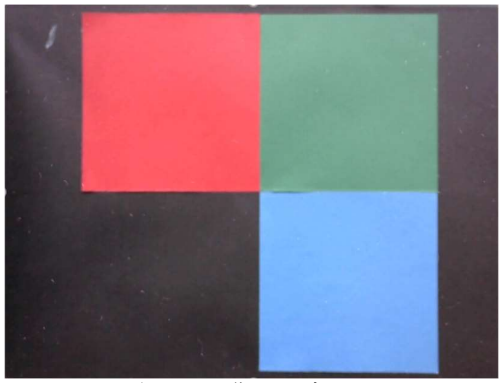


圖 3-18 受照射影響之色卡影像(1000Ci)

AMR 在照射場定位與導航實驗

AMR 將會在照射場中定位與導航其路徑如圖 2-2 綠色線所示，並透過 WIFI 橋接到小電腦後透過實體網路線傳送到照射場外，遠端監控廠內 AMR 的 SLAM 能力，其地圖會在照射前建立 (圖 3-19)。

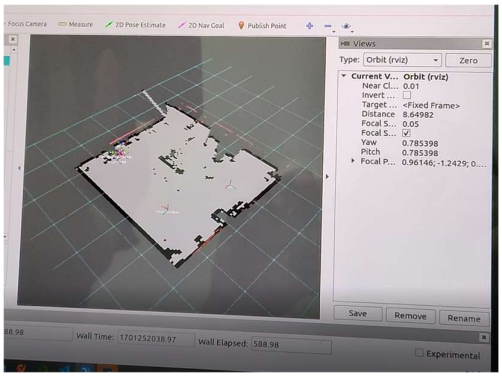


圖 3-19 AMR 在輻射場中建立的地圖

實驗結果

實際照射實驗分為上午場與下午場兩場實驗，上午 8 點 54 分到 11 點 54 分以 1000Ci 強度照射累計 3 小時與下午 12 點 20 分到 3 點 20 分以 29000Ci 強度照射累計 3 小時，根據實驗過後得到的資料，我們得到待測物受輻射照射 6 個小時間的所有數據，將實驗數據與對照數據做比對分析，得到以下結果。

滑軌攝影機實驗結果

在上午場照射實驗中，滑軌馬達均正常運作順利控制滑軌軌跡並回傳距離資訊(圖 3-5)，攝影機在照射中正常回傳圖像並顯示出小白點雜訊，最後經過運算得到 R、G、B 三通道小白點數量資訊(圖 3-6)。

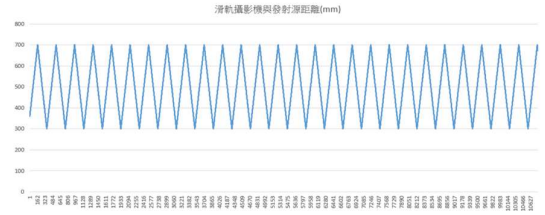


圖 3-5 上午場照射中滑軌攝影機組運動軌跡

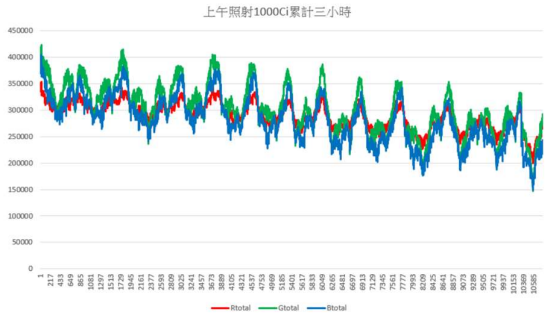


圖 3-6 上午場照射中色卡紅色、綠色、藍色三通道各別計算出的雜訊點數量

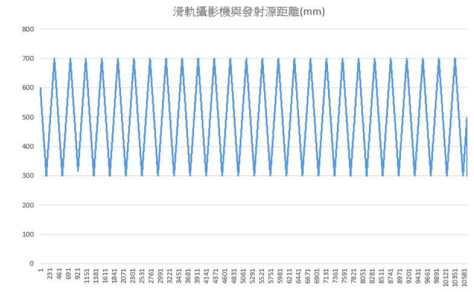


圖 3-7 下午場照射中滑軌攝影機組運動軌跡

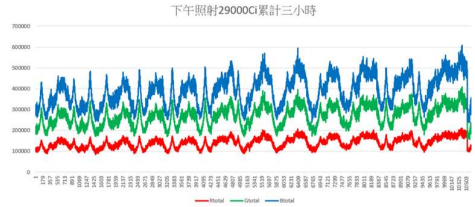


圖 3-8 下午場照射中色卡紅色、綠色、藍色三通道各別計算出的雜訊點數量

在下午場照射實驗中，滑軌馬達均正常運作順利控制滑軌軌跡並回傳距離資訊(圖 3-7)，攝影機在照射中正常回傳圖像並顯示出小白點雜訊，最後經過運算得到 R、G、B 三通道小白點數量資訊(圖 3-8)。

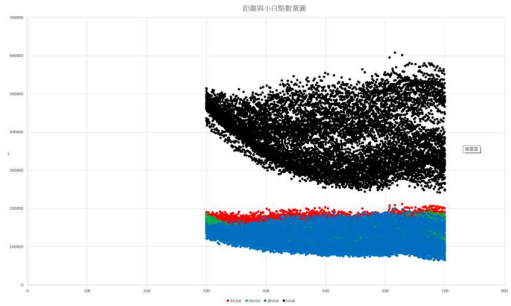


圖 3-9 下午場照射中三小時距離與雜訊點分佈圖

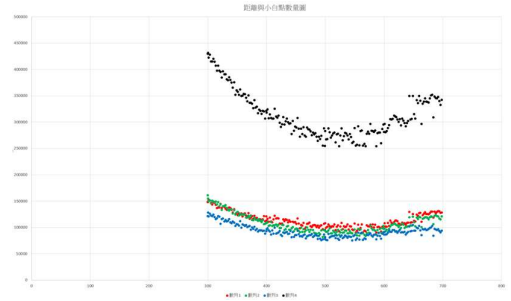


圖 3-10 下午場照射中散佈無法區分距離的滑軌來回一次距離與雜訊點數量圖

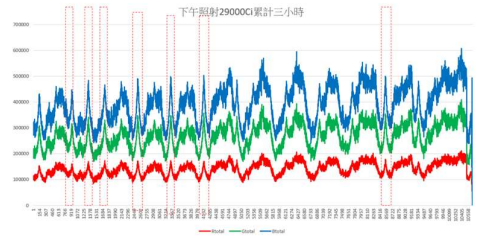


圖 3-11 下午場照射中發生源穩定照射區間的滑軌來回一次距離與雜訊點數量圖

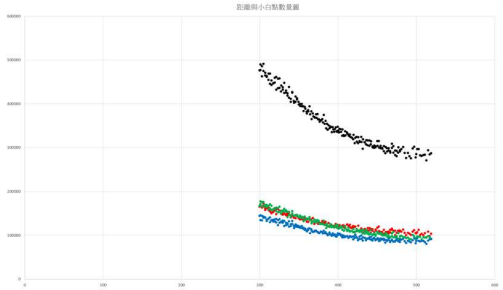


圖 3-12 下午場照射中發生源穩定照射的滑軌來回一次距離與雜訊點數量圖

將數據轉為距離與小白點數量關係之散布圖(圖 3-9)，發現有些部分的分佈無法用來判斷距離(圖 3-10)，其中黑色點數據表示 RGB 三通道的總和，推測與發生源不穩定有關，因此找出有穩定區間的分佈(圖 3-11)，其中穩定區間以紅色虛線方框標示，可以發現在穩定照射區間可以回歸出距離與小白點數量之數學模型。

發生源穩定照射時可以多項式回歸得到小白點雜訊與距離發生源關係(式 3-2)，其中 x 表示小白點雜訊數量，y 為與發生源的距離。

$$y = 4.5548x^2 - 4628.6x + 1000000 \qquad 3\text{-}2$$

AMR 實驗結果

AMR 在輻射場照射中兩場次均失去光達資訊而無法定位與導航，由於光達模組沒有資訊故無法取得資料。

IV. 結論

本研究計畫設計滑軌攝影機組來取得在輻射場中距離發生源與劑量率的資料，經過實驗發現攝影機透過色卡上的小白點雜訊來回推發生源距離會有發生源強度變化太大以致於距離與強度關係沒有鑑別度，由於距離發生源越遠理論上小白點數量要逐漸減少，但由於發生源可能不能夠穩定的產生劑量率，導致小白點數量會無法區分距離，以 29000Ci 的發生源來建立模型只能夠在 300 到 600mm 有鑑別度，若是在穩定照射區間則可以正常的回歸出距離與雜訊點模型，而 1000Ci 的發生源在照射中可能因為強度隨時間下降而導致資料沒有重再現性而無法建模，因此用攝影機來估測與發生源距離還有很多困難，目前只能大概估測距離而無法實際利用。

對於 AMR 在輻射場域中光達失效的問題，可能光達需要用更高規格的設備才能夠做實驗，或者改用視覺 SLAM 來實現定位導航更有強健性。

參考文獻

[1] https://wiki.ros.org/hector_slam.

[2] 鄭竣吉、林辰宗、陳宗麟，“使用部分商規零件之長任務周期太空級導航接收機的游離輻射測試與減緩策略，” Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume19, No4, pp. 313-325, February 2015.

跨域合作與風險溝通(III)

具有高靈敏度與高可靠度雙閘極氧化銦鎵鋅光電感測薄膜電晶體元件製程開發
Development of the device manufacturing process for dual-gate In-Ga-Zn-O light-sensing thin-film transistors with high sensitivity and high reliability

計畫編號：NSTC 112-NU -E-159-001 -NU
計畫主持人：李憶興
e-mail：yslee@must.edu.tw
計畫共同主持人：劉維昇
計畫參與人員：黎日冰心、馬愷強、阮武長草、阮氏美仙
執行單位：明新科技大學半導體與光電科技系

摘要

本學術合作研究計畫為實現具有高靈敏度與高可靠度雙閘極光感測氧化銦鎵鋅薄膜電晶體元件製程開發，雙閘極 IGZO TFTs 元件製程調整與量測包括:(1) 調整 a-IZO 通道層厚度之 IGZO-IZO 雙通道層結構製作與元件特性量測，(2) 調整雙層閘極介電層結構、材料與厚度結構與元件特性，正、負偏壓與溫度應力，(3) 調整頂部閘極電極為透明導電氧化物材料，進行雙閘 TFT 光電特性量測分析。首先研究了雙層通道層氧化銦鎵鋅薄膜電晶體（TFT）元件對特性的影響。雙通道 IZO (5 nm) / IGZO (40 nm)元件的元件參數及 NBS 測試的穩定性都明顯改善。在雙通道結構底層 IZO 薄膜可以有效減少薄膜粗糙度，進而優化通道界面，有效改善元件 NBS 可靠度。雙通道對雙閘 TFT 元件之靈敏常數的影響，雙通道元件都是頂閘電壓掃描時，均呈現較大的靈敏參數(γ)。接著應用雙層介電層於雙閘元件的頂閘介電層，以改善雙閘 TFT 特性，最佳雙介電層厚度組合為 SiO_x/SiN_x (150/65 nm)，同時確認有較佳的元件可靠度。最後進行雙層介電層之雙閘元件的光電特性量測，藉由改變 LED 的驅動電流來調節光強度，量測底閘之轉換特性曲線，並評估不同頂閘電壓照光之底閘 IGZO TFTs 轉換特性分析，計算元件光感應臨界電壓與光強度關係之增益因子。

關鍵詞：雙通道、雙層介電層、正偏壓應力測試、負偏壓應力測試、照光、靈敏常數(γ)、增益因子 (A)。

Abstract

This academic collaborative research project aims to develop a high-sensitivity and high-reliability dual-gate photodetector based on indium-gallium-zinc oxide (IGZO) thin-film transistors (TFTs). The project involves adjusting the dual-gate IGZO TFTs device fabrication and measurement processes, including: (1) Adjusting the a-IZO channel layer thickness to create and measure the device characteristics of IGZO-IZO dual-channel layer structures; (2) Adjusting the dual-gate dielectric layer structure, materials, and thickness, along with testing the device under positive and negative bias temperature stress; (3) Adjusting the top gate electrode to be made of a transparent conductive oxide material, followed by the analysis of the dual-gate TFT optoelectronic characteristics. First, the study examines the impact of the dual-channel layer IGZO TFT on device performance. Devices with a dual-channel IZO (5 nm) / IGZO (40 nm) structure show significant improvement in device parameters and stability under negative bias stress (NBS) tests. The IZO thin film in the bottom layer of the dual-channel structure effectively reduces film roughness, thereby optimizing the channel interface and significantly enhancing the NBS reliability of the device. The influence of the dual-channel structure on the sensitivity constant of dual-gate TFTs shows that dual-channel devices exhibit a larger sensitivity parameter (γ) during top-gate sweep. Next, dual-layer dielectrics were used as the top-gate dielectric layer in dual-gate devices to improve TFT characteristics. The optimal dual-dielectric thickness combination was found to be SiO_x/SiN_x (150/65 nm), which also confirmed better device reliability. Finally, the optoelectronic characteristics of dual-gate devices with dual-layer dielectrics were measured. By varying the LED driving current to adjust light intensity, the transfer characteristics of the bottom gate were measured. The transfer characteristics of bottom-gate IGZO TFTs under different top-gate voltages were analyzed under illumination, and the gain factor (A) relating the photodetector threshold voltage to light intensity was calculated.

Keywords: Dual channel、 Dual layer dielectric, Positive bias stress (PBS), Negative bias stress (NBS), Illuminate, Sensitivity, Gain factor.

I. 前言

有機發光二極體與 IGZO 驅動元件還可以通過內置在軟性基板(flexible substrate)上，使設計人員能夠創造出許多創新的產品，特別是平板電腦，智慧手機和可穿戴式個人電子產品。做過特殊處理的 IGZO 薄膜電晶體陣列(Array)對於 X 光之低功率， 高靈敏度以及更高的解析度。IGZO 薄膜電晶體的低功率和低漏電流特性可以讓陣列作得更小，低漏電流可以使 X 光擊中像素時有更好的敏感度。由於畫素比傳統的 a-Si:H TFT 更敏感，所以可減少曝光時間與輻射劑量。現有的感測器大小受到限制，但 Sharp 已經加強了 IGZO 陣列的解析度。在不久將可以進行全身式掃描， 輻射量遠比以前的小。由於掃描介質是電晶體陣列，而不是底片(film)，因此 IGZO 基感測器將能記錄連續運動的圖像[1]。除了大面積的顯示器應用外，近年來 a-IGZO TFTs 也發現可應用於一些新的領域如互補式金屬氧化物半導體(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)影像感測器(image sensors)元件[2]。另一方面，由於主動式感測電路主要以

感測元件之電壓變化作為感測訊號，只要放置相對應的感測元件至感測電路中，並適當調整操作條件，感測陣列的研發將可適用於多種用途，如 X 光、紫外光、有毒氣體等，搭配軟性電子技術之優勢，可使此技術以最少資源得到最大之商業價值。從文獻中調查，具有高靈敏度與高可靠度雙閘光感測氧化銦鎵鋅薄膜電晶體元件製程開發，主要包括 X 光影像感測器成像技術[3-5]、高光靈敏度雙閘 a-Si:H TFT 元件特性[6-8]、雙閘 IGZO TFTs 元件結構與特性[9-12]，與元件偏壓與照光應力(Bias and illumination stress)特性分析[13-14]，具有 a-IGZO 通道層厚度與使用雙通道層結構[15-16]，閘極介電層結構與材料厚度變化的雙閘 IGZO 薄膜電晶體元件[12-13]。

II. 主要內容

2.1 雙閘 TFT 製程

本研究的元件製程是使用 P^+Si 低電阻晶片作為底部閘極(bottom gate, BG)，先委託 RCA 清洗過後，使用爐管生長 SiO_x 100 nm 作為閘極介電層(gate dielectrics)後，再使用射頻磁控濺鍍(RF Sputter)連續沉積 IGZO 或 IZO/IGZO 作為 Channel。利用第一道光罩，定義源汲極(S/D)及元件通道不同的寬長比(W/L)，使用 E-Gun 沉積 200 nm 的 Al 作為 S/D，並使用超音波震盪去除光阻(PR) 。第二道光罩定義 Channel 利用 PR 當作蝕刻阻擋層後，再使用 1;100 稀鹽酸蝕刻 IGZO 與 IZO，使用 ACE→IPA→DI Water 去除 PR。第三道光罩定義 Gate dielectrics 後，利用 PR 當作蝕刻阻擋層後，以乾蝕刻製程挖出閘極接觸孔，並使用 O_2 plasma 去除 PR，此部分完成就是單閘極元件。之後製作雙閘極元件，使用 PECVD 沉積單介電層(SiO_x)與雙介電層(SiN_x/SiO_x)作為頂閘介電層。使用第四道光罩，定義頂部閘極(Top gate, TG)後，使用 RF Sputter 沉積 200 nm 的 IZO，並使用超音波震盪去除 PR 。為使 S/D 電極與 BG 電極裸露出來，使用第五道光罩定義接觸孔，使用乾蝕刻頂部介電層並使用 O_2 plasma 去除 PR。完成元件後使用 Keysight B1500A 測量元件之電性及分析。圖 1 為雙閘極元件光學照片圖，圖 2 為具有雙層介電層之雙閘極元件結構圖示意圖。

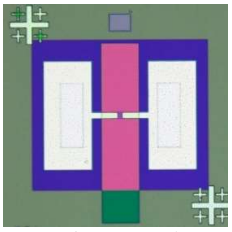


圖 1 雙閘極元件光學照片圖

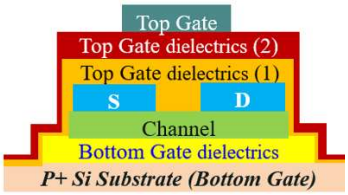


圖 2 雙層介電層之雙閘極元件結構圖示意圖

2.2 元件可靠度與光電特性量測

可靠度量測方法，將 S/D 接地（GND），在正偏壓應力（Positive Bias Stress, PBS）閘極施加正偏壓 (+20 V)，而負偏壓應力（Negative Bias Stress, NBS），則是施加負偏壓 (-20 V) 如圖 3 所示，持續施加偏壓應力 1 小時（再取 0s, 600s, 1200s, 1800s, 3600s 之 I_{DS}-V_{GS} 曲線）。以 IZO 作為光感測元件之頂閘電極，以中心發射波長為 350 nm 的藍光 LED 做光源，改變 LED 的驅動電流來調節光強度 I (0.962-2.465 mW/cm^2)，量測底閘之轉換特性曲線(I_{ds} vs $V_{gs\text{-}bot}$)，並評估不同頂閘電壓照光之底閘 IGZO TFTs 轉換特性分析。元件光感應臨界電壓(V_{th})與光強度(I)關係之增益因子(A)，參考公式 $V_{th} = -AI$ (1)，圖 4 (a)為雙閘 TFT 光電特性示意圖，圖 4 (b)為雙閘 TFT 光電特性測試照片。

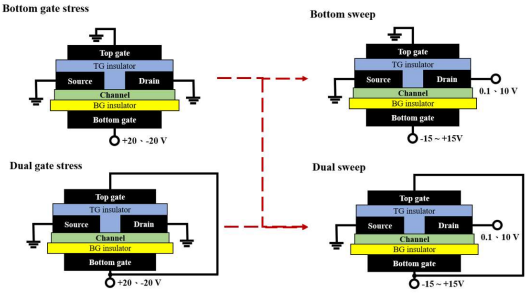


圖 3 單、雙閘之正、負偏壓應力可靠度量測示意圖

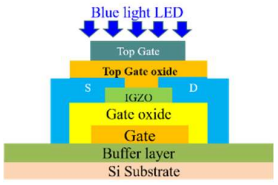


圖 4. (a)雙閘 TFT 光電特性示意圖



圖 4. (b) 雙閘 TFT 光電特性測試照片

III. 結果與討論

3.1 調整 a-IGZO 通道層厚度與使用 (IGZO)-IZO 雙通道層結構，元件特性量測、靈敏常數

為了研究雙通道元件，做為底層的 IZO 薄膜對於元件之影響，本實驗使用了原子力顯微鏡（AFM）量測不同 IZO 薄膜厚度的表面粗糙度之三維影像，並計算其 RMS 與 Ra 值。結果得出，在單獨的 Si 晶片上其表面粗糙度 RMS 為 3.67 nm，當沈積 IZO 薄膜上去，明顯減少薄膜表面粗糙度，隨著 IZO 薄膜厚度增加粗糙度逐漸減少，增加至 3 與 5 nm，RMS 分別爲 1.56 nm 與 0.39 nm，當 IZO 厚度增加到 7 nm 時，RMS 反而增加到 0.77 nm，RMS 粗糙度與平均粗糙度 Ra 數據於圖 5 說明。

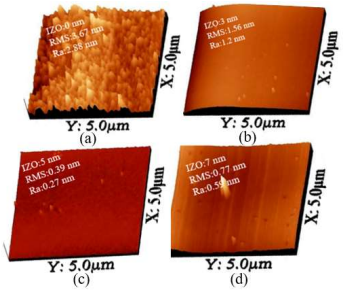


圖5 不同 IZO 膜厚 (a) 0 nm，(b) 3 nm，(c) 5 nm，(d) 7 nm 之AFM影像

雙通道（IZO/IGZO）結構元件，通道層由不同IZO厚度（0、3、5、7 nm）與IGZO (40 nm)所組成，此元件會使用200°C的N_2退火1小時。雙通道元件轉換特性與電性參數表分別如圖6 (a)-(d)與表1所示，而參數比較表中遷移率提升主因是因以高載子濃度的底部通道層(IZO)作為主要電荷傳導通道且有高載子遷移率[17]; 在雙通道IZO (5 nm) / IGZO (40 nm)元件參數: 臨界電壓(V_{th})、次臨界擺幅(S.S.)及場效遷移率(μ_{FE})均明顯改善。元件特

性的提升，由AFM分析解釋，沉積IZO 薄膜明顯減少了薄膜表面粗糙度，雙通道結構之下層IZO薄膜可以有效減少薄膜粗糙度，提供給上層IGZO薄膜一個平滑表面，進而優化通道界面。當雙通道的IZO厚度增加到7 nm 時，元件轉換特性顯示導通，這是由於通道層載子濃度大量增加所致[18]。

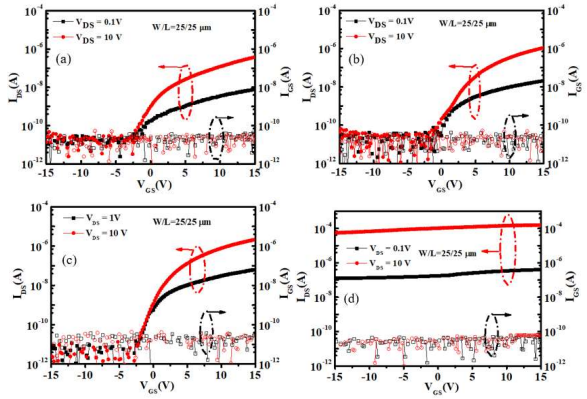


圖 6 不同 IZO 薄膜厚度 (a) 0 nm，(b) 3 nm，(c) 5 nm，(d) 7 nm 之雙通道 IZO/IGZO TFT 元件 I_{DS} - V_{GS}

表 1 不同 IZO 厚度之雙通道 IZO/IGZO TFT 電性參數

IZO/IGZO	V_{th} (V)	S.S. (V/decade)	μ_{FE} (cm^2/V-s)
0/40 nm	-0.85±0.2	2.12±0.7	0.63±0.1
3/40 nm	2.23±0.8	1.21±0.1	1.78±0.5
5/40 nm	0.7±0.4	0.99±0.1	4.28±0.1
7/40 nm	NA	NA	NA

爲證明雙通道對閘極偏壓應力(NBS)之穩定性，進行了負閘極壓應力(NBS)測試，如圖 7(a)-(c) 所示，隨著應力時間增加，單層通道 IGZO 元件 ΔV_{th} 最大；而雙通道 IZO/IGZO 元件，隨著 IZO 厚度增加到 5 nm，元件的穩定性也提高，原因為 IZO 擁有高載子濃度，可以提升雙通道元件載子濃度，有效地減緩了 NBS 對元件影響，圖 7(d)總結了作為應力時間函數的 V_{th} 變化趨勢。

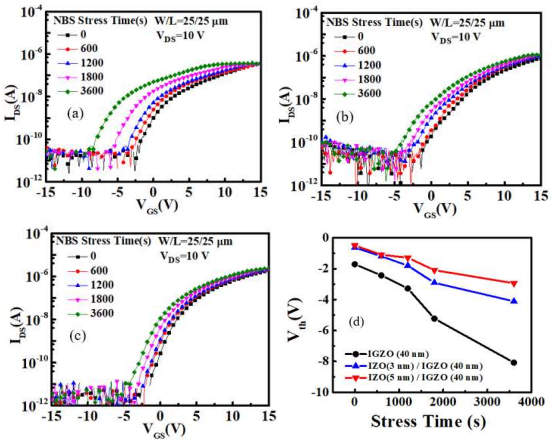


圖 7 (a) IGZO (40 nm)，(b) IZO (3 nm) / IGZO (40 nm)，(c) IZO (5 nm) / IGZO (40 nm)負偏壓應力，(d)V_{th} 變化趨勢

雙通道對雙閘 TFT 元件之靈敏常數的影響，靈敏常數計算公式為: $V_{th}\,(t, V_{GS\text{-}TOP}) = V_{T0} + \gamma V_{GS\text{-}TOP}$ (2)，其中γ為靈敏常數。圖 8 (a)與(c)是頂閘電壓($V_{GS\text{-}TOP}$)變化，評估雙通道 IZO (3 nm) / IGZO (40 nm)與 IZO (5 nm) / IGZO (40 nm)的底閘掃描($V_{GS\text{-}BOT}$ sweep)轉換特性；圖 8 (b)與(d)則是底閘電壓($V_{GS\text{-}BOT}$)變化，評估雙通道 IZO (3 nm) / IGZO (40 nm)與 IZO (5 nm) / IGZO (40 nm)的頂閘掃描($V_{GS\text{-}TOP}$ sweep) 轉換特性；插圖顯示隨著頂閘偏壓負電壓增加，V_{th} 向正值移動，其斜率即為靈敏參數(γ)。IZO 厚度(3 與 5 nm)兩種雙通道元件隨著負電壓增加，元件都是頂閘極掃描時，會呈現較大的 γ 值(0.69~0.77)；然而底閘掃描，兩種 IZO 厚度之 γ 值差異不大，但 IZO/IGZO (5/40 nm)的的靈敏參數(γ = 0.28)較大，而頂閘掃描時，則是 IZO/IGZO (3/40 nm)的靈敏參數(γ = 0.77)較大。

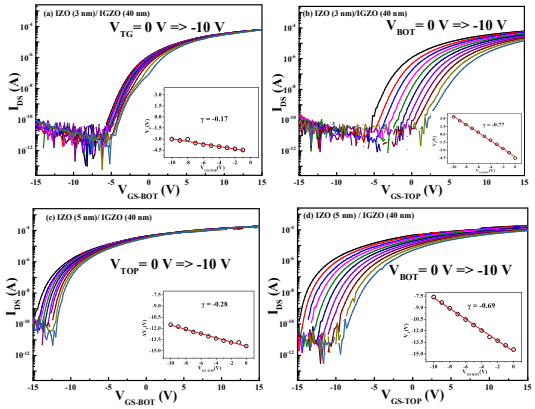


圖 8 V_{DS} = 10 V 時，施加各種頂部閘極偏壓的雙通道 IZO/IGZO TFT 元件的轉換特性: (a) IZO/IGZO (3/40 nm)，(c) IZO/IGZO (5/40 nm)；施加各種底部閘極偏壓的雙通道 IZO/IGZO TFT 元件的轉換特性: (b) IZO/IGZO (3/40 nm)，(d) IZO/IGZO (5/40 nm)

3.2 調整閘極介電層材料與結構與元件特性正、負偏壓應力可靠度量測

為了改善雙閘元件電性及可靠度，使用雙層介電層於雙閘元件的頂閘介電層(TG dielectrics, TGD)。首先以 200 nm SiO_x 做為標準試片，並做為參考電容值，再使用電容串聯公式: $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$ ；$C = \varepsilon \times A/d$ (3)，以 200 nm SiO_x 之等效電容計算雙層介電層 SiO_x/SiN_x 的不同厚度組合製作具有雙層介電層之雙閘 TFT，並比較其元件電性與可靠度。共有 4 個條件:單層介電層 SiO_x (200 nm)，雙層介電層 SiO_x/SiN_x (175/30 nm)、(150/65 nm)、(125/95 nm)。圖 9 與表 2 分別為單、雙層介電層之雙閘 TFT 轉換特性與其元件電性參數表。結果說明雙層介電層 SiO_x/SiN_x 比單層介電層 SiO_x 有較佳元件的電性，包括元件參數 V_{th} 與 S.S.減少，μ_{FE} 與 I_{on} 增加，原因為雙層介電層沉積可以來降低界面陷阱[3]。三種厚度組合的雙層介電層特性中，最佳的雙介電層厚度組合為 SiO_x/SiN_x (150/65 nm)，因為有較好的 V_{th}、μ_{FE}與 I_{on}。

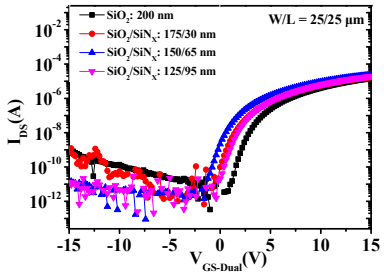


圖 9 單、雙層頂閘介電層之雙閘 TFT I_{DS}-V_{GS} 轉換特性

表 2 不同單、雙層介電層元件之雙閘 TFT 的電性參數

SiO_x/SiN_x	V_{th} (V)	S.S. (V/decade)	μ_{FE} (cm^2/V-s)
200/0 nm	2.2±0.6	0.52±0.04	7.56±0.48
175/30 nm	0.68±0.5	0.63±0.07	7.55±0.68
150/65 nm	0.23±0.7	0.59±0.07	9.54±0.68
125/95 nm	0.7±0.3	0.54±0.03	9.19±0.53

比較單層 SiO_x、雙層介電層對雙閘 TFT 的 PBS、NBS 3600 秒可靠度測試，雙層介電層選擇 SiO_x/SiN_x (150/65 nm)作為比較條件。圖 10. (a)與(b)為單與雙層介電層 PBS 的 ΔV_{th} 變化趨勢圖，圖 10. (c)與(d)則是為單、雙層介電層 NPS 的 ΔV_{th} 變化趨勢圖。表 3 總結 PBS、NBS 在 BG、TG 及 DG (dual gate)三種量測模式之 ΔV_{th} 變化，在 PBS 的結果雙層介電層的 ΔV_{th} 正偏移都比單層介電層較小；然而在 NBS 除 TG 模式雙層介電層 (-3.06V)比單層介電層(-2.12 V)大外，其他模式差異不大。綜合單、雙層介電層 PBS 與 NBS 可靠度測試結果，在雙層介電層確實會比單層介電層更佳的可靠度。

