

106 年原子能科技學術合作研究計畫 成果發表會論文集



主辦單位：科技部、行政院原子能委員會

協辦單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

中華民國 107 年 6 月 12 日

目錄

議程及場地	iii
核能安全科技	
※大型活動輻射事件下物資佈署與群眾安置、疏散之規劃問題	1
※核能電廠低中壓電纜老化檢測與評估研究	4
※應力分析與 CFD 耦合之流沖振動(FIV)模式發展與應用	8
※白金被覆對不銹鋼組件於模擬沸水式反應器啟動過程的應力腐蝕龜裂起始研究	14
※核子事故緊急應變法規對除役中核能電廠之適用性與管制實務研究	18
※Alloy 52/52M 鎳基合金之銲接修補裂紋與製程研究	20
※核能電廠 HDPE 管路之 ASME 法規安全餘裕與老劣化效應	27
※以光彈法量測鋼材銲道殘留應力之實驗力學特性研究	33
※反應器周遭三維中子通量計算及靈敏度量化分析	50
※壓水式核能電廠之 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 事故模擬與 URG 措施分析	53
※核能電廠關鍵區域之鑑定與評估	57
※大型活動輻射事件整備與應變作業研究	63
放射性物料安全科技	
※研析瑞典 SR-site 處置坑道岩力設計前提之訂定原則	65
※用過核子燃料重要核種於深地層處置之物種分析與遷移機制研究－重要核種遷移參數 實驗之模式化方法研究及物種遷移機制分析	69
※乾貯密封鋼筒表面氯鹽沉積量與大氣氯離子含量關係研析	74
※限制速率吸附對核種衰變鏈傳輸的影響	79
※用過核子燃料最終處置緩衝材料再飽和過程下水力傳導特性評估	82
※用過核子燃料重要核種於深地層處置之物種分析與遷移機制研究－重要核種在不同氧 化還原環境下之生成物種分析與研究	87
※放射性廢棄物處置場處置隧道及處置孔間距之尺度規劃研究	93
※熱力引致處置母岩損傷及其對處置坑道之影響研析	101
輻射防護與放射醫學科技(I)	
※給低劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片設計(II)	113
※放射治療儀多葉式準直儀系統品保模式精進之評估	117
※醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄之研究	118
※以 DICOM 資訊建立醫用數位 Tomosynthesis X 光機之輻射劑量參考水平研究 (I) ..	125
※後福島民眾防護行動規範研擬	129
※後福島民眾防護行動規範研擬 II	134
※核醫乳房正子攝影個人劑量系統之研發(2/2)	137
※臺灣重要航線宇宙輻射劑量之評估與量測方法評析及其資料庫建立	143
※換肝移植手術捐贈者與受贈者全程輻射劑量評估	145
※低劑量策略與核醫影像品質最佳化研究	146
輻射防護與放射醫學科技(II)	
※以小豬動物模型來建立鎂-68 INER-038 正子造影正確定量殘存肝功能的的研究	156
※發展 $^{68}\text{Ga}/^{111}\text{In}$ 標誌 galectin-1 及 neuropilin-1 結合適體作為肺腺癌診療之	157
※研發 PD-L1 結合肽於肺癌標靶診療藥物之運用	160
※利用微陣列基因分析鎂-188-微脂體奈米核醫藥物處理原位頭頸癌腫瘤模式	164
※以大腸直腸癌肺轉移小鼠模式研究鎂-188 微脂體調控細胞死亡與腫瘤微環境之機制 ..	167
※固態式 X 光影像感應器關鍵零組件之非臨床特性及品質檢測技術研究	174

※Tau 蛋白標靶造影劑氟-18-FEONM 之阿茲海默基因鼠正子造影研究.....	179
※發展第 2 型組蛋白去乙酰化酶抑制劑 F-18-HDAC2i 正子造影劑與其在阿茲海默症細胞 及動物模式之研究.....	181
※氟-18 FEONM 之合成與評估-TAU 蛋白新型造影劑之研究.....	183
※神經發炎正子造影研究之新型正子造影劑(氟十八)FEPPA 之開發.....	189
※臨床新型心臟專用 CZT SPECT 於整合心肌血流絕對定量與臨床常規心臟檢查的優劣勢 研究.....	190
人才培訓與風險溝通	
※多元族群親子共學輻射與核能教育之研究.....	195
※建立我國核能資訊公開透明機制之法制基礎.....	200
※核電廠除役及核廢料處理議題公眾溝通機制之研究.....	204
※原子能安全與輻射防護之新媒體動畫政策教材製作與行銷.....	221
※原子能跨領域學程推廣.....	224
※雲端學習 幸「輻」生活 東部核能知識推廣.....	229
※恆春地區防災治理之研究.....	232
※原子能民生應用、輻射防護與放射性廢棄物科普實務推動及成效探討.....	235
※原住民之核能與輻射知識宣導.....	240
※藉由輻射度量儀器之開發與課程設計推動原子能科普教育.....	242

本論文集電子檔可至行政院原子能委員會官方網站 (<http://www.aec.gov.tw>)

首頁>施政與法規>施政績效>原子能科技學術合作研究計畫 項下下載

106 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會議程 議程及場地

時間：107 年 6 月 12 日（星期二）

地點：集思台大會議中心

（台北市羅斯福路 4 段 85 號 B1，台灣大學第二學生活動中心內，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
09:40~10:20	報到	1 樓
10:20~11:40	分組成果發表(I)	各領域場地
11:40~13:00	綜合討論(午餐)	各領域場地
13:00~15:30	分組成果發表(II)	各領域場地
15:30~15:50	中場休息	
15:50~16:00	優良計畫頒獎(各場次主持人)	各領域場地

各領域場地

領域	地 點	時間
1.核能安全科技	阿基米得廳	10:20~16:00
2.放射性物料安全科技	亞歷山大廳	10:20~15:30
3.輻射防護與放射醫學科技(I)	拉斐爾廳	10:20~15:40
4.輻射防護與放射醫學科技(II)	達文西廳	10:20~16:00
5.人才培訓與風險溝通	尼采廳	10:20~16:00

106 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 1：核能安全科技					
會場地點：阿基米得廳					
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	李綺思(*)、陳建源、吳文方、廖俐毅、郭榮卿	許聿廷	國立臺灣大學土木工程學系暨研究所	大型活動輻射事件下物資佈署與群眾安置、疏散之規劃問題
	10:40~11:00		張廖貴術	國立清華大學工程與系統科學系	核能電廠低中壓電纜老化檢測與評估研究
	11:00~11:20		馮玉明	國立清華大學工程與系統科學系	應力分析與 CFD 耦合之流沖振動(FIV)模式發展與應用(II)
	11:20~11:40		葉宗洸	國立清華大學工程與系統科學系	白金被覆對不銹鋼組件於模擬沸水式反應器啟動過程的應力腐蝕龜裂起始研究
	11:40~12:00		王曉剛	義守大學機械與自動化工程學系	核子事故緊急應變法規對除役中核能電廠之適用性與管制實務研究
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		李驊登	國立成功大學機械工程學系(所)	Alloy 52/52M 鎳基合金之銲接修補裂紋與製程研究
	13:20~13:40		丁鯤	龍華科技大學化工與材料工程系	核能電廠 HDPE 管路之 ASME 法規安全餘裕與老劣化效應之可靠度評估
	13:40~14:00		黃育熙	國立臺灣科技大學機械工程系	以光彈法量測鋼材銲道殘留應力之實驗力學特性研究
	14:00~14:20		許榮鈞	國立清華大學核子工程與科學研究所	反應器周遭三維中子通量計算及靈敏度量分析
	14:20~14:30		中 場 休 息		
	14:30~14:50		陳紹文	國立清華大學核子工程與科學研究所	壓水式核能電廠之 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 事故模擬與 URG 措施分析
	14:50~15:10		林唯耕	國立清華大學工程與系統科學系	核能電廠關鍵區域之鑑定與評估
	15:10~15:30		汪毓瑋	中央警察大學國境警察學系	大型活動輻射事件整備與應變作業研究
	15:30~16:00		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

106 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：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	10:20~10:40	劉文忠（*）、黃慶村、謝榮春、邱太銘、魏聰揚	楊長義	淡江大學土木工程學系	研析瑞典 SR-site 處置坑道岩力設計前提之訂定原則
	10:40~11:00		蔡世欽	國立清華大學原子科學技術發展中心	重要核種遷移參數實驗之模式化方法研究及物種遷移機制分析
	11:00~11:20		張惠雲	國立高雄大學土木與環境工程學系	乾貯密封鋼筒表面氯鹽沉積量與大氣氯離子含量關係研析
	11:20~11:40		陳瑞昇	國立中央大學應用地質研究所	限制速率吸附對核種衰變鏈傳輸的影響
	11:40~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		楊樹榮	國立屏東科技大學土木工程系	用過核子燃料最終處置緩衝材料再飽和過程下水力傳導特性評估
	13:20~13:40		李傳斌	國立成功大學地球科學系（所）	重要核種在不同氧化還原環境下之生成物種分析與研究
	13:40~14:00		林志森	國立高雄第一科技大學營建工程系（所）	放射性廢棄物處置場處置隧道及處置孔間距之尺度規劃研究
	14:00~14:20		李宏輝	國防大學環境資訊及工程學系	熱力引致處置母岩損傷及其對處置坑道之影響研析
	14:20~14:50		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

106 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：拉斐爾廳					
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（*）、邱志宏、郭瓊文、張似璫、李境和	盧志文	國立清華大學工程與系統科學系	給低劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片設計(II)
	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	放射治療儀多葉式準直系統曝露品保模式精進評估
	11:00~11:20		吳東信	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄之研究
	11:20~11:40		蘇振隆	中原大學生物醫學工程學系	以 DICOM 資訊建立醫用數位 Tomosynthesis X 光機之輻射劑量參考水平研究
	11:40~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		董傳中	長庚大學放射醫學研究院	後福島民眾防護行動規範研擬
	13:20~13:40		吳杰	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	後福島民眾防護行動規範研擬(II)
	13:40~14:00		莊克士	國立清華大學生物醫學工程與環境科學系	核醫乳房正子攝影個人劑量系統之研發(II)
	14:00~14:20		袁明豪	中國醫藥大學職業安全與衛生系	臺灣重要航線宇宙輻射劑量之評估與量測方法評析及其資料庫建立
	14:20~14:30		中 場 休 息		
	14:30~14:50		陳拓榮	中山醫學大學醫學影像暨放射科學系(所)	換肝移植手術捐贈者與受贈者全程輻射劑量評估
	14:50~15:10		楊邦宏	臺北榮民總醫院國家多目標醫用迴旋加速器中心	低劑量策略與核醫影像品質最佳化研究
	15:10~15:40		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

106 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	張志賢(*)、謝栢滄、林昆儒(下午)、許芳裕、黃文盛(上午)	顏若芳	國立臺灣大學醫學院放射線科	以小豬動物模型來建立鎳-68 INER-038 正子造影正確定量殘存肝功能的的研究
	10:40~11:00		陳玉玲	國立成功大學口腔醫學科暨研究所	發展 68Ga/111In 標誌 galectin-1 及 neuropilin-1 結合適體作為肺腺癌診療之開發及應用
	11:00~11:20		吳漢忠	中央研究院細胞與個體生物學研究所	研發 PD-L1 結合肽於肺癌標靶診療藥物之運用
	11:20~11:40		李易展	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	利用微陣列基因分析銻-188-微脂體奈米核醫藥物處理原位頭頸癌腫瘤模式後之微核糖核酸及訊息 RNA 系統性變化
	11:40~12:00		陳裕仁	台灣基督長老教會馬偕醫療財團法人馬偕紀念醫院放射腫瘤科	以大腸直腸癌肺轉移小鼠模式研究銻-188 微脂體調控細胞死亡與腫瘤微環境之機制
	12:00~13:00	綜 合 討 論 (午餐供應便當)			
分組發表 II	13:00~13:20		陳志成	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	固態式 X 光影像感應器關鍵零組件之非臨床特性及品質檢測技術研究
	13:20~13:40		劉仁賢	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	Tau 蛋白標靶造影劑氟-18-FEONM 之阿茲海默基因鼠正子造影研究
	13:40~14:00		柯建志	國立陽明大學生物醫學影像研究中心	第 2 型組蛋白去乙酰化酶抑制劑 F-18-HDAC2i 正子造影劑與其在阿茲海默症細胞及動物模式之研究
	14:00~14:20		鄭澄意	國防醫學院核子醫學科	氟-18 FEONM 之合成與評估-TAU 蛋白新型造影劑之研究
	14:20~14:40		中 場 休 息		
	14:40~15:00		張智偉	臺北榮民總醫院國家多目標醫用迴旋加速器中心	神經發炎正子造影研究之新型正子造影劑(氟十八)FEPPA 之開發
	15:00~15:20		陳遠光	新光醫療財團法人新光吳火獅紀念醫院核子醫學科	臨床新型心臟專用 CZT SPECT 於整合心肌血流絕對定量與臨床常規心臟檢查的優劣勢研究
	15:20~15:50		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

106 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 5：人才培訓與風險溝通					
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	10:20~10:40	王重德（*）、尹學禮、朱慶琪、王居卿、張自立	古建國	臺北市立大學應用物理暨化學系	多元族群親子共學輻射與核能教育之研究
	10:40~11:00		梁世武	世新大學公共關係暨廣告學系	性別、弱勢與核能議題溝通之研究
	11:00~11:20		高仁川	國立臺北大學法律學系	建立我國核能資訊公開透明機制之法制基礎
	11:20~11:40		黃東益	國立政治大學公共行政學系	核電廠除役及核廢料處理議題公眾溝通機制之研究
	11:40~12:00		單文婷	國立臺灣藝術大學廣播電視學系（所）	原子能安全與輻射防護之新媒體動畫政策教材製作與行銷
	12:00~13:00		綜 合 討 論（午餐供應便當）		
分組發表 II	13:00~13:20		宋大崙	龍華科技大學化工與材料工程系	原子能跨領域學程推廣
	13:20~13:40		黃朝曦	國立宜蘭大學資訊工程學系	雲端學習 幸「輻」生活 東部核能知識推廣
	13:40~14:00		楊永年	國立成功大學政治學系	恆春地區防災治理之研究
	14:00~14:20		戴明鳳	國立清華大學物理學系（所）	原子能民生應用、輻射防護與放射性廢棄物科普實務推動及成效探討
	14:20~14:40		中 場 休 息		
	14:40~15:00		陳彥均	龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系	原住民之核能與輻射知識宣導
	15:00~15:20		劉鴻鳴	國立清華大學原子科學技術發展中心	藉由輻射度量儀器之開發與課程設計推動原子能科普教育
	15:20~15:50		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

大型活動輻射事件下物資佈署與群眾安置、疏散之規劃問題

The Planning Problem of Mass Evacuation and Resource Deployment for Major Public Events under Nuclear Threat

計畫編號：106-NU-E-002-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許聿廷

e-mail：yutinghsu@ntu.edu.tw

計畫參與人員：曾慶華、張秉鈞

執行單位：國立臺灣大學土木系

摘要

國內各級政府近年積極承辦大型的國際會展和運動賽事，然而在日趨複雜而緊張的國際情勢之下，此等大型群眾活動同時伴隨恐怖攻擊的潛在威脅。其中，又以輻射攻擊可能引起大規模傷亡和社會集體恐慌，其災難特性和所引發的影響、擴散樣態與臺灣較常見的地震或火災等災難類型有所差異，相關防備、因應措施的制訂也需有不同的思維；而對於輻射攻擊事件的整備工作和應變能力也會是相關國際組織對活動申辦國/單位的重要評估項目之一。

目前國內針對大型群眾活動之規範和管理辦法多訂定於地方政府層級，關於可能遭受輻射攻擊的活動和相關中央單位的應變、支援需求則未有較明確的考量和說明。本研究首先就國內大型群眾活動各面向的性質、風險和維安需求提出活動分級架構，進一步針對恐怖攻擊/輻射攻擊之特性，探討其中受攻擊風險較高之活動分級：主要包含對應美國國土安全部分類 NSSE (National Special Security Event) 中直接關係國安層級之活動和 SEAR (Special Event Assessment Rating) 第一級吸引較高國際關注並涉及一定程度國家元首維安工作者。

針對整體核子保安整備、防護作業之強化以降低活動風險，場域輻射值的偵測、監控是為活動期間最主要的維安手段之一。本研究基於活動相關場域的空間特性和可能的輻射攻擊熱點/脆弱點評估，並就非固定式(可攜式偵測儀器)輻射偵測提出巡邏路線規劃問題，以銷售員旅行路線的數學模式求解最佳巡迴路線(路徑及巡迴時間最短)，以提供作業小組相關人力、物資佈署的參考。所提出的方法並以 2017 臺北世界大學運動會開幕式進行案例的分析和操作說明。

中文關鍵詞：大型群眾活動、輻射攻擊、核子保安、特殊活動分級、輻射偵測。

Abstract

In recent years, both the central and local governments actively bid for large-scale international exhibitions and/or sporting contests. However, upon the complication and tenseness of current international circumstances, these major public events also sustain the threat of terrorist attacks to a certain extent. The threat of nuclear and radiological terrorism is particularly of concern due to its devastating impact and the induced panic to the society. The characteristics of its impact and spreading pattern are

distinct from other frequent disasters in Taiwan, such as earthquakes and fires, and thereby different thinking is needed for the measures and regulations for disaster prevention and response. The relevant preparedness and capability of emergency management can be one of the important aspects to evaluate the qualification of a bidding country/organization for a large-scale international event.

Currently, the relevant regulations and ordinances are made at the level of local governments, which are generally not capable to respond radiological terrorist attacks. However, the supports from the related departments of central governments are not explicitly stipulated or articulated. Hence, this research seeks to propose an event rating framework based on the characteristics of local public events/activities and the associated requirements for security and preparedness. Then, those with certain risk of radiological terrorist attacks are further identified and investigated, primarily those directly related to national security and those with significant involvement of the head of state and attracting higher international attention (similar to national special security events and level 1 events by special event assessment rating defined by U.S. Department of Homeland Security).

To enhance the nuclear security system and reduce the risk to events/activities, this research addressed the problem of radiation detection, which is one of the most important and efficient methods for security reinforcement during. A routing problem of radiation detection (for Hand-held/portable equipment) over the areas associated with the events/activities is formulated, as a traveling salesman problem. Its solution determines the optimal route to examine the areas within the shortest distance/time, which can also be the reference for the allocation of relevant personnel and resources. The proposed method is illustrated and tested by using the case study of the opening ceremony of 2017 Summer Universiade in Taipei.

Keywords: major public event, radiological terrorist attack, nuclear security, special event ratings, radiation detection.

I. 前言

近年來，國內各級政府積極承辦各類大型的國際會展和運動賽事，以爭取國際的參與和認同，這些活動亦吸引了廣大的國內外與會者；如 2017 年 8 月由臺北市政府主辦的夏季世界大學運動會，賽會期間約有 40 萬以上人次國際旅客來臺參賽、觀賽，其開幕、閉幕式假

臺北田徑場舉辦，參加人次超過二萬人。對於此類大型國際活動，其規劃、整備工作和實際執行相對更為複雜、牽涉眾多單位之間的橫向、縱向協調；而對於活動整體維安、管理的層級和緊急事故應變的能力也相對應有更高的要求。

當我國舉辦國際性大型群眾活動時，由於其活動規模龐大、參與人員眾多並受到國際較多的重視，亦無法排除其可能成為恐怖分子攻擊目標。針對活動可能遭受攻擊的潛在風險，主辦和相關主管單位需更行加強對活動場館和參與人員的安檢、預防性措施，同時就事件發生可能造成的災情衝擊規劃緊急應變的作業規範和策略性執行辦法。可能的恐怖攻擊手法中，以輻射攻擊對整體社會可能造成的危害和恐慌最為劇烈，然而，目前國內針對大型群眾活動之規範和管理辦法多訂定於地方政府層級，對於此一類型之恐怖攻擊則還未有較完整、明確的整備作業和應變工作準則。本研究即針對大型群眾活動中可能涉及的輻射攻擊風險做進一步的探討，回顧、彙整各國相關的因應作法，進而對我國籌辦國際大型群眾活動的整備、應變作業流程提出具體建議。考量計畫主要需求單位在現行執行大型群眾活動核子保安之整備、應變工作重點，本研究計畫將著重於整備、應變作業中的防範工作，並以活動場域核輻射之偵測、監控和相關規畫為主要研究課題。

II. 主要內容

本計畫首先就國內各類大型群眾活動之特性進行探討，並參考國內外相關管理辦法和文獻，對各類型群眾活動建立分級架構，針對其中可能涉及輻射攻擊風險者做進一步質性的分析和討論，進而對國內大型群眾活動的核子保安體系及主管層級提出明確的轄屬和管理原則。根據所提出之大型群眾活動核子保安體系的分級、管理原則，本計畫另一研究目的在於針對大型活動可能遭受的輻射攻擊，規劃事前的整備作業和偵測佈署，並以 2017 臺北夏季世界大學運動會為分析案例，建立輻射偵測路線之規劃模式，透過實際的測試檢視模式實用性、提出具體之回饋，作為我國核子事故民眾防護行動規範之修訂參考。

III. 結果與討論

A. 大型群眾活動特性與整備、應變層級劃分

本研究參考美國國土安全部 SEAR (Special Event Assessment Rating) 分級，並考量活動規模、參與人數、活動型態等特性，帶入國內案例如下表。其中較可能涉及恐怖攻擊/輻射攻擊或需特別考慮元首、國安者，主要為 NSSE (National Special Security Event) 等級事件或 SEAR-1 等級中有較多國際人士參與、有一定程度國際影響或能吸引較高國際媒體關注者。

B. 大型群眾活動核子保安與核輻射偵測

考量人力資源與儀器成本有限的情況下，本研究選擇使用銷售員旅行路線規劃方法建立一路網架構並運用數學最佳化模式進行求解，以攻擊者角度為考量，決定輻射偵測之偵測目標，並將偵測目標點之間實測之點

事件分級	負責層級	案例
NSSE	總統府、國安局	- 總統就職典禮 (數十萬人) - 總統政治演說、國慶大典 (數十萬人) - 總統競選造勢晚會 (數十萬人，適用《總統副總統候選人安全維護實施辦法》)
SEAR-1	行政院	- 世界大學運動會 (開/閉幕式超過二萬人) - 超大型陳抗活動：紅衫軍、白衫軍、太陽花 (數十萬人且持續時間長)
SEAR-2	行政院	- 國際燈會 (超過百萬人) - 直轄市長競選造勢晚會 (超過五萬人) - 大型陳抗活動：眾神上凱道 (超過五萬人)
SEAR-3	地方政府	- 例行性國際賽事：日月潭國際泳渡 (三萬人)、臺北國際馬拉松 (六至十萬人) - 例行性地方大型慶典：平溪天燈、媽祖繞境、鹽水蜂炮 (破十萬人) - 大型跨年晚會 (數十萬人)
SEAR-4	應活動需求	- 職棒例賽、季後賽 (數千人至上萬人) - 地方型賽事：梅花湖鐵人三項 (近五千人) - 大型演唱會 (數千至上萬人) - 中型陳抗或競選活動

位間距帶入模式，進行運算，計算出最佳巡邏偵測路線。模式所求得之結果，除可作為作業小組或相關規劃人員對於偵測路線規劃之參考，根據所估算的巡邏時間，並可進而評估人力、儀器的配置是否充足。本研究以 2017 臺北世界大學運動會之開幕式進行案例分析，規劃偵測路線圖如下：



IV. 結論

本研究綜整國內外文獻和現行作法，主要參考美國國土安全部對於特殊事件主管、應變的分級系統 SEAR，提出適用我國大型群眾活動的分級方式，建議其中可能遭受恐怖/輻射攻擊而須特別加強相關防護機制者，包含列於 NSSE 之活動（直接涉及國家元首、潛在國安之虞者）以及 SEAR-1 層級中國際性較高、可能受到較多國際媒體關注、同時國家元首也一定程度參與而有相當的全國影響性者。本研究也針對潛在輻射攻擊風險下的大型群眾活動規劃有關輻射偵測的整備作業，亦為活動期間因應相關威脅最主要的維安、防護手段。對於非固定式的輻射偵測（以可攜式偵測儀器進行），本研究主要提出以空間路網呈現活動場館周邊的環境和空間特性，並以銷售員旅行路線的數學問題考量路網中所有可能遭受攻擊之點位，進而規劃出能巡迴所有點位之最短路徑（亦為一次巡迴所需時間最短者）。所提出之方法以 2017 臺北世界大學運動會開幕式進行案例的分析和操作說明，所規劃之巡迴路徑和其偵測時間估算可作為相關工作小組現場防護、整備作業之參考，以衡量其人力、資源的調度，甚至進一步可對於活動的風險進行評估：若能提高巡邏的頻率，同時也就提高攻擊的難度，亦等同於防護的實體強化、降低活動風險。

參考文獻

- [1] Business Navigation, *Host a Special Event*, City of Aspen, Colorado. Retrieved June, 2017 <http://specialevents.aspenpitkin.com/>.
- [2] Connors, E. (2007). *Planning and Managing Security for Major Special Events: Guidelines for Law Enforcement*, Office of Community Oriented Policing Services (COPS Office), U.S. Department of Justice.
- [3] Dantzig, G., Fulkerson, R., Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4), pp. 393–410.
- [4] Google Trends <https://trends.google.com.tw/trends/>.
- [5] Home Office of United Kingdom (2011). *London 2012 Olympic Safety and Security Strategic Risk Assessment (OSSRA) and Risk Mitigation Process*.
- [6] International Atomic Energy Agency (1988). *The Radiological Accident in Goiania*. IAEA, Vienna, STI/PUB/815.
- [7] International Atomic Energy Agency (2012). *Nuclear Security Systems and Measures for Major Public Events: Implementing Guide*. IAEA Nuclear Security Series No. 18.
- [8] McDonnell, I., Allen, J., O'Toole, W. (1999). *Festival and special event management*, Milton, Qld. Wiley.
- [9] Müller, M. (2015). What makes an event a mega-event? Definitions and sizes. *Leisure Studies*, 34(6), pp. 627–642.
- [10] Roth, R. (1969). Computer solutions to minimum-cover problems. *Operations Research*, 17(3), 455–465.
- [11] Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations research*, 19(6), pp. 1363–1373.
- [12] U.S. Department of Homeland Security (2014). *Special Event Assessment Rating (SEAR)*, National Network of Fusion Centers Final Report.
- [13] 官政哲，城市大型活動之反恐維安策略，第九屆「恐怖主義與國家安全」學術研討會，2013，141-152 頁。
- [14] 《臺北市大型群眾活動安全管理方案》，2016 頒布。
- [15] 《高雄市政府辦理大型活動安全管理作業要點》，2012 市政會議通過。
- [16] 《大型群眾性活動安全管理條例》，中共國務院，2007。

核能電廠低中壓電纜老化檢測與評估研究 Measurement and Evaluation for Low-medium Voltage Cable in Nuclear Power Plants

計畫編號： MOST 106-2623-E-007-003 -NU

計畫類別： ☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫主持人：張廖貴術

e-mail： lkschang@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：方星凱、余彥呈

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

核能電廠機電控制系統裡低中壓電纜的老化劣化評估是一項非常重要的研究題目，其中絕緣材料之老化劣化監測則是基礎而先決的工作。本研究計畫之主要目的，係就核能電廠使用重要設備之中低壓電纜，探討並建立其老化評估的方法及設備。主要的工作係建立 EPR 低中壓電纜泡水與熱人為老化實驗及檢測方法，電纜絕緣材料老化機制與劣化模型之探討，及核能電廠低中壓電纜之允收準則及壽命評估等。研究結果顯示絕緣材料伸長率適合作為允收準則來評估電纜壽命，輻射傷害使絕緣材料產生缺陷並加重溼熱產生的劣化效應。電纜老化程度可由介電損失參數值來觀察，據電纜材料劣化趨勢及程度，並應用 Arrhenius 公式，可以估算其剩餘壽命。本研究計畫所建立之中低壓電纜老化劣化評估方法，可供核能電廠及產業界檢測核能級設備組件所使用，增進核能電廠營運安全，並可深入瞭解絕緣材料老化與劣化效應之物理機制，以期提昇我國之核能科技。
關鍵詞：核電廠、中低壓電纜、絕緣材料、老化、熱濕、輻射、評估

Abstract

The assessment of aging and degradation effects on low-medium voltage cable of the instrumental system in a nuclear power plant is a very important research topic, in which the monitoring of aged insulation material is a basic and preliminary work. The aim of this project is to study and build up the assessment procedures and facility for the insulation materials of low-medium voltage cables used in a nuclear power plant. The major works were to perform the artificial aging experiments with temperature or moisture conditions on the insulation materials of low-medium voltage cable, comprehensive comparison of various test methods for aged cables, the assessment of degradation level and life time for aged cables, and the study of degradation mechanism for insulation materials of aged cable. Results show that the electrical degradation of cable is caused by long term high-temperature submergence. Combining insulation resistance and dissipation factor ($\tan \delta$) measurements can offer a very useful approach to monitor the thermal-moisture related degradation behavior in cables. According to the aging trend and the application of Arrhenius model, the cable remaining life can be evaluated. The method of aging and degradation assessment can be used by the nuclear power plants and the cable vendors to verify the cable components

for the nuclear applications. Then, the safety of operation in nuclear power plant possibly can be improved and the mechanism of aging and degradation effects on the insulation materials of low-medium voltage cables can be well understood, which thereby would promote the technology and science of nuclear in this country.

The assessment of aging and degradation effects on low-medium voltage cable of the electrical/mechanical system in a nuclear power plant is a very important research topic, in which the monitoring of aged insulation material is a basic and preliminary work. The aim of this project is to study and build up the assessment procedures and facility for the insulation materials of low-medium voltage cables used in a nuclear power plant. The major works were to setup the artificial aging experiments with temperature or moisture conditions on the insulation materials of EPR low-medium voltage cable, study of aging mechanism and degradation model for cable insulation materials, and assessment of degradation level and life time for aged cables. Results show that the elongation percentage of insulation material is appropriate for the acceptance criteria of cable lifetime. Defects in insulation material are formed by radiation damage, which also causes more degradation of cable in long term high-temperature submergence. The dissipation factor measurement is a very useful approach to monitor the thermal-moisture related degradation behavior in cables. According to the aging trend and the application of Arrhenius model, the cable remaining life can be evaluated. The method of aging and degradation assessment can be used by the nuclear power plants and the cable vendors to verify the cable components for the nuclear applications. Then, the safety of operation in nuclear power plant possibly can be improved and the mechanism of aging and degradation effects on the insulation materials of low-medium voltage cables can be well understood, which thereby would promote the technology and science of nuclear in this country.

Keywords: nuclear power plant, low-medium voltage cable, insulation material, aged, thermal-moisture, radiation, assessment.

I. 前言

核能電廠廣泛使用的 EPR 電纜，其壽命通常可達數十年以上，但由於有些電纜在使用期間可能經歷較惡劣的環境，包括溫度、溼度及輻射等，而造成這些電纜加速老化，使得實際使用壽命大幅縮短。目前有許多電纜

老化現況偵測 (Condition Monitoring, CM) 方法, 如 indenter、OIT、density 量測等, 已被認為可有效評估電纜老化程度[1-2], 不過這些 CM 方法只能用於電纜的端點或可接觸 (accessible) 部分。對於裝置於管線或溝槽內的非接觸電纜 (inaccessible cable) 而言, 當局部遭受濕氣/浸水、高溫、輻射等較惡劣的環境時, 並無法使用上述 CM 方法, 來評估電纜老化情形。因此, 探討電纜濕氣結合溫度或輻射之劣化行為及偵測方法, 對核電廠電纜老化管理及長期運轉工作是很重要的。電氣偵測方法最大優點在於可直接評估整條電纜功能與電性劣化情形, 所以適用於非接觸電纜。對於高壓電纜長期處於溼度/浸水環境下, 產生水樹 (water trees) 現象, 而造成電纜加速劣化或失效, 目前已有許多文獻研究, 但是探討有關低壓電纜濕氣劣化 (moisture-related degradation) 影響的文獻並不多。經過去研究顯示, 低壓電纜因絕緣材料所受到的電壓應力較低, 所以不會產生水樹現象[3]。雖然如此, 濕氣仍被視為老化因子, 足以影響電纜功能與使用壽命, 尤其在結合溫度與輻射環境, 所造成合成效應的影響[4], 對核電廠電纜老化管理特別重要[5]。利用絕緣電阻量測, 來作為確認電氣設備絕緣性能是否正常, 乃目前最被廣泛使用且為一種簡單快速的方法。由於過去認為此種方法對於熱所造成的材料老化較不敏感[5], 所以較少作為電纜絕緣老化現況偵測方法。然而最近文獻已顯示[6], 熱氧化所引起的老化現象, 會改變 EPR 絕緣材料的絕緣阻抗。由於濕氣環境可提供良好傳導路徑, 所以利用絕緣電阻量測濕氣結合溫度或輻射所造成的材料老化, 可能是很有用的現況偵測方法。另外, 在濕氣環境下, 散逸因素 (dissipation factor 或稱 Tan delta) 為另一種有效的電纜老化現況偵測方法[5,7], 當絕緣材料逐漸老化時, 所量測的值也隨之增加。本研究計畫之目的係建立 EPR 低中壓電纜泡水與熱人為老化實驗及檢測方法, 電纜絕緣材料老化機制與劣化模型之探討, 及核能電廠低中壓電纜之允收準則及壽命評估。

II. 主要內容

本研究計畫之實驗方法及設備略述如下,

電纜材料:

本研究採用低壓電纜的構造為 EPR 600 V 12AWG 3C+14AWG 3C 接地線, 外被覆為 CSPE (chlorosulfonated polyethylene), EPR 絕緣材料厚度約 0.76 mm。中壓電纜的構造為 EPR 15 kV 4/0 AWG, 絕緣材料厚度約 5.6 mm, 被覆為 CSPE。

輻射老化:

為避免短時間大劑量照射電纜, 致絕緣結構遭破壞, 本研究將照射時間由 1 個月延長至 3 個月, 劑量為核反應器 40 年累積之劑量約 50Mrads。

濕熱老化:

將 EPR 電纜置於熱水中浸泡, 以模擬在濕熱老化環境下之電纜劣化, 並在此期間施予電性量測。另考量 EPR 絕緣長期最高耐受溫度為 90°C, 實驗溫度將控制在 90°C, 以避免絕緣因超過使用溫度破壞。

絕緣電阻:

使用 Megger 公司所生產之高阻計 MEG10-01 量測電纜絕緣電阻值及吸收比。

介質損失:

使用 Hipotronics 公司所生產之靜電容量與散逸因素自動量測儀器 Tettex-2877 量測電纜靜態電容、散逸因素及洩漏電流。

III. 結果與討論

本研究計畫除了建立 EPR 低中壓電纜泡水與熱人為老化實驗及檢測方法, 也藉由 EPR 絕緣材料之硬度與申長率量測探討其老化機制與耐壓強度之關聯, 然後綜合其結果評估低中壓電纜之允收準則及壽命。計畫進行期間的查核意見, 建議本計畫工作內容加入輻射傷害的劣化效應。以下分別敘述主要的結果。

硬度與申長率量測

EPR 電纜在熱老化的現象為硬化(hardening), 電纜在熱老化 175°C 之硬度變化, 如圖 1 所示。實驗結果顯示, 電纜在老化時間 130 小時已嚴重老化, 其硬度值高達 91。惟電纜在老化時間大於 130 小時, 其硬度值反而較低。依據 ASTM D 2240 標準測試說明, 當硬度值高於 90 時, 所得測試結果會有較大誤差。本實驗將未老化與熱老化的中壓電纜切薄片後伸長率測試結果, 如圖 2 所示。顯示電纜經過 136 °C/2520 h 熱老化後, 絕緣材料的平均伸長率從 383 % 下降至 95 %; 而平均耐壓強度從 49.4 kVac/mm 下降至 21.9 kVac/mm。

根據美國核能級電纜 IEEE 383 驗證標準, 規定加速老化後之電纜絕緣強度, 最少應大於 3.2 kVac/mm (80 Vac/mil)。另在 AEIC 標準規範, 規定加速老化後之電纜絕緣強度, 最少應大於 10 kVac/mm。因此, 從以上電纜材料硬度與申長率之量測結果, 即使材料已有明顯劣化現象, 其絕緣強度仍在規格以上。

在熱老化環境下, 橡膠電纜絕緣材料老化到了抗氧化劑逐漸用盡時, 將導致伸長率在某區間快速下降, 則稱為 induction-time region。另外, 也發現某些 EPR 材料出現老化斑點, 其可能原因為抗氧化劑濃度分部不均勻時, 濃度較低的局部區域在老化過程先耗盡, 而造成此區域快速老化。最後, 研究顯示橡膠電纜老化過程大約可分為褪色、硬化、收縮、脆化/龜裂等階段。

在濕熱老化環境下, 橡膠電纜絕緣材料老化的過程中, 空孔大小與密度的增加, 使得外界水分子容易侵入絕緣材料內部, 而造成材料耐水性變差及電纜耐電壓強度的劣化。另外, 絕緣材料在濕熱老化過程, 因形成較大且較多的空孔, 使得材料體積膨脹。

本實驗顯示電纜在不同老化環境, 其壽命評估準則也應該有所不同。電纜在熱老化環境時, 絕緣材料伸長率降低速度最快, 所以適用伸長率作為允收準則, 來評估電纜壽命。而在濕熱老化環境時, 由於絕緣材料耐壓強度降低速度最快, 故應以耐壓強度作為允收準則, 來評估電纜壽命, 此結果有助於電纜劣化監測與剩餘壽命評估工作。

本研究觀察與分析電纜在實驗室人工加速老化與自然老化的物理性變化, 顯示兩者老化的過程一致, 此結果將有助於, 利用感官檢查技術, 並配合人工加速老化實驗與人員訓練, 對核電廠使用中的電纜進行評估。

輻射傷害對濕熱老化效應

從各種電性檢測來進行濕熱老化電纜(已浸泡熱水 154 天)分析,絕緣電阻及吸收比在初期下降很快,之後則緩慢下降,無較明顯變化。在介電損失量測中,靜電容量與洩漏電流均隨老化時間呈現上升曲線,散逸因素呈現週期振盪上升。

(1) 輻射對濕熱老化電纜影響

由量測數據來看,輻射似乎對電纜並無影響,但我們進一步比較輻射照射過前後之濕熱老化電纜,發現有照射過輻射電纜的介電損失各參數上升速率均較未照射過輻射電纜快,如圖 3 及圖 4 所示。因此輻射效應將使絕緣材料產生變化,並與其他效應雙重影響,使電纜老化。

(2) 電壓對濕熱老化電纜影響

為了解加載對已濕熱老化之電纜影響,將已浸泡 112 天之電纜拿出熱水池加載(電壓 13.8kV、電流 130A) 1 個月,再進行絕緣電阻、介電損失及局部放電等電性量測。絕緣電阻及吸收比則在加載後明顯上升變好,絕緣電阻由 2.21 G Ω 上升至 119 G Ω ,吸收比至 1.39。而在介電損失量測中,加載後靜電容量及散逸因素均下降,靜電容量值由 1015 pF 下降至 1013.7 pF,散逸因素由 0.0102 下降至 0.00928。由此可知,加載雖然使電纜承受電應力及熱應力,但由於加載之電應力及熱應力均在電纜額定耐受承度下(15kV/90 $^{\circ}$ C),因此在額定能力下加載對電纜可視為是一種去濕作用。

通常良好電纜的各介電損失參數,在允許電壓下,無論電壓大小,各參數值應保持不變,即以電壓為橫軸,介電損失參數為縱軸之圖形上應為一直線。但若電纜內部存在氣泡或水氣,以電纜在不同時期的數據來進行比較,未老化的電纜,從低電壓到高電壓,靜電容量僅微幅上升 1.6pF,散逸因素上升 0.00079,可說是變化相當微小。而在泡水 3 年電纜當中,靜電容量則上升 11pF,散逸因素上升 0.0032,靜電容量及散逸因素斜率較未老化電纜大,如圖 5 及圖 6 所示。因此我們除了藉由比較電纜介電損失參數值大小外,斜率也是可用來判斷電纜濕熱老化之依據。

IV. 結論

本研究計畫完成了預期的工作項目,由研究發現絕緣材料伸長率降低速度快適用為允收準則,來評估電纜壽命。介電損失對老化檢測效果頗佳,欲對電纜進行完整之評估,須建立長期性檢測追蹤,並輔以不同檢測方式,方能有效達成電纜劣化評估。輻射效應使絕緣材料產生缺陷,並加重溼熱效應影響。電纜老化程度可由介電損失參數值來觀察,比較參數對加載電壓之斜率可更清楚判斷電纜受濕熱老化之程度。電纜經長期溫濕度老化,造成電纜電性的劣化。結合絕緣電阻與散逸因數檢測方法,能有效偵測電纜熱濕氣劣化的行為。依據電纜材料劣化趨勢及程度,並應用 Arrhenius 公式,可以估算其剩餘壽命。本研究所建立之中低壓電纜老化劣化評估方法,可供核能電廠及產業界檢測核能設備組件所使用,增進核能電廠營運安全,及深入瞭解絕緣材料老化與劣化效應之物理機制。

參考文獻

[1] Kenneth T. Gillen, Roger A. Assink, Robert Bernstein.

Condition monitoring approaches applied to a polychloroprene cable jacketing material. Polymer Degradation and Stability 2004; 419-431.

- [2] J.V. Gasa, Z.Liu, M.T. Shaw. Relationship between density and elongation-at-break of naturally and artificially aged cable materials used in nuclear power plants. Polymer Degradation and Stability 2005; 77-85.
- [3] EPRI TR-103834-P1-2. Effects of moisture on the life of power plant cables. Final Report; 1994.
- [4] NUREG/CR-6384 Vol. 1-2. Literature review of environmental qualification of safety-related electric cables. Final Report; 1996.
- [5] SAND96-0344. Aging management guideline for commercial nuclear power plants-electrical cable and connections. 1996.
- [6] Yangyang Sun, Shijian Luo, Ken Watkins, C.P. Wong. Electrical approach to monitor the thermal oxidation aging of carbon black filled ethylene propylene rubber. Polymer Degradation and Stability 2004; 209-215.
- [7] S.V. Nikolajevic. The behaviour of water in XLPE and EPR cables and its influence on the electric characteristics of insulation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999.
- [8] J. Novak, R. Bartnikas, Ionization and excitation behavior in a microcavity. IEEE Transactions Dielectrics Electrical Insulation, Vol. 2, 1995 ; 724-728.
- [9] David A. Horvath. Updated aging assessment approach and use with electric cable insulation. Nuclear Technology, Vol. 143, August 2003.

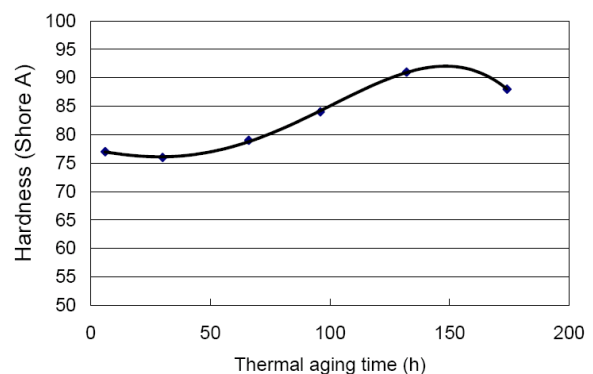
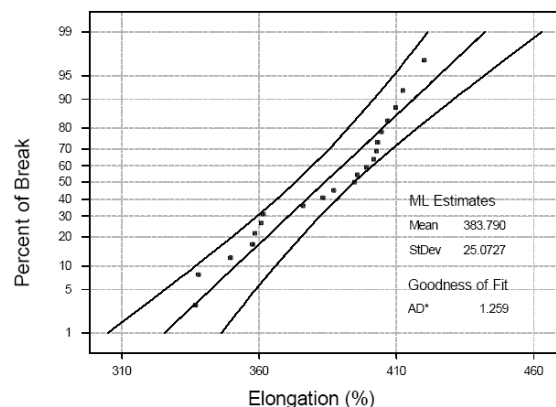
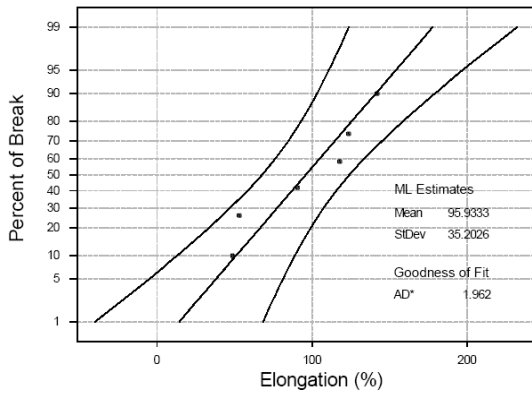


圖 1 電纜熱老化 175 $^{\circ}$ C 之硬度變化



(a)



(b)

圖 2 (a)未老化與 (b)熱老化 136°C/2520h 電纜之伸長率

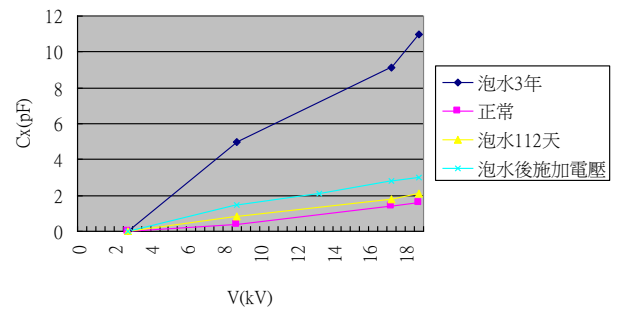


圖 5 電纜長期濕熱老化之靜電容量與外加電壓關係

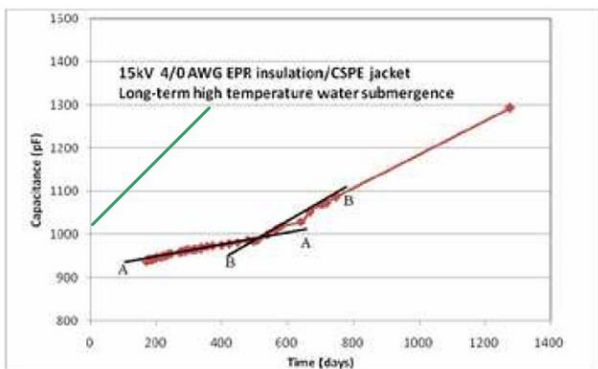


圖 3 電纜長期浸水老化之靜電容量變化與輻射對濕熱老化之影響

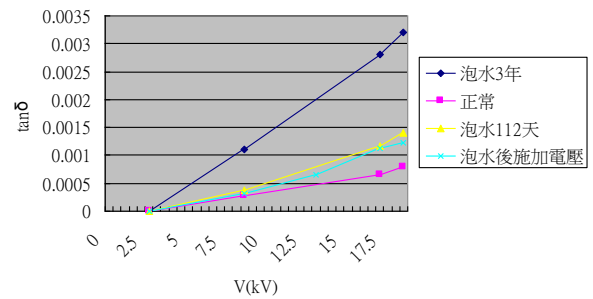


圖 6 電纜長期濕熱老化之散逸因素與外加電壓關係

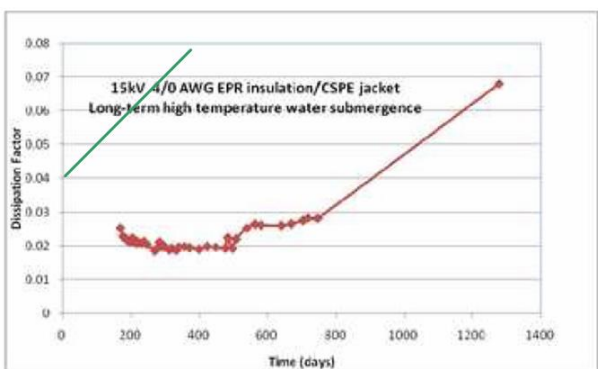


圖 4 電纜長期浸水老化之散逸因素變化與輻射對濕熱老化之影響

應力分析與 CFD 耦合之流沖振動(FIV)模式發展與應用

計畫編號：NSC 106—NU—E—007—003—NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：馮玉明

e-mail：ymferng@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：賴科維、黃品鈞

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

流沖振動(Flow-induced vibration)、水槌(Water hammer)、熱疲乏(Thermal fatigue)、沖腐蝕(Erosion-corrosion)以及壓熱震(Pressurized thermal shock)為電廠重要組件老化與劣化的主因。這些劣化機制基本上屬於應力與流力之流固耦合或交互作用(Fluid structure interaction)。近年來，國外核能安全相關研究單位(包含電廠供應商、管制單位以及學術單位)已開始研究 CFD/Stress analysis 流固耦合模式應用於核電廠重要組件老化與劣化安全分析之可行性，以增進核能電廠之運轉安全以及重要組件設計改善。基於增進國內運轉多年核能電廠之安全並增加民眾的信心，國內核能電廠重要組件相關之老化與劣化分析亦應該開始發展 CFD/Stress analysis 流固耦合模式，並研究其可行性以及分析結果之保守性。

早年核能相關組件老化與劣化之研究大多先進行 CFD 分析，以提供相關熱水流特性與作用力源項(Forcing sources)，再進行應力分析與組件受損分析，此為單向之 CFD/Stress analysis 流固耦合分析方法論。近年來，電腦計算與儲存能力大幅進步，雙向的 CFD/Stress analysis 流固耦合分析方法論已變為可能，使得流沖振動等分析更接近真實的物理現象。然而，核能安全分析的主要精神乃在於分析模式的可行性與保守性。於是，發展單向與雙向 CFD/Stress analysis 流固耦合之 FIV 分析模式並以核電廠應用最廣重要組件的管束流為主，分析的流況亦包含層流與紊流以及單相與雙相，並評估單向/雙向流固耦合應用於電廠複雜幾何配置之可行性以及保守性。用單向與雙向耦合分析的可行性評估與模式校驗的結果來接續並針對核電廠重要組件進行流沖震動分析，並評估單向與雙向耦合分析模式之適用性與保守性。

關鍵詞：流沖振動；流固耦合分析

Abstract

Flow-induced vibration (FIV), water hammer, thermal fatigue, erosion-corrosion, and pressure thermal shock (PTS) are the main causes of aging and deterioration of key components of nuclear power plant. These degradation mechanisms basically belong to the solid coupling or interaction between stress and fluid, also known as fluid structure interaction. In recent years, the feasibility of the CFD/stress analysis fluid-structure coupled model applied to aging and deteriorating safety analysis of important components of nuclear power plants have been studied by foreign nuclear safety research agency to enhance The

operational safety of nuclear power plants and the improvement of important component designs. The analysis of aging and degradation related to important components of domestic nuclear power plants should also begin to develop the fluid-structure interaction model of CFD/stress analysis to improving the safety of domestic nuclear power plants operating for many years and increasing people's confidence.

Most of the research on the aging and degradation of the early nuclear energy related components were conducted firstly by CFD analysis to provide relevant hot water flow characteristics and forcing sources, and then stress analysis and component damage analysis, which is called a one-way CFD / stress analysis. Due to the improvement of computing and storage capabilities of computer, the two-way coupling of CFD / stress analysis has become possible. However, the main spirit of nuclear energy safety analysis lies in the feasibility and conservation of analytical models. One-way and two-way CFD/Stress analysis model of the tube bundle flow of the most important components are developed and bring into comparison of there feasibility and conservation.

Keywords：Flow-induced vibration；two-way CFD/Stress analysis

I. 前言

隨著多年的運轉，核電廠重要組件老化與劣化，深深影響電廠運轉的安全。造成重要組件的老化與劣化的主因，包含中子照射材料而劣化、流沖振動(Flow-induced vibration, FIV)、水槌(Water hammer)、熱疲乏(Thermal fatigue, TF)、沖腐蝕(Erosion-corrosion, EC)以及壓熱震(Pressurized thermal shock, PTS)等。其中，FIV, EC, TF 與 PTS 的基本物理現象皆屬於應力或稱固力(Solid mechanics)與流力(Fluid mechanics)之耦合(Fluid structure coupling)或交互作用(Fluid structure interaction)。這些重要組件包含安全注水(Safety injection, SI)與斷然處置所仰賴的冷端注水的 T-型管(T-junction)與爐槽降流區(Vessel downcomer)、蒸汽產生器(Steam generator)與飼水加熱器(Feedwater heater)熱換管以及燃料管束(Fuel bundles)等。

在實驗研究方面，Koopmann[1]於 1967 年即實驗觀察圓柱體受流體橫向作用之影響與流場之變化；Griffin[2]亦曾實驗研究圓柱體於不同流體中，其下游渦旋的形狀變化；King 與 Johns[3]研究兩個圓柱體間彈性振動所引起干擾流動等特性；Ongoren 與 Rockwell[4]曾利用氫氣氣泡技術觀察以正弦軌跡的圓柱振動於渦漩

流場內之變化；Jendrzeczyk 等人[5]以實驗方式研究雙圓柱體並排於流場時，可能之運動模式；Assi 等人[6]利用 water channel 進行一個圓柱體受上游圓柱體尾流(Wake)之流沖振動相關實驗；最近 Kim 與 Alam[7]亦執行實驗以研究兩個平行排列圓柱體流沖振動之特性以及提出抑制振動之可行方式。

在數值模擬方面，Hurlbut 等人[8]開始以有限差分的數值方法進行圓柱體振動流場的求解；Mittal 與 Tezdyar[9]則以有限元素法模擬單一圓柱體之彈性振動特性；Ichioka 等人[10]採用有限差分法與移動式網格(Moving grid)進行流沖振動之 CFD 模擬；Kassera 等人[11]利用有限體積法進行單管與管束之流沖振動模擬；Schroder 與 Gelbe[12]應用 2-D 與 3-D 模式模擬管束受橫向流造成之流沖振動情形；Mittal 與 Kumar[13]、Jester 與 Kallinderis[14]、Papaioannou[15]均分析兩個縱列的兩個圓柱體流沖振動之特性；Longatte 等人[16]提出 ALE(Arbitrary Lagrange Euler)方式同時模擬流力與應力之雙向耦合並進行單管與管束的流沖振動分析；Carmo 等人[17]執行 2-D(二維)與 3-D 計算以模擬縱列的兩個圓柱體之流沖振動現象；最近 Han[18]等人也進行四方排列圓柱體之流沖振動的相關分析研究。

從這些文獻回顧可以看出，流沖振動相關研究從三四十多年前到現在，一直都有相關的研究進行與發表。不過，近十年來流力與應力之耦合分析才逐漸應用於核能安全分析上，依據 NEA/CSNI/R13(2007)報告[19]以及 Smith 於 2009 年 NURETH-13 發表的論文[20]所論述 NRS (Nuclear Reactor Safety) problems requiring CFD 的表中，耦合流力分析與應力分析(Stress analysis)的安全課題就包含有 FIV induced break、EC、TF 以及 PTS 等。因此，國外核能安全相關研究單位(包含電廠供應商、管制單位以及學術單位)已開始研究 CFD/Stress analysis 流固耦合技術應用於核電廠重要組件老化與劣化之安全分析，以增進核能電廠之運轉安全以及重要組件設計改善。不管國內核能政策如何走向，只要核能電廠存在一天，增進電廠運轉安全之研究，就值得進行。基於增進國內運轉多年核能電廠之安全並增加民眾的信心，國內核能電廠重要組件相關之老化與劣化分析研究亦應該開始發展 CFD/Stress analysis 流固耦合之可行性以及其應用於核能安全分析之保守性。

應力分析與流力分析基本上是基於守恆定律(Conservation law)進行多維局部(Multi-dimensional and localized)的物理特性模擬。NEA/CSNI/R13(2007)報告曾提及，應用這兩大領域於核能安全分析是需要專業人才與大量電腦資源。因此，早年核能安全分析僅能分別採用應力分析或稱計算固體力學(Computational Solid Mechanics, CSM)與 CFD 分析進行組件老化與劣化之研究。或者先進行 CFD 分析，以提供相關熱水流特性與作用力源項，進行相關應力分析與組件受損分析，此為單向之簡化流力/固力分析方法論。近年來，電腦計算與儲存能力大幅進步，雙向的 CFD/Stress analysis 流固耦合分析方法論已變為可能，使得流固耦合分析結果更接近於實際物理特性。然而，雙向流固耦合耗費大量的電腦計算資源，此外核能安全分析之精神主要在於分析模式的可行性與保守性，此為一般 CFD/Stress analysis 流固耦合分析之其他領域應用所不同之處。本計畫主要為雙

向流固耦合分析模式建立與校驗；針對熱交換器管束之漩渦激勵振動與流彈性不穩定進行實際評估；比較單/雙向流固耦合模式預估結果之保守性；最後蒐集、彙整與研究國外發表雙相氣泡流耦合應力與 CFD 之分析模式。

II. 主要內容

對於核電廠組件常見的 FIV 機制可分為：紊流沖擊(Turbulence buffeting)、漩渦激勵振動(Vortex induced vibration)以及流彈性不穩定(Fluidelastic instability)。其中紊流沖擊振動機制與紊流邊界層(Turbulent boundary layer)之離散壓力波動(Random pressure fluctuation)及紊流尾流(Turbulent wake)有關。漩渦激勵振動或稱為漩渦傳播(Vortex shedding)之振動機制則常發生於管束下游，當流體流至管子下游時產生上下交替之漩渦(Trapped vortex)，導致管子受到週期性之升力，而由於此力之作用，造成管子振動，此種漩渦發生之頻率與管子之自然振動頻率相同時即發生共振而導致管子因振幅過大而與支撐板或管與管間互相碰撞發生長時間磨耗而損壞。流彈性不穩定振動機制係因流體流速達到某一臨界值時，熱交換器管束產生振幅極大之運動，此時管與管或管與支撐板孔間之碰撞，常使管子於極短時間內損壞。此外，流彈性不穩定之振動機制，依發生不穩定支配條件之不同，又可分類為流體阻尼支配不穩定(Fluid damping controlled instability)及流體剛度支配不穩定(Fluid stiffness controlled instability)。管束在上述振動機制下，會導致管束因碰撞(Impact)、磨耗(Fretting)或疲勞(Fatigue)而損壞，影響電廠運轉安全與發電效率。因此，管束在橫向流的振動行為，對於管束的完整性是非常關鍵的特性且其與流場特性息息相關。此外，造成漩渦激勵振動的共振頻率與振幅大小以及流彈性不穩定的臨界流速估算，也取決於準確地流場分析。

流體計算力學中，往往需作最基本假設，假設質量守恆、動量守恆，故流體計算需要連續的守恆方程組。雙向耦合中，由於有應力軟體的資料回傳，故格點會產生移動，以下分別表示之：

單向耦合(One-way coupling)

連續方程式(Conservation of Mass; Continuity Equation)：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0$$

動量方程式(Conservation of Momentum; Momentum Equation)：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S$$

雙向耦合(Two-way coupling)

連續方程式(Conservation of Mass; Continuity Equation)：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho(u_j - u_{mj})}{\partial x_j} = 0$$

動量方程式：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i (u_j - u_{mj})}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S$$

而當接受到流場資料後，壓力可積分成力的形式，此力及為作用在圓柱上的升力及阻力，而其程式如下：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_x$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y$$

其中， F_x 為流體作用於管束之阻力(Drag force)； F_y 為流體作用於管束之升力(Lift force)；而 m, c, k 分別為管束之每單位長度質量、結構消散係數(damping coefficient)以及彈簧常數(Spring constant)。

當應力程式計算出管束受流體衝擊而移動之位置後，管束表面的格點勢必要移到新的位置，而格點的移動可由 Laplacian diffusion equation 決定：

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial x'}{\partial x_j} \right) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial y'}{\partial x_j} \right) = 0$$

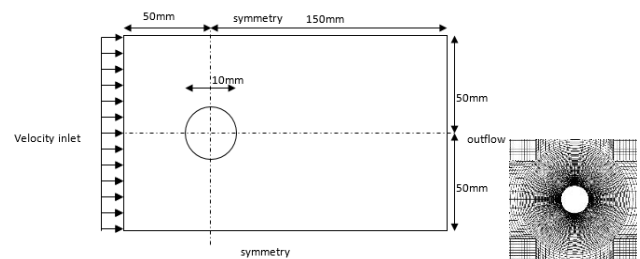
x', y' 為格點於 x, y 方向改變的位置； x^0, y^0 為移動前格點的位置而 x, y 為移動後格點的新位置。而根據文獻回顧並考量到準確度與電腦計算速度，本計畫以 SST k- ω model 與 LES model 來模擬流固耦合中流場的紊流特性。在模型的選擇與建立上，為求在最後以九根圓柱陣列來更貼近電廠實際情況，我們先建立並測試單根與雙根圓柱的模型，以利後續的分析。

在單根圓柱的流固耦合模擬中，本研究使用二維分析方法來模擬單根圓柱的震動，並將三維模型以二維的方法來模擬，圓柱直徑為 10mm，流場全長為 200mm，寬為 100mm，圓柱中心距入口 50mm 距離出口 200mm。並且在進行網格靈敏度分析時參考了 Han[12]的分析方法，將圓周切成不同等分，本研究在單根流固耦合模型的驗證中，將圓周劃分成三種不同等分的案例來分析，其劃分的數目依序是 80、120、160。本研究初步利用前人研究之結果加以驗證，其雷諾數大小設定在 200，流速為 0.02m/s，上下邊界設為 symmetry，左方為 velocity inlet，而右方為 outflow。使用的紊流模式不準度分析中，由於已有文獻指出 k- ε 無法準確的模擬渦流現象，故在單根圓柱之流固耦合的模擬中，本研究選擇了 SST k- ω model 與 LES model 來比較其計算結果。

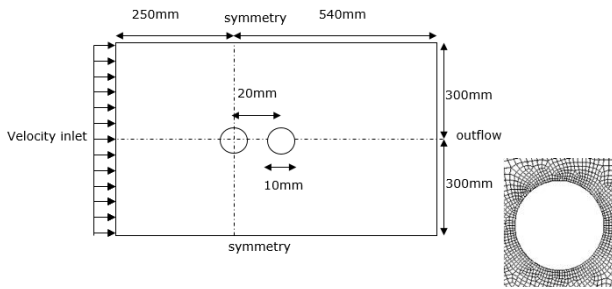
而為了確定流固耦合的方法在單根圓柱的模型可成功模擬且能順利的將此模式套用在多根管柱的模擬上，本研究選擇從雙根圓柱陣列開始模擬，使橫流通過此兩根圓柱，形成分別在上下游的圖形，並觀察其週期渦流的變化是否會交互影響，流場範圍參考 Ravi ChaithanyaMysa[21]等人的設置。圓柱直徑為 0.01m。兩根圓柱之距離 L_x 為 2D。在兩根圓柱流固耦合之模擬中，本研究將雷諾數設定在 200，進口流速為 0.02m/s，上下邊界設為 symmetry，左方為 velocity inlet，而右方為 outflow，由於在單根圓柱的案例中，已經確定了 LES model 相較於 SST k- ω model 在渦流脫離的表現更為精確，且較接近實驗的結果，故在兩根圓柱流固耦合模擬的研究中，本研究選定 LES model 作計算。利用 Fluent 與 Mechanical 求解時均須建立網格，而網格的品質，與

計算時間有密切關聯，Fluent 劃分網格的原則以劃出正交網格為主以減少誤差，在近壁處則將網格加密，以觀察壁面複雜之流體現象。由於 LES model 之網格尺寸與時間步大小有關，故在此分析案例中，我們將時間步設為 0.01，並將圓周切成 80、120、160 等分之網格，將此計算結果比對後並選取適當的圓周數與時間步。在兩根圓柱流固耦合之模擬中，本研究將雷諾數設定在 200，進口流速為 0.02m/s，上下邊界設為 symmetry，左方為 velocity inlet，而右方為 outflow，由於在單根圓柱的案例中，已經確定了 LES model 相較於 SST k- ω model 在渦流脫離的表現更為精確，且較接近實驗的結果，故在兩根圓柱流固耦合模擬的研究中，本研究選定 LES model 作計算。

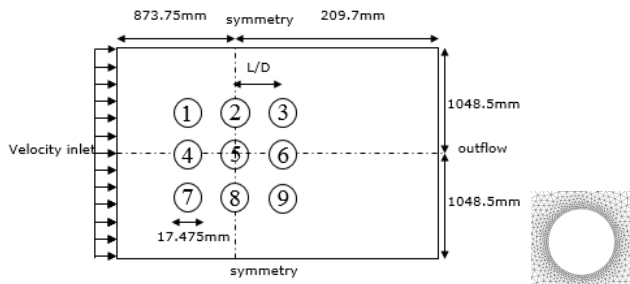
而在觀察與確認雙根圓柱陣列模擬的可行性後，接著我們以核三廠一號機蒸氣產生機之尺寸為參考建立九根圓柱陣列模型，將核三廠一號機蒸氣產生機轉為二維模型。由於蒸氣產生機內有分隔板的關係，所以有強烈的橫流現象(cross flow)產生，故可以將蒸氣產生機轉為二維模型作模擬與討論。本研究將九根熱交換管以正方形排列當作分析模型如圖一所示。其中，熱交換管外徑為 17.475mm，圓心相距 L/D ，並以兩種間距分析其流場變化，間距分別為核二廠蒸氣產生機實際尺寸 24.84mm 與 42.315mm，中心圓柱與進口相距 873.75mm 與出口相距 209.7mm 並與上下兩邊界相距 1048.5mm，並將圓柱如圖中所示，依數字 1 至 9 依序命名。在九根圓柱陣列模擬使用了非結構性網格，如下圖二場網格劃分圖，非結構性網格相較於結構性網格來說，雖然會增加總網格數量，但是對於複雜的物理模型可以迅速生成，在精確性方面，兩者並無明顯差異，由於本模擬使用的分析模型為二維模型，在網格數量上並不如三維模型中將結構性網格改成非結構性網格的網格增加量來的龐大，故使用非結構性網格是可行的做法。而在近壁面處將網格作加密處理以觀察複雜的流體現象，如下圖三示。由於在核三廠蒸氣產生器內冷端(cold leg)之流速不會超過 1m/s，故在本研究中，最大進口速度設為 1m/s，而最小進口流速設為 0.02m/s，並觀察此區間流場圓柱升力係數與阻力係數之隨時間變化，而流場的上下方設為 symmetry。



圖一、單根流場全域與近壁網格圖



圖二、雙根流場全域與近壁網格圖



圖三、九根流場全域與近壁網格圖

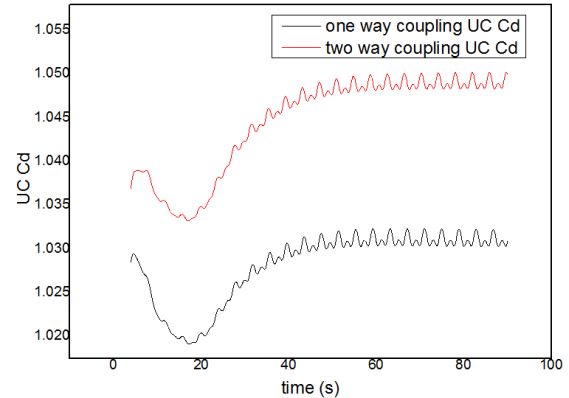
III. 結果與討論

根據單根與雙根模型的分析並與前人之模擬結果作驗證，可以發現將圓周切成 120 等分之模型與前人最接近，且與 Meneghini et al. 計算之結果可以說是幾乎完全一致，唯在 Strouhal number 上高估了一些，但仍在工程誤差可接受的範圍內，根據此結果所示，在後續的分析中，將圓周分割成 120 等分且時間步設為 0.01s 進行模擬分析是可行的做法。並且我們將單向流固耦合與雙向流固耦合之結果比較，由於雙向流固耦合涉及了圓柱振動的回傳，此振動會造成流場產生變化，且可能導致 lock-in 的現象發生，故在上游阻力係數的表現方面較單向流固耦合來的高，而下游圓柱原本受阻力係數的影響並不大，故兩者之前的數值相差無幾，不過，即便是上游，單向耦合與雙向耦合的差異也沒有超過 5%。如圖四與圖五所示。

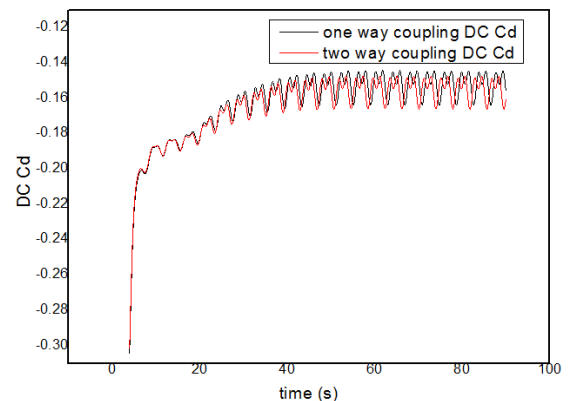
圖六與圖七為不同秒數下，圓柱中心距離 42.315mm 之圓柱周圍之流速與流線分布圖，由圖中可以看出在圓柱之間由於有強烈的速度梯度產生紊流動能(turbulence kinetic energy)以至於產生渦旋，顯示在多管排的結構體中，渦流引致震動的現象是需要被注意的。此外，下游的管排尤須注意震動的情形，圖八與圖九為不同時間下圓柱周圍之壓力與流線分布圖，由圖中可以明顯看出第 1、2、3 根圓柱之壓力最高點一直都在圓柱的左方且沒有明顯的壓力最小值，而第 9 根圓柱在第 88 秒時，壓力的極小值在圓柱的右下方且壓力極大值在圓柱的左上方，但是到了 89.9 秒時，壓力最小值卻出現在圓柱左下方而最大值出現在圓柱左上方，此壓力的分佈不均即是因為複雜的渦流現象產生，且會造成劇烈的圓柱震盪，故在下游的管排需要加強其支撐，以防產生震動現象導致疲勞發生。

本研究將各同列之圓柱的升力與阻力係數放在一起比較，可得知上游圓柱相較於中下游的圓柱，並沒有如此明顯的震盪，但其在阻力係數的平均表現方面較大，而在升力係數方面，中下游的圓柱相較於上游圓柱來說

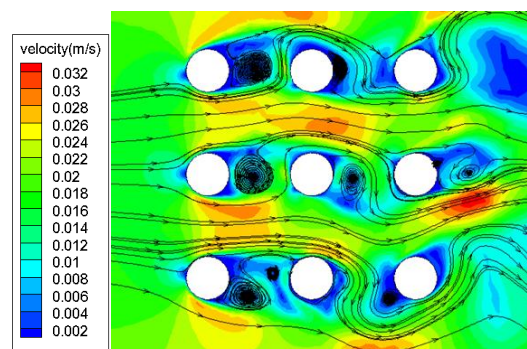
有明顯的震盪，此震盪顯示了在中下游的圓柱受渦流產生的影響是比較大的，也顯示了需加強此區域的物理支撐，以防疲勞的現象發生。此外，渦流發生的頻率即為升力係數震盪週期的頻率，升力、阻力係數整理成下表四，由表中可以看出第一根圓柱與第三根圓柱受到兩個頻率之渦流產生的影響，所以升力係數會有兩種頻率，而中游之三個圓柱亦受到兩種頻率的影響，尤須注意的下游圓柱會產生三種不同的頻率，顯示了有三種不同週期的渦流影響此排的圓柱。



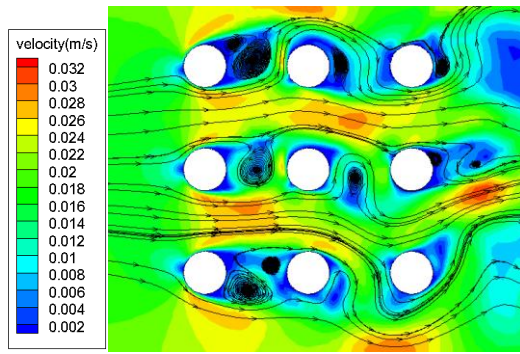
圖四、單向耦合與雙向耦合之阻力係數比較



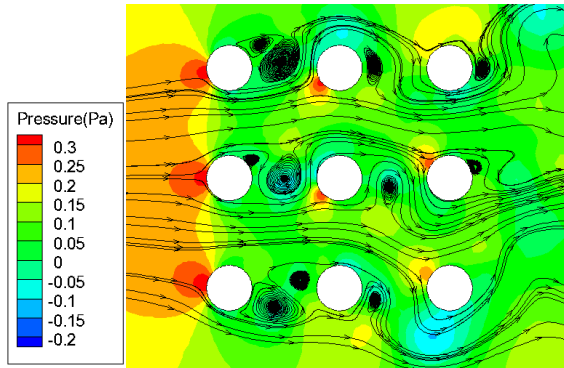
圖五、單向耦合與雙向耦合之阻力係數比較



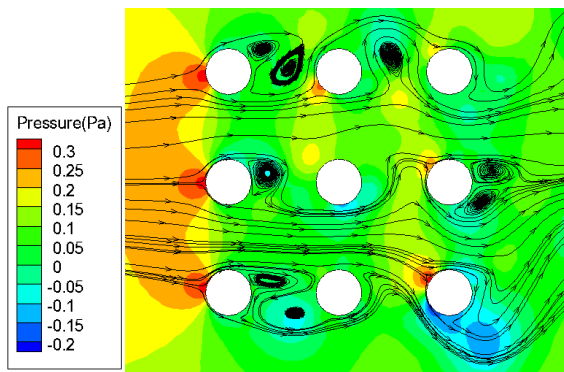
圖六、近壁面速度流線圖



圖七、89 秒時近壁面速度流線圖



圖八、近壁面壓力流線圖



圖九、89 秒時近壁面壓力流線圖

表一、3*3 圓柱陣列各根圓柱之平均阻力係數、平均升力係數振幅與渦流產生頻率

3*3 圓柱	平均阻力係數	平均升力係數振幅	渦流產生頻率
圓柱 1	1.04	0.29	0.195、0.342
圓柱 2	1.18	0.34	0.195
圓柱 3	1.04	0.27	0.195、0.342
圓柱 4	0.30	0.66	0.195、0.39
圓柱 5	0.37	0.66	0.195、0.39
圓柱 6	0.32	0.56	0.195、0.39
圓柱 7	0.64	0.74	0.195、0.39、0.537
圓柱 8	0.65	0.68	0.195、0.537
圓柱 9	0.67	0.65	0.195、0.342、0.537

IV. 結論

固力分析與流力分析基本上是基於守恆定律 (Conservation law) 進行多維局部 (Multi-dimensional and localized) 的物理特性模擬。NEA/CSNI/R13 (2007) 報告曾提及，應用這兩大領域於核能安全分析是需要專業人才與大量電腦資源。因此，近十年來流固耦合分析才逐漸應用於核能安全分析上。而國外核能安全相關研究單位已開始研究流固耦合技術應用於核電廠重要組件完整性之安全分析，以增進核能電廠之運轉安全。而就現階段的研究而言，ANSYS 的軟體的確能夠就流沖振動進行模擬，而本研究在探討單根圓柱振動的情形時，以前人文獻資料為參考依據，著手進行模擬流場的測試，模擬現象與文獻趨勢、流場基本現象皆能夠互相的吻合，顯示流沖振動的分析模式已建立，而在串聯圓柱的模擬驗證中，也更確定了此模式的建立可以應用在熱交換管的模擬中，由以上之結果，可以得出以下幾點結論：

1. LES model 用來模擬 FIV 問題是合適的，將圓周切割成 120 格且時間步設為 0.01 秒是可行的，但在過度區的模擬中，需加密網格與減少 time step，抑或是將二維模型的分析模式改為實際三維模型分析。
2. 單向耦合與雙向耦合幾乎有相同的結果，唯雙向流固耦合之結果涉及了振動的回傳，故在阻力係數及升力係數略有高估的情形，由此可見，雙向流固耦合計算之結果是較為保守的，但計算的資源量是單向耦合的數倍，建議可以單向耦合分析的結果並加上 10% 的餘裕當作衡量的標準。
3. 在分析圓柱陣列中，須注意下游的圓柱震動過大，以防疲勞的現象發生，造成組件的安全問題，且在越下游會有越多個渦流的頻率發生並影響圓柱，須注意結構的自然頻率不可接近此渦流頻率，以免共振的現象發生。
4. 在熱交換器中，若管排間距過小，則不須擔心其渦流剝離發生而造成疲勞現象發生，唯下游圓柱後方並無其他圓柱破壞渦流的形成，故還是會受到渦流產生的影響，須加強其物理支撐。

參考文獻

- [1] G.H. Koopman, "The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers," J. Fluid Mech., 27, 501(1967)
- [2] Griffin, "The unsteady wake of an oscillating cylinder at low Reynolds numbers," J. Applied Mech., 38, 729(1971).
- [3] R. King, D.J. Johns, "Wake interaction experiments with two flexible circular cylinders in flowing water," J. Sound Vib., 45, 259(1976)
- [4] Ongoren, D. Rockwell, "Flow structure from an oscillating cylinder, Part 1: Mechanisms of phase shift and recovery in the near waks," J. Fluid Mech., 191, 197(1988).
- [5] J.A. Jendrzejczyk, S.S. Chen, M.W. Wambsganss, "Dynamic response of a pair of circular tubes subjected to liquid cross flow," J. Sound Vib., 67, 263(1979)
- [6] G.R.S. Assi et al., "Experimental investigation of

- flow-induced vibration interference between two circular cylinders,” *J. of Fluids and Structures*, 22, 819(2006).
- [7] S. Kim, M.M. Alam, “Characteristics and suppression of flow-induced vibrations of two side- by-side circular cylinders,” *J. of Fluids and Structures*, 54, 629(2015)
- [8] M. Hurlbut et al., “Numerical solution for laminar two dimensional flow about a cylinder oscillating in a uniform stream,” *ASME J. of Fluids Eng.*, 104, 214(1982)
- [9] S. Mittlal, T.E. Tezduyar, “A finite element study of incompressible flows past oscillating cylinders and airfoils,” *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, 15, 1073(1992).
- [10] T. Ichioka et al., “Two-dimensional flow analysis of fluid structure interaction around a tube row and tube arrays in cross-flow,” 3rd ICONE, Kyoto, 1995.
- [11] V. Kassera, K. Strohmeier, “Simulation of tube bundle vibrations induced by cross flow,” *J. of Fluids Structures*, 11, 1997.
- [12] K. Schroder, H. Gelbe, “Two-dimensional CFD-simulation of flow induced vibration excitation in tube bundles,” *Chem. Eng. And Proc.*, 38, 621(1999).
- [13] S. Mittal, V. Kumar, “Flow-induced oscillations of two cylinders in tandem and staggered arrangements,” *J. of Fluids and Structures*, 15, 717(2001)
- [14] W. Jester, Y. Kallinderis, “Numerical study of incompressible flow about transversely oscillating cylinder pairs,” *J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 126, 310(2004)
- [15] G.V. Papaioannou et al., “On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders,” *J. of Fluids and Structures*, 24, 833(2008).
- [16] E. Longatte et al., “Methods for numerical study of tube bundle vibrations in cross-flows,” *J. of Fluids and Structures*, 18, 513(2003)
- [17] B.S. Carmo et al., “Computational simulation of the flow-induced vibration of a circular cylinder subjected to wake interference.” *J. of Fluids and Structures*, 41, 99(2013).
- [18] Z.L. Han et al., “Flow-induced vibration of four circulation cylinders with square arrangement at low Reynolds numbers,” *Ocean Eng.*, 96, 21(2015).
- [19] Nuclear Energy Agency, “Assessment of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Problems,” NEA/CSNI/R(2007)13, January 2008.
- [20] Smith, B.L., “The Establishment of a Web Portal for the Assessment of CFD in Reactor Safety Analysis,” The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27-October 2, 2009.
- [21] Feenstra, P., Weaver, D.S., Nakamura, T., 2009. “Two-phase flow induced vibration of parallel triangular tube arrays with asymmetric support stiffness” . *J. Press. Vess. Technol.* 131, 1-9.

白金被覆對不銹鋼組件於模擬沸水式反應器啟動過程的應力腐蝕龜裂起始研究

Evaluation of SCC Initiation for Platinum Treated type 304L Stainless Steels during Simulated BWR Startup Conditions

計畫編號：MOST 106-NU-E-007-006-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：葉宗洸

e-mail：tkyeh@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：王美雅、陳岳泰

執行單位：國立清華大學核工所

摘要

在核能工業界中，由於過去數十年來反應器壓力槽內部組件的腐蝕問題層出不窮，組件防蝕技術的研究於是受到相當程度的重視，包含加氫水化學(Hydrogen Water Chemistry, HWC)、HWC 搭配貴重金屬化學應用(Noble Metal Chemical Application, NMCA)、HWC 搭配線上貴重金屬添加(Online Noble Chem, OLNC) 等，用以減緩或抑制結構組件的應力腐蝕龜裂現象。沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)爐水的氧化性環境，造成反應器冷卻水系統的管路及壓力槽內部組件所採用的不銹鋼及鎳基合金，容易出現沿晶應力腐蝕龜裂(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)。HWC或是再配合白金被覆技術的防蝕方法，這些措施都是為了減緩或抑制結構組件的應力腐蝕龜裂現象，但注氫的過程開始於額定功率運轉操作或是爐心溫度達 450°F 以上(依 HWC 系統的設計而定)。而目前研究顯示，反應器啟動(Start-up)階段的核能電廠爐心組件，因爐水氧化性相對較高且溫度開始升高，而維持在高電化學腐蝕電位(ECP)的狀態，導致對於實施白金被覆技術的沸水式反應器組件較易出現應力腐蝕龜裂的起始現象。因此本研究擬透過模擬 BWR 水環境下的裂縫起始及成長實驗，探討在反應器啟動過程中，在未實施加氫水化學前，如果已進行白金被覆技術，探討結構組件在氧化性環境下發生應力腐蝕龜裂起始的機制。

本計畫以一年的時程來進行相關的研究，透過 BWR 模擬迴路中針對 304L 不銹鋼試棒進行慢應變速率拉伸實驗(Slow Strain Rate Test, SSRT)測試，將 304L 不銹鋼試片經熱敏化處理後進行預長氧化膜，再經 Pt 被覆後，在溶氧狀態下的水化學條件，進行不同運轉溫度下(200°C、250°C、288°C) 304L 不銹鋼試棒的應力腐蝕龜裂行為分析。探討在低於 288°C 時的中間溫度運轉與水化學環境對 304L 不銹鋼試棒 IGSCC 裂縫起始與成長之影響。

關鍵詞：應力腐蝕龜裂、反應器啟動、304L 不銹鋼、貴重金屬添加。

Abstract

As the boiling water reactors (BWRs) age, incidents of intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) and irradiation-assisted stress corrosion cracking (IASCC) are more readily seen in the vessel internals. In order to mitigate the problem of stress corrosion cracking (SCC) in the structural components, the technology of hydrogen

water chemistry (HWC) or low HWC combined with noble metal chemical application (NMCA) or On-line NobleChem™ (OLNC) has been widely adopted in BWRs around the world. The oxidizing chemistry environment of BWR reactor water is the key factor promoting IGSCC of stainless steel and nickel-based alloys in the reactor coolant system piping and vessel internals. Hydrogen injection is not placed into service until the reactor is between approximately 450 oF and normal operating temperature, depending on HWC system design. The reactor coolant, which usually contains high levels of dissolved oxygen due to intrusion of atmospheric air during a cold shutdown, could remain relatively oxidizing under startup operations. As a matter of fact, some laboratory data have already indicated that under oxidizing conditions the rates of IGSCC at intermediate temperatures during plant start-up or shutdown processes were actually higher than those at operating temperatures. Therefore, the SCC behavior was investigated in an oxygenated pure water environment during startup process in this study.

The aim of this project is to study the impact of operating temperatures during plant start-up on SCC response of austenitic 304L stainless steel in pure water environments. In order to have a better understanding to the SCC in sensitized 304L SS specimen treated by platinum nano-particle, the SCC initiation and propagation behavior will be investigated via SSRT tests in 200, 250, 288 oC pure water with dissolved oxygen concentrations. Finally, the mechanism of SCC initiation during startup would be also investigated in this study.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Reactor Startup, 304L Stainless Steel, Noble Metal Chemical Addition.

I. 前言

隨著國際經濟的蓬勃發展，國際能源需求不斷的提升，但因之前對於核能電廠的爭議，新的電廠建造不易，加上傳統化石燃料（煤、石油等）將無法有效應付高能源需求時代的到來，在此能源供需缺口不斷擴大下，而受限於現今技術及環境，替代能源（太陽能、風力、生質能等）的成本依然偏高且供應不穩定，再加上京都議定書溫室氣體排放管制的環保要求下，價格低廉及低碳排放的核能發電在目前所應扮演的角色相對重要。在環境保護及提高及維持供電品質下，現役核電廠除了提昇使用功率外，也使運轉年限延長。沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)的結構組件在建造之初，

大量採用不鏽鋼組件，主要是由於不鏽鋼具有良好的抗腐蝕能力。經多年運轉後，不少反應器的壓力槽內部組件產生應力腐蝕龜裂(Stress Corrosion Cracking, SCC)的問題。應力腐蝕龜裂包含了沿晶應力腐蝕龜裂(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)與輻射促進應力腐蝕龜裂(Irradiation-assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC)，組件產生裂化不僅嚴重影響運轉安全，同時修復組件的工作也須耗費鉅資，挑戰核電廠是否能安全運轉達 40 年年限，甚至更長的運轉年限。

近幾年來，為了解決壓力槽內部組件的劣化，各國研究機構無不投入極大心力來進行組件防蝕的研究。由於運轉中電廠內部組件不易更換，加氫水化學(Hydrogen Water Chemistry, HWC)技術即被廣泛應用[1-2]，降低組件材料的電化學腐蝕電位(Electrochemical Corrosion Potential, ECP)，藉以抑制 SCC 的發生。加氫水化學於 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。加氫水化學是藉由在飼水中加入氫氣，利用氫氣與氧或過氧化氫在具有輻射的環境下進行再結合反應，降低主冷卻水中溶氧與過氧化氫的濃度，可促進 ECP 值的下降。ECP 是 SCC 裂縫起始與成長的驅動力，ECP 值的降低有助於減少裂縫發生與成長的機率，達到保護 BWR 壓力槽內部組件的目的。

應力腐蝕龜裂為應力與特定環境共同作用所引發的材料破裂現象，而應力腐蝕發生的必要因素有三：一是足夠的張應力，加上腐蝕的環境與易受影響的高敏感性材料，三者同時存在才有 SCC 的產生，欲防制及減緩 SCC 的發生須從其中任一項改善做起。張應力會促成 SCC 的發生，壓應力則會抑制其產生。爐心中的組件必須承受材料本身的結構應力，及支撐燃料架、承受高壓，高流速爐水所造成的震動等，都是組件的壓力來源。由於輻射分解效應，導致大量的過氧化氫生成，而存在高濃度的氧化劑，形成腐蝕性環境。包括溫度、流速以及氧化性，都是影響環境的因子。一旦材料的腐蝕電位低於臨界腐蝕電位值則不易發生 SCC。沃斯田不鏽鋼在銲接後於高溫冷卻時，在 500°C 至 850°C 溫度區間會在晶界上有碳鉻化合物析出的傾向，造成晶界附近鉻元素被大量析出，此晶界的狹窄鉻乏區具有較高的活性，易使材料發生 IGSCC。應力腐蝕龜裂的破裂型態有沿晶(IG-破裂痕跡沿著晶界蔓延)和穿晶(TG-破裂痕跡如樹枝狀蔓延)，可能並存，視環境、結構和應力而定。經由上述得知，SCC 發生的三種因素：張應力、腐蝕的環境及敏感性材料，三者環環相扣缺一不可，故為防制 SCC 發生只要去除任一項肇因，即可達到防治 SCC 目的。

腐蝕環境的改善取決於溶解在水中的氧及過氧化氫的濃度。若能降低爐水中氧及過氧化氫的含量，組件上的電化學腐蝕電位就可以降至低於 IGSCC 的臨界電位，進而抑制 IGSCC 的發生，HWC 技術的發展即針對此目的而來。目前全世界已有四十座以上的 BWR 電廠

採用了加氫水化學技術。然而在實行數年後，發現採用中度或更高的注氫量(通常大於 0.6 ppm)時，會有提昇主要蒸汽管路輻射劑量的副作用，輻射劑量提高主要來自 ^{16}N 增加，及因 ^{60}Co 析出而造成停機劑量的上升[3]，除此之外，HWC 對於壓力槽上方空間及側板上部過氧化氫濃度偏高的區域，仍然有 IGSCC 的問題發生[4]。目前有些 BWR 電廠則採取貴重金屬被覆配合低注氫技術，另外有些 BWR 電廠則已採用中度注氫的 HWC 技術。特別值得注意的是國內 2 座核電廠於 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 5 月及 9 月已將注氫量提昇至中度，各為 1.0 ppm、1.1 ppm 及 1.2 ppm。

透過貴重金屬被覆技術，雖可以降低注氫需求量至 0.2~0.4 ppm，但氫氧的比值要達到 2 以上才可，反之可能加劇組件腐蝕的程度。而 HWC 配合貴重金屬被覆的防蝕方法，需在有氫注入的環境下才可發揮作用。通常需要有效的飼水流量進入爐心才能開始注氫的過程。因此都會在爐水加熱後至正常操作的溫度才會開始加氫。台灣核一、二廠機組則等到功率提升至 90%後才開始實施注氫。從停機到啟動過程中因大量殘存的過氧化氫及溶氧，可能使得裂縫成長加速。當爐水中過氧化氫及溶氧因貴重金屬白金的催化性被覆而使得組件上發生的氧化還原反應加劇，對於組件的腐蝕效應也會加重。已有實驗數據顯示在電廠起動(Startup)時或是停機(Shutdown)過程的中間溫度比額定溫度的氧化性環境易造成較高的沿晶應力腐蝕龜裂速率[5]。目前大多的 HWC 系統都設計在功率大於 20%以上或是爐心溫度達於 450°F 以上才可開始注氫，已有少數系統開始更改設計使其可在功率大於 5%時便開始飼水注氫來減低裂縫成長。因起動時間的爐水呈高溶氧與高 ECP 值的環境，可能會導致 SCC 起始(Initiation)。

如果採用白金被覆技術強化加氫的效果，在尚未加氫的啟動過程中，因白金催化效應之影響，使得組件上發生的氧化還原反應加劇，對於組件的腐蝕效應也會加重。本研究預計探討在低於 288°C 時的中間溫度運轉對 304L 不鏽鋼試棒 IGSCC 裂縫起始之影響，評估在反應器啟動時，因組件已實施白金被覆，在氧化性的環境下，對於不鏽鋼應力腐蝕龜裂起始的行為研究。

II. 主要內容

為了探討對於實施白金(Pt)被覆技術的沸水式反應器，不鏽鋼組件暴露於氧化性的水環境下，是否對 SCC 的抑制有負面的影響。本研究透過模擬 BWR 水迴路，針對 304L 不鏽鋼試棒進行慢應變速率拉伸實驗(Slow Strain Rate Test, SSRT)，將 304L 不鏽鋼試棒經熱敏化處理後進行預長氧化膜，再經 Pt 被覆後，在溶氧狀態下的水化學條件，進行不同運轉溫度下(200°C、250°C、288°C) 304L 不鏽鋼試片的應力腐蝕龜裂行為分析，後續利用掃描式電子顯微鏡(SEM)、電感耦合電漿體質譜法(ICP-MS)、能量散佈式 X 光譜(EDX)以及拉曼光譜(LRS)進行試棒破斷面及表面氧化物結構和白金分佈的分析。探討在低於 288°C 時的中間溫度運轉與水化學環境對 304L 不鏽鋼試棒 IGSCC 裂縫起始與成長之影響，並評估在反應器啟動時，因組件已實施白金被覆，在氧化性的環境下，對於不鏽鋼應力腐蝕龜裂起始的行為研究。

III. 結果與討論

本研究透過模擬 BWR 迴路，對 304L 不銹鋼 (304LSS) 試棒進行慢應變速率拉伸實驗 (Slow Strain Rate Test, SSRT) (如圖 1 所示)，測試前先將 304LSS 試棒經熱敏化處理後再進行預長氧化膜，而部分試棒利用熱水沉積法進行 Pt 被覆後，在溶氧量 (Dissolving Oxygen, DO) 300ppb、導電度 $0.6\mu\text{S}/\text{cm}$ 的氧化性純水環境條件下，進行不同運轉溫度 (200°C 、 250°C 、 288°C) 304L 不銹鋼試片的應力腐蝕龜裂行為分析。後續利用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 與能量散佈式 X 光頻譜 (EDX) 進行試片表面與破斷面的分析，並利用電感耦合電漿體質譜法 (ICP-MS) 進行試棒表面 Pt 被覆量之測定，探討在低於 288°C 時的中間運轉溫度與水化學環境對 304LSS 的 IGSCC 裂縫起始與成長之影響，並評估在反應器啟動時，因組件已實施白金被覆，在氧化性的環境下，對於不銹鋼應力腐蝕龜裂起始的行為研究。

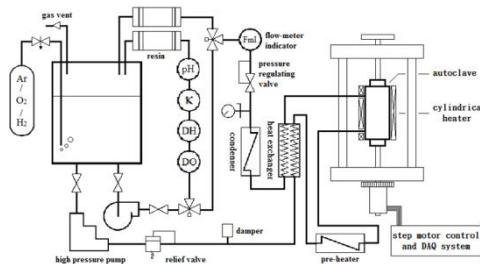


圖 1 慢應變速率拉伸之水循環系統裝置示意圖

為了測試敏化的程度，本實驗利用 DL-EPR 作為分析的方式，將經過 650°C 敏化熱處理 24 小時的 304LSS 利用三極系統進行 DL-EPR 測試，測試結果顯示本實驗使用的 304LSS 敏化程度 (Degree of Sensitization, DOS) 約為 4%。敏化程度的標準 DOS 大於 0.7 表示 SS 有發生敏化，超過 7% 為重度敏化，實驗結果顯示 304LSS 已發生敏化但未達重度敏化的程度，此外，DOS 數值並無絕對鑑別性，僅此說明此試片未達到重度敏化，至於敏化程度的百分比數值不具程度上的差異；304SS 於同樣敏化熱處理條件 (650°C 24 小時) 已可達到重度敏化的程度，故此結果亦證明低碳之 304LSS 相對於 304SS 有較好的抗敏化表現。

預長氧化膜實驗之水環境條件皆為溫度 288°C 、溶氧量 1 ppm 放置 14 天，之後以 SEM 觀察氧化膜顆粒的分佈及成長情形，如圖 3(a) 所示，表面形成緻密的氧化層，氧化膜顆粒約在 0.6 至 $1\mu\text{m}$ 之間；經由拉曼光譜分析氧化膜之結構，其結果如圖 2 所示，可看出其氧化膜結構主要為 Fe_3O_4 。在預長氧化膜後，部分試棒經過熱水沉積法被覆白金 (Pt)，熱水沉積法是將試棒置於如圖 4 之水迴路中利用高溫動態水循環讓 Pt 離子沉積於試棒的氧化層表面，而加入之 Pt 濃度為 1ppm，化學前驅物為六羥基鉑酸鈉 ($\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$)，被覆時間為七天。隨後利用 SEM 觀察表面之 Pt 分佈，其結果如圖 3(b) 所示，可看出白金顆粒之分佈不太均勻並有些微的叢聚現象。而後利用 ICP-MS 檢驗 Pt 於試棒上之被覆量，分析結果顯示，試棒上之 Pt 量約為 $0.33\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，依據美國奇異公司之實際採用貴重金屬被覆的核能電廠結構材料數據顯示，其結構材料上的白金被覆量約為 $1\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ，因此我們的被覆量略少於實際運用達到的量，推測可能因為我

們的 Pt 於金屬氧化層上的分散性較差，由 SEM 結果亦可看出有叢聚的現象，故被覆的效果較差，因此改善 Pt 於金屬氧化層上的分散性來測試是否可改善被覆量亦是我們未來的研究。

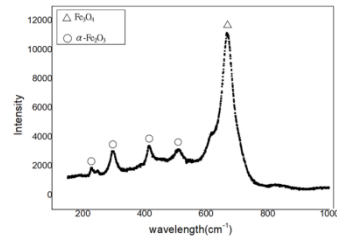
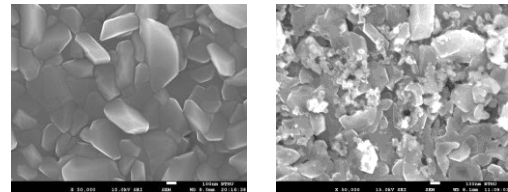


圖 2 304LSS 表面氧化物拉曼光譜分析



(a)Pt 被覆前

(b)Pt 被覆後

圖 3 Pt 被覆前後 304LSS 表面氧化膜 SEM 觀察

以下為 304LSS 於三個測試溫度下有無白金被覆之應力腐蝕龜裂行為。將慢應變速率拉伸之結果繪製成應力應變之曲線以觀察各條件下的機械性質表現，如圖 4 所示。

首先比較 304L 不銹鋼於測試溫度 288°C 下有無白金被覆試棒之 SSRT 結果，從其機械性質之表現可看出有白金被覆之試棒 (Pt-treated) 其伸長量以及最大抗拉強度 (Ultimate tensile strength, UTS) 皆小於未經白金被覆 (Untreated) 之試棒，有較差之機械性質表現；接著利用 SEM 觀察其破斷面及試棒側面之裂口形貌，試棒於各測試溫度下之破斷面電子顯微鏡分析結果如圖 5 所示，紅線區域標示的為沿晶應力腐蝕龜裂 (IGSCC) 的形貌、黃線區域標示的為穿晶應力腐蝕龜裂 (TGSCC) 的形貌、其餘為延性破裂 (Ductile) 的形貌；利用影像處理軟體來估算各別所佔破斷面之比例，其結果如表 1 所示，具白金被覆之試棒破斷面 IGSCC 之佔比雖略為大於未經白金被覆的試棒；接著比較兩者破斷面形貌，無論有無白金被覆的試棒，於破斷面邊緣上皆出現一個 IGSCC 之裂縫起始點，但有白金被覆之試棒的 IGSCC 裂縫深度明顯大於未經白金被覆之試棒，此外，比較試棒側面的裂口，如圖 6 所示，除了於破斷口處出現 IGSCC 之裂縫外，試棒側面亦有出現 IGSCC 的裂縫，其中有白金被覆之試棒裂縫開口大小較無白金被覆試棒的裂縫開口還要大，依據側面 IGSCC 裂縫起始的開口大小與破斷面之 IGSCC 分佈深度此兩證據研判，經過白金被覆處理之試棒於此測試溫度下，IGSCC 之裂縫成長速度可能大於未經白金被覆處理的試棒，也因此造成機械性質之表現較未經處理的試棒還要差。

接著比較 304L 不銹鋼於測試溫度 250°C 下的有白金被覆及無白金被覆之 SSRT 結果，如圖 4 之應力應變曲線所示，兩者之機械性質表現幾乎沒什麼差異，伸長量、降伏強度及最大抗拉強度皆相近。透過 SEM 觀察試棒破斷面，沿著破斷面周圍無論有無白金被覆之試棒皆出現兩個 IGSCC 的裂縫起始點 (紅線區域)，並有幾處

TGSCC 的起始點(黃色區域)，而此兩 IGSCC 的裂縫向內成長主導材料的破裂，估算破斷面上 IGSCC 及 TGSCC 形貌所佔破斷面的比例，結果如表 1 所示，兩者之 IGSCC 比例與 TGSCC 所佔比例相近；再觀察試棒側面的裂縫，如圖 6 所示，可看出有多重的 IGSCC 裂縫起始出現，並相較於測試條件 288°C 的結果，250°C 的測試條件下試棒的側面出現的裂口數明顯大於 288°C 的測試條件。而因多重的小裂縫起始就容易造成小裂縫間容易互重合成較大的裂縫，也因此造成試棒較早斷裂，也因此 304L 不鏽鋼在 250°C 的測試條件下破斷面上會看到較多的裂縫起始點。

最後比較測試溫度 200°C 條件下的 SSRT 結果，如下圖 4 之應力應變曲線，經過白金被覆處理的試棒伸長量及最大抗拉強度皆小於未經白金被覆的試棒，再由 SEM 觀察其破斷面形貌，如圖 5 所示，其破斷面形貌無論是否有白金被覆主要都為延性破裂，而於試棒側面除了破斷口之外無出現其他的裂縫。

根據本實驗室過去的電化學分析，304 不銹鋼若經過白金被覆後，表面測得的 ECP 以及腐蝕電流密度皆會比未經被覆的表面高，而過去許多研究曾指出較高的 ECP 將造成 SCC 的裂縫成長速度上升。在本實驗 304LSS 三個測試溫度中，從 288°C 下的測試條件下可看出，經過 Pt 被覆的試棒裂縫成長速度略大於未經 Pt 被覆的試棒，但在 250°C 及 200°C 的測試條件下由破斷面及試棒側面裂縫形貌均無太大差異，根據我們推斷，Pt 的催化效果可能在低溫時較差，而是否為我們使用的 Pt 被覆量較低造成的結果仍須進一步的研究來確認。

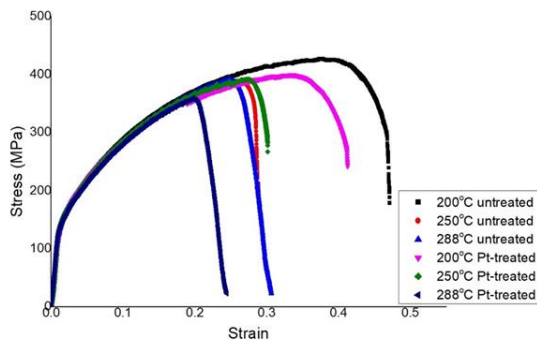


圖 4 各溫度下有無 Pt 被覆的 304LSS 應力應變曲線

表 1 304LSS 機械性質表現及 SCC 佔破斷面比例整理表

	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	IGSCC (%)	TGSCC (%)	Total SCC (%)
288°C untreated	134.77	388.6	30.67	6.9	15.7	22.6
288°C Pt-treated	131.68	356.4	24.44	9.6	13.5	23.1
250°C untreated	127.81	388.1	28.95	10.1	8.4	18.5
250°C Pt-treated	132.97	402.3	30.25	9.2	12.9	22.1
200°C untreated	134.26	427.5	47.13	0	0	0
200°C Pt-treated	136.32	398.7	41.40	0	0	0

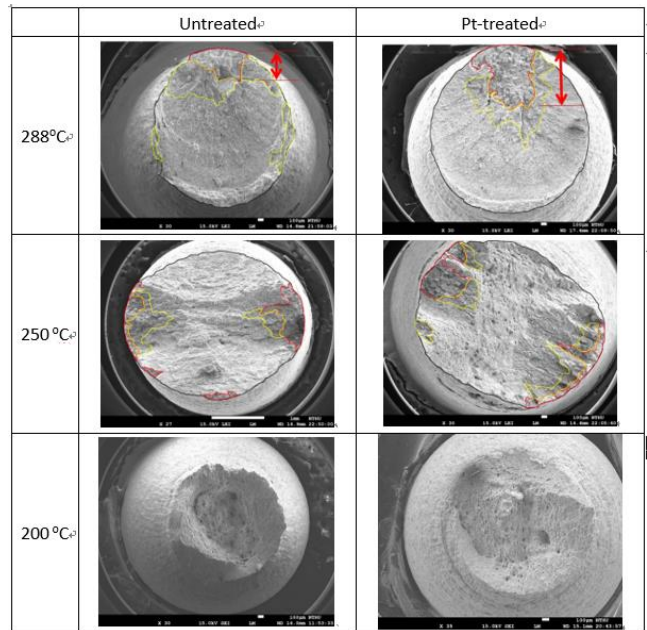


圖 5 不同溫度下有無 Pt 被覆的破斷面 SEM 觀察

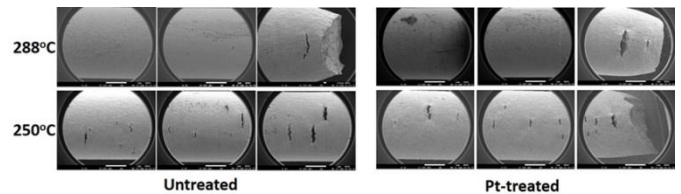


圖 6 試棒側面裂口比較

IV. 結論

經 Pt 被覆的 304L 不銹鋼在模擬 BWR 啟動過程中含氧氣濃度 300ppb 的氧化性環境下之應力腐蝕龜裂行為研究結果總結如下：

1. 從試棒破斷面的結果來看，無論是否有白金的被覆，在 288°C 的測試溫度下，試棒的破裂主要由單一 IGSCC 的裂縫成長造成；而在 250°C 的測試溫度下，將會出現多重的裂縫起始；在 200°C 的溫度下沒有發生任何 SCC。
2. 經過白金被覆的試棒在 288°C 的測試溫度下，將會有較差的機械性質表現，且裂縫成長速度較快；而在 250°C 的測試溫度下，具白金被覆的試棒與未經白金被覆的試棒有相似的機械性質表現，。

參考文獻

- [1] R. L. Cowan, Nuclear Engineering International, 1986.
- [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] R. L. Cowan et al, Nuclear Engineering and Design, vol.166, p. 31-36 (1996)
- [4] Nuclear Regulatory Commission, NRC Information Notice 97-17, April 4, 1997
- [5] M. Y. Wang and T. K. Yeh, Nuclear Engineering and Design, 238, p.2746, 2008

核子事故緊急應變法規對除役中核能電廠之適用性與管制實務研究 Applicability & Adequacy of Nuclear Emergency Plan in Decommissioning Power Plants and associated EP Regulatory Practices

計畫編號：MOST106-NUE-214-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王曉剛

e-mail：skwang@isu.edu.tw

執行單位：義守大學機械與自動化工程系

摘要

本研究在參考國際間對除役中核電廠之緊急應變相關管制做法，評估各除役階段事故風險，訂定管制視察導則及作業程序書，以提供管制實務作業之依循。除役電廠與運轉電廠均須保持緊急應變計畫，以確保事故發生時不會影響大眾生命財產之安全。此計畫中，廣泛收集歐美各國對除役電廠緊急應變計畫之規範，以及電廠對於申請免除或修改緊急應變計畫之申請文件與相關之研究報告，以分析規劃，並考慮台灣之特殊地物與天候等資料，尤其台電極可能將會貯存燃料於反應器若干年，亦應規劃合適合理安全之相對應緊急應變計畫，以利於除役工程之進行，並確保大眾安全之除役緊急應變計畫，以及提供台電與核能管制單位之參考。

關鍵字：除役，緊急應變，緊急應變計畫，豁免，核安

Abstract

Historically, the process for reducing EP requirements at decommissioning plants has been through the license exemption process on a case-by-case basis in the U.S. A licensee shall comply with regulations until an exemption is granted (e.g., the need to perform exercises and drills, or maintain the capability to alert the public of an emergency). In this study, an extensive review and examination on the emergency preparedness and plans of the U.S. and European nuclear power plants, and their exemption or modification schemes to the EM will be performed. The results will be utilized in the planning phase of the decommission of nuclear power plants in Taiwan.

Keywords: decommission, emergency preparedness, emergency plans, exemption, nuclear safety.

I. 前言

本研究收集美國與 IAEA 重要國家的相關除役中核能電廠的相關資料，將對除役中核能電廠之核子事故緊急應變法規加以了解與比較，研究適合我國核電廠狀況及國情的「核能電廠除役中之核子事故緊急應變法規」。亦比較美國 FEMA(Federal Emergency Management Agency)及 NRC (Nuclear Regulatory Commission)的相關法規中緊急應變之項目與標準，最後檢視我國核子事故緊急應變之相關法規是否涵蓋除役中核能電廠之核子事故緊急應變之條文，以及參考核能一廠緊急應變計畫在除役時可修改與豁免部分，並建立國內對於除役

電廠緊急應變計畫之管制導則，以供相關單位參考。

II. 主要內容

本計畫主要做法為蒐集並整理美國、歐洲等國核能電廠的相關除役報告資料，可以瞭解美、歐等國在除役期間之核子事故緊急應變的組織、程序和作法，對未來國內管制單位進行核能電廠除役計畫在「核子事故緊急應變法規對除役中核能電廠之適用性與管制實務」方面，提供建議。

III. 結果與討論

台電核能一廠因特殊原因，在停機過渡階段之前期，用過核子燃料雖然已開始移至用過核子燃料池，但爐心內仍有用過核子燃料，其安全性之考量不下於運轉電廠，但因至今尚無其他電廠有此情況可供參考，故必須建立起隨除役進行時程而合適之緊急應變計畫，以供除役之有效進行，並確保大眾安全。綜觀美國與其他過家之除役經驗，核能一廠除役之進行時程可大致分為三部分，其相對應之緊急應變計畫亦當有所不同之規劃：

1. 反應器停機除役開始，部分燃料仍貯存於爐心內，至燃料完全移入用過燃料池
2. 燃料完全移住用過燃料池
3. 燃料完全移入乾式貯存廠或其他類似貯存場

本研究將以台電公司第一核能發電廠民國 104 年十月發布之「核能一廠緊急應變計畫」為參考藍本，對於相對應之除役過程，提出建議之除役緊急應變計畫。

IV. 結論

1. 除役開始部分燃料仍貯存於反應器內至所有燃料移入燃料池之前
(比照運轉中電廠)
2. 燃料仍貯存於用過燃料池到完全移入乾式貯存場或類似設備之前

燃料仍貯存於用過燃料池到完全移入乾式貯存場或類似設備之前，情況類似於美國最近向 NRC 申請除役緊急應變計畫豁免之四個電廠，故建議以美國 NRC 審查或免/修改之標準，建議核能一廠緊急應變計畫中在除役時可豁免/修改部分。

3. 燃料完全移入乾式貯存場或類似設備後

對於類似美國之獨立用過燃料貯存設備 Independent spent fuel storage installation (ISFSI)，NRC 所規範之緊急應變計畫 10 CFR 72.32，台灣尚未有對應之立定法規，此研究參考美國 10 CFR 72.32，對台灣將

來之乾式貯存廠或類似之設備，提出審核規劃之建議。

參考文獻

1. “Decommissioning from an Emergency Preparedness Perspective,” FALL 2013 EMERGENCY PREPAREDNESS & RESPONSE NEWS, US NRC, Volume 5, Issue IV
2. “U.S. Experience in Evaluating Reductions in Emergency Preparedness requirements for Decommissioning Nuclear Power Plants,” International Conference on Global Emergency Preparedness and Response, US NRC, October 19 - 23, 2015
3. Emergency Preparedness Final Rule Implementation, US NRC.
4. Emergency Preparedness Decommissioning Emergency Preparedness, Decommissioning Task Force, Issue Identification, April 3rd, 2014, US NRC

Alloy 52/52M 鎳基合金之鐸接修補裂紋與製程研究

The cracking and process parameters in the welding repairing process by nickel-based superalloy Alloy 52/52M

計畫編號：106-NU-E-006-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李驊登

e-mail：htlee@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：張淵智、枋敬賀、曾聖文

執行單位：國立成功大學機械工程學系

摘要

鎳基 Alloy 52 鐸材使用於核電廠管路系統覆鐸，在 GTAW 多層覆鐸製程可能形成再熱裂紋(Reheat Cracking)。將評估 Alloy 52 鐸材產生再熱裂之條件，以改變溫度與應變量參數釐清再熱裂紋形成之機制，並建立 Alloy 52 鐸材之再熱裂紋失效窗口(Failure Map)。且為防止雷射覆鐸製程中產生熱裂(Hot Cracking)，對顯微結構與鐸道溫度變化進行量測分析，討論脈衝雷射參數對熱裂敏感性之影響。

隨著脈衝雷射覆鐸之送料率降低時，power ratio 隨之上升，亦使鐸道稀釋率上升，當稀釋率上升時，基材中磷、硫等雜質將進入鐸道，容易造成偏析提高熱裂敏感性；降低鐸接速度會使得脈衝密度上升，高冷卻速率將造成鐸到更容易生成凝固裂紋；降低脈衝頻率雖能降低脈衝密度，但同功率的鐸接條件下將提升脈衝脈寬，稀釋率亦隨脈寬增加而提升，提高熱裂敏感性。

透過預應變模擬 Alloy 52 鐸材經 GTAW 多層覆鐸之 DDC 生成，結果發現裂紋多具有穿晶破壞的特徵，並無再熱裂之沿晶破壞趨勢；而由於裂紋並非沿晶破壞，認為夾具無法獲得理想的拘束條件，使結果具有不確定性，故無法明確定義失效窗口中的材料破壞應變門檻，未來的實驗設計應對此加以改善，以釐清在各溫度下 Alloy 52 形成再熱裂紋的敏感程度。

關鍵詞：Alloy 52、凝固裂紋、失延裂紋、覆鐸

Abstract

Inconel Alloy 52 is used in the cladding of pipeline systems in nuclear power plants. Reheat cracking may form in the GTAW multi-layer welding process. The conditions for reheat cracking of Alloy 52 will be evaluated, and the mechanism of reheat crack formation will be clarified by changing the parameters of temperature and strain, and the reheat crack's failure map of Alloy 52 will be established. In order to prevent hot cracking in the laser cladding process, the microstructure and temperature change of welding pool were measured and analyzed, and the influence of pulsed laser parameters on hot cracking sensitivity was discussed.

As the filling rate of pulsed laser cladding decreases, the power ratio and dilution of the fusion zone increases. When the dilution increases, phosphorus, sulfur and other impurities in the substrate will enter the weld pool, which will easily lead to increased segregation, resulting in increased hot cracking susceptibility. Reduced welding

speed will result in an increased pulse density while a high cooling rate will cause the fusion zone to generate more solidification cracking. Reducing the pulse frequency can reduce the pulse density but under the welding conditions with the same power will increase the pulse width. The dilution also increases with the increase of pulse width and improves the hot cracking sensitivity.

Through pre-strain simulation of Alloy 52 welding material's DDC produced by GTAW multi-layer welding, it was found that the cracks have the characteristics of transgranular fracture, and there is no trend of intergranular failure due to reheat cracking. However, because the crack did not propagate along the grain boundary, it is considered that the fixture did not achieve ideal constraint conditions. Therefore it is impossible to clearly define the threshold of material failure strain in the failure window because of the uncertain constraint conditions. In conclusion, the experimental designs in the future should be improved to clarify the susceptibility of the formation of reheat cracks in Alloy 52 at various temperatures.

Keywords: Alloy 52, Solidification Cracking, Ductility-Dip Cracking, Cladding

I. 前言

鎳基合金(Nickel Based Superalloy)因具有良好的抗蝕能力與高溫強度等性質，被選為核電廠核心元件、輸送管線等主要材料。隨核電廠服役年數增加，各個工業大國都有發生因鐸接衰化所造成的嚴重裂紋，發生輻射水洩漏等核安事故[1-3]。上述事故的主要歸咎於鎳基合金長時間運轉於高溫腐蝕環境中造成衰化，進而使穿越管產生應力腐蝕破壞(Stress corrosion cracking, SCC)[4]。

目前核電廠針對此類損壞的修復對策，除了更換抗蝕性更佳的材料，普遍會使用覆鐸(Cladding)的方式進行修補，針對已檢測到裂紋之管路外圍或鐸接衰化區等裂紋好發處進行預防性或修補性進行覆鐸作業，阻擋裂紋的生成與成長，以防止循環水外洩。而目前覆鐸鐸材的選擇主要以具備抗蝕性更佳之鎳基超合金 Alloy 52/52M/152為主[8, 9]，但研究指出 Alloy 52/52M在多層覆鐸後有產生凝固裂紋(Solidification Cracking)與失延裂紋(Ductility Dip Cracking, DDC)的可能，認為Alloy 52低雜質含量無法產生足夠析出物以阻擋晶界滑移是鐸道DDC生成的原因之一[10-12]。

雷射製程能在短時間提供高能量密度輸出，應用在

鐳接製程上鐳道總入熱量明顯低於傳統GTAW製程，因而覆鐳層將獲得低稀釋率與組織細緻等性質，能改善鐳件扭曲變形與熱影響劣化，但其高冷卻速率特性卻容易誘發鐳道產生凝固裂紋。目前對於雷射覆鐳凝固裂紋的解決方案主要為鐳件預熱以及雷射參數最佳化兩種，其中，鐳件預熱雖能有效降低熱裂敏感性，但亦會使鐳件入熱量增加，造成稀釋率上升與熱影響劣化等缺陷。而雷射參數最佳化，主要將針對覆鐳走速、送料率、鐳接功率、光斑大小等參數進行調整，以獲得較佳的鐳道品質。有相關研究利用脈衝波雷射(Pulsed Wave laser, PW laser)進行覆鐳，由於PW laser採週期性輸出，與連續雷射相比整體入熱量更低，能獲得更優良的覆鐳層品質[13]，但其週期性的能量輸出導致熔池快速升溫與冷卻、冷卻速率增加，將使凝固裂紋更容易生成。因此，使用脈衝雷射進行覆鐳作業時，熱裂敏感性問題亦相當關鍵。

本研究將模擬失延裂紋的生成機制，改變應變量與環境溫度，觀察 GTAW 覆鐳層之 DDC 生長形貌，進一步建立 DDC 之失效門檻(Failure Map)。針對 LBW 對覆鐳層顯微結構分析，討論不同鐳接速度、脈衝頻率與送料率等對覆鐳層表面結構及稀釋率之影響。量測鐳道熱循環履歷與熔池溫度分佈，觀察不同鐳接速度、送料率與脈衝頻率對溫度梯度之影響。最後探討不同鐳接參數與熔池冷卻速率對鐳道熱裂敏感性之影響。

II. 主要內容

2.1 實驗材料

實驗所使用的鐳材為Inconel alloy 52 鐳線。基板材料選用厚3 mm 之SUS 316L不鏽鋼，此種材料因擁有良好耐腐蝕性故常用於製造核能電廠管路，鐳材與基材成分如所示。

2.2 脈衝雷射覆鐳

脈衝雷射覆鐳使用宥晉企業有限公司之 YLW-200B Pulsed Nd:YAG雷射機台，雷射波長為 $1.064\mu\text{m}$ 。本次實驗採用脈衝雷射以熱傳導模式(Conduction mode)進行覆鐳，使用氬氣(Argon)進行保護氣體，送線角度設定為 35° ，送線方向與覆鐳方向相反。將透過雷射覆鐳製作試片，觀察其參數改變對熱裂敏感性之影響。

2.3 GTAW覆鐳

本校鐳接室之GTAW自動走鐳機台，其電壓固定為10V，控制參數主要直流電、熔接電流定80~120A、鐳接走速。以氬氣作為保護進行正面罩吹10L/min保護鐳道。將透過GTAW覆鐳製作試片，觀察DDC生成形貌。

2.4 熱循環歷程與溫度分佈量測

透過熱循環(Thermal Cycle)歷程有助於釐清雷射覆鐳熱傳導分佈，觀察基板敏化時間與溫度範圍，評估其熱影響危害程度，且覆鐳瞬間的溫度分佈量測，將有助於釐清不同雷射參數對熱裂的影響。實驗將使用0.05 mm 之K-Type熱電偶(Thermocouple)，並將編號 $T_{L1} \sim T_{L5}$ 熱電偶鐳於試件表面配置如所示，配合GRAPHTEC GL-900 溫度蒐集記錄器，每10 ms 擷取一次信號進行

熱循環歷程紀錄與溫度分佈量測。

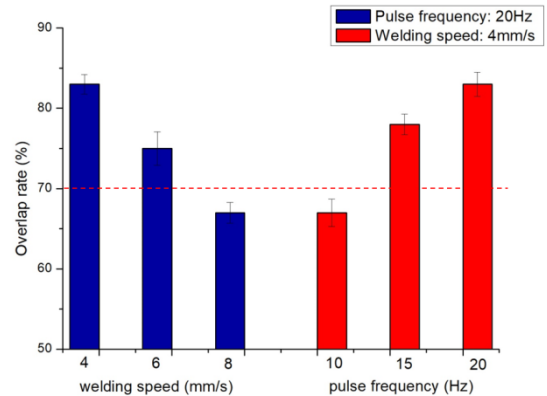


Figure 1 改變鐳接速度與脈衝頻率對鐳道表面重疊率影響之關係圖

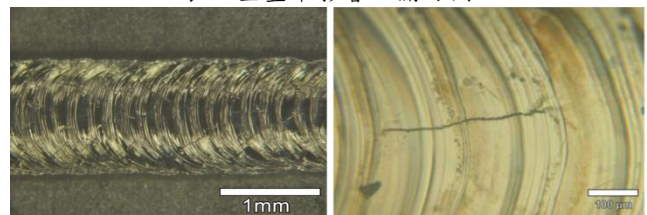


Figure 2 鐳道表面裂紋形貌

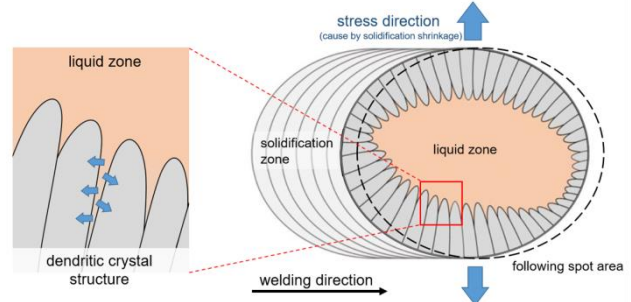


Figure 3 表面熱裂裂紋生成機制示意圖

2.5 金相顯微結構觀察

雷射覆鐳試件完成後使用立體顯微鏡針對覆鐳層表面進行觀察，分析其重疊率、表面形貌等性質，並列為判斷覆鐳層品質的依據。確定覆鐳層品質後將鐳件鑲埋，經砂紙研磨至#4000，再以 $3\mu\text{m}$ 鑽石噴霧拋光，最後使用10 %草酸水溶液進行5V電腐蝕，進行稀釋率與熔池深度觀察分析。

2.6 DDC測試方法

為模擬實際覆鐳造成DDC生成之機制，採用Bent Beam施加試件應變，將其拘束，並快速加熱至失延溫度範圍，待試件加熱至失延溫度時其延性驟降，晶界將無法承受應力，DDC隨即形成。

III. 結果與討論

3.1 脈衝雷射覆鐳層顯微結構分析

3.1.1 鐳道表面結構

以脈衝雷射進行覆鐳，脈衝週期性輸出會因鐳接參數改變對表面結構造成影響。改變脈衝頻率與鐳接速度，量測鐳道重疊率，結果如 Figure 1 所示。由 Figure 1 可得

知固定脈衝頻率 20Hz 時，銲接速度 4 mm/s 具有最高脈衝
Table 1 送料率與 power ratio 對照表

Filling rate (mm/mm)	0.75	0.90	1.05
Power ratio (kW/mm ²)	2.22	1.85	1.59

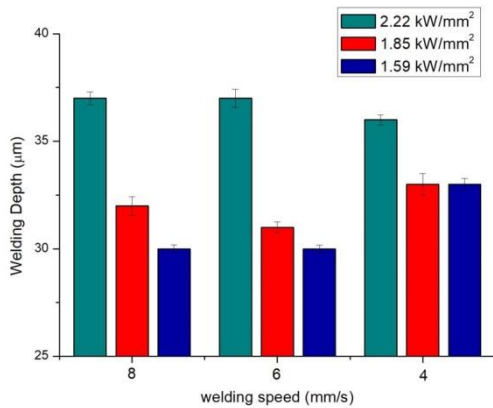


Figure 4 固定脈衝頻率 20Hz 並改變銲接速度與送料率對熔池深度影響之關係圖

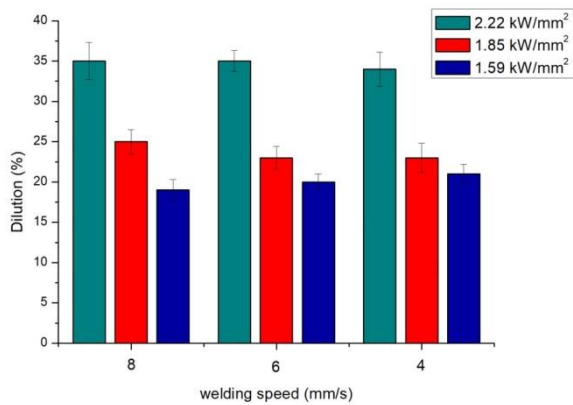


Figure 5 固定脈衝頻率 20Hz 並改變銲接速度與送料率對稀釋率影響之關係圖

重疊率 83%，並隨著銲接速度上升而下降；由固定覆銲走速 4mm/s 改變脈衝頻率可知當脈衝頻率 20Hz 時擁有最高重疊率 83%，並隨著脈衝頻率降低而下降。主因為當走速下降與頻率上升時，單位長度之脈衝密度較密集，重疊率即上升。根據相關文獻指出，重疊率低於 70% 將造成表面粗糙度上升，容易在進行多層覆銲時產生氣孔，並且影響到覆銲層對基材的保護能力。

Figure 2 為銲道表面裂紋形貌，表面熱裂裂紋主要於銲道中央生成，銲道邊緣生成裂紋較少，且裂紋方向均朝向銲道中心、平行覆銲方向。是因當銲道經固液相區間時，液待合金區將位於銲道中心(如 Figure 3 表面熱裂裂紋生成機制示意圖所示)，加上脈衝能量輸出隨著覆銲前進方向，熔池將形成橢圓狀並沿著基材進行凝固，若熔池在經過固液共存區間冷卻速率過快，受凝固所產生殘留應力亦增大，瞬間過大應力使凝固組織沒有足夠的強度抵抗，產生熱裂，延熔池邊緣法線方向，朝液態合金區中心生長，並持續延生，銲道中央即生成平行覆銲方向之裂紋示意圖所示。

3.1.2 銲道稀釋率與熱裂敏感性

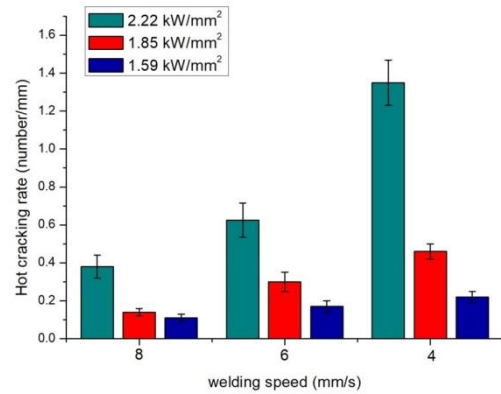


Figure 6 固定脈衝頻率 20Hz 並改變銲接速度與送料率對熱裂率影響之關係圖

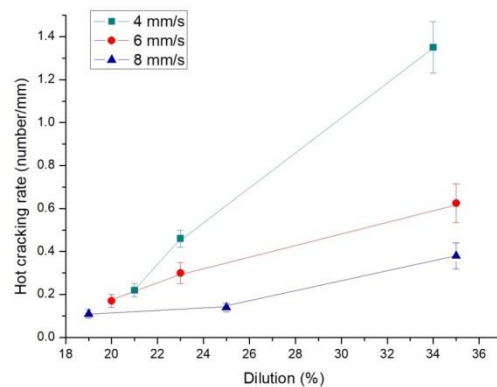


Figure 7 稀釋率對熱裂率影響之關係圖

使用 Alloy 52 銲材於基材上進行覆銲時，因基材 SUS 316L 中 P、S、Si 等雜質含量較高，熔覆過程此類元素將以稀釋進入銲道。由於此類雜質若存在於鎳基金中，將容易於銲道顯微結構產生晶界偏析現象，銲道將容易產生熱裂，因此將針對不同覆銲參數之 Alloy 52 覆銲層顯微結構進行分析，探討銲接參數對稀釋率，以及稀釋率對熱裂敏感性影響之關係。

由於 Power ratio 可以代表銲接過程之入熱量，將送料率與 Power ratio 轉換，顯示於 Table 1 中。以固定脈衝頻率 20 Hz，改變送料率與覆銲走速，計算銲道稀釋率以及量測熔池寬度，並顯示於 Figure 4 與 Figure 5 中。透過 Figure 4 可以發現降低走速雖然會增加銲道整體入熱量，銲接速度對銲道熔池深度影響不大，是因脈衝雷射高冷卻速率的性質限制的銲道融覆尺寸；而在改變送料率參數時發現在 power ratio 為 2.22kW/mm² 時，熔池深度有明顯增加，是因送料率下降會使覆銲時 power ratio 上升，單位面積將獲得更多的能量融覆基材，增加銲道熔池深度，而隨著深度的增加基材融覆面積亦隨之上升。在 Figure 5 亦可發現相同的現象，送料率下降造成 power ratio 上升，單位面積將獲得更多的能量融覆基板，增加熔池面積，銲道合金稀釋率即上升。由 Figure 5 亦可得知 power ratio 對合金稀釋率有明顯的影響，相較之下，銲接速度雖能夠有效降低銲道整體入熱量，但並沒有對稀釋率造成明顯的影響。因此認為進行雷射覆銲時，透過 Power ratio 計算預測銲道合金稀釋率將有助於

Table 2 改變頻率對脈衝密度與合金稀釋率對照表

Pulse frequency (Hz)	10	15	20
Pulse density (number/mm)	2.5	3.75	5
Dilution (%)	51	45	32

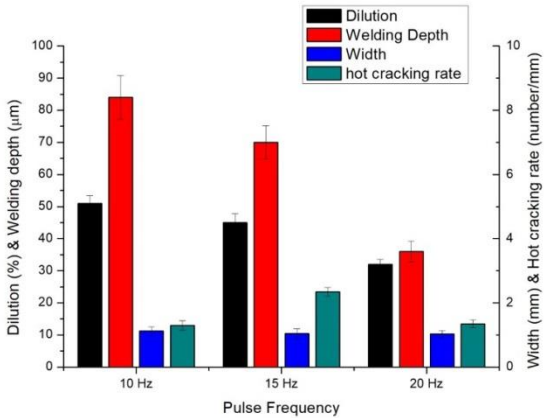


Figure 8 改變頻率對銲道寬度、熔池深度、稀釋率與熱裂率影響之關係圖

設計銲接參數，維持銲道性質並避免覆銲缺陷發生。

Figure 6 為固定脈衝頻率 20Hz 之送料率、走速與熱裂率(R)關係圖。由 Figure 6 可以看出在銲接速度越高的參數條件下，銲道具有較低的熱裂率，是因提高銲接速度可以有效降低整體銲件入熱量，降低銲道熱裂敏感性。而在相同走速下，熱裂率隨 power ratio 的增加而上升。是因當 power ratio 增加會使得稀釋率上升，當稀釋率提高時，基板內部 P、S 等雜質成分將容易進入鎳基超合金之覆銲層，提高熱裂敏感性。Figure 7 為稀釋率對熱裂率影響之關係圖，可以明顯發現熱裂敏感性隨稀釋率增加而上升。

改變頻率對脈衝密度與合金稀釋率對照表。以固定銲接功率、覆銲走速 4mm/s 與送料率 0.75mm/mm，並改變脈衝頻率進行截面尺寸分析與熱裂率分析，並將結果顯示於 Figure 8。如 Figure 8 所示，熔融深度隨著脈衝頻率的下降而上升，是因在固定銲接功率的條件下，頻率下降會使得銲接脈衝脈寬增加，脈衝脈寬增加能夠增長每發光束給基材的入熱量，使得基材將獲得更多的能量進行熔融，熔池深度即增加。熔池深度的增加，亦使得銲道稀釋率上升，因此可以發現在脈衝頻率為 10Hz 時，銲道具有最大的合金稀釋率。針對脈衝頻率對熱裂率影響之結果進行分析，發現在脈衝頻率為 15Hz 時擁有最大熱裂率，熱裂敏感性並沒有隨著脈衝密度的下降而有所改善，是因脈衝頻率降低雖然會使脈衝密度下降，稀釋率卻會增加，且由銲接速度與送料率對熱裂率影響之關係圖可發現稀釋率與脈衝密度對熱裂敏感性均具有較高的影響。因此，認為脈衝頻率為 15Hz 時受到稀釋率與脈衝密度的雙重影響，熱裂率受到兩種因素之影響疊加，熱裂敏感性不僅沒有改善，反而還加劇。

由實驗結果可知，固定銲接功率時，脈衝頻率改變使得脈衝脈寬必須配合，進而造成稀釋率明顯改變；送料率的降低增加了 power ratio，亦增加了稀釋率；而覆銲走速則對稀釋率影響並不明顯。認為在脈衝頻率

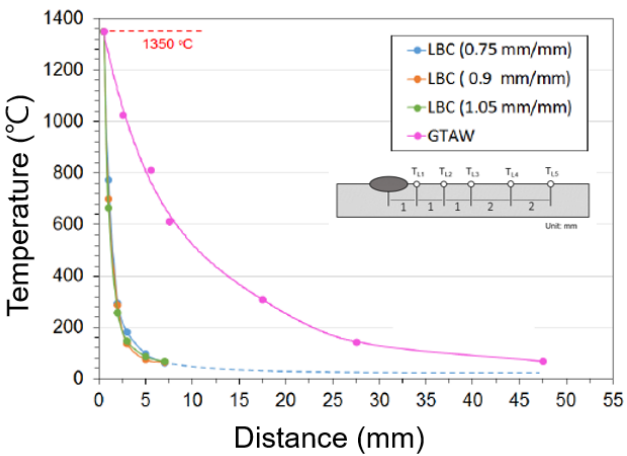


Figure 9 改變送料率之溫度分布曲線圖

Table 3 改變送料率之銲道量測點 T_{L1}、T_{L2} 峰值溫度

Filling rate (mm/mm)	0.75	0.90	1.05
T _{L1} (°C)	773	699	665
T _{L2} (°C)	296	287	257

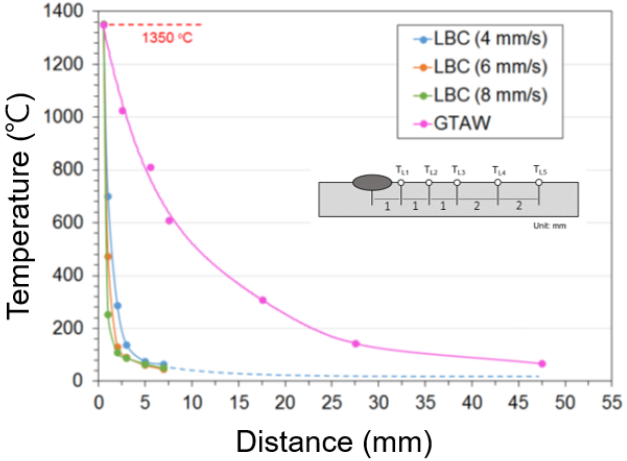


Figure 10 改變銲接速度之溫度分布曲線圖

Table 4 改變銲接速度之銲道量測點 T_{L1}、T_{L2} 峰值溫度

Welding speed (mm/s)	4	6	8
T _{L1} (°C)	699	472	253
T _{L2} (°C)	287	129	108

20Hz、送料率 1.05 mm/mm 時將擁有較佳銲道合金稀釋性質與覆銲效率。

3.2 脈衝雷射熱循環歷程與溫度分布

雷射覆銲具有能量密度集中的特性，對銲件進行局部性地快速加熱與冷卻。希望藉由量測不同送料率覆銲時的熱循環歷程以及溫度分布，進一步釐清溫度對覆銲層所造成的熱應力影響性質。

將各量測點峰值溫度繪製成銲道周圍之溫度分布圖，如 Figure 9 改變送料率之溫度分布曲線圖所示。改變送料率之熱循環歷程中，量測點 T_{L1}、T_{L2} 之峰值溫度記錄並顯示如 Table 3 所示。由 Table 3 可以發現峰值溫度隨著送料率的上升而下降，是因送料率的上升，使得 power ratio 下降，更大比例的雷射能量被銲材吸收，基材獲得的能量較低，銲道周圍的溫度分布亦較緩和。

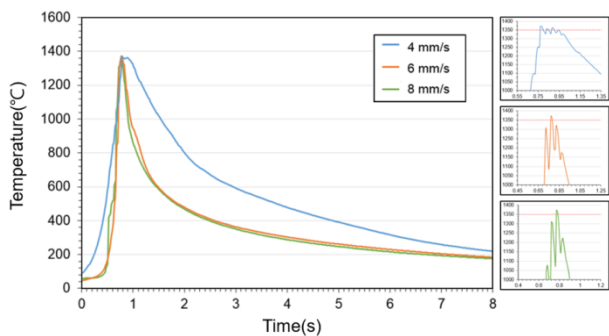


Figure 11 改變銲接速度之熔池溫度變化曲線圖

Table 5 改變銲接速度熔池凝固瞬間冷卻速率

Welding speed (mm/s)	4	6	8
Cooling rate (°C/s)	1100 / 910 / 943	4550	5750

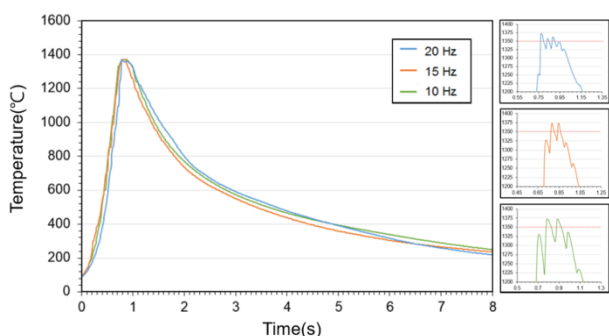


Figure 12 改變脈衝頻率之熔池溫度變化曲線圖

Table 6 改變脈衝頻率熔池凝固瞬間冷卻速率

Pulse frequency (Hz)	10	15	20
Cooling rate (°C/s)	982 / 989	914/1286	1100 / 910 / 943

改變銲接速度之溫度分布曲線圖如 Figure 10，並將 T_{L1} 、 T_{L2} 所測峰值溫度記錄在 Table 4 改變銲接速度之銲道量測點 TL1、TL2 峰值溫度可以發現銲接速度下降會使銲道整體入熱量上升，使得銲道周圍溫度上升、溫度分布擴大，較廣的溫度分布降低了銲道周圍溫度梯度程度，但依脈衝密度對熱裂率影響之結果顯示，銲接速度與溫度梯度的下降並無法有效降低熱裂敏感性，此種現象可由 Figure 10 解釋。由 Figure 10 可以發現儘管降低銲接速度，改善銲道溫度梯度，但相較於 GTA Cladding，降低銲接速度改善溫度梯度的程度十分有限。此外，隨著走速下降，導致脈衝密度上升是為提高熱裂敏感性的主要原因。

固定脈衝頻率 20 Hz、送料率 0.75 mm/mm 進行改變銲接速度對熔池冷卻速率進行分析，將量測結果顯示於 Figure 11，以釐清不同覆銲走速對熱裂敏感性的影響。由 Figure 11 可以明確發現脈衝雷射週期性的瞬間高能量輸出造成銲道熔池快速升溫，由於脈衝式的輸出能量方式，銲道將在脈衝間段快速降溫，多次反覆的能量提供使銲道整體入熱量持續累積，提升平均溫度。由 Figure 11 局部放大圖可以看到當銲道平均溫度上升至接近 Alloy 52 熔點 1350°C 時，雷射輸出會使銲道快速升溫至通過熔融溫度，並在熔融後快速降溫。根據熱裂裂紋生成機制認為裂紋將於熔池冷卻通過熔點時產生。由 Figure 11 可以明顯發現銲接速度降低會降低銲道冷卻速率與溫度分布梯度。將 Figure 11 中通過熔點冷卻速率整

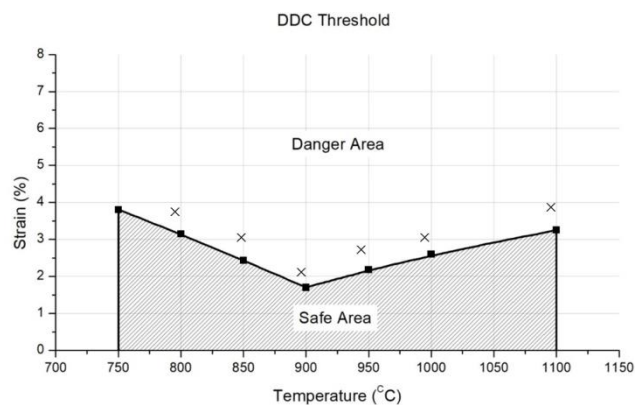


Figure 13 Alloy 52 之 DDC 失效窗口

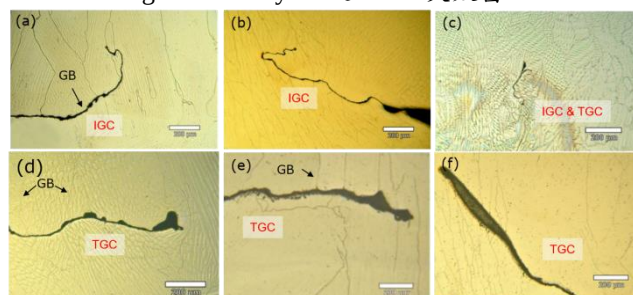


Figure 14 DDC 裂紋形貌金相圖。

- (a)應變量 3.5%、800°C。(b)應變量 3.0%、850°C。
(c)應變量 2.0%、900°C。(b)應變量 2.5%、950°C。
(e)應變量 3.0%、1000°C。(f)應變量 3.5%、1100°C。

理並記錄於 Table 5 改變銲接速度熔池凝固瞬間冷卻速率走速 4 mm/s 因速度較低而擁有較高的脈衝密度，產生了三次的熔融並凝固，冷卻速率結果依脈衝產生時間排列則分別為 1100、910、943°C/s，並認為是最後一次通過熔點導致熱裂形成。銲件整體入熱量增加造成銲件溫度分布範圍擴大、銲件熱量不易逸散。因此，增加銲接速度降低了銲件整體入熱量，冷卻速率將隨著走速上升導致的低入熱量而加快。由 Table 5 中可以得知隨著銲接速度上升至 6 mm/s 與 8 mm/s，冷卻速率更高達 4550 °C/s 與 5750°C/s。

對頻率熔池冷卻速率進行分析，熔池溫度變化如 Figure 12 所示，通過熔點時的熔池冷卻速率已整理並記錄於 Table 6。由 Figure 12 可發現改變脈衝頻率後，銲道因擁有較相近入熱量，溫度變化曲線亦相近。亦可透過 Table 6 中冷卻速率的顯示，發現到脈衝頻率的提升並沒有對熔池冷卻速率產生影響。

3.3 DDC失效窗口建立

改變失效溫度與應變量，探討 Alloy 52 銲材經多曾覆銲熱循環效應造成 DDC 之形貌特徵趨勢，並建立 Alloy 52 GTA Cladding DDC 失效窗口。試驗以延性驟降溫度 750°C~1100°C 作為溫度調整範圍，持溫 30 秒，應變量以 0.5% 為單位，進行應變量 1~7% 預應變試驗。

經改變失效溫度與應變量參數，Figure 13 為 Alloy 52 之 DDC 失效窗口，圖中曲線即為失效門檻參數，曲線下方標示區域為安全區域，Alloy 52 銲道無 DDC 生成；失效門檻以上的區域為失效區域。由 Figure 13 可發現溫

度在間，失效門檻應變量有降低的趨勢，代表 DDC 敏感性在 750°C~900°C 區間隨著溫度上升而增加。以 DDC 形成機制分析，此溫度區間之晶界比晶粒內部更快速衰退。認為是 $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ 強化相析出物維持晶粒內部的高溫強度，當材料開始釋放應力產生變形時，晶界即相對脆弱，應變集中於晶界導致裂紋生成。然而，溫度在 900°C~1100°C 間失效門檻有上升的趨勢，可視為材料的容許應變量逐漸提升，原因可能為溫度超過 900°C 時，原子自由度或擴散能力增強，使得原本分散的細小強化相因溫度提昇而更為集中，導致晶粒內部高溫強度降低，延性因而增加，應力釋放時，減緩晶界應力集中的程度，而使失效門檻之應變量隨著溫度上升而提高，降低了鐸道 DDC 敏感程度。

Figure 14 為 DDC 裂紋形貌金相圖。Figure 14(a) 為預應變量 3.5%、800°C，裂紋長度大，沿晶界開裂，屬於沿晶破壞。Figure 14(b) 為預應變量 3.0%、850°C，裂紋雖有接觸晶界，但由次晶成長取向與晶界方向認為裂紋屬於混合破壞模式。Figure 14(c) 為預應變量 2.0%、900°C，為最低失效門檻，裂紋與晶界交錯，屬於混合破壞模式。Figure 14(d) 為預應變量 2.5%、950°C，裂紋直接橫跨晶粒，屬於穿晶裂紋。Figure 14(e) 為預應變量 3.0%、1050°C，裂紋穿越晶粒，屬於穿晶破壞模式。Figure 14(f) 為預應變量 3.5%、1100°C，裂紋與晶界交錯，屬於穿晶破壞模式。實驗結果顯示在 750°C~1100°C 的溫度範圍內，DDC 失效門檻應變值有先降後升的趨勢，裂紋以穿晶破壞與混合破壞模式為主，並不遵循延晶破裂機制，與一般了解的失延裂紋生成機制有所差異，無法配合再熱裂理論。認為本試驗在預應變夾持上無法使試件均勻受力，故若能改採取 Gleeble 拉伸機進行實驗，應能獲得更加準確的裂紋形貌與失效趨勢。

IV. 結論

脈衝雷射覆鐸

1. 由鐸道表面結構可以發現脈衝雷射光斑與脈寬造成形成橢圓狀熔池，枝晶組織由熔池邊緣沿法線方向向中心凝固，裂紋將沿枝晶組織生成方向成長。並由熱裂形成機制認為裂紋在熔池凝固時即生成。
2. 送料率下降會使 power ratio 上升，造成合金稀釋率上升，增加鐸道熱裂敏感性。隨著稀釋率上升，SUS 316L 內 P、S、Si 等雜質即容易稀釋進入覆鐸鐸料，造成偏析，增加熱裂敏感性。因此認為 power ratio 越低，可產生較低的覆鐸層合金稀釋性質而獲得更佳抗熱裂性質。
3. 改變鐸結速度將不影響稀釋，但速度下降會提升脈衝密度，使熔池冷卻速率提高，層熱裂敏感性上升。固定鐸接功率、降低脈衝頻率以降低脈衝密度，會造成稀釋率上升，提高熱裂敏感性。鐸接速度下降能降低冷卻速率以及改善溫度梯度分布，但效果仍然有限，無法改善熱裂敏感性。整體認為鐸道合金稀釋率與脈衝密度為主要影響熱裂敏感性的原因。

綜合以上實驗結果，提高送料率、降低 power ratio 與脈衝頻率將會得佳合金稀釋；提升鐸接速度雖然能有效降低熱裂敏感性，但走速過快會造成鐸道表面脈衝重

疊率過低，表面粗糙度上升，不利多層覆鐸執行，因此認為設計鐸接速度必須與脈衝頻率及其他鐸接參數有適當搭配，以獲得良好覆鐸層熱裂性質與表面品質。

DDC 失效窗口

1. 以預應變加熱法模擬 Alloy 52 於多道次覆鐸時的再熱裂機制，裂紋並無明顯沿晶開裂的趨勢，且大多為穿、沿晶混合破壞的模式，且裂紋尺寸無明顯趨勢。認為應變集中的效果應該才是影響裂紋尺寸的關鍵因子。

在 750°C~1100°C 的失延溫度區間內，隨著溫度上升，失效門檻應變量有先降後升的趨勢。就裂紋測試結果，主要為混合破壞模式與穿晶破壞模式。後續若能改採 Gleeble 拉伸機進行拉伸預應變 DDC 檢測，了解不同應力型態對 DDC 之失效門檻與模式。

參考文獻

- [1] H. Xu and S. Fyfe, "Laboratory Investigation of PWSCC of CRDM Nozzle 3 and Its J-Groove Weld on the Davis-Besse Reactor Vessel Head," *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System*, 2005.
- [2] S. Fyfe, H. Xu, and J. W. Hyres, "Laboratory Investigation of the Stainless Steel Cladding on the Davis-Besse Reactor Vessel Head," *Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System*, 2005.
- [3] H. C. J. William, "NRC Response to the Davis-Besse Head Degradation Event," *Office of Nuclear Regulatory Research*, pp. 1-6.
- [4] J. Gorman, S. Hunt, P. Riccardella, and G. A. White, "PWR Reactor Vessel Alloy 600 Issues," *Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Code*, vol. 3, pp. 1-26, 2006.
- [5] M. Sennour, P. Laghoutaris, C. Guerre, and R. Molins, "Advanced Tem Characterization Of Stress Corrosion Cracking Of Alloy 600 In Pressurized Water Reactor Primary Water Environment," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 393, pp. 254-266, 2009.
- [6] W. E. Mayo, "Predicting Igsc/Iga Susceptibility Of Ni-Cr-Fe Alloys By Modeling Of Grain Boundary Chromium Depletion," *Materials Science and Engineering*, vol. A232, pp. 129-139, 1997.
- [7] Y. S. Lim, H. P. Kim, J. H. Han, J. S. Kim, and H. S. Kwon, "Influence Of Laser Surface Melting On The Susceptibility To Intergranular Corrosion Of Sensitized Alloy 600," *Corrosion Science*, vol. 43, pp. 1321-1335, 2001.
- [8] T.-K. Song, H.-R. Bae, Y.-J. Kim, and K.-S. Lee, "Numerical investigation on welding residual stresses in a PWR pressurizer safety/relief nozzle," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 33, no. 11, pp. 689-702, 2010.

- [9] P. C. Riccardella, D. R. Pitcairn, A. J. Giannuzzi, and T. L. Gerber, "Weld Overlay Repairs From Conception To Long-Term Qualification," *International Journal Of Pressure Vessels And Piping*, vol. 34, pp. 59-82, 1988.
- [10] G. A. Young, T. E. Capobianco, M. A. Penik, B. W. Morris, and J. J. Mcgee, "The Mechanism Of Ductility Dip Cracking In Nickel-Chromium Alloys," *Welding Research*, vol. 87, pp. 31-43, 2008.
- [11] N. E. Nissley and J. C. Loppold, "Ductility-Dip Cracking Susceptibility of Nickel-Based Weld Metals Part 1: Strain-to-Fracture Testing," *Welding Journal*, vol. 87, pp. 257-264, 2008.
- [12] S. D. Kiser and B. A. B. R. Zhang, "A New Welding Material for Improved Resistance to Ductility Dip Cracking," *Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference*, pp. 639-644, 2009.
- [13] M. A. P. Silva, R. Miranda, N. Pedrosa, "Laser Cladding Using Filler Powder and Wire," 2008.

核能電廠 HDPE 管路之 ASME 法規安全餘裕與老劣化效應之可靠度評估

Studies on safety margin in ASME code and reliability evaluation in aging/degradation for HDPE piping of nuclear power plant

計畫編號：MOST 106-2623-E-262-003 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：丁鯤

e-mail：kuenting@mail.lhu.edu.tw

計畫參與人員：李鴻明、賴宗毅、林郁婕、石逸泉、洪誌謙、
金祐顯、徐紹璋、楊宇斌等

執行單位：龍華科技大學

摘要

高密度聚乙烯(High-Density Polyethylene, HDPE)管路相較於一般金屬材料(碳鋼、不銹鋼)管路而言，具有成本低、重量輕、現場安裝快速、抗腐蝕、不易產生生物性汙染、不易形成腐蝕瘤等優點，所以常被用於液氣態等碳氫化合物的傳送。但由於應用於核電廠使用下，欠缺適當的法規設計依據，且對 HDPE 管路的使用及其安全性仍存有疑慮的狀況下，本計畫的首要工作即是彙整相關研究之參考文獻，同時採用 ASME B&PV Codes 所提供 Code Case N-755 作為 HDPE 管路之設計與安裝規範之可行性研究。

其次藉由蒐集 HDPE 管路之材料機械性質，建立管路有限元素數值模型(含單一周向)，探討 HDPE 管路在設計階段法規安全餘裕研判。在探討外在環境、材料強度不確定性以及老劣化效應、管路使用壽命方面，採用可靠度工程評估。藉由國內運轉經驗的條件參數如尺寸幾何、管內壓力、土壤壓力以及環境溫度等，參考 ASTM 獲取符合國內電廠適用之經驗評估模型，再由該模型估算管路之可靠度函數，並據以探討檢測與維護之最佳方案。

關鍵字：高密度聚乙烯管路、有限元素數值模型、破壞模式、可靠度工程、老劣化效應、潛變

Abstract

High-Density Polyethylene (HDPE) pipe line has several advantages in comparing with that of metal material piping, such as lower cost, light weight, easy to installation, wear resistance, without bio-pollution and anti-tuberculation. It is always used to transmit gas and liquid state compounds like hydrocarbon. Up to now, none of the design code or stand can be used for nuclear power plant applying. This project firstly will survey the appropriateness of the Code Case N-755 provided by ASME B&PV Codes as a regular code for engineering design and installation.

