行政院原子能委員會
ATOMIC ENERGY COUNCIL

EXPLORE 探索

110年度成果發表會論文集
原子能科技學術合作研究計畫

APPLICATION 應用

INNOVATION 創新

目錄

【議程及場地】.....3

【核能與除役安全科技】.....13

01-核能電廠防範內部威脅措施及評估研究.....15
02-斷層錯動引致地表鄰近構造物與管線之位移的離心模型及數值模型模擬（III）.....20
03-國際核電廠運用高密度聚乙烯(HDPE）管路運用之可行性探討.....24
04-水化學控制對壓水式反應器合金 600 材料之應力腐蝕龜裂影響.....29
05-機組商轉末期飼水加氫策略對減緩沿晶應力腐蝕龜裂影響探討.....33
06-壓水式核能電廠於電廠全黑事故下防範潛變破裂及緩和策略研究分析.....37

【放射性物料安全科技】.....41

01-利用 BEM 分析處置坑道受震波之動態行為.....43
02-考慮不確定性的機率式地下水放射性核種衰變鏈遷移分析與放射性廢棄物地質處置的安全評估的應用.....45
03-放射性廢棄物最終處置場址次要斷層帶或變形帶位移危害度分析技術研究.....50
04-用過核子燃料最終處置母岩-緩衝材料孔隙熱-水-力耦合理論與不確定性模式發展研究.....54
05-放射性廢棄物最終處置重要核種遷移試驗與數學驗證模式建立之研析(2/3).....60
06-國際後端多邊化倡議逐步路徑演繹下之最終處置地下實驗室多邊服務情境.....65

【輻射防護與放射醫學科技 I】.....75

01-應用加馬能譜分析技術檢測飲用水中鐳同位素含量並評估國民輻射劑量.....77
02-核電廠除役期間人員劑量評估模式與合理抑低策略(二年期計畫，1/2).....79
03-放射性物質排放及環境輻射影響評估之管制研析.....80
04-職業、民眾及環境輻射防護管制措施精進研析.....85
05-採納 ICRP 118 號報告眼球水晶體劑量限值之建議對臨床醫療工作帶來的衝擊：介入性診療和心導管程序與核子醫學之職業曝露對 Hp(3)貢獻之初步調查.....91
06-飛航劑量評估程式的認證與飛航劑量測量實驗設計.....94
07-運用物聯網技術及大數據分析於輻射源安全管制之研究.....98
08-燃煤設施周圍之空浮採樣調查及居民輻射劑量評估.....102
09-加馬能譜法測量環境中水的鐳元素含量.....108

【輻射防護與放射醫學科技 II】.....115

01-建立探討放射治療與免疫調節成份對腫瘤免疫微環境調控機轉之轉譯平台：從分子生物到分子生物影像.....117
02-開發用於頭頸癌硼中子捕獲治療之環狀 RGD 胜肽修飾含硼奈米金微粒.....120
03-標靶趨化因子受體 CXCR4 之胜肽類正子診斷治療藥物開發.....123

04-利用影像生物指標區辨路易氏體失智症前驅期與老年重度憂鬱症 127
05-開發適用於頭頸癌之含硼 RGD 環狀胜肽 BNCT 試劑 132
06-蒐集國際大腦解剖標準化軟體之技術、版權、與專利資訊暨評估核醫影像學檢查之最佳使用時機 134
07-碘-123 MIBG 心肌造影程序與其心臟/縱膈定量比值之標準化與教育訓練 138
08-失智診斷友善模式 142

【跨域合作與風險溝通 I】 147

01-應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發(II) 149
02-X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比元件製作應用 III 153
03-以高介電介面層與磊晶矽鍺層提升鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性 161
04-大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(III) 166
05-太空環境之積體電路與記憶體元件的輻射效應與製程研究 170
06-以多重混和電漿製程研製高性能 IGZO 薄膜電晶體元件 175
07-機器人累計輻射劑量最少路徑規劃 180
08-X 光分析技術應用於東方書畫之研究 184
09-地下屏蔽環境無人飛船機器人通訊與遠端遙控技術研究 190
10-科展用核能與輻射知識之虛擬實境遊戲 194
11-使用放電產生電漿開發之極紫外光光源 196
12-非接觸式之機器人充電平台開發 199

【跨域合作與風險溝通 II】 205

01-應用知識視覺化建構原子能科普教材之設計驗證 207
02-多元族群探究能源轉型政策中關於原子能議題之研究 211
03-北部核電廠周遭社區自主輻安防災治理之研究II 220
04-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：新媒體溝通策略的解構與建構 225
05-原子能民生應用科普內容製作與網路推播之研究 232
06-化學遊樂趣–因化得幅 235
07-輻射照射在農產品與農業資材的應用研究 239
08-核能研究機關改制行政法人之法制研究 II：國家龍潭原子能科技研究院條例草案暨法規配套措施之研析 244
09-放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究(二) 249
10-輻射誘變選育耐逆境高蛋白質及機能性大豆與根圈益生菌與高加值機能性產品開發 ..253
11-核電廠除役溝通策略規劃的循證基礎：性別與多元族群對於核電廠除役議題的個人決策風格及政策感知 256
12-建構輻射災害防救在地化資訊傳播平台 262

110 年「原子能科技學術合作研究計畫」成果發表會議程

時間：111 年 9 月 26 日（星期一）

地點：集思台大會議中心 (台北市羅斯福路四段 85 號 B1，台灣大學第二學生活動中心 B1，捷運公館站 2 號出口左轉直行)

發表會議程（議程仍以當日現場公告為主）

時間	議程	地點
09:30～10:00	報到	B1
10:00～12:00	分組成果發表(I)	各領域場地
12:00～13:00	午餐及意見交換	
13:00～14:00	分組成果發表(II)	各領域場地
14:00～14:20	中場休息(供應點心)	
14:20～15:00	分組成果發表(II)	各領域場地
15:00～16:00	綜合討論及優良計畫頒獎(各場次)	各領域場地

各領域場地

領域	場地 地點	時間
1.核能與除役安全科技	亞歷山大廳	10:00~13:40
2.放射性物料安全科技	阿基米德廳	10:00~13:40
3.輻射防護與放射醫學科技(I)	洛克廳	10:20~15:20
4.輻射防護與放射醫學科技(II)	達文西廳	10:20~15:20
5.跨域合作與風險溝通(I)	米開朗基羅廳	10:00~16:00
6.跨域合作與風險溝通(II)	尼采廳	10:00~16:00

110 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 1：核能與除役安全科技					
會場地點： 亞歷山大廳					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:00~10:20	*高斌、陳建源、吳文方、單秋成	汪毓瑋	中央警察大學國境警察學系	核能電廠防範內部威脅措施及評估研究
	10:20~10:40		洪汶宜	國立中央大學土木工程學系	斷層錯動引致地表鄰近構造物與管線之位移的離心模型及數值模型模擬（III）
	10:40~11:00		丁 鯤	龍華科技大學化工與材料工程系	國際核電廠運用高密度聚乙烯(HDPE）管路運用之可行性探討
	11:00~11:20		葉宗洸	國立清華大學工程與系統科學系	水化學控制對壓水式反應器合金 600 材料之應力腐蝕龜裂影響
	11:20~11:40		王美雅	國立清華大學原子科學技術發展中心	機組商轉末期飼水加氫策略對減緩沿晶應力腐蝕龜裂影響探討
	11:40~12:00		陳紹文	國立清華大學核子工程與科學研究所	壓水式核能電廠於電廠全黑事故下防範潛變破裂及緩和策略研究分析
	12:00~13:00		午餐及意見交換		
	13:00~13:40		綜 合 討 論 及 計 畫 頒 獎		

***為該場會議主持人**

110 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 2：放射性物料安全科技					
會場地點： 阿基米德廳					
場次	時間	評審委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:00~10:20	*陳文泉、魏聰揚、謝榮春、鄭武昆	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 BEM 分析處置坑道受震波之動態行為
	10:20~10:40		陳瑞昇	國立中央大學應用地質研究所	考慮不確定性的機率式地下水放射性核種衰變鏈遷移分析與放射性廢棄物地質處置的安全評估的應用
	10:40~11:00		李錫堤	國立中央大學應用地質研究所	放射性廢棄物最終處置場址次要斷層帶或變形帶位移危害度分析技術研究
	11:00~11:20		王士榮	國立中央大學應用地質研究所	用過核子燃料最終處置母岩-緩衝材料孔隙熱-水-力耦合理論與不確定性模式發展研究
	11:20~11:40		田能全	國立清華大學原子科學技術發展中心	放射性廢棄物最終處置重要核種遷移試驗與數學驗證模式建立之研析(2/3)
	11:40~12:00		曾雅真	南臺學校財團法人南臺科技大學國際企業系暨研究所	國際後端多邊化倡議逐步路徑演繹下之最終處置地下實驗室多邊服務情境
	12:00~13:00		午餐及意見交換		
	13:00~13:40		綜 合 討 論 及 計 畫 頒 獎		

***為該場會議主持人**

110 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 3：輻射防護與放射醫學科技(I)					
會場地點： 洛克廳					
場次	時間	評審委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:20~10:40	*蔡親賢、施建樑、李境和、邱志宏	吳駿一	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	應用加馬能譜分析技術檢測飲用水中鐳同位素含量並評估國民輻射劑量
	10:40~11:00		許世明	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	核電廠除役期間人員劑量評估模式與合理抑低策略(二年期計畫，1/2)
	11:00~11:20		吳 杰	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	放射性物質排放及環境輻射影響評估之管制研析
	11:20~11:40		趙自強	長庚大學醫學影像暨放射科學系	職業、民眾及環境輻射防護管制措施精進研析
	11:40~12:00		蔡惠予	國立清華大學核子工程與科學研究所	採納 ICRP 118 號報告眼球水晶體劑量限值之建議對臨床醫療工作帶來的衝擊：介入性診療和心導管程序與核子醫學之職業曝露對 Hp(3)貢獻之初步調查
	12:00~13:00		**午餐及意見交換**		
分組發表 II	13:00~13:20		許榮鈞	國立清華大學核子工程與科學研究所	飛航劑量評估程式的認證與飛航劑量測量實驗設計
	13:20~13:40		簡儀欣	逢甲大學材料科學與工程學系	運用物聯網技術及大數據分析於輻射源安全管制之研究
	13:40~14:00		林志忠	國立屏東科技大學食品安全管理研究所	燃煤設施周圍之空浮採樣調查及居民輻射劑量評估
	14:00~14:20		**中場休息 (供應點心)**		
	14:20~14:40		陳庭堅	國立屏東科技大學環境工程與科學系	加馬能譜法測量環境中水的鐳元素含量
	14:40~15:20		**綜 合 討 論 及 計 畫 頒 獎**		

***為該場會議主持人**

110 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 4：輻射防護與放射醫學科技(II)					
會場地點： 達文西廳					)
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:20~10:40	*江啟勳、黃文彥、忻凌偉、謝栢滄	莊惠燕	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	建立探討放射治療與免疫調節成份對腫瘤免疫微環境調控機轉之轉譯平台：從分子生物到分子生物影像
	10:40~11:00		李易展	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	開發用於頭頸癌硼中子捕獲治療之環狀 RGD 胜肽修飾含硼奈米金微粒
	11:00~11:20		馬國興	國防醫學院生物及解剖學研究所	標靶趨化因子受體 CXCR4 之胜肽類正子診斷治療藥物開發
	11:20~11:40		周元華	臺北榮民總醫院品質管理中心	利用影像生物指標區辨路易氏體失智症前驅期與老年重度憂鬱症
	11:40~13:00		**午餐及意見交換**		
分組發表 II	13:00~13:20		潘伯申	淡江大學學校財團法人淡江大學化學系	開發適用於頭頸癌之含硼 RGD 環狀胜肽 BNCT 試劑
	13:20~13:40		林昆儒	長庚醫療財團法人核子醫學科	蒐集國際大腦解剖標準化軟體之技術、版權、與專利資訊暨評估核醫影像學檢查之最佳使用時機
	13:40~14:00		洪光威	秀傳醫療財團法人彰濱秀傳紀念醫院核子醫學科	碘-123 MIBG 心肌造影程序與其心臟/縱膈定量比值之標準化與教育訓練
	14:00~14:20		**中場休息 (供應點心)**		
	14:20~14:40		白明奇	國立成功大學醫學系神經科	失智診斷友善模式
	14:40~15:20		**綜 合 討 論 及 計 畫 頒 獎**		

***為該場會議主持人**

110 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 5：跨域合作與風險溝通(I)					
會場地點： 米開朗基羅廳					
場次	時間	評審委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:00~10:20	*陳志平、陳孝輝、傅昭銘、張永華	陳信樹	國立臺灣大學電機工程學系暨研究所	應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發(II)
	10:20~10:40		蔡坤諭	國立臺灣大學電機工程學系暨研究所	X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比元件製作應用 III
	10:40~11:00		巫勇賢	國立清華大學工程與系統科學系	以高介電介面層與磊晶矽鍺層提升鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性
	11:00~11:20		江偉宏	國立臺灣科技大學化學工程系	大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(III)
	11:20~11:40		張廖貴術	國立清華大學工程與系統科學系	太空環境之積體電路與記憶體元件的輻射效應與製程研究
	11:40~12:00		劉維昇	元智大學電機工程學系（所）	以多重混和電漿製程研製高性能 IGZO 薄膜電晶體元件
	12:00~13:00		**午餐及意見交換**		
分組發表 II	13:00~13:20		陳湘鳳	國立臺灣大學電機工程學系暨研究所	機器人累計輻射劑量最少路徑規劃
	13:20~13:40		陳東和	國立故宮博物院登錄保存處	X 光分析技術應用於東方書畫之研究
	13:40~14:00		王學誠	國立交通大學電機工程學系（所）	地下屏蔽環境無人飛船機器人通訊與遠端遙控技術研究
	14:00~14:20		**中場休息 (供應點心)**		
	14:20~14:40		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虛擬實境遊戲
	14:40~15:00		張博宇	國立成功大學太空與電漿科學研究所	使用放電產生電漿開發之極紫外光光源
	15:00~15:20		羅國原	國立高雄科技大學電機與資訊學院電機工程系	非接觸式之機器人充電平台開發
	15:20~16:00		**綜 合 討 論 及 計 畫 頒 獎**		

***為該場會議主持人**

110 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 6：跨域合作與風險溝通(II)					
會場地點： 尼采廳					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:00~10:20	*趙裕、周桂田、張自立、尹學禮	鄭孟淙	國立臺北科技大學工業設計系	應用知識視覺化建構原子能科普教材之設計驗證
	10:20~10:40		古建國	臺北市立大學應用物理暨化學系	多元族群探究能源轉型政策中關於原子能議題之研究
	10:40~11:00		楊永年	國立成功大學政治學系	北部核電廠周遭社區自主輻安防災治理之研究Ⅱ
	11:00~11:20		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：新媒體溝通策略的解構與建構
	11:20~11:40		單文婷	國立臺灣藝術大學廣播電視學系（所）	原子能民生應用科普內容製作與網路推播之研究
	11:40~12:00		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－因化得幅
	12:00~13:00		午餐及意見交換		
分組發表 II	13:00~13:20		謝廷芳	行政院農業委員會農業試驗所植物病理組	輻射照射在農產品與農業資材的應用研究
	13:20~13:40		翁曉玲	國立清華大學通識教育中心	核能研究機關改制行政法人之法制研究Ⅱ：國家龍潭原子能科技研究院條例草案暨法規配套措施之研析
	13:40~14:00		張 正	國立中興大學園藝學系（所）	放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究(二)
	14:00~14:20		中場休息 (供應點心)		
	14:20~14:40		王紹鴻	國立嘉義大學微生物免疫與生物藥學系	輻射誘變選育耐逆境高蛋白質及機能性大豆與根圈益生菌與高加值機能性產品開發
	14:40~15:00		黃東益	國立政治大學公共行政學系	核電廠除役溝通策略規劃的循證基礎：性別與多元族群對於核電廠除役議題的個人決策風格及政策感知
	15:00~15:20		葉一隆	國立屏東科技大學土木工程系	建構輻射災害防救在地化資訊傳播平台
	15:20~16:00		綜合討論及計畫頒獎		

***為該場會議主持人**

【位置及交通資訊】

gis 集思台大會議中心

交通資訊

地址： 台北市106大安區羅斯福路四段85號B1(台灣大學第二活動中心內)
電話： 02-2363-5868
E-mail： meeting@gisgroup.com

捷運

捷運新店線　公館站2號出口：
2號出口左轉 (步行2分鐘)

公車

捷運公館站一 (羅斯福路)：254

捷運公館站(公車專用道-往西區方向)：0南、1、109、208、208(高架線)、208(區間車)、208(基河二期國宅線)、236、251、252、253、278、284、284(直行)、290、52、642、643、644、648、660、671、672、673、676、74、907、景美女中-榮總快速公車、棕12、綠11、綠13、藍28

捷運公館站(公車專用道-往新店方向)：207、278、280、280(直達車)、284、311、505、530、606、606區間車、668、675、676、松江幹線、松江-新生幹線、敦化幹線、藍28

公館 (羅斯福路基隆路口)：671

公館 (基隆路)：1、207、254、275、275(副)、650、672、673、907、南港軟體園區通勤專車(雙和線)

仁愛路二段：214、248、606

信義杭州路口 (往101)：0東、20、22、204、670、671、信義幹線、信義新幹線、1503

開車

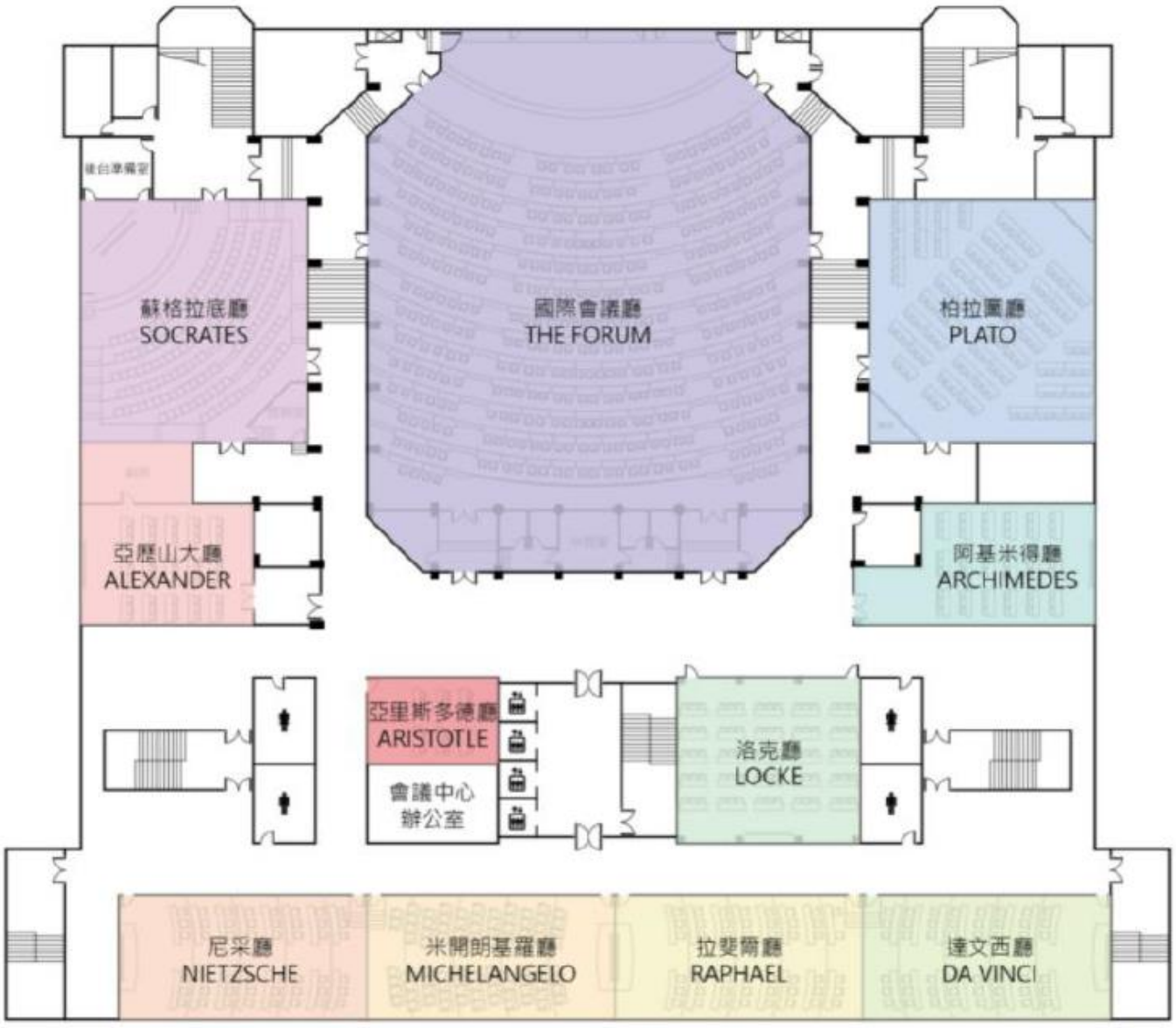
公館水源市場對面羅斯福路上，近羅斯福路與基隆路交叉口

國道一號：由松江路交流道下，轉建國高架道路南行至和平東路出口，續行辛亥路至基隆路右轉，直行至羅斯福路再右轉，隨即於右側「台灣大學公館二活停車場」停車即可。

國道三號：由台北聯絡道下辛亥路端，接基隆路右轉羅斯福路，隨即於右側「台灣大學公館二活停車場」停車即可。

【B1 平面圖】

集思台大會議中心—平面圖



比例尺為 1：400

核能與除役安全科技

核能電廠防範內部威脅措施及評估研究
Nuclear Power Plant Preventing Insider Threats Measures and Evaluation Research

計畫編號：110-2623-E-015-001-NU
計畫主持人：汪毓瑋
e-mail：una254@mail.cpu.edu.tw
計畫共同主持人：王智盛
計畫參與人員：許明賢、王譔評
執行單位：中央警察大學國境警察學系

摘要

對核能電廠等核設施的威脅可能涉及外部或內部對手，或者二者合謀，為了非法或惡意目的與另一內部對手或外部對手進行合作。這些可能涉及風險的核能設施，包括核能電廠、反應爐和其他核燃料循環設施，例如濃縮廠、後處理廠、燃料製造廠、存儲設施等，無論是設計、重新設計、建造、調試、運行、關閉還是退役。

內部知情人員對核能電廠的進入包括實體進入位置和材料；內部或授權的遠程電腦或網路進入；以及進入有關設施的敏感資訊等。因此，必須預防和阻止內部人員未經授權的移走核物料以及破壞核物料和設施；預防和阻止輻射物質及相關設施的擅自轉移和破壞；確保正在運輸的核物料和輻射性物料的安全；以及超出監管控制範圍的對核物料和其他輻射物質的預防和檢測以及回應;保護其他利益相關者，包括主管當局持有或獲取的設施資訊的安全。

然而預防和防止內部威脅的措施，仍應以兼顧安全性和考慮到工作人員輻射防護的平衡方式實施。保安措施和安全措施應以綜合方式設計和實施，才能夠在這兩個領域之間發展協同作用，並確保保安措施不損害安全，安全措施不損害保安。

關鍵詞：內部威脅、關鍵基礎設施保護、基於情節的風險評估途徑、安全文化。

Abstract

Threats to nuclear power plants can involve external or insider adversaries or both together in collusion cooperation for an illegal or malicious purpose with another insider adversary or with an external adversary. These nuclear facilities include nuclear power plants, research reactors and other nuclear fuel cycle facilities, e.g. enrichment plants, reprocessing plants, fuel fabrication plants, storage facilities, whether in design, redesign, construction, commissioning, operation, shutdown or decommissioning.

Insider access to a nuclear power plants includes physical access to locations and material; internal or authorized remote computer or network access; and access to sensitive information about the facility. Therefore, it is necessary to prevent and protect against unauthorized removal of nuclear material and sabotage of nuclear material and facilities by insiders; to prevent and protect against unauthorized removal and sabotage of radioactive material and associated facilities; securing nuclear and radioactive materials undergoing transport; and the prevention and detection of, and response to, nuclear and other radioactive material out of regulatory control; to secure facility information held or obtained by other stakeholders, including the competent authority.

However, measures to the prevent and protect should be implemented in a balanced manner that is compatible with safety considerations and that considers worker radiation protection. Security measures and safety measures should be designed and implemented in an integrated manner to develop synergy between these two areas and in such a way that security measures do not compromise safety and safety measures do not compromise security.

Keywords: Insider threats, Infrastructure Protection, Scenario-based Risk Assessment Approach, Security Culture.

I. 前言

被信任的內部人員，無論是有惡意企圖的還是不知情的人，都可能對組織、設施、資源和人員造成嚴重傷害，破壞經濟發展，甚至危害國家安全。而與商業秘密盜竊、欺詐、破壞、對組織聲譽的損害，工作場所暴力行為等相關的內部事件，每年均造成數十億美元的「實際」和「潛在」收入損失。若僅以美國於 2013 年之調查報告顯示，每年由惡意內部知情人員造成的損失不僅巨大，而且還在增加。每次事件的平均成本至少 41 萬 2,000 美元，而每一個行業的平均損失為 1, 500 萬美元。而英國的「國家關鍵基礎設施保護中心」（Centre for the Protection of National Infrastructure）引用「2018 年內部威脅全球成本調查」（The 2018 Cost of Insider Threats: Global study）報告，公佈此等危害發生的每一件的平均損失為 876 萬美元， 均強烈的表明任何公私部門均需要解決內部知情人之多樣化攻擊行為。例如南韓曾發生核電廠被駭客入侵造成資訊外漏，而根據以往案例顯示多數攻擊係來自內部，因此，原能會及台電公司均從內部威脅角度，評估國內核能電廠數位儀控系統防禦資訊安全攻擊能力。

此等內部人員造成之威脅，不僅對於含核能電廠等在內之重大關鍵基礎設施造成危害，更影響人民的生命與福祉。如何鑑定出此等威脅並提出有效之應對計畫，已是所有與重大關鍵基礎設施有關之公私部門共同面臨之難題，而必須尋求更有效的解決方法。例如長期以

來，為了更好因應類似美國三哩島核電廠與前蘇聯車諾比核電廠重大核子事故，以及「九一一事件」後針對含恐怖分子等在內之利用內部人員的非國家行為者對於含核能電廠在內之核能設施的危害，「國際原能總署」（IAEA）已發展了不同之安全概念來整全的防範與通報此等威脅情事。這些學術概念包括了「核能安全」(Nuclear Safety)，經由技術、設備與核子安全文化等結合議定之程序與規範來防範核子意外事故的發生；「核子保防」(Nuclear Safeguards)，結合國際關係之嚇阻理論與預防實踐，並經由國際原子能總署等國際組織與強國制裁施壓，以防堵有關國家假核能和平用途之名卻行核武發展之實；與「核子保安」(Nuclear Security)，防止核子原料或輻射物質經由非授權的不當取得，並被用於利得之犯罪行為或政治訴求等目的之恐怖主義行為。而迄今，內部人員的威脅也一直都是各國核能電廠之核子保安範疇下之關注焦點。

實務上，從 2009 年 4 月，美國總統歐巴馬在捷克布拉格呼籲召開全球核子保安高峰會(Nuclear Security Summit, NSS)的演說開始，含內部人員威脅在內的「核子保安」就長期成為一個國際上共同關注的重要議題。在其演說後，2010 年 4 月首次核子保安峰會在華府舉行，接續第二屆峰會於 2012 年 3 月在韓國首爾舉行，第三次峰會在 2014 年 3 月於荷蘭海牙舉行，2016 年的第四次峰會又回到華府舉行。每屆峰會的焦點都包括了含關注「內部威脅」等在內之保安共識與強化防範的要求。例如 2010 年之華府高峰會中，產出了「峰會公報」(communique)及「峰會工作計畫」(Work Plan)，要求共同合作來增進全球核子保安、鼓勵企業和機構將核子保安置於組織文化之首要地位、進行聯合演習以增強核子查緝方法和能力等；2012 年之首爾高峰會中，發展出自訂《承諾事項》(House Gift)，並訂出 11 個核子保安優先重要的工作領域，涉及了與內部威脅有關的核材料、輻射性射源、不法走私、核子保安文化、網路資訊安全等；2014 之海牙高峰會中，持續前述相關重點及承諾並轉化成《強化核子保安履行聯合聲明》(Joint Statement on Strengthening Nuclear Security Implementation, INFCIRC-869）正式文件； 2016 年之華府峰會中，產出 1 份峰會公報、5 個國際組織工作計畫、18 項自願承諾事項(多邊聯合聲明)、51 份各國進程報告、9 份雙邊聯合聲明等，其中包括了必須進行更多防範「非國家行為者」利用內部知情人員獲取核子或其他輻射物質而可能被用於惡意目的方面之工作，「國際原能總署」要制定強化預防和保護措施以防止內部破壞威脅之核子保安導則，與產業界合作建立人為破壞通報系統，強化管理者及個人之核子保安文化責任，增進保安人員在核子設施及應用網路安全之認知及技術能力等。雖然我國特殊國際處境，並不能參與這些核子保安主峰會，但由於我國與美國之間簽訂有《核能和平利用合作協定》，以致相關訊息及國際規範亦經由美國要求而必須遵守。因此，本研究主題不僅有其學術上之探討必要性；在實務上亦必須強化相關防範作為才能符合國際共同要求。

II. 主要內容

內部知情者威脅是指內部人員利用其對組織的授權訪問或特殊瞭解來傷害該組織的可能性。展現出的樣態包括了：暴力；工作場所/組織暴力；恐怖主義；間諜；經濟間諜活動；政府間諜活動；刑事間諜活動；破壞；實體破壞；虛擬破壞；盜竊；網路行動等。而造成之潛在損失就是包括了金融損失、失去隱私、個人身份資訊被盜竊、未經授權的揭露、資訊技術服務的中斷、基礎設施的損害、個人受傷及喪失生命等。

必須能夠鑑定與掌握內部知情者之威脅指標，包括了個人指標（個人壓力、個人與組織互動）；背景指標；行為指標；技術指標；組織/環境指標；暴力指標；家庭虐待指標；恐怖主義/偏見事件/仇恨犯罪指標等，必須充分掌握，才可能比較好的進行預防。

實施阻止內部知情者威脅的措施，包括了：預防措施；保護措施；終止時應採取的措施；質量保證政策和計劃；基於電腦的系統的措施；履行保護措施；偵測措施；人員追踪；偵測違禁物品；監視；核物料核算和控制系統；基於電腦的系統的偵測措施；延遲措施；基於電腦的系統中的延遲措施；回應措施；基於電腦系統中的回應措施；增強預防和保護措施的綜合要素。

美國因應內部知情者威脅的作法，包括了安全執行官角色與職責；國家內部知情者威脅工作隊評估；安全查核與適任性改革；連續評估；內部知情者威脅程序推動之「全面運作能力」；用於決定訪問機密信息的資格或擔任敏感職位的資格的國家安全裁決指南（效忠美國、外國影響、外國偏好、性行為、個人行為、個人行為、嗜酒情況、涉毒和藥物濫用、心理狀況、犯罪行為、處理受保護的資訊、外部活動、資訊技術的使用等）。

對於接觸機密資訊或擔任敏感職位人員的報告要求，必須考量鑑定旅行風險之資源；所有涵蓋人員應報告的活動（國外旅行，國外接觸，接觸機密和機密資訊的個人的可報告活動、“L”級訪問或持有非關鍵敏感職位，有權訪問最高機密資訊、有權獲得“Q”級資訊或持有關鍵或特殊敏感職位的個人的可報告活動）；職責；報告所需的數據元素（國外旅行，與已知或可疑的外國情報實體的非官方接觸，繼續與已知的外國國民或外國國民室友交往，涉及國外業務，外國銀行帳戶，外國財產的所有權，外國公民，申請外國護照或旅行身份證，持有外國護照或旅行身份證，使用外國護照或身份證旅行，在外國選舉中投票，收養非本國公民的子女，試圖誘使、剝削、勒索、脅迫或引誘獲取機密資訊或法律明確禁止披露的其他資訊，媒體接觸，逮捕，財務問題和異常，同居者，婚姻，酒精和藥物相關治療）。

建立內部知情者威脅計劃是用於收集，監控和評估內部知情者威脅偵測和緩解的信息。第一步是確定計劃辦公室和領導層；其次是能夠偵測和嚇阻內部知情者威脅；計畫的接續內容包括了培訓和意識計劃；對於那些見證潛在指標的人應該確切地知道他們何時，何地以及如何報告這些信息；強化員工對工作場所公平性的看法；制定使用者活動監控；建立基線使用者行為；內部知情者風險管理策略等。

內部知情者威脅減緩計畫中可接受的人員減緩計畫要素包括了：適職要素（毒品和酒精測試規定，行為觀察，員工援助計劃）；訪問授權計畫要素（初始安全判定，心理評估，直接主管的年度審查，安全判定的定期再調查，訪問重要區域）；網路安全要素；實體保護計劃要素等）。另外，亦要進行行為觀察訓練（培訓計

畫，識別和回應），也要持續要求對退役期間持照者的適職計畫要素。

要鑑定處於風險的員工，其工作重點包括了：評估預測內部知情者威脅風險增加的心理社會行為；重視隱私和道德問題（隱私，電子監控）；運用心理社會模型（相關指標包括了不滿、不接受回饋、憤怒管理問題、脫離接觸、無視權威、績效、壓力、對抗行為、個人問題、自我中心、缺乏可靠性、曠工）。要警覺內部知情者威脅在行動之前應該是可以觀察的，要重視「關注行為」（concerning behaviors）相關的事件和問題，如此管理層不僅意識到最惡劣的行為，而且關注行為的指標可能會在實際攻擊前幾個月出現。

應該推動行為觀察方案（Behavioral Observation Program,BOP），因為它是適職方案、訪問授權（access authorization,AA）方案和內賊緩解方案（insider mitigation program, IMP）的基礎之一。《行為觀察方案》應具有靈活性，以便查看表明可能存在風險的「基本行為因素」（fundamental behavioral factors），並根據新研究的結果，有能力適應可能改善偵測（detection）、評估（assessment）和決定（determination）過程的新因素或方法。一個全面的行為觀察方案，與一個強大的質量保證（quality assurance,QA）方案相結合，可以幫助減少破壞安全和與保安相關的結構、系統與組件的可能性。

在評估和改進建立內部知情者威脅計劃方面，要先彙編和分析有關可能有興趣、動機、意圖和能力對組織或個人造成傷害的相關人員的信息的過程，主要目的是為有關如何管理受關注人的決策提供信息，以防止任何內部知情者事件。最佳實踐應該涵蓋以下領域：威脅評估過程；了解和識別威脅評估中的暴力指標；威脅評估中不存在有用的配置文件（profile）；製造威脅（making a threat）與構成威脅（posing a threat）之間的區別；解有鎖定目標暴力中常見的洩露以及它如何幫助評估過程；處理內部知情者的審查意識問題（awareness of scrutiny）；了解何時使用行為科學家會對評估過程有益，以及何時需要執法人員參與的案例考慮。

也要決定受關注人的基線行為，因為受關注人的行為依據其典型基線的變化，是評估中的一個重要考慮因素。為了與基線行為進行比較，評估者應該：詳細描述支持確定受關注的人是威脅的初始行為和問題；通過使用預先確定的風險量規來監控受關注人的行為軌跡，以了解他們的表現是否正在解決、升級或失去補償；在長期評估期間和干預後，對可能需要額外行動的任何新信息或行為保持警惕，無論是針對特定問題或一般組織；實施和協調措施以評估和管理任何暴力風險，並根據感知風險水平考慮選擇措施。

接著要推動漸進式演習，使組織能夠參與一系列越來越複雜的情節，每次連續的鍛煉演習都建立在前一次的基礎上，直到掌握為止。其次，應建立正式的維護流程，以審查和修訂政策、程序、標準和法律義務。而維護過程應該是一個週期性的活動，任務按月、每半年和每年進行安排。且要注意評估旨在鑑定易受內部知情者威脅之系統弱點，應使用基於威脅評估或設計基準威脅的可信威脅情節。過程包括了：預防措施的評估；保護措施的評估；防範內部知情者之間的串通措施的評估；防範長久盜竊措施的評估；防範破壞措施的評估；保護內部知情者威脅的設施評估等。

在管理知情者威脅過程中，也要考慮請求當地執法部門的協助：例如存在實際犯罪行為；暴力威脅迫在眉睫或正在發生；非自願的精神健康承諾是必要時；有潛在暴力傾向的人被停職或解雇；一宗家庭暴力事件危害到組織的安全；需要定期或不定期的健康檢查，以確保潛在受害者或受關注的人的安全。另亦要關注對受關注人員的停職和解雇後之必要作為，例如向被解僱的員工提供包括員工援助在內的健康福利，以確保繼續進行適當的心理健康治療；尋求法律顧問的建議，以確保了解法律義務和任何限制，特別是在解雇、靈活的離職安排或獲得限制或保護令方面。

III. 結果與討論

含核電廠在內之關鍵基礎設施，一直都是國家行為者與非國家行為者想要危害的主要目標。其中更令人關切的是「內部知情者」犯下的惡意行為，例如盜竊，破壞，工作場所暴力等。而不知情的內部知情者也可能會無意中洩露專有或其他敏感資訊，或是在不知情的情況下下載惡意軟體或促進其他網路安全事件，例如對工業控制系統的攻擊等。為了因應此等透過「內部知情者」中介之針對實體或是網路之攻擊，可以由不同的層次進行防衛，而本文是從對內部知情者之分析著手，希望展現出此等威脅本質之複雜性及多樣性；而在防範作為上，則是聚焦於核電廠內部人員減緩計畫之探討，希望藉此而能夠整全的強化核電廠之安全。

內部知情者之風險與危害不可能完全杜絕，含核電廠在內之所有關鍵基礎設施會也不斷的會強化防範作為。然而在過程中，如何能夠要求持照者及含高階主管及廠長等在內之員工能夠主動遵守各式規範及落實執行外；同時，任何必要進行的查核與監視或是檢查等作為也必須考慮員工之福利與隱私的尊重，如此努力減緩朝向複雜與多樣性演化發展之內部知情者危害的可能性才會持續的增強。

一、預期之研究成果

本研究涉及了關鍵基礎設施保護、核子保安、及內部知情者威脅三個層面之學理與實踐上之整合檢討與改善作為，而此議題在國內學術界上仍屬於可努力開發之研究領域，亦即本研究是綜合性的運用研究，且又涉及了原能會、核能電廠及安全的學術與實務上之專業與實踐領域。因此，雖然存有一定的理論與實踐上結合的難度，但可以預期所有參與研究之工作人員在研究結束後及接續之努力過程中，應該可以獲得以下的訓練：

1. 關鍵基礎設施保護範疇下之基於風險的減緩內部威脅之知識。
2. 精進基於設計威脅基準之可信情節的核能電廠內部威脅反制措施。
3. 深思兼顧人權之未來核電廠防範內部威脅之設計、法律增修及訓練更新。
4. 防範核能電廠內部威脅之客制化公私協力途徑的防衛創新與精進作為。

二、預期之貢獻

（一）本研究為綜合學科之應用性研究，研究完成有利於增進基於核能電廠之整合保安、公私協作與演練領

域之最佳實踐與學術發展。

（二）核能電廠之營運安全攸關國家各層面之發展，包括社會安定、經濟成長、能源政策、外貿投資、國防安全等。本研究經由檢討與設計出符合我國需求的防範核能電廠內部威脅及評估審查等成果，應該有助於減緩核能電廠之不確定性風險，特別是內部威脅，可為國家發展奠定更佳的實踐基礎。

IV. 結論

核材料和核設施一旦遭受惡意行為，就有可能導致各種不可接受的輻射和擴散後果，因此實體保護的有效性必須要有很高的可信度。實體保護方面要達到最高水準的可信度，需要瞭解保護措施和威脅之間的密切相關性。亦即對核資產的實體保護應以這些核資產所面對的威脅做出的評價為基礎。瞭解這種威脅之後，就能詳細描述包括「外部人員」和「內部知情者」（Insiders）在內的潛在敵手。

「內部知情者」可以利用其准入權（access rights），再加上掌握著一定權力，對設施（facility）有一定的瞭解，可以繞過專用的實體保護要素（physical protection elements）或其他規定（provisions），例如安全方面的措施、材料控制和衡算（material control and accountancy）以及運行（operating）措施和程序。此外，作為能夠進入各個負責崗位（positions）的工作人員，在面對保護性要素（protection elements）和進出控制（access controls）時，還能實施外部人員所無法利用的「取勝」（defeat）方法。因此，內部人員有更多機會選擇最薄弱的鎖定目標（vulnerable target）和最好時機來實施惡意行為。

因此，內部威脅是複雜、動態的，會影響所有重大關鍵基礎設施領域的公共和私人地域（domains）。負責保護重要資產的所有者（owners）和營運者（operators）都必須認識到這種威脅的細微差別和廣度，以便制定適當的基於風險的緩解策略。這些所有者和營運者，無論是私領域的還是公共部門也應對其利益相關者負責，在安全方面進行充分且具有成本效益的投資。如果沒有明確、特定領域且可信的威脅資訊，所有者和運營者可能會低估威脅，而造成安全風險或是因為誤導而使資源投資不足。

基於前述的認知，本研究計畫探討的問題，涉及了必須先進行各國有關核能電廠在內之關鍵基礎設施領域之防範內部威脅之具體作為之分析，而首先從潛在的「內部知情人」之威脅鑑定探討；其次，分析核能電廠潛在內部知情者之威脅鑑定；接續探討核能電廠之危害與攻擊目標的鑑定；並進而檢視國際原子能總署與美英等國核能電廠防範內部威脅措施；論述減緩核能電廠內部知情者風險之設計；最後則進行對防範核能電廠內部威脅措施之評估。

而這些必須研究與解答的問題，包括了：分析美、英等先進國家預防內部威脅之措施，例如背景調查、犯罪紀錄查核、適職方案、行為觀察方案；有效減緩內部破壞後果之相關措施；收集美國等國家核能電廠應用實例，提出對於核能電廠保安計畫內防範內部威脅措施之審查建議；以及針對我國法規體制與核設施現況，對實施各項防範措施與成效評估提出具體建議。

參考文獻

[1] Ozkaya, Erdal and Rafiqul Islam. Inside the Dark Web. New York: Taylor & Francis Group. 2019.

[2] Cybersecurity & Infrastructure Security Agency. Insider Threat Programs for the Critical Manufacturing Sector Implementation Guide. August 2019.

[3] Virginia Allen. CPNI Employee IT Monitoring Insider Threat. Cabinet Office. March 2018.

[4] National Insider Threat Task Force. INSIDER THREAT PROGRAM MATURITY FRAMEWORK. 2018.

[5] Office of Environment. Health, Safety & Security, Human Reliability Program Handbook.

[6] HMG Baseline Personnel Security Standard: GUIDANCE ON THE PRE-EMPLOYMENT SCREENING OF CIVIL SERVANTS, MEMBERS OF THE ARMED FORCES, TEMPORARY STAFF AND GOVERNMENT CONTRACTORS. May 2018.

[7] Intelligence And National Security Alliance Security Policy Reform Council Insider Threat Subcommittee. Assessing The Mind of The Malicious Insider: Using A Behavioral Model And Data Analytics To Improve Continuous Evaluation. April 2017.

[8] DNI. 2017 INSIDER THREAT GUIDE: A COMPENDIUM OF BEST PRACTICES TO ACCOMPANY THE NATIONAL INSIDER THREAT MINIMUM STANDARDS. 2017.

[9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Security of Nuclear Material in Transport, IAEA Nuclear Security Series No. 26 G. 2015.

[10] International Atomic Energy Agency. Joint Statement on Strengthening Nuclear Security Implementation. INFCIRC/869. Oct. 22, 2014.

[11] US NRG. Best Practices for Behavioral Observation Programs at Operating Power Reactors and Power Reactor Construction Sites. NUREG/CR-7183. June 2014.

[12] Centre for the Protection of National Infrastructure. Personnel Security Risk Assessment A Guide. June 2013.

[13] Intelligence and national Security alliance Cyber Council: insider Threat Task Force. A preliminary examination of insider threat programs in the U.S. private sector. September 2013.

[14] National Protection and Programs Directorate Office of Infrastructure Protection Integrated Analysis Task Force Homeland Infrastructure Threat and Risk Analysis Center. National Risk Estimate: Risks to U.S. Critical Infrastructure from Insider Threat. December 2013.

[15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities. IAEA Nuclear Security Series No. 16. 2012.

[16] International Atomic Energy Agency, Preventive and Protective Measures against Insider Threats. IAEA Nuclear Security Series No. 8, 2008. Feb, 2012.

[17] U.S. Department of Energy. Identifying at-Risk Employees: A Behavioral Model for Predicting Potential Insider Threats. September 30, 2010.

[18] National Infrastructure Advisory Council. The Insider Threat To Critical Infrastructures. APRIL 8, 2008.

[19] OFFICE OF THE UNDER SECRETARY OF DEFENSE (ACQUISITION. TECHNOLOGY, AND LOGISTICS), NUCLEAR WEAPONS PERSONNEL RELIABILITY PROGRAM (PRP) REGULATION. June 2006

斷層錯動引致地表鄰近構造物與管線之位移的離心模型及數值模型模擬 (III)
Centrifuge modeling and numerical simulation on the deformation ofstructure and pipeline by fault slipping (III)

計畫編號：110-2623-E-008-001-NU
計畫主持人：洪汶宜
e-mail：wyhung@ncu.edu.tw
計畫參與人員：江富誠、黃俊學、王怡琇
執行單位：國立中央大學土木工程學系

摘要

本年度以 4 組離心模型模擬正斷層與逆斷層錯動時，探討不同建物及基礎形式對於土層的影響，於複合土層上施作 3.2 m 不同基礎形式建物(淺基礎及樁基礎)，建物之接觸應力為 27 kPa，而土層中埋設管徑 0.16 m 之鋁合金管線。軟岩層之土層材料採用水泥拌合砂土混合而成的複合土層進行模擬。本次研究中以土層之水泥混合比例為 5%水泥，單壓強度為 0.975 MPa，模擬軟岩層剛性破壞後之行為。此時，莫爾庫倫破壞準則之摩擦角為 43.5 度及內聚力為 148 kPa；上覆土層為石英細砂，其摩擦角為 37 度、相對密度為 70%。砂土層與軟岩層比例為 7:3，模型土層厚度 100 mm，相當於 80 g 之離心力場中，原型尺度 8 m。離心試驗完成後，進行數值模擬偶合，使用離散元素程式 PFC^{2D} 進行，數值模擬成功能省下許多時間與經濟成本。

本年度的離心模型試驗結果與去年的結果進行比較，共 8 組的離心模型試驗能夠得到以下結論，第一點，在正斷層或逆斷層錯動狀況下，高低樓層之樁基礎建物雖然會傾斜，但未發生翻覆；第二點，在正斷層錯動下之低樓層樁基礎建物(NP_1F)角變量未超過基礎構造設計規範對建築物可容許之角變量危險等級 1/150；第三點，在正逆斷層的錯動下，樁基礎能夠有效減少建物的水平位移量；第四點，埋設之地下管線的變形行為如同地層的變形變化，而在正斷層試驗中管線會露出地表；第五點，逆斷層淺基礎與樁基礎相比造成較大的地表影響範圍，影響範圍達 2 倍的總土層厚度；而正斷層試驗的地表影響範圍相似，淺基礎與樁基礎試驗的地表影響範圍皆位於上盤側。本研究亦利用 PFC^{2D} 進行數值模型模擬斷層錯動模擬試驗，以了解軟岩層在斷層錯動下的破壞機制，數值模擬結果及破壞形式與離心模型試驗結果相符。

關鍵詞：正斷層、逆斷層、離心模型試驗、複合土層

Abstract

In this study, four centrifuge modeling tests were utilized in an 80 g centrifugal acceleration field to simulate the reverse fault and normal fault condition for investigating the mechanism of the effect of the soft rock layer underneath on the surface of the sandy soil layer. A 3.2 meters height of different foundation types of buildings (shallow foundation and pile foundation) were put on the ground surface, and the contact stress of the building is 27 kPa. In addition, an aluminum alloy pipeline with a diameter of 160 mm was buried in the soil layer. The soft rock layer was simulated by using the accelerated sand-cement mixture. The 5% cement mixture is selected due to its uniaxial compression strength of 0.975 MPa, which can simulate soft rock and have a brittle mode as the post-failure behavior. The friction angle and the cohesion are 43.5 degrees and 148 kPa, respectively, based on the Mohr-Coulomb failure criterion. The sand layer was simulated by using fine silica sand, which friction angle is 35.7 degrees and relative density is 70%. The ratio of the sand layer to the soft rock layer is 7:3, and the thickness of the model soil layer is 100 mm, a total height of the model is 100 mm, corresponding to 8 meters in the prototype scale. After the centrifugal test is completed, a numerical simulation coupling is carried out using the discrete element program PFC^{2D}. The numerical simulation becomes a function and saves a lot of time and economic costs.

The results in this two years indicate that the buildings with pile foundation would be inclined but not overturn after normal and reverse fault slipped. The building inclination angle of the lower building with pile foundation(NP_1F) is under 1/150 during the normal fault slipping. The pile foundation can reduce the horizontal displacement of the building effectively during the fault slipping. The deformation behavior of the buried pipeline is similar to the deformation behavior of the soil stratum. In the normal fault case, one end of the pipeline will be exposed to the ground surface. In the reverse fault simulation, the model with slab foundation building has a larger ground surface influence range of 200% of total strata thickness. In the normal fault simulation, the models with the slab or pile foundation building have a similar ground surface influence range which is on the hanging wall. In addition, the numerical modeling was conducted by PFC^{2D} to simulate the same model of the centrifuge test. The numerical results and the failure behavior are consistent with the centrifuge modeling results.

Keywords: reverse fault, normal fault, multiple soil strata, centrifuge modelling

I. 前言

由板塊活動引致的災害常常造成人類社區大規模的生命財產損失，一些強烈的地震會伴隨著地表大型且永久的變位，導致許多近斷層結構物倒塌，以及許多的地下電纜、瓦斯、自來水管等民生管線斷裂，造成許多生命財產損失。為了防範上述人造結構物的損壞，許多國家已經制定近斷層活動區域的相關建築規範，而大地工程師需要將複雜的現地問題簡單化，並利用簡化後的

理論分析、物理模型或是數值模擬來進行分析設計。物理模型會受到尺寸效應的限制以及製作耗時費力，全尺度的物理模型除了耗時費力以及高單價之外，也鮮少有實驗室能夠模擬原型尺寸模型，而數值模擬雖然沒有尺寸效應的問題，卻由於地工材料組成十分複雜，以當前的知識尚無法全盤了解。本研究使用中央大學地工離心機進行離心模型試驗，透過縮尺模型(scaled model)與原型(prototype)之間的模型相似律(modeling similitude)，使縮尺模型能夠產生與原型相似的應力應變表現。另外使用 Itasca Consulting Group Inc. 開發的顆粒流程式 PFC^{2D}(Particle Flow Code in 2 Dimensions)進行離心模型試驗結果的數值模擬驗證。本文共進行了四組離心模型試驗，包含了兩種不同的斷層型式(正斷層與逆斷層)及兩種不同的基礎型式(淺基礎和樁基礎)，並與過去試驗結果進行比較，討論不同的斷層型式、基礎型式與建築物型式對結構物受斷層錯動時的反應行為，並與 PFC^{2D} 的模擬結果相互驗證，以供未來數值模擬做基礎。

II. 主要內容

本研究使用中央大學地工離心機與斷層模擬試驗箱，在 80 g 的重力場、斷層傾角為 60 度、錯動量約 4 m 的試驗配置下進行四組離心模型試驗，試驗名稱分別為低樓層正斷層淺基礎(NS_1F)、低樓層正斷層樁基礎(NP_1F)、低樓層逆斷層淺基礎(RS_1F)與低樓層逆斷層樁基礎(RP_1F)。本次研究結果會與過去試驗進行比較，分別為高樓層正斷層淺基礎(NS_3F)、高樓層正斷層樁基礎(NP_3F)、高樓層逆斷層淺基礎(RS_3F)與高樓層逆斷層樁基礎(RP_3F)。本研究中的土壤配置與過去研究一致，為厚度 5.6 m 的水泥混砂層或稱為軟岩層，比例為砂土混合 5%水泥，單壓強度為 0.975 MPa，軟岩層上方有著厚度 2.4 m、摩擦角為 37 度、相對密度為 70%的砂土層，並於地表下 0.8 m 配置管徑 0.16 m、長度 58.56 m 的鋁合金管線作為維生管線的模型。低樓層建築物高度為 3.2 m，質心高度為 1.22 m，接觸應力為 27 kPa 的模型；高樓層建築物高度為 9.6 m，質心高度為 3.45 m，接觸應力為 48 kPa 的模型，樁基礎為可拆式的鋁合金實心圓樁，樁徑為 4.8 m，樁長為 6.4 m，勁度為 182403 kN-m^2，總共 14 支樁基礎遍布建築物底部。在試驗過程中，會架設相機記錄斷層破裂面的發展，垂直位移每 0.01 m 記錄一次，以及每分鐘會進行地表高程掃描，直到建築物傾倒或是錯動量達 4 m 左右即停止試驗，並進行建築物傾斜角變量、建築物水平位移量、剪裂帶寬等分析。

數值模擬是利用 PFC^{2D} 模擬離心模型斷層錯動試驗，本研究主要參考 Potyondy and Cundall (2004)及 Itasca (2008)之方法，建立非鍵結砂土層及鍵結之軟岩層與建物的複合模型試體。建模步驟包括：初始顆粒堆疊、試體等向應力控制、設置重力場、消除虛浮點、設置建築物、平行鍵結建立、試驗箱建立及斷層錯動模擬等步驟。

III. 結果與討論

正斷層試驗結果

建物傾斜角變量

圖 1 顯示，樁基礎於正斷層中產生較小的建物傾斜角變量，淺基礎形式之建物則產生較大的建物傾斜角變量。高樓層建物在試驗中止時產生較大的建物傾斜角變量，低樓層建物在試驗中止時產生的建物傾斜角變量較小。在正斷層試驗中的結果顯示，樁基礎可以減少建物傾斜角變量、避免高樓層建物翻覆，建物傾斜角變量也會受到樓層高度的影響。

建物水平位移量

由表 1 可以看到樁基礎形式之建物幾乎沒有水平位移，淺基礎形式之建物則相對樁基礎之建物有較大的水平位移量，另外，淺基礎形式之建物則高度越高，水平位移量越大，甚至出現建物翻覆的情況。可以認為在正斷層中，基礎形式很大的影響建物水平位移量。

剪裂帶發展

本次試驗與先前的試驗結果可觀察正斷層試驗中側向剪裂帶發展情形，在淺基礎形式之試驗中，剪裂帶發展呈現多道破裂面，軟岩層裂成四部份，在樁基礎試驗中，軟岩層則裂成三部份。在正斷層的試驗結果中，剪裂帶的發展情況比較容易受到基礎形式的影響，較不受到樓層高度及接觸應力的影響。

地表影響範圍

本次試驗與先前試驗的高程掃描結果可觀察正斷層於地表的影響範圍，可以發現不論是淺基礎、樁基礎或是高低樓層，在結束斷層錯動時，地表影響範圍皆是位在上盤，而建物後方(下盤側)皆無產生影響，可得知地表影響範圍是錯動高度與剪裂帶發展有關，與基礎形式或是樓層高度無關。

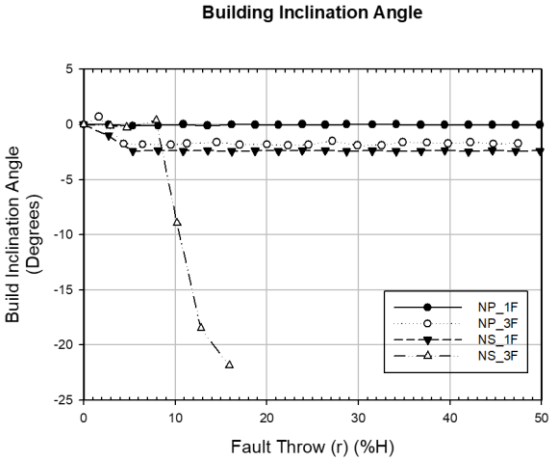


圖 1 正斷層建物傾斜角變量比較圖

表 1 正斷層水平位移量之比較

試驗代號	底部水平位移量(%B)	總頂部水平位移量(%B)	頂部旋轉水平位移量(%B)	淨頂部水平位移量(%B)
NS_3F	-104.6	-295.2	-200.0	-95.2
NS_1F	-3.3	-4.0	-2.8	-1.2
NP_3F	-0.5	-0.3	-6.0	5.7
NP_1F	0.1	0.0	-0.1	0.1

逆斷層試驗結果

建物傾斜角變量

圖 2 顯示，在錯動率 26%以前，樁基礎的建物傾斜角變量皆大於淺基礎形式之建物，在結束斷層錯動時，淺基礎形式之建物產生比樁基礎更大的建物傾斜角變量。高低樓層之樁基礎試驗結果的角變量趨勢相同，皆呈線性成長，顯示建物傾斜角變量受到基礎形式的影響較多。高樓層的淺基礎建物於錯動率 46%發生翻覆，低樓層淺基礎建物則產生嚴重的傾斜卻未發生翻覆，顯示在逆斷層錯動下，樓高對於建物翻覆的影響較為顯著。

建物水平位移量

由表 2 顯示，樁基礎建物產生的水平位移量比淺基礎建物小，顯示樁基礎建物能夠有效的抑制建物的水平位移。淺基礎形式之建物中，由於高樓層發生翻覆，所以產生非常大的水平位移量，低樓層只有傾斜卻未翻覆，顯示於逆斷層錯動下的淺基礎建物的水平位移量會受到樓高的影響；樁基礎形式之建物中，高低樓層的建物水平位移量差異不大，顯示於逆斷層錯動下的樁基礎建物水平位移量較不受到樓高及接觸應力的影響。

剪裂帶發展

本次試驗以及先前的試驗結果顯示，剪裂帶發展情形四組相似，破裂面皆由斷層尖端先向建物下盤側發展，再產生向上盤側發展的另一條破裂面。逆斷層試驗中，剪裂帶的發展情況受基礎形式以及樓高的影響較小。

地表影響範圍

由表 3 顯示逆斷層對地表的影響範圍，淺基礎試驗的最大剪裂帶寬約為 190%H，樁基礎試驗的影響範圍大約是 120%H，在 RS_3F 中建物翻覆後影響範圍大約是到達 255%H，顯示淺基礎地表影響範圍比樁基礎形式之建物大。在淺基礎形式之建物中，不同接觸應力對於軟岩層的剪裂帶寬影響較大，對於砂土層的影響較小；樁基礎形式之高低建物的剪裂帶寬差異不大，顯示在逆斷層錯動下產生的剪裂帶受樁基礎的影響較大，而不是建物高度或是接觸應力。

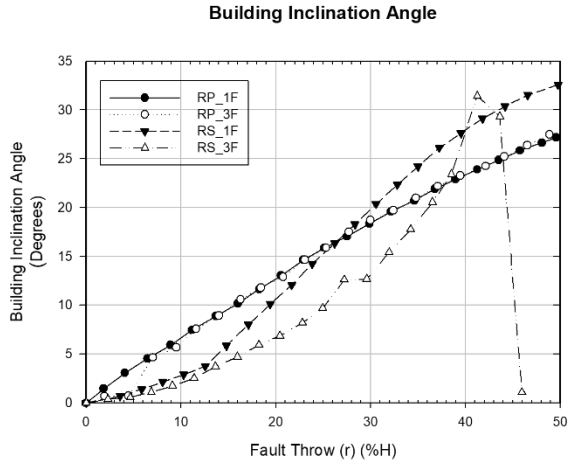


圖 2 逆斷層建物傾斜角變量比較圖

表 2 逆斷層水平位移量之比較

試驗代號	底部水平位移量(%B)	總頂部水平位移量(%B)	頂部旋轉水平位移量(%B)	淨頂部水平位移量(%B)
RS_3F	151.1	340.8	200.0	140.8
RS_1F	84.9	125.6	36.1	89.5
RP_3F	67.7	151.8	91.8	60.1
RP_1F	65.9	91.4	31.6	59.8

表 3 逆斷層剪裂帶寬之比較

試驗代號	最大軟岩層剪裂帶寬(%H)	最大砂土層剪裂帶寬(%H)
RS_3F	70	190
RS_1F	100	200
RP_3F	50	140
RP_1F	40	120

數值模擬結果

正斷層模擬結果

圖 3 分別為低及高樓層淺基礎建物於砂土－軟岩層上，在正斷層錯動下，建物及軟岩層的力學行為。由圖 3 可知，利用 PFC^{2D} 模擬出的巨觀裂隙形貌及斷層錯動引致的建物傾斜狀況，與離心模型試驗結果相似。

圖 4 分別為低及高樓層樁基礎建物於砂土－軟岩層上，在正斷層錯動下，建物及軟岩層的力學行為。由圖 4 可知，利用 PFC^{2D} 模擬的巨觀裂隙形貌及建物情況，與離心模型試驗結果相似；在下盤軟岩中，裂隙會由上下盤交界處沿至樁基礎，而在上盤軟岩也出現巨觀之剪力裂隙，且建物皆未觀察到有大量位移及傾斜發生。

逆斷層模擬結果

低樓層淺基礎建物於逆斷層錯動下，其運動及砂土－軟岩層的力學行為，如圖 5(a)所示。由圖 5(a)可知，此案例模擬出的巨觀剪力裂隙形貌及逆斷層錯動引致之建物傾斜情形，與離心模型試驗結果相似。高樓層淺基礎建物於逆斷層錯動下，其運動及砂土－軟岩層的力學行為，如圖 5(b)所示。由圖 5(b)可知，此案例模擬結果與實驗結果相當符合，而軟岩斷裂情形及建物傾斜機制與實驗觀察結果一致；在此案例中，PFC^{2D} 模擬巨觀剪力裂隙沿逆斷層方向延伸至建物下方，使建物在上下盤交界處有明顯落差，導致建物傾斜。

低樓層樁基礎建物於逆斷層錯動下，其運動及砂土－軟岩層的力學行為，如圖 6(a)所示。由圖 6(a)可知，模擬之巨觀剪力裂縫形貌及逆斷層錯動引致的建物傾斜，與離心模型實驗結果相似。然而，PFC^{2D} 模擬逆斷層錯動時受樁之影響，兩樁附近的軟岩層，因受力碎為許多小塊體，並掉落至軟岩破裂帶處。高樓層樁基礎建

物於逆斷層錯動下，其運動及砂土－軟岩層的力學行為，如圖 6(b)所示。由圖 6(b)可知，模擬之巨觀剪力裂隙形貌及建物傾斜，與實驗觀察相似。此處模擬之現象及原因，如同前一段低樓層樁基礎建物案例一致。

針對各類高度及基礎形式建物在正、逆斷層邊界條件下，當建物位於斷層投影至地表位置上方時，是否有設置樁基礎，會影響斷層錯動引致建物的位移及傾斜發生。同樣，由於圖 3～圖 6 為某次 PFC^{2D} 隨機模擬分析結果，如在不同隨機數模擬下，其軟岩及建物的力學行為也會不同。

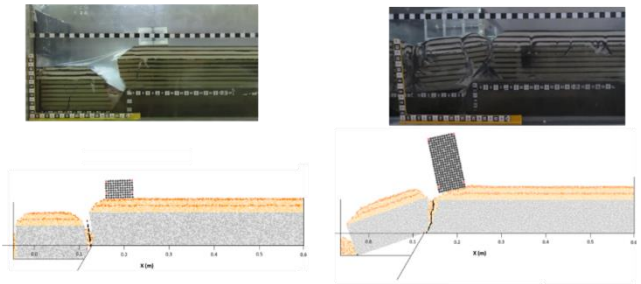


圖 3 正斷層淺基礎數值模擬結果

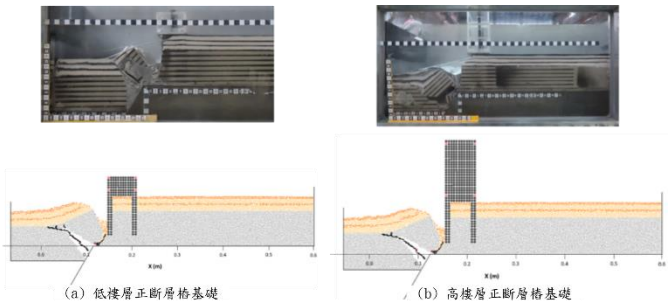


圖 4 正斷層樁基礎數值模擬結果

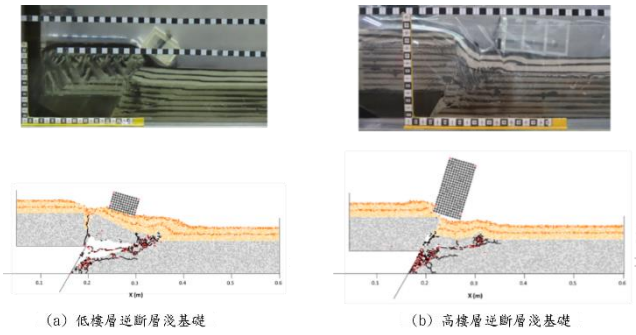


圖 5 逆斷層淺基礎數值模擬結果

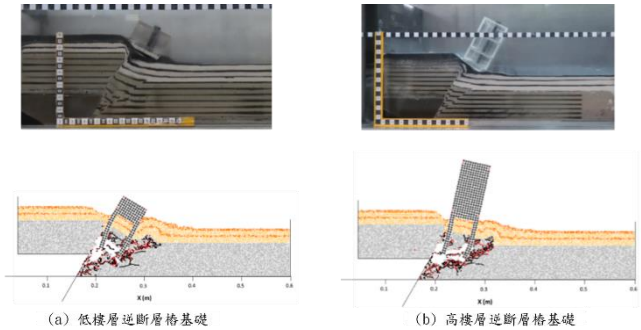


圖 6 逆斷層樁基礎數值模擬結果

IV. 結論

本年度的離心模型試驗結果與去年的結果進行比較，共 8 組的離心模型試驗能夠得到以下結論，第一點，在正斷層或逆斷層錯動狀況下，高低樓層之樁基礎建物雖然會傾斜，但未發生翻覆；第二點，在正斷層錯動下之低樓層樁基礎建物(NP_1F)角變量未超過基礎構造設計規範對建築物可容許之角變量危險等級 1/150；第三點，在正逆斷層的錯動下，樁基礎能夠有效減少建物的水平位移量；第四點，埋設之地下管線的變形行為如同地層的變形變化，而在正斷層試驗中管線會露出地表；第五點，逆斷層淺基礎與樁基礎相比造成較大的地表影響範圍，影響範圍達 2 倍的總土層厚度；而正斷層試驗的地表影響範圍相似，淺基礎與樁基礎試驗的地表影響範圍皆位於上盤側。

本年度數值模擬一套複合的非連續及連續相試體的建模及檢核方法，成功模擬非連續相之砂土、連續相之軟岩及建物、以及軟岩與建物基礎間在斷層錯動下的力學行為。PFC^{2D} 中顆粒及部分力學參數具隨機性質，導致在模擬鍵結試體破壞時，裂隙發展過於隨機，並非所有模擬的試體破裂情形與實驗觀察一致。但多數模擬各種建物於砂土－軟岩層在斷層錯動下的力學行為結果而言，其結果大致與離心模型試驗結果相符，並可透過進一步分析解釋斷層錯動造成軟岩層的破壞機制。但建議未來相關模擬，還須更多參數研究及微觀力學分析，進一步探討建物幾何及載重對軟岩層受正、逆斷層錯動下的力學行為。

參考文獻

[1] Bieniawski, Z.T., Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A.A.Balkema, Rotterdam, Boston. (1984).

[2] 張有毅，「以離心模型試驗及個別元素法評估正斷層和逆斷層錯動地表及地下變形」，博士論文，國立中央大學土木工程學系，中壢(2013)。

[3] Cundall, P. A., “A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system,” Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics (1971).

[4] Itasca Consulting Group Inc., PFC^{2D} (Particle flow code in 2 dimensions), Verson 4.0 (manual), Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, MN:ICG (2008).

[5] Potyondy, D. O., Cundall, P. A., “Abonded-particle model for rock,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, pp. 1329-1364 (2004).

國際核電廠運用高密度聚乙烯(HDPE)管路運用之可行性探討
The Feasibility Study on High Density Polyethylene Pipes Applied to Nuclear Power Plants

計畫編號：110-2623-E-262-001-NU
計畫主持人：丁鯤
e-mail：kuenting@mail.lhu.edu.tw
計畫共同主持人：沈志陽
計畫參與人員：王信宗、蘇展弘、謝昀達、
曾浩軒、張辰愷、魯孟廉
執行單位：龍華科技大學化工與材料工程系

摘要

美國核能電廠的運轉，針對地下供水碳鋼管路的破裂漏水，已進行使用 HDPE 來取代。美國核能管制委員會(NRC)已於 2020 年通過可使用 ASME 規範來進行 HDPE 管路的安裝、設計與檢驗。但 NRC 對 HDPE 熔接接頭處仍有熔接不完全會有裂紋產生的疑慮。因此，除加強超音波技術的發展外，則須建立 HDPE 管路結構完整性的評估技術，包括粘彈性管路慢速裂縫成長率的評估、殘留應力與破裂準則等。本計畫之目的為：1.ASME 法規的經驗回饋；2.裂縫成長模式與殘留應力計算模式的建立；3.粘彈性 J 積分破裂準則建立。

關鍵詞：高聚乙烯管路、慢速裂縫成長率、粘彈性管路殘留應力計算、粘彈性 J 積分

Abstract

HDPE has been used to replace the fracture and leakage of carbon steel pipes for underground water supply system in USA nuclear power plants. The U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) has approved the ASME codes for the installation, design and inspection of HDPE piping in 2020. However, NRC still has concerned that cracks will be caused by incomplete welding of HDPE welded joints. Therefore, in addition to strengthening the development of ultrasonic technology, it is necessary to establish assessment techniques for the structural integrity of HDPE pipelines, including the assessment of the slow crack growth rate of viscoelastic pipelines, residual stress and fracture criteria, etc. The purpose of this project is: 1. Experience feedback of ASME regulations; 2. Establishment of crack growth model and residual stress calculation model; 3. Establishment of viscoelastic J-integral fracture criterion.

Keywords: High Density Polyethylene Pipes, slow crack growth rate (SCG rate), residual stress calculation of viscoelastic pipe, viscoelastic J-integral fracture criterion

I. 前言

起初，核能產業在使用 HDPE 管路時引起了一些問題，因為核能行業的許多人沒有意識到 HDPE 管路的強度、耐用性和追踪記錄。聚乙烯管路在核能安全相關應用中的首次使用始於選擇高性能 PE 4710 樹脂來製造可替代Callaway核電廠碳鋼管的管路。該管路用於電廠緊要廠用給水系統(Essential Service Water System)的埋管部分。使用了大約 1,600 英尺的 36 英寸 HDPE 管路。 Callaway 的所有安裝都是在 2007 年 3 月 ASME 規範個案豁免申請獲得批准之後進行的。連接 HDPE 管路和配件的最便利方法是對接熔接。HDPE 管路的對接熔接的優勢之一是可提供無洩漏性的性能，但對在核能的應用方面則是一個比較陌生的議題。也是美國核能管制委員會對規範個案一直提出疑義的部分，一直到2020年才批准HEPE管路應用於核能電廠安全相關的管路上，但僅限至於建造、安裝、檢查的規範。

因此，若想將HDPE管路擴大使用面，須對 HDPE 的基礎知識，以及對熱塑性管路在設計上所要考量的設計方法，要有完整的了解。**本計畫第一項研究項目，係針對HDEP管路相關法規規範以及經驗回饋，將進行系統性的整理與蒐集，以作為日後HDPE管路取代碳鋼管路時營運中檢測的參考與規範訂定。**

因Calaway與Catawba電廠在2008與2009獲NRC核准以HDPE管路取代碳鋼管路，是進入第四個十年或許在加上延役，另一項NRC關心的議題是HDPE管路安裝後，以後10年的壽命評估。HDPE管路主要的事故模式是緩慢的裂紋成長(Slow Crack Growth，SCG)，是由持續應力(sustained stress)所引起的。因此，**本計畫第二項研究項目則要評估管路中母材和熔接頭材料的SCG抵抗力及壽命評估的模式，並建立殘留應力模式的計算。**

很多研究在討論金屬管路因設計與製造過程中造成的瑕疵與幾何上的缺陷，都需藉由破裂力學的數值與解析分析。實際上，PE的粘彈塑性行為及其對應變速率和溫度的敏感性，較難建立破裂力學的模型。藉由破裂力學，可以評估此類缺陷的威脅，以執行適當的維護程序。儘管表面缺陷可能會在各個方向發生，迄今都以縱向半橢圓形裂紋以及外表面周向裂紋為探討目標，**所以本計畫第三項研究項目要建立粘彈塑性內表面半橢圓形裂紋J積分破裂力學模型的建立。**

II. 主要內容

(一) HDPE 管路應用於核能電廠規範/個案與經驗回饋之文獻探討

2020年5月13日PE管路聯盟提供了美國Callaway核

能電廠2008年使用HDPE管路的案例[1]。該電廠位於密蘇里州是壓水式反應器，在1984年運轉，在2007年(運轉23年後)，重要廠用供水系統的碳鋼管路因微生物引起的腐蝕(Microbiologically Induced Corrosion，MIC)，造成針孔洩漏(pinhole lead和點蝕(pitting)的事件。若要用相同的碳鋼材料替換2,000呎的30吋核能安全三級管路，則會成為一個重大議題，因為這意味著該系統將在電廠的預期使用壽命到期之前必須再進行一次全面的更換。因此，必須找到一個新的解決方案，但還必須符合ASME規範和核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission，NRC）複雜的認可程序。

美國Catawba核電廠早在1995年就開始使用HDPE管路用在非安全相關的廠用水系統，經過了10年沒有發現像碳鋼管路的腐蝕、生鏽、堵塞與洩漏的問題，證明HDPE在管路運轉期間績效良好。於是Callaway電廠提出使用HDPE管路取代碳鋼管路的替代方案，這是美國首例將HDPE管路用在核能安全相關廠用水系統，也是首次根據新訂定的ASME個案N-755來申請[2]。在2008年10月31日獲NRC核准[3]，Callaway電廠在12月9日安裝完畢(參閱圖1)。同時間的還有美國Catawba電廠[4]。目前HDPE管路的應用已是全世界持續運轉電廠以及新建核能電廠的一個新趨勢。

美國ASME規範的Code Case N-755，其中包含HDPE管路在核能電廠中應用的要求[5]，規定在運轉前對所有管路的熔接接頭(pipe fusion joints)進行目視檢查(visual examination)、靜水壓測試(hydrostatic test)和非破壞性檢查（Nondestructive Examination，NDE）[6,7]。目視檢查包括總表面是否有凹痕，查看和驗證接頭處的溶合數據，以及在靜水壓試驗期間包括在加壓、維持壓力和減壓過程中不得有洩漏發生。然而，通過目視檢查只能發現明顯的表面損傷，檢查的有效性很大程度上取決於人員的資格。如果熔接接頭中存在明顯的貫穿壁缺陷，則靜水壓測試通常是有效的[8]。為了檢測對運轉安全有潛在危害的溶合缺陷，應進行體積檢查(volumetric examination)，並應由合格的NDE人員評估結果。儘管ASME已發行了Code Case N-755-3[9]，提出一些與標準溶合與鑑定程序的適用性，但尚未得到完全令人信服的結論。因此，NRC尚未批准Code Case N-755，主要原因包括製造及安裝、溶接頭處熔接品質的驗證與檢測結構完整性要求，是否可以由可靠地體積檢查檢測出在熔接過程中產生熔斷不足的情況[10,11]。相關核電廠與NRC核准使用HDPE的歷程資料詳如表1[12]。

表1 **HDPE管路替代核能安全第三類管路之相關規範與審查結果[12]**

年代	內容
2007	Duke Energy所發行的Code Case N-755-0[2]，對用於在安全相關第三級管路應用HDPE管路，限制HDPE溶合為對接溶合(butt fusion)。
2008	美國NRC同意Callaway電廠一號機可根據N-755與電廠特定資料在重要廠用供水系統(ESW)使用HDPE管路[3]
2009	美國NRC同意Catawba電廠一、二號機可根據N-755與電廠特定資料在核能廠用供水系統(NSW)使用HDPE管路[4]
2010	Code Case N-755-1 修訂一版發行[6]
2013	Code Case N-755-2 修訂二版發行[7]
2014	美國NRC否絕將Code Case N-755-0（修訂0版）用於一般用途，原因包含與溶合程序、劣化程序與接頭檢查的問題被列為未解決議題[13]。
2015	美國NRC同意Hatch電廠二號機廠用供水系統(NSW)使用HDPE管路[14]
2015	HDPE在核能安全三級管路上的使用被納入ASME第三章強制性附錄XXVI[15]。
2015	Code Case N-755-3 修訂二版發行[9]
2017	美國NRC否決將Code Case N-755-1（修訂1版）用於一般用途，原因未解決議題(unsolved issues)尚未澄清[16]。
2020	美國NRC批准2015版ASME B&PV規範，其中包含在第三章應用中使用HDPE管路[17]

(二) HDPE 管路慢速裂紋成長率模式與殘留應力計算

1. HDPE 管路慢速裂紋成長速率(Slow Crack Growth Rate, SCG rate)

本計畫採用 Krishnaswamy 所提出 PE 材料隨溫度變化的 SCG 速率[18]，如式(1)。

$$\frac{da}{dt} = AK^n \exp(\frac{Q}{RT}) \quad (1)$$

式中(da/dt)SCG 速率(不包括起裂時間或裂紋萌生期間)，K 為應力強度因子，T 為溫度，R 為氣體常數；logA=11.09，Q=-104KJ/mol，n=3.7。

針對在 HDPE 管路的對接熔接過程中，要了解由於未熔合或其他原因（例如，接頭未對準、接頭污染、加熱/浸泡時間不當）導致的表面缺陷的 SIF 的範圍非常重要，同時經過數值計算的分析，考慮外徑全週半橢圓裂紋是保守的考量[19]。針對不同的 DR 材料(7,9,11,14)，Krishnaswamy 提出了簡化型應力強度因子的公式[20]，如式(2)。

$$\begin{aligned}
&\text{DR7}: K_I = \sigma_m\sqrt{\pi a}[0.6378(\tfrac{a}{t}) + 1.12] \\
&\text{DR9}: K_I = \sigma_m\sqrt{\pi a}[0.6711(\tfrac{a}{t}) + 1.12] \\
&\text{DR11}: K_I = \sigma_m\sqrt{\pi a}[0.7044(\tfrac{a}{t}) + 1.12] \\
&\text{DR13}: K_I = \sigma_m\sqrt{\pi a}[0.7340(\tfrac{a}{t}) + 1.12]
\end{aligned} \quad (2)$$

其中 σm 是標稱軸向膜應力，a 是裂紋深度，t 是管路的壁厚。a/t 的適用範圍由 0.01 到 0.5。

2. HDPE 管路殘留應力之計算

本計畫數值分析模型是在商用有限元軟件 ANSYS 下進行的，採用 1/2 對稱模型[21]。數值模型中使用高階單元 SOLID186，共 6083 個 元素和 91626 個節點在計算中建模。 HDPE 材料的物理性能參考 [22,23]。HDPE 被假定為各向同性材料，粘彈性模型由多個並行的麥克斯韋模型組成[24]。對於溫度效應，該模型還考慮了 Williams-Landel-Ferry (WLF) 時間-溫度偏移函數 w(T)。 然後，作為 Prony 級數的剪切應力鬆弛模量函數 (SRMF) G(T,t) 可以表示為等式(4) [25、26]：

$$G(T,t) = \sum_{i=1}^{n} G_i exp\left\{-\frac{t}{\Gamma_i w(T)}\right\} \quad (4)$$

$$w(T) = \exp\left(\frac{-c_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})}\right)$$

式中Γ_i為剪應力鬆弛時間(shear stress relaxation time)、G_i

數值。參考溫度為 150°C。

為了模擬整個對接熔接過程並獲取相對應的殘餘應力，將使用有限元分析套裝軟體，其中包含了粘彈性特徵模型。依次建立兩個階段來分析溶接殘餘應力，即溫度場模型和殘餘應力場模型。可以將模擬的溫度場視為預定義的熱源。然後，可以使用該溫度場在 HDPE 焊接接頭中形成殘餘應力場。考慮 HDPE 管路外徑 20in.、管壁厚 1.5in.，含有內表面半橢圓形裂紋，其有限元模型如圖 1 所示。

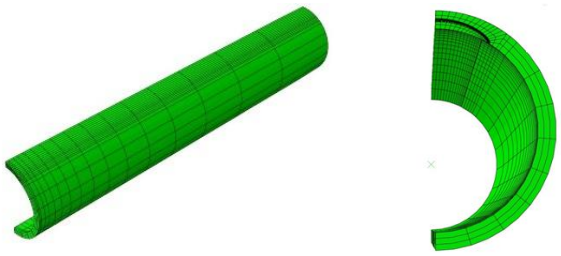


圖 1 含內徑半橢圓裂紋之 HDEP 管路有限元模型

此部分殘留應力的計算採兩階段進行分析，第一階段加載 100psi 與施加溫度至 200°C，最大應力 6.2ksi。第二階段降溫 200°C，並將外加附載卸載。比較兩者之應力值，即為作用在裂紋表面上的殘留應力，為 5.0ksi。

同樣步驟，但溫度改為 160°C，第一階段在高溫 160°C 及 100psi 內壓作用下，最大應力為 6.2ksi，與前述計算結果相類似。第二階段降溫 160°C 與壓力卸載，得到殘留應力值為 5.4ksi。

考慮 HDPE 管路外徑 20in.、管壁厚 1.5in.，不考慮裂紋，溫度降 200°C，所得殘留應力為 5.36ksi。

(三) HDPE 管路含半橢圓形表面裂紋粘彈塑性破裂力學模型建立與分析(包括管路母體與溶接頭處)。

本計畫的主要目的是建立一個半經驗模型，來評估在PE管壁上存在縱向表面缺陷的危害性。聚乙烯是粘彈塑性材料。因此，在線性塑料和非線性彈塑性材料的破裂力學廣泛使用的J積分將被選作材料破裂韌性評估的判據。

然對具有半橢圓形裂紋的管路的數值模擬，在HDPE管路方面破裂力學J積分的數值計算仍是有限的[27]，HDPE管路破裂力學J積分的計算侷限於軸向半橢圓裂紋。因此，本計畫將建立內徑半橢圓裂紋的J積分計算。含內徑半橢圓裂紋之HDPE管路有限圓模型如圖3所示，取1/2對稱模型，考慮粘彈性材料性質。外力考慮軸向拉力600lb及末端彎矩600lb-in.。因轉移溫度的範圍在140°C-200°C之間，所以分別探討200°C與140°C之J積分變化，並於圖2進行比較，顯示溫度對J積分之影響不大。

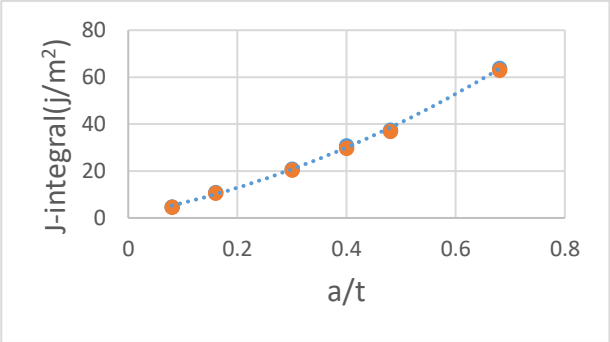


圖2 當溫度不同的狀況下，圖10與圖11的比較

當固定a/t=0.5的情形下，考慮軸向拉伸力與末端彎矩變化對J積分之影響，如圖3所示。外力倍數係以軸向拉力600lb、末端彎矩600lb-in.之倍數來計算。J積分與外力呈比例增加。

當固定a/t=0.5的情形下，軸向拉伸力與末端彎矩固定，考慮裂紋長度對J積分之影響，裂紋長度以角度來表示。裂紋長度與J積分之關係如圖4所示。

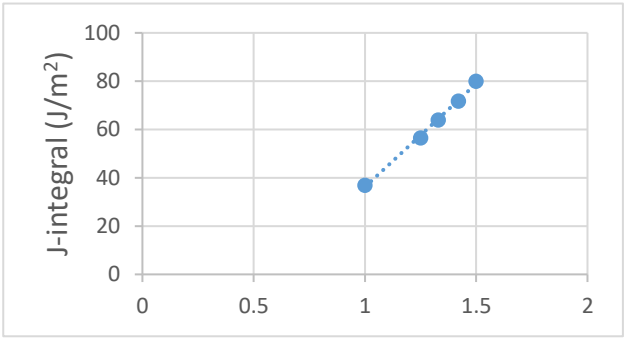


圖3 J積分與軸向拉力與末端彎矩之關係

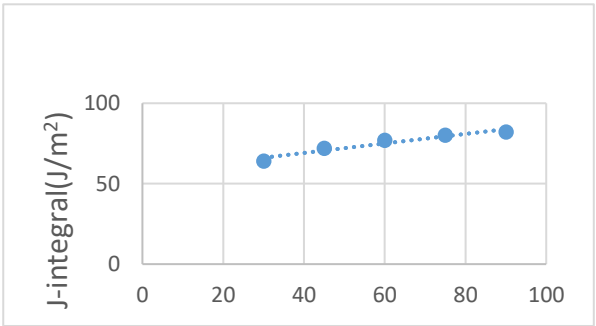


圖4 與裂紋長度相關之J積分

III. 結果與討論

核能電站廠用水系統中使用的鋼管經常遭受各種形式的劣化，包括全面腐蝕、微生物誘發腐蝕、結核和電偶腐蝕。HDPE 通常不受這些劣化形式的影響。此外，核能電廠通常具有強大的抗震要求，而 HDPE 非常具有柔性，增加了在地震中的耐震能力[28]。

本計畫針對 HDPE 管路在熔接後降溫到正常溫度時所產生的殘留應力，進行外徑 20in.、管壁厚 1.5in.的有限元模擬與計算，得到約 5.0ksi(約 30MPa)。對 HDPE 管路殘留應力計算的研究仍是有限，針對外徑 12in、管壁

厚 0.6in.計算所得之殘留應力約在 3.2ksi(約 20MPa)[29]，因此在裂紋成長分析上是保守的。

HDPE 管路破裂力學相關 J 積分的計算與分析考慮到材料黏彈性行為的探討是有限的，雖有研究者將時間效應考慮進去，但還是採用彈性 J 積分的計算方法[30]。本計畫考慮了 HDPE 的粘彈性材料性質，計算內表面半橢圓形裂紋，溫度對 J 積分的效應不大，但與外力與裂紋長度呈正比的關係。

IV. 結論

核一、核二已經開始進入除役階段，除非核三廠延役，HDPE 管路在台灣核電廠應無機會使用。HDPE 管路在非核能應用，石化工廠、都市水供應等應用在國外已經變成主流應用。本計畫所探討的 HDPE 管路超音波檢測、裂紋成長分析、粘彈性 J 積分準則，都可延用到民生應用上。

參考文獻

1. http://www.pepipe.org/case-study-callaway-nuclear-power-plant
2. ASME Code Case N-755-0, 2007, Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe Section III, Division I and XI, An International Code- Cases of ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Approval Date: March 22, 2007.
3. Michael M, 2008, Callaway Plant Unit 1-Relief Request 13R-10 Approved on October 31, 2008 For Third 10-year In-service Inspection Interval –Use of Polyethylene Pipe in Lieu of Carbon Steel Pipe in Buried Essential Service Water Piping System (TAC NO. MD6792), dated November 7, 2008 (ML083100288).
4. Melanie W, 2009, Catawba Nuclear Station Units 1 and 2, Relief 06-CN-003, For use of Polyethylene material in buried service water piping (TAC NOS. ME0234 AND ME0235), dated May 27, 2009 (L091240156).
5. Golliet M G. Update on code case N-755 revision class 3 polyethylene piping. In: Proceedings of International Conference on Nuclear Engineering. Brussels, 2009, 219–223
6. ASME Code Case N-755-1, 2010, Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe Section III, Division I and XI, An International Code- Cases of ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Approval Date: July 1, 2010.
7. ASME Code Case N-755-2, 2013, Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe Section III, Division I and XI, An International Code- Cases of ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Approval Date: July 1, 2013.
8. Crawford S L, Cumblidge S E, Doctor S R, et al. Technical letter report—Preliminary assessment of NDE methods on inspection of HDPE butt fusion piping joints for lack of fusion. In: Proceedings of ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2009, 1039–1045
9. ASME Code Case N-755-3, 2015, Use of Polyethylene (PE) Plastic Pipe Section III, Division I and XI, An International Code- Cases of ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Approval Date: July 1, 2015.
10. Shim DJ, Krishnaswamy P, Focht E, 2009, Comparison of parent and butt fusion material properties of high density polyethylene, in: Proc. of the ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP 2009-78066, Prague, Czech.
11. Focht E, 2011, NRC concerns regarding the use of HDPE piping in safety-related nuclear applications, in: Proc. of Use of HDPE for Power Plant Piping Systems, Workshop, Charlotte, North Carolina, USA, 2011.
12. WIKIPEDIA, Use of HDPE in nuclear power plant piping systems, to be last edited on 1st November, 2020
13. Regulatory Guide RG1.193, 2014, ASME CODE CASES NOT APPROVED FOR USE, Revision 4, August 2014.
14. Michael M, 2015, Edwin I. Hatch Nuclear Plant, Unit 2, Alternative HNP-ISI-ALTHDPE-01 for use of high density polyethylene in plant service water piping (TAC MF6712), dated December 21, 2015 (ML15337A414).
15. ASME, 2015 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components - Division 1. ASME. July 1, 2015.
16. Regulatory Guide RG1.193, 2017, ASME CODE CASES NOT APPROVED FOR USE, Revision 5, August 2017.
17. 50.55a Codes and Standards, https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0055a.html, 2021-11-03 Retrived 2022-03-10.
18. Kalyanam S, Krishnaswamy P, Shim DJ, Hioe Y, Focht E, Structural integrity of HDPE piping and joints in nuclear safety-related applications, Proceedings of the 2012 20th International Conference on Nuclear Engineering collocated with the ASME 2012 Power Conference, ICONE20-POWER 2012, July 30-August 3, 2012, Anaheim, California, USA.
19. Crawford S, Cinson AD, Watts MW, Moran TL, Anderson MT, Assessment of NDE Methods to Detect Lack of Fusion in HDPE Butt Fusion Joints, Proceedings of the ASME 2011 PVP Conference, July 17-21, 2011, Baltimore, Maryland, USA.
20. Krishnaswamy P, Development of Flaw Acceptance Criteria for Butt Fusion Joints in HDPE Piping – A Status Report, ASME BPV Section XI, Task Group on Flaw Evaluation for HDPE Pipe, San Diego, Feb. 2014.
21. Tu CY, Lin SR, Chen KT, Hunag CC, Ting K, Shen SY, Assessment of ASME code safety margin of HDPE pipelines in nuclear applications, Proceedings of the 13th International Symposium on the Integrity of Nuclear Components, Virtual Meeting, Seoul, Korea, April 21-22, 2021.
22. Tadmor Z and Gogos CG, Principles of polymer Processing, Wiley-Interscience, New York, 1979.
23. Luo X, Lu S, Shi J, Li Xand Zheng J, Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement, Engineering Failure Analysis, Vol. 48, pp.144-152, 2015.
24. Siripath N and Thusneyapan S, Simplified shear relaxation modulus function of HDPE for FE simulation in extrusion blow process, MATEC Web of Conferences, Vol. 264, Article 03005, 2019.
25. Laroche D, Kabanemi KK, Pecora L and Diraddo RW, Integrated numerical modeling of the blow molding process, Polymer Engineering and Science, Vol. 39, pp.1223-1233, 1999.

26. Thusneyapan S and Rugsaj R, Non-linear finite element analysis of time-varying thickness and temperature during the extrusion blow molding process, Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering, Transactions of the TSME, Vol. 4, pp.12-24, 2016.

27. Benhamena A, Aminallah L, Bouiadjra BB,Benguediab M, Amrouche A, Benseddiq N, J integral solution for semi-elliptical surface crack in high density poly-ethylene pipe under bending, Materials and Design, 32, 2561-2569, 2011.

28. Docket Nos. 50-277 and 50-278, Request for additional information for the review of the Peach Bottom Atomoc Power Station, Units 2 and 3, February 6, 2002.

29. Haider HJ, Evaluation the effect of residual stress on fracture of polyethylene pipe under pressure loading, Basrah Journal for Engineering Sciences, 16, 71-78, 2016.

30. Bendouba M, Djebli A, Aid A, Benseddiq N, Time-dependent J-ingegral solution for semi-elliptical surface crack in HDPE, Computers, Materials and Continua, 2015. https://www.researchgate.net/publication/282712401

水化學控制對壓水式反應器合金 600 材料之應力腐蝕龜裂影響
Effect of Water Chemistry on Stress Corrosion Cracking of Alloy 600 in a Simulated PWR Primary Water Environment

計畫編號：110-2623-E-007-001-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
計畫參與人員：施湘鈴
執行單位：國立清華大學 工程與系統科學系

摘要

本研究探討當溶氫濃度降低至 5 cc/kg H_2O 的條件時，模擬 PWR 一次側燃料週期初期(Beginning of Cycle, BOC)與末期(End of Cycle, EOC)水環境中的 Alloy 600 與 316L SS 的應力腐蝕龜裂行為。實驗以 Alloy 600 與 316L SS 試棒進行慢應變速率拉伸實驗(Slow Strain Rate Test, SSRT)。Alloy 600 與 316L SS 試棒進行固溶退火熱處理，再分別進行單一階段時效處理(TT)與敏化熱處理(SEN)並預長氧化膜，於 320℃模擬 BOC 與 EOC 溶氫水環境下進行 SSRT 試驗分析其應力腐蝕龜裂行為，並以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察試棒破斷面與表面氧化膜形貌，以雷射拉曼光譜儀 (Laser Raman Spectrophotometer)分析表面氧化層類型。實驗結果顯示，Alloy 600 TT 試棒在模擬 BOC 溶氫條件下展現最差的伸長量與最大抗拉強度(Ultimate Tensile Strength, UTS)，但在各條件下的 Alloy 600 都表現出較佳的 SCC 抗性。316L SEN 試棒在模擬 EOC 溶氫條件下的 UTS 值與降伏強度(Yield Strength, YS)表現最差，此外，實驗結果亦顯示於水環境中添加 5 cc/kg H_2O 的溶氫，即可有效降低 316L SEN 的 SCC 敏感性。

關鍵詞：應力腐蝕龜裂、鎳基 600 合金、316L 不銹鋼、溶氫量、硼/鋰濃度。

Abstract

The aim of this study is to investigate the SCC initiation and propagation behavior of Alloy 600 and 316L SS in 320 ℃ simulated PWR primary water environment with two different dissolved hydrogen (0 and 5 cc H_2/kg H_2O) and two B/Li concentrations (1200 ppm B + 3.5 ppm Li and 300 ppm B + 1 ppm Li). The SCC behavior and the mechanism properties were investigated by slow strain rate test (SSRT). The fracture surface and the morphologies and structure of oxide film were observed by Scanning electron microscopy (SEM) and Laser Raman spectrophotometer. According to the test results, the Alloy 600 TT sample tested at 1200 ppm B + 3.5 ppm Li with DH of 5 cc/kg H_2O exhibited the worst ultimate tensile strength (UTS) and elongation among the Alloy 600 tested samples. The 316L SEN sample tested at 300 ppm B + 1 ppm Li with DH of 5 cc/kg H_2O condition exhibited the lower UTS and yield strength (YS) among the 316L SEN tested samples. In addition, the mechanical properties of Alloy 600 samples were better than those of 316L samples.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Ni-Based Alloy 600, 316L SS, Dissolved Hydrogen, B/Li concentrations

I. 前言

壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)主要使用的組件材料包含鎳基合金 600 (Alloy 600)與不銹鋼 316L (316L SS)，經電廠長期運轉後發現有一次側冷卻水應力腐蝕龜裂(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)發生。而造成應力腐蝕龜裂的三大要素為敏感性材料、張應力與腐蝕性環境，可藉由調整上述三個要素以減緩 PWSCC 之發生。

PWSCC 對於 PWR 一次側組件材料而言，是很常見的劣化行為之一，但可藉由水化學條件的調整，減少 PWSCC 現象發生。常見的水化學調控方法包含在水環境中注氫、pH 值控制、硼與鋰濃度調整等。在 PWR 一次側水環境中，會注入氫氣以抑制輻射分解效應所提高的氧化性，使環境維持在還原性狀態，並減緩材料劣化。此外，也添加硼酸與氫氧化鋰以控制中子反應度與平衡水環境 pH 值，然而隨著燃料週期燃耗，硼濃度會逐漸下降，而氫氧化鋰濃度也須隨之調整。雖有研究指出在目前 EPRI 規範的運轉溫度 320-360℃與注氫濃度 25-50 cc/kg H_2O 下，燃料週期初期的裂縫成長速率可做為整個燃料週期的保守估計值，但在溶氫濃度提升或降低時，硼/鋰濃度對於 PWSCC 現象的影響也需重新評估。

II. 主要內容

一次側水環境會因為輻射分解反應而使環境氧化性提升，為降低水環境的氧化性並抑制腐蝕，電廠多會於水環境中添加氫氣。此外，為控制中子反應度與維持一次側水的 pH 值最佳化，添加了硼酸與氫氧化鋰，使整體水化學更複雜。且硼濃度會隨著燃料週期的燃耗而逐漸減少，氫氧化鋰濃度便須隨之調整。雖有文獻指出在目前 EPRI 規範的溶氫範圍 25-50 cc/kg H_2O 中，材料在燃料週期初期(Beginning of Cycle, BOC)的裂縫成長速率可作為整個燃料週期的保守估計值，但當溶氫(dissolved hydrogen, DH)低至 5 cc/kg H_2O 以下時，則需重新評估其影響。

因此本研究在模擬 PWR 一次側燃料週期初期與末期(End of Cycle, EOC)的除氧(Deaerated)與低溶氫(DH = 5 cc/kg H_2O)水環境下，進行慢應變速率拉伸實驗(Slow Strain Rate Test, SSRT)，探討 Alloy 600 與 316L SS 的應力腐蝕龜裂行為，並評估溶氫濃度至為 5 cc/kg H_2O 時

的防蝕效果。

III. 結果與討論

進行 SSRT 實驗前，試棒先進行為其 14 天的預長氧化膜處理，水環境條件為 320℃、DO 為 1 ppm。SSRT 實驗是比較 Alloy 600 與 316L SS 在模擬 PWR 燃料週期初期(BOC)與末期(EOC)除氧與低溶氫水環境中，不同熱處理條件下的應力腐蝕龜裂起始與成長行為。圖 1 為 Alloy 600 在模擬 PWR 不同水環境下的 SSRT 結果，各條件下的機械性質整理於表 1。除氧環境下的 Alloy 600 SA-BOC-DE 的伸長量略大於 Alloy 600 TT-BOC-DE，然而 UTS 值差異不大，推論與 SA 試棒的敏化程度與微結構有關。SA 試棒的 DOS 值雖較低，但仍屬中度敏化，且其晶粒尺寸與 TT 試棒差異不大，故在應力-應變曲線圖中，伸長量與 UTS 皆差異不大。比較模擬 BOC 除氧與溶氫水環境的 Alloy 600 試棒，兩 SA 試棒的伸長量差異不大，但 Alloy 600 SA-BOC-DH 的 UTS 與 YS 值皆較高。而 Alloy 600 TT-BOC-DH 的整體機械性質皆低於除氧條件的 Alloy 600 試棒，不論伸長量、UTS 與 YS 值皆表現較差。比較模擬 BOC 與 EOC 溶氫條件下的 Alloy 600 試棒，兩 SA 試棒的伸長量差異不大，但 Alloy 600 SA-BOC-DH 的 UTS 與 YS 皆高於 Alloy 600 SA-EOC-DH，約有 70-80 MPa 的差異。兩 TT 試棒的伸長量也無明顯差異，而 UTS 與 YS 值則以 Alloy 600 TT-EOC-DH 較高。此外，TT 試棒的伸長量皆小於 SA 試棒，顯示出材料熱處理的影響，經過固溶退火熱處理後，使 SA 試棒微結構的析出物減少，材料有所軟化。然而仍有少許析出物存在，使 SA 試棒仍有很好的 UTS 與 YS 表現。對於兩種濃度水溶液下的 SA 與 TT 試棒 UTS 及 YS 值差異，推測與試棒的 gauge 直徑大小不一有關。試棒 gauge 的直徑在加工製造或研磨過程中皆可能有所誤差與磨耗，導致 gauge 橫截面面積有所不同，進而導致 UTS 與 YS 值的差異。

圖 2 為 Alloy 600 在不同水環境下的破斷面觀察，而 SCC 比例統整於表 2。比較 BOC 除氧條件的破斷面 SCC 比例，Alloy 600 SA-BOC-DE 有較高的 SCC 比例，而 Alloy 600 TT-BOC-DE 雖有較高的 DOS 值，但破斷面卻僅有少量 SCC 出現。本研究所計算的 SCC 比例並無包含 SCC 到延性破裂過渡區，但若將過渡區納入計算，則 SA 試棒的 SCC 比例約為 6.53%，TT 試棒則可提高至 3.61%。而在 BOC 溶氫條件下，SA 試棒的 SCC 比例相較於除氧條件已降至 1%以下，而 Alloy 600 TT-BOC-DH 的 SCC 比例雖也低於 1%，但在破斷面內部發現大量二次裂紋，此現象可能與水環境溶氫濃度有關。當水環境中有 5 cc/kg H_2O 的注氫時，可能已足以使 Alloy 600 TT 試棒的表面氧化膜接近 Ni/NiO 相轉變區，進而導致氧化層不穩定，而 SCC 容易發生。且 SSRT 試驗會不斷使試棒產生新的破裂面，新表面會因腐蝕性水環境而再度形成氧化層，氧化層依舊不穩定而破裂，此現象不斷循環而導致破裂面的大量二次裂紋。比較 BOC 與 EOC 溶氫條件下的破斷面 SCC 比例，無論是 SA 或 TT 試棒，在 EOC 條件下的 SCC 比例皆較 BOC 條件略高，但差異不大，僅在 1%以內。但 Alloy 600 TT-EOC-DH 破斷面內部亦發現大量二次裂紋，可對應至其伸長量皆較低的結果，且其形成原因應與 BOC 溶氫條件的 TT 試棒相同。若對於兩 TT 試棒的二次裂紋進行比較，發現 EOC 條件下所產生的二次裂紋較少，平均長度亦較 BOC 條件更短。

Alloy 600 在不同水環境下的試棒側面裂口及表面裂縫形貌觀察，發現各條件下的 Alloy 600 表面裂縫皆以沿晶破裂為主，比較模擬 BOC 與 EOC 條件下的 Alloy 600 試棒，Alloy 600 SA-EOC-DH 的表面裂縫平均長度可達到 41.56 μm，且裂縫數量也較 BOC 溶氫條件時更多，可對應至其較差的 UTS 值。而 BOC 與 EOC 溶氫條件下的 TT 試棒平均裂縫長度差異不大，但長度在 20 μm 以下的小裂縫數量以 EOC 條件時更多。

圖 3 為 316L SEN 在不同水環境下的 SSRT 結果，而試棒的機械性質整理於表 3。SA 試棒表現出很好的伸長量與較低的 UTS 與 YS 值，與其熱處理方式有關，使 SA 試棒的析出物再溶回合金之中，且其有較大的晶粒尺寸，使材料有軟化現象。SEN 試棒已屬於重度敏化程度，且熱處理使碳化鉻析出得以強化材料，使 SEN 試棒有較差的伸長量與較佳的 UTS 及 YS 值。BOC 除氧與溶氫條件下的 316L SEN 試棒，兩條件的應力-應變曲線圖幾乎完全重疊，而 316L SEN-BOC-DH 的伸長量略低於 316L SEN-BOC-DE。對於 BOC 與 EOC 條件下的 316L SEN 試棒進行比較，316L SEN-BOC-DH 與 316L SEN-EOC-DH 的伸長量差異不明顯，而 BOC 條件下的 316L SEN，其 UTS 與 YS 值較高，推論此差異與兩試棒 gauge 直徑大小有關，可能在試棒加工過程中，使試棒表面有所磨耗或尺寸誤差，使 gauge 橫截面面積不同，進而導致計算出的 UTS 與 YS 值有所差異。

圖 4 為 316L 在不同水環境下的破斷面形貌，表 4 則為破斷面 SCC 比例統整。316L SA-BOC-DE 的破斷面無任何 SCC 形貌，即 SA 試棒的 SCC 敏感性極低，316L SEN-BOC-DE 的 SCC 比例為 29.25%，且皆為 TGSCC 形貌，顯示 316L SEN 在除氧環境下的 SCC 敏感性較高。比較 BOC 除氧與溶氫條件下的 316L SEN，316L SEN-BOC-DH 的 SCC 形貌亦為 TGSCC，然而相較於除氧條件，316L SEN-BOC-DH 的 SCC 比例大幅下降約 11.15%。推論此現象與水環境中的溶氫有關，溶氫使水環境氧化性降低，並維持於還原性狀態，得以抑制腐蝕現象，雖 BOC 除氧與溶氫條件下的 316L SEN 機械性質無明顯差異，但在破斷面 SCC 比例方面則有明顯改善。316L SEN 在 BOC 與 EOC 溶氫條件下的破斷面進行比較，兩試棒 SCC 形貌皆為 TGSCC，而 316L SEN-EOC-DH 的 SCC 比例略高於 BOC 條件，表示 316L SEN-EOC-DH 的 SCC 敏感性略高於 BOC 條件。然而兩條件的 SCC 比例相較於除氧條件已有大幅降低，仍顯現出在水環境中溶氫的效果，使水環境氧化性降低，並抑制材料腐蝕效應。

316L SA-BOC-DE 的側面裂口表現出明顯的頸縮現象，且表面無發現 SCC 現象，與其極低的 SCC 敏感性相符。SEN 試棒在完成拉伸試驗後即可以肉眼觀察到約為 0.5 mm 的長裂縫。對於 316L SEN-BOC-DH，長度大於 50 μm 的裂縫數量較除氧條件少，而平均裂縫長度亦較小。BOC 條件下的 316L SEN 表面裂縫平均長度約為 56.30 μm，EOC 條件的 316L SEN 則約為 59.08 μ

m，兩者差異亦不明顯。但 20 μm 以下的小裂縫數量以 316L SEN-EOC 較多較密集，可對應至其較差的 UTS 表現，且小裂縫以穿晶型態為主。

IV. 結論

對於各條件下的 Alloy 600 試棒實驗結果進行討論，SA 試棒皆表現出很好的伸長量，而 TT 試棒的 SCC 比例皆不高，但在溶氫環境下皆發現破斷面有大量二次裂紋，其中以 Alloy 600 TT-BOC-DH 機械性質表現最差，無論是 YS、UTS 或伸長量皆表現不佳。但 Alloy 600 的 SCC 比例皆不高，顯示其優異的 SCC 抗性。

對於 316L 在不同環境下的實驗結果進行比較，SA 試棒表現出極低的 SCC 敏感性，而 SEN 試棒的伸長量差異皆不明顯，但 316L SEN-EOC-DH 的 UTS 與 YS 值較低。對於 SCC 比例進行比較，316L SEN-BOC-DE 的 SCC 比例最高，顯示溶氫可有效降低 SEN 試棒的 SCC 敏感性。

參考文獻

[1] A. Molander, et al., "Environmental Effects on PWSCC Initiation and Propagation in Alloy 600," 15th International Conf on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, pp.1700-1711, 2011.

[2] K. Norring, et al., "Influence of Boron and Lithium on the Crack Growth Rate of Alloy 600 in PWR Primary Environment," 13th International Conf on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors. Whistler, B.C., Canada, 2007.

[3] N. Ogawa, et al., "PWSCC susceptibility of mill annealed alloy 600 in reactor coolant system water during the high pH operation," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 165, pp.171-180, 1996.

[4] Tomokazu NAKAGAWA, Nobuo TOTSUKA, Takumi TERACHI, Nobuo NAKAJIMA, "Influence of Dissolved Hydrogen on Oxide Film and PWSCC of Alloy 600 in PWR Primary Water," *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 40.1, pp.39-43, 2003.

[5] Takaaki Kobayashi, Wataru Sugino, "The Effect of Dissolved Hydrogen for PWSCC Initiation test by Reverse U-bend specimen of Alloy 600," *E-Journal of Advanced Maintenance*, vol. 12(1), pp.14-25, 2020.

[6] Yen-Jui Huang, et al., "SCC susceptibility of solution-annealed 316L SS in hydrogenated hot water below 288°C," *Corrosion Science*, vol.145, pp.1-9, 2018.

[7] ASM International, *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*, edited by J. R. Davis, pp. 293-330, 2000.

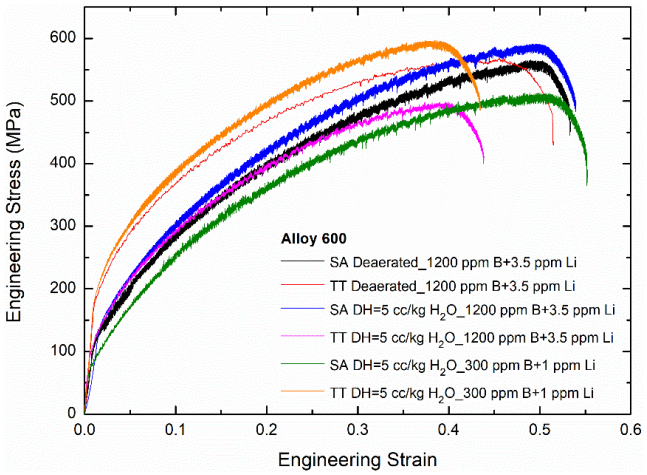


圖 1 不同水環境下 Alloy 600 的 SSRT 結果

表 1 不同水環境下 Alloy 600 的機械性質表現

Alloy 600		Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%
SA	BOC* Deaerated	117.87	557.97	53.43
	BOC DH = 5 cc/kg	149.98	586.26	54.01
	EOC** DH = 5 cc/kg	75.86	505.35	55.25
TT	BOC Deaerated	190.14	570.75	51.52
	BOC DH = 5 cc/kg	103.36	494.02	43.89
	EOC DH = 5 cc/kg	192.37	591.14	43.48

* BOC: 1200 ppm B + 3.5 ppm Li
** EOC: 300 ppm B + 1 ppm Li

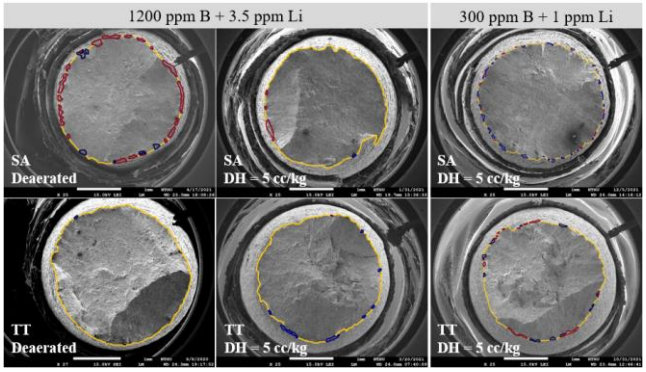


圖 2 不同水環境下 Alloy 600 的破斷面形貌比較 (紅線區域： IGSCC；藍線區域：TGSCC；黃線區域：破斷面)

表 2 不同水環境下 Alloy 600 的破斷面 SCC 比例

Alloy 600		IGSCC (%)	TGSCC (%)	Total SCC (%)
SA	BOC* Deaerated	4.39	1.00	5.39
	BOC DH = 5 cc/kg	0.74	0.07	0.81
	EOC** DH = 5 cc/kg	0.15	1.36	1.51
TT	BOC Deaerated	0	0.05	0.05
	BOC DH = 5 cc/kg	0.03	0.90	0.93
	EOC DH = 5 cc/kg	0.74	1.09	1.83

* BOC: 1200 ppm B + 3.5 ppm Li
** EOC: 300 ppm B + 1 ppm Li

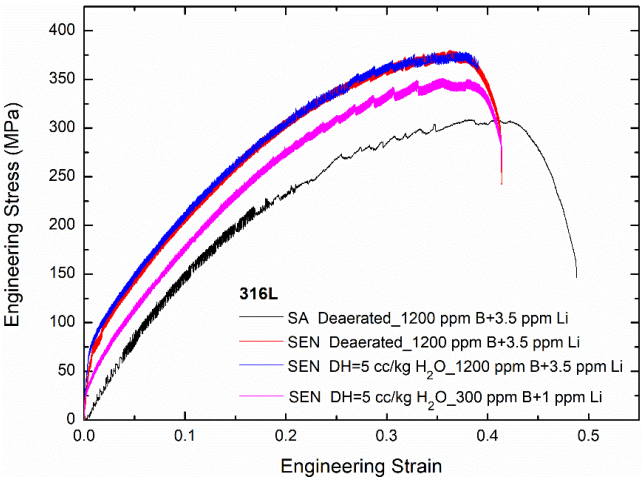


圖 3 不同水環境下 316L 的 SSRT 結果

表 3 不同水環境下 316L 的機械性質表現

316L		Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (
1200 ppm B + 3.5 ppm Li	SA Deaerated	85.74	308.98	48.91
	SEN Deaerated	73.38	375.34	41.40
	SEN DH = 5 cc/kg	74.51	374.14	39.09
300 ppm B + 1 ppm Li	SEN DH = 5 cc/kg	30.28	346.66	41.44

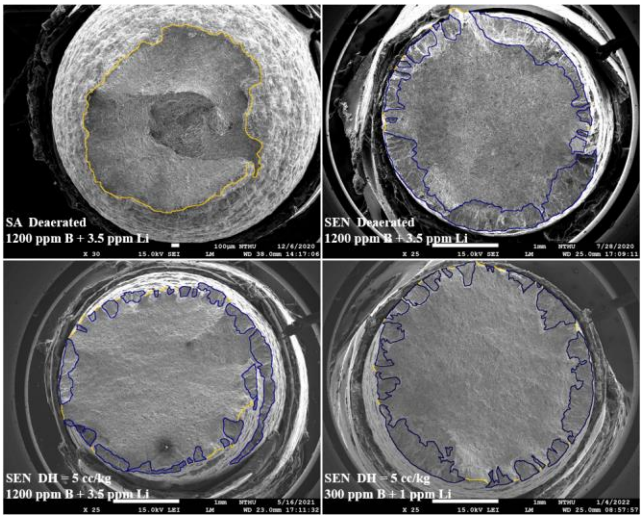


圖 4 不同水環境下 316L 的破斷面形貌

表 4 不同水環境下 316L 的破斷面 SCC 比例

316L		IGSCC (%)	TGSCC (%)	Total SCC (
1200 ppm B + 3.5 ppm Li	SA Deaerated	0	0	0
	SEN Deaerated	0	29.25	29.25
	SEN DH = 5 cc/kg	0	18.10	18.10
300 ppm B + 1 ppm Li	SEN DH = 5 cc/kg	0	20.74	20.74

機組商轉末期飼水加氫策略對減緩沿晶應力腐蝕龜裂影響探討
Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號：110-2623-E-007-002-NU
計畫主持人：王美雅
e-mail：meywang@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

本計畫以一年的時間針對正常運轉電廠在接近商轉末期，是否會對於注氫策略進行調整，選擇逐步減氫或於維持原本注氫量直到永久停止運轉，進行蒐集相關資料文獻與國際案例。另外，針對國內沸水式反應器，在電廠實施不同的注氫濃度下運轉時，應用 DEMACE 程式，分析其主冷卻水迴路中關鍵氧化還原劑(氫、氧、過氧化氫)濃度、組件腐蝕電位與裂縫成長速率的變化情形。

關鍵詞：加氫水化學、應力腐蝕龜裂、腐蝕電位。

Abstract

In this project, we collected the relevant documents and the cases about the strategies of injecting hydrogen at the end of business operations. In addition, the well-developed computer code DEMACE were modified and used to investigate the impact of various feedwater injecting hydrogen on the redox species concentrations, electrochemical corrosion potential and crack growth rate of components in the primary coolant circuits of Taiwan BWRs operated under either normal water chemistry or hydrogen water chemistry.

Keywords: Hydrogen Water Chemistry, Stress Corrosion Cracking, Corrosion Potential.

I. 前言

受到奧斯田鐵系不銹鋼的內部組件因沿晶應力腐蝕龜裂(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)的問題，沸水式反應器的可用性產生了負面的影響。美國原子能管制委員會 Nuclear Regulatory Commission, NRC)要求應定期對於受到影響的管件系統進行檢查，以確保結構的完整性。針對壓力槽內部組件的檢查，也應依據 BWRVIP 檢查與評估指南來進行。但由於反應器組件檢查的困難與費用高，如果適當的採用 IGSCC 防制措施，需要進行內部組件的檢查就可以減少。加氫水化學(Hydrogen Water Chemistry, HWC)於 1970 年代在瑞典首先提出，80 年代進行測試，1984 年在美國首次商業應用，在 90 年代已被廣泛接受，成為 BWR 主冷卻水迴路組件抑制 SCC 產生的主要技術。在反應器爐心，由於輻射分解效應使得爐水產生大量的過氧化氫，過氧化氫易自我分解為氧及水，使得爐水具有高氧化性。BWR 在運轉時，爐水的溶氧量約為 200 至 400 ppb，高溶氧量是造成 IGSCC 的主要環境因素，如可降低溶氧量，就可降低金屬組件的電化學腐蝕電位，降低發生 IGSCC 的機率。

以 NRC 而言，加氫水化學加上低導電度的水是可以防制 IGSCC 的措施之一，並針對 BWR 再循環管件進行基本檢查。在 BWRVIP-62-A 中，NRC 接受中度注氫的加氫水化學(HWC-M)與貴重金屬應用(NMCATM)兩個技術可以有效的保護 BWR 內部組件不受 IGSCC 的影響。目前全世界已有四十多座以上的 BWR 電廠採用了加氫水化學技術，這些防制 IGSCC 的技術包含 HWC、NMCA 與 OLNC(On-Line NobleChem™) [1-3]，應用在美國、西班牙、瑞士、墨西哥、台灣、日本與瑞典的電廠。

國內 2 座沸水式核電廠於 2006 年 10 及 11 月已實施 HWC 防蝕技術，注氫量設定為 0.5 ppm，為了提高防蝕的效益，已於 2009 年 6 月及 9 月已將注氫量提昇至中度注氫，各為 1.0 ppm、1.1 ppm 及 1.2 ppm。當核電廠機組面臨執照到期而不再進行延役申請時，原先採用的加氫防制 IGSCC 的措施是否要進行調整，選擇逐步降低注氫或是維持原本注氫量直至停止運轉，在維持運轉安全的前提下，應審慎評估後決定相關的策略。

II. 主要內容

機組在正常運轉下，為了解決壓力槽內部組件的劣化，維持結構內部的完整性，避免增加高困難度的壓力槽內部檢查，會採取相對應的 IGSCC 防制措施，不論是 HWC 、 NMCA(Noble Metal Chemical Addition) 、 OLNC(On-Line Noble Metal Chemical Addition)、Early HWC 等，都可以有效降低組件的裂縫成長速率。機組在正常運轉下，為了解決壓力槽內部組件的劣化，維持結構內部的完整性，避免增加高困難度的壓力槽內部檢查，會採取相對應的 IGSCC 防制措施。台灣核一廠與核二廠屬於沸水式反應器(BWR)，台灣的核電廠依據 EPRI BWR/PWR Water Chemistry Guidelines 內容的唯一強制性要求，建立保護結構材料完整性、蒸汽產生器管件完整性、燃料無失效等為首要目標且兼顧輻射場劑量抑低的策略性水化學計畫。當核電廠機組面臨執照到期而不再進行延役申請時，原先採用的加氫防制 IGSCC 的措施是否要進行調整，選擇逐步降低注氫或是維持原本注氫量直至停止運轉，在維持運轉安全的前提下，應審慎評估後決定相關的策略。

本計畫以一年的時間針對正常運轉電廠在接近商轉末期，是否會對於注氫策略進行調整，選擇逐步減氫或於維持原本注氫量直到永久停止運轉，進行蒐集相關資料文獻與國際案例。另外，針對國內沸水式反應器，在電廠實施不同的注氫濃度下運轉時，應用 DEMACE 程式，分析其主冷卻水迴路中關鍵氧化還原劑(氫、氧、過氧化氫)濃度、組件腐蝕電位與裂縫成長速率的變化情形。

III. 結果與討論

本研究的內容主要可分為兩部分：一為蒐集注氫策略調整的相關資料文獻與國際案例，透過學術期刊或國際科技報告進行分析。另外，原本想針對 2021 年水化學國際會議中關於加氫水化學內容進行討論，但因疫情延至 2023 年舉辦，因此針對 2016 與 2018 年水化學國際會議發表的研究進行討論。二為台灣核二廠為在實施加氫水化學時，注氫策略的調整對於爐水中氧化還原劑(氫、氧、過氧化氫)濃度、組件腐蝕電位與裂縫成長速率的改變情形。目前針對正常運轉電廠在商轉末期，注氫策略選擇逐步減氫或於維持原本注氫量直到永久停止運轉，在目前的 BWR 水化學指引上並未有相關的說明。在近幾次的國際水化學會議上並未有相關議題的討論，與注氫相關議題主要還是著重於白金觸媒影響評估。

過去幾十年中，BWR 進行水化學的調整，因為電廠水化學在材料的完整性、燃料完整性與較佳的輻射場管理上擔任了關鍵的角色。主要的水化學進展包含耗乏氧化鋅的添加(Depleted Zinc Oxide Addition) 、加氫水化學、貴重金屬的添加、線上貴重金屬添加、用於抑制應力腐蝕龜裂的非氫技術、鐵還原、鈷還原與改善過濾技術。因應電廠的老化以及獲得運轉執照更新，電廠的安全性與可靠性變得愈來愈重要，且核電廠水化學的控制與監測關鍵水化學參數的改善自動化變成重要的焦點，不只是自動監測而是隨著新的監測技術發展而產生自動控制技術。

目前全世界已有四十多座以上的 BWR 電廠採用了加氫水化學技術，這些防制 IGSCC 的技術包含 HWC、NMCA 與 OLNC(On-Line NobleChem™)，如圖 1 所示[3]，主要應用在美國、西班牙、瑞士、墨西哥、台灣、日本與瑞典的電廠，從 2010 年至 2018 年，可以發現採用一般水化學的 BWR 並無變化，HWC 與 NMCA 的數目變少，相對的 ONLC 增加，為主要的 IGSCC 抑制技術。EPRI 於 1997 年建立了 BWR 化學監測與評估資料庫(Chemistry Monitoring and Assessment, CMA)，進行影響參數的監測，協助這個產業來監測與優化不同水化學控制狀態。2017 年的資料庫內共有 52 座運轉中的 BWR，包含 34 座美國的 BWR、2 座墨西哥的 BWR(Laguna Verde 1 and 2)、12 座歐洲的 BWR(Cofrentes; Forsmark 1, 2 and 3; Leibstadt, Mühleberg, Olkiluoto 1 and 2; Oskarshamn 1, 2 and 3, and Ringhals 1)、4 座亞洲的 BWR(Chinshan 1 and 2; Kuosheng 1 and 2) [4]。台灣的核一二廠都是採用中度注氫，即是 HWC-M，並未添加貴重金屬，也未加鋅。美國 EPRI 的 BWRVIP-190[5]資料顯示其中僅維持 NWC 環境的電廠有芬蘭的 Olkiluoto 1 & 2、瑞典的 Oskarshamn 1(DZO)、Forsmark 1 & 2 & 3，除了 Oskarshamn 1 於 2017 年開始除役，其他電廠都還在運轉中。

在一般水化學狀態下的不銹鋼組件表面電化學腐蝕電位(Electrochemical Corrosion Potential, ECP)約在+50 ~ +150 mV_{SHE}，通常 ECP 須低於-230 mV_{SHE} 才會有效抑制 IGSCC 的發生，飼水加氫濃度需介於 0.3~2.0 ppm 之間來抑制 IGSCC，所需注氫量是受到降流區幾何形狀、流速與中子/加馬通率的影響。依現場的經驗顯示，曝露於爐心附近的組件，更容易受到 IGSCC 的影響，在快中子的照射下，IGSCC 的敏感性會增加。Core shroud 與 Top guide 的檢查顯示在高中子通量(Fluence)的區域，IASCC(Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking)發生的影響，在 BWR HWC 或是 PWR 的環境下，與 BWR 含氧環境下相比，發生裂縫的通量限值可以相差 4 倍，而 ECP 愈低，其裂縫成長速率也會減緩。

不銹鋼組件 ECP 對於 IGSCC 的影響如圖 2 所示，透過數個電廠測試的結果，可以發現當 ECP 低於-230 mV_{SHE} 時，經由短期 CERT 測試結果顯示無 IGSCC 發生，透過實驗室與電廠現場的觀察，可以控制導電度至 0.3 μS/cm 以下，將可以抑制電廠管件發生 IGSCC。但如果 ECP 高於-230 mV_{SHE} 時，即使在非常高純度及低導電度的水環境下，IGSCC 起始仍有可能發生在敏化的不銹鋼上[5]。透過電廠線上進行 CT 試片的實驗，可以評估 HWC 抑制效益的結果，圖 3 顯示輻照後的不銹鋼，在 ECP 降低的環境下，顯示其裂縫成長速率也明顯降低，在實際電廠數據上顯示 ECP 降低後對於組件 CGR 降低的效益[5]。

2016 年水化學國際會議發表的研究中，日本 Japan Radioisotope Association 的 Yosuke Katsumura 提到水化學控制和電廠重啟，電廠在長期停機狀態下，須維持其安全性與可靠性，其中表 1 顯示了電廠在長期停機下水化學控制的主要項目，維持主要的主冷卻水循環與持續地進行水淨化[6]。美國電力研究院(EPRI)的 Susan Garcia 提到藉由降低 BWR 和內部不銹鋼表面的 ECP 來減輕沿晶應力腐蝕(IGSCC)，如中度注氫(HWC-M)與熱停機時實施的貴重金屬被覆(NMCA) [7]。

2018 年水化學國際會議發表的研究中，美國 EPRI Paul L. Frattini 討論 The Future of Nuclear Power Plant Chemistry Control 時，化學控制對於核電廠成本的影響是資源需求與電廠營運相關成本的結合來減緩特定的問題。像是積極尋求降低已知抑制技術的應用成本，像是應用在 BWR 的貴重金屬技術，從間歇性應用的裂縫抑制技術轉為連續性的應用。另外，也提及自動化與線上化學分析技術，來維持適當與最佳化的化學控制，可具有較低的維護成本[8]。早期的機制研究表明，氧化劑的存在並不是加速 SCC 的根本原因，而是腐蝕電位的增加，如果提供足夠的氫，即使存在氧化劑，催化效應也可以實現低腐蝕電位。在 BWR 中因水的輻射分解效應會產生 H_2、H_2O_2 與 O_2(以及其他分子)，在 H_2O_2 持續存在的情況下，催化表面的腐蝕電位可能近於或是低於非催化的不銹鋼表面。BWR 已實施多年的 ECP 監測，圖 4 顯示不同電廠在各區域的 304 SS ECP 與 Pt 氧化還原電位的結果(在 NWC 下)，Pt 電位近似或是低於 304 SS ECP[9]。

本研究所使用的電腦模式「DEMACE」架構是以輻射分解程式為主體，它能夠計算冷卻水經過中子及加馬射線照射後，BWR 主冷卻水迴路各處的分解產物的化學成份濃度；在化學成份濃度確立之後，再利用混合電位模式計算電化學腐蝕電位，並結合裂縫成長模式求取既有裂縫之成長速率。核二廠所採用的 BWR 是美商奇異公司設計的 BWR/6 型反應器，民國 100 年運轉參數為功率提升 1.7%(2943 MWt)運轉下，主冷卻水流量為 79.68 Mlb/hr，目前採用的飼水注氫量為 1.0 ppm。本次採用的計算，基於 2011 年現場實際測量的爐水氧化還原劑濃度進行校正，所得校正係數帶入 DEMACE 程式

進行分析，分析的條件包含 NWC(無額外注氫)、低注氫(0.5 ppm)以及 HMC-M(1.0 ppm)三個條件，所得主循環迴路中各位位置的氧化還原劑濃度([H_2]、[H_2O2]、[O_2])、電化學腐蝕電位(ECP)以及裂縫成長速率(CGR)。圖 5 為整個主冷卻水迴路的溶氫濃度變化，隨著注氫量由 0、0.5、1.0 ppm 增加，水中的溶氫濃度也比較高。圖 6 為整個主冷卻水迴路的過氧化氫濃度變化，在爐心區域的過氧化氫濃度，在 NWC 環境下最高可以達到 0.6 ppm 以上，隨著注氫量的增加可以降低至 0.2 ppm 附近，HWC-M 的水化學狀況下可以使過氧化氫濃度將得更低。主冷卻水迴路的溶氧濃度變化如圖 7 所示，可以發現在 NWC 狀況下，溶氧濃度整個主冷卻水迴路都大於 0.15 ppm。圖 8 顯示整個主冷卻水迴路的 ECP 變化，在 NWC 與 0.5 ppm 注氫量的條件下，各區組件的 ECP 都高於-0.23 V_{SHE} 的臨界腐蝕電位，NWC 下的組件 ECP 都維持在 0.15 V_{SHE} 以上，低注氫量(0.5 ppm)時，下降流區下半部與再循環區域的組件 ECP 可以降至 0.05 V_{SHE} 附近，注氫量增加至 1.0 ppm 時，下降流區下半部與再循環區域的組件 ECP 可以降至-0.23 V_{SHE} 的臨界腐蝕電位以下。圖 9 顯示整個主冷卻水迴路的 CGR 變化，在 NWC 條件下，爐心至下降流區上半部區域(1-8 區)組件的 CGR 都高於組件縱深 CGR 的上限值(1.55×10^{-8} cm/sec)，其餘位置都略低於 1.55×10^{-8} cm/sec。低注氫量(0.5 ppm)時，除了爐心至蒸氣分離器側通路區域(1-5 區)外，其他位置組件的 CGR 都低於 1.55×10^{-8} cm/sec，但高於 10^{-10} cm/s。注氫量增加至 1.0 ppm 時，各區域組件的 CGR 與 0.5 ppm 低注氫量時類似，CGR 值略低一些，但是下降流區下半部與再循環區域的組件 CGR 可以降至 10^{-10} cm/s 以下，因為氧化劑濃度過低，組件本身已無因氧化劑造成的腐蝕現象。

IV. 結論

針對正常運轉電廠在商轉末期，注氫策略選擇逐步減氫或於維持原本注氫量直到永久停止運轉，目前相關的文獻著重在 HWC 與貴重金屬被覆技術的精進與改善探討，探討增進 HWC 可用性的研究，包含 Early HWC，或是日本提及的 HWC Startup 技術。在近幾次的國際水化學會議上並未有相關議題的討論，與注氫相關議題主要還是著重於白金觸媒影響評估。除了原本並未採用 HWC 及相關技術的 BWR 外，其餘電廠不是維持 HWC-M 技術，就是採用 HWC+ONLC 進行抑制 IGSCC 以維持電廠運轉。從 DEMACE 程式分析的結果來看，實施 HWC 確實可以保護更多主冷卻水迴路中的區域，但對於爐心附近的區域抑制 IGSCC 起始的效益不足。總體而言，實施注氫確實有助於抑制 IGSCC 的發生，產生防蝕的效益較大。如果未進行加氫，應加強組件已存在裂縫的位置進行監測。

參考文獻

[1] R. L. Cowan, Nuclear Engineering International, January 1986, p. 26.

[2] M. E. Indig, ” Recent Advances in Measuring ECPs in BWR Systems,” Proc. 4th Intl. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, NACE, Jekyll Island, GA., Aug. 6-10, 1989, p.4-411.

[3] P. Frattini et al, “The Future of Nuclear Power Plant Chemistry,” International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, USA, September 10-14 (2018).

[4] Garcia S., Lynch N., Giannelli J., Libra-Sharkey E., BWR Water Chemistry Monitoring and Assessment Update, Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC 2018, San Francisco, California, September 10-14, 2018.

[5] BWRVIP-190, Revision 1: BWR Vessel and Internals Project,” Volume 2: BWR Water Chemistry Guidelines – Technical Basis,” EPRI Technical Report, 2014.

[6] Yosuke Katsumura., Latest activities of the water chemistry group in Japan, Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC 2016, Brighton, UK, October 2-7, 2016.

[7] Susan Garcia., IGSCC Mitigation Monitoring Results at BWR Plants with Noble Metal Treatment, Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC 2016, Brighton, UK, October 2-7, 2016.

[8] Paul L. Frattini, The Future of Nuclear Power Plant Chemistry Control, Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC 2018, San Francisco, USA, September 9-13, 2018.

[9] P. L. Andresen, Addressing the Concern for Elevated Corrosion Potential on Catalytic Surfaces in BWR Normal Water Chemistry Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC 2018, San Francisco, USA, September 9-13, 2018.

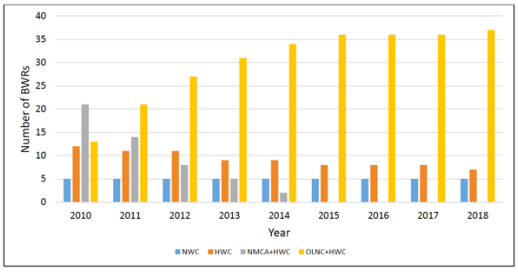


圖 1 BWR 採用 IGSCC 防制措施的變化(自 2010 起)

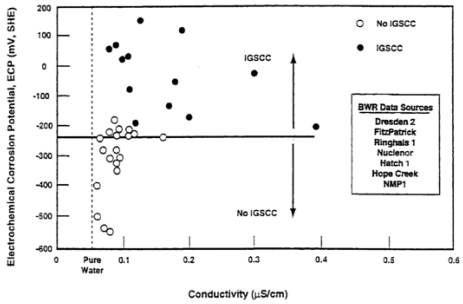


圖 2 不銹鋼材料 CERT 與 ECP 的關係

表 1 電廠在長期停機下水化學控制的主要項目

Systems	Control targets	Target materials	Procedures	Concerns	Water chemistry control
PWR primary cooling system	(1) RPV*1, RCS*2 (2) CVCS*3 and others	stainless steel stainless steel	・dry lay-up without fuel ・wet lay-up with fuel ・water recirculation or wet lay-up	・influences on oxide film, esp., Zn on the film ・decreased O_2-N_2H_4 reaction ・influences of TOC*4	・special control was not required (confirmed with the experiment) ・increasing $[N_2H_4]$ with monitoring ・monitoring
PWR secondary cooling system	(3) turbines through main condenser (4) condenser hot-well through feed water line (5) steam generators	carbon steel stainless steel carbon steel stainless steel Ni-based alloy carbon steel	・dry lay-up ・wet lay-up ・wet lay-up	・increase in ferrous ion input during re-start period ・ditto ・crevice corrosion	・clarification by blowing out during start-up ・clean-up prior to re-start ・monitoring of $[N_2H_4]$
BWR cooling system	(6) RPV primary cooling pipes (7) steam through feed water line	Zr-alloy, stainless steel carbon steel	・water recirculation ・dry lay-up	・crevice corrosion ・increase in ferrous ion input during re-start period	・continuous water clear-up ・hot water clean-up prior to re-start

*1 RPV: reactor pressure vessel *2 RCS: reactor cooling system *3 CVCS: chemical and volume control systems
*4 TOC: total organic carbon

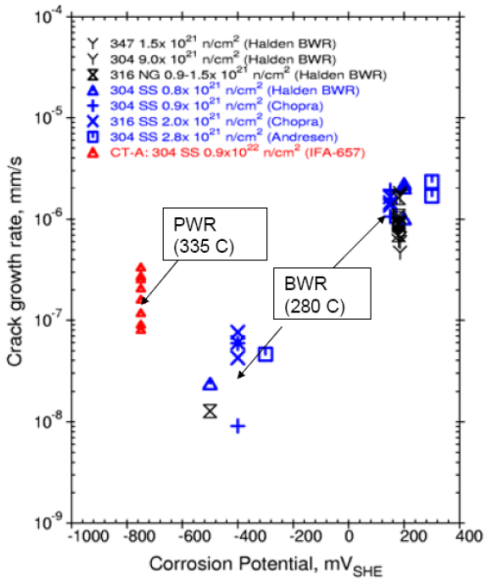


圖 3 ECP 對於輻照後的不銹鋼組件 CGR 的影響

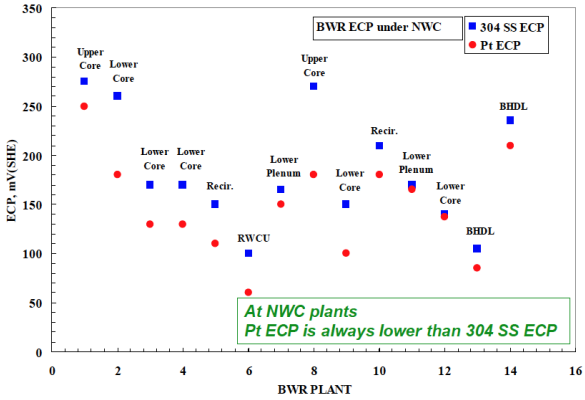


圖 4 在 NWC 下，不同的 BWR 各個區域 SS ECP 與 Pt 氧化還原電位的結果

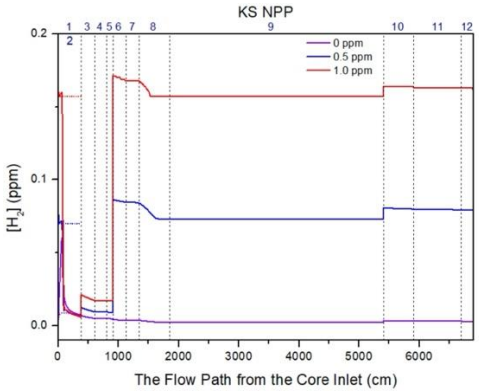


圖 5 在 NWC、低 HWC 與 HWC-M 的水環境下，隨著主冷卻水迴路流徑的增加，溶氫的變化

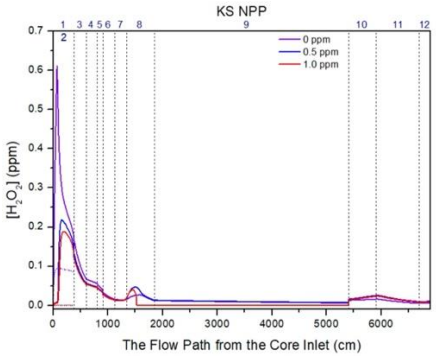


圖 6 在 NWC、低 HWC 與 HWC-M 的水環境下，隨著主冷卻水迴路流徑的增加，過氧化氫的變化

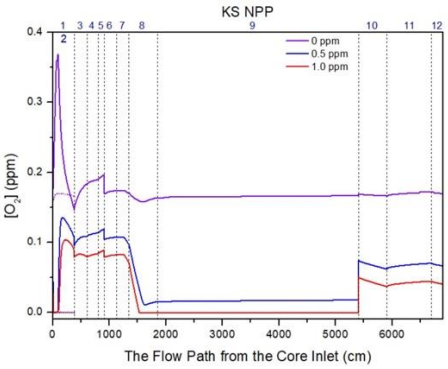


圖 7 在 NWC、低 HWC 與 HWC-M 的水環境下，隨著主冷卻水迴路流徑的增加，ECP 的變化

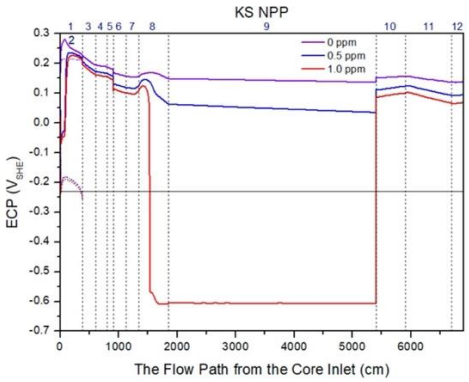


圖 8 在 NWC、低 HWC 與 HWC-M 的水環境下，隨著主冷卻水迴路流徑的增加，ECP 的變化

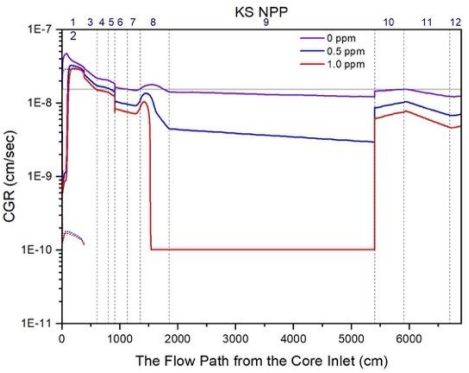


圖 9 在 NWC、低 HWC 與 HWC-M 的水環境下，隨著主冷卻水迴路流徑的增加，CGR 的變化

壓水式核能電廠於電廠全黑事故下防範潛變破裂及緩和策略研究分析
Analysis of PWR in SBO Condition with Hot Leg Creep Rupture and SAMG

計畫編號：110-2623-E-007-003-NU
計畫主持人：陳紹文
e-mail：chensw@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：楊融華
研究成員：王仲容、陳詩奎、陳得誠、陳偉懋、張鴻均、陳雄智、陳韶萱、陳玄哲、江秉修
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

本研究以壓水式電廠(PWR)為例，假設電廠遭遇極端事故且冷卻系統失效時，模擬反應爐冷卻水邊界(Reactor Coolant Pressure Boundary, RCPB)組件可能因高溫與高壓而出現潛變破裂等，以分析潛變破裂事故發生過程及緩和策略。本計畫主要工作首先更新馬鞍山電廠之 MELCOR 2.2 SBO 模型，假設短期電廠全黑(Short-term Station Blackout, STSBO)且蒸汽驅動輔助飼水系統失效之極端假設情境下，進行 RCPB 組件潛變失效模擬分析。根據模擬結果顯示，熱端管路潛變破裂(HLCR)發生時間可能早於反應器壓力槽(RPV)失效，此結果與國外文獻一致。而在假設 RCP 軸封正常、洩漏率為 1 gpm、S/G 管束為平均溫度且沒有缺陷的條件下，HLCR 發生時間早於 S/G 之 U 型管(HLCR 機率達 1 時，S/G 管之機率仍然很低)，此結果也與國外文獻相符。此外，模擬結果亦指出，在全黑事故後約 28,800 秒(約 7.7 小時)爐心水位可能降至 TAF；約 32,040 秒(約 8.9 小時)後爐心出口溫度達到 923K (進入 SAMG 條件)；而約 34,920 秒(約 9.7 小時)後可能出現 HLCR。另外，根據靈敏度分析結果，在進入 SAMG 後，若立即開啟兩個 PORVs 將可以有效延後 HLCR、RPV 失效時間。

關鍵詞：電廠全黑、自然循環、潛變破裂、嚴重事故管理指引、MELCOR 2.2 程式。

Abstract

In this project, a simulation model of pressured water reactor (PWR) system was constructed and a hypothetical station blackout accident (SBO) without recovery of steam generator (S/G) auxiliary feedwater was assumed for the present model. Under these assumed scenarios, the reactor coolant pressure boundary (RCPB) components may be exposed to high pressure and high-temperature, while the hot legs, pressurizer surge lines and SG tubes could be threatened by creep rupture phenomena. The first major task of this study is to improved the MELCOR 2.2 SBO model of Taiwan's PWR (i.e. Maanshang NPP) and conduct simulations of RCPB component creep ruptures under STSBO conditions. The simulation results show that (1) hot leg creep rupture (HLCR) could occur prior to reactor pressure vessel failure, and (2) the hot leg might probably fail by creep rupture prior to the S/G tube. Both results are consistent with those of foreign literature. According to the outcomes of the present simulations, core water level may drop to top of active fuel (TAF) at around 28,800s; core exit temperature could reach 923K at around 32,040s, and HLCR might occur at around 34,920s. Additionally through the sensitive study, the opening of 2 PORVs immediately after entering SAMG can effectively delay the HLCR and RPV failure time.

Keywords: Station Blackout (SBO), Natural Circulation, Creep Rupture, SAMG, MELCOR 2.2.