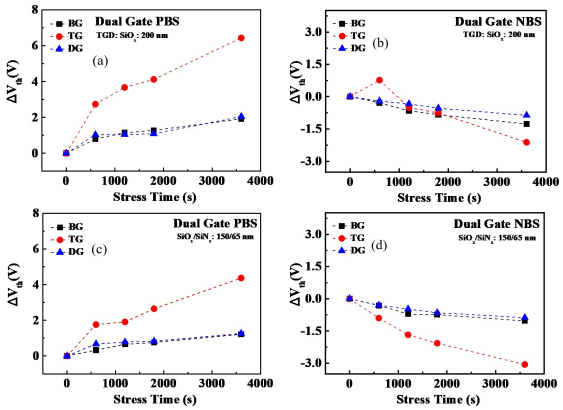


圖 10 雙閘正、負偏壓應力之 ΔV_{th} 變化，單層介電層(a) PBS、(b)NBS，雙層介電層(c)PBS 、(d)NBS

表 3 比較單、雙層介電層經 Dual gate PBS、NBS 經過 3600s 測試之 ΔV_{th}

ΔV_{th} (V)	SiO_x (200 nm)		SiO_x/SiN_x(150/65 nm)	
	PBS	NBS	PBS	NBS
BG	1.92	-1.27	1.22	-1.03
TG	6.43	-2.12	4.37	-3.06
DG	2.05	-0.87	1.26	-0.88

3.3 單、雙層介電層之雙閘 TFT 光電特性量測分析

圖 11(a)-(d)為頂閘偏壓(V_{TG}) =0 V，不同照光強度下，不同單、雙層介電層底閘 TFT 轉換特性(I_{DS} vs V_{GS-BOT})。隨著光強度增加，單、雙介電層 TFT 轉換特性曲線往負壓偏移。在 V_{TG}=0V 時，隨著雙層介電層中 SiN_x 厚度增加，增益因子逐漸下降(1.19~0.76)，此結果說明 SiO_x/SiN_x 雙介電層結構會減少光增益因子，亦即減少光強度對 TFT 特性影響。圖 12(a)-(d)為 V_{TG} =-5 V 不同照光強度下，不同單、雙層介電層底閘 TFT 轉換特性。當 V_{TG}=-5V，隨著雙層介電層中 SiN_x 厚度增加，增益因子逐漸上升(0.2~1.04)。結果說明雙介電層結構之 SiN_x 厚度增加在 V_{TG}=-5V，光強度增加造成更多的電子電洞對，導至底閘 TFT 轉換曲線往負值偏移較多，增加光增益因子。

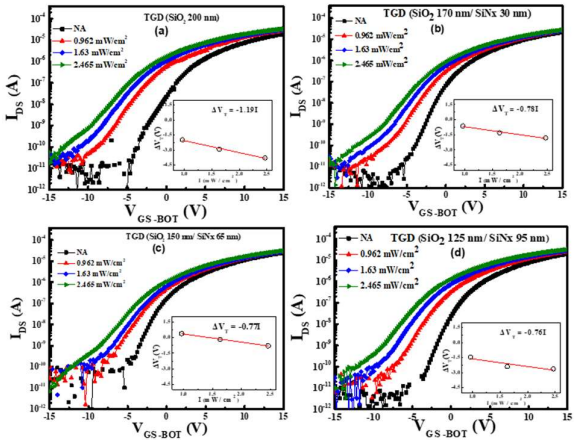


圖 11 V_{TG}=0 V，不同照光強度 TFT 的轉換特性: (a) SiO_x (200 nm)，(b) SiO_x/SiN_x (175/30 nm)，SiO_x/SiN_x (150/65 nm)，SiO_x/SiN_x (125/95 nm)

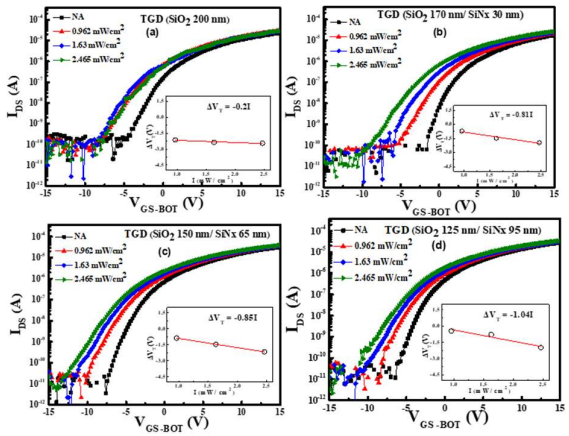


圖 12 V_{PG}=-5 V，不同照光強度 TFT 的轉換特性: (a) SiO_x (200 nm)，(b) SiO_x/SiN_x (175/30 nm)，SiO_x/SiN_x (150/65 nm)，SiO_x/SiN_x (125/95 nm)

IV. 結論

雙通道 IZO (5 nm) / IGZO (40 nm)元件的 I_{on}、I_{off}、V_{th}、S.S 及 μ_{FE} 元件參數及 NBS 的穩定度測試均明顯改善。雙通道結構元件特性提升，主要是底層 IZO 薄膜可以有效減少薄膜粗糙度，進而優化通道界面，並改善元件 NBS 可靠度。雙通道對雙閘 TFT 元件之靈敏常數的影響，兩種雙通道元件都是頂閘極掃描時，均呈現較大的靈敏參數(γ)。藉由使用雙層介電層應用於雙閘元件的頂閘介電層，結果說明雙層介電層 SiO_x/SiN_x 比單層介電

層 SiO_x 有較佳元件的電性，最佳的雙介電層厚度組合為 SiO_x/SiN_x: 150/65 nm，因為有較好的 V_{th}、μ_{FE}與 I_{on}，綜合單、雙層介電層 PBS 與 NBS 可靠度測試結果，在雙層介電層比單層介電層更佳的可靠度。雙層介電層應用於雙閘元件的照光研究從增益因子的結果來比較，當頂閘偏壓為 0 時，雙層介電層中 SiN_x 厚度增加，增益因子逐漸下降(1.19~0.76)，結果說明 SiO_x/SiN_x 雙介電層結構會減少減少光強度對 TFT 特性影響；當頂閘偏壓-5 V 時，雙介電層結構中 SiNx 厚度增加，光強度增加造成更多的電子電洞對，導至底閘 TFT 轉換曲線往負值偏移較多，增加光增益因子(0.2~1.04)。

參考文獻

[1] Vishakha O. Gupta, National Level Technical Conference, XPLORE, no. 1, 2013.
[2] Jeon, et al., in Proc. IEEE IEDM 2010, pp.504-506, 2010.
[3] K. Wang et al. IEEE Trans. Electron Device, vol. 62, no. 9, pp. 2894-2899, 2015.
[4] L. Wang et al, J. Display Technol., vol. 11, no. 8, pp. 646 – 651, Aug. 2015.
[5] X. Liu et al. , IEEE Photonics Technology Letters, vol. 28, no. 18, pp.1952-1955, 2016.
[6] H. Ou, K. Wang, C. Ding, S. Z. Deng, N. S. Xu, and J. Chen, IEEE Electron Device Lett., vol. 36, no. 12, pp. 1373 – 1375, Nov. 2015.
[7] P. Servati et al., IEEE Trans. Electron Devices, vol. 50, no. 4, pp. 926 – 932, Jun. 2003.
[8] J. K. Jeong et al., Appl. Phys. Lett., vol. 93, no. 12, p. 123 508, Sep. 2008.
[9] K. S. Son et al., Electrochem. Solid-State Lett., vol. 12, no. 1, pp. H26 – H28, 2009.
[10] C. H. Wann et al, IEEE Trans. Electron Devices, vol. 43, no. 10, pp. 1742 – 1753, Oct. 1996.
[11] S. Zhang et al, IEEE Electron Device Lett., vol. 22, no. 11, pp. 530 – 532, Nov. 2001.
[12] N. Munzenrieder et al, Solid-State Electronics 84, 198-204, 2013.
[13] S. Hong et. al, IEEE Electron Device Lett, vol. 35, no. 1, Jan. 2014.
[14] I. C. Chiu et al., IEEE Electron Device Letters, vol. 35, pp. 90-92, 2014.
[15] Sanghun Jeon1 et al., IEEEE IEDM11, pp.331-334, 2011.
[16] M. Chun et al., AIP Advances 6, 075217, 2016.
[17] Sun Il Kim et. al, IEEE International Electron Devices Meeting, 2008.
[18] Cam Phu Thi Nguyen. et. al, Applied Surface Science, Vol. 396, pp. 1472-1477, 2017.

於可撓式基板進行 P 型 Cu 摻雜 CrOx 透明導電氧化物與紫外光偵測器之研製
Development of P-type Cu-doped CrOx Transparent Conductive Oxide and UV Photodetector on Flexible Substrates

計畫編號： NSTC112-NU-E-155-001-NU
計畫主持人：劉維昇
e-mail：wsliu@saturn.yzu.edu.tw
計畫共同主持人：Balaji. G
計畫參與人員：Bhavya Kondapavuluri、楊淙安、葉耘睿、陳雨恩、 Sindu Gnanan A. B, Sriranjani. S
執行單位：元智大學 電機工程學系

摘要

本計畫目的是利用金屬氧化物半導體薄膜開發紫外光偵測器。計畫中使用射頻磁控濺鍍於基板上沉積 $CuCrO_2$ 及 AZO 薄膜，並結合上述薄膜材料使其成為 P-$CuCrO_2$/N-AZO 的 P-N 結構。研究中透過 XRD、UV-VIS-NIR 穿透光譜、霍爾量測、AFM 原子力顯微鏡優化薄膜，以研製出高品質紫外光檢測器。製備出的透明紫外光偵測器元件觀察到電流密度從 6.43×10^{-11} A 遽增至 6.12×10^{-6} A，顯示出約 14000 的開/關比，並且照射紫外光後光生電流明顯增加，從 I-V 曲線還可看出元件 PN 介面的特性。在偏壓為 1V 時，電流密度由 2.31×10^{-8} A 上升至 6.12×10^{-6} A ，說明此元件作為紫外光偵測器的優異元件操作特性。此外，也觀察到元件的光響應性，其上升時間為 1.6 秒，衰減時間為 1.5 秒，顯示出良好的響應速度。

關鍵詞：透明導電氧化物、金屬氧化物薄膜、紫外光偵測器、RF 射頻磁控濺鍍。

Abstract

The purpose of this project is to develop ultraviolet detectors using metal oxide semiconductor thin films. The project involves the deposition of $CuCrO_2$ and AZO thin films on a substrate using radio frequency magnetron sputtering, combining these films to form a P-$CuCrO_2$/N-AZO P-N junction structure. The research optimizes the thin films through X-ray diffraction (XRD), UV-VIS-NIR transmittance spectroscopy, Hall measurement, and atomic force microscopy (AFM) to produce high-quality UV detectors. The fabricated transparent UV sensor device shows a rapid increase in current density from 6.43×10^{-11} A to 6.12×10^{-6} A, demonstrating an on/off ratio of approximately 14,000. The photocurrent significantly increases upon UV irradiation, and the I-V curve reveals the characteristics of the P-N junction interface of the device.

At a bias of 1V, the current density increased from 2.31×10^{-8}A to 6.12×10^{-6}A, indicating the performance of this device as an ultraviolet detector. The device's photoresponse was also observed, with a rise time of 1.6 seconds and a decay time of 1.5 seconds.

Keywords: Transparent Conductive Oxides, Metal Oxide Films, UV Light Detectors, RF Magnetron Sputtering

I. 前言

隨著紫外光在多個領域的應用範圍不斷擴大，人們不僅認識到其在各行業中的重要性，也越來越多人關注其對健康可能帶來的風險。傳統的紫外光偵測器大多是不透明的，其檢測功能依賴於特定的材料或技術。因此推動了在可見光範圍內尋找具有高透光率的材料及設計，並開發適用於不同需求的高效紫外光偵測器的研究，成為當前的重要研究題目。

近年來，可撓式電子產品蓬勃發展，便攜式、可穿戴、輕便和可植入的光電設備已進入開發的階段。如當透明紫外光偵測器應用於穿戴式裝置時，能監測紫外光強度，提供個性化警示和建議，幫助使用者根據天氣和光線狀況調整日常活動計劃，保護人體健康。

本計畫使用透明導電氧化物作為材料，因其在當今科技領域極具發展潛力，在光電子元件中的廣泛應用已引起全球範圍內的關注，不僅具備出色的電導率，還有在可見光波長範圍內高透光率以及在紅外區域的反射性等特性，滿足許多高科技應用的需求。在本計劃中，我們選用 $CuCrO_2$ 作為 P 型層，因其具備 3.1 eV 的高光學能隙、高可見光透射率及高電洞遷移率。對於 N 型半導體層，我們選擇了 AZO，因其具有高可見光透光率、低電阻及優異的材料穩定性。

II. 主要內容

2.1 P-$CuCrO_2$ 實驗方法

本計畫使用 3 英吋的圓形 Cu/Cr 靶材（原子比例 1:1）通過射頻磁控濺鍍技術在玻璃基板上成長 $CuCrO_2$ 薄膜。首先將清潔過的玻璃基板放入濺鍍腔體中，並將沉積室內壓力維持在 3 mTorr，靶材與玻璃基板的距離設定為 10 公分，以確保薄膜沉積的均勻性，並為提升靶材表面潔淨度，實驗中進行了 15 分鐘的預濺鍍步驟。此外，通過調整基板溫度、濺鍍功率、沉積時間、氧氣流量及工作壓力等參數，尋找最適合的晶向成長條件。

而完成後的 $CuCrO_2$ 薄膜皆利用快速熱退火(Rapid Thermal Annealing)進行退火，並將溫度統一設定於 600 ℃。

接著透過 X 射線繞射儀（XRD）、UV-VIS-NIR 吸收穿透光譜儀；原子力顯微鏡（AFM）、霍爾量測等儀器來確認 $CuCrO_2$ 的結構、光學及電學性質。

2.2 N-AZO 實驗方法

本計畫藉由射頻磁控濺鍍法在氬氣環境中將 AZO 薄膜沉積在玻璃基板上。首先在沉積薄膜前，先將基板放至裝有電子級丙酮的燒杯中，以超音波震盪機清洗 5 分鐘，再以異丙醇（IPA）去除基板上殘留之丙酮，最終用去離子水除去基板表面上之有機溶液並且使用氮氣槍將其吹乾。此實驗中所採用的靶材為直徑 3 英吋且厚度 3 mm 的氧化鋁鋅（AZO）。靶材與基板之間的距離為 10 公分。在濺鍍前，先以 60 W 功率對靶材進行 15 分鐘的預濺鍍以清潔靶材表面。基礎壓力、工作壓力、濺鍍功率和沉積時間分別保持在 4×10^{-6} Torr、3 mTorr、60 W 及 80 分鐘，另外，反應氣體為高純度 Ar(99.9999%)，流速為 45 sccm。在濺鍍過程中，基板之旋轉速度保持在 10 rpm，並在濺鍍開始前將基板從 100-400℃的預期沉積溫度下預熱 10 分鐘。

III. 結果與討論

3. P-$CuCrO_2$/Glass substrate

3.1 X 射線繞射圖(XRD)

在本計畫薄膜成長，主要採用射頻磁控濺鍍技術生長 $CuCrO_2$ 和 AZO 薄膜，並透過 X 射線繞射（XRD）圖來觀察薄膜的晶體結構，以此來優化半導體薄膜品質。

從圖一的 XRD 分析中，可以在 31.36°和 36.41°處觀察到兩個明顯的峰值，這兩個峰分別對應於(006)和(012)晶面，與聯合委員會資料庫（JCPDS）編號 PDF#89-0539 的 $CuCrO_2$ 數據完全匹配，證實了薄膜的晶體結構與預期的 $CuCrO_2$ 一致。

在不同的濺鍍功率設定下，XRD 圖形顯示了晶體生長的不同特性。當濺鍍功率設定在 150W 和 200 W 時，XRD 圖中未觀察到如 CuO 或 $CuCr_2O_4$ 等其他雜質相的存在，表明在這些條件下薄膜主要由 $CuCrO_2$ 晶相組成。然而，在 150W 的條件下，雖然能觀察到 31.36°和 36.41°的峰值，但這些峰值的強度相對較低，說明在此一濺鍍功率下，晶相未完全形成或薄膜厚度不足，未能產生足夠明顯的 XRD 信號。

隨著濺鍍功率的增加至 250W 和 300W，XRD 圖形中除了顯示 $CuCrO_2$ 的特徵峰之外，還出現了一個與 JCPDS 編號 PDF#89-2531 的 CuO 相匹配的(113)晶相峰。這表明在較高的濺鍍功率下，將會促進 CuO 相的形成。

上述結果顯示，濺鍍功率對 $CuCrO_2$ 薄膜的晶相穩定性和純度有顯著影響，且適當控制濺鍍條件對於避免非目標相的形成至關重要。因此，在製備 CuCrO2 基光電元件時，精確控制濺鍍功率和其他相關參數將是確保材料性能的關鍵因素，相關材料分析過程如下：

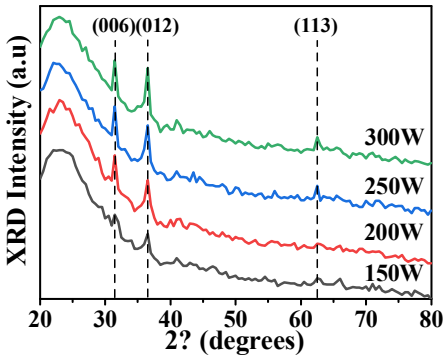
在濺鍍過程中，Cu 和 Cr 與 O 反應形成非晶的 Cu 摻雜 CrO_2 薄膜。當 RF 功率太低時，靶材所獲得的能量不足以激發出足夠多的銅跟鉻原子，導致可用於形成 $CuCrO_2$ 的 Cu 不足，使薄膜中存在多餘的 $CuCr_2O_4$[1]:

$$CuO(s)+Cr_2O_3(s) \rightarrow CuCr_2O_4(s) \quad (1)$$

隨著功率的上升，會有更多的銅跟鉻原子被激發，薄膜中存在夠多的 CuO 與 $CuCr_2O_4$ 反應形成適當的 CuCrO2:

$$CuO(s)+ CuCr_2O_4\,(s) \rightarrow 2CuCrO_2\,(s)+1/2O_2 \quad (2)$$

如果再繼續上升功率，將會導致薄膜中存在過多的 CuO，與本次實驗 250W 及 300W 的 XRD 繞射圖中出現 CuO 的峰值互相呼應。

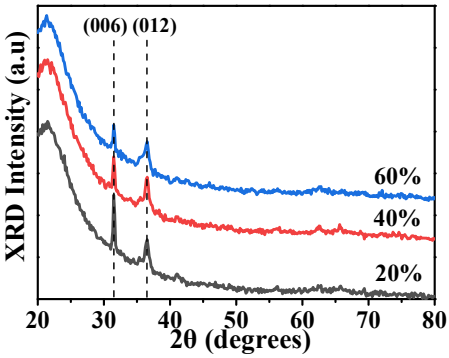


圖一、不同濺鍍功率下生長 $CuCrO_2$ 薄膜之 XRD 繞射圖。

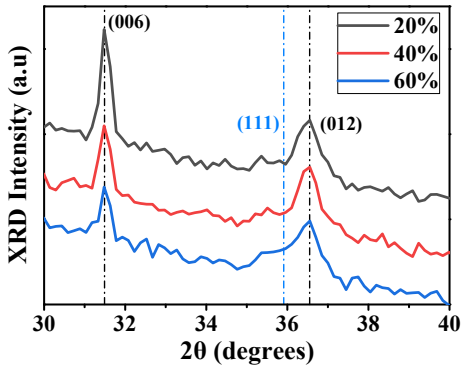
經本團隊調整最佳濺鍍參數後，可得到最適合之射頻功率為 150 W，且搭配 400 ℃之基板加溫後即發現特定晶向之成長，為了增強薄膜的晶向強度，我們調整了氧氣流量比例，旨在透過改變氧氣佔比，以減少不必要的氧化相如 CuO 與 $CuCr_2O_4$ 的形成。在圖二中，通過改變氧氣流量比例從 20%至 60%觀測到的 $CuCrO_2$ 的 XRD 繞射圖中，在 20°至 80°的 2θ 範圍內均未觀察到除 $CuCrO_2$ 以外的其他晶相，顯五示良好的薄膜晶向取向。

進一步地，我們將繞射圖量測範圍關注在 30°到 40°的範圍進行觀察，在圖二中發現隨著氧氣流量從 20%增加至 60%，(006)的峰值強度逐漸下降，顯示薄膜晶相品質的逐漸下降。此外，當氧氣流量達到 60%時，我們注意到 35.9°處 CuO 的(111)峰值與 $CuCrO_2$ 的(012)峰值在 36.41°非常接近，這導致(012)峰值左側出現了 Shoulder 現象[2]。這一觀察使我們推測在高氧氣流量條件下，可能由於 CuO 相的形成而導致 $CuCrO_2$ (012)峰的變化。

綜上所述，過量的氧氣會導致 CuO 的形成，進而影響薄膜的結晶度並降低其整體品質。因此，控制氧氣流量以最小化 CuO 及其他不必要氧化相的生成，並維持薄膜的高晶體品質，是製備高品質 $CuCrO_2$ 薄膜過程中重要的調控參數。



圖二、不同氧氣流量所生長 $CuCrO_2$ 薄膜之 XRD 圖案。

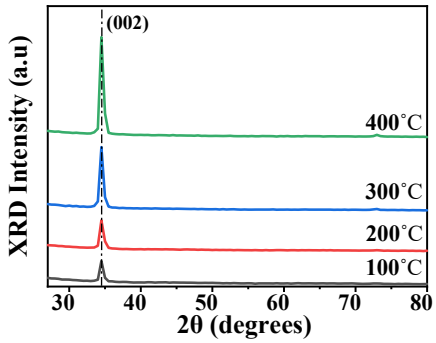


圖三、放大至 30~40° 2θ 範圍的同氧氣比例下 XRD 繞射圖

除了對 $CuCrO_2$ 薄膜的成長進行分析外，本計畫也針對 AZO 薄膜進行了 X 射線繞射（XRD）測量，以瞭解薄膜的成長情況，並對氧化鋅鋁（AZO）薄膜的晶相進行確定。根據圖四中的數據，在 34.4°處出現的高強度 XRD 峰值以及在 72.6°處的低強度 XRD 峰值，分別對應於 AZO 六角閃鋅晶體結構的(002)和(004)晶面。這些繞射峰與聯合委員會資料數據庫（JCPDS）編號 036-1451 的記錄一致，說明了 AZO 薄膜的晶體結構與預期相符。

進一步的實驗顯示，在初始基板溫度為 100°C 時，（002）峰值的強度較低。這可能是由於較低溫度下晶體成長不充分，導致較小的晶粒尺寸，以及較弱的繞射峰強度。然而，隨著基板溫度提升至 200°C，XRD 峰的強度開始增加，顯示出晶體結構逐漸變得更加完整且晶粒成長更加顯著。當溫度進一步升高至 400°C 時，AZO 樣品的結晶性顯著增強，進一步證明高溫有利於 AZO 薄膜晶粒的生長，並提升了晶體的整體品質。

上述量測分析結果，說明了基板溫度對於控制 AZO 薄膜晶相成長以及優化其晶體品質的重要性。藉由調節基板溫度，可以有效控制薄膜的晶粒大小和晶體結構，進而提升薄膜的光電特性。



圖四、不同基板溫度下沉積的 AZO 薄膜之 XRD 繞射圖

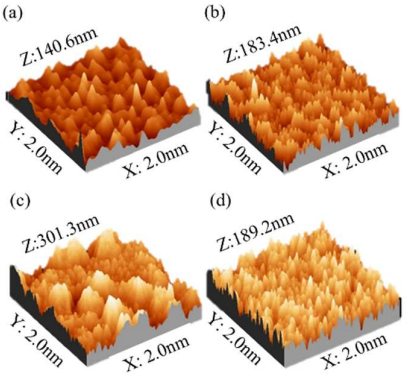
3.2 原子力顯微鏡(AFM)

原子力顯微鏡(AFM)是一種重要的薄膜分析工具，可以用來評估各種製程參數對 $CuCrO_2$ 沉積薄膜表面形態的影響。在圖五呈現的是一個 5.0×5.0 μm² 面積的 $CuCrO_2$ 薄膜樣品的三維 AFM 圖像。根據圖五的實驗結果，AFM 分析說明了隨著濺鍍功率的增加，薄膜表面粗糙度也逐步增加。

這種隨著功率增加而增加薄膜表面粗糙度的現象，可歸因於數個因素。首先，濺鍍過程中較高的功率通常會導致靶材料溫度升高，這同時也會加快沉積速率。在 150W 的功率下，觀察到薄膜表面具有最低的均方根粗糙度（RMS）值為：14.90 nm。然而，隨著功率的進一步提高，可能會導致顆粒在基板上沉積得更不均勻，形成更不規則的表面結構。這種不規則性自然會導致薄膜表面粗糙度整體上升。

此外，較高的濺鍍功率半導體薄膜成長條件下，濺鍍功率可能會干擾濺鍍過程中的流體動力學，使得沉積過程中顆粒分佈變得不均勻。當顆粒分佈不均時，薄膜的表面均勻性受到影響，進而導致薄膜粗糙度的增加。

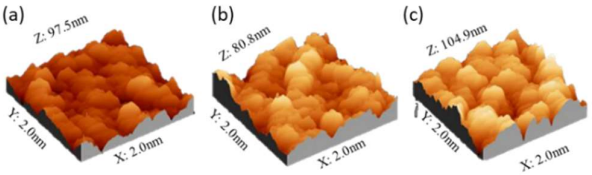
根據上述討論，本研究發現控制濺鍍功率在維持 $CuCrO_2$ 薄膜表面品質方面的重要性。為達到最佳的薄膜表面特性，必須仔細選擇和調整製程中的濺鍍功率，以確保適當的沉積速率和顆粒能量，進而獲得具有良好表面平整度的高品質氧化物薄膜。



圖五、不同濺鍍功率下 $CuCrO_2$ 樣品表面型態之 3D AFM 圖像(a)150 W (b)200 W (c)250 W (d)300 W

圖六說明了氧氣流量對薄膜表面粗糙度的顯著影響。當氧氣流量比例為 20%時，薄膜呈現了最低的均方根粗糙度（RMS）值，達到 9.2 nm。在濺鍍過程中，若氧氣流量增加，可能導致表面氧化物形成的不均勻性，進而加劇了材料表面的化學反應。這些變化的化學反應在沉積過程中引入了不規則性，進而導致薄膜表面粗糙度的提升。此外，增加的氧氣流量還可能引起材料化學組成和晶體結構的變化，這些變化可能會影響薄膜中雜質的存在與分佈。

綜合上述研究觀察顯示，在設計和優化 $CuCrO_2$ 薄膜的製程時，應精細控制氧氣流量，適當的氧氣流量不僅有助於獲得更平滑的薄膜表面，也有利於保持薄膜的結構穩定性和化學均勻性。



圖六、不同氧氣流量下 $CuCrO_2$ 樣品表面型態之 3D AFM 圖像(a)20% (b)40% (c)60%

3.3UV-VIS-NIR 穿透光譜

為製作高元件特性的紫外光偵測器，薄膜的透明度是關鍵條件之一。因此，我們對薄膜進行了紫外光穿透

性量測，以確保其具有高可見光的穿透度。以下將呈現半導體薄膜在 200nm 至 800nm 波長範圍內的光學特性，

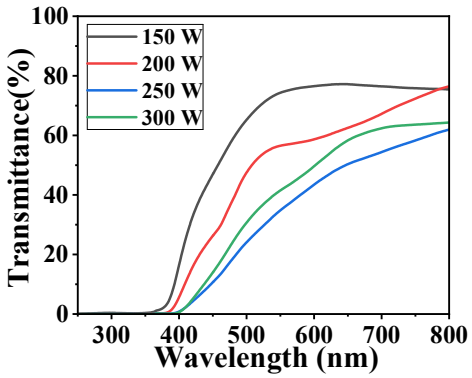
本計畫執行可從圖七觀察到以下現象：

在濺鍍功率設定為 150W 時，薄膜達到了最高的光穿透率，約為 78%，且吸收邊界位於紫外光譜中的約 350nm，顯示出此功率下薄膜的光學品質優異，適合用於紫外光偵測器的應用。該薄膜在波長低於 350nm 的光譜範圍內具備良好的吸收能力。

當濺鍍功率提高至 200W 時，儘管 XRD 分析顯示薄膜的晶體結構峰值有所增加，這可能表示薄膜厚度與表面粗糙度均有所提升，但其光穿透率相較於 150W 時有所下降。這可能是由於薄膜表面粗糙度的增加，導致了光的散射和吸收增加，從而不利於可見光的穿透。

隨著濺鍍功率進一步提升至 250W 和 300W，薄膜中開始出現雜質 CuO，並且觀察到吸收邊界出現紅移現象。紅移是指吸收邊界向長波長方向的移動，這通常與薄膜內部的電子結構變化以及雜質 CuO 的形成有關，因此降低了氧化物半導體薄膜在可見光區域的穿透度。

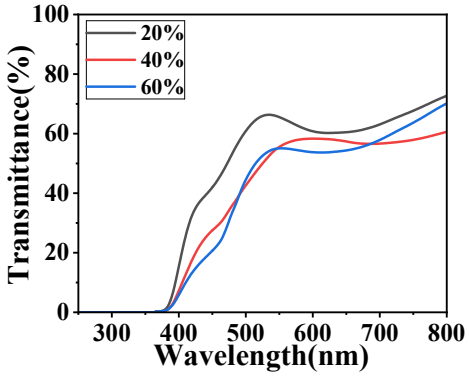
綜合來看，為了獲得高透明度的 $CuCrO_2$ 薄膜，適當的濺鍍功率控制是至關重要的。由量測結果可知採用濺鍍功率 150W 為本計畫製作高透明度薄膜最佳條件，而更高的濺鍍功率可能會因為雜質增加和結構變化而導致不利的光學特性。