Followed by collection of material mechanical properties of HDPE pipe, the finite element numerical models will be built to evaluate the safety margin when

HDPE pipe under the design phase and failure modes. Focusing on the external environment, the uncertainties of the material strength, degradation effects and the service life of the pipeline, the reliability analysis can be induced for the life assessments. Referring to the operation experience and conditions obtained from domestic nuclear power plants, an experience assessment model from ASTM also can be applied with proper parameters, such as the pipe geometry, tube pressure, soil pressure and ambient temperature, etc.. Then, the reliability model for the pipeline can be used to discuss the best methodology on inspection and maintenance.

Keywords: high-density polyethylene pipe, finite element model, failure mode, reliability engineering, degradation effect, creep

I. 前言

2009 年美國 Dresden、Oyster Creek 以及 Peach Bottom 核能電廠的地下管線劣化，發生洩漏事件，導致少量的氬滲到地下水中，雖然此類事件經美國核管會審查評估後認為這些放射性物質在廠內與廠外的洩漏量都低於法規值，不須對現行法規進行更動，但仍執行連串措施，檢核規範、標準、法規以及電廠的作法，並要求核能工業界對地下管線的完整性要提出因應方案，以提升核能安全[1,2]。

美國核能策略指導委員會(Nuclear Strategic Issues Advisory Committee，簡稱 NSIAC)並將地下筒槽一併納入考量，並於2013年提出地下管線完整性的管理導則[3]，並經美國核管會審議通過。2016年並針對核能電廠延役中有關地下管線規範進行修訂[4]。雖然台灣未來不會執行核能電廠的延役，但地下管線的存在，對核電廠除役也是一項重要的議題，因地下管線包含核能三級管線與非核安管線，大部分都以碳鋼材料或鑄鐵材料製作，長期下來或有管路腐蝕與結垢現象導致管路的破裂，在除役階段具有放射性的殘留液體還是有可能從地下管線洩漏出去，所以現階段地下管線的完整性還是要注意的。

地下管線老化劣化導致破裂發生，因此核能界開始

思考一般化工廠成功所使用的高密度聚乙烯材料(High-Density Polyethylene, HDPE)[5]。相較於一般金屬材料(碳鋼、不銹鋼)管路而言，具有成本低、重量輕、現場安裝快速、抗腐蝕、不易產生生物性汙染、不易形成腐蝕瘤等優點，所以常被用於液氣態等碳氫化合物的傳送。事實上，在化工廠或原動力廠中，將 HDPE 管路的應用已相當普遍，且成效良好。但在核能電廠方面，應用在安全相關的管路方面，由於欠缺適當的法規設計依據，人們對 HDPE 管路的使用及其安全性仍存有疑慮，所以仍然使用金屬管路，往往導致該些管路系統因金屬腐蝕等因素而發生洩漏，也需耗費相當多的成本於管路之防腐蝕工程。

美國 Cawata 電廠有鑑於廠用海水系統(Service Water System)中部分地下管線碳鋼管路的損壞，採用 HDPE 材料，並經美國核管會以個案申請核備，使用 HDPE 管線代替現有的碳鋼管線[6]。GALL 報告的第九章[7]而對於名詞「埋管(Buried)」和「地下管(Underground)」在 GALL 有完整的定義。簡而言之，埋管和水箱(Water tank)是與土壤或混凝土直接接觸(例如牆壁穿透)。地下管和貯存箱的使用及維護要求等級較低，其是被包含在隧道內，以便與空氣接觸，並位於檢測通道受限的地方。然而在 ASME B&PV Codes 第三章[8]有關管路的設計規範中，並未特別針對 HDPE 應用於核能三級管路上訂定安全使用規範，僅提供 Code Case N-755-2 供核電廠持照者參考應用[9]。雖美國管制單位曾針對 HDPE 管路的使用壽命、熔接方式、服役中檢測等問題提出多次審議，但迄今尚未完全同意它的使用。於是，各電廠只能以個案方式向管制單位提出相關金屬管路豁免使用的要求，而美國管制單位也提出相關替代方案來規範 HDPE 管路之設計與安裝。

有關 HDPE 地下管路的相關研究，美國核管會(NRC)曾於 2006 年左右曾委託 Engineering Mechanics Corporation of Columbus (Emc2)進行相關研究，該公司亦完成「Review of literature on the use of polyethylene (PE) piping in nuclear power plant safety-related class 3 service water systems」之研究報告[10]，該報告針對 PE 管路與 HDPE 管路在材料機械性質、設計階段、破壞模式以及檢測維護皆有提出重點式之建議，其所列之參考文獻亦是可供本計畫執行的參考依據。故針對前述 HDPE 管路的使用及相關研究，本計畫之目的從兩項議題探討：1. HDPE 管路之材料機械性質研究與法規安全餘裕研判；2. HDPE 管路之老劣化效應探討及壽命與可靠度評估模式。

II. HDPE 管路材料機械性質研究與規範安全餘裕研判

在制定相關安全評估方法之前，我們必須瞭解 HDPE 材料之力學與其他機械性質，它們較金屬材料複雜，且易受到溫度、應力或應變加載速度等因素影響。由於現階段使用該類材料之歷史較使用金屬材料為短，在相關規範制定之前，仍有許多疑慮尚待釐清，譬如說，HDPE 管材的接受準則、各溫度下所容許之拉力、潛變與變形極限、各種可能失效機制、材料可能產生之脆裂情況、材料之同質或異質接合方式、工程設計上應掌握

的最少材料參數等等。

本計畫執行目標之一即在探討 HDPE 管路應用於核能電廠地底埋管上的可能性，我們將歸納並應用目前暫行之 ASME Code Case N-755-2 設計方案[9]，以有限元素法等力學分析方法，比較採用 HDPE 管路與傳統金屬管路之差異性，同時參考國內外相關文獻驗證分析模型的正確性。本計畫也將依分析模擬結果探討各種狀況下 Code Case 所建議設計標準之適用性。本計畫將著重於分析 ASTM3408[11]與 4710[12]等較具有工程應用價值之 HDPE 管路，針對這些管路於核能電廠使用時之接受準則、黏彈性材料參數、製程參數、失效機制等議題分析歸納，藉以釐清 HDPE 的材料機械性質及其在使用上的可行性。最後將簡化設計分析流程並仍保留分析結果之保守性，讓本項目工作之研究結果具有實際工程上之應用價值。

2.1 HDPE 實驗樣本測試與數值分析模型驗證-拉伸降伏應力驗證

實體測試樣本主要參考美國電力研究院之研究報告 TR-1022565[13]，其採用如圖 1 之測試樣本，幾何尺寸如表 1 所示。該實驗的目的主要確定 Uni-modal PE 4710 resin 之拉伸降伏應力，其測試方法主要根據 ASTM D1599-99 [14]所規定的短期液壓失效壓力(爆破壓力，Burst Press)計算拉伸降伏應力，而其執行程序主要可分為兩種模式，每種模式之持續壓力測試條件尚包括了環境溫度 85°C (185.9°F)和 95°C (203°F)。

模式 A

- (1) 將端蓋安裝到試樣上，並用保持在測試溫度的測試液完全填充。將試樣連接到加壓裝置上，確保在使用液體時不會吸入氣體。試樣應完全浸入介質中。
- (2) 均勻持續增加壓力，直到試樣失效，用碼表測量時間。如果故障時間小於 60 秒，降低加載速度並重複測試。所有試樣的失效時間應在 60 至 70 秒之間。
- (3) 記錄壓力和失敗時間。

模式 B

- (1) 以與模式 A(步驟 1、2)中描述的相同的方式準備試樣。
- (2) 均勻連續地增加壓力，測量時間。為了確定試樣符合最小爆裂要求，試樣應在 60 至 70 s 之間爆裂，或在 60 至 70 s 之間達到或超過最小爆破壓力。



圖 1 TR-1022565[13]中採用實體測試樣本

表 1. 實體測試樣本尺寸

管外徑	114.3 mm (4.5 inch)
長度	762 mm (30 inch)
壁厚	10.39 mm (0.409 inch)
其他	兩端為半圓球封蓋

2.2 HDPE 實驗樣本測試與數值分析模型驗證-數值分析模型驗證

本數值分析中材料機械性質主要依據文獻[15]，採黏彈性(Visco-elastic)以及等向(Isotropic)之特性參數。首先，表 2 列出基本穩態分析之材料參數，表 3 則列出黏彈性材料之剪力釋放模數，該參數的參考溫度是設定在 150℃，表 4 則是移轉函數(Shift Function) 之 WLF 係數(Coefficient of William-Landel-Ferry)。

表 2. 材料機械性質

材料性質	輸入值
密度 (kg/m ³)	950
熱膨脹係數	0.00023
楊氏係數(MPa)	1100
Poissons' Ratio	0.35
熱傳導係數(Wm/C)	0.28
比熱(J/kg-C)	2300

表 3. 剪力釋放模數(Prony shear relaxation)

Index i	Relative Moduli(i)	Relaxation Time(i) (s)	Relaxation Time(i) (s ⁻¹)
1	0.245700	0.03906	25.60164
2	0.072430	0.3125	3.2
3	0.030460	2.5	0.4
4	0.007814	20	0.05
5	0.003188	160	0.00625

表 4. 移轉函數(Shift Function) 之 WLF 係數(Coefficient of William-Landel-Ferry) 範圍:140℃ 至 200℃

Coefficients	輸入值
C1	6.928
C2	350
參考溫度 T _{ref}	150

分析模型的負載條件主要參考文獻[13]的實驗結果，也就是其採用模式 A 之實驗步驟，當量測樣本的失效在 60 至 70 秒之間時，紀錄當時施加的管內壓力；此管內壓力即為本模型的輸入負載，如表 5 所列；而數值分析模型的計算結果(等效應力)主要比對該實驗所測得的降伏應力，藉以證明數值分析模型的材料參數是符合及適用於未來後續相關的分析。

表 5. 分析模型管內壓力輸入(附實驗之降伏應力)

溫度	管內壓力(psig)	降伏應力(psi)- 實驗結果
85℃	264 (1.82MPa)	1254
	256(1.77MPa)	1235
	272(1.88MPa)	1286
95℃	205(1.41MPa)	971
	203(1.40MPa)	961
	221(1.52MPa)	1046

本數值分析模型採用商用有限元素軟體 ANSYS，依據表 1 的規格建構如圖 2 之 1/2 對稱模型，數值分析採用高階元素，編號 SOLID 186，共計 6083 個元素以及 91626 個節點進行運算，如圖 3 所示。分析結果如圖 4 及圖 5 所列，表 6 為降伏應力之實驗與數值模擬比較。在表 6 呈現的誤差是指：數值分析皆以 65 秒為增壓歷時，在 65 秒後增壓到實驗的等值壓力下，數值模型所計算出的最大等效應力(von Mises Stress)，該應力視為降

伏應力，且與實驗值比較之。



圖 2. 1/2 對稱模型

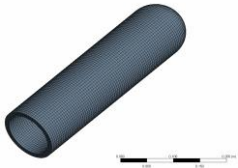


圖 3. 有限元素網格

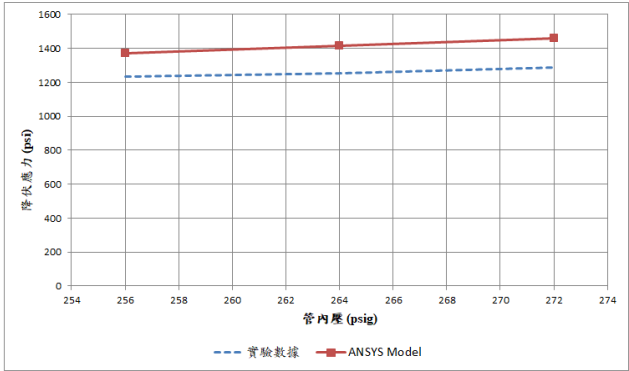


圖 4. 在 85℃下數值模型於 65 秒達到降伏

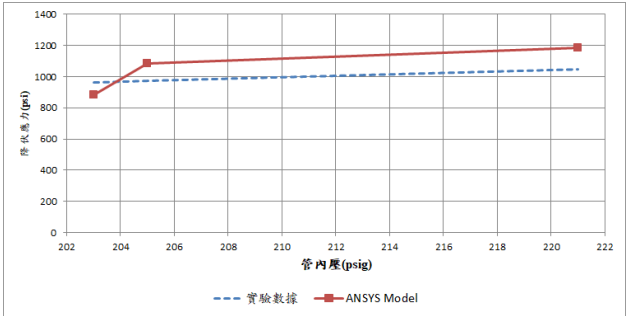


圖 5 在 95℃下數值模型於 65 秒達到降伏

表 6. 降伏應力之實驗與數值模擬比較

溫度	降伏應力(psi)- 實驗結果	降伏應力(psi)- 數值分析結果	Error (%)
85℃	1254	1416.1	11.1
	1235	1372.7	12.9
	1286	1459.8	13.5
95℃	971	1085.9	7.9
	961	885.1	11.8
	1046	1183.0	13.1

2.3 HDPE 管路外部承受土壤壓力及短期性設計負載

現有一 HDPE 直管外徑為 200mm，其壁厚為 11.4mm，承受內壓為 0.4MPa，外部承受土壤壓力為 0.1MPa；材料相關參數如表 2 至表 4 所列。依據 Code Case N-755-2 中 3223.2 短持續時間軸向機械負載之表 3223-3 內的允許應力值作為安全餘裕的研判，以作為設計參考依據。

以下則為本分析在數值分析模型的計算結果。圖 6~圖 11 為應力分析結果，可對應表-3223-3，其中若運轉溫度大於等於 80℃時，上述條件的設計將無法通過檢覈，必須降低設計內壓力由 0.4 降至 0.35MPa，方可達到符合規範要求。

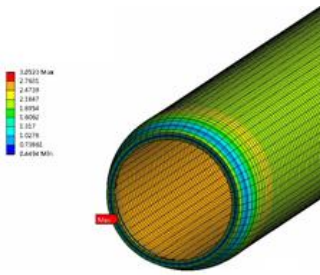


圖 6 運轉溫度為 21°C 最大應力(3.052MPa)

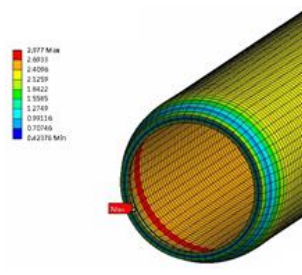


圖 7 運轉溫度為 38°C 最大應力(2.977MPa)

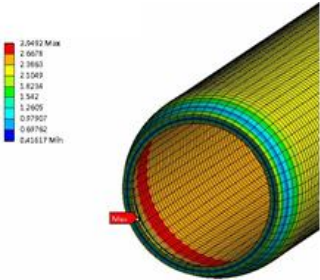


圖 8 運轉溫度為 49°C 最大應力(2.949MPa)

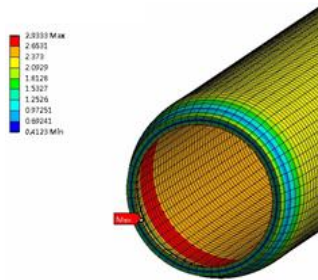


圖 9 運轉溫度為 60°C 最大應力(2.933MPa)

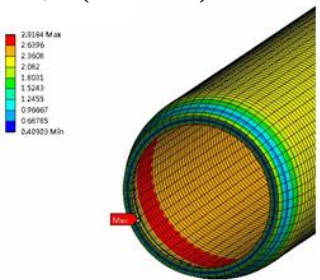


圖 10 運轉溫度為 80°C 內壓 0.4MPa 最大應力(2.918MPa)，不符規範

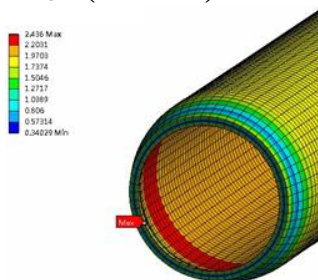


圖 11 轉溫度同為 80°C 內壓 0.35MPa 最大應力(2.436MPa)，通過規範要求

2.4 結果與討論

本研究所提之執行方式、目的與考量，係參考實體測試所使用的環境溫度為 85°C (185.9°F) 和 95°C (203°F)，而 ASTM D1599-99 規定之試驗溫度為 23±2°C (73°F±3.6°F)，此外 Code Case N-755-2 要求 HDPE 埋管應設計使用於 140°F (60°C) 到 -50°F (-45°C) 之間；故於下列說明實體測試之環境溫度選用 85°C 之目的、考量，以及其影響。

本研究引用 EPRI TR-1022565 報告[13]，其主要目的是協助 ASME Code Case N-755 建立評估 HDPE 埋管可接受裂紋深度的方法。由於此實驗在管路設計或運轉溫度下進行非常耗時(在此報告中，部分在 95°C 環境下測試之組件仍有一萬小時以上未達失效標準的情況)，因此該實驗採用業界所認定之 HDPE 開始熔化的溫度 95°C(但事實上該批實驗材料之熔點在 125°C 左右，詳 EPRI TR-1022565 報告 3.6.2 節)，及稍低的 85°C 進行實驗，之後再將這兩個溫度的實驗數據，採用 Popelar 平移函數及 RPM 公式推算在其他溫度下的材料行為。

ASTM D1599-99 規定之試驗溫度為 23±2°C

(73°F±3.6°F)，並規定若使用其他試驗溫度，其容許誤差範圍應在 ±2°C (±3.6°F)，本研究所引用之 EPRI TR-1022565 報告其設定實驗溫度誤差條件符合 ASTM D1599-99 要求。而 Case N-755-2 (2015)說明，其管理範圍之 Class 3 Polyethylene (PE) 加壓管路，設計溫度不超過 140°F (60°C)[第 1100 節]；但不能使用於溫度小於 -50°F (-45°C) 之環境[第 3310 節]。

此外，對於模擬結果與實體測試比較，顯示模擬結果有高估趨勢，其中 95°C 之模擬結果中亦有與其他模擬結果趨勢不一致或明顯相反之情形。由於 HDPE 材料特性屬於高度非線性，特別是在降伏應力之比較下，塑性行為起始亦牽涉到細微的實驗材料狀況，或許具有微小孔隙產生應力集中後，局部尖端塑性區逐漸快速擴大，降低降伏應力，此部分是數值無法模擬的行為(即使使用高階元素及高密度網格)，而從另一個角度而言，數值誤差即反映數值模型的不確定性，可於安全係數方面來考量，以涵蓋此種不確定因素(適當折減材料強度)。

以上的數值模擬與實驗比對，已可顯現出 HDPE 在材料模型設定方面的有效性，加上上述的補充說明，即可進行下階段的可靠度分析(主要配合規範使用)。

EPRI TR-1022565 未對實驗材料之黏彈性材料性質進行測試，僅對材料廠商所提供之材料熔化指數、密度及抗拉強度進行確認試驗(EPRI TR-1022565 Table 3-1)，再加上實驗材料 Gr. PE 4710, Cell No. 445474C 之黏彈性材料參數並無公開資料，故本研究採用已公開之 HDPE 材料黏彈性參數進行模擬，此為模擬數據誤差之主要來源。此誤差將以等比例增加普諾力級數中剪力鬆弛模數的方式，以擬合 Gr. PE 4710, Cell No. 445474C 材料之降伏應力，同時保留 HDPE 材料之流變性質。

其次，依 ASTM D1599-99 規定，試件加壓後失效時間允許在實驗第 60~70 秒之間出現。由於報告中未記載其加壓速度及失效時間，故模擬工作上只能以反覆試算的方式推測其真實的實驗情境，此為數據誤差之次要來源。此誤差預期在調整本研究之剪力鬆弛模數後可得到相當的改善。其餘誤差可能發生的原因不外乎實驗設備、儀表所造成的誤差、實驗材料誤差、材料參數取得的誤差等。由於本研究在第一階段之目的為蒐集資料並建立合理 HDPE 管路力學模型，目前的模型在相同情境下(ASTM D1599-99 測試程序)，其預測趨勢(斜率)與實驗趨勢基本上已相當接近。

III HDPE 管路之老劣化效應探討及壽命與可靠度評估模式

3.1 評估方式簡述

如前言所述，PE 管路 (Polyethylene pipe) 的佈設容易、低成本以及長期可抵抗劇烈的環境變化，應用於埋設地底下並以系統性的配置，常見用於液氣態之碳氫化合物的傳送。對於高密度的聚乙烯管路 (HDPE, High-density polyethylene pipe) 主要承受管內液體或氣體所造成的管內壓力、土壤或地面上外力以及環境(氣候、溫度)變化的影響，故進行可靠度的分析以便於訂定其使用壽命及運轉最佳化。在管路服役期間內，對於與時間

相關的各種物理現象，特別是潛變(Creep)，明顯將造成材料強度下降。

本節主要參考文獻[16]的內容並彙整相關評估之方式；在該篇文獻中，提出了管路壽命之可靠度分析模型，其根據機率性的評估模式選擇適用之壽命分析模型、管路安全層級以及重要相關的可靠度分析參數。主要的參數分析包含了管路組態(如直管、彎管以及 T 型管等)、氣體壓力和運轉溫度。各種評估模式包括運轉壽命、機械性質、結構力學行為、殘餘應力、破壞力學以及環境影響性。其中熱塑性管路製程評估法 (RPM, Rate Process Method) 亦於 ASTM D-2837[17]及 D-2513[18]的標準規範中有說明，其主要評估法(式)的三個參數為失效時間 (Time-to-failure, TTF)、周向應力(Hoop stress)以及運轉溫度(Operating temperature)。

在 PE 管路的老化效應中，機械性質、環境因素以及化學成分機制是導致有效管路使用壽命降低的因素，而在持續承受外力以及相對高溫的條件下，潛變則是影響使用壽命最大的原因。一些文獻亦有針對潛變破壞、潛變下的裂紋成長及潛變應變率試驗做討論，而相關的實驗數據指出：回縮力 (Back stress)以及材料破裂裂紋 (Material cracking)是潛變的兩種主因。潛變的初始現象，可用應力對 TTF 曲線做推測，在此之後，潛變區不再是單軸受力，其在材料中的缺陷將導致應力集中以及三軸向應力(應力狀況與材料非彈性黏滯性複雜程度高)，而材料機械性質的不確定性，亦應該列入考量中。

可靠度分析是普遍被認為在風險評估與執行維護上，訂定決策的有效工具。在決定性分析 (Deterministic analysis) 中，其可提供系統不確定因素的補充資訊，在 2007 年前，已有常見一些應用於鋼製管路的分析，但應用於 PE 管路的可靠度分析仍是有限的。為了評估 HDPE 管路在運轉狀況下的可靠度，三個主要步驟可供參考：第一，比較兩組壽命分析模型 (Lifetime model) 的機率分佈，主要為了呈現定性分析的不完整性；第二，考慮以時間為基準之模型 (Time-based) 的不確定性，藉此呈現出與實驗數據在不同狀況的氣壓以及溫度變化條件下之高敏感度；第三，基於不同運轉條件下的可靠度評估。

3.2 長期性行為之可靠度模型(Long-term behavior Reliability Model)

該文獻[16]介紹了長期埋於地下之管路特性，依序為力學性質、壽命評估模型 (Lifetime model) 以及長期潛變模型 (Long-term creep model)。在力學性質方面，僅需考慮總周向應力(σ_c)的影響，周向應力的計算公式如下：

$$\sigma_c = \sigma_p + \sigma_s + \sigma_t; \quad (1)$$

也就是內壓、土壤壓力以及外界影響的彎矩力(但其並非是長期影響的因素)，故對薄壁的管路在長期運轉效應而言，考慮內壓及土壓即可。

文獻所採用的可靠度分析模型，其強度與作用外力是視為隨機變數，主要用來找尋最有可能的破壞模式。而其採用了三種條件狀態進行評估；第一為設計限制狀態，含內壓 0.4MPa 的 HDPE 管路，其利用破壞函數 $G(x)$

來定義壽命的安全餘裕($G(x_i) > 0$ 視為安全，其他狀況則是為破壞失效，其中 x_i 為隨機變數)，此函數包含了破壞壽命 $t(x_i)$ (Failure age)與運轉時限 $t_{service}$ (Service lifetime) 兩個參數，此模型最後將化成 Cumulative Gaussian probability function；第二為討論管路與外力的不確定性，其不確定因素包含了幾何、外力、製造以及運轉條件；第三為模型的不確定性，其引用公式如下：

$$\log_{10} t_f = \delta_1 \left[A + \frac{B}{T} \right] + \frac{\delta_2 C}{T} \log_{10} \sigma_c; \quad (2)$$

其中 T 為絕對溫度， A, B, C 以及 D 為實驗經驗參數， t_f 為壽命 (TTF)。 δ_1 以及 δ_2 是假設符合常態分配下的修正係數。

3.3 管路可靠度評估(Pipeline reliability assessment)

本分析同樣依據上述之概念，並採用第 2.1 節的材料機械性質，並以假設且定值的管徑尺寸大小進行環境溫度對最大應力的影響。其次，亦可參照 2.1.3 節的相關設計條件，訂定出接受標準；而在環境溫度、外力負荷等隨機變異條件下計算出超過接受標準的結果(餘裕或壽命分佈等之最小要求)，則可推估出此假設管路在使用上的可靠度。以下則是概述數值分析模擬之結果。

此假設性案例之管徑內外半徑為 100mm 及 89.9mm，其承受內壓為 0.4Mpa，另外管端的邊界條件設定為一端自由端與固定端；首先，我們先以分析時間視為單一變數，因主要評估表 1-3 具有時間相關的剪力釋放模數之影響性，故分析時間先以 5 分鐘(參考 Code Case N-755-2 之 3223.2 節的 Table -3223-3)為最短時間，依此增加另外四組參考時間，最後一組則直接假設為 40 年。圖 12 為 300 秒下的應力分布圖，圖 13 為等效應力(MPa)-時間對數圖，圖中轉折點的產生僅是因數據點過少所導致。另外我們也同樣針對環境溫度的影響進行評估，採用分析時間為 300 秒，其餘條件與上述相同，圖 14 則顯示等效應力-溫度的趨勢，其也呈現應力鬆弛的現象，但下降程度遠大於時間的影響，此結果符合上述之討論。

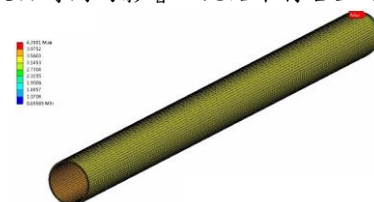


圖 12 直管剪力釋放模數之影響性(300 秒)

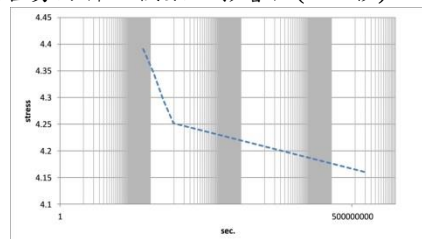


圖 13 時間對直管剪力釋放模數(導致應力鬆弛)之影響性(最後至 40 年)

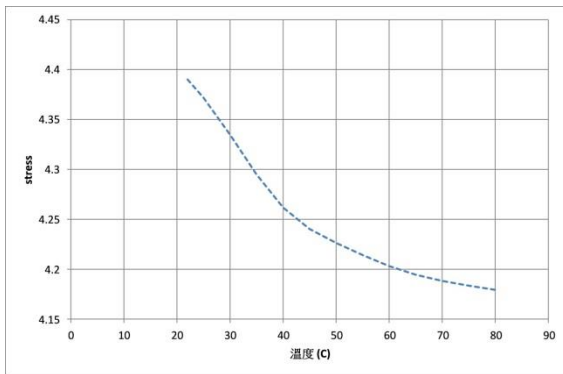


圖 14 環境溫度對應力之影響性(300 秒)

3.4 結果與討論

文獻[16]建議選擇壽命評估模型，不應只是尋求定性評估中，相關定義值的等效，而是亦要考慮幾何、外力、材料的不確定性。本研究對 HDPE 管路壽命可靠度評估提供了實務上的計算程序，發現運轉溫度以及模型不確定性的影響，其遠大於氣壓及管徑幾何尺寸精度的影響。

IV. 結論

本研究主要以數值分析模型，搭配適當的 HDPE 材料機械性質進行與實驗分析的比對，分析結果雖有產生些許誤差，而誤差可能發生的原因不外乎實驗設備、儀表、實驗材料誤差、材料參數取得的誤差等。本研究已建立合理 HDPE 管路力學模型，並經由相同情境下之 ASTM D1599-99 測試程序，而數值結果所呈現的趨勢(斜率)與實驗趨勢基本上已相當接近。

本研究建議依據 ASME 規範，計算得到在相關設計條件下，可得到接受標準；而在環境溫度、外力負荷等隨機變異條件下計算出超過接受標準的結果(餘裕或壽命分佈等之最小要求)，則可推估出管路在決定性論上使用上的可靠度。

根據參考文獻[16]建議模式，進行壽命與參係數的影響評估方面，本分析針對時間與環境溫度的影響，在數值模型最大應力的評估中，確實也符合文獻在不確定性的影響中所提及的結果。當運轉溫度越高，導致應力 σ_c 鬆弛現象越大。本研究也建立 HDPE 管件的壽命評估程序，在壽命 t_f 的計算要比決定論所得的壽命為長。

參考文獻

- [1] STAFF PROGRESS IN EVALUATION OF BURIED PIPING AT NUCLEAR REACTOR FACILITIES, SECY 09-0174, December 2, 2009 (ML093160004).
- [2] NRR ACTION PLAN REVISION 3, BURIED PIPING, TAC NO. ME3939, April, 2013.
- [3] NEI 09-14 Rev. 3, Guideline for the management of underground piping and tank integrity, April Nuclear Energy Institute, 2013.
- [4] LR-ISG-2015-01, License Renewal Interim Staff Guidance, Changes to buried and underground piping and tank recommendation, 2016.
- [5] Walsh T., 34-The plastic piping industry in North

- America, Applied Plastics Engineering Handbook, Processing and Materials, A volume in Plastics Design Library, pp. 585-602, 2011.
- [6] Zhou J., Frand S., HDPE replaces carbon steel in safety related pipe system, Power, Vol. 153, pp.19-20, 2009.
- [7] NUREG-1801, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Revision 2, Aging Management Program (AMP) XI.M18, U.S. NRC, December 2010.
- [8] ASME B&PV Codes, Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components, 2007 Version.
- [9] ASME Code Case N-755-2, Approval date: August 13, 2013.
- [10] Krishnaswamy P., Review of literature on the use of polyethylene (PE) piping in nuclear power plant safety-related class 3 service water systems, NRC Contract No. DR-04-07-072, Emc² Project No. 06-G44-02, 2007.
- [11] JMM High Density Polyethylene (HDPE) PE3408/PE3608 Product Specification, J-M Manufacturing Company, Inc. (<http://www.jmeagle.com/pdfs/HDPE%20Spec%20Sheet%203608.pdf>)
- [12] ASTM D4710-07, Standard Specification for Acetaldehyde, 2012.
- [13] Electric power research institute, Slow Crack Growth Testing of High-Density Polyethylene Pipe: 2011 Update, TR-1022565.
- [14] ASTM Standard D1599-99 (2005) "Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings", 2005.
- [15] S. Thusneyapan, R. Rugsaj; "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, 4(1), 12~24, 2016.
- [16] Rabia Khelif, Alaa Chateaneuf, Kamel Chaoui. "Reliability-based assessment of polyethylene pipe creep lifetime", International Journal of Pressure Vessels and Piping, 84 (12), 697-707, 2007.
- [17] ASTM International D2837, 2009, "Standard Test Method for Obtaining Hydrostatic Design Basis for Thermoplastic Pipe Materials or Pressure Design Basis for Thermoplastic Pipe Products," Annual Book of ASTM Standards, 8(4), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [18] ASTM D2513-16A, Standard Specification for Polyethylene (PE) Gas Pressure Pipe, Tubing, and Fittings, STANDARD by ASTM International, 12/15/2016.

以光彈法量測鋼材銲道殘留應力之實驗力學特性研究 Experimental Mechanical Characteristics of Weld Residual Stress in Steel with Photoelastic Method

計畫編號：106-NU-E-011-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃育熙

e-mail：yhhaung@mail.ntust.edu.tw

計畫參與人員：洪光民、閻建佑、劉美丞、周禹廷

執行單位：國立臺灣科技大學機械工程系

摘要

為了瞭解銲接造成的殘留應力對結構的影響，本研究利用反射式光彈法觀察金屬銲接後產生之全場應力分佈情形，研究中將建立數值模擬分析方法，利用有限元素軟體建立銲接過程中溫度與應力之變化情形，採用熱彈塑性理論配合熱結構耦合元素及考慮非線性材料參數來進行銲接對接分析。分析過程中區分為熱學及力學模式兩種分析理論，並使用 SUS304 不鏽鋼及 5083 鋁合金兩種材料進行研究探討。

實驗量測部分採用鑽孔法並貼附應變規方式量測鑽孔釋放之應變，再將應變值利用理論推導得知未鑽孔前之殘留應力，為單點應力量測方式。另外也進行反射式光彈法獲得全場分佈之殘留應力來相互比較其準確性。反射式光彈法能夠得到元件內部三維應力分佈狀態，除了能得到全域式的應力分佈，也是非接觸式之力學量測。

本研究為解決因殘留應力較小而不易產生之光彈條紋情形，利用影像處理方式將實驗影像進行雜訊濾波再結合光彈干涉影像之亮暗場進行相減取絕對值使條紋增加並作細線化得到明確條紋位置。

關鍵詞：銲接、殘留應力、光彈法、鑽孔法、有限元素法。

Abstract

In order to understand the influence of residual stress caused by welding on the structure. In the study, photoelastic coating method was used to observe the full-field stress distribution after the welding process. Using finite element method (FEM) to establish the temperature and stress fields in the welding process, the use of thermo-elasto-plastic theory with thermal structural coupling elements and considering non-linear material parameters for welding analysis. The process is analyzed by two FEM modules from heat transfer and thermal stress. The residual stress of stainless steel (SUS304) and aluminum alloy (5083) are both numerically calculated in FEM.

The experimental measurement adopts the hole-drilling method with strain gage to measure the release of residual strain. Through inverse calculation, the residual stress is pointwisely obtained from the strain value based on theoretical formula. At the same workpiece, the photoelastic coating method is applied to obtain the residual stress of the whole field distribution. The

photoelastic method can obtain the full-field stress distribution state of the element. The study used image processing methods to improve the quality of photoelastic experimentally results. The Fourier transform was used to filter noise from environment. To increasing and sharpening fringe patterns, the absolute value of subtraction from images of the dark field and bright field was processing to obtain a finer fringe position. The experimental results are shown in good agreement in compared with the FEM analysis.

Keywords: Weld, Residual Stress, Hole-Drilling Strain-Gage Method, Photoelastic Coating Method, Finite Element Analysis.

I. 前言

由於在多數的廠房皆須使用銲接技術施作管線連接，但銲接時將材料接合需經歷溫度脹縮與晶界相變等複雜的製程因素，可能造成殘留應力且會發生沿晶應力腐蝕龜裂現象，造成結構破壞的危險。為了瞭解銲接的殘留應力對結構破壞造成的影響，以獲知銲接施作的品質及延長設備使用壽命，本研究著重於銲接施作對於底材造成的殘留應力的量測。

殘留應力是指物體受力後所產生的應變超過彈性範圍，而使得物體內部無法恢復原來的狀態所殘存的應力，具有三維空間特性。若殘留應力為拉應力時，會加速材料內部裂縫成長，減少材料使用壽命，反之，壓縮殘留應力則有助於延長壽命。殘留應力的量測多數需使用應變規鑽孔法(Hole-Drilling Strain-Gage Method)，這是唯一有制訂標準規範 ASTM E837[2]的殘留應力檢測法，因其所產生的破壞為局部性，在大多數情況下所鑽之小孔並不會影響工件的正常使用。此方法以高速鑽孔破壞待測物原始平衡狀態，內部應力也隨之改變，再配合貼附在表面應變規量測出釋放應力後所對應之應變量，代入材料應力-應變關係式中，亦可量測出內部的殘留應力值。但此方法的最大缺點在於應變規僅能逐點式量測，無法獲得全場應力-應變分布情況。

基於應變規使用的限制，本研究利用反射式光彈法(Photoelastic Coating Method)改善了鑽孔法僅能獲得單點的殘留應力，光彈法可直接獲得全場應力資訊，將具有暫態雙折射性的貼片黏貼於試片表面，當物體因為受到負載而產生形變時，試片表面的光彈貼片也會產生應力並產生暫態雙折射性。當偏振光進入光彈貼片並遇到試片表面反射後，會因為應力差造成的延遲量不同產生

建設性與破壞性干涉而形成明暗相間的光彈條紋圖形。反映了試片表面的應變分佈，應變程度可真實的反應到光彈貼片上，經由反射式光彈儀量測貼片上各點因應變不同而所產生的折射率也相異，可得到等色線(Isochromatic)與等傾線(Isoclinic fringe)條紋。等色線可決定材料的主應力差值(Principal stress difference)，等傾線則決定了主應力的方向角(Principal stress direction)。

光彈法是目目前較適合應力全域性量測方法，但光彈材料在透明的穿透式光彈量測架構下才有比較好的干涉條紋，非透明物件則需使用貼片或塗附光彈液經固化才能得到工件傳遞之應力特性，因此若殘留應力較小時，光彈法的量測就受到很大的限制。

II. 主要內容

1. 有限元素熱傳模擬分析

根據熱力學第一定律，表面所包圍之控制體積(Control volume)內，其熱傳平衡方程式為

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z) = \rho C_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

其 R_x 、 R_y 、 R_z 中為 x 、 y 、 z 方向的單位面積熱流量， Q 為單位面積內熱產生率， ρ 為密度， C_p 為比熱， T 為溫度， t 為時間。

假設物體內的熱傳導具有方向性，應用傅利葉定律(Fourier's Law)可得到

$$R_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2a)$$

$$R_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2b)$$

$$R_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2c)$$

其中 k_x 、 k_y 、 k_z 為 x 、 y 、 z 方向之熱傳導係數(Thermal Conductivity)。

由於材料在非線性情況下， k_x 、 k_y 、 k_z 、 ρ 、 C_p 均是溫度的函數，因此將式(5-2)代入式(5-1)中可得到

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式(3)即為暫態熱傳導御方程式(Governing Heat Conduction Equation)，再將初始條件及邊界條件帶入即可求得完整解。

初始條件:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)$$

邊界條件:

$$\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} N_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} N_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} N_z \right) + q_s = -h_c (T - T_s)$$

其中 N_x 、 N_y 、 N_z 為沿著熱對流之法向量， q_s 為邊界上單位面積給定之熱流量， h_c 為熱對流係數， T_s 為環境溫度。

2. 有限元素分析材料係數

因為焊接過程屬於急速加熱與冷卻的非線性熱循環過程，故所有材料係數在焊接過程中都會隨著溫度變化而變。每一個時間的材料係數是以前一個時間間隔的材料係數的平均值來做計算，其計算的方法是從兩個時間間隔以外插法求到前一個時間的瞬間溫度 $T(\tau)$

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \quad (4)$$

假設 g 為隨著瞬間溫度 $T(\tau)$ 而改變的材料係數，因此其為 $T(\tau)$ 的函數。在時間 t 時的材料係數可由下式求得

$$g = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t g[T(\tau)] dt \quad (5)$$

3. 鑽孔法量測殘留應力

在垂直於任何自由表面的應力必自動歸零，由此觀點，欲量測試件表面的殘留應力，可經由鑽孔法獲得。在試件表面鑽一圓柱小孔，如果在試件表面具有應力場，那麼在沿著孔壁表面的應力勢必會釋放出來，由此種應力從新分配而產生的應變，可藉由預先黏貼的應變規量得，再由彈性力學推導得到試件表面殘留應力。

整個應力值的計算推導過程，首先考慮一無限長薄板受到一單軸向之均勻拉伸應力場的作用，如圖 1、2 所示，則在點 $P(R, \alpha)$ 之應力可表示為 6 式

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (6a)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2} (1 - \cos 2\alpha) \quad (6b)$$

$$\tau'_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \sin 2\alpha \quad (6c)$$

若對此薄板鑽一半徑為 R_0 之穿孔，鑽完孔後，此點 $P(R, \alpha)$ 之應力值將變為

$$\sigma''_r = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2} \right) \cos 2\alpha \quad (7a)$$

$$\sigma''_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{1}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{3}{r^4} \right) \cos 2\alpha \quad (7b)$$

$$\tau''_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2} \right) \sin 2\alpha \quad (7c)$$

其中 $r = \frac{R}{R_0}$ ($R \geq R_0$)

比較鑽孔前後點的應力值改變量，可計算該點 $P(R, \alpha)$ 的應力釋放量(Stress Relaxation)為

$$\Delta \sigma_r = \sigma''_r - \sigma'_r \quad (8a)$$

$$\Delta \sigma_\theta = \sigma''_\theta - \sigma'_\theta \quad (8b)$$

$$\Delta \tau_r = \tau''_{r\theta} - \tau'_{r\theta} \quad (8c)$$

將式 6 與式 7 帶入式 8，可得鑽孔前後應力變化量與單軸向均勻拉伸力的關係，如式 5-9 所示

$$\Delta \sigma_r = \frac{\sigma_x}{2} \left(-\frac{1}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x}{2} \left(\frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2} \right) \cos 2\alpha \quad (9a)$$

$$\Delta \sigma_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \left(\frac{1}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x}{2} \left(\frac{3}{r^4} \right) \cos 2\alpha \quad (9b)$$

$$\Delta \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \left(-\frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2} \right) \sin 2\alpha \quad (9c)$$

假設此薄板材料具有均質性(Homogeneous)、等向性

(Isotropic)，且受力後仍在線彈性範圍內 (Linear-Elasticity)，則利用平面雙軸向虎克定律(Biaxial Hooke's Law)，如式 10 所示，可將應力應變關係銜接起來。

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) \quad (10a)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) \quad (10b)$$

將式 9 代入 10 則可得到鑽孔前後在 $P(R, \alpha)$ 點因應力釋放後的應變值，如式 11 所示。

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{E} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (11a)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (11b)$$

再將式子簡化為

$$\varepsilon_r = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (12a)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x (-A + C \cos 2\alpha) \quad (12b)$$

其中

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad (12c)$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (12b)$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\left(\frac{4\nu}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right] \quad (12c)$$

因在徑向的應變值 ε_r 遠大於在 θ 方向的應變值 ε_θ ，且如果忽略不計 ε_θ ，所造成之誤差遠小於其他量測技術上的誤差，所以一般量測殘留應力之應變規，均將靈敏度方向設計在徑向，用以量取鑽孔時徑向釋放之應變量。

但在一般情況下，殘留應力並非只有單一軸向，必須考慮同一平面另一軸向應力 σ_y 的作用；可將式 6、7 中的 σ_x 改成 σ_y ，而 $\cos 2\alpha$ 改成 $\cos 2(\alpha + 90^\circ)$ 或 $-\cos 2\alpha$ ，經由同樣的推導過程，得到 Y 方向之應力應變關係式，

$$\varepsilon_r^y = \sigma_y (A - B \cos 2\alpha) \quad (13a)$$

X 方向之應力應變關係式，將式 5-12a 改寫為

$$\varepsilon_r^x = \sigma_x (A + B \cos 2\alpha) \quad (13b)$$

再利用疊加原理(Superposition)，將式 13a、13b 合併，可得到薄板在雙軸向應力 σ_x 、 σ_y 作用下，經鑽孔後的應變釋放值，

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (14)$$

由式 14 可知其中有三個未知數 σ_x 、 σ_y 、 α ，因此需要三個方程式才可解答。因此使用三軸向應變規(Rosette Strain-Gage)來量測因應力釋放所產生之應變量。簡化計算過程，選定量測應變的方向為 α 、 $\alpha + 45^\circ$ 、 $\alpha + 90^\circ$ 三個方向，如圖 3 所示。將所量測之應變量分別代入式 14 中，可得方程式 15，

$$\varepsilon_1 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha \quad (5-15a)$$

$$\varepsilon_2 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 45^\circ) \quad (15b)$$

$$\varepsilon_3 = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\alpha + 90^\circ) \quad (15c)$$

三式解聯立可得，

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (15a)$$

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_3 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (15b)$$

$\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 分別為平面最大與最小主應力，而 α 角為最靠近 1 號應變規之主應力軸到 1 號應變規方向的角度。

上述理論公式仍有些限制，說明如下：

I. 工件為薄且無限平板，所鑽孔為穿孔。

II. 點 $P(R, \alpha)$ 為一個點，並非應變規所涵蓋面積下的平均應變值。

III. 工件為一平面應力，沒有沿著厚度方向的應力。

但實際上，實驗均是在有限寬度的厚板上鑽一盲孔 (Blind Hold)，且所量出的應變值式所覆蓋面積下的平均應變值，並不是在一點上。經研究證實穿孔法理論仍適用於盲孔法，只需對式 15 中的 A、B 係數進行校正，校正係數需以實驗求得。

1981 年，G. S. Schajer 首度以數值方法解決應變涵蓋面積的問題，將 A、B 係數改寫為 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 校正係數代替，並求解校正係數通解，

$$A = -\frac{(1+\nu)}{2E} \bar{a} \quad (16a)$$

$$B = -\frac{1}{2E} \bar{b} \quad (16b)$$

其中 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 為無因次因數(Dimensionless Coefficient)。當材料 Poisson's Ratio 介於 0.28 到 0.33 之間， $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 誤差在 1% 以內，故無因次因數幾乎與材料性值無關，參考表 5-1 所示。其中 D_0 為鑽孔直徑，D 為應變規規圓直徑，使用盲孔法時，鑽孔深度需為應變規規圓直徑的 0.4 倍。

4. 光彈法

假設光在空間中行進時，光向量 E (magnitude of light vector) 可由 Maxwell 之電磁波理論表示為

$$E = a \cos \frac{2\pi}{\lambda} (z + \delta - ct) \quad (17a)$$

其中，E 為光向量大小，a 為光波之振幅， λ 為光的波長，z 行進軸方向上之位置， δ 為相對延遲量，c 為光速，t 為時間。

另外，以指數形式表示為

$$E = ae^{i(\omega t - \Delta)} \quad (17b)$$

其中 $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$ 為角頻率， $\Delta = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$ 為相對相位角差 (Relative Angular Phase Shift)。

將入射之光波分解成兩道互相垂直之線偏振光，且各以不同的速度通過之材料，稱之為雙折射性材料。有些光學等向性之非晶體材料受力後，其光學性質將會與雙折射性材料相同，在外力去除後，其雙折射性也隨之消失，此特性稱為暫態雙折射性材料(Temporary Birefringent Material)。如光彈實驗中常使用之多元酯(Polyester)、樹脂(Epoxy)及多元碳酸鹽(Polycarbonate)等。當光波通過雙折射性材料時，由於其特性產生不同之光速，故兩道偏極光之遲滯量(Retardation) δ_1 、 δ_2 分別為

$$\delta_1 = h(n_f - 1) \quad (18a)$$

$$\delta_2 = h(n_s - 1) \quad (18b)$$

其中， δ_1 為快速波之遲滯量， δ_2 為慢速波之遲滯量， n_f 為快軸上之折射率， n_s 為慢軸上之折射率， h 為材料厚度。

相位遲滯量 (Relative Retardation) 為

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = h(n_f - n_s) \quad (18c)$$

相對相位角差 Δ 為

$$\Delta = \frac{2\pi h}{\lambda}(n_f - n_s) \quad (18d)$$

光彈偏光儀的光學元件架構，主要包含偏光片與波片兩種，偏光片(Polarizer)原理係將一般不具偏極性的自然光轉變成偏極光，當沒有偏光片時，光線可自由進出液晶槽，不受外加電場的影響，但在上下層各外加偏光片後，光線的透過就可外加電場加以控制，使得視覺上可以感受到明暗的變化，由此可知，偏光片功能即在於將非偏極光轉為偏極光，而液晶顯示器就是利用此偏極光加上液晶扭轉特性來達到控制光線的通過與否，形成明暗。

波片(Wave Plate)是一種具雙折射性質的光學元件。光通過此元件時，在快軸速度相對於慢軸的速度較快。於是光通過此光學元件時會產生兩軸之間的相位差，若此相位差恰等於四分之一波長時，稱此光學元件為四分之一波片。若此相位差恰等於二分之一波長時，稱此光學元件為二分之一波片。

光彈材料的雙折射率表現在可量測應力的物理特性，主要根據光-應力定律(Stress-Optical Law)，解釋如下，1853年Maxwell[34]提出了受力透明體之光折射率改變與主應力值呈線性比例關係，簡化光彈材料未受力時之折射率 n_0 ， n_1 、 n_2 、 n_3 為光彈材料沿各主應力方向之折射率， σ_1 、 σ_2 、 σ_3 為光彈材料受力時之主應力， C_1 、 C_2 為光應力常數。其相對關係式如下：

$$n_2 - n_1 = (C_2 - C_1)(\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5-19a)$$

$$n_3 - n_2 = (C_2 - C_1)(\sigma_2 - \sigma_3) = C(\sigma_2 - \sigma_3) \quad (5-19b)$$

$$n_1 - n_3 = (C_2 - C_1)(\sigma_3 - \sigma_1) = C(\sigma_3 - \sigma_1) \quad (5-19c)$$

其中 $C = C_2 - C_1$ 為相對光-應力常數，則相對相位角差 Δ 為

$$\Delta = \frac{2\pi h C}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (19d)$$

定義 $N = \frac{\Delta}{2\pi}$ 為條紋級數(Fringe Order)， $f_\sigma = \frac{\lambda}{C}$ 為材料條紋常數(Material Fringe Value)。式 5-19d 可改寫為

$$\frac{N f_\sigma}{h} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (19e)$$

由於平面內任一點之最大剪應力為

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (19f)$$

故綜合 19e 式可得

$$\tau_{\max} = \frac{N f_\sigma}{2h} \quad (19g)$$

由 19e、19f 可得知主應力差與最大剪應力都與光彈條紋級數成正比。

由於反射式光彈法之光路會通過光彈貼片兩次，故代入應力光學定律時，必須將試片之相位延遲量 δ 與厚度

進行修正。相位延遲量 δ 隨著路徑加倍修正為 2δ ，而厚度的修正方式又因為入射角度的不同而有所差異。反射式光彈法根據入射角度關係分成斜向與正向兩種，如圖4、5所示。

斜向反射式光彈法的入射光進入光彈貼片後與試片表面夾一入射角 φ ，並經由試片表面反射後由 CCD 收光強資訊，故試片厚度需修正為 $2h / \cos \varphi$ ，正向反射式光彈法，試片之等效厚度修正為 $2h$ 。斜向與正向反射式光彈法的應力光學定律可分別改寫為式 5-20 所示。

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f_\sigma(2\delta)}{2\pi \left(\frac{2h}{\cos \varphi} \right)} \quad (20a)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{f_\sigma(2\delta)}{2\pi(2h)} \quad (20b)$$

本研究為非透明物件，需與光彈貼片進行貼合，如圖6所示，待測物與貼片之間關係式如下

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^c(x, y) &= \varepsilon_1^s(x, y) \\ \varepsilon_2^c(x, y) &= \varepsilon_2^s(x, y) \\ \sigma_{zz} &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

式中 ε_1^c 、 ε_2^c 為光彈貼片(Coating)主應變， σ_{zz} 為待測物(Specimen)主應力，光彈貼片厚度與待測構件厚度相較下非常小，分析時可以視其為平面應力情況，待測構件與貼片間之應變關係式經由虎克定律(Hooke's Law)可得

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^c &= \frac{1}{E^c}(\sigma_1^c - \nu^c \sigma_2^c) \\ \varepsilon_2^c &= \frac{1}{E^c}(\sigma_2^c - \nu^c \sigma_1^c) \\ \varepsilon_1^s &= \frac{1}{E^s}(\sigma_1^s - \nu^s \sigma_2^s) \\ \varepsilon_2^s &= \frac{1}{E^s}(\sigma_2^s - \nu^s \sigma_1^s) \end{aligned} \quad (22)$$

由式 21 相減可得光彈貼片與待測物應變差之關係式為：

$$(\varepsilon_1^c - \varepsilon_2^c) = (\varepsilon_1^s - \varepsilon_2^s) \quad (23)$$

將 22 代入 23 可得光彈貼片上主應力差為：

$$\sigma_1^c - \sigma_2^c = \frac{E^c(1+\nu^s)}{E^s(1+\nu^c)}(\sigma_1^s - \sigma_2^s) \quad (24)$$

因光路會通過光彈貼片兩次，入射角度為正向，因此行進的厚度改為 $2h$ ，主應力差與主應變差與光彈材料之關係為

$$\sigma_1^c - \sigma_2^c = \frac{N \cdot f_\sigma}{2h} \quad (25a)$$

$$\varepsilon_1^c - \varepsilon_2^c = \varepsilon_1^s - \varepsilon_2^s = N \cdot f_\varepsilon \quad (25b)$$

$$f_\varepsilon = \frac{\lambda}{2hK} \quad (25c)$$

式中 N 為條紋級數(Fringe Order)， f_σ 為光彈材料之應力條紋常數， f_ε 為光彈材料之應變條紋常數。而應力條紋常數與應變條紋常數之關係為：

$$f_\sigma = (2h) \left(\frac{E^c}{1+\nu^c} \right) f_\varepsilon \quad (26)$$

待測物之主應力差可表示為

$$\begin{aligned}\sigma_1^s - \sigma_2^s &= \frac{E^s(1+\nu^c)}{E^c(1+\nu^s)} \cdot \frac{N \cdot f_\sigma}{2h} \\ &= \frac{E^s}{1+\nu^s} \cdot N \cdot f_\sigma\end{aligned}\quad (27)$$

則可得待測物之最大剪應力為

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{\sigma_1^s - \sigma_2^s}{2} = \frac{E^s(1+\nu^c)}{E^c(1+\nu^s)} \cdot \frac{N \cdot f_\sigma}{4h} \\ &= \frac{E^s}{2(1+\nu^s)} \cdot N \cdot f_\sigma\end{aligned}\quad (28)$$

5. 影像處理

光彈干涉條紋的數位影像於本研究中實際上是一個元素值介於0 ~ 255的灰階矩陣。這個矩陣是從CCD攝影機的光細胞(Photo cell)陣列感光後離散取樣轉成電子信號再傳給影像卡做後處理產生的。取像採用完美的假設，干涉條紋中最暗位置的灰階會被定為0，最亮位置的灰階會被定為255。以暗場等色線為例，若把干涉條紋影像中灰階為0的位置點連線，會得到條紋級數 $N=0、1、2、3、\dots$ 的一個畫素寬度條紋，干涉條紋影像中灰階為255的位置點連線，會得到條紋級數是 $N=0.5、1.5、2.5、\dots$ 的一個畫素寬度條紋。因為光細胞的敏感度有限，所以光彈干涉條紋影像經常是一群從灰階0到255都有寬度的條紋，再加上電子雜訊和外界環境所產生的離散斑點都影響實驗的結果，所得到之影像需要用影像處理的方式去除影像雜訊才得以清楚的辨別光彈條紋。

III. 結果與討論

1. 有限元素分析

由於不銹鋼 SUS304 的熔點介於 $1420^\circ\text{C} \sim 1450^\circ\text{C}$ ，因此分析針對上述兩個溫度進行探討，將板材鉚道定為中心分別對左、右兩邊及正面、背面進行熔點差異對於殘留應力影響之探討，表 1、2 可看出於鉚道中心距離 $10 \sim 20\text{mm}$ 處之殘留應力相差不大，但於鉚道中心距離 $20 \sim 50\text{mm}$ 之殘留應力起伏較大，代表位於正面進行鑽孔法量測殘留應力時，應對於距離鉚道中心 $10 \sim 20\text{mm}$ 處量測較不會有熔點帶來的差異性問題產生。表 3、4 則看出位於鉚道中心距離 $30 \sim 50\text{mm}$ 之殘留應力相差不大，但位於鉚道中心距離 $5 \sim 25\text{mm}$ 之殘留應力起伏較大，代表位於背面進行鑽孔法量測殘留應力時，應對於距離鉚道中心 $30 \sim 50\text{mm}$ 處量測較不會有熔點帶來的差異性問題產生。

5083 鋁合金熔點介於 $571^\circ\text{C} \sim 635^\circ\text{C}$ ，也針對上述溫度進行探討，由表 5-8 可看出左右兩邊殘留應力呈現完全對稱，而且位於鉚道中心距離的各個差異都不大，保持在 10MPa 之間，代表 5083 鋁合金對於熔點差異造成之殘留應力影響不大。

2. 鑽孔法結合應變規

試片為 5083 鋁合金，此試片無經過熱處理，針對鉚道中心距離 30mm 為量測位置，為了解試片殘留應力釋放過程，需截取三軸應變規的應變量變化資訊，並擷取

至試片完成盲孔後待試片內應力穩定狀態歷程，如表 9 所示。

鑽孔前依照鑽孔深度分為十道次，一個道次進刀 0.24mm ，當鑽孔至第七道次時，應變產生劇烈變化，鑽完十道次後，由圖表可看出釋放應力漸漸趨近穩定。

將趨近穩定後的三軸應變值，gage1 為 -627μ ，gage2 為 -351μ ，gage3 為 -188μ ，代入 5-15a 應力應變轉換公式得到最大主應力為 207.0790MPa ，最小主應力為 111.4122MPa ，藉由公式 5-15b 得到主應力角為 7.2174°

3. 反射式光彈應用於四點彎曲實驗

四點彎曲理論解對於厚度 h 與高度 l 之應力狀態隨著中性軸的距離呈線性變化，施力如 7-1 所示。當

$$\sigma_{xx} = \sigma_1 = \frac{My}{I}, \sigma_{yy} = \sigma_2 = 0, \text{剪應力為 } 0, \text{ 其中 } I = \frac{hl^3}{12},$$

$$M = \left(\frac{F}{2}\right) \cdot w, \text{ 彎曲力矩表示為 } M, \text{ 施力為 } F, w \text{ 為支撐點與施力點距離, 加以整理後 } \sigma_1 \text{ 則表示為:}$$

$$\sigma_1 = \left(\frac{6Fw}{hl^3}\right) \cdot y \quad (29)$$

與式子 27 相互結合後，改寫為：

$$\sigma_1 = \left(\frac{6Fw}{hl^3}\right) \cdot y = \frac{E^s(1+\nu^c)}{E^c(1+\nu^s)} \cdot \frac{N \cdot f_\sigma}{h_{\text{eff}}} \quad (30)$$

可得知位移量 y 為：

$$y = \frac{E^s(1+\nu^c)}{E^c(1+\nu^s)} \cdot \frac{l^3 f_\sigma}{6Fw} \cdot \frac{h}{h_{\text{eff}}} \cdot N \quad (31)$$

實驗方面將光彈貼片黏貼於待測物上，如圖 32 所示，試片鋁合金，分別施力 3000N 、 4000N 、 5000N ，試片 SUS304，分別施力 6000N 、 10000N 、 13000N ，查看干涉條紋位置是否一致。

圖 33-35 為鋁合金數值模擬分析之干涉條紋位置， 3000N 時出現條紋級數為 ± 0.25 時的干涉條紋， 4000N 時出現條紋級數為 ± 0.25 、 ± 0.75 時的干涉條紋， 5000N 時出現一樣條紋級數為 ± 0.25 、 ± 0.75 的干涉條紋。而條紋級數為 0.25 時，主應力差值為 22.9548MPa ，條紋級數為 0.75 時，主應力差值為 68.8646MPa 。

圖 36-38 為鋁合金實驗得到干涉條紋位置，右邊為暗場下實驗影像，左邊為影像處理細線化後之實驗影像，一樣在 3000N 下出現 ± 0.25 之干涉條紋， 4000N 下出現 ± 0.25 、 -0.75 之干涉條紋， 5000N 下出現 ± 0.25 、 -0.75 之干涉條紋。與分析模擬不同之處在於，實驗施力方式並不是完美對稱的關係，因此在 4000N 以及 5000N 下無法出現條紋級數為 $+0.75$ 之干涉條紋。

圖 39-41 為 SUS304 數值模擬分析之干涉條紋位置， 6000N 時出現條紋級數為 ± 0.25 時的干涉條紋， 10000N 時出現條紋級數為 ± 0.25 、 ± 0.75 時的干涉條紋， 13000N 時一樣出現條紋級數為 ± 0.25 、 ± 0.75 時的干涉條紋。條紋級數為 0.25 時，主應力差值為 68.1221MPa ，條紋級數為 0.75 時，主應力差值為 204.3663MPa 。

圖 42-44 為 SUS304 實驗得到干涉條紋位置，在 6000N 下出現 ± 0.25 之干涉條紋， 10000N 下出現 ± 0.25 、 -0.75 之干涉條紋， 13000N 下出現 ± 0.25 、 -0.75 之干涉條紋，與分析模擬不同之處在於，實驗施力方式並不是完美對

視的關係，因此在 10000N 以及 13000N 施力下，無法呈現條紋級數為+0.75 之干涉條紋。

表 A6 呈現鋁合金實驗影像與模擬分析以及研究理論之差異，模擬分析與研究理論誤差最大在於 4000N 下 1.02%，最小誤差在於 5000N 下 0.36%，而實驗與研究理論最大誤差在於 3000N 下 2.76%，最小誤差在於 5000N 下 0.07%。

表 A7 呈現 SUS304 實驗影像與模擬分析以及研究理論之差異，模擬分析與研究理論誤差最大在於 10000N 下 1.24%，最小誤差在於 13000N 下 0.26%，而實驗與研究理論最大誤差在於 13000N 下 3.85%，最小誤差在於 6000N 下 0.12%。

由上述 A6、A7 表格可得知反射式光彈法可以運用於非透明材料上，並且成功反映出材料內部之全域式殘留應力。

4. 鑽孔法結合反射式光彈量測殘留應力

經過四點彎曲實驗成功得到材料殘留應力後，接著針對鉚接試片貼合光彈貼片，再利用高速鑽孔機得到釋放之全域式殘留應力。圖 45 為 5083 鋁合金貼附光彈貼片後，與鑽孔法結合應變規是同一試片。

無限平板鑽孔釋放之理論解與 5-9 式相似，應力釋放理論模型如圖 46 所示。鑽孔後距離孔洞中心任意點位置會有徑向與切向應力值以及剪應力值，表示為：

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(-\frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(\frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (32)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(\frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{-\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(\frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (33)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{-\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(-\frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \quad (34)$$

將 θ 代 0 或 π 後，並將式子 7-4 代入主應力公式 7-5 後能夠得到主應力差值式子 7-6。

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{2} \right)^2 + \tau_{r\theta}^2} \quad (35)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \left| -(\sigma_x + \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} + (\sigma_x - \sigma_y) \frac{3a^4}{r^4} - \frac{(\sigma_x - \sigma_y) 4a^2}{2 r^2} \right| \quad (36)$$

其中 σ_x 與 σ_y 由 FEM 得到之數值或應變規量測數值代入，進而解析位移量 r 。

針對鉚道中心距離往左 30mm 為量測位置，圖 47 為實驗亮場影像，圖 48 為實驗暗場影像，從亮暗場影像可看出孔洞周圍些許干涉條紋，再經過影像處理把高頻雜訊濾除並將亮暗場相減得到圖 49，明顯從影像可看到條紋級數 0.25 出現。

解析條紋級數為 0.25 之干涉條紋如表 A8 所示，理論與實驗值誤差僅 0.4%，代表利用反射式光彈法也成功解析出鉚接內部殘留應力值，另外理論與 FEM 誤差高達 52% 推測結果為此試片並無在焊接前經過熱處理釋放內部原有應力值造成之影響。

IV. 結論

本研究藉由反射式光彈法配合影像處理技術準確量測鉚接殘留應力全場分佈，同時比較鑽孔應變規法以及 FEM 模擬結果，綜合幾點以下結論為：

1. 四點彎曲搭配反射式光彈法於理論、FEM、實驗影像，過程中使用兩種不同材料都得到良好對應性，代表光彈法不受材料影響也能解析內部應力值。
2. 鉚件之殘留應力大小可藉由光彈貼片直接量測反算獲得，但受限於殘留應力太小時，干涉條紋數量不足，因此需要經過光彈條紋倍增之影像處理解決此問題。經影像處理後的實驗量測結果可準確的與鑽孔法之理論反算值具有很好的一致性。
3. 因為電子雜訊和外界環境所產生的離散斑點都會影響光彈實驗的結果，因此實際亮暗場條紋模糊不清，需經傅立葉轉換處理雜訊進行濾波之影像處理才能得到較明顯的應力條紋。
4. FEM 模擬鉚接結果僅能預測材料內部在無應力狀態下進行鉚接後得到之熱應力數值，實際板材若未經過熱處理釋放應力，實驗量測的殘留應力值會與 FEM 結果有相當大的誤差。
5. 由於 FEM 內部設定數值關係，在實際鉚接時需記錄點鉚時間與整體焊接時間，以及室溫溫度與焊接時試片溫度，才能確保 FEM 結果之準確性。
6. 廠房皆須使用鉚接技術施作管線連接，由於溫度產生之殘留應力影響，造成結構破壞的危險。因此由實驗結果可得知反射式光彈法能夠有效呈現鉚接殘留應力全場分佈情況，有效了解殘留應力對結構的影響。

參考文獻

- [1] N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components", Materials and Design, 2012.
- [2] ASTM E837-01, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Stress-Gage Method", 2001.
- [3] Measurement of residual stresses by the hole-drilling strain gage method. Vishay Precision Group – Teehnote TN-503.
- [4] M. Kabiri, Measurement of residual stresses by the hole-drilling method: influences of transverse sensitivity of the gages and relieved strain coefficients. Experimental Mechanics, 1984.
- [5] J. Mathar, Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes. Trans., ASME, 1934.
- [6] N. J. Renidler and I. Vigness, "Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stress", Experimental Mechanics, 1966.
- [7] M.T. Flaman, Brief investigation of induced drilling stresses in the center-hole method of residual-stress measurement. Experimental Mechanics 1982.
- [8] D.C. Drucker, R.D. Mindlin, Stress analysis by t

- three-dimensional photoelasticity methods. Journal of Applied Physics (1940) 724-732.
- [9] Y.F. Cheng, New techniques for scattered-light photoelasticity. Experimental Mechanics (1963) 275-278.
- [10] Y.F. Cheng, A dual-observation method for determining photoelastic parameters in scattered light. Experimental Mechanics (1967) 140-144.
- [11] Y.F. Cheng, An automatic system for scattered-light photoelasticity. Experimental Mechanics (1969) 407-412.
- [12] L.S. Srinath, Analysis of scattered-light method in photoelasticity. Experimental Mechanics (1969) 463-468.
- [13] R.W. Aderholdt, W.F. Swinson, Establishing the boundary retardation with respect to the observed fringes in scattered-light photoelasticity. Experimental Mechanics (1971) 521-523.
- [14] R.J. Sanford, L.A. Beaubien, Stress analysis of a complex part: photoelasticity vs. finite elements. Experimental Mechanics (1977) 441-448.
- [15] J. W. Dally, W. F. Riley, Experimental Stress Analysis, McGraw-Hill, 1978.
- [16] A. Katoh, J. Rao, M. Takashi, T. Kunio, Mode stress intensity factor measurement by scattered-light photoelasticity using digital image processing. Proceedings of Asian Pacific Conference on Fracture and Strength, Japan (1993) 401-406.
- [17] K. Ramesh, A.K. Yadav, V.A. Pankhawalla, Plotting of fringe contours from finite element results. Communications in Numerical Methods in Engineering (1995) 839-847.
- [18] K. Ramesh, P.M. Pathak, Validation of finite element modelling through photoelastic fringe contours. Communications in Numerical Methods in Engineering (1999) 229-238.
- [19] P.R.D. Karthick Babu, K. Ramesh, Development of photoelastic fringe plotting scheme from 3D FE results. Communications in Numerical Methods in Engineering (2006) 809-821.
- [20] G. Singh, D. Singh Mehta, Residual and induced birefringence measurement of ITO-coated PET substrate by photoelastic method. Journal of Display Technology (2015) 11(12): 1035-1041.
- [21] 郭錦龍、徐澤志、邵清安，金屬薄板之殘留應力量測，元智工學院機械工程研究所，1994 年，碩士論文。
- [22] 劉如峯、黃金城，核能電廠組件多層焊接之有限元素分析，中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會論文集，2007 年，A01-0060。
- [23] 許志民、李驊登，材料物理特性對放電加工鑽孔法引進殘留應力之影響，成功大學機械工程研究所，2006 年，碩士論文。
- [24] J.K. Sharples, L. Gardner, S.K. Batea, M.R. Goldthorpe, J.R. Yates, H. Bainbridge, Project to evaluate the integrity of repaired welds. International Journal of Pressure Vessels and Piping (2005) 82:319-338.
- [25] 林德超、史耀武，焊縫匹配影响焊接残余应力的研究材料工程，1999 年，6: 24-29。
- [26] K.K. Tang, Z.X. Li, D.D. He, Z.H. Zhang, Evolution of plastic damage in welded joint of steel truss with pre-existing defects. Theoretical and Applied Fracture Mechanics (2010) 54: 117-126.
- [27] 洪光民、黃國興、林文輝，一維傅利葉分析應用在光彈影像上的相位擷取，二十六屆中國機械工程師學會年會，2009 年。
- [28] Toll, S., Tang, S., and Hovanesian, J., "Computerized photoelastic fringe multiplication," Experimental Techniques, 14(4), 21-23 (1990)
- [29] Han, B., "Interferometric methods with enhanced sensitivity by optical/digital fringe multiplication," Applied Optics, 32(25), 4713-4718 (1993)
- [30] Han, B., and L. Wang, "Isochromatic fringe sharpening and multiplication," Experimental Techniques, 18(6), 11-13 (1994)
- [31] Han, B., and L. Wang, "Isochromatic fringe sharpening and interpolation along an isoclinic contour, with application to fracture mechanics," Experimental Mechanics, 36(4), 305-311 (1996)
- [32] 蔡曜隆、周長彬，銲接溫度與應力之分析實驗，國立交通大學機械工程研究所，2001 年，碩士論文。
- [33] G. S. Schajer, "Application of Finite Element Calculation to Residual Stress Measurement," Journal of Engineering Materials and Technology, p. 205-207, 1985.
- [34] Dally J. W., Riley W.F. "Experimental Stress Analysis" McGraw-Hill Companies, N.Y, 1978.
- [35] 楊婷雅、黃育熙，利用光彈法研究光學薄膜之應力光學係數，國立臺灣科技大學機械工程研究所，2017 年，碩士論文。
- [36] 吳彥熹、張奇偉，應用數位反射式光彈法量測腐蝕鋼筋混凝土構件之應力行為，中華大學土木工程資訊學系，2010 年，碩士論文。
- [37] 程翊峰、王偉中，應用正向反射式顯微光彈儀於雷射鑽孔後玻璃試片殘留應力之研究，國立清華大學動力機械工程學系，2016 年，碩士論文。

圖表

表 1 304 正面距鐸道中心左邊殘留應力

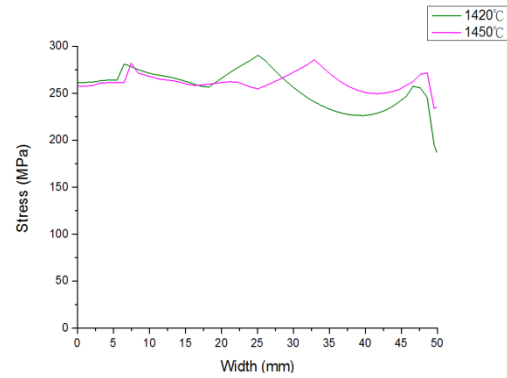


表 2 304 正面距鐸道中心右邊殘留應力

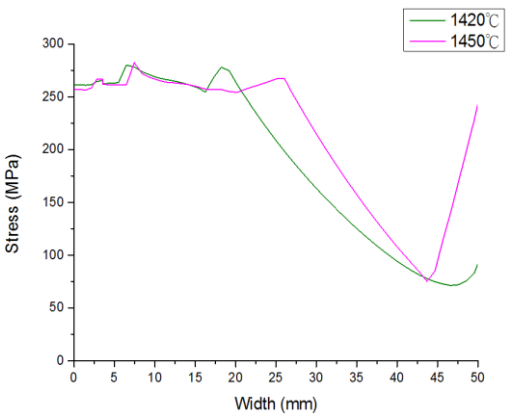


表 3 304 背面距鐸道中心左邊殘留應力

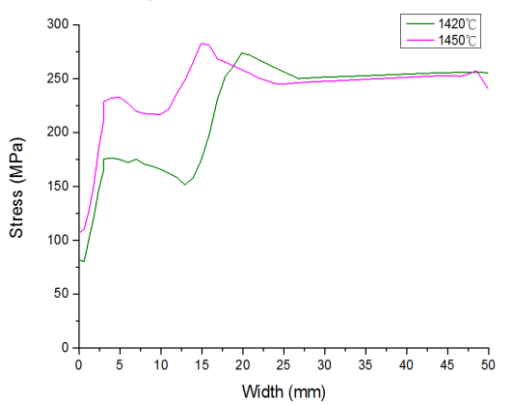


表 4 304 背面距鐸道中心右邊殘留應力

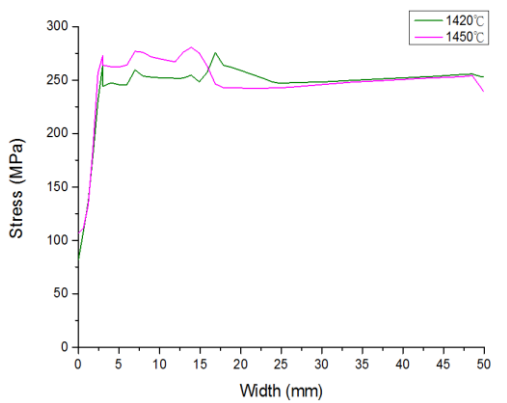


表 5 鋁合金正面距鐸道中心左邊殘留應力

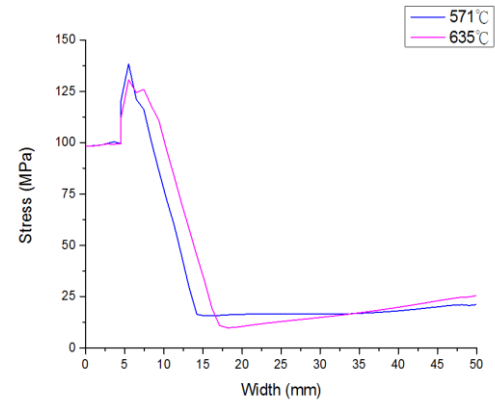


表 6 鋁合金正面距鐸道中心右邊殘留應力

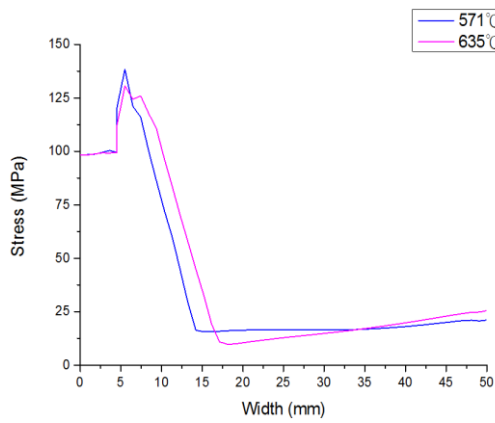


表 7 鋁合金背面距鐸道中心左邊殘留應力

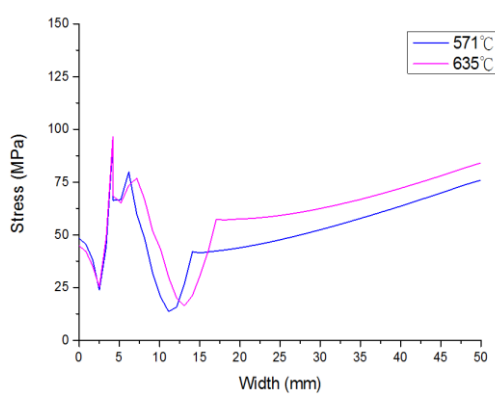


表 8 鋁合金背面距鐸道中心右邊殘留應力

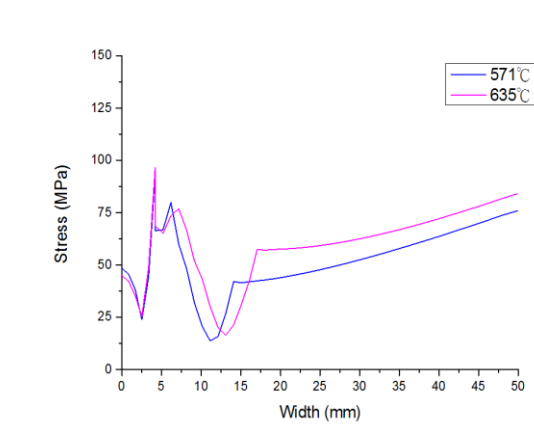
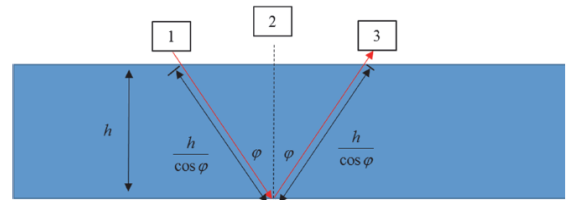
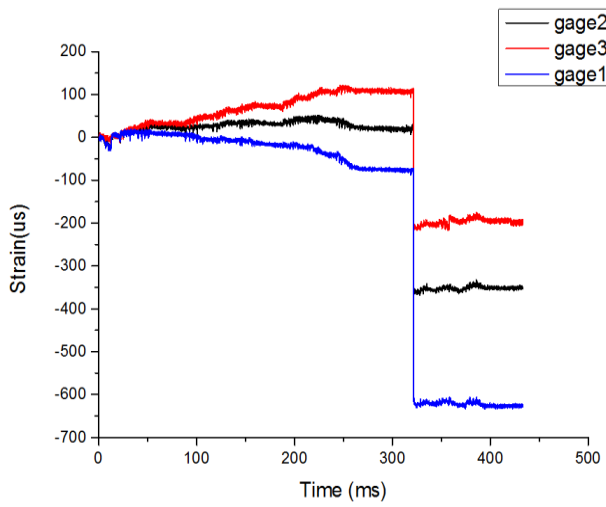


表 9 5083 鋁合金鑽孔釋放應變量



1. Incident Light 2. Normal Line 3. Reflected Light
圖 4 斜向反射式光彈之光彈貼片內部光路圖

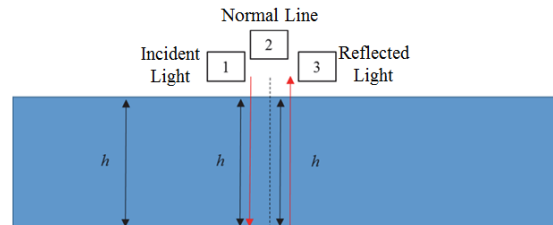


圖 5 正向反射式光彈之光彈貼片內部光路圖

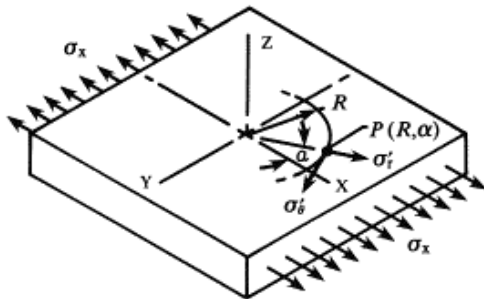


圖 1 鑽孔前平板應力狀況

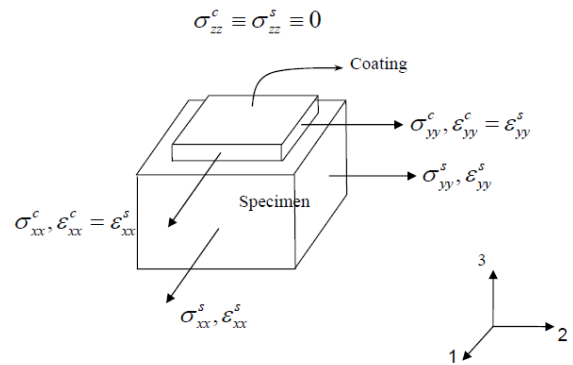


圖 6 光彈貼片與待測物之關係示意圖

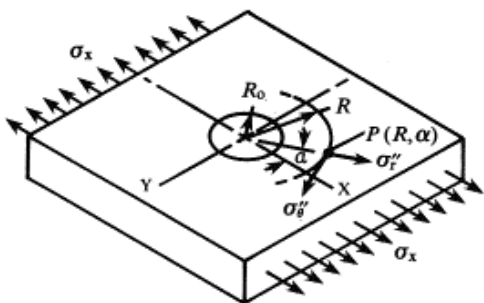


圖 2 鑽孔後平板應力狀況

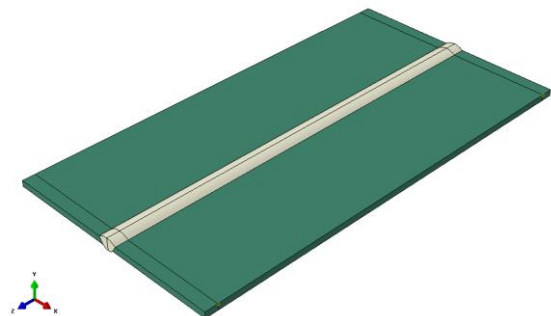


圖 7 板材尺寸示意圖

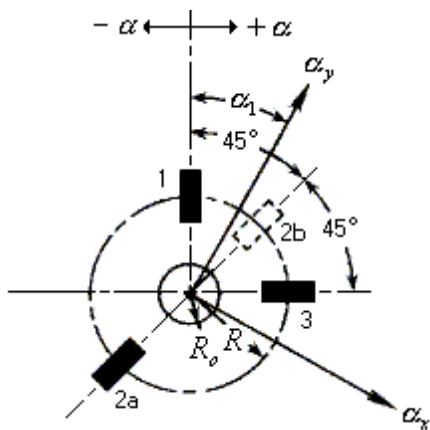


圖 3 三瓣薔薇型應變規



圖 8 板材網格化

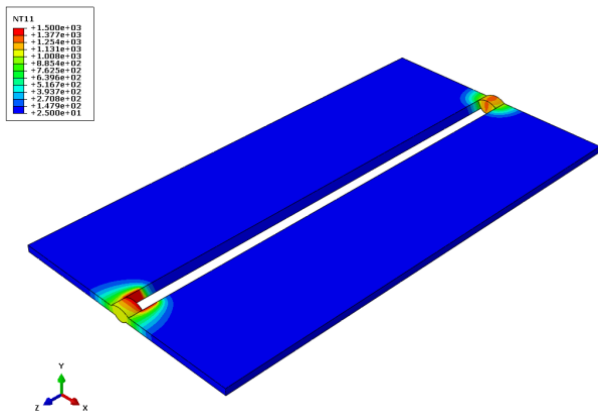


圖 9 前後點銲溫度分佈圖

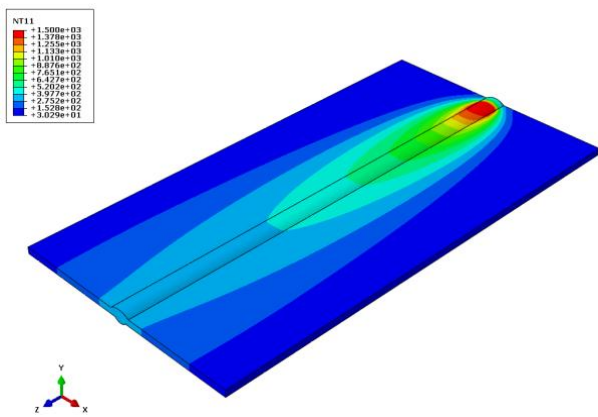


圖 10 銲接 60 秒後溫度分佈圖

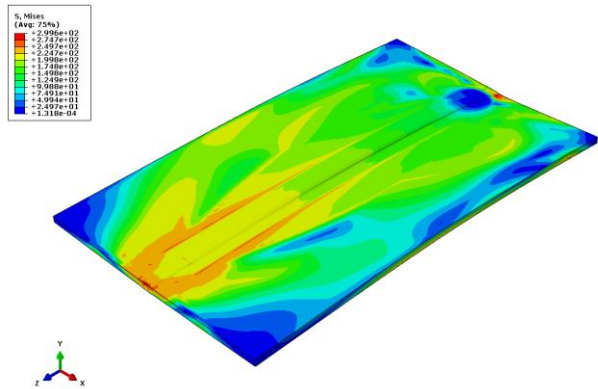


圖 11 銲接 60 秒後應力分布圖

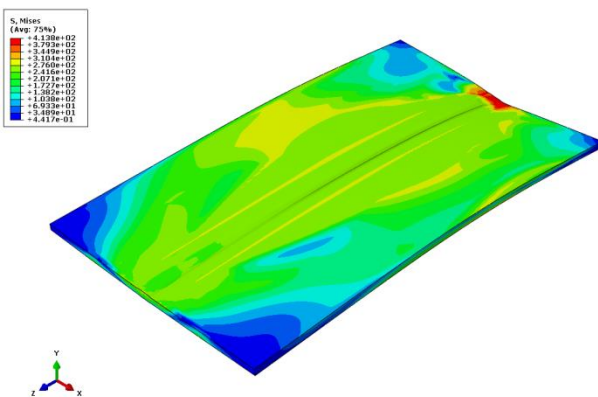


圖 12 銲接殘留應力分布圖

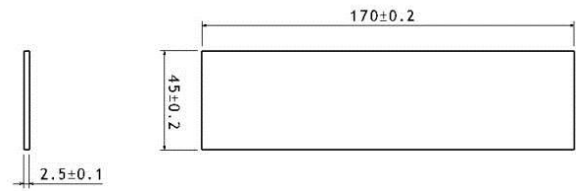


圖 13 實驗板材加工尺寸



圖 14 鋁合金氧化物刮除

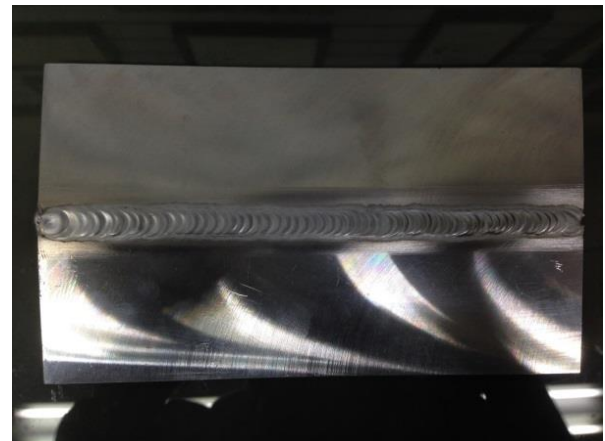


圖 15 5038 鋁合金

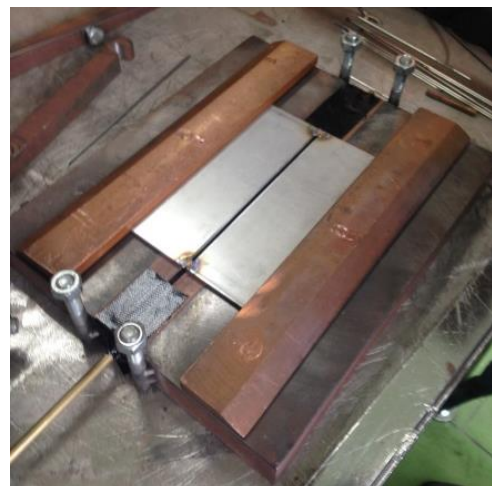


圖 16 SUS304 銲接設置



圖 17 SUS304 低碳合金鋼



圖 20 動態應變計

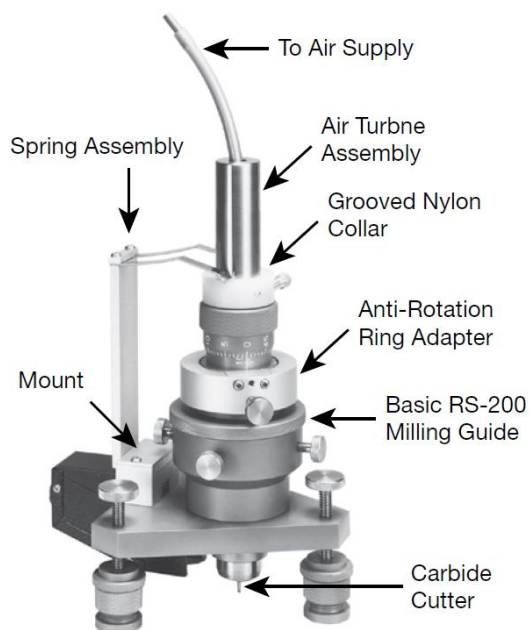


圖 18 RS-200 高速鑽孔機

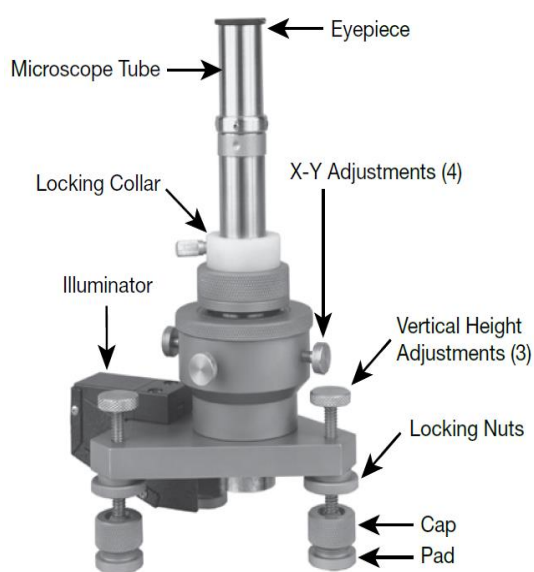
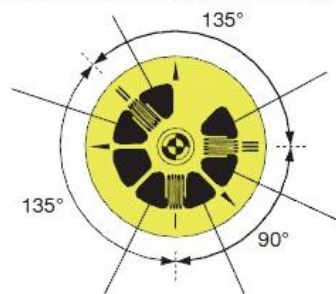


圖 19 光學引導定位系統

Triaxial, $0^\circ/135^\circ/90^\circ$

Resistance : 120Ω , Gage factor : Approx. 2.1



For KFG gages with the leadwire cable pre-attached, refer to page 1-13.

圖 21 量測殘留應力之應變規

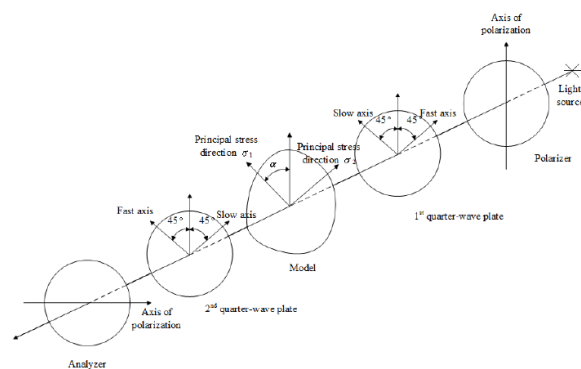


圖 22 圓偏光系統暗場示意圖

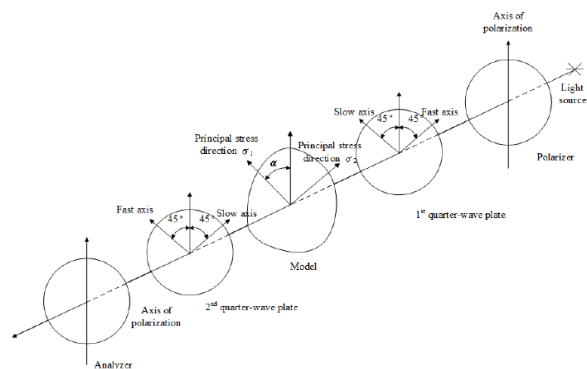


圖 23 圓偏光系統亮場示意圖

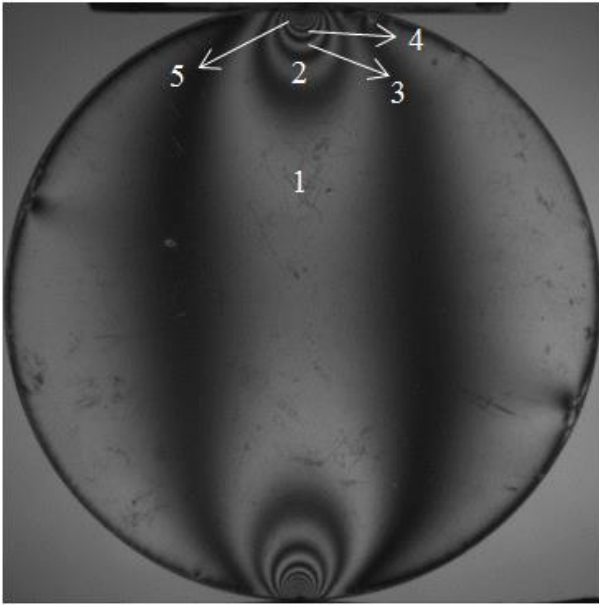


圖 24 亮場亮暗紋示意圖

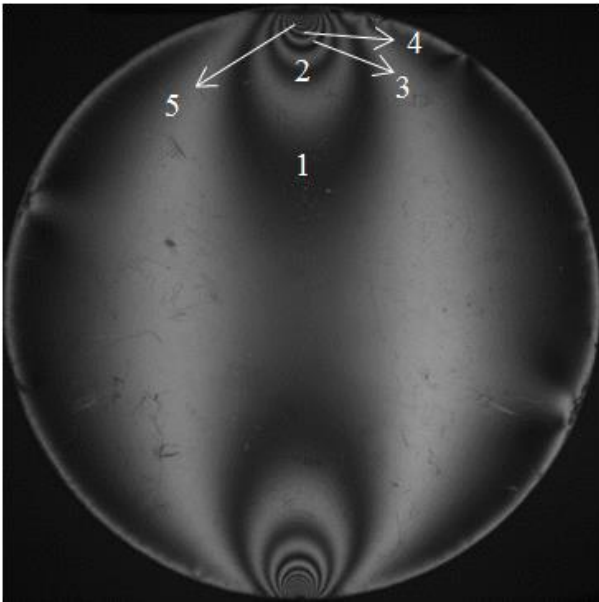


圖 25 暗場亮暗紋示意圖



圖 26 PS-1C 光彈貼片



圖 27 光彈黏著劑 PC-1 和硬化劑 PCH-1



圖 28 8872 拉伸試驗機

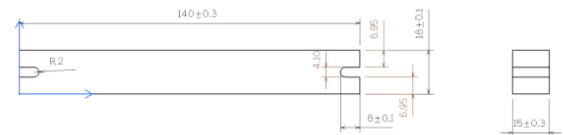


圖 29 試片尺寸示意圖

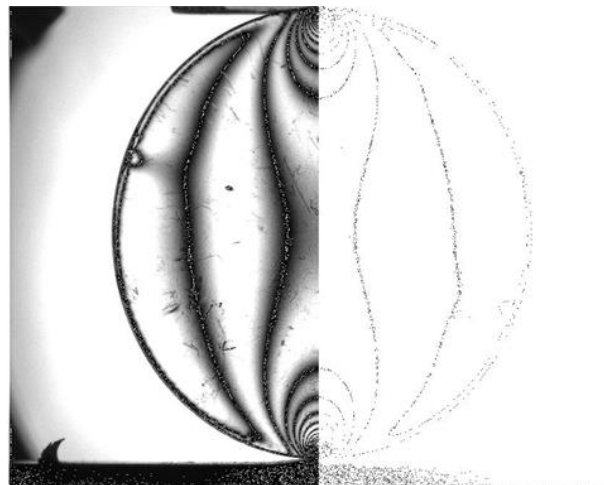


圖 30 影像處理細線化示意圖

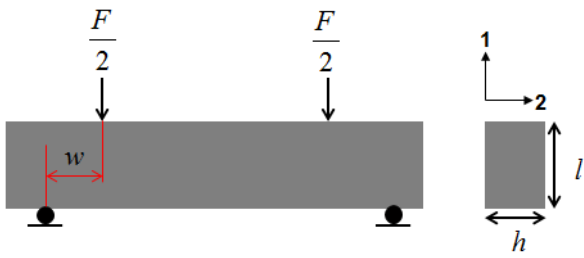


圖 31 四點彎曲施力示意圖



圖 32 光彈貼片黏貼於待測物上

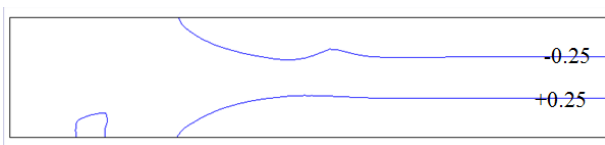


圖 33 鋁合金四點彎曲 3000N 模擬條紋圖

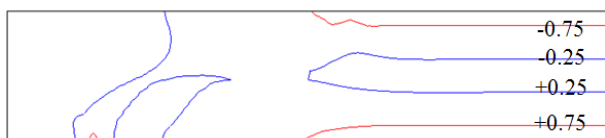


圖 34 鋁合金四點彎曲 4000N 模擬條紋圖

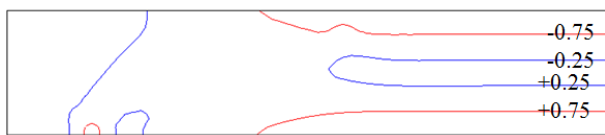


圖 35 鋁合金四點彎曲 5000N 模擬條紋圖

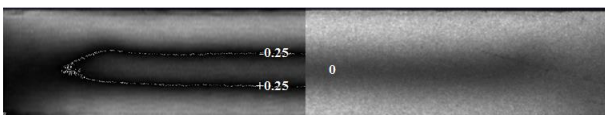


圖 36 鋁合金四點彎曲 3000N 實驗條紋圖

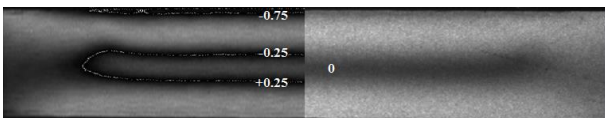


圖 37 鋁合金四點彎曲 4000N 實驗條紋圖

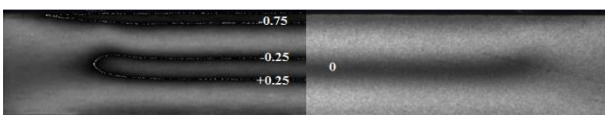


圖 38 鋁合金四點彎曲 5000N 實驗條紋圖

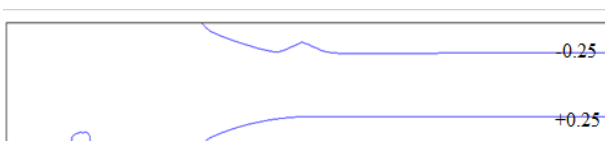


圖 39 SUS304 四點彎曲 6000N 模擬條紋圖

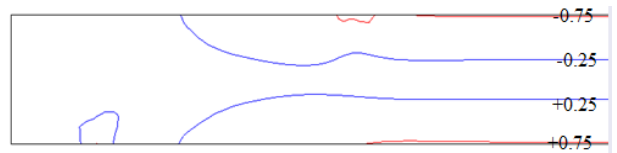


圖 40 SUS304 四點彎曲 10000N 模擬條紋圖

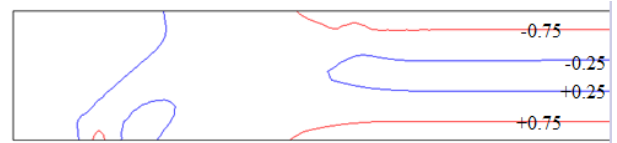


圖 41 SUS304 四點彎曲 13000N 模擬條紋圖

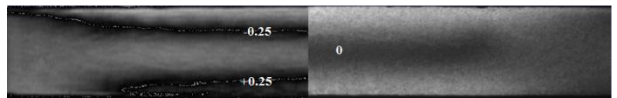


圖 42 SUS304 四點彎曲 6000N 實驗條紋圖

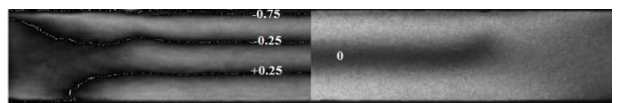


圖 43 SUS304 四點彎曲 10000N 實驗條紋圖

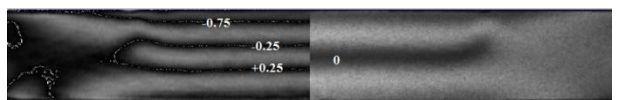


圖 44 SUS304 四點彎曲 13000N 實驗條紋圖

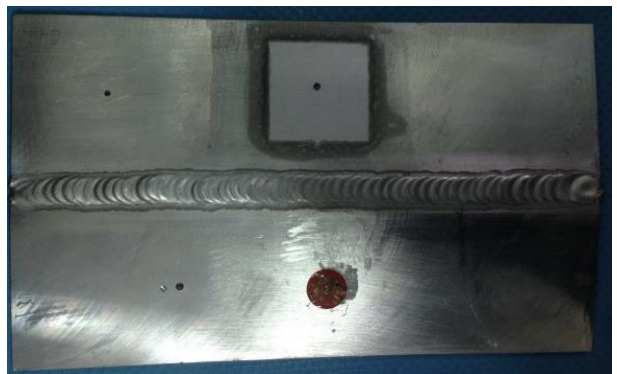


圖 45 5083 鋁合金銲接試片

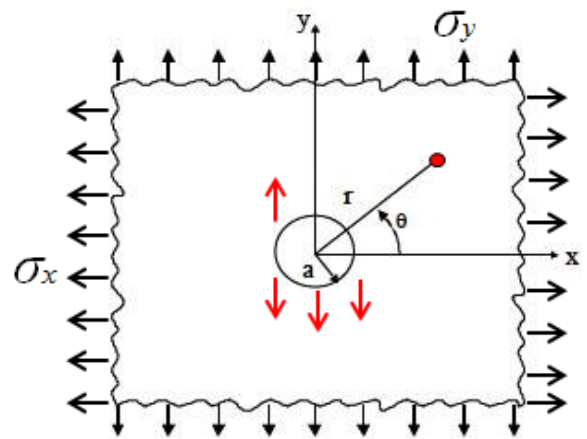


圖 46 鑽孔釋放之應力值示意圖

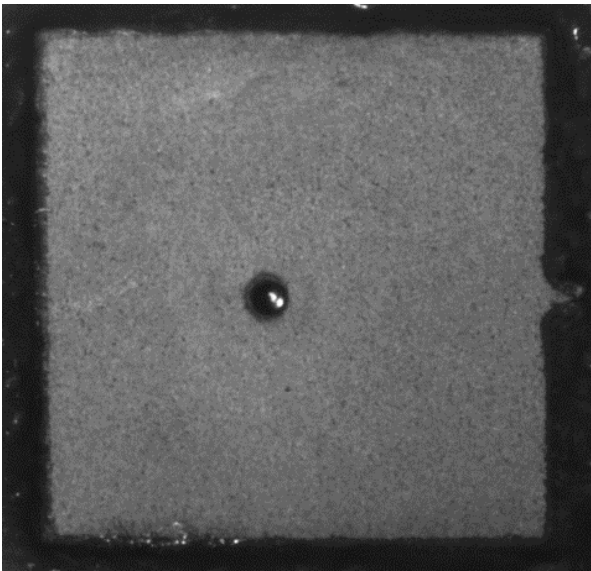


圖 47 鑽孔釋放之亮場影像

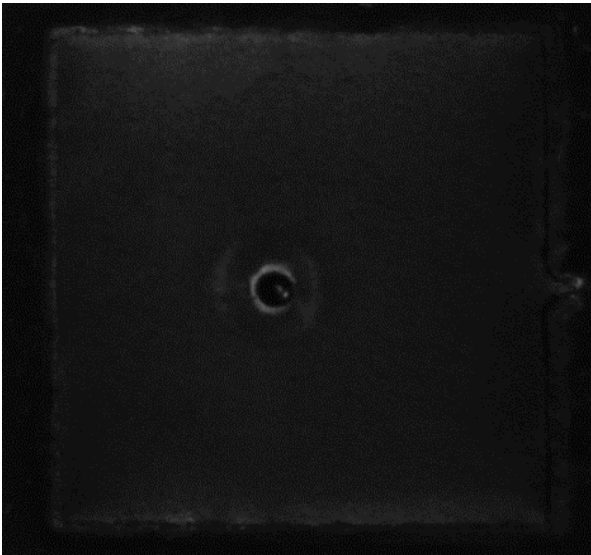


圖 48 鑽孔釋放之暗場影像

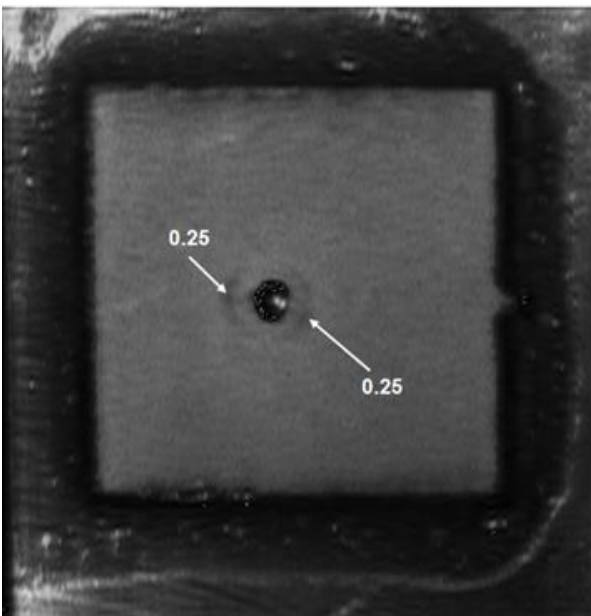


圖 49 鑽孔釋放之處理影像

附錄

表 A1 無因次因數規範表

D_0/D	$\bar{a}$	$\bar{b}$
0.3	0.111	0.288
0.31	0.118	0.305
0.32	0.126	0.322
0.33	0.134	0.340
0.34	0.142	0.358
0.35	0.150	0.376
0.36	0.158	0.394
0.37	0.166	0.412
0.38	0.174	0.430
0.39	0.182	0.448
0.4	0.190	0.466
0.41	0.199	0.484
0.42	0.208	0.503
0.43	0.217	0.521
0.44	0.226	0.540
0.45	0.236	0.558
0.46	0.246	0.576
0.47	0.255	0.594
0.48	0.265	0.612
0.49	0.275	0.630
0.5	0.285	0.648

表 A2 低碳不銹鋼(SUS304)材料機械性質

溫度	比熱	熱傳導率	密度	降伏應力	熱膨脹係數	楊氏係數	浦松比
℃	J/(g·K)	W/mmK	kg/mm ³	N/mm ²	%	N/mm ²	
0	0.462	0.0146	0.79	265	1.70×10^{-5}	198500	0.294
100	0.496	0.0151	0.788	218	1.74×10^{-5}	193000	0.295
200	0.512	0.0161	0.783	186	1.80×10^{-5}	185000	0.301
300	0.525	0.0179	0.779	170	1.86×10^{-5}	176000	0.31
400	0.54	0.018	0.775	155	1.91×10^{-5}	167000	0.318
600	0.577	0.0208	0.766	149	1.96×10^{-5}	159000	0.326
800	0.604	0.0239	0.756	91	2.02×10^{-5}	151000	0.333
1200	0.676	0.0322	0.737	25	2.07×10^{-5}	60000	0.339
1300	0.692	0.0337	0.732	21	2.11×10^{-5}	20000	0.342
1500	0.7	0.12	0.732	10	2.16×10^{-5}	10000	0.388

表 A3 鋁合金(5083)材料機械性質

溫度	比熱	熱傳導率	密度	降伏應力	熱膨脹係數	楊氏係數	浦松比
℃	J/(g-K)	W/mmK	kg/mm ³	N/mm ²	%	N/mm ²	
25	0.9	0.12	0.266	145.299		70300	0.33
100		0.13	0.265	145.309	2.42×10 ⁻⁵	68000	0.34
200		0.137	0.263	115.22	2.5×10 ⁻⁵	60000	0.36
300		0.142	0.261	50.053	2.6×10 ⁻⁵	46500	0.38
400		0.144	0.257	26		30000	0.4
500	1.15	0.146	0.255	13		11500	0.41
575		0.148				7000	0.43

表 A4 PS-1C 反射式光彈貼片規格

貼片類型	PS-1C
尺寸	10"x20"
項目編號	17000
應力光學係數(K)	0.15
厚度	0.044±0.002 IN
應變條紋常數	1720 $\mu\epsilon$ / fringe

表 A5 PS-1 規格表

類型	應力光學係數(K)	Young's Modulus(GPa)	Poisson's Ratio
PS-1 Sheet	0.15	2.5	0.38

表 A6 反射式光彈應用四點彎曲於鋁合金數據表

Aluminum		Theory	FEM	Experiment
3000N	N=0.25	2.5824 mm	2.5723 mm	2.5109 mm
	Displacement			
	Error		0.39%	2.76%
4000N	N=0.25	1.9368 mm	1.9170 mm	1.9148 mm
	Displacement			
	Error		1.02%	1.13%
	N=0.75	5.8105 mm	5.7645 mm	5.8617 mm
	Displacement			
	Error		0.79%	0.88%
5000N	N=0.25	1.5494 mm	1.5399 mm	1.5506 mm
	Displacement			
	Error		0.61%	0.07%
	N=0.75	4.6484 mm	4.6314 mm	4.6202 mm
	Displacement			
	Error		0.36%	0.6%

表 A7 反射式光彈應用四點彎曲於 SUS304 數據表

SUS304		Theory	FEM	Experiment
6000N	N=0.25	3.8319 mm	3.8105 mm	3.8273 mm
	Displacement			
	Error		0.5%	0.12%
10000N	N=0.25	2.2991 mm	2.2836 mm	2.3342 mm
	Displacement			
	Error		0.67%	1.52%
	N=0.75	7.0656 mm	7.1533 mm	6.8878 mm
	Displacement			
13000N	N=0.25	1.7686 mm	1.7507 mm	1.8367 mm
	Displacement			
	Error		1.01%	3.85%
	N=0.75	5.3057 mm	5.2918 mm	5.4336 mm
	Displacement			
			0.26%	2.41%

表 A8 5083 鋁合金鑽孔釋放結合反射式光彈之位移量數據表

Aluminum	Theory	FEM	Experiment
Displacement on	2.4595mm	1.1734mm	2.4706mm
Fringe Order $N=0.25$			
Error		52%	0.4%

反應器周遭三維中子通量計算及靈敏度量化分析

Reactor Pressure Vessel Fluence Calculations and Uncertainty Analysis

計畫編號：MOST 106-2623-E-007-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許榮鈞

e-mail：rjsheu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：黃昱翔

執行單位：國立清華大學核工所

摘要

反應器周遭中子累積通量的計算對於物質活化分析與材料損傷評估非常重要，直接與核電廠除役或生命週期管理息息相關。實務上，複雜的全爐心三維中子遷移計算非常耗時，傳統做法一般採用結合數次低維度的計算結果來合成近似三維的中子通率分佈，例如美國核管會管制指引 1.190 中所建議的合成法，這也是核一廠除役報告中子活化分析採用的方法。有鑑於此一核心技術的重要性，本研究利用幾種獨立的三維中子遷移計算工具(包括 TORT、RAMA 與 MAVRIC)嚴謹地探討傳統合成法的適當性與可能誤差範圍。

關鍵詞：中子通量、遷移計算、三維合成法。

Abstract

Neutron fluence estimation around a reactor core is essential for the assessment of material activation and radiation damage, which are important issues directly related to the lifetime management of a nuclear power plant. 3D neutron transport calculations are usually not practical because of time-consuming and the complexity of modelling all the details around a reactor core. Traditionally, a 3D neutron fluence distribution may be approximately constructed by synthesizing results of several lower dimensional calculations, such as suggested in the U.S. NRC Regulatory Guide 1.190. Considering the importance of this core technology, this study aimed at investigating the appropriateness of this synthesis approximation and quantifying associated uncertainties by comparing with rigorous 3D transport calculations (TORT, RAMA, and MAVRIC).

Keywords: Neutron fluence; transport calculation, 3D synthesis method.

I. 前言

核能電廠為進行延役或除役作業，清楚掌握反應器壓力槽附近的中子通量分佈相當重要，以分別評估壓力槽與其周遭重要組件的結構完整性或材料活化程度。針對反應器周遭中子累積通量的評估，傳統做法主要依據美國核管會管制指引 (USNRC Regulatory Guide) 1.190 中建議的合成方法[1]，三維中子通率可藉由合成低維度之計算結果構成，針對如圖 1 所示常用圓柱形座標的爐心幾何組態，三維中子通率分佈合成方法可由下式來表示：

$$\phi_g(r, \theta, z) \cong \phi_g(r, \theta) \times \phi_g(r, z) / \phi_g(r)$$

其中 $\phi_g(r, \theta)$ 與 $\phi_g(r, z)$ 分別為兩個二維決定論法遷移計算的結果， (r, θ) 與 (r, z) 代表二種不同二維圓柱形座標系， ϕ_g 代表第 g 能群之中子通率分佈；另外， $\phi_g(r)$ 則為一維決定論法遷移計算第 g 能群之徑向中子通率分佈，合成後的三維中子通率最後再對時間（爐心運轉歷程）積分即可得中子累積通量。典型的圓柱形爐心幾何如圖 1 所示，圖中亦顯示沿徑向方向的爐心周遭重要組件，由內至外分別有爐心側板、降流區及噴射泵、監測試片、壓力槽、鏡像絕緣區、與生物屏蔽（Biological shield）等等。觀察圓柱形爐心幾何之射源及中子作用特性，理論上，上述近似公式應僅適用於爐心燃料組件之軸向射源分佈皆相同的情況，以及中子衰減特性並未因軸向變化而改變。

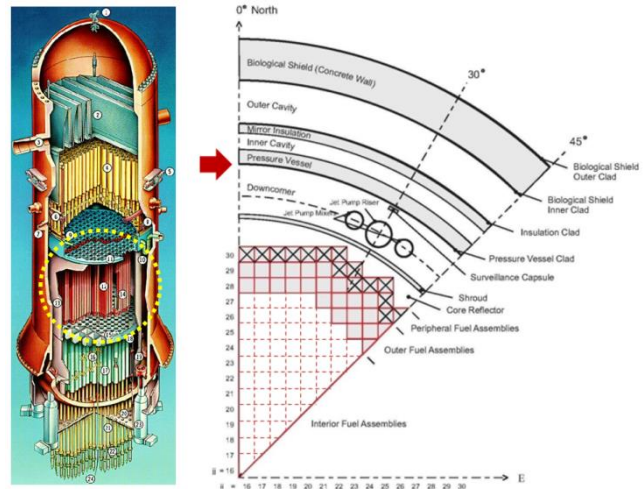


圖 1-1. 圓柱形座標的爐心幾何組態示意圖。

II. 主要內容

有鑑於反應器周遭中子累積通量評估技術的重要性，本研究利用嚴謹的三維中子遷移計算驗證前述的三維中子通率分佈合成法，本計畫使用的三維中子遷移計算程式包括 TORT [2]、RAMA [3]、與 MAVRIC [4]。針對此一核心技術，美國電力研究所（EPRI）已發展出 RAMA Fluence Methodology，它能夠完整快速分析反應爐中子累積通量，並獲 USNRC 認可。EPRI 已將這項技術整合成套裝軟體提供會員單位使用，值得國內引進並深入研究。RAMA 技術是屬於決定論法的中子遷移計算；另一方面，ORNL 開發的 SCALE 程式系統內含三維遷移計算 MAVRIC 程式，則是屬於蒙地卡羅遷移計算程式。

III. 結果與討論

本研究討論四種估算反應器周遭三維快中子通率方法的計算結果及其差異，首先是傳統三維中子通量合成法計算，分別利用一維 ANISN 與二維 DORT 遷移程式進行反應器爐心與周遭組件中子通率分佈計算，依循 USNRC 管制指引 1.190 的建議合成近似的三維空間中子通率分佈。其次是二種嚴謹三維決定論法遷移計算，分別是 TORT 與 EPRI 開發的 RAMA 程式計算反應爐壓力槽內外的中子通率分佈。最後是嚴謹三維蒙特卡羅法遷移計算，我們選用 SCALE/MAVRIC，擇要進行中子通率分佈計算的驗證。為使各方法正確且公平的比較，本研究先以一個簡化的 BWR/4 反應器模型為例，圖 2 是本研究 BWR 計算模型的示意圖，涵蓋有效燃料高度範圍內的重要組件。因考慮的模型屬水平方位角 1/8 對稱，故可以 1/8 的模型搭配特定的邊界條件進行計算，如在 0° 與 45° 的垂直平面使用反射的邊界條件，在生物屏蔽外表面與模型上下緣的水平平面使用真空的邊界條件。我們有興趣的是不同方法對整個壓力槽表面快中子通率分部計算結果的差異，本研究僅考慮有效燃料高度的範圍，未來將向上與向下延伸計算模型涵蓋整個壓力槽，估算腹帶區外計算結果的差異。

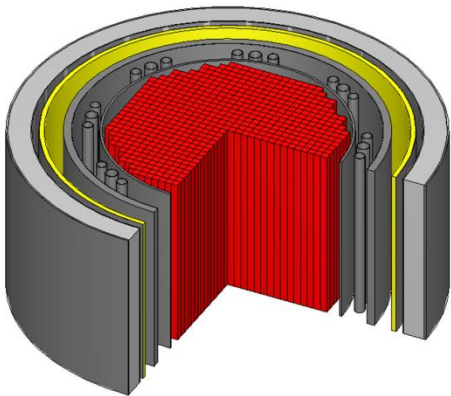


圖 2. 本研究 BWR 計算模型的示意圖。

圖 3 與圖 4 是本研究四種方法計算結果的比較彙整。圖 3 是壓力槽內表面快中子通率分佈，由左到右分別是 (a) 合成法、(b) TORT、(c) RAMA、與 (d) MAVRIC 的計算結果。圖 4(a) 是有效燃料中間高度沿問題模型 0° 方向從爐心中央到生物屏蔽外的徑向快中子通率分佈。圖 4(b) 是以 RAMA 估算壓力槽內表面的快中子通率分佈，最大值約發生在圖片中間偏右下處(約 26° 約 694 公分高)，另有兩條(水平與垂直)通過最大值的虛線，(c) 沿水平虛線的方位角快中子通率分佈，(d) 沿垂直虛線的軸向快中子通率分佈。

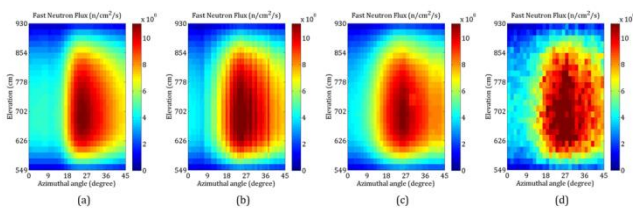


圖 3. 壓力槽內表面快中子通率分佈。由左到右分別是(a) 合成法、(b) TORT、(c) RAMA、與 (d) MAVRIC 的計算結果。

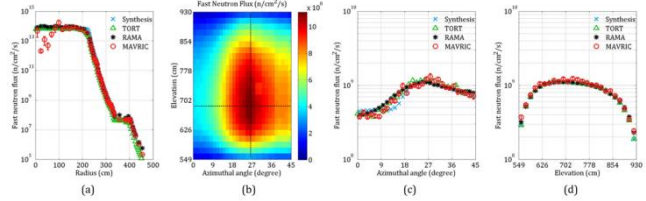


圖 4. 本研究 4 種方法計算結果的比較。由左到右分別是(a)從爐心中央到生物屏蔽外的徑向快中子通率分佈，(b)以 RAMA 估算壓力槽內表面的快中子通率分佈，另有兩條(水平與垂直)通過最大值的虛線，(c)沿水平虛線的方位角快中子通率分佈，(d)沿垂直虛線的軸向快中子通率分佈。

合成法與三維離散座標法 TORT 的比較著重在討論兩種不同空間維度且不同座標系方法的計算結果及其差異，並以直接是三維計算的結果作為參考，評估低維度計算結果的可靠度。這兩種方法皆是使用離散座標法，且可使用相同的截面庫 (BUGLE-96)，但合成法的 ANISN 與 DORT 分別是一維與二維圓柱座標系的計算方法，而 TORT 則是三維直角座標系的計算方法。結果顯示，兩種方法的計算結果除在方位角 7° 處合成法高估約 25%，在 14° 處合成法低估約 30%，其餘方位角上的差異皆在 10% 以內呈現相當好的一致性。這些較大的差異應歸因於兩種方法在建立計算幾何模型時產生的差異。事實上，有效燃料高度間的壓力槽是圓柱殼狀，合成法可在 DORT 的 (r, θ) 中真實模擬，但在 TORT 中則必須以類似化圓為方的方式利用多個方形近似圓柱殼，造成計算幾何模型的差異。圖中沿垂直虛線的軸向快中子通率分佈，結果顯示兩種方法的計算結果呈現預期中完美的一致性，因在軸向上模型的幾何尺寸與材料皆相同，並在爐心區域使用一樣的平均軸向功率分佈，故得到幾乎相同的結果。另從計算時間得知，合成法是估算三維快中子通率分佈非常有效率的方法，合成法的計算時間須約 1.13 分鐘，是三個低維度 ANISN 與 DORT 計算時間的總和，TORT 則須約 516 分鐘，且合成法在有效燃料高度從爐心中央到生物屏蔽外的區域中提供了可接受的準確度。不過，若想以合成法估算有效燃料高度以外區域的中子通量則須小心，有可能須要使用直接是三維的計算方法。

三維離散座標法 TORT 與 RAMA 的比較著重在討論兩種不同幾何建模能力且不同數值方法的計算結果及其差異。這兩種方法皆是三維的遷移計算方法，且可使用相同的截面庫。相較於以直角座標描述問題幾何的離散座標法 TORT，具有組合式建模能力的 RAMA 可以矩形模擬爐心區域的燃料束，同時以圓柱殼模擬爐心區域外的反射體、爐心側板、噴射泵、壓力槽、空腔區、鏡面絕緣區、與生物屏蔽等，建立相當精確的幾何模型，進而排除因選擇單一座標系造成的建模限制，更重要地是減少因建模的近似產生的差異。故可以 RAMA 結果作為參考，評估以矩形近似圓柱殼計算結果的差異。比較結果顯示，除少數幾個可能因 TORT 以方形近似球殼造成較大的差異外，其餘方位角上的差異約在 10% 以內。圖中沿垂直虛線的軸向快中子通率分佈，結果顯示，與合成法與 TORT 比較的結果相同，TORT 與 RAMA 的

結果亦呈現預期中完美的一致性。在計算效率部份，TORT 與 RAMA 的計算時間大致相當，分別是約 516 分鐘與約 279 分鐘，與合成法相比，高出約 2 至 3 個數量級，但對於本研究的反應器模型，TORT 與 RAMA 在現在個人電腦上的計算時間應該是可以被接受的。

RAMA 與蒙地卡羅法 MAVRIC 的比較著重在討論兩種不同計算方法且使用不同截面庫方法的計算結果及其差異。前兩節提到的 ANISN、DORT、TORT、與 RAMA 皆是所謂的以決定論法求解中子遷移方程式，並以多群的方式近似中子的能量分佈。而 MAVRIC 則是以不斷隨機取樣模擬中子行為，最後以統計方式估算結果的蒙地卡羅程式。比較決定論法的 RAMA 與蒙地卡羅法的 MAVRIC 相當有趣，因兩種方法都使用組合式的空間幾何模擬反應器，另外 RAMA 使用多能群的截面庫，而 MAVRIC 則可使用連續能量的截面庫。故在沒有空間、能量、與角度的近似下，MAVRIC 估算的速率結果可作為一個很好的參考，評估 RAMA 在本研究中的估算結果。結果顯示，在速率明顯衰減的區域內，即從爐心邊緣到壓力槽間與生物屏蔽內，兩種方法的計算結果具有高度的一致性。另在 MAVRIC 的結果中可以觀察到，靠近爐心中央的結果有明顯的跳動，這是因為在蒙地卡羅計算中使用了變異數降低方法，使模擬的中子因伴隨射源的位置盡可能地向反應器外圍的生物屏蔽外移動，故靠近爐心中央區域的中子則相對較少，造成結果的跳動。圖中沿水平虛線的方位角快中子速率分佈，結果顯示兩種方法的計算結果大致上具有一致性，但因 MAVRIC 的結果尚未達到讓人滿意的收斂，故在少數方位角上仍有較大的差異。圖中沿垂直虛線的軸向快中子速率分佈，結果顯示與前兩節的比較結果相同，RAMA 與 MAVRIC 的結果有相當的一致性。雖然先進的蒙地卡羅計算具有幾個獨特的優點，但仍須耗費相當多的計算時間，尤其是針對大尺寸的實際案例。如本研究的假想問題，即使是使用變異數降低方法的 MAVRIC 且計算超過 8 天的時間，大部份區域的統計誤差仍不令人滿意，如圖 3 所示，因蒙地卡羅法的結果具有先天統計變動性，故相較於其它決定論法，MAVRIC 的結果若是要得到更平滑的速率分佈，MAVRIC 須要比三維決定論法 TORT 或 RAMA 更多的計算時間。

IV. 結論

本研究已利用一個簡單的 BWR 案例，完成合成法、TORT、RAMA、與 MAVRIC 等 4 種估算反應器周遭快中子速率分佈的比較，合成法是以一維 ANISN 及二維 DORT 求解重建三維速率分佈的方法，TORT 是三維的離散座標法，RAMA 是 EPRI 發展的一種三維決定論法，MAVRIC 是使用連續能量截面庫的蒙地卡羅法。本研究的目的是：(1)建立反應器周遭三維快中子速率分佈的計算方法；(2)驗證本研究為 4 種方法開發的輸入檔產生程式與輸出檔後處理程式；(3)評估 4 種方法計算結果差異的範圍；(4)未來規劃將分析模型沿軸向延伸至可涵蓋整個壓力槽，估算整個壓力槽與周圍組件的中子速率分佈，討論不同計算方法之間的差異。

圖 4 統整了本研究 4 種方法估算快中子速率分佈的比較，結果顯示，4 種方法在徑向、方位角、與軸向的比較結果有合理的一致性，除了解各種方法計算結果的

差異與可能適用的範圍外，同時確認本研究團隊建立的 4 種遷移計算方法的計算能力，與相對應的前處理及後處理能力。事實上，我們有興趣的是整個壓力槽周圍的中子速率分佈，目前沿軸向延伸的計算模型已經開始準備，待模型建立完成後將以不同的方法估算整個壓力槽周圍的中子速率分佈，並互相比較計算結果，目的在評估合成法在有效燃料高度區域外的適用性，另可進一步分析壓力槽活化核種的存量與分佈，提供核電廠除役時須要的放射性核種資訊。

從本研究的比較結果顯示，在有效燃料高度區域中，合成法可提供合理且準確的結果，是一個非常有效的快中子速率估算方法。使用多能群截面庫的決定論法遷移計算程式 TORT 與 RAMA 可以三維建立問題幾何模型，相當適合應用在有效燃料高度區域以外的中子速率估算，兩種方法的計算時間大致相當，較合成法多約 2 到 3 個數量級。使用蒙地卡羅法模擬中子行為的遷移計算程式 MAVRIC 可精確模擬問題幾何，並使用連續能量的截面庫估算中子速率分佈，預期可得到最準確的答案。不過因大範圍的統計結果不易收斂，故 MAVRIC 須要比三維決定論法多約數個數量級的計算時間才可得到令人滿意的結果。

參考文獻

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence," Regulatory Guide 1.190, March 2001.
- [2] DOORS3.2a, "One, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System," RSICC CODE PACKAGE CCC-650.
- [3] BWRVIP-114-A, "BWR Vessel and Internals Project, RAMA Fluence Methodology Theory Manual", Electric Power Research Institute (2009).
- [4] SCALE6, "Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation Modular Code System for Workstations and Personal Computers, Including ORIGIN-ARP," RSICC CODE PACKAGE CCC-750.

壓水式核能電廠之 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 事故模擬與 URG 措施分析

PWR Accident Simulation and URG Strategy Analysis using TRACE/SNAP/FRAPTRAN code

計畫編號：MOST 106-2623-E-007-002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳紹文教授

e-mail：chensw@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：李尚諭、李宛芸、張祐銜、阮培瑄、蘇鈺婷、張靖、林孝柔、蔡明倫、郭封均、鄭延釋、楊鎧駿、黃俊富

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

日本福島事故(2011 年)是由於地震加上海嘯導致電廠全黑狀態(SBO)，安全設備因無交流電驅動而失效，爐心無法冷卻導致後續的外洩事故。針對類似的緊急狀態，台電提出斷然處置措施(URG)來因應確以保電廠安全。本研究利用美國核管會(U.S.NRC)的 TRACE 熱水流程式，結合 SNAP 與 FRAPTRAN 燃料機械性質程式，發展壓水式電廠之假設全黑事故(SBO)模式，考慮 URG 的處置措施、時序與可能補水方式，進行系統熱水流模擬；再藉由 FRAPTRAN 計算燃料護套之機械性質，以確認系統完整性與安全餘裕，提升對壓水式電廠之事故了解與安全管制。本計畫今年度目標為建立壓水式電廠(PWR)之 SBO 假設事故模式，並建立 URG 之爐心熱流與燃料機械性質分析能力。

關鍵詞：電廠全黑(SBO)、TRACE 程式、FRAPTRAN 程式、壓水式電廠(PWR)、斷然處置(URG)

Abstract

In 2011, the Fukushima Daiichi nuclear accident was caused by the M9.0 earthquake and tsunami as well as the following SBO conditions. In this study, the NRC's most advanced thermal-hydraulic code, TRACE, will be utilized along with the graphical control code, SNAP, and fuel-rod transient mechanical simulation code, FRAPTRAN, to develop a PWR severe accident simulation model for assumed SBO events. The assumed conditions of LOCA and potential strategies of URG will be applied using this PWR model to simulate the time sequence and potential water supply methods. Furthermore, the FRAPTRAN code will be used to examine the integrity of the cladding and fuel rods to make sure the system has sufficient safety margin and to ensure the power plant is under regulations. In this year, the PWR TRACE/SNAP/FRAPTRAN model with SBO scenarios has been developed and was used to examine the performance of URG strategies as well as the mechanical behaviors of fuel and cladding under various cases.

Keywords: SBO, TRACE, FRAPTRAN, PWR, URG

I. 前言

2011 年日本發生福島電廠事故，其主要原因為 M9.0 強震加上後續海嘯導致電廠全黑狀態(Station Blackout,

SBO)，因為電廠喪失了所有交流電源導致安全注水設備失效，因而引發了後續的氫氣爆炸與輻射外洩等事故，如何防範類似事故再次發生成為核能產業最重要的議題之一。有鑒於此，全球核能界針對類似福島之複合型事故狀況紛紛提出改善措施與對策，而台電也特別提出斷然處置(URG)等措施來因應類福島事故的狀態。本研究以國內之壓水式核電廠(PWR，馬鞍山電廠)為範例建立分析模式，利用美國核管會(U.S.NRC)所發展的熱水流模擬程式 TRACE、燃料暫態分析程式 FRAPTRAN、以及圖形化介面控制程式 SNAP 等，結合爐心熱流計算與材料應力/應變分析等，發展嚴重事故 SBO (Station Blackout)之暫態分析模式，並代入 URG 措施之時序與補水方式，以進行各種可能狀態之系統熱水流模擬分析。根據上述各種假設狀況，本研究進一步利用 FRAPTRAN 程式對燃料與護套的溫度、應變、應力、氧化物厚度等機械性質進行分析，用以評估 PWR 電廠系統安全餘裕及燃料的完整性，以了解假設事故的狀態與確認 URG 措施之有效性。

II. 模擬案例條件與時序

本研究首先利用 TRACE 程式在 SNAP 介面下建立馬鞍山 PWR 模式，所建立之 PWR 一次側與二次側模型示意圖如圖 1 左側所示；而圖 1 右側為結合 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 程式之示意圖。利用此 TRACE-PWR 模式，本研究假設五個模擬案例，探討馬鞍山電廠處於全黑事件(SBO)，並假設第五台柴油發電機及 TDAFP 與 MDAFP 運轉一段時間後失效之情況下，爐心水位是否能滿足成功準則。同時，在分析電廠在 SBO 狀況下無處置措施與執行救援措施之案例比較中，將針對下列重要參數進行探討，包括：爐心水位、壓力、燃料護套溫度等。為滿足爐心水位成功準則，暫態事故模擬期間爐心水位必須高於燃料頂端高度(TAF, 6.64m)，確保燃料不發生裸露並避免護套破損之風險。本研究首先針對馬鞍山電廠分析下列假設案例：(1)案例一：假設 SBO 事故，執行 URG 措施，假設 TDAFP、MDAFP 運轉 30 分鐘後失效，執行控制降壓、緊急降壓與消防注水；(2)案例二：假設 SBO 事故，假設 TDAFP、MDAFP 運轉 30 分鐘後失效，無降壓與無消防注水；(3)案例三：假設 SBO 事故，假設 TDAFP、MDAFP 運轉 30 分鐘後失效，執行控制降壓、無緊急降壓與無消防注水；(4)案例四：假設 SBO 事故，假設 TDAFP、MDAFP 運轉

30 分鐘後失效，執行緊急降壓、無控制降壓與無消防注水；(5)案例五：假設 SBO 事故，假設 TDAFP、MDAFP 運轉 30 分鐘後失效，執行控制降壓與緊急降壓，並在緊急降壓後執行消防注水、並對注水量進行靈敏度分析，測試注水量分別為 50gpm、100gpm、200gpm 等。本研究模擬案例之重要時序如表一所示；而表二顯示為模擬條件比較表。根據表一與表二，可比較不同時序、不同操作條件與不同注水量可能造成之差異。

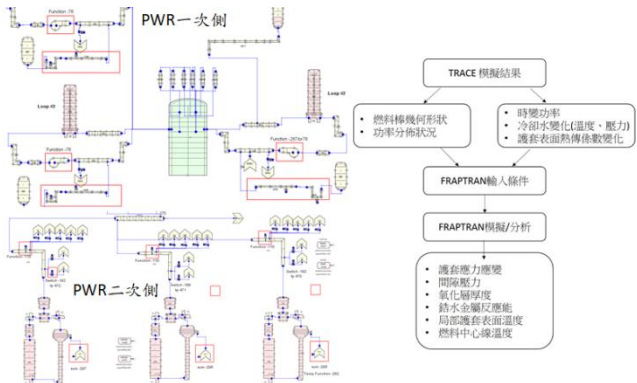


圖 1: TRACE-PWR 模式之一次側、二次側示意圖(左側)與 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 程式結合流程圖(右側)

表 1: 模擬案例時序表

事件	時序	案例一 時序(s)	案例二 時序(s)	案例三 時序(s)	案例四 時序(s)	案例五 時序(s)
模擬開始		0	0	0	0	0
爐心急停、主蒸氣閥關閉		60	60	60	60	60
TDAFP、MDAFP 開啟		61	61	61	61	61
TDAFP、MDAFP 失效		1860	1860	1860	1860	1860
控制降壓		1860	n/a	1860	n/a	1860
電廠全黑 SBO		1860	1860	1860	1860	1860
緊急降壓		5460	n/a	n/a	5460	5460
替代注水		5460	n/a	n/a	n/a	5460

表 2: 模擬案例條件比較表

案例	控制降壓	緊急降壓	注水
案例一	有	有	有(600gpm)
案例二	無	無	無
案例三	有	無	無
案例四	無	有	無
案例五	有	有	有(50,100,200 gpm)

III. 結果與討論

圖 2 為案例一之重要結果摘錄，包括(a)爐心壓力，(b)水位，(c)最高護套溫度，(d)護套環應，(e)護套環應變，(f)護套節點溫度等。本案例分別於 305 秒及 2100 秒依照 EOP 及 URG 策略執行控制性降壓，除大量移除衰變熱外亦保持爐心水位不低於 TAF，當後備水源備妥後即執行緊急降壓，將爐心壓力降至 3kg/cm²以利進行低壓注水。FRAPTRAN 進行案例一之燃料與護套暫態分析。護套環應在順利實施 URG 狀況下，護套環應力越來越小。護套環應變，遠低於法規限值 0.1。護套溫度變化，遠低於 1089K，護套無安全疑慮。護套氧化層厚度從事故發生後，並無增加，經由上述結果證明 URG 可

成功確保爐心燃料安全。

案例二之結果如圖 3 所示，因未執行任何救援策略，爐心水位持續下降，最終於約 15000 秒時爐心水位低於 TAF(6.6445m)，此時燃料頂部裸露且爐心移熱能力降低，燃料護套持續升溫，於 16221 秒達 1088°K(1500°F)。FRAPTRAN 分析護套環應力在約 15000 秒後因爐心水位低於 TAF，第 12 節點開始快速上升。護套環應變在節點 7、8、9 在約 23500 秒時，環應變快速上升。護套溫度在約 18500 秒時，護套溫度達到 1089K，可能開始產生氫氣。護套氧化層厚度在約 19000 秒時快速上升，最高達到 0.27mm，超過法規限值 17%，22450 秒停止運算。由上述結果可知，在此極端假設下，因無適當處置措施，護套可能在 19000 秒後開始有劇烈變化。

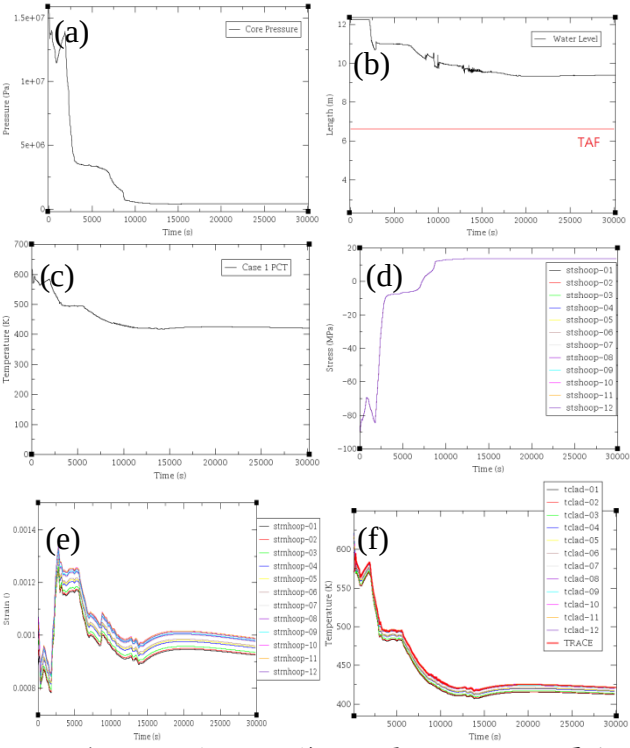


圖 2: 案例一之重要結果節錄(a)壓力，(b)水位，(c)最高護套溫度，(d)護套環應，(e)護套環應變，(f)護套節點溫度。

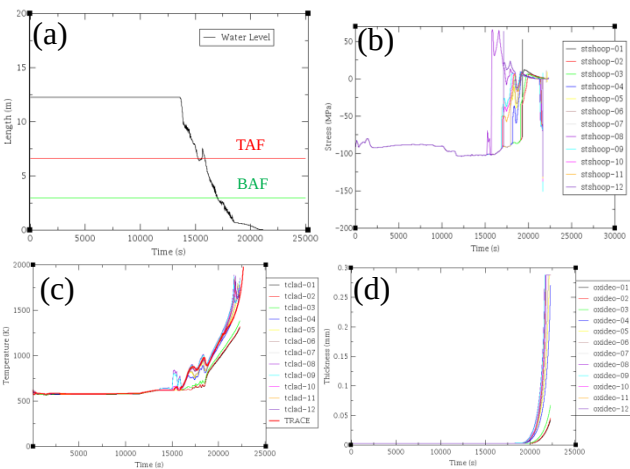


圖 3: 案例二之重要結果節錄(a)水位，(b)護套環應，(c)護套節點溫度，(d)氧化層厚度。

案例三條件與案例二類似，只增加控制降壓，冷卻

水的持續蒸發亦使爐心水位持續下降，約於 16000 秒時爐心水位低於 TAF(6.6445m)，並於約 17000 秒達 1088K (1500°F)，如圖 4 所示。FRAPTRAN 分析護套環應力，在約 16000 秒後因爐心水位低於 TAF，第 12 節點開始快速上升。護套環應變的變化，而節點 7、8、9 在約 23500 秒時，環應變快速上升。而在 19030 秒時，護套溫度達到 1089K，可能開始產生氫氣。護套氧化層厚度，在約 19000 秒與 22000 時，氧化層厚度開始快速上升，最高達到 0.27mm，超過法規限值 17%，在 23500 秒時停止運算。由上述結果可知，在此極端條件下，因無適當的處置措施，所以護套在 22000 秒後開始有劇烈變化。

案例四亦與案例二類似，只有增加緊急降壓，冷卻水的持續蒸發亦使爐心水位持續下降，最終於約 15500 秒時爐心水位低於 TAF(6.645m)，於約 17000 秒達 1088 °K(1500°F)，護套與水蒸氣可能產生銹水反應，結果如圖 5 所示。護套環應力變化，在沒有實施 URG 下，假設 TDAFP 與 MDAFP 失效及後續冷卻注水(包括消防注水等)接失效的情況下，爐心移熱功能將喪失，而節點 7、8、9 在約 22500 秒時，環應力快速上升。圖 3.4.5 顯示護套環應變的變化，而節點 7、8、9 也在約 22500 秒時，環應變快速變化。護套溫度在約 17500 秒時，護套溫度達到 1089K，可能開始產生氫氣。護套氧化層厚度在約 21000 秒時，氧化層厚度開始快速上升，最高達到 0.27mm，可能達到法規限值 17%。

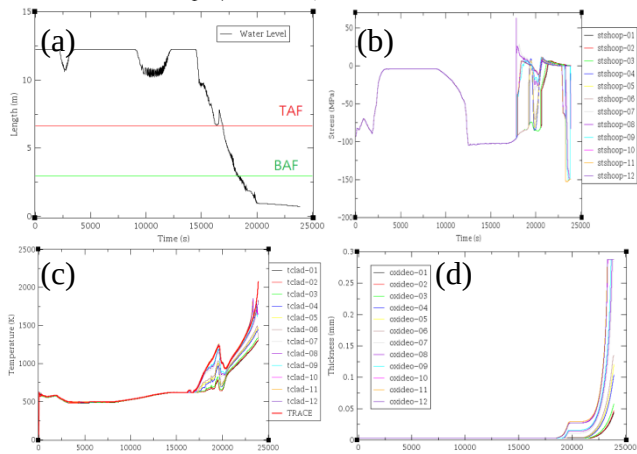


圖 4: 案例三之重要結果節錄(a)水位,(b)護套環應力,(c)護套節點溫度,(d)氧化層厚度。

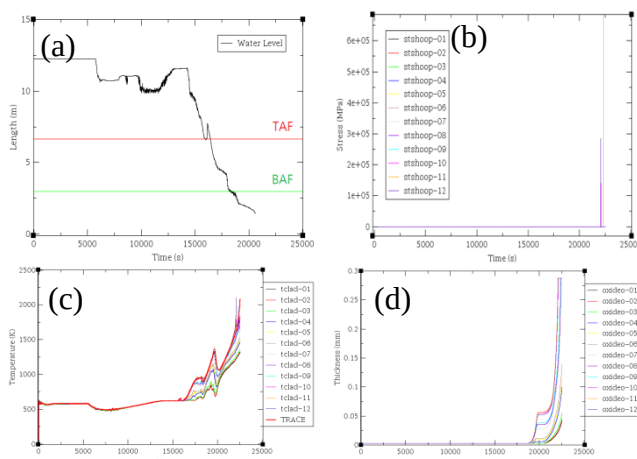


圖 5: 案例四之重要結果節錄(a)水位,(b)護套環應力,(c)護套節點溫度,(d)氧化層厚度。

案例五為注水靈敏度分析，重要結果如圖 6 所示。當低壓注水流量為 50gpm，則爐心水位可能無法順利回升，爐心衰變熱持續發生，爐心水位逐漸下降，可能約在 21000 秒時達到 TAF。若注水流量為 100gpm，雖爐心水位未能迅速回升，然水位不會低於 TAF，而護套最高溫度也遠低於 1088K，可維持在安全的範圍之內。若注水流量為 200gpm，水位也不會低於 TAF，護套最高溫度也遠低於 1088K，也在安全的範圍之內。由本靈敏度分析之結果可知，若在建立替代注水設備時，應盡備妥較高流量之注水設備，或者建議低壓注水流量須至少大於 100~200gpm。此流量可由一般活動式低壓注水設備如消防車等輕易達到，目前台灣的核電廠內皆已配備，故電廠爐心與燃料完整性無須擔心。

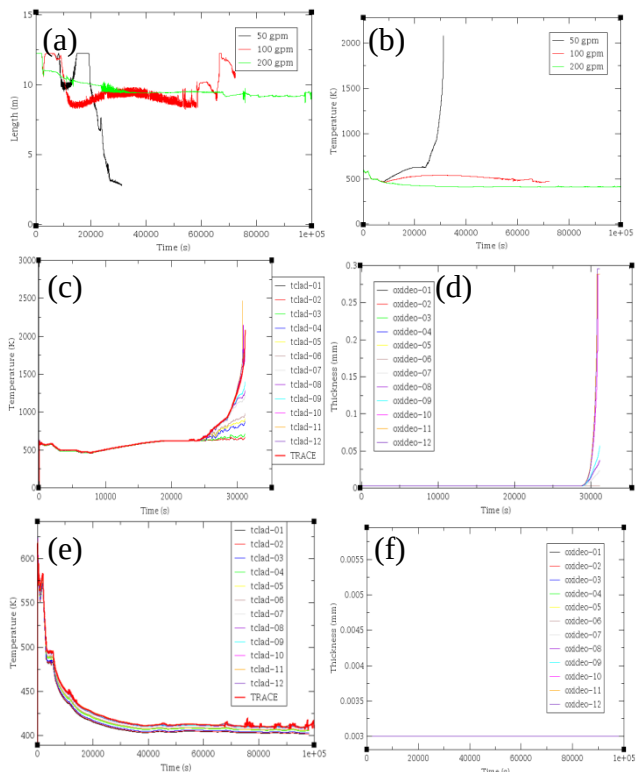


圖 6: 案例五之重要結果節錄(a)水位,(b)最高護套溫度,(c)注水 50gpm 之護套節點溫度,(d)注水 50gpm 之氧化層厚度,(e)注水 200gpm 之護套節點溫度,(f)注水 200gpm 之氧化層厚度。

IV. 結論

本研究結合 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 程式，針對壓水式電廠假設 SBO 狀況模擬執行 URG 措施及另外四種極端假設狀況，分別探討電廠整體熱水流條件及燃料護套的機械行為及完整性。本研究模擬案例分析之重要結論如下：

1. 若電廠發生 SBO 事件，無法注水屬於非常極端之案例，一般情況下不太可能發生，例如案例二到案例四所示。
2. 由案例二可知，當發生電廠全黑 SBO 事件，電廠若無法及時處置備妥緊急注水系統或替代電源(極端假設喪失各種水源包括消防水源等)，則可能於事件發生後 17000 秒後發生爐心溫度升高或燃料棒與護套之應力應變升高等狀況。

3. 若電廠發生 SBO 事件，只須即時執行斷然處置措施 (URG)，即能有效確保電廠安全狀態，例如案例一所示。
4. 根據本研究假設條件之注水流量靈敏度初步分析顯示，低壓注水流量高於 100gpm 以上即可有效補水恢復達到 TAF 以上。若注水流量僅 50gpm 或以下，水位將低可能於 TAF。而 200gpm 以上注水流量更可確保爐心水位恢復並維持在 TAF 以上。而台電 URG 注水量為設定為 600gpm，因此 URG 措施可以確保爐心燃料溫度壓力與燃料完整性皆安全無虞。

參考文獻

- [1] TRACE V5.0 USER' S MANUAL, U. S. Nuclear Regulatory Commission (2017)
- [2] K.J. Geelhood, W.G.L., C.E. Beyer, FRAPTRAN 2.0: Integral Assessment, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, 2016
- [3] A. DAAVITILA, A. HÄMÄLÄINEN, H. RÄTY, "TRANSIENT AND FUEL PERFORMANCE ANALYSIS WITH VTT' S COUPLED CODE SYSTEM" , Mathematics and Computation.
- [4] K. J. GEELHOOD, W. G. LUSCHER, C. E. BEYER, J. M. CUTA, "FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods" NUREG/CR-7023, Vol. 1,
- [5] H. Esmaili, D. Helton, D. Marksberry, R. Sherry, P. Appignani, D. Dube, M. Tobin, R. Buell, T. Koonce, J. Schroeder, "Confirmatory Thermal-Hydraulic Analysis to Support Specific Success Criteria in the Standardized Plant Analysis Risk Models – Surry and Peach Bottom (NUREG-1953)" , USNRC NUREG Report, September 2011
- [6] Chunkuan Shih, Jung-Hua Yang, Jong-Rong Wang, Shao-Wen Chen, NUREG/IA-0471 Fuel Rod Behavior and Uncertainty Analysis by FRAPTRAN/TRACE/DAKOTA Code in Maanshan LBLOCA, 2016
- [7] 台灣電力公司馬鞍山電廠機組斷然處置程序指引

核能電廠關鍵區域之鑑定與評估

計畫編號：MOST 106-NU-E-007-005-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：林唯耕

e-mail：wklin@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：葉璟賢

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

本報告主要為制定緊要區域鑑定之審查導則，並蒐集國際間緊要區域劃分方法，主要從 Sandia National Laboratories, Vital Area Identification for U.S. Nuclear Regulatory Commission 的與 IAEA Technical Guidance, Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities 給各國的對於緊要區域之建議，訂定出一套流程，以利國內核電廠進行緊要區的鑑定並且劃分更為精準，得以更有效率的保護重要區域。同時也會列出緊要區域的審查要點。

關鍵詞：緊要區鑑定、審查導則、核電廠

Abstract

This report focuses on the development of guidelines for the identification of vital areas and the collection of international vital area identification methods, mainly from Sandia National Laboratories, the Vital Area Identification for US Nuclear Regulatory Commission and the IAEA Technical Guidance, Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities. For the recommendations of the vital areas, a set of processes has been formulated to facilitate the identification of vital areas in domestic NPPs and make the classification more precise so as to protect vital areas more efficiently. The critical points for review vital areas will also be listed.