I. 前言

2011 年 3 月 11 日日本福島事故主因是由於地震及海嘯雙重影響，導致福島核電廠發生電廠全黑(Station Blackout, SBO)嚴重事故，造成安全系統與設備失效，爐心無法即時冷卻，最終引發放射性物質外洩事故。在美國桑迪亞國家實驗室(Sandia National Lab, SNL)對於福島一號機的事故報告 SAND2012-6173[1]中可以看到，在沒有爐心洩壓的事故中，爐心的高溫蒸氣會造成蒸氣管的溫度持續上升，當壓力和溫度高到一定程度時，便造成了福島一號機在事故前期發生了潛變破管(Creep Rupture)，使全黑事故的情境演進變得更加複雜。事實上自 1979 年的三哩島事件以後，世界上所有核工相關研究單位就意識到當時對於超出設計基準事件(Beyond-Design-Basis External Event, BDBEE）的認知、研究以及技術尚有不足。因此，美國核管會(U.S.NRC)便成立了國際嚴重事故合作計畫(Cooperative Severe Accident Research Program, CSARP)結合各個使用核能的國家，每年進行嚴重事故的相關討論及發表，加強對於嚴重事故的防範與應對。在核能電廠嚴重事故下，反應器內若因衰變熱無法有效的移除而持續累積，最終爐心會因高溫而熔毀，壓力槽和圍阻體可能也會因過高溫度及(或)壓力而失效，此時運轉人員若能採取有效策略，則可緩和事故並降低影響。此外，在電廠全黑事故下，熱端管路(Hot Leg, HL)可能因溫度、壓力的累積而發生潛變破裂(Hot Leg Creep Rupture, HLCR)，其影響性亦有深入研究之必要。故本研究建立壓水式核能電廠嚴重事故分析模型，藉此分析當全黑狀態發生結合管路潛變破裂事故發生時的電廠狀態變化，以及探討此現象的防範與爐心救援操作、嚴重事故管理指引(SAMG)可能之影響，供管制單位參考。

II. 主要內容

本計畫於研究期間主要工作有三個重點:(1)彙整國際嚴重事故相關文獻，(2)建立馬鞍山電廠 MELCOR 2.2

之 SBO 分析模型，以及執行電廠假設全黑事故(喪失所有 4.16KV 交流電)且蒸汽驅動輔助飼水系統失效(STSBO)情境下 RCPB 組件(一次側熱端管路與 S/G U 型管)之潛變破裂模擬分析，(3)開啟釋壓閥(PORV)之救援案例模擬與評估。

針對彙整國際嚴重事故相關文獻工作，本計畫研析國際壓水式核能電廠 STSBO 情境下有關「自然循環」、「潛變破裂」之嚴重事故熱水流分析文獻，彙整共八篇重要文獻[2~9]，並重點摘錄於報告中。

於模擬分析工作部分，本研究根據 NUREG/CR-7110 [9]報告，以 MELCOR 2.2 進行壓水式電廠在全黑事故(喪失所有 4.16KV 交流電)且蒸汽驅動輔助飼水系統失效情境下 RCPB 組件之潛變破裂模擬分析。本計畫建立之馬鞍山電廠分析模型包括了完整的蒸氣產生系統（一次側、二次側）以及圍阻體。一次側包含了反應爐壓力槽、冷卻水系統迴路、調壓槽與釋壓閥；二次側主要為由六個 CVH 組件組成的三組蒸汽產生器，並用 FL 組件模擬釋壓閥與迴路。一次側和二次側間由熱結構(Hear Structure, HS)組件進行能量傳遞的模擬。總計共有 334 個控制邏輯、79 個控制體積、152 流道組件、171 熱傳計算，642 個連結。馬鞍山電廠分析模型節點如圖 1 所示。於開啟釋壓閥(PORV)之救援案例模擬與評估工作中，則研析核電廠進入 SAMG (爐心出口溫度達 923K)後，立即開啟不同數量 PZR 之 PORVs 進行靈敏度分析，以評估救援案例對事故的緩和成效。

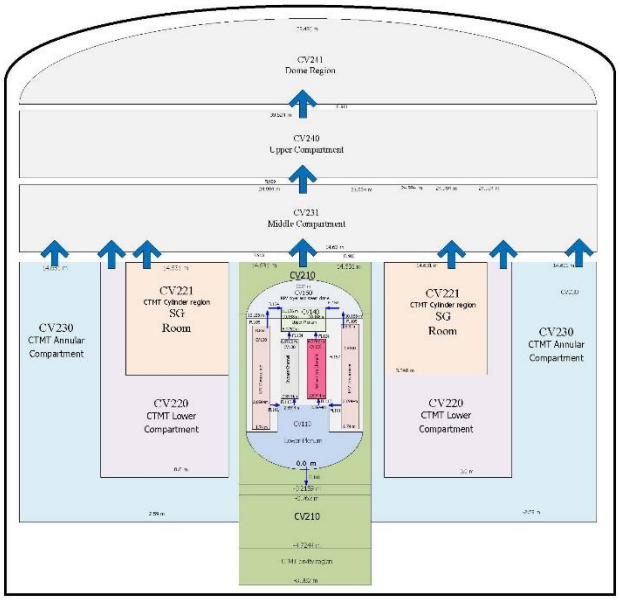


圖 1. 馬鞍山電廠整體模型節點示意圖

III. 結果與討論

本研究發展並建立馬鞍山電廠分析模型，研析工作包含(a)執行電廠假設全黑事故且蒸汽驅動輔助飼水系統失效情境下 RCPB 組件之潛變破裂模擬分析，(b) 以及開啟釋壓閥(PORV)之救援案例模擬與評估。

(a) 假設全黑事故之潛變破裂模擬分析:

於馬鞍山電廠全黑事故評估中，根據假設事故情境，在 0 秒時發生全黑事故，但由於蒸汽產生器仍然還有水，所以依然可以將熱由爐心帶走，分析結果顯示直到 1.7 小時，蒸汽產生器的水蒸乾，如圖 2；而隨著蒸汽產生器水蒸乾喪失了移熱能力，爐心溫度開始上升，隨著溫度的上升壓力也隨之上升，在 3.0 小時的時候達到了調壓槽釋壓閥 17 MPa，釋壓閥開始洩壓，如圖 3；，但由於溫度的升高，爐心內的水快速的化為蒸氣， 水位開始快速下降，在 7.7 小時水位達到了核燃料棒的頂端(TAF)，如圖 4；達到 TAF 後溫度上升速度更加快速，而在注水方面，一次側壓力比蓄壓槽注水開啟壓力要來的高，導致蓄壓槽無法開啟，爐心繼續處於無注水的狀態，最終在事故後 8.9 小時，燃料護套溫度達到鋯水反應發生的 1088.7K，如圖 5；也因為鋯水反應的發生產生了大量的氫、熱與高溫蒸汽，其中蒸氣隨著自然循環開始進入管路，使管路內的溫度開始升高，溫度升高壓力也跟著升高，最終達到潛變破裂需要發生的條件：高、乾、低，在 9.7 小時熱端管路發生了潛變破裂，如圖 6，而表 1 為模擬整體時序結果表。

模擬結果顯示，熱端管路確實有發生潛變破裂，且控制邏輯顯示「熱端管路」發生潛變破裂時間早於「蒸汽產生器」，破裂的時間約在全黑事故後的 9.7 小時。本研究潛變破裂模擬結果與國外文獻資料比對為一致。

表 1. 模擬時序結果表

時間(hr)	事件
0.0	地震發生導致反應爐跳脫、喪失所有廠內外電源、喪失所有注水、1gpm 的軸封洩漏
1.7	蒸汽產生器冷卻水蒸乾
7.7	水位低於 TAF
8.9	護套溫度達到 1088.7K 爐心出口溫度 923K 達到 SAMG 進入條件
9.7	熱端管路發生潛變破裂

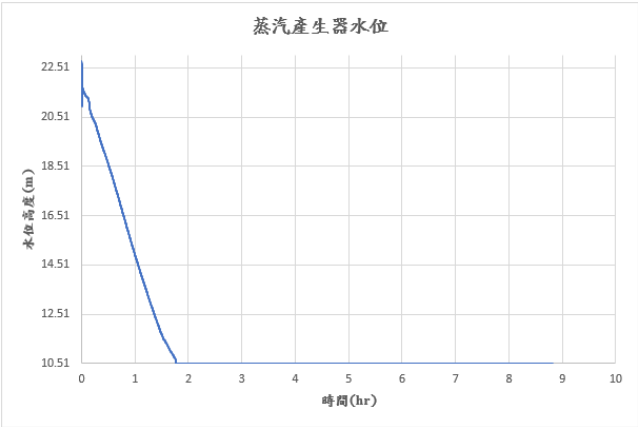


圖 2. 蒸汽產生器水位

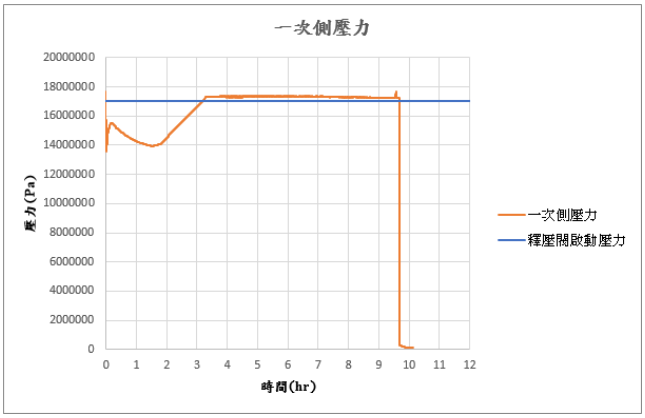


圖 3. 一次側壓力與時間關係圖

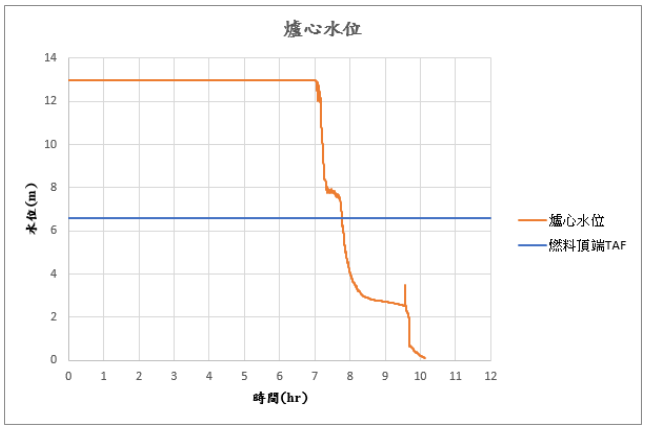


圖 4. 反應爐水位與時間關係圖

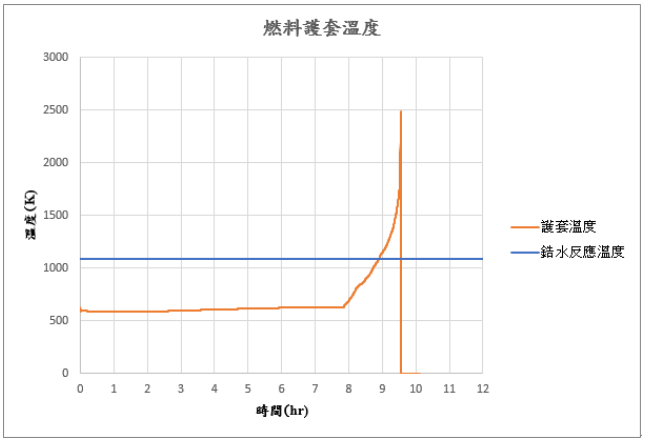


圖 5. 護套溫度與與時間關係圖

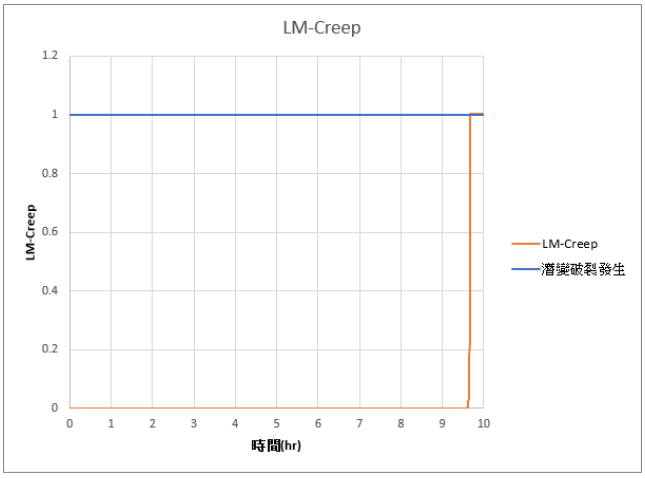


圖 6. 潛變破裂邏輯計算

(b) 救援案例評估:

另外，對於防範潛變破裂，本研究參考國外救援策略，以進入 SAMG (爐心出口溫度達 923K)後，立即開啟不同數量 PZR 之 PORVs 進行靈敏度分析。模擬結果顯示，在只開啟一次側 1 個 PORV 時，爐心壓力只能下降至約 5.5MPa，如圖 7，雖有爐心降壓之效果，但因為 ACC 補水啟動壓力需小於 4.2MPa，所以若 ACC 無法補水進入爐心，對於延緩熱端管路發生潛變破裂的時間並無太大幫助。

若在事故後 8.9 小時爐心出口溫度達到 923K 手動打開 2 個以上 PORVs，則在開啟 PORVs 後爐心壓力會開始下降至約 1 MPa，並在約 9.3 個小時壓力下降至 ACC 可以補水的壓力 4.2MPa，如圖 8；而爐心水位則在 ACC 開始補水後上升，如圖 9。

在潛變破裂的部分，未手動開啟 PORV 時，事故後 9.7 小時就發生熱端管路潛變破裂，而當爐心出口溫度達 923K 手動開啟 2 個 PORVs 後，潛變破裂邏輯運算到 9.7 小時，距離代表發生破裂的 1 還非常遙遠(即潛變破裂發生機率甚低)，如圖 10。而在開啟 2 個與 3 個 PORVs 最大的差別在於，壓力下降的速度會有一些差異。開啟 3 個 PORVs 會比開啟 2 個 PORVs 還快達到讓 ACC 補水的壓力，時間約早了 0.2 個小時，因此較早進行補水，補水的量也相對較多，如圖 11，因此開啟 3 個 PORVs 的潛變破裂的時間也較開啟 2 個 PORVs 的晚一些。

靈敏度分析結果顯示，開啟 2 個 PORVs 即可有效延緩 HLCR 之發生時間，為運轉員恢復交流電源及採取其它緩解措施爭取更多時間。

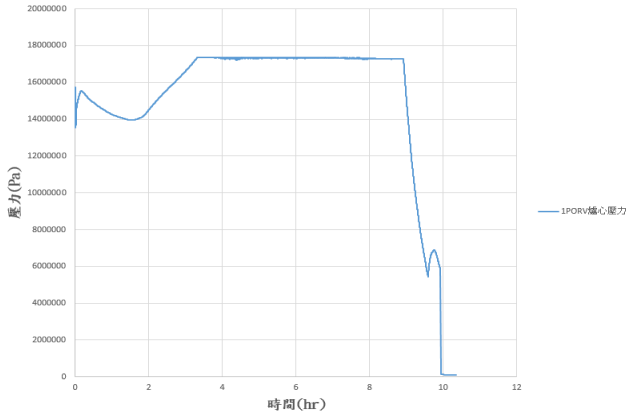


圖 7. 開啟 1 個 PORV 後的一次側壓力

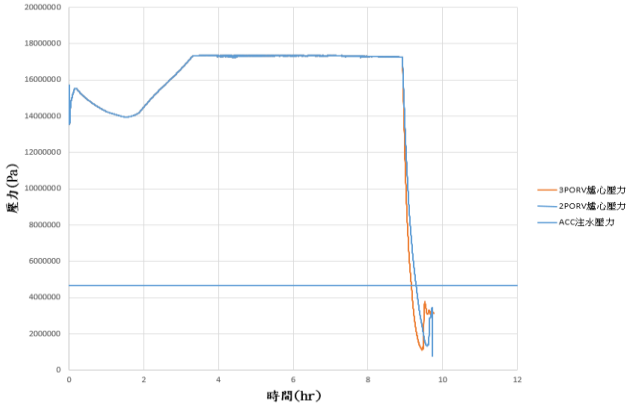


圖 8. 開啟 2 個以上 PORVs 後的一次側壓力

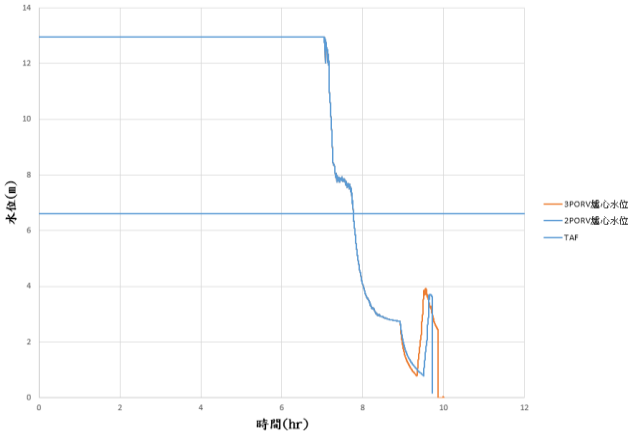


圖 9. 開啟 PORVs 後的爐心水位

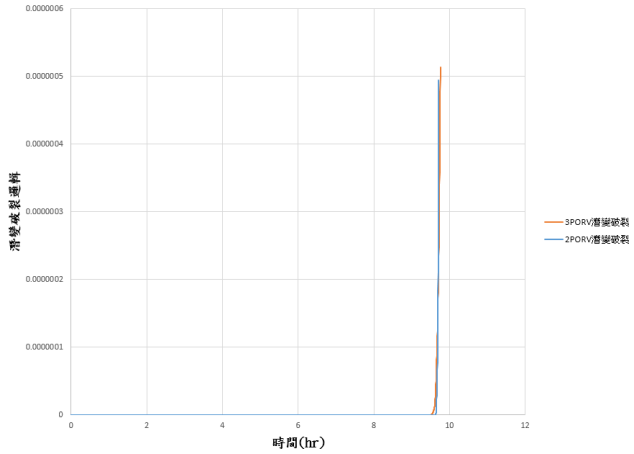


圖 10. 開啟 PORVs 後的潛變破裂邏輯

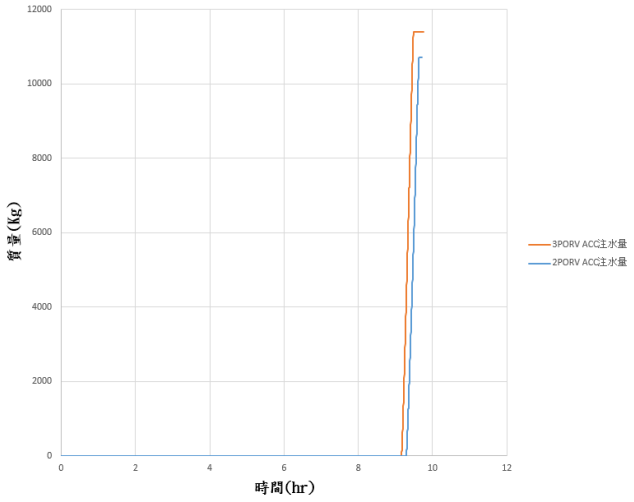


圖 11. 開啟 PORVs 後的 ACC 注水量

IV. 結論

本研究重要結論彙整如下：

1. 彙整與研析國外文獻結果顯示，「熱端管/噴嘴」、「調壓管」、「S/G U 型管」何者先失效因「電廠特性」與「分析程式版本」而有不同，但相對於 RPV，則 RCPB 組件發生潛變破裂的時間均早於 RPV 失效，與本研究之結果為一致。
2. 同時考慮馬鞍山電廠熱端管路與 S/G U 型管(假設平均溫度且管束沒有缺陷)，在自然對流的情境下，熱端管路潛變破裂發生時間早於 S/G U 型管(HLCR 機率達 1 時，S/G 管之機率仍然很低)，此結果與國外文獻之結果一致。
3. 本研究模擬結果顯示，馬鞍山電廠全黑事故後約 28,800 秒(約 7.7 小時)爐心水位可能降至 TAF；約 32,040 秒(約 8.9 小時)爐心出口溫度可能達到 923K (進入 SAMG 條件)、同時護套溫度也將達到鋯水反應(1088.7K)；約 34,920 秒(約 9.7 小時)可能出現 HLCR。
4. 有關潛變破裂之防範：透過國際文獻可知，在進入 SAMG 後，可藉由持續開啟 PZR 之 PORV 來延後 HLCR、RPV 之失效時間；開啟時機及 PORV 數量則可能因電廠特性而有不同。而本研究救援策略靈敏度分析結果可知，對於馬鞍山電廠，在達到進入 SAMG 條件後，立即開啟 2 個 PZR PORVs 即可以有效延後 HLCR、RPV 失效時間。
5. 由國際文獻可知，熱端管路噴嘴發生潛變破裂的時間可能早於熱端管路數分鐘。而本計畫研析成果顯示馬鞍山電廠於 STSBO 事故下，從進入 SAMG 到 HLCR 約 48 分鐘，若熱端管路噴嘴提早破裂則會影響事故發生時序，因此建議未來進一步針對馬鞍山電廠於極端事故條件下，熱端管路噴嘴是否提早破裂進行深度研析，並且探討熱端管路噴嘴破裂對應變程序、救援策略之影響性，以及是否修訂現有程序書等，皆值得未來進一步深入評估，以強化馬鞍山電廠之安全性。

參考文獻

[1] P. Gauntt, D.K., Jeff Cardoni, Jesse Phillips, Andrew Goldmann, Susan Pickering, Matthew Francis, Kevin Robb, Larry Ott, Dean Wang, Curtis Smith, Shawn St.Germain, David Schwieder, Cherie Phelan, “Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012),” Sandia National Lab, 2012.

[2] CHEN Bao-wen, MAO Huan, Xiang-cheng, and CHEN Bin, “Risk Analysis for Steam Generator Tube Creep Rupture Under Severe Accident Induced by Station Blackout”, Atomic Energy Science and Technology, 2014.

[3] Youngsuk Bang, Gunhyo Jung, Byungchul Lee, and Kwang-Il Ahn, “Estimation of temperature induced reactor coolant system and steam generator tube creep rupture probability under high pressure severe accident”, Journal of Nuclear Science and Technology, 2012.

[4] Y. LIAO and K. VIEROW, “MELCOR Analysis of Steam Generator Tube Creep Rupture in Station Blackout Severe Accident”, Nuclear Technology, 2005.

[5] JinHo Song, ByungHee Lee, SungIl Kim, and Gwang Soon Ha, “An Analysis on the Consequences of a Severe Accident Initiated Steam Generator Tube Rupture”, Nuclear Engineering and Design, 2019.

[6] Deng Jian, Cao Xuewu, “Analysis of hot leg natural circulation under station blackout severe accident”, Nuclear Science and Techniques, 2007.

[7] Zhang Long Fei, Zhang Da Fa, Xu Jin Liang, “Station Blackout Accident and Mitigation Measure for PWR-NPP”, Atomic Energy Science and Technology, 2008.

[8] L. Wu, H. Miao, P. Yu, Z. Huang, “Study of PWR hot leg creep rupture and RCS depressurization strategy during an SBO accident”, Kerntechnik, 2021.

[9] SandiaNL, “State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis Project Volume 2: Surry Integrated Analysis,” NUREG/CR-7110, 2012.

放射性物料安全科技

利用 BEM 分析處置坑道受震之動態行為
Study on the Dynamic Behavior of Deposition Tunnels by SH-wave

計畫編號：110-2623-E-032-001-NU
計畫主持人：楊長義
e-mail：yang@mail.tku.edu.tw
計畫共同主持人：李家瑋
計畫參與人員：洪仕恩、黃勗庭
執行單位：淡江大學土木系

摘要

本研究以邊界元素法 BEM 在無限域內處理震波傳遞之優勢，並考慮坑道外圍一圈開挖損傷區(EDZ)力學性質(彈性剪力模數、密度)劣化問題，以探討坑道周圍岩體之動態位移場分布行為，可計算坑壁之動態應力集中因子，並探討兩個相鄰處置隧道受震波作用遮蔽效應。期可供處置坑道受震波分析之平行驗證技術。

關鍵詞：開挖損傷區、邊界元素法、動態位移。

Abstract

The BEM technology accompanied with the null-field boundary integration method is used to study the dynamic displacement behavior of rock volume involved deposition tunnels impacted by a harmonic SH-wave motion. The reduced modulus of excavation damaged rock is considered. The dynamic displacement distribution around the tunnel and dynamic-stress concentration in tunnel wall are calculated. The shelter effect between the neighboring tunnels is discussed.

Keywords: Excavation damage zone, boundary element method, dynamic displacement.

I. 前言

在建造核廢料最終地質處置坑道之開挖施工中，常造成處置坑道開挖壁附近的母岩產生損傷或破裂之為開挖損傷區(EDZ)。在開挖損傷區內母岩之強度、變形性、阻水性等力學性質將被劣化而降低。例如，日本 JAEA 試驗研究結果，指出 EDZ 區損傷母岩的水力傳導係數為 10^{-5} m/s，大於遠處非損傷區原始母岩的 10^{-7} m/s 約 100 倍，顯示其 EDZ 母岩的被開挖破裂損傷。SKB 在 ASPO 地下實驗室之 ZEDEX 實驗也得知以 TBM 開挖之 EDZ 範圍寬約有 35cm，而 D&B 開挖之 EDZ 範圍則可達 1.5m 遠，其 EDZ 實際滲透係數也比原來母岩高出 100~ 1000 倍以上。故可證知處置坑道周圍 EDZ 區的彈性模數或剪力模數會比原始母岩低。

邊界元素法(BEM)或邊界積分方程法，顧名思義僅需要在邊界上建構網格元素資訊即可計算，即使是針對半無限域或無限域的波傳問題，因為所採用的基本解或格林函數，其本身就會滿足無窮遠處的輻射條件。所以不必像領域網格型態的數值方法去設置人工邊界，從這觀點而言，使用邊界元素法或邊界積分方程法來分析半無限域或無限域的波傳問題，在建構網格會比有限元素法更方便，計算成本也遠小於有限元素法。故應可提供我國處置坑道未來在同時採用有限元素法(FEM)軟體、或其它有限差分軟體，分析處置坑道力學或受地震波作用時的另一個平行驗證技術。

II. 主要內容

本計畫利用零場邊界積分方程法，將開挖損傷區(EDZ)岩石剪力模數弱化，求解水平剪力波(SH)，在經過非均勻的岩盤介質中之動態應力與位移之散射特徵。假設在地底 500m 深處內含單一圓坑道，如見圖 2.1(a)所示，若受到一地震所傳過來的水平剪力 SH 波的作用，圖中所示意灰色區域圍岩即是代表 BEM 所考慮的全場計算域，亦即是水平剪力波傳遞的介質，其邊界可以在無窮遠處。

針對此 BEM 數值計算之極座標參數幾何關係則示如圖 2.1(b)，圖中a表示圓形孔洞的半徑，ρ表示圍岩任一個場點x與坑道圓心的距離，ϕ則表示ρ與x_1水平軸方向的夾角。

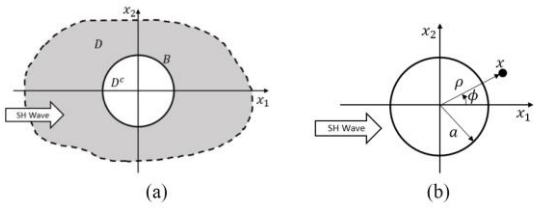


圖 2.1 在無限域岩體內處置坑洞之 BEM 模型

BEM 法處理技巧是透由將求解問題的全場如圖 2.2(a)，分解成圖 2.2(b 圖)未知解的輻射場、及(c 圖)為已知解的入射波自由場之兩部分：即輻射場(b 圖)表示圓坑洞以外之分析區域；入射波場(c 圖)則為尚未含坑道的區域–表示水平剪力波造成的位移場，其位移場解可以推求為已知，其內也包含了坑道內的位移場。再透由疊加原理，將(c 圖)已知位移場解與(b 圖)未知位移解相加，必須符合原本全場(a 圖)的實際狀況，坑道壁即 BEM 邊界上的曳引力為零之已知邊界條件狀況，據以獲知含坑道的未知位移場(b 圖)之位移解，進而推算其應力場。

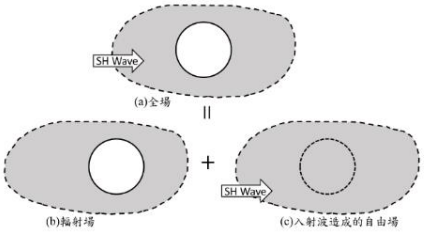


圖 2.2 坑道受 SH 波時 BEM 之拆解示意

由力平衡方程式，可表示剪應力與表面位移$\tilde{u}$之間的關係，本計畫暫只考慮簡諧運動的情況，故可得：

$$\frac{\partial^2\tilde{u}(x,t)}{\partial {x_1}^2}+\frac{\partial^2\tilde{u}(x,t)}{\partial {x_2}^2}+2\beta\frac{\partial\tilde{u}(x,t)}{\partial x_1}=\frac{1}{c_s^2}\frac{\partial^2\tilde{u}(x,t)}{\partial t^2}$$

式中，岩石剪力波速 $c_s=\sqrt{\mu_0/\rho_0}$，ρ_0為岩石材料密度。經過一些變數變換(詳參施奕廷，2019)，可求解其位移函數。而本文使用零場邊界積分方程法（null-field BIEM）來求解，並引入退化核函數來取代閉合型的核函數應用於本計畫研究。

進一步，透由上式計算推導所得之位移場$\tilde{u}$，依下示力學式則可獲知計算域內岩體各點之剪應力值如下：

$$\tau_{x_1z}=\mu(x)\frac{\partial\tilde{u}(x,t)}{\partial x_1}$$

$$\tau_{x_2z}=\mu(x)\frac{\partial\tilde{u}(x,t)}{\partial x_2}$$

故當另ρ=a 該點恰好表示在坑道壁，該點之剪應力即是坑壁受震波之切線最大主應力，因此可據以計算初坑壁因震波作用之動態應力集中倍數。

當模型涉及有 EDZ 損傷層的情況，本報告中所考慮的損傷層將視為一個同心圓環(圖 2.3(b))。針對損傷層與未損傷區域，其位移所滿足的控制方程式分別為

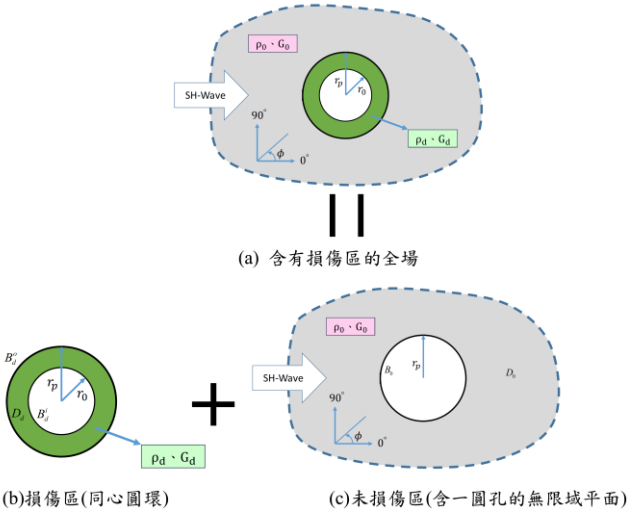
$$\nabla^2u_d(\mathbf{x})+k_d^2u_d(\mathbf{x})=0,\mathbf{x}\in D_d$$

$$\nabla^2u_0(\mathbf{x})+k_0^2u_0(\mathbf{x})=0,\mathbf{x}\in D_0$$

其中$u_d(\mathbf{x})$和$u_0(\mathbf{x})$分別表示損傷層與未損傷區域的位移場，D_d和D_0分別表示損傷區與未損傷區的領域範圍，而波數的關係如下式所定義

$$k_d=\sqrt{\frac{G_d\rho_0}{G_0\rho_d}}k_0$$

根據圖 2.3 所示，經由切自由體圖的技巧後，可分為一個同心圓環的問題(損傷區、圖 2.3(b))與無限域含一圓洞的問題(未損傷區、圖 2.3(c))，針對使用 BIEM 求解未損傷區的過程，只需要再考慮跟損傷區相接介面處的位移連續與力平衡條件。



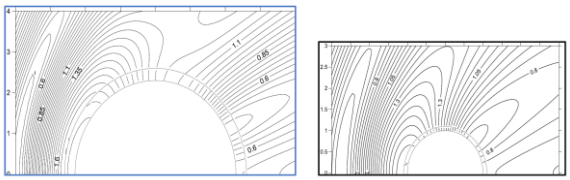
(a) 含有損傷區的全場

(b)損傷區(同心圓環)　　(c)未損傷區(含一圓孔的無限域平面)

圖 3-3 含損傷區孔洞的水平剪力波問題自由體圖分解

III. 結果與討論

當 SH 波從左邊界向右水平入射後(波數 k=1)，計算其圍岩位移之分布結果繪如圖 3.1(a)(b)兩圖所示。由圖中變位量等高線的分布比較，可知：(1)兩大小坑道圍岩之位移分布皆呈現上下對稱狀，(2)發現在波的入射端(即坑道左側圍岩)，所產生的位移量皆較後端(即坑道右側圍岩)為大；(3)隧道之左上或右上方發生較劇烈的位移變化現象，與波的頻率(波數)有關。

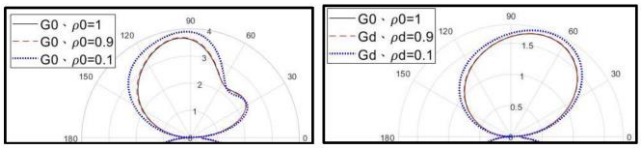


(a) r_0=2.3m(處置隧道規模)　　(b) r_0=1m(處置孔規模)

圖 3.1 上半坑道圍岩動態位移場分布比較

在圓形坑壁上之切線應力即是其最大主應力，可尤其位移函數計算其受震波所造成之動態應力集中因子，並繪如圖 3.2(a)(b)所示結果。由圖可發現：(1)坑壁之應力集中因子大多超過 1 倍且極具方向性；(2)坑壁動態應力集中因子較大值，似乎發生在前述位移變化劇烈處。(3)大坑道在左上方與右上方皆發生高度應力集中問題，其值可達 3.7 倍；小隧道則僅發生在右上方圍岩，故知雖然左壁變位量較大，但右坑壁之應力集中卻比左壁嚴重。(4)在左右兩側壁水平上下θ = 15°角範圍以內之動態應力集中倍數則小於 1。

由此獲知圍岩之動態位移量分布與震波的入射方向有關，在波入射側之變位量會較大，但應力集中程度極具方向性，較嚴重處則可能同時發生在左右上方的坑壁，但與波數頻率及坑道尺寸兩者相對大小有關。



(a) r_0=2.3　　(b) r_0=1m

圖 3.2 上半坑道圍岩動態應力集中因子比較

IV. 結論

研究結果發現：(1)在震波入射端圍岩之位移量較大、後端位移則較小，位移分布場型態與入射波方向及坑道尺寸有關，且極具方向性但呈對稱狀。(2) EDZ 損傷劣化程度越嚴重，對圍岩動態位移場分布改變漸大。(3)坑壁應力集中程度亦具異向性，動態應力集中部位亦與波入射方向及坑道尺寸有關。(4)坑距及 EDZ 區寬度是兩坑道間受震動態位移之二重要因素。

參考文獻

[1] 施奕廷(2019)，零場邊界積分方程法求解含圓形孔洞功能梯度介質引致的 SH 波散射問題，碩士論文，淡江大學。

[2] Chen, JT, JW Lee, CF Wu and IL Chen (2011), SH-wave diffraction by a semi-circular hill revisited: A null-field boundary integral equation method using degenerate kernels, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 21, pp. 729-736.

考慮不確定性的機率式地下水放射性核種衰變鏈遷移分析與放射性廢棄物地質處置的安全評估的應用

Probabilistic analysis of radionuclide migration through groundwater and its application to safety assessment for the geological disposal of radioactive waste considering uncertainty

計畫編號：110-2623-E-008-002-NU
計畫主持人：陳瑞昇 特聘教授兼高等模式研發應用中心主任
e-mail：jschen@geo.ncu.edu.tw
計畫共同主持人：梁菁萍 教授
執行單位：國立中央大學應用地質研究所

摘要

放射性廢棄物深地質處置安全評估常伴隨不確定性，原因可能為未完全了解整個處置系統、不熟悉安全評估的情境、安全評估模式的選擇與模式參數之使用。本研究開發考慮參數不確定性的機率式安全評估模式，首先，發展具高計算效率的三維放射性核種衰變鏈遷移解析解模式。再者，藉由新推導的解析解模式結合蒙地卡羅模擬建立考慮參數不確定性的放射性核種傳輸機率式模式。第三，結合放射性核種傳輸機率式模式與考量飲用水途徑中每個人飲用水攝取率的機率式暴露劑量評估模式建立機率式安全評估模式。最後，本研究藉由假想案例展示放射性核種傳輸機率式分析與放射性廢棄物地質處置的機率式安全評估。

關鍵詞：安全評估、不確定性、機率式、放射性核種衰變鏈、解析解、輻射劑量。

Abstract

Safety assessment is accompanied by uncertainty due to various causes such as incomplete understanding of the disposal system, incomplete understanding of the scenarios incorporated into safety assessment, the choice of the model incorporated into safety assessment as well as determining of the parameters associated with model. This study is designed to develop a probabilistic safety assessment model considering parameter uncertainty. First, a novel analytical model with high computational efficiency for simulating three-dimensional migration of radionuclide decay chain through groundwater pathway is derived. Second, probabilistic model for radionuclide transport is achieved through linking the newly derived analytical model to the Monte Carlo simulation considering parameter uncertainty. Third, probabilistic safety assessment model is constructed by combining the probabilistic model for radionuclide decay chain transport with parameter uncertainty and probabilistic exposure dose rate evaluation model for radiation dose experienced by an individual through the drinking water pathway with considering variability of the drinking water consumption rate of each individual. Ultimately, a hypothetical example is designed to probabilistic analysis of radionuclide decay chain transport and its application to safety assessment for the geological disposal of radioactive waste.

Keywords: Safety assessment, Uncertainty, Probabilistic, Radionuclide decay chain, Analytical model, Radiation dose.

I. 前言

基於物理機制的數學模式與其對應計算機程式進行放射性廢棄物地質處置系統安全評估是自 1980 年代以來美國與瑞典等許多國家採用的方式。但許多原因造成使用數學模式進行放射性核種在地下水遷移模擬時伴隨許多不確定性(uncertainty)，因此也導致安全評估結果存在不確定性。處理不確定性的方法最常用是機率式方法(probabilistic approach)，在機率式方法中，參數相關的不確定性是利用機率密度函數(probability density function，PDF)表示，而由參數所造成的功能指標(performance indices)不確定性也是利用機率密度函數表示。在機率式方法，可以在個別參數所定義的機率密度函數的基礎下進行個別參數值的抽樣(sampling)，根據抽樣所得每一個參數值代入數學模式就可以計算得放射性核種的一個濃度，重覆這些過程就可以得濃度的機率分布。

解析解與數值解模式都可用來進行安全評估，相關不確性分析通常藉由多次的機率式模擬進行，解析解模式主要優點是解的計算較為快速，因此較容易進行多次的模擬，因此解析解常是不確定性分析的選擇工具。放射性核種可能衰變至其它放射性產物或者穩定的物種，衰變的產物稱為子核種(progeny)，衰變過程的原始核種與其子核種就形成所謂的核種衰變鏈。要同時描述原始核種與後代核種所形成 N 個子核種的衰變鏈的遷移行為須採用 N 個移流-延散方程式(advection-dispersion equation)，這 N 個移流-延散方程式會因序列衰變反應會形成一組耦合聯立偏微分方程式，這些耦合聯立偏微分方程式解析解可探討多個物種污染物的傳輸行為，一般稱其為多物種傳輸解析解。主持人團隊(Liao et al., 2020)發展了一個計算非常快速的半無限域多物種傳輸解析解，。但 Liao et al. (2020)考慮的是不隨時間改變的定濃度邊界條件，並無法適用放射性核種衰變鏈遷移模擬常採用隨時間改變的 Bateman 邊界條件。考慮機率式安全評估通常須將數學模式所需的輸入參數相關利用機率密度函數(probability density function，PDF)表示，並進行各種參數組合的多次數學模式計算放射性核種濃度(通常須達數千次實現值(realization)以上)，數千次以上的計算通常會耗費大量的計算時間，因此數學模式的計算速度對機率式安全評估的執行非常重要。為能應用解析解於機率式安全評估，發展類似 Liao et al. (2020)計算非常快速(每個計

算點約在幾秒內)的時變 Bateman 入流邊界條件的三維放射性核種衰變鏈遷移模擬的解析解就非常重要，快速解析解就可以結合 Monte Carlo 理論進行機率式放射性核種衰變鏈遷移分析，所獲得的機率式濃度資料結合輻射劑量模式(radiological model) 就可以進行機率式輻射劑量計算，輻射劑量。

本研究主要目的為發展考慮不確定性的機率式放射性核種衰變鏈遷移分析與放射性廢棄物地質處置的安全評估的應用，

II. 主要內容

本計畫發展快速計算能力的時變 Bateman 入流邊界源的三維放射性核種衰變鏈遷移完全解析解模式，考慮如圖 1 所示的放射性廢棄物地質處置系統與地下水系統，假設水流為沿 x 軸方向穩態的均勻流，主要傳輸機制包括移流、縱向延散(longitudinal dispersion)、水平與垂直方向的側向延散(transverse dispersion)、一階衰變反應與線性平衡吸附等機制過程。

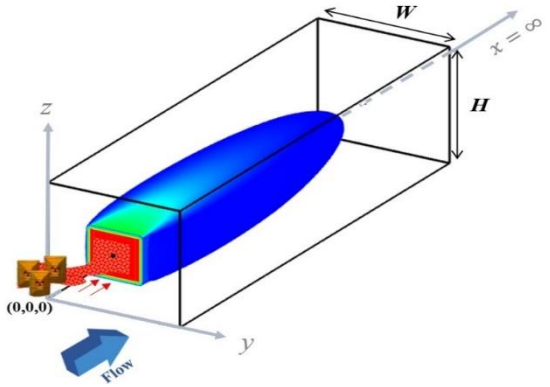


圖 1 三維半無限域放射性核種衰變鏈傳輸解析解示意圖。

對進行放射性核種衰變鏈遷移模擬時，因為放射性核種的「來源項(source term)」決定放射性核種溶解相污染團的放射性活度(radioactivity)濃度、形狀與尺寸。來源項發展是將整個處置區考慮為一團塊隔室系統，考慮貯存區廢棄物的放射性核種會因某些情境外釋，外釋的放射性核種會因地下水流遷移，在考慮貯存區垂直地下水流方向的每單位截面積存在特定量的放射性核種，並假設放射核種的外釋量與貯存設施的放射性核種量呈現正比關係，由於放射性核種衰變鏈中的任一核種本身也會因衰變而造成放射性核種量的減少，同時衰變會產生下一代的子核種，因此在考慮上述機制下，考慮具 N 個子核種的放射性核種衰變鏈　中的第　個子核種在時間　時，於貯存區的量　可以下列一階常微分方程式描述：

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = \mu_{i-1}M_{i-1}(t) - \mu_i M_i(t) - \gamma_i M_i(t)$$
$$\lambda_0 = 0 \quad ; \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (1)$$

此處$M_i(t)$為於時間t時垂直地下水流方向的處置設施內每單位截面積衰變鏈第 i個子核種的量[Bq/m^2]，γ_i為第i個核種的正比常數(proportionality constant)　[year $^{-1}$]，μ_i為第i個核種之一階衰變反應速率常數　[year $^{-1}$]。

上述一階常微分方程式須考慮初始條件求解，考慮下列初始條件(initial condition)：

$$M_i(t=0) = M_i^0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (2)$$

此處M_i^0為初始時間時垂直地下水流方向的每單位截面積第i個核種量[Bq/m^2]。

依衰變鏈的子核種產生序列($i = 1,2,3,\ldots$)求解方程式(1)與其對應的初始條件(2)，可以得適用於第i個子核種的$M_i(t)$解的通用表示式：

$$M_i(t) = M_i^0 e^{-\lambda_i t} + \sum_{j=1}^{j=i-1}\left(\prod_{k=1}^{k=j}\mu_{i-k}\right)M_{i-j}^0 \sum_{l=0}^{l=j}\frac{e^{-\lambda_{i-l}t}}{\prod_{\substack{m=0\\ m\neq l}}^{m=j}(\lambda_{i-m}-\lambda_{i-l})}$$
$$i = 1,2,\ldots,N \qquad (3)$$

此處$\lambda_i = \mu_i + \gamma_i$為描述第$i$個核種同時由自我衰變率($\mu_i$)與外釋率($\gamma_i$)所造成　[year $^{-1}$]，核種的來源則位於圖 1 中的長方形入流邊界源。

假設污染源位於入流邊界處，其分布範圍如為一長方形面積，描述 N 個母核種與子核種的傳輸，須利用 N 個移流-延散-反應傳輸偏微分方程式來描述表示為：

$$D_x\frac{\partial^2 C_i(x,y,z,t)}{\partial x^2} + D_y\frac{\partial^2 C_i(x,y,z,t)}{\partial y^2} + D_z\frac{\partial^2 C_i(x,y,z,t)}{\partial z^2} - v\frac{\partial C_i(x,y,z,t)}{\partial x} - \mu_i R_i C_i(x,y,z,t) + \mu_{i-1}R_{i-1}C_{i-1}(x,y,z,t) = R_i\frac{\partial C_i(x,y,z,t)}{\partial t} \quad \mu_0 = 0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (4)$$

此處$C_i(x,y,z,t)$為第i個子核種濃度[Bq/m^2]；D_x為縱向延散係數(longitudinal dispersion coefficient)[m^2 year $^{-1}$]；D_y與D_z為沿y方向與z方向側向延散係數(transverse dispersion coefficient) [m^2 year $^{-1}$] ；v為孔隙水流速度[m year $^{-1}$]；μ_i為第i個核種之一階衰變速率常數 [year^{-1}]；R_i表第i個核種遲滯因子[-]；x、y、z為空間座標[m]；t為時間[year]。

本計畫考慮下列的初始與邊界條件：

考慮含水層初始無任何一核種分布，表示為：

$$C_i(x,y,z,t=0) = 0 \qquad i = 1,2,\ldots,N \qquad (5)$$

假設放射性核種來源項位於地下水系統入流邊界($x = 0$)處。考慮傳輸通量守恆，則由貯存區外釋的第i個子核種的通量(第i個子核種的正比常數與第i個子核種的量)須等於進入地下水系統溶解相污染團的傳輸通量，在數學上表示為：

$$\phi v C_i(x=0,y,z,t) - \phi D_x\frac{\partial C_i(x=0,y,z,t)}{\partial x} = \begin{cases}\gamma_i M_i(t) & y_1 \le y \le y_2,\ z_1 \le z \le z_2\\ 0 & \text{elsewhere}\end{cases}$$
$$i = 1,2,\ldots,N \qquad (6)$$

此處y_1、y_2、 z_1與z_2定義來源項分布範圍的四個空間座標參數，$M_i(t)$則是將方程式(3)所得的解的通式代入方程式(5)。

本研究考慮沿地下水水流方向無限長度地下水系統，設定放射性核種的出流邊界於無窮遠處，表示為：

$$C_i(x\to\infty,y,z,t) = 0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (7)$$

假設y與z方向邊界第i個子核種傳輸通量為零，表示為：

$$\frac{\partial C_i(x,y=0,z,t)}{\partial y} = 0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (8)$$
$$\frac{\partial C_i(x,y=W,z,t)}{\partial y} = 0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (9)$$
$$\frac{\partial C_i(x,y,z=0,t)}{\partial z} = 0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (10)$$
$$\frac{\partial C_i(x,y,z=H,t)}{\partial z} = 0 \quad i = 1,2,\ldots,N \qquad (11)$$

針對上述的微分方程式與其對應的初始、邊界條件，求解的方法主要利用 Laplace 積分轉換法以消除式(4)的

一階時間微分項，接著利用兩次的 finite Fourier cosine 積分轉換法去消除偏微分方程式(4)的空間 y 與 z 二階空間微分項，因此聯立的偏微分方程組可轉換為聯立的二階常微分方程組，利用二階常微分方程式的求解方法即可進行在轉換區域的除耦操作而解得在轉換區域上每一個物種的濃度，最後須藉由上述所有積分轉換之逆轉換即可得原區域各物種濃度。

III. 結果與討論

3.1 模式應用

本研究根據解析解模式撰寫 Fortran 計算程式，解析解模式的 Fortran 計算程式經與同樣問題的數值解 Fortran 計算程式比較，兩者可獲得相同的結果，因此確認新解析解模式的正確性。經驗證的解析解模式可用來進行地下水核種衰變鏈遷移模擬，進行地下水核種衰變鏈遷移模擬如果採用傳統定率式法進行關放射性核種模擬時(圖 2)。首先給定數學模式每一個輸入參數單一輸入值，然後數學模式會產生不同時間或空間單一輸出值(濃度)，但定率式法無法考慮各種不確定性所導致的模擬結果不確性。

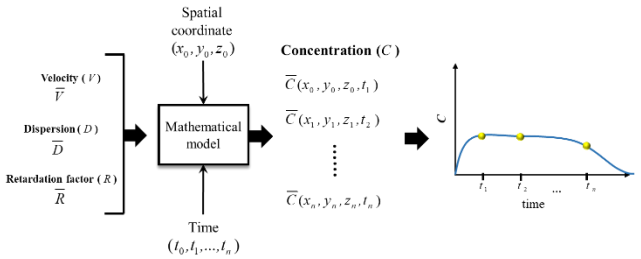


圖 2 利用數學模式進行定率放射性核種遷移模擬。

考慮不確定性最常用為機率式法(圖 3)，首先根據可能取得的資料給定數學模式的每一個參數各自機率密度函數，然後從參數的機率密度函數進行參數值抽樣，將每一參數所抽樣得的參數值作為數學模式的輸入，然後經由數學模式可產生一組輸出(濃度)，重覆這些過程數千次以上，則可產生輸出變數的機率密度函數。

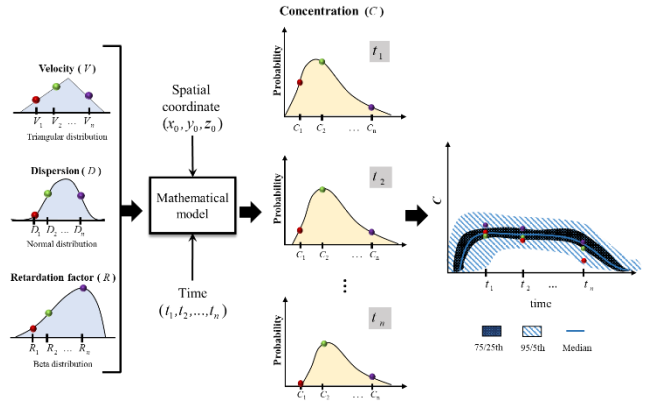


圖 3 利用數學模式進行機率式放射性核種遷移模擬。

本研究利用機率式方法產生隨機參數的分布類型可分為以下四種：

(a) 常態分佈(normal distribution)，其機率分佈函數：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{12}$$

此處σ為標準差，μ為平均值。

(b) 三角分佈(triangular distribution)，其機率分佈函數：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{4(x-a)}{(b-a)^2} & a \le x \le \frac{a+b}{2} \\ \frac{4(b-x)}{(b-a)^2} & \frac{a+b}{2} < x \le b \end{cases} \tag{13}$$

此處a為最小值，b為最大值。

(c) 對數常態分布(lognormal distribution)，其機率分佈函數：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{14}$$

此處σ為對數常態分布的標準差，μ為對數常態分布的平均值。

(d) beta 分布(beta distribution)，其機率分佈函數：

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha,\beta)} \tag{15}$$

此處$B(\alpha,\beta)$為B函數

在高放射性廢棄物核種傳輸模擬最重要的核種衰變鏈為 $^{238}Pu \rightarrow ^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra$，在衰變鏈中 ^{226}Ra 由於其具相對較高的生物危害性與在地質介質中有較高的移動性(Higashi and Pigford, 1980)，因此為最重要的核種。此處考慮的案例為 van Genuchten (1985) 採用的 $^{238}Pu \rightarrow ^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra$核種衰變鏈傳輸問題，模式的數入傳輸參數如表 2 與表 3 所列。參考 Lemke and Bahrou (2009)案例，本研究將地下水流速、延散係數與遲滯因子採用三角機率分佈類型，相關機率分布的參數如表 3 所示。圖 4 為在時間t = 1,000年時進行1,000次機率式模擬時，核種衰變鏈的四個成員核種沿著x軸濃度空間剖面，圖中的虛線為模擬1,000次的所有產生濃度的中位數，虛線兩側的淺灰色區域為模擬1,000次的所有產生濃度的第 25 個百分位到第 75 個百分位，深灰色區域為模擬1,000次的所有產生濃度第 5 個百分位到第 25 個百分位與第 75 個百分位到第 95 個百分位，黑色區域為模擬1,000次的所有產生濃度的下界值到第5個百分位與第95個百分位到上界值。從圖中可看出 ^{238}Pu、^{234}U與 ^{230}Th 隨著遷移距離的增加，其上限值與下限值的差距會越來越大，^{226}Ra差距則較不明顯變化。在 4 個放射性核種的濃度空間分布，^{226}Ra 有最遠的遷移距離，^{230}Th則較不容易移動，此現象主要 ^{226}Ra所採用遲滯因子是 500，反之 ^{230}Th所採用的遲滯因子是 50,000。

表 2 為解析解模式應用於四個子物種的核種衰變鏈 $^{238}Pu \rightarrow ^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra$的應用案例參數，採用 Higashi and Pigford(1980)的模擬案例，此案例也為 van Genuchten (1985)的解析解模式應用案例及利用解析解模式蒙地卡羅模擬不同參數採用三角分佈的區間範圍。

參數	值	最小值 a	最大值 b
孔隙水流速度 v [m year^{-1}]	100	20	180
延散係數 D_x [m^2 year^{-1}]	1,000	800	1,200
孔隙率 ϕ [-]	0.4	--	--
遲滯因子 R_i [-]			
^{238}Pu	10,000	9,000	11,000
^{234}U	14,000	12,600	15,400
^{230}Th	50,000	45,000	55,000

$226Ra$	500	450	550
一階衰變反應速率常數 μ_i [year^{-1}]			
$238Pu$	0.0079		
$234U$	0.0000028	--	--
$230Th$	0.0000087		
$226Ra$	0.00043		
核種來源外釋率 γ_i [year^{-1}]			
$238Pu$	0.001		
$234U$	0.001	--	--
$230Th$	0.001		
$226Ra$	0.001		
核種來源濃度 M_i^0 [Bq/m^2]			
$238Pu$	50,000		
$234U$	0	--	--
$230Th$	0		
$226Ra$	0		

表 3 四個核種衰變鏈$238Pu \rightarrow^{234} U \rightarrow^{230} Th \rightarrow^{226} Ra$的 Bateman 型式邊界的係數值。

	b_{im}			
物種 (序列)	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
$i=1$ $238Pu$	1.25×10^{0}			
$i=2$ $234U$	-1.25044×10^{0}	1.25044×10^{0}		
$i=3$ $230Th$	0.443684×10^{-3}	0.593431×10^{0}	-0.593874×10^{0}	
$i=4$ $226Ra$	-0.51674×10^{-1}	0.120853×10^{-1}	-0.122637×10^{-1}	0.178925×10^{-3}

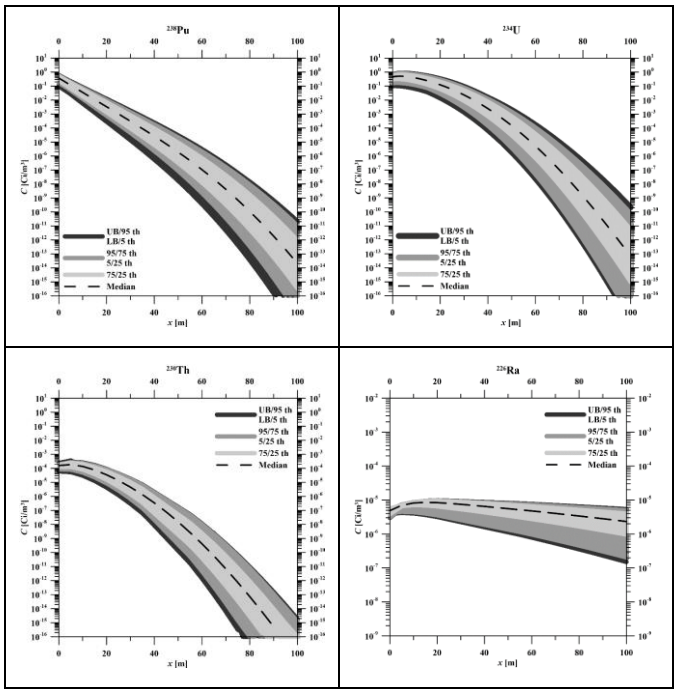


圖 4 採用三角分佈在$t=1{,}000$年時模擬1,000次的四個核種沿著x軸濃度空間剖面的比較。

3.2 輻射劑量評估

一般放射性核種對人體健康的危害影響主要是人體所接受的劑量(dose)值，可由下式。

$$ED_i = IDF_i \times IR \times C_i \quad (16)$$

此處ED_i為衰變鏈第i個子核種劑量 [Sv/ year]，C_i為第i個子核種濃度 [Bq m^{-3}]，IR為水攝入率[m^3/year]，$IR \times C_i$為第i個子核種的攝入量(ingestion rate) [Bq/ year]，IDF_i為第i個核種的攝食劑量係數(ingestion doe coefficient) [Sv/ Bq]，不同核種的IDF_i可參考 ICRP 60 (1991)或 ICRP 119 (2012)。考慮水的攝入率為三角機率分佈類型其上限值為 2.4 liter/day、下限值為 0.4 liter/day，表 5、6、7 與 8 分別為在考慮時間為 1,000 年時，$^{238}Pu \rightarrow^{234} U \rightarrow^{230} Th \rightarrow^{226} Ra$衰變鏈的四個核種成員於距離核種來源位置$x=25\ m$、$x=50\ m$與$x=100\ m$處的 4 個核種的濃度、攝食劑量係數($IDF_i$)與計算得的相關劑量值。從表中可發現 ^{238}Pu與^{234}U在距離較近時有較高的劑量，但隨距離增加劑量明顯的下降；^{226}Ra的劑量在距離越遠時，不會有明顯的下降，與其他核種相比距離越遠時有較高的劑量，因此 ^{226}Ra為較關鍵的核種。且核種劑量的變異性隨移動距離增加。

表 5 考慮時間為 1,000 年時 ^{238}Pu在不同位置處的核種劑量。

$x=50$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	2.3×10^{-7}	8.77×10^{-4}	4.88×10^{0}
95 th		7.49×10^{-5}	2.53×10^{-1}
75 th		4.95×10^{-6}	1.79×10^{-2}
中位數		8.27×10^{-7}	2.82×10^{-3}
25 th		1.66×10^{-7}	5.78×10^{-4}
5 th		2.11×10^{-8}	5.95×10^{-5}
下限值		2.57×10^{-9}	1.52×10^{-6}
$x=100$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	2.3×10^{-7}	2.85×10^{-11}	1.19×10^{-7}
95 th		3.94×10^{-13}	1.43×10^{-9}
75 th		1.97×10^{-14}	7.23×10^{-11}
中位數		2.19×10^{-15}	7.49×10^{-12}
25 th		2.41×10^{-16}	7.71×10^{-13}
5 th		9.61×10^{-18}	3.20×10^{-14}
下限值		2.03×10^{-19}	8.42×10^{-16}

表 6 考慮時間為 1,000 年時$234U$在不同位置處的核種劑量。

$x=50$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	4.9×10^{-8}	1.04×10^{-3}	1.16×10^{0}
95 th		4.04×10^{-4}	3.67×10^{-1}
75 th		1.63×10^{-4}	1.37×10^{-1}
中位數		7.68×10^{-4}	5.68×10^{-2}
25 th		3.20×10^{-5}	1.94×10^{-2}
5 th		8.32×10^{-6}	5.70×10^{-3}
下限值		2.50×10^{-6}	5.94×10^{-4}

$x = 100$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	4.9×10^{-8}	5.88×10^{-12}	3.73×10^{-9}
95 th		4.58×10^{-13}	3.28×10^{-10}
75 th		3.99×10^{-14}	2.86×10^{-11}
中位數		5.69×10^{-15}	3.89×10^{-12}
25 th		7.59×10^{-16}	5.42×10^{-13}
5 th		3.80×10^{-17}	2.70×10^{-14}
下限值		1.19×10^{-18}	5.32×10^{-16}

表 7 考慮時間為 1,000 年時$230Th$在不同位置處的核種劑量。

$x = 50$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	2.1×10^{-7}	1.46×10^{-7}	7.50×10^{-4}
95 th		4.49×10^{-8}	1.59×10^{-4}
75 th		1.78×10^{-8}	5.97×10^{-5}
中位數		7.19×10^{-9}	2.32×10^{-5}
25 th		3.13×10^{-9}	8.79×10^{-6}
5 th		7.10×10^{-10}	1.92×10^{-6}
下限值		1.44×10^{-10}	1.91×10^{-7}
$x = 100$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	2.1×10^{-7}	2.68×10^{-16}	1.53×10^{-12}
95 th		1.29×10^{-17}	4.17×10^{-14}
75 th		9.26×10^{-19}	2.90×10^{-15}
中位數		1.47×10^{-19}	4.86×10^{-16}
25 th		2.36×10^{-20}	6.37×10^{-17}
5 th		1.31×10^{-21}	4.44×10^{-18}
下限值		6.40×10^{-24}	3.86×10^{-20}

表 8 考慮時間為 1,000 年時$226Ra$在不同位置處的核種劑量。

$x = 50$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	2.8×10^{-7}	2.00×10^{-5}	1.08×10^{-1}
95 th		1.17×10^{-5}	6.24×10^{-2}
75 th		7.53×10^{-6}	3.53×10^{-2}
中位數		5.11×10^{-6}	2.10×10^{-2}
25 th		3.17×10^{-6}	1.20×10^{-2}
5 th		1.50×10^{-6}	4.79×10^{-3}
下限值		6.99×10^{-7}	1.11×10^{-3}
$x = 100$ m			
信賴區間	攝食劑量係數 IDF_i (Sv/ Bq)	濃度 C_i (Ci m^{-3})	劑量 ED_i(Sv/ year)
上限值	2.8×10^{-7}	3.35×10^{-5}	1.57×10^{-1}
95 th		6.88×10^{-6}	3.61×10^{-2}
75 th		3.78×10^{-6}	1.69×10^{-2}
中位數		2.13×10^{-6}	8.87×10^{-3}
25 th		1.12×10^{-6}	4.53×10^{-3}
5 th		3.49×10^{-7}	1.22×10^{-3}
下限值		9.44×10^{-8}	2.78×10^{-4}

IV. 結論

本計畫發展考慮不確定性的機率式三維放射性核種衰變鏈遷移完全解析解模式，根據解析解模式計畫中撰寫相對應的 Fortran 程式以執行計算。解析解模式應用於 $238Pu \rightarrow^{234} U \rightarrow^{230} Th \rightarrow^{226} Ra$的三維放射性核種衰變鏈的傳輸的機率式模擬可以了解參數不確定性對三維放射性核種衰變鏈中各核種成員濃度空間分布的影響，結果顯示參數不確定性對放射性核種衰變鏈的濃度空間分布有非常顯著的影響，其上下限差距可能達到數個 order，且變異性隨著遷移距離增加。根據解析解模擬結果計畫中進一步進行不同地下水流距離機率式輻射劑量評估。

參考文獻

[1] Higashi and Pigford, 1980. Analytical Models for Migration of Radionuclides in Geologic Sorbing Media. Journal of Nuclear Science and Technology,17,700-709.

[2] ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

[3] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).

[4] Liao, Z.Y., Suk, H., Liu, C.W., Liang, C.P., Chen, J.S., 2020. Exact analytical solutions to three-dimensional multispecies advection-dispersion equations coupled with a sequential first-order degradation reaction network. Journal of Hydrology (submitted)

放射性廢棄物最終處置場址次要斷層帶或變形帶位移危害度分析技術研究
Study on fault displacement hazard analysis for secondary fault zone or ground deformation zone in radioactive waste disposal site

計畫編號：110-2623-E-008-003-NU
計畫主持人：李錫堤
e-mail：ct@ncu.edu.tw
計畫參與人員：高嘉謙
執行單位：國立中央大學應用地質研究所

摘要

斷層錯動與地變形會直接影響放射性廢棄物處置設施的安全。大地震產生同震地表位移可對位於斷層上或附近的結構物造成重大損害，除非有對應的結構設計而減輕災害。Youngs 等人(2003)提出機率式斷層位移危害度分析，可以推估斷層錯動時引起的地表位移量。前期研究已進行機率式斷層位移評估方法初步回顧及次要斷層位移量評估方法研究，本計畫接續再進行進一步的次要斷層位移危害度分析。配合邏輯樹分析進行實際案例應用，以米崙斷層為例，選用適合之相關經驗式，使用邏輯樹分析並給予各經驗式對應之權重，計算花蓮地區之斷層位移危害度，包含主要斷層平均位移、主要斷層沿線位移、次要斷層位移和花蓮市區斷層位移分布圖。

關鍵詞：放射性廢棄物處置、斷層位移危害度、次要斷層位移。

Abstract

Fault displacement and ground deformation will directly affect the safety of radioactive waste disposal facilities. Coseismic surface displacements from large earthquakes can cause significant damage to structures located on or near faults unless there is a corresponding structural design to mitigate the hazard. Youngs et al. (2003) proposed a probabilistic fault displacement hazard analysis, which can estimate the surface displacement caused by fault dislocation. Last year's research has carried out a preliminary review of the probabilistic fault displacement assessment method and a case study of the secondary fault displacement assessment. This project will continue to conduct further secondary fault displacement hazard analysis, along with logic tree analysis to carry out applications in actual cases. Take Milun fault as an example, select appropriate relevant empirical equations and analyze with a logic tree, and give the corresponding weights to each empirical formula and calculate the fault displacement hazard in the Hualien area. The outcomes include the average displacement of the primary fault, the displacement along the primary fault, the displacement of the secondary fault, and the fault displacement distribution map of Hualien downtown area.

Keywords: Radioactive waste disposal, Fault displacement hazard, secondary fault displacement.

I. 前言

台灣地區位處活動造山帶，斷層及地震活動頻繁，大地震產生同震地表位移可對位於斷層上或附近的結構物造成直接損害，斷層錯動與地變形成為處置窖最需考量的地震影響。地變形主要出現在主斷層的錯移帶及其兩側一定範圍，處置設施於選址時，在選址時就會儘可能避開主要斷層，所以主斷層的變形帶應不是處置窖耐震設計上優先考量的重點。而在主斷層以外，可能有不易探查得到的次要斷層帶或剪裂變形帶，這一些次要斷層帶或剪裂帶在地震時有可能受震而發生位移，直接危害到結構物之安全。因此，本研究擬廣泛蒐集相關資料，前期進行整體放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧，彙整分析邏輯與辨別主要斷層與次要斷層的屬性，後續再進行次要斷層帶或剪裂變形受震位移量評估方法研究，廣泛蒐集次要斷層資料與相關經驗函數，而本研究著重於實際應用，進行放射性廢棄物最終處置場址次要斷層帶或變形帶位移危害度分析技術研究，本研究以米崙斷層為例，選用適合之相關經驗式，使用邏輯樹分析並給予各經驗式對應之權重，計算花蓮地區之斷層位移危害度，包含主要斷層平均位移、主要斷層沿線位移、次要斷層位移和花蓮市區斷層位移分布圖。

II. 主要內容

近年來鄰近斷層重大設施之安全性受到社會大眾極高的重視，當斷層非常接近場址時，除考量可能地震動(可藉由地震危害度分析計算強地動值)外，設計地震分析亦須包含斷層位移危害分析，以利評估斷層錯動造成的地表位移對場址的直接影響。Youngs et al. (2003)針對美國核廢料儲存場址 Yucca Mountain 相對於斷層所在位置，提出評估斷層錯動下位移量超越機率之方法，以探討某場址在使用年限下之結構安全性，此一方法稱為機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)，用來描述某位置受某(些)斷層影響下之超越特定位移量之機率，此一分析法主要可分為地震法與位移法。近十年來已有許多研究產出，重要文獻如 Moss and Ross (2011)對逆斷層建議之經驗式、Petersen et al. (2011)針對平移斷層議之經驗式與 Youngs et al. (2003)對正斷層建議之經驗式。

機率式斷層位移危害度分析之地震法(簡稱地震法)，地震法源自於機率式地震危害度分析(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)，參照 PSHA 之理論公式，PSHA 是分析某一場址，在一特定的時間內，

發生超過某一地動值的機率。地震危害度分析方法包括定值法及機率法，機率法特別著重在不確定性因素的掌握，如邏輯樹法等，而機率式斷層位移危害度分析是分析某一場址，在一特定的時間內，發生超過某一斷層位移值的機率。假設地震的發生是一種自然隨機過程而符合卜桑模式，則在 T 時間內，至少有一次位移值 D 超越 d 的機率如下：

$$P(D > d|T) = 1 - e^{-\nu(d)T}$$

上式中，ν(d)為位移值 D 超越 d 的單位時間(年)平均發生次數。

影響函數 ν(d)的因素包含：1.潛在震源的位置，2.震源的幾何型態，3.震源的地震發生率以及 4.位移衰減的特性。其計算式如下：

$$v_k(d) = \sum_n N_n(m_0) \int_{m_0}^{m_u} f_n(m)[\int_0^{\infty} f_{kn}(r|m) \cdot P_{kn}^*(D > d|m,r)dr]dm$$

上式中，$N_n(m_0)$是在第 n 個震源在最小地震規模 m_0 以上的年發生次數；$f_n(m)$是第 n 個震源在最小地震規模 m_0 至最大地震規模 m_u 間的規模機率密度函數；$f_{kn}(r|m)$是第 n 個震源在規模 m 時，斷層破裂面至第 k 個場址最短距離 r 的距離密度函數；$P_{kn}(Z > z|m,r)$是第 n 個震源及第 k 個場址在規模 m 以及距離 r 時，位移值 D 超越 d 的機率，可代入位移衰減函數求得。

位移衰減函數$P_{kn}^*(D > d|m,r)$與地動衰減函數略有不同:

$$P_{kn}^*(D > d|m,r) = P_{kn}(Slip|m,r) \cdot P_{kn}(D > d|m,r,Slip)$$

上式的第一項$P_{kn}(Slip|m,r)$是第 n 個震源在第 k 個場址產生位移的機率(probability of slip)，上式的第二項$P_{kn}(D > d|m,r,Slip)$是第 n 個震源在第 k 個場址產生位移 $D>d$ 的超越機率(probability of exceedance)。

本計畫經前期相關研究整理，已有一定候選之經驗式，但於台灣進行實際案例分析時，相關函數該如何選用，仍需進一步討論，故本計畫以米崙斷層為例，進行相關預估式選用，計算主要斷層與次要斷層位移危害度分析，相關函數依主斷層與次要斷層位移整理如下：

(1) 主要斷層地表破裂相關函數彙整

Youngs et al. (2003)將 4 個不同的正斷層資料庫分別建立其不同地震規模對應的造成地表破裂函數。Moss and Ross (2011)考量各斷層類型造成地表破裂機制不同，蒐集較新之逆斷層地表破裂的資料，評估其錯動造成地表破裂之機率。Moss et al. (2013)提出 4 個包含地盤參數的主要斷層破裂機率函數，分別對應逆斷層和平移斷層。Takao et al. (2013)在亦使用日本的逆斷層和平移斷層資料建立對應的破裂函數。本計畫比較 10 個條件機率方程式，Takao et al. (2013)在小規模的機率遠低於 Youngs et al. (2003)的 4 個資料集函數，且 Youngs et al. (2003)在逆斷層的所有滑移類型的機率遠大於 Moss and Ross (2011)。

Youngs et al. (2003)與 Petersen et al. (2011)以沿主斷層線上不同位置與相對主斷層總長度，計算其對應之位移量，並以該主斷層線最大位移量或平均位移量，並推估沿主斷層線上之正規化位移量分佈情形。上某位置之位移量需仰賴斷層錯動與位移量之資料庫進行分析，Youngs et al. (2003)與 Petersen et al. (2011)，整理沿主斷層線上不同位置與相對主斷層總長度，其對應之位移量(D)，並以該主斷層線最大位移量(MD)或平均位移量(AD)進行正規化，找出沿主斷層線上之正規化位移量分佈情形，並以如 Beta 或 Gamma 等分佈描述其位移沿斷層線不同位置分佈情形，即可利用地震法進行危害度分析。

主要斷層位移的最大位移量(MD)或平均位移量(AD)的推估部分為關鍵參數，一般以經驗公式推估，例如 Wells and Coppersmith (1994)利用全世界蒐集而得之各類斷層(正、逆、平移斷層整合)資料提出各斷層類型可能造成之地表位移量，該經驗公式至今仍廣為使用，其與地震規模、斷層錯動造成地表破裂長度有關。Moss and Ross (2011)將台灣集集地震(1999)等多個逆斷層錯動事件列入資料庫內進行分析並提出評估之經驗公式。Leonard (2010)亦將穩定大陸地區(stable continental regions)、傾向滑移斷層(dip-slip)和走向滑移斷層(strike-slip)分類並回歸出斷層總長度(L)與平均位移量(AD)的關係式。

Wesnousky (2008)與 Biais (2013)整理 1857 至 2010 年有地表破裂的地震事件，繪製地震破裂痕跡圖，並附有沿斷裂走向觀察到的同震滑動相關描述，故本計畫整理其地震矩規模與平均位移量(AD)並比較上述預估式，這些觀測資料有助於我們篩選各個預估式。資料變異性或資料不確定性為機率式危害度分析中必須研討之範疇，而 Leonard (2010)之預估式並未提供其位移量變異性，即預估式的殘差之標準差，故本計畫以 Wesnousky (2008)與 Biais (2013)之資料庫重新計算其標準差並整理各預估式標準差，本計畫亦以此資料庫重新建立位移預估式，藉由比較不同的經驗式，我們發現 Wells and Coppers (1994)對於逆斷層類型的衰減式與其他十個模型有顯著的不同，而 Leonard (2010)的三個模型的斜率相同，即平均位移和規模的比率相同。

(2) 次要斷層地表破裂相關函數彙整

次要斷層破裂之位移量資料相當少，因為有記錄該處有地表破裂但不一定有記錄其位移量，因此對於計算位移量，Youngs et al. (2003)僅能仰賴少量資料進行迴歸分析，其先計算正規化後位移量與距離，並針對上盤與下盤分別進行分析。Petersen et al. (2011)亦進行遠離斷層破裂機率之計算，其針對所蒐集之 22 條平移斷層進行整理，在研究中採用邊長 200 至 25 公尺不等之網格進行計算遠離斷層之破裂機率與距離及地震規模之關係，其經驗公式與使用之網格大小、斷層距離有關。Taokao et al. (2014)使用日本的平移與逆斷層資料分析次要斷層發生機率函數。Petersen et al. (2011)和 Takao et al. (2014)提出的斷層帶位移的條件機率不會隨著地震規模改變。此外，Takao et al. (2014)計算出的機率遠低於 Petersen et al. (2011)。

Petersen et al. (2011)比照沿主斷層線之位移推估方法進行經驗公式之推導，並建立兩個經驗公式以計算遠離斷層線之位移量，其一為建立地震規模(m)、距主斷層之最短距離(r)與次要斷層之位移量(d)；另一方法為利用次要斷層之位移量(d)與主斷層線平均位移量(AD)之關係建立另一計算隨距主斷層之最短距離(r)增加而位移衰減之經驗公式，並有不同之網格大小。Taokao et al.

(2013, 2014)亦使用日本的平移與逆斷層資料，提出的次要斷層位移預估式。Youngs et al. (2003)和 Takao et al. (2013)的模型表示第 85 到 95 的百分比分佈，而 Petersen et al. (2011)則表示包含標準差的衰減式的平均值。

(3) 斷層位移危害度計算(以花蓮地區為例)

定值法地震危害度分析被廣泛應用在評估強地動的危害，這種方法用來評估受來自影響特定場址的控制震源(斷層)對於特定場址的最大強地動推估，我們亦可以利用定值法的概念來進行定值式斷層位移危害度分析(deterministic fault displacement hazard analysis)來量化特定情景中的斷層位移推估，可給定規模和距離，利用斷層位移預估式評估主要斷層位移以及次要斷層位移。本研究將這種方法應用於米崙斷層，評估三個假想目標場址(花蓮醫院、花蓮火車站和慈濟科技大學[TCUST])的潛在位移。米崙斷層的長度為 32.6 公里，可在主斷層上產生 Mw 6.56 的地震和 68 公分的地表破裂。而次要斷層位移，考慮到距米崙斷層的距離不同，花蓮醫院、花蓮火車站和慈濟科技大學分別有可能遭遇 5.00、3.71 和 2.87 cm 的斷層位移。

本研究亦進行機率式斷層位移危害度分析，以地震法為主，配合邏輯數整合相關經驗函數。使用的邏輯樹的第一部分是選用 Chan et al. (2020)的米崙斷層的參數，如滑移率、傾角、斷層類型和地震最大規模；關於地震規模分布函數，以 Youngs and Coppersmith (1985)的特徵地震模型為主，因為相對於全段斷層破裂，部分斷層破裂產生的中等規模之地震(M5-6)亦可能在斷層附近產生地表破裂。

邏輯樹的第二部分是關於主要斷層位移計算，第一個節點代表 6 個模型之主要斷層發生破裂的條件機率函數，第一個是由 Wells and Coppersmith (1993)對於 Youngs et al. (2003)提出的不同滑移類型所建立的衰減式；第二個是 Moss and Ross (2011)針對逆衝斷層的函數，因米崙斷層是帶逆衝分量的走向滑移斷層，故納入該模型；第三個是 Takao et al. (2013)的逆斷層和走向滑移斷層模型。其他的則是 Moss et al. (2013)納入不同場址條件的逆斷層資料提出的模型。我們假設每個衰減式都有相同的權重；另一分支則是假設 100%的破裂機率(即所有的地震都會造成地表破裂)。第二個節點是主要斷層的斷層位移預估式，我們訂定 Petersen et al. (2011)的兩種衰減式，即標準化位移方法和平均位移衰減式的權重相等，而本研究採用 7 個模型來計算平均位移：Wells and Coppersmith (1994)的所有的類型和平移斷層的函數，Moss and Ross (2011)的逆斷層模型，Takao et al. (2013)應用在逆斷層和平移斷層以及應用本研究所提出的適用於所有斷層類型的模型，需注意的是由於 Wells and Coppersmith (1994)的逆斷層模型之標準差較大，故未納入邏輯樹中。我們假設每項研究的權重為 20%，即若參考文獻針對各種斷層類型提出兩個衰減式，則權重各為 10%。

邏輯樹的第三部分是關於次要斷層位移計算。第一個節點表示主斷層的發生破裂機率，與第二部分的設定相同。第二個節點是關於次要斷層的發生破裂機率，我們假設 Petersen et al. (2011)的平移斷層函數和 Takao et al. (2013)的逆斷層和平移斷層函數權重相同(45%)，並且在加入 100%的破裂機率(10%的低權重)。最後一個節點是次要斷層的斷層位移預估式，我們訂定 Petersen et al. (2011)的兩種次要斷層位移預估式的權重相等進行計算，本研究只選擇 Petersen et al. (2011)的模型，因其可以代表位移變異性的標準偏差和平均值的方程式，而其他方程式只呈現第 85 到第 95 個百分位數的分佈區間。

使用了上述定義的震源特徵和經驗式，我們計算米崙斷層沿線及其附近的斷層位移危害度，米崙斷層的斷層位移危害曲線(圖 1)顯示不同位置的主要斷層位移或米崙斷層的平均位移。米崙斷層沿線不同位置的位移危害顯示出廣泛的結果，代表位移危害對主斷層的敏感性，特別是在較長的再現期(即年超越機率較低)，例如在 10,000 年的再現期內，在 x/L = 0.5 和= 0 時的結果分別為 6.74 公尺和 0.25 公尺，而僅使用平均位移方程式的結果為 2.76 公尺。由於其他活動斷層距離花蓮市區較遠，故其他斷層貢獻的可能斷層位移可以忽略不計，我們將分析重點放在米崙斷層及其附近。為了計算危害對場址到斷層距離對危害度造成的影響，我們分析三個目標場址的案例：花蓮醫院(r = 0.2 公里)、花蓮火車站(r = 1.1 公里)和 TCUST(r = 4.7 km)(圖 2)。場址的平均危害曲線呈現不同距離的不同危險等級，例如花蓮醫院、花蓮火車站和 TCUST 分別為 12.5、9.7 和 8.1 公分，再現期為 10,000 年。位移危害度可以採危害圖分布圖的形式呈現。

IV. 結論

結構物之地震影響可包括強地動之影響、斷層錯動與地變形之影響，及各種次生災害之影響等。本計畫以 fortran 程式語言撰寫相關應用程式，納入相關最新經驗式，包含主要斷層破裂機率的 Youngs et al. (2003)、Moss and Ross (2011)、Moss et al. (2013)與 Takao et al. (2013)；主要斷層位移預估式的 Wells and Coppersmith (1994)、Leonard (2010)、Moss and Ross (2011)與 Takao et al. (2013)；次要斷層破裂機率的 Youngs et al. (2003)、Petersen et al. (2011)與 Takao et al. (2014)；次要斷層位移預估式的 Youngs et al. (2003)、Petersen et al. (2011)與 Takao et al. (2013)，以便後續針對各場址與各震源，選用特定經驗式時或以邏輯樹之模式皆可靈活選用並綜合分析。斷層之機率密度函數、斷層參數及位移衰減式可經邏輯樹分析，其中相關權重需採專家經驗與專業認可後訂定。最後危害度分析將針對斷層位移帶之分布、斷層位移量以及斷層滑動方向對場址影響程度進行評估與不確定性分析。本計畫以米崙斷層為例，建立斷層模型並置入程式，選用適合之相關經驗式，使用邏輯樹分析並給予各經驗式對應之權重，計算花蓮地區之斷層位移危害度，包含主要斷層平均位移、主要斷層沿線位移、次要斷層位移和花蓮市區斷層位移分布圖。

參考文獻

[1] Biasi, G. P., Weldon, R. J., and Dawson, T. E. (2013). Appendix F: Distribution of slip in ruptures. *Open File Rep US Geol. Surv.* **1165**, 65.

[2] Chan, C. H., Ma, K. F., Shyu, J. B. H., Lee, Y. T., Wang,

Y. J., Gao, J. C., ... and Rau, R. J. (2020). Probabilistic seismic hazard assessment for Taiwan: TEM PSHA2020. *Earthquake Spectra* **36** 137-159.

[3] Leonard, M. (2010). Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bull. Seism. Soc. Am.* **100** 1971-1988.

[4] Moss, R. E. S., and Ross, Z. E. (2011). Probabilistic fault displacement hazard analysis for reverse faults. *Bull. Seism. Soc. Am.* **101** 1542-1553.

[5] Moss, R. E. S., Stanton, K. V., and Buelna, M. I. (2013). The impact of material stiffness on the likelihood of fault rupture propagating to the ground surface. *Seismol. Res. Lett.* **84** 485-488.

[6] Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., and Frankel, A. D. (2011). Fault displacement hazard for strike-slip faults. *Bull. Seism. Soc. Am.* **101** 805-825.

[7] Takao, M., Tsuchiyama, J., Annaka, T., and Kurita, T. (2013). Application of probabilistic fault displacement hazard analysis in Japan. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering* **13** 17-32.

[8] Takao, M., Ueta, K., Annaka, T., Kurita, T., Makase, H., Kyoya, T., and Kato, J. (2014). Reliability improvement of probabilistic fault displacement hazard analysis. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering* **14** 16.

[9] Wells, D. L., and Coppersmith, K. J. (1993). Likelihood of surface rupture as a function of magnitude. *Seismol. Res. Lett.* **64** 54.

[10] Wells, D. L., and Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* **84** 974-1002.

[11] Wesnousky, S. G. (2008). Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. *Bull. Seism. Soc. Am.* **98** 1609-1632.

[12] Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., ... and Rogers, A. M. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). *Earthquake spectra* **19** 191-219.

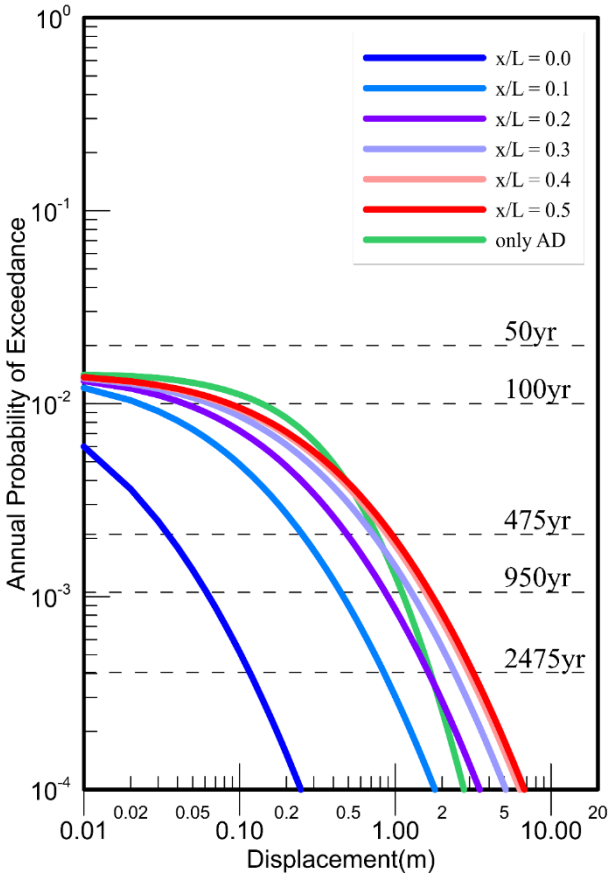


圖 1 米崙斷層之位移危害度分析曲線

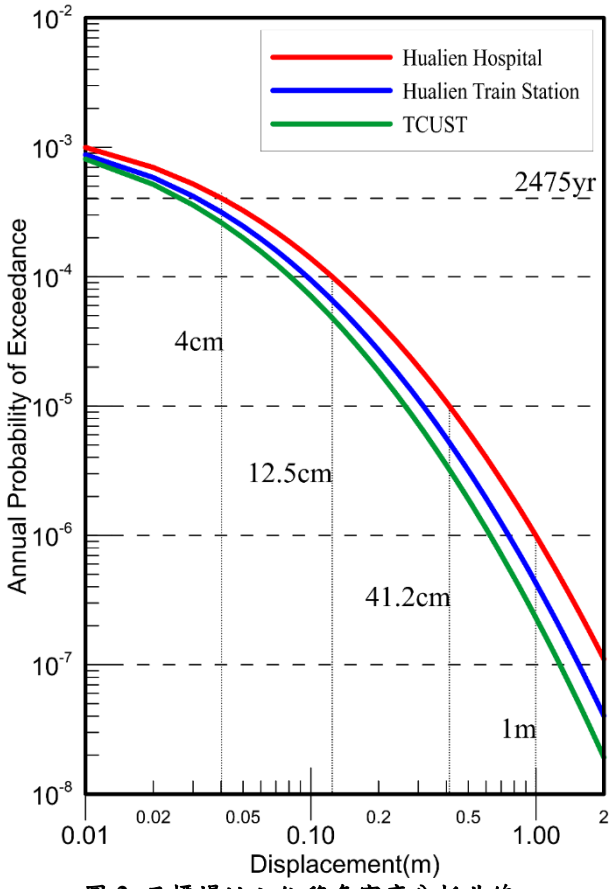


圖 2 目標場址之位移危害度分析曲線

過核子燃料最終處置母岩-緩衝材料孔隙熱-水-力耦合理論與不確定性模式發展研究

The investigations of porous thermal-hydraulic-mechanical theory and model uncertainty on host rock and buffer material of final disposal site for spent nuclear fuel waste

計畫編號：110-2623-E-008-004-NU
計畫主持人：王士榮
e-mail：sjwang@ncu.edu.tw
計畫參與人員：陳建語
執行單位：國立中央大學應用地質研究所

摘要

用過核子燃料最終處置場的技術隨著大量研究人員的投入而越來越成熟，然而國際上使用序率(Stochastic)方式進行安全性評估的文獻仍有所不足，也少有文獻結合序率和非線性參數探討熱－水－力耦合物理現象。因此本研究生產了水力傳導係數隨機場進行蒙地卡羅模擬，接著計算隨機場之平均數、變異數以及共變異數以探討熱－水－力耦合模式的不確定性和交互作用行為，並且比對線性參數模式以及非線性參數模式之差異以量化非線性參數對於模式之影響。

關鍵詞：序率方法、熱－水－力耦合模式、蒙地卡羅模擬、非線性參數、交互作用行為。

Abstract

The techniques for the safety assessment of final disposal site for spent nuclear fuel become mature in recent years. However, previous studies of thermal-hydraulic-mechanical (THM) simulation are seldom on discussing the uncertainty and cross-interactions using the stochastic concept with nonlinear parameters. Therefore, this study developed the nonlinear parameter model in the coupled THM system with the Monte Carlo simulation to discuss the interaction of the variables. The mean, variance, and covariance are calculated to discuss the uncertainty and cross-interactions between the variables in the coupled THM system. The difference between nonlinear parameter model and linear parameter model are compared to understand the influences.

Keywords: Stochastic method, THM coupled model, Monte Carlo simulation, nonlinear parameters, cross-interactions.

I. 前言

深層地質處置法為目前國際上最有潛力長期封存用過核子燃料的方式之一，台灣目前也採用此種方式為用過核子燃料最終處置方式[1]。隨者越來越多國家以及團隊投入相關的研究，其概念以及相關設計也發展的愈趨成熟。然而在使用數值模式進行安全性評估時，卻鮮少有採用序率(stochastic)方式進行的不確定性分析[2]，通常為採用線性參數(linear parameter)系統之模式，而且現今國際上與熱－水－力耦合相關之多重物理量領域的研究，也少有針對熱－水－力耦合物理機制的探討[3]。因此本研究使用序率方法，並導入非線性參數(nonlinear parameter)進行熱－水－力耦合模式之分析，藉由比較不同模式以及參數設定之結果，探討熱－水－力耦合的不確定性以及交互作用行為，並以循序漸進的方式，將研究進行階段式的劃分，逐步進行研究與探討。

本年度之研究成果為序率熱－水－力耦合模式理論研究計畫之先導研究，採用簡化過後的一維度處置場近場以及遠場概念模型進行分析[3]，主要為了能夠正確的釐清複雜的熱－水－力耦合行為各變數之間的交互作用行為，增強對熱－水－力耦合物理現象之認知。另外，也希望能夠以此序率熱－水－力耦合數值模式為基礎，提供後續年度進行進一步研究與探討的參考。本年度之研究引入非線性參數系統並結合序率系統，量化非線性參數與異質場對於熱－水－力耦合模式所造成的影響，並展示其在用過核子燃料最終處置場安全性評估中之重要性。

II. 研究步驟與方法

1. 概念模型之建置

本研究為了探討並加強對熱－水－力耦合物理現象之基礎認知，因而採用相對簡化之處置場概念模型。本研究引用 Wang et al. (2021)之一維度處置場概念模型(如圖 1)，將緩衝材料模式以及母岩模式分開討論，緩衝材料模式採用編號 MX-80 之膨潤土為材料[4]，而母岩模式則採用花崗岩為材料[5]，材料參數如表 1 所示。緩衝材料模式之大小設定為 0.35 m 而母岩模式則設定為 150 m，兩者採用相同的邊界條件以及模式設定，以比較模式尺度對熱－水－力模式所造成之影響。模式的初始設定以及邊界設定則如下：

熱邊界與初始條件

SNFD2017 報告[1]指出，目前台灣之處置深度設計為 500 m，假設地溫梯度每 100 m 上升 3 K(℃)，因此 500 m 深度之地底溫度大約為 40 度，因此右邊界以及模式之初始設定設為 40 度。另外根據 SNFD2017 緩衝材料與母岩不超過 80 度之設計，使用 75 度作為左邊界之邊界條件，上下邊界則採用熱絕緣邊界以實現一維度熱傳場。

水邊界與初始條件

此模式屬於熱驅動之模式，假設初始為水平衡狀態，因此將孔隙水壓左邊界與右邊界以及初始值設定為 0，

代表模式在左邊界以及右邊界的變化量為 0，水體可自由進出研究區。因此，本模式計算出來的孔隙水壓結果為相對於初始狀態的孔隙水壓變化量，而非實際之孔隙水壓數值。而上下兩邊界採用無流動邊界(no flow)以實現一維度流場。

力邊界與初始條件

模式的兩端採用固定邊界，而上下則採用滾動邊界(rolling boundary)以實現一維度位移場。初始狀態同樣假設為穩定狀態，因此沒有任何位移與變形。

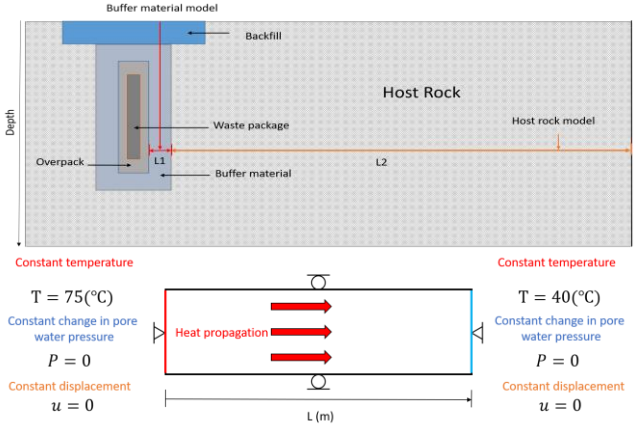


圖 1 概念模型(上圖)以及模式設定(下圖)

表 1 材料參數表。數值為參數初始值。

Type	Parameters	Host Rock (Saturated)	Buffer (Saturated)	Unit
Physical properties	Density	2700	2085.90	kg/m^3
	Effective porosity	0.01	0.3464	1
Mechanical properties	Compressibility of solid	2.20×10^{-11}	2.00×10^{-11}	m^2/N
	Compressibility of fluid	4.44×10^{-10}	4.44×10^{-10}	m^2/N
	Biot's effective stress coefficient	0.449	0.96	1
	Young's modulus	3.75×10^{10}	1.18×10^{8}	Pa
	Poisson's ratio	0.25	0.49	1
Hydraulic properties	Hydraulic conductivity	3.92×10^{-12}	2.21×10^{-14}	m/s
	Viscosity of the pore fluid	1×10^{-3}	1×10^{-3}	$Pa*s$
Thermal properties	Thermal conductivity	2.5	1.12	$W/m*K$
	Specific heat capacity	850	1471	$J/kg*K$
	Volumetric thermal expansion of solid	8×10^{-6}	3.4×10^{-5}	$1/K$

2.熱－水－力耦合控制方程式

本研究蒐集各國研究報告以及文獻，以有限元素軟體 COMSOL MULTIPHYSICS 搭配自行發展的程式，建置了一維度的熱－水－力全耦合模式。COMSOL MULTIPHYSICS 擁有多樣化的物理模組，本研究採用其固體力學、達西定律以及孔隙介質熱傳模組組成熱－水－力全耦合模式之基本控制方程式，這些模組之控制方程式主要參考前人研究[6][7]。

孔隙介質熱傳方程式

本研究孔隙介質以及流體的參數採用平均體積法，依照兩者在控制體積內的比例來展現材料的參數特性，孔隙介質的熱傳導以能量守恆方程式可以表示成：

$$(C_p\rho)_{eff}\frac{dT}{dt}+\nabla\cdot q_T=Q_T$$

其中 $(C_p\rho)_{eff}=nC_p^f\rho_f+(1-n)C_p^s\rho_s$ 為有效比熱與體積乘積，其中 n 是孔隙率[-]、C_p^f 是流體比熱[J/(kg×K)]、ρ_f 是流體密度[kg/m³]而 C_p^s 是固體比熱[J/(kg×K)]、ρ_s 是固體密度[kg/m³]，q_T 為熱通量[W/m²]、Q_T 為能量來源[W/m²]，而熱通量 q_T 則可以表示成：

$$q_T=-k_{Teff}\nabla T+C_p^f\rho_f q_f\nabla T$$

$k_{Teff}=nk_T^f+(1-n)k_T^s$ 為有效熱傳導係數，其中 k_T^f 是流體熱傳導係數[W/(m×K)]、k_T^s 是固體熱傳導係數[W/(m×K)]，q_f 是流體流速[m/s]。

孔隙流體方程式

流體在飽和孔隙介質中的流動行為可以使用水體質量守恆方程式表示成：

$$\rho_f S\frac{dp}{dt}+\nabla\cdot(\rho_f q_f)+\rho_f\alpha\frac{d\varepsilon_v}{dt}=Q_f$$

其中 ρ_f 為流體密度，S= $c_b(1-\alpha)(\alpha-n)+c_f n$ 為儲水模型(storage model)[1/Pa]，c_b 為孔隙介質整體壓縮性[1/Pa]，n 為孔隙率[-]，c_s 為固體壓縮性[1/Pa]，c_f 為流體的壓縮性[1/Pa]，p 為孔隙水壓變化量[Pa]，q_f 為流體通量[m/s]，α 為 Biot 有效應力係數[-]，ε_v 為體積應變[-]，Q_f 則為流體質量流進或流出量[kg/(m³×s)]。假設在流速低的孔隙介質當中，流體通量可以達西定律表示為：

$$q_f=-\frac{k_p}{\mu}(\nabla p)$$

其中 k_p 為滲透率(intrinsic permeability)[m²]，μ 為流體黏滯度[Pa×s]。

固體力學方程式

動量守恆可以用來描述等向性的孔彈性介質的力平衡方程式如：

$$\nabla\cdot(\sigma'-\alpha pI)=0$$

其中 σ' 為三階有效應力矩陣[Pa]，I為三階單位矩陣，$\rho_{eff}=n\rho_f+(1-n)\rho_s$ 為飽和孔隙介質密度。$\nabla\cdot\sigma'$ 又可以表示成：

$$\sigma'_{ij}=\mathbb{C}_{ijkl}(\varepsilon_{kl}-\alpha_T\Delta TI)$$

其中 σ'_{ij} 為有效應力張量，ε_{ij} 為應變張量，α_T 為線熱膨脹係數[1/K]、$\mathbb{C}_{ijkl}=\frac{E\upsilon}{(1+\upsilon)(1+2\upsilon)}(\delta_{ij}\delta_{kl})+\frac{E}{2(1+\upsilon)}(\delta_{ik}\delta_{jl}+\delta_{il}\delta_{jk})$ 為在排水條件下所產生的彈性矩陣，E 為楊氏模數[Pa]、υ 為柏松比[-]、δ 為 Kronecker delta，其規則為 $\delta_{ij}=\begin{cases}1, i=j\\0, i\neq j\end{cases}$。另外在微小應變(infinitesimal strain)的假設下，體積應變大約等於第一應變不變量(first strain invariant)：$\varepsilon_v=\varepsilon_{11}+\varepsilon_{22}+\varepsilon_{33}$，而應變張量又可以用位移梯度張量 u_{ij} 表示成：

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}(u_{ij}+u_{ji})$$

至此熱–水–力耦合模式控制方程式完成。本研究將同時求解位移、溫度以及孔隙水壓等三個變數。

3.非線性參數系統

非線性參數指的是材料參數受到外在環境因素的影響而改變(例如溫度的上升會導致流體的動黏滯係數下降)，尤其在多重物理量耦合領域當中，能夠改變材料參數的因子更多。因此，本研究蒐集相關文獻並導入耦合模式中，並比較線性參數模式(LPM)以及非線性參數

模式(NPM)之結果以進行討論。緩衝材料模式以及母岩模式分別使用不同程度的非線性參數系統，主要因為本研究假設模式全時段皆為全飽和狀態，而 MX-80 膨潤土材料參數的特性則與飽和程度有較大之關係，因此 MX-80 緩衝材料模式的僅引用流體參數之非線性系統；而花崗岩模式則引用從其他文獻蒐集而來之非線性參數，非線性方程式如下：

孔隙率

本研究孔隙介質之參數採用平均體積法，因此孔隙率的變化也會間接地影響到材料之有效參數，例如熱傳導係數以及比熱等。根據 Mainguy and Longuemare[8]的研究指出，彈性孔隙介質的孔隙率會因為應力應變狀態而有所改變，其方程式為：

$$\Delta \mathrm{n} = (n_0 c_f + (n_0 - \alpha) c_s) \frac{dp}{dt} - \alpha \frac{d\varepsilon_v}{dt}$$

其中n_0為初始孔隙率[-]，c_s為固體壓縮性[1/Pa]。

水力傳導係數、滲透率

水力傳導係數(hydraulic conductivity)以及滲透率(permeability)皆控制孔隙流體流動之能力，不同的是水力傳導係數代表的是綜合流體以及孔隙介質兩者之特性，而滲透率僅代表孔隙介質給予流體流動的能力。滲透率會受到孔隙結構的變化而影響，根據 Touhidi-Baghini[9]的實驗指出，滲透率可以透過體積應變以及初始孔隙率表示成：

$$ln\frac{k_p}{k_p^0} = \frac{B}{n_0}\varepsilon_v$$

其中k_p^0代表初始滲透率、$B = 2$或$B = 5$則為實驗所訂定的數據，本研究採用代表較緻密材料的$B = 2$。另外，水力傳導係數除了孔隙介質之特性也包含了流體本身的特性，其方程式可以表示成：

$$\mathrm{K}_\alpha = \frac{k_p \rho_f g}{\mu_f}$$

其中μ_f為流體動黏滯係數[Pa×s]，而μ_f會到溫度的影響。

楊氏模數(花崗岩)

楊氏模數代表材料的剛性，越高的量值使其越不容易形變。根據 Chen 等人的花崗岩實驗[10]，溫度上升的時候會導致花崗岩的楊氏模數下降。本研究採用其楊氏模數與溫度之線性關係得到其關係式為：

$$E = \mathrm{b}(T - T_{room}) + E_0$$

E_0為初始楊氏模數[Pa]、b 為楊氏模數與溫度之梯度[Pa/K]，T_{room}則為室內溫度[K]。

Biot's 有效應力係數(花崗岩)

當孔隙介質中流體的體積因為材料整體體積快速變化而變化之時，Biot's 有效應力係數被定義來描述孔隙壓力作用在材料上之行為：

$$\alpha = 1 - \frac{c_s}{c_b}$$

$c_b = \frac{3(1-2\upsilon_b)}{E}$為孔隙介質整體壓縮性，本研究為了量化非線性參數系統的影響，因此假設孔隙介質之柏松比和材料整體之柏松比一樣($\upsilon = \upsilon_b = \upsilon_s$)並將其帶入上式可以得到：

$$\alpha = 1 - \frac{E}{E_s}$$

熱傳導係數、比熱(花崗岩)

根據 Dwivedi 等人的研究[11]指出，花崗岩的熱傳導性質會受到溫度之影響，其表示式分別為：

$$\mathrm{C}_p^s = c \times (T - 273.15) + \mathrm{C}_{p0}^s$$

$$\mathrm{k}_T^s = \mathrm{k}_{T0}^s - d_1 \times (T - 273.15) + d_2 \times (T - 273.15)^2$$

其中$c = 0.586$[J/(kg× K^2)]，為迴歸式一階項之係數、$\mathrm{C}_{p0}^s = 818$為溫度條件為 273.15K 的固體比熱、$\mathrm{k}_{T0}^s = 2.63$為溫度條件為 273.15K 的固體熱傳導係數，$d_1 = 2.8 \times 10^{-3}$[W/(m× K^2)]與$d_2 = 1.43 \times 10^{-6}$[W/(m× K^3)]分別為迴歸式一階和二階項之係數。

4.序率模式之設定

本研究使用地質統計開源程式碼 SGSIM (Sequential Gaussian SIMulation) [12]產生一維度水力傳導係數之高斯隨機場。SGSIM 是基於克立金插值法的隨機場演算法，其採用固定的變差函數模型(Variogram model)、影響範圍(Range)、閾值(Sill)，並以克立金預測值為平均值、克利金誤差為變異數，從常態分布中隨機抽取數值成為其模擬值，因此使用不同之隨機種子號碼進行模擬將得到不一樣之結果，而生產出來的隨機場則稱為實現場(realization)，此方式常被用來進行異質材料的不確定性分析。本研究藉由產生多個實現場，代入熱–水–力耦合模式進行蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)，並計算其平均數、變異數以及共變異數等統計特性，以進行不確定性分析。因台灣尚未有較完整的處置場地質材料參數相關資訊，因此本研究採用非條件模擬法(Unconditional simulation)進行隨機場產製。非條件模擬之隨機場雖然不固定已知資料點進行模擬，但其必須符合設定之平均值、變異數以及變差函數。本研究以花崗岩之水力傳導係數取自然對數，設定為其平均值 ln(3.92×10^{-12}) = -26.265、變異數 0.5，影響範圍 17.32 m，變差函數模型則選用高斯模型。考量到模擬結果之穩定性以及計算效率，本研究共產製 8000 實現場進行模擬。

III. 結果與討論

本研究之成果包含許多不同案例之比較與探討，受限於篇幅與內容尚未發表，僅挑選部分成果於本報告中說明。

1. 定率模式成果

本研究首先分別進行了 MX-80 模型以及花崗岩模型的定率模式分析，並比較線性參數模式以及非線性參數模式之差異。圖 1 為 MX-80 模式定率模式結果，符號為 NPM 結果、實線為 LPM 結果。MX-80 模式之結果顯示，溫度大約 50 小時後幾乎達到平衡，而孔隙水壓以及位移則於大約 200 天之後才漸漸達到平衡；然而，花崗岩模式的結果則顯示其溫度、孔隙水壓以及位移皆在約 300 年之後才漸漸達到平衡狀態。此一現象顯示出模型尺度大小差異所引致的耦合行為差異，MX-80 模式的溫度平衡速度遠

快於孔隙水壓以及位移，因此 MX-80 模式在溫度平衡後之行為較接近水–力耦合系統；花崗岩模式則因為較大的模式尺度，其溫度、孔隙水壓以及位移的平衡速率較一致，所以其物理行為會較接近完整之熱–水–力耦合系統。兩者空間尺度的差異也造成位移、孔隙水壓變化量在空間分布上的差異，MX-80 模式當中傾向於對稱式的分布，而花崗岩模式則無。另外，花崗岩模式也因為較大的空間尺度而在材料左側產生先膨脹後壓縮的現象，在空間尺度較小的 MX-80 模式則無如花崗岩模式中如此明顯的變化。

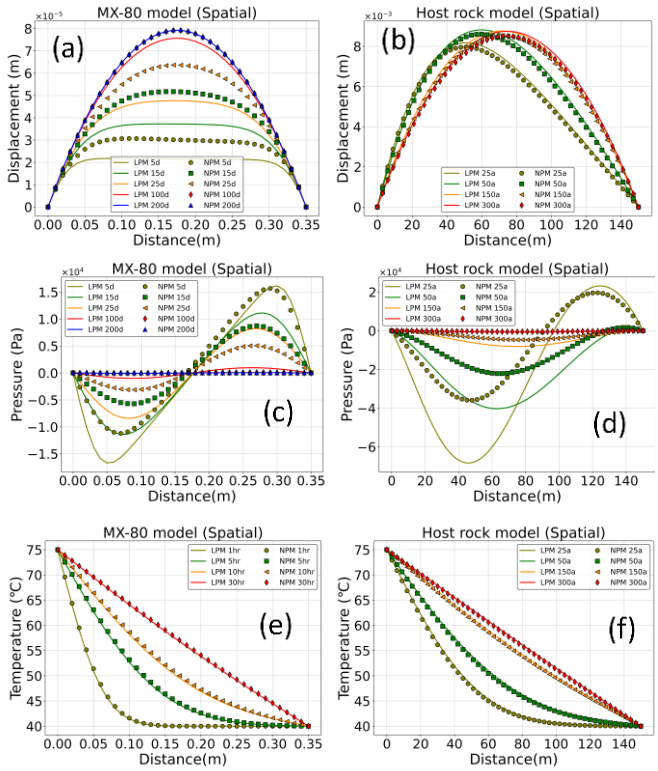


圖 1 定率模式空間域在(a)MX-80 位移(b)花崗岩位移(c)MX-80 孔隙水壓變化量(d)花崗岩孔隙水壓變化量(e)MX-80 溫度(f)花崗岩溫度之結果。符號為非線性模式解、曲線為線性模式解。

比較 MX-80 的 LPM 和 NPM，可以得知溫度、孔隙水壓以及位移在 NPM 中皆有較快的平衡速率，並且在某些時段其物理量不再對稱分布，但最後達到穩定狀態的時候，LPM 與 NPM 之間幾乎沒有差異。上升的水力傳導係數是導致平衡速率加速的主要原因，另外，非均勻分布的數值則導致模式兩側的排水速度不一，所以造成不對稱之結果。MX-80 模式的溫度的傳遞速度因為熱傳導參數的改變而略微上升。

比較花崗岩模式的 LPM 和 NPM，溫度以及位移皆有著較慢的平衡速率，甚至 NPM 的位移和溫度在穩態時期結果仍然相較於 LPM 低，然而孔隙水壓則與 MX-80 一樣有著較快的平衡速率。溫度較慢的平衡速率是因為熱傳導係數的下降以及比熱的上升，而熱傳導參數之改變與 MX-80 模式不同是基於本研究之假設，兩者的孔隙率大小差異導致 MX-80 的熱傳導參數之改變主要由流體參數貢獻，花崗岩模式則主要由介質本身貢獻。另外，因為足夠的空間尺度加上非均勻的熱傳導參數分布，造成花崗岩模式的溫度最終空間中並非線性分佈。位移較小的結果主要是由非線性的楊氏模數所造成，較小楊氏模數理論上應該導致位移結果上升；但是因為楊氏模數分布在左側高溫處較低、右側低溫處較高，導致膨脹地區(熱應力較高)的楊氏模數低於受壓地區(熱應力較低)，位移難以發展，所以位移結果反而更小了。孔隙水壓結果則與 MX-80 模式一致，因為水力傳導係數的增加，整體的平衡速率加快。

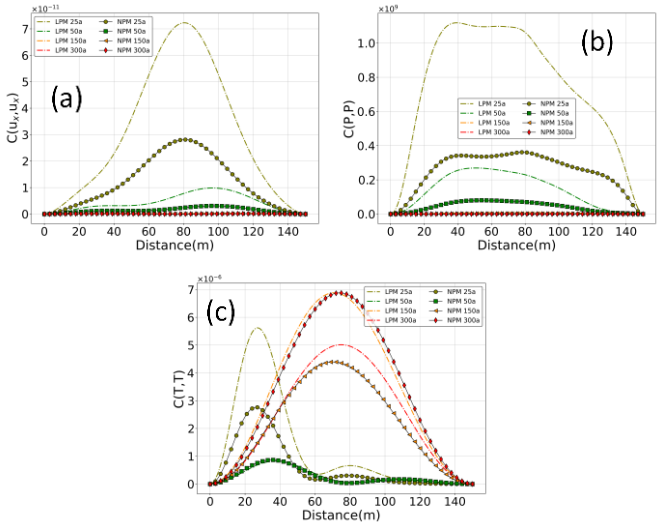


圖 2 花崗岩序率模式 (a)位移變異數(b)孔隙水壓變化量變異數(c)溫度變異數之空間域解。

2. 序率模式成果

本研究分別產製水力傳導係數隨機場，進行 MX-80 模式以及花崗岩模式的不確定性分析以及物理機制探討。MX-80 模式與花崗岩模式的物理機制探討在概念上相差不遠，然而 MX-80 模式因為其較小的尺度，產生的物理現象較不明顯，因此本節以差異較明顯之花崗岩模式為主進行探討。本研究目前僅使用第一類邊界條件進行運算，因此花崗岩模式位移、孔隙水壓變化量以及溫度之變異數在邊界地區之數值皆為 0。

圖 2 為花崗岩模式之位移、孔隙水壓變化量以及溫度之不確定性結果(分別為 C(u,u), C(P,P), C(T,T))，虛線之結果為 LPM，而帶符號之黑線為 NPM 之結果。無論 LPM 或 NPM，位移以及孔隙水壓變化量之不確定性皆隨著時間的推移而減少，並且大部分時間的結果也顯示 LPM 比起 NPM 有較大之不確定性。雖然各實現場由對流產生擾動的溫度差異並不明顯，但仍然可以從其不確定性結果去探討其中之物理現象。例如 NPM 溫度之不確定性，其數值從 150 年到 300 年時增加，此一結果與 LPM 之現象相反，主因是熱傳導參數的改變，導致溫度最終平衡的結果在空間中的分布為曲線(中間地區溫度較低)，加上孔隙水壓變化量在後期也是中間低兩側高，因此兩側流入之對流會導致溫度之不確定性反而升高。另外，孔隙水壓不確定性在 25 以及 50 年也顯示著擾動而非平滑的分布，主因則是異質水力傳導係數所導致。

圖 3(a)為對數水力傳導係數以及孔隙水壓變化量之共變異數結果(C(y,P))，其結果大致上與預期相符，例如圖中 C(y,P)第 25 年在 0~60 m 為正而 100~150 m 為

負，原因為平均孔隙水壓變化量在 25 年 0~60 m 為負變化，周圍之孔隙流體將會流入該區域，因此越高的水力傳導係數會導致孔隙水壓上升的越快；而 100~150 m 則是相反的狀況，越高的水力傳導係數會導致孔隙流體流失的速度越快而導致孔隙水壓下降。另外，60~100 m 則是在正負變化之間擾動，其主要原因為異質水力傳導係數導致各實現場在第 25 年孔隙水壓正負變化的分布皆不同，各實現場的 0 水壓變化量分布在 60~100 m 的不同地區，所以導致 C(y,P)在 60~100 m 數值來回震盪。另外，C(y,P)的 LPM 和 NPM 結果差距不大，靠近邊界地區因為有較大的變動空間而有較大之差異性，而非線性參數不均勻的參數變化則造成了 C(y,P)的 LPM 和 NPM 在左右地區的增減不一。

圖 3(b)為對數水力傳導係數以及位移之共變異數結果(C(y,u))，結果顯示 C(y,u)在 25 年時 0~40 m 和 120~140 m 皆呈現負值，而 40~120 m 則呈現正值，50 年之後則大致呈現左半側為負值，右半側為正值。負值的 C(y,u)代表當水力傳導係數上升的時候位移傾向減少，反之亦然。首先以 25 年的 C(y,u)結果進行探討，0~40 m 負的 C(y,u)是因為邊界條件的設定所致，當溫度漸漸地傳入到模式中間的區域時，中間區域產生的膨脹導致左側邊界受到壓縮(因為左邊界固定)，而水力傳導係數的上升造成孔隙水壓平衡速率上升，造成中間地區的膨脹加速使左側地區受到壓縮，因此 C(y,u)在 0~40 m 呈現負相關。C(y,u)在 25 年時於 40~120 m 呈現正相關，則是因為該地區在此模式設定之下無論如何皆會膨脹，而水力傳導係數的上升使孔隙水壓平衡速率上升也間接加速了位移的發展速度，因此呈現正相關。C(y,u)於 25 年右側的負相關則與孔隙水壓變化量之分布有關，平均孔隙水壓變化量在大約 120 m 處為最大值，越大的水力傳導係數會導致越快的孔隙水壓消散速率，因此流體的支撐也漸漸消失而導致 120~150 m 產生些微的膨脹(產生抵抗向右位移的力量)。C(y,u)在 50~300 年之間，則呈現左半側負相關右半側正相關的分布，其原因為孔隙水壓變化量大部分地區都呈現負變化，孔隙水壓大多正在上升，隨著越快的孔隙水壓平衡速率也會導致位移的平衡速率加快。模式後期的位移發展趨勢則大致上呈現左半側下降(再壓縮作用)、右半側上升的狀況，所以 C(y,u)會如此呈現。

圖 3(c)為孔隙水壓變化量和位移之共變異數結果(C(u,P))，25 年之結果在正負之間反覆擾動，主要之原因與先前所述的再壓縮作用以及解壓作用一樣。而在 50~300 年之後，C(u,P)則趨近於左半側負相關右半側正相關的分布，與 C(y,u)的表現一致。另外，比較 C(u,P)的 LPM 與 NPM，可以看到除了數值差異之外，其在空間中的分布也略有差異。圖 3(d)為位移與溫度相關係數(Corr(u,T))，結果顯示溫度與位移在後期會呈現接近完全相關。因為此模式為由"溫度"驅動之模式，且排水邊界使孔隙水壓在穩定狀態時回到初始水壓的設定，因此最後溫度會與位移呈現完全相關。

綜合以上共變異數的結果可以得知，熱驅動的模式中，孔隙水壓的變化量以及其在空間中分布的狀態影響著位移的發展方式以及速率，若模式中的孔隙水壓穩定條件與初始條件不同，則會更進一步地影響到位移穩定狀態之結果。

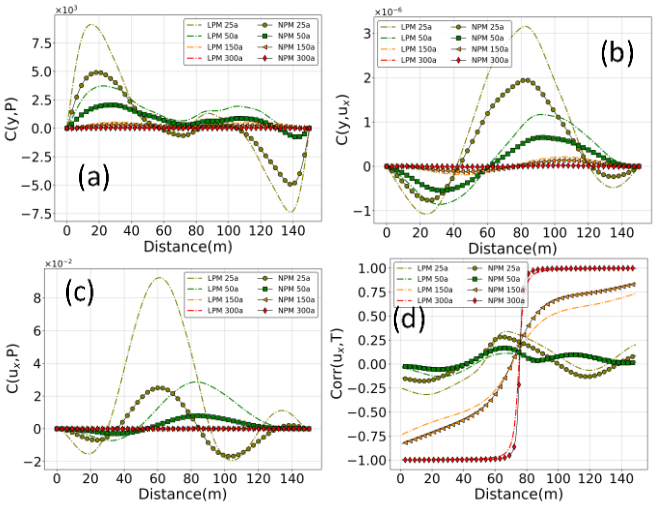


圖 3 花崗岩序率模式空間域解(a)對數水力傳導係數與孔隙水壓變化量之共變異數(b)對數水力傳導係數與位移之共變異數(c)孔隙水壓變化量與位移之共變異數(d)位移與溫度之共變異數

IV. 結論

本研究結合了 COMSOL MULTIPHYSICS 以及 GSLIB 程式碼，發展了以水力傳導係數為隨機場的一維度序率熱－水－力全耦合非線性參數模式，使用 python 程式碼計算平均數、變異數以及共變異數並輸出成果，探討熱－水－力耦合之交互作用行為以及非線性參數對耦合系統的影響。非線性參數模式以及線性參數模式的定率模式比對結果顯示，參數中的水力傳導係數受到外部條件的影響最顯著，熱傳導係數、比熱以及楊氏模數其次。變數的部分，孔隙水壓變化量受到的影響最顯著，位移其次，溫度最小。定率結果也顯示不同尺度大小的模型以及非線性參數的非均勻分布，皆會導致不同的交互作用現象。序率之變異數結果顯示，孔隙水壓變化量有最大的不確定性，位移其次，溫度最小；另外，透過信賴區間的比對得知，孔隙水壓變化量之不確定性受到邊界條件以及初始設定影響，導致部分區位出現一些特殊的統計分布。序率的共變異數結果顯示，各變數交互作用行為會有局部之差異，尤其在邊界區域時常出現與其餘區域相反之共變異數結果。本研究開發的序率熱－水－力耦合非線性參數模式，除了加強熱－水－力耦合之物理現象的基礎認知外，並量化異質參數造成之影響、了解非線性參數可能之影響以及以水力傳導係數為隨機變數可能產生之參數不確定性，另外也建立了一套序率熱水力模擬的架構，以供後續研究工作之進行。

參考文獻

[1] 台灣電力公司. (2017). 用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告 SNFD2017 報告(TPC-SNFD2017-V1). Retrieved from

[2] Buchwald, J., Chaudhry, A., Yoshioka, K., Kolditz, O., Attinger, S., & Nagel, T. (2020). DoE-based history matching for probabilistic uncertainty quantification of

thermo-hydro-mechanical processes around heat sources in clay rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 134*, 104481.
[3] Wang, S.-J., Chen, J.-Y., & Hsu, K.-C. (2021). Investigation of cross-interactions of coupled thermal-hydraulic-mechanical model using stochastic simulations. *Computers and Geotechnics, 133*, 104020.
[4] Wang, X., Shao, H., Hesser, J., & Kolditz, O. (2016). Analysis of the THM behaviour in a clay-based engineered barrier system (EBS): modelling of the HE-E experiment (Mont Terri URL). *Environmental Earth Sciences, 75(20)*, 1350.
[5] Cheng, A.-D. (2016). Investigation of flow and soulte transport at the field scale through heterogeneous deformable porous media. *J Hydrol, 540*, 142-147.
[6] Biot, M. A. (1962). Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. *Journal of Applied Physics, 33(4)*, 1482-1498.
[7] Nield, D. A., & Bejan, A. (2013). Convection in Porous Media.
[8] Mainguy, M., & Longuemare, P. (2002). Coupling fluid flow and rock mechanics: formulations of the partial coupling between reservoir and geomechanical simulators. *Oil & Gas Science and Technology, 57(4)*, 355-367.
[9] Touhidi-Baghini, A. (1998). Absolute permeability of McMurray formation oil sands at low confining stresses.
[10] Chen, Y.-L., Wang, S.-R., Ni, J., Azzam, R., & Fernandez-Steeger, T. M. (2017). An experimental study of the mechanical properties of granite after high temperature exposure based on mineral characteristics. *Engineering geology, 220*, 234-242.
[11] Dwivedi, R., Goel, R., Prasad, V., & Sinha, A. (2008). Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(3)*, 303-315.
[12] Deutsch, C. V. a. J., A.G. (1997). GSLIB Geostatistical Software Library and User' s Guide, Oxford University Press, New York, second edition. 369 pages.

放射性廢棄物最終處置重要核種遷移試驗與數學驗證模式建立之研析(II)
Study on the migration experiments of important radionuclides and the development of mathematical verification models for the final disposal site (II)

計畫編號：110-2623-E-007-004-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

摘要

本計畫旨在設置平流-延散管柱實驗及建立實驗流程，進行重要核種在碎裂岩體中傳輸之研究，所獲得之實驗數據將以建立之數學模式進行參數反推估；目的在於探討臺灣之潛在母岩在進行地質處置後，受地下水入侵導致放射性核種外釋後的傳輸行為，本計畫將以三年時間進行，主要工作為：(1)建立平流-延散管柱實驗設置及測試實驗標準流程；(2)針對本土潛在母岩，首先進行非吸附性核種(例如：氚)平流-延散管柱實驗，並分析其穿透曲線（BTC，breakthrough curves）；(3)利用相同條件進行重要核種的平流-延散管柱實驗，研析本土地質材料對這些核種的吸附效能；(4)利用實驗數據，以數學模型推導重要傳輸參數（延散度、遲滯係數與分配係數等）。研究結果除了可以預測潛在場址是否具有優良的地質條件外，也可做為未來處置場施工之依據。

關鍵詞：平流-延散、管柱實驗、數學模式、延散度、遲滯係數、分配係數

Abstract

The aim of this project is to set up a advection-dispersion column experiment and establish an experimental procedure to carry out the study of the migration of important radionuclides in the fractured rock mass. The experimental data obtained will be used to estimate critical transport parameters through mathematical models. The purpose is to increase understanding of radionuclides transport when groundwater intrudes a geological disposal site. This study will be carried out in three years and the main work is as:(1). Set up an advection-dispersion column experiment and establish a standard experimental procedure. (2). For the local potential rock, non-reactive radionuclides (such as tritium) will be used as a tracer in the column experiments and the breakthrough curve of the tracer concentration will be analyzed. (3). Under the identical conditions of 2, some important radionuclides will be used as a tracer in the column experiments. Sorption capability of those radionuclide on local potential rocks will be analyzed. (4) The experimental data will be used to derived the important transport parameters, such as dispersivity, retardation factor and distribution coefficients etc, through using mathematical models. In addition to predicting whether the potential site has excellent geological conditions, the research results can also be used as the basis for future disposal site construction.

Keywords: advection-dispersion, column experiment, mathematical model, dispersivity, retardation factor, distribution coefficient

I. 前言

The safety assessment (SA) of the final disposal of high-level radioactive waste(HLW) in geology requires researches on migration of important radionuclides in the surrounding environment. The most possible scenario of released radionuclides is the groundwater intrusion into HLW repository due to the failure of engineering barriers. Granite as one kind of crystalline rocks have been regarded as a potential host rock in the area of high-level radioactive waste geological disposal in a number of countries[1 – 3]. Generally, several important parameters for migration of radionuclides are applied in the transport of geological media for SA, such as the hydrodynamic dispersion coefficients, diffusion coefficients, and the retardation factor (R) and distribution coefficients and (Kd).

It is relatively easy to understand that the diffusion for radionuclides of studies in the relatively homogeneous pore such as compacted bentonites and argillaceous rocks [4 – 7]. However, it is difficult and critical to prevent radionuclides (RNs) to transfer with groundwater for the evaluation of the natural barriers (or granite) of HLW repository because heterogenous mineral composition and fractures distribution in granitic formations. The knowledge of certain transport parameters plays a important role in granites, and the most important amongst them are the retardation and dispersion coefficients [8,9]. Granite rock matrices are basically consisted of quartz, micas and feldspars with typical particle sizes of the range from mm to cm.

Selenium-79 owned a long half-time ($t1/2 = 3.27 \times 10^5$a) and high radioactivity, as one of the primary concern of activation and fission products, dominates the main potential risks from spent fuel waste disposal repositories [10]. Effectively, different speciation of Selenium which presents in various valence states (selenite (IV), selenate (VI), selenide (-II) and element selenium) ,depends on pH, redox conditions in aqueous solution. The fact that the mobility of selenite (Se(IV)) and selenate (Se(VI)) in the groundwater have a much better than others. Hence, when it comes to safety assessment for evaluating the behavivour of radionuclides release to the environment, the more relatively fast transport rate of selenite (Se(IV)) and selenate (Se(VI)) from disposal repositories to geological environment will be regarded as the primary concert.

The transport of radionuclides in the crack of

crystalline rocks can be described by a dual-porosity model[11]. Radionuclides (RNs) not only can transport into the pore network of the fractures or rock matrix, but also sorb onto the rock particles whereas delaying their transport through the geosphere. Advection and dispersion behavior of radionuclides in the granite' s fractures are of importance processes to keep the safety of geological disposal. It has also been investigated that many experimental conditions, such as ionic strength, pH, and flow rate can influence retention and chemical transport [12-14]. In order to develop a reliable model and obtain various parameters for long-term safety assessments, it is necessary to know and quantify such advection and dispersion processes fractures or rock matrix. The free pore spaces between these grantic grains and intragranular secondary pores form water-filled, heterogeneous networks with varying geometric factors such as constricitivity and tortuosity[15,16] .

The dynamic column technique have been widely adopted to simulate different contaminated substances transport behavior under natural groundwater condition. Moreover, it has been developed different models with the experimental breakthrough curves (BTCs) for various radionuclides by the distribution coefficients and (Kd), different retardation factor (R) and the dispersity (α) in past years [17 – 19]. It has shown the influence of grain size on sorption of HTO, a non-reactive radiotracer, to be negligible in experimental breakthrough curves (BTC) of HTO obtained from column tests [18]. Many experimental studies have reported that model parameters determined with the popular batch test might deviate substantially from those obtained using the column test [20,21]. Furthermore, a two-region model was developed and proposed to simulate the retarded transport of organic contaminants in porous media containing aggregates of clay minerals and organic matter as sorbents, which was incorporated with nonlinear sorption and intra-aggregate diffusion[14]. However, the two-region (mobile/immobile) transport models were not completely simulated to provide numerical BTCs matching the Cs experimental BTCs due to the extra diffusion/dispersion effect or an unnecessary column connection space volume[22].

In this work, HTO, a non-reactive radiotracer, is applied prior to Se(IV) and Se(VI), and breakthrough curves (BTCs) of HTO for different flow rates were investigated in order to obtain the dispersion coefficients (D) , retardation factor (R), and dispersity (α) with crushed granite for compacted column. Moreover, the advection and dispersion behavior of Se(IV) and Se(VI) in crushed granite have been investigated and developed to determine different reactive transport models. Finally, the retardation mechanisms of Se(IV) and Se(VI) on granite rock could be generally demonstrated with the comparative analysis between reactive transport models and transport parameters, and its results would provide the important techniques and experimental data for SA of HLW waste disposal in near future.

II. 主要內容

2.1 Theory of advection and dsispersion

The majority of studies focusing on solute transport in saturated porous media can be simplified to the one-dimensional advection-dispersion equation and be expressed as: [23]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Where C is the solution concentration (M), t is the time , v is the average pore-water velocity (Lt-1), and x is the distance. D is the dispersion coefficient (L2t-1) that can be further written as:

$$D = D^* + \alpha v \quad (2)$$

With D*(L^2t^{-1}) being the diffusion coefficient in free water and α (L) is the dispersity. If adsorption and desorption equilibrium is instant or the reaction time is long enough, solute adsorption by the solid phase is described with a linear isotherm as:

$$S = K_d C \quad (3)$$

Where K_d is an distribution coefficient (cm3g-1or mLg-1), C is the remaining concentration of solute in the liquid phase. In this study, radionuclide takes only account of instant adsorption in the surface of crushed granite in the pores, and the Eq. (2) can be written as:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho b}{\theta}\frac{\partial S}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

ρ_b is bulk density of compacted crushed granite, and θ is the porosity or volumetric soil-water content. It could be combined by a retardation factor given by $R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}$, and Eq (4) is re-written as :

$$R\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} \quad (5)$$

Both initial and boundary conditions can be expressed as:

$$C(x,0) = 0, 0 < x < L$$
$$C(0,t) = C_0$$
$$\frac{\partial C(\infty,t)}{\partial t} = 0$$

Where C_0 is the inlet solute concentration, L is the overall length of the column. General solution for equilibrium model. In attempt to solve the equation, the dimensionless approach is introduced and applied from previous works. [24-26] General initial and boundary conditions is changed:

$$C1(0,T) = 1$$
$$\frac{\partial c_1}{\partial z}(\infty,t)$$

With $C1$,($C1 = \frac{C-C_i}{C_0-C_i}$), and T,(T=vt/L), is the pore volume. also z,(z=x/L)are all the dimensionless. Moreover, the general solution for dimensionless concentration profile Ce is given by M. van Genuchten (1981) [24]:

$$C_e = \frac{1}{2}erfc\left[\left(\frac{P}{4RT}\right)^{1/2}(R-T)\right] +$$
$$\frac{1}{2}\exp(P)\,erfc[(\left(\frac{P}{4RT}\right)^{1/2}(R+T)] \quad (6)$$

2.2 Experiments

The non-reactive tracer (HTO) was designed and applied in multi-stage advection – dispersion experiments in order to identify the reliabilty of our column device to build inadequate reaction models through a calibration/validation process. Fig.4 displays the experimental results and fitting curves (Fit 1 to Fit 3) by estimating retardation factor (R=1) and dispersivity (α =

0.28) when only effective porosity (a mobile zone) was modeled. As velocity increased from 0.986 to 4.890 cm/min, root mean error square (RMSE) was found as the best among the three fitting curves (Fit 1 to Fit 3), and it identified that our column device are well-controlled and high reliability in ADE experiments. Generally, the shape of experimental breakthrough curves (BTCs) were basically included sorption (up-flooding) and desorption (down-flooding) curves by applying a constant flow rate from 1 to 5mL/min, its (C/C0=0.5) also meet the specific breakthrough point in the around 1 pore volume (P.V). Moreover, the C/C0 value in all BTCs of HTO is the desorption period finally was zero, and all curves were symmetric due to no any retention in crushed granite for HTO. It demonstrated that the filled and compacted granite in glass column were almost homogenous and no wall effect in our device by applying non-reactive tracer (HTO)

Fig 5 lists experimental results and four sets of parameters used to fit Se(VI) and Se(IV) BTCs. As we know, retardation effect may be caused only by geochemical reactions (sorption/desorption). Se(VI) is non-sorptive and its breakthrough data in **Fig 5 (a) (b)** demonstrated a silimar and no tailing phenomenon with HTO retardation factor (R=1). However, **Fig 5 (a) (c)** showed there was a obvious difference in the desorption curves of Se(IV) and Se(VI) due to its tailing curve with a higher retardation factor (R >1). That indicated that the kinetic sorption/desorption reaction of Se (IV) on the granite could be suitable fitting and explained by different reaction tranport models, such as Fit 3 and 4. In this study, both one and two sites non-equlibrium transport model was also proposed based on the analysis of Se(IV) BTCs, and two-site models was better than others investigated appropriately for the reactive transport of Se(IV) according to lowest RMSE. The presence of significant differences for the retardation effect of Se(IV) on granite was dominated by sorption mechanism related to irn-content minerals. Granite is one kind of igneous rocks, and its component mainly consists of quartz, feldspar, and iron-content minerals (i.e., biotite), where the biotite had a weak sorption behavior for Se(IV) in previous studies [27,28]. According to BTCs of Se(VI) and Se(IV) in this study, it also could be identified that both Se spciation (Se(VI) and Se(IV)) showed a obvious diversely chemical or reaction behavior in various oxidation-reducing condition.

III. 結果與討論

The ADE column experiments were carried out to investigate the HTO and Se migration behavior on crushed granite sample by applying various flow rates, respectively. Subsequently, the experimental breakthrough curves (BTCs) of non-reactive (HTO) and reactive Se(VI) and Se(IV) were derived from the experimental data in the present study. On the basis of that, the numerical models for two sites fitting were suitable among different models and several key parameters used in this study by fitting the acquired results. There are three main conclusions as follow:

1). The BTCs for HTO were symmetrical in various flow rates(1 to 5 ml/min), and there was no significant differences in both the accessible porosity and dispersity values of HTO. Therefore, based on upon these summaries, it was obviously suggested that not only the experimental apparatus were reliable but also the granite samples filled and compacked in the column were almost homogeneous.

2.) The desorption of experimental breakthrough curve for Se(IV) has obviously a tailing effect due to sorption on granite and the results in the present study suggest that the retardation of Se(IV) on crushed granite could be observed. There were several sets of models, equilibrium, one-site non-equilibrium, two-sites non-equilibrium were performed to fit those experimental data to obtain transport parameters, and the root mean square error (RMSE) acquired from the two-sites fitting was minimum than others.

3.) Due to the experimental breakthrough curve of Se(VI) was symmetrical just like the curve of HTO, this possibly indicated that the sorption of Se(VI) on crushed granite was not adsorptive at all. In fact, there is a sorption effect of Se(IV) was observed and it showed a higher retardation factor (R>1) than HTO and Se(VI) due to iron-content minerals (i.e., biotite). According to BTCs of Se(VI) and Se(IV) in this study, it also could be identified that both Se speciation (Se(VI) and Se(IV)) showed a obvious diversely chemical or reaction behavior in various oxidation-reducing condition.

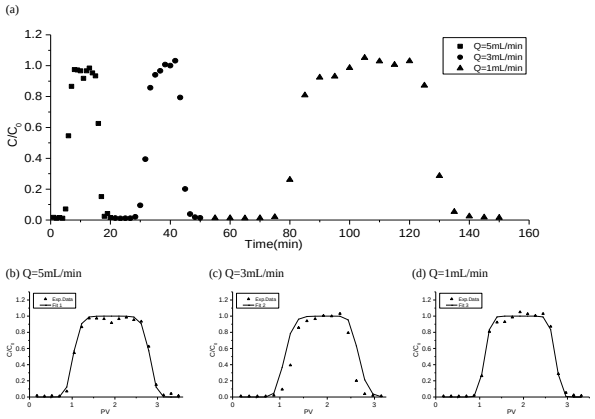


Fig.1 The experimental breakthroughs of HTO and fitting curves

Table 1. The multi-stage ADE experimental up-flooding/down-flooding process in this study

Batch.	1			2	
RN	HTO			Se(VI)	Se(IV)
Item	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Flow rate (mL/min)	5	3	1	3.4	3.4
up-flooding (sorption) time (min)	10	15	50	16.5	30
down-flooding (desorption) time (min)	15	15	50	16.5	30
Initial HTO Activity A_0(dpm/mL) / Se Conc. Co (ppm)	HTO : 50 Bq/mL (V_0≒ 5000mL)			Se(IV) : 9.68×10^{-5}M Se(VI) : 5.42×10^{-4}M	

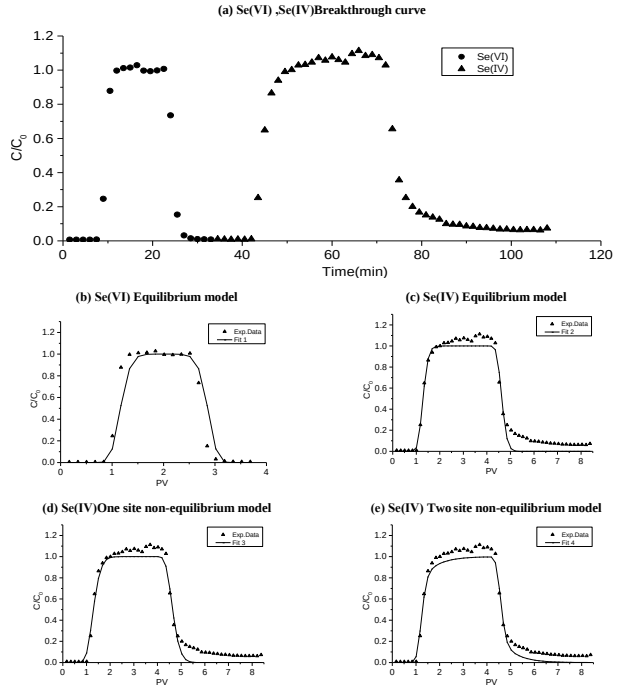


Fig.2. The experimental breakthroughs and fitting curves of Se(VI) and Se(IV)

参考文献

[1] Hansen FD, Hardin EL, Orrell A (2011) Geologic disposal options in the USA. International High-Level Radioactive Waste Conference. American Nuclear Society Albuquerque NM pp:934–940

[2] NEA (2012) NEA Sorption Project. Phase III: Thermodynamic sorption modelling in support of radioactive waste disposal safety cases. OECD-NEA, Paris

[3] SKB, 2004. RETROCK Project. Treatment of geosphere retention phenomena in safety assessments. Scientific basis of retention processes and their implementation in safety assessment model (WP2). SKB Technical Report R-04-48. SKB, Stockholm, Sweden

[4] Muurinen A (1994) Diffusion of anions and cations in compacted sodium bentonite. VTT Publications 168, Espoo, Finland

[5] Tachi Y, Yotsuji K, Suyama T, Ochs M (2014) Integrated sorption and diffusion model for bentonite. J Nucl Sci Technol 29: 454–460

[6] Altmann S, Tournassat C, Goutelard F, Parneix J-C, Gimmi T, Maes N (2012) Diffusion-driven transport in clayrock formations. Appl Geochem 27(2): 463–478

[7] Robinet JC, Sardini P, Coelho D, Parneix JC, Prêt D, Sammartino S, Boller E, Altmann S (2012) Effects of mineral distribution at mesoscopic scale on solute diffusion in a clay-rich rock: Example of the Callovo-Oxfordianmudstone (Bure France). Water Resour Res 48 (7) W05554. http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011352

[8] IAEA (1985) Deep underground disposal of radioactive wastes: near-field effects. Technical Report Series No 251.Vienna

[9] Alexander WR, Smith PA, McKinley IG (2003) Modelling radionuclide transport in the geological environment. In: Scott EM (ed) Modelling radioactivity in the environment. Elsevier Amsterdam pp 109–145

[10] Jörg G, Bühnemann R, Hollas S, Kivel N, Kossert K, Winckel SV, Gostomski CLV (2010) Preparation of radiochemically pure Se-79 and highly precise determination of its half-life. Appl Radiat Isot 68(12): 2339–2351

[11] Neretnieks I (1980) Diffusion in the rock matrix: an important factor in radionuclide retardation. J Geophys Res 85(B8): 4379–4397

[12] Compère F, Porel G, Delay F (2001) Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity. J of Contaminant Hydrology 49(1-2): 1-21

[13] Guha H, Saiers JE, Brooks S, Jardine P, Jayachandran K (2001) Chromium transport, oxidation, and adsorption in manganese-coated sand. J of Contaminant Hydrology 49(3-4):311-334

[14] Fesch C, Simon W, Haderlein SB, Reichert P, Schwarzenbach RP (1998) Nonlinear sorption and nonequilibrium solute transport in aggregated porous media: Experiments, process identification and modeling. J of Contaminant Hydrology 31(3-4):373-407

[15] EUR (2005) Treatment of radionuclide transport in geosphere within safety assessments (Retrock). Final report June (2005) Contract No. FIKW-CT-2001-20201 EUR 21230 EN

[16] Sardini P, Siitari-Kauppi M, Beaufort D, Hellmuth KH (2006) On the connected porosity of mineral aggregates in crystalline rocks. Am Mineral 91(7): 1069–1080

[17] Pala´gyi, S˘tamberg K (2014) Transport parameters of I^- and IO_3^-determined in crushed rock column and groundwater system under dynamic flow conditions. J Radioanal Nucl Chem 302:647–653

[18] Stamberg K, Pala´gyi S˘, Videnska´ K, Havlova´ V (2014) Interaction of $3H^+$ (as HTO) and $36Cl^-$ (as Na36Cl) with crushed granite and corresponding fracture infill material investigated in column experiments. J Radioanal Nucl Chem 299:1625–1633

[19] Pala´gyi K, S˘tamberg D, Vopa´lka (2015) A simplified approach to evaluation of column experiments as a tool for determination of radionuclide transport parameters in rock-groundwater or soil-groundwater systems. J Radioanal Nucl Chem 304:945-954

[20] Plassard F, Winiarski T, Petit-Ramel M (2000) Retention and distribution of three heavy metals in a carbonated soil: comparison between batch and unsaturated column studies. J Contam Hydrol 42(2-4):99–111

[21] Maraqa MA, Wallace RB, Voice TC (1997) Effects of degree of water saturation on dispersivity and immobile water in sandy soil columns. J Contam Hydrol 25(3-4):199–218

[22] Lee CP, Wu MC, Tsai SC, Liu CY, Tsai TL, Pan CH, Yang MS (2015) Numerical analysis of transport and retardation for cesium in crushed granite using multi-stage advection-dispersion column experiments. J Radioanal Nucl Chem 304:377-386

[23] Hemond HF, Fechner EJ (1994) Chemical fate and transport in the environment. Academic Press. New York
[24] Martinus Th, Van Genuchten (1981) Technical Report Non-Equilibrium Transport Parameters from Miscible Displacement Experiments
[25] Toride N, Leij FJ, Genuchten MTh Van,Technical Report No.137 1995 The CDXTFIT Code for estimating Transport parameters from Laboratory on field tracer experiments Version 2.0
[26] Toride N, Leij FJ, Genuchten M Th Van,Technical Report No.137 1999 The CDXTFIT Code for estimating Transport parameters from Laboratory on field tracer experiments Version 2.1
[27] Tsai TL, Lee CP , Lin TY, Wei HJ, Men LC (2010) Evaluation of sorption and diffusion behavior of selenium in crushed granite by through-diffusion column tests. J Radioanal Nucl Chem 285:733-739
[28] Jan YL, Tsai SC, Li YY (2014) Determination of sorption and diffusion parameters of Se(IV) on crushed granite. J Radioanal Nucl Chem 301:365-371

國際後端多邊化倡議逐步路徑演繹下之最終處置地下實驗室多邊服務情境
Multilateral Cooperative Services Scenarios of the Repository Underground Research Laboratory in the Evolution of the Step-by-Step Approach for the International Back-End Multilateral Initiatives

計畫編號：110-2623-E-218-001-NU
計畫主持人：曾雅真 教授
e-mail：paristwo@stust.edu.tw
執行單位：南臺科技大學國際企業系

摘要

本計畫運用文獻分析、情境規劃分析法(scenarios analysis)暨專家諮詢與訪談，前瞻分析國際後端多邊化倡議逐步路徑演繹，評估最終處置地下實驗室(URL)多邊服務機制的九種可能態樣與挑戰。

核燃料循環多邊化倡議經多年的實踐討論，已從尋覓多國最終處置設施地主國(host state)的歷程路徑(staged approach)，轉向逐步路徑(step-by-step approach)的演繹發展。歷程路徑質疑，多邊倡議可能排斥各國興建本土最終處置庫的機會，且其他夥伴國不無有將其後端管理責任，強加於多邊設施地主國之虞。如果能夠迴避往昔專注於選定最終處置多邊設施地主國的陷阱，另外採行漸進拓展區域合作網絡的穩健方式，並在透明化(transparency)與信心促進(confidence)下，採行逐步路徑，先期組建 URL 多邊服務機制，則得以化解各方疑慮，強化人員、技術、知識暨設施分享，終將利於營造組建區域最終處置設施多邊化機制的友善氛圍。

最終處置地下實驗室，主要分為泛用型地下實驗室(Generic URLs)與場址特定型地下實驗室(Site-Specific URLs)。泛用型 URL，旨在提供地質實驗環境，研究最終處置庫的可選定岩層，但不會成為最終處置庫的場址。相對地，場址特定型 URL，則位於最終處置庫或是現存最終處置庫的選定場址附近。

目前國際社會僅有八座泛用型 URL 與三座場址特定型 URL，乃是安全管理 SFRW 暨興建 SFRW 最終處置庫的稀有資源。對於目前尚沒有 URL 的國家，例如台灣及美國，或有幾種可能的路徑選項：(1)在本國適當地點，興建泛用型 URL，待本土最終處置庫場址選定後，再建造場址特定型 URL，或者(2)進行雙邊國際合作，使用其他國家的 URL 進行實驗(Wang, 2014: 102)，或者(3)加入未來的 URL 多邊服務機制，以強化 SFRW 最終處置計畫的安全論證。

在台灣本島興建泛用型 URL 進度停滯，並且難於短期內改善的現實環境下，建議可以在考量成本、專業人員培育暨增進社會接納等因素後，就參與現有國際社會的 URL 國際合作研究，進行前瞻性規畫，並參酌 2021 年美國核廢物技術審查委員會的建議，以為借鏡。

關鍵詞：多邊化，歷程路徑，逐步路徑，最終處置，泛用型地下實驗室，場址特定型地下實驗室，情境分析。

Abstract

This research project uses respectively literature analysis, scenario analysis, expert consultation and interviews for analyzing the step-by-step approach of the international back-end multilateralization initiatives as well as evaluating the nine possible scenarios of the final disposal's underground research laboratory (URL) multilateral service mechanism and its challenges.

After years of practical discussions, the nuclear fuel cycle multilateralization initiative has shifted from the staged approach of finding the host state of a multi-national final disposal facility to the deductive development of a step-by-step approach. The staged approach doubted that multilateral initiatives may exclude the opportunity for states to build local final repositories, and other partner states mighty shift their back-end management responsibilities on the multilateral facility's host state. Had we evaded the trap of searching and selecting the host state for the multilateral final disposal facilities, and we instead adopt a step-by-step path under the support of transparency and confidence by establishing the URL multilateral service mechanism, which might resolve concerning parties' doubts, enhance the personnel, technology, knowledge and facilities sharing, and will ultimately help to create a friendly atmosphere for the establishment of a multilateral mechanism for the final disposal of facilities in the region.

The underground research laboratory for the final disposal is mainly divided into generic URL and site-specific URL. Generic URLs intend to provide a geological experiment environment to study the rock formations for the final repository, but it is not the site for the final repository. In contrast, site-specific URLs are located near the final repository or the selected site for the existing final repository.

Currently, there are only eight generic URLs and three site-specific URLs in the international community. Therefore, URLs are rare resources for the safe management of the spent fuel and radioactive waste (SFRW) and the construction of the final SFRW repository. For states that do not currently have a URL, such as Taiwan and the United States, there may be several possible path options. (1) Building a generic URL at state's appropriate location, and then building a site-specific URL after the domestic final repository site is selected, or (2) For bilateral cooperation, using other state's URL for experiments, or (3) Joining the future URL multilateral service mechanism to strengthen the safety demonstration for the SFRW final disposal plan.

Under the realistic environment that constructing general-purpose URLs on Taiwan is stagnant and it is difficult to improve it in the short term, this research project suggested that taking into account of the 2021 U.S. Nuclear Waste Technology Review Board's recommendations for reference, it is proper to undertake foresight plan on Taiwan's participation in the existing international URL international research cooperation after calculating factors such as cost, professional training and promotion of social acceptance.

Keywords: multilateralization, staged approach, step-by-step approach, final disposal, underground research laboratory, Generic URLs, Site-Specific URLs, scenario analyses

I. 前言

核燃料循環多邊化倡議(nuclear fuel cycle multilateralization)經多年的實踐討論(IAEA, 2005; IAEA, 2016)，已從尋覓多國最終處置設施地主國(host state)的歷程路徑(staged approach)，轉向逐步路徑(step-by-step approach)的演繹發展。這些國際後端多邊化倡議的逐步路徑演繹，已為最終處置地下實驗室(Underground Research Laboratory, URL)，開創多邊服務的契機。

II. 主要內容

一、 國際後端多邊化倡議的逐步路徑(Step-by-Step Approach)演繹

徵選國際/區域最終處置多邊設施地主國的歷程路徑，是各方籌組國際/區域最終處置多邊設施的早期策略(IAEA, 2016: 15-20)。不過，用過核燃料暨放射性廢物(spend fuel and radioactive waste, SFRW)最終處置多邊設施的歷程路徑，面臨諸多挑戰。首先，疑慮以為，多邊倡議可能排斥各國興建本土最終處置庫的機會。其次，其他夥伴國不無有將其後端管理責任，強加於最終處置多邊設施地主國之虞(Newman, Constantin, and Isaacs, 2019: 5)。紐曼(Andrew Newman)等人認為，如果能迴避往昔專注於選定最終處置多邊設施地主國的陷阱(pitfall)(Newman, Constantin, and Isaacs, 2019: 1)，另外採行漸進拓展區域合作網絡的穩健方式，並在透明化(transparency)與信心促進(confidence)下，先期組建 URL 多邊服務機制，進而化解各方疑慮，強化人員、技術、知識暨設施分享，終將利於營造組建區域最終處置設施多邊化機制的友善氛圍。

表一 國際後端多邊化倡議發展概況

倡議名稱	倡議內容	路徑策略	進展成果
IAEA/INPRO	探索建立後端管理機制	歷程路徑	舉行年度技術會議撰擬報告初稿，但自 2019 年後無後續活動。
IFNEC/CFS	透過雙軌制建立國際後端處置設施	歷程路徑	持續定期集會發佈研究構想。
ERDO-WG	建立歐洲共享處置設施	由歷程路徑轉至逐步路徑	定期集會觀念溝通，自 2018 年後轉向探索逐步路徑可能性。
NTI/DSFS	建立亞太區域最終處置設施	由歷程路徑轉至逐步路徑	定期集會觀念溝通，自 2018 年後轉向探索逐步路徑可能性。
南澳政府	在南澳地方設立多國使用中期貯存暨最終處置設施。	歷程路徑	已被否決。

參考資料：計畫主持人研究整理。

二、 最終處置地下實驗室的定義與種類

最終處置地下實驗室，在選址、建造暨運轉 SFRW 最終處置庫(repository)的決策過程中，扮演著關鍵性的角色(OECD/NEA, 2013: 3)。URL 可以驗證 SFRW 最終處置庫之選址、設計、施工、運轉與封閉的工程數據模型，更是核安全監管單位，建立安全評估(safety assessment)基準(OECD/NEA, 2013: 41)，審查最終處置庫是否符合 IAEA 安全論證(safety case)暨內國核安全標準，建立監管信心的基礎(OECD/NEA, 2013: 36)。瑞典與芬蘭的公眾溝通實踐更顯示，URL 具備強化公眾信心的效能(IAEA, 2001: 30; Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 14)。

最終處置 URL，主要分為泛用型地下實驗室(Generic URLs)與場址特定型地下實驗室(Site-Specific URLs)(IAEA, 2001; OECD/NEA, 2013; Nuclear Waste Technical Review Board, 2020)。中國自 2021 年起建的北山 URL，自行定位為第三類的特定場區地下實驗室(area-specific URL)(Wang, 2014; 王駒，2022: 2-3)。美國則將北山 URL，定位為泛用型 URL (Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 10)，似與一般認知的泛用型 URL 概念，有所歧異。

泛用型 URL，旨在提供地質實驗環境，研究最終處置庫的可選定岩層，但不會成為最終處置庫的場址(Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 11)。選擇不適合作為最終處置庫場址的複雜地質條件，設置泛用型 URL，可以提供更多的研究機會，例如觀察斷層活動的影響，開發更廣泛的檢證模型(Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 12)等等。此外，由於泛用型 URL 確定不會作為最終處置庫場址，較易取得地方社區的同意，更易向公眾揭示資訊，強化公眾信心建立(confidence-building)效能(Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 12)。表二為國際社會的泛用型地下實驗室營運概況，其中黃色背景者為正在營運的 URL，可以發現，許多國際泛用型 URL 大部分均已停用，仍在使用中的泛用型 URL 只有八座。

表二 國際社會的泛用型地下實驗室營運概況

名稱	停用時間(年)	場址國(參與的國際組織)	岩體與深度	附註
HADES	1984-今	比利時(IAEA, OECD, EURATOM)	軟黏土(Boom Clay)；230 公尺	特別建造。
Whiteshell	1984-2003	加拿大(IAEA, OECD)	花崗岩(Granite)；240-420 公尺	特別建造；軸封(shaft sealed)。已停用。
北山坑探設施(Beishan exploration tunnel)	2015-2016	中國(IAEA)	花崗岩；約 50 公尺	特別建造；檢證北山 URL 的建造工法。已停用。
Bedrichov Tunnel	2003-2015	捷克(IAEA, OECD, EURATOM)	花崗岩；150 公尺	利用已有隧道。已停用。
Bukov	2017-今	捷克(IAEA, OECD, EURATOM)	變質角閃岩(Metamorphic, amphibolite)；550 公尺	利用已有鈾礦坑，開挖新坑道。
Amelie	1986-1992	法國(IAEA, OECD, EURATOM)	層狀鹽岩(Bedded salt)	利用已有隧道。已停用。
Fanay-Augères Mine	1980-1990	法國(IAEA, OECD, EURATOM)	花崗岩	既有鈾礦坑。已停用。
Tournemire Research Tunnel	1990-今	法國(IAEA, OECD, EURATOM)	頁岩(Shale)；250 公尺	既有坑道。
Asse Mine	1965-1997	德國(IAEA, OECD, EURATOM)	鹽岩背斜(Salt anticline)；490-950 公尺	既有礦層 490- 800 公尺，洞穴(carvern)在 950 公尺處。已停用。
瑞浪超深地層研究所(Mizunami)	2004-2020	日本(IAEA, OECD)	花崗岩；1000 公尺	特別建造。2020 年停止研究計畫，開始回填作業。
幌延深地層研究中心(Horonobe)	2005-今	日本(IAEA, OECD)	沉積岩(Sedimentary rock)；500 公尺	特別建造。
Korean Underground Research Tunnel	2006-今	南韓(IAEA, OECD)	花崗岩；90 公尺	特別建造。
Stripa Iron Mine	1976-1992	瑞典(IAEA, OECD, EURATOM)	花崗岩；360-410 公尺	既有坑道。已停用。
Äspö Hard Rock Lab.	1995-今	瑞典(IAEA, OECD, EURATOM)	花崗岩；240-460 公尺	特別建造。
Grimsel Test Site	1984-今	瑞士(IAEA, OECD, EURATOM)	花崗岩；450 公尺	平行於既有坑道，特別建造。
Mont Terri	1995-今	瑞士(IAEA, OECD, EURATOM)	乳白黏土(Opalinus Clay)；400 公尺	平行於既有坑道，特別建造。
Climax stock, Nevada	1978-1983	美國(IAEA, OECD)	花崗岩；420 公尺	既有坑道。已停用。
G-tunnel, Nevada	1979-1990	美國(IAEA, OECD)	凝灰岩(Tuff)；300 公尺	既有坑道。已停用。

參考資料：計畫主持人研究整理。(Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 10; Wang, et. al., 2018).

相對地，場址特定型 URL，位於最終處置庫或是現存最終處置庫的選定場址附近，它可以直接調查最終處置庫的地質特性，研究熱力-水力-力學-化學(Thermal-

Hydrological-Mechanical-Chemical, THMC) 耦合效應(coupling)暨實驗工程障壁系統(Engineering Barrier System)。其目的在運用現地之實際條件與數據，發展相關處置技術，提供最終處置設施後續規劃暨建造的重要資訊。表三是國際社會的場址特定型地下實驗室營運概況表，其中綠色背景欄者為正在營運的 URL，只有芬蘭與法國兩座，以及中國大陸自 2021 年動工興建的北山特定場區地下實驗室，預計於 2026 年完工啟用(王駒等，2022)。

表三 國際社會的場址特定型地下實驗室營運概況

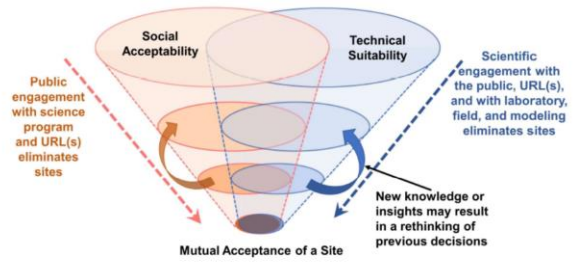
名稱	啓用時間(年)	場址國(參與的國際組織)	岩體與深度	附註
北山特定場區地下實驗室	2026	中國大陸(IAEA)	花崗岩；560 公尺	2021 年動工；預計於 2026 年完工啓用
ONKALO, Olkiluoto	2003-今	芬蘭(IAEA, OECD)	花崗岩；500 m	特別建造。
Meuse/Haute-Marne (Bure)	2000-今	法國(IAEA, OECD, EURATOM)	頁岩/硬化黏土(Shale, indurated clay)；450-500 公尺	特別建造。
Gorleben	1985-1990; 2010	德國(IAEA, OECD, EURATOM)	鹽丘(Salt dome)；大於 900 公尺	特別建造；2010 年已停用。
Morsleben repository	1998–今	德國(IAEA, OECD, EURATOM)	鹽丘(Salt dome)；大於 525 公尺	除役研發。
Nizhnekansky, Krasnoyarsk	約 2025	俄國(IAEA)	變質岩/片麻岩(Metamorphic, gneiss)；450-550 公尺	特別建造。2016 年核發興建執照
Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)	1982-1999	美國(IAEA, OECD)	層狀鹽層(Bedded salt)；655 公尺	已停用。
Busted Butte, Yucca Mountain, Nevada	1998-2001	美國(IAEA, OECD)	非熔結凝灰岩(Non-welded tuff)；70 公尺	特別建造。已停用。
Exploratory Studies Facility, Yucca Mountain, Nevada.	1996-2010	美國(IAEA, OECD)	熔結凝灰岩(Welded tuff)；300 公尺	特別建造。已停用。

參考資料：計畫主持人研究整理。(IAEA, 2017: 121; Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 10; 王駒，2019;王駒等，2022).

三、參與最終處置地下實驗室多邊合作的迫切性

美國核廢物技術審查委員會(Nuclear Waste Technical Review Board, NWTRB)，於 2021 年針對美國興建 SFRW 最終處置庫所遭遇的挑戰，認為有必要建立強大、安全暨有效的核廢物管理能力，為成功的地質處置庫奠定基礎。為此，NWTRB 建議美國能源部應該：(一)確實採用綜合性組織方法，(二)預估所需的基礎設施與人員需求，(三)擴展研究典範檢證假設，(四)採取互動與調應性路徑(iterative and adaptive approach)，開發暨管理核廢物管理計劃，(五)擴大國際社會交往，俾能從經驗教訓中受益，最後(六)採行開放、透明與參與策略(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: vii-x)。

圖一 URL 在選址最終處置庫過程所扮演之角色



資料來源：Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 35.