圖七、不同濺鍍功率下 $CuCrO_2$ 樣品之穿透光譜圖
(a)150 W (b)200 W (c)250 W (d)300 W

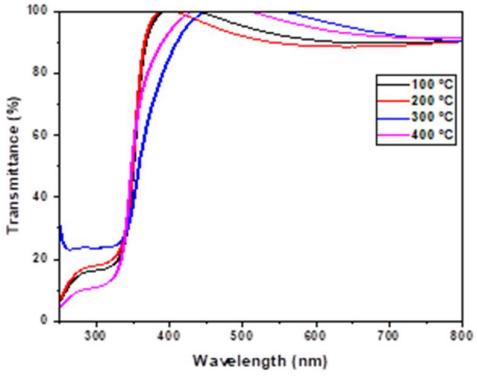
另外，從分析氧氣流量對樣品的影響中，我們可以觀察到，隨著氧氣流量的增加，薄膜內形成了更多的氧化物雜質，特別是 CuO 和 $CuCr_2O_4$。這些雜質的形成主要是由於氧氣與銅的過量反應所致，其中我們尤其關注 CuO 晶相的形成，因為其可見光吸收範圍約為 1.2eV [3]，相較於 $CuCrO_2$ 的吸收範圍顯著較低，這將導致薄膜的整體光穿透率降低，進而影響薄膜的光學品質。

根據圖八中的穿透光譜顯示，當氧氣比例為 20%時，薄膜展示了最高的穿透率。說明在較低的氧氣流量下，雜質的形成受到抑制，從而保持了較高的透明度。然而，當氧氣流量增加至 60%時，薄膜的整體透光度顯著降低，這顯示出較高的氧氣流量促進了更多雜質的形成，進一步降低了薄膜的光學品質。



圖八、不同氧氣流量下 $CuCrO_2$ 樣品之穿透光譜圖
(a)20% (b)40% (c)60%

我們也針對了 AZO 薄膜進行不同溫度下的紫外光穿透性量測，以確保它的高透明度。我們可以得知在退火後，由於晶界散射的減少，可以改善 AZO 薄膜的性能。從圖九中可以發現 AZO 擁有非常高的穿透度(90%)。



圖九、不同濺鍍溫度下 AZO 樣品之穿透光譜圖
(a) 100℃ (b) 200℃ (c)300℃ (d)400℃

3.4 霍爾量測

在本研究中，我們針對 $CuCrO_2$ 薄膜進行了詳細的電性分析，並使用霍爾效應測量探討了不同濺鍍功率、氧氣流量和製程壓力對薄膜電性的影響。

根據表一的薄膜電性分析結果，當濺鍍功率設定為 150W 時，薄膜展現出最佳的電性表現，具有最低的電阻值 11.93 ohm-cm，以及最高的載子濃度達到 3.95×10^{18} cm^{-3}。這說明在 150W 的濺鍍功率下，薄膜的雜質含量極低，主要由 $CuCrO_2$ 組成，且未受到額外的 CuO 等不希望出現的物質的影響。

然而，隨著濺鍍功率提升至 250W 和 300W，薄膜中開始出現 CuO 雜質，這對薄膜的電性產生了顯著的不利影響。已知 CuO 薄膜的電阻約為 10^4 ohm-cm，因此在高濺鍍功率條件下，薄膜的電阻顯著增加，分別達到 30.45 ohm-cm 和 61.87 ohm-cm，這說明了材料中 CuO 晶相的形成，顯著影響了半導體薄膜的導電性。

Sample	Type	Resistivity (ohm-cm)	Mobility (Cm^2/Vs)	Carrier Concentration (Cm^{-3})
150W	P	11.93	1.93	3.95×10^{18}
200W	P	12.46	1.83	2.87×10^{18}
250W	P	30.45	0.99	6.80×10^{17}
300W	P	61.87	0.91	9.14×10^{17}

表一、不同濺鍍功率所量測的霍爾電性。

在計畫執行過程中，我們針對不同氧氣流量條件下的 $CuCrO_2$薄膜進行了詳細的電性分析，並獲得了相關的電特性數據，如表二所示。從研究結果中可見，氧氣流量對薄膜電阻具有顯著影響。

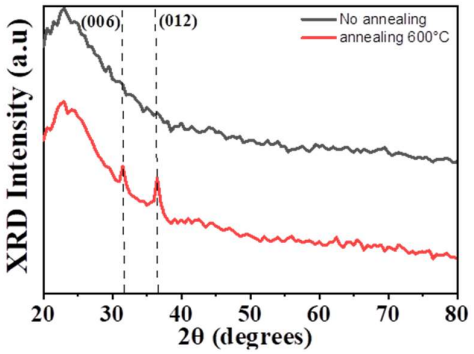
當氧氣流量增加至 60%時，由於過多的氧氣促進了更多氧化物如 CuO 和 $CuCr_2O_4$的形成，導致薄膜電阻顯著上升，達到 12.7 ohm-cm。這種效應很可能是由於 CuO 和 $CuCr_2O_4$的導電性質較差，它們在 $CuCrO_2$薄膜中扮演了載子散射中心，從而降低了載子的傳導率並增加了薄膜的電阻。

相較之下，在氧氣流量僅為 20%的環境中成長的薄膜顯示出更優異的電性，具有較低的電阻：3.0 ohm-cm 以及較高的載子濃度 3.0×10^{19} cm^{-3}。因此，研究結果顯示，在較低氧氣比例的濺鍍環境中，有利於降低薄膜的電阻，從而提升薄膜的電性。

Sample	Type	Resistivity (ohm-cm)	Mobility (cm^2/Vs)	Carrier concentration(cm^{-3})
20%	P	3.0	0.6	3.0×10^{19}
40%	P	4.7	1.8	3.6×10^{18}
60%	P	12.7	2.4	2.5×10^{18}

表二、不同氧氣流量所量測的 $CuCr_2O_4$薄膜霍爾電性。

另外，從不同退火溫度對氧化物薄膜結晶特性的研究分析實驗結果中可以得知，無退火處理與退火溫度為 600℃的樣品在 XRD 分析中展現了顯著的差異。正如圖十所示，在退火溫度為 600℃的樣品中，明顯觀察到了(006)和(012)的 XRD 峰值，而無退火處理的樣品則完全沒有晶相的出現，呈現非晶薄膜。這些結果證實，高溫退火有助於 $CuCrO_2$晶相的形成與成長。



圖十、無退火及於溫度為 600℃中退火之 $CuCrO_2$ 樣品之 XRD 圖

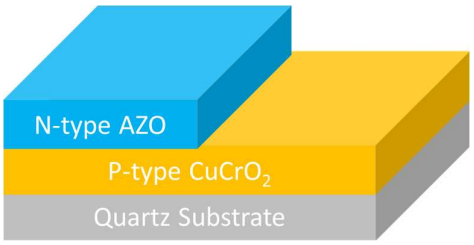
從 UV-VIS-NIR 穿透吸收譜中也可以看出退火與否對薄膜透光度的顯著影響。如圖十一所示，退火溫度為 600℃的樣品顯示出超過 80%的高穿透度，而未經退火處理的樣品則相對不透明。此結果與其他研究文獻中的報告相符[4-5]，因此本計畫執行使用 600℃的退火溫度，可獲得最佳品質的 $CuCrO_2$薄膜。

圖十一、無退火及於溫度為 600℃中退火之 $CuCrO_2$ 樣品之 UV 穿透吸收圖

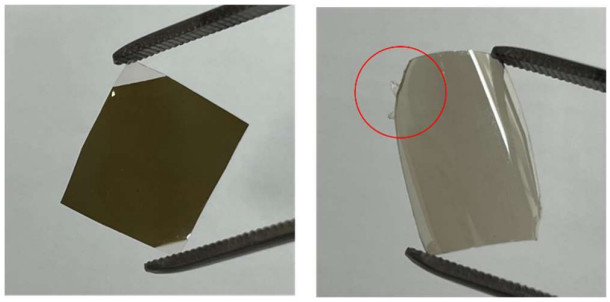
3.5 元件製作方法

本計畫中所提出的透明紫外光偵測器元件結構，如圖十二所示，其中 AZO/$CuCrO_2$所形成的 P-N 異質界面將使用 RF 濺鍍系統進行濺鍍製造。本計畫選擇 PET 基板，因其具有可撓性、防潮性以及高於 85%的透光率。然而，由於 $CuCrO_2$薄膜需要在 600℃的高溫環境下進行退火，才能提升薄膜的結晶品質，但 PET 基板因為低熱阻的特性，無法承受此高溫退火處理。正如圖十三所示，在高溫下進行退火處理會導致 PET 基板熔化並產生表面熱損傷。因此，為了確保薄膜的光電性質，改採用石英作為元件結構的基板。

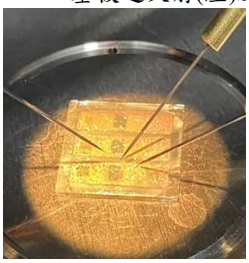
元件製作首先利用異丙醇和丙酮對石英基板進行必要的化學清潔。接著，將 P 型 $CuCrO_2$薄膜沉積於基板上方，並在 600℃下進行退火，以提升薄膜的結晶品質。之後，將基板放置於客製的金屬濺鍍遮罩（Shadow Mask）上方，進行 N 型 AZO 薄膜的沉積，以形成特定的元件結構。最後，對元件進行 400℃的退火處理，以完成整個製作流程。



圖十二、元件示意圖

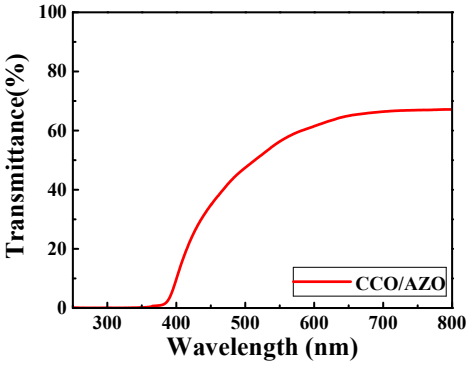


圖十三、PET 基板退火前(左)及後(右)



圖十四、Quartz substrate/ $CuCrO_2$/AZO 元件之元件 I-V 量測圖

為驗證本計畫所製備之紫外光偵測器的有效性，將採用檢測儀器進行一系列特性分析，包括利用 UV-VIS-NIR 穿透光譜量測元件整體穿透度，並由圖十五觀察到元件在可見光波長範圍內的穿透率達 66%。此外，使用了電流-電壓量測儀來測量元件的電流，以評估偵測器在無光照條件下的基礎電流特性。

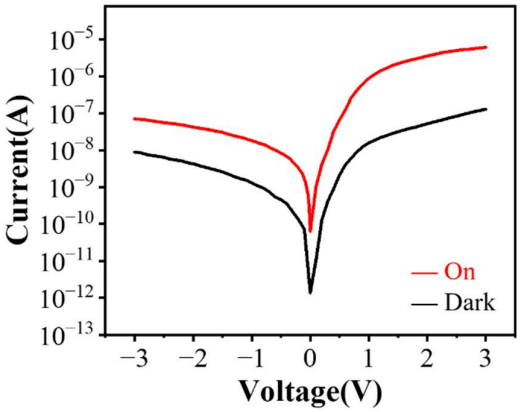


圖十五、石英基板/$CuCrO_2$/AZO 元件之 UV-VIS-NIR 穿透光譜

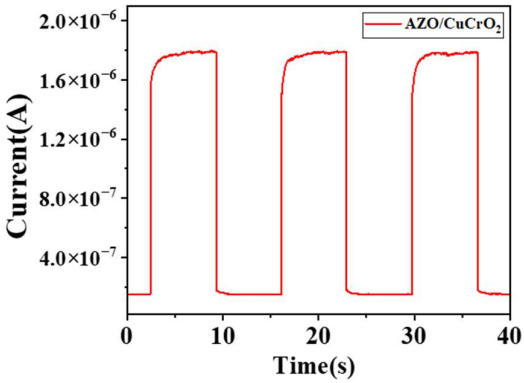
接著，我們將使用紫外光燈來測量光電流，以直接顯示偵測器對紫外光的響應能力，即在光照條件下的電流變化。透過比較暗電流與光電流的差異，可以有效評估偵測器的靈敏度及光響應特性。

如圖十六所示，我們測量了元件的電流-電壓（I-V）特性，並比較了在無 UV 光照和 365nm UV LED 光源下的性能。結果顯示，電流開關比（I on/off）明顯提升，證實了 P-N 介面的存在。此外，我們發現當裝置暴露在紫外光光源下，光電流大幅增加，有利於電子與電洞對分離成自由載子，進一步提升偵測器的性能。

從圖十六中可以看到，在偏壓為 1V 的情況下，電流密度從 2.31×10^{-8}A 上升至 6.12×10^{-6}A。圖十七則顯示了元件的響應時間，該元件具有約 1.6 秒的上升時間和 1.5 秒的衰減時間，這些元件操作特性結果說明了本計畫製備紫外光偵測器的優越元件特性。



圖十六、石英基板/$CuCrO_2$/AZO 元件之 I-V 量測結果



圖十七、石英基板/$CuCrO_2$/AZO 元件之光響應圖

IV. 結論

在本計畫研究，我們深入探討了濺鍍參數對 Cu 摻雜 CrO_2薄膜的結構與光學性能的影響。透過實驗結果，我們觀察到濺鍍功率與氧氣流量對薄膜品質的顯著影響。當濺鍍功率設定為 150W、氧氣流量為 20%時，$CuCrO_2$半導體薄膜展現出(006)的晶體擇優取向。此一晶體取向為薄膜帶來了優異的光電特性，包括 3.0 Ω·cm 的低電阻率和 77%的可見光穿透率。

元件量測特性結果說明，$CuCrO_2$和 AZO 薄膜確實具有良好的透明度和優異的光電特性，使其在紫外光偵測器的製作中展現出重要的應用潛力。在 I-V 測量結果中，我們比較了元件在有紫外光照射與無紫外光照射情況下的性能差異，觀察到在正逆偏壓下有顯著的變化，進一步證實了 P-N 介面的特性。在 1V 偏壓下，元件電流密度從 6.43×10^{-11} A 遽增至 6.12×10^{-6} A，顯示出約 10^4 的開/關比，證明了該元件作為紫外光電偵測器的優秀元件操作特性。

參考文獻

[1] Wang, Jinmei, et al. "Preparation of delafossite-type CuCrO2 films by sol－gel method." Journal of Alloys and Compounds 509.18 (2011): 5715-5719

[2] Zhou, Shu, et al. "Hydrothermal synthesis and characterization of CuCrO2 laminar nanocrystals." Journal of Crystal Growth 310.24 (2008): 5375-5379.

[3] Kar, J. P., et al. "Influence of sputtering pressure on morphological, mechanical and electrical properties of Al-doped ZnO films." Solid-State Electronics 54.11 (2010): 1447-1450.

[4] Ruei-Sung Yun , Chorng-Pyng Tasi. “Structure, composition and properties of p-type CuCrO2 thin films” . Received 25 October 2013; received in revised form 20 December 2013; accepted 3 January 2014.

[5] Sreeram Sundaresh. Akash Hari Bharath. K.b. Sundaram.” Effect of Annealing Temperature on Radio Frequency Sputtered p-Type Delafossite Copper Chromium Oxide (CuCrO2) Thin Films and Investigation of Diode Characteristics Forming Transparent pn-Heterojunction” . Journal of Applied Physics, Volume 128, Issue 14, article id.140902.

使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台培育前瞻原子科學人才 (II-III)

Using the radiation verification platform of semiconductor devices and related circuits for space environment to cultivate and educate the talents of atomic science (II-III)

計畫編號：NSTC 112-NU-E-002-002-NU
計畫主持人：李佳翰
e-mail：jiahan@ntu.edu.tw
計畫共同主持人：陳信樹、朱旭新
計畫參與人員：洪建平、黃羿誌、許宏維、吳彥廷、劉晏妤、邱昱翰、田 鈞、陳品涵、王政輝、王志中、蔡孟珊、吳子瑄、傅鈺淇、王佩茵、吳芷瑩
執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系
共同執行單位：臺灣大學電子工程學研究所、中央大學物理學系

摘要

本計畫為該研究計畫之第二年的研究成果，目的為達成使用太空環境下之半導體元件及相關電路輻射驗證平台，並透過研究加以培育前瞻原子科學人才。本年度的研究主要專注在增進並改善高能脈衝雷射對半導體元件之單事件效應的實驗架構，以及質子束對半導體元件產生之單事件效應的實驗測試。我們完成了經過改進之雷射實驗架設，該架設可用來量測晶片太空單事件效應的架構，在我們的實驗結果中顯示了利用雷射照射晶片確實能量測到產生之單事件效應，證實架設雷射測試電路輻射驗證平台確實可行。除進行相關實驗之外，本計畫也善用機會，和相關研究團隊討論，參訪不同的研究設施，今年並有國內和國外研究團隊參訪我們實驗室架構之利用雷射的電路輻射驗證平台並進行學術交流，多次的實驗、參訪和討論協助訓練原子科學人才。

關鍵詞：單事件效應、短脈衝雷射、抗輻射、具幅射容忍度、晶片

Abstract

This project has involved nearly two years of research, aiming to establish a radiation verification platform for semiconductor devices and related circuits in space environments, while also cultivating forward-looking atomic science talents through the research. This year's research primarily focuses on enhancing and improving the experimental framework for single event effects of high-energy pulsed lasers on semiconductor devices, as well as experimental tests of single event effects caused by proton beams on semiconductor devices. We have completed the improved laser experimental setup, which can be used to measure the single event effects of chips in space environments. Our experimental results show that laser irradiation on the chips can indeed measure the resulting single event effects, confirming the feasibility of setting up a laser test circuit radiation verification platform. In addition to conducting related experiments, this project also takes advantage of opportunities to discuss with relevant research teams and visit different research facilities. This year, both domestic and international research teams have visited our laboratory's laser circuit radiation verification platform for academic exchanges. Multiple experiments, visits, and discussions have assisted in training talents in atomic science.

Keywords: Single Event Effects, short-pulse laser, Radiation Hardness, Radiation Tolerance, Integrated Circuits

I. 前言

近幾年已經見證了太空產業的發展和太空探索領域在國際議題的重要地位。太空科技的演進和各國在太空領域方面的研討，為我們提供了更多學習的機會。這些年許多國家都已經在太空探索研究取得了新成就，如美國 NASA 持續推進的阿提米絲計畫，歐洲太空總署籌備木星探測計畫，以及中國天宮太空站任務等。這些成果不僅拓寬了我們對宇宙的認識，也突顯了太空技術在未來的關鍵角色。在過去的一年的研究中，隨著太空領域的迅速擴張，我們認為研究方向應該更加關注新的挑戰和需求。在這樣的背景下，我們想進一步探討如何透過原子科學的研究與技術創新，促進太空探索的更大發展。這是個充滿挑戰和機遇的領域，我們期待通過深入的研究，為未來太空科技的發展提供有價值的洞見。

II. 主要內容

本計畫在這兩年已投入了許多時間、資源和人力在學習和研究上，致力於培育具有光學及前瞻原子科學知識的優秀人才，主要研究的方向包括進行雷射驗證測試相關之模擬，質子束及高能粒子之單事件效應或總游離劑量效應的實驗和探討，建構短脈衝雷射驗證單事件效應之實驗架設，以及研討短脈衝雷射與質子束及高能粒子對半導體元件單事件效應的等效模型，此外，為了訓練和培養人才之能力及視野，我們也積極參與不同研討、

實驗參訪，還有與其他單位之研究人員的學術討論跟交流。

III. 結果與討論

1. 雷射光在電晶體多層材料中之相關模擬

我們經過相關文獻的研討後，已有研究發現雷射光束在半導體材料中的傳播[1]、[2]、表面反射以及線性和非線性（雙光子）吸收[3]，這些效應決定了半導體材料中雷射光產生的電荷軌跡的性質。隨著距離增加，雷射光的縱向輪廓呈指數下降，而高能粒子的強度則逐漸增加，直到達到最大值，即粒子的布拉格峰，然後再迅速下降至零[4]、[5]。儘管雷射光和高能粒子在產生物質中的電荷軌跡的機制不同，也有研究指出認為脈衝雷射光仍然是評估單一事件效應的有效工具[6]。本計畫使用時域有限差分法 (finite-difference time-domain , FDTD) 求解 Maxwell equation，來處理電磁波輻射的傳遞、反射和散射等問題，本研究以脈衝雷射照射晶片敏感節點的模型進行建構，目標期望通過 DUT 受到電磁輻射的模擬結果，了解電場以及磁場在該 DUT 內的分布情形，來輔助分析雷射光在電晶體多層材料實際實驗時的雷射光照射情形，此模擬方法可提供我們對電晶體內受到脈衝雷射照射時所造成的電荷分布及動態能有更清楚的理解。

2. 質子束或高能粒子對半導體元件或電路之單事件效應或總游離劑量效應之實驗規劃

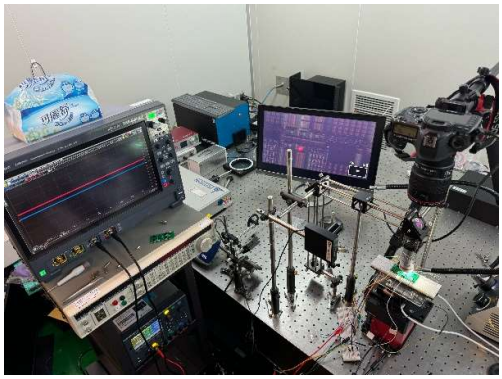
本團隊持續在長庚醫院放射治療室中使用質子射束設備進行實驗，完成規劃中的質子 (proton) 束的單事件效應實驗，並且再優化半導體元件和電路之設備架設以及實驗，如圖一所示為我們在長庚進行實驗時所拍照的實驗記錄圖。



圖一、質子束實驗之實驗架設

3. 短脈衝雷射對半導體元件及電路單事件效應之實驗

本團隊將高能短脈衝雷射對半導體元件或電路之單事件效應之實驗持續進行設計和優化，比如半導體元件之測試平台的自動控制化，使得實驗測試能夠更精準的控制，而由於高能脈衝雷射的能量太強可能對半導體元件產生傷害，我們還在光路中加入了濾光器，來做到對高能脈衝雷射的能量衰減控制，圖二為單事件效應雷射實驗之光路架設圖。



圖二、單事件效應雷射實驗之光路架設圖。

4. 高能脈衝雷射與質子束或高能粒子對半導體元件或電路單事件效應之等效模型假設

為了更深入的理解高能脈衝雷射對電路單事件效應之影響，我們透過時域有限差分法的分析可以模擬雷射照射電路下的電荷分布和電場強度，此外，我們藉由質子束實驗時的電路照射和高能脈衝雷射對電路比對，可以分析出電路相關敏感節點位置。在單事件效應（SEE）實驗的研究探討中，Chugg 等人使用脈衝雷射，並計算了照射到待測物體上的線性能量轉移（LET），然後將其結果與重離子測試數據進行了比對[7]。Weulersse 及其團隊利用不同波長的脈衝雷射進行了單事件瞬態（Single Event Transient , SET）實驗，針對運算放大器電路進行研究，並確定了敏感節點的深度。他們的實驗結果與重離子實驗數據相近[8]。Pouget 等人進行了理論研究，探討了在單事件效應測試中定義等效雷射光線性能量轉移（linear energy transfer , LET）的可能性。他們提出了基 RPP 模型的等效雷射光線性能量轉移的一般表達式，該表達式用於說明非線性吸收模型的效果[9]。在針對單事件瞬態的實驗中，Ildefonso 等人提出了一種方法，即先記錄不同脈衝能量對待測元件所產生的瞬態電流值，然後將其與不同能量的重離子所產生的相同結果進行對應，從而實現等效的效果[10]。Ren 等人進行了脈衝雷射 和重離子實驗，以研究在 DC/DC 脈寬調制控制器上使用波長為 750 nm、800 nm、850 nm 和 920 nm 的等效雷射光線性能量轉移。[11]。Pickel 也研究了在高能粒子測試中應用 RPP 模型來計算由高能粒子產生的電荷量。他的結論表明，使用該模型可以大致預測單一事件瞬態（SEU）的發生[12]。Mavritskii 等人提出了一種利用局部雷射光照射的技術，用於測試航天器上的半導體元件輻射特性。這種方法使用稍微散焦的雷射光束，

可以穿透多層金屬和多晶矽等材料，特別適用於測試現代超大規模集成電路（VLSI）[13]。因此，相關使用高能脈 衝雷射對電路產生之單事件效應之等效相關模型可透過逐步數據的累積加已完成，本年度計畫已經收集部分的實驗數據，現正透過少量的數據逐步建構相對應等效模型，並預計在第三年度計畫中持續進行驗證相關模型可靠性。

5. 培育前瞻原子科學人才

本研究計畫以培育前瞻原子科學人才為目標，因此除了研究並執行以上本研究計畫的內容，本研究計畫預計每年還會規畫相關領域之參訪，認識和探索更多原子能相關的設備及工程應用的可能性，藉此讓前瞻原子能科技人才對於應用於未來科技之原子科學有更深的了解，整理如下表所示。此外除了我們進行實驗、參訪、和研討外，也有邀請其他研究團隊參訪我們建構的雷射照射實驗，並與我們團隊進行相關交流，透過國內與國際間的學術交流，讓我們更能推進研究進度也達到此計畫培育原子能科技人才之目的。

日期	實驗/參訪/討論	參加人員
112/01/16~ 112/01/18	中央大學強場物理與超快技術實驗室進行實驗	台大數位同學和中央人員
112/05/31~ 112/06/01	新加坡理工大學參訪 ZES 雷射技術	台大數位人員
112/07/3	國家太空中心參訪	台大數位人員
112/07/4~ 112/07/5 112/08/26 112/10/27 112/12/12	長庚質子照射實驗	台大數位人員
112/08/23	台灣半導體研究中心張大強博士率隊參訪台大架構應用雷射測試相關電路輻射驗證平台	台灣半導體研究中心 4 位人員、台大數位人員。
112/08/31	中央大學強場物理與超快技術實驗室 100-TW 雷射系統研究設施參訪	核安會李綺思組長帶隊、台大清大多位人員
112/10/23	「台積創新館」參訪	核安會李綺思組長帶隊、台大清大多位人員
112/10/30~ 112/11/03	參與 TASTI(台灣太空國際年會)研討會	台大數位人員
112/11/15	參訪太空中心	台大工程科學及海洋工程學系趙修武主任帶隊、台大多位教授和助教
112/11/20~ 112/11/23	南洋理工大學雷射照射實驗	台大數位人員
112/11/22	參與太空中心舉辦之抗輻射電子元件市場調研專家座談	產學研多位人員
112/12/6	瑞典 Linköpings universitet 參訪台大架構應用雷射測試相 關電路輻射驗證平台	瑞典 Linköpings universitet 三位教授、台大數位人員
112/12/13	參訪國家原子能科技研究院同位素所 052 館」	核安會帶隊、台大清大多位人員

表一、2023 年度執行計畫之相關實驗和參訪

6. 預計可能遭遇之困難及解決途徑

本計畫為執行第二年度之人才培訓，相關實驗、參訪都讓我們在培訓原子科學人才有所收穫。在計畫執行過程中，對於雷射和質子束相關實驗已經有很不錯的成果，但在建構等效模型方面，雖然已有初步結果，但由於需要較多實驗數據的累積才可驗證模型的可靠度，規畫在第三年執行計畫期間，能夠透過更多實驗數據的支持和分析，來建構較完整的等效 LET 模型。

IV. 結論

本計畫目前的主要成果在改進使用高能脈衝雷射來進行半導體電路之單事件效應的實驗操作流程便利性，本團隊目前優化高能雷射脈衝實驗之流程，針對實驗過程的參數和取樣的流程排序順暢化，並透過電子量測設備紀錄量測實驗之資訊，用以提供後續數據分析，目前雷射平台可進行基本的照射量測，並可透過控制平台的移動來尋找電路之敏感節點，有助於修正電路的抗輻射性能。本年度除了接續前一年度利用質子束對半導體元件或電路單事件效應與高能脈衝雷射實驗比較之外，今年度，也針對高能脈衝雷射實驗進行更多的實驗，並收集更多之實驗數據，將所得到的實驗數據進行互相對比，將能提供利用高能脈衝雷射於抗輻射晶片設計之寶貴的電路設計規畫，並透過電路模型的重設計，能有更準確的等效模型可供評估。本計畫除了研究之外，也透過多次不同研究實驗機構的參訪，來提升參與本計畫和有興趣輻射及原子能科技之學生的研究興趣，在計畫執行期間，參觀相關粒子束設施與環境，並配合核能安全委員會參 與相關會議討論及參訪重要研究設備，在透過研究實驗，參訪和會議的交流中，逐步達到本計畫之培訓原子能科技人才的目的。

參考文獻

[1] Melinger, J. S., et al. "Critical evaluation of the pulsed laser method for single event effects testing and fundamental studies." IEEE Transactions on Nuclear Science 41.6 (1994): 2574-2584.

[2] Melinger, J. S., McMorrow, D., Campbell, A. B., Buchner, S., Tran, L. H., Knudson, A. R., & Curtice, W. R. (1998). Pulsed laser-induced single event upset and charge collection measurements as a function of optical penetration depth. Journal of applied physics, 84(2), 690-703.

[3] McMorrow, Dale, et al. "Subbandgap laser-induced single event effects: Carrier generation via two-photon absorption." IEEE Transactions on Nuclear Science 49.6 (2002): 3002-3008.

[4] Gossett, C., Barrie W. Hughlock, and Allan H. Johnston. "Laser simulation of single-particle effects." IEEE transactions on nuclear science 39.6 (1992): 1647-1653.

[5] Johnston, Allan H. "Charge generation and collection in pn junctions excited with pulsed infrared lasers." IEEE Transactions on Nuclear Science 40.6 (1993): 1694-1702.

[6] Buchner, Stephen P., et al. "Pulsed-laser testing for single-event effects investigations." IEEE Transactions on Nuclear Science 60.3 (2013): 1852-1875.

[7] Chugg, A. M., Burnell, A. J., Moutrie, M. J., Jones, R., & Harboe-Sørensen, R. (2007). Laser SEE sensitivity mapping of SRAM cells. IEEE Transactions on Nuclear Science, 54(6), 2106-2112.

[8] Weulersse, C., Bezerra, F., Miller, F., Carriere, T., Buard, N., & Falo, W. (2008). Probing SET sensitive volumes in linear devices using focused laser beam at different wavelengths. IEEE Transactions on Nuclear Science, 55(4), 2007-2012.

[9] Pouget, Vincent, et al. "Theoretical investigation of an equivalent laser LET." Microelectronics Reliability 41.9-10 (2001): 1513-1518.

[10] ldefonso, A., Fleetwood, Z. E., Tzintzarov, G. N., Hales, J. M., Nergui, D., Frounchi, M., & Cressler, J. D. (2018). Optimizing optical parameters to facilitate correlation of laser-and heavy-ion-induced single-event transients in SiGe HBTs. IEEE Transactions on Nuclear Science, 66(1), 359-367.

[11] Ren, Yi, et al. "Correlation of heavy-ion and laser testing on a DC/DC PWM controller." Journal of Electronic Testing 29.4 (2013): 609-616.

