

目錄
----

【議程及場地】	
【核能與除役安全科技】	13
01-核能異質銲接組件於除役過渡階段之加凡尼加速腐蝕評估 2-熔合介面對耐加	1凡尼腐
蝕性之影響	15
02-核能電廠及恐保安演習之規劃、實施與評估之探討	
03-低浴虱對於壓水式反應益一次側迴路合金 000 的腐蝕行為評估	40
04-斷層錯動引致地衣鄉近構造物與官線之位移的離心模型及數值模型模擬(II).	
05-核二廠 然 几 座 生 奋 (SO) 然 父 撰 官 SUC 方 化 研 充 興 結 構 限 值 計 估 (1/2)	
00- 無入機對核能电廠之威貨與國際间官制及防範束略研充	
07-國內核电廠保役期间入火避難之初期研充	03
【放射性物料安全科技】	71
01-地下水環境中硫化物對放射性廢棄物處置銅罐腐蝕之研究	73
02-日本地下實驗室超深開挖與地工試驗成果研析	77
03-用過核子燃料最終處置近場溫度估算數值解之研究	81
04-放射性核種衰變鏈於裂隙岩層遷移解析解快速預測工具發展與深層地質處置	安全評
估應用	85
05-以離散元素法探討岩體裂隙對開挖引致處置母岩損傷範圍之影響	92
06-放射性廢棄物最終處置重要核種遷移試驗與數學驗證模式建立之研析	99
07-異向性岩體之裂隙水力-力學耦合特性研究	103
08-核燃料處置場之地下孔隙擴散 THM 模型建立與最佳化分析	111
09-填補區域多邊貯存設施到最終處置的空白-區域中期貯存多邊協力機制的多述	邊監管型
態與運作連結	117
【輻射防護與放射醫學科技 I】	
01-應用加馬能譜分析技術檢測台灣特種農產品之放射性核種分佈並評估國民輻	射劑量133
02-公眾曝露劑量約束之實務作業與管制研究	135
03-除役核電廠輻射劑量評估之廠址特定參數及其不確定性分析研究	140
04-建築材料輻射劑量調查及輻防管理研究	145
05-系統化與客製化的飛航輻射劑量研究 (2/2)	148
06-植物對放射性銫汙染的濃縮移除作用研究	152
07-物聯網 IoT 技術應用於輻射源安全管制之研究	159
08-公眾與職業曝露劑量約束之實務作業與管制研究	164
09-温泉水中放射性氡氟量测技術之建立及不同地質區溫泉水氡氣之量測	168
10-台灣與境外食用菇類與栽種介質的放射性核種分布之初探	174
11-台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質 238U、232Th 與 226Ra 之初探	

【輻射防護與放射醫學科技 II】1	89
01-探討以卵巢癌特異性抗體 CHI3L1 及其抗原辨識區作為卵巢癌診斷藥物之可行性1	191
02-18F-PSMA-1007 之製造與於攝護腺癌之臨床應用1	193
03-結合光-免疫-微脂體與氟-18 去氧葡萄糖車倫可夫輻射之卵巢癌光動力免疫治療研究.1	195
04-開發腫瘤微環境特異性放射性標記抗體及蛋白質1	197
05-攝護腺癌造影劑 18F-PSMA-1007 的研製1	199
06-開發可用於乳癌之硼中子捕獲治療含硼試劑2	200
07-研究免疫檢查點療法合併受體放射核種治療對前列腺腫瘤微環境之調控機制2	202
08-高能質子治療設施與放射性固態廢棄物之輻射安全分析研究	205
<b>09-</b> 輻射災害緊急應變期終止條件之評估研究2	210
10-質子治療機之輻射安全與品質保證作業研究2	214
【政策推動與風險溝通 I】2	17
01-應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發	219
02-X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比元件製作應用(II)	224
03-開發遠端 3D 建模掃描機器人並建立輻射劑量地圖以輔助核電廠除役2	230
04-大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(II)2	233
05-開發遠端視訊操作裝置用於移動機器人與機器手臂控制2	237
【政策推動與風險溝通 II】24	47
01-放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究2	249
02-以伽瑪輻射誘變進行大豆育種並改良發酵益生菌與食用麴菌(2)	251
03-以碳酸鹽動力學評估硼同位素在海洋酸化之角色2	254
04-文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃描系統之優化及其應用(II)2	256
【政策推動與風險溝通 III】2	65
01-北部核電廠周遭社區自主輻安防災治理之研究2	267
02-核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行(III)	271
03-結合多媒體敘事效果分析提昇公民參與核能公共議題整合計畫(2/2)2	277
04-核能與輻射知識之虛擬實境體驗程式開發2	282
05-培育學生之核能素養-網路專題式學習之取向2	284
06-原子能民生應用數位內容製作與網路傳播溝通研究2	287
07-以使用者經驗整合原能會網站內容架構與民眾資訊需求之研究2	290
08-核能研究機關改制行政法人之法制研究:組織定位及監理制度之研析2	293
09-針對不同族群設計開發原子能科普教育學習課程(III)2	299

### 議程

時間:110年9月22日(星期三)

地點: <u>集思台大會議中心</u> (台北市羅斯福路4段85號B1,台灣大 學第二學生活動中心B1,捷運公館站2號出口左轉直行)

發表會議程(議程仍以當日現場公告為主)

時間	議程	地點
09:40~10:20	報到	B1
10:20~12:00	分組成果發表(I)	各領域場地
12:00~13:00	綜合討論(供應午餐)	
13:00~14:00	分組成果發表(II)	各領域場地
14:00~14:20	中場休息(供應點心)	
14:20~15:10	分組成果發表(II)	各領域場地
15:10~16:00	優良計畫頒獎(各場次主持人)	各領域場地

各領域場地

領域	場地 地點	時間
1.核能與除役安全科技	亞歷山大廳	10:20~14:50
2.放射性物料安全科技	阿基米德廳	10:20~15:10
3.輻射防護與放射醫學科技(I)	拉斐爾廳	10:20~15:50
4.輻射防護與放射醫學科技(II)	米開朗基羅廳	10:20~15:30
5.政策推動與風險溝通(I)(上午)	達文西廳	10:20~13:00
6.政策推動與風險溝通(II)(下午)	達文西廳	13:00~15:10
7.政策推動與風險溝通(III)	尼采廳	10:20~15:10

場地	場 地 1:核能與除役安全科技																	
會場地點:亞歷山大廳																		
場次	時間	評審	計畫	執行機關	計畫名稱													
		委員	主持人															
				國立臺灣科技大學機械	核能異質銲接組件於除役過渡階段之加													
	10:20~10:40		王朝正	工程系	凡尼加速腐蝕評估 2-熔合介面對耐加凡													
分					尼腐蝕性之影響													
組	10:40~11:00		汪毓瑋	中央警察大學國境警察	核能電廠反恐保安演習之規劃、實施與													
發	10.10 11.00			學系	評估之探討													
表	11.00~11.20		華宇洸	國立清華大學工程與系	低溶氫對於壓水式反應器一次側迴路合													
Ι	11.00~11.20	吉	赤 示 ル	統科學系	金 600 的腐蝕行為評估													
	11.20.11.40	斌	计计句	國立中央大學土木工程	斷層錯動引致地表鄰近構造物與管線之													
	11.20~11.40	· 、	灰人且	學系	位移的離心模型及數值模型模擬(Ⅱ)													
	11:40~13:00	陳建源	陳建源	陳建源	陳建源	陳建源	陳建源	陳建源	陳建源	床建源	<b>床建</b> 源	<b>床建</b> 源	床建源	陳建源	陳建源		綜合討論	(午餐供應便當)
	12.00 12.20	· ·	モーロ	國立清華大學工程與系	核三廠蒸汽產生器(SG)熱交換管 SCC 劣													
	15:00~15:20	廖俐	<b>尚</b> 五明	統科學系	化研究與結構限值評估(1/2)													
分	12.20 12.40	毅	守十步	龙華科技大學化工與材	無人機對核能電廠之威脅與國際間管制													
組	15.20~15.40		个八角	料工程系	及防範策略研究													
發	12.40 14.00		抗士勝	國立清華大學原子科學	國內核電廠除役期間火災避難之初期研													
表	13.40~14.00		可入防	技術發展中心	究													
II	14:00~14:20			中場休	息 (供應點心)													
	14:20~14:50			綜合討論	<b>命及計畫頒獎</b>													

場地	場 地 2:放射性物料安全科技									
會場地	也點:阿基米德	廰								
担力	咗明	評審	計畫	劫行幽国	计量力级					
场入	时间	委員	主持人	キバイ 」 7支( )外)	目 重 <i>石</i> 件					
	10.20 - 10.40		林文勝	國立臺灣大學水工試驗所	地下水環境中硫化物對放射性廢棄物					
	10.20*10.40		11-213	因工至伤八千尔二时城川	處置銅罐腐蝕之研究					
	10.40~11.00		楊長義	淡江大學土木工程學系	日本地下實驗室超深開挖與地工試驗					
分	10.40 11.00		10 1.44		成果研析					
組	11.00~11.20		陳浩維	國立中央大學地球科學學	用過核子燃料最終處置近場溫度估算					
發	11.00 11.20		INCID OF	系	數值解之研究					
表			陳瑞昇 陳文 泉 *	國立中央大學應用地質研	放射性核種衰變鏈於裂隙岩層遷移解					
Ι	11:20~11:40			四亚十六八字 恋 用 地 貞 动 空 所	析解快速預測工具發展與深層地質處					
	11:40~12:00	陳			置安全評估應用					
		·文泉*、謝*		國防大學環境資訊及工程	以離散元素法探討岩體裂隙對開挖引					
				學系	致處置母岩損傷範圍之影響					
	12:00~13:00		、謝	、謝	、謝	、謝	、謝	、謝		綜合討論(4
	12.00. 12.20	赤春	田能公	國立清華大學原子科學技	放射性廢棄物最終處置重要核種遷移					
	15.00~15.20	、魏	山肥土	術發展中心	試驗與數學驗證模式建立之研析					
	13.20.13.40	聰	给子克	國立交通大學土木工程學	異向性岩體之裂隙水力-力學耦合特性					
~	15.20~15.40	揚	羽皿茄	系 (所)	研究					
万	13.40~14.00		林大倍	國立臺南大學機電系統工	核燃料處置場之地下孔隙擴散 THM					
組	13.40~14.00		14	程研究所	模型建立與最佳化分析					
み 表	14:00~14:20			中場休息	(供應點心)					
II				南臺學校財團法人南臺科	填補區域多邊貯存設施到最終處置的					
	14:20~14:40		曾雅真	技大學國際企業系暨研究	空白-區域中期貯存多邊協力機制的多					
				所	邊監管型態與運作連結					
	14:40~15:10			綜合討論	及計畫頒獎					

場地	場 地 3:輻射防護與放射醫學科技(I)							
會場	也點:拉斐爾廳							
堪力	時間	評審	計畫	劫行機關	計畫久稱			
勿入		委員	主持人	-7-7.1 J 73% 1981	可更力府			
				國立陽明大學七物堅	應用加馬能譜分析技術檢測台灣特種			
	10:20~10:40		吳 杰	學影像既放射科學系	農產品之放射性核種分佈並評估國民			
				于形体重从羽杆于水	輻射劑量			
分	10.40.11.00		茲車子	國立清華大學核子工	公眾曝露劑量約束之實務作業與管制			
組	10.40~11.00		<b>尔心</b> 1	程與科學研究所	研究			
發	11.00.11.20		挡涅胀	國立清華大學原子科	除役核電廠輻射劑量評估之廠址特定			
表	11.00~11.20		赵竹肠	學技術發展中心	參數及其不確定性分析研究			
Ι	11.20.11.40		拉艾议	國立清華大學原子科	建築材料輻射劑量調查及輻防管理研			
	11.20~11.40	)	<b>矸</b> 万 俗	學技術發展中心	究			
	11.40.12.00		抗怒的	國立清華大學核子工	系統化與客製化的飛航輻射劑量研究			
	11.40~12.00	蔡	计尔约	程與科學研究所	(2/2)			
	親 12:00~13:00 業		綜合討論(-	午餐供應便當)				
	13:00~13:20	、邱志宏、	<ul><li>・ <sup>蘇世</sup>欽</li></ul>	國立清華大學原子科	植物對放射性銫汙染的濃縮移除作用			
				學技術發展中心	研究			
	12.20 12.40		的美的	逢甲大學材料科學與	物聯網 IoT 技術應用於輻射源安全管			
	15:20~15:40	施	間俄欣	工程學系	制之研究			
	12.40 14.00	建樑	告明真	中國醫藥大學職業安	公眾與職業曝露劑量約束之實務作業			
分	15:40~14:00		衣呐家	全與衛生系	與管制研究			
組	14:00~14:20			中場休息	(供應點心)			
贺王	14.20 14.40		山井谷	南華大學自然生物科	温泉水中放射性氡氣量測技術之建立			
衣 II	14:20~14:40		林杆省	技學系	及不同地質區溫泉水氣氣之量測			
11	14.40 15.00		陆应取	國立屏東科技大學環	台灣與境外食用菇類與栽種介質的放			
	14:40~15:00		床庭室	境工程與科學系	射性核種分布之初探			
	15.00 15.00		<b>莊</b> 政	國立屏東科技大學科	台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射			
	15:00~15:20		亲一 <u>隆</u>	技管理研究所	性物質 238U、232Th 與 226Ra 之初探			
	15:20~15:50			綜合討論	及計畫頒獎			

場地	場 地 4:輻射防護與放射醫學科技(II)																					
會場地點:米開朗基羅廳					)																	
場次	時間	評審 委員	計 <b>畫</b> 主持人	執行機關	計畫名稱																	
	10:20~10:40													江盈澄	國立臺灣大學醫學院 婦產科	探討以卵巢癌特異性抗體 CHI3L1 及其抗 原辨識區作為卵巢癌診斷藥物之可行性						
	10:40~11:00		顏若芳	國立臺灣大學醫學院 放射線科	18F-PSMA-1007 之製造與於攝護腺癌之 臨床應用																	
分組發生	11:00~11:20		劉仁賢	國立陽明大學生物醫 學影像暨放射科學系	結合光-免疫-微脂體與氟-18 去氧葡萄糖 車倫可夫輻射之卵巢癌光動力免疫治療研 究																	
衣 I	11:20~11:40		藍耿立	國立陽明大學傳統醫 藥研究所	開發腫瘤微環境特異性放射性標記抗體及 蛋白質																	
	11:40~12:00	魏孝萍*、黄文彦、忻凌偉	魏孝范	張智偉	臺北榮民總醫院國家 多目標醫用迴旋加速 器中心	攝護腺癌造影劑 18F-PSMA-1007 的研製																
	12:00~13:00			綜合討論	龠(午餐供應便當)																	
	13:00~13:20		更文彦、忻凌偉	更文彦、忻凌偉	潘伯申	淡江大學化學系	開發可用於乳癌之硼中子捕獲治療含硼試 劑															
	13:20~13:40				忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	忻凌偉	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
分 組 7	13:40~14:00			陳顯鑫	長庚醫療財團法人放 射腫瘤科	高能質子治療設施與放射性固態廢棄物之 輻射安全分析研究																
殺表	14:00~14:20			中場休	(供應點心)																	
II	14:20~14:40		董傳中	長庚大學放射醫學研 究院	輻射災害緊急應變期終止條件之評估研究																	
	14:40~15:00		李財福	國立高雄科技大學電 資學院電子工程系	質子治療機之輻射安全與品質保證作業研 究																	
	15:00~15:30			綜合討	論 及 計 畫 頒 獎																	

場地	場 地 5(上午):政策推動與風險溝通(I)									
會場地	也點:達文西廳	•								
担力	咕朗	評審	計畫	劫行撤国	计重力经					
场入	마 <u>라</u> (81)	委員	主持人	书礼 1 1 753 1991	引 重 石 枏					
	10.20 10.40		庙仁井	國立臺灣大學電子工程學	應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位					
	10.20~10.40		休旧倒	研究所	混合晶片電子設計自動化開發					
	10.40 11.00	陳	蔡坤諭	國立臺灣大學電機工程學	X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精					
分	10:40~11:00	心平		系暨研究所	度高深寬比元件製作應用(II)					
組	11.00 11.20	*		國立臺灣大學機械工程學	開發遠端 3D 建模掃描機器人並建立					
發	11:00~11:20	葉	葉	葉	葉	葉	葉	陳湘鳳	系暨研究所	輻射劑量地圖以輔助核電廠除役
表	11.20 11.40	又冠	江侍安	國立臺灣科技大學化學工	大氣常壓微電漿技術合成矽量子點					
	11:20~11:40	、庙	江译玄	程系	(II)					
	11.40 12.00	不孝	上国兴	國立高雄科技大學電資學	開發遠端視訊操作裝置用於移動機器					
	11:40~12:00 輝	杠圆件	院電機工程系	人與機器手臂控制						
	12:00~13:00		綜合討論(午餐供應便當)							

場地	場 地 6(下午):政策推動與風險溝通(II)							
會場地點:達文西廳								
揭次	時間	評審	計畫	劫行機關	計書名稱			
· , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	~1 (~)	委員	主持人	אין איז דייא	ч <b>с</b> л <del>п</del>			
	12:00~13:00			午餐(1	共應便當)			
	12.00 12.20		進工	國立中興大學園藝學系	放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研			
	15.00~15.20	陳	ҡ 止	(所)	究			
	12.20 12.40	心平	工纫迫	國立嘉義大學微生物免疫	以伽瑪輻射誘變進行大豆育種並改良			
	15.20~15.40	*	工品内	與生物藥學系	發酵益生菌與食用麴菌(2)			
分	12.40.14.00	張剛	苦药人	黄蔚人 國立中山大學海洋科學系	以碳酸鹽動力學評估硼同位素在海洋			
組	13.40~14.00	<b>府</b> 瑋	東京八		酸化之角色			
贺表	14:00~14:20	、蘇士		中場休息	(供應點心)			
	14.20 14.40	心杰	陆南和	國立故宮博物院登錄保存	文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃			
	14:20~14:40		宋 宋 和	處	描系統之優化及其應用(II)			
	14:40~15:10			綜合討論	及計畫頒獎			

場地	易地7:政策推動與風險溝通(III)						
會場地	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		
	10:20~10:40				楊永年	國立成功大學政治學系	北部核電廠周遭社區自主輻安防災治 理之研究
分	10:40~11:00		黃東益	國立政治大學公共行政學 系	核電廠除役利害關係群體意見探詢與 溝通機制之設計及執行-III		
祖發	11:00~11:20	0	林承宇	世新大學廣播電視電影學 系	結合多媒體敘事效果分析提昇公民參 與核能公共議題整合計畫(2/2)		
к I	表 I 11:20~11:40	陳彥均	龙華科技大學多媒體與遊 截發展科學系	核能與輻射知識之虛擬實境體驗程式 開發			
	11:40~12:00	土重德*、尹	蘇萬生	國立臺灣科學教育館推廣 組	培育學生之核能素養-網路專題式學習 之取向		
	12:00~13:00			综合討論(-	午餐供應便當)		
	13:00~13:20	字禮、益	單文婷	國立臺灣藝術大學廣播電 視學系 (所)	原子能民生應用數位內容製作與網路 傳播溝通研究		
分	13:20~13:40	阮大衛	張伯謙	世新大學傳播管理學系 (所)	以使用者經驗整合原能會網站內容架 構與民眾資訊需求之研究		
組 發	13:40~14:00		翁曉玲	國立清華大學通識教育中 心	核能研究機關改制行政法人之法制研 究:組織定位及監理制度之研析		
表	14:00~14:20			中場休息	(供應點心)		
	14:20~14:40		劉鴻鳴	國立清華大學原子科學技 術發展中心	針對不同族群設計開發原子能科普教 育學習課程(III)		
	14:40~15:10			綜合討論	及計畫頒獎		



交通資訊



地址: 台北市106大安區羅斯福路四段85號B1(台灣大學第二活動中心內)

- 電話: 02-2363-5868
- E-mail : meeting@gisgroup.com



捷運新店線 公館站2號出口: 2號出口左轉 (步行2分鐘)

#### 捷運公館站一 (羅斯福路): 254



捷運公館站(公車專用道-往西區方向): 0南、1、109、208、208(高架線)、208(區間車)、208(基河二期國宅線)、236、251、252、253、278、284、284(直行)、290、52、642、643、644、648、660、671、672、673、676、74、907、景美女中-榮總快速公車、棕12、線11、線13、藍28
捷運公館站(公車專用道-往新店方向): 207、278、280、280(直達車)、284、311、505、530、606、606區間車、668、675、676、松江幹線、松江-新生幹線、敦化幹線、藍28
公館(羅斯福路基隆路口): 671
公館(基隆路): 1、207、254、275、275(副)、650、672、673、907、南港軟體園區通勤專車(雙和線)
仁愛路二段: 214、248、606
信義杭州路口(往101): 0東、20、22、204、670、671、信義幹線、信義新幹線、1503



#### 公館水源市場對面羅斯福路上·近羅斯福路與基隆路交叉口

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

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



比例尺為1:400

# 核能與除役安全科技

### 核能異質銲接組件於除役過渡階段之加凡尼加速腐蝕評估 2-熔合介面對耐加凡尼 腐蝕性之影響

### The investigations of galvanic corrosion accelerating on dissimilar weldment nuclear components in the transition phase decommissioning. Part II: Effect of fusion line on resistance of galvanic corrosion

計畫編號:109-2623-E-011-001-NU 計畫主持人:王朝正 e-mail:cjwang@mail.ntust.edu.tw 計畫參與人員:王朝正、梁焕昌、Prihatno Kusdiyarto、李异翃 執行單位:國立台灣科技大學

#### 摘要

本研究使用實施覆銲(IN-52M)之異質銲接件(A508/IN-182/316L-308L 緩衝層)浸泡於靜滯鹽水環境並添加腐蝕抑 制劑。透過電化學儀器分析合金在環境之腐蝕特性,以及配 合浸泡試驗之表面觀察、腐蝕產物之成分分析與材料損失 量,探討腐蝕機制及腐蝕損失與電化學相關性。

實驗結果顯示,在鹽水環境中,316L、308L、IN-182、 IN-52M的絡含量足以在金屬表面形成穩定的鈍化膜,有相 近的腐蝕電位及較低的腐蝕電流。A508 在本異質銲接件系 統中有最大的腐蝕電流密度及最低的腐蝕電位,與其它合 金相差達 500 mV 至 600 mV,因此 A508 為陽極金屬。再 者,A508 熱影響區之微觀組織為每道熱影響組織依序彼此 相連排列,其中耐蝕性較差之組織易成為局部陽極區,加上 異質界面的成分急劇變化產生加凡尼腐蝕,使熱影響區產 生規律之腐蝕形貌以及在兩銲珠之交界處有最大的腐蝕深 度。在距離異質界面較遠的 A508 母材受加凡尼腐蝕影響不 明顯,為均勻腐蝕。隨時間增長,A508 表面的腐蝕產物沉 積量增加,阻礙腐蝕環境與材料表面接觸,使其腐蝕速率逐 漸減緩。

關鍵詞:異質金屬銲接,熱影響區,加凡尼腐蝕。

#### Abstract

In this study, dissimilar weldments(A508/IN-182/316L-308L buttering) that were carried out overlay welding(IN-52M) were immersed in with or without inhibitors additional of salt water environment. The corrosion characteristics of the alloy were analyzed by electrochemical instruments. The immersion test was adopted to investigate the corroded appearance, the composition of the corrosion products and the corrosion depth. Meanwhile, the corrosion mechanism and the correlation between corrosion loss and electrochemistry were discussed.

In the experimental results, the chromium and nickel content of 316L, 308L, IN-182, and IN-52M were sufficient to form a stable passivation film on the metal surface. As a result, it had similar corrosion potential and lower corrosion current in the salt water environment. A508 had the lowest corrosion potential in this dissimilar weldment system, the potential different was 500 mV to 600 mV lower than other alloys. Furthermore, A508 has a larger corrosion current density. Therefore. A508 was an anode metal. The appearance of the A508 heat-affected zone was composed of heat-affected

microstructures connected and arranged in sequence. Among them, the portions with poor corrosion resistance was easy to become a local anode zone. And the instantaneous change in composition of the dissimilar interface produced galvanic corrosion. It caused heat-affected zone had a regular corrosion morphology and the maximum corrosion depth at the junction of the 2 weld beads. However, the A508 base metal that was far away from A508/IN-182 interface was not significantly affected by galvanic corrosion. As the development of corrosion behavior, corrosion products were kept producing, and deposited on the surface of A508, which hindered the contact between the environment and the surface of the material. As a result, its corrosion rate was gradually slowed down.

**Keywords:** dissimilar metal weldment, heat affected zone, galvanic corrosion, corrosion products

#### I. 前言

現今核電廠壓力反應堆廣泛應用異質金屬銲接 (DMW)組件作為兩不同環境之管線連接。異質金屬銲接 主要是由不同成分及性質的合金銲接在一起。銲接過程 中,管材受熱影響的組織改變、成分再分布,以及銲接 金屬固化後產生的殘留應力,導致銲道對張應力和腐蝕 敏感性提升,長時間的使用,容易在銲道形成初始裂紋。 輕微者發生管線洩漏,重則發生嚴重的工安事故。於核 電廠,已有一些異常洩漏事件,與銲道處裂縫的產生有 關的文獻報告<sup>[1]</sup>。近幾年,為了減緩缺陷成長,技術上會 在管內壁或是外壁進行覆銲修補,降低管材的殘留應力 [2,3]。

依核電廠經除役規定<sup>[1]</sup>,核電廠機組被核發之運轉 執照有效期限為40年。使用年限到期後即開始進行 25年的除役程序。其中前8年為停機過渡階段,仍持 續低頻率負載,此時管內長時間將於浸滯溶液的狀態。 此狀況及可能面臨許多腐蝕問題,像是異質金屬間的加 凡尼腐蝕,或是沉積物累積及不均等情形。

為了解異質銲接件的腐蝕型式及抑制劑添加的影響,本研究以覆銲之異質銲接件浸泡於鹽水環境。利用 材料的成分分布、腐蝕深度、腐蝕產物相鑑定、電化學 分析,探討腐蝕機制以及電化學與腐蝕深度的相關性。

#### Ⅱ. 主要內容

本研究之實驗流程圖,如圖 1 所示。異質銲接件使 用 A508 Gr.1 與 316L 板材,底部利用 IN-82 (ERNiCr-3) 對接,兩板材中間以 V 型開槽銲進行填料,利用屏 蔽金屬電弧銲(SMAW),以 Temper bead 法,填入 IN-182(ERNiCrFe-3) 緩衝層及填料層之異質銲接件。在異 質銲接件上方利用鎢極氣體保護電弧銲(GTAW),以一 樣 Temper bead 法,採用 IN-52M(ERNiCrFe-7) 作覆銲 層處理,並在 316L 底材與 IN-52M 覆銲層之間預先 施作 308L 緩衝層,材料成分如表 1 所示。試片製備 以線切割垂直填料銲方向裁切。試片尺寸為長 50mm、 寬 30mm、厚 5mm,如圖 2所示。為觀測管線長期的 腐蝕行為,提升氯離子及溫度加速腐蝕,浸泡試驗環境 水溶液為 3.5% NaCl(aq) 70℃。利用場發射掃描式電子 顯微鏡(JOEL JSM-7900F),搭配能量散佈光譜,分析異 質界面處的成分分布。並透過恆定電位儀(GAMRY 1010T)之動電位極化模式進行各合金及合金組合之耐 蝕性分析,測試環境為 3.5% NaCl(aq)常溫。浸泡後之試 片利用表面輪廓儀(Kosaka - ET200), 如圖 3(a) 所示。另 在,狹縫產生之區域,形貌深且窄,無法使用表面輪廓儀 進行量測,因此利用狹縫的截面形貌量測腐蝕深度。量 測區域及方法之示意圖如圖 3(b) 所示。量測區域之 Y 軸由 A508/IN-52M 界面向下 2.3~5mm 之範圍,X 軸 須包含狹縫以及 A508/IN-182 界面,約 2.6 mm。量測手 法首先從靠近狹縫的位置進行裁切、鑲埋,以逐步研磨 方式觀察狹縫各截面的形貌,並利用光學顯微鏡搭配的 軟體進行截面形貌的影像擷取(共取 5 張截面影像),用 軟體的點位座標功能標示及記錄各截面形貌軌跡的座 標,再進一步將 5 張截面紀錄的座標數據繪製成等高線 圖。利用 X 射線繞射分析儀 (Bruker D2 PHASER),分析 試片浸泡後之表面腐蝕產物成分。最後比較電化學對浸泡 腐蝕深度的相關性。

#### III. 結果與討論

#### i. 異質銲接件浸泡試片外觀

圖 4 為 A508/IN-182/316L-308L 緩衝層 覆銲 IN-52M 樣品浸泡滿 1、2、3 個月之外觀。滿 1 個月試片表面由 於腐蝕產物為鬆散且無附著性,取出過程腐蝕產物從表 面脫落,A508 表面為較淡灰色的殘留腐蝕產物。滿 2 個月水洗前,部分區域附著紅色腐蝕產物,經 XRD 成 分分析結果顯示,此腐蝕產物主要為 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,次產物為 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe(OH)<sub>3</sub>,如圖 5(a)所示。其中 A508 表面為主要 沉積區域,但部分腐蝕產物仍易鬆散脫落,水洗後,A508 表面存留附著黑色腐蝕產物,經 XRD 成分分析結果顯 示,此腐蝕產物主要為 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,次產物為 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe(OH)<sub>3</sub>, 相對紅色腐蝕產物,有較強的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 峰值,如圖 5(b)所 示。滿 3 個月的 A508 表面外層完全沉積具附著性之紅 色腐蝕產物,水洗後,A508 表面為黑色腐蝕產物。

浸泡满1、2、3個月之試片經過酸洗後,如圖6所 示。316L、IN-52M、IN-182及308L表面皆仍為金屬色 澤,未觀察到孔蝕現象。A508於每個月皆可觀察到靠近 異質合金界面之A508側,具有高低落差大且有規律之 腐蝕現象。其規律與IN-182銲珠相對應,樣貌為同方向 之弧形,另外,A508/IN-182界面處觀察到狹縫。

#### ii. A508 熱影響組織觀察

熱影響區的組織分布依熱源之流向從銲接金屬向 A508 母材,分別為粗晶熱影響組織、細晶熱影響組織、 臨界熱影響組織,如圖7(a~d)。另外,第n道次熱影響 區的上半部組織,受到n+1次(位於上方之銲接)銲接 溫度進而相變化,形成第n道熱影響組區與第n+1道 熱影響區之界面連接,如圖7(e)。A508熱影響區經多道 銲的形貌呈現規律且同方向之弧形樣貌,與浸泡後產生 之規律腐蝕樣貌相同。進一步從截面觀察 A508 熱影響 區的腐蝕形貌,取樣位置為靠近2個相鄰銲珠之交接處, 平行於試片 X 軸方向進行截面觀察,如圖 8(a)所示。 A508 於 A508/IN-182 界面處有最嚴重的腐蝕深度,並且 腐蝕深度隨距離增加而減緩,此現象與加凡尼腐蝕趨勢 相符<sup>[4]</sup>,在一定距離後轉為均勻腐蝕型式,如圖 8(b)所 示。再者,從截面觀察到熱影響區的臨界熱影響組織與 A508 母材交界處有腐蝕高低差,如圖 8(c) 所示。

#### iii. 浸泡後腐蝕深度

在 A508/IN-182/316L 且避開狹縫的深度量測結 果,圖 9 為各月試片上、中、下量測線之腐蝕深度數據。 IN-182 及 316L 皆無深度損失變化。IN-182 至 A508 開始有深度損失,其中在 A508/IN-182 界面及熱影響 區與原材界面,有較深的腐蝕深度。隨著距離的遠離, 溶液電阻增加,阻斷加凡尼腐蝕發生<sup>[4]</sup>,最後轉為一般 均勻腐蝕,腐蝕深度趨於平緩。A508 於滿 1 個月至滿 3 個月的均勻腐蝕深度分別約為 69.33  $\mu$ m、91.92  $\mu$ m、98.33  $\mu$ m,每個單月的腐蝕損失分別為 69.33  $\mu$ m、 22.59  $\mu$ m、6.41  $\mu$ m,腐蝕深度及每月腐蝕損失趨勢如 圖 10 所示。顯示在長期浸泡試驗中,A508 母材均勻腐 蝕的腐蝕速率隨時間增加而減緩。

由圖 6 表面觀察以及圖 8 截面形貌觀察道狹縫的產 生,為了解狹縫的腐蝕趨勢與最大腐蝕深度,利用以腐 蝕深度繪製的等高線圖進行觀察,每個月的取樣位置及 等高線圖如圖 11 及圖 12 所示。A508 的狹縫最大腐蝕 深度均發生於兩個相鄰銲珠之交界處,滿 1 個月至滿 3 個月分別約為 149 µm、220 µm、208 µm,由於 取樣位置未必為最大深度,因此僅供參考。另外,狹縫 的腐蝕趨勢由腐蝕較深的異質界面垂直向母材方向減 緩。在加凡尼腐蝕距離效應下,異質界面處有較嚴重的 腐蝕,加上 A508 在兩個銲珠之交界處所相鄰的陰極表 面積較大,因而有最大腐蝕深度,並且腐蝕深度都由加 凡尼腐蝕較嚴重的異質界面垂直向母材方向減緩。

#### iv. 異質銲接件成分分析

圖 13 為各異質界面鉻、鐵、鎳的成分線掃描。 A508/IN-52M、A508/IN-182、308L/IN-52M 及 IN-182/316L 組合中,A508、308L、316L 於銲接過程作 為底材時,在與 IN-52M、IN-182 銲接金屬接觸的局 部區域發生熔融,此區域稱為熔融區。底材熔出的鐵 與銲接金屬的鎳基成分進行交互擴散,相比於銲料金 屬成分,熔融區成分變化為絡 -3.3~+4 wt.%,Fe 上升及 Ni 下降 8~22 wt.% 之變化。由於母材及 熱影響區仍為固態,鉻、鐵、鎳等主要成分難以進行 熔融擴散,因此 A508、308L、316L 內部成分幾乎不 受稀釋影響,並且在異質界面處的成分為瞬間變化。 IN-182/IN-52M 與 308L/IN-52M 之組合,由於成分 組成相近,各成分變化幅度小。

#### v. 電化學分析

在電化學理論中,腐蝕電位較低之金屬為陽極金 屬,圖 14 及表 2 分別為異質銲接件各金屬動電位 極化曲線和腐蝕電位與腐蝕電流密度。IN-52M 為最 正的腐蝕電位,其次為 316L 及 IN-182,最負的為 A508。其中, IN-52M、316L、IN-182 皆為高鉻含量 之金屬,在大氣環境中合金表面就已自然形成具有保 護性鈍化膜<sup>[5]</sup>,極化曲線顯示出 IN-52M、316L、IN-182 等鈍化合金於鹽水環境中有較低的腐蝕電流密 度,各約為 12~86 nA/cm<sup>2</sup>,並且三者之腐蝕電位相 近,約在 -300 mVsce~-380 mVsce。當兩種合金電位 差少於 200 mV 以下,陽極合金不會受到加凡尼腐 蝕影響<sup>[6]。</sup>而 316L(鈍化)與鎳基合金(鈍化)電位差皆 少於 100 mV,因此彼此組合不易受到加凡尼腐蝕影 響。A508 腐蝕電位約為 -916 mVsce,與上述合金之 腐蝕電位相差約 500 mV<sub>SCE</sub>~600 mV<sub>SCE</sub>,在浸泡試 i 樣中為陽極金屬。

圖 15 為接觸之兩合金於同一溶液的動電位極 化,測試表面積 0.2 cm<sup>2</sup>,腐蝕電位與腐蝕電流密度 如表 3 所示。由於 IN-52M、316L、IN-182 三種合 ii. 金的電化學特性相似,陽極曲線及陰極曲線皆相近, 因此組合後的腐蝕電位與腐蝕電流密度和單一合金 相比差距不大。在與 A508 的組合當中,A508/ IN-52M、A508/IN-182 腐蝕電位約在 -821 mV<sub>SCE</sub>~-866 iii. mV<sub>SCE</sub>,腐蝕電流密度約為 1762~1871 nA/cm<sup>2</sup>,相 對於 A508 有較正(約正 50~100 mV)的腐蝕電位 及較大(約提升 700~900 nA/cm<sup>2</sup>)的腐蝕電流密度。 即在 A508/IN-52M、A508/IN-182 組合中,A508 作 為陽極合金受異質合金產生加凡尼腐蝕。

#### vi. 異質銲接件之腐蝕機制

本合金系統的不銹鋼及鎳基合金含有 14 wt.%~30 wt. % 的鉻含量,足以在表面形成鈍化的氧化鉻保護薄 膜<sup>[7]</sup>,防止鹽水環境侵蝕基材。此外,上述合金有相近的 腐蝕電位,因此任兩合金界面未受到加凡尼腐蝕影響。 A508 在鹽水環境腐蝕電位最負,耐蝕性較差,並與其 他合金相差大,因此是為陽極。A508 在異質界面處發 生腐蝕規律以及狹縫原因如下:(1) 銲接之熱能造成 A508 組織改變,形成熱影響區。由圖 6 及圖 7 的形貌 觀察得知,多道次銲接工法,呈現規律的熱影響區排列。 熱影響區的不同熱影響組織,其耐蝕性的差異,造成不 均匀的腐蝕。(2)由於異質界面處有較嚴重的加凡尼腐 蝕,陽極合金週圍相鄰接觸的陰極面越大,腐蝕越嚴重。 由圖 11 及圖 12 所示,靠近 A508/IN-182 界面的 A508 在兩個銲珠之交界處因接觸較大的陰極表面積,有最大 腐蝕深度。再者,從圖 12 腐蝕深度等高線圖觀察到, 從腐蝕深度較大的異質界面垂直向母材方向隨距離增 加而減緩之腐蝕趨勢。綜合上述現象造成規律腐蝕形貌 以及狹縫的產生。

具附著性之腐蝕產物在 A508 表面的沉積量,隨著 時間的增加而增加,如圖 4 所示。腐蝕產物由不穩定腐 蝕產物轉成穩定之 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。隨時間的增加,累 積的腐蝕產物減緩了氧擴散至 A508 表面的速率,使 A508 的腐蝕速率因此得到減緩。由量測的腐蝕深度乘 以時間計算得知腐蝕速率,如圖 16 所示。均匀腐蝕分 別在第 1、2、3 個月期間的最後單月腐蝕速率分別為 0.84 mm/y、0.27 mm/y、0.08 mm/y,其單月腐蝕速率皆 比前一個月減少為 1/3。狹縫之成長速率分別在第 1、2 個月期間也隨時間增加而減少,分別為 1.79 mm/y、1.1 mm/y,並在第 3 個月期間有明顯受到抑制的現象。

#### vii.電化學與浸泡試驗的相關性

圖 17 為 A508 及 A508/IN-182 腐蝕深度與腐蝕 電流密度的趨勢圖。狹縫位置發生於 A508/IN-182 的電 化學測試區,因此狹縫的腐蝕電流密度與 A508/IN-182 區域相關。A508/IN-182 在滿 1、2、3 個月的腐蝕深度 皆大於 A508 母材的腐蝕深度,其趨勢與對應 A508 及 A508/IN-182 的腐蝕電流密度趨勢呈正相關。

#### IV. 結論

- A508/IN-182/IN-52M/308L/316L 異質銲接組合於 鹽水中,鎳基及不銹鋼為鈍化合金,有較好的耐蝕 性,且合金間有相近的腐蝕電位。A508 於異質銲接 組合中,有較差的耐蝕性及最低的腐蝕電位。
- 2. A508 受熱影響引起組織變化以及異質合金之成 分變化影響,使 A508 熱影響區受加凡尼腐蝕形成 規律之腐蝕形貌以及產生較深的狹縫。狹縫深度為 均勻腐蝕的約 2 倍。
- 長期浸泡於鹽水環境下,A508 表面的緻密腐蝕 產物逐漸變厚,環境的溶解氧向 A508 表面擴散的 速率減緩,腐蝕速率隨之減緩。

#### 参考文獻

- 台灣電力公司,核一廠除役計畫,參考來 源:https://www.aec.gov.tw/,2021年6月。
- [2] W. Jiang, Y. Luo, B. Y. Wang, S. T. Tu, and J. M. Gong, "Residual stress reduction in the penetration nozzle weld joint by overlay welding." Materials and Design 60, p. 443-450, 2014.
- [3] K. S. Kim, H. J. Lee, B. S. Lee, I. C. Jung, and K. S. Park, "Residual stress analysis of an Overlay weld and a repair weld on the dissimilar Butt weld." Nuclear Engineering and Design, 239(12), p. 2771 2777, 2009.
- [4] S. Won, B. Seo, J. M. Park, H. K. Kim, K. H. Song, S. H. Min, and K. Park, "Corrosion behaviors of friction welded dissimilar aluminum alloys." Materials Characterization, 144, p. 652-660, 2018.
- [5] 柯賢文、王朝正, "腐蝕及其防治",全華圖書股 份有限公司,2014。
- [6] X. G. Zhang and E. M. Valeriote. "Galvanic protection of steel and galvanic corrosion of zinc under thin layer electrolytes." Corrosion Science 34.12, p. 1957-1972, 1993.
- [7] M. Sumita, "Comprehensive Structural Integrity." Failure Processes in Biometallic Materials, p. 131-167, 2003.
- [8] S. Wang, J. Ding, H. Ming, Z. Zhang, and J. Wang, "Characterization of low alloy ferritic steel-Ni base

alloy dissimilar metal weld interface by SPM techniques, SEM/EDS, TEM/EDS and SVET." Materials Characterization, 100, p. 50-60, 2015.