NWTRB 特別強調，URL 在選址最終處置庫過程中，對科技適用、社會接納暨共同接受過程中所扮演的重要角色(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 35)，請參見圖一。NWTRB 認為，URL 研究成果可以全面地瞭解耦合過程，提高模型預測能力，更可以詳細描述未受干擾的岩石及深度的水文地質、機械、地球化學與微生物環境，以及工程屏障系統組件的特徵(U.S. Nuclear Waste Technical Review Board. 2021: 29)。URL 更容許使用新的感測器技術，採取現場監測方式，取得巨量岩石的物理與化學參數，如果運用高性能電腦處理這些監測實驗數據，將以可以產出更好的理解與建模能力(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 29-30)。

NWTRB 提醒美國能源部，目前幾乎所有的 SFRW 最終處置庫，都遭遇意外以及未預料到的挑戰，為解決這些一般模型所未預期的挑戰，美國能源部有必要在 URL 透過全尺度現場測試，檢證原有的假設(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 30)。就此，NWTRB 更建議美國能源部，建立一個或多個專門的本土 URL，為研究人員暨學生提供必要機會，進行大規模現場調查、模型測試並強化國際合作(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 30)。強化 URL 國際合作，是 NWTRB 建議的重點(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 38)。

目前 URL 多邊合作研究，集中於瑞士暨瑞典之泛用型 URL 所開展的研究計畫。諸如瑞士格里姆瑟爾試驗場(Grimsel Test Site, GTS)執行中的「膠體形成和遷移計畫」(Colloid Formation and Migration Project, CFM)與「全尺寸工程屏障實驗-拆除計畫」(Full-Scale Engineered Barrier Experiment - Dismantling Project, FEBEX-DP)。瑞士蒙特麗岩石實驗室(Mont Terri)的「蒙特麗計畫」(Mont Terri Project)，以及瑞典 Äspö 硬岩地下實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory)「SKB 任務編組」(SKB Task Forces)下的「地下水流動與溶質遷移的建模」(SKB Task Force on Modelling of Groundwater Flow and Transport of Solutes)，以及「工程屏障」(SKB Task Force on Engineered Barriers)等計畫。比較特別的是，始自 1992 年的 DECOVALEX(DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments Project)計畫，它是各國研究團隊，採用各自的模型與數值模擬程序，針對同一主題開展研究，並透過室內及大型現場的試驗結果，驗證數值模擬的可靠性，以便完善並發展各自的模型與模擬方法(Birkholzera, et. al. 2019)。

表四 各國參與國際地下實驗室多邊合作計畫概況

國家	參與組織	合作計畫名稱				
		DECOVALEX	Mont Terri Project	CFM	FEBEX-DP	SKB Task Forces
比利時	SCK/CEN FANC		*			
加拿大	NWMO	*	*			*
	CNSC	*				
中國	中國科學院武漢岩土力學研究所	*				
捷克	SURAO	*			*	*
法國	ANDRA;		*		*	
	IRSN	*	*			
	Total		*			
芬蘭	POSIVA			*	*	*
德國	BGR	*	*		*	*
	GRS		*			
	BMWi/KIT;			*		
	Helmholtz Asso.		*			
英國	RWM	*	*	*	*	*
日本	JAEA	*	*	*		*
	CRIEPI		*	*		
	大林組(Obayashi)		*		*	
南韓	KAERI	*		*	*	*
西班牙	ENRESA		*		*	
	CIEMAT				*	
瑞典	SKB			*	*	*
	SSM	*				
瑞士	NAGRA		*	*	*	*
	ENSI;	*	*			
	Swisstopo		*			
台灣	台電公司	*				
美國	能源部	*	*	*	*	*
	Chevron		*			

資料來源：計畫主持人研究整理 (Birkholzer, 2019: 10)

美國能源部雖已參加 DECOVALEX、Mont Terri Project、Colloid Formation and Migration Project、FEBEX-DP 與 SKB Task Forces 等五項國際 URL 合作計畫(請參

見表四)。不過，NWTRB 仍於 2020 年強烈建議，美國應拓展參與 URL 國際合作的深度與廣度，藉以增益美國研究能量，充實最終處置的安全驗證，強化公眾信心，並培育次世代的最終處置科研人力(Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 49-51)。NWTRB 更建議美國能源部，繼續擴大參與國際 URL 協作活動，未來在建成美國本土 URL 後，更應鼓勵國際參與，以整合更廣泛的觀點與專業知識，進而使美國的 SFRW 最終處置庫進而受益(Nuclear Waste Technical Review Board, 2021: 33)。

參與 URL 多邊合作計畫多著眼於下列考量。(一)分享科學知識，(二)數據測試模型運用，(三)提供測試數據或開發概念暨數值模型，(四)向其他科學家學習，(五)培育下一代研究人員，以及(六)拓展研究規模，亦即將實驗室規模拓展到現場規模(U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 9)。此外，現有 URL 多邊合作計畫的實踐發現，URL 多邊合作計畫，多具有下列特徵：(一)保持最終處置庫設計、興建、運轉與封閉的彈性(flexibility)，(二)應對科學意外與未預期的挑戰(Scientific surprises and unexpected challenges)，(三)強化核安全論證，(四)優化系統操作(System and operations optimization)，(五)展示 URL 執行單位的科技與操作水準(Demonstrating technical and operational competence)，以及(六)強化公眾信心 (Nuclear Waste Technical Review Board, 2020: 13-14)。日本幌延深地層研究中心副所長大澤英昭(Hideaki Osawa)，強調國際多邊 URL 的優點，在於建立區域地質特性資料庫，分析各國國家最終處置庫位址概念，此外，經由地下實驗室的國際化，可以進行大規模研究計畫，進一步分享知識與經驗，提升研究暨同儕審查品質(NTI, 2017: 6)。

四、後端多邊協力倡議的逐步路徑構想

目前國際社會計有三種採取逐步路徑的後端多邊化管理倡議，分別是美國智庫「核威脅倡議組織」(Nuclear Threat Initiative, NTI)，自「用過核燃料發展戰略」(Developing Spent Fuel Strategies, DSFS)轉型而成的「環太平洋用過核燃料管理夥伴」(Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)倡議，「歐洲處置庫開發組織工作小組」(Working Group of European Repository Development Organization, ERDO-WG)的分享邁進(Steps to Sharing)討論，以及 2019 年日本倡議，在 OECD/NEA 架構下所成立的最終處置圓桌論壇(International Roundtable on Final Disposal of High-Level Radioactive Waste)(請參見表五)。

表五 國際後端多邊化逐步路徑倡議態樣

倡議名稱	NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議	ERDO-WG 分享邁進	日本 最終處置圓桌論壇
策略	逐步路徑	逐步路徑	逐步路徑
其他國際連結	另組環太平洋用過核燃料管理夥伴機制。	結合歐盟現有的科研計畫。	OECD/NEA
參與資格	東亞環太平洋國家	歐盟國家	OECD/NEA 會員
議題規畫	地下實驗室、選址、中期貯存暨運輸。	知識分享、前處置分享與鑽孔處置(borehole disposal)分享。	知識分享、工程設計數據與 URL 驗證。
近期活動	召開年度夥伴會議；組建地下實驗室，以及選址等工作小組。	2019 年召開 Steps to Sharing 研討會暨 2019 ERDO-WG 年度參與方會議，執行共享計畫。	召開 2019 與 2020 年度圓桌論壇會議。
預期目標	逐步推動區域用過核燃料最終處置設施。	人員、技術與設施共享。	加強用過核燃料最終處置設施的知識與研究設施分享合作。

參考資料：計畫主持人研究整理。

(一) NTI/環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議

NTI 自 2017 年起，開始嘗試探索逐步路徑的可能性。NTI 於 2017 年 5 在日本東京召開的 DSFS 年度會議，將 URL 的國際化，列為重要討論主題。2018 年於南韓慶州，以環太平洋用過核燃料管理夥伴會議之名，召開年度會議，並決定成立地下實驗室、中期貯存暨運輸，以及選址等三個工作小組(NTI, 2018: 5)。2019 年，在美國新墨西哥州的桑迪亞國家實驗室(Sandia National Laboratories)、南韓水原市與日本北海道稚內市，密集召開三次工作小組會議，主軸在討論三個工作小組的制度創建，以及各工作小組的工作項目(NTI, 2019a, NTI, 2019b, NTI, 2019c)。至 2019 年，已成功匯集來自美、加、日、南韓、中國大陸與台灣的專家學者，組建專家團隊網絡(Newman, Constantin, and Isaacs, 2019: 7)，地下實驗室與選址等工作小組。NTI 期望能透過各國專家學者的持續性參與，贏得各夥伴參與國政府高層的具體承諾(commitment)與財政支持，邁向組建區域/國際最終處置設施的目標(Newman, Constantin, and Isaacs, 2019: 7-8)。 NTI/環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議的參與方，日本與南韓，均正在營運泛用型 URL，中國大陸則已於 2021 年起，興建北山新場特定場區地下實驗室。

(二) ERDO-WG 分享邁進構想

ERDO-WG 成員於 2019 年開始討論分享技術、人力與設施的可能路徑。2019 年 9 月，ERDO 在 IAEA 維也納總部召開「分享邁進」研討會(Steps to Sharing)，討論放射性廢物管理的分享契機，計有來自奧地利、克羅埃西亞(Croatia)、丹麥、意大利、荷蘭、挪威與斯洛維尼亞(Slovenia)等成員，來自捷克、法國、希臘、匈牙利、葡萄牙、羅馬尼亞與斯洛伐克(Slovakia)等 14 國的 26 人，以及 IAEA 職員代表出席(ERDO, 2019a)，成為 ERDO-WG 正式邁向逐步路徑的里程碑。

與會者認為，分享的領域，可包括放射性廢物管理程序的研發，服務與設施，包括人員交流在內的訓練與知識管理，知識、能力與技術的移轉，利益攸關者的參與經驗，以及成本暨籌資機制等(ERDO, 2019b)。會議結論建議，前處置(pre-disposal)分享，深層鑽孔處置(deep borehole disposal)分享，以及財務成本分享(Costs and Financing sharing)，是 ERDO-WG 成員未來分享路徑的主軸(ERDO, 2019b)。

二個月之後的 2019 年 11 月，ERDO-WG 成員在克羅埃西亞的札格雷布(Zagreb, Croatia)舉行會議，決定未來的組織轉向，以及研究計畫分享的重大決定(ERDO, 2019b)。會議決定，未來五年 ERDO-WG 的具體工作包括：

1. 向公眾，媒體與政治人物，推動本土與區域最終處置的「雙軌制」(Dual-track)，並與參加「歐洲放射性廢物管理聯合計畫」(EURAD)之歐盟國家的廢物管理組織(Waste Management Organizations, WMO)保持聯絡；
2. 執行前處置(pre-disposal)、深層鑽孔處置(deep borehole disposal)，以及財務成本(Costs and Financing sharing)等三項 ERDO-WG 共享計畫；
3. 開發通用的 ERDO-WG 庫存清單(inventory)；

4. 開發涉及整備(conditioning)，包裝(packaging)，中期貯存(storing)與最終處置(disposing)的特定 ERDO 廢物流(waste streams)共享解決方案；
5. 制定走向共享最終處置庫的計劃進度表，以滿足歐洲原子能共同體(EURATOM)理事會指令 2011/70/EURATOM 所認可之本土/區域終處置庫雙軌(dual-track)制的具體要求(ERDO, 2019b)。

目前 ERDO-WG 參與國，並未興建或是營運 URL。

(三) 日本倡議的 OECD/NEA 最終處置圓桌論壇

日本於 2019 年藉承辦 G-20 年度部長級會議暨元首高峰會議的機會，[1]於 2019 年 6 月 19 日發佈的「能源轉型與全球環境以促進永續增長之 G20 部長級會議公報」，以及「能源轉型與全球環境以促進永續增長之輕井澤創新行動計劃」(Karuizawa Innovation Action Plan on Energy Transitions and Global Environment for Sustainable Growth)，主張由經濟合作暨發展組織之核能署(OECD/NEA)籌辦「最終處置圓桌論壇」，促進核電國家在高放射性廢物最終處置的技術合作(METI, 2019a; METI, 2019b)。

目前 OECD/NEA 已舉行二次最終處置圓桌論壇。第一屆最終處置圓桌論壇，於 2019 年 1 月 14 日在 OECD/NEA 舉行，計有美、加、法、德、英、比、荷、芬蘭、瑞典、俄羅斯、西班牙、中、日、韓等十四國，以及 OECE/NEA 與 IAEA 的代表參加此項會議(經濟產業省，2020a)。第二屆最終處置圓桌論壇於 2020 年 2 月 7 日在巴黎的 OECD/NEA 舉行，原有的十三個參與國(中國未派代表出席)，以及 OECE/NEA 與 IAEA 的代表皆參與此項會議。第二屆最終處置圓桌論壇彙編報告，闡明公眾對話活動的最佳做法暨經驗教訓，以及進一步加強國際合作研發的方向；希望透過 OECD/NEA 的放射性廢物管理委員會(Radioactive Waste Management Committee, RWMC)的討論機制，進一步實現國際合作研究(經濟產業省，2020b)，強調逐步路徑的重要性(OECD/NEA, 2020: 9)，並建議強化現有日本、瑞士、瑞典暨未來中國與俄羅斯 URL 設施的國際合作(OECD/NEA, 2020: 33)。最終處置圓桌論壇的對話，為 URL 的國際多邊化分享，開啟曙光。

最終處置圓桌論壇報告強調，在內國開發與建造 URL 涉及大量的投資、時間，以及未來與最終處置設施的配置(configuration)，故而對處於建造最終處置設施早期階段，且尚未決定主岩環境的國家而言，位在他國的 URL 乃是寶貴的資源(OECD/NEA, 2020: 33)。最終處置圓桌論壇報告，突顯進行 URL 國際合作的經濟效益。

日本經濟產業省(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)與 OECD/NEA，於 2021 年 9 月 22 日舉行共同利用 URL(Joint utilization of underground research laboratories for research and development projects)線上會議，共計來自 18 個國家與 IAEA 的 130 名代表與會；此一會議認為，URL 共享設施，乃是最具成本效益的方式，得以維持暨強化國家層次的核廢物最終處置技術能力(OECD/NEA, 2021)。

OECD/NEA 會員國中，計有比利時、捷克、芬蘭、法國、日本、南韓、俄羅斯、瑞典與瑞士等國，均正在興建或營運泛用型 URL 與特定場址型 URL。瑞典與瑞士的泛用型 URL，有活躍的國際合作研究活動。日本亦積極推動 URL 研究的國際合作共享。

III. 結果與討論

一、 國際社會 URL 設施的運作概況

國際社會的泛用型暨場址特定型 URL 的數量十分有限，乃是國際社會的珍稀資源。仍在運作中的泛用型 URL，目前僅有比利時 HADES，捷克 Bukov，法國 Tournemire Research Tunnel，日本幌延深地層研究中心，南韓 Korean Underground Research Tunnel，瑞典 Äspö 硬岩地下實驗室，瑞士的蒙特麗岩石實驗室與格里姆瑟爾試驗場等八處。這些有限數量的泛用型 URL 的規格都不相同，例如比利時與南韓的 URL 設施深度都不到 300 公尺；瑞典 Äspö 硬岩地下實驗室與瑞士格里姆瑟爾試驗場均屬於花崗岩，深度則達到 400 公尺以上。

目前 URL 國際多邊合作研究，多採泛用型 URL 作為研究樣本，例如瑞士格里姆瑟爾試驗場的 CFM 與 FEBEX-DP 計畫；瑞士蒙特麗岩石實驗室的蒙特麗計畫(Mont Terri Project)，以及瑞典 Äspö 硬岩地下實驗室的 SKB 任務編組。**上述研究計畫，皆有個別的研究主題，但都沒有涵蓋選址、設計、興建暨操作地下最終處置庫，所涉及的全面性數據驗證。**

特定場址 URL 是為興建地下最終處置庫所開發的地下實驗室，目前以芬蘭、法國、俄羅斯與中國大陸的進展最為顯著。瑞典核燃料暨廢棄物管理公司(SKB)設有泛用型的 Äspö 硬岩地下實驗室，雖然 SKB 於 2022 年元月取得興建 Forsmark 最終處置庫的執照，但似乎仍沒有興建特定場址 URL 的規畫案(台電公司，2022)。有關上述五國最終處置庫選址與特定場址 URL 的興建時程對照表，請參閱表七。

表七 國際最終處置庫選址與特定場址 URL 時程對照表

單位：年

國別	最終處置庫選址	特定場址 URL 興建	特定場址 URL 啓用	核發最終處置庫興建執照	最終處置庫啓用	備註
芬蘭	2001	2004-2014	2004	2015	2025	URL 自 2004 年起隨建隨用
瑞典	2009	---	---	2022	---	Äspö 硬岩實驗室非特定場址 URL，瑞典似無意再興建特定場址 URL。SKB 任務編組下的國際合作研究。
法國	2009	2000	2006	2022	2030	2006 年拓建 Meuse/Haute Marne 特定 URL 設施，研究興建 Cigeo 數據。
俄羅斯	---	2016	2024	---	---	
中國大陸	2011	2021	2026	2041	2050	均為預估時程
台灣	2028*2038*	2033	---	2044	2055	均為預估時程

*依《台電用過核子燃料最終處置計畫書(2018 年修訂版)》規劃，我國用過核燃料最終處置時程規劃，預定於 2028 年完成候選場址調查與評定建議優先調查場址；2038 年完成場址可行性研究報告(場址詳細調查與試驗)。(台灣電力公司，2019)

*依原能會高放射性廢棄物最終處置網頁訊息，我國用過核燃料最終處置時程規劃，「預定於 2038 年擇定處置場址，2055 年完成處置場建造。」(原子能委員會，2022)

資料來源：計畫主持人匯整 (IAEA, 2017; 原子能委員會，2019；原子能委員會，2022；台灣電力公司，2019；王駒，2019)

有關興建 SFRW 最終處置庫與特定場址 URL 的連結，僅管案例不多，初步仍可歸納出兩種不同的路徑作法。首先是瑞典的套用型 URL 資料路徑，其次為芬蘭、

[1] G-20 是國際經濟合作論壇，成立於 1999 年。出席方為加拿大、美國、英國、法國、德國、義大利、日本、巴西、俄羅斯、印度、中國、南非、墨西哥、阿根廷、土耳其、沙烏地阿拉伯、韓國、印尼、澳洲，以及歐洲聯盟等二十方。

法國暨中國大陸在最終處置設施區域興建特定場址 URL 的強化路徑。瑞典是採取套用路徑的唯一國家，它先興建泛用型的 Äspö 硬岩實驗室，然後再選定其他區域，興建 SFRW 最終處置庫。現有資料顯示，瑞典似乎沒有在最終處置庫所處區域，再興建特定場址 URL 的規畫。芬蘭、法國暨中國大陸的強化路徑，則是先選定最終處置庫場址區域，再於該區域內興建特定場址 URL，藉以取得最終處置庫場址熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應暨工程障壁的第一手數據，驗證該最終處置庫的設計規格。

芬蘭於 2001 年完成終最終處置庫選址，執行最終處置管理的公司 Posiva，接著於 2004 年在最終處置庫選定區域內興建特定 URL，並進行各項實驗。法國與中國大陸則是在最終處置庫優選區域內，興建特定 URL，驗證工程可行性，並據此決定更精準的最終處置庫興建位置。法國國家核廢物管理局(L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, ANDRA)，1999 年在法國默斯/上馬恩省(Meuse/ Haute-Marne)的布爾地區(Bure)，取得興建 URL 執照，自 2000-2006 年興建 Meuse/Haute Marne 特定 URL，探索在黏土層中興建高放射性最終處置庫的各種技術數據。2006 年法國國會通過法案，授權 ANDRA 在 Meuse/ Haute-Marne 設計並興建「地質處置工業中心」(Industrial Centre for Geological Disposal, Cigeo)，就高放射性廢物進行最終處置。ANDRA 依據 Meuse/Haute Marne 特定 URL 所進行之研究數據，於 2009 年提交在布爾地區興建最終處置庫的具體區域，並依法進行民意諮詢(ANDRA, 2022)。目前 ANDRA 已於 2022 年取得在布爾興建 Cigeo 的執照(台電公司，2022)。中國於 2011 年 7 月 22 日，經國防科工局與環保部，聯合召開專家評審會，選定甘肅北山，作為中國大陸高放射性廢物最終處置庫的首選預選區(王駒，2019: 2075)，再於該特定場區興建深達 500 公尺的地下實驗室，該特定場區 URL 主要功能在於(一)評價場址深部環境，(二)開展 1:1 工程尺度驗證實驗，(三)開發最終處置庫施工、建造、回填與封閉技術，(四)全面掌握最終處置技術，(五)為地下現場實驗，提供深部實驗巷道、水、電、通風、通訊、安全與緊急應變等後勤支援，以及(六)提供公眾參觀(王駒等，2022: 3)。

就國際合作而言，瑞典的套用路徑作法，允許進行國際合作研究。法國的 Meuse/Haute Marne 特定 URL，允許其他國家研究人員進行參訪，但未開放進行大規模的國際合作研究計畫。芬蘭與中國大陸未來特定場址 URL 建成後，是否會開放其特定場址 URL 進行國際共同研究，仍有待持續觀察。

二、國際後端多邊化逐步路徑的進展狀況

受到 COVID-19 疫情影響，NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議，及日本推動之最終處置圓桌論壇，仍採視訊會議型式，進行概念溝通與意見交流。國際多邊化逐步路徑的成果，在 COVID-19 疫情結束後，值得持續觀察。

NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議，固然受到 COVID-19 疫情影響，但仍在 2020-2021 年舉行多次線上討論，並於 2022 年公佈「安全、安保暨社會接受的高放射性暨中放射性永壽型放射性廢物之地下最終處置設施選址共識框架」(Common Framework for the Safe, Secure, and Socially Acceptable Siting of Geological Disposal Facilities for High-Level and Long-Lived Intermediate Level Radioactive Waste)(NTI, 2022)，針對興建 SFRW 最終處置設施，提出共識框架文件。在該文件中，特別強調核安全(nuclear safety)、核安保 (nuclear safeguards)與社會接納(society acceptance)等「三 S」的重要概念，對於未來進行各項區域/國際後端多邊化倡議之推展，劃定基本的夥伴方參與原則(NTI, 2022)。該文件同時彰顯，建立暨維持公眾信心，乃是興建並運轉 SFRW 最終處置庫的重大挑戰。NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議的共同框架文件，在參考國際實踐案例後認為，SFRW 最終處置庫的成功選址，須建立在下列三項基石之上：(一) 令人信服之地質處置案例與敘事(narrative)；(二) 決策過程之清晰透明，乃奠基於互信/尊重的靈活、分階暨調適的公眾參與方式；(三) 建立在政治意願與承諾之上的綜合性國家立法暨監管框架(NTI, 2022)。[2]

NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議，計畫在 COVID-19 疫情結束後，繼續依往例舉行年度夥伴方實體會議，並就夥伴方的 URL 合作研究，作進一步的深化合作。

日本結合 OECD/NEA，舉行兩屆最終處置圓桌論壇，就國際分享 URL 研究成果，提出初步的建議。日本經濟產業省更於 2021 年 9 月 22 日，與 OECD/NEA 舉行共同運用 URL(Joint Utilisation of Underground Research Laboratories for Research and Development Projects)線上會議。在疫情影響下，日本結合 OECD/NEA 平台，推展國際共同分享暨運用 URL 的動作頻頻，未來可能影響國際 URL 多邊合作的發展走向，值得持續密切觀察。

據日本積極推動的最終處置圓桌論壇提議，**各 URL 應避免執行重複性的研究計畫**，優化 URL 研究資源(OECD/NEA, 2021: 33)；並建議由 OECD/NEA 的放射性廢物管理委員會(RWMC)協調各國的 URL 研究計畫，在現有的 URL，**執行尚未探索的研究主題**(OECD/NEA, 2021: 33)。

相較於美國與日本積極推動後端多邊化逐步路徑，歐洲國家在 COVID-19 疫情中推動後端多邊化路徑的力道，則相對停滯。ERDO-WG 成員於 2019 年開始討論分享技術、人力與設施的可能路徑，不過自 2020 年 COVID-19 疫情爆發後，則未舉行實體集會或是線上視訊會議。

三、九種 URL 多邊服務機制之情境分析

本計畫以美國智庫 NTI「環太平洋用過核燃料管理夥伴」倡議、ERDO-WG 的分享邁進(Steps to Sharing)倡議，以及日本推動的 OECD/NEA 最終處置圓桌論壇之三項國際暢議，作為參考樣本；並參照 IAEA 不涉及設施

[2] 詳參閱計畫主持人曾雅真教授參與撰擬之附件內容。

所有權的服務保證類型(assurance of services)(IAEA, 2005: 3)；畫定本研究之情境關鍵變數，為(一)國際後端多邊化逐步路徑倡議(橫軸)，以及(二)URL 服務保證型式(縱軸)。續就下列六大次變項，描繪分析 URL 多邊服務機制九項情境的具體面貌：包括 URL 多邊設施地主國之選定方式(夥伴國主動請纓、沿用區域組織既有設施、國際組織選定)、成立 URL 之多邊協議內容、URL 多邊管理機構、URL 多邊協力指導機構(Steering Committee)的構成、URL 設施的服務機制，以及 URL 多邊服務機制的影響等。(參閱表六)

表六 最終處置地下實驗室的多邊服務情境

最終處置 URL 的多邊服務情境		國際後端多邊化逐步路徑倡議態樣		
		NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴(A)	ERDO-WG 分享邁進倡議(E)	日本 OECD/NEA 最終處置圓桌論壇(O)
URL 服務保證型式	夥伴國提供的服務保證(P)(不涉及設施所有權)	PA	PE	PO
	多國政府組合實體提供的服務保證(M)	MA	ME	MO
	國際組織提供的服務保證(I)	IA	IE	IO

資料來源：計畫主持人研究製表。

研究發現，尚未建立泛用型暨特定場址型 URL 的台灣，如能儘快取得最終處置 URL 國際多邊服務，將可以提升我國管控 SFRW 最終處置庫工程設計品質的安全管理效能，並提高社會大眾對於興建 SFRW 最終處置庫的社會信任度。有鑑於此，本研究乃以國際 URL 多邊服務設立的快捷度，以及台灣參與 URL 國際多邊服務機制的便利性，勾勒台灣受益於不同情境的效益排序。以下摘要相關的研究發現。

(一)東亞 URL 具快捷啟動優勢

總結九種 URL 多邊服務情境，觀察 NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議，ERDO-WG 分享邁進討論，以及日本在 OECD/NEA 架構下的最終處置圓桌論壇發展概況，並衡量上述三項倡議夥伴方的 URL 營運藍圖，可以發現，如以 URL 多邊服務之啟動快捷度進行排序，其順序依次為 PA〉PO〉MA〉MO〉IA〉IO〉PE〉ME〉IE。其中，以日本與南韓為核心的東亞夥伴國，具備 URL 多邊服務快速啟動的優勢。

日本在北海道營運的幌延深地層研究中心(沉積岩)，以及在南韓大田的地下研究坑道(花崗岩)，均設有泛用型 URL。在夥伴國自動請纓的假設下，無論是夥伴國服務保證(PA/PO)，多國政府組合實體(MA/MO)或國際組織服務保證情境(IA/IO)，這兩個場址均是可以立即投入運營的多邊合作場址。由於 ERDO-WG 夥伴方(E)均沒有營運 URL，即使 ERDO-WG 有心，卻巧婦難為無米之炊，PE、ME 與 IE 情境，恐無法立即啟動多邊服務。

其次，在 PA、PO、MA、MO、IA、IO 等情境中，國際多邊制度化的複雜性，將是阻礙 URL 多邊服務機制成型的最大障礙。在多國政府組合實體(M)或是國際組織(I)主宰下的 URL 多邊服務型態(MA/MO/IA/IO)，自動請纓的申請國，可能面臨繁瑣的申請服務程序，研究計價成本，其研究計畫主題暨研究成果分享，也會受到 URL 多邊協力指導機構的干預，未必有利於申請國的初衷。不過，夥伴國如在國際倡議媒介下自動請纓(P)，將其個別管控下的 URL，開放為國際多邊服務協力設施(PA/PO)，則可以成為最快捷的 URL 多邊服務機制。

綜上，以夥伴國自動請纓為主的 PA 與 PO 情境，東亞夥伴快捷啟動模式，將可以增益原有夥伴國之間的互信，深化彼此合作領域，為構建全面的國際 SFRW 多邊最終處置設施協力機制，奠定逐步推動發展的基礎。

(二)台灣參與 URL 多邊服務的准入趨向

台灣目前已參與 NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴(A)倡議，但仍不是 OECD/NEA 正式會員，亦沒有參與 OECD/NEA 下屬放射性廢物管理委員會(RWMC)的活動，又以 ERDO-WG 乃是以歐盟境內成員為核心，即使未來 ERDO-WG 之逐步路徑漸次成型，台灣順利參與的空間與深度，似難以過度期待。

衡量台灣目前參與前述三項倡議的情境，可以勾勒出台灣參與 URL 多邊服務的准入趨向。若以台灣參與准入之便利性進行排序，則各情境的順序依次為 PA〉MA〉MO〉ME〉PO〉IA〉IO〉PE〉IE。

首先，台灣目前已參與 NTI 環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議，未來一旦在此架構下成立 URL 多邊服務機制，則以夥伴國自動請纓構成的 PA 情境，對台灣最為有利。**政府組合實體(M)**成型後，如**服務對象未被限定為國際組織會員**，則**夥伴資格**並不會構成服務排擠障礙，因此 MA、MO 與 ME 情境構成台灣取得 URL 多邊服務的次佳情境。

最後，一旦 URL 多邊服務的服務對象，被限定為國際組織會員例如 OECD/NEA、IAEA 或是 EURATOM，則將構成台灣取得 URL 多邊服務的資格性障礙(IA/IO/PE/IE)。

IV. 結論與建議

第一，美國核廢物技術審查委員會在 2021 年，提交執行 SFRW 安全管理暨興建 SFRW 最終處置庫的六項建議，其中有關及早興建本土 URL 並積極參與 URL 國際合作的建議內容，值得台灣在考量本土各項挑戰後，妥慎參酌。

第二，國際社會 SFRW 多邊最終處置之各項倡議，雖迭有起落消長，但仍緩步邁進中。建議宜仿效日本暨南韓亦步亦趨的作法，以對話參與暨管道暢通維繫，作為最低的參與底線。

第三，目前國際社會僅有八座泛用型 URL 與三座場址特定型 URL，乃是 SFRW 安全管理暨興建 SFRW 最終處置庫的稀有資源。對於目前仍沒有 URL 的國家，例如台灣及美國，或有幾種可能的路徑選項：(1)在本國適當地點，興建泛用型 URL，待本土最終處置庫場址選定後，再建造場址特定型 URL，或者(2)進行雙邊國際合作，使用其他國家的 URL 進行實驗(Wang, 2014: 102)，或者(3)加入未來的 URL 多邊服務機制，以強化 SFRW 最終處置計畫的安全論證。在台灣本島興建泛用型 URL 進度停滯，並且難於短期內改善的現狀下，建議可以在考量成本、專業人員培育暨增進社會接納等因素後，就參與現有國際社會的 URL 國際合作研究，進行前瞻性規畫，並參酌 2021 年美國核廢物技術審查委員會的建

議，以為借鏡。

第四，觀察本研究計畫匯整的九類 URL 多邊服務情境，可以發現，在計畫主持人多年努力下，已逐步夯實我國參與NTI環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議的基礎，構建台灣在最短時間內，以無礙方式，參與國際 URL 多邊服務機制的空間。[3]

第五，雖受到 COVID-19 疫情拖延，日本仍積極推動不同型式的國際 URL 研究分享模式，建議台灣涉及 SFRW 安全管理之利益關係方暨核監管機構，持續關注各項發展，並預擬各種參與策略。

最後，OECD/NEA 最終處置圓桌論壇建議，統一協調並管制國際 URL 研究計畫的構想，未來對台灣的負面影響，恐不宜等閒視之。建議台灣核監管機構，宜就相關發展對 SFRW 安全論證(safety case)，以及審核 SFRW 最終處置庫選址、設計、建造、調試、運行、停止運轉暨除役關閉執照等各階段，所可能涉及的利害關係人，進行後續追蹤，及早研析因應對策。

參考文獻

[1] 王駒，209，「中國高放廢物地質處置 21 世紀進展」，《原子能科学技术》，53(10): 2072-2082。

[2] 王駒，蘇銳，陳亮，趙宏剛，周志超，趙星光。2022，「中國高放廢物地質處置地下實驗室場址篩選」，《世界核地質科學》，39(1): 1-13。

[3] 台灣電力公司，2022，「高放國際經驗」，https://nbmi.taipower.com.tw/%e9%ab%98%e6%94%be%e5%9c%8b%e9%9a%9b%e7%b6%93%e9%a9%97new/。

[4] 台灣電力公司，2019，《用國核子燃料最終計畫書」(2018年修訂版) 》。https:// 629CrD95ZefdhJqIeU9qrQ__.pdf (aec.gov.tw)

[5] 行政院原子能委員會，2020，《用過核子燃料最終處置計畫書(2018 年修訂版)審查報告》。https://www.aec.gov.tw/share/file/fcma/EmC2JqEwf03xr~O2iBvUuA__.pdf.

[6] 原子能委會，2019，《核廢料最終處置技術及世界各國高、低放最終處置場址選擇與興建近況報告》。https://ww.aec.gov.tw/share/file/focus/eDwrt4VXx5zEexP9WLACig__.pdf.

[7] 原子能委員會，2022，「Q4-1 我國用過核子燃料最終處置時程規劃為何？」- 高放射性廢棄物最終處置網頁。https://高放射性廢棄物最終處置 - 行政院原子能委員會 (aec.gov.tw)

[8] 經濟產業省，2020a，「技術開発の現状について(原子力発電環境整備機構)」，第五回地層処分研究開発調整会議。2020 年 1 月 27 日。https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/005_03_01.pdf.

[9] 經濟產業省，2020b，「研究開発における國際協力強化に向けた取組みの状況(最終処分國際ラウンドテーブル(第 2 回)での議論」，第六回會合地層処分研究開発調整会議，2020 年 3 月 9 日。https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/006_s02_00.pdf.

[10] 簡國元與王郁如，2019，「高放射性廢棄物最終處置熱水力耦合國際研討會(DECOVALEX2019 8th Workshop)暨放射性廢棄物設施觀摩與討論會議」，公務出國報告，C10803384。https://report.nat.gov.tw/ReportFront/PageSystem/reportFileDownload/C10803384/001.

[11] Birkholzer, Jens. 2019. “Overview of DOE’s International Collaboration and URL Activities,” Presentation to Nuclear Waste Technical Review Board, April 24-25, 2019 workshop. https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/meetings/2019/april/birkholzer.pdf?sfvrsn=6.

[12] Birkholzera, Jens T.et. al. 2019. “25 Years of DECOVALEX - Scientific Advances and Lessons Learned from an International Research Collaboration in Coupled Subsurface Processes,” International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 122, pp. 1-21.

[13] ERDO, 2019a. “Note of the Workshop-Steps to Sharing Opportunities for Sharing in Radioactive Waste Management Programmes,” IAEA, Vienna: 25th- 26th September 2019. http://www.erdo-wg.com/documents/steps_to_sharing/Steps%20to%20Sharing%20-%20Note%20of%20Meeting.pdf.

[14] ERDO, 2019b. “Note of the Meeting,” Zagreb, 20th-21st November, 2019. http://www.erdo-wg.com/documents/Note%20of%20ERDO-WG%20Zagreb%20Nov%202019.pdf.

[15] IAEA, 2001. *The Use of Scientific and Technical Results from Underground Research Laboratory Investigations for the Geological Disposal of Radioactive Waste.* IAEA-TECDOC-1243. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1243_prn.pdf.

[16] IAEA, 2005. “Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle: Expert Group Report submitted to the Director General of the International Atomic Energy Agency,” INFCIRC/640, February 22, 2005.http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/mna-2005_web.pdf.

[17] NTI, 2022. “A Common Framework for the Safe, Secure, and Socially Acceptable Siting of Geological Disposal Facilities for High-Level and Long-Lived Intermediate Level Radioactive Waste” The Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Working Group. https://www.nti.org/analysis/articles/the-pacific-rim-spent-fuel-management-partnership-working-group/.

[18] IAEA, 2016. *Framework and Challenges for Initiating Multinational Cooperation for the Development of a Radioactive Waste Repository,* Vienna: IAEA.

[19] IAEA, 2017. “The Fifth National Report of the Russia Federation on the Compliance with the Obligations of the Joint convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management.” https://www.iaea.org/sites/default/files/russian-federation-eng-jc.pdf.

[20] METI, 2019a. “Communiqué, G20 Ministerial Meeting on Energy Transitions and Global Environment for Sustainable Growth,” 15-16 June 2019, Karuizawa, JAPAN. https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190618008/20190618008_01.pdf.

[3] 計畫主持人曾雅真教授於 2020 年 7 月成功地舉薦台灣工業技術研究院，成為美國華府智庫「核威脅倡議組織」(Nuclear Threat Initiative，NTI) 組建之「環太平洋用過核燃料管理夥伴」(The Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)地下實驗室工作小組的「理事成員」(board member)。

[21] METI, 2019b. “G20 Karuizawa Innovation Action Plan on Energy Transitions and Global Environment for Sustainable Growth,” https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190618008/20190618008_02.pdf.

[22] Newman, Andrew, Alina Constantin, and Thomas Isaacs. 2019. “A Step-by-Step Approach to Regional Spent Fuel Management Cooperation in the Pacific Rim,” Washington D. C.: Nuclear Threat Initiative. https://www.nti.org/analysis/reports/step-step-approach-regional-spent-fuel-management-cooperation-pacific-rim/.

[23] NTI, 2017. “Meeting Summary: NUMO-NTI Tokyo Workshop on Developing Spent Fuel Strategies,” May 29-June 1, 2017. Tokyo, Japan. https://media.nti.org/documents/Summary_of_the_NTI-NUMO_DSFS_Regional_Workshop_Tokyo_2017_vGt7XkX.pdf.

[24] NTI, 2018. “Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Workshop,” 5-7 September 2018. Gyeongju, Republic of Korea. https://media.nti.org/documents/PRSFMPW_September_2018_ROK_Workshop_Summary_002.pdf.

[25] NTI, 2019a. “Meeting Summary-Horonobe Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Working Group Meeting,” October 29-30, 2019. Wakkanai, Japan.

[26] NTI, 2019b. “Meeting Summary- Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Workshop,” 12-14 August 2019. Suwon, Republic of Korea. https://media.nti.org/documents/NTI-KHU_Meeting_Summary_FINAL.pdf.

[27] NTI, 2019c. “Summary of the Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Working Group Meeting,” February 27-28, 2019. Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico, USA. https://media.nti.org/documents/DSFS_NTI-SNL_Workshop_Summary_2019_final.pdf.

[28] Nuclear Waste Technical Review Board, 2020. Filling the Gaps: The Critical Role of Underground Research Laboratories in the U.S. Department of Energy Geologic Disposal Research and Development Program, Arlington, Virginia. https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/reports/nwtrb-url-report.pdf?sfvrsn=9.

[29] Nuclear Waste Technical Review Board. 2021. “Six Overarching Recommendations for How to Move the Nation’s Nuclear Waste Management Program Forward.” https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/reports/nwtrb-six-recommendations-report.pdf?sfvrsn=20.

[30] OECD/NEA, 2013. *Underground Research Laboratories (URL)*. NEA/RWM/R(2013)2. Paris: OECD. https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2013/78122-rwm-url-brochure.pdf.

[31] OECD/NEA, 2020, International Roundtable on the Final Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel: Summary Report. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39718/international-roundtable-on-the-final-disposal-of-high-level-radioactive-waste-and-spent-fuel-summary-report?details=true.

[32] OECD/NEA, 2021. Joint utilization of underground research laboratories for research and development projects. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_60776/joint-utilisation-of-underground-research-laboratories-for-research-and-development-projects.

[33] Wang, Ju, Liang Chen, Rui Su, Xingguang Zhao, 2018. “The Beishan Underground Research Laboratory for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste in China: Planning, Site selection, Site Characterization and in situ Tests,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 10(3): 411-435.

[34] Wang, Ju. 2014. “On Area-specific Underground Research Laboratory for Geological Disposal of High-level Radioactive Waste in China,” J*ournal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 6(2):99-104.

輻射防護與放射醫學科技(Ⅰ)

應用加馬能譜分析技術檢測飲用水中鐳同位素含量並評估國民輻射劑量
Quantifying Radium Isotopes in Drinking Water Sources using Gamma Spectroscopy and Assessing National Radiation Dose

計畫編號：110-2623-E-010-002-NU
計畫主持人：吳駿一
e-mail：chunyiwu@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：吳杰
計畫參與人員：張庭瑀、劉世恩、黃詳恩、洪文翔
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

在自然界中岩石與土壤存在鈾系與釷系的天然放射性核種，隨著鈾與釷元素的衰變會形成鐳-226、鐳-228 與鐳-224 等同位素，藉由雨水沖刷而進入飲用水源中，其活度濃度受到當地地質和氣候特徵的影響，分布範圍可從地表水的 0.001 Bq/L 到自然地下水的 50 Bq/L。本研究計畫考量環境輻射度量技術的進步與國民飲用瓶裝水習慣的改變，協助主管機關針對水中所含鐳同位素建立檢測技術，並評估台灣十大水庫水源以及市售瓶裝水與礦泉水中鐳同位素含量數據，並依此評估攝取飲用水對於國民輻射劑量之貢獻。預期透過本計畫的成果，可提升低濃度環境水樣中鐳同位素的檢測分析能力，建立國內瓶裝水與水庫環境水源中鐳同位素與其他天然放射性核種的數據庫，提供主管機關作為評估環境中背景輻射對於國民有效劑量影響之參考依據。本計畫已完成：鐳同位素之檢測技術與作業程序，包括：(1)水中鐳同位素的化學濃縮技術建立，(2)藉由加馬能譜分析定量國內水庫水源中鐳同位素的含量與分布，以及(3)瓶裝水與淨水廠水樣中鐳同位素活度濃度之定量。

關鍵詞：加馬能譜分析、鐳同位素、飲用水、國民輻射劑量

Abstract

In nature, there are some natural radionuclides, especially those in a series of decays of uranium and thorium, in rocks and soils. As uranium and thorium, isotopes such as ^{224}Ra, ^{226}Ra, and ^{228}Ra would be produced and washed out to sources of drinking water. The radioactivity concentration is affected by local geological and climate characteristics, ranging from 1 mBq/L (surface water) to 50 Bq/L (groundwater). Regarding the progress of environmental radiation measurement and the changes in people's drinking habits in Taiwan, this research determined the regional distribution of radium nuclides in drinking water sources and bottled water to assist authorities in acquiring the updated data. We also estimated the contribution of drinking water to national radiation dose. In this study, we have established the standard detection protocol for water samples containing radium isotopes. The results could be a reference for authority to evaluate the influence of background radiation on an individual's effective dose. This study completed the following items: (1) The protocol for the chemical concentration of water containing radium. (2) Quantification of radium in reservoir water sources using gamma spectroscopy and (3) Quantification of radioactivity concentration of bottled water and the water sample in the water treatment plant.

Keywords: Gamma spectroscopy, radium isotopes, drinking water, national radiation dose

I. 前言

國民輻射劑量的來源包含天然輻射與人造輻射，**表一**彙整了我國、美國與全球輻射劑量的評估結果，其中依據民國 87 年出版的「台灣地區國民輻射劑量評估」調查結果可知[1]，我國民眾的年平均有效劑量為 2.44 毫西弗/年，其中天然輻射劑量為 1.62 毫西弗/年(佔 66.4%)、人造輻射的貢獻為 0.82 毫西弗/年(佔 33.6%)；聯合國原子輻射效應科學委員會(United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR) UNSCEAR 2008 報告彙整提出了全球平均個人輻射劑量[2]，年平均有效劑量為 3.0 毫西弗/年，其中天然輻射劑量為 2.4 毫西弗/年、人造輻射為 0.6 毫西弗/年；美國輻射防護委員會(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)於 2009 年重新調查全美地區民眾輻射曝露劑量，並出版 NCRP 160 號報告[3]，該報告大幅提升人造輻射中醫療輻射的劑量達 3.1 毫西弗/年，而天然輻射的劑量貢獻為 3.11 毫西弗/年，平均美國國民的輻射劑量為 6.2 毫西弗/年。

深入探討天然輻射所造成的劑量貢獻，其來源主要分為四大部分，包括：(1) 來自太空中的宇宙輻射，其可透過計算空間曝露劑量，並引入住宅屏蔽因子以及室內與戶外時間佔比進行劑量評估；(2) 岩石或土壤中的天然放射性物質所釋出加馬射線造成的體外曝露劑量，主要為鈾系、釷系衰變系列之子核以及鉀-40；可透過岩石或土壤中的核種分析以評估活度濃度，據以推算空間曝露劑量，並引入住宅屏蔽因子以及室內與戶外時間佔比進行劑量評估；(3) 吸入由岩石或土壤中鈾系與釷系所釋出的氡氣與其子核，進而造成的體內曝露輻射劑量，由於衰變系列的子核常會釋出阿伐粒子，故常造成顯著的體內劑量貢獻，因此，這方面的劑量貢獻常以鐳同位素的活度濃度做為計算約定等效劑量的代表；(4) 日常飲水與飲食中含天然放射性核種而造成的體內輻射劑量，通常與土壤中的天然放射性物質相同，包含鈾系、釷系衰變系列之子核種(例如：鐳同位素)以及鉀-40。這些天然放射性核種經雨水沖刷而累積於水源處，進而透

過飲水與飲食進入體內，而鐳同位素具有趨骨性會造成紅骨隨顯著的約定等價劑量，需要謹慎評估其對於國民劑量的貢獻。另由 UNSCEAR 2008 報告中所統計的全球天然輻射劑量變動範圍得知，各地區天然輻射劑量的差異主要來自鈾系與釷系的子核所造成，全球變動範圍可達 0.2 至 10 毫西弗/年。其中，因攝入天然放射性核種造成體內輻射曝露的平均劑量維持在 0.29 毫西弗/年，變動範圍則為 0.2 至 1 毫西弗/年。近年來因為日本福島核電廠事故造成民眾對核災與核食的高度重視，行政院原子能委員會常年致力於台灣地區環境輻射監測[4]，其中亦包含飲用水與食品放射性含量偵測計畫，以先期作業評估環境中自然背景輻射對國民有效劑量的影響[5]。鑒於國內已有 20 年未重新評估國民輻射劑量，本計畫配合考量環境輻射度量技術的進步與國民生活水平、飲食習慣的改變，透過計畫執行目標，協助主管機關獲取更多台灣各地區環境水樣與包裝飲用水中鐳同位素含量與國民劑量數據。

II. 主要內容

本計畫之計畫目標為協助主管機關獲取更多台灣各地區環境水樣與包裝飲用水中鐳同位素含量與國民劑量數據，已達成之成果如下：(1)建立利用加馬能譜分析技術測量環境水源中鐳同位素(Ra-226、Ra-228、Ra-224)的活度濃度技術；(2)建立以飲用水源為主的化學濃縮方法，以提高加馬能譜分析的偵測效率，同時降低核種分析的偵測低限；(3)調查並採集台灣主要飲用水源，包含：民生用水中淨水廠之水樣、水庫水與包裝水，進行鐳同位素含量分析，以瞭解台灣地區水中鐳同位素的濃度與分布；(4)評估飲用水與環境水源中鐳同位素所造成的國民輻射劑量，比對鐳同位素的活度濃度是否符合「商品輻射限量標準」中的飲用水限值。

III. 結果與討論

各水樣依本計畫建立之鐳同位素化學濃縮技術以及檢測作業程序進行前處理與量測。從結果可以得知，台灣十大水庫中 Ra-224、Ra-226 及 Ra-228 的最高活度分別可達 80±29 mBq/L、79±23 mBq/L 及 118±26 mBq/L。五間淨水廠中 Ra-224、Ra-226 及 Ra-228 的最高活度分別可達 57 ±34 mBq/L、254 ±23 mBq/L 及 152±31 mBq/L。五間市售瓶裝水中 Ra-224、Ra-226 及 Ra-228 的最高活度則分別達 29±23 mBq/L、124±14 mBq/L 及 144±26 mBq/L。

從國民劑量計算結果可觀察到幼兒、孩童及成年人因攝入飲用水中之鐳同位素所導致之最高約定有效劑量分別為 188 μSv/y、164 μSv/y 及 52 μSv/y，其中又以 Ra-226 及 Ra-228 所造成之劑量貢獻比例較多。造成此現象的原因除了因樣品中 Ra-226 及 Ra-228 的活度略高於 Ra-224 之外，也可能與 Ra-226 及 Ra-228 相對於 Ra-224 有較高的 $D_{ing(}$劑量轉換因子)有關。而從不同年齡群間的比較可以得知，幼兒族群的約定有效劑量相對於孩童與成年人來的高，這也可能為幼兒的 D_{ing} (劑量轉換因數)較孩童與成年人來的大所導致。

IV. 結論

本研究成功針對台灣各地區的主要的飲用水源進行鐳同位素的活度量測並計算其所導致的國民劑量，也建立了完善的化學濃縮技術，可協助國內建立飲用水源之天然放射性核種數據庫，以提供主管機關作為評估環境中背景輻射對於國民有效劑量影響之參考依據。

參考文獻

[1] 林培火、陳清江、林友明，國民輻射劑量之評估研究報告，原子能委員會輻射偵測中心，民國 87 年 6 月。

[2] UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 2008, UNSCEAR Report.

[3] NCRP. National Council on Radiation Protection and Measurements. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. 2009, NCRP Report No. 160.

[4] 台灣地區環境輻射監測計畫書，原子能委員會輻射偵測中心，民國 108 年 3 月。

[5] 國民輻射劑量評估先期研究執行報告，原子能委員會輻射偵測中心，民國 108。

核電廠除役期間人員劑量評估模式與合理抑低策略(二年期計畫，1/2)
Personal radiation dose assessment mode and the strategy of as lowas reasonably achievable during the decommissioning of a nuclearpower plant (two-year plan, 1/2)

計畫編號：110-2623-E-010-003-NU
計畫主持人：許世明
e-mail：smhsu@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：林駿丞
計畫參與人員：王昱傑、馮真如
執行單位：國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系(所)

摘要

近年全球能源政策改變，及核電廠陸續達到法規運轉年限，各國開始致力於電廠的除役準備工作。本兩年期計畫有兩大目標：(1)建立除役人員劑量評估模式；(2)發展合理抑低策略。本計畫使用不同防護方法，設置模擬參數之模型，比較工作人員所獲得之個人及集體有效劑量。

關鍵詞：合理抑低，有效劑量，核電廠，輻射。

Abstract

In recent years, global energy policies have changed, and nuclear power plants have reached the operational life of regulations. The governments start to commit themselves to the decommissioning of power plants. This project has two major goals: (1) Establish a dose assessment model for decommissioned person; (2) Develop a reasonable strategy for as low as reasonably achievable. This study will use different protection methods and set up simulation parameters to compare the individual and collective effective doses from radiation workers.

Keywords: as low as reasonably achievable, effective dose, power plant, radiation

I. 前言

考量我國因能源政策調整及核電廠陸續將屆運轉期限，借鑑國外之經驗，進行國內核電廠之除役工作，並且制定相關規章，進行作業人員、環境工程等相關劑量評估作業，達到環境永續利用之目的，故本計畫進行核電廠除役期間人員劑量評估模式與合理抑低策略。

II. 主要內容

針對工作人員體外劑量進行評估，評估模型參數包括 MCNP 輸入模型、粒子遷移模式、廠房空間位置等。本計畫除了使用電腦程式模擬軟體外，亦與國外文獻比較模擬數據結果，以驗證準確性。為增進輻射作業安全性，各輻射作業之規劃與管制，需考慮輻射工作人員有效劑量及集體有效劑量之合理抑低措施。

III. 結果與討論

本年度評估不同核電廠之除役模式以及評估參數。使用 DECRAD 軟體進行相關運算。此軟體會根據輸入拆廠作業資訊區分為計算模組及計畫模組兩部分，分別計算出整體拆解造成之集體劑量、所需人力、及除役步驟之劑量率，並針對個人平均劑量進行推估。個人劑量之影響會因實際人力配置、作業密集程度與工作效率等因素而有所差異。因此，對於評估後集體劑量較高之除役項目，應採取輻射防護措施或人力調度等方式，降低集體劑量以避免個人劑量超過法規限值。

IV. 結論

本年度計畫結果發現，人員劑量評估模式均有所不同，但皆有計算集體劑量與個人年劑量值，可經由此計算結果，評估工作人員之輻射劑量；故本計畫之建議劑量評估模式如下：劑量評估，係參考我國除役計畫之評估參數與數據結果，再依據 ICRP 60 報告進行人員劑量計算；環境空浮，係由空浮值經由比例運算後得到，並針對機組空浮進行計算；劑量轉換因子，係由 ICRP 60 報告中各核種產生衰變情形，並結合體內劑量計算公式，得到各核種之劑量轉換因子。

參考文獻

[1] Ola Eriksson. Nuclear Power and Resource Efficiency—A Proposal for a Revised Primary Energy Factor. Sustainability. 2017; 9(6): https://doi.org/10.3390/su906 1063
[2] U.-V. Diana. The World Nuclear Industry Status Report. 2019.
[3] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Battelle Memorial Institute. (1996). Revised Analysis of Decommissioning for the Reference Boiling Water Reactor Power Station (NUREG/CR-6174) Volume 1. Washinton, DC: United State Government.
[4] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Battelle Memorial Institute. (1980). Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station (NUREG/CR-0672). Washinton, D. C.: United State Government.
[5] M.-M. Be, V. Chiste, et al. “Table of Radionuclides”. ISBN 92-822-2206-3. France. 2004.
[6] Audrius Simonis, et al. Estimation of the Radiation Doses during the Dismantling of the Equipment in Building 117/1 at the Ignalina NPP. Annals of Nuclear Energy. 2018; 121(5): 29-35.

放射性物質排放及環境輻射影響評估之管制研析
Regulatory Requirements for Discharges of Radioactive Substances and Environment Impact Assessment

計畫編號：110-2623-E-010-005-NU
計畫主持人：吳杰
e-mail：jaywu@nycu.edu.tw
計畫協同主持人：黃玶吉
計畫參與人員：陳品琇
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

本研究探討對放射性物質排放之管制要求，於管制面須秉持正當性以檢視排放行為是否合理而可被授權，並須符合劑量限值授權排放限值以確保輻射安全，同時須遵循輻射合理抑低，進行環境影響評估以達到防護最適化，降低對環境的影響。本研究亦探討環境影響評估之技術規範，分析研究通用模型，探討曝露途徑、劑量模式，進行放射性物質排放限值之推導。最後研析對排放源項與環境之監測要求，提供主管機關精進完善國內的輻射防護管制體系，達成國內輻射民生應用的最適化與輻射劑量的合理抑低。

關鍵詞：放射性物質排放、排放限值、環境影響評估、環境監測。

Abstract

This study investigated the regulatory requirements for discharge of radioactive materials. In the aspect of control, legitimacy must be adhered to evaluate whether the discharge is reasonable and can be authorized. Meanwhile, it is necessary to conform the ALARA principle and conduct environmental impact assessment to achieve optimal radiation protection and reduce impact on the environment. This study also discussed the technical specifications of environmental impact assessment, analyzed the general models, exposure routes, dose models, and discharge limits for radioactive substances. The suggestions for planned exposure of radiation practice for discharges can be provided to achieve the comprehensive effect of optimizing radiation dose under the balance of social cost.

Keywords: radioactive substances discharge, discharge limit, environment impact assessment, environmental monitoring.

I. 前言

輻射作業設施或活動在正常運作期間或設施除役時，有可能會產生含有少量放射性物質的排放物，若要處理這些排放物質達到零排放是不太可能，且需要付出大量經濟成本才可達成。故國際規範建議，政府、主管機構、設施經營者都應秉持輻射防護三大理念：正當性、最適化與劑量限值來進行輻射安全管制，控制放射性物質排放對公眾造成之輻射曝露影響，在安全、經濟與環境保育下得到最妥適的平衡。

在管制立場上，管制機關可透過審查程序，要求輻射作業設施或活動從設計、建造、申請授權、運轉作業及監測等方面，預防放射性物質之排放或是將排放影響降至最低，以使對公眾和環境受曝露的影響程度低於危害輻射水平或是背景水平。

本計畫將依據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)公布的第 GSG-9 號報告[1]「Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment」彙整放射性物質排放之管制要求，並探討 IAEA 第 GSG-10 號報告[2]對放射性環境影響評估之技術規範需求，並依據 IAEA 第 RS-G-1.8 號報告[3]和 IAEA 第 TECDOC-1638 號報告[4]研析對排放源項、環境定期監測之要求與授權排放限值之設定，提供主管機關具有國際管制規範之依循，助於完善國內的輻射防護管制體系，達成國內輻射民生應用的最適化與輻射劑量的合理抑低。

II. 主要內容

所謂「排放」，意旨有計畫地且有控制地將氣態、溶膠態或液態等放射性物質釋放至環境中，上述定義並不包含因意外而釋放至環境中的情形。據國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第 103 號報告[5]之建議，此放射性物質排放係屬計畫曝露情境，IAEA 於 2008 年發佈第 GSG-9 報告「Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment」彙整放射性物質排放之管制要求及安全導則供國際參考。

基於探討放射性物質排放至環境的管制及環境影響，本研究依國際原子能總署之相關報告，依輻射防護正當化、最適化、劑量限度三原則，探討管制放射性物質排放所需面臨之關鍵問題，集合第 GSG-9 號報告、IAEA 第 RS-G-1.8 號報告和 IAEA 第 TECDOC-1638 號報告，研究國際對放射性物質排放所設立之管制規範與要求。同時依 IAEA 第 GSG-10 號報告，探討放射性物質排放須進行的環境影響評估之技術規範需求與評估方法，研析放射性物質排放行為之各項關鍵曝露途徑，彙整出通用型體外及體內劑量計算方式。最後在技術應用面上，引入日本打算將福島事故廢水經處理後排放高濃度的含氚廢水之實事議題，透過實際案例討論，掌握管制面如何落實輻射防護正當化、最適化、劑量限度三原則，期回饋至放射性物質排放與環境輻射影響評估的管制技術，針對輻射作業之計畫曝露提供管制建議，以達到綜衡社會成本下，實踐最適化管制與合理抑低輻射

劑量的綜效。

III. 結果與討論

輻射作業設施或活動在正常運轉期間或設施除役時，有可能會產生含有少量放射性物質的排放，若要處理這些排放物質達到零排放是不太可能，且需要付出更大的經濟成本才可達成。故在綜衡社會與經濟成本下，實踐最適化管制與合理抑低輻射劑量，IAEA 建議政府、管制機構、設施經營者都需秉持輻射防護三大理念：正當性、最適化與劑量限值來進行輻射安全管制，以控制放射性物質排放對公眾造成之輻射曝露影響。

在管制立場上，管制機關會要求輻射作業設施或活動從設計、建造、申請授權、運轉作業及監控等面向，預防放射性物質排放至環境中或是將此類排放的影響降至最低，以使對公眾和環境受曝露的影響程度低於危害輻射水平或是背景水平。依據對公眾和環境受曝露的影響程度，管制機關透過審查程序，依據設施經營者提出的放射性環境影響評估報告，決定採行豁免或是授權方式進行管制。

國際對授權許可放射性排放之重要規範，要求輻射作業設施或活動在正常運作期間或除役期間的所有情況下，公眾任一成員在有計畫性曝露情境下，授權所有放射源項對任何公眾所產生的最高可允許劑量限值為年有效劑量 1 毫西弗；在特殊條件下，可允許單一年度可以有較高的有效劑量，但連續 5 年內的平均年有效劑量不得超過 1 毫西弗。

設施經營者向管制機關申請授權排放時，應確定被排放物質的特性、活度，以及可能的排放地點及方法，且要能事先進行相關研究調查，確定所有可能造成公眾成員曝露之曝露途徑，評估此計畫性排放放射性物質行為，對代表人造成之年有效劑量是否可符合劑量限度，同時亦應依據放射性物質排放實施計畫與周圍環境特徵與人為活動，綜合評估放射性環境影響，秉持合理抑低原則提出最適化排放實施計畫與防護規劃，最後透過輻射監測計畫的執行，核實是否能符合授權的排放限值，以及預期造成的環境影響。

輻射環境影響評估是針對有計畫的曝露情境進行量化評估，包括正常運作下可能發生的曝露及潛在曝露，此可作為早期階段決策排放策略的一部分過程，亦可作為管制機關建立排放限值，進行授權許可過程的一部份。IAEA 於 2018 年發行 GSG-10 報告「Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities」，說明事前進行放射性環境影響評估是授權排放程序中重要的一環，用以評估對公眾或環境的輻射影響，該報告為輻射作業設施和活動所需之輻射環境影響評估提供安全評估導則與建議，包括應說明輻射作業中所存在的放射性核種種類、數量與型態，以及在正常操作與預期事故條件下的可能排放方式；同時亦須掌握放射性核種排放至環境中的相關擴散與傳輸資訊，包括地質、水文、氣象與生物介質特徵等，評估過程須結合人口統計學、生活、飲食習慣、以及動植物生態等，定義出排放行為所影響的潛在曝露群體，透過分析土地使用和相關活動行為(如農畜業)，評估關鍵曝露途徑，以得出對代表人或關鍵群體之輻射劑量影響。

管制機關應事先規定需要進行輻射環境影響評估的輻射作業設施或活動的類型，且應訂定相關評估標準。輻射環境影響評估方法可依據輻射作業設施或活動的複雜程度以及曝露情境，透過建立數學計算方法進行輻射劑量影響的量化分析。而通用的數學計算模式常以簡單保守評估目的為出發點，需要考量假設條件、概念模型、數學模型、以及輸入參數的保守合理性，配合各種公眾和環境曝露情境的各種可能性，增加模型計算的複雜性與多樣性，以得到一個明確且可辯護的輻射環境影響評估結論，證明可符合對任何公眾所產生的最高可允許劑量限值為年有效劑量 1 毫西弗。

以國內而言，國內主管機關為原子能委員會(以下簡稱原能會)，於輻射防護法 (以下簡稱輻防法) [6]授權，若輻射工作場所排放含放射性物質之廢氣或廢水者，設施經營者應進行輻射安全評估，並報請主管機關核准後，始得為之；且授權排放限值之規定見於游離輻射防護安全標準[7]第 13 條。除此之外，設施經營者於規劃、設計及進行輻射作業時，可採模式計算或符合游離輻射防護安全標準附表四之二規定之放射性核種年平均濃度，以確保符合一般人之劑量限值。

本研究為精進放射性物質排放之輻射環境影響評估技術，研析 IAEA Safety Report Series No.19 報告[8]，彙整提供通用模型與評估方法論，包括：

(一) 大氣中煙羽傳輸與擴散

$$C_A = \frac{P_P Q_i}{V} \qquad \text{式(1)}$$

其中：

C_A＝下風向距離 x 處的地面空氣濃度 (Bq/m^3)

Q_i＝放射性核種平均排放率 (Bq/s)

V＝排氣口或煙囪之釋放點的體積空氣流量 (m^3/s)

P_P＝風吹向偵測點的時間分率(無因數)，建議值為 0.25

(二) 水中傳輸與擴散

$$C_{w,tot} = C_0 = \frac{Q_i}{F} \qquad \text{式(2)}$$

其中：

$C_{w,tot}$＝放射性核種總濃度 (Bq/m^3)

C_0＝污水排放口的放射性核種總濃度 (Bq/m^3)

Q_i＝放射性核種平均排放率 (Bq/s)

F＝液體放流之流速 (m^3/s)

(三) 地面沉降

$$C_{gr} = \frac{\dot{d}_i[1 - \exp\left(-\lambda_{E_i^s} t_b\right)]}{\lambda_{E_i^s}} \qquad \text{式(3)}$$

其中：

$\dot{d}_i$＝因乾、濕沉降，核種 i 每日平均沉降速率 $(\mathrm{Bq}\cdot m^{-2}\cdot d^{-1})$

$\lambda_{E_i^s}$＝土壤表面 10 cm 至 20 cm，每日耗減活度之有效速率常數 (d^{-1})，$\lambda_{E_i^s}=\lambda_s+\lambda_i$，其中$\lambda_s$為核種衰變以外的土壤耗減活度的速率常數，$\lambda_i$為放射性核種之衰變常數

t_b＝放射性物質排放的持續時間 (d)

(四) 動物產品濃度

計算牛奶之濃度：

$$C_{m,i}=F_m\left(C_{a,i}Q_m+C_{w,i}Q_w\right)\exp(-\lambda_i t_m) \quad 式(4)$$

其中：

$C_{m,i}$＝牛奶中之核種 i 濃度 (Bq/L)

F_m＝動物每日攝入的放射性核種活度，轉換在牛奶中的比例 (d/L)

$C_{a,i}$＝動物飼料中之核種 i 濃度 $(Bq/Kg$，乾重$)$

$C_{w,i}$＝水中之核種 i 濃度 (Bq/m^3)

Q_m＝動物每日消耗的飼料量 $(kg/d$，乾重$)$，

Q_w＝動物每日消耗的水量 (m^3/d)

λ_i＝放射性核種之衰變常數 (d^{-1})

t_m＝採集牛奶到食用之間的平均時間 (d)

計算肉品之濃度：

$$C_{f,i}=F_m\left(C_{a,i}Q_f+C_{w,i}Q_w\right)\exp(-\lambda_i t_f) \quad 式(5)$$

其中：

$C_{f,i}$＝新鮮肉品中之放射性核種 i 濃度 (Bq/kg)

F_f＝動物每日攝入的放射性核種活度，轉換在肉品中的比例 (d/kg)

Q_f＝動物每日消耗的飼料量 $(kg/d$，乾重$)$，

t_f＝採集肉品到食用之間的平均時間 (d)

(五) 水生環境之遷移

$$C_{af,i}=C_{w,i}B_p/1000 \quad 式(6)$$

其中：

$C_{af,i}$＝水產食品中的放射性核種 i 濃度 (Bq/kg)

$C_{w,i}$＝水中溶解的放射性核種 i 濃度 (Bq/m^3)

B_p＝水產食品中的放射性核種 i 濃度與其在水中溶解濃度之平衡分率，為生物累積因子

1000＝m^3轉換成 L 之因子

(六) 懸浮沉積物中的濃度

$$C_{s,w}=\frac{0.001K_dC_{w,tot}}{1+0.001S_sK_d}=0.001K_dC_{w,s} \quad 式(7)$$

其中：

$C_{s,w}$＝懸浮沉積物吸附的放射性核種濃度 (Bq/kg)

K_d＝分配係數 (L/kg)

$C_{w,s}$＝地表水中溶解放射性核種濃度 (Bq/m^3)

(七) 體外劑量評估

計算大氣中放射性核種造成的體外曝露：

$$E_{im}=C_ADF_{im}O_f \quad 式(8)$$

其中：

E_{im}＝空浸於放射性物質煙羽中造成的年平均有效劑量 (Sv/y)

C_A＝放射性核種在空氣中的年平均濃度 (Bq/m^3)

DF_{im}＝空浸曝露途徑之有效劑量轉換係數 $(Sv/y)/(Bq/m^3)$

Q_f＝每年接受此曝露途徑之比率

計算大氣中放射性核種沉積在地面造成的體外輻射：

$$E_{gr}=C_{gr}DF_{gr}O_f \quad 式(9)$$

其中：

E_{gr}＝放射性核種地表沉積造成的年平均有效劑量 (Sv/y)

C_{gr}＝放射性核種地表沉積的濃度 (Bq/m^2)

DF_{gr}＝地表沉積曝露途徑之有效劑量轉換係數 $(Sv/y)/(Bq/m^2)$

Q_f＝每年接受此曝露途徑之比率

計算沉積物造成的體外輻射：

$$E_m=C_{s,s}DF_{gr}O_f \quad 式(10)$$

其中：

E_m＝放射性核種沉積物造成之有效劑量 (Sv/y)

$C_{s,s}$＝海岸/海灘沉積物中的表面活度濃度 (Bq/m^2)

DF_{gr}＝地表沉積曝露途徑之有效劑量轉換係數

$(Sv/y)/(Bq/m^2)$

Q_f＝每年接受此曝露途徑之比率

(八) 體內劑量評估

計算吸入放射性核種造成體內曝露劑量：

$$E_{inh} = C_A R_{inh} DF_{inh} \quad \text{式(11)}$$

其中：

E_{inh}＝吸入放射性核種造成約定有效劑量 (Sv/y)

C_A＝放射性核種在空氣中的年平均濃度 (Bq/m^3)

R_{inh}＝呼吸率 m^3/y

DF_{inh}＝吸入曝露途徑有效劑量轉換係數(Sv/Bq)

計算攝入放射性核種造成體內曝露劑量：

$$E_{ing,p} = C_{p,i} H_p DF_{ing} \quad \text{式(12)}$$

其中：

$E_{ing,p}$＝攝入含有放射性核種食品造成之約定有效劑量 (Sv/y)

$C_{p,i}$＝食用所含放射性核種之食品的濃度 (Bq/kg)

H_p＝每年對食品 p 的食用量 kg/y

DF_{ing}＝攝入曝露途徑之有效劑量轉換係數 (Sv/Bq)

建立環境輻射監測計畫是在安全目標之下，以即時監控防止環境污染，確保達到民眾劑量小於 1 mSv 目標，在例行運轉下監測計畫可區分為排放源監測以及環境監測。有關源監測是對特定輻射源或放射性核種之輻射水平測量，設計源監測計畫係假設所有輻射源都是相同的，旨在測量源處的劑量率或放射性核種的排放率，訂定所需之依監測規模和監測頻率。而環境監測可以進一步細分為二類，包括與源相關之環境監測以及與人相關之環境監測，與源相關的環境監測涉及測量空氣中的吸收劑量率或由特定源排放的活度濃度；與人相關的環境監測是應用在同一設施可能具有多個輻射來源，為確保對公眾個體劑量的安全所進行的環境監測。

環境環境監測計畫包括測量與人體曝露相關的環境樣品中的輻射場和放射性核種活度濃度，主要為空氣、飲用水、農產品、天然食品、以及可作為放射性核種累積與趨勢指標水平之代表生物體。另環境監測計畫需考量環境特徵，規劃進行環境中活度濃度或劑量率的長期趨勢變化，用以同步驗證源監測的結果，並驗證環境中放射性核種遷移的預測分析。

綜上所述，管制放射性物質排放之重要要求，包括正當性、在符合劑量限度下授權排放限值，以及事先進行輻射劑量影響評估達到合理抑低最適化目標，並透過輻射監測計畫作為核實排放限值，以及預期造成的環境影響。以此原則，以日本福島電廠含氚廢水排放之時事案例探討，可得到以下的發現：

(1) 日本 ALPS 小委員於 2021 年 2 月 10 日就含氚廢水的處置方式作全面檢視提出評估結果，評估要點包括考量所需處置時間、處置花費、技術議題、法規議題、社會議題以及執行可行性，並於日本經濟產業省網頁正式公布「福島 ALPS 處理後含氚水之處置規劃報告書」[8]，評估內容討論有「地層注入」、「地下埋設」、「海洋排放」、「水蒸氣排放」及「氫氣排放」等 5 種處置方式的可行性，最後建議「海洋排放」及「水蒸氣排放」是具較可行之處置方案。

(2) 基於 ALPS 小委員會之專家研究結果和 IAEA 之審查、辦理公聽會，彙整各方相關意見，於 2021 年 4 月 13 日由經產省公佈有關處置福島第一核電廠 ALPS 含氚廢水的基本方針[9]，定調將致力於確保排放的安全性、透明性及可靠性。

(3) 為確保排放的安全性，ALPS 含氚廢水會進行淨化/再淨化和稀釋處理，根據國際安全標準，確保對公眾輻射劑量每年低於 1 毫西弗，並基於合理抑低，超標得含氚量將透過海水稀釋，排放目標以不超過日本國家管制標準的 1/40，即為 1500 貝克/升，此數值亦為世界衛生組織(World Health Organization, 以下簡稱 WHO)飲用水標準每公升 10,000 貝克的約七分之一；同時每年之排放總量亦將低於事故發生前的管理目標值，即為每年 22 兆貝克。

(4) 東京電力提送排放實施計畫，送交日原子力規制委員會審查，同時日本政府也邀請 IAEA 進行國際

IV. 結論

本計畫透過研析國際相關安全導則，彙整放射性物質排放之管制要求、排放限值管制、曝露途徑以及放射性環境影響安全評估之管制規範，提供國內輻射防護管制參考。同時為精進國內針對放射性物質之排放管制需求為目的，已研析 IAEA GSG-9 的放射性物質排放管制要求，包括氣體排放及液體排放分析，並探討 IAEA GSR Part 3 報告內之安全規範，彙整出設施或活動在進行排放或運轉前所須遵循之依據及授權規則。

本計畫亦探討授權放射性物質排放對環境造成之影響評估方法，研析 IAEA GSG-10 報告據以提出相關環境安全評估方法及要求，同時亦透過研析 IAEA RS-G-1.8 及 TECDOC-1638，彙整進行授權前或進行安全評估時需要進行之射源監測、環境監測以及放射性物質之可能曝露途徑，進一步討論不同排放的關鍵核種與曝露途徑對於代表人有效劑量的影響及劑量推導，以供探討估計劑量與現行國內法規之排放限值之比較，協助國內對放射性物質之排放進行管制，並與國際接軌。

參考文獻

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA), Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. 2018, IAEA General Safety Guide No.

GSG-9.
[2] International Atomic Energy Agency (IAEA), Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. 2018, IAEA General Safety Guide No. GSG-10.
[3] International Atomic Energy Agency (IAEA), Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. 2005, IAEA Safety Guide No. RS-G-1.8.
[4] International Atomic Energy Agency (IAEA), Setting Authorized Limits for Radioactive Discharges: Practical Issues to Consider. 2010, IAEA-TECDOC-1638.
[5] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Pulication 103. Ann ICRP 37 (2-4).
[6] 行政院原子能委員會，游離輻射防護法，91 年 1 月 30 日發布，華總一義字第 09100019000 號。
[7] [11] 行政院原子能委員會，游離輻射防護安全標準，民國 59 年 7 月 29 日發布，94 年 12 月 30 日修正，會輻字第 0940041080 號。
[8] The Subcommittee on Handling of the ALPS treated water Report, (February 10, 2020)，本計畫於 2021 年 9 取自日本經濟產業省網頁 https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/atw.html
[9] Basic Policy on handling of ALPS treated water at the Tokyo Electric Power Company Holdings’ Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (April 13, 2021)，本計畫於 2021 年 9 取自日本經濟產業省網頁 https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/atw.html

職業、民眾及環境輻射防護管制措施精進研析
The Study on the Occupational, Public and the Environment Radiation Protection

計畫編號：110-2623-E-182-001-NU
計畫主持人：趙自強
e-mail：chaot@mail.cgu.edu.tw
計畫共同主持人：董傳中、林倩伃
執行單位：長庚大學醫學影像暨放射科學系

摘要

職業曝露為從事核能工業、醫療事業，運輸、教育研究，以及其他相關行業從業人員於工作時接觸射源或可發生游離輻射設施所受到的曝露。ICRP 在 2007 年公佈最新的輻射防護基本建議－ICRP 103，IAEA 也於 2018 年發布新的職業輻射防護安全指引－IAEA GSG-7。這也意味著，當我國開始研擬採用 2007 年新的 ICRP 建議書和 2014 年 IAEA 國際基本安全標準之餘，我們也應該檢視我國輻防管制體系在職業曝露輻射防護是否有進一步研析與精進之必要，以強化輻防管制效能，並確保人員輻射安全。在這些最新的建議書中，提出了一個更穩定的架構，除了既有的正當化、最適化、限制化三原則之外，更將此三原則實踐到新的曝露情境，包括計畫性曝露、既存性曝露、緊急性曝露。除此之外，工作人員多元化態樣需要新的管制哲學、例如懷孕或哺乳工作人員、流動人員、緊急曝露工作人員…等，除了輻射安全之外，還需考量健康權、工作權等不同面向。本計畫除研析 IAEA-GSG-7 職業輻射防護安全指引之外，還探討了國際間對輻射工作人員之定義、分級管理法規，並檢視了我國現行職業輻射防護管制作法，並提出相關精進管制措施之建議。

關鍵詞：職業曝露、計畫性曝露、既存性曝露、緊急性曝露、劑量約束、劑量指引。

Abstract

Occupational exposure is the exposure of workers engaged in nuclear energy industry, healthcare, transportation, education and research, and other related industries when they work with radioactive sources or radiation generator. ICRP published the latest recommendations for radiation protection – ICRP-103 in 2007, and IAEA also issued a new occupational radiation protection guideline – IAEA-GSG-7 in 2018. Before Taiwan begins to adopt the new ICRP and IAEA safety standard, we should also review whether radiation protection protocols in Taiwan has further improved in occupational exposure radiation protection. The refinement is needed in order to strengthen the effectiveness of radiation protection control and ensure the radiation safety of personnel. In these latest recommendations, a more stable framework is proposed, in addition to the three principles of justification, optimization, and limitation, new exposure situations, including planned exposure situation, existing exposure situation, emergency exposure situation were proposed and coupled with the three principles. In addition, new types of workers are emerging, requiring new regulatory philosophies, such as pregnant or breastfeeding workers, external workers, emergency exposure workers, etc. In addition to radiation safety, it is also necessary to consider the right to health, and the right to work. In addition to the analysis of IAEA-GSG-7 occupational radiation protection safety guidelines, this project also discusses the international definition of radiation workers, hierarchical management regulations, and examines current occupational radiation protection regulations in Taiwan, and proposes improvements recommendations for occupation radiation protection.

Keywords: Occupational exposure, Planned exposure situation, Existing exposure situation, Emergency exposure situation, Dose constraint, Reference Level.

I. 前言

我國近年研擬 2007 年新發布之 ICRP-103 建議書[1]，開始進行修法作業。在職業曝露方面，參考 IAEA-GSR-3 (IAEA IBSS) [2]和 IAEA-GSG-7[3]。在這些最新的建議書中，提出一個更穩定的架構，除了既有的正當化、最適化、限制化三原則之外，更將此三原則實踐到新的曝露情境(exposure situation)，主要包括計畫性曝露(planned exposure situation)、既存性曝露(existing exposure situation)、緊急性曝露(emergency exposure situation)。此外 ICRP-60 [4]的管制分界，原本是訂在人工輻射與天然輻射之間，人工輻射須接受管制，而天然輻射不適用游離輻射防護法規定。在管制分類上，正常狀況為輻射作業，而異常狀況採輻射干預，但這種分類方式造成很多管制困難，因此，ICRP-103 建議書[1]引進了三情境的概念，讓輻射管制更加完善。雖然，緊急性曝露和既存性曝露都會帶來職業曝露，但計畫性曝露還是職業曝露最常見的來源，並須仰賴輻射防護計畫之完善規劃、合理審查、與實際執行，和追蹤檢討，端賴主管機關、設施經營者、雇主、和工作人員各司其責，才能共同完成此輻射防護計畫，在 IAEA-GSG-7[3]中，詳述了輻射防護計畫各細項的撰寫，足供各界參考，雖未必完全適用我國的法規與社會現況，但可為未來改進之參考。更重要的是,，職業曝露安全指引只是保護職業曝露人員整體健康和安全的一部分，此規劃必須與職業安全衛生、醫療和消防安全等其他領域合作。最後，劑量約束、劑量指引、潛在曝露、調查基準、紀錄基準、緊急/既存性曝露、和特殊工作人員之職業曝露概念，之前已散見在我國法規各處，但因應最新輻防建議書之演進、進步人權之觀念、以及國際、國內跨界合作之新態樣，在 IAEA-GSG-7[3]中也有許多新建議。

II. 主要內容

本計畫研究重點為：1. 研析 IAEA-GSG-7 職業輻射防護安全指引；2. 研析國際間對輻射工作人員之定義、分級管理法規；3. 檢視我國職業輻射防護管制作法面臨的問題，並提出相關精進管制措施之具體建議。

III. 結果與討論

- **曝露三情境**

ICRP-103 建議書提出新的曝露三情境，包括計畫性曝露、緊急性曝露、和既存性曝露[1]。計畫性曝露必須向主管機關提出申請(正當化 justification)，撰寫輻射防護計畫經過主管機關審核之後(最適化 optimisation)，同意了才能實施，之後便依照計畫進行例行性的輻射作業與防護，以確保工作人員與民眾不超過劑量限度(限制化 limitation)，並合理抑低(as low as reasonably achievable，簡稱 ALARA)，最適化)。緊急性曝露是針對意外事故，導致工作人員或民眾接受緊急性或是短時間的曝露，需要緊急應變措施來降低緊急性曝露(正當化)，並須確保工作人員與民眾在採取此應變措施時其劑量合理抑低(最適化)。既存性曝露，分為兩類，A 類為事故後殘留的長期污染，B 類為人為行動造成的增強性天然輻射，可透過適當防治措施降低民眾劑量。採取緊急性曝露的應變措施與既存性曝露的防治措施可能會增加工作人員的職業曝露，但不做的話，公眾的緊急性曝露和既存性曝露可能無法降低，主管機關就須進行正當化與最適化的衡量來決定是否採取這些措施。

對於可控的輻射源，輻防劑量多以劑量限度(dose limit)與劑量約束(dose constraint)來管制，對於不可控的輻射源，則多以劑量指引(reference level)來管制。不管是計畫性曝露、緊急性曝露、和既存性曝露，都與職業曝露相關。接受職業曝露的人員包含一般工作人員、懷孕工作人員、哺乳工作人員及流動人員，其中哺乳工作人員及流動人員在過去法規著墨不深，卻是 IAEA-GSG-7[3]的重點之一。

計畫性曝露就是 ICRP-60 所說的輻射作業[4]，因此可以在開始作業之前就做好防護和安全措施，並限制相關的照射及其發生的可能性。其職業曝露以劑量約束與劑量限度管制，並經由良好的設施、設備和操作程序設計、培訓…等來合理抑低劑量，除了正常的計畫性曝露之外，設施經營者也應評估可能的意外劑量，稱為潛在曝露，潛在曝露的來源、發生機率、程度及其風險，也要在輻射防護計畫中探討。緊急性曝露肇因於事故、惡意行為或意外事件，需要迅速採取應變措施以避免或減少不利後果，這些措施分為可事前規劃的預防性措施和因時、因地、因劑量動態調整的緊急及早期措施，一旦緊急性曝露真正發生，必須採取應變措施才能減少曝露。既存性曝露為需要做出決定時已經存在的曝露，可為人工增強天然輻射或過去排除的放射性物質、以及緊急性曝露之後仍然存在的殘餘曝露，可採取防治措施以降低既存性曝露。緊急性曝露與既存性曝露之職業劑量以劑量約束來管制。

- **劑量系統**

輻射防護常用的單位可分成物理量、操作量、防護量三類，其中物理量包含通量(fluence)、克馬(kerma)與吸收劑量(absorbed dose)。防護量主要用於推斷人類的健康風險，包含器官劑量(D_T, organ absorbed dose)，等效劑量(H_T, equivalent dose)和有效劑量(E, effective dose)。

雖然防護量可直接轉成風險，但不能直接測量，ICRU 引入了實際用於輻射防護的操作量，這些量的定義可以在 ICRP-103[1]、IAEA-GSR-3 [2]、及 IAEA-GSG-7[3]中找到。操作量可在輻射作業中遇到的多數輻射場提供方便且有效的劑量估計，並可在需要時，例如操作量超過紀錄水平時，透過 ICRU 提供的轉換因子轉換為防護量。

在物理量、操作量、防護量被定義之後，在計畫性曝露中，可用劑量限度、劑量約束、以及豁免水平來盡可能抑低輻射劑量。劑量限度不包含醫療曝露，政府、主管機關、設施經營者與僱主、及工作人員皆應確保任何個人(individual)不超過其劑量限度。劑量限度僅適用於計畫性曝露，亦即可控的輻射源，管制的對像是個人的防護量。劑量限度在 ICRP-103[1]、IAEA-GSR-3 [2]、及 IAEA-GSG-7[3]皆有表列，這些劑量建議值，除了眼球水晶體劑量外，皆與 ICRP-60 相同。至於工作場所中之非職業曝露工作人員，其劑量限度與公眾曝露相同。

劑量約束用於最適化輻射安全，希望能將所有曝露控制在考慮到經濟、社會和環境因素的合理可實現的最低水平。劑量約束適用於計畫性曝露的職業曝露和公眾曝露。不同於劑量限度管制個人的防護量，劑量約束管制的是個別的輻射源，也是用於最適化過程中的邊際條件，並且可用於評估現行的輻射防護計畫是否適用或者需要調整。劑量約束值的設定需要結合其他健康和安全規定以及目前可用的技術。另外，劑量約束定義於單次照射劑量或是單次作業的多個曝露，而不是像劑量限度定義於一定的時間週期。

- **職業曝露分級管理**

有了劑量系統後，便可以此為基礎建立分級管理，IAEA-GSG-7[3]建議主管機關應採用分級方法實施輻射安全管理，使得管制強度與曝露的輻射風險相稱。尤其是計畫性曝露，需與輻射源強度相稱，目前國內依據「放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法」將輻射源分為豁免、登記、許可等三類；在 IAEA-GSG-7[3] 建議多了通知(notification)一類。可能是因為有些國家輻防業務繁多，增加一類減少管制負擔，目前我國三分級運作良好，或可不必跟進。

- **計畫性曝露**

計畫性曝露最適化須考量可用於輻射防護的資源、不同工作人員個體曝露和集體曝露的分佈、潛在曝露的發生機率與程度、輻射防護措施對工作人員或公眾的非輻射風險潛在影響、其他機構經驗、和社會經濟成本，這些考量仰賴輻射防護計畫的規劃、審查、執行、與再檢視。

輻射防護計畫的總體目標是通過採用與風險的性質和程度相稱的管理結構、政策、程序和組織安排來履行管理層對防護和安全的責任[3]。輻射防護計畫應涵蓋有助於防護和安全的所有主要要素，並涵蓋輻射作業的生命週期，從設計、試運轉、作業、改善、直至退役。輻射安全只是輻射防護計畫中確保工作人員整體安全的要件之一，其制定和管理應與職業安全、工業安全和消防安全等其他領域密切合作。輻射防護計畫應最大程度利用工程控制(Engineered control-防呆措施)，優先於行政控制(Administrative controls)和個人防護設備(PPE, Personal Protective Equipment)來維護輻射安全。

輻射防護計畫的目標不止於確保工作人員和公眾接受的劑量低於劑量限度，而是應主要考量如何盡可能降低計畫性曝露的劑量，包括防止或減少潛在曝露和減輕輻射意外的措施。而輻射防護計畫的作業，始於輻射安全評估。

不同的輻射作業場所會有不同的曝露狀況，這些作業可能有很大差異，例如機場行李檢查 X 光機其情況可能十分簡單，核電廠卻是非常複雜。 應以分級方式評估輻射防護計畫以適應各種狀況。作為確定輻射防護計畫的第一步。

- **輻射防護計畫**

在我國「游離輻射防護法施行細則」第 2 條中規定，設施經營者依本法第七條第二項規定擬訂輻射防護計畫。在 IAEA-GSG-7[3]中，則對輻射防護計畫的範圍有更多的建議。

- **緊急性曝露**

職業曝露在緊急性曝露的應用可參考 IAEA-GSR-3 [2]和 IAEA-GSG-7[3]。在事故發生前數小時，預期劑量最高，可進行預防性疏散，而後數小時到數日，需進行緊急及早期措施。參與緊急應變的工作人員可能有四種態樣：[3]

- 具有特定職責的緊急應變工作人員(緊急曝露人員)
- 在工作場所未參與緊急應變的工作人員(職業曝露人員)
- 被要求離開現場的工作人員(緊急性曝露民眾)
- 在事故開始時意外曝露且此曝露與緊急應變無關的工作人員，這些人需要醫務監護(medical follow up)。

此外，參與緊急應變的志工應登記在冊且視同緊急曝露人員(§4.4)、軍警；醫療人員也是。對於緊急曝露人員應施予以下措施：[3]

- 預先培訓預指定之緊急曝露人員
- 及時培訓未事先指定的緊急曝露人員，提供如何在緊急情況下履行職責並保護自己的說明
- 管理、控制和記錄接受的劑量
- 提供適當的專業個人防護設備和監控設備
- 酌情提供碘劑
- 醫療醫務監護和心理諮詢
- 簽署知情同意書

在緊急性曝露時，緊急性曝露民眾和緊急曝露人員之間的區別為：緊急性曝露民眾因意外且未採取必要應變措施而導致曝露，而緊急曝露人員是為了實施緊急應變措施而接受曝露，其曝露始於執行應變措施，並以完成應變措施或宣布終止緊急情況結束。因此，在應變措施準備階段，應證明應變措施對緊急曝露人員的風險，遠小於緊急性曝露民眾的利益(正當化)。然後，所建議之緊急應變措施劑量指引進行劑量最適化過程，如果超過劑量指引，則此應變措施應是不合適的，與劑量約束相同，劑量指引並非回溯性劑量，與劑量指引進行比較的劑量通常是預期劑量，即未來可能接受的劑量，因為只有未來的劑量會受到應變措施的影響。

緊急曝露人員可分成三類，分別適用不同劑量指引：[3]

- C1. 在現場採取緩解措施和緊急保護措施的緊急曝露人員，包括救生措施、防止嚴重傷害的措施、防止可能對人類和環境產生重大影響的災難性條件發展的措施、防止嚴重確定性影響的措施和採取措施避免大的集體劑量。
  - 必須在準備階段指定為此類人員
  - 受僱於設施經營者或應變組織，應接受職業輻射防護培訓。
- C2. 在場外採取緊急防護措施（例如疏散、庇護和輻射監測），以避免高的集體劑量
  - 警察、消防員、醫務人員以及疏散車輛的司機和工作人員
  - 在應變反應中擔任預先指定的職責
  - 應定期接受職業輻射防護培訓。但平常不被視為職業曝露，雇主是應變組織。
- C3. 在場外採取早期保護措施和其他反應措施（例如疏散、除污和環境監測）以及旨在終止緊急情況的其他措施。
  - 可能不會在準備階段被指定為應變工作人員
  - 通常不會被視為職業曝露
  - 可能未接受任何相關訓練，包括輻射防護訓練。

由此可知，能超過劑量指引的緊急曝露人員須為 C1 場內人員，受僱於設施經營者或應變組織，並應接受職業輻射防護培訓，在準備階段前已被指定。應變組織聘用之場外警察、消防員、醫務人員以及疏散車輛的司機和工作人員，不論是否事先有培訓，皆不得超過 500 mSv 之劑量指引[3]。

超過某些劑量值的緊急曝露人員需接受醫務監護(§4.30-31)：[3]

- >100 mSv (一個月)
  - 應評估特定輻射敏感器官的等效劑量，作為醫務監護和諮詢的基礎
  - 可再度進行輻射工作
- >200 mSv
  - 應評估特定輻射敏感器官的等效劑量，作為醫務監護和諮詢的基礎
  - 不應再度進行輻射工作
- >500 mSv 或出現確定性效應

- 立即進行醫學檢查、諮詢和指定治療
- 進行污染控制
- 如果可能，立即進行除污
- 進行長期醫療追蹤
- 提供全面的心理輔導

- **既存性曝露**

IAEA-GSG-7 將既存性曝露可分為兩類，並以防治措施預防或減少既存性曝露，既存性曝露之防治措施通常可分為兩類：[3]

- 補救措施(remedial action)：去除既存性曝露的輻射源或減少其活度與數量，例如從污染場域清除殘留的放射性物質。
- 防護措施(protective action)：既存性曝露的保護措施採用限制曝露途徑，而不是對輻射源本身操作的措施，例如，限制進入受污染區域和限制使用受污染的飲用水。

更多防治措施的探討可見 IAEA-WS-G-3.1[5]。

既存性曝露除了直接由殘留放射性物質產生之外，也可能由含有殘留放射性物質的既存性商品間接產生。既存性商品指內含了既存性放射性物質之民生物品，包括建築材料、食品、飼料、飲用水等民生原料或產品，其曝露屬於既存性曝露。

既存性曝露相關工作人員也可分為兩種態樣，兩者受防治措施影響不同：[3]

- 進行防治措施的工作人員，因其工作涉及殘餘放射性物質的處理、運輸或處置，其曝露可因其工作的直接結果而增加。
- 未採取任何防治措施即在既存性曝露下工作的工作人員，由於採取防治措施，這些工作人員的曝露最終可能減少。

因此，若進行防治措施，前者劑量增加，後者劑量減少，反之亦反之，此外，研究亦指出，許多核子事故或歷史事件殘留污染，即使未經防治措施，劑量也會快速降低，因此防治措施正當化十分重要。因既存性曝露之劑量遠低於造成確定效應的劑量限值，通常此類曝露只考慮機率效應。還要考量長期與後代的效應，此正當化考量有時非常複雜。補救措施的整體利益，有時還不限於減少個人劑量和集體劑量，也包括預期降低民眾焦慮。

既存性曝露的最適化通常須訂定劑量指引，通常以代表人的年有效劑量表示，範圍為 1-20 mSv。例如，氡曝露的劑量指引通常以空氣中的年平均氡濃度表示，劑量指引為氡濃度 1000 Bq/m^3，該值假設平衡係數為 0.4，年工作 2000 小時，此劑量約等於每年 10 mSv 。機組人員接受的平均劑量通常在 1-3 mSv/年的範圍內，某些國家報告的最大值為 3.5 至 6.5 mSv/年，因此澳洲將機組人員劑量指引訂為年劑量< 6 mSv。

既存性曝露的補救措施需撰寫補救計畫，內容包括：[3]

- 污染的性質和程度；
- 補救工作人員的曝露途徑；
- 評估所有可能接觸途徑的工作人員個人劑量；
- 評估補救措施工作期間的健康和安全問題，包括使用適當的個人防護設備。

- **特殊工作人員**

IAEA-GSG-7 列出兩類特殊工作人員，例如：[3]

- 懷孕及哺乳女性員工，本身和胚胎、胎兒或母乳喂養的嬰兒都有曝露的風險。
- 流動人員：經常在另一雇主的現場工作並可能因使用輻射而受到曝露的工作人員，通常受僱於承包商，可分為三種態樣；
  - 態樣 1：流動人員無射源、設施經營者有射源
    - 設施經營者是註冊人或被許可人，而承包商只是雇主
  - 態樣 2：流動人員有射源、設施經營者無射源
    - 承包商是註冊人或被許可人，而設施經營者只是發包的業主
  - 態樣 3：流動人員有射源、設施經營者有射源
    - 設施經營者和承包商都是註冊人或被許可人

雖然媽媽是職業曝露工作人員，但胚胎或胎兒為一般民眾，且因其平均餘命較長，所受風險較高，宜關注其曝露途徑。當胚胎在子宮內時，可能受到外部的輻射源引起的體外曝露，不僅照射母體組織，還照射胚胎或胎兒。或是由於媽媽攝入放射性核種，這些核種或通過胎盤轉移到胎兒造成體內曝露，或存在於媽媽中空器官，如膀胱或腸道，造成胎兒體外曝露。對哺乳的嬰兒，可能接受媽媽身體中的放射性核種穿透輻射引起的體外曝露，或是隨母乳從媽媽體內轉移到嬰兒體內的體內曝露。由於對兒童的劑量限度更為嚴格，女性工作人員在懷孕和哺乳期間的劑量監測，應評估所有相關的體外及體內曝露途徑。女性工作人員在懷孕和哺乳期間其新陳代謝可能改變，造成體內劑量改變，可參考 ICRP-88[6]。ICRP-88 公佈了媽媽攝入放射性核種對胚胎或胎兒的劑量資訊，包括基於生物動力學和劑量學模型的劑量係數，此模型考慮了放射性核種從媽媽胎盤的轉移，以及胎盤和媽媽組織中放射性核種引起的曝露之劑量係數，還提供了胎兒的器官劑量係數[6]。

按我國法規，如游離輻射防護安全標準第 11 條規定「雇主於接獲女性輻射工作人員告知懷孕後，應即檢討其工作條件，使其胚胎或胎兒接受與一般人相同之輻射防護。前項女性輻射工作人員，其膳餘妊娠期間下腹部表面之等價劑量，不得超過二毫西弗，且攝入體內放射性核種造成之約定有效劑量不得超過一毫西弗。」然而，隨著時代進步，女性的隱私權與工作權更受保護，IAEA-GSG-7 [3]建議，為尊重懷孕女性工作人員，不能強迫她通知雇主。但是，管理階層需要告知女性工作人員盡快通知雇主的重要性，以便相應地調整職業曝露的工作條件，以保護胚胎或胎兒或母乳喂養的嬰兒。此類通知不應被視為將女性工作人員排除在工作之外的理由。若媽媽堅持繼續工作，其劑量計配戴位置、紀錄基

準、調查基準都要評估調整。如何在法規中兼顧女性健康權、工作權及隱私權，將是立法與執法的一大挑戰，我們也當思想這樣的設計是否符合我國國情。

對於流動人員，過去因為法規不完整，流動人員經常面對許多問題，例如：流動人員的體檢項目未必符合工作場域的需求、流動人員的教育訓練與實際操作項目與面對風險未必相關、流動人員的劑量計讀與紀錄，可能因設施經營者與雇主有不同背景值產生爭議，甚至流動人員有多份輻射相關工作，其總劑量或超過劑量限度。因此，歐盟已強調重複監管(overlapping management)與劑量護照(dose passport)以管制其經常發生的跨國流動人員問題，這些種種也足供我國參考。

流動人員之雇主可同時為設施經營者和承包商，設施經營者對設施場域擁有主要控制權，而承包商僅依契約提供服務。例如：[3]

- 於管制區內工作，但非操作輻射源之專職人員，例如於醫院中核子醫學科任職之專職護理人員；
- 於管制區內工作之臨時人員，例如輻射源維修工程師、清潔/水電維護人員、核電廠臨時維修/大修期間之承包商等；
- 經常進出管制區內之見習生或實習生；
- 核電廠/廢棄物貯存場等之承攬除污人員；
- 攜帶移動型輻射源於一般性場所進行輻射作業之人員，例如：放射性非破壞照相檢驗業者等；
- 承包商同時為工作人員；
- 外國工程師。

學生曝露不是職業曝露，但是當學生的學習或實習需要他們出現在監測區或管制區時，學生也可以被視為流動學生。

所謂的重複監管，在於同時強調設施經營者和承包商，對流動人員輻射安全的責任，在作業期間，流動人員的職業曝露責任主要在於設施經營者，而承包商(雇主)負責其員工的輻射安全。因此，流動人員的輻射安全，需要兩個雇主的合作(重複監管)。這些工作包括：[3]

- 制定對曝露的特定限制和其他手段，以確保外部流動人員所受的保護及安全措施，與設施經營者的僱員相當；
- 就流動人員所受劑量的具體評估；
- 書面紀錄雇主、註冊者、或被許可人在輻射安全的明確責任分配。

其中，態樣 1 的流動人員最需要重複監管的幫助，設施經營者應從雇主處獲得流動人員以前的職業曝露史和其他必要的資訊、應向雇主提供適當的資訊、並應向工人和雇主提供在設施中的曝露紀錄。此外，於管制區內工作之流動人員(例如維修和清潔人員)，通常承包商及其僱員對輻射作業了解十分有限，在這種情況下，設施經營者有責任對流動人員實施與其自身僱員相同的輻射防護基準，此為有權僱傭流動人員的先決條件。所謂的相同的輻射防護基準，意指具備相同的：[3]

- 輻射安全最適化
- 劑量限度
- 管制區/監測區定義
- 個人防護裝備
- 管制規則和程序
- 教育訓練
- 個別劑量監測
- 健康檢查

IV. 結論

IAEA-GSG-7[3]之「職業曝露安全指引」只是保護職業曝露工作人員整體健康和安全的一部分，整體規劃必須與職業衛生、醫療、工業安全和消防安全等其他領域合作。計畫性曝露為職業曝露中最重要一環，IAEA-GSG-7 也用了最大篇幅詳述輻射防護計畫各細項的撰寫，足供各界參考，雖未必適用我國的法規與社會現況，但可為未來改進之參考。主管機關在逐步實施之前，也應該給業者充分的輔導，或以雇員人數、風險程度、管制強度…等指標提供一定的彈性。

在 IAEA-GSG-7[3]新的建議中，以大量篇幅來細述輻射防護計畫應包含之管理結構、政策、程序和組織安排來履行管理層對防護和安全的責任，也強調了員工的參與，這也大大提高了輻射防護計畫制定的難度。

我國現行輻射法規架構尚屬完整，並已涵蓋大多數職業輻射防護需求，對於劑量約束、劑量指引、潛在曝露、調查基準、紀錄基準、緊急/既存性曝露、和特殊工作人員之職業曝露概念，現已散見在我國法規各處。曝露三情境的概念與既存性曝露，以及緊急曝露情境，建議可考量我國國情後適度納入輻防或緊急應變相關體系。

哺乳工作人員及流動人員在過去法規著墨不深，卻是 IAEA-GSG-7[3] 的重點之一。除了更完整的保護外，還對人權、工作權、隱私權有更多思考，不能強迫懷孕工作人員通知雇主，此類通知也不應被視為將女性工作人員排除在工作之外的理由。若媽媽堅持繼續工作，其劑量計配戴位置、紀錄基準、調查基準都要相應修改。這種管理態度是否能在我國施行可作進一步討論。其實不限於女性工作人員，IAEA-GSG-7 也建議了即使接近或超過劑量限度，若員工自願且醫師評估可行，主管不能剝奪其工作權利，如此建議是否順應我國國情，也值得探討。

參考文獻

[1] ICRP, *The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. 2007, Oxford, England: Published for the International Commission on Radiological Protection by Elsevier.

[2] IAEA, *Radiation protection and safety of radiation sources : international basic safety standards*. 2014.

[3] IAEA, *Occupational Radiation Protection : General Safety Guide*. 2018.

[4] ICRP, *Radiation protection : 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection : adopted by the commission in November 1990*. 1992, Oxford: Published for the International Commission on Radiological Protection by Pergamon Press.

[5] IAEA, *Remediation Process for Areas Affected by*

Past Activities and Accidents, IAEA WS-G-3.1. 2007.
[6] ICRP, *Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother, Publication 88*. 2002, Oxford; New York: Pergamon Press.

採納ICRP 118號報告眼球水晶體劑量限值之建議對臨床醫療工作帶來的衝擊：介入性診療和心導管程序與核子醫學之職業曝露對$H_p(3)$貢獻之初步調查

Impact of the adoption of eye-lens dose limit suggested by ICRP Report No. 118 on clinical medical workers: Survey of $H_p(3)$ from occupational exposure of interventional and cardiological procedures and nuclear medicine

計畫編號：110-2623-E-007-005-NU
計畫主持人：蔡惠予
e-mail：huiyutsai@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理 吳冠毅
博士班研究生-兼任助理 練蒙恩
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

ICRP118 號報告於 2012 年提出眼球水晶體輻射劑量限值下修的建議，即水晶體等價劑量從原先之每年 150 mSv 下修至 5 年 100 mSv，單一年不超過 50 mSv。本計畫目標為因應 ICRP 提出眼球水晶體劑量限值的下修，實際調查與量測台灣的介入性診療、心導管及核子醫學工作人員之眼球水晶體劑量，並探討若台灣法規採納新眼球水晶體劑量限值時對臨床工作將產生的衝擊。

鉛眼鏡可為從事透視引導介入性診療流程之醫師提供必要的水晶體輻射防護效能，因此鉛眼鏡除了需具備適當的鉛當量厚度(可有效阻擋輻射)外，良好的幾何設計以廣泛地包覆眼球水晶體區域，方可最大程度阻擋散射光子，並有效降低醫師於執行血管攝影介入性流程與心導管介入性流程時之眼球水晶體劑量；此外，執行臨床 $H_p(3)$劑量量測發現從事心導管及血管攝影之醫師眼球水晶體劑量有超過新劑量限值之虞，故為避免眼球水晶體輻射劑量超過 ICRP 118 號報告對於職業曝露眼球水晶體平均每年 20 mSv 或每年不超過 50 mSv 之劑量限值，建議血管攝影介入性流程從業醫師應避免使用傳統透視 X 機以執行介入性流程，心導管介入性流程從業醫師應避免承擔過於繁重的工作量；最後，核子醫學部門從業人員眼球水晶體輻射劑量經評估均無超過水晶體新輻射劑量限值之虞，無需特別執行水晶體輻射劑量的常規量測。

法規對於眼球水晶體輻射劑量限值的下修，建議應充分考量臨床$H_p(3)$劑量現況，在完善相應的輻射防護教育及合理的人力分配下參考他國修法建議以調整之。

關鍵詞：劑量限值，等價劑量，眼球水晶體，$H_p(3)$，鉛眼鏡，輻射防護

Abstract

ICRP suggested a dose reduction to the eye lens for occupational exposure from 150 mSv/y to 20 mSv/ year, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv. This study aims to investigate the levels of radiation dose to the eye lens of medical workers from the department of interventional radiology, interventional cardiology, and nuclear medicine. Furthermore, we also evaluate the potential impact on medical workers when implementing the new dose limit to the eye lens by law.

The lead glasses provide sufficient radiation protection efficiency to the lens of the eye for physicians performing fluoroscopy-guided interventional procedures. Not only should lead glasses have lateral protection, but a design that provides a large protection region around the eyes can efficiently reduce the eye lens dose. The physicians of the departments of interventional radiology and interventional cardiology have great potential to reach or exceed the dose limit for the eye lens of 20 mSv/y or a maximum of 50 mSv/y. We suggest that physicians in the interventional radiology department avoid using traditional fluoroscopy X-ray machines to perform interventional procedures, the moderate workload of physicians in the interventional cardiology departments. The eye lens dose of medical workers from the department of nuclear medicine is unlikely to reach the new dose limit for the eye lens, implying that there is no need to operate individual eye lens dose monitoring.

The reduction of the dose to the eye lens in domestic legislation should consider the clinical situation with promoting education to radiation protection and referring to the legislative progress made by other countries.

Keywords: Dose limit, dose equivalent, eye lens, $H_p(3)$, lead glasses, radiation protection

I. 前言

醫療業從事透視引導介入性流程（透視X光機下介入性診療、透視X光機下心導管診療和電腦斷層下介入性診療）之從業醫師及核子醫學部門執行放射性同位素藥物配製與分裝之工作人員為水晶體輻射劑量需特別關注的群體：前者因其執行透視引導介入性程時需站立於病人身邊，將接受大量來自病人體的散射輻射，且因手術複雜程度而影響作業時間的長短，最終導致該類輻射工作人員所接受的水晶體體等價劑量之統計數據範圍較大；後者則因其於執行核子醫學檢查流程時，將涉及放射性同位素藥物製備和分裝，且將在作業過程中接收到較高放射性活度射源之長時間的曝露。此外，依據不同診斷目的及所適用之器官，所選用之放射性同位素藥物的種類也不盡相同，故最終工作人員之水晶體等價劑量亦呈現較大之劑量分佈情形。依據國際上相關研究文獻之數據，上述兩類醫療輻射工作人員，若於常規作業時未使用或佩戴合適之輻射防護器具，或其承擔較高

臨床工作量時，其水晶體等價劑量皆有超過最新輻射劑量限值之風險。本研究乃借鑒相關文獻之研究方法以設計適合台灣臨床狀況的水晶體劑量量測系統，來評估影像引導介入性流程之從業醫師及核子醫學部門執行放射性同位素藥物配製與分裝之工作人員之眼球水晶體輻射劑量水平，並探討若台灣法規採納新眼球水晶體劑量限值時對臨床工作將產生的衝擊。

II. 主要內容

為因應國際趨勢之改變，需要針對台灣醫療關鍵群體進行實際調查，並探討法規限值採納國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第 118 號建議時對臨床工作的衝擊。本計畫針對以下面向進行研究，包含: (a)研析 ICRP 下修眼球水晶體劑量限度之生物影響事證；(b)建立眼球水晶體的個人等效劑量「$H_p(3)$」人員劑量計的能量校正與劑量校正程序；(c)針對心導管醫師與介入性診療醫師，建立劑量評估方法並進行測量，調查臨床工作情境下的眼球水晶體劑量情形；(d)研析心導管醫師與介入性診療醫師的診療程序、工作量與輻射防護行為分別與 $H_p(3)$劑量的關係；(e)針對核子醫學部門工作人員進行 $H_p(3)$之量測，以評估工作情境下的眼球水晶體劑量情形；(f)評估職業曝露眼球水晶體劑量限度改變後對台灣醫療關鍵群體之衝擊，與提出相應輻防措施建議。

III. 結果與討論

1. 透視引導介入性流程

執行血管攝影介入性流程時，醫師皆站立於病患右側之髖關節處以執行介入性作業，相較於頭頸部介入性流程時，治療部位位於病患之頭頸部，執行軀幹部介入性流程時，醫師將更為靠近病患所治療之軀幹部位，故在較短的距離內來自病人體的散射光子無法有效的衰減，使得醫師將接受較大強度的散射輻射曝露，最終導致醫師於執行軀幹部介入性流程時累積較多的水晶體輻射劑量，執行單次透視引導介入性流程時，所量測的水晶體等效劑量($H_p(3)$結果為18.9 μSv (中位數，範圍：0.52–15.26 μSv)，執行頭頸部介入性流程測得為5.3 μSv (中位數，範圍：0.25–71.20 μSv)，若比較劑量中位數，則發現醫師執行軀幹的介入行診療時會比執行頭部高3.6倍。

醫師於執行心導管介入性診療，不同類別的診療程序會有不同程度之水晶體劑量，即：執行單次心導管介入性診療，經皮冠狀動脈介入性治療之$H_p(3)$劑量為102.1 μSv (中位數，範圍：14.35–1811.94 μSv)；下肢經皮腔內血管成形術為54.1 μSv (中位數，範圍：3.68–282.31 μSv)；心臟診斷為40.9 μSv (中位數，範圍：6.97–357.69 μSv)；EP 為32.7 μSv (中位數，範圍：12.14–163.55 μSv)；上肢經皮腔內血管成形術為18.3 μSv (中位數，範圍：15.57–33.48 μSv)；其他類為53.9 μSv (中位數，範圍：4.32–226.68 μSv)。其中醫師於執行經皮冠狀動脈介入性治療流程將接受到最高的水晶體劑量，因該類檢查之複雜程度較高，執行該類流程所需的時間亦為上述6類心導管介入性流程之最，故醫師將接受長時間且大量之散射輻射的曝露。

配戴鉛眼鏡可為透視引導介入性流程之醫師提供必要的水晶體輻射防護效能，此外，其應具備側向防護外，良好的幾何設計使其可以較大面積的包覆眼部區域亦尤其重要。

血管攝影部門從業醫師應避免使用傳統透視X 機以執行血管攝影介入性流程。心導管從業醫師需於執行介入性流程時正確佩戴鉛眼鏡外，承擔適度的工作量將防止其水晶體的$H_p(3)$年劑量超過新眼球水晶體輻射劑量限值。

2. 核子醫學

參與量測之放射化學藥師、放射師及護理師左右眼年$H_p(3)$劑量並無顯著差異，極可能的原因為其於作業過程中所操作的放射性同位素或是病患基本處於工作人員的正前方，故左右眼球水晶體所獲得的輻射劑量較為接近；此外，鑒於放射化學藥師需從事放射性同位素的製備、分裝及品管，相較於該部門之放射師及護理師，其於上述過程中受到高濃度放射性同位素之曝露，故其左右眼球水晶體年輻射劑量最高，所推估之年$H_p(3)$劑量最大值為0.24 ± 0.24 mSv，遠低於ICRP 118 號報告對於職業曝露眼球水晶體平均每年20 mSv之劑量限值。

IV. 結論

配戴鉛眼鏡可為透視引導介入性流程之醫師提供必要的水晶體輻射防護效能，因此鉛眼鏡需具備以下2種特性：(1)具備適當的鉛當量厚度，可有效阻擋散射輻射；(2)具備適當包覆的幾何設計，以較大範圍地包覆眼球水晶體區域方，而達到最大程度地阻擋散射光子，並有效降低醫師於執行血管攝影介入性流程與心導管介入性流程時之眼球水晶體劑量；此外，為避免眼球水晶體的劑量超過ICRP 118號報告的限值：對於職業曝露眼球水晶體平均每年20 mSv或每年不超過50 mSv之劑量限值，本計畫建議血管攝影介入性流程從業醫師應避免使用傳統透視X 機執行介入性流程，心導管介入性流程從業醫師應避免承擔過於繁重的工作量；最後，核子醫學部門從業人員眼球水晶體輻射劑量經評估均無超過新水晶體輻射劑量限值之虞，無需特別執行水晶體輻射劑量的常規量測。

本計畫亦建議先行了解台灣關鍵群體的眼球水晶體的劑量現況，並開始臨床工作人員的數據測量調查，以作為法規修訂的依據。此外，劑量限度的修訂策略可依據台灣現況而擬定之，若調查結果為多數符合新限度，則建議可直接採用20 mSv/y，反之，則建議採用逐步下修劑量限度，以減低修法所帶來的衝擊。

參考文獻

[1] Carinou, E., Ferrari, P., Bjelac, O.C., Gingaume, M., Merce, M.S., O'Connor, U., 2015. Eye lens monitoring for interventional radiology personnel: Dosemeters, calibration and practical aspects of Hp(3) monitoring. A 2015 review. J. Radiol. Prot. 35, R17–R34. https://doi.org/10.1088/0952 4746/35/3/R17

[2] IAEA, 2013. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, International Atomic Energy Agency.

[3] ICRP, 2012. ICRP publication 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of

Radiation in Normal Tissues and Organs-Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Annals of the ICRP. https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.001

[4] Lian, M.-E., Tsai, Y.-H., Li, I.-G., Hong, Y.-H., Chang, S.-L., Tsai, H.-Y., 2020. Occupational radiation dose to the eye lens of physicians from departments of interventional radiology. Radiat. Meas. 132, 106276. https://doi.org/10.1016/J.RADMEAS.2020.106276

[5] Lian, M.-E., Wu, G.-Y., Chao, M.-F., Wang, C.-S., Miao, H.-C., Tsai, M.-S., Hsieh, M.-Y., Chen, Y.-P., Chu, C.-Y., Chang, S.-L., Tsai, H.-Y., 2022. Occupational radiation dose and protection to the eye lens for interventional cardiology operators. Radiat. Meas.106778. https://doi.org/10.1016/J.RADMEAS.2022.106778

飛航劑量評估程式的認證與飛航劑量測量實驗設計(1/2)
Validation of flight dose calculator and design of measurement experiments (1/2)

計畫編號：110-2623-E-007-006-NU
計畫主持人：許榮鈞
e-mail：rjsheu@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：黃昱翔、賴柏辰、楊子毅
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

本團隊開發了國內第一套技術自主的飛航劑量評估程式(NTHU Flight Dose Calculator，目前版本 v3.1)，在此基礎上，我們完成了飛航劑量影響因子的靈敏度量化分析、10 條台灣重要國際航線的劑量計算、以及華航與長榮機師的年集體劑量與個人平均有效劑量的評估。延續此一發展，未來最重要的工作有二面向：飛航劑量評估程式的認證與飛航劑量測量的實驗。有鑑於此，本研究規劃以二年的時間深入探討程式認證與測量實驗相關重要工作的準備與研發。本年度(第一年)的重點在於程式的比對認證，重要工作包括收集與評估文獻上飛航實驗的量測數據、分析數據並建立程式驗證的比較標的、執行程式預估與文獻測量值的比對、以及參加國際飛航劑量評估程式的比對試驗。本年度的成果完成了飛航劑量評估程式的合理驗證，包括程式與程式以及程式與實驗的嚴謹比對；下一年度將建立適當的測量工具與分析方法，做好未來執行飛機上測量的準備。最後本研究亦將蒐集各國飛航輻射之管制規範，彙整提供主管機關參考。

關鍵詞：宇宙射線、飛航劑量、程式認證、實驗設計。

Abstract

Our team has developed an advanced aviation dose assessment code called NTHU Flight Dose Calculator, the latest version is 3.1. Accordingly, we have investigated and quantified the effects of most influential factors on the dose calculation. In addition, we have performed reliable dose assessments for ten popular international flight routes from Taiwan and for all pilots of China Airlines and EVA Air. The next step in continuing this development is mainly two-folded: accreditation of the flight dose calculator and direct comparison with on-board measurements. In view of this, the two-year research plan aimed to prepare our team for future code validation and in-flight measurements. The first year's focus was on code validation: collected measurement data of in-flight experiments in the literature, performed data analysis and established reference for code benchmark; conducted code-to-code and code-to-experiment comparisons; participated in code comparison exercise organized by EURADOS on harmonization of aircrew dosimetry practices around the world. The results of this study will be beneficial to the future aviation dose management and regulation in Taiwan.

Keywords: galactic cosmic rays; aviation dose assessment; accreditation; measurement.

I. 前言

宇宙射線在典型民航機飛航高度造成的輻射劑量率約在 2-10 Sv/h 左右，劑量率的變化主要受飛航高度、地磁緯度與太陽活度的影響，詳細輻射場特性的定量描述非常複雜，通常必須仰賴費時的蒙地卡羅粒子追蹤等計算工具搭配特殊偵檢器的應用與校正。相較於許多地面的游離輻射工作場所，典型飛航高度的劑量率範圍明顯高出不少，飛航人員接受輻射的平均年劑量可能與輻射工作人員相當甚至超過，值得關注並仔細評估。[1]

II. 材料與方法

飛航劑量計算的過程牽涉許多複雜的變數，完整探討飛航劑量必須考量各種大氣層次級宇宙射線成分的貢獻，此一工作有其困難性，因為原始宇宙射線的能量極高，二次粒子種類多而且能量範圍極廣。本團隊長期投入宇宙射線與天然輻射相關的研究與測量，經由科技部與原能會的補助，本團隊完成第一套本土自行開發的飛航劑量評估程式(稱之 NTHU Flight Dose Calculator)，目前最新版本為 3.1c [2]，圖 1 顯示 *NTHU Flight Dose Calculator* (FDC)的主要使用者操作介面與部分功能展示。該程式的理論核心是基於 FLUKA 蒙地卡羅程式的高能物理作用模型[3]，透過一系列複雜費時的宇宙射線與大氣層作用的模擬，我們成功建立一套全球三維大氣層宇宙射線各成分的輻射資料庫，最後利用數學擬合可估計大氣層內任一選定位置的能譜與劑量率或是沿任一飛航路線的累積結果。上述 NTHU FDC 主要是基於一系列複雜的大氣層宇宙射線二次粒子模擬的結果所建立的，其預測能力正確與否以及適用範圍為何？應該需要經過嚴謹驗證，這也是本研究的主要目的。

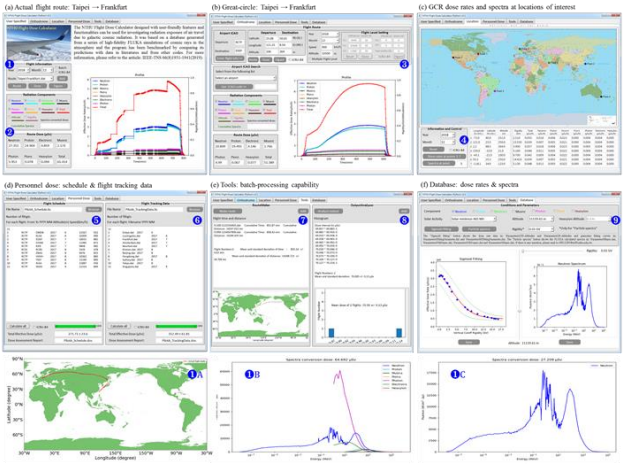


圖 1：*NTHU FDC* 最新版的主要使用者操作介面與重要

功能的展示。

III. 結果與討論

本研究第一年的重點在於準備程式認證的要求：除了建立 Code-to-Code 的比對驗證，我們也將收集與評估文獻上飛航實驗的量測數據，作為 NTHU FDC 程式的進階驗證對象，建立 Code-to-Experiment 的比對驗證基準；根據國際標準組織 ISO 軟體認證的流程，建立相關質量保證與質量控制(QA/QC)的文件與程序；尋求與業經認證之國外飛航劑量評估程式的比對機會。以下分段簡述個工作項目的重要成果。

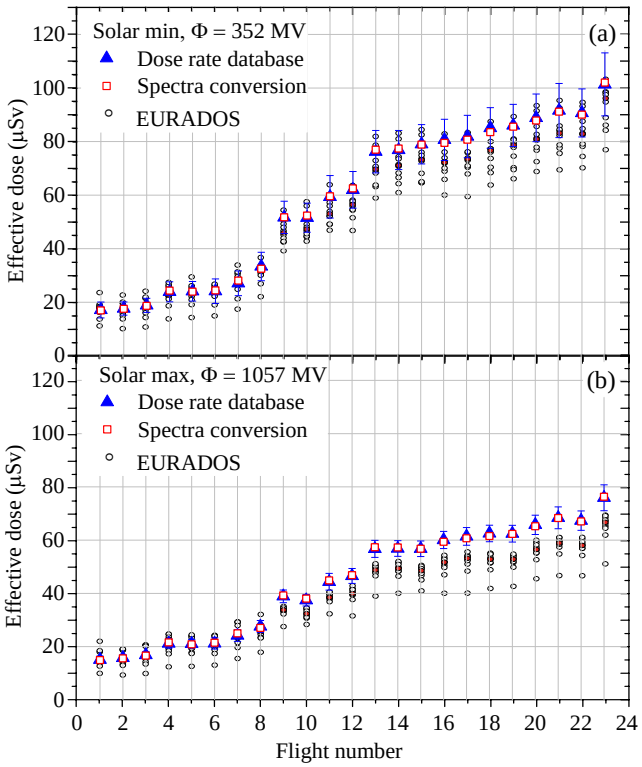


圖 2：使用最新版 NTHU Flight Dose Calculator 程式評估 EURODOS-2012-03 報告所列 23 條航線的輻射暴露。

目前 NTHU Flight Dose Calculator 的驗證主要是透過與歐盟 EURODOS-2012-03 報告內容[4]的比較為主軸，報告中比較 11 個來自不同國家與實驗室的飛航劑量程式：AVIDOS、CARI、EPCARD、FDOScalc、IASON、JISCARD、QARM、PANDOCA、SIEVERT、PCAIRE、PLANETOCOSMICS。這 11 個程式主要來自歐美日等先進國家，其劑量評估模式與資料庫不盡相同，有的以實驗量測數據為主，有的以簡化計算模型為主，有的以詳細模擬為基礎。在 EURODOS-2012-03 報告中，這 11 個程式被匿名用來評估 23 條選定之全球重要航線的輻射暴露。本團隊利用自行開發之 NTHU FDC 評估報告所列 23 條飛航路徑所受之宇宙射線輻射劑量，同樣考量報告所述之二種太陽活度，預測之有效劑量與 11 個程式匿名評估結果同時呈現以利直觀比較。結果如圖 2 所示，在較低太陽活度期(ϕ=352 MV)，針對中短程航線 1-8 的有效劑量評估與大部分程式有較好的吻合，但是針對長程航線 9-23 的有效劑量評估則差異擴大；在較高太陽活度期(ϕ=1027 MV)的比較結果亦呈現類似趨勢，與 11 個程式的平均值相比，NTHU FDC 的評估結果傾向給出較保守的劑量預測，但是差異維持在 20%的合理範圍以內。EURODOS-2012-03 報告中的參考數據涵蓋不同年份的太陽活度、不同地磁緯度、不同距離與高度的航線，以及不同程式的評估結果，因此與其整體比較的趨勢與變化相當具有代表性，圖 2 比較結果幾可確認 NTHU FDC 對於飛航劑量的合理預測能力。

FDC 的 Code-to-Experiment 驗證資料庫主要以 ICRU 認可並彙整於 ICRU Report 84 [5]中的測量結果為基礎，再蒐集近年發表於國際期刊的高品質測量結果作為補充，建立 FDC 的驗證比較對象。這些測量結果均有清楚地說明測量實驗的條件及測量標的，因此可先利用 FDC 估算各測量實驗條件下的周圍等效劑量率 H*(10)後再與 ICRU-84 及文獻中的測量結果比對。ICRU-84 報告的目的在提供從測量方式得到飛航高度的劑量率，並作為以計算方式估算年劑量結果的參考基準，希望有助於各國飛航機組人員劑量的評估。ICRU-84 提供的參考資料是第 23 個太陽週期中 3 個太陽活度期間的測量結果，分別是 1998 年 1 月、2000 年 1 月、及 2002 年 1 月，各太陽活度期間有 3 個飛航高度，分別是 31,000(FL310)、35,000（FL350）、及 39,000 英尺（FL390），各飛航高度有 0 至 17 GV 間隔 1 GV 共 18 個垂直地磁截止剛度下的測量結果。ICRU-84 報告中建議計算結果與測量結果間差異的接受程度是 30%。ICRU-84 報告提供一個相當公認可靠的比對基礎，但如報告中所述，該報告只收集回顧了發表於 1992 到 2006 年之間有關實驗量測的數據，缺乏近年的測量結果。因此，除了 ICRU-84 之外，本團隊亦選擇一些近年實驗測量作為輔助以補充 ICRU-84 的不足，包括以下 4 組飛機或氣球上的宇宙輻射劑量測量實驗，作為 FDC 的 Code-to-Experiment 驗證資料庫：Wissmann et al (2010) [6]、Mertens et al. (2013) [7]、Kubancak et al. (2014) [8]、及 Mertens et al (2016) [9]。

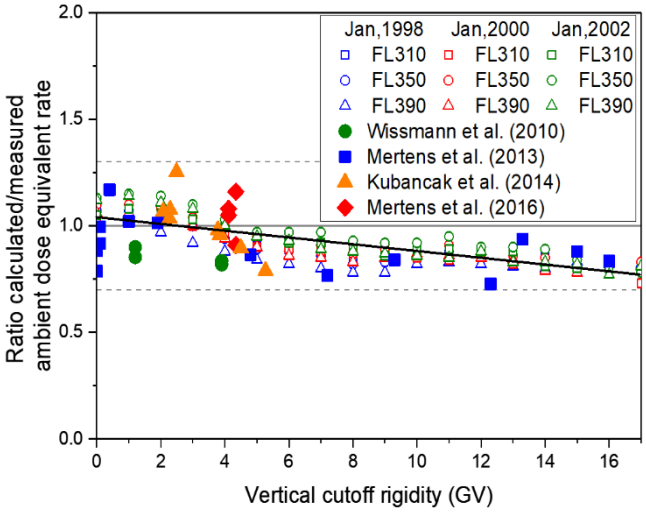


圖 3：FDC 預估的周圍等效劑量率與實驗測量結果的比值，實測值包含 ICRU-84 的參考值及近期 Wissmann et al. (2010)、Kubancak et al. (2014)、Mertens et al. (2013, 2016)等測量得到的結果。

為了更清楚地量化及表示 FDC 預測值與 ICRU-84 量測值之間的差異，以預測值與量測值的比值呈現隨垂直地磁截止剛度的變化，如圖 3 所示。整體而言，所有比值的分佈呈現一個傾斜的趨勢，圖中有一條由所有比值以線性擬合方式得到的趨勢線，在截止剛度 0 GV 時趨勢線在 y 軸上的截距（即擬合後的比值）約 1.04，而在 17 GV 時趨勢線在 y 方向的截距（即擬合後的比值）約 0.79，這表示對照 ICRU-84 量測值在低截止剛度的飛航條件下 FDC 的預測值有稍微高估，相反地在高截止剛度下則是低估約 20%。在一些文獻中也觀察到類似的趨勢，但目前沒有一個適當的解釋。從輻射防護的角度考慮，計算與測量之間比值的這種稍微傾斜趨勢在機組人員的劑量評估中並不重要，但值得從理論和實驗兩方面進行更進一步的研究。新版本的 FDC 已考慮圖 3 中呈現傾斜的趨勢，並整合為一個修正的選項，讓使用者可自行決定是否採用。在與近年量測值的比對方面，跟與 ICRU-84 比對方法相同，以 FDC 預測近年量測實驗條件下的周圍等校劑量率，預測值與近年量測值的比值一起呈現在圖 3 中。從近年比值在圖 3 中的分佈顯示，以近年量測實驗條件預測的劑量率結果同樣有令人滿意地一致性，均落在 ICRU-84 建議量測值的±30%以內。因此圖 3 彙整了 ICRU-84 以及前述 4 組近年量測實驗的比對結果，顯示 FDC 預測的宇宙射線劑量率與文獻中實驗量測值的差異都不超過 30%，滿足 ICRU-84 建議的比對規範。

FDC 是本團隊自行開發的飛航劑量評估程式，為了確保 FDC 評估結果的正確性，我們根據下列兩份 ISO 文件的建議標準，開始建立 FDC 的品質管理文件，即依 ISO 標準撰寫 FDC 程式開發與使用手冊，準備軟體認證相關的品質保證（QA）/品質確認（QC）的文件：(1) ISO 20785-3:2019, Dosimetry for exposures to cosmic radiation in civilian aircraft - Part 4: Validation of codes 與 (2) ISO/IEC/IEEE DIS 29119-2, Software and systems engineering - Software testing。本團隊研讀上述兩份 ISO 文件，檢視並修改 FDC 的程式開發及使用手冊，目前 3.1c 版使用手冊的內容已涵蓋 ISO 20785 建議須包含的具體項目。

本年度另一個重點是參加國際飛航劑量評估程式的比對試驗，這是一種 Code-to-Code 的驗證，將 FDC 的評估結果跟其它軟體的結果比較。我們團隊獲得 EURADOS（European Radiation Dosimetry Group）的邀請，參加 WG11 Task1: Comparison of Monte Carlo Codes using ICRP103 Conversion Factors for Radiation Exposure of Aircraft Crew 的國際飛航輻射劑量評估程式比對。EURADOS 是一個註冊在德國學會的非營利協會，旨在促進協會的會員對游離輻射劑量的研究發展及歐洲內的合作，重要的目標有增加對游離輻射劑量在科學上的認識，促進評估劑量的方法及相關儀器設備的技術發展及在實務上的運用，並協調歐盟內部使用的劑量測定程序及其與國際慣例的一致性。EURADOS 擁有許多劑量科學領域的專家，這些專家針對不同子領域組成不同的 WG（Working Group 工作小組），目前共有 8 個 WG，WG11 則是針對有關 High Energy Radiation Fields 的部份定期研究討論，WG11 中也有不同的主題正在進行，目前有 9 個 Task，我們團隊受邀參加 Task1 的討論。

本團隊這次獲得 EURADOS 正式的邀請，有機會參加新一輪國際飛航輻射劑量評估程式的比對，這是一次具有真正國際同行專家認證程式能力的機會，相當難得。本次驗證的方式與該組織過往舉辦的活動類似，由 WG11 Task1 的負責人直接出題，提供參與團隊擬比對的航線與條件，參與比對的團隊各自利用評估程式進行航線劑量分析，並將結果後填入指定格式的檔案再寄回彙整。圖 4 呈現 EURADOS 選定之 23 條代表性的航線，這些航線涵蓋許多重要國際航班，航線範圍包含高緯度及低緯度地區，航線的垂直截止剛度涵蓋 0 至 18 GV，另有 6 條飛行時間超過 13 小時的超遠程航線，及編號 23 跨越 0 至 17 GV 寬垂直截止剛度的新加坡至紐約航線。EURADOS 要求參與比對的程式須提供各航線的累積劑量及航線中給定航點的周圍等效劑量率及有效劑量率的結果，計算時的太陽活度須分別考慮在太陽活度的最大值及最小值，EURADOS 會提供各航線出發及目的地機場的經緯度座標，及所有航點的飛行高度、經緯度、與該航點代表的航行時間，作為各程式的輸入資訊。

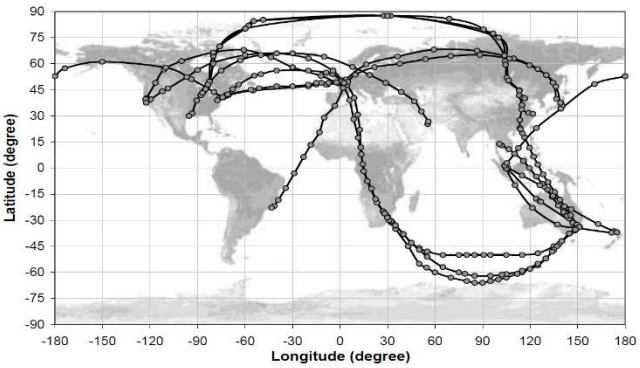


圖 4：EURADOS 選定之 23 個航班的航線。灰點表示具有給定緯度、經度、高度和飛行時間的航路點[4]。

我們利用自行開發的 FDC 評估報告所列 23 條航線的宇宙射線輻射劑量，評估結果之一如圖 5 所示，以編號 009 航線為例，依 EURADOS 提供的飛航條件，009 航線的總劑量是 11 個航點劑量的總和，因此我們利用 FDC 依 EURADOS 提供的各航點飛行高度及經緯度，評估以 2000 年 08 月 18 日代表最大太陽活度下的劑量率結果如圖 5 所示。接著，各航點的劑量率結果分別乘上該航點考慮的飛行時間則可得到各航點貢獻的劑量，再依序累加得到各航點的累積劑量。依上述步驟完成 EURADOS 要求的共 23 條航線所有航點的計算，所有航線的總劑量結果如圖 6 案例，圖 6 是 23 條 EURADOS 航線在最大太陽活度時的有效劑量，圖中我們另以 EXPACS 重新評估所有航線的劑量作為回報前的平行檢查。比較結果顯示 FDC 與 EXPACS 結果有相同的趨勢與合理範圍的差異，因此我們對於 FDC 通過 EURADOS 航線劑量的比對有很大的信心。經本團隊初步以 EXPACS 做平行驗證後，我們的評估資料已依 EURADOS 指定的格式編輯完成，並寄回 WG11 Task1 負責人，另在 2021 年 10 月 11 日參加 Task1 的線上會議，負責人報告各團隊回傳資料的進度，圖 7 是線上會議報告的截圖之一，顯示這次所有參加比對的程式與團

隊列表(#18 就是本團隊)，圖中右邊 Email、Data、及 Text 欄位下可以看到，Task1 已經確認收到我們寄過去的資料，目前等待正式彙整結果與報告。

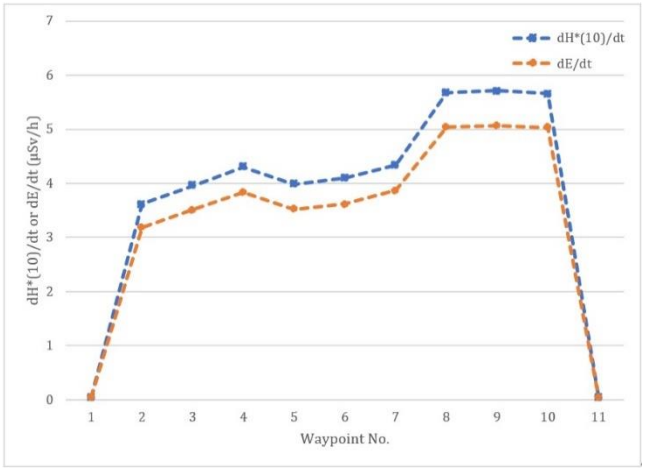


圖 5：以 FDC 評估 EURADOS 選定航線編號 009 航線各航點在最大太陽活度下的劑量率。

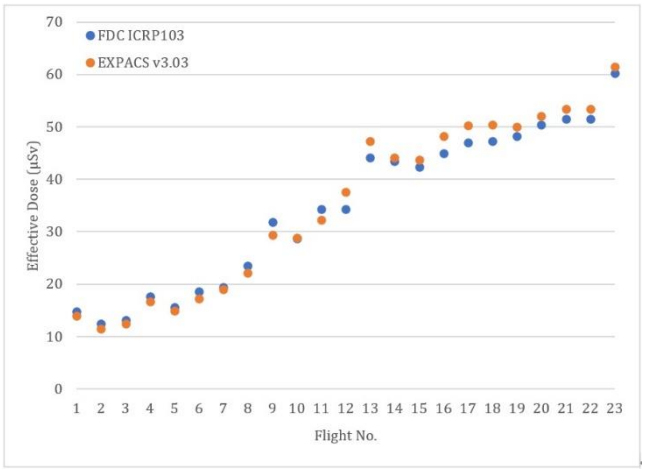


圖 6：以 FDC 及 EXPACS 分別評估 23 條 EURADOS 選定航線在最大太陽活度時的有效劑量。

EURADOS

Contributors and status of contributions (Oct. 2021)

#	Name	Institute	Country	Email	Data	Text	Comment
1	Peter Beck	Seibersdorf Laboratories, SL	Austria	☑	☑	☑	AVIDOS (1)
2	Jean-Francois Bottolier-Depois	Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, IRSN	France	☑			Involve colleagues SIEVERT(2)
3	Rolf Bütikofer	University of Bern & International Foundation HFSJG	Switzerland	☑	☑	☑	UniBern Model (3)
4	Erwin Flückiger	University of Bern & International Foundation HFSJG	Switzerland	☑	☑	☑	UniBern Model (3)
5	Nicolas Fuller	Paris-Meudon Observatoire, LESIA	France	☑			SIGLE (4)
6	Karl-Ludwig Klein	Paris-Meudon Observatoire, LESIA	France	☑			SIGLE (4)
7	Alex Hands	University of SURREY	United Kingdom	☑			Update of MAIRE (5)
8	Marcin Latocha	Seibersdorf Laboratories, SL	Austria	☑	☑	☑	AVIDOS (1)
9	Vladimir Mares	Helmholz Zentrum München, HMGU	Germany	☑	☑	☑	EPCARD.NET (6)
10	Daniel Matthiä	German Aerospace Center, DLR	Germany	☑			PANDOCA (7)
11	Frank Wissmann	Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin, BfS	Germany	☑			FDOSCalc (8)
12	Hiroshi Yasuda	National Institute of Radiological Sciences, NIRS	Japan	☑			WASAVIES/JISCARDEX (9)
13	Kyle Copeland	Federal Aviation Administration, FAA	USA	☑			CARI 7 (10)
14	Marty Bean	PCAire Inc.	Canada	☑	☑		PCAire, Description will come (11)
15	Brent Lewis	Royal Military College of Canada	Canada	☑	☑		PCAire (11)
16	Christopher Mertens	NASA	USA	☑			NAIRAS (12)
17	Pavlos Paschalis	Universisty of Athens	Greece				DAYASTIMA (13)
18	Rong-Jiun Sheu	Nuclear Engineering and Science, National Tsing Hua University	Taiwan	☑	☑	☑	NTHU Flight Dose Calculator (14)
19	Ondrej Ploc	Nuclear Physics Institute of the CAS	Czech Rep.	☑	☑		CARI-7 (10)

圖 7：2021 年 10 月 11 日 EURADOS Task1 線上會議：參加飛航劑量評估程式比對的程式（#18 是本團隊）。

IV. 結論

針對銀河宇宙射線的劑量評估，本團隊已完成開發國內第一套技術自主的飛航劑量評估程式並持續精進，在此基礎上，本研究規劃以二年期間進行宇宙射線飛航劑量評估程式的認證與飛航劑量測量實驗設計。本年度順利完成 Code-to-Code 與 Code-to-Experiment 的驗證、建立 FDC 程式品管文件、並獲邀請參加 EURADOS WG11 Task1 的飛航劑量評估程式的國際比對活動。本團隊已將 FDC 評估的 23 條 EURADOS 選定航線劑量結果寄回，待 EURADOS 比對的報告出版後，預期 FDC 評估飛航劑量的能力將可獲得國際上更客觀更正式的認可。本計畫接下來第二年的重點是偵檢器的選擇、測試與飛航實驗設計。最後，本團隊亦將彙整飛航輻射管制的國際經驗，包含各國（歐盟、美國、加拿大、日本等先進國家）飛航輻射之納管情形及管制規範，提供國內主管機關參考。

參考文獻

[1] ICRP, “Radiological protection from cosmic radiation in aviation”, ICRP Publication 132, Ann. ICRP, vol. 45, 2016.

[2] Z.Y. Yang, P.C. Lai, R.J. Sheu, “Update and New Features of NTHU Flight Dose Calculator: a Tool for Estimating Aviation Route Doses and Cumulative Spectra of Cosmic Rays in Atmosphere”, IEEE Trans. Nucl. Sci., 66, 1931-1941, 2019.

[3] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, “FLUKA: A Multi-Particle Transport Code”, CERN-2005-10 CERN-2005-10 (2005), INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.

[4] J.F. Bottollier-Depois et al., “Comparison of codes assessing radiation exposure of aircraft crew due to galactic cosmic radiation”, EURADOS Report 2012-03 (2012).

[5] ICRU, “Reference Data for the Validation of Doses from Cosmic-Radiation Exposure of Aircraft Crew”, ICRU Report 84, 2010.

[6] F. Wiseemann et al., “The ambient dose equivalent at flight altitudes: a fit to a large set of data using a Bayesian approach,” J. Radiol. Prot., 30, 513 (2010).

[7] J. Kubancak et al., “Measurement of dose equivalent distribution on-board commercial jet aircraft,” Radiat. Prot. Dosim., 162, 215 (2014).

[8] C.J. Mertens et al., “NAIRAS aircraft radiation model development, dose climatology, and initial validation,” Space Weather, 11, 603 (2013).

[9] C.J. Mertens et al., “Cosmic radiation dose measurements from the RaD-X flight campaign,” Space Weather, 14, 874 (2016).

運用物聯網技術及大數據分析於輻射源安全管制之研究
The study on applications of IoT-related and big data techniques for Radiation source safety control

計畫編號：110-2623-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：葉俊良
計畫參與人員：劉子瑜、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(IoT)與人工智慧(AI)的技術蓬勃發展，物聯網的技術可以從設備、輻射源或作業人員中(Things)獲取有用的資訊(Data)，再透過網路(Internet)將大量的資訊與使用者/管理者建立連結，其中可以即時獲得移動性輻射源的位置資訊(運送車輛位置、輻射源於車內位置)、固定型輻射源的即時資訊、工作人員被動式劑量臂章配戴情況等，再將巨量資訊統計或透過 AI 運算處理，提供異常警示、非結構化數據(輻射源、工作人員監看畫面)分析、輻射源管制之研判及決策參考。因此本計畫將進行物聯網與人工智慧技術應用於輻射源安全管制之研究，評估合適於輻射源工作場域之解決方案，其中包含資料傳輸技術、邊緣運算裝置(Edge Computing Device)、AI 電腦視覺演算法之建議，並且以輻射源管制之場域環境的設備耐久度、資料傳輸穩定度、電源供應量(設備耗電量)的方面做為考量。本計畫之研究成果將根據不同輻射源的作業場域，提供適用的物聯網與人工智慧技術，協助輻射安全管制主管機關減少不可控因素以降低輻射源危害風險、保障作業人員健康、加速數位轉型、落實輻射源管制。

關鍵詞：物聯網、輻射源、輻射安全管理、人工智慧與數據運算分析

Abstract

In recent years, the technology of IoT (Internet of Things) and AI (Artificial Intelligence) is booming. The information of equipment, devices and instruments could be collected and transmitted to the online platform to monitor and tracking the position of nuclear and radioactive materials to prevent illicit trafficking and the failure of nuclear facilities or containment units. In this proposal, the present development of the IoT techniques applied in the nuclear safety is studied. The feasibility in application of IoT, big data and AI on the tracking of nuclear and radioactive materials in movable radiation source will be studied. To evaluate the terminal device performance and possible failure conditions, survey of the terminal device sensor, reliability and data transmission information will also be studied.

Keywords: Internet of things (IoT), nuclear materials, nuclear safety, Artificial Intelligence and Data computing analysis.

I. 前言

隨經濟發展，輻射源使用數量日益增加，輻射源產生的核輻射對人體的健康具有危害性，而輻射源的丟失與被盜更會造成環境污染，引起社會恐慌。為了解決輻射源的異常洩漏和意外丟失、被盜等問題，中國投入基於 RFID、GPS、GPRS 和 GSM 等技術的輻射源監控系統。輻射劑量檢測儀和 GPS 無線定位模組分別即時獲取輻射源輻射劑量值與位置信息，RFID 閱讀器讀取安裝在輻射源底部的電子標籤狀態資訊。輻射源輻射劑量值、位置與標籤狀態資訊通過 GPRS 無線傳輸方式發送到遠端監控中心，藉此進行輻射源監控，並於異常時產生警報通知相關人員。

如圖 1，韓國核能安全研究所(Korea Institute of Nuclear Safety)亦針對輻射源的非法運輸進行監控與資訊平台的建置，可進行移動性輻射源之軌跡追蹤、移動，即時量測輻射劑量、終端量測與通訊裝置狀態之資訊即時收集，可上傳至平台供即時中控中心進行監控，因此可以針對輻射源被盜取、遺失，進行迅速的反應。此平台藉由可拆裝之網路通訊硬體連結輻射源，並以 2G/3G 網路與基地台對接，上傳輻射源即時量測輻射劑量、終端量測與通訊裝置狀態之資訊即時收集，並藉由 GPS 即時顯示地圖位置。

輻射源已逐漸廣泛應用在許多行業，運輸及使用機會因此增加遺失將會造成許多問題，僅依靠傳統的人工管理方式，已很難滿足對輻射源的安全管制要求。然而目前國內在放射源監管的領域內，並沒有針對輻射源識別、定位與追蹤的物聯網應用與完善的整套流程，亦無針對輻射安全相關資訊的收集與資料應用。而在歐美部分國家因有核能燃料再利用的專門技術，相關的組織單位或民間企業都具有相當專業之技術，來補足主管機關在監控運輸與使用方面的實務操作面的經驗。為了補強本國在輻射源安全管制方面的缺口，提高輻射源監控的水平和效率，為輻射源的科學管理提供可靠的技術手段，在本研究中，我們將評估融合應用 RFID、藍芽、NB-IoT、GPS、GIS、無線數據通信、人工智慧、大數據分析等技術對輻射源的位置、狀態、劑量等情況進行全方位且系統化的輻射源監督控制之方案建議，讓相關主管機關能即早發現問題而即時做出相應的措施，這將可建立起長效動態的安全監控管理機制，有利於降低輻射源遺失、失竊等事故發生的機率，保障使用單位、場所的輻射安全，對保證輻射源安全可靠應用具有十分重要的意義。

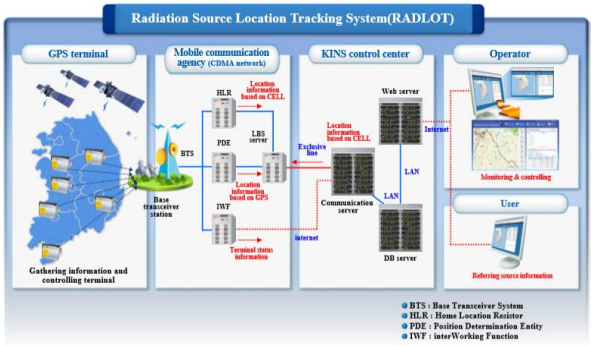


圖 1、韓國核能安全研究所平台系統架構

II. 主要內容

本計畫通過 109 年研究成果釐清 IoT 技術應用於輻射安全管制之重點，應先進行圖資呈現與業務功能評估，再針對端網雲系統及網路統訊架構評估相關方案，並以示範場域之實際情形進行輻射源監管評估與建議，重點內容彙整如下:

1. 國內相關部門應用 IoT 技術於公共安全之圖資呈現案例: 民生公共物聯網

在已彙整民生公共物聯網的主要監測網站、空氣品質網站、水資源網站主要業務功能中，圖資呈現與業務功能(如表 1)，可提供輻射管制後續規劃之參考，其中像是空氣品質指標的量測計圖可以作為輻射劑量指標參考；空氣/地震/水資源測站之分佈可作為輻射監測站分布之參考。

表 1、民生公共物聯網業務功能與圖資呈現統整

項目	功能	圖資呈現
主要網頁	空氣品質指標	量測計圖
	過去 48 小時空氣品質指標	散佈圖
	水位即時概況	散佈圖
	空氣、地震、水資源測站之分佈	地理圖
空氣品質	各地區空氣品質指標	地理色階圖
	過去 72 小時空氣品質指標	折線圖
	單一地區的空氣品質指標	數值、顏色
水資源	水庫情資(基本資料、水位)	水位圖
	淹水感測器、河川水位站之分佈	地理圖
	API 使用統計 (7 天)	長條圖
	API 使用次數排名(月)	圓餅圖
防救災	即時災害	地理圖

2. 國際輻射源監管的圖資呈現、業務功能與端網雲系統架構

查詢國外輻射源監管案例，並彙整其圖資呈現、業務功能與端網雲系統架構，包含美國 DOE、韓國 KINS(表 2、圖 2)、國際 MicroStep-MIS(表 3、圖 3)，可供後續規劃之參考，例如輻射源之即時位置/歷史路徑可以協助原能會解決移動性輻射源運送監管之參考；輻射源偵測資訊可提供車內輻射源的即時資訊，達到降低車內輻射源遺失的風險；GPS(端)可將訊號傳至 BTS 再透過 Internet(網)傳至 Server(雲)等。

表 2、KINS 案例之業務功能與圖資呈現統整

種類	業務功能	圖資呈現
移動性輻射源	輻射源之即時位置、歷史路徑	GPS 圖/列表
	單個輻射源的詳細資料 (名稱、種類、許可證號、序號、製造商、製造日期、檢驗日期、檢驗方法)	列表
	輻射源偵測資訊 (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)	列表
	輻射源事故資訊 (事故地點與影響半徑、輻射劑量量測相關資訊、最後位置與移動路徑、地勢等高線圖、歷史資料檢索)	GIS 圖/列表
環境(排放)監測	各地區輻射劑量(每小時輻射劑量 (μSv/hr、μR/hr)、狀態 (Normal,Caution,Warning, Emergency, Inspection))	GIS 圖/列表
	所在位置與鄰近地區的輻射劑量	GIS/散佈/柱狀圖

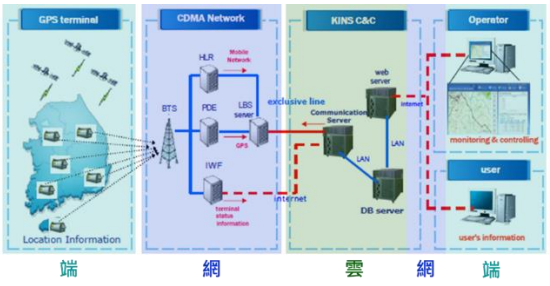


圖 2、RADLOT 之輻射源追蹤系統

表 3、MicroStep-MIS 案例之業務功能與圖資呈現統整

種類	業務功能	圖資呈現
移動性輻射源	各地區測站的位置及量測值	GPS 圖+量測計圖
	單一測站的詳細輻射資料	列表
	單一測站的詳細氣象(環境)資料	量測計圖
	資料作圖	折線圖
	輻射擴散建模	GPS/GIS 圖

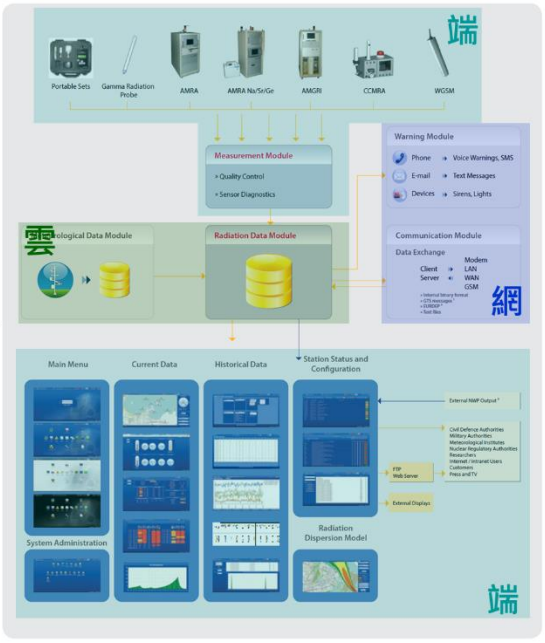


圖 3、MicroStep-MIS 之輻射監測系統

3. 實際場域端網訊號通訊之介面評估

實際場域可分成輻射源儲存室、輻射源運送車輛中的儲存箱兩個部分進行評估與測試，而測試方法如圖 4 所示，測試 Sub 1G、NB-IoT、4G 網路、藍牙、WiFi 等通訊技術是否能在場域內將訊號傳出場域外。而測試結果如表 4、表 5 所示，在輻射源儲存室中只有 Sub 1G 和藍牙(部分位置)可以收到訊號；而在輻射源運送車輛中除了 NB-IoT 外都可以順利收到訊號。

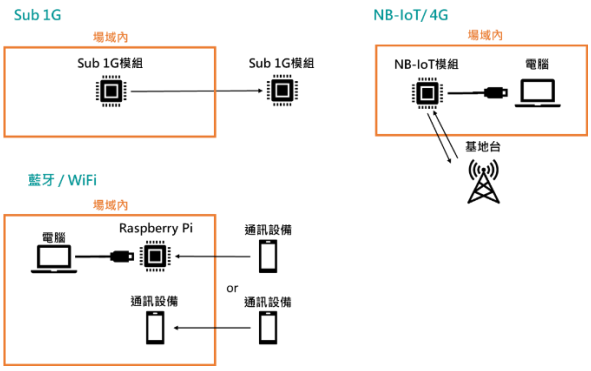


圖 4、無線通訊模組測試方法

表 4、輻射源儲存室之各無線通訊模組測試結果

無線通訊技術	規格	測試結果
WiFi	802.11ax	收不到訊號
Sub 1G	頻率:433 MHz, 速率:1250 Kbit/s	可收到訊號
Bluetooth	藍牙 5.0	1. 在 A 點無訊號 2. 在 B 點有訊號
4G 網路	中華電信 4G 網路	收不到訊號
NB-IoT	中華電信 物聯 NB-A 型	沒收到基地台訊號

表 5、輻射源運送車輛中的儲存箱之各無線通訊模組測試結果

無線通訊技術	規格	測試結果
WiFi	802.11ax	可收到訊號
Sub 1G	頻率:433 MHz, 速率:1250 Kbit/s	可收到訊號
Bluetooth	藍牙 5.0	可收到訊號
4G 網路	中華電信 4G 網路	可收到訊號
NB-IoT	中華電信 物聯 NB-A 型	沒收到基地台訊號

III. 結果與討論

1. 實際場域端模組設計

根據蒐集的國際輻射源應用 IoT 技術針對端模組部分、實際應用場域與使用狀況進行端模組評估。如圖 5 所示，於輻射源上分別裝設 RFID Tag、GPS 接收器、G-Sensor、Geiger counter、LTE、Sub-1G 裝置/模組；於輻射源儲存室內裝設 RFID Reader、Sub-1G 裝置/模組；因 Sub-1G 訊號傳出儲存室的距離有限，因此需於儲存室外裝設 Gateway，其中包含 Sub-1G 接收器、可連接 LTE 或 WiFi 或 Ethernet 等訊號傳輸方式；於輻射源運送車輛中的輻射源追蹤以建置於輻射源上的端模組即可，另外建議若能固定運送車輛，則可於運送車輛中裝設 RFID Reader、ETC Tag、G-Sensor 裝置/模組，能夠提升輻射源監控的品質。而每個裝置/模組的詳細功能如下:

輻射源上 (每個欲監控之輻射源都需裝設)

- **RFID Tag**: 可以記錄輻射源的詳細資料，並可透過 RFID 序號區分不同輻射源，並配合 RFID Reader 判斷輻射源是否被移動。
- **GPS 接收器**: 可以接收 GPS 訊號以監看輻射源之位置，但通常於室內訊號不佳，因此室內由 RFID Tag 配合 RFID Reader 判別輻射源位置。
- **G-Sensor**: 可以偵測 G 值以判斷輻射源是否受到撞擊等事故。
- **Geiger counter**: 可以偵測輻射值，提供判斷輻射源是否異常。
- **LTE&Sub-1G**: 可以傳輸輻射源的相關資訊，若於輻射源儲存室內則以 Sub-1G 傳輸訊號至 Gateway；若於輻射源運送車輛則由 LTE 傳輸訊號至雲。

輻射源儲存室內

- **RFID Reader:** 接收 RFID Tag 的資訊，並透過接收 RFID Tag 的資訊以判斷輻射源是否移動。
- **Sub-1G:** 將 RFID Reader 接收的資訊傳輸至儲存室外。

輻射源運送車輛 (其他建議): 需固定運送車輛

- **RFID Reader:** 可以協助 GPS 判斷輻射源是否有在車內。
- **ETC Tag:** 可以協助判斷車輛是否有移動至目的地。
- **G-Sensor:** 可以協助判斷事故發生。若運送車輛發生事故，於車輛上裝置的 G-Sensor 會比輻射源上的 G-Sensor 的判斷來的精準。

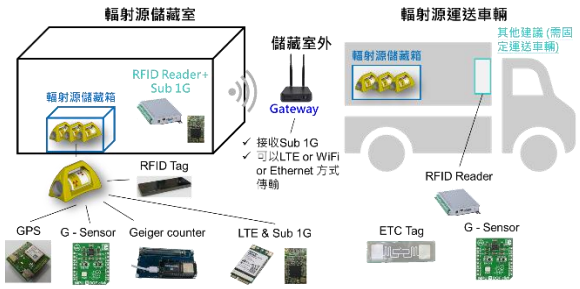


圖 5、實際場域之通訊模組設計示意圖

2. 端模組實際建置可能之狀況

在尚未進行實際驗證前，無法確認實際場域使用情境之細節，如模組於該場域之輻射損耗狀況、各模組整合之問題等，因此根據上述之端模組設計，評估實際建置可能會遇到的狀況/困難如下:

- **輻射環境影響**: 於輻射源上之通訊模組若因輻射損耗會導致功能失效，以 RFID Tag 為例因輻射損耗會資料遺失使輻射源失去 ID、室內追蹤等資訊，進而失去監管功能，因此後續需對通訊模組於輻射環境下之抗損耗能力進行測試評估(例如: 實際場域之抗輻射測試、送測其他輻射測試單位)。
- **儲藏室外 Gateway 訊號傳輸**: 需依照實際場域之訊號屏蔽狀況決定訊號傳輸至 Server 之方式，根據先前所述之內容可知分為有線和無線，若可使用無線之方式較不會因實際場域限制，但使用有線的方式就會受到現場空間限制。
- **蓋格計數器**: 根據目前查詢的資訊，蓋格計數器的廠商不提供資料串接的服務，因此若要取得蓋格計數器之資料數值，需進行蓋格計數器之相關研究。若研究後仍無法獲得相關資料數值，則可透過影像辨識技術讀取螢幕顯示之指標數值。
- **不同功能模組/產品之整合開發**: 如上所述，因目前尚未進行實際可行性驗證，所以先依現有產品進行評估，待確認進一步可行性驗證資訊後，即可根據實際狀況與需求進行模組/產品之整合開發。

IV. 結論

本計畫進行運用物聯網技術及大數據分析於輻射安全管制之研究，蒐集相關資訊與評估建議可行性方案。包含彙整 IoT 巨量資料處理及應用、國內導入 IoT 技術應用的圖資呈現案例、國際輻射源監管的圖資呈現/業務功能/端網雲系統架構等內容。

根據彙整資料，提出主要業務功能與圖資呈現建議: 輻射量測值、輻射源位置、量測值/移動路線異常警示、儲存歷史移動路徑等，並與主管機關討論定義實際場域情境之場域種類、輻射源運送情境、警示作法等。除此之外，也根據端網雲架構提出建議，端的部分:輻射源於儲存室位置偵測、輻射源於運送位置(GPS)偵測、輻射源劑量偵測、輻射源運送車輛事故偵測(G-sensor)；網的部分:訊號傳出儲存室(Sub-1G)、訊號由儲存室外傳至 Server、訊號由運送車輛傳至 Server；雲的部分:Web Server、Database Server、Communication Server(依目前資料量可不建)。

目前也根據實際場域之通訊模組設計(如圖 5)進行端模組、網頁頁面之成本估算，對於其他部分之成本估算(例如: 韌體、server 硬體…等)，建議於後續計畫進行更詳細的功能規格確認與考慮端模組實際建置狀況後，再進行成本估算。因此後續規劃將會進行示範場景的選擇與業務管制流程建立、示範場景智能化系統管制平台架構評估及初步設計規格、示範場景圖資及地理資訊系統評估與資料庫設計評估等。在更進一步確認實際輻射源管制細節後，以獨立端模組/產品進行實際示範場域可行性驗證，確認可行性後再進行整合及其他模組開發流程(例如: Layout、打樣、測試…)的成本估算及執行。而本年度計畫之成果將做為導入後續期程計畫之研究基礎，協助輻射安全管制主管機關進行數位轉型與管制落實。

參考文獻

[1] Byung Soo Lee (Korea Institute of Nuclear Safety), Abu Dhabi Conference: Successful Korean Initiatives for Strengthening Safety and Security of Radioactive Sources, 27-31 Oct. 2013

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

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

[4] 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

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

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

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

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

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

燃煤設施周圍之空浮採樣調查及居民輻射劑量評估

The airborne particulate matter sampling and analysis around the coal-fired facilities (power plants) and assessment of radiation exposure dose of the residents

計畫編號：110-2623-E-020-001 -NU
計畫主持人：林志忠
e-mail：lincc@mail.npust.edu.tw
計畫共同主持人：陳庭堅
計畫參與人員：陳信良
執行單位：國立屏東科技大學環境工程與科學系

摘要

為探討燃煤設施周圍大氣懸浮微粒上天然放射性核種活度及居民輻射劑量評估，本研究以四部高流量採樣器採集大氣之懸浮微粒，分別在冬季及夏季在燃煤電廠進行採樣，分析大氣總懸浮微粒濃度、微粒上金屬濃度及天然放射性核種活度，研究結果顯示：興達電廠大氣懸浮微粒(TSP)平均濃度範圍為 68.6~88.4 μg/m^3；台中電廠 TSP 平均濃度範圍為 134~204 μg/m^3，電廠周圍大氣總懸浮微粒以主要金屬中地殼元素（Mg、Al、Ca、Fe）所佔之比例最高（達 90%以上）。大氣總懸浮微粒天然放射性核種活度均低於偵測極限，說明火力發電廠所周圍懸浮微粒並不會對人體造成輻射威脅。飛灰上 ^{40}K 之活度範圍在 222.4~410.4 Bq kg^{-1} 之間，平均值為 284 Bq kg^{-1}；^{232}Th 之活度範圍為 53.2~70.5 Bq kg^{-1}，平均值為 61.9 Bq kg^{-1}；^{226}Ra 之活度範圍為 53.2~67.0 Bq kg^{-1}，平均值為 60.1 Bq kg^{-1}。底灰上 ^{40}K 之活度範圍為 194~281 Bq kg^{-1}，平均值為 244 Bq kg^{-1}；^{232}Th 之活度範圍在 53.2~71.8 Bq kg^{-1} 之間，平均值為 65.1 Bq kg^{-1}；^{226}Ra 之活度範圍在 55.4~68.4 Bq kg^{-1} 之間，平均值為 61.1 Bq kg^{-1}。興達電廠煤炭中 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 天然放射性核種活度分別依序為 27.9、9.68 及 8.70 Bq kg^{-1}，而台中電廠混合亞煙煤中 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 之平均活度分別依序為 33.63、6.66 和 4.47 Bq kg^{-1}。電廠周圍土壤中其 ^{40}K 之平均活度較高，核種活度範圍在 61.39~657.59 Bq kg^{-1} 之間，^{232}Th 活度在 10.68~40.62 Bq kg^{-1} 之間，而 ^{226}Ra 之活度在 9.20~23.57 Bq kg^{-1} 之間。興達電廠飛灰 86.17% 是分布於粒徑小於 105 μm，而中火高達 95.53%。^{40}K 在粒徑小於 105 μm 之活度明顯高於 105~250 μm，約 1.83 倍，而 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 則些許增加，僅分別為 1.25 及 1.34 倍。^{40}K 在粒徑小於 105 μm 之活度明顯低於興達電廠，約 0.49 倍，而 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 則較接近興達之量測值，分別為 0.99 及 0.98 倍。

關鍵詞：燃煤鍋爐、天然放射性核種活度、金屬、總懸浮微粒、飛灰、底灰

Abstract

To investigate the activity of natural radionuclide of total suspended particulate (TSP) and exposure doses of radiation around the coal-fired power plant, we collect TSP to analyze mass concentration, metal composition, and activity of natural radionuclide in the coal-fired power plants in winter and summer respectively by 4 high-flow samplers. These results indicate that the TSP concentrations in the Hsinta Power Plant were ranged from 68.6 to 88.4 μg/m^3 and 134 to 204 μg/m^3 in the Taichung Power Plant. The TSP around the power plants are mainly composed (over 90%) of crustal elements (i.e., Mg, Al, Ca, and Fe). The activity concentration of natural radionuclides in TSP are below the detection limit, indicating that the TSP around thermal power plants does not pose a radiation threat to humans. The activity concentration of ^{40}K on fly ash ranges from 222.4 to 410.4 Bq kg^{-1}, with an average value of 284 Bq kg^{-1}; the activity concentration of ^{232}Th ranges from 53.2 to 70.5 Bq kg^{-1}, with an average value of 61.9 Bq kg^{-1}; ^{226}Ra activity concentration ranged from 53.2 to 67.0 Bq kg^{-1}, with an average of 60.1 Bq kg^{-1}. The activity concentration range of K-40 on bottom ash was 194~281 Bq kg^{-1}, with an average value of 244 Bq kg^{-1}. The activity concentration of ^{232}Th ranged from 53.2 to 71.8 Bq kg^{-1}, with an average value of 65.1 Bq kg^{-1}. The activity concentration of ^{226}Ra ranges from 55.4 to 68.4 Bq kg^{-1}. The average was 61.1 Bq kg^{-1}. The activity concentrations of ^{40}K, ^{232}Th, and ^{226}Ra natural radionuclides in the coal of the Hsinta Power Plant are 27.9, 9.68, and 8.70 Bq kg^{-1}, respectively. The average activity concentrations of ^{40}K, ^{232}Th, and ^{226}Ra in the mixed sub-bituminous coal from Taichung Power Plant were 33.63, 6.66 and 4.47 Bq kg^{-1}. The average activity concentration of ^{40}K in the soil around the power plant is high, the activity concentration of natural radionuclide is between 61.39 and 657.59 Bq kg^{-1}, the activity of ^{232}Th is between 10.68 and 40.62 Bq kg^{-1}, and the activity concentration of ^{226}Ra ranges from 9.20 to 23.57 Bq kg^{-1}. The 86.17% of fly ash in the Hsinta Power Plant is distributed in particle size less than 105 μm, and as high as 95.53% in Taichung Power Plant. The activity concentration of ^{40}K with a particle size of less than 105 μm was significantly higher than that of 105 to 250 μm, about 1.83 times, while the activity concentrations of ^{232}Th and ^{226}Ra increased slightly, only 1.25 and 1.34 times, respectively. The activity of ^{40}K with a particle size smaller than 105 μm is significantly lower than that of the Hsinta Power Plant, about 0.49 times, while ^{232}Th and ^{226}Ra are closer to the measured values of Hsinta, 0.99 and 0.98 times, respectively.