[12] Pickel, J. C. (1996). Single-event effects rate prediction. IEEE Transactions on Nuclear Science, 43(2), 483-495.

[13] Mavritskii, Oleg B., et al. "The laser-only single-event effects test method for space electronics based on ultrashort-pulsed-laser 'local irradiation'." Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XVIII. Vol. 10522. International Society for Optics and Photonics, 2018.

具半導體準線上整合能力之 X 光技術開發
Developing Semi-online Integration of X-ray Techniques for Semiconductor Characterizations

計畫編號：NSTC 112-NU -E-A49-001 -NU
計畫主持人：曾院介
e-mail：yctseng1978@nycu.edu.tw
執行單位：國立陽明交通大學材料科學與工程學系所

摘要

鐵電材料被譽為下一代記憶體的有力候選者，其中的氧化鉿鋯($Hf_{1-x}Zr_xO_2$, HZO)尤為突出，能在厚度十奈米以下展現出強大的鐵電特性。然而，儘管 HZO 具有微縮的潛力，在如此小的原子尺度下，材料原子排列的結構或是化學鍵結狀態的變化，對會對電子元件造成顯著的影響。所以透過 X 光分析設計與整合來解析材料在原子尺度下的特性至關重要。

通過 metal-ferroelectric-metal (MFM)電容結構對 HZO 的厚度微縮進行了系統性的調查，通過選用不同的電極材料、優化製程參數以及原位電漿處理，實現了更薄的 HZO 鐵電薄膜。對 HZO 進行氬氣電漿處理，不僅提升了 HZO 薄膜的結晶性，還減少了薄膜內部的氧空缺含量。並於下電極上層積不同種子層(TiN、TiO_2)及種子層厚度變更(1nm、2nm、3nm)來實現 HZO 結晶優選取向。本研究使用同步輻射 X 光進行材料分析，探討隨著製程演變，HZO 的微觀和宏觀特性之間的變化與關聯性。

關鍵詞：氧化鉿鋯、電漿處理、優選取向、同步輻射

Abstract

Ferroelectric materials are regarded as strong candidates for next-generation memory devices, with hafnium zirconium oxide ($Hf_{1-x}Zr_xO_2$, HZO) being particularly prominent due to its robust ferroelectric properties even at thicknesses below ten nanometers. However, despite HZO's potential for scaling, the structural arrangement of atoms or changes in the chemical bonding state at such small atomic scales can significantly impact the performance of electronic devices. Therefore, utilizing X-ray analysis for design and integration to elucidate the characteristics of the material at the atomic scale is crucial.

In this study, we systematically investigate the thickness reduction of HZO film. Thinner HZO was achieved by using different electrode materials, optimizing process parameters, and applying interfacial plasma treatments. Argon plasma treatment during HZO deposit not only enhances the crystallinity of HZO but also improves the oxygen vacancy within the films. Otherwise, different seed layers (TiN, TiO_2) were stacked on the lower electrode and the thickness of the seed layer was changed (1nm, 2nm, 3nm) to achieve the optimal orientation of the HZO crystal. Material analysis was performed using synchrotron radiation Xray to observe the changes and relationship between the microscopic and macroscopic characteristics of HZO as the process evolves.

Keywords: Hafnium Zirconium oxide,Plasma treatment, preferred orientation, Synchrotron radiation

I. 前言

2011 年發現摻雜氧化鉿基鐵電材料以來 [1]，該材料已成為學術界和工業界的焦點。二氧化鉿（HfO2）作為高介電常數（High-κ）材料，已被廣泛應用於 CMOS 製程中。2020 年的研究表明，氧化鉿基鐵電材料在超薄尺寸（<2 奈米）下仍然展現出鐵電特性 [2]，顯示出其並無微縮的臨界值。然而，在如此小的尺度下，材料表面原子的排列或內部化學鍵結的變化都會對元件性能產生重大影響。因此，通過適當的 X 光分析設計與整合方法來了解材料在原子尺度下的特性，對於後續電子產品品質至關重要。

II. 主要內容

第一部分，探討使用 2D-XRD 來分析氮化鈦或鎢金屬作為上下電極對 7 奈米 HZO 薄膜性質的影響。樣品分為三種：第一種以 TiN 作為上下電極，第二種以 W 作為下電極並以 TiN 作為上電極，第三種以 W 作為上下電極。所有電極厚度均為 50 奈米，W 下電極皆經過氧化處理（使用氧電漿進行 26 秒、20 次的循環進行表面處理）。中間堆疊 7 奈米厚的 HfO_2: ZrO_2=1:1 的 HZO 鐵電層，最後在合成氣體氛圍中於 400°C 退火 60 秒以促進 HZO 結晶。

接下來我們利用 XPS 來分析當 HZO 薄膜厚度由 7 奈米縮減至 5 奈米時所面臨的挑戰及調控氧空缺含量的影響。樣品分為六種：使用 TiN 作為上電極、W 作為下電極(TW400、TW500)；使用 W 作為上下電極(WW400、WW500)；先沉積 W 作為下電極，並在 ALD 腔體中使用氧電漿進行 26 秒、20 次循環的表面處理以形成部分氧化層(WOx)，再以 W 作為上電極(WO400、WO500)。所有電極金屬厚度均為 50 奈米，中間堆疊 5 奈米厚的 HfO_2: ZrO_2=1:1 的 HZO 鐵電層，最後在合成氣體氛圍下於 400°C 及 500°C 退火 60 秒。

最後將 HZO 薄膜厚度縮減至 4 奈米，並在沉積過程中使用氬氣（Ar）電漿處理，同時運用 XPS 分析化學鍵結以確認 Ar 電漿能否在沉積過程中提供能量促進 HZO 結晶。樣品分為三種：第一種為標準樣品（STD），以 HfO_2: ZrO =1:1 堆疊 4 奈米厚的 HZO；第二種和第三種同樣以 HfO_2: ZrO_2=1:1 沉積 HZO，但在每次 HZO 沉積循環（ZrO_2/HfO_2）中，分別使用功率 280 W、流量 100 sccm 的 Ar 電漿進行 6 秒（P6）及 12 秒（P12）的表面

處理，直到堆疊完 4 奈米的 HZO 薄膜。所有樣品均使用 25 奈米厚的 W 作為上下電極，並在合成氣體氛圍下於 450°C 退火 60 秒。

第二部分，藉由 in-plane XRD、GI-XRD 對提升晶粒優選取向後之樣品作微觀觀察。樣品製備部分；於下電極上以原子層積(ALD)層積不同種子層氮化鈦(TiN)及二氧化鈦(TiO_2)，經過 SPM、DHF、SC1 以及 SC2 的交互浸泡，確保基板的表面沒有氧化層或是有機物汙染等等，而後分成兩個試片，第一個試片進行原子層沉積(ALD)沉積 2 奈米的氮化鈦(TiN)，而第二個試片進行原子層沉積(ALD)沉積 2 奈米的二氧化鈦(TiO_2)做為不同的種子層，而後兩個試片都利用原子層沉積(ALD)進行 HZO 鐵電層的沉積，再利用物理氣相沉積(PVD)進行 50 奈米氮化鈦(TiN)的沉積，做為上電極，最後將試片進行快速升溫熱退火 (RTA)，在合成氣體(Forming gas）的氛圍下進行 400 度 C、60 秒的退火製程，至此完成鐵電薄膜的製作。

上述不同種子層的樣品經 XRD 圖譜判別，得知 TiN 為種子層將具有較佳優選取向，基於上述選擇 TiN 作為下電極之種子層進行種子層厚度改變實驗計畫，同上述步驟前處理後，於下電極上分別長出 1nm、2nm、3nm 之 TiN 並完成後續 HZO 層及上電極並通過退火製程，至此完成樣品樣品製備，進行 in-plane XRD、GI-XRD 觀測。

III. 結果與討論

第一部分，通過 2D-XRD 以及 XPS 來分析不同的電極材料和製程參數對於 HZO 鐵電薄膜特性的變化以及影響。

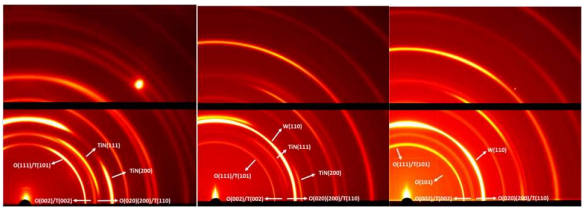


圖 3.1 TiN/HZO/TiN 與 TiN/HZO/W 與 W/HZO/W 之 2D-XRD 圖

從圖中可以發現利用 2D-XRD 可以觀察到電極金屬與 7 奈米 HZO 的結晶狀態。繞射環的出現表明電極金屬與 HZO 均為多晶，並且其強度分布可用來判斷結晶是否具有特定的紋理。如圖 3.1 中左圖和中圖所示，TiN(111)與 TiN(200)的繞射環並不連續，這表明 TiN 晶體具有偏好的結晶方向。左圖顯示 HZO 的訊號強度分布與 TiN 的結晶方向相似，O(111)對應 TiN(111)、O{200}對應 TiN(200)，這表示 TiN 電極或許可以控制 HZO 的結晶方向。另外，使用 W 作為下電極時，從圖 3.1 中的中圖和右圖可以看到 W 與 HZO 的繞射環非常完整，沒有顯示出特定的紋理，這意味著結晶方向分布較為隨機且均勻。三張圖都可以明顯地觀察到 HZO 的繞射環，表明 7 奈米厚的 HZO 無論是使用 TiN 還是 W 作為電極，都能達到良好的結晶效果。此外，圖 3.1 中右圖使用 W 作為上下電極時，能夠看到淡淡的 O(101)繞射強度，雖然不像使用 TiN 那樣能使 HZO 產生明顯的紋理，但似乎能增強 O 相的生成。這些結果表明， 利用 2D-XRD 可以分析材料的結晶方向和相的形成，是一種非常快速且適當的分析方法。

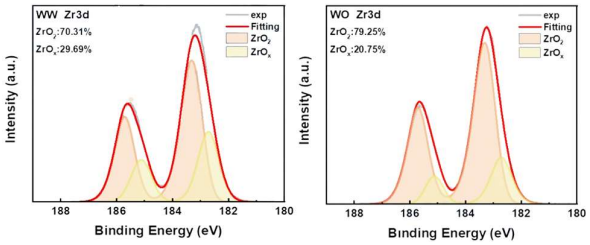


圖 3.2 WW500 樣品 Zr 3d 與 WO500 樣品 Zr 3d 之 XPS 圖譜擬合結果

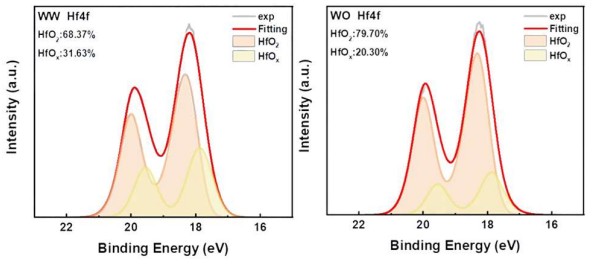


圖 3.3 WW500 樣品 Hf 4f 與 WO500 樣品 Hf 4f 之 XPS 圖譜擬合結果

接下來利用具有表面靈敏特性的 XPS 的分析來測量未經過和經過氧電漿處理的 WW 及 WO 樣品，以確定對下電極進行氧電漿處理能否有效控制 HZO 薄膜中的氧空缺含量。圖 3.2 中展示了 WW500 和 WO500 樣品的 Zr 3d 軌域 XPS 圖譜擬合結果。根據圖譜分析，WW 樣品中完全氧化的 ZrO_2 含量約為 70.31%，未完全氧化的 ZrO_x 含量約為 29.69%。相比之下，WO 樣品中 ZrO_2 的含量約為 79.25%，ZrO_x 的含量約為 20.75%。圖 3.3 顯示了 WW500 和 WO500 樣品的 Hf 4f 軌域 XPS 圖譜擬合結果。WW 樣品中完全氧化的 HfO_2 含量約為 68.37%，而未完全氧化的 HfO_x 含量約為 31.63%；在 WO 樣品中 HfO_2 的含量約為 79.70% ，HfO_x 的含量約為 20.30% ，兩者呈現出相同的趨勢。而這些 XPS 擬合分析結果皆可以看出，WW 樣品中未完全氧化鍵結的比例較高，這表明在未經氧電漿處理的 W 下電極上生長的 HZO 薄膜會產生較多的氧空缺。相較之下，WO 樣品明顯地顯示出 HZO 內部的氧空缺含量有所減少。透過這些結果表明，運用 XPS 可以分析樣品中氧空缺的情況，快速了解樣品化學鍵節的變化。

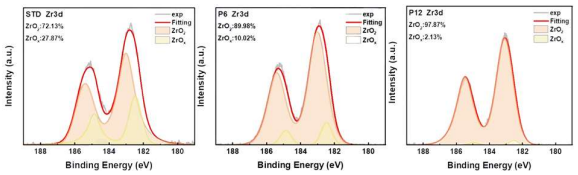


圖 3.4 STD 樣品與 P6 樣品與 P12 樣品 Zr 3d 之 XPS 圖譜擬合結果

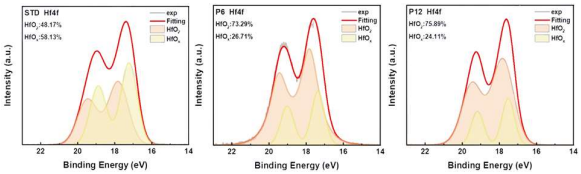


圖 3.5 STD 樣品與 P6 樣品與 P12 樣品 Hf 4f 之 XPS 圖譜擬合結果

繼續使用 XPS 分析了三種 4 奈米電容器的 HZO 鍵結情況，以確認在沉積過程中施加 Ar 電漿是否會對 HZO 薄膜的化學組態造成影響。圖 3.4 展示了 STD、P6 及 P12 的 Zr 3d 軌域 XPS 圖譜擬合結果。未使用 Ar 電漿處理的 STD 樣品中，ZrO_x 含量較高，達到 27.87% 。隨著 Ar 電漿施加時間的增加，ZrO_x 的比例下降至 10.02%，最終減少到 2.13%。圖 3.5 顯示了三種樣品的 Hf4f 軌域 XPS 圖譜擬合結果，與 Zr 3d 的擬合結果呈現相同的趨勢。STD 樣品中，HfOx 含量高達 50% ， 而隨著 Ar 電漿施加時間的增加，該比例下降至 26.71% ，最終減少到 24.11% 。這些結果代表在 HZO 沉積過程中，施加 Ar 電漿的時間越長，HZO 中的 Zr 和 Hf 的氧化程度越高，證明 Ar 電漿處理有助於 HZO 薄膜變得更加緻密，以上的研究結果證明，若非利用 XPS 量測來分析各樣品的化學鍵節情況，不同階段 ALD 沉積過程中施加 Ar 電漿所帶來的優勢是無法被快速發現的。

第二部分，針對不同種子層的試片進行外全反射繞射法進行垂直表面方向之 XRD 分析，也就是下界面是 2 奈米 TiN 作為種子層以及 2 奈米 TiO2 作為種子層的試片，以下以 TiN-seeding 和 TiO2-seeding 分別代表這兩種試片，分析結果如以下圖 3.6 所示，發現到兩種試片最高的峰值都出現在 2θ=30.5°，而 30.5°正是 HZO O 相(111)以及 T 相(101)特徵峰的所在位置，說明兩個試片在垂直表面方向的晶體都有良好的 HZO 晶相存在，而在 2θ=35°的地方具有兩個峰值，其中 2θ=34.7°為 O(200)， 2θ=35.3°為 O(020)以及 O(002)的特徵峰，不論是 TiN-seeding 還是 TiO2-seeding，都可以發現到這兩個峰值的存在，說明在垂直表面方向的 HZO 晶體也存在著 O(200)、O(020)以及 O(002)，而 2θ=37.1°為 TiN(111)的特徵峰，代表著電極的結晶也是良好的，之後，本研究對其進行 scherrer equation 的計算， 分析的結果 TiN-seeding 之晶粒大小約為 20.47 奈米，而 TiO2-seeding 之晶粒大小約為 18.26 奈米，兩個試片的平均晶粒大小並無顯著的差異。

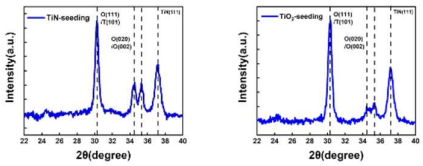


圖 3.6 TiN-seeding 及 TiO2-seeding In-plane XRD 圖譜

而後分析了 TiO2-seeding 和 TiN-seeding 兩種試片的 GI-XRD 結果。圖 3.7 展示了 TiO2-seeding 和 TiN-seeding 試片的 GI-XRD 分析結果。比較圖譜可以發現 TiN-seeding 在 Out-of-plane 方向上具有非常強的優選取向特徵，而在 TiO2-seeding 試片中則未見此現象，推測是因為該試片中的晶粒呈隨機排列所致。

進一步研究中，我們擷取了 γ=75°~90°範圍內的訊號，並將結果呈現在圖 3.7 中。從中可以看到，TiN-seeding 試片在 36°附近有一非常高的峰值，而 TiO2-seeding 試片在 36°處的表現並不明顯。由於 2D-XRD 積分時間較短且探測器為平面，導致量測角度與標準角度存在些許誤差，因此峰值會顯現 36°，仔細觀察 36°峰值的部分，可以發現這個 36°峰值似乎存在多個峰值耦合的現象，這是 HZO 的 O 相和 TiN 峰值共同疊加的結果。我們將 36°峰值左側的凸起視為 HZO O 相的峰值，並計算 36°峰值強度除以 30.5°峰值強度的比值，以評估優選取向強度。結果如表三顯示，TiO2-seeding 的比值約為 0.28，說明其晶粒排列方向呈隨機排列，而 TiN-seeding 的比值約為 1.17，說明其具有非常強的 HZO 晶粒優選取向。

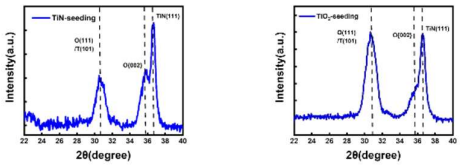
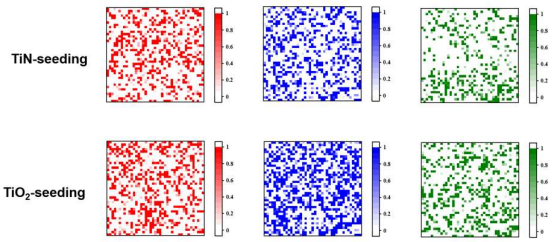


圖 3.7 TiN-seeding 及 TiO2-seeding GI-XRD 圖譜

在本小節中，我們對 TiO2-seeding 和 TiN-seeding 的 X 射線吸收光譜（XAS）結果進行了分析，以確定樣品中正交相（O 相）、四方相（T 相）和單斜相（M 相）的比例組成。分析結果如圖 3.8 所示，顯示出 TiO2-seeding 樣品中 T 相佔 35.19%、O 相佔 30.69%以及 M 相佔 34.11%。這意味著 TiO2-seeding 樣品中的三種晶相大約各占三分之一。相比之下，TiN-seeding 樣品中 T 相佔 27.86%、O 相佔 52.08%以及 M 相佔 20.06%。可以看出，O 相是 TiN-seeding 樣品中的主要晶相，佔據了超過一半的比例。



	T-phase	O-phase	M-phase
TiN-seeding	**27.86%**	**52.08%**	**20.06%**
TiO_2-seeding	**35.19%**	**30.69%**	**34.11%**

圖 3.8 TiN-seeding 及 TiO2-seeding XAS 分析結果

承上在選取 TiN 為種子層的前提下，進行種子層厚度變更試片(1nm、2nm、3nm)分析，針對不同種子層厚度的試片進行外全反射繞射法進行垂直表面方向之 XRD 分析，分析結果如圖 3.9 所示，同樣的，不管是哪

一種試片，都發現到 XRD 最高的峰值都出現在 2θ=30.5°，而 30.5°正是 HZO O 相(111)以及 T 相 (101)特徵峰的所在位置，說明兩個試片在垂直表面方向的晶體都有良好的 HZO 晶相存在，而在 2θ=35°的地方具有兩個峰值，其中 2θ=34.7°為 O(200)，2θ=35.3°為 O(020)以及 O(002)的特徵峰，不論是 1 奈米 TiN、3 奈米 TiN 以及上一小節的 2 奈米 TiN，都可以發現到這兩個峰值的存在，說明在垂直表面方向的 HZO 晶體也存在著 O(200)、O(020)以及 O(002)，而 2θ=37.1°為 TiN(111)的特徵峰，代表著電極的結晶也是良好的，之後，亦對其進行 scherrer equation 的計算， 1 奈米 TiN 之晶粒大小約為 22.66 奈米，而 2 奈米 TiN 之晶粒大小約為 20.47 奈米，3 奈米 TiN 之晶粒大小約為 23.97 奈米，三種試片的平均晶粒大小並無顯著的差異。

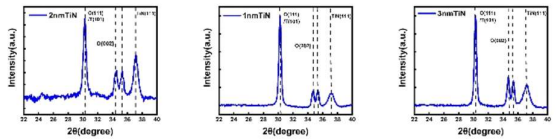
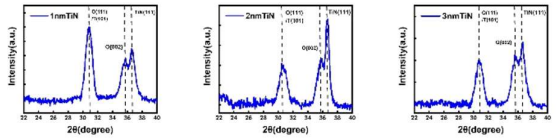


圖 3.9　TiN-seeding 1nm、2nm、3nm in-plane XRD 圖譜

對於不同種子層厚度的試片使用國家同步輻射研究中心的 TPS09A 實驗站進行長積分時間的 GI-XRD 掃描。掃描結果如圖 3.10 所示，此次 GI-XRD 的結果能夠清晰區分出三種試片在 36°的峰值。使得本研究對峰值強度的比值計算更加嚴謹。經計算，1 奈米 TiN、2 奈米 TiN 以及 3 奈米 TiN 的峰值比值強度約為 0.57、1.17 以及 1.12，皆顯著高於隨機取向的 0.26。

此外，發現 1 奈米 TiN 的優選取向程度最弱，而 2 奈米 TiN 和 3 奈米 TiN 呈現相似的優選取向程度。由此可以推測，種子層厚度會對 HZO 的晶粒排列產生不同程度的優選取向，大致呈現越厚越明顯的趨勢。三者計算的峰值強度比值比較如示。



	1nmTiN	2nmTiN	3nmTiN
$I_{36°}/I_{30.8°}$	0.57	1.17	1.12

圖 3.10　TiN-seeding 1nm、2nm、3nm GI-XRD 圖譜

IV. 結論

本研究第一部分探討使用 2D-XRD 來分析氮化鈦或鎢金屬作為上下電極對 7 奈米 HZO 薄膜性質的影響。再來利用 XPS 分析比較在下電極表面上施加與未施加氧電漿處理，以調控 5 奈米 HZO 薄膜內部的氧空缺含量。最後運用 XPS 分析證明在 HZO 沉積過程中施加 Ar 電漿確實改善了氧空缺的含量，實現了低熱預算的 4 奈米 HZO 電容。

第二部分探討不同種子層及其厚度對 HZO 晶粒優選取向的影響。本研究使用原子層沉積（ALD）技術分別成長了 2 奈米厚的 TiN 和 TiO2 作為兩種種子層。從 XRD 結構分析中發現，晶粒尺寸並無顯著差異，但 TiN 種子層能顯著提升 HZO 晶粒的優選取向。

在確定 TiN 種子層對 HZO 成長方向有影響後，本研究進一步分析了不同厚度的 TiN 種子層對 HZO 優選取向的影響。通過成長 1 奈米、2 奈米和 3 奈米厚的 TiN 層並進行 XRD 結構分析，發現種子層厚度對 HZO 優選取向有顯著影響。2 奈米 TiN 層的優選取向程度最大，其次是 3 奈米 TiN 層，最小的是 1 奈米 TiN 層。

本研究成功發展出一種顯著改善 HZO 晶粒優選取向的製程，為提升均勻度邁出第一步，期望這些發現能為未來器件的應用提供重要參考方向。

參考文獻

[1] Böscke, T., et al., "Ferroelectricity in Hafnium Oxide Thin Films." Appl. Phys. Lett. 99(10) (2011).
[2] Cheema, S.S., et al., "Enhanced Ferroelectricity in Ultrathin Films Grown Directly on Silicon." Nature 580(7804), 478-482 (2020).
[3] Müller,J., Polakowski, P., Mueller, S., & Mikolajick, T. Ferroelectric hafnium oxide based materials and devices: Assessment of current status and future prospects. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 4(5), N30. (2015).
[4] Upadhyay, M. I. K. a. T. C. General introduction to ferroelectrics. (01 June 2021).
[5] West, A. R. Basic solid state chemistry (2nd ed.). John Wiley & Sons. (1999).

本計畫內容表在已發表在 C.Y. Teng, C.C. Cheng, K.S. Li, C.M. Hu, J.M. Lin, B.H. Lin, M.T. Tang and Y.C. Tseng*, "Optimizing the Ferroelectric Properties of Hf1-xZrxO2 Films via Crystal Orientation", *ACS Appl. Elec. Mater.*, 5,1114(2023)

極紫外光及以下波段光學元件之保護膜材料開發與微影製像應用

計畫編號：112-NU-E-492-001-NU
計畫主持人：李昭德
e-mail：tigerlee@narlabs.org.tw
計畫共同主持人：：蔡坤諭、許博淵
計畫參與人員：李佳翰、林崴士、陳宏彬、吳品鈞
執行單位：財團法人國家實驗研究院台灣儀器科技研究中心

摘要

本研究計劃分別以射頻磁控濺鍍(RF magnetron sputtering)及原子層沉積設備(atomic layer deposition, ALD)，製備 Mo/Si 週期性薄膜及 TiO_2 保護膜，進行應用於極紫外光(Extreme ultraviolet, EUV)及以下波段微影(EUV/Beyond EUV)之光學元件保護膜材料開發與特性量測，探討基板溫度(70~90 ºC)、保護膜厚度(1~10 nm)、對於薄膜微結構、表面粗糙度與光學性質之影響。實驗中將以場發射掃描電子顯微鏡(Field emission scanning electron microscopy, FE-SEM)、X 光反射儀(X-ray reflectivity, XRR)、原子力顯微鏡(atomic force microscope, AFM)、高解析度透射電子顯微鏡(High resolution transmission electron microscopy, HRTEM)和極紫外光光譜儀，進行薄膜微結構、表面粗糙度及光學量測。實驗結果發現，基板溫度為 70 ℃時，TiO_2 薄膜的表面粗糙度(root mean square, RMS)為 0.55 nm，當基板溫度高於 80 ℃時，可得到表面光滑之薄膜，其薄膜的表面粗糙度皆低於 0.2 nm。而鍍製不同薄膜厚度之 TiO_2 保護膜於 Mo/Si 週期性薄膜後，薄膜的表面粗糙度則隨 TiO_2 薄膜厚度增加而呈現略為上升現象，薄膜 RMS 值從 0.15 nm 增加至 0.19 nm。在光學分析部分，從光譜儀量測結果，我們發現 Mo/Si 週期性薄膜/TiO_2 薄膜的反射率是隨著 TiO_2 保護膜薄膜厚度的增加而下降。Mo/Si 週期性薄膜的反射率為 66 %，鍍製 1.8 nm 厚度之 TiO_2 保護膜後，薄膜的反射率為 65.97 %。然而，當 TiO_2 保護膜厚度增加至 3 nm 時，薄膜的反射率則下降至 59.27 %。依據表面粗糙度及反射率量測結果，我們確認以低溫原子層沉積技術製備表面光滑的 TiO_2 薄膜，可作為極紫外光高反射鏡之保護膜。

關鍵詞：射頻磁控濺鍍(RF magnetron sputtering)、原子層沉積設備(atomic layer deposition)、極紫外光(Extreme ultraviolet, EUV)、保護膜、光譜儀

Abstract

The periodic Mo/Si bilayers and TiO_2 films were deposited by RF magnetron sputtering and atomic layer deposition. The effects of substrate temperature and thickness of TiO_2 film on the microstructure, surface roughness and optical properties were investigated by Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), X-ray reflectivity (XRR), atomic force microscopy (AFM), high resolution transmission electron microscopy (HRTEM). It was found that the RMS value of TiO_2 film was 0.55 nm when the substrate temperature was 70 ºC. The smooth surface TiO_2 films, RMS value was below 0.2 nm, were deposited when the substrate temperature was above 80 ºC. The effect of TiO_2 film thickness on the surface roughness of Mo/S periodic film was slight increased. It was only increased from 0.15 to 0.19 nm. However, it was an obvious factor on the EUV reflectivity of Mo/Si periodic film. The EUV reflectivity of Mo/Si/TiO_2 films was decreased with increased the thickness of TiO_2 film. The reflectivity of Mo/Si periodic film was 66 %, and the reflectivity of Mo/Si periodic film with TiO_2 film (1 nm) was 65.97 %. However, when the thickness of the TiO_2 film was increased to 3 nm, the reflectivity of the films was decreased to 59.27 %. Based on the AFM and reflectivity measurement results, we confirmed that the TiO_2 thin film (1 nm) with smooth surface roughness prepared by atomic layer deposition technology (substrate temperature > 80 ºC) can be used as a protective film for extreme ultraviolet light highly reflective mirrors.