- [9] S. Wang, H. Ming, J. Ding, Z. Zhang, J. Wang, E. H. Han, and A. Atrens, "Effect of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> on corrosion in 0.01 M NaCl solution of the interface between low alloy steel A508 and alloy 52M." Corrosion Science, 102, p. 469-483, 2016.
- [10] S. Weng, Y. Huang, F. Xuan, and F. Yang, "Pit evolution around the fusion line of a NiCrMoV steel welded joint caused by galvanic and stress-assisted coupling corrosion." RSC advances, 8(7), p. 3399-3409, 2018.
- [11] B. O. Okonkwo, H. Ming, Z. Zhang, J. Wang, E. Rahimi, S. Hosseinpour, and A. Davoodi, "Microscale investigation of the correlation between microstructure and galvanic corrosion of low alloy steel A508 and its welded 309/308L stainless steel overlayer." Corrosion Science, 154, p. 49-60, 2019.

表1 所用材料之化學成分(wt.%)。

	С	Si	Mn	Р	S	Fe	Ni	Cr	Мо	N	Cu
316L	0.023	0.60	0.64	0.035	0.001	Bal.	10.05	16.67	2.01	0.011	0.26
A508 Gr.1	0.23	0.21	1.04	0.011	0.006	Bal.	0.06	0.09	0.01	0.0	0.09
ER308L	0.018	0.55	1.94	0.026	0.012	Bal.	10.34	19.61	0.09	0.341	0.23
ERNiCr-3 (IN 82)	0.009	0.11	3.18	0.004	0.003	0.35	73.6	20.0			< 0.01
ERNiCrFe-3 (IN 182)	0.04	0.40	5.45	0.005	0.004	4.24	73.50	14.70			0.01
ERNiCrFe-7 (IN 52M)	0.03	0.13	0.76	0.003	0.0006	8.53	59.14	30.20	0.01		0.03
	Ti	Cb+Ta	Co	Al	Nb+Ta	Al+Ti	В	Zr	Others		
ERNiCr-3 (IN 82)	0.35	2.64	<0.1	0.10							
ERNiCrFe-3 (IN 182)	0.01				1.52						
ERNiCrFe-7 (IN 52M)	0.23		0.010	0.09	0.80	0.32	< 0.001	< 0.01	< 0.50		

表 2 各合金之動電位極化量測值。

合金材料	A508	IN-182	316L	IN-52M	
Ecorr vs. SCE (mV)	-916	-358	-345	-297	
Icorr (nA/cm^2)	1038	16	22	12	

表3 合金組合之動電位極化量測值。

耦合材料	A508/ IN-52M	A508/ IN-182	A508/IN- 52M/IN-182	
Ecorr vs. SCE (mV)	-866	-821	-832	
Icorr (nA/cm^2)	1871	1762	1946	
耦合材料	316L/ IN-182	316L/308L/ IN-52M	316L/IN- 182/ IN-52M	IN-52M/ IN-182
Ecorr vs. SCE (mV)	-324	-290	-294	-338
Icorr (nA/cm^2)	27	51	21	38





圖 2 鹽水浸泡之試片外觀。



狹縫深度量測方法示意圖

圖 3 腐蝕深度量測,(a) 表面輪廓儀量測路徑,(b) 狹縫量測方法示意圖。



圖 4 浸泡試片水洗前後之表面樣貌。





圖 6 浸泡試片酸洗後之表面樣貌。



圖 7 A508 熱影響組織 (a) 單道熱影響區, (b) 粗晶組織, (c) 細晶組織, (d) 臨界熱影響組織, (c) 與下一道組織 介面。



圖 8 A508/IN-182 截面觀察, (a) 取樣位置示意圖, (b) 狹縫橫截面觀察, (c) 母材/臨界熱影組織界面形貌。



圖 9 A508/IN-182/316L 之腐蝕深度 (a) 第 1 個月, (b) 第 2 個月, (c) 第 3 個月。



圖 9 (續)。



圖 9 (續)。





圖 11 狹縫取樣位置。



圖 12狹縫腐蝕深度。







圖 14各合金之動電位極化。





圖 16A508 之時間與腐蝕速率的趨勢圖。


# 核能電廠反恐保安演練之規劃、實施與評估之探討 Research on Planning, Implementation and Evaluation of Anti-terrorism Safeguard Exercises in Nuclear Power Plants

計畫編號:109-2623-E-015-001-NU 計畫主持人:汪毓瑋教授 e-mail:una254@mail.cpu.edu.tw 計畫共同主持人:蔡裕明副教授 執行單位:中央警察大學國境警察學系

#### 摘要

核子設施之保安防護為核能安全的重要課題,因為 嚴重的非法入侵破壞可能造成放射性物質外釋等災 害。911 事件發生後,美歐國家更加強核能電廠對恐怖 攻擊的防範,我國近年來也強化核電廠的核子保安防護 管制措施,包括每年實施防恐保安演練。但是如何強化 演練設計與效果,仍應該是持續努力的目標。因此,希 望能夠設計出更加有效的保安演練規劃與實施方式,而 能夠有限資源的限制下達成演練效果的最大化。同時能 夠以最有效能之演練模式,強化核能電廠之防護與回應 能力。

**關鍵詞**:核能電廠、恐怖主義、演練、情節

#### Abstract

The safeguard protection of nuclear facilities is an important issue for nuclear energy safety, because serious illegal intrusion and damage may cause disasters such as the release of radioactive materials. After the September 11th incident, US and European countries strengthen the security of nuclear power plants and prevent terrorist attacks. In recent years, Taiwan has also strengthened the nuclear security protection control measures for nuclear power plants, including the implementation of anti-terrorism security exercise every year. But how to strengthen the design and effect of the exercise should still be the goal of continuous efforts. Therefore, it is hoped that effective security exercise planning more and implementation methods can be designed, and the effect of the exercise can be maximized under the constraints of limited resources. At the same time, it can strengthen the protection and response capabilities of nuclear power plants with the most effective exercise mode.

Keywords : nuclear power plant, terrorism, exercise, scenario

#### I. 前言

核能電廠的安全防範攸關國家安全,若能運作良好 可以有助社會安定,並推動經濟發展。然而含核電廠在 內之任何重大關鍵基礎設施均有其運作上的風險,特別 是恐怖分子亦以核電廠作為其攻擊目標的選項之一,而 必須有充分的準備。藉由檢討不同型態及設計的演練, 就是測試核電廠含準備文化在內之預防、減緩、保護、 回應與復原五大核心功能之最佳途徑。

為了因應恐怖主義等非國家行為者的威脅以及處

理來自國家行為者等之混合運用不同之威脅來源,而能 夠更有效的掌握影響安全的不確定性因素及攻擊效 果,各國均會推動演習與各種不同之情節規劃,以強化 作為重大國家關鍵基礎設施之核電廠的預防、應變與復 原能力。我國亦有類似之核安演習而必須與時俱進。

例如美國的「核子管理委員會」(NRC)為確保核能 安全體系在發生攻擊時能夠正常的運作,會定時進行實 兵對實兵演習(force-on-force, FOF)之審查,並根據「設 計基準威脅」(Design Basis Threat, DBT)模擬攻擊並評估 其成功的可能性,然而這類演習不見得完全是模擬實際 攻擊,也可能是其他的方式,例如核電廠會收到預先警 告,以有效評估核電廠的安全部隊能力是否能夠因應。

# II. 主要內容

演習是測試,培訓,評估和證明應急回應能力的一 種方式。參與者和參加組織應了解其作用和職責,以及 處理演習主題的既定程序。參與者在演習中作為扮演, 控制者或評估者的角色,可以由以下人員組成:保安部 隊,營運,應急計劃,輻射防護,安全,異地,主管當 局和進行演習情節 (scenario)所需的任何其他人員。

演習的大小和範圍可能會有所不同。在因安全事件 導致輻射緊急情況下,演習可以設計為測試各種功能, 包括警衛隊回應,安全和保安界面,命令和控制以及緊 急通信。且時間(情節注入對應自由扮演)以及模擬活 動的使用,是準備演習時應確定的重要因素。

表1、演習選項:優點和缺點

演習類型	優點	缺點
研討會	簡單又便宜	有限的準備(readiness)測 試
工作論壇	簡單而專注	無明顯壓力
桌上推演	將主要領導人聚集在一 起	沒有能力(capability)測試
兵棋推演	複製主要問題	急於簡單答案
演練	嚴格的準備工作測試	可能無法測試所有方面
功能演習	現實的準備狀態測試	昂貴與複雜
全範圍演習	每一個關鍵功能都經過 測試	永遠時間不夠

資料來源:引用 An Introduction to Emergency Exercise Design and Evaluation 專書之內容

在大多數情況下,演習選擇將由可用的預算、資

源、人員和機會來驅動,以展示應急人員和設備是如何 一起工作的。測試能力(capabilities)和克服績效 (performance)差距是關鍵。

在編寫演習設計和戰略草案的要素時,演習設計者 應該認真考慮幾個重要議題。設計師必須面對這樣一種 可能性,即他們無法集結實施真實演習所需之天賦、時 間或技術專家,但他們必須致力於嘗試替代方案,以顯 示他們試圖說明的準備。資源不足、關鍵人員或設備的 短缺,或者面臨政治領導人不願意支持的演習設計事 件,可能反映出一些緊急管理人員面臨的現實。然而, 他們必須思考哪種替代方法最適合他們面臨的情況。這 些基本和根本性的考慮包括以下議題:

•根據情況,什麼類型的演習是最好的?

•能現實地複製危機環境的需求和風險嗎?

•是否應該聘請專家來設計演習?

• 演習設計的預期成本是多少?

•要演習的最重要的任務和功能是什麼?

•是否應該向當地大學尋求設計方面的幫助?

•是否應該借鑒其他城市或城鎮的演習設計?

是否應該控制我們稀缺的資源,加入其他社區?
 當然,這些並不是一個城市或社區在設計一項活動

時所有問題和關注的全部,但它們提出了應該解決的重要問題。

在許多司法管轄區,應急演習設計的問題可能會落 在緊急管理人員身上,他必須擔心能否得到所有關鍵人 員和組織的充分參與,這些人員和組織的參與使演習可 信,並使演習得現實。這就完全削弱了管理者作為第一 總反應者的總協調者的核心作用,使管理者免於與員工 打成一片。從專業協會、退休緊急管理人員或雇傭專家 那裡獲得外部人才,對設計任務至關重要。如果某些關 鍵人員或機構不能或不願參與,則必須做出安排,插入 不同的情節或用可信的替代方案模擬他們的積極參與。

在設計過程的早期,演習設計人員必須努力解決的 一個關鍵問題是選擇最佳演習工具,以證明第一線反應 人員、應急指揮中心人員和支援人員具備必要的培訓和 經驗,能夠成功有效地處理他們可能面臨的各種問題。 如果考慮主要城市和管轄區必須應對不同目標的能 力,似乎是整體準備狀態所強調的基本能力的不同反應 能力更重要,我們可以看到演習範圍從工作論壇和兵棋 推演到全面部署和複雜的功能演習,其中多個管轄區以 及聯邦和州的參與者都參與了演習。

情節是模擬事件序列的模型或輪廓,可推動參與者 的討論或行動。情節可以是書面敘述(a written narrative),也可以由事件時間表描述。情節應該是合 理、現實和具有挑戰性的,以便參與者可以實現目標。 在確定範圍和目標之後,演習計劃組應選擇和發展情 節,以使演習能夠評估目標和能力。

演習情節應涵蓋旨在防止和應對惡意行為(包括破 壞設施和活動)的措施,以最大程度地減少或減輕破壞 行為的輻射後果。根據演習範圍,情節可能需要分為幾 個階段,每一個階段都集中在安全或應急計劃的特定方 面。例如,在應急回應演習中,情節至少應包括警衛或 回應部隊及相關支持機構的行動。一旦執行了正常操 作,該演習的第二階段可能包括複製惡意操作以測試特 定的應急計劃。 應該有一個明確的策略來處理媒體和公眾對有關 演習的信息要求。最好對所有演習都採用一致的策略, 而不是對每個演習都採用特定的策略。如果外部組織 (例如央,縣市或鄉鎮政府)參加了演習,則應採用聯 合或協調的信息策略。考慮上述要點的策略將減少誤傳 和混亂的機會,並因此減少所有有關人員的信譽。

在任何給定時間,可以將媒體視為以下任何一項或 全部:可能的資產,潛在的資源或耗時的負債。媒體策 略最好與媒體建立積極的關係,使媒體既是資產又是資 源。總的來說,應該將演習視為向真實媒體通報已經 制定了應對核安保事件的計劃和程序的機會。

根據所進行的演習類型,演習目標和範圍將決定評 估過程的程度。在一些專門投入大量資源的演習中,可 以將正式的評估過程納入演習的機制中。實體保護系統 和回應組織的行動可以由受過培訓的主題專家評估。結 果應在正式的評估報告中提供,並應納入組織的糾正措 施計劃中,以提高實體保護系統的有效性。在其他演習 中,參與組織可以進行行動後評估 (after-action review, AAR),這將構成自我評估。然後,行動後評估可能會 得出一份經驗教訓報告,以支持組織的戰略,政策,程 序或其他實體保護措施的內部改進。應該評估行動和實 體保護系統,以便從專用資源中獲取價值,即使它只是 簡單的參與者匯報 (debrief)。

有效的評估會根據演習目標評估績效,並鑑定和記錄相對於能力(capabilities)的優勢(strengths)和領域。 評估很重要,並且要在演習計劃週期的所有階段中都應 加以考慮,從演習計劃團隊開會確定目標並通過改進計 劃啟動演習設計開始。

要有演習評估指南,為評估人員提供了標準化的工具,以指導資料收集和獲取績效結果。由於每一個轄區/組織都有獨特的目標和關鍵任務,因此,《演習評估指 南》是針對其計劃、政策、程序和協議而發展的。

有效評估涉及:

演習評估計劃;

在演習執行期間觀察演習並收集演習資料;

分析收集的資料以確定優勢和需要改進的領域;

• 在行動後報告(AAR)中報告演習結果。

在演習過程中,所有安全法規和程序仍然有效。演 習的壓力可能導致人們將精力集中在自己的任務上,以 至於他們可能忽略遵循標準的安全預防措施。

演習後要有改善計畫(Improvement Planning, IP) 包括所有合併的糾正行動。改善計畫可能是行動後報告 的附錄。行動後報告/改善計畫是最終的,並視情況分 發給演習計劃者、參與者和其他準備之利益相關者。

改善計劃是一個過程,通過該過程,可以將演習中 需要改進的地方轉變為可增強能力的具體、可衡量的糾 正行動。這樣,改善計劃活動可以幫助型塑轄區/組織的 準備工作優先事項並支持持續改進。改善計劃活動現在 從國土安全演習與評估計畫週期過渡到整合準備週期。

在改善計劃中鑑定的行動,有助於增強轄區/組織的 計劃、組織/裝備、培訓和行使能力的要素。過渡如下圖 所示。

有效的改善計劃是作為整個整合準備週期的重要 工具,其方法是:

優先考慮從個人識別出的糾正行動;

·為戰略發展和計劃優先事項提供有價值的投入;

啟動對計劃、政策和程序的檢討或新的發展;和

• 鑑定並獲得所需的培訓、設備和其他資源。

此外,對於任何演習,安全都是至關重要的。這對 於測試回應能力的核保安事件演習尤其重要,因為回應 可能涉及實戰以及使用槍支或武器 安全和執法人員可 能會對演習事件做出反應,就好像它們是真實的一樣, 這可能會導致傷害。另除非所有演習人員都得到充分的 簡要介紹和清楚的標識,否則安全人員可以使用槍支面 對演習人員。一些演習可能要求使用真實的炸藥和空包 彈來增強真實感。為了避免受傷,應制定嚴格的安全規 程,並應指派安全員或團隊負責設計安全規程並確保遵 守安全規程。

#### III. 結果與討論

進行分析或探討的問題:

核子設施之保安防護為核能安全的重要課題,因為 嚴重的非法入侵破壞可能會造成放射性物質外釋而引 發更大的災害。核能電廠由外至內依其保安要求之不 同,而可以劃分為控制區、保護區、緊要區。對於可能 造成高放射性事故後果之設備、系統或核物料,均劃分 在緊要區內以加強保護,而緊要區就位於保護區之內, 保護區外圍而作為控制區。由於「核電廠保安」旨在防 範核物料(nuclear material)或高強度放射性物質遭竊進 而被濫用,或其所在之設施遭破壞或其他惡意攻擊行為 造成放射性物質外逸,而必須有效執行防止、偵測及應 變措施。

「九一一事件」後,美歐國家更加強核能電廠對於恐怖攻擊的防範,我國近年來也強化核電廠的核子保安 防護管制措施,每年均實施反恐保安演練,例如目前我 國運轉中之各個核能電廠每年均依照《核子事故緊急應 變法施行細則》辦理保安反恐演練。但長期實施以來, 是否有更佳的不同演習練方式,且在情節規劃上如何才 能與時俱進應可再探討。亦即不論是在核能電廠保安 練之情境想定、演練規劃及實施方式之精進;電廠與執 法人員權責與角色區分、有限資源之運用、標準作業程 序之建構等課題方面,仍應有相當改善空間。因此,有 必要參酌安全相關學理與實務,建構保安演練效能評估 模式,建立評核要項,評估演練效能。

(一)建立有效的保安演練規劃與實施方式,以有 限資源達成效果最大化

從國土安全範疇定義演習,指的是:「在無風險環 境下,針對預防、保護、應變、復原能力,進行訓練、 評估、實踐、改善的一種手段,可用以檢查及驗證政策、 方案、程序、訓練、裝備、跨單位及領域(部門)之協調 與支援,闡明應變人員的角色與責任,促進跨領域(部 門)之協防與溝通,找出資源缺口、改善個人應變能力、 善用改進機會。」因此,本研究可以預期達到進行驗 證應變程序與計畫、決策模擬,以及不同資源限制下必 須發揮之安全功能。

(二)設計多元之「情境想定」而能從嚴從難的紓 緩不確定性 必須依於恐攻案例的與時俱進基礎上去設計情境 想定,才能面對未來不確定性的最大風險。而非從既定 的作業流程簡單的回溯而想定一些易於上手的情境設 計,結果卻造成了與真實情境脫節,耗費了大量的人力 與資源卻造成演練不到位的抨擊。且要有多層面的情境 規劃,例如測試危機溝通就要思考如何有效推動涉及核 子輿情與群眾恐慌之演練。目前手機與網路傳播媒體相 當普遍,民眾可用手機拍攝影片立即上傳到 FB、IG 或 Dcard。加上從日本福島核災後,民眾與媒體尤為關切核 能事故相關訊息,即便核電廠倘若發生異常,若經過媒 體渲染極可能造成群眾恐慌;更何況假新聞事件的故意 傳播等,均為情節設計不同階段之演練課題。

(三)以最有效能之演練模式,強化核能電廠之防 護與應變能量

演練模式已是多樣化的發展,若是以美國國土安全 部推動之類型,計有:學術研討型演習(Seminars);專案 研 討 型 演 習 (Workshops) ; 桌 上 推 演 (Tabletop Exercises);模擬演習(Games);行動型演習,又分成訓 練式演練(Drills)、功能性演習(Functional Exercises)、全 規模(複合式)演習 (Full-Scale Exercises)等,各演習舉行 之條件、規模、資源、時間等均不相同,經由本研究之 綜合檢討,應該可以比較彼等之不同功能,而找出適合 我國核電廠之有效演練模式,或是設計此等不同類型之 併行或是分離實施,而達到強化核能電廠防護與應變能 量的最大成效。

(四)在基於能力評估範疇下,建立核能應變訓練 考核標準與作業程序

由於核電廠之地點、規模與功能並不完全一致,保 安演練之考核對象也不一定相同,而會導致非客制化的 評估,因為評估的內容的不同、難度標準也不一樣。因 此,必須鑑定可用於評估之項目或是要素,嘗試設計一 套普,除了演練實作外,可再以考試、口試算傳統方法為 基礎,發展跨核能領域之考核,包括資訊與網路安全考 核,發展跨核能領域之考核,包括資訊與網路安全考 式。而在整體訓練考核方面,可先以核電廠安全事故作 為測試的背景,結合兵推或是桌上推演、指揮中心演 練估整體之核能安全實踐作為是否達到預期的標準。同 時期更新演練主題、設定或想像各種核電廠保安事件想 像情境、特殊情境,供核電廠與核能主管單位參酌依據。

#### IV. 結論

核能電廠的安全防範攸關國家安全,而恐怖分子常 以核電廠作為其攻擊目標選項,為了避免或是減緩此等 威脅,檢討及設計演練來進行核心功能測試與強化持續 營運功能,就是防範核電廠安全的必要途徑。因此本研 究在學術上,可以填補此方面之專業內容;在社會上有 助於穩定社會日常活動與民心;在經濟上可以提升經濟 發展的多功能選項。

# 文獻探討

一、 國外研究部分

有關各別的國土安全、恐怖主義、關鍵基礎設施保 護及核能電廠安全等之各式學術論文與專書有很多,但 是對聚焦於演練、演習、情節規劃與模擬等整合性議題 之專書或是學術論文,比較上仍不是太多,僅重點列舉 如下表。特別是針對核能電廠的反恐安保演練與情節規 劃、演練效能評估、標準作業程序建構、電廠與執法人 員權責與具體協作等之綜合檢討幾乎没有。

作者	書名	出版社	出版年月	評析
Peter Bursens, Vincent Donche, David Gijbels, Pieter Spooren eds.	Simulations of Decision-Making as Active Learning Tools: Design and Effects of Political Science Simulations	Springer	2018	內容論及模擬的設計與評估及 模擬效果兩大主軸,因為是合 輕,因此議題太過於零散、較乏 層次感,惟在對於決策與溝通方 面之分析可供參考。
Robert McCreight	An Introduction to Emergency Exercise Design and Evaluation	The Scarecrow Press, INC.	2011	內容論及緊急事件演習、設計的 要素與變數、演習該計的議題、 演習組織與結構、演習控制與管 理、演習評估的原則、演習評估夠與管 項、激習評估的原則、演習評估有關議題等,過解一貫且層次分 明,較少演習之機向協作介紹, 亦缺乏具體案例之交互印證,但 者助本研究思考演習規劃之總 體方向。
Bill Ralston and Ian Wilson	The Scenario Planning: Developing Strategies in Uncertain Times	South-Wes tern: Cengage Learning	2006	內容論及如何規畫情節、基於環 境分析的基礎、從情節發展到決 策、及創造一個變遷取向的文化 等,層次分明,但概是原則性說
				明,較少分析具體案,惟有利思 考如何透過情節設計以減緩不 確定性的風險。
Sheldon M. Ross	Simulation	Elsevier	2006	內容論及可能性要素、隨機變數 的持續產生、具體事件的模擬途 徑、減少變數的最何大鏈聚特卡 羅方法等內容,過於聚焦於量化 的技術,但可作為本研究之質化 途徑補充思考。
Mats lindgren and Hans Bandhold	Scenario Planning: The Link Between Future and Strategy	Palgrave macmillan	2003	內容論及為何需要演習規畫、如 何實踐演習規畫、情節思考的原 則、戰略思考的原則等,雖有一 些案例但僅是簡單的介紹卻未 有深入分析,其他內容亦似有些 踐與規畫情節之啟發。

表 2、 國外研究簡示表

資料來源:研究團隊自製

二、國內研究部分

在學術方面,目前雖有少數針對恐怖主義與國土安 全和關鍵基礎設施保護之相關專文或是專書,但是較少 分析反恐實踐的具體威脅與恐怖分子的攻擊能量評估 或是比較;且完全沒有結合恐怖主義與保安及演練三個 領域的整合性研究,更遑論是針對核能電廠之主體。而 在政策報告方面,目前行政院國土安全辦公室雖有公佈 《國家關鍵基礎設施防護--演習參考手冊》,然而內容概 是普遍性之步驟性操作。只是提及了「如何做」,但更 重要的「為何要這樣做」卻沒有說明或是詮釋;內容之 層次與一些名詞定義仍不夠明確;且亦缺乏情節想定之 檢討與設計;演練效能評估、評核要項等之內容或無或 仍有改善空間。因此,本研究嘗試補充此方面之不足。

# 低溶氫對於壓水式反應器一次側迴路合金 600 的腐蝕行為評估 Evaluation of Corrosion Behavior of Alloy 600 in PWR Primary Water with Low Dissolved Hydrogen Concentration

計畫編號:109-2623-E-007-004-NU 計畫主持人:葉宗洸 e-mail:tkyeh@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人:王美雅 計畫參與人員:施湘鈴 執行單位:國立清華大學工程與系統科學系

# 摘要

在核電廠長期運轉下,組件的腐蝕問題層出不窮, 其中之一為壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)一次侧水迴路所發生的鎳基合金 600 沿晶應力腐 蝕龜裂(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)。 為了減緩核電廠的腐蝕問題,與水環境因輻射分解反應 所提高的氧化性,需注入氫氣抑制這些現象。在目前 EPRI 規範的溶氫濃度25~50 cc/kgH<sub>2</sub>0及運轉溫度 320~360 ℃下, 鎳基合金仍有 SCC 的問題, 因此各國 核電廠決定調整溶氫濃度,歐美國家傾向提高溶氫濃度 至75 cc/kgH<sub>2</sub>O以上,而日本則主張降低溶氫濃度至 5 cc/kgH<sub>2</sub>O以下。本研究探討在模擬 PWR 一次側水環 境下,溶氫濃度控制在 5 cc/kg H<sub>2</sub>O 時鎳基 600 合金的 應力腐蝕龜裂行為,並評估在此溶氫量下的防蝕效果。 以鎳基 600 合金試棒進行慢應變速率拉伸實驗(Slow Strain Rate Test, SSRT)。實驗將 600 合金試棒進行固溶 熱處理與敏化處理並預長氧化膜後,在320 ℃水環境下 進行 SSRT 試驗分析其應力腐蝕龜裂行為,並以掃描式 電子顯微鏡(SEM)觀察試棒破斷面與表面氧化膜形貌, 以雷射拉曼光譜儀 (Laser Raman Spectrophotometer)分 析表面氧化層類型。

**關鍵詞:**應力腐蝕龜裂、鎳基 600 合金、慢應變速率拉 伸試驗、壓水式反應器、溶氫量。

#### Abstract

As the pressurized water reactors (PWRs) age, incidents of general corrosion and stress corrosion cracking (SCC) are more likely seen in the structural components. One of the corrosion problems is the intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) of Alloy 600. To mitigate the risk of material degradation, hydrogen is added to maintain the reducing condition in PWR primary coolant and minimize the corrosion of construction material. However, at the dissolved hydrogen concentration of 25-50 cc H<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O, hydrogen may affect the Ni-based alloy surface stability and cause SCC. A change of hydrogen concentration from 25-50 cc  $H_2/kg H_2O$  to >75 cc  $H_2/kg H_2O$ or to <5 cc H<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>O is beneficial in avoiding PWSCC in Ni-based alloys. The aim of this study is to investigate the SCC initiation and propagation behavior of Alloy 600 in 320 °C simulated PWR primary water environment with two different dissolved hydrogen (0 and 5  $cc/kg H_2O$ ). The SCC behavior and high temperature tensile properties were investigated by slow strain rate test (SSRT). The

fracture surface and the surface oxide film were observed by Scanning electron microscopy (SEM). Laser Raman spectrophotometer was conducted to characterize the structure of the oxide film.

**Keywords:** Stress Corrosion Cracking, Ni-Based Alloy 600, Slow Strain Rate Test, Pressurized Water Reactor, Dissolved Hydrogen.