Keywords: coal-fired boiler, activity concentration of natural radionuclide, TSP, fly ash, bottom ash

I. 前言

近年來大家對於核能發電之安全產生疑慮，興起了許多廢核活動，台灣目前有核二及核三廠運轉發電，另外核一廠已依計劃辦理除役。日本福島第一核電站事故(FDNPPA) 是由於 2011 年 3 月東北地震引發之海嘯而造成，此事件排放約 520 PBq (Peta = 10^{15}) 之人為放射性污染物(Men et al., 2021)，而引起了民眾極大關注。臺灣除了核能發電外，還包含火力發電、水力發電、風力與太陽發電等組成，而火力發電則是台灣目前最主要的發電方式，此發電方式佔全台總發電量比例高達 82.23%，火力發電使用之燃料包含煤炭、天然氣與石油等 3 種燃料。其中燃煤發電佔總發電量 45%，燃煤發電程序造成之空氣污染已成為目前政府極力改善之首要環境問題。由於煤炭含鈾系及釷系等天然放射性物質，使煤炭在燃燒過程排放含天然放射性物質之微粒，使得燃煤設施排放飛灰含天然放射性核種(^{40}K、^{226}Ra 及 ^{232}Th) 之濃度增加。若燃煤電廠使用煤炭中 ^{226}Ra 之濃度高於 370 Bq kg^{-1}，燃煤設施排放之飛灰將導致空氣中微粒上 ^{226}Ra 之濃度超過空氣中最大允許濃度(Papastefanou et al., 2010)，由於飛灰中放射性核種會影響人體健康，因此測量飛灰中之放射性核種活度極為重要(Gupta et al., 2013)。燃煤電廠由煙囪排放粒狀物量約為製程飛灰總量之 1%~3%(Papastefanou et al., 2010)，含有放射性物質之微粒在大氣中反應成長，最後沉降至土壤或水源中，對水體、土壤、空氣及環境均有嚴重之影響。

目前文獻主要針對發電廠不同煤炭種類進行天然放射性核種活度之比較，文獻中也較少針對發電廠周圍大氣懸浮微粒上天然核種進行分析。本研究在發電廠周圍進行大氣懸浮微粒採樣，並分析總懸浮微粒上金屬濃度及天然放射性核種活度。另外同步採集燃煤發電製程產生之底灰及飛灰，並分析其天然放射性核種活度，本研究更進一步分析飛灰在不同粒徑範圍 (<61、61~105、105~149 及 149~250 μm)之佔比及天然放射性核種活度。

II. 主要內容

為探討燃煤設施周圍之大懸浮微粒上輻射劑量及居民輻射劑量評估，本研究以四部高流量採樣器採集大氣之懸浮微粒，分別在冬季及夏季在燃煤電廠進行一次採樣，分析大氣總懸浮微粒濃度、微粒上金屬濃度及微粒上天然放射性核種活度，建置大氣微粒上輻射劑量分析方法。並採集燃煤電廠使用之煤炭及其製程產生之副產物，如飛灰、底灰與發電廠周遭土壤，分析其輻射劑量並計算其危害風險指數。本計畫在燃煤鍋爐之東、西、南及北四個方向各架設一部高流量採樣器及在其中一點架設一台 PS1，採樣期間架設一台氣象儀蒐集採樣期間氣象資料。土壤採樣主要採集表土，以採樣鏟先將地表覆蓋物（如石礫、植被）移除即可採樣，並將土樣混合均勻。

III. 結果與討論

大氣中懸浮微粒濃度

本研究於 2021 年 4 月 13~15 日及 2021 年 10 月 23~25 日在興達電廠進行大氣懸浮微粒採樣，並於 2021 年 9 月 7~9 日在台中電廠進行採樣，每次採樣皆為連續三天微粒採樣，探討大氣總懸浮微粒濃度及微粒上天然放射性核種活度濃度，圖 1 為三次採樣之 TSP 濃度分析結果，第一次興達電廠三天採樣之 TSP 平均濃度分別依序為 76.71±19.84、86.95±19.67 及 80.99±8.60 μg/m³，造成標準偏差較大之可能原因為在水圳旁的採樣點有大卡車經過而造成揚塵，導致該採樣點 TSP 濃度偏高，致標準偏差較大。台中電廠三天採樣之 TSP 平均濃度分別依序為 204.04±113.31、134.32±63.81 及 169.73±78.31 μg/m³，TSP 濃度標準偏差較大，主要原因可能設置之 5 個採樣點環境差異較大，且該廠之運煤履帶在計畫採樣期間故障維修，運煤皆由大卡車從儲煤場運往燃煤機組，而南方警崗採樣點為其必經之路，大卡車來回經過產生揚塵，因此造成此採樣點 TSP 濃度較高之原因，其最高濃度高達 394.81 μg/m³。而第二天 TSP 平均濃度明顯下降，主要是因為前天晚上降雨所致，第三天 TSP 平均濃度上升至 169.73 μg/m³。10 月 23~25 日進行第二次南部發電廠採樣，三天採樣結果其 TSP 平均濃度分別依序為 88.49±27.52、68.57±8.26 及 82.33±10.03 μg/m³，與第一次採樣之 TSP 濃度差異不大。

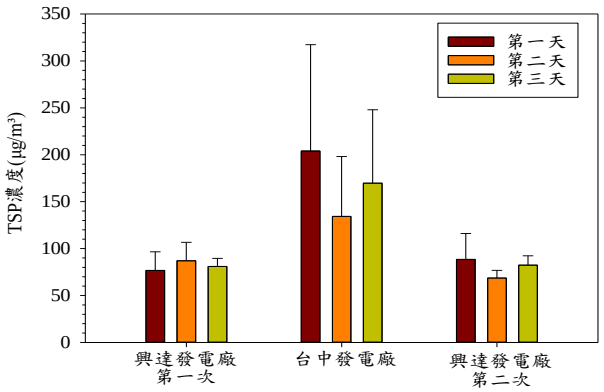


圖1　三次採樣之 TSP 濃度

火力發電廠大氣微粒上重金屬之濃度

本研究探討台中及興達火力發電廠大氣微粒上主要金屬（major metals major metals： Mg、Al、K、Ca、Fe）、次要金屬（sub-major metals： Cr、Mn、Cu、Zn、Sr、Ba、Pb）及微量金屬（minor metals： V、Co、Ni、Cd、Cs、Tl）。結果顯示：台中火力發電廠主要金屬 Mg、Al、K、Ca、Fe 在總懸浮微粒上之濃度分別依序為 6121.21 ± 7280.81、2173.37 ± 868.54、 328.68 ± 113.54、 1089.81 ± 648.37 及 6056.6 ± 1430.34 ng/m³，興達火力發電廠則分別依序為 456.79 ± 80.13、1336.91 ± 536.8、504.27 ± 136.82、111.59 ± 25.02 及 1040.86 ± 444.75 ng/m³；台中火力發電廠次要金屬 Cr、Mn、Cu、Zn、Sr、Ba、Pb 之濃度分別依序為 47.32 ± 51.20、 131.96 ± 51.66、184.72 ± 134.65、110.18 ± 51.99、14.53 ± 5.59、17.69 ± 5.19 及 10.71 ± 6.44 ng/m³，興達火力發電廠則分別依序為 6.37 ± 1.33、12.53 ± 17.27、19.14 ± 29.19、98.09 ± 21.86、6.57 ± 0.98、 15.51 ± 2.60 及 12.82 ± 4.25 ng/m³；台中火力發電廠之微量金屬 V、Co、Ni、Cd、Cs、Tl 之濃度分別為 8.28 ± 3.98、2.59 ± 2.57、51.82 ± 59.14、0.11 ± 0.27、

0.12±0.33 及 0.05±0.06 ng/m^3，興達火力發電廠則分別依序為 2.04±0.61、0.25±0.34、4.39±1.02、0.13±0.29、N.D.及 N.D. ng/m^3；研究發現台中火力發電廠以主要金屬所佔之比例最高（達 90%以上），由於粗微粒含有大量地殼元素（Mg、Al、Ca、Fe），在研究採樣期間台中火力發電廠之煤炭輸送帶因故障維修，燃煤鍋爐使用之煤炭改由大型貨車運輸，而造成大量揚塵導致懸浮微粒地殼元素含量增加。

大氣中微粒上天然放射性核種活度濃度

本研究將該日所有高流量採樣氣採集之微粒全部置於塑膠計測容器中，以純鍺偵檢器量測天然放射性核種活度，偵測時間為 10 萬秒，分析結果顯示：大氣中總懸浮微粒上之天然放射性核種活度極低，均小於偵檢器之偵測極限。本研究以高流量採樣器進行大氣中總懸浮微粒採樣，其採氣體積範圍 3922~10238 m^3，其平均值為 7585±2233 m^3，平均採氣體積大於一個人一年之大約呼吸量（約 4380 m^3）。此結果說明火力發電廠所周邊總懸浮微粒並不會對人體造成輻射威脅。

煤炭天然放射性核種活度

圖 2 為採樣期間興達及台中電廠提供之各種煤炭分析其天然放射性核種活度，第一次興達電廠提供 Tiger 及 Glencore 兩種煤炭，分析結果 Tiger 煤炭上 ^{40}K、^{226}Ra 及 ^{232}Th 天然放射性核種活度均低於偵測極限，而 Glencore 煤炭 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 天然放射性核種活度分別依序為 27.9、9.68 及 8.70 Bq kg^{-1}。台中發電廠僅提供混合亞煙煤，分析煤炭上 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 之平均活度為 33.63、6.66 和 4.47 Bq kg^{-1}。興達電廠第二次採樣提供 ABK 及 Glencore 兩種煤炭，分析結果 ABK 煤炭 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 天然放射性核種活度均低於偵測極限，而 Glencore 煤炭當中 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 之平均活度為 29.30、12.15 和 12.91 Bq kg^{-1}。

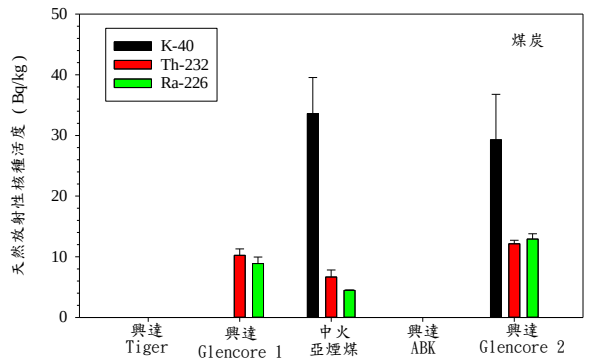


圖2 採樣期間煤炭樣品上天然放射性核種活度

飛灰天然放射性核種活度

圖 3 為三次電廠採樣飛灰上天然放射性核種活度分析結果，分析結果顯示：^{40}K 之活度範圍在 222.35 至 411.80 Bq kg^{-1} 之間，平均值為 283.6±66.8 Bq kg^{-1}。歷次採樣以興達第二次採樣之活度最高，主要是因為第二機組之飛灰(411.80 Bq kg^{-1}) ^{40}K 活度較第四機組之飛灰 (232.28 Bq kg^{-1}) 高 1.8 倍；三次採樣飛灰上 ^{232}Th 之活度範圍為 53.24~70.54 Bq kg^{-1}，三次採樣 ^{232}Th 平均之活度分別依序為 66.44、62.79、56.60 Bq kg^{-1}；三次採樣飛灰上 ^{226}Ra 之活度範圍為在 53.23~66.97 Bq kg^{-1}，三次採樣平均活度分別依序為 61.42、62.19、56.66 Bq kg^{-1}。三次採樣之平均活度可以發現到 ^{232}Th 及 ^{226}Ra 之活度較接近，而 ^{40}K 之活度明顯高於其他物種，在 UNSCEAR 報告指出飛灰之 ^{40}K、^{232}Th、^{226}Ra 世界平均活度分別依序為 500、200、200 Bq kg^{-1}。本研究探討台灣地區燃煤電廠飛灰上 ^{40}K 活度以興達第二次採樣為最高，其中又以第二機組 ^{40}K 活度為 410.36 及 413.24 Bq kg^{-1} 最高，其平均活度仍低於世界的平均活度。而 ^{232}Th 及 ^{226}Ra 更是不及世界平均活度之 1/4。

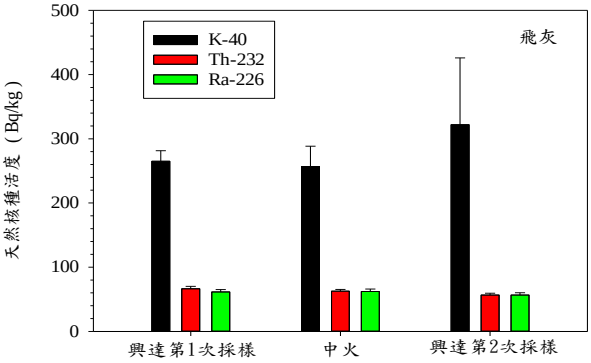


圖3 飛灰天然放射性核種活度分析結果

底灰天然放射性核種活度

圖 3 為本研究所採集之三次底灰上 ^{40}K 之活度範圍為 194.23~281.03 Bq kg^{-1}，三次採樣底灰之平均活度分別依序為 253.92、241.07 及 235.87 Bq kg^{-1}。^{232}Th 之活度範圍在 53.24~71.84 Bq kg^{-1} 之間。三次之均活度分別為 68.23、59.66 及 67.64 Bq kg^{-1}。^{226}Ra 之活度範圍在 55.42~68.38 Bq kg^{-1} 之間。三次之平均活度分別為 62.76、57.87 及 62.66 Bq kg^{-1}。飛灰及底灰皆為煤炭燃燒後之產物，由採樣分析結果得知：飛灰天然放射性核種活度皆高於底灰，Zielinski and Budahn (1998)提到天然核種會優先富集於飛灰當中，與本研究結果相似。UNSCEAR(2000) 報告中亦指出建築材料之 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 全球平均活度為 500、50 和 50 Bq kg^{-1}，飛灰和底灰中的天然放射性核種除了 ^{40}K 低於全球平均值，^{232}Th 及 ^{226}Ra 皆高於平均，進行回收再利用時必須更注意其輻射風險。

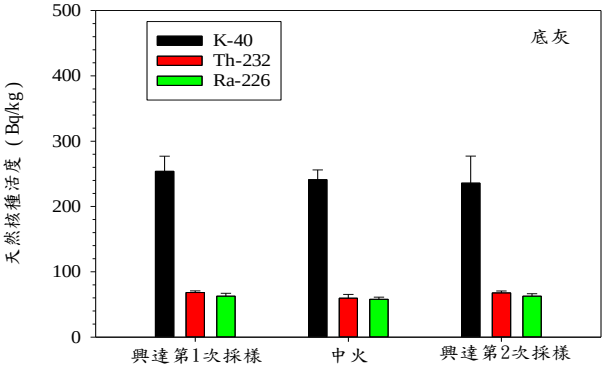


圖4 底灰天然放射性核種活度分析結果

土壤天然放射性核種活度

天然放射性核種 ^{40}K 平均活度為所有土壤樣品中最高，其活度範圍在 61.39 至 657.59 Bq kg^{-1} 之間。圖 5 中可以發現煤倉附近之土壤其 ^{40}K 活度越低，推測原因可能是採集土壤樣品時為採集表層土壤，而表層土壤會因煤堆受風力或雨水沖刷而佈滿較細顆粒之煤炭，本研究量測 ^{40}K 之活度偏低是因為採集煤廠旁土樣時含有較高比例之煤碳，而煤炭中 ^{40}K 之活度較一般土壤為低，導致煤廠旁土樣 ^{40}K 之活度量測結果也偏低。土壤之 ^{232}Th 活度在 10.68 至 40.62 Bq kg^{-1} 之間，而 ^{226}Ra 之活度在 9.20 至 23.57 Bq kg^{-1} 之間。

圖 5 是利用兩次興達發電廠所採集之土壤樣品進行比較，兩次採樣時間分別為 4 月 15 日及 10 月 25 日兩次間隔時間約 6 個多月，天然放射性核種活度並無太大變化。其他國家土壤之 ^{40}K、^{232}Th 及 ^{226}Ra 平均值為 340、30 及 35 Bq kg^{-1}(UNSCEAR, 2000)。所採集之樣品僅興達大門口之 ^{40}K 和 ^{232}Th 和台中之大門口 ^{40}K 高於其他國家之平均值。

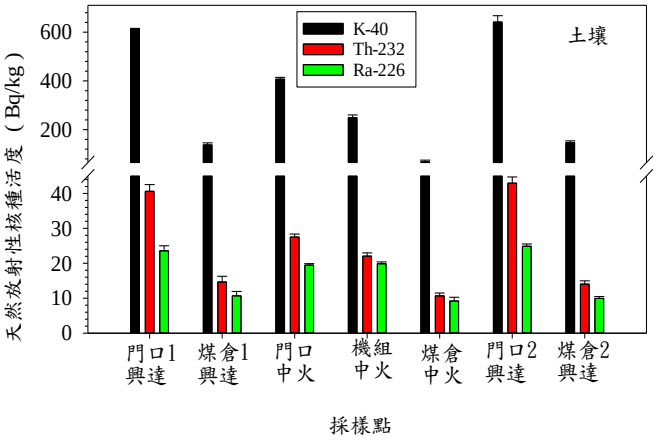


圖5　興達及中火電廠土壤樣品中天然放射性核種分析結果

飛灰不同粒徑範圍分析

本研究分析興達及台中電廠燃煤程序產生飛灰在不同粒徑範圍之佔比（如圖 6 所示），其結果顯示：飛灰主要分布在粒徑小於 105 μm 以下，興達飛灰粒徑範圍在<61、61~105、105~149 及 149~250 μm 之佔比分別依序為 26.90%、59.27%、11.16%及 2.67%；中火飛灰粒徑範圍在<61、61~105、105~149 及 149~250 μm 之佔比分別依序為 27.62%、67.91%、3.35%及 1.12%。興達電廠飛灰 86.17%是分布於小於 105 μm，而中火高達 95.53%。本研究也進行各粒徑範圍天然放射性核種量測，其結果如圖 7~9 所示，興達飛灰粒徑範圍在<61、61~105、105~149 及 149~250 μm 之 ^{40}K 活度分別依序為 442.5、419.4、237.7 及 222.1 Bq kg^{-1}，^{232}Th 活度分別依序為 59.3、63.5、50.6 及 47.4 Bq kg^{-1}，^{226}Ra 活度分別依序為 60.7、58.0、44.2 及 44.5 Bq kg^{-1}，結果顯示：興達電廠之 ^{40}K 在粒徑小於 105 μm 之活度明顯高於 105~250 μm，約 1.83 倍，而 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 則些許增加，僅分別為 1.25 及 1.34 倍。中火飛灰粒徑範圍在<61、61~105、105~149 及 149~250 μm 之 ^{40}K 活度分別為 237.5、188.0、212.9 及 116.9 Bq kg^{-1}，^{232}Th 活度分別為 67.0、54.1、58.3 及 31.3 Bq kg^{-1}，^{226}Ra 活度分別依序為 70.3、45.9、58.8 及 34.4 Bq kg^{-1}，結果顯示：^{40}K 在粒徑小於 105 mm 之活度明顯低於興達電廠，約 0.49 倍，而 ^{232}Th 與 ^{226}Ra 則較接近興達之量測值，分別為 0.99 及 0.98 倍。

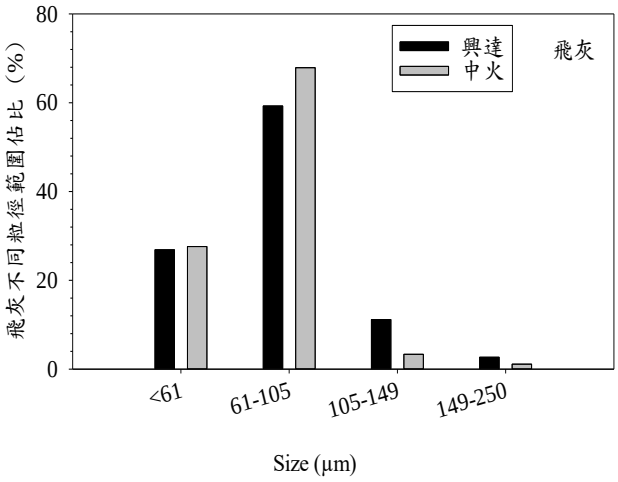


圖6　興達及中火發電廠飛灰不同粒徑範圍之佔比

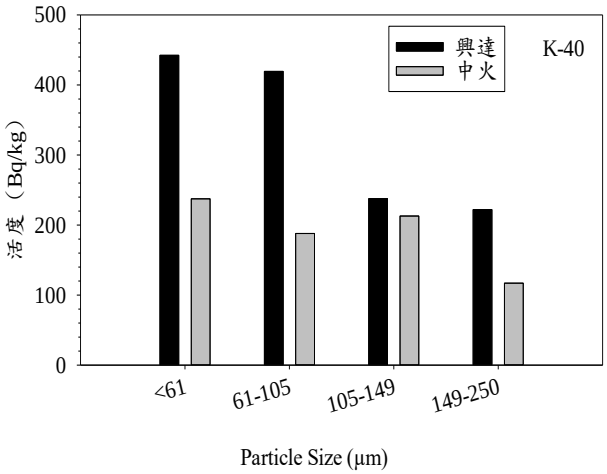


圖7　興達及中火發電廠飛灰不同粒徑範圍上之 ^{40}K 活度

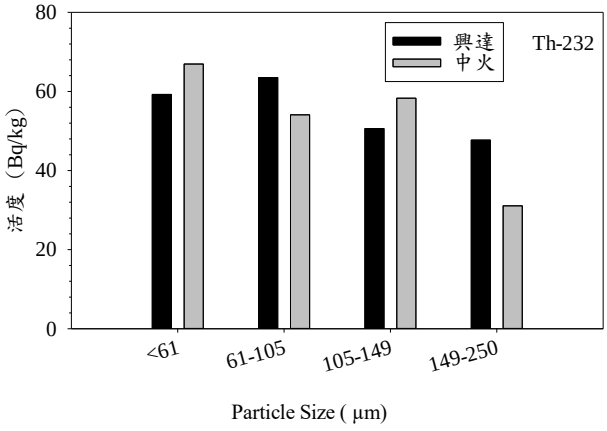


圖8　興達及中火發電廠飛灰不同粒徑範圍上之 ^{232}Th 活度

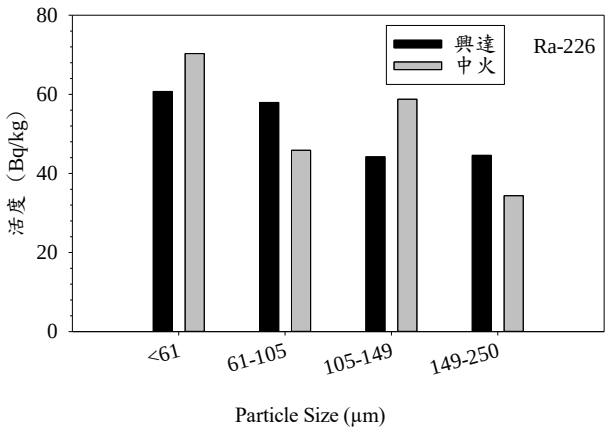


圖9 興達及中火發電廠飛灰不同粒徑範圍上之 ^{226}Ra 活度

放射性風險評估

本研究以分析結果計算放射性風險評估，並計算空氣中之加馬劑量率、年有效劑量、鐳當量活度及體外危害指數。

室外吸收加馬劑量率(Dout)是計算地面上方 1 m 處空氣中之加馬劑量率，^{226}Ra、^{232}Th 和 ^{40}K 之活度轉換因子分別為 0.427、0.662 和 0.043。其計算式如下:

$$D_{out} = 0.462 \times A_{\mathrm{Ra}} + 0.604 \times A_{Th} + 0.0417 \times A_K$$

年有效劑量是土壤放射性的人群預期有效劑量採用 0.7 Sv/Gy 之換算係數。成年人待在室內與室外之佔比約為 80%及 20%，故占用係數使用 0.8 及 0.2 公式如下:

$$\mathrm{E_{in}} = \mathrm{D} \times 8670\mathrm{h} \times 0.8 \times 0.7 \times 10^{-6}$$

$$\mathrm{E_{out}} = \mathrm{D} \times 8670\mathrm{h} \times 0.2 \times 0.7 \times 10^{-6}$$

鐳當量活度是以鐳之等效活度算出的單一指數，並評估體外加馬射線對人體的影響，其最大值必須小於 370 Bq kg^{-1}，計算式如下:

$$\mathrm{Ra_{eq}} = A_{\mathrm{Ra}} + 1.43 \times A_{Th} + 0.077 \times A_K$$

外部危害指數是直接由加馬輻射所引起的，利用建築材料所散發之加馬輻射劑量值所計算，其公式如下:

$$H_{ex} = \frac{A_{\mathrm{Ra}}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810}$$

上述之計算結果如表 1，我們所採樣品之吸收加馬劑量率在 0~80.8 nGy h-1 之間，其結果明顯較(Gupta et al., 2013)計算飛灰之加馬劑量平均值為 158.4 nGy h^{-1}，其飛灰之吸收加馬劑量率高本研究約兩倍。年有效劑量本研究採用室外占用係數來估算，其值在 0~0.099 之間，其中土壤之年有效室外劑量值在 0.017~0.075 之間，其結果與 UNSCEAR (2000) 之平均 0.07 相較僅南部電廠大門口高於其平均值。本研究所有樣品其鐳當量活度範圍為 16.6~179.9 之間，其最高值僅為標準值(370 Bq kg^{-1})之一半。體外危害指數其指標必須小於 1，以保證無輻射危害之風險，本研究之所有樣品之體外危害指數(Hex)值在 0.045 至 0.486 之間，最大值為南部電廠第一次採樣之底灰，而且底灰及飛灰只是回收再利用添加在水泥或是建材相關產品中，因此，其體外危害指數亦會大大降低。

表 1 本研究煤與其副產物之輻射危害風險

	空氣中加馬劑量率 (D)nGy/h	年有效劑量 (mSv/y)	鐳當量活度(Ra_{eq})	體外危害指數 (Hex)<1
興達電廠				
飛灰 1	79.56	0.098	177	0.478
飛灰 2	73.79	0.090	162	0.439
底灰 1	80.79	0.099	180	0.486
底灰 2	79.64	0.098	178	0.480
煤倉旁(土壤)	19.50	0.024	42.2	0.114
煤炭 1 (Glencore)	10.29	0.013	23.5	0.064
煤炭 2 (Glencore)	14.52	0.018	32.5	0.088
台中電廠				
飛灰 1	77.37	0.095	172	0.464
底灰 1	72.83	0.089	162	0.437
大門口(土壤)	42.58	0.052	90.1	0.243
機組下(土壤)	32.86	0.040	70.5	0.190
煤倉旁(土壤)	13.54	0.017	29.7	0.080
煤炭	7.49	0.009	16.6	0.045

IV. 結論

本研究結果發現：煤炭經燃煤設施燃燒後產出之底灰及飛灰均具有輻射濃縮之現象，導致飛灰及底灰等後端產物有較高之天然放射性核種活度，與其他國家之飛灰、底灰相較，台灣電廠排放之底灰及飛灰含有較低之天然放射性核種活度。本研究所採集之兩座燃煤電廠，皆採用高熱值、低灰份及低硫份之優質煤炭，可獲致最佳之運轉效果並符合政府之排放標準。電廠之飛灰及石膏等廢棄物交由混凝土公司及水泥廠進行再利用，以加馬劑量率、年有效劑量、鐳當量活度及體外危害指數進行風險評估皆低於限制值，且無輻射危害。一般民眾較容易接觸到的是經由排放管道排放至大氣之懸浮微粒，本研究進行大氣微粒上天然放射性核種活度之分析，分析樣品之採集體積已遠高於一個成年人一年所吸入之空氣體積，而量測微粒上所含之輻射物質皆小於偵測極限，並不會對人體造成健康危害。本研究將取得之飛灰進行篩分，其結果顯示：興達電廠飛灰 86.17%是分布於小於 105 μm，而中火更高達 95.53%，而這些飛灰約有 1~3%會排放至大氣中，並懸浮在大氣中。興達及中火之飛灰小於 61 μm 之佔比分別為 26.90%及 27.62%，燃煤設施為一高溫燃燒設備，其產生粒狀物或經氣固相轉移分佈在超細或是細微粒上，排放至大氣，民眾經由呼吸系統進入體內，進而影響身體健康，本研究之結果亦顯示：飛灰粒徑小於 105 μm 明顯高於粒徑大於 105 μm 粒徑範圍之天然放射性核種活度（約 1.25~1.87 倍），其中以興達廠飛灰上 ^{40}K 之 1.87 倍最高，此結果說明煤炭燃燒過程排放之較小粒狀物含有較高之天然放射性核種活度。因此有必要進一步分析煙道中超細或細微粒上天然放射性核種活度。

參考文獻

[1] Men, W., Wang, F., Yu, W., He, J., Lin, F., Deng, F., Yu, T., Ma, H. and Zeng, Z., 2021, "Radioactive Impacts of the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant Accident on Blue Sharks in the Northwest Pacific," Chemosphere, Vol. 285, p. 131537.

[2] Papastefanou, C., 2010, "Escaping Radioactivity from Coal-Fired Power Plants (Cpps) Due to Coal Burning and the Associated Hazards: A Review," Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 101, No. 3, pp. 191-200.

[3] Gupta, M., Mahur, A.K., Varshney, R., Sonkawade, R., Verma, K. and Prasad, R., 2013, "Measurement of Natural Radioactivity and Radon Exhalation Rate in Fly Ash Samples from a Thermal Power Plant and Estimation of Radiation Doses," Radiation Measurements, Vol. 50, pp. 160-165.

[4] Zielinski, R.A. and Budahn, J.R., 1998, "Radionuclides in Fly Ash and Bottom Ash: Improved Characterization Based on Radiography and Low Energy Gamma-Ray Spectrometry," Fuel, Vol. 77, No. 4, pp. 259-267.

[5] UNSCEAR, G., 2000, "Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume II: Effects. New York. United Nations," United Nations: New York. ISBN: 92-1-142238-5, 453-487.

加馬能譜法測量環境水中的鐳元素含量
Measurement of radium element content in water for environment samples by gamma spectrometry

計畫編號：110-2623-E-020-002-NU
計畫主持人：陳庭堅
e-mail：chen5637@mail.npust.edu.tw
計畫參與人員：黃韋翔、劉詠瑜、黃朝敏
執行單位：國立屏東科技大學環境工程與科學系

摘要

水是人類重要的資源,在環境研究中具有重要意義，除了人類每日的攝取外，並具有運輸與稀釋分解污染物的能力。水是維持身體機能活力重要元素，當飲用水中含有天然放射性核種，通過飲用被攝入體內時，會對健康造成危害。本研究的目的是採集台灣屏東地區環境水體(地下水)、飲用水體及國內外市售瓶裝水等樣本，分析放射性核種鐳同位素(^{226}Ra)，了解鐳同位素(^{226}Ra)的濃度及分佈。另外建立各類水源的化學濃縮方法，以提高偵測效率，降低核種計測時的偵測極限，使之能應用於「商品輻射限量標準」中對飲用水中鐳同位素(^{226}Ra)偵測的要求。同時由檢測結果探討飲用水中的^{226}Ra元素濃度是否符合「商品輻射限量標準」中飲用水之限值，並評估計算飲用水攝取造成的年有效劑量。

本研究針對水中鐳的濃縮方法進行試驗,包括共沉澱法及樹酯吸附法，共沉澱法其測試結果回收率介於67.2-102.6%；樹酯吸附法其測試結果回收率介於72.4-91.3%。採集市售國內外瓶裝飲用水並進行放射性核種分析,其Th-232核種活度介於14-527 mBq/L;Ra-226核種活度介於4-522 mBq/L；Ra-228核種活度介於2-276 mBq/L，國外瓶裝飲用水其活度皆小於本國「商品輻射限量標準」公告第三條:鐳226及鐳228濃度限值各為740 Bq/m^3。計算國內外市售瓶裝飲用水其年有效劑量，嬰兒年有效總劑量介於0-84 μSv/y之間；兒童年有效總劑量介於0-100 μSv/y之間；成人年有效總劑量介於0-119 μSv/y之間。本研究所採集的國內外市售瓶裝飲用水年有效總劑量遠低於UNSCEAR的估計值。國內外市售瓶裝飲用水其終身致癌風險，Th-232的終身致癌風險評估值介於0.0-7.6 (10^{-5})之間；Ra-226則介於0.0-29.4 (10^{-5})之間，低於建議的放射性致癌風險限值10^{-3}。

關鍵詞：鐳同位素(^{226}Ra)、共沉澱法、樹酯吸附法、年有效劑量、終身致癌風險。

Abstract

Water is an essential resource for human beings and is significant in environmental research. In addition to human daily intake, water transport dilutes and decomposes pollutants. Therefore, water is a crucial element to maintain the vitality of bodily functions. However, when drinking water contains natural radionuclides, it will cause harm to health when it is ingested into the body. This study aims to collect samples of environmental water (groundwater), drinking water, and bottled water sold at local markets and imported from abroad in the Pingtung area of Taiwan. This study analyzed the radionuclide radium isotope (^{226}Ra) and understood the radium isotope concentration and distribution. In another aim, this study used chemical concentration methods to improve the detection efficiency and reduce the detection limit of nuclear species measurement for various water sources. Therefore, the methods can be applied to the requirements for detecting radium isotope (^{226}Ra) in drinking water in the "Commercial Radiation Limit Standard." At the same time, based on the test results, whether the concentration of ^{226}Ra in drinking water meets the limit of drinking water in the "Commercial Radiation Limit Standard" and evaluates and calculates the national dose caused by drinking water intake.

In this study, the concentration methods of radium in water were tested, including the co-precipitation and resin adsorption methods. The recovery rates of the co-precipitation method were between 67.2 and102.6%; the recovery rates of the resin adsorption method were between 72.4 and 91.3%. Collect commercially available bottled drinking water of domestic and imported products and conduct radionuclide analysis. The activity concentrations of Th-232 were between 14 and 527 mBq/L. The activity concentrations of Ra-226 were between 4 and 522 mBq/L; the activity concentrations of Ra-228 were between 2 and 276 mBq/L. Imported foreign bottled drinking water's activity concentrations were lower than that of the domestic "Commodity Radiation Limit Standard" Announcement No. 3. The concentration limit of Ra-226 and Ra-228 is 740 Bq/m^3. The calculated annual effective dose of bottled drinking water sold at the market and infants' total annual effective dose was between 0 and 84 μSv/y. The total annual effective dose in children was between 0 and 100 μSv/y. The effective dose for an adult was between 0 and 119 μSv/y. The total annual effective dose of bottled drinking water collected in this study was much lower than the estimated value of UNSCEAR. The lifetime cancer risk of bottled drinking water sold at markets shows that the calculated lifetime cancer risk for Th-232 was (0.0-7.6) x 10^{-5} and (0.0-29.4) x 10^{-5} for Ra-226. For general radiological risk, these values are lower than the recommended LCR limit of 10^{-3}.

Keywords: Radium isotope (^{226}Ra), Co-precipitation method, Resin adsorption method, Annual effective dose, Lifetime cancer risk.

I. 前言

水是人類重要的資源,在環境研究中具有重要意義，除了人類每日的攝取外，並具有運輸與稀釋分解污染物的能力。水是維持身體機能活力重要元素，當飲用水中含有天然放射性核種，通過飲用被攝入體內時，會對健康造成危害(UNSCEAR, 2000)。飲用水是人類重要的必需品,其品質安全對保護健康至關重要。全球許多國家，已經對飲用水中的天然放射性進行了測量，評估飲用水各類核種活度與攝食有效的劑量以及輻射體內暴露致癌風險(Karahan et al., 2000)。

環境放射性物質包括天然或人工來源。天然來源主要為含放射性礦物的岩石風化礦物成為土壤組成的一部分和宇宙射線產生的核種的沉降。而人工放射性主要來源為核電工業、核武器測試以及核材料釋放於環境的核種(Thatcher et al., 1977)。地下水中的放射性主要來自天然衰變鏈^{238}U和^{232}Th的放射性核種，以及土壤和基岩中的^{40}K 溶解於水中(Gorur and Camgoz, 2014)。由於地下水與土壤和基岩的反應，某些放射性核種較易溶解在水中，這取決於土壤和岩石的礦物學和地球化學組成，氧化還原條件以及地下水在土壤和基岩中的停留時間(Vesterbacka, 2007)。在地下水中傳輸的放射性核種可通過灌溉水進入食物鏈，並通過地下水井進入水源。地面水缺乏國家或地下水資源豐富的地區與國家廣泛使用地下水作為水廠的原水源。用地下水代替地表水的趨勢也越來越大，可能會增加水中天然放射性核種的風險。地下水當作飲用水源導致放射性核種的攝入，增加人體內部放射核種暴露與致癌風險。

測定水中天然放射性核種應用於環境和公共衛生研究，需考慮到^{226}Ra和^{228}Ra的高放射毒性，而它們在水中的濃度在以及相關的健康風險需要特別注意。含水層的鈾與鐳的濃度決定了鐳從固體中溶解到水中的能力。水中^{226}Ra和^{228}Ra的分佈與濃度是含水層中釷和鈾的含量、含水層土壤與岩石的地球化學性質以及每種同位素的半衰期決定。

水環境中鐳同位素的研究在地球化學中非常重要，鈾和釷衰變系列的四種鐳同位素(^{223}Ra, ^{224}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra)可以用作天然地球化學的追蹤劑,研究生物圈和地球圈中重要環境過程的重要核種(Rama and Moore, 1996)。飲用水中^{226}Ra及其後代^{210}Pb和^{210}Po的測定在放射防護領域也引起了極大的興趣，因為這些核種部分累積在骨骼中，導致在人體中的停留時間較長(ICRP, 1975)。另外，^{226}Ra和^{228}Ra的子代由α粒子的發射而衰變，而增加了內部輻射的劑量(ICRP, 1994)。研究顯示水中^{226}Ra/^{228}Ra活度比具有高變異性(^{226}Ra為^{238}U系列，^{228}Ra為^{232}Th系列)(Kahn et al., 1990; Moore, 1996)，清楚地證明Ra同位素之間的關係和對於確定陸地水體進入海洋的通量和混合速率的適用性(Moore, 1996; Moore, 1997)，以及地下水與地表水之間的交換作用(Tricca, 1997)。水可以溶解岩石、土壤或礦化體相互作用的天然鐳,因此，地下水中鐳的活度變異性較大，這歸因於特定的岩石成分、礦物學、地質結構和地下水化學(Moise et al., 2000; Sturchio et al., 2001)。

飲用水中的放射性會導致人群暴露於游離輻射中，監測水中放射性核種含量是國家公共衛生系統的責任，可以藉由水處理方法移除核種活度或監測核種濃度確保有效劑量在規定的範圍內。人類藉由攝入飲用水中的放射性核種而暴露於游離輻射中。UNSCEAR估計，人類在天然環境，自然來源放射性核種貢獻的放射性核種的有效劑量為2.4 mSv/y (其中食物和水貢獻的劑量值0.3 mSv/y) (Pintilie et al., 2016; UNSCEAR, 2000)。

天然放射性鐳被歸類為放射性有毒物質。^{226}Ra 和^{228}Ra 主要通過攝入食物和水在人體中累積。飲用水對總攝入量的貢獻很重要，當飲用水從地下水中抽取時，鐳的濃度變化很大，並且經常超過 200 mBq/L (Abbady, 2017)。當鐳進入人體時，其代謝行為與鈣相似，並且一部分累積在骨骼中。人體中 70%以上的鐳都沉積在骨骼中，其餘部分相當均勻地分佈在軟組織中(UNSCEAR, 2000)。攝入較高的 ^{226}Ra 可能會導致每年的體內劑量接近世界衛生組織建議的 0.1 mSv/y 參考值(WHO, 2003)。^{226}Ra 轉移至人體的主要途徑是食入。近年的研究數據顯示，公共供水中的 ^{226}Ra 含量變化很大(Abbady, 2017)。飲用水中鐳的發生、自然分佈和濃度受地質環境以及地下水與含鐳物質如岩石、土壤、礦體等相互作用的影響很大(Bronzovic and Marovic, 2005)。來自地表水源中的飲用水鐳攝入量通常較低(Asikainen and Kahlos, 1980)。由於屏東地下水資源豐富，台灣屏東地區飲用水供應大多使用地下水源，活度、攝入劑量並未有系統調查可能提高當地的攝入量。雖地下水在進入民生用水之前都要經過水處理過程，可能降低鐳的體內攝入量，使輻射危害風險也降低。

美國環境保護局(USEPA)已設定飲用水在公共供水中構成健康風險的污染物標準。目前，放射性核種的最高污染物含量為鐳(合計^{226}Ra和^{228}Ra)為0.19 Bq/L,總α(包括鐳，但不包括鈾和氡)為0.56 Bq/L (Outola et al., 2008)。根據 NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements)，普通人每天消耗約3升淡水。其中包括飲用水中的1.2 L/d，通過空氣吸入皮膚的水份0.2 L/d，來自食物中的水份為1.3 L/d和海鮮消耗的水份0.3 L/d有關(Santschi and Honeyman, 1989)。人類和動物研究都證明，低至中等劑量的輻射暴露可能會增加癌症的長期發病率。^{226}Ra在體內的吸收取決於各種因素，例如年齡、體重、性別和代謝活性。^{226}Ra對健康的影響分為鐳引起的輻射危險和鐳作為重金屬引起的化學危險(Patra et al., 2013)。體內吸收^{226}Ra的重要途徑是消化系統。消化系統中的吸收值約為攝入量的15-21%，稱為ρi吸收係數值(消化系統中^{226}Ra的吸收分率)，嬰兒的該係數為1.0，成人的該係數為0.2。而1至15歲年齡段的吸收係數為0.6至0.3值(ICRP, 1993)。根據世界衛生組織的建議，飲用水中^{226}Ra的健康風險主要與有效劑量有關，而不是化學放射毒性(WHO, 2004)。測定飲用水中^{226}Ra的含量有助於防止人類不必要地暴露於自然輻射中。監測水中^{226}Ra的存在也非常重要，以防止童年時期有害元素在骨骼中的不良累積，並減少以後生命中發生癌症的風險。

II. 主要內容

本研究的目的是採集台灣屏東地區環境水體(地下水)、飲用水體及國內外市售瓶裝水等樣本，分析放射性核種鐳同位素(^{226}Ra)，了解鐳同位素(^{226}Ra)的濃度及分佈。另外建立各類水源的化學濃縮方法，以提高偵測效率，降低核種計測時的偵測極限，使之能應用於「商品輻射限量標準」中對飲用水中鐳同位素(^{226}Ra)偵測的要求。同時由檢測結果探討飲用水中的^{226}Ra元素濃度是否符合「商品輻射限量標準」中飲用水之限值，並評估計算飲用水攝取造成的國民劑量。

III. 結果與討論

水中 Ra-226 濃縮測試

本研究測試兩種濃縮水中 Ra-226 核種的試驗，分別為共沉澱法及樹酯吸附法，本研究購買 NIST Ra-226 標準品(30.32±0.39 Bq/g)進行水中 Ra-226 核種的濃縮試驗，以增加測試結果的可信度。共沉澱法主要是利用 $BaCl_2$ 與 H_2SO_4 跟 Ra 反應，並產生 $RaSO_4$ 與 $BaSO_4$ 沉澱物已達到濃縮效果，並收集沉澱物進行加馬核種分析。

表 1 為水中 Ra-226 共沉澱法濃縮測試結果，共進行 5 次測試，理論值是利用 NIST 標準品進行配置的已知活度介於 2.075-5.89 Bq/L；實際值則是由純鍺偵檢器檢測 Bi-214 核種之活度介於 1.962-5.370 Bq/L；計算後之回收率介於 67.2-102.6%。

樹酯吸附法主要是利用 MnO_2 樹酯去吸附 Ra，再利用 5M HCl/1.5% H_2O_2 將 Ra 淋洗出來已達到濃縮效果，並將淋洗液進行加馬核種分析。表 2 為水中 Ra-226 樹酯吸附法濃縮測試結果，共進行 5 次測試，理論值是利用 NIST 標準品進行配置的已知活度介於 1.000-20.000 Bq/L；實際值則是由純鍺偵檢器檢測 Bi-214 核種之活度介於 0.724-16.170 Bq/L；計算後之回收率介於 72.4-91.3%。

表 1 水中 Ra-226 共沉澱法濃縮測試結果

共沉澱法	理論值 (Bq/L)	實際值 (Bq/L)	回收率 (%)
Test-1	2.075	1.962	94.5
Test-2	2.075	2.128	102.6
Test-3	4.400	2.956	67.2
Test-4	5.989	5.313	88.7
Test-5	5.989	5.370	89.7

表 2 水中 Ra-226 樹酯吸附法濃縮測試結果

樹酯吸附法	理論值 (Bq/L)	實際值 (Bq/L)	回收率 (%)
Test-1	20.000	16.170	80.9
Test-2	20.000	14.855	74.3
Test-3	10.000	7.342	73.4
Test-4	1.000	0.913	91.3
Test-5	1.000	0.724	72.4

國內外市售瓶裝水 Ra-226 分析及國民劑量評估

本研究於市面上分別購買國內及國外之瓶裝飲用水進行放射性分析，一方面了解瓶裝飲用水的放射性活度，另一方面則比對本國公告「商品輻射限量標準」看是否符合標準規範。最終進行國民劑量及癌症風險的評估，了解有效劑量是否在規定的範圍內。

國內瓶裝飲用水是直接計測方式進行，並未做濃縮處理。圖1為國內瓶裝飲用水放射性分析，從圖顯是其Th-232核種活度範圍介於14-527 mBq/L之間；Ra-226核種活度範圍介於195-367 mBq/L之間，其中46%(6/13)的樣本其活度小於MDA值；Ra-228核種活度範圍介於69-251 mBq/L之間，其中31%(4/13)樣本其活度小於MDA值，A6樣本其Th-232、Ra-226和Ra-228核種活度皆小於MDA值。國內瓶裝飲用水其活度皆小於本國「商品輻射限量標準」公告第三條:鐳226及鐳228濃度限值各為740 Bq/m^3。

國外瓶裝飲用水是直接計測方式進行，並未做濃縮處理。圖2為國外瓶裝飲用水放射性分析，從圖顯是其Th-232核種活度範圍介於20-393 mBq/L之間，其中12.5%(2/16)樣本其活度小於MDA值；Ra-226核種活度範圍介於4-522 mBq/L之間，其中37.5%(6/16)樣本其活度小於MDA值；Ra-228核種活度範圍介於2-276 mBq/L之間，其中31.3%(5/16)的樣本其活度小於MDA值，整體看來國內外瓶裝飲用水其放射性核種活度差異不大。國外瓶裝飲用水其活度皆小於本國「商品輻射限量標準」公告第三條:鐳226及鐳228濃度限值各為740 Bq/m^3。

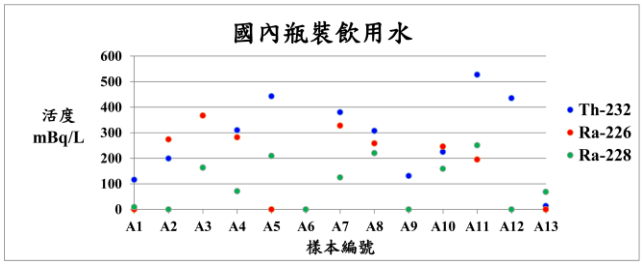


圖1 國內瓶裝飲用水放射性分析

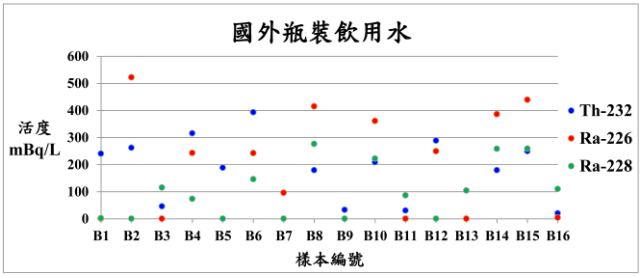


圖2 國外瓶裝飲用水放射性分析

本研究亦計算國民劑量及癌症風險的評估，並將有效劑量分為不同對象，包括嬰兒、兒童及成人。因其飲用的水量不同，放射性核種的轉換因子亦不同。本研究針對Th-232及Ra-226核種進行有效劑量之評估，並加總計算出年度有效總劑量；而癌症風險評估亦針對Th-232及Ra-226核種做評估。

表3為國內市售瓶裝飲用水年度有效總劑量，嬰兒年有效總劑量介於0-84(10^{-3} μSv/y)之間；兒童年有效總劑量介於0-92 μSv/y之間；成人年有效總劑量介於0-110 μSv/y之間。表4為國外市售瓶裝飲用水年度有效總劑量，嬰兒年有效總劑量介於0-61 μSv/y之間；兒童年有效總劑量介於0-100 μSv/y之間；成人年有效總劑量介於0-119

μSv/y之間。UNSCEAR估計，人類在天然環境，自然來源放射性核種貢獻的放射性核種的有效劑量為2.4 mSv/y (其中食物和水貢獻的劑量值0.3 mSv/y) (Pintilie et al., 2016; UNSCEAR, 2000)。故本研究所採集的國內外市售瓶裝飲用水年有效總劑量遠低於UNSCEAR的估計值。

表3國內市售瓶裝飲用水終身癌症風險評估，Th-232的終身癌症風險評估值介於0.0-7.6(10^{-5})之間；Ra-226則介於0.0-20.7(10^{-5})之間。而表4國外市售瓶裝飲用水終身癌症風險評估，Th-232的終身癌症風險評估值介於0.0-5.7(10^{-5})之間；Ra-226則介於0.0-29.4(10^{-5})之間。可見國內外市售瓶裝飲用水其終身癌症風險評估比一般的放射性風險建議的LCR限值10^{-3}低(Asaduzzaman et al., 2015; Aswood et al., 2017; Jackson, 1996; Part, 2011; Patra et al., 2013; Salih, 2018; Stark et al., 2017; UNSCEAR, 2000)。

表 3 國內市售瓶裝飲用水年度有效總劑量及終身癌症風險評估

樣本編號	年度有效總劑量 (10^{-3} μSv/y)			成人終身癌症風險 (10^{-5})		
	嬰兒	兒童	成人	Th-232	Ra-226	Total
A1	14	15	18	1.7	15.4	17.1
A2	55	60	72	2.9	20.7	23.6
A3	62	68	81	2.4	15.9	18.3
A4	69	76	90	4.5	0.0	4.5
A5	52	57	67	6.4	0.0	6.4
A6	0	0	0	0.0	1.9	1.9
A7	83	90	107	5.5	14.5	20.0
A8	66	72	86	4.4	0.0	4.4
A9	15	17	20	1.9	13.9	15.8
A10	55	60	71	3.2	11.0	14.2
A11	84	92	110	7.6	0.0	7.6
A12	51	56	66	6.3	0.0	6.3
A13	2	2	2	0.2	0.0	0.2

表 4 國外市售瓶裝飲用水年度有效總劑量及終身癌症風險評估

樣本編號	年度有效總劑量 (μSv/y)			成人終身癌症風險 (10^{-5})		
	嬰兒	兒童	成人	Th-232	Ra-226	Total
B1	0	31	36	3.5	0.0	3.5
B2	61	100	119	3.8	29.4	33.2
B3	0	6	7	0.7	0.0	0.7
B4	28	71	85	4.5	13.7	18.2
B5	0	24	29	2.7	0.0	2.7
B6	28	81	96	5.7	13.6	19.3
B7	11	12	15	0.0	5.4	5.4
B8	49	76	90	2.6	23.4	26.0
B9	0	4	5	0.5	0.0	0.5
B10	42	73	87	3.0	20.3	23.3
B11	0	4	5	0.4	0.0	0.4
B12	29	69	82	4.2	14.0	18.2
B13	0	0	0	0.0	0.0	0.0
B14	45	72	86	2.6	21.7	24.3
B15	51	88	104	3.6	24.7	28.3
B16	0	3	4	0.3	0.2	0.5

地下水及飲用水體 Ra-226 分析及國民劑量評估

本研究於屏東地區採集地下水及相對應之飲用水體進行放射性分析，一方面了解其放射性活度，另一方面則比對本國公告「商品輻射限量標準」看是否符合標準規範。最終進行國民劑量及癌症風險的評估，了解有效劑量是否在規定的範圍內。

地下水體及其對應之飲用水體採集回實驗室則直接計測，並未做濃縮處理。國內瓶裝飲用水是直接計測方式進行，並未做濃縮處理。圖3為地下水體放射性分析，從圖顯是其Th-232核種活度範圍介於8-343 mBq/L之間，其中14%(3/21)的樣本其活度小於MDA值；Ra-226核種活度範圍介於26-1699 mBq/L之間，其中14%(3/21)的樣本其活度小於MDA值；Ra-228核種活度範圍介於33-403 mBq/L之間，其中38%(8/21)樣本其活度小於MDA值。

圖4為飲用水體放射性分析，從圖顯是其Th-232核種活度範圍介於16-380 mBq/L之間，其中9.5%(2/21)樣本其活度小於MDA值；Ra-226核種活度範圍介於30-508 mBq/L之間，其中19%(4/21)樣本其活度小於MDA值；Ra-228核種活度範圍介於30-290 mBq/L之間，其中19%(4/21)的樣本其活度小於MDA值。飲用水體其活度皆小於本國「商品輻射限量標準」公告第三條:鐳226及鐳228濃度限值各為740 Bq/m^3。

從地下水體與其對應之飲用水體可以看到樣本C1其Ra-226核種活度為1699 mBq/L，經過飲水機處理後的樣本D1其Ra-226核種活度降至317 mBq/L；同樣的樣本C6其Ra-226核種活度為1070 mBq/L，經過飲水機處理後的樣本D6其Ra-226核種活度降至小於MDA，推測由於水中的放射性核種如Ra-226其主要是由水中的懸浮微粒所貢獻，而飲水機在處理過程中會過濾掉水中的懸浮微粒而使的其Ra-226核種活度降低約81.3%(C1樣本)。

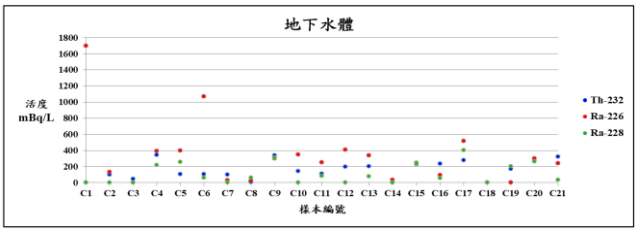


圖3 地下水體放射性核種分析

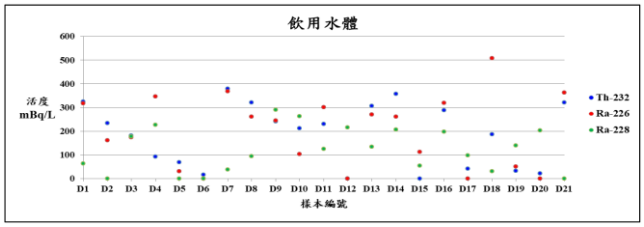


圖4 飲用水體放射性核種分析

表5為飲用水體年度有效總劑量，嬰兒年有效總劑量介於0-88 μSv/y之間；兒童年有效總劑量介於0-95 μSv/y之間；成人年有效總劑量介於0-114 μSv/y之間。UNSCEAR估計，人類在天然環境，自然來源放射性核種貢獻的放射性核種的有效劑量為2.4 mSv/y (其中食物和水貢獻的劑量值0.3 mSv/y) (Pintilie et al., 2016; UNSCEAR, 2000)。故本研究所採集的飲水機之飲用水年有效總劑量遠低於UNSCEAR的估計值。

表5飲用水體終身癌症風險評估，Th-232的終身癌症風險評估值介於0.0-5.5(10^{-5})之間；Ra-226則介於0.0-28.6(10^{-5})之間；總和終身癌症風險評估值介於0.0-31.3(10^{-5})之間。飲用水體其終身癌症風險評估比一般的放射性風險建議的ELCR限值10^{-3}低(Asaduzzaman et al., 2015; Aswood et al., 2017; Jackson, 1996; Part, 2011; Patra et al., 2013; Salih, 2018; Stark et al., 2017; UNSCEAR, 2000)。

表5 飲用水體年度有效總劑量及終身癌症風險評估

樣本編號	年度有效總劑量 (μSv/y)			成人終身癌症風險 (10^{-5})		
	嬰兒	兒童	成人	Th-232	Ra-226	Total
D1	75	82	97	4.7	17.9	22.1
D2	46	51	60	3.4	9.1	12.5
D3	42	45	54	2.6	9.8	12.4
D4	51	56	67	1.3	19.5	20.8
D5	11	13	15	1.0	1.7	2.7
D6	2	2	2	0.2	0.0	0.2
D7	88	95	114	5.5	20.7	26.2
D8	68	74	88	4.6	14.8	19.4
D9	57	62	74	3.5	13.8	17.3
D10	37	40	48	3.1	5.9	9.0
D11	62	68	81	3.3	17.0	20.3
D12	0	0	0	0.0	0.0	0.0
D13	68	74	88	4.4	15.3	19.7
D14	72	79	94	5.2	14.7	19.9
D15	13	14	17	0.0	6.3	6.3
D16	71	78	92	4.2	18.0	22.2
D17	5	5	6	0.6	0.0	0.6
D18	81	89	106	2.7	28.6	31.3
D19	10	11	13	0.5	2.8	3.3
D20	3	3	3	0.3	0.0	0.3
D21	80	87	104	4.6	20.4	25.0

環境水體 Ra-226 濃縮測試

本研究採集屏東地區共 16 個環境水體包括溪水、地下水、井水、湧泉和瀑布水等，並進行樹酯吸附試驗。圖 5 為環境水體樹酯吸附試驗放射性核種分析，從圖顯是其 Th-232 核種活度範圍介於 43-211 mBq/L 之間；Ra-226 核種活度範圍介於 75-335 mBq/L 之間；Ra-228 核種活度範圍介於 66-180 mBq/L 之間。

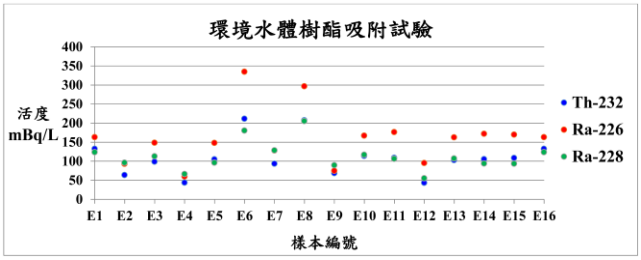


圖 5 環境水體樹酯吸附試驗放射性核種分析

IV. 結論

本研究針對水中鐳的濃縮方法進行試驗，包括共沉澱法及樹酯吸附法，共沉澱法其測試結果回收率介於67.2-102.6%；樹酯吸附法其測試結果回收率介於72.4-91.3%。本研究採集市售國內外瓶裝飲用水並進行放射性核種分析，其Th-232核種活度介於14-527 mBq/L；Ra-226核種活度介於4-522 mBq/L；Ra-228核種活度介於2-276 mBq/L，國外瓶裝飲用水其活度皆小於本國「商品輻射限量標準」公告第三條:鐳226及鐳228濃度限值各為740 Bq/m^3。計算國內外市售瓶裝飲用水其年有效劑量，嬰兒年有效總劑量介於0-84 μSv/y之間；兒童年有效總劑量介於0-100 μSv/y之間；成人年有效總劑量介於0-119 μSv/y之間。本研究所採集的國內外市售瓶裝飲用水年有效總劑量遠低於UNSCEAR的估計值。計算國內外市售瓶裝飲用水其終身癌症風險，Th-232的終身癌症風險評估值介於0.0-7.6(10^{-5})之間；Ra-226則介於0.0-29.4(10^{-5})之間，比一般的放射性風險建議的LCR限值10^{-3}低。

本研究採集屏東地區地下水體及其對應飲用水體進行放射性分析，地下水體Th-232核種活度範圍介於8-343 mBq/L之間；Ra-226核種活度範圍介於26-1699 mBq/L之間；Ra-228核種活度範圍介於33-403 mBq/L之間。飲用水體Th-232核種活度範圍介於16-380 mBq/L之間；Ra-226核種活度範圍介於30-508 mBq/L之間；Ra-228核種活度範圍介於30-290 mBq/L之間。計算飲用水體其年有效總劑量，嬰兒年有效總劑量介於0-88 μSv/y之間；兒童年有效總劑量介於0-95 μSv/y之間；成人年有效總劑量介於0-114 μSv/y之間，遠低於UNSCEAR的估計值。Th-232的終身癌症風險評估值介於0.0-5.5(10^{-5})之間；Ra-226則介於0.0-28.6(10^{-5})之間。比一般的放射性風險建議的LCR限值10^{-3}低。境水體樹酯吸附試驗放射性核種分析，其Th-232核種活度範圍介於43-211 mBq/L之間；Ra-226核種活度範圍介於75-335 mBq/L之間；Ra-228核種活度範圍介於66-180 mBq/L之間。

參考文獻

[1] Abbady, A. G., 2017, "Natural radioactivity in drinking water and associated age-dependent dose in Luxor, Upper Egypt," IOSR Journal of Applied Physics, Vol. 9, No. 01, pp. 17-21.

[2] Asaduzzaman, K., Khandaker, M., Amin, Y., and Mahat, R., 2015, "Uptake and distribution of natural radioactivity in rice from soil in north and west part of peninsular malaysia for the estimation of ingestion dose to man," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 76, No. pp. 85-93.

[3] Asikainen, M. and Kahlos, H., 1980, "Natural radioactivity of drinking water in Finland," Health Physics, Vol. 39, No. 1, pp. 77-83.

[4] Aswood, M.S., Jaafar, M.S., Salih, N., 2017. Estimation of annual effective dose due to natural radioactivity in ingestion of vegetables from Cameron Highlands, Malaysia. Environmental Technology & Innovation 8, 96-102.

[5] Bronzovic, M. and Marovic, G., 2005, "Age-dependent dose assessment of ^{226}Ra from bottled water intake," Health physics, Vol. 88, No. 5, pp. 480-485.

[6] Gorur, F. K. and Camgoz, H., 2014, "Natural radioactivity in various water samples and radiation dose estimations in Bolu province, Turkey," Chemosphere, Vol. 112, No. pp. 134-140.

[7] ICRP (1975),International Commission on Radiological Protection. (1975). Report of the task group on reference man. Oxford: Pergamon Press, ICRP Publication No. 23.

[8] ICRP (1994),International Commission on

Radiological Protection. (1994). Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. Oxford: pergamon Press, ICRP Publication No. 68.

[9] ICRP, International Commission on Radiological Protection(1993). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2: Ingestion dose coefficients. Publication 67, Oxford Pergamon Press: Oxford; 23(3/4).

[10] Jackson, P., 1996. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 5 compilation of ingestion and inhalation dose coefficients (ICRP Publication 72). IOP Publishing.

[11] Kahn, B., Rosson, R., and Cantrell, J., 1990, "Analysis of ^{228}Ra and ^{226}Ra in public water supplies by a gamma-ray spectrometer," Health physics, Vol. 59, No. 1, pp. 125-131.

[12] Karahan, G., Öztürk, N., and Bayülken, A., 2000, "Natural radioactivity in various surface waters in Istanbul, Turkey," Water research, Vol. 34, No. 18, pp. 4367-4370.

[13] Moise, T., Starinsky, A., Katz, A., and Kolodny, Y., 2000, "Ra isotopes and Rn in brines and ground waters of the Jordan-Dead Sea Rift Valley: enrichment, retardation, and mixing," Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 64, No. 14, pp. 2371-2388.

[14] Moore, W. S., 1997, "High fluxes of radium and barium from the mouth of the Ganges-Brahmaputra River during low river discharge suggest a large groundwater source," Earth and Planetary Science Letters, Vol. 150, No. 1-2, pp. 141-150.

[15] Outola, I., Nour, S., Kurosaki, H., Inn, K., La Rosa, J., Lucas, L., Volkovitsky, P., and Koepenick, K., 2008, "Investigation of radioactivity in selected drinking water samples from Maryland," Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 277, No. 1, pp. 155-159.

[16] Part, NGG, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources International Basic Safety Standards.

[17] Patra, A., Mohapatra, S., Sahoo, S., Lenka, P., Dubey, J., Tripathi, R., and Puranik, V., 2013, "Age-dependent dose and health risk due to intake of uranium in drinking water from Jaduguda, India," Radiation protection dosimetry, Vol. 155, No. 2, pp. 210-216.

[18] Pintilie, V., Ene, A., Georgescu, L. P., Moraru, L., and Iticescu, C., 2016, "Measurements of gross alpha and beta activity in drinking water from Galati region, Romania," Romanian Reports in Physics, Vol. 68, No. 3, pp. 1208-1220.

[19] Rama, M. W. and Moore, W., 1996, "Using the radium quartet to estimate water exchange and ground water input in salt marshes," Geochim et Cosmochim Acta, Vol. 60, No. pp. 4645-4652.

[20] Salih, N.F., 2018. Determination of natural radioactivity and radiological hazards of 226Ra, 232Th, and 40K in the grains available at Penang Markets, Malaysia, using high-purity germanium detector. ARO-The Scientific Journal of Koya University 6, 71-77.

[21] Santschi, P. H. and Honeyman, B. D., 1989, "Radionuclides in aquatic environments," International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry, Vol. 34, No. 2, pp. 213-240.

[22] Stark, K., Goméz-Ros, J.M., i Batlle, J.V., Hansen, E.L., Beaugelin-Seiller, K., Kapustka, L.A., Wood, M.D., Bradshaw, C., Real, A., McGuire, C., 2017. Dose assessment in environmental radiological protection: State of the art and perspectives. Journal of environmental radioactivity 175, 105-114.

[23] Sturchio, N., Banner, J. L., Binz, C., Heraty, L., and Musgrove, M., 2001, "Radium geochemistry of ground waters in Paleozoic carbonate aquifers, midcontinent, U.S.A.," Applied Geochemistry, Vol. 16, No. 1, pp. 109-122.

[24] Thatcher, L. L., Janzer, V. J., and Edwards, K. W., 1977, Methods for determination of radioactive substances in water and fluvial sediments, US Government Printing Office.

[25] Tricca, A., "Transport mechanisms of trace elements in surface and ground water: Sr, Nd, U and Rare Earth Elements evidence," 1997.

[26] UNSCEAR (2000) United Nations scientific committee on the effect of atomic radiation. Sources, effects and ionizing radiation. United Nation, New York.

[27] Vesterbacka, P., 2007, "Natural radioactivity in drinking water in Finland," Boreal environment research, Vol. 12, No. 1,

[28] WHO, 2003, World Health Organization, Guidelines for Drinking-Water Quality, Geneva (2003).

[29] WHO, 2004, World Health Organization, Guidelines for Drinking-Water Quality (Vol. 1). World Health Organization.Geneva, Switzerland, WHO Library.

輻射防護與放射醫學科技(II)

建立探討放射治療與免疫調節成份對腫瘤免疫微環境調控機轉之轉譯平台：從分子生物到分子生物影像

Establishment of a translatable platform to investigate how radiotherapy and immunomodulators regulate tumor immune microenvironment: from molecular biology to molecular imaging

計畫編號：110-2623-E-010-001-NU
計畫主持人：莊惠燕
e-mail：huiyen@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：吳駿一
計畫參與人員：詹惠雯
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

近來免疫檢查點抑制劑 (immune checkpoint inhibitors, ICIs) 為癌症治療的新選擇，亦可與放射治療合併，顯著改善療效。推論為放射治療導致腫瘤大量表現 PD-L1，使得本來對 ICIs 沒反應的腫瘤，轉為可治療的新對象，因此放射治療合併 ICIs 可達加乘效果。此外，放射治療相關的遠隔效應亦為近年熱門議題。遠隔效應意指當病人具有多處腫瘤，但僅有部分可接受放射治療，除接受照射的腫瘤外，其他未接受照射之腫瘤，亦發生體積減小或消失的現象。遠隔效應的發生，被指出與免疫細胞活化有關。本實驗使用薑黃素合併放射治療，探討此藥物能否促進免疫反應，增強放射治療效果。本研究建立荷有雙腫瘤的大腸直腸癌小鼠模式，以了解遠隔效應背後的機轉；並以放射性同位素標誌 anti-OX40 抗體，利用生物分布實驗觀察於活體荷腫瘤小鼠之積聚，以評估合併治療是否可增進與腫瘤控制相關的 T 細胞活化。相關的結果將有助於建立具轉譯潛力的分子生物影像平台，以利未來測試其他具免疫調節潛力的新興藥物或化合物。

關鍵詞：放射治療、遠隔效應、免疫調節、分子生物影像、腫瘤微環境

Abstract

Immune checkpoint inhibitors (ICIs) are often combined with radiotherapy and significantly improve tumor control. It has been reported that radiotherapy increases PD-L1 expression in both irradiated and bystander tumor cells and turns those ICI-unresponsive tumors into potentially treatable targets. Therefore, combining radiotherapy and ICIs leads to a synergistic tumor inhibition effect. The ‘abscopal effect’ found in patients receiving radiotherapy describes the tumor inhibitions on the irradiated and non-irradiated tumors found in the same patient after radiotherapy. It is thought that the abscopal effect strongly correlates to radiotherapy-mediated immune activation.

The present study combined curcumin with radiotherapy and investigated whether the combination treatments could enhance immune response, then boost the radiotherapy outcome in a colorectal cancer-bearing mouse model. A bilateral tumor model was generated to study possible immune modulation and tumor suppression caused by the combination treatments. Moreover, the ^{111}In-labeled anti-OX40 antibody was generated and used to monitor the changes in T cell activation between different treatment groups by biodistribution study.

The established molecular imaging platform and related experiments would speed up the overall processes to understand whether potential immunomodulating agents could ameliorate the tumor microenvironment and improve radiotherapy outcomes in the future. More importantly, it could be used to test other potential immunomodulating drugs or chemicals in the future.

Keywords: radiotherapy, abscopal effect, immune modulation, molecular imaging, tumor microenvironment

I. 前言

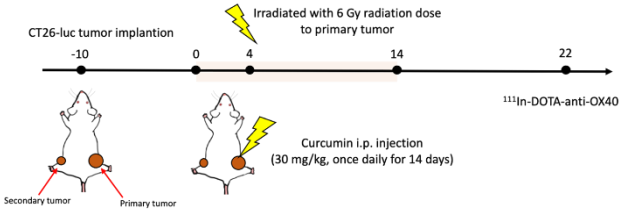
In addition to causing DNA damage and cell death, radiotherapy can modulate tumor immunogenicity by prompting the release of cytokines and chemokines. Collectively, the positive immunomodulation of radiotherapy may turn immunologically 'cold' tumors 'hot' and enhance the efficacy of immune checkpoint inhibitors (ICIs), a type of new immunotherapy for cancer treatment. However, there is no standard procedure to study how potential immunomodulators enhance the abscopal effect yet.

Therefore, the goal of the study was to establish a translatable platform that could help us understand whether curcumin could function as potential immunomodulating agents and shape the tumor immune microenvironment from molecular biology to molecular imaging aspects.

II. 主要內容

To mimic the clinical situation, we generated a bilateral tumor-bearing mouse model and only treated one tumor with radiotherapy. Curcumin was given three days before the single dose irradiation to prime the tumor microenvironment. ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb was made for assessing the distribution of activated T cells *in vivo*. Tumor growth and bodyweight tracking were performed for 22 days to monitor the *in vivo* tumor inhibition effect and general toxicity caused by treatments. At the end of the

experiment, the mice were sacrificed to harvest tumor samples for subsequent analysis. Proinflammatory cytokine level and proteins related to apoptosis and immunity were evaluated by ELISA and Western blot, respectively. All the *ex vivo* results were used to explain the findings seen in the tumor-bearing mice.



Experimental details of animal model and treatments

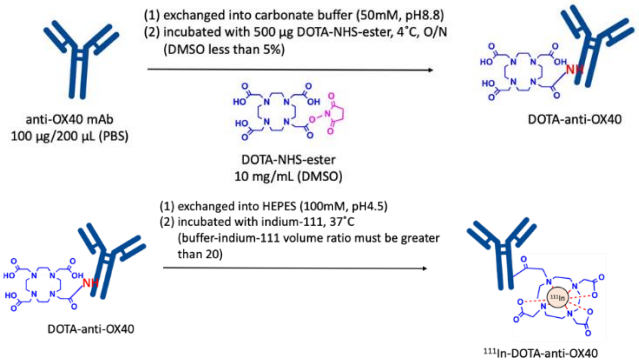
III. 結果與討論

Compared to the control group, radiotherapy (RT) did not inhibit the primary tumor and slightly suppressed the secondary tumor. Both curcumin and combination groups showed a better tumor inhibition on the primary tumors than the RT group. Differ from the results detected in primary tumors, the tumor growths of secondary tumors looked similar between the curcumin and RT groups. Additionally, the combination treatment suppressed the secondary tumor the most among all the groups, which indicated that the combination treatment might boost the overall anti-tumoral immune responses and further impair the secondary tumor growth.

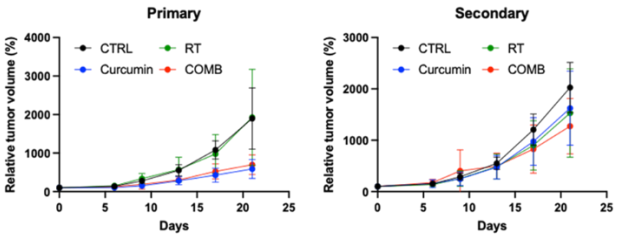
The concentrations of pro-inflammatory cytokines, including IL-6, TNF-α, and IFN-γ, were determined by ELISA. No significant difference was detected in the cytokine concentrations of primary tumors among all the groups. Compared to the control group, the combination group showed higher pro-inflammatory cytokine levels in the secondary tumors. IL-1 β is associated with the M1-type macrophage polarization, relating to anti-tumor effects and tumor-infiltrating T cell recruitment. IFN-γ is mainly produced by activated T cells or NK cells. Increased tumor IFN-γ implying activated T cells and NK cells may present in tumors to exert anti-tumor effects. IL-6 is known as a pro-inflammatory cytokine and triggers the polarization of M1-type macrophages. Therefore, the ELISA results evidenced that the most profound tumor inhibitions found in the combination groups were related to enhanced anti-tumoral immunity.

Due to the long circulation span of antibodies, the blood radioactivity in blood remained high at all the time points detected by the biodistribution study. Expect for the tumors, the biodistribution of ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb in other organs and tissues showed no significant difference among all the groups. Both the curcumin and combination groups showed higher ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb accumulations in tumors than the control group, indicating that curcumin may have an immunity-boosting effect and could increase the number of activated T cells in tumors. Compared to the RT and curcumin groups, the combination group showed increased tumor uptake of ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb, indicating a more robust anti-tumoral immunity. The primary and secondary tumors in the RT and combination groups showed comparable ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb accumulations, meaning that 6 Gy irradiation did activate the systemic anti-tumor immune responses, which may further suppress the non-irradiated secondary tumor. The biodistribution results echoed the finding of the ELISA assay, which revealed a higher concentration of pro-inflammatory cytokines in the combination group. It is known that activated T cells would generate more IFN-γ and activated T cells also express higher levels of OX40 and lead to elevated accumulation of ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb in tumors.

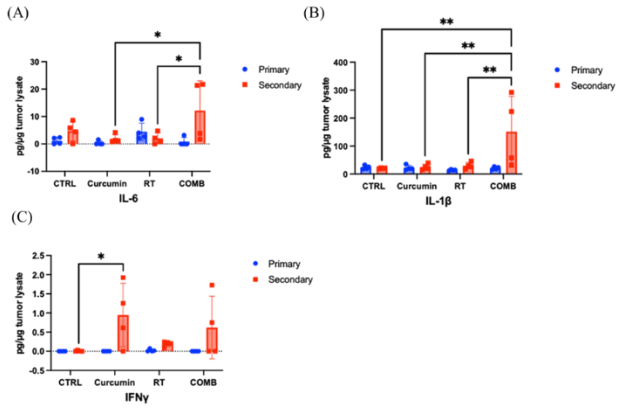
We further analyzed the immune-associated protein expressions in tumor tissues to understand the anti-tumor immune responses. Although the NF-κB level did not change, significant PD-L1 downregulation was found in the combination group. Moreover, the combination group also had the highest Bax/Bcl-2 ratio in the primary tumor among all the groups, indicating that the combination treatment promoted tumor apoptosis. The tumor-associated antigens would release and be uptake by APCs after cell deaths. The activated APCs would further prime the $CD8^+$ T cells for cell killing and result in the upregulations of iNOS, Granzyme B, and IL-1β.



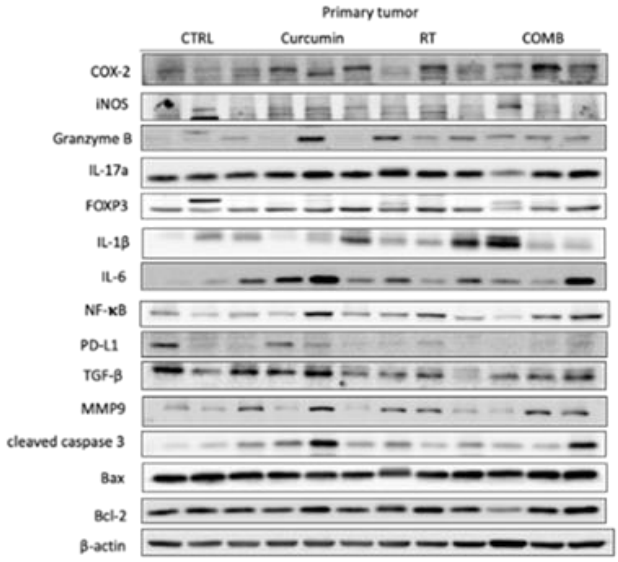
Scheme of generation of ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb (Upper) DOTA-NHS conjugation with anti-OX40 mAb. (Bottom)Radiolabeling of ^{111}In with DOTA-anti-OX40 mAb.



Combination treatment causes the most obvious tumor inhibition on both the primary and secondary tumors among all the groups. Tumor growth curves of (Left) primary tumor and (Right) secondary tumor in different groups. Six mice per group.



Combination treatment results in higher concentrations of pro-inflammatory cytokines in both the primary and secondary tumors than that in other groups. Concentrations of proinflammatory cytokines, including (A) IL-6, (B) IL-1β, and (C) IFN-γ, in primary and secondary tumors were evaluated by ELISA assay. Four mice per group.



Combination treatment increases expressions of pro-inflammatory and pro-apoptosis associated proteins.

IV. 結論

In the current study, we successfully generated ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb for assessing T cell activation in tumor-bearing mice. Here, we demonstrated that curcumin could augment the abscopal effect in a bilateral tumor-bearing mouse model by suppressing NF-κB and PD-L1, modulating the overall tumor immune microenvironment, and increasing apoptosis. Furthermore, we validated that curcumin could enhance radiotherapy outcomes and boost the anti-tumoral immune responses in bilateral CT26-luc tumor-bearing mice by performing a biodistribution study of ^{111}In-DOTA-anti-OX40 mAb, ELISA assay, and Western blot. More clinically relevant animal models will be generated, and molecular imaging techniques will be utilized to track the dynamic changes in immune cell distribution to find out the correlations among different immune cell populations in living animals in the future.

參考文獻

[1] McLaughlin, M., et al., Inflammatory microenvironment remodelling by tumour cells after radiotherapy. Nat Rev Cancer, 2020. 20(4): p. 203-217.

[2] Massoud, T.F. and S.S. Gambhir, Molecular imaging in living subjects: seeing fundamental biological processes in a new light. Genes Dev, 2003. 17(5): p. 545-80.

[3] Alam, I.S., et al., Imaging activated T cells predicts response to cancer vaccines. J Clin Invest, 2018. 128(6): p. 2569-2580.

[4] Paul, S. and G. Sa, *Curcumin as an Adjuvant to Cancer Immunotherapy.* Front Oncol, 2021. **11**: p. 675923.

[5] Schwarz, K., et al., *Modification of radiosensitivity by Curcumin in human pancreatic cancer cell lines.* Sci Rep, 2020. **10**(1): p. 3815.

開發用於頭頸癌硼中子捕獲治療之環狀 RGD 胜肽修飾含硼奈米金微粒
Development of cRGD-modified boron-containing gold nanoparticles for boron neutron capture therapy against head and neck cancer

計畫編號：110-2623-E-010-004-NU
計畫主持人：李易展
e-mail：yjlee2@nycu.edu.tw
計畫共同主持人：吳駿一、許銘華、陳一瑋
計畫參與人員：林旻穎、洪文翔、張庭瑀
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

頭頸癌是台灣患者人數高居第五名的惡性腫瘤，每年約有八千餘名新確診病患，近六成的患者會在治療的三到五年內在原處或周圍區域復發。經手術治療頭頸癌患者之五年存活率不到四成，而使用放射或化學治療者，五年存活率幾乎不到百分之五，發展新式有效的治療方式實刻不容緩。硼中子捕獲治療(boron neutron capture therapy, BNCT)是一種二元性的治療方式，一般而言，含硼藥物或熱中子射束皆無法單獨殺死細胞，但若 ^{10}B 原子的藥物選擇性地積聚於腫瘤內，再經中射束照射腫瘤部位，即可僅殺傷腫瘤而將正常組織的傷害降到最低。全世界僅七個國家(八個地點)有中子捕獲治療的設施與治療技術供臨床治療，國立清華大學水池式反應器 BNCT 中心(THOR)已與台北榮民總醫院癌病中心合作執行復發性頭頸癌及腦瘤病人的臨床試驗，療效極佳。本研究成功與核能研究所合作發展新式環狀 RGD 胜肽修飾之含硼聚乳酸-甘醇酸(PLGA)奈米微粒，其包覆硼苯丙胺酸(BPA)的效率最高可達 25%，PLGA 外層再以血清白蛋白包覆以利 RGD 修飾及增加生物可用率，最後產物的平均粒徑約為 200 nm。活體動物實驗發現經靜脈注射 RGD 胜肽修飾之奈米藥物 24 小時後之腫瘤積聚量達到最高值(86±16 ppm)，相較未修飾者具有更理想的腫瘤積聚量。後續將進一步發展放射性標誌技術以非侵入性地觀察奈米粒子於活體內的分布，並以實際進行硼中子捕獲治療以驗證其療效，望能早日應用於臨床以造福頭頸癌患者。

關鍵詞：頭頸癌、硼中子捕獲治療、環狀 RGD 胜肽、含硼聚乳酸-甘醇酸奈米微粒

Abstract

Head and neck cancer is the fifth most frequently occurring cancer in recent years. There are approximately eight thousand newly diagnosed patients each year and around 60% of these patients would have a local recurrence within the first 5 years after treatment. Surgery is the best option for patients with head and neck cancer at an early stage; however, the 5-year survival rate is less than 40%. For those who receive chemotherapy or radiation therapy, the 5-year survival rate is only ~5%. Boron neutron capture therapy (BNCT) is a binary treatment strategy. Neither neutron beam alone nor boron drug is capable of causing tissue damage. However, when a boron atom specifically remains in the tumor, it can capture a neutron and then undergoes fission reactions to produce Li-7 and high-energy alpha particles to destroy the tumor rather than normal tissues. There are only seven countries (8 sites) with BNCT facilities around the world. About 100 patients with late-stage cancer of head and neck cancer and brain tumor have been treated at the National Tsing Hua University THOR reactor. Some of them have had complete regressions. We successfully collaborated with the team at the Institute of Nuclear Energy to develop novel boron-containing nanoparticles in this study. Bovine serum albumin (BSA) was coated on the membrane of the core PLGA nanoparticles for modification of RGD and increased bioavailability. The average diameter of cRGD-modified L-4-dihydroxyborylphenylalanine (BPA)-containing PLGA nanoparticles was about 200 nm with an encapsulation efficiency of ~25%. The intratumoral boron content of mice receiving RGD-modified boron-containing nanoparticles was significantly higher than those injected with non-RGD-modified nanoparticles, reaching a maximum of 86±16 ppm at 24 h after injection. We will carry out imaging studies to noninvasively determine the distribution of these nanoparticles and investigate their therapeutic efficacy in BNCT in future studies.

Keywords: Head and neck cancer, boron neutron capture therapy (BNCT), cRGD, PLGA nanoparticles

I. 前言

硼中子捕獲治療(boron neutron capture therapy, BNCT)是一種「一加一」的治療方式，當僅有硼原子或是僅接受熱中子射束照射，都不會造成細胞損傷，但若 ^{10}B 原子捕捉一個中子進行核反應而成為不穩定的 ^{11}B (因 10B 對熱中子的反應截面極高)，則會產生具高線性轉移能量(linear energy transfer,LET)的氦核(^{4}He, α)及鋰核(^{7}Li)，兩者會在極短路徑內將能量完全釋放而造成顯著的殺傷效應，其行走路徑長度理論上小於細胞直徑，僅約 5-9 μm，因此不會影響鄰近細胞。若能將 ^{10}B 原子選擇性地送至腫瘤病灶，經熱中子射束照射後，則僅於腫瘤內發生核反應造成殺傷，因正常細胞中硼原子濃度極低，發生死亡的機會不高，如此一來就可以達到夢想中只殺傷腫瘤而非正常組織的目的。

硼中子捕獲治療迄今已發展了近六十年，但目前為止，全世界僅七個國家擁有硼中子捕獲治療的設施，若是論及持續進行臨床治療的國家，則數目更加稀少。主

要原因還是由於中子源的取得不易，由過往中子的來源都是核反應爐產生的事實觀之，應該不難理解為何硼中子捕獲治療遲遲無法普及化。目前硼中子捕獲的治療經驗屬日本最豐，已有數千個病人接受過此種治療，拜直線加速器型機種問世所賜，往後治療將不用在核反應爐進行，可於醫院直接設立治療中心，因此日本國內可以進行治療的場域逐年增加，治療患者數亦持續上升。硼中子捕獲治療過往多用於治療臨床上束手無策的癌症患者，如罹患多形性膠質母細胞瘤(glioblastoma multiform, GBM)、轉移性皮膚黑色素瘤(metastatic melanoma)或是復發性頭頸癌(recurrent head and neck cancer)的患者。國立清華大學水池式反應器中心(THOR)已與台北榮民總醫院癌病中心於 2010 年 8 月完成第一例人體試驗，至今以「緊急醫療」的模式完成百餘位復發性頭頸癌病人病人的治療，由效果觀之，硼中子捕獲治療極有潛力成為日後臨床治療選擇之一，也是國內少數於國際癌症治療上可以取得先機的領域。

使用聚乳酸-甘醇酸當作含硼藥物載體用於硼中子捕獲療法的優勢在於其為一生物相容性高且發展較成熟之藥物載體，且不似其他奈米載體系統對於藥物親脂性有一定限制。對奈米藥物載體而言，肝臟及脾臟等器官的積聚必占注入藥量的絕大部分，原因是這些器官中的內皮網狀系統(reticuloendothelial system, RES)會將這些藥物載體視為外來病原而進行吞噬。有研究指出，若在聚乳酸-甘醇酸奈米表面進行血清白蛋白(serum albumin)的修飾可以延長體內循環時間並增加奈米顆粒在腫瘤中的積聚。整合素(integrin)係一異二聚體跨膜蛋白(heterodimeric transmembrane glycoprotein)，由一個 α 和一個 β 亞基所組成，通過不同的 α 及 β 亞基組合，能產生 20 餘種之整合素，其在細胞與周圍微環境(microenvironment)的雙向溝通上扮演了重要的角色，與細胞黏附(adhesion)、生存(survival)和凋亡(apoptosis)息息相關[1]。1984 年，Pierschbacher 等人首次發現精胺酸－甘胺酸－天門冬胺酸胺基酸序列(arginine-glycine-aspartic acid peptides, Arg-Gly-Asp, RGD)對於整合素具有專一性[10]，至今已發現 αvβ1、αvβ3、αvβ5、αvβ6、α5β1、α8β1 及 αvIIbβ3 等整聯蛋白會專一性結合 RGD 序列[2]，而此些整合素亦被發現於腫瘤表面高度表現。就結構及生物特性而言，線狀的胺基酸序列可直接影響接受器的親合性、選擇性及其它的生物特質。而環狀的胺基酸序列，則更能抵抗體內蛋白質水解酶的作用，增加體內循環時間，所以現今大多表面修飾都以環狀 RGD 為主。Moffatt 等人即是在 PLGA 奈米顆粒表面修飾 RGD 肽以達到主動靶向之目的使 doxorubicin 於腫瘤之積聚增加[3]。

II. 主要內容

目前硼中子捕獲療法無法普及的原因主要為下列三點: (1)缺乏適合的含硼藥物，可以兼具腫瘤選擇性及腫瘤積聚量。(2)缺乏可以示蹤含硼藥物的方法。如同現今臨床上欲進行硼中子捕獲治療的病人(以 BPA-fructose 治療)，需在治療之前接受 ^{18}F-FBPA 造影，以確定腫瘤積肌肉攝取量比值大於 3，以免虛擲時間與金錢。(3)缺乏使用上較為便利的中子源。但現已有加速器型式的中子源問世，往後普及性可期。此計畫目標係製備表面修飾 RGD 之含硼聚乳酸-甘醇酸微粒，並以非侵入性醫學影像(SPECT/CT)探討其藥物動力學，進一步評估其生物特性及往後臨床使用之可行性(礙於核定經費，列為預期目標，未於今年執行)。使用聚乳酸-甘醇酸當作含硼藥物載體用於硼中子捕獲療法的優勢在於其為一生物相容性高且發展較成熟之藥物載體，且不似其他奈米載體系統對於藥物親脂性有一定限制。希望可以藉此發展出新式具主動靶向性之含硼奈米微粒，解決上述第一點及第二點的窘境。

III. 結果與討論

DLS 測定之粒徑結果與 ICP-MS 測定之含硼藥物濃度顯示利用雙層油水乳化法所製備之含硼 PLGA 奈米顆粒在添加 BPA 水溶液進行二次乳化包裹藥物之過程並不會使粒徑產生明顯變化，但發現在給予相同體積不同濃度之 BPA 水溶液進行包覆，BPA 水溶液濃度越高奈米顆粒包覆之藥物越多，且粒徑隨包覆藥物量上升而增加。經實驗證實在 1 mL DCM 中加入 50 μL BPA 水溶液可以獲得最好之藥物包覆效果。因此後續製備含硼 PLGA 奈米顆粒時將盡量提高 BPA 濃度，並保持固定水與油之比例以獲得最佳之藥物包覆量。

為了避免後續所使用之緩衝溶液會對奈米顆粒之粒徑造成影響與型態改變，在進行標誌前，事先將奈米顆粒以三種緩衝液回沖(0.05M pH5.5 MES、0.05M pH7.4 PBS 及 0.05M pH7.4 HEPES)並於室溫放置一天觀察粒徑變化，確認所使用之緩衝溶液並不會對顆粒造成影響。奈米顆粒經修飾後之粒徑變化結果顯示奈米顆粒靜置在緩衝溶液中具有良好的穩定性，三種緩衝溶液皆不會使粒徑產生大幅度的變化。經過 RGD 與 DTPA 的修飾後粒徑將小幅度上升，然於修飾 RGD 後再執行 DTPA 標誌，粒徑則增加至 600 奈米，不符計畫所需。但若於 DTPA 修飾後不經離心純化即繼續 RGD 修飾，產物粒徑大小則與單獨修飾者相差無幾，推測是由於 PLGA 表面包覆之 BSA 並非是經由鍵結的方式修飾於 PLGA 外層，因此在每次的離心、回沖與各項反應的過程中會使表層之 BSA 剝離，降低其穩定性，致使經過離心純化後之奈米顆粒產生凝集現象。因此後續修飾都將採用一鍋化方法。

將 BPBC NPs 或 BPBRC NPs 以 MES 緩衝液(0.05M, pH5.5)回沖，加入適當活性之 ^{111}In，於室溫反應 1 小時，以薄層分析法(固定相為 ITLC，移動相為 0.5M citrate buffer, pH4.5)進行放射薄層分析(radio-TLC)分析，標誌效率高於 90%，離心純化後，放射化學純度可達到 98% 以上。然而，離心純化的過程仍會產生無法沖散之 PLGA 顆粒聚集現象，推測與前項 RGD 與 DTPA 修飾時所遇到之問題相同。

荷腫瘤小鼠經尾靜脈給予表面修飾 RGD 之 PLGA 含硼奈米粒子(BPBR NPs)、未經表面修飾 RGD 之 PLGA 含硼奈米粒子(BPB NPs)及臨床使用之 BPA 與果糖複合體(BPA-Fr)後，於各時間點犧牲動物摘取腫瘤及肌肉，其 ICP-MS 測定結果顯示表面修飾 RGD 之 PLGA 含硼奈米粒子(BPBR NPs)在腫瘤積聚量於注射後 24 小時達

最高點(86±16 μg/g)，此積聚量約為臨床要求積聚量(~20 ppm)的 3 倍。而未經表面修飾 RGD 之 PLGA 含硼奈米粒子(BPB NPs)的腫瘤最高積聚量僅為 47±28 μg/g，顯見表面修飾 RGD 胜肽確有助於奈米藥物標靶及滯留。然而，無論表面是否有修飾 RGD 的含硼奈米藥物之腫瘤積聚量於各時間點皆高於臨床使用之 BPA 與果糖複合體(BPA-Fr)，推測原因是實驗選擇的時間點並非 BPA-Fr 的最佳治療時間，其於腫瘤內會被 LAT-1 運送子(transporter)運送出細胞，因此在臨床治療時都是用點滴持續給予藥物進行治療。

IV. 結論

本研究成功製備表面 RGD 胜肽修飾之含硼聚乳酸-甘醇酸奈米微粒，活體動物實驗發現經靜脈注射 24 小時後其腫瘤積聚量達到最高值(86±16 ppm)，相較未修飾者具有更理想的腫瘤積聚量。後續將進一步發展放射性標誌技術以非侵入性地觀察奈米粒子於活體內的分布，並以實際進行硼中子捕獲治療以驗證其療效，望能早日應用於臨床以造福頭頸癌患者。

參考文獻

[1] Nieberler M, Reuning U, Reichart F, Notni J, Wester HJ, Schwaiger M, et al. Exploring the Role of RGD-Recognizing Integrins in Cancer. Cancers (Basel). 2017;9. doi:10.3390/cancers9090116.

[2] Schittenhelm J, Klein A, Tatagiba MS, Meyermann R, Fend F, Goodman SL, et al. Comparing the expression of integrins alphavbeta3, alphavbeta5, alphavbeta6, alphavbeta8, fibronectin and fibrinogen in human brain metastases and their corresponding primary tumors. Int J Clin Exp Pathol. 2013;6:2719- 32.

[3] S. Moffatt, R. Cristiano and R. Boyle, "Combined formulation of Doxorubicin-Arg-Gly-Asp (RGD) and modified PEGylated PLGA-encapsulated nanocarrier improves anti-tumor activity," 2012 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine Workshops, 2012, pp. 903-909, doi: 10.1109/BIBMW.2012.6470261.

標靶趨化因子受體 CXCR4 之胜肽類正子診斷治療藥物開發
Development of peptide-based positron diagnostic therapeutic drugs targeting chemokine receptor CXCR4

計畫編號：110-2623-E-016 -001 -NU
計畫主持人：馬國興
e-mail：kuohsing91@yahoo.com.tw
計畫共同主持人：邱創新
計畫參與人員：趙韻婷、孫綠涵
執行單位：國防醫學院 (生物及解剖學研究所)

摘要

CXCR4 (C-X-C chemokine receptor type 4)是屬於人類趨化因子受器蛋白質家族的成員，此受器在許多癌症如肺癌、前列腺癌、乳癌及胰臟癌的癌細胞中過度表現，並與腫瘤生長、血管新生與癌細胞轉移具有高度相關性。近年來，許多研究顯示 CXCR4 拮抗劑對於數種癌症具有良好之治療效果。藉由放射性配體標靶 CXCR4 進行癌症的診斷或治療，可能是一種具有高度潛力的策略，本計畫將利用兩年時間，開發可標靶於 CXCR4 並具金屬螯合配基之放射性同位素鎵-68 或氟-18 的診斷用放射性配體- [^{68}Ga]-pentixafor、[68Ga]-pentixather 與[^{18}F]- AIF-NOTApentixather，以及治療用放射性配體-[177Lu]-pentixather，並在癌症動物模式進行診斷或治療相關研究，第一年將運用小動物正子造影配合[^{68}Ga]-pentixafor、[^{68}Ga]- pentixather、與[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather，觀察具過度表現 CXCR4 之 MCF-7 細胞所注射之腫瘤裸鼠動物模式，比較這些放射性配體與臨床廣泛使用之[18F]FDG 在生物分布的差異，並運用 CXCR4 拮抗劑 AMD3100 進行抑制試驗，並以免疫組織化學染色觀察腫瘤組織 CXCR4 表現，評估這些放射性配體對於 CXCR4 之專一性與敏感性。第二年將在腫瘤裸鼠模式評估[177Lu]-pentixather 的抗癌效應，將根據第一年計畫的研究結果從[^{68}Ga]- pentixafor、[^{68}Ga]- pentixather、[^{18}F]-AIF- NOTA- pentixather 三種放射性配體中篩選出造影品質最佳者並搭配小動物正子造影，作為評估[^{177}Lu]-pentixather 治療效果的造影方法，最後以 CXCR4 與 ki-67 免疫組織化學染色以及 TUNAL assay，進一步確認[177Lu]-pentixather 是否具有治療效果。

關鍵詞：趨化因子受體 4，診斷治療，正子造影。

Abstract

CXCR4 (C-X-C chemokine receptor type 4) is a member of the chemokine receptor subfamily which is overexpressed in several human cancer cells including lung, prostate, breast and pancreas cancers and contributes to the tumor growth, angiogenesis and metastasis. Recently, several studies have shown that CXCR4 antagonists are effective against several cancer types. Therefore, developing radioligands that target CXCR4 may be a strategy with high potential for better diagnosis and more effective treatment of cancer. In this two-year research project, we aim to develop peptide-based theranostic radioligands that target CXCR4. For diagnosis, we will explore metal chelators labeled with gallium 68 or fluorine 18, including [^{68}Ga]-pentixafor, [^{68}Ga]- pentixather, and [^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather. For therapeutic purposes, peptidebased [177Lu]-pentixather will be explored. We will use the animal model bearing MCF-7 cells, a breast cancer cell line with high CXCR4 expression, and small animal positron emission tomography (PET) to investigate the bio-distribution of different radionuclide labeled peptide-based radioligands in vivo and compare them with that of clinical widely used [^{18}F]FDG. In addition, the blocking test will be performed using CXCR4 antagonist AMD3100 and immunohistochemistry will be employed to evaluate the specificity and sensitivity of these radioligands. In the second year, the radioligands with best diagnosis potential will be selected for further evaluating the anti-cancer efficacy of [^{177}Lu]-pentixather in the tumor bearing animal model. Finally, the CXCR4 and ki-67 immunostaining studies and TUNAL assay will be performed to further evaluate the therapeutic effect of [^{177}Lu]-pentixather in this animal model.

Keywords: CXCR4 ， Theranostic, pentixafor, pentixather, Positron Emission Tomography

I. 前言

CXCR4 參與多項生理機制，包括促使白血球聚集 (leukocyte recruitment)，於胚胎階段影響心血管、神經系統及造血功能發育等，CXCR4 在許多不同種類癌細胞上均有過度表現，包含乳癌 (breast cancer)、前列腺癌 (Prostate cancer)、白血病 (leukemia)、肺癌 (lung cancer)、大腸癌 (Colorectal cancer)及多發性骨髓瘤（multiple myeloma）等 [1]

[2] [3] ，此受體在腫瘤生長、侵犯周邊組織、腫瘤細胞微環境相互作用等亦扮演關鍵的角色[4] [5]，先前研究顯示利用 CXCR4 之拮抗劑 (antagonist) Plerixafor 在肺癌及急性骨隨性白血病 (acute myeloid leukemia；AML) 動物模式中具良好之治療效果[6] [7] [8]，並能有效阻止癌細胞生長及轉移[9]，因此開發標靶 CXCR4 受體的分子影像示蹤劑及治療已成為一個重要的研究課題。

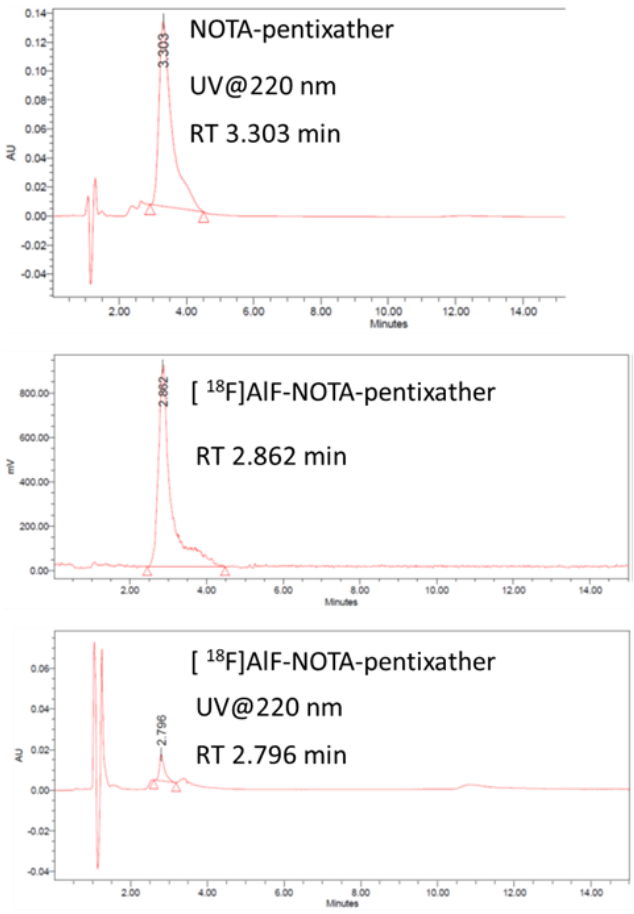
II. 主要內容

以往標靶於 CXCR4 的放射性配體主要可分為以下三類：第一類為非胜肽類的 bicyclams AMD3100 (Plerixafor / MozobilTM) 及其類似物 AMD3465，以放射性 Cu-64 標幟成為 [^{64}Cu]AMD3100 或 [^{64}Cu]AMD3465。第二類為以 T-140 胜肽為基礎結構的類似物，與 CXCR4 具高度親合的胜肽類物質，例如[^{18}F]-T140 或[^{68}Ga]-NOTA-NFB 等。第三類則為以 FC-131 為基礎的環狀五胜肽結構類似物，例如[^{68}Ga]-Pentixafor 等[10]。前兩類物質經研究證實與 CXCR4 具高度親和力，然而在臨床前與人體試驗中均顯示於脾臟及肝臟有大量積聚，因而降低了影像的對比度。相較於前兩類結構，第三類以 FC-131 為基礎的胜肽衍生物顯示對於人類 CXCR4 不但具有高度親和力與選擇性，並且快速地經由腎臟系統排出，具有非常低的非特異性背景積聚，造就了高對比的臨床影像，也是目前唯一一種標靶 CXCR4 具有廣泛臨床應用的造影劑。在以 CXCR4 拮抗劑 FC-131 胜肽類的衍生物中，一種名為 pentixafor 的結構展現出對於 CXCR4 良好的親和力與選擇性而被廣泛地進行研究。本團隊第一年將研究[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 的合成方法，並建立腫瘤裸鼠動物模式，以此動物模式分析[^{68}Ga]-pentixafor、[^{68}Ga]-pentixather 及[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 於小動物正子造影中之影像結果差異，並與[18F]FDG 的造影結果進行比較，探討此四種不同藥物於腫瘤裸鼠模式之造影效果，於造影結束後進行免疫組織組織化學染色研究，以 CXCR4 抗體觀察腫瘤組織切片中 CXCR4 之表現，並與造影結果進行比對。第二年將利用第一年所建立之腫瘤裸鼠模式，於注射腫瘤細胞後兩週再注射[^{177}Lu]-pentixather 進行治療，並根據第一年計畫的研究結果從[^{68}Ga]-pentixafor、[^{68}Ga]-pentixather、[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 三種放射性配體中篩選出造影品質最佳者並搭配小動物正子造影，作為評估[^{177}Lu]-pentixather 治療效果的造影方法，待最後一次造影結束後犧牲進行免疫組織化學染色，進行 CXCR4 免疫染色觀察腫瘤組織切片中 CXCR4 之表現，並以 ki-67 免疫染色及 TUNAL assay 觀察腫瘤組織細胞凋亡狀況，此研究除探討[^{68}Ga]-pentixafor、[^{68}Ga]-pentixather、[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 此三種放射性配體於腫瘤裸鼠模式中之造影效果，更能評估[^{177}Lu]-pentixather 在乳癌治療之可行性。

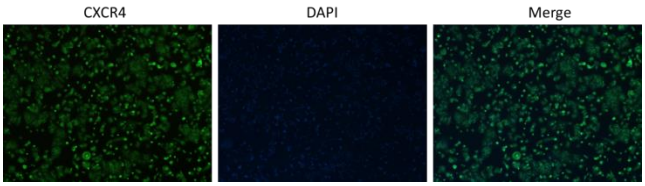
III. 結果與討論

本研究獲核可補助執行計畫一年，著重[18F]-AIF-NOTA-pentixather 之製備，由三總正子中心製造的[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 產物以高效液相層析分析放射化學純度>95%，放射偵測器圖譜顯示成品 RT 為 2.862 分鐘；UV (220nm) 偵測器圖譜顯示成品 RT 為 2.796 分鐘，比對標誌前 NOTA-pentixather 於 UV220 的 RT 為 3.303 分鐘 (圖一)，使用 Nova-Pak C18 (4 μm；150*4.6 mm)管柱，流速 1.5 mL/min；30% acetonitrile in H_2O；0.1% trifluoroacetic acid (TFA)沖洗。

在建立 MCF-7 荷乳腺癌細胞動物模式之前，先進行 MCF-7 細胞培養，並將 MCF-7 細胞株進行 CXCR4 免疫細胞螢光染色，結果顯示確認可在細胞核周圍發現有 CXCR4 訊號表現(圖二)。

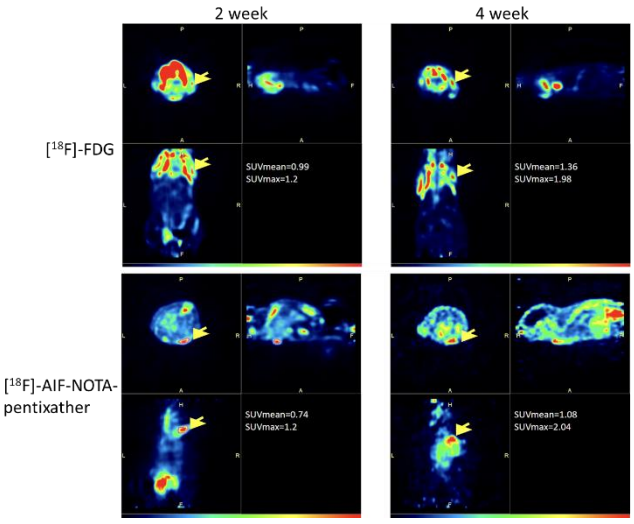


圖一、[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 之 HPLC 分析圖。NOTA-pentixather 以 UV 偵測器於波長 220nm 觀察(上圖)；[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 分別以放射性偵測器(中圖)與 UV 偵測器(下圖)觀察。



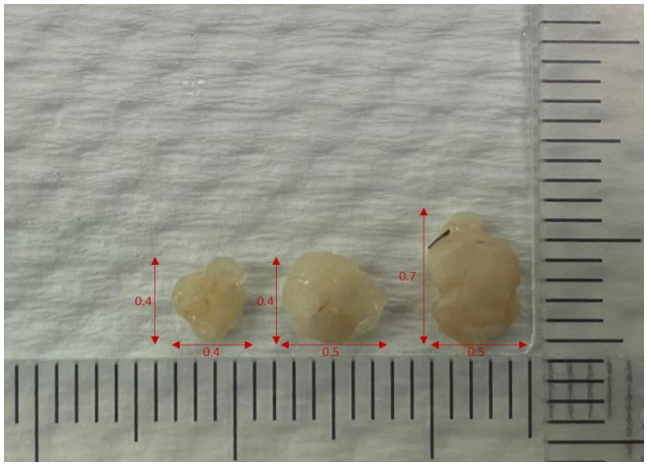
圖二、MCF-7 cell 免疫細胞螢光染色結果。以 DAPI 藍色螢光染細胞核(中圖)，CXCR4 抗體接有綠色螢光染 MCF-7 細胞上表現的 CXCR4 受體，經由影像疊圖顯示細胞核周圍有 CXCR4 訊號。

前項實驗中確認 [^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 製備作業，並完成 MCF-7 細胞培養，接著將 MCF-7 細胞植入免疫缺陷母鼠，分別於腫瘤細胞植入後第 2 週、第 4 週進行小動物正子造影，比較 [^{18}F]-FDG 以及 [^{18}F]-AIF-NOTA- pentixather 兩者的造影結果 (圖三)。



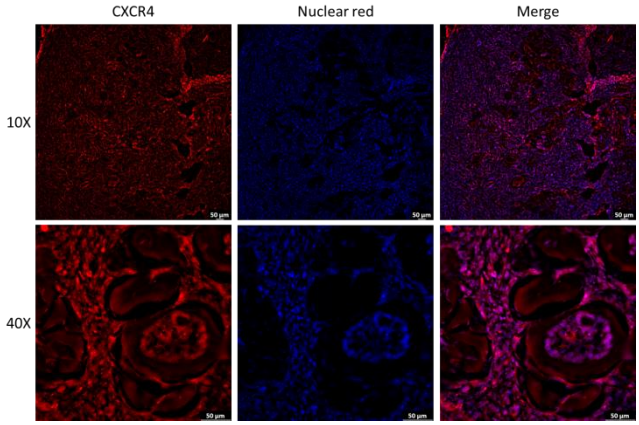
圖三、[^{18}F]-FDG 及[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 之小動物正子造影圖。MCF-7 細胞注射至免疫缺陷鼠後第二、四週造影。[18F]-FDG 於尾靜脈注射至裸鼠體內後結合 45 分鐘，再進行 30 分鐘靜態造影；[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 注射後進行 120 分鐘動態造影，擷取 60-120 影像圖。箭頭為腫瘤位置。

[^{18}F]-FDG 於第二週造影的標準攝取值 (standardized uptake value, SUV) 之平均值為 0.99、最大值為 1.2，第四週 SUV 平均值為 1.36、最大值為 1.98，顯示腫瘤隨著時間增大；[^{18}F]-AIF-NOTA-pentixather 於第二週造影 SUV 平均值為 0.74、最大值為 1.2，第四週 SUV 平均值為 1.08、最大值為 2.04，結果與[^{18}F]-FDG 相符。實驗鼠於第四週造影後犧牲取出腫瘤，確認實驗鼠腫瘤生長情形(圖四)。



圖四、 免疫缺陷鼠體內之 MCF-7 腫瘤。MCF-7 腫瘤小鼠於第四週造影後犧牲後取出腫瘤，紀錄量測大小。單位：cm。

其中最小的腫瘤大小約為 0.4 x 0.4 cm^2 ，最大的腫瘤約為 0.5 x 0.7 cm^2。取出後的腫瘤經冷凍切片後以免疫螢光染色，標定 CXCR4 與 nuclear red 共染(圖五)，結果顯示，腫瘤細胞呈現密集堆積，且核周圍可觀察到 CXCR4 訊號表現。



圖五、MCF-7 腫瘤螢光染色結果。CXCR4 抗體接有紅色螢光 (左圖) ，以 Nuclear red 藍色螢光染細胞核 (中圖)，經由影像疊圖(右圖)顯示細胞核周圍有 CXCR4 訊號。上排為倍率 10X 的影像結果；下排為倍率 40X 之影像結果。scale bar = 50 μm。

IV. 結論

本研究團隊合成之 CXCR4 正子示蹤劑 [18F]-AIF-NOTA-pentixather，可於腫瘤小鼠體內成功偵測 MCF-7 腫瘤，具有專一性及敏感性，且免疫染色結果亦能與造影結果相符。未來可進一步將標靶 CXCR4 受體的分子影像示蹤劑應用於臨床診斷以及治療。

參考文獻

[1] Kim, J., H. Takeuchi, S. T. Lam, R. R. Turner, H.-J. Wang, C. Kuo, L. Foshag, A. J. Bilchik and D. S. Hoon (2005). "Chemokine receptor CXCR4 expression in colorectal cancer patients increases the risk for recurrence and for poor survival." Journal of Clinical Oncology 23(12): 2744-2753.

[2] Akashi, T., K. Koizumi, K. Tsuneyama, I. Saiki, Y. Takano and H. Fuse (2008). "Chemokine receptor CXCR4 expression and prognosis in patients with metastatic prostate cancer." Cancer Science 99(3): 539-542.

[3] Furusato, B. and J. S. Rhim (2009). CXCR4 and cancer. Chemokine Receptors in Cancer, Springer: 31-45.

[4] Domanska, U. M., R. C. Kruizinga, W. B. Nagengast, H. Timmer-Bosscha, G. Huls, E. G. de Vries and A. M. Walenkamp (2013). "A review on CXCR4/CXCL12 axis in oncology: no place to hide." Eur J Cancer 49(1): 219-230.

[5] Walenkamp, A. M. E., C. Lapa, K. Herrmann and H. J. Wester (2017). "CXCR4 Ligands: The Next Big Hit?" J Nucl Med 58(Suppl 2): 77s-82s.

[6] Burger, J. A., D. J. Stewart, O. Wald and A. Peled (2011). "Potential of CXCR4 antagonists for the treatment of metastatic lung cancer." Expert Rev Anticancer Ther 11(4): 621-630.

[7] Peled, A. and S. Tavor (2013). "Role of CXCR4 in the pathogenesis of acute myeloid leukemia." Theranostics 3(1): 34-39.

[8] Wald, O., O. M. Shapira and U. Izhar (2013). "CXCR4/CXCL12 axis in non small cell lung cancer (NSCLC) pathologic roles and therapeutic potential." Theranostics 3(1): 26-33.

[9] Gravina, G. L., A. Mancini, P. Muzi, L. Ventura, L. Biordi, E. Ricevuto, S. Pompili, C. Mattei, E. Di Cesare, E. A. Jannini and C. Festuccia (2015). "CXCR4 pharmacogical inhibition reduces bone and soft tissue metastatic burden by affecting tumor growth and tumorigenic potential in prostate cancer preclinical models." Prostate 75(12): 1227-1246.

[10] Kircher, M., P. Herhaus, M. Schottelius, A. K. Buck, R. A. Werner, H.-J. Wester, U. Keller and C. Lapa (2018). "CXCR4-directed theranostics in oncology and inflammation." Annals of nuclear medicine 32(8): 503-511.

利用影像生物指標區辨路易氏體失智症前驅期與老年重度憂鬱症
Application of imaging biomarkers in identifying prodromal dementia with Lewy bodies in late-life depression

計畫編號：110-2623-E-075-001-NU
計畫主持人：周元華
e-mail：c520608@ms64.hinet.net
計畫共同主持人：楊凱鈞、劉慕恩、楊邦宏
計畫參與人員：謝文琦
執行單位：臺北榮民總醫院品質管理中心

摘要

失智症是重要的公共衛生議題，需要及早辨識與介入。在部份未有失智臨床表現的老年憂鬱症個案，已能偵測到失智相關之病理變化。雖然這些研究以阿茲海默症為主，但路易氏體失智症與老年憂鬱症之關係較阿茲海默症更為密切；因此老年憂鬱症個案也是研究路易氏體失智症前驅期的重要對象。

多巴胺轉運器與 I-123-MIBG 心臟造影是診斷路易氏體失智症的兩個主要生物標記。兩種工具併用，可以提升診斷路易氏體失智症的能力；但也會增加受試者的負擔。若使用 Tc-99m-TRODAT 進行多巴胺轉運器造影，因為不同核種間能窗的差異 (Tc-99m: 140 keV 與 I-123: 159 keV)；理論上可進行兩者的同日造影。但傳統 SPECT 機器之能窗解析度約 9%，無法避免兩核種間互相干擾。採用 CZT 的新型 SPECT 機器，除了有較高的影像解析度與偵測零敏度；其能窗解析度也為傳統機器的 2 倍，更適合進行 Tc-99m-TRODAT 與 I-123-MIBG 的同日雙核種造影來促進其臨床應用。目前尚未有相關臨床研究。

本研究原本預計在兩年內納入 60 名老年憂鬱症個案與 30 名正常受試者，每位受試者會接受多巴胺轉運器、I-123-MIBG 以及臨床功能評估。在第一年因 I-123-MIBG 無法供藥；故先進行 ^{123}I 假體造影的研究。結果顯示其影像解析度可達到 10mm 以下。我們也開始進行 Tc-99m-TRODAT 與 I-123-MIBG 的臨床造影，初步結果 (5 名 LLD 個案) 顯示個別造影的可行性。會在完成兩類核種的新假體造影、確認參數後；開始進行同日雙核種造影。

關鍵詞：老年憂鬱症、路易氏體失智症、I-123-MIBG、Tc-99m-TRODAT、雙核種、同日造影。

Abstract

Dementia is a major public health problem that requires early identification and management. Dementia-related pathology could be observed in some patients with late-life depression (LLD). Most current studies evaluating the dementia pathology in LLD focus on the pathology of Alzheimer's disease (AD). Dementia with Lewy bodies (DLB), the second most common neurodegenerative dementia, has a closer relationship to depression than AD. Therefore, it is also essential to examine DLB pathology in LLD.

Dopamine transporter (DAT) and 123I-MIBG myocardial scintigraphy are the two main indicative biomarkers of DLB. Although combining DAT and 123I-MIBG imaging could elevate the power to diagnose DLB, at least two days of the imaging process will increase the burden on patients. In theory, it is possible to obtain Tc-99m-TRODAT for DAT imaging and 123I-MIBG data in a one-day protocol for the different energy windows of these two isotopes (Tc-99m: 140 keV and I-123: 159 keV). However, the limited resolution of the energy window of the conventional SPECT camera (around 9%) cannot prevent contamination from cross-talk between two isotopes, restricting the application of dual-isotope SPECT imaging.

The new SPECT camera equipped with Cadmium-Zinc-Telluride (CZT) detectors can provide better detector sensitivity, spatial resolution, and around two times the energy resolution than conventional SPECT cameras. These features made the CZT SPECT camera a promising tool for a one-day protocol of Tc-99m-TRODAT and 123I-MIBG imaging. Still, there is no related clinical study.

The current study planned to enroll 60 patients with LLD and 30 healthy controls in two years. Every subject will receive DAT imaging, 123I-MIBG myocardial scintigraphy, and clinical evaluations. During the first year, due to unavailable 123I-MIBG, we conducted a phantom study with 123I, which indicated a resolution better than 10 mm. We then acquired separate Tc-99m-TRODAT and 123I-MIBG imaging using CZT SPECT cameras in 5 LLD patients. Preliminary results supported the feasibility of imaging acquisition. Following the phantom study with both isotopes, we will initiate dual-isotope SPECT imaging.

Keywords: late-life depression, dementia with Lewy bodies, I-123-MIBG, Tc-99m-TRODAT, dual-isotope, one-day protocol

I. 前言

失智症的照護與治療是重要的公共衛生議題。根據 The Global Burden of Disease Study 2016，失智症在全球之盛行率為 1.7% [1]。在 2016 年，全球有 4 千 4 百萬人罹患失智症；是 1990 患者 (2 千萬人)的兩倍以上，其所造成的支出為 8180 億美金。目前失智症還缺乏有效的治療方式，因此疾病預防在降低失智症的影響上扮演很關鍵的角色 [2-4]。老年憂鬱症 (late-life depression, LLD) 會增加 4%之失智發生率，比許多心血管與代謝問題之風險還高 [2]。有憂鬱症病史者，其發生失智症的風險約是一般族群的 2 倍 [5, 6]。所以在近幾年的失智症防治策略，越來越強調憂鬱症的重要性 [3, 4]。

憂鬱症可能是失智症的危險因子 (risk factor)或前驅期 (prodrome)表現 [3, 4, 7]。研究顯示：每次重度憂鬱發作會增加約 14%之失智風險 [8, 9]，老年憂鬱症導致失智的風險較青壯年憂鬱症高 [10]，以及較接近失智症診斷時的憂鬱症其導致失智的風險比較高 [11]。也有許多研究支持：有一部份的老年憂鬱症個案，具有失智症相關的疾病生理變化 [4, 12, 13]。如 2014 年台灣本土的研究：具有憂鬱症病史的高齡個案，其腦部造影之類澱粉酶 (amyloid)增加 [14]。但目前相關研究，大多侷限於憂鬱症與阿茲海默症 (Alzheimer's Disease, AD)之關係，主要是因為阿茲海默症是最常見的失智症。路易氏體失智症 (Dementia with Lewy bodies, DLB)是除了阿茲海默症以外最常見的退化性失智症 [15]，而且路易氏體失智症與憂鬱症的關聯性，比阿茲海默症還顯著：路易氏體失智症具有憂鬱症病史之比率是阿茲海默症的 4 倍 [16]，台灣本土的研究也報告路易氏體失智症具憂鬱症共病之比率是阿茲海默症的 2 倍 [17]。約有 20%的路易氏體失智症個案一開始被診斷為重度憂鬱症 [18]。

這些研究結果顯示：老年憂鬱症和路易氏體失智症的關係較阿茲海默症更為密切，部份老年憂鬱症個案可能已經有路易氏體失智症相關之病生理變化 [15]。對老年憂鬱症個案之路易氏體失智症病生理研究，可協助進一步了解憂鬱症與失智症之相互關係；評估及早辨識失智症之可能性，也可協助發展更有效的治療方法。值得注意的是：為了能夠及早辨識路易氏體失智症之病生理變化，需要改善目前偵測工具之精確度；以及改善使用偵測工具相關之流程，讓其在臨床上的應用更便利。

II. 主要內容

根據 2017 年第四版的路易氏體失智症診斷標準，有三個生物指標：(1) 多巴胺轉運器 (dopamine transporter, DAT)下降 (2) I-123-MIBG 之心肌閃爍圖 (myocardial scintigraphy)吸收下降與 (3) 多項睡眠生理檢查 (Polysomnography, PSG)確認有在快速動眼期睡眠時缺乏肌肉抑制 (REM sleep without atonia)。

路易氏體病理會造成正腎上腺素交感神經系統結後神經分布之異常 (noradrenergic postganglionic sympathetic denervation)。I-123-MIBG 是正腎上腺素的衍生物，I-123-MIBG myocardial scintigraphy 已經被驗證可以用來估計 myocardial 之交感神經系統分布之異常，故此工具可以用來評估路易氏體病理 [19]。I-123-MIBG myocardial scintigraphy 除了在協助路易氏體失智症的診斷上具高 sensitivity/specificity (0.77~0.98/0.94~0.97)外 [19, 20]；幾個追蹤 3 至 4 年的研究均顯示：baseline 之 I-123-MIBG data 對最後之診斷預測非常有效 [19, 21]。因此 I-123-MIBG myocardial scintigraphy 被認為在辨別路易氏體失智症之早期非常有幫助 [19, 21]，也可以協助診斷前驅型路易氏體失智症 [22]。

路易氏體病理所造成神經退化也會導致 nigrostriatal 多巴胺迴路之異常 [23]，使用正子 (positron emission tomography)或單光子 (single photon emission computed tomography, SPECT)的多巴胺轉運器造影；可以偵測相關的異常，也被驗證是路易氏體失智症之生物指標 [24]。值得注意的是：在路易氏體失智症個案中，憂鬱之嚴重度和尾核 (caudate)之多巴胺轉運器有顯著負相關 [25]。此結果和過去對路易氏體失智症與巴金森氏症的研究相符：憂鬱症嚴重度與多巴胺轉運器呈負相關 [26, 27]。這些研究都支持：多巴胺轉運器在路易氏體失智症相關之憂鬱情緒中扮演重要角色。

對路易氏體失智症的早期偵測，研究顯示：併用多巴胺轉運器與 I-123-MIBG 造影，能更有效地鑑別路易氏體失智症與阿茲海默症；比任一個單一影像工具好 [28]。但併用兩項工具，會需要至少兩次的造影，造成受試者的負擔；特別是在高齡與神經精神疾病的患者。在台灣我們是利用 Tc-99m-TRODAT 來進行多巴胺轉運器造影，其和 I-123-MIBG 造影所需要的能窗 (energy window)不同 [29]，故有可能在同一天進行兩項造影。但因為兩個核種的能窗 (Tc-99m: 140 keV 與 I-123: 159 keV)十分接近，所以傳統的 SPECT 機器 (能窗解析度約在 9%)無法避免 crosstalk 的干擾；是很大的限制。

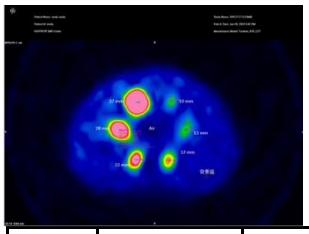
Cadmium-zinc-telluride (CZT)是新的 detectors 技術，能顯著改善 SPECT 機器的能窗解析度 (約 2 倍)、detector 敏感度 (Tc-99m: 約 4 倍、I-123: 約 2 倍)以及空間解析度 (約 2 倍) [30]。故採用 CZT 的 SPECT 機器，更適合進行兩個不同核種的同時或同日造影 [31, 32]。已經有研究驗證：採用 CZT 的 SPECT 機器，進行 Tc-99m 與 I-123 兩類核種造影劑的同時造影，其品質和分別造影類似 [33-36]。但目前未有利用 CZT SPECT 機器，進行 Tc-99m-TRODAT 與 I-123-MIBG 同日造影的相關研究。

本研究之主要目的：納入未有失智之老年憂鬱症患者，評估其臨床表現；以及利用二項造影工具 (多巴胺轉運器造影與 123I-MIBG)來評估其路易氏體病理之表現與影響。特別是藉由新的 CZT SPECT 機器 (GE SPECT/CT 870CZT WB)，發展適合同日進行二項造影的造影方法。並評估是否能利用這些資訊，建立有效的模型來及早辨識路易氏體失智症之個案。

I-123-MIBG 之造影方式如下：(1) 每位受試者注射 3mCi=111MBq I-123 MIBG；(2) 每位受試者在注射 I-123 MIBG 後，分別在第 15 分鐘早期像及 4 小時晚期像各造影一次；(3) 使用 GE 870 CZT SPECT/CT 儀器，每次收集 10 分鐘的平面影像。因為篇幅限制，其餘研究方法之細節暫不列出；有需要之讀者請再與主持人連繫確認。

III. 結果與討論

我們使用 The NEMA IEC phantom 進行 I-123 假體造影。其有 6 個空心球 (直徑：10、13、17、22、28 與 37 mm)與保麗龍球模擬肺的不同衰減係數，軟組織、空氣、水等材質。將 I-123 藥物 10mCi 活度，注射到假體內 (體積 7000 cc)，使背景活度為 5.3 kBq/cc；另外將六個球內活度為背景值得四倍以上 (0.00056 mCi/ml)。



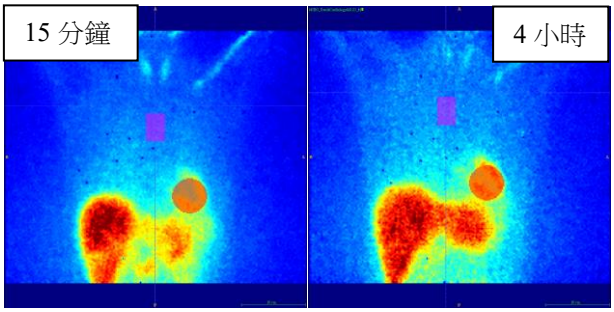
影像經過 CT 衰減校正後，如左之影像軸狀圖。結果顯示：其影像解析度可達到 10mm 以下。

區域	計數平均值	計數最大值	總計數 Total Count	活性比*

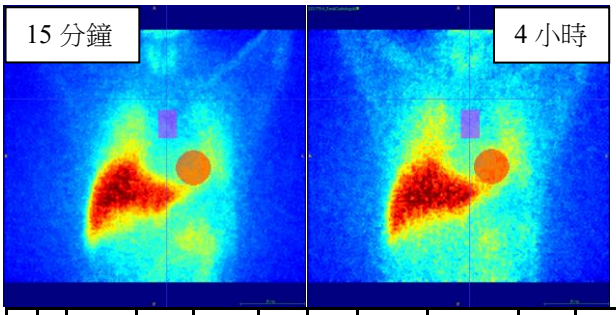
37mm	3516	4173	14065	1:13.62
28mm	2248	2643	8993	1:8.71
22mm	1268	1698	5074	1:4.91
17mm	827.5	1017	3310	1:3.21
13mm	566	604	2266	1:2.19
10mm	528	573	2115	1:2.05
Air	174	199	697	1:0.675
背景	258	267	1032	1:1

*以總計數，背景 1032 為基準。

在開始進行 LLD 個案之 MIBG 造影後，我們發現影像無法清晰分辨出來，並且有許多雜訊光點出現。



本次儀器因為使用新款 GE NM 870 CZT WB 儀器，為半導體 CZT 感光晶體，與傳統 NaI (Tl)晶體需要經過光電倍增管 (PMT)不同。經過與 GE 原廠討論後發現，主要是儀器安裝後如果需要做 I-123 射源檢查，需要建立有該儀器晶體對於射源 I-123 能量有 159Kev (83.3%)，529Kev (1.4%)的均勻平面射源訊號收集，因為高能量會穿透 CZT 晶體，造成雜訊點狀，經過 GE 原廠使用 30mCi 平面均勻射源進行各個 Pixel 訊號均勻度校正後，之後即可以正常取像 (如下圖所示，與上圖之個案不同)。相關之造影結果如下表所示，個案 1 至 3 為受雜訊影響，個案 4 與 5 是修正過後的造影結果。



個案	年齡	H	M	HMR (早)	H	M	HMR (晚)	WR (HMR)	WR (BC: -)	WR (BC: +)
1	73	92.6	46.8	1.98	47.5	27.8	1.71	13.6	37.6	47.7
2	84	60.0	42.1	1.43	37.2	27.4	1.35	5.1	24.7	34.2
3	70	114.2	48.9	2.34	77.9	31.0	2.51	-7.4	17.1	12.8
4	64	45.9	36.1	1.27	25.2	23.0	1.10	13.8	33.3	72.7
5	62	96.0	56.2	1.71	55.0	33.7	1.63	4.4	30.4	35.0

Abbreviations: H: heart ROI mean counts, M: midiastinum ROI mean counts, HMR: H/M ratio, WR: washout rates (%), BC: background correction

這些初步結果顯示：我們可以運用 GE NM 870 CZT。取得良好的 I-123-MIBG 2D planar 與 Tc-99m-TRODAT 影像。我們接著將進行同時使用 I-123 與 Tc-99m 的假體造影，於確認相關造影參數後，開始同日雙核種造影。

我們也將進一步發展利用此機器進行 I-123-MIBG 之 3D-SEPCT 造影 [37-42]。其除了提升整體心臟變化的造影品質，3D-SEPCT 造影還可以將心臟的造影分區；有機會看到在早期比較局部性的異常 [42]，符合我們希望能早期偵測路易氏體病理之主要研究目的。

IV. 結論

本研究藉由同時評估在老年憂鬱症患者之多巴胺轉運器與 I-123-MIBG 心臟造影，偵測路易氏體失智症之病理變化；以早期辨識失智症患者。利用新型的 CZT SPECT 機器，我們欲發展 Tc-99m-TRODAT 與 I-123-MIBG 的同日造影；以促進此造影工具之臨床應用。初步的假體研究與 5 名老年憂鬱症個案之結果，顯示個別 radioligand 造影的可行性。預計在完成同時兩類核種的新假體造影後，開始進行臨床同日雙核種造影。才能進一步確認其在老年憂鬱症患者與正常受試者間的差異，兩種造影結果間之相關性；以及與臨床表現之關聯。我們也將進一步納入 I-123-MIBG 之 3D-SEPCT 造影，確認其是否有更佳的偵測早期異常之能力。

參考文獻

[1] Nichols E, et al. Global, regional, and national burden of Alzheimer's disease and other dementias, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. Lancet Neurol. 2019;18(1):88-106.

[2] Livingston G, et al. Dementia prevention, intervention, and care. The Lancet. 2017;390(10113):2673-734.

[3] Lenze EJ, et al. Stopping Cognitive Decline in Patients With Late-Life Depression: A New Front in the Fight Against Dementia. Am J Geriatr Psychiatry. 2018;26(8):828-34.

[4] Dafsari FS, et al. Depression—an underrecognized target for prevention of dementia in Alzheimer's disease. Transl Psychiatry. 2020;10(1):160.

[5] Diniz BS, et al. Late-life depression and risk of vascular dementia and Alzheimer's disease: systematic review and meta-analysis of community-based cohort studies. Br J Psychiatry. 2013;202(5):329-35.

[6] Ownby RL, et al. Depression and Risk for Alzheimer Disease: Systematic Review, Meta-analysis, and Metaregression Analysis. Arch Gen Psychiatry. 2006;63(5):530-8.

[7] Leyhe T, et al. A common challenge in older adults: Classification, overlap, and therapy of depression and dementia. Alzheimers Dement. 2017;13(1):59-71.

[8] Kessing LV, et al. Does the risk of developing dementia increase with the number of episodes in patients with depressive disorder and in patients with bipolar disorder? J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2004;75(12):1662-6.

[9] Dotson VM, et al. Recurrent depressive symptoms and the incidence of dementia and mild cognitive impairment. Neurology. 2010;75(1):27-34.

[10] Barnes DE, et al. Midlife vs Late-Life Depressive

Symptoms and Risk of Dementia: Differential Effects for Alzheimer Disease and Vascular Dementia. Arch Gen Psychiatry. 2012;69(5):493-8.
[11] Green RC, et al. Depression as a Risk Factor for Alzheimer Disease: The MIRAGE Study. Arch Neurol. 2003;60(5):753-9.
[12] Harrington KD, et al. Amyloid-beta and depression in healthy older adults: A systematic review. Aust N Z J Psychiatry. 2015;49(1):36-46.
[13] Nascimento KKFd, et al. Plasma and cerebrospinal fluid amyloid-β levels in late-life depression: A systematic review and meta-analysis. J Psychiatr Res. 2015;69:35-41.
[14] Wu K-Y, et al. Increased brain amyloid deposition in patients with a lifetime history of major depression: evidenced on 18F-florbetapir (AV-45/Amyvid) positron emission tomography. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2014;41(4):714-22.
[15] Fujishiro H. Late-Life Depression and Lewy Body Disease. Am J Geriatr Psychiatry. 2019;27(3):287-9.
[16] Boot BP, et al. Risk factors for dementia with Lewy bodies. A case-control study. 2013;81(9):833-40.
[17] Chiu P-Y, et al. Depression in dementia with Lewy bodies: A comparison with Alzheimer's disease. PLoS One. 2017;12(6):e0179399.
[18] Galvin JE, et al. Lewy body dementia: The caregiver experience of clinical care. Parkinsonism Relat Disord. 2010;16(6):388-92.
[19] Komatsu J, et al. 123I-MIBG myocardial scintigraphy for the diagnosis of DLB: a multicentre 3-year follow-up study. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2018;89(11):1167-73.
[20] Treglia G, et al. Diagnostic Performance of Myocardial Innervation Imaging Using MIBG Scintigraphy in Differential Diagnosis between Dementia with Lewy Bodies and Other Dementias: A Systematic Review and a Meta-Analysis. J Neuroimaging. 2012;22(2):111-7.
[21] Estorch M, et al. Cardiac 123I-metaiodobenzylguanidine imaging allows early identification of dementia with Lewy bodies during life. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2008;35(9):1636.
[22] McKeith IG, et al. Research criteria for the diagnosis of prodromal dementia with Lewy bodies. Neurology. 2020;94(17):743-55.
[23] Patterson L, et al. Degeneration of dopaminergic circuitry influences depressive symptoms in Lewy body disorders. Brain Pathol. 2019;29(4):544-57.
[24] McKeith IG, et al. Diagnosis and management of dementia with Lewy bodies: Fourth consensus report of the DLB Consortium. Neurology. 2017;89(1):88-100.
[25] Roselli F, et al. Severity of neuropsychiatric symptoms and dopamine transporter levels in dementia with Lewy bodies: A 123I-FP-CIT SPECT study. Mov Disord. 2009;24(14):2097-103.
[26] Weintraub D, et al. Striatal Dopamine Transporter Imaging Correlates with Anxiety and Depression Symptoms in Parkinson's Disease. J Nucl Med. 2005;46(2):227-32.
[27] Vriend C, et al. Depressive symptoms in Parkinson's disease are related to reduced [¹²³I]FP-CIT binding in the caudate nucleus. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2014;85(2):159-64.
[28] Shimizu S, et al. Utility of the combination of DAT SPECT and MIBG myocardial scintigraphy in differentiating dementia with Lewy bodies from Alzheimer's disease. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2016;43(1):184-92.
[29] Biggans TJ. Same day cerebral perfusion and dopamine transporter imaging for differential diagnosis of cerebral impairment. Med Eng Phys. 2019;64:56-64.
[30] Niimi T, et al. Evaluation of Cadmium-Zinc-Telluride Detector-based Single-Photon Emission Computed Tomography for Nuclear Cardiology: a Comparison with Conventional Anger Single-Photon Emission Computed Tomography. Nucl Med Mol Imaging. 2017;51(4):331-7.
[31] Slomka PJ, et al. Solid-State Detector SPECT Myocardial Perfusion Imaging. J Nucl Med. 2019;60(9):1194-204.
[32] Nappi C, et al. Simultaneous dual-tracer 99mTc-tetrofosmin and 123I-BMIPP acquisition with CZT for ischemic memory: The future approaches to image the past. J Nucl Cardiol. 2021;28(1):196-8.
[33] Blaire T, et al. Determination of the Heart-to-Mediastinum Ratio of 123I-MIBG Uptake Using Dual-Isotope (123I-MIBG/99mTc-Tetrofosmin) Multipinhole Cadmium-Zinc-Telluride SPECT in Patients with Heart Failure. J Nucl Med. 2018;59(2):251-8.
[34] Bellevre D, et al. First determination of the heart-to-mediastinum ratio using cardiac dual isotope (123I-MIBG/99mTc-tetrofosmin) CZT imaging in patients with heart failure: the ADRECARD study. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2015;42(12):1912-9.
[35] Yamada Y, et al. Feasibility of simultaneous 99mTc-tetrofosmin and 123I-BMIPP dual-tracer imaging with cadmium-zinc-telluride detectors in patients undergoing primary coronary intervention for acute myocardial infarction. J Nucl Cardiol. 2021;28(1):187-95.
[36] Yamada Y, et al. Shortened acquisition time in simultaneous 99mTc-tetrofosmin and 123I-β-methyl-p-iodophenyl pentadecanoic acid dual-tracer imaging with cadmium–zinc–telluride detectors in patients undergoing primary coronary intervention for acute myocardial infarction. Nucl Med Commun. 2019;40(11):1130-7.
[37] Flotats A, et al. Proposal for standardization of 123I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) cardiac sympathetic imaging by the EANM Cardiovascular Committee and the European Council of Nuclear Cardiology. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2010;37(9):1802-12.
[38] Slomka PJ, et al. Quantification of I-123-meta-iodobenzylguanidine Heart-to-Mediastinum Ratios: Not So Simple After All. J Nucl Cardiol. 2014;21(5):979-83.
[39] Roberts G, et al. Uniformity of cardiac 123I-MIBG uptake on SPECT images in older adults with normal cognition and patients with dementia. J Nucl Cardiol. 2019.

[40] Odagiri H, et al. On the Utility of MIBG SPECT/CT in Evaluating Cardiac Sympathetic Dysfunction in Lewy Body Diseases. PLoS One. 2016;11(4):e0152746.
[41] Lebasnier A, et al. Potential diagnostic value of regional myocardial adrenergic imaging using 123I-MIBG SPECT to identify patients with Lewy body diseases. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2015;42(7):1043-51.
[42] Wu J, et al. Recent advances in cardiac SPECT instrumentation and imaging methods. Phys Med Biol. 2019;64(6):06TR1.

開發適用於頭頸癌之含硼 RGD 環狀 BNCT 試劑
Development of Breast Cancer Targeting Boron Delivery Agent for Boron Neutron Capture Therapy

計畫編號：110-2623-E-032-002-NU
計畫主持人：潘伯申
e-mail：138020@gms.tku.edu.tw
計畫參與人員：專題生：袁景星
執行單位：淡江大學化學系

摘要

硼中子捕獲治療法(Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)的原理乃是藉由低能熱中子照射 ^{10}B 原子並造成核分裂之後所產生高能量粒子 (^{7}Li, and ^{4}He)來破壞癌症細胞。[1] 研究顯示，如果能夠再針對目前的含硼 BNCT 遞送試劑在運送特性與癌細胞/正常細胞的選擇性上予以改進，BNCT 的治療效果將更進一步改善。[2] 因此，本研究計畫的兩個終極目標將為，第一:利用 Ugi-四成分反應合成兩個系列的含多硼酸官能基之小分子化合物，第二: 利用生物實驗來評估所合成之化合物是否能夠成為理想 BNCT 試劑。

關鍵詞：硼元素，含硼化合物， 硼中子捕獲治療， 癌症，多組成化學。

Abstract

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) utilizes low thermal energy to irradiate the boron-10 isotope, which generates highenergy particles (^{7}Li, and ^{4}He) to destroy the tumor cell. One of the key to the success of BNCT relies on the boron delivery agent that fulfills the following criteria: (a) blood/ tumor ration greater than three; (b) tumor/ normal cell ration greater than 3; (c) low toxicity. The specific aims of this research includes: (a) Constructs libraries of multiple boron-containing analogs via highly efficient Ugi four components reaction (Ugi-4CR); (b) Subject the synthesized multiple boron-containing analogs to series of biological assays. These assays will verify the hypothesis that multiple boron-containing analogs could serve as the ideal boron delivery agent for the BNCT.