Keywords: RF magnetron sputtering, atomic layer deposition, Extreme ultraviolet, protective layer, Spectroscope

I. 前言

極紫外光微影技術(Extreme ultraviolet lithography, EUVL)近年來已正式投入量產應用，有別於傳統微影技術，目前採用雷射激發電漿方式，主要是以二氧化碳雷射激發錫滴來產生極紫外光光源。為避免錫顆粒披覆極紫外光光源區或沉積於 collector mirror 上，造成反射率下降。現有解決方式是通入氫氣，使其與錫反應成 SnH_4 氣體，再被抽氣系統帶走。隨著元件尺寸再縮小，半導體製程將使用 High-NA EUVL 或更短波長技術，迫使需要更高的雷射功率，來彌補採用新技術所造成的反射率下降。因此，也必須更重視錫顆粒與氫氣對於 collector mirror 產生沉積與吸附的現象。

目前鍍製 EUV(13.5 nm)高反射率薄膜材料選擇為 Mo 與 Si，採用方法包括常見的磁控濺鍍[1-3]、離子源濺鍍[4,5]及脈衝雷射混和濺鍍[6]等。Shiraishi 等人[2]，使用磁控濺鍍及採用 Xe 氣體，在 50 週期 Mo/Si 多層薄膜，可得到 71%的 EUV 反射率；而採用 Ar 氣體的相同多層薄膜，該 EUV 反射率只有 68%。文獻中指出，兩種材料易常發生擴散現象，因而造成 EUV 反射率的下降。由於是以週期性多層膜結構所產生的建設性干涉來提高 EUV 反射率，因此薄膜表面粗糙度、膜層界面的平整、每一層薄膜的品質及精準控制薄膜厚度，皆是影響反射率的重要因素。

傳統鍍膜技術如物理氣相沉積(physical vapor deposition, PVD)與化學氣相沉積(chemical vapor deposition, CVD)製程，已被廣泛使用在任何工業。近年

來，由於原子層沉積技術具有精準控制薄膜厚度，薄膜緻密性與高沉積覆蓋率，在半導體製程上，逐漸取代傳統鍍膜技術。傳統鍍膜方式，雖具有快速沉積薄膜特性，但對於高深寬比結構要求及薄膜均勻覆蓋性之要求，唯有 ALD 鍍膜方式能符合精準控制膜厚、高深寬比結構鍍膜及均勻覆蓋之要求。隨著半導體元件尺寸的縮小，元件間距與膜層厚度要求越來越嚴峻，因此，ALD 技術將在半導體製程上取得重要地位。

本研究分別以射頻磁控濺鍍及原子層沉積設備，製備 Mo/Si 週期性薄膜及 TiO_2 薄膜，進行應用於極紫外光及以下波段微影之光學元件保護膜 (TiO_2)材料開發與特性量測，將逐一探討基板溫度、保護膜厚度對於薄膜微結構、表面粗糙度與光學性質之影響。

II. 主要內容

本實驗使用高真空射頻磁控濺鍍系統與原子層沉積設備，製備 Mo/Si 週期性薄膜與 TiO_2 薄膜於 Si 基板上，濺鍍時所使用的靶材分別為直徑 3 吋，高純度(99.995 %) Mo 與高純度(99.995%)Si 靶材，Mo 靶材功率為 RF 50 W，Si 靶材為 100 W；原子層沉積製程是以 H_2O 及四(二甲氨基)鈦(TDMAT)，作為成長 TiO_2 薄膜之前驅物。鍍製前 Si 基板分別經丙酮及異丙醇清洗，取出後以高純度氮氣(99.9995%)吹乾並迅速置入腔體。濺鍍系統先以機械幫浦將腔體真空抽至 $10X10^{-2}$ Torr，再以渦輪幫浦將腔體真空抽置小於 $5X10^{-7}$ Torr 之背景真空。通入高純度(99.9995%)氬氣工作氣體，工作壓力固定 3 mTorr。薄膜鍍製前先以低功率對靶材進行預濺鍍 3 分鐘，進行靶材表面清潔。Mo/Si 週期性薄膜與 TiO_2 薄膜製程分析後，進行 TiO_2 薄膜鍍製於 Mo/Si 週期性薄膜上，探討 TiO_2 薄膜厚度對於表面粗糙度與光學性質之影響。

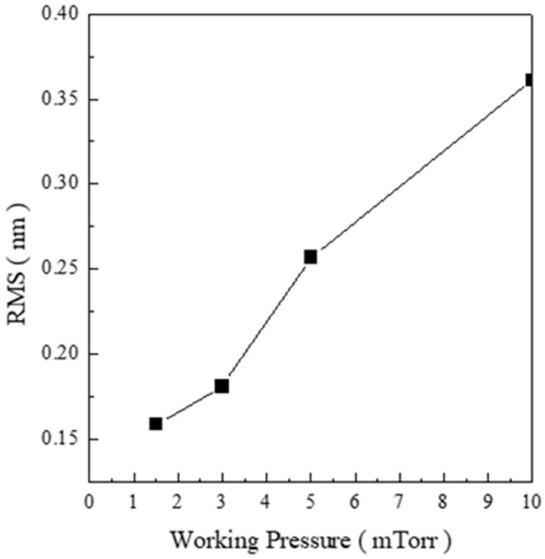
III. 結果與討論

極紫外光(extreme ultraviolet, EUV)高反射率薄膜為 Mo/Si 週期性薄膜，依據其 Mo 與 Si 薄膜在極紫外光波段之光學特性，代入光學模擬設計。當 Mo 薄膜厚度為 3.07 nm，Si 薄膜厚度為 3.89 nm，極紫外光入射光與基板法線夾角 6 度時，可得到最高 74%反射率。

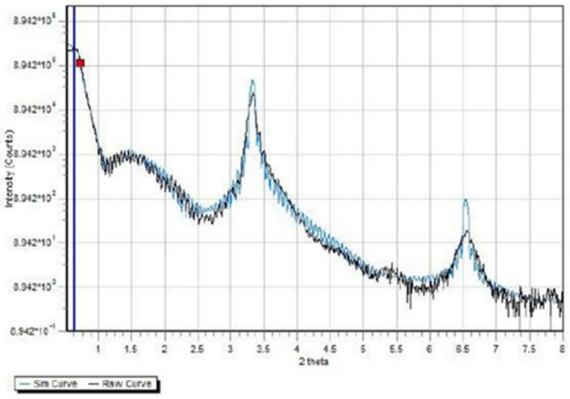
A. Mo/Si 週期性薄膜製備及分析

從文獻得知，Mo/Si 多層膜薄膜表面粗糙度越低可以得到更高的 EUV 反射率。因此，本實驗先以製備薄膜表面粗糙度低之 Mo/Si 週期性薄膜為主。圖一為濺鍍工作壓力與 Mo 薄膜表面粗糙度(RMS)之關係圖，背景真空為 $5X10^{-7}$Torr，Ar 10 sccm，RF 50W。從圖可看出，Mo 薄膜表面粗糙度是隨著工作壓力上升而上升，當工作壓力為 1.5 m Torr 時，可以得到最低的薄膜表面粗糙度 0.16 nm。以相同的工作壓力下製備 Si 薄膜，其薄膜面粗糙度僅為 0.15 nm。將以 1.5 mTorr 為本計畫採磁控濺鍍製備 Mo/Si 週期性薄膜之工作壓力。

以自動化程式控制進行 Mo/Si 週期性薄膜製備(Mo 為 2.48 Å/sec，Si 為 1.76 Å/sec)，進行 AFM、XRR 量測與 TEM 分析。結果顯示，該薄膜表面粗糙度為 0.17 nm。圖二為 Mo/Si 週期性(50 cycle)薄膜之 XRR 分析，從圖量測結果，我們可以看出只有兩個主要 Peak，沒有其他 Peak，並且分析模擬 Mo/Si 週期性薄膜曲線與量測結果重疊，這代表 Mo/Si 週期性薄膜呈現相當好的 Mo/Si 週期性排列。



圖一、濺鍍工作壓力與 Mo 薄膜表面粗糙度(RMS)之關係圖。



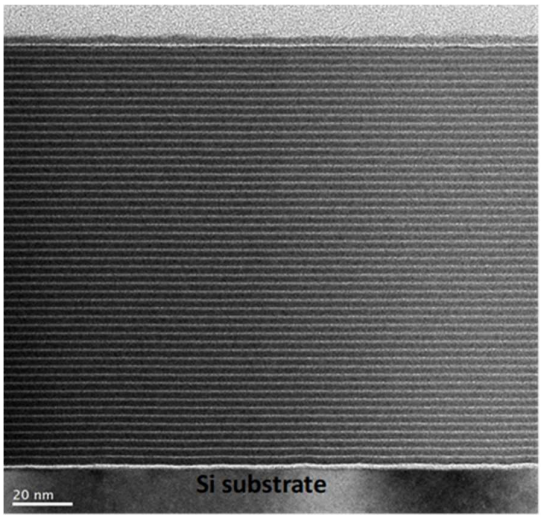
圖二、Mo/Si 週期性(50 cycle)薄膜之 XRR 分析。

圖三為 Mo/Si 週期性(50 cycle)薄膜之之 TEM 橫截面圖形。從圖觀察到的結果，這 50 層週期性 Mo/Si 薄膜，任一區間內 Mo/Si 界面平整且無擴散現象；Mo 薄膜厚度約為 1.6~1.7 nm，Si 薄膜厚度約為 0.9~1.1 nm。從 TEM 薄膜厚度分析結果與 XRR 模擬結果(Mo 薄膜 1.56 nm，Si 薄膜厚度 1.15 nm)，我們可以看出本計畫所鍍製 50 層週期性 Mo/Si 薄膜，Mo/Si 界面平整，TEM 觀察與 XRR 模擬的 Mo 與 Si 薄膜厚度相近。將依照此薄膜厚度結果，重新計算薄膜鍍膜速率並進行 50 層週期性 Mo/Si 薄膜製備。

B、TiO_2 薄膜製備及分析

本計畫中以原子層設備使用 H_2O 及四(二甲氨基)鈦(TDMAT)為前驅物，氧源的氣體為氧氣混合氬氣(O_2/Ar)，比例約為 91:9，製備 TiO_2 薄膜於 Si 基板上。由於 TDMAT 在使用上，需要將溫度維持在 65 ºC 以上，才能到達飽和蒸氣壓大於 1 Torr 以上。然而，高溫容易造成 Mo/Si 界面擴散，因此，製備 TiO_2 薄膜基板溫度希望能

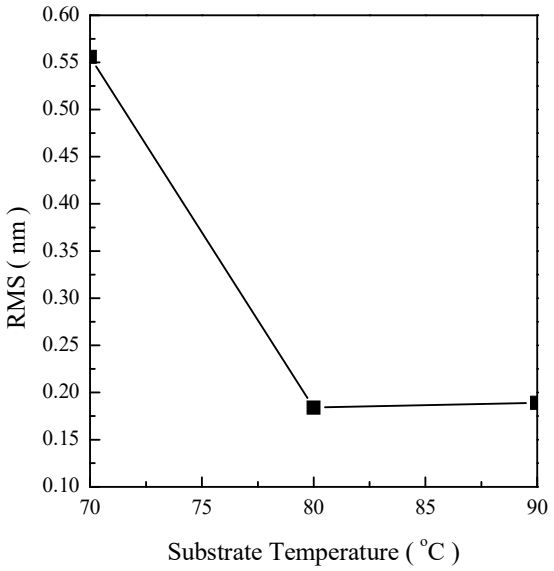
低於 100 ºC。圖四為沉積 TiO_2 薄膜，基板溫度與 TiO_2 薄膜表面粗糙度之關係圖。從圖可看出，當基板溫度為 70 ºC 時，由於基板溫度過低，會形成顆粒狀 TiO_2 薄膜，因此，薄膜表面粗糙度為 0.55 nm；而當基板溫度在 80-90 ºC 之間，則可得到表面光滑之 TiO_2 薄膜。將以基板溫度 80 ºC 製備不同厚度 TiO_2 薄膜於週期性 Mo/Si 薄膜上，並進行後續量測與分析。



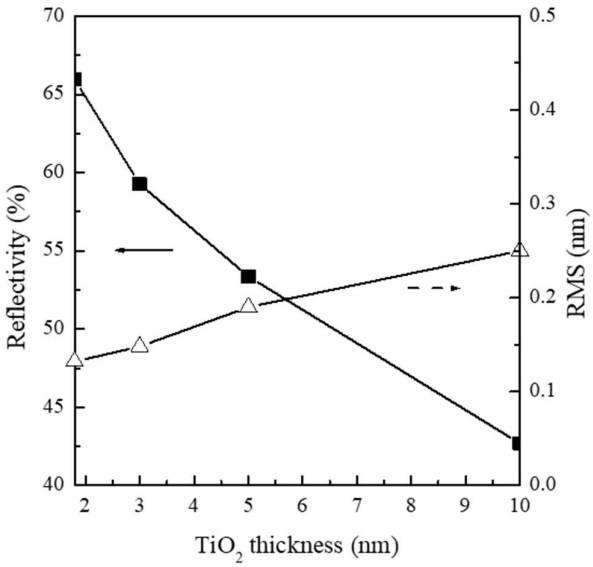
圖三、Mo/Si 週期性(50 cycle)薄膜之 TEM 橫截面圖形。

C. Mo/Si /TiO_2 薄膜製備及分析

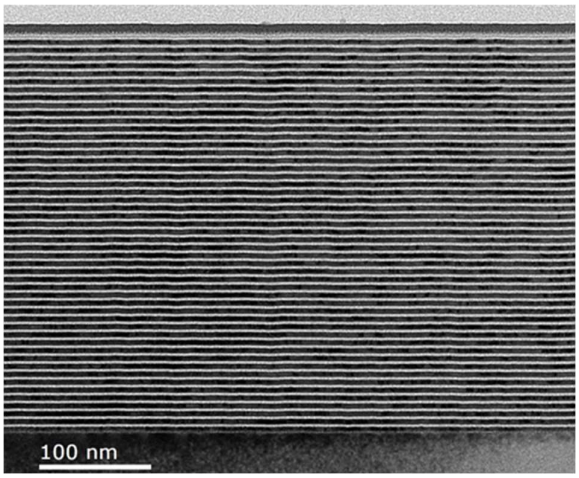
以基板溫度 80 ºC 製備不同厚度 TiO_2 薄膜於 Mo/Si 週期性薄膜，並進行反射率量測與表面粗糙度分析。圖五為不同厚度 TiO_2 薄膜鍍製在 Mo/Si 週期性薄膜之反射率(波長為 13.5 nm)與表面粗糙度關係圖，入射光與基板法線夾角 6 度。從圖可看出，多層膜的極紫外光反射率是隨著 TiO_2 薄膜厚度的增加而下降。在 TiO_2 薄膜厚度為 1.8 nm 時，多層膜的極紫外光反射率為 65.5%，這與 Mo/Si 週期性薄膜的反射率相近(66 %)。當 TiO_2 薄膜厚度增加至 3 nm 時，多層膜的極紫外光反射率則下降至 55.5 %；隨著 TiO_2 薄膜厚度增加至 5 nm 時，極紫外光反射率下降至 52.5 %。此外，多層膜表面粗糙度則是隨著 TiO_2 薄膜厚度的增加而增大，多層膜表面粗糙度約為 0.132~0.19 nm 範圍之間。圖六跟圖七分別為 Mo/Si /TiO_2(1.8 nm)薄膜之低倍率及高倍率 TEM 橫截面影像圖。從圖六跟圖七可看出 TiO_2 薄膜均勻鍍製於週期性 Mo/Si 薄膜上， Mo/Si/TiO_2(1.8 nm)薄膜各層及 TEM 觀察所鍍製之 MSS 層。綜合分析結果，我們發現 TiO_2 薄膜厚度為 1.8 nm 時， Mo/Si/TiO_2 薄膜具有低表面粗糙度(0.132 nm)及高反射率(65.5%)，可作為極紫外光反射鏡之保護膜。



圖四、沉積 TiO_2 薄膜，基板溫度與 TiO_2 薄膜表面粗糙度之關係圖。



圖五、不同厚度 TiO_2 薄膜之反射率與 RMS 之關係圖。

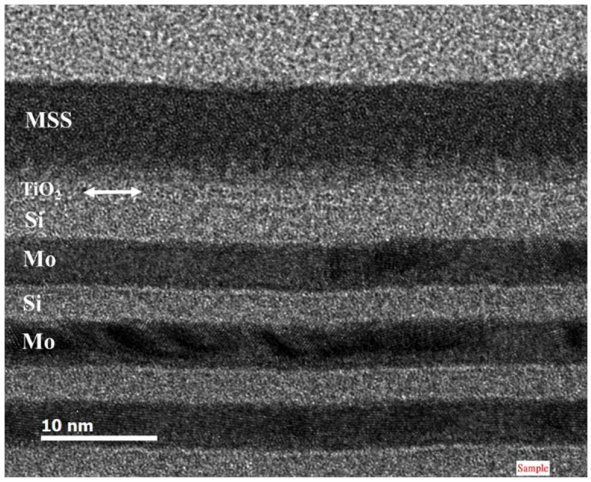


圖六、Mo/Si/TiO_2(1.8 nm)薄膜之低倍率 TEM 橫截面影像圖。

IV. 結論

由以上實驗結果發現，以原子層沉積 TiO_2 薄膜時，基板溫度為 70 ℃時，TiO_2 薄膜的表面粗糙度 RMS 值

為 0.55 nm，當基板溫度高於 80 ℃時，可得到表面光滑之薄膜，其薄膜的表面粗糙度皆低於 0.2 nm。從極紫外光光譜儀量測結果，我們發現多層膜的反射率，是隨著 TiO_2 保護膜薄膜厚度的增加而下降。Mo/Si 週期性薄膜的反射率為 66 %，鍍製 1.8 nm 厚度之 TiO_2 保護膜後，薄膜的反射率為 65.97 %。然而，當 TiO_2 保護膜厚度增加至 3 nm 時，薄膜的反射率則下降至 59.27 %。依據表面粗糙度及反射率量測結果，我們確認以低溫(80 ºC)原子層沉積技術製備表面光滑的 TiO_2 薄膜(薄膜厚度 1 .8 nm)，可作為極紫外光高反射鏡之保護膜。



圖七、Mo/Si /TiO_2(1.8 nm)薄膜之高倍率 TEM 橫截面影像圖。

參考文獻

[1] U. Mizutani, T. Yamaguchi, T. Tomofuji, Y. Yanagi, Y. Ltoh, K. Saitoh, N. Tanaka, N. Matsunami and H. Ikuta, "Factors Affecting Extreme Ultraviolet Reflectivity of Mo/Si Multilayer Films Synthesized by Superconducting Magnetron Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys. 48, 025507(2009).

[2] M. Shiraishi, N. Kandaka and Murakami, Proc. SPIE 5037, 249 (2003).

[3] S. Miyagaki, H. Yamanashi, A. Yamagychi and I. Nishyama, "Influence of glass substrate surface roughness on extreme ultraviolet reflectivity of Mo/Si multilayer", J. Vac. Sci. Technol. B 22, 3063 (2004).

[4] A. Ma, P. Kearney, D. Krick, R. Randive, I. Reiss, P. Mirkarimi and E. Spiller, Proc. SPIE 5751, 168 (2005)

[5] K. Hiruma, S. Miyagaki, H. Yamanashi, Y. Tanaka and I. Nishiyama, "Performance and quality analysis of Mo-Si multilayers formed by ion-beam and magnetron sputtering for extreme ultraviolet lithography", Thin Solid Films 516, 2050 (2008).

[6] T. W. Barbee, "Multilayers for x-ray optics", Opt. Eng. 25, 898 (1986).

以磊晶鍺層整合種子層、應力層與新穎結晶回火技術實現抗輻射之鐵電記憶體元件

Implementing FeFET Memory with Anti-Radiation Capability by Introducing Epitaxial Ge layer, Seed Layer, Stress Layer, and Novel Annealing Scheme

計畫編號：112-NU-E-007-001-NU
計畫主持人：巫勇賢
e-mail：yunhwu@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：陳羿帆、郭俊毅、黃凱揚、鄭聖諺、高唯甯、董郁襦、謝平遠
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

本研究採用 $HfZrO_x$ (HZO)為鐵電材質，所開發的 n 型 Ge 通道記憶體，雖然此記憶體並非是傳統所理解純粹利用材料鐵電特性的鐵電記憶體，但可視為鐵電特性輔助下所形成的快閃記憶體，亦即採用了具有鐵電性之電荷陷阱層(charge trapping layer)應用於快閃記憶體所形成的混合型記憶體(hybrid memory)。此記憶體無須傳統快閃記憶體的 blocking oxide，可將操作電壓控制在 5 V 以下，大幅降低操作功耗。另一方面，與傳統的鐵電記憶體相較之下，此元件亦可完全避免讀取延遲(read latency)的限制，可以算是兼顧快閃記憶體與鐵電記憶體優點的元件。本研究另一項特色在於是首次以具有 n 型 Ge 通道之記憶體元件進行 γ-ray 抗輻射能力之研究。混合型記憶體在輻射照射前記憶視窗(memory window)可達 2.2 V，一旦照射輻射後，無論劑量高低(300 krad 或 1 Mrad)，其記憶視窗大約都衰減至 1.7 V，此衰減幅度與本團隊先前發表的 Ge p-FeFET 其衰減幅度相仿。雖然在輻射照射後混合型記憶體之記憶視窗會有所衰減，但衰減後的記憶視窗隨資料保存時間增加並沒有顯著的劣化，幾乎與未照射之元件擁有相近的資料保存能力，也證實這種創新的元件結構即使沒有 blocking oxide，其資料保存仍幾乎不受輻射照射之影響。在 p 型 Ge 通道鐵電記憶體已具備抗輻射能力之背景下，本計畫成果的重要意義在於證實 n 型 Ge 通道亦具備相匹配的抗輻射能力，這對於需要同時應用 n 型/p 型 Ge 通道元件之 CMOS 電路有相當大的助益。

關鍵字：γ 射線輻射、鐵電材料、混合型記憶體、鐵電記憶體、快閃記憶體、低電壓操作、讀取延遲、資料保存

Abstract

This study utilizes $HfZrO_x$ (HZO) as the ferroelectric material for the development of memory devices with n-type Ge channels. Although this memory does not strictly adhere to the traditional understanding of ferroelectric memory, which relies purely on the ferroelectric properties of the material, it can be considered a flash memory enhanced by ferroelectric properties. Essentially, it is a hybrid memory formed by applying a ferroelectric charge trapping layer to flash memory. This memory does not require the blocking oxide used in traditional flash memory, allowing the operating voltage to be controlled below 5 V, significantly reducing power consumption. Furthermore, compared to traditional ferroelectric memories, this device completely avoids the limitation of read latency, making it a device that combines the advantages of both flash and ferroelectric memories. Another highlight of this study is the first investigation of γ-ray radiation resistance in memory devices with n-type Ge channels. The memory window of the hybrid memory can reach 2.2 V before radiation exposure. Once exposed to radiation, regardless of the dosage (300 krad or 1 Mrad), the memory window typically decreases to around 1.7 V, a decay magnitude similar to that observed in previously published Ge p-FeFET devices by our team. Although the memory window of the hybrid memory decreases after radiation exposure, there is no significant degradation in the memory window with increasing data retention time. It remains nearly equivalent to the data retention capability of the devices without radiation, confirming that this innovative device structure, even without a blocking oxide, is minimally affected by radiation exposure. In the context where p-type Ge channel ferroelectric memories already exhibit radiation resistance, the significant implication of this project's findings is the confirmation of comparable radiation resistance in n-type Ge channels. This is highly beneficial for CMOS circuits requiring the simultaneous application of n-type/p-type Ge channel devices.

Keywords: γ-rays radiation, ferroelectric material, hybrid memory, FeFET memory, flash memory, low-voltage operation, read-after-write latency, retention

I. 前言

在現今科技已相當進步的世代，全球仍有超過 70%的地理區域涉及 40%的人口(約 30 億人)無法使用網際網路。而實現地球上的每一個人都能連接網路，打造一個訊號無死角的環境是通訊技術的終極目標。然而由於經濟條件與地理環境的限制，並不是每個區域都適合建設通訊所需的基礎設施，更不用說廣闊的海洋。因此，以距地球約 160-2000 公里的低軌衛星(low earth orbit，LEO)建構衛星星座(satellite constellation)，形成非地面網路(non-terrestrial networks)，實現無所不在的網路服務(ubiquitous network access)的構想在近年來受到廣泛關注。相比於距離地球更遠的高軌衛星與中軌衛星，低軌衛星的優勢在於距離地面較近，具備「低延遲、低輻射、低成本」等特性。有鑑低軌衛星對於強化國家韌性通訊的重要性，2019 年起政府規劃為期 10 年的「第三期國家太空科技發展長程計畫」在衛星發射與衛星製造這兩項技術上投注相當多的資源。2021 年我國立法院也三讀通過了「太空發展法」，政府更宣示太空產業是台灣「六大核心戰略產業」之一。以衛星製造為例，政府期盼這項技術可以建構完整的太空科技基礎，同時可以讓台灣太空零組

件產業更頻繁地進入太空軌道以取得「飛行履歷」，證明零組件能通過實際發射與飛行的檢驗，有助於拓增國際商業機會。衛星本體大致上可以區分幾個重要零組件，大多數零組件都需要半導體晶片，而也是台灣目前最具競爭項目。儘管台灣在民生用半導體晶片發展已有相當的基礎，但在太空任務採用的晶片上須克服輻射造成的損傷，因此仍有相當大的研發空間。

II. 主要內容

快閃記憶體(flash memory)憑藉其多位元存儲(multi-level cell, MLC)能力以及優異的記憶視窗[1]而在非揮發性記憶體(non-volatile memory)市場上占有主導地位，且不存在讀取延遲(read latency)問題。除了主流的 Si 通道記憶體外，Ge 通道應用於快閃記憶體亦被證實可以提高操作速度[2]並可與 Ge 邏輯製程的整合[3]，因此也受到極高的關注。儘管已經取得了顯著進展，快閃記憶體主要的限制仍然是高操作電壓(>20 V)和低操作速度(~1 μs)。另一方面，基於 HfO_2 的鐵電記憶體作為新興的 NVM，不僅具有優越的效能和 CMOS 兼容性，還展現了關聯搜索[4]和內存計算加速器的潛力[5]。本研究的主要特色在於將 HZO 鐵電層導入 Ge 通道電晶體並探討不同介面層薄膜的堆疊、位置及材料等參數與鐵電元件效能之關聯性，而此新穎的混合式鐵電記憶體的表現是文獻上較少的討論，因此兼具學術性與產業應用性。

感謝國科會與原能會的計畫支持本團隊之研究成果，構想源自於 2021 年本團隊導入高介電材料 AlON 作為介面層分別製作基於 $HfZrO_x$ 鐵電層之 n-FeFET 及 p-FeFET 鐵電記憶體**[6]**。2022 年本團隊以次為基礎，探討 TID 對鐵電記憶體基本、讀取延遲(read latency)**[7]**與可靠度的影響，這是文獻上首次以 p-FeFET 之鐵電元件進行相關的輻射測試**[8]**。不論是 n-FeFET 或 p-FeFET 鐵電記憶體，在照射游離輻射之後其記憶體視窗幾乎沒有改變，且資料保存能力在十年預估線仍能維持 3 個數量級的電流開關比。相較 n-FeFET 鐵電記憶體，雖然 p-FeFET 鐵電記憶體具有較小的記憶體視窗，然而因其具有更好的 endurance，且在高輻射環境下依舊可以保持更為優異的讀取延遲，故 p-FeFET 鐵電記憶體比起 n-FeFET 鐵電記憶體更適合在高輻射環境下進行高速應用，有望在太空環境實現高速度操作下之低延遲通信。

整體而言，基於 HfO_2 之 FeFET 鐵電記憶體其鐵電層厚度具有高度的微縮潛力，有助於提升抗輻射能力。目前 FeFET 鐵電記憶體之抗輻射研究仍在初步階段，介面層工程與 p 型 FeFET 是影響 endurance 可靠度的關鍵。展望未來，以新結構與材料進一步提升 p 型 FeFET 鐵電記憶體的抗輻射能力將是重要發展方向。

由上述的研究成果可知，FeFET 記憶體可靠度劣化主要是反覆操作下的 fatigue 與 imprint 效應，發生的機制是在於半導體/介面層間或鐵電層中，以氧空缺為主的缺陷造成了電荷捕獲現象。由於游離輻射照射下會產生更多數量的缺陷，因此會造成可靠度發生更為嚴重的劣化。至於 retention 的影響則因為基於 HfO_2 的鐵電層其 E_C 較大，比較能承受去極化電場的影響，輻射所造成的影響較小。為了提升鐵電記憶體的抗輻射能力，本計畫將從(1)製程、(2)材料與(3)元件結構等三個面向進一步強化 FeFET 記憶體之抗輻射表現。

(1) 製程方面: 有別於文獻上絕大部分以金屬沉積後的回火(post-metal annealing，PMA)使 HZO 結晶成鐵電相，本計畫將採用鐵電層沉積後的回火(post-deposition annealing，PDA)進行結晶製程，其優勢在於回火時鐵電層上方並無金屬，故可完全避免金屬與鐵電層間因熱製程造成的反應以及可能的缺陷如氧空缺，對於可靠度的提昇會有相當的助益。

(2) 材料方面: 本計畫導入 PDA 製程，雖然可以減少缺陷數量，但可預期的缺點是由於回火時缺乏上層金屬提供的應力，因此 P_r 會不如 PMA 製程，而 P_r 減少的衝擊則是記憶視窗會受限。有鑑於此，本計畫將導入種子層(seed layer)與應力層(stress layer)等介面工程，分別沉積於鐵電層的下方與上方，這將有有助於提升鐵電層晶相與 P_r，彌補 PDA 所造成的 P_r 衰減。

(3) 元件結構方面: 由於 p-FeFET 已被證實比 n-FeFET 具有更優異的抗輻射能力，本計畫將進一步以 Ge 取代 Si 作為半導體材料，主要目的在於 Ge 可整合於次世代積體電路技術，因此是相當值得的嘗試，而這也是目前文獻上尚待開發的領域。

整體而言，本計畫主要的研究工作是以 Ge 晶圓為基板，並搭配高介電常數且具有鈍化功能的介面層當作穿隧氧化層，搭配具有鐵電特性的 HZO 薄膜來製備混合式記憶體。透過不同製程、材料與元件結構的導入來抑制 Ge 與 HZO 的反應因此提高鐵電層本身以及元件結構介面的品質藉此降低在照射輻射與反覆操作下發生載子注入並被捕獲的機率，最後實現強化元件可靠度與抗輻射性。

III. 結果與討論

(A) 不同介電層對於 Ge 混合記憶體鐵電性之影響

首先在**圖 1** 顯示了 Ge n-FeFET 的元件結構示意圖並透過 TEM 影像確認每層薄膜成長的狀況以及厚度。基於此結構下設計實驗，透過不同的介電材料以及鈍化層來驗證混合記憶體的可行性及效能。在介電材料的部分，分別為非鐵電性的 HfO_2(AlO-HfO) 以及具有鐵電性的 HZO(AlO-HZO)，而成長在 Ge 電晶體常見之 HfN(HfN-HZO)及 Al_2O_3 不僅具備防止 Ge 原子擴散反應的鈍化功用，也充當本計畫的混合記憶體中穿隧氧化層的角色。**圖 2(a)**顯示不同元件在 10^5 循環(cycles)操作進行喚醒(wake-up)後之極化-電壓(Polarization-Voltage, P-V)特性圖。元件之剩餘極化量(remnant polarization, P_r)由高至低依序是 AlO-HZO、HfN-HZO 與 AlO-HfO 元件，其中 AlO-HfO 元件由於薄膜不具鐵電性，故幾乎沒有任何極化量。至於 HfN-HZO 元件之極化量低於 AlO-HZO 元件推估是由於 HfN 之氮原子擴散至 HZO 後抑制了氧空缺(oxygen vacancy)的移動，不利於鐵電相 o-phase 的形成，故極化量較低。**圖 2(b)**顯示不同條件之元件其剩餘極化量統計圖(量測 20 個元件)，其中 AlO/HZO 元件之極化量($2P_r$)為 24.7 μC/cm²，高於矽基板上 SiO_2/HZO 結構之 20 μC/cm²。即使 AlO/HZO 元件之 HZO 厚度較薄，但仍顯現極為優異之極化量，推測與 Ge 基板的熱膨脹係數有密切關係。