#### I. 前言

目前全球正在商業運轉的核電廠,約有 63.2%為壓 水式反應器,台灣的核三廠也屬於此類型。然而隨著運 轉時間增長,組件材料劣化問題逐漸浮現,因此對於核 電廠組件的維護與延長材料壽命,並抑制材料腐蝕行為, 是各國核能產業與研究的一大議題。PWR 水環境為了控 制反應度與 pH 值而加入硼酸與氫氧化鋰,此外爐水受 到輻射分解效應而產生過氧化氫並分解成氧,使水環境 的氧化性上升,為了減緩氧化性環境,便在水中注入氫 氣作為還原劑。鎳基合金 600 在 PWR 中為常見結構組 件材料,但經電廠長期運轉卻發現有 PWSCC (Pressurized Water Stress Corrosion Cracking) 產生。由於 在目前 EPRI 規範的溶氫濃度 25~50 cc/kg H2O 及運轉 溫度 320~360 ℃下, 鎳基合金有 SCC 的問題, 因此各 國核電廠決定調整溶氫濃度至 75 cc/kgH2O 以上或低於 5 cc/kg H<sub>2</sub>O。其中日本主張降低溶氫濃度,以減少水中 溶氫對材料產生氫脆的影響。

## II. 主要內容

PWR 主要使用的材料之一為鎳基合金 600,經核電 廠長期運轉後發現有一次側冷卻水應力腐蝕龜裂 (PWSCC)發生。而應力腐蝕龜裂的三大因素為敏感性材 料、張應力與腐蝕性環境,若欲減緩 PWSCC 之發生, 則須減輕上述三個因素之一。鎳基合金 600 經加工或銲 接時容易產生殘留應力;而一次側水環境因輻射分解效 應產生過氧化氫與氧,使環境氧化性提升,為降低水環 境的氧化性,電廠多會實施加氫水化學。然而,為了控 制反應度與一次側水的 pH值,添加了硼酸與氫氧化鋰, 使整體水化學更複雜。

本研究在模擬低溶氫(5 cc/kg H2O)PWR 一次側水環 境下,以鎳基合金 600 試棒進行慢應變速率拉伸實驗 (SSRT)。將合金 600 試棒進行固溶熱處理與敏化處理並 預長氧化膜後,進行 SSRT 試驗分析其應力腐蝕龜裂行 為,而後再以掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察試棒破斷面 與表面氧化膜形貌,以拉曼光譜儀所得之試棒拉曼雷射 光譜(Laser Raman Spectroscopy, LRS)分析表面氧化層類 型與特性。探討在 320℃低溶氫時的模擬 PWR 一次側 水迴路下,對鎳基合金 600 的應力腐蝕龜裂裂縫起始與 成長之影響,並評估溶氫濃度降為 5 cc/kg H<sub>2</sub>O 時的防 蝕效果。

# III. 結果與討論

將熱處理後的試棒進行預長氧化膜,水環境條件為 320°C、溶氧 1 ppm 並靜置 14 天,使氧化膜結構穩定。 接著進行 SSRT 實驗,本實驗比較 600 合金在模擬 PWR 除氧與低溶氫水環境中,經敏化熱處理的試棒(Alloy 600 TT)與經固溶熱處理後的試棒(Alloy 600 SA)之應力腐蝕 龜裂裂縫起始及成長行為。實驗環境為 320°C、12.1 MPa、 硼酸濃度 1200 ppm 與氫氧化鋰濃度 3.5 ppm 水溶液,導 電度維持在 11~14  $\mu$ S/cm。除氧(Deaerated)條件為溶氧濃 度(DO)<50 ppb,低溶氫條件為 DO<50 ppb 且溶氫濃度 (DH) =5 cc/kg H<sub>2</sub>O。

圖 1 為 600 合金在不同熱處理與不同氣體環境下的 應力應變曲線圖,其機械性質整理於表 1。除氧環境下 的 Alloy 600 TT 有良好伸長率 51.52%,降伏強度(Yield strength)為三者中最高,最大抗拉強度(Ultimate tensile strength, UTS)為 570.75 MPa。DH=5 cc/kg H<sub>2</sub>O 時, Alloy 600 TT 機械性質則較差,伸長率降至 43.89%,降伏強度 與最大抗拉強度也大幅降低,整體韌性變差。低溶氫條 件的 Alloy 600 SA 伸長率與最大抗拉強度與除氧條件的 Alloy 600 TT 相差不大。推論試棒經固溶熱處理後,晶 界對於腐蝕敏感性較低,因此相較於低溶氫環境的敏化 試棒有更好的伸長率。

SSRT 實驗結束後,將破斷的試棒進行 SEM 形貌觀 察,圖 2(a)、圖 3(a)、圖 4(a)為三條件下的試棒破斷面, 圖中黃線標定出試棒的破斷區域,藍線區域為穿晶應力 腐蝕龜裂(TGSCC),而紅線區域則為沿晶應力腐蝕龜裂 (IGSCC)。圖 2 為 Alloy 600 TT 在除氧環境下的試棒破 斷面 SEM 觀察。試棒雖經過敏化熱處理,卻只有極少量 的 TGSCC 區域,推測由於水環境中溶氧量極低,對 SCC 的發生產生抑制效果。整體破斷面仍以延性(Ductile)破 裂的窩穴(Dimple)組織為主,邊緣有些許 TGSCC 到延性 破裂的過渡區,也發現少量二次裂紋,為穿晶破裂。

圖 3 為 Alloy 600 TT 在低溶氫環境下的試棒破斷面 SEM 觀察,整體表面以延性破裂的窩穴組織為主,邊緣 則有少許 TGSCC。雖然整體 SCC 的面積比例極低,但 破斷面邊緣與內部延性破裂區皆有大量二次裂紋,圖 3(d)可明顯觀察到沿晶二次裂紋在破斷面內部產生。推 論在低溶氫環境下,整體環境呈現還原性,但此溶氫量 卻可能足以影響 Alloy 600 TT 表面氧化物,使之接近 Ni/NiO 相轉變區,導致氧化物不穩定而更容易發生 SCC。 且拉伸試驗過程中,試棒破裂處不斷有新表面產生,這 些表面接觸到水環境後也發生 SCC,才造成破斷面內部 大量的穿晶或沿晶二次裂紋,而大量二次裂紋的出現則 呼應了其較差的機械性質表現。

圖 4 為 Alloy 600 SA 在低溶氫環境下的試棒破裂面 SEM 觀察。其仍有少許 IGSCC 與 TGSCC 產生,但整體 SCC 面積比例極低,以延性破裂為主。且二次裂紋較少, 多在邊緣形成。可能原因為 Alloy 600 SA 敏化程度低, 即晶粒在腐蝕環境下的沿晶腐蝕敏感性低,但水環境中 的溶氫量仍對 Alloy 600 SA 造成影響,因此還是有少量 的 IGSCC 與 TGSCC 出現。

圖 5(a)、圖 6(a)、圖 7(a)為三條件下的試棒側面形 貌,三者皆出現明顯的頸縮現象。圖 5 為 Alloy 600 TT 在除氧環境下的試棒側面裂縫 SEM 觀察。發現破斷面 附近與遠離斷口處皆有大量裂縫,多為沿晶裂縫,其平 均長度約 21 μm,長裂縫多由較小裂縫相接而成。

圖 6 為 Alloy 600 TT 在低溶氫環境下的試棒側面裂 縫 SEM 觀察。與除氧條件結果相似,有大量沿晶裂縫。 但仍有少量穿晶裂縫,且長度可達約 200 μm,如圖 6(b) 所示。沿晶裂縫的平均長度約為 30 μm,長度與數量皆 略大於除氧條件,但寬度略小於除氧環境下的敏化試棒。 此差異推測為水環境中溶氫量的影響,使表面氧化膜接 近 Ni/NiO 相轉變區而變得不穩定,對基材的保護力下 降,也更容易造成 IGSCC。

圖 7 為 Alloy 600 SA 在低溶氫環境下的試棒側面裂 縫 SEM 觀察。少數穿晶裂縫出現在斷口邊緣,如圖 7(b) 所示。側面裂縫則以沿晶裂縫為主,但相較於兩條件下 的 Alloy 600 TT, Alloy 600 SA 裂縫較寬與淺,數量上 也較少。

實驗以SEM進行試棒的表面氧化物觀察,並以EDS 對其進行元素分析,之後再以拉曼雷射光譜儀判定表面 氧化物結構。圖8、圖9與圖10為三條件下的表面氧化 物 SEM 觀察及 EDS 分析結果。三條件下的試棒表面氧 化物尺寸皆大小不一且分布不均,數量與平均顆粒尺寸 上皆以低溶氫條件下的 Alloy 600 SA 最大,除氧條件下 的 Alloy 600 TT 最小。

由圖 11 的拉曼光譜分析結果可知,三條件下的氧 化膜結構並無太大差異。三條件下的尖晶石氧化物皆有 最大峰值,結合 EDS 可知,氧化膜應以尖晶石氧化物 NiFe2O4 為主,此外也有 Cr2O3 與 NiO 的訊號。而低溶 氫環境下的 Alloy 600 SA 在 NiFe2O4 的峰值強度高於另 外兩者,顯示出其表面的 NiFe2O4 數量較另外兩者更多。

#### IV. 結論

在所有實驗條件中,低溶氫條件下的 Alloy 600 TT 表現出最差的機械性質,雖然整體 SCC 面積比例很低, 但有大量的二次裂紋產生,可能與水環境中的溶氫量造 成氧化膜不穩定有關。而三條件下的側面皆有大量裂縫 產生,多為沿晶破裂。

三條件下的表面氧化物皆尺寸不一且分布不均,但 數量與平均顆粒尺寸上皆以低溶氫條件下的 Alloy 600 SA 最大,除氧條件下的 Alloy 600 TT 最小。且三者氧 化膜皆以尖晶石氧化物 NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>為主。

# 参考文獻

- [1] P. Andresen, International Workshop on Optimization of Dissolved Hydrogen Content in Primary Coolant, Sendai, 2007.
- [2] N. Totsuka, et al., A New Evaluation Method of Short Crack Growth and Influence of Dissolved Hydrogen on PWSCC of Alloy 600. Proc. of 10th International Symposium on Environmental Degradation of

Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Lake Tahoe, 2001.

- [3] P.L. Andresen, et al., Effects of Hydrogen on Stress Corrosion Crack Growth Rate of Nickel Alloys in High-Temperature Water, Corrosion, 64(9), September 2008.
- [4] T. Tsuruta, Proc. of Spring Technical Meeting, Japan Society of Corrosion Engineering, p.78, 1983.
- [5] A. Molander, International Workshop on Optimization of Dissolved Hydrogen Content in PWR Primary Coolant, Sendai, 2007.
- [6] C. Soustelle, M. Foucault, A. Gelpi, P. Combrade, and T. Magnim, PWSCC of Alloy 600: A parametric Study. Proc. of EUROCORR 98, the Netherlands, 1998.
- [7] P. L. Andresen et al., "Effects of PWR Primary Water Chemistry on PWSCC of Ni Alloys," Proceedings of the 13th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems -Water Reactors, CNS, Whistler, BC, Canada, August 19-23, 2007.
- [8] Koji DOZAKI, et al., "Effects of Dissolved Hydrogen Content in PWR Primary Water on PWSCC Initiation Property," E-Journal of Advanced Maintenance, 2, p.65-76 (2010).
- [9] Soon-Hyeok Jeon, et al., "Effects of dissolved hydrogen on general corrosion behavior and oxide films of alloy 690TT in PWR primary water," Journal of Nuclear Materials 485 (2017) 113-121
- [10] X. Zhong, et al., "Effects of dissolved hydrogen and surface condition on the intergranular stress corrosion cracking initiation and shortcrack growth behavior of non-sensitized 316 stainless steel in simulated PWR primary water," Corrosion Science, 118, pp. 143-157 (2017).
- [11] Y. Oiu, et al., "Effect of dissolved hydrogen on the electrochemical behavior of Alloy 600 in simulated PWR primary water at 290°C," Corrosion Science, 53, pp. 1983-1989 (2011).
- [12] P. M. Scott, "An Overview of Materials Degradation by Stress Corrosion in PWRs," EUROCORR, Nice (France); 12-16 Sep 2004.



應力應變曲線圖



圖 2 Alloy 600 TT 在除氧環境的試棒破斷面 SEM 觀察



圖 3 Alloy 600 TT 在溶氫(DH = 5 cc/kg)環境下的試棒 破斷面 SEM 觀察



圖 4 Alloy 600 SA 在溶氫(DH = 5 cc/kg)環境下的試棒 破斷面 SEM 觀察



觀察



圖 6 Alloy 600 TT 在溶氫(DH = 5 cc/kg)環境下的試棒 側面裂縫 SEM 觀察



圖 7 Alloy 600 SA 在溶氫(DH = 5 cc/kg)環境下的試棒 側面裂縫 SEM 觀察



圖 8 Alloy 600 TT 在除氧環境下的試棒表面氧化物 EDS 分析結果



圖 9 Alloy 600 TT 在溶氫(DH = 5 cc/kg)環境下的試棒 表面氧化物 EDS 分析結果



圖 10 Alloy 600 SA 在溶氫(DH = 5 cc/kg)環境下的試 棒表面氧化物 EDS 分析結果



圖 11 合金 600 在不同氣體與熱處理條件下的拉曼雷射 光譜結果

表1 合金 600 在不同氣體環境與熱處理條件下的機械 性質表現

320°C	Yield strength (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
Alloy 600 TT Deaerated	190.14	570.75	51.52
Alloy 600 TT DH = 5 cc/ kg	103.36	494.92	43.89
Alloy 600 SA DH = 5 cc/ kg	149.98	586.26	54.01

表 2	合金 600	)的破斷	面形貌比較整理
-----	--------	------	---------

320°C	IGSCC (%)	TGSCC (%)	Total SCC (%)
Alloy 600 TT Deaerated	0	0.04	0.04
Alloy 600 TT <b>DH = 5 cc/kg</b>	0.01	0.77	0.78
Alloy 600 SA <b>DH = 5 cc/kg</b>	0.74	0.07	0.81

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

計畫編號:109-2623-E-008-002-NU 計畫主持人:洪汶宜 e-mail:wyhung@ncu.edu.tw 計畫參與人員:鍾承哲、黃俊學、王怡琇 執行單位:國立中央大學土木工程學系

#### 摘要

自然沉積土壤是非均匀且非均質材料,斷層錯動 過程中,剪裂帶會通過強度與特性不同的土層,活動 斷層錯動多伴隨永久的地表變形,並損壞鄰近斷層之 結構物與地下維生管線,為了避免上述災損,過去國 內外已有正逆斷層錯動針對上覆砂層或黏土層的相 關研究成果,並制定建築物的安全規範。本研究以離 心模型模擬 60 度傾角之正、逆斷層錯動,通過總厚 度 8 m 之較高強度膠結砂土層與石英砂土層,兩土 層厚度比為 7:3,並於地表設置高 9.6 m、接觸應力為 48 kPa、分別具有樁基礎與淺基礎之建築物,土層中 埋設長 58.56 m、管徑 0.16 m 之鋁管線以模擬維生 管線。試驗過程中記錄錯動期間的剪裂帶發展、斷層 錯動高度、建築物傾斜角變量與地表高程變化的關係。

離心模型試驗結果顯示,在正斷層與逆斷層錯動 狀況下,樁基礎建築物雖然會傾斜,但未發生翻覆; 在錯動率 5%以下時,各試驗條件下建築物角變量 皆超過1/100 之規定,建築物已達危險但可扶正的程 度;具樁基礎建築物在正、逆斷層錯動率到達 50% 時皆未發生翻覆,但具淺基礎建築物於正斷層錯動率 18.6%、逆斷層錯動率 46.0% 時發生翻覆;在逆斷 層試驗中地下管線的變形趨近於地表變形趨勢,正斷 層試驗則因土層滑落使管線露出地表;具淺基礎建築 物在逆斷層錯動時,地表變形水平範圍約2倍的總土 層厚度。

**關鍵詞**:離心模型試驗、斷層錯動模擬、結構物、管線。

#### Abstract

Permanent ground displacement due to the fault slip is a concern to infrastructures adjacent to the active fault. In addition, natural soil deposit is rarely homogeneous and uniform. Some part of the soil has higher strength layers, it would cause some complex behavior while the fault rupture is propagating through both soft rock and soil strata.

In this study, four centrifuge modeling tests were utilized in an 80 g centrifugal acceleration field to simulates the reverse fault and normal fault condition for investigating the mechanism of the effect of the soft rock layer underneath on the surface of the sandy soil layer. The soft rock layer was simulated by using the accelerated sand-cement mixture. The ratio of the sand layer to the soft rock layer is 7:3, and the thickness of the model soil layer is 100 mm, a total height of the model is 100 mm, corresponding to 8 meters in the prototype scale. A 9.6 meters height of different foundation types of buildings (shallow foundation and pile foundation) were put on the ground surface, and the contact stress of the building is 48 kPa. In addition, an aluminum alloy pipeline with a diameter of 0.16 m was buried in the soil layer.

The results indicate that the building with pile foundation would be inclined but not overturn after normal and reverse fault slipped. The building inclination angle is over 1/100 before the fault slip distance is less than 5% of the total fault slip distance. However, the building with the pile foundation was not overturned even when the fault slip distance reaches 50% of the total fault slip distance. The deformation behavior of the buried pipeline is similar to the deformation behavior of the soil stratum. In the normal fault case, one end of the pipeline will be exposed to the ground surface. In the reverse fault simulation, the model with slab foundation building has a larger ground surface influence range of 200% of total strata thickness.

**Keywords:** Centrifuge modelling, fault, building, pipeline.

#### I. 前言

斷層錯動時會造成強烈的震動,隨著震源深度、距 離及地震規模等不同,會對我們周遭的環境產生不同的 震度,同時斷層錯動會引致地表的永久變形,導致斷層 帶附近的建築結構物損壞,甚至造成自來水、瓦斯、電 力等地下維生管線的斷裂與失效,進而影響人民的生命 安全與財產損失。為了防止上述結構物遭受損壞,許多 國家對斷層線附近結構物制定相關的安全規範,國內也 已訂定相關規範例如:建築技術規範設計施工規範、實 施區域計畫地區建築管理辦法及內政部營建署基礎構 造設計規範等,但以現有規範皆是以禁建、不得開發等 方式應對,因此透過多樣化的研究,可以提供國土規劃 更多參考的依據,減輕斷層帶上地表變形引致的威脅與 損失。

一般情況下不容易觀察斷層錯動後之地質剖面,本 研究使用中央大學地工離心機進行縮尺物理模型試驗, 在離心模型試驗中配合縮尺模型(scaled model)與原型 (prototype)間的模型相似律(modeling similitude),即能模 擬與原型相同之應力應變狀況,透過物理模型模擬斷層 線上不同基礎型態的三層樓建築物,當斷層錯動時,記 錄淺基礎與樁基礎建築物的傾斜角變量、剪裂帶的發展 情形、地表影響範圍與地層橫剖面剪裂帶的發展過程。 另外,亦使用數值模擬使用顆粒流程式 PFC<sup>2D</sup> (Particle Flow Code in 2 Dimensions)進行離心模型模擬的驗證, 以期未來能以數值模型進行更多正、逆斷層的參數研究, 包括土層厚度、斷層傾角、不同地表構造物對剪裂帶與 地表變形的互制關係。

## Ⅱ. 試驗設備、材料及條件

本研究以 1/80 縮尺模型在 80 倍地球重力加速度的 離心力場中進行實驗,模擬 60 度傾角之正、逆斷層錯 動,通過總厚度 100 mm (模擬原型現場 8 m)之較高強度 膠結砂土層與石英砂土層,兩土層厚度比為 7:3,並於地 表設置高 120 mm(模擬現場高 9.6 m 建築物)、接觸應力 為 48 kPa、分別具有樁基礎與淺基礎之建築物,地表土 層 中埋設鋁管線模擬現場維生管線因斷從錯動引致的 變形。試驗過程中記錄錯動期間的剪裂帶發展、斷層錯 動高度、建築物傾斜角變量與地表高程變化的關係。試 驗設備包含地工離心機、斷層錯動模擬試驗箱、移動式 實降儀、地表高程掃瞄系統、攝影系統、試驗材料等, 簡單說明如下:

一、 中大地工離心機與斷層錯動模擬試驗箱

中央大學梁式地工離心機 (NCU geotechnical centrifuge),標稱旋轉半徑為 3 m,最大承載容量 (capacity)為 100 g-ton,即離心機荷重 1 ton 時,可 提供之最大重力場為 100 g。斷層錯動模擬試驗箱, 試驗箱材料為鋁合金,試驗箱外徑為 1000 mm (L) × 405 mm (W) × 675 mm (H),逆斷層土層模型準 備空間為 740 mm (L) × 300 mm (W) × 325 mm (H); 正斷層土層模型準備空間為為 705 mm (L) × 300 mm (W) × 255 mm (H)。

斷層錯動模擬係以 220V 的 AC 伺服馬達驅動 渦輪減速機,使機械機構沿 60 度方向上下錯動。 220V 的 AC 伺服馬達,可於 0~2.5 mm/min 之間調 節斷層錯動速率,最大垂直錯動量為 50 mm,於 80g 離心力場中可模擬現場 4 m 垂直錯動量。

二、 移動式 實降機

模型砂土層以空氣中實降法(air pluviation)準備,利用不同落距與管徑,可以在短時間內準備不同相對密度的乾砂試體,本研究利用 48 公分之落距,製作離心模型砂土層的單位重為 1587 kg/m<sup>3</sup>、 相對密度 70%。

三、 地表高程掃瞄系統

地表高程掃瞄系統由運輸帶、滑軌、馬達及雨 支雷射位移計構成,馬達能使 LDT 在滑軌上以 75 mm/s 的速率水平移動,LDT 分別量測 x 方向及 y 方向的距離,在離心模型試驗過程中,每分鐘記錄 地表高程變化及建築模型的傾斜角度。

四、 攝影系統

攝影系統安裝在試驗箱一側的壓克力視窗外, 因焦距較短,可觀察的視野約 210 mm 寬、200 mm 高,試驗中斷層錯動速率不快,所以相機以垂直位 移每 0.125 mm 紀錄一次影像,可於控制室同步觀 察並記錄剪裂帶的發展情形。

五、 試驗材料

試驗材料包含石英砂、色砂及水泥混石英砂作 為製作離心模型土層的材料,石英砂基本物性參數 如表一,土壤顆粒形狀為角狀,粒徑分佈圖如圖一 所示,依統一土壤分類法為不良級配砂(SP),相 對密度 70%時之摩擦角約為 35.67 度、平均粒徑 (D<sub>50</sub>)為 0.19 mm、最大與最小乾單位重分別為 16.3 kN/m<sup>3</sup> 及 13.67 kN/m<sup>3</sup>。使用黑色色砂為金鋼砂, 試驗中為了清楚觀察砂土層的地層變化作為分層 之用,砂層中每 8 mm 會鋪設一層 2 mm 的黑色砂 層,其基本物性參數如表二,相對密度 70%時之摩 擦角約為 47.30 度、平均粒徑(D<sub>50</sub>)為 0.15 mm。

使用卜特蘭水泥第 I 型以及水泥急結劑, 搭配 石英砂進行拌合, 試驗配比以 5%水泥混合 95%石 英砂, 再加入石英砂總重 4.5%的純水及 0.1%純水 總重的水泥急結劑均勻拌合, 作為模擬軟岩層之材 料, 其養護七天之無圍壓縮強度為 0.98 MPa, 參考 Bieniawski (1984)的岩石無圍壓縮強度分類, 其強 度接近分類中的軟岩強度, 本研究中將該混和材料 稱為軟岩層或高強度膠結土壤。

材料性質 數值/說明 形狀 角狀 平均粒徑 D50 (mm) 0.19 有效粒徑 D10 (mm) 0.15 16.30 最大乾密度  $\gamma_{d,max}$  (kN/m<sup>3</sup>) 13.67 最小乾密度  $\gamma_{d,min}$  (kN/m<sup>3</sup>) 內摩擦角 (Degrees) (Dr = 70%) 35.67 2.65 比重 Gs 統一土壤分類 不良及配 (SP)





圖一、石英砂粒徑分佈曲線圖

表二、黑色砂基本物性

材料性質	數值/說明
平均粒徑 D <sub>50</sub> (mm)	0.15
有效粒徑 D <sub>10</sub> (mm)	0.11
最大乾密度 $\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.90
最小乾密度 $\gamma_{d,min}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13.60
內摩擦角 (Degrees) (D <sub>r</sub> = 70%)	47.30
比重 Gs	3.26
統一土壤分類	不良及配 (SP)

六、 建築模型設計與管線

本研究參考真實大型廠房設計圖,建築物總樓 高 9.6 m (模型尺寸 120 mm), 1 樓地板面積 25552.5 m<sup>2</sup>,總重 58499 頓,參照建築設計規範增 加活載重模擬與土壤間具有較高接觸應力之建築 物,一樓層樓板加入活載重 1500 kg/m<sup>2</sup>,二、三樓 則加入活載重 600 kg/m<sup>2</sup>,總接觸應力圍 48.83 kPa, 設計完成之建築物模型外觀如圖二,建築物質心高 度為 3.45 m (模型尺 3.1 mm)。地下管線以 732 mm、 直徑 2 mm 之鋁合金條模擬現場 58.56 m、管徑 0.16 m 維生管線。



圖三、管線外觀

#### III. 結果與討論

本研究包含四組離心模型試驗,試驗代號與試驗 條件整理於表三中,試驗代號 R 及 N 分別代表逆斷 層(reverse fault, R)及正斷層(normal fault, N),不同基 礎型式構造物的代號為 S 及 P,分別代表淺基礎 (shallow foundation, S)及椿基礎(pile foundation, P)。第 一組試驗為正斷層淺基礎(NS)試驗,第二組試驗為正 斷層樁基礎(NP)試驗,第三組試驗為逆斷層樁基礎(RP)試驗,第四組試驗為逆斷層樁基礎(RP)試驗,第四組試驗為逆斷層樁基礎(RP)試驗,淺 基礎試驗配置如圖四;樁基礎建築物試驗配置如圖五。 試驗中斷層錯動速率以 2.3 mm/min 進行,斷層錯動 直到建築物翻覆或垂直錯動量到達 48 mm 即試驗結 束。

表三、試驗代號與試驗條件

試驗代號	斷層型態	基礎型式	建築物位置	
NS	正斷層	淺基礎	S/B=0.5	
NP	正斷層	樁基礎	S/B=0.5	
RS	逆斷層	淺基礎	S/B=0.5	
RP	逆斷層	樁基礎	S/B=0.5	



圖四、淺基礎建築物試驗配置示意圖



回<u>山</u>· 裕 巫 啶 廷 采 初 讯 橛 癿 且 小 息

#### 一、 正斷層試驗結果

#### (1) 建築物角變量

由圖六正斷層建築物角變量比較圖,可見樁基礎 建築物角變量到一定程度後就保持不變,而淺基礎建 築物角變量則是到錯動率 7.9%後急遽增加,這可能 是因為淺基礎下方因載重造成的應力球根,雖然使剪 裂帶位置偏移,但仍發展到結構物下方,導致建築物 隨著地表變動而產生較大角變量,進而導致建築物翻 覆。具樁基礎之建築物,在正斷層上盤滑落時,剪裂 帶沿樁基礎發展至地表,結構物在地表變形時並無太 大傾斜。

(2) 剪裂帶發展

圖七與圖八可見剪裂帶發展情形,在淺基礎試驗 中,剪裂帶發展呈現多道剪裂痕,軟岩層明顯斷裂成 四部份,且多斜向發展至建築物下方,產生較大的差 異沉陷引至建築物翻覆。而樁基礎試驗中,軟岩層裂 成三部份,因樁基礎的圍束與建築物載重產生的應力 球根,使剪裂帶提前向上發展,在建築物前(上盤側) 延伸至地表。

(3) 地表影響範圍

圖十二及圖十三可觀察地表上影響範圍,由高程 掃描結果比較可以觀察到,在試驗結束時,影響範圍 大部分在上盤地表,淺基礎建築物翻覆時,以及樁基 礎建築物於是驗結束時,於下盤建築物後方地表多保 持平坦。

#### 二、 逆斷層試驗結果

(1) 建築物角變量

圖九顯示,兩組試驗中的角變量趨勢相同,初始 大約到錯動率5%時,建築物產生5度以下的角變量, 但具樁基礎的建築物,因為底部錨錠在軟岩層中,使 其傾斜程度隨錯動率增加而近似線性增加,雖有較大 傾斜量但沒有翻覆,且試驗剖面可以看到樁基礎可抑 制剪力帶發展至結構物後方地表;具淺基礎建築物則 是受地表砂土層變形的影響,傾斜程度隨錯動率增加 而非線性大量增加,直至建築物翻覆。過程中,有局 部上部砂土流入軟岩層裂隙中,使地表有些許不均勻 沉陷。

(2) 剪裂帶發展

圖十與圖十一可觀察逆斷層試驗中土層剪裂帶 發展情形,剪裂帶發展情形兩組相似,都在建築物下 方發展,樁基礎可以有效限制剪裂帶發展,淺基礎建 築物仍然造成翻覆。

,逆斷層錯動時,

(3) 地表影響範圍

圖十四及圖十五可觀察逆斷層對地表的影響範 圍,由高程掃描結果比較,在試驗中止之錯動高度, 影響範圍主要位在下盤部份,在下盤建築物後方可觀 察到局部地表隆起,而位在近建築物上盤側的地表砂 層有所沉陷。以總土層厚度正規畫評估地表水平影響 範圍,淺基礎建築物試驗的水平影響範圍大約是 2.65 約土層厚度,而樁基礎試驗的影響範圍大約是 2.55 倍 的土層厚度,所以淺基礎在比較沒有辦法限制剪裂帶 發展的情況下,使錯動後地表影響範圍較大。



圖六、正斷層建築物角變量比較圖



圖七、正斷層淺基礎試驗完成側視圖



圖八、正斷層樁基礎試驗完成側視圖





圖十、逆斷層淺基礎試驗完成側視圖



圖十一、逆斷層樁基礎試驗完成側視圖





#### 三、 數值模擬結果

本研究使用離散元素(Discrete Element Method, 簡稱 DEM)數值模擬程式 Particle Flow Code in 2 Dimensions (PFC2D),建立模擬物理模型的數值模型, 驗證輸入參數之合理性,並初步建立具淺基礎與樁基 礎建築物於複合土層之斷層錯動模擬模型,並進行輸 入參數的研究。本研究數值模型建構流程如圖十六所 示,為了確保能可靠的模擬物理模型試驗行為,故在 進行數值離心模型模擬前,以無圍壓縮試驗數值模擬 對土層參數進行校正,所建立之無圍壓縮試驗模型尺 寸為高100mm、寬50mm,模型外觀如圖十七所示。 試體長軸方向左、右為自由面,模型試體上、下採用 無摩擦之剛性牆邊界,係使用位移控制方式,上下同 時施加荷重,故設定在模型試體頂部與底部以垂直軸 向加載,施以0.005 m/s 速率往中心移動。





# 圖十七、UCS 單壓試驗模型 表四、數值模型輸入參數表

項	[目	符號	數值	單位
	顆粒單位重	ρ	2650	kg/m <sup>3</sup>
物理性質參數	平均顆粒粒徑	R	$0.675\times10^{-3}$	m
	孔隙率	n	0.165	GPa
	楊氏模數	E <sub>c</sub>	0.2	GPa
接觸勁度模式	顆粒勁度比	k <sub>s</sub> /k <sub>n</sub>	1.3	-
滑動模式	摩擦係數	μ	0.7	-
	半徑放大係數	λ	1.0	-
	鍵結楊氏模數	Ep	0.2	GPa
鍵結模式 (平行鍵結)	鍵結之勁度比	$k_{sp}/k_{np}$	1.3	-
	鍵結抗張強度	$\sigma_{np}$	1.4	MPa
	键结抗前端度	σ	1.4	MPa

#### (1) 數值單壓試驗結果

為了確保數值模擬的正確性,以相同參數進行十 次隨機顆粒生成,並上下施加位移以模擬無圍壓縮試 驗(UCS test),並以模擬結果之平均求得數值軟岩之楊 氏模數、柏松比與單壓強度。模擬結果顯示,楊氏模 數平均值為 0.2 GPa、單壓強度平均值為 0.94 MPa、 柏松比平均值為 0.21,結果亦與物理試驗楊氏模數 0.2 GPa 與單壓強度 0.98 MPa 相符,PFC<sup>2D</sup>模擬 UCS 試 驗結果的應力應變關係曲線如圖十八所示,約 70%的 模擬結果外觀如圖十九所示,40%的隨機顆粒生成模 型的破壞模式,亦有發生上下邊界局部破壞的情況。 綜合以上結果,以數值模型進行模擬時,在固定柏松 筆情況下,顆粒隨機產生的模型須先進行行為驗證, 採能準確模擬離心模型試驗中之軟岩層的力學行為。



圖十八、PFC<sup>2D</sup>之 UCS 試驗數據結果



圖十九、PFC 模擬 UCS 試驗結果外觀

(2) 自由場錯動結果

土層顆粒以不同隨機方式排列會造成上覆土層的 剪裂帶發展有所不同。進行六組不同顆粒排列狀態之 斷層自由場土層錯動模擬,各自由場模型剪裂帶發展 結果如圖二十與表四所示,根據地表之影響範圍與剪 裂帶的發展結果,在六組數值模擬試驗中,即產生出 一組與離心模型試驗相近之結果。





(f) 斷層自由場模型6



(g) 離心模型試驗結果(Soegianto, 2020) 圖二十、自由場模型比較

#### 表四、地表總影響範圍比較表(%H)

模型	模型	模型	模型	模型	模型	離心
1	2	3	4	5	6	試驗
397.3	232.9	143.1	395.1	419.1	391.9	184.7

#### (3) 淺基礎建築物

淺基礎建築物之數值模擬結果如圖二十一(a)所示, 數值模型使用球顆粒模擬砂顆粒,在逆斷層錯動後建築 物左側角隅附近顆粒發生旋轉,造成建築物左側向土層 陷落,建築物整體向左側上盤處傾斜;實際上離心模型 試驗使用的石英砂其顆粒為角狀,建築物左側因逆斷層 向上頂昇,使建築物向右側下盤處傾斜,數值與物理模 型結果相異。因此,在數值模型中,對砂土層表層顆粒 間給予十分之一軟岩層顆粒鍵結強度的設定,嘗試限制 地表砂土的轉動,數值模型剪裂帶發展結果如圖二十一 所示,還是無法抑制結構物貫入剪裂帶的情況,值得未 來後續探討。數值淺基礎建築物之地表總影響範圍為2.4 倍總土層厚度;鍵結砂土之淺基礎建築物之地表總影響 範圍為 2.5 倍總土層厚度。建築物傾斜角變量關係如圖 二十二所示,建築物的傾斜趨勢與離心模型結果有所不 同,數值模擬之建築物在錯動過程中貫入土層,對建築 物底部最大的水平位移量分別為:淺基礎數值模型 35.0%H(58.3%B)、砂土表層鍵結模型27.3%H(45.5%B)。





(4) 樁基礎建築物

樁基礎建築物數值模型之樁基礎的楊氏係數,分別 以混凝土與10倍混凝土(剛性樁基礎)參數進行模擬,再 跟離心模型試驗結果進行比較,試驗剪裂帶發展結果如 圖二十三所示。混凝土樁基礎之地表影響範圍為2.3倍 總土層厚度,剛性樁基礎建築物之地表總影響範圍為3.8 倍總土層厚度;所造成地表影響範圍分別大於離心模型 試驗結果1.4倍及2.2倍。樁基礎建築物傾斜角變量與 錯動率關係如圖二十四所示,當錯動量為48.9%時,剛 性樁基礎造成建築物傾斜角變量為23.4度。建築物的水平位移 量分別為:離心模型39.5%H(65.8%B)、剛性樁基礎 59.8%H(99.7%B)及混凝土樁基礎:44.6%H(74.3%B)。



(b) 北风工宿金延矾弧临不 圖二十三、數值模型樁基礎試驗結果



IV. 結論

#### 一、 離心模型試驗

- 離心模型試驗中,在正斷層與逆斷層錯動率 50%以下之狀況,樁基礎建築物雖然會傾斜, 但未發生翻覆。
- 2. 在錯動率 5%以下時,各試驗條件下建築物 角變量皆超過新北市建築物工程施工損壞鄰 房鑑定手冊 1/100 之規定,建築物已達危險但 可扶正的程度,樁基礎建築物在正、逆斷層錯 動率到達 50%時皆未發生翻覆,但淺基礎建 築物於正斷層錯動率 18.6%、逆斷層錯動率 46.0%時發生翻覆。
- 理設之地下管線的變形行為,在逆斷層試驗中 如同地表的變形變化,正斷層試驗則因上層滑 落,易使管線露出地表。
- 沒基礎結構物在逆斷層錯動時會有較大的地 表變型範圍,其影響範圍達2倍的總土層厚 度。

## 二、 數值模擬結論

- 在以 PFC2D 進行數值模擬之前,需先以無圍 壓縮實驗結果校正砂土層與軟岩層的設定參 數,輸入參數可參考本研究之建議。
- 以不同顆粒排列組成條件進行錯動模擬,會造成不同的剪裂帶發展結果,因此土層柏松比設 定後自由生成之土層,須先進行行為之驗證, 才可用於實際的模擬。
- 剛性樁基礎試驗之地表總影響範圍為 3.8 倍總 土層厚度;混凝土樁之影響範圍為 2.3 倍總土 層厚度,所造成地表影響範圍分別大於離心模 型試驗結果 2.2 倍及 1.4 倍。
- 樁基礎勁度高於土層強度會造成建築物有更 大的傾斜量,與更大的地表影響範圍。

# 參考文獻

 Ahmadi, M., Moosavi, M., and Jafari, M., K., "Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through wet granular soil," *Engineering Geology*, Vol. 239, pp. 229-240 (2018).

- [2] Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and Nahas, A. El., "Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 3, pp. 359-370, (2009).
- [3] Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., and Towhata, I., "Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 3, pp. 505-519 (2016).
- [4] Bonilla, M. G., "Evaluation of potential surface faulting and other tectonic deformation," U.S. Geological Survey, Open-File Report 82-732, Version 1.1 (1982).
- [5] Bransby, M. F., Davies, M. C. R., and Nahas, A. El., "Centrifuge modeling of reverse faultfoundation interaction," *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, pp. 607-628 (2008b).
- [6] Bray, J.D., Seed, R.B., Cluff, L.S., and Seed, H.B. "Earthquake fault rupture propagation through soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 3, pp.43–561 (1994).
- [7] Bray, J. D., Seed, R. B., and Seed, H. B., "Analysis of earthquake fault ruptures propagation through cohesive soil," *Journal of geotechnical engineering*, Vol. 120, pp. 562-580 (1994b).
- [8] Chang, Y.Y., Lee, C. J., Hung W. C., and Hung, W. J. "Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip," *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 79-89 (2013).
- [9] Chen, Y. G., Chen, W. S., Lee, J. C., Lee, Y. H., Lee, C. T., Chang, H. C., and Lo, C. H., "Surface rupture of 1999 Chi-Chi earthquake yields insights on active tectonics of central Taiwan," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 91, pp. 977-985 (2001).
- [10] Demircia, H.E., Bhattacharyaa, S. Karamitrosb, D., and Alexander, N., "Experimental and numerical modelling of buried pipelines crossing reverse faults," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.114, pp.198-214 (2018).
- [11] Faccioli, E., Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Callerio, A., and Paolucci, R., "Fault rupture– foundation interaction:selected case histories," *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 557-583 (2008).
- [12] Huang, C., Chan, Y.C., Hu, J.C., Angelier, J., and Lee, J.C., "Detailed surface co-seismic displacement of the 1999 Chi-Chi earthquake in western Taiwan and implication of fault geometry in the shallow subsurface," *Journal of Structural Geology*, Vol. 30, pp. 1167-1176, (2008).
- [13] Jalali, H. H., Rofooei, F. R., Attari, N. K. A., and Samadian, M., "Experimental and finite element study of the revere faulting effects on buried continuous steel gas pipelines", *Soil Dynamics* and Earthquake Engineering, Vol. 86, pp. 1-14

(2016).