Keywords: Boron, Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), Ugi fourcomponent reaction, cancer.

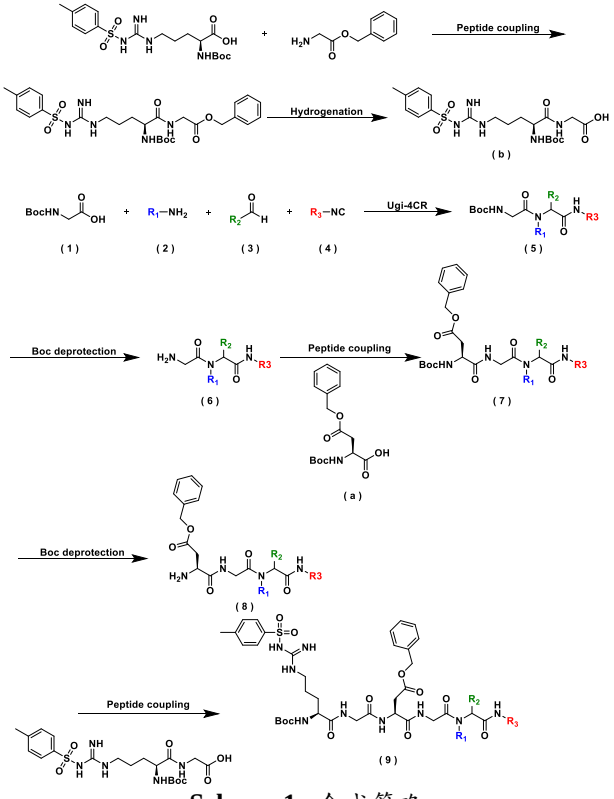
I. 前言

乳癌是女性致命的癌症類型，全球每年診斷出近 200 萬例病例。[3] 目前治療乳癌的選擇有是化學療法、手術、內分泌療法、放射治療、標靶治療。然而，除了標靶治療（Herceptin）之外，這些選擇中的大多數會導致顯著的不良副作用。再者，但並非所有患者都適用標靶治療。例如，三陰性乳癌，為乳癌的一種亞型，其特徵為孕酮受體 (PR)、雌激素受體 (ER)、人表皮生長因子受體 2 (HER2) 等生物標靶皆為陰性。因此，三陰性乳癌患者不適合使用 Herceptin。現今，除了外科手術外，化療為三陰性乳癌患者的主要治療選擇。然而，能找到對三陰性乳癌有選擇的低毒性含硼藥物，經由 BNCT 治療後，能降低對正常組織的傷害，對於三陰性乳癌的患者而言會是一個不錯的選擇。

多組成反應具有高效率、環保等優勢。本實驗室已針對此反應方式開發出了合成含硼化合物的客製化條件，而研究成果已發表多篇論文與專利。[4] 本研究以 peptide 為起始物透過 Ugi 多組成反應，合成具有 peptide 骨架的衍生物。並藉由多組成反應與 peptide 序列反應獲得結構多樣性的化合物。此策略如果成功將可以有效率地合成含硼之 peptide 衍生物，有利於生物實驗平台篩選適用於 BNCT 之化合物。此研究策略有以下 3 個重點：(1) peptide 可以視為導彈，將含硼化合物帶入癌細胞；(2)其餘官能基則是攜帶大量的硼原子。綜合上述，此分子對於 BNCT 的應用，不僅能觀察含硼化合物於體內的分布，還同時具有治療的效果。

II. 主要內容

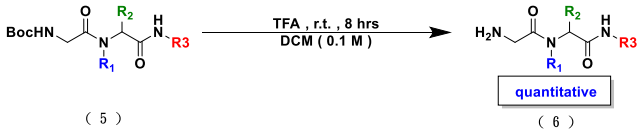
本研究主要內容分為兩部分，第一：利用 Ugi Reaction 合成含硼胜肽化合物，第二：利用 Peptide coupling 合成含有 RGD 序列之含硼類肽結構。以獲得目標產物 (9) (**Scheme 1.**)。



Scheme 1. 合成策略

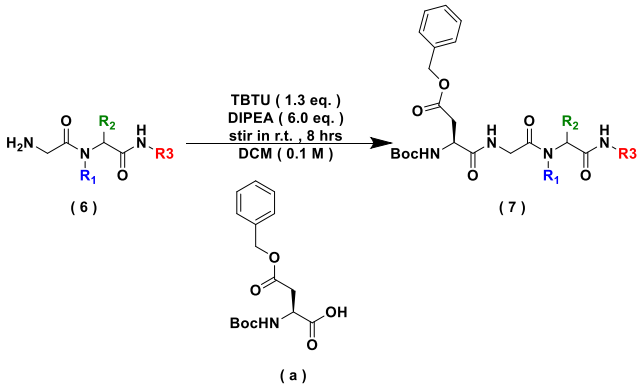
III. 結果與討論

透過多組成反應取得化合物 **(5)** 之後，其上之 Boc 保護基便可以在酸性條件下去保護得到化合物 **(6) (Scheme 2)**。



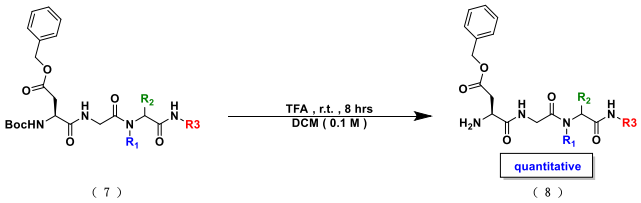
Scheme 2. 化合物 **(5)** Boc 保護基去保護

在取得化合物 **(6)** 之後，利用標準的 peptide coupling 反應條件便可以將其與化合物 (a) 耦合得到化合物 **(7) (Scheme 3.)**。反應所得之粗產物經由酸萃取、管柱層析、Hexane 再沉澱的方式予以純化。

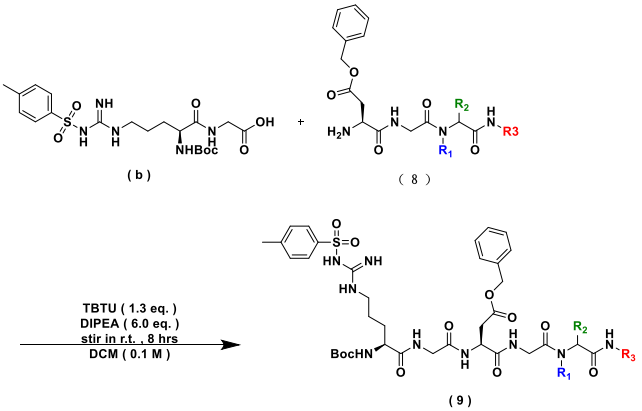


Scheme 3. Peptide-Ugi 的合成

化合物 (7) 再進行一次 Boc 保護基去保護得到化合物 **(8) (Scheme 4)**，利用標準的 peptide coupling 反應條件便可以將其與化合物 (b) 耦合得到化合物 **(9) (Scheme 5.)**。反應所得之粗產物經由酸萃取、管柱層析、Ether 再沉澱的方式予以純化。經 ^{1}H-NMR、^{13}C- NMR、高解析度質譜鑑定後，確認成功取得化合物 **(9) (Scheme 5)**。



Scheme 4. 化合物 **(7)** Boc 保護基去保護



Scheme 5. RGDG-Ugi 的合成

IV. 結論

本研究成功地合成目標產物且其衍生的合成策略尚未有被報導過。因此，我們預計將會在蒐集完成相關資料之後申請專利。而關於 Bpin 在進行 Boc 保護基去保護時，可能會脫落還原回硼酸導致產率下降，目前有考慮改變硼酸上的保護基，使產率增加。

參考文獻

[1] Malouff, T. D., Seneviratne, D. S., Ebner, D. K., Stross, W. C., Waddle, M. R., Trifiletti, D. M., Krishnan, S. *Front. Oncol.* **2021**, *11*, 601820.

[2] Barth, R. F., Mi, P., Yang, W. *Cancer Commun. (Lond)*. **2018**, *38(1)*, 35.

[3] Kumar, P., Aggarwal, R. *Arch. Gynecol. Obstet.* **2016**, *293(2)*, 247–269.

[4] 中華民國專利號 I707685，2020；United States Patent No. 10,689,404 B1 2020

蒐集國際大腦解剖標準化軟體之技術、版權、與專利資訊暨評估核醫影像學檢查之最佳使用時機

Collect technology, copyright, and patent information of international brain anatomy standardization software and evaluate the best time to use nuclear medicine imaging examination

計畫編號：110-2623-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、邱百誼、洪光威、白明奇、曾繁斌、陳世欣
執行單位：長庚醫療財團法人核子醫學科

摘要

腦影像分析為提取隱藏在醫療數位影像中疾病特徵的一個流程。該程序的主要目標是為了從數位影像的幾何型態完成識別、分析和標記紋理的工作。腦影像分析廣泛的應用在偵測、診斷和治療評估腦部相關問題與疾病。為了在臨床有意義的實踐工具運用，進而協助醫師照護病人，了解這些影像的分析步驟、工具的最新進展以及臨床使用情境就顯得非常重要。在這項為期兩年的研究中，我們第一年將搜尋市面上腦影像分析工具軟體，並對其進行分類整理。通過 Pubmed、Web of Science、Google Scholar 中的非系統性搜索以及相關參考文獻，彙整醫學影像分析工具，以支持醫師選擇合適的工具來進行影像的分割、對位以及定量處理。第二年將彙整 TRODAT、Tc-99m ethyl cysteinate dimmer（ECD）和 I-123 metaiodobenzylguanidine (MIBG) 等腦部分子影像臨床研究文獻，提出醫學影像臨床工作流程的建議，彙整供核醫及神內專家會議審查，建立專家共識通過適切的分子影像運用，來協助臨床照護。

關鍵詞：腦影像分析，分子影像，臨床工作流程，TRODAT, ECD, MIBG

Abstract

Brain image analysis is a process mainly utilized to extract facts confined in the images. This process basically goals at identifying, analyzing, and labeling the texture together with the geometry of digital images. Brain image analysis comprises a huge range of applications in detecting, diagnosing, and treating brain-related issues and diseases. It is important to understand the steps and current status of the image processing tools and to learn its clinical application workflow to help doctors to manage their patients. In this two year study, we will catalog available software solutions for brain image analysis to support scientists in selecting suitable tools for specific medical segmentation, registration, and quantification purposes. Image analysis tools will be identified using nonsystematic search in Pubmed, Web of Science, Google Scholar, and references in identified sources. We will identify recently published studies that have investigated the clinical use and utility of functional brain imaging such as TRODAT, Tc-99m ethyl cysteinate dimmer(ECD), and I-123 metaiodobenzylguanidine(MIBG). Clinical workflow for the use of brain images after appropriate analysis will be summarized as the consensus for community review.

Keywords: Brain image analysis, molecular imaging, clinical workflow, TRODAT, ECD, MIBG

I. 前言

隨著人口高齡化，醫療面臨的挑戰也慢慢從急重症轉換成慢性以及退化性疾病。其中，腦部的神經退化性疾病更是社會必須共同面對的問題。根據內政部民國 110 年 12 月底人口統計資料估算：台灣 65 歲以上老年人共 3,939,033 人，其中輕微認知障礙（MCI）有 709,577 人，佔 18.01%；失智症有 300,842 人，佔 7.64%（包括極輕度失智症 122,608 人，佔 3.11%，輕度以上失智症有 178,234 人，佔 4.52%）。也就是說，65 歲以上的老年人約每 13 人即有 1 位失智者，而 80 歲以上的老年人則約每 5 人即有 1 位失智者[1]。所幸，在各界的努力之下，現今社會大眾對於失智症的認識及關注慢慢增加，這也使得有越來越多的患者及其家屬向醫事專業人員尋求有關大腦健康的資訊及建議。

在台灣，我們確實有很多有用的問卷及臨床工具來協助醫師評估認知障礙的患者，但仍沒有一致性且簡易的方法以儘早幫助患者做出正確的診斷，為此幾乎是所有疑似失智症患者及家屬必須經歷的漫長痛苦歷程。不過，成像技術領域近期的創新有望對神經退化性疾病的臨床評估有所幫助，這些新穎的檢查技術包括由核能研究所（INER）所開發用於神經退化性病理學分子影像的新追蹤劑，以及用於使影像判讀一致性的新型影像處理平台，結合落實方法學優勢及改進工作流程，有助於醫療界及早診斷神經退化性疾病，並予以改善病程進展的治療。

同樣令人感興趣的是，超過 80%的神經學專家表明希望以分子影像做為診斷輔助工具。分子影像經過有意義的處理後，可提供分子和細胞水平上的訊息[2]，為人體提供獨特的見解，使醫師能做到個人化的患者照護。其中，腦影像的紋理特徵只有在經過適當處理後才能被正確地揭示出來[3]，而腦影像分析即為提取隱藏在醫療數位影像中疾病特徵的一個流程。典型的影像分析流程如圖 1 所示[4]。

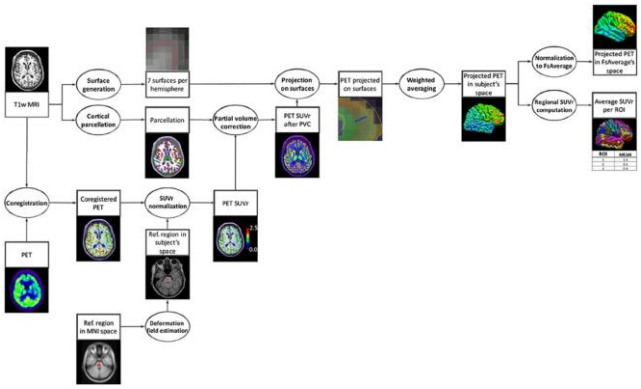


圖 1、典型的影像分析流程（改編自參考文獻[4]）

影像處理程序之主要目的是從數位影像中的幾何形態來完成識別、分析及紋理標記。目前，各界研究團隊所使用的影像處理工具，如：3D slicer、AFNI、FMRIB software library、IDL、MATLAB、MountainsMap 等，有些可以通過由非營利組織 Creative Commons 所發布的創用 CC 授權條款免費取得[5-8]；有些則可以根據特定協議，免費用於商業用途[9]。

II. 主要內容

本計畫旨在蒐集並了解國際大腦解剖標準化軟體之技術、版權與專利資訊，以確保正確使用腦影像處理平台，進而提供於廣泛臨床應用。透過 Pubmed、Web of Science、Google Scholar 中的非系統搜索及相關參考文獻來整理歸納出新型的影像分析工具，以便對影像對位和分割進行系統性文獻回顧；其中，也包括對 MRI、CT 的開發方法進行比較。

腦神經影像分析功能的基本要素（分割、空間標準化、強度歸一化、統計比較）與核能研究所（INER）已開發的初步程序比較和分析。來自多中心研究的初步影像分析結果和要求的影像分析功能如下所示：

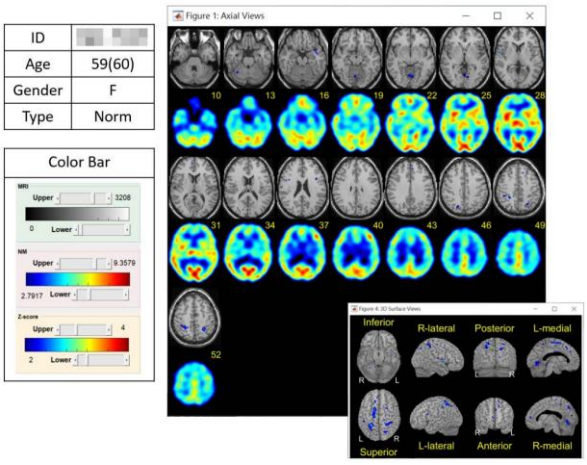


圖 2、正常人

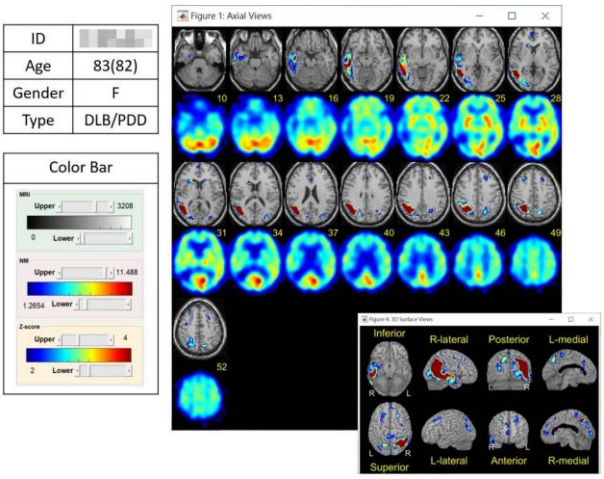


圖 3、阿茲海默症患者

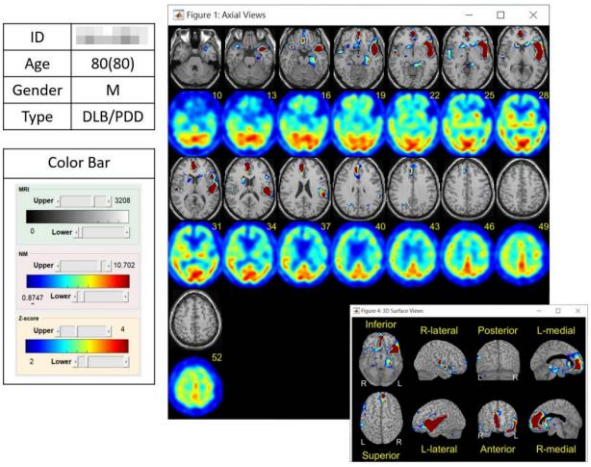


圖 4、額葉變異型阿茲海默症患者

2.1 影像分割 Image segmentation

於影像分割方面，其出版物數量將按出版物類型（會議、期刊和總數）分開。為確保調查的全面性，包括以下影像分析技術作為搜索標準：

(1) Quantitative Evaluation of Radiotracer Uptake
(2) Manual Segmentation
(3) Thresholding-based Methods
(4) Fixed thresholding
(5) Adaptive thresholding
(6) Iterative thresholding method
(7) Partial volume and reconstruction effects on thresholding
(8) Stochastic and learning-based thresholding methods (Mixture models, Fuzzy locally adaptive Bayesian method…)
(9) Region-based segmentation methods
(10) Boundary-based methods (level set and active contours, gradient-based methods…)
(11) Joint segmentation methods

2.2 影像對位 Image registration

旨在二維或三維影像中找到能將其結構對齊最好的最佳轉換，是影像分析過程中不可或缺的步驟，且於多個醫學領域中至關重要，如形態和功能影像的融合、影像減贅、電腦輔助診斷、治療追蹤等。為確保調查的全面性，包括以下影像分析技術作為搜索標準：

(1) Multi-Modality Registration
(2) Mutual information
(3) Multi-Atlas Based Methods
(4) Rigid registration
(5) Multi-resolution registration
(6) Translation transform
(7) Scale transform

2.3 影像比對 Image comparison

為影像分析的最後一個重要步驟。須比較兩組影像以分別促成可視化和模擬參數，並評估它們之間的相似性及相異性。典型方法包括：

(1) Pixel-by-pixel comparison
(2) Comparing images using the Hausdorff distance
(3) Distance-based functions for image comparison
(4) Image Change Detection Algorithms
(5) Pre-processing methods consideration
(6) Comparing Images Using Color Coherence Vectors and joint histograms
(7) Feature-Based Image Comparison
(8) Comparison of Near-Duplicate Image Matching
(9) Comparison metrics consideration
(10) Relaxed Matching Kernels For Robust Image Comparison
(11) Statistical comparison of images using Gibbs random fields
(12) Comparison Analysis for Efficient Defect Detection Algorithm for Gray level Digital Images using Median Filters Gabor Filter and ICA
(13) Visual read for Image Comparison

III. 結果與討論

3.1 影像處理軟體之蒐集結果

截至目前，本計畫分別蒐集了 47 套免費軟體、21 套專有軟體詳如表 1。於這些軟體中，其中又以 SPM、FreeSurfer、ANTs 及 Pmod 為目前該領域較常使用的影像分析工具。

Free	Proprietary
3D slicer	IDL
AFNI	AMIRA
CellCognition	ANALYZE
Cellprofiler	BitPlane
Dlib	Mathematica
Endrov	MATLAB
Fiji	Mimics
FMRIB softare library	Visage SDK
ImageJ	Aphenlion
AMIDE	**PMod**
SPM	Brain Label
FreeSurfer	BrainVoyager
ANTs	MIMneuro
BrainSuite	OsiriX
BrainParser	Vesalius3D
BrainGraph	Athena DICOM Viewer
Brain Connectivity Toolbox	3D-DOCTOR
BrainVISA	Navegatium
BioImage Suite	MeVisLab
AIR	SubtlePET
REST	EIKONA 3D
ggseg	
DPTOOLS	
AFQ-Browser	
ShapeViewer	
MRtrix3	
SimpleElastix	
DSI Studio	
CAMINO	
ITK	
ITK-SNAP	
InVesalius	
Ginkgo CADx	
MIPAV	
MITK	
Neurostat/3D-SSP	
SHIVA	
MedSeg	
CONN	
FastSurfer	
Mango	
CARET	
LESYMAP	
LINDA	
TLEprediction	
MultiTracer	
ShapeTools	

表 1、影像處理軟體與工具之蒐集結果

以下針對較常使用的影像分析工具做進一步說明：

1. SPM（免費軟體）

該軟體主要可分為影像標準化、統計分析及顯著性評估三項功能，以像素為基礎 (pixel-based)，透過評估空間擴展的統計過程，來檢驗有關功能性影像數據的假設。

SPM 軟體程式集由 Karl Friston 設計並用於腦影像數據分析(包括 fMRI、PET、SPECT、EEG 及 MEG)。其開發基於專有軟體/電腦語言/MATLAB 平台，具有影像分割、對位及強度標準化的完整功能，主要應用於 MRI、PET、SPECT 影像分析。

2. FreeSurfer（免費軟體）

為一套用於分析、可視化結構性及功能性神經影像數據的軟體程式集。可進行多種模態數據的前處理，以結構性 MRI 為例，其可為該影像數據提供完整的串流處理程序，包括：對腦影像做頭骨去除、B1 偏磁場校正、分割灰白質、重建皮質表面模型（灰白質邊界表面和軟腦膜表面）、皮質表面區域及皮質下大腦結構的標記、立體定位圖譜下個體皮質表面的非線性對位、量測皮質厚度、表面積、折疊型態、群組間形態測量差異的統計分析等。

該軟體主要應用於功能性影像的分析處理，如人腦 MRI 影像、PET/SPECT 影像；此外，也因為其在影像分割及空間標準化的優勢，且包含許多用於區域數據分析的工具，常被應用於 PET 腦影像的區域分析。

3. ANTs（免費軟體）

由 Avants Brian、Tustison Nicholas、Johnson Hans 等人所開發，建立於 Insight ToolKit（ITK）下，以 C 語言編寫並發展出醫學影像對位、分割、標準化、統計、多元分析特徵解剖學等相關技術，其他功能像是建立模板、

影像前處理（如偏差校正、去噪）、估計大腦皮質厚度等，都可於該軟體上執行。

該軟體的影像對位及分割工具被普遍認為是最先進的，其影像對位具有變數轉換(如 elastic、diffeomorphic、diffeomorphisms、unbiased)及相似度量測(如 landmarks、cross-correlation、mutual information)，並使用先驗模型、非參數模型、多變量模型進行影像分割；此外，它的應用範圍廣泛，包括：多模態神經影像學、額顳葉退化、多發性硬化症等。

4. PMod（專有軟體）

為一套用戶友好且功能強大的影像處理工具，目前擁有超過 10 個分析模組，可以進行各式各樣的影像瀏覽、多模態影像融合、藥物動力學分析、三維體積影像呈現、阿茲海默資料庫比對分析等，其建立於一大工作平台，使功能之間能流暢地交互使用，並用於處理來自人類和其他物種的各種研究數據。

該軟體主要應用於核子醫學影像分析，因為其針對腦影像的分割、對位及強度標準化方面佔有優勢，常被應用於 PET 和 SPECT 腦影像分析；此外，其適用於多模態影像分析，特別是在 PET/MR 和 PET/CT。

3.2 專利資訊蒐集之統計結果

截至目前，本計畫總共蒐集了至少 3,491 項與醫學影像處理(包括影像可視化及影像比對)、影像分割、影像對位、強度與空間標準化相關的專利項目，並將其對應於不同之影像工具(PET/SPECT, MRI, CT)如表 2。

	Image Processing	Image Segmentation	Image Registration
PET/SPECT	856	367	129
MRI	261	413	202
CT	393	904	475

表 2、相關技術與不同影像工具(PET/SPECT, MRI, CT)之專利資訊統計蒐集結果

以下針對專利資訊統計蒐集結果作分析與論述：

(1) 依**影像處理 Image Processing** 方法進行搜索：
若僅針對 PET/SPECT，透過專利搜索網頁至少可找到 856 項專利；而 MRI、CT 分別為 261 項和 393 項。

(2) 依**影像分割 Image Segmentation** 方法進行搜索：
可以發現大多數專利技術是以 CT 來開發，而針對 PET/SPECT 開發的最少。這可能是因為 PET/SPECT 影像難以定義邊界，且其於核子醫學成像中看到的影像解析度通常也較差。

(3) 依**影像對位 Image Registration** 方法進行搜索：
可以找到如上所述相同的趨勢。不過，影像對位為 PET 區域分析的關鍵，因為自動定量需要 PET 到 MRI 的空間標準化。通常，相互資訊（mutual information, MI）是多模態成像最有效的對位方法。例如，有一項專利（US 10,034,610 B2）修改了基於以投影為基準之參考影像對位多模態大腦影像的相互資訊技術。

IV. 結論

本計畫是為期兩年整合型研究中的第一年，了解這些影像軟體的分析處理功能、最新技術進展、版權、專利資訊以及使用情境，對於學術發展、產品開發、醫學影像分析平台的建立與設計都具有寶貴的價值，也將利於臨床有意義的實踐工具運用，進而協助醫師照護病患。此外，關於軟體使用時機，我們也與臨床醫師討論相關軟體落地考量，目前正徵詢相關廠商回饋，以及建置系統的可行性。

計畫第二年將彙整 TRODAT、Tc-99m ethyl cysteinate dimmer（ECD）和 I-123 metaiodobenzylguanidine (MIBG)等腦部分子影像臨床研究文獻，提出醫學影像臨床工作流程的建議，彙整供核醫及神內專家會議審查，建立專家共識通過適切的分子影像運用，來協助臨床照護。

期許核醫影像專家與臨床失智症專家攜手合作，整合性的通過這些新的分子影像技術合宜的來照顧失智病患，以利未來有更多的疾病緩解療法藥物導入或是影像分析技術的進步，可進一步彰顯分子影像檢查在精準臨床照護的重要性。

參考文獻

[1] 台灣失智症協會(2022，4 月)。失智人口知多少。資料引自 http://www.tada2002.org.tw/

[2] Weissleder, R. & Mahmood, U. Molecular imaging. Radiology 219, 316-333 (2001).

[3] Chung, M. K. Statistical and computational methods in brain image analysis. (CRC Press, 2013).

[4] Marcoux, A. et al. An Automated Pipeline for the Analysis of PET Data on the Cortical Surface. Frontiers in Neuroinformatics 12, doi:10.3389/fninf.2018.00094 (2018).

[5] Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J. & Ram, S. J. Image processing with ImageJ. Biophotonics international 11, 36-42 (2004).

[6] Schindelin, J. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. Nature methods 9, 676-682 (2012).

[7] Rosset, A., Spadola, L. & Ratib, O. OsiriX: an open-source software for navigating in multidimensional DICOM images. Journal of digital imaging 17, 205-216 (2004).

[8] Van der Walt, S. et al. scikit-image: image processing in Python. PeerJ 2, e453 (2014).

[9] Yoo, T. S. et al. Engineering and algorithm design for an image processing API: a technical report on ITK-the insight toolkit. Studies in health technology and informatics, 586-592 (2002).

碘-123 MIBG 心肌造影程序與其心臟/縱膈定量比值之標準化與教育訓練
Standardization and education of imaging procedure and heart/mediastinum ratio for I-123 MIBG myocardial scintigraphy

計畫編號：110-2623-E-758-001-NU
計畫主持人：洪光威
e-mail：106143@gmail.com
執行單位：秀傳醫療財團法人彰濱秀傳紀念醫院核子醫學科

摘要

碘-123 MIBG 不僅有用於神經內分泌腫(如嗜鉻細胞瘤、神經母細胞瘤)的診斷，近年來國外有非常豐富的經驗與研究證實碘-123MIBG 心肌造影於心臟衰竭的預後和治療、以及路易氏體疾病等神經退化疾病亦有很高的診斷價值。而日本多年臨床經驗更表明前述心臟與神經疾病的運用約佔了九成以上的使用量。然而日本的經驗也顯示碘-123 MIBG 心肌造影診斷心衰竭與路易氏體疾病所仰賴的心臟/縱膈定量比值會受到造影參數、設備廠牌、準值儀類型的不同而產生一定程度的影響，並進而造成診斷上的困擾。2019 年 9 月核能研究所研製的碘-123 MIBG 正式獲食藥署核准上市，本研究主題透過假體的實驗與教育訓練來解決這個問題並推廣其臨床的運用，以作為該藥品臨床運用前的基礎建設工作。

本計畫的執行獲得日本金澤大學中嶋教授的大力支持，提供了於日本與歐洲進行碘-123MIBG 心臟/縱膈定量比值標準化假體實驗完全相同的專利假體，並於假體實驗前進行了一場視訊會議為參與這項計畫的同仁介紹原理與相關細節。最後在北中南多家醫院進行了假體實驗，順利完成了計畫預訂「至少進行三種主要廠牌(GE, Siemens,Philips)、三種主要準直儀(LEHR, LMEGP and MELP)轉換參數的測量」的目標，未來將過核醫學會合作舉辦教育訓練活動把相關的知識與經驗傳遞給台灣的核醫伙伴，分享這些轉換參數給全台灣各醫院作為未來進行標準化碘-123MIBG 心臟/縱膈定量比值計算之用。

關鍵詞：碘-123 MIBG 心肌造影, 程序, 心臟/縱膈定量比值, 標準化

Abstract

I-123 MIBG had been shown not only useful for neuroendocrine tumors (such as pheochromocytoma, neuroblastoma...etc) but also its high diagnostic value for heart failure and neurodegenerative disease (such as dementia with Lewy bodies [DLB]). According to the clinical experience in Japan, more than 90% of I-123 MIBG were used for cardiac and neurological diseases. In addition, the Japanese experience also showed that imaging parameters, modalities and collimators had huge impacts on the measurements of heart-to-mediastinum (H/M) ratio which are critical for diagnosis of heart failure and DLB and might result in errors of diagnosis. The INER produced I-123 MIBG was approved in 2019-09 by TFDA. The current proposal conducted phantom studies and education activity as part of basic works for promoting utilization of I-123 MIBG myocardial scintigraphy as a pre-clinical preparation.During the period of this project, we got full support from Prof. Nakajima from Kanazawa University, Japan, whoprovided a the same cardiac phantom as that used in the standardization study of I-123 MIBG myocardial scintigraphy performed in Japan and Europe. In addition, Prof. Nakajima joined a teleconference with us for introducing the principles and details of phantom study for participants of this study. Finally, the phantom experiments were successfully undergone in many hospitals of Taiwan (including north, middle and south areas) and accomplished the goal of measuring the conversion coefficient from three main cameras (GE, Siemens, Philips) equipped with more than three kinds of collimators (LEHR, LMEGP and MELP). In future, we will further collaborate with Taiwan Nuclear Medicine Society for holding education activity for sharing the knowledge and experience to our nuclear medicine colleagues of Taiwan and providing the conversion coefficients to them for calculating the I-123 MIBG H/M ratio.

Keywords: I-123 MIBG myocardial scintigraphy, procedure, H/M ratio, standardization

I. 前言

碘-123 MIBG 不僅可用於神經內分泌腫(如嗜鉻細胞瘤、神經母細胞瘤)的診斷，近年來國外有非常豐富的經驗與研究證實碘-123 MIBG 心肌造影於心臟衰竭的預後和治療、以及路易氏體疾病等神經退化疾病亦有很高的診斷價值。而日本多年臨床經驗更顯示前述心臟與神經疾病的運用約佔了九成以上的使用量。

2019 年 9 月核能研究所研製的碘-123 MIBG 正式獲食藥署核准上市，其許可證上載明之適應症除了嗜鉻細胞瘤之診斷外；亦包括鬱血性心臟衰竭(Congestive Heart Failure): 藉由心臟與縱膈(Heart to Mediastinum, H/M)放射性攝取比值，評估心肌交感神經功能。

日本的經驗顯示 H/M 比值的計算會受到造影參數、設備廠牌、準值儀類型的不同而產生一定程度的影響(圖一)，並進而造成診斷上的困擾。此外，台灣並未有合適的正常人與相關疾病診斷與預後的 H/M 比值資料庫，故本研究將和日本金澤大學合作，引進其開發的心臟假體，該假體已在日本七百家與歐洲三十家醫院使用，並累積豐富的臨床資料，並已驗證以假體實驗獲得轉換系數以標準化 H/M 比值的可行性與正確性。

本計畫以該金澤大學的專利假體在台灣北中南共十二家醫院、涵蓋三種主要廠牌的六種以上型號加馬相機搭配 LEHR, LMEGP, MELP 等不同的準直儀上進行假體實驗，以獲得計算標準化 H/M 定量比值的「轉換係數」，如此一來，各醫院不管使用任何廠牌與何種準直

儀皆可透過適當的轉換係換將 H/M 比值換算成標準值，如此一來將可正確地引用日本核醫學會所建立的正常人與疾病資料庫進行診斷、並進行不同使用者間的比較，為未來核研所碘-123MIBG 的臨床推廣作法準備。

H/M ratio of control groups in Japan

Source	N	Mean	SD	Manufacturer	Collimater	ref.
Nakajima et. al. 1994	15	**2.42**	0.30	Toshiba	LEHR	Nucl Med Commun. 1994;15(5):317-323
Takeishi et. al. 1994	10	**2.00**	0.30	Siemens	LEHR	Ann Nucl Med. 1994;8(3):177-182
Suwa et. al. 1997	9	**2.60**	0.20	Toshiba	---	Am Heart J. 1997;133(3):353-358
Nakata et. al. 1998	16	**2.38**	0.28	---	LEGP	J Nucl Cardiol. 1998;5(6):579-590
Orimo et. al. 1999	10	**2.30**	0.22	Shimazu	---	J Neurol Neurosurg Psychiatry. 1999;67(2):189-194.
Yano et. al. 1999	7	**2.17**	0.13	Shimadzu	ME	Ann Nucl Med. 1999;13(2):89-93
Fukuoka et. al. 2000	10	**2.65**	0.35	GE	LEGP	Nucl Med Commun. 2000;21(3):291-297
Mu et. al. 2001	15	**2.87**	0.42	Toshiba	LEGP	Ann Nucl Med. 2001;15(5):411-416
Arimoto et. al. 2004	17	**1.98**	0.22	Siemens	LEHR	Ann Nucl Med. 2004;18(2):145-150
Nagayama et. al. 2005	10	**2.10**	0.13	Siemens	---	J Neurol Neurosurg Psychiatry. 2005;76(2):249-251
Sakata et. al. 2005	86	**1.88**	0.16	Toshiba	---	Circ J. 2005;69(2):171-176
Kasama et. al. 2007	10	**2.44**	0.26	GE	---	Eur Heart J. 2007;28(8):989-995
Average		2.32	0.25			

圖一、日本在 I-123MIBG 心肌造影臨床運用的早期，許多機構因相機廠牌和準直儀的不同，即使是在正常人 H/M 比值計算上也會產生差異相當大結果。

II. 主要內容

本研究採用日本金澤大學的 Nakajima 教授所設計的專利心臟假體，如圖二所示，共包含心臟、肺、縱膈和肝臟等器官，主要用以計算 H/M Ratio (HMR)之用。

圖二、日本金澤大學中嶋教授設計之心臟假體

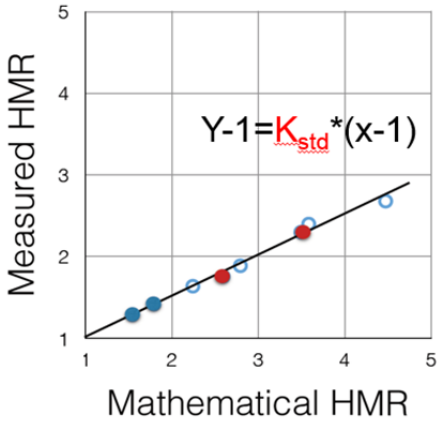
該假體由心臟、肺、縱膈和肝臟等四種器官所組成；實驗開始前先將 Type F3 使用漏斗及測量杯將水注滿假體；接著準備 500ml 的水和 I-123(3-5mci)倒入 2000ml 塑料瓶中，再將水補足擰緊蓋子，始其充分混合，最後注入 Type KB 使用漏斗及測量杯(1000ml)，完成灌注假體的工作。接著正假體的設置，如圖三所示，在 Table 上鋪設防水除污紙，避免放射線污染，並將 Type F3(純水)放置 Type KB(有腔室)上方。

圖三、心臟假體之實際使用影像

造影參數包括 256 x 256 matrix、能窗中心為 159keV(範圍 10%)、影像採集時間 2-3 分鐘、準值儀距離假體表面為 3cm (如圖四)。首先進行前位影像(Anterior view)掃描，完成後在條件不變的狀況下，翻轉 KB 假體/蓋上 F3 假體，進行後位影像(Posterior view)掃描 (不建議同時進行前後位掃描)。

圖四、假體放置位置與 SPECT 準直儀之距離量測

如圖五所示，影像採集完成後，將所得到的前後位影像分別計算 heart-to-mediastinum ratio (HMR)，並依此二組數字作線性迴歸公式進行計算，即可產生轉換係數(K)。(註：依中嶋教授的研究，八組數字、六組數字、四組數字和二組數字進行線性迴歸所得的結果幾乎完全一致，故採二組數字計算即可；另外公式中所謂的 Kstd 就是我們所要參考的單位進行假體實驗所計算得到的轉換係數，故稱為標準轉換係數(standard K；簡稱 Kstd)；依同樣的公式，在各機構單位進行假體實驗所得的轉換參數，故稱為機構轉換係數(institutional K；簡稱 Ki)。



圖五、以測量值和理論值進行線性迴歸分析以獲得標準化轉換係數

未來，各醫院單位在實際進行 I-123 MIBG 心肌造影並計算 HMR 時，即可利用實驗所得對應相同廠牌/型號/準直儀的轉換係數(Ki)，搭配我們要進行比較(例如日本核醫學會正常人資料庫)的機構(或醫院)的轉換參數(Kstd)，套用以下的公式即可將所得的 HMR 值轉換成標準化的 HMR 數值(HMRstd)。

$$HMR_{std} = \frac{K_{std}}{K_i} \times (HMR_i - 1) + 1$$

III. 結果與討論

依據國際碘-123 MIBG 心肌造影權威學者日本金澤大學 Nakajima 教授的建議，碘-123 MIBG 心肌造影標準化作業參數如下頁表一所示。

表一、碘-123 MIBG心肌造影標準化作業參數

	Planar	SPECT
Injection dose (MBq)	111	111
Imaging time after injection (early)	20	20
Imaging time after injection (delay)	3-4h	3-4h
Collimator	LMEGP	LMEGP
Energy window	159 kev ± 10%	159 kev ±7.5%
Sampling angle	-	6 degree
Acquisition type	planar	Step and shoot
Acquisition time	2 min	30 s/view
Matrix size	256x256	64x64
Pixel size	2.4 mm	6.6 mm
Acquisition zoon	1x	1.45 x
Pre-filtering	-	FBP
Post-filtering	-	Butterworth Critical Frequency : 0.5Nyquist (0.38cycles/cm) Power : 8
Scatter correction	-	None
Attenuation correction	(Standardization of H/M ratio to MEGP condition)	None

本次假體試驗涵蓋北中南各四家醫院、共十二家，三種廠牌，以及十三種不同的設備型號、六種準直儀。

各醫院之 SPECT 儀器經假體實驗所得之 dicom 數據經計算後，得其轉換係數（Ki），整理如表二所示。

表二、國內十二家醫院使用之SPECT經體實驗結果得到之影像標準化參數

醫院名稱	廠牌	機型	準直儀	轉換係數(Ki)
彰化秀傳紀念醫院	西門子	Symbia T2	LEHR	0.48
彰化秀傳紀念醫院	西門子	Symbia T2	LEGP	0.56
彰化秀傳紀念醫院	西門子	Symbia T2	MEGP	0.93
彰濱秀傳紀念醫院	奇異	Infinia Hawkeye4	LEHR	0.52
彰濱秀傳紀念醫院	奇異	Infinia Hawkeye4	LEGP	0.59
彰濱秀傳紀念醫院	奇異	Infinia Hawkeye4	MEGP	0.93
中山醫學大學醫院	西門子	Symbia T	LEHR	0.49
中山醫學大學醫院	西門子	Symbia T	MELP	0.97
中山醫學大學醫院	奇異	Discovery NM/CT 670 CZT	WEHR	0.37
彰化基督教醫院	奇異	NM/CT 670	LEHR	0.51
彰化基督教醫院	奇異	NM/CT 670	ELEGP	0.81
彰化基督教醫院	奇異	NM/CT 670	MEGP	0.94
台灣大學附設醫院	西門子	Symbia Intervo 6	LEHR	0.58
台灣大學附設醫院	西門子	Symbia Intervo 6	LEGP	0.68
台灣大學附設醫院	西門子	Symbia Intervo 6	MEGP	1.04
輔仁大學附設醫院	奇異	NM/CT 640	LEHR	0.54
輔仁大學附設醫院	奇異	NM/CT 640	ELEGP	0.77
輔仁大學附設醫院	奇異	NM/CT 640	MEGP	0.90
亞東醫院	西門子	Symbia Intervo 6	LEHR	0.57
亞東醫院	西門子	Symbia Intervo 6	MELP	1.00
亞東醫院	奇異	Infinia Hawkeye4	LEHR	0.53
亞東醫院	奇異	Infinia Hawkeye4	LEGP	0.57
亞東醫院	奇異	Infinia Hawkeye4	MEGP	0.97
新光醫院	西門子	Symbia Intevo 6	LEHR	0.57
新光醫院	西門子	Symbia Intevo 6	LEGP	0.65
新光醫院	西門子	Symbia Intevo 6	MELP(MEGP)	1.02
成功大學附設醫院	飛利普	BrightView	LEHR	0.59
成功大學附設醫院	奇異	NM630	LEHR	0.47
成功大學附設醫院	奇異	NM630	MEGP	0.97
成功大學附設醫院	西門子	Symbia T16	LEHR	0.59
成功大學附設醫院	西門子	Symbia T16	MELP	1.05
台南新樓醫院	西門子	Symbia Evo Excel	LEHR	0.58
台南新樓醫院	西門子	Symbia Evo Excel	MELP	1.06
高雄長庚醫院	西門子	Symbia S	LEHR	0.51
高雄長庚醫院	西門子	Symbia S	MELP	0.92
高雄醫學大學醫院	飛利普	BrightView XCT	LEHR	0.61
高雄醫學大學醫院	飛利普	BrightView XCT	MEGP	0.96

IV. 結論

本計畫的完成除了獲得北中南共 12 家醫院所配置的主要廠牌設備 I-123MIBG 心肌造影 HMR 的標準化轉換係數外，在實驗的進行過程中也為各醫院的醫師、放射師同仁進行了一次相當深入的假體實驗流程與 I-123MIBG 心肌造影 HMR 標準化概念的教學，讓大家認識到核醫影像定量數值在疾病診斷的重要性，為未來 I-123MIBG 上市後的臨床推廣與運用建立了良好的基礎。

本計畫只是一個開端，在全台 75 家設有核子醫學科的醫院中，仍有許多的單位尚未進行假體實驗，雖然仍可依目前 12 家醫院完成的實驗數據中，選擇相同廠牌相同的設備與準直儀型號所對應的轉換係數來進行影像標準化。但依全球在推廣 I-123 MIBG 臨床運用最成功的日本經驗來看，日本有超過 700 家醫院進行假體實驗，這些參與實驗的醫療院所不僅能得到自己的單位最正確的轉換係數，更重要的是在臨床醫師或放射師參與假體實驗過程中，也能學習到 I-123 MIBG 影像標準化的正確概念，這是未來臨床運用前十分關鍵的基本功。

因此，我們誠摯建議未來核研所應再投入資源將假體實驗在其它的醫療院所作更廣泛的推廣，相信在 I-123 MIBG 正式上市後，將會更快速有效地在臨床推廣開來。

參考文獻

[1] Agostini D, Verberne HJ, Burchert W, Knuuti J, Povinec P, Sambuceti G et al. I-123-mIBG myocardial imaging for assessment of risk for a major cardiac event in heart failure patients: insights from a retrospective European multicenter study. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2008 35:535 – 546.

[2] Jacobson AF, Senior R, Cerqueira MD, Wong ND, Thomas GS, Lopez VA et al. Myocardial iodine-123 meta-iodobenzylguanidine imaging and cardiac events in heart failure. Results of the prospective ADMIRE-HF (AdreView Myocardial Imaging for Risk Evaluation in Heart Failure) study. J Am Coll Cardiol 2010; 55:2212 – 2221.

[3] Nakata T, Nakajima K, Yamashina S, Yamada T, Momose M, Kasama S et al. A pooled analysis of multicenter cohort studies of 123I-mIBG imaging of sympathetic innervation for assessment of long-term prognosis in heart failure. JACC Cardiovasc Imaging

2013;6:772 – 784.

[4] Verschure DO, Veltman CE, Manrique A, Somsen GA, Koutelou M, Katsikis A et al. For what endpoint does myocardial 123I-MIBG scintigraphy have the greatest prognostic value in patients with chronic heart failure? Results of a pooled individual patient data meta-analysis. Eur Heart J Cardiovasc Imaging 2014; 15:996 – 1003.

[5] Henzlova MJ, Duvall WL, Einstein AJ, Travin MI, Verberne HJ. ASNC imaging guidelines for SPECT nuclear cardiology procedures: stress, protocols, and tracers. J Nucl Cardiol 2016; 23:606 – 639.

[6] JCS Joint Working Group. Guidelines for clinical use of cardiac nuclear medicine (Japanese Circulation Society 2010). https://www.jstage.jst.go.jp/article/circj/76/3/76_CJ-88-0019/ pdf). Accessed 27 Apr 2017 (English digest version)

[7] Treglia G, Cason E. Diagnostic performance of myocardial innervation imaging using MIBG scintigraphy in differential diagnosis between dementia with Lewy bodies and other dementias: a systematic review and a meta-analysis. J Neuroimaging 2012; 22:111 – 117.

[8] King AE, Mintz J, Royall DR. Meta-analysis of 123I-MIBG cardiac scintigraphy for the diagnosis of Lewy body-related disorders. Mov Disord 2011; 26:1218 – 1224.

[9] Nakajima K, Nakata T. Cardiac 123I-MIBG Imaging for clinical decision making: 22-year experience in Japan. J Nucl Med 2015; 56(Suppl 4):11S – 19S.

[10] Flotats A, Carrio I, Agostini D, Le Guludec D, Marcassa C, Schafers M et al. Proposal for standardization of 123I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) cardiac sympathetic imaging by the EANM Cardiovascular Committee and the European Council of Nuclear Cardiology. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2010; 37:1802 – 1812.

[11] Verberne HJ, Feenstra C, de Jong WM, Somsen GA, van Eck-Smit BL, Busemann Sokole E. Influence of collimator choice and simulated clinical conditions on 123I-MIBG heart/mediastinum ratios: a phantom study. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2005; 32:1100 – 1107.

[12] Verschure DO, de Wit TC, Bongers V, Hagen PJ, Sonneck-Koenne C, D' Aron J et al. 123I-MIBG heart-to-mediastinum ratio is influenced by high-energy photon penetration of collimator septa from liver and lung activity. Nucl Med Commun 2015; 36:279 – 285.

[13] Nakajima K, Matsubara K, Ishikawa T, Motomura N, Maeda R, Akhter N et al. Correction of iodine-123-labeled metaiodobenzylguanidine uptake with multi-window methods for standardization of the heart-to-mediastinum ratio. J Nucl Cardiol 2007; 14:843 – 851.

[14] Nakajima K, Okuda K, Yoshimura M, Matsuo S, Wakabayashi H, Imanishi Y et al. Multicenter cross-calibration of I-123 metaiodobenzylguanidine heart-to-mediastinum ratios to overcome camera-collimator variations. J Nucl Cardiol 2014; 21:970 – 978.

失智診斷友善模式
Making diagnosis of dementia friendly

計畫編號：110-2623-E-006-001-NU
計畫主持人：白明奇
e-mail：pair@mail.ncku.edu.tw
計畫共同主持人：鄭順林、曾繁斌、邱百誼、林昆儒
執行單位：國立成功大學

摘要

背景：人口結構老化與醫療進步所賜，失智症盛行率持續成長，失智照護愈顯重要。眾所周知，正確的失智症診斷是完美照護的開始，如何讓更多醫師得以參與失智診斷、並有正確診斷能力，是一個亟待解決的難題。失智症的診斷仰賴病史及理學檢查、認知測驗、生物標記以及持續追蹤。儘管如此，目前臨床醫師在適當時機、做出正確失智症的診斷，仍有距離。國內核研所研製之腦血流及腦神經藥物，搭配核醫智慧影像分析軟體運用於臨床失智症的診斷支持功能具有相當大之助力，融合核醫影像分析及失智症臨床問診資訊，提升影像判讀是未來之發展趨勢。

目的：本整合型計畫將整合 2 個子計畫，期能改善病史、認知測驗、以及神經影像生物標記的精準度與使用時機。

方法：透過文獻回顧、邀請子計畫三(SP3)主持人及國內臨床失智症學、神經影像學、統計學、資訊工程與電機工程學等專家召開專家會議、並透過智能機器建立本土失智病史資料庫以前瞻性累積數據，收集做為診斷主要失智症(阿茲海默氏症、路易氏體症、血管性失智症)的臨床依據，作為 SP3 臨床工作整合 影像流程的基礎；並將出版最新失智症的診斷準則，期能建議失智診療流程中使用核醫智慧影像的最佳時機。

成果：計畫第 1 年規劃專家會議，針對「診斷分類」及「臨床診斷輔助 APP」二主題進行討論。執行期間收集失智症臨床相關文獻，作為 APP 背景資料依據。目前已收集 2014-2020 年間失智症診斷與臨床相關之文獻，共計 35 篇。計劃期間，研究團隊定期召開進度會議。第一年我們安排 2 場專家會議，針對「臨床診斷輔助 APP」內容設計進行討論與意見交流，在 2021 年 4 月 25 日於台南已舉辦了第 1 場專家會議，邀請了神經學科、精神學科、統計學科、核醫學科以及生物科技的專家出席，並針對失智症相關的診斷分類表徵進行的討論並彙整。第 2 場專家會議則是在 2021 年 8 月 14 日於台中舉行，同樣邀請神經學科、精神學科、統計學科與核醫學科、電機學科及巨量數據分析專家。在 2021 年 8 月 21 日與 2021 年 12 月 18 日分別共同主辦「2021 年台南失智照護博覽會」與「第 23 屆熱蘭遮行為神經科學研討會- 友情的夜宴」。另外我們也邀請了電機工程學專家，針對「臨床輔助 APP」的設計內容及資料庫的建立條件提供建議，現階段「臨床輔助 APP」已建立網頁模板(網址 ：http://www.vactainan.somee.com/White/index.aspx)，相信未來在臨床診斷輔助上助益良多。

關鍵詞：核子醫學、失智症、診斷、臨床問診、資料庫、使用時機

Abstract

Introduction: To make an accurate diagnosis of dementia timely is not easy. One reason is that clinical history of persons with cognitive impairment is difficult for most physicians to obtain and the translation of history to the criteria of dementia or specific subtypes of dementia is not straightforward. A lack of not-too expensive and credible biomarkers is another cause, which makes it not easy to complete the goals aforementioned. Ways to facilitate physicians to make a proper and correct diagnosis are urgent, since the prevalence of dementia is rising in almost every country in the world, including Taiwan. Among the biomarkers for dementia diagnosis, neuroimages, including structural, molecular or functional, can provide useful information. As compared with PET scan, other nuclear functional neuroimaging studies, such as ECD SPECT or TRODAT, can be an alternative to strengthen the confidence of clinical diagnosis of dementia and their cost and availability are more acceptable than PET scan.

Aims: The aims of this PPG are target-oriented. For this PPG, three subprojects (SPs) will collaborate with each other to combine clinical information of persons with cognitive impairment or dementia and brain ECD SPECT, TRODAT and MIBG to improve the diagnosis of Alzheimer continuum, Lewy body disease and vascular dementia. To propose an indication for the use of the mentioned neuroimaging studies is also one of the aims. The SP1 aims to build a database for clinical history of dementia syndromes. To collect the updated classification and diagnostic criteria for dementia, mild cognitive impairment, and subjective cognitive decline.

Methods: For SP1, a review article will be done first. Then, three workshops will be arranged to gather suggestions from experts of clinicians, engineers and users to reach a consensus. Based on the consensus, an APP will be developed to collect real-world data and verify the model produced through the workshops. In collaboration with SP2 and SP3, the indication to use the mentioned neuroimaging can come out.

Expectations: We developed an APP draft (website: http://www.vactainan.somee.com/White/index.aspx). This platform will collect clinical history with discriminating ability to differentiate major subtypes of dementia. Potential users, namely clinical physicians who are interested in dementia care, will be trained to use it and upload data to verify its validity.

Keywords: Nuclear Medicine, Dementia, Clinical information, Machine learning, Indication.

I. 前言

Dementia has been a critical issue that people living in an aged society have to face it seriously. Although there is no cure for Alzheimer's disease (AD) and related degenerative dementia currently, ways to slow down the progression, decrease the detrimental effect it may produce, such as behavioral and psychological symptoms, or to improve the quality of people living with dementia and their caregivers have been known. Hence, a timely diagnosis of dementia and its subtype is important, not only for medical treatment or management, but also for non-pharmacological interventions or services delivered by the staff or facilities supported by long term care policy. Obviously, in order to improve the quality of dementia care in Taiwan, a friendly pathway to make a diagnosis of dementia is urgent.

This is a top-down and target orientated proposal aimed to build up a database for clinical history of dementia.

II. 主要內容

In the first year, the PI and the investigators reviewed academic papers and books to write a **review article** on diagnostic procedure for dementia with focus on clinical history. Via the form of **workshop**, we invited **two** groups of experts to come to a consensus on discriminative clinical history of incipient clinical stage of dementia in different subtypes. These results are to be used to correlate nuclear neuroimages as a biomarker. Moreover, potential users (primary care physicians or neurology/ psychiatry residents in training) would have been invited for feedback. Finally, **an APP** is be developed to collect real-world data, **Figure 1**.

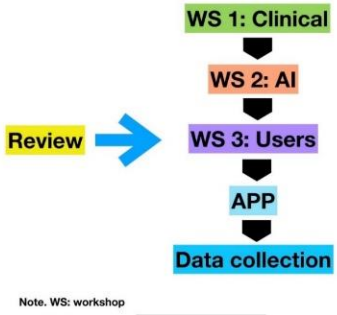


Figure 1. Ways to complete the goals of SP1.

Review literatures and write a review article

The PI and investigators found out academic papers and books related to the aims of this subproject and write a review articles for publication. This work focuses on discriminative clinical history, signs, symptoms or distinctive findings which can help to differentiate different subtypes of dementia.

Experts round-table discussion

The PI arranged two round-table workshops and invited 10 experts to share experiences and reached a consensus for each workshop.

Workshop I round-table discussion. On 25 April 2021, we invited clinicians, including neurologists, psychiatrists, nuclear neuroimaging specialists and neuroradiologists and biomarker experts to join the workshop. The goal is to reach a consensus on **clinical pathway** for a diagnosis of dementia in early clinical stage.

Workshop II round-table discussion. On 14 Aug 2021, those who are experts in the field of machine learning, platform staff and engineers were invited the goal is to reach a consensus on how to **build a platform** for the diagnosis of dementia in early clinical stage.

Develop an APP to collect dementia symptoms for a database

To collect clinical history specific to or of help for subtypes of dementia can be done by top-down or bottom-up approach. For the **former**, it can be done by a check list. From practical viewpoint, only the most frequent seen and discriminative items will be listed, such as REM sleep behavioral disorder and recurrent/ vivid visual hallucination for DLB, impaired episodic memory and getting lost for AD, psychomotor slowness and gait disturbance for vascular dementia, **Table 1**.

Table 1. Examples of potential useful clinical history.

Alzhiemer's disease：evidence of impaired episodic memory: repetitive queries, unable to locate personal items, repeated behaviors, spatial navigation impairment, delusions
Lewy body disease: recurrent and vivid visual hallucination, REM sleep behavioral disorder, parkinsonism, confabulations, daytime hypersomnolence
Vascular dementia：focal neurological signs/symptoms, early sphincter incontinence, psychomotor slowness, gait disorder, memory impairment of subcortical type

Table 2 shows a proposed content. The clinical history to be collected are restricted to those appear in the early two years after the clinical onset. This attempt is to eliminate contamination by further neurological deficits or mixed type dementia which may occur in longer duration of dementia. Moreover, the final version of the items to be collected on the APP are determined by consensus from the formal workshops.

Table 2. The items to be used on the APP.

Case Nr	Site-20-06-25-01 (YY-MM-DD-NR)
Level 0	Age, Gender, Edu
	AOO (younger than 65, etc)
	Mode (progressive, etc)
Level 1	C 01-10 Cognitive impairment(such as impaired episodic memory, aphasia, cognitive fluctuation, etc)
	B 01-10 BPSD (such as delusion, hallucination, depression, agitation, personality change, etc)
	O 01-10 Others (getting lost event, etc)
Level 2	N 01-10 Neuropsychology (profound impairment in recent memory, executive dysfurnction, etc)
	P 01-10 NE/PE findings (parkinsonism, focal signs, pseudobulbar palsy, alien limb, Balint's syndrome, etc)
Level 3	D 01-10 EEG (periodic sharp, fluctuating BA, etc)
	M 01-10 Structural MRI (MTA, PA, PVWMC, CSVD, focal atrophy, stroke, etc)
	S 01-10 ECD SPECT (perfusion deficit in precuneus, posterior pariteal cortex, occipital, prefrontal cortex, etc)
	T 01-10 TRODAT (reduced DAT uptake, etc)
Level 4	Q 01-10 Biofluids (CSF, blood, etc)
	G 01-10 Genetic (ApoE4, PS1, PS2, etc)

Note: AOO: age of onset; BPSD: behavioral and psychological symptoms of dementia; NE: neurological examination; PE: physical examination; BA: background activity; MRI: magnetic resonance image; MTA: mesial temporal atrophy; PA: posterial atrophy; PVWMC: periventricular white metter change; CSVD: cerebral small vessel disease; DAT: dopamine transporter; ECD: Tc-99m ethyl cysteinate dimmer; MIBG: I-123 meta-iodobenzylguanidine

From May 2018 to Apr 2020, Professor Pai leaded five physicians who are experts in dementia diagnosis from four

sites around Taiwan to complete an INER project. These investigators successfully contributed a total of **699 cases**, including 243 cognitively unimpaired, 178 Alzheimer's disease, 149 Lewy body disease, and 129 vascular dementia. The data collected include clinical information, neuropsychological tests, brain MRI, **SPECT ECD and TRODAT, and three papers based on these dates have been published** (Ni 2020, Ni 2021, Ni 2021). In this PPG, the investigators are to help to analyze these data and empower ***the APP*** to be developed.

III. 結果與討論

In the first year, Over the initial six months, we have collected criteria for the diagnosis of specific types of dementia as many as possible. We hold PI meetings regularly. On 25 April 2021, we organized an expert meeting to collect important information to improve the quality of dementia diagnosis making. The information was from 3 neurologists, 1 psychiatrist, 1 nuclear medicine scientist, two industry persons and one statistician, **Figure 2**. Here shows the summary. On 14 Aug 2021, as previously set schedule, we held a meeting to discuss on clinical application and collect comments from potential users, **Figure 3**. Currently, we have had a developer to help us for the LaPlace APP. We also published three papers, based on our previous research sponsored by INER and MoST (Ni 2020, Ni 2021, Ni 2021). We also co-organized the "Tainan Dementia Care Expo 2021" on 21 August 2021 and "The 23rd Zeelandia Symposium on Behavioral Neuroscience (ZSBN)" on 18 December 2021 with success, **Figure 4, Figure 5**. Additionally, PI had 2 lectures for the study introduction at Taiwan Dementia Society (TDS) monthly seminar and the Laplace APP announcement at TDS annual meeting on 08 May 2021 and 30 October 2021. At the next step, based on the information and clinical need, an algorithm has been developed by the statistician and applied to the APP. The APP will be opened to first-line clinicians or primary care physicians to collect data. These data include clinical information, plasma markers, and features extracted from neuroimaging (structural, functional and molecular).

The two workshops had been arranged on schedule and comments from experts and opinion leaders had reached a consensus to develop a platform and an APP, **Figure 6**. This platform will collect clinical history with discriminating ability to differentiate major subtypes of dementia. Potential users, namely clinical physicians who are interested in dementia care, will be trained to use it and upload data to verify its validity.

Figure 2. LaPlace I meeting held on 25 April 2021

Figure 3. LaPlace II meeting held on 14 Aug 2021

Figure 4. Tainan Dementia Care Expo 2021

Figure 5. The 23rd Zeelandia Symposium on Behavioral Neuroscience (ZSBN)

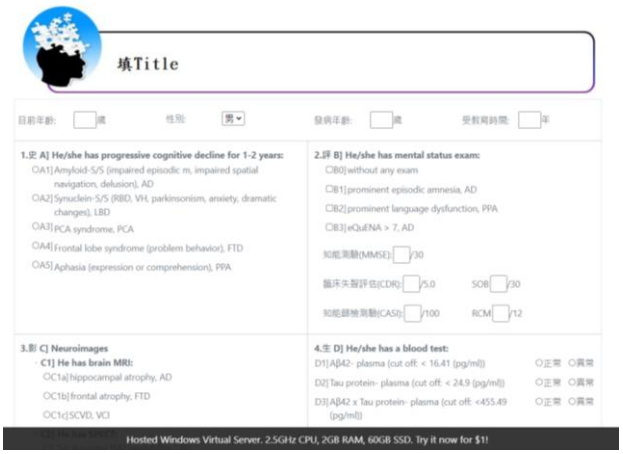


Figure 6. LaPlace, The clinical diagnosis platform

IV. 結論

Through this project and the long-term effect, hopefully, more physicians can make a diagnosis of dementia with better accuracy and confidence.

參考文獻

[1] Ahmed, M.R., Zhang, Y., Feng, Z., Lo, B., Ian, O.T., Liao, H. (2019). Neuroimaging and machine learning for dementia diagnosis: Recent advancements and future prospects. IEEE Reviews in Biomedical Engineering. 12: 19-32.

[2] Ang, T. F. A., An, N., Ding, H., Devine, S., Auerbach, S. H., Massaro, J., et al. (2019). Using data science to diagnose and characterize heterogeneity of Alzheimer's disease. Alzheimer's. Dement (N Y). 5, 264-271.
[3] Avants, B.B.., Cook, PA., Ungar, L., et al. (2010). Dementia induces correlated reductions in white matter integrity and cortical thickness: A multivariate neuroimaging study with sparse canonical correlation analysis. NeuroImage. 50: 1004-1016.
[4] Bahia, V.S.., Takada, LT., Deramecourt, V. (2013). Neuropathology of frontotemporal lobar degeneration. Dement Neuropschol. 7: 19-26.
[5] Breitve, M. H., Chwiszczuk, L. J., Brønnick, K., Hynninen, M. J., Auestad, B. H., Aarsland, D., et al. (2018). A longitudinal study of neurocognition in dementia with Lewy bodies compared to Alzheimer's disease. Front. Neurol. 9, 124.
[6] Chiu, P. Y., Hsu, M. H., Wang, C. M., Tsai, C. T., Pai, M. C. (2017). Visual hallucinations in Alzheimer's disease is significantly associated with clinical diagnostic features of dementia with Lewy bodies. PLos. ONE. 12, e0186886.
[7] Chiu, P. Y., Hung, G. U., Wei, C. Y., Tzeng R. C., and Pai M. C. (2020). Freezing of Speech Single Questionnaire as a Screening Tool for Cognitive Dysfunction in Patients with Dementia with Lewy Bodies. Front. Aging Neurosci., 12, 65.
[8] Chui, H. C., Mack, W., Jackson, J. E., Mungas, D., Reed. B. R., Tinklenberg, J., et al. (2000). Clinical criteria for the diagnosis of vascular dementia: a multicenter study of comparability and interrater reliability. Arch. Neurol. 57, 191-196.
[9] Falahati, F., Ferreira, D., Soininen, H., Mecocci, P., Vellas, B., Tsolaki, M., et al. (2016). The effect of age correction on multivariate classification in Alzheimer's disease, with a focus on the characteristics of incorrectly and correctly classified subjects. Brain. Topography. 29, 296-307.
[10] Forman, M.S, Farmer, J., Johnson, J.K., et al. (2006) Frontotemporal dementia: clinicopathological correlations. Ann Neurol. 59: 952-962.
[11] Huang, L., Jin, Y., Gao, Y., Thung, K.H., Shen, D., and Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. (2016). Longitudinal clinical score prediction in Alzheimer's disease with soft-split sparse regression based random forest. 46, 180-191.
[12] Iadecola, C., Duering, M., Hachinski, V., Joutel, A., Pendlebury, S. T., Schneider, J. A., et al. (2019). Vascular cognitive impairment and dementia. J. Am. Coll. Caridiol. 73, 3326-3344.
[13] Khan, A., Zubair, S. (2020) An improved multi-modal based machine learning approach for the prognosis of Alzheimer's disease. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. (in press)
[14] Kundu, M. G., and Harezlak, J. (2019). Regression trees for longitudinal data with baseline covariates. Biostat. Epidemiol. 3, 1-22.
[15] Matsuda, H. (2007a). Role of neuroimaging in Alzheimer's disease, with emphasis on brain perfusion SPECT. J. Nucl. Med. 48, 1289-1300.
[16] Matsuda., H., Mizumura, S., Nagao, T., Ota, T., Iizuka, T., Nemoto, K., et al. (2007b). Automated discrimination between very early Alzheimer's disease and controls using an easy z-score imaging system for multicenter brain perfusion single-photon emission tomography. Am. J. Neuroradiol. 28, 731-736.
[17] McKeith, I. G., Boeve, B. G., Dickson, D. W., Halliday, G., Taylor, J. P., Weintraub, D., et al. (2017). Diagnosis and management of dementia with Lewy bodies: Fourth consensus report of the DLB Consortium. Neurology. 89, 88-100.
[18] McKhann, G. M., Knopman, D. S., Chertkow, H., Hyman, B. T., Jack, C. R. Jr, Kawas, C. H., et al. (2011). The diagnosis of dementia due to Alzheimer's disease: recommendations from the National Institute on Aging-Alzheimer's Association workgroups on diagnostic guidelines for Alzheimer's disease. Alzheimers. Dement. 7, 263-269.
[19] Nelson, P.T., Dickson, D.W., Trojanowski, J.Q., et al. (2019) Limbic-predominant age-related TDP-43 encephalopathy (LATE): consensus working group report. Brain. 142(6): 1503-1527.
[20] Ni, Y.C., Tseng, F.P., Pai M.C., Hsiao I.T., Chiu P.Y., Hung, C.G., et al. (2020) Deep Learning Model to Predict Alzheimer's Disease Using a Small Number of Tc-99m-ECD SPECT Images. Ann. Nuc. Med. Mol Imag. 33(4): 231-243.
[21] Ni, Y.C., Tseng, F.P., Pai M.C., Hsiao I.T., Lin, K.J., Lin, Z.L., et al. (2021) Recognize Alzheimer's disease by transfer learning from FDG PET to ECD SPECT images. Ann. Nucl. Med. Jun 2.
[22] Ni, Y.C., Tseng, F.P., Pai, M.C.,Hsiao. I.T.,Lin, K.J., Lin, Z.L., et al. (2021) The feasibility of differentiating Lewy body dementia and Alzheimer's disease by deep learning using ECD SPECT images. Diagnostics. 11(11): 2091.

跨域合作與風險溝通(I)

應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發 II
A radiation hardening analog-to-digital mixed-signal circuit and electronic design automation development for low orbit satellite applications II

計畫編號：110-NU -E-002-001 –NU
計畫主持人：陳信樹博士
e-mail：hschen@ntu.edu.tw
計畫共同主持人：蔡坤諭博士
計畫參與人員：陳昱霖、蔡佳勳、蔡孟智、梁淳皓
執行單位：國立台灣大學電機系電子工程研究所

摘要

本計畫目標為在類比數位訊號轉換器電路上實現抗輻射功能，並完善相關電子自動化設計軟體與實驗流程。本計畫利用模擬軟體建立電晶體模型，以此預測不同布局方式之電晶體電性與抗輻射能力，並藉由量測數據最佳化模型。實際電晶體量測部分，將不同佈局電晶體集成於晶片中，並進行實驗與量測，藉此得知布局對電晶體電性與抗輻射能力之影響。另外本計畫設計並測試商用類比數位訊號轉換器，藉此找出輻射敏感電路部分，以利達成抗輻射之功能。

關鍵詞：抗輻射、類比/數位轉換器、混合訊號晶片、電子設計自動化

Abstract

The goal of this project is to realize the anti-radiation function on the analog digital signal converter circuit, and to improve the related electronic automation design software and experimental process. This project uses simulation software to build transistor models to predict the electrical properties and radiation resistance of transistors in different layouts, and optimize the model based on measurement data. In the actual transistor measurement part, transistors with different layouts are integrated into the chip, and experiments and measurements are carried out to learn the influence of the layout on the electrical properties and radiation resistance of the transistors. In addition, this project designs and tests commercial analog digital signal converters, so as to find out the radiation sensitive circuit parts, so as to achieve the function of radiation resistance.

Keywords: Radiation harden, analog-to-digital converter, mixed-signal circuit, electronic design automation.

I. 前言

運作於低軌道衛星上的晶片，由於受到太空輻射的影響，導致晶片功能產生劣化與異常，輻射對於晶片的影響主要分為總劑量效應(Total Dose Effect, TDE)與單事件效應(Single Event Effect, SEE) [2]。

總劑量效應(TDE)主要分為位移損傷(Displacement Damage，DD)和總電離劑量(Total Ionized Dose，TID)，位移損傷是因為輻射造成晶格缺陷，使電晶體特性改變[3] [4]，而總電離劑量是當電晶體經過輻射照射後，晶片氧化層捕獲電荷，當電荷在淺溝槽絕緣處(STI)累積一定量時，所累積的電荷形成兩個平行寄生漏電路徑，使電晶體汲極(drain)到源極(source)漏電流增加[6]。

在抗輻射電晶體模型建立的部分，本計畫使用 in-house 的最佳化 tool，來曲線擬合 SPICE 模型的電性，藉此建立最佳電晶體電器特性並得知模擬與實驗結果之差異。

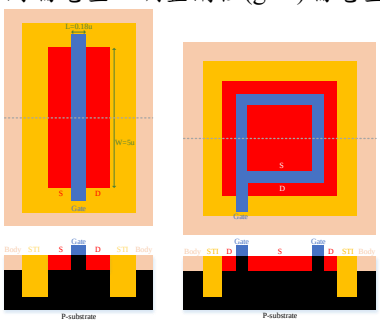
電晶體電性量測與輻射實驗部分，我們將不同布局之電晶體整合於晶片中，量測輻射照射前後電晶體特性，使用鈷 60 作為輻射源，利用距離與時間調整照射的總劑量，並在照射前後進行電性量測。

在商用類比數位訊號轉換器輻射測試部分，設計並量測商業 ADCs 性能，以此建立 ADC 性能量測環境，並且利用此電路得知 ADCs 輻射敏感電路。

II. 主要內容

封閉式佈局電晶體(Enclosed Layout Transistors，ELT)是目前被用來抵抗總電離劑量(TID)影響最有效的方式，其結構避免產生源極端到汲極端的漏電流的洩漏路徑[6]。封閉幾何結構的電晶體和保護環(guard ring)可以避免因輻射引起的漏電流，如圖一(b)所示[7]。

在電晶體　實驗設計方面，選擇不同型態封閉式佈局電晶體作為實驗組，傳統電晶體作為實驗對照組，如圖一(a)呈現，將不同型態的電晶體，如圖一(b)，集成到同一晶片上，作為固定的平台，在照射輻射前後，進行電晶體電性量測，主要觀察電晶體汲極端電流 Id，固定汲極與源極間端電壓，調整閘極(gate)端電壓。



(a)　　(b)

圖一 (a)傳統電晶體 (b)環形源電晶體

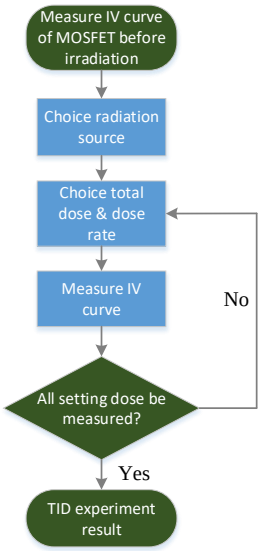
在量測基本電晶體電性之後，對晶片進行輻射照射實驗，步驟如圖二為鈷 60 伽瑪射線照射流程圖。選用鈷 60 伽瑪射線作為輻射源，選擇特定劑量率進行照射。將照射後的待測物取出，量測照射後電晶體電性變化的數據並記錄。重複上述步驟，並藉由照射劑量與照射時間

改變不同總劑量(不同照射時間)，量測並記錄照射待測物，最後探討不同電晶體佈局對抗輻射能力之影響。

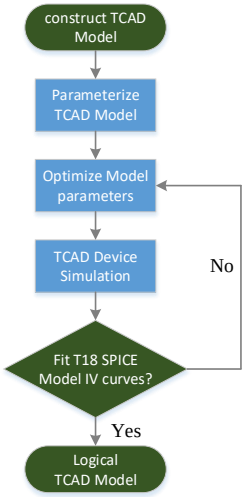
在電晶體模型建立的部分，如圖三為本計畫電晶體模型建立的流程圖。在一開始，先建立一個基本的 TCAD 電晶體模型與參數化。最佳化的過程中，調整電晶體參數，並依照參數建立模型、執行 TCAD 元件模擬。模擬完後，使用 NMSE 公式計算 TCAD 及 SPICE 模型的電性誤差，調整參數直到電性誤差小於特定容忍值。

圖四(a)為使用 TCAD 軟體自行開發出的 TCAD 電晶體模型，其中電晶體閘級長(gate length)為 0.18 m，電晶體閘級寬(gate width)為 5 m，電源電壓 VDD 為 1.8V。圖四(b)呈現最佳化後電晶體電性的結果，NMSE 的誤差約在 1%。圖四(b)上為電晶體 on state 的電性結果，紅線為商用 CMOS 0.18 m 製程模擬結果，藍線則是使用 TCAD 軟體最佳化後結果，圖四(b)下則呈現電晶體 off state 的電性結果。

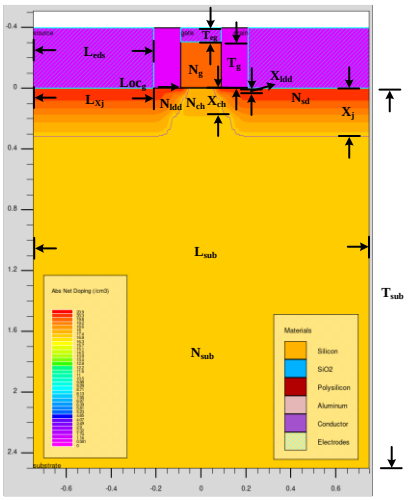
在 ADC 性能量測與輻射實驗部分，將所需量測之 ADC 接上量測儀器後，針對不同輸入頻率去量測 ENOB、DNL、INL 等 ADC 相關性能，TID 效應定性測試部分，利用質子束照射至 70krad，並監測其靜態功耗，以觀察其對於 TID 效應之定性結果，ADC 量測詳細流程如圖五。



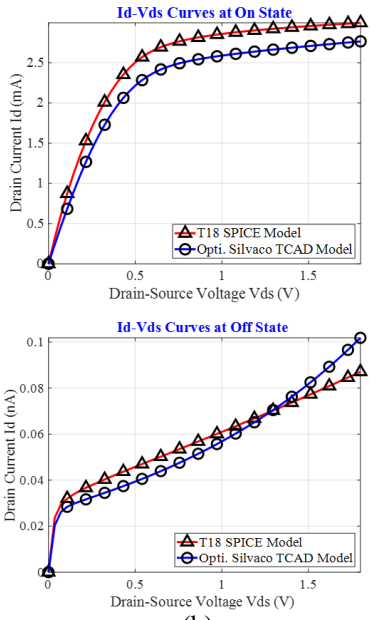
圖二 鈷 60 伽瑪射線照射流程圖



圖三 電晶體模型建立流程圖

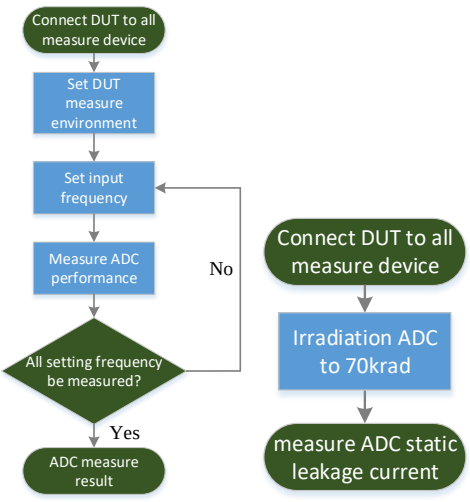


(a)



(b)

圖四 (a)自行開發之電晶體模型(b)電晶體模型建立最佳化結果

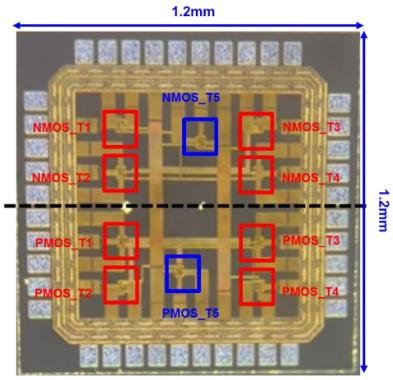


(a) (b)

圖五 (a) ADC 性能量測流程 (b)TID 定性實驗流程

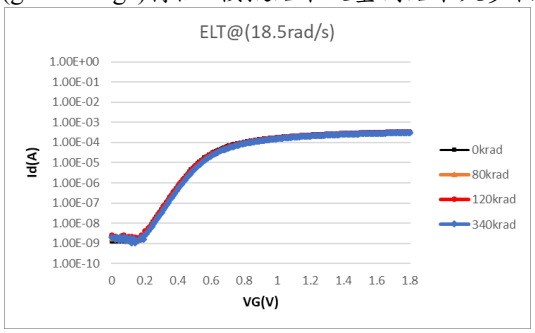
III. 結果與討論

以下簡介電晶體照射模擬與實驗結果。圖六為本計畫下線的晶片圖，分別將不同的佈局之電晶體放置在晶片中，並以此晶片為平台進行電晶體電性量測與輻射照射實驗。

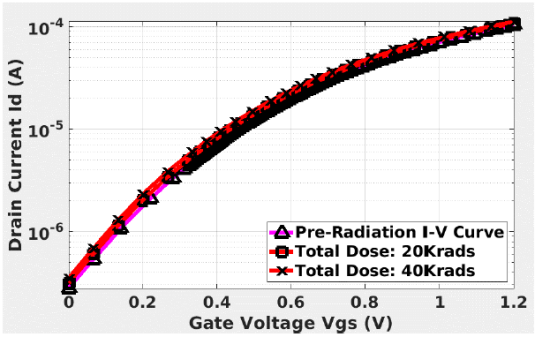


圖六 晶片圖

圖七則呈現環形電晶體照射鈷 60 伽瑪射線模擬與量測電性圖(I-V curve)結果，固定汲極端及源極端之電壓，改變閘極端的電壓，量測汲極端的電流，將量測結果取對數和模擬結果做比較，汲極電流(drain current) 對閘極電壓(gate voltage)特性，模擬結果及量測結果大多相符。



(a)



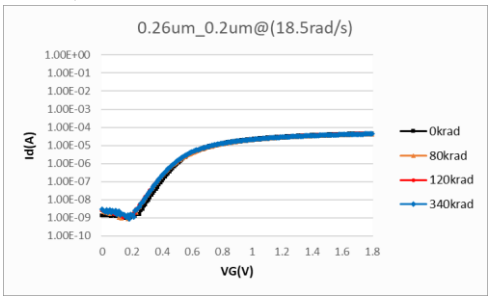
(b)

圖七 (a) ELT 輻射照射實驗結果 (b)ELT 照射照射模擬結果

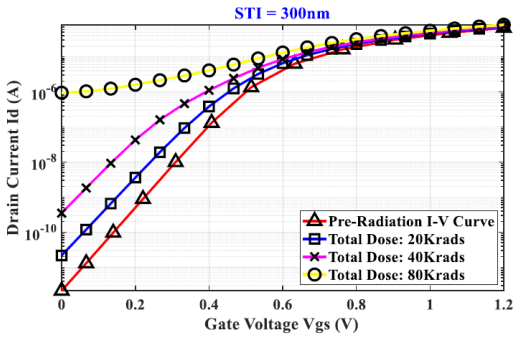
環形電晶體實際量測部分，在閘極端電壓 0-0.2V 區間，可能由於保護電路產生之漏電流大於電晶體產生之漏電流，導致汲極電流無法量測小於十的負九次方安培，抗輻射性能部分則與模擬相符，成功達到抵抗輻射影響之功能。

圖八則呈現傳統電晶體照射鈷 60 伽瑪射線模擬與量測電性圖(I-V curve)結果，並使用與環形電晶體相同方式量測，模擬結果及量測結果不相符。

傳統電晶體實際量測部分，除閘極端電壓 0-0.2V 區間與環形電晶體有相同電性不符的情況外，傳統電晶體經伽瑪射線照射後並未如預期出現漏電流，可能原因為照射時測試晶片腳位浮接，另電子電動無法及時分離而重新複合，導致輻射現象未能明顯出現。



(a)



(b)

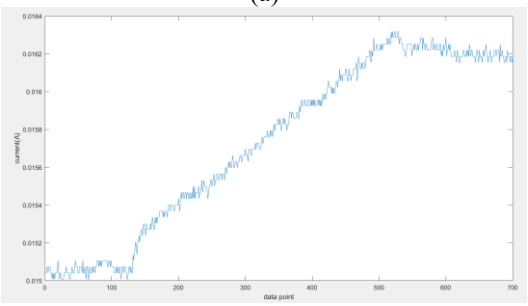
圖八 (a)傳統電晶體照射實驗結果 (b)傳統電晶體照射模擬結果

以下簡介本計畫設計之 ADC 性能量測與輻射結果。此 ADC 採用 SAR ADC 架構，設計規格為 12bits,1MS/s，此 ADC 將作為本計畫抗輻射類比數位轉換器之原型，並使用訊號產生器、邏輯分析儀、電源供應器與電腦進行性能量測，其性能量測結果如圖九(a)。

此 ADC 已有進行初步 TID 效應實驗，其實驗為在 ADC 給定 Vdd=1.8V, clock 與輸入訊號皆接地情況下，利用質子束照射 70krad 並觀察其漏電流變化，其電流自 15mA 上升至 16mA，如圖九(b)。

Fin (kHz)	Fs (MHz)	SNR (dB)	SNDR (dB)	SFDR (dB)	THD (dB)	ENOB (bit)	DNL (LSB)	INL (LSB)
1.99279	1	67.72	64.75	73.31	-67.80	10.46	+3.48 / -1	+2.66 / -2.61
2.99987	1	66.46	57.39	63.18	-57.18	9.24	+2.9 / -1	+3.3 / -2.8
4.99572	1	67.12	66.44	83.24	-74.89	10.75	+2.46 / -1	+2.02 / -1.8
49.9572	1	65.73	64.03	74.32	-68.92	10.34	+1.94 / -1	+1.74 / -1.75
122.100	1	64.63	63.41	77.74	-69.53	10.24	+2.65 / -1	+2.1 / -1.86

(a)



(b)

圖九 (a)其他輸入頻率量測結果 (b)初步輻射照射結果

IV. 結論

經過本次計畫實驗歸納出以下幾點作為本計畫的結論:

建立電晶體模型與電晶體實際量測部分,可能因為測試電路使用 ESD 保護電路產生之漏電流,導致電晶體在接近關閉時之漏電流模擬結果不符。

輻射效應實驗部分,傳統電晶體所量測之輻射效應與模擬並不相符,可能原因為由於照射期間電晶體為浮接,輻射產生之電子電洞並不能有效分離而快速復合,導致其變化並未被有效量測。

ADC 輻射效應實驗部分,本次定性實驗結果顯現明顯總電離劑量效應,未來將更進一步進行定量實驗,另外本計畫實驗令我們確立此種實驗方法可觀測到 TID 效應,未來若無法排除鈷 60 實驗流程問題,將採用此種實驗流程。

參考文獻

[1] He Baoping, Wang Zujun, Sheng Jiangkun, and Huang Shaoyan, "Total Ionizing Dose Radiation Effects On NMOS Parasitic Transistors In Advanced Bulk CMOS Technology Devices," Journal of Semiconductors, vol. 37, no. 12, pp. 124003-1 - 124003-6, Dec. 2016.

[2] 黃楓台及林俊良"太空輻射對衛星任務影響及因應之道"台灣原能會核能所能源資訊平台 http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=YW5hbHlzaXM%3D&id=MTk3#_ftn2

[3] NASA Analog Missions https://www.nasa.gov/analogs/nsrl/why-space-radiation-matters

[4] Alter Technology https://wpo-altertechnology.com/displacement-damage-testing/

[5] H. J. Barnaby, "Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies," IEEE Trans. Nucl. Sci, vol. 53, no. 6, Dec. 2006.

[6] N. Nowlin, J. Bailey, B. Turfler, and D. Alexander, "A Total-Dose Hardening-By-Design Approach For High-Speed Mixed-Signal Cmos Integrated Circuits," International Journal of High-Speed Electronics and Systems., vol. 14, no. 2, pp.367-378, 2004.

[7] R. N. Nowlin, S. R. McEndree, A. L. Wilson, and D. R. Alexander, "A New Total-Dose-Induced Parasitic Effect in Enclosed-Geometry Transistors," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 6, pp. 2495–2501, Dec. 2005.

[8] C.-M. Zhang, F. Jazaeri, G. Borghello, S. Mattiazzo, A. Baschirotto, F. Faccio, and C. Enz, "Characterization and Modeling of Gigarad-TID-Induced Drain Leakage Current of 28-nm Bulk MOSFETs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 66, no. 1, pp. 38–47, Jan. 2019.

X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比原件製作應用 III
X-ray Lithography Proximity Effect Correction Technologies and Applications in High-precision High-aspect-ratio Component Fabrication III

計畫編號：110-NU-E-002-002-NU
計畫主持人：蔡坤諭
e-mail：ktsai@ntu.edu.tw
計畫共同主持人：李昭德、許博淵
協同研究人員：李佳翰
計畫參與人員：錢盛偉、蔡佳勳、李建霖、柯志瑋、陳儀儒
執行單位：國立臺灣大學電機工程學系暨研究所

摘要

相對於深紫外光微影(deep ultraviolet lithography, DUVL)與極紫外光微影(extreme ultraviolet lithography, EUVL)，X-ray/EUV 微影(X-ray lithography, XRL)因其曝光波長對一般物質具有相當高的穿透能力，非常適用於製作高深寬比的元件，例如高性能光學繞射元件與微機電元件等，可大幅減少微影之外鍍膜與蝕刻等製程的複雜度與困難度。然而高性能元件的寬度控制也需要相當精準，傳統 X-ray/EUV 微影受光罩製作誤差及近場繞射種種效應的影響，造成製像誤差過大，影響元件性能。本計畫嘗試研究軟 X-ray/EUV 及以下波段光罩製程中的電子束散射，與軟 X-ray/EUV 及以下波段曝光近場繞射等現象作高精度模擬模型校準，及高效能數值最佳化方法作鄰近效應修正(proximity effect correction)，並於國家同步輻射研究中心進行實際軟 X-ray/EUV 及以下波段微影，驗證製作高精準度高解析度之週期性圖案，及應用於前瞻製程記憶體相關元件和液體過濾濾網的可能性。本年度研究中，我們提出一種利用氦離子束直寫進行關鍵微影製程之軟 X-ray/EUV 及以下波段光源光罩製作方法以降低製像誤差，並建立粒子束散射模擬和軟 X-ray/EUV 及以下波段曝光近場繞射模擬以利後續光罩圖案修正和製作，也初步製作可用於軟 X-ray/EUV 及以下波段曝光之週期性圖案光罩及液體過濾濾網應用之原型樣本並進行奈米金溶液過濾測試，此外我們亦與儀科中心合作設計並製作軟 X-ray/EUV 及以下波段曝光用之真空腔體，同時國家同步輻射研究中心之軟 X-ray/EUV 及以下波段光源之設備參數亦有初步確認。

關鍵詞：X-ray 微影，帶電粒子束微影，鄰近效應修正，高深寬比，光罩。

Abstract

As compared to deep ultraviolet lithography (DUVL) and extreme ultraviolet lithography (EUVL), most regular process materials are relatively transmissive to the exposure wavelengths in soft X-ray (EUV) and beyond lithography. This makes it capable of fabricating high-aspect ratio structures, such as those in high-performance diffractive optical elements and MEMS devices. The difficulties and complexities of non-lithograhpic processes such as deposition and etching can be significantly alleviated. However, high-performance devices usually also require very precise critical dimension control. The patterning fidelity of conventional soft X-ray (EUV) and beyond lithography is susceptible to mask fabrication errors and near-field diffraction effects. The device performances are adversely affected. This project aims at investigating the electron scattering phenomena in soft X-ray (EUV) and beyond mask fabrication and near-field diffraction in soft X-ray (EUV) and beyond exposure for high-precision simulation model calibration, and efficient numerical optimization techniques for proximity effect correction. Exposure experiments will be conducted at NSRRC for the fabrication of the large arrays of periodic structures which is suitable for fabrication of advanced memory devices. The potential application on liquid filtration by fabricated periodic nanopores filter has also been investigated. In this project, a method utilizing helium ion beam direct write patterning to perform the critical process of soft X-ray (EUV) and beyond mask fabrication is proposed to improve patterning fidelity. The particle beam scattering simulation and X-ray/EUV near-field diffraction simulation are also established to construct the subsequence correction process for mask pattern designed. The prototype sample for liquid filtration and mask with periodic structures for soft X-ray (EUV) and beyond exposure has been fabricated and the gold nano particle solution filtration experiment has been conducted to preliminary confirm the potential application on nanopore-based solution filter. Besides, we have also collaborate with Taiwan Instrument Research Institute to design and fabricate the chamber for soft X-ray (EUV) and beyond lithography system, and the soft X-ray (EUV) and beyond light source equipment parameter for lithography have been confirmed at National Synchrotron Radiation Research Center.

Keywords: X-ray lithography, charged particle beam lithography, proximity effect correction, high-aspect-ratio, photomask.

I. 前言

摩爾定律描述計算硬體歷史上的一個長期趨勢：積體電路上可以相對低價置入的電晶體數量大約每兩年增加一倍[1]。英特爾公司的聯合創始人和名譽主席 Gordon E. Moore 博士首先在 1965 年的一篇開創性文章中提出[2]，並 IEDM[3]、SPIE 微影技術研討會[4]和 ISSCC[5]中持續討論近 40 年。在所有演講中，微影作為

半導體製造中定義電路圖像的關鍵製程，始終被認為是限制摩爾定律持續有效的關鍵技術和經濟因素之一。甚至可以說，摩爾定律的過去和未來與微影技術的不斷發展和突破有著非常密切的聯繫。

目前，領先的積體電路製造商所採用的光學投影式微影技術(OPL)，使用深紫外線(DUV)波段的曝光波長(波長=193 nm)、NA 接近 0.95 的高數值孔徑投影透鏡、離軸照明和浸潤技術(n=1.437)[6]，使得在一次曝光能中解析出密度高達 45 nm 的半間距(HP)的電路圖案。一個典型的光學式投影微影系統和浸潤式透鏡的示意圖如圖 1 所示[7]。由於波的繞射，最小可分辨的半間距是

$$0.5\frac{\lambda}{\mathrm{NA_p}\cdot n\cdot(1+\sigma)}$$

其中σ為部分同調係數，等於照明和投影光學元件之間的 NA 比（即σ=NAp/NAi）[8]。由於材料上的重大困難，進一步降低 DUV 波長和增加浸潤液的折射率在經濟上已被認為不可行，而 NAp 和σ也已提高到接近其理論極限（均為 1.0），因此，人們普遍認為 45 奈米半間距技術節點（商業上又稱 "28 奈米節點"）是單次曝光 OPL 的最後一個節點。2011 年版的《國際半導體技術藍圖》（ITRS）[9]中已經預測到，後續將採用雙重和多重製像技術，使 OPL 解析度擴展到 32 奈米、22 奈米和 16 奈米半間距技術節點。圖 2 所示為各種間距分割製造流程和結果的示意圖。目前(截至 2016 年)，26 奈米至 32 奈米半間距的前瞻製程節點(又稱 "14 奈米節點 "或 "16 奈米節點")確實採用了雙重製像技術。然而，在 12 奈米半間距節點以下，利用多重製像 OPL 相關的製程複雜度和成本很可能無法衡量[10][11]，非 OPL 技術，如極紫外投影光刻技術（EUVPL）[12]和電子束直寫微影技術（EBDWL）[13]等無光罩曝光技術，也應在 2017 年至 2021 年期間深入研究，以取代或協助 OPL[14]（如 ITRS 2015 年微影技術藍圖中的圖 3 和圖 4[15]），同時和本計畫之時程相呼應。然而，與傳統中 EUVPL 和 EBDWL 於製造奈米級結構的能力相當強的印象相反，兩者在 12 奈米半間距節點以下也都存在一些解析度問題。

相對於深紫外光微影(deep ultraviolet lithography, DUVL)與極紫外光微影(extreme ultraviolet lithography, EUVL)，X-ray/EUV 微影(X-ray lithography, XRL)因其曝光波長對一般物質具有相當高的穿透能力，非常適用於製作高深寬比的元件，例如高性能光學繞射元件與微機電元件等，可大幅減少微影之外鍍膜與蝕刻等製程的複雜度與困難度。然而高性能元件的寬度控制也需要相當精準，傳統 X-ray/EUV 微影受光罩製作誤差及近場繞射種種效應的影響，造成製像誤差過大，影響元件性能。本計畫嘗試研究軟 X-ray/EUV 及以下波段光罩製程中的電子束散射，與軟 X-ray/EUV 及以下波段曝光近場繞射等現象作高精度模擬模型校準，及高效能數值最佳化方法作鄰近效應修正(proximity effect correction)，並於國家同步輻射研究中心進行實際軟 X-ray/EUV 及以下波段微影，驗證製作高精準度高解析度之週期性圖案，及應用於前瞻製程記憶體相關元件和液體過濾濾網的可能性。

II. 主要內容

本計畫旨在研究軟 X-ray/EUV 及以下波段光罩製造中的電子散射現象和軟 X-ray/EUV 及以下波段曝光中的近場繞射現象，以便進行高精度的模擬模型校準，以及用於鄰近效應修正的高效數值最佳化技術，特別是藉由延伸為極紫外光(EUV)和電子束直寫(EBDW)微影技術密集開發的各種製像模擬和解析度增進技術，以用於奈米積體電路的大量製造。

本計畫規劃三個年度，並且為確實達成本計畫的主要目標，另外仔細定義出三項工作項目(如表 1)。這三項分別是 (1) 軟 X-ray/EUV 及以下波段光罩製程和電子束近鄰近效應修正及氦離子束直寫製像；(2) 軟 X-ray/EUV 及以下波段近場繞射模擬和微影鄰近效應修正；(3) 軟 X-ray/EUV 及以下波段微影技術用於大範圍高解析度週期性圖案陣列。透過仔細設計這些工作項目來銜接過去開發的鄰近效應修正方法[16][17][18][19]和鄰近效應建模與模擬方法[20][21][22][23][24]，以結合 X-ray 微影光罩和粒子束微影對 X-ray 光罩製作的需求，並且研究微影製像真確度與所製造結構性能的相互影響[25][26][27]。

III. 結果與討論

傳統的 X-ray 光罩製造通常利用電子束微影製作。在軟 X-ray/EUV 及以下波段光罩製程和電子束近鄰近效應修正及氦離子束直寫製像中，本計畫研究並提出替代方案—利用氦離子束直寫方法製作光罩。氦離子束直寫相較於傳統電子束有幾項優勢，如較小的聚焦範圍，較低的鄰近效應，以及較低的曝光劑量。因此，理論上擁有使用氦離子束微影製作能有更高的解析度、較佳的製像真確度和產能。此外，本計畫預計建立利用軟 X-ray/EUV 及以下波段光源的 Talbot lithography(TL)曝光腔體，TL 是一種光學微影技術[28]，能夠以高產量製造奈米級解析度任意形狀的二維週期結構。它類似於 EUV 干涉微影技術（EUV-IL），但不需要複雜的光學系統。它的優點是可以引入更多入射光束的繞射階數，因此可以提高效率。此外，由於 Talbot effect 的自成像特性，TL 可以在光罩和晶圓之間有相當大的工作距離。通過在 TL 中引入多個波長(如前年計畫所提的消色差 Talbot 微影技術，ATL），可以進一步提高聚焦深度、曝光效率和最小間距。廣義 TL 的機制和相應的光罩設計原理如圖 5-7。於本年度成果中，基於前二年建立的氦離子束微影模擬機制、ATL 光罩結構的氦離子束散射模型和光阻模型(如圖 8-11 及表 2)，並利用氦離子束直寫微影及氦離子束銑削製作 ATL 光罩原型的結果如圖 12-14 所示，及嘗試進行較大範圍(1-10 微米平方)的樣本製作以測試大面積製程開發的可行性(如圖 15)，並提出一種先微影所需圖案及支撐框架後蝕刻的製程(如圖 16-17)以提高樣本的強度避免在大範圍樣本的後續製程或使用上破裂，並進一步探討週期性奈米結構於半導體製造中液體濾網的應用(說明於後續段落)。此外為了提升基於 Talbot effect 的微影模擬在光罩結構方面的準確性，本年度計畫於 NSRRC 進行穿透率量測實驗取得並透過最佳化方法和光罩材料之光學參數模型擬合，以獲得 TL 光罩的光學和結構特性的精確參數(如圖 31-34、表 4)。

而在軟 X-ray/EUV 及以下波段近場繞射模擬和微影鄰近效應修正工作項目中，主要探討軟 X-ray/EUV 及以

下波段微影中的近場繞射模擬方法，關鍵模型參數的校正，以及高效能的鄰近效應修正技術。為提高軟 X-ray/EUV 及以下波段繞射模擬精準度以利後續微影模擬及修正，於光罩附近的電磁場分布採用較嚴謹的有限時域差分電磁模擬來計算(如圖 18-19)，離光罩較遠至光阻內的能量分佈則是由近場（菲涅爾）繞射公式計算(如圖 20)，以求在保持精度的同時提升模擬速度。至於軟 X-ray/EUV 及以下波段微影鄰近效應修正的部分，本計畫開發一修正程序，用以補償由繞射引起的幾何製像失真，以減少邊緣放置誤差，提高整體製像的真確度。本計畫運用前兩年度建立的模擬技術應用至廣義 TL，初步的微影模擬結果如圖 21-22，經過鄰近效應修正技術後之模擬結果如圖 23-24，可有效增加製像真確度，未來將會研發加速運算技術及長距離模擬技術，以提升 TL 模擬速度、拓展可用波段和最佳化參數以及擴大可模擬圖案尺寸和結構。

最後在軟X-ray/EUV及以下波段微影技術用於大範圍高解析度週期結構上，經本計畫評估後，將申請利用 NSRRC 現有的軟 X-ray/EUV 及以下波段光束線及實驗設備，並與國家同步輻射研究中心的人員合作調整設備、儀器參數以提升後續實際微影驗證之可行性。此外，本計畫與國研院儀科中心(TIRI)合作，建造 TL 腔體，在本工作項目中將使用該腔體在國家同步輻射研究中心進行 TL 曝光，以製造大範圍高解析度週期結構，詳細設計和製造的腔體如圖 25-26。此外，本年度計畫亦探討 TL 微影可製造之週期性奈米孔洞結構進行半導體製程中使用之液體濾網的應用。藉由使用平均直徑為 30.6 奈米的金奈米粒子溶液進行過濾實驗，我們評估利用氦離子束直寫製像所製造的奈米孔洞結構原型(如圖 27)作為液體過濾濾網的效能和潛力。該過濾實驗使用自製過濾設備進行(如圖 29-30)，並透過蠕動泵來輸送溶液。收集足夠過濾溶液之後，用電感耦合等離子體質譜法（ICP-MS）測量過濾後的溶液中殘留的金粒子的濃度(如圖 28)。ICP-MS 的結果顯示，奈米孔洞結構有潛力用來過濾奈米級的受汙染液體。初步結果表示，該週期性結構可以成為利用軟 X-ray/EUV 及以下波段光源進行 TL 微影的實際應用，並可用於基於奈米孔洞的半導體製程液體濾網。

IV. 結論

本研究計畫完成了第二年度預期的工作項目，於第一項 X-ray 光罩製程和電子束近鄰近效應修正及氦離子束直寫製像中，我們利用氦離子束直寫進行關鍵微影製程之光罩製作並開發可用於 ATL 光罩之製程，並在第二項工作項目建立 ATL 近場繞射模擬以利後續光罩圖案修正和製作。而第三項 X-ray 微影技術用於精密高深寬比結構，亦有和 TIRI 合作建置 ATL 腔體，並和國家同步輻射研究中心確認EUV/X-ray光源及相關實驗設備參數，已確立未來實際進行 ATL 將使用之程序。

參考文獻

[1] J. R. Maldonado, M. Peckerar, “X-ray lithography: Some history, current status and future prospects,” Microelectronic Engineering 161, 87-93, 2016

[2] G. Moore, “Cramming more components onto integrated circuits,” Electronics 38(8), 1965

[3] G. Moore, “Progress in digital integrated electronics,” IEDM Tech Digest p. 11-13, 1975

[4] G. Moore, “Lithography and the future of Moore's Law,” Proc. SPIE Vol. 2437, May 1995

[5] G. Moore, “No exponential is forever: But forever can be delayed!”, ISSCC 2003

[6] B. J. Lin, “Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing,” *J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, Vol. 3, No. 3, 377–395, Jul. 2004

[7] ASML *Images* Customer Magazine, 2010.

[8] A. K.-K. Wong, *Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography*, SPIE Press, 2001

[9] *International Technology Roadmaps for Semiconductors*, 2011 edition.

[10] H. Yaegashi et al., “Novel approaches to implement the self-aligned spacer double-patterning process toward 11-nm node and beyond,” *Proc. SPIE* 7972, 79720B, 2011

[11] L. Liebmanna, A. Chua, and P. Gutwinb, “The daunting complexity of scaling to 7NM without EUV: Pushing DTCO to the extreme,” *Proc. of SPIE* Vol. 9427, 942702, 2015

[12] C. Wagner et al., “EUV lithography at chipmakers has started: performance validation of ASML's NXE:3100,” *Proc. SPIE* 7969, 79691F, 2011

[13] B. J. Lin, “Marching of the microlithography horses: Electron, ion, and photon: Past, present, and future,” *Proc. SPIE* Vol. 6520, 652002-1, 2007

[14] Y. Borodovsky, “ArF lithography extension for critical layer patterning,” LithoVision 2010, San Jose, CA/USA, 2010

[15] *International Technology Roadmaps for Semiconductors*, 2015 edition.

[16] Philip C. W. Ng, Kuen-Yu Tsai*, and Lawrence S. Melvin III, “Non-delta-chrome optical proximity correction methodology for process models with three-dimensional mask effects,” *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, Volume 10, Issue 3, 033010, Sept. 2011

[17] Philip C. W. Ng, Kuen-Yu Tsai*, Yen-Min Lee, Fu-Min Wang, Jia-Han Li, and Alek C. Chen, “Fully model-based methodology for simultaneous correction of extreme ultraviolet mask shadowing and proximity effects,” *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, Volume 10, Issue 1, 013004, Mar. 2011

[18] Chun-Hung Liu, Pei-Lin Tien, Philip C. W. Ng, Yu-Tian Shen, and Kuen-Yu Tsai*, “Model-based proximity effect correction for electron-beam direct-write lithography,” Advanced Lithography 2010 -- *Proc. SPIE* 7637, 76371V, San Jose, California, USA, Feb. 2010

[19] Chien-Lin Lee, Sheng-Wei Chien, Kuen-Yu Tsai*, “Model-based proximity effect correction for helium ion beam lithography,” Advanced Lithography 2018 -- *Proc. SPIE* Vol. 10584 Novel Patterning Technologies 2018, 105841C, San Jose, California, USA, Feb. 2018

[20] Hoi-Tou Ng, Yu-Tian Shen, Sheng-Yung Chen, Chun-Hung Liu, Philip C. W. Ng, and Kuen-Yu Tsai*, “New method of optimizing writing parameters in electron beam lithography systems for throughput improvement

considering patterning fidelity constraints" , *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* , Vol. Volume 11, Number 3 , 033007-, Sep. 2012

[21] Chun-Hung Liu, Hoi-Tou Ng, and Kuen-Yu Tsai*, "New parametric point spread function calibration methodology for improving the accuracy of patterning prediction in electron-beam lithography" , *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS* , Vol. Volume 11, Number 1 , 013009-, Mar. 2012

[22] Yi-Yeh Yang, Hsuan-Ping Lee, Chun-Hung Liu, Hao-Yun Yu, Kuen-Yu Tsai*, Jia-Han Li, "Direct-scatterometry-enabled PEC model calibration with two-dimensional layouts" , Advanced Lithography 2014 -- *Proc. SPIE* Vol. 9050, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVIII , San Jose, California, USA , Feb. 2014

[23] Chih-Yu Chen, Philip C. W. Ng, Chun-Hung Liu, Yu-Tian Shen, Kuen-Yu Tsai*, Jia-Han Li, Jason J. Shieh, and Alek C. Chen, "Direct-scatterometry-enabled optical-proximity-correction-model calibration" , Advanced Lithography 2013 -- *Proc. SPIE* Vol. 8681, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII , San Jose, California, USA , Feb. 2013

[24] Chien-Lin Lee, Sheng-Wei Chien, Kuen-Yu Tsai*, Chun-Hung Liu, "Investigation on helium ion beam lithography with proximity effect correction," *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*, Volume 20, Number 3, 033201, Jul. 2021

[25] Philip C. W. Ng, Sheng-Wei Chien, Bo-Sen Chang, Kuen-Yu Tsai*, Yi-Chang Lu, Jia-Han Li, and Alek C. Chen, "Impact of process-effect correction strategies on critical dimension and electrical characteristics variabilities in extreme ultraviolet lithography, " *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 50, Number 6 (Special issue: MNC 2010), 06GB07, Jun. 2011

[26] Chun-Hung Liu, Philip C. W. Ng, Yu-Tian Shen, Sheng-Wei Chien, and Kuen-Yu Tsai*, "Impacts of point spread function accuracy on patterning prediction and proximity effect correction in low-voltage electron-beam-direct-write lithography," *Journal of Vacuum Science & Technology B* (minor revision), 2013

[27] Meng-Fu You, Philip C. W. Ng, Yi-Sheng Su, Kuen-Yu Tsai*, and Yi-Chang Lu, "Impacts of optical proximity correction settings on electrical performances," Advanced Lithography 2007 -- *Proc. SPIE* Vol. 6521, Design for Manufacturability through Design-Process Integration, 65210W, San Jose, California, USA, Mar. 2007

[28] A. Isoyan, et al. "Talbot lithography: Self-imaging of complex structures." *Journal of Vacuum Science & Technology B* 27.6 (2009): 2931-2937.

[29] Dimitrios Kazazis, Li-Ting Tseng, and Yasin Ekinci. "Achromatic Talbot lithography with nano-ring masks for high-throughput periodic patterning." *Microelectronic Engineering* 225 (2020): 111273.

表 1 計畫規劃時程

年度	季	研究項目		
		X-ray 光罩製程及粒子束散射之建模與修正	X-ray 近場繞射模擬與微影鄰近效應修正	X-ray 微影驗證製作高精度高深寬比元件
1	1	文獻整理		文獻整理
	2	X-ray 光罩製程所需之粒子束散射模擬		X-ray 微影設備參數最佳化
	3	X-ray 光罩製程研發	文獻整理	
	4		X-ray 微影能量分布模擬	
2	1	文獻整理		文獻整理
	2	粒子束散射模型校正技術		X-ray 微影製程改善
	3	粒子束鄰近效應修正技術	文獻整理	X-ray 微影模型校正技術
	4		X-ray 微影修正技術	
3	1			文獻整理
	2			高性能光學繞射元件和/或微機電元件設計
	3			高性能光學繞射元件和/或微機電元件製造
	4			高性能光學繞射元件和/或微機電元件測試

圖 1 浸潤式光學投影式微影系統

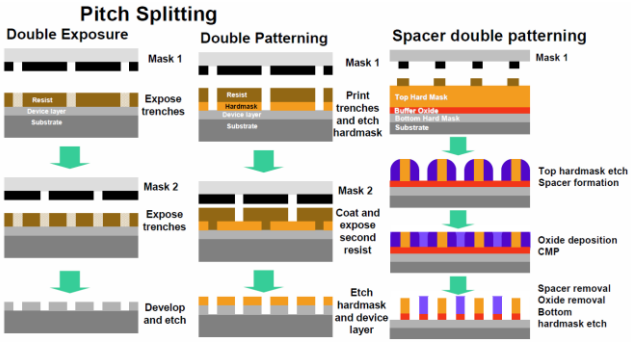


圖 2 三種間距分割製造流程:(左)雙重曝光，(中)雙重製像，(右)自對準雙重製像

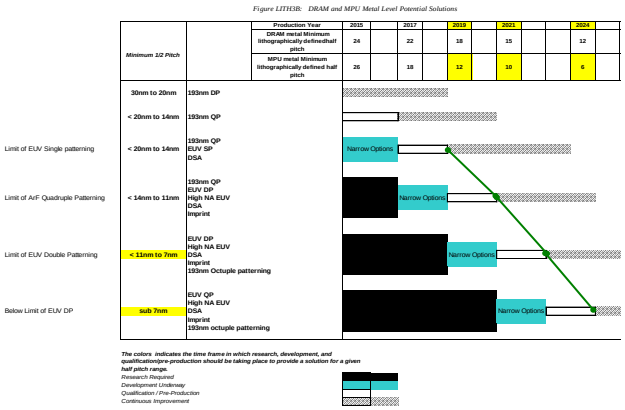


圖 3 截至 6 奈米半間距節點的 DRAMs 和微處理單元之可能微影製程方案

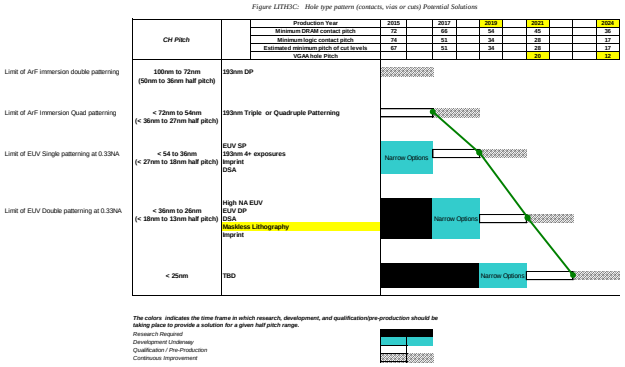


圖 4 截至 6 奈米半間距節點的洞型圖像之可能微影製程方案

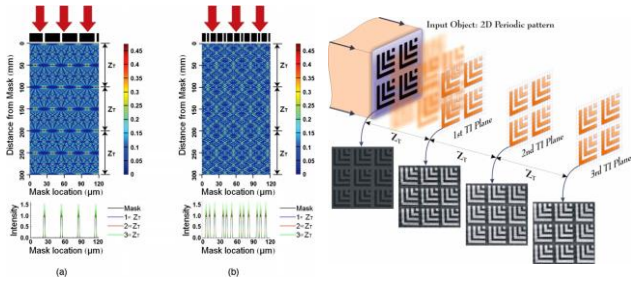


圖 5 廣義 TL 架構和其自成像於不同距離之 Talbot 平面示意圖[28]

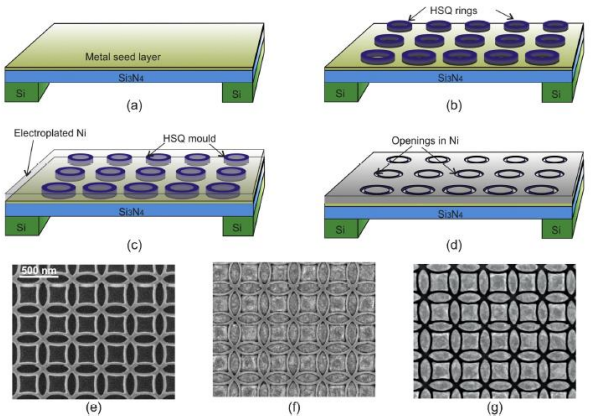


圖 6 廣義 TL 光罩製作流程(以電子束製作)及光罩製作結果之 SEM 影像[29]

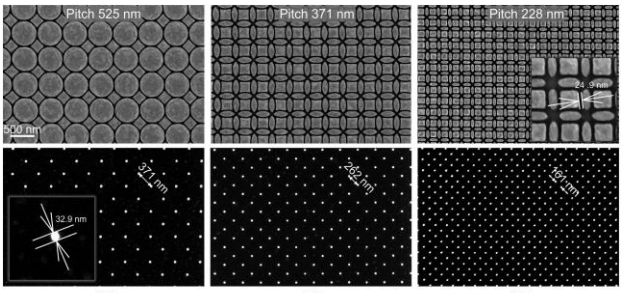


圖 7 廣義 TL 光罩(上)及其對應曝光結果(下)之 SEM 圖像[29]

表 2 氦離子束散射模擬之材料結構詳細參數

層數	材料	厚度
1	ZEP 520A	40 nm
2	SiO2	60 nm
3	SiN (Si_3N_4)	100 nm
4	Silicon	1 μm

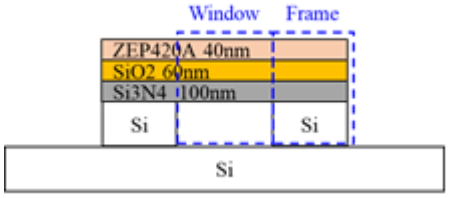


圖 8 氦離子束散射模擬之材料結構示意圖

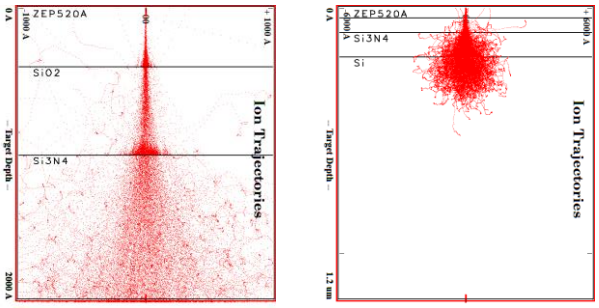


圖 9 氦離子束散射模擬結果

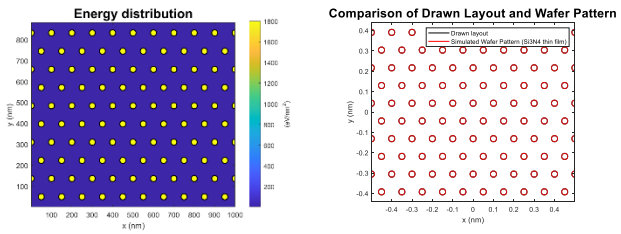


圖 10 氦離子束於圖 8 window 區域高密度點圖案微影模擬結果

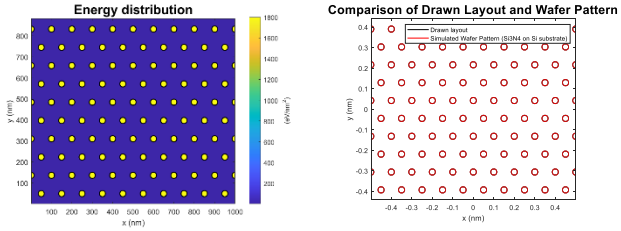
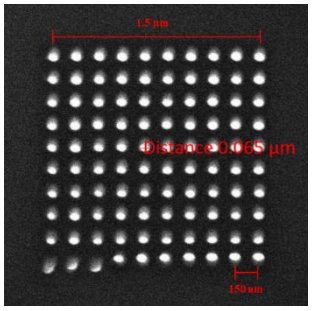


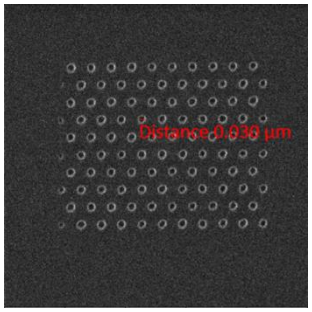
圖 11 氦離子束於圖 8 frame 區域高密度點圖案微影

模擬結果



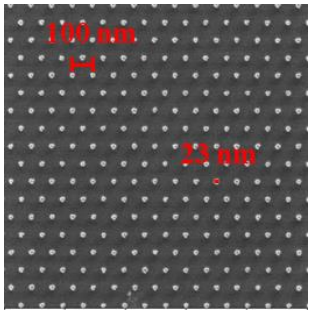
材料	Si_3N_4
厚度	50 nm
基板	Silicon

圖 12 利用氦離子束直接銑削製作 ATL 光罩之結構參數與結果



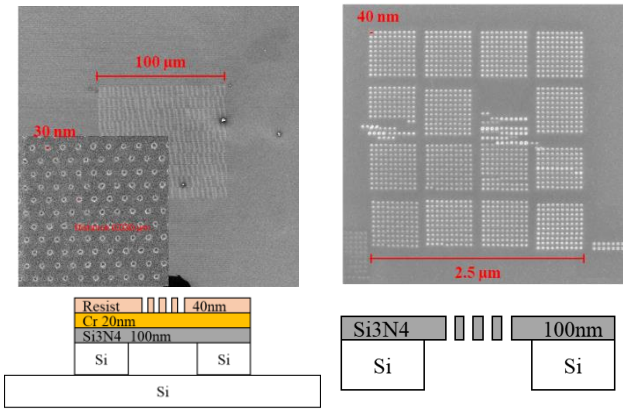
材料	ZEP520A（正光阻）
厚度	40 nm
基板	Silicon

圖 13 利用氦離子束微影製作 ATL 光罩之結構參數與結果



材料	HSQ（負光阻）
厚度	30 nm
基板	Silicon

圖 14 利用氦離子束微影製作 ATL 光罩之結構參數與結果



氦離子束微影　　氦離子束直接銑削

圖 15 利用氦離子束於 Si_3N_4 薄膜上製作大面積 ATL 光罩

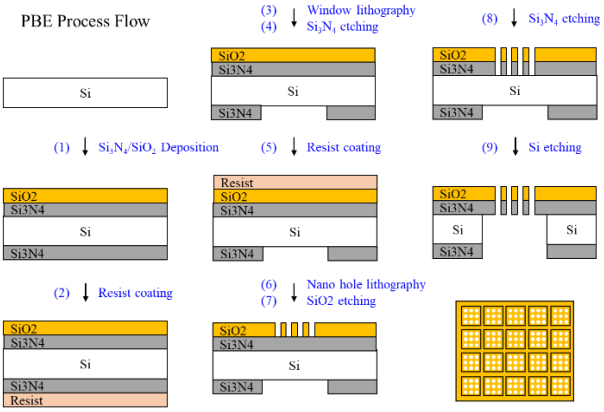


圖 16 利用氦離子束之先微影奈米圖案後蝕刻背面矽孔洞製程

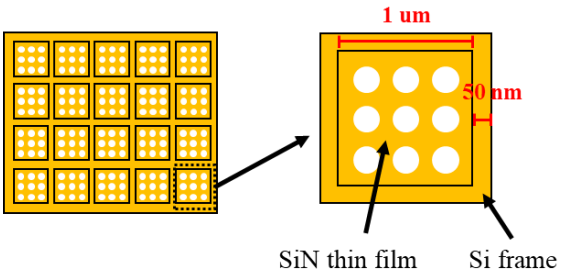


圖 17 含支撐框架之奈米孔洞陣列設計於 Si_3N_4 薄膜上

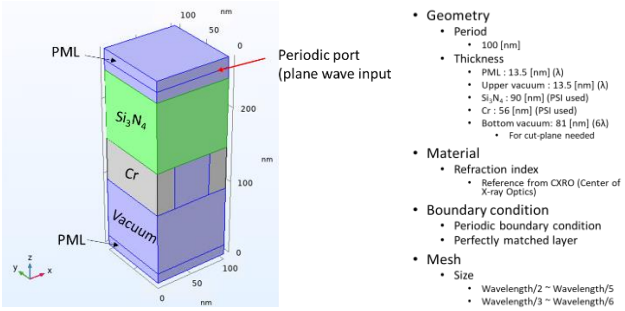


圖 18 TL 電磁模擬單元結構及模擬參數

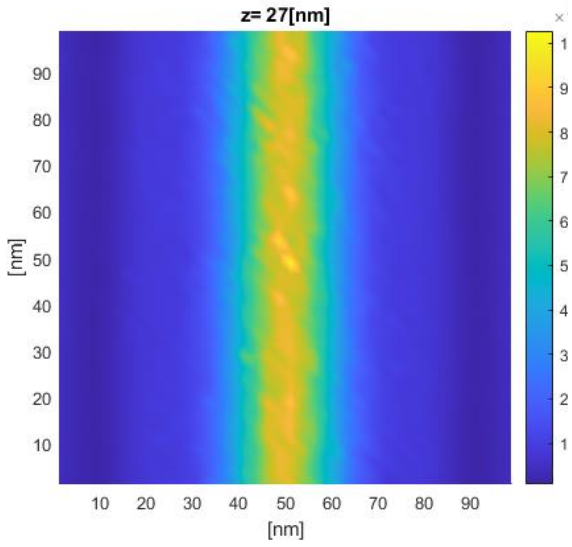
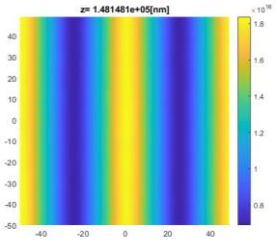


圖 19 TL 光罩附近電磁模擬結果：強度分布於 z=27nm 處



- Setting
  - Input field: unit cell
  - Wavelength: λ = 13.5 [nm]
  - Period: P = 100[nm]
  - Grid size : 1[nm]
  - Sampling number: 100X100
  - Propagation distance: Δz = 1.48 E5 [nm] (according to $z_A = \frac{2p^2}{\Delta\lambda}n$)

圖 20 遠場模擬參數設定及能量分布結果

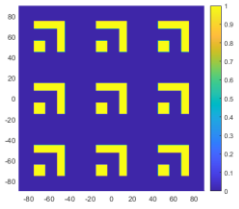


圖 21 TL 模擬光罩圖案

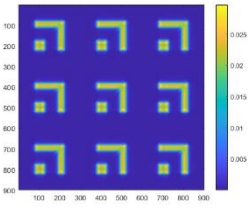


圖 22 Talbot image 於第四個 Talbot plane 之模擬結果

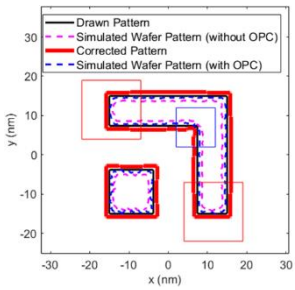


圖 23 TL 初步 PEC 模擬結果

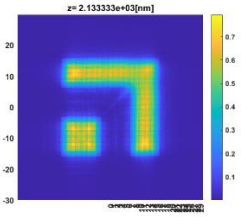
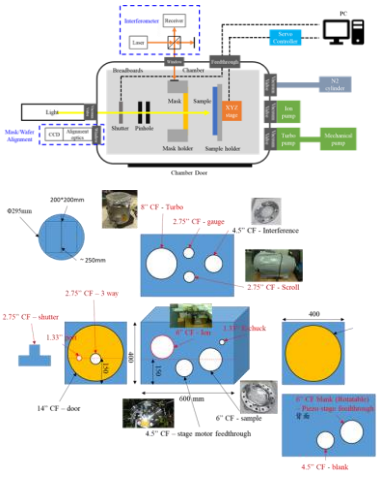


圖 24 套用 PEC 模擬後之 Talbot image



Schematic and detailed design of chamber for EUV ATL

Chamber for EUV ATLat NSRRC

圖 25 TL 實驗腔體架構及設計

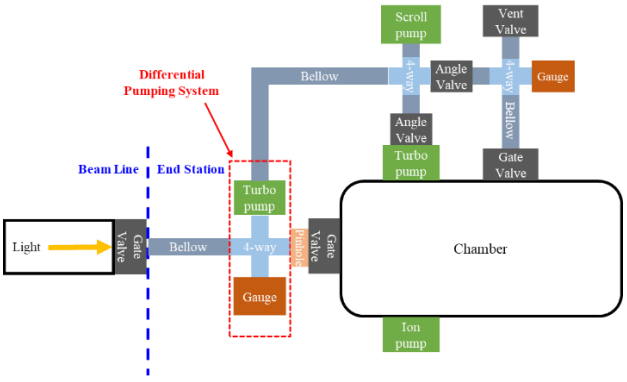


圖 26 TL 實驗腔體之真空系統架構圖

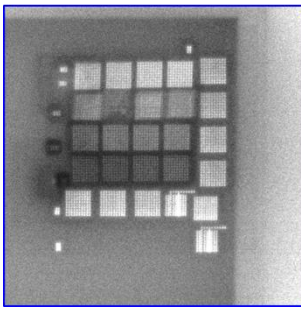


圖 27 總面積約 1.77 微米平方之直徑 30 奈米孔洞陣列

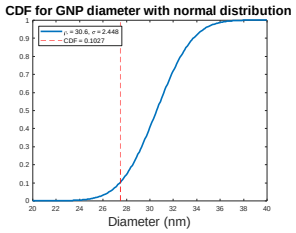


圖 28 ICP-MS 結果及金粒子溶液規格評估之奈米孔洞直徑

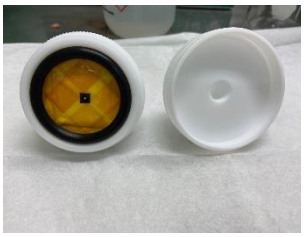


圖 29 過濾實驗用之濾網載台

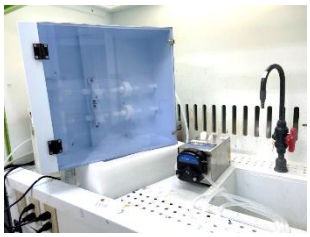


圖 30 溶液過濾設備圖

表 3 過濾後之金粒子溶液 ICP-MS 量測結果

樣本名	10 ppb 金粒子溶液	
	1st result	2nd result
過濾後	2.087	1.7
過濾效能	89.6%	91.5%

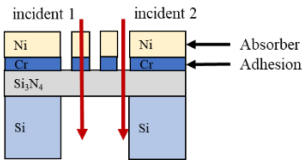


圖 31 TL 光罩結構

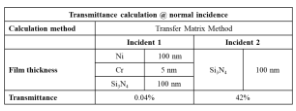
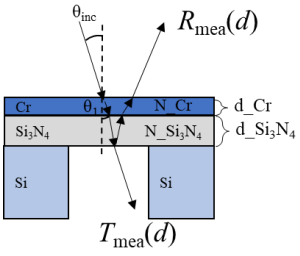


圖 32 模擬 TL 光罩於 EUV 波段下之穿透率



Known values
- $R_{mea}(d)$: Measured Reflectance
- $T_{mea}(d)$: Measured Transmittance
- θ_{inc}: Incident Angle
- N_Si_3N_4: Complex refractive index of Si_3N_4
- N_Cr: Complex refractive index of Cr
- d_Si_3N_4 : Thickness of Si_3N_4

Unknown value
- **d_Cr: Thickness of Cr**

圖 33 光罩材料之光學及結構參數模型校正範例

表 4 光罩材料之光學及結構參數模型校正結果

Calibration Settings & Results		
Parameter	Known Value	
θ_{inc} (°)	6	
N_Si_3N_4	0.97 - 0.0094i	
N_Cr	0.93 - 0.039i	
d_Si_3N_4 (nm)	100	
R_{mea}	$2.83x10^{-3}$	
T_{mea}	0.29	
	Unknown Value	
	Initial	Optimized
d_Cr (nm)	1	**10**
Total error	0.11	**$6.66x10^{-11}$**

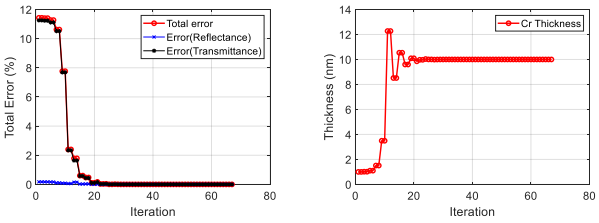


圖 34 誤差及校正參數(厚度)收斂示意圖

以高介電介面層與磊晶矽鍺層提升鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性
Enhanced Reliability and Anti-Radiation Capability for FeFET Memory by Integrating high-k Interfacial Layer and Epitaxial SiGe Film

計畫編號：110-NU-E-007-001-NU
計畫主持人：巫勇賢
e-mail：yunhwu@gapp.nthu.edu.tw
計畫參與人員：彭皓楷、賴亭潔、劉家銘、陳冠儒、莊凱晴
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

本計畫以矽晶圓上 n-/p-FeFET 鐵電記憶體整合高介電材料 AlON 介面層作為研究平台，探討 γ-ray 輻射效應對其電性表現、可靠度以及讀取延遲(read latency)所造成的影響。本研究最大的貢獻是首次以 p-FeFET 鐵電記憶體進行相關的輻射測試，研究其應用於太空科技的可行性。 研究結果發現當總游離劑量在 300 krad 至 1 Mrad 之間，接受輻射照射後的 FeFET 記憶體，由於輻射引起晶格變形，加上氧空缺的形成，使其剩餘極化量(P_r)有下降的趨勢。然而不論輻射劑量多寡，但其記憶體儲存資料能力的參數-記憶體視窗(memory window)和長時間放置下的資料保存(retention)，不論是在 n-FeFET 亦或是 p-FeFET 的表現皆不受輻射影響。由於本計畫採用高品質 AlON 作為介面層，其較佳的介面特性亦使漏電流下降，因此元件具有更佳的資料保存性，在 10^4 秒後仍舊相當穩定，預測 10 年後的電流開關比僅微幅縮減。至於在耐久度(endurance)特性方面，不論輻射劑量多寡，由於以高介電常數材料 AlON 作為介面層，有助於減少介面層分壓，可降低脈衝操作對介面層的破壞，因此在經過 10^5 次反覆操作後，n-FeFET 或 p- FeFET 鐵電記憶體元件皆仍能維持正常運作。儘管相較 n-FeFET，p-FeFET 之記憶體視窗較小，但其耐久度可以達 10^5 次，並具有更為優異的電流開關比，這是由於熱電子引發的電洞產生(hot-electrons induced hole generation)較為和緩所致。 除了前述的可靠度表現之外，在高輻射環境下滿足高速操作應用也是 FeFET 的一大目標。研究結果發現 p-FeFET 不只提升耐久度，亦降低讀取延遲，因此 p-FeFET 鐵電記憶體相當具有應用於太空任務的潛力。

關鍵詞：總游離劑量、p 型鐵電記憶體、讀取延遲、資料保存時間、耐久度、可靠度。

Abstract

$HfZrO_x$-based n- and p-FeFETs with high-k AlON interfacial layer (IL) were employed as the platform to evaluate how γ-rays radiation affects the memory performance and reliability characteristics. It can be found that the remanent polarization (P_r) is reduced as the radiation dose increases. Nevertheless, both types of FeFETs demonstrate stable MW and desirable retention performance independent of total ionizing dose (TID) in the range between 300 krad and 1 Mrad. Even with radiation dose up to 1 Mrad, the memory window (MW) and retention in terms of current ratio are hardly changed for both types of FeFETs. In addition, memory devices with the AlON IL have better reliability performance. Although showing a smaller MW than n-FeFETs, p-FeFETs are considered with higher competitive advantages in terms of more robust endurance against radiation up to 10^5 cycles by long-pulse (10^{-4} s) cycling. Furthermore, the much-improved read latency for p-FeFETs also maintains after being subjected to 1 Mrad radiation doses. These promising results suggest that p-FeFETs possess a great potential for high-speed, high-reliability applications in the radiation environment.

Keywords: total ionizing dose, p-FeFET memory, read latency, retention, endurance, reliability .

I. 前言

在 5G 通訊的世代，抗輻射的半導體元件將扮演越來越重要的角色。目前主流的非揮發 3D-NAND 快閃記憶體其記憶胞內的操作電壓大於 10 V，這會大量消耗衛星上太陽能板所提供的珍貴能源。另外，從輻射效應的觀點分析，快閃記憶體藉由電荷儲存與否決定邏輯訊號，一旦接受輻射照射後，易受到產生的缺陷導致漏電流增加造成保存能力劣化及電荷捕捉(charge trapping)造成資料反轉等負面效應。此外，由於電荷捕捉效應隨氧化層增加而惡化，由厚氧化層元件所組成的 charge pump 電路接受輻射所引發的負面效應尤其明顯。

為了進一步開發可應用於游離輻射環境之高效能、高密度與低功耗之非揮發記憶體，具有高抗輻射能力之鐵電記憶體(ferroelectric memory)技術受到產業界的高度矚目。鐵電記憶體又以鐵電隨機存取記憶體(FeRAM)和鐵電電晶體(FeFET)等形式之記憶體較為成熟，也最具有量產的潛力。這些記憶體技術並不使用電荷儲存的方式儲存資料，且具備較低的操作電壓，有望成為應用於高輻射環境之記憶體元件候選者。

與其他前瞻技術相較之下，鐵電記憶體具備非揮發性，擁有極佳的操作速度(10-100 ns 等級)以及低功率消耗(每位元消耗能量 1-10 fJ)等，吸引了科學家與工程師持續多年的研發。雖然 FeRAM 所使用的 1T1C 電路結構技術較為成熟，不僅其記憶胞面積較大，破壞性讀取的特性更需要消耗額外的能量及時間以重新寫入原先的資料，造成資料讀取操作不夠快速以及能源消耗。而 FeFET 採用非破壞性的讀取方式，且為單一電晶體架構，製程上僅需將閘極氧化層改以鐵電材質取代即可，在新世代的記憶體技術中極具潛力。其運作原理是在 FeFET 的閘極施加高於矯頑電壓(coercive voltage，Vc)以改變鐵電層內的極化方向，進而決定通道是強反轉(inversion)或是加強通道的聚積(accumulation)狀態，使元件之臨界電

壓(V_{TH})有所變動，可作為邏輯 1 或 0 的儲存。

II. 主要內容

FeFET 目前作為非揮發記憶體應用最大的挑戰為其可靠度之表現，其中包括(a)資料保存能力不佳(retention loss)、(b)耐久度惡化(endurance degradation)與(c)印記效應(imprint effect)。尤其是金屬-鐵電層-半導體(M-F-S)結構產生的介面層，更加劇了耐久度表現惡化，其主因來自於(1) 介面層經反覆操作下的劣化，而非鐵電層本身劣化、(2) 閘極漏電流上升與(3) 鐵電層電荷捕捉[1]。電子與電洞在不同偏壓方向上反覆操作後會形成鐵電層電荷捕捉效應，使得 FeFET 的電晶體特性分別往正方向/負方向偏移，進而造成記憶視窗隨操作次數增加而惡化。值得一提的是電荷捕捉效應的前提是氧化層中具有足夠數量的陷阱方能捕獲電荷，由於 HfO2 鐵電層是離子鍵結構，本身即富含大量的陷阱，而這也是可靠度劣化主要的根源。

FeFET 在抗輻射應用上所面臨的挑戰照射輻射下可能會受到離子化(ionization)而產生電子/電洞對(electron/hole pairs)，且易受到多晶(poly-crystalline)鐵電材質晶界(grain boundary)缺陷捕獲(因電子遷移率較大，故以電洞為多數)，或因鐵電層鍵結斷裂產生以氧空缺進而影響鐵電材質的特性，甚至會因電洞遷移過程釋放出氫離子(質子)造成介面品質惡化。這些效應均導致輻射下的 FeFET 記憶體面臨更加嚴峻的挑戰。

本團隊於 2019 年發表於 IEEE Electron Device Letters 的論文即是針對 γ-ray 輻射效應對於矽晶圓上 FeFET 記憶體可靠度影響進行深入的分析並證明了 n-FeFET 在 300 krad 的輻射劑量下，因為不良的 M-F-S 結構之介面層，導致嚴重的電荷捕捉效應，使耐久度大幅下降[2]。為了進一步改善耐久度，抑制電荷捕捉的介面改善工程被視為能夠解決輻射效應導致可靠度劣化的根本方法，本計畫以 HfZrOx 鐵電層整合更高介電常數之氮化處理介面層形成 AlON 降低壓降與電荷捕獲效應以減少氧空缺，期盼能開發出低功率、高速操作、非揮發性且具備高可靠度與抗輻射性之 FeFET 鐵電記憶體。

III. 結果與討論

(A) 鐵電薄膜剩餘極化量與輻射照射之關聯性

本計畫之實驗規劃分為兩個階段，第一階段以 10.2 nm HfZrOx 鐵電層(ALD HfO2:ZrO2 = 1:1 cycle ratio、250 oC 成長溫度)整合高介電材質 AlON 介面層，以 900 oC/30 sec 熱製程於矽晶圓上製作 n-FeFET 及 p-FeFET，其示意圖如圖 1 所示，圖 2 顯示了透過高解析度穿透式電子顯微鏡(HRTEM)所拍攝的 p-FeFET 其金屬層/HfZrOx 鐵電層/AlON 介面層/矽基板影像。第二階段則以最佳化的鐵電記憶體參數為基礎進行不同輻射總游離計量(300 krad 與 1 Mrad)測試並分析記憶體可靠度與輻射計量之關聯性。

本計畫採用鐵電元件專屬的 PUND (Positive-Up-Negative-Down)方法量化剩餘極化量(remnant polarization, Pr)，量測時將-FeFET 之源極、汲極及基板皆接上相同電壓，在閘極施加脈衝，頻率為 10 kHZ，量測出鐵電材料之電偶極切換電流(dipole switching current)，接著萃取出 P-V (極化量-電壓)曲線[3]，如圖 3、圖 4 所示。P-V 曲線證明了 HfZrOx 層的鐵電性，其中未照射輻射的元件，其剩餘極化量為 14.7 μC/cm2，而照射鈷 γ-射線總游離劑量 300 krad 後，其剩餘極化量下降到 12.1 μC/cm2。隨著 γ-射線總游離劑量進一步增加到 1 Mrad，其剩餘極化量衰減的更加嚴重，此種情況與 n-FeFET 類似，意味著鐵電性在照射游離輻射之後有劣化的現象發生。過去研究指出，照射 γ-射線後導致鐵電性劣化與剩餘極化量下降的現象與輻射所產生的氧空缺有關[2]。值得一提的是圖 4 顯示 Vc 幾乎不受輻射劑量影響，而鐵電記憶體主要是由 Vc 決定記憶體視窗，故即使照射輻射後元件之剩餘極化量減少，鐵電記憶體的記憶體視窗理論上仍不受輻射劑量所影響。

(B) n-FeFET 及 p-FeFET 基本記憶體特性分析

如圖 5、圖 6 所示，n-FeFET 及 p-FeFET 之記憶視窗幾乎不受輻射劑量所影響。未照射 γ-射線的 n-FeFET 及 p-FeFET 的記憶體視窗分別為 2.4 V 和 1.5 V，此量測條件為分別在 n-FeFET 及 p-FeFET 的汲極固定+0.8 V/−0.8 V 電壓，並在閘極施加條件為+5 V/−5 V、100 μs 的脈衝，來回掃描得到逆時針方向的 IDS-VGS 遲滯特性曲線。記憶體視窗是抹除狀態(ERS)和寫入狀態(PGS)之間的臨界電壓差值，其中臨界電壓由定電流(constant current)在 10 μA 處所萃取。n-FeFET 及 p-FeFET 的記憶體視窗不對稱現象可透過降低 HfZrOx 鐵電層層厚度來緩解[4]。除了 IDS-VGS 特性曲線有輕微的平移外，記憶體視窗大小幾乎維持與未照射 γ-射線之樣品相同。此外，隨著總游離劑量的增加，並沒有發生次臨界擺幅退化的現象，與文獻中所描述的行為一致 [2]。 值得一提的是，n-FeFET 及 p-FeFET 的 IDS-VGS 轉換特性曲線都向閘極電壓的正方向移動。這種現象與照射輻射後大量負電荷累積在 HfO2 中有關[5]。在過去文獻中，通常 NMOS 元件在照射 γ-射線後效能劣化的主要原因與次臨界區域中的汲極電流有關，因為 NMOS 元件中的寄生電晶體在照射 γ-射線後產生多餘電荷所導致。然而，在本次研究中，n-FeFET 沒有觀察到明顯增加的漏電流，可能原因為漏電流在較大的汲極電流或較長的通道長度中所佔的比例影響較小[6]。由於本次實驗汲極電流是在汲極施加 0.8 V 電壓時所量測，如此可以確保有較高的資料讀取速度。在相對較高的電壓下，可以測量到較大的電流，也因此寄生電晶體的漏電流成分可以相對忽略不計。

(C) n-FeFET 及 p-FeFET 臨界電壓與讀取延遲之關聯性

由於 HfZrOx 鐵電層和介面層之間以及介面層和矽基板之間的介面處易發生電荷捕捉現象，因此讀取延遲(read latency)被視為基於 HfO2 之 FeFET 的重要議題。為了研究讀取延遲其相關特性，臨界電壓的變化可視為量化輻射總游離劑量對 n-FeFET 及 p-FeFET 讀取延遲的指標。首先，透過在閘極施加條件為-5 V、100 μs 的脈衝，將 n-FeFET 及 p-FeFET 設置為抹除狀態。接著，改施加+5 V、100 μs 的電壓以達到寫入狀態，之後以總共 50 μs 的電壓掃描時間連續快速讀取，以測量出暫態臨界電壓(VTH−t)隨讀取延遲時間的變化，直到獲得穩定的臨界電壓(VTH−s)。臨界電壓隨讀取時間的演進如

圖 7 和圖 8 所示，其中電荷釋放(charge de-trapping)百分比其定義為(1-|VTH−t-VTH−s|/VTH−s)*100 %。n-FeFET 及 p-FeFET 分別需要 10-1 秒及 10-3 秒才能達到完全電荷釋放。顯示 p-FeFET 比 n-FeFET 具有更快的電荷釋放效應，且總游離劑量幾乎對電荷釋放效應不構成影響。儘管該現象背後的機制目前各界仍在研究當中，但似乎與不同特性的記憶體視窗無關。實驗結果顯示即使照射高達總游離劑量 1 Mrad 之γ-射線後，p-FeFET 仍能維持更快地電荷釋放效應，意味著 p-FeFET 非常適合在輻射環境中滿足應用於低讀取延遲之需求。

(D) n-FeFET 及 p-FeFET 耐久度與輻射照射之關聯性

圖 9 比較未照射輻射與照射γ-射線總游離劑量 300 krad 之 p-FeFET 的耐久度表現。由於汲極電流在實際記憶體儲存陣列中常被用於判斷當前資料所處的狀態，故在進行耐久度操作測試時，抹除及寫入狀態會利用電流來做判斷。汲極電流讀取方式是在閘極施加條件為-1 V、10 μs 之脈衝，以確保能精準測量極限 10 nA 以下之汲極電流。當進行耐久度操作試驗時，所有元件樣品皆以 +5.5 V/−5 V 之方形脈衝及 100 μs 之脈衝間隔重複抹除與寫入，且電壓之上升或下降時間皆固定在 20 ns，以符合最嚴格之元件壓力測試條件。藉由本次耐久度反覆切換脈衝操作測試，實驗結果發現不論是抹除或寫入狀態的汲極電流，在是否照射γ射線的條件下，皆能維持相當穩定的 105 次的操作次數。圖 10 顯示 n-FeFET 與 p-FeFET 在相同的耐久度反覆操作壓力測試條件下，兩種鐵電記憶體在未照射輻射與照射γ射線總游離劑量 300 krad 後的耐久度表現之比較。對於 n-FeFET 而言，其電流開關比(ERS/PGS)可維持大於 5x103 之比例重複操作 104 次。相較於傳統使用 SiOx 作為介面層的 n-FeFET，在照射相同總游離劑量之鈷-射線時，其特性有大幅進步 [2] 。這主要歸功於 AlON 這層新開發的介面層材料，因其具有相較 SiOx 更高的介電常數，使得鐵電層的分壓提高，相對降低介面層的分壓，進而降低脈衝操作對介面層品質的破壞，防止可靠度劣化。另外，p-FeFET 在照射總游離劑量 300 krad 之鈷γ射線後，其耐久度表現能維持幾乎不變的穩定電流開關比高達 105 次的操作次數，故其耐久度表現甚至優於 n-FeFET。至於照射γ射線總游離劑量 1 Mrad 之元件，p-FeFET 的耐久度表現尚能維持，而 n-FeFET 雖然具有 AlON 介面層可改善可靠度，但其耐久度表現在總游離劑量 1 Mrad 之γ射線照射下仍較 300 krad 劑量之條件大幅劣化(沒有顯示)，故改善 n-FeFET 在游離輻射照射下的可靠度表現為本團隊未來的一大研究目標。

(E) n-FeFET 及 p-FeFET 資料保存能力與輻射照射之關聯性

圖 11 與圖 12 顯示未照射輻射與照射γ射線總游離劑量 300 krad 之 n-FeFET 與 p-FeFET 在閘極不施加電壓的情況下，隨時間演進讀取不同狀態的高低電流值。對於照射γ-射線總游離劑量 300 krad 之 n-FeFET 而言，其汲極電流在兩個操作狀態下皆能維持穩定資料保持長達 104 秒。相較以往文獻[2]以 SiOx 作為介面層之 n-FeFET，其汲極電流在寫入狀態時經常會隨著時間放置後而產生資料保持劣化現象。 本實驗利用高介電常數 AlON 作為介面層，有助於減少介面層分壓，並提升介面品質進而抑制漏電流的產生，如此能減少因照射游離輻射導致漏電流的上升，維持長時間穩定的資料保持時間。同樣的現象在 p-FeFET 也能觀察到，且在照射高達總游離劑量 1 Mrad 的γ-射線後，其資料保持能力在經過 104 秒的長時間放置後依然保持穩定，從延長十年線可以預估照射γ-射線總游離劑量 300 krad 與 1 Mrad 之 p-FeFET 皆能保持 3 個數量級的電流開關比，顯示 p-FeFET 在高輻射的環境下具有相當大的優勢。另外，在過去的文獻報導中，移除偏壓時(閘極偏壓為 0 V)的閘極漏電流會導致電荷捕捉效應及去極化電場(depolarization field)，使得資料保持能力受到影響，然而在本研究中，閘極偏壓為 0 V 時之閘極漏電流並沒有明顯增加，因此獲得了較理想的資料保持性能。

IV. 結論

本計畫中以高介電材料 AlON 作為介面層分別製作基於 $HfZrO_x$ 鐵電層之 n-FeFET 及 p-FeFET，並探討照射不同程度之總游離劑量對鐵電記憶體其特性和可靠度的影響。雖然照射游離輻射造成 $HfZrO_x$ 鐵電層產生氧空缺並使得剩餘極化量減少，然而從 I_{DS}-V_{GS} 轉換特性曲線中，可以發現不論是 n-FeFET 或 p-FeFET，在照射游離輻射之後其記憶體視窗幾乎沒有改變，且資料保存能力在延長十年預估線仍能維持 3 個數量級的電流開關比。相較 n-FeFET，雖然 p-FeFET 具有較小的記憶體視窗，然而因其具有更好的耐久度及可靠度，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 比起 n-FeFET 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的低延遲通信，未來可嘗試其他介面工程持續提升鐵電記憶體可靠度。上述的成果已發表於 2022 年頂尖國際期刊 IEEE Electron Device Letters [7]。

參考文獻

[1] H. Bae, S. G. Nam, T. Moon, Y. Lee, S. Jo, D.-H. Choe, S. Kim, K.-H. Lee, and J. Heo, “Sub-ns polarization switching in 25 nm FE FinFET toward post CPU and spatial-energetic mapping of traps for enhanced endurance,” in IEDM Tech. Dig., Dec. 2020.

[2] K. Y. Chen, Y. S. Tsai, and Y. H. Wu, “Ionizing radiation effect on memory characteristics for HfO2-based ferroelectric field-effect transistors,” IEEE Electron Device Lett., vol. 40, no. 9, pp. 1370 – 1373, Sep. 2019.

[3] K. Toprasertpong, K. Tahara, M. Takenaka, and S. Takagi, “Evaluation of polarization characteristics in metal/ferroelectric/semiconductor capacitors and ferroelectric field-effect transistors,” Appl. Phys. Lett., vol. 116, no. 24, Jun. 2020.

[4] H. K. Peng, T. H. Kao, Y. C. Kao, P. J. Wu, and Y. H. Wu, “Reduced asymmetric memory window between Si-based n- and p-FeFETs with scaled ferroelectric HfZrOx and AlON interfacial layer,” IEEE Electron Device Lett., vol. 42, no. 6, pp. 835 – 838, Jun. 2021.

[5] A. Y. Kang, P. M. Lenahan, and J. F. Conley, “The radiation response of the high dielectric-constant

hafnium oxide/silicon system," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 49, no. 6, pp. 2636 – 2642, Dec. 2002.

[6] V. Re, M. Manghisoni, L. Ratti, V. Speziali, and G. Traversi, "Impact of lateral isolation oxides on radiation-induced noise degradation in CMOS technologies in the 100-nm regime," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 54, no. 6, pp. 2218 – 2226, Dec. 2007.

[7] H. K. Peng, T. C. Lai, T. H. Kao, and Y. H. Wu, "Improved reliability and read latency under radiation observed in HfZrOx based p-FeFETs with AlON interfacial layer," IEEE Electron Device Lett., vol. 43, no. 3, pp. 494-497, Mar. 2022.