(B) Ge 混合記憶體的資料存儲能力之表現

圖 3(a)為三種不同元件施加+5 V/-3 V pulse 達 1 μs 後進行讀取的 I_D-V_{GS} 特性曲線。無論是哪一種介面層，施加+5 V/- 3 V 偏壓分別會使元件呈現 high-Vt 與 low-Vt 狀態，這意味著元件是仰賴電荷儲存(charge storage)，而非電耦極(dipoles)的方向來進行狀態的改變，其中 AlO/HZO 元件的記憶視窗(memory window, MW)高達 2.1 V，而 AlO/HfO 元件之 MW 僅小於 0.3 V。此現象代表 HZO 與 AlO 分別扮演著類似快閃記憶體中的穿隧氧化層(tunnel oxide)與電荷陷阱層(charge trapping layer)的角色，故元件

呈現快閃記憶體的特性，而非鐵電記憶體之性質。**圖 3(b)** 為三種不同元件之 MW 分佈統計圖(量測 20 個元件)，HfN-HZO 元件之 MW 低於 AlO-HZO 元件也與上述之極化量趨勢相吻合。從 AlO/HZO 與 AlO/HfO 元件極大的 MW 差異可確認 HZO 的鐵電性仍扮演著提升 MW 的關鍵的角色。**圖 4** 為 AlO/HZO 以及 AlO/HfO 兩種元件於 +5 V/-3 V 偏壓下之能帶圖。比較 AlO/HZO 與 AlO/HfO 元件之能帶圖可知，具有極化之 HZO 因為電耦極的原因使得 AlO 的能帶彎曲更加顯著，亦即穿隧氧化層之電場較高，在施加相同的電壓下會有更多的電子由通道注入到 HZO 電荷陷阱層，對於實現低電壓操作有相當的助益。

整體而言，本元件結構可以提升載子寫入/抹除的速度，或可以較小的操作電壓達到相同的記憶視窗，可以大幅降低操作功耗。另一方面，傳統鐵電記憶體儘管操作速度與操作電壓方面都比快閃記憶體具備更優異的競爭優勢，不過其操作上有讀取延遲(read latency)的限制，亦即在寫入資料後需要等待一段時間(通常超過 1 ms)延遲方能讀取到最大的 MW，其發生的主因為寫入資料時連帶造成的電荷捕獲(charge trapping)需要時間進行捕獲電荷釋放(de-trapping)方能使 MW 最大化，而這個讀取延遲導致鐵電記憶體的操作仍有改善空間。相較之下，AlO/HZO 元件因為本質上就是鐵電層輔助的快閃記憶體，因此並沒有傳統鐵電記憶體讀取延遲的困擾，完全避免讀取延遲的限制，這可由**圖 5(a)**不同讀取延遲條件之 MW 獲得印證。傳統鐵電記憶之 MW 會隨讀取延遲而逐漸增大，反觀 AlO/HZO 與 AlO/HfO 元件之 MW 在 10^{-5} s 其 MW 即達到最大值，不隨讀取延遲而改變。**圖 5(b)**顯示了 AlO/HZO 與 AlO/HfO 兩種元件之資料保存能力(retention)，兩種元件在沒有 blocking oxide 的情況下呈現極為顯著的資料保存能力差異，其中 AlO/HZO 元件預測在 10 年線仍有 1.6 V 之 MW，反觀 AlO/HfO 元件之 MW 在 10^4 s 急遽衰減。此結果所代表的重要意義在於 AlO/HZO 元件其具有鐵電性之電荷陷阱層有助於電荷的保存，因而可以省去 blocking oxide，這也有助於降低操作電壓。AlO/HZO 元件兼具鐵電記憶體之高速/低電壓操作與快閃記憶體免於讀取延遲特性是本計畫所開發的記憶體元件最具特色之處。

圖 6 顯示了 AlO/HZO 與 AlO/HfO 兩種元件之耐久性(endurance)測試結果，測試的條件是以 1 μs 之 5 V/- 3 V 電壓脈衝進行反覆操作。AlO/HZO 元件經過高達 10^7 次的反覆操作後，MW 僅從原來的 2.2 V 微幅下降至 2.0 V，符合一般對於快閃記憶體的要求。同時，由量測結果也可觀察隨著操作次數增加，low Vt 狀態不斷提高，MW 逐漸縮小，這是由於電子越來越不易抹除所致。儘管如此，AlO/HZO 元件仍有足夠大的 MW 進行可以進行多位元儲存(multi-level cell, MLC)，亦即每個元件儲存 2 個位元之能力。**圖 7(a)**展示此元件 MLC 操作能力，並可證實在操作 10^5 操作次數後 4 個狀態之間仍能清楚辨識，**圖 7(b)**則顯示 4 個狀態下元件對元件的變異性(device to device variability)統計，各狀態之間不重疊的情況也證實其未來應用於大規模陣列之可行性。除了多位元存儲能力外，人工智慧中的神經網路型態運算也透過**圖 8** 中的興奮/抑制性之突觸後電流(excitatory/inhibitory postsynaptic currents，EPSC/IPSC)來驗證 Ge 混合記憶體也能與相關應用進行整合。

(C) 輻射對 Ge n-FeFET 鐵電記憶體效能之影響

本計畫第一階段確認 Ge n-FeFET 混合記憶體之最佳化製程後，採用 AlO/HZO 元件為測試平台進行後續抗輻射的研究，輻射源以 γ-ray 為主。**圖 9** 顯示了元件在 γ-ray 照射劑量達 300 krad 與 1 Mrad 後，其 I_D-V_{GS} 特性曲線的變化。最明顯的變化在於未照射輻射前，MW 達 2.2 V，一旦照射輻射後，無論劑量高低，其 MW 大約都衰減至 1.7 V，此衰減幅度與本團隊先前發表的 Ge p-FeFET 其衰減幅度相仿。值得注意的是，此 MW 衰減主要都來自於 low-Vt 狀態的劣化。事實上，low-Vt 狀態源於電子自 HZO 電荷陷阱層移除，而經輻射照射後的元件其介面層推測產生一些正電荷，導致電子不易移除。儘管如此，無論照射輻射與否，如**圖 10** 所示，元件均展現之優異的資料保存能力。換句話說，基於 AlO/HZO 結構之 Ge n-FeFET 混合記憶體，雖然在輻射照射後其 MW 會有所衰減，但衰減後的 MW 隨資料保存時間增加並沒有顯著的劣化，幾乎與未照射之元件擁有相近的資料保存能力。由外插法預估 10 年之資料保存與初始狀態相比幾乎沒有衰減。這是首次以具有 n 型 Ge 通道之記憶體元件(鐵電記憶體或快閃記憶體)進行抗輻射能力研究，也證實這種創新的元件結構即使沒有 blocking oxide，其資料保存仍幾乎不受輻射照射之影響。

IV. 結論

本計畫成功開發混合式記憶體，透過 Ge 通道 n-FEFET 中介面的優化，包括(a) 於 GeO_2 鈍化層與 HZO 鐵電層之間沉積 Al_2O_3 介面層，這層 Al_2O_3 防止 GeO_2 與 HZO 兩層薄膜間之相互反應，維持優異之熱穩定性。(b) 包括 GeO_2、Al_2O_3、HZO 等三層薄膜均是在不破真空的環境下進行前述的所有製程，這可確保各層薄膜之間具有最佳化之介面品質，免除在不同機台沉積薄膜可能造成的高缺陷之介面層。透過高品質的 HZO 薄膜，其提供的不僅僅只是良好的鐵電特性，將其作為具有鐵電性的電荷儲存層，免除了快閃記憶體之 blocking oxide，因此無論在操作速度或電壓上均優於傳統的快閃記憶體並利用其發展出類快閃記憶體免除讀取延遲的表現，更是對其做抗輻射之測試，在輻照輻射後雖然技藝視窗有些許衰減，但其資料保存能力與未照輻射之元件無異，由外插法預估 10 年之資料保存與初始狀態相比幾乎沒有衰減，因此可證實本元件具有相當優異的抗輻射能力，目前 Ge n-FeFET 是文獻上從未報導的記憶體元件，無論是新世代高載子遷移率之 Ge 材質，抑或是低功耗操作之鐵電材質，其對於抵抗輻射能力的評估都是相當值得研究的主題，亦有助於瞭解新型態記憶體應用於太空任務的可行性。

參考文獻

[1] B. Kim et al., IEEE ISSCC, 402 (2023)
[2] Z. H. Ye et al., IEEE Electron Device Lett., 36, 12 (2015).
[3] C. Lee et al., IEEE Electron Device Lett., 43, 6 (2022).
[4] X. S. Hu et al., IEEE IEDM Tech. Dig., 25.2.1 (2021).
[5] M. K. Kim et al., Sci. Adv., 8, 14 (2022).
[6] H. K. Peng et al., IEEE Electron Device Lett., 42, 835 (2021).
[7] D. Kleimaier et al., IEEE Electron Device Lett., 42, 1774 (2021).
[8] H. K. Peng et al., *IEEE Electron Device Lett.*, 43, 494 (2022).

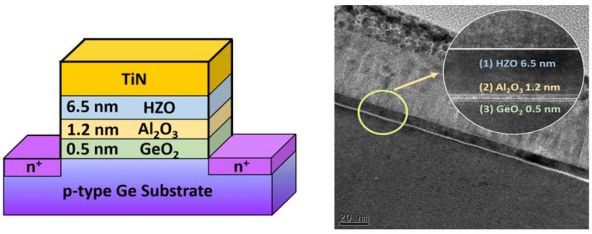


圖 1 Ge n-FeFET 鐵電記憶體之結構示意圖與閘極結構之 TEM 剖面圖。

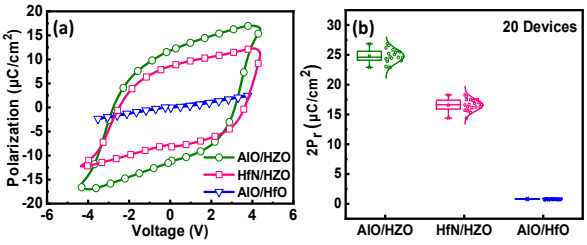


圖 2 元件於各種結構下之 **(a)**極化值-電壓特性圖以及 **(b)** 極化值統計圖。

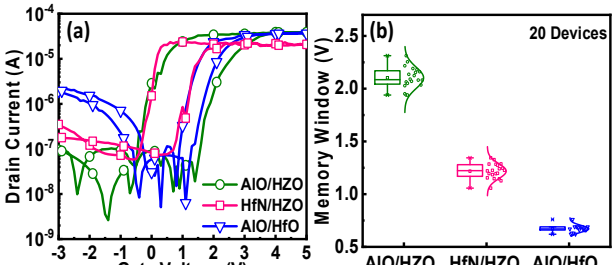


圖 3 元件於各種結構下之 **(a)** I_D-V_{GS} 特性曲線以及**(b)** 記憶視窗的統計圖。

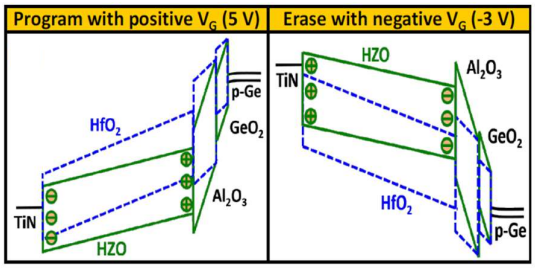


圖 4 比較電荷陷阱層是否具鐵電性對於寫入/抹除條件下之能帶影響。

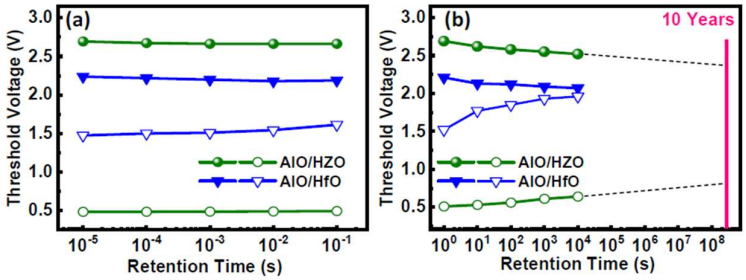


圖 5 元件於各種結構下之**(a)** 讀取延遲條件相依之記憶視窗以及**(b)** 資料保存能力。

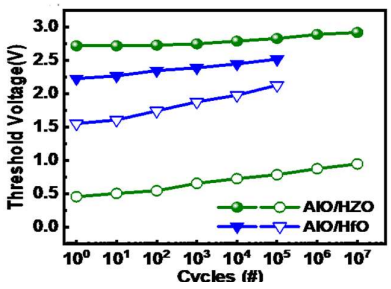


圖 6 元件於各種結構下之耐久性，AlO/HZO 元件之表現遠優於 AlO/HfO。

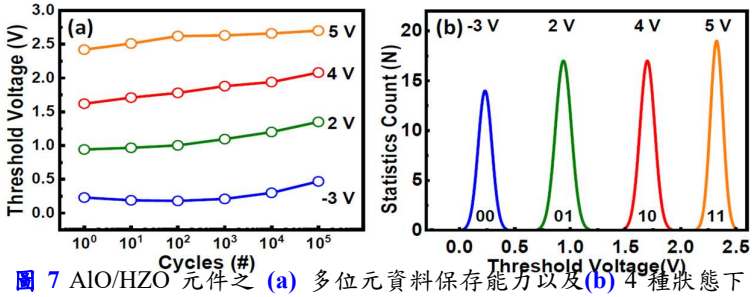


圖 7 AlO/HZO 元件之 **(a)** 多位元資料保存能力以及**(b)** 4 種狀態下之元件變異性統計。

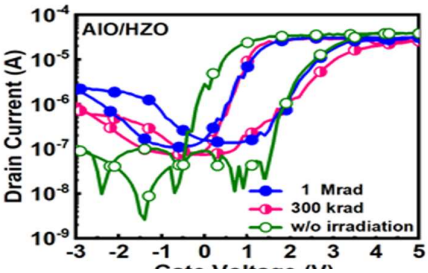


圖 9 AlO/HZO 元件於同輻射劑量照射後之 I_D-V_{GS} 特性曲線。

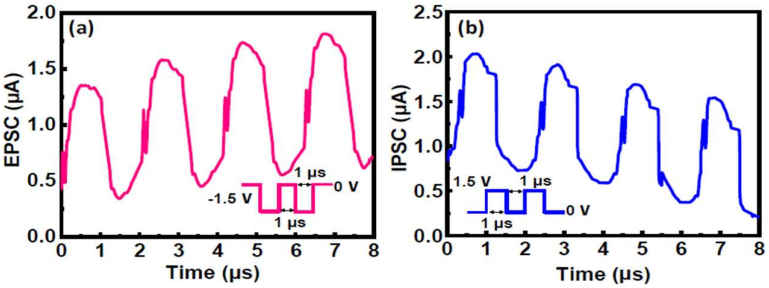


圖 8 於 AlO/HZO 元件閘極輸入連續的脈衝所呈現的 **(a)** 興奮性突觸後電流特性(+1.5 V)與 **(b)** 抑制性突觸後電流特性(-1.5 V)。

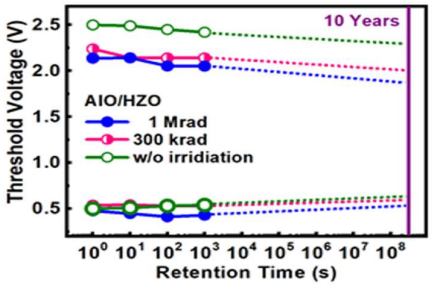


圖 10 AlO/HZO 元件於不同輻射劑量照射後之資料保存能力。

中子轉化摻雜技術於氮化鎵磊晶式異質基板之應用可行性評估
Feasibility Evaluation of Application of Neutron Transmutation Doping Technology to GaN Epitaxial on Heterosubstrate

計畫編號：112-NU-E-007-004-NU
計畫主持人：趙得勝
e-mail：dschao@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：梁正宏
計畫參與人員：鍾岳均、余岳倫、王湲媛、林晉毅、張家豪、陳孟渝、林亞勳
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

中子轉化摻雜(Neutron Transmutation Doping, NTD)是一項特殊且專門的半導體材料摻雜方法，可在半導體材料中提供精確控制摻雜濃度及高度摻雜均勻性的優勢，目前已被商業應用於矽晶圓的摻雜，為原子能和平應用於半導體工業的優良典範。除了矽之外，氮化鎵(Gallium Nitride, GaN)半導體中的鎵元素 69Ga 和 71Ga 也可經由熱中子吸收反應轉化為 70Ge 和 72Ge，形成 n-型摻雜子，並且相較於矽具有更高的理論摻雜效率。目前已有一些相關的研究初步證實 NTD-GaN 的可行性，然由於氮化鎵材料屬於化合物半導體，在經歷高通量的中子照射之後將牽涉更為複雜的輻射損傷與雜質活化相關的技術問題。有鑑於此，本研究旨在通過不同的實驗設計，深入地探討中子照射參數和退火溫度對 NTD-GaN 材料特性的影響，藉此獲取最佳化的摻雜效果與實驗參數，並評估中子轉化摻雜應用於氮化鎵材料之可行性。本研究使用在藍寶石基板(Sapphire substrate)上透過異質磊晶生長(Heteroepitaxial)的氮化鎵薄膜試片，並利用清華水池式反應器(Tsing Hua Open-pool Reactor, THOR)的中子源進行中子照射。完成中子照射之後，試片首先使用高純度鍺輻射偵測儀量測活化鍺核種的活度，並將其轉換為摻雜濃度。之後，設計一系列的退火實驗以修復晶格損傷並活化轉化後的鍺核種，並輔以霍爾效應電性量測及多項材料特性分析中子照射和退火溫度對 NTD-GaN 材料特性的影響。結果顯示，NTD-GaN 的微結構及其摻雜特性與中子照射參數和退火溫度高度相關，並且其晶格損傷程度與快中子的通量成正比。提高熱退火溫度可以促進中子照射損傷和相關缺陷的修復，在 1100℃的退火溫度可達成 95.4%的高摻雜活化率。本研究所獲得的結果預期將有助於建立最佳化的 NTD-GaN 製程參數。

關鍵詞：中子轉化摻雜、清華水池式反應器、氮化鎵、中子照射、摻雜特性、晶格缺陷。

Abstract

Neutron Transmutation Doping (NTD) is a specialized and dedicated method for doping semiconductor materials, providing advantages such as precise control over doping concentration and high doping uniformity within the semiconductor material. It has already been commercially applied to the doping of silicon wafers, serving as an excellent example of the peaceful application of atomic energy in the semiconductor industry. Apart from silicon, gallium elements 69Ga and 71Ga in Gallium Nitride (GaN) semiconductor can also be transmuted into 70Ge and 72Ge through thermal neutron absorption reactions, resulting in n-type dopants. Moreover, compared to silicon, NTD-GaN boasts a higher theoretical doping efficiency. A few studies have preliminarily confirmed the feasibility of NTD-GaN so far. However, due to GaN materials being compound semiconductor, they suffer more complex technical issues related to radiation damage and impurity activation after undergoing high-fluence neutron irradiation. Therefore, this study aims to explore the effects of neutron irradiation parameters and annealing temperature on the characteristics of NTD-GaN materials through different experimental designs. This is done to obtain optimized doping effects and experimental parameters, and to evaluate the feasibility of neutron transmutation doping applied to GaN materials. In this study, heteroepitaxially GaN thin films grown on sapphire substrate were utilized. Neutron irradiation was conducted using the Tsing Hua Open-pool Reactor (THOR) neutron source. After neutron irradiation, the samples were first measured for the activity of activated germanium isotopes using a high-purity germanium radiation detector, which was then converted into the doping concentration. Subsequently, a series of annealing experiments were designed to repair lattice damage and activate the transformed germanium isotopes. Hall effect electrical measurements and various material characteristic analyses were performed to assess the effects of neutron irradiation and annealing temperature on the properties of NTD-GaN materials. The results indicate a strong correlation between the microstructure and doping characteristics of NTD-GaN with neutron irradiation parameters and annealing temperature, and the lattice damage caused by neutron irradiation is proportional to the fluence of fast neutrons. Increasing the annealing temperature promotes the repair of neutron irradiation damage and related defects, achieving a high doping activation yield of 95.4% at an annealing temperature of 1100°C. The findings of this study are expected to contribute to establishing optimized process parameters for NTD-GaN..

Keywords: Neutron Transmutation Doping (NTD), Tsing Hua Open-pool Reactor (THOR), Gallium Nitride (GaN), Neutron Irradiation, Doping Properties, Lattice Defects.

I. 前言

寬能隙半導體材料的研發在近年一直都是非常熱門的研究方向，因其更高效節能和更高功率等優勢被認為是具有極大發展潛力的材料選擇，氮化鎵（Gallium Nitride, GaN）正是其中被認為具有高度發展性的新一代半導體材料，已被視為突破矽基電子元件性能極限的關鍵材料。

中子轉化摻雜（Neutron Transmutation Doping, NTD）是一種特殊的摻雜方法，與傳統的離子佈植法和擴散法相比，可具備精準控制摻雜濃度並達成高度摻雜均勻性的優勢，皆能夠更好地滿足後續製程和元件上的需求[1]。中子轉化摻雜是藉由將基材照射中子的方式，使靶材原子吸收中子，並通過（n, γ）反應衰變轉化成目標原子來達到摻雜效果。雖然中子轉化摻雜已成功商用於矽晶圓，但因氮化鎵屬於新興發展的材料，中子轉化摻雜氮化鎵的相關研究目前仍然相當少數且也不夠深入。中子轉化摻雜應用於氮化鎵材料的反應式如下 [2, 3]：

$$^{69}\mathrm{Ga(n,\gamma)}^{70}\mathrm{Ga} \rightarrow {}^{70}\mathrm{Ge}\ \ (t_{1/2} = 21.15\ \mathrm{min}) \quad (1)$$

$$^{71}\mathrm{Ga(n,\gamma)}^{72}\mathrm{Ga} \rightarrow {}^{72}\mathrm{Ge}\ \ (t_{1/2} = 1.41\mathrm{hr}) \quad (2)$$

$$^{14}N(n,\gamma)^{15}N \quad (3)$$

$$^{14}\mathrm{N(n,p)}^{14}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}\mathrm{N}\ \ (t_{1/2} = 5730\mathrm{y}) \quad (4)$$

$$^{15}\mathrm{N(n,\gamma)}^{16}\mathrm{N} \rightarrow {}^{16}\mathrm{O}\ \ (t_{1/2} = 7.13\mathrm{s}) \quad (5)$$

$$^{27}Al(\mathrm{n},\gamma)^{28}Al \rightarrow {}^{28}Si\ \ (t_{1/2} = 2.25\mathrm{min}) \quad (6)$$

其具有以下兩項優勢：（1）中子轉化摻雜可達成極度均勻的摻雜分佈，可解決化合物半導體利用傳統冶金或磊晶擴散或離子佈植摻雜可能造成的雜質錯置及雜質濃度與種類限制等問題；（2）摻雜效率：由於 III-V 族化合物半導體材料可具有較大的中子吸收截面，相較於矽、鍺等元素半導體可大大提升中子轉換摻雜效率。然而，中子轉化摻雜的過程也會牽涉高通量的中子照射而導致晶格損傷，後續仍需要經由退火製程以回復其缺陷並活化其轉化核種，因此仍有必要進一步的研究以釐清相關變因並最佳化其製程條件。

在本研究中，我們使用生長於藍寶石基板上的異質磊晶氮化鎵樣品，利用清華大學的清華水池式反應器（Tsing Hua Open pool Reactor, THOR）中子源進行樣品的中子照射，並設計不同的中子照射與退火實驗條件，以分析異質磊晶氮化鎵樣品的材料特性與電性隨中子轉化摻雜製程參數的變化，並探討熱處理之於活化率與損傷修復的影響。

II. 實驗方法

2.1 樣品製備與參數

本研究購置兩片市售四吋氮化鎵薄膜晶圓，以有機金屬化學氣相沉積法（Metal-organic Chemical Vapor Deposition，MOCVD）磊晶未摻雜氮化鎵晶層 650 μm 藍寶石基板上，先行磊晶一層約為 50 nm 之未摻雜的 u-GaN 緩衝層，未摻雜之氮化鎵再行磊晶，氮化鎵磊晶層薄膜厚度約為 4.5 μm。兩片晶圓皆切割成尺寸為 11.5 mm × 11.5 mm 的正方形樣品，以方便進行後續的中子照射與特性分析。

2.2 實驗流程與中子照射

本研究的實驗流程圖如圖 2.1 所示。首先，使用位於新竹清華大學的 THOR 反應器進行樣品的中子照射，照射實驗則依實驗規劃選擇位於 THOR 反應器爐心中不同的垂直照射管，分別為 VT-6、VT-E 和 VT-F，這些照射管都具有單獨的中子通量和中子能譜。本研究共設計兩組實驗，詳細參數如表 2.1 所示。實驗一（樣品 A、B）係將樣品接受的熱中子控制在相同的照射通量，並以快中子通量作為變數，藉此探討不同熱/快中子比對氮化鎵材料特性的影響。實驗二（樣品 C）則採用相同的照射管進行更高通量的中子照射，後續並以不同的退火溫度（500~1100℃）進行樣品退火，藉此觀察退火溫度對於晶格回復及其轉化摻雜元素活化的影響。

2.3 材料特性分析

樣品完成中子照射與退火處理之後，使用不同的分析方法進行其材料特性分析，包括：高純度鍺（High-Purity Germanium, HPGe）輻射偵檢器、霍爾效應分析儀（Hall effect analyzer）、X 射線衍射（X-ray Diffraction, XRD）、二次離子質譜（Secondary Ion Mass Spectroscopy, SIMS）以及拉曼散射（Raman scattering）、光致發光（Photoluminescence, PL）、紫外可見光（Ultraviolet-Visible, UV-Vis）吸收光譜等光譜分析。

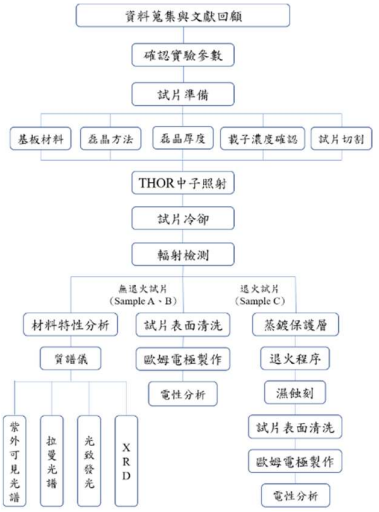


圖 2.1、本研究之實驗流程圖

表 2.1、本研究之中子照射實驗參數

Sample No.	Irradiation Tube	P (MW)	t_{irrad} (s)	Φ_t (n/cm^2)	Φ_f (n/cm^2)	Φ_t/ Φ_f ratio
Experiment I						
A	VT-6	1.7	12600	2.40×10^{16}	4.99×10^{15}	4.81
B	VT-E	1.7	1260	2.40×10^{16}	3.50×10^{16}	0.69
Experiment II						
C	VT-F	1.7	21600	5.81×10^{17}	4.62×10^{17}	1.26

III. 結果與討論

為了確定從中子活化的 ^{72}Ga 核衰變放出的 γ 射線能譜，將曝照於中子並在經過大約 10-15 個半衰期週期內衰變的樣品，放置於 Canberra 型號 747 的鉛屏蔽中，並利用 HPGe 偵檢器進行檢測。SIMS 量測則使用 CAMECA IMS-4f 分析中子照射後氮化鎵中的 N、Ga 和 Ge 原子的分佈，該儀器使用 30 keV、1 pA Bi^+作為主要

入射的離子束，濺射區域為 100 × 100 μm^2。圖 3.1 為完成中子照射後樣品的 SIMS 分析，圖 3.2 為利用 HPGe 偵檢器量測轉化核種的加馬衰變特徵峰譜，由結果可確認樣品中存在經中子轉化的 ^{72}Ge、^{70}Ge 摻雜核種，藉此證實氮化鎵樣品中鎵（Ga）元素的中子轉換摻雜效應。

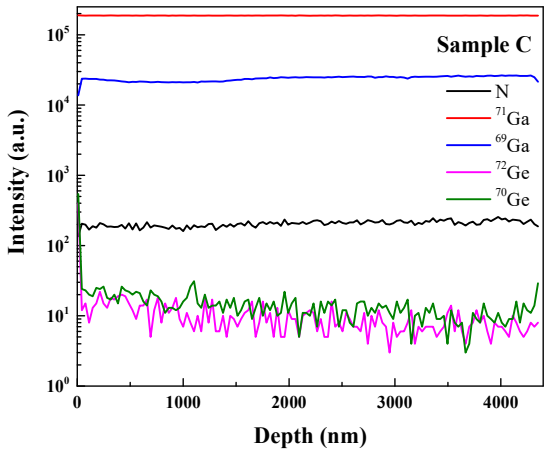


圖 3.1、SIMS 分析結果

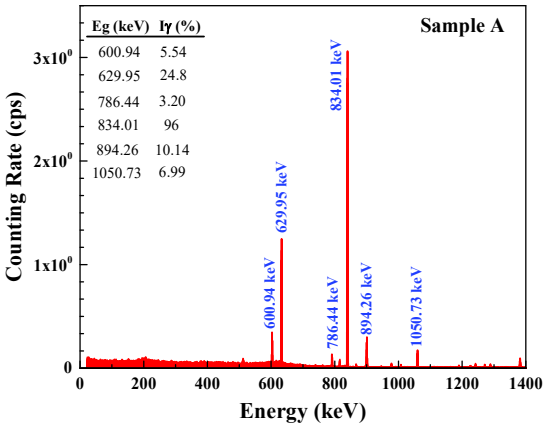


圖 3.2、HPGe 能譜分析結果

藉由 HPGe 偵檢器所測得的特徵 γ 射線峰的計數，可以轉換為相應由中子轉化的 Ga 核種的活度（Ac）[3]：

$$A_c = \frac{C_\gamma \times \lambda}{\epsilon \times e^{-\lambda \times t_{cool}} \times (1-e^{-\lambda \times t_{measure}}) \times I_r \times (1-r_d)} \quad (7)$$

其中，C_γ 是 HPGe 測得的特徵 γ 射線峰的計數數量，λ 是鎵核素的半衰期，ϵ 是系統的計數效率，t_{cool} 是照射後樣品的冷卻時間，$t_{measure}$ 是總測量時間，I_γ 是特徵 γ 射線衰變的概率，γ_d 是檢測期間的 dead time 比率。圖 3.3（a）與（b）所示為樣品 A 與 C 藉由 HPGe 偵檢器量測轉化核種的加馬衰變特徵峰譜活度計算所得的摻雜濃度與理論轉化濃度的比較，由 HPGe 推估的濃度與理論濃度極為接近，而其誤差來源應可歸因於分裂中子源的通量率誤差所致。