- [14] Kanji, M. A., "Critical Issues in soft rocks," Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 6, pp. 186-195 (2014).
- [15] Karamitros, D., Bouckovalas., G., and Kouretzis, G., "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 200–211 (2007).
- [16] Lin, M. L., Chung, C. F., Jeng, F. S., and Yao, T. C., "The deofrmation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels," *Engineering Geology*, Vol. 92, pp. 110-132 (2007).
- [17] Rojhani, M., Moradi, M., Galandarzadeh, A., and Takada, S., "Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 49, No. 6, pp. 659-670 (2012).
- [18] Taylor, R. N., "Centrifuges in modelling: principles and scale effects," *Geotechnical* centrifuge technology, pp.19-33(1995).
- [19] Yao, C. F., and Takemura, J., "Using laser displacement transducer scanning technique in centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 121, pp. 219-232 (2019).
- [20] 李崇正,「離心模型試驗在大地工程之應用」, 地工技術,第36集,第76-91頁(1991)。
- [21] 林啟文、盧詩丁、陳文山,「臺灣活動斷層分 布圖 2012 年版說明書」,經濟部中央地質調 查所特刊,第 26 號,第 1-30 頁(2012)。
- [22] 林啟文、陳文山、饒瑞鈞,「台灣活動斷層調 查地近期發展」,經濟部中央地質調查所特 刊,第18號,第85-110頁(2007)。
- [23] 盧詩丁、陳柏村、許晉瑋,「臺灣活動斷層研 究及未來發展」,大地技師,第15期,第14-25頁(2017)。
- [24] 李正兆、張瑞誠、陳斗生,台北斷層調查-南港某工址現地調查為例,經濟部中央地質 調查所特刊,第11號,第181-205頁(1999)。
- [25] 張有毅,「以離心模型試驗及個別元素法評估正斷層和逆斷層錯動地表及地下變形」, 博士論文,國立中央大學土木工程學系,桃 園(2013)。
- [26] 張庭傑,「以離心模型模擬正斷層及逆斷層 通過複合土層引致的地表變形特性」,碩士 論文,國立中央大學土木工程學系,桃園 (2014)。
- [27] 鍾春富,「逆斷層錯動引致上覆土層變形行為及對結構物影響之研究」,國立臺灣大學 土木工程學研究所博士論文,台北(2007)。

# 核三廠蒸汽產生器(SG)熱交換管 SCC 劣化研究與結構限值評估(1/2) Investigation of SCC degradation and structural limit for the Maanshan SG heat exchange tubes (1/2)

計畫編號:109-2623-E-007-003-NU 計畫主持人:馮玉明 e-mail:ymferng@ess.nthu.edu.tw 計畫共同主持人:鄧文俊 計畫參與人員:黃品鈞、陳昱瑋 執行單位:國立清華大學工程與系統科學系

# 摘要

蒸汽產生器(Steam Generator, SG)為壓水式反應器 (Pressurized Water Reactor, PWR)中之重要組件之一,假 設 SG 管束發生破管事故,會造成一次側爐水流失進而 可能影響燃料棒之完整性與輻射外洩等事故發生。核三 廠一號機 EOC-24 大修時, SG 管束 A 台熱交換管熱端 之擴管過渡區域發現一處周向一次側應力腐蝕龜裂 (Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC), 雖然 加裝穩定器(Stabilizer)並予以塞管處理而順利解決問題, 但隨著 SG 之運轉, SCC 出現於其他管束區域的機率亦 隨之增加,可能會對蒸汽產生器的運轉有一定的影響。 因此,本計畫利用擴展有限元素法(eXtended Finite Element Method, XFEM)[1]結合牽引力分離法(Traction Separation Law, T-S law)研究管束的 SCC 裂紋成長特性, 並利用 Mohanty 等人[2]分析結果進行驗證 XFEM 分析 法的可行性,同時以簡易的平板模型探討 XFEM 與傳統 破壞力學的應變能量釋放率(Strain Energy Release Rate, G)差異,其比較之結果均有良好的匹配性,最大的誤差 不超過10%。最後,本研究在第一個階段,利用校驗的 XFEM 模式分析管束周向與軸向 SCC 的成長特性。

關鍵詞:蒸汽產生器、擴展有限元素法、應力腐蝕裂紋

#### Abstract

Steam Generator (SG) is an important component of Pressurized Water Reactor (PWR), and its structural integrity is also vital for the safety operation of PWR. If SG tubes are assumed to rupture due to crack growth, it may result in loss of RCS and challenge the fuel rod integrity. A primary water stress corrosion cracking (PWSCC) had been measured in the expansion transition region of hot-leg tube of SG-A during the EOC24 outage of Maanshan nuclear power plant. This problem can be fixed using the stabilizer and tube plugging. However the possibility of SCC might increase with the increasing operation time, which will challenge the SG tube integrity. This project investigates the SCC characteristics using the eXtended Finite Element Method (XFEM) and Traction Separation Law (T-S law). The predicted results using the XFEM methodology is compared with the simulation ones from Mohanty et.al [2] and is also assessed against with the traditional fracture mechanics using the Strain Energy Release Rate in a simple plate. The compared results show that the maximum error is less than 10%. Finally, this established method is used to analyze the circumferential

and axial SCC for a tube.

Keywords: SG, XFEM, SCC.

# I. 前言

核三廠為壓水式反應爐(Pressurized Water Reactor, PWR),而蒸汽產生器(Steam generator, SG)乃為 PWR 的 重要組件之一。SG 的功用為將一次側的熱水透過熱交 換管傳遞至二次側的飼水(Feedwater),進而產生蒸汽並 帶動汽渦輪機發電,同時 SG 也可做為防止輻射外釋的 壓力邊界之一。由於 SG 管束位於壓力邊界上,所以必 須選用特定的材料來滿足 PWR 高溫高壓的操作環境, 核三廠的 SG 管束選用 Alloy 600TT(Thermal Treatment) 鎳基合金作為材料,在過去數十年間對於 PWR 的運轉 環境具有良好的適應性,不過由於長期處於高溫高壓的 環境下,一次側的水質也具有輻射線以及沉積物等侵蝕 效應,而隨著運轉年份的增加,SG 管束劣化的問題就 值得研究。

核三廠於一號機 EOC24 大修時, SG 擴管區有一根 熱換管發現 PWSCC 劣化現象,雖經西屋公司加裝 stablizer 並予以塞管處理而順利解決問題,隨著 SG 運轉 之老化,亦有可能於其他區域出現 SCC,進而對於 SG 運轉安全有一定的影響。即使在核三廠還有幾年的運轉 時間,核能安全仍是我們應該注意與確保的。由是之故, 對於管束 SCC 相關分析研究,有其一定的急迫與需要性。 本研究擬以兩年的時間,進行 SCC 成長與管束結構限值 相關之研究,第一年建立 SCC 之擴展有限元素法 (eXtended Finite Element Method, XFEM)分析模式並結 合相關應力理論(牽引力分離法, Traction Separation Law, T-S law)與程式研究 SG 熱交換管 SCC 劣化成長特性與 成長速率,並利用前人研究成果與傳統破壞力學分析進 行相互比對,校驗本模式之合理性;第二年則進而探討 不同裂紋形狀、長度與深度等參數對 SCC 裂紋成長以及 管路結構完整性之影響。進而從學術的觀點,研究管束 SCC 劣化特性與其結構限值,進而與 EPRI 所提供的相 關經驗式進行研究與比對,以提供管制單位維護運轉安 全管制之參考。而本論文乃是呈現第一年之研究成果。

# Ⅱ. 理論模式介紹

#### 2.1 破壞力學理論

在傳統材料力學上,透過材料的性質例如:楊氏係數 和應力應變關係,可以計算出材料受力後的變形模式, 但任何材料都有發生損傷的情形,因此破壞力學可用於 預測材料的可用壽命(Lifetime)。基於線彈性破壞力學上, 裂紋可能會承受三種不同類型的負載:Mode I Fracture: 開放型破壞模式、Mode II Fracture:滑移型破壞模式以 及 Mode III Fracture:撕裂型破壞模式。

在破壞力學上,可以藉由計算應力強度因子(Stress Intensity Factor, K)來評估裂紋尖端的應力情形,考慮到 的裂紋尖端於無窮長度之平板受力詳圖如圖 2-1 所示, 應力強度因子取決於物體的幾何形狀、裂紋的尺寸以及 負載的大小和分布,其各種模式下的應力強度因子公式 如下:

$$K_{I} = \lim_{r \to 0} (\sqrt{2\pi r} \sigma_{yy}) f_{I}(\theta) = \sigma_{yy} \sqrt{2\pi r} \quad , \quad \sigma_{yy} = \sigma_{yy}(r, \theta = 0)$$

$$(2-1)$$

$$K_{II} = \lim_{r \to 0} (\sqrt{2\pi r} \tau_{xy}) f_{II}(\theta) = \tau_{xy} \sqrt{2\pi r} \quad , \quad \tau_{xy} = \tau_{xy} (r, \theta = 0)$$

$$K_{III} = \lim_{r \to 0} (\sqrt{2\pi r} \tau_{yz}) f_{III}(\theta) = \tau_{yz} \sqrt{2\pi r} \quad , \quad \tau_{yz} = \tau_{yz} \sqrt{2\pi r}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_{\infty}\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)$$
(2-4)



圖 2-1 裂紋在無窮長度之平板受力示意圖[3]

 $K_i$ (i = I, II, III)可用於決定負載為靜態或是動態的斷裂應力(Fracture Stress), $K_{ic}$ (i = I, II, III)則稱為材料的破壞韌性(Fracture Toughness),不同於應力強度因子取決於裂紋尖端周圍的應力場,破壞韌性是材料參數的一種,是一種表達材料對裂紋擴展的抵抗程度之數值,當結構的應力強度因子大於破壞韌性,也就是 $K_i > K_{ic}$ 時,材料將會發生破壞。

而應變能釋放率(Strain Energy Release Rate, G)被稱 作裂紋驅動力(Crack driving force),其和應力強度因 子以及彈性模數相關,關係式為:

$$G_{i} = \frac{K_{i}^{2}}{\frac{E}{(1-v^{2})}} \quad i = I, II, III$$
(2-5)

其中,

E = 彈性模數(Elastic modulus of elasticity) v = 蒲松比(Poisson's ratio)

#### 2.2 J 積分理論

線彈性破壞力學僅適用於特殊情況下之破壞行為, 當材料進入塑性區後線彈性破壞力學可能無法有效地 描述裂紋尖端的應力行為,因此J積分由 James R. Rice 於 1968 年所提出[4],其利用輪廓積分(Contour Integral) 的方式避開裂紋尖端複雜的應力-應變場(Stress-Strain Field) 如圖 2-2 所示,具有路徑獨立(Path Independent) 的特性,並且能有效地描述彈塑性材料的破壞行為。J 積分所計算出的應變能量釋放率,即為裂紋成長過程中 釋放至裂紋尖端的能量。而裂紋前端之二維輪廓積分(J 積分)公式如下:

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - \vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds)$$
(2-6)

其中,

W為彈性應變能量密度(Elastic Strain Energy Density)  $\vec{u}$ 為位移向量 ds為沿著輪廓的微小長度 N 為輪廓Г的法線  $\vec{T} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds$ 為輸入作功  $\vec{T}$ 為牽引力向量作用於Г表面 Г為任意的逆時針方向輪廓



#### 2.3 擴展有限元素法理論

傳統有限元素法(Finite Element Method, FEM)在模擬結構的破壞分析時,裂紋位置必須沿著元素邊界,並且在裂紋尖端附近的網格需要特別加密,最重要的是裂紋尖端的網格需要隨著裂紋成長而重新設置,因此由Belytschko等人[]提出擴展有限元素法(eXtended Finite Element Method, XFEM), XFEM 改進了不連續函數和裂紋尖端位移場函數(Crack tip function)來模擬任意初始裂紋的成長路徑,如圖 2-3 顯示了 Heaviside Function 與近似裂紋尖端位移場函數兩種函數的示意圖[5],並且不需要重新劃分網格也不需要在裂紋尖端周圍建立類似環狀的網格,進而簡化模擬的過程,其基本公式如下:  $u = \sum_{i}^{N} N_{i}(x) [u_{i} + H(x)\alpha_{i} + \sum_{\alpha=1}^{4} F_{\alpha}(x) b_{i}^{\alpha}]$  (2-7)

$$H(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & if \ (x - x^*) \ge 0\\ -1 & otherwise \end{cases}$$
(2-8)

$$F_{\alpha}(x) = \left[\sqrt{rsin\frac{\theta}{2}}, \sqrt{rcos\frac{\theta}{2}}, \sqrt{rsin\frac{\theta}{2}}sin\theta, \sqrt{rcos\frac{\theta}{2}}sin\theta\right] (2-9)$$

$$\ddagger \psi ,$$

u 為節點函數 H(x)為 Heaviside Function 用於描述裂紋的上下 表面,其值只存在+1 or -1  $F_{\alpha}(x)$ 為近似裂紋尖端位移場函數  $N_{I}(x)$ 為節點形狀函數  $u_{I}$ 表示節點的自由度  $\alpha_{I}$ 為不連續裂紋函數的節點自由度向量  $b_{I}$ 為近似裂紋尖端的節點自由度向量



圖 2-3 Heaviside Function 與 $F_{\alpha}(x)$  示意圖[5]

XFEM 類似於一種計算網格節點位移的數學模型, 藉由耦合水平集方法(Level-Set Method, LSM)可以去捕 捉到完整裂紋成長的路徑,水平集方法為一種分析介面 運動的數值分析方法,裂紋幾何通常會由兩個無符號距 離函數所定義,如下

$\phi_i(x,t) = \sum_{j \in J} \phi_{ij}(t) N_j(x)$	(2-10)
$\varphi(\mathbf{x}, \mathbf{t}) = \sum_{j \in J} \varphi_j(t) N_j(x) (2-11)$	(2-11)

其中,

Φ描述裂紋表面

Øi描述正交於裂紋尖端面(下標i表示裂紋尖端的數量)相同於有限元素插值,在越精細的網格密度中可以更精準的匹配到實際的裂紋路徑。

#### 2.4 牽引力-分離法則理論

擴展有限元素法在模擬裂紋成長時,必須在材料性 質上給予損傷啟始(Damage Initiation)條件與損傷演變 (Damage Evolution)條件,在程式中可以依據材料應力或 應變的臨界值去定義不同的啟始標準,在本研究中選用 最大主應力(Maximum Principal Stress, Maxps)作為定義 裂縫是否成長的準則,即

 $f = \frac{\langle \sigma^{p}_{max} \rangle}{\sigma^{p}_{cr}} = \begin{cases} \geq 1 + f_{tol} & crack will initiate \\ \langle 1 + f_{tol} & crack will not initiate \end{cases}$ (2-12)

 $\sigma^p_{max}$ : Solution-dependent maximum principal stress

 $f_{tol}$ : 公差值 (默認為 0.5)  $\sigma^{p}_{cr}$ : critical principal stress

而根據中提及最大主應力的公式即為  $\sigma^{p}_{cr} = \frac{1}{2}(\sigma_{y} + \sigma_{u})$  (2-13)  $\sigma_{y}$ 為降伏強度(Yield Strength)  $\sigma_{u}$ 為極限強度(Ultimate Strength)

一旦裂紋達到啟始條件之後,根據牽引力-分離法則 來描述裂紋的成長行為,如圖 3-5 描述牽引力與位移的 關係,並非傳統應力-應變關係(Stress Strain relation)來避 免裂紋尖端的奇異性(Singularity)如下圖所示



圖 2-4 牽引力-分離法則與能量釋放率的關係[6]

在裂紋開始成長後,假設為線性的牽引力-分離行為, 則圖中從損傷啟始至材料失效的區間所圍面積即為臨 界應變能量釋放率(Critical Fracture Energy),公式如下

$$G_{cr} = \frac{1}{2} t_0 \delta_f \tag{2-14}$$

其中,

 $\delta_f$ 為材料失效時的位移量 $t_0$ 為在損傷啟始時的牽引力

# Ⅲ. 結果與討論

#### 3.1 本研究與前人研究驗證

為了驗證本研究建立 XFEM 模式模擬 SG 管束的裂 紋擴展分析之合理性,採用 Mohanty 等人[2] 於 2016 年 所建立 SG 束模型進行 XFEM 之驗證比較,此乃基於 Mohanty 等人[2]之模擬結果與 NRC 所提供之實驗數據 相符,可以利用此參考文獻之分析結果來確保 XFEM 在 分析上的可靠性。比對的參數為假設固定裂紋長度下 (L=6.35mm)裂紋深度開始變化所需要之破管壓力為何? 裂紋則是設置於外徑的管壁中央,即二次側的位置。而 分析之尺寸與網格參數分別列於表 3-1 與 3-2 之中。

如圖 3-1 比較結果所示,本研究所建立的 XFEM 模型與 Mohanty 等人之模擬結果相差並不大,除了在 95%TW 下的裂紋深度需要的破管壓力差異較大為 3Mpa 的差距,而其他組裂紋尺寸的結果都能很良好的 匹配於文獻中之結果以及文獻與實驗數據的比對,驗證 了 XFEM 能合理地應用於計算管路中之軸向裂紋擴展 分析。

表 3-1 XFEM 模式之參數

參數	數值
蒸汽產生器管束外徑尺寸	22.2 mm
蒸汽產生器管束厚度	1.27 mm
彈性模數 E	200 GPa
蒲松比	0.3
臨界最大主應力	490 MPa
臨界能量釋放率	415 KJ/m <sup>2</sup>
最大主應力計算點	裂紋中心處(Centroid)

表 3-3 網格參數	
網格設定	
Along Thickness Element Length	0.02 mm
Along Axial Direction Element	1 mm
Length	
Along Circumferential Direction	1 mm
Element Length	
Total Number of Element	47616





#### 3.2 XFEM 與傳統破壞力學比較

傳統破壞力學乃是用 J 積分模擬裂縫劣化情形,並 會針對裂紋尖端周圍的網格做圓餅型的切割,原因是在 計算裂紋尖端的應力時,越接近尖端的部分,數值會趨 近於無窮大,應力強度因子也會因此發散。因此,傳統 破壞力學分析網格必須在裂紋尖端進行非常細密之格 點配置(如圖 3-2 所示);但擴展有限元素法在計算裂紋 的應力時,並不需要對裂紋尖端附近的網格以特殊形狀 來加密(如圖 3-3 所示),為了確保擴展有限元素法在計 算裂紋的應力值能具有一定的可信度,須將其與傳統破 壞力學的分析法進行比對。比對的案例乃是採用一個簡 單 5 in\*5 in\*1 in 的平板,負載皆假設上下平面都受到 1000N 的均匀拉應力,比較兩種模擬方式所計算出的應 變能量釋放率是否趨勢相同。

由於 XFEM 不必針對裂紋尖端周圍做特殊的網格 處理,裂紋尖端周圍的應力值可能會隨著網格密度而改 變,針對 XFEM 模式分析,便分別建立了兩組不同的網 格大小,一組的網格密度較為粗略,另一組的網格密度 則較為細緻,進而去比較網格密度對於 XFEM 的影響, 以及與J積分所計算出的應變能釋放率差異。

比對上,在傳統破壞力學分析模式上,第一個積分 輪廓為裂紋尖端外側的第一個圓圈,第二個積分輪廓則 是第一個積分輪廓外側的圓圈,以此類推(如圖 3-2 所示); 而 XFEM 的網格配置,第一圈積分輪廓就是以裂紋尖端 元素作為中心的九宮格元素,第二圈就是第一圈向外推 移一個元素距離,如圖 3-3 所示。越靠近裂紋尖端的元 素(Element),其應力值會趨近無窮大以致裂紋尖端具有 奇異性,故在比較 XFEM 與傳統破壞力學的結果時,在 第一圈積分輪廓會具有較大的差異性(如圖 3-4 所示)。 圖 3-5 與 3-6 可明顯地展現,從第二圈積分輪廓開始, Thinner Mesh 的 XFEM 模型的數值和趨勢都與傳統破換 力學模型差異不大,顯示了 XFEM 在計算應變能量釋放 率時,與傳統破壞力學模型的差異並不大。而以 Mises 應力分布圖來看,傳統破壞力學與 XFEM 模式所計算出 的結果分布圖也非常接近(如 3-7 與 3-8 所示)。



圖 3-2 傳統破壞力學分析網格模型



圖 3-3 XFEM 分析網格模型



圖 3-4 傳統破壞力學與 XFEM 比較\_Contourl



圖 3-5 傳統破壞力學與 XFEM 比較\_Contour 2



圖 3-6 傳統破壞力學與 XFEM 比較\_Contour 3



圖 3-1 傳統破壞力學計算之 Mises 應力分布圖



圖 3-8 XFEM 計算之 Mises 應力分布圖

IV 結論與未來工作

# 4.1 結論

本研究已完成第一年之的工作,包含建立 SCC 之 XFEM 分析模式並結合 T-S law 研究管束 SCC 劣化特性, 並利用前人研究成果與傳統破壞力學分析進行相互比 對,以校驗本模式之合理性,從研究成果中,有幾項重 要的結論,摘錄於下:

- 本研究已建立完整的 XFEM 分析流程,從建模、 材料參數設定、邊界條件施加與裂紋參數等,並佐 以 STATUS 模組觀察裂紋擴展情形。
- 經與前人計算進行比較,驗證本研究發展 XFEM 分析法合理性,同時經過網格加密處理後 XFEM 分析結果與傳統彈塑性破壞力學結果相互吻合。
- 由模式校驗結果顯示,現階段建立之 XFEM SCC
   之模式,可以合理地掌握 SCC 裂紋擴展的特性以及評估管束發生 SCC 結構之完整性。

# 4.2 未來工作

下一個階段就是將校驗過的 XFEM SCC 分析模式進 行下面的分析工作:

- 以XFEM 模擬核三廠 SG 管束裂紋擴展之特性以 及管束若發生 PWSCC 之結構限值
- 以軸向 PWSCC 裂紋之分析結果,並比對 EPRI 經 驗公式所評估之結果。
- 以周向 PWSCC 裂紋之分析結果,探討不同周向裂 紋之 PDA 所對應的破管壓力,並比對 EPRI 經驗 公式所評估之結果。
- 評估 EPRI PWSCC 經驗公式計算結果的保守性,

以提供管制單位對維護運轉安全管制之參考。

本研究也有進行初步的模式建立,首先建立 1/2 的 Model F型蒸汽產生器管束模型,僅考慮直管束區域的 部分(不考慮 U型彎管區域)。根據 XFEM 的使用方式, 裂紋是以一個二維的矩形殼零件(Shell Part)所表示,並 將裂紋組合在 SG 管束模型內側管壁(一次側)上,軸向裂 縫示意圖如圖 4-1 所示,負載部分皆是採取均勻負載 (Uniform),一次側設定為由正常運轉的 2250Psia 線性提 升至 10000Psia,而二次側則是維持在 1000Psia,分析由 正常運轉增至 10000Psi 的壓差下裂紋之成長,並利用 STATUS 模組觀察裂紋擴展至破管之情形,如圖 4-2 所 示。





(a) 圖 4-2 以 STATUS 觀察裂紋擴展示意圖(a)裂紋尚未擴展 (b)裂紋已向外擴展

# 参考文獻

- T. Belytschko, T. Black, "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing," Int. J. Numerical Methods Eng. 45 (1999) 131.
- [2] S. Mohanty, S. Majumdar, and K. Natesan, "Steam generator tube rupture simulation using extended finite element method," Nucl. Eng. Des. 305 (2016) 697.
- [3] C. H. Wang, "Introduction to Fracture Mechanics," DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, vol. DSTO-GD-0103, 1996.
- [4] J. R. Rice, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks," J. Appl. Mech, 35 (1968) 379.

- [5] "Abaqus Analysis User's Guide 6.14."
- [6] M. Haddad, k. Sepehrnoori, "Integration of XFEM and CZM to Model 3D Multiple-Stage Hydraulic Fracturing in Quasi-brittle Shale Formations: Solution- Dependent Propagation Direction,"Rock Mech. Rock Eng. 49 (2016) 4731.

# 無人機對核能電廠之威脅與國際間管制及防範策略 The study of UAV Threats and Regulations for Nuclear Power Plants

計畫編號:109-2623-E-262-001-NU 計畫主持人:宋大崙 e-mail:tlsung@gm.lhu.edu.tw 計畫共同主持人:李九龍 計畫參與人員:林瑋格 執行單位:龍華科技大學

#### 摘要

商用無人機的技術發展使無人機更便宜,並且能夠攜 帶物品和不同的感測器。儘管有許多有益的應用,例如: 地形繪圖,檢查輸電線路和管路,運送貨物,警方監視, 交通監視,邊境巡邏和緊急災難監視等,但無人機始終 是重大威脅。過去幾年中,發生了許多無人機威脅事件, 例如,無人機產松山機場墜落,無人機撞台北101大樓, 以及無人機撞擊法國的核廢料儲存設施等;這些事件發 生在無人機侵犯隱私和敏感設施安全,包括核能電廠。 核電廠的實體保護可以防止入侵者竊取核材料或破壞 核電廠,其保護措施包括入侵偵測,延遲和應變。然而, 帶有照相機,感測器,爆炸性物體或易燃材料的無人機 很容易穿越實體屏障,以進行間諜,破壞性攻擊或網路 攻擊。本研究整理有關商用無人機對核電廠威脅的論文, 提出商用無人機對台灣核電廠的威脅,並討論降緩商用 無人機威脅的策略。

**關鍵詞**:核能電廠、無人機、威脅。

#### Abstract

The technology evolution of commercial UAVs makes UAVs cheaper, and the capabilities to carry portable items and different sensors. Although there are lots of beneficial applications, such as: terrain mapping, inspecting power transmission lines and pipelines, delivering goods, police use monitoring, traffic monitoring, border patrols and emergency disaster monitoring, the significant threat of UAVs is always mostly concerned. There were a lot of UAVs threat incidents in past years, such as UAV falling off at Songshan Airport, the crash of the UAV into the Taipei 101 building, and the UAV hitting French nuclear waste storage facilities. These incidents occurred with UAVs violating privacy of the public and security of sensitive facilities, including several nuclear power plants in the world. The physical protection of nuclear power plants could prevent intruders from stealing nuclear materials or destroying nuclear power plants, by intrusion detection, path blocking and security force. However, cheap UAVs with cameras, sensors, explosive objects or flammable material could easily flow pass the physical barrier for spying, destructive attacking or cyberattacking the nuclear facilities. By reviewing the papers concerned the threats of nuclear power plants, this study would conclude the threats of Taiwan nuclear power plants and discuss the strategy to prevent the threat of drones.

Keywords: Nuclear Power Plant, UAV, Threats.

# I. 前言

自 Consumer Technology Association (CTA) 舉辦的 CES 2010 上第一架無人機(Parrot)問世以來,商用無人機 開始應用於各種產業,由於價格合理,美國註冊的商用 無人機迄 2020 年 10 月止已達到 172 萬架[1]和並朝多種 商業非軍事用途發展;台灣商用無人機註冊數量也超過 3 萬架(至 2020 年 6 月 30 日止)[2]。世界各國皆提出商 用無人機產業發展計畫,加速技術發展與應用,因此預 期市場規模 2020 年將達到 24.3 億美金,到 2027 年將達 到 77.5 億美金[3-4]。廣泛應用和擁有眾多操作使用者, 商用無人機可能造成隱私權和安全損害等相關問題,也 同時受到社會大眾之重視。

2015 年 7 月 22 日[5]空拍機撞台北 101 大樓事件; 2017 年 2 月 6 日[6]空拍機摔落松山機場跑道造成機場 關閉 1 小時,無人機造成機場的飛安威脅。2018 年 07 月 07 日商用無人機被裝飾成超人外型,超人在空中飛 行,然後直接撞上法國布吉地區(Bugey)的核廢棄物設 施,該地距離里昂約 20 英里遠。商用無人機是否對核能 電廠的安全造成傷害,核子保安如何因應其威脅,成為 討論的議題。

商用無人機的應用發展迅速,各國在推動技術發展及 應用外,對於商用無人機造成的威脅,開始訂定有法規, 以降低商用無人機的潛在威脅。本研究從商用無人機的 發展與管制,了解其特性,進而評估對核能電廠的威脅, 如偵察、動能攻擊及網路保安,並蒐集國際上防範的管 制與策略,擬對台灣的防範管制與策略提出建議。

# Ⅱ. 商用無人機對於核能電廠威脅

生多起,如表」。				
年月	國家	事件		
2012 年	以色	無人機至迪莫納(Dimona)核能研究中心		
10 月	列	拍照,在距離該設施10英里處被擊落		
		[7]		
2014 年	法國	13 座核能電廠以上的限航空域內, 無		
秋季		人機群同時在這些核能電廠上空飛行[8]		
2016 年	美國	薩凡納河廠址(SRS)發現8架無人機		
7月		在美國薩凡納河廠徘徊[9]。		
2016 年	南非	無人機墜毀在南非 Koberg 核能電廠,		
8月		擊中了外牆[10]。		
2018 年	法國	兩架無人機飛越了布吉地區,其中一架		
10 月		已經被法國警察攔截。另一架無人機進		
		入了位於里昂附近的 Bugey 核能電廠附		

近年來,商用無人機威脅核能設施的安全事件已經發

		近的限航區,然後撞向了該廠用過燃料 池建築物的牆壁[11]。
2019 年	美國	5-6 架無人機在亞利桑那州 Palo Verde
9月		Nuclear Generating Station 控制區內附
		近飛行[12]

因此,商用無人機技術會對核能設施的核子保安系統 提出新的挑戰,且商用無人機的價格多落在數千至數萬 元之間且取得容易,惡意侵入或攻擊者使用無人機的可 能性增加。如何因應這項新的挑戰,是值得探討的議題 [13,14]。商用無人機可以穿越實體屏障及偵查困難的特 性,因此核能電廠的控制區、與保護區之門禁及實體屏 障(保安圍籬),將無法有效阻止商用無人機。商用無人機 載運武器包或是感測器,可以直接用於投擲爆裂物、以 破壞電力或通信網路,或提供武器給電廠內的人員攻擊 電廠設施。商用無人機通訊特性,可進行網路攻擊,如 資料竊取、竄改及破壞[15,17]。無人機群(SWARM)的協 同任務,可以進行多處攻擊或是有戰略的偵查與攻擊 時進行。以下將針對動能攻擊、協助攻擊、無人機群 (SWARM) 及網路攻擊,進行核能電廠的威脅評估,進 而討論核能電廠設計基準威脅(Design basis Threat)。

#### 2.1 動能攻擊之危脅

動能攻擊可能造成設施破壞,重要的設施為反應器及 用過燃料池、燃料乾貯設施,可能造成核能安全事件而 發生放射性物質外洩。此外核能電廠意外事故,最重要 的是提供反應器冷卻使用的水和電的供應,以提供反應 器冷卻使用,如果破壞供水供電的裝置如管路、油槽、 開關廠或設施,將會引起反應器安全停機,無法運轉。

動能攻擊關鍵在於其動能的大小,包含武器的能量, 能夠造成以上的破壞。市面上販售之商業無人機約為 3 公斤左右,載重 3 公斤,最大時速約為 72 公里每小時 (20m/s),本身的動能或攜帶爆裂物的能量,遠小於一般 航空器的重量及飛行時速,因此商業無人機的動能攻擊 評估不至於超過一般航空器對於核能設施威脅。

一般航空器如 Cessna 172 Skyhawk [18]的威脅評估, 波音 767(或類似飛機)直接撞擊反應器圍阻體的損傷評 估[19-22],其他如乾貯用的護箱(Cask),用過核子燃料池 [23-25],經過評估分析發現皆不會造成燃料損傷而輻射 外洩。除評估外,核能電廠強化對恐怖攻擊所衍生爆炸、 火災而喪失大範圍廠區的因應能力[26],以防範恐怖攻 擊。

由以上評估結果看來,商用無人機的特性(尺寸、載重、 飛行時間、距離及移動速度能力等),不致造成燃料損傷 及輻射外洩的嚴重事故。雖然商用無人機無法直接破壞 反應器,或者其他堅固建築物,但是反應器的安全維持, 需要供電及供水作為冷卻之用,因此破壞反應器周邊供 水供電裝置設施,如攜帶爆裂物或可燃性物質,破壞開 關場、管路或油槽,造成安全停機(停機是為了保護燃料, 因此是安全的),用所謂心理戰的武器(psychological weapon),通常造成人們對於核電廠的恐慌或無法運轉的 經濟損失[27]。

#### 2.2 協助攻擊之威脅

商用無人機可穿越實體屏障進行偵測監看,提供電 廠資訊給攻擊者,或是協助攻擊,作為攻擊的武器。核 子保安策略中,有考量內應者提供資訊(包含電廠資訊及 營運資訊),及攻擊者可能攜帶的武器,因此核子保安策 略可以涵蓋這類偵測或協助攻擊之威脅。

#### 2.3 多架無人機協同(SWAM)攻擊之威脅

多架無人機協同(SWAM) 如 Raytheon Technologies 的 Coyote<sup>®</sup> UAS 有可以進行操控多架無人機飛行的軟 體,無須操縱者一一遙控每個無人機。因此無人機協同 攻擊,可以是多處攻擊,或是聯合攻擊的策略,增加許 多的攻擊策略及路徑,將對於核能電廠的保安能力(數量 及範圍)進行考驗。但是台灣核能電廠設計,進入反應器 廠房僅有一個入口,因此到達入口後,其攻擊型態將會 成為一處攻擊,其聯合行為效果將會降低。

核能電廠由外至內依其保安要求不同劃分為控制 區、保護區、及緊要區;商用無人機可以協助多項路徑 及聯合策略來進行,並可以穿越實體屏障(保安圍籬),因 此控制區及保護區,可能受到極大的威脅,但要進入緊 要區時,必須穿越實體屏障(堅固廠房),因此可以阻斷商 用無人機的優勢,因為要進入廠房(建築物)內,並非飛越 可以做到。

#### 2.4 網路攻擊之威脅

網路攻擊對於核能電廠是一個新的威脅,商用無人 機可以接近目標,滲透取得或竄改數據、甚至取得數位 控制權,或是劫持藍牙裝置、wifi 裝置或智慧裝置(如 物聯網裝置),及竄改用戶的身份驗證,因此網路保安 是一個重要課題。由於商用無人機多為無線系統侵入、 透過網際網路或是數位化系統的侵入,因此對於獨立系 統且與外界實體隔離之核能電廠,發生機率很低。國際 原子能總署(IAEA)及美國核管會(NRC)已將資通安全納 入設計基準威脅(Design Basis Threat, DBT)[28-30],並訂 定資通安全準則[31-33],商用無人機的網路攻擊,僅是 資通安全的一個考量,整體的資通安全,已經涵蓋商用 無人機的滲透、竄改、及取得控制等項目。

#### 2.5 設計基準威脅(DBT)

核能電廠的安全,由於考量內部或外部行為人試圖 實施惡意行為而造成嚴重的後果,因此針對的潛在威脅 的動機、意圖和能力的描述,來設計與評估實體保護系 統,這樣的分析方法稱為設計基準威脅(DBT)分析,DBT 的定義是以4個重要的主題為基礎導出:(1)內部及外部 威脅(2)惡意行為和不可接受的後果之間的關係(3)描述 威脅的屬性及特徵,是指其惡意行為的動機、意圖及能 力(4)實體保護系統的設計及評估。美國 NRC 2017 年開 始進行 DBT 分析[34], 2019 評估的結果決定目前不會 將商用無人機的威脅納入 DBT 中,但是 NRC 會持續觀 察商用無人機的技術發展,並分析其影響。目前的文獻 資料並無顯示有任何國家(包括 IAEA)評估需要將商用 無人機納入 DBT 中,但是技術日新月異,DBT 分析會 經常需要檢視及維護,因此仍需持續觀察。。

#### III. 無人機威脅核能電廠之管制與防範策略

商用無人機的管制主要是由航管局來管制,因此其 中核能電廠的空域,就是限航區。各國制定無人機管制 辦法時就會設定限航區,機場、重要設施與核能電廠同 屬於限航區。表2是各國核能電廠限航區的訂定。各國 管制商用無人機,原則上是以註冊及操作證的建立,並 以電子式之無人機識別系統,發展地理柵欄(Geo-fencing) 的應用技術,避免無人機在限航區的飛行。

國	台灣	美國	歐盟	英國	日本	大陸
家						
限	核能電	核能電	歐盟	核能	核能	核能
航	廠半徑	廠半徑	成員	電廠	電廠	電廠
品	2 海浬	3 海浬	國國	2海	設施	周
距	內(3.7	內 (5.6	家,	浬內	300	圍。
離	公	公	在核	(3.7	公	
	里)。	里)。	能電	公	尺。	
			廠半	里)		
			徑 5			
			公			
			里。			