Keywords : Vital Area, Review Guidelines, Nuclear Power Plant

I. 前言

自 911 事件之後，世界各地恐怖攻擊頻傳，且核能電廠的安危一直是民眾所擔心的議題，且 INFCIRC_225_Rev.5 報告中也提出電廠的防護目標條件，要盡可能避免核電廠的蓄意破壞以及最小化電廠遭破壞的影響。國內雖然已經有核電廠的 PRA 分析文件，但是大多是以系統或設備來進行分析，緊要區的劃分也是透過這些 PRA 分析文件來進行劃分。但是當恐怖攻擊發生時，恐怖份子占領或破壞一個「區域」，導致此區域的系統設備全部失效，而不是單一個系統或設備，且破壞這個區域可能對鄰近區域或相關的系統設備造成影響，進而導致其他區域相繼失效。因此「區域」的概念就被引進 PRA 分析之中，透過分析某一區域遭受破壞而失效，會對電廠造成的影響，進一步建立更為精準的緊要區域。

國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 也指出緊要區域的鑑定對於核子設施對

抗恐怖攻擊是很重要的一個步驟，因此也對會員國提出一些跟緊要區鑑定相關的建議與模擬假設方法。本報告希望藉由蒐集國外與 VAI 鑑定相關的重要文獻，進一步建立起國內對於以區域概念為主的緊要區域之鑑定流程與審查導則。此鑑定流程主要根據 Sandia National Laboratories 與 IAEA Technical Guidance 所提出的 Vital Area Identification 之方法，擬定出一套鑑定方法，其中包含假設、鑑定肇始事件、緩解系統……等，可以提供國內核能電廠來對電廠緊要區域進行審查。同時也為電廠提供一套緊要區的鑑定劃分方法，並將緊要區域鑑定出來，以加強實體防護，減少區域內設備遭到破壞的可能性，或是降低當此區域受到攻擊時，輻射後果的嚴重程度。

II. 主要內容

本研究主要參考之文獻為 Sandia National Laboratories Report, Vital Area Identification for U.S. Nuclear Regulatory Commission Nuclear Power Reactor Licensees and New Reactor Applicants，報告中提及電廠進行緊要區域鑑定時需要的模擬假設、鑑定步驟、惡意來源之肇始事件 (initiating event of malicious origin, IEMO) 的鑑定、緩解系統的鑑定……等，其中最主要目標為 1. 加強核設施對付潛在攻擊的能力 2. 評估 CFR 中規定的保安是否足夠 3. 對核設施的安全計畫進行全面審查，並提供一些建議給 NRC。

大部分肇始事件已經很完整的在電廠 PRA 或其他安全分析程式中定義以及分析過，而所有可能導致輻射外釋的貯存點都必須被考慮進去，但是有 2 種類型則是例外：

1. 該肇始事件不太可能隨機發生，像是大規模違規行為 (massive breaches) 或是許多被動元件同時故障 (failures of passive components) 之類的，它雖然有被定義但是被排除在考慮以往 PRA 之外。
2. 該輻射材料的外釋可能沒有在電廠 PRA 的分析之中 (像是為了防止爐心嚴重事故而將放射性物質外釋)。

而透過以下 4 個步驟可以定義惡意肇始事件：

1. 審查風險評估文件 (Review of risk assessment documentation)：列出全功率運轉的 PRA、火災 PRA、地震 PRA 以及其他安全分析中的 IEs，因為任何可能隨機發生的事件都有可能人為惡意造成，而這些 IEs 應在可能遭受惡意破壞的狀況下進行重新審查。

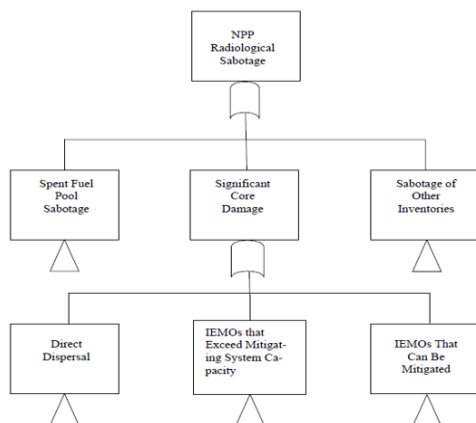
2. 參考其他風險評估文件(Reference to other VAIs)：在其他類似設施的 VAI 分析中所確定的 IEMO 進行審查，最重要的是找出沒有被包含在電廠 PRA 中的 IEMO。
3. 工程評估(Engineering evaluation)：有系統的審查操作系統和安全系統，確認是否有可能使惡意破壞行為為直接性導致或和其他破壞行為一起導致輻射外釋。但此種方法通常不是 VAI 的主要方法，如果 PRA 文件足夠，則此方法應限於確定能提供有用資訊的時候使用，包括分析風險或安全分析文件中未涉及的可能惡意行為的類別。
4. 分析(Deductive analysis)：這一步需考慮 IEMOs 在沒有緩解與預防措施狀況下的輻射外釋情形。安全功能必須確保核物料儲存庫的安全狀態，而惡意行為可能導致這些安全功能喪失，因此必須鑑定導致這些安全功能喪失的行為。此種方法通常也不是 VAI 的主要方法，但此方法主要是可能提供風險或安全分析中未涉及的可能的惡意行為類別。

對於可以緩解 IEMO 的緩解系統，有可能成為恐怖攻擊的破壞對象。因此為了防止 IEMO 的發生，必須讓相對應的緩解系統正常運作，以維持下列 6 點對於防止爐心受損與燃料池破壞的重要安全功能：

1. 控制爐心反應度
2. 移除爐心衰變熱
3. 維持爐心冷卻系統邊界條件(壓力控制)
4. 維持爐心冷卻水存量
5. 移除燃料棒衰變熱
6. 維持燃料池完整性

之後建立各種可能導致輻射破壞的情況，第一步：建立 top-level fault tree 以記錄各類型的破壞攻擊，第二步：建立 the system fault tree，為各個 Front line systems 與其所依賴的 Support systems 的分支。

1. The top event (first level)：Nuclear Power Plant Radiological Sabotage
2. The second level：所有電場中核物料存放點，像是爐心、燃料池
3. The third level：各個存放點所有可能遭遇的攻擊類型(直接與間接)，如下圖一。



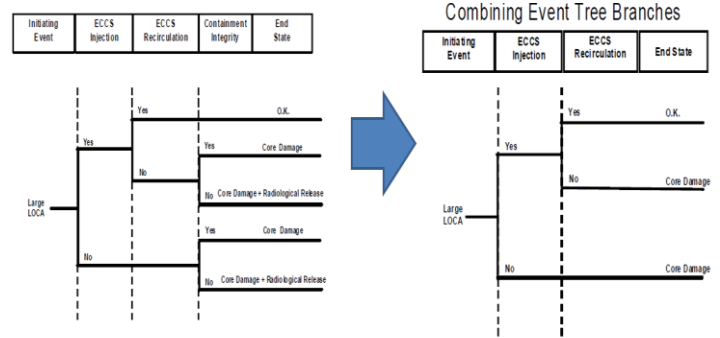
圖一、故障樹範例圖

之後由以下 3 步驟建立電廠的故障樹

Step 1 每個 IEMO 有其相對應的 Safety IE，審查事件樹

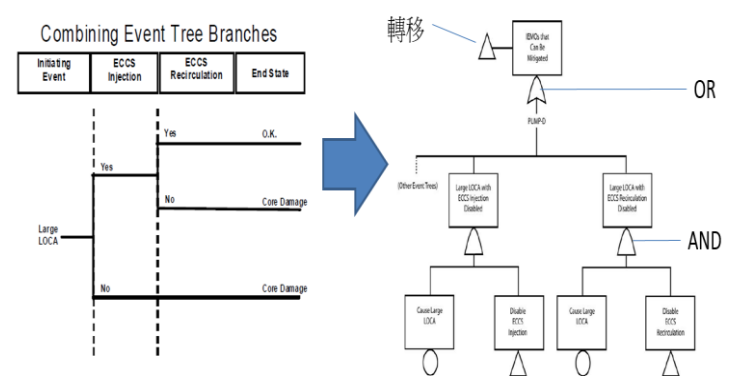
中說明肇始事件對電廠的影響。

Step 2: 藉由移除導致相同結果的分支來簡化 Event tree，如下圖二。



圖二、事件樹簡化

Step 3: 將簡化過的 Event tree 轉換成 Fault tree 的分支，各分支之間用 OR 連接，而分支底下的事件分支用 AND 連接，如下圖三。

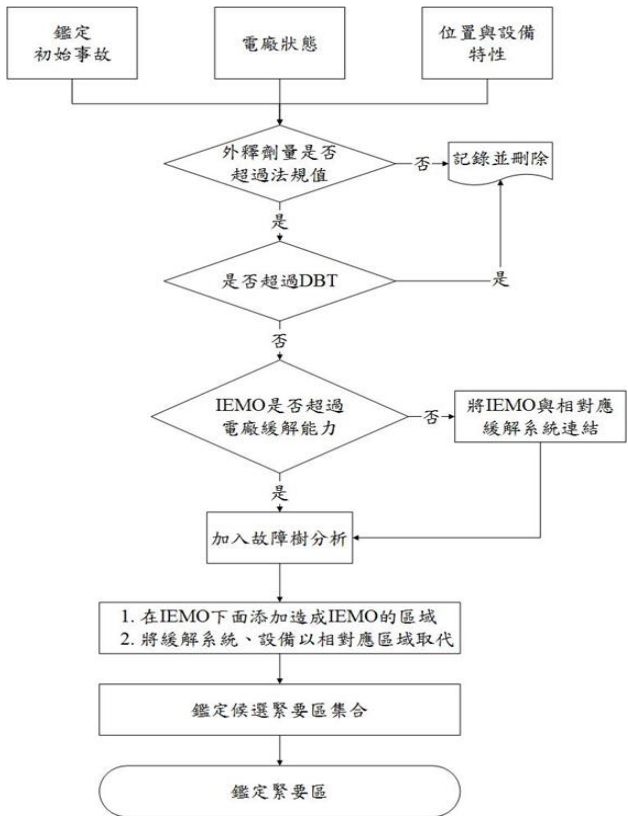


圖三、事件樹轉換

而緊要區域之鑑定流程可根據 Sandia 與 IAEA 報告的建議，統整為以下 7 個步驟，如下圖四：

1. 首先針對各 IE、電廠、設備特性進行分析
2. 針對外釋劑量與 DBT 能力進行 IE 篩選
3. 將 IEMO 與緩解系統進行連結
4. 建立故障樹
5. 將 IEMO 與緩解系統、設備以區域進行取代
6. 鑑定候選緊要區集合
7. 鑑定緊要區

下表一為除役期間可能發生之肇始事件。



圖四、緊要區域鑑定流程圖

表一、除役期間可能之肇始事件

廠內事件	冷卻水流失	
	喪失燃料池冷卻	註二
	喪失廠外電源	註二
	廠內水災	註二
	廠內火災	註二
	非預期臨界	
	重物掉落	註二
廠外事件	飛機撞擊	註二
	海岸侵蝕	
	乾旱	
	廠外水災	
	廠外火災(森林火災)	
	強風或龍捲風	註二
	大霧或鹽霧	
	冰雹	
	大潮、湖面水位過高、河川水位過高	
	夏季高溫	
	冬天溫度過低	
	颶風或颱風	註二
	工業或軍事設施意外	
	山崩	
	雷擊	
	湖面水位過低、河川水位過低	
	隕石或衛星撞擊	
	管線意外	
	強降水	
	廠內儲存的化學物質外釋	

	河川改道	
	沙塵暴	
	湖震	
	地震	註二
	土壤膨脹與收縮	
	風暴潮	
	交通事故	
	海嘯	
	有毒氣體	
	汽機葉片飛射	
	火山活動	
	巨浪	
	生物事件	
	船隻撞擊	
	非安全相關廠房火災	
	天坑	
	重物掉落	註二

註二：無法篩濾之事件，即可能對電廠造成危害，需繼續進一步分析

III. 結果與討論

1. 鑑定肇始事件、電廠、設備特性分析

先從以往的 PRA 報告進行鑑定，其中可包含火災 PRA、地震 PRA 以及其他安全分析中的 IEs，如表二。任何可能隨機發生的事故都有可能 是人為惡意破壞造成，而這些 IEs 應在可能遭受惡意破壞的狀況下進行重新審查。最後可參考其他核設施的 VAI 分析中已確定的 IEMO，並找出未列入上步驟分析的 IEMO。

而電廠正常營運時狀態可能有很多種，可以藉由下有幾點來確保電廠與設備維持在安全狀態：

- a) 反應度的控制
- b) 放射性物質的冷卻
- c) 放射性物質的限制

表二、肇始事件清單

肇始事件	肇始事件 頻率	後果	風險
喪失燃料池冷卻	1.22×10^{-4}	2.4×10^{-2}	2.9×10^{-6}
喪失廠外電源	8.5×10^{-2}	3.5×10^{-5}	3.0×10^{-6}
地震	7.0×10^{-7}	3.6×10^{-10}	2.5×10^{-16}
廠內火災	5.26×10^{-4}	0	0
重物掉落	5.6×10^{-5}	1.0×10^{-10}	5.6×10^{-15}
飛機撞擊	6.3×10^{-9}	5.0×10^{-6}	3.2×10^{-14}
工業或軍事設施意外	3.5×10^{-14}	3.6×10^{-4}	1.3×10^{-17}

2. 根據外釋劑量與 DBT 能力進行 IEMO 篩選

保守狀況假定在沒有實體防護與緩解措施時的外釋劑量，並且根據 10 CFR part 100 進行篩選，同時也透過國家所訂定的劑量進行分類，將沒有超過法規限值的 IEMO 從分析中刪除，同時刪除 DBT 沒辦法處理的 IEMO。這裡採用美國 NRC 的後果限值規定 10^{-6} 為基準進行刪除，如表三。

表三、肇始事件篩選

肇始事件	肇始事件頻率	後果	風險	備註
喪失燃料池冷卻	1.22×10^{-4}	2.4×10^{-2}	2.4×10^{-6}	
喪失廠外電源	8.5×10^{-2}	3.5×10^{-5}	3.0×10^{-6}	
地震	7.0×10^{-7}	3.6×10^{-10}	2.5×10^{-16}	刪除
廠內火災	5.26×10^{-4}	0	0	刪除
重物掉落	5.6×10^{-5}	1.0×10^{-10}	5.6×10^{-15}	刪除
飛機撞擊	6.3×10^{-9}	5.0×10^{-6}	3.2×10^{-14}	刪除
工業或軍事設施意外	3.5×10^{-14}	3.6×10^{-4}	1.3×10^{-17}	刪除

3. IEMO 與緩解系統進行連

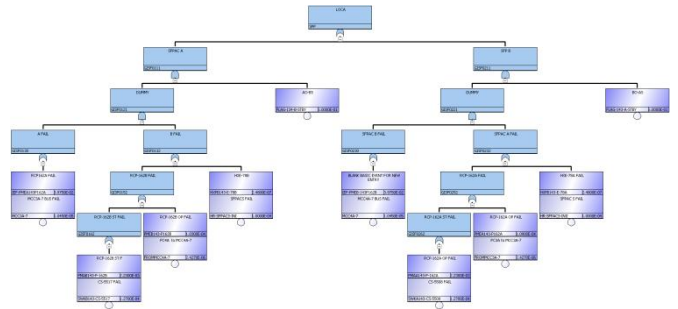
確認 IEMO 發生後是否超出電廠緩解系統，如果超出其緩解能力則直接放入故障樹分析，如果未超出其緩解能力則將各 IEMO 與其相對應的緩解系統進行聯結，並製成依賴關係表(dependency tables)。以喪失燃料池冷卻為例，如下表四與圖五，其結果以再循環泵運轉失敗佔比最高達 43.45%，如下圖六。

表四、喪失燃料池冷卻依賴關係表

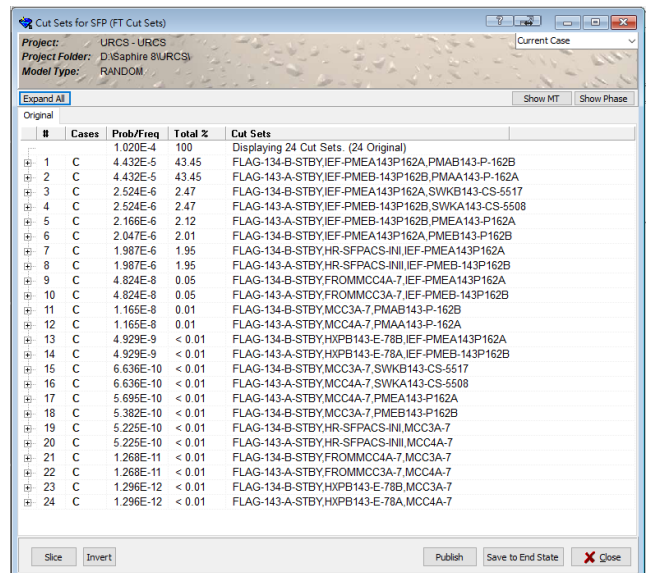
肇始事件	緩解系統	頻率	後果	位置
喪失燃料池冷卻	A BUS 短路失效	1.045×10^{-5}	4.8×10^{-6}	Room A
	B BUS 短路失效	1.045×10^{-5}	4.8×10^{-6}	Room B
	A 電纜斷路失效	2.427×10^{-6}	5.2×10^{-6}	Room A
	B 電纜斷路失效	2.427×10^{-6}	5.2×10^{-6}	Room B
	A 串運轉 B 串備用	5.0×10^{-1}	0	註一
	B 串運轉 A 串備用	5.0×10^{-1}	0	註一
	手動啟動 SFPAC 失效	1.0×10^{-4}	3.8×10^{-3}	CT room
	手動啟動 SFPAC 失效	1.0×10^{-4}	3.8×10^{-3}	CT room
	熱交換器 A 失效	2.48×10^{-7}	2.4×10^{-4}	Room C
	熱交換器 B 失效	2.48×10^{-7}	2.4×10^{-4}	Room D
	再循環泵 A 運轉失敗發生頻率	3.975×10^{-2}	3.0×10^{-5}	Room E
	再循環泵 B 運轉失敗發生頻率	3.975×10^{-2}	3.0×10^{-5}	Room F

再循環泵 A 啟動失敗	2.23×10^{-3}	3.0×10^{-5}	Room E
再循環泵 B 啟動失敗	2.23×10^{-3}	3.0×10^{-5}	Room F
再循環泵 A 管路破裂	1.09×10^{-4}	3.0×10^{-5}	Room E
再循環泵 B 管路破裂	1.09×10^{-4}	3.0×10^{-5}	Room F
手動開關 A 閉合失敗	1.26×10^{-4}	4.9×10^{-6}	CT room
手動開關 B 閉合失敗	1.26×10^{-4}	4.9×10^{-6}	CT room

註一：表示 AB 串運轉備用機率各半



圖五、喪失燃料池冷卻故障樹



圖六、喪失燃料池冷卻故障樹結果圖

4. 將 IEMO 與緩解系統、設備以區域進行取代

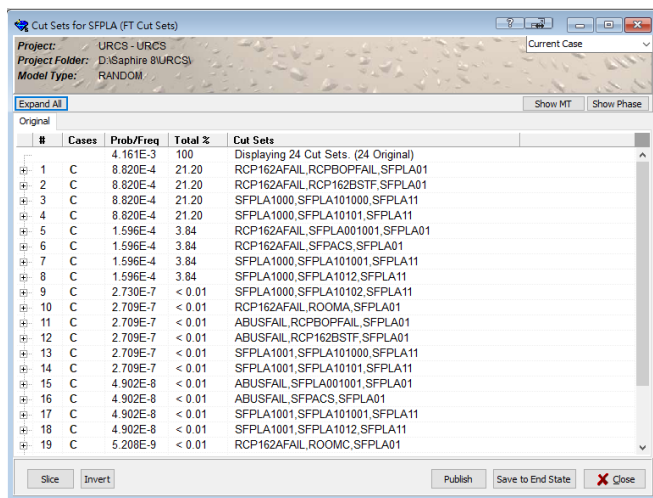
將故障樹中的 IEMO 事件，以其發生的區域或可能造成事件發生的區域取代之。使用以區域取代事件手法，

將系統與設備相對應的區域以及該系統與設備有關聯的區域加入故障樹中系統與設備下方，最後將區域加入依賴關係表中。而設備系統轉換成區域的手法以下提供兩種方法：

- A. 使用 Boolean algebra，將以往 PRA 分析中，位置在同一區域的設備、系統的故障機率，以 Boolean algebra rules 進行運算，將區域內的設備、系統的故障機率轉換成區域遭破壞的機率。此方法有考慮設備故障性的可能，對於緊要區域的鑑定除了考慮恐怖攻擊，還包括了設備、系統、人為因素等各方面考量。因此以往 PRA 分析中較容易故障的設備所在區域，其遭破壞的機率也較高，透過加強實體防護來降低輻射外釋值，以減低輻射後果的嚴重性，是種考慮較為綜合的轉換方法，如下表五其結果顯示如圖七，RCP 所在的 Room E 與 Room F 佔比為 21.2%，但是這是只考慮到喪失燃料池冷卻狀況而已，尚未加入其他緩解系統所在的區域，但可以看出 RCP 所在廠房在燃料池冷卻事件中較為重要。

表五、喪失燃料池冷卻區域關係試算表 A

Room A	1.29×10^{-5}
Room B	1.29×10^{-5}
Room C	2.48×10^{-7}
Room D	2.48×10^{-7}
Room E	4.2×10^{-2}
Room F	4.2×10^{-2}
CT room	4.52×10^{-4}



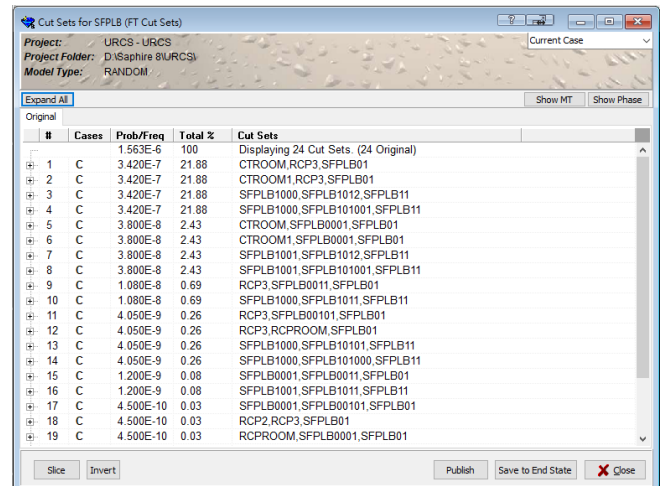
#	Cases	Prob/Freq	Total %	Cut Sets
1	C	8.820E-4	21.20	RCP162AFail, RCPBOPFail, SFPLA01
2	C	8.820E-4	21.20	RCP162AFail, RCP162BStf, SFPLA01
3	C	8.820E-4	21.20	SFPLA1000, SFPLA101000, SFPLA11
4	C	8.820E-4	21.20	SFPLA1000, SFPLA10101, SFPLA11
5	C	1.596E-4	3.84	RCP162AFail, SFPLA001001, SFPLA01
6	C	1.596E-4	3.84	RCP162AFail, SFPLA01, SFPLA01
7	C	1.596E-4	3.84	SFPLA1000, SFPLA101001, SFPLA11
8	C	1.596E-4	3.84	SFPLA1000, SFPLA10102, SFPLA11
9	C	2.730E-7	< 0.01	SFPLA1000, SFPLA10102, SFPLA11
10	C	2.730E-7	< 0.01	RCP162AFail, ROOMA, SFPLA01
11	C	2.730E-7	< 0.01	ABUSFail, RCPBOPFail, SFPLA01
12	C	2.730E-7	< 0.01	ABUSFail, RCP162BStf, SFPLA01
13	C	2.730E-7	< 0.01	SFPLA1001, SFPLA101000, SFPLA11
14	C	2.730E-7	< 0.01	SFPLA1001, SFPLA10101, SFPLA11
15	C	4.902E-8	< 0.01	ABUSFail, SFPLA001001, SFPLA01
16	C	4.902E-8	< 0.01	ABUSFail, SFPLA01, SFPLA01
17	C	4.902E-8	< 0.01	SFPLA1001, SFPLA101001, SFPLA11
18	C	4.902E-8	< 0.01	SFPLA1001, SFPLA10102, SFPLA11
19	C	5.208E-9	< 0.01	RCP162AFail, ROOMC, SFPLA01

圖七、喪失燃料池冷卻區域關係試算結果 A

- B. 只考慮發生在恐怖攻擊時，不考慮設備故障的可能性以及機率，單純考慮當此區域遭到破壞時可能造成的輻射後果。因為分析都是假設在沒有實體防護與緩解措施時遭到破壞，所以輻射後果越嚴重的區域越容易成為恐怖攻擊的目標。因此只考慮當此區域被破壞時可能產生的輻射後果，並將輻射後果較為嚴重的區域列為緊要區域。透過加強實體防護等方法，減少遭到破壞的機率；或是降低輻射外釋值，以減少輻射後果的嚴重性，如下表六其結果顯示如圖八，其計算出來的結果和方法 I 有所不同，CT Room 和 RCP 所在廠房佔比為 21.88%，兩者在喪失燃料池冷卻事件中都很重要。

表六、喪失燃料池冷卻區域關係試算表 B

Room A	1.0×10^{-5}
Room B	1.0×10^{-5}
Room C	2.4×10^{-4}
Room D	2.4×10^{-4}
Room E	9.0×10^{-5}
Room F	9.0×10^{-5}
CT room	7.6×10^{-3}



#	Cases	Prob/Freq	Total %	Cut Sets
1	C	3.420E-7	21.88	CTROOM, RCP3, SFPLB01
2	C	3.420E-7	21.88	CTROOM1, RCP3, SFPLB01
3	C	3.420E-7	21.88	SFPLB1000, SFPLB10102, SFPLB11
4	C	3.420E-7	21.88	SFPLB1000, SFPLB101001, SFPLB11
5	C	3.800E-8	2.43	CTROOM, SFPLB0001, SFPLB01
6	C	3.800E-8	2.43	CTROOM1, SFPLB0001, SFPLB01
7	C	3.800E-8	2.43	SFPLB1001, SFPLB10102, SFPLB11
8	C	3.800E-8	2.43	SFPLB1001, SFPLB101001, SFPLB11
9	C	1.080E-8	0.69	RCP3, SFPLB0011, SFPLB01
10	C	1.080E-8	0.69	SFPLB1000, SFPLB1011, SFPLB11
11	C	4.050E-9	0.26	RCP3, SFPLB00101, SFPLB01
12	C	4.050E-9	0.26	RCP3, RCPROOM, SFPLB01
13	C	4.050E-9	0.26	SFPLB1000, SFPLB10101, SFPLB11
14	C	4.050E-9	0.26	SFPLB1000, SFPLB101000, SFPLB11
15	C	1.200E-9	0.08	SFPLB0001, SFPLB0011, SFPLB01
16	C	1.200E-9	0.08	SFPLB1001, SFPLB1011, SFPLB11
17	C	4.500E-10	0.03	SFPLB0001, SFPLB00101, SFPLB01
18	C	4.500E-10	0.03	RCP2, RCP3, SFPLB01
19	C	4.500E-10	0.03	RCPROOM, SFPLB0001, SFPLB01

圖八、喪失燃料池冷卻區域關係試算結果 B

5. 鑑定候選緊要區集合

目標集：透過位置故障樹分析來獲得最小切割集，每個最小切割集是一組區域，恐怖分子可以透過攻擊這些區域達成目的，而這些區域為電廠必須保護的目標，可透過實體防護或訂定訪問權來進行保護。

6. 鑑定緊要區

最後可由以下幾點進行分析決定哪些區域適合加入緊要區域之中：

- 對安全和緊急應變系統的影響
- 保護此區域的難度
- 保護措施的效率與成本
- 此區域在故障樹分析中出現的頻率
- 發生事故後果的影響

IV. 結論

緊要區域的鑑定可以更有效地將電廠需要保護的區域鑑定出來，並且可以使用最少的人力、物力資源，進行最為完善的保護。而 VAI 與傳統 PRA 最主要不同的地方在於以往 PRA 分析是從設備與系統的故障機率、輻射後果等去計算風險值，這種方法可以得知哪些設備較為重要，發生事故時後果較為嚴重，但是卻無法看出設備所在區域的重要程度，有可能會發生不是重要的區域卻被保護的很完全；而 VAI 則是將設備的風險值、後果、故障機率等融入「區域」用以進行分析，此種方法前半段過程與傳統 PRA 相差沒有太多，也能在過程中得知哪些設備較為重要，可是在最終結果可能無法看出哪個設備最為重要或最容易故障，而此方法卻可以知道哪

個區域是最需要加強保護，同時也是最有可能成為恐怖分子攻擊的目標。

傳統 PRA 與 VAI 最主要差異在於多一個轉換的過程，從以往 PRA 分析中設備與系統的故障機率、風險值轉換成區域的風險值有很多分析方法，根據 Chang-Kue Park 與 IAEA 提出的 Boolean algebra rules，是需要考慮到設備隨機故障的可能性，將各設備的風險值轉換成區域的風險值，因此考慮較為綜合，不單單只是針對恐怖行動；而根據 Sandia 提出的不需要考慮到設備隨機故障的可能性，是把各個設備的後果值轉換成區域的後果值，再進行分析，因為考慮到設備遭破壞時輻射後果較為嚴重，那麼該設備所在區域會較為容易成為恐怖分子攻擊目標，是一種較為針對恐怖行動的分析方法。此兩種方法分析出來的結果都可以當作 VAI 的鑑定參考依據，並進行各個緊要區域的劃分。

而緊要區域的鑑定結果會有 1. 事件依賴關係表 2. 區域依賴關係表 3. 各區域的保安、防護與地理位置，最終得以透過這些結果與 VAI 分析流程來決定緊要區域以及緊要區域的審查。

參考文獻

- [1] IAEA. Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities. INFCIRC/225/Rev. 5; 2010.
- [2] IAEA. Identification of vital areas at nuclear facilities. IAEA Nuclear security series No. 16; 2012.
- [3] Chang-Kue Park. A PSA-based vital area identification methodology development. Reliability Engineering & System Safety; 2003.
- [4] Young Choi. Preliminary Analyses of Vital Area Identification in Nuclear Power Plant. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting; 2007.
- [5] G. Bruce Varnado and Donnie W. Whitehead. Vital area identification for U.S. nuclear regulatory commission nuclear power reactor licensees and new reactor applicants. Sandia National Laboratories; 2008.
- [6] Guidance on how to assess the adequacy of a vital area identification submission. Office for Nuclear Regulation; 2016.
- [7] Jaetoo Ha. The application of PSA techniques to the vital area identification of nuclear power plants. Nuclear Engineering and technology; 2005.
- [8] M. A. Viplak. Vital area identification in the hungarian nuclear facilities. Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki; 2016.
- [9] T. Malachová. Vital Area Identification – State-of-the-Art. Advances in Military Technology Vol. 10, No. 1; June 2015.
- [10] Yoon-Hwan Lee. Importance of location dependencies such as cable and pipe runs when identifying the vital areas. Nuclear Engineering and Design; 2012.
- [11] NS-R-1, Safety of Nuclear Power Plants: Design, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2000.
- [12] John Hockert and David F. Beck, A systematic Method for Identifying Vital Areas at Complex Nuclear Facilities, SAND2004-2866, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, May 2005.
- [13] USNRC, Nuclear Power Plant Security Assessment Format and Content Guide, Washington, DC, September 2007
- [14] Vital area access controls, protection of physical security equipment, and key and lock controls. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION; 1986.
- [15] USNRC, Nuclear Power Plant Security Assessment Format and Content Guide, Washington, DC, September 2007.
- [16] IAEA Safety Standards No. GSR Part 6, "Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety", 2014 Regulatory Guide 1.3, Rev. 2, "Assumptions Used for Evaluating the Potential Consequences of A Loss of Coolant Accident for Boiling Water Reactors", US Nuclear Regulatory Commission, 1974
- [17] Regulatory Guide 1.191, "Fire Protection Program for Nuclear Power Plants During Decommissioning and Permanent Shutdown", US Nuclear Regulatory Commission, 2011/10
- [18] 10 CFR 73.2 Definitions.
- [19] 10 CFR 73.55 Requirements for physical protection of licensed activities in nuclear power reactors against radiological sabotage
- [20] 10 CFR 95, Facility Security Clearance and Safeguards of National Security Information and Restricted Data.
- [21] 10 CFR Part 100, REACTOR SITE CRITERIA, US Nuclear Regulatory Commission
- [22] IAEA, Physical Protection of Nuclear Facilities and Nuclear Material against Sabotage, IAEA Nuclear Security Series No. 13, Vienna (2011).
- [23] IAEA, Amendment to the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material, IAEA International Law Series No. 2, Vienna (2006)
- [24] IAEA, Development, Use and Maintenance of the Design Basis Threat, IAEA Nuclear Security Series No. 10, Vienna (2009)
- [25] 核子反應器設施除役安全策略研究, 2013
- [26] 核能電廠除役作業意外事故安全評估之審查技術研究, 2013
- [27] 除役期間預期之意外事件安全分析, 2016
- [28] A Systematic Method for Identifying Vital Areas at Complex Nuclear Facilities, 2005.
- [29] Safety of Nuclear Power Plants: Design, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2000.
- [30] Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2001

大型活動輻射事件整備與應變作業研究

Research on Response and Preparedness of Large Activity of Radiation Events

計畫編號：MOST106-2623-E015-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：汪毓璋

e-mail：yuhwoei.wang@mas.hinet.net

計畫參與人員：汪毓璋、蔡裕明

執行單位：中央警察大學國境警察學系

摘要

各國之大型公眾活動事件均關注自然災難與人為攻擊所造成之災害風險，有的是直接針對輻射設備或場所、有的是攜帶有害輻射物質進行攻擊。我國於2017年8月舉辦「世界大學運動會」，跨及全台五個縣市及數十個場地。本研究聚焦於確保活動賽事順利，以及強化我國舉辦大型活動之防範輻射事件之應變能力，以確保活動賽事順利圓滿進行。

關鍵詞：大型公眾活動事件、化生放核攻擊、恐怖主義、微型無人飛行器、放射擴散裝置、簡易核子裝置

Abstract

States hold "Major Public Events" has always been concerned about the risk from natural disasters and man-made disaster caused by the attack, either directly or place equipment for radiation, some carrying hazardous radioactive substances attack. Our upcoming "World University Games" in August 2017 and across five counties and dozens of venues. The research focus to ensure the event for a smooth and strengthen our resilience capability to prevent radiation attack and successful conduct.

Keywords: Major Public Events, CBRN attack, terrorism, mini-UAV, Radiological Dispersal Device, Improvised Nuclear Device

I. 前言

由化學、生物、放射以及核子材料構成的大規模毀滅性武器會造成攻擊目標之嚴重傷亡或汙染，且會持續多年無法恢復。過去恐怖份子由於國際組織的全力圍堵，很難取得製作大規模毀滅性武器的技術以及材料，但近年來不受控於正常國家治理的地區越來越多，也給恐怖份子努力取得此等材料或武器之空間。

從風險管理角度言，大型活動賽事之安全維護工作可以區分為賽前、賽事期間與事故應變等不同階段。在賽事前，主要包括第一線應變人員的輻射警示儀器使用訓練，提供應變人員諮詢安全建議的輻射專家，統一指揮管控的應變系統，跨單位間之協調，以及評估威脅、訂定應變計畫、執行輻射基線掃描與熱點辨識等。在賽事期間之安全維護工作方面，包括了人員進入場館與車道輻射篩檢、陸上和海上輻射篩檢、警報觸動後之辨識與人車盤查等多項預防作為。在事故應變方面，則包括立即回應、事件調查與處置、輻射源回收、風險評估與

緩解等各個階段，均必須事先規劃才能較好處理。

II. 主要內容

彙整有關大型活動安全防護工作及應行辦理事項：蒐集國內既有的大型活動安全相關程序與法規等相關資料，並佐以國外有關大型活動輻射事件整備與應變作業之相關資料，進行整理與分析，以規劃及建議執行大型活動之輻射安檢工作之平時整備作業。

蒐集國際有關攻擊事件之資訊與案例：有關發生案例有助具體瞭解此等威脅及問題。因而蒐集美、英等國家及國際原子能總署等之因應以往發生過案例的相關作為，及思考未來因應此等威脅之演化而必須不斷更新之有關輻射安全維護之應有努力、有關運用之設備與含警務人員在內之教育訓練等，並比較分析安全檢查之執行重點並探討有關問題、輻射安檢之策略與未來展望。

研訂大型活動輻射事件應變指導綱要：大型國際活動容易受到恐怖攻擊，且已有證據顯示：恐怖份子會以核子/放射性物質作為攻擊手段，除各種場館將成為恐怖分子目標外，活動過程當中的人群聚集之處，包括：各式活動地點、機場港口、住宿飯店、購物區、媒體區、水電供應設施、公園或開放區域、運輸系統或特定道路等，均可能成為攻擊之標的。而安全單位應該配合輻射管理機關強化對於這些場所之檢查，建立攸關安全之輻射檢查的標準作業程序。

III. 結果與討論

本研究全面檢視與提出有關大型活動輻射事件整備與應變作業及設計出可供運作之指導綱要等之必要內容，但是分析與檢證的過程中仍發現有一些相關與必須持續性關注的議題，值得未來再深入的研究，其中包括了：

一、輻射整備與應變的「縱向到底、橫向到邊」之應變機制操作性設計？

二、實際執行的行政與國安體系之情勢警訊與預警情資分享之具體運作？

三、選舉造勢、民俗節慶、跨年晚會等不同類型之各地方相關活動之更細緻化的應變指導綱要？

四、輻射事件之第一線應變人員之聯合訓練、情節模擬、演訓規劃等之整合性設計與操作？

IV. 結論

國家重要安全事件遭受恐怖攻擊，可讓特定組織或團體順遂其宣傳目的或達到政治目標。而惡意使用典型放射性物質攻擊，約略可以分為三種類型：放射性散佈裝置(RDD)、放放射曝露裝置(RED)、簡易核裝置(IND)。

在全球範圍內，醫療用途的輻射或工業用途的輻射若是管理不良或缺乏有效管控，已經成為民眾或工業化社會可能遭逢輻射武器或髒彈攻擊最可能原因。

有關對於輻射來源之國家立法以及更嚴格之控制與應變計畫，應可以降低輻射攻擊之風險，不要心存僥倖我國不會發生此類事件，或是認為以往沒有發生以後也不會發生，恐怖份子或極端分子並非不會使用輻射物質所製成之爆裂物。

在極端情況下，兩種類型的恐怖攻擊可能會使民眾受到輻射的侵害。第一、恐怖分子可能會在特定地點或人群聚集處施放輻射物質；第二、恐怖分子可能隨機釋放放射性物質，目的在於引起公眾恐懼與恐慌，包括使用傳統形式之爆裂物，或可能散佈放射性物質之「髒彈」，而在放射性物質逐漸擴散情況下，僅有醫務人員或輻射專業人員可辨識或診斷早期輻射效應。

儘管任何放射性物質之攻擊事件，不太會導致大規模放射性傷亡，但是建立輻射安全措施與規劃防範輻射攻擊之應變計畫，就是強化政府能力之必要作為。

參考文獻

- [1] American College of Radiology. Disaster Preparedness for Radiology Professionals. 2006.
- [2] Barnett, Daniel J., Cindy L. Parker, David W. Blodgett, Rachel K. Wierzbica, and Jonathan M. Links. Understanding Radiologic and Nuclear Terrorism as Public Health Threats: Preparedness and Response Perspectives. The Journal of Nuclear Medicine. Vol. 47, No. 10. October 2006.
- [3] Connors, Edward. Planning And Managing Security For Major Special Events: Guidelines for Law Enforcement. U.S. Department of Justice. March 2007.
- [4] DHS. A National Radiological and Nuclear Detection Support Capability.
- [5] Hagby, Moti, Avishay Goldberg, Steven Becker, Dagan Schwartz and Yaron Bar-Dayana. Health implications of radiological terrorism: Perspectives from Israel. Journal Emergency and Trauma Shock. Vol. 2, No. 2.
- [6] Health Physics Society,. Radiation Safety Culture. February 2012.
- [7] Hoffman, A., A. Eisenkraft, A. Finkelstein, O. Schein, E. Rotman, T. Dushnitsky. A Decade after the Tokyo Sarin Attack: A Review of Neurological Follow-up of the Victims. Military Medicine. Vol.176, No. 6. June 2007.
- [8] IAEA. Nuclear Security Systems and Measures for Major Public Events. 2012.
- [9] IAEA. Generic Procedures for Assessment and Response during a Radiological Emergency. 2000.
- [10] IAEA. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. September 2003.
- [11] IAEA. Nuclear Security Culture: Implementing Guide. 2008.
- [12] IAEA. Security of Radioactive Sources. 2009.
- [13] IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. 2011.
- [14] Karam, P. Andrew. Radiological Terrorism. Human and Ecological Risk Assessment. Vol. 11, No. 3. June 2005.
- [15] National Council on Radiation Protection and Measurements. Key Elements of Preparing Emergency Responders for Nuclear and Radiological Terrorism. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements. 2006.
- [16] Radiation Emergency Medical Management. Radiation Control Zones and Perimeters Recommended by Various Agencies for Responding to Radiological Emergencies.
- [17] Radiological Health Department. Radiation Safety Policy Manual. June 1996.
- [18] Shea, Dana A.. The Global Nuclear Detection Architecture: Issues for Congress. CRS Report for Congress. September 23, 2008.
- [19] Turai, István, Katalin Veress, Bengül Günalp and Gennadi Souchkevitch. Medical Response to Radiation Incidents and Radio Nuclear Threats. BMJ. March 2004.
- [20] 汪毓璋。恐怖主義威脅及反恐政策與作為。下冊。台北：元照出版社。2016年5月。
- [21] 潘自強主編。核與輻射恐怖事件管理。北京：科學出版社。2005年12月。
- [22] 國際原子能機構。安全領導與管理，一般安全要求第 GSR Part2 號。2016年11月。
- [23] 國際原子能機構。核安保文化。《核安保叢書》。2012年2月。
- [24] 國際原子能機構。放射源安全和保安行為準則。2004年1月。
- [25] 國際原子能機構。基本安全原則，安全基本法則第 SF-1 號。2007年11月8日。

研析瑞典 SR-site 處置坑道岩力設計前提之訂定原則

Study on the SKB's Design Premises of Underground Openings Related to Rock Mechanics

計畫編號：MOST 106-2623-E-032-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊長義

e-mail：yang@mail.tku.edu.tw

計畫參與人員：吳勁頤、花子鈞

執行單位：淡江大學土木工程系

摘要

本報告主要對瑞典 SKB 在設計 Forsmark 處置場 26 個設計前提內，有關規定地下坑道設施之相關七大類「設計前提」進行研析，計包含處置孔、處置隧道、以及豎井與斜坡道與其他坑洞，以了解其背後訂定該設計前提之考慮根據與論證理由，俾利台灣未來擬定本土性坑道設計前提或設計規範的參考。

成果主要分二：(1)依 SKB 對處置孔、處置隧道與回填材料、及其他聯絡隧道、豎井與封閉等三類地下坑道設施所建議之「設計前提」，彙集分析 SKB 有關岩石工程方面之訂立的立論與邏輯；並以相關條文[解說]方式條列於該「設計前提」之後，俾利未來形成設計規範及解說。(2)檢視我國目前既有高放條例或規定之不足，例如「高放放射性廢棄物最終處置設施場址規範」、「高放放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，並初步建議了研訂本土台灣地區處置場址地下坑道七類「設計前提」雛型之方向。

關鍵詞：Forsmark 處置場、設計前提、地下坑道設計、台灣潛在場址。

Abstract

This research studies the key points on SKB's determining the design requirement and criterion concerning underground design at Forsmark. The design premises for deposition hole, deposition tunnel and other openings are studied. The main conclusion is divided into two parts. Collation and study on the SKB technical reports of excavation and backfill for underground designs. The key points in verifying the safety function and determining the safety function criteria of SR-site are listed and explained in the form of engineering standards. A reference example to build up the regulations for potential site Taiwan is displayed. This will accelerate our native premises of underground designs.

Keywords: Forsmark repository, design premises, underground design, site Taiwan.

I. 前言

在瑞典的 SR-site(at Forsmark)場址研發及設計研究報告最豐富，目前該設計也趨進入成熟的申照主要審查階段(Main review phase)；而在台灣，若高放廢棄物未來決定在本土境內處理，設計觀念勢必也會模仿瑞典 SR-site 的設計，因此及早深入了解瑞典 SR-site(Forsmark)

場址之設計是目前最佳的捷徑。

但誠如所知，台灣地質條件特殊如地震活躍、地質弱帶發達等等均不同於北歐板塊，在設計上可能並無法全盤移植至本地。由瑞典 SR-site 的設計得知，處置場地下坑道的規劃、設計、建造施工及維護，均須是在滿足「設計前提(Design Premises)」之規範下，進行調整設計與滿足規範施工要求；而「設計前提」(或設計導則)的擬定，除須遵守政府的相關法規外，更須根據於場址之工程性質報告(SER, Site Engineering Report)的了解程度，而訂定之。

SKB 就是以 D1 階段的設計(2004)為基礎，在 2006 年經過初步安全評估後—SR-Can (SKB, 2006)，回饋而改進形成了 D2 階段的設計(SK, 2007)。故真正了解其「設計前提(Design Premises)」背後的演變理路及其抉擇邏輯，實是我國目前亟需事先預備的工作。

因此，本報告將針對瑞典 SKB 在設計 SR-site 處置場研究技術報告中，有關處置地下坑道(主要針對處置隧道、處置孔)之相關岩石工程方面的「設計前提」規定進行研析，期望了解其訂定的根據與論證及其後續修訂的原因，俾利我國未來在擬定本土處置場之坑道設計前提(或設計導則)、審查重點、或施工對策的參考。

II. 主要內容

「設計前提」是規範高放處置場各部位構件設計的主要根據，例如設計廢料罐、緩衝材、處置孔、處置隧道與回填料、及其他封閉之參考設計例(reference case)。每一條設計前提(導則)皆有其立論的背景與依據，各設計前提之間亦可能相關，其內涵內實是包含各類「要求(requirements)」與「限制(restrictions)」，主要目的旨在確保多重障壁系統之長期安全功能。

SKB 針對在 Forsmark 場址 KBS-3V 處置場的設計準則—設計前提的發展，截至目前訂立了 26 個(SK, TR- 09- 22)。其中有關地下坑道長期安全(long-term safety)之設計前提(或設計導則)，以下七個與岩石工程有相關的「設計前提」：

[設計前提 1] 選擇處置場之深度與面積

處置場的體積需提供滿足指定處置孔數量之需求，KBS-3 處置場之深度規定至少須 400 m。

[設計前提 2] 減輕地震的災害

處置孔不允許設置於距離跡長超過 3

km 之變形帶 100 m 以內。處置孔位不可位在可能產生超過廢料罐抗剪能力之處。為達成此一目的，處置孔位之選擇需參照擴大全圓周交會準則(EFPC, Extended Full Perimeter Criterion)。位置若受剪切作用，則其剪力不得超過廢料罐之抗剪強度。

[設計前提 3] 可接受的場址熱狀況

慎選緩衝材料幾何(例如空隙)、含水量及處置孔的間距，以使緩衝材料溫度皆不超過 100 °C (廢料罐最大熱釋出限定為 1,700 W)。

[設計前提 4] 處置隧道的開挖損傷區(EDZ)

必須限制開挖導致處置隧道及跨越隧道地面的損傷，不可導致沿隧道重要區段(至少 20~30 m)之有效流通係數高於 $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

[設計前提 5] 處置隧道除外之豎井、坡道、岩石坑洞及隧道之開挖損傷區(EDZ)

在頂部密封層高程以下($Z = -200 \text{ m}$)之隧道、豎井、坡道的回填材料及他們周圍的開挖損傷區之整體有效連通水力傳導係數須低於 10^{-8} m/s 。但是，當隧道或坡道穿越高導水帶時不須維持此一限制。在中央區(central area)沒限制水力傳導係數。

[設計前提 6] 處置隧道的灌漿及加固

只允許使用 $\text{pH} < 11$ 的低酸鹼值水泥材料。不可有連續性噴凝土，也須避免隧道周邊有連續性的灌漿孔配置。

[設計前提 7] 處置隧道除外之鑽孔、豎井、坡道、岩石坑窖及隧道之灌漿

在頂部封阻區高程以下($Z = -200 \text{ m}$)只允許使用 $\text{pH} < 11$ 的低酸鹼值水泥材料。

本計畫以處置孔、處置隧道與回填材料、及其他聯絡隧道、豎井與封閉的有關岩石力學之設計前提(或設計導則)為研析對象，其設計亦主要要求須足以滿足 THMC 四方面安全條件(SKB TR-09-22)。其中本章主要就先就處置孔(deposition holes)岩石力學相關之 T、M、H-方面設計前提與其考量重點討論。舉例如下：

完成針對SKB所導出之設計前提暨解說

SKB 總結，發生地震剪位移大小與處置孔的位置、及其距主要變形帶的距離有密切關係，須有一套篩選準則。因此演化形成 SKB 導出訂定下列二個「設計前提(導則)」，於處置場設計時須被要求：

Design premise ❶：

「處置孔位不允許靠近跡長大於3km之主要變形帶100公尺以內。」

Design premise ❷：

「處置孔應選擇在不可能發生剪動量超過廢料桶之容許抗剪量。為達到這目的，孔位之選擇應採用擴充全圓周交會準則(EFPC)。」

[解說1] SKB指明此二個規則待真正建造後實際開挖狀況，也有可能進一步修正。

[解說2] (1) FPC 當裂面穿越處置孔、並且切過處置隧道整個圓周，其所被通過的處置孔孔位應放棄使用；

(2) EFPC 同時通過四個或四個以上處置孔的裂隙，其所通過的處置孔均應放棄使用。

在考慮裂面之滲流流量方面，目前 SKB 利用 FPC 準則做為篩選具高滲流流量之處置孔須以放棄。

[解說3] NEA 的國際審查團隊(IRT, International review term) 審查 SKB 計畫結果(NEA/RWM/PEER, 2012)認為，據現場狀況，達西流量大於 0.01 m/yr 的裂面幾乎應已被 EFPC/FPC 準則所篩出而放棄。

[解說4] 目前處置孔接受/放棄標準包括：基於以下四點，瑞典 SRK 顧問公司尚不清楚處置孔接受/放棄標準(EFPC)將如何使用：(1)量化裂隙延伸的程度；(2)判釋盲斷裂構造，即未能於處置孔觀察到，但大小又於臨界範圍內；(3)判斷連通性，當 EDZ 被考慮，縱使處置孔的裂隙不相交，但流體仍可經由 EDZ 相交；(4)識別坑道壁和/或不同的處置孔中的裂隙是否為同一裂隙。

SRK 顧問公司認為放棄處置孔的方法仍需要進一步改進。識別盲斷裂構造，量化其延伸程度，確定其水力特性，以及過去和未來的演變，都需要努力開發可靠的技術並進行測試。EFPC 的放棄處置孔準則，需要配合其它技術(如地球物理學)，其中，透地雷達可能會很有用。

[解說5] 值得一題，在日本，規定處置坑應離開長度 10km 以上的主要斷層兩側一定距離(斷層長度/100)之外。所以，即是離主要斷層兩側 100m 以上。(註解：在台灣，查知斷層長度 10km 約可產生芮氏地震規模 6.2 地震、斷層長度 3km 則約可產生芮氏地震規模 5.0 地震。)

在台灣之訂定方向 ② >

A、國內既有管理高放射性廢棄物相關法規：

「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」	
第三條 場址不得位於活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區	
(一)活動斷層之主要斷層帶兩側各一公里及兩端延伸三公里之帶狀地區。	
第十四條 場址不得位於其他依法不得開發之地區，其範圍及認定標準依各該其他法律之規定。	

「建築技術規則」建築設計施工篇	
第十三章 山坡地建築	
第一節 山坡地基地不得開發建築認定基準	
三、活動斷層：依歷史上最大地震規模(M)劃定在下表範圍內者：	
歷史地震規模	不得開發建築範圍
$M \geq 7$	斷層帶二外側邊各一百公尺
$7 > M \geq 6$	斷層帶二外側邊各五十公尺
$M < 6$ 或無記錄者	斷層帶二外側邊各三十公尺內

B、建議研訂方向：

- SKB規定處置孔(註：不是處置場址)不允許設置於距離跡長超過3 km以上之變形帶100 m之內；正巧與我國「建築技術規則」內山坡地建築該章，規定建築物基地距地震規模 $M \geq 7$ 的活斷層之邊緣線、或斷層線兩側各100公尺，兩者一致。但是，處置孔功能設計要求實應更嚴格，建築物功能所考慮壽命遠低於處置孔功能性之要求期限。
- 若以台灣地震統計資料，探究SKB所採定跡長超過3 km之變形帶或斷層帶，查圖1內知大約是可以產生芮氏規模 $M=5$ 之地震(相當於地震矩規模 $M_L=5.1$)。表示SKB關切處置孔之安全應考慮地震規模 $M=5$ 以上之地震。地震規模 $M=5$ 在北歐發生次數可能已屬少見，但是在台灣則甚為頻仍，值得注意此二地域性差異。
- 北歐兩個核廢料處置先進國家，顯示目前仍對未來地震引致裂面錯移問題之不確信性，此一議題卻是台灣地區一定必須面對的嚴重問題。故SKB專家於台電同儕審查研討會(台電公司，2015)建議與期望，台灣可利用本地具有多震特性優勢，未來能於此一地震傷害議題上對國際處置設計作出具體貢獻。
- 針對處置坑，第一步我們應針對在台灣之地震資料，檢視(1)斷層長度3km以上的地震斷層是否也顯示可錯動超過10cm 位移量(或有保守設為5cm)、抑或(2)是否有鄰近地震斷層之大型裂面(或地底下坑道)被觸動錯位的記錄、及其剪動位移量的數據，據以判定我國本土應該退避的關鍵性裂面之尺度(CFS, critical fracture size)；關鍵性裂面尺寸通常以相當於圓形裂面面積之等效半徑來表現。
- 舉例，如由下圖2根據統計震央在台灣島內數個地震規模 $M > 5$ 以上之地震斷層位移資料，常可見到一次地震位移錯動超過10cm以上的地震。例如921地震中車籠埔斷層面就錯動高達接近

8m。即使從圖2就可進一步瞭解 $M=6$ 約可觸發31cm斷層位移、或 $M=6.5$ 也約可觸發100cm斷層位移量之基本認知。惟此例，是如同假設地震斷層直接切過處置孔。國內也尚無大裂面(fractures)被附近地震觸發位移量之實際統計資料。

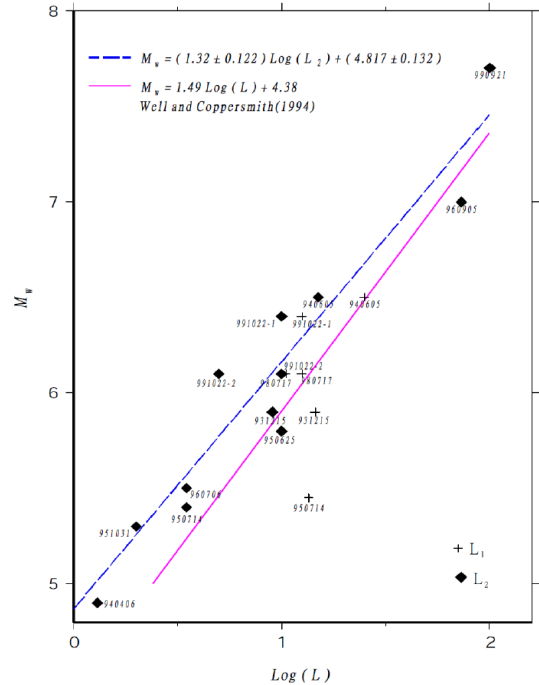


圖1. 斷層長度與地震規模統計關係

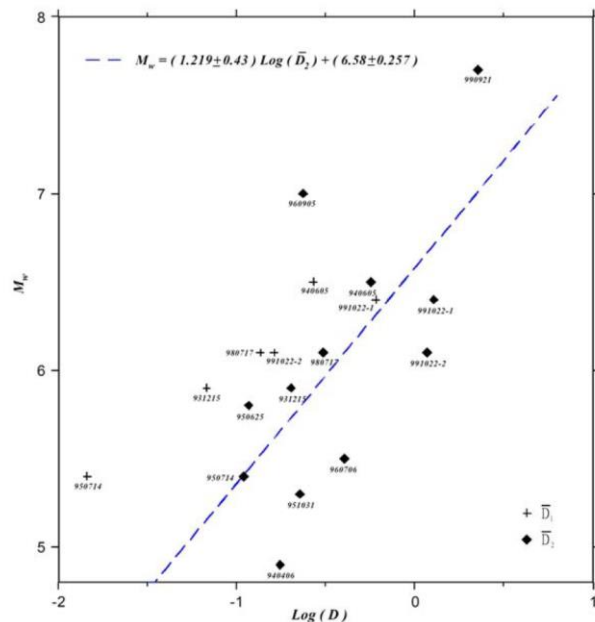


圖2. 台灣地震規模與斷層錯動位移統計關係

III. 結論

處置場設計是涉及(1)一個大範圍的岩體、(2)需評估熱的作用、(3)坑道建造標準之嚴格要求、(4)考慮很長久的設計，諸特性是在一般土木工程不會遇到的，因此學習先進國家之經驗是最有效益一途。

1. 地質處置之多重障壁旨在保護處置孔內的廢料罐之長期安全，因而要求廢料罐(Canister)須具備三項安全功能準則：

[C1]：遭腐蝕後之廢料罐銅壁厚度尚需大於零；

[C2]：廢料罐之強度大於等向靜態荷重；

[C3]：廢料罐之破壞強度極限高於剪應力。

而欲達成上述三項廢料罐安全功能，則有賴其外部之緩衝材、處置隧道內回填材、及岩盤地質圈等發揮圍阻及保護效果。

2. SKB 針對在 Forsmark 場址 KBS-3V 處置場的設計有七個「設計前提」與岩石工程相關是：

[設計前提1]選擇處置場之深度與面積

[設計前提 2] 減輕地震的危害

[設計前提 3] 可接受的場址熱狀況

[設計前提 4] 處置隧道的開挖損傷區(EDZ)

[設計前提 5] 處置隧道除外之豎井、坡道、岩石坑洞及隧道之開挖損傷區(EDZ)

[設計前提 6] 處置隧道的灌漿及加固

[設計前提 7] 處置隧道除外之鑽孔、豎井、坡道、岩石坑窖及隧道之灌漿

3. 「設計前提」的內涵實際包含 (1)「要求(requirements)」、(2)「限制(restrictions)」。在設計一個最終處置場設施的位址選定與運轉過程可分為：可行性研究階段、場址調查階段、建造與細部特徵化階段、試運轉階段、常規運轉階段。評估最終處置設施建設的可能性，須依賴在場址調查階段(SI, Site Investigation phase)的資訊。場址調查階段(SI)會連結到對應的「設計階段(design step)」：通常一個新的設計，是立基於前一階段的設計產出、以及更新後的場址描述，形成一種迭代推演。目前，SKB 已完成第二版地下坑道設計前提 UDP/D2 (Underground Design Premises/ D2)」，未來藉在地下開挖觀察經驗，「設計前提」也必隨之改善更新。

經過本計畫之執行，主要透先由瞭解 SKB 所訂立的「設計前提」重點及其原因，再針對現有對場址台灣之瞭解與有限數據之下，建構出場址台灣(site Taiwan)地下坑道設施之岩力方面的「設計前提」暨[解說]條文之雛型。本報告分別依 SKB 對 (1)處置孔、(2)處置隧道與回填材料、及(3)其他聯絡隧道、豎井與封閉等三類地下坑道設施所建議之「設計前提」，彙集分析 SKB 有關岩石力學方面之訂立的立論與邏輯。

本報告雖已初步建構地下坑道設施之「設計前提」暨條文[解說]之雛型。然因計畫執行期間有限以及尚未有組成專家顧問群，目前僅以個人之能力撰寫勾勒出台灣地區「高放地下坑道設計暨解說」之該有輪廓樣態，愈早開始越佳。

參考文獻

- [1] Falth, B. and H. Hokmark (2006), Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modelling, SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [2] Munier,R.(2006), Using observations in deposition tunnels to avoiding intersections with critical fractures in deposition holes, SKB R-06-54, SKB.
- [3] SKB(2007), Final repository facility-Underground design premises/D2, SKB R-07-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [4] SKB(2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark –Main report of the SR-Site project (Volume I), Technical note TR-11-01, SKB.

用過核子燃料重要核種於深地層處置之物種分析與遷移機制研究—重要核種遷移參數實驗之模式化方法研究及物種遷移機制分析

On the study of modelling for the radionuclide migration experiment methods and the nuclide-species transport mechanism

計畫編號：MOST 106-NU -E-007-007 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蔡世欽博士

e-mail：sctsai@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

本研究以離子層析儀分離及分析 I^- 及 IO_3^- 離子，並以三種擴散模型分析 I^- 及 IO_3^- 離子的擴散係數實驗。研究結果顯示：離子層析儀可以有效分離及分析 I^- 及 IO_3^- 離子，檢量線的 r^2 值達 0.99 以上。三種模式得到 I^- 離子的有效擴散係數 (De) 分別介於為 2.87×10^{-12} 至 $4.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 之間，差距在一個級數之內相當接近，確認不同模型所獲得之擴散參數有相當的一致性。 IO_3^- 離子的結果雖然超過一個級數，然後續應用高效率離子層析儀及感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES) 進行比對，提高分析的精準度後應可降低此差距。這些結果對於高放射性廢棄物處置安全評估使用核種遷移參數時提供十分重要的參考依據。

關鍵字：高放射性廢棄物、碘及碘酸根離子、穿透擴散、遷移

Abstract

The results of this study showed that Ion Chromatography (IC) can successfully separate and quantitatively analyze I^- and IO_3^- ion, with r^2 regression coefficient above 0.99. In addition, the effective diffusion coefficients of I^- ions for three different models of through diffusion are between 2.87×10^{-12} to $4.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, which were of a similar order of magnitude. The difference of effective diffusion coefficients of IO_3^- ions for three different models excess one order of magnitude. The discrepancy could be reducing by enhancing the efficiency of IC and applying Induced Couple Plasma Optic Emission Spectrometer (ICP-OES) as comparison. These results showed very important fundamental characters of nuclides/mineral reaction, which would be valuable references for the usage of radionuclide migration parameters to the evaluation of high-level radioactive wastes disposal safety.

Keywords: HLW, Iodine Iodide species, diffusion, migration

1. 前言

核種遷移的研究，是用過核子燃料(Spent Nuclear Fuel)或高放射性廢棄物(HLW)最終處置中相當重要的

一環。目前我國用過核子燃料的政策是直接處置，然而不排除再處理的方案。無論是用過核子燃料或是高放射性廢棄物，在目前世界各先進國家均採深層地質處置(deep geological disposal)的觀念來規劃最終處置設施，藉由多重障壁 (multiple barriers) 的觀念，包括廢料本身的包封、廢料罐、周圍的緩衝回填材料、處置場之工程結構體、處置場所在之母岩、及介於處置場母岩與人類生活環境間之圍岩等，有效封阻用過核子燃料中的放射性核種的外釋與遷移。核種的放射性隨著時間而遞減，在達到與我們的生活圈之前，便已衰變至可接受的無害程度。而各障壁實際能影響核種遷移及遲滯的功能，就成為處置時安全評估的重點。

用過核子燃料的重要核種為 I-129 (半化期 1.6×10^7 年)，Cs-135 (半化期 2.3×10^6 年)，Tc-99 (半化期 2.11×10^5 年)，Se-79 (半化期 $< 6.5 \times 10^5$ 年)等長半化期的分裂核種，以及 U、Pu 及其他的超鈾核種如 Np 及 Am 等。I-129 在地下水環境中主要是 I^- 及 IO_3^- 兩種離子物種型態。一般地下水環境中主要是以 I^- 形式存在， IO_3^- 大致存在於富含氧氣及高鉀、鈉離子濃度地下水中。無論 I^- 或 IO_3^- 兩種離子，均是陰離子的型態，而一般的地質介質材料其組成礦物以鋁矽酸鹽為主，在地下水環境中材料表面電荷分佈是負電，因此從表面電性互斥的性質來看，大部分的地質介質材料均不易吸附 I^- 或 IO_3^- 離子。然而 Kaplan 等人發現 I^- 及 IO_3^- 離子會被土壤中某些有機質包圍形成特殊物種，往往成為土壤中重要的碘離子吸附成分。Fuhrmann 等人研究則以 X 光吸收邊緣結構光譜 (X-ray Absorption Near-Edge Structure, XANES) 分析碘離子的不同電子價數，確認碘的吸附物種，以延伸 X 光吸收精細結構 (Extended X-ray Absorption Fine Structure, EXAFS) 來分析碘離子吸附位址周圍的原子組成，來進行確認。

在遷移部分，一般深地層處置設施環境下地下水的流速是非常低，就緩衝材料部分更是如此，因此研究 I-129 遷移主要由擴散作用及固相介質的吸附來決定。由於擴散速度十分緩慢，早期的研究大多將岩石樣品予以粉碎後進行擴散實驗，雖可縮短實驗時間快速得到相關的參數，然而粉碎試體的結果外推至真實處置環境，其適用性受到相當的挑戰。岩石樣本必須在保持原樣的情況下採集製成實驗試體，緩衝回填材料則需以模具壓製成密度 2000 kg/m^3 以上，進行擴散實驗，方能獲得具有代表性的擴散係數及遲滯因數。擴散係數可以直接用來預估碘核種在地質環境的遷移速度，遲滯因數是顯示碘核種的遲滯效果，可以與吸附實驗所獲得的 Kd 值做比較探討。

綜合上述的文獻回顧與國際核種遷移研究趨勢，本研究以碘離子為標的，提出三年的研究計畫，來探討重要核種遷移參數實驗之模式化方法研究及物種遷移機制分析。圖 1.1 為整體高放射性廢棄物核種遷移實驗實施方法之規劃。其中，本計畫即是實驗方法標準化的精進及固相吸附物種的分析這兩項研究。本研究計畫為三年整合型研究計畫，第一年（106 年）除放射性核種之物種分析資料與國際文獻的蒐集與研析以外，以碘核種遷移實驗參數模式化為目標，針對 TD 穿透擴散實驗方法進行精進及驗證。室內實驗室量測核種擴散係數大都是以穿透擴散實驗(through-diffusion, TD)為主，這個方法可以量測核種在多孔地質材料中的有效擴散係數 D_e 及遲滯因數，然而整個穿透擴散過程需要長達一年以上甚至數年，方能得到穩態擴散曲線進行分析，對於 U, Np, Pu, Am, Cm 等鈾系核種，這些核種價數多，對氧化還原環境極為敏感、生成的化合物形態複雜且很難量測，遷移速度又極為緩慢，在維持實驗條件及度量方面都會面臨困難。日本原子力研究開發機構(NUMO)在平成 24 年(2012 年)的研究報告中，彙整核種遷移參數實驗及模式研究實施方法，提出參數實驗方法精進與核種遷移機制分析的整合建議，如圖 1.2 所示。圖中所提擴張型 TD 及擴張型 RD 就是修正後的 TD 擴散實驗技術。Zhang, Chen 等人則進一步提出理論模式及解析解。本研究整合這些解析解及其擬合分析，先以碘離子的擴散實驗來予以驗證。因為 I-129 (半化期 1.6×10^7 年)是用過核子燃料中的重要核種。I-129 在地下水環境中主要是 I^- 陰離子型態。由於擴散實驗的注入槽或擴散槽有固定濃度(Constant Concentration, CC)或可變濃度(Variable Concentration, VC)兩種條件，因此本研究設計三種不同模型(即 CC-CC、CC-VC 和 VC-VC)之擴散實驗，分別探討 I^- 在壓實膨潤土塊中的擴散參數，並對不同模型之結果進行交互比對與驗證。

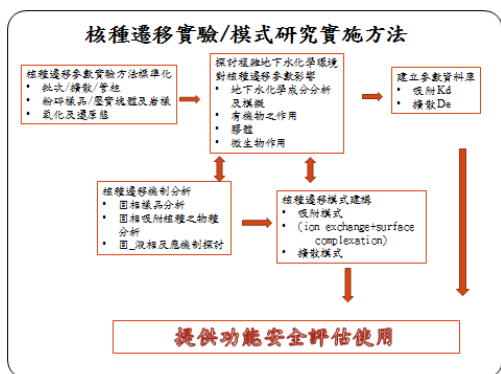


圖 1.1 整體核種實驗實施方法之規劃

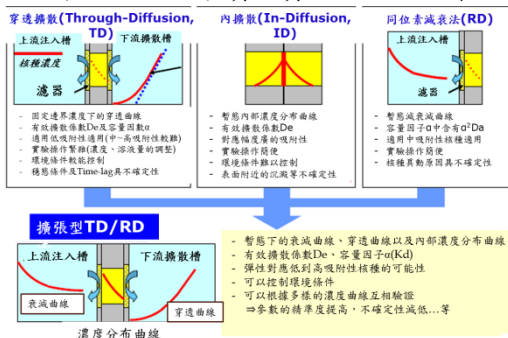


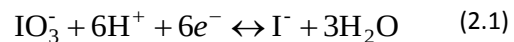
圖 1.2 日本 NUMO 報告建議之精進及整合核種擴散實驗方法

II. 主要內容

2.1 I^- 及 IO_3^- 離子分析

離子層析儀能分析的離子有：鹵素，有機酸，有機鹽類，磷酸鹽，胺等，幾乎涵蓋所有的陽離子及陰離子，其特點包括：(1) 離子間不會互相干擾而影響檢出之正確性；(2) 可同時分析多種離子，並進行定性及定量分析；(3) 儀器檢測的靈敏度高 (10 ppb 以下)，適用濃度範圍廣 (0.001~103 ppm)；(4) 分析速度快，每個離子不超過兩分鐘；(5) 所使用之溶媒為一般無機溶劑，費用經濟。本計畫因此採用離子層析儀來分析 I^- 及 IO_3^- 離子兩種不同價數的碘物種。

本實驗分別以 KI 及 KIO₃ 來備製 I^- 及 IO_3^- 載體。 I^- 及 IO_3^- 載體配置成 $10^{-3} \sim 10^{-7} M$ 等不同濃度，利用高效率離子層析儀(HPIC)分離不同價態碘離子物種，將試樣注入迴圈。以離子強度為 20 mM、pH=7 的 $NH_4H_2PO_4$ 與 $(NH_4)_2HPO_4$ 混合緩衝液，以 1 mL/min 速率將試樣流洗出來，並以電導度計紀錄結果，接著以分液收集器收集後，分別由電導度計結果及自動加馬計數結果，分析是否有兩個尖峰流出，以確定 I^- 及 IO_3^- 離子的分離效果。 I^- 及 IO_3^- 離子的氧化還原反應式如下：



I^- 離子溶液可以在常態下保存， IO_3^- 溶液以 NaOH 將 pH 調至 9，並添加 H_2O_2 氧化劑以避免實驗中 IO_3^- 離子還原為 I^- 離子。

2.2 三種擴散模型之穿透擴散實驗及分析模式

本研究參考 Chen 等人提出修正的穿透擴散實驗及分析模式，此模式包括三組不同的起始及邊界條件如圖 2.1，其中，

- 左側及右側濃度區仍維持固定濃度，但是左側高濃度加入衰變因素修正，稱之為 CC-CC (Constant Concentration- Constant Concentration) 模式。
- 左側濃度區仍維持固定濃度，但是加入衰變因素修正；右側低濃度區隨著時間增加濃度漸增，稱之為 CC-VC (Constant Concentration- Variant Concentration) 模式。
- 左側濃度區隨實驗時間濃度減少，右側低濃度區隨著時間增加濃度漸增，稱之為 VC-VC (Variant Concentration- Variant Concentration) 模式。

代入上述三個模式的起始及邊界條件，經過拉普拉斯轉換等方法，可分別解出高低濃度區的濃度隨時間變化函數 $C_A(t)$ 及 $C_B(t)$ ，將這兩個濃度隨時間變化作圖，可推算出對應的擴散係數如表 2.1。

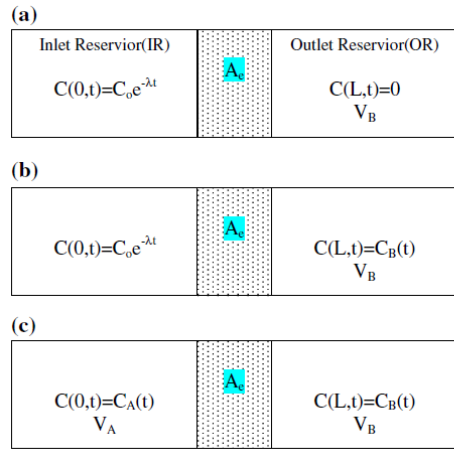


圖 2.1 穿透擴散實驗三組不同的起始及邊界條件修正分析模式

表 2.1 三組穿透擴散分析模式對應的解析解及擴散係數

Diffusion model	Equation	Plotting	D
CC-CC model	$\frac{C_t}{C_0} = \left(1 - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \frac{n\pi x}{2L}}{\sin^2 \frac{n\pi a}{2L}}\right) e^{-\lambda t}$ $\frac{C_t}{C_0} = \frac{A_0}{V_A} \left\{ -\frac{1}{2} e^{-\lambda t} + \frac{A_0}{2\sqrt{D\lambda}} \left[\coth\left(\frac{L}{2}\sqrt{\lambda}\right) - \tanh\left(\frac{a}{2}\sqrt{\lambda}\right) \right] - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda n^2} e^{-\left(\frac{n\pi a}{2L}\right)^2 \lambda t} \right\}$	CC-CC method	$D = -\frac{a^2 V_A \lambda}{4C_0}$ $\frac{C_t}{C_0}$ v.s. $e^{-\lambda t}$
CC-VC model	(1) Semi-analytical solution $\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{p+1} \left[\cosh(\alpha x) - \frac{M \sinh(\alpha L) + \cosh(\alpha L)}{M \cosh(\alpha L) + \sinh(\alpha L)} \sinh(\alpha x) \right], \frac{V_A}{C_0} = \frac{M}{p+1 M \cosh(\alpha L) + \sinh(\alpha L)}$ where $M = \frac{A_0 \sqrt{D\lambda}}{V_A(p+1)}$ and $m = \sqrt{\frac{D\lambda}{p+1}}$ (2) Analytical solution $\frac{C_t}{C_0} = e^{-\lambda t} + \frac{A_0}{V_A} \left[\gamma_1 - \gamma_2 \right] - \frac{1}{2} \left[\gamma_1 + \gamma_2 \right], \frac{C_t}{C_0} = e^{-\lambda t} + \frac{A_0}{2\sqrt{D\lambda}} \left[V_A + 2V_B \right] \left[\gamma_1 - \gamma_2 \right] - \frac{1}{2} \left[\gamma_1 + \gamma_2 \right]$ where $\gamma_1 = e^{-\left(\frac{L}{2} + \frac{a}{2} + \frac{1}{\sqrt{D\lambda}}\right)^2 \lambda t}, \gamma_2 = e^{-\left(\frac{L}{2} + \frac{a}{2} - \frac{1}{\sqrt{D\lambda}}\right)^2 \lambda t}$, and $\beta = \sqrt{\lambda^2 (V_A^2 + 4V_B^2)}$	CC-VC method $\ln \left[1 - \frac{C_t}{C_0} e^{\lambda t} \right]$ v.s. t	$D = -\frac{a^2 \lambda}{4C_0}$
VC-VC model	(1) Semi-analytical solution $\frac{C_t}{C_0} = \frac{M_1 V_A}{(p+1) M_1 V_A - \frac{1}{2} (p+1) M_1 V_B} \frac{V_A}{V_A} = \frac{V_A}{(p+1) M_1 V_A - \frac{1}{2} (p+1) M_1 V_B} [M_2 \cosh(m_1 L) + \sinh(m_1 L)]$ where $M_2 = \frac{M_1 \cosh(m_1 L) + \sinh(m_1 L)}{M_1 \sinh(m_1 L) + \cosh(m_1 L)}, M_1 = \frac{A_0 \sqrt{D\lambda}}{V_A(p+1)}$ and $m_1 = \sqrt{\frac{D\lambda}{p+1}}$ (2) Analytical solution $C_t = \frac{V_A V_B}{V_A} \left\{ e^{-\lambda t} + \frac{(\gamma_1 - \gamma_2) \left[-\sqrt{D\lambda} V_A + 2\sqrt{D\lambda} V_B - V_A V_B + V_A V_B^2 - 2V_A V_B^2 \right] + \beta (\gamma_1 + \gamma_2) [V_A + V_B]}{2\beta V_A} \right\}$ $C_0 = \frac{V_A V_B}{V_A} \left\{ e^{-\lambda t} + \frac{(\gamma_1 - \gamma_2) \left[V_A + V_B + \sqrt{D\lambda} V_A + 2\sqrt{D\lambda} V_B - \beta (\gamma_1 + \gamma_2) \right] + \beta (\gamma_1 + \gamma_2) [V_A + V_B]}{2\beta V_A} \right\}$ where $V = V_A + V_B$, $\alpha = \frac{A_0 \sqrt{D\lambda}}{V_A}, \beta_1 = \sqrt{V_A^2 V_B^2 - 2\sqrt{D\lambda} V_A V_B + V_A^2 V_B^2 + 4V_A^2 V_B^2}, \gamma_1 = e^{-\left[\frac{L}{2} + \frac{a}{2} + \frac{1}{\sqrt{D\lambda}} + \frac{\beta_1}{\sqrt{D\lambda}}\right]^2 \lambda t}$, and $\gamma_2 = e^{-\left[\frac{L}{2} + \frac{a}{2} + \frac{1}{\sqrt{D\lambda}} - \frac{\beta_1}{\sqrt{D\lambda}}\right]^2 \lambda t}$	(1) VC-VC method $D = -\frac{a^2 \lambda}{4C_0}$ (2) VC-VC IR method $D = -\frac{a^2 \lambda}{4C_0} \frac{V_A V_B}{(V_A + V_B)}$ (3) VC-VC OR method $D = -\frac{a^2 \lambda}{4C_0} \frac{V_A V_B}{V_A + V_B}$ $\ln \left[1 - \left(\frac{C_t}{C_0} + 1 \right) e^{\frac{C_0}{V_A} \lambda t} \right]$ v.s. t	$D = -\frac{a^2 \lambda}{4C_0}$

III. 結果與討論

3.1 I^- 及 IO_3^- 離子分析結果

本實驗分別以 KI 及 KIO_3 來備製 I^- 及 IO_3^- 載體離子，並以離子層析儀(IC)進行物種分離及濃度分析。試樣經離心後取出，量測完 pH 值後以採樣注射器注入 IC。為避免管柱阻塞發聲壓力過高情形，故在注入前，先在注射器前裝置濾膜孔洞為 $0.22\mu m$ 過濾頭。注射器推入樣本溶液(至少注入量為 1 ml)後。完成後，則可開啟圖譜，並記錄樣本之中陰離子停留時間(retention time, RT)及該陰離子積分面積。碘離子及碘酸根離子的圖譜分別為圖 3.1(左)及圖 3.1(右)，混合之後之結果如圖 3.2。由圖 3.2 的結果發現：兩種不同離子形式的碘可以經由 IC 分離及分析。

此外，在 10-1000 ppm 濃度間，離子層析儀經重覆測試，並以其波峰積分面積建立良好的檢量線之線性範圍，檢量線迴歸值均達到 0.99 以上(如圖 3.3)。

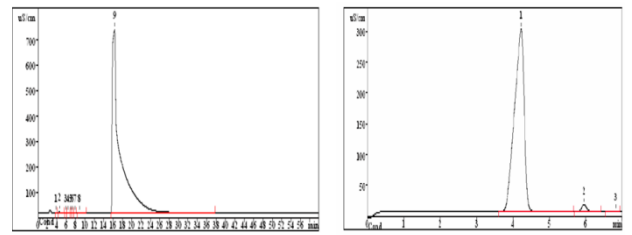


圖 3.1. 0.1M 碘離子 IC 分析圖譜(左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

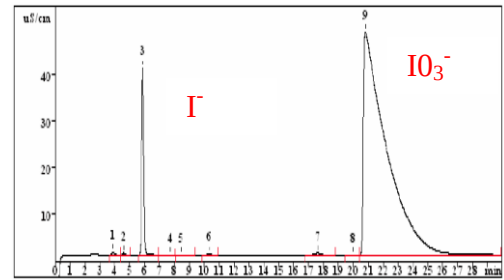


圖 3.2 0.1M 條件下 I^- 及 IO_3^- 離子共存時 IC 分析圖譜

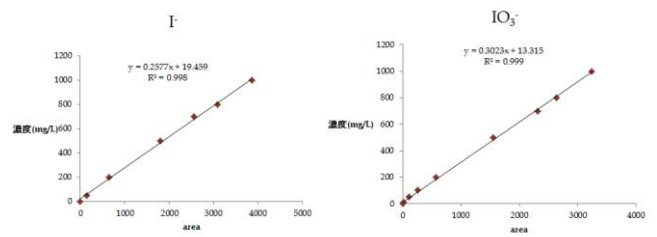


圖 3.3 離子層析分析檢量線(左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

3.2 三種擴散模型之穿透擴散實驗及分析結果

本實驗分別以 KI 及 KIO_3 來備製 I^- 及 IO_3^- 載體，並以離子層析儀(IC)進行物種分離及濃度分析，在 10-1000 ppm 間的檢量線迴歸值均達到 0.99 以上。實驗結果如圖 3.4 至圖 3.8，及表 3.1 實驗結果顯示：對 I^- 離子而言，三種模式所得到的有效擴散係數 (D_e) 分別介於為 2.87×10^{-12} 至 $4.61 \times 10^{-13} m^2/s$ 之間，差距在一個級數之內相當接近；對 IO_3^- 離子而言，三種模式所得到的有效擴散係數 (D_e) 分別介於為 1.90×10^{-11} 至 $3.44 \times 10^{-13} m^2/s$ 之間，CC-CC 模式略高於對 I^- 離子，差距超過一個級數，且 VC-VC 模式及 VC-VC IR 模式無法 FIT 出擴散係數(斜率不符)。可能的原因是 IO_3^- 離子在 IC 分析儀定量積分時未完全流出所導致。在後續研究時取樣時，將強化 CC-CC 模式的解析解，不再採用漸進直線在逼近法，以降低分析誤差；分析的部分則將採用高效率 IC 層析儀，並以感應耦合電漿原子發射光譜儀(ICP-OES)進行比對，提高分析結果的精準度。此外，本研究後續將應用於高吸附性，擴散緩慢的核種，節省人力、物力與時間，提升核種擴散係數之可靠度與信心度。

IV. 結論

本研究以精進核種遷移實驗及分析技術為目標。實驗結果顯示：兩種不同離子形式的碘可以經由 IC 層析儀分離及分析。在 10-1000 ppm 濃度間，IC 層析儀經重覆測試，並以其波峰積分面積建立良好的檢量線之線性範圍，檢量線迴歸值均達到 0.99 以上。對 I^- 離子而言，三種模式所得到的有效擴散係數 (D_e) 分別介於為 2.87×10^{-12} 至 $4.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 之間，差距在一個級數之內相當接近。透過本研究對擴散參數實驗方法的精進，可以解決國內最終處置核種遷移實驗參數取得之技術問題，節省人力、物力與時間，提升核種擴散係數之可靠度與信心度。

參考文獻

1. 独立行政法人日本原子力研究開発機構(NUMO)，地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書，平成 24 年 3 月。
2. Alonso, U., et al, 2007, "Colloid diffusion in crystalline rock: An experimental methodology to measure diffusion coefficients and evaluate colloid size dependence." Earth and Planetary Science Letters 259, 2007, 372–383.
3. Alonso, U., et al, 2003, "Study of the contaminant transport into granite microfractures using nuclear ion beam techniques," Journal of Contaminant Hydrology, 61, 95–105.
4. Aude Naveau, Fanny Monteil-Rivera, Emmanuel Guillon, Jacques Dumonceau, XPS and XAS studies of copper(II) sorbed onto a synthetic pyrite surface, Journal of Colloid and Interface Science 303 25–31, 2006.
5. Chen, C.L., et al, 2014, "Intercomparison of diffusion coefficient derived from the through diffusion experiment using different numerical methods," J Radioanal Nucl Chem 300:393–407.
6. Chih-Lung Chen, Tsing-Hai Wang, Ching-Hor Lee, and Shi-Ping Teng, "Intercomparison of diffusion coefficient derived from the through diffusion experiment using different numerical methods," J Radioanal Nucl Chem (2014) 300:393–407.
7. Crank, J., The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford, UK, 1975. C. Tournassat, E.C. Gaucher, M. Fattahi, B. Grambow, 2007. On the mobility and potential retention of iodine in the Callovian–Oxfordian formation. Physics and Chemistry of the Earth 32 (2007) 539–551.
8. Fuhrmann, M., Bajt, S., Schoonen, M.A.A., 1998. Sorption of iodine on minerals investigated by X-ray absorption near edge structure (XANES) and 125I tracer sorption experiment. Applied Geochemistry, 13, 127–141. García-Gutiérrez, M., et al, 2004, "Diffusion coefficients and accessible porosity for HTO and ^{36}Cl in compacted FEBEX bentonite. Applied Clay Science, 26: 65-73.
9. García-Gutiérrez, M., et al, 2006, "Overview of

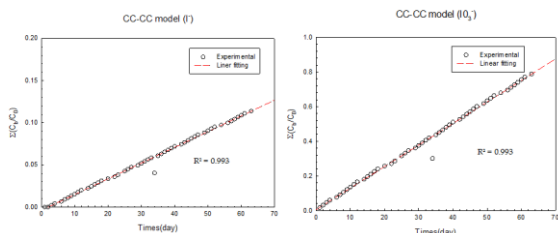


圖 3.4 CC-CC 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析 (左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

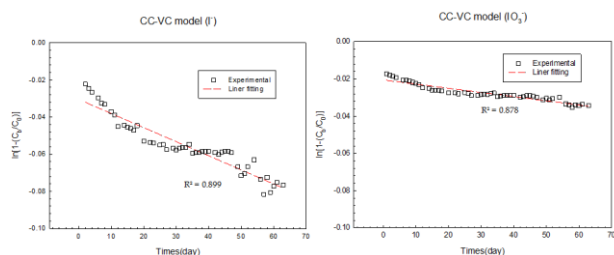


圖 3.5 CC-VC 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析 (左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

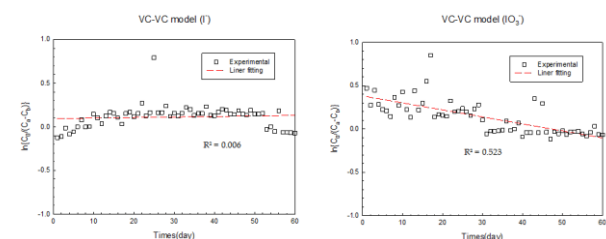


圖 3.6 VC-VC 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析 (左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

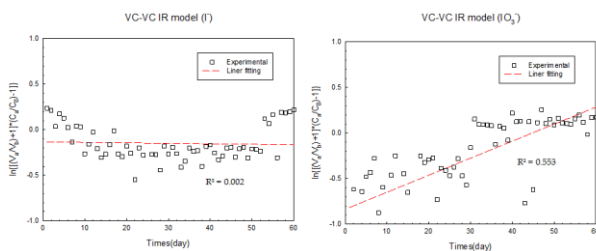


圖 3.7 VC-VC IR 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析 (左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

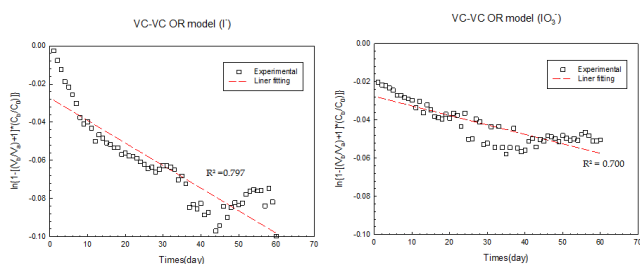


圖 3.8 VC-VC OR 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析 (左: I^- 離子; 右: IO_3^- 離子)

- laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite,” *Journal of Iberian Geology* 32 (1): 37-53
10. Kim SS, Chun KS, Choi JW, et al., The effects of container materials and buffer additives on decreasing the iodide concentration in a disposal vault for spent nuclear fuel, *Journal of Environmental Science and Health part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 42 (1): 39-43 2007.
 11. Kaplan, D.I., Serne, R.J., Parker, K.E., Kutnyakov, I.V., 2000. Iodide sorption to subsurface sediments and illitic minerals. *Environmental Science and Technology* 34 (3), 399.
 12. Kaplan, D.I., 2003. Influence of surface charge of an Fe-oxide and an organic matter dominated soil on iodide and pertechnetate sorption. *Radiochimica Acta* 91 (3), 173.
 13. Poinssot, C and Gecke, 2012, *Radionuclide behavior in the natural environment science, implications and lessons for the nuclear industry*, Woodhead Publishing Limited,UK.
 14. Shackelford, C.D., 1991. “Laboratory diffusion testing for waste disposal—a review,” *Journal of Contaminant Hydrology*. 7, 177–217.
 15. Tsai, S.C., Lee, C.P., Tsai, T.L., and Yu, Y.C., 2017, “Characterization of cesium diffusion behavior into granite matrix using Rutherford backscattering spectrometry,” on-line publication.
 16. Yu, J.-W. and Neretnieks, I., 1997. Diffusion and sorption properties of radionuclides in compacted bentonite. SKB Technical Report 97-12, Stockholm, Sweden.
 17. Zhang M., et al, 2006, “Determining the transport properties of rock specimens using an improved laboratory through-diffusion technique. In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 932, 135–142.

乾貯密封鋼筒表面氯鹽沉積量與大氣氯離子含量關係研析

計畫編號：MOST 106-NU-E-390-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：張惠雲 副教授

共同主持人：賴啟銘 特聘教授

執行單位：國立高雄大學

摘要

與美國同樣，台灣乾貯設施是由混凝土護箱與不銹鋼密封鋼筒所構成。不銹鋼材料具有極佳的耐熱性、耐久性及抗腐蝕性，使用在核能組件非常普遍，也被多數國家選作密封鋼筒的主要材料。不銹鋼材料的工業使用時，曾發現在特定材料條件(材料選擇、應力狀態等)及環境條件(溫度、相對溼度等)，經過非常長時間的鹽分沉積時可能在表面產生應力腐蝕破裂 (stress corrosion cracking, SCC) 之現象。針對乾貯密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 現象，本計畫根據文獻調查，模型試驗與電腦模擬，探討 (1) 國外有關密封鋼筒表面氯鹽附著量檢測技術及發展，(2) 大氣環境氯離子濃度與密封鋼筒表面附著量之相關性，(3) 貯存護箱進氣口加裝減鹽裝置之技術可行性。本計畫研究成果除可用於評估國內密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 之可能性，也將有助於本土化乾貯設施監測維護計畫之發展。

關鍵詞：不銹鋼密封筒，應力腐蝕劣化，氯鹽沉積，減鹽裝置，可行性評估

Abstract

Like the U.S., Taiwan have a dry storage system composed of a concrete cask and a stainless steel canister. Stainless steel have superior resistance against high temperature, aging effects and corrosion attacks, therefore are commonly used as nuclear components, for example dry storage canisters in many countries. Industry experience shows that stress corrosion cracking (SCC) may occur in stainless steel as a result of the combined influence of tensile stress and corrosive environment. In this study, an investigation is made into the SCC mechanism of stainless steel for a dry storage canister. In detail, a literature review is first given to the recent development of measurement and monitoring technologies for chloride salt deposits on canister surfaces. Then model testing and computer simulation will be made to find the correlation between chloride salt deposits and atmospheric chloride concentration. A feasibility study is also made of adding a salt-reducing device in the air inlet of a concrete cask as a SCC countermeasure. The results obtained above will help evaluate the SCC susceptibility of a Taiwan dry cask canister, and will also help develop a local surveillance plan for dry storage facilities.

Keywords: stainless steel canister, stress corrosion cracking (SCC), chloride salt deposits, salt reducing device, feasibility study.

I. 前言

台電公司目前規劃於核能發電廠內興建用過核子燃料乾式貯存設施，其主要組件包括不銹鋼材料製的密封鋼筒與外部混凝土護箱。不銹鋼材料具有極佳的耐熱性、耐久性及抗腐蝕性，使用在核能組件非常普遍，也被多數國家選作密封鋼筒的主要材料。不銹鋼材料的工業使用時，曾發現在特定材料條件(材料選擇、應力狀態等)及環境條件(溫度、相對溼度等)，經過非常長時間的鹽分沉積時可能在表面產生應力腐蝕破裂 (stress corrosion cracking, SCC) 之現象。最近的國際研究結果顯示，考慮使用 40 年甚至延長使用 60 年的時間內乾貯密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 可能性仍無法完全排除，因此美日研究建議發展 SCC 環境監測技術。例如，日本中央電力研究所 (CRIEPI) 在 2011 年針對用過核燃料乾貯設施密封鋼筒提出兩階段的 SCC 監測與維護計畫(草案)，並在 2013 年加入去除鹽分之選項進行修正 [1,2]。具體而言，第 1 階段監測不銹鋼筒表面附著的氯鹽量，若監測結果超過控制臨界值，則可以考慮加裝濾網等減鹽裝置、降低氯鹽沉積速率，或直接進入第 2 階段是對裂隙深度進行監測與 SCC 評估管理。然而，上述不銹鋼表面附著鹽分的監測技術仍在持續研究發展中 [3-5]，而加裝濾網等減鹽裝置對乾貯系統氣冷除熱效能之影響也需進行評估 [6,7]。

II. 文獻探討

(1) 國外有關密封鋼筒表面氯鹽附著量檢測技術及發展

如前所述，日本中央電力研究所 (CRIEPI) 已在 2011 年針對用過核燃料乾貯設施密封鋼筒提出兩階段的 SCC 監測與維護計畫(草案)，並在 2013 年加入去除鹽分之選項進行修正 [1,2]。對於上述的乾貯設施監測與維護計畫，密封鋼筒表面氯鹽量定期量測於 SCC 有無之確認極重要。為此，日本有研究開發應用雷射元素光譜分析儀(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)於密封鋼筒表面氯鹽量量測 [3,4]。考量密封鋼筒表面是高溫且有放射線之環境，最近的研究又進一步進行遠距量測實驗驗證 [5]。新開發的機器可在混凝土護箱與密封鋼筒間狹隘的空間內進行量測，其以雷射為光源和電漿為受光體，在每 50 mm 間距量測一次，且不銹鋼試片表面氯鹽 50g/m² 之條件下進行實測，已確認雷射光經 20 m 以上傳送後可將氯鹽反射光傳回、測定鹽量。另一方面，美國 Calvert Cliffs 與 Hope Creek 兩個電廠乾貯檢查中，密封鋼筒表面氯鹽檢測是直接採樣後進行 XRD 與 SEM 分析

(2) 大氣環境氯離子濃度與密封鋼筒表面附著量相關性

日本 CRIEPI 曾對福島第一核能發電廠 (距海岸線 80 m) 與東海核能發電廠 (距海岸線 450 m) 兩個放有金屬護箱密封鋼桶的中間貯存設施進行鹽量量測, 結果發現室內與室外的空氣中氯鹽量並無明顯差異 [12]。後續研究改在日本氣候試驗中心銚子暴露試驗場 (距海岸線 4km) 進行試驗, 並以 1 個月為單位進行長時間觀測, 結果發現室內與室外的空氣中氯鹽含量相差可達 2 至 6 倍 [13]。風洞(室內)試驗與(現地)曝曬試驗均顯示, 試片平擺 (與氣流平行) 時比豎放時鹽分單位面積累積 較多, 且實驗溫度 30 °C 比 100 °C 試片鹽分累積快 [7]。改以自然氣流進行簡易風洞試驗結果則顯示, 水平方向氯鹽沉積量隨試驗溫度 (30, 100 與 200) 升高而減少, 垂直方向氯鹽沉積量很少、幾乎是量測誤差等級, 其與試驗溫度之相關性不顯著 [13]。上述研究 [13] 也特別說明, 土木構造物或電器機機等鹽害評估中, 構造物等鹽分附著是重要的問題, 到目前為止也進行了很多的研究, 但因與密封鋼桶鹽分附著的氣流狀態大不相同, 這些既有的評估方式並不適用於乾貯設施系統。具體而言, 既有的評估方式主要是針對設置於戶外的結構物 (例如橋樑或建築物), 空氣與之垂直接觸; 混凝土護箱中空氣平行於附著面(密封鋼桶表面)流動。另外, 密封鋼桶還有附著面高溫 (最高達 200°C) 且為鉛直面等特徵。考慮以上特徵的話可以推測, 與既有構造物鹽分附著量 (附著速度) 相比, 密封鋼桶鹽分附著量非常的少。對照美國最近 Calvert Cliffs 與 Hope Creek 兩個電廠乾貯檢查結果, 密封鋼桶表面氯鹽附著量確實遠比過去推測的少。

(3) 貯存護箱進氣口加裝減鹽裝置可行性之技術發展

日本用過核子燃料在處理前進行中間貯存, 為了採用混凝土護箱密封鋼桶系統, 須於事先對密封鋼桶不銹鋼材料應力腐蝕劣化 (SCC) 評估技術充分掌握。中間貯存設施中護箱的熱是利用自然氣冷。但建造於海岸附近的混凝土護箱貯存設施, 因為帶有鹽份的空氣會從冷卻孔道流入, 成為密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 之原因。有研究提案於設施入氣口裝設對自然氣冷影響較小的低壓損型濾網(filter), 並以市售濾網進行試驗評估後發現壓力將降低 1/10 而鹽份可減少 30% 的程度 [6]。後續的研究針對建築物或混凝土護箱, 進一步提出不妨礙入氣的低壓損減鹽裝置[7]。評估將減鹽裝置設於混凝土護箱給氣口之適用性。流入粒子粒徑則根據現地實測, 考慮流入粒子的 56% 為平均直徑為 2.5 μm 、以此為中心呈現正規分布之粒子群, 另外 44% 為平均直徑為 20 μm 、呈正規分布之粒子群。驗證試驗 假設中間密封鋼桶內用過核子燃料發熱量 80% 由自然對流(及氣冷)排出, 以板數 (n) 為參數檢討的結果, 當減鹽裝置的板長 (L) 0.5 m, 板數為 15, 鹽份捕獲率達 40%, 而壓力損失增加所致排氣溫度僅 上升 0.48°C。最後根據室內壓力與電廠實地鹽分之量測結果, 確認新開發裝置的壓力損失可降至販售 濾網之 1/30 至 1/20, 鹽分捕獲率達 40% 且貯存設施除熱性能不受影響。綜合以上, 貯存護箱進氣口加裝濾網等減鹽裝置對乾貯系統氣冷除熱效能之影響必須進行評估 [6,7]。本研究根據模型試驗與電腦分析, 對國內貯存護箱進氣口加裝濾網等減鹽裝置前後系統壓力與溫度, 進行驗證。

II 研究方法

本研究利用計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, 簡稱 CFD) 模擬並搭配熱流實驗, 探討乾貯系統之密封鋼筒、混凝土護箱與流道內於一特定條件下之溫度分布與流場特性。結果將用於評估用過核燃料乾式貯存箱內氯鹽沉積情形, 與加裝減鹽裝置對乾貯設施散熱效能之影響。

(1) 研究對象

台電核二廠採用 NAC 公司 MAGNASTOR-87 乾式貯存系統, 每一密封鋼筒最大設計熱負載為 14.6 kW。系統內部主要有一則內含用過核子燃料之直徑 1.8 m 且高 5 m 密封鋼筒(①)以及圍繞這鋼筒、厚度約為 1m 之混凝土護箱(②), 兩者(密封鋼筒與混凝土護箱)之間留設寬度約 10cm 的流道(③), 用過核子燃料之餘熱將會加熱流道內的空氣, 被加熱後的空氣則以熱浮力效應上升至流道出口(④), 順勢離開乾式貯存箱, 外部空氣則經由下方入口(⑤)流進流道中, 形成一則自然通風路徑(⑥)。本研究在入風口處裝設如圖 2 所示之沉積板式減鹽裝置 (SPCD) [6], 觀察此裝置對於乾式貯存箱熱流性能的影響。減鹽裝置高 0.3m(Ho)、寬 0.3m(B), 沉積板長度(亦即, 減鹽裝置之長度 L)為 0.5m, 1.0m, 板數為 15, 鹽份捕獲率預估值約為 40%

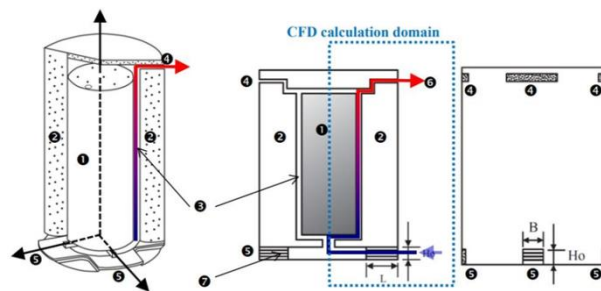


圖 1. 研究對象之乾貯系統

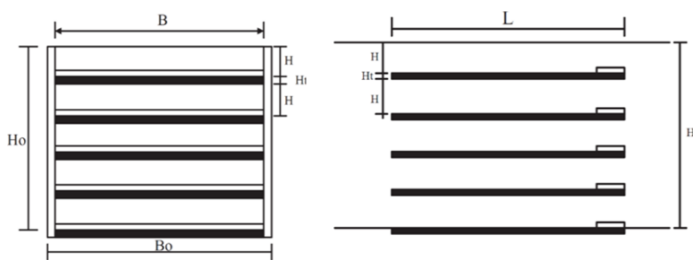


圖 2. 沉積板式減鹽裝置

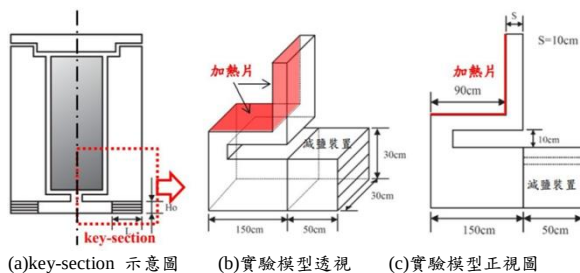


圖 3. 足尺實驗模型

(2) 試驗模型與參數

本研究將乾式貯存箱之 key-section (如圖 3(a)紅色虛線區域) 做成足尺實驗模型, 如圖 3(b)(c)所示, 而後利用實驗方式分析乾式貯存箱之熱流行為, 以作為 CFD 模擬結果之比對。密封鋼筒內用過核子燃料之發熱功率設定為 400 W/m^2 , 減鹽裝置之沈積板長度則是 0.5m 。熱壁 (如圖 3(b)紅色區塊所示) 係由雲母式加熱片黏貼於銅板上所形成, 主要係用來模擬用過核子燃料之發熱。此加熱片之輸出電功率為 400 W/m^2 , 銅板厚度為 1cm 其目的是讓加熱壁能達均勻等溫。為了控制輸出功率, 將電源供應器與功率計 (TES WM-01) 串接並將加熱片做為負載, 當輸出功率流經功率計至加熱片時, 功率計會顯示出所設定之功率值。本研究使用 type K 熱電偶量測多處的溫度, 測點位置分別為加熱面的表面溫度, 流道入口與出口處的空氣溫度 (各有 10 個點位) 以及混凝土護箱流道側之壁溫。熱流計則是佈設在加熱片與銅板之間, 用以量測發熱功率。微風速計的位置則分佈在流道的入口 (共 10 個點位) 與出口 (共 5 個點位)。

(4) 熱流分析與驗證

本研究是以 CFD 模擬軟體 PHOENICS 為解析工具 (Spalding, 1994), 其本體架構為 Patankar (1980) 所提出的 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) algorithm, 數值方法係在錯排網格 (staggered grid) 系統上將統御方程式以控制體積分法 (control volume integration approach) 差分展開, 其中對流項、空間微分項採用「混合法則」(hybrid scheme), 紊流模式採用 Two-Equation Model 中的 K-Epsilon Model (Launder and Spalding, 1974)。格點系統擬採用適當尺度之非均勻格點, 相對收斂準則 (relative convergence) 初期設定為 10^{-2} 。控制變因包含: 有無 SPCD, SPCD 的板長 (50cm , 100cm), 密封鋼筒發熱功率 (1.15 kW/m^3 與 2.6 kW/m^3), 環境溫度 (25°C , 30°C , 35°C) [22]。本研究依據 (台灣電力公司, 2011) 的設計規範將評估準則設定為: 燃料護套 fuel steel basket 的最高可接受溫度為 570°C (異常及意外); 混凝土可接受溫度分別為 93.3°C (正常時的平均溫度), 148.8°C (正常時的局部最高溫度), 176.6°C (異常/意外時的局部最高溫度)。

III 結果與討論

熱流模擬與實驗結果

本研究利用 CFD 模擬並搭配熱流實驗, 觀察使用後核燃料乾式貯存箱之熱流特性, 並評估加裝減鹽裝置對於貯存箱散熱效能之影響。研究對象為一貯存箱, 其內部有一則內含用過核子燃料之密封鋼筒 (直徑 1.8m , 高 5m) 以及圍繞這鋼桶、厚度約為 1m 之混凝土護箱, 兩者之間留設寬度約 10cm 的流道。如圖所示, 比較 CFD 模擬結果與實驗結果, 並無太大差別。故模擬結果具有高度可信度。

減鹽裝置 (SPCD) 之影響

根據熱流分析, 相較於無裝置 SPCD, 裝有 50 cm-SPCD 其流道氣流所帶走的熱可增加約 7.6% (當密封鋼筒發熱功率為 1.15 kW/m^3 - 2.6 kW/m^3); 裝有 100 cm-SPCD 其流道氣流所帶走的熱則是增加約 7.1% (1.15 kW/m^3 - 2.6 kW/m^3)。此由於 SPCD 為板狀構造,

當 50 cm-SPCD 裝置於貯存箱入風處時, 其類似整流的效果 (圖 5 (c)) 反而使得流道氣流的平均流速增加 (相較於沒有裝置時)。但板長從 50cm 增加到 100cm 時, 則會因為流動摩擦的增加使得平均流速稍降, 但相較於沒有裝置 SPCD, 裝有 100 cm-SPCD 的貯存箱其平均流速還是較高, 流道氣流所帶走的熱也較大。

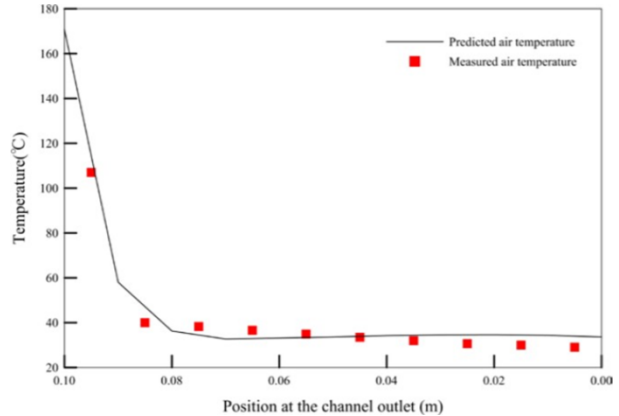


圖 4.足尺實驗與 CFD 模擬結果的比較

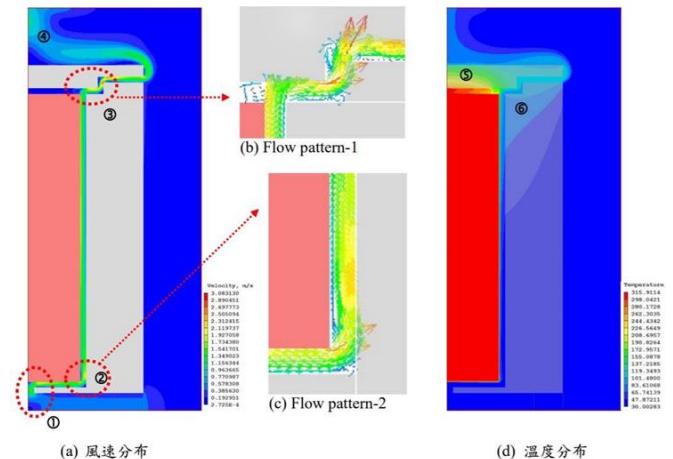


圖 5.乾貯系統熱流特性 (減鹽裝置 SPCD 長 50 cm , 功率 2.6 kW/m^3 (熱負載 33kW), 環境溫度 30°C)

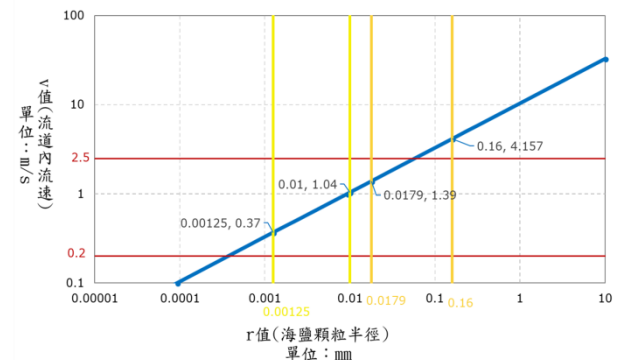


圖 6.氣鹽顆粒半徑 r 與離開系統所需臨界速度 v

乾貯系統內氣鹽沉積情形

乾貯系統內氣鹽顆粒受到浮力, 空氣阻力與重力所共同作用; 當向上合力超過向下合力時可判斷氣鹽顆粒隨加热的空氣離開系統, 依此條件所推估出來的氣鹽顆粒半徑 $r (\text{mm})$ 與離開系統所需臨界速度 $v (\text{m/sec})$, 如

圖 6。國內最近研究 [23] 根據 CFD 模擬探討核二乾貯通風通道內空氣夾帶氣鹽之流速分佈，結果發現氣鹽顆粒大者應會被系統下部彎曲流道所阻擋，而顆粒小者則隨著空氣被加熱而被帶離系統。對照圖 5(c) 乾貯入氣口附近的流場結構可知，密封鋼桶表面因為流道幾何形狀變化造成流場改變、流速加快。因此，入氣口附近的氣鹽沉積不是在密封鋼桶表面、而是混凝土護箱內面。日本 CRIEPI 研究 [7] 指出，流入乾貯系統的氣鹽依顆粒可分成兩個正規分佈之群組，直徑平均值分別為 2.5 μm ，與 20 μm 。乾貯系統內氣鹽顆粒受到向上合力超過向下合力時可判斷氣鹽顆粒隨加熱的空氣離開系統，依此條件所推估出來的氣鹽顆粒半徑將遠大於 20 μm ，也就是說流道內氣鹽顆粒幾乎全部上浮、隨空氣離開系統。美國最近 Calvert Cliffs 與 Hope Creek 兩個電廠乾貯檢查結果，密封鋼桶表面氣鹽附著量遠比研究推測少。前述推論與分析，與美國乾貯檢查結果相當一致。

參考文獻

- [1] Shirai et al. (2011). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use-Feasibility Study on Prevention of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking for Type304L Stainless Steel Canister-, CRIEPI Report (No. N10035).
- [2] Goto et al. (2013). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use - Feasibility Study on Prevention of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking for Type304L, 316L Stainless Steel Canister-, CRIEPI Report (No. N12023).
- [3] Eto et al. (2014). Development of Measurement Technology of Chlorine Attached on Canister Using Laser-Remote Measurement in Narrow Space for The Application during Storage of Spent Fuel-, CRIEPI Report (No. H13004) (in Japanese attached with English abstract)
- [4] Eto et al. (2013). Development of Measurement Technology of Chlorine Attached on Canister Using Laser, CRIEPI Report (No. H12003) (in Japanese attached with English abstract)
- [5] Eto et al. (2012). Development of measurement technology of chlorine attached on canister using laser-Application of LIBS using collinear geometry-, CRIEPI Report (No. H11020) (in Japanese attached with English abstract)
- [6] Tani et al. (2007). Chloride induced stress corrosion cracking of candidate canister materials for concrete cask storage of spent fuel Vol.5 -Evaluation of SCC and development of salt particle collection device-, CRIEPI Report (No. Q06014) (in Japanese attached with English abstract)
- [7] Hirofumi Takeda and Toshiari Saegura (2012). Development of Salt Particle Collection Device for Preventing SCC on Canister (Part 2)- Applicability Evaluation for Salt Particle Collection Device-, CRIEPI Report (No. N11044) (in Japanese attached with English abstract)
- [8] Letter from M.D. Flaherty to U.S. NRC, "Response to Request for Additional Information, RE: Calvert Cliffs Independent Spent Fuel Storage Installation License Renewal Application (TAC No. L24475)," June 14, 2013. (Accessible with NRC Accession No. ML13170A574)
- [9] Calvert Cliff Stainless Steel Dry Storage Canister Inspection, EPRI technical report, 2014.
- [10] Sandia national Laboratories (SNL) (2013). Data Report on Corrosion Testing of Stainless Steel SNF Storage Canisters, Prepared for U.S. Department of Energy Used Fuel Disposition Campaign (FCRD-UFD-2013-000324; SAND2013-8314P)
- [11] SNL (2014). Draft report - Results of Stainless Steel Canister Corrosion Studies and Environmental Sample Investigations, prepared for U.S. Department of Energy Used Fuel Disposition Program (FCRD-UFD-2014-000055; SAND2014-20347O)
- [12] Wataru et al. (2007). Evaluation on the atmospheric sea salt concentration for practical use of the dry storage facility using the concrete cask, CRIEPI Report (No. N06022) (in Japanese attached with English abstract)
- [13] Masumi Wataru and Hirofumi Takeda (2015). Evaluation of the salt deposition on the canister surface of concrete cask (Part 3)- Long-term measurement of salt concentration in air and evaluation of the salt deposition -, CRIEPI Report (No. N14019) (in Japanese attached with English abstract)
- [14] Wataru et al. (2016). Study on Commercial Realization of Concrete Cask for Interim Storage of Spent Fuel – Proposal and Verification of Code Case on SCC Countermeasure of Canister, CRIEPI Report (No. N15014) (in Japanese attached with English abstract)
- [15] Incropera and DeWitt, 2002, Fundamentals of Heat and Mass Transfer 15/e, John Wiley & Sons, New York. Spalding, D.B. The PHOENICS encyclopedia. CHAM Ltd: London, UK, 1994.
- [16] Bejan A. and Lage J.L., 1990, The Prandtl number effect on the transition in natural convection along a vertical surface, J. Heat Transfer, Vol.112, pp.787-790.
- [17] Electrical Power Research Institute (EPRI). (2013). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) of Welded Stainless Steel Canisters for Dry Cask Storage Systems, pp. 2-16, 17
- [18] 核二乾貯安全分析報告
http://www.aec.gov.tw/webpage/dry/files/index_01_2_5-03.pdf
- [19] 台灣地區金屬材料大氣腐蝕之研究發展
<https://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?id=6604>
- [20] 台灣腐蝕分類資訊系統
<http://act.ihmt.gov.tw:8080/local.asp?acType=cl>
- [21] 張惠雲(2013). 不鏽鋼材料應力腐蝕劣化機制研析與對策研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫成果報告（編號 102FCMA003）
- [22] Heui-Yung Chang, Rong-Horng Chen, Chi-ming Lai, (2018). Numerical Simulation of the Thermal Performance of a Dry Storage Cask for Spent Nuclear Fuel, Energies, 11(1), 149 (SCI) (Impact

Factor: 2.262; Energy & Fuels) (SCI Rank Factor:
45/92=48.91%) (DOI:
10.3390/en1101014)(Published: January 8, 2018)

- [23] 施純寬 (2015). 核二廠乾式貯存設施設計壽命期
間熱傳行為分析, 行政院原子能委員會放射性物
料管理局委託研究計畫成果報告 (編號
104FCMA011)

限制速率吸附對核種衰變鏈傳輸的影響

Effect of rate-limited sorption on the transport of a radionuclide decay chain

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳瑞昇

e-mail：jschen@geo.ncu.edu.tw

計畫參與人員：梁菁萍

執行單位：國立中央大學應用地質研究所

摘要

本計畫發展考慮限制速率吸附的放射性核種衰變鏈傳輸的解析解模式並利用所發展的解析解模式探討限制速率吸附對核種衰變鏈移動的影響，研究結果顯示未考慮吸附反應的瞬間平衡吸附的放射性核種衰變鏈傳輸的解析解會低估衰變鏈每一核種的濃度，本研究也利用解析解探討限制速率吸附對劑量計算的影響。

關鍵詞：核種衰變鏈；解析解模式；瞬間平衡吸附；限制速率吸附；劑量。

Abstract

An analytical model for radionuclide decay chain transport subject to rate-limited sorption is developed in this study. The derived analytical model is then applied to investigate the effects of the rate-limited sorption on plume migration of radionuclide decay chain. The results show that instantaneous equilibrium sorption transport model underestimates the concentrations of each member of radionuclide decay chain. Ultimately, the derived analytical model applied to evaluate the rate-limited sorption on calculation of dose.

Keywords: radionuclide decay chain; analytical model; instantaneous equilibrium sorption; rate-limited sorption; dose.

I. 前言

由於地下水的流動為人體放射性核種暴露情境下的可能重要途徑(pathway)，因此研究人員進行了許多實驗或理論的研究以了解放射性核種在地下環境的傳輸行為，以物理機制為基礎的放射性核種衰變鏈傳輸數學模式為預測了解核種傳輸的有效工具。

解析解模式的特性對解決計算時間尺度與計算的空間尺度問題將是另一非常可行的選擇的工具。目前文獻中所有的種衰變鏈傳輸的解析解模式都是採用「瞬間平衡吸附(instantaneous equilibrium sorption)」假設簡化來描述之衰變鏈物種在溶解相與吸附間的吸/脫附行為，瞬間平衡吸附假設之適用性取決於污染物於吸附相和水溶液相間之質量傳遞速率與地下水水流速度之相對比較，當吸附相和水溶液相間之質量傳遞速率遠大於孔隙介質水流速度時，瞬間平衡吸附效應即可適用；否則此時瞬間平衡吸附假設無法適用，此時之吸附就稱為限制速率吸附(rate-limited sorption)。

本研究的目的是發展納入考慮限制速率吸附假設的多子核種衰變鏈傳輸的解析解模式，並比較限制速率

吸附與瞬間平衡吸附模擬結果差異，釐清瞬間平衡吸附模式的適用參數條件。最後利用所發展的解析解模式進行核種劑量評估，比較限制速率吸附與「瞬間平衡吸附在劑量計算與風險評估的差異。

II. 主要內容

考慮區域地下水流動為沿著正 x 軸方向、穩態(steady state)且為均勻流(uniform flow)，在溶解相(dissolved phase)的核種傳輸機制將包括移流(advection)、縱向延散(longitudinal dispersion)與一階衰變反應(first-order decay reaction)，溶解相與吸附相(sorbed phase)間的質量傳輸不是傳統常使用瞬間平衡吸附(instantaneous equilibrium sorption)，而是限制速率吸附(rate-limited sorption)。放射性核種依序產生 $N-1$ 核種($C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow \dots \rightarrow C_N$)，則母物種與其子核種須以 N 個移流延散方程式來描述，其溶解相與吸附相(sorbed phase)間的數學表示式分別為：

$$D \frac{\partial^2 C_1(x,t)}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_1(x,t)}{\partial x} - \lambda_1 C_1(x,t) - \frac{\beta_1}{\theta} \left(C_1(x,t) - \frac{S_1(x,t)}{K_1} \right) = \frac{\partial C_1(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$D \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} - v \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} - \lambda_i C_i(x,t) + \lambda_{i-1} C_{i-1}(x,t) - \frac{\beta_i}{\theta} \left(C_i(x,t) - \frac{S_i(x,t)}{K_i} \right) = \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} \quad i = 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\rho_b \frac{\partial S_1(x,t)}{\partial t} = \beta_1 \left(C_1(x,t) - \frac{S_1(x,t)}{K_1} \right) - \gamma_1 \rho_b S_1(x,t) \quad (3)$$

$$\rho_b \frac{\partial S_i(x,t)}{\partial t} = \beta_i \left(C_i(x,t) - \frac{S_i(x,t)}{K_i} \right) - \gamma_i \rho_b S_i(x,t) + \gamma_{i-1} \rho_b S_{i-1}(x,t) \quad i = 2, \dots, N \quad (4)$$

此處 x 為空間座標[L]， t 為時間[T]， $C_i(x,t)$ 為溶解相第 i 個物種濃度[ML⁻³]， $S_i(x,t)$ 為吸附相第 i 物種濃度[MM⁻¹]， ϕ 為孔隙率(porosity)[-]， D 為縱向延散係數(dispersion coefficient) [L²T⁻¹]， v 為孔隙水流速度(pore water velocity)， λ_i 為第 i 物種溶解相之一階衰變反應速率常數(first-order decay rate constant) [T⁻¹]， ρ_b 為總體密度(bulk density)， β_i 為第 i 個物種的動力吸附反應速率

常數(kinetic sorption reaction coefficient)[T^{-1}]， K_i 表第 i 個物種的溶解相與吸附相間分配係數(distribution coefficient) [$L^3 M^{-1}$]， N 為總物種數目。 γ_i 為第 i 物種溶解相之一階衰變反應速率常數 [T^{-1}]。

上述方程式(式(1a)、(1b)、(2a)、(2b))將考慮下列初始條件(initial condition)與邊界條件(boundary condition)求解：

$$C_i(x, t = 0) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$S_i(x, t = 0) = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$-D \frac{\partial C_i(x=0, t)}{\partial x} + v C_i(x=0, t) = v C_{i,0} \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_i(x=L, t)}{\partial x} = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

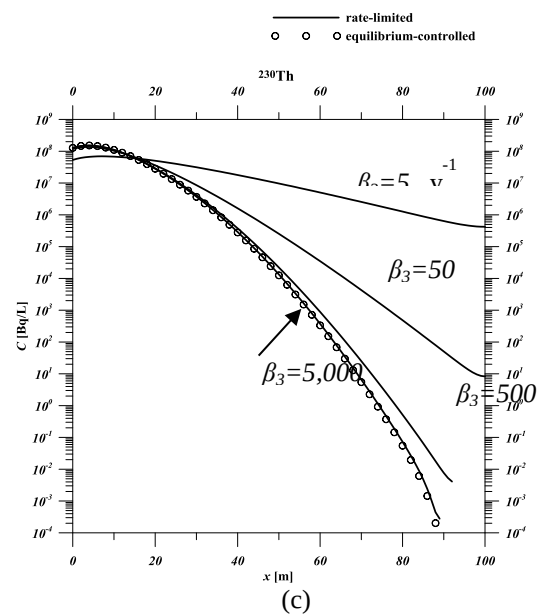
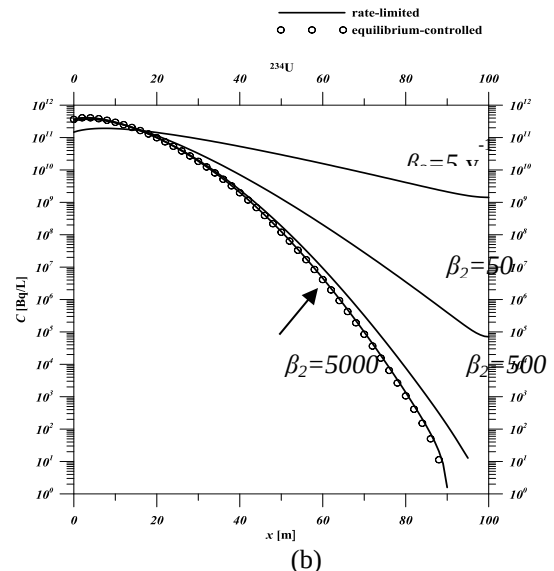
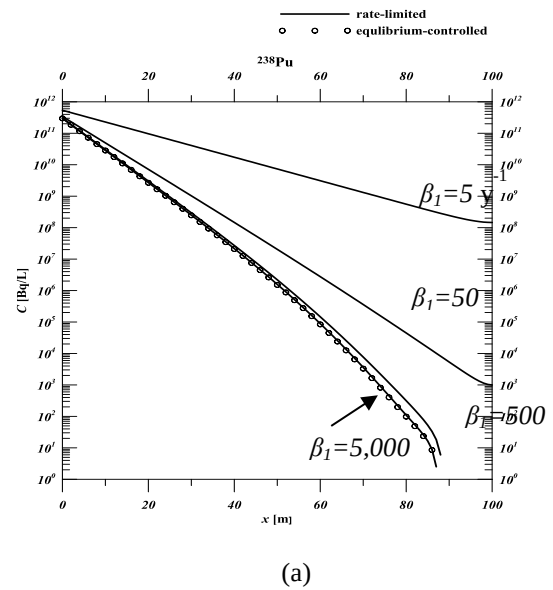
此處 $C_{i,0}$ 表示第 i 個物種的入流邊界濃度 [ML^{-3}]， L 為系統長度 [L]，式(3)表示考慮邊界污染源且採用符合質量守恆的第三類(third type)邊界條件。

本研究採用連續積分轉換法求解聯立偏微分方程組與邊界條件(式(1)-(8))。

III. 結果與討論

為測試所發展的解析解的正確性與 FORTRAN 計算程式的準確性，驗證工作主要是由比較本研究發展考慮吸附相衰變的限制吸附傳輸的遞迴式解析解與 Ho (2017)所發展的忽略吸附相衰變的限制吸附傳輸通式解析解。研究中考慮了 4 個子核種的核種衰變鏈 $^{238}Pu \rightarrow ^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra$ 。驗證結果顯示兩者非常吻合(圖未顯示)。

不同於傳統的瞬間平衡吸附模式考慮動力吸附反應速率常數值為無窮大，本研究發展的解析解可考慮不同的動力吸附反應速率常數值，為探討動力吸附反應速率常數對傳輸的影響，採用相同的參數條件進行探討，圖 1 為 4 個物種在不同動力吸附反應速率常數下 1,000 年時沿著 x 軸濃度空間剖面的比較，從圖中可以清楚看出動力吸附反應速率常數小時會有較高的濃度，且污染物移動的距離較遠，當 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 5,000 \text{ year}^{-1}$ 時，另外圖中亦加入 Chen et al. (2012)考慮瞬間平衡吸附的多物種解析解，本研究的解析解所得的結果與 Chen et al. (2012)一致，此意謂在此條件下瞬間吸附平衡假設是成立，Damköhler number 為 5000，意謂此條件可做為判斷瞬間吸附平衡假設是否成立的基礎。



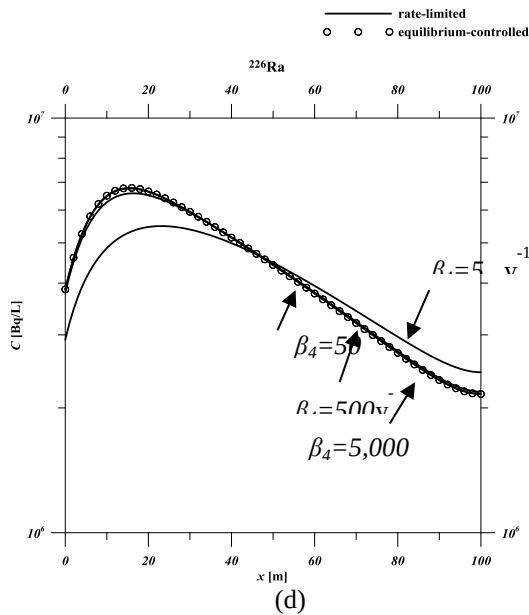


圖 1 $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$ 不同動力吸附反應速率常數下，1,000 年時沿著 X 軸濃度空間剖面的比較，圖中空圈圖為 Chen et al. (2012)考慮瞬間平衡吸附的解析解。 ^{234}U

放射性核種對人體健康影響主要是人體所接受之劑量(dose)值，並非人體的攝入量(intake)，因此輻射安全是根據劑量的概念，吸收劑量(absorbed dose)定義為在一單位平方面積小質量吸收的能量。劑量轉換因子(dose conversion factor, DCF)則提供由攝入量以估算劑量的相對直接方式，劑量轉換因子通常來自非常詳細的模式，須考量衰變率(decay rate)、子核種的內生(daughter ingrowth)與核種在體內的代謝(metabolism)。

放射性核種的劑量估算可利用下式表示：

$$Dose_i = C_i \cdot R_i \cdot DCF_i$$

(5)

此處 $Dose_i$ 第 i 個放射性核種劑量[Sv/day]， $C_i \cdot R_i$ 為攝入量， C_i 為濃度[Bq/L]， R_i 為水的攝入率(rate of intake)[L/day]， DCF_i 為劑量轉換因子[Sv/ Bq]，不同核種的 DCF_i 可參考 ICRP(2012)。

利用本計畫解析解可計算得式(5)的 C_i 並由 ICRP 查得 DCF_i ，考慮水的攝入率 R_i 為 2 L/day (90 百分比)，可由(5)式計算得每一核種的劑量。

IV. 結論

本計畫目的為發展可考慮吸附相衰變的非平衡吸附反應的核種衰變鏈解析解模式，作為更準確的核種衰變鏈傳輸的分析工具，計畫中的解析解經與未考慮吸附相衰變的非平衡吸附反應的核種衰變鏈通式型解析解比較，兩者非常吻合，確認解的正確性與計算 FORTRAN 程式的準確性，研究中探討了吸附速率反應常數的影響，且與前人考慮平衡吸附反應的解析解比較，發現在大吸附速率反應常數下本研究解析解與考慮平衡吸附反應

的解析解計算結果一致，顯示此時吸附反應速率可以忽略，解析解可結合劑量估算公式推估劑量。

參考文獻

- [1] 何佑婕，2017，受限制速率吸附影響下之多物種溶質傳輸解析解模式，中央大學應用地質研究所碩士論文。
- [2] Chen, J.S., Liu, C.W., Liang, C.P., Lai, K.H., 2012. Generalized analytical solutions to sequentially coupled multi-species advective-dispersive transport equations in a finite domain subject to an arbitrary time-dependent source boundary condition. J. Hydrol., 456-457, 101-109.
- [3] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.)

用過核子燃料最終處置緩衝材料再飽和過程下水力傳導特性評估

Hydraulic Conductivity Properties of Buffer Material for Spent Nuclear Fuel Final Disposal under Resaturation Process

計畫編號：MOST 106-2623-E-020-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊樹榮

e-mail：sryang@mail.npust.edu.tw

計畫參與人員：張郁馨

執行單位：國立屏東科技大學

摘要

黏土常被用來作為高放射性核廢料緩衝材料，台灣現階段高放射性核廢料最終處置計畫係採深層地質最終處置方案，計畫中使用夯實的膨潤土作為緩衝材料，用來阻隔廢棄物罐與回填材料和母岩接觸，可以避免核種經由地下水過於快速地向外遷移。在處置場近場環境溫度升高作用下，緩衝材料出現的再飽和的水力過程影響了核種向外遷移的速度，由於緩衝材料於不飽和狀態下的水力傳導度影響再飽和的過程，本研究設計一個能夠模擬近場環境，且可量測緩衝材料於不飽和狀態下之水力傳導度的試驗系統，探討溫度和單位重對於緩衝材料水力傳導度的影響。

關鍵詞：緩衝材料、深層地質最終處置、水力傳導度。

Abstract

Clayey soils are used as buffer material in an engineered barrier system for isolation of high-level radioactive wastes (HLW) in a repository. In the current proposal for deep geological disposal of the high-level radioactive wastes in Taiwan, compacted bentonite is used to contain the metallic waste canisters and separate the waste from the host rock and backfill materials. The major roles of the buffer material are to reduce the groundwater flow, to protect the overpack from degradation, and to minimize the migration of radionuclides. The resaturation of the buffer considered as a hydro-process occurring at elevated temperatures in the near-field of a repository affects the migration of radionuclides. Hydraulic conductivity properties of buffer material affects this resaturation process. To evaluate the influence of temperature and dry density on hydraulic conductivity properties of buffer material, an equipment was designed to simulate the near-field environment of a repository and to measure the hydraulic conductivity at unsaturated condition.

Keywords: Buffer material, deep geological disposal, hydraulic conductivity.

I. 前言

放射性核廢料依其來源以及輻射放射性強度分為高放射性核廢料及低放射性核廢料，而核電廠使用過後的燃料棒屬於高放射性核廢料(即高階核廢料)。高放射

性核廢料毒性大、發熱量大、核種半衰期長，其對於人體及環境皆有極大的影響，因此高階核廢料之最終處置需要格外謹慎。另一方面，由於用過核子燃料棒其中所含之放射性核種壽命長達千百年至數十萬年以上，因此，放射性核廢料在最終處置時需具有高穩定性及高安全性，以降低輻射外泄之可能。世界各國對高放射性核廢料處置曾提出多種方案，如外太空處置、深海處置、海島處置、冰層處置及深層地質處置等等，目前國際間針對高階核廢料多採用深層地質最終處置法，而我國高放射性核廢料最終處置措施在經專家學者評估後，深層地質處置亦為可行性方案之一 [1-3]。

國內採用的用過核廢料最終處置方案，近程係將燃料棒置於廠內燃料池儲存，待核廢料放射性及衰變熱充分衰減後，再移至乾式中期儲存設施，一般儲存期限為50年，使高放射性核廢料產生之熱衰減至最低，再將高放射性核廢料裝填至內部鑄鐵外部銅殼之金屬罐，藉此提供足夠強度來抵抗外部侵蝕之能力，並且保護內部廢棄物體，可防止核種外釋至自然環境中，接著將廢棄物罐運送至處置場，利用豎井輸送至地下500至1000公尺處已開挖好的岩體處置坑中，在將廢棄物罐嵌入前，處置坑底部須事先襯填好夯實後的緩衝材料塊(buffer material)，並且在廢棄物罐周圍利用緩衝材料圍繞之。

深層地質最終處置場一般建構在500至1000公尺的地下深處，這個深度一般均屬於地下水充沛之飽水帶。在處置場開放運作後，地下水將從周圍壓力較高的地區向低壓區流動，而地下水最先接觸的將是回填材料，緊接著會影響到緩衝材料 [4]，使得緩衝材料吸收水分而由最初不飽和的狀態逐漸變為飽和狀態，同時核廢料所釋放出來的高溫衰變熱又會使得緩衝材料水分降低變成不飽和狀態，若地下水持續入侵又會使得緩衝材料再度飽和，此乾溼循環的過程稱之為再飽和過程。再飽和過程會影響水力傳導度變化，隨之影響放射性核種釋出的時間。因此，緩衝材料於不飽和狀態下的水力傳導度為影響放射性核種釋出或遷移的關鍵。

高放射性核廢料與地下水接觸乃是導致放射性核種釋出或遷移的主要途徑 [2]，本研究設計一個能夠模擬近場環境，且可量測緩衝材料於不飽和狀態下之水力傳導度的試驗系統。研究成果除可做為未來緩衝材料現場厚度與乾單位重設計之依據，並且可充分瞭解核廢料高溫衰變熱對緩衝材料水力傳導度之影響與再飽和過程中緩衝材料之水力傳導特性，以利建立我國本土化的

用過核子燃料最終處置緩衝材料再飽和過程的審查重點，確保深層地質最終處置場廢棄物處置設施之安全。

II. 試驗材料與研究方法

2.1 試驗材料

本研究實驗所使用的土壤為台灣磊盈公司進口由 Black Hills 公司於美國俄亥俄州(Ohio)所開採的 Black Hills Bentonite(以下簡稱 BH 膨潤土)，膨潤土是以蒙脫石為主要成份的黏土，蒙脫石黏土礦物是因火山爆發促使沉積在海底的火山灰或凝灰岩產生變質作用而成，膨潤土吸水力相當強，質地細滑且顆粒微小，且可耐高溫約 1200℃，一般可分為鈉型及鈣型膨潤土，其主要礦物成分為最少 90% 的蒙脫石，其餘含有長石、石英、黑雲母、方解石與高嶺土等。其土壤基本物理性質如表 1。

表 1 BH 膨潤土物理性質

比重 Gs	活性 Ac	ω (%)	LL	PL	PI
2.6	5.85	14	434	54	380

2.2 研究方法

本研究利用水平土柱法概念並加以改良，將土柱置於四周皆有加溫功能的恆溫烘箱中，模擬核廢料衰變熱對於緩衝材料影響的近場環境，探討近場環境中地下水遭受衰變熱之溫度變化以及其對緩衝材料穩定性之影響，同時，為了模擬地下水壓對土柱所產生之影響，將在土柱內打入水壓。研究變因包含單位重土與溫度，為加速試驗，設計三個水平土柱，可同時進行試驗，儀器設備圖如圖 1 所示。



圖 1 儀器設備圖

由於緩衝材料之不飽和土壤水力傳導度是影響地下水或海水入侵及核種外洩疑慮之關鍵，因此，本研究將利用不同單位重及溫度，分別試驗水汽平衡法求得最終之土壤含水量及吸力並繪製成土壤水份特性曲線，取得不飽和土壤水力傳導度參數依據，還有利用水平土柱法入滲試驗求得土壤擴散係數並推估不飽和土壤之水力傳導度。

2.2.1 水汽平衡法(Vapour Equilibrium Technique)

為了求得土壤水份特性曲線並取得不飽和土壤水力傳導度，將試體放在不同的飽和鹽溶液中控制試驗的環境濕度，利用水汽平衡之原理，使土壤試體孔隙間壓力與環境濕度達到平衡，即為水汽平衡法。本試驗參考

Schneider [5]所提出不同溫度下鹽溶質之相對濕度，選擇可達到預期吸力之適合的溶質進行試驗，如表 2 所示。

表 2 飽和溶液於不同溫度下之相對濕度與吸力值

	Temperature			
	40°C		60°C	
Saturated solution	RH (%)	Suction (MPa)	RH (%)	Suction (MPa)
NaCl	74.9	41.8	74	46.3
K ₂ SO ₄	96.8	4.7	96	6.3
Mg(NO ₃) ₂	48	106.1	40.5	138.9
KCl	82.5	27.8	80.1	34.1
MgCl ₂ ·6H ₂ O	32	164.7	30	185.1
NaNO ₃	70.8	49.9	67	61.6
LiCl	10.8	321.7	10.2	351

2.2.2 水平土柱法

土柱法又分為垂直土柱法與水平土柱法，水平土柱法的試驗早在 1950 年代就被提出，用水平土柱測定不飽和土壤水份擴散度實驗，普遍使用的方法是 Bruse 和 Klute 提出的水平土柱法，即利用一個半無限長水平土柱吸滲實驗，將乾單位重一致、初始含水量均一的土壤裝填在一水平土柱中，在土柱一端維持一個定水頭的供水，並使水份在土柱中做水平吸滲運動，且忽略重力作用，隨著時間增加，土壤各垂直剖面的含水量持續變化，因此該方法稱之為暫態剖面法，根據一維水平流動的偏微分方程式，引入 Bohzmann 變換後，求得計算公式，再由實驗資料列表計算值。經推導後，不飽和土壤擴散度可由下式求得：

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta z}{\Delta \theta} \sum_{\theta_a}^{\theta} \lambda \Delta \theta \quad (1)$$

其中， $D(\theta)$ 為土壤擴散係數； θ 為土壤體積含水量； $\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}}$ ， x = 濕潤鋒的位置， t = 入滲時間； $\Delta \lambda$ 為兩剖面間濕潤鋒前進之距離； $\Delta \theta$ 為兩剖面間之含水量差。

擴散係數 $D(\theta)$ 跟水力傳導度 $K(\theta)$ 關係如下：

$$D(\theta) = \frac{K(\theta)}{C} \quad (2)$$

其中 C 為比水容積，係為土壤含水量與基質吸力之比值，如下式所示：

$$C = \frac{\Delta \theta}{\Delta \phi} \quad (3)$$

其中 $\Delta \phi$ = 兩剖面間基質吸力差。

III. 結果與討論

3.1 土壤水份特性曲線(SWCC)

土壤水份特性曲線為緩衝材料飽和過程中數值模擬重要參數之一，將試體放在不同的飽和鹽溶液中控制試驗的環境濕度，利用水汽平衡之原理，使土壤試體孔隙間壓力與環境濕度達到平衡，即為水汽平衡法。土壤吸力可透過表 2 而得。

圖 2 至圖 3 為 BH 膨潤土分別在單位重 1.6 g/cm^3 、 1.7 g/cm^3 、 1.8 g/cm^3 的條件下，NaCl、與 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 鹽溶液在溫度 40°C 試驗水汽平衡法之重量變化圖。當試體的濕度小於玻璃容器內之濕度時，試體放入容器中，在玻璃罐內試體含水量會隨時間而增加，如圖 2 所示，反之，在當試體的濕度大於玻璃容器內之濕度時，試體放入容器中，其試體含水量會受到玻璃罐中鹽溶液所產生之濕度影響而下降，如圖 3 所示。

待試體重量穩定後，將試體取出烘乾量測最終含水量，藉以瞭解土壤吸力與含水量的關係。由於黏土礦物具有非常高的水份吸附能力，烘乾 24 小時無法完全移除孔隙水，本研究發現試體至少烘乾 10 天才能將水份完全移除。同樣方式可得其他鹽溶液試驗下，土壤吸力與含水量的關係，並可據此繪製土壤水份特性曲線。

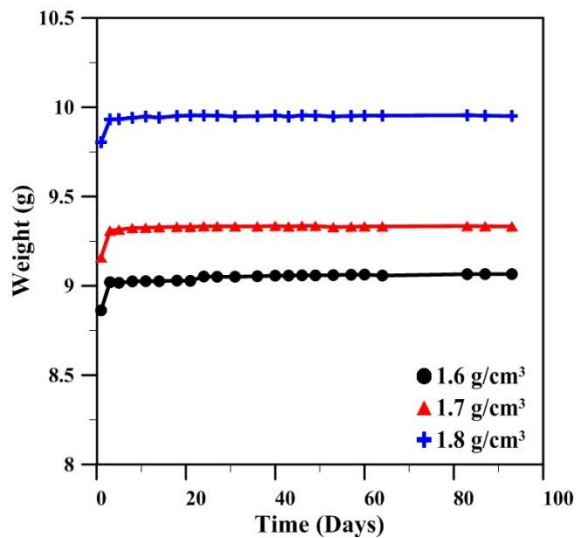


圖 2 40°C NaCl 重量變化圖

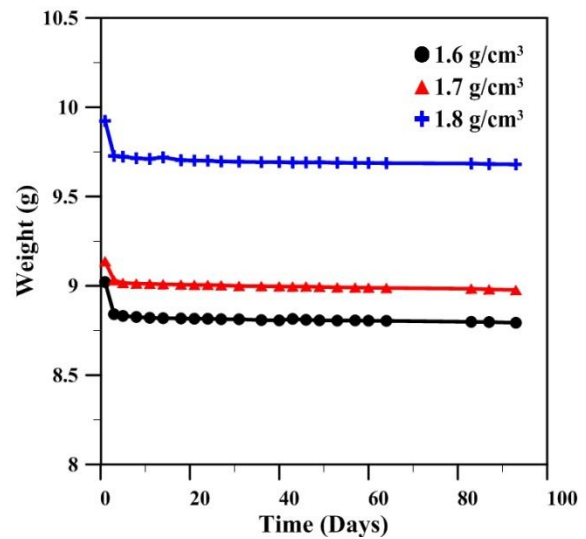


圖 3 40°C $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 重量變化圖

圖 4 及圖 5 為 BH 膨潤土分別在溫度 40°C 及 60°C 之土壤水份特性曲線(SWCC)。圖 6 為單位重 1.6 g/cm^3 於不同溫度下的 SWCC。由驗結果得知，不同溫度與單位重下 SWCC 差異性不大。

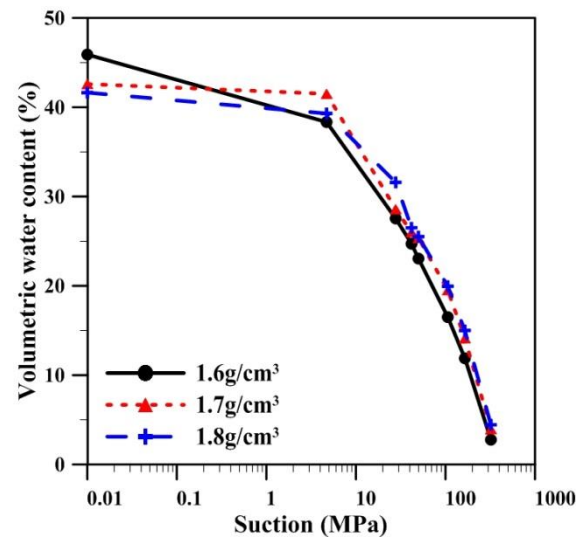


圖 4 40°C 各單位重 SWCC

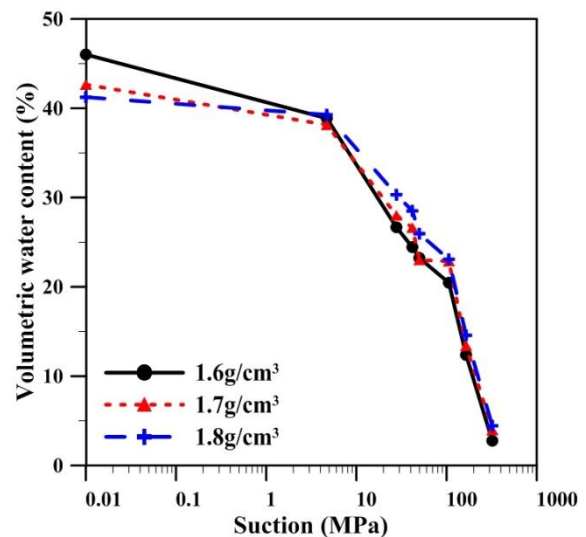


圖 5 60°C 各單位重 SWCC

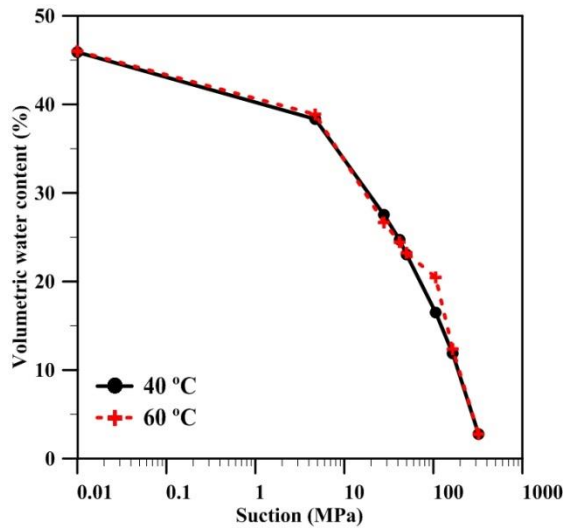


圖 6 不同溫度單位重 1.6 g/cm³ SWCC 比較

3.2 不飽和土壤擴散係數

本研究利用水平土柱法試驗並根據 Bohzmann 轉換公式(1)計算土壤擴散係數，進而根據式(2)求取不飽和土壤水力傳導度。40°C 各單位重之土壤體積含水量與擴散係數如圖 7 所示。由圖中可知，在相同含水量下，單位重 1.6g/cm³ 時土壤擴散係數較單位重 1.7g/cm³ 及單位重 1.8g/cm³ 之土壤擴散係數來得小，但在溫度 60°C，單位重 1.8g/cm³ 之土壤擴散係數則最小，如圖 8 所示。

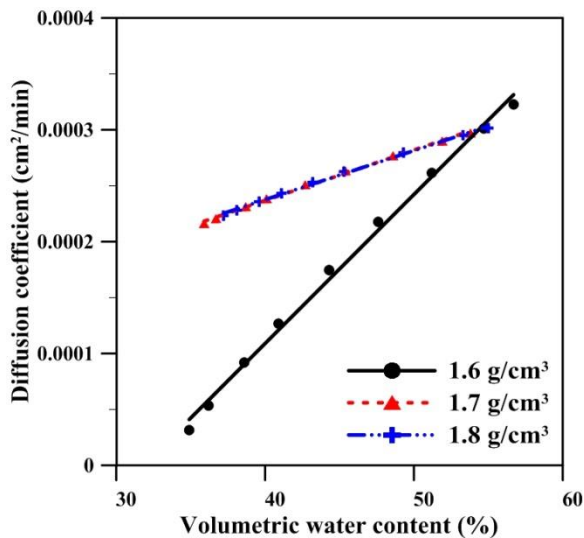


圖 7 40°C 不同單位重體積含水量與擴散係數圖

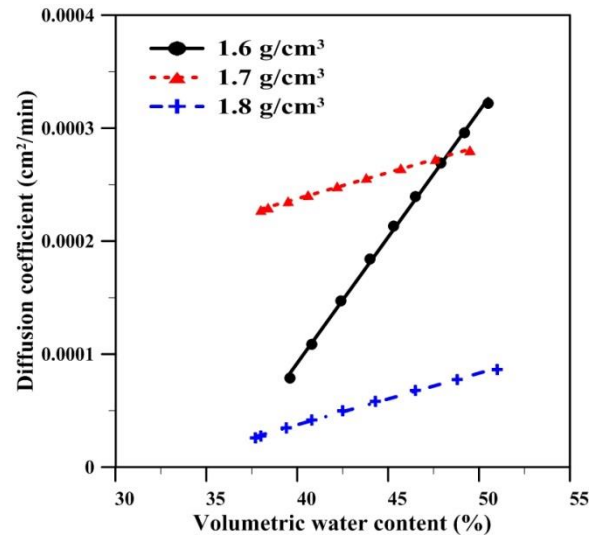


圖 8 60°C 不同單位重體積含水量與擴散係數比較圖

3.3 不飽和土壤水力傳導度

本研究根據水汽平衡法所求得之土壤 SWCC 與水平土柱法所求得之土壤擴散係數，利用式(2)土壤擴散係數與水力傳導度關係式，求得不飽和土壤水力傳導度之值，溫度 40°C 及 60°C 試驗該土壤於單位重 1.6 g/cm³、1.7 g/cm³、1.8 g/cm³ 飽和與不飽和時之水力傳導度及含水量關係如圖 9 及圖 10 所示，由圖 9 及圖 10 可得知，含水量越高，單位重 1.6 g/cm³ 之飽和土壤水力傳導度大於單位重 1.7 g/cm³ 及 1.8 g/cm³，然而，溫度越高，水力傳導度越不穩定，其原因為孔隙水的粘滯度會受到溫度變化而有影響，導致土壤水力傳導度變化極大。

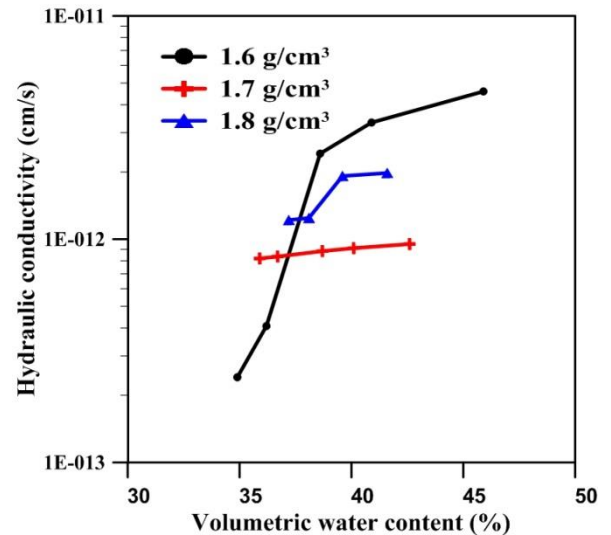


圖 9 40°C 不同單位重下不飽和土壤水力傳導度與體積含水量關係圖

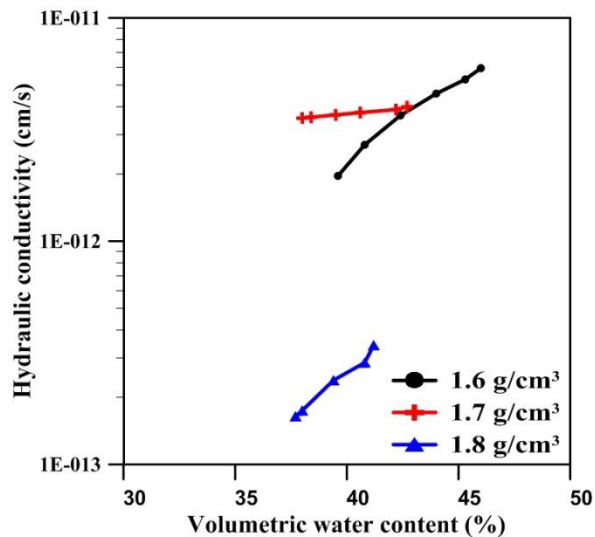


圖 10 60°C 不同單位重不飽和土壤水力傳導度與體積含水量關係圖

不飽和土壤中的水力傳導度是與含水量 θ 及飽和度有關，土壤在不飽和狀態時，土壤結構中的孔隙並沒有完全被孔隙水填充，故傳導度將會低於飽和時之水力傳導度，飽和度愈低水力傳導度則愈小 [6]。

IV. 結論

本研究利用水汽平衡法量測土壤之最終含水量，並繪製成土壤水份特性曲線，由水汽平衡法試驗中可得溫度與單位重對 BH 膨潤土 SWCC 影響不大，但對擴散係數與不飽和土壤水力傳導度則有較明顯的影響。

參考文獻

- [1] 台灣電力公司，「用過核子燃料最終處置計畫-潛在母岩特性調查與評估階段」，成果報告，2013。
- [2] 黃偉慶，「用過核子燃料深層地質處置場近場緩衝材料耦合效應研析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託計畫研究期末報告，2014。
- [3] 張瑞宏、黃偉慶，「深地層處置設施緩衝材料熱-水力-力學耦合模擬研析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託計畫研究期末報告，2015。
- [4] 郭永海、王駒、金遠新，「世界高放廢物地質處置庫選址研究概況及國內進展」，地學前緣 Earth Science Frontiers，第 8 卷，第 2 期，第 327-332 頁，2001。
- [5] Schneider, A. "Neue diagramme zur bestimmung der relativen luftfeuchtigkeit uber gesattigten wasserigen salzlosungen und wasserigen schwefelsaurelosungen beiverschiedenen temperaturen", Holz als Rohund Werkstoff18, 269-272., 1960.
- [6] van Genuchten, M. "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil .Sci. SOc. Am.J. 44,pp.892—898. 1980.