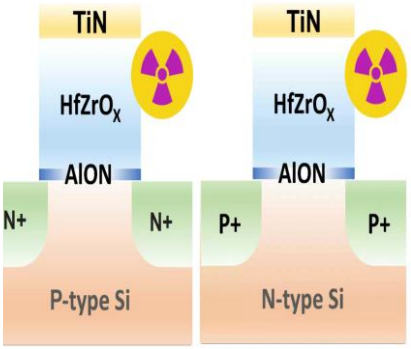


圖 1 n-FeFET 與 p-FeFET 鐵電記憶體之結構示意圖

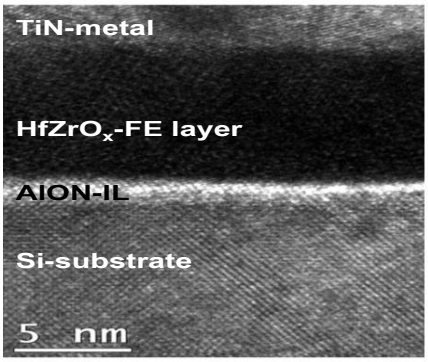


圖 2 p-FeFET 在高解析度穿透式電子顯微鏡之結構

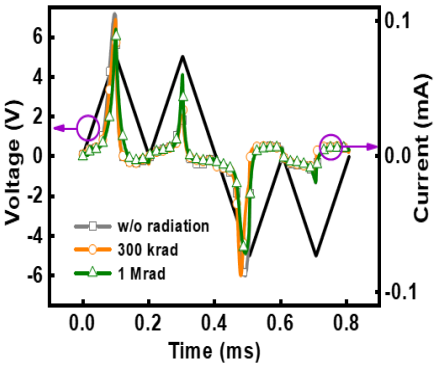


圖 3 p-FeFET 於不同輻射照射劑量下之 PUND 量測結果

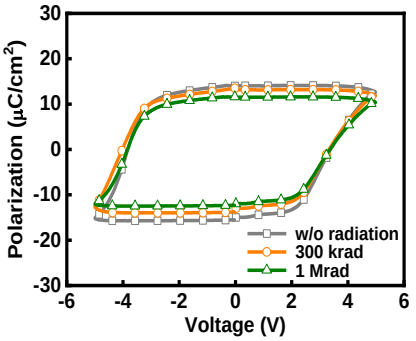


圖 4 p-FeFET 於不同輻射照射劑量下之極化量-電壓(P-V)關係圖

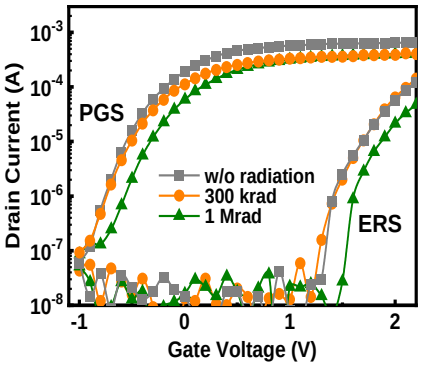


圖 5 n-FeFET 於不同輻射照射劑量下之汲極電流-電壓(I-V)關係圖

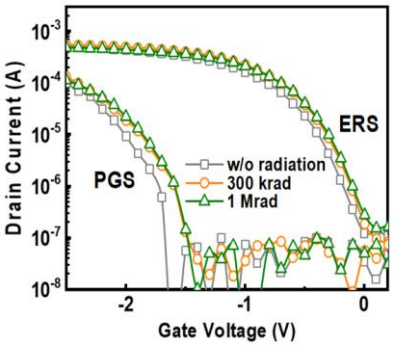


圖 6 p-FeFET 於不同輻射照射劑量下之汲極電流-電壓(I-V)關係圖

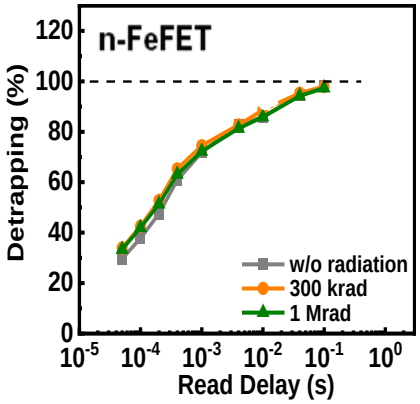


圖 7 n-FeFET 於不同輻射照射劑量下之電荷釋放-讀取延遲關係圖

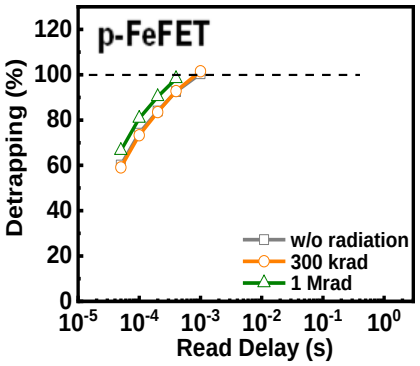


圖 8 p-FeFET 於不同輻射照射劑量下之電荷釋放-讀取延遲關係圖

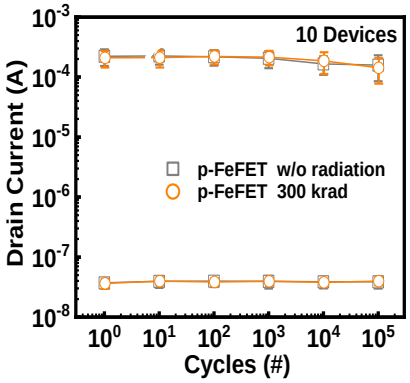


圖 9 不同輻射照射劑量下 p-FeFET 之耐久度表現

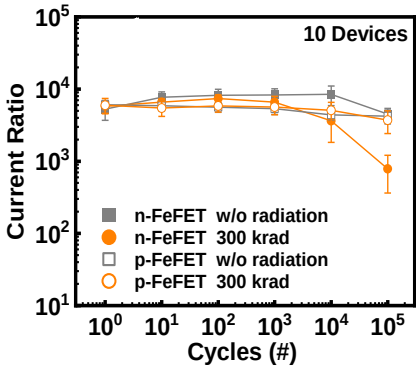


圖 10 不同輻射照射劑量下兩種 FeFET 之耐久度表現

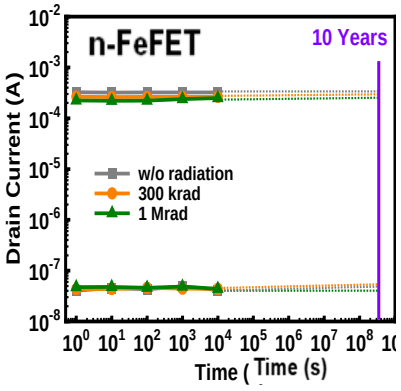


圖 11 n-FeFET 於不同輻射照射劑量下之資料保存能力

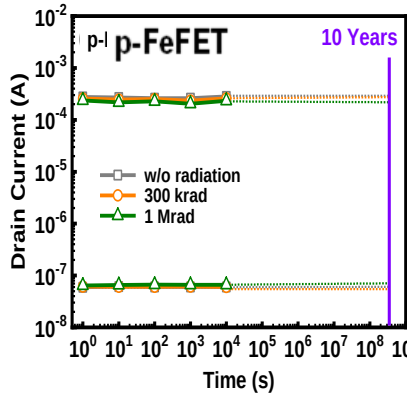


圖 12 p-FeFET 於不同輻射照射劑量下之資料保存能力

大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(III)
Synthesis of Si Quantum Dot using Atmospheric-Pressure Microplasmas (III)

計畫編號：110-NU-E-011-001-NU
計畫主持人：江偉宏
e-mail：whchiang@mail.ntust.edu.tw
執行單位：國立臺灣科技大學化工系

摘要

近年來矽量子點因具備優異的物理及化學特性，已被報導可應用於光電元件、感測材料、能源、催化與生醫相關技術等領域。然而目前矽量子點的主要製備方式製程所需時間長、前驅物成本高、操作溫度高等因素不利於工業化大量生產，加上反應機制不清楚不易控制產物結構及材料特性，尚無法實現產業應用。本計畫主要目的為建立開發大氣常壓微電漿矽量子點合成技術。本計畫構想利用低成本矽烷分子為前驅物，以高能量密度大氣常壓微電漿進行液態化學反應合成矽量子點。利用光譜研究電漿反應過程中矽量子點合成的化學機制及反應動力學。本研究計畫所開發的技術將提供學術界矽量子點基礎研究的平台，以及矽量子點未來產業應用的重要基石。

關鍵詞：矽量子點；大氣常壓電漿；合成；光致發光光譜

Abstract

In recent years, silicon quantum dots (SiQD) have attracted much attention due to their superior physical and chemical characteristics, making them useful for the applications of optoelectronics devices, sensing, energy and catalysis. In addition, they are non-toxic and biocompatible and potentially applicable in biosensing and biomaging. However, the current conventional methods to synthesis SiQD usually involve high temperature, toxic chemicals, and expensive and time-consuming procedures, hampering their commercialization. Consequently, the development the scalable synthesis of SiQD is critical for both fundamental study and applications. The goal of our study is to develop a scalable method to synthesize SiQD using atmospheric-pressure microplasmas. Moreover, the growth mechanism and kinetics of SiQD by microplasmas will be studied by *in situ* spectroscopy.

Keywords: Silicon quantum dot；Atmospheric pressure；Synthesis；Photoluminescence.

I. 前言

量子點材料可應用顯示器、LED 照明等消費型電子產品、太陽能電池、催化、藥物輸送、及生醫顯影(bioimaging)應用等。矽量子點(Silicon quantum dots; SiQDs)為零維的矽奈米材料，一般為尺度小於 10 nm 的矽奈米結構，具有良好的化學與物理特性性。由於其特殊的奈米尺寸，電子受到邊界束縛而產生量子侷限效應和邊界效應，進而衍生獨特的光學、物理與化學特性，如光致發光(photoluminescence)，已被報導可應用在光電元件、感測材料與生醫相關技術等領域。矽為地球含量相當高的元素，為目前半導體製程主要使用的材料，經適當處理對環境友善，且對人體無明顯生物毒性，因此矽量子點為相當優良的量子點材料之一。然而目前矽量子點的主要製備方式製程所需時間長、前驅物成本高、操作溫度高等因素不利於工業化大量生產，且不易控制產物結構及材料特性，尚無法實現產業應用。

電漿為半導體製程中常見的製程技術，主要應用於表面處理及薄膜沉積，是非常適合應用於材料合成及處理的製程工具(圖 1a)。大氣常壓微電漿(atmospheric-pressure microplasmas)是一種可在大氣常壓下穩定產生的微型化電漿，其電漿體直徑可控制在微米(μm)等級，具有高能量密度的特性，搭配各式反應器設計，不需要低壓或高真空度的環境，易於人員操作且設備系統簡易與低成本，在大氣常壓下操作可進行液態化學製程，近幾年來被報導可應用於奈米半導體材料合成。主要是由於此技術相較於其他方法具有簡易的操作程序與快速合成的特性。大氣常壓微電漿與傳統電漿相比更能衍生出高密度的電子與能量，進行液態化學製程時，可使得更多的高能自由基與電荷於電漿-液面界面進行電化學氧化還原反應與非電化學反應，可加速化學反應，有助於量產製程開發。大氣常壓微電漿為非熱平衡反應，具高反應動力學可應用於合成超小奈米(ultrasmall nano structure)/量子材料合成。大氣常壓微電漿相較於傳統電漿的優勢在於不需要低壓或高真空度的環境即可操作，因此更易於人員操作且設備系統簡易與低成本。

本計畫構想利用大氣常壓微電漿進行高產率矽量子點合成技術開發。台灣量子點相關技術開發較晚，關鍵量子點材料仍仰賴國外進口，因此開發具高穩定性及高發光效率的量子點材料對產業發展相當重要，進行量子點材料相關學術研究及產業技術對國家的永續發展有重大的影響。本計畫研究目標為開發大氣常壓微電漿矽量子點合成技術，進行電漿反應可行性研究，產物材料分析及光學特性研究，及電漿反應動力學研究。最終目標為希望開發台灣產業可使用的矽量子點合成技術。

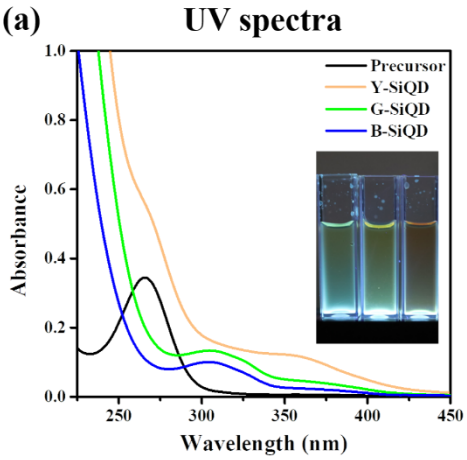
II. 主要內容

本研究利用有機矽烷分子：(3-氨基丙基)三乙氧基矽烷 (3-Aminopropyl)triethoxysilane (APTES)、無機矽酸鹽類：矽酸鈉 Sodium metasilicate (Na_2SiO_3)與電解質(抗敗血酸; ascorbic acid (A.A.))作為合成前驅物，藉由調控不同前驅物的種類與電解質的濃度，經由微電漿系統反應後，生成可調控發光波長的矽量子點。此外，本計畫更進一步探討大氣常壓微電漿系統下，如何將前驅物

經化學途徑轉換成矽量子點奈米結構，並利用調控電漿的物理參數與反應系統的化學參數達到控制矽量子點的表面結構、尺寸大小及發光特性等。本研究根據之前的研究經驗設計大氣常壓微電漿反應裝置，主要部件包括直流電 DC 高壓電源，氣體流率控制器(MFC)，化學耐高溫耐酸鹼玻璃反應槽，電子電路控制裝置及數據紀錄/控制用電腦，經組裝後進行反應測試。以下簡單扼要介紹反應流程: 首先，分別以 2 毫升 4.2 M 的 APTES 與 1.75 公克 Na_2SiO_3 作為矽的前驅物與 0.1M(A.A.)作為電解質，並加入超純水配置總體積為 10 毫升前驅物溶液，接著進行大氣常壓微電漿反應。電漿反應系統的陽極為白金片(platinum)，經由 150 kΩ 的電阻連接到電流供應器；陰極則是對氬氣施以高電壓產生的自由電子和帶電離子及中性分子所組成的氣體，通過內徑為 180 微米的不銹鋼毛細管導入到溶液界面。氬氣氣體流率約為 25 sccm (standard cubic centimeter per minute)，電漿電流約為 5~10 毫安培，兩電極間距離為 1.5 公分，經過 10~70 分鐘的電漿反應。在完成反應器架設且完成初步反應之後。本計畫進行系統化研究電漿參數對產物產率及材料結構及特性的影響。物理參數為時間、電流。本研究將進一步探討不同實驗參數設置對產物產率，結構，及發光性質的影響。

III. 結果與討論

為了對矽量子點做有效的發光波長調控，在固定系統中矽前驅物 APTES 的濃度下，藉由改變電解質的濃度，並對其調控濃度，經由大氣常壓微電漿反應後且改變時間，可得發光波長分別為 460、510 與 530 奈米的矽量子點。亦可從 UV 可見光吸收圖譜中觀察到明顯的矽量子點 n → π*吸收峰，此外，利用 PL 光譜可觀察電漿前後的比較與明顯的紅移發光現象，與文獻結果符合(圖 1、2)。目前研究成果利用氬氣氣體流率 25 sccm (standard cubic centimeter per minute)，電漿電流 8 毫安培，兩電極間距離為 1.5 公分，經過 60 分鐘的電漿反應可完成矽量子點合成反應。



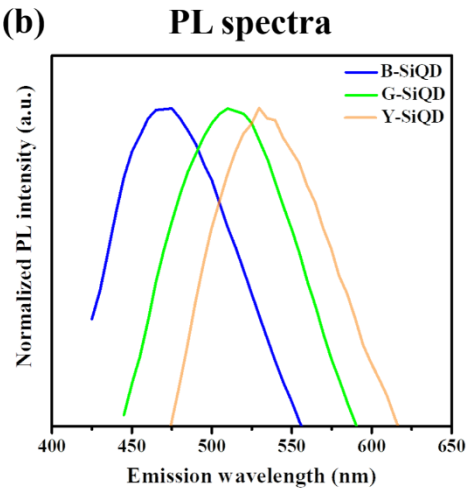


圖 1. (a) APTES 前驅物進行電漿反應前後之 UV 可見光吸收圖譜 (內圖為矽量子點在 UV 燈源激發下照片)。(b) 不同發光波長矽量子點之 PL 光譜。

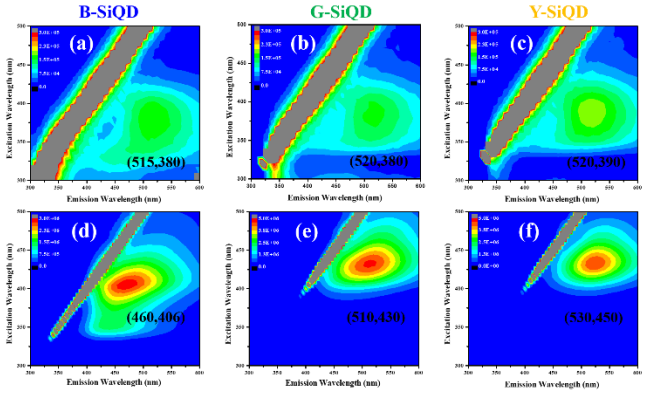


圖 2. APTES 與抗敗血酸電漿反應結果。(a)-(c)未進行電漿反應之 PL mapping 圖。(d)-(f)不同發光波長矽量子點之 PL mapping 圖。

為了比較不同前驅物對矽量子點做有效的發光波長調控，固定在系統中的無機矽前驅物 Na_2SiO_3 的濃度下，藉由改變電解質的濃度，並對其調控濃度，經由大氣常壓微電漿反應後且改變時間，可得發光波長分別為 445、530、550 與 560 奈米的矽量子點。亦可從 UV 可見光吸收圖譜中觀察到明顯的矽量子點 n → π*吸收峰，此外，利用 PL mapping 亦可觀察電漿前後的比較與明顯的紅移發光現象，與文獻結果符合(圖 3、4)。

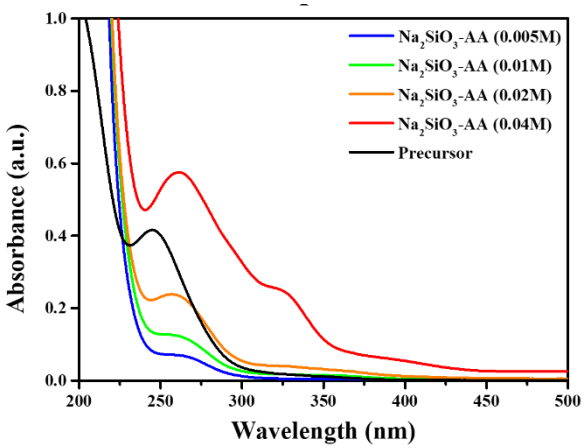


圖 3. 無機 Na_2SiO_3 與抗敗血酸製程所得可調控波長之矽量子點與前驅物進行電漿反應前後之 UV 可見光吸收圖譜。

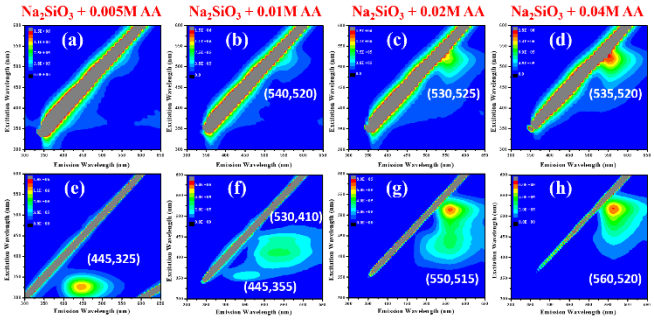


圖 4. 無機 Na_2SiO_3 與抗敗血酸電漿反應結果。(a)-(d)未進行電漿反應之 PL mapping 圖。(e)-(h)不同發光波長矽量子點之 PL mapping 圖。

穿透式電子顯微鏡通常用來分析產物其粒子大小、粒徑分布、形貌、分散狀態及結晶度，因此，本研究利用穿透式電子顯微鏡對矽量子點做進一步分析，圖 5 為以 APTES 與抗敗血酸作為電解質合成藍光、綠光與黃光矽量子點之穿透式電子顯微鏡影像(晶格面距 0.20 nm 對應於 220 晶格面、晶格面距 0.22 nm 對應於 211 晶格面、晶格面距 0.28 nm 對應於 200 晶格面、晶格面距 0.31 nm 對應於 111 晶格面)，結果顯示本研究經由大氣常壓微電漿處理後成功將有機矽烷前驅物合成出矽量子點，並均勻分散在溶液中。我們亦利用影像分析及電腦軟體代入高斯函數，並建立趨勢線以分別計算出粒徑大小約為 2.92 ± 0.71 nm、4.42 ± 0.79 nm、3.99 ± 0.19 nm (圖 5d-f)。

此外，我們亦對無機 Na_2SiO_3 以抗敗血酸作為電解質合成不同發光波長之矽量子點對其做穿透式電子顯微鏡影像分析 (晶格面距 0.20 nm 對應於 220 晶格面)，結果顯示本研究經由大氣常壓微電漿處理後成功將無機矽鹽前驅物合成出矽量子點，並均勻分散在溶液中。我們亦利用影像分析及電腦軟體代入高斯函數，並建立趨勢線以分別計算出粒徑大小約為 3.04 ± 0.63 nm (如圖 6 所示)。

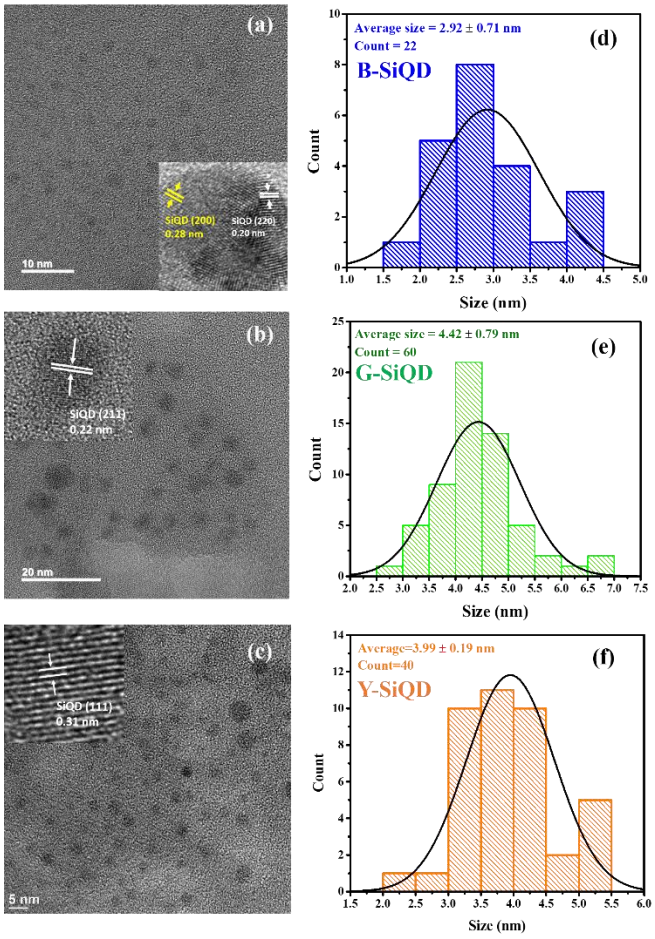


圖 5. APTES 與抗敗血酸製程所得(a)藍光矽量子點、(b)綠光矽量子點、(c)黃光矽量子點之 TEM 影像分析(d)藍光矽量子點、(e)綠光矽量子點、(f)黃光矽量子點之粒徑大小分析。

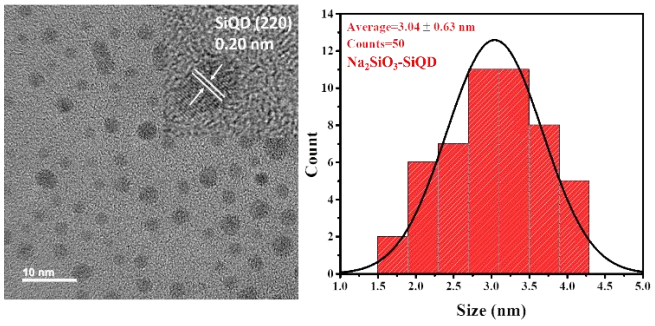


圖 6. Na_2SiO_3 與抗敗血酸製程所得矽量子點之 TEM 影像分析與粒徑大小分析。

利用 X 射線光電子能譜儀檢測，可以分析矽量子點的元素組成以及表面官能基的種類。在上述 PL 光譜儀分析中，已提到隨著改變電解質抗敗血酸的濃度可利用微電漿系統合成發光波長增加的矽量子點，由文獻回顧可以得知矽量子點表面含氧官能基的增加，會使量子點放光產生紅移現象，為了更進一步對其分析，我們進行的 XPS 的檢測，由圖 7(a-c)可分析各個矽量子點在 C1s 的表面化學鍵結，分別對應 Si-C (282.9 eV)、C-C/C=C (284.3 eV)、C-N (285.2 eV)、C-OH/C-O-C (286.3 eV)、

C=O (287.7 eV)，並對其計算含氧官能基的比例(C-OH/C-O-C 和 C=O)，可得隨著發光波長的增加含氧官能基的比例也會隨之增加(如圖 7(d)所示)，因此我們可以了解到含氧官能基對其發光波長影響的重要性。

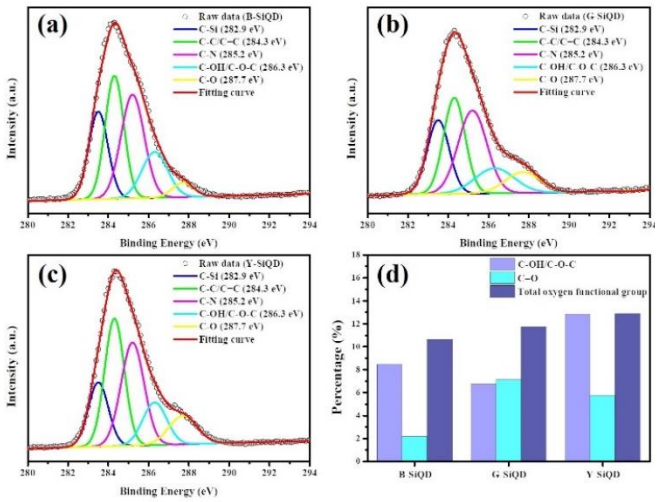


圖 7.有機矽烷與抗敗血酸製程所得(a)藍光矽量子點 (b)綠光矽量子點 (c)黃光矽量子點之 X 射線光電子能譜 C1s 鍵結分析 (d) 含氧官能基比例計算。

IV. 結論

本年度執行成果良好，分別有效利用有機 APTES 及無機 Na_2SiO_3 與電解質(AA)作為合成前驅物，藉由調控不同電解質的種類與濃度，經微電漿系統反應後，可成功合成出可調控發光波長的矽量子點。將合成之矽量子點水溶液，在 UV 燈源激發下，可觀察出明顯的紅移發光現象，並對其做光致發光檢測，確實證明發光波長分別在 445、460、510、530、550 與 560 nm。此外，亦從 UV 可見光光譜可以觀察到矽量子點的 n → π^*吸收峰，約在 320~350 nm，與文獻符合。從 XPS 的 C1s 圖譜計算其含氧官能基比例，可以研究矽量子點表面含氧官能基對發光波長的影響性。利用矽量子點在 UV 可見光圖譜中計算檢量線，並對其做產率的計算，矽量子點轉換率約 90%。矽量子點產率約 2g/hr。未來研究規劃可進行電漿反應動力學研究，研究調整反應參數以提高矽量子點的產率。

上述年度計畫成果有以下重要性: 1. 研究產物發光波長機制，提供未來研究矽量子點發光特性基礎學術研究之重要資訊。2. 計劃成果未來可延伸至與國內半導體產業結合，開發前瞻半導體/量子材料合成製程技術，未來可應用於奈米半導體材料合成。本計畫成果具高度學術創新性，進行前瞻電漿技術合成半導體量子點材料學術研究，可發表高品質高影響力學術論文，提升我國於電漿及量子材料研究的國際能見度。本計畫具高產業價值性，開發電漿技術及量子材料合成技術，可以加強我國產業於電漿及量子材料的研發能量。本計畫具重大社會價值，前瞻半導體量子點材料可以應用於癌症及重大疾病預防偵測，毒品快速偵測降低犯罪率，環境毒化物監控增進國家社會安定及人類福祉永續發展。

太空環境之積體電路與記憶體元件的輻射效應與製程研究
Radiation effects and process study of integrated circuit and memory devices for space environment

計畫編號：110-NU-E-007-002-NU
計畫主持人：張廖貴術
e-mail：lkschang@ess.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

抗輻射積體電路(IC)元件在太空科技與半導體產業製造上，都有很重要的應用。閘介電層製程是發展積體電路金氧半、快閃記憶體元件很重要的研究課題，而先進積體電路元件必須使用高介電係數材料(high-K)。為了改善 high-K 材料與半導體基材之界面特性，本研究應用 high-K/半導體的界面或 high-K/介電層工程以形成閘堆疊，可增進金氧半場效電晶體(MOSFET)、鰭式場效電晶體(FinFET)特性，及快閃記憶體元件操作效能。另外，本計畫探討 MOSFET、FinFET、及快閃記憶體元件之輻射效應，進行總游離輻射劑量測試及開發 high-K 閘介電層製程以增進其抗輻射特性。實驗發現經輻射照射後，元件特性衰退以 MOSFET 最為嚴重，然後是 FinFET。快閃記憶體的寫入及抹除速度皆隨著輻射劑量的增加而變慢，輻射效應對於耐久力特性並沒有明顯的影響，經輻射照射之元件皆表現更好的電荷保持力。本研究計畫之成果，可作為抗輻射積體電路製程整合之範例，並瞭解輻射傷害之物理機制及提出減少傷害的可能方法。

關鍵詞：抗輻射，太空，閘介電層，金氧半場效電晶體，鰭式場效電晶體，快閃記憶體元件

Abstract

The radiation hardening integrated circuit (IC) devices are important for the applications in the science and technology of space and semiconductor industry production. The research topic of gate dielectric process is crucial for MOS and Flash devices in IC. High-K gate dielectrics have to be implemented in modern IC. To improve the property of high-K material/semiconductor interface, gate stack formed with interface engineering will be studied in this project. Then, MOSFET, FinFET, and Flash devices with excellent characteristics can be achieved. Besides, radiation effects of MOSFET, FinFET, and Flash devices will be investigated. It is found that the degradation of electrical characteristics in MOSFET is the most serious, followed by FinFET. The programming and erasing speeds of flash memory both slow down as the radiation dose increases, and the radiation effect has no significant effect on the endurance characteristics. The device with radiation exposure all show better charge retention characteristics. The results of this project would provide a good example of the integration of radiation hardening IC process. The physical mechanism of radiation-induced damage on MOS device and the reduction of radiation damage are better understood as well.

Keywords: Radiation hard, space, gate dielectric, MOSFET, FinFET, Flash device

I. 前言

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。半導體製造在我國更是一重要產業，其中積體電路(IC)技術水準已領先國際。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。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。由於系統整合晶片的發展趨勢，元件之間隔離的困難將增加，所以各種製程方法正積極進行中，如高速離子植入等。再者，由於電漿製程已大量使用在超大型 IC 製造，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。

而在傳統的平面 Bulk CMOS 電晶體中，閘極只能控制通道的上方，通道的下方是接到基座(substrate)或 well，因此 Bulk CMOS 閘極上的電壓對通道控制性比較弱，並且基座常常是雜散的漏電流傳導路徑。如前所述，FinFET 的閘極對通道有比較好的控制性，因此可以抑 short-channel 效應，並減少 Drain 與 Source 之間的次臨界漏電流。另外，也因為 FinFET 的閘極對通道有良好的控制性，因此在閘極與通道之間的絕緣層(gate oxide)可以做得厚一點，較厚的 gate oxide 可以有效地抑制閘極的漏電流。一般而言，FinFET 之間的通道，通常不做 doping 或只做輕微的 doping，使得 FinFET 電晶體的載子移動率(carrier mobility)會較高，並且 doping fluctuations 所造成的元件變異(device variation)也較小。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。

而半導體元件的發展比較上世紀的傳統元件已經出現較大的不同，更多的元件結構(如: 多閘極電晶體 Multi-Gate Transistor，快閃記憶體元件 Flash memory device，等等)，及越來越多基板種類（Ge，SiGe，GaAs，三五族半導體等等）已經有大量的研究報告。而關於新元件新材料，對於他們未來應用在太空領域及核能相關領域的研究仍然是有待探討，其中一個關鍵是缺乏相關元件對於高輻射環境的可靠度測試。為了避免半導體元件在高輻射環境下失效造成核子安全事故或太空系統

失效等問題，造成無法挽回的損失，確定元件在輻射能量傷害下造成的劣化程度及抗輻射能力非常重要。另外一個關鍵是如何利用相關製程技術提升元件的抗輻射能力，以期望可以達到高輻射環境的使用標準。因此，本研究將以金氧半場效電晶體(MOSFET)及快閃記憶體元件(Flash)受輻射傷害之元件可靠度為研究重點。

快閃記憶體 (Flash memory) 同時具備了許多優點如，非揮發性、高積集度、快速寫入/讀取、可直接於系統中重複寫入資料、高擦寫次數、低消耗功率、低成本、單一電源供應等，因此快閃記憶體近年來快速崛起，其中固態電子元件式硬碟機(Solid State Disk)的應用已漸漸取代現有硬式磁碟。目前仍有許多研發的空間以期增進其工作效能、減少工作電壓及功率、增加記憶容量等。快閃記憶體又稱非揮發性記憶體(non-volatile memory)，主要分為浮動閘極（Floating Gate）及電荷陷阱式（Charge trapping -Substrate）兩種結構 [11, 12]。為了增進 flash device 工作效能，高介電係數(high-k)材料、能帶工程的效應大都建立於平面本體元件上，但是這些效應在複晶矽快閃記憶體元件上的影響卻少有相關文獻。我們使用二氧化鉿(HfO2)/氮化矽(SiN)堆疊而成的能帶工程儲存層(BETL)來改進複晶矽奈米線(nanowire, NW)記憶體的電性[13]。根據實驗結果，使用二氧化鉿/氮化矽堆疊式能帶工程擷取層，並運用在奈米線通道結構上，寫入抹除速度以及電荷保持力皆有效地提升，同時也保有著良好的元件耐寫抹特性。因此，本研究擬開發抗輻射之積體電路 MOSFET、Flash 元件製程，以期提升我國 IC 元件製造技術水平。

本研究計畫之主要目的係開發金氧半場效電晶體(MOSFET)及快閃記憶體(flash)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。本研究計畫之目標有三項，一為 high-K 閘介電層 MOSFET 之製作與抗輻射量測，二為 MOSFET、FinFET、GAAFET 元件輻射效應之比較分析，三為積體電路 Flash 元件製程開發、元件製作與抗輻射量測，四為福爾摩沙衛星七號電子元件之抗輻射資料蒐集與分析研究。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

本實驗的金氧半電晶體製程部分，其中 SOI 金氧半電晶體的電容無法被量測，因此另製作相同閘極堆疊的平面電容器，得以模擬計算出電晶體的等效電容，這兩部分的實驗是同時進行的，流程與結構示意圖如圖 1 所示。實驗樣品使用八吋 P 型單晶矽晶片，晶格方向為(100)，電阻值為 8~22 Ω-cm。利用 EBL 微影技術，得以在同一晶片上精準控制各種不同的電晶體之線寬，蝕刻出通道，定義出主動區，接著在 RCA 清洗過程中，本實驗樣品不同的地方就是在此處，在使用 DHF 清理 Native Oxide 時，為了做出不同閘極結構，分別浸泡不同秒數，進而達到通道下的 SiO_2 絕緣層(BOX)蝕刻，用 H_2O_2 成長介面氧化層 IL，接著用 ALD 沉積出高品質的高介電層 HfO_2，完成閘極層堆疊。沉積完介電層後，依序進行閘極金屬沉積、閘極圖形定義與蝕刻、離子佈植、快速熱處理退火、隔離氧化層覆蓋、接觸窗口定義及蝕刻、連接金屬沉積以及金屬燒結，完成此實驗元件。鈷(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(I_d-V_g)、直流特性曲線(I_d-V_d) 、臨界電壓(V_{th})、最大轉導值(Gm_{max})、汲極電流(I_d)、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 C_{gb}、J_g-V_g。

本實驗的快閃記憶體製程部分，表 1 為多晶矽奈米線通道之無接面式快閃記憶體樣品列表，如列表中顯示，本實驗使用多晶矽作為通道材料，搭配雙層電荷儲存層來完成閘極堆疊，並製備於電阻值 8~12 Ω-cm 的六吋矽晶圓上，完成以多晶矽薄膜電晶體平台形成之快閃記憶體元件，再將元件分別照射 10 k、100 k、1000 k（rad）三種鈷（Co）-60 輻射劑量。前製片之堆疊方式，以低壓化學氣相系統（LPCVD）在 980 ℃的環境下，於矽晶圓上利用濕式氧化的方式成長 100 奈米（nm）的二氧化矽（SiO_2），以及於 780 ℃的環境下沉積 50 奈米（nm）的氮化矽（Si_3N_4），完成前製片的堆疊。接著再同樣以 LPCVD 沉積厚度約為 100 奈米(nm)的非晶矽(α-Si)，並以固態結晶（Solid-phase crystallization, SPC）的方式長晶，形成多晶矽，接著利用中電流離子佈植機以劑量 1E15，能量 30 KeV，以磷（P^{31+}）摻雜，使未摻雜之多晶矽反轉為所需的 N-type，再使用快速升溫退火機台（RTA）以 900 ℃、30 秒退火來活化植入的離子。後續經過數道的薄膜沉積及微影蝕刻製程，利用側壁空間（sidewall spacer）作為蝕刻阻擋層（hard mask）的方式，再以光阻保護源極與汲極（Source/Drain）和蝕刻阻擋層保護通道，形成微小線寬的奈米線結構。閘極堆疊的部分，以快速升溫氧化（RTO）在 900 ℃的環境下，進行 30 秒的方式，形成厚度約 3 奈米（nm）的 SiO_2 作為元件的穿隧氧化層；再利用 LPCVD 在 780 ˚C 的環境下，沉積約 4 奈米（nm）的 Si_3N_4 作為電荷儲存層的前端；接著使用原子層化學氣相沉積系統（ALD）沉積 4 奈米（nm）的 ZrO_2 做為後段的電荷儲存層；而在後續的阻擋氧化層則是使用 ALD 沉積 16 奈米（nm）的氧化鋁（Al_2O_3），並以物理氣相沉積系統（PVD）沉積 100 奈米（nm）的 TiN 作為金屬閘極層，之後再經過數項後段製程步驟，完成元件製作。最後，再將製備完成的元件送至國立清華大學原子科學技術發展中心之同位素館的鈷（Co）-60 照射場，來進行 10 k、100 k、1000 k（rad）三種鈷（Co）輻射劑量的照射工作。圖 2 為本實驗樣品 ZrO_2 元件通道剖面之穿透式電子顯微鏡（Transmission electron microscope, TEM）圖像，透過 TEM 圖可以觀察到奈米線閘極的通道切面。其奈米線通道寬度約為 22 奈米（nm），通道高度約為 15 奈米（nm）。而透過穿透式電子顯微鏡圖像可以清楚觀察到二氧化矽（SiO_2）、氮化矽（Si_3N_4）、二氧化鋯（ZrO_2）以及氧化鋁（Al_2O_3）堆疊之穿隧氧化層、電荷儲存層與阻擋氧化層，並可進一步了解各層之間的厚度關係。製備樣品時是使用國立交通大學奈米中心 Fjji F202DC ALD 機台沉積，奈米中心當時所提供的鍍率如下（加熱式原子氣相沉積方式）：二

氧化鋯（ZrO_2）：0.98 Å/cycle，氧化鋁（Al_2O_3）：1.07 Å/cycle。

III. 結果與討論

本研究計畫依照原規畫工作完成了 high-K 閘介電層 MOSFET 之製作與抗輻射量測，MOSFET、FinFET、GAAFET 元件輻射效應之比較分析，積體電路 Flash 元件製程開發、元件製作與抗輻射量測等。本實驗之結果分成兩部份去探討，第一部份為不同輻射傷害對不同閘極結構之電特性分析以及可靠度測試，第二部份為快閃記憶體(Flash)元件製程開發、元件製作與抗輻射量測。以下分別簡要敘述主要的結果。

1.不同輻射傷害對 MOSFET、FinFET、GAA-FET 之電特性比較

不同結構 Planar、FinFET、GAAFET 的閘介電層是一樣的，圖 3 為不同形式電晶體經 100k rads 照射後之汲極電流對閘極電壓(Id-Vg)圖，圖 4 為不同形式電晶體經 100k rads 照射後之汲極電流對汲極電壓(Id-Vd)圖。(a)Planar MOSFET 有嚴重的劣化，已沒有操作特性。(b)鰭式電晶體(FinFET)僅有些微衰退，(c)全環繞式電晶體(GAAFET)幾乎不受影響，有最佳的抗輻射能力。所以，FinFET 與 GAAFET 元件的立體通道結構，具有更好的靜電控制效應，抗輻射傷害的能力也大幅提高。

2. Flash 元件製程開發、元件製作與抗輻射量測

實驗中臨界電壓是由選用定電流的方式獲得，採用的參考電流值為 10^{-9} A，圖 5 為 ZrO2 樣品分別承受 10 k、100 k、1000 k（rad）三種輻射劑量照射後，在初始狀態下，給定 0.5 V 的汲極電壓，執行 IV 掃描，並以汲極電流對閘極電壓作圖表示。

此四個元件的導通電流及開關電流比，皆隨著輻射劑量增加而有減少的趨勢，如表 2 數據顯示，無輻射之元件其導通電流約為 $1.02x10^{-6}$ A，開關電流比約有 6.5 個數量級；經 10 k 輻射劑量照射之元件其導通電流約為 $6.59x10^{-7}$ A，開關電流比約有 6.3 個數量級；經 100 k 輻射劑量照射之元件其導通電流約為 $4.53x10^{-7}$ A，開關電流比約有 6.2 個數量級；經 1000 k 輻射劑量照射之元件其導通電流約為 $1.24x10^{-7}$ A，開關電流比約有 5.6 個數量級。

IV. 結論

本研究計畫完成了預期的工作項目，由研究結果得知，經過不同的輻射傷害後，Planar 相對 FinFET 與 GAAFET 而言，有嚴重的劣化，因有更好的靜電控制能力，抗輻射傷害的能力也大幅提高。另外 GAAFET 在不同輻射傷害下，在各種特性參數都有著更好的抗輻射能力。從汲極電流與源、汲極轉換特性之對數圖中發現，經不同輻射劑量後，源、汲極接面有著不同程度的傷害，以 Planar 最為嚴重，依序是 FinFET 與 GAAFET。由電性結果可以推測，輻射對整體元件都有傷害，在低劑量時隨機發生傷害外，隨著輻射劑量的增加，接近閘極邊緣的源、汲極接面傷害最為嚴重。

本研究也探討 Si3N4/ZrO2 堆疊電荷儲存層之多晶矽無接面式快閃記憶體元件承受不同鈷（Co）輻射劑量後，輻射效應對於記憶體的操作速度及可靠度的影響。無輻射之 ZrO2 元件相較於其他三種輻射劑量照射之元件，具有相對較大的導通電流、開關電流比及較小的次臨界擺幅。次臨界擺幅會隨著輻射劑量增加而增大。在寫入及抹除速度方面，皆會隨著輻射照射劑量的增加而變慢，使速度依劑量增加而變慢。在耐久力特性上，無輻射之元件以及經不同輻射劑量照射之元件具有相似的表現，顯示輻射效應對於耐久力特性並沒有明顯的影響。而電荷保持力方面，無輻射之 ZrO2 元件外插十年後，只剩餘 71 %，隨著輻射照射劑量從 10 k 增加至 1000 k 時，三種經輻射照射之元件皆表現出比無輻射之元件更好的電荷保持力。

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] K.S. Chang-Liao and L.C. Chen., J. Vac. Sci. & Tech. B15(4), p.942 (1997).
[6] T.P. Ma, IEEE ED-45, p.680 (1998).
[7] X. Guo et al, IEEE EDL-19, p.207 (1998).
[8] X. Guo et al, IEEE 1999 IEDM, p.137.
[9] H.F. Luan et al, IEEE 1999 IEDM, p.141.
[10] W.J. Qi et al, IEEE 1999 IEDM, p.145.
[11] M.H. White et al., IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 16(4), p. 22, 2000.
[12] W.J. Tsai et al., IEEE International Reliability Physics Symposium, p. 34, 2002.
[13] Z. H. Ye et al., IEEE Electron Device Lett., vol. 33 (10), p. 1351, 2012.
[14] Y. Sun et al., IEEE Trans. Electron Devices, vol. 58, p. 1329, 2011.。

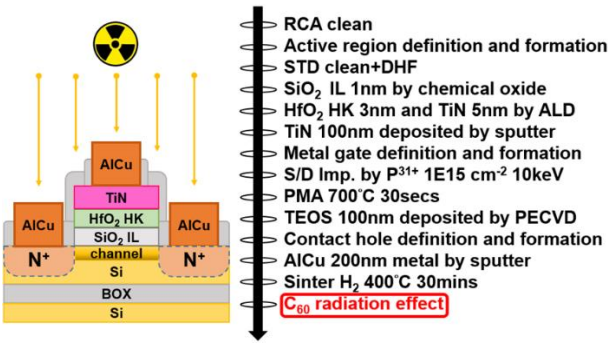


圖 1 本計畫 FET 之元件製程結構與流程圖

表 1 快閃記憶體元件實驗樣品列表

Sample	ZrO_2			
Radiation dose	X	10 k	100 k	1000 k
Gate	TiN 100 nm (PVD)			
Blocking	Al_2O_3 16 nm (ALD)			
Trapping	ZrO_2 4 nm			
	SiN 4 nm (LPCVD)			
Tunneling	SiO_2 3 nm (RTO)			
Channel	poly-Si (JL)			
Structure	Tri-Gate			

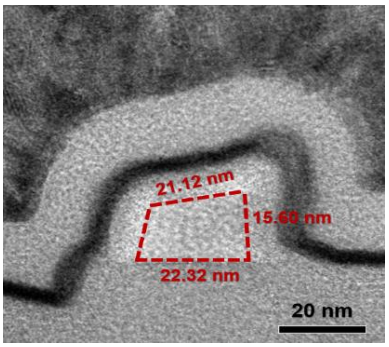
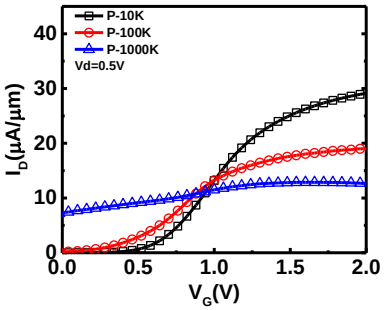
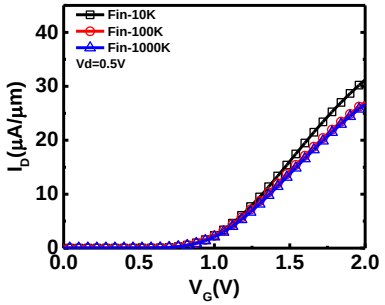


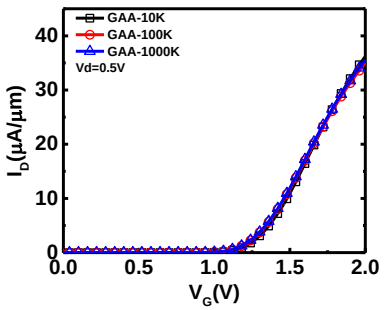
圖 2　ZrO_2 樣品之元件通道剖面圖



(a) MOSFET(傳統平面式)

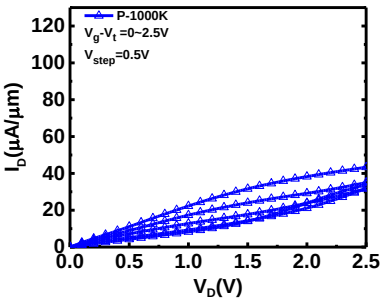


(b) Fin FET (鰭式)

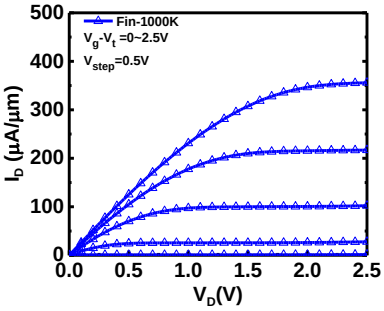


(c) GAAFET(環閘式)

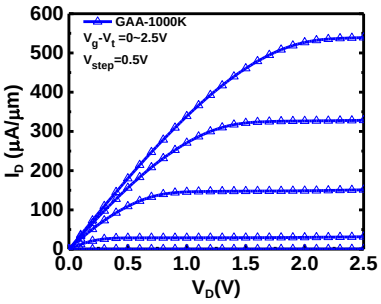
圖 3　不同形式電晶體經 100k rads 照射後之汲極電流對閘極電壓(Id-Vg)圖



(a) MOSFET(傳統平面式)



(b) Fin FET (鰭式)



(c) GAAFET(環閘式)

圖 4　不同形式電晶體經 100k rads 照射後之汲極電流對汲極電壓(Id-Vd)圖

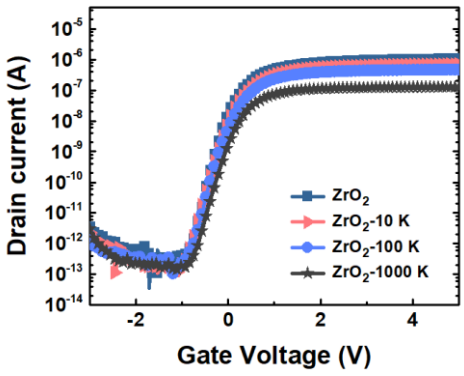


圖 5　ZrO_2 樣品受不同輻射劑量傷害之汲極電流對閘極電壓特性圖

表 2　ZrO_2 樣品受不同輻射劑量傷害之電特性比較表

ZrO_2				
Sample	X	10 k	100 k	1000 k
S.S.(mV/dec)	142	158	167	178
I_{on} / I_{off} ratio	6.51	6.35	6.26	5.67
I_{on} (A) @V_G=V_{th}+3.5V	1.02E-6	6.59E-7	4.53E-7	1.24E-7
I_{off} (A)	3.18E-13	2.93E-13	2.5E-13	2.67E-13

以多重混和電漿製程研製高性能 IGZO 薄膜電晶體元件
Developing the high-performance IGZO thin-film transistors by using the multiple plasma mixture treatment process

計畫編號：110-NU -E-155-001 -NU
計畫主持人：劉維昇
e-mail：wsliu@saturn.yzu.edu.tw
計畫參與人員：姜煜、吳世華、徐愷揚、陳冠儒
執行單位：元智大學電機工程學系

摘要

本計劃主旨在利用雙閘極製程改善經高密度電漿處理後的 IGZO 薄膜電晶體元件特性，使電晶體元件具有更高的場效遷移率與元件操作可靠性。研究中發現採用氧氣混合電漿進行 IGZO 薄膜表面改質，將降低薄膜的氧空缺密度與電子濃度，使得薄膜電阻率隨之上升，並可提升薄膜內的載子遷移率。本計畫以此為研究基礎，成長含氫鈍化層並進行退火 300 ºC 後，採用雙閘極薄膜電晶體元件製程，使調整通道層位置可降低表面缺陷態對於元件操作傳導載子的影響，因此可提升電晶體操作特性得到優異的場效遷移率為 58.8 cm^2 / V-s、次臨界擺幅為 0.12 V / decade、關閉電流為 7.32×10^{-12} A 以及 5.46×10^8 的電流開關比。研究結果表明，鈍化層退火及雙閘極應用於電漿處理 IGZO 電晶體，展現出優異的元件特性，有助於提升大型顯示器之發展潛力。

關鍵詞：薄膜電晶體、雙閘極、電漿處理

Abstract

The main purpose of this project is to use the dual gate design to improve the characteristics of IGZO thin-film transistors after high-density plasma treatment, so that the transistors can have higher carrier field-effect mobility and device operation reliability. During the study, it was found that the surface modification of the IGZO thin film with oxygen mixture plasma could lead to the reduction of the oxygen vacancy density and electron concentration of the thin film, leading to the increase in the thin-film resistivity, with improvement of the carrier mobility. This project is developed based on this research. After growing a hydrogen-containing passivation layer and annealing at 300 ºC, a dual-gate thin-film transistor device process is adopted, so that adjusting the position of the channel layer can reduce the influence of surface defect states on the operation and conduction carriers of the device. Therefore, the transistor operating characteristics can be improved to obtain an excellent field mobility of 58.8 cm^2 / V-s, a subthreshold swing of 0.12 V / decade, an off current of 7.32×10^{-12} A, and a current on-off ratio of 5.46×10^8. The research results show that the application of annealed passivation layer and plasma-treated IGZO transistors with dual-gate design could exhibit the excellent device operation characteristics, which is helpful to enhance the development of large-scale displays.

Keywords: Thin Film Transistor, Dual Gate, Plasma Processing

I. 前言

隨著科技不斷進步，顯示器產業隨著發展在全世界占有舉足輕重的地位。在過去的顯示器中均有著體積大、重量重、螢幕尺寸大小受到限制等等許多缺點，然而新一代的顯示器開始朝向厚度薄、重量輕、螢幕尺寸越來越大的趨勢；因此厚度較薄、面積較小之薄膜電晶體(Thin Film Transistor)開始備受重視[1]。

近年來，透明氧化物薄膜電晶體相較於傳統的非晶矽或低溫多晶矽薄膜電晶體引起業界及學界重大關切，主要因其具備優越的遷移率，可低溫製程、高穿透率、製造成本低、可使用濺鍍製程等優良特性，故可應用於許多光電元件或是軟性電子顯示器，均有相當高的應用潛力。目前主要研究為氧化鋅(ZnO)、氧化銦鎵鋅(IGZO)兩種材料應用於電晶體通道層。

因 IGZO 薄膜為非晶結構，所製作出的電晶體臨界電壓飄移幾乎一致。將 IGZO 薄膜運用在面板生產上，預期可提高面板性能、降低成本，且在 a-IGZO 薄膜電晶體中，電子霍爾遷移率是非晶矽薄膜電晶體的數十倍。因此，a-IGZO 可以將電晶體尺寸縮小，並保有同樣效能，由此優勢將可提高液晶面板畫素的開口率，較易實現高精細化與高解析度之顯示面板。

雖然 IGZO 是非常有潛力的通道層材料，但 IGZO TFT 通常需要經過 400°C 的退火製程以改善其元件操作電性與穩定性，而現今有許多應用是使用柔性基板，無法經過太高溫的製程，故使用了預電漿處理再熱退火製程的方式，不僅可降低所需退火的溫度，遷移率的優化也更勝單純爐管退火的效果。此外 TFT 元件設計中採用雙閘極設計，可藉由且頂部和底部雙閘驅動方式調整通道層位置，使通道層中傳導載子分布於通道層中間，以降低介電層與通道層薄膜界面態的散射效應與傳導影響，因此可以增加元件的載子場效遷移率，並提高元件導通電流與轉導(g_m)以及趨近於零的導通電壓。

II. 主要內容

2.1 單閘元件實驗方法

本計畫採用 Si 基板，並使用電漿增強式化學氣相沉積(PECVD)在 Si 基板上沉積 500 nm 厚的 SiO_2 層以減少 TFT 元件的漏電流，然後通過雙電子束蒸鍍(ULVAC, E-gun) 沉積 50 nm 厚的鋁閘極，接著使用 PECVD 沉積了 250 nm 厚的 SiO_2 層作為閘極絕緣層，再使用射頻 (RF) 磁控濺鍍系統在 5×10^{-3} Torr，與

Ar/O_2 (32/1 sccm) 電漿環境下沉積 IGZO 通道層，並通過高密度電漿（Unaxis/Nextral 860L，HDP，RF 功率 = 100 W）系統進行電漿處理，O_2 混合氣體流量比（O_2/Ar+O_2）為 16%、20%, 和 33%，分別標記為樣品 TFT-A、TFT-B 和 TFT-C，亦製作未經 O_2 電漿處理的 IGZO 薄膜，作為比較對照參考試片。最後再使用 E-gun 沉積 300 nm 厚的鋁作為源/汲極(S/D)。單閘極元件結構圖如圖 2.1。

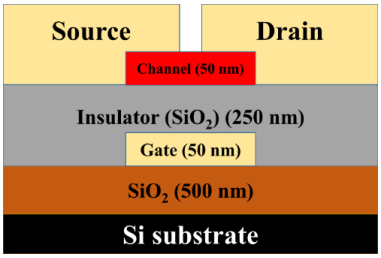


圖 2.1、單閘極電晶體元件結構圖

最後透過霍爾量測設備、原子力顯微鏡(AFM)、X 射線繞射儀(XRD)以及 X 射線光電子能譜儀(XPS)量測薄膜品質，以及探究元件之電特性。

2.2 雙閘元件實驗方法

以單閘電晶體元件為基礎，在上層再成長 250 nm 的 SiN_X 與 50nm 厚度的鋁金屬作爲 Top gate，圖 2.2 為雙閘薄膜電晶體元件結構圖。

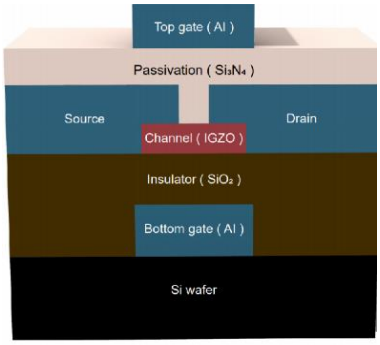


圖 2.2、雙閘極電晶體元件結構圖

III. 結果與討論

3.1 IGZO 薄膜量測結果

3.1.1 霍爾量測

在這項研究中，霍爾測量用於分析和比較 未經電漿處理的 IGZO 薄膜（即原始 IGZO 樣品）和 IGZO 薄膜樣品 A、B 和 C 的薄膜電特性，如圖 3.1。隨著電漿中的氧氣比例增加到 33%，由於 IGZO 薄膜中氧空缺密度的減少，IGZO 薄膜的載子濃度從 4.6×10^{19} cm^{-2} 降低到 1.5×10^{17} cm^{-2}，其薄膜電阻率亦從 0.02 Ω-cm 增加到 34.5 Ω-cm。此外，從原始 IGZO 樣品到樣品 C，可觀察到載子遷移率從 1.3 cm^2/V-s 增加到 12 cm^2/V-s。由於 IGZO 金屬氧化物薄膜半導體中的氧空缺起到了貢獻電子濃度的施體的作用，經由此計畫成果，本研究團隊發現到經由氧氣電漿處理減少的 O_2 空缺密度是 IGZO 薄膜中電子濃度降低和載子遷移率增加的主要原因[2]。

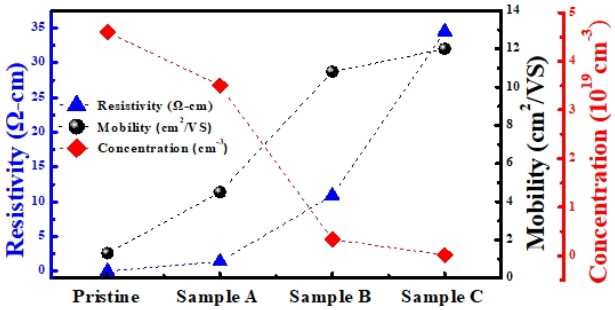


圖 3.1、不同電漿處理的 IGZO 薄膜 Hall 量測關係圖

3.1.2 AFM 量測

為了研究 O_2 電漿處理的 IGZO 薄膜的表面形態，本計畫使用 AFM 研究了電漿處理的 IGZO 薄膜的 RMS 表面粗糙度，分析結果如圖 3.2 所示。測量結果表明原始 IGZO 薄膜的表面粗糙度為 0.35 nm。 樣品 A 在電漿處理後 IGZO 薄膜的表面粗糙度增加到 0.51 nm，這是由於電漿處理過程中離子轟擊對 IGZO 薄膜表面造成的物理損傷。隨著電漿中氧濃度的進一步增加，樣品 B 的薄膜表面粗糙度降低至 0.45 nm，樣品 C 降低至 0.4 nm。在混合電漿中，電漿處理後的薄膜表面粗糙度隨著 O_2 比例的增加而降低，因為減少了離子轟擊造成的損害。此外，表面散射效應會導致載子遷移率降低，因此，降低的表面粗糙度有助於將載子遷移率提高，此推論也在霍爾量測中得到證實。此外，研究表明，使用純 Ar 電漿處理獲得的薄膜表面粗糙度高於使用純 O_2 電漿處理獲得的薄膜表面粗糙度 [3-5]，這歸因於 Ar 原子擁有更高的原子質量（Ar 為 39.9 u、O_2 為 15.9 u）以及更大的共價半徑（Ar 為 107 pm，O_2 為 62 pm）。

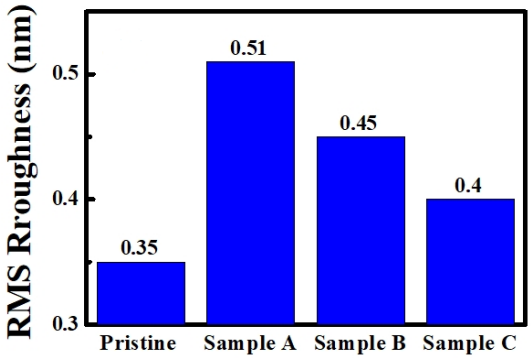


圖 3.2、電漿處理前後薄膜之表面粗糙度比較

3.1.3 XRD 量測

圖 3.3 顯示原始 IGZO 薄膜和樣品 A、B 及 C 的 XRD 圖譜。正如結果所示，此研究中所有 IGZO 薄膜皆表現出非晶結構。這是因為不同的 O_2 流量在進行 O_2 電漿處理時可降低 O_2 空缺的密度，但並不會改變 IGZO 薄膜的材料結構。研究表明，具低退火溫度（＜600℃）的 IGZO 薄膜會保留其非晶結構，而 a-IGZO 薄膜中具有高載子傳遞的原因為 In 5s 軌道的球對稱重疊所致[6-8]。因此，本研究中 O_2 電漿處理的 IGZO 薄膜表現出非晶態結構，而樣品 C 的載子遷移率上升原因為減少薄膜內載子缺陷散射密度的關係。

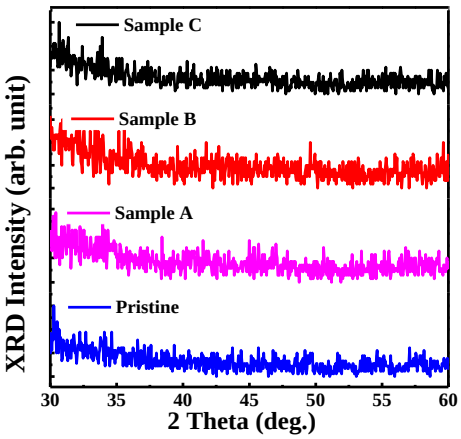


圖 3.3、IGZO 薄膜 X 光繞射圖

3.1.4 XPS 量測

XPS 用於研究使用各種氧氣流量比下所獲得的電漿處理之 IGZO 薄膜的化學特性。透過對比圖 3.4 中 O 1s XPS 譜線的高分辨率掃描，本計畫探究了電漿處理過程中氧流量比和氧空缺的關係。圖 3.4 (a)顯示原始樣品的 O 1s 峰之 XPS 光譜。樣品 A、B 及 C 的 XPS 之 O 1s 峰分別如圖 3.4 (b)-(d)所示。

IGZO 薄膜的 O 1s 表現出不對稱的束縛能，由兩個混合的高斯-勞倫茲函數組成並且對應於 O_I 及 O_{II}，它們的中心分別為 530.3 和 531.3 eV [9]。O_I 峰代表氧離子與 Zn、Ga 及 In 陽離子的共價鍵，而 O_{II} XPS 信號峰則代表氧空缺。因此，IGZO 薄膜中 O 1s 核心能級的 $O_{II}/(O_I+O_{II})$ 積分強度比，可被用來判斷薄膜內氧空缺比例以及氧化物薄膜材料品質。由研究結果，經計算後可得到未經電漿處理之 IGZO 樣品之 XPS $O_{II}(O_I+O_{II})$強度比為 0.40，然而樣品 A、B 及 C 在增加氧氣電漿流量比例後，其電漿處理之 IGZO 薄膜的強度比卻較低，分別為 0.38、0.34 和 0.28。可發現隨著氧氣電漿比例的增加，氧化物半導體內的氧空缺密度亦隨之下降，說明了氧化物半導體薄膜的品質提升。

由於氧空缺在 a-IGZO 薄膜中發揮了提供電子的關鍵施體作用，因此在 XPS 測量中所觀察得到較低 O_{II} 峰強度，可以解釋霍爾量測中樣品 C 中較低的載子濃度及較高的載子遷移率 [21,22]。

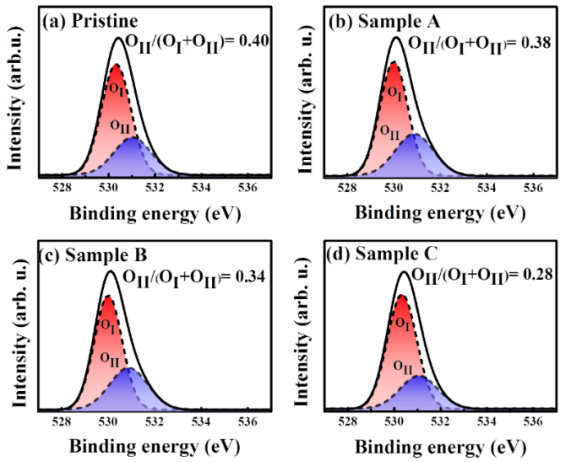


圖 3.4、高分辨率 O 1s XPS 光譜和 IGZO 薄膜的曲線擬合結果：(a)未經電漿處理樣品 (b) 試片 A、(c) 試片 B 和 (d) 試片 C。

3.2 單閘極薄膜電晶體(SG-TFT)電性量測

經由電漿處理之單閘極薄膜電晶體(SG-TFT)元件電性量測之 I_{DS} - V_{GS} 轉換特性曲線，如圖 3.5 所示。此量測固定 V_{DS} 電壓控制固定在 10 V，變化 V_{GS} 從-10 V 提升至 20 V，可觀察到所有的電晶體轉換特性皆顯示出 n-type 電晶體特性。然而未經過電漿處理的電晶體元件(Pristine)，由於電子濃度過高，因此產生過大的元件漏電流，無法關閉元件

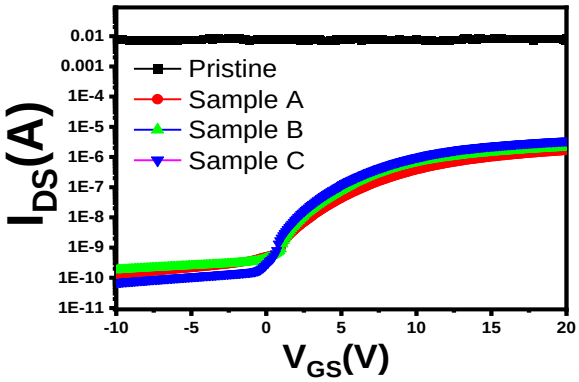


圖 3.5、單閘極電漿處理 IGZO 通道層電晶體元件之 I_{DS} - V_{GS} 轉換特性

元件特性分析量測曲線中，樣品 A、B、C，分別展現出 5.34×10^4、3.73×10^4 與 7.55×10^5 電流開關比及臨界電壓（V_{th}）分別為 1.4 V、1.6 V 與 2.2 V。TFT 元件的場效應遷移率（μ）可經由計算得到為 18、20.7 以及 36 cm^2 / V-s。因此可以瞭解到隨著氧氣電漿比例的提升，相對應的電晶體元件，可呈現出更高的場效遷移率。 另外在次臨界擺幅(S.S.)計算上，其元件 S.S.值分別從 1.71 V / decade 降至 1.25 V / decade。也說明了隨著氧氣電漿濃度的提升，元件中較低的表面粗糙度和表面陷阱能態。

表一、IGZO (SG-TFT)之電晶體特性比較表

TFT Ar/O_2	V_{th} (V)	Off current	On/Off Ratio	μ (cm^2 /V-s)	S.S. (V/decade)	N_{it} (cm_{-2})
Sample A	1.4	3.03E-11	5.34E+4	18	1.71	2.39E+12
Sample B	1.6	5.61E-11	3.73E+4	20.7	1.63	2.27E+12
Sample C	2.2	4.58E-11	7.55E+5	36	1.25	1.72E+12

圖 3.6 顯示出了不同氧氣比例電漿處理 IGZO SG-TFT 之電晶體輸出飽和特性（I_{DS} - V_{DS}）。量測中變化 V_{DS} 從 0 到 20 V，且分別施予 V_{GS} = 0、2、4、6、8、10 V 的電壓，觀察 I_{DS} 變化特性。從圖中可以觀察到在 V_{DS} = 20 V 時，氧氣電漿比例越高，則飽和電流亦隨之增加，說明經由高密度氧氣電漿處理之 SG-TFT，具有優異的場效應電晶體特性。

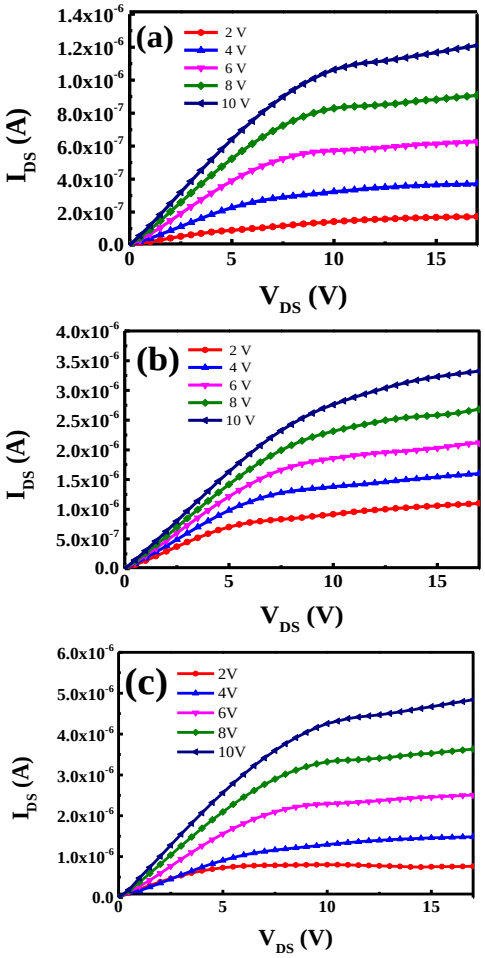


圖 3.6、(a) Sample A 、 (b) Sample B、及(c) Sample C SG-TFT 結構之電晶體輸出飽和特性曲線（I_{DS} - V_{DS}）

3.3 雙閘極薄膜電晶體(DG-TFT)電性量測

根據上述結果，我們瞭解到使用 33%的氧氣流量比（樣品 C）進行電漿處理之 a-IGZO 薄膜具有最好的元件特性，因此使用 33%的氧氣流量比之電漿處理製造 DG-TFT，並以熱退火 100 °C、200 °C、300 °C 保持 a-IGZO 通道層的非晶結構和減少施體能態及 a-IGZO TFT 元件之截止電流確保 IGZO TFT 元件的高性能。圖 3.7 顯示了使用 100 °C ~ 300 °C 的低退火溫度進行元件熱處理後，所量測得到 DG TFT 的 I_{DS}-V_{GS} 元件特性圖，此外，相關的元件特性亦總結於表二。

量測結果可發現經由 100 °C 熱退火的試片 C，可表現出 39.7 cm^2/V-s 的高場效載子遷移率，臨界電壓(V_{th}) 為 0.8 V，電流開關比為 3.64×10^6。當退火溫度提高到 200 °C 和 300 °C 時，試片 C 的場效載子遷移率亦分別顯著提高至 42.6 cm^2/V-s 和 58.8 cm^2/V-s，同時電流開關比為分別為 2.73×10^7 和 5.46×10^8。此外，S.S. 從 0.20 下降到 0.12 V/decade，通道層陷阱態（Nt）從 2.03×10^{11} cm^{-2}/eV 下降到 8.75×10^{10} cm^{-2}/eV。經由測量結果表明，退火製程改善了經電漿處理的 DG IGZO TFT 的元件特性，不僅由於氧空缺數量的減少，還可能藉由雙閘極設計，調整通道層傳導位置，降低了界電層/通道層表面陷阱態對於通道層載子所造成的表面散射效應，另外也有可能是經由 PECVD 製備表面界電層，殘留的氫原子在高溫驅動下，擴散進入了通道層，因此頓化了表面陷阱態，所以可提升元件操作特性。

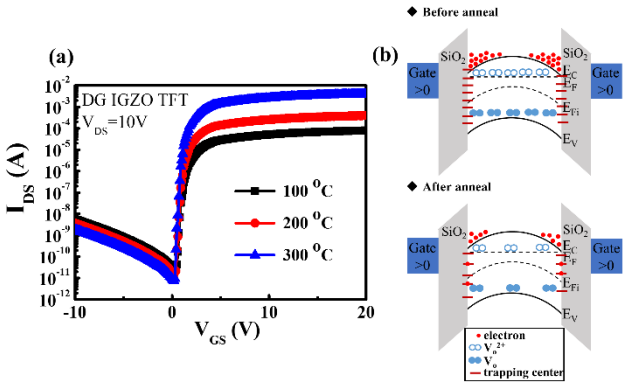


圖 3.7、以 100 °C、200 °C、300 °C 退火處理後之 IGZO 雙閘極薄膜電晶體元件 I_{ds}-V_{gs} 電流電壓轉換曲線圖

表二、IGZO (DG-TFT)之電晶體特性比較表

DG TFT (°C)	V_{th} (V)	Off current	On/Off Ratio	μ (cm^2/V-s)	S.S. (V/decade)	N_{it} (cm_{-2})
100	0.8	2.17E-11	3.64E+6	39.7	0.27	3.05E+11
200	0.8	1.45E-11	2.73E+7	42.6	0.20	2.03E+11
300	0.8	7.23E-12	5.46E+8	58.8	0.12	8.75E+10

3.4 雙閘極薄膜電晶體(DG-TFT)可靠性測試

由於 TFT 元件中，IGZO 背通道層中之陷阱捕獲態容易從從大氣中吸收水氣和氧氣，導致元件漏電流增加與 V_{th} 偏移，因此薄膜電晶體元件的操作可靠特性，亦為判斷元件操作特性的重要參考指標。本計畫針對元件操作可靠性進行正偏應力(PBS)與負偏應力(NBS)可靠性測試，觀察元件 V_{th} 的偏移，以了解退火對元件陷阱密度的影響。研究中發現當 IGZO 背通道層吸收水氣時，會釋放電子導致氧空缺電離形成 Vo^{2+}並使 V_{th} 產生負偏移，如圖 3.8 (c)；而當陷阱捕獲態吸收氧氣時，將導致氧空缺減少，使電子被捕捉導致 V_{th} 正偏移，如圖 3.8 (d)[10]。

在 100 ˚C、200 ˚C 和 300 ˚C 下退火的 DG IGZO TFT 的 0~1800 秒的 PBS 可靠性測試中，100 °C 的 ΔV_{th} 為 0.8 V，隨著退火溫度提升至 200 °C 和 300 °C 時，ΔV_{th} 分別下降到 0.7 V 和 0.6 V，而在負偏應力時， ΔV_{th} 也由-1.6 V 分別降到-1.4 V 與-1 V，說明隨著退火溫度提高，通道層與介電層接面處的陷阱密度減少，因此可以提高元件操作穩定性。

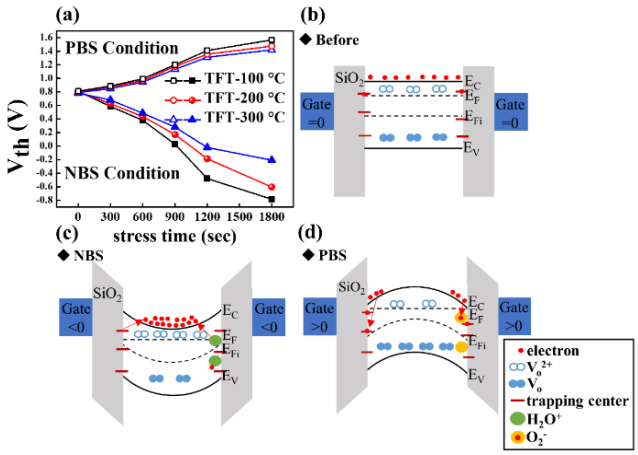


圖 3.8 (a) 經由不同低溫熱退火處理之 DG TFT 在 0~1800 秒的 PBS 與 NBS 後，臨界電壓偏移比較，與(b)可靠性測試前、(c)NBS 測試後與(d)PBS 測試後能帶示意圖

IV. 結論

本計畫以不同通氧含量電漿處理，改善 IGZO 氧化層薄膜品質，並搭配低溫熱退火製程改善雙閘極薄膜電晶體之元件操作特性。研究中以 O_2 氣體流量比為 16%、20%以及 33%的高密度的氧氣與氫氣混和電漿對 IGZO 薄膜電晶體之通道層進行電漿表面處理，並發現較高氧流量電漿處理之 IGZO 氧化物半導體薄膜，具有較高薄膜表面平坦度與載子遷移率之優秀材料特性。以此優秀 IGZO 氧化物材料，結合創新雙閘薄膜電晶體元件結構，可改善元件導通電流、降低次臨界擺幅(S.S.)、提升載子場效遷移率，並降低電晶體之臨界導通電壓。更可藉由後續熱退火處理方式，進一步改善 IGZO 薄膜電晶體元件之操作穩定性和可靠性。

在本研究中，可發現於濺鍍沉積過程中，IGZO 薄膜由於高濃度的 Ar 電漿轟擊，造成氧化物半導體薄膜表面高濃度的氧空缺。同時也因為氧空缺提供大量電子，因此導致薄膜電晶體元件較大的元件漏電流。使用 Ar/O_2 混合電漿處理之 IGZO 薄膜通道層，可以有效減少材料內氧空缺密度，以及元件的漏電流。研究發現，採用 33% Ar/O_2 混合電漿比例處理之 IGZO TFT 元件可具較佳元件特性，其場效遷移率可高達 36 $cm^2/V\text{-}s$，元件電流開關比達 7.55×10^5。

根據上述研究結果，後續採用 300 °C 低溫熱退火處理 TFT 元件，由於 PECVD 沉積的氮化矽薄膜介電質材料中採用 SiH_4 作為 Si 來源，薄膜製備過程中所產生的裂解氫原子，將因為退火製程處理而擴散進入 IGZO 氧化物半導體薄膜內，可有效鈍化 IGZO 氧化物半導體薄膜內的氧空缺密度，因此可抑制電晶體內的過剩載子以及元件漏電流，進而得到較高的電流開關比、G_m 值以及趨近於零的導通電壓，其元件場效遷移率可高達 58.8 $cm^2/V\text{-}s$，開關比達到 5.46×10^8，以及最佳的元件操作穩定性。

參考文獻

[1] James T. Lin et al., Computers & Industrial Engineering, Vol. 59 ,pp.720–729 , 2010.

[2] Han Wang, Wangying Xu et al., J. Appl. Phys. 117 035703, 2015

[3] Liu P, Chen T P, et al., Thin Solid Films 545 533, 2013

[4] Sokolov A S, Jeon Y-R et al., J. Alloys Compd. 822 153625, 2020

[5] Wu C-H, Yang F-C, et al., Surf. Coat. Technol. 303 209, 2016

[6] Sellers J , Surf. Coat. Technol. 108 496, 1998

[7] Nomura K, Kamiya T and Hosono H, Solid State Sci. Technol. 2 5, 2013

[8] Ahn B D, Jeon H-J, Sheng J, Park J and Park J-S, Semicond. Sci. Technol. 520 1679, 2012

[9] Nayak, P.K.; Hedhili, M.N.; Cha, D.K.; Alshareef, H.N., Appl. Phys. Lett, 100, 202106, 2012

[10] Liu, W.-S.; Huang, C.-L. Semicond. Sci. Technol. 35, 025004, 2020

機器人累計輻射劑量最少路徑規劃
Minimum Cumulative Radiation Dose Path Planning for Robots

計畫編號：110-NU-E-002-003-NU
計畫主持人：陳湘鳳
e-mail：ssmith@ntu.edu.tw
執行單位：國立臺灣大學機械工程學系

摘要

當核電廠達到其運行壽命的終點時，需要進行除役工作。最重要的除役策略之一是如何規劃一條最佳的路徑，使工作人員暴露到的累積輻射劑量最少。本研究開發了兩種仿生啟發式演算法，分別使用粒子群優化 (particle swarm optimization, PSO) 演算法和基因演算法 (genetic algorithm, GA)，進行最小劑量路徑規劃。為了評估這兩種啟發式演算法的有效性，本研究模擬了兩種極端的假設環境。一個是小而稀疏的環境，另一個是大而雜亂的環境。在累積劑量、計算時間和距離方面，將開發的仿生啟發式演算法與先前的最小劑量路徑規劃演算法進行比較。結果顯示，在兩種假設環境中，PSO 在累積劑量和距離方面都優於先前的方法。然而，基因演算法僅在小而稀疏的環境中，在累積劑量和距離方面優於先前的方法。

關鍵詞：最少輻射劑量路徑規劃、啟發式演算法、粒子群優化、基因演算法。

Abstract

When a nuclear power plant reaches its end of operational life, decommissioning work needs to be carried out. One of the most important decommissioning strategies is to plan an optimal path for workers or robots to move around in a radioactive environment, keeping the radiation exposure as low as possible. This paper develops two bio-inspired metaheuristic methods for minimum dose path planning using a particle swarm optimization (PSO) algorithm and a genetic algorithm (GA), respectively. To evaluate the effectiveness of the two metaheuristic methods, two extreme hypothetical environments are simulated. The developed bio-inspired metaheuristic methods are compared with prior grid-based and sampling-based minimum dose path planning algorithms, in terms of cumulative dose, computational time, and distance. The results indicate that PSO outperforms prior grid-based and sampling-based algorithms in cumulative dose and distance. GA outperforms only the grid-based algorithms in cumulative dose and distance.

Keywords: Power plant decommissioning, dose map, minimum dose path planning.

I. Introduction

Optimal path planning is important for autonomous mobile robots. An optimal path could be the one that minimizes the distance or the number of turns along the path. However, in nuclear power plant decommissioning, an optimal path usually means the one that minimizes the amount of cumulative dose along the path. One of the important issues in nuclear power plant decommissioning is to plan a safe path for workers or robots to move in a radioactive environment. Therefore, path planning not only makes the decommissioning process more efficient but also keeps workers or robots from being overexposed to radiation.

Prior minimum dose path planning algorithms can be classified into three categories: grid-based, sampling-based, and metaheuristic-based. For grid-based algorithms, environmental maps are partitioned into triangular, square, or hexagonal grids (Alzalloum, 2010; Chen et al., 2020; Liu et al., 2015). For sampling-based algorithms, environmental maps are scattered with randomly generated nodes (Chao et al., 2019; Wang and Cai, 2018b). For metaheuristic algorithms, bio-inspired methods are often used to evolve solutions (Liu et al., 2014; Wang and Cai, 2018a).

The Dijkstra's algorithm and A* algorithm are two popular grid-based path planners for discretized grid maps. Alzalloum (2010) developed two minimum dose path planners using the Dijkstra's algorithm and Bellman-Ford algorithm to avoid obstacles in a radiologically contaminated environment. Liu et al. (2015) proposed a walking path planner for nuclear facilities using A*. Since they set the heuristic function of A* to zero, the property of A* was not fully exploited. Chen et al. (2020) developed an improved A* algorithm for minimum dose path planning. The heuristic function was the estimated cumulative dose from the current node to the goal node. When estimating the cumulative dose, the improved A* algorithm considered multiple potential paths by expanding the detected area. However, the experimental results showed that the proposed method did not always outperform the traditional A* algorithm.

Sampling-based algorithms are based on random sampling and are extensively used for path planning because they are less computationally complex (Islam et al., 2012). However, the solution quality of the sampling-based algorithms depend on the number of sample points (Chao et al., 2018; Karaman and Frazzoli, 2010). Probabilistic roadmap (PRM) and rapidly-exploring random trees star (RRT*) are two well-known sampling-based algorithms for path planning. Wang and Cai (2018b) compared PRM with A* and found that the computational time of PRM was much less than A*, but the cumulative radiation dose was slightly more than A*. Chao et al. (2017b) used RRT* to find a minimum dose path. Experimental results showed that RRT* was capable of finding better paths than the Dijkstra's algorithm. Since the Dijkstra's algorithm was grid-based, it tended to find a zigzag and longer path.

There are some variants of RRT* for minimum dose path planning. Given the fact that RRT* shows slow convergence toward optimal paths, different approaches

were proposed to compensate for the weakness. Chao et al. (2017a) proposed a new algorithm called bias-based T-RRT* (BT-RRT*), which was a modification of transition-based RRT* (T-RRT*). BT-RRT* behaved like T-RRT* until a path was found. After a path was found, a new sampling strategy was executed to find a better path near the current path area. The results showed that BT-RRT* had a better performance in convergence toward the minimum dose path finding.

Chao et al. (2018) developed a new algorithm called grid-based RRT*(GB-RRT*). GB-RRT* inherited the advantages of RRT* and was enhanced by the strength of the grid-based searching strategy. The authors modified RRT* by applying grid nodes for obstacle area identification and utilized it for fast collision detection. The result showed that the running time of GB-RRT* was less than RRT*, especially in narrow areas and in the environments with cluttered obstacles. Chao et al. (2019) combined D* Lite and RRT*, called DL-RRT*, to find minimum dose paths in a dynamic environment. DL-RRT* avoided global re-planning by utilizing the information from the last planning, which helped to reduce computational time.

Other than the grid-based and sampling-based methods, some researchers used bio-inspired metaheuristic methods, e.g., particle swarm optimization (PSO) and genetic algorithm (GA), to find minimum dose paths. Metaheuristic algorithms are powerful techniques to solve various of optimization problems. The basic searching strategies that metaheuristic algorithms use are exploitation and exploration. Metaheuristic algorithms have the potential to obtain near-optimal solutions in a short time. However, given that the algorithms are heuristic, there is no guarantee to find a global optimal solution.

Liu et al. (2014) and Wang and Cai (2018a) applied PSO to find an optimal path in a radioactive environment. However, they solved the path planning problem like the traveling salesman problem. The number and locations of the particles were chosen manually and were fixed at each iteration. By doing so, the methods needed to use trials and errors to find the proper location for each particle, which made the methods less effective.

Santiago et al. (2017) compared the advantages and disadvantages of PRM and GA in shortest path planning. Both algorithms were implemented on a simple map and a complex map. In GA, if the path intersected with an obstacle, a penalty was added to the path. By doing so, solutions found by GA were able to avoid infeasible paths. The results showed that GA can obtain a smoother path, but it took more time to process. PRM produces a feasible path in a much lesser amount of time, but it sacrifices the smoothness of navigation.

Prior research used different approaches to find minimum dose paths in a radioactive environment. They were implemented in different simulation scenarios. The performance of each algorithm varies depending on the size and complexity of the environments. As a result, in order to compare the algorithms, it is necessary to implement them in the same scenarios. In this research, two innovative bio-inspired metaheuristic algorithms, dynamic PSO and dynamic GA, are developed to find minimum dose paths. Contrary to the prior bio-inspired algorithms, in this study, the location of each node will be updated in each iteration. The results are compared with prior approaches in terms of cumulative dose, computational time, and distance of the paths. Based on the pros and cons of each method, users can select an appropriate method for their applications.

II. Metaheuristic Algorithms

In this study, two dynamic bio-inspired metaheuristic algorithms for minimum dose path planning are developed.

2.1 Particle Swarm Optimization

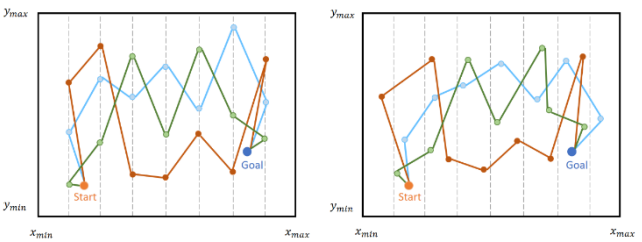
PSO is motivated by the social behavior of bird flocks or fish schools (Eberhart and Kennedy, 1995). PSO is initialized with a group of random particles and each particle represents a candidate solution. Particles are evaluated by a fitness function which is used to find the optimal solutions. Instead of using gradient descent, PSO optimizes solutions by learning from self-experience and the experiences of others. PSO records the personal best solution (or position) of each particle as individual best (pbest). The global best solution found by any particle is recorded as global best (gbest). The moving direction of each particle is influenced by pbest and gbest.

2.1.1 Dynamic PSO

In this study, PSO starts by initializing N paths, each with M nodes, including the start node and the goal node. The map is equally divided into M-1 strips, and the x coordinate of the nodes in the path is calculated by Eq. (1), where j represents the j-th node in the path, and (x_{min}, y_{min}) and (x_{max}, y_{max}) are the lower bound and the upper bound of the map, respectively.

$$\begin{gathered} x_j = x_{min} + \frac{x_{max} - x_{min}}{M-1} \times (j-1), \\ j = 2 \ldots (M-1), M > 2 \\ x_1 = \text{the start node} \\ x_M = \text{the goal node} \end{gathered} \tag{1}$$

During path initialization, the x coordinates of the nodes are fixed in order to accelerate the initialization process. The y coordinate of each node is randomly generated. Paths are formed by connecting two nodes on the adjacent trips. For example, PSO is initialized with 3 paths and each with 9 nodes, as shown in Figure 1 (a). After path initialization, the moving direction of each node in each iteration is no longer constrained, as shown in Figure 1 (b).



(a) Path initialization (b) Path updation

Figure 1. PSO path initialization (left) and during iterations (right).

In this study, the velocity and location of each node are 2-dimensional variables. The movement of each node is updated according to Eqs. (2) and (3).

$$V_{ij}^{t+1} = wV_{ij}^{t} + c_1 r_p\left(pbest_{ij} - X_{ij}^{t}\right) + c_2 r_g\left(gbest_j - X_{ij}^{t}\right) \quad (2)$$

$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^{t} + V_{ij}^{t+1} \quad (3)$$

where, i represents the i-th path, j represents the j-th node in the path, V_{ij} is the velocity of the node, X_{ij} is the position of the node, t represents the t-th iteration, w is the inertia weight, c_1 and c_2 are cognitive factor and social factor, respectively, and r_p and r_g are random numbers between 0 and 1. The personal best $pbest_{ij}$ is the best position that the j-th node in the i-th path has ever reached. The global best $gbest_j$ is the best position that the j-th node in any path has ever reached. The best position is defined as the position of each node in the path with the lowest fitness value. The fitness value is the cumulative dose along the path defined.

2.1.2 Experimental Results

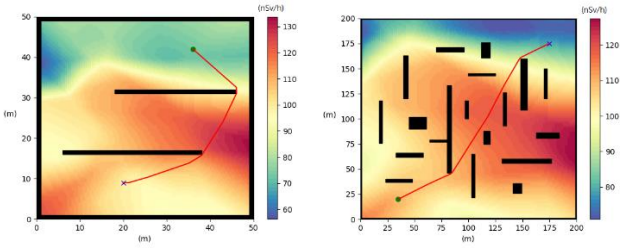
In hypothetical case 1, the parameters are set as following: number of paths = 6, number of nodes in each path = 9, maximum iterations = 60, w = 0.3, c_1 = 0.4, c_2 = 0.6, velocity bounds = [-1,1]. In hypothetical case 2, the parameters are set as following: number of paths = 8, number of nodes in each path = 11, maximum iterations = 60, w = 0.3, c_1 = 0.4, c_2 = 0.6, velocity bounds = [-1,1]. Since metaheuristic algorithms are stochastic, both the mean and the 25th percentile of the dose value, running time, and total distance of 100 runs are recorded. Tables 1 and 2 show the results of hypothetical cases 1 and 2, respectively. One of the minimum dose paths found by PSO for both cases are shown in Figure 2.

Table 1.PSO for hypothetical case 1

Algorithm	Dose (nSv)	Running time (s)	Distance (m)
Mean PSO	1.5424	30.4404	55.7068
S.D.	0.0363	10.1260	2.9016
25% PSO	1.5061	25.4466	52.6133

Table 2. PSO for hypothetical case 2

Algorithm	Dose (nSv)	Running time (s)	Distance (m)
Mean PSO	6.5778	295.8351	225.7190
S.D.	0.0826	80.4880	5.5743
25% PSO	6.5425	246.1882	219.9277



(a) hypothetical case 1 (b) hypothetical case 2

Figure 2. One of the best paths found using PSO.

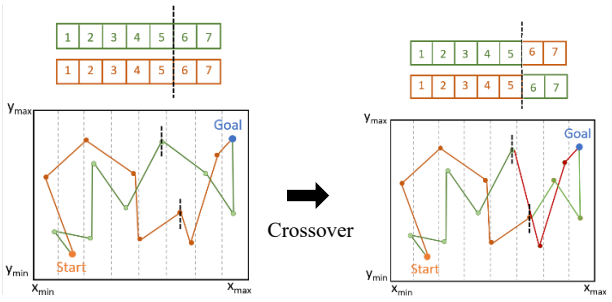
2.2 Genetic Algorithm

GA is an optimization algorithm inspired by the mechanism of natural selection (Goldberg, 1989). The principle of natural selection is that the stronger ones survive and the weaker ones die out. In each generation, GA uses the chromosomes in the current generation to produce a set of offspring as the next generation.

2.2.1 Dynamic GA

In this research, GA uses the same path initialization technique as that used in PSO. For minimum dose path planning, a chromosome represents a path, and the genes in the chromosome represent the nodes in the path. A gene is a 2-dimensional variable that represents the x and y coordinates of a node. After initializing the first population, the fitness, the cumulative dose along the path, of each chromosome is evaluated. The fitness value is the cumulative dose along the path, as defined by Eq. (3). Chromosomes with higher fitness values will have a higher chance to be selected as parents. Reproduction, single-point crossover, and mutation operators are used to generate offspring.

For the reproduction operator, the best individual in a generation is kept unchanged and reproduced to the next generation. For the single-point crossover operator, two chromosomes are selected. One is selected by the elitism selection and the other one is selected by the standard roulette wheel selection. The crossover point is randomly chosen, and the nodes after the crossover point are swapped between the two parents to generate two new paths, as shown in Figure 3. The mutation operator is used to maintain the diversity of the chromosomes from one generation to another.



(a) Before crossover (b) After crossover

Figure 3. Single-point crossover operation.

2.2.2 Experimental Results

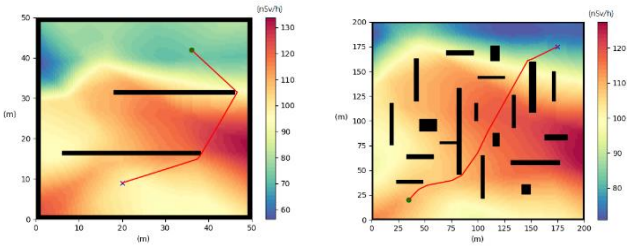
For hypothetical case 1, the GA parameters were set as follows: number of chromosomes = 10, number of genes in each chromosome = 8, crossover rate = 0.7, reproduction rate = 0.3, mutation rate = 0.8, maximum generations = 50. For hypothetical case 2, the parameters were set as follows: number of chromosomes = 8, number of genes = 11, crossover rate = 0.7, reproduction rate = 0.3, mutation rate = 0.8, maximum generations = 80. Both the mean and the 25th percentile of the dose value, running time, and total distance of 100 runs for hypothetical cases 1 and 2 are recorded. Tables 3 and 4 show the results of hypothetical cases 1 and 2, respectively. One of the minimum dose paths found by GA for both cases are shown in Figure 4.

Table 3. GA for hypothetical case 1

Algorithm	Dose (nSv)	Running time (s)	Distance (m)
Mean GA	1.5898	38.2196	56.6336
S.D.	0.0709	2.3780	3.6815
25% GA	1.5328	36.9660	53.7472

Table 4. GA for hypothetical case 2

Algorithm	Dose (nSv)	Running time (s)	Distance (m)
Mean GA	6.6931	214.2302	228.6849
S.D.	0.0946	19.7711	4.3182
25% GA	6.6398	202.4872	226.2265



(a) hypothetical case 1 (b) hypothetical case 2

Figure 4. One of the best paths found using GA.

III. Conclusions

In this study, two bio-inspired metaheuristic algorithms, PSO and GA, are developed. Two extreme hypothetical cases are simulated to evaluate the algorithms. Comparisons of the bio-inspired metaheuristic algorithms with grid-based and sampling-based algorithms are conducted in terms of cumulative dose, time, and distance. It should be noted that the grid resolution and sampling strategies affect the performances of the algorithms. They can be used to trade the optimality of cumulative dose for computational time. Compared to the grid-based algorithms, both PSO and GA can find a much smoother path and perform better in both hypothetical environments. Compared to the sampling-based algorithms, PSO performs better in both hypothetical environments, but GA performs better only in the small and sparse environment. The results also show that the developed bio-inspired metaheuristic methods usually take longer time to run. Based on the pros and cons of each path planner, users can choose a most suitable one for their specific applications.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Ministry of Science and Technology in Taiwan for supporting this research under contract MOST 110-NU-E-002-003–NU.

References

[1] Alzalloum, A.-Q. (2010) Application of Shortest Path Algorithms to Find Paths of Minimum Radiation Dose. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.

[2] Chao, N., Liu, Y.-K., Xia, H., Ayodeji, A., Bai, L., 2018. Grid-based RRT∗ for minimum dose walking path-planning in complex radioactive environments. Annals of Nuclear Energy. 115, 73-82.

[3] Chao, N., Liu, Y.-K., Xia, H., Bai, L., 2017a. Minimum dose path planning in complex radioactive environments with sampling-based algorithms. 25th International Conference on Nuclear Engineering, Shanghai, China, pp.V004T006A042.

[4] Chao, N., Liu, Y.-K., Xia, H., Peng, M.-J., Ayodeji, A., 2019. DL-RRT* algorithm for least dose path Re-planning in dynamic radioactive environments. Nuclear Engineering and Technology. 51(3), 825-836.

[5] Chao, N., Liu, Y.-K., Xia, H., Xie, C.-L., Ayodeji, A., Yang, H., Bai, L., 2017b. A sampling-based method with virtual reality technology to provide minimum dose path navigation for occupational workers in nuclear facilities. Progress in Nuclear Energy. 100, 22-32.

[6] Chen, C., Cai, J., Wang, Z., Chen, F., Yi, W., 2020. An improved A* algorithm for searching the minimum dose path in nuclear facilities. Progress in Nuclear Energy. 126, 103394.

[7] Eberhart, R., Kennedy, J. (1995) A new optimizer using particle swarm theory. MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. 39-43.

[8] Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

[9] Islam, F., Nasir, J., Malik, U.A., Ayaz, Y., Hasan, O., 2012. RRT∗-Smart: Rapid convergence implementation of RRT∗ towards optimal solution. 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Chengdu, China, pp.1651-1656.

[10] Karaman, S., Frazzoli, E., 2010. Incremental sampling-based algorithms for optimal motion planning. Robotics Science and Systems VI. 104(2).

[11] Liu, Y.-K., Li, M.-K., Xie, C.-L., Peng, M.-J., Wang, S.-Y., Chao, N., Liu, Z.-K., 2015. Minimum dose method for walking-path planning of nuclear facilities. Annals of Nuclear Energy. 83, 161-171.

[12] Liu, Y.-K., Li, M.-K., Xie, C.-L., Peng, M.-J., Xie, F., 2014. Path-planning research in radioactive environment based on particle swarm algorithm. Progress in Nuclear Energy. 74, 184-192.

[13] Santiago, R.M.C., Ocampo, A.L.D., Ubando, A.T., Bandala, A.A., Dadios, E.P. (2017) Path planning for mobile robots using genetic algorithm and probabilistic roadmap. 2017IEEE 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). 1-5.

[14] Wang, Z., Cai, J., 2018a. The path-planning in radioactive environment of nuclear facilities using an improved particle swarm optimization algorithm. Nuclear Engineering and Design. 326, 79-86.

[15] Wang, Z., Cai, J., 2018b. Probabilistic roadmap method for path-planning in radioactive environment of nuclear facilities. Progress in Nuclear Energy. 109, 113-120.

X 光分析技術應用於東方書畫之研究
Applications of X-ray analytical techniques in the studies of East Asian paintings

計畫編號： 110-NU-E-136-001-NU
計畫主持人：陳東和
e-mail：thchen@npm.gov.tw
計畫參與人員：陳韻婕
執行單位：國立故宮博物院

摘要

本計畫主要利用 X 光輻射檢測技術分析研究東方書畫，包括使用 X 光螢光分析（XRF）於材料的元素分佈掃描分析，以及利用 X 光影像技術觀察書畫材料結構層次並藉以瞭解繪畫設色、技法問題。此外，亦將視需要運用其他分析技術如 FT-IR、拉曼光譜等，輔助研究分析以獲取較為完整的書畫材料與結構訊息。藉由 X 光分析技術實際應用於故宮收藏的部分清代宮廷繪畫及唐卡等不同時期、類型之東方書畫的分析研究，建立 X 光檢測技術於書畫綜合交叉分析最佳化實驗參數與分析流程，同時著重研究方法的建立，包括利用非破壞輕元素掃描分析技術、藉由 X 光能量的調整取得最佳化影像等，以便日後能進一步結合藝術史的研究，討論繪畫技法與風格的相關議題。此外，本計畫也可建立東方書畫 X 光分析資料庫，作為未來保存、修復、藝術史研究之重要參考資料。

關鍵詞：X 光分析，X 光螢光，X 光影像，東方書畫，顏料。

Abstract

This project employs X-ray analytical techniques, including Macro-X-ray fluorescence (XRF) for elemental mapping and X-ray imaging for layer structure inspection, to study some East Asian paintings of different types and periods. Besides, FT-IR and Raman spectroscopy are also used to complement the study. Some court paintings of the Qing dynasty and Thangka are investigated to acquire detailed information about distribution of pigments and coloration in painting, which may permit us to explore the issues concerning the techniques and styles of the paintings studied in the field of history of art. The project can also establish the X-ray analytical database of the East Asian paintings as reference for conservation, restoration, authentication and art historical studies in Taiwan.

Keywords: X-ray analysis, XRF, X-ray imaging, East Asian paintings, pigments.

I. 前言

不論從書畫的保存、材質的研究，或書畫鑑識的角度而言，科技分析方法或可扮演輔助的角色，提供基本或關鍵的作品材質、技法或年代訊息。東方傳統書畫一般是以墨、礦物及動、植物顏料於處理過的紙或絹上書寫或作畫，就材料和技法上而言，與西方油畫有異。雖然所使用的顏料之原始材質或相同，但不似油畫通常以畫布或木板為基底材，於其上施繪較厚的顏料層，書畫作品整體組成較薄，墨及有機類材質常是主要材料，即便使用礦物顏料，通常亦無如油畫有厚厚堆疊的顏料層，因此，從非侵入性、無取樣的非破壞檢測分析的角度而言，確實有其技術上的限制。而在另一方面，拜科技日新月異之賜，有愈來愈多針對藝術品研究而發展或改良的非破壞檢測技術，如 X 光螢光光譜（XRF）、FT-IR 光譜、多光譜或高光譜術等，不論是靈敏度或解析度，都較過去要提高許多，對書畫的分析研究的確有所裨益。不過就書畫的科技檢測整體而言，因為相關參考資料庫有限，即使運用了新穎的光學技術獲取了材料光學圖譜，亦未必能精確地判斷材料屬性與內容；另一方面，國內結合科技分析與書畫藝術史的跨領域之整合性研究尚有待持續開拓。

關於東方繪畫的研究，日本方面過去對浮世繪及中國或日本傳統書畫也進行了不少科學分析研究，累積了一定的成果，例如東京文化財研究所的諸多研究案例，這些亦可提供國內博物館界參考。國內最早利用 X 光等輻射技術分析研究文物者應屬國立故宮博物院 （以下簡稱故宮或本院）。1970 年代故宮曾與國立清華大學合作，利用中子活化技術對青銅器與陶器分析，獲取材料中相關的元素組成資訊。1980 年代後，隨著非破壞 X 光影像技術的建置與應用，開始較有系統地進行商周時期青銅器的拍攝，對於瞭解青銅內部構造與鑄造工藝技術有極大的幫助，其中著名的案例如毛公鼎真偽問題的探討。近年來，隨著文物科學研究實驗室的成立與多項新穎的科學分析技術之建置，也開展對各類文物的研究，而在X光分析技術的應用上，大多集中於青銅器、陶瓷、玉石寶石等器物類，而針對繪畫的研究則相對較少，對於相關藝術史與材料、風格問題的探討尚有許多努力的空間。本計畫即是期望藉由 X 光技術應用於東方書畫之跨科技與人文的合作研究，拓展書畫藝術史研究領域的新視野。

II. 研究對象及方法

一、研究對象

本計畫將以故宮收藏的部份清代繪畫及唐卡作為分析研究的對象，除了所使用的顏料判定外，亦透過顏料分佈狀態、影像分析等來探究這些畫作的繪畫技法，以及紀錄繪畫的保存狀況與修復痕跡。在本研究中，將著重於實際利用 X 光分析技術解開待分析書畫中之顏料/染料層次等問題，以便日後能更進一步結合藝術史的研究，討論書畫技法與風格的相關議題。此外，亦藉由

實務經驗建立書畫分析最佳化實驗參數與流程。

1. 清代宮廷繪畫

明清時期許多傳教士進入中國，同時也陸續將西方工藝或藝術創作的一些元素及材料引進中國，特別是康熙朝之後，而其中進口琺瑯色料以及繪畫顏料在宮廷及地方的使用情形始終受到學者的關注與討論。由於新材料或新顏料的使用能為作品注入新的面貌，因此，探究作品的色彩與顏料之間的關係，實有助於瞭解作品形貌風格轉變之環節。過去雖然有不少學者引用文獻—特別是清宮內務府造辦處活計檔，討論這些顏料的使用狀況，不過由於缺乏實物實際分析結果，因此甚難有進一步的結論。

圖 1 清郎世寧繪 〈四季花卉棋盤〉 國立故宮博物院藏

圖 2 仙萼長春 冊 第四開
海棠玉蘭

圖 3 仙萼長春 冊 第八開
櫻桃桑鴿

在眾多有關中西交流的藝術作品中，郎世寧的繪畫作品毋寧是其中最具代表性之一。郎世寧(1688-1766)，原名 Giuseppe Castiglione，是出生於米蘭的義大利傳教士，於康熙五十四年(1715)進入中國，在中國居留 51 年期間，以專職畫家身份在清宮中服務，歷經康熙、雍正及乾隆三朝，乃清代西畫東漸之核心人物。郎世寧的畫作，除了帶進西方透視法及陰影表現的質素外，其設色方式與傳統中國畫亦有差異之處。在探討西畫東漸與中西藝術交流的議題中，自然不能忽略顏料層面所帶來影響。究竟郎世寧在顏料使用上與傳統中國繪畫有何不同？郎世寧早期接受西方繪畫訓練，對十七世紀以來西方的繪畫材料必然有相當程度的掌握，而其在清宮創作的繪畫中，是否使用了從西方進口的顏料？為了釐清這些問題，有必要從實際的畫作出發，進行科學檢測，確認其所使用之顏料種類。

本院曾分析清代宮廷畫家郎世寧的少部分作品，如〈錦春圖〉，雖然初步嘗試探討其所使用的顏料與設色技法，但受限於彼時儀器設備有限與實際所能進行檢測的時間，並未能獲取繪畫中較全面的顏料分佈訊息。本計畫將在先前的基礎上，持續深入分析研究郎世寧顏料與繪畫技法相關課題。

2. 唐卡分析

唐卡分析之目的包括：瞭解不同時代唐卡作品上之顏料分佈及其他繪畫材料使用情形；探討不同時期唐卡之繪製技術；與清代同時期相關繪畫及唐卡所使用之顏料與技術做比較研究；確認畫中是否有進口顏料普魯士藍的使用；提供未來保存修護之參考。

本次研究的唐卡主題為無量壽佛。無量壽佛即阿彌陀佛，是西方淨土世界的守護者。佛雙手結禪定印，趺坐於蓮花座上。主尊佛像以碩大比例和明顯地位居於正中，但在光圈外層祥雲繚繞的佈局裡，重複出現此主尊佛像的縮小圖像，頂上五尊，左右各三尊，意味著反覆背誦真言，佛法傳佈四方。

唐卡是畫在布面或紙上的卷軸畫，多以礦物顏料敷彩，因而色澤鮮麗、具裝飾性，大多是傳教或供信徒禮拜之用。藏傳佛教盛行於清代宮廷，唐卡也因而大量出現於宮中，或由西藏進貢，或由宮中製作。此畫品質極佳，據傳是乾隆為母親暖壽而作。

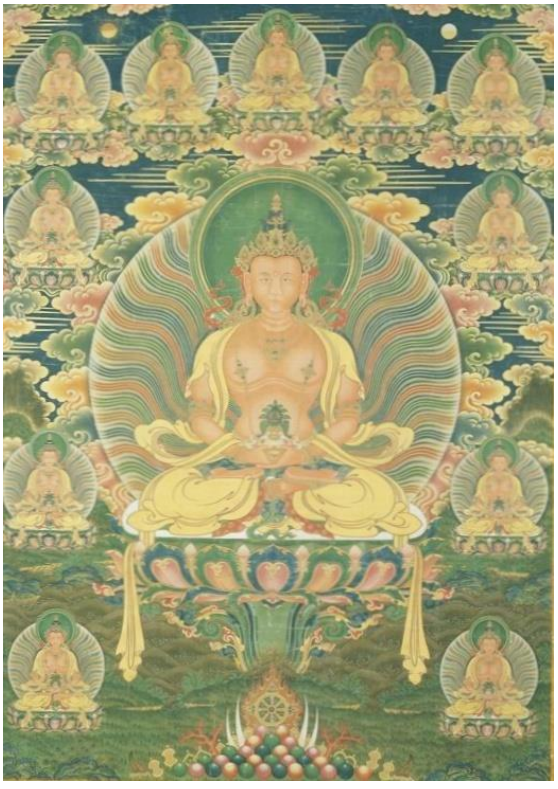


圖 4 清無量壽佛 軸 國立故宮博物院藏

二、研究方法

本研究使用的 X 光輻射檢測技術主要包括 X 光螢光分析（XRF）及 X 光影像技術，並視需要使用其他分析技術如 FT-IR、拉曼光譜及光學顯微鏡等，輔助研究分析以獲取較為完整的書畫材料與結構訊息。其中 XRF 主要利用於材料的化學成份分析，X 光影像技術則利用於觀察書畫材料結構層次並藉以瞭解繪畫設色、技法問題。

1. X 光螢光光譜分析（XRF）

XRF 技術為元素分析技術，主要利用 X 光激發材料而產生特性 X 光螢光，由於每一種元素之特性 X 光能量不同，從偵測所得之 X 光能量即可判定元素種類。XRF 視儀器精密度及設計考量，可進行非破壞之定性、半定量及定量分析。由於繪畫通常面積較大，無法置於桌上型 XRF 之樣品室中進行分析，因此，較常使用手持式 XRF 對畫作的局部微小區域進行點分析，本研究計畫中部分繪畫之分析亦使用之。不過雖然分析上方便，但手持式 XRF 無法獲取整體畫作大範圍顏料分佈狀況。有鑑於此，本院新建置了 macro-XRF 大面積微區掃描技術，不同於一般 XRF 只能作定點檢測，macro-XRF 儀可作大範圍自動掃描分析，因此可獲取繪畫中材料元素分佈影像圖(element mapping)，從而推斷畫像中顏料的分佈與使用狀況，並藉以探究繪畫技法的相關問題。

2. X 光影像術

本研究計畫中主要利用故宮建置的 X 光影像系統進行部分書畫作品之檢視。X 光影像技術廣泛應用於文物、藝術品的檢測，本院使用的 X 影像及 CT 系統可用於二維及三維影像拍攝，目前所使用的 X 光光源主要為微米級 CT 用反射式 X 光管，藉由調整 X 光能量（電壓、電流）大小，獲取最佳化影像。

3. 其他輔助分析技術

除了 X 光分析技術外，本計畫亦利用下列分析技術輔助研究計畫之進行，以獲取較完整的有關東方書畫材料、技術上的相關資訊。

3.1 一般紫外與紅外光影像

檢視及紀錄畫作原始與修護狀況，獲取不同繪畫層之相關影像訊息，提供進一步探究畫作材料與技法之參考。

3.2 可見光與紅外光之高光譜影像(含光譜訊息)

利用可見光至近紅外光(1800nm)之不同波段光源，檢視畫作，同時獲取如同指紋般的畫作材料光譜與影像訊息，提供有關於畫中的顏料、有機材質，以及其與修護所用材料之比較研究等之訊息。

3.3 FT-IR 光譜

由於 XRF 分析僅提供顏料元素訊息，而許多不同顏料中也含有相同的元素，且顏料也經常混合使用，因此，為了能更精確判定畫作中的顏料，本計畫亦利用桌上型或移動式之高解析度反射式 FT-IR 技術，不接觸畫作，直接獲取繪畫表面多處之顏料分子結構訊息，進一步正確判定顏料種類。

3.4 顯微拉曼光譜

拉曼光譜亦為分子結構分析技術，有助於判定顏料種類。此次將視實際需要(如 FT-IR 無法提供良好訊號時)，使用桌上型或移動式拉曼光譜，以非接觸、低功率、非破壞之方式與條件，進行顏料分析。

III. 結果與討論

本計畫之執行產出之影像及光譜數據甚多，觸及議題相當廣泛，此報告中僅就部分結果摘要說明之。

一、無量壽佛唐卡

唐卡分析之目的包括：瞭解唐卡作品上之顏料分佈及其他繪畫材料使用情形；探討唐卡之繪製技術；與清代同時期相關繪畫及唐卡所使用之顏料與技術做比較研究；分析畫中是否有進口顏料普魯士藍的使用；提供未來保存修護之參考。經利用 Macro-XRF 及 FT-IR 等分析技術，確認畫中所使用之各種顏料材質如金、硃砂、鉛白、石青、石綠等，同時也發現部分綠色顏料中含有普魯士藍，此一結果提供探討十八世紀普魯士藍在東方的流傳之重要參考。

在 XRF 分析部分，透過唐卡正反面之分析，可以清楚瞭解繪畫中顏料層次分佈情形，進而瞭解設色技法。以下僅就部分區域之分析結果摘要說明之。

佛像金色衣著：表層含 Au，主要使用金粉做為色料；底層含 Pb、Hg、S（混合鉛白與朱砂）。

佛像衣著紅色區域：主要為朱砂（含 Hg、S）

佛像冠飾：含 Au、Pb、As (雄黃/雌黃)。

冠飾紅色寶石：硃砂、鉛白。

綠色區域：主要元素為銅，應為石綠。

佛身膚色／橘色區域：主要含 Pb、Hg、S 等，以及微量 Fe，應由鉛白、硃砂、赭石等混合之色澤。

深藍色區域：主要含銅，應為石青。

蓮花座橘色區域：主要含鉛，可能為鉛丹。

月亮：白色區域主要為鉛白，金色部分則使用了金粉。

太陽：赭色區域底層含 Pb、As、S（鉛白、雄黃/雌黃），表層主要為 Fe（赭石）。金色底層同樣含 Pb、As、S 等，表層主要為金。

粉色雲朵：主要為鉛，推測為鉛白混合有機顏料如洋紅。

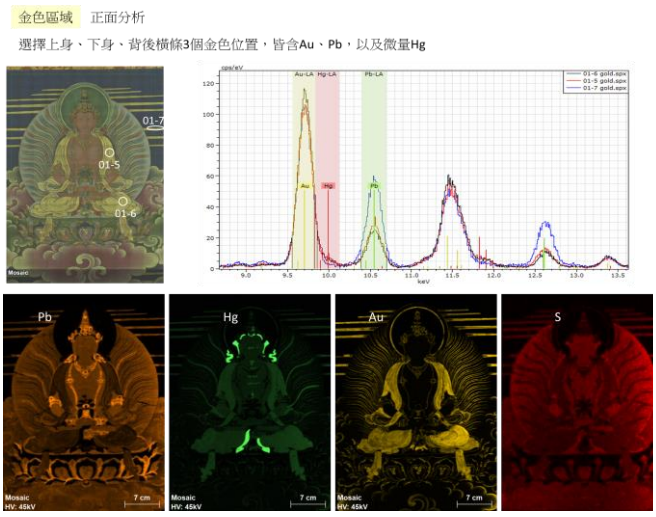


圖 5 無量壽佛唐卡之 macro-XRF 分析顏料元素分佈圖-1

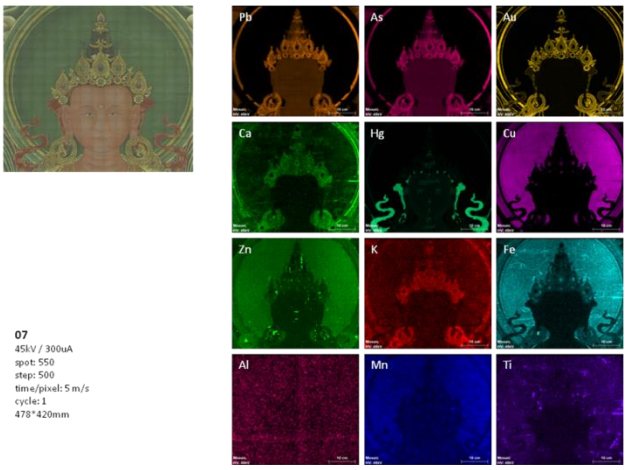


圖 6 無量壽佛唐卡之 macro-XRF 分析顏料元素分佈圖-2

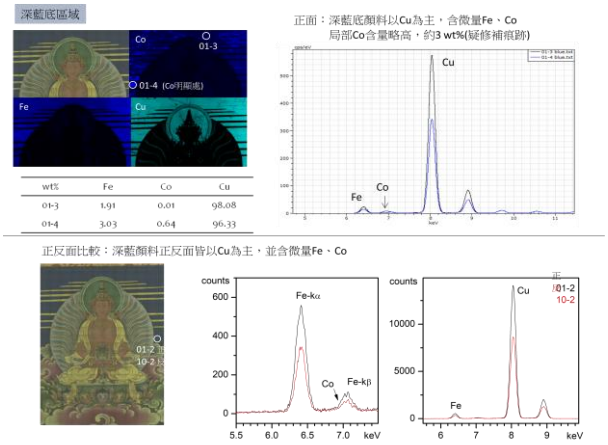


圖 7 無量壽佛唐卡之 macro-XRF 分析顏料元素分佈圖-3

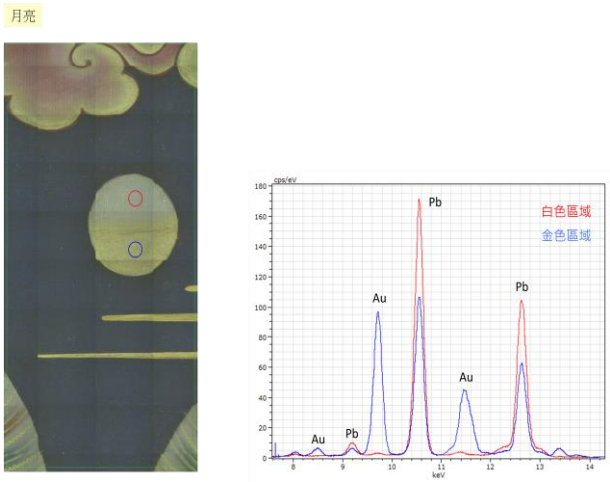


圖 8 無量壽佛唐卡之 macro-XRF 分析顏料元素分佈圖-4

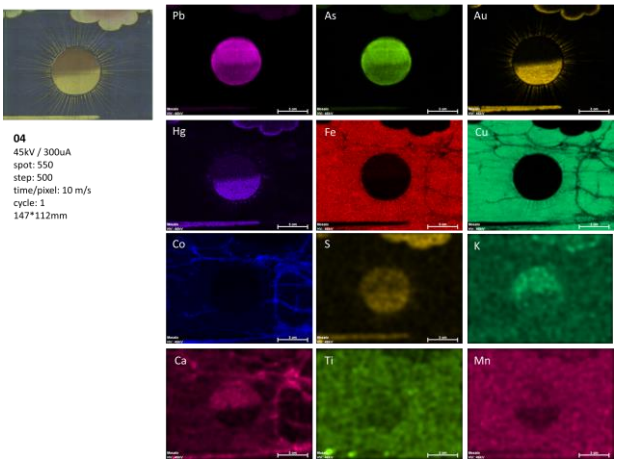


圖 9 無量壽佛唐卡之 macro-XRF 分析顏料元素分佈圖-5

二、郎世寧〈四季花卉棋盤〉

此為一摺疊的紙胎象棋盤，展開後，一面是泥金紙棋局，背面則為郎世寧所作之結合春、夏、秋、冬四季繁花盛開景緻之絹畫，繪有松竹、坡石、荷塘，及菊、梅、荷、牡丹、海棠、鳶尾、桔梗...等各色花卉，色彩飽和豔麗。

這幅畫從風格上而言，屬於郎世寧來華早期作品。由於此幅畫作非皇帝下令所畫，郎世寧顯然有較多的自由發揮空間。不論在花卉或是樹幹、枝葉以及坡岸的表現上，應是在郎氏習得中國畫的一些技法之後，結合油畫技法所畫而成。在花卉部分，具有非常典型的光影表現方式，設色上也極為豐富。

經結合拉曼光譜、X 光螢光光譜(XRF)、傅立葉轉換紅外線光譜(FT-IR)及光致發光光譜(photoluminescence)等技術之分析結果，此四季花卉棋盤上的白色花卉顏料則為鉛白，鳶尾花與桔梗花之藍色顏料主要為石青（azurite），各類花卉莖葉之綠色顏料主要為石綠(malachite)和汁綠(植物染料)，汁綠成份主要由花青(靛藍，indigo)和藤黃(gamboge)調配而成，紅色花卉部分為紅花或蘇木類植物染料混合鉛白，黃色牡丹與菊花所用顏料為藤黃調配鉛白而成。而從 FT-IR 的分析結果可知，綠色部份含有微量的普魯士藍(Prussian blue)，是目前所知東方繪畫中最早使用普魯士藍的案例，對研究普魯士藍在東亞的流傳具有重大意義。此一部之詳細論述亦將另文為之。

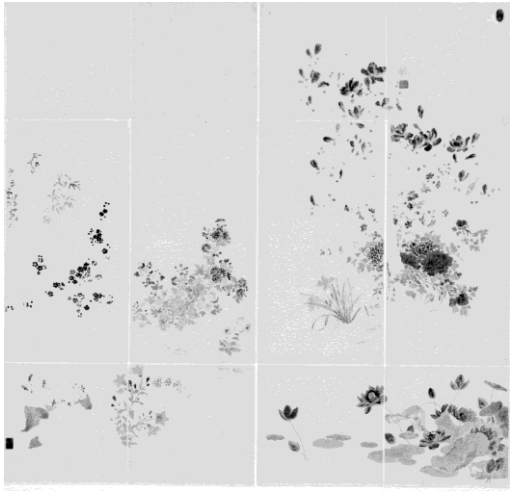


圖 10 〈四季花卉棋盤〉X 光影像

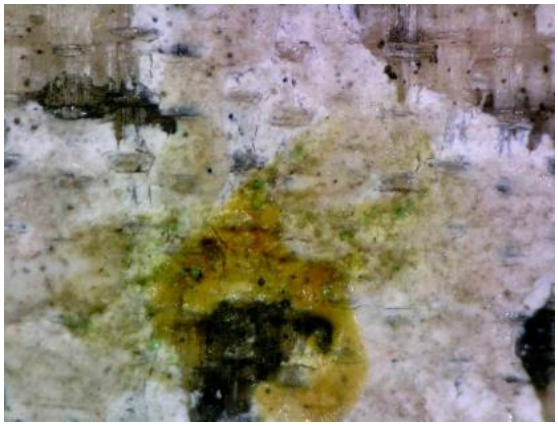


圖 11 四季花卉棋盤，梅花局部之油亮質感

三、郎世寧< 仙萼長春 冊> 絹本設色 故畫 01222

檢測的重點在於確認圖冊畫作上所使用的包括藍色、紅色、綠色、紫色、赭色及黑色等顏料種類。 經使用 XRF 及拉曼光譜分析結果顯示，此系列畫作上所使用之顏料仍屬中國傳統繪畫顏料範疇，包括石青、石綠、雌黃、鉛白、朱砂、赭石、洋紅或紅花等、花青、藤黃。紫色顏料則是利用石青與紅花調配而成。雖然初步分析看來顏料本身無特殊性，不過由於寫實與西方光影明暗技法的使用，使得此畫風格明顯有別於傳統中國花鳥畫。透過 X 光影像與紅外光影像，即可較明顯的看出畫中顏料設色情形。此外，在偏光顯微鏡下，顯示畫作部份區域有油亮光澤，應也是使用了亮面漆塗佈來增加其光影的細膩變化。

圖 12 仙萼長春 海棠玉蘭 之 X 光及 IR 影像分析結果

圖 13 仙萼長春 冊 紫白丁香 之 X 光及 IR 影像分析結果

IV. 結論

本計畫透過 X 光分析技術的使用，可以獲知繪畫中顏料的種類與設色狀況，協助探究、瞭解繪畫之技法與風格，特別是清代繪畫受到西洋材料與技法之影響，有關顏料的使用情形向來受到關注，而本計畫乃在文獻紀錄之外提供實物分析資訊，對進一步探究藝術史的相關議題或有幫助。

透過本文之簡要介紹可大致瞭解部分唐卡與郎世寧畫作中的顏料使用情況，同時也可進一步關注顏料流傳的議題，特別是普魯士藍的使用。過去檢測分析發現中國繪畫中使用普魯士藍，主要是十九世紀的作品，特別是外銷畫。在郎世寧「四季花卉棋盤」中發現普魯士藍，說明清代宮廷至遲在 1735 年前便已進口普魯士藍，這是目前所知在中國或東方藝術作品中使用普魯士藍最早的案例。此外，乾隆時期的無量壽佛唐卡中也發現普魯士藍的使用，顯示普魯士藍在十八世紀中葉後應當已為宮中經常使用的顏料之一。

參考文獻

[1] 陳東和、陳致甫，西清續鑑鏡匣的顏料檢測。國立台灣博物館學刊，67(1): 13-29，2014。

[2] 陳東和，透視蒙娜麗莎的微笑，科學人，162, 44-47，2015。

[3] 陳東和，郎世寧繪畫中的顏料與設色。激盪與新生—亞歐文化藝術的交流，國立故宮博物院，台北，2015。

[4] 張莅、陳東和（2017 年 05 月），透視青銅—院藏鄀公鼎器蓋銘文的再現。故宮文物月刊，410, 90-99。

[5] 陳東和，國立臺灣博物館藏鄭成功畫像再研究計畫期末報告，國立臺灣博物館/國立故宮博物院，2018。

[6] 陳東和，東亞繪畫中的普魯士藍，顏料與染料的科學研究工作坊，國立故宮博物院，2019 年 11 月。

[7] Almeida I. P., Schyns L. E. J. R., Ollers M. C., and Elmpt W. V., Dual-energy CT quantitative imaging: a comparison study between twin-beam and dual-source CT scanners. *Medical Physics*, vol. 44, Issue1, pp. 171-179, 2017.

[8] Alvarez R. E. and Macovski A., Energy-selective reconstructions in X-ray computerised tomography. *Phys. Med. Biol*., vol. 21, p. 733, 1976.

[9] Auweter S. D., Herzen J., Willner M. et al., X-ray phase-contrast imaging of the breast—advances towards clinical implementation. *Br J Radiol*, 2014.

[10] Birnbacher L., Willner M., Velroyen A., et al., Experimental realisation of high-sensitivity laboratory x-ray grating-based phase contrast computed tomography, *Sci. Rep*. 6, 24022, 2016.

[11] Bongartz T., Glazebrook K.N. and Kavros S. J., Dual-energy CT for the diagnosis of gout: an accuracy and diagnostic yield study, *Ann Rheum Dis*. 74, pp. 1072-1077, 2015.

[12] Bonse U. and Hart M., An x-ray interferometer. *Appl. Phys. Lett*., 6, pp. 155–156 , 1965.

[13] Bravin A., Coan P. and Suortti P. X-ray phase contrast imaging: from pre-clinical applications towards clinics. *Phys Med Biol*; 58: R1–35. 2013. Doi: 10.1088/0031-9155/58/1/R1

[14] Brooks R. A. and Chiro G. D., Beam Hardening in X-ray Reconstructive Tomography. *PHYS. MED. BIOL*., vol. 21, NO. 3, pp. 390-398, 1976.

[15] Chen, Tung-Ho and Huang, Chien-Chi, Investigation of 18th-century Chinese double-walled vases in yangcai painted enamel . TECHNART 2017: Non-destructive and microanalytical techniques in art and cultural heritage, Bilbao, Spain, 2017.

[16] Chen, Tung-Ho, Yun-Chie Chen, Chien-Chi Huang, Chien-Lin Tseng, Pigments and colouration in the 18th century Chinese court paintings of Giuseppe Castiglione (1688-1766). TECHNART 2017 : Non-destructive and microanalytical techniques in art and cultural heritage, Bilbao, Spain , 2017.

[17] Chen, Tung-Ho, Questions concerning the bronze casting techniques of Southern Song dynasty from the vessel Shaoxingdou. 亞洲鑄造技術史研究會，2017台北大會，中央研究院，台北，台灣。

[18] Chen, Tung-Ho, Huang, Chien-Chi Huang, A Cost-Effective and Versatile XRay CT Automation System for Artifact Analysis. ISMTII2015-The 12th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments , Taipei, Taiwan, 2015.

[19] Croton L. C. P., Morgan K. S., Paganin D. M. et al., In situ phase contrast X-ray brain CT. *Medical Physics*, 2018, DOI: 10.4225/03/5a56e4df15309

[20] De Viguerie, L., Walter, Ph., et al., Revealing the sfumato techniques of Leonardo da Vinci by X-ray fluorescence spectroscopy, *Angewandte Chemie* Vol. 49, 35, 6125-6128, 2010.

[21] Diekhoff T., Engelhard N., Michael Fuchs et al., Single-source dual-energy computed tomography for the assessment of bone marrow oedema in vertebral compression fractures: a prospective diagnostic accuracy study. *European Radiology*, pp. 1–9, 2018.

[22] Flohr T. G., McCollough C. H., Bruder H. et al., First performance evaluation of a dual-source CT (DSCT) system. *Eur Radiol*;16(2), pp.256–268. 2006.

[23] Holmes D. R., Fletcher J. G. and Apel A., Evaluation of non-linear blending in dual-energy computed tomography. *Eur J Radiol*. Dec; 68(3): pp. 409–413. 2008.

[24] Jerjen, I., Revol, V., Kottler, C. & Kaufmann, R. The Benefits and Challenges of Differential Phase Contrast Imaging for Material Science. *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography,* pp. 1-8, 2011.

[25] Johnson T. R., Krauss B., Sedlmair M. et al., Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *European radiology*;17, pp. 1510–1517, 2007

[26] Kastner J., Plank B. and D. Salaberger, Phase Contrast Imaging with High Resolution Cone Beam X-ray Computed Tomography. *In International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, Wels, Austria, 2011.

[27] McCollough C. H., Leng S., Yu L., and Fletcher J. G., Dual-and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications. *Radiology.* Vol. 276, pp. 637-653, 2015.

[28] Mohen, J. P., Menu, M., Mottin, B., Mona Lisa : Inside the Painting, Abrams inc, 2006.

[29] Pfeier F., Weitkamp T., Bunk O., and David O., Phase retrieval and differential phase-contrastimaging with low-brilliance X-ray sources. *Nature Physics*, vol. 2, pp.258-261, 2006.

[30] Primak A. N., Ramirez Giraldo J.C., Liu X., Yu L. and McCollough C. H., Improved dual-energy material discrimination for dual-source CT by means of additional spectral filtration. *Med Phys*;36(4), pp. 1359–1369. 2009.

[31] Simon S., Martin M., Julian L. et al., Dual-energy computed tomography in patients with cutaneous malignant melanoma: Comparison of noise-optimized and traditional virtual monoenergetic imaging. *European Journal of Radiology,* ,(95), pp. 1-8, 2017.

[32] Vandivere, A. and W. Elkhuizen，The Girl in the Spotlight: Technical (re-)examination of Vermeer's Girl with a Pearl Earring，*Technart 2019, Book of abstracts,* p.60.

地下屏蔽環境無人飛船與地面機器人通訊與遠端遙控技術研究
Communication-aware Unmanned Blimp and Ground Vehicles for Inspection, Search and Rescue Missions in Subterranean Environments

計畫編號：110-NU-E-009-001-NU
計畫主持人：王學誠
e-mail：hchengwang@nycu.edu.tw
計畫參與人員：黃筱晴、呂旺全、謝銘峰、黃靖欽
執行單位：國立陽明交通大學電控所

摘要

本計畫目標開發自主地面與無人載具飛行載具於輻射風險高的區域進行任務，以策人員安全，此系統需涵蓋能夠持續飛行 40 分鐘無人飛行載具，本研究採用無人飛船，能夠自主提供升力且更耐碰撞，較一般受飛行時間限制的四軸無人機是更好的選擇，本系統也包含通訊設備與能夠長距離傳輸資料，以便傳輸必要的資訊給遠端監控人員，本計畫於室內走廊階梯及地下室，更進一步在礦坑和洞穴環境進行測試，並於核研所進行通訊節點裝置之輻射照射測試。本計畫部分成果已發表於一篇期刊論文，研究的成果希望對於在核能發展或是高輻射風險的領域應用有所裨益。

關鍵詞：無人載具、通訊、輻射、核能災害、屏蔽環境

Abstract

Unmanned vehicles are suitable for exploring the disaster environment which is full of gravel and rubble and offer a safe inspection for the operators. Recent research in UAV domain focus on the quad-drone, due to the precise motion control. However, due to the load of battery, the operation time is limit in 15 minutes. Our proposed blimp robot could lift the payload via buoyancy, enabling longer flight time. The collision tolerance of such design makes it suitable for the missions. We further tested it in various indoor environments. This report also includes a field test of communication components for their radiation tolerance in the facility of the Institute of Nuclear Energy Research.

Keywords: Unmanned vehicle, communication, radiation tolerant, nuclear disaster

I. 前言

台灣於 2019 年五月通過核一廠除役，台電將以 25 年的時間，一個長期且需要高度專業、精密規劃以及大量溝通的任務。除役相關的技術包括土木、機械、環境工程等大量且多元技術整合與量測，另外社會大眾的心理層面以及工作者安全、健康問題也會是需要面臨到的議題，因此導 入機器人於輻射場域為必要工作。人類史上重大的三次核能災和分別是 1979 年烏克蘭的車諾比 核災、1986 年美國的三里島核泄露事故及 2011 年，其中福島核災讓幅射災害的嚴重性再度被喚 醒，2020 年美國國防高等研究計劃署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 所舉辦的地下救災機器人競賽便以核能發電廠做為比賽的場地，本研究團隊於 2020 年曾參與該競賽。

圖一、本研究團隊於 2020 年參與美國國防部 DARPA 地下機器人挑戰賽，比賽場地是位於華盛頓州未啟用核能電廠。

在防災機器人方面，福島的重建工作吸收的前兩次核災經驗，使用遠端操控機器人執行拍照、輻射量測、混凝土採樣和高壓洗淨的任務，在 DARPA 救災機器人競賽除了開發輪型無人載具，此外還有針對上下樓梯的履帶機器人，如: Yamachi 團隊所開發的 Packbot、KIST 的 ROBHAZ 和 Hirose 團隊的 HELIOS，2021 年波士頓動力的機器狗 Spot 也被用在相關任務。 近年多軸無人飛行器技術發展雖日趨成熟，多著重於戶外開放環境，於室內環境若與環境發生碰撞造成損壞，導致整台無人機失控墜毀，另外，由於電池的重量造成電力限制，飛行時間僅約 15 分鐘以內，若需長時間進行檢測造成許多限制，因此，若能開發能夠長時間運作的無人飛行載具便能輕易橫越。

不論任何形式的機器人都難以在數小時內完整探索核能電廠如此大容積的建築，因此勢必仰賴通訊與機器人間的協同合作，此外為了避免操作人員在高風險的環境下作業，一般會架設遠端工作站遙控機器人執行任務，但核能發電廠是大型多層樓的建築物，為避免輻射外洩依法規其建築物的牆壁厚度必須大於 60 公分厚的水泥牆， 然而這一堵堵高且厚的牆建構了屏蔽環境，對於無線電波傳播、機器人間的通訊還有機器人與外界的通訊而言無疑是一大障礙，2020 年美國 DARPA 地下機器人競賽的冠軍隊伍直言通訊為最大挑戰 [1]，訊號在室內環境訊號反彈導致接收 時間不一致造成相差及雜訊，無法確保無線通訊的品質，一旦失去通訊所有資料都無法傳輸到外面的控制站。一般而言，提高無線

電波的功率可以得到更好穩定的通訊品質且可延長通訊距離， 在福島核災救援時，[2] 團隊便向日本政府申請許可使用加裝功率放大器使無線電模組高於一般家用功率，可在戶外通訊距離可從 50 公尺可延伸至 2 公里，但依然無法保障室內通訊距離，在通訊不易的核能電廠，該團隊也嘗試使用有線及無線網路並行的架構，將機器人分為探索及通訊兩種類別，探索機器人與通訊機器人使用無線通訊，而探索機器人與所架設 的無線通訊節點間使用 500 公尺長的網路線，通訊節點間則是以網狀無線網路系統 (Mesh Network) 的形式傳遞訊號，然而這種混合型的用法勢必要事先了解該地區收訊狀況再佈設通訊節點，依然要面對無線網絡不穩定的狀況，還有另一個伴隨有線通訊產生的風險是收放網路線時拉扯時的張 量或是勾住建築物內的設施雜物等，導致加裝捲線器的機器人的行動受限，即便捲線器和線長經過設計，在上下樓梯或轉角處依然容易產生失誤，危樓的地面有突起障礙物或是拉線後造成其他 機器人路線受限，捲線器也佔據機器人有限的附載空間，無線通訊依然是在高輻射風險的環境唯一可行的通訊方式。

近年在用於輻射場域的硬體零件也朝向低成本商用現成裝置，在低風險的任務中降低設計、製造和發布的成本門檻，美國 NASA Electric Parts and Packaging Program (2014)的工作坊 [3] 指出: 使用樹梅派 Model B、Arduino 開發板進行輻射測試，過程中將樣品放置在鉛鋁輻射屏蔽箱裡，並裝設探針以測量輻射劑量率和累積劑量，輻射測試環境中維持一伽瑪射線劑量率，測試過 程將測試樣品的電子零件進行重置，觀察其外頻、記憶體速度和驅動速度，在照射結束後將測試 樣品連接至 HDMI 相容的顯示裝置、電源和無線滑鼠鍵盤。測試結果發現，測試樣品可在輻射量 低於 40 krad 下正常運作。在輻射量 50 至 60 krad 時將造成測試樣品損壞或表現下降，受損時出 現不穩定的狀況或無法運作，當測試樣品接受超過輻射劑量 60 krad 時造成所有測試樣品損壞。

II. 主要內容

本報告為為連續性計畫第一年成果，第一年具體目標為 1) 提升機器人移動彈性，建置無人飛船硬體平台，可長時間飛行（40 分鐘以上），此部分研究成果已發表於[10]。2) 通訊模組技術開發並評估在輻射場域使用之適切性。

2.1 開發無人飛船提升機器人移動彈性

本計畫第一年預計開發無人飛船，目標是在室內與地下環境部署一偵察用的無人飛船 Duckiefloat，從運作時間的角度來看， 無人飛船比一般四軸無人機是更好的選擇，而且在地下環境中狹窄通道等比無人機更耐碰撞。無人飛船本身的升力是靠著氣體浮力，不必耗費大部分能量在與重力對抗，只需適時地對高度進行微調，因此能在空中長時間定點停留 [4]。同時因為所需要馬達動力較小， 運作時不會產生如四軸那樣大的噪音與震動;大部分體積為有彈性的塑膠外皮，即便在窄道發生碰撞也不至於墜毀，高度穩定的特性。飛船的船體大部分體積為有彈性的塑膠外皮，在飛行器需要與人類近距離接觸的應用當中，即使側面與人體碰撞或是在空 中失去動力也不會產生危險 [5, 6]，並且因其非鋼體的特性，飛船能安全地在開放式空間中飛行並承受撞擊，這使得飛船在搜救任務這類要求穩定性的領域中成了一種良好的解決方案[7-9]。

圖二、無人飛船於(左上) 工程五館走廊 (右上) 工程六館地下室 (左下) 后豐鐵馬道 (右下) 石門水庫地下廊道進行測試。

然而，無人飛船的尺寸受到執行任務環境的限制，然而飛船的浮力直接影 響到負載的選擇，即馬達、電池和感測器，無人飛船是設計為可持續執行任務一小時的無人飛型載具。本研究第一代至第三代的的設計考量如下：第一代的無人飛船 為節省重量，所有的電子設備是以魔鬼氈黏貼於十字型保麗龍板上，飛船皮填滿氦氣時，尺寸為 1.2 m × 1.2 m × 2.5 m，浮力為 1,600 克，尺寸小巧，能夠順利在狹小空間穿梭，實際在后里隧道測試，由人員遠端遙控取得階段性成功，有 20 公尺的飛行路程，然而測試時發 現這種安裝方式沒有辦法固定每次馬達的位置，因此便開發出第二代無人飛船，將骨架改為碳纖維架構，並設計碳纖維組裝件，讓骨架可維持輕量，且各電子元件的位置可固定且可快速組裝，因此我們試圖將第二代 無人飛船尺寸增大為 1.5 m × 1.5 m × 2.5 m ，浮力可達 2,500 克 ，企圖安裝光達 (LiDAR) ，然而這樣的尺寸在測試時遇到困難，在一次美國地下機器人挑戰賽中在廢棄的核能發電廠難以通過人造的狹小窄門，這啟發本研究必須設計無人飛船無人飛船 能通過 90 公分左右的辦公室門，因此第三代的無人飛船 將尺寸定調為 1.8 m × 0.8 m × 2.5 m，尺寸和浮力為三代中最小，約為 900 克。

2.2 通訊信標模組開發

由於研究指出輻射會影響電子電路損壞或表現下降，規劃為評估低成本電子元件於 高輻射區輻射可行性，在無線通訊使用上，為讓在遠端人員能了解內部狀況進行遠端遙控，可以仰賴不同的通訊設備，如：高穩定度的小頻寬通訊模組 XBee，負責傳送緊急訊息，WiFi 雖然能傳輸即時影象，但穩定性較低，兩者在通訊策略上有不同的定位，因此 XBee 為本計畫開發遠端遙測技術所使用，為使通訊品質更為穩定，預計以接收訊號強

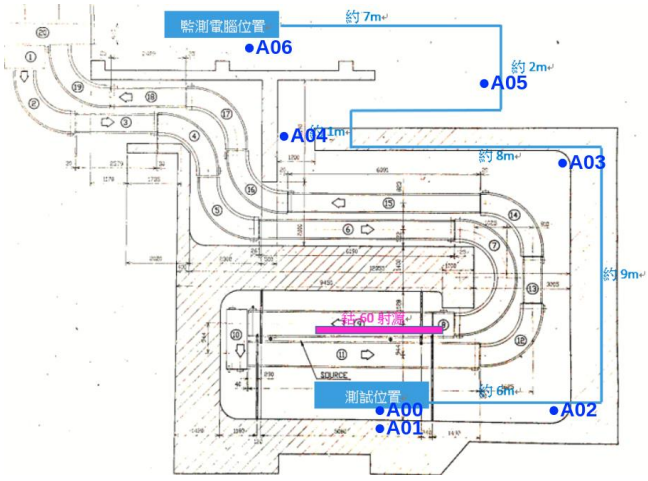
度指標（Received Signal Strength Indicator, RSSI）為依據，接收訊號強度指標是考量信號接收強度及當下雜訊強度還有天線發大率等等的綜合型指標，當接收訊號強度指標減弱時便布設通訊節點，建立網狀無線網路系統，使得訊號範圍得以不間斷地擴增，預期在屏蔽環境下，讓無人載具依然能夠通訊及遠端遙控。 因為在真實的無人載具導航任務中，無人載具可能暴露在輻射環境下進行作業，為了評估相關零件在輻射環境下，是否能正常的運作，需要將無人載具導航任務中使用到的相關硬體設備，進行輻射劑量的照射實驗。這對於在輻射環境下工作之機器人非常重要，用來確認我們所開發之系統，在輻射環境下是否依然能正常運作。以下為本次實驗中，進行鈷 60 照射測試的硬體設備，它是本研究開發的通訊模組，我們將其命名為 Anchor。其中包含運算單元 RPI，超寬頻定位模組（Pozyx UWB）、Xbee 通訊模組和電源供應系統。

本研究使用 XBee 來部屬網路。XBee 是 Digi International 公司製造，具備資料採集功能的無線通訊模組。在網路的拓樸（topology）上支援支援點對點（point-to-point）、單點對多點（point-to-multipoint）、星狀（star）以及網狀（Mesh）架構。我們在實驗場域中部屬多個 Anchor，每個 Anchor 中的 XBee 為通訊節點，用來建立 mesh 網路架構。但如果沒有清楚地了解環境中的無線電傳播特性，無法確定我們的通訊系統和 Anchor 放置點的部署策略是可靠的。因此，我們讓每個 Anchor 中的 XBee，與其他所有 Anchor 中的 XBee，定時(1/15sec)互相發送通訊封包，收集各個封包的訊號強度 RSSI(received Signal Strength Indication)數據，分析在輻射場域下使用 XBee 通訊的可靠度，以及室內複雜環境下 Anchor 放置點的設計。

2.3 實驗評估模組於輻射場域適切性

本實驗利用龍潭核能研究所之水下腔體照射，照射方式為將鈷-60 射源自水中升起於空氣中，使受照物暴露於輻射環境，照射位置之劑量為 150 Gy/h，累積劑量與照射時間長短成正比，乘上照射時間即為累積劑量。實驗中以硬體迴路的方式，來測試之通訊信標模組，一面累積輻射照射量，一面持續使用測試中的設備，進行無人載具之運算，模擬真實任務的應用情形。實驗場域地圖如圖四所示。

圖三、本研究開發之通訊模組，具有 Xbee 通訊模組和電源供應系統，用於輻射環境測試。上圖以鋁片包覆，上蓋為鋁玻璃。下圖外殼為壓克力防水箱。

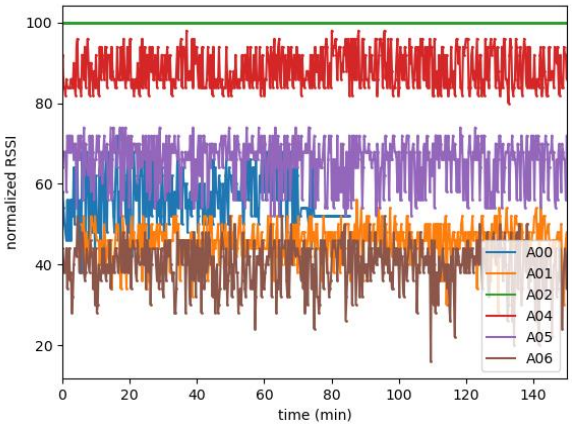


圖四、核研所實驗場域設置圖，藍色點為實驗時各 anchor 擺放之位置，其中 A00 和 A01 最接近輻射射源。A02-A05 則以網狀網路（Mesh Network）以無線通訊傳輸資料，實驗並設計一網路線（藍色線段）同時確認通訊節點狀態。

III. 結果與討論

XBee 的 RSSI 值可偵測(detectable)範圍-40~-90，其中-40~-70 為穩定訊號，RSSI 強度變化主要受到環境和 anchor 擺放位置的影響。我們以 A03 和其餘 6 個 anchor 之間的訊號強弱變化為例。在圖五中我們將 RSSI 值正規化至 0~100。從圖中數據可見，A02 因為是 A03 之視線範圍內（line-of-sight）且距離不長，RSSI 強度良好。其餘 anchor，距離越遠則 RSSI 強度越弱，而遇到轉角(non-line-of-sight)會有明顯幅度的衰減。因此，了解環境變因後，為了維持穩定的無線通訊品質，我們佈置 anchor 的策略為每個轉角至少一個。

在實驗過程中，經過 150 分鐘的輻射照射後，離射源最近的 A01 沒有明顯因為輻射影響而造成 RSSI 衰減，其他亦然。A00 在 1 小時 15 分後，因為該 anchor 之行動電源損壞停止電供而失去 RSSI 訊號更新。



圖五、A03 與其他 anchor，在輻射照設下，XBee RSSI 強度隨時間之變化。其中 1) A00 在實驗開始 1 小時 15 分後失去訊號, 2)其他 anchor 之間的 RSSI 依據環境因素呈現可預測的穩定結果。

實驗結果圖五所示，經過 2 小時 30 分鐘的照射後，扁平防水盒版本之 Anchor 依然功能正常，該 Anchor 中的 RPI 持續回傳自動導航演算法之運算結果，確認 Anchor 中所有的電子零件仍皆無損壞。代表在本研究所開發的 Anchor 至少能承受輻射累積劑量 375 戈雷，得以在輻射場域使用。然而，鉛板和鉛玻璃包覆版本之 Anchor 實驗開始後 1 小時 15 分時，停止回傳運算結果，經測試發現是市售行動電源經輻射照射後毀壞，且無法再度充電，而其他零件則無損壞。

IV. 結論

本研究開發無人載具系統，具備自主移動能力，並評估通訊信標模組在輻射環境下進行檢測，所有電子元件在輻射場域中可以持續工作長達 2.5 小時，符合任務需求，在持續累積至 375 戈雷的輻射量下，依然能正常運作，然本研究測試發現，部分市售行動電源無法負擔 187.5 戈雷的輻射量，不符合輻射場域下的任務需求。未來研究將進一步對高頻寬通訊模組，以及遠端遙控機制進行測試，讓機器人能夠代替人類到較危險且不確定的場域內，協助人們除役的工作，讓工作人員可以在遠端無風險區域操控機器人於輻射照射區作業，希望能藉此降低工作中的風險及社會大眾的壓力，提高工作人員安全。

參考文獻

[1] E. Ackerman, IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News, 2020. [Online].https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-hardware/robotics-teams-prepare-darpa-subt-challenge-urban-circuit. [Accessed: 30- Jun- 2020].

[2] K. Nagatani et al., "Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots", *Journal of Field Robotics*, vol. 30, no. 1, pp. 44-63, 2012. Available: 10.1002/rob.21439.

[3] D. P. Violette, “Arduino/Raspberry Pi: Hobbyist Hardware and Radiation Total Dose Degradation,” Electric Parts and Packaging Program, Retrieved from https://drive.google.com/file/d/1UnNfprJzeR4ZUSIvGmw8DpOPn5NVMjhx/view?usp=sharing

[4] D. Palossi, A. Gomez, S. Draskovic, K. Keller, L. Benini and L. Thiele, "Self-Sustainability in Nano Unmanned Aerial Vehicles", Proceedings of the Computing Frontiers Conference on CF'17, 2017, pp. 79-88, doi: 10.1145/3075564.3075580.

[5] M. Burri et al., "Design and control of a spherical omnidirectional blimp," 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo, 2013, pp. 1873-1879. doi: 10.1109/IROS.2013.6696604

[6] N. Yao, E. Anaya, Q. Tao, S. Cho, H. Zheng and F. Zhang, "Monocular vision-based human following on miniature robotic blimp," 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Singapore, 2017, pp. 3244-3249, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989369.

[7] A. Elfes, S. Siqueira Bueno, M. Bergerman and J. G. Ramos, "A semi-autonomous robotic airship for environmental monitoring missions," Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146), Leuven, Belgium, 1998, pp. 3449-3455 vol.4. doi: 10.1109/ROBOT.1998.680971

[8] E. Hygounenc, I. Jung, P. Souères and S. Lacroix, "The Autonomous Blimp Project of LAAS-CNRS: Achievements in Flight Control and Terrain Mapping", The International Journal of Robotics Research, vol. 23, no. 4-5, pp. 473-511, 2004. doi: 10.1177/0278364904042200

[9] V. Mai et al., "Local Positioning System Using UWB Range Measurements for an Unmanned Blimp," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 4, pp. 2971-2978, Oct. 2018. doi: 10.1109/LRA.2018.2849553.

[10] C. Lu, C. Huang, J. Huang, C. Hsu, P. Chang, Z. Ewe et al., “A heterogeneous unmanned ground vehicle and blimp robot team for search and rescue using data-driven autonomy and communication-aware navigation,” *Field Robotics*, vol. 2, pp. 557 – 594, 2022.

科展用核能與輻射知識之虛擬實境遊戲
Virtual Reality Game of Nuclear and Radiation Knowledge for Science Fairs

計畫編號：110-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

摘要

核能與輻射知識，是一般人比較不了解的領域。然而，核能與輻射具有許多應用，和民眾的日常生活相關。根據過去的經驗，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。本計畫利用電玩遊戲技術，開發了核能與輻射知識的問答考驗電玩遊戲。此程式可以應用在傳統科展活動，以及線上科展之上。

關鍵詞：核能、輻射、科展。

Abstract

Nuclear and radiation knowledge are unfamiliar topics for the public. However, there are many applications related to our daily life. According to past experiences, computer game is attractive to children and teenagers. It is suitable to propagate knowledge in science fairs. In this project, a computer game program of testing nuclear and radiation knowledge is developed. This program can be applied in both traditional science fairs and online science fairs.

Keywords: Nuclear, radiation, science fairs.