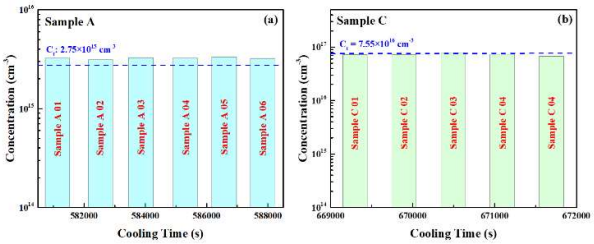


圖 3.3、Ge 轉化濃度計算結果：（a）樣品 A 與（b）樣品 C

圖 3.4 呈現了實驗一原始樣品和中子照射樣品的 XRD 2θ 分析結果。隨著快中子通量的增加，GaN（0002）的 2θ 繞射峰強度降低。中子輻照產生的內部缺陷導致晶格的結晶性降低，進而使得反射光彌散並呈現在（0002）晶向的繞射峰值逐漸降低的現象。在相同的熱中子轉化效應下，樣品 B 受到更高劑量的快中子影響，導致（0002）晶向繞射峰值大幅下降，并且產生拉應力，使繞射峰向低角度位移。因此，樣品 B 中的角度移位可以合理地歸因於中子誘發的晶格損傷。圖 3.5 顯示了實驗一樣品在方位角 ω 下測得的 XRD 搖擺曲線的結果。搖擺曲線中峰值的 FWHM 隨快中子通量呈逐漸增加的趨勢，此表明中子照射導致氮化鎵晶體的結構的變化，除了結晶性劣化之外，由繞射角的位移也可以證實輕微的晶格擴張。由以上結果可知，快中子通量高的樣品所受到的輻射損傷較為明顯，由此推知若期望有較好的摻雜效果並減緩材料的輻射損傷，使用較高熱/快中子比例的照射管應是較理想的選擇。

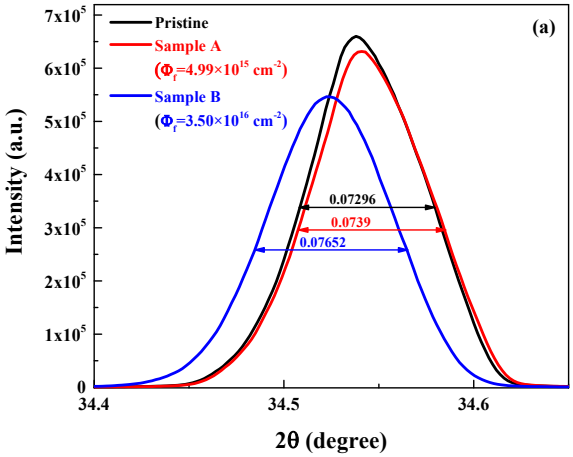


圖 3.4、中子轉化摻雜試片之 XRD θ-2θ 繞射圖譜

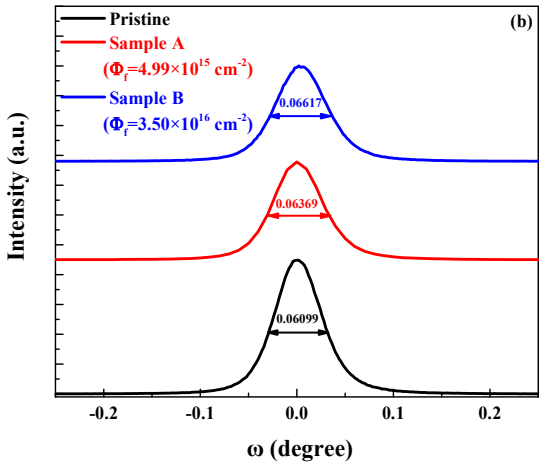


圖 3.5、中子轉化摻雜試片之 XRD rocking curve

對受輻射損傷影響和被轉化雜質活化的電導率分析，則採用 Van der Pauw（VdP）方法，並使用配備 HP4145B 半導體參數分析儀的 Hall 效應測量系統（型號：VdP4145），在室溫下測量其電阻率和霍爾系數。圖 3.6 所示為霍爾效應量測結果，載子濃度或載子活化率隨退火溫度上升而增加，並於退火溫度達 1100ºC 時，達到約 95%的預估濃度轉化率。由此可知中子輻照樣品在發生轉化效應之後，需要在一定的溫度下才可以使得被轉化的摻雜原子回到晶格位置而具備電性活化，並修復經由快中子照射所造成的輻射損傷。

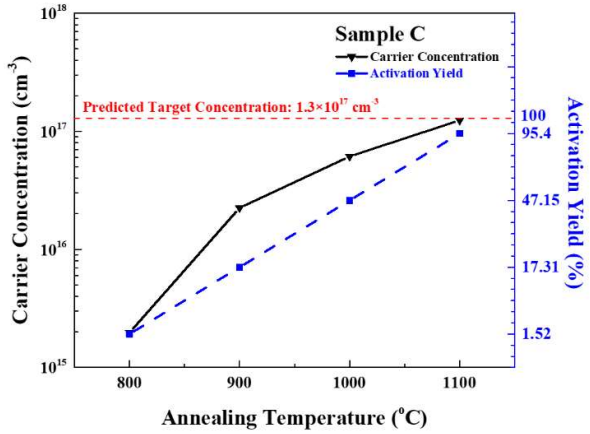


圖 3.6、中子轉化摻雜試片之載子濃度與活化率隨退火溫度之變化

圖 3.7 所示為 UV-Visible 吸收光譜量測結果。由圖可知經過更高中子通量輻照且未退火樣品的透光率（紅線）明顯降低，但隨著退火溫度增加，輻照樣品的透光率可逐漸接近未照射樣品（黑線）的透光率。此退火溫度效應顯示晶格損傷修復之於退火溫度成正比關係，與文獻的結論吻合。此外，根據 Tauc's Method 評估能隙寬度與退火溫度的相關性 [5]，結果顯示能隙寬度的大小隨著退火溫度的增加逐漸接近原始值。

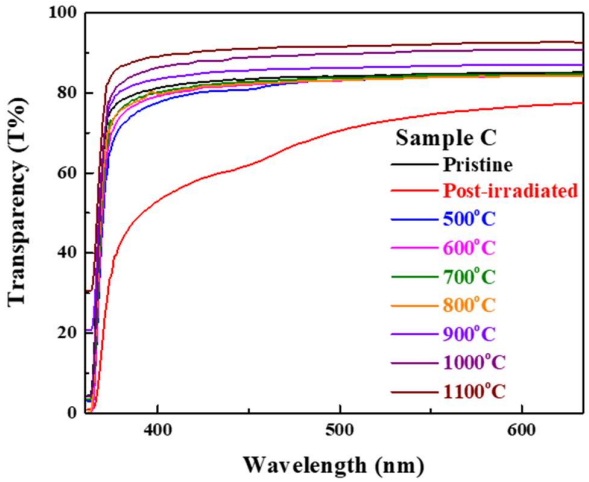


圖 3.7、中子轉化摻雜試片之 UV-Visible 吸收光譜隨退火溫度之變化

圖 3.8 所示為中子輻照樣品隨著退火溫度變化的光致發光 (photoluminescence, PL) 光譜，經過中子照射後，氮化鎵的近帶隙發光 (near-band-edge emission, NBE) 強度急劇下降。隨著退火溫度的增加，其發光強度則呈現逐漸回復的趨勢。退火處理不僅促進了摻雜原子的活化，也進一步消除氮化鎵晶體中的非輻射復合缺陷。然而，即使在 1100°C 的退火溫度下，NBE 發光的峰值強度仍然無法達到未照射的水平，此表示中子照射造成的缺陷在 1100°C 退火之後仍未完全修復。

圖 3.8、中子轉化摻雜試片之光致發光能譜隨退火溫度之變化

IV. 結論

本研究成功證實中子轉化摻雜應用於異質磊晶氮化鎵薄膜的可行性，與早期依賴熱中子主導的中子照射的研究相比，本研究利用了一個照射位置，其快中子和熱中子通量幾乎相等，並且採用目前較為主流的異質磊晶異質磊晶氮化鎵薄膜而非氮化鎵塊材。本研究所獲致的重要成果包括：（1）在 1100℃的退火條件下，可實現高達 95.4%的摻雜活化率。（2）利用 HPGe 偵檢器量測活化 Ga 同位素的活度經驗證為可靠的摻雜量估算法，與霍爾電性分析結果相近，可用於定量估算中子轉化摻

雜氮化鎵中轉化的 Ge 摻雜濃度值。（3）透過光學分析可定性評估輻射損傷，可識別中子照射通量與退火溫度等參數對缺陷及晶體微結構的變化。（4）中子轉化摻雜氮化鎵中的晶格損傷與照射的快中子通量呈現高度相關，雖然在 900℃ 以上的退火條件可有效地回復大部分由快中子所引起的晶格損傷，然即使在 1100℃的退火後仍會有些許殘留缺陷無法被消除。（5）為了提高中子轉化摻雜氮化鎵的商用可行性，進一步減少氮化鎵晶體中的晶格缺陷是至關重要的。透過更有效的退火工藝（高壓退火、更高溫的持溫溫度等），或者是利用特定能量分布的中子能譜進行中子照射，都是未來值得參考的研究方向。

參考文獻

[1] W. E. J. R.E. Davis, K. Lark-Hhorovitz and S. Siegel, Physical Review 74, 1255, 1948.
[2] K. Kuriyama, T. Tokumasu, J. Takahashi, H. Kondo, and M. Okada, Appl Phys Lett 80, 3328, 2002.
[3] R. Barber, Q. Nguyen, J. Brockman, J. Gahl, and J. Kwon, Sci Rep 10, 16295, 2020.
[4] M. P. Patrycja Makula, Wojciech Macyk, *The Journal of Physical Chemistry Letters* 9, 4, 2018.

先進矽鍺場效電晶體元件之製程與抗輻射特性研究
Process and radiation hardness study of advanced SiGe FET devices

計畫編號：NSTC 112-NU-E-007-007-NU
計畫主持人：張廖貴術
e-mail：lkschang@ess.nthu.edu.tw
計畫參與人員：王顥諺、林品翔
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

抗輻射體電路元件在衛星科技與半導體產業製造上，都有很重要的應用。由於高移動率通道與閘介電層製程是發展積體電路元件的關鍵技術，應用矽鍺(SiGe)通道及高介電係數材料(high-K)閘堆疊是很重要的研究題目。本研究探討矽鍺鰭式場效電晶體(SiGe FinFET)、環繞式閘極電晶體(GAAFET)元件之製作與製程開發、SiGe FinFET、SiGe GAAFET 元件之輻射效應量測分析與比較、開發鍺縮合製程以增進 SiGe FinFET、GAAFET 元件之抗輻射特性等。研究結果發現，1P FinFET、2P FinFET、Si GAAFET、1P GAAFET、2P GAAFET 之不同結構的含鍺電晶體，經過 Co-60 輻射後皆造成電特性衰退，原因可能為輻射引起氧化層正電荷堆積、邊界和界面缺陷增加。所有元件電性衰退較以前熱電子可靠度測試的少，推測可能是本研究開發了更高品質的界面層與閘極氧化層，有較少的本質缺陷。鍺含量越高的電晶體其抗輻射能力會越差，在 FinFET 與 GAAFET 皆有相同趨勢。主因是由於 Si 懸鍵或是較弱之 Si-Ge-O 鍵，經過輻射造成斷鍵，形成界面陷阱導致元件電特性劣化。再者，GAAFET 相較 FinFET 明顯地增進了抗輻射能力，特別在漏電流、界面陷阱的減少。

關鍵詞：衛星，抗輻射，閘介電層，矽鍺，鰭式場效電晶體，環繞式閘極場效電晶體

Abstract

The radiation hardening integrated circuit (IC) devices are important for the applications in the science and technology of satellite technology and semiconductor industry production. Since the processes of high mobility channel and gate dielectric are the key technology for IC device, the process study of SiGe channel and high-k gate stack processes are crucial research topics. Several tasks will be carried out in this proposal, including the process development and fabrication of SiGe FinFET and GAAFET, radiation effects and comparison for SiGe FinFET and SiGe GAAFET, improved radiation hardness of SiGe FinFET and GAAFET with Ge condensation processes. The major purposes in this project are the fabrication of radiation hardening SiGe FinFET and GAAFET devices. It is found that electrical characteristics of FinFET and GAAFET with Ge-containing channels are degraded after Co-60 radiation. The reasons may be the accumulation of positive charges in the oxide layer, boundaries and interfaces caused by radiation. The electrical degradation with radiation is less than that with hot electron reliability tests, probably due to higher-quality interface layers and gate oxide with fewer intrinsic defects. The higher the Ge content in channel of a transistor, the worse radiation hardness for both FinFET and GAAFET. The main reason is that Si dangling bonds or weak Si-Ge-O bonds are broken through radiation, forming interface traps and causing degraded characteristics of device. Furthermore, GAAFET has significantly improved radiation resistance compared to FinFET, especially in reducing leakage current and interface traps.

Keywords: Satellite, Radiation hard, gate dielectric, SiGe, FinFET, GAAFET device

I. 前言

半導體製造在我國是一重要產業，其中積體電路(IC)技術水準已領先國際。半導體晶片大量使用於日常生活及各種裝置，已經是不可或缺的電子零組件。近年來隨著太空科技與核能技術的進步，半導體元件技術在該領域的應用越來越受到人們的重視。再者，半導體與太空技術開發都符合國家重點科技項目。隨著積體電路元件之奈米化與製程複雜化，介電層的品質要求將更嚴格，因此絕緣層或閘高介電層之界面、漏電流等特性是當前研發的重點。由於人造衛星使用大量太空等級半導體元件等，因而輻射或荷電粒子對半導體元件產生的傷害與防治是非常重要的研究課題。一般的太空任務都位於近地軌道(low earth orbit, LEO)，其軌道高度小於 2000 公里，台灣的福爾摩沙衛星七號任務也都是在近地軌道**[1]**。

由於積體電路 CMOS 製程技術的持續進步，使得電晶體的 feature size 持續縮小。然而當電晶體的 feature size 縮小到低於 45 nm 以下時，傳統的 Bulk CMOS 電晶體會遇到三個嚴重的挑戰：(1)Drain 與 source 之間的次臨界漏電流(subthreshold current)越來越嚴重(2)閘極漏電流也是越來越嚴重(3)由於製程變異(process variation)的影響，導致晶片中的每顆電晶體的 doping 濃度會有所差異(稱為 doping fluctuations)。電晶體的臨限電壓是跟電晶體的 doping 濃度有關係，但由於電晶體的 feature size 的縮小，稍微的 doping 濃度差異即會引起極大的臨限電壓差異。因此，Bulk CMOS 電晶體的臨限電壓極易受到製程變異的影響。由於鰭式場效電晶體(FinFET)沒有傳統 Bulk CMOS 電晶體的上述問題，並且 FinFET 的製程跟傳統 Bulk CMOS 的製程差異不大，因此在 20 nm 以下的製程，FinFET 電晶體被認為是實現 ULSI 電路的更好選擇**[2]**。FinFET 電晶體的結構**[3]**，連接 Drain 與 Source 之間的通道的形狀像魚鰭(Fin)一

樣，也就說此通道的外型高而薄。而控制 Drain 與 Source 之間的通道是否能導通的閘極(Gate)，其形狀就像ㄇ字型，緊緊圍住通道的三面，因此閘極上的電壓對通道有比較好的控制性，可以輕易地控制通道是導通或是關閉。三面包覆閘極電晶體 FinFET 的電特性雖然比平面 MOSFET 有明顯改善，為了進一步增進閘極靜電控制能力，四面全包覆閘極電晶體 GAAFET 元件已有許多研究報告，可以更增進元件特性**[4]**。GAAFET 在抑制短通道效應上比 FinFET 有著更好的效果，除此之外，對於元件微縮的極限中，以 GAAFET 趨向有著最小微縮可能性。

近年來，為使 IC 電路元件操作速度有更快的表現，提升載子遷移率是一個勢在必行的方向，有許多研究使用 SiGe 或 Ge 基板增加載子遷移率，進而使得元件的操作速度得到提升。而 Ge 相對於 Si 而言，載子遷移率分別對電子提升了兩倍(3900cm2/Vs)以及對電洞提升了四倍之多(1900cm2/Vs)**[5-7]**。雖然鍺以高遷移率來提升電晶體的驅動電流，但是鍺價格很高且熱穩定很差，所以發展出矽鍺通道磊晶在純矽基本上的技術。在純矽基板上磊晶矽鍺通道，因為鍺原子相較於矽原子還要來的大，所以在磊晶矽鍺通道的過程中，由於晶格常數不匹配的關係很容易產生錯位(misfit)進而在整個矽鍺薄膜裡面生成螺旋狀或線狀的缺陷(threading)**[8]**，因此，當矽鍺通道在磊晶的過程中假如直接的提高鍺的磊晶含量比例，會使得系鍺薄膜內的錯位大量的增加而使得薄膜的品質下降，更進一步地會影響到後續製作的電晶體的驅動電流，和閘極漏電流的上升。為了要解決磊晶矽鍺時因原子大小和晶格常數產生的錯位和缺陷，鍺純化(condensed of Ge in SiGe layer)技術可以解決此問題。由文獻得知**[9]**，矽鍺通道內的鍺含量和矽鍺薄膜厚度的關係，故可以得到不同的鍺含量對應的矽鍺薄膜臨界厚度(critical thickness)。當鍺含量提高的時候臨界厚度也會急遽的變薄，由於此物理特性的限制，所以用傳統的磊晶技術是無法得到一層很薄又高濃度的鍺含量的矽鍺薄膜。

高 Ge 含量的 SiGe 通道，其載子遷移率可望接近 Ge，而形成的 S/D 接面漏電流可以降低，閘極界面層的熱穩定性也將改善，因此 SiGe condensation 技術很可能是兼顧高效能與低功耗 CMOS 的可行方法。根據相關文獻**[10]**，當矽鍺薄膜氧化時，鍺原素會析出在氧化層和矽鍺薄膜兩者之間的介面處，形成一層鍺濃度較高的矽鍺層。因為其氧化過程中鍺原素不會消失，且在矽鍺薄膜氧化時，因為二氧化矽的生成熱為(-204 kcal/mol)二氧化鍺的生成熱為(-119kcal/mol)，矽會和氧優先反應生成二氧化矽，鍺元素留下且二氧化矽會變成一阻擋層阻礙氧氣進入矽鍺層中，所以最後將形成一層高濃度的矽鍺層和表層的二氧化矽。在一片矽基板上面磊晶低含量的矽鍺薄膜以得到品質不錯的薄膜品質，接著再將以磊晶好矽鍺薄膜的晶圓推送進去爐管成長乾式氧化層，在 1000 度的環境下成長 3nm 的二氧化矽。矽鍺通道內的矽被氧化過後，由於二氧化矽是非常穩定的化合物，所以會防止矽鍺通道內的鍺繼續與外界的氧反應，故在矽鍺通的表面上的矽會被氧給氧化形成薄薄的一層二氧化矽，再將二氧化矽用氫氟酸(HF)將二氧化矽給去除，如此重複幾個循環，就可以得到一層提高鍺含量的矽鍺通道，但又能夠維持住矽基板與矽鍺薄膜接面的錯位數目，最終得到一個品質相當良好又擁有高鍺含量的矽鍺通道。

本研究計畫之主要目的係開發鰭式場效電晶體(FinFET)及環繞式閘極電晶體(GAAFET)元件抗輻射製程，將探討元件中絕緣層與高介電層之輻射效應，進行測量分析並以製程方法減少元件之輻射傷害。本研究計畫之最大宗旨在培育輻射應用技術與半導體產業之人才，其工作目標有以下幾項，一為 SiGe FinFET、SiGe GAAFET 元件之製作與製程開發，二為 SiGe FinFET、SiGe GAAFET 元件之輻射效應量測分析與比較，三為開發鍺縮合製程以增進 SiGe FinFET、GAAFET 元件之抗輻射特性等。這些研究目標是積體電路元件很重要的製程研發課題，也將提出抗輻射製程與可靠度分析。

II. 主要內容

本計畫的 FinFET/GAAFET 元件結構與製程流程，如**圖 1**、**圖 2** 所示。本實驗使用八吋 P 型 SOI 晶圓，阻值介於 8～12 Ω-cm。對 SOI 晶圓進行 RCA 清洗，然後定義出零對準層，做為後續曝光的對準點。然後在兩片 SOI 上分別磊 5nm Si0.8Ge0.2 與 5nm Si，一個循環 1 period (1P)以及兩個循環 2 period (2P)的磊晶(後面以 1P/2P 代稱)。呈現兩層以及四層 Si0.8Ge0.2 與 Si 交叉堆疊的超晶格層，形成兩種不同堆疊的矽鍺超晶格基板。再進行 RCA 的標準清洗、電子束微影技術完成通道、主動區光阻圖案，並以特殊蝕刻方法，非等向性乾蝕刻出鰭狀通道，蝕刻後去除 hard mask 以及光阻。下一步為了做出不同閘極結構，使用 HF:H2O=1:10 的 DHF 分別浸泡不同秒數。進而達到通道下的 SiO2 絕緣層(BOX)蝕刻。接著用 H2O2 75 度進行 180 秒的介面氧化層成長。後續的元件製程與一般相同。完成元件後，接著送到清大同位素館進行 Co-60 不同輻射劑量的照射，完成後即拿回清大工科進行量測。**表 1** 為不同輻射傷害對不同閘極結構參數表。Co-60 以不同輻射劑量 10k、100k、1000k (rad)照射後，量測元件電特性變化。依據國家太空中心所提供資料，福衛五號在近地軌道的輻射環境，經鋁(Al) 3 mm 厚度後，電子元件每年吸收的 TID 值大約是 10 Krads (Si)。利用 HP 4156B 機台進行金氧半電晶體的基本電性量測，其量測包括轉移特性曲線(Id-Vg)、直流特性曲線(Id-Vd) 、臨界電壓(Vth)、最大轉導值(Gmmax)、汲極電流(Id)、次臨界斜率(S.S.) 、汲極引發位能障降低(DIBL)；在電容器的量測，主要是利用 HP 4156B 與 Agilent 4284A 量測 Cgb、Jg-Vg。。

III. 結果與討論

本研究計畫依照原規畫工作完成了 SiGe FinFET、SiGe GAAFET 元件之製作與製程開發、SiGe FinFET、SiGe GAAFET 元件之輻射效應量測分析與比較、開發鍺縮合製程以增進 SiGe FinFET、GAAFET 元件之抗輻射特性等。以下分別簡要敘述主要的結果。

本實驗為 Si/SiGe 1P 之 n-FinFET、n-GAAFET、Si/SiGe 2P 之 n-FinFET、n-GAAFET 以及 Si n-GAAFET 共五個樣品，經過不同輻射傷害後馬上量測記錄之後做電特性分析以及可靠度測試。

圖 3、**圖 4** 為不同輻射傷害對 1P/2P/Si FinFET/GAAFET 轉換特性之對數圖與汲極電流對汲極

電壓圖。由 ID-VG 分別計算出 S.S.、ION、Ioff、on/off ratio 以及 Gm。圖中可以觀察到不同閘極結構超晶格 SiGe/Si 電晶體經輻射後。所有電特特性不管是 FinFET 還是 GAAFET 其電性皆有劣化。

根據相關文獻報告，輻射效應在導通電流變化影響較小，而在截止漏電流劣化會較明顯。輻射導致損傷的機制說明，可由一個 P 型基板金屬-氧化物-矽(MOS)電容的閘極上，施加正偏壓的能帶圖來說明。當輻射的能量高於材料的能隙時，可能會激發出電子-電洞對(e-h pairs)。這些 e-h pairs 存在的時間非常的短暫，大部分的電子會受到正偏壓影響，迅速往閘極方向移動剩餘則會跟電洞複合。而電洞因為電場的關係，會往 Si/SiO2 介面飄移。一部分將會被氧化層中靠近介面附近的能階捕捉，形成氧化層捕捉正電荷(Positive oxide trapped charges)。由於 SiO2/Si 介面上的 dangling bond 氫離子鍵結比起其它原子鍵結力較弱，斷鍵的氫離子會被驅動到介面形成介面缺陷(Interface traps)。而這些因輻射產生之陷阱，會造成元件電特性退化。

因此將本研究元件的導通電流與關閉電流退化比例對總輻射劑量歸納於**圖 5**。可以發現 FinFET 與 GAAFET 在導通電流退化部分皆很微小，但關閉狀態漏電流上升較明顯，與文獻結果一致。另外從一個堆疊週期(1P)與兩個堆疊週期(2P)的元件比較中來看，2P 皆比 1P 劣化程度嚴重，而純矽通道則較無劣化趨勢。推測原因是因為 2P 相對 1P 鍺含量較高，通道介面有更多不穩定的 Si-Ge-O 鍵結之弱鍵。在輻射的高能量下更容易打斷原子鍵結、產生電子電洞對，導致在元件界面產生大量的界面陷阱數量ΔNit 或氧化層電荷ΔNot。界面的總陷阱量較多使得 2P 元件在導通電流與截止電流上，相對純矽元件有較大幅度的退化。

為了證實元件電特性退化的推論，是因為在輻射照射中產生大量的介面缺陷造成。本研究也利用次臨界擺幅(Subthreshold swing, S.S.)測量，它主要是因為介面缺陷而變化的特性。本研究所有元件之 S.S. 變化量之盒狀圖，如**圖 6**，從中可以明顯看出 FinFET 與 GAAFET 趨勢皆相同。隨著輻射量的增加 S.S.也隨之增加與上述推論一致。另外從圖 6 (a)(b)中 1P FinFET 與 2P FinFET 的 S.S.的變化量可以看出，鍺含量較高的 2P 元件其 S.S.變化量較大，符合上述鍺含量愈多之元件，受到的輻射傷害會較大之推論。

IV. 結論

本研究計畫完成了規劃的工作項目，探討了 1P FinFET、2P FinFET、Si GAAFET、1P GAAFET、2P GAAFET 之不同結構的含鍺電晶體，經過 Co-60 輻射後的影響。對電晶體會造成電性衰退，衰退原因可能為輻射引起氧化層正電荷堆積、邊界和界面缺陷增加。所有元件電性衰退較以前熱電子可靠度測試的少。推測原因為本研究開發了更高品質的界面層與閘極氧化層，有較少的本質缺陷。且較薄的閘極氧化層其輻射釋放的能量也較小，使因輻射產生之電子-電洞對較少。因此元件受到的輻射傷害較低。在基本電性上鍺含量越高的電晶體其抗輻射能力會越差，在 FinFET 與 GAAFET 皆有相同趨勢。主因是由於 Si 懸鍵或是較弱之 Si-Ge-O 鍵，經過輻射造成斷鍵。形成界面陷阱導致元件電特性劣化。因此如何使用有效的界面處理方式達到補強鍵結的效果，來提升含鍺電晶體的抗輻射能力，是非常值得研究的項目。

參考文獻

[1] http://tacc.cwb.gov.tw/v2/mission.html
[2] M. Agostinelli et al, VLSI Tech, p. 232, 2010.
[3] S. A. Tawfik, ICM, p. 171, 2007.
[4] Y. Tian et al., 2007 IEEE International Electron Devices Meeting, p. 895.
[5] D. K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, third edition, 2006.
[6] D. Kuzum, et al., IEDM Tech. Dig., 2009, pp. 1-4.
[7] R. Zhang, et al., IEDM Tech. Dig., 2011, pp. 28.3.1-28.3.4.
[8] L. J. Liu, et al., IEEE Electron Device Letters, vol. 33, no. 9, p. 1264, 2012.
[9] C. H. Fu et al., IEEE Electron Device Letters, vol. 33, no. 2, p. 188, 2012.
[10] K.-W. Jo, et al. IEEE VLSI Tech. Symposium, p. 196, 2018.