用過核子燃料重要核種於深地層處置之物種分析與遷移機制研究 -重要核種在不同氧化還原環境下之生成物種分析與研究 Study on speciation of important radionuclides under oxi-reducing conditions

計畫編號：MOST 106—NU—E—006—002—NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李傳斌博士

e-mail：cplee@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：康綾珍、潘春花、吳銘志

執行單位：國立成功大學地球科學系

摘要

本計畫之實驗方法與分析成果可分為兩個部分：首先，利用一套標準物種分析方法，已成功完成分析不同的硒物種，並定量分析不同核種（硒，Se）之穩定同位素的物種濃度，如：4價硒（ SeO_3^{2-} ）、6價硒（ SeO_4^{2-} ）。其次，以高效率離子層析儀（IC）搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀（ICP-OES）或感應耦合電漿原子質譜儀（ICP-MS），進一步定量分析不同硒物種，如：4價硒（ SeO_3^{2-} ）與6價硒（ SeO_4^{2-} ）之穩定同位素的物種最低可偵測濃度（Detection Limit）。

以 ASTM 批次實驗方法，利用 1g 與 30mL 的固液比條件下，經 7 天震盪後，利用 IC 與 ICP-OES 個別分析其物種濃度與定量濃度，交叉比對後，其實驗分析結果整理如表 3，並由吸附率 $S(\%)$ 及分配係數 K_d 值 (mL/g) 的結果發現，花崗岩對 4 價硒（ SeO_3^{2-} ）與 6 價硒（ SeO_4^{2-} ）具有不同的吸附行為，可由其 K_d （4 價硒， SeO_3^{2-} ）大於 K_d （6 價硒， SeO_4^{2-} ）得知，同時發現花崗岩幾乎不吸附 6 價硒（ SeO_4^{2-} ）。

關鍵詞：高效率離子層析儀、4 價硒、6 價硒、花崗岩、吸附

Abstract

Among the methods for selenium (Se) speciation we knew, this study propose a new method by coupling the Ion Chromatography (IC) and the Induced Couple Plasma Optic Emission Spectrometer (ICP-OES), thus to measure simultaneously the concentration of SeO_3^{2-} and SeO_4^{2-} in aquatic solutions; within the detection limit for Se (1~50 ppm).

The method of using IC and ICP-OES measurements for Se species has been successfully developed in this study and also been recognized for the Se speciation; as well as been developed to be used as a detector of Se. ^{79}Se , with long half-life of million years, is a fission product in High-Level Radioactive Waste (HLW) as well as a critical radionuclide for the assessment of geological disposal of HLW.

According to the pH-Eh diagram of selenium, elementary Se (Se^0) and selenide (Se^{2-}) should prevail in reducing conditions, selenite (Se^{4+}) and selenate (Se^{6+}) in oxidizing conditions. In the present study a new method

based on Ion Chromatography (IC) and ICP-OES or ICP-MS will be tried to measure Se species of different oxidation states in solution. This method then may be applied to study the sorption and diffusion behaviors and mechanism of SeO_3^{2-} and SeO_4^{2-} for granite in synthetic groundwater by batch tests.

Keywords: IC, SeO_3^{2-} , SeO_4^{2-} , granite, sorption

I. 前言

用過核燃料含有萬年以上之高毒性且長半化期核種，如：Pu（Plutonium，鈾）、Np（Neptunium，釷）等，其最終處置之安全性需考量將其與人類生活圈長久隔離；因此，用過核燃料的最終處置，是核能發電之後端營運中，最關鍵的課題。

「多重障壁」是由「人工障壁」與「天然障壁」所構成；其中，人工障壁係包封用過核子燃料或高放射性廢棄物的堅固金屬容器，以及金屬容器外所填入能抑制核種傳輸的低透水性緩衝材料（如：膨潤土），以及確保處置單元安全的工程結構體所組成；而天然障壁則為可遠離人類生活環境的完整且體積碩大之處置場的母岩，其應具有地下水稀少、流速緩慢，且地質環境穩定等特性條件，係經審慎調查後評選出的合適岩層。

按各國的研究結果顯示，花崗岩（結晶岩）對於阻滯核種外釋，其主要優點在於岩體的緻密性與完整性，其所結構而成之地層甚為穩定，且其熱傳導性及機械強度皆較好；其最主要的功能在於提供一個地質及物理、化學上皆屬穩定的環境。然而，黏土層的不透水性及其對於核種的吸附性均優於結晶岩，故兩者均各有其優點，在地質調查中均為重要的研究項目和功能安全評估的重點。

放射性廢棄物中的放射性核種自用過核子燃料中釋出，然後在深地質環境下的遷移過程，最後進入人類生活圈，對人體造成輻射危害，這整個「核種遷移」的過程，基本上是針對放射性廢棄物的最終處置，所應要深入瞭解的核心課題。因此，該項工作更應是我國目前推動高放射性廢棄物最終處置的重點發展技術工作；特別是在日本 311 福島事件之後，放射性核種在自然環境中的遷移研究，已成為歐、美、日許多國家實驗室的重點研究與技術發展項目。近年來，各國紛紛投入在不同氧化還原環境條件下，放射性核種之物種分析技術的發

展；其中，對於 Np(鈾)、Pu(鈾)、Am(錒)、Cm(錒)、U(鈾)等錒系(Actinium, ^{89}Ac)核種的分析技術建立更是一大難題；除了因為這些核種在不同氧化還原的價數甚多以外(圖1)，根據目前地質調查結果顯示，深地質的環境條件和一般大氣下的實驗條件有著極大的差異，其中二者最大的區別在於其低氧氣濃度與地下水環境為還原狀態($E_h < 0 \text{ mV}$ ，氧化還原電位小於0)的差異。因此，在我國尚未建立深地層地下實驗室之前，如何在實驗室內，模擬深地層環境條件(低氧且氧化還原電位小於0)，並能精確地度量與分析不同價態的放射性核種將會是一大挑戰。根據各國經驗顯示，該研究將會是一項長期性的跨領域整合型研究工作，預計將由核工、原料、地科、環境、化工、水文地質等不同研究團隊，依其專業領域分工合作，完成本土核種遷移研究，並需嘗試與各國研究團隊互相交流與驗證，建立國際合作關係，提升我國在核種遷移研究之技術能力。

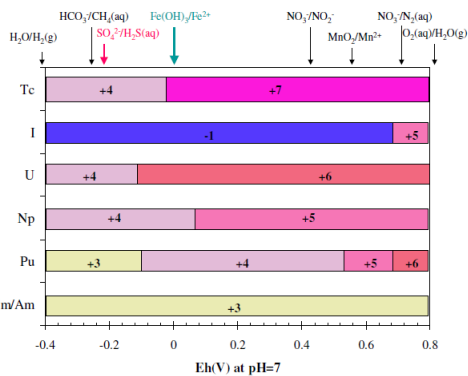


圖1、在 pH 值為 7、氧化還原條件下，不同的放射性核種可能存在不同價態的物種。

在完成放射性廢棄物最終處置場建置工作之前，必須經過各種功能安全評估的分析計算，並利用各種不同類型的數值模式，分析在各種不同環境條件下的結果，進而提出一套完整且可靠的評鑑辦法，使處置場如何達到最佳的圍阻效益；除了對場址的地質、水文進行詳盡的調查外，尚需對當地岩石、礦物及地球化學等條件，作進一步的分析與評估，俾以建構最終處置場的場址初步概念模式，進而能在下一階段進行場址設計模式的修正與可行性的驗證。

由於高放射性廢棄物處置場係長期位於地底深層，一旦發生地下水入侵而使具毒性放射性核種與圍岩地質發生化學反應，其將可能造成有毒核種的外釋；因此，放射性廢棄物的深層地質處置之地球化學特性調查、分析研究與核種遷移參數評估，一直是各國在放射性廢棄物處置場的場址選擇中最重要的研究工作，特別是針對在低氧氣濃度與潛在地下水環境條件(還原狀態，氧化還原電位 $E_h < 0 \text{ mV}$)下，對緩衝/回填材料的滲透性、化學緩衝性、核種吸附能力等之可能的影響。

近年來各國對於硒(Se, Selenium)的研究有重新回溫的情況，主要乃因為其化學特性。硒與硫同屬 6 族，化學性質有許多類似的地方，例如：在自然界中，同樣有多數以 4 價與 6 價的氧化陰離子存在(如： SeO_3^{2-} 、 SeO_4^{2-})，也因為這樣的特性，硒與生物有相當多的交

互作用。在生物體中，硒是需求量極少但缺少的話又會致病的微量營養素，人類體內的硒若少於 0.1 mg/kg ，肌肉組織會出現病狀，大於 $3\sim 4 \text{ mg/kg}$ 人類會出現一種叫「蹣蹣病」的現象。由這些發現可知，硒對於人類及生態圈有著不可忽視的影響力，而現代社會中硒的使用也非常的廣泛，工業金屬的提煉(如：銅、鋅、.....等)，還有半導體電子元件，如：玻璃、塑膠、混凝土、染料、潤滑油等，還有家用的洗髮精等等，都有硒的存在。除此之外，硒-79也是核分裂產物之一(半化期數十萬年)；因此，亦是目前各國放射廢棄物處置所關注的關鍵核種。硒在好氧水溶液環境中，其主要的物種(species)為以陰離子 SeO_3^{2-} 及 SeO_4^{2-} 的形態存在，導致易於在天然介質中遷移，有許多關於礦物或土壤對硒之收附(sorption)研究，均有 SeO_3^{2-} 的被吸附(adsorption)率大於 SeO_4^{2-} 之發現，如：針鐵礦、蒙脫石、農業及森林土壤等，都是針對固相材料為土壤礦物之研究，僅少數研究是針對花崗岩的，如：Papelis (2001) 指出硒在花崗岩之吸附為 Freundlich 的等溫吸附模式，且其吸附量隨離子強度增加而增加。

本計畫主要乃針對深層地質處置的實驗環境條件(還原狀態，氧化還原電位 $E_h < 0 \text{ mV}$)對放射性核種的物種影響進行探討與分析研究。因此，需要建立一套實驗裝置來維持無氧條件的環境，並確保深地層環境模擬實驗的穩定性。本實驗室與核能研究所化學組共同合作，以放射化學實驗室中的厭氧手套裝置(Glove Box)，模擬深層地質處置實驗條件，並確認厭氧手套裝置環境中的氧氣濃度($< 100 \text{ ppm}$)可連續維持超過 2 個月並達穩定。除定期記錄合成地下水之 pH、 E_h 及 DO(溶氧)值，觀察厭氧手套裝置環境條件之變化；俾以確認可於實驗室中模擬深地層實驗之低氧氣濃度與還原條件合成地下水。待完成厭氧手套裝置之穩定測試(低氧氣與還原態)，並以批次法(吸附實驗)或管柱法(動態吸附實驗)，同時準備兩組實驗樣品，探討硒(SeO_3^{2-} 、 SeO_4^{2-})在不同環境條件下，對緩衝回填材料的吸附與擴散行為之差異。

II. 主要內容

過去數十年來，均以利用放射分析化學方法(Radio-Analytical method, RA 法)進行重要核種的活度分析；然而，近年來在不同高解析度或進階光譜技術，或質譜儀器等，陸續被開發與建立標準分析方法後，除了可利用放射分析化學方法以外，更進一步地可利用高階光譜儀或質譜儀，進行定量分析不同核種之濃度；爰此，對於度量環境中不同核種，有著相當大的助益。然而，RA 法與光譜技術或光譜儀、質譜儀，均有其本身的限制，並非完美無瑕，例如： β 核種的能譜(為連續電子能譜)非常容易受到基質種類、pH 及周圍其它放射性核種等因素之影響；而超鈾元素 α 的能譜，則有射程太短、易被遮蔽的困難；質譜或光譜分析均取決於其最低偵測極限與光譜干擾。此外，兩者均無法分析其核種之不同物種，僅能分析其總濃度或活度。

因此，本研究利用一套標準物種分析方法，已成功完成分析不同硒物種，並定量分析不同核種(硒)之穩定同位素的物種濃度，如：4 價硒(SeO_3^{2-})、6 價硒(SeO_4^{2-})。

再者，以 IC 搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES) 或感應耦合電漿原子質譜儀 (ICP-MS)，進一步定量分析不同硒物種，如：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 及 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 之穩定同位素的物種最低可偵測濃度 (Detection Limit)，並透過 ASTM 批次法分析不同硒物種於臺灣本土花崗岩之吸附行為之差異。其 IC 與 ICP-OES 儀器分析方法簡述如下：

2.1 物種分離方法

(1) 高效率離子層析儀 (IC, Ion Chromatography)

高效率離子層析儀 (圖 2) 係利用離子交換能力的不同，使溶液中的離子經過離子交換樹脂所充填的管柱 (column) 予以分離，以定性定量分析不同離子之強度。IC 的構造主要包括：流洗液 (eluent)、幫浦 (pump)、分離管柱 (separation column)、抑制管 (suppressor)、檢測器 (detector) 及資料處理系統 (computer)。偵測器 (detector) 一般為電導度計，所測得之各成份的電導度訊號，經資料處理系統的運算 (電路積分) 後，可得波峰之面積，該面積則作為離子濃度定量之用。分離管柱 (separation column) 的原理即是利用對溶液離子親和力相異的樹脂，親和力較強的樹脂，該離子不易被帶出，滯留時間較長；親和力較弱，陰離子易保持原有離子狀態，離子滯留時間短。利用高效率離子層析儀的基本流程為，樣品經由流洗液 (eluent) 被幫浦 (pump) 帶入分離管柱中，由於樣品中所含之離子與分離管柱中所填充的樹脂之間具有不同的親和力，利用兩者間的親和力之大小不同，離子與樹脂產生交換作用而吸附於樹脂交換基之上。「流洗液」一般為強電解液，濃度高而多量，因此將造成相當高的背景值，訊號雜訊 (noise) 強，使訊號雜訊比 (Signal/Noise) 變小，常會遮蔽了待測離子的訊號，因此需在流洗液流經分離管柱後，再經過一抑制管柱 (suppressor column)，將流洗液中之強電解質轉變微弱電解質，並且能將原欲分析之離子由鹽類轉變為酸或鹼而加強其電導度。

離子層析儀所能分析的離子幾乎涵蓋所有的陽離子及陰離子，在某些分析上，它取代了 A.A.、Emission、GC、NMR、Ion Meter 等。目前所能分析的離子有：鹵素，有機酸，有機鹽類，磷酸鹽，胺等。其特點包括：(1) 離子間不會互相干擾而影響檢出之正確性；因此，(2) 可同時分析多種離子，並進行定性及定量分析。(3) 儀器檢測的靈敏度高 (10 ppb 以下)，適用濃度範圍廣 (0.001~103 ppm)。(4) 分析速度快，每個離子不超過兩分鐘。(5) 所使用之溶媒為一般無機溶劑，費用經濟。本計畫係首次執行不同硒物種之濃度定量分析，包括：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 及 6 價硒 (SeO_4^{2-})。

(2) 感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES, Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)

感應耦合電漿原子發射光譜儀 (圖 3) 為微量元素分析常用之檢測儀器，係利用通過高頻電感耦合產生電漿體放電的光源，進行原子發射光譜分析的方法；

是為一種火焰溫度範圍 6000~10000K 的火焰技術。其原子發射光譜的發射強度即表示樣品中元素的濃度，為一種新型激發光源，性能優異，應用廣泛。此技術可提供實驗室一相對簡單及具成本效益之元素檢測方法；可以定量濃度低至 ppm，甚至 ppb 等級之元素。

感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES) 主要包括：電漿體炬管 (ICP torch)、高頻發生器 (radiofrequency generator，為產生高頻電流)、感應圈 (work coil)、供氣系統 (air supply system) 和霧化系統 (analytical nebulizer)。炬管由三層同心石英玻璃管組成。外管內切向通入的氬氣 (Argon) 為電漿體工作氣或冷卻氣。中管通入的氬氣為輔助氣。內管中的氬氣為載氣 (eluent gas)，將試樣氣膠 (aerosol) 引入炬管中。

使用感應耦合電漿原子發射光譜儀進行樣品分析時，其分析結果常會受到許多干擾因素的影響，而導致誤差的產生。常見的干擾可分為兩類，分別為光譜性干擾及非光譜性干擾 (人為影響)。其中，光譜干擾可分為 (1) 不同元素光譜的重疊 (2) 分子光譜無法解析的重疊 (3) 由光譜連續及電漿中物種之再結合現象造成之背景 (4) 因高濃度元素迷光造成干擾。因此，根據行政院環境保護署環境檢驗所之標準方法 (水中金屬及微量元素檢測方法：感應耦合電漿原子發射光譜法 NIEA W311.52C) 建議，進行分析時應盡量降低光譜性干擾與排除非光譜性干擾 (人為影響)。

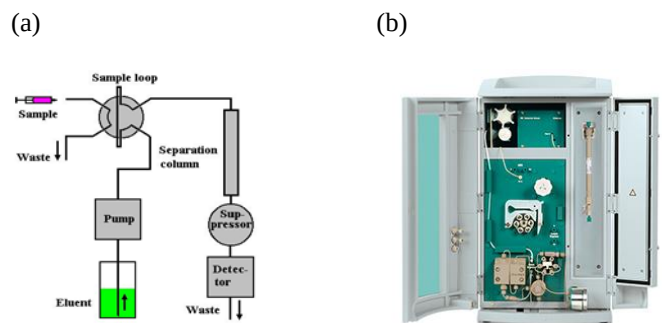
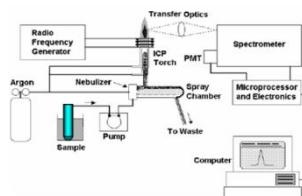


圖 2、離子層析儀 (IC) 分析原理與照片

ICP-OES (PerkinElmer 7000DV) 該儀器為國立成功大學地球科學系穩定同位素實驗室所有，在本計畫中將搭配 IC 進行不同硒元素濃度的定量分析，包括：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 及 6 價硒 (SeO_4^{2-})。ICP-OES 為一種原子發射光譜儀，藉由吸收熱量成為激態，而以發光的形式放出能量。ICP-OES 系統採用電腦自動控制，並配合 WINLAB32 軟體進行實驗分析。液態樣品經過霧化成細粒狀後，形成氣膠 (Aerosol) 粒子，氣膠粒子則藉由載送氣流 (氬氣) 傳送到電漿及分光儀進行元素分析 (圖 3)。ICP-OES 的偵測極限可達到 ppb 等級，且能進行多元素分析，並能達到定性、定量的效果。測試樣品的時候需配製檢量線，而測試樣品的最高濃度不得超過檢量線的上限，其相關係數 (R^2) 達到 0.9999 為佳，而分析時根據不同元素其相關係數最好均大於 0.99 以上，進而達到定量分析。在本計畫中將配合 IC (高效率離子層析儀) 執行不同硒物種之濃度定量分析，包括：4 價硒

(SeO_3^{2-}) 及 6 價硒 (SeO_4^{2-})，並建立一套標準物種分析方法。

(a)



(b)



圖 3、ICP-OES 的進樣流程與主機

2.2 批次法

利用批次吸附實驗來探討核種的分配係數 (K_d) -- 吸附參數，已經被廣泛的使用在放射性廢棄物處置場的功能安全評估上。根據前人研究顯示，礦物扮演著對核種吸附的主要關鍵角色，對核種具高吸附性的礦物表示遲滯核種的外釋與遷移的能力較佳，富有黏土礦物與雲母類的岩石乃具有較高的吸附效果。在過去之研究文獻成果中，已知富有黏土礦物的膨潤土對陽離子具有高吸附作用。本研究主要乃利用已完成建立之標準物種分析方法，包括：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 和 6 價硒 (SeO_4^{2-})，加上 ASTM C1733-10 (2010) 批次法，進行，探討不同核種 (硒) 於臺灣本土潛在母岩 (如：花崗岩) 之吸附行為的差異性。

本工作項目乃利用 ASTM C1733-10 (2010) 的標準方法，進行模擬花崗岩對 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 的吸附實驗，即利用 IC 搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES) 進行 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 濃度變化的分析，了解 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 在花崗岩中的分布情形。於本研究中，所使用的收附模式 (sorption model) 為：「當核種在液相中的濃度很低，而且吸附於固相所耗費的時間很短時」，針對核種在固、液相上的比例，將可以下列關係式表示：

$$K_d = \frac{(C_0 - C)}{C} \cdot \frac{V}{M} \quad (1)$$

式 (1) 中 C_0 為初始濃度 (ppm)， C 為實驗進行 7 天後溶液核種的剩餘濃度 (ppm)， V 為加入試驗管柱中之液相的體積 (mL)， M 為膨潤土樣品之重量 (g)；

III. 結果與討論

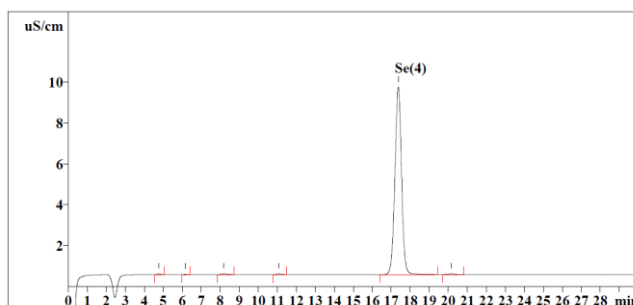
3.1 硒物種分離與鑑定分析

首先利用 ICP-OES (Perkin Elmer 7000DV) 定量分析不同硒物種：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 之濃度。本項工作主要乃是利用已知的二氧化硒 (SeO_2) 與硒酸鈉 (Na_2SeO_4) 粉末溶於去離子水中；以四位數天秤精秤，配置數個不同濃度之 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 之濃度 (1~50 ppm)。經過反覆測試後，選擇陰離子層析管柱 (Metrosep A Supp3, 4.6 x 250 mm)，並以 1.0 mM NaHCO_3 與 3.2 mM Na_2CO_3 流洗液，在流

速每分鐘 0.7mL 下沖提，可將 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 成功的分離於 17 與 22 分鐘附近，並且在 Se 濃度 1 至 50 ppm 間有良好的線性範圍 (圖 4)。

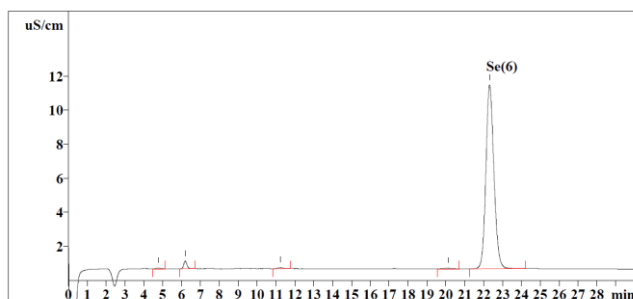
(a)

CHROMATOGRAM PLOT



(b)

CHROMATOGRAM PLOT



(c)

CHROMATOGRAM PLOT

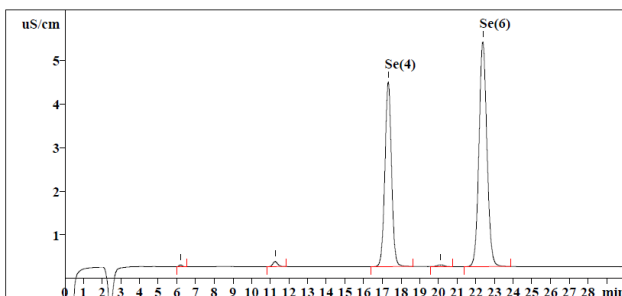


圖 4、硒物種：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 的分離與鑑定分析。

3.2 分配係數 (K_d) -- 硒物種：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-})

為了更真實地反應放射性廢棄物處置場的放射性核種遷移行為，除了探討硒物種：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 在去離子水中，於花崗岩上的吸附行為以外，本計畫更進一步將以模擬地下水之地球化學條件，並以 Na、K、Ca、Mg、Cl、S 等離子做為模擬合成地下水之主要元素，進行之吸附實驗。以 ASTM 批次實驗法，利用 1g 與 30 mL 的固液比條件下，經 7 天震盪後，利用 IC 與 ICP-OES 個別分析其物種濃度與定量濃度，交

又比對後，其實驗結果整理如表(1)，並由吸附率 $S(\%)$ 及分配係數 K_d 值 (mL/g) 的結果發現，花崗岩對 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 具有不同的吸附行為，可由其 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 的 K_d 大於 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 的 K_d 得知，並可發現花崗岩幾乎不吸附 6 價硒 (SeO_4^{2-})。

表 1、分配係數 (K_d) -- 硒物種：4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-})。

液相	去離子水	
RN	S (%)	K_d
4 價硒 (SeO_3^{2-})	16.5	7.5
6 價硒 (SeO_4^{2-})	0	0

IV. 結論

本計畫已成功建立 IC 與 ICP-OES 之硒物種定量分析方法，硒在好氧水溶液環境中主要物種 (species) 為以陰離子 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 與 6 價硒 (SeO_4^{2-}) 的形態存在，導致易於在天然介質中遷移，並可從批次實驗結果發現，4 價硒 (SeO_3^{2-}) 被吸附率大於 6 價硒 (SeO_4^{2-})，由文獻可知，如：針鐵礦、蒙脫石、農業及森林土壤等，均具有對 4 價硒 (SeO_3^{2-}) 的吸附行為。

由於高放射性廢棄物處置場將因長期位於地表下之深層地層中，一旦發生地下水入侵而使具毒性的放射性核種與地質發生化學反應，進而將可能造成有毒核種的外釋。因此，放射性廢棄物深地質處置之地球化學特性調查分析研究與核種遷移參數評估，一直是各國在放射性廢棄物處置場的場址選擇中，最重要的研究工作；特別是針對在低氧氣濃度與潛在地下水環境條件 (還原狀態，氧化還原電位 $E_h < 0 \text{ mV}$) 下，對緩衝/回填材料的：滲透性、化學緩衝性、核種吸附能力等之可能影響。

故此，本研究團隊 (成功大學 地球科學系與清華大學 原子科學技術發展中心) 與核能研究所化學組去年開始共同合作，以放射化學實驗室中的厭氧手套裝置 (Glove Box)，模擬深層地質處置環境之實驗條件，並確認厭氧手套裝置環境中氧氣濃度 ($< 100 \text{ ppm}$) 可連續維持超過 2 個月達穩定，定期記錄合成地下水之 pH、 E_h 及 DO (溶氧) 值，觀察厭氧手套裝置環境條件之變化，以確認可於實驗室中模擬深地層環境之低氧氣濃度與還原條件合成地下水。待完成厭氧手套裝置之穩定測試 (低氧氣與還原態)，並以批次法 (吸附實驗) 或管柱法；同時準備兩組實驗樣品，探討硒 (SeO_3^{2-} 及 SeO_4^{2-}) 在不同環境條件下，對緩衝回填材料的吸附與擴散行為之差異。此外，除了建立 IC (離子層析儀) 搭配 ICP-OES (感應耦合電漿發射光譜儀) 分析不同硒物種方法以外，後續將持續進行利用不同的材料分析法，如：電子顯微鏡分析 (SEM)、能量分析儀 (EDS)、X 光光電子分析法 (XPS)、X 光繞射分析 (XRD)、X 光螢光分析 (XRF)、拉曼顯微光譜分析、X 光斷層掃描分析 (Micro-CT)、拉瑟福背向擴散分析 (RBS) 與同步輻射中心提供之 XANES (X 光吸收近邊緣結構) 等分析技術，以金門花

崗岩或懷俄明膨潤土 (MX-80) 為材料進行分析實驗，俾以建立在不同條件下，緩衝回填材料黏土礦物結晶形態與花崗岩薄片的硒 (SeO_3^{2-} 與 SeO_4^{2-}) 分析技術，並與傳統批次法 (或管柱法) 交互驗證 (國內及國際文獻比較)，以克服不同吸附性核種長時間 (長期) 耗時遷移實驗之困難，更可進一步了解核中遷移過程中的遲滯特性及反應機制。

參考文獻

- [1] ASTM (2010) American Society for Testing and Materials. Philadelphia, C1733-10
- [2] Crank J., 1975. The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., Oxford University Press London
- [3] Hsu, C. N., Y. Y. Wei, J. T. Chuang, C. L. Tseng, J. Y. Yang, C. H. Ke, H. P. Cheng, and S. P. Teng (2002) Sorption of Several Safety Relevant Radionuclides on Granite and Diorite – A Potential Repository Host Rock in Taiwan Area, *Radiochimica Acta*, 90, pp.659-664
- [4] Tsai S.C., Ouyang S., Hsu C. N. Sorption and diffusion behavior of Cs and Sr on Jih-Hsing bentonite. *Appl. Rad. Isotopes* 54 (2001) 209-215.
- [5] T.E Payen et al., Relationship of quantitative X-ray diffraction measurements of geologic materials to Cs sorption. *Radiochim. Acta*, 90 (2002) 705-711
- [6] Xia, X., K. Iijima, G. Kamei and M. Shibata (2006) Comparative study of cesium sorption on crushed and intact sedimentary rock, *Radiochimica Acta*, 94, pp.683-687
- [7] Lee, C. P., L. P. Lan, Y. L. Jan, Y. Y. Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu (2006) Sorption of Cesium on Granite Under Aerobic and Anaerobic Conditions, *Radiochimica Acta*, 94, pp.679-683
- [8] Lee, C. P., Y. L. Jan, L. P. Lan, Y. Y. Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu (2007) Anaerobic and Aerobic Sorption of Cesium and Selenium on Mudrock, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274, pp.145-151
- [9] Lee, C. P., S. C. Tsai, Y. Y. Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu (2008) Comparative Study on Sorption of Individual and Coupling Cesium and Selenium on Mudrock, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 115-119.
- [10] Lee, C. P. Y. M. Kuo, S. C. Tsai, Y. Y. Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu (2008) A Numerical Analysis for

- Characterizing the Sorption/Desorption of Cesium in Crushed Granite, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 343-349.
- [11] Lee, C. P., S. C. Tsai, Y. L. Jan, Y. Y. Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu (2008) Sorption and Diffusion of HTO and Cesium in Crushed Granite Compacted to Different Lengths, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 371-378
- [12] Taiwan Power Company (2009) Preliminary Technical Feasibility Study for Final Disposal of Spent Nuclear Fuel - 2009 Progress Report (Summary) Taiwan.
- [13] Tsai, T. L., C. P. Lee, T. Y. Lin, H. J. Wei, and L. C. (2010) Men Evaluation of Sorption and Diffusion Behavior of Selenium in Crushed Granite by Through-Diffusion Column Tests, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 285, pp. 733-739.
- [14] Wu, M.-C. and Cawfield, J. D., 1992, Probabilistic Sensitivity and Modeling of Two-Dimensional Transport in Porous Media, No. 6, Stochastic Hydrology and Hydraulics, Springer-Verlag, pp. 103-121.
- [15] Wu, M.-C. (1993) Probabilistic Sensitivity Analysis for Contaminant Transport Modeling with a Reliability Algorithm, Ph.D. Dissertation, University of Missouri – Rolla, 314 p.
- [16] Cawfield, J. D. and Wu, M. -C., 1993, Probabilistic Analysis of One-Dimensional Reactive Transport Porous Media, Vol. 29, No. 3, Water Resources Research, American Geophysical Union, pp. 661-672.
- [17] Wu, M.-C. and Shih, K., 1999, Modeling The Inter-Strata Seepage Effect Near the Nanhua Reservoir, *Journal of the Geological Society of China*, Vol. 42, No. 3, pp. 409-428
- [18] P. Christophe, and G. Horst. 2012 Radionuclide behavior in the natural environment. Woodhead, U.K
- [19] 李振誥、吳銘志、陳俊焜, 1997, 土壤持水曲線碎片維度之研究-案例說明, 臺灣水利, Vol.45, No.3, pp. 29-41。
- [20] 周定芳、吳銘志、鍾廣吉, 1997, 儲集層特性分析技術之建立與應用實例, 臺灣石油地質, 第三十一期, 第 203-232 頁。
- [21] 劉文忠, 銻、鋇及鈷在安山岩及珊瑚礁石灰岩中遷移行為之研究, 國立清華大學原子科學系研究所, 博士論文, 1990 年 7 月。
- [22] 許俊男, 「在模擬地下水中沸石和高嶺土對銻鉍核種的吸附機制研究, 」國立清華大學原子科學系, 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告 (1996)。
- [23] 林哲毅, 「從緩衝材料觀點研究放射核種在膨潤土中的吸附與擴散行為, 」國立清華大學原子科學系研究所, 碩士論文 (1997)。
- [24] 張顥齡, 「酸鹼度和溫度對銻鉍在膨潤土中吸附與擴散行為之影響, 」國立清華大學原子科學系研究所, 碩士論文 (1997)。
- [25] 劉靜蓉, 「銻鉍在潛在母岩與水泥工程障壁中吸附與擴散的基礎研究, 」國立清華大學原子科學系研究所, 碩士論文 (1999)。
- [26] 黎華嶸, 「鉍在粉碎花崗岩與低鹽度人造地下水中傳輸之研究, 」國立清華大學原子科學系研究所, 碩士論文 (2000)。
- [27] 陳子雲, 「放射性廢料處置主要核種之遷移, 」清華大學原子科學系研究所, 碩士論文 (2001)。
- [28] 郭殷銘, 「鉍在粉碎花崗岩中宿命與傳輸模式之建立, 」國立清華大學原子科學系研究所, 碩士論文 (2002)。

放射性廢棄物處置場處置隧道及處置孔間距之尺度規劃研究

Planning Study of the Distance between Deposition Tunnels and Disposal Holes in Repository of Radioactive Waste

計畫編號：NSC 106-2623-E-327-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：林志森

e-mail：linct@nkfust.edu.tw

計畫參與人員：王瑋麟、梁繼中

執行單位：國立高雄第一科技大學

摘要

本研究採用了深層地質處置方法(Deep Geological Disposal Method)永久處置高放射性廢棄物的概念，針對主隧道及處置孔的開挖過程中進行三維力學行為有限差分法(Finite Difference Method)的數值模擬分析，使用之程式為美國 ITASCA 公司在 1997 年所開發之 FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)程式。分析中所使採用之岩體為完全彈塑性材料(perfectly elasto-plastic material)且符合 Mohr-Coulomb 破壞準則，並假設岩盤的品質 RMR(Rock Mass Rating，簡稱 RMR)為 30 與 70，岩盤之現地應力則藉由 500m 的岩體覆蓋進行推算，而側向壓力係數 K 則因深地層的關係而取為 1。

本研究內容分成兩個部分，一為進行多孔主隧道的開挖後周遭岩體之力學分析，二為考慮單一主隧道內多孔垂直處置孔開挖後周遭岩體之力學分析。數值分析結果顯示：(1)多孔主隧道周遭岩體之應力分布與變形性明顯會受到不同開挖順序的影響；(2)單一主隧道內進行多孔垂直處置孔開挖時，處置孔周遭岩體之應力分布與變形性深深會受到鄰近垂直處置孔開挖的影響。以上之分析結果可以做為決定未來處置場內處置孔與主隧道間距之參考依據。

關鍵詞：深地層處置法、FLAC^{3D}、有限差分法、RMR。

Abstract

In this research, the concept of Deep Geological Disposal Method was adopted to permanently dispose radioactive waste. A 3-D mechanical analysis using Finite Difference Method for the simulation of excavation process for main tunnel and disposal hole was conducted. The numerical program FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) was originally developed by US ITASCA company in 1997. The rock mass was assumed to perfectly elasto-plastic material obeying Mohr-Coulomb failure criterion and the RMR (Rock Mass Rating) values were 30 and 70. The in-situ stress was obtained from the overburden of 500 m depth of rock mass and the magnitude of lateral pressure coefficient, K, was assumed as one due to deep underground.

This research is composed of two parts. The mechanical analysis of surrounding rock mass in multiple main tunnels was conducted in the first part. In the second part, the mechanical analysis of surrounding rock mass in multiple vertical disposal holes located in a main tunnel

was conducted. The numerical results demonstrate that (1) the stress distribution and deformability of surrounding rock mass around main tunnels are obviously influenced by the excavation order of multiple tunnels and (2) the stress distribution and deformability of surrounding rock mass around vertical disposal holes are deeply influenced by the excavation of near disposal holes. The numerical results can be a valuable reference for the determination of spacing for main tunnels and vertical disposal holes in the future.

Keywords: Deep Geological Disposal Method, FLAC3D, Finite Difference Method, RMR.

I. 前言

我國目前對於高放射性廢棄物的最終處置方式是規劃採用國際核能先進國家所認定最穩定及安全的深層地質處置方式，將高放射性廢棄物深埋在深約 300 至 1000 公尺的地下岩層天然障壁之中。然而，在深層岩盤內進行高放射性廢棄物的安置，在規劃階段必須先考慮到處置場的佈設，決定主隧道的間距，每一條主隧道內處置孔的間距，再根據高放射性廢棄的總量計算出整體處置場的大小，亦即處置母岩的大小。在初期的地質調查階段，除了確定地下岩盤的地質條件必須符合穩定性與安全性的基本要求之外，適合建造處置場的岩體體積與範圍必須也要評估出來。

II. 主要內容

2-1 數值分析程式介紹

本研究採用了美國 ITASCA 公司在 2005 年開發之 FLAC^{3D}(全名為 Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, 以下簡稱 FLAC^{3D})程式 3.0 版作為數值分析之工具。該程式適用於分析模擬土壤、岩石等大地材料的力學行為，乃利用外顯有限差分法(explicit finite difference method)所發展出之程式。

2-2 三維數值分析網格建立

依據台灣電力公司之我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD2009)所設計之處置坑尺寸規格，處置隧道之斷面形狀為如圖 2.1 所示之馬蹄型斷面。

處置隧道斷面尺寸高 4.1 公尺，寬 3.6 公尺，總長 60 公尺，表層岩石覆蓋深度 500 公尺。處置孔直徑為 1.75 m，深度 7.91 m，間距 6 到 8 m。如圖 2.1 所示，模型之座標系統 Z 為垂直方向，Y 為隧道挖掘方向，X 為垂直於 Y 的水平方向。

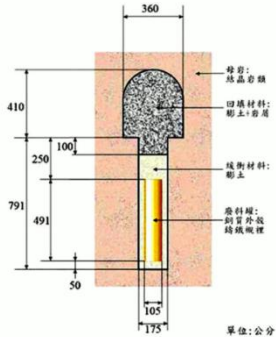


圖 2.1 處置隧道與處置孔剖面圖(摘自 SNFD2009)

高世鍊(1998)針對 RMR 之 II、III、IV 與 V 四類岩體進行模擬隧道數值分析時發現，為避免隧道壁面之變形量偏大，則強度較佳之岩體可取較小之邊界，強度較差之岩體則需取較大之邊界。研究顯示 II 類之岩盤分析邊界可取隧道半徑之 10a(a 為隧道半徑)倍長度，III 類岩盤為 15 倍隧道半徑(15a)長度，而 V 類岩盤最少應取 30 a 以上。

由於本研究數值分析為避免邊界效應影響，故採用之邊界網格寬度為主隧道中心距邊界寬度 X 向 60m，中心距邊界深度 Y 向 60m，邊界總高度 Z 向 150m，即滿足上述之條件，整體網格示意圖如圖 2.2 所示。

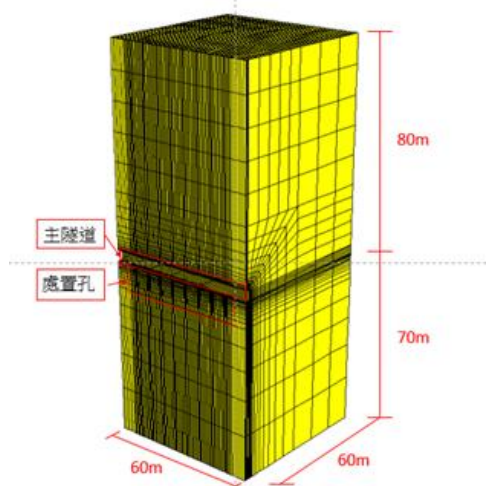


圖 2.2 整體網格示意圖

處置概念將最終處置場規劃設置在地底下約 500 m 處，所以本研究設定網格邊界上之垂直覆土深度為 420 m 轉為垂直應力邊界，再加上網格垂直邊界高度為 80 m，因此數值分析模擬的總深度為 500 m。假設整體網格邊界之節點不受開挖或外力的影響，因此本研究在網格之前後左右與底部邊界皆以滾支承(roller)來限制邊界，如圖 2.3 所示。

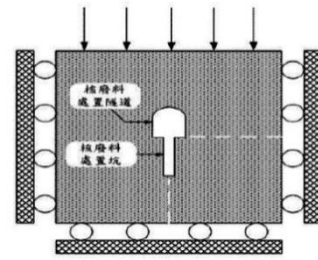


圖 2.3 FLAC^{3D} 網格邊界束制示意圖

2-2-1 參數設定

利用數值分析的方法模擬實際隧道開挖的問題，必須先探討相關材料參數、地質條件、分析範圍、邊界條件等的設定，以獲得合理的分析結果，提供未來處置場規劃的依據。

(1) 岩盤變形性：

一般岩盤均具有節理與裂隙，會影響到整體岩盤的變形性，其複雜的工程性質則由岩體品質的評分方式 (RMR) 來描述。據此，本研究假設為岩盤為均質材料，而以模擬岩盤在隧道工程施工中之變形性行為，並且不考慮岩體本身潛變所造成的影響。

(2) 側向壓力係數K值的選定：

岩石現地應力的大小與方向是受到地質構造與岩盤覆蓋深度的影響，必須進行現地應力的量測與分析才能獲得。本研究尚不考慮地質構造的因素，所以深地層內處置場岩石的垂直初始應力直接由盤覆岩石的自重與深度所產生，隨岩盤之深度增加而增高，水平的初始應力則參考既有的統計資料。根據 Hoek-Brown(1980) 所彙整之分結果可了解側向壓力與覆土深度之關係如圖 2.4 所示。整體來說 K 值(=水平初始應力/垂直初始應力)是隨著深度增加而減少，是因為岩體會受到垂直向與側向的變形限制越深越大的原故，依據該圖所示，在深度 500m 以內，K 值多半大於 1；而深度 500m 至 1500m，之間時，K 值約等於 1；當深度超過 1500m 以上時，K 值多半小於 1。

K 值為介於(1)式與(2)式兩曲線之間：

$$K = \frac{1500}{Z} + 0.5 \quad (1)$$

$$K = \frac{100}{Z} + 0.3 \quad (2)$$

上述 K 值將隨 Z 值增加而減小。

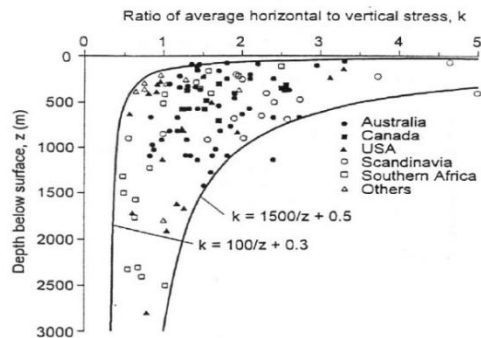


圖 2.4 側向壓力係數與覆土深度關係(摘自 Hoek-Brown,1980)

另外，為鄭寶山與王文禮(1993)則提出由台灣中部與東部 180 處隧道監測記錄之反算分析結果如圖 2.5 所示，而 K 值與覆土深度之關係則如方程式(3) 所示，其中 K 值大多集中於 0.5 至 1.5 之間。本研究模擬之覆土深度為 500m，代入方程式(3)時可求得之 K 值接近 1.0，故本研究採用 K=1 求得處置場的水平初始應力，即 $\sigma_v = \sigma_h$ 。

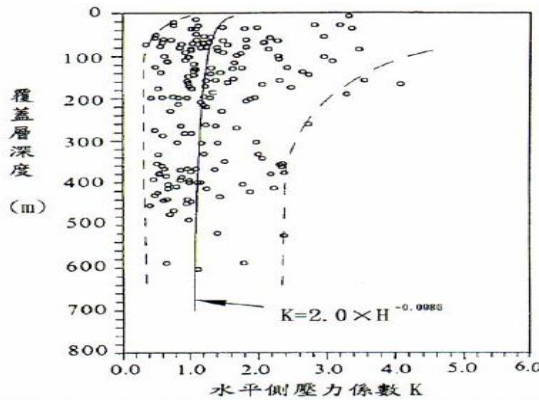


圖 2.5 側向壓力係數 K 與覆土深度之關係(摘自鄭寶山，1993)

$$K = 2.0 \times z^{-0.0986} \quad (3)$$

2-2-2 岩體材料參數

利用 FLAC^{3D} 進行程式分析時，需要決定的參數是由選用的組合律模式而定。本研究岩體材料部份選用完全彈塑性之 Mohr - Coulomb 模式進行分析，必須輸入的參數有剪力模數(shear modulus, G)、體積模數(bulk modulus, B)、凝聚力(cohesion, c)、摩擦角(friction, ϕ)、單位重(total unit, γ)及現地初始應力等。

(I) 岩體變形模數 E_m

數值分析中岩體之變形模數 E_m 為一相當重要之參數，然而現地岩體內多少均存在有節理與裂隙構造，而且在實驗室所求得之岩心彈性模數往往會受到尺寸效應的影響，因此無法精準的獲得岩體變形模數。所以，現地試驗仍然是獲得現地岩體變形模數比較可靠方式之一。但是，由於隧道工程所穿越地層範圍廣大而且地質狀況複雜，加上現地試驗的價格相當昂貴而且費時甚長，所以可進行的試驗範圍有限而造成試驗的結果代表性不足，所以一般還是以經驗公式來推估岩體變形模數。國外經驗公式中以 RMR 來推求岩體模數係數最常引用公式之一為：

Bieniawski(1978)建議 RMR>50 時：

$$E_m = 2 \times RMR - 100 \quad (\text{GPa}) \quad (4)$$

Serafim and Pereira(1983)建議 RMR<50 時：

$$E_m = 10^{[(RMR-10)/40]} \quad (\text{GPa}) \quad (5)$$

(II) 剪力模數 G 與體積模數 B

由上述方法決定岩體之變形模數後，便採用岩體變形模數 E_m 取代彈性力學理論公式中之彈性模數 E 值，以計算所需之剪力模數 G 與體積模數 B。以下為彈性力學理論公式可求參數 G、B：

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6)$$

$$B = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (7)$$

式中， ν 為岩體之柏松比(Poisson's ratio)。

(III) 岩體強度參數

岩體強度性質之估計，一般建議採用 Hoek-Brown 破壞準則(1980)。根據多年實務經驗及試驗修正(Hoek and Brown,1997)，其準則可表示如下：

對完整岩心：

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad (8)$$

對節理岩體：

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (9)$$

式中， σ_c 為岩心單壓強度，m、s、a 為 Hoek-Brown 破壞準則之岩體參數。

由岩體評分 RMR 值或地質強度指數 GSI 值(Geological Strength Index)推求 Hoek-Brown 破壞準則之參數 m_b 、s、a，公式如下：

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) \quad (10)$$

當 GSI > 25 時，

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) \quad (11)$$

$a = 0.5$

當 GSI < 25 時，

$s = 0$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (12)$$

RMR(1989 年版)與 GSI 之關係可寫為：

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (13)$$

將計算得之參數 m_b 、s、a 寫成 Hoek-Brown 破壞準則(8)

式。分別代入一系列之最小主應力值 σ_3' 於此式，可求得對應之最大主應力值 σ_1' ，將此一系列之 σ_3' 、 σ_1' ，使用線性回歸之方式，可推求 c、 ϕ 值。而根據試誤法之發現，最符合的線性回歸模式，為使用 8 組 σ_3' ，其值建議為 n=2 至 8 時， $\sigma_3' = (n-1)(\sigma_3'/28)$ ；而當 n=1 時， σ_3' 使用趨近於 0 而不等於 0 之值。而以線性回歸推求 c、 ϕ 值之公式如下：

$$k = \frac{\sum(\sigma_3'\sigma_1') - (\sum\sigma_3'\sum\sigma_1')/8}{\sum(\sigma_3')^2 - (\sum\sigma_3')^2/8} \quad (14)$$

$$c' = \frac{(\sum\sigma_1')/8 - k(\sum\sigma_3')/8}{2\sqrt{k}} \quad (15)$$

$$\phi' = \sin^{-1}\left(\frac{k-1}{k+1}\right) \quad (16)$$

岩體單壓強度可由 c、 ϕ 值求得，其推估公式為：

$$\sigma_{cm} = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (17)$$

式中， σ_{cm} 為岩體單壓強度。

Hoek-Brown 破壞準則建議之岩體張力強度估計公式為：

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_c}{2} \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (18)$$

式中， σ_{tm} 為岩體張力強度。

本研究數值分析所使用之參數係採用離島的花崗岩體，其岩體單位重 $\gamma=2750\text{kg/m}^3$ 、柏松比 $\mu=0.17$ 與單軸抗壓強度 $\sigma_c=111.54\text{MPa}$ (台灣電力公司, 2013)，岩心完整度 $m_i=33$ (Hoek and Brown, 1997)。當 RMR 為 70 及 30 時利用前述之 Hoek-Brown 破壞準則中興工程顧問社陳錦清等人(1997)之火成岩經驗公式，分析出來如表 2.1 所示之岩石材料參數。

表 2.1 岩石材料參數表

RMR ^o	體積模數 B ^o (MPa) ^o	剪力模數 G (MPa) ^o	凝聚力 c (MPa) ^o	摩擦角 ϕ (degree) ^o	楊氏模數 E _m (MPa) ^o	抗拉強度 σ_t (MPa) ^o
70 ^o	5799 ^o	4907 ^o	8.033 ^o	46.17 ^o	11481 ^o	0.241 ^o
30 ^o	579.9 ^o	490.7 ^o	4.314 ^o	34.85 ^o	1148.2 ^o	0.012 ^o

III. 結果與討論

本研究係利用 FLAC3D 數值分析程式模擬深地層隧道的開挖過程，同時進行不同岩體性質之力學行為分析。考慮到未來我國用過核燃料的處置場的規劃設計，本研究進行了兩種模擬開挖的過程：第一種是針對在單一處置隧道內不同間距下高放射性廢棄物垂直處置孔的開挖模擬；第二種是針對在不同間距下進行水平主隧道的開挖模擬。

第一種處置孔的開挖，必須在開挖之前先進行岩體的初始應力加載，直到整體系統達到力的平衡狀態(如圖 3.1 所示)。接著，如圖 3.2 所示，順著主隧道方向進行第 I 階段由座標系統 Y 負方向往 Y 的正方向掘進，每次掘進輪進大約 1m。在主隧道完成開挖後，接著進行第 II 階段挖掘主隧道內順著 Z 方向設置之處置孔，考量處置孔在現場施工的順序必須由內向外，即由 Y 的正方向往 Y 的負方向開挖處置孔(II 階段)，處置孔開挖的高程是由座標系統 Z=-1.5 到 Z=-9.41。

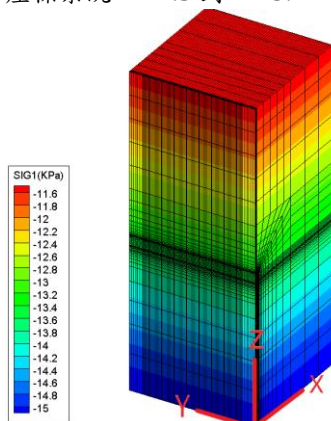


圖 3.1 處置孔模型初始應力平衡圖

本研究採用三種不同間距之處置孔進行模擬分析，間距分別為 6m、7m 及 8m，總計依序開挖 8 個垂直隧道地面的處置孔。另外，如圖 3.3 所示分別在頂拱處(R)、側壁處(SL)、角落處(CL)、仰拱處(TF)設立監測點以利進行應力與變位的分析。

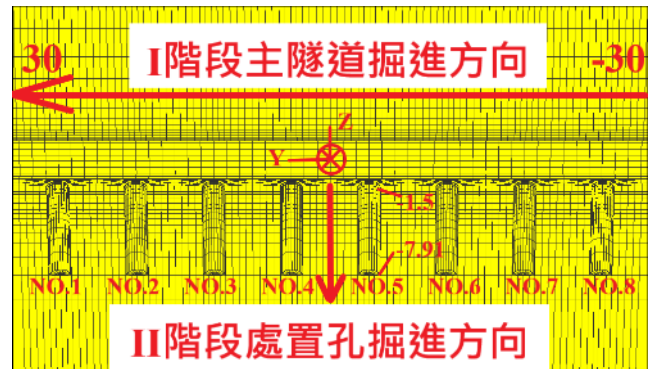


圖 3.2 掘進方向示意圖

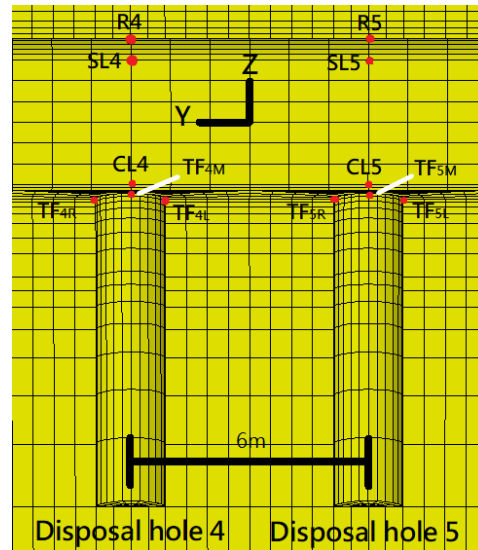


圖 3.3 監測點與處置孔位置圖

第二種模擬分析是在不同間距下進行水平主隧道的開挖，本研究採取 4 孔隧道進行模擬，針對多孔水平主隧道在不同間距以及不同開挖順序下進行開挖時，對於週遭岩體的變位及應力所產生的差異性進行探討。在每一個案例開始開挖之前，必須先進行岩體的初始應力加載，直到整體系統達到力的平衡狀態(如圖 3.4 所示)。本研究共完成四種不同間距(10m、16m、18m 及 20m)下水平主隧道之開挖模擬，4 種隧道開挖方式皆為依據主隧道方向由座標系統 Y=-30 向 Y=30 的方向掘進。另外，如圖 3.5 所示分別在頂拱處(R)、側壁處(SL)、角落處(CL)設立監測點以利進行應力變位分析。

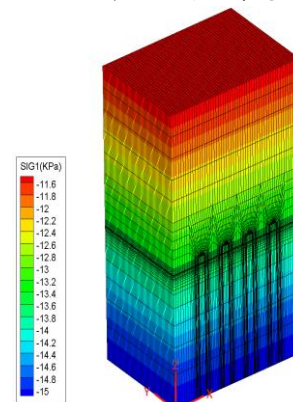


圖 3.4 多隧道模型初始應力平衡圖

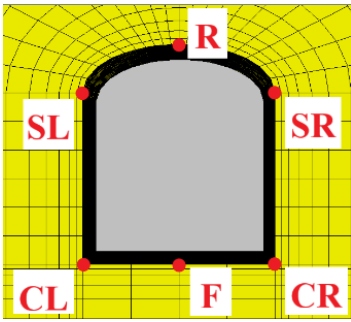


圖 3.5 隧道監測點位置圖

3.1 處置孔在不同間距與不同岩體品質下之分析

本節係屬於如圖 3.2 所示之第一種的模擬分析，分第 I 及第 II 兩階段進行開挖。針對不同岩體性質及處置孔間距在掘進後產生的變位及應力作影響性分析，並對開挖後整體處置場之主隧道與處置孔交叉段的塑性區進行探討。本研究分析採用的岩體性質有 RMR30 及 RMR70 時，每種岩體再細分為 6m 間距、7m 間距及 8m 間距的處置孔來作分析與探討。本節受限於篇幅，僅以 6m 間距、RMR70 為例進行以下分析結果的剖析，其餘的案例分析可詳主報告。

3.1.1 處置孔掘進完成時之變位分析

經過兩階段的主隧道與垂直處置孔開挖完成後，變位監測值顯示隧道在 δ_z 方向的變位最大(如具體成果附表 1 所示)，監測點 R4 的 δ_z 為 -4.395mm 向下變位，監測點 R4 的 δ_y 為 -0.012mm 向隧道外變位；監測點 R5 的 δ_z 變位為 -4.516mm 向下變位，監測點 R5 的 δ_y 變位為 -0.009mm 向隧道內變位。

3.1.2 處置孔掘進完成時之應力分析

經過兩階段的主隧道與垂直處置孔開挖完成後，從具體成果附表 2 的各個監測點數據發現，當主隧道開挖完成後，隧道頂點(R)的 σ_1 與 σ_3 沒有進一步增壓或解壓；隧道底部(TF)的 σ_1 維持解壓到 0，然而 σ_3 則進一步解壓到約 22MPa 左右。起拱線(SL) σ_1 解壓到 0，然而 σ_3 維持在約 28MPa 左右；在角隅處(CL) σ_1 解壓到 5MPa，然而 σ_3 稍為解壓到約 38MPa 左右。

基本上，在第 I 階段主隧道開挖完成後開挖垂直處置孔前，岩體被擠壓而產生往內縮的變形與岩體的應力分布已經趨於穩定。因此，再進行第 II 階段的垂直處置孔開挖時，主隧道再產生的變形量與應力的變化有限，然而產生明顯的應力變化與應力集中的現象是發生在處置孔與主隧道的交接的角隅處。

3.1.3 主隧道及處置孔掘進之塑性區分析

從具體成果附圖 1 與附圖 2 的隧道岩體塑性分布圖顯示，當第 I 階段主隧道開挖完成後，主隧道四周的部分岩體已經進入了塑性的狀態。當進一步進行第 II 階段的垂直處置孔的鑽掘後，發現各孔的上部與中段處的塑性範圍較大，尤其孔與孔之間在處置孔與主隧道的交接的角隅處，可能因為應力集中的原因，塑性範圍比較大，未來在施工時必須要事先特別的留意。

3.2 主隧道在相同間距及不同開挖順序下之分析

本節係屬於如圖 3.4 所示之第二種的模擬分析，針對 4 孔水平主隧道在間距 16m 及 RMR70 而不同開挖順序下進行開挖時，對於週遭岩體的變位及應力所產生的差異性影響進行探討。本研究採取 4 孔隧道進行模擬，並分析並採用三種開挖順序。分別是：(a)四條隧道同時挖掘，

(b) 第一、三條隧道先行開挖完成再挖第二、四條隧道，(c)四條隧道依序由左而右一條一條的進行開挖。隧道之編號如下圖 3.6 所示。本研究在主報告中完成了四種不同間距(10m、16m、18m 及 20m)與 RMR30 及 RMR70 下水平主隧道之開挖模擬。

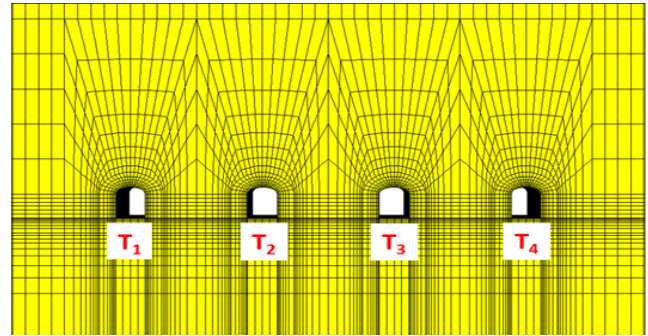


圖 3.6 隧道編號示意圖

3.2.1 應力分析圖

由具體成果附圖 3 至附圖 11 顯示，不同開挖順序下，最後主應力 σ_1 、 σ_2 以及 σ_3 的分布沒有明顯的影響，可能是岩體品質良好(RMR=70)以及 16m 主隧道間距偏高的緣故。但是，未來必須要進一步探討在開挖的行進過程中，隧道四周岩體主應力的相互影響狀況。另外，由附圖發現位於隧道角隅處(CL、CR)與隧道側壁連結頂拱處(SL、SR)4 處位置之應力變化最為明顯。

3.2.2 位移分析圖

由具體成果附圖 12 至附圖 14 顯示，三種開挖順序下在 X 方向的位移分布無明顯的差異，但是在 T₂ 隧道與 T₃ 隧道之間有發生相互影響的情形，應該也可能是岩體品質良好(RMR=70)以及 16m 主隧道間距偏高的緣故。Y 方向位移圖如具體成果附圖 15 至附圖 17 顯示，隧道同時開挖(3.2 節之 a 開挖法)的影響較第一、三條隧道先行開挖完成再挖第二、四條隧道(3.2 節之 b 開挖法)及四條隧道依序一條一條進行開挖(3.2 節之 c 開挖法)兩種不同開挖順序來的大。Z 方向位移圖如具體成果附圖 18 到附圖 20 所顯示，位移分布也是無明顯的差異，但是在隧道下方處會產生相當明顯的相互影響而且範圍頗大的岩盤鬆動區，未來在進行工程開挖時必須加以處理。

3.2.3 塑性區分析圖

由具體成果附圖 20 及附圖 21 的塑性區分布圖顯示，隧道開挖完成後於頂拱 R、側壁 SL、SR 及底部 TF 皆發生過拉力的塑性區，於角隅處 CL、CR 則發生過剪力的塑性區。

3.3 主隧道在不同間距與岩體性質下之分析

本節係屬於如圖 3.4 所示之第二種的模擬分析，針對 4 孔水平主隧道在同時開挖完成後(3.2 節之 a 開挖法)，在不同間距(10m、16m、18m 以及 20m)及岩體品質(RMR30 及 RMR70)下進行開挖時，對於週遭岩體的變位及應力所產生的差異性影響進行探討。

3.3.1 主隧道掘進時之變位分析

由具體成果附表 3 至附表 10 的位移總表顯示，隧道於相同岩石品質的條件下，間距越大其監測點的位移越小，個隧道互相的影響程度也越小。從相同間距的條件下，分析的數據顯示，岩石品質越不好(RMR 值越小)的情況下其變形量也越大，所以 RMR30 之岩體品質較差變形量也因此偏高，而岩體品質較好的 RMR70，其變形量

也因此較小。

今以主隧道 10m 間距具有 RMR30 岩體的分析結果為例，頂拱處 R 及仰拱處 F 變形量最大，T3 與 T4 隧道在頂拱 R 處其變形量達到最大 43mm 左右之沉降，而仰拱 F3 與 F4 達到約 72mm 之抬升。另外，T2 與 T3 隧道變形量都較 T1 與 T4 隧道為大，原因應該是中間隧道的變形受到兩側隧道開挖的影響，而外側僅受到單側隧道的影響會比較小之故，因此未來在工程施工時必須要考慮到相鄰隧道的影響。

3.3.2 主隧道掘進時之應力分析

由具體成果附表 11 至附表 18 之應力增幅比較總表顯示如下之分析結果：

1. 間距條件相同之情形下之 σ_1

監測點 SR、SL、CR、CL 之 RMR30 之岩體變化量較大，SR、SL 增幅量約為 86% 左右，CR 及 CL 增幅量約為 74%，上述 4 個監測點於各間距所得之變化量相近。

隧道頂拱處 R 及仰拱處 F 以 RMR30 較大，頂拱處 R 的 σ_1 增幅量約 97% 左右，仰拱處 F 的 σ_1 增幅量約 100% 左右。

2. 間距條件相同之情形下之 σ_3

在 RMR70 岩體中，頂拱處 R 及兩側側壁 SR、SL 處的主應力比值較其他岩體高。頂拱處 R 又以 20m 間距變化量最大，其中監測點以 R4 增幅量達 61.86%；側壁處監測點 SR、SL 以 10m 間距變化量最大，又以監測點 SL3 最大，增幅量達 185.54%。

隧道角隅處 CR、CL，主應力變化比最大的岩體為 RMR30 及 RMR70 的彈性體。各間距監測點變化量以 CL2 及 CR3 最大，又以 10m 間距較其他間距監測點更大達 200.75%，可以得知隧道角隅處在隧道間距越小之情況下其變化量越大。

隧道仰拱處 F，主應力變化比最大者為 RMR30 岩體。其中以 10m 間距的 F3 監測點變化量最大達 29.99%。

IV. 結論

4-1 結論

本研究數值分析所展現的各項關鍵的應力、位移與塑性區分析結果顯示只要地質條件與岩體的材料力學參數已知，FLAC^{3D} 在模擬多孔主隧道與處置孔的開挖過程當中可以獲得詳細而且充分的分析數據，並且提供包含關鍵位置的位移、應力與塑性圖，得以充分瞭解週遭岩體受開挖時力學行為的變化情形。最重要的是，可以進一步提供處置孔以及主隧道間的安全間距，得以確保處置場四周岩體在施工階段的安全性以及完工後的長期穩定性，而且可以進一步達到估計處置母岩的大小尺寸的終極目的。

4-2 建議

- (1) 本研究對於處置場的岩石現地應力的預估係採取：(a) 在垂直壓力方面採用岩石單位重乘上覆蓋岩石厚度而 (b) 水平壓力方面則採用側向壓力係數則採取 $K=1$ 。但事實上，岩石現地應力的大小與方向必須要有現地量測的數據，因此強烈建議本計畫應該儘速規劃發展深地層岩石的現地應力量測技術。
- (2) 台灣位處在太平洋周圍沿大陸邊緣的環太平洋地震帶(Circum-Pacific seismic zone) 上，加上也處在歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊之衝撞帶裏，造成無論地上或地

下均形成相當複雜之地質條件，同時在板塊錯動時會頻繁地發生地震。因此強烈建議本計畫的未來發展應該特別考慮到地震對處置場的穩定性所造成之影響。

參考文獻

- [1] 台灣電力公司, "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-成果報告," 2013.
- [2] 台灣電力公司, "用過核子燃料最終處置計畫書(2010 修訂版)," 2010 修訂版.
- [3] 吳祐豪, "應用有限差分法探討隧道週遭岩體內開挖擾動帶之力學行為," 國立高雄第一科技大學-營建工程研究所, 2016.
- [4] 高世鍊, "開挖中隧道變形行為之初步研究," 碩士, 土木工程研究所, 國立成功大學, 台南市, 1998.
- [5] 張淑君、施建樑, "參加放射性廢棄物管理專家技術研討暨參訪研究設施," 核能研究所 2015.
- [6] 曾漢湘, "赴美國核管會實習研究放射性廢棄物地質處置管制技術," 2005.
- [7] 蘇依豪, "最終處置場緩衝材料地下水入侵模擬研究," 國立中央大學圖書館, 2005.
- [8] 台灣電力公司, "我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告," 2009.
- [9] 李清山, "台灣瑞典經濟合作會台灣電力公司議訪 SKB 公司報告書," 2011.
- [10] 洪秋金, "隧道地盤反應曲線及破裂區發展之三向度數值分析," 1995.
- [11] 洪錦雄、莊文壽、劉凌振、董家寶, "我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段一前二年計畫, 功能/安全評估研究-建立深層處置場初期功能評估技術, 核能研究所。," 2001.
- [12] 陳燕儒, "應用有限差分法模擬三維地下處置隧道之力學行為," 國立高雄第一科技大學-營建工程研究所, 2012.
- [13] 陳錦清, 岩體變形特性與 RMR 岩體評分值關係之研究. 中興工程顧問社, 1997.
- [14] 黃偉慶, "放射性廢料處置場緩衝及回填材料物理性質研究; Physical Properties of Buffer and Backfill Materials for Radioactive Waste Disposal Site," 財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心, 2000.
- [15] 劉尚志、張璞、焦自強, "高放射性廢料深層地質處置," 第二十四卷, 原子能委員會核能彙刊, 第五期, 1988.
- [16] 歐陽湘、戴國邦、董倫道等, "我國用過核燃料長程處置計畫-第三階段區域調查前四年工作計畫-第二工作年度計畫-瑞典 SKB (國外人員訓練) 出國報告," 工研院能資所, 1995.
- [17] 賴成銑、洪浩源, "我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段-發展初步功能/安全評估模式(第一年計畫)-地質圖評估技術," 核能研究所, 2002.
- [18] 謝佩珊、林蔚、林鎮國, "高放射性廢棄物的最終處置," 30, 地質, 3, 2011.
- [19] 鍾柏仁, "核廢料深層處置近場岩石熱力學行為初步研究," 碩士, 資源工程學系碩博士班, 國立成功大學, 台南市, 2002.
- [20] 鄭寶山、王文禮, "FLAC 程式於隧道工程之實例分析," 地工技術雜誌, 第 41 期, 1993.

- [21] AB., S. k., Aspo hard rock laboratory. Annual report 1999. Svensk Karnbranslehantering AB, 1999.
- [22] Becker, A. A., The boundary element method in engineering: A complete course. McGraw-Hill Companies, 1992.
- [23] Bieniawski, Z., "Determining rock mass deformability: Experience from case histories," in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, vol. 15, no. 5, pp. 237-247: Elsevier.
- [24] Bray, J., "A study of jointed and fractured rock, part 1: Fracture patterns and their failure characteristics," in Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 1967, vol. 5, no. 2-3.
- [25] Brown, E., Bray, J., Ladanyi, B., and Hoek, E., "Characteristic line calculations for rock tunnels," in J. Geotech. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng., 1983, vol. 109, pp. 15-39.
- [26] Daemen, J. and Fairhurst, C., "Influence of failed rock properties on tunnel stability," in The 12th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 1970: American Rock Mechanics Association.
- [27] Deist, F., "A nonlinear continuum approach to the problem of fracture zones and rockbursts," in Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, vol. 65, no. 10, pp. 502-522.
- [28] Egger, P., "Gebirgsdruck im tunnelbau und stütz Wirkung der ortsbür bei überschreiten der gebirgsfestigkeit," in Advances in Rock Mechanics, Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics, 1974, vol. 2, no. Part B.
- [29] ElBaradei, M., "Saving ourselves from self-destruction," in The New York Times, 2004, pp. 37-37.
- [30] Endlagerstandorte-AkEnd, A. A., "Site Selection Procedure for Repository Sites. Recommendations of the AkEnd-Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites. Final report, December 2002," 2002.
- [31] Environment, F. and Rural Affairs, D. F., "Managing Radioactive Waste Safely: Proposals for Developing a Policy for Managing Solid Radioactive Waste in the UK," Department For Environment, Food And Rural Affairs, 2001.
- [32] EXO. (2014). SERIOUS "RADIATION INCIDENT" AT UNDERGROUND NUCLEAR WASTE SITE
Available:
<http://tfrrlive.com/serious-radiation-incident-at-underground-nuclear-waste-site/>
- [33] Fenner, R., Untersuchungen zur erkenntnis des gebirgsdrucks. Glückauf, 1938.
- [34] Goodman, R. E., "Introduction to rock mechanics," 2, Wiley New York, 1989.
- [35] Hakami, E. and Olofsson, S.-O., "Global thermo-mechanical effects from a kbs-3 type repository," in SKB TECHNICAL REPORT, 1998, pp. 355-366.
- [36] Hendron Jr, A. J. and Aiyer, A. K., "Stress and strains around a cylindrical tunnel in an elasto-plastic material with dilatancy," HENDRON (ALFRED J) MAHOMET IL1972.
- [37] Hobbs, D., "A study of the behaviour of a broken rock under triaxial compression, and its application to mine roadways," in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1966, vol. 3, no. 1, pp. 11-43: Elsevier.
- [38] Hoek, E. and Brown, E. T., Underground excavations in rock (no. Monograph). 1980.
- [39] Hoek, E. and Brown, E. T., "Practical estimates of rock mass strength," in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, vol. 34, no. 8, pp. 1165-1186.
- [40] Itasca, F. D., "Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, ," in Minneapolis, Minnesota, Itasca Consulting Group, 2005, vol. 438.
- [41] JNC, H., "Project to establish the scientific and technical basis for hlw disposal in japan, supporting report i, geological environment in japan, pp," III-119-III-1201999.
- [42] Kaiser, P., "Effect of stress history on the deformation behaviour of underground openings," in Proceedings of the 13th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, 1980, pp. 133-140.
- [43] Kastner, H., "Über den echten gebirgsdruck beim bau tiefliengender tunnel, vol. 10," in Vienna: Österreich Bauzeitschrift, 1949.
- [44] Kennedy, T. and Lindberg, H. E., "Laboratory investigation of rock cavity reinforcement," STANFORD RESEARCH INST MENLO PARK CALIF1976.
- [45] Kirsch, E. G., "Die theorie der elastizität und die bed rfnisse der festigkeitslehre," in Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1898, vol. 42, pp. 797-807.
- [46] Korbin, G. E. and Brekke, T. L., "Model study of tunnel prereinforcement," in Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1976, vol. 102, no. ASCE# 12415.
- [47] Labasse, H., "Les pressions de terrains dans les mines de huiles," in Revue Universelle des Mines, 1949, vol. 5, no. 3, pp. 78-88.
- [48] Ladanyi, B., "Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings," in Proceedings of 3rd congress, international society for rock mechanics, Denver, 1974, vol. 2, pp. 1150-1165.
- [49] LAGHINA SERAFIM, J. and PEREIRA, J., "Considerations on the geomechanical classification of beniawski," in International symposium on engineering geology and underground construction, 1983, pp. II. 33-II. 42.
- [50] Lambe, T. W., "Methods of estimating settlement," in Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1964, vol. 90, no. Proc. Paper 4060.
- [51] LAMBE, T. W., AND MARR, W.A., "Stress path method: Second edition," in Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1979, vol. 105, no. GT6, pp. pp727-738.
- [52] Lombardi, G., "The influence of rock characteristics on the stability of rock cavities," in Tunnels & Tunnelling International, 1970.
- [53] Morrison, R. and Coates, D., "Soil mechanics applied to rock failure in mines," in Can. Min. metall. Bull, 1955, vol. 48, pp. 523,701-711.
- [54] NGUYEN, M. D. and Berest, P., "Etude de la stabiité des cavités souterraines avec un mode ie de comportement élastoplastique radoucissant," in Congres International de Mecanique des Roches Vol, 1979, vol. 1.
- [55] Organization, W. H., "The Swedish Ministry of the Environment," (in English), The Royal Swedish Academy of Sciences: Stockholm, Sweden, 2001.
- [56] Panet, M., "Analyse de la stabilité d'un tunnel creusé

dans un massif rocheux en tenant compte du comportement après la rupture," in *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1976, vol. 8, no. 4, pp. 209-223.

[57] Posiva, "Mitä on loppusijoitus?," 2009.

[58] Pusch, R. and Börgesson, L., Pass-projekt on alternative systems study: Performance assessment of bentonite clay barrier in three repository concepts: Vdh, kbs-3 and vlh. *Svensk kärnbränslehantering*, 1992.

[59] Roscoe, K. H. and Burland, J., "On the generalized stress-strain behaviour of wet clay," 1968.

[60] Salençon, J., "Contraction quasi-statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu elastoplastique," in *Annales des ponts et chaussées*, 1969, vol. 4, pp. 231-236.

[61] Schwartz, C. W. and Einstein, H. H., "Simplified analysis for ground-structure interaction in tunneling," in *The 21st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 1980: American Rock Mechanics Association.

[62] Site, S., "94. Deep repository performance assessment project," in *SKI Report*, SKI, 1996, vol. 96, p. 36.

[63] Staub, I., Andersson, J. C., and Magnor, B., "Öspö pillar stability experiment. Geology and mechanical properties of the rock in tasq," *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.* 2004.

熱力引致處置母岩損傷及其對處置坑道之影響研析 Influences of Thermally Induced Rock Damage on Deposition Tunnel

計畫編號：MOST 106-2623-E-606-009 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李宏輝

e-mail：hunghuili@gmail.com

共同主持人：楊長義

協同主持人：李彥良

計畫參與人員：陳祺杰、朱澄偉

執行單位：國防大學理工學院環境資訊及工程學系

摘要

「深層地質處置」為目前國際間公認之較可行的用過核子燃料處置方式，處置場的現地應力、處置母岩的力學及熱力學特性為影響處置坑與處置隧道長期安全的重要因素。根據芬蘭 Olkiluoto 的研究經驗，當處置坑壁之切線應力超過岩石單軸壓縮強度之 0.3 ~ 0.4 倍時，於平行坑道表面側壁處將產生裂面並導致岩石剝落(spalling)，此現象易造成岩盤滲漏水問題；若未來隨著用過核子燃料的置入，在衰變熱長期作用下，天然障壁系統的完整性實有待進一步探討與評估。

目前已知岩石在熱力作用下的力學特性，包括抗壓強度、張力強度與彈性模數等，均有隨溫度遞增而呈現遞減的趨勢；岩石的力學特性，與其組成礦物、既有裂隙及受力過程中的裂隙發展有關。然受限於試驗技術，一般傳統的試驗研究實不易進行：(1)岩石在力作用(M)、(2)熱力作用(T)、與(3)熱力-力(T-M)耦合作用下之裂隙發展與微觀機制探討。循此，本研究透過顆粒流分析軟體(PFC)，建構一具異質組成特性之處置母岩 PFC 單軸壓縮試驗與巴西人圓盤模型，透過升溫模擬分析潛在處置母岩在熱力作用下，導致力學特性變化之微觀機制。

異質 PFC 模型中，依顆粒種類給定不同的(線)熱膨脹係數，藉以反應石英、鉀長石、斜長石與黑雲母礦物顆粒其在熱膨脹特性之差異。所建構的異質組成特性 PFC 數值模型，無論是單軸壓縮或是巴西人圓盤模型，當溫度增加量高於 250 °C，將因熱應變導致部分正向鍵結斷裂，其原因主要為組成礦物熱膨脹係數的不同，於升溫過程中產生的體積變化差異所導致，且此一分析結果為均質 PFC 模型無法觀察者。在模擬溫度變化範圍內(80 至 300 °C)，異質 PFC 模型之單壓強度(UCS)、彈性模數(E)與模擬之初始破裂應力(σ_c)均隨溫度愈高，而呈現下降的趨勢。

關鍵詞：深層地質處置場、PFC、熱-力耦合、異質性。

tunnel will occur on the tunnel wall and it will induce rock spalling and affect the permeability of host rock. Furthermore, the integrity of nature barrier will be affected by thermal-induced stress under long-term decay heat after the installing of canisters.

The mechanical properties of rock including uniaxial compressive strength (UCS), tension strength, Young modulus are thermal dependent, e.g., the UCS of rock will decrease with the increasing of temperature, and it is resulted by the occurrence of thermally-induced cracks between mineral particles. However, it is hard to observe the thermally-induced cracks and the micro mechanism of rock damages induced by thermal heating by experiments. Consequently, PFC models including UCS and Brazilian disk models with heterogeneous thermal expansion properties were proposed to reveal the micro mechanism of rock damages induced by thermal heating.

There are four kinds of particles with various thermal expansion properties in the heterogeneous PFC models including granite particle (GP), potassium feldspar particle (PF), plagioclase particle (PL) and Biotite particle (BP). According to a series of heating simulations (temperature increment: $\Delta T = 80 \sim 300$ °C), the heterogeneous PFC models reveal the thermal-induced cracks occurred when the temperature increment exceeds 250 °C, and the main crack type is tension crack. However, there are no any thermal-induced crack occurred even though the temperature increment reaches to 300 °C in the homogenous PFC models. In the simulations of thermal-mechanical coupling, the heterogeneous PFC models illustrate that UCS, Young modulus and initial crack stress tend to decrease with the increasing of temperature.

Keywords: deep geological repository, granite, PFC, thermal-mechanical coupling, heterogeneous.

I. 前言

深層地質處置場在建造過程，及用過核燃料處置期間，可能引起處置母岩之影響包括：工程開挖導致處置母岩物理特性與力學行為變化、衰變熱引起的包封容器及處置母岩岩石力學特性改變、岩石-地下水系統及地下水流場因開挖擾動及衰變熱作用而引致之變化、岩石及地下水因輻射引起的物性及化性變化等。

為瞭解上述效應並探討其對近場環境造成的影響，

Abstract

Deep geological repository is the more feasible and reliable way to deal with the spent nuclear fuel, and the rock mechanical and thermal properties of the host rock for nuclear waste repositories are the key factors for the long-term safety of deep geological repository. According to the experience of Olkiluoto field tests in Finland, when the tangent stress is larger than the 0.3 ~ 0.4UCS, the cracks paralleled to the longitudinal direction of deposit

國際間核能先進國家已針對相關研究課題進行研析，包括：處置場熱—水—力學耦合效應(THM)、地溫梯度對工程障壁系統之影響(TM)、開挖行為及熱效應對處置坑道穩定性的影響(MT)、緩衝回填材料現地回填/封塞特性試驗、近場地下水化學特性(H)、近場水文地球化學反應(C)、輻射效應對處置場環境影響性等研究。

處置母岩並非由單一礦物所組成，以我國潛在處置母岩-花崗岩為例，其礦物組成包括了石英、鉀長石、斜長石類和黑雲母類，礦物顆粒的力學特性與熱特性並不全然相同，岩體一經開挖擾動(M)與置入廢棄物罐後，在衰變熱(T)耦合作用下，母岩組成礦物之異質特性如何影響處置母岩的損傷行為，實有待進一步之分析與探討。本研究透過數值分析，探討處置母岩於熱力作用下，導致力學特性變化之微觀機制，另蒐集之國內外有關結晶岩石之單軸壓縮強度、變形特性與應力應變曲線隨溫度變化特性，及處置母岩組成礦物之熱力特性等，除可作為發展具異質特性處置母岩數值模型之依據，亦可供國內相關研究之參考。

II. 處置母岩熱力特性

2.1 國外處置母岩熱力特性

根據日本 H12 報告指出，岩體的熱力與力學特性是牽涉到處置場設計與建造的重要因子。就熱力特性而言，不僅影響工程障壁內的化學反應，也影響地下工作環境條件。熱力特性主要包括熱傳導係數、比熱、熱擴散係數與熱(線)膨脹係數，且以熱(線)膨脹係數為評估岩石損傷之重要熱力參數。

熱膨脹係數區分線熱膨脹係數(α_l)與體積膨脹係數(β)。線熱膨脹係數的定義為單位溫度增加量(ΔT)條件下，所產生之材料單位長度變化量($\Delta L/L_0$)，如式(1)，對於均質材料而言，體積膨脹係數為線熱膨脹係數之三倍，如式(2)。

$$\alpha_l = \frac{\Delta L/L_0}{\Delta T} (1/^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$\beta = 3\alpha_l = \frac{\Delta V/V_0}{\Delta T} (1/^\circ\text{C}) \quad (2)$$

本研究蒐整了礦物與岩石之熱膨脹係數(Fei, 1995; Dane Jr., 1942; Skinner, 1966; Jumikis, 1983)，及 Kjörholt (1992)整理之 Olkiluoto 地區岩石熱膨脹係數等資料，並整理下列幾點：

- (1) 熱膨脹係數與礦物種類有關，例如石英(quartz)體積熱膨脹係數 $24.3 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，赤鐵礦(hematite)為 $23.8 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，白雲石(dolomite)為 $22.8 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，白雲母(muscovite)為 $35.4 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，方解石(calcite)為 $3.8 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ 。
- (2) 部份礦物的熱膨脹係數具方向性，例如石英(quartz)，在溫度範圍 20°C 至 50°C 範圍內，其在垂直晶軸方向的線熱膨脹係數為 $23.33 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，在平行晶軸方向則為 $10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ 。

- (3) 根據 Dane Jr.(1942)與 Jumikis(1983)蒐整的試驗結果，花崗岩(granites)與流紋岩(rhyolites)的線熱膨脹係數約為 $8 \pm 3 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，石英岩為 $11 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ 與 $6.05 \pm 0.05 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，板岩為 $9 \pm 1 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ 與 $4.7 \pm 0.2 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，其間差異可能與取樣地點與試驗方式有關。

- (4) Olkiluoto 地區之熱膨脹係數，以雲母片麻岩(mica gneiss)為例，其在不同試驗溫度條件下之熱膨脹係數並不相同。

此外，瑞典 Åspö 硬岩實驗室(Åspö URL)評估放射性廢棄物產生的衰變熱可能造成圍岩溫度上升到 70°C ，此等溫度可使岩石受到額外的熱應力及造成礦物顆粒間之微裂隙，將使岩石的力學行為與滲透性發生改變，故在 20°C ~ 50 ~ 70°C 間進行 Åspö 花崗岩之熱膨脹試驗，以應變計量測軸向及切向應變，其結果顯示花崗岩之線膨脹係數約為 $4.5 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ ，體膨脹係數約為 $14.1 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ 。

另外，Akesson(2012)取 Olkiluoto 鑽孔的 22 個岩心試體，取樣深度大約在 290 m，於 20°C 、 40 ~ 60°C 間進行熱膨脹試驗，其中偉晶花崗岩(Pegmatitic granite, PGR)有 6 個試驗資料，得知在濕密度 2610 ~ 2650 kg/m^3 ，其平均線膨脹係數約為 $7.2 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ (其值介於 3.2 ~ $10.8 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ 之間)。

2.2 熱力與力學參數之耦合

熱力與力學參數的耦合關係，可由 Nye(1957)提出的關係圖說明之，詳如圖 1，由溫度引致的應變如式(3)所示。假設材料在溫度變化的過程中，其原有的長度受到束制，此時材料內部產生的熱應力詳如式(4)所示。

$$\varepsilon_{ij} = \alpha_{ij} \Delta T \quad (3)$$

$$\sigma = E \alpha \Delta T \quad (4)$$

此外，熱力引致之裂隙(thermal crack)種類計有二種(Cooper and Simmons, 1977)：(1)熱梯度裂縫(thermal gradient crack)，主要來自非均質的溫度變化所造成的非均質應變(inhomogeneous strain)；(2)熱循環裂縫(thermal cycling crack)，其原因來自組成顆粒熱力膨脹特性的差異，及顆粒接觸邊界因應變的不一致性所造成。

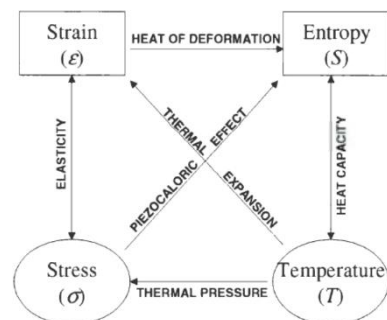


圖1 熱力與力學材料特性之耦合關係圖(Nye, 1957)

2.3 熱力引致完整岩石力學特性變化

根據李耀武(1993)與顏建忠(1999)分別取台灣中橫

馬鞍壩址處之變質石英砂岩，及東部蘇花段所鑽取之板岩與大理岩岩樣進行一系列控制溫度與壓力之岩石三軸試驗，其研究指出溫度增加強度會稍為減弱，但圍壓與溫度相結合時，岩石強度的減弱效果會明顯增大，據其推測，原因為試體加溫時受圍壓束縛限制，導致熱膨脹應力逐漸累積的結果。蕭富元等人(2009)取砂岩、花崗岩及大理岩試體進行熱傳導試驗、熱膨脹試驗及高溫後試體單軸抗壓試驗，結果如圖2所示。就花崗岩而言，其熱應變與平均熱膨脹係數並無隨溫度增加而有明顯的變化，如圖2 (a)(b)，當加熱至400°C時，單壓強度才會折減為室溫條件之 0.7 倍，彈性模數則是折減為0.73 倍，如圖2 (c)(d)。

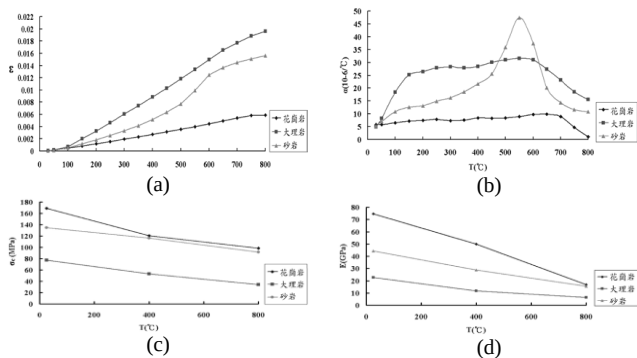


圖2 台灣本土砂岩、花崗岩及大理岩試體之熱傳導試驗、熱膨脹試驗及高溫後試體單軸抗壓試驗結果：(a)熱應變與溫度關係、(b)平均熱膨脹係數與溫度關係、(c)平均尖峰應力與溫度關係與(d)平均彈性模數與溫度關係(蕭富元等人，2009)

根據Takarli與Prince-Agbodjan(2008)取法國Pyrénées地區花崗岩進行熱效應對岩石物理與力學行為影響研究，並探討不同溫度條件下之損傷應力門檻值，如圖3所示，在溫度105°C至500°C期間，UCS與破裂損傷應力(σ_{cd})隨溫度漸增而遞減，初始破裂應力(σ_i)較無顯著變化，但溫度高於500°C後，各種損傷應力門檻值則是迅速降低。

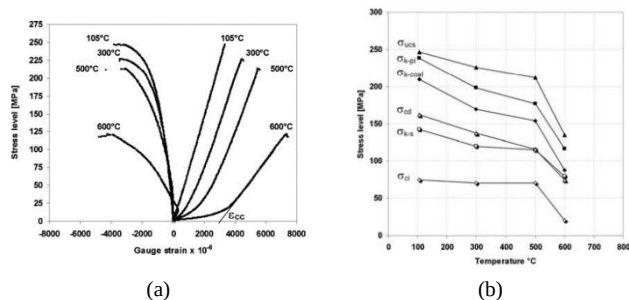


圖3 法國 Pyrénées 地區花崗岩在單軸壓縮試驗條件下之(a)應力應變曲線與(b)各種損傷應力門檻值隨溫度變化關係(溫度條件為105°C、300°C、500°C與600°C)(Takarli 與Prince-Agbodjan, 2008)

2.4 我國潛在處置母岩礦物組成、力學與熱力特性

2.4.1 礦物組成

根據我國「用過核子燃料最終處置計畫」102年度成果報告(台灣電力公司，2014)，有關我國本島H區岩心(HCBH01)之岩礦分析，主要的岩性為花崗片麻岩、花崗岩與細粒花崗岩，如圖4。其中，花崗片麻岩為和平花

崗片麻岩體主體岩性，粗粒至細粒，灰黑、灰色至灰白色，葉理發達至輕微葉理狀，為變質花崗岩中受剪切作用影響明顯變形組構，主要礦物為正長石、斜長石、石英、黑雲母、白雲母，附屬礦物有綠簾石、褐簾石、榍石、磷灰石、方解石、金紅石、黃鐵礦、鈷石。夾石英團塊、大理石團塊及砂質變質岩塊。(台灣電力公司，2014)

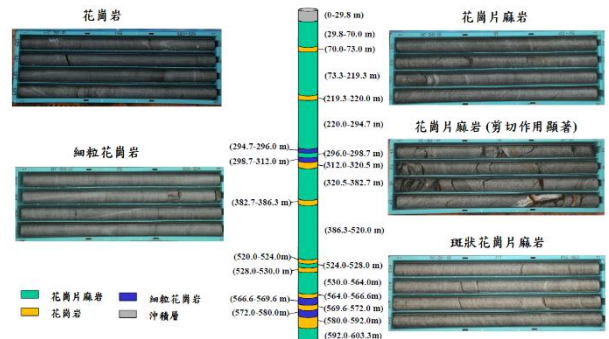


圖4 我國本島H區鑽井岩心之代表岩性分布示意圖(台灣電力公司，2013)

K區東部以太武山花崗片麻岩體為主，斗門花崗岩體為第二大岩體。太武山岩體具混合岩狀或片麻狀特徵，為鐵鎂礦物含量少、長英質含量多的花崗岩體，為K區東部主要的基盤岩(台灣電力公司，2015)。此外，根據岩樣薄片經偏光顯微鏡下計數所獲得之礦物含量QAP分類圖，可知，岩體主要是以石英(Q)含量20%至60%之間的廣義花崗岩類(granitoids)範圍內，更明確的是以斜長石(P)含量35%至65%的二長花崗岩(monzogranite)與斜長石(P)含量65%至90%的花崗閃長岩(granodiorite)為主(台灣電力公司，2015)。

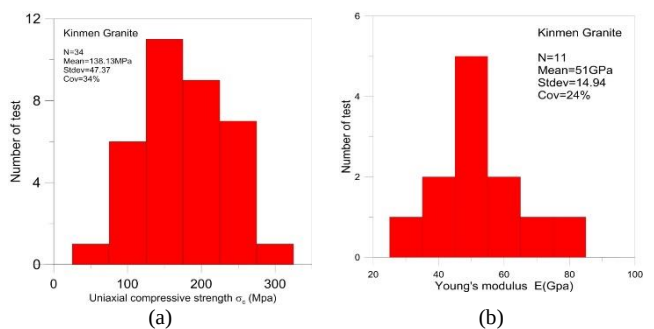


圖5 離島花崗岩之(a)UCS與(b)彈性模數統計(楊長義，2016)

2.4.2 力學特性

根據「台灣潛在母岩破壞強度特性與處置坑道破壞關係之研析」(楊長義，2016)之研究，計蒐集了台灣大學土木系岩石力學實驗室的 15 組單壓應力-應變曲線，亦可據此獲得花崗岩彈性模數E值，另增收 19 個單壓 UCS試驗值資料，共統計 34 個 UCS試驗值結果，詳如圖5，可獲得K區花崗岩母岩之平均單軸壓縮強度UCS、巴西人法試驗間接張力強度、彈性模數與柏松比：

- (1) 金門地區花崗岩母岩之平均 UCS = 138.13 MPa、標準偏差 Stdev = 47.37 MPa、相關變異係數 CoV = 34 %。
- (2) 巴西人法試驗間接張力強度平均值為 7.37 MPa、標準偏差 Stdev = 1.16 MPa、CoV = 18 %，張力強

度約為 UCS/20。

- (3) 平均彈性模數 $E = 51 \text{ GPa}$ (Stdev = 14.94 GPa、CoV = 24 %), 其 CoV 值也略大於國際試驗經驗(CoV = 1~11 %); 柏松比值為 $\nu = 0.22$ (Stdev = 0.03、CoV = 0.42%)。
- (4) 金門地區花崗岩之 Hoek-Brown 強度參數 $m = 34$, 與 Hoek-Brown 建議值 $m = 32.7$ 接近。

2.4.3 熱力特性

本研究蒐整了我國歷年「用過核子燃料最終處置計畫」成果報告(台灣電力公司), 及科技部個別型研究計畫「模擬裂隙損傷區對母岩受熱應力與外力作用之耦合效應研究(I)」(楊長義, 2014)有關我國花崗岩之熱力特性等資料, 茲整理如后:

(1) 熱傳導係數(λ , Thermal Conductivity)

熱傳導係數反應材料之導熱能力, 隨著溫度變化岩石熱傳導係數並非固定常數, 而是與岩石之性質有關, 一般花崗岩之熱傳導係數 λ 約為 $1.73 \sim 3.98 \text{ (W/m} \cdot ^\circ\text{C)}$ 之間; 金門花崗岩則平均為 $2.34 \sim 3.04 \text{ (W/m} \cdot ^\circ\text{C)}$ (台灣電力公司, 2010)。

(2) 比熱(C , Specific Heat)

比熱為岩石每升高 1°C 時所需之熱量, 比熱可作為岩石對於熱之敏感度指標, 比熱越高對熱的敏感度越低。測定岩石比熱多採用量熱法, 是將一已知質量及溫度之岩石, 置入於一已知溫度與比熱之流體中, 並以此流體做為對岩石產生熱傳導效應之介質, 待其流體與岩石之溫度達到一平衡狀態後, 測得流體在平衡前與平衡時所產生之溫度差, 以計算出岩石所吸收或釋放之熱量值, 便可求出岩石之比熱。實際的情況下, 體積將會隨著壓力、與溫度變化而改變, 故物質之比熱並非為一固定常數, 大多數岩體之比熱與溫度間之關係呈線性變化。當溫度越趨於高溫時, 其能量與物質中各震動模式關連性越大, 故溫度之影響更為顯著。而為求得較理想之比熱值, 將其定義分成定容比熱 (C_v) 與定壓比熱 (C_p) 兩種, 分別來表示物質比熱是在容積或壓力固定之兩種情況下所求得, 花崗岩在溫度 $20 \sim 98^\circ\text{C}$ 之間的比熱為 $C = 192 \text{ (J/kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

(3) 熱擴散係數(κ , Thermal Diffusivity)

岩石之熱擴散係數 $\kappa = \lambda / C$, 是熱傳導係數與單位體積熱容量(Heat Capacity)之比所得, 熱擴散係數代表岩石本身對吸熱與放熱之速度, 熱擴散係數值越高則熱之傳輸速率越快。而其熱擴散係數也與岩石之礦物特性、含水量、溫度有關, 欲了解岩石本身熱擴散係數之變化, 最常藉由溫度之趨勢來求得。

(4) 熱膨脹係數(α , Coefficient of Thermal Expansion)

對於岩石隨溫度改變而致長度(L)、面積(A)或體積(V)變化量之關係, 便可視為熱膨脹係數。隨著溫度上升, 一般熱膨脹係數將隨之增加, 其中線膨脹係數是定義在長度與溫度之變化關係, 故受束制岩石之溫度場有熱變化情況發生時, 將進一步改變應力場之平衡狀態, 造成應力重新分布。當溫度介於 $25 \sim 100^\circ\text{C}$ 之間, 花崗岩之線膨脹係數 $\alpha = 5 \sim 11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

綜整上述資料研析成果, 提出我國處置母岩物性、力學與熱力特性參數, 及礦物組成與線熱膨脹係數, 分別如表1與表2所示, 以供後續建立PFC數值模型之參

考。

表1 我國潛在處置母岩之物性、力學與熱力特性參數

項目	單位	值
單位重	kg/m ³	2600
孔隙率	%	0.60
單壓強度	MPa	138
巴西人法間接張力強度	MPa	7
彈性模數	GPa	50
柏松比		0.15
熱傳導係數	W/m · K	2.50
定容比熱	J/kg · °C	700
線熱膨脹係數	/°C	10×10^{-6}

表2 我國潛在處置母岩礦物組成與線熱膨脹係數

項目	百分比(%)	線熱膨脹係數($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)
石英	35	24.3
鉀長石	45	8.7
斜長石類	15	14.1
黑雲母類	5	3.0

III. PFC 力學與熱力參數之校正

3.1 顆粒流分析軟體簡介

Potyondy 與 Cundall (2004)利用顆粒流分析軟體 (Particle Flow Code, PFC)建立的鍵結顆粒模型(Bonded Particle Model, BPM)已可用於模擬岩石宏觀力學特性, 透過鍵結斷裂的追蹤, 可模擬岩石在單軸壓縮試驗過程因岩石破裂所引致的 AE 訊號, 據此可探討其間的微觀力學機制。PFC 屬離散元素法(Discrete Element Method, DEM)之一種, 經由圓形顆粒間的運動與顆粒接觸行為, 模擬分析顆粒堆積模型相關的靜態與動態問題。程式所選用的粒徑尺寸, 可為均勻分佈或高斯分佈, 亦能由使用者自行設計所需的級配分佈。模型中每一個顆粒的運動均是各自獨立, 顆粒間的相互作用僅發生在接觸點上, 相鄰顆粒間的接觸屬軟接觸型式(soft contact), 故是以勁度彈簧模擬顆粒間的變形行為, 進而透過顆粒的運動與接觸點之接觸力來描述此堆積模型的力學特性。

本研究依圖 6 流程, 進行力學參數與熱力參數之校正, 以確保所建立之 PFC 數值模型與選用參數之正確性。在力學參數較正部分, 模擬之 PFC 模型與參數必須符合真實岩石之單軸壓縮強度、間接張力強度與破壞形態。

3.2 力學與(線)熱膨脹係數校正

3.2.1 均質PFC岩石力學試驗數值模型與參數校正

本研究以二維顆粒流分析軟體PFC建立花崗岩單軸壓縮試驗與巴西人法間接張力試驗模型, 詳如圖7。根

據前述我國離島完整岩石單軸壓縮試驗資料中，擷取單壓強度、彈性模數與應力應變曲線作為PFC參數訓練與校正之依據。本研究參考真實岩石單軸壓縮試驗尺寸，建立一寬 5 cm，高12 cm之PFC2D單軸壓縮試驗模型，如圖7(a)，經過一系列之顆粒數穩定性分析，採用的顆粒為 6000 顆，其顆粒平均半徑為 0.52 mm，孔隙率為 0.60 %，模型採用平行鍵結模式(parallel bond model)，總計鍵結數計有 12753 。

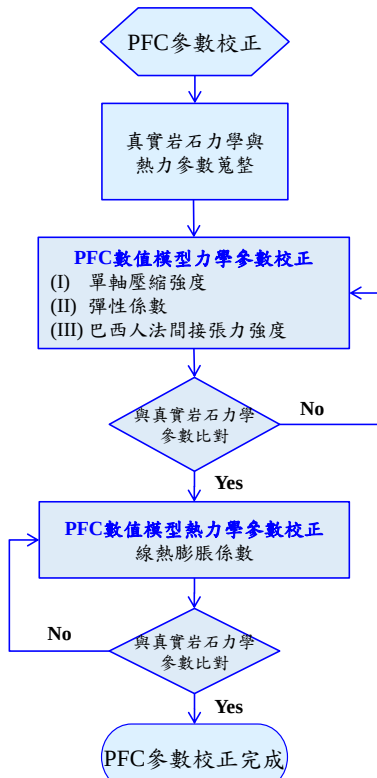


圖6 PFC力學與熱力參數校正流程

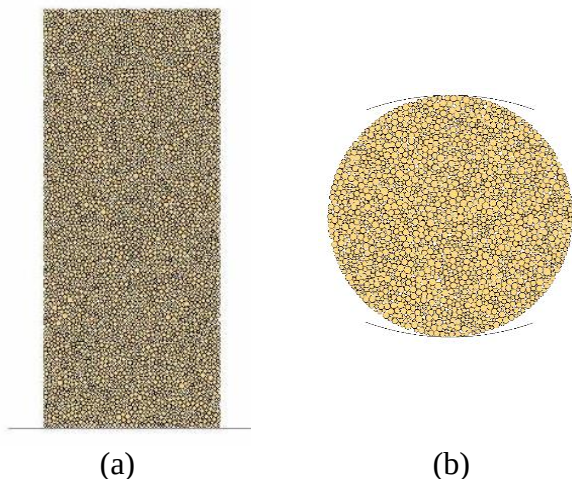


圖7 PFC2D岩石力學參數試驗數值模型:(a)單軸壓縮試驗與(b)巴西人法間接張力試驗

在巴西人法間接張力試驗數值模型部分，則參考實際之試體尺寸，建立一直徑(D)為 5 cm，厚度(t)為單位長度之 PFC 巴西人圓盤，採用之顆粒平均半徑為 0.298 mm，其鍵結模式與前述單軸壓縮試驗模型相同，總計

鍵結數計有 4068，總顆粒數為 1963 顆，如圖 7(b)，取壓力與位移曲線之峰值(P)，依據式(5)計算間接張力強度 $\sigma_{t,B}$ 。

$$\sigma_{t,B} = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (5)$$

有鑑於 PFC 需輸入的參數多達九項，且不易直接從基本力學參數建立其間之關係，為提升參數訓練過程之效率，本研究參考 Potyondy 與 Cundall (2004)分析 Lac du Bonnet 花崗岩及李宏輝(2008)分析砂岩損傷研究經驗，進行 PFC 參數之校正，綜整如下述：

- (1) 以既有的基本力學(例如單軸壓縮試驗)試驗結果，進行輸入參數的訓練與數值校正；
- (2) 部分微觀參數，如正向勁度 k_n 、與切向勁度 k_s ，則可透過以同一粒徑的顆粒群在一定的排列規則條件下(例如簡單排列、與最緊密排列等方式)，建立 k_n 與 k_s 兩者與彈性模數 E 及泊松比 ν 間的合理關係，據此可獲知 k_n 與 k_s 的參考值。
- (3) 有關平行鍵結強度的設定，一般則先設定正向鍵結強度的初始值 $\sigma_n = \text{UCS}$ ，再根據(A)單軸應力應變曲線、及(B)破裂形態兩方面的模擬效果，進行參數的微調整。

此外，依前述 2.4.2 節有關岩石力學特性相關資料蒐整成果，已知潛在場址花崗岩之平均單壓強度值為 138.13 MPa (標準偏差為 47.37 MPa)，平均彈性模數為 51 GPa (標準偏差 14.94 GPa)，巴西人法試驗間接張力強度平均值為 7.37 MPa (標準偏差為 1.16 MPa)，本研究以上述基本力學參數之平均值進行參數校正，提出 PFC 輸入參數，詳如表 3。

表3 PFC力學輸入參數

PFC 微觀參數項目	單位	值
顆粒單位重, ρ	kg/m ³	2600.0
顆粒之彈性模數, E_c	GPa	51
顆粒之切向與正向勁度比, k_s/k_n		0.208
顆粒之摩擦係數, μ		0.2
平行鍵結半徑放大因子, λ		1.0
平行鍵結之彈性模數, E_p	GPa	51
平行鍵結之切向與正向勁度比, k_{sp}/k_{np}		0.208
平行鍵結之正向鍵結強度, σ_n	MPa	138
平行鍵結之切向鍵結強度, σ_s	MPa	117.3

經 PFC2D 分析之單軸壓縮試驗，其應力應變曲線及破壞產狀詳如圖 8(a)，模擬之單壓強度為 133.78 MPa，彈性模數為 51.52 GPa，透過正向與切向斷鍵數的追蹤，及模型最終的破壞產狀可掌握此單軸壓縮數值模型的破壞為靠近承壓板的張力(主要)與剪力(次要)破壞。

此外，根據岩石在單軸壓縮試驗下之岩石損傷應力

研究(Martin and Chandler, 1994)，初始破裂應力(crack initiation stress, σ_{ci})，為裂隙經初始壓縮後，因持續的應力作用導致新的裂隙產生所對應的應力，可由開始產生 AE 訊號之應力值定義之，其值約為 0.3~0.5UCS。本研究根據 PFC 模擬所記錄的斷鍵發展，作為初始破裂應力之判定根據，其值約 80.8 MPa (=0.6UCS)，略高於前述國外文獻值。巴西人法間接張力試驗之力與位移曲線及破壞產狀詳如圖 8(b)，模擬之巴西人法間接張力強度 $\sigma_{t,B}$ 為 12.78 MPa，其值為模擬單壓強度之 0.11，主要的鍵結破壞屬張力破壞。

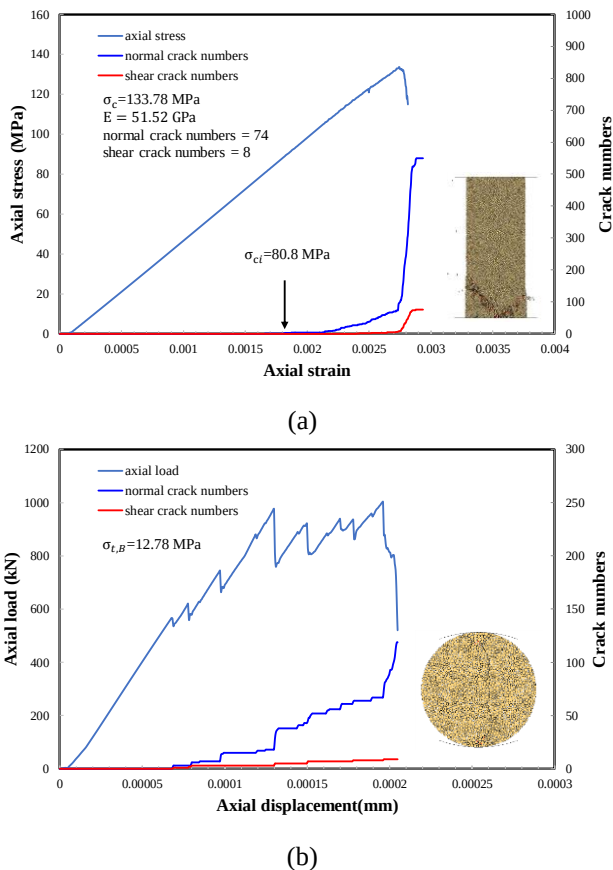


圖8 PFC力學模型與參數校正:(a)單軸壓縮試驗與(b)巴西人法間接張力試驗模擬結果

3.2.2 均質PFC數值模型(線)熱膨脹係數校正

根據表 1 所列處置母岩熱力特性參數，本研究以圖 7(b)之巴西人圓盤進行(線)熱膨脹係數校正程序，假設初始溫度為 20 °C，並在溫度變化(ΔT)分別為 50、100、150、200、250 與 300 °C 之條件下，分析數值模型之軸向與側向應變增量，同時記錄正向鍵結(張力裂縫)與切向鍵結(剪力裂縫)的斷鍵數，詳圖 9。

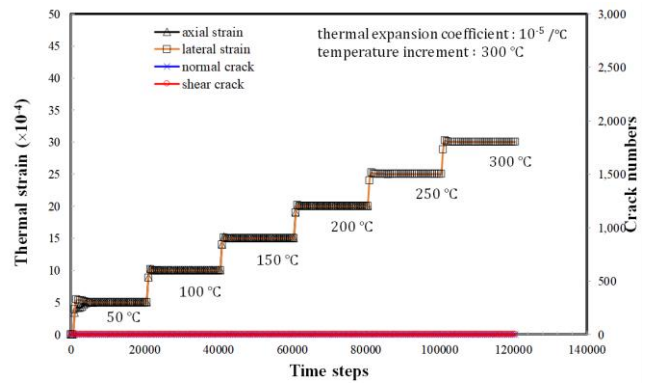


圖9 熱應變與運算時階關係圖(均質組成之巴西人圓盤模型分階段升溫至 300 °C)

根據巴西人圓盤升溫模擬結果，模型的軸向與側向熱應變符合預期，在線熱膨脹係數為 $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 之設定下，以溫度增量 $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ，分六階段逐次升溫至 300 °C，其最終產生的熱應變增量為 30×10^{-4} 。此外，在運算過程中，無論是暫態或穩態階段，其軸向與側向熱應變的變化量大致相同。

3.3 具異質組成特性之PFC數值模型

考量真實處置母岩其組成具異質性，各個組成礦物的熱膨脹特性亦不相同，以表 2 所列礦物之線熱膨脹係數為例，石英的熱膨脹係數為 $24.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，為黑雲母礦物的 8 倍，此一受熱膨脹特性的差異，造成礦物顆粒間有應力集中現象，並導致處置母岩內部形成損傷。

為能進一步探討上述處置母岩熱力特性具異質性之影響，本節根據 2.4.3 節所蒐整之處置母岩礦物組成、礦物面積含量百分比與熱膨脹係數，詳如表 2，建構具異質熱力特性之 PFC 單軸壓縮試驗與巴西人法間接張力試驗數值模型，詳如圖 10 與圖 11。PFC 數值模型內所含之顆粒種類、面積百分比、熱膨脹係數與顆粒數量，詳如表 4。

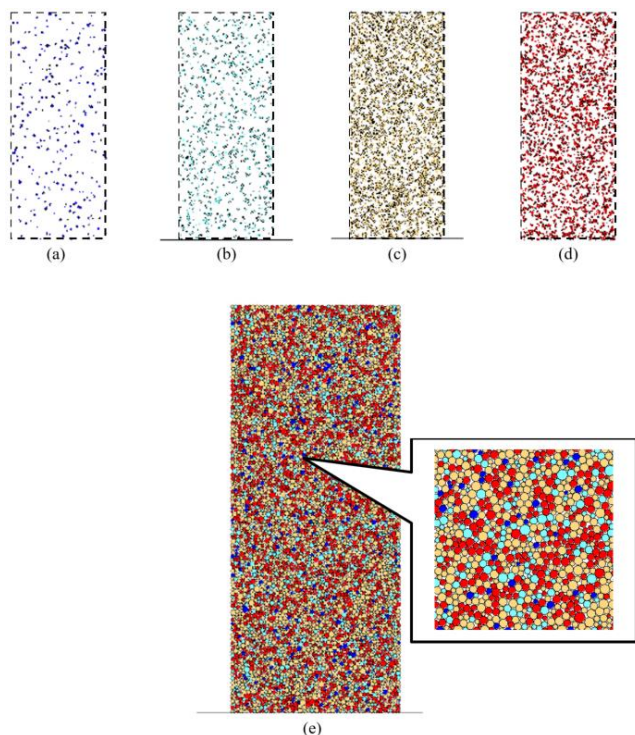


圖10 具異質熱力特性之PFC單軸壓縮試驗數值模型：(a)黑雲母顆粒(藍)、(b)鉀長石顆粒(湛藍)、(c)斜長石顆粒(黃)、(d)石英顆粒(紅)與(e)整體模型

表4 具異質組成特性之PFC數值模型顆粒資訊

顆粒種類	面積百分比 (%)	線熱膨脹係數 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	單壓模型顆粒數	巴西人圓盤模型顆粒數
石英	35	24.3	2100	687
鉀長石	45	8.7	2700	883
斜長石	15	14.1	900	294
黑雲母	5	3.0	300	99
總顆粒數			6000	1963

此外，所建構的具異質組成特性之 PFC 數值模型，其所需之力學微觀參數仍沿用表 3 所列之參數內容，僅在熱膨脹係數部分存在異質性。

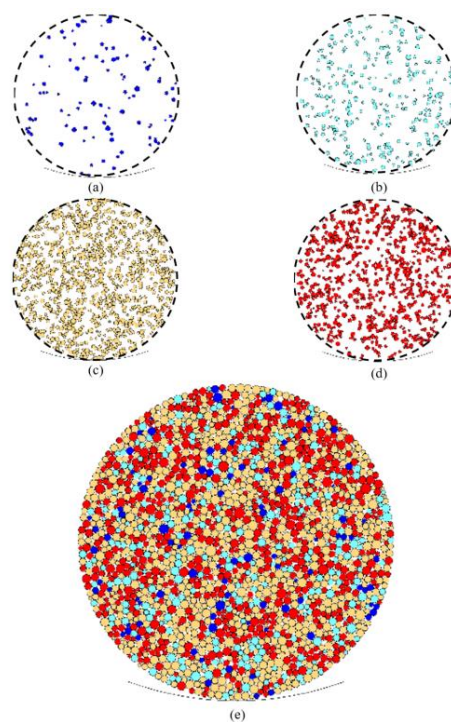


圖11 具異質熱力特性之巴西人法間接張力試驗數值模型：(a)黑雲母顆粒(藍)、(b)鉀長石顆粒(湛藍)、(c)斜長石顆粒(黃)、(d)石英顆粒(紅)與(e)整體模型

3.3.1 單壓模型升溫模擬

以具異質組成特性之單壓模型進行升溫模擬，其 PFC 數值模型及顆粒組成詳如圖 10，以溫度增量(ΔT)為 50°C ，分階段升溫至 800°C ，每一階段之運算階數為 2000 步，並記錄數值模型之軸向與側向應變增量，同時記錄正向鍵結(張力裂縫)與切向鍵結(剪力裂縫)的斷鍵數，詳圖 12，不同溫度條件下，模型內部的斷鍵分佈詳如圖 13。根據模擬結果，可整理下列幾點：

- (1) 軸向與側向熱應變均隨溫度增加而遞增，且在溫度增加的初始階段，側向熱應變的暫態反應明顯較高。
- (2) 當溫度達到 200°C ，因熱應變導致部分正向鍵結斷裂，且隨著溫度的增加，斷鍵數量亦隨之遞增，且以正向鍵結的破壞為主，以溫度達到 800°C 為例，正向與切向鍵結斷裂數分別為 2555 與 8，各為總鍵結數 12753 之 20% 與 0.06%。
- (3) 當溫度高於 250°C ，側向熱應變大於軸向熱應變，且隨著溫度愈高，差異愈來愈大，研判原因來自於正向鍵結的斷裂形成張力裂縫。
- (4) 將各溫度條件下對應之熱應變整理於圖 14，熱應變與溫度變化二者間存在良好的線性關係，惟溫度愈高，側向熱應變愈高於軸向應變；此外，由線性迴歸曲線斜率可知模擬之軸向線熱膨脹係數為 $18 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ ，側向則為 $18.7 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 。

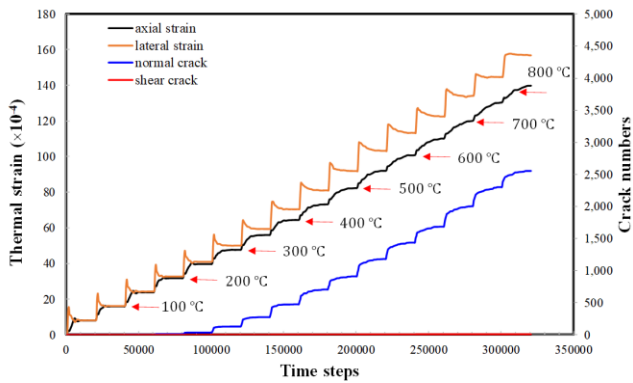


圖12 熱應變與運算時階關係圖(異質組成之單壓模型分階段升溫至 800 °C)

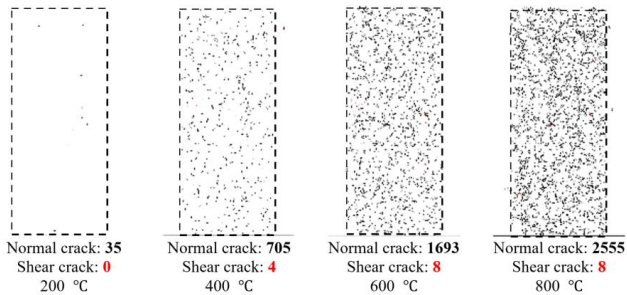


圖13 伴隨熱應變產生之鍵結破壞分佈(異質組成之單壓模型分階段升溫至 800 °C)

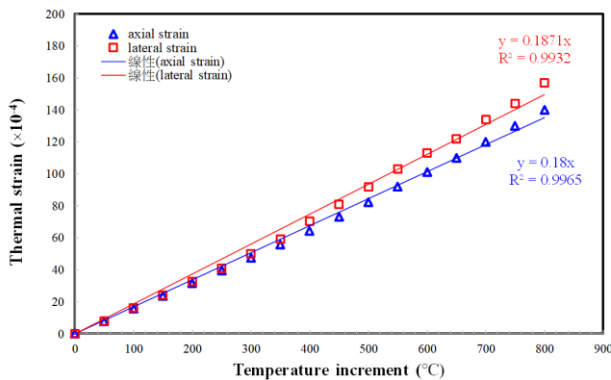


圖14 不同溫度條件下之熱應變(異質組成之單壓模型分階段升溫至 800 °C)

3.3.2 巴西人圓盤升溫模擬

以具異質組成特性之巴西人圓盤進行升溫模擬，其 PFC 數值模型及顆粒組成如圖 11 所示，同樣以溫度增量(ΔT) 50 °C，分階段升溫至 800 °C，每一階段之運算階數為 2000 步，並記錄數值模型之軸向與側向應變增量，同時記錄正向鍵結(張力裂縫)與切向鍵結(剪力裂縫)的斷鍵數，詳圖 15，不同溫度條件下，模型內部的斷鍵分佈詳如圖 16。根據模擬結果，可整理下列幾點：

- (1) 軸向與側向熱應變均隨溫度增加而遞增，且無論是軸向或是側向熱應變均無明顯的暫態反應，此部分與 3.3.2 節之均質巴西人圓盤模型反應相同。
- (2) 當溫度達到 150 °C 時，軸向熱應變略高於側向熱應變；隨著溫度愈高，其間差異略有增加，但增加的幅度不似單壓模型顯著。

- (3) 隨著溫度的增加，因熱應變導致的斷鍵數量亦隨之遞增，且以正向鍵結的破壞為主；以溫度達到 800 °C 為例，正向鍵結斷裂數為 789，切向鍵結為 8，分別為總鍵結數 4068 之 20% 與 0.2%。
- (4) 將各溫度條件下對應之熱應變整理於圖 17，熱應變與溫度存在良好的線性關係，隨著溫度愈高，軸向熱應變愈高於側向應變；此外，由線性迴歸曲線斜率可知模擬之軸向線熱脹係數為 $18 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，側向則為 $17.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

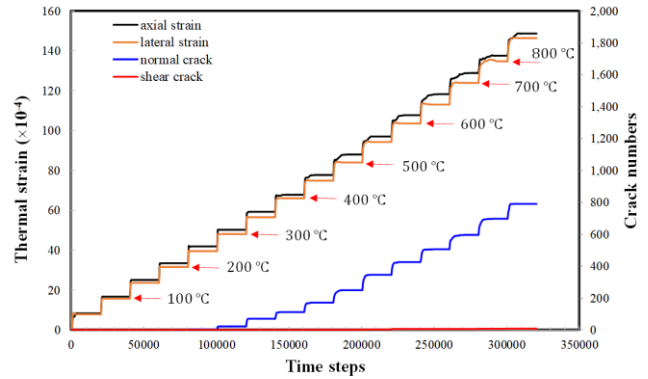


圖15 熱應變與運算時階關係圖(異質組成之巴西人圓盤模型分階段升溫至 800 °C)

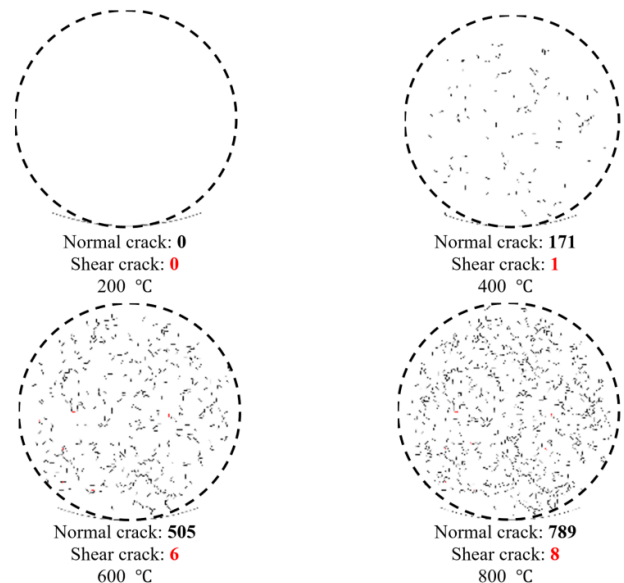


圖16 伴隨熱應變產生之鍵結破壞分佈(異質組成之巴西人圓盤模型分階段升溫至 800 °C)

根據上述分析結果，本研究建構的異質組成特性 PFC 數值模型，無論是單軸壓縮試驗或是巴西人圓盤試驗模型，在溫度變化量達到 250 °C 以前，模型內的顆粒鍵結狀況並無明顯的斷裂紀錄，詳如圖 12 與圖 15。

當溫度變化量高於 250 °C，可在單軸壓縮試驗或是巴西人圓盤試驗模型觀察到顆粒鍵結斷裂的現象，且二者的斷鍵型態均以正向鍵結為主。此外，隨著溫度變化，模型內部的應力分佈亦隨著改變，以 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ 之巴西人圓盤加熱模擬為例，詳圖 18，可發現在加熱前，模型內部的接觸力(contact force)較為均勻，且最大值為 $1.73 \times 10^3 \text{ N}$ ；經加熱模擬後，其接觸力呈現局部且集中

於石英顆粒所在處，且最大值為 1.65×10^5 N，為加熱前的 95 倍。

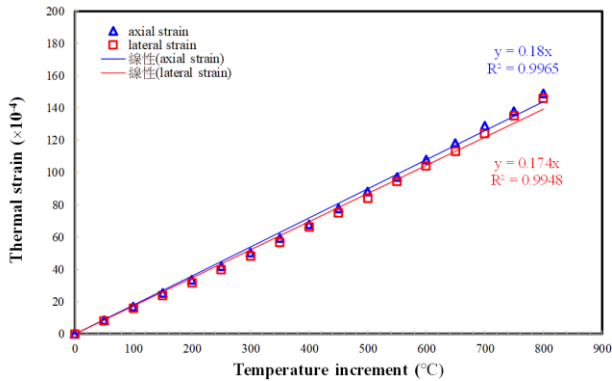


圖17 熱應變與運算時階關係圖(異質組成之巴西人圓盤模型分階段升溫至 800 °C)

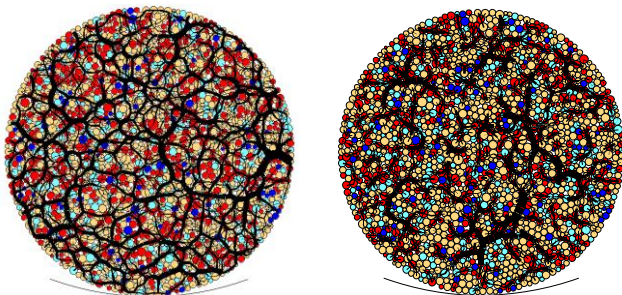


圖18 具異質組成特性之巴西人法間接張力試驗模型在加熱前、後之接觸應力變化(以 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ 為例)

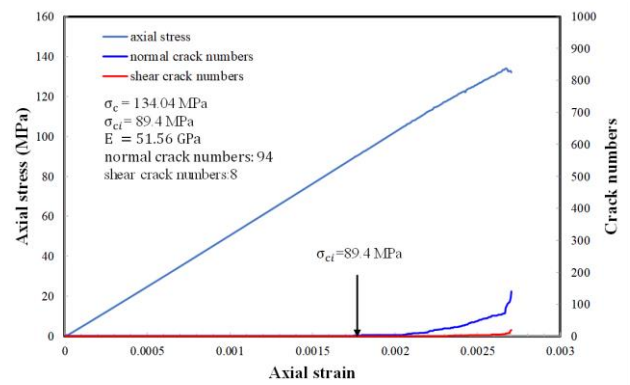
IV. 熱-力耦合作用下之岩石力學特性變化極其對處置坑道產生剝落破壞之潛在影響

本節針對均質與具異質組成特性之 PFC 單軸壓縮數值模型，其分別在溫度變化量(ΔT)為 80、100、120、140、200 與 300°C 條件下之分析結果進行比較，並針對處置坑產生剝落破壞之潛在評估進行討論。

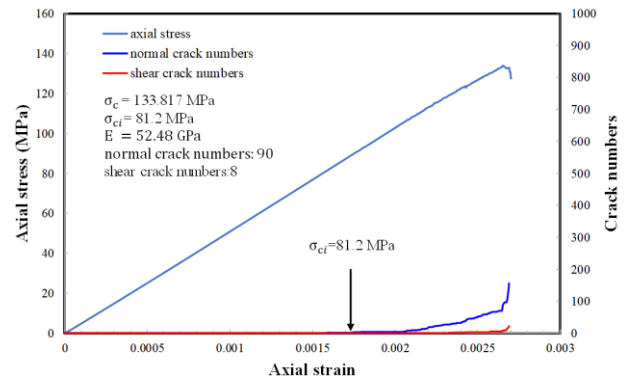
4.1 單軸壓縮試驗之熱-力耦合模擬分析

當 $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ ，均質 PFC 單軸壓縮數值模型軸向應力應變曲線如圖 19(a)，其單壓強(UCS)為 134.04 MPa，彈性模數 E 為 51.56 GPa，初始破裂應力(σ_{ci})為 89.4 MPa。當 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ ，其單壓強度為 133.82 MPa，彈性模數為 52.48 GPa，初始破裂應力(σ_{ci})為 81.2 MPa，詳圖 19(b)，顯示此一溫度變化範圍內，均質 PFC 模型的力學特性並無太大差異，僅初始破裂應力略有變化。

相同的溫度變化條件下，具異質組成特性之 PFC 模型單壓試驗模擬結果詳如圖 20。當 $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ ，異質 PFC 單軸壓縮數值模型軸向應力應變曲線如圖 20(a)，其單壓強度為 133.52 MPa，彈性模數為 51.48 GPa，初始破裂應力(σ_{ci})為 72.8 MPa。當 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ ，其單壓強度降為 96.94 MPa，彈性模數為 41.36 GPa，初始破裂應力(σ_{ci})為 19.5 MPa，詳圖 20(b)。

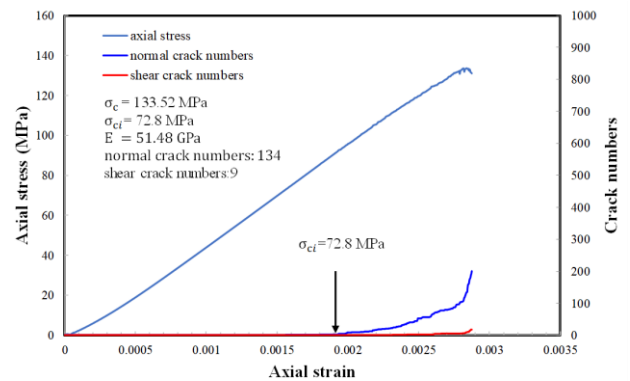


(a)

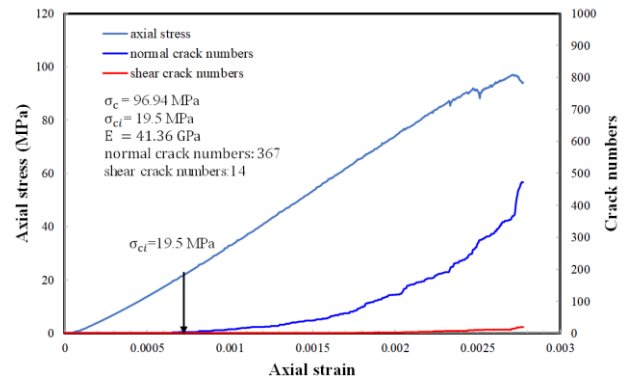


(b)

圖19 均質PFC單壓試驗之應力應變曲線：(a) $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ 與(b) $\Delta T = 300^\circ\text{C}$



(a)



(b)

圖20 異質組成PFC單壓試驗之應力應變曲線：(a) $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ 與(b) $\Delta T = 300^\circ\text{C}$

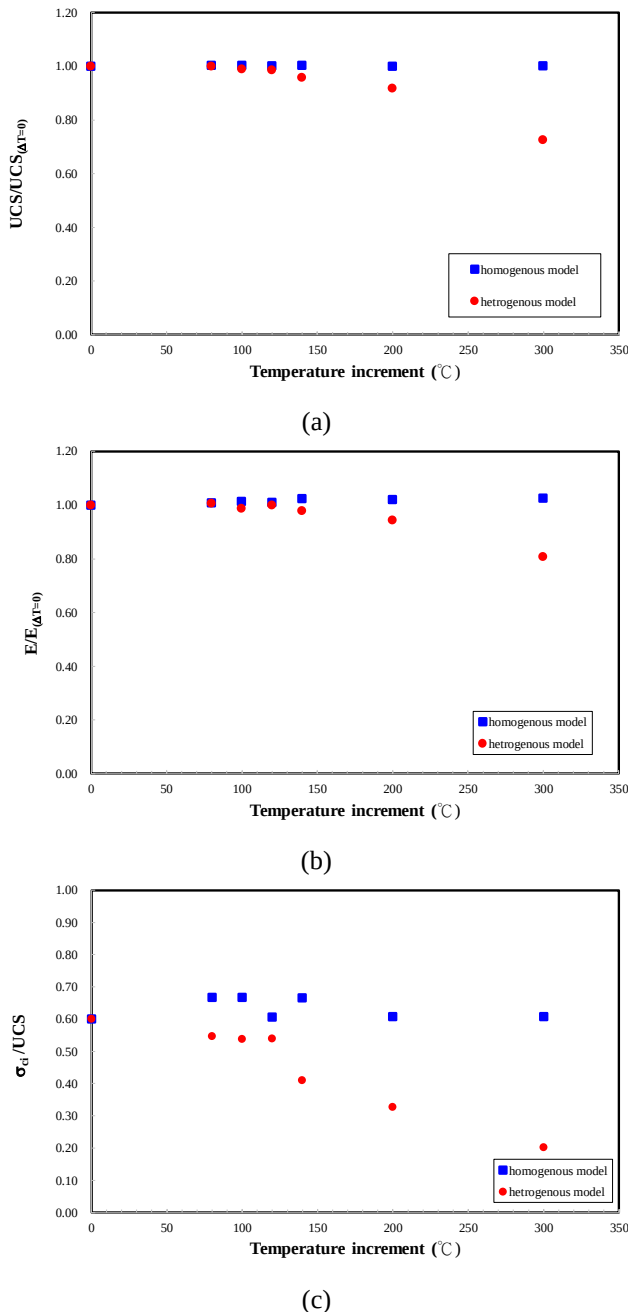


圖21 不同溫度變化條件下之PFC單壓試驗模擬結果：
(a)UCS/UCS_(ΔT=0)、(b) E/E_(ΔT=0)、與(c) σ_{ci}/UCS

此外，將溫度變化量 $\Delta T = 80 \sim 300^\circ\text{C}$ 條件下，由均質與異質組成特性PFC模型分析之單壓強度(UCS)與彈性模數(E)，分別取 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 條件下之分析結果予以正規化，詳如圖21(a)(b)，各溫度條件下之初始破裂應力(σ_{ci})與單壓強度(UCS)比值，詳如圖21(c)，茲將相關分析比較整理如下幾點：

- (1) 根據圖21(a)之單壓強度(UCS/UCS_(ΔT=0))與溫度(ΔT)變化關係圖，當 $\Delta T \geq 120^\circ\text{C}$ ，模擬的單壓強度有遞減的趨勢，在 ΔT 分別達 200°C 與 300°C 時，其單壓強度分別為 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 時的0.92與0.73。
- (2) 根據圖21(b)之彈性模數(E/E_(ΔT=0))與溫度(ΔT)變化關係圖，當 $\Delta T \geq 120^\circ\text{C}$ ，模擬的彈性模數有遞減的趨勢，在 ΔT 分別達 200°C 與 300°C 時，其彈性模數分別為 $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 時的0.94與0.81。

(3) 根據圖21(c)之初始破裂應力/單壓強度(σ_{ci}/UCS)與溫度(ΔT)變化關係圖，當 $\Delta T = 0$ 時，初破裂應力為0.6UCS；當 $\Delta T = 80 \sim 120^\circ\text{C}$ 時，其值約為0.55UCS；當 $\Delta T \geq 140^\circ\text{C}$ ，初破裂應力降為0.41UCS，且隨溫度的增加而有明顯的折減，例如 $\Delta T = 300^\circ\text{C}$ 時，則為0.2UCS。

(4) 上述的分析比較中，顯示均質PFC模型在熱-力耦合分析時，並無法有效地反應單壓強度、彈性模數與初始破裂應力之熱效應影響，主要原因在於顆粒的熱膨脹係數均屬相同，故在本研究探討的溫度變化範圍內，即使在升溫模擬過程中，詳圖9，亦無鍵結破壞的現象產生。

4.2 熱效應引致坑道剝落損傷評估

岩石經開挖後，坑道壁周圍的應力調整與應力集中造成的圍岩損傷現象，就圓形開挖斷面而言主要是岩石剝落(spalling)。剝落損傷屬脆性岩石的伸張劈裂或破裂(extensional splitting or cracking)，與一般發生在軟岩的剪力破壞並不相同(Fairhurst and Cook, 1966)。有關圓形坑道因開挖引致之剝落損傷評估，可採用(i)最大切線應力與單壓強度之比值(σ_{max}/UCS)，或(ii)最大切線應力與初始破裂應力之比值(σ_{max}/σ_{ci})作為評估的參考。

Martin 等人(1999)蒐集現地試驗結果，提出剝落深度(R_f/a)與正規化坑道壁最大切現應力(σ_{max}/UCS)關係圖，詳圖22，並提出剝落深度(R_f/a)評估經驗式，詳如式(6)。

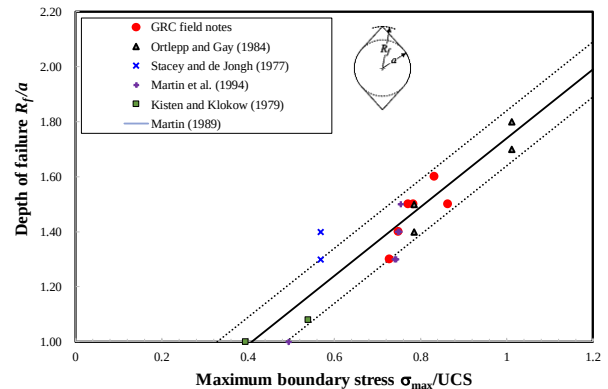


圖22 剝落深度(R_f/a)與正規化坑道壁最大切線應力(σ_{max}/UCS)關係圖(轉繪自 Martin 等人, 1999)

$$R_f/a = 0.49(\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_{max}}{UCS} \quad (6)$$

式中， R_f 為剝落深度， a 為坑道半徑， $\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$ ，可推知當 $\sigma_{max} \approx (0.4 \pm 0.1)UCS$ 時，可做為是否發生剝落破壞的判斷依據。

為探討熱效應對處置坑道剝落損傷的潛在影響，本研究根據核能研究所2002年提出之我國處置場設施配置之初步概念(張哲維, 2007)，依深度、最大與最小水平應力等相關資訊整理如表5。此外，假設處置方式採垂直處置，故最大與最小主應力分別為該深度所測得的最大與最小水平應力。據此，本研究以異質PFC單壓模型模擬之UCS隨溫度變化關係圖，詳圖21(a)，計算正規化坑道壁最大切線應力(σ_{max}/UCS)與溫度變化關係圖，詳圖23。

表 5 不同深度之岩覆應力及最大與最小水平應力列表

深度(m)	σ_v (MPa)	$\sigma_{Hmax}(=\sigma_1)$ (MPa)	$\sigma_{Hmin}(=\sigma_3)$ (MPa)	$\sigma_{max}(=\sigma_1 - \sigma_3)$ (MPa)
238	6.43	8.4	4.54	20.66
292	7.88	9.84	6.25	23.27
306	8.26	10.68	5.73	26.31
430	11.61	14.43	9.38	33.91

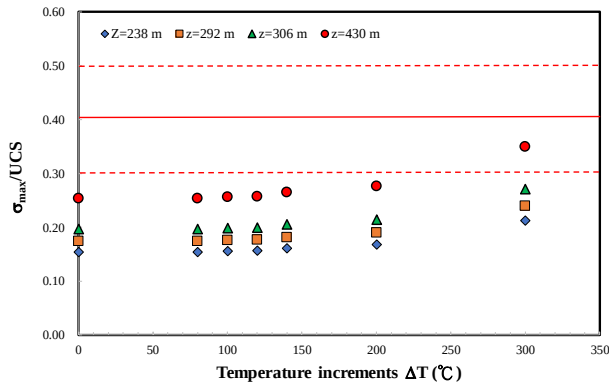


圖 23 正規化坑道壁最大切線應力(σ_{max}/UCS)與溫度變化關係圖(UCS採PFC模擬結果)

由圖 23 可知，隨著升溫模擬過程，因單壓強度(UCS)遞減，將導致正規化坑道壁最大切線應力(σ_{max}/UCS)逐漸增加。以深度 430 m 為例，溫度增量達 $\Delta T = 0 \sim 200^\circ C$ ， $\sigma_{max}/UCS = 0.25 \sim 0.28$ ，剝落損傷發生可能性低，當 ΔT 達 $300^\circ C$ ， $\sigma_{max}/UCS = 0.35$ ，將可能發生剝落損傷。

V. 結論

本研究透過顆粒流分析程式(PFC)建構具異質組成特性之處置母岩力學試驗模型，基於數值模型參數訓練所需，本研究蒐整國內外有關處置母岩之力學特性、熱力特性，及其在熱-力耦合作用下之力學特性變化。此外，針對 PFC 在相關研究課題之應用，亦一併蒐整。茲將本研究研析之重要結論，整理如以下幾點：

- (1) 所建構的異質組成 PFC 數值模型，無論是單軸壓縮或是巴西人圓盤模型，當溫度達到 $150 \sim 200^\circ C$ ，因熱應變導致部分正向鍵結斷裂，此一分析結果為均質 PFC 模型無法觀察者。且當 $\Delta T \geq 120^\circ C$ ，單壓強度($UCS/UCS_{(\Delta T=0)}$)與彈性模數($E/E_{(\Delta T=0)}$)隨溫度遞增而有遞減之趨勢。
- (2) 當 $\Delta T = 0$ 時，初破裂應力為 $0.6UCS$ ；當 $\Delta T = 80 \sim 120^\circ C$ 時，其值約為 $0.55UCS$ ；當 $\Delta T \geq 140^\circ C$ ，初破裂應力降為 $0.41UCS$ ，且隨溫度的增加而有明顯的折減。
- (3) 根據國外研究經驗，可根據 $\sigma_{max} \approx (0.4 \pm 0.1)UCS$ 做為是否發生剝落破壞的判斷依據。此外，依我國處置場設施配置之初步概念，本研究整理了岩覆深度、最大與最小水平應力等相關資訊，另根據 PFC 分析之 UCS 隨溫度變化關係，計算正規化坑道壁最大切線應力(σ_{max}/UCS)與溫度變化之關係，可做為判斷熱效應對處置坑道剝落損傷評估之依據。

參考文獻

- [1] 台灣電力公司，用過核子燃料最終處置計畫書-2010 修訂版，2010。
- [2] 台灣電力公司，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(SNFD-AR2014-V3)，2014。
- [3] 台灣電力公司，潛在處置母岩特性調查與評估階段—103 年度成果報告(修訂二 版)，2015。
- [4] 李耀武，脆性岩石在高溫/高壓下之力學性質，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，新竹、台灣，1993。
- [5] 張哲維，應用有限元素法模擬岩盤內開挖孔之熱與力耦合行為，碩士論文，高雄第一科技大學，2007。
- [6] 楊長義，模擬裂隙損傷區對母岩受熱應力與外力作用之耦合效應研究(I)，科技部補助專題研究計畫成果報告，NSC 102-2623-E-032-002-NU，2013。
- [7] 顏建忠，極深覆岩下隧道之岩石力學問題，國立交通大學土木工程研究所，新竹、台灣，1998。
- [8] 蕭富元、陳聖文、吳柏裕與王建力，"岩石熱力學與力學性質之研究-以三種岩石為例"，礦冶，53(3)，第 79-86 頁，2009。
- [9] Andersson, J. C., Rock Mass Response to Coupled Mechanical Thermal Loading Åspö Pillar Stability Experiment, Sweden. Doctoral Thesis. Division of Soil and Rock Mechanics Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology, 2007.
- [10] Dane, Jr., E.B., Density at High Temperature; Thermal Expansion. In: Birch F., Schairer J. F. & Spicer H. C. (eds.). Handbook of Physical Constants. Geological Society of America Special Papers, Number 36, pp. 27-37, 1942.
- [11] Fei, Y., Thermal expansion. In: Ahrens T.J. (ed.). Mineral physics and crystallography - A Handbook of Physical Constants, AGU Reference shelf 2. Washington, USA: American Geophysical Union. pp. 29-44, 1995.
- [12] Jumikis, A. R., Rock Mechanics, Second Edition. Clausthal-Zellerfeld, Federal, Republic of Germany: Trans Tech Publications, 1983.
- [13] Kjørholt, H., Thermal properties of rock. Helsinki, Finland, Site investigation, Work report, pp. 92-56, 1992.
- [14] Larsson, K., Determination of the coefficient of thermal expansion for two Aspo rocks, diorite and granite, Master's thesis, Luldi University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Rock Mechanics.
- [15] Martin, C. D., Kaiser, P. K., McCreath D. R., Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36(1), pp. 136-151, 1999.
- [16] Nye, J. P., Physical Properties of Crystals. London, United Kingdom: Oxford, University Press., 1957.
- [17] Poirier, J. P., Introduction to the physics of the Earth's interior. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.
- [18] Potyondy, D. and P. Cundall, A Bonded-particl Model for Rock, International Journal of Rock Mechanics &

- Mining Sciences, Vol. 41, pp.1329–1364, 2004.
- [19] Skinner, B. J., Thermal Expansion. In: Clark, JR. S.P. (ed.), Handbook of Physical Constants. Revised Edition. The Geological Society of America, Inc., Memoir 97, pp. 75-96, 1996.
- [20] Takarli M. and Prince-Agbodjan W., "Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage," Journal of ASTM International, Vol. 5(3), 2008.

給低劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片設計(II)

Multi-Channel Readout Circuit Design for Low-Dose Radiation Image Detector (2)

計畫編號：MOST 106—NU—E—007—008 —NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：盧志文

e-mail：cwlu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：郭亘倫、賴李沛毅

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

在本計畫中，吾人設計並實現給低輻射劑量放射影像感測器應用之 16 通道讀出電路晶片，每一通道的讀出電路包含一個寬頻放大器、一個積分器、一個觸發電路及一個十位元的連續漸進式類比數位轉換器。感測 SiPM array 所產生的電流流到一個感測電阻，此電阻將電流轉換成電壓，寬頻放大器將此電壓信號放大並轉換成差動訊號，積分器將此差動訊號積分成一個電壓，此電壓再由類比數位轉換器轉換成數位資料，此數位資料送到數位資料處理器做影像成像處理。

關鍵詞：放射影像感測系統、讀出電路、放大器、積分器、類比數位轉換器、數位資料處理器。

Abstract

In this project, we designed and implemented a 16-channel readout chip for low-dose radiation image detectors. Each output channel of the chip consists of a broadband amplifier, an integrator, a trigger circuit, and a 10-bit SAR ADC. SiPM array generates a signal current, and this current is sensed and converted to a signal voltage by a sensing resistor. This signal voltage is amplified by the broadband amplifier. The integrator integrates the signal voltage for a period and outputs a differential voltage. The SAR ADC converts the integrated differential voltage to digital data. The digital signal processor process the signal data sent by the readout chips for radiation imaging.

Keywords: radiation image system, readout circuit, amplifier, analog-to-digital converter (ADC), SAR ADC, digital signal processor.