表2各國核能電廠限航區範圍

美國核管會(NRC) 2020 年 10 月針對商用無人機對於 子保安的威脅,正式在其網站說明[35]:商業無人機日益 普及,並出現在核能電廠上方,引起關注。NRC 確信目 前的商用無人機,不會對於核能電廠造成嚴重的風險。 核能電廠上空如發生無人機飛行事件,電廠可自願報告 NRC,而相關訊息會轉給政府、航管局(FAA)及聯邦調 查局(FBI)。核能電廠的安全部隊無權試圖攔截或擊落飛 越其設施的飛機,這包括商用無人機。

#### Ⅳ 台灣管制防範策略與建議

因應商用無人機活動漸增,因操作不慎、設計不良、 或飛行環境影響、造成人身安全、隱私權侵犯或是網路 威脅,台灣由民航局制定管理商用無人機的辦法,保護 人民的安全。其遙控規範則來自國家通訊傳播委員會 (NCC)。遙控無人機專章已於107年4月3日經立法院 三讀通過、107年4月25日經總統公布。行政院已於 108年6月10日核定「民用航空法」第99條之9至第 99條之19及第118條之1至第118條之3,自109年3 月31日施行。

商用無人機在機場設禁航區,而核能電廠、水庫、鐵 道上空設限航區。其他地區依照風險進行管理,訂定一 般管理規則以降低對於個人及建築物安全威脅。使用商 用無人機進行惡意或恐怖攻擊,不只核能電廠、機場及 重要建築物或人群皆是重要威脅,因此防範技術必須由 國土安全及國防部等單位進行開發及評估[37-38]。

針對核能電廠受到無人機威脅,首先討論管制無人機 進入的管制,進而討論無人機進入後所產生的破壞攻擊 及網路攻擊的可能及防範,最後進行防範與管制策略建 議。

#### 4.1 管制無人機進入核能電廠

對於無人機的防範機制,原能會在91年與國防部、交 通部及經濟部協商,將台電公司核能電廠所在地上方空 域劃設為限航區。依民用航空法第99-13條第1項「… 限航區..四周之一定距離範圍內,禁止從事遙控無人機 飛航活動」,第3項「未經同意進入…限航區活動之遙 控無人機,由…限航區之管理人採取適當措施予以制止 或排除;必要時,得通知民航局會同警察機關取締。」 民航局遙控無人機專章明定核能電廠、水庫、鐵道上空 也屬限航區,目前核能電廠半徑2海浬(3.7公里)為限航 區。台灣的規定與前述美國 NRC 的說明不同的是,台灣 可以採取措施制止或排除,因此可以干擾、捕捉或摧毀 (法國則是授權射擊在核能電廠區域飛行的商用無人機)。 但是美國核能電廠的安全人員則無權試圖攔截或擊落, 可自願報告上空的商用無人機活動 (美國 NEI 則是說明 美國所有核能電廠皆會回報)。

針對商用無人機入侵廠區之應變處置,台灣核能電廠 編訂「核能發電廠保安事件應變計畫」針對商用無人機 入侵電廠之廠區事件,建立應變處置作為:"駐廠保警 及各警崗加強注意廠區上空,若發現無人機入侵,立即 採取應變機制,查察可疑人士,除通知本廠保安師、安 管副廠長及廠長外,並通報核發處保安師及原能會。核 發處再另依權責區分上陳報經濟部。"台灣核能電廠的 位置多於臨山靠海,因此以目前商用無人機特性,飛行 時間 30 分鐘飛行距離 20 公里,其起飛位置會受到電廠 位置的地理特性而受限,因此可進行模擬,找到起飛位 置,進行早期預警。

#### 4.2 動能破壞攻擊之評估

目前商用無人機動能攻擊核能電廠的評估雖然沒有, 但核能電廠防震及接受飛機撞擊的風險已經有評估資料,由於商用無人機重量體積及速度,或是攜帶爆裂物 的動能攻擊皆小於飛機,因此其風險遠小於飛機撞擊的 風險,可以藉由飛機撞擊評估來討論。

台電公司曾因為華航貨機墜落事件評估核二廠遭受 飛機撞擊的風險,評估結果撞擊反應器圍阻體及用過燃 料池機率不高,依美國幽靈式戰鬥機遙控模擬撞擊試驗 結果,判定撞擊對圍阻體不造成傷害。

核能電廠的安全設備均具有重覆、隔離、多樣化等多 重深度防禦設計,且商用無人機的動能攻擊風險遠小於 飛機,因此核能電廠的應變能力應可足以應付商用無人 機動能攻擊,不致造成核能安全事故。如果破壞反應器 周邊裝置或非堅固建築物,如攜帶爆裂物或可燃性物質, 破壞開關場、管路或油槽,造成安全停機(停機是為了保 護燃料,因此是安全的),無法運轉,則可能引起民眾恐 慌及社會經濟損失。

核能電廠的核子保安措施,防止入侵者偷竊核子物料 或破壞核能電廠,其保護措施,包括入侵偵測、路徑阻 擋和武力應變,及其任務執行所須使用的人員、設備和 相關作業程序等,就是「實體防護」。商用無人機的偵 查、攻擊及無人機群的入侵的威脅狀況,包含在目前台 灣核子保安的防禦策略下,如多處入侵,協同入侵,內 部接應者及獲取電廠相關資料的各種情況,因此商用無 人機對於核能電廠的威脅,不致造成重大風險,並屬於 目前核子保安策略範圍內。雖是如此,台灣核能電廠的 保安演習,開始增加了商用無人機的情境,進行實兵演 練,以因應其威脅。

#### 4.3 網路攻擊的威脅與防範

台灣核能電廠(核一、二、三廠)的發電及安全相關設備 都是獨立的系統,其控制系統為類比系統,與外界實體 隔離,阻絕網路攻擊的機會,並訂有隨身碟資訊設備及 門禁管制程序,以避免駭客透過網際網路以外之其他方 式入侵。

由於商用無人機多為無線系統侵入、透過網際網路或 是數位化系統的侵入,因此對於獨立系統且與外界實體 隔離之核能電廠(核一、二、及三廠)發生機率很低。原能 會訂定我國「核能電廠關鍵數位資產資通安全計畫審查 導則」,要求台電公司從技術面、操作面、管理面等重 方面落實關鍵數位資產資安防護;核電廠平日依相關資 通安全程序書定期執行資安演練,並結合行政院之國家 關鍵基礎設施防護演練計畫進行網路攻防演練。如2015 年行政院資安攻防演練,針對核二廠,進行駭客入侵核 電廠的演練。因此商用無人機的網路攻擊,在資通安全 全面考量下,其衍生的各種網路攻擊狀況,已經被考慮 在資通安全防護內。

#### 4.4 管制、防範策略的建議

核能電廠基於安全要求,除核能電廠,廠區上空嚴禁 未經申請之無人機飛行,其核能電廠設計足以保護重要 核能設施(如反應器廠房、及用過燃料池),能承受飛機撞 擊,不致產生重大輻射外洩意外。由於商用無人機的動 能攻擊小於飛機撞擊,因此核能電廠已經具有承受商用 無人機攻擊的應變能力。商用無人機對於周邊管路、油 槽及開關廠的攻擊,可能造成安全停機無法運轉,以致 造成經濟損失及社會恐慌,防範商用無人機的進入,仍 是重視的議題。核能電廠網路封閉系統及資通安全規定 可防範無人機之網路攻擊;核子保安對於各種威脅的情 境,已加入無人機進行模擬與演習,實施偵測識別-延遲 -與應變的措施,來保護核子設施。

因此,本研究對於台灣核能電廠的商用無人機威脅管 制與防範策略,認為目前管制及防範策略措施,如一般 商用無人機的管制已由民航局制定管理,其遙控規範來 自國家通訊傳播委員會,設定核能電廠為限航區,核能 電廠保安應變策略,因此無須設置新的核子保安的商用 無人機法令規定。

商用無人機的網路攻擊,可以進行資料取得及竄改、 或劫持智慧裝置執行其任務等,要進行無線網路、智慧 裝置及監測系統等網路攻擊的評估。雖然核能電廠為內 部封鎖之系統,網路攻擊能性低,但風險不只來自外部 連網,像是內部人員輸入的參數錯誤、人員被收買,甚 至封閉系統必須依賴USB隨身碟作為資料傳輸等情況, 一定要確實遵守資通安全規定,進行網路攻防演練並補 強所發現的弱點。

核子保安的偵測識別-延遲-與應變措施,顯示如能早 期偵測,可提高核子保安的強度,須定期關注商用無人 機的偵測及防範相關技術。商用無人機可跨越實體屏障 (門禁、保安圍籬),於保安演習模擬情境時加入商用無人 機的參考,學習對事件的應變能力。如日本演習無人機 攻擊的情境及台灣核子保安演習。

#### V. 結論

商用無人機的技術發展與應用,創造了更美好的生 活願景,因此各國都有獎勵此新興發展及產業利用,核 能產業也正積極地應用於保安、輻射監測及定期檢查等。 但由於發展迅速及大量普及使用,可能造成的生活上威 脅、機場飛航、核能電廠,國家重要設施及經濟活動, 造成威脅,因此防範技術除機場、核能電廠需評估外, 國土安全及國防部等主要負責單位應該要進行全面開 發及評估。

本研究蒐集文獻評估商用無人機對於核能電廠的威 脅,如偵測、動能攻擊、無人機群及網路攻擊,已包含 在核能電廠設計(如飛機撞擊)、核子保安設計如實體防 護、核子保安策略及資通安全等方面,不會造成重大的 風險,如同美國 NRC 網站對於商用無人機威脅的說明。 但反應器周邊設施(管路、油槽及開關廠)之破壞可能造 成安全停機、引起民眾恐慌及社會經濟損失,仍須提高 警覺將商用無人機管制防範於核能電廠外。

商用無人機動能攻擊的風險遠小於飛機,因此不致造 成核能電廠輻射外洩的重大安全風險;商用無人機可以 穿越實體屏障(保安圍籬),並可載送物品給內應人員、分 散攻擊及無人機群等特性,其類似威脅情境已經納入潛 在核子保安威脅考量,但仍建議核子保安的演習項目可 以考慮納入商用無人機攻擊的情境;網路攻擊部分,核 能電廠為獨立系統,遭受網路攻擊的可能性低,但仍宜 依照資通安全規定,進行網路攻隊減練,並納入無線網 路、智慧裝置及監測系統被攻擊的情境,以降緩核能電 廠的商用無人機之網路攻擊威脅。由於商用無人機技術 日新月異,以上的評估也須因應技術發展趨勢,持續進 行,才能確實有效降緩商用無人機對核能電廠的可能潛 在威脅。

# 參考文獻

- Federal Aviation Administration, USA, UAS by the Numbers https://www.faa.gov/uas/resources/by\_the\_numbers/ last accessed: Nov 08, 2020
- [2] 民航局宣布:10月起無人機註冊需收費 不可越級, 政策與資訊 2020/07/07 https://www.cadf.org.tw/blog/404 (2020)
- [3] Global Industry Analysts, Inc, UAV Drones Global Market Trajectory & Analytics, (2020)
- [4] Meticulous, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Component (Hardware, Software), Class (Mini UAVs, Micro UAVs), End User (Military, Commercial, Agriculture), Type (Fixed Wing, Rotary-Wing UAVs), Capacity, and Mode of Operation - Global Forecast to 2027 (2020)
- [5] 張君如,無人機撞台北 101 撞出飛安疑慮,網址: https://video.udn.com/news/354772,(上次查訪 11 月 29 日 2020 年)
- [6] 劉慶侯,空拍機墜落台北松山機場 追查機主身份中,網址:
   https://news.ltn.com.tw/news/society/breakingnews/1376798,(上次查訪11月29日2020年)

- SHEERA FRENKEL, Hezbollah drone may have been sent to monitor Israel's nuclear facility at Dimona, MCCLATCHY NEWSPAPERS, (2012) https://www.mcclatchydc.com/news/nationworld/world/article24738688.html
- [8] Gaffey, C., Philips, C., Most French Nuclear Plants 'Should Be Shut Down' Over Drone Threat. Newsweek [Online]. Available: http://europe.newsweek.com/most-french-nuclearplants-should-be-shutdown-over-drone-threat-309019, (2015)
- [9] Gardiner, T., Eighth drone spotted in SRS skies. Aiken Standard [Online], Available: http://www.aikenstandard.com/article/20160706/AIK 0101/160709671, (2016)
- [10] Admire Moyo , Drone crashes into Eskom' s nuclear plant , https://www.defenceweb.co.za/aerospace/civilaviation/drone-crashes-into-eskoms-nuclear-plant/ (2016/08/11)
- [11] Reuters, Greenpeace crashes Superman-shaped drone into French nuclear plant, world news, July3 2018, https://www.reuters.com/article/us-france-nucleargreenpeace/greenpeace-crashes-superman-shapeddrone-into-french-nuclear-plant-idUSKBN1JT1JM
- [12] KEITH GRIFFITH, "Who flew drone swarms over America's most powerful nuclear reactor last year? Federal probe proves inconclusive after mysterious security breach in Arizona" https://www.dailymail.co.uk/news/article-8577381/Drone-incursions-Palo-Verde-nuclearpower-plant-leave-investigators-baffled.html (2020)
- [13] USA Homeland security, Nuclear Reactors, Materials, and Waste Sector-Specific Plan 2015, (2015)
- [14] Jean-Paul Yaacoub, Hassan Noura, Ola Salman, Ali Chehab, "Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations, Internet of Things 11 100218 (2010)
- [15] KATHARINA LEY BEST, JON SCHMID, SHANE TIERNEY, JALAL AWAN, NAHOM M. BEYENE, MAYNARD A. HOLLIDAY, RAZA KHAN, KAREN LEE, "how to analyze the cyber threat from drones, RAND CORPORATION ISBN: 978-1-9774-0287-5 www.rand.org/t/RR2972 (2020)
- [16] Ahmad Y. Javaid, Weiqing Sun,Vijay K. Devabhaktuni, Mansoor Alam, Cyber Security Threat Analysis and Modeling of an Unmanned Aerial Vehicle System, 2012 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security (HST) Date of Conference: 13-15 Nov. 2012
- [17] Yalin Liua, Hong-Ning Daia, Qubeijian Wang, Mahendra K.Shukla, Muhammad Imran, Unmanned aerial vehicle for internet of everything: Opportunities and challenges, Computer Communications, Volume 155, 1 Pages 66-83 (2020). Available:http://www.dailymail.co.uk/news/article-2948062/The-drone-catcher-France-reveals-flyingnet-stopterrorists-flying-bomb-laden-gadgets-nuclearpower-stations-following-spate-sightings.html,
- [18] Department of Homeland Security, Design Basis Threat, (2010)
- [19] M.R. Sadique, M.A. Iqbal, P. Bhargava, Nuclear

containment structure subjected to commercial and fighter aircraft crash, Nuclear Engineering and Design Volume 260, July 2013, Pages 30-46

- [20] Anton Andonov, Alexander Iliev and Marin Kostov, CONTAINMENT ULTIMATE PRESSURE CAPACITY WITH CONSIDERATION OF AIRCRAFT IMPACT Transactions, SMiRT-22 San Francisco, California, USA - August 18-23, 2013
- [21] Xiaoxin Wang, Qin Zhou, Li Shi, Haitao, An Integral Numerical Analysis of Impact of a Commercial Aircraft on Nuclear Containment, Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2019 |Article ID 9417954 p.1-15 (2019)
- [22] Y.G. Qu, H. Wu, Z.Y. Xu and etc., Safety assessment of Generation III nuclear power plant buildings subjected to commercial aircraft crash Part II: Structural damage and vibrations / Nuclear Engineering and Technology 52 (2020) 397-416
- [23] EPRI, Aircraft Crash Impact Analyses Demonstrate Nuclear Power Plant's Structural Strength (2002)
- [24] Sanghoon Lee, Woo-Seok Choi, Ki-Seog Seo, Safety Assessment of a Metal Cask under Aircraft Engine Crash, Nuclear Engineering and Technology Volume 48, Issue 2, April 2016, Pages 505-517 (2016)
- [25] Belal Almomania, Sanghoon Lee, Dongchan Jang, Hyun Gook Kang, Probabilistic risk assessment of aircraft impact on a spent nuclear fuel dry storage, Nuclear Engineering and Design Volume 311, January 2017, Pages 104-119 (2017)
- [26] NEI, NE106-12B.S.b Phase 2 & 3 Submittal Guideline, 2006.
- [27] André Ranson, The 2014 UAV Threat To French Nuclear Power Plants, National Security and Future v.18, pp. 125-142, (2017.)
- [28] NRC, 10 CFR Part 73, RIN 3150-AH60, Design Basis Threat, Final Rule, (2006)
- [29] IAEA, NUCLEAR SECURITY THREAT ASSESSMENT, DESIGN BASIS THREATS AND REPRESENTATIVE THREAT STATEMENTS, 20XX (2018)
- [30] IAEA, Development, Use and Maintenance of the Design Basis Threat, IAEA Nuclear Security Series No. 10 (2009)
- [31] NRC, REGULATORY GUIDE 5.71 (New Regulatory Guide) CYBER SECURITY PROGRAMS FOR NUCLEAR FACILITIES (2010)
- [32] NRC, 73.54 Protection of digital computer and communication systems and networks. (2009)
- [33] IAEA, Computer Security at Nuclear Facilities, IAEA Nuclear Security Series No. 17 (2011)
- [34] NRC, EXECUTIVE SUMMARY FOR "TECHNICAL ANALYSIS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR NUCLEAR POWER PLANTS AND CATEGORY I FUEL CYCLE FACILITIES" SECY PAPER, (2019)
- [35] 網站資料, https://www.nrc.gov/reading-rm/doccollections/fact-sheets/fs-drone-pwr-plantsecurity.html, Page Last Reviewed/Updated Tuesday, October 27, 2020
- [36] 陳永全,新興威脅-無人機惡意運用之應處防護作為,

https://www.tcw.moj.gov.tw/media/85090/782810555 7357.pdf?mediaDL=true (2016)

[37] 台灣新社會智庫,新小型無人機的國家安全問題與因應http://www.taiwansig.tw/index.php/政策報告/科技經濟/8548-小型無人機的國家安全問題與因應 (2019)

# 國內核電廠除役期間火災避難之初期研究

# A preliminary study on evacuation in the event of a fire during decommissioning of nuclear power plants in Taiwan

計畫編號:109-2623-E-007-005-NU 計畫主持人:許文勝 e-mail:wshsu@ess.nthu.edu.tw 計畫參與人員:江秉修 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

#### 摘要

核電廠除役階段內部人員與設備配置會與正常運 轉狀態不同,有必要依據現況進行除役期間火災避難評 估,了解影響避難之相關參數、避難路線、容易產生壅 塞之區域,並提出改進方式。本研究利用 REVIT 程式繪 製核一廠聯合廠房,並利用 Pathfinder 程式執行多項避 難分析。相同避難條件下,人員密度與總逃生時間呈現 正相關;聯合廠房整棟避難時間由地下層人員之避難時 間決定;地上層人員同時有向下與向上之避難路線選擇 時,應選擇向上之避難路線,以避開地下層之人員;開 放控制室做為避難路線僅能降低樓層避難時間,無法降 低整體避難時間。

**關鍵詞:**核電廠除役、火災避難、Pathfinder

#### Abstract

Equipment distribution and the number of works in nuclear power plants during decommissioning stage will differ from the normal operation stage. Identify the curial factor, evacuation routine, and areas where congestion easily happens are the research goals. Under the same evacuation conditions, the density of people positively correlates with the total escape time. The entire evacuation time of the combination structure of the Chinshan nuclear power plant is determined by the evacuation time of the underground personnel. When the above-ground personnel has both downward and upward evacuation routes, they should choose the upward evacuation route and avoid the people in the basement. Opening the control room as an evacuation route can only reduce the floor's evacuation time but cannot reduce the overall evacuation time.

Keywords: decommissioning, evacuation, Pathfinder

# I. 前言

除役之目標為核電廠永久停止運轉後,該設施及其 土地資源能再度開發利用,目前核一廠已進入除役階段, 而核二廠兩部機組也將分別於110年及112年進入除役 階段[1、2]。在除役過渡階段以及除役拆廠階段中,電廠 內各項設備及廠房皆會依序移出或是拆除,因此廠內人 員配置及數量皆會與電廠狀態穩定運轉時不同,其中聯 合廠房於運轉階段幾乎無常駐人員,不影響火災避難, 然而進行設備拆除時需要額外的器具與人力,皆會影響 廠房避難動線與規劃,因此有需要由現有之廠房配置進 行避難研究。

# Ⅱ. 研究方法

本研究執行國內核電廠除役期間火災避難之初期 研究共分為四階段,簡要工作流程圖如圖1所示。第一 階段涵蓋文獻蒐集及利用 REVIT 程式建立核一廠聯合 廠房幾何模型。第二階段為利用 Pathfinder 程式建立核 一廠聯合廠房避難分析模型。第三階段為避難案例分析, 分析各個參數設定如何影響人員於核一廠聯合廠房之 避難結果。第四階段為根據分析結果提出管制建議。



#### III. 結果與討論

#### 3.1 建立避難安全分析模式

繪製聯合廠房三維幾何模型時,假設平面圖中標示 之各項設備,如水槽、熱交換器、柴油發電機等,皆尚 未拆除或移動,且其位置、尺寸與平面圖相符。本研究 安全分析之詳細區域包含6個高程,地下2層依序命名 為B1、B2;地上4層依序命名為1F至4F,共計33防 火區。圖2為繪製完成之聯合廠房模型外部圖,圖3為 聯合廠房模型剖面圖,由於使用之 REVIT 程式為學生 版,因此顯示效果有限。圖4為由Pathfinder 程式指引 網格構成之核一廠聯合廠房分析模型,由6層包含各防 火區之樓層、6層設置樓梯間之樓層以及連接房間之門 與樓梯所組成。圖5為結合幾何模型與指引網格之聯合 廠房模型。



圖 2、聯合廠房外側



圖 3、聯合廠房剖面圖



圖 4、聯合廠房分析模型



圖 5、結合幾何模型與幾何網格之聯合廠房模型

#### 3.2 案例介紹

本研究共包含 17 組案例,分析若特定防火區無法 通行,以及聯合廠房內人員密度兩大因素對避難時間之 影響。由於控制室為高度機密與專業區域,在所有案例 中皆假設控制室內固定為 20人,此外防火區 9A 之避難 路徑為經由頂樓出入口至公共設施廠房,其路徑不與聯 合廠房其他防火區相關,因此固定其人員密度為每平方 公尺 0.1 人(0.1 人/m<sup>2</sup>),其餘相同之假設條件包含廠內人 員皆為健康成人且了解避難路線,以及人員行為設定為 接收到火災訊息後,立刻朝向任何一個出口離開聯合廠 房,因此本研究評估之避難時間並不包含察覺時間與準 備時間,僅包含步行時間、通過防火區出口時間、通過 樓層出口時間、以及通過廠房出口時間之總和,各案例 之假設條件如表 1 所示。

表1、分析案例假設條件

案例	假設條件	人員密度
1	防火區皆可通行	0.1 人/m <sup>2</sup>
2	防火區皆可通行	0.2 人/m <sup>2</sup>
3	防火區皆可通行	0.3 人/m <sup>2</sup>
4	4E、4F、4G 無法通行	0.1 人/m <sup>2</sup>
5	4E、4F、4G 無法通行	0.2 人/m <sup>2</sup>
6	4E、4F、4G 無法通行	0.3 人/m <sup>2</sup>
7	5M 無法通行	0.1 人/m <sup>2</sup>
8	5M 無法通行	0.2 人/m <sup>2</sup>
9	5M 無法通行	0.3 人/m <sup>2</sup>
10	7A、7B 無法通行	0.1 人/m <sup>2</sup>
11	7A、7B 無法通行	0.2 人/m <sup>2</sup>
12	7A、7B 無法通行	0.3 人/m <sup>2</sup>
13	4E、4F、4G、5M、7A、7B 無法通行	0.1 入/m <sup>2</sup>
14	4E、4F、4G、5M、7A、7B 無法通行	0.2 人/m <sup>2</sup>
15	4E、4F、4G、5M、7A、7B 無法通行	0.3 人/m <sup>2</sup>
16	控制室只出不進,其餘防火 區皆可通行	0.3 人/m <sup>2</sup>
17	4J僅能向下避難,其餘防火 區皆可通行	0.3 人/m <sup>2</sup>

#### 3.3 分析結果

整棟避難時間如表2所示。圖6至圖8依序為人員 密度 0.1 人/m<sup>2</sup>、人員密度 0.2 人/m<sup>2</sup>、人員密度 0.3 人/m<sup>2</sup> 之案例避難時間,總人數相近的條件下,可觀察到圖中 整棟避難時間會分為2區,以圖6為例,其一為案例3、 案例9、案例12;另一區為案例6與案例15,兩者差異 在於是否大幅影響到位於地下層人員之避難路線,在案 例6與案例15中皆缺少一座連接B1層與1F層之樓梯, 大幅增加地下層人員避難過程中之等待時間,反之地上 層避難路線改變對整棟避難時間影響較輕微。核一廠聯 合廠房 B2 層與 B1 層皆無對外出入口,人員避難需透過 4 座樓梯到達 1F 後,再經由位於 1F 之出入口離開;而 地上各層皆有對外出入口,且樓板面積較地下層低使人 員數較地下層少,因此核一廠聯合廠房整體避難時間由 位於地下室之人員決定。圖9為案例1之結果動畫圖, 圖中紅色虛線方框為位在聯合廠房西北側之#2樓梯,綠 色實線方框為連接防火區 4I 與防火區 6A 之 SW3 門, 地下層人員經由#2 樓梯抵達位於 1F 之防火區 4I 後, 需 要透過 SW3 門至防火區 6A 再由 R23 門至汽機廠房避 難。然而位於聯合廠房 1F 西側之人員也需要經由相同 路線離開聯合廠房,因此兩方避難人員會在 SW3 門前 相遇,當人員於 SW3 門前等待並擁擠至#2 樓梯於 IF 之 樓梯口時,會影響地下層人員至 IF 避難之時間,如圖 10 與圖 11 中紅色虛線方框所示,B2 層與 B1 層之人員 需要在該層樓梯口排隊,待位在 IF 之人員逐漸離開聯 合廠房後,才能離開地下層,綜上所述,SW3 門允許的 出口流量為地下層人員避難時間之瓶頸。

上述 15 項案例顯示影響核一廠聯合廠房整棟避難 時間之關鍵為總人數與地下層之避難路線是否充裕,然 而真實情況可能比本研究之假設條件更為複雜,因此評 估如何增加地上層之避難效率也至關重要。本研究將案 例 3 之假設條件進行部分修改,人員數量、人員行為與 初始位置等各方面盡量維持一致,針對防火區 9(控制室) 於避難過程中是否應該開放(案例 16),以及防火區 4J之 逃生動線進行研究(案例 17)。在案例 16 中,控制室不對 避難人員開放,僅允許內部人員離開進行避難;在案例 17 中,僅允許防火區 4J 內部人員由樓梯向上避難,不 允許由樓梯向下避難。

圖 12 為案例 3 與案例 16 之避難時間,案例 3 耗 費 428 秒而案例 16 耗費 433 秒。此外本研究分析同一 名人員於案例 3 與案例 16 之避難時間,在案例 3 中, 其經由控制室抵違汽機廠房完成避難,在案例 3 中, 其在案例 16 中耗費 202 秒完成避難。因此在確保除役 安全的前提下,經由控制室避難可有效降低等待時間。 圖 13 為案例 3 於疏散後 1 分鐘之服務水準[3](3F),控 制室位於圖中左下方,白色實線方框中藍色點,可視為 部分人員經由控制室避難之路徑,圖 14 為案例 16 於疏 散後 1 分鐘之服務水準(3F),圖中左下方白色實線方框 無任何人員。觀察圖 13 與圖 14 可知,大多數人員於圖 中紅色虛線方框區域(防火區 4K)排隊,等待前往汽機廠 房避難,該區域服務水準已達 D 級,此時應提供該區域 人員避難指引,將部分人員引導至控制室走廊,前往公 共設施廠房避難。

圖 15 為案例 3 與案例 17 之避難時間,案例 3 共 耗費 428 秒而案例 16 耗費 422 秒。結果顯示案例 3 同 時向上與向下之避難路線可縮短離開防火區 4J 所需要 之時間,相較於案例 17 需耗費 98 秒完成居室避難,案 例 3 僅耗費 87 秒完成居室避難。防火區 4J 之避難分析 結果如表 3 所示,本研究挑選案例中最後離開防火區 4J 之人員進行分析,在案例 3 中,最後一名離開防火區 4J 之人員耗費 156 秒完成避難;在案例 17 中,最後一名 離開防火區 4J 之人員耗費 223 秒完成避難,由此可知防 火區 4J 部分人員由樓梯向上避難為較佳之選擇。圖 16 與圖 17 分別為案例 3 與案例 17 於疏散後 1 分鐘之服務 水準(2F),圖中白色實線方框為向上之樓梯,白色虛線 方框為向下之樓梯,在避難開始 1 分鐘後,防火區 4J 內 部人員皆已於樓梯口排隊,若如案例 17 般隨其他人員 向下避難會耗費更多避難時間。

衣 2、 定保					
案例	總人數	整棟避難時間(秒)	標準差(秒)		
1	675	183.2	44.5		
2	1275	312.6	76.8		
3	1878	428.4	107.7		
4	627	251.3	63.8		
5	1181	374.5	93		
6	1738	489	134.3		

表	2	•	整棟	避難	避	難	時	間	
1	_		11-1215			<u></u>			

7	659	186.4	43.4
8	1244	348.3	77.4
9	1831	410.1	103.1
10	628	180.9	45.4
11	1184	331.7	80.3
12	1741	427.6	110.2
13	566	250.5	60
14	1059	389.6	96.6
15	1554	503.6	134.4
16	1878	433	108.2
17	1877	422.3	111.1

表 3、防火區 4J 內部人員避難時間

案例	居室避難	*離開廠房時間
3	86.8 秒	156.4 秒
17	98.3 秒	223.2 秒
		-

\*最後一位離開防火區 4J 之人員



圖 6、人員密度 0.1 人/m<sup>2</sup>之案例避難時間



圖 7、人員密度 0.2 人/m<sup>2</sup>之案例避難時間



圖 8、人員密度 0.3 人/m<sup>2</sup>之案例避難時間



圖 9、案例 1 動畫圖(疏散後 1 分鐘)



圖 10、案例 2 動畫圖(疏散後 1 分鐘)



圖 11、案例 3 動畫圖(疏散後 1 分鐘)



圖 12、案例 3 與案例 16 之避難時間



圖 13、案例 3 於疏散後 1 分鐘之服務水準(3F)



圖 14、案例 16 於疏散後 1 分鐘之服務水準(3F)



圖 15、案例 3 與案例 17 之避難時間



圖 16、案例 3 於疏散後 1 分鐘之服務水準(2F)



圖 17、案例 17 於疏散後 1 分鐘之服務水準(2F)

# IV. 結論

本研究計畫完成核電廠除役階段火災避難之安全 分析,主要工作重點如下:(1)彙整與研析國際間評估火災 避難之方法論與分析工具;(2)選用建立火災安全分析評 估模型所需程式;(3)建立核一廠聯合廠房火災避難分析 模型;(4)執行火災避難安全分析以了解不同火災情境對 人員避難之影響。本研究計畫成果可歸納為下列結論與 建議,供執行除役期間火災避難相關之管制作業時之參 考:

- (1) Pathfinder 程式可迅速並準確抓取 BIM(本研究採用 REVIT)程式匯出之幾何結構,並建立火災避難分 析模式。另一方面 Pathfinder 可執行多樣化的人員 設定,模擬人員於避難時之反應,並於分析完成後 呈現模型中各區域之服務水準及產出人員移動之動 畫,利於使用者掌握分析過程。
- (2) 人員密度為火災避難時間之關鍵參數,出入口、樓 梯等通道提供之人員流率有限,過多的人員會耗費 更多的等待時間。
- (3)核一廠聯合廠房整棟避難時間由位於地下層之人員 所決定,因此連接地下層之4座樓梯在火災避難過 程中皆須維持可用,否則會大幅影響人員避難之時 間。
- (4) 開放控制室做為避難路徑雖無法縮短整棟避難時間, 但可縮短地上層之避難時間;位在防火區 4J 之人員 在廠內人員密集時應往上避難;防火區 4K 應設立 指引,引導部分防火區內人員經由控制室走廊往公 共設施廠房進行避難。

# 參考文獻

- [1] 行政院原子能委員會,「核一廠除役計畫書」(2019)
- [2] 行政院原子能委員會,「核二廠除役計畫書」(2020)
- [3] J.J. Fruin, "Pedestrian Planning and Design, Revised Edition", Elevator World Inc (1987)

# 放射性物料安全科技
# 地下水環境中硫化物對放射性廢棄物處置銅罐腐蝕之研究 Corrosion of copper canister in radioactive waste disposal caused by sulfide in groundwater environment

計畫編號:109-2623-E-002-003-NU 計畫主持人:林文勝 e-mail:wslinlin@ntu.edu.tw 執行單位:國立臺灣大學水工所

## 摘要

地下水環境中硫化物可能會對放射性廢棄物處置之銅 罐造成腐蝕,所以本研究利用 COMSOL 模式建立廢棄物罐 容器及緩衝材料之三維模型,模擬地下水硫化物擴散至銅 罐之可能腐蝕深度。若以最大腐蝕速率 1.553×10<sup>8</sup> m/yr 進行 腐蝕深度分析,發現於 10 萬年後之腐蝕深度約為 1.5 mm。 由於銅罐設計厚度為 5 公分,所以該 1.5 mm 之腐蝕深度應 不足影響處置場銅罐的安全條件。本研究成果可以作為放 射性廢棄物處置場安全評估之應用。

**關鍵詞:**地質處置、銅罐腐蝕、硫化物、擴散係數、安 全評估

#### Abstract

Sulfide may cause the corrosion of the copper canister for the radioactive waste disposal in groundwater environments. Therefore, COMSOL model was used to establish a three-dimensional model of waste canister container and buffer material to simulate the possible corrosion depth of copper canister due to sulfide diffusion into the container in this study. If the maximum corrosion rate is  $1.553 \times 10^{-8}$  m/yr, the corrosion depth is about 1.5 mm after 100,000 years. The thickness of copper canister is designed to be 5cm thick, so the corrosion depth of 1.5mm should not be enough to affect the safety conditions of the copper canister in the disposal site. The study results can be used for safety assessment of radioactive waste disposal site.