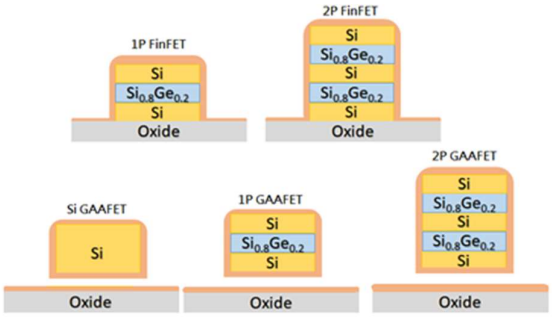


圖 1 元件結構圖

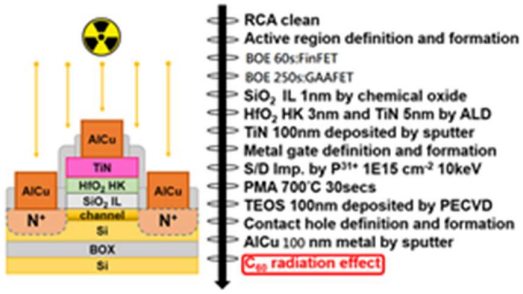


圖 2 本計畫 FinFET/GAAFET 元件製程流程圖

表 1 不同輻射傷害對不同閘極結構參數表

Gate shape	Finfet(8") (n-type)		GAA(8") (n-type)		
Sample	1P	2P	Si	1P	2P
Radiation dose	Virgin/10k/100k				
Contact	Al-Si-Cu 200nm				
Metal gate	TiN 80nm				
High-k	HfO_2 3nm				
Interface layer	$SiO_2$1nm				
Channel material	Si/SiGe	Si/SiGe/Si/SiGe	Si	Si/SiGe	Si/SiGe/Si/SiGe
Substrate	SOI				

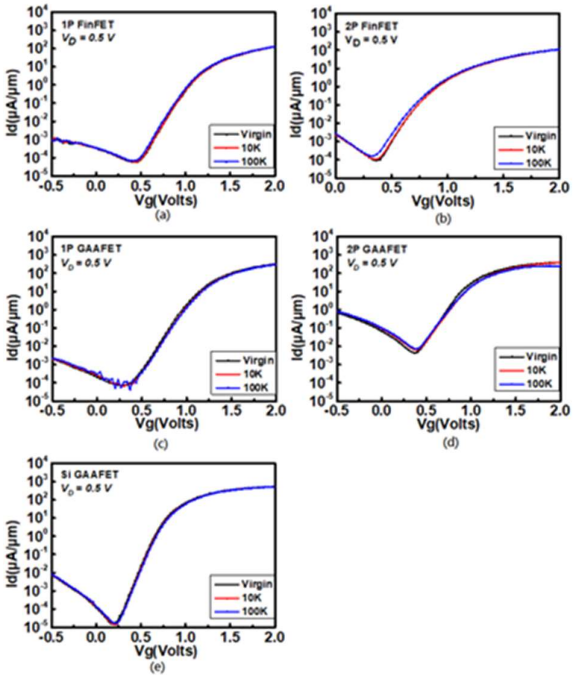


圖 3 不同輻射傷害對 1P/2P/Si FinFET/GAAFET 轉換特性之對數圖

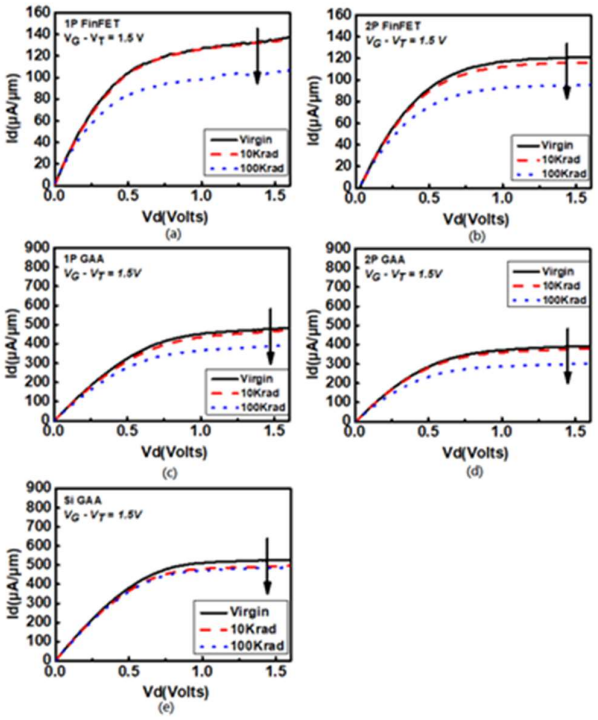


圖 4 不同輻射傷害對 1P/2P/Si FinFET/GAAFET 汲極電流對汲極電壓圖

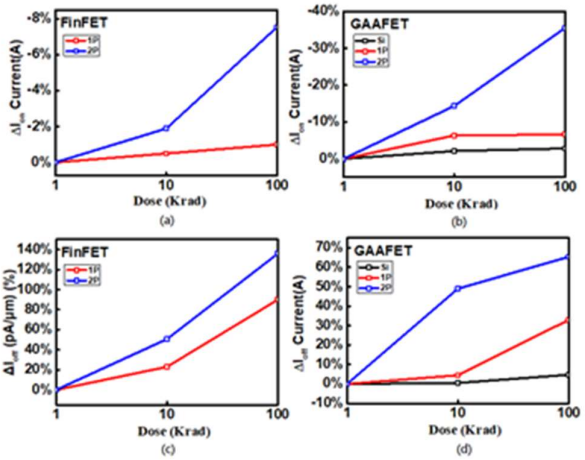


圖 5 1P/2P/Si FinFET/GAAFET 照射輻射後(a)(b)Ion 與(c)(d)Ioff 退化比例對總輻射劑量圖

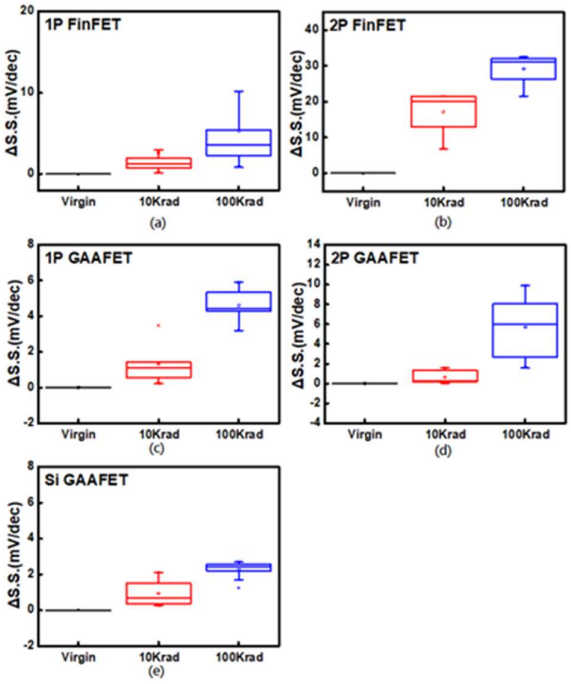


圖 6 1P/2P/Si FinFET/GAAFET 照射輻射後 S.S.變化量對總輻射劑量盒狀圖

X 光、電子等量子束於氧化亞銅異質奈米結構光電化學產氫膜層之材料分析研究與人才培育(第二年)

Material Analysis Research and Talents Cultivation of Using X-ray and Electron Beams to Analyze Cu2O Heterogeneous Nanostructures Films for Photo- electro-chemical (PEC) Hydrogen Generation Application (II)

計畫編號：NSC 112-NU-E-214-001-NU
計畫主持人：劉文仁
e-mail：jurgen@isu.edu.tw
計畫參與人員：陳冠銓、胡冠毅、張育弘、張力文、鄭博仁、吳昇晃
執行單位：義守大學/材料科學與工程學系

摘要

近年來，氫能被認為是理想燃料，而光電化學產氫則是利用豐富的太陽能和水資源進行製氫的理想模式。半導體光電化學產氫為近年來熱門之研究方向，光電材料經光線照射後，光的能量大於光電材料本身的電子能隙，就能把光電材料的價帶中受束縛的電子激發至導帶產生電子-電洞對，進而躍遷至材料的表面，電子與溶液中的氫離子進行氧化還原反應可產生出氫氣。

本年度計畫目的採用低成本、低毒性和操作方便之常壓電漿鍍膜系統，進行 WO_3 與染敏太陽能電池(DSSC)電力驅動、PEC 產氫之工作電極材料設計、製作與分析之開發。於高純度銅片表面利用低溫常壓電漿噴流系統與熱氧化方法，製作高比表面積之高準直性 Cu_2O 奈米線(NWs)結構膜層，以研究其作為 PEC 產氫光電極之相關核心技術。同時利用低溫常壓電漿噴流鍍膜系統，鍍覆 ZnO 奈米顆粒於 Cu_2O 奈米線表面，使其形成 Cu_2O/ZnO 奈米線異質 PN 結構的光電極，同時配合本團隊近二年發展之前述 WO_3 與 DSSC 膜層，形成 WO_3 與 DSSC 驅動之 PEC 系統，探討奈米線異質膜層型態與組合等微觀結構對 PEC 產氫效率之影響評估。顯示於無外加電力、純光電效應下之 PEC 產氫設計，於 5 小時的數據呈現穩定的產氫效率，顯示膜層相當穩定，產氫效率已由上年度 1.73%大幅提升至 5.63%，成果已發表於 OPTIC2023 國際會議。

關鍵詞：光電化學、異質結構、染敏太陽能電池、奈米結構、產氫。

Abstract

In recent years, hydrogen energy has been considered as an ideal fuel, and photo-electro-chemical (PEC) hydrogen production is an ideal mode for hydrogen production using abundant solar energy and water resources. Semiconductor PEC hydrogen production is a hot research direction in recent years. The photoelectric material is irradiated with light, the energy of the light is greater than the energy gap of the photoelectric material itself, and the bound electrons in the valence band of the photoelectric material can be excited to the conduction band to generate electron-hole pairs, and then jump to the surface of the material. The redox reaction between the electrons and the hydrogen ions in the solution can produce hydrogen gas.

The purpose of this year's project is to use a low-cost, low-toxicity and convenient-operation atmospheric pressure (AP) plasma deposition system to synthesize hybrid cuprous oxide (Cu_2O) and zinc oxide (ZnO), WO_3 and TiO_2 films for the working electrode materials in the application of PEC hydrogen generation. A low-temperature AP plasma deposition system and thermal oxidation method were used to form a high-specific surface area and high-aligned Cu_2O nanowires (NWs) on the surface of a high-purity copper sheet as a PEC hydrogen generation photo-electrode. Subsequently, the AP plasma deposition system is used to synthesize ZnO nanoparticles (NPs) on the surface of Cu_2O NWs to form a photo-cathode with a heterogeneous P-N structure. At the same time, WO_3 nano-rodes (NRs) and TiO_2 nano-dendrites (NDs) films were deposited by the AP plasma system. WO_3 NRs was connected to the Pt-counter electrode of a DSSC, and dye-sensitized TiO_2 of the DSSC was wired to the hetero-nanostructure composed of P-type Cu_2O nanowires (NWs) and N-type ZnO nanoparticles (NPs). The PEC hydrogen production design without external power and pure photo-electric effect revealed stable hydrogen production efficiency after 5 hour light irradiation. It indicated that the film is quite stable and the hydrogen production efficiency has been significantly improved from 1.73% to 5.63%. The results had presented at OPTIC2023 international conference.

Keywords: Photo-electro-chemical, Hetero-structure, Dye-sensitized solar cell, Nanostructure, Hydrogen generation

I. 前言

在材料研究中，各式各樣的分析儀器通常被用來協助技術開發(Technology development)、製程監控(Process monitoring)、故障分析(Failure analysis)和進行產品功能異常偵錯(Products debug)等研究。材料製程係指材料本身之生產、合成、加工及改質處理…等；顯微結構係指探討材料在不同尺度(微米或奈米)之細微結構及原子排列缺陷等；材料性質係指探討材料本身所表現物理或化學性質；材料應用:不同材料在不同工程領域之應用。而獲取正確的材料結構與成份，取決於正確的製程並影響後續在光、電、機、磁等性質的應用，因此，學習材料分析技術的理論與實作應用至為重要。

在 P 型 Cu_2O 鍍覆至其他 N 型材料建立 NP 結構的光電極之方案中，例如 ZnO、TiO_2、$SrTiO_3$ 等鍍覆氧化亞銅，其中值得特別注意的是在 2016 年 Gratzel 發表的

一篇論文中[1]，他們將 P 型 Cu_2O 表面上製備上 ZnO、TiO_2 和 RuO_2 的技術中，在光電化學分解水上有極高的效益[1-5]。

本研究延續第一年計畫之研究目的與成果，主要透過「原子能科技學術合作研究計畫」進行 X 光、電子等量子束科學之材料分析技術，培育基礎科學人才，進行「綠氫」材料之開發研究，整個研究概分為四個階段進行。第一階段為第一年之結果進行再現性實驗，採用低成本、低毒性和易合成的方式，在銅箔上利用不同製程製備出一維方向成長之高表面積的氧化亞銅(Cu_2O)奈米線薄膜型態。後續為了進一步提升整體光電化學產氫效率，透過常壓電漿系統搭配化學氣相沉積法製備氧化鋅奈米顆粒附著於氧化亞銅奈米線表面，形成 PN 異質結構，在電極表面有效快速分離電子電洞對及增進對水的氧化還原反應，與第一年製作 PN 結構之光電化學反應及光電流進行差異比較與探討。第二、三階段則同時開發六方晶結構(Hexagonal structure)三氧化鎢(WO_3)奈米棒(Nano-rods, NRs)膜層與染料敏化太陽能電池所需之二氧化鈦(TiO_2)奈米樹枝(Nano-dendrites, NDs)膜層等，進行微觀結構與光電性質的分析。第四階段則將前面三階段開發之膜層整合組成無外加電力系統的「染料敏化太陽能電池驅動之 PEC 系統」，如圖 1-1 所示，探討 Cu_2O 奈米線異質膜層微觀結構對光電化學產氫效率之影響評估，並與外加電力系統的 PEC 系統進行差異比較與探討。本研究成功實踐「人工水草(Artificial Water Grass)」進行無外加電力、純光電效應下 PEC 產氫作用的可能性，利用豐富的太陽能和水資源進行製氫的理想模式。

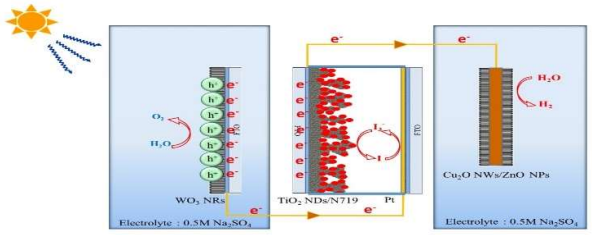


圖 1-1 本研究之 WO_3 與 DSSC 電力驅動之 PEC 產氫示意圖

II. 研究方法

本實驗主要以光電化學產氫(PEC)以及使用三極式電化學測量其光電流為主。銅片上成長 ZnO/Cu_2O 異質結構、FTO 基板上分別沉積 WO_3 與 TiO_2 之詳細實驗流程圖如圖 2-1 所示。以下僅針對銅片上成長 ZnO/Cu_2O 異質結構之步驟進行說明。

A. 銅片裁剪：將原先拿到的銅基板(ASTM C11000)裁剪成適當大小以利後續實驗製備。

B. 銅片清潔：將裁切好的銅基板使用丙酮、異丙醇、乙醇以及去離子水進行超音波震盪來去除原先基板上的高分子抗氧化膜層以及殘留在基板上其他不必要的雜質。

C. 選用蝕刻溶液：先在銅箔上使用硫酸在表面進行蝕刻處理，讓銅原子游走在晶界上作為擴散路徑，與環境氧氣做結合，以利快速成長出奈米線。

D. 在銅片上成長奈米線：透過使用熱氧化法、空氣電漿沉積系統、氮氣電漿沉積系統以及空氣電漿沉積系統＆熱氧化法的混和製程來製備出密度高且長度及直徑較佳的奈米線。

E. 奈米線膜層上沉積氧化鋅(ZnO)奈米顆粒：選用空氣電漿系統搭配前驅物霧化震盪器系統來霧化相對前驅物溶液製程，將鍍覆出氧化鋅奈米顆粒與薄膜於高比表面積奈米線表面來提升光電流及穩定效能 ZnO/Cu_2O 異質結構。

F. 實驗所製備之膜層透過 FE-SEM、XRD、TEM、XPS、UV-Vis、EIS 等儀器，分別進行膜層表面型態、微觀結構、鍵結、能隙、阻抗等材料分析。研究期間將利用太陽能模擬器與三極式電化學分析儀進行光電化學反應及太陽能轉氫效率(STH)之評估。

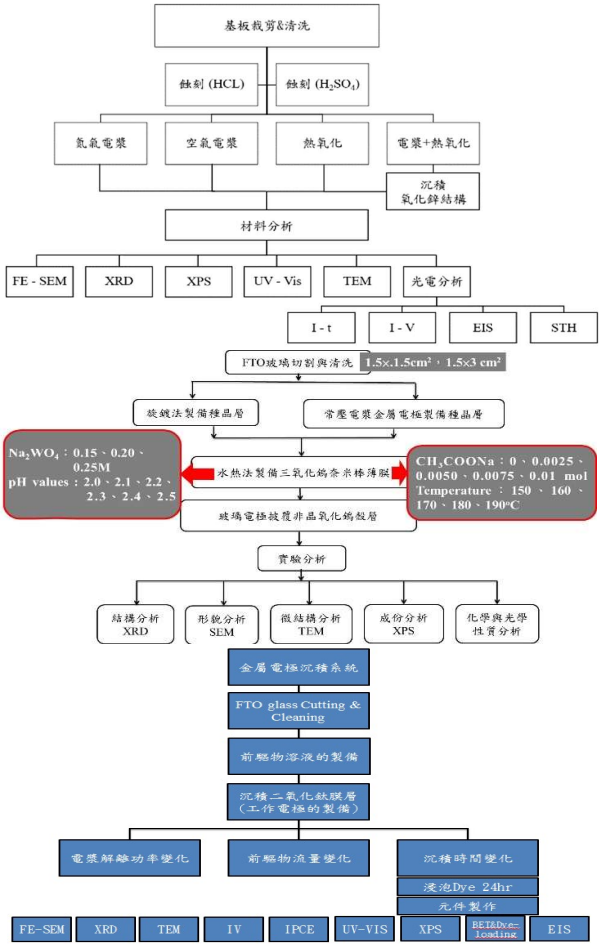


圖 2-1 實驗流程圖

III. 結果與討論

3-1 ZnO/Cu_2O 奈米線異質膜層

本研究第一階段目的採用低成本、低毒性和易合成的方式，在銅箔上利用不同製程製備出一維方向成長之高表面積的氧化亞銅(Cu_2O)奈米線薄膜型態，根據實驗結果在 300°C(1h)的電漿與熱氧混合製程之光電流密度在 0V(vs. RHE)量測出單層最大值為-2.92 mA/cm^2，如圖 3-1(a)。後續為了進一步提升整體光電化學產氫效率，分別透過常壓電漿系統搭配化學氣相沉積法製備氧化鋅奈米顆粒與二氧化鈦奈米顆粒附著於氧化亞銅奈米線表面，形成 PN 異質結構，在電極表面有效快速分離電子電洞對及增進對水的氧化還原反應，實驗結果顯示：在 200°C(20sccm)沉積 10s 氧化鋅奈米顆粒下，光電流密

度在 0V(vs. RHE)量測出雙層可達到-7.72 mA/cm^2，如圖 3-1(a)，並且在 ZnO/Cu_2O 的太陽能產氫效率最大可到 1.73%，如圖 3-1(d)。

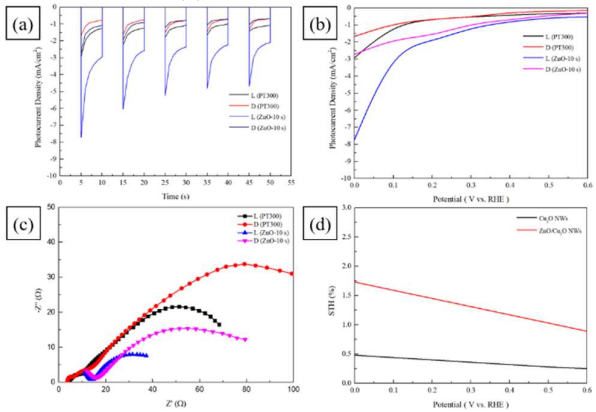


圖 3-1 顯示最佳製程條件下 Cu_2O NWs 與 ZnO/Cu_2O NWs(a)I-t；(b)I-V；(c)EIS；(d)STH

3-2 三氧化鎢奈米棒膜層

本研究第二階段目的為使用自行開發之常壓電漿噴流(Atmospheric Pressure Plasma Jet)金屬電極沉積系統於 FTO 玻璃基板上製備種晶層，如圖 3-2 所示，以輔助水熱法，並探討其對水熱法生長三氧化鎢奈米棒膜層之影響。本實驗沉積種晶層 WO_3 膜層以羰化鎢粉末(Tungsten hexacarbonyl 99%, $W(CO)_6$)當作前驅物，透過改變電漿功率、膜層沉積時間及前驅物流量進行實驗研究。將已鍍有種晶層之 FTO 基板置入由鎢酸鈉(Sodium tungstate, Na_2WO_4)、鹽酸(Hydrochloric acid, HCl)、草酸(Oxalic acid, $H_2C_2O_4$) 及 醋 酸 鈉 (Sodium acetate, CH_3COONa)所調配之水熱前驅溶液中，透過此四種藥品之濃度參數、水熱反應之溫度及時間的改變進行實驗，成長六方晶結構(Hexagonal structure)之三氧化鎢變色層膜層，如圖 3-3 所示。在經過乾式種晶層之輔助水熱法生長三氧化鎢奈米棒薄膜，其穩定性經過 2000 次循環結果相當佳，如圖 3-4 所示，成果已發表於 OPTIC2023 國際會議。

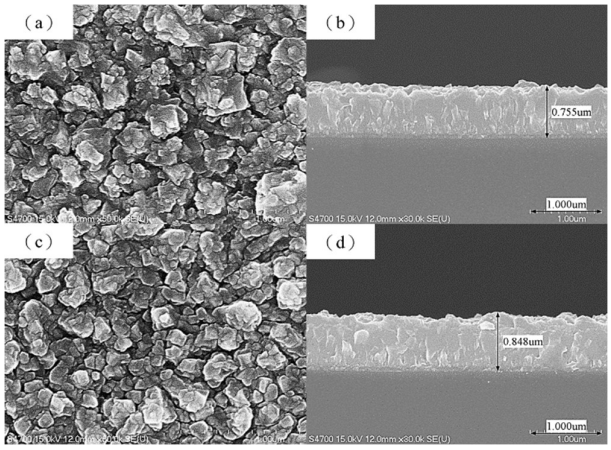


圖 3-2 不同電漿功率，基板溫度 500℃於空氣流量 20 slm，前驅物流量 50sccm，沉積時間 8min，工作距離 20 mm 下所沉積之種晶層 SEM 上視圖及橫截面圖。(a、b)330W，(c、d)440W

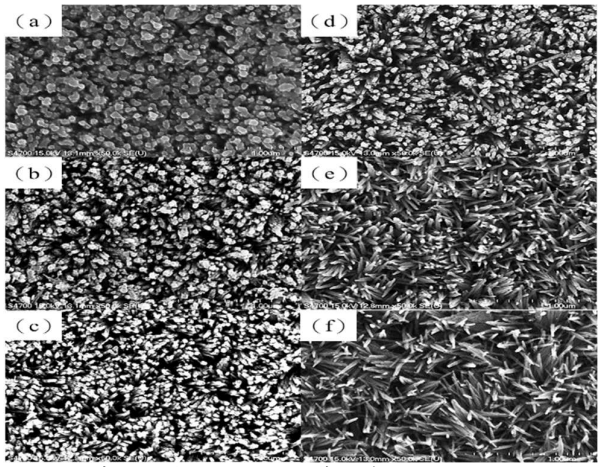


圖 3-3 以基板溫度 500℃，電漿功率 330W 之種晶層輔助水熱生長三氧化鎢奈米棒，不同 PH 值之 SEM 上視圖。(a) PH 2.0；(b) PH 2.1；(c) PH 2.2；(d) PH 2.3；(e) PH 2.4；(f) PH 2.5。

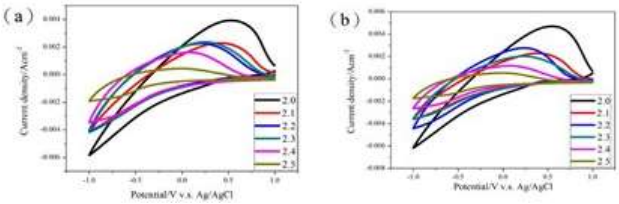


圖 3-4(a)基板溫度 400℃，電漿功率 440W 之種晶層輔助水熱生長三氧化鎢奈米棒，不同 PH 值之電化學曲線圖。(b) 基板溫度 500℃，電漿功率 330W 之種晶層輔助水熱生長三氧化鎢奈米棒，不同 PH 值之電化學曲線圖

3-3 二氧化鈦奈米樹枝膜層

本研究第三階段目的為使用自行開發之常壓電漿噴流(Atmospheric Pressure Plasma Jet)金屬電極沉積系統，以化學輔助氣相沉積法製備二氧化鈦膜層於 FTO 透明導電玻璃上，並且後續再結合水熱法製程作為染料敏化太陽能電池(DSSC)之工作電極，搭配 N719 染料及含碘離子的電解液組裝成染料敏化太陽能電池元件，並以 FE-SEM、XRD、I-V、UV-Vis、TEM 進行膜層之各項材料分析。在實驗過程中，已研究出固定且較佳的電漿功率、距離、溫度、主電漿氣體流量及前驅物流量，而因為改變前驅物霧化系統，所以分別改變膜層沉積時間，目的為提升樹狀結構(如圖 3-5 與 3-6 所示)的高度、密集性及空孔性，再結合水熱法製程生長奈米多孔刺蝟狀結構，進而提升膜層對於染料的吸附量，以達到提升光電轉換效率的目的，此實驗最佳光電轉換效率已達 12.08.%，成果已發表於 OPTIC2023 國際會議。

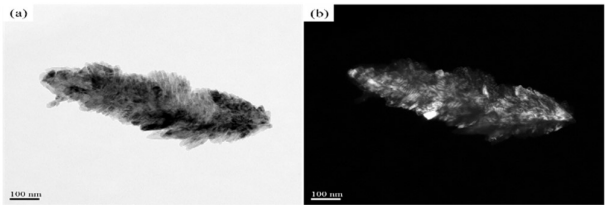


圖 3-5 常壓電漿沉積時間變化之最佳光電轉換效率樹狀結構(a)明視野及(b)暗視野

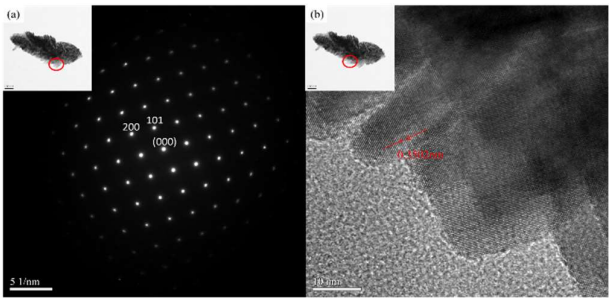


圖 3-6 小圖示紅圈處為最佳光電轉換效率樹狀結構(a)繞射模式及(b)高解析影像

3-4 WO_3 與 DSSC 驅動之 PEC 系統

本研究第四階段目的乃結合低成本、操作方便之常壓電漿鍍膜系統，進行低成本、WO_3 與 DSSC 電力驅動(如圖 3-7 所示)、高 PEC 產氫效率之工作電極材料設計、製作與分析之開發。於高純度銅片表面利用低溫常壓電漿噴流系統與熱氧化方法，製作高比表面積之高準直性 Cu_2O 奈米線(NWs)結構膜層，以研究其作為 PEC 產氫光電極之相關核心技術。同時利用低溫常壓電漿噴流鍍膜系統，鍍覆 ZnO 奈米顆粒於 Cu_2O 奈米線表面(如圖 3-8)，使其形成奈米線異質 PN 結構的光電極，同時配合本團隊近二年發展之前述 WO_3 與 DSSC 膜層，形成 WO_3 與 DSSC 驅動之 PEC 系統，探討奈米線異質膜層型態與組合等微觀結構對 PEC 產氫效率之影響評估。顯示於無外加電力、純光電效應下之 PEC 產氫設計，於 5 小時的數據呈現穩定的產氫效率，如圖 3-9 所示，顯示膜層相當穩定，產氫效率已由上年度 1.73%大幅提升至 5.63%，成果已發表於 OPTIC2023 國際會議。

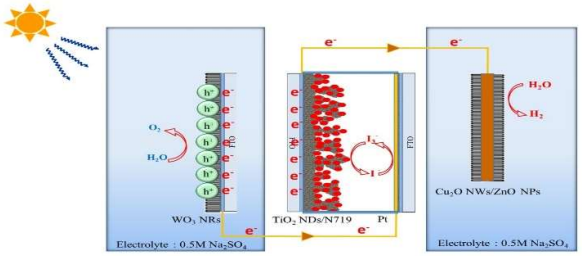


圖 3-7 WO_3 與 DSSC 電力驅動之 PEC 產氫示意圖

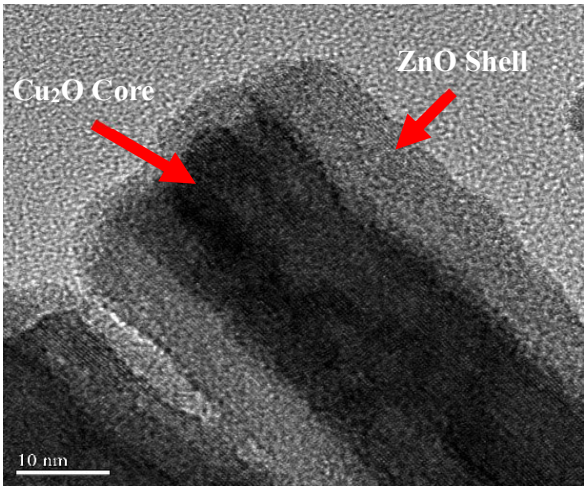


圖 3-8 Cu_2O/ZnO 奈米線 core-shell 的 HRTEM 結構圖

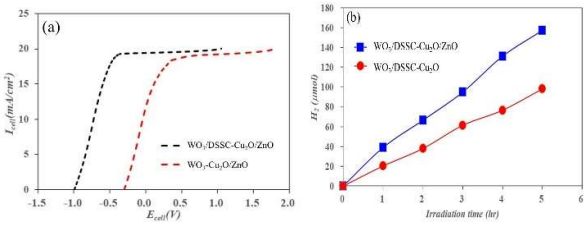


圖 3-9 (a)WO_3 奈米棒與 Cu_2O/ZnO 奈米線於有否串接 DSSC 之 I-E 曲線圖及(b)WO_3/DSSC-Cu_2O 與 WO_3/DSSC-Cu_2O/ZnO 之產氫效率.

IV. 結論

本研究成果顯示於無外加電力、純光電效應下之 PEC 產氫設計，於 5 小時的數據呈現穩定的產氫效率，顯示膜層相當穩定，產氫效率已由上年度 1.73%大幅提升至 5.63%。本研究利用成長最佳的混和製程(PT300)奈米線來鍍覆氧化鋅奈米結構，在 200oC(20sccm)以沉積 10 s(符號 ZnO-10 s)顯示出較佳奈米線狀態。搭配 WO_3 與 DSSC 電力驅動，成功實踐「人工水草(Artificial Water Grass)」進行產氫、產氧的無外加電力、純光電效應下 PEC 產氫作用的可能性，利用豐富的太陽能和水資源進行製氫的理想模式。

誌謝

非常感謝原子能科技學術合作研究計畫(國科會計畫：NSC 111-NU-E-214-001-NU & NSC 112-NU-E-214-001-NU)在經費上的鼎力支持，並感謝中山大學 TEM 操作員王良珠小姐、成功大學 XRD 操作員李坤樹先生、成功大學 XPS 操作員李瑞欽先生等人的協助。

參考文獻

[1] Luo, J., Steier, L., Son, M. K., Schreier, M., Mayer, M. T. and Grätzel, M. “Cu2O nanowire photocathodes for efficient and durable solar water splitting. Nano letters, 16(2016) 1848-1857.

[2] Bai, J., Li, Y., Wang, R., Huang, K., Zeng, Q., Li, J. and Zhou, B., “A novel 3D ZnO/Cu2O nanowire photocathode material with highly efficient photoelectrocatalytic performance. Journal of Materials Chemistry A, 3(2015) 22996-23002.

[3] Yuan, W., Yuan, J., Xie, J. and Li, C. M., “Polymer-mediated self-assembly of TiO2/Cu2O core–shell nanowire array for highly efficient photoelectrochemical water oxidation”, ACS applied materials & interfaces, 8(2016) 6082-6092.

[4] Hou, J., Yang, C., Cheng, H., Jiao, S., Takeda, O. and Zhu, H., “High-performance p-Cu2O/n-TaON heterojunction nanorod photoanodes passivated with an ultrathin carbon sheath for photoelectrochemical water splitting. Energy & Environmental Science”, 7(2014) 3758-3768.

[5] Sharma, D., Upadhyay, S., Satsangi, V. R., Shrivastav, R., Waghmare, U. V. and Dass, S. “Improved photoelectrochemical water splitting performance of Cu2O/SrTiO3 heterojunction photoelectrode”, The Journal of Physical Chemistry C, 118(2014) 25320-25329.