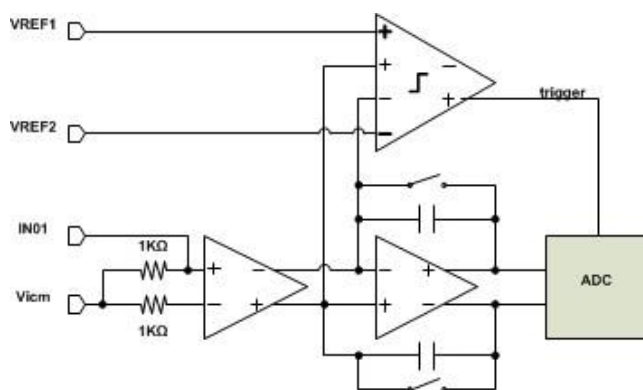
I. 前言

全球放射影像設備市場呈現穩定 2~3% 的成長，數位放射影像設備提供了比傳統放射影像設備更多的優點，如可以較低的輻射劑量提供更好的影像品質，快速成像，減少重製，而且數位放射影像設備亦可提供診斷醫師以電子化方式進行影像的檢視、擷取、傳送、分析，大幅提高醫院醫事效率，所以數位放射影像設備已成為醫學影像市場未來成長的主要動能[1-6]。本計畫接續前一年的計畫設計並實現一個 16 通道給低輻射劑量放射影像感測器應用之讀出電路晶片。

II. 主要內容

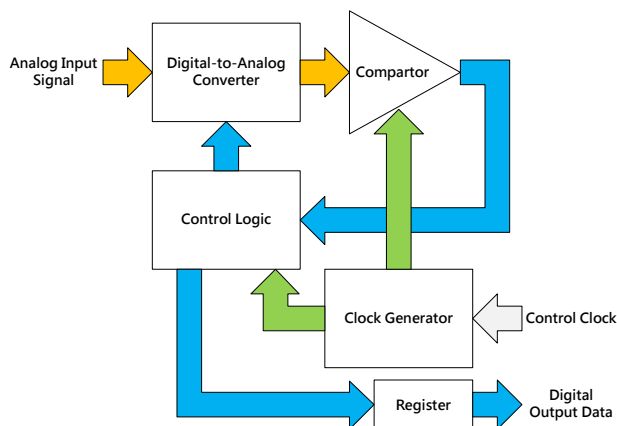
一個 16 x 16 放射影像面板感測系統，包含一個 16x16 SiPM array、16 顆 16 通道放射影像感測讀出電路

晶片、一顆數位資料處理晶片及終端顯示器。每一通道的讀出電路晶片包含一個寬頻放大器、一個積分器、一個觸發電路及一個十位元的連續漸進式類比數位轉換器。圖（一）為每一個通道之讀出電路架構，幫包含一個寬頻放大器、觸發電路、積分器及類比轉數位電路。為了達到寬頻及高共模拒斥比，吾人設計的放大器為一級差動放大器。



圖（一）每一個通道之讀出電路架構。

循序漸進暫存器類比數位轉換器由數位類比轉換器、比較器、時脈產生電路、控制邏輯以及暫存器構成，如圖（二）所示。



圖（二）循序漸進暫存器類比數位轉換器架構。

循序漸進暫存器類比數位轉換器當其數位類比轉換器的速度跟不上控制時脈時，便會發生轉換錯誤的問題。另外當轉換動作中的比較訊號相當接近而因雜訊干

擾導致比較器解析錯誤時，也會發生轉換錯誤的問題。這裡使用非二位元比值的循序漸進暫存器類比數位轉換器架構，搭配數位補償機制可以將轉換動作中比錯的部分利用數位計算的方式校正成正確的轉換資訊。使用 TSMC 0.18 μm CMOS 製程模擬此 SAR ADC，表（一）為此循序漸進暫存器類比數位轉換器模擬規格表。

表（一） 循序漸進暫存器類比數位轉換器規格表

Specification Summary of SAR ADC		
Technology	TSMC 0.18 μm 1P6M	
Supply Voltage	1.2	V
Reference Voltage	1.2	V
Power Consumption	233.3	μW
Sampling Rate	10	MS/s
Resolution	10	Bit
LSB	1.172	mV
DNL	0.25 / 0	LSB
INL	0.12 / -0.17	LSB
ENOB	10.037	Bit
FoM	22.206	fJ/step

III. 結果與討論

吾人以 TSMC 0.18 μm CMOS 製程實現此 16 通道放射影像感測讀出電路晶片，圖（三）為 16 通道讀出電路晶片照相圖，面積為 1.284 mm x 10.42 mm。圖（四）為將製作好的晶片焊在電路板上。吾人先量電性特性，輸入一個三角波電流，量輸出數位資料，圖（五）為針對四個不同增益的量測結果，量出結果雖然還不是非常線性，可是比上一顆晶片有改善。

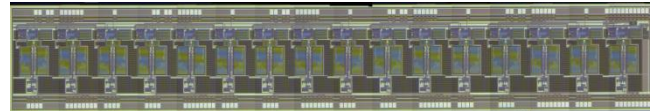
量完電性特性後，讀出晶片接上閃爍晶體及 SiPM Array，先不擺放射源，圖（六）為還未擺放射源讀出晶片第一個通道輸入波型，從圖中可看出有非常多的雜訊，圖（七）為擺放射源 Cobalt 60 後，讀出晶片第一個通道輸入波型，從圖中可看出射源 Cobalt 60 的訊號，除了 Cobalt 60 的訊號之外還有很大的雜訊。圖（八）為還未擺放射源讀出晶片第 16 個通道輸入波型，比較圖（八）和圖（六）可看出第 16 個通道輸入端遭受到的雜訊比較小，我們推論這些雜訊是受到並列轉串列輸出電路的時脈所干擾，此電路比較靠近第一個通道，所以第一個通道的雜訊最大；圖（九）為擺放射源 Ba 133 後，讀出晶片第 16 個通道輸入波型，從圖中可看出射源 Ba 133 的訊號受到雜訊干擾較小。

由於第 16 通道所受到的雜訊干擾較小，我們使用讀出電路晶片量 Cobalt 60 和 Ba 133 的訊號，圖（十）和圖（十一）為讀出電路晶片第 16 通道分別量 Cobalt 60 和 Ba 133 的訊號十分鐘後所紀錄下來的 histogram 統計圖。從圖中可看出，讀出電路讀到不少雜訊能量，這是接下來要克服的。

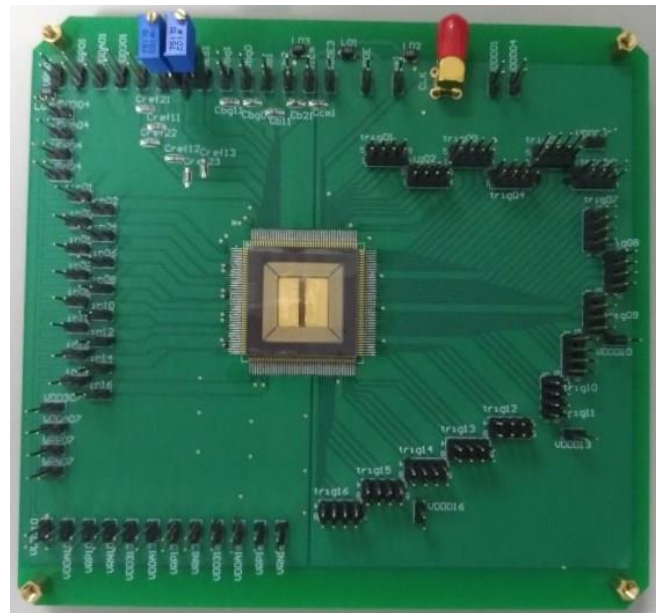
IV. 結論

年這一年吾人以 TSMC 0.18 μm CMOS 製程實現一個 16 通道放射影像感測讀出電路晶片，量測結果有以

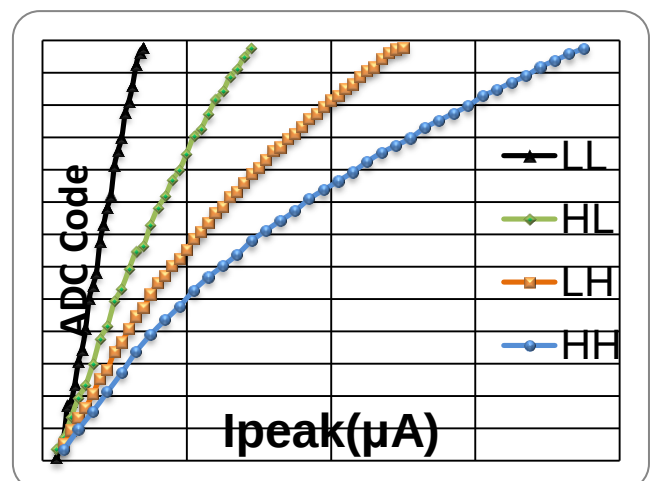
下結論與建議：讀出電路含類比數位轉換器能正常工作，輸入一個電流訊號，讀出電路可以將輸入電荷能量轉換成數位輸出，可是當此讀出電路晶片接上閃爍晶體及 SiPM array 時，讀出電路晶片的輸入端受到干擾，干擾源推測有三個來源：日光燈的輻射、宇宙射線及晶片電路中並列轉串列輸出電路的時脈信號。降低日光燈的輻射及宇宙射線干擾須作好屏蔽並關燈，對於電路中並列轉串列輸出電路的時脈信號干擾，我們將重新下線，在晶片中使用 deep N-well 作隔離，確實把敏感的類比電路和數位電路隔離，並使用 metal line 對輸入訊號線作保護，對於前端差動放大器重新設計，提高 CMRR 以提高 SNR 值。



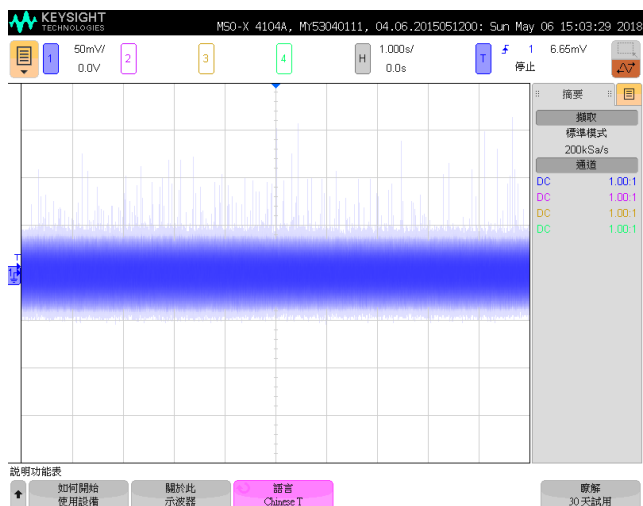
圖（三） 16 通道讀出電路晶片照相圖。



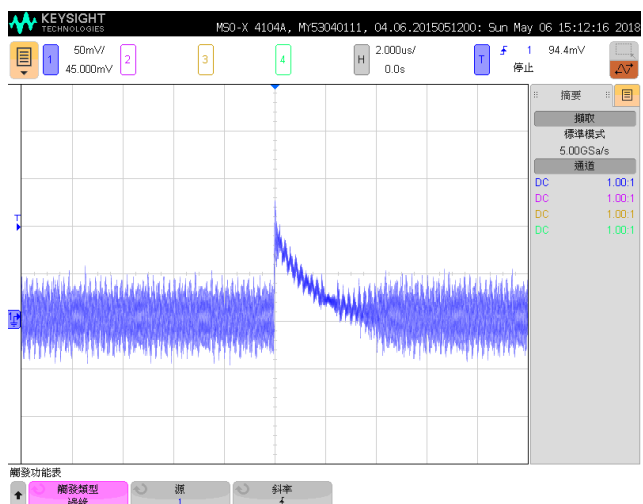
圖（四）量測電路板。



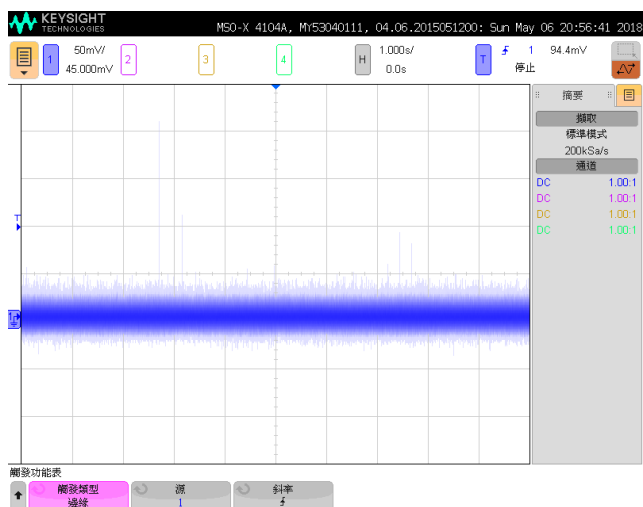
圖（五） 調整四個不同增益的讀出電路之量測結果，輸入為一個三角波電流，輸出為數位資料。



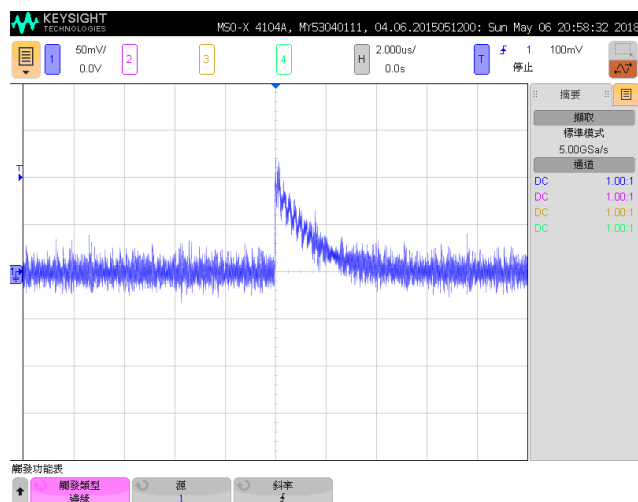
圖(六) 還未擺放射源讀出晶片第一個通道輸入波型。



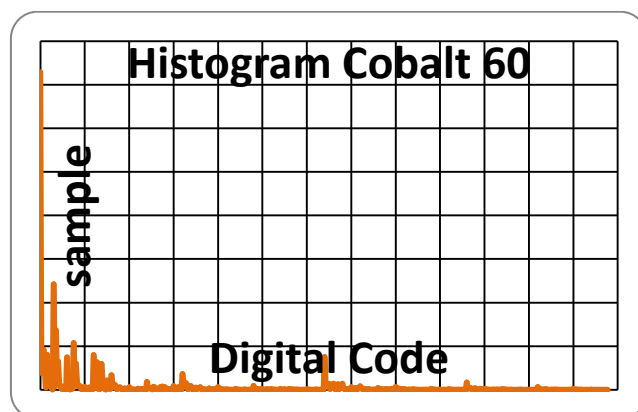
圖(七) 擺放射源 Cobalt 60 後，讀出晶片第一個通道輸入波型。



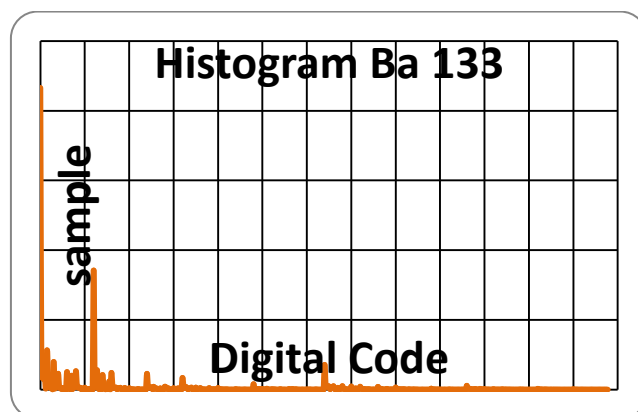
圖(八) 還未擺放射源讀出晶片第 16 個通道輸入波型。



圖(九) 擺放射源 Cobalt 60 後，讀出晶片第 16 個通道輸入波型。



圖(十) 讀出電路晶片第 16 通道量 Cobalt 60 的訊號十分鐘後所紀錄下來的 histogram 統計圖。



圖(十一) 讀出電路晶片第 16 通道量 Ba 133 的訊號十分鐘後所紀錄下來的 histogram 統計圖。

參考文獻

- [1] Available on website:
www2.itis.org.tw/book/download_sample.aspx?pubid=65226047.
- [2] Available on website:

http://iekweb2.iek.org.tw/IEKConf/Client/confinfo.aspx?mode=confinfo&conf_no=217609829.

- [3] R. Irsigler, J. Anderson, J. Alverbro, J. Borglind, C. Frojdh, P. Helander, S. Manolopoulos, H. Martijn, V. O'Shea, and K. Smith, "X-ray imaging using a 320 x 240 hybrid GaAs pixel detector," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 507-512, Jun. 1999.
- [4] S. Steadman, F. M. Serrano, G. Vogtmerier, A. Kemna, E. Oezkan, W. Brockherde, and B. J. Hosticka, "A CMOS photodiode array with in-pixel data acquisition system for computed tomography," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 7, pp. 1034-1043, July 2004.
- [5] B. Mikulec, "Development of segmented semiconductor arrays for quantum imaging," *Nucl. Instrum. methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip.*, vol. 510, pp. 1-23, Sep. 2003.
- [6] I. Willekens, B. Dierickx, N. Buls, C. Breucq, A. Schiettecatte, J. D. mey, and C. Bourgain, "Superiority of multi-energy color X-ray for breast spectrum radiography," in *European Society for Radiography Congress*, Mar. 2011.
- [7] B. P. Ginsburg and A. P. Chandrakasan, "A 500 MS/s 5 b ADC in 65-nm CMOS," *IEEE Symp. VLSI Circuits*, Jun. 2007, pp. 174-175.
- [8] Y. K. Chang, C. S. Wang, and C. K. Wang, "A 8-bit 500 KS/s low power SAR ADC for bio-medical application," *IEEE ASSCC Dig. Tech. Papers*, Nov. 2007, pp. 228-231.
- [9] Liu, C.-C., Chang, S.-J., Huang, G.-Y., and Lin, Y.-Z.: 'A 10-bit 50-MS/s SAR ADC with a monotonic capacitor switching procedure', *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2010, 45, (4), pp. 731-740.
- [10] Y. Zhu, C. H. Chan, U. F. Chio, S. W. Sin, S. P. Martins, and F. Maloberti, "A 10-bit 100MS/s reference-free SAR ADC in 90nm CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 6, pp. 1111-1121, Jun. 2010.

放射治療儀多葉式準直儀系統品保模式精進之評估

計畫編號：106-NU-E-010-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許世明 教授

e-mail：smhsu@ym.edu.tw

計畫參與人員：陳昕麟、莊和達、馮真如

執行單位：國立陽明大學

摘要

國內每年約有 140 萬人次的病患接受放射治療；對於放射治療而言，輻射安全與劑量給予的準確性是一重要議題。考量國內放射治療設備醫療曝露品保作業的推動。本研究建立放射治療儀多葉式準直系統曝露品保模式，協助國內放射治療在輻射劑量輸出有相互比對及討論的機制，同時協助提昇國內放射治療劑量輸出的準確性，並確認輻射品質保證作業的成果。

關鍵詞：劑量、多葉式準直系統、品質保證、放射治療。

Abstract

Nearly 1.4 million cancer patients receive radiation treatments per year in Taiwan. Radiation safety and dose accuracy are the important issues for radiation treatments. In order to promote the quality assurance of radiotherapy equipment, it is needed to establish the verification methods for clinical multi-leaf collimator system. The quality assurance mode can serve as the platform for dose inter-comparison among these departments, and thereby achieve dose consistency between different radiation therapy systems. Therefore, it is necessary to carry out the related research focused on the evaluating the calibration procedure for radiation therapy dose output in order to achieve the above goals.

Keywords: dose, multileaf collimator system, quality assurance, radiotherapy

I. 前言

放射治療儀器的發展中，多葉式準直系統在強度調控放射治療、體積調控弧形放射治療、影像導引放射治療…等治療技術中，扮演照野形成的重要角色，其葉片目的位置及葉片移動速度的準確度，會嚴重影響小照野範圍內堆疊的輻射劑量，因此放射治療儀多葉式準直系統之曝露品保，將攸關治療劑量給予的準確性。多葉式準直系統在執行放射治療時，做為能夠形成照野的重要元件，應用在強度調控放射治療，及體積調控弧形放射治療…等不同的治療技術，而多葉式準直系統移動時的速度及葉片位置準確度，不但影響放射治療劑量給予的準確性，更嚴重影響病人接受放射治療時的安全性。本研究目的為放射治療儀多葉式準直儀系統曝露品保模式的精進評估。

II. 主要內容

使用電子驗證影像裝置，進行各項量測，並根據量測結果，評估國內現行之輻射醫療品保程序精進之可行

性，並規劃建立國內放射治療儀多葉式準直系統之曝露品保作業模式。

III. 結果與討論

目前國內法規規範有關多葉式準直系統的項目，為光照野與輻射照野一致性、準直儀角度指示器、準直儀對稱性，為每月驗證一次。而在 AAPM TG-142 報告中，已提出每周、每月、每年的建議品保項目，關於多葉式準直儀葉片位置準確度、葉片移動速度、葉片穿透率等皆有所規範。相較傳統使用輻射變色底片進行品保，利用現今大多數直線加速器皆配備有的 EPID 做為品保驗證工具，可節省執行品保流程時的整體耗費時間。Zwan 等人的研究提出，EPID 在 MLC 產生 0.5 mm 錯誤時，即可偵測出錯誤。EPID 高解析度的特性，對於品保作業有所助益。綜合以上結果，並參考國內外文獻，現行法規中應將多葉式準直系統的準確度列入執行品質保證項目中。

參考文獻

- [1] 行政院原子能委員會：游離輻射防護法；(2002)
- [2] 行政院原子能委員會：游離輻射防護安全標準；(2007)
- [3] Andrew Wu, Edward D. Brandner, Dwight E. Heron, and M. Saiful Huq, Ning J. Yue, Wen-Cheng Chen. "Dosimetric evaluations of the interplay effect in respiratory-gated intensity-modulated radiation therapy." Medical Physics. 36: 893-903 (2009)
- [4] Paul J. Keall, Amit Sawant, Byungchul Cho, Dan Ruan, Junqing Wu, Per Poulsen, Jay Petersen, Laurence J. Newell, Herbert Cattell, Stine Korreman. "Electromagnetic-Guided Dynamic Multileaf Collimator Tracking Enables Motion Management For Intensity-Modulated Arc Therapy." International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics. 79: 312-320 (2011)
- [5] Amit Sawant, Sonja Dieterich, Michelle Svatos, Paul Keall. "Failure mode and effect analysis-based quality assurance for dynamic MLC tracking systems." Medical Physics. 37: 6466-6479 (2010)

※報告內容將於成果發表會當天公開，請就可公開之內容揭露

醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄之研究 Monitoring and Integration of Radiation Doses from Medical Exposure

計畫編號：MOST 106-NU -E-010-002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳東信

e-mail：tung7061@gmail.com

計畫參與人員：杜俊元、孫靜儀、林冠亨、陳冠名

執行單位：國立陽明大學 生物醫學影像暨放射科學系

摘要

美國國家輻射防護與測量委員會(National Council on Radiation Protection and Measurement, NCRP) 在 2006 年的 160 號報告指出，美國醫療曝露劑量約佔整體國民年劑量的 48 %，其中電腦斷層掃描儀(computed tomography, CT)是醫療曝露劑量貢獻度是最高的，約佔總醫療輻射曝露的 50%。依據衛生福利部統計資料顯示，國內 CT 設備數及檢查人次近年來呈現持續成長的趨勢。本計畫以劑量貢獻度最高的 CT 為主要研究對象，使用所規範之輻射曝露監控整合系統(radiation exposure monitoring, REM)於醫學影像儲傳系統端(picture archiving and communication systems, PACS)，以回溯性的方式於兩家醫學中心收集約 18,000 筆臨床 CT 檢查，包含成人(頭部、胸部、腹部)及兒童(頭部、腹部)的單相位(single-phase)或多相位(multi-phase)等檢查，分析病人劑量與相關檢查參數，並導入游離輻射生物效應第七份報告(Biological Effects of Ionizing Radiation VII, BEIR VII)在組織或器官的終身可歸因風險(lifetime attributable risk, LAR)，評估計算成人及兒童單次 CT 檢查的癌症風險。結果顯示成人最高有效劑量(effective dose)的前四項檢查分別是：頭頸部多相位檢查 5.05 ± 2.26 mSv、胸腹部多相位檢查 20.66 ± 5.36 mSv、全腹部多相位檢查 17.98 ± 5.78 mSv 及腸胃道電腦斷層血管攝影檢查 26.31 ± 14.77 mSv；兒童腹部多相位檢查在各年齡的有效劑量：1~5 歲是 10.03 ± 3.01 mSv、6~10 歲是 13.68 ± 8.55 mSv、11~15 歲是 16.55 ± 6.34 mSv；兒童頭部單相位檢查在各年齡的有效劑量：1~5 歲是 2.43 ± 0.86 mSv、6~10 歲是 2.54 ± 0.96 mSv、11~15 歲是 2.01 ± 0.54 mSv。癌症風險評估結果顯示成人腸胃道電腦斷層血管攝影檢查的 LAR 最高，兒童則是腹部多相位檢查。醫療輻射曝露劑量安全管理與合理抑低一直是國際上主要議題，病人輻射安全更是重要的醫療品質指標，藉由本研究達成落實醫療輻射曝露品質提升、為病人輻射安全把關。

關鍵字：醫療輻射曝露劑量、輻射曝露監控整合系統、終身可歸因風險。

Abstract

The National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP) report number 160 revealed in 2006, the annual per caput radiation dose from the medical radiation exposure is 48% in the United States. Specifically, CT is the greatest contributor, about 50% of total exposure to medical radiation. According to the statistics of the

Ministry of Health and Welfare in Taiwan, the numbers of domestic CT scanner and examination have shown continuous growth in recent years. This study focused on CT and retrospectively collected more than 18,000 records from two medical centers, including single-phase or multi-phase examinations of adults (head, chest, abdomen) and children (head, abdomen) by using the system of radiation exposure monitoring (REM) on medical archiving and communication systems (PACS). Also, the radiation risks were evaluated and calculated by the factors of lifetime attributable risk (LAR) from the guidelines of Biological Effects of Ionizing Radiation VII report (BEIR VII). The results showed that the highest four effective doses for CT examinations in adults were: 5.05 ± 2.26 mSv for multiple-phase head and neck, 20.66 ± 5.36 mSv for multi-phase chest and abdomen, 17.98 ± 5.78 mSv for the multi-phase whole abdomen, and 26.31 ± 14.77 mSv for gastrointestinal CT angiography examination. The effective doses in children for multi-phase whole abdomen examination were 10.03 ± 3.01 mSv (1~5 year), 13.68 ± 8.55 (6~10 year) and 16.55 ± 6.34 mSv (11~15 year). The effective doses in children for single-phase brain examination were 2.43 ± 0.86 mSv (1~5 year), 2.54 ± 0.96 mSv (6~10 year) and 2.01 ± 0.54 mSv (11~15 year). The radiation risk assessment showed that LAR was the highest in adult gastrointestinal CT angiography, and the child was the multi-phased in whole abdomen. Medical radiation exposure and dose management for as low as reasonably achievable (ALARA) is always the major issues in the world. Patient radiation safety is an important indicator of medical quality. Through this study, it has been achieved to improve the quality of medical radiation exposure and ensure radiation safety for patients.

Key words: medical radiation doses, Radiation Exposure Monitoring Integration, lifetime attributable risk.

I. 前言

1895 年 Roentgen 發現 X 光，隨著科技進步輻射被廣泛的應用於醫療行為上，依其用途可分成放射診斷、放射治療及核子醫學等三部分。除放射治療外，因醫學影像檢查所造成的醫療輻射曝露劑量，美國食品藥物管理局(U.S. food and drug administration)已於 2010 年報告中提出相關統計(表一)[1]。聯合國輻射影響科學委員會 (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCAR)於 2008 年全球人口年度集體有效劑量與年人均劑量來源分析，發現來自醫療輻射曝露劑量的貢獻度約佔 21 %，但是其中因放射診斷所貢

獻的劑量就佔了 20 %。美國國家輻射防護與測量委員會 (National Council on Radiation Protection and Measurement, NCRP) 在 2009 年的 160 號報告指出，美國醫療輻射劑量約佔整體國民年劑量的 48 % (圖一)，其中電腦斷層掃描儀 (computed tomography, CT) 是醫療輻射劑量貢獻度是最高的，約佔總醫療輻射劑量的 50 % [3] 依據衛生福利部統計資料顯示，國內 CT 設備數及檢查人次近年來呈現持續成長的趨勢 [4]。近年來數位醫療影像迅速發展，已經可以藉由健康資訊整合協會 (Integrating the Healthcare Enterprise, IHE) 所規範之輻射劑量監控整合系統 (radiation exposure monitoring, REM)，直接擷取醫學影像儲傳系統 (picture archiving and communication systems, PACS) 中數位影像的輻射劑量相關資訊 [5]，進行醫療輻射劑量監控整合紀錄及風險管理。醫療輻射劑量監控整合紀錄及風險管理是現今國際上相當重視的議題，為達成此一目的，將透過蒐集分析國際上執行醫療輻射劑量監控整合紀錄之方法，進行國內醫院各項放射診斷程序之醫療劑量評估，而醫療輻射劑量中最高的是 CT，若是由 CT 開始示範醫療輻射劑量監控將會是一種有效且快速的方法，利用 CT 劑量監控達成醫療輻射劑量優化，可更進一步完成個人化劑量風險管理；以 CT 的經驗評估建立醫療輻射執行醫療輻射劑量監控整合

紀錄之方法。

II. 主要內容

本研究執行方法分為三部分：一、蒐集分析國際上執行醫療輻射劑量監控整合紀錄之方法。二、蒐集國內各項放射診斷程序之醫療劑量，參考國際上目前狀況並達到分析國內醫療劑量之目標。三、評估建立醫療輻射劑量監控整合紀錄之可行性。藉由文獻查證，整合系統直接擷取檢查儀器或 PACS 中數位影像的輻射劑量資訊的方法，分析醫療數位影像傳輸協定 (digital imaging and communications in medicine, DICOM) 檔案格式、檔頭 (header) 內規範定義 (圖二) 及各項放射診斷程序的劑量指標 (表二) [6]。以正確使用劑量指標於劑量監控整合紀錄中，並分析國際上的執行方法。

本計畫將選擇兩家醫學中心，先以劑量貢獻度最高的 CT 為主要研究對象，以回溯性的方式於兩家醫學中心收集 18,000 筆以上的臨床 CT 劑量資料，這將是國內首度大規模且跨中心醫療輻射劑量的巨量分析，包含成人 (頭部、胸部、腹部) 及兒童 (頭部、腹部) 的單相位 (single-phase) 或多相位 (multi-phase) 等檢查，使用 REM 整合系統將临床上所有 CT (不限廠牌、機型) 檢查程序之輻射劑量進行相關轉換資訊整合，將病人的醫療輻射劑量轉換成有效劑量 (effective dose)。

表一、各種醫學影像的輻射劑量*

種類	成人平均有效劑量 (mSv)	預估劑量相等值 (胸部 X 光攝影張數)
牙科 X 光	0.005 ~ 0.01 ^a	0.25 ~ 0.5
胸部 X 光	0.02	1
乳房攝影	0.4	20
電腦斷層	2 ~ 16 ^b	100 ~ 800
核醫檢查	0.2 ~ 41 ^c	10 ~ 2050
侵入性透視檢查	5 ~ 70 ^d	250 ~ 3500

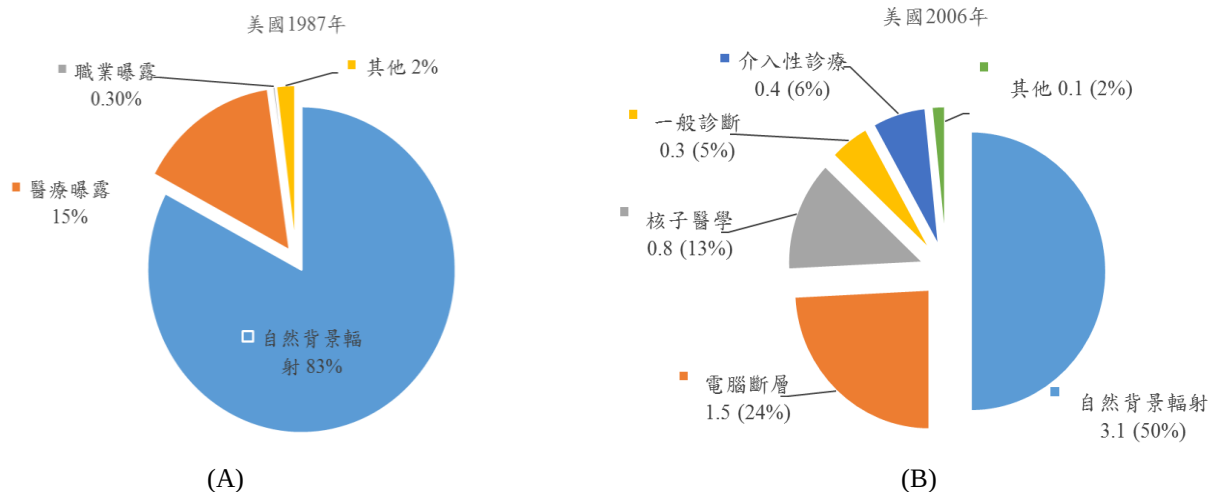
*：表中各種檢查之成人平均有效劑量是與胸前後位 X 光檢查 (0.02 mSv) 之成人平均有效劑量比較。

a：0.005 mSv 是牙科單齒攝影之成人平均有效劑量。0.01 mSv 是全口牙攝影之成人平均有效劑量。

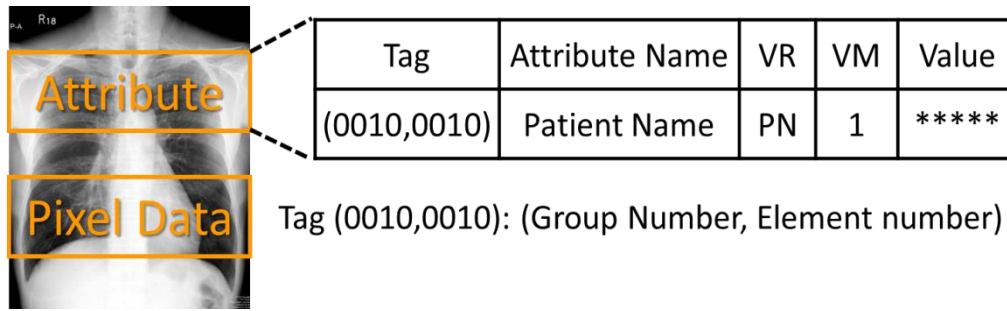
b：2 mSv 是頭部電腦斷層之成人平均有效劑量。16 mSv 是冠狀動脈電腦斷層血管攝影之成人平均有效劑量。

c：0.2 mSv 是 99mTc-DTPA 肺部灌注檢查之成人平均有效劑量。41 mSv 是心肌灌注造影之成人平均有效劑量。

d：5 mSv 是頸部或頭部血管攝影之成人平均有效劑量。70 mSv 是經頸靜脈肝內肝門靜脈造流術之成人平均有效劑量。



圖一、NCRP 160 號報告美國年人均劑量與來源分析：(A)1987 年美國年人均劑量為 3.6 mSv，其中醫療輻射劑量佔 0.54 mSv、(B)2006 年美國年人均劑量為 6.2 mSv，其中醫療輻射劑量佔 3.0 mSv。



圖二、數位醫學影像物件(information object definition, IOD)包含影像屬性(attribute)及像素資料(pixel data)，影像屬性位於檔案格式的檔頭並使用標籤(tag)做識別，Tag內包含群組編號(group number)及元素編號(element number)以定義資料內容。註：資料代碼(value representation, VR)、資料複合數(value multiplicity, VM)

表二、各項放射診斷程序之劑量指標

輻射量	定義	適用
表面入射劑量 (Entrance Surface Dose, ESD)	空氣中，放射線進入受照射表面的吸收劑量(包含散射輻射劑量)	DR(CR)、RF、MG
克馬面積乘積 (Kerma-Area Product, KAP)	X光射束空氣克馬與射束面積乘積	DR(CR)、RF
累積空氣克馬 (Cumulative Air Kerma)	介入性檢查中於固定參考點所累計總空氣克馬值	RF
電腦斷層體積劑量指標 (Volume-weighted CTDI, CTDI _{vol})	電腦斷層加權劑量指標(Weighted CTDI, CTDI _w)與螺距乘積	CT
劑量長度乘積 (Dose Length Product, DLP)	CTDI _{vol} 與掃描長度乘積	CT

DR(CR):一般 X 光攝影、RF:透視攝影、MG:乳房攝影、CT:電腦斷層掃描

將計算出之有效劑量套用 BEIR VII 報告中的致癌風險評估方法，評估組織或器官的終身可歸因風險(lifetime attributable risk, LAR)[7]，LAR 值的高低將取決於病人所受之輻射劑量、性別及在接受曝露當下的年齡，參考 BEIR VII 報告中的 TABLE 12D-1 來評估癌症發生率(cancer incidence, CI)的終身可歸因風險，藉此達到醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄與風險管理的目的。在不影響臨床診斷和治療的前提下，降低受檢病人的輻射劑量與致癌風險，以 CT 檢查程序輻射劑量轉換資訊整合經驗，逐步分析其他放射診斷程序之醫療劑量。藉由文獻探討與蒐集分析 CT 診斷程序醫療劑量經驗，評估建立醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄之可行性，完成個人化的醫療輻射曝露劑量風險管理。

III. 結果與討論

本計畫中的 CT 檢查以電腦化回溯性的方式收集 18,000 筆臨床檢查劑量資料，進行國內首次大數據且跨中心的醫療輻射曝露劑量分析，將臨床電腦斷層掃描檢查之醫療輻射曝露劑量監控研究結果分成：

臨床電腦斷層掃描醫療輻射曝露劑量評估

電腦斷層掃描檢查依照影像取樣時序可分成單相位檢查、多相位檢查及血管攝影檢查，依據臨床兒童及成人主要檢查部位進行分類，兒童電腦斷層掃描檢查則參考美國醫學物理學會(AAPM)報告[5]之分齡方式進行分組，並統計分析成人及兒童各項電腦斷層掃描檢查的年齡、體積電腦斷層劑量指標(volume-weighted CTDI, CTDI_{vol})、劑量長度乘積(dose length product, DLP)、有效劑量及病人體型(water equivalent diameter of the patient, patient

WED)或個別體型劑量估算(size-specific dose estimate, SSDE)等項目之結果(表三 ~ 表八)。

臨床電腦斷層掃描檢查癌症風險評估

使用 BEIR VII 報告中的 TABLE 12D-1，再以臨床電腦斷層掃描醫療輻射曝露劑量評估(表三 ~ 表八)中各部位有效劑量平均值較高的多相位檢查為主，分別評估計算成人及兒童臨床多種類 CT 檢查執行單次的癌症發生率的 LAR，評估結果如圖三及圖四。

建立醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄之可行性

藉由 CT 診斷程序醫療劑量相關文獻探討與分析 CT 醫療數位影像傳輸協定檔案格式、檔頭內規範定義及各項劑量相關指標的經驗，了解 IHE 已規範數位醫學影像物件(information object definition, IOD)需包含影像屬性(attribute)及像素資料(pixel data)，影像屬性位於檔案格式的檔頭並使用標籤(tag)做識別，tag 內包含群組編號(group number)及元素編號(element number)以定義資料內容，DICOM tag 內之 group number 及 element number 定義各項影像資料內容，包含病人基本資料對應欄位、儀器相關掃描參數資訊對應欄位、病人醫療輻射劑量資訊對應欄位。使用正確 DICOM tag 建立個人化之 CT 醫療輻射曝露劑量整合紀錄，確實可用於分析單一病人因多次 CT 檢查所獲得之醫療輻射曝露劑量，以 CT 檢查程序輻射劑量轉換資訊整合經驗，逐步分析其他放射診斷程序之醫療劑量，進行不同影像設備醫療輻射曝露劑量整合並評估建立醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄(圖五)。

表三、成人頭部電腦斷層掃描檢查醫療輻射曝露劑量評估 (n = 6,845)

	Brain single-phase	Brain multi-phase	Temporal single-phase	Orbit single-phase	Facial bone single-phase
Age (year)	61.86±19.96	61.84±14.96	52.13±14.62	53.89±16.65	50.20±14.92
CTDI _{vol} (mGy)	50.63±9.43	56.03±7.11	33.75±5.34	22.56±9.96	9.73±8.63
DLP (mGy-cm)	870.62±239.00	1726.63±301.10	253.64±130.58	244.74±122.43	161.93±162.99
Effective dose(mSv)	2.24±0.77	4.47±0.98	0.72±0.35	0.64±0.33	0.40±0.42
Patient WED (mm)	173.43±19.15	171.64±10.97	191.48±13.48	187.79±17.08	185.79±13.72

	Facial bone multi-phase	Head and neck single-phase	Head and neck multi-phase	C spine single-phase
Age (year)	51.43±16.30	49.34±18.38	52.93±14.70	58.20±16.96
CTDI _{vol} (mGy)	21.05±22.89	9.33±3.95	9.10±2.86	16.12±5.85
DLP (mGy-cm)	736.76±302.04	277.75±131.69	524.88±177.17	337.48±132.91
Effective dose(mSv)	2.95±1.36	2.74±2.33	5.05±2.26	3.12±1.48
Patient WED (mm)	173.75±11.56	187.46±19.13	187.90±17.41	198.36±31.63

表四、成人胸部電腦斷層掃描檢查醫療輻射曝露劑量評估 (n = 3,860)

	HRCT chest single-phase	HRCT chest multi-phase	Chest single-phase	Chest multi-phase	Chest and abdomen multi-phase
Age (year)	61.58±15.35	62.22±17.30	60.94±17.84	62.26±16.56	63.72±12.70
CTDI _{vol} (mGy)	7.04±2.59	7.10±2.36	7.57±3.29	7.03±2.72	8.21±2.30
DLP (mGy-cm)	242.82±83.63	464.77±156.29	271.27±113.20	510.74±238.44	1210.83±360.98
Effective dose(mSv)	5.38±1.42	10.77±3.42	5.90±2.10	10.99±4.44	20.66±5.36
Patient WED (mm)	253.68±28.54	250.48±27.01	256.37±31.42	250.11±29.00	232.69±45.43
SSDE (mGy)	9.47±2.83	9.78±2.63	10.20±3.50	9.73±3.25	13.23±2.51

表五、成人腹部電腦斷層掃描檢查醫療輻射曝露劑量評估 (n = 4,452)

	Whole abdomen single-phase	Whole abdomen multi-phase	Lower abdomen single-phase
Age (year)	64.07 ± 16.80	55.23±18.58	58.71±19.16
CTDI _{vol} (mGy)	9.87 ± 3.75	9.39±3.58	9.65±4.85
DLP (mGy-cm)	547.08±271.73	997.12±480.38	340.77±247.11
Effective dose(mSv)	9.57±3.89	17.98±5.78	5.73±3.77
Patient WED (mm)	265.82±30.33	261.82±29.94	268.45±33.20
SSDE (mGy)	13.27±3.53	12.76±3.44	12.83±4.94

	Lower abdomen multi-phase	Upper abdomen multi-phase	Pancreas multi-phase
Age (year)	53.24±18.19	57.05±14.81	59.55±13.47
CTDI _{vol} (mGy)	8.67±2.76	8.67±2.90	8.79±3.36
DLP (mGy-cm)	740.86±298.89	513.69±264.29	689.34±311.43
Effective dose(mSv)	13.97±5.03	9.48±4.82	12.85±4.38
Patient WED (mm)	258.02±26.70	263.70±26.66	258.88±30.09
SSDE (mGy)	12.28±2.92	12.01±3.21	12.21±2.70

表六、成人電腦斷層血管攝影檢查醫療輻射曝露劑量評估 (n = 1,775)

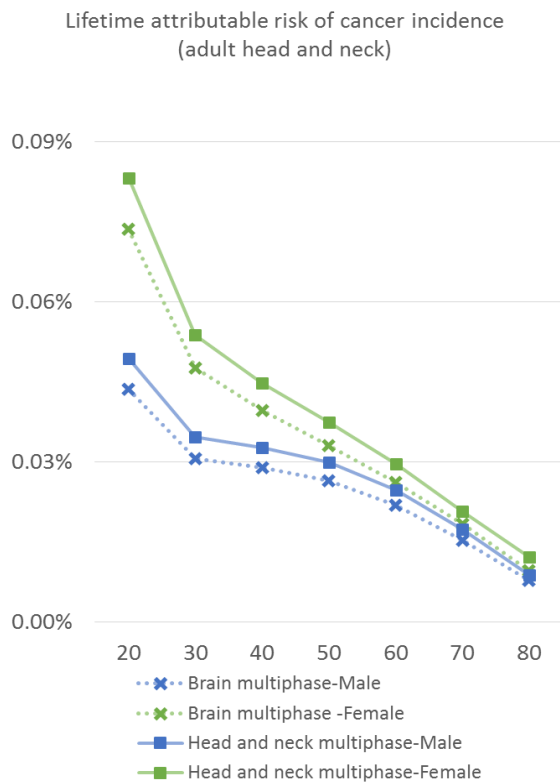
	Brain CTA	Cardiac CTA	Heart and vessels CTA	Gastrointestinal CTA	Liver CTA
Age (year)	59.70±14.52	59.00±10.63	65.28±20.10	66.50±15.14	58.43±14.58
CTDI _{vol} (mGy)	22.70±7.48	15.97±11.37	8.78±5.70	10.10±5.13	8.66±2.82
DLP (mGy-cm)	2057.37±1035.32	451.01±252.56	794.98±398.44	1470.72±871.99	931.58±405.10
Effective dose(mSv)	8.18±6.61	9.64±6.13	15.58±7.26	26.31±14.77	15.62±5.57
Patient WED (mm)	187.03±30.45	248.34±27.10	265.04±34.29	265.23±31.11	265.98±28.43
SSDE (mGy)		23.21±17.43	11.31±7.33	13.45±6.36	11.88±2.58

表七、兒童頭部電腦斷層掃描檢查醫療輻射暴露劑量評估 (n = 299)

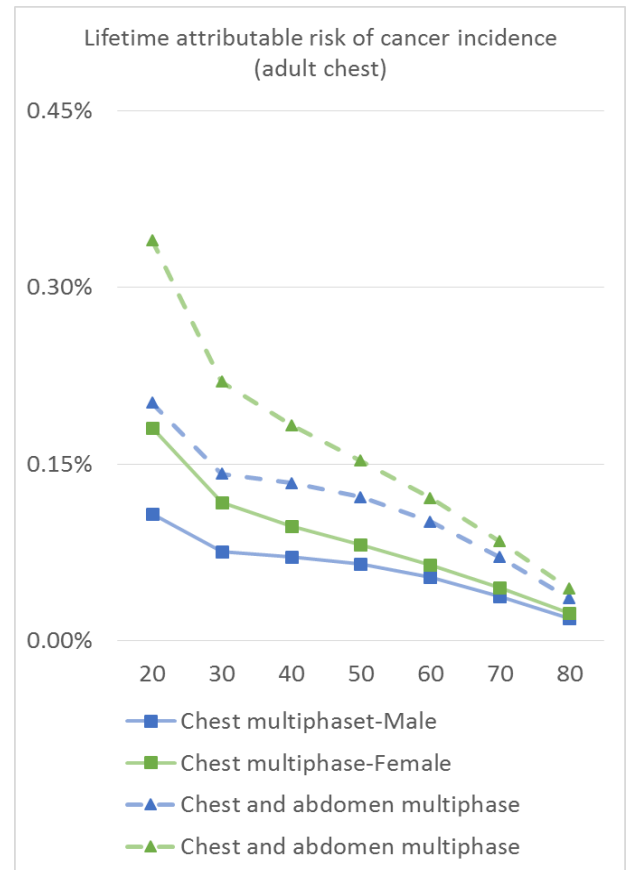
	Children brain single-phase (1-5 y)	Children brain single-phase (6-10 y)	Children brain single-phase (11-15 y)	Children brain single-phase (16-17 y)
Age (year)	3.46±1.47	7.98±1.48	14.08±1.45	16.98±0.59
CTDI _{vol} (mGy)	29.24±7.23	39.18±11.19	44.55±11.31	51.87±10.25
DLP (mGy-cm)	454.28±141.66	635.67±202.91	718.11±200.51	843.88±158.34
Effective dose(mSv)	2.43±0.86	2.54±0.96	2.01±0.54	2.21±0.41
Patient WED (mm)	148.08±13.48	153.01±9.72	164.99±30.89	176.68±27.31

表八、兒童腹部電腦斷層掃描檢查醫療輻射暴露劑量評估 (n = 231)

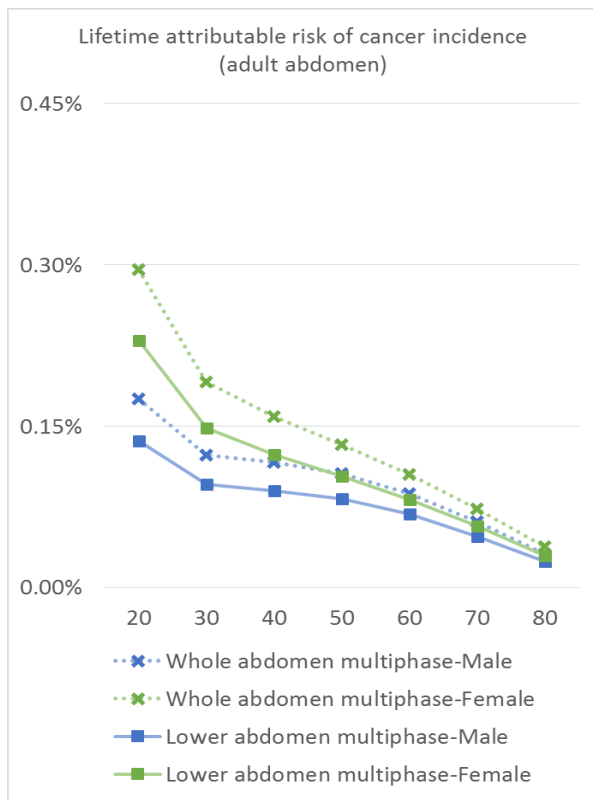
	Whole abdomen multi-phase (1-5 y)	Whole abdomen multi-phase (6-10 y)	Whole abdomen multi-phase (11-15 y)	Whole abdomen multi-phase (16-17 y)
Age (year)	3.10±1.37	8.17±1.36	13.97±1.60	17.00±0.62
CTDI _{vol} (mGy)	2.76±0.63	5.12±4.11	7.30±3.20	8.07±1.57
DLP (mGy-cm)	220.11±80.89	418.22±261.80	779.81±448.54	782.24±198.42
Effective dose(mSv)	10.03±3.01	13.68±8.55	16.55±6.34	16.44±4.68
Patient WED (mm)	152.75±14.56	188.92±18.72	237.42±34.80	248.65±17.88
SSDE (mGy)	5.59±1.43	9.19±7.18	10.58±2.87	10.92±1.88



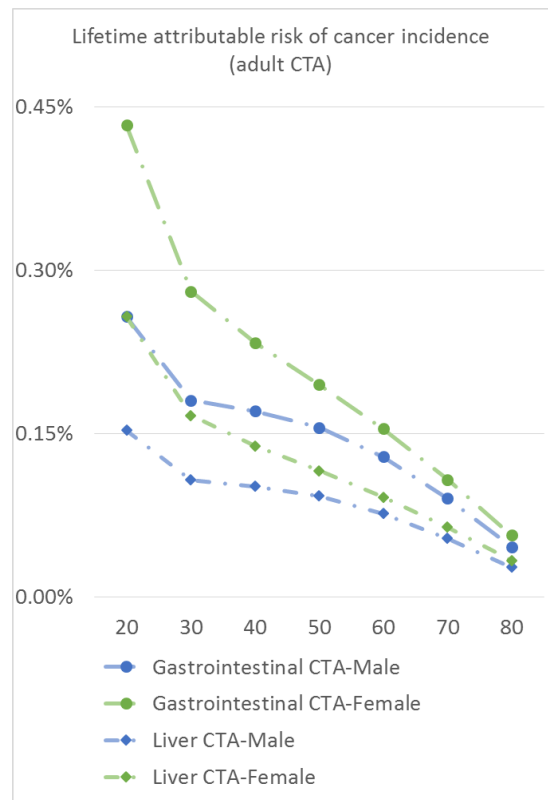
(A)



(B)

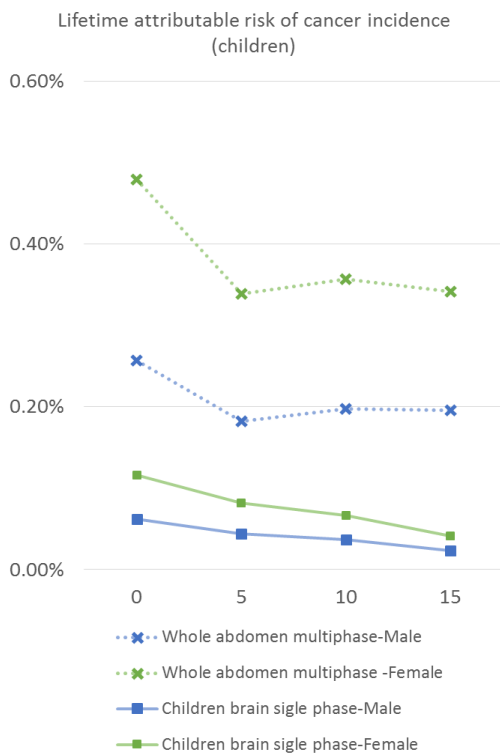


(C)

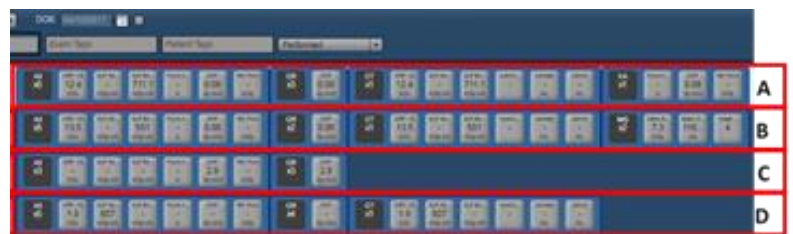


(D)

圖三、成人男性與女性於不同年齡在接受不同電腦斷層掃描檢查種類所造成癌症發生率的終身可歸因風險：(A)多相位頭部(有效劑量 4.47 mSv)及多相位頭頸部檢查(有效劑量 5.05 mSv)。(B)多相位常規胸部(有效劑量 10.99 mSv)及多相位胸腹部檢查(有效劑量 20.66 mSv)。(C)多相位全腹部(有效劑量 17.98 mSv)及多相位下腹部檢查(有效劑量 13.97 mSv)。(D)腸胃道電腦斷層血管攝影(有效劑量 26.31 mSv)及肝臟電腦斷層血管攝影(有效劑量 15.62 mSv)。



圖四、兒童男孩與女孩不同年齡在多相位腹部檢查於 1~5 歲(有效劑量 10.03 mSv)、6~10 歲(有效劑量 13.68 mSv)、11~15 歲(有效劑量 16.55 mSv)及單相位頭部檢查於 1~5 歲(有效劑量 2.43 mSv)、6~10 歲(有效劑量 2.54 mSv)、11~15 歲(有效劑量 0.21 mSv)所造成癌症發生率的終身可歸因風險。



圖五、呈現 A、B、C、D 分別為 4 位不同的病人，病人 A 總計接受 5 次不同種類設備的醫療輻射曝露，其中包含 3 次一般 X 光攝影、1 次電腦斷層掃描及 1 次透視攝影；而病人 C 總計接受 3 次同一種類設備的醫療輻射曝露，由上述實驗驗證多次同一影像設備的醫療輻射曝露劑量是可以加總計算的，而不同影像設備醫療輻射曝露劑量也確實可以達成整合。

IV. 結論

醫療輻射曝露劑量安全管理與合理抑低是現今國際上主要的議題，而病人輻射安全更是重要的醫療品質指標，歐美先進國家早已開始著手進行病人醫療輻射曝露劑量管理，以美國為例，ACR 對國內設有電腦斷層掃描儀的各醫療機構以電腦自動化的方式，對各醫療機構的各項檢查部位的 $CTDI_{vol}$ 、DLP 及 SSDE 等劑量相關指標，提出每季的評估報告並進行劑量管理。未來若是我們要與國際接軌推行醫療輻射曝露劑量監控整合相關政策，需要醫療院所的設備能完整符合相關格式及完整的人員教育訓練，才能讓醫療輻射曝露劑量監控整合發揮最大效益。藉由醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄之研究了解國際上目前執行醫療輻射曝露劑量管理之經驗與執行方法，蒐集國內 CT 診斷程序之醫療劑量，實際分析台灣目前醫療輻射曝露劑量概況，達成評估建立醫療輻射曝露劑量監控整合紀錄可行性之目標，落實醫療輻射曝露品質提升、為病人輻射安全把關。

參考文獻

- [1] Center for Devices and Radiological Health, U.S. Food and Drug Administration. Initiative to Reduce Unnecessary Radiation Exposure from Medical Imaging. 2010.
- [2] United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources And Effect of Ionizing Radiation. 2008.
- [3] Norman E. Bolus. NCRP Report 160 and What It Means for Medical Imaging and Nuclear Medicine. Journal of Nuclear Medicine Technology 2013; 41:255-260.
- [4] 行政院衛生福利部，表 15 歷年醫療設備數(含特定醫療技術檢查檢驗醫療儀器、手術台、產台、牙科治療台及門診診療室)。
http://www.mohw.gov.tw/cht/DOS/Statistic.aspx?f_list_no=312&fod_list_no=5534. 2016.
- [5] Integrating the Healthcare Enterprise, Radiation Exposure Monitoring (REM) Integration Profile. 2008.
- [6] C. J. Martin. Management of Patient Dose in Radiology in the UK. Radiation Protection Dosimetry, 2011; 147:355 - 372.
- [7] National Academy of Sciences Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) Report VII. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiations: Time for reassessment? Washington DC: National Academy of Sciences, 2005.
- [8] International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Report 60). Annals of the ICRP. 1991; 21(1-3).

以 DICOM 資訊建立醫用數位 Tomosynthesis X 光機之輻射劑量參考水平研究 (I)

Application and Establishment of the DICOM Information in Radiation Doses Reference Levels of Digital Tomosynthesis (I)

計畫編號：MOST 106—NU—E—033—001—NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蘇振隆

e-mail：jlsu@cycu.edu.tw

計畫參與人員：郭銘芳、倪于晴

執行單位：中原大學生物醫學工程學系

摘要

以放射線造影技術來進行疾病的診斷，在醫學上是很有力的工具。隨著相關醫療設備及診斷技術的進步，醫療輻射防護相關議題也越受到重視，接受的輻射劑量越多，造成之輻射傷害機率也越高，但照射劑量不足，所呈現出來的影像無法提供疾病正確診斷而重照，病患受到的輻射量也將增加。因此，適當劑量在放射診斷上儼然成為重要的議題，尤其資訊數位化比重逐漸增加，加上數位 X 光影像設備提供了傳統 X 光影像設備所不能達到的優點，全球 X 光影像設備市場均呈現平穩成長。國內政府致力推動高階影像器材發展方案，也積極鼓勵醫療器材產業朝高階創新產品發展，目前已有多家廠商投入醫用數位 X 光攝影儀開發，造影系統如何輸出正確成像內容及可靠劑量資訊，且能同時符合醫療器材法規及醫學數位影像及通信標準是國內所欠缺的。

本計畫已完成符合數位 X 光攝影儀輸出影像物件及與系統參數（管電壓(KVp)、管電流(mAs)等）連結之輻射劑量與 DICOM 影像物件輸出资訊的研析，並完成(1) 與促使輻射劑量抑低相關之醫療用數位 X 光攝影儀 DICOM 輸出影像格式及標籤的研析。(2) 透過與醫界之實務使用經驗結合，並針對數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像物件進行測試驗證，完成符合輻射劑量監視與國際影像格式標準之可行方案研究，以作為國產放射類之高階醫療造影儀器設備規格檢視及輻射管制與防護要求之參考，並實際協助相關技術之發展。

關鍵詞：數位 X 光攝影儀、醫學數位影像及通信標準、輻射劑量、管電壓、管電流

momentum for future markets. Reduce radiation risks while maximizing the benefit. To maintain image quality while reducing the radiation dose is very important. The government encourages medical device industry towards high-end innovation and product development. There are manufacturers of the x-ray equipment are now producing digital x-ray systems, how to output the correct image content and reliable radiation dose information in the system, which also comply with the Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) standard and medical devices regulations is currently lacking.

DICOM images objects need to be integrated with the many digital X-ray systems parameters currently available. Such as, tube voltage (KVp), tube current (mAs). The purpose is to integrate the radiation dose and output image objects information. We have completed the following work: (1) Holding meeting to discuss about the low-dose related medical digital X-ray systems and DICOM image format and tag. (2) With the medical community through the combination of practical experience, and for the digital X-ray system of the radiation dose and DICOM image objects for testing and verification, to complete the dose monitoring and compliance with the international standard image format. Finally, we also made recommendations and provided to manufacturers as a reference about high-level medical equipment specification, the radiation dose, and radiation protection requirements.

Keywords: Digital X-Ray, DICOM, Radiation Dose, Tube Voltage (KVp), Tube Current (mAs).

I. 前言

The global X-ray imaging system market has shown steady growth. With a gradual increase in global information digitization ratios, coupled with digital X-ray system that features advantages not available in traditional X-ray imaging equipment, such as digital X-ray system that can provide images with higher quality at lower radiation doses, fast imaging, enhanced image storage and reduced reproduction, productivity and efficiency have been greatly enhanced. In addition, digital imaging is used to diagnose physicians' examination, extraction, transmission, and image analysis through electronic means, which has greatly enhanced and simplified the traditional work process and has improved the overall efficiency of medical institutions. Hence, digital X-ray system has become a major growth

在醫學診斷影像技術之精進、研究領域擴增及新興國家基礎醫療設施建構等市場需求增加情況下，讓許多醫療院所由傳統洗片式 X 光機逐漸升級為數位 X 光影像系統，也因此帶動 X 光影像設備市場的成長，相關技術包含醫用和非醫用所衍生之產值龐大，經濟效益可觀。根據研究指出，2009 年全球醫用 X 光影像診斷設備之市場約為 35.7 億美元，其中，包含傳統 X 光影像設備 (Analog X-ray) 及數位 X 光影像設備 (Digital X-ray)，且數位 X 光影像設備約佔所有 X 光影像設備之 9 成。預估 2016 年全球醫用 X 光機市場將達到 47.8 億美元以上。

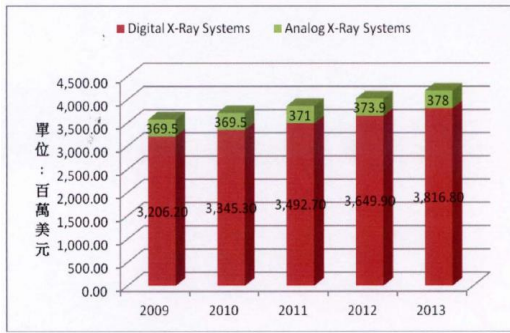


圖 1、2009-2013 年全球醫用 X 光機市場規模預測
(來源：工研院 IEK(2012))

傳統 X 光攝影以底片接收穿透患者之 X 光，再利用顯影液、定影液將底片上的潛像黑化而形成灰階影像，傳統底片式 X 光影像系統因無法滿足醫學影像儲存及通信系統(PACS)用於儲存、取得、傳送與顯示之需求，故傳統底片式 X 光影像系統已逐漸淘汰。數位 X 光攝影利用直接或間接式之轉換技術將穿透人體組織的 X 光轉為數位訊號，再將其重組為二維影像後，直接顯示於高解析度之顯示器，數位成像系統已成為 X 光影像設備之市場主流。2010 年行政院生技產業策略諮議委員會議決全面推動數位 X 光造影系統等高階醫學造影設備作為台灣高階醫學影像器材產業發展產品；目前有多家廠商已投入醫療用數位 X 光攝影儀系統之開發。

隨著造影設備日新月異，相關醫療輻射防護議題也越受重視。接受的輻射劑量越多，造成輻射傷害之機率也將會越高，但照射劑量不足，所呈現出來的影像無法提供疾病正確診斷而必須重照時，病患所接受的輻射量也會增加。Image Gently 與 Image Wisely 之低劑量 X 光攝影已是國際趨勢，遵守 ALARA 原則，若病患為孩童，使用 Society for Pediatric Radiology 公布之 Image Gently 參考資料，病患為成人時，使用 Radiological Society of North America 之 Image Wisely 指導方針。整個影像鏈，除放射醫師、醫學物理師及放射技師外，儀器製造商、病患及家屬等均應注重劑量紀錄與抑低。AAPM 會議也指出利用每次造影之影像所呈現輻射曝露、劑量、造影程序設定等相關資訊，醫院端可即時監視病人之劑量。因此，適當的劑量在放射診斷影像上是很重要的議題。原子能委員會為保障民眾健康，積極推動醫療曝露品質保證作業，藉以提升國內輻射醫療曝露之品質。可見，在維持放射影像品質同時，降低患者接受之輻射劑量為世界潮流。然而，造影系統如何能輸出造影資訊及可靠之劑量資訊且同時符合醫療數位影像傳輸協定規範是國內所欠缺的，透過此橋接研究的進行，可有效控制在檢查時之非預期輻射劑量曝露，故確有必要進行。

II. 主要內容

本計畫主要係以完成數位 X 光攝影系統之 DICOM 影像物件解析及輻射劑量曝露與影像品質評估等相關工作，使造影系統能輸出符合 DICOM 標準規範之正確造影內容及可靠劑量資訊，以期能有效控制其進行造影檢查時之非預期的輻射劑量曝露；其完成之工作項目，包括有：(a) 探討解析數位 X 光攝影儀之 DICOM 輸出

影像物件格式與標籤；(b) 數位 X 光攝影儀之輻射劑量評估與影像物件驗證，透過與醫界實務經驗結合，進行符合劑量監視與 DICOM 影像物件格式之可行性研究。以下就上述重點工作項目進行說明之：

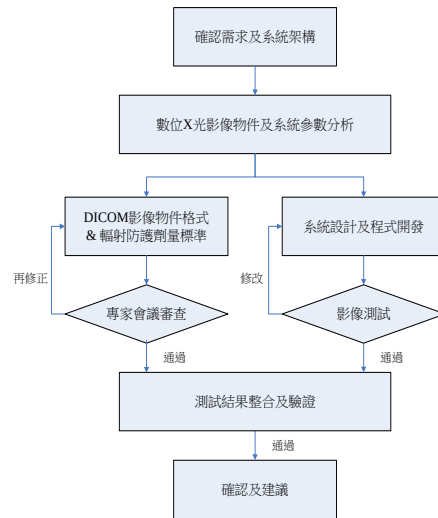


圖 2、主要執行流程及步驟

(a)數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤研析：

為使數位 X 光攝影儀輸出影像物件能完整展現，並符合臨床使用之需求及達到劑量監視目標，本年度邀請資通信等領域專家、臨床放射技術師及放射科醫師參與影像物件格式標籤之研討，並參照 DICOM 標準、AAPM TG 116、游離輻射防護法及原能會公告之輻射醫療曝露品質保證作業流程，配合相關數位 X 光攝影儀器開發，並於計畫期間舉辦會議進行討論，以符合輻射劑量暴露防護並實際應用於放射類造影儀器設備上。

DICOM 影像物件檔頭欄位包含有許多重要資訊，DICOM 對檔頭的規定，有一般性及針對不同類影像的特殊性。一般性檔頭包含有病患姓名、基本資料及檢查日期等欄位，特殊檔頭則依據影像特性而有特定欄位。影像資料如同傳統影像一般，紀錄了每幅圖像的值；而影像屬性部分，包含病患姓名、病歷號碼、檢查項目、日期及造影儀器等訊息，其中與劑量有關的資訊為曝露指標(Exposure indicator)，每一家廠商對曝露指標的表示方式與定義，皆不相同。儀器在定期校正情況下，曝露指標可提供臨床放射師作為技術條件調整之參考。DICOM 影像物件會因影像特性而有不同影像檔頭模組定義；以數位 X 光攝影儀影像為例，資訊個體包含 Patient, Study, Series, Frame of Reference, Equipment 及 Image；不同資訊個體，又分別對應不同模組。除上述部份，尚包含參考框資訊個體，主要用以記錄連續影像的參數，如各影像間的時間間隔，或各影像間的厚度，影像碼號等相關資訊。本計畫依據 DICOM 標準第 3 部：資訊物件定義、第 5 部：資料結構及編碼，以及第 6 部：資料辭典規定，透過原始影像解碼所得資訊及參數，以研析 X 光攝影儀之影像物件與輻射劑量間的關係。

在標準 DICOM 影像物件中，檔頭資訊對於影像及

造影相關資訊的呈現非常重要，為使數位 X 光攝影儀能將影像完整的展現，必須選取正確的檔頭，本計畫依據 DICOM 標準第 3 部規定之數位 X 光影像 IOD 模組屬性的定義(M：必要、U：可有可無及 C：依某條件才有的模組)選擇所需對應模組內容，並依據所對應模組(參閱 DX 影像 IOD 模組 Reference 處)規定，選擇對應的欄位。以下針對各資訊模組定義及其內容，列述如下：

表 1、數位 X 光影像 IOD 模組屬性

IE	Module	Reference	Usage
Patient	Patient	C.7.1.1	M
	Clinical Trial Subject	C.7.1.3	U
Study	General Study	C.7.2.1	M
	Patient Study	C.7.2.2	U
	Clinical Trial Study	C.7.2.3	U
Series	General Series	C.7.3.1	M
	Clinical Trial Series	C.7.3.2	U
	DX Series	C.8.11.1	M
Frame of Reference	Frame of Reference	C.7.4.1	U
Equipment	General Equipment	C.7.5.1	M
Image	General Image	C.7.6.1	M
	Image Pixel	C.7.6.3	M
	Contrast/Bolus	C.7.6.4	U
	Display Shutter	C.7.6.11	U
	Device	C.7.6.12	U
	Intervention	C.7.6.13	U
	Specimen	C.7.6.22	U
IE	Module	Reference	Usage
Image	DX Anatomy Imaged	C.8.11.2	M
	DX Image	C.8.11.3	M
	DX Detector	C.8.11.4	M
	X-Ray Collimator	C.8.7.3	U
	DX Positioning	C.8.11.5	U
	X-Ray Tomo Acquisition	C.8.7.7	U
	X-Ray Acquisition Dose	C.8.7.8	U
	X-Ray Generation	C.8.7.9	U
	X-Ray Filtration	C.8.7.10	U
	X-Ray Grid	C.8.7.11	U
	Overlay Plane	C.9.2	C - Required if graphic annotation is present
	VOI LUT	C.11.2	C - Required if Presentation Intent Type (0008,0068) is FOR PRESENTATION. Shall not be present otherwise. See Note 8.
	Image Histogram	C.11.5	U
	Acquisition Context	C.7.6.14	M - See A.26.5
	SOP Common	C.12.1	M

(b)數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像驗證：

為因應國內相關醫療器材製造商及核能研究所於數位 X 光攝影儀之先期開發，本計畫選定國內投入研發之數位 X 光攝影儀作為標的，並以 GE, Siemens 等廠商之數位 X 光攝影儀所產出影像物件進行研析，並已透過自行開發之驗證系統以資料表連結方式來擷取儀器端參數及相關設定。而數位 X 光攝影由照射、原始成像、處理、傳輸到顯示，有多個參數會影響其顯示之結果，在維持放射影像品質的同時，降低患者接受之輻射劑量為世界潮流。然而，造影系統如何輸出造影資訊及可靠之劑量資訊，且同時符合醫療數位影像傳輸協定規範是國內所欠缺的。因此本計畫依據數位 X 光攝影儀之實際產出影像物件資訊（如儀器參數、影像變數、管電壓(KVp)、管電流(mAs)及輸出劑量等資料），且針對數位 X 光攝影儀器的使用者操作軟體，建立實體連結參數；並參考 DICOM 標準第 3 部對應之影像模組規定及依循原子能委員會之輻射管制與防護要求進行驗證，以完成數位 X 光攝影儀器之輻射劑量與影像物件驗證。

III. 結果與討論

本計畫係以完成「以 DICOM 資訊建立醫用數位 Tomosynthesis X 光機之輻射劑量參考水平研究」為預期目標，其目的為探討及研析造影系統如何輸出符合臨床診斷所需造影內容及可靠劑量資訊且同時能符合醫學數位影像及通信標準規範，而讓數位 X 光攝影儀等設備之輸出影像物件能符合 DICOM 標準，有效控制檢查時非預期之輻射劑量曝露，並透過整合學研單位研發能量，協助相關技術之開發。年度工作項目包括；(1) 研究探討數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤；(2) 數位 X 光攝影儀輻射劑量與 DICOM 影像物件之格式標籤驗證。表 2 所示即為可用來描述有關輻射劑量值(Radiation Dose)之資訊屬性，該屬性讓資訊系統可儲存病人於治療過程所接受之游離輻射照射量。

表 2、輻射劑量模組屬性

Attribute Name	Tag	Attribute Description
Anatomic Structure, Space or Region Sequence	(0008,2229)	Anatomic structure, space or region that has been exposed to ionizing radiation. Zero or one item shall be included in this Sequence.
>Include 'Code Sequence Macro' Table 8.8-1		No Baseline Context ID is defined.
Total Time of Fluoroscopy	(0040,0300)	Total duration of X-Ray exposure during fluoroscopy in seconds (pedal time) during this Performed Procedure Step.
Total Number of Exposures	(0040,0301)	Total number of exposures made during this Performed Procedure Step. The number includes non-digital and digital exposures.
Distance Source to Detector	(0018,1110)	Distance in mm from the source to detector center. Note: This value is traditionally referred to as Source Image Receptor Distance (SID).
Distance Source to Entrance	(0040,0306)	Distance in mm from the source to the surface of the patient closest to the source during this Performed Procedure Step. Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.
Entrance Dose	(0040,0302)	Average entrance dose value measured in dGy at the surface of the patient during this Performed Procedure Step. Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.
Entrance Dose in mGy	(0040,8302)	Average entrance dose value measured in mGy at the surface of the patient during this Performed Procedure Step. Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.
Exposed Area	(0040,0303)	Typical dimension of the exposed area at the detector plane. If Rectangular: row dimension followed by column; if Round: diameter. Measured in mm. Notes: 1. This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus. 2. This attribute is used in the X-Ray Acquisition Dose Module with units in cm (see Section C.8.7.8 Table C.8-33).
Attribute Name	Tag	Attribute Description
Image and Fluoroscopy Area Dose Product	(0018,115E)	Total area-dose-product to which the patient was exposed, accumulated over the complete Performed Procedure Step and measured in dGy*cm ² , including fluoroscopy. Notes: 1. The sum of the area dose product of all images of a Series or a Study may not result in the total area dose product to which the patient was exposed. 2. This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.
Comments on Radiation Dose	(0040,0310)	User-defined comments on any special conditions related to radiation dose encountered during this Performed Procedure Step.
Exposure Dose Sequence	(0040,030E)	Exposure Dose Sequence will contain Total Number of Exposures (0040,0301) items plus an item for each fluoroscopy episode not already counted as an exposure. Zero or more items shall be included in this sequence.
>Radiation Mode	(0018,115A)	Specifies X-Ray radiation mode. Enumerated Values: CONTINUOUS PULSED
>KVp	(0018,0060)	Peak kilo voltage output of the x-ray generator used. An average in the case of fluoroscopy (continuous radiation mode).
>X-Ray Tube Current in μA	(0018,8151)	X-Ray Tube Current in μA. An average in the case of fluoroscopy (continuous radiation mode).
>Exposure Time	(0018,1150)	Time of x-ray exposure or fluoroscopy in msec.
>Filter Type	(0018,1160)	Type of filter(s) inserted into the X-Ray beam (e.g. wedges). See C.8.7.10 and C.8.15.3.9 (for enhanced CT) for Defined Terms.
>Filter Material	(0018,7050)	The X-Ray absorbing material used in the filter. May be multi-valued. See C.8.7.10 and C.8.15.3.9 (for enhanced CT) for Defined Terms.
>Comments on Radiation Dose	(0040,0310)	User-defined comments on any special conditions related to radiation dose encountered during the episode described by this Exposure Dose Sequence item.

本計畫執行過程，與核能研究所皆保持良好互動，本計畫已依進度完成低輻射劑量 Tomosynthesis X 光機

之 DICOM 影像物件格式標籤之研析及驗證。在數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像物件格式標籤驗證上，亦完成 2 家之低輻射造影設備產出影像物件且針對取得之輸出影像物件進行彙整，並透過所開發之 DICOM 影像物件讀取系統進行讀檔及解析。該系統執行時，使用者可以自左側窗格的路徑資料，選取欲檢視之 DICOM 影像的縮圖，即可顯示所選取之影像於 DICOM 影像格式驗證系統之圖像顯示區塊中，右側窗格顯示內容即為該 DICOM 影像檔之檔頭資訊，如圖 3 所示。

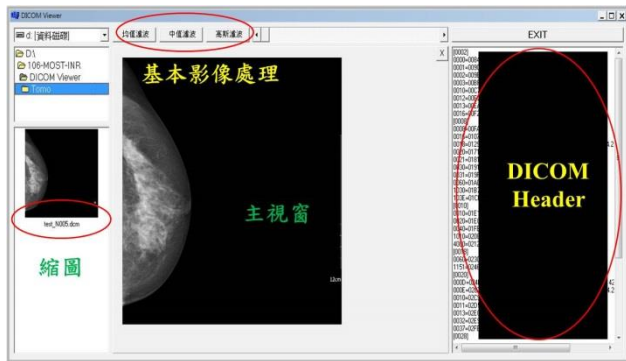


圖 3、DICOM Viewer 執行時之介面

輻射醫療檢查主要為提供臨床醫師對於疾病作出準確判斷，以對症下藥達治療之目的。故民眾就診時，臨床醫師會依據其專業判斷，以決定應採取之輻射診療行為，此屬輻射正當化行為，且檢查對病患益處遠大於輻射造成風險，故在國際輻防管制與我國輻射防護法，對醫療輻射劑量並無劑量限制之相關規定。以下為摘錄自美國國家輻射防護學會(NCRP) 1989 年出版第 100 號報告之放射線診斷攝影的皮表劑量。

表 3、放射線診斷攝影之皮表劑量，單位(毫侖琴 mR)

檢查部位	攝影方向	表皮劑量	檢查部位	攝影方向	表皮劑量
胸部 (Chest)	前後位	50	腰薦椎 (L-S spine)	前後位	910
	後前位	20		側位	3485
	側位	80	腎盂攝影 (IVP)	前後位	559
頭部 (Skull)	前後位	480		後前位	440
	後前位	445		側位	2525
側位	側位	280	大腸鋇劑攝影 (Barium enema)	前後位	760
	側位	260		後前位	775
頸部 (C-spine)	側位	170		側位	4010
胸椎 (T-spine)	前後位	665	胃部攝影 (Upper-GI)	前後位	640
	側位	1460		後前位	550
腰椎 (L-spine)	前後位	885	乳房攝影 Mammo. (Mo)	前後位	730
	側位	665		側位	280
腹部 (KUB)	前後位	420	膽囊攝影(OGT)	前後位	545
	側位	2095		後前位	545
股盆 (Pelvis)	前後位	545			
	側位	1345			

註：前後位指 A-P、後前位指 P-A、側位指 Lat. view。

在數位 X 光攝影設備中，其成像三大要素，如下：

- KVP(電壓值)：指 X 光管或 X 光機之最高輸出。
- mA(電流量)：指 X 光管或 X 光機之最高輸出。
- Sec(時間)：指曝光時間。
- mAs (mA x sec 乘積)：以 mAs 顯示為減化操作流程。mAs 只是曝光劑量值，不代表設備規格。

在數位 Tomosynthesis X 光機中，其規格至少應包含：

- Focal spot (聚焦點)

- KVP range (電壓範圍)
- mA range (電流範圍)

國際電工委員會(IEC)公布之 IEC 60601-2-43 標準要求數位 X 光攝影儀器設備必須顯示劑量面積乘積 (Dose area product, DAP) 和皮膚累積劑量 (Cumulative skin dose)。現行輻射防護法規，乃基於「再微量的輻射，仍可能有害，並無所謂劑量低限值」假說為考量基準。這種考量的方式是將高劑量領域的相關數據，直接外插延至低劑量範圍，並非在低劑量領域實際驗證結果。低劑量輻射對被曝者風險及其輻射生物效應，仍然是科學上有待究明的課題。根據研究顯示，生物對低劑量輻射具有巧妙的反應機制，人類對此等機制的產生條件(劑量、劑量率等)更明瞭後，相信將來應會依據科學實驗數據，重新制訂更為符合事實的輻射防護規範。

IV. 結論

隨著造影設備的日異更新，相關醫療輻射防護議題也越受到重視，國內醫療器材產業也逐漸朝向高階創新醫療造影設備及週邊產品發展，其對由資通訊產業轉入醫療器材產業之廠商而言，醫療器材安全性與功效性的相關評估技術與法規驗證等問題，實為進入市場的基本門檻。本計畫內容從醫用數位 Tomosynthesis X 光機之 DICOM 影像物件的研析、輻射劑量曝露及造影系統參數連結驗證，邁向成熟有效的產學整合，以取得診斷市場之先機。尤其，高階醫療影像器材開發為國家經濟推展目標，因其費時費力且需跨領域的合作，透過本計畫相關工作的進行，可開啟研究單位及學術機構之合作契機，有效整合雙方研發力量，並以驗證技術，開發具市場利基之高階醫療影像器材，以彌補關鍵技術缺口，同時尋找可配合台灣優勢項目且易成功之方式，縮短整體開發時程。本計畫也提供了碩士班研究生參與合作研究之機會，參與計畫人員也學習到與業界合作技巧、增強撰寫程式能力、資料處理程式之設計及論文撰寫能力，且能增進實務經驗，有利國內研究人力及素質之提升。

參考文獻

- [1] J. Anthony Seibert, Digital radiography: CR versus DR? Time to reconsider the options, the definitions, and current capabilities, Applied Radiology, 2007.
- [2] 蘇振隆、蔡育秀、劉建財、郭銘芳：引進及推動健康醫療資訊標準，經濟部標準檢驗局成果報告，2007。
- [3] Oosterwijk, DICOM Basics, Third Edition, OTech Inc.
- [4] DICOM 3.0, Digital Imaging and Communications in Medicine, ACR-NEMA, 2016.
- [5] 游離輻射防護法，2002。
- [6] 輻射醫療曝露品質保證標準，2011。
- [7] AAPM TG 116, An Exposure Indicator for Digital Radiography, Report of AAPM Task Group 116, 2009.
- [8] IEC 60601-2-43, Medical electrical equipment - Particular requirements for the safety of x-ray equipment for interventional procedures, 2000.

後福島民眾防護行動規範研擬

Development of guidelines for post-Fukushima public protective actions

計畫編號：MOST 106-NU-E-182-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：董傳中、趙自強

e-mail：cjtung@mail.cgu.edu.tw

計畫參與人員：無其他計畫參與人員

執行單位：長庚大學放射醫學研究院

摘要

核子事故緊急應變民眾防護之目的，在於避免高劑量引起之確定效應，以及抑低低劑量誘發之機率效應風險。為達此目的，國際放射防護委員會針對緊急曝露提供參考水平之規範，國際原子能總署也針對民眾防護行動提供劑量基準之建議，以便緊急應變時作為採取掩蔽、疏散、服用碘片、食物及飲水管制、暫時移居、永久遷離等措施之依據。

福島事故發生後，國際組織及各國政府都針對此一事故之緊急應變措施，進行了徹底深入的檢討，然後依據檢討結果修訂了緊急應變民眾防護指引。主要結論為：以往於事故發生後再利用電腦程式輸入事故源項及氣象條件，先評估緊急計畫區內民眾之可省劑量，然後再實施民眾防護行動之作法，不但緩不濟急、並且誤差很大，不僅可能耽誤第一時間的緊急救援，而且可能疏漏一些熱區民眾的防護。為了修正此缺點，國際原子能總署建議改採兩階段式的應變方法：(1)當全面緊急事故發生、尚無雲團放射性物質外釋之階段，採用預先模擬嚴重核子事故所訂之緊急行動基準 EAL，以決定預防性行動區 PAZ 內實施之預防性防護行動，避免民眾發生確定效應；(2)當全面緊急事故發生、且有雲團放射性物質外釋之階段，採用預先模擬嚴重核子事故所訂之作業干預基準 OIL，以決定緊急防護區 UPZ 內實施之緊急防護行動，抑低民眾發生機率效應的風險。

由於核子事故緊急應變計畫之民眾防護行動基準，與國情、政策、環境等因素有關，需要經過最優化的分析，才能訂出適用之民眾防護行動規範。本計畫乃透過蒐集國際最新規範與法規，了解世界各國在福島事故後之最新民眾防護行動的規劃與標準，然後藉由舉辦專家研討會、與主管機關雙向溝通、以及進行最優化分析等步驟，研擬完成了我國核子事故民眾防護行動規範之修訂建議草案，以提供主管機關參考。

關鍵詞：核能電廠、核子事故、緊急應變、操作干預基準。

Abstract

The aims of public protective actions in a nuclear emergency are: (1) to prevent deterministic effects of acute radiation exposure, and (2) to reduce stochastic risks of chronic radiation exposure. To achieve these aims, ICRP recommended the emergency exposure reference levels. Also, IAEA suggested the dose criteria for public protective actions. These reference levels and dose criteria

should be used in the developments of guidelines for public protective actions, including sheltering, evacuation, iodine prophylaxis, food and water restrictions, and temporary/permanent relocation, during a nuclear emergency.

Lessons learned from the Fukushima accident have led international organizations to revise their former recommendations and guidelines for the public protective actions in a nuclear emergency. It was demonstrated in the Fukushima accident that the decision making process based on the computer-prognosis system for initiating off-site protective actions was impractical. This was largely due to the unpredictable wind direction and precipitation and so the release of radioactivity to the atmosphere in hours or days. In the new decision making framework, the computer based prognosis was abolished and a new system was introduced. This system included: (1) the use of emergency action levels (EALs) for the precautionary protective actions and (2) the use of operational intervention levels (OILs) for the urgent protective actions. Consequently, a precautionary action zone (PAZ) and an urgent protective zone (UPZ) should be pre-established in order to implement, respectively, the precautionary protective actions and the urgent protective actions. Radiation monitoring plays a key role during nuclear emergency in order to locate hotspots for urgent protective actions and to restrict the consumption of water, food, milk, etc.

Since protective actions depend on the optimization of local conditions, the present study collected relevant information on the up-to-date international recommendations and guidelines for the emergency response by considering lessons learned from the Fukushima Dai-ichi NPP accident. Optimization was performed to establish local OILs for the emergency protective actions. The findings of this study could help the governmental to implement public protective actions in a timely phase in case of nuclear accident.

Keywords: nuclear power plant, nuclear emergency, emergency response, operational intervention level.

I. 前言

嚴重核子事故一旦發生，若放射性物質有外釋之虞時，首要工作在於民眾防護。要採取有效的民眾防護行動，必須先瞭解核子事故的特性，包括：(1)事故的演變通常先有徵兆、醞釀一段時間而搶救無效後，才經由雲團(plume)外釋放放射性物質；(2)外釋之放射性物質以核能電廠為中心，由內往外朝下風向逐漸擴散；(3)外釋放

射性物質之濃度，隨著距離增加而逐漸減少；(4)雲團外釋之放射性物質，最終沉降於地表形成環境(土壤、海洋、河流、房屋外表、戶外動植物等)污染；(5)短半衰期放射性污染很快就會消失，長半衰期放射性污染則在環境中存在很長時間。處理短期內近距離之高濃度雲團之放射性物質，民眾防護屬於緊急應變措施；處理長時間大範圍之地表放射性污染，民眾防護則屬長期復原措施。本計畫之研究限於緊急應變措施。

從有徵兆到雲團開始外釋，一般需要一天以上的時間，在這段緊急期間內如果應變得宜，可以完全避免或大幅減少民眾傷亡，反之若應變不當錯失良機則後果堪慮。基於上述(1)、(2)、(3)項的核子事故特性，緊急應變計畫的原則為：(a)為了避免鄰近核能電廠最內圈地區民眾遭受高濃度雲團之影響，防止民眾發生輻射確定效應，應提早在事故醞釀期間有放射性物質外釋之虞(全面緊急事故)時，立即採取預防性措施；(b)為了避免鄰近核能電廠次內圈地區民眾遭受雲團擴散之影響，抑低民眾發生機率效應的風險，應依輻射監測之地表劑量率或人員、食物之污染濃度，決定採取之緊急措施。不論是預防性措施或是緊急措施，都應訂定核子事故緊急應變計畫，依據其中之操作基準採行防護行動。國際原子能總署建議，在鄰近核能電廠最內圈地區之預防性行動區(precautionary action zone, PAZ)內，應依緊急行動基準(emergency action level, EAL)採行預防性行動；而在鄰近核能電廠次內圈地區之緊急防護區(urgent protective zone, UPZ)內，依據操作干預基準(operational intervention level, OIL)採行緊急行動。我國預防性行動區 PAZ 以及緊急行動基準 EAL，已由政府發布；本計畫研議之緊急防護區 UPZ 及操作干預基準 OIL，乃依據國際原子能總署之建議，參考鄰近國家之作法，考量國內地理、人口、環境後，提出之建議草案，供主管機關參考使用。

II. 主要內容

針對嚴重核子事故，以往國際放射防護委員會及國際原子能總署均建議，利用事故發生後之外釋放射性物質(源項)及氣象條件，以及雲團擴散(plume dispersion)模式，評估緊急應變區內若實施防護行動，民眾之可減免輻射劑量，以此作為防護行動之依據。此一作法的優點，在於民眾輻射劑量直接與健康風險有關，以其作為行動依據，符合民眾防護之目的。然而此一作法的最大缺點，在於劑量評估須於事發後進行，等評估結果出來恐已錯失應變時間。特別是雲團到達鄰近核能電廠最內圈地區的時間很快，只有在雲團到達前之預防性行動，才能有效避免民眾發生確定效應。此外，雲團擴散模式所依據之源項及氣象條件會隨時間改變，使得評估之可減免劑量誤差可能很大，不如以實際監測之劑量率或污染濃度，作為行動依據來得可靠。基於這些考量，國際原子能總署修改建議，以 EAL 為依據決定 PAZ 內民眾之預防性行動，而以 OIL 為依據決定 UPZ 內民眾之緊急行動。

2011 年 3 月 11 日 14:46 日本外海發生地震，引起海嘯造成福島核能電廠一號機失去冷卻水，17:30 燃料棒破損。此時雖然尚無放射性物質外釋，然而日本政府於國際建議下，於 19:03 開始疏散 2 公里內的民眾，隨

後 21:23 下令疏散範圍擴大至 3 公里，3 月 12 日 05:44 再次擴大至 10 公里，這些預防性防護行動，有效地避免了鄰近核能電廠最內圈地區民眾的確定效應。3 月 12 日 15:36 福島核能電廠一號機發生爆炸，產生了放射性雲團，於是 18:25 日本政府再次下令擴大疏散範圍至 20 公里，其目的在於抑低民眾發生機率效應的風險。這些措施與國際原子能總署之建議：PAZ 內民眾先採行預防性行動，UPZ 內民眾再採行緊急行動，作法上完全一致。

我國核子事故緊急應變法中明訂政府應公布緊急應變基本計畫及核子事故民眾防護行動規範；又核子事故民眾防護行動規範中明訂民眾採取掩蔽、疏散、服用碘片、食物及飲水管制、暫時移居、永久遷離等措施之干預基準(intervention levels)及行動基準(action levels)。由於我國核子事故民眾防護行動規範只有掩蔽、疏散、服用碘片之可減免劑量干預基準，而無這些措施之操作干預基準，因此為了補足此一規範之不足，本計畫乃依據國際機構之建議、福島事故之經驗、鄰近國家之作法，考量國內地理、人口、環境等因素後，提出我國核子事故緊急應變民眾防護之建議，供主管機關參考使用。

2.1. 緊急應變地區之劃分

由於嚴重核子事故產生的雲團是以核能電廠為中心，由內往外朝下風向逐漸擴散，因此雲團中的射性物質濃度，會隨著距離增加而逐漸減少。核子事故一旦產生雲團，雲團擴散到鄰近核能電廠最內圈地區之時間極短，導致民眾輻射劑量很高，欲避免民眾發生確定效應，必須在雲團到達前實施預防性行動：安全疏散當地民眾。因雲團抵達鄰近核能電廠次內圈地區之時間較久，民眾輻射劑量相對較低，故緊急應變行動之目的，已從避免發生確定效應轉為抑低機率效應風險。國際原子能總署建議：核子事故如有產生雲團之虞時，應在預防性行動區 PAZ 內立即實施預防性行動；而在雲團產生之後，則在緊急防護區 UPZ 內立即實施緊急行動。

PAZ 及 UPZ 的範圍，可透過模擬嚴重核子事故之源項及氣象條件，依據民眾防護劑量基準，利用演算程式評估求得。國際原子能總署建議之劑量基準為：避免確定效應之甲狀腺等價劑量 10 西弗、胎兒等價劑量 1 西弗、紅骨髓加權吸收劑量 1 戈雷；而抑低機率效應風險之有效劑量為 100 毫西弗。依此方法求得之 PAZ = 3-5 公里、UPZ = 15-30 公里，應作為不考慮本土優化條件之通用建議值，各國政府可依其本土條件，評估優化之 PAZ 及 UPZ。

2.2. 緊急防護行動之操作基準 OIL

國際原子能總署建議：應依輻射監測之操作干預基準 OIL[表 1]，決定如何實施緊急防護區 UPZ 內之緊急防護行動。OIL 包括：OIL1 之疏散、掩蔽、服用碘片等緊急行動的操作干預基準，OIL2 之暫時移居早期行動的操作干預基準，OIL3 之食物管制初檢的操作干預基準，OIL4 之人員污染醫務監護的操作干預基準，OIL7 之食物管制覆檢的操作干預基準，OIL8 之甲狀腺醫務監護的操作干預基準。

OIL 的訂定，需模擬嚴重核子事故之源項及氣象條件，依據關鍵民眾(孕婦之胎兒、兒童等)之呼吸、飲食、體外照射等曝露途徑[圖 1]，評估民眾有效劑量不得超過機率效應之劑量基準求得。OIL1 之劑量基準為關鍵民眾

7 日內之預期有效劑量 100 毫西弗，OIL2 之劑量基準為關鍵民眾 1 年內之預期有效劑量 100 毫西弗，OIL3 之劑量基準為關鍵民眾 1 年內之預期有效劑量(飲食吸入)10 毫西弗，OIL4 之劑量基準為關鍵民眾 4 天內之預期有效劑量(皮膚污染之體外照射及飲食吸入)100 毫西弗，OIL7 之劑量基準為關鍵民眾 1 年內之預期有效劑量(飲食吸入)10 毫西弗，OIL8 之劑量基準為關鍵民眾甲狀腺之預期約定等價劑量(吸入及吸入)100-200 毫西弗。依此方法求得之各項 OIL 值列於表 1，作為不考慮本土優化條件下之通用建議值，各國政府可依其本土條件，自行評估決定優化之 OIL 值。

表 1. 國際原子能總署推導操作干預基準 OIL 所依據之劑量基準

劑量基準								
OIL 項目	輻射 監測 方式	OIL 基準	民眾 防護 行動	劑量基準	曝露途徑			
					地 表 照 射	吸 入	空 浮 照 射	嚥 入
OIL1		1000 μSv/h	緊急防 護行動	$E(7 \text{ 天})=100 \text{ mSv}$ $H_{\text{有效}}(7 \text{ 天})=100 \text{ mSv}$	✓	✓	✓	✓
OIL2		100 μSv/h	早期防 護行動	$E(1 \text{ 年})=100 \text{ mSv}$ $H_{\text{有效}}(1 \text{ 年})=100 \text{ mSv}$	✓	✓	✓	✓
OIL3		1 μSv/h	食物管 制初檢	$E(1 \text{ 年})=10 \text{ mSv}$	嚥入：食物、牛 乳、飲水			
OIL4		1 μSv/h	人員污 染醫護	$AD_{\text{有效}}(4 \text{ 天})=1 \text{ Gy}$ $E(4 \text{ 天})=100 \text{ mSv}$ $H_{\text{有效}}(4 \text{ 天})=100 \text{ mSv}$	皮膚污染體外照 射；嚥入：食物			
OIL7		^{131}I : 1000 Bq/kg ^{137}Cs : 200 Bq/kg	食物管 制覆檢	$E(1 \text{ 年})=10 \text{ mSv}$	嚥入：食物、牛 乳、飲水			
OIL8		<7 歲: 0.5 μSv/h >7 歲: 2 μSv/h	甲狀腺 醫護	$H_{\text{甲狀腺}}=100-200 \text{ mSv}$	吸入及嚥入：放射 性污染			

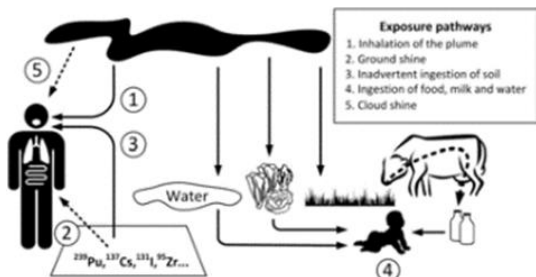


圖 1. 評估操作干預基準 OIL 所用之關鍵民眾劑量評估途徑

表 2. 日本、韓國、中國大陸的操作基準比較

操作基準	主要防護行動	IAEA	日本	韓國	中國大陸
EAL	預防性疏散	PAZ: 3-5 公里	PAZ: 5 公里	PAZ: 3-5 公里	PAZ: ?
OIL	緊急防護行動	UPZ: 15-30 公里	UPZ: 30 公里	UPZ: 20-30 公里	UPZ: 10 公里
OIL1	緊急疏散	1,000 $\mu\text{Sv/h}$	500 $\mu\text{Sv/h}$	污染外釋前: 50 mSv 污染外釋後: OIL1	同 IAEA
OIL2	暫時移居	反應器停機 10 天內: 100 $\mu\text{Sv/h}$ 反應器停機 10 天後: 25 $\mu\text{Sv/h}$	20 $\mu\text{Sv/h}$	第一個月: 30 mSv 以後每月: 10 mSv	同 IAEA
OIL3	食物管制初檢	1 $\mu\text{Sv/h}$	0.5 $\mu\text{Sv/h}$		同 IAEA
OIL4	除污、醫護	1 $\mu\text{Sv/h}$	40,000 cpm		同 IAEA
OIL7	食物管制覆檢	^{131}I : 1000 Bq/kg ^{137}Cs : 200 Bq/kg			同 IAEA
OIL8	甲狀腺醫護	小於 7 歲: 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 大於 7 歲: 2 $\mu\text{Sv/h}$			同 IAEA

2.3. 中、日、韓之 OIL 比較

鑑於國際原子能總署之建議，以及福島核子事故之經驗，世界各國均在研議以 EAL 作為預防性防護行動之操作基準，以及以 OIL 作為緊急防護行動之操作基準。由於國際原子能署提供之 OIL 值，係不考慮本土優化條

件下之通用建議值，因此各國政府需依其本土條件，訂定各自之優化 OIL 值；表 2 為中、日、韓等國之 OIL 值比較。參考這些 OIL 值之後，本計畫研擬了台灣核子事故緊急防護行動之 OIL 值，提供主管機關參考使用。

III. 結果與討論

本計畫依據國際機構建議、福島事故經驗、鄰近國家作法，考量國內法規、地理、人口、環境後，提出核子事故緊急應變民眾防護兩階段之建議流程，供主管機關參考使用。

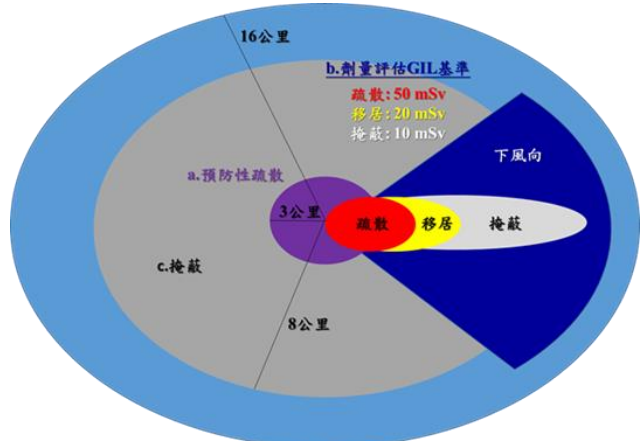


圖 2. 核子事故緊急應變分區及應變示意圖

3.1. 全面緊急事故後污染外釋前之民眾防護行動應變與決策參考指引

- 緊急應變計畫區鄰近核能電廠(3 公里，如圖 2)內民眾：實施預防性疏散、服用碘片、減少非必要之飲食。
- 緊急應變計畫區及其鄰近區域(16 公里)內下風向民眾：當評估之預期輻射劑量達到 50 mSv 時，實施安全疏散、服用碘片、減少非必要之飲食；當評估之預期輻射劑量達到 20 mSv 時，實施暫時移居、服用碘片、減少非必要之飲食；當評估之預期輻射劑量達到 10 mSv 時，實施室內掩蔽、依指示服用碘片、減少非必要之飲食。
- 緊急應變計畫區(8 公里)內非下風向民眾：室內掩蔽、依指示服用碘片、減少非必要之飲食。
- 應疏散而未疏散民眾：服用碘片、室內掩蔽(不超過一天)、收聽廣播(電視)並遵照指示。
- 緊急應變計畫區及鄰近區域(16 公里)內民眾：未經 OIL7 食物複檢前，減少非必要之飲食；牧放動物盡量移入保護(譬如有屋頂)場所；保護食物及飲水避免遭受污染；停止食用非必需之當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水、動物飼料；未經安全評估前，停止流通商品。
- 陸、海、空交通人員：禁止進入緊急應變計畫區內。

3.2. 全面緊急事故後污染外釋後之民眾防護行動應變與決策參考指引

- 監測離地 1 公尺高度之輻射劑量率，當達到 500 mSv/h 之 OIL1 時，立即實施該地區民眾之防護措施：

安全疏散、服用碘片、減少非必要之飲食；停止食用當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水、動物飼料；未經安全評估前，停止流通商品；災民登記、輻射監測、污染監測、除污、醫療篩檢；數日內實施該地區民眾之防護措施：評估民眾的輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。

- b. 食品管制初篩基準：監測離地 1 公尺高度之輻射劑量率，當達到 1 mSv/h 之 OIL3 時，立即實施該地區民眾之防護措施：未經 OIL7 食物複檢前，停止食用非必需之當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水、動物飼料；未經安全評估前，停止流通商品。數日內實施該地區民眾之防護措施：更換必需之當地產品、乳品、雨水、動物飼料；若無法更換，則遷離該地區之民眾；對於已經食用當地產品、乳品、雨水之民眾，評估其輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- c. 食品管制複檢基準：取樣及分析食品、飲水、乳品中碘 131、銻 134、銻 137 之活度濃度，當活度超過衛福部規定限值時，實施該地區民眾之防護措施：停止食用非必需之食品、飲水、乳品；盡速更換必需之食品、飲水、乳品；若無法補給及更換，則遷離該地區之民眾；對於已經食用了當地產品、乳品、雨水之民眾，評估其輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- d. 監測離地 1 公尺高度之輻射劑量率，當達到 20 mSv/h 之 OIL2 時，立即實施該地區民眾之防護措施：通知民眾準備暫時移居、減少非必要之飲食；停止流通及食用當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水。一個月內實施該地區民眾之防護措施：依劑量高低順序，分批移居該地區之民眾；評估該地區民眾之輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- e. 監測離皮膚 10 公分之加馬輻射劑量率，當達到 1 mSv/h 之 OIL4 時，立即實施該人員之防護措施：服用碘片、減少非必要之飲食、登記輻射劑量率、人員除污、醫療檢查、通知醫院準備污染傷患治療。數日內實施該人員之防護措施：評估輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- f. 監測緊貼甲狀腺皮膚之加馬輻射劑量率，當達到 0.5 mSv/h(小於 7 歲)或 2 mSv/h(大於 7 歲)之 OIL8 時，立即實施該人員之防護措施：服用碘片、減少非必要之飲食、登記甲狀腺輻射劑量率、醫療檢查、通知醫院準備污染傷患治療。數日內實施該人員之防護措施：評估輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。

IV. 結論

國際間對於日本福島核子事故的緊急應變，進行了深入徹底的檢討。日本政府也於事後分析了當初(2011 年 3 月 12 日)利用源項及氣象條件，藉由 SPEEDI 評估程式，計算所得之空間劑量率，發現電腦預測劑量率與實測劑量率之間的差異甚大，主要因為：源項的掌握不易，以及氣象條件的時間變化很大。如果當初日本政府是以電腦預測劑量率作為緊急應變的依據，將導致許

多錯誤與遺憾。

幸好日本政府當初在國際建議下，採取了較為保守的作法，及時實施了預防性疏散及掩蔽，避免了人員傷亡。基於此一經驗，國際原子能總署於 2013 年及 2017 年公布了納入福島經驗的核子事故緊急應變指引，建議在 PAZ 內以 EAL 為依據實施預防性防護行動，而在 UPZ 內以 OIL 為依據實施緊急防護行動。依此建議，本研究報告提供了我國核子事故民眾防護行動應變與決策參考指引，供主管機關引用。

參考文獻

- [1] International Atomic Energy Agency. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, EPR-NPP Public Protective Actions, Emergency Preparedness and Response. May 2013.
- [2] International Atomic Energy Agency. Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for Their Derivation, EPR-NPP-OILs 2017. March 2017.
- [3] International Atomic Energy Agency. Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency, General Safety Guide No. GSG-2. Jointly sponsored by the FAO, IAEA, ILO, PAHO, WHO. May 2011.
- [4] International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Annals of the ICRP. March 2007.
- [5] International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards, General Safety Requirements No. GSR Part 3. July 2014.
- [6] International Atomic Energy Agency. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards, General Safety Requirements No. GSR Part 7. November 2015.
- [7] Minoru Saito. The Planning of Emergency Detection, Dose Evaluation during Nuclear Accident in Japan. Taiwan-Japan International Experts' Meeting on a Nuclear or Radiological Emergency, 28 July 2015, Tokyo, Japan.
- [8] Sohei Sato and Kazuya Yamamoto. Basic Concept of the Nuclear Emergency Preparedness and Response in Japan after the Accident of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station - The Plain Explanation for Regional Officials and Emergency Workers. Japan Atomic Energy Agency, July 2013.
- [9] Nuclear Emergency Preparedness and response to local residents. Crisis Management and Disaster Prevention Section, Fukui Prefectural Government. October 6, 2015.
- [10] Seihiro Itoya, Nuclear Emergency Preparedness and Response in Japan following Fukushima Accident. 8th Meeting of the ANSN Topical Group on Emergency Preparedness and Response, Hanoi, Vietnam, 20 and 21 June, 2013
- [11] OECD/NEA. The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt. NEA No. 7161, 2013

- [12] ENCO. Review of Current Off-site Nuclear Emergency Preparedness and Response Arrangements in EU Member States and Neighbouring Countries. Final Report ENER/D1/2012-474. European Atomic Energy Community, 2014.
- [13] U.S. Environmental Protection Agency. Protective Action Guides and Planning Guidance for Radiological Incidents, Draft for Interim Use and Public Comment. March 2013
- [14] U.S. NRC. A comparison of U.S. and Japanese regulatory requirements in effect at the time of the Fukushima accident. November 2013.
- [15] Canadian Nuclear Safety Commission. Emergency Management and Fire Protection: Nuclear Emergency Preparedness and Response, REGDOC-2.10.1 (Draft). August 2013.
- [16] Toshimitsu Homma. A new emergency response scheme based on lessons learned from the Fukushima Daiichi NPP accident. International Conference on Effective Nuclear Regulatory Systems – Transforming Experience into Regulatory Improvements. Ottawa, 8-12 April 2013.
- [17] Seihiro Itoya. Nuclear Emergency Preparedness and Response in Japan following Fukushima Accident. Regional Workshop on Observing a Nuclear Radiological Emergency Exercise. October, 2013.
- [18] NORDIC. Protective Measures in Early and Intermediate Phases of a Nuclear or Radiological Emergency: NORDIC Guidelines and Recommendations, 2014.
- [19] Report of the Korean Government Response to the Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Policy Issue 0, Korea.
- [20] Seung-Young Jeong, Role of KINS for Emergency Preparedness and Response in Korea, 2014.
- [21] Seung-Young Jeong, EPR of Korea and International Assistance, 2016.
- [22] 中國的核應急，中華人民共和國國務院新聞辦公室，2016 年 1 月
- [23] 核或輻射應急準備與響應通用準則，中華人民共和國國家職業衛生標準 GBZ/T 271-2016
- [24] 大亞灣應變計劃輻射與核安全緊急應變計劃區，
<http://www.dbcp.gov.hk/text/chi/safety/zone.htm>

後福島民眾防護行動規範研擬 II

Study of Criteria in Preparedness and Response for a Nuclear Emergency after the Fukushima accident II

計畫編號：MOST 106-2623-E-010-005 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳杰

e-mail iamjaywu@gmail.com

計畫參與人員：吳杰、黃哲鴻

執行單位：國立陽明大學醫放系

摘要

日本於 2011 年發生福島事故迄今，可區分為三個時期，第一時期為應變期(2011/03~2011/12)，此時期為廠內事故狀態搶救至恢復到爐心冷卻狀態；第二時期為過渡期(2011/04~2012/03)，著重於廠外環境復原措施為主；第三時期為既存曝露，係指廠內狀況已於 2011 年 12 月趨近於穩定以及廠外各項復原措施已於 2012 年 4 月執行妥適。本計畫因應 IAEA 於 2017 年最新發布的 EPR-NPP-OILs，以及配合主管機關依據「核子事故民眾防護行動規範」研擬通用基準(GC)及操作干預基準(OIL)之需求，強化研析 IAEA 2017 年刊物所提出的 OIL 建議值之推導說明，以回饋技術成果以使我國緊急應變及其相關應變防護體系與國際發展趨勢一致，確保民眾安全。

關鍵詞：福島事故、復原、行動基準、輻射防護。

Abstract

Since the Fukushima nuclear plant accident occurred in 2011, IAEA published a series of technical reports. Three phases can be defined after the accident, including the early response phase (2011/03~2011/12), from in-site rescue to the reactor core cooling state, the transition phase (2011/04~2012/03), off-site recovery measurements, and the existing exposure phase (2012/03~), indicating the stable state in the environmental dose level and well execution of the recovery measurements. In this second year project, we analyzed the IAEA Emergency Preparedness and Response Standards and provide the General Criteria (GC) & Operational Intervention Levels (OIL) based on "Emergency Response Action for Civil Protection Practices". Through the whole study, the emergency response scheme could be made based on the lessons learned from the Fukushima accident, and the public health system can be maintained consistent with international development trends for public safety.

Keywords: Fukushima nuclear plant accident, recovery, reference action level, radiation protection.

I. 前言

我國現行核子事故民眾防護行動規範，係採行國際放射防護委員會於 1990 年提出之 ICRP-60 號報告(ICRP, 1991)、國際原子能總署於 1996 年發行的 IAEA-115 號安全叢書(IAEA, 1996)，以輻射作業實踐(practice)、干預

(intervention)作為放射防護體系之分類，以單一防護行動的干預水平作為最適化之判斷標準，掩蔽措施之干預基準為可減免劑量於二天內達十毫西弗以上，疏散措施之干預基準為可減免劑量於七天內達五十至一百毫西弗，服用碘片措施之干預基準，為可減免甲狀腺約定等價劑量達一百毫西弗以上。

為強化重大核子事故的應變防護能力，且在福島事故的經驗回饋下，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)於 2013 年(IAEA, 2013)建議使用防護通用基準(Generic Criteria, GC)作為防護行動操作干預基準(operational intervention levels, OILs)的概念，於 2017 年出版了 Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for Their Derivation, EPR-NPP 2017(IAEA, 2017)，報告中提出 OILs 預設值(以下簡稱 IAEA 2017 OILs)，並詳細說明推導方法以及量測方式，提供各國直接作為國家緊急應變防護行動之依據，各國可依國情需求而自行修改，以達到國家緊急應變防護行動的最適化規劃。

本計畫因應 IAEA 於 2017 年最新發布的 EPR-NPP-OILs，以及配合主管機關依據「核子事故民眾防護行動規範」研擬通用基準(GC)及操作干預基準(OIL)之需求，研析 IAEA 2017 OILs 預設值的推導依據、過程與應用說明，完成此報告以回饋技術成果，使我國緊急應變及其相關應變防護體系與國際發展趨勢一致，確保民眾安全。

II. 主要內容

IAEA 2017 OILs 預設值主要是針對輕水式反應爐或用過核子燃料相關嚴重事故的放射性物質外釋情況而設計的量測方式，可立即應用於緊急應變階段。另 IAEA EPR-NPP 2017 報告亦詳細說明 OILs 預測值的推導方法、假設條件、實務應用建議，以及說明如何基於事故情境演變下，合理修改 OILs 預設值的考慮因素，以提供各國依據其決策需求，而保有正當性與最適化應用的彈性。

一旦儀器量測到空間劑量率，將可啟動 OILs 預設值的決策作業而調整初始的防護行動。如圖 1 所示的 OILs 預設值於防護策略的應用，由於核子事故是有序列演變的特性，在事故發生的數小時內，當宣布全面緊急，此時放射性物質尚未外釋到環境，即可先行採取預防性防護行動，當數天後，圍阻體需要釋壓而開始外釋放射性物質時，則可依據各項 OILs 預測值的監測數據修正

後續的防護行動。表 1 所示為 IAEA EPR-NPP 2017 報告建議的 OILs 預測值

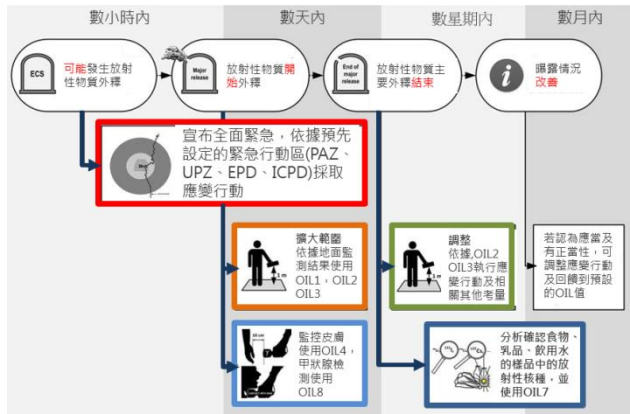


圖 1、OILs 預設值於防護策略的應用

表 1、EPR-NPP 2017 報告建議的 OILs 預設值

OIL	預設 OIL 值	監測型態
OIL1	1000 $\mu\text{Sv/h}$	地面監測
OIL2	100 $\mu\text{Sv/h}$ (反應器停機後的 10 天內) 25 $\mu\text{Sv/h}$ (反應爐關閉，10 天之後)	距離地面 1m 的空氣劑量率
OIL3	1 $\mu\text{Sv/h}$	皮膚監測
OIL4	1 $\mu\text{Sv/h}$	距離手或臉皮膚 10cm 的空氣劑量率
OIL4 _B	1000cps	皮膚監測 距離手或臉皮膚 2cm 的 β 計數率
OIL7	1000Bq/kg of I-131 200Bq/kg of Cs-137	食物乳品及飲用水樣本監測 食物乳品及飲用水樣本中 I-131 及 Cs-137 的活度濃度
OIL8	0.5 $\mu\text{Sv/h}$	甲狀腺監測 貼著皮膚在甲狀腺前的空氣劑量率

IAEA EPR-NPP 2017 提供 OILs 預設值的推導方法，說明基本假設、參考和計算程序，方便各個國家能自行推導，能在緊急應變期間直接且放心的使用 OILs 預設值。OILs 預設值，需要在準備階段中即作出一系列考量。所考慮的部分包括：制定防護行動的通用基準、放射性核種混合物的代表性考量、評估代表人的考量、曝露情境和途徑的考量、放射性核種特性的考量、器官劑量轉換因子的計算、輻射監測儀器的反應度、時間的變化、不確定性考量、防護策略的考量。

IAEA 在 2017 OIL 中所訂定的 OIL7，是採集食物乳品及飲用水樣本，進行監測食物乳品及飲用水樣本中之放射性核種 I-131 及 Cs-137 的活度濃度為目的，以期在事故影響期間能迅速檢測並管制食品使用。而國際食品法典委員會(CODEX Alimentarius，簡稱 CODEX)，在其 1995 年出版的《食品和飼料中污染物和毒素通用基準(CODEX STAN 193-1995)》(CODEX, 2015)亦訂出了放射性核種的規範，在該標準裡律定出不同食物含有不

同放射性核種的種類及其所產生的活度濃度的指導值，該指導值在國際貿易中廣為採用，能為民眾健康提供充足保障。表 2 為 CODEX 的限值。

表 2、CODEX 限定食品中的放射性核種濃度

商品/產品名稱	指導基準 (GL) (Bq/kg)	商品/產品名稱	指導基準 (GL) (Bq/kg)	代表之放射性核種
嬰兒食品	1	嬰兒食品以外之食品	10	Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241
嬰兒食品	100	嬰兒食品以外之食品	100	Sr-90, Ru-106, I-129, I-131, U-235
嬰兒食品	1000	嬰兒食品以外之食品	1000	S-35, Co-60, Sr-89, Ru-103, Cs-134, Cs-137, Ce-144, Ir-192
嬰兒食品	1000	嬰兒食品以外之食品	10000	H-3, C-14, Tc-99

日本自福島核災事故之後，厚生勞動省於 2014 年修訂了其食品中的放射性物質標準，將原來的標準值大幅下修，主要為確保國際貿易及國內食品的食用安全，並告訴其國民如何訂定相關標準及其與國際標準的差異，作為進行復原階段之使用。厚生勞動省特別說明食品中放射性物質含量的標準值，是基於一年中被曝輻射量不超過 1 毫西弗而訂定。日本、美國、歐盟與 CODEX 的食品中放射性物質相關指標比較如表 3。

表 3、國際間食品中放射性物質相關指標比較

核種	日本	CODEX	EU	美國
放射性銫	飲用水 10 Bq/kg 牛奶 50 Bq/kg 嬰幼兒食品 50 Bq/kg 一般食品 100 Bq/kg	嬰幼兒食品 1,000 Bq/kg 一般食品 1,000 Bq/kg	飲用水 1,000 Bq/kg 牛奶 1,000 嬰幼兒食品 400 Bq/kg 一般食品 1,250 Bq/kg	全部食品 1,200 Bq/kg
放射線量的上限值	1mSv	1mSv	1mSv	5mSv
進口食品比例的假定值	50%	10%	10%	30%

我國衛福部現已修訂「食品中原子塵或放射能污染安全容許量標準」，係基於福島核災後國際輻射防護委員會(ICRP)之要求並參考美國、加拿大與 CODEX、歐盟等國家組織標準，近年重新評估修訂後，使我國法規標準更合乎國際趨勢。衛福部修法後的標準遠比 CODEX 的標準為低，較接近參考日本的標準，比較表如表 4。

表 4、我國標準與國際標準

核種	食品種類	我國	日本	CODEX
¹³¹ I 碘	乳品	55	100	100
	嬰兒食品	55	100	100
	其他食品	100	100	100
¹³⁴ Cs + ¹³⁷ Cs	乳品	50	50	1000
	嬰兒食品	50	50	1000
	其他食品	100	100	1000
⁹⁰ Sr 銻	乳品	100	100	100
	嬰兒食品	100	100	100
	其他食品	100	100	100
⁸⁹ Sr 銻	乳品	100	100	1000
	嬰兒食品	100	100	1000
	其他食品	100	100	1000

於本計畫中，亦草擬「核子事故民眾防護行動應變與決策參考指引」，以期與實際應變行動結合並推行相關 OIL 的觀念。除此之外，擬定了民眾版 OILs 說明，以期以簡單的語言與民眾溝通，使民眾瞭解 OILs 的意義，與 OILs 實施的時機，以確保民眾的安全。

III. 結果與討論

從日本福島事故發生後，國際與日本近年來陸續訂定相關制度標準，檢討改進輻射防護基準與行動基準，最新的建議標準是 IAEA EPR NPP OILs 2017，整理曾發生過的核子事故，如福島事故、車諾比爾事故及各種可能的核電廠事件，依放射性物質混合物類型推導 OILs 的函數曲線，並詳細說明推導過程、訂定基準值之假設，提供各個國家以設定適合自己國內所使用的 OILs 預設值，提供萬一發生事故時能及時反應，提升對民眾的輻射防護機制。

而 OILs 係依照核子事故放射性物質開始外釋之初期與早期應變階段，提供主要防護行動與應變時序。對於應變期與復原期的相關食物、牛奶及飲水的管制則以 CODEX 所訂定的規範為主。然而各國仍將會依照國情需求進行些微調整，以我國臨近日本為例，衛福部參考日本國內的管制標準訂定我國的「食品中原子塵或放射性污染安全容許量標準」，並採用較高的進口食品污染比例，標準嚴格較接近日本，不似歐美及 CODEX 的進口食品比例較低，容許標準較為高。

IV. 結論

從日本、歐美及國際組織所訂的防護行動標準，取其優點將操作干預基準的防護行動概念應變之決策參考指引，藉由現場量測數據迅速啟動防護行動，增進對民眾防護機制。現階段我國仍有完善的緊急應變劑量評估系統及預防性的防護行動機制，可於第一時間疏散核電廠周圍民眾，因此導入操作干預基準，不但可以強化原有的機制，更能提升緊急應變的時效。而從事故發生到放射性核種外釋結束期間，相關的應變行動順序相當重要，制定「核子事故民眾防護行動應變與決策參考指引」將能夠於事故發生時，依照時間順序按部就班操作執行防護行動。本計畫將目前國際趨勢整理並納入相關的法規中，一方面可以與國際接軌，增加對民眾健康的防護機制外，另一方面可以審視現行的制度是否能在事故發生時達到最佳的防護效果，若有不足或是有更佳方案，亦可以視情況加以補強，達到最佳化的防護效果。

參考文獻

[1] IAEA, 1996. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, IAEA Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).

[2] IAEA, 2013. Actions to protect the public in an emergency due to severe conditions at a light water reactor. IAEA EPR NPP Public Protective Actions, IAEA, Vienna (2013).

[3] IAEA, 2017. Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies. IAEA EPR NPP Public Protective Actions, IAEA, Vienna (2017).

[4] ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford (1991).

[5] CODEX, 2015. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed, CODEX STAN 193e-1995, JOINT FAO/WHO FOOD STANDARDS PROGRAMME, CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, CAC, Rome (2015).

核醫乳房正子攝影個人劑量系統之研發(2/2)

Development of Patient-Specific Dosimetric System in Positron Emission Mammography (2/2)

計畫編號：106-2623-E-007 -004 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：莊克士

e-mail：kschuang@nthu.edu.tw

計畫參與人員：姜智傑、林信宏、詹美齡

執行單位：國立清華大學生醫工程與環境科學系

摘要

核能研究所發展出正子乳房攝影系統(positron emission mammography; PEM)局部地對乳房作正子斷層掃描，由於距離近故具高靈敏度的優點，可以減少病人劑量。PEM 是以兩片平行偵檢器，不同於一般圓形的 PET 系統，無法用傳統重建方法重建影像。我們將 stochastic origin ensemble (OE) 隨機射源全體的重建方法應用到 PEM 的重建，SOE 重建的影像品質稍遜於 MLEM，應該歸咎於目前所發展的 OE 僅適用於 2-D 重建，並沒有應用到所有數據，今後應將其擴展到 3-D 的重建模式。該 OE 程式也利用於本實驗室所開發的 TOF-DuPECT (time of flight dual-photon emission computed tomography) 影像系統的重建工作，初步結果證明 TOF-DuPECT 的可行性；目前已完成大部分的模擬實驗，研究相關的論文正在撰寫中。為了改善 OE 影像雜訊太高的缺陷，我們也發展出 filtered OE 影像平滑的方法：我們在評估事件密度(event density)時先使用一個 3×3 的平滑濾器(smoothing filter)過濾；初步結果達到預期效果。Filtered OE 方法已發表在 2017 歐洲核醫年會，研究論文以撰寫完畢正投稿國際期刊中。OE 也可應用在 Compton camera 的影像重建與作為質子治療中質子射程的驗證。

關鍵詞：雙光子發射斷層掃描，隨機射源全體，核醫影像。

Abstract

The positron emission mammography (PEM) developed by Institute of Nuclear Energy Research (INER) can be used for breast imaging. Due to its closeness to the target, PEM possess a high sensitivity than a regular PET. But PEM

consists of two stationary parallel detectors and cannot be reconstructed using traditional MLEM. In this study, we developed a stochastic origin ensemble (SOE) algorithm for PEM. However, the image quality of the reconstructed image is not as good as MLEM which is probably due to the fact that our OE algorithm is only applied in 2-D geometry. Most of the 3-D information in the projection data is not utilized in the reconstruction processing. It is our main target to rewrite the code for 3-D reconstruction.

The OE algorithm was also applied to a time of flight dual photons emission computed tomography (TOF-DuPECT) developed by our team. Preliminary results validate the feasibility of the proposed system. For the time being, we finish most of the simulation and the results are being analyzed and will be submitted for publication. To improve the noise artifacts inherent in the OE algorithm, we proposed a filter-OE method. A 3×3 smoothing filter is employed when estimating the event density in the OE algorithm. The results are promising. The filter-OE method was published in 2017 European Association of Nuclear Medicine (EANM) and the manuscript is under review to an international SCI journal. The OE algorithm can be applied in Compton camera which is under hot pursuit in the range verification in proton therapy.

Keywords: Dual photons emission computed tomography, stochastic origin ensemble, nuclear imaging

I. 前言

Maximum likelihood expectation maximization (MLEM)是核子醫學最常使用的

影像重建方法，它的重建需要重複在 projection 域與影像域中進行轉換，對於幾何形狀複雜的投影（如 Compton camera 的 Compton cone），就需要非常長的運算時間。Stochastic origin ensemble (OE) 是在影像域上直接重建，在複雜投影時的重建就非常有效率。例如目前的質子治療，它具有獨特的 Bragg peak 特性，使得治療時腫瘤區獲得大部分劑量，而周遭的正常器官僅有極小的劑量。但是由於質子射程 (range) 具有有限的不確定性，會影響 Bragg peak 的位置，因此質子治療時的射程需要能夠驗證。許多專家利用質子與身體組織所產生的瞬間加馬 (prompt gamma)，以 Compton camera 來推定射程的位置。Compton camera 在重建時需要把偵測到的數據投影在 Compton cone 上，以傳統 MLEM 計算非常費時，這時 OE 演算法就是不錯的選擇。

雙光子核種衰變時同時放出兩個無角度相關性的光子，常見的雙光子核種有 ^{43}K 、 ^{48}Cr 、 ^{52}Fe 、 ^{73}Se 、 ^{75}Se 、 ^{75}Br 、 ^{111}In 、 ^{127}Xe 、 ^{169}Yb 、 ^{179}Hf 、 $^{180\text{m}}\text{Hf}$ 、 ^{178}Ta 、 ^{192}Ir 、 ^{196}Au 、 ^{202}Tl 等。DuPECT (雙光子發射斷層掃描) 就是針對此雙光子核種所發展出來的影像偵檢系統，可偵測此種核種的活度分布。在這個研究我們將飛行時間 (time of flight; TOF) 資訊加入 DuPECT 之二維影像重建中，可以避免使用準直器，提高系統的靈敏度。飛行時間的原理與 TOF-PET 相同，皆是利用同符事件之時間差來提供射源位置的資訊，可提高影像的解析度。當來自同個衰變之加馬-加馬同符事件 (Gamma-Gamma coincidence) 被偵測到時，此二光子的飛行時間差代表飛行路徑的距離差。由此距離差可算出射源可能位置是位於空間上雙曲線中的一條，而同符電路上 (coincidence circuit) 的一對偵檢器位置即為雙曲線之焦點。由於雙曲線的幾何方程式複雜，在使用 MLEM 重建時，很耗時間；此時就需要借助 OE 直接在影像域重建的特性，可加速影像重建。

II. 主要內容

1. Stochastic Origin Ensemble (OE)

In OE algorithm, an arbitrary initial state was generated for each event by randomly selecting an origin inside the field of view (FOV) of

reconstructed domain on the corresponding response curve. All these selected origins were regarded as a stochastic origin ensemble. The state in ensemble can be described as the vector Y , which was corresponding to the spatial coordinates of recorded event. At state s , an event density $D_{k,s}$ for voxel k was defined as the number of event origins in that voxel.

During iterative procedure the following steps were performed for each event:

- (1) At new state $s+1$, randomly select a new possible location on its own corresponding response curve.
- (2) The acceptance probability $A(Y_s \rightarrow Y_{s+1})$ depending on the relative event density is calculated as below:

$$A(Y_s \rightarrow Y_{s+1}) = \min \left(1, \frac{\alpha(y_{k,s+1})(D_{k,s})^{D_{k,s}}(D_{k,s+1}+1)^{D_{k,s+1}+1} \varepsilon(y_{k,s})}{\alpha(y_{k,s})(D_{k,s}+1)^{D_{k,s}+1}(D_{k,s+1})^{D_{k,s+1}} \varepsilon(y_{k,s+1})} \right).$$

where α and ε were the system matrix and sensitivity at each location, respectively (Sitek 2011) and both were set to 1 for simplicity as they will not affect the results of the new method.

- (3) According to the acceptance probability, if the event density at new possible location was larger than the current one, the new location will always be accepted. When the new event density was smaller, the new possible location was accepted according the value of acceptance probability. The event density matrix was updated accordingly as the new location

was accepted.

Repeat steps (1) to (3) until all events were calculated once to complete an entire iteration and the new state was also generated. After a sufficient number of iterations, the algorithm stopped when the origin ensemble reached a quasi-stationary state resembling the actual distribution of emitters.

2. TOF-DuPECT (time of flight dual-photon emission computed tomography)

The concept of TOF-DuPECT imaging is the same as time difference of arrival (TDOA) technique, which is one of the multi-lateration techniques that measures the relative difference between signal arrival times to determine the location of mobile and aircraft. The time difference of arrival is given by:

$$TDOA = \Delta t = \frac{1}{c(d_1 - d_2)}$$

where c is the speed of light and d_1 and d_2 are the distances between source and two receivers. The above equation can be rewritten on the following form

$$d_1 - d_2 = c \times \Delta t = \text{constant}$$

that defines a hyperbola in the space.

Based on above equations, the possible locations of the source can be determined when the time difference of the two arriving photons is known. Note that there is only one branch of hyperbola is selected for each coincidence event depending on the sign of the time difference (Fig. 1). The DuPECT system is constructed similar to a PET system only the energy window is

different based on the nuclides to be scanned.

3. Filtered OE

As stated by Sitek (2008) that after equilibrium, the voxels with high number of events vary slightly while the empty voxels remain empty during the iteration of OE. As a result, the image contains empty voxels and the image looks noisy. In this work, we proposed an algorithm to estimate the event density by filtering of a region of interest (ROI) centered on the candidate voxel. In this study, three smoothing filters with sizes of 3×3 were considered: mean, median, and Gaussian. The ROI can be thought as the blurring of a point due to the limited resolution of detectors. With the bridging through the ROI filtering, the two LORs can be treated as from the same origin. In other words, this method took the spatial resolution into consideration when estimating the event density. The filter-OE algorithm enabled the distribution to area with smaller activity while in original OE it was more difficult for these areas to accumulate event density. Furthermore, the operation of the proposed filtering was similar to applying the conventional OE algorithm on the smoothed image. As a result, the proposed filter-OE generated a more uniform distribution.

III. 結果與討論

1. DuPECT

In this study, the dual-photon emitter used is Se-75 which has a half-life of 120 days and disintegrates 100% by electron capture to excited levels and to ground state of As-75. It emits two

photons of energies 136 keV and 264.7 keV in cascades with 11.2 ps half-life of intermediate state.

Fig. 2 shows the reconstructed images of the DuPECT system with time resolution equal to (a) 0 ps, (b) 50 ps, (c) 100 ps, (d) 150 ps, and (e) 200 ps. It can be seen that spatial resolution deteriorates as the temporal resolution of the system lengthens. The preliminary results suggest that the proposed DuPECT system is feasible.

2. Filtered –OE

In this study, three smoothing filters with sizes of 3×3 were considered: mean, median, and Gaussian. In conventional method, the image is generally processed by a 3×3 Gaussian filter after OE reconstruction (post-filtering).

Figure 3 displays the digital Flangeless Esser PET Phantom and reconstructed images by various OE algorithms. The original OE algorithm shows the most noisiest image. The image of post-smoothing algorithm shows improved smoothness over original OE but is still very noisy. The smoothing effects by the three filter-OE algorithms are obvious. The smoothness in the three filter-OE images are similar. However, the median-OE image appears to preserve edge better among the three filters. Due to the noise the shapes of both hot and cold spots are distorted in images of both original and post-smoothing OE. The size and shape of both the cold and hot objects are well preserved and can be appreciated visually in all filter-OE images.

Figure 4 illustrates the digital Flangeless Esser PET Phantom and the three profiles drawn across the images reconstructed by post-smoothing, mean-OE, median-OE, and Gaussian-OE. The post-smoothing shows the largest variation in pixel values. There are very small differences among profiles of the images by the three filter-OE algorithms.

Table I list the CV (coefficient of variance), CRC (contrast recovery coefficient), and BI (blurring index) measured on the PET image reconstructed by various OE algorithms. It can be seen that original OE shows the highest variation in pixel values followed by post-smoothing, median-OE, Gaussian-OE and mean-OE. The contrast recoveries of the filter-OE are slightly smaller than original OE w/ and w/o post-filtering. However, the difference is not significant. Note that the calculations were based on the regions selected from phantom. Were it from the images, the performances of conventional methods might be worsened due to the distortion of object shape. The BI is an indication of edge preservation. Median-OE shows less blurring than both mean-OE and Gaussian-OE.

3. 結論

The advantages of the proposed method over conventional algorithm are: (1) better recovery rate as compared to conventional OE algorithm with post-smoothing; (2) smoother images can be generated; and (2) object size and shape are more accurately detected.

Similar to the filtering in image processing, the median-OE possesses the best edge preserving property with slightly less smoothing effect as compared to mean-OE and Gaussian-OE. The median-OE also has the largest contrast recovery among the three filter-OE algorithms and is the filter of choice in our consideration for image reconstruction.

A modification to the OE algorithm for image smoothing has been proposed and the initial evaluation performed. By estimating the event density from the filtering of each neighborhood, we are able to generate smoothed results.

參考文獻

- [1] Andreyev A, Sitek A, and Celler A (2011a) Fast image reconstruction for Compton camera using stochastic origin ensemble approach. *Medical physics*, **38**(1), 429-438
- [2] Sitek A (2008) Representation of photon limited data in emission tomography using origin ensembles, *Phys. Med. Biol.* **53** 3201-16
- [3] Sitek A (2011) Reconstruction of emission tomography data using origin ensembles *IEEE Trans. Med. Imaging* **30** 946-56

Table I. The CV, CRC, and BI measured on the PET image reconstructed by various OE algorithms.

		CV	CRC	BI
OE	original	0.84	0.80	0.75
	Post-smoothing	0.22	0.81	0.059
Filter-OE	Median	0.16	0.79	0.036
	Mean	0.13	0.76	0.045
	Gaussian	0.14	0.75	0.046

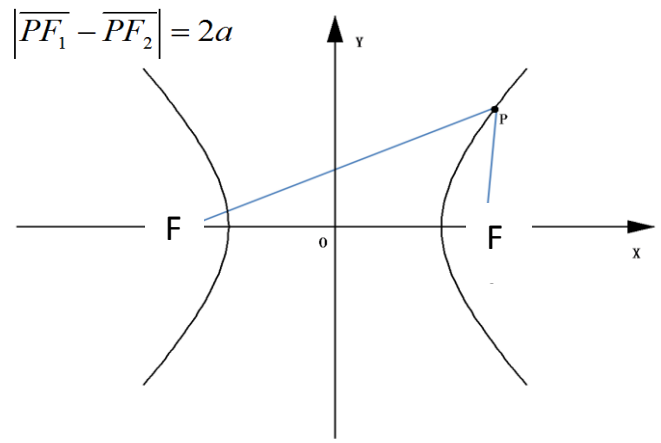


Fig. 1. The possible source locations (P) in a DuPECT system. F_1 and F_2 are the detectors and $2a$ is the difference in flight distance of the two photons.

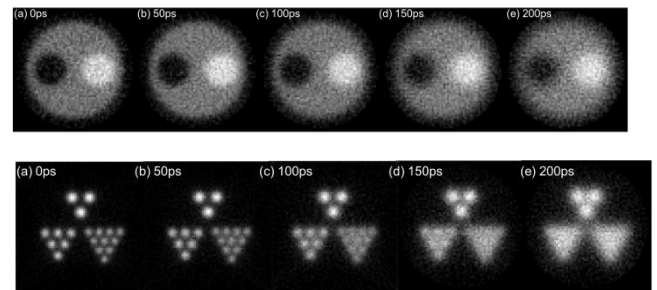


Fig. 2. The reconstructed images of the DuPECT system with time resolution equal to (a) 0 ps, (b) 50 ps, (c) 100 ps, (d) 150 ps, and (e) 200 ps.

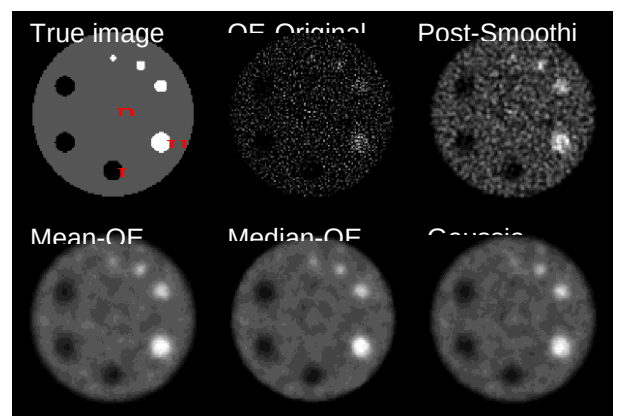


Fig. 3. The digital fangless phantom and its images reconstructed by various OE algorithms. The activity ratio inside the phantom is H: B: L = 3: 1: 0. All presented images are averages over 500 iterations after equilibrium are reached.

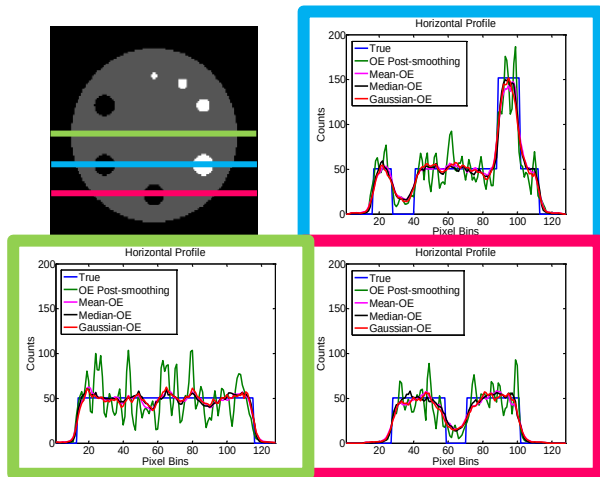


Fig. 4. The digital Flangeless Esser PET Phantom and the three profiles drawn across the images reconstructed by SOE with post-smoothing, mean-OE, median-OE, and Gaussian-OE.

臺灣重要航線宇宙輻射劑量之評估與量測方法評析及其資料庫建立

Assessment and Measurement of Cosmic Radiation Dose and Development of the Dosimetry Database for the Taiwanese Major Airline Routes

計畫編號：MOST 106-2623-E-039-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：袁明豪

e-mail：mhyuan@mail.cmu.edu.tw

計畫參與人員：吳昀庭、胡家瑜、吳怡靚、林欣儀

執行單位：中國醫藥大學職業安全與衛生學系

摘要

本研究利用 CARI-6、CARI-7A、EPCARD.Net 5.4.3 軟體，評估臺灣民航業者 16 條重要頻繁國際航線共 1455 次航班之宇宙輻射有效劑量(佔每週航班 67%)。研究結果顯示 CARI-7A 模式評估劑量在各航線中皆最高；以民航局的每月空勤工作時數上限估算，臺灣起飛之亞洲與歐美航線輻射曝露劑量，理論上最高為亞洲札幌航線之 3.66 mSv/yr 與歐美紐約航線之 7.50 mSv/yr。實務上，臺灣民航業者之固定歐美航線需搭配亞洲航線班表，應可有效管控年累積輻射有效劑量。

關鍵詞：宇宙輻射、有效劑量、空勤人員、CARI、工時與健康管理

Abstract

This study evaluated cosmic radiation exposure doses of 1455 flights on 16 routes using CARI-6, CARI-7A and EPCARD.Net 5.4.3 software. The results showed that under the working-hour limitation of flight crews by the Civil Aviation Authority in Taiwan, the highest effective dose of the scheduled flights on Asian and North American/European routes is 3.66 and 7.50 mSv/yr for Sapporo and New York route, respectively. In practice, North American and European flight schedules may be accompanied by Asian route schedule as the work-hour management strategies.

Keywords: *Cosmic radiation, effective dose, flight attendant, CARI, working hours and health management*

I. 前言

宇宙射線(Cosmic ray)屬於自然游離輻射，包括從宇宙空間來到地球的帶電高能次原子與粒子流，及透過射入地球大氣層後，因碰撞產生之高能量的介子、光子、質子、中子與 γ 射線等的粒子(O'Sullivan et al., 2000)。宇宙射線在高空相較於地面有較高強度之輻射，對長期在 10–12 km 高空工作的空勤人員(機師、機組員與空服員)，可能累積較高的曝露劑量，引發對空勤人員職業安全與健康的疑慮。

II. 主要內容

本研究首先藉由臺灣民航公司(中華航空與長榮航空)2017 年夏季定期班表(四月第二週)資料，鑑別出臺灣重要頻繁之國際航線航班資料。

研究方法以美國聯邦航空總署之 CARI-6 及

CARI-7A 軟體及德國環境衛生研究中心之 EPCARD.Net 5.4.3 軟體，及 Flightadar 24 取得之實際飛航參數，建立臺灣重要航線之宇宙輻射有效劑量資料庫。

III. 結果與討論

本研究鑑別出臺灣重要頻繁國際航線 16 條航線，共計每周 1455 次航班(佔每週航班 67%)，包括：亞洲地區中國的香港、北京、上海，日韓的東京、大阪、札幌、仁川，東南亞的曼谷、馬尼拉、吉隆坡、雅加達；北美的洛杉磯、紐約、舊金山；歐洲的巴黎、法蘭克福。

比較 CARI-6、CARI-7A 及 EPCARD.Net 5.4.3 的評估結果，CARI-7A 結果皆高於 CARI-6 與 EPCARD.Net 5.4.3 的結果；另外 CARI-6 在亞洲航線結果較接近 CARI-7A，在歐美航線則低於 EPCARD.Net 5.4.3。

以亞洲航線之最高有效劑量為 CARI-7A 的桃園飛札幌航線為例。一年中若每月飛 15 趟札幌來回航班，飛行時間將達 120 h/月之民航局規定空服員工時(包括飛行時間、待命、上課受訓)上限，累計有效劑量為 3.66 mSv/yr。此外，臺灣重要頻繁航線中最高輻射曝露劑量為桃園飛紐約航線。若一年每月飛 3 趟紐約來回，飛行時間將達 90 h/月，CARI-7A 累計有效劑量為 7.50 mSv/yr，EPCARD 及 CARI-6 則分別為 5.31 及 4.64 mSv/yr。在此情境下 CARI 7A 評估結果雖可能會造成累積有效劑量到達 5-10 mSv/yr，然而實務上極不可能發生。以 105 年長榮航空 2,668 名空服員為例，長榮每週飛紐約來回共計 22 班，每班安排 16 名空服員，需 7.5 週(約 2 個月)能輪到一次桃園-紐約來回航班。以華航 3,302 名空服員固定每週來回 10 班飛紐約，需 20 週(5 個月)輪到一次。

IV. 結論

本研究依臺灣民航業者(中華航空與長榮航空)之 2017 年夏季定期航線航班資料，鑑別出臺灣重要頻繁航線 16 條、航班 1455 次。再利用 CARI-6、CARI-7A 與 EPCARD.Net 5.4.3，建立臺灣重要航線之宇宙輻射有效劑量資料庫。依據本研究評估結果，在民航局規範空勤人員工時限制下，理論上最高為亞洲札幌航線之 3.66 mSv/yr 與歐美紐約航線之 7.50 mSv/yr。實務上，臺灣民航業者之固定歐美航線，建議需搭配亞洲航線排班，應可有效管控年累積輻射有效劑量。

參考文獻

- [1] O'Sullivan, D., et al. (2000), Evaluation of the cosmic radiation exposure of aircraft crew. FIGM-CT-2000-00068, Community Research and Development

Information Service, EU.

換肝移植手術捐贈者與受贈者全程輻射劑量評估

Effective dose assessment of living liver transplant process for donor and recipient

計畫編號：MOST106-2623-E-040-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳拓榮

e-mail：trchen@csmu.edu.tw

計畫參與人員：蔣獻文、涂柔安、蔡惠予

執行單位：中山醫學大學、長庚醫療財團法人

摘要

本研究以回溯性方式取得換肝手術接受輻射曝露的劑量參數。收集劑量指標的臨床參數，包括 X 光診斷次數、電腦斷層肝掃描的劑量長度積(DLP)、透視攝影機的劑量面積乘積(DAP)和核醫檢查的曝露。透過 DLP 轉換有效劑量因數、DAP 轉換有效劑量因數、蒙地卡羅模擬、和核子醫學活度轉換有效劑量因數，分析計算捐贈者與受贈者的全程有效劑量。結果可找出最大有效劑量貢獻源，探討降低輻射劑量的策略。

關鍵詞：肝、移植、有效劑量、輻射

Abstract

The study is to collect the dose parameters undergoing liver transplant operation with retrospective method to access the data from the hospital database. The effective doses can be calculated by the factors of DLP, DAP, isotope's activity converted to effective dose and the program of Monte Carlo simulation. The effective dose of donor and recipient for different kinds of radiation exposure can be evaluated in the living liver transplant process. The study provides the contribution of effective dose attributed to different exposures and presents possible strategy to reduce dose.

Key words: liver, transplant, effective dose, radiation

I. 前言

全球癌症統計資料指出，肝癌於東亞地區的發生率最高，台灣的肝癌發生率高達每 10 萬人有 35 人。目前台灣肝臟移植術後 1 年存活率為 86%與 5 年存活率為 79%。肝臟移植受贈者在手術前、後須施做多種 X 光診斷檢查多樣。檢查種類與方式則依病況有許多可能的組合。除肝受贈者須施做多種 X 光，捐贈者也須經嚴格的篩選。在應用放射診斷或治療病患時，醫師常專注於疾病的發現或治療，而放射人員則儘可能的協助儀器的操作，但常忽略了 X 光可能造成病患罹患癌症的風險。隨著肝移植受贈者的存活率(5 年 77%)提高，考量手術後的生活品質與壽命延續仍值得關注；另外，一般捐贈者的年紀更輕，其手術前電腦斷層掃描和可能透視輻射造成的風險，當然更須謹慎研究與可能的劑量降低策略。

II. 主要內容

本研究目的以回溯性方法蒐集活體肝臟移植捐贈者與受贈者(各 100 人，共 200 人)在換肝移植手術前後接受任何輻射暴露檢查(包含一般 X 光攝影、電腦斷層、核子醫學檢查、透視攝影)的劑量參數，時間定義為手術日

前後各一年的數據。收集劑量指標的臨床參數，包括診斷檢查次數、DLP、DAP 和核醫檢查藥物活度。分析換肝移植手術各種輻射檢查的分佈比例、頻率、與掃描劑量。依據臨床的劑量參數，(1)以蒙地卡羅軟體模擬一般 X 光攝影的有效劑量，(2)參考文獻中電腦斷層和透視攝影的劑量轉換因數，核子醫學的核種活度劑量轉換因數，相乘可得到換肝移植手術中不同檢查對受贈者和捐贈者造成的有效劑量。

III. 結果與討論

從 2016 年到 2017 年共蒐集 200 位完成換肝移植手術病人(捐贈者、受贈者各 100 位)在術前、後一年所有診斷檢查的劑量參數。捐贈者的男/女人數和平均年齡分別是 52 人/48 人/34±9 歲；受贈者為 64 人/36 人/54±13 歲。在 100 位捐贈者中，一般 X 光攝影、電腦斷層、透視攝影檢查的檢查次數頻率比例為：60%、27%和 13%；有效劑量百分比分別是 2%、97%和 1%。在 100 位受贈者中，X 光攝影、電腦斷層、核子醫學檢查的檢查次數頻率百分比分別是 88%、7%和 5%；平均有效劑量比例分別是 3%、78%和 19%。每位捐贈者約接受 5 次一般 X 光攝影、2 次電腦斷層和 1 次透視攝影檢查，平均有效劑量為 78 毫西弗/人；每位受贈者大概會接受 38 次一般 X 光攝影、3 次電腦斷層和 2 次核子醫學檢查，平均有效劑量為 147 毫西弗/人。捐贈者或受贈者術前和術後兩個月，是檢查次數的高峰期。

IV. 結論

換肝移植手術捐贈者和受贈者平均接受了 78 和 147 mSv 的有效劑量，雖然是醫療劑量或為搶救緊急健康生命之處置，但付出的高劑量風險確是事實。其中高劑量的貢獻，主要來自肝多相電腦斷層掃描。未來應朝降低換肝病人的劑量或尋找非輻射檢查去替代，若能更謹慎使用電腦斷層，例如將肝四相檢查改為肝三相，或改善成像技術為 IR 影像，應可合理地降低有效劑量。

參考文獻

- [1] Torre LA, Bray F, Siegel RL, Ferlay J, Lortet-Tieulent J, Jemal A, Global Cancer Statistics, 2012, CA Cancer J Clin. 2015, 65:87-108
- [2] 器官移植，衛生福利部中央健康保險署網頁，<http://www.nhi.gov.tw/webdata/>

低劑量策略與核醫影像品質最佳化研究 Strategies for image quality in nuclear medicine and lower radiation dose optimization

計畫編號：106-2623-E-075-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊邦宏

e-mail：bhyang@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：楊邦宏、吳東信

執行單位：臺北榮民總醫院國家多目標醫用迴旋加速器中心

摘要

正子造影/電腦斷層掃描儀(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)與單光子電腦斷層造影/電腦斷層掃描儀(single photon emission computed tomography/computed tomography, SPECT/CT)結合功能性影像(functional images)及優異的解剖性影像(anatomic images)，可以增加診斷與療效資訊的準確性，然而根據文獻指出 CT 造影所產生的輻射劑量相較於放射性同位素所帶來的輻射劑量最高可多達 181%。疊代影像重建法(iterative reconstruction, IR)為降低輻射劑量策略中最有效的方法之一，使得 CT 造影時可使用低劑量造影參數，達到更好的影像品質。因此，本計畫目的為建立核醫影像品質與低劑量造影參數之最佳化。

本研究使用 PET/CT 及 SPECT/CT 造影儀進行假體的影像擷取，使用六組低劑量參數的 CT 掃描，並搭配一系列不同計算程式的 IR 影像重建方法進行影像重組，經過衰減校正的每組 PET、SPECT 影像將圈選感興趣區域(region of interest, ROI)，比較標準攝取值(standard uptake value, SUV)、對比度雜訊比(contrast to noise ratio, CNR)的分析；CT 的影像品質則採

用訊號值(signal)、雜訊值(noise)進行評估。

結果顯示使用 10mA CT 影像對 PET 和 SPECT 影像進行衰減校正的結果，和 120mA 的 gold standard 並無明顯差異，使用不同權重 IR 的 10 mA CT 影像對 PET 影像進行衰減校正後發現，隨著 IR 的比重增加並不會影響 PET 的分析結果，但是，在 SPECT 影像中，隨著 IR 比重增加，體積太小的球體會被影響。分析 CT 的影像結果發現，IR 比重的增加並不會影響 CT 的 HU 值，但是會降低雜訊。

關鍵字：CT 疊代影像法、輻射劑量、衰減校正。

Abstract

Positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) and single photon emission computed tomography/computed tomography (SPECT/CT) provide both precisely anatomic and functional information, resulting in accuracy of diagnosis and prognosis information. The increase in radiation dose of CT scans in nuclear medicine may be up to 181 % compared as radiopharmaceutical. Iterative reconstruction (IR) is one of most effective methods of reducing radiation dose in CT scans because it is able to reduce radiation dose for maintaining the same

image quality. Therefore, the purpose of this study is to establish scanning protocols and image quality optimization in nuclear medicine.

Anthropomorphic Cardio Phantom (QRM) and IEC phantom were used to perform images acquisition in PET/CT scanner and SPECT/CT scanner. CT images will be acquired with different parameters and reconstructed by a series of different IR techniques. Standard uptake value (SUV) and contrast to noise ratio (CNR) were calculated by drawing region of interest (ROI) on PET and SPECT images which corrected by CT_{FBP} and CT_{IR} images. Imaging parameters derived from signal and noise were used for quantified analysis between CT_{FBP} and CT_{IR} images.

The results showed SPECT and PET images corrected by CT_{10mA} were not significantly different, compared with gold standard (CT_{120mA}). The quantification of PET images corrected by different weighted IR CT images was not apparently changed. However, on SPECT images, the CNR were significantly different for small sphere due to increasing IR weighted. The results of CT images reconstructed by different IR weighted showed CT number was not variable. And increasing IR weighted degraded noise and increased image quality.