**Keywords:** geological disposal, copper canister corrosion, sulfide, diffusion coefficient, safety assessment

## I. 前言

地質處置環境的多重障壁設計中,廢棄物罐需考慮 長期環境的影響,必須克服腐蝕等工程問題,而廢棄物 罐選用材料的腐蝕行為,直接決定其可行性與其使用年 限。因此,廢棄物罐的罐體材料,必須依據場址環境, 搭配適當的金屬材料並驗證其抗蝕性能。瑞典 SKB 提 議利用銅材料作為用過核子燃料深層地質處置中廢棄 物罐體。目前已有相關文獻進行多項研究,評估銅罐在 處置場地下水地化環境條件下的抗蝕能力。SKB 過去曾 針對銅罐腐蝕行為進行研究,包括:處置設施環境的現 場試驗驗證,以及長時間的腐蝕作用驗證,藉此更深入 的了解銅腐蝕的相關機理與影響。其中包含在冰河條件 下的長期好氧環境之影響、初期高溫效應及無氧環境硫 化物之影響等條件,進行長期腐蝕行為預測研究,以及 包括一般腐蝕(general corrosion)、局部腐蝕(localized corrosion)、應力腐蝕開裂(Stress Corrosion Cracking,簡 稱 SCC) 及 微 生 物 腐 蝕 (Microbiologically Influenced Corrosion, 簡稱 MIC)等問題, 也都有相當大的研究進展。 (King et al., 2010; 台電公司, 2017)。

本研究針對硫化物造成的一般均勻腐蝕進行研究, 利用 COMSOL 模式建立廢棄物罐容器及緩衝材料三維 模型,模擬硫化物擴散至銅罐可能的腐蝕深度,分析硫 化物的擴散作用及可能導致的腐蝕深度。

# II. 主要內容

#### 2.1 硫化物形成銅腐蝕作用

在處置條件下硫化物造成銅腐蝕,涉及多種反應的 複雜機制(King, 2013),目前已有許多國家的處置計畫 進行廣泛的研究(Scully and Edwards, 2013)。針對電化 學研究,提出 Cu 在硫化物存在情況下發生氧化反應, 銅腐蝕與硫化物通量成正比,並遵循下列反應:

 $2Cu_{(s)} + HS_{(aq)} + H_{(aq)} = Cu_2S_{(s)} + H_{2(aq)}$ (1)

由於硫化物造成銅腐蝕,一般基於以下假設及銅腐 蝕機制:(Cloet et al., 2017)

- 硫化物是主要的腐蝕性物種(多硫化物和硫代硫酸 鹽被忽略為腐蝕性物種)。
- ·遵循反應式(1)的腐蝕反應。假設反應是瞬時的,因此總腐蝕速率取決於質量傳輸。
- 除了上述與HS的反應之外,銅不參與任何其他反應 或與任何其他物種相互作用,例如Cl。
- •不考慮固體腐蝕產物的形成及其潛在的保護作用。
- •忽略潛在的局部現象,如點蝕,並假設均勻腐蝕。
- 假設罐體由純銅製成,並且忽略與銅塗層在組成、微觀結構或其他性質上的任何差異。

因此,腐蝕深度僅基於質量平衡原理計算,並不一 定反映實際的腐蝕深度。計算的腐蝕深度僅作為硫化物 通量對鍍銅罐的影響,並提供了一種簡單的方法可看出 預期的腐蝕損壞程度。該方法已有研究團隊分析硫化物 對銅的腐蝕(Wersin et al., 2014, King et al., 2008)。然 而,在反應傳輸模型中,上述反應是經由快速動力學反 應模擬其效果。另外假設忽略銅腐蝕而產生的氫氣影響 (釋放的氫氣與氧化還原系統分離)。

一旦處置場達飽和狀態,溶解的物種可以通過分子 擴散和平流(如果出現水流的話會產生平流)通過容器 外部的孔隙空間進行遷移。由於膨潤土的導水率較低, 因此預計膨潤土緩衝材料中的擴散傳輸將占主導地位。 這種腐蝕機制受到硫化物種類向容器表面遷移的限制。 假設存在於母岩-膨潤土緩衝材料介面(而非膨潤土內部) 的任何硫化物都是由於母岩中的硫酸鹽還原菌(SRB) 的活性所致。這是因為工程障壁膨潤土材料係為抑制微 生物活性 (Stroes Gascoyne et al., 2010; Bengtsson 和 Pederson, 2017)。因此,硫化物必須經由擴散作用通過 膨潤土,到達容器表面造成腐蝕。

廢棄物罐銅殼腐蝕速率可利用下式求得(SKB, 2010)

$$v_{corr} = BCF \cdot Q_{eq} \cdot [HS^{-}] \frac{f_{HS}M_{Cu}}{2\pi r_{can}h_{can}\rho_{Cu}}$$
(2)  
$$Q_{eqdiffusive} = \frac{D_{e,buffer,i}W_{zone}L_{zone}}{d_{buffer}}$$
(3)

其中

 $v_{corr} = 腐蝕速率, [mm/yr];$  $<math>Q_{eq} = 等效流率, [m^3/yr];$   $[HS^-] = 硫化物(氢硫酸根)濃度, [mol/L];$   $f_{HS} = 硫化物之計量因子(stoichiometric factor), [-];$   $M_{cu} = 銅的莫耳質量, [g/mol];$  $\rho_{cu} = 銅的密度, [kg/m^3];$ 

Acorr=腐蝕面積(WzoneLzone), [m<sup>2</sup>];

BCF=緩衝材料濃度因子。

銅腐蝕深度(在任何給定時間)[LT-1]可根據硫化氫 與硫化銅的莫耳轉化率和化學計量轉化率計算得出 (SKB,2010年):

Dcorr=(N<sub>HS</sub>f<sub>HS</sub>M<sub>Cu</sub>)/(A<sub>corr</sub>ρ<sub>Cu</sub>) (4) 式中,N<sub>HS</sub>是根據模型確定的硫化物量[NT<sup>-1</sup>]。

#### 2.2 腐蝕化學物種的擴散方程式(擴散模組)

工程障壁內的膨潤土緩衝材料具低滲透性,腐蝕化 學物種的傳輸以擴散為主。一般工程障壁之膨潤土為 MX-80,具有較高的蒙脫石含量,因此具有較高膨脹能 力。膨潤土的導水率非常低,因此擴散將成為主要的傳 輸機制(Alt-Epping et al., 2015; Bourg et al., 2008)。擴散 作用是由菲克第一定律描述,如下式:

$$\mathbf{I}=-\mathbf{D}\nabla\mathbf{C}$$
 (5)

式中,J 是擴散通量[NL<sup>-2</sup>T<sup>-1</sup>],D 是有效擴散係數 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>],而∇C 是化學物種[NL<sup>-3</sup>]在距離[L]上的濃度,並 使用以下公式計算:

$$\mathbf{D} = \tau \boldsymbol{\varepsilon}_{a} \mathbf{D}_{0} \tag{6}$$

在 25°C 下,硫化物在水中的擴散係數 ( $D_0$ ,自由 擴散)為 10° m<sup>2</sup>/s (Lide 和 Haynes, 2009; Chen et al., 2011)。有效傳輸孔隙度 ( $\mathcal{E}_a$ ) 是總孔隙率的一個部分子 集,代表硫化物傳輸的孔隙分數,假設為 0.1 (Briggs and Krol, 2018)。假定膨潤土緩衝材料的彎曲度 ( $\tau$ )為 0.1, 因此有效擴散係數為 10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>/s (Oscarson et al., 1994)。

#### 2.3 非等溫和完全飽和環境(稱為熱模組)

由於用過核子燃料處置場因核種衰變熱作用,所以 短期內會變熱。從長期來看,將冷卻至母岩背景溫度。 廢棄物衰變熱由 SKB 技術報告可以 P(t)表示,其中 t 為 時間(年), a<sub>i</sub>為係數,列於表 1(SKB, 2009)。

$$P(t) = \sum_{i=1}^{7} a_i \exp(-t/t_i)$$

$$= \frac{1}{2} \operatorname{BBB}(a_i \otimes a_i)$$

$$(7)$$

i	<i>t</i> [years]	$a_i$	i	<i>t</i> [years]	$a_i$				
1	20	0.060147	5	2000	0.025407				
2	50	0.705024	6	5000	-0.009227				
3	200	-0.054753	7	20000	0.023877				
4	500	0.249767							

初始廢料罐熱量 1315W,應用 COMSOL 軟體模擬

工程障壁內溫度變化,熱傳模擬參數列於表 2。研究假 設模擬區域底部位於地表下深度 1,000 m,處置隧道底 部位於地表下深度 500 m處,模擬區域頂部為地表。邊 界條件部分,模擬區域上部為假設地表溫度 20.8 ℃,底 部(地下 1,000 m)溫度為 37.8 ℃,區域左右邊設為零熱 流通量邊界。初始溫度分佈於區域上方(地表)之溫度為 20.8 ℃,底端(地下 1,000 m)之溫度約 37.8 ℃(即考慮地 溫梯度: 20.8 + 1.7×10 = 37.8)。熱傳導係數目前假設為 定值(如表 2)。

表2 熱傳模擬所需之參數

參數	單位	說明	緩衝材料	回填材	母岩
				料	
ρ	g/cm <sup>3</sup>	密度	1.95	1.535	2.75
$C_{p}$	Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	熱含量	830	830	712
Tint	°C	初始溫度	25	25	29
k	$Wm^{-1}K^{-1}$	熱傳導係數	1.1	1.1	2.91
n	-	孔隙率	0.435	0.46	-
$ ho_D$	$g/m^3$	乾土密度	1.56	-	-

本研究利用 COMSOL 模式模擬硫化物對銅罐腐蝕。 並進行參數化設計,建立模型幾何。母岩的低滲透性,地下 水流經膨潤土的流量很小,本研究假設三種腐蝕情節之最 大進流通量,分析硫化物隨地下水進入處置孔,加上硫 化物通過處置場腐蝕物種進入到銅罐表面的擴散傳輸作用, 分析銅罐腐蝕作用。在建立本模型時,進行幾個假設,包括: 假設所有硫化物自由擴散到母岩-膨潤土界面。硫化物通過 膨潤土時,沒有任何化學或生物反應,這是一個保守估計, 因為硫化物可能與膨潤土或母岩中的不同化學物種發生反 應產生硫化物減少或改變 (Wersin et al., 2014; Wersin et al., 2017)。其次,假設擴散受菲克第一定律控制,並受有效擴 散係數控制。

#### III. 結果與討論

本研究分析地下水環境中廢棄物罐銅殼腐蝕,建立 廢棄物罐容器及緩衝材料三維模型(如圖1),獲以下結果。



圖1 模擬區域及有限元素網格示意圖

用過核子燃料處置場,因燃料束衰變熱的作用下, 處置初期會變熱,需使用熱傳模組估算。廢棄物衰變熱 由 SKB 技術報告可以 P(t)表示(如式 7),得到緩衝材料 中不同位置之時間與溫度變化如圖 2,可看出廢棄物罐 頂部溫度最高(約 78℃),並逐漸向處置孔中心與母岩 交界處、處置孔底部與母岩交界處及處置孔與隧道底部 交界處減少,於 10,000 年之後溫度趨向一致(約 38℃), 並逐漸與外在環境溫度平衡(約 35℃)。圖 3 顯示整個 模擬區域於模擬時間 10 年時之三維溫度變化,可看出



係由處置罐體之廢棄物衰變熱向周遭環境進行熱傳輸, 而呈現均勻分散出熱,周遭環境溫度約35℃至55℃。

圖2 緩衝材料不同位置溫度隨時間變化



圖3 三維溫度變化 圖4 緩衝材料飽和度隨時間變化

本研究對於飽和過程之等效熱傳導係數 $K_{ea}Se =$  $K_{ea}(Se^{0}) + Se \cdot (K_{eq}(Se^{1}) - K_{eq}(Se^{0}))$ 及相對滲透率 影響流速,採用下式進行計算 $K_r = Se^{l}[1-(1-Se^{1/m})^m]^2$ 。 參考台電公司出版之 SNFD2017 腐蝕情節安全評估之最 大進流通量,計算飽和時間,並保守加大進流率10倍及 100 倍評估腐蝕時間變化,依 7.6×10<sup>-4</sup> m/yr、7.6×10<sup>-3</sup> m/yr 與 7.6×10<sup>-2</sup> m/yr,計算銅罐交接處之緩衝材料飽和時間 約為6萬年、6000年與520年(如圖4)。硫化物隨地下 水進入處置孔內,根據台電公司出版 SNFD2017 報告有 關用過核子燃料最終處置計畫在潛在處置母岩特性調 查與評估階段-用過核子燃料最終處置技術可行性評估 報告之 K 區潛在場址現場地下水水質,與本研究分析之 硫化物濃度為 5.37×10<sup>-6</sup> mol/m<sup>3</sup>, 並經由廢棄物罐銅殼腐 蝕速率之公式計算。圖 5 為本研究得出模擬時間 100 年 時之硫化物分布濃度,可看出100年時間於處置孔周遭 之硫化物濃度已達約 3.6×10<sup>-6</sup> mol/m<sup>3</sup>,硫化物已入侵至 罐體表面附近。





圖7 飽和前腐蝕速率(進 流率=7.6×10<sup>-3</sup> m/yr)





圖8 飽和前腐蝕速率(進流率  $=7.6 \times 10^{-2} \text{ m/yr}$ 

本研究分析緩衝材料與銅罐交界處達到飽和時,使 用飽和體積計算硫化物地下水中最高濃度 5.37×10-6 mol/m<sup>3</sup>, 飽和後腐蝕速率均為 1.553×10<sup>-8</sup> m/yr, 飽和前 腐蝕速率隨時間變化,腐蝕速率圖如下,圖6表示進流 率為 7.6×10<sup>4</sup> m/vr 時, 飽和前之腐蝕速率變化圖, 6000 年後腐蝕速率皆達最大值 1.553×10-8 m/yr;圖 7 表示進 流率為 7.6×10-3 m/yr 時, 飽和前之腐蝕速率變化圖, 6000 年後腐蝕速率皆達最大值 1.553×10<sup>-8</sup> m/yr; 圖 8 表示進 流率為 7.6×10-2 m/yr 時, 飽和前之腐蝕速率變化圖, 520 年後腐蝕速率皆達最大值 1.553×10<sup>-8</sup> m/yr。

硫化物的溶解度可能受各種含硫礦物相的控制,這 些相都有相關的不確定性。此外,溶解度控制相高度依 賴於環境系統的 pH 和 Eh。這些參數是可以估計的,但 它們的精確值可能會隨著近場演化的過程而略有變化。 影響硫化物行為的不確定性因素很多,如微生物 CH4-SO4氧化還原反應動力學和黃鐵礦或 FeS 沉澱動力學。 本報告提出 5.37·10<sup>-6</sup>[mol/m<sup>3</sup>],可能仍須配合後續相關場 址調查及地化條件進一步分析,以利進行場址硫化物對 銅罐腐蝕之進一步研究。

腐蝕速率決定腐蝕深度,由於本研究發現腐蝕速率 隨著時間增加而變化,最大腐蝕速率為1.553×10<sup>-8</sup> [m/yr], 且隨著進流率大小而改變,後續若要計算腐蝕深度建議 依據相關場址水文地質調查及地下水文條件進一步分 析,將可以應用本研究之方法完整計算實際腐蝕深度。 本報告中計算腐蝕速率隨著時間增加而變化可作為硫 化物對銅罐影響的分析結果,並提供銅罐腐蝕入侵程度 之預測。若以最大腐蝕速率為 1.553×10<sup>-8</sup> [m/yr]進行腐蝕 深度分析,相當於10萬年後腐蝕深度約1.5 mm。若以 銅罐設計為5公分之厚度,該1.5 mm 之腐蝕深度應不 足影響處置場銅罐的之安全條件。

處置場近場硫化物變化及其對銅腐蝕的潛在影響 受到微生物、地球化學、遷移和水文相互耦合作用的影 響。本研究並未針對這些作用進行耦合模擬。對於這些 微生物代謝過程造成的氧化還原作用、含硫礦物的溶解 反應、水流作用及廢棄物衰變熱的熱作用之熱-水-化耦 合系統的反應化學傳輸的地化演化數學模型,可能可以 更完整表示關鍵過程及其相互作用。

反應化學傳輸模型可以直接表示和評估單個化學 反應之間的複雜相互作用以及溶質遷移對化學系統的 影響。未來研究可利用熱-水-化耦合系統的反應化學傳 輸模式進行處置場近場硫化物變化及其對銅腐蝕之熱-水-化耦合系統的反應化學傳輸模擬。處理複雜的生物地 球化學反應,包括水合、礦物溶解,陽離子交換和表面 絡合反應。並可利用高放廢棄物處置地化反應化學熱力 學資料庫,搭配潛在場址水文地質資料,進行處置場近 場硫化物變化及其對銅腐蝕潛在影響之進一步研究。

#### IV. 結論

本研究參考台電公司出版之 SNFD2017 腐蝕情節 安全評估之最大進流通量,計算飽和時間,並保守加大 進流率 10 倍及 100 倍分別評估腐蝕時間之變化,分別 使用 7.6×10<sup>-4</sup> m/yr、7.6×10<sup>-3</sup> m/yr 與 7.6×10<sup>-2</sup> m/yr,計算 得到與銅罐交接處之緩衝材料飽和時間約為 6 萬年、 6000 年與 520 年。

硫化物隨地下水進入處置孔內,根據台電公司出版

SNFD2017 報告有關用過核子燃料最終處置計畫在潛在 處置母岩特性調查與評估階段-用過核子燃料最終處置 技術可行性評估報告之K區潛在場址現場地下水水質, 與本研究分析之硫化物濃度為 5.37×10<sup>-6</sup> mol/m<sup>3</sup>,並經由 廢棄物罐銅殼腐蝕速率之公式計算。得出模擬時間 100 年時之硫化物分布濃度,發現 100 年時間於處置孔周遭 之硫化物濃度已達約 3.6×10<sup>-6</sup> mol/m<sup>3</sup>,硫化物已入侵至罐 體表面附近。若以最大腐蝕速率為 1.553×10<sup>-8</sup> m/yr 進行 腐蝕深度分析,相當於 10 萬年後腐蝕深度約 1.5 mm。 若以銅罐設計為 5 公分之厚度,該 1.5 mm 之腐蝕深度 應不足影響處置場銅罐的之安全條件。

# 參考文獻

- [1] King, F., Lilja, C., Pedersen, K., Pikänen, P. & Vähänen, M. (2010): An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository. SKB Report TR-10-67. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management, Stockholm, Sweden.
- [2] 台灣電力公司,2017,用過核子燃料最終處置計畫 -潛在處置母岩特性調查與評估階段-發展功能/安 全評估技術(104-107 年度計畫)- 廢棄物罐腐蝕研 究報告,台灣電力公司。
- [3] King, F., Lilja, C., Vähänen, M., (2013). Progress in the understanding of the long-term corrosion behaviour of copper canisters. J. Nucl. Mater. 438 (1), 228 – 237.
- [4] Scully, J. and Edwards, M. (2013). Review of the NWMO Copper Corrosion Allowance. TR-2013-04. Nuclear Waste Management Organization. Toronto, Ontario.
- [5] Cloet, V., Pekala, M., Smith, P., Wersin, P., Diomidis, N., (2017). An Evaluation of SulfideFluxes in the Near Field of a HLW Repository. Technical Report, NTB 17 - 04, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- [6] Wersin, P., Alt-Epping, P., Pekala, M., Pitkänen, P., & Snellman, M. (2017). Modelling Sulfide Fluxes and Cu Canister Corrosion Rates in the Engineered Barrier System of a Spent Fuel Repository. Procedia Earth and Planetary Science, 17, 722-725.
- [7] King, F., Kolar, M., Maak, P. (2008). Reactivetransport model for the prediction of the uniform corrosion behaviour of copper used fuel containers. J. Nucl. Mater. 379, 133-141.
- [8] Stroes-Gascoyne, S., Hamon, C., Maak, P., and Russell, S. (2010). The effects of the physical properties of highly compacted smectitic clay (bentonite) on the culturability of indigenous microorganisms. Applied Clay Science, 47(1), 155-162.
- [9] Bengtsson, A., & Pedersen, K. (2017). Microbial sulphide-producing activity in water saturated Wyoming MX-80, Asha and Calcigel bentonites at wet densities from 1500 to 2000kgm – 3. Applied Clay Science, 137, 203-212.
- [10] Alt-Epping, P., Tournassat, C., Rasouli, C., Steefel, C.I., Mayer, K.U., Jenni, A., Mader, U., Sengor, S.S., Fernandez, R., (2015). Benchmark reactive transport simulations of a column experiment in compacted bentonite with multispecies diffusion and explicit treatment of electrostatic effects. Comput. Geosci. 19,

535 - 550.

- [11] Bourg, I.C., Sposito, G., & Bourg, A.C.M. (2008). Modeling the diffusion of Na+ in compacted watersaturated Na-bentonite as a function of pore water ionic strength. Applied Geochemistry, 23, 3635-3641.
- [12] Briggs, S. & Krol, M. (2018). Diffusive Transport Modelling of Corrosion Agents through the Engineered Barrier System in a Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel. NWMO-TR-2018-06, Nuclear Waste Management Organization, Canada.
- [13] Lide, D.R., & Haynes, W.M. (2009). CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data-/editor-in-chief, David R. Lide; ass. ed. WM Mickey Haunes. Boca Raton, Fla: CRC.
- [14] Chen, J., Qin, Z., & Shoesmith, D. W. (2011). Longterm corrosion of copper in a dilute anaerobic sulfide solution. Electrochimica Acta, 56(23), 7854-7861.
- [15] Oscarson, D. W., Hume, H. B., & King, F. (1994). Sorption of cesium on compacted bentonite. Clays and Clay Minerals, 42(6), 731-736.
- [16] SKB (2009), Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [17] Wersin, P., Alt-Epping, P., Pekala, M., Pitkänen, P., & Snellman, M. (2017). Modelling Sulfide Fluxes and Cu Canister Corrosion Rates in the Engineered Barrier System of a Spent Fuel Repository. Procedia Earth and Planetary Science, 17, 722-725.
- [18] Wersin, P., Alt-Epping, P., Pitkänen, P., Román-Ross, G., Trinchero, P., Molinero, J., Smith, P., Snellman, M., Filby, A., Kiczka, M., (2014). Sulphide Fluxes and Concentrations in the Spent Nuclear Fuel Repository at Olkiluoto. (Posiva 2014-01). Posiva, Olkiluoto.

# 日本地下實驗室超深開挖與地工試驗成果研析 Study on the tunnel excavation and geotechnical test results in deep underground laboratory in Japan

計畫編號:109-2623-E-032-001-NU 計畫主持人:楊長義 e-mail:yang@mail.tku.edu.tw 計畫共同主持人:李宏輝 計畫參與人員:胡乃壬、呂艾明 執行單位:淡江大學土木系

#### 摘要

本計畫係透由整理研析日本幌延(Horonobe)及瑞 浪(Mizunami)深地層研究實驗室,分別在沉積硬泥岩地 層及結晶質花崗岩地層內,建造豎井或研究廊道之調查 與開挖經驗、及其現場深地層地工技術驗證成果,包括 在深淺地層之現地應力調查方法、現地試驗技術、不同 深度地盤之實測受震反應、豎井與坑道圍岩之開挖損傷 及檢測技術、坑道襯砌材料與岩石長期變形特性等地工 技術問題。期望藉由比較二個坐落在不同地層內實驗室 之開挖經驗與驗證結果,據以瞭解於不同岩性中深地層 內調查技術或建造地工技術之差異及適用性。

**關鍵字:**幌延地下研究實驗室、瑞浪地下研究實驗室、地 工技術、現地應力量測、開挖損傷區

#### Abstract

This project studies the field experiment results on the topic of geotechnical technologies adopted to investigate the geological disposal characteristics in Horonobe and Mizunami underground research laboratory (URL), Japan. The rock formation in Horonobe URL is mainly the mudstone formation and the Mizunami URL is granite formation. The technical methods performed to measure the rock mechanical properties of these two URLs such as the in-situ principal stresses, tunneling and support methods in deep ground are summarized. The measured peak ground acceleration(PGA) at different depth in these two URLs trigged by several earthquake events are also investigated.

Keywords: Horonobe URL, Mizunami URL, geotechnical method, in-situ stress measurement, Excavation Damage Zone

# I. 前言

在深層地質處置場設施設計之重要規劃,諸如決定處 置場設置深度、地下坑道的形狀與開挖方法、處置隧 道方向與現地主應力方位相對關係,此等規劃第一步 均賴場址岩力特性之足夠的認識。這確認與評估是目 前地表調查方法或試驗所無法滿足的,必須深入到超 深地下的真實環境,現地實際試驗與驗證方能獲取評 估信心。因此,在地底實驗室(URL, Underground Research Laboratory)的進行試驗是確保處置場安全性最 可信途徑。

目前核處置先進國家瑞典 SKB 公司執行之 ASPO

及芬蘭 Posiva 公司之 ONKALO 兩大地底實驗室,以跨 國研究團隊對深層結晶岩類(花崗岩質)場址性能,已進 行長達三十年實地、長時程足尺寸的驗證試驗研究,已 獲致許多結晶岩類處置技術認識與信心,然而歐洲大陸 地盤特性仍與台灣地區不盡相同。

台灣地區研究趨勢顯示,目前國內潛在具有成為高 放核廢物處置的母岩,包括:(1)結晶岩類(花崗岩質為主)、 (2)泥岩類、及(3)中生代基盤岩類等三類。現階段雖比較 可行潛在母岩以「花崗岩質」為優先考量,但是建議也 不能放棄對其它「泥岩類」及中生代基盤岩類之準備。

#### Ⅱ. 主要內容與結果

有鑒於日本地質條件與台灣相近,又日本原子力研 究開發機構(JAEA)自 2002 及 2001 年開始正在建造(A) 瑞浪超深地層研究實驗室(MIU)、及(B)幌延深地層研究 實驗室(Horonobe),二者之主要地層分別就是座落在結 晶質花崗岩地層、沉積岩質的泥岩地層內,見圖 2-1。其 岩性力學特徵與現地應力場、處置隧道設計與開挖反應、 與地下水流受開挖擾動行為應有所差異。目前,其開挖 建造深度也已到達地底 500 及 350 公尺之深,其間已累 積珍貴的超深地層開挖經驗與實際監測資料。尤其, JAEA 在幌延之沉積岩超深層開挖經驗更是北歐 SKB、 Posiva 二大公司所缺,本計畫主要從研析日本此二實驗 室,在花崗岩地層、泥岩地層不同地層內試驗或開挖建 造之經驗,並將之與一般在地表探測結果或試驗成果之 差異處。





圖2-1 日本幌延及瑞浪超深實驗室地層特性與坑道設計 形狀差異示意

其中,有關 URL 計畫共進行為期五年的挖掘和相 關調查:在2014年底,見圖2-2,已在(1)岐阜縣的瑞 浪地下研究實驗室(MIU),開挖了兩個深度500m的豎 井,並在該500m深度開挖一條長430m的水平隧道; 主要任務為地球科學研究。(2)北海道的幌延

(Horonobe)開挖了三支深度 350 m 的豎井,並在該深度 挖掘 760 m 長的調查隧道;其主要任務為地球科學研 究與處置技術研發。



圖 2-2 瑞浪(Mizunami)及幌延(Horonobe) 地下實 驗室的設施開挖圖示(截至 2014 年)

# 2.1 探测技術與試驗方法之適用性

本文利用瑞浪-花崗岩地層、及幌延-泥岩地層, 兩實驗室在地底調查廊道現地應力量測技術或岩力試 驗方法所得結果,再與在地表調查結果互相比較,以瞭 解在地表調查與在 URL 調查之異同,並據以瞭解各類 技術在花崗岩或泥岩之適用性。

#### 1. 現地應力量測技術於不同岩性之適用性比較

因為瑞浪(Mizunami)位於硬岩石地層,而幌延 (Horonobe)位於軟岩地層,兩地的岩石強度不同,因此現 地應力測量的使用方法具有限制性。(1)在軟岩中,鑽孔 常發生塌孔,很難進行現場測量,水力破裂法試驗不能 使用於塌孔。而且,(2)套鑽法也不能在這類軟岩中使用, 因為此一技術係假設岩石是在彈性行為下所推導公式。 (3)在坍孔的情況下,可以使用井孔崩落法來估計最大主 應力的方向。(4)儘管圓錐孔底套鑽法(CCBO)技術可用 於多種類型的岩石,但應變計盒並無法粘在幌延的沉積 岩上。綜上可知,各類現地應力量測技術適用性在沉積 岩地層中將受到限制,由日本幌延實驗室之經驗可知: 於硬岩的水力破裂法、套鑽法、圓錐孔底套鑽法三者可 適用,於沉積岩地層可能均不適用但可利用井孔崩落法。

#### 2. 在地表與地下URL之現地應力量測值比較

在日本幌延沉積岩層內,從地下URL廊道所測得的 最大或最小水平應力值,常比由地表所獲得的值為小, 大約僅是地表調查時之一半,這種現象被認為是因為豎 井與廊道之開挖而導致透水性良好的沉積岩地層內地 下孔隙壓力下降之結果。透水性低的花崗質硬岩則較無 此一差異。

# 2.2 地下坑道之地盤加速度

瑞浪地下實驗室(MIU)在 2008 年 11 月至 2014 年 12 月將近六年期間,已監測到附近發生 19 個地 震事件之實測地盤加速度數據,詳細資料見圖 2-3。正可供了解不同深度下之岩盤地動特性,可作為 地底處置坑道之襯砌設計與分析所用。

幌延實驗室,也在地面(Z=0)以及豎井內之深度 Z=250m 及 Z=350m 三深度處裝設地震儀,佈設位置 參見圖 2-4。在 Z=250m 處自 2011 年 8 月起開始量 測,已量測到沉積地層不少地底地盤最大震動加速度 (PGA, peak ground acceleration)資料。及至挖到深度 Z=350m 處則自 2016 年 1 月起才有地盤最大震動加 速度(PGA) 量測資料在 2011 年前,可用在距幌延西 北方的豐富町地區,地下 Z=135m 處,自 2003 年已 有量測之數據可供輔助參考。兩實驗室 PGA 之深度 分布繪於圖圖 2-5 及圖 2-6。



圖2-3 瑞浪MIU花崗岩地層不同深度之實測地盤加速度

PGA



圖2-5 瑞浪MIU花崗岩地層地震加速度PGA之深度分布



圖2-6 幌延在地下 Z=250、350m處之地盤最大加速度 PGA深度分布

綜上瑞浪花崗岩地層及幌延沉積地層試驗結果的相 互比較,在忽略地震特性(地震規模大小、震央距離遠近、 震源深淺、震動高低頻率等因素)之下,可初步將花崗質 地層與沉積地層兩種不同處置地層之受地震反應震動 PGA 差異,歸納比較之於圖 2-7。



#### A、岩性因素:

在地表面 Z=0m,花崗質地層多數 PGA< 20 gal (但有紀錄到 66 gal);而沉積地層多數 PGA< 5 gal (但 有紀錄到 17gal)。故知沉積岩地層之受震 PGA 小於花 崗質地層,在地表面 PGA 約僅為花崗質地層 1/4 左 右,反映顯示對低勁度的沉積岩地層(例如泥岩)可能具 有較佳吸震能力。

#### B、深度因素:

(1)、花崗質地層之 PGA:在地表 Z=0m,PGA小於 20 gal,在 Z=100m處 PGA 平均衰減成 65%、在深度 Z=300m處 PGA 衰減成 40%,在 Z=500m處 PGA 僅剩 12%,顯示在 Z=500m處置深度花崗質地層之受地震影 響已不大。

(2)、沉積地層之 PGA:在地表 Z=0m, PGA 小於 5gal, 在 Z=250m 處 PGA 在 2 gal 以下,衰減成 40%,但在 Z=350m 處 PGA 大多在 0.5 gal 以下,衰減成僅剩 10%, 顯示沉積地層在處置深度 Z=350m 幾乎已不受地震影響。 也反映,在受震考慮上沉積地層之處置深度可以設計在 比花崗質淺之深度。

#### 2.3 地工技術經驗

地下研究實驗室(URL)的優點係可以透過在深層 地質環境中應用傳統或先進工程技術的機會,以驗證地 下設施之建造、維護之安全與可行性。在 JAEA 第Ⅱ個 中期計劃中,目標是在瑞浪(深度 500 m)及在幌延(深 度 350 m)豎井及廊道,測試用於深地層下的建造施工 與對策技術的適用性。

在瑞浪和幌延的豎井和廊道的開挖中所採用的設 計和施工技術是公路和鐵路隧道的一般工程技術,可以 應用於各類岩石。但這些技術應予謹慎處理,因為在瑞 浪需要採取抵擋大量地下水流入的對策,而在幌延則需 要一個力學穩定和支撐的系統。

- (1)先導探查鑽孔— 在瑞浪和幌延結果確定先導探查鑽 孔對減少地質環境的不確定性很有用。
- (2)豎井降挖之循環時間與岩體分類有相關性,但機械開 挖或鑽炸法之降挖循環時間幾乎相同。在幌延沉積岩 地層廊道開挖經驗中,垂直於天然裂縫方向的開挖速 率比較快。
- (3)混凝土襯砌 豎井支撑混凝土襯砌之最小、最大應 力正好分別發生在水平現地最大、最小主應力方向 上,應在水平現地最小主應力方向上的混凝土襯砌 內部之下方安裝應力計,以估算豎井混凝土支撑系 統的穩定性。混凝土襯砌會從最初圓柱形逐漸變形 為橢圓形,且其長軸方向平行於水平最小主應力方 向。

# 2.4 坑道開挖引致之圍岩損傷區

由幌延地下實驗室建造施工引起的 EDZ 範圍的調 查發現如下:

- (1)對於軟質沉積岩,如在幌延(Horonobe)地區岩石,可以目視判定 EDZ 的分佈和特徵,據地質測繪圖及廊 道鑽孔調查結果構建 EDZ 型態的概念模型。對瑞浪 Mizunami 地區的花崗岩類岩石,開挖引起的 EDZ 無 法透過目視觀測識別。
- (2)在幌延(Horonobe) 沉積岩的深度 250 m 的觀察到 EDZ 裂縫不受開挖方向的主控,EDZ 裂縫的形成是沿 著弱面而發生,受既有裂縫型態之控制,開挖損傷區 EDZ 的裂隙形態是由於新生裂隙及既有裂縫所構成。 在既有裂縫總跡長較小的區域,新生裂縫總跡長較大, 既有裂縫總跡長與新生裂縫總跡長之間存在負相關 性。

#### IV. 結論

本計畫係透由整理研析日本幌延(Horonobe)及瑞浪 (Mizunami)深地層研究實驗室地工技術驗證成果。主要 結論歸納如下:(1)硬岩常用現地應力量測技術的水力 破裂法、套鑽法、圓錐孔底套鑽法不適用幌延這類軟沉 積岩;可用井孔崩落法。(2) 花崗質地層受地震在500m 處PGA僅剩地面的12%,沉積地層在350m處PGA僅剩 10%,幾乎已不受地震影響。(3)在地表花崗質地層PGA 多小於20gal、沉積地層PGA多小於5gal,僅約為花崗質 地層的1/4,顯示沉積地層具有較佳吸震能耐。(4) 機械 開挖或鑽炸法之豎井降挖循環時間幾乎相同。垂直於沉 積岩的天然裂縫方向開挖速率比較快。(5) EDZ區裂縫不 受開挖方向的主控,而是沿著弱面而發生的,受既有裂 縫型態之控制。(6)超細波特蘭水泥可用以改善在高地下 水壓環境下且初始滲透係數約只1 Lugeon的低滲透性岩 石,這是普通波特蘭水泥無法達成的。(7) 腎井混凝土襯 砌之最小、最大應力正好分別發生在現地最大、最小水 平主應力方向上。(8) 膨潤土緩衝材在湧水點易被侵蝕 而流失,受湧水壓力之影響勝於湧水量。

# 參考文獻

- [1] 日本幌延地下實驗室資料庫 (https://www.jaea.go.jp/04 /horonobe/disclosure ikakuseika.html)
- [2] 日本瑞浪地下實驗室資料庫 (https://www.jaea.go.jp/04/tono///miu/list.html)
- [3] 台灣電力公司(2010),我國用過核子燃料最終處 置初步技術可行性評估報告,SNFD2009。
- [4] 台電公司(2017),用過核子燃料最終處置計畫-潛在處置母岩特性調查與評估階段:我國用過核 子燃料最終處置技術可行性評估報告 SNFD2017。
- [5] 郭銘傳(2015), TPC-NUMO 高放射性廢棄物地 質處置交流年會,出國報告,原能會。
- [6] 楊長義 (2014),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),國科會專題計畫 完整報告,NSC 102-2623-E-032-002-NU。
- [7] 楊長義(2015),台灣虛擬場址地底實驗室配置之 岩力考量,2015兩岸放射性廢棄物地質處置研討 會,北京。
- [8] 楊長義(2015),先進國家地下實驗室岩力實驗之 規劃與成果研析,科技部專題計畫完整報告, NSC 103-NU-E-032-001-NU。
- [9] 楊長義(2016),先進國家地下實驗室熱水力(THM) 耦合試驗成果與分析模式之研析,科技部專題計 畫完整報告,MOST 104-NU-E-032-002-NU。
- [10] 楊長義、李宏輝、萬明憲、吳勁頤(2016,11),以 PFC 模擬推估台灣潛在地質處置場母岩之力學參 數,2016 岩盤工程研討會,高雄,148-157.
- [11] 楊長義、陳文泉、萬明憲、吳勁頤(2016),台灣 潛在場址 THM 試驗之概念模型配置,第六屆廢物 地下處置學術研討會,敦煌,甘肅,71-77。
- [12] 楊長義 (2017),台灣潛在母岩破壞強度特性與 處置坑道破裂關係之研析,科技部專題計畫成 果報告,MOST 105-NU-E-032-001-NU。
- [13] 楊長義(2018),研析瑞典 SR-site 處置坑道岩力設計前提之訂定原則,科技部專題計畫成果報告,MOST 106-2623-E-032-002-NU。
- [14] 李宏輝、楊長義(2018),熱力引致處置母岩損傷 及其對處置坑道之影響研析,科技部專題計畫成 果報告,MOST 106-2623-E-606-009-NU。
- [15] 楊長義 (2019),研析 SKB 訂定地震危害之關鍵性 裂面尺寸邏輯,,科技部專題計畫成果報告, MOST 107-NU-E-032-001-NU。

# 用過核子燃料最終處置近場溫度估算數值解之研究 Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號:109-2623-E-008-003-NU 計畫主持人:陳浩維 e-mail:hwchen@ncu.edu.tw 計畫參與人員:王顥鈞、蘇揚達、安蒂安、雅尤、費安妲、法東尼 執行單位:國立中央大學地球科學學系(地球物理研究所)

# 摘要

本計畫為透過自行發展的軟體進行於不同時、空尺度與 場址情境下的近場溫度估算。探討用過核子燃料(核料) 最終處置場或於地熱開發區內受到大尺度地質、地體構 造的控制;當受到中尺度的不同地熱物理參數的影響,諸 如岩性、斷層構造、斷層破碎帶等,或受到小尺度的岩石 片理、劈理等的側向變化其地熱物理參數受孔隙率、岩 石密度、熱傳導係數、滲透率等參數影響的基礎研究。 研究基本構想為「溫度估算受到岩性物理參數、地質與 邊界條件影響,數值解為必要之手段」。透過本計畫的執 行針對其應用發展來進一步探討各種可能議題,如以一 維溫度場模擬問題為例,針對最終處置場井下近場溫度 的監測,可按收集到的觀測資料針對溫度-深度變化與溫 度梯度的量度進行擬合模擬。透過數值解與解析解兩者 的比較,瞭解簡化的解析解與兼顧實際地質與邊界條件 的數值解兩者間互補的關係,強調基礎研究與應用發展 縱向整合的必要性。

**闌鍵詞:**核子燃料, 核料, 最終處置, 近場, 估算, 溫度模 擬, 數值解

#### Abstract

This project uses an in-house self-developed software to estimate near- and far-field temperature distribution under different time, space scales and site scenarios. Explore the final disposal site of used nuclear fuel (nuclear material) under the control of large-scale geology and terrane structure in the geothermal development zone; when it is affected by different meso-scale geothermal physical parameters, such as lithology, fault structure, and fault brecciated or fragmented zone. The basic research on temperature simulation rely on variety of scaled physical parameters affected by porosity, rock density, thermal conductivity, permeability and other parameters. The basic topic of the research is on issue of "temperature estimation is affected by lithological physical parameters, geology and boundary conditions, and numerical solution is a necessary method." Through the proposed research plan, various possible issues will be explored for its potential applications extended from research and development. Taking the one-dimensional temperature field simulation problem as an example, for the monitoring of the near-field downhole temperature distribution of the final disposal site, the collected temperature-depth observation data can be used to study one-dimensional variation of geothermal parameters. The measurement of change and temperature gradient is simulated by trial and error fitting. Through the comparison between the numerical solution and the analytical solution,

we can understand the complementary relationship between the simplified analytical solution and the numerical solution that takes into account the actual geology and boundary conditions. Emphasizing the necessity of having the initial vertical integration (assimilation) of basic geothermal research and development that is important at initial stage and can become useful for future potential application.