I. 前言

原子能科技學。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 VR 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。然而，因為疫情的影響，民眾對於共用 VR 頭盔應該會有疑慮。因此，本計畫調整方向，改用電玩遊戲技術，開發核能與輻射知識的問答考驗遊戲。

II. 主要內容

在大賣場和遊樂場等地，有設置許多電玩遊戲機台，如圖 01。這些機台的遊戲機制，是讓玩家和電腦進行對戰，當玩家戰勝後，可以獲得獎勵。這種遊戲機制，淺顯易懂，而且深受民眾（尤其是兒童和青少年）喜愛。本計畫的主要目標，是針對科展用途，開發電玩遊戲。因為科展會場人潮眾多，無法長時間地進行講解，所以必須採用淺顯易懂的遊玩方式。這種對戰型式的遊戲機制，民眾非常熟悉，不需要工作人員講解，非常適合用於科展。

圖 01：對戰型式的電玩遊戲機台

原能會所主辦的科展，會有許多的展覽項目。在最後，會有一個測驗，看看參觀民眾是否吸收了展覽的知識。經過多年的累積，原能會已經具有充足的展覽項目，但是最後的測試，還是使用最傳統的方式。因此，本計畫利用對戰型式的電玩遊戲，製作一款問答類型的遊戲，以取代科展最後的測試。考驗參觀的民眾，是否具有正確的核能與輻射知識。本計畫利用原能會現有的人物角色，製作了一款問答型式的對戰遊戲。在遊戲中，守護寶藏的惡龍會提出問題，考驗民眾。透過正確地回答問題，才能夠過關，獲得惡龍的寶藏。在戰鬥的過程，加入了各種絢麗的多媒體特效，並且以隨機方式出現，以吸引民眾的興趣。

圖 02：遊戲畫面

III. 結果與討論

本計畫的成果，授權給原子能委員會免費使用。在原子能委員會所舉辦的科展之中，進行實際進行展出，並且開放給民眾體驗使用，如圖 03 所示。吸引了許多參觀民眾進行體驗。

圖 03：於科展中開放民眾使用

因應疫情，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。

IV. 結論

本計畫利用民眾有興趣的電玩遊戲技術，開發了核能與輻射知識的問答考驗遊戲。藉此，吸引民眾了解何能與輻射知識，並且測試民眾對於相關知識的了解程度。本遊戲開發完成之後，授權給原子能委員會使用，已經在科展之中，實際開放給民眾體驗，獲得良好的成果。除了單機版程式之外，因應疫情，本計畫也將其轉製成網頁程式，可以應用在線上科展之上。本計畫的整體成果，與原先的規劃大致相符。

使用放電產生電漿開發之極紫外光光源
Development of the EUV light source using discharge-produced plasma

計畫編號：110-NU-E-006-001-NU
計畫主持人：張博宇
e-mail：pchang@mail.ncku.edu.tw
計畫參與人員：劉嘉楷、陳俊宇、郭名翔、杜承翰、劉致賢、劉哲宇、林彥呈、華蔻雷
執行單位：國立成功大學太空與電漿科學研究所

摘要

本計畫是開發利用放電產生的電漿(Discharged-produced plasma, DPP)來產生極紫外光(extreme ultraviolet light, EUV light)。首先，我們從充有氬氣的加壓罐，透過脈衝閥門(pulse valve)來產生氣體噴流。當氣體通過斂散噴嘴(convergent-divergent nozzle)被加速至超音速，再透過電弧放電電離形成電漿，然後電漿再被角向捏縮(theta pinch)，以絕熱壓縮的方式加熱到至少 30 eV，從而輻射出極紫外光。迄今為止，我們已經構建了一個由我們的一千焦耳的脈衝功率系統所驅動，用於角向捏縮的亥姆霍茲線圈，可以產生 11.4 ± 1.0 T 的脈衝磁場。除此之外，我們也已經建立了一個加壓系統。並且透過紋影圖像來研究氣體噴流的特性。從紋影圖像中，我們可以看出，氣體噴流的張角為 1.3 ± 0.3 度，是一個非常準直的氣體噴流，符合我們的要求。因此，我們已經證明可以在大氣條件下產生準直的氣體噴流。由於斂散噴嘴的性能是進氣及出氣口的壓力比的函數，因此在真空系統中結合斂散噴嘴的脈衝閥系統產生的氣體噴流具有更好的準直性。我們將在不久的將來將加壓系統、亥姆霍茲線圈及電弧放電結合，進一步探討透過角向捏縮產生的極紫外光的效果。

關鍵詞：極紫外光、極紫外光微影技術、角向捏縮、脈衝電源系統。

Abstract

The project is to generate extreme ultraviolet (EUV) light using discharged-produced plasma (DPP). A gas puff is first produced from a pressurized reservoir filled with Aron gas and a pulse valve. The gas is accelerated to supersonic by a convergent-divergent (CD) nozzle and ionized by an arc discharge. Then, the plasma is compressed by a theta pinch, heated to over 30 eV via adiabatic compression, and thus radiates EUV light. To date, we have built a Helmholtz coil driven by our 1-kJ pulsed-power system for the theta pinch. A field of 11.4 ± 1.0 T was generated. Furthermore , we have built a gas-puff system. We used Schlieren images to study the performance of the gas puff. From the Schlieren images, we have shown that the opening angle of the gas puff was 1.3 ± 0.3 degrees. It was a very collimated gas puff and matched our requirements. We have demonstrated that a collimated gas puff can be generated in atmospheric condition. Since the performance of a CD nozzle is a function of the pressure ratio, better performance of the gas puff produced by the pulse valve system combing the CD nozzle in the vacuum system is expected. Therefore, we are going to integrate the gas-puff system with the arc discharge and the Helmholtz coil for the theta pinch in the near future.

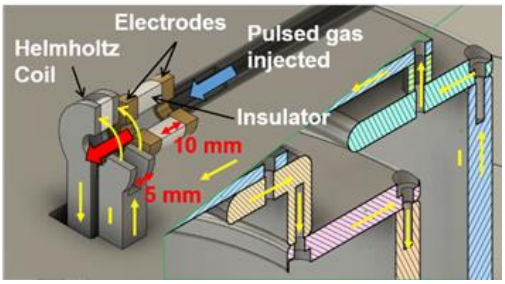
Keywords: EUV light, EUV lithography, theta pinch, pulsed-power system.

I. 前言

隨著半導體元件製作的線寬越來越窄，使用光源波長為 13.5 nm 的紫外光微影技術的重要性在先進半導體製程中也變的越來越高。此計畫目的為開發一個新式的極紫外光光源，用於極紫外光微影技術，或用於檢測光罩所需的光源。此極紫外光光源技術將具有比現在業界使用中的光源有更高的能量轉換效率的潛力，有機會取代現有技術，並讓臺灣在半導體製程機台上擁有領先的關鍵技術。

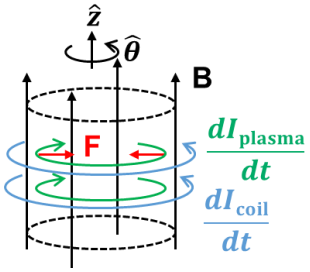
II. 設計概念

如圖一所示，是我們產生極紫外光的設計概念。當氣體噴流通過一對帶有高電壓的電極，會誘發電弧放電，從而使氣體噴流被游離，成為電漿羽流，此時電漿羽流的溫度約為 1~10 eV[1]。



圖一、極紫外光的設計概念。

接著，使用一千焦耳的脈衝功率系統[2]所驅動的亥姆霍茲線圈產生脈衝磁場(圖二中黑色箭頭)，在電漿羽流中感應出一個電流(綠色箭頭)，此電流與脈衝磁場互相作用之下，便可以將電漿羽流壓縮，稱作角向捏縮。



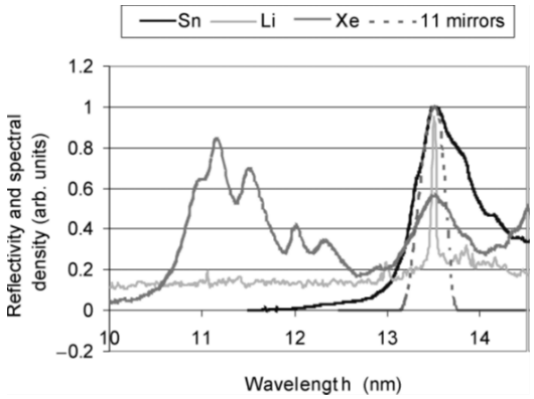
圖二、角向捏縮之示意圖。

如果壓縮速度足夠快，電漿羽流會透過絕熱壓縮的方式被壓縮加熱，其溫度與電漿羽流的的半徑的關係如下：

$$T_f = T_o \left(\frac{r_o}{r_f}\right)^{4/3} \quad , \qquad (1)$$

其中 T_o 及 r_o 為電漿羽流的初始溫度及半徑，T_f 及 r_f 為電漿羽流的被壓縮後的溫度及半徑。若電漿羽流的半徑被壓縮的比例(r_o/r_f)為 12.8 ~ 2.3，則被壓縮後的溫度 T_f 便可以達到 30 eV 以上。

如圖三所示，若電漿羽流的離子為錫(Sn)、鋰(Li)或氙(Xe)的話，電漿羽流便可以輻射出 13.5 nm 的極紫外光，做為微影所使用的光源，或用於檢測光罩所需的光源。



圖三、錫(Sn)、鋰(Li)、氙(Xe)內層電子軌域中電子躍遷之放射光光譜[3]。

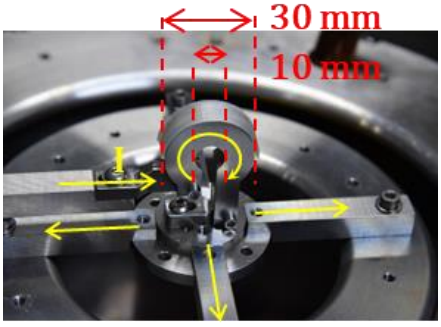
本計畫的目的為探討使用放電產生電漿之極紫外光光源的可行性，因此會先以氬(Ar)氣做為操作氣體，探討電漿羽流加熱的過程。

III. 結果與討論

目前為止，我們已經完成了(1)亥姆霍茲線圈的建置、(2)產生未來用於角向捏縮所需要的磁場、(3)氣體噴流產生器。

1. 亥姆霍茲線圈

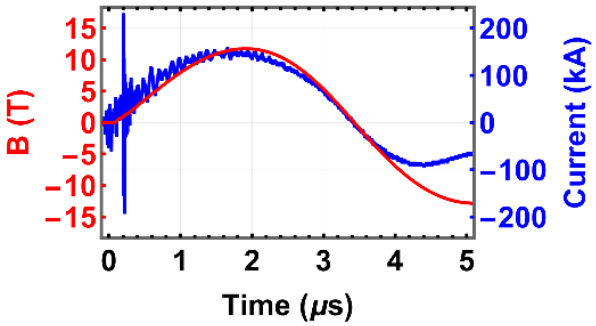
如圖四所示，是我們所製作的亥姆霍茲線圈，它是由兩片厚度為 2.5 毫米的不銹鋼板所製成。每個線圈的內徑和外徑分別為 10 毫米和 30 毫米，兩個線圈之間的距離為 5 毫米。當脈衝電流流過線圈時，為了防止亥姆霍茲線圈中的兩個線圈因為互相的吸引力而變形，我們在兩線之間放置了一個使用 3D 列印所得的塑膠墊片作支撐。



圖四、亥姆霍茲線圈，用於角向捏縮所需要的磁場。

2. 磁場

製作完成亥姆霍茲線圈後，我們使用了 B 點探針(B-dot probe)[4][5]量測了亥姆霍茲線圈所產生的磁場。如圖五所示，為其中一組放電測試的的結果。藍線為我們的脈衝功率系統所提供的電流，電流鋒值為~100 kA；紅線為亥姆霍茲線圈中心所產生的磁場，鋒值為 11.4 ± 1.0 T，相對應的磁場壓力為 5.2 x 10^7 Pa，可以用來壓縮電漿羽流。

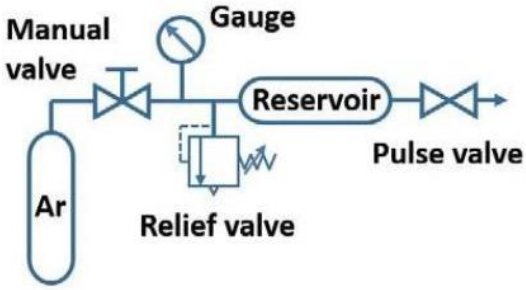


圖五、脈衝功率系統所提供的電流(藍線)及亥姆霍茲線圈所產生的磁場(紅線)。

3. 氣體噴流

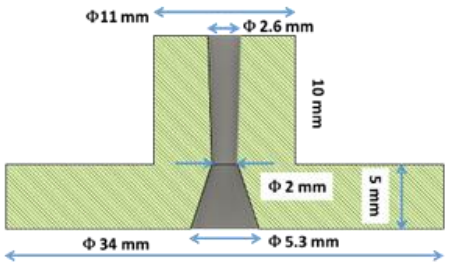
因為最後的系統將處於高真空的條件(~10^{-6} Torr)，因此，只能使用脈衝閥在很短的時間內注入氣體。此外，為了產生準直的氣體噴流，以便將其噴射到亥姆霍茲線圈的中心，我們使用了斂散噴嘴(convergent-divergent nozzle，也稱為德拉瓦噴嘴，de Laval nozzle)。在斂散噴嘴中，因為噴嘴喉部的半徑小於噴嘴入口的半徑，因此會產生阻塞流(chocked flow)，最後可以在噴嘴出口產生超音速且準直的氣體噴流。

首先，我們在大氣條件下測試了氣體噴流產生器。圖六是氣體噴流產生器的示意圖。加壓罐填有加壓至 2 個大氣壓的氬氣，換言之，脈衝閥的出口壓力比大氣條件高了一個大氣壓。更重要的是，壓力比為 2:1。最後，在此壓力條件下，我們在短時間內打開脈衝閥來產生氣體噴流。



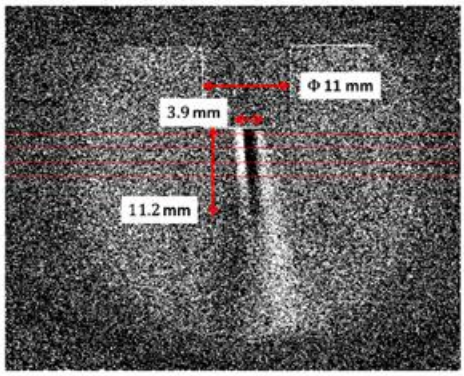
圖六、氣體噴流產生器的示意圖。

如圖七所示，是我們使用 3D 列印機所製作的斂散噴嘴，裝在脈衝閥的出口處。斂散噴嘴入口的直徑為 5.3 毫米，喉部的直徑為 2 毫米，出口處的直徑為 2.6 毫米。由於喉部的直徑比入口處的直徑小，因此產生了阻塞流，從而產生了超音速氣體噴流。

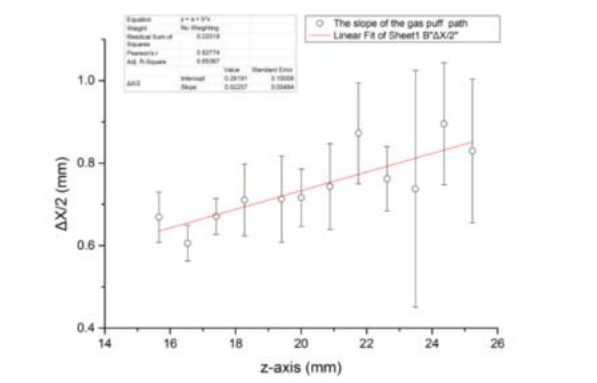


圖七、斂散噴嘴。

最後，我們使用紋影成像系統來量測氣體噴流的特性。如圖八所示，是其中一組實驗的結果。我們將原始影像減去背景雜訊後，可以清楚的觀察到準直的氣體噴流。為了定量量測噴流的張角，我們沿著如圖中在不同高度的紅線測量了氣體噴流的寬度，量測結果如圖九所示，顯示了在不同高度的氣體噴流的寬度。透過線性擬合所得的斜率，可以得到張角為 1.3±0.3 度，意即我們產生了一個非常準直的氣體噴流，符合我們的要求。



圖八、超音速氣體噴流之紋影成像。



圖九、超音速氣體噴流於不同高度之寬度，對數據作線性擬合後所得的紅線的斜率即為張角。

IV. 結論

總結一下我們已經完成的事項：

(1) 完成由不銹鋼所製成的亥姆霍茲線圈。

(2) 使用我們一千焦耳的脈衝功率系統驅動亥姆霍茲線圈時，可以在線圈中間產生鋒值為 11.4 ± 1.0 T 的脈衝磁場，相對應的磁場壓力為 5.2 x 10^7 Pa，可以用來壓縮電漿羽流。

(3) 我們製作了一個能在大氣條件下產生張角為 1.3± 0.3 度的準直氣體噴流的氣體噴流產生器，也預計在真空系統中可以產生準直的氣體噴流。證明了結合斂散噴嘴的脈衝閥可於真空系統中產生準直的超音速氣體噴流。

我們未來將於真空系統中產生準直的超音速氣體噴流，配合真空中的電弧放電產生超音速電漿羽流，及亥姆霍茲線圈所產生鋒值為 11.4 ± 1.0 T 的脈衝磁場壓縮加熱電漿羽流至 30 eV，最後產生極紫外光。未來可用於極紫外光微影技術或檢測極紫外光光刻所使用的光罩的缺陷。

參考文獻

[1] J. Reece Roth. *Industrial Plasma Engineering*. Taylor & Francis Ltd, 1995。

[2] Po-Yu Chang, *etc.*, *Review of Scientific Instruments* **93**, 043505 (2022)。

[3] V. Bakshi, *EUV Sources for Lithography*, SPIE, Bellingham, Wash, 2006。

[4] I. H. Hutchinson, *Principles of Plasma Diagnostics*, 2nd edition, Massachusetts Institute of Technology.

[5] S. Bose, *etc.*, *European J. of Physics* **40**, 015803 (2018).

非接觸式之機器人充電平台開發
The Development of Contactless Charging Platform for Robot System

計畫編號：110-NU -E-992-001 -NU
計畫主持人：羅國原
e-mail：kylo@nkust.edu.tw
計畫參與人員：林頎珅
執行單位：國立高雄科技大學

摘要

本計畫主旨為開發應用於探勘機器人之非接觸充電平台，將非接觸充電平台搭載至探勘機器人上，使其具備應用於特殊之環境，例如能夠抗輻射之機器人取代人類的工作，在不適合接觸充電的特殊環境下，可維持機器人之續航力。感應線圈的設計為非接觸電能傳輸系統重要的一環，通過對線圈設計形狀、參數和每環的線圈間距模擬，可得出較佳電能傳輸的效果，此實驗非接觸電能傳輸線圈設計外型以環形繞製，使其中心磁通密度較強，增加傳輸效率。實驗使用感應線圈大小為配合機器人尺寸，接收端線圈尺寸為外徑 200mm 之環型，發送端為線圈尺寸為外徑 210mm 之環型，操作頻率為 40 kHz~50kHz，感應充電時透過無線傳輸通訊，監測電池充狀況與保護機制。

關鍵詞：非接觸充電、感應充電、探勘機器人。

Abstract

The object of this project is to develop a contactless charging platform for robots. The contactless charging platform is mounted on the exploration robots to enable them in dangerous environments, such as radiation-resistant robots instead of human work, and to maintain the endurance of the robots are not suitable for contact charging. The design of induction coil is an important part of contactless power transmission system. By designing the coil shape, wire parameters, and coil spacing of each ring with the simulation, the effect of power transmission can be optimized. In the experiments, the design of contactless power transmission coil is wound in a ring shape, which makes its central magnetic flux density strong with higher transmission efficiency. To fit the size of the robot, the diameter of the receiving and transmission coil are 200 mm and 210 mm, respectively. The switching frequency is 40 kHz~50 kHz. During the induction charging, wireless communication is used to monitor the battery charging status and protection mechanism.

Keywords: Contactless Charging, Inductive Charging, Exploration Robots.

I. 前言

機器人研發至今，國內外也出現了許多各式各樣行駛形式的機器人，在無線式機器人的續航力上是很重要的問題，蓄電池因材料問題難以突破，但許多時候受限於環境因素所影響，在一些特殊的場合；不適合進行接觸式充電。以福島事件的救災為例，當發生核能相關意外導致輻射外洩，人員無法長期暴露在高輻射的環境下工作，以能夠抗輻射的機器人取代人類的工作就顯得格外重要，當需要利用機器人進入核電廠時，機器人需要能在不平坦的環境中行走、傳回即時畫面與偵測數據、簡易清除障礙物與電子零件能抵抗輻射外，另一個重要性就是續航力要夠久以應付長時間的任務。

以福島事件的救災為例，當發生核能相關意外導致輻射外洩時，由於人員無法長期暴露在高輻射的環境之下工作，以能夠抗輻射的機器人取代人類的工作就顯得格外重要，當需要利用機器人進入核電廠時，機器人需要能在不平坦的環境中行走、傳回即時畫面與偵測數據、簡易清除障礙物與電子零件能抵抗輻射外，另一個重要性就是續航力要夠久以應付長時間的任務。目前發展的無人飛行機器人可進行初步的探勘和簡易的輻射偵檢[1]-[2]，核電廠建築物內外的探勘則可交由陸上機器人，反應爐內的情形調查則可交由水下機器人進行[3]，考量到電池容量有限，無論是陸海空機器人可能都會面臨到續航力不足的問題，若再返程充電則會有輻射汙染與無法執行更遠距或更長時間的任務，因此，以電磁感應為基礎的非接觸式電能傳輸技術可以解決前述問題，機器人可在下雨、下雪、水下等惡劣場域安全地進行供電，使機器人能夠運用在各種的工作場域，同時也可以將系統電路完全密封，避免潮溼鏽蝕、接點老化、接觸不良與操作安全等問題。

由於非接觸式感應充電技術需要將高頻正弦電流饋入線圈，以達成較佳的電能傳輸效果，因此將功因修正電源轉換電路之直流輸出饋入以高頻切換的換流器中，其換流器開關操作頻率通常介於 20 kHz 至 150 kHz，並將換流器之輸出饋入初級側耦合結構。由於非接觸式感應供電技術其初級側與次級側之間距相較於傳統變壓器來得大，因此初級側與次級側間處於鬆耦合的狀況，互感相對較小，導致非接觸式感應供電系統其傳輸功率及傳輸效率相對較低，因此在初級側以及次級側加入諧振電路，初級側諧振電路利用電抗相消原理，在線圈產生較大正弦交變電流，而次級側後經由整流濾波電路以及電壓調節電路將拾取到之電能傳遞給後方負載，完成非接觸式充電技術。美國 MIT 的 Marin Soljacic 教授所帶領的團隊在 2007 年發表運用磁共振的方式將 2 公尺外的 60 瓦燈泡點亮[4]-[5]，同時成立 WiTricity 公司，基於磁共振無線電能傳輸技術概念持續研發相關應用。在 2008 年華盛頓大學與西雅圖的 Intel 實驗室共同發表以 MIT 發表的技術概念所研發的無線供電裝置，將 2 英呎外的 60 瓦燈泡點亮，其傳輸效率可達 75%[6]。美國猶他州立大學研究團隊針對 25 kW 以上之電動巴士具高效率與高度錯位容忍之充電帶，或者是對於耦合結構

進行更深入的特性研究等[7]。國內方面有成功大學團隊近年來開發了非接觸式感應充電槳、大眾運輸電動載具用大間隙型非接觸式感應充電平台、垂直磁浮型旋轉機具之感應供電系統與具雙槽口型電能拾取器結構，針對特殊應用情境進行非接觸式電能傳輸的相關研究[8]-[10]，其中發現其非接觸式等效之鬆耦合變壓器所之耦合係數過低，僅而使反射阻抗較小，而為了提升傳輸功率所增加的初級側電流所造成的導通損耗較高，導致整體系統傳輸效率較低另外彰化師範大學也進行多年非接觸式直流電源轉換器之開發[11]-[12]，針對感應結構以電容元件設計補償電路時，可使傳輸功率與傳輸效率問題獲得改善，但接受電能之輸出電壓或電流難以穩定，由於若由初級側進行功率回授控制則有輸出精準度不足的問題，若直接由次級側回傳訊號至初級側進行回授控制，則因為電磁耦合的環境下，回授訊號容易受到干擾。此外在非接觸式電能傳輸系統中，初級側需以激勵源載入高頻正弦電流產生交變磁場，使耦合結構次級側能拾取更多電能。交流激勵源架構常使用全橋諧振換流器、Class D 及 Class E 諧振換流器，或是利用多階換流器得到階梯式交流電再透過諧振來產生正弦交流電[13]-[14]。

II. 主要內容

探勘地形大多為未知的，探勘機器人必須擁有應付各種地形的能力，以應付可能發生的各種狀況，例如階梯、碎石路、階梯、壕溝…等地形。探勘地的環境或許存在危險，不適合親自進入，搭配無線攝影鏡頭即時傳輸畫面，就能讓使用者在遠端進行監控，具備資料採集的功能，探勘地的所處環境的各項參數，例如溫度、濕度、氣體檢測、地形環境等，能夠經由無線傳輸，將資料回傳至使用者。此機器人擴充性較高，可針對不同的環境，決定欲收集的資料類型，例如在充滿危險氣體的場合，即可配備氣體感測器。本論文設計之探勘機器人，本計畫以 PIC18F46K22 微處理機做為控制核心，配置了溫溼度感測器、氣體感測器、陀螺儀感測器、無線攝影機、並將移動的機構設計成可 360 度全方位擺動，來達到適應崎嶇路面等功能，以及上下完全對稱的車體設計，能讓整台機器翻覆時，依然能繼續動作，包含非接觸充電，達到克服大多地形的功能。圖 1 為探勘機器人平台整體系統架構，分為機器人端、非接觸充電發送端、手機控制端及電腦端，本文介紹此機器人特殊設計及功能；與應用在探勘機器人非接觸充電部分分析。圖 2 為此機器人線圈位置示意圖，會將充電線圈放置於機器人下方，機器人行駛至充電站時，可透過感應達到對電池充電，增加探勘機器人續航力之功能本實驗製作之探勘機器人，無線通訊使用藍芽傳輸資料，機器人端透過藍芽傳輸多組封包至非接觸充電端、手機控制端與電腦端，非接觸充電發送端、手機控制端與電腦端分別解碼所接收到的封包，機器人端與非接觸充電發送端傳輸流程如圖 2 所示，機器人端將電池電壓資訊發送至非接觸充電發送端，由非接觸充電發送端晶片判別是否開始充電，如果電量為 100%則停止輸出充電之開關頻率，若未充飽則依電池電壓調整輸出接近或遠離諧振頻率，以此調整充電電流，以防止過充所造成的電池損壞。

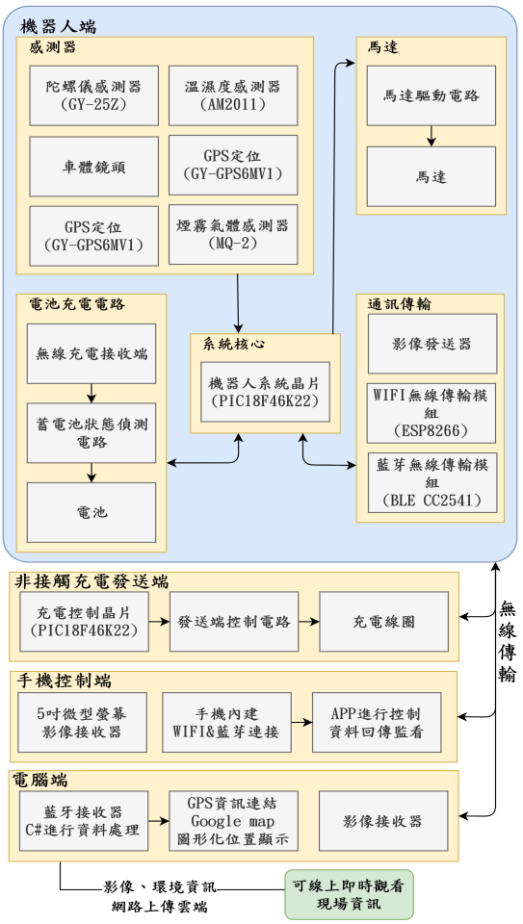


圖 1 探勘機器人整體系統架構圖

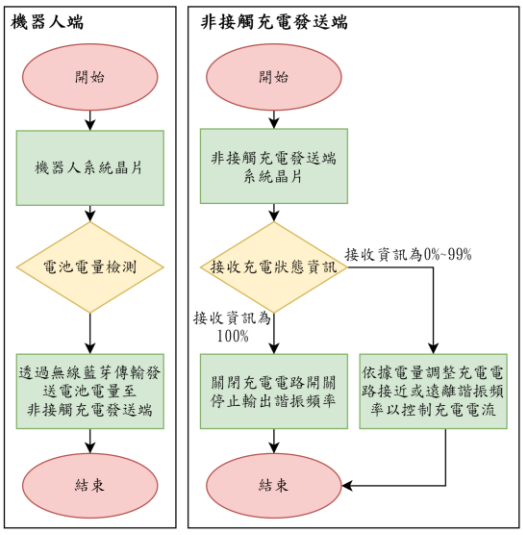


圖 2 非接觸充電控制流程圖

III. 非接觸充電系統設計

補償諧振電路分析

初級側線圈若以非正弦方式將能量輸入，除了輸出有效能量較小外，容易因為消耗虛功而導致無法達到傳輸電能的目的，因此使用諧振補償的方式可使初級側電流或電壓以正弦形式產生磁場，即因為磁通量正比於電流大小的關係而獲得較大之磁通密度，同時當諧振發生時初級側線圈電壓與電流兩者能保持同相，進而達到最大功率傳輸之目的，常見的基本諧振電路拓樸如圖 3 所

示，依照電容電感串聯或並聯主要可以分為：基本四種架構 S-S、S-P、P-S 與 P-P，其中 S 表示串聯，P 表示並聯，而與分別為初、次級側之等效線阻抗，不同的諧振振拓棋有不同特性其應用場合也不同。

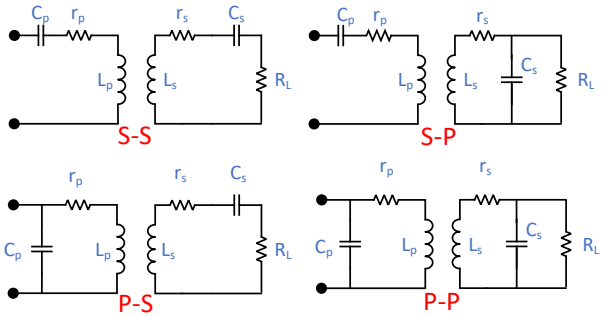


圖 3 基本諧振電路拓樸示意圖

串聯諧振時之其等效阻抗為最低，相反的並聯諧振時之其等效阻抗為最高，以初級側線圈而言，串聯諧振設計可產生最大的電流與對應之磁場強度，次級側線圈則以並聯諧振方式達到高阻抗，反射到初級側線圈以得到較大的輸出電壓。但初級側線圈串聯諧振設計的頻率對應電流較敏感，容易有電流過大的危險，亦或是加入複合諧振方式來改善，次級側方面則採用諧振電容及次級側線圈電感進行並聯諧振補償，在實際電路應用方面，非接觸式充電平台之次級側負載為電池，並非固定負載，考量輸出電壓穩定性之問題，同時改善轉換器次級側與初級側之電壓增益，以次級側並聯諧振具穩定電壓之特性，穩定負載變換時之電壓。圖 4 為使用雙阜網路分析，電能傳輸等校模型。

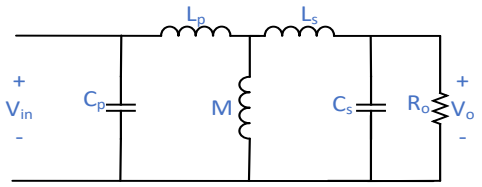


圖 4 電能傳輸等校模型

電能傳輸等校模型電壓增益轉移函數$G(S)$為：

$$G(S)=\frac{b_0}{a_2S^2+a_1S+a_0} \quad (1)$$

其中

$b_0 = C_pMR_o$

$a_2 = C_sC_pR_o(L_sM+L_pM+L_sL_p)$

$a_1 = L_pC_p(M+L_s)+C_sL_sM$

$a_0 = MR_o(C_p+C_s)+L_pC_pR_o$

帶入$L_s=34uH$, $L_p=73uH$, $C_s=0.47uF$, $C_p=0.2uF$, $M=0.1$與 $R_o=100\Omega$的數值後，可得到電能傳輸增益之響應頻率，可看到增益高點落在 41K 附近，如圖 5 所示。

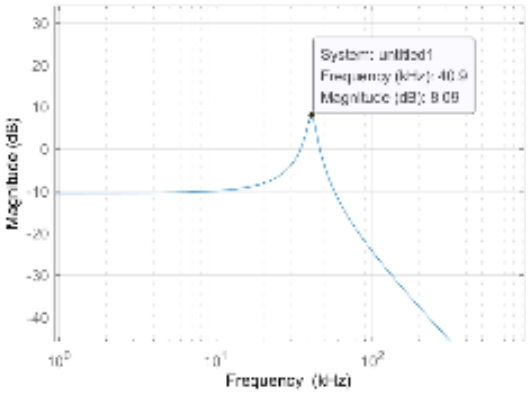


圖 5 電能傳輸增益之響應頻率

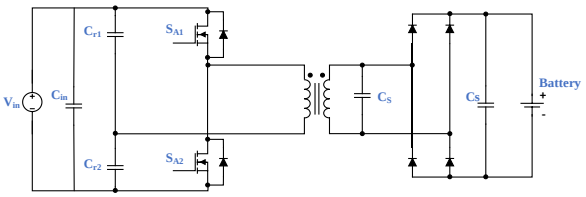


圖 6 半橋對稱諧振之電路架構

目前非接觸式電力傳輸主電路多為全橋諧振電路架構，為簡化系統控制複雜度以提升穩定性，採用半橋對稱諧振電路架構，如圖 6 半橋對稱諧振轉換器模組由 2 個切換開關與 2 個橋接電容所組成，其主要功能為整流後將電壓以固定導通週期方式調變產生高頻電壓脈波。

IV. 結果與討論

非接觸充電平台發送端與機器人控制端晶片；使用 Microchip 所生產的 PIC18F46K22 晶片進行程式的撰寫與控制，非接觸充電電路操作頻率為 40KHz~50KHz，透過通無線通訊得知電池充電狀況，對電路開關操作頻率進行調整，探勘機器人實際測試環境如圖 7 所示，實際充電距離為 1 公分。

表 1 非接觸充電規格表

規格項目		規格數據	單位
發送端	線圈內徑	105	mm
	線圈外徑	200	mm
	諧振電容	0.2	uF
	諧振電感	73	uH
接收端	線圈內徑	152	mm
	線圈外徑	210	mm
	諧振電容	0.47	uF
	諧振電感	34	uH
	導磁條尺寸	15*5*120	mm
諧振頻率		41	kHz
操作頻率		40~50	kHz

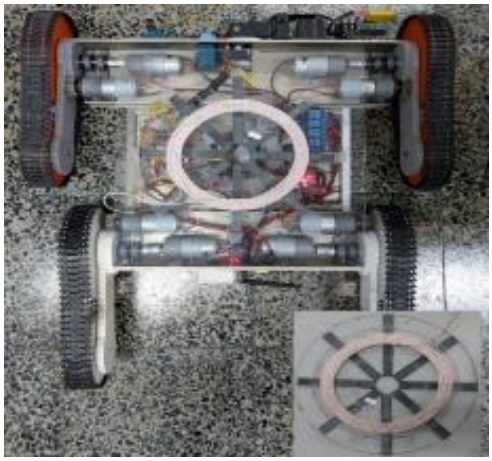


圖 7 探勘機器人充電線圈位置圖

圖 8 為電能傳輸時線圈發送端波形，V_{L1} 為電壓，曲線為電容放電時所下降的電壓，I_{L1} 為電感之電流，圖 9 為電能傳輸時線圈接收端波型，V_{L2} 為電壓 I_{L2} 為電流，電流因為必須達到整流二極體導通電壓，電流才會導通因此，電壓未達到整流二極體導通電壓時，電流為截止狀態。

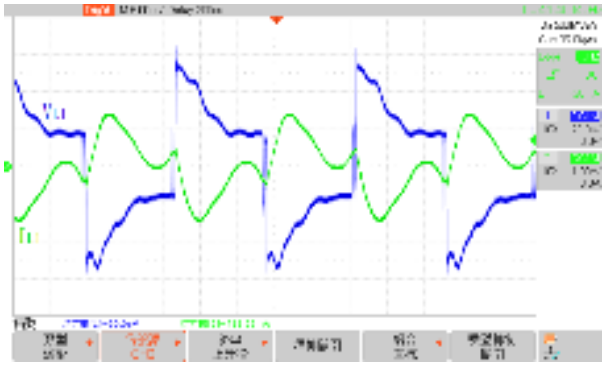


圖 8 一次側電感輸入之電壓電流

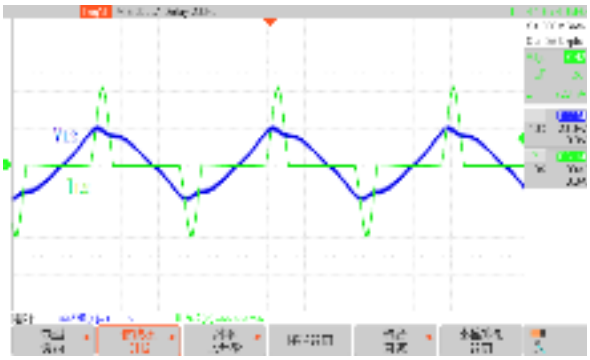


圖 9 二次側電感輸出之電壓電流

本實驗分別測試了在不同操作頻率下，距離 1 公分時輸入 100 伏特，結果如圖 10 所示，可看到在不同頻率下輸出效率之變化，頻率約在 41k 附近時，可達到較佳之效率，接近當初模擬之結果。由以上實驗的得知，操作頻率在 41k 時可達到較佳之結果，因此又分別測試了在不同距離下傳輸之效率，當距離 1~3 公分時可達到 80%以上的效率，在距離 1 公分時效率可達到 85%左右。當距離 1 公分；傳輸功率為 50W 時，充電線圈中心點偏移之效率，可以觀察到在有導磁條的幫助下，可增加充電線圈的容錯率，減少了線圈偏移所造的損失。

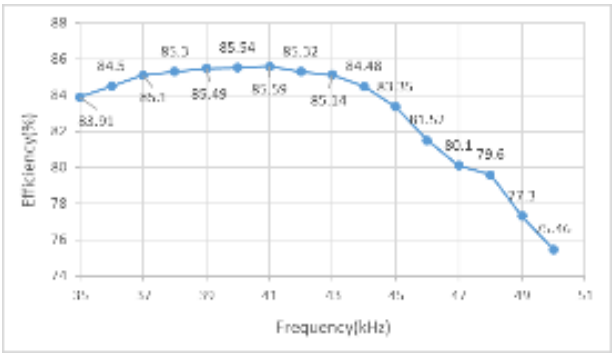


圖 10 輸入 100V 不同頻率下轉換效率

V. 結論

本文目的是將非接觸充電平台結合至探勘機器人上，並與機器人整體系統整合，避免並解決線圈磁場對機器人控制電路干擾造成影響，探勘機器人設計成雙面對稱，使機器人反覆後也能行動自如，底部並帶有大平面適合放置充電板，夾爪也設計成側邊放置，以達到可雙面放置充電板，控制機器人移動的履帶擺臂設計也讓此機器人在崎嶇或是高低落差地形行動自如，符合探勘式機器人之設計。

充電透過藍芽無線傳輸將資訊封包傳送至非接觸充電發送端，調整操作頻率控制充電電流，並且將電量回傳至控制端，得知電池充電之狀況，且使用導磁條解決在進行非接觸充電時；線圈磁場對機器人控制電路造成干擾之問題，並實驗在不同頻率、不同距離與中心點偏移等情況；電能傳輸之效率。在不同頻率傳輸效率實驗中，在 41k 附近時得到的效率為最佳效率，符合電能傳輸增益模擬之結果。不同距離實驗結果中，可得到在高度距離為 3.5 公分以內時；可達到 80%以上之效率，中心點偏移實驗中，因加入長導磁條設計，在中心偏移至 5 公分時，效率可達到 80%以上，使充電線圈容錯率大增，符合當初預期之結果，證明了此設計在實際搭載至探勘機器人上運用是可行的。

參考文獻

[1] Š. Čerba, B. Lüley, B. Vrban, and V. Nečas, “Unmanned radiation-monitoring system,” IEEE Trans. Nuclear Science, vol. 67, no. 4, pp. 636-643, Apr. 2020.

[2] X. Wang. X. Wang, J. Zhao, J. Fan, X. Su, and D. Zou, “Monitoring the thermal discharge of hongyanhe nuclear power plant with aerial remote sensing technology using a UAV platform,” in Proc. IEEE IGARSS, 2017, pp. 2958–2961.

[3] A. Mazumdar, M. Lozano, A. Fittery, and H. H. Asada, “A compact, maneuverable, underwater robot for direct inspection of nuclear power piping systems,” in Proc. IEEE ICRA, 2012, pp. 2818–2823.

[4] Wireless power transfer for light-duty plug-in/electric vehicles and alignment methodology, SAE International.

[5] A. Kur, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, Jul. 2007.

[6] R. E. Hamam, A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, “Efficiency weakly-radiative wireless energy

transfer: An EIT-like approach," Anm. Phys., vol. 324, no. 8, pp. 1783–1795, Aug. 2009.
[7] 林采樺，具改良型感應耦合結構之非接觸式條帶狀供電軌道系統，國立成功大學電機工程系碩士論文，2016 年。
[8] 陳重羽，具垂直磁浮型旋轉式感應耦合結構之非接觸式旋轉供電系統，國立成功大學電機工程系碩士論文，2016 年。
[9] 陳奕霖，非接觸式條帶狀感應供電軌道之雙槽口型電能拾取器結構，國立成功大學電機工程學系碩士論文，2017 年。
[10] 王麒豪，應用四線圈式多單元矩陣型結構於無線電能傳輸系統之研究，國立成功大學電機工程學系碩士論文，2018 年。
[11] 簡宗石，具初級側電流回授控制之平板型非接觸式充電系統研製，國立彰化師範大學電機工程學系碩士論文，2010 年。
[12] 何依霖，具受控整流功能低成本非接觸式電池充電器之研製，國立彰化師範大學電機工程學系碩士論文，2010 年。
[13] 廖芝翊，應用五階變流器激勵源於具分段激發感應耦合結構之非接觸式供電陣列軌道，國立成功大學電機工程學系碩士論文，2018 年。
[14] J. Y. Lee, C. Y. Liao, S. Y. Yin, and K. Y. Lo, "A multilevel inverter for contactless power transfer system," IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, Early Access Article 2020.

跨域合作與風險溝通(II)

應用知識視覺化建構原子能科普教材之設計驗證
Design Validation for Knowledge Visualization to Atomic Energy Knowledge for Public

計畫編號：MOST 110-NU-E-027-001-NU
計畫主持人：鄭孟淙
e-mail：zmcdesign@gmail.com
計畫參與人員：陳靜儀、嚴以文
執行單位：國立臺北科技大學

摘要

原子能科普知識無疑是科學領域中的「硬」知識。受限於教材、話題性的缺乏，且較難吸引民眾主動探索，導致社會大眾對原子能知識的理解程度普遍不足。

本研究以知識視覺化為出發點，前期盤點了世界各國以「日常生活中的輻射」為主題的視覺化內容，以內容分析法逐一整理歸納，再以問卷調查法對各式視覺化設計的問題點加以釐清。最終對選取之三組最優的視覺化進行知識內的以統一，並按照原視覺元素設計編排完成了三組「日常生活中的輻射--原子能科普教材」進行者要的實驗。

研究結果確認了知識視覺化的呈現能協助讀者理解原子能科普的內容。儘管某些實驗受測者提及資料來源的重要性，但本研究發現視覺化中資料來源內容的多寡並不影響這些讀者對它的信任，更多的受測者是提到對內容信任度部份來自整體內容是否精心設計、或看起來像是專業的學術報告。在設計美學方面，圖形與圖示能夠一目了然、並且整體設計具有一致性，與讀者感受設計的新穎性相關。加上搭配適合主題的色彩，均能夠驅使讀者更願意吸收關於原子能科普的內容並且在社群媒體中分享。

本研究確認了即便是艱澀的原子能科普教材，若能1)將內容組織成一個清晰的結構；2)搭配能反應主題的顏色；3)加入容易理解並具一致性的圖示設計；4)考慮圖文等視覺元素的編排；5)善用格式塔的視覺法則，將能更吸引讀者閱讀此類的科普知識，並易於理解與記憶，我們期待能在下一次研究中依照這些發現做出更具理解力與傳播力的原子能科普教材。

關鍵詞：視覺感知、科普、知識視覺化、風險感知、視覺呈現

Abstract

Example, Atomic Energy Technology Academic Seminar, and Achievement Presentation Atomic Energy Technology Academic Seminar and Achievement Presentation Atomic Energy Technology Academic Seminar and Achievement Presentation Atomic Energy Technology Academic Seminar and Achievement Presentation Atomic Energy Technology Academic Seminar and Achievement Presentation.

Keywords: visual perception, popular science, knowledge visualization, risk perception, visual presentation.

I. 前言

英國皇家學會發表的博德曼報告（Bodmer Report）中，揭示了「公眾對科學的理解」，將大眾對於科學知識的缺乏加以「問題化」[1]，引發了世人意識到推廣科學教育的重要性。然而科學知識具備「典範特質」[2]，內容往往過於艱深導致令人難以親近，相對於其他知識領域，接觸門檻較高。因此普遍的作法是將科學知識的內涵加以簡化，並藉由生活化或是趣味性的方法加以演繹，以達到大眾化與普及化的效果[3]。

隨著時代的演進、數位科技與社群媒體的發達，人們的注意力與時間日趨碎片化。知識與資訊的閱讀習慣逐漸從傳統的「文字」轉變為「圖像」。而視覺化具有描述性的特質，更能代表不同類型的主題及更適合進行推理[4]。

而在各種學習和教學環境中，概念圖被證明是有價值的認知工具[5]。與傳統的學習評估相較之下，概念圖對學生理解力的細微變化更為敏感 [6]。知識視覺化的方法還考慮了文化的應用場景和美學面向，強調使用視覺隱喻來表示相關訊息可以讓更廣泛的讀者能夠理解[7]。而經由情感與認知的過程，連結藝術與知識的關聯性，會對視覺訊息產生不同的理解[8]。

知識視覺化工具能幫助人轉化有效的信息、掌握知識、促進創新、改進學習[9]。現今社會大眾普遍缺乏對原子能相關科普知識，此一課題更是需要群體共同謀求解決方法。因此本研究欲了解目前國內外原子能科普知識的現況與主題，解構其文本與圖像化的應用模式、定義以視覺敘事架構下將知識視覺化運用於原子能知識視覺化之設計條件。後續並針對民眾之認知、理解成效評估以，並運用幾個美學研究的概念[10,11,12,13,14]製作出美學量表，完成設計驗證，促進原子能科普知識的傳播與交流，進一步讓社會大眾也能夠成為傳播科普知識的參與者。

II. 主要內容

原子能相關的知識視覺化主題類型與應用範圍：

本研究先從網路上以「radiation in daily」關鍵字蒐集原子能相關的知識視覺化圖表，共收集到 30 張「日常生活中的輻射（包含對人體的影響）」。

「Radiation in daily」知識視覺化之內容分析：

從 30 張「日常生活中的輻射」視覺化中，，刪除了圖表相同但不同語系的成品，將剩餘的 18 張圖，以每組圖中呈現的「劑量數字」、「文字內容」、以及「圖片內容」進行資訊歸納。在視覺表達上，則解構為標題內容、資訊、美學、文字與插圖之面積比例等元素歸納分析。

Study I 問卷調查：釐清各式視覺化設計的問題點

在完成內容分析後，先排除各元素較類似的圖表，篩選出資訊內容相近，但視覺特徵差異較大的 10 組（詳見圖 1），將所有語言翻譯成正體中文以消除資訊理解隔閡，並保留其他設計元素，如顏色、字型、字體、行數、位置、元素間的空白。

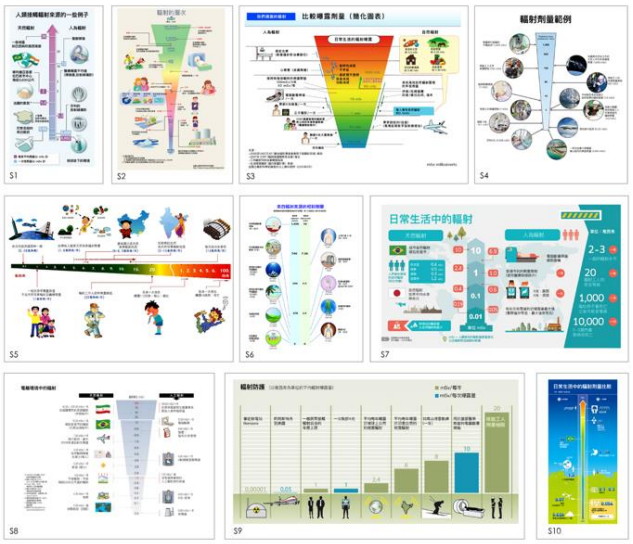


圖 1. 10 組圖表

問卷調查來釐清各式視覺化設計的問題點。問卷題目包含認知記憶、美學與感受、風險感知、和個人偏好四個面向。

在認知記憶方向包含了從十張材料中隨機分配到的一張，在 1 分 30 秒內進行視覺化圖表的理解與記憶，接續回答了單選題、排序題與開放作答題。同時針對該張圖表進行美學因子的同意度調查，以李克特七等量表來評估古典與表現主義的美學因子：乾淨俐落/整潔、清晰、對稱、具有創意、具原創性、以及與特殊效果六個因子。另外，以語義差異量表評估 24 組反義形容詞，以了解受訪者對十張圖的感受。題目共包含七題認知記憶題、六題美學因子態度量表、24 組語意差異量表、三題風險感知面向、一題個人偏好、三題個人背景資料（性別、年齡、教育程度）。

風險感知的部份，則擷取十張圖表中劑量尺度的部份（圖 2），一次呈現並讓受訪者進行風險感知強弱的排序。

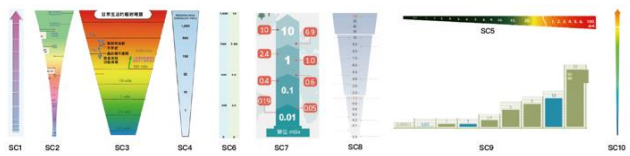


圖 2. 10 張劑量尺度圖表

Study II 實驗設計

為深入探討讀者對於調查一結果，並了解讀者對不同視覺元素，對其帶來的認知、感知與感受的影響。在本調查中，將透過實驗獲得知識視覺化對受測者之知識傳達效能、理解、記憶、美學、情緒感受的進行記錄與分析。最終將歸納出能促進最佳認知績效、為讀者帶來積極感受、並符合美學的知識視覺化設計條件。

內容設計以問卷調查結果中三組（樣本 A：S8、樣本 B：S7、樣本 C：S10）最優的視覺化，將知識內容統一（統一為 12 個項目，參考表 1），並按照原視覺元素以設計編排（參考圖 3-5）。

圖 3. 樣本 ABC 組圖

表 1. 12 項統一的內容（項目描述與劑量）

No.	項目	輻射劑量 (mSv)	備註
1	靠近核電廠	0.05	此三組視覺化原本皆有資料來源，將採取原有的資料來源描述。 標題的部份將統一為相同的文字「**日常生活中的輻射劑量比較**」 人為輻射與人工輻射，將統一為「人為輻射」
2	一趟洲際航班往返	0.07	
3	一次胸部 X 光	0.2	
4	食物/一年	0.35	
5	一般大眾每年劑量限值/每年	1	
6	每年自然輻射劑量(宇宙、地表食物、空氣中)	1.3~4.3	
7	住宅的氡氣	2.28	
8	一次正子斷層掃瞄攝影	7	
9	抽煙：每天 20 支/一年	8.8	
10	巴西喀拉哈里市	10	
12	輻射工人安全等級限值/一年	20	
13	嘔吐但不會死亡，可能罹癌	1000	
14	2-3 週內會患病而死亡	>6000	

每組材料將隨機分配給 30 名受測者，每位受測者將只針對其中一組進行測量與評估，最終每組材料將各有 10 名受測者的評估資料。依序收集受測者之講解與練習、測量認知績效、半結構式訪談、量表評估等各部分內容。

III. 結果與討論

Study I 結果

認知記憶面向：總分前三名依次為 S8（平均分數：7.33）、S9（7.14）、S7（6.55）。S1（4.13）為認知記憶得分最差的一張。本研究團隊認為 S8 這張圖能獲得較高的認知記憶得分，可能是因為其資訊一開始便清楚地將分成自然與人工輻射兩類，尺度的顏色透過色彩濃

度由淡到濃，呈現劑量的寡至多，梯形的分段也理性地呈現數字的不同級距，由劑量尺度位置水平繪製出的指示線，清晰地指出相對應的圖片項目，而文字與圖片的排版對齊的方式有助於在短時間內閱讀並記憶。

風險感知面向：在「方向」的排序得分上，最高分的前三名是 SC2、SC3 與 SC8。僅有 S5 與 S9 是橫向呈現，其排序得分較低，為倒數第三和最後一名，亦即受訪者多數認為劑量尺度在版面上以「縱向」排序，相較於「橫向」排列要來得強。「形式」方面風險感知的前三名為 SC3、SC2 以及 SC8。較強者多數為梯形/漏斗形，接著為箭頭型，最後為長條形；梯型中前三名的尺度視覺表現上，劑量高與低在其面積上呈現較大的落差，影響了受訪者對風險感知的強弱感受。受訪者在「顏色」對於風險感知的影響上，前四名皆為多彩、飽和度相對較高的漸層色，分別是 SC3、SC5、SC10、以及 SC2。

美學感知與感受：美學因子同意度量表與感受的語意差異量表的結果，在比較後發現一個有趣的結果。在美學因子（乾淨俐落、清晰、對稱、有創意、具原創性、有特殊效果）平均皆獲得同意以上的四張圖表（S3、S7、S8、S10），與獲得傾向「正向」形容詞 4 張圖表一致（詳見圖 4），表示在此調查中，符合古典主義與表現主義美學因子的圖表，能帶給讀者較積極的感受。

此四張圖表中，S7 與 S8 除了在美學面向和正向感受方面平均得分高外，其認知理解記憶上的表現也在前三名，研究推測其美學的表現除了影響讀者感受，也顯示了對於圖表呈現的訊息，有一定程度的幫助。而這些推論需要在未來的實驗與訪談中，獲得進一步的驗證。

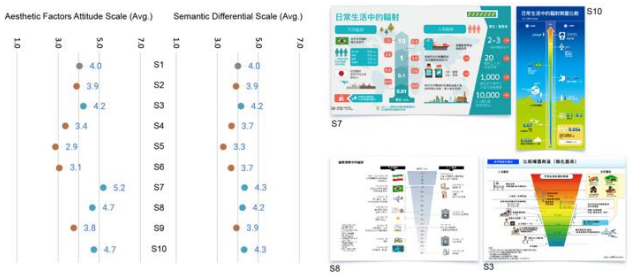


圖 4.（左）美學因子同意度與語意差異量表平均分數比較；（右）得分較高的四張圖表。

若將認知記憶、美學、正向感受三個面向的平均得分相加，最高分的三名依序為 S8（16.23）、S7（16.05）、S10（15）。

小結

在 Study II 實驗設計中，將保留上述三張圖表的設計元素與樣式，但資訊更改為相同一致的內容，以便在理解與記憶的評估項目中有同樣的內容基礎，如此可以比較出設計各種元素是否影響讀者對知識或資訊的認知。期待透過半結構式訪談，更進一步了解設計元素如何影響讀者的感知與認知。

Study II 綜合分析

態度量表

圖 4 為受測者態度量表結果之同意度分析結果

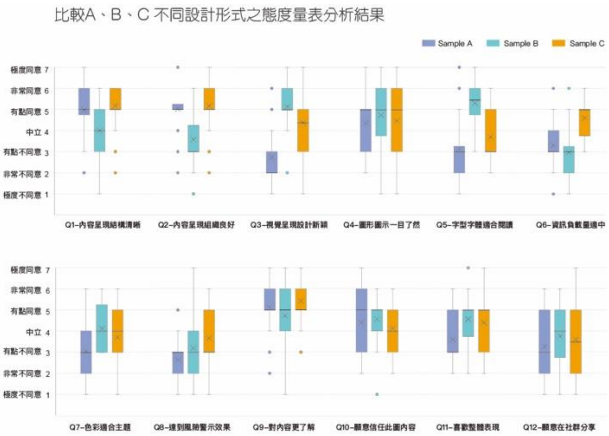


圖 4. A, B, C 態度量表分析結果比較

綜合分析

樣本 A 的美學面向平均值是三組中最低，但受測者對其內容結構清晰與組織良好皆沒有反對的意見。它的尺度設計比例較大，因此有一半的受測者第一眼就注意到。分割的梯型代表數據不同的級距十分合理。以指示線對應到劑量範例內容並對齊，成為了視覺搜尋的線索。但有五位受測者提到它的顏色「太淺」、「太灰不吸引人」、「過於柔和」等意見，讓輻射在高劑量的部份，風險感知較低。另外標題字相對較小、內文中劑量數字並不突顯、以及範例的圖示的設計缺乏一致性，都是缺點。其中有三位認為它像是學術或研究報告，缺乏設計感，而這點也反應在新穎性的同意度(mean=2.7)上。

受測者評估樣本 B 在設計新穎性、圖示和字體相較於 A 與 C 要同意度高，但有一半的受測者於其在內容結構清晰(mean=4.0)與組織良好(mean=3.6)並不佳，在訪談中有 10 位不約而同以「有點亂」來形容樣本 B。探究其問題出在於，某些視覺元素的鄰近性並沒有安排得很好，因為造成資訊的誤解，例如巴西國旗與下方每年人們受到的自然輻射劑量過於相近，讓受測者誤以為那是巴西喀拉哈里市的數據資料。另外，劑量數據雖然以橘紅色色塊白色字呈現，但他們與範例圖示和文本距離不夠接近，導致一開始受測者忽略了其關聯性。而以圓型橘紅色塊標示一次或一年的部份也是相同的問題。合理推測以上的問題似乎造成樣本 B 花費最多閱讀時間，卻是得分最低的一組。受測者顯少提及尺度的設計，它在發話思考中幾乎被忽略。但有一位受測者提到在顏色的配置上，顏色的深淺程度應該要與劑量數值成正比。劑量高而顏色淺顯得不合理。

樣本 C 是唯一沒有在尺度上標示數據級距者，但此並不影響受測者對劑量的理解。尺度顏色的變化，可以感受到由下往上是劑量低到劑量高。但是有 12 位受測者表示，它的背景顏色（藍/綠）與主題不符、以及範例的劑量數字融入到背景，以致於難以辨識。而相較其他兩個樣本而言，樣本 C 的資訊負載量（Q6）最低（mean=4.6），並且在短期記憶的得分與閱讀時間的數

據來看，也表現得不差。

IV. 結論

本研究的受測者皆認同知識視覺化呈現有助於他們了解內容。我們也發現視覺化中資料來源內容的多寡並不影響這些讀者對它的信任，雖然也有受測者提到資料來源的重要性，但更多的受測者是提到對內容信任度部份來自整體內容是否精心設計、或看起來像是專業的學術報告。

過多裝飾性的視覺元素容易讓讀者在閱讀時失去焦點。與自身無關的訊息（例如巴西）需要加以文字輔助說明；與讀者息息相關的內容容易引起注意（例如吸煙、死亡），並產生警覺。而標題是多數讀者第一眼會注意的部份，因此它需要讓讀者了解視覺化主題的具體內容。

若能將內容組織成一個清晰的結構，搭配能反應主題的顏色、容易理解並具一致性的圖示設計、考慮圖文等視覺元素的編排並善用格式塔的視覺法則，將能更吸引讀者閱讀此類的科普知識，並易於理解與記憶。

參考文獻

[1] W. F. Bodmer, “The public understanding of science,” London, 1985.。

[2] T. S. Kuhn, “The Structure of Scientific Revolutions”, University of Chicago Press, 1996.

[3] J. Trumbo, “Essay: Seeing Science: Research Opportunities in the Visual Communication of Science,” *Science Communication,* vol. 21, no. 4, pp. 379–391, 2000, 21(4):379-391. doi:10.1177/1075547000021004004

[4] Schnotz, W. & Kürschner, C., (2008), "External and internal representations in the acquisition and use of knowledge: visualization effects on mental model construction", *Instr Sci*, vol. 36, pp. 175-190, 2008.

[5] Draper, D. C., & Amason, R. F. (2014). Digital Knowledge Mapping as an Instructional Strategy to Enhance Knowledge Convergence: A Case Study. In Digital Knowledge Maps in Education (pp. 331–354). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3178-7_17

[6] Koufou, A. K., Ergazaki, M. I., Komis, V. I., & Zogza, V. P. (2014). Researching Individual and Collaborative Pair Learning in Primary School Students Using Digital Knowledge Maps for Science Education. In Digital Knowledge Maps in Education (pp. 139–159). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3178-7_8

[7] Bertschi, S., Bresciani, S., Crawford, T., Goebel, R., Kienreich, W., Lindner, M., … Moere, A. Vande. (2013). What is knowledge visualization? Eight reflections on an evolving discipline. In Knowledge Visualization Currents: From Text to Art to Culture (pp. 13–32). Springer-Verlag London Ltd. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4303-1_2

[8] Goodman, N. (1976). Languages of art : an approach to a theory of symbols. Hackett.

[9] J. Zhang, D. Zhong and J. Zhang, "Knowledge Visualization: An Effective Way of Improving Learning," *2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 2010, pp. 598-601, doi: 10.1109/ETCS.2010.268.

[10] Cawthon, N., & Moere, A. Vande. (2006). A conceptual model for evaluating aesthetic effect within the user experience of information visualization. In Proceedings of the International Conference on Information Visualisation. https://doi.org/10.1109/IV.2006.4

[11] Garabedian, C. A. (1934). Birkhoff on aesthetic measure. Bulletin of the American Mathematical Society, 40(1), 7–10. https://doi.org/10.1090/S0002-9904-1934-05764-1

[12] Tractinsky, N., Katz, A. S., & Ikar, D. (2000). What is beautiful is usable. Interacting with Computers. https://doi.org/10.1016/S0953-5438(00)00031-X

[13] Norman, D. (2007). Emotional design: Why we love (or hate) everyday things. The Journal of American Culture.

[14] Tateosian, L. G., Healey, C. G., & Enns, J. T. (2007). Engaging viewers through nonphotorealistic visualizations. In NPAR Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. https://doi.org/10.1145/1274871.1274886

多元族群探究能源轉型政策中關於原子能議題之研究
A Study of Multi-Ethnic Groups on Nuclear Power Issues in Energy Transition Polic

計畫編號：110-NU -E-845-001 -NU
計畫主持人：古建國
e-mail：kuo@utaipei.edu.tw
執行單位：臺北市立大學應用物理暨化學系

摘要

聯合國於 2014 年提出「永續發展目標(SDGs)」，談到要有可靠與永續的能源。本研究目的包括開發國家能源轉型政策下核安資訊與國際能源知識的教材、辦理多元族群活動與學習成效分析。研究對象包括學生、親子與新住民等，上課地點包括社教機構或學校等地。教材編輯包括設計、發展、實施階段及成效分校後修正，教材內容包括國內、外能源轉型趨勢、國內核能電廠除役步驟、鄰避效應、核廢料處理與國際處理案例與核安資訊與防護等。研究工具為國小學生學習成效分析。

研究結果在教材方面包括一本教師手冊、一般中學生以上程度教材與一本親子程度之教材；活動型態括融入科學園遊會體驗與闖關、以新住民為主親子參訪、演講與體驗活動、小學到大學以及成人室內課程之演講與體驗等；學生學習成效方面，研究發現學習後成效優於學習前，並達顯著差異。

關鍵詞：能源轉型、多元族群、輻射教育。

Abstract

The purpose of this study includes the development of teaching materials on nuclear information and international energy knowledge in the Energy Transition Policy, the processing of multi-ethnic activities, and the analysis of learning effects. The subjects of the research were students, parents and children, and new students, and the research was conducted in classrooms such as electric exhibition halls, social education institutions, and schools.

Research results include teacher manuals on teaching materials, for general junior high school students and above, and for parents and children, integration experiences and intrusions into science parks, parent-child visits mainly to new residents, speeches and experiential activities, speeches and experiences in elementary school to university and adult indoor courses, student learning outcomes, etc. The study found that the results after learning were better and significantly different than before learning.

Keywords: Energy Transition Policy、Multiple ethnic groups、Radiation education

I. 前言

1.動機

2025年達成非核家園目標下，未來勢必需要進行能源轉型。

臺灣目前六個機組的核電廠已有三個機組不再發電，勢必思考核電廠除役後續事宜。停止使用的核電廠正規畫除役，除役的核電廠將面臨核廢料處理、拆除與復原等階段。目前學校課程對輻射相關內容與核安資訊描述不多，加上目前的能源轉型與2025年非核家園等議題也著墨不多。所以推動國內上述議題的教育十分重要，內容應該涵蓋民眾關切之核電廠退役、放射性廢棄物之管理與處置、醫療應用與核能電廠意外事故之防護與環境輻射監測等。

臺灣核電近年發電占比約10%，其中核一廠已進入除役階段，核二、核三廠也將面臨使用期限將至。除此之外，核廢料也面臨如何有效處理問題，這些核廢料包括低階核廢料最終處置場址的選擇，故核電廠除役還有不少事情要處理，2025年之後還在商轉的三機組將全部如期除役，共有六個機組需要處理。故編輯相關教材進行多元族群輻射教育與推廣有其重要性。

2. 研究目的

具體目的說明如下:

(1) 開發國家能源轉型政策下核安資訊與國際能源知識的教材。
(2) 辦理多元族群核安資訊與國際能源知識推廣活動。
(3) 探討多元族群核安資訊與國際能源知識推廣活動學習成效。

II. 研究方法

1. 研究步驟

本計畫多元族群包括親子與高中職以上的學生，為了因應不同族群差異的差異，擬開發相關教材，內容規劃是配合國家能源轉型政策為基礎，提供多元族群之民眾，有關「鄰避效應」、「核能電廠除役」、「核廢料處理」等核安資訊與國際能源知識，參考ADDIE教學模式進行開發教材，其步驟為分析階段、設計階段、發展階段、應用階段及評鑑階段。

2. 研究對象

小學生為施測主要對象，教育推廣對象還包括大學生與成人。上課地點以參訪設施適合場地或學校為主。

3.研究工具

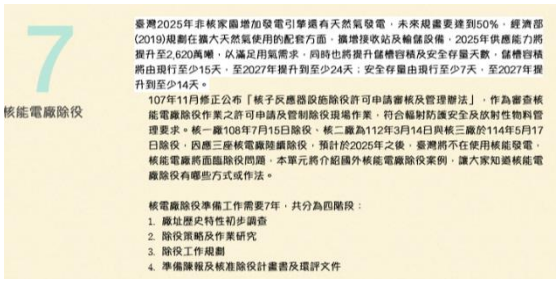
本研究之研究工具為學習成效調查。進行學習成效調查，將所蒐集的資料予以編碼及建檔，以 SPSS V20.0 中文版進行資料的統計及分析，進行描述性統計及成對樣本 t 檢定。

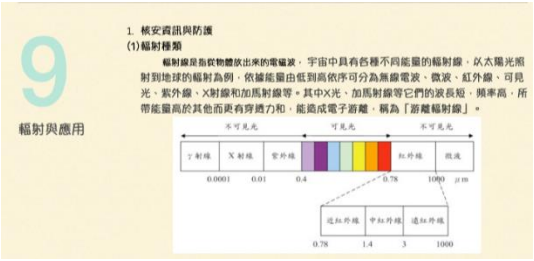
III. 結果與討論

1. 開發國家能源轉型政策下核安資訊與國際能源知識的教材

教材內容包括能源轉型下非核家園、避鄰、核電廠除役階段介紹、核廢料處理與輻射之醫療檢查，教學方式包括講述法與遊戲闖關，一套為教師增能用數位教材、一套為國中生以上程度之數位教材，一套為親子程度數位教材。

(1) 教師用數位教材





(2)國中生以上用數位教材

第一章 認識能源轉型

一、永續發展目標(SDGs)

聯合國於2014年提出「永續發展目標(SDGs)」，涵蓋弱勢族群照顧、糧食安全、健康生活與福址、公平與高品質教育、性別平等、環境品質保護、能源永續、優質就業機會、運輸系統建構、減少不平等、永續城鄉建構、綠色經濟、氣候變遷因應、海洋生態系保護、陸域生態系保護、和平多元社會與司法平等、多元夥伴關係等。在能源目標談到未來要確保所有的人都可取得負擔的起、可靠與永續的能源，各國應該要提高再生能源使用與提升能源使用。

永續發展目標(SDGs)
https://www.ait.org.tw/wp-content/uploads/sites/269/un-sdg.pdf

臺灣永續發展目標(SDGs)共有18項，前17項與聯合國永續發展目標相對應，另外依據我國「環境基本法」第23條等條文，增列第18項為非核家園。

2030年臺灣永續發展目標
https://www.ey.gov.tw/Page/9277F759E41CCD91/b6825d98-73fc-47fb-8f31-8cfe48288114
能源發展細節
https://www.moeaboe.gov.tw/ecw/populace/content/Content.aspx?menu_id=2796

第二章 鄰避效應

1970年代美國學者厄黑爾首次提出了"鄰避效應"的概念，指的是"不要建在我家後院"。

鄰避效應
http://terms.naer.edu.tw/detail/1320304/
https://icefoxy841027.wixsite.com/fortuneville/post/不要在我家後院鬼好-淺談鄰避效應

造成鄰避原因包括：

1. 排放污染對環境造成污染或高速公路的噪音污染。
2. 對土地的占用和對當地原有社會經濟和利益分配的衝擊。
3. 存在一定風險，或者比較敏感，成為民眾關心的話題。
4. 補償或者利益分配問題。

鄰避原因
https://kknews.cc/news/6n82qyq.html

歐盟(2019)提出經濟復甦計畫「新世代歐盟」(Next Generation EU)草案，強調歐盟綠色新政以促進再生能源計畫為主軸，尤其是風力，太陽能與啟動歐盟潔淨氫能為計畫重點。發展綠能已成為未來全球經濟復甦的重點，透過提升再生能源佔比可增加電力。

大眾對核電文化的認知與認可
https://kknews.cc/history/b86kzxj.html

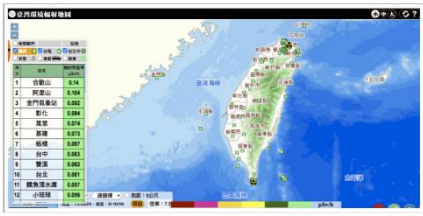
問題思考：

1. 學校有哪些鄰避效應的案例？

2. 居家生活有哪些鄰避效應的案例？

第三章 臺灣輻射地圖

為了解生活環境或核電廠周邊輻射量，訂定不同監測項目。可分為陸地監測與海域偵測。陸地監測項目包括直接輻射、大氣、淡水、植物、農畜產物、土壤等；海域監測項目包括海水、海產物、岸沙 及海底沈積物等。



監測方法分為環境直接輻射及環境試樣放射性分析兩項，前者以充氣式偵檢器或閃爍偵檢器及熱發光劑量計偵測環境輻射劑量率；後者包括總貝他活度分析、氚活度分析、碘-131分析、加馬核種能譜分析、鍶 -90

問題思考：

1. 學校周邊環境游離輻射劑量約多少？

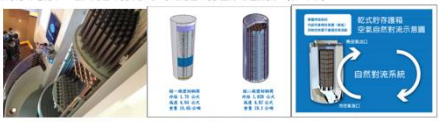
2. 住家附近游離輻射劑量約多少？

3. 景點周邊游離輻射劑量約多少？

第四章 核廢料處理

核能發電所產生核廢料有高放射性廢料與低放射性廢料兩種。

高放射線性廢料: 用過核燃料棒、β衰變或γ衰變的分裂產物、α衰變的錒系元素、含有放射線中子的放射性同位素（如鈽）



低放射性廢棄物：來自於核能電廠的設備維修或改善工程，以及清潔與輻射防護等作為所使用的物品，或受醫學產生之核廢棄手套、農業產生之核廢棄工具。因有可能沾染到低程度的放射性元素(但不是核物料)，故稱為「低放射性廢棄物」。

基金之來源如下：

(一)由臺灣電力股份有限公司 (以下簡稱臺電公司) 逐年按提撥率提撥核能發電後端營運費用。

(二)由政府循預算程序之撥款。

(三)本基金之孳息收入。

(四)其他有關收入。

利用micrbit遙控器擴充版控制麥昆小車認識低放射線與高放射線廢料，包括：高放射線性廢料: 用過核燃料棒、β衰變或γ衰變的分裂產物、α衰變的錒系元素、含有放射線中子的放射性同位素（如鈽）

低放射性廢棄物：核廠工作靴、核廠工作手套、醫學之核廢棄手套、農業產生之核廢棄工具。

第五章 核能電廠除役

一、日本

日本在 2011 年福島事故後，於 2013 年制定更嚴格的核能安全標準，除了在福島事故前就已開始除役作業的東海核電廠 1 部、浜岡核電廠 2 部機組之外，新制核安標準啟用後有 15 部機組宣布除役，加上福島第一核電廠 6 部機組，於2020年已邁入 24 部（若再加上 2 座研究用反應爐文殊與普賢則為 26 部）。

除役計畫申請

根據日本法律規定，電力公司在停止核電機組運轉時應依照管制機構的規定，適當處理機組內部的燃料；核電機組在開始除役作業前，也必須先向管制機構提出該部機組的除役計畫，待管制機構批准其除役計畫後才可開始執行。

除役計畫的內容也必須包含以下項目：

1. 核燃料的管理與移轉；
2. 需要拆除的建物與拆除方法；
3. 受到核燃料污染區域的除污；

3、第三階段為「最終偵測階段」：

主要為待機組拆除後，進行廠址環境的最終輻射偵測，確認土壤是否需要進行整治復原。依據核一廠除役計畫，台電公司規劃最終偵測階段約為3年，且除役後之廠址輻射劑量將以符合非限制性使用標準為目標進行除役。依據「核子反應器設施管制法」及其施行細則之規定，非限制性使用者對一般人造成之年有效等效劑量不得超過0.25 mSv之限值。相較於台灣每年天然背景輻射劑量約1.6mSv而言，非限制性使用的輻射劑量目標值可確保除役後廠址的輻射安全。在此階段，除進行廠址最終狀態偵測外，亦有其他作業目標如聯合結構廠房、汽機廠房、廢氣廠房、修配大樓、新修配大樓等建物拆除。

4、最後階段為「復原階段」：

台電公司規劃約需2年，其主要作業目標為進行土地復原與景觀工作，即執行覆土作業，以達地面之平整及景觀美化之效。

利用兩片Microbit控制小車循著規劃路徑前進認識核電廠除役。

小車程式

https://sites.google.com/site/wenyuanker2/02micro-bit-yan-jiu/44-mai-kun-xiao-che

第六章 認識輻射與核安防護

一、輻射種類

輻射線是電磁波， 宇宙中具有不同能量輻射線，以太陽光為例，依據能量由低到高依序可分為無線電波、微波、紅外線、可見光、紫外線、X射線和加馬射線等。X光、加馬射線的波長短，頻率高，所帶能量高於其他而更有穿透力和，能造成電子游離，稱為「游離輻射線」。

關於游離輻射研究始於1895 年德國物理學家倫琴發現 X 射線；隔年，1896 年法國物理學家貝克勒發表「鈾鹽放出 X 射線，可以穿透物體」。

居禮夫人受到倫琴與貝克勒兩人研究影響，研究鈾射線，於1898 年 12 月，發現新的元素，命名為「鐳」，為「射線」之意。 居禮夫婦和貝克勒因游離輻射現象的研究於 1903 年共同獲得諾貝爾物理學獎。

居里夫人的放射線發現

https://www.phys.nchu.edu.tw/news/ins.php?index_m_id=11&index_id=146

居里

http://www.hk-phy.org/history/chi/curie.html

第七章 核能在醫療上應用

核能在醫療上應用包括輻射檢查與治療：

一、輻射檢查

電腦斷層掃描儀(Computer Tomography)：利用人體組織對X光的衰減程度不同，使用不同角度的X光穿透人體，並經電腦處理後，所形成之三度空間解剖影像。當器官、組織有病變時，將會顯現在影像上，可提供醫師臨床診斷使用，是一種非侵入性的醫療檢查設備。

（一）核醫檢查前準備：接受核醫掃描前醫師會給予含微量放射性物質的藥物，有靜脈注射、吞服藥丸或經由呼吸裝置吸入放射性同位素藥物等方式，當進行核醫掃描能提供身體組織器官在結構上和功能上的資訊。

（二）等待檢查：在給藥之後到開始掃描之前，通常需要等一段時間，以便將藥物帶到特定的檢查器官。

（三）接受掃描或檢查：當進行輻射檢查時候，會先躺在檢查床上，保持輕鬆心情與正常呼吸，若聲音較大，必要時可以帶耳塞。接著啟動機器與記錄體內放射性藥物散發出來的輻射訊號，唯一的輻射曝露是來自您體內微量的放射性藥物。

鈷60照射機

直線加速器

(3)親子用數位教材

第一章 認識能源轉型

課前思考：

1.(　)行政院於2017年能源發展綱領以及能源局提出的能源轉型白皮書，強調能源轉型，其中將減少下列哪一種發電方式(A)太陽能發電(B)風力發電(C)燃煤發電(D)天然氣發電。

2.(　)行政院於2017年能源發展綱領以及能源局提出的能源轉型白皮書，強調能源轉型，其中將終止下列哪一種發電(A)水力發電(B)核能發電(C)火力發電(D)天然氣發電。

3.(　)行政院於2017年能源發展綱領以及能源局提出的能源轉型白皮書，強調能源轉型，其中下列哪一種發電量會最多(A)水力發電(B)核能發電(C)火力發電(D)天然氣發電。

4.(　)行政院於2017年能源發展綱領以及能源局提出的能源轉型白皮書，強調能源轉型，其中再生能源發電量規劃有多少百分比(A)10%(B)20%(C)30%(D)40%。

5.(　)世界各國目前正積極推動能源轉型，其中發電量降低或終止是下列哪一種發電方式？(A)核能發電(B)風力發電(C)火力發電(D)水力發電。

一、永續發展目標(SDGs)

聯合國於2014年提出「永續發展目標(SDGs)」，涵蓋弱勢族群照顧、糧食安全、健康生活與福址、公平與高品質教育、性別平等、環境品質保護、能源永續、優質就業機會、運輸系統建構、減少不平等、永續城鄉建構、綠色經濟、氣候變遷因應、海洋生態系保護、陸域生態系保護、和平多元社會與司法平等、多元夥伴關係等。在能源目標談到未來要確保所有的人都可取得負擔的起、可靠與永續的能源，各國應該要提高再生能源使用與提升能源使用。

第二章 鄰避效應

課前思考：

5.(　　)什麼是「鄰避效應」概念(A)不要有惡鄰居(B)不要有鄰居(C)獨棟獨居房子(D)設施不要建在我家後院。

6.(　)下列何者屬於鄰避設施(A)核電廠(B)有機農場(C)淡蘭古道(D)陽明山公園。

1970年代美國學者厄黑爾首次提出了"鄰避效應"的概念，指的是"不要建在我家後院"。

鄰避效應

http://terms.naer.edu.tw/detail/1320304/

https://icefoxy84.1027.wixsite.com/fortunevillepost/不要在我家後院鄰避-選舉鄰避效應

造成鄰避原因包括：

1. 排放污染對環境造成污染或高速公路的噪音污染。
2. 對土地的占用和對當地原有社會經濟和利益分配的衝擊。
3. 存在一定風險，或者比較敏感，成為民眾關心的話題。
4. 補償或者利益分配問題。

鄰避範圍

https://hknews.cc/news/6n82qvg.html

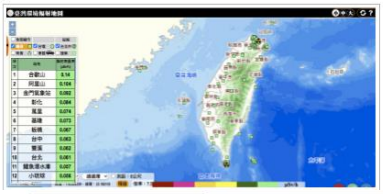
第三章 臺灣輻射地圖

課前思考：

7.(　　)環境輻射監測項目包括下列哪一項？(A)氘-2(B)氡-18(C)碘-131(D)碳-14。

8.(　　)在正常沒意外事故情況，下列哪一個地方偵測到的游離輻射劑量最高(A)核電廠(B)機場(C)市場(D)都差不多。

為了解生活環境或核電廠周邊輻射量，訂定不同監測項目。可分為陸地監測與海域偵測。陸地監測項目包括直接輻射、大氣、淡水、植物、農畜產物、土壤等；海域監測項目包括海水、海產物、岸沙 及海底沈積物等。



問題思考：

1. 學校周邊環境游離輻射劑量約多少？
2. 住家附近游離輻射劑量約多少？
3. 景點周邊游離輻射劑量約多少？

第四章 核廢料處理

課前思考：

9.(　　)核廢料中，輻射放射性最高是下列哪一種？(A)核廢棄手套(B)廢棄X光機(C)用過核燃料棒(D)廢棄輻射加速器。

10.(　　)美國國會於 1980 年及 1985 年先後制訂通過「低放射性廢棄物政策法」，明定由哪個層級負責處置低放射性廢棄物？(A)州政府(B)中央政府(C)鄰鎮政府(D)交給廠商處理。

11.(　　)依據德國聯邦政府於 2013 年修訂之原子能法規定，，明定由哪個層級負責放射性廢棄物？(A)中央政府(B)聯邦政府(C)鄰鎮政府(D)產生者。

12.(　　)處理核能發電低放射性廢棄物最多國家是哪一個國家？(A)日北(B)美國(C)法國(D)臺灣。

核能發電所產生核廢料有高放射性廢料與低放射性廢料兩種。

高放射線性廢料：用過核燃料棒、β衰變或γ衰變的分裂產物、α衰變的鋼系元素、含有放射線中子的放射性同位素（如鈽）

第五章 核能電廠除役

課前思考：

13.(　　)目前臺灣運轉中核電廠有六個機組，其中除役的有幾組？(A)一組(B)二組(C)三組(D)四組。

14.(　　)臺灣核電廠除役作業中，除役拆廠是第幾階段？(A)第一階段(B)第二階段(C)第三階段(D)最後階段。

15.(　　)臺灣已有的核電廠除役中，目前除役階段最快的廠房已進行到哪裡？(A)準備工作(B)過渡階段(C)拆廠階段(D)復原階段。

核一廠108年7月15日除役、核二廠為112年3月14日與核三廠於114年5月17日除役，因應三座核電廠陸續除役，預計於2025年之後，臺灣將不在使用核能發電，核能電廠將面臨除役問題，107年11月修正公布「核子反應器設施除役許可申請審核及管理辦法」，作為審查核能電廠除役作業之許可申請及管制除役現場作業，符合輻射防護安全及放射性物料管理要求。

核電廠除役準備工作需要7年，共分為四階段：

（一）廠址歷史特性初步調查。

（二）除役策略及作業研究。

（三）除役工作規劃。

（四）準備陳報及核准除役計畫書及環評文件。

第六章 認識輻射與核安防護

課前思考：

16.(　　)宇宙有不同能量輻射線，根據能量高低的排列，下列何者的能量最高？(A)微波(B)紫外線(C)X射線(D)伽馬射線。

17.(　　)游離輻射研究始於1895 年由下列哪位科學家發現 X 射線開始？(A)德國倫琴(B)法國貝克勒(C)波蘭居禮(D)美國拉塞福。

18.(　　)大家出門搭乘運輸工具所使用的「悠遊卡」、「一卡通」、「ETC」或寵物身上的「寵物晶片」是應用下列哪一種輻射？(A)無線電波(B)微波(C)紅外線(D)磁鐵感應。

19.(　　)碘片服用最恰當時機為放射性碘外釋之前至放射性碘外釋後多久時間內，超過這時間保護功能將遞減？(A)6小時(B)8小時(C)12小時(D)24小時。

20.(　　)核子事故警報為響 1 秒，停 1 秒，共持續多少秒？(A)50 秒(B)過 60 秒(C)90 秒(D)120 秒。

一、輻射種類

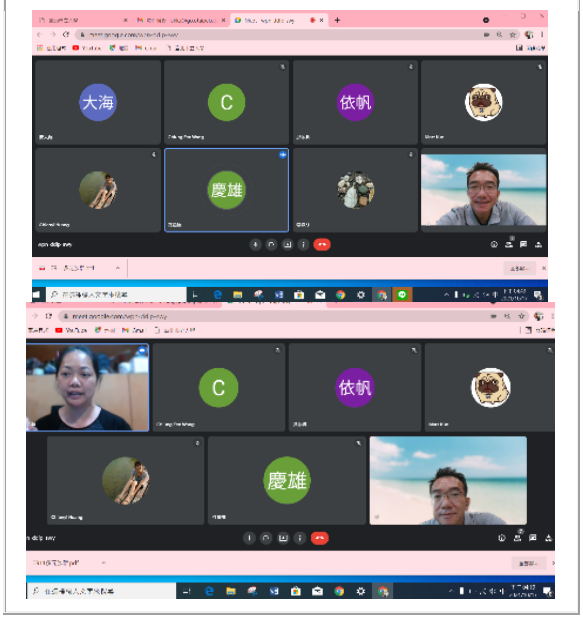
輻射線是電磁波，宇宙中具有不同能量輻射線，以太陽光為例，依據能量由低到高依序可分為無線電波、微波、紅外線、可見光、紫外線、X射線和加馬射線等。X光、加馬射線的波長短，頻率高，所帶能量高於其他而更有穿透力和，能造成電子游離，稱為「游離輻射線」。

2. 辦理多元族群推廣活動

推廣活動對象包括臺東桃源國小(偏鄉/含原住民與新住民)、臺北市立大學(體育系/含原住民/師培生)、台灣科學節~國立台灣科學教育館(一般民眾)、新住民親子、岡山和平國小(一般民眾)、屏東田子國小與建興國小(偏鄉/含原住民與新住民)等，科學園遊會型態有三場，有數千人次參與；自辦 14 場(含師資培訓 1 場，有 7 位老師參與)等，說明如下。

(1) 師培

舉辦日期	舉辦地點	參與人數
110/10/17	臺北市立大學(博愛~線上)	7 人（男 2、女 5）



(2) 偏鄉/含原住民與新住民

舉辦日期	舉辦地點	參與人數
2021/04/24	臺東桃源國小/台東體育館	35 人（男 23、女 15）

110/11/14	臺北市立大學/新住民關懷協會、台電北區電力展示館等	28 人（男 12、女 16）

110/12/04	屏東田子國小/屏東千禧公園	34 人 (男 18、女 16)

110/12/11	屏東枋寮建興國小	852 人

111/01/09	新住民關懷協會、台電北區電力展示館等	34 人 (男 14、女 20)

111/03/30	碧湖國小新住民教育班	8 人 (男 0、女 8)

(3) 小學

舉辦日期	主/協辦單位	舉辦地點	參與人數
111/03/22	臺北市立大學	新北市立萬里國小	19 人 (男 9、女 10)

111/03/23	臺北市立大學	新北市立金美國小	10 人 (男 7、女 3)

111/03/24	新北市立金山國小	21 人 (男 11、女 10)

111/03/30	新北市立蘆洲國小課後班	15 人 (男 13、女 2)

111/03/31	新北市立信義國小課後班	8 人 (男 5、女 3)

(4) 中學

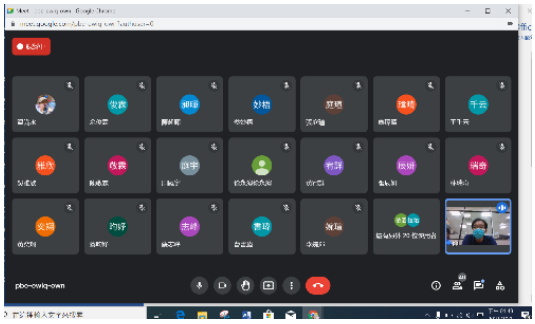
舉辦日期	舉辦地點	參與人數
111/03/17	基隆市建德國中	21 人 (男 11、女 10)

111/03/22	新北市立三重高中	20 人 (男 10、女 10)

111/03/23	新北市立萬里國中	16 人 (男 12、女 4)

111/03/24	新北市立金山高中	20 人 (男 13、女 7)

(5) 大學(含師培生/原住民)

舉辦日期	舉辦地點	參與人數
110/10/5	臺北市立大學(博愛~線上)	48 人（男 28、女 20）
		
110/10/6	臺北市立大學(博愛~線上)	51 人（男 22、女 29）
110/10/15	臺北市立大學(博愛~線上)	53 人（男 26、女 27）

111/02/25	華山藝文中心	36 人 (男 24、女 12)

(6) 一般民眾

舉辦日期	舉辦地點	參與人數
110/11/13-14	國立台灣科學教育館	台灣科學節一般民眾約 7800 人
110/11/28	岡山和平國小	第四屆平野季&北高雄科學日/約 1200 人

(7) 成人教育班

舉辦日期	舉辦地點	參與人數
111/03/29	碧湖國小成人教育班	8 人(男 1、女 8)

4. 探討多元族群推廣活動學習成效

本研究為學習成效，進行學習成效調查，將所蒐集的資料予以編碼及建檔，以 SPSS V20.0 中文版進行資料的統計及分析，進行描述性統計及成對樣本 t 檢定。

(1) 研究對象

某三學小學為對象，共計 48 人 (男 25、女 23)

(2) 信度

信度Cronbach's Alpha 值為.654，經分析信度較低原因來自於第6題與第7題關於「鄰避效應」概念，以及第12題與第14題關於除役與拆除，然本計畫希望學學習，為了解學生成效，而保留下來所造成。

(3) **描述性統計**

各題學習前後平均數與標準差見表1。

表1各題學習前後平均數與標準差

	前側		後側	
	平均數	標準差	平均數	標準差
1.( )行政院於2017年能源發展綱領提出能源轉型政策，於2025年之後下列哪一種發電量會減少？(A)太陽能發電(B)風力發電(C)燃煤發電(D)天然氣發電。	.63	.602	.86	.354
2.( ) 行政院於2017年能源發展綱領提出能源轉型政策，於2025年之後將終止下列哪一種發電方式？(A)水力發電(B)核能發電(C)火力發電(D)天然氣發電。	.47	.544	.78	.422
3.( ) 行政院於2017年能源發展綱領提出能源轉型政策，於2025年之後下列哪一種發電量佔比最高？(A)水力發電(B)核能發電(C)火力發電(D)天然氣發電。	.14	.354	.57	.500
4.( ) 行政院於2017年能源發展綱領提出能源轉型政策，其中再生能源發電量規劃預計達到多少百分比？(A)10%(B)20%(C)30%(D)40%。	.27	.446	.53	.504
5.( )目前世界各國正積極推動能源轉型，下列哪一種發電量會逐漸降低或終止？(A)核能發電(B)風力發電(C)生質能發電(D)水力發電。	.53	.616	.84	.373
6.( )什麼是「鄰避效應」概念？(A)不要有惡鄰居(B)不要有鄰居(C)避免鄰居生活影響到我家(D)設施不要建在我家後院。	.33	.474	.92	.277
7.( )下列何者屬於鄰避設施？(A) 鄰里辦公室(B)鞋店(C)核電廠(D)公園。	.67	.474	.88	.331
8.( )環境輻射監測項目包括下列哪一項？(A)氘-2(B)氧-18(C)碘-131(D)碳-14。	.24	.434	.04	.200
9.( )在正常沒意外事故情況下，下列哪一個地方偵測到的游離輻射劑量最高(A)海邊 (B) 核電廠 (C) 機場 (D)都差不多。	.10	.306	.61	.492
10.( )核廢料中，下列哪一種輻射放射性最高？(A)核電廠工作廢棄手套(B)廢棄X光機(C)用過核燃料棒(D)廢棄輻射加速器。	.39	.492	.86	.354
11.( )下列哪一種核廢料中輻射放射性最低？(A) 核電廠工作廢棄手(B)廢棄X光機(C)用過核燃料棒(D)廢棄輻射加速器。	.49	.505	.69	.466
12.( )目前臺灣運轉中核電廠有幾組已經除役？(A)一組(B)二組(C)三組(D)四組。	.24	.434	.06	.242
13.( )臺灣核電廠除役作業流程中，除役拆廠是第幾階段？(A)第一階段(B)第二階段(C)第三階段(D)最後階段。	.33	.474	.41	.497
14.( ) 臺灣已有的核電廠除役中，目前除役階段最快的電廠已經進行到哪一個階段？(A)準備工作(B)過渡階段(C)拆廠階段(D)復原階段。	.20	.407	.06	.242
15.( ) 臺灣核電廠除役作業若順利進行，大約需要多久時間？(A)20年(B)25年(C)30年(D)40年。	.37	.487	.61	.492

學生普遍對於除役與核廢料議題較為不熟，學習後仍需要再加強，才能記住。

(4) 成對樣本t檢定

學生學習前、後成對樣本t檢定見表2。

表2 各題學習前後平均數與標準差

		t	自由度	顯著性(雙尾)
成對1	前測總分 - 後測總分	-8.705	47	.000

結果顯示學生學習後有明顯進步。

(5) 性別對學習影響

表3 後測總分單因子變異數分析

	平方和	F	顯著性
組間	4.909	1.136	.292
組內	203.091		
總和	208.000		

研究發現，男女生在學習後成績並未達到顯著差異。

IV. 結論

(一) 結論

1. 教材：已完成國家能源轉型政策下核安資訊與國際能源知識的教材電子書三套：一套為教師增能用數位教材、一套為國中生以上程度之數位教材，一套為親子程度數位教材。數位教材設計動手體驗之輔助教具，包括認識能源轉型、高階與低階核廢料判斷、認識核電廠除役過程與認識生活中應用輻射之偵測器等。
2. 本計畫透過不同單位合作推廣多元族群認識能源轉型下原子議題，包括參考教育部臺灣科學節(國立台灣科學教育館)、臺東縣政府與屏東縣政府等科學園遊會，讓不同族群人士了解核電廠除役過程與能源轉型方向；另外，與不同單位或學校共同辦理推廣活動，包括新住民關懷協會、本校理學院體育系與不同縣市的學校，參與對象與族群多元豐富，參與人數超過數千人。
3. 對象多元，包括新住民親子、學校師生與大學生，其中大學生部分是與體育系教授合作，將運動傷害遇到的輻射醫療概念融入能源轉型下原子議題中，拉近民眾對輻射的距離。
4. 多元族群對能源轉型中原子議題教材可以透過科學園遊會、學校課後時間或研習進行教育推廣。受疫情影響，針對高中職與大學生嘗試進行線上課程教學，發現學生接受度很高，可以做為日後推廣參考。
5. 研究發現，男女生在學習後成績並未達到顯著差異。

(二)建議

1. 完成國家能源轉型政策下核安資訊與國際能源知識的教材包括教師增能用數位教材、國中生以上程度之數位教材與親子程度數位教材可以供有興趣的家長或老師們利用資訊設備，例如平板或電腦等數位工具參考或使用。
2. 可以透過科學園遊會、學校課後時間或研習對多元族群進行能源轉型中原子議題教材教育推廣。

參考文獻

[1] 行政院原子能委員會（2011）。闔家平安－核子事故緊急應變民眾防護手冊。

[2] 行政院原子能委員會(2014)。輻射－您有所不知。

北部核電廠周遭社區自主輻安防災治理之研究Ⅱ
Research on Community Self-reliance and Disaster Prevention of Nuclear Power Plants in Northern Taiwan Ⅱ

計畫編號：110-NU -E-006-002 –NU
計畫主持人：楊永年
e-mail：yungnane@ncku.edu.tw
計畫參與人員：林立琁
執行單位：國立成功大學政治學系

摘要

「核安守護」與「核廢處理」是跨世代的工程與責任，因此必須符合世代正義，進行管制核能電廠、除役作業及核廢料處理。其過程必須考量核電廠鄰近民眾的立場與接受性。能源政策目前仍有核能選項，但因 2011 年日本福島核電事故，導致民眾核安意識高漲，對核能安全重視度提高；核能安全自然受核能電廠周遭社區民眾關注。本研究採行的研究方法包括個案研究法、檔案分析法、田野調查法以及行動研究法。研究目的為提昇核能二廠周遭社區民眾的核能安全認知，透過社區發展特色連結，普及核安防護知識，以強化社區緊急應變能力。

本年度計畫執行以北部核電廠緊急應變範圍周遭社區為範圍，針對目前既有的核能安全緊急應變策略進行研究，透過與社區民眾互動交流，調整資訊公開方式，強調相關資訊與在地的連結性以及客製化特色，擴大民眾參與程度。北部核電廠鄰近社區，包括金山區永興里、五湖里以及萬里區萬里里三個里。透過社區參與的溝通模式瞭解民眾實際需求，並參考過去執行模式以及過去在核三廠周遭社區的操作經驗，普及北部核電廠周遭社區民眾對核子事故的防護知識。主要在提升核能電廠鄰近社區之核能安全知能，達成社區緊急應變能力之強化。

為達前述目的，本計畫以社區民眾參與與核能安全為操作面向，探討政府賦予民眾於政策執行時有參與與溝通的機制。讓民眾能在參與政府政策過程中，了解政策執行內涵，依此提升社區核安治理效能。透過與社區代表互動討論方式，完成核能安全防災地圖的製作；納入在地元素，包括地方信仰中心、特殊地景與農作物產等，以及核子事故緊急應變措施。並將相關資訊以毛巾、口罩收納夾以及看板等形式產出，讓核能知識的傳遞具易讀性外也融入日常生活，以漸進式的方式強化社區民眾對於核能災害緊急應變的效能。

關鍵詞：核能安全、民眾溝通、民眾參與、社區

Abstract

Nuclear safety policy has been the major concern of Taiwan government. In particular, the "nuclear safety protection" and "nuclear waste disposal" are cross-generation projects, which are needed to be taken seriously. It is also related to inter-generational justice since governments have to deal with nuclear power regulation, decommissioning and nuclear waste disposal. The extension of nuclear power plant is an important issue for Taiwan because the alternative energy could not satisfy the energy demand. If so, nuclear safety should be an essential topic if the nuclear power plants were counted as one option of energy policy. Rresearch methods include case studies, archival research, field research and action research. The purpose of this study is to improve nuclear safety knowledge of neighboring communities around nuclear power plants. Also, it is to provide community citizens with correct information of nuclear safety protection. It is to increase resiliency of community's emergency response capabilities.

This research is focused on the EPZ area communities includes the Yongxing Village and Wuhu Village in Jinshan District, and the Wanli Village in Wanli District. The maps for evacuation in the three communities will be completed at the end of 2021. It is to promote the knowledge of nuclear safety and civil protection actions for communities surrounding nuclear power plants in Northern Taiwan. The purpose is to construct platforms of nuclear safety communication for the communities. It is to improve the effectiveness of disaster management including self-reliance and mutual assistance. Research suggestions will be proposed based on the research findings.

In order to achieve the purpose, community citizens' participation of disaster prevention was arranged. It is to explore how community citizens could be encouraged to participate the nuclear safety communication. For the reason, community citizens are able to participate decision making of government policies. Effectiveness and/or satisfaction of nuclear safety policy might be achieved. Through interactive discussions with community citizens, nuclear energy safety and disaster prevention maps was prepared. The maps with local elements, including temples, special attractions and crops, and emergency measures for nuclear accidents are incorporated. Also, related information is displayed on towels, the mask wallet and boards of output. In this way, nuclear safety knowledge could be easily used and understood. And it could be integrated into community citizens' daily life. Effectiveness of community emergency response to nuclear energy disasters could be improved in a gradual manner.

Keywords: nuclear safety, public communication, public participation, community

I. 前言

依據經濟部能源統計月報 109 年 1 月至 2 月電力供

給統計，發電量為 41,015 百萬度，其中火力發電占 79.91％；核能占 13.45％；再生能源發電占 5.49％；抽蓄水力則是占 1.16％。核能發電占比雖已逐年降低，然由於過去在國際上發生過的重大核災事件，再加上空氣汙染以及用電量不足等相關議題再被提及，核電廠安全以及核能發電是社會大眾持續關注議題。目前國內位新北市萬里區的核二廠一號機業已停止運轉，而二號機預定停止運轉日期為 2023 年 3 月 14 日；位處核電廠周遭的社區在面臨目前的狀況時，是否對於核電廠或核輻射問題仍有誤解或因有疑慮而產生不安，是本研究計畫主要探討或解決的問題。核電事故發生時如何因應，政府單位已有許多宣導，但仍有社區民眾認為訊息不完整。而核能與核能安全政策，在日本福島核電事故發生後，產生變化。「核安守護」與「核廢處理」屬跨世代的工程與責任，不斷被提起與討論。政府因此盡可能在符合世代正義的前提下，進行核能電廠管制、除役作業及核廢料處理。並盡可能透過由下而上的民眾立場，共同處理相關問題及強化防禦機制。惟對位處核電廠周遭社區民眾，對核能安全的關注程度高，而且民眾參與公共事務的意願也益趨增加。在此情形下，如何強化核能安全的防護知識以及相關資訊等就很重要。

近年台灣防災工作已呈現多元化參與，不論是在社區防災或民間非政府組織的投入，依此也建立公私部門間的夥伴關係，在防災作業上政府與民間已逐步朝向分工的配合。而社區防救災是全球防救災的重要議題，例如，108 年 5 月與瑞士舉辦的「2019 聯合國減災署全球減災會議」（Global Platform for Disaster Risk Reduction）指出參與直接社區的重要，同時需將社區居民視為平等的夥伴，並確保規劃、實施和監測、復原和重建等策略可符合社區需求。雖要達成一定程度的社區參與需花費時間，但為使社區達到具備永續性的結果仍必須為之。而在減災會議的參與成員亦認為仍需加強社區能力，並在基層組織及地方與國家間建立一定的信任關係。在聯合國的減災會議主軸中具體指明各國於面對災害發生時的應變作為，需強化社區面對災害的應變能量以及防災教育的落實。以社區為主體考量民眾需求、落實減災教育、強化民眾防災知能等工作，列為國際減災策略的優先執行工作之一。從國內外曾發生的重大災害事件中可發現，社區雖然位於災害防救體系中的最底層或第一線重要性最高，但資源最為貧乏；而社區災害因應能力與社區災害韌性是降低災害衝擊與損失關鍵，也是目前防災社區在現今災害管理實務工作中不可或缺的一環。其亦促使相關單位更為重視災害防救體系最基層的社區防救災能量；而民眾防災教育的落實、防災資訊與知識的傳遞也是現階段重要的任務與待解決問題，其凸顯本計畫之重要性。

II. 主要內容

本年度計畫是以北部核電廠周遭社區為對象，包括金山區永興里、五湖里及萬里區萬里里為本年度執行範圍，依第一年度的執行成效，仍可預期透過小範圍的區域研究方式，對社區民眾是具有一定影響性；尤其在透過深入了解地方特色梳理其歷史脈絡所繪製而成的核能安全防災地圖，再轉化為民眾可日常生活使用的文宣品，以降低核電廠鄰近社區居民內心不安，或提高其對核能安全認知的滿意度有其效益。由於社會結構日趨複雜，政府人力與相關資源運用漸趨困難，但仍需回應民眾參與社區公共事務之需求。不同於過去以技術官僚參與的政策執行類型，不以說服民眾服從為目標，漸進式地納入利害關係人的意見，由公部門或研究者與社區民眾共同參與。研究過程調合核能安全政策，但強調公民參與以及自我治理的過程。透過核安資訊討論，擴大民眾參與，取得核安治理的合理性與必要性。本計畫採用核能安全防災地圖製作進行討論，以民眾居住地區為主體，連結在地特色包括地景、標的、文化及農特產等。藉由在地熟悉的公共溝通語言，提高社區居民與代表參與輻安公共事務，提升其參與與規劃的能力。讓長期生活在該區域的社區民眾可以依長期在地生活經驗累積提出相關議題，並針對執行政策提出具體作法，以達自我治理效益。公共事務的推動納入民眾參與方式，政策執行較能貼近民眾。有關北部核電廠周遭社區自主輻安防災治理之研究計畫，主要以資訊傳遞方式、公開透明管道以及民眾參與與溝通為理論架構思考，目的在提升社區居民核安知能。

本研究的目在提升北部核電廠周遭社區的自主輻安防災治理效能，建立民眾核能安全認知正確並普及核安防護知識。透過繪製出北部核電廠周遭社區金山區永興里與五湖里，以及萬里區萬里里等三里核能防災緊急應變地圖，並結合各里的歷史、文化、活動及農作特產等社區特色的防災地圖，藉以深化社區民眾的核能安全緊急應變知識。本研究採取與社區民眾代表溝通為操作方式，探討政府於核能安全面向上，賦予民眾於政策執行時參與及溝通的機制。讓民眾在參與過程了解核安政策依據與原則，以提升社區核安自主治理效能。透過與社區民眾代表討論，完成核能安全防災地圖製作。納入地區形成脈絡以及在地特色元素，並將相關資訊以毛巾、口罩收納夾以及看板等形式產出，使緊急應變資訊內容呈現更具在地性與友善性。文宣品也因貼近民眾需求，可深化社區民眾對於核能災害緊急應變的效能。

III. 結果與討論

本年度計畫主要以北部核能電廠周遭社區為範疇，透過工作坊辦理，讓政府核能安全政策符合社區需求，進而普及社區緊急應變知識教育。所產出的防災地圖文宣，包括毛巾以及口罩收納夾等，考量與民眾日常生活結合。因此文宣品設計，以友善性、可讀性、實用性為原則。使得專業資訊的傳達，具有明確性與可接受性。本研究辦理工作坊對象是以北部核電廠周遭社區的鄰里民眾（代表）為主，討論議題內容較為深入，因此以社區意見領袖人物（即里長）為諮詢對象。其中萬里里轄區的萬里國小的師長代表，亦同為工作坊成員。工作坊辦理過程發現，參與人員對於核子事故緊急應變均具備基本認知，但也體會到社區民眾對於應變資訊的認知可能不足。因此對研究團

隊將核能安全訊息融入地方歷史脈絡以及地區重要元素，將核安資訊演繹為民眾能快速理解的文宣品展示的作法，參與工作坊討論的人員均認同，因為能有更多元的管道傳遞緊急應變資訊。

本年度工作坊進行以核二廠周遭里別為對象，依核能安全緊急應變資訊與在地特色及地方脈絡等特性，繪製成核能安全地圖。文宣品透過不同型態或管道呈現重要資訊。產出包括結合地方特色的毛巾、口罩收納夾以及看板等文宣品，以有效地傳遞核安資訊。以下為各里透過工作坊討論繪製得出的防災地圖圖說以及圖面內容：

圖 1 五湖核安心--核子事故疏散避難路線圖圖說

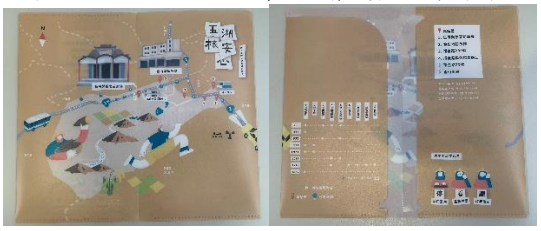


圖 2 五湖里核能安全防災地圖口罩收納夾正反面示意

圖 3 五湖里里長協助發送核能安全防災地圖口罩收納夾並協助解說相關應變資訊

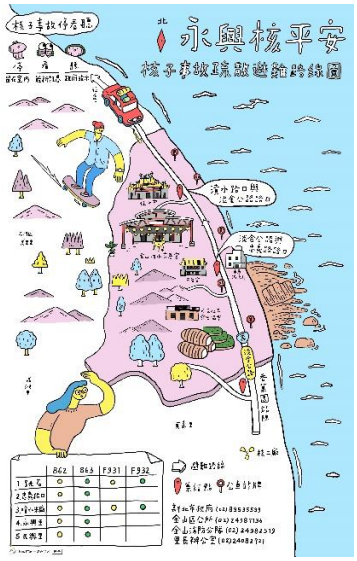


圖 4 永興核平安--核子事故疏散避難路線圖圖說

圖 5 永興里核能安全防災地圖口罩收納夾正反面示意

圖 6 永興里里長協助發送核能安全防災地圖口罩收納夾

圖 7 瑪錄核安--核子事故疏散避難路線圖圖說

圖 8 萬里國小校園防災疏散路線圖說

圖9 萬里國小師長協助解說看板與毛巾上的緊急應變資訊與內涵

圖10 防災地圖毛巾分送予萬里國小師生

IV. 結論

本計畫以核能二廠緊急應變計畫區範圍內的社區民眾為對象，透過工作坊的辦理，產出貼近民眾生活的宣導教育品，有助提升核能安全知識以及民眾防護行動等的理解程度。工作坊辦理模式具體化社區參與核能政策行動，透過溝通瞭解社區實際需求；同時表達中央政府（原子能委員會）對社區核能安全的關心。本計畫主要成果為產出五湖里、永興里及萬里里三里的核能安全緊急應變地圖及其文宣，執行過程中透過田野調查與地區歷史脈絡的爬梳，再配合研究方法的運用，完成社區核能安全地圖。透過毛巾、口罩收納夾與看板等文宣品的產出。透過該模式運作以及產出的成果，具體普及核子事故防護知識並強化社區民眾的緊急應變能力。

本年度計畫於執行前已對研究範圍進行爬梳，並有過去於核一、核二及核三廠周遭社區的執行經驗，以及產出的客製化防災地圖文宣品可供參酌，故本年度於計畫執行獲社區代表支持與肯定。惟計畫執行中期，巧遇新冠肺炎疫情惡化，影響原排定各里工作坊辦理期程。唯執行之初即超前進度，因此未耽誤後續工作事項進度。但里長也因應疫情發生，增加若干防疫措施需配合地方政府執行的工作，導致工作坊的辦理受到影響。這亦是本研究未曾遭遇的困境。又本研究團隊雖礙於人力與資源限制，造成執行困難；但成員仍盡力協力社區民眾核安資訊的傳遞與觀念養成，並扮演社區與各層級機關間的重要溝通橋樑。

主要產出成果為北部核電廠周遭各里的核能安全緊急應變防災地圖，透過毛巾、口罩收納夾及看板等文宣品的產出，呈現各里防災地圖資訊。藉由融入在地紋理，以及各地區形成的歷史脈絡所代表意象，更深化與地方的連結。依此調整資訊傳遞方式，使資訊能有效益地傳達予社區民眾，是本計畫執行時所衍生出的重要價值。又所產出的研究成果落實應用於民眾日常生活，因此製作者選用適當的內容與管道，將正確資訊傳遞給相關利害關係人。核能安全防災地圖的製作納入核二廠周遭社區參與，與民眾溝通瞭解其需求，除達成民眾核能安全知識提昇之成效外，亦具備教育宣導與社區永續意義，也係本年度計畫主要成效與貢獻。

本計畫工作項目的辦理可拓展社區參與，亦能在與民眾溝通過程，瞭解社區實際需求，以及核能安全緊急應變民眾知能的困境。本次研究納入北部核電廠周遭社區部分利害關係人的參與，達成民眾核能安全知識提昇之成效外。在兩年的操作期程已見成效，透過領袖人物的擴散，使得核安知識傳遞效能更佳。綜整兩年度的研究應用成果發現，透過與核電廠周遭社區民眾溝通討論，能使在地思維與特色融入核能安全地圖，使核能安全緊急應變資訊內容的呈現更具效益，特別亦獲社區肯定，建議相關模式能賡續辦理擴及至核電廠周遭社區。

參考文獻

[1] 吳明上(2013)，日本村山內閣在阪神大地震中的危機管理，人文與社會學報，第三卷，第二期，頁：23-39。

[2] 吳嘉苓(2015)，永久屋前搭涼棚：災後家屋重建的建築設計與社會改造，科技、醫療與社會，第 20 期，頁：09-74。

[3] 林宗弘(2012)，災後重建的政治：中國 512 地震與臺灣 921 地震的比較，臺灣社會學刊，第 50 期，頁：57-110。

[4] 張四明、戴世偉(2016)，新北市防災社區之建構與發展經驗，極端氣候下以灣災害治理，張四明主編，臺北：財團法人二十一世紀基金會，2016 年 1 月出版，頁：169-210。

[5] 陳敦源(2019)，民主治理：公共行政與民主政治的制度性調和，臺北：五南書局。

[6] 楊永年(2020)，救災體系，台北：五南出版社。

[7] 蕭嘉政(2009)，災害潛勢地區推動防災社區之調查研究：以彰化縣為例，彰化縣：國立彰化師範大學碩士論文。

[8] 蔡清田(2000)，教育行動研究，台北：五南出版社。

[9] Chen, L.C., Liu, Y.C., Chan, K.C.(2006). Integrated Community-Based Disaster Management Program in Taiwan: A Case Study of Shang-An Village. Natural Hazards. 37. 209 – 223.

[10] Federal Emergency Management Agency.(2011). A Whole Community Approach to Emergency Management: Principles, Themes, and Pathways for Action. FEMA: Washington, D.C.

[11] Jang, L.J, & Wang, J.J. (2009). Disaster Resilience in a Hakka Community in Taiwan. Journal of Pacific Rim Psychology. 3. 2. 55 – 65.

[12] Jha, A. K., Barenstein, J. D., Phelps, P. M., Pittet, D., Sena, S.(2010). Safer Homes, Stronger Communities: A Handbook for Reconstruction after Natural Disasters. D.C.: World Bank.

[13] McIntyre, A.(2008). Participatory Action Research. CA: SAGE.

[14] O'Leary, M. Ed. (2004). The First 72 Hours: A Community Approach to Disaster Preparedness. New York: iUniverse.

[15] Tanigawa, K. (2012). 'Lessons learned from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident:

evacuation, screening and emergency care for the injured following the Fukushima incident'. Paper presented at the Disaster Medical Assistance Team (DMAT) International Conference, 15 September, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan.
[16] Yang, Yung-Nane(2016). The nuclear disaster management system in Taiwan: a case study of the third (Maanshan) nuclear power plant. Disasters. Volume 40, Issue 3, July 2016, Pages 534 – 553.

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

Empowering people to have the proper attitude towards the decommission of nuclear power plants: An integrated plan of construction and deconstruction of the media communication strategy

計畫編號：MOST 110-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、沙宛萱、楊麒凌
執行單位：世新大學廣播電視電影學系(所)

摘要

運轉 40 年由我國台電經營的第一核能發電廠於 2018 年使用年限到期，成為臺灣第一座進入除役程序的核能設施。檢視核電廠除役二大工作流程，原能會在核電廠除役工作主司「安全管制」主軸的實際任務與形象究竟是如何被社群媒體再現，尤其在新媒體上再現的具體內容為何確實有全面性深入討論的必要；尤其核電廠在 25 年的除役工作期間，新媒體的溝通策略絕不可忽略，更應作為未來政策溝通的重點。本計畫基於提升臺灣民眾正確理解與參與核電廠除役的公共議題，必須先培力民眾充分掌握台電與原能會對於除役工作的職責，方能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中，以最有效的文本產製、針對不同新媒體受眾為原能會擘劃核電廠除役的新媒體溝通策略具體內容。本計畫以社群口碑分析平台資料庫（OpView）為社群資料統整核心，整理出最貼近核電廠除役的真實民眾意見，試圖為原能會建構適用於新媒體的核電廠除役安全管制訊息文本，以促進原能會與不同新媒體分眾的正確建構核電廠除役訊息，進而修正原能會作為「核能安全與原子能民生應用永續發展」為主體的正確形象定位。本年度研究結果顯示，針對五大社群體（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」議題的討論數、聲量、與正負情緒比例的統計後發現，社群媒體對於核電廠除役的議題，負面情緒的比例比正面情緒比例高（6.96% vs.33.16%；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；主要的正面聲量以活動公關稿為主；中立的聲量主要環繞國內事實與國際核電廠除役狀況的事實討論。本研究透過大數據文字雲的模式處理亦與上述發現吻合。本研究極力建議應將核電廠除役議題的新媒體／社群媒體解構後之整理與發現，延續為原能會建構新媒體／社群媒體聲量、正確核電廠除役素養觀的不同面向訊息，以促進原能會正確形象的新媒體再現。

關鍵詞：健康識能、素養導向、核電廠除役、社群媒體、政策溝通。

Abstract

The first nuclear power plant operated by Taiwan Power Company for 40 years was decommissioned in 2018 and was the first nuclear energy facility in Taiwan to enter the decommission procedure. By reviewing the two workflows of the decommission of nuclear power plant, how exactly actual task, safety control the main axis of the decommission of nuclear power plant of Atomic Energy Council (AEC), and image produced by the media representation, especially the specific content on the new media and why there is the necessity to have an overall and deep discussion. The communication strategy of new media is required and should be the focus of future policy communication during the period of decommission of nuclear power plant for 25 years. This study is to focus on improving the correct understanding and participation in the public issue of the decommission of nuclear power plant. It is necessary to empower the public to fully understand the responsibilities of Taiwan Power Company and AEC, so that we can use the communication model of competency-based literacy to construct the safety control message delivery by the AEC, and use the most efficient producing new media content to reach the audience of different new media to plan a specific content of new media communication strategy of the decommission of nuclear power plant for AEC. Forward looking, AEC can progress to the correct image positioning which is to protect the public health and safety from nuclear materials and facilities as well as sustainability development of nuclear technology in people. The result of this first year research shows that five social media so-called PTT, Dcard, Facebook, Instagram, and YouTube (including their post & reply contents, other social networking sites, Q&A sites, blog, news and news reply content) on the decommission of nuclear power plants issue is negative voices is higher than the positive voices (6.96%vs.33.16%; neutral sentiment: 59.88%). The main negative voices are mainly “accusations” of clear pro-nuclear and anti-nuclear positions; the main positive

voices are mainly public relations drafts; the neutral voices mainly focus on domestic facts and factual discussions on the decommissioning status of international the decommission of nuclear power plants issue. The pattern processing of big data word clouds in this study is also consistent with the above findings. This study strongly suggests that the deconstruction of new media/social media on the decommission of nuclear power plants issue should be sorted out and discovered, and continued to be the different aspects of the original energy society to build new media/social media voices, and to correct the concept of the decommission of nuclear power plants issue literacy to promote AEC new media representations that would have been the correct image.

Keywords: health literacy, competency-based literacy, decommissioning nuclear power plants, social media, political communications.

I. 前言

由臺灣電力公司（以下簡稱台電）經營的第一核能發電廠（以下簡稱核一廠）是一座位於新北市金山區附近的核能發電廠，也是臺灣第一座核電廠；其係源自1970 年代我國推動十大建設之一的能源重大建設。核一廠在 1978 年開始運轉，40 年後於 2108 年使用的年限到期，成為我國第一座進入除役程序的核能設施。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 年係由經營的公司臺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子能委員會（以下簡稱原能會）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，以確保除役工作之安全為要務。

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」建構得很正確，反而在許多核廢料汙染議題上糾纏不清，此即造成原能會並沒有回歸「安全把關」的政府組織本質上。尤其未來在 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，如何透過新媒體溝通的新命題都是有必要且迫切地深入探究的政策溝通。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。

本研究基於上述脈絡，從提升臺灣民眾正確理解與參與核電廠除役的公共議題著手，以培力民眾充分掌握臺電與原能會對於除役工作的職責不同外，更希望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中，以最有效、最正確的文本產製，針對不同新媒體（社群媒體）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。本計畫預計透過二年的整合型計畫的研究期程，試圖為原能會建構適用於新媒體的核電廠除役安全管制訊息，促進原能會與不同新媒體分眾的正確建構與解構核電廠除役訊息，以開創原子能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訊息。本年度研究範圍主要係著力於新媒體訊息的解構上，依循前述問題脈絡，本研究認為要與時俱進地處理上述命題，至少必須涵蓋不同層面的探索：第一層面，必須全面盤點過去原能會在新媒體，尤其是社群媒體中，所負責的核電廠除役安全把關議題上如何被討論？原能會是否有意識到社群媒體討論什麼？社群媒體的討論是否悖離原能會的職責？原能會如何回應？這些社群媒體討論內如的意義何在？影響了什麼？這些訊息又如何被轉載，與傳統媒體又是如何競合？這些在新媒體文本再現面向的不同問題，有待深入且精確地整理與分析，因此透過社群口碑分析平台的理論與實作方式為之有其必要。本計畫將透過與既有社群口碑分析平台的合作（OpView 最新 3 年內有關不同分眾在不同社群媒體上的數位足跡（以 PTT、Dcard、FB、IG、YouTube 五大社群媒體為主）進行核電廠除役的文本分析。透過對過去社群媒體所討論與再現的核電廠除役，如何與原能會對接？對原能會的影響又是如何？進而，以原能會對於現有的社群媒體內容所表現的反應（可能毫無反應），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之 SWOT 實況，作為未來擬定正確產製核電廠除役政策溝通宣傳內容的依據。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」核能除役知識權威性的可能性。此媒體策略之作為係促使原能會應回歸科學中立、核能安全把關、依法行政的政府單位，而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。政府單位既繼受於全民，以原能會遮樣專業單位成立目的來說，其所涉之主管議題本該回歸專業服務，作為增進全民福祉、核能安全的社會角色，而不該陷入其他任何不必要的紛擾之中。故第一年研究回歸解構原能會是如何被社群媒體建構的所有文內容分析確有其必要。

而研究的第二層面即在於民眾在新媒體中對於核電廠除役的看法，與民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。此係民眾對於新媒

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，2011 & 2014）；易言之，政府單位如原能會若能從新媒體敘事的架構下，作為倡導民眾正確獲取核電廠除役的訊息，同時以培力民眾對核電廠除役相關的健康識能養成，促使民眾不再對核電廠除役有任何健康疑慮，則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，否則長久以來原能會的專業形象將難以形塑與建構，會不斷複製於民眾既有的窠臼印象中。

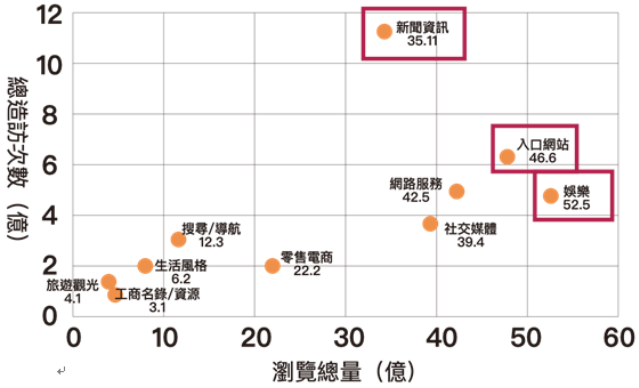
因此，藉由透過社群口碑分析 OpView 平台的資料庫完整蒐集，擷取近 3 年原能會在新媒體／社群媒體上的再現與被討論的實情整理，精準掌握與分析原能會在新媒體上的形象是否與設立目的吻合（第一年）；以上述為基礎，透過調查與分析新媒體分眾對於核電廠除役的核電廠除役素養觀現實，作為設計與建構符合原能會的形象設定與新媒體政策溝通的傳播策略（第二年）。

II. 主要內容

根據 TWNIC 財團法人台灣網路資訊中心「2020 台灣網路報告」結果顯示，臺灣上網率 2020 年 12 歲以上曾經上網民眾約有 1,778 萬人，上網率達 83.8%，而全國上網人數經推估已達 1,884 萬；家戶上網部分，全國家戶上網比例達 82.8%，家中主要上網方式為手機行動上網，比例高達 91.3%。以網路資訊服務類型加以分析以可發現，臺灣單月平均不重複人數最多的網站類型為「新聞資訊」，到達率高達 96%，總造訪次數也是最高；其次為「入口網站」及「娛樂」類別，到達率也有 9 成以上；「娛樂類」網站是總瀏覽量最高的網站類別，其次為「入口網站」（如下圖一、圖二所整理）。

Top 10 網站類別	不重複造訪人數	到達率
新聞資訊	1,595 萬人	96.0%
入口網站	1,524 萬人	91.7%
娛樂	1,499 萬人	90.2%
生活風格	1,448 萬人	87.2%
社交媒體	1,446 萬人	87.0%
搜尋/導航	1,384 萬人	83.3%
零售店商	1,344 萬人	80.9%
工商名錄/線上資源	1,270 萬人	76.4%
網路服務	1,244 萬人	74.9%
旅遊觀光	1,143 萬人	68.8%

圖一：臺灣網路媒體使用分析（作者綜合二級資料整理）



圖二：臺灣 2021 年網路媒體市場分布整理（資料來源：創市際市場研究）

而新媒體（如入口網站）可觸及一般大眾，知名度高、資料流量大、可利用使用者的資料分析，精準瞭解社群媒體上的議題聲量、正負情緒等實況；也可針對新聞網站，鎖定社經地位高的意見領袖進行議題宣導、或運用社群網站，掌握一般名眾及學生族群等。透過新媒體的整理與分析，本研究選擇能涵蓋最多閱聽群族的五大社群媒體 PTT、Dcard、FB、IG、YouTube，具體研究設計與運作說明如下。

PTT：是一種臺灣電子佈告欄（BBS），採用 Telnet BBS 技術運作，建立在臺灣學術網路的資源之上，原以學術性質為目的提供線上言論空間；目前由國立臺灣大學電子佈告欄系統研究社管理，大部份的系統原始碼由國立臺灣大學資訊工程學系的在校及畢業學生進行維護，並且邀請法律專業人士擔任法律顧問。它有兩個分站，分別為批踢踢兔與批踢踢參。目前在批踢踢實業坊與批踢踢兔註冊總人數約 150 萬人，尖峰時段兩站超過 15 萬名使用者同時上線，擁有超過 2 萬個不同主題的看板，每日超過 2 萬篇新文章及 50 萬則推文被發表，是使用人次最多的華語網路服務之一，亦為網路言論自由文化的孕育地之一。由於主流媒體的重視，此平台時常成為資訊戰的媒介並常引起國際媒體關注，針對本研究議題的社群媒體討論，自然必須將此重要社群平台的討論容納入分析內容。

Dcard：是臺灣的社群網路服務網站，開放給臺灣與國外部分大學學生註冊。2021 年起，開放非大學生一般民眾憑證件、透過手機註冊。2011 年 Dcard 於網路推出服務時，只開放臺大、政大學生註冊，後來陸續開放其他大學註冊，現在是超過百萬會員的大型論壇，也是資本額高達四千萬並拿到上億融資的公司。其平台上的討論亦能反映出本研究所設定的議題聲量。

Facebook：在臺灣的網路使用者，高達 94.2%會使用 facbook，更有 72%的 facebook 用戶每天使用。因此透過對議題反應的研究設定精準度高達 91%，能直接、快速的針對研究議題掌握社群媒體的意見實況，同時透過 OpView 的資料庫擷取，可依照地點、年齡、性別、興趣、人際關係鏈，甚至自訂會員名單與曾經造訪過網站的用戶，來做受眾設定。因此 FB 為本研究選定社群媒體資料之一。

Instagram：全球用戶已超過 10 億人口，在臺灣的網路使用者超過 39.2%會使用 Instagram，而主要用戶為

年輕族群，以 18~34 歲的女性年輕世代為主，且 12~14 歲用戶使用率高達 65.2%。針對核電廠除役議題的年輕族群溝通甚為吻合。

YouTube：選擇此社群媒體主要係其為影音網站的翹楚，在臺灣主要使用者年齡為 18-44 歲，每週平均觀看 YouTube 16.4 小時，臺灣百萬訂閱的創作者讀破 65 位，而 10 萬訂閱的頻道更多達 1,250 個，多元豐富的頻道內容能透過平台上的討論狀況掌握分眾溝通實情，網路使用者對影音平台的黏著度也甚高。

總此，本研究針對五大社群媒體平台所進行核電廠除役的社群媒體聲量分析，應能反映本研究議題的實況梗概，亦能反映出臺灣當前社群媒體討論核電廠除役議題的實情。

III. 結果與討論

從本研究計畫第一年的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，採取「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、探索與檢視三種類型，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。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及理論飽和。因此，本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 3 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。更細緻地論述具體研究方法的操作，本計畫將藉由「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。更細緻地討論本研究具體研究方法的操作，第一年的「文件分析法」作為主要的研究方法基礎，主要係以 OpView 所完整取得的近 3 年關於核電廠除役在新媒體上的文件方式，進行具邏輯性且有意義的編號，並完成文件的樹狀關係圖，以達到 Wolcott 所謂詮體再現的厚實描述；文件編號目的係為方便研究者進行後續資料處理與分析，所有文件的編號邏輯係以英文代號加上日期作為編號模式。例如，每一個社群媒體的開頭字母做為所蒐集到文件的代號，即 PTT 以 P20210101、P20210102 等依序編列；Dcard 則為 D20210101、D20210102 等依序編列；Facebook 即是 F20210101、F20210102 等依序編列；IG 則是以 I20210101、I20210102 等依序編列；最後的 YouTube 則為 Y20210101、Y20210102 等依序編列）。研究者則將不同群的樹狀圖的資料整理作為解構本計畫命題核心。

整體而言，本年度具體操作方式為：1.蒐集 OpView 資料庫的關鍵字決策；2.對於上述的資料進行分析：將本議題相關的研究文獻、OpView 撈取資料，整理與分析原能會在臺灣社群媒體中關於核電廠除役議題的具體新媒體再現情狀；3.進行系統性文件脈絡分析；4.進行新媒體／社群媒體再現訊息的整體分析；5.再次進行既有文件交叉分析：將已完成之系統文件資料進行比對與效果鑑定；6.研究資料整理與分析：依據資料進行分析和整理，如有不清楚或疑惑之處，再尋求最後確認；7.依研究成果撰寫成果報告：依據上開研究成果及資料，撰寫研究成果報告，並依限繳交，完成研究目的。

（一）研究結果：有關資料分析與研究信實度檢視

針對五大社群體之 OpView 詳細的資料蒐集，包括 PTT、Dcard、FB、IG、YouTube 之 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、新聞回文等內容，以「核電廠除役」議題蒐集並整理 2019 年～2021 年共三年的討論數與聲量，總計：46849 筆資料，其中 2019 年共有 11264 筆資料；2020 年則有 4450 筆資料符合本研究議題；2021 年共有 31135 筆資料符合。綜觀該三年資料，2020 年在整體社群媒體資料中，以 COVID-19 議題佔據最多版面，可能受到這樣的影響，核電廠除役議題在 2020 年比數大幅降低；而 2021 年受到核四公投影響，社群媒體的討論筆數又再度攀升。因此，以最近三年的社群媒體資料為分析內容，應屬合適。

而本研究有關社群媒體的資料分析，涉及有關正、負、中立情緒呈現，系有助於對社群媒體訊息的精準判讀，亦能有效反映社群媒體的真實亦見情狀。OpView 資料庫中對於此正、負、中立的「情緒模組中」功能主要透過一組標準一致的情緒模型，經由資料前處理自動將帶有重要情緒的資訊彙整提供，縮減使用者須大量閱讀觀測主題完整。資訊時間為處理單位針對每篇單一文章（主文、回文獨自運算），進行文字內容的情緒辨識，以「語意學習」的預測模型預測各篇口碑資料之正面、負面、中立三種情緒的分數，並以最高之分數作為該則口碑資料的情緒標籤結果呈現。此情緒表徵於 2013 年 7 月後之情緒資料較完整，本研究係以 2019-2021 三年資料為主，所得到資料應屬完整。本研究所分析之資料，每一篇文章（貼文）皆會標上情緒類別（正面、負面、中立)，藉此情緒標籤進行結果呈現，區分為情緒線圖、正負情緒比、討論串情緒彙總排名之情緒排行三項功能，大致如下圖示。

宜說明者在於，正負情緒比係以查詢區間內正、負評情緒聲量，進行特定主題的聲量情緒評比，特別以 P/N 比代表觀測品牌之情緒好感度，透過觀測多重主題可進行好感度比較，完整表格資訊為：A.總聲量、B.正評聲量與佔比、C.負評聲量與佔比、D.中立情緒聲量數、E.顯著情緒比例、F. P/N 比：正評聲量÷負評聲量；一則負評相對有幾則正評。而情緒線圖功能係以繪製查詢區間內每日的聲量總則數、正面則數與負面則數、正負情緒比，藉此了解觀測議題之情緒走勢，結合點擊情緒高峰聲量可透過文章列表解讀具顯著情緒之質化內容。除了透過趨勢線圖可看出其正負中立的情緒表現外，亦以直方圖結果呈現。此外，本研究仍採用「情緒排行功能」，針對所選擇的時間區間與觀測主題，顯示按照討論串合併統計之 TOP 20 最多正評/負評回應討論串，提供來源、標題原始連結，以及整體回文之正評、負評累積數量。

（二）有關資料分析之文字雲整理分析之運用

透過關鍵詞的視覺化描述，讓本研究所聚焦之核電廠除役議題在社群媒體再現狀況用於匯總生成標籤或一種整體概念的文字內容，本研究將此一標籤以獨立詞彙標籤雲可以靈活地依照字序或熱門程度來檢索一個標籤，根據近三年每一年之分布狀況，整理如下圖五、六、七。從其趨勢可看出，核電廠除役議題在社群媒體上的再現，大致圍繞幾個主軸（如圖所示），本研究對此整體分析如下段論述所示。

2019 年核電廠除役議題在五大社群媒體的聲量分布

2020 年核電廠除役議題在五大社群媒體的聲量分布

2021 年核電廠除役議題在五大社群媒體的聲量分布

IV. 結論

針對 2019 年的 11264 筆資料分析後發現，正評共有 994 筆、負評則為 3429 筆、中立則為 6841 筆；2020 年的 4450 筆資料中，正評共有 514 筆、負評則有 1368 筆、中立則有 2568 筆；2021 年的 31135 筆的資料中，正評共有 1755 筆、負評則為 10740 筆、中立則為 18640 筆。綜合統整其三年資料並交叉比對後發現，有關負面評論內容的模式（pattern）整理，通常是有清楚的立場（擁核 vs.反核），大致是：1.反核立場對於核電廠安全疑慮（如斷層、反應爐）；2.反核麗立場之公民團體（綠色公民行動聯盟、地球公民基金、再生能源推動聯盟）意見表述；3.反核立場之批判，如用謊言與恐嚇廢核、用愛發電不可行、用命發電的爭議等；4.反核立場對於缺電的人為疏失，多屬抱怨；5.反核立場的環保問題（如離岸封店的漁民抗爭）；6.擁核立場的質疑供電不穩的疑慮（如 2022 年會更明顯的質疑）；7.擁核立場與中立立場質疑執政黨能源政策的問題（尤其在經濟層面）；8.擁核立場之核能或其他能源的真相與謊言（如電費飆漲）；9.擁核立場之企業觀點責備反核（如零排放就要核電）；10.不同立場的批評敵對陣營主張；以及 11.不同立場的批評核四電廠全民買單等內容。

有關正面評論的內容較少，其內容的模式（pattern）整理大致為：1.支持某政治人物（如侯友宜）之言論；2.多為公關稿（如全科會訊息、相關單位的說明如臺電、活動訊息如臺電與政大等活動訊息）；3.公共議題的公共討論（如議會質詢問題）；以及 4.與能源有關之投資理財訊息等。

而最多的中立評論，其內容的模式（pattern）通常有比較多國外的訊息，大致有：1.事實陳述（如核廢料處理）；2.能源轉型問題（能源到底夠不夠）；3.使用核能減少 CO2；4.澄清歐盟將何能納入綠色轉型；5.因核電廠除役對政治人物主張的質疑（如中火問題）；6.核電付出的土地成本；7.日本福島的廢爐記事；8.德國訊息廢核是正確的決定；9.臺電訊息，確保核電廠安全運轉、務實面對核廢料問題；10.不缺電、不漲價、不要核根本不可能；11.瑞士關閉核電廠；12.以核養綠 vs.非核家園贊成哪一邊；13.若出現核災將無法估算成本等。

又根據正負情緒比例的統計後發現，社群媒體對於核電廠除役的議題，負面情緒的比例比正面情緒比例高（6.96% vs.33.16%；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；主要的正面聲量以活動公關稿為主；中立的聲量主要環繞國內事實與國際核電廠除役狀況的事實討論。本研究

透過大數據文字雲的模式處理亦與上述發現吻合。本研究極力建議應將核電廠除役議題的新媒體／社群媒體解構後之整理與發現，延續為原能會建構新媒體／社群媒體聲量、正確核電廠除役素養觀的不同面向訊息，以促進原能會正確形象的新媒體再現。

參考文獻

[1] AHRQ (2015). *AHRQ Health literacy universal precautions toolkit* (2nd ed.). Rockville, MD: U.S. Department of Health & Human Services.

[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] Buckingham, D. (2003). *Media education: Literacy, learning and contemporary*. Cambridge, UK: Polity Press.

[9] Dance, F. (1967). Speech Communication Theory and Pavlov'S Second Signal System. *Journal of communication, 17(1)*, 13-24.

[10] Freire, P. (1972). *Pedagogy of the oppressed*. (Ramos, M. B., Trans.). Harmondsworth, UK: Penguin.

[11] 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.

[12] Green, J., & Britten, N. (1998). Qualitative research and evidence based medicine. *British Medical Journal*, *316*, 1230-1232.

[13] Hofrichter, R. (Ed.). (2003). *Health and social justice: Polities, ideology, and inequity in the distribution of disease*. San Francisco, CA: Jossey-Bass.

[14] Kress, G. R. (2003). *Literacy in the new media age*. London: Routledge.

[15] Leary, V. A. (1994). The right to health in international human rights law. *Health and Human Rights: An International Quarterly Journal*, *1*, 24-56.

[16] Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Newbury Park, CA: Sage.

[17] Lichtman, M. (2006). *Qualitative research in education: A user's guide.* London, England: Sage.

[18] Livingstone, S. (2002). *Young people and new media*. London: Sage.

[19] 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.

[20] Marx, K. (1976). *Capital: a critique of political economy*. (B. Fowkes, Trans.) London, UK: Penguin. (Original work published 1867)

[21] Masterman, L. (1985). *Teaching the media*. London, UK: Routledge.

[22] Mcquail, D. (2010). *Mcquail's mass communication theory* (6th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] Miller, K. E., & Waller, D. S. (2004). Attitudes towards DTC advertising in Australia: an exploratory study. *International Journal of Advertising*, *23*(3), 389-404.

[28] Moriarty, S., Mitchell, N., & Wells, W. D. (2012). *Advertising & IMC principles and practices* (9th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

[29] Nielsen-Bohlman, L., Panzer, A. M., & Kindig, D. A. (2004). *Health literacy: A prescription to end confusion*. Washington, DC: The National Academies Press.

[30] Patton, M. (2002). *Qualitative research & evaluation methods* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

[31] 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.

[32] Postman, N. (1992). *Technopoly: The surrender of culture to technology*. New York, NY: Knopf.

[33] Ritchie, J., & Lewis, J. (2003). *Qualitative research practice a guide for social science students and researchers*. London, UK: Sage.

[34] Roth, M. (2003). Media and message effects on DTC prescription drug print advertising awareness. *Journal of Advertising Research*, *43*(2), 180-192.

[35] Sanghi, S. (2007). *The handbook of competency mapping: Understanding, designing and implementing competency models in organizations* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.

[36] Semali, L., &. Pailliotet, A. (Eds.). (1999).

Intermediality: The teachers' handbook of critical media literacy. Boulder, CO: Westview/Harper Collins.
[37] 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.
[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] 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.
[43] Wolcott, H. F. (2001). *Writing up Qualitative Research*. Newbury Park, CA: Sage.
[44] 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. ）。
[45] 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。
[46] 高淑清（2008），《質性研究的 18 堂課：首航初探之旅》。高雄：麗文文化。
[47] 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。
[48] 教育部（2002），《媒體素養教育政策白皮書》。臺北：教育部。
[49] 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。
[50] 梁世武（2018），《核電廠除役各階段公民參與模式及民意溝通之研究》，科技部專題研究：107-NU-E-128-001-NU。
[51] 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。
[52] 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。
[53] 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。
[54] 風傳媒（2019），〈政府不告訴你的核廢處理〉。參考網站：https://www.storm.mg/article/2042430（上網日期：20210531）。
[55] 橘報（2019），〈根本沒有國家有技術處理核廢料！連歐美都對「永久貯存場」難產，台灣憑什麼說辦得到？〉。參考網站：https://buzzorange.com/2019/11/15/problem-of-nuclear-waste/（上網日期：20210531）。
[56] 關鍵評論（2018），〈核能發電民調〉。參考網站：https://www.thenewslens.com/article/109367（上網日期：20210531）。

原子能民生應用科普內容製作與網路推播之研究
The Research of Popular Science Content Production and Internet Communication of Atomic Energy Commission

計畫編號：110-NU -E-144-001 -NU
計畫主持人：單文婷
e-mail：wenting@ntua.edu.tw
執行單位：國立臺灣藝術大學廣播電視學系

摘要

科學傳播是一個不斷變化發展的研究領域，過去 20 年，學術統計發現，科學傳播的實踐場域從學校課程到科普各類活動、線上或實體的科學展覽等，越來越多元的項目讓公民有機會親近科學研究，成就公眾參與科學（PES）。社群媒體普及發展後，讓科學家、研究機構、政府、公民有機會群聚在同一空間參與科學討論，許多跨域者的加入讓科學傳播更顯活力。本研究即是在上述脈絡中展開研究，嘗試協助原子能委員會將民生應用的科普知識、科普展覽等製作成各類短影音，並協助挑選重點原子能科普內容，改編成國、中小線上課程以及製作電子書籍，讓原子能科普在疫情期間也能持續傳播，並且藉由社群媒體，讓原子能科普知識不分年齡向大眾流動，研究目的一方面讓民眾理解原子能科普與民眾日常息息相關，並且藉由網路短影音提高民眾對原子能科普認識、理解並進一步參與討論的意願。

關鍵字：科學傳播、原子能民生應用、社群媒體、政策行銷。

Abstract

Science communication is a constantly changing field of research. In the past 20 years, academia statistics have found that the practice fields of science communication range from school courses to various popular science activities, online or physical science exhibitions, etc. Citizens have the opportunity to get close to scientific research and achieve Public Participation in Science (PES). After the popularization and development of social media, scientists, research institutions, governments, and citizens have the opportunity to gather in the same space to participate in scientific discussions. The participation of many cross-domain people makes science communication more dynamic. This research is carried out in the above context, and the popular science knowledge of the application of atomic energy to people's livelihood is made into short videos, and do select appropriate atomic energy science content, and adapts it into an online course for primary and secondary schools, which can continue to spread during the epidemic. Through social media, the knowledge of atomic energy science can be disseminated regardless of age. On the one hand, the purpose of the research is to let the public understand that atomic energy science is closely related to people's daily life. On the other hand, through the dissemination of short videos, it can improve the public's knowledge and understanding of atomic energy science. interest.

Keywords: Science communication, atomic radiation protection, social media, internet marketing.

I. 前言

社群媒體的出現，讓科學家與民眾有直接交流的機會，低進入成本和容易學習的使用方式讓沒有科學背景的民眾也可以成為科學影片的製作者，並且以自身的觀點將科學觀念或訊息置入影片。學者發現民眾製作的科學影片可能比科學專家製作的更為吸引人，原因在於民眾拍攝的科學影片的敘事方式更貼近大眾，也較能產生共鳴，而專家製作的影片風格多專注在科學內容，也常使用艱澀的文字描述，過度專業通常難得到觀眾青睞【1】。McClain（2017）研究指出，網路上越來越多非科學家的自製影片，可能造成科學威權的移轉，也因此提醒科學家必須意識到科學影片該如何呈現，顧及傳播效果，也提醒科學家需要學習如何設計影片內容，才能使社群媒體成為科學傳播的有效工具【2】。

2018年Cisco公司就調查發現，社群媒體影片佔全球網路流量75%以上，製作、上傳、觀看網路影片已成為全球民眾的日常習慣，便利的移動式載具加速社群媒體影片的生產、消費和支付方式，一般來說，短影音帶給觀眾娛樂與資訊，而科學短影音還多了與科學交流的目的，若內容再經過設計，應該可以更有效提高公眾看影片、參與科學討論的興趣【3】。

製作科學影片的目地除了上述所言，有助於科學家與民眾交流，幫助實踐公眾參與科學外，學者認為科學影片也有助於降低民眾心中對科學發展風險的疑慮。尤其近10年來，科學研究風險事件頻傳，引起公民對科學發展的懷疑與不確定，學者也提出警訊「當科學權威受到威脅，社會發展也將面臨危機」。而此種情況該如何解決？科學專家們嘗試提出解決方法，比如增加科學家與公眾互動需求（increased need for scientists to engage with public audiences），建立以信任為前提、更穩固的公民溝通模式等，而社群媒體上的科學短影音則被認為是最快速有效的、又可以廣泛接觸到最多受眾的媒介內容，尤其在疫情期間更得到應證。

因此，歐美科學傳播學界，在鼓勵科學家走入人群時，便提出鼓勵科學家使用社群媒體、製作短影音進行傳播，藉此增加與公眾互動。同時，學界也認為政府、科學研究機構也應該主動產製更多完整、正確的科學影音內容，讓公眾理解與親近科學。更有甚者，若公民可

以得到足夠的資訊，便可以一同參與政府科學政策的討論，實踐公民科學。

在社群媒體的推波助瀾下，科學傳播走向嶄新發展，科學家又是如何看待這樣的轉變？兩位資深的科學傳播研究者 Dudo & Besley 調查發現，科學家並不排斥使用社群媒體自我傳播，討論其原因，其一是他們非常在意媒體上對科學的錯誤報導，如果可能的話，科學家們會希望透過各種媒體管道糾正媒體上的錯誤資訊。兩位學者還歸納出五個科學家願意使用社群媒體自我傳播的目的，包括有一、以教育為目的，向其他人傳達科學知識；二、激起其他人關心科學知識；三、確保民眾將科學家視為值得信賴的人；四、構思科學訊息，讓民眾對科學觀點產生共鳴；五、防止錯誤的科學資訊傳播或糾正錯誤訊息【4】。

這十年來，因日本福島核電廠事件引起全球對核電安全的重視，核能安全、輻射防護也成為國人關心的議題。隨著政府確立非核家園政策，以及核一廠正式進入除役期，未來如何確保核電安全和能源政策等，成為政府政策宣導的重要課題，也是原子能委員會的施政重要項目。本計畫在上述背景脈絡中規劃執行，因應科學傳播新興的研究方向，鼓勵與協助原能會內的科學家自製有趣活潑的傳播內容，尤其聚焦以社群媒體為傳播載體的前提下，製作更親民的原子能科普內容。

II. 主要內容

基於計畫目標在協助科學家自製社群媒體上的科學短影音，本研究也整理近年來在科學傳播研究領域，有關社群媒體上科學短影音的相關研究。如早在2015年，學者Welbourne和Grant就發表過一篇名為「YouTube上的科學傳播：網路視頻受歡迎的影響因素」（Science communication on YouTube: Factors that affect channel and video popularity）【5】，他們整理YouTube上390個科學影片進行內容分析，結果發現，科學短影音內容大致呈現科學家與業餘科學家互相競奪公眾注意力的情況。另外，學者也發現，由專業科學家產製的科學影片雖然數量較多、內容豐富，但是由公眾或業餘科學家產製的科學影片視頻則更受到民眾歡迎。學者對此結果並不意外，因為多年前歐美科研機構曾鼓吹科學家成為公共傳播者，但是科學家總容易遇上思慮保守、缺少與公眾互動經驗等困境，以至於專業科學機構、或科學家製作出來的科學短影片通常傳播效果都不如預期。

紐約州立大學學煮Stengler 等人（2019）研究指出，線上科學短影片，讓年輕族群和科學接觸機會大增。他分析歐美國家社群媒體上的科學短影片內容發現：社群媒體上的科學短影音內容不同於電視、電影的敘事結構，短影音對科學專業知識的再現、轉譯都呈現另種類型，對年輕族群較產生吸引力【6】。

不過，也有學者提出警語，不是所有在社群媒體上的科學短影音內容都是正確的，這可能與影片產製者身分有關。影片產製者除了科學專家，其他如業餘科學家、記者、部落客甚至一般民眾都可以產製科學短影片，其內容可能造成科學資訊被錯誤解讀，甚至發生誤導大眾等問題【7】。社群媒體上科學影片內容的嚴謹度不足是常被外界質疑的瑕疵，對此，學者則提出兩個建議：其一是科學短影片的內容必須以科學傳播和公眾溝通為目的，應鼓勵由更多專家與非專家合作製作；其二應有更多研究關注科學傳播的影片內容（science communication through online video），藉由研究分析找出影片的敘事呈現，藉以提高科學短影片的傳播效果。

本研究從民國 105 年起執行科技部補助「原子能安全與輻射防護新媒體教材製作與行銷」計畫，至今執行進入第七年，這幾年執行過程也發現，民眾確實對內容有趣、生動活動的科學短影片較容易感到親近，另外，短動畫或由科學家講述的科普內容(經設計過的)也比較受到公眾歡迎。因此本計畫 110 年經與原子能委員會討論後，挑選重要之政策項目進行傳播內容設計，製作拍攝之內容包括有由科學家主講的英文版的原子能科普課程，以及 110 年歷次科普展的活動紀錄、及當天展覽會場內的重點項目製拍成線上課程，即使在疫情期間，也能繼續科普傳播。另外，本計畫為落實性別平等，從 109 年起製作原子能女科學家紀錄片，110 年企劃拍攝曾榮獲十大傑出女青年獎、中研院院士彭汪嘉康女士，從她的觀點談女科學家在職場上的苦辣酸甜，以及給年輕後進的女科學家勉勵與建議。

III. 結果與討論

110年本計畫製拍與協助網路推播的成果說明如下：

一、 重新製作5部英文版原子能科學科普課程，符合雙語教育目標，同時也為推廣國中、小原子能科普課程提供英文版，讓國中小學生能知曉與接觸科普英文。110年五部英文版課程主題為：核電廠除役你我他、輻災防救關鍵密碼、居禮夫人沒教你的事、身體的螢火蟲-會發光的核醫藥物、輻射照起來細菌都掰掰。

二、 依 110 年計畫目標，本計畫協助原能會在屏東、台中、華山舉辦三場原子能科普展覽。包括設計與製作三部原子能科普展覽的宣傳預告片，協助上架、進行社群網路推播宣傳。雖因疫情考量，上半年僅完成屏東、台中預告片，華山展覽因考量疫情確認取消，但本計劃仍與原能會商議，改制作拍攝 7 部線上原子能科普課程。

三、 110年5月因疫情升溫全國停止實體課程，本計畫從5月至8月無法依原定計畫執行，待9月疫情趨緩，便開始企劃製作7部新原子能科普課程，並協助原能會進行科學家自我傳播、拍攝剪輯技巧等課程，並在9月底完成拍攝線上7部微課程影片，並協助網路推播。

四、 因7部線上課程反應良好，11月繼續協助原能會籌拍國中、小三部線上課程，符合疫情時代線上學習需求。另外，也拍攝鬆餅姐姐說科學故事，讓國小孩童藉由故事更親近原子能科普。

五、 落實科學研究場域性別平等，鼓勵更多女性加入科普傳播與科學研究，本計畫企劃拍攝中央研究院院士彭汪嘉康女士紀錄片，並製作成中英文版本並協助傳播。

IV. 結論

本計畫執行過程也發現，現今全球社群媒體上已充斥各種各類的科學短影音，產製者包括科學機構、政府科研單位或是非科學家，例如記者、自然觀察家等，此情況符合歐美科學傳播學界的研究發現，越來越多科學傳播使用短影音方式呈現。另外，國內也出現許多科學研究機關、學校等嘗試製作科學影音內容，尤其是邀請科學家用輕鬆簡單的方式解釋科學現象或知識、傳遞科學資訊，經過設計、創意構思的內容更能吸引民眾，達到科學傳播效果。而此也是日後原能會或其他政府機關執行科普傳播可參考的方向，將更多樣化、有趣、創意的科普內容藉由短影音呈現給大眾。

參考文獻

[1] Welbourne,D.J.& Grant,W.J.(2015). “Science communication on YouTube: Factors thataffect channel and video popularity”.*Public Understanding of Science*,1–14, doi: 10.1177/0963662515572068

[2] McClain, C.R. (2017). Practices and promises of Facebook for science outreach:Becoming a Nerd of Trust.*PLoS Biol.*15(6),e2002020. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2002020

[3] Stengler, E. & Sherman, H. (2019). “Research catches up with the unstoppable How to citereality of science communication through online video”. *JCOM*.18 (02), doi:https://doi.org/10.22323/2.18020701.c

[4] Dudo, A.& Besley, J.C. (2016). Scientists’Prioritization of Communication Objectives for Public Engagement. PLoS ONE. 11(2), doi:10.1371/journal.pone.0148867

[5] 同註.1

[6] 同註3

[7] Guenther, L. and Joubert, M. (2017). ‘Science communication as a field of research:identifying trends, challenges and gaps by analysing research papers”.

化學遊樂趣－因化得幅
Chemistry On the Go - Radioactive

計畫編號：110-NU-E-032-001-NU
計畫主持人：陳曜鴻
e-mail：yauhung@mail.tku.edu.tw、yunchin.wu@gmail.com
計畫參與人員：高憲章、吳勇慶
執行單位：淡江化學系、淡江科學教育中心

摘要

本計畫主要是為了讓國高中生能從實驗中學習原子能及輻射知識，透過與淡江科學教育中心辦理「化學遊樂趣」活動，以兩台改裝的貨車做為活動及實驗載具，將規劃出的化學及輻射教材帶入全臺各地教學資源相對缺乏的學校，讓參與活動及實驗的學生能有機會認識原子科學，同時利用辦理活動時機進行雙方交流，以連結更多偏遠地區學校師生，以此增加原子能科普教育受教地區及人數，達成更全面的原子能推廣教育。

關鍵詞：化學遊樂趣、化學實驗、輻射偵測、放射元素、輻射防護、輻射應用。

Abstract

The project Chemistry On the Go were based on two 3.5 ton trucks to introduce science to students by mini lecture, shows and hands-on experiences in activity. The project schedule events which focus on schools in under privilege or remote areas. We design a series of curriculum to connect the periodic table and radioactive elements. The curriculum will give teachers a strong support when they teach corresponding topics in future. Base on the result of survey after each activity, this project can open a wide vision of atomic science and expand the knowledge of radiation for students.

Keywords: Chemistry On the Go、chemical experiment、radiation measurement、radioactive elements、radiation protection、radiation application.