Keywords: iterative reconstruction, radiation dose, attenuation correction

I. 前言

核子醫學提供細胞生理代謝的功能性影像(functional images)，有其診斷價值，但是，2D (2-dimension)的平面影像無法精準的定位

病灶位置，為其詬病之處。隨著醫療科技進步，多模組醫療儀器(multi-modality)時代已來臨，正子造影/電腦斷層掃描儀(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)的問世更被時代雜誌列為 21 世紀最偉大的發明之一，單光子電腦斷層造影/電腦斷層掃描儀(single photon emission computed tomography/computed tomography, SPECT/CT)隨後也孕育而生，同時結合功能性影像及優異的解剖性影像(anatomic images)，可以更精確地找出病兆所在，提供臨床醫師詳盡的資訊，進而增加診斷與療效資訊的準確性。而電腦斷層掃描儀(CT)在 PET/CT 及 SPECT/CT 造影系統中扮演三個關鍵性的角色，(1) 診斷(diagnosis)、(2) 解剖定位功能(anatomic localization)、(3) 衰減校正(attenuation correction)，其中，正確的衰減校正結果可顯現正確的放射性藥物分佈於體內狀況(radiotracer distribution)及藥物吸收數值(uptake value)的量化分析結果，故證明 CT 造影的重要性，但代價是高通量的光子數將產生高輻射劑量(radiation dose)，以及重複 CT 造影(repeated CT scan)將會造成接受多次的輻射劑量，然而，醫療輻射劑量合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)是現今國際上相當重視的議題，故探討降低輻射劑量策略與核醫影像品質之影響為本次研究之重點。

美國放射線學會(American College of Radiology, ACR)和北美放射學會(Radiological Society of North American, RSNA)共同建立的「Image Wisely」網站，主要提供成人接受放射診斷檢查時可供依循的準則，其針對

PET/CT 造影、CT 造影及正子藥物所產生的輻射劑量進行調查，並提出一個參考數據(表 1)[1]，雖然 10 mA 的 CT 影像足以執行衰減校正[2-3]，但是，臨床上 CT 造影不僅被用來執行衰減校正也必須提供定位或診斷資訊。至於 SPECT/CT 造影，2012 年 Punit Sharma et.al.[4] 團隊對 SPECT/CT 檢查進行輻射劑量調查(表 2)，結果發現 CT 所產生的輻射劑量相較於放射性同位素所帶來的輻射劑量最高可多達 181%，假使為了降低劑量而使用低劑量的造影條件，勢必犧牲影像品質。因此，如何在輻射劑量與影像品質間取捨成為大家所關注的議題。

表 1. 全身 FDG PET/CT 造影之輻射劑量評估

種類	參數	有效劑量 (mSv)
PET 造影	注射約 5-15 mCi ^{18}F -FDG (185-555 MBq)	3.5-10.5
CT 造影 (診 斷)	110-200 mAs CTDI _{VOI} = 8-14 mGy	11-20
CT 造影 (解 剖定位功 能)	30-60 mAs CTDI _{VOI} = 2-4 mGy	3-6
CT 造影 (衰 減校正)	5-10 mAs CTDI _{VOI} = 0.3-1.0 mGy	0.5-1.0

表 2. SPECT/CT 各項檢查放射性同位素及 CT 輻射劑量評估

Primary scintigraphy	Radiopharmaceutical effective dose (mSv)	CT effective dose (mSv)	% increase due to CT (range)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP bone SPECT/CT	4.1±1.7	4.2±2.8	99.4±65.7 (1-333.7)
Head	4.1±1	0.4±0.8	11.2±19.5 (1.2-65.6)
Chest	4.3±0.5	4±2.3	91.2±50 (31.5-239)
Abdomen	4.1±0.7	5±2.7	124±71.5 (20.2-333.7)
Pelvis	4.3±0.6	4.7±2.8	109.7±63.5 (31.9-289)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -ECD brain perfusion SPECT/CT	4.1±1.8	0.9±0.7	29.3±43.9 (2.3-284.5)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI parathyroid SPECT/CT	6.4±0.7	1.6±0.9	25.6±13.6 (7.5-59.7)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -GHA brain tumor SPECT/CT	3.7±0.7	1.38±0.4	37.5±10.5 (15.8-59.1)
^{131}I -MIBG diagnostic SPECT/CT	7.8±0.9	3.2±1.9	42±26 (5.2-96.2)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -others SPECT/CT*	2.0±1.1	2.6±1.9	181.3±174.7 (15.2-666.4)
^{131}I -NaI post-therapy SPECT/CT	2205.2±595.4	2.5±2.5	0.1±0.1 (0.02-0.5)

CT, computed tomography; ECD, ethylene cysteine dimer; GHA, glucoheptonate; MDP, methylene diphosphonate; MIBG, meta-iodobenzylguanidine; MIBI, sestamibi; NaI, sodium iodide; SPECT, single-photon emission computed tomography.
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DMSA, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -pertechnetate, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -mebrofenin, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sulfur colloid, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -labeled RBC, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA.

近年來，最熱門的降低劑量方法為使用搭載疊代影像重建技術(iterative reconstruction, IR)的 CT 進行造影。過去的 PET/CT 及 SPECT/CT 造影系統皆搭載濾波反投影影像重建法(filter back-projection reconstruction, FBP)來進行 CT 影像的重建，爾後提供 PET 或 SPECT 做影像衰減校正使用，主要因為 FBP 影像重建法對於龐大的 CT 影像資料處理速度既快速又簡便。然而，這幾年低劑量 CT 造影的意識抬頭，大量的研究論文證實低劑量 CT 造影的可行性，但是，FBP 影像重建法對於低劑量 CT 影像進行影像重組時，會導致較多的雜訊(noise)和假影(artifacts)的產生，這將會導致診斷資訊不正確(圖 1)[5]。隨著科技進步，電腦運算能力日漸強大，疊代影像重建法已成功地應用於 CT 影像，每家儀器公司也各自發展與改良不同的程式來進行疊代影像計算，例如：GE 公司所發展的 IR 影像重建法為自適應統計疊代重建技術(Adaptive Statistical Iterative Reconstruction, ASiR)，此方法可混合不同權重的 FBP 及 IR 兩種重建法同時使用；Siemens

公司的 advances modeled iterative reconstruction (ADMIRE)和 sinogram affirmed iterative reconstruction (SAFIRE)；Philips 公司的 iDose iterative model reconstruction (iDose) 等。

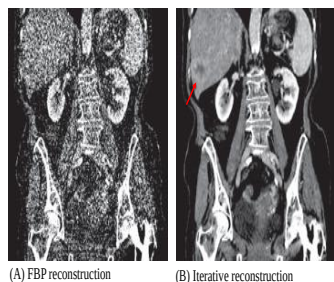


圖 1. 冠狀面(coronal)腹部 CT 影像。造影參數為 120 kV、10 mA，管球旋轉時間為 0.5 sec，產生的有效劑量為 0.61 mSv。(A) 使用 FBP 影像重建法所獲得的影像；(B) 使用 IR 影像重建法所獲得的影像。

從影像中可發現，低劑量影像由於光子數不足所以會導致雜訊較多，FBP 影像甚至無法辨識肝腫瘤的位置，但是，IR 影像不僅影像品質較好也降低忽視腫瘤的機率。

大量的文獻報告(Behroze Vachha et.al.[6] 2013, Lee M. Mitsumori et.al.[7] 2012 等)證實使用疊代影像重建法有較高的影像解析度(spatial resolution)及較少的影像雜訊，因此，取像時可使用更低劑量的參數，達到較好的影像品質，然而，目前國際上，IR 影像重建法大多廣泛地應用在診斷 CT 影像重建，對於核子醫學中 PET/CT 和 SPECT/CT 的研究，僅有兩篇使用 CT 疊代影像重建法應用於 PET/CT 及 SPECT/CT 衰減校正及輻射劑量評估(Norikazu Matsutomo et.al.[8] 2015, Louis Sibille et.al.[9] 2016)，此外，此兩篇研究僅針對一台造影儀進行研究。本計畫主要透過蒐集分析全國核醫科不同機型之 PET/CT、SPECT/CT 中衰減校正 CT 所使用的造影參數，探討醫學影像檢查的正當性與最適化(As Low As Diagnostically Acceptable, ALADA)，核醫用 CT 造影不僅提供正確的衰減校正資訊，也具有診斷價值，尤

其目前國內建置越來越多的 PET/CT 及 SPECT/CT 造影儀，臨床核醫診斷對此二者的依賴度也隨之增加，因此，影像品質與輻射劑量之間的平衡為首要課題，診斷 CT 造影所使用的最佳化造影參數搭配 IR 影像重建法可否適用於核醫用 CT？是否影響衰減校正資訊抑或影響診斷價值？本研究將探討 CT 疊代影像重建法應用於 PET/CT 及 SPECT/CT 造影的影像品質與劑量最佳化評估，將提供一套最佳造影參數供國內各醫院參考，相信如此一來，在保有診斷價值的前提下，將有效降低國人醫療輻射曝露累積劑量。

II. 主要內容

研究方法

研究方法可分為兩大部分：PET/CT 及 SPECT/CT 造影。

PET/CT 影像收集：

使用水假體進行影像擷取，背景值(background)為 ^{18}F -FDG (Fludeoxyglucose)放射性同位素水溶液(圖 2A)，水假體內將放置四支試管，分別為：a. 空氣、b. 鈣化物質(hydroxyapatite, HA; $200\text{mg}/\text{cm}^3$)用來模擬骨頭等效組織、c. 與背景質濃度比 4:1 的放射性同位素水溶液、d. 與背景質濃度比 8:1 的放射性同位素水溶液(圖 2B)，目的在於模擬不同組織的密度及不同濃度的 hot spot。接著使用表 3 參數進行(1) PET 造影；(2)將多組經過 FBP 及 IR 重組過後的低劑量 CT 影像，分別做為 emission 影像之衰減校正來源，對於衰減校正

後的 emission 影像，於 background 以及 a、b、c、d 試管的位置圈選同樣大小的 ROI (region of interest)，PET 影像進行 SUV 的分析。

圖 2. 圓柱形水假體。(A)圓柱形水假體透視圖，內置四支試管，分別灌入不同密度及活度之物質。(B)圓柱形水假體俯視圖，試管內物質分別為：a.空氣，b.鈣化物質 (hydroxyapatite, HA; 200mg/cm3)，c. ¹⁸F-FDG(或 ^{99m}Tc) 水溶液，d. ¹⁸F-FDG 水溶液(或 ^{99m}Tc)。

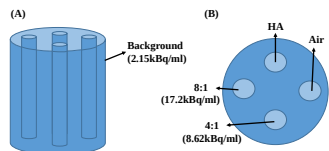


表 3.低劑量 CT 經不同權重之 ASiR 重組後，對 PET 影像作衰減校正。

CT parameter				
kVp	mA	s	Reconstruction methods	
120	10	0.5	FBP ASiR10% ASiR30% ASiR50%	ASiR70% ASiR90% ASiR100%
120	20	0.5	FBP ASiR10% ASiR30% ASiR50%	ASiR70% ASiR90% ASiR100%
120	40	0.5	FBP ASiR10% ASiR30% ASiR50%	ASiR70% ASiR90% ASiR100%
120	60	0.5	FBP ASiR10% ASiR30% ASiR50%	ASiR70% ASiR90% ASiR100%
120	80	0.5	FBP ASiR10% ASiR30% ASiR50%	ASiR70% ASiR90% ASiR100%

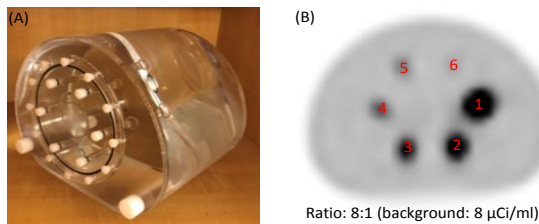
120	120	0.5	FBP ASiR10% ASiR30% ASiR50%	ASiR70% ASiR90% ASiR100%
PET parameter				
PET-CTAC				
PET _{FBP-10mA} PET _{ASiR10-10mA} PET _{ASiR30-10mA} PET _{ASiR50-10mA}			PET _{ASiR70-10mA} PET _{ASiR90-10mA} PET _{ASiR100-10mA}	
PET _{FBP-20mA} , PET _{ASiR10-20mA} PET _{ASiR30-20mA} PET _{ASiR50-20mA}			PET _{ASiR70-20mA} , PET _{ASiR90-20mA} , PET _{ASiR100-20mA}	
PET _{FBP-40mA} PET _{ASiR10-40mA} PET _{ASiR30-40mA} PET _{ASiR50-40mA}			PET _{ASiR70-40mA} PET _{ASiR90-40mA} PET _{ASiR100-40mA}	
PET _{FBP-60mA} PET _{ASiR10-60mA} PET _{ASiR30-60mA} PET _{ASiR50-60mA}			PET _{ASiR70-60mA} PET _{ASiR90-60mA} PET _{ASiR100-60mA}	
PET _{FBP-80mA} PET _{ASiR10-80mA} PET _{ASiR30-80mA} PET _{ASiR50-80mA}			PET _{ASiR70-80mA} PET _{ASiR90-80mA} PET _{ASiR100-80mA}	
PET _{FBP-120mA} , PET _{ASiR10-120mA} PET _{ASiR30-120mA} PET _{ASiR50-120mA}			PET _{ASiR70-120mA} PET _{ASiR90-120mA} PET _{ASiR100-120mA}	

SPECT/CT 影像收集：

使用 NEMA IEC Body Phantom 進行影像收集，此假體裡面有 6 個不同體積大小的球體 (圖 3)，體積分別為 26.52、11.49、5.57、2.57、1.15、0.52 ml，使用 8:1 的 ^{99m}Tc 放射性同位素

水溶液注入此 6 個球體，並使用表 3 參數進行影像擷取，並將不同重組參數的 CT 影像對 SPECT 影像進行衰減校正。SPECT 影像使用對比度(contrast to noise ratio, CNR)分析。

圖 3. (A) 核醫影像品質評估假體(IEC Body Phantom)，模擬放射性同位素於體內之分布，內部有 6 個不同體積的球體，可注入放射性同位素，如圖(B)，本研究使用同一濃度 8:1 的 ^{99m}Tc 放射性同位素水溶液注入此 6 個球體進行 SPECT/CT 的影像收集。



CT 影像品質評估使用 QRM 假體模擬成人胸部構造，並進行上述 CT 造影及重組條件的擷像，使用 Hounsfield unit (HU)做為影像分析指標。

III. 結果與討論

PET 影像衰減校正之評估，分成兩部分探討。第一部分為驗證低劑量 CT 是否能夠與 PET 影像進行衰減校正，將 $\text{CT}_{\text{FBP}(120\text{mA})}$ 、 $\text{CT}_{\text{FBP}(80\text{mA})}$ 、 $\text{CT}_{\text{FBP}(60\text{mA})}$ 、 $\text{CT}_{\text{FBP}(40\text{mA})}$ 、 $\text{CT}_{\text{FBP}(20\text{mA})}$ 、 $\text{CT}_{\text{FBP}(10\text{mA})}$ 六組經傳統 FBP 重組之 CT 影像，對 PET 影像進行衰減校正，得到 6 組 PET 影像(圖 4)，由影像上來看，假體內無論背景值、cold spot、hot spot，皆無太大差異。此外，各組影像上，五種不同密度之物質的 ROI 量化分析結果，可發現各組不同劑量之 CT 影像，於同樣傳統 FBP 重建法之條件下，隨著劑量降低，其衰減校正後的 PET 影像，無論於何種物質，其 SUV 值

皆不會受到影響(圖 5)，即代表低劑量 CT 並不會影響衰減校正之正確性。此外，以 $\text{CT}_{\text{FBP}(120\text{mA})}$ 衰減校正所得的 $\text{PET}_{\text{FBP}(120\text{mA})}$ 作為標準組(gold standard)，與其他組影像中之 SUV 進行相關性分析(correlation coefficient)，結果顯示，雖然隨著 CT 劑量降低，各組物質之 R^2 皆為降低趨勢(表 4)，但是在 $\text{FBP}(10\text{mA})$ 中， R^2 最差的為 Air 這組， R^2 也還有 0.871，因此，結果得知 PET 衰減校正結果會受 CT 劑量降低影響，但其變化仍在可接受範圍內。

圖 4. 六組不同劑量的 CT 影像經傳統 FBP 重建法重組過後，對 PET 影像進行衰減校正的結果。其中 a. b. c. d. 管分別為： K_2HPO_4 、Air、4:1 ^{18}F -FDG 水溶液、8:1 ^{18}F -FDG 水溶液。

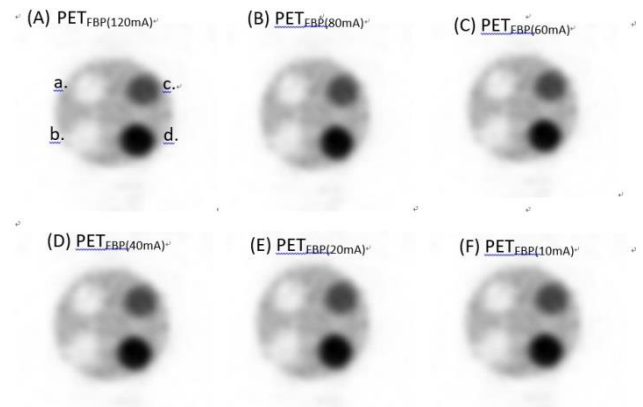


圖 5. 上述六組 PET 影像中，圈選 ROI 所得的 SUV 值。結果顯示 CT 劑量降低並不影響 PET 衰減校正結果。

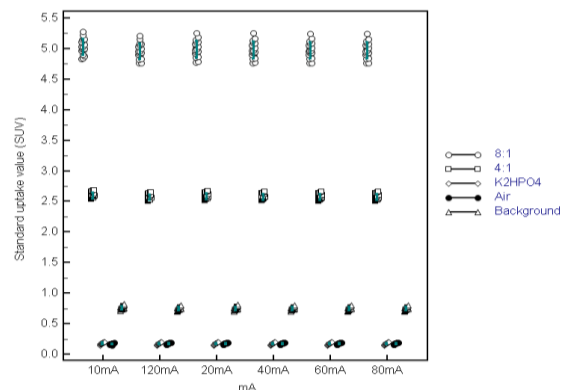


表 4、六組不同劑量的 CT 影像經傳統 FBP 重建法重組過後，對 PET 影像進行衰減校正後，圈選 ROI 獲得 SUV 值，以 FBP(120mA)為 gold standard，進行每組的相關係數計算結果。

SUV	8:1		4:1		K ₂ HPO ₄		Air		Background	
PET Classification	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²
FBP(120mA)	4.96±0.69	1	2.57±0.32	1	0.18±0.06	1	0.18±0.06	1	0.75±0.05	1
FBP(80mA)	4.97±0.69	0.998	2.58±0.33	0.995	0.18±0.06	1	0.18±0.06	1	0.75±0.05	0.987
FBP(60mA)	4.98±0.69	0.997	2.58±0.33	0.991	0.18±0.06	1	0.18±0.06	1	0.75±0.05	0.991
FBP(40mA)	4.98±0.69	0.998	2.57±0.33	0.989	0.18±0.06	1	0.18±0.06	0.972	0.75±0.05	0.985
FBP(20mA)	4.99±0.69	0.998	2.59±0.33	0.995	0.18±0.06	0.985	0.18±0.06	0.947	0.75±0.05	0.985
FBP(10mA)	5.03±0.70	0.999	2.63±0.33	0.997	0.18±0.06	0.935	0.17±0.06	0.871	0.76±0.05	0.982

然而，於上述結果可得知，以傳統 FBP 重組方法下，CT_{FBP(10mA)}能執行衰減校正，但 CT 影像品質也隨之降低，進而影響其本身之臨床價值，然而，現今發展之 CT 影像 IR 重建法，已能有效改善低劑量參數所產生的影像雜訊。但經 IR 重建法所得之 CT 影像，是否會影響 PET 衰減校正之正確性？此為第二部份探討之議題。以 CT_{FBP(10mA)}執行衰減校正後的 PET 影像為標準組，與同樣 10mA 劑量條件下、不同重組參數之 CT 所執行衰減校正後的 PET 影像，共 7 組 PET 影像進行比較(圖 6)，發現此五種不同密度之物質於影像上的表現皆無太大差異。接著，對各組影像進行量化分析，圈選 ROI 以獲得 SUV 值，FBP(10mA)為 gold standard，進行每組的相關係數計算，結果顯示，不同權重的重組條件所獲得的 SUV 值皆與 gold standard 高度相關(R²接>0.9)，即代表 CT 之 IR 重建法的比重，並不會影響衰減校正之正確性，證實 PET 影像並不會受到 IR 重建比重的影響。於此可推論，無論搭配合種重組方式，劑量條件為 10mA 之 CT 影像，皆能滿足核醫衰減校

正之功能。

圖 6. 不同重建法的 10mA CT，執行衰減校正所產生的 PET 影像，此圖顯示肉眼並無法判斷相異之處。

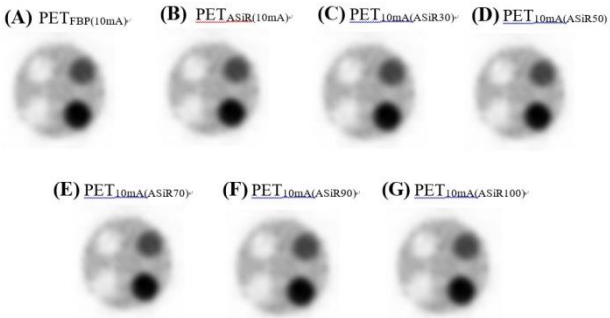


表 5、七組不同重建參數的 10mA CT 影像，對 PET 影像進行衰減校正後，圈選 ROI 獲得 SUV 值，以 FBP(10mA)為 gold standard，進行每組的相關係數計算結果。

SUV	8:1		4:1		K ₂ HPO ₄		Air		Background	
PET Classification	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²	Mean±SD	R ²
FBP(10mA)	5.03±0.70	1	2.60±0.33	1	0.18±0.06	1	0.17±0.06	1	0.76±0.05	1
ASIR10 (10mA)	5.03±0.70	1	2.60±0.33	1	0.18±0.06	1	0.17±0.06	1	0.76±0.05	1
ASIR30 (10mA)	5.03±0.70	1	2.60±0.33	0.999	0.18±0.06	1	0.17±0.06	0.966	0.76±0.05	1
ASIR50 (10mA)	5.03±0.70	0.999	2.60±0.33	0.999	0.18±0.06	1	0.17±0.06	0.966	0.76±0.05	1
ASIR70 (10mA)	5.03±0.70	0.999	2.60±0.33	0.998	0.18±0.06	0.984	0.17±0.06	0.966	0.76±0.05	1
ASIR90 (10mA)	5.03±0.70	0.999	2.60±0.33	0.998	0.18±0.06	0.984	0.17±0.06	0.966	0.76±0.05	1
ASIR100 (10mA)	5.03±0.70	0.999	2.60±0.33	0.997	0.18±0.06	0.984	0.17±0.06	0.913	0.76±0.05	1

進一步分析不同 IR 重建比重之低劑量 CT，是否能應用於 PET/CT 檢查中之解剖對位功能，並找出滿足解剖對位功能之最低劑量參數。首先，以 10mA 之 CT 影像為例，進行初步分析，結果顯示不同密度之物質，無論 IR 比重如何改變，訊號值皆不受影響；然而於雜訊值方面，隨著 IR 比重增加，各物質之雜訊值皆呈現下降趨勢(圖 7)，證實 IR 重建法能有效降低影像雜訊，提升影像品質。

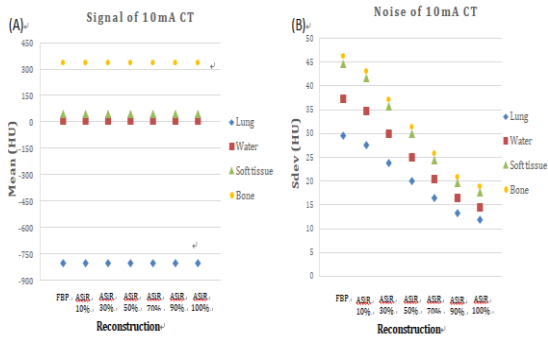


圖 7. 10mA CT 的 ROI 圈選分析結果。(A) 不同重建權重的訊號值表現。(B) 不同重建權重的雜訊值表現。

將 $CT_{FBP(120mA)}$ 、 $CT_{FBP(80mA)}$ 、 $CT_{FBP(60mA)}$ 、 $CT_{FBP(40mA)}$ 、 $CT_{FBP(20mA)}$ 、 $CT_{FBP(10mA)}$ 六組經傳統 FBP 重組之 CT 影像，對 SPECT 影像進行衰減校正，得到 6 組 SPECT 影像(圖 8)，由影像上來看，假體內無論背景值、hot spot，皆無太大差異。由於假體內的球體體積不同，影像所呈現的亮度即不同。進一步對這 6 組 SPECT 影像圈選 ROI 計算每組影像每個球體的對比度(CNR)，結果發現(圖 9)隨著劑量降低，對比度會下降，但 80 mA-10 mA 這 5 組並無太大差異，此外，可以發現，在每一組劑量中的 6 顆球體，1、2、3 號球差異不大，但隨著體積變小，對比度明顯下降，這是因為 SPECT 解析度原本就不高，加上體積太小會有部分體績效應(partial volume effect)的影響。

圖 8. 使用 6 組不同劑量以 FBP 重建法重組的 CT 影像對 SPECT 影像進行衰減校正之結果，影像顯示無法用肉眼判斷出差異。

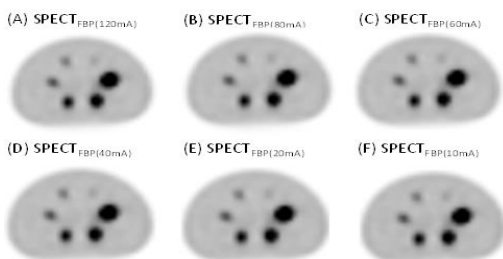
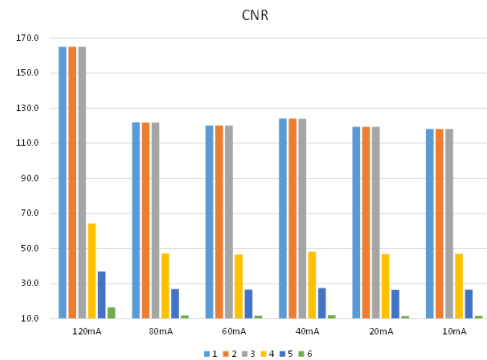


圖 9. 對 6 組不同劑量進行衰減校正的 SPECT 影像進行 6 顆球體的 ROI 圈選，計算而得的 CNR 值。



第二部份探討之議題為以 $CT_{FBP(10mA)}$ 執行衰減校正後的 SPECT 影像為標準組，與同樣 10mA 劑量條件下、不同權重重組參數之 CT 所執行衰減校正後的 SPECT 影像，共 7 組 SPECT 影像進行比較(圖 10)，發現此 6 顆球體於影像上的表現皆無太大差異。進一步對這 7 組 SPECT 影像圈選 ROI 計算每組影像每個球體的對比度(CNR)，結果顯示在同樣 10 mA 造影條件下，隨著疊代重組的權重增加，球 1、2、3、6 的對比度隨之增加，而在每一組不同權重的重組條件中，球 6 的對比度反而比球 5 高(圖 11)。接著進行分析不同 IR 重建比重之低劑量 CT，是否能應用於 SPECT/CT 檢查中之解剖對位功能。以 10mA 之 CT 影像為例，進行初步分析，結果顯示不同密度之物質，無論 IR 比重如何改變，訊號值皆不受影響(圖 12)。

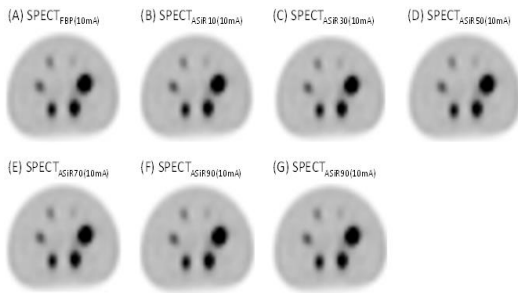


圖 10. 不同重建法的 10mA CT，執行衰減校正所產生的 SPECT 影像，此圖顯示肉眼並無法判斷相異之處。

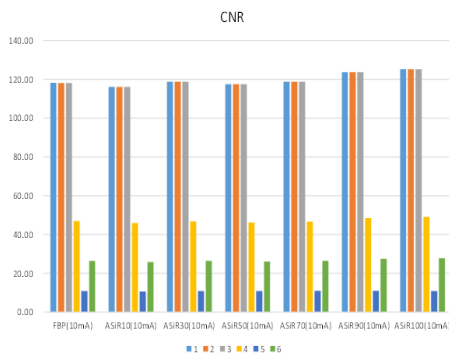


圖 11. 對 6 組不同劑量進行衰減校正的 SPECT 影像進行 6 顆球體的 ROI 圈選，計算而得的 CNR 值。

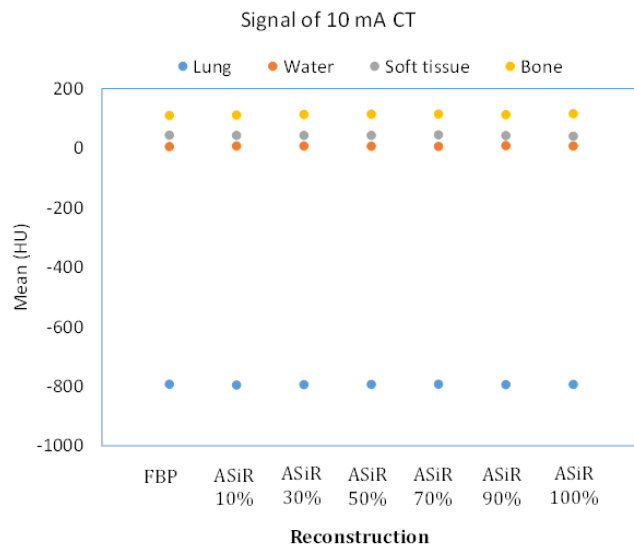


圖 12. 10mA CT 經由不同權重的重組條件進行 ROI 圈選分析的結果。

IV. 結論

透過上述的分析結果，可以得知低劑量 CT

造影條件對 CT、PET、SPECT 影像品質造成的影響並不是很大，甚至在低劑量影像之間是幾乎沒有影響；而適當運用 IR 影像重建法可以有效改善低劑量影像之雜訊，提高影像品質，證明低劑量 CT 在核醫影像檢查具有臨床診斷價值，進一步達到降低病人醫療輻射曝露累積劑量的效果。

參考文獻

- [1] <http://www.imagewisely.org/imaging-modalities/nuclear-medicine/articles/ct-protocol-selection>
- [2] Kamel E, Hany TF, Burger C, Treyer V, Lonn AH, von Schulthess GK, Buck A. CT vs 68Ge attenuation correction in a combined PET/CT system: evaluation of the effect of lowering the CT tube current. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2002; 29:346–350.
- [3] Wu TH, Huang YH, Lee JJ, Wang SY, Wang SC, Su CT, et al. Radiation exposure during transmission measurements: comparison between CT- and germanium-based techniques with a current PET scanner. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2004; 31:38–43.
- [4] Sharma P, Sharma S, Ballal S, Bal C, Malhotra A, Kumar R. SPECT-CT in routine clinical practice: increase in patient radiation dose compared with SPECT alone. Nucl Med Commun. 2012;33(9):926-32.
- [5] http://www3.gehealthcare.com/en/products/categories/computed_tomography
- [6] Vachha B, Brodoefel H, Wilcox C, Hackney DB, Moonis G. Radiation dose reduction in soft tissue neck CT using adaptive statistical iterative reconstruction (ASIR). Eur J Radiol. 2013;82(12):2222-6.
- [7] Lee M, Mitsumori, William P. Shuman, Janet M. Busey, Orpheus Kolokythas, Kent M. Koprowicz. Adaptive statistical iterative reconstruction versus filtered back projection in the same patient: 64 channel liver CT image quality and patient radiation dose. Eur Radiol. 2012;22(1):138-43.

- [8] Matsutomo N, Nagaki A, Sasaki M. Validation of the CT iterative reconstruction technique for low-dose CT attenuation correction for improving the quality of PET images in an obesity-simulating body phantom and clinical study. Nucl Med Commun. 2015;36(8):839-47.
- [9] Sibille L, Chambert B, Alonso S, Barrau C, D'Estanque E, Al Tabaa Y, Collombier L, Demattei C, Kotzki PO, Boudousq V. Impact of the Adaptive Statistical Iterative Reconstruction Technique on Radiation Dose and Image Quality in Bone SPECT/CT. J Nucl Med. 2016;57(7):1091-5.
- [10] Spatial Resolution in CT. Journal of the ICRU. 2012; 12(1):107-120.

以小豬動物模型來建立鎳-68 INER-038 正子造影正確定量殘存肝功能的 Establish Ga-68 NOTA HL PET imaging for dynamic evaluation of functional liver reserve using porcine model

計畫編號：MOST 106-NU-E-002-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：顏若芳

e-mail：rfyen@ntu.edu.tw

計畫參與人員：顏若芳、黃雅瑤

執行單位：國立台灣大學醫學院放射線科

摘要

與核研所合作，利用核研所發展的肝受體造影凍晶製劑(核研多蓄克鎳肝功能造影劑, Ga-68 NOTA HL, INER Dolacga, Institute Nuclear Energy Research, Taoyuan, Taiwan)進行 Ga-68 標誌，經品管測試確認後，以小豬動物模型，使用本院臨床正子造影掃描儀 Discovery 710(GE, USA)由正子動態造影評估該藥物的藥動學，生物分佈，及安全性等，做為該藥物進入人體臨床試驗的參考。

關鍵詞：Ga-68、Dolacga、肝功能、正子造影、定量。

Abstract

We have successfully labelled [⁶⁸Ga]Ga-NOTA-HL and performed complete quality assurance. We also performed porcine PET scan to establish the pharmacokinetics, bio-distribution, and safety of this novel PET tracer.

Keywords: Ga-68, Dolacga, Hepatic reserve, PET, quantification.

I. 前言

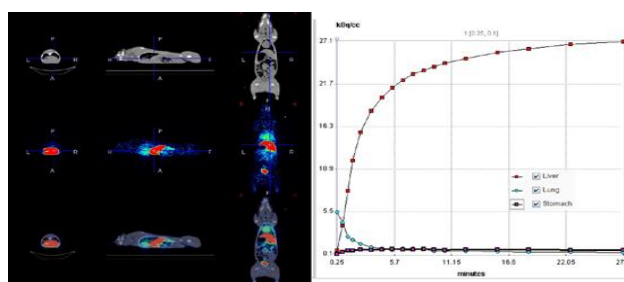
肝臟是人體攝取代謝結合排泄各種體內產生或由體外吸收而來的物質的最重要器官。當肝臟功能殘餘降低至一個閾值就可能發生肝臟衰竭。因此，正確評估殘留肝臟功能對於預測病程及決定臨床治療方向非常重要。目前在临床上靜態測量肝臟血清酵素等指數或動態測量以 indocyanine green (ICG) clearance test 來做肝功能的評估，但這些測量和臨床及病理常有不合的發現，和病人預後相關性也較低。因此，临床上急需發展準確的藥物及影像檢查來精確評估並定量肝功能。

II. 主要內容

核研所發展的以 Ga-68 標誌的肝受體造影凍晶製劑(核研多蓄克鎳肝功能造影劑, Ga-68 NOTA HL, INER Dolacga, Institute Nuclear Energy Research, Taoyuan, Taiwan). Ga-68 是正子衰變核種，半衰期為 67.7 分鐘。以正子造影解析度高。可以正確定量正常肝細胞表面 ASGP-R。這個受體的數量已被證明和殘留肝臟細胞及肝功能有極大得相關性。

III. 結果與討論

本計畫在台大醫院正子中心以 GalliaPharm (Erkert & Ziegler, German) 發生器洗出 Ga-68，洗出液經過本中心品質確認後，和 NOTA-HL freeze-dried kit (INER, Taiwan) 做標誌。品管測試確認後，以小豬動物模型，使用本院臨床正子造影掃描儀 Discovery 710(GE, USA)由正子動態造影評估該藥物的藥動學，生物分佈，及安全性等，做為該藥物進入人體臨床試驗的參考。



IV. 結論

本團隊已經在台大醫院成功標誌 [⁶⁸Ga]Ga-NOTA-HL。從小豬模型的資料可見 [⁶⁸Ga]Ga-NOTA-HL 與 ASGPR 有特異性結合，可用來定量肝臟受體，評估殘存肝功能。

參考文獻

- [1] Mei-Hui Wang, Chuan-Yi Chien, Ping-Yen Wang, Hung-Man Yu, Hsuan-Shu Lee, Wu-Jyh Lin. The specificity and accuracy of ¹¹¹In-hexavalent lactoside in estimating liver reserve and its threshold value for mortality in mice. J hepatol 2015;63:370-377.
- [2] Hofman MS, Lau wF, Hicks RF. Somatostatic receptor imaging with ⁶⁸Ga DOTATATE PET/CT: clinical utility, normal patterns, pearls, and pitfalls in interpretation. RadioGraphics 2015;35:500-516.

※報告內容將於成果發表會當天公開，請就可公開之內容揭露

發展 $^{68}\text{Ga}/^{111}\text{In}$ 標誌 galectin-1 及 neuropilin-1 結合適體作為肺腺癌診療之開發及應用

Development of $^{68}\text{Ga}/^{111}\text{In}$ -labeled aptamers targeting galectin-1 and neuropilin-1 for theranostic application of human lung cancer

計畫編號：MOST 106-NU-E-006-003-NU

計畫類別：■ 個別型計畫 □ 整合型計畫

計畫主持人：陳玉玲、張志賢

e-mail：yuhling@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：洪澤民、蔡耀宗、吳宜欣

執行單位：國立成功大學口腔醫學研究所

摘要

癌症診療學是將診斷與治療合一的新療法，期望達到個人化早期診斷並精準治療的目標。放射性藥物是利用靶向分子攜帶放射性分子至患部，預期可以達到癌症診療學的目的。半乳糖凝集素-1(Galectin-1)是一種 β -半乳糖的聚醣結合蛋白質，許多研究證實在腫瘤進展和腫瘤轉移扮演重要的角色。神經纖毛蛋白質-1(Neuropilin 1)是細胞膜蛋白質，已知高量表現在較惡性以及高轉移性的腫瘤中，且在腫瘤生成、癌細胞侵犯、及腫瘤血管新生扮演關鍵性角色，近期研究也顯示標靶在神經纖毛蛋白質-1 可以促進腫瘤血管通透性並增加藥物穿透癌組織而達到較好的癌症治療效果。因此半乳糖凝集素-1 和神經纖毛蛋白質-1 是理想且具有潛力的惡性腫瘤標靶。我們先前的研究利用配體指數富集系統進化篩選(SELEX)已經獲得幾個單鏈 DNA 適體(aptamers)能分別與半乳糖凝集素-1 和神經纖毛蛋白質-1 結合，並具高專一性及親和力，同時亦能抑制腫瘤細胞的遷移活性。本計畫的研究目的是設計與開發半乳糖凝集素-1 結合適體和神經纖毛蛋白質-1 結合適體的放射性藥物，用於惡性腫瘤的診斷與治療上。我們已經將半乳糖凝集素-1 和神經纖毛蛋白質-1 結合適體鍵結 DOTA 再接上放射性分子 ^{68}Ga 和 ^{111}In ，利用肺腺癌實驗小鼠模式並使用 PET / SPECT 成像觀察及評估腫瘤標靶之能力，結果顯示放射性同位素標記的結合適體在靜脈注射入活體後能有效聚集於腫瘤部位，我們將進一步修飾此 DNA 適體以增加其體內穩定性後，相信可開發為腫瘤追蹤顯像的輔助試劑，對肺癌的早期發現治療追蹤期能提供更精準的顯像工具。

關鍵詞：癌症診療學、放射性藥物、神經纖毛蛋白質-1、半乳糖凝集素-1。

Abstract

Cancer theranostics (therapy + diagnostic) have shown to improve the accuracy of detection, precise treatment, realtime monitoring of treatment efficacy, and improves patient care. Radiopharmaceuticals are drugs that are composed of a radioisotope bond to targeting molecules and can be used for cancer theranostic purposes. Galectin-1, a glycanbinding protein with a preference for ligands containing β -galactose, plays important role in cancer progression and metastasis. Overexpression of galectin-1 in

tumor tissues is significantly associated with poor clinical outcome in several cancers such as lung and oral cancers. Neuropilin 1 (NRP1), a membrane protein, has been known to be highly expressed in high grade and metastatic tumors and play a pivotal role in tumorigenesis, cancer invasion, and angiogenesis. Targeting NRP1 can enhance tumor vascular permeability and compounds penetrating into tumor tissues, and may improve tumor therapeutic efficacy. These results imply that galectin-1 and NRP1 could be ideal and promising targets for future cancer theranostic clinical applications. By a SELEX (systematic evolution of ligands by exponential enrichment) selection against recombinant galectin-1 or NRP1 proteins, we have identified several single-stranded DNA aptamers could bind to galectin-1 or NRP1 with high specificity and affinity. In this study, we have radiolabel NRP1- and galectin-1-binding aptamers with ^{68}Ga and ^{111}In to examine the tissue uptake kinetics and clearance and the PET/SPECT imaging of radiolabeled aptamers in murine xenograft lung cancer models. In order to decrease the dose of isotopes-labeled aptamers in liver and kidney and enhance the tumor targeting activity, we also tried to modify the isotopes-labeled aptamers. We are moving closer to develop novel theranostic strategies to enhance accurate molecular imaging and precise treatment.

Keywords: Cancer theranostics, Radiopharmaceuticals, Neuropilin 1, Galectin-1

I. 前言

Radiopharmaceuticals and Cancer theranostics

Most cancer-related deaths are due to advanced disease, which results from combination of delayed diagnosis, metastasis, and relapse. Earlier detection from more aggressive monitoring could lead to improved treatment strategies and possibly improved survival. Molecular-based cancer theranostics (therapy + diagnostic) have shown to improve the accuracy of detection, precise treatment, real-time monitoring of treatment efficacy, and improves patient care. Radiopharmaceuticals are drugs that are composed of a radioisotope bond to targeting molecules and can be used either for diagnostic or therapeutic purposes. Nowadays, radiopharmaceuticals offer several advantages that enable the early detection of cancer, simultaneous monitoring and treatment and targeted

therapy with minimal toxicity (Aerts et al., 2014). The targeting molecule conveys the radioisotope to specific organs, tissues or cells, which can make treatment more effective than regular radiation. For instance, radioactive iodine (I-131) has traditionally been very effective in the treatment of thyroid cancer because it can destroy thyroid growths without damaging other cells in the body. Besides small molecules, the targeting molecules ranged from antibodies to antibody fragments, proteins, peptides and nucleic acids, are usually more specific compared to small molecules and can be more effective radiopharmaceutical carriers. For example, an anti-CD20 antibody, ibritumomab tiuxetan, radiolabeled with Y-90 (Zevalin®), which is clinically used for the treatment of non-Hodgkin lymphomas (Mondello et al., 2016). A radiolabeled $\alpha_v\beta_3$ integrin antagonist, ^{68}Ga -NODAGA-THERANOST, is the first peptidomimetic to reach clinical development for targeting integrin receptors and confirmed the feasibility of integrin receptor peptidomimetic positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) imaging in patients with non-small-cell lung cancer and breast cancer (Baum et al., 2015).

Aptamers and their applications in cancer diagnosis and therapy

Aptamers are single stranded nucleic acid (RNA, DNA and modified RNA or DNA) that possessing specific binding characteristics to their target and are artificially synthesized. Aptamers have similar properties to antibodies, but the advantage than antibodies are low toxicity, cheaper producing in synthesis of DNA or RNA and decompose easily in human body. Since aptamers are high affinity and specificity for the targets and easy for synthesis and modification, they are usually exploited to deliver drugs and a variety of other cargo into cells, including conjugation with nanoparticles or small interfering RNAs (siRNA). Recently, many studies focus on the application of aptamers in cancers. The general researches have proved that aptamers can be used in cancer medicine for detecting cancer cells, cancer biomarkers and enriching rare cancer cells with nanoparticle technology (Marolt et al., 2012). For example, the aptamer against prostate-specific membrane antigen (PSMA), A10, is conjugated with nanoparticle encapsulated docetaxel. This report demonstrates that nanoparticle-aptamer bioconjugation has higher efficiency than docetaxel treatment only (Farokhzad et al., 2006). siRNA-aptamer conjugation is another progression for drug delivery study in aptamer application. For instance, nucleolin (NCL)-targeting aptamers conjugating with Slug-siRNA suppress tumor growth, invasiveness and cell motility ability in lung cancer cells (Lai et al., 2014). Moreover, aptamers seem to be a promising platform for developing PET imaging agents. Recent reports exhibited that ^{18}F or ^{64}Cu -labeled Tenascin-C aptamers have appropriate properties of tumor contrast and suggest utility for clinical evaluation of tenascin-C expression in several cancers (Jacobson et al., 2015). Several aptamers have been used as targeting molecule of radiopharmaceuticals in preclinical studies (Gijs et al., 2016).

Galectin-1 in cancers

Galectin-1 is a member of β -galactoside-binding

protein family (Camby et al., 2006). Our studies and several lines of evidence have demonstrated that highly expression of galectin-1 promotes cancer progression and poorer clinical outcome (Wu et al., 2009 and 2011; Carlini et al., 2014; Astorgues-Xerri et al., 2014). Overexpression of galectin-1 is not only in cancer cells but also in tumor microenvironmental cells (Hsieh et al., 2008; Laderach et al., 2013; Tang et al., 2014). Overexpression of galectin-1 in cancer also strengthens the tumor's defense against the immune response (Rubinstein et al., 2004). Blocking the expression of galectin-1 reduced tumor growth and enhanced tumor rejection, and was accompanied by the generation of T cell-mediated rejection (Banh et al., 2011, Ito et al., 2011). Taken together, these observations all emphasized galectin-1 could be an ideal and promising target for future development of cancer theranostic applications.

II. 主要內容

Due to these potential aptamers for cancer imaging and therapeutic applications would be advantageous, to evaluate their bio-distribution and in vivo clearance rate are urgently needed. Functional imaging with SPECT or PET is usually used to characterize biologic processes at the molecular level. In this work, we will radiolabel galectin-1-binding aptamers with ^{68}Ga and ^{111}In and analyze the PET/SPECT imaging of radiolabeled aptamers to evaluate their in vivo tissue uptake kinetics and clearance for further preclinical applications. Three specific aims are proposed to accomplish our goals:

1. To synthesize ^{68}Ga - and ^{111}In -NOTA-gal-1 aptamers.
2. To analyze the binding properties and stability of ^{68}Ga - and ^{111}In -NOTA-gal-1 aptamers.
3. To assess tumor targeting activity and specificity and the whole body bio-distribution of ^{68}Ga / ^{111}In -NOTA-gal-1 aptamers by analyzing the PET/SPECT imaging in murine lung tumor xenografts.

III. 結果與討論

In this grant, we successfully synthesized ^{68}Ga -DOTA and ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamers. We assayed tumor targeting ability and bio-distribution of both isotopes-labeled aptamers. In order to decrease the dose of isotopes-labeled aptamers in liver and kidney and enhance the tumor targeting activity, we also tried to modify the isotopes-labeled aptamers.

Gal-1 aptamer was labelled by ^{68}Ga -DOTA.

Our previous results have demonstrated that gal-1-aptamers could specifically bind to gal-1 high expressed CL1-5. Here, we want to know whether Gal-1 aptamer apply to cancer imaging and therapeutic application. First, we synthesized ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer. We further characterized the ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer by mass and instant thin-layer chromatography (iTLC). We found that ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer could be separated from aptamer only or free ^{68}Ga . In this result, we successfully synthesized ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer.

^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer can target lung tumor xenografts.

We further examined the tumor targeting ability of ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer in CL1-5 lung cancer bearing murine by NanoPET/CT. We found that ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer could target the tumor site at 0.5 and 2 hours after intravenous injection of aptamer. We also analyzed the bio-distribution of ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer. Although aptamer could target the tumor, it rapidly decreased at tumor and accumulated at liver and kidney. The imaging signal of ^{68}Ga -DOTA-gal-1 aptamer in liver and kidney were high than tumor.

^{111}In -NOTA-gal-1 aptamers can also target lung tumor xenografts.

According to above result, we further wanted to prolong the detention time of isotope-aptamer. Therefore we used another isotope ^{111}In in which has longer half-life to synthesize ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer. The results of iTLC assay showed that ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer could be synthesized. We further wanted to know whether ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer target the tumor site. The NanoPET/CT imaging was analyzed at 2, 4, and 24 hours after intravenous injection of aptamer. Comparing with ^{111}In -DTPA-45N random sequence, we found that ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer could target tumor site and the signal were extended over 4 hours.

Human serum albumin (HSA) modification decreased the binding ability of ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer.

According to the result of table 1, the tumor/liver or tumor/kidney ratio of isotope signal were smaller than 1. This data revealed that isotope-aptamer were accumulated at liver and kidney. In order to reduce the liver and kidney accumulation, we modified the ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer by Human serum albumin (HSA). HSA modification extended the half-life of drug or compound in circulation. However, we found that HSA modification decreased the binding ability of ^{111}In -DTPA-gal-1 aptamer to CL1-5. We speculated that the size of HSA was too big to affect the structure of aptamer. Thus, we will consider adding linker between HSA and aptamer. °

IV. 結論

In summary, we synthesized ^{68}Ga -DOTA and ^{111}In -DTPA -gal-1 aptamers and they could target the gal-1 high expressed tumor. However, the half-life of isotope-aptamer or liver/kidney accumulation are pending problems. Altogether, gal-1 targeting isotope-labeled aptamer could be a potential strategy for cancer theranostic applications.

參考文獻

[1]Aerts A, Impens NR, Gijs M, et al. (2014) Biological carrier molecules of radiopharmaceuticals for molecular cancer imaging and targeted cancer therapy. *Curr Pharm Des.* 20, 5218–44. Review.
[2]Astorgues-Xerri L, Riveiro ME, Tijeras-Raballand A, et al. (2014) Unraveling galectin-1 as a novel therapeutic target for cancer. *Cancer Treat Rev.* 40(2):307–19.
[3]Barar J, Omidi Y. (2014) Surface modified multifunctional nanomedicines for simultaneous imaging and therapy of cancer. *Bioimpacts.* 4, 3–14.

[4]Baum RP, Kulkarni HR, Müller D, et al. (2015) First-In-Human Study Demonstrating Tumor-Angiogenesis by PET/CT Imaging with (^{68}Ga)-NODAGA-THERANOST, a High-Affinity Peptidomimetic for $\alpha\text{v}\beta 3$ Integrin Receptor Targeting. *Cancer Biother Radiopharm.* 2015 May;30(4):152–9.
[5]Chu YW, Yang PC, Yang SC, et al. (1997) Selection of invasive and metastatic subpopulations from a human lung adenocarcinoma cell line. *Am J Respir Cell Mol Biol* 17:353–60.
[6]Farokhzad OC, Cheng J, Teply BA, et al. (2006) Targeted nanoparticle-aptamer bioconjugates for cancer chemotherapy in vivo. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 103, 6315–20.
[7]Gijs M, Aerts A, Impens N, Baatout S, Luxen A. (2016) Aptamers as radiopharmaceuticals for nuclear imaging and therapy. *Nucl Med Biol.* 43:253–71.
[8]Jacobson O, Yan X, Niu G, et al. (2015) PET imaging of tenascin-C with a radiolabeled single-stranded DNA aptamer. *J Nucl Med.* 56(4):616–21.
[9]Lai WY, Wang WY, Chang YC, et al. (2014) Synergistic inhibition of lung cancer cell invasion, tumor growth and angiogenesis using aptamer-siRNA chimeras. *Biomaterials.* 35, 2905–14.
[10]Marolt U, Cencic A, Gorenjak M, Potrc S (2012) Generating Aptamers for Cancer Diagnosis and Therapy. *Clin Exp Pharmacol* 2, 111.
[11]Mondello P, Cuzzocrea S, Navarra M, Mian M. (2016) 90 Y-ibritumomab tiuxetan: a nearly forgotten opportunity. *Oncotarget.* 7:7597–609.
[12]Ruoslahti E. (2016) Tumor penetrating peptides for improved drug delivery. *Adv Drug Deliv Rev.* pii: S0169-409X(16)30094-1.
[13]Sugahara, K.N., Teesalu, T., Karmali, P.P., et al. (2009) Tissue-penetrating delivery of compounds and nanoparticles into tumors. *Cancer Cell* 16, 510–20.
[14]Sugahara, K.N., Teesalu, T., Karmali, P.P., et al., (2010) Coadministration of a tumor-penetrating peptide enhances the efficacy of cancer drugs. *Science* 328, 1031–5.
[15]Waybrant B, Pearce TR, Wang P, Sreevatsan S, Kokkoli E. (2012) Development and characterization of an aptamer binding ligand of fractalkine using domain targeted SELEX. *Chem Commun (Camb).* 48(80):10043–5.

研發 PD-L1 結合胜肽於肺癌標靶診療藥物之運用

Development of PD-L1-binding peptides for molecular imaging and targeted therapy of lung cancer

計畫編號：MOST 106-2623-E-001-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳漢忠、張志賢

e-mail：hew0928@gate.sinica.edu.tw

計畫參與人員：呂瑞旻、劉怡如、陳亮丞

執行單位：中央研究院細胞與個體生物學研究所

摘要

癌細胞能夠藉由免疫抑制分子的表達，活化免疫檢查點相關的路徑來逃避免疫系統的攻擊。已有報導指出 PD-L1 表現於數種腫瘤的細胞表面，其可以與 PD-1 結合而抑制 T 細胞的活化，並且抑制 T 細胞殺死癌細胞的能力。臨床上已利用抗體阻斷 PD-1/PD-L1 的交互作用，使腫瘤縮小且延長多種癌症病患的存活時間，目前 PD-L1 被認為是極重要的標的，且成功地應用在治療上。腫瘤細胞 PD-L1 的表現程度與病人接受針對 PD1/PD-L1 免疫療法的反應呈高度相關，然而，病患的腫瘤組織檢體不易取得，以進行 PD-L1 表現量的分析，因此需要發展抗體、胜肽或是適體等標靶分子來進行專一性偵測腫瘤 PD-L1 的非侵入性醫學影像。噬菌體顯現技術是強而有力的工具，能夠透過生物淘選，藉由親和力篩選的過程，快速地鑑定出各式目標分子所相對應的配體，像是蛋白質、細胞表面受體、醣分子等。使用此方法，我們在過去已成功篩選出對抗腫瘤或腫瘤血管的胜肽或抗體片段。此研究計畫中，我們以噬菌體顯現胜肽庫淘選出四個噬菌體株能對抗 PD-L1 細胞外區域重組蛋白的新穎胜肽，其中兩個噬菌體株可以明顯地結合 PD-L1 蛋白及具有 PD-L1 表達的肺癌細胞，藉由合成胜肽也證明其有細胞結合能力。未來藉由放射性同位素[⁶⁸Ga]標定 PD-L1 結合胜肽發展成標靶造影試劑，具有放射性標定的 PD-L1 結合胜肽將可應用於 nanoPET/CT 的造影上，以及異體移植人類肺癌的免疫缺乏小鼠上進行生物分布的研究，以上結果將有助於放射標定的專一性 PD-L1 結合胜肽，應用於臨床上偵測肺癌細胞 PD-L1 表現以及醫學影像，所獲得之成果也可增進了解 PD-L1 標靶診療藥之設計。

摘要關鍵詞：肺癌、PD-L1、噬菌體顯現法、標的胜肽、醫學影像

Abstract

Cancer cells escape the immune system through expression of immunosuppressive molecules to activate immune checkpoint pathway of immune cells. Programmed death ligand-1 (PD-L1) reportedly expresses on the cell surface of multiple tumor types, and interacts with PD-1 to inhibit T cell activity and restrict cancer destruction. Blocking the interaction of PD-1/PD-L1 using antibodies leads to tumor regression and improved survival in several cancers. Currently, PD-L1 is a crucial target and being

successfully translated into anticancer immunotherapy. The expression level of PD-L1 in tumors highly correlates with response to PD1/PD-L1 immune checkpoint therapy. However, the tumor tissue samples from patients are not always available to analyze PD-L1 expression for guided therapy. Thus development of targeting molecules, such as antibodies, peptides and aptamers, for specific and non-invasive imaging to PD-L1 in tumors is necessary. Phage display technology is a powerful tool that allows rapid identification of ligands for various target molecules such as proteins, cell-surface receptors and carbohydrates through an affinity selection process called biopanning. Using this method, we have previously identified several peptides and antibodies which target tumors and tumor vasculature. We have identified four phage clones that recognized the extracellular domain of PD-L1 recombinant protein using phage-displayed peptide library. Two of these phage clones can bind to PD-L1 recombinant protein and PD-L1 overexpressing lung cancer cells. Two synthetic peptides also have binding activities to PD-L1 overexpressing cancer cells. In the future, we plan to develop targeted imaging agents by conjugation of radioisotope [⁶⁸Ga] with PD-L1 binding peptides. The radiolabeled-PD-L1 peptides will be used in nanoPET/CT imaging and biodistribution studies in SCID mice bearing xenografted human lung tumors. These PD-L1-specific peptides have clinical potential for molecular imaging and detection of PD-L1-expressing tumor. These results will also benefit to design PD-L1-targeting drug for lung cancer theranostics.

Keywords: lung cancer, PD-L1, phage display, targeting peptides, molecular imaging

I. 前言

PD-L1-expressing tumor cells providing inhibitory signals through interaction of PD1/PD-L1 enable these tumor cells to evade immune detection and destruction by NK cells or T cells. PD-L1 plays a central role to mediate the inhibition of local immune responses in tumor environment. Thus it can be an important target for exploiting anti-cancer drugs (Sharma and Allison, 2015). Upregulated expression level of PD-L1 has been found in many different cancer types, including melanoma, NSCLC, and multiple myeloma. Until now, immunohistochemistry of tumor specimens with anti-PD-L1 antibodies is the most

commonly used as a biomarker to guide therapy for patients (Kerr et al., 2015). At least three anti-PD-L1 monoclonal antibodies, 22C3, 28-8 and SP142, have been used in IHC and developed as companion diagnostic kits for selecting patients before anti-PD-L1 antibody therapy. However, the surgical tumor specimen from patients might not always easily be obtained for IHC staining. Thus development of non-invasive imaging method for PD-L1-expressing tumor *in vivo* by PD-L1-specific targeting molecules, such as antibodies, peptides and aptamers, will be potential to improve the PD-L1 diagnosis.

II. 主要內容

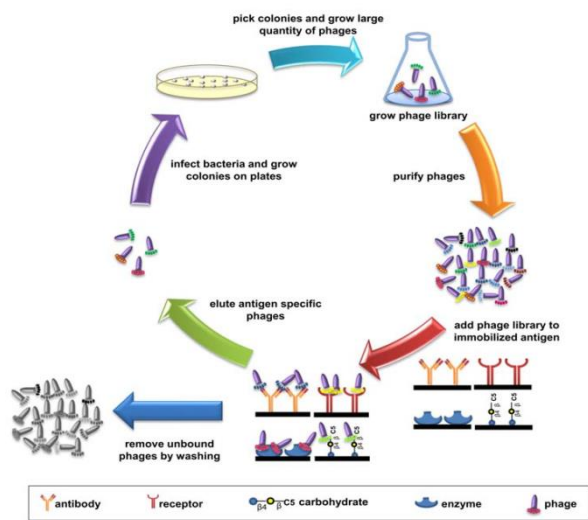


Figure 1. Application of biopanning with phage-displayed random peptide libraries. (Wu et al., JBMS, 23, 8, 2016)

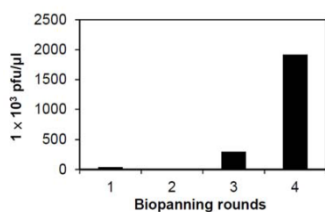


Figure 2. Biopanning of PD-L1-Fc protein by phage display random peptide libraries. After the fourth round of biopanning, marked enrichment (up to 51.2-fold) was shown, compared with first round of selection.

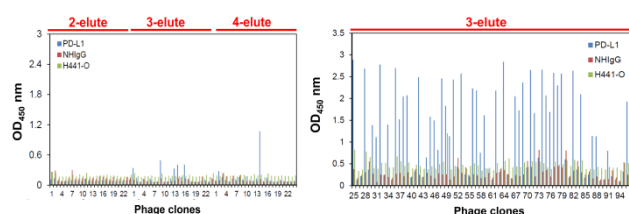


Figure 3. Identification of selected phage clones by ELISA. We screened phage clones from second (24 clones), third (96 clones) and fourth (24 clones) round of biopanning and significantly reactive to PD-L1 phage clones DNA were purified and sequenced. H441-O is a stably PD-L1-overexpressing H441 cell line.

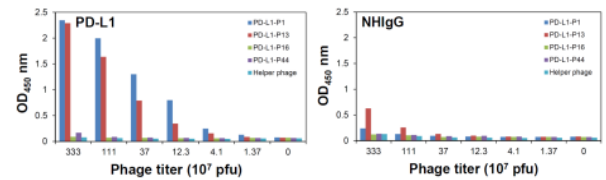


Figure 4. Specific reactivity of selected phage clones binding to PD-L1 by ELISA. PD-L1-Fc and control NHlgG protein-coated plates were incubated with a three-fold serial dilution from 3.3×10^9 to 1.37×10^7 pfu of P1, P13, P16 and P44 phage clones and P1 and P13 could recognize PD-L1 in a dose-dependent manner, but not with NHlgG. Helper phages were used as a negative control.

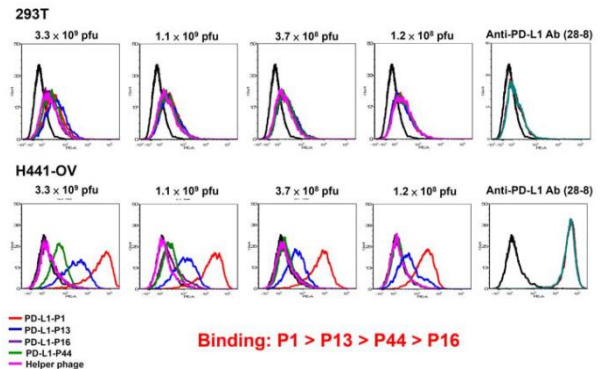


Figure 5. Determination of selected phage clones specific binding to cellular PD-L1 by flow cytometry. PD-L1 overexpressing H441 cells were incubated with three-fold serial dilutions from 3.3×10^9 to 1.37×10^7 pfu of P1, P13, P16 and P44 phage clones and P1, P13 and P44 could bind to H441 PD-L1 overexpressed cells in a dose-dependent manner, but not with 293T cells. P1 has high binding activity to PD-L1. Commercial anti-PD-L1 antibody (28-8) was used as a positive control.

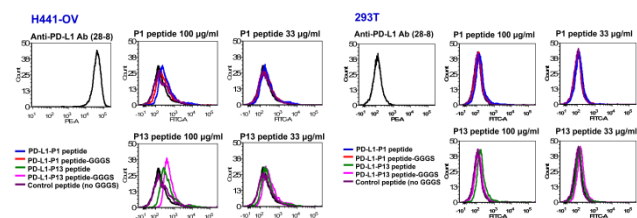


Figure 6. Determination of synthetic peptide binding to cellular PD-L1 by flow cytometry. PD-L1 overexpressing H441 cells were incubated with a three-fold serial dilution from 100 to 33 $\mu\text{g}/\text{ml}$ of P1 and P13 synthetic peptides and all of them could bind to H441 PD-L1 overexpressed cells, but not with 293T cells. P13-GGGG peptide has higher binding activity to PD-L1 than others. Commercial anti-PD-L1 antibody (28-8) was used as a positive control.

III. 結果與討論

In this project, we employed the phage-displayed random peptide libraries for affinity selection of the peptides binding to human PD-L1-Fc recombinant protein. We identified four individual anti-PD-L1 phage clones. Using ELISA and flow cytometry, two of them showed better binding activities to H441 cells constitutively expressing PD-L1 and PD-L1-Fc recombinant proteins,

compared to control cells and protein (Figs. 3, 4 and 5). The PD-L1-targeted synthetic peptides could also recognize PD-L1 overexpressing H441 cells, but not control 293T cells (Fig. 6). The tumor-homing assay of PD-L1-targeted phages will investigate in a xenograft mouse model *in vivo* showed that PD-L1-targeting peptides localized to PD-L1 expressing tumor tissues.

The application of targeted peptides provides several possible advantages, including low immunogenicity, enhanced tissue penetration due to their small size, ready diffusion, ease of manufacture, and simple targeted formulation assembly as compared to larger biomolecules, such as antibodies. Targeted delivery of small molecule drugs can be achieved by enhancing the drug formulation with molecules that preferentially bind to tumors. Targeted peptides may play roles as “cruise missiles” to guide the localization of drugs to cancer cells, and to deliver higher doses to kill cancer cells with minimal damage to normal tissues. Unfortunately, over the past decade, targeted drug delivery systems have been studied extensively in preclinical *in vitro* and *in vivo* models, but to date, only a few promising results have been sufficiently developed to be used effectively in the clinical environment.

In addition to targeted drug delivery system, synthetic peptides can be used to apply for molecular imaging detection system. Cancer diagnosis using nanotechnology is an emerging field which can facilitate early detection of cancer and early treatment. In our previous data, target SPION was prepared by attaching a ligand, SP204, which recognizes specific receptors expressed only on prostate cancer cells. Our observation confirming strong and selective accumulation of SP204-SPION in tumor tissues suggests that SP204-mediated SPION has great potential for its use in prostate cancer-targeted imaging (Yeh et al, 2016).

In the future, we intend to develop the targeted imaging agents by conjugation of radioisotope [^{68}Ga] with the PD-L1 binding peptides. We plan to use radiolabeled-PD-L1 peptides for nanoPET/CT imaging and biodistribution studies in SCID mice bearing xenografted human lung tumors. These results will suggest that, the specific radiolabeled-PD-L1 peptides have potential of clinical translation for applications like molecular imaging and diagnosis for PD-L1-expressing tumor. These data will also give insights into the design of PD-L1-targeting drug for lung cancer theranostics.

IV. 結論

此研究計畫中，我們以噬菌體顯現肽庫淘選出四條能對抗 PD-L1 細胞外區域重組蛋白的新穎肽，其中兩條肽對 PD-L1 有高度專一性，說明實驗篩選策略成功，次兩條肽序列具新穎性，具有研究發表之創新性。對抗 PD-L1 之新穎肽與具有 PD-L1 表達的肺癌細胞有結合力，希望藉由放射性同位素[鎵]標定 PD-L1 結合肽發展成標靶造影試劑。具有放射性標定的 PD-L1 結合肽將可應用於 nanoPET/CT 的造影上，以及異體移植人類肺癌的免疫缺乏小鼠上進行生物分布的研究。希望以高專一性肽之輔助，增加目前標靶造影的訊號。

參考文獻

- [1] Chang, D. K., Lin, C. T., Wu, C. H. and Wu, H. C. (2009a) A novel peptide enhances therapeutic efficacy of liposomal cancer drugs in xenograft models of lung cancer. PLoS ONE 4, e4171.
- [2] Chang, D. K., Chiu, C. Y., Kuo, S. Y., Lin, W. C., Lo, A., Wang, Y. P., Li, P. C. and Wu, H. C. (2009b) Peptide-mediated anti-angiogenic drug delivery systems increase therapeutic efficacy of solid tumors. Journal of Biological Chemistry 284, 12905-12916.
- [3] Chang, D. K., Li, P. C., Lu, R. M., Jane, W. N., and Wu, H. C. (2013) Peptide-mediated liposomal doxorubicin enhances drug delivery efficiency and therapeutic efficacy in animal models. PLOS ONE 8, e83239.
- [4] Kerr, K.M., Tsao, M.-S., Nicholson, A.G., Yatabe, Y., Wistuba, I.I., Hirsch, F.R., and Committee, I.P. (2015). Programmed death-ligand 1 immunohistochemistry in lung cancer: in what state is this art? Journal of Thoracic Oncology 10, 985-989.
- [5] Lee, T. Y., Wu, H. C., Tseng, Y. L., and Lin, C. T. (2004) A novel peptide specifically binding to nasopharyngeal carcinoma for targeted drug delivery. Cancer Research 64, 8002-8008.
- [6] Lee, T. Y., Lin, C. T., Kuo, S. Y., Chang D. K. and Wu, H. C. (2007) Peptide-mediated targeting to tumor blood vessels of lung cancer for drug delivery. Cancer Research 67, 10958-10965.
- [7] Lo, A., Lin, C. T., and Wu, H. C. (2008) Hepatocellular carcinoma cell-specific peptide ligand for targeted drug delivery. Molecular Cancer Therapeutics 7, 579-589.
- [8] Lu, T. Y., Lu, R. M., Liao, M. Y., Yu, J., Chung, C. H., Kao, C. F. and Wu, H. C. (2010) Epithelial cell adhesion molecule regulation is associated with the maintenance of undifferentiation of human embryonic stem cells. Journal of Biological Chemistry 285, 8719-8732.
- [9] Lu, R. M., Chang, Y. L., Chen, M. S. and Wu, H. C. (2011) Single chain anti-c-Met antibody conjugated nanoparticles for *in vivo* tumor targeted imaging and drug delivery. Biomaterials 32, 3265-3274.
- [10] Lu, R. M., Chen M. C., Chang, D. K., Chiu, C. Y., Lin, W. C., Yan, S. L., Wang, Y. P., Kuo, Y. S., Yeh, C. Y., Lo, A., and Wu, H. C. (2013) Targeted drug delivery systems mediated by a novel peptide in breast cancer therapy and imaging. PLoS ONE 8, e66128.
- [11] Sharma, P., and Allison, J.P. (2015). Immune checkpoint targeting in cancer therapy: toward combination strategies with curative potential. Cell 161, 205-214 Torchilin,
- [12] Wu, C. H., Kuo, Y. H., Hong, R. L., Wu, H. C. (2015). α -Enolase-Binding Peptide Enhances Drug Delivery Efficiency and Therapeutic Efficacy Against Colorectal Cancer. Science Translational Medicine. 7, 1-14.
- [13] Wu, H. C., Lin, C. T. and Lee, T. Y. (2007) A peptide marker targeting to nasopharyngeal carcinoma cell and application thereof. US 7,238,665 (USA), Jul 03, 2007 ~ Mar 08, 2024.
- [14] Wu, H. C. and Chang, D. K. (2010). Peptide-mediated liposomal drug delivery system targeting tumor blood vessels in anticancer therapy. Journal of Oncology 2010:723798.
- [15] Wu, H. C. Chi, Y. H. and Wu C. H (2011). Targeting Liposomes for Drug Delivery in Cancer Therapy. Book

title “Lipid Nanocarriers in Cancer Diagnosis and Therapy” , in Chapter 5, published by iSmithers, UK.

- [16] Wu, H. C., Lin, C. T., Lee, T. Y., and Kuo, S. Y. (2012) Peptide-conjugates that bind to VEGF-stimulated or tumor vasculature and methods of treatment. US Patent # 8,088,887 (USA), Jan 03, 2012 ~ April 13, 2027.
- [17] Yeh, C. Y., Hsiao, J. K., Wang, Y. P., Lan, C. H., Wu, H. C. (2016). Peptide-conjugated nanoparticles for targeted imaging and therapy of prostate cancer. *Biomaterials*, 99, 1-15.

利用微陣列基因分析銻-188-微脂體奈米核醫藥物處理原位頭頸癌腫瘤模式
後之微核糖核酸及訊息 RNA 系統性變化
Microarray analysis for investigating the systematic change of
microRNA and mRNA in Rhenium-188 liposome treated human head and
neck cancer cells

計畫編號：106-2623-E-010-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李易展

e-mail：yjlee2@ym.edu.tw

協同主持人：張志賢

計畫參與人員：張淳媛、林秉澤

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

臨床對惡性腫瘤最有效之治療方式為手術切除，而複雜的骨骼及神經血管構造增加了治療困難度。特別是位於顏面部的頭頸癌。衛福部統計指出，頭頸癌為惡性腫瘤排名第四位。核能研究所開發的銻-188 微脂體藥物可衰變產生貝他粒子及伽馬射線，以聚乙二醇化(polyethylene glycol, PEG)修飾後，可延長藥物體內循環時間並藉由滲透及停滯增強效應(enhanced permeability and retention, EPR)使病灶積聚效果提升。然而，除了藥物傳送機制之外，該藥物對腫瘤細胞本身的效果仍未完全探討，包括腫瘤的抑制效果是否與特定的基因表現及訊息傳導途徑有關。現今許多腫瘤的產生已被認為與微核糖核酸(microRNA)的表現有關，因為它會控制致癌基因或是腫瘤抑制基因的表現，而銻-188 微脂體藥物在治療後的基因表現情形仍不清楚。因此本計畫擬透過基因微陣列分析，配合 Ingenuity Pathway Analysis (IPA)軟體來建立銻-188 微脂體藥物療效的分子訊息傳導途徑及相關的生物資料庫。同時透過分子基因操作工具，例如可抑制 microRNA 的 locked nucleic acid 或抑制基因表現的干擾 RNA，來確認特定基因的表現影響銻-188 微脂體藥物療效的程度與角色。期望透過本計畫之執行能提供更多銻-188-微脂體藥物的基礎分子生物學資訊，以作為日後臨床治療的預後，及精準化治療的基礎。

關鍵詞：銻-188-微脂體、人類下咽部上皮細胞癌、分子影像、微核糖核酸。

Abstract

According to the Ministry of Health and Welfare annual cancer registration report, head and neck cancer (HNSCC) is ranked as top four of Taiwanese malignant tumor incidence in recent statistical analysis. Surgical resection is one of the most commonly used strategies that have been performed to treat human cancers, but the surgical process is greatly restricted by the anatomical barriers, such as skull base bones and vessels. 188 Re-liposome can emit both high-energy β particles and γ -rays, and accumulate in tumors via the enhanced permeability and retention (EPR) effect. 188 Re-liposome has been used for evaluating the

theranostic efficacy of various human cancers. However, in addition to the drug delivery mechanism, whether the therapeutic efficacy of 188 Re-liposome is directly related to gene regulation and specific signaling pathways is largely unknown. Nowadays the development of tumor is regarded to be associated with microRNA that is upstream of several oncogene and tumor suppressor genes via gene suppressive mechanism. In this project, we are interested in investigating the global microRNA and mRNA changes in HNSCC tumor

model treated with 188 Re-liposome. The microRNA microarray and cDNA microarray will be used for this purpose, and the dataset will be further analyzed using Ingenuity Pathway Analysis (IPA) software to establish the molecular signaling pathways of 188 Re-liposome radiopharmaceutical. Subsequently, the locked nucleic acid (LNA) and small hairpin interference RNA (shRNA) will be used to target on microRNA and mRNA followed by 188

Re-liposome treatment in HNSCC tumors, respectively. We expect to use these approaches to confirm if any specific genes and signaling pathways that can determine the therapeutic efficacy of 188 Re-liposome. The results of this research would provide the fundamental molecular bioinformatics for prognosis of clinical applications and personalized medicine in the future.

Keywords:

Liposome embedded Re-188 radiopharmaceutical, HNSCC, multimodality molecular and genetic imaging, microRNA

I. 前言

由核研所領導開發的銻-188-微脂體藥物經由許多研究已經證實對大腸癌、肺癌、頭頸癌、卵巢癌、腦瘤及食道癌具有療效[1-3]，同時針對生物分布、藥物動力學、器官輻射劑量之評估均有完整之研究，也已經開始了臨床一期的試驗，並申請多國專利中。銻-188 核種可同時放射高能量貝他粒子及伽馬射線，非但能提供腫瘤殺傷效果並避免正常組織過度傷害，也同時能利用單光子斷層掃描(SPECT)以追蹤藥物之積聚效果。銻-188-微脂體藥物已經利用聚乙二醇(PEGylation)修飾，可避免在

循環中引發免疫反應，一方面降低藥物本身的風險，另一方面也延長了藥物在動物體內持續循環的時間。在腫瘤發展的過程中，為了供應其快速生長所需的氧氣與養分，癌細胞便會藉由釋放各種激素開啟血管新生(angiogenesis)的機制，腫瘤的周圍也因此快速地生成血管；然而，在缺乏平滑肌支持且血管皮細胞之間的連結也缺乏緊密連結蛋白(tight junction)與周細胞(pericytes)連結的情形下，導致了這類型新生血管(neo-vasculature)的疏漏特性，許多小分子物質可透過這類新生血管壁疏漏的孔洞進入組織。此現象被稱為藥物滲透與遲滯增強效應(The enhanced permeability and retention effect, EPR)。銻-188-微脂體藥物已被認為是透過 EPR 效應靠近並聚集在腫瘤位置，進而利用核種特性，攻擊局部的腫瘤組織，抑制腫瘤的生長。在先前研究中，在原位接植有人類非小細胞肺癌以及人類頭頸部鱗狀細胞癌的小鼠中，施以單一劑量的銻-188-微脂體藥物，經由 SPECT/CT 造影與生物體分布分析研究已經顯示藥物能夠有效積聚於病灶，並且能夠有效延長小鼠的平均存活期。然而，但其抑制腫瘤的機制仍不清楚。因外部輻射已知會誘導腫瘤特殊分子機制並引發抗輻射效應及治療後復發，因此了解銻-188-微脂體的生物作用機制將有助於預測其是否可更有利於長期之腫瘤控制。透過機制的探討，我們期望可以得知是否有特定的分子或重要的訊息傳遞途徑會受銻-188-微脂體的影響，並決定該藥物的療效。這類研究的目的，主要擬了解是否銻-188-微脂體可用於個人化醫學治療(Personalized Medicine)，而分子機制的確立更是作為該藥物預後的重要依據。

II. 主要內容

本次計畫延續先前建立的人類頭頸癌小鼠腫瘤模式，透過銻-188-微脂體藥物，進行人類頭頸癌治療效果探討，並且運用 MicroRNA Openarray 等技術，進一步研究其背後的分子機制，是否對於腫瘤治療有實質效益。

先前研究證實銻-188-微脂體藥物可透過 EPR 效應，使其專一地累積在植入人類 FaDu 頭頸癌的小鼠原位接植(orthotopically implantation)，且因細胞會表現報導基因，故可與分子影像偵測相互輔助，增進實驗結果之可信度。

總結來說，本計畫之實驗目的可歸納如下：

1. 建立人類頭頸癌腫瘤之動物模式

(1)銻-188-微脂體給藥後，核糖核酸(microRNA)之腫瘤基因表現

(2)建立基因表現資料庫

2. 進行致癌相關及腫瘤抑制相關之微核糖核酸及訊息核糖核酸之定量分析

(1)影響最巨大之致癌基因及腫瘤抑制基因

(2)系統性整理銻-188-微脂體核醫藥物影響之 Oncogene/Tumor suppressor miRNA

III. 結果與討論

本實驗室建立原位的頭頸癌模型，將帶有三合一報導基因(GFP, Luc, tk)的 FaDu 頭頸癌細胞，由口腔內

側沿著韌帶種入裸鼠的下頷部，待其長成腫瘤後，利用 PEG 修飾的銻-188-微脂體核醫藥物以尾靜脈注入動物體內，分為治療一次、治療二次，於治療第 0 與第 6 天給予裸鼠 80%MTD(640 μ Ci)銻-188-微脂體藥物處理，於不同時間點以非侵入式偵測光子訊號觀察腫瘤生長情形(圖一)。結果可發現，與控制組相比，不論是治療一次或二次都能顯著性的延緩腫瘤生長，給予二次劑量的組別又比一次劑量的組別治療效果更好，給予兩次的組別存活時間也最長(圖二)，在體重上也沒有低於 20%，顯示銻-188-微脂體不會造成嚴重副作用，並且能有效積聚於腫瘤部位，延緩腫瘤生長。

為了想了解銻-188-微脂體治療腫瘤背後的分子機制，我們透過 MicroRNA openarray 去檢測給予一次、二次劑量組別，MicroRNA 表現量的變化。本次陣列共檢視 758 個 MicroRNA(圖三)，設定 cutoff 值為 Fold change>5，共篩選出 17 個最顯著變化的 microRNA(圖三)，最有可能是銻-188-微脂體在分子機制上的調控路徑。接著，我們更進一步廣泛地搜尋文獻，想了解各個 MicroRNA 在細胞內扮演的角色，羅列出最有可能調控腫瘤生長的分子(圖五)，並且使用 IPA 線上資料庫系統分析其背後的調控機制，以期在未來能以調控這些分子，結合銻-188-微脂體達到抑制腫瘤的最終目的。

IV. 結論

本次計畫研究成果，除了延續原位頭頸癌小動物模式，對藥物的臨床前研究，可進一步探討腫瘤生長的微環境是否會影響銻-188-微脂體藥物對療效的影響，在腫瘤治療效果上，單劑與雙劑的銻-188-微脂體都能顯著的延緩腫瘤生長速度，且以雙劑效果更好，為了瞭解其背後的分子機制，我們共篩選出表現最顯著 17 種 MicroRNA，廣泛搜尋文獻後發現有 6 種 MicroRNA 是最有可能與腫瘤控制相關的分子，此外，我們也使用 IPA 去了解可能的調控路徑，未來將選用特定分子，結合銻-188-微脂體，達到更好的抑制腫瘤效果。

參考文獻

- [1] Chiang, C. H., et al. (2013). "Up-regulation of miR-182 by beta-catenin in breast cancer increases tumorigenicity and invasiveness by targeting the matrix metalloproteinase inhibitor RECK." *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 1830(4): 3067-3076.
- [2] Feng, L., et al. (2017). "miR-330-5p suppresses glioblastoma cell proliferation and invasiveness through targeting ITGA5." *Bioscience Reports* 37(3).
- [3] Husby, S., et al. (2015). "miR-18b overexpression identifies mantle cell lymphoma patients with poor outcome and improves the MIPI-B prognosticator." *Blood* 125(17): 2669-2677.
- [4] Liang, S., et al. (2011). "MicroRNA let-7f inhibits tumor invasion and metastasis by targeting MYH9 in human gastric cancer." *PloS One* 6(4): e18409.
- [5] Liu, H., et al. (2013). "Up-regulation of miR-182 expression in colorectal cancer tissues and its prognostic value." *International Journal of Colorectal Disease* 28(5): 697-703.
- [6] Su, C. M., et al. (2015). "miR-520h is crucial for DAPK2 regulation and breast cancer progression."

Oncogene 35: 1134.

[7] Wu, J. H., et al. (2016). "MiR-18b suppresses high-glucose-induced proliferation in HRECs by targeting IGF-1/IGF1R signaling pathways." *International Journal of Biochemistry and Cell Biology* 73: 41-52.

[8] Xiang, Y., et al. (2014). "MiR-152 and miR-185 co-contribute to ovarian cancer cells cisplatin sensitivity by targeting DNMT1 directly: a novel epigenetic therapy independent of decitabine." *Oncogene* 33(3): 378-386.

[9] Yao, Y., et al. (2015). "Knockdown of long non-coding RNA XIST exerts tumor-suppressive functions in human glioblastoma stem cells by up-regulating miR-152." *Cancer Letters* 359(1): 75-86.

[10] Trehoux, S., et al. (2015). "Micro-RNAs miR-29a and miR-330-5p function as tumor suppressors by targeting the MUC1 mucin in pancreatic cancer cells." *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 1853(10 Pt A): 2392-2403.

以大腸直腸癌肺轉移小鼠模式研究銻-188 微脂體調控細胞死亡與腫瘤微環境之機制

計畫編號：MOST 106-2623-E-195 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳裕仁

e-mail：chenmdphd@gmail.com

計畫參與人員：劉欣怡

執行單位：財團法人馬偕紀念醫院放射腫瘤科

摘要

奈米微脂體是一種能有效運送臨床藥物的載體，透過奈米微脂體在血液中停留期長以及留滯於腫瘤周邊血管的特性，奈米微脂體包覆治療藥物可增加藥物送達腫瘤處的特異性，大幅增加藥物的療效同時降低藥物造成之副作用。奈米微脂體包覆放射性核種(如 rhenium-188, Re188)，擁有臨床治療(貝他粒子)與影像觀察(加瑪射線)的雙重功能。本研究期望探討銻 188 微脂體在肺轉移大腸直腸癌老鼠模式中，合併臨床治療方式與免疫療法是否可提高肺轉移大腸直腸癌之毒殺效果。肺轉移小鼠模式是利用穩定表現冷光基因之大腸直腸癌細胞，經由尾靜脈注射方式，定期追蹤冷光表現量代表肺轉移腫瘤生長速度。小鼠存活率、生物安全性、腫瘤微環境與 PD-1 表現程度將紀錄以評估合併療法的可行性。

研究結果顯示，合併銻 188 微脂體與化療藥物 5-FU 無法提高對肺轉移大腸直腸癌的療效，肝毒性也較單一療法高。腫瘤微環境方面，銻 188 微脂體治療可增加血液中以及腫瘤處的巨噬細胞與嗜中性球，合併銻 188 微脂體與 5-FU 將加大此現象。進一步分析腫瘤微環境中 PD-1/PD-L1 表現量發現，銻 188 微脂體治療造成 CD4+ T 細胞和巨噬細胞上的 PD-1 表現量增加，此結果在 5-FU 單一治療組別中也觀察到。合併銻 188 微脂體、5-FU、IR 治療後，CD8+ T 細胞上的 PD-1 表現量顯著增加，未來我們將確認此三合一療法造成 CD8+ T 細胞增加是否能提高療效。值得注意的是銻 188 微脂體可增加 CD8+ T 細胞上的 PD-L1 表現，不論是單一治療或合併治療均出現此現象。合併銻 188 微脂體與 PD-1 或 PD-L1 抗體療法顯示，小鼠存活期有延長，其中銻 188 微脂體合併 PD-1 抗

體造成較高的肝毒性副作用。由於銻 188 微脂體可增加巨噬細胞量，我們利用巨噬細胞抑制劑合併銻 188 微脂體，觀察巨噬細胞對銻 188 微脂體分布及療效的影響。結果顯示抑制銻 188 微脂體所誘發之巨噬細胞可增加小鼠存活期，銻 188 微脂體在小鼠體內的分布結果顯示，銻 188 微脂體在脾、血液、肺(腫瘤處)的聚積量均較高，顯示銻 188 微脂體的清除率降低且較多銻 188 微脂體停留在腫瘤處。未來我們將針對銻 188-微脂體對巨噬細胞的影響、腫瘤微環境的平衡做更進一步探討。

關鍵詞：銻-188 微脂體、肺轉移、大腸直腸癌、腫瘤微環境

Abstract

Nanoliposomes have been used as effective carriers for drug delivery due to their long circulating character and the enhanced permeability and retention effect at tumor sites. In addition to therapeutic application, liposomes encapsulated with radionuclide (such as rhenium-188, Re188) possess both therapeutic (beta particle) and imaging (gamma ray) functions. To evaluate the therapeutic effect with combination therapeutic strategy of 188Re-liposome, we established colon cancer cells stably expressing luciferase gene to trace tumor growth in vivo and lung metastatic colon cancer mice model was generated by intravenous cell injection method. To evaluate the application value of combination therapy, cumulative survival, biological safeties, PD-1 signaling in tumor microenvironment were further analyzed.

Our data showed combination of Re188-liposome and 5-FU did not have better tumor control, and led to abnormal liver function.

From tumor microenvironment analysis, Re188-liposome treatment increased the level of macrophages and neutrophils, both in circulated and localized population. After combination with 5-FU, Re188-liposome-mediated macrophages and neutrophils induction was further enhanced. With respect to PD-1/PD-L1 signaling in tumor microenvironment, Re188-liposome exposure resulted in higher level of PD-1 in CD4+ T cells and macrophages, a phenomenon also observed after 5-FU treatment. After combination of Re188-liposome, 5-FU, and IR, the expression of PD-1 in CD8+ T cells was significantly increased. Next, we will evaluate whether high level of PD-1 in CD8+ T cells contribute to better therapeutic efficacy after combination of Re188-liposome, 5-FU and IR. It is worth to note that Re188-liposome treatment increased the expression of PD-L1 in CD8+ T cells either in monotherapy or combined therapies. Focused on PD-1/PD-L1 signaling, combination of Re188-liposome and anti-PD-1 or anti-PD-L1 antibody led to longer murine survival; however, combination of Re188-liposome and anti-PD-1 antibody showed higher liver toxicity. Due to macrophages were increased after Re188-liposome exposure, we depleted macrophages and then observed the role of macrophage in Re188-liposome. Surprisingly, suppression of Re188-liposome induced macrophages showed extended murine survival and bio-distribution data further demonstrated Re188-liposome stayed longer in blood, spleen and lung (tumor site). These data supported macrophage depletion led to the decrease of Re188-liposome clearance rate and more accumulation of Re188-liposome at tumor site contributed to better therapeutic effect. Next, we will investigate the role of Re188-liposome-induced macrophages in the balance of tumor microenvironment.

Keywords: Re188-liposome, lung metastasis, colon cancer, tumor microenvironment

I. 前言

Metastatic malignant tumor is one of the common causes of death in the worldwide. The current result is aimed to analyze tumor microenvironment, bio-distribution and efficacy of Re188-liposome alone or in combination with chemotherapy, radiotherapy, and immune therapy.

Understanding the role of Re188-liposome in the regulation of immune system is crucial for enriching our knowledge in the therapeutic strategy design, which provides insight of immune therapy-based regimen in malignant cancer. Analysis of the correlation between Re188-liposome and immune checkpoint blockage may provide a new therapeutic approach to treat metastatic colon cancers in a better way.

II. 主要內容

Analysis of tumor microenvironment in lung metastatic colorectal cancer mice model

Lung metastatic colorectal cancer mice model was successfully established by using tail vein method. Total murine lung was perfused with PBS and enzyme mixture (Figure 1A) and then incubated with enzyme mixture to generate single cell before flow cytometry analysis. Quantification of cell markers of immune cells showed that localized M1 and M2 macrophages were significantly increased at tumor site when colorectal cancer CT26-luc cells grown at murine lung, but circulated M1 and M2 macrophages had no change as shown in spleen sample (Figure 1B&C). In addition to macrophages, localized leukocytes were also increased at tumor site, but circulated leukocytes were decreased in lung metastatic colon cancer-bearing mice (Figure 1D).

Tumor microenvironment after combination of Re188-liposome and 5-FU in vivo

Understanding that colon cancer cells grow in murine lung can increase the proportion of M1/M2 macrophages and neutrophils at tumor site, we next investigated the effect of Re188-liposome on tumor microenvironment. In lung metastatic CT26-luc-bearing mice, Re188-liposome (400 μ Ci) and standard chemotherapeutic agent 5-FU (10 mg/kg, i.p. consecutive 5 days) were administered alone or combination. After three days of treatment, flow analysis showed that Re188-liposome treatment enhanced M1/M2 macrophages in murine spleen (circulation) and murine lung (local), while 5-FU treatment only elevated localized M1/M2 macrophages and no change in circulated M1/M2 macrophages (Figure 2A&B). Moreover, neutrophils were stimulated by Re188-liposome

treatment either circulated or localized population, but not effected by 5-FU exposure (Figure 2C). Combination of Re188-liposome and 5-FU further increased circulated and localized M1/M2 macrophages.

Multiple administrations of Re188-liposome and 5-FU in lung metastatic mice model

Whether the combination of Re188-liposome and 5-FU have better therapeutic efficacy for lung metastatic colon cancer-bearing mice, multiple administrated of Re188-liposome (400 μ Ci, i.v., on Day 0 and Day 7) and 5-FU (10 mg/kg, i.p. on Day 0-4 and Day 7-11) were performed. Tumor growth was examined each week by IVIS analysis (Figure 3A). At three weeks post-treatment, Re188-liposome only showed better tumor control and survival rate; however, combination of Re188-liposome and 5-FU had no synergistic effect in tumor control. Survival rate analysis also showed combination treatment had no better therapeutic efficacy than single treatment (Figure 3B). Lung metastatic mice in 5-FU (1/5 mice) and 5-FU combined with Re188-liposome groups (1/5 mice) still survived to 60 days post-treatment. Compared Re188-liposome and 5-FU only, average mice weight in Re188-liposome group was slightly higher than that in 5-FU group (Figure 4A). Combination treatment showed lower mice weight than other groups, indicating mice were in a weak state, and liver function in combination treatment group was abnormal (Figure 4C). White blood cell (WBC) counts indicated lung metastatic mice appeared higher level of WBC counts and treatment of Re188-liposome led to significant decrease of WBC (Figure 4B). No abnormal values of kidney function were observed in each group (Figure 4D).

PD-1/PD-L1 level in tumor microenvironment after combination treatment in vivo

Our previous data found phagocyte cells including macrophages and neutrophils were increased at tumor site in lung metastatic colon cancer-bearing mice. Next, we explored the expression of PD-1 and PD-L1 in immune cells. Lung metastatic CT26-luc-bearing mice were divided into 8 groups: control, liposome, irradiation (IR), 5-FU, Re188-liposome, IR and Re188-liposome, 5-FU and Re188-liposome,

5FU and IR and Re188-liposome. IVIS imaging showed the tumor growth degree in each group before flow cytometry analysis (Figure 5). At 4 days post-treatment, it was still too early to observe the therapeutic efficacy of each treatment and these luciferase signals provided the evidence of tumor growth of colon cancer cells metastasized in lung. Flow cytometry analysis revealed that when tumor cells metastasized and grew in lung, the level of T cells and macrophages were increased (Figure 6A&B). Interestingly, the level of neutrophils had no change, and this inconsistent result may be result from the tumor size difference (Figure 1D). For T cells population, Re188-liposome treatment only led to the increase of PD-1 in T cells, especially in CD4 T cells (data from CD8⁻ cells). Meanwhile, the level of PD-L1 in CD8⁺ T cells was significantly increased after Re188-liposome exposure (Figure 6A). Compared to Re188-liposome treatment, both IR and 5-FU treatment resulted in the decrease of PD-L1 in CD8⁺ T cells. Three combined treatments of IR, 5-FU, and Re188-liposome led to the increase of CD8⁺ T cells and the level of PD-1 in CD8⁺ T cells. For macrophages and neutrophils, Re188-liposome treatment gave rise to the increase of macrophages and neutrophils and the level of PD-1 in macrophages was also elevated (Figure 6B and 7B). Treatment of 5-FU also increased macrophages but no effect in neutrophils, while IR treatment increased neutrophils but not in macrophages, consistent to our previous observation (Figure 2C). The expression of PD-1 in macrophages was increased by 5-FU, but no change after IR treatment. Intriguing, the level of PD-1 in neutrophils were all decreased by all treatments, suggesting external stimuli led to the suppression of PD-1 signaling in neutrophils (Figure 7B). Three combined treatments of IR, 5-FU and Re188-liposome only influenced the elevation of macrophages induced by Re188-liposome (Figure 6B).

Therapeutic efficacy after combination of Re188-liposome and ICB treatment in vivo

Next, we explored the therapeutic effect with the combination treatment of Re188-liposome and ICB therapy in lung metastatic colon cancer xenografts. Lung metastatic colon cancer mice model was

generated and divided into 8 groups including control, liposome, Re188-liposome, anti-PD-1 antibody, anti-PD-L1 antibody, anti-PD-1 antibody and Re188-liposome, and anti-PD-L1 antibody and Re188-liposome. Lung metastasis of CT26-luc cells-bearing mice was monitored by IVIS analysis (Figure 8). At day 3 post-treatment, Re188-liposome slightly increased tumor growth in lung metastatic CT26-luc-bearing mice and half of mice in anti-PD-L1 antibody group showed higher luciferase signal than control. In combination groups, anti-PD-1 antibody combined with Re188-liposome presented the highest signal and anti-PD-L1 antibody combined with Re188-liposome relieved growth stimulation mediated by PD-L1 blocking.

Regarding to biological toxicities, mice weight, WBC, indicators of liver and kidney function were evaluated. Mice in either single or combination treatment of Re188-liposome appeared lower weight within 10 days post-treatment and mice in combination treatment group slightly gained their weight at later time points, a phenomenon which was not observed in other groups (Figure 9A). White blood cells count showed administration of PD-1 antibody slightly increased WBC count at 7 days post-treatment, while treatment of Re188-liposome in single or combined groups showed immune suppression induced by lung metastasis (Figure 9B). The level of GTP was abnormally increased after treatment of PD-1 antibody combined with Re188-liposome, mice in other groups showed normal liver function (Figure 9C). All treatment had no significant toxicities to kidney function (Figure 9D). With respect to survival rate, mice in control and liposome groups were died within 16 days, followed by mice in Re188-liposome group (Figure 9). Single treatment of PD-1 or PD-L1 antibody resulted in shorter lifespan (11 days). Combination of PD-1 or PD-L1 antibody with Re188-liposome extended murine lifespan to 25 days (Figure 10). Above data indicated the level of tumor growth at the beginning could not predict the end point survival in lung metastatic colon cancer mice model. Combination of Re188-liposome and ICB therapy provided a benefit in overall survival.

The role of macrophage in response to Re188-liposome in lung metastatic xenografts

As tumor associated macrophages (M1/M2) were significantly enhanced in response to Re188-liposome treatment, we would like to observe the role the macrophage in Re188-liposome-mediated tumor control by depletion of macrophages. Mice were intravenous injected with lipoosomal clodronate (50 mg/kg) two days before Re188-liposome exposure (400 μ Ci, twice, on Day 0 and Day 7) to suppress macrophages in advance. Flow cytometry analysis demonstrated that both circulated M1 and M2 macrophages were successfully depleted by liposomal clodronate, and localized M1/M2 macrophages were just slightly suppressed at tumor site on 6 days after injection of macrophage depletion agent (Figure 11A&B). Similarly, combination of liposomal clodronate and Re188-liposome dramatically decreased M1/M2 macrophages at murine spleen, but only minorly suppressed M1/M2 macrophages at murine lung. These data indicated depletion of macrophages by liposomal clodronate only suppressed macrophages in circulation; however, tissue-resident macrophages had limited effect. Besides, combined treatment of liposomal clodronate and Re188-liposome further enhanced neutrophils at tumor site (Figure 11C).

Therapeutic efficacy of Re188-liposome treatment after macrophage depletion

After twice administration of liposomal clodronate and Re188-liposome, tumor growth in lung metastatic CT26-bearing mice was monitored by IVIS system. At 3 weeks post-treatment, Re188-liposome monotherapy showed good reduction in tumor growth than other groups (Figure 12A). However, at 4 weeks post-treatment, only combination treatment of Re188-liposome and liposomal clodronate showed steady tumor suppression. Survival analysis revealed that mice treated with liposomal clodronate combined with Re188-liposome had the highest survival rate (2/5 mice) and survived to 60 days post-treatment (Figure 12B). Biological toxicity analysis showed combination of liposomal clodronate and Re188-liposome kept mice weight in a lowest level (Figure 13A), indicating mice were in a weak state. White blood cell count indicated CT26-luc cells grew at murine lung led to inflammation status in each group, and treatment

of Re188-liposome suppressed this inflammation effect (Figure 13B). Liver function data revealed that monotherapy and combined therapy decreased abnormal induction of ALT, while kidney function data also did not show any fluctuation in lung metastatic colorectal cancer mice model (Figure 13C&D). Cumulative survival analysis showed both single treatment of liposomal clodronate and Re188-liposome can extend murine survival and the best overall survival was observed in combination group (Figure 14). These data indicated suppression of local macrophages or elevation of neutrophils led to better survival for lung metastatic colorectal cancer in vivo.

Tumor microenvironment after combination of Re188-liposome and macrophage depletion

To examine comprehensive tumor microenvironment, we analyzed the expression of specific cell markers of immune cells by RT-PCR. Lung metastatic CT26-luc bearing mice were treated with Re188-liposome monotherapy or combined therapy with liposomal clodronate. Both murine spleen and lung tissues were collected and digested as single cell followed with red blood cells lysis before total RNA extraction. M1 macrophages were examined with the expression of IL12beta, CCR7, and iNOS, while M2 macrophages were presented with the expression of Arg1, YM1, and FIZZ1. Two markers for M1 macrophages were decreased (non detected for iNOS), and two makers for M2 macrophages were increased (Arg1 and FIZZ1) after Re188-liposome exposure (Figure 15). Interestingly, neutrophils was increased at spleen and at lung in normal mice in response to Re188-liposome, but decreased in lung metastatic colon cancer-bearing mice after Re188-liposome. Moreover, Re188-liposome treatment stimulated NKT cell population either in normal and lung metastatic mice. TNFalpha signaling was activated by Re188-liposome stress at tumor site, especially in normal mice group.

Bio-distribution of Re188-liposome after macrophage depletion in lung metastatic colon cancer mice model

Since therapeutic efficacy analysis demonstrated lung metastatic colon cancer-bearing mice survived longer after combination of Re188-liposome and macrophage

depletion, we are curious about the accumulation of Re188-liposome in vivo followed by the suppression of macrophages. At 1hr post-injection, the level of Re188 was higher in the blood, spleen, and urine after macrophage depletion (Figure 16A). At 24hr post-injection, Re188-liposome kept accumulating in the spleen, and reduced in liver, large intestine, and skin (Figure 16B) with reduced macrophages. At 48hr post-injection, macrophage suppression led to the increase of Re188-liposome in spleen, blood, brain, heart, lung, pancreas, kidney, testis, bone marrow and the decrease of Re188-liposome in liver (Figure 16C). It was worth to note that Re188-liposome significantly accumulated in murine lung after macrophage depletion, indicating better therapeutic efficiency of combination strategy as supported by the data from survival analysis.

III. 結論

1. Lung metastatic colon cancer mice model was established with high successful rate (over 90%) using CT26-luciferase cell line. After intravenous injection of CT26-luc cells, the optimal observation window is 10 days to 40 days.
2. Colon cancer cells metastasized and grew in lung led to the tumor microenvironment composed of increased macrophage, neutrophils, NK cells, NKT cells, and DC.
3. Re188-liposome treatment resulted in the tumor microenvironment consisted of higher level of M2 macrophage, neutrophils, and NKT cells in lung metastatic colon cancer xenografts.
4. Combination of Re188-liposome and 5-FU had no better effect in tumor control and survival in lung metastatic colon cancer mice.
5. PD-1 expression in CD8+ T cell and macrophages was elevated after Re188-liposome treatment in lung metastatic colon cancer mice.
6. Combination of Re188-liposome and ICB therapy (anti-PD-1 or anti-PD-L1 antibody) had better tumor control and longer survival in lung metastatic colon cancer mice model.
7. Combination of Re188-liposome and liposomal clodronate (macrophage depletion) led to better therapeutic efficacy and longer survival in lung metastatic mice model.
8. Bio-distribution data showed significant

accumulation of Re188-liposome at tumor site in lung metastatic CT26-luc-bearing mice, supporting the result of survival analysis after combination of Re188-liposome and macrophage depletion agent.

具體績效及貢獻

Our study revealed tumor microenvironment influence by Re188-liposome. In addition to immune cells induction (macrophages, neutrophil, NKT cells), Re188-liposome also increased PD-1 expression in T cells and macrophages. Blockade of PD-1/PDL-1 signaling indeed elevated therapeutic efficacy of Re188-liposome, and suppression of macrophages also significantly extended survival in lung metastatic colon cancer mice. However, mice were in weak condition after treatment of Re188-liposome and macrophage depletion drug. To achieve better therapeutic efficiency and lower side effect, macrophages modulation will be explored after Re188-liposome treatment.

參考文獻

1. Sautes-Fridman C, Cherfils-Vicini J, Damotte D, Fisson S, Fridman WH, Cremer I, Dieu-Nosjean MC: Tumor microenvironment is multifaceted. *Cancer Metastasis Rev* 2011, 30(1):13-25.
2. Rahir G, Moser M: Tumor microenvironment and lymphocyte infiltration. *Cancer Immunol Immunother* 2012, 61(6):751-759.
3. Mbeunkui F, Johann DJ, Jr.: Cancer and the tumor microenvironment: a review of an essential relationship. *Cancer Chemother Pharmacol* 2009, 63(4):571-582.
4. Gajewski TF, Schreiber H, Fu YX: Innate and adaptive immune cells in the tumor microenvironment. *Nat Immunol* 2013, 14(10):1014-1022.
5. Krneta T, Gillgrass A, Ashkar AA: The influence of macrophages and the tumor microenvironment on natural killer cells. *Curr Mol Med* 2013, 13(1):68-79.
6. Ruffell B, Affara NI, Coussens LM: Differential macrophage programming in the tumor microenvironment. *Trends Immunol* 2012, 33(3):119-126.
7. Ramanathan S, Jagannathan N: Tumor associated macrophage: a review on the phenotypes, traits and functions. *Iran J Cancer* 2014, 7(1):1-8.
8. Barros MH, Hauck F, Dreyer JH, Kempkes B, Niedobitek G: Macrophage polarisation: an immunohistochemical approach for identifying M1 and M2 macrophages. *PLoS One* 2013, 8(11):e80908.
9. Wang N, Liang H, Zen K: Molecular mechanisms that influence the macrophage m1-m2 polarization balance. *Front Immunol* 2014, 5:614.
10. Yuan A, Hsiao YJ, Chen HY, Chen HW, Ho CC, Chen YY, Liu YC, Hong TH, Yu SL, Chen JJ et al: Opposite Effects of M1 and M2 Macrophage Subtypes on Lung Cancer Progression. *Sci Rep* 2015, 5:14273.
11. Ghansah T: A novel strategy for modulation of MDSC to enhance cancer immunotherapy. *Oncoimmunology* 2012, 1(6):984-985.
12. Manjili MH: Phenotypic plasticity of MDSC in cancers. *Immunol Invest* 2012, 41(6-7):711-721.
13. Benoist C, Mathis D: Treg cells, life history, and diversity. *Cold Spring Harb Perspect Biol* 2012, 4(9):a007021.
14. Sawant DV, Vignali DA: Once a Treg, always a Treg? *Immunol Rev* 2014, 259(1):173-191.
15. Gagne P, Akalu A, Brooks PC: Challenges facing antiangiogenic therapy for cancer: impact of the tumor extracellular environment. *Expert Rev Anticancer Ther* 2004, 4(1):129-140.
16. Entschladen F, Palm D, Drell TL, Lang K, Zaenker KS: Connecting a tumor to the environment. *Current pharmaceutical design* 2007, 13(33):3440-3444.
17. Allavena P, Sica A, Solinas G, Porta C, Mantovani A: The inflammatory micro-environment in tumor progression: the role of tumor-associated macrophages. *Crit Rev Oncol Hematol* 2008, 66(1):1-9.
18. Gacche RN, Meshram RJ: Targeting tumor micro-environment for design and development of novel anti-angiogenic agents arresting tumor growth. *Prog Biophys Mol Biol* 2013, 113(2):333-354.
19. Takayama T, Miyanishi K, Hayashi T, Sato Y, Niitsu Y: Colorectal cancer: genetics of development and metastasis. *J Gastroenterol* 2006, 41(3):185-192.
20. Smith JJ, Deane NG, Dhawan P, Beauchamp RD: Regulation of metastasis in colorectal adenocarcinoma: a collision between

- development and tumor biology. *Surgery* 2008, 144(3):353-366.
21. Sugihara K, Uetake H: Therapeutic strategies for hepatic metastasis of colorectal cancer: overview. *J Hepatobiliary Pancreat Sci* 2012, 19(5):523-527.
 22. Oude Blenke E, Mastrobattista E, Schifflers RM: Strategies for triggered drug release from tumor targeted liposomes. *Expert Opin Drug Deliv* 2013.
 23. Kostarelos K, Emfietzoglou D: Tissue dosimetry of liposome-radionuclide complexes for internal radiotherapy: toward liposome-targeted therapeutic radiopharmaceuticals. *Anticancer research* 2000, 20(5A):3339-3345.
 24. Hafeli UO, Roberts WK, Meier DS, Ciezki JP, Pauer GJ, Lee EJ, Weinhaus MS: Dosimetry of a W-188/Re-188 beta line source for endovascular brachytherapy. *Med Phys* 2000, 27(4):668-675.
 25. Argyrou M, Valassi A, Andreou M, Lyra M: Rhenium-188 production in hospitals, by w-188/re-188 generator, for easy use in radionuclide therapy. *Int J Mol Imaging* 2013, 2013:290750.
 26. Moghimi SM, Hamad I: Liposome-mediated triggering of complement cascade. *J Liposome Res* 2008, 18(3):195-209.
 27. Fanciullino R, Ciccolini J: Liposome-encapsulated anticancer drugs: still waiting for the magic bullet? *Curr Med Chem* 2009, 16(33):4361-4371.
 28. Chang YJ, Chang CH, Chang TJ, Yu CY, Chen LC, Jan ML, Luo TY, Lee TW, Ting G: Biodistribution, pharmacokinetics and microSPECT/CT imaging of 188Re-bMEDA-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor animal model. *Anticancer Res* 2007, 27(4B):2217-2225.
 29. Chang CH, Liu SY, Chi CW, Yu HL, Chang TJ, Tsai TH, Lee TW, Chen YJ: External beam radiotherapy synergizes (1)(8)(8)Re-liposome against human esophageal cancer xenograft and modulates (1)(8)(8)Re-liposome pharmacokinetics. *Int J Nanomedicine* 2015, 10:3641-3649.

固態式 X 光影像感應器關鍵零組件之非臨床特性及品質檢測技術研究

Research on nonclinical characteristics and quality inspection technology for solid state x-ray imaging devices

計畫編號：106-2623-E-010-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳志成

e-mail：jcchen@ym.edu.tw

計畫參與人員：朱健豪、蔡羽威、梁凱傑

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

隨著 X 光影像感應器需求在市場上快速增加及其技術對於醫學影像所扮演的角色日漸重要，國際電工委員會制定了 IEC 62220-1 報告，明定調制轉換函數及量子偵測效率之量測、計算方法。然而在實作中發現若直接將多條預採樣邊緣擴散函數平均，會造成邊緣擴散函數較實際情況平坦，並使調制轉換函數值低估。

本實驗將比較 4 種不同之邊緣擴散函數計算方法，方法一為將所取得之多條邊緣擴散函數，僅取中央條計算調制轉換函數；方法二為將多條預採樣邊緣擴散函數進行平均，取得平均之邊緣擴散函數計算調制轉換函數；方法三為將多條邊緣擴散函數先行計算調制轉換函數，再將多條調制轉換函數平均；方法四則為新提出之方法，將取得之多條邊緣擴散函數皆位移後平均，再計算調制轉換函數。

本研究使用假體實驗，確認本論文自行撰寫之程式無誤並驗證四種方法於理想狀況下之結果；再透過實驗室自製的測試平台實際量測影像感應器。結果顯示，無論假體或實體實驗中，本研究所使用之方法四：將多條邊緣擴散函數先行位移後再平均之方法，能有效地消除邊緣平緩效應。但與法一及法二有差距，其在頻率小於 1.5 lp/mm 時，計算之差異不大，約 10 % 之差異，但大於 1.5 lp/mm 後差異逐漸顯現；且能消除因雜訊造成之結果，使得所計算出之調制轉換函數不須進行任何訊號處理即可擁有較平滑之曲線。

關鍵詞：影像感應器、影像品質、邊緣擴散函數、調制轉換函數、量子偵測效率

Abstract

As the market kept expanding, and the technology of the digital X-ray detector became more and more important, the International Electrotechnical Commission developed the IEC 62220-1 standard for the device to cope with the medical imaging report requirements. This report specified the calculation method of the modulation transfer function (MTF) and detective quantum efficiency (DQE). However, during the practical operation, we found that if the multiple pre-sampling edge spread function were averaged directly, the value of MTF would be underestimated.

In this study, we compared four different methods of calculating the edge spread function (ESF). For Method One, the ESF is obtained by taking only the central line. For Method Two, the MTF is obtained by many ESFs which were then calculated to obtain average ESF. For

Method Three, each MTF is obtained from corresponding ESF, and the MTFs are averaged directly. For Method Four, the novel method proposed in this study, the ESFs would be shifted before they were averaged. The MTFs are then obtained through calculations of the three different ESFs in Methods 1, 2, 4.

We used a phantom experiment to verify the correctness of the code and confirm the results of the four methods under ideal conditions. Then, we measured the detector through our homemade laboratory testing platform. The results showed that, Method Four effectively eliminated the edge smooth effect. The difference was not significant when the frequency was less than 1.5 lp/mm, however when it was greater than 1.5 lp/mm, the difference was larger. This finding suggests that Method Four can eliminate the results caused by noise without any signal processing and give the MTF a smoother result.

Keywords: Detector、Image Quality、Edge Spread Function、Modulation Transfer Function、Detective Quantum Efficiency

I. 前言

隨著 X 光影像感應器需求在市場上快速增加及其技術對於醫學影像所扮演的角色日漸重要，本計畫參考美國 FDA 針對固態式 X 光影像感應器之上市審查要求，針對非臨床評估項目之功能特性進行探討，並利用 IEC 62220-1.1 報告發展 X 光影像感應器之量子偵測效率 (Detective Quantum Efficiency; DQE) 及調制傳遞函數 (Modulation Transfer Function; MTF) 檢測之技術及檢測所需之分析軟體。

II. 主要內容

一、參照 IEC 62220-1.1 標準建立固態式 X 光影像感應器量子偵測效率檢測技術

目前針對固態式 X 光影像感應器之檢測，本實驗室已可由自製之軟體、假體以及實驗平台進行量測，並提供符合國際標準之報告。並於實驗室訓練相關人員熟悉固態式 X 光影像感應器量子偵測效率之檢測及美國 FDA 固態電子 X 光影像感應器之上市審查要求，以提供廠商固態式 X 光影像感應器諮詢之管道，提升產品品質跨越檢測障礙，加速產品開發週期，縮短產品申請上市時程以期有效提升國內 X 光產業之規模。



圖 1、實驗室自製量測平台

二、量子偵測效率量測 GUI 介面

本計畫依據國際電工委員會 IEC 62220-1.1 報告，利用 MATLAB 軟體撰寫圖形使用者介面以利一般人操作及分析，其分析計算利用影像完成 MTF 及 DQE 量測。而此 GUI 介面程式皆具原始碼，可隨不同之分析或學術研究需要進行程式的修改，以達成所需之目的。相較於目前市售之軟體較具彈性。

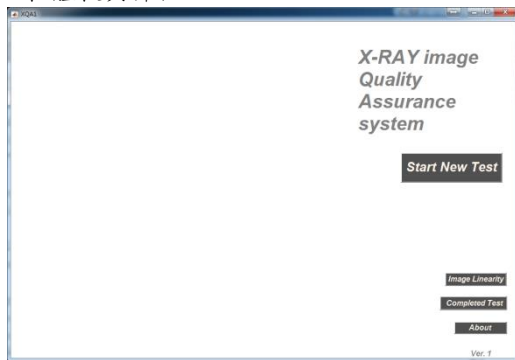


圖 2、量子偵測效率量測 GUI 介面

三、降低邊緣擴散函數平均而造成之調制轉換函數低估效應

本研究於利用國際電工委員會所制定之 IEC 62220-1.1 (2015) 報告進行量子偵測效率之分析，在實作過程中發現若直接將多條預採樣邊緣擴散函數平均，會造成平均之邊緣擴散函數較實際情況平坦，並在計算後造成調制轉換函數之低估。因此提出一方法於多條預採樣邊緣擴散函數平均前，先將多條邊緣擴散函數進行位移後，再將預採樣邊緣擴散函數平均，並計算調制轉換函數，以期降低調制轉換函數之低估。並比較多種不同之邊緣擴散函數計算方法，第一種方式為 Buhr, E. 提出之方法 [4]，將取得之多條預採樣邊緣擴散函數，僅取中央之預採樣邊緣擴散函數計算調制轉換函數；第二種方式為 IEC 62220-1.1 (2003) [2] 之方法，將取得之多條預採樣邊緣擴散函數計算取得多條調制轉換函數，再將多條調制轉換函數平均取得單一調制轉換函數；第三種方式為 IEC 62220-1.1 (2015) [3] 之方法，將取得之多條預採樣邊緣擴散函數，直接進行平均，取得平均之預採樣邊緣擴散函數遂計算調制轉換函數。第四種方法則為本研究提之方法，將取得之多條預採樣邊緣擴散函數，每條預採樣邊緣擴散函數皆移動一段距離後平均再取得其調制轉換函數。

本研究中的實驗將藉由引用之論文設計數位假體，利用論文中所提供之數學式模擬邊緣擴散函數，並進一

步模擬邊緣影像，以驗證撰寫程式碼之正確性及評估四種不同邊緣擴散函數計算調制轉換函數在理想狀態下之差異，最後利用實驗室自行開發之量測平台進行實際之量測。

III. 結果與討論

本計畫將數位假體實驗引用論文[4]，利用指數模擬邊緣擴散函數， x 為所在位置之座標，並依據實驗室之影像偵測器像素 0.150 mm，模擬 -9 mm 至 9 mm，共 121 點。式中之 r 為描述邊緣傾斜度之參數並採用論文之建議定為 6.6667。

$$ESF(x) = \begin{cases} 2 - e^{rx}, & x < 0 \\ e^{-rx}, & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

實驗使用邊緣影像，產生預採樣邊緣擴散函數，因此利用式(1)建立模擬之邊緣影像。模擬之邊緣角度為 3.8141° ，其預採樣條數為 15 條，共可做成 31 條之預採樣邊緣擴散函數，因此模擬出之影像大小為長 465 像素，高 121 像素之邊緣影像。

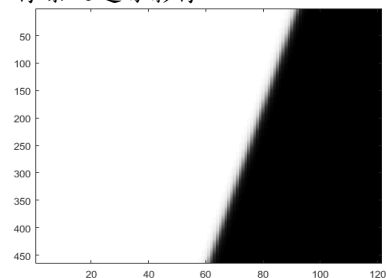


圖 3、模擬之邊緣影像結果

實體實驗依據 IEC 62220-1.1 步驟進行，依據 RQA 5 條件量測。測試幾何條件如下圖所示其 SID 為 169 公分，並利用準直儀控制照野之大小。在 X 光球管之窗口放置 21 mm 之鋁濾片，以達 RQA 5 條件。

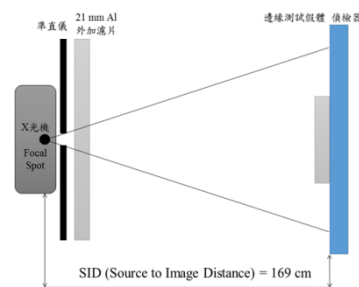


圖 4、本實驗實驗之幾何條件

本實驗利用實驗室自製平台進行測試，X 光球管為移動式 X 光球管(PORTA 100 HF)，其焦斑大小為 1.2 mm。所使用之影像偵測器為平板式搭配 CsI 晶體(Thales Pixium 2430EZ)，其可偵測範圍為 240 mm × 300 mm，像素大小為 148 μ m。調制轉換函數測試假體為按照 IEC 62220-1.1 規定之假體(iBA TX5)。並利用劑量計(RTI Cobia Flex R/F)量測影像偵測器表面之劑量、球管之管電流及半值層。

預採樣之調制轉換函數係利用下列步驟產生：(1) 取得邊緣影像，並輸入邊緣傾斜角度；(2) 產生預採樣之邊緣擴散函數，本實驗之不同邊緣擴散函數為在此步驟進行；(3) 將取得之邊緣擴散函數微分後取得線擴散函數；

(4)將線擴散函數進行傅立葉轉換即可取得其調制轉換函數，再將其頻率為0時之值定為1，以利後續之判讀。

擺放之邊緣角度介於為1.5°至7°之間，若角度過小其取樣條數過多，已無法使結果更加準確，反倒徒增計算之時間；若角度過大則無法有效提升其取樣率。影像偵測器之像素大小為p值，取得之邊緣角度為α值。圖5為解釋公式(2)中各項符號之意義

$$\Delta x = p * \tan \alpha$$

(2)

$$N = \text{round}\left(\frac{p}{\Delta x}\right) = \text{round}(1/\tan \alpha)$$

(3)

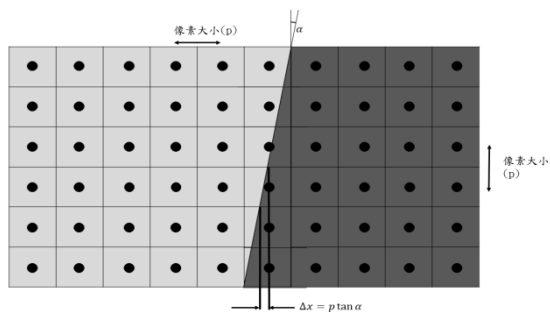


圖 5、公式(2)於影像上之代表意義

由假體實驗模擬出之邊緣影像，第一條預採樣邊緣擴散函數與最後一條之預採樣邊緣擴散函數其差異約450 像素，若不將預採樣邊緣擴散函數位移再平均，其所計算之數值必定有誤。

圖 6 即為四種方法之調制轉換函數比較，其中方法一為藍線、方法二為黃線、方法三為紅線、方法四為紫線，其中方法一、方法二、方法四所計算之數值並無所差異，因此其調制轉換函數值皆重疊。

表一為不同頻率下四種方法調制轉換函數數值之比較，可以發現在小數點後4位之情況下，方法一、方法二與方法四幾乎無任何之差異，而方法三其函數值下降非常快速，至0.5 lp/mm 時其調制轉換函數值即降至0.1 以下，已無法描述實際之情況。

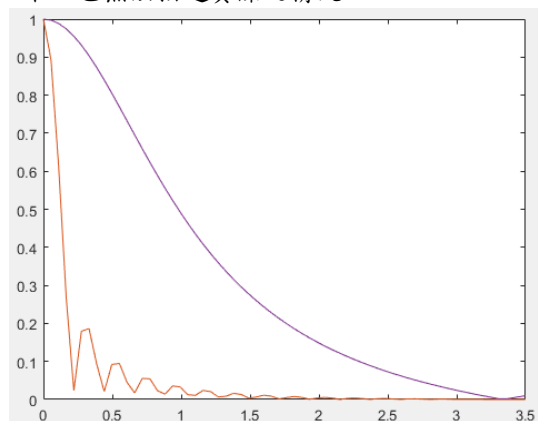


圖 6、數位假體實驗三種方法比較(方法一為藍線、方法二為黃線、方法三為紅線、方法四為紫線)

本實驗所提之方法四能於理想之無雜訊、且角度計算正確下，有效解決預採樣邊緣擴散函數位移而造成調制轉換函數低估之效應，使得所計算之調制轉換函數結果相當接近，以描述系統真實之品質。

表一、數位假體不同頻率下四方法之調制轉換函數值

	0.5 lp/mm	1.0 lp/mm	1.5 lp/mm	2.0 p/mm	2.5 lp/mm	3.0 lp/mm	3.5 Lp/mm
法一	0.8027	0.4887	0.2743	0.1485	0.0729	0.0241	0.0100
法二	0.8027	0.4887	0.2743	0.1485	0.0729	0.0241	0.0100
法三	0.0923	0.0305	0.0040	0.0043	0.0023	0.0003	0.0002
法四	0.8027	0.4887	0.2743	0.1485	0.0729	0.0241	0.0100

圖 7 為假體擺設 4.5°之調制轉換函數值之四方法調制轉換函數比較。表二為四方法計算出之數值。如同以上數位假體實驗之結果，方法三直接將多條預採樣邊緣函數平均所計算出之調制轉換函數，其衰減相當快速，在0.5 lp/mm 時就與方法一有相當大之差異，無法表現原始系統應有之品質結果。方法四雖能將調制轉換函數之數值提升但計算出之數值仍有些差距，在頻率小於1.5 lp/mm 時，其計算出之差異不大，約10 至15 %之差異，但大於1.5 lp/mm 後差異逐漸顯現，此部分在數位假體實驗並未有相同效應，應為實際角度量測誤差之結果。

實體實驗之角度量測為利用角度儀量測之結果，其可能與真實假體角度存在些微差異，而造成計算位移像素值計算不精確使得後續之位移差異幾個像素值平均而無法完全表現出系統應有之邊緣。此部分為數位假體實驗不會產生之效應，其模擬之角度相當精準因此能精確知道位移各條預採樣邊緣擴散函數。而實體實驗中，系統存在雜訊的關係造成僅使用單一條預採樣邊緣擴散函數所計算調制轉換函數結果較不平滑，易有不尋常之凹凸情況；而使用方法二及方法三與方法四為多條預採樣邊緣擴散函數平均計算之調制轉換，因其平均之關係減少因系統雜訊造成之影響，使其結果較為平滑。

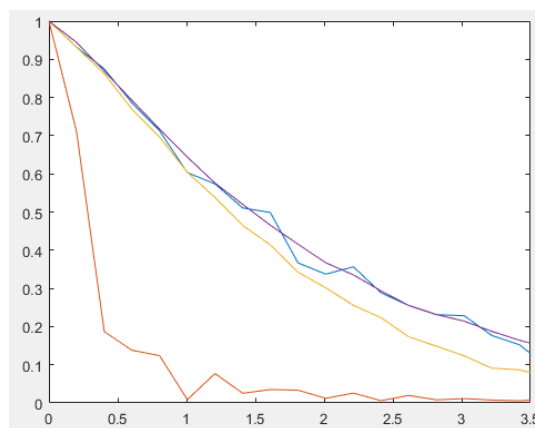


圖 7、實體實驗四種方法比較(方法一為藍線、方法二為紫線、方法三為紅線、方法四為黃線)

表二、實體實驗不同頻率下四方法之調制轉換函數值

	0.5 lp/mm	1.0 lp/mm	1.5 lp/mm	2.0 p/mm	2.5 lp/mm	3.0 lp/mm	3.5 lp/mm
法一	0.8317	0.6064	0.5052	0.3389	0.2742	0.2288	0.1295
法二	0.8320	0.6461	0.4952	0.3701	0.2772	0.2157	0.1567
法三	0.1631	0.0120	0.0298	0.0133	0.0118	0.0112	0.0074
法四	0.8171	0.6070	0.4417	0.3041	0.2018	0.1256	0.0793

而本實驗所測出之雜訊功率譜之兩軸向比較如下圖 8，其中藍線為水平方向之標準雜訊功率譜，橘線為垂直方向標準雜訊功率譜。兩軸向之雜訊功率譜差異不大，具有相同之趨勢。但在約 0.3 lp/mm 下，其標準雜訊功率譜之數值較大，可能原因為使用之 21 mm 鋁濾片製成時[9]，造成鋁顆粒大小不均，使影像上出現假影，而影響極低頻時之雜訊功率譜。

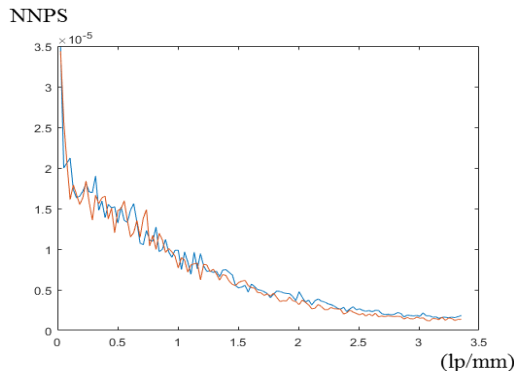


圖 8、兩軸向標準雜訊功率譜，藍線為水平方向之標準雜訊功率譜，橘線為垂直標準雜訊功率譜

而所計算量子偵測效率，其趨勢與調制轉換函數之結果相當類似，在 1 lp/mm 情況下其差異不大，但隨著頻率變大差異也隨之上升且其差異較調制轉換函數更大，因其計算為調制轉換函數之平方，進而使差異也變為平方倍。方法一之調制轉換函數 2.5 至 3.0 lp/mm 時出現些許突起，因此在量子偵測效率在此頻率下也有相同突起。而在 0.3 lp/mm 頻率以下之量子偵測效率，有不尋常之上升後下降，其原因為上述雜訊功率譜所造成之原因，雜訊功率譜在極低頻時數值較大，而造成計算出之量子偵測效率先行下降後上升。

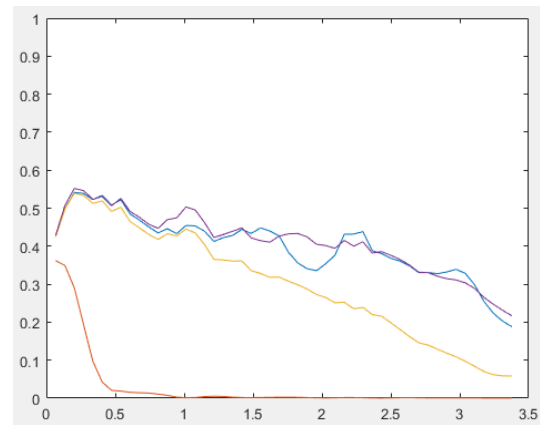


圖 9、數位假體 DQE 實驗四種方法比較(方法一為藍線、方法二為紫線、方法三為紅線、方法四為黃線)

表三、實體實驗不同頻率下四方法之量子偵測效率值

	0.5 lp/mm	1.0 lp/mm	1.5 lp/mm	2.0 p/mm	2.5 lp/mm	3.0 lp/mm
法一	0.5278	0.4436	0.4520	.03262	0.3865	0.3390
法二	0.5278	0.5001	0.4347	0.3855	0.3948	0.3063
法三	0.0205	0.0005	0.0016	0.0006	0.0007	0.0007
法四	0.5095	0.4421	0.3459	0.2588	0.2094	0.1038

IV. 結論

本研究之目的為利用 IEC 62220-1.1 之標準發展一套圖形使用者介面，建立自行研發之 DQE 檢測軟體。然而實做過程中卻發現調制轉換函數的問題。因此提出一方法降低將多條預採樣邊緣擴散函數直接平均造成之調制轉換函數低估效應，並利用國際電工委員會所用製定之 IEC 62220-1.1 (2015) 報告進行調制轉換函數及量子偵測效率之量測及計算，並比較四種不同之邊緣擴散函數計算方法，希望能透過預採樣邊緣擴散效應之位移而降低低估之效應，盡可能還原實際影像感應器之品質。

本研究使用數位假體實驗及實體實驗，先行利用數位假體實驗確認撰寫之程式無誤並驗證四種方法於理想狀況下之結果；再透過實體實驗，利用本實驗室自行開發之平台量測數位 X 光影像感應器，於實際檢視具有雜訊、角度之量測不精確…等問題下是否能有效解決低估之效應。

結果顯示，無論在數位假體或實體實驗中，本研究所使用之方法四：將多條預採樣邊緣擴散函數先行位移後再平均之方法，能有效地消除方法三直接平均多條預採樣邊緣擴散函數而造成之邊緣平緩效應。且與其他方法比較，也能消除因雜訊造成之結果，使得所計算出之調制轉換函數不須進行任何訊號處理即可擁有較平滑之曲線。

雖然方法一與方法二於實體實驗所計算出之調制轉換函數其數值較本實驗所計算之數值高，但方法一所計算出之數值因僅有單一條之結果較不平滑，且方法三之做法，國際電工委員會於 2015 年之版本表示，2003

年版之計算方法在有雜訊之情況下可能會使高頻的調制轉換函數產生錯誤，因此才在 IEC 62220-1.1 (2015) 中，更動調制轉換函數之計算方法，將多條預採樣邊緣擴散函數先行平均以計算調制轉換函數，以減少上述所提之高頻假影。

本研究透過所提出之方法，雖能解決多條預採樣邊緣擴散函數平均低估系統之效應，但與實體實驗中之方法一及方法二計算出之調制轉換函數仍有差異，此差異較大可能來自於角度之不精確造成，因此期望未來能夠使用自動計算邊緣角度之方法，直接計算影像上邊緣之角度使得位移之像素值更加精準。

參考文獻

- [1] FDA, Guidance for the Submission of 510(k)s for Solid State X-ray Imaging Devices. American Food and Drug Administration, 1999.
- [2] IEC, Medical electrical equipment –Characteristics of digital X-ray imaging devices –Part 1: Determination of the detective quantum efficiency. International Electrotechnical Commission, 2003.
- [3] IEC, Medical electrical equipment –Characteristics of digital X-ray imaging devices –Part 1: Determination of the detective quantum efficiency. International Electrotechnical Commission, 2015.
- [4] Buhr, E., S. Günther -Kohfahl, and U. Neitzel, Accuracy of a simple method for deriving the presampled modulation transfer function of a digital radiographic system from an edge image. Medical physics, 2003. 30(9): p. 2323-2331.
- [5] Samei, E., Performance of digital radiographic detectors: quantification and assessment methods. Advances in digital radiography: RSNA, 2003: p. 37-47.
- [6] Samei, E., M.J. Flynn, and D.A. Reimann, A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic systems using an edge test device. Medical physics, 1998. 25(1): p. 102-113.12
- [7] Dobbins, J.T., et al., DQE (f) of four generations of computed radiography acquisition devices. Medical physics, 1995. 22(10): p. 1581-1593.
- [8] Ranger, N.T., et al., Assessment of detective quantum efficiency: Intercomparison of a recently introduced international standard with prior methods 1. Radiology, 2007. 243(3): p. 785-795.
- [9] Ranger, N.T., et al., Measurement of the detective quantum efficiency in digital detectors consistent with the IEC 62220 - 1 standard: Practical considerations regarding the choice of filter material. Medical physics, 2005. 32(7): p. 2305-2311.

Tau 蛋白標靶造影劑氟-18-FEONM 之阿茲海默基因鼠正子造影研究

[F-18]FEONM tau targeting agent for PET study of transgenic mouse of Alzheimer's disease

計畫編號：MOST106-2623-E-010-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：劉仁賢

e-mail：rsliu@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：陳怡安、柯建志、曾雅真、邱顯智

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射醫學系

摘要

阿茲海默症(AD)的病理特徵包括細胞外所堆積的 β -類澱粉酶形成之癥塊以及神經細胞內有雙股的螺旋狀纖維或直形纖維纏繞形成之神經纖維糾結，其中 tau 病理學傳播的時間過程與個體患者的臨床和認知的變化有關。Tau-PET 造影與各種生物標誌用於診斷阿茲海默症具有相輔相成的效果，因此針對 tau 蛋白開發的 PET 造影劑，要能判斷疾病進程和有效區分不同的神經退化性疾病。本研究計畫將使用核研所開發的[F-18]FEONM 進一步探討對 tau 蛋白病變之選擇性與專一性，將可輔助進行更精確的 AD 診斷，並有助於以抑制 tau 蛋白為主的治療藥物的研發。在這項研究中，貼近大腦環境的三維擬 AD 病變之細胞培養模型已經顯示出不僅能促進神經分化，p-Tau 和 A β 表現也明顯增加。同時，我們追蹤 3xTg-AD 轉基因小鼠的 AD 疾病進展中期腦部的變化，使用[C-11]PiB 的 PET 影像針對澱粉樣蛋白積聚，和以[F-18]FDG PET 評估神經代謝。從 6 個月齡開始，[C-11]PiB 影像呈現較高訊號，並且伴隨著認知缺陷，[F-18]FDG 攝取則顯著降低。目前，我們建立了體外細胞平台和小鼠腦部影像平台，就臨床前研究而言，將可獲得相當具有價值的相關性分析資訊，未來能輔助進行更精確的 AD 診斷和治療。

關鍵詞：阿茲海默症，神經纖維糾結，tau 蛋白病變，正子發射斷層掃描，三維擬 AD 病變之細胞培養模型

Abstract

Accumulation of extracellular A β plaques and hyperphosphorylated tau protein or neurofibrillary tangles are major hall markers of AD and thought to induce neuronal alteration and death. The time course of tauopathy is especially related to the clinical and cognitive changes of individual patients. Tau-PET imaging and a variety of biomarkers provide complementary information in diagnosis of AD. Thus, most promising tau PET tracers will allow discriminating neurodegenerative diseases and monitoring disease progression effectively. [F-18]FEONM developed by Institute of Nuclear Energy Research (INER) will be used to further explore the selectivity and specificity towards tau deposits. Currently, there are many efforts on novel anti-tau therapies, so the development of tau-PET tracer becomes much more important to evaluate the therapeutic effects. In this study, 3D neural cell culture, which closely mimics brain environments, has

demonstrated obvious increase in neuronal maturation and A β and p-Tau expression following differentiation. Meanwhile, we have profiled AD progression of 3xTg-AD transgenic mice using [C-11]PiB PET imaging for amyloid accumulation and [F-18]FDG to access neural metabolism. Also, [C-11]PBB3 PET imaging has potential for differentiating AD and WT control. AD mice showed that higher levels of [C-11]PiB retention starting from 6 month of age and significant decrease in [F-18]FDG uptake over time with cognitive deficits. Both *in vivo* and *in vitro* platforms we established respectively will further apply for evaluating [F-18]FEONM and provide considerable relevance for preclinical studies.

Keywords: Alzheimer's disease, 3D neural cell culture model, neurofibrillary tangles, tauopathy, PET, [F-18]FDG, [C-11]PiB

I. 前言

Tau 蛋白為一種微管相關蛋白(microtubule-associated proteins, MAPs)，於神經元細胞表現量較高，除了維持神經元細胞軸突微管的穩定性及靈活性，也負責營養物質的傳輸。阿茲海默症(AD)患者的 tau 蛋白發生過度磷酸化(hyperphosphorylation)後，會與其他的 tau 蛋白纖維集結成雙股螺旋纖維(PHF)相互糾結，形成無法分解的團塊，進而癱瘓神經細胞內的營養傳輸，最後導致細胞死亡。因此，除細胞外所堆積的 β -類澱粉酶(β -amyloid, A β)形成之癥塊(plaque)外，tau 蛋白在 AD 形成及演變的過程中亦具有重要的影響。分析病患腦中 tau 病理學的區域分佈及其進展的順序分期(stage)已經於驗屍研究中得到廣泛的描述，從這些研究中首次表明，早期和相對較長的 tau 聚集表現於前臨床期(pre-clinical stage)，此時期無認知或臨床神經功能異常。儘管如此，tau 病理學傳播的時間過程，特別是與個體患者的臨床和認知的變化有關，但礙於驗屍研究的侷限性，在很大程度上仍然是推測的。因此，tau-PET 造影與上述的各種生物標誌(biomarker)檢測對於 AD 的診斷有相輔相成的效果。

目前在發展中的 tau 蛋白造影劑有[C-11]PBB3，[F-18]THK-523，[F-18]THK-5105，[F-18]THK-5117，[F-18]T808，[F-18]FDDNP 以及[F-18]T807，然而在結合 tau 蛋白的專一性和親合力以及同位素的半衰期等各有優缺點；雖然[C-11]PBB3 與 tau 結合的專一性高，但是由於 C-11 半衰期短，限制了臨床上的應用。好的 tau 蛋白造影劑要能判斷疾病進程和有效區分不同的神經退化性疾病，因此，本研究計畫將使用核研所開發的

[F-18]FEONM，針對上述 tau 蛋白造影劑的優缺點，進行了修飾與改良，將進一步探討對 tau 蛋白病變之選擇性與專一性，輔助進行更精確的 AD 診斷，並有助於未來以抑制 tau 蛋白為主的治療藥物的研發。

II. 主要內容

本計畫之目的在驗證[F-18]FEONM與tau結合的情形及偵測AD動物模型腦部tau病變(tauopathy)的效用。利用表現磷酸化tau的三維擬AD病變之細胞培養模型作為藥物測試平台，並以帶有3突變基因AD轉殖鼠模型收集長期追蹤腦部正子造影之資訊，包含偵測腦部神經代謝造影劑[F-18]FDG、 $A\beta$ -PET造影劑[C-11]PiB及tau-PET造影劑[C-11]PBB3，驗證[F-18]FEONM偵測於AD鼠腦tau病變的效用。

子目標一：[F-18]FEONM之製備最佳化。

子目標二：建立3D神經細胞培養平台作為藥物體外測試平台(in vitro platform)。

子目標三：建立阿茲海默症基因轉殖鼠腦部影像平台(in vivo platform)。

子目標四：驗證[F-18]FEONM 與 $A\beta$ 及 tau 結合的情形及偵測 AD 動物模型腦部 tau 病變(tauopathy)的效用。

III. 結果與討論

放射藥物[F-18]FEONM 之製備，合成條件已可達最佳化，然而還欠缺針對 tau 病變蛋白的專一性和結合力的探討。利用體外自體放射顯像術(In vitro autoradiography)於各種 tau 病變的神經退化性疾病之腦組織切片上加入[F-18]FEONM，以影像計讀儀獲得獲得自體放射顯像；同時以過量的具有螢光特性之 PBB5 (PBB3 analog)去完全競爭掉[F-18]FEONM 結合的部分，即體外結合之測定。此外，腦組織切片三重標記(triple labeling)法，以單株抗體個別在[F-18]FEONM 結合的自體放射顯像腦片上偵測 tau 蛋白和 β -amyloid，最後進行多重染色的分析比較，更能得知[F-18]FEONM 對 tau 病變蛋白的專一性和結合力是否為佳。之後，較高劑量的藥物的生產已討論由台北榮總製藥室協助，進行基因轉殖鼠 3xTg-AD 腦部 tau 蛋白的定期追蹤。

於已建立好的三維擬 AD 病變之細胞培養模型可觀察到 $A\beta$ 累積和 tau 病變，藉由化學組織切片染色的結果發現神經分化至 6 週時，阿茲海默症相關特定位點 (ser396 和 ser404)過度磷酸化的 tau 蛋白表現明顯上升，而免疫螢光染色更可以清楚看到沿著神經細胞突觸表現的情形。可應用在上述所提的組織切片三重標誌法，依分化時間越長則 tau 病變越明顯，[F-18]FEONM 探針的結合力及敏感度皆能獲得驗證。依所收集的正子造影資訊搭配認知功能測試所建立而成的小鼠腦部造影平台，包含[C-11]PiB 針對澱粉樣蛋白積聚，以[F-18]FDG 評估神經代謝以及對 tau 蛋白具高度專一性的[C-11]PBB3，首先觀察到的是當疾病進展中期時，這些探針都有能力區分出 3xTg-AD 基因轉殖鼠和同齡正常鼠。[C-11]PiB 於 3xTg-AD 鼠齡 5 個月時顯著上升，並持續至 10 個月。3xTg-AD 基因轉殖鼠和控制組在[F-18]FDG 造影中，兩者神經元的血糖代謝活性並沒有顯著差異。其中 B6 控制組腦部對[F-18]FDG 的攝取在

鼠齡 5 個月中沒有出現明顯差異；然而 3xTg-AD 小鼠相較於第 3 個月時，神經元之血糖代謝率隨月齡漸漸將低，且略低於 B6 控制組。3xTg-AD 基因轉殖鼠在鼠齡 5 個月時，就開始出現記憶與認知功能的缺失，且維持到第 12 個月。3xTg-AD 小鼠腦部對於[C-11]PBB3 的活性積聚明顯高於同齡控制組，依動態造影分析的結果，注射藥物 30 分鐘之後持續積聚。本研究建立一長時且動態的病程觀測報告，用來評估[F-18]FEONM 是否能獲得更佳的 Tau-PET 影像，利用影像分析軟體擷取出現在各腦區的影像特徵，並與根據腦網路組圖譜分離出的腦組織切片染色進行比較。

腦部病理切片觀察 tau 病變的區域是從 entorhinal 開始，依序為 hippocampus，anterior temporal cortex，inferior temporal，mid temporal，broca area，motor cortex 至 occipital area，相較於類澱粉蛋白酶的沈積區域，tau 病變的區域進展過程與患者的認知退化更具相關性，針對 tau 蛋白開發的 PET 造影劑，不僅輔助進行更精確的 AD 診斷，更能有助於推論治療時間點和治療策略。

IV. 結論

藉由體外細胞平台和小鼠腦部影像平台的建立，可為未來將[F-18]FEONM 推廣為臨床用藥，提供相當具有價值的相關性分析資訊，亦可提供我國研究AD早期診斷及抗tau蛋白之AD治療藥物研發團隊一個 PET 影像生物標記，加速研究的進展，達到早期診斷 AD，有效治療的目標。

參考文獻

1. Kim YH, Choi SH, D'Avanzo C, Hebisch M, Sliwinski C, Bylykbashi E, et al. A 3D human neural cell culture system for modeling Alzheimer's disease. *Nature protocols*. 2015;10(7):985-1006.
2. Sahara N, Shimojo M, Ono M, Takuwa H, Febo M, Higuchi M, et al. In Vivo Tau Imaging for a Diagnostic Platform of Tauopathy Using the rTg4510 Mouse Line. *Frontiers in neurology*. 2017;8:663.
3. Maruyama M, Shimada H, Suhara T, Shinotoh H, Ji B, Maeda J, et al. Imaging of tau pathology in a tauopathy mouse model and in Alzheimer patients compared to normal controls. *Neuron*. 2013;79(6):1094-108.
4. Ni R, Ji B, Ono M, Sahara N, Zhang MR, Aoki I, et al. Comparative in-vitro and in-vivo quantifications of pathological tau deposits and their association with neurodegeneration in tauopathy mouse models. *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine*. 2018.
5. Saint-Aubert L, Lemoine L, Chiotis K, Leuzy A, Rodriguez-Vieitez E, Nordberg A. Tau PET imaging: present and future directions. *Molecular neurodegeneration*. 2017;12(1):19.
6. Chiotis K, Saint-Aubert L, Rodriguez-Vieitez E, Leuzy A, Almkvist O, Savitcheva I, et al. Longitudinal changes of tau PET imaging in relation to hypometabolism in prodromal and Alzheimer's disease dementia. *Molecular psychiatry*. 2017.

發展第2型組蛋白去乙酰化酶抑制劑 F-18-HDAC2i 正子造影劑與其在阿茲海默症細胞及動物模式之研究

HDAC2 Targeting PET Imaging Agent F-18-HDAC2i for Study of Cell and Mouse Model of Alzheimer's Disease

計畫編號：MOST 106-2623-E-010-001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：柯建志

e-mail：s2289.tw@yahoo.com.tw

計畫參與人員：劉仁賢，李銘忻，陳傳霖，陳怡安，邱顯智

執行單位：國立陽明大學生醫影像研究中心

摘要

阿茲海默氏病(Alzheimer's disease; 簡稱 AD) 是一種神經退化性疾病，佔失智症七成。目前 AD 確切的診斷乃死後觀察腦組織是否有乙型類澱粉蛋白(A β)斑塊沉積。從病理學的觀點來看，AD 致病原因可能是腦部在大腦細胞外 A β 斑塊異常沉積以及細胞內的 tau 蛋白及神經纖維纏結所造成。阿茲海默氏症的影像診斷以正子造影搭配 ^{11}C -PiB 及 ^{18}F -AV45 來偵測 A β 沉積。近年來研究發現在阿茲海默症等神經退化性疾病的小鼠模型，組蛋白乙酰化明顯降低，相對地組蛋白去乙酰化酶(HDAC)表現量較高，研究更進一步指出主要是由 HDAC2 調控神經迴路和突觸形成，負向調控學習和記憶。若能偵測並調控 HDAC2 在 AD 病患腦中的活性，不失為一極有潛力診斷與治療之利器。具苯甲醯胺(benzamide)結構的 HDAC 抑制劑對第一類 HDAC 有特異性，基於此，本計畫與核研所所開發之 HDAC2 抑制劑之造影劑： ^{18}F -HDAC2i-INER1577 來測試此藥物對於 HDAC2 的結合效果，進出 BBB 之能力，比對不同時期腦切片中 HDAC2 的表現量後評估此藥物在正子造影的專一性及準確性。本實驗室並搭配 ^{18}F -FDG 及 ^{11}C -PiB 的正子造影，建立一完整小鼠的 AD 疾病發展過程紀錄，詳細呈現在不同時間 AD 鼠腦內 HDAC2 活性變化，葡萄糖代謝情形，類澱粉蛋白沉積交互比對，提供 AD 疾病進程中的詳細資訊。本研究在本期目前已建立完備細胞與動物的阿茲海默氏病模式以供日後造影劑合成後的測試應用。細胞模式方面乃建立可異常表現類澱粉蛋白酶及 Tau 蛋白之神經纖維母細胞瘤的 3D 模型平台，更易於進行藥物測試。在動物方面，本研究採用 Jackson Lab 之 3 $\times$ Tg AD, JAX-004807 品系之 AD 鼠進行實驗，此 AD 鼠在行為上約莫六個月開始可觀察到病情的變化，行為 NOR 在第五個月開始可觀察到行為差異，腦部葡萄糖代謝也開始降低，腦內 ^{11}C -PiB 積聚也開始增高，顯示此模型應用於本研究中的可行性。在藥物 ^{18}F -Fluoroethyl-INER1577 方面，由於化學特性的不穩定，使其在影像上的結果將產生許多不確定因子，故目前尚在努力改善合成步驟，以及檢討所設計之結構。關鍵詞：最多選擇 6 個詞以內。

Abstract

Alzheimer's disease (AD) is a chronic neurodegenerative disease that usually starts slowly and gets worse over time.

It is the cause of 60% to 70% of cases of dementia. AD can be definitely diagnosed only after death, by linking clinical measures with an examination of brain tissue in an autopsy. The cause of AD may be related the accumulation of extracellular amyloid plaques and intraneuronal neurofibrillary tangles which are built by amyloid- β (A β) peptides and phosphorylated tau protein, respectively. PET imaging using ^{11}C -PiB and ^{18}F -AV45 is the main imaging tool for the diagnosis of AD. These two agents are used to detect the accumulation of A β plaques. Recent studies showed decreased histone acetylation and increased expression of histone deacetylases (HDACs) in mouse model of neurodegenerative diseases including AD. HDAC2 reportedly negatively regulates memory formation and synaptic plasticity. Furthermore, treatment with HDAC inhibitors such as sodium butyrate or SAHA can effectively reverse the cognition impairment. Although ^{18}F -FAHA, a derivative of SAHA, is synthesized as a PET imaging agent for the detection of HDAC activity, it is not specifically binding to HDAC2. HDAC inhibitor with benzamide structure can specifically binds to class I HDACs including HDAC2. To detect HDAC2 activity using PET imaging, our lab collaborate with Institute of Nuclear Energy Research (INER), and develop a PET imaging agent based on the MS-275, a HDAC inhibitor with benzamide structure. This agent, namely ^{18}F -Fluoroethyl-INER1577, will be tested for the ability of HDAC2 activity inhibition, cell toxicity, ability of BBB penetration, and the performance of AD mouse imaging. Also, ^{18}F -Fluoroethyl-INER1577 imaging will be compared with HDAC2 expression in mouse brain as detected by IHC, and also the PET images of ^{18}F -FDG and ^{11}C -PiB. These information will establish the complete record of change of HDAC2 activity, glucose metabolism and A β accumulation following the progression of AD.

Keywords: Use maximum 6 terms.