**Keywords:** Nuclear fuel, Nuclear material, Final disposal, Near-field, Temperature simulation, Numerical solution

# I. 前言

台灣地區的火山活動和斷層(地震)活動,皆與台灣 大地構造的時、空演化息息相關,岩體的抬升或沉陷主 要係取決於大地架構及其演化特性。岩體的抬升伴隨著 剝蝕作用將對深層地質處置有不利影響,相對地,岩體 發生沉陷將伴隨著沈積作用,將會對深層地質處置的環 境條件有利。區域性長時間地殼變動,探討萬年來冰期 結束後,於河口沖積扇的沉積環境層序地層中所記錄的 抬升或沉陷作用,以及數百萬年尺度造山帶逆衝擠壓作 用,轉變為數十萬年至百萬年間發育成沉陷盆地之地殼 變動機制等的相關研究目前尚仍拘限於人為發想與解 釋層面。透過數值模擬來分析與預測地殼變動對最終處 置場或於地熱開發的影響為必要的手段。數值模擬需有 足夠的資料庫如蒐集既有的溫、壓、地下水及陸、海域 震測資料,針對火山和斷層活動作為潛在處置區域篩選 之依據。本計畫為透過自行發展的軟體進行於不同時、 空尺度與場址情境下的近場溫度估算。探討用過核子燃 料(核料)最終處置場或於地熱開發區內受到大尺度地 質、地體構造的控制;當受到中尺度的不同地熱物理參 數的影響,諸如岩性、斷層構造、斷層破碎帶等,或受到 小尺度的岩石片理、劈理等的侧向變化其地熱物理參數 受孔隙率、岩石密度、熱傳導係數、滲透率等參數影響 的基礎研究。處置母岩特性調查的基本資料收集及其溫 場分布影響性的研究工作,為本計畫研究的主要重點。

#### II. 主要內容

前言 台灣地區的火山活動和斷層(地震)活動,皆與 台灣大地構造的時、空演化息息相關,岩體的抬升或沉 陷主要係取決於大地架構及其演化特性。岩體的抬升祥 隨著剝蝕作用將對深層地質處置有不利影響,相對地, 岩體發生沉陷將伴隨著沈積作用,將會對深層地質處置 的環境條件有利。區域性長時間地殼變動,探討萬年來 冰期結束後,於河口沖積扇的沉積環境層序地層中所記 錄的抬升或沉陷作用,以及數百萬年尺度造山帶逆衝擠 壓作用,轉變為數十萬年至百萬年間發育成沉陷盆地之 研究目的本計畫主題為探討用過核子燃料(核料) 的最終處置場或於地熱開發區內受大尺度地質、斷層構 造和片理、斷層破碎帶,並與中或小尺度的地熱物理參 數如受岩性變化、孔隙率、岩石密度、熱傳導係數、滲 透率等參數影響的基礎研究。研究基本構想為「溫度估 算受到岩性物理參數、地質與邊界條件影響,數值解為 必要之手段。但仍需先探討與比較不同數值方法的計算 效率與所得數值解的精準度及與已知解析解兩者間差 異的比較」,並進一步針對其應用發展,如以一維溫度 場模擬問題,針對最終處置場井下近場溫度的監測,可 按收集到的觀測資料針對溫度-深度變化與溫度梯度的 量度進行擬合模擬。透過數值解與解析解兩者的比較, 瞭解簡化的解析解與兼顧實際地質與邊界條件的數值 解兩者間互補的關係,強調基礎研究與應用發展縱向整 合的必要性。

在地熱能源開發上,因地熱為淨潔、環保之再生能 源。發生世界能源危機及全球暖化爭議以來,各國莫不 積極開發各種替代能源。依國際地熱協會(IGA)統計,全 球傳統地熱總發電量約 12GW,且以每年約 5%幅度增 加。其中多為火山型地熱,而變質岩裂隙型地熱電廠則 相當少。全球利用地熱的驅勢已逐年增加,目前全球約 有 76 個國家約 700 個地熱開發計畫在進行,顯示全球 之地熱開發正逐漸加速(WGC,2015)。日本核災事件發生 後,台灣考量替代性能源的議題,亦愈趨重要。

目前的想法是利用電腦數值模擬手段描述地下熱 流傳導與對流過程可幫助對台灣區域熱構造的解釋。透 過自行發展地熱數值模擬模組,其中的應用為針對用過 核料最終處置近場進行一維、二維與三維數值情境下受 不同邊界條件下地表以下溫度分布的估算。

# 井下一維地熱地溫梯度與溫度受基本地熱物理參數的 模擬

本節為以一維地熱模擬程式模擬地熱於地下的熱 傳導過程。採用一維熱力學方程,且熱擴散係數(thermal diffusivity)為地表深度(x)的變數。考慮一維熱力學方程:

$$\dot{T} = \frac{d}{dx} \left( C(x) \frac{dT}{dx} \right), \quad C = \frac{k}{c_p \rho}$$

- T: 溫度(temperature)
- C: 熱擴散率(thermal diffusivity,; m2s-1)
- K: 熱導係數(thermal conductivity; Wm-1K-1)
- ρ: 密度(mass density; kg m-3)

c: 比熱(specific heat capacity; J·kg-1 K-1)

K: 絕對溫度(absolute temperature)

以有限差分法配合錯位格點推導出的熱傳導公式

$$T_{I}^{m+1} = T_{I}^{m} + \frac{\Delta t}{h^{2}} \left( C_{I+1/2} \left( T_{I+1}^{m} - T_{I}^{m} \right) - C_{I-1/2} \left( T_{I}^{m} - T_{I-1}^{m} \right) \right)$$

模擬初始條件為:地表至深度 800 公尺溫度線性增加, 由5度升高到 35度,如下圖之最左圖。熱擴散係數設 定為平滑步階函數(smooth step function),由0.002 上升 至0.008(圖中之左二)。圖右之上下層模擬邊界條件為上 層溫度模擬日照溫度變化,溫度由5度升高到 25度, 再降至5度;下層溫度模擬加熱過程,溫度短時間內由 35度升高到 85度。模擬結果可以很明顯的看出熱擴散 係數(thermal diffusivity)為深度的變數時,對於熱的傳遞 會有明顯的影響。若地表溫度維持不變(5度),則達成熱 平衡後的溫度變化會大約呈現為兩條直線,此兩條直線 的斜率比為 4:1,與熱擴散係數為一倒數關係(0.002: 0.008)。



圖一 地熱模擬初始條件:(a)溫度,(b)熱擴散係數,(c)上 層邊界和(d)下層邊界。





此外,在長期地質時間影響下,熱對地質條件的影響應 不可忽視。若針對放射性廢棄物處置場址與深層地質處 置、選址實務以及選址策略與規劃等議題,本計畫主題 應有實質的幫助。如選址方面與深層地質處置的研究, 主要若是以科學問題為導向,則透過地熱數值模擬技術 的建立可幫助: (1)以科學為基準的應用發展;(2)強化 選址過程的實務經驗;(2)建立選址過程的經驗或成果; (4)延伸廢棄物處置安全案例(safety case)的研習經驗與 學習新觀點。這些議題的建立與學習經驗皆可做為未來 長期發展研究的基礎。

同時,本計畫亦能進一步的延伸為能夠幫忙從事開發地

熱能源。如進行(1)瞭解台灣地熱區地熱模式,建立初步 的(2) 大尺度地質、斷層構造和片理、斷層破碎帶等地質 數值模型,建立資料庫與概念數值模型,(3)考量如何結 合國外既有技術與深化國內自行發展適合地科學界進 行基礎研究的數值模擬方法,(4) 依照大屯、清水、金崙、 土場等已知地熱地區進行勘探和從事室內試驗以獲取 開採地熱必要的地熱物理參數,(5)實質化與精準化原有 的初步的概念數值模型。這些皆應是學界需積極進行探 索的議題。

本計畫構想即在於擬自行發展地熱數值模擬模組,未來 可與一些其他相關的研究課題做進一步結合。例如如何 將熱效應與地震波波傳,岩石波速這些考量受熱波速變 慢、振幅衰減,產生頻散效應與相關的岩石物理參數加 以結合,以便能考量從事更實際可應用的地物課題的研 究。研究成果進一步的可以與已知的軟體如 TOUGH2 模 擬結果比較。 為使計畫執行內容與研究方向與需求契 合,透過召開開工討論會議,由各主持人簡報說明計畫 執行的方向及內容,並藉由討論避免各計畫間有過於相 似的工作或無法執行的研究項目。開工討論會議中曾建 議研究方向須依照或著重於非溫度異常場址的溫度場 估算為主,針對此項建議,本計畫擬向對口單位尋求協 助向相關單位溝通,蒐集數值模擬所需要的岩體物性、 地質構造等資料,展開與評估燃料最終處置近場溫度估 算之後續研究。然按二月末期間所召開的開工會議中所 說,合作單位可能無相關的資料庫可提供計畫主持人參 考。針對此種情況,主持人希望計畫核可執行單位給予 協助。計畫核可執行單位建議按台電公司 SNFD2017 於 地質處置合適性的整體評估的報告來進行計畫。評估結 果顯示,除了位於台灣東南部地熱區花崗岩體外,其餘 花崗岩體至今尚未發現必須排除作為處置母岩之不利 條件。此結論可供作為下階段台灣處置母岩的選擇與決 定優先調查對象。故建議行政院原子能委員會能標定、 建議及提供一處場址,展開與評估燃料最終處置近場溫 度估算之研究。目前的想法是利用電腦數值模擬手段描 述地下熱流傳導與對流過程可幫助對台灣區域熱構造 的解釋。透過自行發展地熱數值模擬模組,其中的應用 為針對用過核料最終處置近場進行一維、二維與三維數 值情境下受不同邊界條件下地表以下溫度分布的估算。 地熱模擬研究方法 本計畫研究方法為透過地熱模擬的 基本數理與數值方法進行數值模擬。地熱熱能轉換機制 基本上包括熱傳導(heat conduction),熱輻射 (heat radiation)與熱對流(heat convection),其中層 流(advection)為對流的特例。針對地熱模擬中的主要 考量因素而言,我們需知道,熱源(heat source),地下 溫度剖面的數值模型(isotherms),地下水的流動模式 (fluid flow pathways),地下水補充機制(recharge zone), 礦物受熱與地下水的置換(alternation mineralogy)地下 構造(structure)的流通性(fluid conduits)與邊界條件 (boundary condition) 等的影響。透過數值方法,例如 結合有限差分法與有限元素法進行一維,二維與三維的 數值模擬。在不同的空間尺度下可進行:井下地溫的測 量與模擬;二維與 三維的模擬則需考量不同的數值邊 界條件與地質,熱學參數並考量在地形受風化、侵蝕造 山運動等地質作用下對熱的交換、傳導與質能互換等因 素的考量下,進行地熱的時空變化模擬與預測其他相關

參數的可能變化等,原則上均可透過數值模擬進行系統 化的解析。

地熱模擬應用示範目前本研究團隊在無經費補助下已 自行建立了地熱模擬的基本數值方法,初步的一維,二 維與三維的地熱數值模擬示範與成果發表(參見相關論 著)。本計畫研究構想書示範一個情境模擬問題:比如 潛在深層地質處置場址的母岩當有裂隙存在時,場址溫 度的變化受圍岩特性與裂隙分布密度、裂隙寬度、與裂 隙或斷層泥物性皆有相當關係。圖三中模擬若在花崗岩 區內有斷層或裂隙時場址溫度延裂隙傳輸熱能而改變 場址區內溫度的模擬。圖三中斷層或裂隙尺度較大以便 較易說明溫度的細節變化。



圖三花崗岩區內存在斷層或裂隙時溫度延裂隙擴散傳 輸熱能而改變場址內溫度分布。

溫度與地溫梯度隨時間與深度的變化除受熱源岩石的 物性及產熱與傳熱能力有關外,地表以下的溫度分布受 地表地形的影響也相當劇烈。透過地熱數值模擬的事前 評估,如圖四所示可知,地表以下的溫度分布除受地表 熱源影響與本身總體產熱有關外,溫度在約十公里的 殼厚度範圍內的溫度變化深受地表地形的側向急劇變 化影響。按處置計畫的應用需求而言,地表下 1,000 公 尺範圍內的岩體特性與地質穩定性評估愈顯重要。愈低 緩的地形變化,造成愈深度的溫度擾動。故潛在深層地 質處置場址的選址、斷層構造和斷層破碎帶等地質數據 資幣與規劃等,皆為必要的手段。地熱數值模擬在此方 面可達到預期與預估的目標。



圖四 透過地熱數值模擬,地表以下的溫度分布在約 十公里的地殼厚度範圍內,溫度變化深受地表地形的 側向急劇變化影響。

# 二維火成岩脈入侵相對均質地下最終處置場址的地熱 模擬

二維地溫分布的情境模擬可以如下假設一火成岩脈侵 入於相對均質的地下最終處置場址的簡化模型的情況 來演示。

三維地表侵蝕與沉積對地熱與地溫分布影響的模擬 圖九至圖十二是三維地表侵蝕與沉積對地熱與地溫分 布影響的情境模擬。考量在地形受風化、侵蝕造山 運 動等地質作用下對熱的交換、傳導與質能互換等因素 的影響下,進行地熱的時空變化模擬與預測其他相關 參數如震波速度與衰減的可能變化。原則上均可透過 數值模擬進行系統化的解析。細節因牽涉到理論部分



# 無法詳述待論文發表後可自行參閱。

Heat Pulse

圖五 台灣火成岩脈侵入於相對均質的地下最終處置場 址簡化地熱模型的地溫分布模擬

#### 板塊碰撞與隱沒作用對大尺度溫度分布的影響

地殼深度為(~30km)而時間尺度為千至萬年的解析與數 值解、岩漿庫由上部地函侵入至地殼在空間溫場隨時 間向外擴散,由暫態逐漸進入穩態所需的時間。進一 步受溫度控制的大陸與海洋板塊彼此碰撞、隱沒、停 滯而躺平的時、空尺度模擬現象的計算皆已完成。針 對台灣大地構造的時、空演化目前人仍有資料不足的 限制。



圖六 板塊碰撞與隱沒作用對大尺度溫度分布的模擬

# III. 結果與討論

建立最終處置場址的簡化模型及依前人的研究成 果找出裂隙特性參數,台電過去的裂隙特性資料與裂隙 連通性的研究與模擬技術應可引入成為模型的前置資 料,若有則可考量岩脈群岩石構造對溫場影响,建構模 型時採用地質鑽探岩心井錄、井測及孔壁攝影判識資料 作為已知裂隙控制點,進行條件式模擬及修正數值模型 以確保裂隙採樣與建模參數和分析結果一致。具體評估 衰變熱,相關熱傳與熱演化變化,是否對於處置系統安 全產生影響。藉由前人的研究成果,瞭解地表裂隙量測 方式,取得本島與離島花崗岩裂隙參數分布,數據與脆 韌性構造特徵,探討裂隙參數分布隨空間變化特性以及 區域性應力 場分布,獲得臺灣本島花崗岩體地表變形 逐年累積之觀測數據,分析區域性地殼抬升或沉陷趨勢, 進一步瞭解臺灣本島花崗岩體區域地表應變率變化情 形,探討地殼於觀測期間內之變 動特性。岩石之熱傳特 性及熱變形特性。岩石力學概念模式包含基本的力學及 變形行為係利用岩石的彈性參數 (體積模數與剪力模數)

描述岩體受力後之變形行為,以及利用其強度參數檢核 受力後之破壞機制。

情境模擬目前已發展的模擬情境包括於小尺度井測 (borehole)場址的模擬、地殼深度為(~30km)而時間尺度 為千至萬年的解析與數值解、岩漿庫由上部地函侵入至 地殼在空間溫場隨時間向外擴散,由暫態逐漸進入穩態 所需的時間。進一步受溫度控制的大陸與海洋板塊彼此 碰撞、隱沒、停滯而躺平的時、空尺度模擬現象的計算 皆已完成。針對台灣大地構造的時、空演化目前人仍有 資料不足的限制,詳見 pptx 附件中成果的展示。

## IV. 結論

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

# 參考文獻

- 陳浩維, 2017, Decoupled and Dispersion Responses by Low-rank Fractional Laplacian Simulation, 2017 年臺 灣地球科學聯合學術研討會。
- [2] 陳浩維, 2016,一維度到三維度的熱流模擬, 2016年 臺灣地球科學聯合學術研討會。
- [3] 陳致瑋、陳浩維、劉家瑄,零支距波線模擬於疊後 剖面時深轉換、應用於下枋寮海盆三維震測資料之 沉積地質解釋,2016 年臺灣地球科學聯合學術研討 會。
- [4] Li, K. S. and H. W. Chen, 2012, Illumination and resolution analyses on marine seismic data acquisiti ons by adjoint wavefield method, Terr. Atmos. Oce an. Sci., 23, 6, 621632, doi: 10.3319/TAO.2012.06. 15.01(T).
- [5] Lee\*, S. J., H. W. Chen, K. F. Ma, 2007, Strong motion simulation of the 1999, ChiChi, Taiwan eart hquake from a realistic 3D source and crustal struc ture, J. Geophys. Res., Vol. 112, B06307,doi:10.102 9/2006JB004615.
- [6] Kang, I. B., and H. W. Chen\*, 2003, Wavefield Simulation in General Elastic and Viscoelastic Fracture Media Based upon Pseudo-spectral Method, Terr. Atmos. Ocean. Sci., 14, 4, 487–504.
- [7] Chen\*, H. W., 1996, Staggered–grid pseudospectral viscoacoustic wave field simulation in two-dimensional media, Journal of Acoust. Soc. of Am., 100, No. 1, 120– 131.
- [8] 陳浩維(2016),一維度到三維度的熱流模擬,2016 年臺灣地球科學聯合學術研討會。

# 放射性核種衰變鏈於裂隙岩層遷移解析解快速預測工具發展 與深層地質處置安全評估應用

# Analytical model for rapidly simulating migration of radionuclide decay chain in a fractured rock and its application to safety assessment of deep geological disposal

計畫編號:109-2623-E-008-004-NU 計畫主持人:陳瑞昇 特聘教授 e-mail:jschen@geo.ncu.edu.tw 計畫共同主持人:梁菁萍 教授 執行單位:國立中央大學應用地質研究所

# 摘要

本計畫提出一個全新的放射性核種衰變鏈於裂隙-母岩介質系統傳輸的解析解模式,所發展的解析解模式 主要根據互相耦合的裂隙的移流-延散方程式與在母岩 的擴散方程式。考慮的傳輸機制包含裂隙地下水的移流、 延散、放射性衰變、裂隙表面吸附作用以及母岩中的擴 散與吸附作用。所發展的解析解經與 Laplace 轉換有限 差分模式比較確認其正確性。模式接著應用於了解傳輸 過程/機制對放射性核種衰變鏈在裂隙-母岩系統傳輸 的影響。最後,模式應用於計算地質處置場址安全評估 的劑量率。

**闌鍵詞:**裂隙、母岩、解析解、放射性核種衰變鏈、輻 射劑量評估、深地層處置。

#### Abstract

This study is designed to develop a novel analytical model for radionuclide decay chain transport through a coupled fracture-matrix system. The analytical model is developed in terms of two coupled transport equations, an advection-dispersion equation for the fracture and an diffusion equation for the porous rock matrix. The processes include advection, dispersion, radioactive decay and sorption onto the surface of the fracture and diffusion, radioactive decay and sorption in the microfissures of the matrix. The correctness of the developed analytical model is confirmed by a Laplace transform finite difference model. The developed analytical model is then applied to understand the transport processes/mechanisms affecting radionuclide transport in fractured porous media. Ultimately, the developed analytical model is applied to calculate dose rate for safety assessment of a nuclear waste deep geologic disposal.

**Keywords:** Fracture, Matrix, Analytical solution, Radionuclide decay chain, Radiological dose assessment, Deep geological disposal.

# I. 前言

為取得深地層處置設施的建造、營運與封閉後的 許可,處置設施必須是安全而且證明可以符合保護人 類與環境免於因為其放射性廢棄物的儲存所帶來的長 期的危害,因此分析處置設施的功能表現與評估其安 全性為一重要工作。

考慮圖 1 的深層地質處置設施,安全評估目的為

估算經由裂隙的地下水傳輸的核種,透過主要的曝露 途徑(例如:飲用地下水)可能產生的劑量(或風險)。對 於計算劑量,核種的濃度(放射性活度)為最為重要的 關鍵變數,藉由實驗室試驗真實呈現核種由處置設施 外釋後的長期遷移行為是不可能,因此在現地試驗、量 測或觀測資料輔助下,使用地下水核種傳輸模式,計算 核種外釋經由裂隙地下水遷移的核種濃度為最有效方 法。因此,發展地下水核種傳輸模式做為預測核種經由 裂隙(fracture)-母岩(matrix)系統的地下水放射性濃度, 了解控制核種於裂隙-母岩系統中地下水傳輸相關機制 的合理性,將是非常重要的一件工作。

一般認為在裂隙-母岩系統,因為母岩滲透性 (permeability)遠較裂隙滲透性為低,因此裂隙岩層地下 水流動大部份是經由開放的裂隙。這些開放的裂隙為 流動的通道(flowing channel)提供核種到生物圈的有效 途徑(pathway)。裂隙內隨地下水流動的核種可藉由所 謂的母岩擴散(matrix diffusion)而進入到母岩,因此母 岩內相對較不易移動的地下水可儲存一部份的核種, 減低經由裂隙外釋的濃度。

對高放射性射廢棄物的管理最大挑戰在於選擇處 置設施確保數千年安全(NEA, 1999)。一般可以藉由求 解移流-延散方程式(advection-dispersion equation)以發 展預測長期核種行為的地下水傳輸模式,儘管解析解 模式只能使用於均質(homogeneous)介質與相對較為簡 單與規則的幾何形狀,解析解模式相較於數值模式需 要大量的計算時間而言,是快速且有效率的核種長期 行為預測工具。解析解模式特別可應用當可取得的資 料並無法進行較為複雜的評估或者保守地選擇模式參 數而進行基於法規所需的評估。因此發展放射性核種 於裂隙-母岩系統傳輸的解析解為近三十年相關領域重 要的工作。

放射性核種於裂隙-母岩系統遷移的解析解的相關 文獻大可以發現相關解析解發展的研究開始於Tang et al. (1981),他們考慮單一核種於單一裂隙的傳輸,在裂隙內 核種的傳輸機制包括沿水流方向的移流、沿水流方向延 散、一階衰變反應與平衡吸附,而母岩內的傳輸機制則 只考慮垂直水流方向的擴散、一階衰變反應與平衡吸附。 Barker (1982)提出單一核種於存在一組互相平行的兩裂 隙的裂隙地層的Laplace域的解析解,其要計算原區域濃 度則須藉由Laplace數值逆轉換。Sudicky and Frind (1982) 發展單一核種於存在一組互相平行的兩裂隙的裂隙地 層的解析解。

由於放射性核種可衰變至其它的放射性產物或穩 定的核種(即所謂的子核種(progeny))而形成所謂的衰變 鏈(decay chain)。衰變鏈在模擬錒系(actinides)或超鈾 (transuranics)放射性核種的遷移特別重要,只考慮單一 核種的地下水核種傳輸模式將因為忽略母核種與子核 種間的交互作用,造成在預測衰變鏈子核種濃度的重大 誤差。Nair et al. (2010)發展三維數值地下水污染傳輸模 式探討一個長的核種衰變鏈並證明沒考慮衰變鏈所計 算的有效劑量將是有考慮衰變鏈所計算的所有效劑量 將是的1/1,000,此說明沒考慮衰變鏈將低估有效劑量值。 Sudicky and Frind (1984)發展兩個成員衰變鏈(twomember decay chain)於單一裂隙的裂隙地層的解析解,S 他們的解析解可以考慮兩個成員核種(母核種與子核種) 可以有各自不同的遲滯因子(retardation factor)。 Hodgkinson and Maul (1988)發展可以考慮任意核種數目 (或可稱任意長度)的衰變鏈於單一個裂隙傳輸的Laplace 域解析解,但是要計算原區域的核種濃度同樣也須藉由 Laplace數值逆轉換。Comenzana (2000)則指出Sudicky and Frind (1984)的解在模擬母核種與子核種在裂隙與母 岩都有相同遲滯因子其解析解模擬結果並不合理, Comenzana (2000)發展母核種與子核種在裂隙與母岩具 有相同遲滯因子的二個成員核種的解析解。Sun and Buscheck(2003)發展可以考慮任意成員核種數目的核種 衰變鏈於單一個裂隙傳輸的解析解,但是其他們的解析 解有一重大限制,就是每一衰變鏈中的成員核種必須有 相同的遲滯因子。Ojha et al. (2012)則考慮非平衡吸附而 發展單一核種於單一個裂隙傳輸的解析解。Hansen (2012)發展雙核種於一組互相平行裂隙單裂隙的裂隙 地層的解析解。Mahmoudzadeh et al. (2014)考慮多層不 同性質的母岩層,發展可以考慮任意核種數目的核種衰 變鏈於單一個裂隙傳輸的解析解。Shahkarami et al. (2015) 考慮裂隙中存在一滯水區而發考慮任意核種數目的核 種衰變鏈於單一個裂隙傳輸的解析解。Mahmoudzadeh et al. (2016)考慮多層不同性質的圓形母岩層,因此母岩的 擴散為徑向擴散(radial diffusion),發展可以考慮任意核 種數目的核種衰變鏈於單一個裂隙傳輸的解析解。

根據上述的發展現況與考慮深層地質處置安全評 估的需要,本計畫的目的為發展放射性核種衰變鏈於裂 隙-母岩系統遷移的解析解模式以做為快速預測工具, 並利用所發展解析解模式探討主要的傳輸參數對放射 性核種衰變鏈於裂隙-母岩系統遷移的影響,最終,應用 所發展的快速工具進行深層地質處置的安全評估。



圖1 置設施核種外釋經由裂隙遷移示意圖。

# II. 主要內容

本計畫考慮如圖 1 所示的飽和多孔岩體(saturated porous rock),此岩體內存在一裂隙,假設裂隙寬度遠小 於裂隙長度,由於裂隙的寬度很小,因此孔隙內的側向 延散(transverse dispersion)作用可使得核種在裂隙寬度 方向完全混合。另外,由於多孔母岩的滲透率非常低, 因此在母岩的傳輸機制只有分子擴散傳輸而不考慮移 流傳輸,假設在裂隙與母岩的吸附皆為線性平衡吸附, 核種衰變為一階衰變反應,所以在母岩-裂隙系統的核 種衰變鏈傳輸可以下述偏微分方程式以及初始與邊界 描述:

$$D_{f} \frac{\partial^{2} C_{i}(x,t)}{\partial x^{2}} - v_{f} \frac{\partial C_{i}(x,t)}{\partial x} - \lambda_{i} R_{f,i} C_{f,i}(x,t)$$
$$+ \lambda_{i-1} R_{f,i-1} C_{f,i-1}(x,t) - \frac{q_{i}(x,t)}{b} = R_{f,i} \frac{\partial C_{f,i}(x,t)}{\partial t}$$

$$\lambda_0 = 0 \qquad i = 1, \dots, N \tag{1}$$

$$D_{m} \frac{\partial^{2} C_{m,i}(x,z,t)}{\partial z^{2}} - \lambda_{i} R_{m,i} C_{m,i}(x,z,t) + \lambda_{i-1} R_{m,i-1} C_{m,i-1}(x,z,t)$$
$$= R_{m,i} \frac{\partial C_{m,i}(x,z,t)}{\partial t}$$

$$\lambda_0 = 0 \qquad i = 1, \dots, N \tag{2}$$

$$q_{i}(x,t) = -\varphi_{m}D_{m}\frac{\partial C_{m,i}(x,z,t)}{\partial z}\bigg|_{z=0} i = 1,..,N$$
(3)

$$C_{f,i}(x,t=0) = 0 (4)$$

$$C_{f,i}(x=0,t) = f_i(t)$$
 (5)

$$\frac{\partial C_{f,i}(x \to \infty, t)}{\partial x} = 0 \tag{6}$$

$$C_{m,i}(x, z = 0, t) = C_{f,i}(x, t)$$
(7)

$$\frac{\partial C_{m,i}(x, z \to \infty, t)}{\partial z} = 0 \tag{8}$$

此處 $C_{f,i}(x,t)$ 為裂隙內第i個成員核種的濃度[M/L<sup>3</sup>], x 為裂隙的空間座標[L], z為垂直裂隙的空間座標[L], t 為時間[T],  $D_f$ 為裂隙內的延散係數[L<sup>2</sup>/T],  $v_f$ 為裂隙內 的地下水滲流速度[L/T],  $\lambda_i$ 為為第i個核種的一階衰變 反應常數[T<sup>-1</sup>],  $R_{f,i}$ 為裂隙的第i個核種遲滯因子[-],  $C_{m,i}(x,z,t)$ 為母岩內第i個核種的濃度,  $D_m$ 為母岩內的 分子擴散係數[L<sup>2</sup>/T],  $R_{m,i}$ 為母岩內第i個核種遲滯因子 [-],  $q_i(x,t)$ 為裂隙中的核種經由分子擴散進入母岩的傳 輸通量。

針對上述控制方程式與初始及邊界條件,首先針對

式(1)-(8)的時間*t*進行 Laplace 轉換,可得  

$$D_{f} \frac{d^{2}\overline{C_{f,i}}(x,s)}{dx^{2}} - v_{f} \frac{d\overline{C_{f,i}}(x,s)}{dx} - (R_{f,i}s + \lambda_{i}R_{f,i})\overline{C_{f,i}}(x,s)$$

$$- \frac{\overline{q_{i}}(x,s)}{b} = -\lambda_{i-1}R_{f,i-1}\overline{C_{f,i-1}}(x,s)$$

$$\lambda_{0} = 0 \qquad i = 1,..,N$$
(9)

$$D_{m} \frac{d^{2} \overline{C_{m,i}}(x,z,s)}{dz^{2}} - \left(R_{m,i}s + \lambda_{i}R_{m,i}\right)\overline{C_{m,i}}(x,z,s)$$
$$= -\lambda_{i-1}R_{m,i-1}\overline{C_{m,i-1}}(x,z,s)$$

$$\lambda_0 = 0 \qquad i = 1, \dots, N \tag{10}$$

$$\overline{q_i}(x,s) = -\varphi_m D_m \frac{d\overline{C_{m,i}}(x,z,s)}{dz} \bigg|_{z=0}$$
(11)

$$\overline{C_{f,i}}(x=0,s) = \overline{f_i}(s)$$
(12)

$$\frac{d\overline{C_{f,i}}(x \to \infty, s)}{dx} = 0$$
(13)

$$\overline{C_{m,i}}(x,z=0,s) = \overline{C_{f,i}}(x,s)$$
(14)

$$\frac{d\overline{C_{m,i}}(x,z\to\infty,s)}{dz} = 0$$
(15)

求解(10)與(14)與(15)可解得 $\overline{C_{m,i}}(x,z \to \infty,s)$ ,利用 式(11)可計算 $\overline{q_i}(x,s)$ ,此時可以表示為 $\overline{C_{f,i}}(x=0,s)$ ,然 後將 $\overline{q_i}(x,s)$ 代入式(9),再進行消除式(9)的一階微分項 與移除邊界條件的(12)的非齊次項,再利用通用型積分 轉換可求得解析解,關於此過程可參考 Chen et al. (2012)。

### Ⅲ. 結果與討論

#### 3.1 解析解驗證

本計畫根據所推導的解析解撰寫了一個以 Fortran 程式語言為基礎的計算程式,本計畫首先進行驗證所發 展解析解的正確性與其 Fortran 計算程式的準確性,驗 證工作的進行是與數值解解模式進行驗證,數值解的發 展是採用相同的控制方程式與邊界條件下利用先進的 Laplace 轉換有限差分(Laplace transform finite difference, 簡稱 LTFD)法求解。考慮的驗證案例為<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu 放 射性核種衰變鏈傳輸模擬,相關之模式所需的傳輸參數 列於表 1。圖 2 為解析解與 LTFD 數值解在 1,000 年時 濃度隨空間變化的比較,顯示解析解與 LTFD 數值解兩 者有非常好的吻合,證明了本計畫所發展的解析解的正 確性與 Fortran 計算程式的準確性。

表 1 解析解模式於二個物種的核種衰變鏈  $(^{243}Am \rightarrow ^{239}Pu)$ 的應用案例參數,採用 Shahkarami et al.