I. 前言

本計畫內容主要起源於生活中各種媒體管道常見之能源與輻射議題，這些議題在各式產官學組織中常伴隨著許多爭議，在沒有透過適合的教育管道了解議題背後的知識下，民眾眼裡的核能與輻射就成為不安全與危險的代名詞。社會大眾對於原子科學的了解，常透過各式報導文章中，從核電廠爆炸、核廢料、核武器等具有爭議的角度進入，進而以較負面的看法來詮釋原子能。然而原子能的基礎科學知識、對現代社會科技的諸多應用，廣泛而深入在醫農工商研究等領域之中，影響力不容小覷，因此如何將原子能科普知識推廣於社會之中，就成為科普工作者刻不容緩的事情。

過去數年，淡江大學科學教育中心一直深耕於化學科普教育的推廣，我們舉辦了適合國中小、高中生的科普推廣活動，希望藉此讓更多偏遠地區師生能有機會接觸更多有趣的化學知識。在 2019 年的活動之中，因緣際會下與清華大學原子科學技術發展中心展開合作，建立起化學教育與原子科學教育一同推廣的方式，在嘗試合作兩年後，開啟了本次計畫的執行。計畫之中，淡江科教中心透過辦理「化學遊樂趣」活動的方式，以兩台三噸半貨車改裝成「化學車」及「分析車」，將車子變身為適合展現實驗效果的舞台，同時也能搭載科普教育所需之儀器及教案，巡迴於臺灣各地偏遠地區的學校，將教育資源帶入校園，給予在校師生們另種學習科學的方式。

II. 主要內容

本計畫基於一般中學師生無法透過正規學校課程學習原子能及輻射基本知識下，以淡江科學教育中心過去數年的化學推廣教育經驗做為基礎，透過與社會各產官學組織單位合作，以化學遊樂趣活動做為推廣主軸，將原子能及輻射相關知識送進偏遠地區學校。計畫執行期間，我們與各縣市政府教育單位、有活動需求之學校合作，討論雙方需求，一同辦理科普推廣活動。具體內容分別敘述如下：

1. 化學車－科普活動執行：

計畫執行期間，化學遊樂趣的化學車活動是以淡江科教中心團隊為主體，帶領校內化學系及服務學程生參與活動執行，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、助教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。另外，化學車也於計畫期間與原能會合作高雄左營站科普列車活動，各別內容敘述如下：

(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，以脫口秀及魔術表演的方式，吸引學生的注意，讓同學能在輕鬆嘻笑之中知道化學的趣味。

(2)化學的故事：以充滿歡笑的表演方式讓同學學習化學之外，我們也用一節課的時間，設計專業講座介紹化學的故事，如：瑪麗居禮的故事、輻說講座，講座知識也會結合時事、新聞、產業資訊等議題，另外化學故事時間也會搭配課程主題，設計出大型壁報，在活動期間於巡迴學校展覽。

(3)實驗動手做：化學是一門以實驗為主的科學，然而在偏遠地區的學校常受限於實驗器材或藥品的不完備、實驗課程時間不易取得分配等因素，讓學生無法透過實驗進行化學學習，因此我們設計出數個實驗，如：知輻習輻、三碘一課等，由淡江科教中心團隊及化學系的學生擔任講師及助教，指導學生從操作中學習步驟背後所代表的化學知識。

(4)高雄左營站科普列車：本次活動我們以化學車實驗動手做的方式與行政院原子能委員會、高雄輻射偵測中心、高雄中學合作，以教導雄中學生實驗原理及操作，並協助學生於輻射偵測中心拍攝線上科普虛擬列車影片。

2. 分析車－分析實驗學習：

分析車活動主要執行方式是以專業的器材、化學分析實驗及數據分析整理的方式來進行，過程中希望讓參與學生體驗科教人員日常實驗的研究方式，使學生能從動手做實驗建立起學習化學的興趣。活動執行流程，我們先將實驗預備知識放在約 40 分鐘的講座中，將專業知識與生活科學結合，接著再利用約 2 小時進行實驗，逐步帶領學生完成化學分析實驗、器材操作及數據計算。在分析車的實驗課程中，我們原定將輻射知識及實驗內容融入其中，但因 110 年的新冠疫情影響，使得我們做了些許的調整，將輻射實驗先進行簡化放在化學車活動之中，而利用分析車到校辦理的時間，與學校師生進行前期探訪、討論需求，以待未來計畫能繼續深耕，開發設計出專屬分析車的輻射實驗。

III. 結果與討論

利用 II.主要內容所提及之活動、故事、實驗等課程，本計畫在今年度執行之研究結果主要是：化學車的講座與實驗、科普列車合作、分析車的實驗學習、化學遊樂趣活動場次統計，細部說明如下：

1. 化學車－化學的故事：

本計畫所進行之化學遊樂趣活動分為化學車及分析車活動，化學車活動為一日行程，其中化學的故事時間會採用校內 1～2 節課的時間，以基礎化學或原子科學的歷史故事、科學新聞、生活科普、產業訊息及科技動態等資訊，整合設計出適合國中小生的講座(圖 2)，如：瑪麗居禮的故事、「輻說」講座。另外，也會依據搭配的實驗動手做部份，以主題的方式整理出大型壁報，在活動執行期間跟著化學車到各巡迴學校做展覽。今年的研究成果，設計出「知輻習輻」、「三碘一課」的背景知識壁報(圖 1)，提供校內師生利用活動時間觀看，以增進課程學習效果。

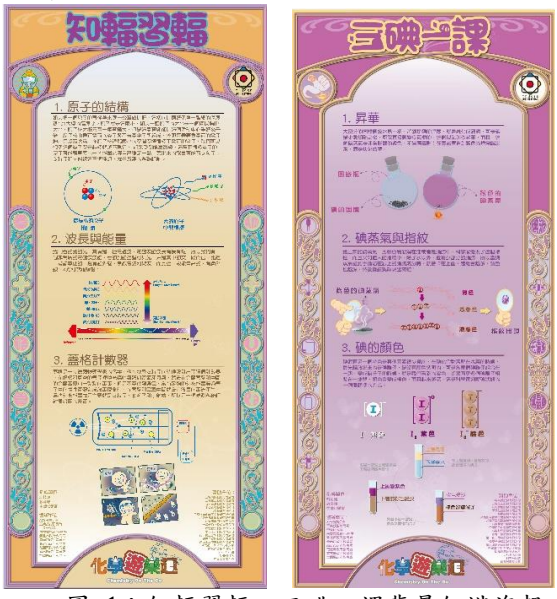


圖 1：知輻習輻、三碘一課背景知識海報

圖 2：化學車-輻說與化學主題講座
左上：桃園大坡國中；右上：雲林口湖國中
左下：苗栗三灣國中；右下：高雄龍肚國中

2. 化學車－實驗動手做：

化學遊樂趣之中化學車的活動為一日行程，分為三個部份，此項實驗動手做的部份通常安排於活動日的下午進行，教學方式為設計出三個實驗，並讓參與學校學生進行闖關體驗，淡江科教團隊在過去數年之中已設計出約 22 個實驗，今年計畫研究成果新增兩個，分別為「知輻習輻」實驗、「三碘一課」實驗，實驗內容分別敘述如下：

(1)「知輻習輻」實驗：本實驗利用簡易蓋格管輻射偵測器、生活中的輻射源、特殊屏蔽材料、實驗學習單(圖 3)及教案等教材，開發出一套適合國中生學習之輻射課程教案，讓學生在體驗實驗後，能學習到輻射是什麼？輻射在哪裡？輻射的分類、輻射的防護及輻射的應用等原子能知識，新增正規課程之外的科學知識。

(2)「三碘一課」實驗：本實驗利用生活中容易取得的熱水、優碘、指紋及去漬油等材料，搭配實驗學習單(圖 3)及教案等教材，根據碘元素三態變化的原理，設計出一套適合國中生學習的碘元素教案，讓學生在認識碘元素的諸多性質中，能有機會接觸到核電廠事故中常提及的碘 131、碘片、輻射汙染等知識議題，也會知道碘酸鉀(KIO3)常添加於一般食用鹽中形成加碘鹽，如此教授方式，將延伸同學認識輻射防護與放射科學的重要知識。

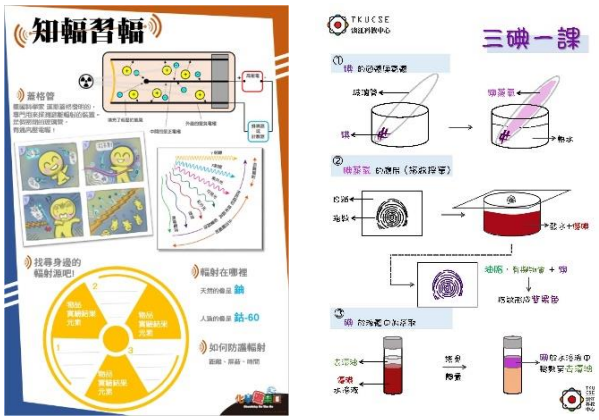


圖 3：知輻習輻、三碘一課實驗學習單

圖 4：知輻習輻、三碘一課實驗照片
左上：高雄寶來國中；右上：桃園觀音高中
左下：高雄六龜高中；右下：宜蘭文化國中

3. 化學車－高雄左營站科普列車：

本項活動我們採用化學車實驗動手做的方式，利用設計出的「知輻習輻」、「三碘一課」實驗教案與行政院原子能委員會、高雄輻射偵測中心、高雄中學合作。活動初期，淡江科教團隊先至高雄中學教導該校學生學習兩個實驗的原理、操作方式及步驟等，讓同學能利用在校時間自行練習實驗講解內容；活動中期，淡江團隊協助雄中學生於高雄輻射偵測中心進行科普列車線上實驗教材拍攝，指導學生於拍攝現場中的表達方式、臨場反應等，並利用指導後時間與雄中師生一同參訪輻射偵測中心實驗室材料及儀器，彼此互相教學相長，以提升對輻射科學知識的認知；活動後期，待學生實驗影片後製完成後，即上傳至 2021 臺灣科普虛擬列車網站，淡江團隊也將此項教學資源列入化學遊樂趣活動宣導影片。

圖 5：知輻習輻、三碘一課實驗教學及指導照片
左上：知輻習輻教學；右上：知輻習輻指導
左下：三碘一課教學；右下：三碘一課指導

4. 分析車－分析實驗學習：

化學遊樂趣分析車活動的核心，是以專業的實驗器材、嚴謹的實驗操作及完整的數據分析做為實驗方式，實驗過程是希望讓參與活動的學生能體驗科教人員日常實驗的研究方式，在動手做實驗之中建立起對化學的興趣。活動執行流程，首先我們會將實驗預備知識放在約 40 分鐘的講座中，將專業知識、生活科學及新聞報導結合，讓學生先備有實驗的預備知識；接著再利用約 2 小時進行實驗，逐步帶領學生完成化學分析實驗、器材操作及數據計算。在分析車的實驗課程中，我們原本預定將輻射知識、實驗器材及方式融入其中，但因 110 年的新冠疫情影響，使得我們做了些許的調整，將輻射實驗先進行簡化放在化學車活動之中，而利用分析車到校辦理活動的時間，與學校師生進行前期探訪及討論需求，以待未來計畫能繼續深耕，開發設計出專屬分析車的輻射實驗。

圖 6：分析車實驗前講座及實驗後合照
左上：桃園觀音高中；右上：新北桃子腳國中小
左下：宜蘭羅東高中；右下：新北江翠國中

5. 化學遊樂趣活動場次：

本計畫所辦理之化學遊樂趣活動，以淡江大學科教中心為出發點，連結全臺各地縣市政府教育單位、校外企業及基金會、科學教育相關民間組織及其它有心深耕於科普教育的團體進行合作，開著兩台改裝貨車跑遍全臺各縣市偏遠地區國中小、高中之到校科普教育活動。然而，2021 年淡大團隊面臨成立十年來所遭遇的最大考驗，因新冠疫情確診人數的爆發、三級警戒之下限制跨縣市的教學活動，使得化學車及分析車出隊期間減少了四個多月，在這樣的艱困條件下，我們仍然努力執行計畫任務及推廣活動。最終，2021 年化學遊樂趣活動場次統計：化學車 30 場、分析車 14 場、科普列車活動 2 場，全年共 46 場次，平均約 4 場/月；活動參加人數總計 2626 人（男生 1340 人、女生 1286 人），活動場次大合照如圖 7。從數據統計中可得知，活動參與男女生人數已相當接近，在社會講究性別平等的風氣之下，我們盡力做到不因性別差異而影響受教機會。

圖 7：活動場次大合照
左上：桃園觀音高中；右上：花蓮玉東國中
左下：雲林虎尾國中；右下：高雄茂林國中

本計畫結果提列三點展望，討論如下：

(1)持續將化學遊樂趣活動所開發及設計之課程、實驗、教案等資源，向全臺各縣市之偏遠地區學校辦理，也希望在來年的計畫中，疫情影響力趨緩的情況下，將原子科學及輻射科普教材融入化學魔術秀表演、分析車實驗之中，以讓更多國高中學生能夠有機會體驗化學與原子科學的奧秘與樂趣。

(2)本計畫所辦理之活動工作人員，不論是否是淡江大學學生，除了在活動前教導應有知識及訓練操作技能外，也需要學生能將課程實驗知識融會貫通，並有能力教導同儕，我們希望團隊對於工作人員的培養，將會塑造出一群對於化學及原子科學有清楚概念及能力的種子講師。

(3)本團隊將加強與活動所到之學校團隊合作，將化學遊樂趣現有之教案與教材提供給有需求的中小學教師，以協助教師在現有的課綱上進行相關科學課程教材開發、探究與實作課程設計。另外，活動進行同時也持續建立與化學相關產業合作管道，並在課程之中提供學生了解臺灣目前化學及能源產業現況，以期待未來有更多年輕族群在臺灣深耕相關科技產業。

IV. 結論

本計畫依據研究結果資料顯示，將 110 年度計畫之化學車活動、分析車活動、科普列車活動、化學遊樂趣場次及成效評量等成果總結於下：

(1)化學遊樂趣之化學車活動，開發設計出適合國中生之化學故事時間課程：瑪麗居禮的故事、輻說講座；化學車動手做實驗：知輻習輻實驗、三碘一課實驗。全年活動場次共 30 場。

(2)化學遊樂趣之科普列車活動，與行政院原子能委員會、高雄輻射偵測中心、高雄中學合作，透過教導雄中學生學習實驗知識並協助至輻射偵測中心拍攝講解影片，其成果上傳至 2021 臺灣科普虛擬列車網站，以供全國民眾收看及學習，活動共辦理 2 場。

(3)化學遊樂趣之分析車活動，以化學講座開場介紹實驗背景知識，結合生活中的科普，再讓參與活動學生動手做實驗，從實驗中學習化學及原子能科普知識。全年活動場次共 14 場。

(4)本計畫辦理之化學遊樂趣活動場次，分別為化學車活動 30 場、科普列車活動 2 場、分析車活動 14 場，共辦理 46 場次。活動場次分佈圖於圖 8。

(5)本計畫在辦理化學遊樂趣 46 場活動之後，將活動結束後回收之有效問卷統計並做量化資料評量，發現學生對於活動滿意度高，化學實驗操作非常感興趣，在經過課程學習後，有近 6 成的學生對化學或原子科學是有想法或有興趣，甚至有高達 98%的學生有意再參加一次活動，有此可見，本團隊持續深耕臺灣科普教育之重要性，將有助於社會年輕學子們啟發對於科學知識的好感與喜愛。

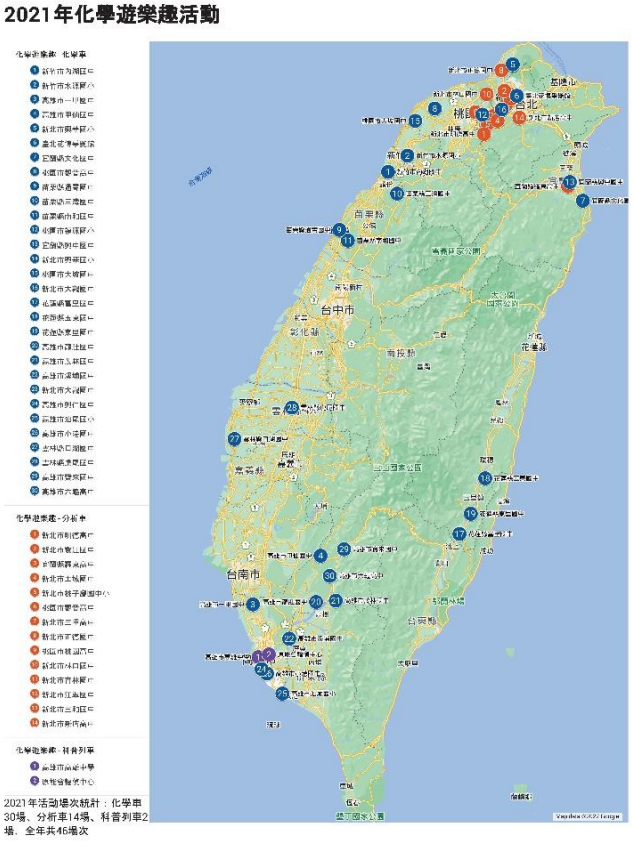


圖 8：活動場次分佈圖

參考文獻

[1] 106 年度原子能科技學術合作研究計畫成果發表會精簡報告內容及格式。

輻射照射在農產品與農業資材消毒的應用研究
Application of gamma irradiation on elimination of plant pathogens and pests in agriculture products and cultural materials

計畫編號：110-NU-E-055-001-NU
計畫主持人：謝廷芳
e-mail：tfhsieh@tari.gov.tw
計畫參與人員：蘇俊峯、戴廷恩、賴思倫、陳淑佩、蔡佳欣、黃巧雯、陳純葳
執行單位：行政院農業委員會農業試驗所

摘要

本研究的主要目的在探討水苔介質透過輻射照射處理之後，達到除滅介質中有害生物的目標。取乾燥進口水苔經不同劑量輻射照射處理，結果顯示水苔介質以 3 kGy 以上輻射照射處理，即分離不到有害生物活體。以 3kGy 以上的輻射照射劑量，可使根瘤線蟲 (*Meloidogyne incognita*) 二齡幼蟲的存活率與卵的孵化率下降，炭疽病菌 (*Colletotrichum* sp.) 與鐮胞菌 (*Fusarium* sp.) 的菌絲生長與孢子發芽受到抑制。以 1.5kGy 以上輻射照射處理可增加茄棉粉介殼蟲 (*Phenacoccus solenopsis*) 與木瓜秀粉介殼蟲 (*Paracoccus marginatus*) 致死率。採用 3kGy 以上的輻射照射量，則會造成文心蘭與火鶴花切花永久性的物理傷害。

關鍵詞：輻射照射、水苔、植物害蟲、植物病害、伽馬輻射、消毒

Abstract

The main purpose of this study is to disinfect and eliminate the plant pathogens and pests in sphagnum medium by using radiation. The imported dried sphagnum medium treated with radiation dose more than 3 kGy could eliminate any microbe and living pest. The radiation dose above 3 kGy could decrease the 2nd juvenile survival and egg hatching rate of *Meloidogyne incognita*, and also could inhibit the mycelial growth and spore germination of *Colletotrichum* sp. and *Fusarium* sp. More than 1.5 kGy dose radiation treatment could increase the lethality of *Phenacoccus solenopsis* and *Paracoccus marginatus*. The radiation exposure more than 3kGy could cause permanent physical damage to both cut flowers of *Oncidium* and *Anthurium*.

Keywords: radiation dose, sphagnum, pest, plant pathogen, gamma radiation, sterilization

I. 前言

農業的栽培模式會依據科技與生活型式的改變而精進，但是作物栽培一定要有介質的原則是不會變得。介質可包括很廣，傳統的農業一般將作物種在土裡，也有設施栽培採用水耕栽培，而越來越多的精緻農業所採用的介質，然而這些介質多仰賴進口。進口的介質最怕遇到病蟲草害的問題，如果有檢疫上的疑慮則更是棘手。栽培用介質的消毒處理目前常採用有：(1)自然曝曬，陽光消毒；(2) 化學藥劑浸泡，如漂白水、二氧化氯消毒；(3) 熱水消毒，如水苔以 80℃高溫浸泡消毒。如果有檢疫上的疑慮則需進行 (4) 燻蒸處理。然而上述消毒方式都有其限制，(1) 陽光消毒在消毒溫度的限制，使得許多耐高溫雜草種子無法被殺死；(2) 化學藥劑浸泡消毒，常因消毒藥劑有揮發性導致作用時間不長；(3) 高溫消毒則容易破壞介質質地而易於崩解，影響後續作物生長。(4) 燻蒸處理需有專門業者、設備方可進行。目前有業者嘗試利用其他消毒處理方式進行介質消毒，如蒸氣消毒、有機添加物消毒等，效果與應用性都有待觀察。據此，放射線於農業生產用資材消毒的應用或許是可行的替代方案之一。本研究的主要目的在探討水苔介質透過輻射照射處理之後，可達到消毒、除滅介質中有害生物的目標。

II. 主要內容

一、不同輻射照射量對進口水苔介質有害生物存活的影響

取進口乾燥立體 5kG 包裝的水苔 (53x29x29cm^3) 8 顆，分別經由 0 (CK，無處理)、0.5、1、1.5、3、6、18 及 25kGy 輻射照射處理，每個輻射照射處理 1 顆水苔。輻射照射處理後，每顆水苔設有 7 個採樣點，分別為該水苔立方體的 6 個表面中心點，以及立體水苔的正中心點。採樣時，輕取採樣點深約 5cm 的範圍，每份樣本 30g，每採樣點各取 4 份樣本，分別進行真菌、細菌、線蟲及害蟲的檢查，並計算分離率 (%)。

1. 線蟲分離與鑑定：利用改良式柏門氏漏斗分離法 (Modified Baermann Funnel Method)，取每份樣本 30g，置於 60 孔目網篩上 (已鋪 2 張衛生紙)，再將衛生紙摺好，避免底層樣本漏出。靜置 4-36hr 後收集指形管中的線蟲懸浮液，將分離所得之線蟲樣本，倒入直徑 5cm 的玻璃鏡檢皿中，以解剖顯微鏡 (dissecting microscope) 進行鏡檢。

2. 細菌與真菌的分離：取水苔樣本後，再秤取 1g 的次樣本置入含 9mL 無菌水的三角燒瓶中，於室溫 (26-27˚C) 下震盪 (100rpm) 4 小時。隨後，利用吸管吸取 1mL 懸浮液加入含 9mL 無菌水的試管中進行序列稀釋。每稀釋濃度再利用微量吸管吸取 100uL 稀釋液，均勻塗佈於 NA 培養基上，置於 28˚C

定溫培養箱中培養 3 天後，並計算培養基上細菌的菌落數。另一處理，則將每稀釋濃度利用微量吸管吸取 100uL 稀釋液，均勻塗佈於 PDA 培養基上，進行真菌的分離與計數菌落數。

3. 害蟲類群的分離與活性評估：取 30g 的水苔樣本進行鏡檢，並採樣放置於土壤蟎類收集器中，於室溫烘烤後，將害蟲收集於酒精瓶內。於顯微鏡下鏡檢、鑑定，各類害蟲的種類與數量，並判斷其活性。

二、 不同輻射照射量對有害生物存活的影響

1. **不同輻射照射量處理對根瘤線蟲二齡幼蟲存活率與卵孵化率的影響：**將 100 隻根瘤線蟲 (*Meloidogyne incognita)* 的二齡幼蟲移置於玻璃保存瓶中，密封備用。將 10 塊根瘤線蟲卵塊從番茄根中挑出，移置於塑膠培養皿中，密封備用。將含根瘤線蟲二齡幼蟲的保存瓶與卵塊的培養皿固定於紙箱中 (67x30x40 cm^3)，5 重複，分別經由 0 (CK，無處理)、3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理後，觀察二齡幼蟲的存活與孵化率，並計算存活率 (%) 與孵化率 (%)。

2. **不同輻射照射量處理對炭疽病菌與鐮胞病菌菌絲生長與孢子發芽的影響：**將炭疽病菌 (*Colletotrichum* sp.) 菌株 Col-17 與鐮胞菌 (*Fusarium* sp.) 菌株 F-172 培養在 PDA 培養基上 1 星期。利用 8mm 打孔器取菌絲塊移置於另一新配置之 PDA 培養基中 2 天，備用。另一處理，則將 Col-170 與 F-172 菌株培養在 PDA 培養基上 1 星期後，製備孢子懸浮液，並調整其濃度為 1-5x10^5 spores/mL，將該孢子懸浮液裝置於 2mL 的微量試管中，備用。將該些培養皿與微量試管固定於紙箱中 (67x30x40 cm^3)，5 重複，分別經由 0 (CK，無處理)、3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理後，觀察病原菌菌絲生長情形，並與 0 kGy 比較、計算不同輻射照射處理的菌絲生長抑制率(%)。另一處理，則利用 10 倍序列稀釋法，將不同輻射照射處理的孢子懸浮液於 PDA 培養基上觀察孢子發芽的情形，並與 0 kGy 比較、計算不同輻射照射處理的孢子發芽抑制率 (%)。

3. **不同輻射劑量對茄棉粉介殼蟲與木瓜秀粉介殼蟲致死的影響**：將茄棉粉介殼蟲 (*Phenacoccus solenopsis*) 雌成蟲 20 隻、木瓜秀粉介殼蟲 (*Paracoccus marginatus*) 卵 200 顆、若蟲 20 隻與雌成蟲 20 隻，分別裝置於塑膠杯中，備用。將該些塑膠杯固定於紙箱中 (67x30x40 cm^3)，5 重複，分別經由 0 (CK，無處理)、0.5、1 及 1.5 kGy 輻射照射處理後，觀察該些害蟲的活力，並計算不同輻射照射處理的致死率(%)。

三、 不同輻射照射量對文心蘭與火鶴花切花品質的影響

1. **不同輻射照射量對文心蘭切花品質的影響**：將文心蘭檸檬綠切花 30 枝包裝於外銷用之紙箱中，備用。將該些紙箱，分別經由 0 (CK，無處理)、3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理後，觀察切花的外觀品質，並計算落花比率(%)、花苞變色比率(%)、花梗焦枯比率(%) 與花瓣焦枯比率(%)。

2. **不同輻射照射量對火鶴花切花品質的影響**：將火鶴花邱比特切花 36 枝，包裝於外銷用之紙箱中，備用。將該些紙箱，分別經由 0 (CK，無處理)、3、6、18 及 25kGy 輻射照射處理後，觀察切花的外觀品質，並計算肉穗花序(spadix)變色比率(%)、佛焰苞(spathe)變色比率(%)及佛焰苞焦枯比率(%)。

III. 結果與討論

一、不同輻射照射量對進口水苔介質內有害生物存活的影響

1. **不同輻射照射量處理後水苔介質內線蟲的分離率：**取立體包裝之乾燥水苔，分別經由不同劑量之輻射照射處理，7 個採樣點，分別為該水苔立方體的 6 個表面中心點，以及立體水苔的正中心點。經改良式柏門氏漏斗分離法分離結果顯示，僅在 0 kGY (CK，無處理) 的正中心點樣本發現有 1 nematode/30g sphagnum 的腐生性線蟲外，其餘樣本皆未發現線蟲。

2. **不同輻射照射劑量對水苔介質中細菌存活的影響：**取立體包裝之乾燥水苔，分別經由不同劑量輻射照射處理，2 個採樣點，分別為該水苔立方體的下方表面的中心點，以及立體水苔的正中心點。經利用稀釋平板塗佈於 NA 培養基分離結果顯示，僅在 0kGy (CK，無處理) 的樣本可分離得到細菌菌落，下方表面中心點與立體水苔的正中心點分別有 2 與 7 x10^3 cfu/mL 細菌外，其餘樣本皆無細菌被分離得到。

3. **不同輻射照射劑量對水苔介質中真菌存活的影響：**取立體包裝之乾燥水苔，分別經由不同劑量輻射照射處理，7 個採樣點，分別為該水苔立方體的 6 個表面中心點，以及立體水苔的正中心點。經利用稀釋平板塗佈於 PDA 培養基分離結果顯示，0 kGy (CK，無處理) 的樣本可分離得到最多真菌菌落，有 1.2×10^7 cfu/g sphagnum。由 6 kGY 處理的樣本可分離真菌菌落 5.6×10^3 cfu/g sphagnum，其他 3、18 及 25 kGy 處理的樣本皆無真菌菌落產生。經統計分析，3、6、18 及 25 kGy 處理樣本的真菌菌落數，皆與 0 kGy (CK，無處理) 處理樣本的真菌菌落數具有統計上的顯著差異 ($p<0.05$)。

4. **不同輻射照射劑量對水苔介質中有害生物存活的影響：**取立體包裝之乾燥水苔，分別經由不同劑量

輻射照射處理，7 個採樣點，分別為該水苔立方體的 6 個表面中心點，以及立體水苔的正中心點。經顯微鏡鏡檢結果顯示，在 0 kGy (CK，無處理) 的樣本可觀察到 6 numbers/30g sphagnum 的有害生物，主要為甲蟎，在 0.5 kGy 處理下可觀察到 3 numbers/30g sphagnum 的有害生物，主要為薊馬、捕植蟎及蜘蛛，而在 1 與 1.5 kGy 處理下則無活體有害生物可被檢測出。

二、 不同輻射照射量對有害生物存活的影響

1. **不同輻射照射量處理對根瘤線蟲二齡幼蟲存活率與卵孵化率的影響**：將 100 隻根瘤線蟲 (*Meloidogyne incognita)* 的二齡幼蟲，分別經由 不同劑量輻射照射處理後 5 天，觀察、計算二齡幼蟲的存活率。結果顯示 0 kGy 處理的二齡幼蟲存活率最高為 72%；3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理的二齡幼蟲存活率，分別為 15、3、1 及 0%。0 kGy 處理與其他輻射劑量處理的二齡幼蟲存活率，經 LSD 分析具有顯著差異 ($p<0.05$)。另一處理將 10 個根瘤線蟲的卵塊，分別經由不同劑量輻射照射處理後 5 天，觀察、計算卵的孵化率。結果顯示 0 kGy 處理的卵的孵化率最高達 100%；3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理，卵的孵化率分別為 12、16、6 及 12%。0 kGy 處理與其他輻射濃度處理卵的孵化率，經 LSD 分析具有顯著差異 ($p<0.05$)。

2. **不同輻射照射量處理對炭疽病菌與鐮胞病菌菌絲生長與孢子發芽的影響**：將炭疽病菌 (*Colletotrichum* sp.) 菌株 Col-170 與鐮胞菌 (*Fusarium* sp.) 菌株 F-172 培養基分別經由不同劑量輻射照射處理後，再與 0 kGy 比較，結果 Col-170 菌株經 3 kGy 輻射照射處理的菌絲生長抑制率為 80%，其他處理者皆為 100%；而 F-172 菌株經 3 與 6 kGy 輻射照射處理的菌絲生長抑制率分別為 48 與 57%，其他處理者皆為 100%。另一處理，利用 10 倍序列稀釋法，計算不同輻射照射處理對 Col-170 與 F-172 菌株孢子發芽的影響，結果所有輻射照射處理的孢子發芽抑制率皆為 100%。

3. **不同輻射劑量對茄棉粉介殼蟲與木瓜秀粉介殼蟲致死的影響**：將茄棉粉介殼蟲 (*Phenacoccus solenopsis*) 雌成蟲、木瓜秀粉介殼蟲 (*Paracoccus marginatus*) 卵、若蟲與雌成蟲，分別經由不同劑量輻射照射處理後，結果 0 kGy 輻射照射處理的茄棉粉介殼蟲雌成蟲致死率為 0%，而經 0.5、1 及 1.5 kGy 輻射照射處理的致死率則分別為 80、87 及 87%。0 kGy 輻射照射處理的木瓜秀粉介殼蟲卵致死率為 0%，而經 0.5、1 及 1.5 kGy 輻射照射下的致死率皆為 100%。0 kGy 輻射照射處理的木瓜秀粉介殼蟲若蟲致死率為 0%，而 0.5、1 及 1.5 kGy 輻射照射下的致死率則分別為 20、60 及 67%。0 kGy 輻射照射處理的木瓜秀粉介殼蟲雌成蟲致死率為 0%，而 0.5、1 及 1.5 kGy 輻射照射下的致死率則分別為 10、20 及 47%。

三、 不同輻射照射量對文心蘭與火鶴花切花品質的影響

1. **不同輻射照射量對文心蘭切花品質的影響**：將文心蘭檸檬綠切花包裝於外銷用之紙箱中，分別經由不同劑量輻射照射處理後，結果 0 kGy 處理的切花外觀品質皆無異常，在落花比率、花苞變色比率 、花梗焦枯比率與花瓣焦枯比率皆為 0%;經 3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理文心蘭檸檬綠切花後，其落花比率皆為 100%，花苞變色比率分別為 70、80、100 及 100%，花梗焦枯比率分別為 70、80、100 及 100%，花瓣焦枯比率則分別為 0、40、100 及 100%。

2. **不同輻射照射量對火鶴花切花品質的影響**：將火鶴花邱比特切花包裝於外銷用之紙箱中，分別經由不同劑量輻射照射處理後，結果 0 kGy 處理的切花外觀品質皆無異常，在肉穗花序變色比率、佛焰苞變色比率與佛焰苞焦枯比率皆為 0%。經 3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理邱比特切花後，其肉穗花序變色皆為 100%，佛焰苞變色比率分別為 92、100、100 及 100%，佛焰苞焦枯比率分別為 8、100、100 及 100%，均喪失商品價值。

IV. 結論

醫療材料在使用前必須進行滅菌消毒，通常可使用的方法包括乾熱(dry heat)、環氧乙烷(ethylene oxide (EtO)、甲醛 (formaldehyde) 、電漿 (gas plasma) 、過氧乙酸 (peracetic acid)、電子束(e-beams)和伽馬射線 (gamma rays) (Lambert et al., 2011; Harrell et al., 2018)。其中，伽馬輻射具有幾個優點，包括更好的穿透性、更好的消毒效果、不受溫度和壓力等外在條件影響其有效性等 (Singh et al., 2016)。許多的研究證實伽馬輻射會造成活體細胞傷害的機制，包括細胞膜的通透性增加(AlZahrani and Al-Sewaidan, 2017)、酵素活性的功能障礙(Rendic and Guengerich, 2012)、放射性毒素的產生(Ibragimova *et al.*, 2008)，以及造成脫氧核糖核酸 (DNA) 的損傷 (Sage and Shikazono, 2017)。致使本研究在針對不同輻射照射量對文心蘭與火鶴花切花品質的影響試驗中，不管採用輻射照射劑量，皆會造成文心蘭與火鶴花切花的物理性傷害。或許在一些醫療器材與食品的消毒上，使用伽馬輻射照射會存在一些疑慮 (Harrell et al., 2018)，且會造成具保鮮特性之農產品的物理性傷害。但是用在農業資材，例如水苔的消毒，其主要目的是在殺死介質內的有害生物，伽馬輻射會造成活體細胞傷害的機制，或許伽馬輻射是可應用在農業資材的消毒上。

在針對不同輻射劑量對根瘤線蟲二齡幼蟲存活率與卵孵化率的影響試驗中，3 KGy 以上的劑量即可造成二齡幼蟲的存活率低於 15%，卵的孵化率低於 16%。過去的研究發現，以 7.5 kGy 伽馬射線(gamma-irradiation) 處理根瘤線蟲 (*Meloidogyne javanica*) 1 天之後可完全殺死二齡幼蟲，以 6.25 kGy 處理卵塊 1 天後，則可完全抑制卵的孵化率(Chinnasri *et al.*, 1997)。在 7.5 kGy 或更高劑量時，可完全除滅土壤中的根腐線蟲 (*Pratylenchus thornei*)；但在 5 kGy 時，則大約有 1% 的

根腐線蟲可以存活(Thompson, 1990)。以 Cesium-137 當射源時，評估伽馬射線對松材線蟲 (*Bursaphelenchus xylophilus*)的致死率，結果其致死劑量介於 6-8 kGy，但是該劑量會對商業生產的木板有品質上的影響(Eicholz *et al.*, 1991)。針對不同輻射照射量對炭疽病菌與鐮胞病菌菌絲生長與孢子發芽的影響試驗中，3 kGy 以上的劑量即可使炭疽病菌菌絲生長抑制率達 80% 以上，孢子發芽抑制率達 100%。同樣地，3 kGy 以上的劑量亦可使鐮胞菌菌絲生長抑制率達 48% 以上，孢子發芽抑制率達 100%。過去的研究發現，以 Co60 當射源時，在 0.75 與 1 kGy 的輻射劑量處理，即可抑制木瓜炭疽病病菌 (*Colletotrichum gloeosporioides*) 的菌絲生長與孢子發芽，亦可減少木瓜炭疽病的發生。但是輻射照射之後的木瓜，再接種炭疽病菌，則仍會發生炭疽病(Cia *et al.*, 2007)。針對茄棉粉介殼蟲(*Phenacoccus solenopsis*)雌成蟲而言，以 0.5 kGy 以上的輻射劑量處理，即可達 80% 以上的致死率。同樣的，以 0.5 kGy 以上的劑量處理時，木瓜秀粉介殼蟲(*Paracoccus marginatus*)卵致死率可達 100%。而若蟲的致死率在 1 kGy 以上的處理下，其致死率可達 60%以上，雌成蟲致死率則需在 1.5 kGy，方可達 47%的致死率。而過去的研究證實，以 Co60 當射源，在 26 Gy 時木瓜秀粉介殼蟲卵的致死率 (effective doses, ED) 可達 99.9%：而雌成蟲致死率達 99.9% (ED99.9 doses) 的輻射劑量則介於 56-165 Gy，主要差異來自於雌成蟲的成熟度(Seth *et al.*, 2016)。

本研究的最終目的在於透過輻射照射處理之後，能達到除滅水苔介質中有害生物。但在 Bunzl 與 Schimmack (1988)的研究中，利用 Co60 當射源，以 40 和 80 kGy 的輻照劑量處理六種土壤、兩種水苔和一種粘土礦物。結果每個樣品中微生物的生物量有顯著的減少，但是消毒的效果會因介質的類型與特性而有所差異。除了殺菌之外，輻照照射還會對介質產生其他影響，從而改變介質的吸附特性。在本研究的試驗中取立體包裝之乾燥水苔，分別經由 0.5、1、1.5、3、6、18 及 25 kGy 輻射照射處理，試驗結果顯示水苔介質以 1 kGy 以上輻射照射處理，即無活體的有害生物可被分離得到。以 3 kGy 以上輻射照射處理，即無真菌菌落生長。但是僅在 0 kGY (CK，無處理)的正中心點樣本發現有 1 nematode/30g sphagnum 的腐生性線蟲，其餘樣本皆未發現線蟲。僅在 0 kGy 的樣本可分離得到細菌菌落，下方表面中心點與立體水苔的正中心點分別有 2 與 7 x10^3 cfu/mL，其餘樣本皆無細菌菌落。此結果有兩種可能，(1) 線蟲與細菌族群在乾燥水苔介質中的存活力已不佳、甚至死亡，致使無較多族群數可被分離出；(2) 線蟲與細菌族群在乾燥水苔介質中，以更韌性的存活方式存活，在輻射照射的處理過程仍繼續保持存活狀態，致使無較多族群數可被分離出，用以進行數據分析。

參考文獻

[1] AlZahrani, K., and Al-Sewaidan, H. A. 2017. Nanostructural changes in the cell membrane of gamma-irradiated red blood cells. Indian journal of hematology & blood transfusion : an official journal of Indian Society of Hematology and Blood Transfusion, 33(1): 109–115. doi://doi.org/10.1007/s12288-016-0657-z

[2] Bunzl K, and Schimmack W. 1988. Effect of microbial biomass reduction by gamma-irradiation on the sorption of 137Cs, 85Sr, 139Ce, 57Co, 109Cd, 65Zn, 103Ru, 95mTc, I by soils. Radiat Environ Biophys. 27(2):165-176. doi: 10.1007/BF01214606. PMID: 3393624.

[3] Carlile, W. R. 2008. The use of composted materials in growing media. Acta Hort. 779: 321-327.

[4] Chinnasri, B., Moy, J. H., Sipes, B. S., Schmitt, D. P. 1997. Effect of gamma-irradiation and heat on root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*. J Nematol. 29(1): 30-34.

[5] Cia, P., Pascholati, S. F., Benato, E. A., Camili, E. C., and Santos, C. A. 2007. Effects of gamma and UV-C irradiation on the postharvest control of papaya anthracnose. Postharvest Biology and Technology 43: 366-373.

[6] Eichholz, G. G., Bogdanov, A. A., and Dwinell, L. D. 1991. Radiation sensitivity of pine wood nematodes in wood chips. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A, Applied Radiation and Isotopes 42:177-179.

[7] Harrell, C. R., Djonov, V., Fellabaum, C., & Volarevic, V. 2018. Risks of using sterilization by gamma radiation: the other side of the coin. International journal of medical sciences, 15(3): 274–279. doi://doi.org/10.7150/ijms.22644

[8] Ibragimova, M. I., Petukhov, V. Y., Zheglov, E. P., Khan, N., Hou, H., Swartz, H. M., Konjukhov, G. V., and Nizamov, R. N. 2008. Quinoid radio-toxin (QRT) induced metabolic changes in mice: an ex vivo and in vivo EPR investigation. Nitric oxide : biology and chemistry, 18(3): 216–222. doi://doi.org/10.1016/j.niox.2008.01.002

[9] Lambert, B. J., Mendelson, T. A., and Craven, M. D. 2011. Radiation and ethylene oxide terminal sterilization experiences with drug eluting stent products. AAPS PharmSciTech, 12(4): 1116–1126. doi://doi.org/10.1208/s12249-011-9644-8

[10] Raviv, M. 2008. The use of compost in growing media as suppressive agent against soil-borne diseases. Acta Hort. 779: 39-49.

[11] Rendic, S., and Guengerich, F. P. 2012. Summary of information on the effects of ionizing and non-ionizing radiation on cytochrome P450 and other drug metabolizing enzymes and transporters. Current drug metabolism, 13(6): 787–814. doi://doi.org/10.2174/138920012800840356

[12] Sage E, and Shikazono N. 2017. Radiation-induced clustered DNA lesions: repair and mutagenesis. Free Radic Biol Med. 107: 125-135. doi:

10.1016/j.freeradbiomed.2016.12.008. Epub 2016 Dec 8. PMID: 27939934.

[13] Seth, R., Zarin, M., Khan, Z., and Seth, R. K. 2016. Towards phytosanitary irradiation of *Paracoccus marginatus* (Hemiptera: Pseudococcidae): ascertaining the radiosensitivities of all life stages. Florida Entomologist 99: 88-101.

[14] Singh, R., Singh, D., and Singh, A. 2016. Radiation sterilization of tissue allografts: A review. World journal of radiology, 8(4): 355–369. doi://doi.org/10.4329/wjr.v8.i4.355

[15] Smith, B. 2008. The growing media market in New Zealand. Acta Hort. 779: 179-183.

[16] Thompson, J. P. 1990. Treatments to eliminate rootlesion nematode (*Pratylenchus thornei* Sher & Allen) from a vertisol. Nematologica 36:123-127.

[17] Tsitko, I., Lusa, M., Lehto, J., Parviainen, L., Ikonen, A. T. K., Lahdenperä, A. M., Bomberg, M. 2014. The variation of microbial communities in a depth profile of an acidic, nutrient-poor boreal bog in Southwestern Finland. Open J. of Ecol. 4: 832-859.

[18] Waller, P. L., Thornton, C. R., Farley, D., Groenhof, A. 2008. Pathogens and other fungi in growing media constituents. Acta Hort. 779: 361-365.

核能研究機關改制行政法人之法制研究(II)：國家原子能科技研究院設置條例草案暨法規配套措施之研析

Legal Study on the Institute of Nuclear Energy Research transformed into Non-Departmental Public Body (II): Focus on Legal Study of the Draft of the "National Atomic Energy Technology Research Institute Act" and related Legal Supporting Measures

計畫編號：110-NU-E-007-003-NU
計畫主持人：翁曉玲副教授
e-mail：hlweng@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人：紀和均助理教授
執行單位：國立清華大學通識教育中心

摘要

本計畫參酌目前國內現有的六個行政法人機構相關法制與實務運作經驗，檢視「國家原子能科技研究院設置條例」草案架構的完整性與條文內容的適當性，重點放在比較「核能研究所」與組改後的「國家原子能科技研究院」，兩者在組織型態、業務範圍、與主管機關的監督服從關係、經費來源、員工權益及規章訂定程序等異同。

其次則特別探討「國家原子能科技研究院」與主管機關之間的受監督與管理關係，例如董監事會組成與遴選、政府經費撥給、業務監督關係、績效評鑑等，研析本草案規定是否完備，期能深入評估核能研究所當改制成行政法人、組織鬆綁後，其組織運作、效能與專業技術上能否有效提昇。

關鍵詞：行政法人、核能研究所、原子能委員會、國家原子能科技研究院。

Abstract

With reference to the relevant legal system and practical operation experience of the six existing domestic non-departmental public bodies, this project examines the integrity of the framework and the adequacy of the provisions of the aforementioned "Act of the Establishment of the National Atomic Energy Technology Research Institute", focusing on comparing the "Nuclear Energy Research Institute " and "National Atomic Energy Technology Research Institute". They both have similarities and differences in organizational type, business scope, supervision and compliance relationship with the competent authority, funding source, employee rights and regulations, and procedures for formulating regulations.

Secondly, it specifically discusses the supervised and managed relationship between the " the National Atomic Energy Technology Research Institute and the competent authority, such as the composition and selection of the board of directors and supervisors, government funding, business supervision relationship, performance evaluation, etc., and analyzes whether the provisions of this draft are complete, it is expected that an in-depth assessment of the Nuclear Energy Research Institute can effectively improve its organizational operation, efficiency and professional technology after it is transformed into an non-departmental public bodies and the organization is loosened.

Keywords: Non-departmental Public Body, Institute of Nuclear Energy Research (INER), Atomic Energy Council (AEC), National Atomic Energy Technology Research Institute.

I. 前言

本團隊在第一期研究計畫中雖不支持將核能研究所脫離原子能委員會而轉型成為行政法人之規劃方案，但由於目前行政院在核能研究所的組改議題上似已定調，核能研究所將改制為行政法人，行政院迄今已陸續公佈兩個「原子能科技研究院設置條例草案」版本，第一個版本是「行政法人國家龍潭原子能科技研究院設置條例（草案）」，於 2018 年 11 月 8 日經行政院會議審議通過，不過因其內容有較多爭議，故未列入建議立法院審議的優先法案；2022 年 5 月 5 日行政院會議又再通過第二個版本「國家原子能科技研究院設置條例草案」（以下簡稱國家原科院設置草案，國家原子能科技研究院，簡稱為國家原科院）。由此可見，核能研究所轉型為行政法人之事，政策上已定案，故有必要進一步研析建置核能研究行政法人之相關法制問題。

職是之故，本期（第二期）計畫之重點，乃聚焦於設置核能行政法人「國家原子能科技研究院」之相關法制準備，包括組織制度、業務運作、財務、人力和監督評鑑等事項方面，主要檢視和評析前述行政院 2022 年 5 月公佈的「國家原子能科技研究院設置條例」草案內容之適切性；同時亦將參酌現行國內行政法人設置之法律規定，以及國外行政法人之學理與實務經驗，提出完備原子能科技研究院設置之具體可行的法制建議與法案配套措施。

II. 主要內容

行政機關或機構進行組織改組成為行政法人，其目的在於減輕中央政府負擔與提高營運績效。原則上，行政法人的內部結構，也符合公私混合營運模式的組織基本架構。其特殊性為行政法人是一種公法人，卻大幅援引私法人經營模式的公法組織。這類公私混合組織的成

立目的在於：（1）可以專注於單一政策目標、（2）專精化任務執行，有助於預定政策目的達成、（3）脫離傳統的科層式組織、（4）營運更具彈性與靈活、（5）更具獨立性較能抗拒政治、（6）不再受到國家或地方自治團體的土地管轄權的侷限、（7）克服權力分立限制、（8）外展於利害關係人、顧客與相關團體的參與，以及（9）得利於私企業的營運方式。本研究從國外學理與實務經驗探討行政法人之組織、模式與治理架構之設計，提出當欲規劃一個設置完善的核能研究法人時應思考的重點。

從組織法觀點，我國的行政法人係為「公法營造物法人」，屬於人財共生組織，應該促使其運作與監督跟公法社團法人或公法財團法人有所不同。簡言之，政府創設或傾向創設行政法人或其他類似的或多或少具有自主權組織的目的，主要在於執行計畫或規劃，不過，這些自主權組織仍然要向相關部會負責，但是卻擁有脫離相關部會的實質的自主權 。此外，這類自主權組織主要是不受到傳統「官僚組織」（bureaucracy）層層節制，並且具有獨立執行職務的權限，有學者又笑稱為「臂距組織」（arms-length organization）。

事實上，政府與行政法人關係中，績效契約做為管理的工具，與其說是在兩個獨立公法人之間，毋寧是在「監督者」（superior）與「被監督者」（subordinate）之間。因此，形塑行政法人制度時，最重要是處理行政法人之「自主權」與「績效監督」等兩個構面。從監督者與受監督者的對應結構，即是指一個或數個監督者單獨或共有監督一個或數個受監督者的概念中，可以區分監督部會與「臂距組織」的對應關係，組織學上可以區分成四種：一對一的專責模式、一對多的共管模式、多對一的控幅模式、多對多的網絡模式。這四類模式均曾出現在各國的行政法人制度中，而各有其優缺點。

早在 1999 年「經濟合作暨發展組織，以下簡稱為經合組織」（Organization for Economic Cooperation and Development，OECD）就倡儀「法人治理」的理念，不過，由於 corporate governance 中 corporate 常被翻成「公司的」，再加上理念與架構多提及投資方、市場、經營者、股東、員工，因此，確為較受到國內私企業所重視；然而，行政法人制度是公法人為本體，納入私企業的經營模式，學者即認為 corporate governance 應該改譯成「法人治理」較好 。經合組織建議公私組織採行法人治理架構的目的是，好的法人治理能協助建立信任、透明與負責的環境，必定會促進長期投資、財務穩定與事業整合，提供強勁成長與更包融的企業。2015 年「二十大工業國集團」（Group of Twenty, G20）與經合組織共同出版「法人治理原則」（G20/OECD Principles of Corporate Governance）白皮書，其中高度推崇合法環境與法人成功的重要相關性。

法人治理在方式上，希望法人可以透過諮詢政府或其他管制機關、他們的代表組織與利害關係，一起進行內部治理；（政府建立的）機制也要保護法人的權利。公共部門或機關應該要有效推行，以及有權去處罰法人不正當行為。同時，監督者、管制者與強制機關必須有權限（authority）、正直（integrity）與資源（resource）去滿足其專業與客觀措施上職責。法人的規制措施應該要即時、透明，以及充分說理。其次，股東、利害關係人可以接近法人運作的各種資訊，具有機會或代表去參與法人決策，並且不會因為表達不同意見，而遭到不公平，甚至是報復性的對待。最後，董事會與關鍵執行者---也就是俗稱的執行長---他們報酬與薪資可以受到合理的承諾，相對地，他們也要向股東負起誠信經營的責任，與第三方交易時，不該有任何出賣法人或股東利益的行為。

本研究著眼於行政法人仍為公部門的一員，凡具有此特性，組織目的須滿足公益，而非以營利為目的。因此，「公共性」的維持，可做為行政法人制度的主軸，個別行政法人運作時，援引私部門的經營方式，以達到靈活性，絕不可主客異位，使得行政法人逸脫公益要求，變成行政機關逃避政治責任、法律責任與行政責任的替罪羊。其次，監督部會與行政法人的連繫，必須要依賴切實的績效評鑑，而直接涉及到行政法人的建置目的達成，強化績效評鑑才是重中之重。最後，利用法人治理架構，去規範法人運作的基本原則，使行政法人制度不會成為組織法上行政機關假援引私部門經營模式，而真逃脫公部門必須遵守「法治國原則」（État de droit）的巧門。

回顧行政院原子能委員會核能研究所（以下簡稱核研所）的發展，其成立於民國 57 年，成立之初先是由原子能委員會（以下簡稱原能會）委託國防部中山科學研究院籌備處（即行政法人國家中山科學研究院之前身）代為運作，研究所地點選在桃園縣龍潭鄉境（現在的桃園市龍潭區）。民國 59 年 12 月 3 日總統令公布行政院原子能委員會組織條例施行。民國 62 年 10 月 18 日行政院函准行政院原子能委員會核能研究所組織條例；民國 68 年 7 月 27 日修正原子能委員會組織條例設核能研究所，又過了九年，民國 77 年 10 月 1 日，行政院核定核能研究所歸建於行政院原能會。民國 79 年 1 月 5 日總統公布行政院原子能委員會核能研究所組織條例。至此核能所的法制基礎成形，再無重大組織變動，直至當前討論是否要改制為行政法人。

核能研究所隸屬於原能會之下的三級行政機關，置有所長、副所長 2 名、主任秘書，另設有兩個委員會（所務發展諮議委員會和職業安全衛生委員會）、一個技術支援中心、十個功能組、一個專案計畫暨五個業務支援單位。依據 111 年度核能研究所單位預算書顯示，核研所之員工數合計有 897 人，其中包括職員 789 人，技工、工友、駕駛為 34 人，聘用 69 人，約僱 5 人；每年約有新台幣 17 億元經費。若加入勞務承攬人力（例如計畫人力）122 位，核研所則約有千人員工。

核能研究所位於桃園市龍潭區，作為我國核能與輻射應用的專責研究機構。首要任務包括我國核能安全、輻射防護、緊急應變、以及核後端相關技術研發。核研所配合政府政策發展核能科技，建立本土化核能技術，在核能電廠安全維護與營運績效提升方面扮演關鍵角色，協助國內核能系統運轉安全之協助，從設計、施工、測試、運作、維修、除役等事項；同時也負責處理我國醫、農、工業產生之低放射性廢棄物，以確保其安全維護。此外因應國內核後端的需求，核研所也積極發展核

設施除役及放射性廢棄物處理與處置等相關技術。

而後配合不同時期的國家政策發展，核研所不斷擴大其研發領域，有兩次重大研究領域變化。

第一次在民國 77 年，核研所以放射性科技基礎，跨足核醫診斷與治療藥物及高階醫材開發。如今核醫藥物研發及影像設備研究已有顯著成果，是國內唯一具規模且合法供應核醫藥物之政府機構，其產品品質追上國際標準，得以自產自銷。

第二次則是在民國 90 年後，核研所因應能源多元化國家政策，將研發領域擴增至與原子能科技應用相關之新能源與再生能源技術研發，成為從事原子能及其衍生科技之研發機構，並針對政府施政需求，配合相關部會規劃與推動國家重點施政計畫。

目前，為配合國家能源轉型政策，自民國 101 年起，核研所再由核能延伸及於新能源與再生能源技術研發，擴大技術投入於創能、儲能、節能及系統整合之發展，以配合政府推動潔淨能源之政策目標。

依照目前政府規劃，核能研究所將脫離既有行政機關的地位，轉型成為行政法人。一般認為此等作法將可使核研所擺脫傳統政府機關僵化人事、會計和採購法令制度，朝向更為專業、彈性且更有效率的方向發展。不過，觀察我國目前已設置營運的行政法人，至今未見有運作成功的案例。各行政法人其實都有不足為外人道的苦處，有的是與主管機關的互動關係不良、有的是經費不足或自籌收入不易、有的是仍維持公務機關的狀態、亦有受到各方外界壓力等。故行政法人之設置運作並非表面上的容易，實因影響行政法人營運績效的因素眾多，再說「行政法人法」本身規範要求亦非寬鬆，故行政法人作為新型行政組織型態，未見得會比行政機關更容易遂行政任務，達成行政目標，受到的法律拘束較少。

核研所轉型為行政法人最大的好處是解決核研所向來被詬病的「球員兼裁判」的問題。此因核研所既是監督機關原能會的下屬機關，卻又承接台電委託的研究案、技術服務案、檢測案等，恐有角色混淆、利益衝突之虞。其次，核研所轉型成為行政法人後，預期在人事任用上可更彈性靈活，還可從事更多元的技術研究發展、更自由地進行技術轉移和與產業界連結，大幅突破目前身為行政機關所受種種法令的限制。

不過，仍有不少專家學者們擔心核研所改制行政人後，恐將面臨經費不足、人才流失和無法維持營運獨立自主的問題。而且核研所現在作為原子能委員會重要技術支援單位的角色關係，亦將隨著改制為行政法人後發生質變，亦即從上下隸屬關係，轉變為董事會合議之監督關係，核安會與國家原科院彼此的緊密程度恐不如前。此外，核研所改制為行政法人「原子能科技研究院」後，該由哪一個部會作為適格的監督較為適當，是核安會、經濟部、抑或國科會，亦引發不少討論。總之，核研所轉型成為行政法人之事，須思考與克服的問題不少，猶待慎密規劃、完備相關法制建置，以利核能行政法人之發展。

III. 結果與討論

本研究認為，未來國家原科院四大類業務，包括：原子能研究、安全與應用；輻射防護、放射性應用與核設施除役；再生能源研究與應用；相關技術應用與服務專業性極高，除了核研所有人力與設備可以研究外，我國目前尚無其他行政機關、機構有替代的可能性。為延續我國在民用核能應用研究的優勢與豐富成果，靈活組織與業務推廣，再加上核能研究的專業性極高，世界上核能產業規模隨著全球氣候變遷治理越來越重大，培養核能專才不但可供我國使用，也可以組成專業團隊前往其他國家，爭取合作或委託機會。因此，援用本研究建議的行政法人成立標準：「執行特定政策」與「具有專業需求或須強化成本效益及經營效能者」。核研所改制為行政法人確為合理的組織選擇。

不過，進一步從市場競爭的角度下，四大類業務全由單一行政法人承接，恐會造成國家原科院業務壓力過大，應該適度分散於其他行政機關或機構較為合適。例如，行政院與經濟部亦推動設置「行政法人放射性廢棄物管理中心」，本研究認為，至少將放射性廢棄物處置與管理的研發業務，從國家原科院切割出來給放射性廢棄物管理中心來接手。一方面符合該管理中心的成立宗旨為，針對放射性廢棄物的管制與處置，另方面也讓兩個行政法人彼此可以合理的競爭關係，並且減少現在常常批評行政院原能會對核研所監督是「球員兼裁判」。

綜觀現存 7 個行政法人，不但沒有出現「首長制」的行政法人，甚至連決策合議組織的名稱，均稱為「董事會」。本研究認為，沒有首長制行政法人的存在，或許與我國的政府捐助財團法人長期習慣於合議制的慣行有關，既然如此，實在可以修法刪除此特例。至於董事會的名稱較適於商業活動或市場競爭取向的組織，相反地，科研、專探與公益性組織，稱之為「理事會」，可以從名稱就得知其組織定位與決策取向。

行政法人制度的初衷在於，脫離傳統官僚體制中上下階層分明，「指揮監督機制」（control and command）不利組織創新與靈活。對照 7 個現存行政法人的董事會成員規定，監督機關過度介入董事會的組成，並且未設有勞工董事制度，恐不利於落實法人治理的概念，因之，建議未來國家原科院的董事會朝放寬法人自主權的設計，亦引進勞工董事。國家原科院的執行長名稱改為院長，依本院規章、董事會之決議及董事長之授權，執行本院業務，並督導所屬人員。問題在於如同其他行政法人一樣，均未特別明文規定院長的職掌，然而，由於董事會的政府機關代表過半數，可以想見未來院長執行業務與內部管理時，非常大的程度上，受制於政府機關。本研究建議須明確劃分董事會與院長的權限，以利將來營運。

同時，勞工董事是院內員工推選之，相關部會指定的法定董、監事，其他董、監事與院長，均採公開甄選程序，不限於本國人，以擴大董監事的專業能力與國際視野。

未來國家原科院成立後，收入來源的規定均是採蕭規曹隨的作法，最大的不同在於，設置條例草案第 4 條

第 2 項詳細指定政府核撥捐（補）助經費的名目，包括有：包括人事費、相關主管機關交辦本院事項、本院各核設施之除役、清理及復育、放射性廢棄物之處理、貯存及處置、建築物與固定設備等重要設施維持及其他原子能科技研究發展所需經費。以此直接法律指定，確實有助於國家原科院的財務穩定，但是恐難提升自籌收入財源比例，易遭審計部門臧否。本研究建議應該鼓勵未來國家原科院打造服務協助團隊，進軍國際原子能產業，透過參與競標國外核能設施的興建或除役，收取豐富收入。

國家原科院的財務也連動到董事、監事與院長的利益衝突迴避制度，本研究草擬之國家原子能科技研究院設置條例第十五條第一項明定：「董事、監事、院長或與該等職務相當之人及其關係人之利益迴避事項，依公職人員利益衝突迴避法之規定辦理。」此處所稱利益，參考公職人員利益衝突迴避法」第 4 條，包括財產上利益及非財產上利益。詳言之，所稱財產上利益如下：一、動產、不動產。二、現金、存款、外幣、有價證券。三、債權或其他財產上權利。四、其他具有經濟價值或得以金錢交易取得之利益；相反地，所稱非財產上利益，指有利董事、監事、院長或其關係人於國家原科院員工之進用、勞動派遣、陞遷、調動、考核及其他相類似之人事措施。所謂的相類似之人事措施，參照法務部 92 年 9 月 22 日法政字第 0920039451 號函釋之意旨，係指除列舉「任用、陞遷、調動」等人事措施外，因其他有利公職人員或其關係人之相類人事措施難以一一列舉，為免疏漏，爰另以「其他人事措施」作概括式規定。故舉凡有利公職人員或其關係人之任用、陞遷、調動等相類之人事行政作為，均屬該條所稱之「其他人事措施」，實際適用宜依具體個案斟酌認定之。

轉型為國家原科院後，其原本員工具公務員身分者，依司法院大法官釋字第 575 號解釋文明示：「憲法第十八條規定人民有服公職之權利，旨在保障人民有依法令從事於公務，暨由此衍生享有之身分保障、俸給與退休金等權利。機關因改組、解散或改隸致對公務人員之憲法所保障服公職之權利產生重大不利影響，應設適度過渡條款或其他緩和措施，以資兼顧。」考其釋字本旨在於，憲法賦予人民服公職權，立法者要給予尊重。然而，公務人員不能期待行政機關永遠都不會出現改組、解散或改隸的情況。換言之，限制立法者永遠不對行政機關進行組織改造不符合立法形成空間。不過，既然機關（構）組改會造成人民服公職權的重大不利影響，為適度保護公務人員的信賴利益，應設適度過渡條款或其他緩和措施，給予平衡。

針對行政法人董監事的合法性監督後，本研究認為行政法人制度要成功，其最重要的關鍵在於，監督機關或主管機關有沒有切實進行績效評鑑。因為比較原機關（構）與改制後的行政法人的績效，才可以證明行政法人確實能達成靈活執行業務，改進效率與效能的目的。然而，這麼涉及到法人制度成敗的評鑑機制設計，行政法人法竟只有兩個通則性條文，即行政法人法第 16 條、第 17 條。具體評鑑機制的設計，則是交由各行政法人的監督機關另行訂定辦法。評鑑的內容應該包括：國家原科院年度執行成果之考核、國家原科院業務績效及目標達成率之評量、國家原科院年度自籌款比率達成率、國家原科院年度人員流動率、國家原科院經費核撥之建議，以及其他有關事項。

評鑑之方式與程序，首先，國家原科院應依發展目標及計畫、年度業務計畫，擬具業務績效指標，提經董事會通過後，報送監督機關核安會，交由評鑑小組審議。國家原科院得邀集核安會及專家學者召開會議，以研提前項業務績效指標。業務績效指標應以促進核能安全、輻射防護、原子能和平用途，以及能源相關產業需求之科技發展與人才培養等面向，並依不同性質設定質化之衡量標準及量化目標值。其次，評鑑前，核安會得邀集參與評鑑之機關代表、學者專家及社會公正人士召開會議，說明受評之國家原科院業務屬性、評鑑重點、方式、程序及其他應注意事項；評鑑小組會議由召集人召集之，並擔任主席。召集人請假或因故未能行使職權時，得指定委員一人代理；未指定或不能指定者，由委員互推一人代理。評鑑小組會議應有過半數委員之出席，其決議應有出席委員三分之二之同意。應出席或已出席委員人數之計算，不包括應迴避或已迴避之委員。評鑑委員應親自出席評鑑小組會議，不得委託他人代理出席。

評鑑會為辦理績效評鑑，以書面為原則，必要時，得依評鑑項目不定期實地訪視，並擬具訪視報告，提供評鑑會參考。原科會應提供評鑑所需資料，並配合相關評鑑作業；實地訪視，應經評鑑會會議決議，並應有評鑑委員三人以上出席。

最後，核安會應於次年八月三十一日前提交績效評鑑分析報告，送立法院備查；並得作為核安會編列年度預算補助之參據，提供國家原科院作為改善之依據。同時，核安會得要求國家原科院就評鑑結果所提尚待改善部分加強辦理，應給予合適時期，以確保其所負責之公共事務能適切實施。

IV. 結論

本研究先從行政法人在組織面與治理面出發，闡述一個健全的行政法人制度或架構的軟硬體設計，強調組織基本架構必須要搭現代的法人治理原則，才可能使行政法人運作有好的開始。

本研究認為行政法人制度的最大優點是，它讓立法者可以有更多的組織法上選擇，不再是「絕對公私二元區分」，然而，最大的缺點在於，不管是立法者或監督機關，均是將行政法人視同原本未改制的官僚式行政機關，不願意給予其更多的自主權。次大缺點則是，國內行政法人自籌財源收入的能力，普遍欠佳，去年甚至有 6 個行政法人是大幅依靠政府核撥捐（補）助經費，才有正常經營的動力。雖然不是說行政法人一定要 100% 的靠自己賺錢生活，但是動輒超過 80%經費是政府出錢，實難脫出「拿人手短，吃人嘴軟」的譏諷。

當前政府在處理原子能委員會暨所屬機關之組織改造議題時，政策上決定將核能研究所轉型為行政法人，分別於民國 107 年先提出「國家龍潭原子能科技研究院設置條例草案」，而後於 111 年酌修前案名稱和條文再度提出「國家原子能科技研究院設置條例草案」。此項法案體例與條文內容，其實與「行政法人法」和其他國

內行政法人之設置條例內容大同小異，並未從立法上突顯出原子能科技研究院設置和相關權利義務之特色。

職是之故，本研究認為，行政院原能會在思考未來國家原科院時，要跳脫原本的窠臼，一方面要從繼續我國原子能科技發展與應用，另方面又能扶持國家原科院漸漸走向財務自主的方向去進行規劃。不要太過度掌握國家原科院未來的經營決策單元，而該扮演後端監督者的角色，著重績效評鑑機制即可；且該勇於建立「共管模式」的互動模式。

最後，本研究就行政院通過之「國家原子能科技研究院設置條例草案」提出修正對案（詳請參閱本研究完整報告），其中重要建議修正項目包括立法目的、監督機關、經費來源、員工董事、增定防範利益衝突條款、增訂罰則等事項；另亦提出一部子法草案和二部子法草案修正建議，分別是「國家原子能科技研究院董事長董事及監事遴聘解聘辦法草案」、「國家原子能科技研究院董事監事暨院長利益迴避及處置準則草案暨本計畫修正建議」、「國家原子能科技研究院績效評鑑辦法草案暨本計畫修正建議」，期完備「國家原子能科技研究院設置條例草案」之內涵，供主管機關與立法者參考之。

參考文獻

[1] 王澤鑑（2013），債法原理，增訂 3 版，作者自刊。

[2] 李天申（2020），臺灣行政法人制度推動歷程的歷史制度分析，政治科學論叢，第 86 期，頁 151-190。

[3] 朱宗慶（2009），行政法人運作的再思考，研考雙月刊，271 期，頁 22-31。

[4] 杜昱潔（2016），中央政府推動行政法人實施成效，人事月刊，347 期，頁 41-47。

[5] 吳定（2003），公共政策辭典，2 版，五南圖書出版股份有限公司。

[6] 吳庚（2020）、盛子龍，行政法之理論與實用，增訂 16 版，三民書局。

[7] 紀和均（2020），臺灣獨立機關與行政法人定位與職權之法制設計，銘傳大學法學論叢，第 32 期，頁 69-129。

[8] 紀和均（2020），法國地方型行政法人與地方財政補助，中國地方自治，73 卷 12 期，頁 3-18。

[9] 陳敏（2019），行政法總論，10 版，作者自刊。

[10] 彭錦鵬（2000），英國政署之組織設計與運作成效，歐美研究，第 30 卷第 3 期，頁 89-141。

[11] 董保城（2017），行政法講義，一版，作者自刊。

[12] 蔡茂寅（2002），機關法人化實務問題之探討－以「行政法人建制原則」之檢討為中心。

[13] 審計部（2022），中華民國 110 年度中央政府總決算審核報告。

[14] 劉坤億（2008），效率、課責、政治與法人治理：建置行政法人制度的四項思考，考銓季刊，53 期，頁 50-62。

[15] Boyte, H.C. and M.N. Kari（1996）, *Building America: The Democratic Promise of Public Work*, Temple University Press, Philadelphia.

[16] Bouckaert, G. and G.B.Peters（2004）, What is available and what is missing in the study of quangos?, in *Unbundled Government* edited by C. Pollitt and C. Talbot, Routledge, NY.

[17] Frederiksson, H.G.2004）, Shall we quango ,American society for public administration,27（1）, pp.2-7.

[18] Graham, A. and A. Roberts（2004）, The Agency concept in North America, in *Unbundled Government* edited by C. Pollitt and C. Talbot, Routledge, NY.

[19] James, O. and S. van Thiel（2013）, Structural Devolution to Agencies, in *The Ashagte Research comparion to New Public managemen*t, edited by T. Christensen and P. Lægreid, Ashgate, Surey.

[20] Mintzberg, H.（1979）, *The Structure of Organization*, Pearson, Baltimore. Talbot, C.（2004）, The Agency idea, in *Unbundled Government* edited by C. Pollitt and C. Talbot, Routledge, NY.

[21] Walker,A.H. and J. W.Lorsch（1996）, Organizational Choice: Product versus Function, in *Classics of Organization Theory* edited by J.M. Shafritz and J.S. Ott, 4 edition, Harcourt Brace& Company ,Orlando.

射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究(二)
Study of mutation breeding of orchid by radiation mutagenesis II

計畫編號：110-NU-E-005-001-NU
計畫主持人：張正
e-mail：chenchang@dragon.nchu.edu.tw
計畫共同主持人：杜定賢
計畫參與人員：莊淳雅、林軒靖
執行單位：中興大學園藝學系

摘要

110 年度延續 109 計畫成果，進行誘變株中階選拔開花性狀調查，進行組織培養苗單一劑量照射等二個延續試驗。新進行二個試驗分為以文心蘭類原球體照射劑量試驗及單一劑量大量照射文心蘭類原球誘變試驗，結果分別敘述如下。109 年度計畫的誘變株經中階選拔，有三株正向選出誘變株，編號 M104 誘變株假球莖數多株型緊湊且生長勢強適合作為盆花生產。M114 假球莖外型特殊顏色為深綠色具光澤外觀飽滿。M115 葉片產生斑葉新生側芽葉片斑葉性狀穩定。從誘變庫中調查三株開花株之開花性狀，編號 M22 小花朵數量最多。大量組織培養苗以 50 Gyγ 射線照射後第五個月，存活率接近 50%。照射後第六個月選拔出 30 株準誘變株，未來進行中階及高階選拔正向變異株。110 年度新增二個試驗，分別為利用迴歸方程式計算分析，以文心蘭類原球體半數生長劑量(RG50)值為 57.2Gy。使用 60 Gy 大量照射直徑 0.5 cm 之類原球體，照射後 6 個月類原球體有生長受阻，株高達 3 cm 以上小苗繼代至培養基中，未來將持續觀察照射株外觀形態變化進行誘變株篩選。

關鍵詞：文心蘭、誘變種原庫、選種

Abstract

There were two continuation experiments were conducted, including the investigation of the flowering characteristics of the mutant strains, and the single-dose irradiation of tissue culture seedlings. Two new experiments were conducted: the irradiation dose test with oncidium protocorm like bodies, and the mutagenesis test of protocorm like bodies irradiated with a single dose. The results are described below.

There were three mutant strains selected in the positive direction. The numbered M104 mutant strain has a large number of pseudobulbs and is compact and has a strong growth potential, which is suitable for potted flower production. The special color of M114 pseudobulb is dark green with luster and full appearance. M115 leaves produce variegated new lateral buds and leaves have stable variegated characteristics. The flowering characters of three flowering plants were investigated from the mutagenesis library, and the number M22 had the largest number of small flowers. Five months after a large number of tissue culture seedlings were irradiated with 50 Gy γ-rays, the survival rate was close to 50%. In the sixth month after irradiation, 30 mutagenic strains were selected, and in the future, middle-level and high-level selection of positive mutants will be carried out.

Two new experiments were added, which were calculated and analyzed using regression equations, and the half growth dose (RG50) of protocorm like bodies was 57.2 Gy. Use 60 Gy to irradiate a large amount of protocorm like bodies with a diameter of 0.5 cm. The growth of the protocorm like bodies is retardant 6 months after irradiation, and the seedlings with a height of more than 3 cm are subcultured to the medium. In the future, the appearance and morphology of the irradiated plants will be continuously observed and selection.

Keywords: Oncidium orchid, mutagenesis library, selection

I. 前言

本計畫以自行研發的蘭花品種及重要待改良的商業品種為標的，與原子能委員會核能研究所進行技術合作，透過放射射誘變的技術，在現有成熟的蘭花育種技術，與自行研發的品種基礎上，加速蘭花品種育成效率，開創具新穎性的蘭花品種，提升臺灣的蘭花育種技術，及蘭花產業的全球競爭能力。

II. 主要內容

本年度進行以下六項試驗：1.興大福氣文心蘭放射線誘變；2.檸檬綠文心蘭組織培養苗放射線誘變；3.檸檬綠文心蘭誘變株中階選拔；4.測定檸檬綠文心蘭類原球體照射伽瑪射線之半數生長劑量；5.檸檬綠文心蘭類原球體經伽瑪射線大量照射；6.選拔誘變株之開花調查

III. 結果與討論

1.興大福氣文心蘭放射線誘變

興大福氣文心蘭溫室栽培苗經劑量 80 Gy 照射後 2 周，單芽之葉片出現黃化枯萎現象；照射後第 4 周，五種處理之存活率皆高於 94%；照射後第 20 周，經高劑量照射處理之劑量總和 80 Gy、100 Gy 及 110 Gy 之存活率下降最多，降低至 2%、8%及 0%，可得知經照射後之單芽生長狀況不理想，照射組皆因為頂端枯萎而造成整株死亡，因此推測可能發生原因為單芽生長勢弱且所照射之劑量過高。興大福氣文心蘭溫室栽培苗經 20 Gy 照射後再次照射 80 Gy，於兩周後發現已抽花梗植株開花，相較對照組之植株其花梗長度較短且小花朵數少，唇瓣參雜紅褐色斑點。

2.檸檬綠文心蘭組織培養苗放射線誘變

2-1γ 射線照射試驗

檸檬綠文心蘭經γ射線照射後一個月，其存活率皆高於 90%以上，沒有明顯降低；照射後第二個月，處理劑量 50 Gy 之存活率逐漸下降，對照組則維持在 91.7%；於照射後第五個月，處理劑量 50 Gy 則降至 55.1%，存活率接近正常植株之一半數量，可得知所篩選之劑量接近半數致死劑量。

於照射後第二個月觀察假球莖生長狀況，對照組假球莖生成率為 40.3%，假球莖充實飽滿，平均高度為 2.1±0.1 公分；照射組生成率為 22.0%，假球莖多半呈徒長細瘦狀且組織不充實，平均高度為 1.9±0.0 公分。照射後第四個月，對照組假球莖生成率提高至 72.2%，且有頂芽活化之情形發生；照射組則為 22.2%，假球莖平均高度提高至 2.0±0.0 公分。另外發現文心蘭經照射後會出現假球莖畸形、葉片基部黃色斑駁及頂芽枯萎等現象，其中假球莖畸形率於照射後兩個月達 11.2%，包含中間塌扁、捲曲等。

檸檬綠文心蘭瓶苗經劑量 50 Gy 之γ射線照射後兩個月，發現可促進側芽之生成，其側芽生成率達 39.8%，而未照射之對照組則為 15.3%；於照射後四個月，照射組側芽生成率提高至 52.3%，未照射之對照組則提高至 40.3%。另外，也發現經劑量 50 Gy 之γ射線照射後，單株平均側芽數也較未經照射之植株高。

2-2 變異株選拔

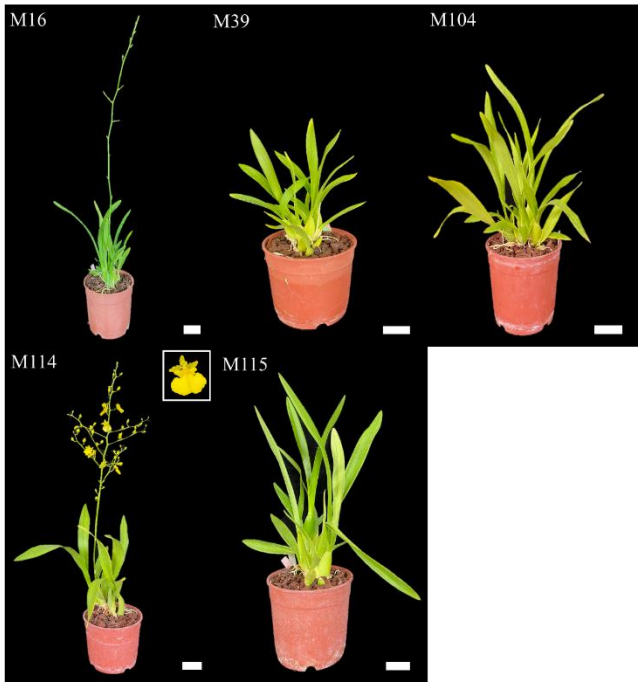
檸檬綠文心蘭瓶苗經劑量 50 Gy 照射後第三個月，觀察到一株母株出現頂芽活化之情形，在母株的假球莖上長出 2 個新的假球莖；另外發現一株母株及側芽新葉有葉緣黏合不展開之情形。於照射後第六個月，對照組有 8 株母株出現頂芽活化，照射組則有 3 株；經劑量 50 Gy 照射之植株，觀察到新葉葉緣黏合不展開、葉片分裂帶有摺痕、葉色改變等情況發生，可得知經γ射線照射後可以使葉片造成外觀性狀之改變。將外觀形態有改變之植株進行低階選拔以建立誘變庫，目前已選拔出 30 株。

表一、檸檬綠文心蘭誘變蘭株選拔之原因

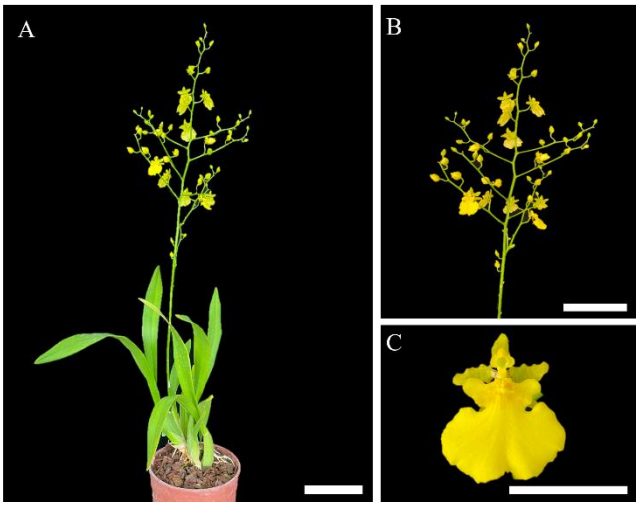
編號	γ射線	照射日期	初選日期/原因	中階選拔日期/原因
M16	10 Gy	2019.08.08	2020.04 1 芽長 2 枝系	2021.05.04 具早花特性
M39	20 Gy	2019.08.08	2020.04 假球莖有角度	2021.05.04 具早花特性
M104	65 Gy	2019.10.30	2020.04 新生枝系數多	2021.05.04 株型緊生長勢強假球莖數多
M114	50 Gy	2019.09.09	2020.06 有 1 斑葉	2021.05.04 假球莖飽滿，顏色深綠光澤
M115	40 Gy	2019.09.09	2020.06 枝系皆有斑葉產生	2021.05.04 新生側芽葉片遺傳斑葉

3.109 年度計劃試驗之檸檬綠文心蘭誘變株選拔

檸檬綠文心蘭瓶苗經不同劑量之γ射線照射後，發現以低劑量 20Gy 以下照射較容易引起早花特性，如 M39 開花日期為 9 月 7 日，M16 則為 12 月 30 日。中高劑量 40Gy 以上照射之植株外觀易產生變異，如 M104 經 65 Gy 照射，使假球莖數多，株型緊湊且生長勢強，預測未來適合作為盆花生產；M114 經 50 Gy 照射，使假球莖外型特殊，顏色為深綠色具光澤，外觀飽滿；M115 經 40Gy 照射，於初選時照射之葉片產生斑葉，再次選拔時，其新生側芽之葉片遺傳斑葉性狀。(表一、圖一、圖二)



圖一、檸檬綠文心蘭中階選拔之誘變株。M16(10 Gy)，具早花特性，於 2022 年之七月中旬抽花莖；M39(20 Gy)，具早花特性；M104(65 Gy)，株型緊湊且生長勢強，假球莖數多，適合作為盆花；M114(50 Gy)，假球莖飽滿，顏色深綠具有光澤，於 2022 年七月上旬抽第一支花莖，八月中旬開第一朵花；M115(40 Gy)，照射之葉片維持斑葉，為條狀斑，且新生側芽之葉片遺傳斑葉性狀。(Bar=5cm)



圖二、檸檬綠文心蘭高階選拔誘變株 M114 的開花性狀

A.開花植株; B.花序性狀; C.單花性狀

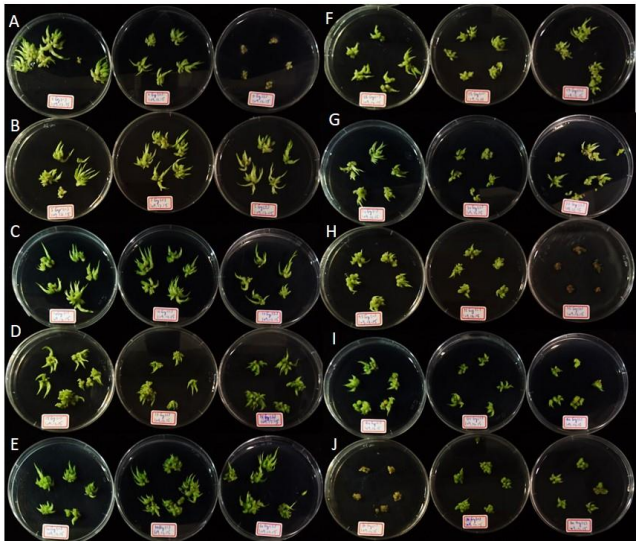
表二、檸檬綠文心蘭類原球體進行γ射線照射再生率

劑量 (Gy)	PLBs 團數	出現真葉 PLBs 團數	再生率 (%)
0	10	10	100
5	15	14	93.3
10	15	14	93.3
15	15	11	73.3
20	15	11	73.3
25	15	7	46.7
30	15	8	53.3
35	10	5	50.0
40	15	3	20.0
80	10	0	0.0

4.測定檸檬綠文心蘭類原球體照射伽瑪射線之半數生長劑量

4-1.γ 射線照射試驗

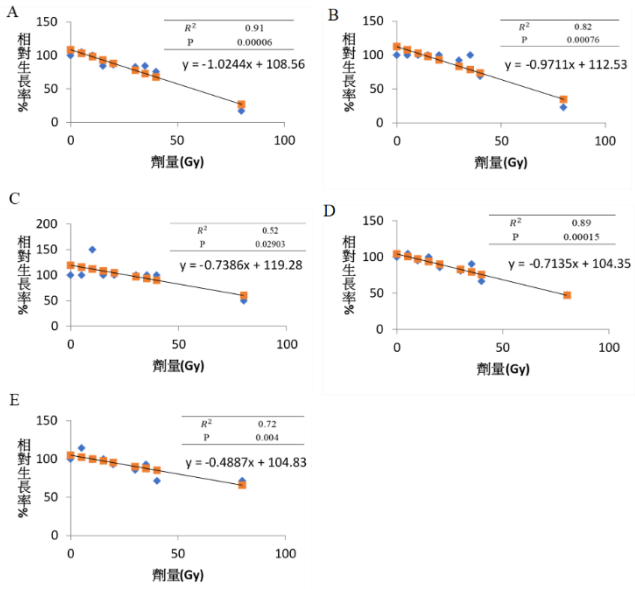
檸檬綠文心蘭類原球體經不同劑量之照射處理四週後，並類原球體團粒死亡的現象，0 Gy、35 Gy、80 Gy 這三個劑量中一重複類原球體團粒有褐化情況產生(圖三)。觀察類原球體團粒出現真葉計算文心蘭類原球體再生率，再生率以劑量 10 Gy 以下達 93.3%，30 Gy 以上再生率從 53.3%持續降低，在劑量 80 Gy 降至 0(表二)。



圖三、檸檬綠 PLBs 團粒在不同照射劑量照射一個月之後的情形。(A)0 Gy、 (B)5 Gy、(C)10 Gy、(D)15 Gy、(E)20 Gy、(F)25 Gy、(G)30 Gy、(H)35 Gy 、(I)40 Gy、(J)80 Gy，由左至右為重複一、二、三

4-2.半數生長率劑量測定(Growth Rate 50)

利用迴歸分析(Regression Analysis)計算檸檬綠文心蘭類原球體葉數、最長之葉長、最寬之葉寬、株高、株寬之第 0 周至第 20 周的相對生長率與劑量之預測迴歸方程式，皆呈現隨著劑量增加而減少的趨勢(圖四)，並比較方程式之相關係數平方值(R2)與顯著值(P)，葉數之相關係數 R 的平方值為 0.91，較葉寬、株寬、葉長、株高相關係數 R 的平方值 0.82、0.52、0.89、0.72 接近 1，且其顯著值 P 為 0.00006，表示葉數之相對生長率與劑量較相關。若利用葉數所分析出之預測迴歸方程式 y = -1.0244x + 108.56 計算半數生長劑量(RG50)，其值為 57.2Gy。



圖四、檸檬綠文心蘭類原球體經γ射線照射其母株營養性狀相對生長率與處理劑量之迴歸分析圖 (A)葉數、(B)葉長、(C)葉寬、(D)株高、(E)株寬。

5.檸檬綠文心蘭類原球體經伽瑪射線大量照射

5-1γ 射線照射試驗

使用所測定出之半數生長劑量取整數為 60 Gy 大量照射直徑 0.5 cm 之類原球體。照射後的類原球體再生率隨著培養時間的拉長逐漸提高，於第六周達 85.5%，而未照射之對照組於四周後已達最大值 100% 。照射劑量 60Gy 之類原球體於照射後發現有褐化的情況發生，第六周褐化率為 0.7% ；照射後兩周，發現照射組與對照組生長狀況沒有太大差別；照射後四周可發現對照組之再生小苗數及株高皆高於照射組，對照組類原球體成功再生 7 個植株，而照射組僅再生四個植株且生長較緩慢；於照射後六周可發現經γ射線照射之類原球體有白化的情況發生且難以再生成小苗。

5-2.變異株之選拔

目前經γ射線照射後為接近第 6 個月，經劑量 60Gy 大量照射之類原球體有生長受阻之情形發生，部分類原球體生長緩慢且無法長至正常植株之高度。已將培養過程中株高達 3 cm 以上的再生小苗繼代至含 PA3 培養基中，並持續觀察外觀形態之變化。

6.選拔誘變株之開花調查

從誘變庫中調查三株開花株之開花性狀，包含 M39、M22、M16，經 20Gy 照射之 M22 及經 10Gy 照射之 M16 較未經照射之植株晚開花，其中 M22 小花朵數量最多。

IV. 結論

本年度研究計畫，著重在建立蘭花放射線誘變育種方法學的劑量測量與蘭花照射後的反應，並建立篩選誘變株建立庫，本計畫的誘變株有一株具成為盆花品種的潛力，二株具成為切花品種之潛力。

參考文獻

[1] 傅仰人、楊雅淨、鄭隨和. 2009. 聖誕紅新品種桃園核研 1 號及 2 號之育成. 桃園區農業改良場研究彙報 64: 27-37.

[2] Ahloowalia, B. S. and M. Maluszynski. 2001. Induced mutations - A new paradigm in plant breeding. Euphytica 118: 167-173.

[3] Datta, S. K. 2012. Success Story of Induced Mutagenesis for Development of New Ornamental Varieties, p. 15-26. In: Kozgar, M.I. and S. Khan(Eds.). Induced Mutagenesis in Crop Plants. Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability Volume 6 (Special Issue 1). Global Science Books, UK.

[4] Datta, S.K., J.A.T. Silva. 2006. Role of Induced Mutagenesis for Development of New Flower Colour and Type in Ornamentals, p.640-645. In:.Teixeira da Silva, J. A(ed.). Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology Volume I. Global Science Books, UK.

[5] Ibrahim, R., Z. Ahmad, S. Salleh, A. A. Hassan, and S. Ariffin. 2018. Mutation Breeding in Ornamentals, p. 175-209. In: Huylenbroeck, J. V(ed.). Ornamental Crops. Springer Nature,

[6] Okamura, M., A. Tanaka, M. Momose, N. Umemoto, J. A. Teixeira da Silva, and T. Toguri. 2006. Advances of Mutagenesis in Flowers and their Industrialization, p. 619-628. In:.Teixeira da Silva, J. A(ed.). Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology Volume I. Global Science Books, UK.

[7] Yamaguchi, H. 2018. Mutation breeding of ornamental plants using ion beams. Breeding Science 68:71-78.

輻射誘變選育耐逆境高蛋白質及機能性大豆與根圈益生菌與高加值機能性產品開發

Gamma-irradiation mutagenesis and breeding of stress-tolerant high-protein and functional soybeans and plant beneficial rhizobacteria and development of high-value functional products

計畫編號：110-NU-E-415-001-NU
計畫主持人：王紹鴻
e-mail：shwang@mail.ncyu.edu.tw
計畫共同主持人：朱紀實、謝佳雯、蔡文錫、林志鴻、羅至佑
計畫參與人員：張心怡、楊修銘、劉冠妤
執行單位：國立嘉義大學微生物免疫與生物藥學系

摘要

針對高異黃酮金珠大豆伽瑪輻射誘變品系篩選耐逆境特性，本計畫篩選出 9 株具開發價值誘變株系。同時自大豆根瘤分離出具有結瘤活性之 *Bradyrhizobium yuanmingense*，以及自根圈土壤分離出高多醣溶磷性 *Bacillus megaterium*，分別經伽瑪輻射進行誘變篩選高固氮活性根瘤菌與高 IAA 產量芽孢桿菌之誘變菌株。此外，轉譯本團隊研究成果，藉由胜肽分析、寡糖分析、血管張力素轉化活性抑制分析平台，獲得有效水解胜肽及降解寡糖的優良菌株組合。另透過分析大豆發芽過程及根瘤菌感染時異黃酮類成分變化，優化大豆產品附加價值，生產具健康促進活性之植物性蛋白質產品以供應素食市場需求。

關鍵詞：伽瑪輻射誘變、抗逆境選育大豆、根瘤菌誘變、根圈細菌誘變、發芽大豆異黃酮變化、微生物生物轉化發酵平台

Abstract

The selected γ-irradiation mutant lines of golden pearl soybean were screened further on adverse stresses, 9 high-isoflavone and high-yield mutant lines with strong waterlogging tolerance were selected. *Bradyrhizobium yuanmingense* isolate candidates with nodulation activity and *Bacillus megaterium* isolate candidates possessing high polysaccharides and phosphate-soluble activity were further mutated by γ-irradiation to screen for higher nitrogen-fixing activity and IAA production, respectively. A good lactic acid bacteria combination harboring high bioactive peptides and oligosaccharide degradation was further screened with the inhibition activity against conversion of angiotensin enzyme. The changes in isoflavones of soybeans during germination and bacterial infection were monitored to produce high bioavailable isoflavone soybean products. Thereafter, the plant-based protein products with health-promoting activities will be produced to meet the needs of the vegetarian market.

Keywords: γ-irradiation mutagenesis, Adverse tolerant soybean screening, Rhizobia mutants, Plant growth-promoting rhizobacteria mutants, Changes of isoflavones during germination, Microbial biotransformation platform.

I. 前言

本計畫係針對農糧作物抗逆境品系育種技術以及植物生長促進微生物進行伽瑪輻射誘變之應用育種，並針對 109 年篩選出高產量與高異黃酮之金珠大豆突變品系 [1]，選育具抗逆境特質株系。利用伽瑪輻射誘變技術達成染色體大範圍多元變異，誘變選育具有耐澇特色之大豆品系，並篩選出廣效性的固氮根瘤細菌與根圈共生菌候選芽孢桿菌，續以伽瑪輻射誘變技術篩選可提升植株生長活性之誘變微生物。結合優異乳酸菌誘變株篩選出優秀乳酸菌組合，開發具有健康促進生理活性之水解產物。同時分析大豆發芽或根瘤菌感染過程時異黃酮類成分變化，搭配乳酸菌發酵組合開發具有高生理活性產品。自上游抗逆境農糧作物、中游植株栽培根圈益生菌、與下游產品開發等階段，以伽瑪輻射誘變技術導入大豆產品生產研發，並已初步取得豐富成果。

II. 主要內容

延續 109 年度成果並進一步針對優秀且性狀穩定之金珠大豆突變品系，本計畫進一步篩選抗澇逆境活性。同時利用植株根瘤與根圈土壤分別篩選出具有植物生長促進活性微生物，並以伽瑪輻射誘變技術篩選可提升抗環境逆境農業微生物。

以前期計畫成果中高異黃酮且高產之大豆株系 S004-A1，田間種植經大雨等級強降雨淹水處理後，採收存活優良單株篩選優良株系，進一步應用微量萃取高效能液相層析平台，分析大豆異黃酮含量及水溶性蛋白含量以挑選新品系進一步育種及產品開發。同時，自栽種土壤分離之優良根瘤菌與根圈益生芽孢桿菌進行伽瑪照射誘變以改良菌株，篩選針對大豆具有植物生長促進活性以及促抗逆境活性之細菌。本計畫衍生具潛力產品之開發，針對優良大豆誘變品系利用具有經濟效益的生物轉化製程以生產包含異黃酮、GABA、大豆活性肽產品，建立具有可供相關產業利用之製程技術。同時，本計畫也利用有限資源進一步分析大豆發芽過程異黃酮類物質之變化，做為未來開發富有高功能活性分子發芽大豆產品之優化製程。

III. 結果與討論

以前計畫具高異黃酮且高產之大豆株系 S004-A1，經 200 Gy 照射後，於田間種植 1500 粒種子，經人工淹水處理 3 天後持續觀察，種植期間經歷強降雨並經歷 24 小時淹水。該批突變大豆於大雨後一個月收得 34 優良單株，經第二次種植每單株後代選取最優良 5 株形成株系，其中有 20 個株系的平均單株重>40 g，有 12 個株系的 100 粒種子重>20 g，而這其中有 9 個株系的單株重>40 g 且 100 粒種子重>20 g (**表一**)，此 9 個株系具有較佳生產表現潛力。

表一、S004-A1 突變第二次種植優良株系組合

Code (5 株)	總種子重	佰種子重,g	單株產量,g
MSB004-32A	260.7	21.55	52.14
MSB004-2A	248.7	20.06	49.74
MSB004-13A	233.2	20.98	46.64
MSB004-4A	221.5	20.19	44.30
MSB004-17A	220.3	20.78	44.06
MSB004-15A	212.1	20.16	42.42
MSB004-16A	204.9	20.11	40.98
MSB004-20A	203.8	20.86	40.76
MSB004-33A	201.8	20.71	40.36
S004-A1	136.6	18.38	27.32

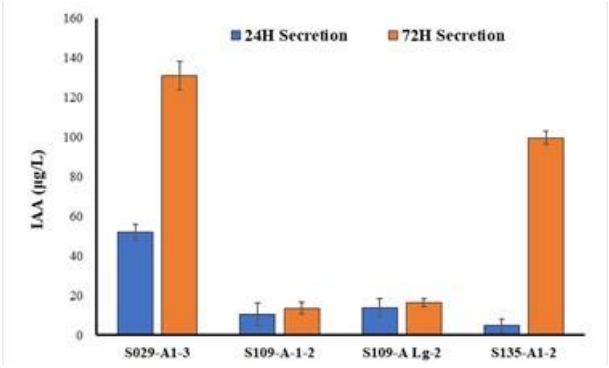
自大豆根瘤分離並經柯霍氏法則檢測之 4 株根瘤細菌分離株，不論是以 16S rRNA、*nodC*、*nifH* 等部分基因序列進行親緣分析，所有親緣樹皆顯示此 4 株根瘤細菌分離株皆與參考菌株 *Bradyrhizobium yuanmingense* 具高度親緣性。固氮根瘤細菌與共生植物經常存在高度的寄主專一性，而 *B. yuanmingense* 可與多種豆科植物共生，產生固氮根瘤，具有作為開發生物性肥料潛力。以分離株 SB006-1-2 的結瘤數量評估大豆植物栽培介質對根瘤細菌結瘤能力之影響，結果顯示以泥炭土與蛭石等比例混合處理組最高。初步評估結果顯示泥炭土與蛭石等比例混合作為大豆植物之栽培介質，對根瘤細菌分離株 *B. yuanmingense* SB006-1-2 有較佳的結瘤能力 (**表二**)，將以此作為未來研究的接種平台，分析伽瑪輻射誘變候選菌株之結瘤活性。已獲得 6 株 *B. yuanmingense* 的伽瑪輻射誘變菌株 SB006-1-2^{m1}~SB006-1-2^{m4}、CyPM1^{m1} 及 CyPM1^{m2}。

表二、不同介質對根瘤細菌分離株 *B. yuanmingense* SB006-1-2 接種金珠大豆 4 週後結瘤之影響

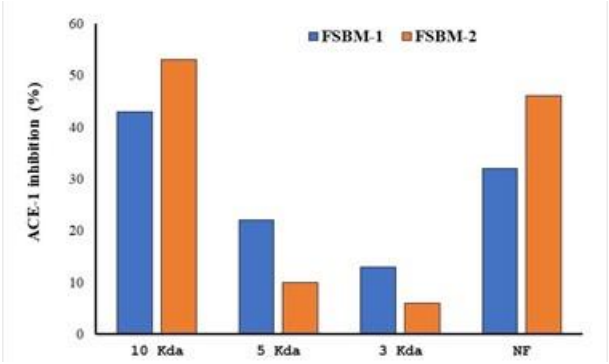
Medium[1]	Nodules	Effective nodules	Nodules fresh weight (g)
PV	23.7 ^{a}	18.7 ^{a}	0.08 ^{a}
PS	15.7 ^{a}	8.3 ^{ab}	0.04 ^{a}
V	14.7 ^{a}	8.7 ^{ab}	0.03 ^{a}
P	14.3 ^{a}	4.0 ^{b}	0.05 ^{a}
PSV	14.0 ^{a}	9.0 ^{ab}	0.06 ^{a}
S	13.0 ^{a}	8.0 ^{ab}	0.06 ^{a}
SV	12.0 ^{a}	7.3 ^{ab}	0.04 ^{a}

[1] P (peat moss), V (vermiculite), and S (soil); Means within each column followed by the same letter are not significantly different at $p < 0.05$ by Fisher's protected LSD test.

收集 9 批大豆栽種之根圈土壤懸浮於 LB 培養液後以高溫誘導孢子形成進行培養篩選，挑選平盤上大小、顏色、形狀等外觀不同的菌落進行畫線分離培養，再透過 Bacillus *ChromoSelect* agar (Sigma) 培養觀察及利用 5%綿羊血盤 Blood Agar Plate (TSA with 5% Sheep Blood) 排除可能致病之 *B. cereus* 菌種與具有溶血活性菌株，再以 Pikovskaya's agar 篩選具有溶磷活性菌株，並以菌落拉絲測試選拔產胞外多醣 (Extracellular Polysaccharide, EPS) 之 4 株候選株 S109-A-Lg-2、S109-A-1-2、S029-A1-3、S135-A1-2 並 PCR 增幅 16S rRNA 序列分析鑑定菌種，與資料庫序列比對後，4 隻候選菌株與 *Bacillus megaterium* 或 *Bacillus aryabhattai* 具有高度親緣性。4 株候選菌株之生產植物生長促進因子 IAA 分泌活性，以 S029-A1-3 與 S135-A1-2 兩菌株活性最高候選菌株 (**圖一**)。4 株候選菌株皆已完成伽瑪輻射誘變取得穩定生長菌株，將持續進行 IAA 分析以及盆缽試驗以篩選高植物生長促進活性之益生菌候選株 [3]。



圖一、4 株 PGPR 候選菌株培養 24 小時或 72 小時後分泌於上清液之 IAA 濃度分析



圖二、FSBM-1 及 FSBM-2 組合菌株於豆漿發酵 24 小時，不同分子量胜肽對於血管張力素轉化酶活性抑制的潛力評估

109 年計劃中，篩選出伽瑪輻射誘變菌株 *L. plantarum* (LPL)-RA16、LPL-RB29；*L. pentose* (LPT)-RA03 等菌株，並選得最佳培養條件組合優化 GABA 生產及大豆異黃酮醣基切割 [1]。今年進一步搭配大豆寡糖分解、蛋白質水解等分析平台，篩選高水解胜肽及降解大豆寡糖等優良菌株組合。FSBM-1 及 FSBM-2 為將 LPL-RA16、LPL-RB29、LPT-RA03 以不同比例組合，24 小時豆漿培養時半乳糖苷分解酵素活性最高。兩菌組合皆可於 16 小時快速降解棉仔糖，而水蘇糖降解效率低於棉仔糖，但同樣也在 16 小時達到高峰。FSBM-2 比 FSBM-1 在 24 小時有較佳大豆蛋白水解效率 (546.33 ± 18.42 μg serine/mL)。以分子篩膜透析過濾將發酵豆漿胜肽劃分並分析濃度，結果顯示 10 kDa、5 kDa 及 3 kDa

劃分胜肽組別中，FSBM-2 濃度均較高於 FSBM-1。分別評估以 FSBM-1 及 FSBM-2 發酵豆漿 24 小時，使用 HHL (hippuryl-L-histidyl-L-leucine) 作為基質進行分析胜肽產物對於血管張力素轉化酶的抑制潛力。結果顯示，兩組別在 10 kDa 劃分組別的胜肽，均有顯著抑制血管張力素轉化酶活性，以 FSBM-2 的 66.38 ± 1.5% 抑制率高於 FSBM-1 的 44.63± 1.5% (**圖二**)。透過微量異黃酮分析平台，大豆發芽過程以及根瘤菌感染之異黃酮變化已可微量分析 (**表三**)，相關成果並已完成撰寫並投稿國際期刊 [4]。

表三、無菌培養基在不同發芽期間根部及子葉異黃酮含量分析

Retention Time	5 days			10 days			15 days		
	R+H*	C*	Ratio	R+H*	C*	Ratio	R+H*	C*	Ratio
12.4 Daidzin	0.85	0.28	3.5	0.53	0.27	1.9	0.53	0.33	1.6
14.3 Glycitin	0.57	0.29	2	0.3	0.3	1	0.4	0.31	1.3
18.1 Genistin	0.59	0.39	1.5	0.44	0.36	1.1	0.35	0.36	1
30 Daidzein	-	-	-	-	-	-	0.3	-	-
32.1 Glycitein	0.93	0.73	1.3	0.12	0.1	1.2	0.51	0.66	0.8
40.5 Genistein	0.6	-	-	0.15	-	-	0.22	0.33	0.67
SUM	**6.17**	**2.85**	**2.16**	**4.69**	**2.95**	**1.59**	**7.15**	**5.28**	**2.56**

* R = root; C = cotyledon; H = hypocotyl. Ratio = (R+H)/C.

IV. 結論

因應全球氣候劇烈改變以及台灣所面臨降雨集中，本計畫旨在開發抗逆境優質大豆與植物生長益生菌以及大豆衍生健康促進產品開發技術。基於 109 年度「以伽瑪輻射誘變進行大豆育種並改良發酵益生菌與食用麴菌(2)」優異成果所取得高產優質金珠大豆突變株及發酵大豆之根黴菌與乳酸菌伽瑪輻射誘變篩選技術，本期第一年針對金珠大豆誘變品系以及土壤根圈益生微生物進行突變與選育，已取得豐富初步成果：(1)以淹水逆境篩選出 9 株耐澇特性大豆株系、(2)針對 4 株寄主廣效性固氮根瘤候選細菌衍生伽瑪輻射誘變株、(3)針對 4 株具植物根圈促生活性候選芽孢桿菌衍生伽瑪輻射誘變株、(4)優化乳酸菌輻射誘變菌株組合之大豆生物轉化製程、(5)分析尋找大豆發芽過程異黃酮含量高點以優化大豆健康產物製程。

參考文獻

[1] 王紹鴻, 朱紀實, 蔡文錫, 謝佳雯, & 吳進益. (2021, 22th September). *以伽瑪輻射誘變進行大豆育種並改良發酵益生菌與食用麴菌(2)*. Paper presented at the 「109 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會」。台北市集思台大會議中心。

[2] 陳星妤, 陳立耿, & 王紹鴻. (2022). 伽瑪輻射誘變根黴菌合併乳酸菌共發酵大豆天貝之功能成分分析. *嘉大農林學報*, 19(1), 15-28。

[3] 呂世姻, 陳星妤, & 王紹鴻（2022）。*篩選伽瑪輻射誘變大豆根圈分離菌株之抗逆境潛力*。已接受預計發表於「第二十六屆細菌學研討會」。國立陽明交通大學博愛校區賢齊館，2022.08.25-08.27。

[4] Lih-Geeng Chen, ChiaWen Hsieh, Bayan Asad Subhi Musmar, Chih-Hung Lin, I-An Tsai, Chishih Chu. (2022). *Changes in soybean (Glycine max L.) isoflavones during germination with and without two nitrogen-fixing bacteria*. Manuscript submitted to *Cogent Food and Agriculture* for publication.

核電廠除役溝通策略規劃的循證基礎：性別與多元族群於核電廠除役議題的個人決策風格及政策感知

Evidence Base of Communication Strategies regarding Nuclear Plant Decommission Issues: The Decision Styles and Policy Perceptions among Genders and Ethnic Groups

計畫編號：110-NU-E-004-001-NU
計畫主持人：黃東益 教授
e-mail：tyhuang@nccu.edu.tw
計畫共同主持人：董祥開 副教授、傅凱若 副教授
計畫參與人員：田玉玨博士、黃妍甄、董皓崴、張雅筑
執行單位：國立政治大學公共行政學系

摘要

在核電廠除役的過程中，除了需要有專業人員的協助與合作外，民眾的支持及意見亦是執行核能政策時不容忽視的關鍵，而核電廠除役的議題涵蓋核廢料安全、核廢料選址公投以及整體能源政策等多種面向，需同時注意不同利害關係人的意見與多元立場，以提升政策溝通的效果。本研究針對不同群體之決策風格、風險感知、傳播媒介偏好，以及核能相關政策的認知程度，試圖了解不同群體偏好的政策溝通管道。

本研究透過電話訪問方式針對三個不同的樣本群體進行調查：全國民眾、鄰近核電廠的居民、以及原住民族。經分析資料後發現，不同群體民眾在個人訊息接觸以及核電除役認知看法上存在明顯差異：(一)男性、教育程度愈高、年齡愈長之民眾對相關訊息的接收程度越高，而女性及教育程度較低之民眾，則是對於對核電廠除役的相關風險較為敏感。(二)教育程度越高的民眾，對於核能除役支持以及除役安全的信任度越低。(三)原住民族獲得核能相關資訊較為不足，但對於核能議題的態度卻較為正面，不僅展現較高的信任以及支持，也會更積極和他人分享核能議題的相關訊息。

本研究建議在核能政策的溝通與宣導時，須針對不同群體調整溝通管道，對於鄰近核電廠的居民以及原住民族，較適合透過「人際網絡」的管道傳遞資訊，除持續透過傳統媒體及網路媒體宣傳外，亦應配合在地文化特性，深入部落建立溝通管道，舉辦公聽會或說明會等實體面對面的活動，將能更有效強化政府的溝通成效，讓民眾能夠了解政策、提高民眾對政府的支持以及信任。

關鍵詞：核能政策、核電廠除役、決策風格、政策感知、政策傳播策略。

Abstract

During the process of nuclear power plants decommissioning, public support and opinion are critical to the implementation of the Nuclear energy policy, other than professional and technical assistance,. Issues of nuclear power plants decommissioning include safety of the nuclear waste, site selection of the nuclear waste disposal, referendum, and the overall energy policy. As a result, it is essential to emphasize the diversity of different policy stakeholders to ensure the quality of policy communication. This study focused on the decision-making style, risk perception, media preferences, and degrees of knowledge regarding the nuclear energy policy and tried to find the effective way of policy communication to different groups.

This study conducted telephone survey to three different samples: the entire population in Taiwan, residents in the nearby neighborhood of nuclear power plants, and the indigenous people. We found significant differences among different groups in terms of acquiring information and views on nuclear power plants decommissioning. First, male, the highly educated, and older citizens generally received more information, while female and people who had lower level of education were more sensitive to the relevant risks. Second, people who had higher level of education tend to distrust the government regarding decommissioning safety, and thereby being less supportive to it. Third, the indigenous people generally received less information than others, but they tended to be more positive on nuclear related issues. They not only showed a higher level of trust and support, but also were more active in sharing information.

This study suggests that the government should adjust ways of policy communication according to the characteristics of different groups when communicating the nuclear energy policies. “Social network” channels will be more effective to the indigenous people and people who live in the neighborhood of nuclear power plants. In addition to the traditional media and social media, government should consider providing more face-to-face public hearings, meetings, or workshops to better strengthen the communication outcomes, so that to win more support and trust from the public.

Keywords: Nuclear Power; Policy Nuclear Power Plants Decommissioning; Decision-Making Style; Policy Perception; Policy Communication Strategy.

I. 前言

核一、二、三廠在運轉執照有效期限結束後不延役是我國重要的能源政策。2019 年 7 月 12 日行政院原子能委員會（以下稱原能會）核發了核一廠除役許可，台灣電力公司（以下稱台電公司）取得除役許可後應依除役計畫執行相關作業，25 年內完成除役。除役計畫的目

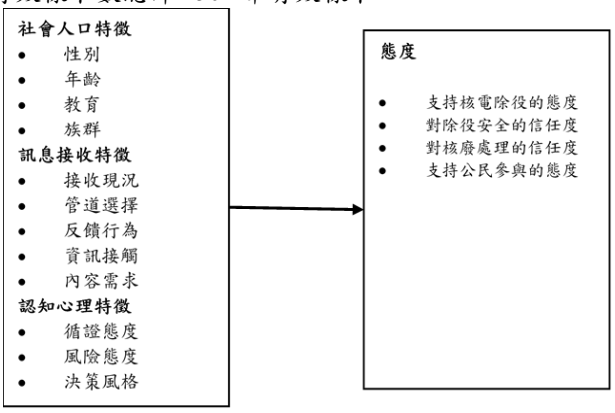
標主要是安全移除核能設施或系統操作相關的放射性和非放射性危險物質，在移除過程當中保護工作者、一般大眾和環境，核能設施的除役目的是讓設備一旦停止服務後，不僅免於規則管控、也免除其安全上的責任。根據國際相關研究及實務經驗指出，核能、放射性廢棄物具有高度危險性會讓民眾產生恐慌，且出現長期持續的心理憂慮與壓力。因此除役過程若溝通管道不夠暢通、提供的資訊相對匱乏、訊息無法取得或者是接收到令人混淆的資訊時，易讓民眾感到恐懼與不確定性，認定自身置於風險當中，甚至轉化為對政策的抗拒，增加政府在核能除役工作的管理與協調的困難。政府一直在探索利害關係人參與核安與輻安決策的重要議題，隨著經驗的積累，工作的重點逐漸從「科學」方面轉移到「社會」方面，認識到必須適應社會的需求，提供服務，而不僅只是向公眾解釋核安與輻安工作的決策。政策的溝通涉及「內部」的溝通與「外部」的溝通。政府在核電廠除役及核廢料處理議題的「外部」溝通上，如何透過有效溝通解決在地住民的疑慮，需要在溝通策略上全盤的整理與調整，同時，在與不同的對象溝通時需要採取不同的溝通略模式，專家、學者也應在溝通策略管道革新，發展雙向溝通模式，而不只是單向的訊息傳送與接收式。

近年來學者開始展開多元族群對於核能政策的態度和風險認知探詢，像是針對蘭嶼暫時貯存場長期以來的爭議，蘭嶼原住民對漢人政權的不信任，影響其對核廢料的風險認知，在面對核能風險認知與知識不對等的鴻溝下，學者建議應蘭嶼核廢料管制和檢測過程的設計上，納入地方部落的參與及課責的機制，才能達到真正的風險溝通。另一方面，也有學術社群運用公共審議模式，以台東達仁鄉作為低放射性核廢料候選場址為議題，有效的讓參與者思考地方發展背後族群正義的問題，審議後發現部落族人的思維與主流社會價值觀的明顯落差。這些研究雖然呈現出原住民、不同性別和世代對於核能政策的態度和風險認知的差異，卻無法說明何謂有效的政策溝通，故政府應該提供何種類型的政策內容，針對多元族群（世代、性別和族群）運用不同的溝通策略而達到溝通成效。

II. 主要內容

為瞭解民眾對於核電廠除役及核廢料管理議題之溝通訊息的接收與認知情況，以制定有效的溝通策略，本研究以循證的觀點從較為客觀的證據作為實行政策之基礎，透過對不同背景民眾進行電訪，讓政府部門提供不同族群最想知道的問題疑義，研究目的如下：（一）調查不同性別與族群的個人決策風格與風險感知；（二）了解不同性別與族群對於核電廠除役和相關議題訊息的傳播接觸情形；（三）探討不同性別與族群的核電廠除役和原能政策相關議題的政策感知；（四）分析與評估核電廠除役和原能政策相關議題的政策傳播策略；（五）提出政府進行原能政策相關議題的政策溝通策略與模式建議。

而在研究方法上，本研究旨在探討性別與族群差異以及個人在訊息接收特徵以及認知心理特徵，對於民眾對於核能議題態度的影響，故本研究將針對民眾對於核能議題的「訊息接收」和「認知心理」，對於核能議題的態度進行驗證。並以電話問卷訪問進行調查。電訪對象分為三類族群「鄰近核設施區、原住民族、全國樣本」，有效樣本數總計 2504 筆有效樣本。



圖一：問卷架構圖

資料來源：本研究繪製。

III. 結果與討論

本研究在研究設計上主要電話調查的方式，了解民眾對核電廠除役的接收狀況、管道選擇、反饋行為、資訊接觸、內容需求、循證態度及風險態度，研究結果及發現如下。

一、 接收現況

從接收現況的部分來看，可知在核一廠已經進入除役階段這件事上，鄰近核設施區民眾有超過六成的人知道這件事，全國約有五成民眾，但在原住民族中卻只有不到四成的民眾知道，其中，男性、年紀越長、教育程度越高者，則知道的比例也越多，而更進一步比較可知，男性以及大學（含）以上教育程度者知道我國核一廠已經進入除役階段這件事上知悉程度較高，而在全樣本中，了解程度較高者為 50-59 歲的民眾，然而在原住民族中，反而 40-59 歲的中壯世代了解程度較高。最後，針對「接收現況越清楚的民眾」的四個研究假設，不論是針對全樣本、鄰近核設施區民眾、原住民族的調查，皆不成立，也就是說，是否知道核一廠已經進入除役階段，並不會影響到民眾對於不會影響到民眾對於核能除役的支持度、除役與核廢處理的信任以及對於公民參與的支持度。

二、 管道選擇

從管道選擇的部分來看，針對知道核一廠除役的民眾進行追問，發現民眾多半透過遠距離的溝通管道獲得核電廠除役的相關資訊，管道選擇前三名依序是電視、網路上的新聞網站或平台、社群媒體，但鄰近核設施區民眾以及原住民族雖然在排序上與全國樣本略有不同外，透過政府辦的說明會（公聽會）、親朋好友獲得核電廠除役的相關資訊也有不低的比例。而不同族群最希望從電視、網路上的新聞網站或平台、社群媒體獲得核電廠除役的相關資訊，另外在住在鄰近核設施區的民眾，教其他民眾希望能透過政府辦的說明會（公聽會），故目前民眾獲知訊息的管道都是民眾最常且最希望的方式。最後，針對「以網路或是人際作為主要接收管道的民眾」的四個研究假設，不論是針對全樣本、鄰近核設施區民眾、原住民族的調查，僅在全樣本中部分成立，相較於以傳統媒體作為主要訊息接收者，以網路媒體為主要訊息接收者，他們對於核電除役支持越低。

三、 反饋行為

從管道選擇的部分來看，不同族群分享、表達、討論核電廠除役相關資訊的意願，以及認為政府在提供、宣傳核電廠除役相關資訊足夠程度上，來分析民眾（接收者）對傳送者（政府）訊息的回應，探究在訊息接收後的反饋行為，發現只有五成的民眾有分享、表達、討論核電廠除役相關資訊的意願，再來，男性以及教育程度在大學（含）以上者，較願意分享、公開、討論核電廠除役這件事；從在不同年齡層中，60 歲以上老年人的反饋行為較高，也就是老年人較願意分享、公開、討論核電廠除役這件事。

四、 資訊接觸

有六至七成的民眾認為政府在提供、宣傳核電廠除役相關資訊上認為不足夠。而針對資訊接觸的四研究假設則在不同調查中有不同的結果，在全樣本中，資訊接觸確實會影響民眾的對核能除役的支持度以及除役安全的信任度，而對於鄰近核設施地區的民眾而言，資訊接觸僅會影響到其對於除役安全的信任度，值得注意的是，資訊接觸僅對於原住民的公民參與支持產生負向的影響。

五、 內容需求

從內容需求的部分來看，在特定議題進行搜尋意願的內容需求上，只有六成民眾願意了解更核電廠除役相關資訊，而不同教育程度尤其明顯，不同族群間受過大學以上教育者，皆有較高的意願去了解更多核電廠除役的資訊，再追問想了解哪些資訊後，依序為核廢料的處理、替代能源配套問題、電力供應能力問題、除役的安全管理與未來電價收費問題。而從性別上來看，相較之下男性以及教育程度在大學（含）以上者的內容需求較高，也就是男性以及高教育程度者較願意了解更核電廠除役相關資訊。而不同年齡層間則沒有明顯差異。針對「內容需求越高的民眾」的四個研究假設， 則在不同調查中有不同的結果，在全樣本中，內容需求確實會影響民眾的對核能安全以及核廢處理的信任程度以及公民參與的支持度，也就是說，了解核電廠除役資訊的意願越高的民眾，會擁有較正面的看法，也會將這股動力轉化為支持公民參與的能量。而對於鄰近核設施地區的民眾而言，內容需求僅會影響到其對於核能安全信任。

六、 循證態度

從循證態度的部分來看，在測量認知心理特徵的循證態度中，也就是政府在制定公共政策或民眾在進行個人決策時，對依循證據的客觀態度上發現有八成的民眾，願意在日常生活中充分蒐集資訊再進行決定，大學（含）以上教育程度者較願意在日常生活中，做決定之前，花時間充分蒐集資訊後再做決定，而在年齡差異則在不同調查中有不同的結果，全樣本中，願意程度較高者為 30-39 歲的民眾，在鄰近核設施區中，願意程度較高者為 40-49 歲之民眾，然而在原住民族中，反是 50-59 歲的民眾願意程度較高。而對於政府在規劃核能電廠除役政策時，依據的證據的足夠程度上，雖然有一半的民眾皆認為不足夠，其中，又以在全樣本中，18-29 歲的民眾認為政府在規劃核能電廠除役政策時，依據的證據較足夠。更進一步來看，最後，針對「循證態度越積極的民眾」的四個研究假設，除了全樣本中的公民參與以及鄰近核設施地區中核廢處理的信任度外，由分析可知循證態度確實會影響民眾的對核能除役以及公民參與的支持度，同時，亦會影響到民眾對於核廢處理的信任程度。

七、 風險態度

最後，從風險態度的部分來看，在測量認知心理特徵的風險態度中，也就是在結果不確定情境下進行決策時，朝向承擔或接受或避免風險的取向，而為了讓核能電廠除役工作能夠繼續進行，先找一個地方暫時貯存核廢料，不同族群間同意的民眾皆佔六成，相較於女性，男性更同意先找一個地方暫時貯存核廢料，讓核能電廠除役工作能夠繼續進行。另外輻射外洩、廢料處理不當帶來危害及環境受到輻射汙染為民眾最擔心的風險。最後，針對「風險態度越高的民眾」的四個研究假設，在不同調查中有著相同結果，發現風險態度的確會影響到民眾對除役安全、核廢處理的信任度以及公民參與的態度，但卻不會對核電除役的支持度造成影響。

IV. 結論

依據本研究之分析結果，提出未來在除役溝通方面之結論與具體建議，以協助提升原能會等機關之政策溝通效能，進而獲得更多民眾的支持與信任。

一、 男性對於除役安全以及核廢處理的信任度較高，同時，也較支持核能的公民參與

不同性別者對於核能信任與公民參與的看法上有所差異，性別會影響到民眾對於除役安全以及核廢處理的信任度，相較於女性，男性對於除役安全以及核廢處理的信任度較高，同時，也較支持核能的公民參與，顯見，不同性別者的看法上有一定的歧異。

二、 原住民族在我國的核一廠已經進入除役階段這件事上知悉程度較低

相較於非原住民，原住民族在我國的核一廠已經進入除役階段這件事上知悉程度較低，儘管如此，原住民族仍較積極願意和其他人一起討論核電廠除役的相關議題。也就是說，族群之間對於核能除役的資訊接收確實存有一定的差異，而造成此一差異的原因可能是語言本身的差異或溝通管道的不足¬而導致的資訊落差。此一結果應作為日後政策溝通時的重要標體團體，以因應族群特性結合多元訊息途徑及整合方式，提升政策推廣效果（黃東益等人，2019）。

三、 原住民族對於核能議題態度較為正面

相較於非原住民，原住民族對於核廢料能夠得到安全的處置這件事較有信心，同時，也較支持民眾應該參與核能電廠除役與核廢料處理的監督工作，顯見，原住民族對於核能議題的整體態度較為正面。

四、 高教育程度者對於核能除役支持度、安全的信任度與公民參與反而越低

教育程度越高者對於核能除役支持以及除役安全的信任度反而越低，同樣地，教育程度越高者，越不支持公民參與核電廠除役的過程之中，教育程度越高者多認為核電廠除役工作是很專業的事情，應該全部交由專家來決定，較不支持民眾應該參與核電廠除役與核廢料處理的監督工作。從上述現象也可以發現，高教育程度者反而對於公共政策的執行，抱持著較負面的看法，是

否意味著高教菁英對於公共事務的失望與卻退，則有待更多實證研究。

五、 年長者較支持公民參與

年齡的差異並不影響到民眾對於核能除役的支持，以及對於除役安全以及核廢處理的信任度，但卻會影響到民眾對於核能公民參與的態度，與過去發現不同的，年紀越長者反而支持民眾參與核電廠除役的過程，這是否代表年輕世代對於公共事務參與的不足以及消極，亦是發展公民參與時所不容忽視的議題。

六、 網路媒體為主要訊息接收者對於核能除役支持越低

在全樣本分析中，管道接觸對於民眾支持核能除役有顯著的影響，也就是說，相較於以傳統媒體作為主要訊息接收者，以網路媒體為主要訊息接收者，他們對於核能除役支持越低，這是否意味網路中同溫層更可能導致民眾對於核電除役的反對，甚至是意見的極化，也有待後續做更多的觀察（Balog-Way et al, 2020；陳靜君、陶振超，2018）。

七、 民眾的資訊接觸會影響其對於核能議題的態度

對資訊接觸的四個研究假設則在不同調查中有不同的結果，在全樣本中，資訊接觸確實會影響民眾的對核能除役的支持度以及除役安全的信任度，而對於鄰近核設施地區的民眾而言，資訊接觸僅會影響到其對於除役安全的信任度。當政府在核電廠除役這件事情上所提供的資訊以及宣傳越充足時，是有助於提高鄰近核設施地區的民眾對於核能除役安全的信任，顯示出風險溝通，確實有助於降低民眾的風險認知，有助於提高民眾的政策接受度。而值得注意的是，反饋行為僅對於原住民的公民參與支持產生負向的影響。

八、 內容需求的提升有助於提高民眾對核能議題的信任度

對於全體民眾而言，對於核能訊息需求的程度越高者，則對於核能安全以及核廢處理的信任也會越高，而值得注意的是，內容需求亦是影響鄰近核設施地區的民眾對於核能安全信任的重要關鍵，當民眾越願意更多了解核電廠除役的資訊，對於核能議題有一定的關注度時，有助於提高對於核能安全信任度，了解核電廠除役資訊的意願越高者，也會將這股動力轉化為支持公民參與的能量，顯示出政府資訊的傳遞效果確實是影響民眾態度的重要關鍵。

九、 循證態度越高的民眾對於核能議題的看法亦較為正面

循證態度確實會影響到民眾對於核電除役與公民參與的支持度以及除役安全與核廢處理的信任度，擁有較高的循證態度的民眾，對於核能議題的看法亦較為正面。循證即是奠基於證據，有助於我們釐清過往的盲點，豐富決策資料來源，循證確實有助於提升幫助民眾釐清核能除役的資訊，在資訊理解下，有助於對能核能除役形塑出較正面的看法。

十、 風險態度的影響效果有所改變

民眾對於核能風險的態度，並不會影響到民眾對於核能除役的支持度，但對於除役與核廢處理的信任以及對於公民參與的支持度仍是重要的影響關鍵，此一差異可能是是因為在核一廠除役之後，民眾最關心的部分已經有所轉變，轉而更加關心輻射外洩、廢料處理不當帶來危害及環境受到輻射汙染，而風險態度的影響效果已經有所降低，因此，未必會影響民眾對於核能除役的支持度，但風險態度越高者，擁有較高的承擔風險時，則對於核能議題的信任程度以及公民參與的支持度亦越高。

十一、 不同族群民眾在在個人訊息接觸上的差異

在調查完不同「性別、教育程度、年齡」後發現，男性、教育程度愈高及年齡愈長之民眾在訊息接收上也愈高。反之，女性、教育程度愈低及年齡愈小之民眾在訊息接收上較低。而在不同族群對於訊息接收方面，鄰近核設施區之民眾相較全國民眾及原住民族接收到較多核電廠除役相關訊息，反之，原住民族接收到之訊息為三者族群中最少數。更進一步來看，透過了解不同「性別、族群」對於核電廠除役和相關議題訊息的傳播接觸情形後發現，「女性」、「年紀越小」、「教育程度越低」知道核電廠除役的人也越少，而為了加強政策溝通的效果便要從管道下手，再管道選擇中民眾最常也最希望透過「電視、網路上的新聞網站或平台、社群媒體」獲得核電廠除役的相關訊息，然而在特定族群中則較依賴政府辦的說明會（公聽會）、親朋好友獲得核電廠除役的相關資訊。雖然在「性別」上，男性比較願意去分享自己對除役資訊的看法，但在分享相關資訊給其他人這個部分卻是女性較為願意，在「教育程度」上受教育程度較低的人雖然較不願意公開表達或是何人討論相關議題，但卻較為願意進行訊息的傳播。

十二、 不同族群在個人認知心理上有所差異

認知心理指的是循證態度及風險態度，在核電廠除役這件事上可能會面對的風險之中，在「性別」上女性較男性對風險較為敏感，在「教育程度」上受教育程度較低的人較為敏感，舉例來說像是為了除役工作能順利運行，就在還沒確定最終處置場前找地方暫時存放核廢料這件事上，女性及受教育程度在大學以下者就比較沒辦法接受。而在不同性別與族群的個人循證態度以及風險態度上得出，不同族群間在教育程度及年齡上有所差異，特別是教育程度越低的民眾對於不只對於政府的核電除役政策比較不支持，對於除役安全以及核廢處理也比較不信任。而其中，本研究發現越能承擔不確定風險的民眾，對於核電廠除役安全以及核廢料處理的信任度越高，也越支持公民參與核電廠除役的過程。

V. 建議

奠基於以上研究發現與文獻檢閱後，以下提出幾點政策建議，前三點為針對不同教育程度性別、年齡、族群以及鄰近核設施地區的民眾所提出之特定政策建議，而後三點則是針對核能政策溝通的一般性政策建議，分述如下：

一、 對於高教者的意見探詢與分析

過去研究多認為高教育程度者對於公共事務的參與會越積極，然而，由分析可知，教育程度越高者對於核能除役支持以及除役安全的信任度反而越低，也越不

支持公民參與核電廠除役，高教菁英對於核能議題萌生失望與卻退，則有賴更進一步地追蹤。而面對高教者不願意參與的現象，也應針對高教者進行意見的探尋，了解其背後不支持與不信任的原因，並設立相關的溝通管道，亦或者結合大專院校進行宣導與推廣，也成為政府在進行政策溝通以及宣導時，不容忽視的重要關鍵。

二、 強化對於原住民的資訊溝通

儘管相較於非原住民來說，原住民對於核能資訊量較為不足，但原住民對於政府在核廢料的處理上，展現較高的信任度，同時，也較支持核能議題的公民參與活動，且較積極願意和他人分享核能議題的相關訊息，因此，政府應該強化對於原住民的資訊溝通，配合原住民社會文化的特性，如深入部落建立多元溝通管道，亦或者建構在地族語教材，打破語言隔閡等，以促成族群間的溝通，強化原住民對於資訊的取得與恩分享。

三、 因應不同性別、年齡及族群建置不同的溝通渠道

因民眾對於「核一廠除役原因」以及「監督執行的權責區分」認知上較模糊，如民眾對於核電廠除役工作是哪個機關進行、監督工作是由哪個機關負責較不清楚，不同性別、年齡及族群，不僅對於核電廠除役認知上有所差異，其對於核能的信任度與支持度也有所不同，故應針對特的族群加強宣導，建議在核電廠除役的政策溝通上需要針對不同性別以及年齡間訂定不同的政策溝通渠道，並針對不同民眾分別擔心的風險進行說明，事先釐清每一次政策溝通的標的團體，對不同團體採用不同溝通方式，針對較不了解核電廠除役相關資訊之民眾給予較清楚說明，使其瞭解相關資訊後會對除役認知上有所改變，給予相關回應及表態。

四、 強化鄰近核設施民眾對於核能議題的反饋

政府在核電廠除役這件事情上所提供的資訊以及宣傳越充足時，有助於提高鄰近核設施地區的民眾對於核能除役安全的信任，顯示出風險溝通確實有助於降低民眾的風險認知，有助於提高民眾的政策接受度，因此，政府應該強化鄰近核設施民眾對於核能議題的反饋，並提供相應的資訊以及宣傳。

五、 多元政策溝通工具

核能政策的溝通與宣導，是影響民眾對於核能看法的重要關鍵，故政府須針對政策溝通建立完善的管道，並依照不同族群特性適時調整，除了傳統媒體、網路媒體外，人際網絡亦是民眾最希望瞭解核電廠除役資訊管道之一，因此，政府族除了傳統的溝通管道外，仍要針對鄰里之間的政策宣導有更好的規劃。且應於不同族群之間還須針對不同的溝通渠道作個別強化，如鄰近核電廠之民眾及原住民族較依賴透過「人際網絡」獲得相關資訊，故建議政府單位除了要持續在「傳統媒體、網路媒體」進行政策宣導外，亦需要針對鄰近核電廠的居民以及原住民族，舉辦「說明會（公聽會）」，並增加其參與人數，透過參與民眾傳播核電廠除役的資訊予其他群體，以此讓政策溝通的效益達到最大化。

六、 網路言論的把關與澄清

相較於以傳統媒體作為主要訊息接收者，以網路媒體為主要訊息接收者，他們對於核能除役支持越低，此一現象可能與網路傳播特性有關，網路中同溫層更可能導致民眾對於核電除役的反對，甚至是意見的極化。未來政府也應加強在網路上核能議題資訊的正確性，以免造成訊息的錯誤傳遞，甚至是加速意見的極化。

七、 滿足民眾對於核能議題的內容需求

內容需求是影響民眾對於核能看法的重要關鍵，不僅有助於提高鄰近核設施地區的民眾對於核能安全信任度。同時，也有助提高原住民對於公民參與支持的能量，政府應該加強宣導管道，同時，也因應不同族群對於核能議題內容需求的差別來加以回應。

參考文獻

[1] 黃東益、董祥開、傅凱若（2019）。**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（I）**。科技部專題研究計畫（編號：MOST107-NU-E-004-001-NU），未出版。

[2] 范玫芳(2016)。誰的風險？誰的管制與檢測標準？蘭嶼核廢料爭議之研究。**傳播研究與實踐，7**(1)，107-139。

[3] 靳菱菱（2012）。反核或擁核？核廢料儲置場之審議式民主討論與原住民部落發展。**台灣原住民族研究季刊，5**（2），1-39。

[4] 陳靜君、陶振超（2018）。偏見同化效果：網路新聞不文明留言對態度極化的影響。**中華傳播學刊，33**，137-179。

[5] 楊崑霖（2016）。**以風險治理角度檢視低放射性廢棄物處理法制**，國立成功大學碩士論文，未出版，臺南。

[6] 黃東益、董祥開、傅凱若（2021）。**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（III）**。科技部專題研究計畫（編號：MOST109-NU-E-004-001-NU）。

[7] Slovic, P. (2001). Perception of risk from radiation. In P. Slovic (Ed.), ***The Perception of Risk*** (pp. 264-274). London, UK: Earthscan.

[8] Slovic, P., Fischhoff, B., & Lichtenstein, S. (1982). Psychological aspects of risk perception. In D. L. Sills, C. P. Wolf, V.B. Shelanski (Eds.), ***Accident at Three Mile island: The Human Dimensions*** (pp. 11-19). Boulder, Colo: Westview Press.

[9] Rosa, E. A., & FreudenBerg, W. R. (1993). Public Reactions to Nuclear Waste: Citizens' Views of Repository Siting In R.E. Dunlap, M. E. Kraft, E.A. Rosa (Eds.), ***The Historical Development of Public Reactions to Nuclear Power: Implications for Nuclear Waste Policy*** (pp. 32-63). Durham, UK: Duke University Press.

[10] RuBin, G. J., Chowdhury, A. K., & Amlôt, R. (2012). How to Communicate with the Public about Chemical, ***Biological, Radiological, or Nuclear Terrorism: A Systematic Review of the Literature. Biosecurity and Bioterrorism: Biodefense Strategy, Practice, and Science, 10***(4), 383-395.

[11] Fan, M. F. (2006). Environmental Justice and Nuclear waste conflicts in Taiwan. ***Environmental Politics, 15***(3), 417-434.

[12] Fan, M. F. (2009). PuBlic Perceptions and the Nuclear Waste Repository on Orchid Island, Taiwan. ***Public Understanding of Science, 18***(2), 167-176.

[13] Balog-Way, D., K. McComas, & J. Besley (2020). The Evolving Field of Risk Communication. ***Risk Analysis, 40***(1), 2240-2262.

[14] Lee, D. W., & G. H. Kwon (2019). The effect of Risk Communication on the Acceptance of Policies for High-Risk Facilities in South Korea: with Particular Focus on the Mediating Effects of Risk Perception. ***International Review of Administrative Sciences, 85***(2), 337–355.

[15] Head, B. W. (2008). Three lenses of evidence-Based policy. ***Australian Journal of PuBlic Administration, 67***(1), 1-11.

[16] Head, B. W. (2010). Reconsidering evidence-Based policy: Key issues and challenges. ***Policy and Society, 2***(29), 77-94.

[17] IAEA (2015). Module XXIII: Public communication. Retrieved June 13, 2020, from https://gnssn.iaea.org/main/BPTC/Pages/module23.aspx

建構輻射災害在地化資訊傳播平台
Build Localized Information Propaganda Platform for Radiation Disaster Rescue

計畫編號：110-NU-E-020-001-NU
計畫主持人：葉一隆
e-mail：yalung@mail.npust.edu.tw
計畫共同主持人：李昇諺
計畫參與人員：吳靜怡、黃瑞麗、虞皓芸
執行單位：國立屏東科技大學土木工程系

摘要

核三廠位於著名觀光地區的屏東縣恆春鎮，為使居民瞭解輻射安全知識，以及核子事故之應變作為，政府時常辦理核子事故講習與宣導活動，但對於遊客及新住民宣導則較缺乏。因此，本研究目的在建構一套民眾宣導模式，以臉書社群媒體於恆春地區建立輻射災害防災資訊聯絡網，並於恆春鎮 17 個里張貼輻射安全宣導海報，提供當地民眾及遊客觀看。研究成果包括設計含中文、越南文、印尼文及英文等 4 種語言之 4 種不同輻射安全主題宣傳海報，完成 8 位新住民輻射安全宣導種子教師培訓，並辦理 4 場次新住民輻射安全教育訓練。依據執行結果建議對民眾宣傳方式可搭配商家廣告設計宣導摺頁，提供更便於民眾接收資訊的機會；為強化並維持新住民教師的防災知能，可辦理新住民輻射安全種子教師再教育訓練，同時配合新住民以小團體、線上課程等學習方式，協助新住民參與輻射安全教育訓練，以解決新住民可自由運用時間較少，較不易參與相關防災課程的問題。

關鍵詞：輻射安全、防災資訊平台、民眾防災宣導、新住民防災。

Abstract

The Maanshan Nuclear Power Plant locates in Hengchun Town, Pingtung County, a famous tourist area. To let residents understand radiation safety knowledge and what to do in response to a nuclear accident, the government often organizes nuclear accident lectures and publicity activities. However, there is a lack of publicity for tourists and new residents. Therefore, this study aims to construct a set of public awareness models. Firstly, we establish a network of radiation disaster prevention in the Hengchun area through the Facebook social community. And put up radiation safety propaganda posters in 17 villages in Hengchun Town to provide nuclear safety information for local people and tourists. In this study, four radiation safety-themed posters are designed in Chinese, Vietnamese, Indonesian, and English. Then, eight new residents' of radiation safety publicity seed teachers joined the study and conducted four sessions for new residents' radiation safety education and training. According to the implementation results of this study, we recommend that the Facebook social community network established during the conducting project period can continue planning for Facebook fan interaction activities to maintain publicity benefits. In addition, it provides more convenient opportunities for the public to receive information.

Furthermore, the study suggests re-education training for the radiation safety seed teachers to strengthen and sustain their disaster prevention knowledge. In addition, small groups, online courses, and other learning methods are used for new residents to participate in radiation safety education and training. It may help establish disaster prevention knowledge for the new residents because they have less free time and are less likely to participate in relative radiation safety courses.

Keywords: safety of radiation, information platform for disaster prevention, public protection propaganda of disasters, disasters prevention and mitigation for immigrant resident.

I. 前言

臺灣自 1971 年開始興建第一核能發電廠（簡稱核一廠）至今，共有 4 座核能發電廠，核一廠自 1978 年開始商轉，已達役期屆滿，故依計畫辦理除役；第四核能發電廠（簡稱核四廠）依政府指示，進行資產維護管理。目前臺灣運轉中的發電廠為第二核能發電廠（簡稱核二廠）及第三核能發電廠（簡稱核三廠），以運轉役期屆滿期限，核二廠至 2023 年役期屆滿，核三廠運轉期限至 2025 年[1]。

為使核三廠緊急應變計畫區民眾，對於核子事故有正確認知，並於面對核三廠發生核子事故之相關應變作為有所瞭解，屏東縣政府自 2015 年，陸續配合行政院原能會，辦理核子事故民眾逐里宣導及疏散撤離演練計畫，包含 2015 年辦理「屏東縣 104 年度核子事故緊急應變計畫區內逐里宣導及疏散撤離演練計畫」[2]、2017 年辦理「106 年核子事故緊急應變計畫區內逐里宣導及疏散撤離演練計畫」[3]、2018 年辦理「107 年核子事故緊急應變計畫區內逐里宣導及疏散撤離演練計畫」[4]；經由逐年逐村里，在 2018 年完成核三廠緊急應變計畫內所有村里核子事故防災社區建置工作。為驗證屏東縣核子事故區域民眾防護應變計劃執行可行性，屏東縣政府於 2019 年配合行政院原能會辦理「屏東縣 108 年核安第 25 號演習」[5]，規劃核三廠緊急應變計畫區 3 公里民眾，共同參與疏散撤離演練，以集結點搭車方式，搭乘疏散撤離專車至加祿堂營區進行登記編管作業及收容安置作業。

核能安全是核能和平使用的基石，日本 311 福島事件衝擊核能安全的架構，未來詳細的檢討與徹底改善將無可避免[6-8]。過子庸與何其穎[9]以案例比較分析法，針

對三哩島、車諾比及福島核災三大核災案例進行相互比較，瞭解這些核災發生之主要原因及影響。對於核子事故所造成之影響，Chang [10]檢視在 2011 年 3 月 11 日於東日本所發生的地震與海嘯所引發的核災事件中的心靈麻痺、假性無效率、慢思、和跨層級想像。龜井緣與李劭懷[11]指出 2011 年 3 月 11 日於日本的東北地區發生的超級強震，引發巨大的海嘯，嚴重破壞福島第一核能發電廠，導致大量的輻射外洩而引發核災。許多當地居民被迫撤離，強制被安置到臨時避難所。福島縣是一個高齡化的地區，在災難發生現場，長者遷徙避難不易，在遇到災難時，高齡者並非只有身體層面的問題，在心理層面或社會層面上，亦會造成重大的影響而變成自閉退縮或對未來有強烈之不安，對於生活，會衍生更多的不安定因素。Simons and Wechling [12,13]指出媒體在傳統上被賦予守望、決策、教育、娛樂的功能，具有客觀報導新聞、解釋新聞，使讀者瞭解政府的施政，讓民眾隨時注意社會上發生的事，適時反映社會真實的重要使命。齊偉先[14]以 2011 年日本福島核災為例，透過分析臺灣平面媒體對此災變的報導，由分析顯示災難是現代社會中少數能透過媒體激發出集體「共在感」的重要因素，並且災難敘事的戲劇分析進一步說明現代媒體自身也可能是一種製造風險的來源。陳憶寧[15]指出在福島核災之後，檢視民眾對核能議題之風險感知與態度，結果顯示政治信任程度愈低，愈是認為核能風險重要性高；民眾對政府的信任程度愈高，則愈支持核能。在傳播層面上，對核災的電視新聞愈注意，則愈覺得風險重要性高，也愈反對核能。客觀知識程度較高者，愈支持核能，也較接受核能風險。

恆春地區目前外籍配偶數約有 800 餘人，為使恆春當地居民的輻射安全知識能量傳遞擴及更多層面，本研究培訓新住民為輻射安全宣導種子教師，配合行政院原子能委員會、屏東縣政府、核能三廠等相關單位，針對恆春地區外籍配偶，辦理輻射安全宣導課程，由於新住民以外籍配偶為當地長住人口，移工部分因為服務年限規定有異動情形，故新住民種子教師培訓以外籍配偶為主要培訓對象，完成課程培訓後，針對恆春當地新住民，辦理輻射宣導教育訓練。

II. 研究方法

本研究工作項目包含「建立恆春鎮鄰里輻射災害防災資訊聯絡網」、「建構恆春鎮輻射災害防災資訊平台」、「培訓新住民輻射安全宣導種子教師」、「辦理新住民輻射安全教育訓練」等 4 項，各工作執行方式說明如下：

1. 建立恆春地區鄰里輻射災害防災資訊聯絡網
   工作方式包含：(1).規劃輻射安全防災宣導內容、(2).規劃設計互動輻射防災宣導機制、(3).結合恆春在地臉書進行居民輻射安全防災宣導、(4).防災資訊宣導成效評估
2. 建構恆春地區輻射災害防災資訊平台
   工作內容包含：(1).實體資訊平台服務內容規劃、(2).實體資訊平台適宜地點評估、(3).實體資訊平台服務意願調查、(4).實體資訊平台防災資訊宣導運作。
3. 培訓新住民輻射安全宣導種子教師
   工作內容包含：(1).恆春地區新住民類型調查、(2).恆春地區新住民參與意願調查、(3).新住民種子教師課程規劃、(4).新住民種子教師培訓研習。
4. 辦理新住民輻射安全教育訓練
   工作內容包含：(1).新住民輻射安全研習課程規劃、(2).辦理新住民輻射安全教育訓練。

III. 結果與討論

本研究針對恆春地區建立輻射災害防災資訊聯絡網、建構恆春地區輻射災害防災資訊平台、培訓新住民輻射安全宣導種子教師以及辦理新住民輻射安全教育訓練，執行成果分述如下。

1. 建立輻射災害防災資訊聯絡網

輻射災害防災資訊聯絡網之建立結合「屏科大-災害放射性分析備援實驗室」及「恆春半島公共事務討論社團」平台，設計與民眾互動方式，提升民眾對於輻射安全以及自我防護的瞭解，並且同步接收政府對於核子事故發生時，民眾應採取的各項防護作業規劃。本平台亦分享「原能會輻務小站」臉書訊息，以及於恆春地區辦理之各相關輻射安全宣導、教育訓練、演練等活動，提供民眾輻射安全相關資訊交流平台。由粉絲專頁使用對象進行宣導成效評估問卷調查分析得知，參與對象以女性較高，年齡以 41-50 歲居多，居住地主要在恆春地區。對於粉絲專頁使用認知上，對於民眾在輻射安全的認識，以及民眾願意透過粉絲專頁接收訊息，都有正向的效果。

2. 建構恆春地區輻射災害防災資訊平台

恆春地區輻射災害防災資訊平台建構主要以實體文書為主，本研究以漸進方式分為 4 個主題，設計輻射安全宣導海報，並於恆春各里分別選擇人口聚集處張貼輻射安全宣導海報，為提供恆春地區新住民接收輻射安全資訊，海報設計除中文之外，同步設計越南文、印尼文以及英文版本，海報規劃請參閱表 1，4 種語言海報如表 2 所列。

表 1 輻射安全宣導海報內容規劃表

期別	內容規劃
第一期	• 輻射是什麼? • 這些輻射有什麼差別? • 輻射符號說明與介紹。
第二期	• 如何得知核電廠有事故? • 核子事故發生怎麼辦?
第三期	• 核子事故初期掩蔽。 • 為何要去登記編管處所? • 如何搭乘政府專車(說明搭乘方式/集結點)。
第四期	• 發生核子事故，民眾疏散撤離安置規劃。 • 學童就學規劃（安置學校規劃）。

表 2 輻射安全宣導海報 4 種語言彙整表

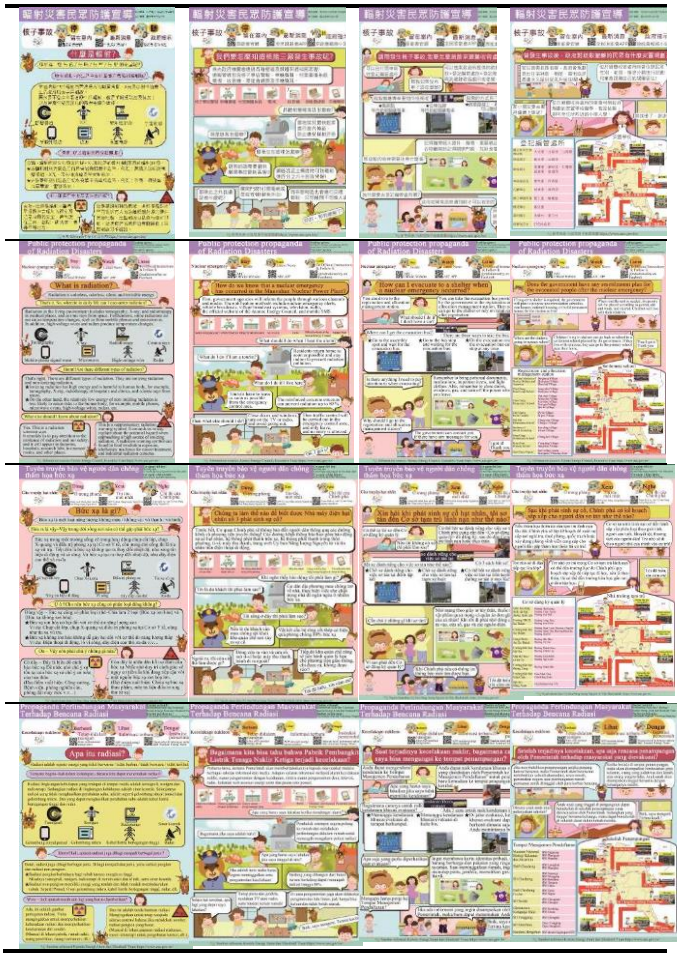


表 3 宣導海報摺頁

輻射安全宣導三摺頁正面

輻射安全宣導三摺頁背面

3. 培訓新住民輻射安全宣導種子教師

恆春地區目前外籍配偶數約有 800 餘人，為使恆春當地居民的輻射安全知識能量，傳遞擴及更多層面，本研究培訓新住民輻射安全宣導種子教師，希望藉由新住民種子教師，逐漸將輻射安全知識傳遞給更多不同族群民眾。本研究所規劃新住民輻射安全宣導種子教師課程共計 4 週 10 小時課程，共計培訓越南籍、印尼籍與中國籍新住民種子教師 8 位，課程包含理論與實務課程，內容包括，輻射基本知識認知及輻射防護教育、核子事故民眾防護行動(含情境練習)、師資培訓實作工作坊、核子事故民眾防護行動實務參訪。完成師資培訓之種子教師，由執行單位國立屏東科技大學頒發結訓證書。

4. 辦理新住民輻射安全教育訓練

由培訓之新住民輻射安全宣導種子教師於恆春地區進行當地新住民輻射安全宣導教育訓練，訓練對象包含對於國語較不熟悉的新住民對象，本研究所培訓教師則以越南語或印尼語，進行輻射安全宣導教學，由於新住民可自由使用時間較少，本研究亦安排種子教師至恆春國中新住民語言班，針對國中學生進行輻射安全印尼文教學，學生即可將輻射安全資訊傳達給父母，增加民眾接收輻射安全資訊管道，結合輻射安全宣導多國語言海報，並將海報內容摺頁化，將宣導海報以折頁模式設計製作，依照中文、英文、越南文及印尼文製作成摺頁，於宣導期間依據使用對象發放，增加宣導效果。宣導海報摺頁如表 3 所示。

IV. 結論

本研究結合恆春在地社群網路，以互動方式進行民眾輻射安全防災宣導，藉由訊息傳遞活化臉書粉絲團，使輻射安全教育擴及至更多民眾，可提升民眾輻射安全知識。透過建構恆春地區實體資訊平台，進行輻射安全宣導作業；並以多國語言海報，提供較年長者以及當地新住民或遊客獲取輻射安全防災宣導資訊。以完成新住民輻射安全種子培訓教師擔任課程講師，協助恆春地區新住民輻射安全教育宣傳，可增加新住民彼此間情感及宣傳輻射安全教育目標。

參考文獻

[1] 台灣電力股份有限公司（2019）。核能營運現況與績效。2020 年 6 月 14 日，取自 https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=203。

[2] 屏東縣政府（2015）。屏東縣 104 年度核子事故緊急應變計畫區內逐里宣導及疏散撤離演練計畫期末報告。屏東縣政府委託計畫成果報告。

[3] 屏東縣政府（2017）。106 年度核子事故緊急應變計畫區內逐里宣導及疏散撤離演練計畫期末報告。屏東縣政府委託計畫成果報告。

[4] 屏東縣政府（2018）。107 年度核子事故緊急應變計畫區內逐里宣導及疏散撤離演練計畫期末報告。屏東縣政府委託計畫成果報告。

[5] 屏東縣政府（2019）。屏東縣 108 年核安第 25 號演習內容規劃期末報告。屏東縣政府委託計畫成果報告。

[6] 楊清田，林立夫，2011，由日本福島事件之啟示，省思核能安全之強化，前瞻科技與管理，1(2):41-53。

[7] Guerreiro, A, 2011, IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety, paper presented at the annual meeting

of the International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
[8] Yoshimura U, 2011, Impacts of the Fukushima Accident, Committee on the Regulatory Activities, Nuclear Energy Agency, OECD, Issy-les-Moulineaux, France.
[9] 過子庸，何其穎，2012，對世界三大核災事故—三哩島、車諾比及福島核災之研析，前瞻科技與管理，2(1): 123-146。
[10] Chang, Kathryn Yalan, 2017, After the Japan 3/11 Disaster: Slow Violence and Slow Living in The Land of Hope and Homeland, Tamkang Review, 47(2): 63-81.
[11] 龜井緣，李劭懷，2012，從東日本大地震探討災難護理的角色與經驗-核能發電廠事故，護理雜誌，59(3): 87-92。
[12] Simons, Herbert W., and Elizabeth A. Wechling, 1981, The Rhetoric of Political Movements, In Dan D. Nimmo and Keith Sanders, eds., Handbook of Political Communication, pp. 417-444. Beverly Hills, CA: Sage.
[13] 鄭安授，2019，福島事件後台灣核能議題的媒體再現，問題與研究，58(2):29-89。
[14] 齊偉先，2013，媒體災難敘事的社會意義建構：日本福島核災的戲劇分析，思與言，51(1):103-134。
[15] 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。