I. 前言

目前在發展以影像診斷阿茲海默氏症的工具中，以正子斷層造影 (PET, Positron emission tomography) 搭配 ^{11}C -PiB (Pittsburgh Compound B) 及 ^{18}F -AV45 (Florbetapir) 為主流，其機制為針對乙型類澱粉蛋白沉積進行專一性的結合，於是可利用影像定量乙型類澱粉蛋白的沉積程度，輔助診斷阿茲海默氏症病患的疾病進程。而針對 HDAC 活性的造影，目前研究最廣泛的藥物為

SAHA 衍生物 ^{18}F -FAHA (^{18}F -6-(fluoroacetamido)-1-hexanoic anilide)，在神經細胞內 ^{18}F -FAHA 會被第 IIa 類 HDAC (HDAC 4, 5, 7 及 9) 所切割，形成 ^{18}F -FACE (^{18}F -fluoroacetate)，再被代謝成 ^{18}F -fluorocitrate。在細胞內的 ^{18}F -FACE 會與 aconitase 結合而降低排出細胞的速度，使其可當作偵測細胞內第 IIa 類 HDAC 活性之造影劑。除了 ^{18}F -FAHA, ^{18}F -SAHA 以及 ^{64}Cu -CUDC-101 是另兩種可偵測 HDAC 活性之正子造影劑，雖然 ^{18}F -SAHA 結構上最接近臨床上使用之 SAHA，但由於其對血腦障壁穿透性不佳，使其利用在偵測腦部 HDAC 活性的用途大為侷限， ^{64}Cu -CUDC-101 可專一地偵測 HDAC 的活性，加上 ^{64}Cu 同位素的優點，使得此造影劑未來應用在阿茲海默症的偵測極具潛力。雖然 ^{18}F -FAHA 以及 ^{64}Cu -CUDC-101 對 HDAC 活性的偵測有一定優勢，但對 HDAC2 的活性造影卻並不專一，有鑑於 HDAC2 在近年來的研究指出是阿茲海默症極為重要的調控者，能夠偵測以及控制 HDAC2 的活性在發展阿茲海默治療及診斷成為目前刻不容緩之課題。具苯甲醯胺 (benzamide) 結構的 HDACi 對第一類 HDAC 具有特異性結合的並抑制其活性的能力，其中 MS-275 更被證實可抑制阿茲海默模式小鼠 (APP/PS1) 的神經發炎現象，以及降低 $\text{A}\beta$ 的形成，基於此，本計畫將測試核研所李銘忻主持人所開發一以 benzamide 為骨架之 HDAC2 抑制劑之正子造影劑，期能精準以影像方式量測腦內 HDAC2 活性，在阿茲海默疾病上提供準確診斷及提供相關資訊作為 HDAC2 抑制治療的參考。

II. 主要內容

本計畫與核研所李銘忻主持人合作，以及本身由劉仁賢主任所領導的分子暨基因影像實驗室，目標設定在開發並驗證以一 benzamide 為骨架之 HDAC2 抑制劑之造影劑： ^{18}F -Fluoroethyl-INER1577，並針對此藥劑進行一連串相關測試，驗證其對 HDAC2 結合，抑制活性的能力，量測對 BBB 的通透性，以及利用 AD 小鼠進行動物腦部造影，比對 AD 相關影像如 $\text{A}\beta$ 之 ^{11}C -PiB 造影，腦代謝 ^{18}F -FDG 造影，建立阿茲海默疾病進程的 HDAC2 活性資料庫，交叉比對 $\text{A}\beta$ 沉積，腦代謝以及神經發炎資訊。研究目標如下：1. Fluoroethyl-INER1577 對 HDAC2 結合與活性抑制能力測試 2. 以三維神經細胞培養平台測試 INER1577 對細胞產生類澱粉蛋白沉積之抑制 3. 轉殖基因 AD 疾病小鼠之正子造影

III. 結果與討論

本研究在本期目前已建立完備細胞與動物的阿茲海默疾病模式以供日後造影劑合成後的測試應用。細胞模式方面乃建立可異常表現類澱粉蛋白酶及 Tau 蛋白之神經纖維母細胞瘤的 3D 模型平台，更易於進行藥物測試。在動物方面，本研究採用 Jackson Lab 之 3xTg AD, JAX-004807 品系之 AD 鼠進行實驗，此 AD 鼠在行為上約莫六個月開始可觀察到病情的變化，行為 NOR 在第五個月開始可觀察到行為差異，腦部葡萄糖代謝也開始降低，腦內 ^{11}C -PiB 積聚也開始增高，顯示此模型應用於本研究中的可行性。在藥物 ^{18}F -Fluoroethyl-INER1577 方面，由於化學特性的不穩定，使其在影像上的結果將產生許多不確定因子，故目前尚在努力改善合成步驟，

以及檢討所設計之結構。

IV. 結論

此年度計畫研究成果，除了建立阿茲海默症細胞與動物模式，也初步驗證了此模式的可靠性，在阿茲海默症正子造影研究領域，提供一準確之細胞動物材料。HDAC 之異常表現在阿茲海默症中益顯重要，其活性除了可當診斷工具之外，其參與致病機轉的角色也是日後發展藥物之可能標的，此課題值得持續鑽研，期許早日開發出有效診斷甚至治療之藥物。

參考文獻

- [1] Hendricks, J. A. et al. In vivo PET imaging of histone deacetylases by 18F-suberoylanilide hydroxamic acid (18F-SAHA). *J Med Chem* 54, 5576-5582 (2011).
- [2] Meng, Q., Li, F., Jiang, S. & Li, Z. Novel (64)Cu-Labeled CUDC-101 for in Vivo PET Imaging of Histone Deacetylases. *ACS Med Chem Lett* 4, 858-862 (2013).
- [3] Kepe, V. et al. Amyloid-beta positron emission tomography imaging probes: a critical review. *J Alzheimers Dis* 36, 613-631 (2013).
- [4] Zhang, Z. Y. & Schluesener, H. J. Oral administration of histone deacetylase inhibitor MS-275 ameliorates neuroinflammation and cerebral amyloidosis and improves behavior in a mouse model. *J Neuropathol Exp Neurol* 72, 178-185 (2013).
- [5] Simonini, M. V. et al. The benzamide MS-275 is a potent, long-lasting brain region-selective inhibitor of histone deacetylases. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 1587-1592 (2006).
- [6] Hooker, J. M. et al. Histone Deacetylase Inhibitor MS-275 Exhibits Poor Brain Penetration: Pharmacokinetic Studies of [11C]MS-275 using Positron Emission Tomography. *ACS Chemical Neuroscience* 1, 65-73 (2010).
- [7] Sung, Y. M. et al. Mercaptoacetamide-based class II HDAC inhibitor lowers Abeta levels and improves learning and memory in a mouse model of Alzheimer's disease. *Exp Neurol* 239, 192-201 (2013).
- [8] Alzheimer's, A. 2015 Alzheimer's disease facts and figures. *Alzheimers Dement* 11, 332-384 (2015).

氟-18 FEONM 之合成與評估-TAU 蛋白新型造影劑之研究

計畫編號：MOST 106-2623-E-016-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：鄭澄意

e-mail：chengcy60@gmail.com

計畫參與人員：周大凱、趙韻婷

執行單位：國防醫學院 核子醫學科

摘要

微管相關蛋白質-Tau 蛋白質，其主要功能與軸突微管之穩定性相關，當其過度磷酸化及異常堆積於腦中神經細胞，會產生如成對螺旋形細絲 (PHF)與神經纖維化糾結 (NFTs) 等異常蛋白質結構，此結構常見於多種神經退化疾病患者腦部，如阿茲海默症。此類神經退化性疾病初期並無明顯之臨床症狀，難以在疾病初期進行診斷，然若以非侵入性之正子造影輔以適合之放射性示蹤劑，或將可提供早期診斷之重要依據。[18F]FEONM 為 [18F]FDDNP 經結構改良後衍生之新型正子藥物，輔以正子造影技術，偵測腦中 Tau 蛋白之變化。本實驗開發自動合成 F-18 FEONM 之自動化製成，並以 RP-HPLC 純化分離產物，其放射性化學物質純度高於 90%，比活度大於 3090 ± 995 Ci/mmol，而後我們發現側腦室注射鏈佐黴素 (STZ)誘發形成之阿茲海默症動物模式注射 [18F]FEONM 後，其腦中 [18F]FEONM 於海馬迴之攝取量明顯高於正常大鼠，免疫組織化學染色中亦顯示相同結果，在 STZ 誘發形成之阿茲海默症動物模式之海馬迴內顯示高量的磷酸化之 Tau 蛋白，接下來我們將利用基因轉殖鼠 (P301S) 進行驗證，觀察其腦中 [18F]FEONM 攝取情形，並同時輔以免疫組織化學染色驗證造影結果。並以此成果評估全新正子製劑 [18F]FEONM 偵測異常 tau 蛋白質堆積之效度及靈敏度，以期能成為未來臨床早期診斷之依據。

關鍵字：Tau 蛋白質；阿茲海默症；正子造影。

Abstract

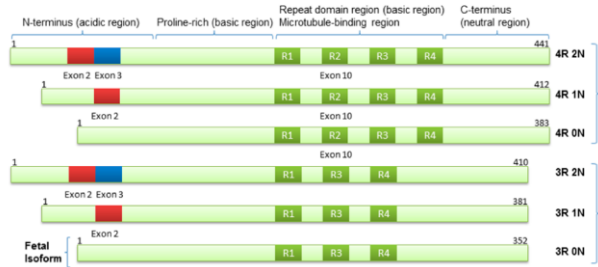
Hyperphosphorylation and abnormal aggregation of tau protein, a microtubule-associated protein essential to neuronal stability and functioning, is a major contributing factor in various neurodegenerative diseases such as Alzheimer's disease, labelled as tauopathies. Aggregation of hyperphosphorylated tau into paired helical filaments (PHFs), subsequently, into neurofibrillary tangles (NFTs) is a progressively process, no obvious clinical symptom in the early onset of neurodegenerative diseases and is difficult to diagnosis. Positron emission tomography (PET) provide non-invasive technique to detect small molecules, which may offer important evidence for early diagnosis of different tauopathies. F-18 FEONM, an analogue of F-18 FDDNP with structural modification, expected to improve lipophilicity and specificity using PET to detect abnormal tau aggregation in brain. In this study, we developed automated synthesis process of F-18 FEONM using commercialized automated synthesizer, also validate its applicability as tau protein imaging agent in a

streptozotocin intra-cerebral ventricular (stz-icv)-induced AD-like rat model using animal micro positron tomography (PET). STZ-icv induced AD-like rat model were generated by bilateral injection of streptozotocin into lateral ventricles twice within 48 hours using Sprague-Dawley rats. Micro-PET imaging were performed for 60 minutes dynamic scan to analyze the optimal imaging time. Images were analyzed by drawing volumes of interest for cerebellum, midbrain, hypothalamus, thalamus, frontal cortex, hippocampus and striatum manually with use of magnetic resonance images and express as standard uptake value (SUV). RP-HPLC were used to purify the product in order to separate product and its tosyl-precursor. Radiochemical yield (EOS) of 1 was $3.03 \pm 0.45\%$ (n=5) with radiochemical purity of > 90%, the specific activity was above 3090 ± 995 Ci/mmol. Dynamic micro-PET imaging and SUV derived from PET of [18F]FEONM show rapid uptake and clearance in 25 minutes after tracer injection in both normal and stz-icv induced AD-like rats. Higher uptake of tracer in hippocampus was shown in stz-icv rats compared with normal rats. Immunohistochemistry stain also demonstrate accumulation of abnormal phosphorylated tau protein Ser396 in hippocampus area. [18F]FEONM maybe an potent PET tracer for detecting abnormal phosphorylated tau protein in brain, further comparisons with different tau protein tracers are needed to evaluate its potency.

Keywords: Tau protein; F-18 FEONM; Positron emission tomography (PET); Alzheimer's disease.

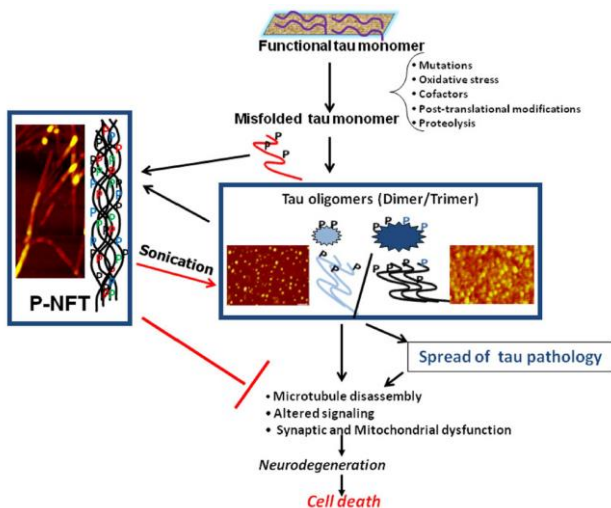
I. 前言

Tau 蛋白質為一種與微管相關的蛋白質 (microtubule-associated protein)，主要分布位置神經軸突端，tau 蛋白質之主要功能為與微管蛋白 (tubulin) 結合以維持軸突微管之穩定性，並且控制微管的聚合作用，對於維持細胞形狀、軸突營養成分之運輸及神經傳導之機制均有相關 (Manuela A. et al., 2015)。在人腦中，已被辨識出共有六種不同亞型之 tau 蛋白質，是否具有外顯子 exon 2、exon 3 以及 exon 10，以及具有不同之微管結合區域 (microtubule binding domain)，使 tau 蛋白質分為具有四個或三個結合區域之 4R type 或 3R type；其中又再可各細分為僅具有 exon 2，具有 exon 2 與 exon 3 以及均不具有 exon 2 或 exon 3 之三種亞型，分別為 4R1N、4R2N 與 4R0N 及 3R1N、3R2N 與 3R0N (圖一)。



圖一、六種不同亞型之 tau 蛋白質(Manuela A et al., 2015)

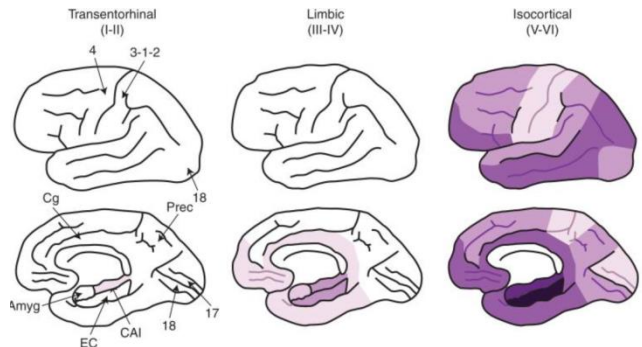
一般情況下，tau 蛋白質為一未摺疊且尚缺乏確認之立體 3D 結構，其磷酸化與去磷酸化之調控處於平衡狀態，然而若因基因變異、氧化壓力刺激、轉譯後修飾或蛋白水解等影響，導致 tau 蛋白質被過度磷酸化，則會使其結構產生改變，形成錯誤摺疊之蛋白質單體，進而形成二聚體與三聚體，失去穩定微管與神經訊號傳遞之功能，最終將形成如 paired helical filament (PHF)與 neurofibrillary tangles (NFTs)等異常蛋白質糾結結構，導致神經細胞死亡而造成神經退化疾病之產生(圖二)(Naruhiko S. et al., 2014)。



圖二、tau 蛋白質產生變異糾結結構之示意圖(Naruhiko S. et al., 2014)

阿茲海默症 (Alzheimer' s disease)、帕金森氏症 (Parkinson' s disease)、路易士體癡呆症 (Lewybody dementia)、額顳葉失智症(Frontotemporal dementia)、皮質基底核退化症 (Corticobasal degeneration) 等均為常見的神經退化疾病，文獻研究指出，許多罹患神經退化疾病病患腦部均出現異常的 tau 蛋白質沉澱現象，因此

這些疾病可歸類為 tauopathies (Melanie D. et al., 2016)。其中，阿茲海默症為最常見之神經退化疾病之一，其病患腦部神經病理特徵主要為 neurofibrillary tangles (NFTs)與乙型類澱粉斑塊(beta-amyloid plaque)之沉澱，這些異常蛋白質會誘發活化腦中微膠質細胞，星型膠質細胞等，進而引發神經細胞損傷及死亡，其中 tau 蛋白在腦部沉澱分布的位置及沉澱量之多寡已被證實與某些疾病之臨床症狀的發生及嚴重程度具有相關聯性 (Melanie D. et al., 2016)。文獻研究指出，異常 tau 蛋白質之沉澱為一漸進式之過程，首先沉澱於海馬迴 (hippocampus)，並逐漸擴展至主要掌管運動、感覺與視覺之皮層，進而引發各類臨床症狀(圖三) (Alberto S.P. et al., 2011)。

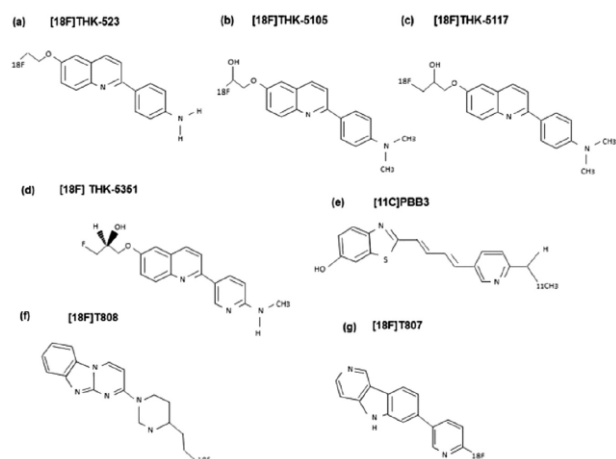


圖三、tau 蛋白質產生堆積進程之示意圖 (Alberto S.P. et al., 2011)

目前臨床對於阿茲海默症之診斷，常透過詢問病史、日常生活作息自理情況或行為之改變，並輔以記憶、解決問題能力測試、注意力測試與語言能力測試等行為測試進行判定，輔以電腦斷層 (CT) 或磁振造影 (MRI) 等解剖性醫學影像觀察腦部結構之完整性，然而卻缺乏直接之醫學影像證據診斷是否具有此類異常 tau 蛋白質之堆積或神經功能是否異常之功能性造影，且經研究發現，此類 tau 蛋白質之變異產生與堆積，遠早於臨床症狀之產生，換言之，若能及早偵測發現此類異常蛋白質之產生及分布位置，當可在臨床症狀尚未出現前，及早施行治療策略之擬訂與執行 (Kang J.H. et al., 2015)。近年來許多研究致力於開發針對異常 tau 蛋白質具良好選擇性與高度親和力之正子造影藥物，搭配正子斷層造影儀器 (Positron Emission Tomography)，期許能於活體偵測腦部異常 tau 蛋白質沉澱與分佈位置之資訊，藉以提供臨床早期診斷神經退化疾病有力的輔助診斷依據，同時亦期望能協助偵測神經退化疾病之發展之進程、做為開發治療藥物或治療策略之療效評估等 (Ryuichi H. et al., 2016)。

由於 tau 蛋白質位於神經細胞內且結構複雜，並具有多種異構體及轉譯後修飾分子成份，同時 tau 蛋白與類澱粉斑塊均具有類似之 beta-sheet 型態結構，因此如何開發針對 tau 蛋白質具有專一選擇性、可適用於各式不同亞型之異常 tau 蛋白質，並具有高度親和力、且能通過血腦屏障(blood-brain barrier)及穿透細胞膜進入細胞之造影劑，實為現階段具高度需求之研究課題 (Victor L.V. et al., 2012) (Maria G.S. et al., 2013)。此類 tau 蛋白質藥物開發之研究中，常用之動物模式可分為二類，其一為基因轉殖鼠系列，其二為經由藥物誘發引起之動物模式。MAPT 基因為編碼調控產生微管相關蛋白 tau 蛋白之主要基因，基因轉殖鼠藉由調控突變 MAPT 基因上不同位置而使動物產生各式異常序列之 tau 蛋白質，目前已研究出之異常蛋白質包含 N279K, Δ K280, P301L, P301S, V337 以及 R406W 等，此類基因轉殖鼠會於年紀漸長於腦部杏仁核 (Amygdala)、海馬迴 (hippocampus) 逐漸形成異常 tau 蛋白質之堆積，並且擴散至大腦皮質層，此類基因轉殖動物模式較近似於臨床家族性遺傳之阿茲海默症 (familial AD) (Jurgen G. et al., 2008)。然而，臨床大部份阿茲海默症患者屬於 sporadic AD，即並非遺傳性致病，乃是由於後天致病原因例如環境因素、基因突變或代謝性異常因素而導致逐漸發病，故研究另發展出以藥物誘發引起阿茲海默症之動物模式，藉以模擬臨床常見之致病機轉。其中以 streptozotocin (STZ) 經顱內注射誘發之動物模式已被證實藉由影響胰島素受器之訊號傳遞路徑，進而誘發 tau 蛋白質之異常過度磷酸化，導致神經發炎及神經細胞凋亡，最終產生類似阿茲海默症之症狀包含認知缺損及腦內異常 tau 蛋白質堆積等病理特徵 (Pradip K.K. et al., 2015)。不論基因轉殖或藥物誘發之動物模式，皆可做為開發針對異常 tau 蛋白質之正子造影劑良好之評估平台。

F-18 FDDNP 為具有 naphthylethylidene 結構之造影劑，原被開發作為標定類澱粉斑塊用，然而研究指出，其亦能與 tau 蛋白質進行結合，故為第一個被開發出之 tau 蛋白質正子造影劑 (Melanie D. et al., 2016)，然而後續許多研究指出，F-18 FDDNP 對 tau 蛋白之親和力不佳，且缺乏分辨 tau 蛋白質與類澱粉斑塊之選擇能力 (Manuela A. et al., 2015)，然而 F-18 FDDNP 在罹患阿茲海默症患者腦部的攝取量隨著臨床症狀加重亦隨之增加，故 F-18 FDDNP 正子斷層掃描仍可做為追蹤疾病進程工具之一 (Melanie D. et al., 2016)。近年來除具有 naphthylethylidene 結構之造影劑外，亦有多種其他類別之 tau 蛋白質正子造影劑被開發並應用於動物及臨床人體試驗，大致上依其化學主結構之差異可分為三大類。首先第一類為具有 arylquinoline 主結構者，研究人員開發出一系列代號為 THK 的化合物，研究報告指出，部分此系列化合物對於 tau 蛋白質之親和力高於類澱粉斑塊，然而其於腦部白質中的非特异性攝取量較高，可能會阻礙準確判斷 tau 蛋白沉積的位置 (Melanie D. et al., 2016)。第二類為具有 pyridindole 主結構或其衍生物者，亦被開發作為 tau 蛋白正子造影劑，如 F-18 T807 與 T808 等，此類化合物對於 tau 蛋白之親和力同樣高於類澱粉斑塊，然而其對於非阿茲海默症之其他種類神經退化疾病患者腦部內之 tau 蛋白沉積，並無顯著之親和與標定，故此類正子造影劑在非阿茲海默症外其他類別



圖四、各類針對 tau 蛋白質開發之正子造影劑結構 (Melanie D. et al., 2016)

之神經退化疾病之應用，尚需更多研究驗證 (Melanie D. et al., 2016)。第三類為具有 pyridinyl-butadienyl-benzothiazole 衍生結構之化合物，如 C-11 PBB3。此類化合物對於多種神經退化病症致病之 tau 蛋白質均有親和力，但同時亦包含類澱粉斑塊，然而其主要困難點為 C-11 標幟之藥物半衰期過短，需具有迴旋加速器始能進行產製與應用，因而限制了其使用範圍，另其於血漿中之代謝物會穿過血腦屏障，亦可能造成影像判讀上之干擾 (Melanie D. et al., 2016)，各類針對 tau 蛋白質開發之正子造影劑結構如圖四。經由各研究者開發各式正子造影劑之經驗可得知，做為一個優秀的 tau 蛋白造影劑，必須具備有以下特徵：(1) 容易以放射性核種標幟，並且具有適當之半衰期。(2) 對於 tau 蛋白質具有高度之親和力。(3) 具有良好之選擇性，能辨別 tau 蛋白質與類澱粉斑塊。(4) 具有良好之血腦屏障之通透性，即具有較高之脂溶性。(5) 背景之攝取量低，具有較低之非特异性界結合。(6) 穩定性佳，具有低之代謝活性，以避免代謝物質之干擾。

綜合上述之文獻探討及本研究團隊現有針對各式正子造影劑豐富之開發經驗與完善之設備與人員，本計畫之目的如下：(一) 以 [18F]FDDNP 為主結構，參照文獻開發其類似結構之衍生物 [18F]FEONM (2-(1-{6-[(2-2'-[18F]Fluoroethoxyethyl) ethyl]amino}-2-naphthyl)ethylidene) malononitrile) (Chen J.T. et al., 2015)，期許能改善原正子造影劑之藥物特性，包含一、增加脂溶性，以利更多造影劑能通過血腦屏障而進入腦部，增加與 tau 蛋白結合之攝取量。二、增加與 tau 蛋白之親和力。三、增加特异性結合能力，對於 tau 蛋白質之結合能力應大於對類澱粉斑塊之結合能力，以達成產製針對 tau 蛋白具高度專一性之正子造影劑。(二) 以模擬家族性阿茲海默症 (familial AD) 之基因轉殖鼠動物模式及模擬 sporadic AD，以藥物鏈佐黴素 streptozotocin (STZ) 經顱內注射誘發之阿茲海默症動物模式，分別驗證 [18F]FEONM 於生物體內之藥物特性。本計畫二年之主要工作分述如下：

第一年建立以鏈佐黴素 streptozotocin (STZ) 經顱內注射誘發之大鼠動物模式作為評估平台，分別以開放

空間行為測試 (open field test) 及八爪迷宮測試 (Radial arm maze test) 等行為測試、微正子電腦斷層造影與免疫組織化學染色等方式，經由分析影像結果與免疫染色分析結果，並與本團隊先前進行先導性研究之成果進行比較，藉以評估 [^{18}F]FEONM 於藥物誘發之阿茲海默症動物模式，偵測 tau 蛋白質之靈敏度。

第二年將購置基因轉殖小鼠作為評估之平台，分別以開放空間行為測試 (open field test) 及八爪迷宮測試 (Radial arm maze test) 等行為測試、配合微正子電腦斷層造影與免疫組織化學染色等方式，經由分析影像結果與免疫染色分析結果及行為測試結果，評估 [^{18}F]FEONM 於家族性遺傳阿茲海默症動物模式偵測異常 tau 蛋白質之靈敏度。

II. 材料與方法

實驗動物

本研究所使用之動物為八週齡之雄性 Sprague-Dawley (SD) 大鼠，體重約 300 ~ 350 公克，購自台灣樂斯科生物科技 (BioLASCO Taiwan Co., Ltd., Taipei, Taiwan)。飼養環境恆定十二小時晝夜周期，鼠房內溫度控制在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ，並於正式實驗前最少代養七天適應環境，老鼠可任意飲食及飲水。所有的實驗程序皆符合國防醫學院動物管理委員會所制訂之倫理規範。

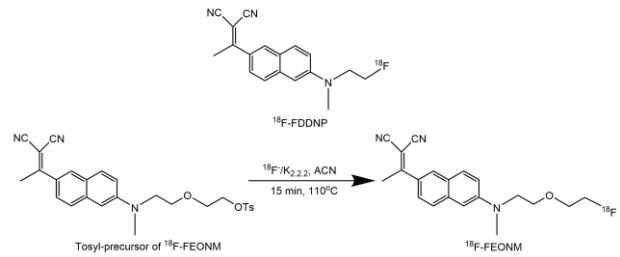
側腦室注射鏈佐黴素藥物引發阿茲海默症大鼠動物模式之建立與鑑定

本計畫中所使用之側腦室注射鏈佐黴素技術是依據之前學者所發表的論文內容 (Sharma M. et al., 2001, Balouchnejadmojarad T. et al., 2009) 並加以稍微改良。將大鼠麻醉後固定於立體定位儀上，以前囟門 (bregma) 作為原點，將鏈佐黴素 (Sigma - Aldrich, St Louis, MO) 溶解於 0.1M 的檸檬酸緩衝液中 (pH=4.5) 後過濾。再將 5 μL 的檸檬酸緩衝液或是鏈佐黴素溶液分別注射至控制組或實驗組大鼠之側腦室。注射藥物的位置是在大鼠顱骨的兩側用下列定位方式鑽孔並完成給藥：注射點位置位於前囟門後方 0.8mm；矢狀縫外側 1.5mm；大腦表面下方 3.6mm

(Sharma M. et al., 2001)。鏈佐黴素溶液在 48 小時的間隔內需注射兩次 (劑量共 3 mg/kg)。每隻大鼠在進行藥物誘發實驗前皆進行一次 [^{18}F]FEONM 小動物正子斷層造影作為對照影像。

[^{18}F]FEONM 製備

本實驗於三軍總醫院正子中心進行，將 FEONM 前驅物 tosyl-FEONM 溶於含 [^{18}F] Kryptofix 2.2.2 之無水乙腈中，利用自動合成盒 (TRACERlab FX2 N) 控制反應於 110°C 下進行十五分鐘，而後利用半製備化 C18 HPLC 系統純化產物，最終產物即為 [^{18}F]FEONM，之後溶於維他命 C 溶液中以增加其穩定度，並進行之後各項實驗。



圖五、FEONM 製備圖

小動物正子斷層造影

本研究之小動物正子造影於國防醫學院動物中心執行。實驗所需之放射性結合子 [^{18}F]FEONM (純度 > 90%) 經由三軍總醫院正子中心周大凱技術員製備與提供。大鼠先以混合之 isoflurane/oxygen (5% isoflurane 用於誘導麻醉，2% isoflurane 用於維持麻醉深度) 進行吸入性麻醉。收集後之原始正子影像資料使用 3D-OSEM 進行影像重建，使用影像分析軟體

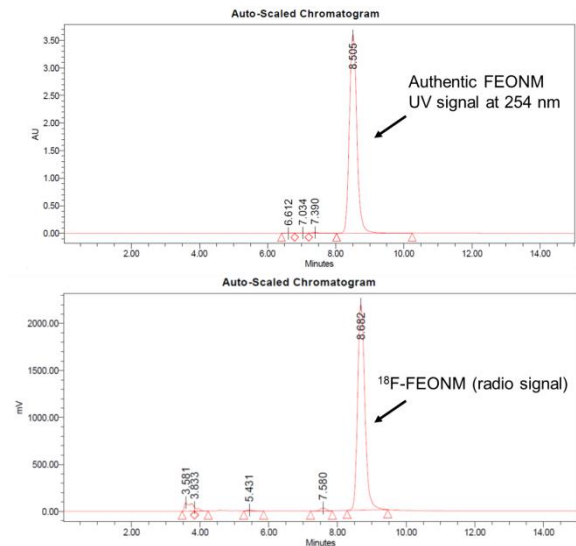
AMIDE software version 1.0.4 進行影像分析與量化。參考大鼠腦部解剖圖譜及核磁共振影像圈選關心體積 (volumes of interest, VOIs)，圈選腦區包海馬迴、丘腦、下丘腦、中腦、前葉皮質層、紋狀體及小腦等區塊，並以 standard uptake value (SUV) 呈現量化數值。

免疫組織化學染色

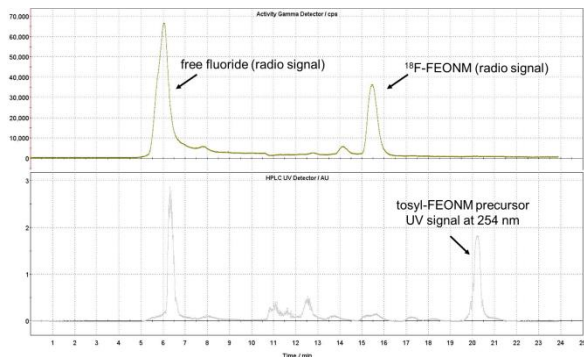
實驗大鼠經 [^{18}F]FEONM 正子造影實驗後，待體內放射性藥物之放射性衰退至輻射背景值即進行灌流犧牲取腦，待進行免疫組織切片染色。並以兔子抗過度磷酸化 tau 蛋白質抗體 [rabbit anti-hyperphosphorylated tau protein Ser396 antibody, 1:2000; ABCam] 觀察位於 Ser396 過度磷酸化之異常 tau 蛋白質。一級抗體於 4°C 環境放置隔夜 (overnight) 後進行清洗，再加入二級抗體-山羊抗兔子 IgG 抗體 (goat anti-rabbit biotinylated IgG, 1:200; Vector, Burlingame, CA)，並於室溫下反應 1 小時；隨後加入 ABC kit (avidin-biotin complex, 1:200; Vectastain ABC kit; Vector) 於室溫下反應 1 小時；最後以 0.05% diaminobenzidine (DAB，溶於 0.05 M Tris-buffer 與 0.1% H_2O_2 , pH 7.6) 呈色，再以 0.1MPBS 清洗 3 次後，以封片膠 (mounting medium) 封片保存。

III. 結果與討論

首先，本研究主要先評估新型的造影藥物 [^{18}F]FEONM 合成狀況，包括是否可以精確且穩定合成以及合成後純度等相關情形，此一實驗由三軍總醫院正子造影中心放射化學室主任周大凱執行產製。由圖一及圖二的結果可以得知，合成具高度 Tau 蛋白質親和力之核醫正子藥物 [^{18}F]FEONM 後，經過 HPLC 分析其純度可以達到 90% 以上，且合成後的產物可與前驅物 tosyl-FEONM 與游離氟明顯分開，顯示本實驗室對於之後研究所需的核醫造影藥物有相當優良且精準的生產能力。

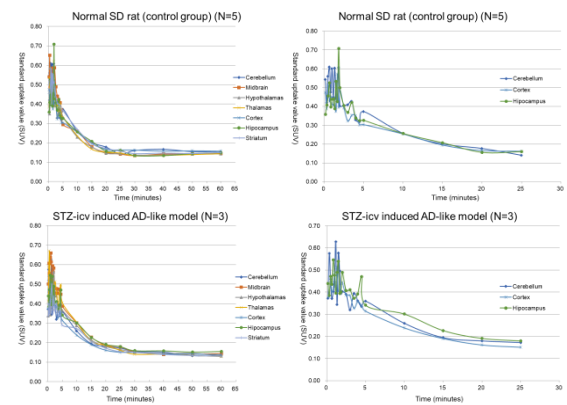


圖一 使用高效能液相層析儀(HPLC)分析圖譜比對 FEONM 標準品與 ^{18}F FEONM 產物。HPLC 分析出 ^{18}F FEONM 產物與標準品滯留時間相同，且計算其純度大於 90%。

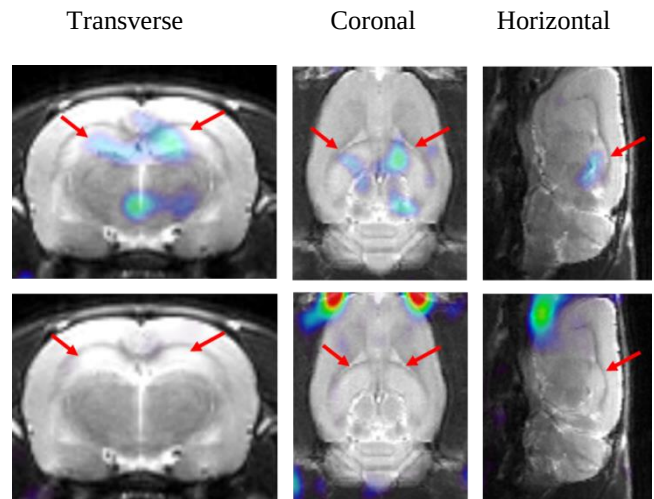


圖二 使用高效能液相層析儀(HPLC)分析圖譜比對 FEONM 前驅物、 ^{18}F FEONM 產物以及游離氟。HPLC 分析中可得知出 FEONM 前驅物、 ^{18}F FEONM 產物以及游離氟滯留時間均不相同。

成功穩定合成 ^{18}F FEONM 後，我們接下來將探討其是否能運用於齧齒類動物及成功造影。我們將正常大白鼠以及利用 STZ-icv 誘導成的阿茲海默症大鼠以尾靜脈注射核醫藥物 ^{18}F FEONM，以動態的小動物正子斷層造影，連續性的觀察此造影藥物於不同腦區之攝取與清除情形。結果發現，注射 ^{18}F FEONM 後約於 5 分鐘達到吸收最高峰 (圖三)，之後攝取量開始下降，是以注射藥物後 5-10 分鐘為最佳造影時間；其中於 STZ-icv 誘導成的阿茲海默症大鼠海馬迴於五分鐘時，其 ^{18}F FEONM 攝取量高於正常大鼠，於造影圖亦顯示相同結果 (圖四)。

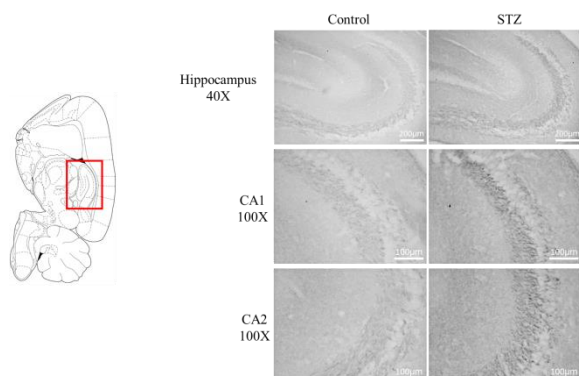


圖三 Tau 蛋白質正子示蹤劑 ^{18}F FEONM 在正常大白鼠 (上圖) 以及 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠 (下圖) 的連續性動態正子造影，個別時間點之 standard uptake value (SUV) 如圖所示，觀察 STZ-icv 誘導成的阿茲海默症大鼠之海馬迴，在注射 ^{18}F FEONM 五分鐘後， ^{18}F FEONM 的 SUV 高於正常大鼠。



圖四 Tau 蛋白質正子示蹤劑 ^{18}F FEONM 在 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠 (上圖) 及正常大白鼠 (下圖) 之造影圖，由圖可見，在尾靜脈注射 0.5-0.6 mCi ^{18}F FEONM 5 分鐘後，在 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠海馬迴之 ^{18}F FEONM 攝取量明顯高於正常大鼠。

確認 Tau 蛋白質正子示蹤劑 ^{18}F FEONM 可於大鼠中使用，且於 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠中可明顯觀察到攝取量之變化，顯示於此動物模式中或能成功監測 Tau 蛋白質之變化，接下來我們利用免疫組織化學染色觀察在大鼠腦中於 ser396 過度磷酸化之 Tau 蛋白質是否異常堆積於海馬迴，以此結果驗證於正子造影所觀察之影像，由免疫組織化學染色結果可見 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠海馬迴中 ser396 過度磷酸化之 Tau 蛋白質明顯高於正常組大鼠 (圖五)，此結果與造影結果相互呼應，顯示造影結果具高度可信度。



圖五 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠及正常大白鼠之免疫組織化學染色於大鼠腦中海馬迴之結果。於 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠中可見其海馬迴中 ser396 過度磷酸化之 Tau 蛋白質明顯高於正常組大鼠，高倍鏡下觀察海馬迴 CA1 及 CA2 區域，可見此二區均異常堆積 ser396 過度磷酸化之 Tau 蛋白質。

IV. 結論

綜合以上結果可得知，本實驗室研究團隊已可穩定合成 Tau 蛋白質正子示蹤劑[18F]FEONM，且可於正常大鼠以及 STZ-icv 誘導之阿茲海默症大鼠中成功偵測是否有 Tau 蛋白質過度堆積之情形，在之後的實驗中，我們會觀察在基因轉殖小鼠中是否亦能成功偵測 Tau 蛋白質異常堆積，未來可成為阿茲海默症篩藥平台，或可更進一步逐漸發展至臨床運用，期可於早期成功偵測是否罹患阿茲海默症。

參考文獻

- [1] Alberto S.P., Matthew P. F., Eliezer M., Bradley T.H., Neuropathological Alterations in Alzheimer Disease. Cold Spring Harb Perspect Med. (2011) Sep; 1(1): a006189.
- [2] Bowman R.E., Zrull M.C., Luine V.N., Chronic restraint stress enhances radial arm maze performance in female rats. Brain Res. 2001 Jun 22;904(2):279-89.
- [3] Balouchnejadmojarad T., The effect of genistein on intracerebroventricular streptozotocin-induced cognitive deficits in male rat. Basic and Clinical Neuroscience (2009) 1(1): 17-21.
- [4] Chen J.T., S.H Lin, K.W., Chang, C.S., Yu Y.C., Huang S.S., Farn W.J., Lin C.Y., Shiue C.Y., Synthesis of 2-(1-{6-[(2-{2'-[18F]Fluoroethoxyethyl}) (methyl)amino]-2-naphthyl} ethylidene) malononitrile ([18F]FEONM) as a potential tau protein imaging agent. Annual meeting of Taiwanese Society for Molecular Imaging, 42.
- [5] Chiu C.H., Li I.H., Weng S.J., Huang Y.S., Wu S.C., Chou T.K., Huang W.S., Liao M.H., Shiue C.Y., Cheng C.Y.*, Ma K.H., PET imaging of serotonin transporters with 4-[18F]-ADAM in a Parkinsonian rat model with porcine neural xenografts. Cell Transplant. 2016;25(2):301-11.
- [6] Cheng C.Y., Chou T.K., Shiue C.Y., Fully automated one-pot two-step synthesis of 4-[18F]-ADAM, a potent serotonin transporter imaging agent. Applied Radiation and Isotopes. 2016 Apr;110:8-15.

- [7] Chiu C.H., Siow T.Y., Weng S.J., Hsu Y.H., Huang Y.S., Chang K.W., Cheng C.Y., Ma K.H., Effect of MDMA-Induced Axotomy on the Dorsal Raphe Forebrain Tract in Rats: An In Vivo Manganese-Enhanced Magnetic Resonance Imaging Study. PLOS One. 2015 Sep 17;10(9):e0138431.
- [8] Huang Y.Y., Cheng C.Y., Huang W.S., Ma K.H., Tseng T.W., Chou T.K., Huang Y., Shiue C.Y., Toxicity and radiation dosimetry studies of the serotonin transporter radioligand [18 F]AFM in rats and monkey. EJNMMI Research. 2014 Dec; 4 (1): 71. Epub 2014 Dec 29.
- [9] Jurgen G., Lars M.I., Animal models of Alzheimer' s disease and frontotemporal dementia. Nat Rev Neurosci (2008) Jul;9(7):532-44.
- [10] Kang J.H., Magdalena K, Michal J. F, Jon B. T, Kaj B, Henrik Z, Teresa W, Magdalena B, Leona F, Nirali S, Holly S, Robert A. D, Hugo V, Ronald C. P, Paul S. A, Andrew J. S, Michael W. W, John Q. T, Leslie M. S. The Alzheimer' s Disease Neuroimaging Initiative 2 Biomarker Core: A review of progress and plans. Alzheimer' s & Dementia 11 (2015) 772-791.
- [11] Manuela A., Hartmuth C. K, Dieder M, Frederik R, Jose Ignacio A. Tau positron emission tomography (PET) imaging : Past, Present, and future. J. Med. Chem. (2015), 58, 4365-4382.
- [12] Maria G.S., Michel G., Tau pathology and neurodegeneration. Lancet Neurol (2013); 12: 609 – 22.
- [13] Melanie D., Paul E., David J. B., Imaging biomarkers in tauopathies. Parkinsonism and Related Disorders 22 (2016) S26-S28.
- [14] Naruhiko S., Jesus A. “Tau oligomers” , what we know and what we don' t know. Front.Neurol. (2014) 5:1. doi: 10.3389/fneur.2014.00001.
- [15] Pradip K.K., Streptozotocin induced Alzheimer's disease like changes and the underlying neural degeneration and regeneration mechanism. Neural Regen Res. 2015 Jul; 10(7): 1050 – 1052.
- [16] Qian Y., Lei G., Francisco X.C., Hans F., Rochellys D.H., Deficits in fine motor skills in a genetic animal model of ADHD. Behav Brain Funct. 2010; 6: 51.
- [17] Ryuichi H., Nobuyuki O., Shozo F., Tetsuro T., Kazuhiko Y., Hiroyuki A., Yukitsuka K., Characteristics of Tau and Its Ligands in PET Imaging. Biomolecules(2016), 6(7) doi:10.3390/biom6010007.
- [18] Sharma, M. and Gupta Y.K., Intracerebroventricular injection of streptozotocin in rats produces both oxidative stress in the brain and cognitive impairment." Life Sci (2001) 68(9): 1021-1029.
- [19] Victor L.V., Shozo F., Michelle Fodero-Tavoletti, Ryuichi H., Mulligan R.S., Yukitsuka K., Masters C.L., Kazuhiko Y., Rowe C.C., Nobuyuki O., The Challenges of Tau Imaging. Future Neurology. (2012) ;7(4):409-421
- [20] Weng S.J., Li I.H., Huang Y.S., Chueh S.H., Chou T.K., Huang S.Y., Shiue C.Y., Cheng C.Y., Ma K.H., KA-bridged transplantation of mesencephalic tissue and olfactory ensheathing cells in a Parkinsonian rat model. Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine. 2015 Oct 29. [Epub ahead of print].

神經發炎正子造影研究之新型正子造影劑(氟十八)FEPPA 之開發

The Development of A Novel [^{18}F]FEPPA Tracer for Neuroinflammation Positron Emission Tomography

計畫編號：MOST 106-2623-E-075-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：張智偉

e-mail：cwchang@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：黃文盛、郭諭燁、葉信顯、游宗勳

執行單位：臺北榮民總醫院正子臨床中心

摘要

據報導大鼠體內 [^{18}F]FEPPA 對於轉運蛋白 (translocator protein, TSPO) 具有非常高的親和力，是用於 PET TSPO 造影的示踪劑。研究發現誘導型一氧化氮合成酶(inducible nitric oxide synthase, iNOS)在動脈粥樣硬化和神經發炎的發病機轉中扮演重要角色。本計劃使用自動化合成系統合成 [^{18}F]FEPPA 及 [^{18}F]FBAT 分子探針，並對 lipopolysaccharide (LPS)藥物誘導腦神經發炎老鼠模式進行微正子放射電斷層掃描(μPET)造影，加以比較，分子影像為一非常有效的技術，它能夠提供臨床醫師更多有關於疾病評估和診斷的依據並嘉惠更多神經發炎疾病的患者。

關鍵詞：[^{18}F]FEPPA, TSPO, iNOS, [^{18}F]FBAT

Abstract

[^{18}F]FEPPA has a very high affinity for TSPO and could be useful as a PET radiotracer for imaging TSPO using PET. The roles of inducible nitric oxide synthase (iNOS) as a family of nitric oxide synthases have been largely investigated for atherosclerotic plaque (AP) formation and microglia function in central neuroinflammatory process. [^{18}F]FBAT and [^{18}F]FEPPA are developed by the robotic system for imaging neuroinflammation in mouse models lipopolysaccharide (LPS) induced inflammatory brain with μPET and their images are compared. Molecular imaging is a powerful technique which offers more clinical information to doctors about disease assessment and diagnosis as well as benefits people who suffer from neuroinflammation diseases.

Keywords: [^{18}F]FEPPA, TSPO, iNOS, [^{18}F]FBAT.

I. 前言

18 kDa 的轉運蛋白(Translocator protein, TSPO)，在活化的微膠質細胞會有大量表現，並認為是神經發炎的特徵，可以作為微膠質細胞媒介的神經發炎的一個生物標記物(biomarker)，利用對 TSPO 有高親合力、良好的腦攝取和高專一性結合的放射藥物配合 PET 對 TSPO 進行造影，可以診斷神經發炎病灶。誘導型一氧化氮合成酶(inducible nitric oxide synthase, iNOS)可用來評估冠狀動脈不穩定斑塊剝落和腦功能異常，發展 [^{18}F]FBAT，以 [^{18}F]FBAT μPET 進行 LPS 藥物誘導腦神經發炎老鼠模式的 iNOS 表達程度的研究。

II. 主要內容

苯環上是 NO_2 之前驅物， ^{18}F 不易進行親核取代反應，而苯環上接 boron ester， ^{18}F 可較易標幟在苯環上。嘗試調整標幟反應參數，已可得到放射化學產率 3% 之 iNOS 造影劑 [^{18}F]FBAT，並合成 [^{18}F]FEPPA 對誘導腦神經發炎的小鼠進行 [^{18}F]FBAT 及 [^{18}F]FEPPA μPET ，加以比較。

III. 結果與討論

利用新(boron ester precursor)、舊(NO_2 precursor)方法得到之 [^{18}F]FBAT 的放射化學純度均 $\geq 99\%$ ，但前者比活度為 $137 \text{ GBq}/\mu\text{mol}$ ，後者為 $2 \text{ GBq}/\mu\text{mol}$ ，主因為以兩個 boc 保護基分別保護 boron ester 前驅物的兩個 NH 基，且設計了一個 boron ester 在苯環上，使 ^{18}F 容易進行親核取代反應，因此前者的產率為後者的 300 倍。利用 boron ester 前驅物取代早期的 NO_2 前驅物，將放射化學產率自 0.01% 提高至 3%，並得到放射化學純度均大於 99% 之 [^{18}F]FEPPA 及 [^{18}F]FBAT。

IV. 結論

得到足量放射活度及品管合格之 [^{18}F]FEPPA 及 [^{18}F]FBAT，完成動物之微正子電斷層造影研究，未來可作為 PET 臨床診斷神經發炎及一氧化氮合成酶(iNOS)造影之潛力評估。

參考文獻

- [1] Chavarria A, Alcocer-Varela J. Is damage in central nervous system due to inflammation? Autoimmun Rev. 2004; 3(4): 251-60.
- [2] Wyss-Coray T. Inflammation in Alzheimer disease: driving force, bystander or beneficial response? Nat Med. 2006; 12(9): 1005-15.
- [3] Wilson AA, Garcia A, Parkes J, McCormick P, Stephenson KA, Houle S, Vasdev N. Radiosynthesis and initial evaluation of [^{18}F]-FEPPA for PET imaging of peripheral benzodiazepine receptors. Nuclear Medicine and Biology 2008; 35: 305-314.
- [4] Pike VW, Halldin C, Crouzel C, Barré L, Nutt DJ, Osman S, et al. Radioligands for PET studies of central benzodiazepine receptors and PK (peripheral benzodiazepine) binding sites — current status. Nucl Med Biol 1993; 20:503-25.

臨床新型心臟專用 CZT SPECT 於整合心肌血流絕對定量與臨床常規心臟檢查的優劣勢研究

計畫編號：MOST 106-2623-E-341-001-NU
計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫
計畫主持人：陳遠光
e-mail：t003744@ms.skh.org.tw
計畫參與人員：陳隆景、陳世緯、辜啟泰、許百靈、陳穎柔
執行單位：新光醫療財團法人新光吳火獅紀念醫院

摘要

CZT 心臟專用機採用多針孔準直器，比傳統 SPECT 相機俱備更高的記數率、能量解析度、空間解析度與列表採集功能等多項優勢，更適合臨床常規心臟檢查與心肌血流絕對定量檢查，本研究通各項假體測量 GE 530c CZT SPECT 的系統性能表現，並與 Siemens ECAM 傳統相機對比，同時發展多針孔定量影像重建方法，可定量重建 GE 530c CZT SPECT 影像，並通過臨床病例驗證 GE 530c CZT SPECT 可同時整合心肌血流絕對定量與臨床常規心臟檢查於單次 listmode 採集，並分析優劣勢，以心肌血流量、影像品質與便利性等三大方向提出新一代心臟專用 SEPCT 相機發展的參考與建議。

關鍵詞：CZT SPECT、多針孔準直器、listmode 採集、心肌血流量。

Abstract

CZT SPECT camera encompassing higher count rate, higher energy resolution, higher energy resolution and listmode acquisition capability which can be more dedicated for cardiac purpose. This research study utilized multiple phantom to measure performance characteristics of GE 530c CZT SPECT and compared to those of Siemens ECAM SPECT. Quantitative image reconstruction method was also developed. Also, an integrated protocol to combine myocardial blood flow quantitation and routine myocardial perfusion scans was developed and validated with a single listmode acquisition. A recommendation for a new generation of cardiac-dedicated CZT SPECT was also made.

Keywords: CZT SPECT, multi-pinhole, listmode acquisition, myocardial blood flow quantitation.

I. 前言

SPECT 心肌血流量在國際上漸漸受到重視，特別是無法採用昂貴 PET 心臟檢查的國家(包括台灣)，SPECT 心肌血流量可成為一項取代 PET 心臟檢查的臨床工具，讓無法採用昂貴 PET 心臟檢查的國家也能通過 SPECT 心肌血流量提升心血管病診斷達到歐美的水平。近年來心臟專用 CZT SPECT 相機的問世，具備列表(listmode)採集的功能對於整合 SPECT 心肌血流量成為臨床常規心臟檢查項目提供了多項優勢，本研究計畫將通過假體數據分析心臟專用 CZT SPECT 相機與傳統 SPECT 相機的差異，並發展整合 SPECT 心肌血流量為臨床常規檢查的程序，同時驗證 SPECT 心肌血流量提升核醫心臟檢查的準確性，並評估負荷心肌血流量取代靜息-負荷心肌血流定量的可行性，本計畫並將提供關鍵數據，作為政府相關單位發展新一代心臟專用 SEPCT 相機的參考。

II. 方法學

GE 530c: 共 8 個點環繞中心點(距離 50.0 mm)，並以 z 方向 $\pm 20\text{mm}$ 、 $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 90\text{mm}$ 平移，經過空間解析度恢復的影像重建，量測不同點源所在位置的點擴散函數半高全寬(FWHM)。Siemens ECAM: 共 7 個點源，直線排列擺放於視野中心，以點源 4 為正中間，每個點源距離 40.0 mm，經過空間解析度恢復的影像重建，量測不同點源所在位置的 FWHM。

兩可樂瓶(2000cc 與 1000cc)分別填充約 50mCi 的

Tc99m 水溶液，經過不同時間的衰變後，分別在 GE 530c 與 Siemens ECAM 進行 SPECT 掃描，分析重建 SPECT 影像中的像素值與放射線濃度的關係。

在心臟假體的前壁(anterior wall)植入一 defect，並在正常心壁填入約 1.0mCi 的 Tc99m 水溶液。以 GE 530c 與 Siemens ECAM 進行 SPECT 掃描，掃描參數為臨床常規使用於心臟檢查的參數。所有 SPECT 影像重建採用定量重建(完整的物理校正：組織衰減、散射、準直器模糊與影像雜訊)。

40 位臨床患者注射 ^{99m}Tc -Sestamibi 時，於 GE 530c SPECT 進行動態 listmode SPECT 顯像 與一小時後進行臨床門控心肌灌注檢查。早期顯像前給病患喝水 300-500cc，以增加肝臟與心臟的距離，可降低肝臟對於心臟的干擾。以臨床參數進行重建早期門控心肌灌注影像與臨床門控心肌灌注影像，比較心肌灌注影像與心室功能的差異。排除過肥胖，無法在 GE 530c SPECT 檢查的病患。

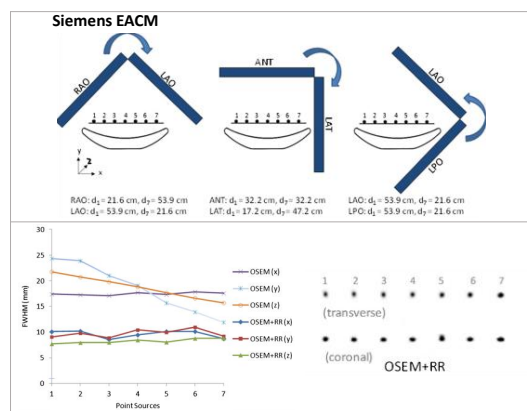
60 位臨床穩定型冠心病患者在 GE 530c SPECT 進行動態 listmode SPECT 顯像的心肌血流定量檢查，並需排除過肥胖無法在 GE 530c SPECT 檢查的病患。以 PET 所建立的血流狀態體系標示心肌血流的狀態，並統計各血流狀態所佔整體心肌的百分比，a) 先以心肌各處的 stress flow 數值標示心肌各處的血流狀態，b) 加入 rest flow 與 MFR 值，重新標示心肌各處的血流狀態。

比對採用單一 stress flow 與(rest flow、stress flow、MFR) 參數時，血流狀態分布的相關性。

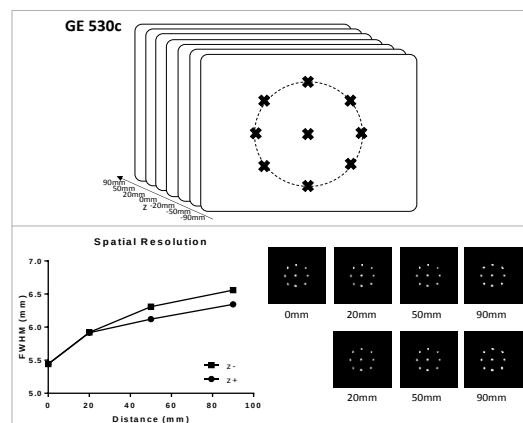
III. 結果

GE 530c: 立體 90.0 mm 的半徑範圍內，空間解析度大致為均勻(FWHM 範圍: 5.44 -6.55 mm)，該範圍為臨床病患心臟擺放的位置。Siemens ECAM:立體 240.0 mm 的半徑範圍內，通過影像空間解析度恢復重建，影像檢析度大致為均勻(FWHM 範圍: 8.2 -9.6 mm)，該範圍為臨床病患心臟擺放的位置。GE 530c 的影像解析度優於 Siemens ECAM，但 GE 530c 的可用視野較狹窄，只能適合用於心臟器官造影。GE 530c 與 Siemens ECAM 比對顯示：兩種 SPECT 的計數率和重建影像中

的像素值，與可樂瓶中的放射線濃度皆呈現線性關係達 50mCi 活度，一般病患的注射劑量<40 mCi，在此範圍內，像素值轉放射線濃度轉換係數皆為固定值。

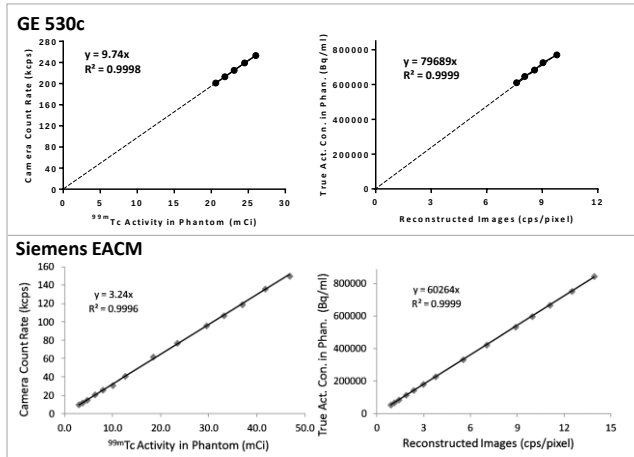


Siemens ECAM

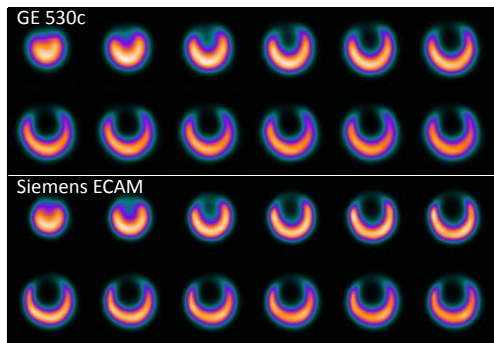


GE 530c

GE 530c 與 Siemens ECAM 比對顯示：兩種 SPECT 的計數率和重建影像中的像素值，與可樂瓶中的放射線濃度皆呈現線性關係達 50mCi 活度，一般病患的注射劑量<40 mCi，在此範圍內，像素值轉放射線濃度轉換係數皆為固定值。

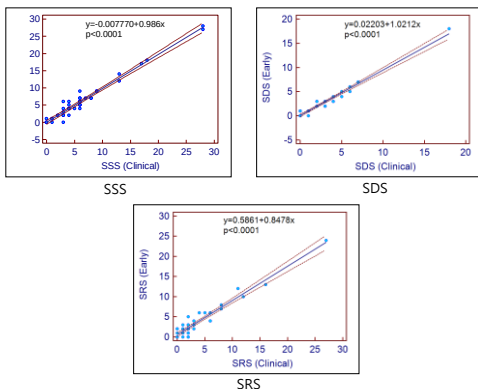


通過 SPECT 影像定量重建，可在 GE 530c 與 Siemens ECAM 兩儀器產生 高品質的心臟影像。

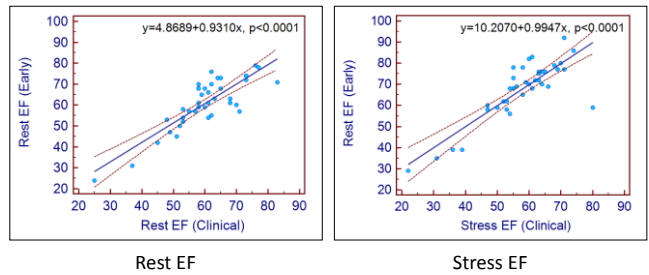


	Sensitivity (kcps/mCi)	Uniformity (%)	Defect Contrast
GE 530c	535.69	0.14	0.95
Siemens ECAM	115.95	0.13	0.94

早期心肌灌注影像與臨床心肌灌注影像間的灌注分數(包括: SSS、SDS 與 SRS)皆呈現高度線性相關，早期與臨床的心室功能(EF)亦呈現高度線性相關，早期門控心肌灌注檢查能夠取代臨床門控心肌灌注檢查。

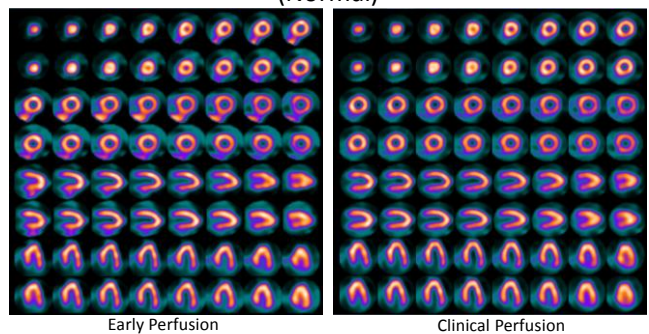


早期與臨床心肌灌注影像的相關係數 R^2 : SSS=0.96, SDS=0.95, SRS=0.93。

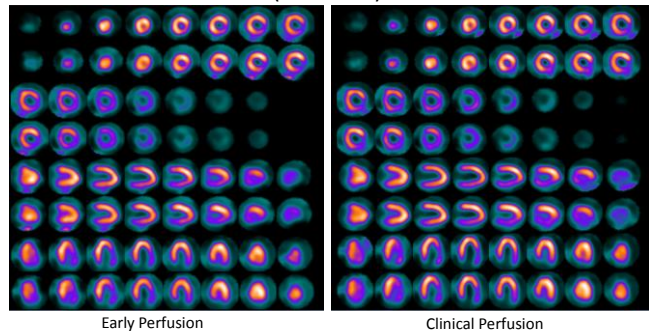


早期與臨床心室功能相關係數: Rest $R^2=0.71$ 與Stress $R^2=0.70$ 。

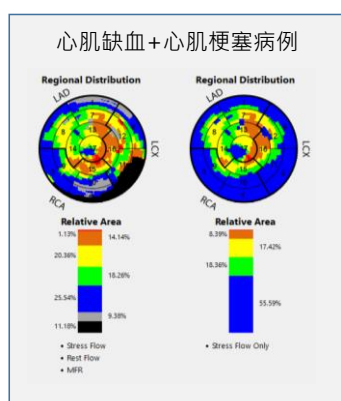
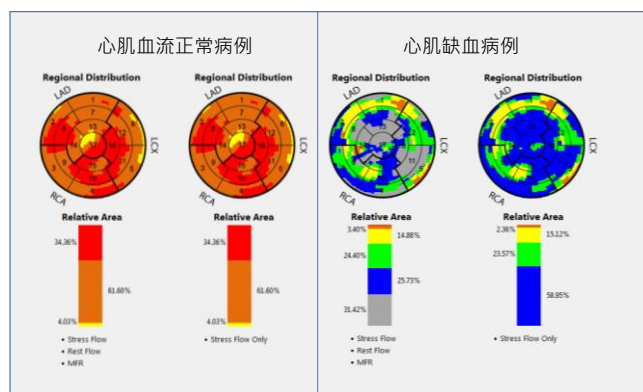
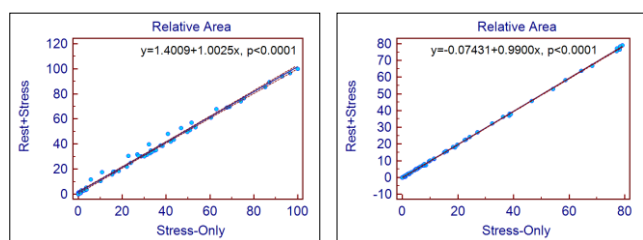
Early Perfusion vs Clinical Perfusion Scans (Normal)



Early Perfusion vs Clinical Perfusion Scans (Ischemia)



針對穩定型冠心病無心肌梗塞病史的病患，心肌血流的定量檢查採用 stress flow only 並不會改變對於心肌缺血範圍的診斷，表示 stress flow only 已足夠用於心肌缺血的診斷，針對穩定型冠心病有心肌梗塞病史的病患，應加做 rest 檢查，以取得 rest flow 與 MFR，可顯示心肌梗塞區域並避免高估心肌缺血的範圍。



VI 結論與討論

本研究藉由(A)點源實驗、(B)可樂瓶實驗與(C)心臟假體實驗共同驗證了 GE530c CZT SPECT 相機俱高敏感度且定量影像俱高準確性。同時證實在 GE530c SPECT 進行單次 listmode 採集方式可同時進行絕對心肌血流定量與高可信度的心肌灌注影像和心室功能分析，並建立同時進行心肌血流定量與心肌門控顯像的標準採集程序。針對穩定型冠心病無心肌梗塞病史的病患，進行心肌血流定量時使用 stress flow only 檢查替代完整檢查的可行性高，可進一步提高採用心肌血流定量檢查的便利性，並可降低至少 50%的輻射劑量。本研究同時證實 GE 530c CZT SPECT 主要劣勢為影像視野較小且無法掃描過於肥胖病患。新一代心臟專用 CZT SEPCT

相機發展需要能夠同時符合(A)高靈敏度、(B) listmode 採集與(C)產生定量重建影像等要求，且(D)需要足夠大的影像視野能夠掃描過於肥胖的病患。

參考文獻

1. Klein R, Hung GU, Wu TC, Huang WS, Li D, deKemp RA, et al. Feasibility and operator variability of myocardial blood flow and reserve measurements with 99mTc-sestamibi quantitative dynamic SPECT/CT imaging. J Nucl Cardiol 2014;6:1075-88.
2. Hsu B, Chen FC, Wu TC, Huang WS, Hou PN, Chen CC, et al. Quantitation of myocardial blood flow and myocardial flow reserve with 99mTc-sestamibi dynamic SPECT/CT to enhance detection of coronary artery disease. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2014;41:2294-306.
3. Ben Bouallègue F, Roubille F, Lattuca B, Cung TT, Macia JC, Gervasoni R, et al. SPECT Myocardial Perfusion Reserve in Patients with Multivessel Coronary Disease: Correlation with Angiographic Findings and Invasive Fractional Flow Reserve Measurements. J Nucl Med 2015;56:1712-7.
4. Nkoulou R, Fuchs TA, Pazhenkottil AP, Kuest SM, Ghadri JR, Stehli J, Fiechter M, Herzog BA, Gaemperli O, Buechel RR, Kaufmann PA. Absolute Myocardial Blood Flow and Flow Reserve Assessed by Gated SPECT with Cadmium-Zinc-Telluride Detectors Using 99mTc-Tetrofosmin: Head-to-Head Comparison with 13N-Ammonia PET. J Nucl Med. 2016;57:1887-1892.
5. Wang L, Wu D, Yang Y, Chen IJ, Lin CY, Hsu B, Fang W, Tang YD. Avoiding full corrections in dynamic SPECT images impacts the performance of SPECT myocardial blood flow quantitation. J Nucl Cardiol. 2017;24:1332-1346.
6. Hsu B, Hu LH, Yang BH, Chen LC, Chen YK, Ting CH, et al. SPECT myocardial blood flow quantitation toward clinical use: a comparative study with 13N-Ammonia PET myocardial blood flow quantitation. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2017;44:117-128.
7. Wells RG, Marvin B, Poirier M, Renaud J, deKemp RA, Ruddy TD. Optimization of SPECT Measurement of Myocardial Blood Flow with Corrections for Attenuation, Motion, and Blood Binding Compared with PET. J Nucl Med. 2017;58:2013-2019.

8. Agostini D, Roule V, Nganoa C, Roth N, Baavour R, Parienti JJ, Beygui F, Manrique A. First validation of myocardial flow reserve assessed by dynamic ^{99m}Tc -sestamibi CZT-SPECT camera: head to head comparison with ^{15}O -water PET and fractional flow reserve in patients with suspected coronary artery disease. The WATERDAY study. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2018 Mar 1.

多元族群親子共學輻射與核能教育之研究 Study of Parents and Children Co-Learning on radiation and nuclear energy education in Multi-ethnic groups

計畫編號：MOST 106-2623 -E-845-001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：古建國

e-mail：2014ckku@gmail.com

計畫參與人員：詹昌諭、王世綸

執行單位：臺北市立大學應用物理暨化學系

摘要

臺灣是一個具有多元文化的島嶼，除原住民之外，從早期閩南族與客家族到近年來新移民的加入，豐富這個地方的生活內涵。隨著時間累積，這些多元族群中，老人與新住民之間總有以本土母語作為溝通語言，然以輻射或核能教育相關母語學習的教材不多。本計畫目的是藉由製作多元族群之本土母語-閩南語為主進行輻射教育教材開發、培育核安與輻射防護之志工老師與辦理研習活動與戶外教學之實驗課程，以推廣輻射防護與醫療輻射之母語教育。研究步驟包括文獻探討本土語教材的開發作為編輯母語雙語教材參考，同時透過課程或假日教學，以推廣醫療輻射與核能安全防護教育，並進行學習成效評估。研究對象有培育本土語教育教師與參加活動之親子兩類。師資培育部分：我們招募教師進行培訓，針對教材草案實施進行諮詢與修正。進行教材試教後修正並確定教材，修正後教材，透過種子教師培訓、教案開發、試教與預試、諮詢與修正、正式教學檢核五步驟確立教材與師資培訓。親子部分，透過課程實施教學與學習問卷進行成效分析，並輔以晤談，以了解學習情況。

關鍵詞：輻射、核能教育、親子共學

Abstract

Taiwan is a multi-ethnic groups Island, The difference groups include Indigenous Peoples, different provincial origins and new immigrants in recent years. The elders of ethnic-groups families usually use mother tongue as the language of communication. The Mother-tongue teaching, radiation or nuclear energy, are not much. In order to promote Mother-tongue teaching of radiation or nuclear energy, related supplementary teaching material is developed. This research aims developed the Mother-tongue teaching applied on radiation and nuclear energy teaching material. Then the integration and analysis of K-12 curriculum, and learners' characteristics are completed, in order to design the teaching material structure. Education, Mother-tongue and energy experts are invited to review the accuracy and appropriateness of the content. The teaching material was designed for elders or new immigrants with their children. This teaching material is presented as radiation principal and Institution visit. The teaching time is arranged after school. The review and improvement of the teaching material are made through qualitative interview. The tools are the satisfaction survey

and radiation principal tests, to analyze the students' satisfaction and learning before and after the teaching.

Keywords: Radiation、Nuclear protection、Mother tongue

I. 前言

1. 背景

日本在 2011 年因東日本大地震所引發大海嘯造成福島核電廠爐心熔毀、氫氣爆炸與輻射外洩的核災事故，估算其放射性物質外釋的量約為車諾比事故之 10%，之後國內防災教育納入與強化輻射與核能防護教育。（行政院原子能委員會，2012）。

如何推動國內環境游離輻射教育就顯得非常重要，尤其民眾關切原子能之安全、輻射安全管制、民生與醫療應用、核能電廠意外事故之防護、環境輻射監測與放射性廢棄物之管理等為教育宣導之重點工作。而台灣這幾年來，不斷有新移民，外籍配偶等透過婚姻或工作來到台灣，加上年輕人工作關係，小孩留給老年人照顧之隔代教養，讓我們注意到多元族群教育的重要。目前北台灣第一核電廠、第二核電廠與南台灣第三核電廠所在地散佈中小型學校，每年都有相關核能防護演練，若能透過親子共學將多元族群母語學習與輻射及核能防護教育結合，讓學校防災教育演練延伸至家庭或社區之核子防護教育，將有助於原子能教育的推廣。

2. 動機

有鑑於一般民眾可以閱讀的輻射教材不多，尤其針對新住民語所發展之輻射教材更少（整合中文、越語、印尼語、英語與泰語），所以多元文化教材開發是未來方向之一。

我們發現這些新住民因家庭生活關係亦使用本土母語，若能製作本土母語（例如使用最多的是閩南語）教材，讓多元母語雙向交流，將豐富學習教材。考慮學習者背景，教材內容包括且輔以簡明之圖示或插圖。

另外我們必須思考教學者培育，透過辦理研習培育種子教師，結合實驗、體驗及參訪課程，融入所製作之多元族群教學教材，再辦理親子共學活動。

II. 主要內容

1. 研究目的：

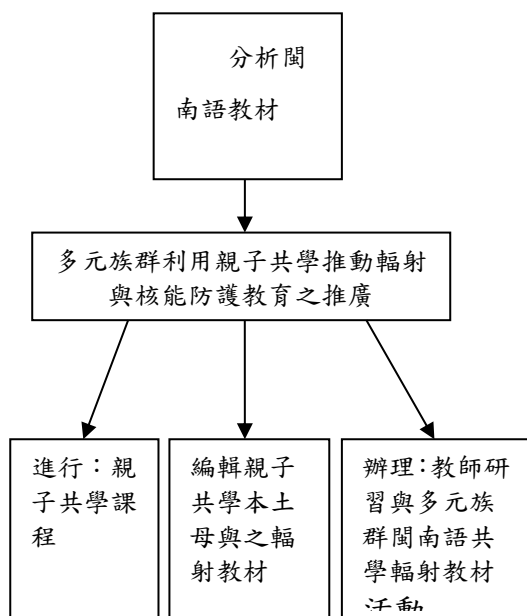
參考中、小學環境游離輻射課程指標及層級架構，與九年一貫自然與生活科技課程與社會科課程教材分析，

設計多元族群本土母語(閩南語)輻射與核能防護教育文宣教材，內容涵蓋民眾關切原子能之安全、輻射安全管制、民生應用、核能電廠意外事故之民眾防護、環境輻射監測與放射性廢棄物等。另外師資培訓為此階段重點，配合中小學多元族群學習，藉由種子教師的研習、參訪、討論、實驗等方式，了解所製作之多元族群教學內容並進行教學。因此本研究目的如下：

- (1) 製作多元族群本土母語(閩南語)文宣教材。
- (2) 辦理種子教師培育研習。
- (3) 辦理結合實驗、體驗及參訪核設施之親子共學活動。

2. 研究構想

本研究旨整體概念以下圖呈現：



圖一 研究構想

3. 研究流程

本研究根據研究動機、研究目的與文獻探討的結果，分為準備階段、實施階段與撰寫階段：

- (1) 準備階段：根據自然與生活科技領域及社會領域教科書輻射概念分析為課程深度，著手蒐集國內外相關期刊與論文，分析教學者對教材需求與對親子共學看法，進行課程分析與教材發展之參考。
- (2) 實施階段：本研究之場域為學校或社教機構，利用課外時間實施本研究之課程，教學內容以輻射知識與核子防護為主，輻射基本認識與應用為輔，並以母語(本研究指閩南語教學)教學為主，其他語言為輔。
- (3) 撰寫階段：整理資料及撰寫論文。將蒐集之資料、評量單與學習單進行分析及詮釋、歸納，並提出研究結果報告，與適當建議。

4. 研究工具

為了瞭解學習者學習成效，本計畫針對研究目的，參考文獻資料和教材內容自編輻射教育認同度、滿意度與認知測驗，收集學習者意見與學習成

效。

效度部分，計畫依據教材內容進行內容效度分析。由學者專家、資深教師，依據課程教學內容、測驗之雙向細目表進行效度之審查，以建立專家效度。

6. 資料處理與分析

蒐集師生意見，先擬定好訪談問題，再對訪談者進行訪談，認知測驗部分：測驗答對一題給1分，答錯或未作答則不予計分。受測者對於輻射教育認同程度依李克特量表分為非常同意、同意、不同意、非常不同意，得分依序為4、3、2、1。課程滿意度得分依序為5、4、3、2、1。

III. 結果與討論

1. 製作閩南語漫畫與動畫

a. 編輯閩南語動畫

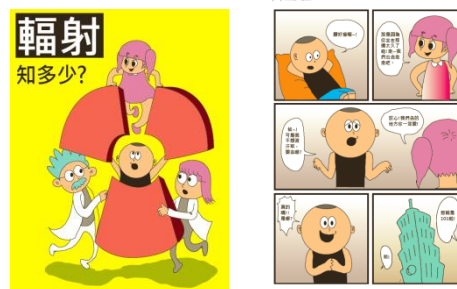
我們整合漫畫與動畫內容，並根據漫畫教材編輯閩南語版動畫，並邀請學校進行閩南語教學教師進行閩南語的配音工作，動畫教材內容包括輻射基本知識、輻射應用與核子防護等。



圖1 動畫(摘錄)

b. 編輯閩南語漫畫

本計畫編有輻射知多少的漫畫，內容包括輻射基本知識、輻射應用與核子防護等。



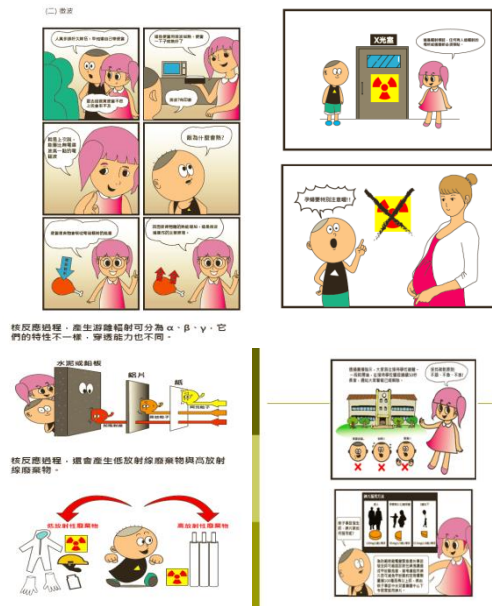


圖 2 漫畫(摘錄)

2. 培育核安與輻射防護以多元族群語言教學種子教師
本計畫因應閩南語教材開發增加四位種子教師
培訓並於教材完成後辦理師資培訓營。

表1 培育核安與輻射防護種子教師

時間	地點/培訓老師
1060630/1830~2030	科學館S103b/沈佳燕, 詹昌諭
1060804/1830~2030	科學館S103b/莊麗琴, 王世綸
1061018/1400~1630	二重國中會議室/新北市環教輔

3. 辦理研習與參訪活動多元推廣課程
本計畫教學推廣分為北部場與南部場。

a. 北部場

表2 北部場活動

日期	地點	人數
20171007(六)	台電北部發電展示館	41
0171022(日)	台電北部發電展示館	33
20171029(日)	台電北部發電展示館	34
20171122(三)	碧湖國小	12
20171215(五)	新北市大坪國小	28



圖 3 北部場活動照片

b. 南部場

表3 南部場活動

日期	地點	學員人數
20171201(五)	屏東公館國小	28
20171202(六)	屏東信義國小	32
20171203(日)	屏東勝利國小	34
20171203(日)	屏東後庄國小	36
20171203(日)	屏東泰安國小	38
20171216(六)	屏東公館國小	31
20171217(日)	高雄市大寮國小	34



圖 4 南部場活動照片

4. 輻射教育認同度及課程滿意度

a. 輻射教育認同度

主要是調查親子參與活動對於輻射教育認同程度意見(樣本數為121)，受測者認同度最高的展品為「9. 核子意外發生狀況在室外或學校緊急應變知識」(M=3.60)，「7. 我們應該要了解那些是游離輻射(X光或 α 射線)」(M=3.58)，「4. 我們應該要了解那些是非游離輻射(紅外線、微波或無線電波)」(M=3.56)及「5. 基礎輻射防護知識應加入學校課程中」(M=3.56)，唯「2. 人體接受過X光或電腦斷層等的設備照射後，不會有輻射殘留或汙染發生」(M=2.64)測試結果落於不同意範圍，代表本題概念為受測學生仍較有疑慮或因原本對此概念之疑慮較深，值得針對此概念加深加廣，俾利提升整體輻射防護概念；整體而言，由第1題到第10題對於各項概念的平均分數可得知，各項概念同意度的平均分數皆高於3.27，顯示受測者都此次活動呈的正面評價。

表 4 輻射教育認同度

題目	平均數	標準差
1. 我們生活中的環境就有天然輻射存在	3.52	.564
2. 人體接受過X光或電腦斷層等的設備照射後，不會有輻射殘留或汙染發生	2.64	.947
3. 看見病房內在使用移動式X光機時，大家要盡可能離很遠，以免對身體造成不良影響	3.45	.548
4. 我們應該要了解那些是非游離輻射(紅外線、微波或無線電波)	3.56	.498
5. 基礎輻射防護知識應加入學校課程中	3.56	.561
6. 當有核能意外災害時，應以搶救病患生命優先搶救，輻射劑量可後續進行偵測	3.27	.753
7. 我們要了解游離輻射(X光或 α 射線)是那些核子意外發生之緊急狀況下，知道何時才可以吃碘片以保護甲狀腺的知識。	3.58	.496
核子意外發生狀況在室外或學校緊急應變知識。	3.47	.564
認識核能發電原理	3.60	.510
	3.51	.518

b. 課程滿意度

各項課程滿意度分析受測者對於輻射三個面向的滿意度方面，也都呈現高度的正面肯定，其中以「輻射防護基本概論」最高(M=4.54)，其次為「1-3 生活中輻射種類與應用」(M=4.53)，接續為「1-2 醫療輻射簡介」(M=4.39)，代表此類的活動給予了參加學生正向的感受與體驗，更達到了本次教育的主要的推廣目的。

表5 課程滿意度

題目	平均數	標準差
輻射防護基本概論	4.54	.592
醫療輻射簡介	4.39	.711
生活中輻射種類與應用	4.53	.620

5. 學習成效

我們於教學前後進行調查以了解學習者對於輻射概念的學習差異見表6。

表6 學習成效

題目	後測答對率
1.在醫療檢查用的X光是【①自然輻射 ②人造輻射 ③人體本身的輻射】。	33.34%
2.在照X光時，需要在密閉的空間裡，避免輻射外洩，還要穿一件很重的鉛衣，請問鉛衣有何功能？【①鉛衣可以吸收對人體有害的輻射線。 ②鉛衣可以隔離對人體有害的輻射線。③鉛衣可	33.34%

以防止輻射線跑到室外。】

3.為什麼X光一照到我們身體過去，我們在X光片中看到骨頭是白色的顯示出來，其他的看不清楚或是呈現黑色的呢？【①骨頭是白的，X光顯示為白色。②利用電腦設定顯示出不同。③人體組織對輻射接收能力不同，顯示也不同】

4.在人造輻射的場所或儀器都需要張貼的輻射警告標誌來提民眾，下列哪一個是輻射警告標誌？



【① ② ③】

5.電視、行動電話、和收音機等都是利用天線發出去什麼來傳達資訊？【①遠紅紫外線 ②無線電波 ③放射線】

6.醫療器材都需要消毒滅菌，下列哪一種消毒滅菌過程中容易破壞醫療物品的品質？

【①真空消毒滅菌 ②輻射消毒滅菌 ③高溫消毒滅菌】

7.根據內政部警政署航空警察局旅客不得攜帶物品進入航空器之補充說明規定中，例如：剪刀，自拍器……等，不得放入隨身行李中。海關人員如何快速檢查旅客的行李？【①應用輻射的X光掃描來檢查行李。②利用紅外線掃描來檢查行李。③利用無線電波掃描來檢查行李。】

8.輻射被廣泛應用在醫療中，下列哪一種檢查輻射劑量較少？【①骨頭顯像掃描 ②頭顱電腦斷層掃描 ③乳房X光攝影】

9.在大自然中，地表和岩石含有天然放射性種，不同地區可能因不同地質型態而具有不同輻射劑量。在台灣有一塊因為輻射而出名的石頭，李遠哲博士還曾經以這顆石頭做為研究素材，請問是下列哪一種石頭？【①澎湖石 ②鶯歌石 ③北投石】

10.若發生核子事故，警報聲響為【①三長兩短，重覆10次 ②響一秒，停一秒，重覆25次 ③連續聲響達50秒】。

11.在今日，輻射普遍被應用在各式現代化設備，若能夠對它有正確的認知，注意安全防護，我們便可以安心享受其所帶來的各種便利。下列哪一個是將輻射有效應用在民生上？【①殺滅農作物的害蟲 ②用鋁棒來當球棒 ③增加農產品的新鮮度】

12.核能發電原理是透過核能反應所產生的熱，將水變成蒸氣，並讓水蒸氣帶動發電機發電的。請問核能發電場發電類似下列哪一種發電？【①火力發電 ②水力發電 ③風力發電】

66.67%

100%

91.67%

91.67%

100%

100%

91.67%

83.33%

75%

75%

13.核能發電雖然可以提供我們電力使用，但我們也要做好防災準備。國際史上最重大的核子事故是【①日本福島事故 ②烏克蘭車諾比事故 ③美國三哩島事故】	100%
14.請問我國的國家災日是哪一天？【①4月22日 ②9月21日 ③10月10日】	100%
15.萬一發生核子事故，中央災害應變中心會透過電視、電台持續播放警報通知，廣播車也會在街頭巡迴廣播。下列哪一應變的方式的錯誤的？【①如果在室內，打開門窗通風。 ②打開電視了解最新情況。③如果在車上打開收音機接收最新訊息。】	83.33%
16.用於核子意外發生之緊急狀況下，有發生放射性碘暴露時，用以保護甲狀腺的是【①鉛片 ②碘片 ③抗生素】。	91.67%

IV. 結論

(一) 結論

1. 建構完整多語系教材:結合先前計畫所開發越南語、印尼語與泰語動畫教材，於本年度新增閩南語教材，讓我們推廣活動能進行多語系教學，若結合平板或手機，可讓學習者選擇自己熟悉語言進行輻射學習。
2. 本年度嘗試開設越南語、印尼語和泰語為主要對象的親子共學各一班，希望能用他們語言傳遞輻射防護知識，避免語言不同所造成學習障礙。
3. 本計畫教材亦於輔導團增能研習時間，進行教學，培育更多種子教師。

(二)建議

1. 透過先觀賞閩南語動畫在學習輻射教材有助於親子理解輻射知識。
2. 透過親子共學與參與活動來認識輻射相關概念方式可以提升親子對輻射知識的討論與學習興趣。

參考文獻

- [1] 王文進(2012)。成人教育之環境游離輻射漫畫輔助教材設計研究。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版): 臺北。
- [2] 王文濱 (1978)。輻射線在工業、農業上之應用。科學月刊全文資料庫, 103。取自 <http://210.60.224.4/ct/content/1978/00070103/0004.htm>。
- [3] 王敏妃(2012)。開發國小高年級學生「認識輻射」四格漫畫輔助教材與學習成效之研究。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版): 臺北。
- [4] 林延霞(2006)。新北市國民小學本土語言教學實施現

- 況及其問題之研究。淡江大學教育政策與領導研究所碩士在職專班碩士論文(未出版): 新北。
- [5] 林群智(2006)。由核電爭議談核科學主軸之通識教育。通識教育與跨域研究, 1 (1), 19-36。
 - [6] 莊淵源 (2012)。桃園縣國民小學教師環境認知、環境態度及環境議題抉擇之研究—以「核能發電」為例。國立新竹教育大學人資處數理教育研究所(未出版): 新竹。
 - [7] 張孟育(2012)。新移民親子共學發展之研究—以宜蘭地區國中小之新移民子女為例。佛光大學管理學系碩士論文(未出版): 宜蘭。
 - [8] 教育部終身教育司 http://depart.moe.edu.tw/ED2400/News_Content.aspx?n=115F1082F1FB6842&s=84F79B76535C0408
 - [9] 許瑞芬(2015)。繪本教學在新住民親子共學上之行動研究。中國文化大學華語文教學碩士學位學程論文(未出版): 臺北市。
 - [10] 游麗芬(2006)。鄉土語言支援人員實施閩南語教學的經驗與困境之分析研究—以雲林縣國小低年級為例。國立嘉義大學幼兒教育學系研究所碩士論文(未出版): 嘉義市。
 - [11] 楊文彬 (2003)。台灣光復後成人教育政策發展之研究。國立中正大學碩士論文(未出版): 嘉義縣。
 - [12] 楊國良(2011)。高中職學生核能認知與核能態度關係之研究。國立彰化師範大學工業教育與技術學系工業教育教學碩士班碩士論文(未出版): 彰化市。
 - [13] 楊國德(2004)。新型態社會的成人教育。成人教育, 77, 23-31。
 - [14] 黃富順(2000)。成人教育導論。臺北市: 五南。
 - [15] 廖雪伶(2014)。環境游離輻射概念在中小學教科書內容分析之研究—以社會及自然與生活科技領域為例。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版): 臺北。
 - [16] 鄧運林(1988)。成人學習原則及其在課程設計上之應用。隔空教育論叢, 1, 67-88。
 - [17] 劉建國(2007)。國民小學閩南語教學研究之整合研究。國立臺北教育大學課程與教學研究所碩士論文(未出版): 臺北
 - [18] Ku, C. K. & Wu, C. T. (2012). The Study of Radiation Education Indicators in K-9 Sustainable Environmental Education. 11th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Vancouver, Canada.

建立我國核能資訊公開透明機制之法制基礎 Establish Legal Institutional Foundation for Nuclear Freedom of Information and Transparency

計畫編號：MOST 106-NU-E-305-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：高仁川助理教授

e-mail：lawrck@mail.ntpu.edu.tw

計畫參與人員：共同主持人：張惠東助理教授

執行單位：國立臺北大學法律學系

摘要

儘管我國已制定政府資訊公開法，但在核安資訊公開制定專法的必要性上，仍有不同見解。因此，伴隨我國核能政策的爭議，從廢核到核廢的轉變，在理論層次，釐清並分析作為法制基礎的基本概念，尤其是資訊公開、透明性，仍有待進一步釐清。本研究計畫旨在分析這兩概念有何差異？與民眾參與的關係又為何？於法制設計上，資訊公開、透明性、民眾參與所具體對應的制度或法規為何？假使，欲落實資訊公開的理念，在組織面上，如何兼顧專業委員會的專業客觀及公正性、民主參與的代表性，乃至尊重地方居民的權益，各國法制、司法審判實務有何進展？並在此基礎之上，探究我國核廢立法的議題上，闡明如何鑲嵌資訊公開與透明性的理念，釐清並鋪陳未來法制化所需的理論基礎。

關鍵詞：核安管制、資訊公開、透明性、核廢立法、民眾參與

Abstract

Although Taiwan government passed “Freedom of Government Information Act” in 2005, it is controversial on the necessity to adopt a specific legislation on nuclear safety and transparency. As the focal issue changed from “Nuclear Free Policy” to “Nuclear Waste Disposal”, it is essential to deepen the theory related to legal institutional foundation concepts, freedom of information, transparency, for example. This research project aims to clarify what difference between these concepts? Do these concepts have any relationship with citizen participation? How to apply these concepts to shape correspondent legal mechanism? In term of the objectivity, how to design professional impartial committee? Based on the theoretical foundation, this project also intends to explore the possibility to apply these concepts to the draft of nuclear waste proposal of Taiwan.

Keywords: nuclear safety regulation, freedom of information, transparency, legislation of nuclear waste, citizen participation

I. 前言

民主制度之運作良窳，與政府透明度息息相關。透過溝通以及參與，民主才有意義，公民才能在資訊公開的情況下進行公共政策的選擇。政府如何就其決策與公民進行資訊交流，說明政府的選擇，其中關於公民的行政文書近接權相當重要，具體制度包括行政資訊以及文書資訊的公開。

然而，伴隨科技快速發展與自然因素變化的交互影響漸為人類所重視，倘根據風險社會學理論，近來有主張：主流科學觀點壓抑了具有爭議的生態與社會理性，進而擴大了公眾、國家與科學家之間的鴻溝。公眾缺乏對科學家與科技風險治理的信任，而科學家與專家則對於政府缺乏風險溝通機制感到不滿意，這將會導致科學研究正當性的危機。近來越來越多學者主張將科學民主化，提倡在風險脈絡中的科技決策增加更多公民參與。針對公民對科學專家與國家權威的懷疑態度，亦有抱持樂觀看法者，並積極肯定公民的參與，甚至建議擴大參與民主，並認為公民抗爭運動對於打破科技對社會的支配是必要的。在這過程中，亦有強調地方居民對科技風險的判斷，其間所展現出的對社會與政治價值的敏感度，卻往往被專家所忽略。本計畫提案者認為：從建構我國核能資訊公開透明機制之法制基礎，思考如何由法制層面，回應上述觀點與看法的質疑，應有其價值。

面對行政任務日益多樣化與複雜化，強調權利保護與司法審查的傳統行政法體系對於現今社會的迅速變化已無法妥善因應，比較法上，德國自 1960 年代起開始討論法律如何能兼顧對行政的規範拘束，又能對行政適度的鬆綁，自早期對裁量、不確定法律概念以及判斷餘地的討論，到近來部分學者開始主張所謂革新路線。以環境領域為例，即吸納經濟學的理论在法律中運用經濟誘因以及官民合作等概念。再者，由於科技進步，人們開始區分危險以及風險的不同，而國家任務從傳統危險防禦外亦開始逐漸重視對風險的預防，但由於風險的複雜性以及評估的不確定性，故風險的程度如何也很難清楚說明並加以界定，更有學者認為風險是一種社會建構，反應的各種價值觀甚至偏見，也就是風險認定須透過民眾自身的因果詮釋，而為使民眾信賴國家行為，法

律須建構完善之民眾參與程序。

II. 主要內容

本計劃在執行過程中，主持人曾經藉德國呂納堡大學法學院教授(Leuphana Universität Lüneburg, Germany)，Prof. Thomas Schomerus 來台演講訪問之際，當面請教 Prof. Schomerus，究竟所謂「資訊公開」、「民眾參與」以及「行政透明性」這三組學理概念比較的關聯性與區別。Prof. Schomerus 係環境與能源法、自然資源法領域的專家，其認為：這三組觀念實際上難以嚴格區別，但他們共同構成當前國際環境法上重要的奧爾胡斯公約(Aarhus Convention，中文有譯為：奧爾胡斯公約)的重要支柱。奧爾胡斯公約係由聯合國歐洲經濟委員會(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)制定，全名為「有關環境事務行政決定程序中之資訊請求權與民眾參與以及司法請求權公約」(The Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters)，於1998年6月25日在丹麥奧爾胡斯市通過，2001年10月30日正式生效。國內亦有研究認為：民眾參與環境事務之程序權利，包括：參與環境決策(access to environmental information)、環境資訊透明(public participation in environmental decision-making)、以及可運用的司法救濟管道(access to justice)，並隱含對國家有效執行環境法之請求權利。

奧爾胡斯將前三種權利明白反映在它的三大支柱(three pillars)。因此，從環境資訊領域，國際公約的發展已經將傳統上屬於內國法的資訊公開法制，如：美國的資訊自由法(FOIA)、或是我國的政府資訊公開法，拓展到國際法的面向。並且，將所謂的資訊公開與民眾參與融合在一起，更值得注意的是：其意義已經不是單純推促進行政決策的透明性而已，而更具有實體法上權利之性質，使資訊公開、程序參與之權利，可經由向法院尋求訴訟之方式而獲得保障。資訊取得或資訊使用權(Access to Information)是在處理各式爭議問題層面上(包含環境相關爭議)，最重要的核心之一，其在環境相關爭議問題的重要性在於消弭雙方資訊取得的不對等。舉例而言，主張環境不正義(Environmental Injustice)的在地社區居民與其欲指控的對方相比，有較大的可能性在資訊來源的獲取上，具其弱勢之處，而這也正是對抗環境不正義的主要措施--「重新分配資源以達成實質公平」的本質。因此，在環境行政領域，聚焦介紹各式於處理環境爭議問題中，可供於使用的公開資料來源，遂成為1970年代美國環境立法興起之後的一個重要課題。

法國2006年「核能透明性暨核能安全法」(Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, TSN法)第一條規定，「所有的機制都是用來確保人民有獲得正確的且可得知的核能安全相關資訊」。(l'ensemble des dispositions prises pour garantir le droit du public à une information fiable et accessibles en matière de sécurité nucléaire)。其立法目的，乃在於透過立法來提供一個清楚而明確的核能資訊公開機制，也明確化人民的權利的範圍，減少社

會上的紛爭與動盪。如此之目的，更支持了核能資訊公開法獨立制定專法的必要性。針對法國法制，若側重在以組織面向為中心，我們可見：核能資訊公開制度專節，規定在TSN法第三章第一節的「輻射防護與核能安全的資訊權利」(droit à l'information en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection)之中。法國核能透明性暨核能安全法創設了兩個機關來負責核能資訊的相關問題，一個是地方層級的「地方核能資訊公開委員會」(commissions locales d'information, CLI)，另一個則是位於國家層級的核能安全資訊公開及透明性高等委員會(HCTISN)。地方核能資訊公開委員會。全法國共有53個，職司核電廠之一般監測任務、資訊公開及關於核能安全、輻射防護和核活動對人和對環境影響的諮詢服務，為法國核能資訊公開制度中最重要與實質操作之組織。依本法規定，地方核能資訊公開委員會之成員包括國會議員、縣(市)議會或省議會議員、環境保護團體、經濟利益團體和工會組織代表及醫學相關學者專家等。至於政府機關中，核能安全局(ASN)的代表、其他國家有關的服務和省衛生局(ARS)以及核子設施經營者代表，可以諮詢之身分參加會議，但無表決權。此外，若核子設施之廠址位於國境，委員會的組成也應包括外國國家成員。核能資訊公開法規定，不論任何人(私人、法人)均有請求公開的權利。此外，請求人也不需要證明自己有法律上利益，而可逕自直接請求。請求人可以向核子設施經營者請求公開「重要核能設備」的相關資訊，透明性的要求也適用於放射性物質的運輸。如果超過行政命令(décret)規定的放射性物質運輸、移送的基準量，請求人也可以向該放射性物質的所有人(détenteur)或是搬運的責任人請求公開相關資訊。亦即任何人皆有權，透過放射性物質運輸的負責人，獲得關於因活動而暴露於游離輻射的風險，以及為了防止或減少這些風險所採取的核能安全及輻射防護的相關措施等資料的界線。本法的公開資訊對象為：一、起因於核子設施經營者活動所致的照射風險的相關資訊；二、為了防止或減輕照射風險，而構想的安全對策與輻射防護對策的相關資訊。此處不問資訊來源(不論是自己做成的或從他處受領)，也不問資訊的媒介(文書或是電子)，均應公開。民間核子設施經營者拒絕公開時，人民得提起越權訴訟。

就理論而言，國內亦有研究透過比較德、美相關資訊公開的理論，並論述這些理論在我國之發展，基本權之組織程序保障功能、正當法律程序以及民主理論，而民主理論正當化行政權的方式也就是透過民眾參與，其中值得關注的也就是晚近所發展的審議式民主概念，此概念近來在各國逐漸受到重視，雖然並非十全十美，但仍值得注意；接著提到奧爾胡斯公約，本公約係希望改善民眾取得環境資訊之管道，本公約內容大致包括政府相關資訊之主動、被動公開，民眾參與程序之設計、司法救濟的必要、訴訟權能的放寬以及相關配套措施。除了有關奧爾胡斯國際公約介紹之外，在論述民眾參與理論基礎的三個面向，該研究清楚指出：分別是民主理論、憲法上正當法律程序之保障以及兩公約相關論述。此外，尤其在開發行為上，論者更認為開發行為中的民眾參與必須始於所有選擇均具可能性，且有廣泛參與、實質討

論，且具有濃厚價值選擇色彩，但行政程序法關於聽證之程序並無法達到上述要求，因此主張應該以審議式民主為基礎在開發行為中建立審議式之民眾參與，方能使開發行為的焦點著重在受影響的居民，而非開發單位的龐大經濟利益，方能達到民眾參與抑制支配之制度目的。且建立審議式的民眾參與亦能與兩公約以及經社文公約相關規定遙相呼應，再者亦較能符合釋字第 709 號解釋所要求「確保利害關係人有知悉相關資訊及適時陳述意見機會」之意旨。本研究計畫初步認為：該研究於民眾參與的理論基礎問題上，進行相當完整而清楚的說明，相當程度上，或亦可作為建構我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的參考。

至於具體制度的實踐，論者更進一步依序討論「資訊公開、陳述意見、聽證、公聽會、決策形成程序」以及「民眾參與方式選擇」之外國立法例和我國現行制度。前三者主要著重政府資訊公開法以及行政程序法和外國法之比較，但我國目前則欠缺公聽會之相關規定。就此，本研究計畫亦認為，於首先闡述建構理論基礎之後，歸結現有總論性的法律規範，以作為探究我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的實定法規範，則為建構法制基礎的第二個步驟。因此，前述論者的分析方法，正呼應本研究計畫在方法論上的主張。在細部規範設計上，該論者所提出的見解：「關於決策形成程序主要有三，協商式的法規、合議制決策委員會之民眾代表、需民眾同意之行政決策；關於民眾參與方式之選擇，德國法認為因應行政事務的差異對當事人範圍做不同的界定，且盡可能公開資訊，但對政府資訊公開及民眾提出資訊設有期間之限制，行政的決定亦有一定期限之限制；美國法則依據 *Mathews v. Eldridge* 所提出之利益衡量公式做斟酌；而我國法上選擇民眾參與方式之判斷標準根據大法官對正當法律程序之相關解釋本文整理出以下判準：案件涉及之事物領域、基本權種類、限制強度及範圍、所欲追求之公益、功能最適之角度、有無替代程序、各項可能程序之成本、其他相關因素，綜合以上八點判斷應選擇何種民眾參與模式。」明確而具體，應可作為核能行政領域之參照。在橫向其他制度面的比較上，甚至各論領域法規範之間的關聯性，例如：土地開發行為係一連串之行政流程，涉及多種法規範競合，國內論者從制度的橫向比較出發，以都市計畫法、區域計畫法、環境影響評估法以及土地徵收條例為中心，且認為開發行為不能割裂單獨為判斷應該整體觀之，並進而剖析上述法規範中關於民眾參與程序之規定、細譯行政法院相關判決後，就現行規範以及司法實務之運作現況提出檢討，嘗試重建開發行為中民眾參與程序之藍圖，以及試著建構原理原則以充實民眾參與規範之內涵。

換言之，本研究認為：於建構我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的過程中，除了相關核能法規範之外，釐清、描繪出其他相關領域的法規範中，有關民眾參與的規定，亦屬必要。例如：核電廠興建或放射性廢棄物儲存處置的選址問題上，必然涉及土地利用法規，則在該等法規中的民眾參與、資訊公開，乃至行政透明性的規範要求，亦應作通盤整理。針對現行民眾參與的現行制度缺失與建議，若從現行制

度來看，論者在分析相關行政法院判決後觀察到現行實務操作上，似有下述缺失：1.民眾參與程序過晚，至遲應於選址程序即使民眾參與得進入開發案件。2.都市計畫法以說明會之形式使民眾參與流於形式。3.區域規劃法欠缺民眾參與程序。4.環境影響評估法只有在第二階段環評始有民眾參與程序，但實務上多數案件皆是第一階段環評有條件通過，變相壓縮民眾參與。5.土地徵收條例第 10 條第 2 項由說明會架空實質民眾參與機制。6.法院多將開發行為割裂來做審查，忽略開發行為應作為整體流程審查行政程序之合法性。7.法院審判上似乎過於保守的尊重行政機關之判斷餘地，僅作形式上程序審查，不太審酌實體爭點。

現行開發行為民眾參與程度由寬到窄依序為：環境影響評估法、區域計畫法、都市計畫法、土地徵收條例，並認為由於土地徵收條例以及區域計畫法民眾參與法制過於不足，因此欲走程序內救濟之人民皆回過頭爭執環境影響評估法之民眾參與程序，因此使得環評程序負擔了過重之負荷。因此參酌國土計畫法草案認應將民眾參與流程之重建藍圖勾勒為：五年通盤檢討區域計畫、五年通盤檢討都市計畫、環境影響評估程序、土地徵收條例，重新建置開發行為中民眾參與之完整規範。

論者最後更提出民眾參與制度之原理原則：

- 1.漏斗式參與原則，強調越早開始之程序應開放越多民眾參與隨著程序進行逐漸縮減參與民眾之範圍。
- 2.實質參與原則，賦予各階段不同之效力，行政機關有實質促進民眾參與且使議題能獲有效討論以及最終之回應說明義務。
- 3.盡早參與原則，與漏斗式原則相呼應，避免民眾參與時機過晚而流於形式。
- 4.全面參與原則，非僅只保障利害關係人參與，越早期之參與應開放越大範圍之民眾參與，使各種議題經充分討論審議，以達行政正確之目的。
- 5.必要參與原則，大範圍的民眾參與並不能取代一定比例之利害關係人參與，以免代表性遭受質疑，認為利害關係人之法定出席率設計應隨開發階段進行而有不同設計。
- 6.平等參與原則，關注每一次的公聽會，強調應強化人民之權利，且須以人民為主體而非行政機關、開發單位，並強調如時間、地點、語言等皆應配合人民，使得每個人民都有實質參與以及討論之機會。

從以上的引介、比較，本研究計畫初步認為：現有其他各論領域，經由個別法規範所形成之制度的操作經驗，既有若干研究者所累積的反省成果，已提供關於民眾參與未來制度修正的相當參考方向。換言之，歸結參考借鏡現有的其他各論性法律規範，以茲作為探究我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的實定法規範，進而落實建構核能法制中民眾參與機制的設計基礎，此第三個步驟應不難尋得其具體可行之作法，並應留意其他法規範檢討修正之建議方向。

本研究初步認為：前述見解，就特定、具體環境行政領域中的管制法規，有關民眾參與制度具體規範設計，詳細加以檢視，並援引正當法律程序原則作為檢視基準，在方法論上頗為可採。其觀點充分掌握管制法規範中的行政行為定性，乃至救濟層面的完整思考，或可作為一

對照範例。換言之，在「歸結參考借鏡現有的其他各論性法律規範，探究我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的實定法規範，進而落實建構核能法制中民眾參與機制的設計基礎」之後，盤點並檢討既有核能行政領域中的民眾參與及資訊公開現有法制，尤其是核能行政領域中的作用法或管制性法規，此應為建立我國核能資訊公開透明性機制法制基礎的第四個必要步驟。

III. 結果與討論

關於計畫成果的部份，本研究發現並認為：

1. 隨著國際間強調對當代風險社會的應有認知，國家任務逐漸從傳統危險防禦擴展到重視對風險的預防。但由於風險的複雜性以及評估的不確定性，不同的風險程度事實上未必都能明確地以量化的標準予以界定。遂有見解認為：風險是一種社會建構的過程，反映出各種價值觀甚至也可能是偏見。換言之，風險的認知與界定，亦須透過民眾自身的對因果關係的理解與詮釋，而政府資訊的主、被動公開，以及對決策過程的進一步透明化，其目標也不應侷限在確保特定行政決定的產出或是其作成，能符合合法性與正當性的要求而已，同時也應具有促進民眾信賴行政機關行為的作用，並使法規在就所謂危害或風險的界定與因應措施的立法建置設計上，將透明性、資訊公開，及民眾參與的程序加以前置化。

2. 因此，如何通盤觀察各種不同行政程序中的民眾參與的法規範設計與原理、並就此等法規範與資訊公開的關連性及理念，進行比較對照，以釐清行政透明性、民眾參與、資訊公開的概念意涵有何異同、作為制度設計的原理，表現在法規範設計上，該如何區別與發揮各自的功能，避免規範的床架屋與可能衍生出不必要的過度複雜關係，造成適用上的混亂與困難，實屬重要！

3. 本計劃彙整比較資訊公開透明機制之相關可能法制基礎，如：資訊公開、陳述意見、聽證、公聽會等決策形成程序，以及民眾參與方式選擇之外國立法例和我國現行制度。

4. 發現我國個別領域的法令共通問題之一，在於普遍多係將決定權限實質上一部分委由專家委員的參與或諮詢，民眾參與僅在行政程序前期，但在後期進入專家學者審議之階段並未給予民眾參與之機會，故而欠缺雙方直接、實質之討論、交換意見，與透明性的理念，仍有落差。此外，在立法研擬的過程，多偏重行政院提交到立法院的版本草案、立法院個讀會的討論過程的記錄與公開，但在行政院核定提交法規草案之前的過程，原始提案機關的考量為何、專家與智庫幕僚單位的意見如何形成，似乎少見其透明公開與民眾參與過程的呈現。簡言之，行政透明性、民眾參與、資訊公開的意義與功能，並不應只從法律制定之後的適用過程，具體行政行為的角度來理解，其與立法過程的意義雖不相同，但在立法制定或修正之前的行政部門草案研擬階段，亦應屬廣義的行政過程而有強化此一面向之透明性、民眾參與及資訊公開的必要。

5. 有關行政透明性、民眾參與及資訊公開的理念與條文

統整、對應與分析上，未來應強調制度關連性的連結比較，有別於傳統孤立式的條文解讀與制度割裂研究，使關於我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的建立，得有一相對較為完整之全貌。

IV. 結論

從環境資訊領域觀察，國際公約的發展已經將傳統上屬於內國法的資訊公開法制，如：美國的資訊自由法（FOIA）、或是我國的政府資訊公開法，拓展到國際法的面向。「資訊公開」、「民眾參與」以及「行政透明性」這三組學理概念實際上難以嚴格區別，但他們共同構成當前國際環境法上重要的奧爾胡斯公約（Aarhus Convention，中文有譯為：阿爾胡斯公約）的重要支柱。法國 2006 年「核能透明性暨核能安全法」則是進一步專門針對核能行政領域制定資訊公開內國法的重要先例。在瞭解核能管制資訊公開法制於國際間法制的演變之後，本計畫認為：首先，透過探討民眾參與的理論基礎，相當程度上或亦可作為深化建構我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的參考。其次，歸結現有總論性的法律規範，以作為探究我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的實定法規範，則為建構法制基礎的第二個步驟。繼而針對現有其他各論領域，經由個別法規範所形成之制度的操作經驗，參酌既有若干研究者所累積的反省成果，歸結參考借鏡現有的其他各論性法律規範，以茲作為探究我國核能資訊公開透明機制之法制基礎的實定法規範，以落實建構核能法制中民眾參與機制的設計基礎，此第三個步驟應不難尋得其具體可行之作法，並應留意其他法規範檢討修正之建議方向。最後，盤點並檢討既有核能行政領域中的民眾參與及資訊公開現有法制，尤其是核能行政領域中的作用法或管制性法規，此應為建立我國核能資訊公開透明性機制法制基礎的第四個必要步驟。透過釐清方法論上的思維路徑，將有助日後我國省思及檢視核能管制資訊公開法制的應然走向。

參考文獻

- [1] 吳美智，從奧爾胡斯公約論國際環境法中的民眾參與，國立政治大學外交系國際關係學系，http://csil.org.tw/home/wp-content/uploads/2012/11/吳美智_從奧爾胡斯公約論國際環境法中的民眾參與，頁 4。
- [2] 許宏達，環境風險管制下民眾參與制度之法制研究—以環境災害敏感區為中心，國立中正大學法律研究所博士論文，2015 年。
- [3] 許珮育，國土計畫、環境行政與土地徵收之程序理性——以開發行為流程之民眾參與為中心，國立台灣大學法律學研究所碩士論文，2012 年。
- [4] 關於法國法，整理自網路對於該法介紹的原文資訊，<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006053843&dateTexte=20081107>

核電廠除役及核廢料處理議題公眾溝通機制之研究

Public Communication on Nuclear Plant Decommission and Nuclear Waste Disposal Issues

計畫編號：106-2623-E-004 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃東益

e-mail：tyhuang@nccu.edu.tw

計畫參與人員：董祥開、傅凱若

執行單位：國立政治大學公共行政學系

摘要

本研究主要針對核電廠除役及核廢料處理議題之公眾溝通機制進行探討，研究目的希望借鑑國外成功的實踐經驗，以了解我國政府如何針對爭議衝突的核電除役相關問題對外進行溝通，並採取有效的公民參與機制以達成政策目標。本研究主要根據國際公眾參與協會所發展的五種公眾溝通光譜（包含告知、諮詢、涉入、合作以及授權）作為本研究主體架構，進一步分析美國、德國、日本、瑞士、法國及英國的除役及核廢料處理機制。分析結果發現，其中美國具有最完善的法規而公民參與機制完善；德國運用網路資訊平台持續進行除役行動；日本於福島核災後開始積極進行國際性論壇；瑞士具有完全公民參與的投票機制決定政策；法國著重展覽方式使公民了解資訊進而減少恐懼；英國則透過高峰會及學校合作交流資訊。

而我國政府在核電除役及核廢料議題方面，在公眾參與光譜五階段的架構中，相較而言，頗稱完備。於告知、諮詢、涉入三種途徑上政府相當努力與公眾進行溝通，除了在原能會的網站上提供相關資訊外，亦利用社群軟體、及時輻射監管等做法，化除民眾在核能安全上之疑慮。在合作方面有貯存廠周遭居民參與的輻射平行監測；授權層面則有核廢料處置場選址的公投設計等之溝通方法。目前國外不同國家各有其可供參考之創新作法，但仍需進一步評估。本研究參考六國的經驗，亦提出中程、長程的政策建議，特別在核廢料選址的議題更是未來需審慎討論的重點，以完整規劃核能除役計畫，實現「非核家園」的政策目標。

關鍵字：核電廠除役、核廢料處理、公眾溝通、公民參與

Abstract

This study emphasizes public communication on the subject of nuclear decommissioning and radioactive waste management. Based upon the spectrum of citizen participation (ex. inform, consult, involve, collaborate, and empower) developed by International Association for Public Participation, this report mainly analyzes experiences from six countries including America, German, Japan, Swiss, France, and British. The purpose of this study is to find out solutions to respond these controversial issues and understand how to adopt effective communication approaches to involve stakeholders and citizens into policy making processes.

The results demonstrate that in America, it has the most comprehensive regulations and various kinds of public participation channels for citizens in the nuclear decommissioning process. In Germany, it employs information and communication technologies and makes progress with nuclear decommissioning plan. After Fukushima nuclear disaster, Japan government takes active action to hold international forums to share information and communicate with their citizens. Swiss government builds up referendum systems to empower their citizens who can make final decision for their nuclear plants. In France, it stresses to open data related to nuclear plants and decommissioning plan in order to make people have more understanding and reduce their fear. British government holds summits and collaborates with schools to communicate with citizens and students.

Compared with six countries, Taiwan government makes great efforts in three types of approaches in the public participation spectrum including inform, consult, and involve to communicate with citizens. In addition to providing information in the website of Atomic Energy Council (AEC), it utilizes social media and timely nuclear radiation safety supervision to dispel people's worries and doubts. The AEC also involves citizens surrounding the nuclear waste depository in paralleling surveillance of radiation level as a cooperation channel. As a way to empower citizen, it also designs referendum mechanism engaging local residents in deciding nuclear waste final disposal site. The six countries studied in our report show strengths in different respects. Whether the innovations are applicable to Taiwan's context deserves further assessment. Based on the experience of the six cases, we propose suggestions to be evaluated and implemented in different stages. In particular, selecting the sites for nuclear waste disposal is the priority in implementing nuclear decommissioning plan. In consequence, this issues needs to be approached with great delicacy in order to achieve the goal of nuclear-free homeland.

Keywords: Nuclear decommissioning, nuclear waste disposal, public communication, citizen participation

I. 前言

近年來，不只我國持續關注核能的議題，各國紛紛將此議題納入重要決策當中，過去有關核能議題民眾往往對此議題產生畏懼，因此導致政府與民眾之間存有資訊上的落差。時至今日，再生能源的提倡使得各國開始面臨核電廠除役以及核廢料處理之問題，而後續與民眾

溝通的問題顯得格外重要。

在過去數十年間，公民在科技與環境政策上的議題扮演越來越重要的角色，特別是在健康與環境風險管理學界與民間團體有越來越廣泛的討論，政府及相關部門亦必須重視課責與回應性，在政策制定的過程中納入多元的公民參與及政策溝通途徑。放射性廢棄物長期以來被民眾視為有極高的風險（Ahearne, 1990; Putnam, 2002），政府該如何進行管理是極具爭議性的話題，國際相關研究及實務經驗發現放射性的物質如核能、放射性廢棄物等物質會讓民眾產生恐慌，會出現長期且持續的心理憂慮與壓力（Slovic, 2001; Slovic, Fischhoff & Lichtenstein, 1982; Rosa & Freudenberg, 1993）。要降低民眾的憂慮以及畏懼的心理因素，民眾需要充分的資訊，若是在資訊匱乏、訊息無法取得或者是接收到令人混淆的資訊時，恐懼與不確定性更會讓民眾認定其置身在風險當中，進而轉化為對政策的抗拒導致鄰避情節的產生（環境資訊中心，2002），讓管理與協調更難以推展。因此，普遍認為政府在制定放射性廢棄物管理上，必須更有效地提供充分的政策資訊及參與的溝通管道，不以達成重視民主價值及程序上的正義，更重要的是在政策管理過程中獲得民眾的支持與信心，建立民眾與政府間的互信與合作（OECD, 2013）。

故本文將以國際公眾參與協會（International Association for Public Participation, IAPP）依照公民參與權力之程度分為告知、諮詢、涉入、合作、授權五層面，所提出的政府與公民諮詢的五框架模式為基礎，檢視美國、德國、日本、瑞士、英國、法國等六個國家在核能議題上與民眾溝通之策略，並與我國現況進行比較分析，進而歸納出之中的差異，做為我國精進與強化溝通策略之建議。

II. 主要內容

在除役過程中，由於政府與民眾之間存在資訊不對稱，因此容易面臨民眾對政策反對或不信任的問題。政府與公眾溝通時，應著重於提供專業資訊並取得民眾信任。本章綜整分析六個國家的案例，結合上述之五階段架構，探悉各國與民眾溝通之機制。

一、美國

1、告知

美國核管會在聯邦公報、新聞稿及當地廣告通知，聯邦公報上會發布關於所有反應爐營運商的執照修改及展延續存的聽證會資訊及通知。美國核管會準備環境評估報告（Environmental Assessment, EA）描述執法的必要性以及所需諮詢的專家名單，若設備的異動導致巨大的環境影響，那麼美國核管會將製作一份環境影響報告書（Environmental Impact Statements, EISs）。環境影響報告書的內容包含該場址的地理資訊。

2、諮詢

若涉及地方的利益較大時，美國核管會會在除役設施附近召開公眾會議，除將開會通知單以郵寄的方式給公民團體、當地的公民以及政府首長外，還會將結果刊登在地方的報紙上。若非受影響的個人或單位想進入會議現場，則須於美國核管會刊登開會通知後 60 日內提出申請。美國核管會也會在官網公開徵詢意見，民眾也能隨時上傳意見給美國

核管會。

3、涉入

在執照發予上公眾可參與執照發予的過程，諸如營運執照、除役執照、更改執照等並可在委員會表達其建議（Nuclear Regulatory Commission, 2017c）。在參與環境影響審查上美國核管會會在受影響地區界定會議範圍，舉辦論壇，讓公眾可表達意見並為環境檢討提供資訊，會議主要目的是協助美國核管會確定環境影響報告中待解決的問題。參與者包含州、地方機構、印第安部落（Indian Tribes）或其他要求參與的民眾。

然而美國核管會在做除役溝通時，涉及到相當多的利害關係人，2003 年，美國核管會主席為加強公眾溝通效能，故指示成立公眾溝通專案小組，評估各式與公眾溝通工具，分析出適合各式利害關係人的關鍵，並提供溝通策略。

4、合作

如執照（許可證）中止計劃，美國核管會將審查執照中止計劃進行公眾討論，與民眾一起討論是否要中止廠商的核電廠許可證，也會在持照者的設施附近舉辦公眾會議，討論執照中止計畫以及審查其流程。

5、授權

關於美國核電廠的除役溝通，在法規制定上民眾可以針對核能相關的規定進行修改的請求，此一制度為法規制定權（rulemaking），其程序為民眾提交申請書，由美國核管會立案審查並將申請內容刊登至聯邦公報上，廣納民眾的意見並評估是否採取行動，如果民眾的意見具建設性會被提案至議會，最終的結果也會由美國核管會刊登至聯邦公報上（Nuclear Regulatory Commission, 2017f）。

二、德國

德國聯邦政府在 2013 年開始修訂公民參與選址的法規，2017 年立法通過，預計 2018 年啟動核廢料選址程序。選址法修法完成後下列為德國法律明定在選址過程中公民參與的權利與義務。以國際公眾參與協會的公民參與五框架模式進行探討：

1、告知

為確保公民在核廢料選址程序中確實得到相關資料，而建立一個資訊平台，聯邦核廢料管理局建立一個網路平台，將有關選址程序中的文件、資料收集、報告、意見等放置平台供民眾檢閱。聯邦核廢料管理局所舉行的會議，其會議內容將會放置於資訊平台上公布，也會公布在聯邦公報與當地報紙中。

2、諮詢

選址地點評估完成後，聯邦核廢料管理局應在受影響的區域舉行至少一個月的討論會議，政府會詢問當地居民的意見以取得回饋。

3、涉入

舉辦地區會議由受選址影響範圍內滿 16 歲之公民、地方區域代表、社會團體代表組成。區域會議與選址程序會同時進行，由聯邦核廢料管理局針對場址選擇與地區進行討論與協商。

4、合作

根據德國法律檔案在選址的過程中會成立全國陪審委員會，由 18 名成員組成，其中 12 名成員為德國聯邦議會提案選出，並由聯邦環境、自然保育及核能安全部部長任命 6 名公民（含兩名年輕一代的代表），三年一任。委員會成員不屬於聯邦或州政府的立法機構，也不屬於聯邦或州政府一員，這樣的安排最大的目的是讓公民進行參與並獨立監督選址程序。

5、授權

就本研究所蒐集的資料，依據這五個分類分析德國沒有授權的機制。

三、日本

關於日本核電廠的除役溝通必須以日本福島核災作為前後期區分，日本在福島核災發生前期，核電廠除役僅限於媒體報導及政府官方網站；日本福島核災發生後，日本政府開始加強對外的溝通機制，於 2013 年 8 月 1 日成立「核能除役國際研究機構」（International Research Institute of Nuclear Decommissioning, IRID），引進國際技術及組合研發團隊，由經濟產業省主導並成立福島第一核電廠除役委員會，加強對於福島核電廠的除役工作（陳鴻斌，2013）。以下運用國際公眾參與協會的公民參與五框架模式言之：

1、告知

日本在福島核災發生前期，日本政府多半只做到告知，例如東海第一核電廠的除役僅於媒體報導及在政府機關的官方網站上公布審查核准的核電廠除役計畫。福島核災發生後，除了運用原本就有的網站資訊揭露，東京電力公司會定期公布福島核能廠狀況，媒體與報紙的傳播媒介以及記者會的說明外，也開放核能電廠及研究室的參觀，例如日本原子能研究開發機構辦理關於核能除役及核廢料處置的宣傳展覽，還有低放射性核廢料處置場六所村的導覽。

2、諮詢

除了於地方舉辦專題討論會及小型的會議外，日本政府透過特殊的溝通車（Geo Mirai）（吳才基等，2016），運用大型的貨櫃車走訪各地區域的科學博物館、商業區及公園等地方（詳參圖 3-11），提供人民獲取核能及地質資訊外，也邀請人民進入車內共同對話並實際參與瞭解核能與處置場設置問題（原子能發電環境整備機構，2017）。

3、涉入

2011 年福島核災爆發時，福島核電廠所屬東京電力公司召開兩種型式的記者會，一是僅容納 40 人房間參與關於福島災難的小型會談，另一是關於電力一般使用的 300 人大型會議，足證事故發生時強調的重點不在於災難，而是關於是否會影響到一般用電，且在記者會中只有通過日本政府審查的記者俱樂部（Kisha Kurabu）會員才可以提問並獲得回答（Pratt & Yanada, 2014）。

福島核災後，日本政府與東京電力公司也遭受批評，未與民眾進行有效的溝通且試圖隱瞞資訊，日本政府在輿論壓力下，修正原子能基本法，仿效美國核管會整併經濟產業省的原子能安全及保安

院及內閣辦公室內的原子能安全委員會，於 2012 年 9 月 19 日成立核能管制機關「原子能規制委員會」，並改隸屬於環境省，脫離原本的經濟產業省，加強重視核能安全的決心。

日本政府也於 2016 年 4 月 10 日至 11 日辦理第一屆關於福島第一核電廠除役的國際論壇（The 1st International Forum on the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station），廣邀國內及外國學者、當地居民及學生共同參與關心福島核電廠的除役問題。

4、合作、授權

就本研究所蒐集的資料，依據這五個分類分析日本沒有合作、授權的機制。

四、瑞士

關於瑞士核能除役的對外溝通方式，以國際公眾參與協會的公民參與五框架模式言之：

1、告知

BKW FMB Energie 電力公司於 2015 年向瑞士聯邦能源局提交除役申請書後，會將該申請書公布於自我的官方組織網站，並揭露除役項目的主報告，另外還有事故分析和緊急保護措施、環境影響報告和安全報告三項子報告。

在除役項目的主報告會提及相關的除役法律、除役的方式、放射性廢物的處置、安全措施的介紹、除役的組織結構，以及除役及處置的資金來源。而事故分析和緊急保護措施報告揭露在保護措施之下，所有可能與除役發生相關事件的控制方式及安全要求。環境影響報告則是評估除役對於環境的無核效應，在整個除役過程保障整體的環境。安全報告則指出在除役期間所採取的預防措施，例如防止放射性物質的釋放或核心的偷竊（BKW energy, 2017）。

另外 BKW 電力公司也針對 Mühleberg 整個除役的過程製作動畫短片，對於 Mühleberg 在不同流程及時點所對應的工作進行說明，而在影片介紹的頁面也會提供關於除役項目主報告的相關連結，幫助人民熟知 Mühleberg 的除役狀況。

2、諮詢

BKW 電力公司在 2016 年 4 月針對除役申請的文件進行為期一個月時間的公民諮詢（Public Consultation）及召開媒體討論會（Media Conference），針對媒體提供更詳細的除役計畫資訊。

公民諮詢的指涉對象為 Mühleberg 核能廠的周圍人口，共有七百多人接受邀請，而在會議中指出關於 BKW 為什麼除役的決定、除役方式及放射性物質的移除流程。另外 BKW 也在自身的官網提供對話平台，讓人民可以去詢問以獲得官方的回應及解答，讓人民可以滿足自己想要的資訊。

3、涉入

BKW 電力公司除了藉由媒體宣傳外，會舉辦資訊事件（Information Events）的召開，不僅提供當地居民資料外，還致力於與地方和區域性的政治代表及利益團體進行對話與協商，相關的資訊事件共有三場次，分別在不同的時間及地點舉辦，依次是

2016 年 4 月 5 日在 Mühleberg、4 月 7 日在 Wohlen 及 4 月 12 日在 Radelfingen。

4、合作

就本研究所蒐集的資料，依據這五個分類分析瑞士沒有合作的機制。

5、授權

最後在授權上，鑒於瑞士許多核能法規尚未完備，若對於聯邦議會通過的新法律不滿意，也可以在法律公布後的一百天以內收集五萬個公民的聯署簽名，提交一份新修改的法律提案，進行一次選擇性的公民投票 (Optional Referendum)，否決新修正或新制定的法律。

五、法國

在國家層級上，舉辦每年當地的資訊委員會，在法國核能安全署的倡議下，與全國聯合會合作，匯集了 200 多名參與者舉辦有關重要核問題的圓桌會議。而在區域層級上，舉辦地方資訊委員會的會議辯論，地方資訊委員會之間研討會匯集來自同一地區的委員會。資訊開放的前提必須政府資訊透明化，才能讓大眾了解核能政策，2006 年核能與安全透明法案涉及核領域的透明度和安全性，加強了有關核問題的透明度和知情權的要求。它將核領域的透明度定義為「為確保公眾獲得可靠且易獲得的訊息而採取一系列的規定。」2015 年能源轉型法進一步放寬關於透明度的規定。該法明確規定法國核能安全署在編制法國核安全和輻射防護狀況年度報告中的作用。該法還包括一套有關基礎核能設施地方資訊委員會的規定。它規定地方資訊委員會每年至少要舉辦一次向公眾開放的會議 (Nuclear Safety Authority, 2016)。然以國際公眾參與協會的公民參與五框架模式言之：

1、告知

每年法國核能安全署向議會提交關於法國核安全和輻射防護狀況的報告，與議會成員建立關係。法國核能安全署發展公眾開放和風險文化，它希望透過促進公民參與有關核安全和輻射防護的主題來發展核能風險文化。核能風險文化即透過公民參與讓大眾瞭解核能的知識、核電廠的運作、核廢料的處理及其可能帶來的風險。為此，法國核能安全署使用多種通訊手段，並在這些領域提供透明的訊息，成立法國核能安全署資訊中心，其作用是向公眾通報核安全和輻射防護，協調對法國核能安全署（技術問題、行政文件請求、環境資訊、出版物發送及文件檢索）的要求處理。它在 2015 年響應了近 2000 個來自不同民眾的請求。公眾可以查閱所有法國核能安全署出版物，並可以查閱各利益相關者（地方資訊委員會、核能設施業者、法國輻射防護和核安全研究所 以及其他技術專家、學會、專業人士及非政府組織組織）。向公眾提供有關廣泛的核安全和輻射防護主題的綜合和教育資訊如法國核燃料循環、放射性物質運輸、輻射防護原則、核反應緊急情況 (Nuclear Safety Authority, 2016)。

2015 年法國核能安全署開設了一系列題為「讓我們談論核安全與輻射防護」的教育影片，旨在透

過問答方式以簡單的方式向廣泛的觀眾傳達訊息。該影片有幾個主題如核電廠的運行年限、核電廠的除役及緊急情況管理 (Nuclear Safety Authority, 2016)。

法國核能安全署網站的內容適用於行動設備（平板電腦、智慧手機等）和主要社交媒體。2016 年法國核能安全署利用 Twitter 提供的功能，廣泛地傳播有關的新聞和訊息：議會聽證會、公開會議、和安全及輻射防護巡迴展覽等。法國核能安全署還使用 Facebook 來維繫居住在核設施附近的協會和民眾，如告知某些地方資訊委員會轉發的事件（展覽、資訊等）。最後，法國核能安全署在 YouTube 和 LinkedIn 專業網絡上繼續發展其用戶網絡 (Nuclear Safety Authority, 2016)。

法國核能安全署透過媒體傳達訊息，與部分區域進行了多次採訪和報導，使媒體了解法國核能安全署監管工作中涉及的不同步驟，並向大眾介紹為確保核設施安全和醫療安全所採取的步驟。再者，法國核能安全署也收到了來自國際媒體的大量請求，要求獲得有關其運作情況，新聞以及在法國發生事件的資訊 (Nuclear Safety Authority, 2016)。

2、諮詢

法國核能安全署資訊中心擁有核安全和輻射防護方面的 3000 多個文件，特別是行政文件（公眾查詢檔案、影響研究和設施業者年度報告）可供諮詢。

網站 www.asn.fr 是向公眾提供資訊的主要媒介，在諮詢方面為不同的民眾提供了訊息。法國核能安全署的意見和決議、訊息通知、出版物、教育內容（電影、檔案等）、監督文件以及就決議草案進行公開諮商等等 (Nuclear Safety Authority, 2016)。

地方資訊委員會近年來有 91 位成員來自國家、部門、地方政治人物、企業社群以及非營利組織團體，這個多元的組成包含對地質儲存處的倡議者與反對者，地方資訊與監督委員會可以從多元觀點中組成論壇諮詢、討論並發佈資訊。

3、涉入

2015 年為了大眾和學校，法國核能安全署和法國輻射防護暨核能安全研究所舉辦了一個針對放射性相關風險的教育旅遊展。設有 80 個資訊佈告板，目的是向公民告知有關放射性的現象，無論是自然還是人造的，在核電廠、醫院和工業中的使用以及對人類和環境的影響。這些主題透過互動輔助材料、影片和工作坊以及幾個教育遊戲（互動模型、數位遊戲）來說明，提供切實的學習體驗。此展覽由主辦機構免費提供，2016 年有超過 35 個網站舉辦展覽，同年有超過 5000 人參觀展覽 (Nuclear Safety Authority, 2015)。

4、合作

2015 年法國核能安全署與國家教育機構之關係，它與學校環境進行交流，以發展教師和學生的核能風險文化。法國核能安全署支持由核能防護評估中心 (Nuclear Protection Evaluation Centre, CEPN) 和位於法國蒙貝莉亞的科學博物館科學中心所組

織的輻射防護研討會，而科學中心聚集法國和歐洲的高中生，讓他們齊聚一堂從事有關輻射防護的教育項目 (Nuclear Safety Authority, 2015)。

5、授權

就本研究所蒐集的資料，依據這五個分類分析法國沒有授權的機制。

六、英國

英國擔任獨立的「場址利害關係人團體」(Site Stakeholder Groups, SSGs) 的主席與當地利害關係人進行公開的對話，使核能除役局能夠與社區接觸困難主題或問題，例如合併中放射性廢棄物 (Intermediate-Level Waste, ILW) 的儲置。其策略是追求開放和透明的目標，目標是依據主題或問題而制定。以國際公眾參與協會的公民參與五框架模式言之：

1、告知

關於如何向核能除役局的利害關係人傳達訊息。總體目標在於為利害關係人提供均衡和客觀的訊息，使他們意識到並幫助他們理解問題。較常運用的方法乃社交媒體，或不斷地更新網站確保內容的最新，並發送電子公告給那些註冊民眾。如運用 Twitter 和 LinkedIn 等社交媒體來爭取更廣泛的利害關係人 (Nuclear Decommissioning Authority, 2016)。

2、諮詢

指尋求利害關係人對法定出版物（如核能除役的業務計畫和策略）回應的過程。放射性廢料管理委員會針對利害關係人，會定期舉辦面對面會議讓利害關係人提出問題和關切，請求他們反饋並對放射性廢料管理委員會的工作計劃提出評論 (Committee on Radioactive Waste Management, 2013)。

3、涉入

透過場址利害關係人團體、地方層級利益相關者及核能除役局的國家利害關係人在國家層級進行交流與活動。英國和國際核工業專家在「大廢料爭論」中與業界知名學者，共同分享了觀點。為當地社區團體，包括慈善機構和小企業，舉辦了一個展覽和研討會 (GOV. UK, 2017)。

4、合作

專家與學校之間的合作，核能除役局將確保在整個除役期內，會有正確的技術以及適當的研究與開發，以有效解決除役所面臨的挑戰性問題，並盡可能地減少納稅人所負擔的成本 (Nuclear Decommissioning Authority, 2016)。

5、授權

依據這五個分類分析英國沒有授權的機制。

七、台灣

核電廠除役以及核廢料處置議題為近幾年來，社會輿論關注的重點，而原能會以及台電公司也在「非核家園」政策確立之後，戮力與民眾進行溝通，雖然經驗的累積不比各國的案例，但在多方嘗試以及努力之下，已展現部分成果，甚至有許多具備創意的溝通方式，故下列將我國所實施之溝通策略，以國際公眾參與協會的公民參與五框架模式言

之：

1、告知

台灣除了各國普遍採取實施的做法之外(網站資訊揭露)，亦透過 Youtube 懶人包製作、會議直播、於網站架設核能議題各式主題專區，盼建構核能議題的基礎知識。而相較於其他國家較特別的是，除了核能權責機關原能會對於核能資訊會主動公開以外，其除役執行單位台電公司也會進行資訊揭露，並透過舉辦營隊的方式來向青年學子傳遞議題，相較其他國家而言更為新穎。

2、諮詢

台灣在諮詢的階段除了透過記者會以及公眾參與平台的形式之外，原能會也透過邀請國內外專家舉辦專題演講的方式，與民眾進行交流並汲取的經驗，是與其他各國相較之下不同的地方。而在國發會所架設之公共政策參與平台，台灣也展現了在諮詢層面的用心，以及因地制宜採取與他國相較之下較為特別的方式，使民眾得透過此一管道進行政策意見的闡述，藉由提案將議題交由公民討論，若附議達一定門檻之後，相關機關則須針對議題進行回復與解釋。雖然於該平台上的提案具有門檻，但仍是一個與民眾交流很好的管道，可藉此發現台灣民眾於核能議題所關心的問題。

3、涉入

涉入層面，台灣則利用除役計畫審查說明會與地方說明核電廠除役規劃與討論，也使用電視公民討論會將議題的接觸範圍擴大到全國國民。而原能會在執行各次的審查會議以及地方說明會時，也考量到利害關係人的參與，邀請的對象除了一般民眾和村里長之外，與核能議題相關的利益團體也在受邀之列（如：綠色公民行動聯盟、媽媽監督核電廠聯盟等），相較國際經驗依照各類型的利害關係人召開不同的論壇、會議，闡釋國家政策推動方式、徵詢意見並凝聚各界共識，台灣也能朝此一方向進行會議形式的精進。然而台灣在涉入層面亦透過平行監測的方式，讓民眾參與與輻射安全監測，與他國相比涉入層面相當廣泛。

4、合作

我國原能會在蘭嶼貯存場的核廢料管理所舉辦之活動——平行監測，其中包含涉入面的公民指定檢測樣品輻射值外，另有與公民團體及學術機構合作（第三方檢測分析）的經驗，但是在核電廠除役溝通這部分，目前則和日本與瑞士類似，需再強化相關機制的擬定。

5、授權

在公共政策網路參與平台中，目前在核能議題最新之提案 (2018.01.11)，民眾期望政府運用公民投票之方式，由公民決定核電廠運轉與否議題，雖提案被以公民投票法第 13 條——行政機關不得藉用任何形式對各項議題辦理或委託辦理公民投票事項予以否決，但此項提案也間接顯示出公民對核電廠運轉與否的議題關注程度。然而我國在選址程序中，已將地方性公投融入最終處置場選址流程，為授權層級中與民眾溝通的機制設計。

III. 結果與討論

由於本研究欲探討各國政府如何針對核電廠除役及放射性廢棄物管理進行溝通並採取何種公民參與機制達成政策目標。因此必須先理解各國政府在核電政策中的歷史、發展現況、相關機關之間的連結以及法規制定的情況。從近年相關的資料分析，並運用國際公眾參與協會的公民參與五框架分析，釐清各國在除役中與公眾溝通之機制，因此以下之研究發現與討論將會回應本研究的研究問題：

一、各國政府如何針對核電廠除役及放射性廢棄物管理進行溝通？

1、美國

美國核管會在核電廠執照者提出除役申請之後，會將停機除役計畫報告刊登至聯邦公報供公眾參考與討論，廣泛的向民眾散播資訊，並提供各式各樣的管道，例如：EMAIL、傳真、郵寄等方式，讓民眾將意見回傳，並針對建設性之意見進行雙向溝通。而美國核管會也會在欲進行除役的設施附近舉辦公眾會議，讓民眾知悉除役的規劃，並於現場進行意見的陳述，讓民眾能與持照者以及核管會進行三方的交流與溝通。

美國相較其他國家特別之處在於，核管會針對各式利害關係人以及使用之溝通工具進行評估與分析，分為成功、待改善以及成效不彰三類，並發展一份報告向全國民眾說明，作為改善溝通方式的依據。

2、德國

德國在核電廠除役除了在一般程序流程中，由地方當局向公眾召開說明會、進行環境影響評估審查，藉此與民眾溝通之外，德國政府於 2017 年立法通過核廢料選址程序，並設立一個公眾參與的架構，在區域框架（區域會議）、或是跨區域框架下（研討會），由公民、利益團體、地方當局構成會議主體，針對核廢料議題與聯邦當局、核電廠商進行溝通討論，且在最終場址確定前的會議，亦加入公民陪審團的機制，讓公眾在核廢料選址程序裡，有參與並讓意見具有影響力的機會。

3、日本

日本除役相關的溝通可以分成三個時期，前期是日本福島核災發生前，此期間關於除役的資訊多半僅限於媒體報導及政府官方網站；中期為日本福島核災發生時的因應，此期間福島核電廠所屬的東京電力公司，開始定期性的資訊揭露，將核電廠的資訊公開的向民眾顯示，並結合媒體的力量，向公眾說明核電廠概況，然因記者會內僅有通過日本政府審查的記者俱樂部會員才可以提問並獲得回答，使得日本政府以及東京電力公司受到廣大的批評；日本福島核災發生後期，日本政府受到強大的輿論壓力，開始強化對外的溝通機制，透過特殊的溝通車，運用大型的貨櫃車走訪各地區域提供人民獲取核能資訊外，也邀請人民進入車內共同對話並實際參與瞭解核能問題，並成立核能除役國際研究機構以作為對外溝通之機制。

4、瑞士

瑞士政府表示在核電廠除役以及核廢料處理是

政府的責任，政府必須向國民正確標示出最安全的地方，更指出在地方居民接受核廢料處理廠前不會提出任何補助金方案，因為其認為讓居民接納科學的判斷比金錢誘因重要，然而在真正面臨核能問題時，瑞士政府仍是仰賴公民投票的方式與公眾進行溝通。但在除役過程中，BKW FMB Energie 電力公司除了藉由媒體宣傳外，亦會進行資訊事件（Information Events），不僅提供當地居民資料外，還致力於與地方和區域性的政治代表及利益團體進行對話與協商。

5、法國

法國除了透過傳統的報章雜誌向民眾進行資訊的傳遞之外，亦顧慮到 E 化的趨勢，針對資訊平台上各式 3C 產品的瀏覽，設計了適用於各設備的網站導覽模式，方便民眾進行檢閱，並利用社交媒體 Facebook、Twitter 提供的功能，盡可能向民眾廣泛地傳播有關的核能新聞和訊息；議會聽證會、公開會議、和安全和輻射防護巡迴展覽等，亦透過 YouTube 管道上傳核能知識與資訊的影片，與民眾進行溝通。

6、英國

英國與公眾溝通之策略與法國相近，常運用社交媒體，不斷地更新網站確保內容的即時性，運用發送電子公告給註冊之民眾，並運用 Twitter 和 LinkedIn 等社交媒體來爭取更廣泛的利害關係人。而英國較特別的是透過法規與大學端牽起連結，共同承擔研發核廢料處理方式的重責大任。

二、各國政府採取何種公民參與機制達成政策目標？

1、美國

美國核管會於核電廠除役程序與公眾之間的溝通相當重視，且程序已相對完整，非常重視公民之意見，依據公民參與五框架而言，美國政府在告知上的資訊傳遞；諮詢層面的聽證會舉辦；涉入層面的論壇召開、專題討論會、利害關係人上溝通工具的使用與評估；合作層面與民眾共同審議執照中止計畫，以及授權層面允許民眾對既有法規提出問題與質疑，並且進行修改。已是非常完整而有系統的管理、融入公民意見。

2、德國

德國政府在核能電廠及廢料處置的流程，以公民參與五框架進行審視，在告知層面上，與美國相同高度利用「聯邦公報」通知公民相關資訊；在諮詢層面上，於審查執照與核廢料場址選擇中，舉辦區域性的公聽會以及相關調查、專家座談；在涉入層面，利用跨區域性的工作坊、圓桌會議、公民諮詢，而在合作層面則有全國陪審委員會的設計，讓公民參與其中，藉此達成與民眾溝通之目標。

3、日本

日本在告知層面，除基本的網站資訊平台揭露核電廠狀況、媒體與報紙以及記者會說明外，也開放核電廠及研究室讓大眾透過參觀展覽更深刻了解核風險文化。諮詢層面，則透過特殊的溝通車，運用大型貨櫃車走訪各個區域提供人民獲取核能

相關的訊息和知識，且邀請人民進入車內共同對話並實際參與瞭解核能問題；涉入層面，則在福島核災之後舉辦福島第一核電廠除役國際論壇，結合各方的力量，讓民眾得以了解國內的核能概況，完善與民眾溝通之機制。

4、瑞士

有關瑞士除役與公眾溝通之機制，在告知上，瑞士電力公司會向聯邦能源局提交除役申請書後，會將該申請書公布在官方網站上。除了媒體宣傳外，在諮詢層面，則使用公民諮詢以及媒體討論會的方式，與公眾進行交流，在涉入層面還致力於與地方和區域性政治代表及利益團體進行對話及協商。而相較於他國沒有的機制，在授權層面上瑞士會進行一次選擇性的公民投票否決新修正或制定的法律。

5、法國

法國核能安全署在參與機制方面做到了告知、諮詢、涉入及合作。在告知方面，法國核能安全署網站上可以清楚找到相關的資訊或透過視頻學習知識；在諮詢層面，法國核能安全署藉由舉辦會議與利害關係者進行交流；涉入層面，法國核能安全署與法國輻射防護暨核能安全研究所共同舉辦展覽讓民眾了解核能相關知識降低對核能的畏懼，最後在合作層面，則是與學校進行交流。

6、英國

英國在溝通機制上有達到告知、諮詢、涉入、合作等方面，在告知方面，透過核能除役局網站可以得到相關資訊；在諮詢層面，可以透過運用社交軟體、電子郵件與政府進行互動、諮詢；涉入層面，與當地利害關係者進行公開對話、舉辦展覽和小型研討會，最後在合作層面核能除役局與大學進行學術上的合作研發或與當地經濟發展組織合作。

三、案例比較

1、告知層面

各國除了透過傳統報章雜誌以及政府出版之官方刊物等形式宣傳資訊及議題之外，亦結合了E化網路提供雙向快速便捷的資訊通知，比如 EMAIL、網站訂閱等。較為特別的是日本透過核能電廠以及研究室的開放，讓民眾深入運作的工作間了解核電廠的運作方式；而英國的案例甚至結合網路社交媒體—推特(Twitter)的力量，將核能電廠的相關資訊擴散至全國及全球，而本文比較的各國案例中，在告知層面上的共通點為各國核能專責機構皆會在其官網上公布核電廠、核廢料最新發展進度與資訊供民眾檢閱。

台灣除了各國普遍採取實施的做法之外(網站資訊揭露)，亦透過 Youtube 懶人包製作、會議直播、於網站架設核能議題各式主題專區，盼建構核能議題的基礎知識。而相較於其他國家較特別的是，除了核能權責機關原能會對於核能資訊會主動公開以外，其除役執行單位台電公司也會進行資訊揭露，並透過舉辦營隊的方式來向青年學子傳遞議題，相較其他國家而言更為新穎。

2、諮詢層面

在此一層面，透過公民諮詢、研討會、討論會、辯論會等舉辦會議的方式，與公民進行溝通及政策協商，注重政府與民眾之間的關係。而德國與法國則將專家的意見融入此一階段，日本更透過溝通車的方式，在核電廠內部的實景及所處地質還原在一台貨櫃車裡頭，藉由貨車的移動讓議題進行地理上的移動，將資訊擴散並與民眾進行政策的討論。

台灣在諮詢的階段除了透過記者會以及公眾參與平台的形式之外，原能會也透過邀請國內外專家舉辦專題演講的方式，與民眾進行交流並汲取的經驗，是與其他各國相較之下不同的地方。而在國發會所架設之公共政策參與平台，台灣也展現了在諮詢層面的用心，以及因地制宜採取與他國相較之下較為特別的方式，使民眾得透過此一管道進行政策意見的闡述，藉由提案將議題交由公民討論，若附議達一定門檻之後，相關機關則須針對議題進行回復與解釋。雖然於該平台上的提案具有門檻，但仍是一個與民眾交流很好的管道，可藉此發現台灣民眾於核能議題所關心的問題。

3、涉入層面

涉入層面，多數國家(美國、德國、瑞士、英國)皆注重與利害關係人或利益團體之間的連結，所以針對利害關係人設計了許多不同的會議、論壇與圓桌會議，藉以了解各方的需求，部分國家甚至將核能相關的議題交由民眾討論尋求共識。其中日本因福島核災的緣故，所以舉辦了一次國際論壇，但在這之前並未有任何讓公民涉入核能議題的規劃與形式。

台灣則利用除役計畫審查說明會與地方說明核電廠除役規劃與討論，也使用電視公民討論會將議題的接觸範圍擴大到全國國民。而原能會在執行各次的審查會議以及地方說明會時，也考量到利害關係人的參與，邀請的對象除了一般民眾和村里長之外，與核能議題相關的利益團體也在受邀之列(如：綠色公民行動聯盟、媽媽監督核電廠聯盟等)，相較國際經驗依照各類型的利害關係人召開不同的論壇、會議，闡釋國家政策推動方式、徵詢意見並凝聚各界共識，台灣也能朝此一方向進行會議形式的精進。然而台灣在涉入層面亦透過平行監測的方式，讓民眾參與和輻射安全監測，與他國相比涉入層面相當廣泛。

4、合作層面

在合作面的公眾參與模式、方法之使用，各國作法不同，也沒有披露足夠資訊，不像前述幾個階段有大量而豐富的做法，其中日本與瑞士在現有的資料當中，並未透露出與民眾合作共同討論核能議題的措施，不過在美國、德國、法國以及英國，仍有透過建立陪審團、與大專院校以及經濟發展組織進行交流合作，共同協商核廢料的選址議題以及共同研發處理技術等，而在美國的部分，則允許民眾參與核電廠執照運轉的討論和議決。

我國原能會在蘭嶼貯存場的核廢料管理所舉辦之活動—平行監測，其中包含涉入面的公民指定檢測樣品輻射值外，另有與公民團體及學術機構合作(第三方檢測分析)的經驗，但是在核電廠除役溝通

這部分，目前則和日本與瑞士類似，需再強化相關機制的擬定。

5、授權層面

在授權層面，美國公民可透過官方提供的管道針對核能政策法律問題提出修改、創建，若具建設性與可行性，則公民之建議將會被採納並送交至議會進行法律的修改或創建；瑞士則因其國家的政治體系的關係，民眾較容易透過公民投票的方式直接影響核電政策，本文所列舉之國家，除了美國與瑞士兩國之外，多數國家可能礙於授權模式的實施成本考量，鮮少會直接將政策決定權授權於民眾，故其可供參考的方法非常有限。

在公共政策網路參與平台中，目前在核能議題最新之提案（2018.01.11），民眾期望政府運用公民投票之方式，由公民決定核電廠運轉與否議題，雖提案被以公民投票法第 13 條—行政機關不得藉用任何形式對各項議題辦理或委託辦理公民投票事項予以否決，但此項提案也間接顯示出公民對核電廠運轉與否的議題關注程度。然而我國在選址程序中，已將地方性公投融入最終處置場選址流程，為授權層級中與民眾溝通的機制設計。

在此一架構圖下(參看下表 1)，可以明顯看出本文所分析的大部分國家，其公民參與的程度皆僅停留在涉入層面，在這之前皆做了許多嘗試企圖與社會大眾連結，並讓公民有議題接觸、影響的管道。然而，在合作與授權層次的機制則寥寥無幾，可供借鏡的方法非常有限，然而，造成這樣的現象出現，本文歸結出兩個原因：第一，需要更多的成本來進行此種程度的公民參與，不符合效益，以公民投票為例，需要耗費許多的資源和時間，公民與政府皆然，且因為民意的搖擺不定，使得決策在短時間之內又被公民自己推翻，實為資源的浪費，以瑞士舉例，核能政策的議題若遇到瓶頸時，多仰賴公民投票來決定，所以多次舉辦核電廠運轉與否的投票，至今瑞士國內還是為了此項議題正在爭論當中，並未能完全解決。第二，喪失立法部門的部分職能，在授權民眾進行政策創建時，可能會因此受到立法部門質疑的聲浪，所以在採取這樣的方式時各國政府皆會有所顧忌，至於在前三階段，除了幾個較特別的模式（例如日本的溝通車、台灣的研習營），各國所採用的各種方式皆大同小異，將公民意見融入政策執行細項，也是在政府施政與公民權力之間能夠取得平衡的階段，如此也較不容易忽略民主國原則下代議民主的精髓。

本節之案例比較，可看出多元而具創意將公民意見納入政策考量方式，雖然有些許差異，但讓全民一同來商討極具爭議性的核能問題，是各國政府都想努力的方向，期盼以溝通代替對立，如此才能夠擱置爭議，理性尋求共識。台灣的除役經驗在近幾年才剛開始起步累積，但原能會已做了相當多的努力與創新，部分的創新也值得向國外推廣。未來持續精進，向各國執行經驗持續借鏡學習是須經歷的方向與趨勢，在國外成功的案例截取精華，在失敗的案例看見改善的方式，並且找到一套適合台灣的做法。畢竟，台灣的人文地理條件特殊、多元文

化及民主自由建構的社會環境，政策決定的變數以及影響因子眾多，不可能完全複製國外的經驗，所以如何去樹立台灣自己的標竿，讓具爭議的核電廠以及核廢料問題，透過適合台灣的公民參與模式去解決，才是能夠使政策長久並化解社會對立及誤解

	告知 Inform	諮詢 Consult	涉入 Involve	合作 Collaborate	授權 Empower
公民參與權力的增加					
台灣	原能會/台電公司網站資訊公開 Youtube 平台懶人包 各式會議網路直播 台電公司地方大型活動之業務宣導 台電公司暑期核能知識研習營	全民監督核電記者會 公眾參與平台 公共政策網路參與平台 專家演講	審查說明會 現場訪查 蘭嶼貯存場平行監測採樣	蘭嶼貯存場平行監測第三方檢測	地方性公投(選址)
美國	聯邦立法網站 Email/郵寄/傳真 聯邦公報 NRC 檔案管理系統 (ADAMS) 當地廣告及報紙 訂閱 NRC 網站	公眾會議 聽證會 公開意見徵詢 隨時上傳意見給 NRC	國家會議 論壇 專題討論會 利益團體會議	執照(許可證)中止計畫	規則制定
德國	郵件/EMAIL 聯邦公報 (Federal Gazette)	公民諮詢 公眾討論 調查 公開議會 專家建議	工作坊 國家會議 利益團體參與	全國陪審委員會	-
日本	網站資訊揭露 東京電力公司定期公布福島核電廠狀況 媒體與報紙之傳播媒介 記者會 核能電廠及研究室開放	專題討論會及小型會議 溝通車	福島第一核電廠除役國際論壇	-	-
瑞士	官方組織網站	公民諮詢 媒體討論會	與區域性政治代表及利益團體進行對話與協商	-	公民投票
法國	ANS 網站 教育視頻 行政文件 ANS 本身的出版物	公眾調查 會議辯論 專家評估 公眾諮詢	國家會議 舉辦展覽	與學校進行交流	-
英國	NDA 網站 Twitter 和 LinkedIn 等社交軟體 電子郵件	公眾諮詢 研討會 公開對話	建立利害相關團體與當地利害關係人進行公開對話 論壇	與當地經濟發展組織合作 與大學合作研發	-

之良方。

表 1：國際公眾參與協會政府與民眾互動框架模式—台灣與他國比較

資料來源：本研究繪製

四、差異分析與標竿學習

台灣的核能自 1972 年開始發展迄今已過 45 個年，隨著經濟、環境及社會的變遷，核能政策已逐漸受到關注，特別在國際間幾次核災事故之後，核電廠及核廢料更受到前所未有的輿論及民情挑戰，回顧國際間各國政府在處理此類具爭議性議題的態度以及做法，的確有許多可供台灣效法學習。前一部分本文針對各國在公眾溝通上的做法進行比較分析，而本節將擴大論述廣度，將台灣與美國、德國、日本、瑞士、法國、英國在法規、體制以及公民參與及公眾溝通三個面向進行差異分析，

並嘗試說明台灣在核能政策當中，於不同面向能夠向其他國家借鏡學習之處。

1、法規面

本文所列舉之國家包含台灣，在核能的法規方面皆從原子能法做為開端，往下延伸核電廠或核廢料的相關法規，其中美國、德國兩國與其他國家相較之下較為特別的是將公民參與程序列入法規文明規定，意即在核電廠除役及核廢料處置的過程當中，都必須有民眾的意見融入其中。德國甚至在核廢料處置中的選址法裡有全國陪審委員會之設計，將選址的課題與公民一起討論，民眾甚至有權審議，將參與會列為一種義務。

而我國目前雖於選址程序中加入強制性地方公投，但是在核電廠除役的法規面上僅由原能會公布之行政命令（資訊公開作業要點）規範，然而儘管在此現況下，原能會仍嘗試多元的努力與民眾進行溝通，透過舉辦各式的說明會、公聽會、乾貯設施訪查活動，戮力將資訊公開，邀請民眾共同參與核能議題。未來可參照國外經驗，在法律層級的法規的輔助下，強化公民參與的程度，使得民眾的意見獲得有效的徵詢及答覆。

2、體制面

(a)核廢料專責機構

本文所列舉之案例當中，各國普遍設有核廢料處理皆有專責機構，專責於核廢料處理的議題或廠址的選擇。以台灣目前是由台電公司作為執行核電除役及核廢料處理宣導的角色，擔任雙重的執行身分，在核電廠除役上的執行和溝通上容易受到挑戰和質疑，近幾年，台灣跟進國際腳步，修改相關法令並規劃成立權責機構，然而「行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例草案」在 105 年提出送進立法院後，因法案審議及立法的進度緩慢，而導致在不確定性高，恐影響核廢料處理工作進程，也間接影響核電廠除役工作的推動。

(b)核能廠營運公司屬性

多數國家的核能廠營運公司皆屬民營公司，較受制於政府監督與管控的公權力。然而我國台電公司係屬國營企業，配有大部份的公股於公司營運中，事實上很難完全擺脫政府的角色，使得台電公司與政府機關的關係，常被社會大眾放大檢視；也因政治生態的關係，常常在執政黨輪替後，台電公司的人事異動更加頻繁；加上近一次的政黨輪替台電公司的能源政策隨即更換，時間點過於敏感與倉促，因而產生民眾對於台電公司所提出的除役計畫信心不足的問題。

(c)核廢料最終處置場的選址

核電廠停止營運後，便是反應爐內的除汙及淨化，同時也涉及未來核廢料的處置，德國、日本、瑞士等國家在除役過程中皆已開始進行最終處置場的調查及選址，過程中遭遇許多反對的聲音，至今依然尚未決定。然台灣在確立非核家園的政策目標時，最終處置場的議題也於近幾年開始備受注目，從海拋、蘭嶼貯存場的爭議、放置於無人島的規劃以及選址的困境，原能會及台電公司雖已開始著手進行與民眾溝通的程序，更在「低放射性廢棄物最終處置設施場址設施條例」中，加入低放處置潛在

場址1需經當地民眾公投議決才能成為最終處置場之規定，然因選址問題倡議中斷執行多年，較少著墨於核廢料新貯存場址的選擇與民眾進行溝通，造成雖有建議候選場址，但其場址所在之縣市也拒絕辦理公投，使最終處置場「卡關」的現象，故未來與民眾溝通應加強最終處置場的規劃說明及應變方案的討論。

3、公民參與及公眾溝通面

(a)拓展資訊傳播管道

在國際公眾參與協會政府與公民互動框架模式比較之下，美國、德國、日本皆會藉由聯邦公報等主流報紙，以及法國與英國會使用電視傳播或社交媒體傳播的方式來進行資訊的傳達，範圍擴及全國國民。我國目前應強化資訊傳播的範圍，因核廢料議題受到鄰避效應的影響，應由全民共同商討研議以尋求共識，首先應透過各種途徑來傳播消息，讓全民皆有接收政府資訊的便捷管道。

(b)公民參與管道的宣傳與管理

分析原能會在與公眾溝通所嘗試之方式，與國外案例相比，有過之而無不及，甚至有些方式反而更具創意且多元（如：平行監測）。然而在相關管道的使用效率則有些差距，如：美國核管會的檔案管理系統截至 2018 年 3 月 9 日每日皆有民眾意見的湧入與答覆，反觀台灣在「人民申請提供政府資訊案件」的統計中，其使用的頻率不高。故應強化公民參與管道的宣傳，讓民眾知悉原能會或台電公司所規劃的參與管道。

(c)政府與民眾之互動

我國民眾在與原能會交流之管道，目前有舉辦之公眾會議、局長信箱、特定專題的專屬網頁、各種常見問題問答集、宣導影片等多元之管道，可見原能會之用心，但仍可參考國外許多更積極作為，由台電公司多舉辦相關活動，與地方民眾保持友好關係，並即時掌握民眾關切之事項，立即回應，以增進民眾對核能政策之信心。

(d)利害關係人溝通工具的盤點與評估

本文所探討之國家，大部分皆有針對不同的利害關係人使用不同的方法來進行溝通，最大宗的方式就是直接建立利害關係人的會議或論壇，美國與德國針對各種不同的利害關係人評估溝通工具的效能並做改善。目前原能會在與利害關係人溝通時皆依據「資訊公開作業要點」之準則，以主動接觸利害關係人為策略，例如核電廠居民逐村里家庭拜訪、邀請地方代表及環保人士等共同執行不定期場內視察、核廢料處置設施平行監測活動，這些策略頗具備新意，但在公民參與決策制定的效能上，宜考量辦理大型論壇的方式激盪各界的想法，藉此凝聚共識。

(e)公眾教育與青年世代的連結

許多國家在核能議題的推廣與觀念建立，都是由教育方面著手，讓民眾從小便能了解政策議題背後的來龍去脈，且藉由核能設施的開放參觀讓民眾真實明白整個機組的運行與情況，並在各大型會

¹ 指依選址計畫經區域篩選及場址初步調查，所選出之合適場址。

議及論壇中邀請年輕世代的民眾加入討論，德國在選址法中硬性規定會議中年輕人參與的人數。其立法的理由為核廢料的半衰期很長，在短短的幾十年內無法毫無後顧之憂解決如此棘手的問題，由於核廢料問題具有跨世代及延續性的特質，所以要讓年輕人盡早了解議題演變的過程。而台灣的地方說明會或審議會，尚未規範出席者的年齡層、世代分布，目前僅台電公司以舉辦暑期研習營的方式，嘗試與青年世代勾起連結，能否將政策議題的核心價值或問題延續，含納在正式的教育體系中，是目前需要向各國參考借鏡的地方。

透過三個面向統整台灣核能政策與公眾溝通機制與其他國家的比較，經濟部、原能會、物管局、台電公司可參考評估其他國家的創新做法。核一廠為台灣第一座面臨除役的核電廠，確實會面臨到許多前所未有的問題，但可嘗試處理解決，藉此建立機關管理知識的方式，便於未來的應用。2025 年之前所有核電廠皆逐步進入除役，建立更成熟而有效的模式來與民眾進行溝通，才能夠在民眾認同及支持的背景之下，如期完成非核家園的目標。台灣是個逐漸成熟的民主國家，公民參與與溝通的環節若能夠得到認可，在執行政策時所遭遇的阻礙就能夠減少，有效降低政府與民眾之間的對立氣氛與政策的認知差異，能夠強化政策的正當性與合法性。

IV. 結論

本文所探討的六個國家，在核電廠除役及核廢料處理議題上，因為風土民情、社會環境與政治體制等因素，與公眾溝通的方式與策略不盡相同，因而間接提供了許多不同的經驗供台灣學習和參考。所以本章將從前幾章的比較分析，綜合性的論述彙整出研究發現，進而提供政策建議，並且說明本文的研究限制，針對未來相關的研究提供建議。

一、研究發現：在告知、諮詢、涉入方面，各國主要是透過資訊公開、公眾諮詢及舉辦公聽會、論壇等方式與民眾溝通，但是在合作與授權面向上各國有明顯的差異，如美國在合作方面，美國核管會將審查執照中止計劃進行公眾討論，與民眾一起討論是否要中止廠商的核電廠許可證；在授權方面，法規的制定，民眾可以針對核能相關的法律規定進行修改的請求。若民眾的意見具建設性，將會被提案到議會，民眾的意見可以納入政府決策中。而德國在合作方面，擁有一個全國陪審委員會的機制，裡面的成員納入一些公民代表，讓公民能夠進行參與並獨立監督選址程序，但授權方面則沒有明顯的機制。日本及瑞士在合作方面，雖然沒有明顯的機制，但是瑞士在授權方面，公民擁有投票權可以決定修改法律。法國與英國雖然在授權沒有明顯的機制，但是在合作方面，兩者皆與學校進行相關核能文化及技術的交流，後者更與大學研發合作，且與當地經濟發展組織合作發展社會經濟，創造更大的利益。

二、政策建議：

1、暢通與擴充公民與政府交流之管道：

原能會或台電公司在與民眾的溝通，具有單向及雙向的交流互動，民眾在公眾會議上進行意見傳達，除了現場提問單以及相關業務單位的回應之外，

應可再加強系統性的管道，讓民眾能夠得到完整而詳細的資訊。如：學習美國經驗，針對不同對象提供各式管道、導入日本溝通車的經驗、或學習法國舉辦核能議題之展覽。

2、針對利害關係人與利益團體進行溝通：

界定利害關係人為政府在推動政策並與民眾溝通時首要面臨的問題，若能清楚界定與分析因為核能政策所受到影響的個人或團體，即可針對同質性群體的需求進一步釐清並解決，便能夠在尋求社會共識時更加容易，建議考量建立一個專屬於利害關係人與利益團體的平台，促進多方的溝通交流，稗以界定因核能政策所引發的真正問題，藉此在政策頒布施行之前，化解各團體之間與政府間對立的氣氛。

3、盤點溝通工具並與利害關係人進行交叉分析：

台灣得針對目前已進行過對話之利害關係人及溝通工具進行評估，統整當前溝通效能與情況，進行利害關係人以及溝通工具的交叉分析，從中歸納出適合各類利害關係人之溝通方式，再針對效果不好的方式進行修正與調整，使溝通的效用極大化，讓政策於執行時能夠更為順利。

4、行政法人放射性廢棄物管理中心設置之過渡期：

建議在此過渡階段會同未來改組後經濟部成立偕同工作小組，逐步將業務移轉，並擴大工作小組的職能，以利未來無縫接軌的續辦相關業務。

5、增加核電廠除役之公民參與法源基礎：

由本文所使用之五階段架構比較，可得知各國在授權層面的機制較為缺乏，這也說明鮮少國家能給予民眾絕對的權力去影響政策，因此在政策制定的過程當中就必須更注重公民的想法，使民意透過不同方式融入政策中。目前台灣在低放處置選址時，即有法規明定地方性公投的程序，未來應考量嘗試增修適用於核電廠除役的相關法律，以強化公民參與之強度與正當性，藉以取代由原能會公布之行政命令——資訊公開作業要點的效力，使公民能夠完整獲得資訊、真正投入決策參與且意見能夠透過正式的管道呈現，以實現「全民的原能會」意象。

6、年輕世代的意見與技術人才之培訓：

核能政策並非在一個世紀內能夠完整解決的問題，許多國家已在協商的過程當中讓年輕世代進入參與，例如德國的全國陪審委員會，其中就有規定委員會裡需要有年輕世代的代表。建議未來在除役的規劃裡，透過教育或者學校論壇的方式，使青年世代能夠正式接觸議題，而台電公司已有舉辦核能研習營的經驗，建議將其擴大規模，組成更為正式的培訓營，培養在核能議題或與民眾溝通議題上的年輕世代人才，並藉此將其意見融入政策中，讓核能除役的百年大計能有長遠的遠景與連續性的執行。

三、研究限制：

1、無法實地至各國考證：

因為資源的關係，無法針對各國的狀況進行考證，並評估在台灣的適用性，僅能針對各國紙本

及電子文獻進行詮釋，並輔以原能會或台電公司各次的訪查報告交叉比對，對於各國的風土民情與田野狀況無法確實掌握，便無法得知與公眾溝通的作法成效為何，使得本研究僅能針對台灣與他國的不同與差異進行論述，未來如有延伸研究的可能，將規劃至各國實地考察。

2、各國資料取得有所限制：

各國在網路資料庫建置時，大部分國家皆會以本國語言以及英文作為瀏覽的語言工具，然而部分國家在轉換為英文時，資料量明顯有減少之勢，使得能使用的資料量有所侷限，內容僅能淺嘗則止，恐無法深入探究。官方的文件的部分，各國通常都僅使用其本國的語言，僅有相對重要的文件才會進行英文的翻譯（如：原子能法規），翻譯與內文理解的問題也限制了本研究的論述深度，實為可惜。

3、僅能針對組織改組前之狀況評析：

本研究所計畫之時間，適逢政府組織改組之前，故僅能針對當前所見之問題提供政策建議，對於未來經濟部、原能會改組之後可能遇見之問題，無法進行全面性的論述，也許在改組之後，部分問題會因此找到解決之道，使得與民眾溝通之機制更為完備，故目前只能運用文獻資料，提供國外已有過的實施案例供斟酌並做推估。

4、需加強了解民眾對溝通方式的觀點：

本研究仍需加強原能會、台電公司與民眾溝通之努力與方式，將運用過之溝通工具的成效進行評估分析，藉此了解民眾對政府溝通方式的態度與觀點。因此僅從國外案例學習之方式，提供國內評估強化溝通的建議事項。

四、研究建議：

1、國內外核廢料議題的持續研究：

我國目前在最終處置場以及集中式貯存的規劃，雖有訂立相關期程，但如何突破我國目前選址的困境，透過何種方式降低社會意見的歧異，仍需深入研究我國的問題，並持續追蹤國際上之作法，以強化與完善在核廢料選址議題的溝通機制。

2、深入探討資訊完整、障礙較低的國家案例：

得針對資料庫較為完整的國家，如美國、法國、英國進行深入的探析，擴大論述的架構，進而提升研究的完整度。

3、持續評析與完善台灣與公眾溝通之方式：

組織改組後，仍需針對核電廠除役及核廢料處理議題公共溝通機制，進行評估與方法之完善，也需要持續追蹤各國的策略轉變與改善，並多方嘗試運用到台灣的核能權責機關的體制裡。

參考文獻

中文部分

- [1] 小村浩夫 (2000)。日本核能發展的困境—核廢料的處理，財團法
- [2] 人環境資訊中心，2017 年 10 月 26 日，取自：<http://e-info.org.tw/node/16599>。
- [3] 中華民國行政院 (2016)。行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例草案總說明，2017 年 12 月 25 日，取自：https://www.ey.gov.tw/News_Content4.aspx?n=D0675BEBB0C613C7&sms=1B6A34286EEBCD4C&s=0BFBFBD77F1AC143。
- [4] 中央社 (2017)。福島核災後，日本重啟第 5 座核子反應爐，2017 年 6 月 6 日，取自：<http://technews.tw/2017/06/06/the-fifth-nuclear-reactor-reopen-japan/>。
- [5] 中央社 (2017)。高濱核電廠 4 號機重啟，日本第 4 例，2017 年 5 月 17 日，取自：<https://udn.com/news/story/6811/2468965>。
- [6] 中華民國核能學會 (2017)。各國相關單位，2017 年 10 月 22 日，取自：<http://archived.chns.org/s.php?id=42&id2=214.html>。
- [7] 日本原子能機構 (2017)。取自：<https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/summary/history.html>。
- [8] 王佳煌、潘中道、郭俊賢、黃瑋瑩、邱怡薇 (譯) (2002)。當代社會研究法 (W. Lawrence Neuman 原著)。台北：學富文化事業有限公司。
- [9] 白寶實、許文勝、李宜娟、楊雋之 (2012)。核能電廠除役計畫審查技術之研究。
- [10] 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告 (編號：101FCMA007)。
- [11] 丘昌泰、余致力、羅清俊、張四明、李允傑 (2001)。政策分析。台北：國立空中大學。
- [12] 立法院國會圖書館 (2013)。能源安全法，2017 年 10 月 22 日，取自：<https://npl.ly.gov.tw/do/www/billIntroductionContent?id=56>。
- [13] 台灣電力股份有限公司 (2016)。蘭嶼貯存場遷場規劃報告，2017 年 12 月 5
- [14] 日，取自：http://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_25_01.pdf。
- [15] 台灣電力股份有限公司 (2016)。低放射性廢棄物最終處置計畫「替代/應變方案」之具體實施方案 (公開版)，2017 年 12 月 12 日，取自：http://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_07_d-1.pdf。
- [16] 台灣電力股份有限公司 (2017)。核一廠除役計畫，2017 年 12 月 5 日，取自：http://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_18_2_1-01.pdf。
- [17] 朱証達 (2013)。英國近期核電發展與未來展望—英國核電政策發展、產業推動及核電除役與核廢料處置規劃之探討。工業研究院綠能與環境研究所。
- [18] 朱文成 (2017)。考察英國核能除役局 (NDA)、國家電網公司 (NGC) 及考察
- [19] Oldbury 核電廠除役作業。台灣電力公司出國報告。
- [20] 自由時報 (2016)。瑞士核能公投闖關失敗 核電廠維持 2050 年除役，2016 年 11 月 27 日，取自：<http://news.ltn.com.tw/news/world/breakingnews/1899931>。

- [21] 行政院原子能委員會 (2010)。核能發電安全嗎。
- [22] 行政院原子能委員會 (2016)。核一廠除役計畫審查說明會會議手冊，7-18。
- [23] 行政院原子能委員會 (2017)。放射性物料管制法修法現況，2017 年 10 月 22 日，取自：https://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_20_1-04.pdf。
- [24] 行政院原子能委員會 (2017)。德國放射性廢棄物管理法規與管制實務，2017 年 10 月 22 日，取自：http://www.aec.gov.tw/webpage/UploadFiles/headline_file/2017106171338430120.pdf。
- [25] 行政院原子能委員會 (2017)。德國放射性廢棄物資訊公開與公眾參與實務，2017 年 10 月 22 日，取自：http://www.aec.gov.tw/webpage/UploadFiles/headline_file/2017106171338430570.pdf。
- [26] 行政院原子能委員會 (2017)。核電廠除役資訊，2017 年 12 月 5 日，取自：http://www.aec.gov.tw/category/%E6%A0%B8%E7%89%A9%E6%96%99%E7%AE%A1%E5%88%B6/%E6%A0%B8%E9%9B%BB%E5%BB%A0%E9%99%A4%E5%BD%B9/6_2550.html。
- [27] 何展旭 (2013)。日本核能電廠除役法制規範與實務之借鏡，2017 年 10 月 25 日，取自：<http://www.npf.org.tw/printfriendly/12178>。
- [28] 何展旭 (2013)。日本放射性廢棄物處置場設置規範之探討，2013 年 4 月 15 日，取自：<http://www.npf.org.tw/1/12144>。
- [29] 李麗霞 (1987)。政策過程中民眾參與之角色—以杜邦事件為個案分析。國立中興大學公共行政及政策研究所碩士論文，未出版，台中。
- [30] 李翰林、蔡卉荀(2016)。民間社會動動腦核廢核從一起找。地球公民，(27)，27-28。
- [31] 李翰林 (2016)。核能風險溝通≠核能風險公關。財團法人環境資訊中心，2017 年 10 月 26 日，取自：<http://e-info.org.tw/node/114134>。
- [32] 社團法人中華民國核能協會 (2017)。各國相關單位，2017 年 10 月 25 日，取自：<http://archived.chns.org/s.php?id=42&id2=214.html>。
- [33] 吳定 (2003)。公共政策。台北：國立空中大學。
- [34] 吳定 (2003)。政策管理。台北市：聯經出版社。
- [35] 吳才基、丁宇、張仁坤 (2016)。赴日本參加「高放射性廢棄物地質處置交流年會」並參訪貯存、處置設施及研究機構。台灣電力公司出國報告。
- [37] 周鼎 (2012)。主要國家核子反應器設施除役相關法規研究。行政院原子能委員會。
- [38] 會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告(編號：101FCMA006)，未出版。
- [39] 周東漢 (2016)。從德國經驗看能源轉型與核廢。地球公民，(27)，26。
- [40] 房思宏 (2013)。英國發展核電的前景與挫折。綠色公民行動聯盟，2017 年 11 月 2 日，取自：<http://www.gcaa.org.tw/post.php?aid=125>。
- [41] 林水波、王崇斌 (1999)。公民參與與有效的政策執行，公共行政學報，3，175-202。
- [42] 林國明、黃東益 (2004)。公民參與模式及其運用。收錄在行政院衛生署編《公民參與：審議民主的實踐與全民健康保險政策》，215-239。台北：行政院衛生署。
- [43] 林伯聰 (2013)。國際高放射性廢棄物最終處置場址技術準則之研究。行政院原
- [44] 子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告(編號：102FCMA014)。
- [45] 林祥輝 (2015)。日本核電廠重啟狀況觀察—川內核電 1 號機已重啟運轉，結束
- [46] 將近 2 年的零核電狀態。工業技術研究院綠能與環境研究所。
- [47] 邱一夫 (2016)。赴日本參與 NUMO/TPC 雙邊討論年會與核後端設施參訪。核
- [48] 能研究所出國報告。
- [49] 邱太銘 (2011)。國外核子動力反應器設施除役概況。行政院原子能委員會核能
- [50] 研究所。
- [51] 邱賜聰等 (2017)。參加第 3 屆台日核能管制資訊交流會議及參訪活動。行政院
- [52] 原子能委員會出國報告。
- [53] 香港商樹德產品驗證顧問股份有限公司 (2013)。研討會活動工作成果報告書。
- [54] 協助行政院原子能委員會放射性物料管理局邀請德國專家召開核能電廠
- [55] 除役審查及管制研討會委託勞務採購案 (編號：102FCMA011)，未出版。
- [56] 苦勞網(2010)。核廢何從電視公民討論會，2017 年 12 月 5 日，取自：<http://www.cooloud.org.tw/node/50882>。
- [57] 侯榮輝 (2013)。法國輻射防護暨核能安全研究所 (IRSN)對核子事故緊急應變之作為。行政院原子能委員會報告。
- [58] 原田和義 (2015)。日本的電力結構：2030 年的核電比例控制在 20~22%，2017 年 10 月 25 日，取自：<http://www.nippon.com/hk/features/h00114/>。
- [59] 原子能發電環境整備機構 (2017)。”Geo Mirai” Communication Vehicle，取自：https://www.numo.or.jp/en/what/topics_160911_02.html。
- [60] 財團法人核能資訊中心 (2016)。日本核電廠除役現況，162 期簡訊，2017 年 10 月 22 日，取自：http://www.nicenter.org.tw/modules/tadbook2/view.php?book_sn=&bdsn=1592。
- [61] http://www.nicenter.org.tw/modules/tadbook2/view.php?book_sn=&bdsn=1592。
- [62] 財團法人核能資訊中心 (2011)。日本東海第一核電廠除役計畫(上)，133 期簡訊，2017 年 10 月 25 日，取自：
- [63] http://www.nicenter.org.tw/modules/tadbook2/view.php?book_sn=&bdsn=925。
- [64] 陳敦源 (2002)。績效制度設計的資訊問題：信號、機制設計、與代理成本。行政暨政策學報，35，45-69。
- [65] 陳敦源 (2002)。公部門政策行銷五問。公訊報導，102，54-55。
- [66] 經濟部 (2018)。低放射性廢棄物最終處置選址流程。2018 年 3 月 20 日，取自：

- <http://www.llwfd.org.tw/act.aspx?id=63>。
- [67] 陳鴻斌 (2013)。OECD/NEA 核設施除役合作計畫 (CPD)第 55 屆技術諮詢組
- [68] (TAG)會議。核能研究所出國報告。
- [69] 陳文姿 (2016)。核能大國風向轉！法國立法極力發展再生能源。財團法人環境資訊中心。2017 年 11 月 2 日，取自：<http://e-info.org.tw/node/112949>。
- [70] 陳金貴 (1992)。公民參與的研究。行政學報，24，95-128。
- [71] 許焜發 (2008)。由「樂生事件」論教師公民參與之信念與實踐及其對教育工作的影響。教育實踐與研究，21 (1)，1-32。
- [72] 黃秉修 (2015)。參加「核廢棄物處理與處置研討會」。台灣電力公司出國報告。
- [73] 黃俊英 (2011)。整合性行銷溝通—強化政策宣導與溝通的利器。文官制度季刊，3 (2)，1-23。
- [74] 黃瑞祺 (1998)。理性討論與民主：哈伯馬斯之溝通理論的民主涵義。收錄在蕭高彥、蘇文流編《多元主義》，337-377。台北：中央研究院人文社會科學研究所。
- [75] 黃菁菁、江靜玲 (2015)。日本委託英法處理核廢料棒，2015 年 2 月 18 日，取自：<http://www.chinatimes.com/newspapers/20150218000045-260102>。
- [76] 黃瑞祺 (2001)。批判社會學 (二版一刷)。台北：三民。
- [77] 游欣儀 (2003)。台北市社區大學學員公民意識、公民參與行為及其影響因素之研究。國立中山大學教育研究所碩士論文，未出版，台北。
- [78] 經濟部能源局 (2015)。法國能源政策轉彎中，2017 年 11 月 2 日，取自：<https://energymonthly.tier.org.tw/outdatecontent.asp?ReportIssue=201510&Page=46>。
- [79] 趙衛武 (2015)。淺談美國核能管制委員會資訊公開。行政院原子能委員會，未
- [80] 出版。
- [81] 楊偉甫 (2017)。瑞典、法國荷蘭除役及放射性廢棄物設施考察。台灣電力公出國報告。
- [82] 臺灣電力股份有限公司 (2014)。臺電公司於中臺灣進行核能溝通之策略研究完成報告。
- [83] 蔡育環 (2003)。公民意識與公民參與行為對組織公民行為影響之研究。國立中正大學勞工所碩士論文，未出版，嘉義。
- [84] 蔡富豐、徐自生 (2017)。考察英國核能除役署 (Nuclear Decommissioning
- [85] Authority)作業模式及參訪所屬相關除役核設施。台灣電力公司出國報告。
- [86] 鄭敬瀚 (2017)。參訪英國核能除役局 (NDA) 及參加 Informa 公司之第 33 屆
- [87] 除役與放射性廢棄物管理訓練課程。行政院原子能委員會放射性物料管理局。
- [88] 鄭柏彥 (2016)。日本核電重啟對我國能源安全之啟示，核一、二、三的除役 將會使我國能源安全風險指數惡化，2016 年 4 月 5 日，取自：<http://km.twenergy.org.tw/Data/share?R50CKMeKYVVFZRXiC2rLZA==>。
- [89] 蕭金益 (2010)。參訪日本原燃低放最終處置建設及東京電力展示館與北海道電
- [90] 力電化生活館。台灣電力公司出國報告。
- [91] 謝雯凱 (2017)。瑞士 2050 能源策略與能源法公投一過半公民贊成能源轉型，
- [92] 逐步減核、發展綠能並強化能效。工業技術研究院綠能與環境研究所。
- [93] 謝文全 (1997)。教育行政—理論與實務 (十二版)。台北：文景出版社。
- [94] 環境資訊中心 (2002)。鄰避效應前瞻：從環境正義與衝突管理談鄰避效應，2017 年 10 月 26 日，取自：<http://e-info.org.tw/news/taiwan/special/2002/tasp2002-10.htm>。
- [95] 轉角國際 (2017)。法國啟動環保革命：2025 核電減半、2040 年停售汽柴油車，2017 年 11 月 2 日，取自：https://global.udn.com/global_vision/story/8662/2569450。

英文部分

- [96] Ahearne, J. F. (1990). Telling the public about risks. Bull at Sci, 46(7), 37 - 39.
- [97] Allitt, P. (2014). A Climate of Crisis: America in the Age of Environmentalism. New York: Penguin Press.
- [98] Areva (2017). Legal Notive. Retrieved November 1,2017, from
- [99] https://en.wikipedia.org/wiki/Orano#Back_End_Business_Group.
- [100] Aristotle. (1991). On Rhetoric: A Theory of Civic Discourse. Trans. George Alexander Kennedy. New York: Oxford University Press.
- [101] Arnstein, S. R. (1969). A ladder of citizen participation. Journal of the American Institute of Planners, 35(4), 216-224. doi: 10.1080/01944366908977225.
- [102] Barnard, C. I. (1968). The Functions of the Executive. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [103] Bessette, J. M. (1980). Deliberative democracy: Majority principle in republican government, in Robert A. G. & William A. S., eds., How Democracy is the Constitution? Washington DC: American Enterprise Institute, 102-116.
- [104] BKWenergy (2015). BKW Submits Decommissioning Application. Retrieved December 18, 2015, from <https://www.bkw.ch/en/about-us/media/press-releases/detail/news///bkw-submits-decommissioning-application-1/>.
- [105] BKWenergy (2016). Informationsanlässe Start öffentliche Auflage Stilllegungsgesuch. Retrieved April 14, 2016, from <https://www.bkw.ch/en/about-us/unsere-infrastruktur/kerkraftwerk-muehleberg/stilllegung/aktuelles/>.
- [106] BKWenergy (2017). Decommissioning of the Mühleberg Nuclear Power Plant.
- [107] Bond, A., Palerm, J., & Haigh, P. (2004). Public participation in EIA of nuclear power plant

- decommissioning projects: A case study analysis. *Environmental Impact Assessment Review*, 24(6), 617-641.
- [108] Brunnengräber, A., Di Nucci, M. R., Isidoro Losada, A. M., Mez, L., & Schreurs, M. A. (2015). *Nuclear Waste Governance*. Wiesbaden : Springer VS.
- [109] BUM (2017). *Nuclear Regulatory Issues and Main Developments in Germany*. Retrieved November 1, 2017, from
- [110] http://www.bfe.bund.de/SharedDocs/Downloads/BfE/EN/reports/kt/germany-nuc-reg-issues.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- [111] Bundesministerium fuer Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Federal
- [112] Environment Ministry) (2017). Retrieved November 1, 2017, from
- [113] <https://www.bmub.bund.de/en/>.
- [114] Buurma, H. (2001). Public policy marketing: Marketing exchange in the public sector. *European Journal of Marketing*, 35(11/12), 1287-1300.
- [115] Chambers, S. (2003). Deliberative democratic theory. *Annual Review of Political Science*, 6, 307-326.
- [116] Chandler, R. C., & Plano. J. C. (1988). *The Public Administration Dictionary* (2nd Ed.). Santa Barbara, California: ABC-Clio.
- [117] CNN (2011). 3 nuclear reactors melted down after quake, Japan confirms. Retrieved June 7, 2011, from <http://edition.cnn.com/2011/WORLD/asiapcf/06/06/japan.nuclear.meltdown/index.html?iref=NS1>.
- [118] Cohen, E. L. (2015). *Communication Yearbook 39*. New York: Routledge.
- [119] Committee on Radioactive Waste Management (2013). *CoRWM' s Stakeholders*
- [120] Engagement Strategy.
- [121] Crettaz von Roten, F. Clémence, A., & Thevenet, A. (2017). Understanding Attitudes Toward Nuclear Energy After the Fukushima Accident: Differences Between Asserted and Ambivalent Positions. *Social Science Quarterly*, 98(2), 659 – 671.
- [122] Dahl, R. (1971). *Polyarchy: Participation and Opposition*. New Haven, Conn.: Yale University Press.
- [123] Dahl, R. (1986). *Democracy, Liberty, and Equality*. Oslo: Norwegian University Press.
- [124] Dahl, R. (1989). *Democracy and Its Critics*. New Haven, CT: Yale University Press.
- [125] Dapas, M. L. (2016). *Status of the Decommissioning Program 2016 Annual Report*.
- [126] Nuclear Regulatory Commission(NO.SECY-16-0129), Unpublished.
- [127] Davidson, A. (1997). *From Subject to Citizenship: Australia Citizenship in the Twentieth Century*. New York: Cambridge University Press.
- [128] Denhardt, J. V., & Denhardt, R. B. (2003). *The New Public Service: Serving, not Steering*. New York: M. E. Sharpe.
- [129] Dryzek, J. S. (2000). *Deliberative Democracy and Beyond: Liberals, Critics, Contestations*. New York: Oxford University Press.
- [130] Eidsvik, H. K. (1978). Involving the public in park planning: Canada. *Parks*, 3(1), 3-5.
- [131] Englund, T. (2006). Deliberative communication: A pragmatist proposal. *Journal of Curriculum Studies*, 38(5), 503-520.
- [132] Federal Company for Radioactive Waste Disposal(BGE) (2017). Retrieved November 28, 2017, from
- [133] <https://www.bge.de/de/standortauswahl/standortauswahlverfahren/&usg=ALkJrhgeAcozNbSobfqPTX8QpBwX58FEGw>.
- [134] Forum on Stakeholder Confidence (2015), *Stakeholder Involvement in Radioactive Waste Management Decision Making*.
- [135] Foxall, G. (1989). Marketing' s domain. *European Journal of Marketing*, 23(8), 7-22.
- [136] Gamson, W. A., & Modigliani, A. (1989). Media discourse and public opinion on nuclear power: A constructionist approach. *American Journal of Sociology*, 95(1), 1-37.
- [137] Garson, G. D., & J. Williams, O. (1982). *Public Administration: Concepts, Readings, Skills*. Inc. Boston: Allyn and Bacon.
- [138] Gelders, D., & Ihlen, Ø. (2010). Government communication about potential policies: Public relations, propaganda or both? *Public Relations Review*, 36(1), 59-62.
- [139] German Academy of Science and Engineering (Acatech) (2017). Retrieved November 1, 2017, from <http://www.acatech.de/uk>.
- [140] GOV.UK (2016). Geological disposal: understanding our work. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.gov.uk/government/news/geological-disposal-understanding-our-work#full-history>.
- [141] GOV.UK (2017a). Nuclear Decommissioning Authority:About us. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.gov.uk/government/organisations/nuclear-decommissioning-authority/about#subsidiaries>.
- [142] GOV.UK (2017b). Find out about the structure of CoRWM and read minutes of plenary and other meetings. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.gov.uk/government/organisations/committee-on-radioactive-waste-management/about/our-governance>.
- [143] GOV.UK (2017c). Radioactive Waste Management. Retrieved January 1, 2018, from <https://www.gov.uk/government/organisations/radioactive-waste-management>
- [144] GOV.UK (2017d). Under the Energy Act 2004, the NDA is required to promote and, where necessary, carry out research to support decommissioning and clean-up. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.gov.uk/government/organisations/nuclear-decommissioning-authority/about/research#nuclear-waste-and-decommissioning-research-forum-nwdrf>.
- [145] GOV.UK(2017e). 200 people attend NDA' s first stakeholder summit in west Cumbria. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.gov.uk/government/news/200-people-attend-ndas-first-stakeholder-summit-in-west-cumbria>.
- [146] Gwin, L. (1990). *Speak no Evil : The Promotional Heritage of Nuclear Risk Communication*. New York: Praeger.
- [147] Habermas, J. (1987). *The Theory of Communicative Action Lifeworld and System: A Critique of*

- Functionalist Reasoning. Boston: Beacon Press.
- [150] Harold, P. G. (1974). Public participation in nuclear power plant licensing: The great delusion. *William & Mary Law Review*, 15(3).
- [151] He, G. Arthur, P. J. Mol, L. Z., & Lu, Y. (2013). Public participation and trust in nuclear power development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23(C), 1-11.
- [152] Hindmarsh, R (Eds.). (2013). *Nuclear Disaster at Fukushima Daiichi: Social, Political, and Environmental Issues*. London: Routledge.
- [153] Hutri, K. L. (2010). STUK's Communication with the Public and Final Disposal of Spent Nuclear Fuel.
- [154] International Association for Public Participation (2000) IAP2's Public Participation Spectrum. Retrieved November 1, 2017, from http://c.ymcdn.com/sites/www.iap2.org/resource/resmgr/foundations_course/IAP2_P2_Spectrum_FINAL.pdf
- [155] International Atomic Energy Agency (2016). *Country Nuclear Power Profiles(Germany)*. Retrieved February 6, 2018, from <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Germany/Germany.htm>
- [156] International Atomic Energy Agency (2018a). *Power Reactor Information System in Japan*. Retrieved January 1, 2017, from
- [157] <https://www.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=JP>.
- [158] International Atomic Energy Agency (2018b) . *Power Reactor Information System in Switzerland*. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CH>.
- [159] International Atomic Energy Agency (2018c). *LUCENS*. Retrieved January 19, 2017, from <https://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=966>.
- [160] Irland, L.C. (1975). Citizen participation - A tool for conflict management on the public lands. *Public Administration Review*, 35(3), 263-269.
- [161] Jowett, G., & O' Donnell V. (2012). *Propaganda and Persuasion*. Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications.
- [162] Jasanoff, S. (2003). Accounting for expertise. *Science and Public Policy*, 30(3), 157-162.
- [163] 162.
- [164] Kraft, M. E., & Clary, B. B. (1991). Citizen participation and the NIMBY syndrome: Public response to radioactive waste disposal. *Western Political Quarterly*, 44(2), 299-328.
- [165] Keller, W., & Modarres, M. (2004). A historical overview of probabilistic risk development and its use in the nuclear industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 89(3), 271-285. doi: 10.1016/j.res.2004.08.022.
- [166] Kotler, P., & Levy, S. J. (1969). Broadening the concept of marketing. *Journal of Marketing*, 33(1), 10-15.
- [167] Kotler, P. (1972). A generic concept of marketing. *Journal of Marketing*, 36(2), 46-54.
- [168] Lasswell, H. D. (1948). The Structure and Function of Communication in Society. In L. Bryson (Ed.), *The communication of ideas* (pp. 37-51). New York, NY: The Institute for Religious and Social studies, Jewish Theological Seminary of America.
- [169] Lehtonen, M. (2015). Megaproject underway: Governance of nuclear waste management in France. In Brunnengraber, A. et al. (Ed.), *Nuclear Waste Governance: An International Comparison*, Springer VS, 117-138.
- [170] Lidskog, R., & Andersson, A. C. (2002). *The Management of Radioactive Waste. A Description of Ten Countries*. (Rep. NEI-SE--423). Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- [171] Luc, J. (2017). *Decommissioning of Nuclear Facilities in France: French Perspectives*. France: Nuclear Safety Authority.
- [172] Masaki, N. (2016). The 1st International Forum on the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Retrieved February 6, 2018 from http://ndf-forum.com/common/data/pdf/result_summary_en.pdf.
- [173] McCarthy, E. J. (1960). *Basic Marketing: A Managerial Approach*. Illinois: Richard D. Irwin Inc.
- [174] Merrifield, J. S. (2003). *Report of the Public Communications Task*. Retrieved November 7, 2017, from <https://www.nrc.gov/public-involve/stakeholder-involvement/final-report.pdf>.
- [175] Minh, H. D., & Journé, V. (2014). Calculating Nuclear Accident Probabilities from Empirical frequencies. *Environment Systems and Decisions*, 34 (2), pp.249-258. <10.1007/s10669-014-9499-0>. <hal- 01018478v2>.
- [176] National Radioactive Waste Management Agency (2012). *Cigeo*. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.cigeo.com/en/calendar-public-debate>.
- [177] Nuclear Regulatory Commission (2015). *Decommissioning Communication Strategy*. Retrieved October 31, 2017, from <https://www.nrc.gov/docs/ML1501/ML15013A068.pdf>.
- [178] Nuclear Regulatory Commission (2016). *Status of the Decommissioning Program 2016 annual report*. Retrieved October 31, 2017, from <https://www.nrc.gov/docs/ML1628/ML16285A198.pdf>
- [179] Nuclear Regulatory Commission (2017a). *Decommissioning of Nuclear Facilities*. Retrieved October 25, 2017, from <https://www.nrc.gov/waste/decommissioning/process.html>.
- [180] Nuclear Regulatory Commission (2017b). *Decommissioning process*. Retrieved October 25, 2017, from
- [181] <https://www.nrc.gov/waste/decommissioning/process.html>.
- [182] Nuclear Regulatory Commission (2017c). *Public Involvement in Decommissioning*. Retrieved October 25, 2017, from <https://www.nrc.gov/waste/decommissioning/public-involve.html>.
- [183] Nuclear Regulatory Commission (2017d). *Public Involvement in Enforcement*. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.nrc.gov/aboutnrc/regulatory/enforcement/p>

- public-involvement.html.
- [184] Nuclear Regulatory Commission (2017e). Hearing Opportunities and License Applications. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/adjudicatory/hearing-license-applications.html>.
- [185] Nuclear Regulatory Commission (2017f). The Rulemaking Petition Process. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.nrc.gov/aboutnrc/regulatory/rulemaking/petition-rule.html>.
- [186] Nuclear Safety Authority (2015). ASN Report Abstracts on the State of Nuclear Safety and Radiation Protection in France in 2016. France: Nuclear Safety Authority, Public Information Centre.
- [187] Nuclear Safety Authority (2016). ASN Report Abstracts on the State of Nuclear Safety and Radiation Protection in France in 2016. France: Nuclear Safety Authority, Public Information Centre.
- [188] Nuclear Decommissioning Authority (2016). Strategy. England: Nuclear decommissioning Authority.
- [189] Nuclear Decommissioning Authority (2017). University Research and Development Approve Strategy (Gate C) Issue 2. England: Nuclear decommissioning Authority.
- [190] Oakley, P. & Marsden, D. (1984). Approaches to Participation in Rural Development. Geneva: International Labour Organization.
- [191] OECD (2001). Citizens as partners OECD handbook on information, consultation and public participation in policy-making. Drafted by Marc Gramberger.
- [192] OECD (2003). Public Information, Consultation and Involvement in Radioactive
- [193] Waste Management: An International Overview of Approaches and Experiences, Nuclear energy agency.
- [194] OECD (2013). Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management: An
- [195] Annotated Glossary of Key Terms, Nuclear energy agency.
- [196] Office for Nuclear Regulation (2017). Aims and Objectives. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.onr.org.uk/aims-and-objectives.htm>.
- [197] Otway, H., & Wynne, B. (1989). Risk communication: paradigm and paradox. Risk
- [198] Analysis, 9(2), 141-145.
- [199] Peters, G. B. (1996). The Future of Governing: Four Emerging Models. Lawrence, KS: The University Press of Kansas.
- [200] Pratt, C. B., & Yanada, A. (2014). Risk Communication and Japan's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Meltdown: Ethical Implications for Government-Citizen Divides. Public Relations Journal, 8(4).
- [201] Presseportal (2015). Mühleberg nuclear power plant BKW submits decommissioning application. Retrieved November 1, 2017, from
- [202] <https://www.presseportal.ch/de/pm/100001009/100782136>
- [203] Putnam, T. L. (2002). Communicating Nuclear Risk: Informing the Public about
- [204] the Risks and Realities of Nuclear Terrorism. Workshop Report. Palo Alto, Calif: Center for International Security and Cooperation, Stanford University.
- [205] Ramana, M. V. (2013). Nuclear policy responses to Fukushima: Exit, voice, and loyalty. Bulletin of the Atomic Scientists, 69(2), 66-76. doi: 10.1177/0096340213477995.
- [206] Rankin, W. L., & Nealey, S. M. (1979). A Comparative Analysis of Network News Coverage of Nuclear Power, Coal, and Solar Stories. Seattle: Battelle Human Affairs Research Centers.
- [207] Renn, O. (2006). Participatory Processes for designing environmental policies.
- [208] Land Use Policy, 23, 34 – 43.
- [209] Revolvvy. (2017). Nuclear power in Switzerland. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.revolvvy.com/main/index.php?s=Nuclear%20power%20in%20Switzerland>.
- [210] Reynal, N. (2017). Trends in Transparency and Stakeholder Engagement in Nuclear Projects in France. France: Nuclear Safety Authority, the Environment and Emergency Department.
- [211] Rosa, E. A. & Freudenberg, W. R. (1993). The Historical Development of Public
- [212] Reactions to Nuclear Power: Implications for Nuclear Waste Policy. In: Dunlap, R.E., Kraft, M.E., Rosa, E.A. eds. Public Reactions to Nuclear Waste: Citizens'
- [213] Views of Repository Siting. Durham: Duke University Press: 32 – 63.
- [214] Schumpeter, J.A. (1942). Capitalism, Socialism, and Democracy. New York: Harper and Brothers.
- [215] Simon, H. A. (1976). Administrative Behavior: A Study of Decision-Making
- [216] Processes in Administrative Organization (3rd Ed.). New York: Free
- [217] Press.
- [218] Sigrid, S. (2006). Multicriteria evaluation and public participation: The case of UK energy policy. Land Use Policy, 23(1). 53-62.
- [219] Slovic, P. (2001). Perception of risk from radiation. In: Slovic, P. eds. The
- [220] Perception of Risk. London: Earthscan Publications Ltd: 264 – 274.
- [221] Slovic, P. Fischhoff, B., & Lichtenstein, S. (1982). Psychological Aspects of Risk
- [222] Perception. In: Sills DL, Wolf CP, Shelanski VB. Accident at Three Mile
- [223] Island: The Human Dimensions. Boulder, Colo: Westview Press: 11 – 19.
- [224] Swissinfo.ch (2003). Switzerland's first nuclear plant decommissioned. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.swissinfo.ch/eng/switzerland-s-first-nuclear-plant-decommissioned/3518582>.
- [225] Swiss Federal Office of Energy (2017). Retrieved November 1, 2017, from <http://www.bfe.admin.ch/org/index.html?lang=en>.
- [226] Swiss Federal Office of Energy (1969). Lucens. Retrieved November 1, 2017, from <https://www.ensi.ch/en/topic/versuchsatomkraftwerk-lu>

- cens/?noredirect=en_US.
- [227] Stout, M. (2013). *Logics of Legitimacy: Three Traditions of Public Administration Praxis*. Florida: CRC Press.
- [228] Tanaka, S. (2015). *Safety Regulations for Decommissioning of Nuclear Power Plants in Japan and Future Challenges*. Material for the Study Team Meeting on the Regulation of Radioactive Waste in Decommissioning, Japan.
- [229] Taylor, P. M. (2003). *Munitions of the Mind: A History of Propaganda from the Ancient World to the Present Day*(3rd ed.). Manchester, UK: Manchester University Press.
- [230] The Cigeo Project (2013). *Meuse/Haute-Marne Reversible Geological Disposal Facility for Radioactive Waste*. France: National Radioactive Waste Management Agency.
- [231] The Japan Atomic Power Co., & The Kansai Electric Power Co. (2015). *Decommissioning situation of Nuclear Power Plant in Japan*. Unpublished.
- [232] The OECD Nuclear Energy Agency (2011). *Nuclear Legislation in OECD and NEA Countries: Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities*.
- [233] Thegerström, C. (2010). *Siting and Public Communication in the Swedish Deep Disposal Programme*. Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- [234] The OECE Nuclear Energy Agency (2012). *International structure for decommissioning costing (ISDC) of nuclear installations*.
- [235] Thompson, J. B. (1984). *Studies in the Theories of Ideology*. Cambridge: Polity.
- [236] The National Association of Local Information Commissions and Committees (2017). *Nos implantations*. Retrieved November 28, 2017, from <http://www.anccli.org/nos-implantations>.
- [237] World Nuclear Association (2016). *Nuclear Development in the United Kingdom*. Retrieved November 30, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/appendices/nuclear-development-in-the-united-kingdom.aspx>.
- [238] World Nuclear Association (2017a). *Nuclear power in Japan*. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>.
- [239] <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>.
- [240] World Nuclear Association (2017b). *Nuclear power in Switzerland*. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/switzerland.aspx>.
- [241] World Nuclear Association (2017c). *Nuclear power in the France*. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>.
- [242] World Nuclear Association (2017d). *Nuclear Power in the United Kingdom*. Retrieved November 1, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>.
- [243] World Nuclear Association (2017e). *Nuclear Power in the USA*. Retrieved November 28, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>. (附)
- [244] World Nuclear Association (2017f). *Nuclear Power in Germany*. Retrieved November 28, 2017, from <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>. (附)
- [245] Working Party on Decommissioning and Dismantling (2007). *Stakeholder issues and involvement in decommissioning nuclear facilities*.
- [246] Whitaker, G. P. (1980). *Coproduction: Citizen participation in service delivery*. *Public Administration Review*, 40(3), 240-246.
- [247] Wanner, H. (2017). *Decommissioning in Switzerland*. Regulatory Information Conference 2017, Bethesda.
- [248] Zuidema, P. (2008). *Communicating the Safety of Radioactive Waste Disposal: The Perspective of A Person Responsible for Science and Technology within An Implementing Organization*. Session IV: Communication of risk and uncertainties, Luxembourg.

原子能安全與輻射防護之新媒體動畫政策教材製作與行銷 Nuclear Produce New Media Teaching Materials and Image Marketing of Atomic Energy and Radiation Protection

計畫編號：MOST 106-NU -E-144-001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

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

本計畫以原子能專業知識與政策訊息為主題，運用創意內容進行科學知識傳播，透過生動有趣、一般民眾容易接受的影音模式，讓核廢料處理、核能安全或與民生相關的輻射防護知識能有效且正確地傳播。本計畫以科學傳播視角進行原子能知識與訊息傳播，已完成三項成果包括：一是以故事行銷概念，配合原能會 106 年度重點政策製作影音動畫，增加政策訊息在網路傳播效益。二是以既有文宣(或活動)為內容，如原子能輻射防護知識、世大運反恐監測等，製作成多元類型影片讓民眾更容易親近理解。三是協助原能會臉書「輻務小站」內容優化，提高民眾再傳播分享的意願，同時也將研究心得透過研討會供學術界交流討論。

Abstract

The project is based on atomic energy expertise and policy. It uses creative content to disseminate scientific knowledge. Through vivid and interesting visual modes that are generally accepted by the public. The project uses the perspective of scientific communication to disseminate atomic energy knowledge and information. Three achievements have been completed: First, the concept of story marketing has been used in conjunction with the key policies of the Institute of Atomic Energy to produce video and animations to increase the effectiveness of policy messages on the Internet. The second is based on existing texts, such as knowledge of atomic radiation protection, anti-terrorism monitoring and so on, to produce multiple types of films for the public to understand more easily. The third is to assist in the optimization of the contents of the Facebook, enhance the people's willingness to re-distribution, and also to share the research experience through seminars for discussion and discussion in the academic community.

Keywords: Scientific Communication, Social Media, Nuclear safety and radiation protection, Policy Marketing

I. 前言

當網路科技對社會影響越來越複雜，相對造成社會不穩定風險越來越高，這使得人們對科技產生依賴又反感的矛盾的現象。學者建議，此時政府機構在進行科學傳播時，就應該從傳統單向資訊傳送模式，改為雙向、鼓勵公民涉入的參與式溝通模式，以減緩民眾對科學發展的不安全感，同時應該培養公民對科學公共政策深思熟慮的觀點【1】。過去，民眾認為科學知識是難以親近

的專業領域，以至於長期以來對科學公共政策的參與度非常低，但是網路普及，科學知識傳播路徑有了新發展，學者對於科學治理模式也重燃信心，尤其鼓勵公民普遍參與科學決策的好處與必要性。有學者就指出，如果能透過網路，進行雙向互動式的科學傳送訊息，不只讓公眾充分討論科學政策，釐清對科學研究不同情境的想像，一方面有助於提高科學傳播效益，甚至對於說服公眾支持政府的科學政策，將有顯著效果【2】。

「全民的科學」(science for all)理念引起學界共鳴，主要論點是指在進步的科技社會中，公民應該要有科學素養，以便在科學政策討論時能明辨利弊、有所貢獻。現今無論是個人屬性的科學議題，如醫療、食品安全，或是關係整體公眾的科學議題，如全球暖化、核能安全等，都參雜政治經濟或文化等各種因素，使得科學政策承載更複雜面向，也因此容易造成公眾意見分歧【3】。而這也是各國政府為什麼積極推動公民參與科學政策制定的主要原因【4】，讓公民能接收正確的科學知識，或各類的研究資訊，成為他們認識、參與科學公共議題討論的基礎，使公民在政府推動相關政策時產生比較積極的態度，而不是盲目跟隨新聞媒體的報導或是將政策決定權交給專家。

從 2011 年 3 月 11 日日本發生福島核電廠事件後，核電安全議題成為全球關注焦點，同樣也是國內民眾關心的問題。而原子能委員會執掌業務中包含對核能電廠、核子設施及輻射作業場所的安全監督，除了嚴格執行核能安全管制外，有關輻射防護及環境偵測等也都是原能會重要工作且與民眾生活環境安全密切相關。與此同時，原能會謝曉星主委也揭示要以「全民的原能會」、「核安的守護者」為主要施政理念，實際上即是鼓勵全民參與科學政策討論，並落實資訊公開。本計畫即是在上述背景下展開規劃，並聚焦關心以下問題：民眾普遍對於核能安全、輻射防護、核災食品等議題產生高度關切，原能會以培養科技公民科學知識素養、以及鼓勵全民參與政策討論的目標下，如何應用臉書社群媒體提高專業知識(或資訊)傳播效益？尤其如何處理科學語言與民眾理解落差問題。

II. 主要內容

本計畫背景分以下兩點說明：一是全球科學傳播模式的轉向。由傳統媒體如電視、廣播的單向、專家式的傳播模式轉為雙向、公民參與式的傳播模式，網路普及更助長此發展趨勢，公民可以透過網路公開討論、相

互辯論，甚至影響政府科學政策制定。政府機構如何與民眾「互動」成為重要課題，影響層面包括了政策說服、或政策支持度。二是科技社會特質為科學議題與社會脈絡關係密切，政府無法單憑科學家實驗結果來制定政策，也需要公民參與表態，以減緩公民的科技風險意識高漲而影響政策推動，核能發電便是一例。因此 90 年後，世界各國在制定涉及科學風險的政策過程，如何號召公民參與、以及提高公民科學素養使其有能力與政府官員對話，就成為政府建立科技公民社會的核心任務。本研究基於上述背景，關心我國政府以建立科技公民社會為目標，首先就必須提高科學傳播效益，以及在科學政策制定或執行的過程中，不斷與民眾互動對話，而本計畫內容即是協助原能會藉助社群媒體提高與民眾互動、實踐公民參與科學。

研究者曾在 2016 年協助執行科技部補助「原子能安全與輻射防護新媒體教材製作與行銷」專案計畫，主要以動畫影片製作，重新包裝高專業的原子能輻射防護知識，再透過原能會臉書或官方網站進行傳播。研究發現使用民眾容易親近的影片動畫進行政策傳播，一方面增加原子能知識(或資訊)的網路傳播效益，增加民眾的瀏覽意願，另外藉由社群媒體平台傳播，研究也發現增加了非科學專業領域的一般民眾也因此有機會接觸、瞭解甚至分享原子能知識或政策資訊內容。106 年度計畫則延續此脈絡，以網路故事行銷的觀點，配合原能會兩個施政重點：核電廠除役、核廢料處理來製作 2 部 3D 全動畫，除了將動畫藉由臉書或官網傳播外，由於動畫內容易懂，也可作為後續進入地方或校園的宣導影片。

另方面本計畫也協助將現有的原子能文宣品重新製作，挑選以「輻射防護」為主題製作兩種不同類型影片，包括專家解說的輻射無所不在以及嘗試用類戲劇方式製作的輻射檢測貴金屬的設備介紹，目的是以不同類型影片增加政策說服效果。同時因 2017 年 8 月舉辦世界大學運動會，原能會也配合進行反恐偵測，本計畫則以類新聞報導的方式拍攝剪輯，製作原能會反恐偵測設備介紹。上述內容均以影音方式製作以網路傳播為主要模式，藉此增加民眾對原能會政策的親近感甚至願意參與討論或主動分享訊息。

III. 結果與討論

從歐美各國經驗發現社群媒體普及加速「公眾參與科學」，也加快科學教育生活化的實踐。Halford (2016)

【5】發現民眾能輕易地從網路上找到各類科學資訊，內容也比傳統媒體更豐富多元，透過網路交流，民眾更容易、願意參與科學討論。Levinson (2009) 【6】比較科學部落格與傳統媒體內容發現，兩者最大差異在於部落格由公眾主導，比如媒體記者、科學家或長期對科學議題關注者，都是以自身觀點進行寫作討論，一方面讓部落格內容深度更勝於傳統新聞報導，同時也更貼近民眾生活。Walejko & Ksiazek (2010) 【7】的研究也發現，新聞媒體競爭激烈，根本無法詳細討論科學議題，或是得依賴政府部門、公關公司提供消息，但是網路上的科學專欄(比如部落格)卻可看到權威機構以外的不同意見，也歡迎民眾提出各種討論，對推展科學教育有正面幫助。

本研究計畫一方面與原能會討論整理專業的原子能輻射防護知識製作成動畫與影片，也觀察這些新媒體素材透過臉書或官網等進行政策傳播的效益。另方面研究者也帶領大專學生實際參與觀察原能會臉書「輻務小站」的內容編排並且提供優化建議，站在一般民眾觀點提供科學貼文的改編意見，目的在增加「輻務小站」的瀏覽率。

本計畫此次共製作 5 部新媒體動畫與影片教材內容說明如下：

一、「核電廠除役，生活樂無慮！」3D 全動畫。影片重點以「核能除役」主題，排除民眾的疑慮並且傳遞正確的除役知識。訴求對象為一般民眾，內容角度是從學校教室場景出發，由專業科學博士向同學們說明何謂「核能除役」帶出除役知識與政府資訊。



圖一「核電廠除役，生活樂無慮！」3D 全動畫截圖

二、「認識核廢料，生活咖放心！」3D 全動畫，影片重點為讓民眾了解低階的核廢料目前是如何安全儲存，以排除民眾對核廢料危險的疑慮，傳遞原能會監控核廢料的正確知識。執行角度則是延續 2016 年原能寶寶的角色進行宣導，透過安寶與原能寶寶的對話，讓民眾也了解低階核廢料是如何安全儲存。



圖二「認識核廢料，生活咖放心！」3D 全動畫截圖

三、製作 2 分 40 秒專家說科學知識，主題訂為「無所不在的輻射-「天地人氣篇」」。邀請原能會輻射防護處王濬儒技士，針對民眾普遍感到疑慮的「輻射」進行解說。採用輕鬆易懂的語言，讓民眾理解輻射種類，也解除對輻射刻板印象的疑慮。



圖三 專家解說「無所不在的輻射-「天地人氣篇」」截圖

四、製作 2 分 20 秒類戲劇短片「小偷篇」。以介紹輻射偵測貴重金屬的設備為主題，用輕鬆詼諧的內容呈現原先的嚴肅議題，提高民眾對原子能知識的理解與親近感。此篇影片製作為大學部戲劇系、廣電系同學共同完成，在製作過程中無形增加大專生對原能會知識與任務的理解且讓大學生增加對原子能科學傳播的興趣。



圖四 「輻射偵測貴重金屬設備介紹」-小偷篇類戲劇 截圖

五、配合台北市舉辦世大運，拍攝原能會進行反恐設備與偵測運用，並剪輯成 4 分 45 秒類新聞報導形式的影片供網路傳播，讓外界民眾理解原能會的任務以及反恐偵測設備使用。



圖五世大運期間原能會進行反恐偵測的新聞影片 截圖

IV. 結論

科技特質來看，社群媒體強調以使用者為中心，具備社群互動、公眾協力、公民參與和資訊公開等特點，成為政府行銷科學政策的重要平台，一方面允許公眾參與科學政策討論，增加政策合法性，另一方面也打破過去「由上而下」單向政策傳播模式，讓科學決策更透明。有學者就指出，應用社群媒體進行政策行銷，不只增加公民與政府（C2G）的對話互動，在社群媒體的傳播網絡中，公民對公民（C2C）或政府對政府（G2G）的溝通也同時發生，相對傳統式以電訪或問卷調查方式蒐集民意，社群媒體顯然能更快也更全面得到民眾意見。

透過本次計畫也發現原子能輻射防護與安全的議題十分廣泛，包括環境游離輻射、輻射量偵測、環境輻射監測、核能發電、緊急應變民眾防護、放射性廢料以及原子能安全管制等，與民生相關議題非常多，本計畫今年增加原子能科學政策的數位教材製作到五部，也是原能會使用影片網路政策行銷首次嘗試，在臉書與官網傳播上也得到迴響，但上述政策議題眾多，日後或可再增加數位教材影片數量，提高科學政策網路行銷效果。另方面本計畫執行也結合課程，包括讓對於網路行銷、科學傳播有興趣的大學生一起參與，如圖文系、廣電系、戲劇系學生等，除了讓同學們藉由製作影片理解網路政策行銷的實際操作外，在過程中也必須頻繁地接觸原能會網站上資訊，並且理解科學政策實際內容，對於增加大學生科學知識素養（因大部分學生接收到的爭議的核能安全議題大多來自新聞媒體且為負面）有顯著的正面影響，此對於原能會任務的認知理解以及形象提升也有一定程度幫助。

至於本研究計畫在文獻中提及，以歐美的執行經驗，藉由臉書等社群媒體傳播進行科學政策溝通行銷，是否能確實吸引公民參與政策討論或因此明顯增加民眾再轉貼訊息分享的意願，甚是促使另一種科學傳播參與式溝通模式的發展則仍有待後續研究觀察

參考文獻

- [1] Corley, E. A., & Scheufele, D. A. (2010). Outreach going wrong? *The Scientist*, 24(1):22
- [2] Powell, M. C., & Colin, M. (2008). Meaningful citizen engagement in science and technology. *Science Communication*, 30:126-136.
- [3] 周桂田 (2002), 〈在地化風險之實踐與理論缺口—遲滯型高科技風險社會〉, 《臺灣社會研究季刊》, 45: 69-122。
- [4] Priest, S. H. (2006). Public discourse and scientific controversy: A spiral-of-silence analysis of biotechnology opinion in the United States. *Science Communication*, 28(2):195-215.
- [5] Halford B. (2016). Teaching social media to scientists. A handful of courses help researchers navigate the landscape of internet communication. *C&EN*,
- [6] Levinson, P. (2009). *New new Media*. Boston, MA: Allyn & Bacon.
- [7] Walejko, G., & Ksiazek, T. (2010). Blogging from the niches. The sourcing practices of science bloggers. *Journalism Studies*. 11(3):412 - 427

原子能跨領域學程推廣

The development of The Atomic Energy Course Program

計畫編號：MOST 106-2623-E-262-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：宋大崙

共同主持人：周源卿

e-mail：tlsung@mail.lhu.edu.tw

計畫參與人員：林瑋格，林昱維，吳哲安，林信佑，林俊錡，柯彥廷，郭怡君

執行單位：龍華科技大學化工與材料工程系(所)

摘要

藉由原子能應用課程教學、參訪原子能應用設施、專業演講等活動，培養學生正確知識（原子能應用、輻射安全及核能電廠除役），進而培養學生成為具有關懷社會環境具世界觀之原子能應用人才，增加其就業機會，且對於政府推動核能電廠除役有正確的認識及疑惑的解答。此計畫共開設兩門核心課程：輻射防護及應用與核工導論；架設 Facebook 網頁，讓同學隨時有互動；參觀清華大學原子爐、北部核能展示館及放射藥物的生產公司。專業演講請到準備除役的核能電廠的經理，說明除役的過程及所需要的技術等，讓同學對於核能電廠的除役作業有初步的了解；另亦邀請輻射應用及防護、放射藥物的生產的生技公司及原子能應用於考古學(義大利考古學專家-安德烈·羅西)方面的專家授課。藉著問卷調查了解同學對於電廠除役的認識，顯示多數同學對於核能電廠除役作業並不瞭解，顯然未來可增加此方面的課程或宣傳。

關鍵詞：原子能，學程

Abstract

The students' correct knowledge (atomic energy application, radiation safety and nuclear power plant decommissioning) will be conducted through the teaching of atomic energy application courses, visits to atomic energy application facilities and professional lectures. After these training, the students could become talents of atomic energy with a world view of social environment. This program not only increases the students' employment opportunities but also provides their correct understanding about the government's efforts to decommission nuclear power plants. There are two main courses in the program: "radiation protection and application" and "nuclear engineering". Facebook page is set up to allow students to interact with each other at any time. The visits of Tsinghua University nuclear reactor, Nuclear Energy Exhibition Center and radiopharmaceutical manufacturing company provide the students' experiences. Professional speakers, who came from the nuclear power plant to be decommissioned, explained the process of decommissioning and the required technologies to the students for having a correct understanding of the decommissioning of nuclear power plants. Experts in radiation applications and radiation protection, introduce the applications of radiation and their protection. The production of radiopharmaceuticals (Chairman of PET Pharm Biotech Co, Ltd.) and atomic

energy applied to archeology (Archeology expert of Italy - Andrea Rossi). Through questionnaire survey shows that most of the students do not understand the work of decommissioning nuclear power plants and proper knowledge. The government may need more efforts in promoting the decommissioning nuclear power plant policy.

Keywords: Atomic Energy, Program.

I. 前言

原子能應用常會伴隨著輻射，因此非原子能應用科系的學生及民眾，常會有敬而遠之或擷取網路上錯誤的知識，其實原子能應用除核能發電之應用外，醫療輻射及工業應用也十分廣泛，而放射性廢棄物及輻射安全更是在使用原子能在產業之應用後，不可或缺的重要考量，正確的知識更顯得重要，除了政府政策的執行外，民眾的安全更是獲得保障。核能電廠除役的政策雖然在原子能委員會網站上[1]多有說明，但多數同學或民眾卻選擇媒體或其他網站來擷取知識，為期學生有全面性之認識，本計畫直接給予學生正確知識或給予指導進行討論辯論，利用翻轉教室理論[2]，讓同學對於原子能應用多所了解。本校實施及執行原子能應用跨領域學程多年[3,4]，積極宣傳原子能應用之相關知識，及有邏輯性的討論相關的議題，在同學中已發揮作用。

本校鼓勵學生跨領域的學習，希望同學在學習課程時能更有明確方向，在畢業時除了取得學位證書外更能擁有一張「跨領域學程證書」。龍華科技大學為技職體系，近年來獲得教育部教學卓越及典範科大之計畫，長期推廣創新創業及專案管理，並整合製造技術配合政府的生產 4.0，提供跨領域學程[5]，例如巨量資料分析、物聯網、雲端供應鏈資訊化、創新創意創業、及專案管理等學程，原子能相關的原子能應用學程，就是在此理念下建立的。共開設 18 個學程，原子能應用學程[6]規劃學生學程，結合本校工學院「機械工程系」、「化工與材料工程系」、「電機工程系」、「電子工程系」及「資訊網路工程系」等系所之資源與人力，投入原子能應用相關技術的人才培育工作。

目前國內技專院校曾開設核工學程或在學程中開設核工相關課程者之技專院校如高雄應用科技大學核工概論課程學程[7] 台北科技大學核能科技學程，其目的及課程規劃亦然。

本校學程核心課程內容規劃如下：

(1) 核工導論：原子核構造、核能電廠技術、核能

電廠除役、核能安全法規介紹、核能廢料處理、緊急事故應變處理等概念課程，普及學生原子能知識。

(2) 輻射防護與應用：輻射防護的基本概念例如游離輻射的定義、輻射的量測、輻射安全標準的訂定。

(3) 管路設計：ASME 規範介紹、材料力學複習、高壓設備流體力學介紹、高壓設備材料力學介紹、疲勞與破壞介紹、壓力容器與管路設計實例探討。

學程配有學程導師一名，目前由宋大崙老師（計畫主持人）擔任，負責學程規劃及輔導學生。如進班宣傳、輔導學生修讀學程等。學程的課程配當表及其他相關規劃，會經由院課程委員會審議及討論。並且邀請業界專家擔任業界導師，提供學程學生更多實務經驗之回饋。輔導學生，與修學程的同學晤談，瞭解同學修課情形，並給予修課之建議，輔導同學取得學程證書。

II. 執行方法

本計畫進行的方式主要為培養學生基礎知識；參觀原子能相關之設施；舉辦演講及研討會等三方向來進行。

1. 原子能應用學程推廣：

本校原子能應用學程，結合本校工學院「機械工程系」、「化工與材料工程系」、「電機工程系」、「電子工程系」及「資訊網路工程系」等系所之資源與人力，投入核能發電相關技術的人才培育工作。

核心課程內容規劃如下：

(1) 核工導論：由本校周源卿老師授課。課程內容：放射性核種之衰變，核子反應，輻射偵測，保健物理與輻射防護，放射性同位素在醫農工業之應用，中子與物質之作用，核子反應器，核能電廠，核能電廠除役。

(2) 輻射防護與應用：由周源卿老師擔任。課程內容有：基礎物理，原子結構、核種、同位素，放射物理核電介紹，核電安全與事故，參訪核二北展館，核廢料(INER)，除役(INER)，核醫(INER)，照射廠(INER)，輻射特性，輻射與物質作用，輻射劑量與單位，輻射偵測，輻射安全與管制

周源卿老師，美國 MIT 核工博士，龍華化材系教授。

課程的安排，會儘量安排學生投入自主學習，不侷限於課程內容之介紹，例如利用網路考試，練習計算之習題，完成工程方面之理解；或者針對時事議題，加入辯論；以輻射的原理應用創意思考相關的產品；利用多元學習學習讓學生對核能更有興趣。APP 的製作及 3D 列印也讓同學有更多的參與度。

學程配有學程導師一名，目前由宋大崙老師（計畫主持人）擔任，負責學程規劃及輔導學生。並且商請奈米科技學程的學程導師李九龍老師（共同計畫主持人），協助學程的推廣，如進班宣傳、輔導學生修讀學程等。學程的課程配當表及其他相關規劃，會經由院課程委員會審議及討論。並且邀請業界專家擔任業界導師，提供學程學生更多實務經驗之回饋。

輔導學生，與修學程的同學晤談，瞭解同學修課情形，並給予修課之建議，輔導同學取得學程證書。

2. 參觀原子能相關之設施

參觀原子能相關之設施主要讓同學瞭解核能發電並瞭解核能電廠之周遭環境，工作人員等，除得到實務

經驗外，實際的參觀可以和電廠人員互動，及周遭環境的認識，不僅是知識的吸收，更能產生關懷環境的心懷。本計畫規畫清華大學原子爐、北部核能展示館及士宣生技(輻射藥物生產)等相關設施。

3. 演講及研討會

選擇關心議題，如福島災害影響、核能發電、核子廢料、全球暖化及各項相關議題，培養學生民主素養，關心環境議題，擁有正確知識，討論台灣的未來走向。使台灣能在和諧的氣氛下，以專業素養討論重大議題。

邀請核能科技協進會、清華大學、台電公司等專家學者，並針對核廢料的處理、福島事件、核子緊急事故應變、台灣核能發展困境、後端營運...等課題做一說明。

4. 維護學程網站

成立核工學程網站在 Facebook，同學們可以在上面討論議題，延長學程學習時間，由課堂的短促時間，增長為課後之討論。

III. 結果與討論

本計畫完成了預定目標如表 1。以下對於各項成果分別說明：

表 1 計畫完成工作項目

工作項目	預定值	完成值及說明
1 學程核心必修課程	2 門	2 門;輻射防護與應用及核工導論
2 每學期進班宣傳	2 次	2 次
3 輔導學生與學生晤談人次	50 人次	100 人次
4 輔導學生取得核子工程學程證書	20 張	105 第二學期有 54 位學生獲得
5 舉辦專家學者演講	6 次	9 次
6 參訪原子能相關設施	3 次	3 次
7 定期維護核工學程網站- FACEBOOK 網頁更新	更新	更新
8 其他相關之活動，並未使用此計畫經費	無	1.參加國際發明展-銅牌 2. APP 製作 1

1 核心必修課程

對於核心必修課程方面開設 2 門，105 第二學期開設「輻射防護及應用」及 106 第一學期開設「核工導論」。其授課老師為周源卿博士(表 2)。上課情形如圖 1 及圖 2。其上課人數:105 第二學期開輻射防護與應用:男生 47，女生 4；106 第一學期核工導論:男生 35，女生 1。

表 2 核心必修課程

科目	授課老師	學經歷/證照
輻射防護及應用	周源卿博士	龍華科技大學教授 美國 MIT 核工博士
核工導論	周源卿博士	龍華科技大學教授 美國 MIT 核工博士

(1) 輻射防護與應用課程:

此課程以初階的輻射防護為主，課程講授內容：基

基礎物理，原子結構、核種、同位素，放射物理核電介紹，核電安全與事故，輻射特性，輻射與物質作用，輻射劑量與單位，輻射偵測，輻射安全與管制

(2) 核工導論:

課程內容以核能的基礎知識及核能電廠除役為主，課程講授內容：射性核種之衰變，核子反應，輻射偵測，保健物理與輻射防護，放射性同位素在醫農工業之應用，中子與物質之作用，核子反應器，核能電廠，核能電廠除役。

上述課程有作同學對於除役的認知，發現 80% 的同學並不清楚核能電廠除役的過程及除役之後的情況。



圖 1 周源卿博士 上課情形

2 每學期進班宣傳

讓學生們了解獲得證書的含意及功用；講解獲得證書的條件及解決學生們對核工學程的疑惑。每學期進班宣傳，105 第二學期共進班宣傳兩次 及 106 第一學期共進班宣傳兩次。經過兩次的宣傳，充分地讓同學了解到核工學程對於未來升學與就業的好處，並且告訴同學如何選修及選擇核心課程，並在老師及助教的細心講解及說明，同學也相當踴躍的參與。

3 輔導學生與學生晤談人次

針對學生的疑問，提供學程修課與獲證資格查詢與幫助；同學主要問題為差多少學分方可獲得證書及指導學生如何選取課程以獲得證書 105 第二學期共晤談學生 50 人次 106 第一學期 共晤談學生 50 人次。

4 輔導學生取得原子能應用學程證書

學生完成學分後獲得學程證書，102 學年證書取得人數為 61 位（男 51/女 10）學生，103 學年證書取得人數為 34 位（男 30/女 4）同學，104 學年證書取得人數為 43 位（男 39/女 4）同學。105 學年證書取得人數為 54 位（男 49/女 5）同學。

5 舉辦專家學者演講

邀請了 9 位專家學者(表 3)，針對相關議題演講並回答學生的疑問。深入淺出的說明也獲得學生的熱烈討論。[圖 2]

表 3 演講議題(106)

時間	題目	專家學者	專家背景
3/8	放射性應用於畫作鑑定之介紹	Andrea ROSSI	史賓內利宮修復學院 木板畫與畫作的保存與修復學士
4/21	核廢料與除役除污簡介	張清土	中央大學化學工程與材料工程 博士
4/28	背景輻射來源與食品輻射檢測	邱煌盛	中國文化大學應用化學研究所 碩士
5/5	核醫藥簡介	陳家杰	美國科羅拉多大學輻射生物 博士
5/5	輻射防護、放射性物料管理	林善文	財團法人核能科技協進會董事兼顧問
5/12	輻射應用簡介	陳家杰	美國科羅拉多大學輻射生物 博士
10/25	核燃料何去何從 - 小鈾的故事	張文彬	核一廠 核能技術課長
11/8	核能電廠的日常	張益瑞	核一廠除役專案小組 執行秘書
11/15	核能電廠除役概述	劉純光	核一廠 值班經理



圖 2 核燃料何去何從 - 小鈾的故事 - 張文彬

6 參訪原子能應用及能源相關設施

參觀原子能相關設施(3 次)，如表 4，其參觀花絮如圖 4。核能展示館，清華大學 BNCT 的參觀與士宣生技(輻射藥物生產)相關設施等。

表 4 參觀原子能相關設施

項次	日期	參觀地點	備註
1	4/14	台電核二廠-北部展示館	核能發電及相關
2	5/3	士宣生技股份有限公司	分子影像醫學用藥
3	5/19	清華大學	原子爐及中子照射治療

原子能相關的 3D 模型，提升對於核能電廠及原子能應用的了解。



圖 3 台電 - 北部展示館

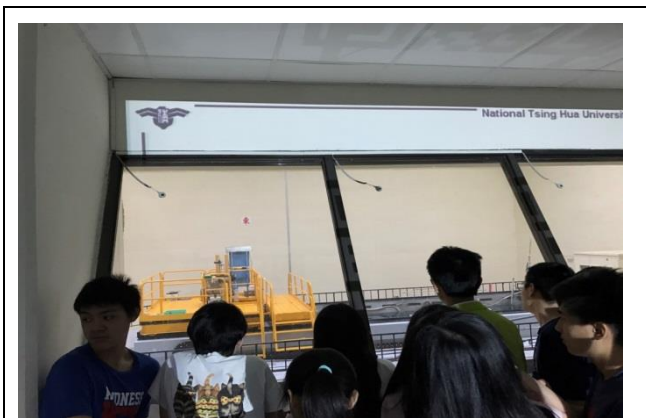


圖 4 清華原子爐

7 定期維護核工學程網站-FACEBOOK 網頁更新

本學程在 FACEBOOK 有成立學程網站 <https://www.facebook.com/groups/nano.nuclear/>，與原能會之輻務小站相連，可以將原能會相關之資訊及時送給學生，除將課程資訊發布，亦提供最新相關訊息及課程討論。

8 其他相關之活動，並未使用此計畫經費

其他原子能推廣的活動，由學校其他經費支出，並未使用本計畫，但與本計畫相關，且由主持人辦理之活動，也在此報告整理。

(1) 利用參與國際發明展(圖 5)，讓同學提出創意思考及使用 3D 列印來製作模型，此次參與作品為:"降低海面的溫度",利用 Bernoulli's principle 將深層的海水打到海面上降溫，可以應用於核能電廠出海口的溫度，不需額外電力及昂貴的機械設備。

(2) 利用 APP INVENTOR II 的教授，讓同學感到興趣，再以截取網路資訊如同駭客一般，同學們都感到十分有趣。此次製作以截取輻射劑量資訊了解輻射劑量及其計算(圖 6)。

(3) 利用 3D 列印的課程，讓同學們列印核能電廠及



名稱：降低海面水溫之方法
內容：發明運用海水中的冷水減少電廠溫度較高的出水溫度，而無需額外的能源。

圖 5 參加 2017 國際發明展 獲得銅牌



圖 6APP 畫面

IV. 結論

本計畫在工作目標部分，皆達成或超前。對於計畫進行過程中，學生對於原子能學程的認識，及專業能力的培養，讓同學具有跨領域的競爭力，成為關懷環境之工程師。核能電廠除役的工作需要更多人力的投入，技專院校可以提供這方面的技術人才培育，並可以讓政府推動核能電廠除役的工作更加順利。

參考文獻

- [1]https://www.aec.gov.tw/category/%E6%A0%B8%E7%89%A9%E6%96%99%E7%AE%A1%E5%88%B6/%E6%A0%B8%E9%9B%BB%E5%BB%A0%E9%99%A4%E5%BD%B9%E7%AE%A1%E5%88%B6/6_2550.html，2017/01/23
- [2]吳清山 (2014)。翻轉課堂。教育研究月刊，238，135-136。
- [3]宋大崙，「龍華科技大學核工學程之實施與核工人才培訓」，100 年度行政院國科會與原能會科技學術合作

研究計畫成果發表會，龍潭，Dec 16, (2011)

[4] 宋大崙，「龍華科技大學核工學程之推廣」，105年度行政院國科會與原能會科技學術合作研究計畫成果發表會，台北，June 29, (2017)

[5] 龍華科技大學跨領域學分學程設置辦法，龍華科技大學, 105.12.08 第 10502 次教務會議修正通過 (2016)

[6] 工程學院「原子能應用學程」規劃書，龍華科技大學, 105.12.08 第 10502 次教務會議修正通過 (2016)

[7] 國立高雄應用科技大學核工概論課程推廣網站，
<https://sites.google.com/site/hegaituiguang/>

雲端學習 幸「輻」生活 東部核能知識推廣

LOHAS learning "nuclear" family relieved est of nuclear knowledge to market

計畫編號：MOST 106-2623-E-197-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃朝曦

e-mail：chhuang@niu.edu.tw

計畫參與人員：唐偉庭、廖偉翔、何東陽、
郭獻勤、王敬翔、黃御軒

執行單位：國立宜蘭大學資訊工程研究所

摘要

本計畫將利用 MOOCs 平台和原子能知識 APP 的特性，增修一系列原子能知識、輻射防護相關教材於數位學習平台並進行東部地區偏鄉學校知識講座，搭配 APP 方式讓大眾輕鬆快速地學習核能知識，激發主動學習的欲望，利用 MOOCs 可隨時隨地觀看線上課程，幫助偏鄉地區與學校資源不足的困境。透過學員或民眾使用過後的回饋，修正網站和 APP 知識內容以及呈現方式，最終達到讓使用者能對原子能科普知識有初步的了解，建立正確的觀念，不再畏懼輻射，達到計畫的目的。

關鍵字：數位學習、遊戲式學習、核能安全。

Abstract

The project will use the characteristics of the MOOCs platform and the Atomic Energy Knowledge App to update a series of atomic energy and radiation protection related teaching materials on the digital learning platform and conduct rural school knowledge seminars in the eastern region. The APP approach will allow the public to quickly and easily learn nuclear energy knowledge. Inspire the desire of active learning, using MOOCs to watch online courses anytime, anywhere, to help the plight of rural areas and school resources. Through the use of feedback from trainees or citizens, the website and APP knowledge content and presentation methods will be revised. This will eventually allow users to have a preliminary understanding of atomic energy science knowledge, establish correct concepts, and no longer fear radiation and achieve the purpose of the project.

Keywords：E learning, Game-based learning, nuclear safety

I. 前言

近年來由於電力問題，核能發電的敏感話題再度被開啟，加上 106 年 8 月 15 日的全台跳電事件，更讓民眾意識到了發電量不足的事實，那核能呢？大部分的民眾都會將核電廠視為比原子彈還可怕，而且認為在核電廠附近一定會被輻射導致癌症，對於游離輻射、醫療輻射防護及核廢料處理等知識完全不明白，因此本計畫希望把宜蘭大學當作東部原子能知識推廣的一個基地，目

標是能夠增加師生、家長及民眾對原子能民生應用、輻射防護及核災應變民眾防護之認知，提升原子能科普知識素養結合本系資訊專業，持續精進於 105 年為原能會開發之「原子能知識推廣及內部人員訓練平台」，作為原子能安全管制人才教育學習平台。

II. 主要內容

本計畫主要的內容說明如下：

1. 辦理原子能科普活動，並收集回饋單後，修正 APP 之內容及提供開發方向：

希望藉由主持人 FUN 科學到東部的科普推廣活動，讓學員透過遊戲方式激起學習的欲望，真正了解有關原子能科普的知識。並透過學員或民眾使用過後的回饋意見，修正 APP 內容以及呈現方式，讓使用者對原子能知識有初步的了解，建立正確的觀念，不再畏懼輻射。

本計畫辦理 10 場次的核能知識推廣科普活動，參加人數共計 491 人(男性 318 人；女性 173 人)。

2. 使用「遊戲式學習」的方式製作 APP，達到寓教於樂的目的：

將數位遊戲結合學習，所推出的一種新型教學方式，我們稱之為「遊戲式學習」，透過數位遊戲為平台進行學習，學習者在遊戲中透過解決問題、克服挑戰，使學習者在遊戲中獲得成就感。相當多的研究報告都指出遊戲式學習的方式對於各個學科都有相當大的成效。比起傳統教育模式，讓使用者可以不限時間地點隨時隨地學習，以輕鬆的心情兼顧學習與娛樂，達到更好的效果。

計畫主持人在行動裝置 APP 上經驗豐富，至今已為原能會開發 12 款原子能知識 APP，在本計畫執行期間亦開發出兩款互動式遊戲 APP，Nuclear Brain it On(圖 1)及除役之旅(圖 2)。Nuclear Brain it On 是要利用積木將球落入正確的桶子中，是款結合原子能知識的益智遊戲；除役之旅是類似馬力歐的遊戲，撞擊方塊可獲得拼圖，蒐集到足夠的拼圖可組成題目，答對題目即可過關。



圖 15 Nuclear Brain it On



圖 16 除役之旅

3. 持續精進「原子能知識推廣及內部人員訓練」，達到工作經驗傳承及永續經營的目的：

磨課師線上課程 (MOOCs, Massive Open Online Courses, 又名大規模開放式線上課程) 是以課堂知識講授和學生回家自行練習作業順序對調的「翻轉教室」為概念，將授課內容錄製成影片，讓同學於上課前觀看學習，在課堂中便可以與同儕、老師討論，相較於傳統授課方式，使同學能有更多的思考與互動，可以真正進行雙向溝通的教學活動；而磨課師強調的是大規模的「線上」課程，更多的互動與學習激發思考，將學習自主權以及學習的節奏交還給學生，最後將此經驗導入 MOOCs 學習平台，達到工作經驗傳承及永續經營的目的。該線上學習平台係於 105 年計畫開發，已克服現有之資安問題，完成建置，可作為原能會人才培訓和經驗傳承之參採使用。

III. 結果與討論

106 年辦理 10 場次的原子能科普推廣活動(表 1)，對象從國中、高中到大學，並在講座中導入原子能相關知識 APP 主題達到寓教於樂的目的。

本計畫執行期間共累計 491 人(男:318 人,約占 65%;女: 173 人,約占 35%)參與,統計資料總計回收 191 份有效問卷(表 2)(表為整體問卷結果統計表),問卷 採用李克特五點量表(「非常同意」為 5 分,「同意」為 4 分,以此類推),藉此了解活動的成效和滿意度分析。本計畫以東部地區為主,我們的努力也有被其他地區看見,同時受邀前往台中科博館進行科普演講。另外,為宜蘭樂齡大學舉辦的研習活動也是特別的一次體驗,透過先帶學員參觀龍門核能發電廠(核四),再進行解說和演講,大多數年長的學員雖對核能也有些誤解,但經過這次的活動後,學員們也表示更加了解和能安全和輻射防護的管制措施,此次活動也獲得相當大

的肯定。

隨著不斷修正研習的內容以及活動辦理的經驗,從 106 年和 105 年的回饋單之滿意度對照表(表 3),顯見學員對活動的滿意度逐年提升。

日期	項目(男/女)
2017. 04. 12	宜蘭大學樂齡大學-核四廠演講(11/9)
2017. 04. 14	台中豐原高中-科普演講(13/17)
2017. 04. 15	台中豐原高中(科博館)-科普演講(56/34)
2017. 05. 01	宜蘭大學樂齡大學-科普演講(11/9)
2017. 05. 31	宜蘭中華國中-科普演講(18/12)
2017. 08. 01	宜蘭復興國中-科普夏令營(26/13)
2017. 09. 12	宜蘭蘭陽女中-科普演講(0/30)
2017. 10. 03	花蓮自強國中- FUN科學講座(17/8)
2017. 11. 08	宜蘭蘇澳海事-FUN科學講座(98/4)
2017. 11. 13	宜蘭大學-科普演講(68/37)

表 1 演講場次

	活動後 您對 演講的 主題 有初步 的認識。	活動辦理 的內容有達到 您預期參加的 目的 與期望。	本次演 講者的 演講清 楚易懂。	此活動 有助於 您該科 學領域 產生興 趣。	未來願 意再參 加類似 的演講 活動。
非常同意	1 2 3	1 1 5	1 2 3	1 1 2	1 0 3
同意	5 5	5 5	5 2	5 4	5 8
沒意見	1 3	2 1	1 6	2 5	3 0
不同意	0	0	0	0	0
非常不同意	0	0	0	0	0
平均分數	4.58	4.49	4.56	4.46	4.38

表 2 滿意度統計表

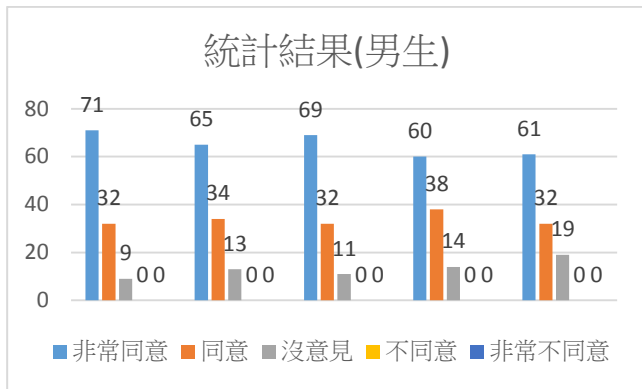


圖 17 滿意度統計圖(男)

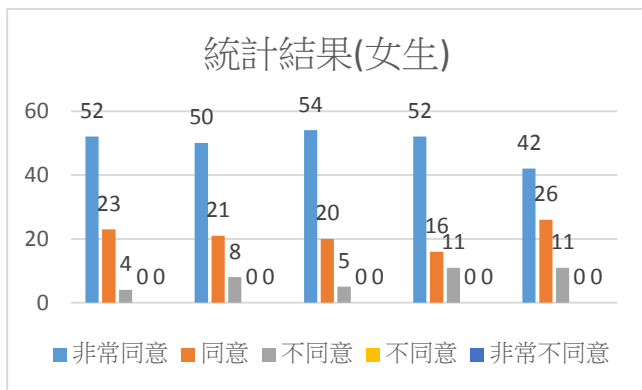


圖 18 滿意度統計圖(女)

105計畫	4	4	4	4	4
平均滿意度	4	3	4	2	2
	3	3	4	8	6
106計畫	4	4	4	4	4
平均滿意度	5	4	5	4	3
	8	9	6	6	8
增幅	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1
	5	6	2	8	2

表 3 滿意度對照表

IV. 結論

為了提升學生的學習意願，透過科普活動作為啟發，結合原子能知識 APP 及簡單有趣的物理實驗來呈現，達到寓教於樂，從做中學，學中做的概念，進而達到原子能科普推廣之目標。另利用現在資訊普及的優勢，透過數位學習的管道，讓學生能更便捷取得原子能科普知識為未來的趨勢。持續精進，克服 105 年資安問題，完成建置「原子能知識推廣及內部人員訓練平台」之 MOOCs 線上課程系統，提供原能會內部人員訓練及經驗傳承使用。



圖 19 原能會訓練平台

參考文獻

- [1] IX 市調解析 - 智慧型手機篇，
<http://yahoo-emarketing.tumblr.com/post/120303044121/ix-%E5%B8%82%E8%AA%BF%E8%A7%A3%E6%9E%90-%E6%99%BA%E6%85%A7%E5%9E%8B%E6%89%B%E6%A9%9F%E7%AF%87>。
- [2] 2016 Yahoo 奇摩遊戲白皮書，
<http://yahoo-emarketing.tumblr.com/post/148732014111/2016gamewp>
- [3] 賴翠媛，“資優教育數位學習資源之探討”，資優教育季刊，第 125 期，第 1-8 頁，101，12。
- [4] Cistic, D., Tijan, E., & Kurek, A., “Mobile Game Based Learning - Taxonomy and Student Experience. Proceedings of the ITI”, Int. Conf. on Information Technology Interfaces, 29th, pp.299-305, 2007, June.
- [5] 江明涓、劉晃溢，“Mobile e-Learning—延伸數位學習之無線行動力”，經濟部工業局，2004，10。
- [6] 蘇照雅，“行動學習五項特性”，生活科技教育月刊，38 卷第 7 期，1-2，2005，1。
- [7] 沈佳萍，“行動學習應用於數學步道之研究”，國立台灣師範大學工業科技教育學系碩士論文，2006。
- [8] E Klopfer, K Squire, “Environmental detectives: PDAs as a window into a virtual simulated world”, IEEE, 95-98, 203-228, 2002。
- [9] 陳萌智、何嘉原、吳東誼、王佩馨、嚴士翔，“結合數位學習與數位遊戲之研究—以國小自然科學課程為例”，吳鳳學報，18 期，1993，5。
- [10] 陳似瑋、徐新逸，“行動遊戲學習之現況與發展”，資訊科技國際研討會論文集，2009

※報告內容將於成果發表會當天公開，請就可公開之內容揭露

恆春地區防災治理之研究

Disaster Prevention Governance Studies at Hengchun Area of Ping-Tung County in Taiwan

計畫編號：106-2623-E-006-013-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊永年

e-mail：yungnane@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：楊永年、林怡君

執行單位：國立成功大學政治系

摘要

我國仍面臨有核電廠商轉、核廢料及廢核棒儲存問題以及核子反應爐封爐等問題，均是與核能安全無法脫勾的議題，此些爭議不僅可能影響生態永續、環境保護、經濟發展、能源自主等問題，乃至於公共安全、民眾意識覺醒等均持續發酵為民眾參與問題。本研究主要目的為有效提昇核電廠鄰近社區民眾的核能安全認知，同時建立正確的核安防護知識，強化社區緊急應變能力，普及核子事故防護認知；主要透過「自助：共助：公助」原則的應用，深化共助與公助。本研究將以民眾參與與自我治理為操作面向，探討如何賦予民眾更多監督及溝通的權利與機制。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。期待藉由與社區民眾互動討論的執行方式，凝聚相關共識，直接將建議與意見納為決策參酌，以此強化社區民眾自我治理能力以及災害緊急應變效能。

關鍵詞：核能安全、自我治理、社區緊急應變

Abstract

Although the development of nuclear energy policy slightly adjusted, we are still facing the commercial operation of facilities, nuclear waste, the storage problems of used fuel rod, and seal of nuclear reactor. These are associated with nuclear safety issues. The controversies mentioned above have had a lot of impacts including ecological sustainability, environmental protection, economic development, and energy independency. Even public safety and public consciousness have continued to become the problem of public participation. Mainly through “self-support, common support, public support” principle application, to deepen common support and public support. This study will take public participation and self-governance as action-oriented to investigate how to give people more rights and mechanisms of supervision and communication. The research methods include case studies, archival research, field research and action research. Due to current energy policies in Taiwan, the nuclear safety must be considered simultaneously for communities nearby the nuclear power plants. Therefore, this project will focus on neighboring communities around nuclear power plants and nuclear safety. By community involvement to involve life of local people, it's effective for increasing knowledge of nuclear safety about neighboring communities around nuclear power plants. At the same

time, it could build up correct protect concepts of nuclear safety. Moreover, by strengthening ability of community emergency response, it could popularize the cognition about protection of nuclear disaster.

Keywords: nuclear safety self-governance community emergency response

I. 前言

依目前國內的發電方式，至少在短期內核能發電仍為國內發電的重要選項。核能安全的問題在國內、外仍持續發酵，而在此能源轉型期間，我國目前仍面臨核電廠商轉、核廢料及廢核棒儲存問題以及核子反應爐封爐等相關營運問題，均是與核能安全無法脫勾的議題，此些爭議將可能影響生態永續、環境保護、經濟發展、能源自主等，乃至於公共安全、民眾意識覺醒等；故在各類能源仍處於不同階段的規劃時期，於此能源轉型過程中，政府也強調應落實公平正義原則，包括資訊公開、公眾參與以及政策風險溝通等各面向均視為能源政策執行的重要環節。

再就國際間針對重大災害事件發生後所進行的檢討與分析，社區是目前降低災害脆弱度、減少人員傷亡以及經濟損失最根本的一環。聯合國於 1994 年世界減災會議年時提出「橫濱策略暨行動計畫」，以及 2005 年提出的「兵庫行動綱領」中，將社區參與減災工作、強化社區應對災害能力、建構社區災害回復力等列為行動重點。而台灣於近年亦因天然災害發生的頻率、規模與衝擊程度均有呈現持續上升趨勢，促使相關單位開始重視災害防救體系最基層的「社區」防救災能量。

聯合國的減災會議主軸具體指明各國於面對災害發生時的應變作為，尤其是強化地方(社區)面對災害的應變能量以及防災教育的落實。而社區參與減災工作，皆被此兩綱領列為國際減災策略的優先執行工作之一。從國內外歷次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，但其災害因應能力與災害韌性是降低災害衝擊與損失關鍵；亦是目前防災社區為現今災害管理實務工作中不可或缺的一環。

惟由於過去台灣的核電廠曾發生不少突發事件，雖不屬於核子事故範疇，然由於不透明的處理方式以及資訊不公開，民眾亦因之而恐慌且引發民眾詬病，也因此加深民眾對於核能電廠的不信任感。依前揭面向加總，核電廠周遭社區民眾對於核能安全相關議題有一定的重視程度，對於核能安全的緊急應變知識或資訊的汲取

更甚於一般社區民眾。而有關核電廠鄰近社區的核能安全議題亦可賦予民眾更多監督、參與及溝通的機會與權利，以建構完善監督機制，並透過落實民眾深根力量，使社區的核安監督機制得以發揮其效能。

II. 主要內容

有關本計畫執行步驟主要將透過研究方法的運用，繪製各里核能安全地圖，依不同社區與對象，產出符合各里需求的防災地圖，藉此提升或強化民眾防災應變知能。由於核災的屬性與其他災害屬性不盡相同，儘管事故發生後可能釋出的放射性物質，惟依據過往國際案例發生狀況，相關災害發生時並不至於在第一時間內，即造成生命財產的直接損失，此觀念與認知確實得以藉由實際操作時，於討論過程中強化相關觀念，降低民眾對於核子事故發生時過多的恐慌，亦可促成民眾日常生活習慣的養成。此所指的對象主要是指山海里、德和里、城西里及城南里社區或鄰里的民眾為主，函括族群包括國中、小學生、社區長者、婦女會或相關組織、社區大學學員、或周邊範圍商家等。而在計畫執行過程中，也將視執行需要，借重長期致力及耕耘恆春地區社區發展事務的社區發展團體併同協力完成，從設計、策劃乃至於執行，均是以恆春社區四里為主體。民眾對於緊急應變計畫內容瞭解程度越高，則日常生活防救災觀念與知能亦可隨之提升。

工作坊以核能電廠周邊區域為主要對象，藉由社區參與方式深入在地民眾生活，有效提昇核能電廠鄰近社區核能安全認知，普及民眾對於核子事故民眾防護知識，強化社區緊急應變能力。本計畫所操作的核安防災地圖主要是以核能安全緊急應變措施為繪製主軸，並融入或強化各里特色，是與地方政府產出的防災地圖有所區別。由於過去政府機關所產出的地圖，其為求呈現資訊一致，常忽略在地特質與環境紋理等特性；再者，其呈現的資訊專業度過高，是造成民眾可讀性低的狀況；故為改善上揭公部門所繪製防災地圖的劣勢，遂藉由現地勘查蒐集資料方式，再依據各(里)社區呈現特色與特質，納入社區民眾意見，以為本研究核能安全防災地圖繪製主要參酌，透過手繪地圖方式呈現核能安全緊急應變與社區重要元素資訊。

本年度計畫以 8 公里警戒範圍涵蓋里別為對象，包括山海里、德和里、城西里及城南里等四個里為核安地圖繪製優先考量區域，為社區環境進行診斷，納入在地思維與智慧，共同集思廣益，製作社區核安防災地圖。透過社區手繪地圖呈現，強化居民核安知識與知能，提升民眾防救災意識及強化其能力。本研究主要工作項目擬透過「自助：共助：公助」災害防救法則概念，策動參與式工作坊進行，納入民眾參與以及資訊透明原則，聚焦於自助與共助面向上。工作坊主要對象是以恆春地區周邊的社區或鄰里民眾為主，在執行過程中即以社區中重要的領袖人物為主要諮詢對象，主要為里長、社區發展協會理事長，以及國小師長等人員，相關人員對於核子事故緊急應變均有基本認知，同時也意識到社區民眾對於相關應變資訊的認知仍明顯不足；故對於研究團隊能將此些訊息融入在地元素並進而以簡單明瞭的文宣品展示的作法，各里參與工作坊討論的人員均表贊同。工作坊進行主要以里為單位，依據在地特色推動手繪地

圖工作坊進行，文宣品的製作著重考量使用者的意願及立場，所產出文宣透過不同的媒體型態或管道呈現，將核能安全緊急應變資訊或印象傳遞給文宣對象。

III. 結果與討論

本研究主要將防災社區的觀念具體呈現，使民眾更願意參與社區公共事務，並且主動投入關注、意志、知識、時間、精力於社區公共事務的決策與執行等相關活動上。民眾關注因災害，包括人為及自然災害所引發的核能事故可能造成的問題，進而對災害發生時該如何應變與整備有所作為。民眾積極參與，主要亦是認為緊急應變措施的重要性，由於過去的資訊傳遞方式對於訊息接收者的接收是有門檻的，資訊呈現過於專業或是一貫的官方文字或作為，都會使得訊息傳遞不具效益；本年度研究計畫主要產出防災地圖，透過社區民眾的參與討論，融入在地需求與元素的圖面呈現，讓資訊的傳遞簡易明瞭，民眾依此亦可獲取正確的知能。

核能科技官僚在溝通過程，通常會較重視論述內容背後的科學依據。尤其是核能科技的專業更是一般人員較未觸及的，故對於相關的科學事實以及數據等通常都由同一領域(或單位)人員所提供或產生，所以一旦論及核能政策時，核能科技官僚通常是透過科學技術或專業知能等語言予以侷限；較易排除一般人員對其描述性以及情境觀察的論述方式，且認為相關闡述納入過多外在因素與因子，是無法併同解決。由於過去較強調科學證據，提高了民眾參與溝通以及政策參與的門檻，將一般民眾對於核能政策的意見隔絕於政策討論範疇外；此也讓民眾對於核能科技以及相關策略的執行不易理解且無法釐清真正問題，無法更進一步參與討論與表達訴求，民眾對於核能科技官僚的信賴程度越是低落，公部門後續一但要進行溝通僅會流於形式或不具效益。

辦理工作坊過程主要是與社區中的領袖人物討論，使用民眾容易理解的語言傳遞相關訊息，增加防災地圖傳達效益，討論內容包括緊急應變資訊與措施、民眾瞭解相關措施或知識的程度等皆是討論重點，而參與討論人員則透過社區溝通方式提升社區公共事務參與效能；各里防災地圖的產出，主要是以里長為主軸，各里里長對於核子事故緊急應變資訊的理解程度較高，故在辦理工作坊時，里長多能提出以在地需求為主軸的訴求，而相關討論結果也可回饋至防災地圖設計上；而所繪製出的防災地圖，再由主管機關審核其資訊傳遞的正確性，其相互往來的過程可構成一有效的溝通決策平台。

IV. 結論

治理模式主要係強調由公部門及私部門共同實踐包括政治、社會及經濟的目標，此種治理模式採用參與性及合作性的決策程序及執行方法，其也鼓勵更多的利害關係人共同分擔治理責任。社會科學對於災害的描述主要是以治理面向著手，災害管理主要多從專家角度進行專業分析，惟治理更強調資訊透明與責任性；社會科學於科技專業外，更廣泛地納入包括人文面向、族群問題、地方政治、社會永續甚至氣候變遷等面向。治理是強調公民參與以及自治過程，而主要是由公部門、研究學者與在地民眾間進行的溝通過程，不以說服民眾需服從專家為目的，強調的是雙向的溝通；而透過溝通過程

所獲致結論與意見，也將成為公部門做成決策的依據，所形成政策除符合在地需求及民眾期待。

而在過去所接觸民眾實際狀況，各里別的領袖人物或代表人物對於政府機關的緊急應變機制充斥著不信任感，或是認為一旦認同核能安全即等同於認同核能的謬誤，更認為相關的文宣或演習演練可發揮的效益不高；由下而上的民眾參與模式建立亦非一蹴可及，尤其台灣目前民眾對於公共政策的參與程度已較高，唯民眾對於可參與決策階段尚有一段距離；故目前由公部門所促成的工作坊辦理，其所建構出雙向交流溝通模式，亦非過去由上而下的政策執行方式，也彰顯了公部門對於民眾參與的重視程度。由於單一議題的聚焦或社區的凝聚力多會因該議題的重複出現才能獲致社區民眾的重視，故一旦後續未能持續針對該區域進行相關之研究時，再次重新凝聚恆春社區在地組織時恐需耗費更多的能量，此也是後續研究進行時須考量的重要因素。而本年度的研究所獲致經驗、所遭遇困境的解決方式以及成果等，都可成為後續研究的重要基礎，主要仍是希冀透過此模式的建置，使資訊的傳遞無礙並協助社區民眾防災意識與觀念的養成，並進而對於相關決策產生認同。

參考文獻

- [1] Burt, R. S. (1992). Structural holes: The social structural of competition. Canbridge, MA: Harvard University Press.
- [2] Garson, G. D. and J. D. Williams.(1982). Public Administration Concept: Reading, Skill, (Boston: Aliny and Sacon).
- [3] Hall, L. M. and S. S. Kennedy.(2008). “Public and Nonprofit Management and the “New Governance” , American Review of Public Administration, Vol. 38(3), pp. 307-321.
- [4] 李長晏、林煥笙，2009，〈中央與地方協力夥伴關係之分析—以台中縣潭子段旱溪整治工程為例〉，《公共行政學報》，第31期，頁62。
- [5] 杜文苓、黃郁芬，2014，〈核安議題之民眾風險溝通困境初探〉，「創造適當科技，啟動社會轉型」2014年台灣科技與社會研究學會第六屆年會學術研討會，國立交通大學客家文化學院，2014年3月22-23日。
- [6] 楊永年，2003，〈社區防救災組織之研究〉，《重建區社區營造點案例實例選錄》，財團法人台灣省文化基金會印行，頁8。
- [7] 楊永年，2010，〈核能安全體系之研究—以核三廠變+壓器失火為例〉，「府際關係的新興議題與治理策略」學術研討會，台灣大學集思會議中心洛克廳，2010年11月12-13日。
- [8] 劉學仁，2003，《我國核能電廠緊急應變機制之研究》，國立政治大學社會科學院行政管理碩士學程碩士論文。
- [9] 鄧子正、沈子勝，2002，〈民間與社區防救災教育之建立與推動分析〉，內政部消防署委託學術研究計畫(091-301060000C1-009)。

原子能民生應用、輻射防護與放射性廢棄物科普實務推動及成效探討

Practical Promotion on General Science Education for Atomic Energy Civilian Application, Radiological Protection and Radioactive Waste

計畫編號：MOST106-NU-E-007-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：戴明鳳

e-mail：mftai@phys.nthu.edu.tw

計畫參與人員：蕭仲凱醫師

執行單位：國立清華大學物理學系(所)

摘要

本計畫除能培育具備輻射相關知識的種子教師與推廣人才外，並能協助社會大眾深入瞭解原子能在生活上的各種應用、輻射防護和放射性廢棄物之安全處理相關問題，以匡正民眾心中的誤解與疑慮。並面對問題時能以正確的觀念和處理態度，做到實質有效的防護，使民眾對原子能不再聞之色變，確保社會大眾安全，避免不必要的恐慌。根據計畫徵求要點，規劃辦理下列工作：

(1) 辦理科普活動：包括輻射專題演講，以及實地參訪清華大學水池式反應器（THOR）、國家同步輻射研究中心等相關輻射設施。總計辦理講座 29 場、參訪 16 場、科學營 1 場、其他推廣活動 1 場，總時數 128 小時，參與人數 3,366 人，男性 53%、女性 47%。(2) 錄製講座影片：完成五部內含與輻射議題相關的開放式專題講座的高品質影片錄製；影片經標記後上載至科技部科技大觀園「知識大講堂」網頁，提供公教人員之研習認證用；亦同步上傳到清華大學跨領域科教中心網站內，供國內外師生與民眾分享學習。

關鍵詞：原子能民生應用、輻射防護、放射性廢棄物、科普教育、推廣活動。

Abstract

The program committed to not only the training of seeded teachers but also the practical promotion on general science education for atomic energy civilian application, radiological protection and radioactive waste. Therefore, the public could deal properly with issue related to atomic energy application without collective panic. The major progresses were: (a) to promote the science education of radiation safety and radiological protection, there were speeches of radiation issues and visiting to radiation facilities, such as Tsing Hua Open-pool Reactor (THOR) and the National Synchrotron Radiation Research Center. In this project, we held many popular science activities related to radiation issues, including 29 speeches, 16 visits, 1 science camp and so on. The total activities were 128 hours long and the participants were 3,366 in total, while the gender ratio is 53 to 47 percent. (b) In addition, a series of lectures related to the radiation issue were recorded in videos with HDTV quality. The videos were uploaded to The Knowledge Lecture Hall and The Cross-disciplinary Science and Technology Center Website of National Tsing Hua University as well. It is expected that teachers,

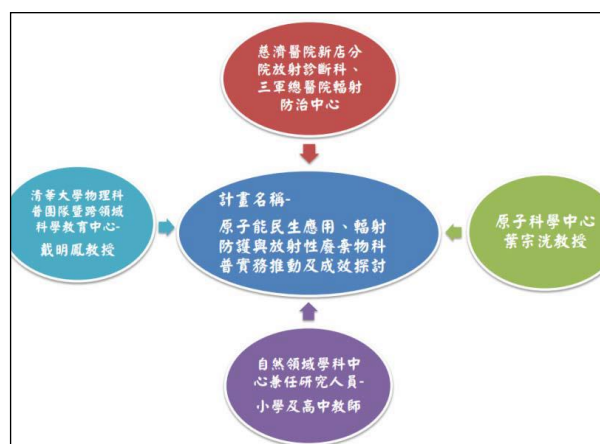
students and civics would be enlightened at the event and learn the correct knowledge of radiation. On top of this, students will put more attention to science in general. Someday, they will make a good use of it.

Keywords: Atomic energy civilian application, radiological protection, radioactive waste, general science education.

I. 前言

原子能民生應用、輻射防護與放射性廢棄物相關知識在正規教育中論及有限，一般人對此領域的基本知識明顯不足，亦多不熟悉可從何管道獲取正確且完整的知識。本計畫團隊暨跨領域科學教育中心特邀本校原科中心葉宗光主任與新店慈濟醫院放射診斷科主治醫生蕭仲凱博士合作，規劃辦理各式科教活動，以進行「原子能民生應用、輻射防護與放射性廢棄物科普實務推動及成效探討」。

除培育具備相關知識的種子教師與推廣人才外，並協助大眾深入瞭解這些議題，以匡正民眾心中的誤解與疑慮。當面對問題時能有正確的觀念和處理的態度，以做到實質有效防護，使民眾不再聞原子能就色變，確保社會大眾的安全，避免造成不必要的恐慌。



II. 主要內容

本計畫延續過往辦理輻射科普推廣工作的成效與心得 [1,2]，並根據本計畫之徵求項目「DN6人才培訓與風險溝通」學門的重點，以下列兩項主軸工作執行本計畫：

一、輻射科普知識推廣及成效探討：

本計畫以國中至大學的學生為主要推廣對象，辦理一系列輻射相關議題的科普活動，活動方式包含專題講座以及輻射設施實地參訪，例如清華大學水池式反應器（THOR）、國家同步輻射研究中心、台灣電力公司電力展示館等相關輻射設施。

本計畫執行期間總計辦理了29場輻射專題講座、16場輻射設施參訪、1場科學營、1場與交通部臺灣鐵路管理局鐵路節合作辦理的「科教與原能」擺攤活動，總時數達128小時，參與人數3,366人，男性53%、女性47%。

為能有效優化及強化輻射知識深耕教育的推廣，我們經由下列多元的推廣方式執行輻射推動和成效的探究：

1. 辦理各級學校師生瞭解輻射安全與防護之參訪課程：

接受國內各級學校及民間團體邀約委託或主動為各單位規劃，辦理0.5—4天不等的科學教育活動，安排實地參觀輻射設施。經由專題講授、實驗示範、演示、DIY等各種教學方式，以及實地參訪相關設施，如國家同步輻射研究中心（NSRRC）、清華大學水池式反應器（THOR）、清華大學硼中子捕獲治療（BNCT）中心等設施，使學員能夠當面與資深的從業人員交流討論，解開疑惑與誤解，獲取深刻紮實的知識。

圖1—圖5為參訪機構及活動剪影。



圖1 參訪設施



圖2 國家同步輻射研究中心實地參觀活動剪影



圖3 清華大學硼中子捕獲治療（BNCT）中心實地參觀



圖4清華大學水池式反應器（THOR）實地參觀



圖5 同學實際操作蓋格計數器測量輻射值

2. 舉辦科普系列專題講座活動：

近年本團隊每年約有200場次以上的科學活動邀請，其中約有1/5的場次規劃為與本計畫推廣主題相關的研習，並將因發電所衍伸的輻射安全與防護相關議題高比例地納入研習課程中，不定期舉辦2-3小時的專題演講系列活動，本計畫年度總計辦理29場次。



圖6 輻射議題專題演講活動照片

其中葉宗洸教授特別分享2018年1月18日於台南市善化國中講課現場，邀請了四位同學即席表演國外「急性曝曬」輻傷個案，效果超乎想像的好，全場650位剛考完期末考的躁動學生變得更安靜也更專注了，順利完成科普演講。



圖7 葉宗洸教授與學生現場演示

3. 科教與原子能推廣擺攤：

2017年6月4日適逢交通部台灣鐵路局130周年「鐵路節」慶祝活動，清大科普團隊應邀前往竹南車站設置科學攤位，展示團隊設計開發的各種教具及裝置。其中更特別設置了一輻射偵測體驗與輻射文宣發送的攤位，分享輻射於日常生活的應用，推廣核能安全及輻射防護的正確知識。當天有不少民眾駐足此攤位，與本團隊進行輻射安全與防護等相關議題的諮詢與討論；此外由於文宣特別印製了泰文、越南文、印尼文等版本，攤位上有不少新住民配偶及外籍移工前來索取。



圖8 2017鐵路節科學遊戲營 成果影片

另外本團隊也於2017年暑假受邀至國立雲林科技大

學第57屆全國科展參展設攤，帶來五個包含光學、力學、電磁學等不同主題的趣味互動攤位。攤位上同步展示本團隊規劃、設計、製作以輻射議題為主題的動畫影片，以動畫影集包裝專業的輻射知識以及資訊，讓社會大眾在輕鬆觀看動畫之餘能逐步吸收新知，並在影片後端放上較深入的知識連結，讓有興趣的觀眾能繼續探討，活化輻射科學教育之推廣通路與成效。



圖9 第57屆全國中小學科學展覽會 參展紀錄

二、「輻射安全與防護、生活中的輻射」等議題系列專題講座影片錄製與實務推廣：

近年來本團隊特別著力於科普教育影片的錄製工作，特與清大原科院巫勇賢教授所主持的「週末學術科普列車全國巡迴走透透(計畫編號：MOST 104-2515-S-007-005-MY3)」合作輻射議題之科普講座影片的錄製，由本計畫負責講座活動規劃、演講者邀請、聽眾程度評估和安排，以及影片完成後的使用、推廣與維護；巫教授之計畫僅協助錄影及後製剪輯工作。期使無法蒞臨現場參加講座的師生或民眾，能夠透過線上學習的機會獲取新知，也讓豐富的講座內容得以達到更高的推廣效益。



圖10 專題講座影片錄製

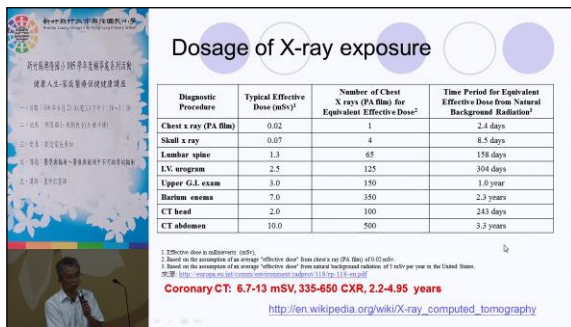
本計畫執行期間完成了五部由專業講師主講之輻射專題影片，影片均具備HDTV高畫質規格，影片名稱與講員一覽表請參見表一。

#	影片名稱	講者
1	輻射科技與其應用	清華大學 葉宗洸教授
2	核能發電的輻安與防範	清華大學 葉宗洸教授
3	醫學與輻射 醫療與檢測中不可或缺的輻射	慈濟醫院 蕭仲凱醫師

4	清華水池式研究反應器(THOR)之原理介紹及研究應用	清華大學 李進得博士
5	輻射電力與生活	清華大學 葉宗洸教授

表1 與輻射議題相關的線上影片清單
(點選各影片名稱,即可超連結到影片的youtube網址)

影片除公開於本校跨領域科教中心YouTube頻道
(<https://www.youtube.com/playlist?list=PLjdLYhXXIL4NygV0tJT343KBAoj0lhtR8>)及跨領域科教中心網站
(<http://isec.web.nthu.edu.tw/files/11-1917-10841.php?La ng=zh-tw>)以外,亦同步上傳至科技部「知識大講堂」
(http://knowledge.colife.org.tw/partner_one_detail.aspx)以及「科技大觀園」→週末學術科普列車專區
(<https://scitechvista.nat.gov.tw/list/r41/reset.htm>)中,供公教人員或民眾研習認證用,並使更多大眾能夠分享探究。部分影片主題雖以能源及發電為主,但其中皆涉及核能發電時應注意的核安與輻射防護議題之探討,以及面臨核災事故發生時,電廠與民眾應該具備的應變能力與態度。



Diagnostic Procedure	Typical Effective Dose (mSv) ¹	Number of Chest X rays (PA film) for Equivalent Effective Dose ²	Time Period for Equivalent Effective Dose from Natural Background Radiation ³
Chest x ray (PA film)	0.02	1	2.4 days
Skull x ray	0.07	4	8.5 days
Lumbar spine	1.3	65	158 days
LX. urogram	2.5	125	304 days
Upper GI exam	3.0	150	3.6 year
Barium enema	7.0	350	2.3 years
CT head	2.0	100	240 days
CT abdomen	10.0	500	3.3 years

1. Effective dose in millirem (mSv).
2. Based on the assumption of an average 'effective dose' from chest x ray (PA film) of 0.02 mSv.
3. Based on the assumption of an average 'effective dose' from natural background radiation of 2 mSv per year in the United States.
Source: <http://www.aclis.com/education/education/118.htm>
Coronary CT: 6.7-13 mSv, 335-650 CXR, 2.2-4.95 years
http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_computed_tomography

新店慈濟醫院主治醫師蕭仲凱
主講「醫學與輻射 醫療與檢測中不可缺席的輻射」
影片網址: <https://youtu.be/H3P2HaqNVvY>



為什麼選擇BNCT治療癌症?

◎現行癌症的主要治療方法包括: 手術、化療、放療、以及免疫療法。但BNCT是一種結合外部射線與硼中子治療的方法。

◎外科手術對於無法切除(如: 腦神經瘤、或經過手術後復發)之癌症患者效果有限。化療藥物注射進入體內後會毒害所有快速分裂的細胞, 包括正常細胞。放療則會造成局部性損傷, 但對周圍正常組織的傷害也難以避免。

◎BNCT是一種結合外部射線與硼中子治療的方法。外部射線會產生具有殺傷性的氦-3粒子, 而硼中子則會與硼-10發生反應, 產生具有殺傷性的氦-3粒子。BNCT可以針對腫瘤細胞進行精準治療, 而不傷害周圍正常組織。

◎BNCT是一種結合外部射線與硼中子治療的方法。外部射線會產生具有殺傷性的氦-3粒子, 而硼中子則會與硼-10發生反應, 產生具有殺傷性的氦-3粒子。BNCT可以針對腫瘤細胞進行精準治療, 而不傷害周圍正常組織。

◎BNCT是一種結合外部射線與硼中子治療的方法。外部射線會產生具有殺傷性的氦-3粒子, 而硼中子則會與硼-10發生反應, 產生具有殺傷性的氦-3粒子。BNCT可以針對腫瘤細胞進行精準治療, 而不傷害周圍正常組織。

清大原子科學技術發展中心李進得博士
主講「清華水池式研究反應器(THOR)之原理介紹及研究應用」
影片網址: <https://youtu.be/oH3neW3NNBs>



清大工程與系統科學系葉宗洸教授
主講「輻射電力與生活」
影片網址: https://youtu.be/8Oc2Nzu_GAk

III. 結果與討論

本計畫於執行期限間總計辦理了 31 場次與輻射議題相關的科學研習活動, 包含 29 場輻射專題講座、16 場輻射設施參訪、1 場科學營、1 場與交通部臺灣鐵路管理局鐵路節合作辦理的「科教與原能」擺攤活動, 總時數達 128 小時, 參與人數 3,366 人, 男性 53%、女性 47%。並完成 5 部含有輻射議題相關的線上講座課程影片的錄製。

本團隊活動自前期計畫開始曾試圖將推廣對象延伸至國中生; 儘管收到的課後問卷回饋反應都相當熱烈, 認為輻射課程非常有趣、甚為值得, 但可能囿於國中生的輻射相關科學知識較為有限, 本期所辦理的活動對象仍回歸到以高中師生為主(參閱表2)。不過本團隊長期與新竹縣市國中、小教師及家長保持密切聯繫, 亦針對醫療與輻射教育的宣導可能進行討論, 期許將輻射知識從小開始紮根, 使K12師生與一般民眾對於輻射提早擁有正確的概念與資料來源, 提升探討原子科學之基本知識和其應用的興趣, 達到教育推廣之成效。

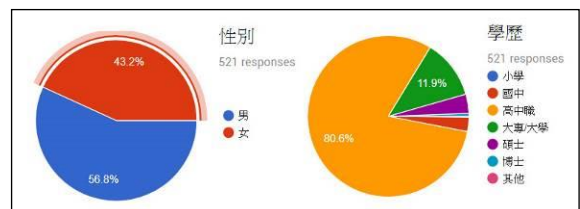


表2 學員身分統計

106 年度原子能與輻射科學活動之學員參與演講活動心得暨建議調查表一共回收了 521 份有效問卷, 在滿意度調查的五個項目裡: (1) 參與本活動後, 對活動的主題有了初步的認識 (2) 本活動辦理內容有達到預期參加的目的和期望 (3) 講員的講解清楚易懂 (4) 此活動有助於對原子能與輻射的基本觀念、應用與防護更深入的瞭解 (5) 會向其他人推薦此活動, 所收到回饋有高達九成以上皆給予本活動高度肯定, 顯示活動辦理之成效。

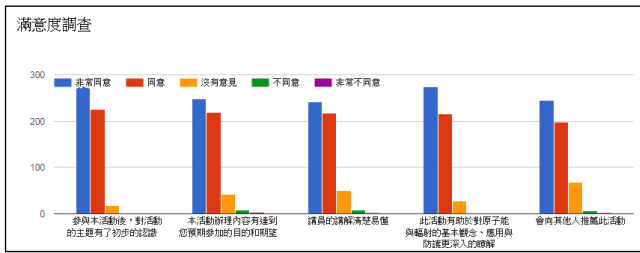


表3 學員滿意度調查

在自由發揮的心得及建議中，學員們熱情分享在講座所收穫的新知，例如輻射不僅能夠用來發電，還有癌症治療上重要的醫療應用。以及透過實地參訪平時難以見得的相關機構與設備，表示大開眼界、被勾起對原子能科學的興趣。此外也紛紛感嘆時間有限，無法詳盡理解相關原理。後續若有進一步探討的機會，學員們也提到想要瞭解的相關主題，包括輻射未來可能發展的方向、於醫學上的應用、生活中的輻射防護、輻射污染帶來的問題等等，皆提供本團隊日後持續辦理相關領域活動時重要的參考指標。

心得分享及建議(請填寫30-100字)

521 responses

這次去漫不的特別活動，讓我學到很多新東西像是核能反應爐的運作方式、原理、設計之類的也是很特別的體驗，畢竟能站在核能反應爐上方的機會應該也不多，還有一個從下到上環繞整個東西的樣子真的很有趣，就像那個教授說的以後就可以跟別人說我站在核能反應爐上面過，我知道這是一個多難得的機會了。

在這次的活動中，讓我了解到反應爐的功能與及聽中子對我們的醫療有那些幫助。

這次的參訪很有趣，第一次知道輻射能伸發展可以治療癌症，希望可以幫助到很多人。

在這次的活動中，讓我了解到反應爐的功能與聽原子對於醫療上的幫助。

希望所聽能久一點，才能體驗學習到更多科學知識。

希望以後多舉辦這類活動供高中生參加，並延長參加與體驗的時間。

藉由這次機會，讓我更加了解甚麼是原子能與輻射科學等等，...並加深對這東西的概念。

能藉由這次的活動來瞭解關於科學方面的知識，覺得相當不錯，希望兩所學校下一次可以更換地方辦活動課程。

以前參加過清大的科學課程，這次的又和之前的大不一樣，對我未來選科系的發展有十分大的幫助，希望以後可以多辦這種類似的活動。

真是個特別的體驗，我竟然能站在核能反應爐上面，我相信很多人都沒有這種體驗。

我覺得這次的活動讓我對原子能與輻射有更多的了解，希望下次還有機會能去。

表 4 學員心得分享及建議（部分截圖）

各場次活動主要為本計畫團隊規劃課程主題和研習內容，參與學員由主辦單位自行招攬。多數單位在一次參訪或講座後仍會定期與本科普團隊聯繫，委託本團隊辦理相關研習活動，由此可見得本計畫推動之成效：經前述多元活動方式切入探究原子科學領域，學員們得以深入淺出地理解正確的基本輻射知識，強化大眾對輻射議題之正確資訊傳遞與吸收的管道，以及進一步探討原子科學知識和其應用的興趣，提昇後續教育推廣的成效。

IV. 結論

本計畫執行至今已將近三年，透過長期辦理科普專題講座、安排學員到相關設施實地參訪、讓學員與此領域專業講師面對面交流座談、以及觀看原子能相關科學知識的開放式課程影片，讓學員得以深入淺出認識正確的輻射知識、輻射科技的應用與輻安防護等觀念，了解輻射僅是存在於自然界中的一種能量，消除對輻射的誤解、疑惑和不安，達到推廣輻射安全的目的。

在執行計畫的過程中本團隊發現一般學校體系對於輻射領域的教育仍是相對缺乏的，也顯示出學生乃至於民眾對於輻射的正確認知與安全防護尚有加強的空

間。未來除持續致力於輻射教育的推廣之外，也期望能發展更多元的平台管道，例如動畫影集等，讓一般學生及社會大眾能夠接觸更加平易近人的輻射議題，面對輻射不再陷入無謂的盲從及恐慌，以正確的觀念接受輻射帶來的便利與影響，與輻射和平共處。

參考文獻

- [1] 104 年度「原子能安全與輻射防護科普實務推動及成效探討」計畫(編號：MOST 104-NU -E-007-009 -NU) 成果報告；
- [2] 105 年度「輻射防護科普實務推動及成效探討-II」計畫(編號：105-NU-E-007-009-NU)成果報告。

原住民之核能與輻射知識宣導

Propagation of Nuclear and Radiation Knowledge for Indigenous People

計畫編號：MOST 106-2623-E-262 -001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳彥均

e-mail：chen.mg.lhu@live.com

計畫參與人員：黃莉琄

執行單位：龍華科技大學多媒體系

摘要

核能設施的設置地點，會優先選擇人口較不稠密之處，這些地方往往也是原住民的生活區。因為數位資訊較不發達，這些地區的民眾較容易受到親友的口耳相傳，而對新興科技的某些副作用產生恐懼。本計畫將核能與輻射知識影片，製作成原住民的族語教學節目。藉此，以原住民能夠接受的方式，傳播正確的核能與輻射知識。

關鍵詞：原住民、核能、輻射、影片。

Abstract

Areas without densely populated are considered as the higher priority of nuclear facility locations. These areas are usually overlapped with living zone of indigenous people. Due to less digital information, these people are often misled by some misconception and refuse new technologies, such as nuclear. This project transforms videos of nuclear and radiation knowledge into videos of aboriginal languages. The nuclear and radiation knowledge are propagated using the method which indigenous people can accepted.

Keywords: Indigenous people, nuclear, radiation, video.

I. 前言

台灣的原住民，大約有 53 萬人，有許多居住在鄉下與山區等人口較不稠密的地區。和都市地區的民眾相比，容易具有城鄉之間的數位落差，不容易從網路等新興科技，取得知識。因此，有必要採用針對原住民，採用適合的方法，來宣傳核能與輻射知識。以彌補因為城鄉數位落差，導致原住民不易獲得核能與輻射知識的問題。

為了讓原住民族更願意觀看政府的宣傳影片，並且更願意接納影片中的核能與輻射知識，本計畫使用原住民族最容易認同的方式，來製作並傳播原子能委員會的宣傳影片。透過原住民的母語教學節目，來宣傳重要的核能與輻射知識。

II. 主要內容

台灣的核能發電廠，位於新北市的北海岸（核一廠與核二廠）與屏東縣恆春（核三廠）。在新北市部分，雖然原住民是以泰雅族為大多數，但是泰雅族大多居住於烏來地區，而非北海岸。北海岸地區的原住民並不多，人數大約百人，屬於阿美族。至於恆春地區的原住民，則是排灣族。因此，核電廠附近的原住民，可以說是阿

美和排灣兩族，也正好是人數最多的兩個原住民族群。

在本計畫之中，針對原子能委員會過去所製作的多媒體影片「原來如此」系列（圖 01），進行重製。擷取出其中的知識解說段落，轉製成阿美族與排灣族的族語教學節目。「原來如此」系列影片共 23 集，經過挑選，選出民眾觀看次數較多的主題，共選出了 17 集，主題如表 01 所列。本計畫將這 17 集的知識講解影片，重新規劃設計，製作成阿美族與排灣族的族語教學節目，每集時間長度統一為 2 分鐘，以利於未來在電視台上撥放。



圖 01：原子能委員會製作之「原來如此」系列影片

表 01：原住民族族語解說影片清單

集數	主題
01	輻射是如何傷害人體？
02	在行進中若發生核災時，如何幫助疏散民眾？
03	去醫院照 X 光，輻射會殘留在體內嗎？
04	目前台灣用過的核子燃料放在哪裡？
05	台灣核能電廠的運轉執照期限是幾年？
06	輻射最多的地方在哪裡？
07	輻射排名第二多的地方在哪裡？
08	你覺得食物中有輻射嗎？

09	機場的行李 X 光機，會傷害人體嗎？
10	食物為什麼要照輻射？
11	誤食遭受輻射污染的食物，該怎麼辦？
12	當孕婦照口腔 X 光時，會影響胎兒健康嗎？
13	你的身旁有輻射嗎？
14	飲用水有輻射嗎？
15	發生核子事故時，一定要疏散嗎？
16	核電廠拆除要花多少年？
17	核燃料棒跟原子彈一樣嗎？

本計畫將原子能委員會的「原來如此」知識講解影片，轉製成阿美族和排灣族的族語教學影片。在影片之中，先用族語提出問題，接著由原子能委員會的專業人士進行講解，最後再用族語說出答案。同時，也藉由族語的問題和答案，分別介紹一個族語的單字。如此，新一代原住民也可以認識族語的單字，加強對於自己族群的認同。本計畫所製作的影片之中，總共介紹的單字如表 02 所列。因為不同的原住民族，具有不同的語言和文化，所以選用的單字略有不同。舉排灣族為例，金屬對於排灣族具有重要的意義。所以在說明機場 X 光檢查的單元，解答是金屬可以屏障 X 光的輻射，就選用金屬做為該集的族語單字。完成之族語教學影片如圖 02 所示。

表 02：原住民族族語解說影片清單

集數	阿美族語單字	排灣族語單字
01	身體、疾病	身體、疾病
02	幫忙、關閉	幫忙、關閉
03	殘留、陽光	殘留、陽光
04	放、池子	放、池子
05	知道、年	知道、年
06	最多、地方	最嚴重、地方
07	在哪裡、岩石	在哪裡、花崗岩
08	覺得、有	認為、有
09	傷害、擔心	有害、金屬
10	食物、蟲	食物、蟲
11	污染、喝水	污染、喝水
12	孕婦、牙齒	孕婦、牙齒
13	周遭、不用	周遭、擔心
14	水、健康	水、健康
15	疏散、近	疏散、近
16	拆除、完成	拆除、完成
17	一樣、爆炸	一樣、爆炸

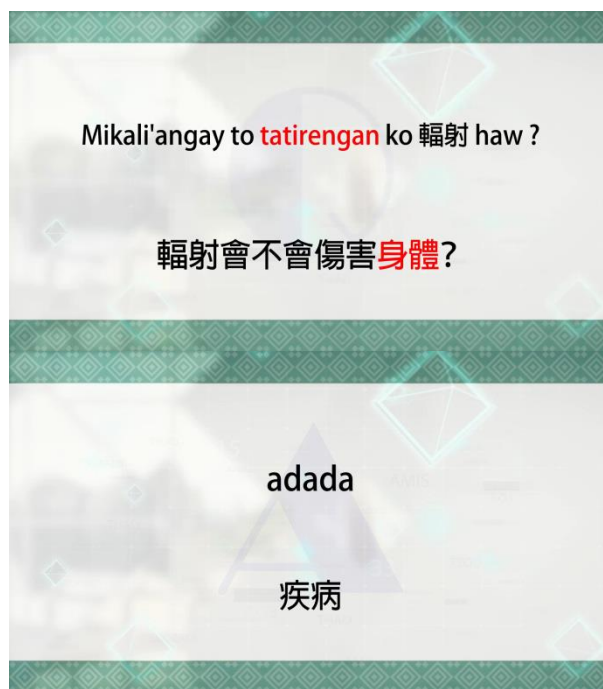


圖 02：本計畫所製作之族語教學影片

III. 結果與討論

本計畫已經完成相關影片的製作工作，也讓部分原住民人士觀看過這些影片。觀看過影片的原住民人士，對於這些影片可以讓原住民，認識自己的族語，都表示肯定。也認為可以讓相關的科學知識，觸及更多原住民。目前，本計畫將製作完成的影片，送交原子能委員會進行審查。待審查完成之後，就可以在原住民的相關媒體頻道(如原住民電視台、原住民族委員會的族語 YouTube 頻道等等)進行播出。

IV. 結論

本計畫透過製作原住民的族語教學影片，來宣傳核能與輻射知識。藉此，讓原住民的相關媒體頻道，願意播放本計畫所製作的影片。同時也讓原住民，願意觀看本計畫所製作的影片。藉此，達到更好的宣傳效果。計畫的整體成果，與原先的規劃大致相符。

藉由輻射度量儀器之開發與課程設計推動原子能科普教育

With the development of radiation measurement equipment and related curriculum design to promote atomic energy science education.

計畫編號：MOST 106-NU-E-007-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：劉鴻鳴

e-mail：hmliu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：劉鴻鳴、周文采、吳勇慶

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

本計畫主要是藉由改良、精進已開發完成之簡易輻射度量儀器，並透過活動設計與內容之修正，進一步規劃設計出相對應的實驗課程與教材，以輻射度量實際體驗活動為開端，延伸介紹輻射應用、輻射防護、甚至放射性廢棄物處置…等相關課題，讓民眾與學子們可以認識生活環境中的輻射及輻射量測，並瞭解輻射防護措施等基本常識。

關鍵詞：輻射度量、輻射防護、輻射劑量、輻射應用。

Abstract

This project is mainly to improve the radiation measurement instruments that have been developed and to further plan and design corresponding experimental courses and teaching materials. The promotion process starts with radiation measurement and actual experience activities, and extends the related topics such as radiation application, radiation protection, and even the disposal of radioactive waste. It is hoped that the activities will enable the people and students to understand the radiation and radiation measurements in the living environment and understand the basic knowledge of radiation protection.

Keywords：Radiation measurement, Radiation protection, Radiation dose, Radiation application.

I. 前言

計畫構想源起於觀察到：過去幾年前來清華大學原科中心參觀之師生或一般民眾，在進行環境介紹及原子能科普知識演講時，經常發現 K12（小學與中等教育）師生、民眾對於清大原子爐內外環境的輻射能量高低感到好奇，尤其在日本福島事件之後，參訪的一些團體，對於輻射及能源等相關議題更為熱切關注，因此我們就利用現有及自行開發出的游離輻射偵測儀器，在帶領參訪團體時，即偵測週遭環境游離輻射數值並進行相關知識講解，有不少參觀師生對於偵測儀器感到興趣，故在此經驗下，我們認為可結合中心既有教學資源，並融入自行開發的儀器，使得學校團體、社會大眾等在沒有相關知識背景下，能有更多機會認識原子能科普知識。

此外，近年來國內民眾對於日本核災食品的進口也甚為關注，但對於食品中含有放射性物質的認知、甚至可能造成的危害卻不甚了解，以訛傳訛的情況下，可能造成一般民眾對於輻射的過度擔憂。

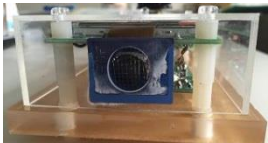
因此，本計畫結合清華大學原科中心既有的參觀活動與課程資源，同時邀請本校師長、校外廠商、核能研究所、以及輻射偵測中心具備輻射度量專長的學者專家，一起合作，進行基本輻射度量儀器之精進與改良（以降低製作成本並提高儀器性能為目標，方可提供中小學的師生進行 DIY 活動），同時針對已有之實驗課程及上課講義進行相對應的修正與內容擴充，達到寓教於樂、親身體驗的科普教育目的。

II. 主要內容

本計畫的內容主要包含兩部分：(1)輻射度量儀器的開發與精進；(2)課程設計與原子能科普教育的推動。分別說明如下：

- (1) 在輻射度量儀器的開發與精進方面：清大原科中心科普團隊(本團隊)與核康科技股份有限公司在 2015 年曾合作進行輻射計數器研製的研究，並於 2016 完成以尾端窗型蓋格計數管並自製具數據顯示功能的手持式游離輻射偵測器的裝置(如下表 1)，但受限於儀器之穩定度不佳、且故障率偏高，導致教學使用受到極大的限制。因此本計畫在今年度與核康公司持續針對該款儀器進行改善與精進，降低故障率並提高測量穩定度，做為後續輻射度量實驗之用途。

表 1：核康科技公司所研發的手持式輻射偵測儀

G150 (美製蓋格管 LND712)	
	
G50 (透明式，美製蓋格管 LND712)	
	

- (2) 在課程設計與原子能科普教育的推動方面：本計畫利用上述改善與精進後之儀器，針對高中以上之學生（含大專院校）設計輻射度量課程。除此之外，本計畫亦向核能研究所商借快速輻射偵測儀器（如下表2），做為中小學老師及學生、以及一般社會大眾在進行認識輻射過程，做為實際操作體驗的儀器。

表 2：核研所開發之快速輻射偵測儀器

核能研究所-FS99 快速輻射偵查儀	
	
核能研究所-INER9200 多用途輻射偵測儀	
	

本計畫以 K12 教育推廣為主，針對不同對象採用不同的方式進行輻射教育推廣課程：高中以上學生，本計畫以邀請參觀清華大學原科中心為主，除了參觀相關核子設施及輻射應用場所之外，並規畫基礎輻射度量實驗體驗課程；針對國中國小學生或教職員工，本計畫則採取主動出擊，免費前往該校演講，並提供輻射儀器操作與度量體驗；針對一般社會大眾，本計畫則採取被動配合支援，利用發展完成之儀器與課程內容，因應不同單位需求，提供人力及器材的協助。

利用上述之儀器及相對應發展完成的課程，本計畫在今年度執行之成果說明如下：

III. 結果與討論

- (1) 研發與更新簡易型手持式游離輻射偵測器：本計畫團隊與核康科技股份有限公司合作研發具偵測器功能及外型設計的簡易型手持式游離輻射偵測器，並針對故障率高且穩定度不佳的問題進行改善。本團隊將改善後之儀器在清華大學原科中心校正實驗室進行輻射偵測儀的校正實驗，在 $800 \mu\text{Sv/hr}$ 劑量率之下，其反應均呈線性關係（圖 1 為 G150 的線性測試結果），且偵測儀偵測數據的再現性與儀器的穩定性也藉由背景輻射的量測而獲得確定。

完成儀器改善後，除了在清大原科中心校正實驗室完成儀器校正外，並與原科中心曾永信博士合作，利用 3D 列印方式設計出一套適合實驗進行之底座（如圖 2 所示），除了用來固定射源、提供不同材質屏蔽效果、以及射源距離與輻射強度關係之實驗外，更期許能藉由與此一方式降低整組輻射度量套件的組合價格，讓此一輻射偵測器及其套件，能更加普遍、更加有效地推廣輻射知識，使一般大眾能藉由動手量輻射

的體驗，更能清楚認識輻射度量及輻射防護。

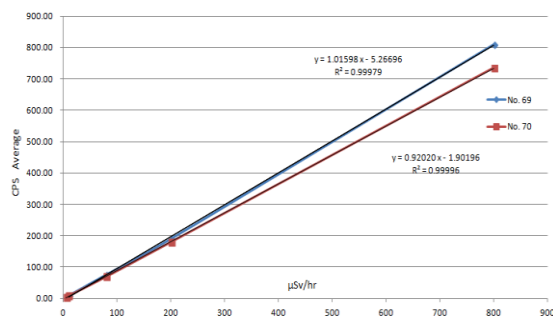


圖 1：G150 線性反應測試結果



圖 2：與清大曾永信博士合作之實驗底座

- (2) 本計畫與張似璵教授合作，將此一套教材實驗教材與中國醫藥大學放射系合作，將基本輻射度量實驗課程融入大學實驗課程中，讓一般大學生也有機會接觸到輻射度量的基本知識。圖 3 是張似璵教授在中國醫藥大學放射系進行「輻射度量」等課程的上課情形，總參與人數達到 100 人次。



圖 3：中國醫藥大學放射系進行「輻射度量」課程

- (3) 為了將上述之實驗設計推廣至高中師生，本計畫結合原科中心現有之參訪資源，進行教學推廣適合高中師生（含大專學生）實作的輻射度量實驗教材及內容：在 2017 年規劃了一套包含演講、設施導覽及動手做實驗的活動，安排對象為高中師生，名為「2017 原子科學探奇之旅」。圖 4 為此活動的課程表，包含認識輻射、認識核能、認識核廢料三個演講主題，以及

設施參觀和實驗體驗課程。此系列活動總計舉辦 29 場次，參與人數共 1236 人。但受限於場地、同時為顧及教學品質、以及讓參與師生可以深度學習到學校課程中較少提及的輻射知識，我們不得限制每場次將師生人數在 45 人以內。

破解超人的迷門 - 演講

講題一：人在「輻」中要知「輻」(1~2 小時)

看不見、摸不著、聞不到的輻射，讓一般人常常心生恐懼，但事實上我們生活周遭到處都是輻射。輻射到底在哪裡，你知道嗎？

- (1) 生活中的輻射。
- (2) 輻射的應用。
- (3) 輻射的風險及基本防護。

講題二：THOR 的前世今生(1~2 小時)

清華水池式反應器 (THOR) 是目前臺灣唯一的核子反應器，其運轉原理與核能發電廠相同。核子反應器除了發電之外還有很多其他的用途，你知道多少呢？

- (1) 核能知多少？
- (2) 核能安全設計。
- (3) THOR 的醫學用途 (BNCT)。

講題三：何處是兒家？——誠實面對放射性廢棄物(1~2 小時)

放射性廢棄物是目前臺灣新聞中的爭議性話題，其對我們生活的影響常令人注目。然而放射性廢棄物的來源除了核電廠外，還有哪裡呢？其處置方式，你知道多少呢？

- (1) 認識放射性廢棄物。
- (2) 放射性廢棄物的來源。
- (3) 放射性廢棄物的處置。

小心變成蜘蛛人 - DIY & 實驗 -

藉由動手做實驗的樂趣，讓我們知「輻」習「輻」。(2~3 小時)

- (1) 輻射的發現。
- (2) 蓋格計數器的誕生及其原理。
- (3) DIY—組裝簡易蓋格計數器。
- (4) 輻射量測實驗。

別人到不了的打卡點 - 參觀「清華大學原科中心設施」

了解輻射基本知識與應用後，我們將實地參觀清華原科中心設施，藉由親身接觸，讓我們從中得到寶貴的經驗。

- (1) THOR 參觀(30min)。
- (2) BNCT 參觀(30min)。
- (3) 鈾 60 照射場 參觀(30min)。
- (4) 全身計測室 參觀及體驗(30min)。

圖 4：「2017 原子科學探奇之旅」活動課程表

- (4) 本計畫針對國中、國小學生、以及教職員工的輻射教育推廣，主要採取主動出擊的方式，推出「2017 知輻習輻，核家平安 Q&A」免費講座，內容包括：認是核能與輻射(以 Q/A 方式進行)、及動手找輻射(簡易輻射偵測儀器的示範與體驗)，並將此訊息發函各縣市政府教育局轉知各級學校，結果報名超乎想像的踴躍，惟受限於本計畫之經費及人力資源有限，最後本計畫接受 32 場次的邀約，對象分佈於全台各地中小學，其中又以中南部偏遠地區中小學為主，參與人數共達 3330 人。圖 5 是本計畫推廣輻射教育的足跡地圖。

透過認識核能與輻射 Q/A 的活動進行方式，國中國小學生及教職員工所提出的問題可謂千奇百怪、五花八門，如：能量石(或鍍金屬)對人體是否真有醫療的效果？有什麼武器是用輻射做的？若發生核災事件，放射性物質要多久才會消失不見？受核災影響的食品是否會導致食品基因突變，若吃下去對人體會有影響嗎？微波食品是否會讓食品殘留輻射？…這樣

的活動也讓我們更進一步瞭解一般民眾對於輻射的恐懼主要源自於生活經驗，也讓我們在活動過程逐步調整方向，除了傳遞正確的輻射基本知識之外，更重要的是解除民眾生活上的疑慮。

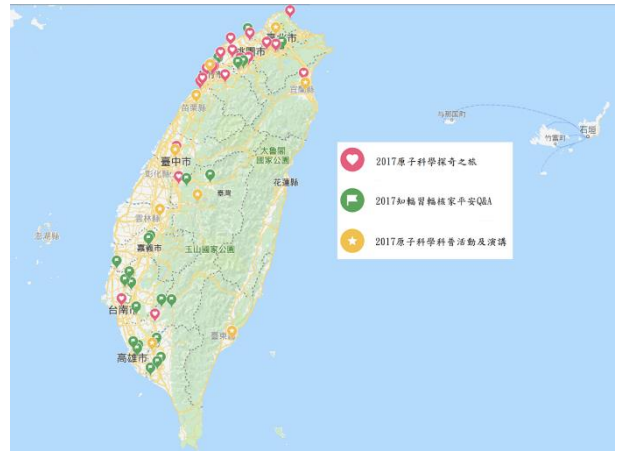


圖 5：輻射教育推廣足跡地圖(2017 年)

- (5) 在一般民眾的輻射教育推廣方面，本研究主要是配合其他主辦單位，利用既有之儀器及已開發完成之課程，因應不同主辦單位的需求，提供人力或器材的協助。其中配合原能會與科教館合作之 106 年縣市科學巡迴教育活動中，本計畫參與闖關設站活動(動手量輻射)，活動海報如圖 6 所示。本計畫總共支援 6 個場次，參加之一般民眾及學生達數千人。

106 年縣市科學巡迴教育活動

動手量輻射

闖三關送贈品!

活動說明
手持飛鏢射問題，完成三題的考驗，即送精美小禮物！

問題 1 輻射是什麼？
簡單的說：輻射是一種能量，依能量高低可分為：游離輻射和非游離輻射

問題 2 輻射在哪裡？
輻射無所不在，可分為天然輻射和人造輻射

問題 3 輻射如何防護？
ALARA 是輻射防護原則，時間、距離、屏蔽則為三要素

圖 4：106 年縣市科學巡迴教育活動

除此之外，本計畫所開發的儀器及所設計的教材也應其他主辦單位的邀請，提供人力或器材的支援，如：(a)台中科博館的教育訓練及科博嘉年華，本計畫除了應邀演講並進行儀器示範實驗之外，雙方並建立未來持續合作管道；(b)新竹市消防局的防災教育訓練，

本計畫則應邀演講並進行儀器示範實驗，同時說明清華水池式反應器(THOR)的緊急應變機制，建立雙方未來持續互相支援的管道；(c)台電北展館針對高中生舉辦之認識核能及核廢料活動，本計畫也應邀進行認識輻射演講和體驗輻射儀器簡易操作活動；(d)屏東空軍後勤指揮部所舉辦之輻射再教育訓練，本計畫也提供演講課程。每次活動所參與之人數約 50 人上下。

- (6) 本計畫針對所主辦的活動，經由設計問卷的方式，收集以上不同對象的回饋資料，了解學員對於輻射的認知，並安排適合不同對象的課程及實驗方式：本計畫所研發的輻射課程及教材，在課程完畢後，收回近 1100 份的回饋單據，此資料將可協助我們進行輻射課程的重點探討及歸納，做為日後課程及實驗內容修改之依據。

當然本計畫也特別注重性別平等教育，依據目前統計的結果，男女比例約略相當，只有針對中小學教職員工的活動中，女性的比例明顯高於男性。此外，本計畫也希望平衡城鄉差距，若有偏鄉學校或弱勢團體提出申請，在時間與人力允許的情況下，盡量優先錄取前往進行講演活動。

IV. 結論

本計畫依據目前已完成簡易型手持式游離輻射偵測器的開發，並持續進行功能及品質之改良，同時將儀器配合課程設計用於大專學生及高中生的課程及活動之中。除了將輻射度量實驗推廣至中國醫藥大學放射系之外，並將之擴大應用於高中學生的參訪課程之中，讓更多高中以上的學生有機會體驗輻射度量課程。

本計畫主辦的活動包括：(1)辦理 29 場次適合高中生之「2017 原子科學探奇之旅」活動，讓更多高中師生有機會藉此獲得原子科學基礎知識與應用；(2)辦理 32 場次適合中小學師生之「2017 知輻習輻，核家平安 Q&A」演講，藉由演講及示範實驗的方式，解答師生們常見之疑惑。此外，本計畫也應其他主辦單位的邀請，配合辦理了 10 場次適合學生團體及一般民眾之輻射與核能教育推廣活動及講座，讓更多民眾能藉此了解輻射基礎知識，

本計畫未來的規劃與期望，希望能將已完成之簡易型手持式游離輻射偵測器結合更多實驗器材，發展出一套又一套適合不同族群的攜帶式教學套組；將基本輻射度量實驗，推廣至更多大學，特別是警消、醫護學校，讓輻射度量相關知識落實於大學教育之中；持續辦理適合高中生之「原子科學探奇之旅」活動，且讓更多偏遠地區學校能有優先參與的機會；持續辦理適合中小學之「知輻習輻，核家平安」演講，並藉此與中小學教師取得合作的管道與機會，開發出適合不同年級的中小學「認識核能與輻射」基本教材；持續推動適合一般民眾、社會不同族群的輻射與核能教育推廣活動與講座，取得與更多社教單位及公家單位的合作，並嘗試將課程推廣至社區大學。

目前本計畫仍以點的方式往外擴散，盡一己之力努

力推廣輻射教育，但影響層面仍屬有限。雖然本計畫以清華大學原科中心為基礎已建立講師群，但仍希望未來能配合不同對象的教案設計，將教案留給當地的老師沿用，本計畫僅在每年寒暑假進行種子教師的培訓或教案更新，如此才能透過類似灑種子的方式，成為全面式的輻射推廣教育。

輻射教育推廣是一種持續性的計畫，除了向下扎根之外，如何透過活動與意見的回饋，逐步調整溝通內容與方式，才能讓正確的輻射知識傳遞下去。