(2015)的模擬案例。

參數	值
模式長度, L [m]	2,000
平均滲流速度, $v_f$ [m year <sup>-1</sup> ]	5
孔隙率, ø [-]	$5.0 \times 10^{-3}$
時間, t [year]	1,000
衰變常數, み [year-1]	
<sup>243</sup> Am	9.4×10 <sup>-5</sup>
<sup>239</sup> Pu	2.9×10 <sup>-5</sup>
初始核種量, $M_i^0$ [Bq/m <sup>2</sup> ]	
<sup>243</sup> Am	1
<sup>239</sup> Pu	0
裂隙內的延散係數, $D_f$ [m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup> ]	100
裂隙內的遲滯因子, $R_i^f$ [-]	
<sup>243</sup> Am	1
<sup>239</sup> Pu	1
母岩內的分子擴散係數, $D_m$ [m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup> ]	$2.5 \times 10^{-4}$
母岩內的遲滯因子, $R_i^m$ [-]	
<sup>243</sup> Am	7.95×10 <sup>3</sup>
239 <b>P</b>	$7.05 \times 10^{3}$



圖2<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu放射性核種衰變鏈傳輸模擬,圖中顯示 解析解與數值解在2個物種的濃度空間剖面有非常好的 吻合。

# 3.2 解析解應用

本計畫所發展的解析解模式,可用來了母岩擴散對 裂隙中放射性核種衰變鏈的傳輸,相關模擬參數與表1 同。但不同於驗證的案例,進一步考慮母岩內不同的分 子擴散係數,分別為2.5×10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>的10倍、100倍、 1,000倍、10,000倍與100,000倍。圖3到圖5為<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu 放射性核種在1,000年時分別採用地下水滲流速度為5 m/year、2.5 m/year、1 m/year下沿著x軸濃度空間剖面的 比較。可發現母岩內的擴散係數會對裂隙內核種濃度有 影響,當母岩分子擴散係數越大時,會較多裂隙的核種 擴散到母岩,因此會造成裂隙內放射性核種濃度下降的。 另外比較採用不同地下水流速的三組結果,可以發現當 地下水滲流速度較小時,母岩內的分子擴散係數對裂隙 內的放射性核種濃度影響越大,但根據過去文獻採用的 參數顯示(如表2及表3),現地母岩內的分子擴散係數的 約介於 $2.5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>,因此在這樣的參數 下,母岩分子擴散係數對於裂隙內的放射性核種濃度影 響較小。

接著我們進一步探討地下水流速對於放射性核種 衰變所產生的子物種在裂隙中傳輸上的影響。圖 6 為 <sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu 放射性核種在不同地下水滲流速度下 1,000 年時沿著 x 軸濃度空間剖面的比較。可以發現當 流速增大時,代表在相同時間下會有更多的原始放射性 核種(<sup>243</sup>Am)的溶質從污染源釋放進到裂隙中,因此會使 產生的子物種<sup>239</sup>Pu 濃度峰值較高,且會因為流速較大 的影響導致子物種的污染團向較遠的距離移動。





圖3<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu放射性核種在地下水滲流速度5 m/year 與1,000年時母岩內不同分子擴散係數下沿著x軸濃度空 間剖面的比較。



圖 4  $^{243}$ Am→ $^{239}$ Pu 放射性核種在地下水滲流速度 2.5 m/year 與 1,000 年時母岩內不同分子擴散係數下沿著 x 軸濃度空間剖面的比較。



圖5<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu放射性核種在地下水滲流速度1 m/year 與1,000年時母岩內不同分子擴散係數下沿著x軸濃度空 間剖面的比較。





圖6<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu放射性核種在1,000年時不同地下水滲 流速度下沿著x軸濃度空間剖面的比較。

Sudicky and Frind, 1984 Sudicky and Sudicky and Frind, 1981 Frind, 1982 模式長度, L [m] 300 10,000 平均滲流速度,  $v_f$  [m year<sup>1</sup>] 3.65 2.7 36.5 36.5 36.5 孔隙率, Ø [-] 0.01 0.01 0.01 時間, t [year] 1~50 1~28 1~28,00 衰變常數, み [year1] 物種一 5.6×10 5.6×10 1.4×10<sup>-1</sup> 物種二 1.5×10-3 初始核種量,  $M_l^0$  [Bq/m<sup>2</sup>] 物種一 1 1 1 物種二 0 裂隙内的延散係數, Dr 0 0 0 [m<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>] 裂隙内的遅滞因子,  $R_i^{f}$  [-] 物種一 1 1 1 物種二 1 母岩内的分子擴散係數, D" 5.0×10 5.0×10 3.2×10 [m<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>] 母岩內的遲滯因子,  $R_i^m$  [-] 物種一 1 1 1 物種-1

表2 文獻中的應用案例參數。

# 表3 文獻中的應用案例參數。

	Sun and	Shahkarami
	Buscheck, 2003	et al., 2015
模式長度, L [m]	1200	2,000
平均滲流速度, v <sub>f</sub> [m year <sup>1</sup> ]	36.5	5
	365	
孔隙率, ∅ [-]	0.01	0.005
時間, t [year]	3	1,000
衰變常數, み [year <sup>1</sup> ]		
物種一	1.4×10 <sup>-1</sup>	9.4×10 <sup>-5</sup>
物種二	1.5×10 <sup>-3</sup>	2.9×10 <sup>-5</sup>
初始核種量, $M_t^0$ [Bq/m <sup>2</sup> ]		
物種一	100	1
物種二	20	0
裂隙內的延散係數, $D_f$ [m <sup>2</sup> year <sup>1</sup> ]	182.5	100
裂隙內的遲滯因子, $R_i^f$ [-]		
物種一	1	1
物種二	1	1
母岩內的分子擴散係數, $D_m$ [m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup> ]	3.2×10 <sup>-3</sup>	$2.5 \times 10^{-4}$
	3.65×10 <sup>-3</sup>	
母岩內的遲滯因子, R <sub>1</sub> <sup>m</sup> [-]		
物種一	1	7.95×103
物種二	1	$7.95 \times 10^{3}$

#### 3.3 輻射劑量評估

一般放射性核種對人體健康的危害影響主要是人 體所接受到的劑量(dose)值,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。放射性核種 輻射劑量取決於輻射的型式與輻射的位置(體內或體外), 且劑量會隨放射性核種在身體各器官累積而產生變化, 因此劑量是針對每一器官乘以一特定之加權值來以估 算器官劑量(organ dose)或有效劑量(effective dose),加權 值通常是正比於相關於此器官輻射的總風險。劑量轉換 因子(dose conversion factor, DCF)則由攝入量估算為輻 射劑量的相對較直接方式,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:

 $Dose_i = C_i \times R_i \times DF_i$  (16) 此處  $Dose_i$  第i個放射性核種劑量[Sv/year],  $C_i \times R_i$ 為攝 入量,  $C_i$  為濃度[Bq/m<sup>3</sup>],  $R_i$  為水的攝入率(rate of intake)[L/day],  $DF_i$ 為劑量因子[Sv/ Bq], 不同核種的  $DF_i$ 可參考ICRP(2012)。

我們進一步採用所發展的解析解模式針對上述提 到的案例,來計算放射性核種對於人體造成的健康危害。 表 4、5 與 6 為 1,000 年時,分別在母岩內的考慮不同分 子擴散係數,當中每一組擴散係數中又會進一步比較不 同的地下水滲流速對於劑量評估的影響。模擬計算的結 果為針對<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu 放射性核種於距離核種來源位置 x = 500 m與x = 1,500 m處的 2 個核種的劑量因子( $DF_i$ ) 與計算得的相關劑量值以及核種總劑量,很明顯<sup>243</sup>Am 在不同距離下都有較高的劑量。而地下水滲流速度越大 時<sup>243</sup>Am 的劑量與總劑量會越大,且在位置離污染源釋 放的位置x = 500 m,<sup>243</sup>Am 甚至比產生的子物種<sup>239</sup>Pu 劑量高約 100 倍。而在採用不同大小的擴散係數下比較, 對於劑量的影響就沒這麼明顯。

表 4 考 慮 時 間 為 1,000 年 時 分 子 擴 散 係 數  $D_m = 2.5 \times 10^4 m^2 year^{-1}$ 下在不同位置處與不同地下水 滲流速度的2個核種劑量。

Nuclide	Ingestion dose coefficient, DFing (Sv/Bq)	Dose (Sv/year)					
Distance (m) 500					1500 m		
Velocity (	m year-1)	1	2.5	5	1	2.5	5
Diffusion	coefficient (m <sup>2</sup> ye	ear <sup>1</sup> )	0.00025				
<sup>243</sup> Am	$2.0 \times 10^{-7}$	9.74×10	<sup>8</sup> 1.07×10 <sup>-7</sup>	$1.08 \times 10^{-7}$	$1.72 \times 10^{-8}$	1.03×10 <sup>-7</sup>	1.06×10 <sup>-7</sup>
<sup>239</sup> Pu	2.5×10 <sup>-7</sup>	5.03×10	° 2.54×10 <sup>-9</sup>	1.28×10 <sup>-9</sup>	1.75×10 <sup>-9</sup>	7.30×10 <sup>-9</sup>	3.79×10 <sup>-9</sup>
Total		1.02×10	<sup>7</sup> 1.10×10 <sup>-7</sup>	$1.10 \times 10^{-7}$	1.90×10 <sup>-\$</sup>	1.10×10 <sup>-7</sup>	$1.10 \times 10^{-7}$

表 5 考 慮 時 間 為 1,000 年 時 分 子 擴 散 係 數  $D_m = 2.5 \times 10^{-2} m^2 year^{-1}$ 下在不同位置處與不同地下水 滲流速度的2個核種劑量。

Nuclide	Ingestion dose coefficient, DFing (Sv/Bq)	Dose (Sv/year)					
Distance	(m)	500 m			1500 m		
Velocity (	m year <sup>1</sup> )	1	2.5	5	1	2.5	5
Diffusion	coefficient (m <sup>2</sup> ye	ar-1)	0.025				
<sup>243</sup> Am	2.0×10 <sup>-7</sup>	9.72×10	<sup>8</sup> 1.07×10 <sup>-7</sup>	$1.08 \times 10^{-7}$	1.71×10 <sup>-8</sup>	$1.02 \times 10^{-7}$	1.06×10 <sup>-7</sup>
<sup>239</sup> Pu	2.5×10 <sup>-7</sup>	5.01×10 <sup>-5</sup>	2.54×10 <sup>-9</sup>	1.28×10 <sup>-9</sup>	1.73×10 <sup>-9</sup>	7.28×10 <sup>-9</sup>	3.78×10 <sup>-9</sup>
Total		1.02×10 <sup>-7</sup>	1.10×10 <sup>-7</sup>	$1.10 \times 10^{-7}$	$1.88 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-7}$	1.10×10 <sup>.7</sup>

表 6 考 慮 時 間 為 1,000 年 時 分 子 擴 散 係 數  $D_m = 2.5 \times 10^0 m^2 year^{-1}$ 下在不同位置處與不同地下水 滲流速度的2個核種劑量。

Nuclide	Ingestion dose coefficient, DFing (Sv/Bq)	Dose (Sv/year)					
Distance (m) 500 m					1500 m		
Velocity (	m year <sup>-1</sup> )	1	2.5	5	1	2.5	5
Diffusion	coefficient (m <sup>2</sup> ye	ear-1)	2.5				
<sup>243</sup> Am	2.0×10 <sup>-7</sup>	9.50×10	<sup>8</sup> 1.07×10 <sup>-7</sup>	$1.08 \times 10^{-7}$	1.54×10 <sup>-8</sup>	9.90×10 <sup>-8</sup>	$1.05 \times 10^{-7}$
<sup>239</sup> Pu	$2.5 \times 10^{-7}$	4.84×10	<sup>9</sup> 2.52×10 <sup>-9</sup>	1.27×10 <sup>.9</sup>	$1.55 \times 10^{-9}$	7.02×10 <sup>-9</sup>	3.74×10 <sup>-9</sup>
Total		9.98×10	<sup>8</sup> 1.09×10 <sup>-7</sup>	1.09×10 <sup>-7</sup>	1.70×10 <sup>-8</sup>	1.06×10 <sup>-7</sup>	1.09×10 <sup>-7</sup>

# IV. 結論

本計畫發展放射性核種衰變鏈於裂隙-母岩遷移解 析解以做為快速預測工具,所得的解析解與 Laplace 轉 換有限差分法比較,兩者呈現非常一致的結果,確認所 發展解析解的正確性與計算 Fortran 程式的準確性。經 驗證的解析解模式應用於<sup>243</sup>Am→<sup>239</sup>Pu的放射性核種衰 變鏈於裂隙地層遷移的傳輸模擬,結果顯示擴散係數的 大小確實會對於裂隙中的溶質傳輸有影響,且會因為水 流速的減小而讓擴散效應的現象較為明顯。另外較高的 大小症實會對於裂隙中的核種濃度有相當大的影響,尤 其對於所衰變的產物會因母物種存在於裂隙中的溶質 較高而相對提高。此解析解可進一步針對放射性核種在 是深層地質處置場周圍的輻射劑量評估。本計畫所發展 的模式可以提供給政府單位做為放射性廢料處置候選 場址安全評估之篩選模式或數值解模式的驗證。

# 參考文獻

- Barker, J. A., 1982. Laplace transform solutions for solute transport in fissured aquifers, Adv. Water Reosur. 5, 98-104.
- [2] Comenzana, J., 2000. Transport of a two-member decay chain in a single fracture: Simplified analytical solution for two radionuclides, Water Resour. Res. 36 (5), 1339–1346.
- [3] Chen, J.S., Lai, K.H., Liu, C.W., Ni, C.F., 2012. A novel method for analytically solving multi-species

advective-dispersive transport equations sequentially coupled with first-order decay reactions. J. Hydrol. 420,191-204.

- [4] Hansen, S.K., 2012. Semianalytic solution for transport of a two-member decay chain in discrete parallel fractures, Water Resour. Res., 49, 6105–6110, doi:10.1002/wrcr.20451.
- [5] Hodgkinson, D.P., Maul, P.R., 1988. 1-D modeling of 1-D modelling of radionuclide migration through permeable and fractured rock for arbitrary length decay chains using numerical inversion of Laplace transforms, Annals of Nuclear Energy, 15(4), 175-189.
- [6] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
- [7] Mahmoudzadeh, B. Longcheng Liu, L., Moreno, L., Neretnieks, I., 2014. Solute transport in a single fracture involving an arbitrary length decay chain with rock matrix comprising different geological layers, J. Contam. Hydrol., 164, 59-71.
- [8] Mahmoudzadeh, B. Longcheng Liu, L., Moreno, L., Neretnieks, 2016. Solute transport through fractured rock: Radial diffusion into the rock matrix with several geological layers for an arbitrary length decay chain, J. Hydrol., 536, 133-146.
- [9] Nair, R.N., Sunny, F., Manikandan, S.T., 2010. Modelling of decay chain transport in groundwater from uranium tailings ponds, Appl. Math. Model., 34, 2300–2311.
- [10] NEA, 1999. Geological disposal of radioactive waste, review of developments in last decade. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.
- [11] Shahkarami, P., Liu, L., Moreno, L., Neretnieks, I., 2015. Radionuclide migration through fractured rock for arbitrary-length decay chain: Analytical solution and global sensitivity analysis, J. Hydrol., 520, 448-460.
- [12] Sudicky, E.A., Frind, E.O., Sharma, P.K., 1984. Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solution for a two-member decay chain in a single fracture, Water Resour. Res. 20 (7), 1021– 1029.
- [13] Sudicky, E.A., Frind, E.O., 1982. Contaminant transport in fractured porous media: Analytical solutions for a system of parallel fractures, Water Resour. Res. 18(6), 1634-1642.
- [14] Sun, Y., Buscheck, T.A., 2003. Analytical solutions for reactive transport of N-member radionuclide chains in a single fracture, J. Contam. Hydrol., 62-63, 695-712.
- [15] Tang, D.H., Friend, E.O., Sudick, E.A., 1981. Contaminant transport in fractured porous media: analytical solution for a single fracture. Water Resour. Res. 17 (3), 555–564.
- [16] Tien, N.C., Li, S.H., 2002. Transport of a two-member decay chain of radionuclides through a discrete fracture in a porous rock matrix in the presence of colloids, Nuclear Technology, 140, 83-93.

# 以離散元素法探討岩體裂隙對開挖引致處置母岩損傷範圍之影響 A study on the damage zone around tunnel excavation using discrete element method

計畫編號:109-2623-E-606-004-NU 計畫主持人:李宏輝 e-mail:hunghuili@gmail.com 計畫共同主持人:楊長義 計畫參與人員:陳祺杰、張良駿、陳弈中 執行單位:國防大學理工學院環境資訊及工程學系

# 摘要

有鑑於開挖引致處置母岩的損傷分析,必須先掌握 處置母岩在單軸與三軸應力條件下之損傷應力,本研究 綜合國內、外試驗研究成果,合理推估離島花崗岩在單 軸應力條件下之裂縫形成應力與裂縫損傷應力分別為 0.3UCS 與 0.6UCS。其次,本研究以離散元素分析軟體 UDEC 分別進行了基本力學試驗模擬、參數率定與坑道 開挖損傷模擬分析,藉以探討坑道開挖引致之岩體損傷 及相關力學機制。其中,以 voronoi 多邊形塊體與有限 差分網格建立處置坑道開挖損傷分析模型,能有效掌握 不同開挖階段下之坑道損傷位置與深度,且根據本研究 整理與建立之離島花崗岩裂縫形成應力、裂縫損傷應力 與尖峰強度包絡線,及 UDEC 分析過程中記錄的有限 差分網格應力態,可進一步分析開挖過程中之應力路徑 發展與破壞機制。

關鍵詞:深層地質處置、EDZ、離散元素分析。

#### Abstract

For the damage analysis of the host rock caused by excavation, it is necessary to understand the damage stress of the rock under uniaxial and triaxial compression tests. according to the analysis of the collected experimental data on Kinmen granite, the crack initiation and crack damage stress of Kinmen granite are estimated as 0.3UCS and 0.6UCS respectively. Besides, this study uses the discrete element analysis software UDEC to perform a series of basic mechanical test simulations, parameter calibration, and tunnel excavation simulation to explore the rock damage caused by tunnel excavation and related mechanical mechanisms. Dealing with tunnel excavation damage analysis, this study combines the Voronoi polygonal block and the finite-difference grid to carry out the tunnel excavation damage analysis, which can effectively reveal the location and depth of tunnel damage at different excavation stages. Also, according to the crack initiation, crack damage, and peak strength envelopes of Kinmen granites and the simulation results, it can further analyze the stress path development and the failure mechanism during the excavation process.

Keywords: deep geological repository, granite, EDZ, DEM.

# I. 前言

為確保深層地質處置設施在經過數十萬年之後仍 能維持設計的功能需求,針對場址特性進行嚴謹的調查、 處置母岩的鑽探取樣與實驗,及透過各種不同加載場景 的模擬與分析,一直是處置技術先導研究的重要課題。 此外,由於深層地質處置係於處置母岩進行開挖,可能 因為開挖過程中引致處置母岩的破壞,並在開挖面周圍 形成高度損傷區(HDZ)、開挖損傷區(EDZ)與開挖擾動區 (EIZ),詳圖 1,進而影響了處置母岩的水力滲透性與力 學穩定性。



圖1. 深層地質處置設施設計概念(Ghazvinian, 2015)

# II. 岩石損傷應力

根據 Diederichs (2003)的研究,於深層的堅硬岩層 中進行坑道開挖,坑道壁的降服條件遠低於完整岩石的 實驗室強度。以往有關坑道壁面的強度預測,係將坑道 壁面的應力態視為實驗室的單軸壓縮試驗條件,且隨著 深入岩體,現地岩體的強度則採用基於室內實驗與現地 經驗所建立的破壞準則,例如 Hoek-Brown 破壞準則 (Hoek et al., 2002)。

然而,針對脆性岩石的坑道開挖,現有的破壞準則 並無法預測在圍壓近乎零條件下(例如開挖面)之力學穩 定性,主要原因在於傳統的破壞準則忽略了裂縫形成 (crack initation, CI)和裂縫損傷(crack damage, CD)對現地 岩體強度折減的影響,從而低估了圍壓條件下之脆性岩 體現地強度(Diederichs 2003)。 Diederichs 等人(2004)證 明了裂縫損傷(CD)和裂縫形成(CI)應力門檻值,分別可 視為脆性岩石在低圍壓條件下的極限(ultimate)和長期 (long-trem)現地強度。根據其提出的三線性脆性岩體長 期強度包絡線(tri-linear long-term strength envelope for brittle rock masses),詳圖 2,當岩體在低圍壓條件下,其 應力態高於 CI 包絡線,或是在高圍壓條件下,應力態 高於 CD 包絡線,則岩體即達到降伏條件。此外,在低 圍壓至高圍壓之間的岩體降伏判斷,由岩石剝落極限 (spalling limit)強度控制。據此,Diederichs 等人(2004)所 提三線性脆性岩體長期強度包絡線可用於預測地下開 挖面周圍高度損傷區(high damaged zone, HDZ)的形成, CI 包絡線可用於分析開挖損傷區(excavation damaged zone, EDZ)的形成和分佈範圍。

# 2.1 單軸應力條件下之岩石損傷應力

芬蘭 Posiva 公司取自深度 400~450 m 及 550~ 600 m 之偉晶花崗岩及雲母片岩試體(直徑 62 mm)進行 單軸壓縮試驗,並根據完整應力應變曲線、體積應變曲 線與計算之裂隙體積應變(calculated crack volumetric strain),定義出:(1)裂縫形成應力(crack initiation stress)  $\sigma_{ci}$ ,為裂隙體積應變為零處之應力,其值約為 0.35~ 0.5UCS;(2)裂縫損傷應力(crack damage stress) $\sigma_{cd}$ ,為體 積應變由壓縮轉為膨脹處之應力,其值約為 0.7~ 0.9UCS。有關裂縫形成應力與裂縫損傷應力,其與單壓 強度 UCS 的比例關係,亦可從瑞典 Forsmark 地區的 花崗岩單軸壓縮強度試驗結果得到相同的結果 (Ghazvinian 等人, 2013),  $\sigma_{cd}$ 約為 0.78UCS,  $\sigma_{ci}$ 約為 0.55UCS。



圖2. 利用三線性脆性岩體長期強度包絡線定義地下坑 道開挖引致的岩體損傷(Diederichs and Martin, 2010)

楊長義(2016)根據金門花崗岩單軸壓縮試驗結果, 推估金門花崗岩裂縫損傷應力(σ<sub>cd</sub>)約發生在單壓強度 UCS 之 60% 處(該 UCS=123.38 MPa),並概估裂縫形 成應力(σ<sub>ci</sub>) 約介於 (0.24~0.36)UCS,平均裂縫形成應 力 =0.3UCS。另根據**「我國用過核子燃料最終處置技術** 可行性評估報告」(台灣電力公司,2019)第5章安全評估, 亦保守假設裂縫起始應力為單壓強度的 0.3 倍。

#### 2.2 三軸應力條件下之岩石損傷應力

Ghazvinian(2015)為探討圍壓對裂縫損傷(CD)應力 的影響,分別取 Wrsetrly 花崗岩、Indiana 石灰岩、Grey Carrara 大理岩與 White Carrara 大理岩,進行了單軸壓 縮、巴西人法間接張力試驗與三軸試驗。此外, Ghazvinian(2015)根據式(1)及 Hoek-Brown 破壞準則 (Hoek et al., 2002),詳式(2)分別建立裂縫形成(CI)與裂 縫損傷(CD)應力門檻值之經驗公式。

$$\sigma_1 = A \times UCS + B \times \sigma_3 \tag{1}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + UCS(m\frac{\sigma_3}{UCS} + s)^a \tag{2}$$

式中  $\sigma_1$ 為最大主應力、 $\sigma_3$ 為最小主應力、UCS 為單 軸壓縮強度。Brace 等人(1966)根據 Westerly 花崗岩試 驗結果,估計 Westerly 花崗岩的 A = 0.33 和 B = 1.4。 Pestman 和 Van Munster(1996)根據音洩(acoustic emission, AE)試驗結果,提出砂岩的 B = 1.5。

為掌握金門花崗岩之裂縫形成應力(Gci)與裂縫損傷 應力(Gcd),本研究根據趙振宇(2005)進行之金門花崗岩 單軸壓縮與三軸試驗(圍壓為 20 MPa 與 30 MPa),同時 參考 Ghazvinian(2015)的方法,分別以側向應變呈現非 線性行為,及體積應變由壓縮轉為膨脹時,定義裂縫形 成應力(Gci)與裂縫損傷應力(Gcd)。

在單軸壓縮試驗部分,其單壓強度(UCS)為 125.36 MPa,裂縫形成應力為 38.58 MPa(0.31UCS),裂縫損傷 應力為 70.47 MPa(0.56UCS)。三軸壓縮試驗部分,圍壓 為 20 MPa 與 30 MPa 條件下之尖峰強度分別為 287.8 MPa 與 369.43 MPa,其裂縫形成與裂縫損傷應力詳如 表 1。

表1. 金門花崗岩單軸壓縮與三軸壓縮試驗資料(整理自 趙振宇,2005)

試驗條件	σ <sub>3</sub> (MPa)	σ <sub>ci</sub> (MPa)	σ <sub>cd</sub> (MPa)	σ <sub>1</sub> (MPa)
直接張力試驗	-7.37*	-	-	0
無圍壓縮試驗	0	38.58	70.47	125.36
三軸試驗1	20	68.68	157.79	287.8
三軸試驗2	30	100.68	225.27	369.43

\*:參考自楊長義(2016)於「台灣潛在母岩破壞強度特性與 處置坑道破裂關係之研析」成果

此外,根據 Hoek-Brown 破壞準則,進一步整理了 裂縫形成應力、裂縫損傷應力及尖峰強度門檻之迴歸式, 詳如圖 3,及式(3)至(5)。根據 Ghazvinian(2015) 以 Wrsetrly 花崗岩等四種岩石評估其裂縫損傷應力及尖 峰強度門檻之迴歸式,可得材料參數  $m_{cd}$  與  $m_{ucs}$ ,其值 分別介於 6.6~18.5 及 8.5~27.5。相較於國外文獻,金 門花崗岩之  $m_{cd}$  與  $m_{ucs}$ ,其值分別為 12 與 25,亦符 合可能的分佈區間,詳如表 2 所示。 CI envelope :  $\sigma_1 = 28.86 + 2.257\sigma_3$  (3)

CD envelope :

$$\sigma_{cd,conf} = \sigma_3 + \sigma_{cd} (m_{cd} \frac{\sigma_3}{\sigma_{cd}} + 1)^{0.5}, \quad m_{cd} = 12 \quad (4)$$

Laboratory peak strength envelope :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + UCS(m\frac{\sigma_3}{UCS} + 1)^{0.5}, \ m = 25$$
(5)



圖3. 金門花崗岩裂縫形成(CI)、裂縫損傷(CD)與尖峰強 度包絡線

Rock type	CD (MPa)	CI (MPa)	m <sub>ucs</sub>	m <sub>cd</sub>	А	В
Westerly Granite	127.0	70.2	27.5	18.5	0.42	1.6
Indiana Limestone	46.0	27.9	10.7	6.9	0.41	0.9
Grey Carrara Marble	74.1	41.6	8.5	7.1	0.51	0.7
White Carrara	77.3	41.3	8.6	6.6	0.44	0.5
Kinmen Granite	70.5	38.6	25	12	0.23	2.26

表2 不同岩石之損傷應力門檻值

## III. UDEC 基本力學試驗模擬與參數率定

本研究根據離島花崗岩之岩石力學特性進行坑道 開挖損傷之模擬分析,為確保所採用之材料參數符合前 述第II節有關離島花崗岩之岩石力學特性與損傷應力, 故分別透過岩石單軸壓縮試驗與三軸壓縮試驗模擬,確 保輸入參數之合理性。

#### 3.1 單軸壓縮試驗模擬

所採 UDEC 岩石單軸壓縮試驗模型詳如圖 4,模型 寬度為 5 cm,高度為 12.5 cm,透過 UDEC 提供的 voronoi 指令將模型切割成 277 個不規則塊體,塊體之 最小邊長為 0.5 cm。此外,每個塊體內又切割成數個有 限差分網格,其最小邊長亦為 0.5 cm,共計有 1835 個 有限差分網格,其材料模式採莫爾-庫倫塑性準則(Mohr-Coulomb plasticity),相關輸入參數詳表 3。在塊體與塊 體之接觸介面部分,所採用之參數包括正向勁度、切向 勁度、拉力強度、凝聚力、摩擦角與膨脹角。

模型之邊界條件設定,係於模型底部採固定邊界(限 制其 y 方向位移為零),左、右邊界為自由邊界,頂部 則施以往下之速度邊界,其值為 10<sup>4</sup> m/s。根據單軸壓 縮試驗模擬結果,取模型高度 1/2 處之有限差分網格, 繪製應力-應變曲線,詳如圖 5,並參考 Ghazvinian(2015) 的方法定義裂縫形成應力(σ<sub>ci</sub>)與裂縫損傷應力(σ<sub>cd</sub>)。

結果顯示模擬之單壓強度為 130 MPa,楊氏模數為 53.94 GPa,柏松比為 0.27,裂縫形成應力為 88 MPa(0.68UCS),裂縫損傷應力為 102 MPa(0.78UCS)。 相較於真實花崗岩單軸壓縮試驗結果,其單壓強度為 125.36 MPa,裂縫形成應力為 38.58 MPa(0.31UCS),裂 縫損傷應力為 70.47 MPa(0.56UCS),楊氏模數為 51 GPa,柏松比為 0.2。顯示模擬之單壓強度、楊氏模數與 柏松比大致與實驗結果相同,惟裂縫形成應力與裂縫損 傷應力均高於實驗結果。



圖4 UDEC voronoi多邊形塊體單軸壓縮試驗模型

表3 UDEC voronoi多邊形塊體模型材料輸入參數

			-
	參數	單位	值
Voronoi block	楊氏模數	GPa	5.1
	柏松比	-	0.2
	單壓強度	MPa	125.36
	张力强度	MPa	10.86
	凝聚力	MPa	28
	摩擦角	o	47
	膨脹角	0	47
	正向勁度	GPa/m	5000
	切向勁度	GPa/m	5000
Interfere	拉力强度	MPa	10.86
Interface	凝聚力	MPa	20
	摩擦角	o	40
	膨脹角	٥	40

UDEC 在數值模擬過程中,可展示塊體間之介面 滑移(slip)與張開(open)破壞,如圖6所示紅色線段即為介 面發生滑移破壞處,而張開破壞主要是從既有的滑移裂 縫尖端開始發展。此外,當軸向應力達 55 MPa (0.42UCS)時,即有滑移破壞產生,詳圖6(a),若將此階 段之應力值視為裂縫形成應力應屬合理,且與花崗岩實 驗結果之38.58 MPa(0.31UCS) 亦較為接近。





圖6 UDEC單軸壓縮試驗不同應力階段下之裂隙分布

### 3.2 三軸壓縮試驗模擬

在三軸壓縮試驗模擬部分,所採之 UDEC 模型同 圖4所示,惟在進行軸向壓縮模擬前,於模型之左、右邊 界與頂部先施予應力,藉以模擬三軸實驗之圍壓階段(圍 壓分別為 20 MPa 與 30 MPa)。根據單軸壓縮試驗與三 軸壓縮試驗 UDEC 模擬結果,將裂縫形成(CI)、裂縫損 傷(CD)與尖峰強度整理於圖7,並提出以下幾點說明:

- 根據楊長義(2016)於「台灣潛在母岩破壞強度特性 與處置坑道破裂關係之研析」成果,金門花崗岩張力 強度為 7.37 MPa,本研究以 UDEC 進行直接張力 試驗模擬,其值為 7.34 MPa,與實驗值相當接近。
- 2. 在壓縮試驗模擬部分,UDEC 模擬之單軸壓縮強度 130 MPa 略高於實驗值 125.36 MPa,但在同一組 UDEC 輸入參數條件下,隨著圍壓增加至 20 MPa 與 30 MPa,UDEC 模擬之尖峰強度均略低於實驗 值,其原因可能與真實岩石在圍束應力條件下,存 在於岩石內部的微小裂隙與礦物顆粒間的接觸趨於 緊密,並影響其尖峰強度;相較之下,UDEC 模型 無論是在單軸壓縮或是三軸壓縮,其模型內的塊體 組成與接觸關係並無法反映上述裂隙與礦物顆粒在 高圍壓條件下,介面接觸關係趨於緊密的影響。
- 在損傷應力部分,UDEC 模擬分析之裂縫形成(CI) 應力與裂縫損傷(CD)應力均高於實驗值,詳圖7;在

裂縫形成(CI)應力部分,若以 UDEC 模型之塊體介 面產生破壞之應力視為裂縫形成應力,其值較接近 於實驗值。



圖7 金門花崗岩三軸實驗與UDEC模擬分析之裂縫形成 (CI)、裂縫損傷(CD)與尖峰強度

# IV. 處置坑道開挖損傷模擬與分析

根據我國未來處置場設施配置初步概念設計,預定 之處置深度位於地表以下 300~1000 m,處置場全長 1340 m、寬 800 m,故處置所需面積約 1.1 km<sup>2</sup>;處置隧 道高度區分 4.1 m 與 4.9 m 兩種,其寬度為 3.6 m。每 一區 6 條相互平行隧道(長 320 m),處置隧道間隔 40 m;處置坑(deposition hole)深度 7.91 m、直徑 1.75 m、 間距 6 m。其中,處置坑之規劃是以 SKB-3V 模型為學 習對象,採垂直豎坑方式置放廢料罐。

#### 4.1 處置隧道與處置坑道 UDEC 模型

本研究利用離散元素分析軟體 UDEC 建立處置隧 道與處置坑道開挖損傷分析模型,考量的處置深度位於 地下 500m 處,且側向壓力係數 k=1.3 之條件,詳圖 8,所採用之 UDEC 參數係根據前述參數率定之結果, 詳表 3。





圖8所示之數值模型,係考量處置隧道與處置坑道 具對稱性,為避免數值模型的 voronoi 多邊形塊體與有 限差分網格數過多,影響分析效率,故採對稱性模型進 行開挖損傷分析。模型中所含的 voronoi 多邊形塊體數 為 787,有限差分網格數為 6644,並設置 7 處紀錄點 ,詳圖9。數值分析程序區分大地應力平衡、處置隧道開 挖與處置坑道開挖,每一階段的模擬均確保不平衡力達 到平衡後始進行下一階段的分析。



圖9 UDEC 處置坑道開挖損傷數值模型:(a) voronoi多邊 形塊體數為 787,有限差分網格數為 6644;(b)設置 7 處紀錄點



圖10 UDEC 處置坑道開挖損傷數值模型分析,顯示第一 階段處置隧道開挖模擬後之裂隙發展

#### 4.2 處置坑道開挖損傷模擬與分析

UDEC 數值模型經處置隧道與處置坑道開挖模擬後,可分別觀察到局部的 voronoi 多邊形塊體介面裂隙 與有限差分網格降伏破壞,茲將分析結果整理如后:

- 經過第一階段的處置隧道開挖模擬後,在處置隧道 底部與側壁轉角處有一小段的裂隙發展,其自隧道 壁面往岩體內延伸之長度約 2 cm,詳如圖 10。
- 2. 經第二階段的垂直處置坑開挖模擬後,可分別在(1) 處置隧道的頂拱(裂隙位於壁面深度 6 cm 處)、(2) 起拱線(自壁面往內延伸 4 cm)與起拱線 45°處、(3) 處置坑道與處置隧道底拱交界處、(4)處置坑道頂段 (裂隙位於壁面深度 12 cm 處)、(5)處置坑道底段(自 壁面往岩體內延伸之長度約 9 cm)與(6)處置坑道底 部(裂隙位於壁面深度 17 cm 處)發現新增的裂隙發 展,詳如圖 11。



圖11 UDEC 處置坑道開挖損傷數值模型分析,顯示第二 階段處置坑開挖模擬後之裂隙發展與降伏破壞

# 4.3 應力路徑分析

為能進一步了解處置坑道在開挖過程中的損傷機 制與應力路徑變化,於上述的 UDEC 開挖模擬程序中, 記錄了 A-G 七處位置的 σ<sub>xx</sub>、 σ<sub>yy</sub> 與 σ<sub>xy</sub>,據以計算其 最大與最小主應力 σ<sub>1</sub> 與 σ<sub>3</sub>。另根據前述第 II 節整理 之離島花崗岩裂縫形成(CI)、裂縫損傷(CD)與尖峰強度 包絡線,取處置隧道頂拱(A 點)、側壁與仰拱交界處(C 點)、仰拱與處置坑道交界處(D 點)及處置坑道底部(G)的 記錄點,繪製應力路徑,詳圖 12。茲將相關結果整理如 下列幾點:

1. 在第一階段處置隧道開挖

(1)處置隧道頂拱(A點),其應力路徑即已通過裂縫

形成應力包絡線(CI),並直接往張力破壞區發展。

- (2) 側壁與仰拱交界處(C點),其應力路徑通過裂縫 形成應力包絡線(CI),顯示此開挖階段已有裂隙 產生。
- (3) 仰拱與處置坑道交界處(D 點),其直接往張力區發展。
- (4) 處置坑道底部(G)之應力態無顯著變化。
- 第二階段處置坑道開挖 側壁與仰拱交界處(C點)及處置坑道底部(G)均直接 進入張力區。



圖12 UDEC 處置坑道開挖模擬過程之應力路徑分析





#### 4.3 處置深度之影響

考量我國未來處置場之規劃設計深度係位於地表 以下 300~1000m,除前述之分析深度 500m外,本研 究另外針對處置深度 350m 與 750m,同樣在側向壓 力係數 k = 1.3 之條件下進行 UDEC 開挖損傷分析, 詳圖 13,茲將結果整理如下列幾點:

- 在深度 350m 條件下,經第一階段開挖後,於側壁 與仰拱交界處出現塊體介面裂隙。經第二階段開挖 後,除了在處置隧道頂拱壁面處有裂隙產生外,於 處置隧道仰拱與坑道交界處有顯著的張力破壞。
- 在深度 750m 條件下,經第一階段開挖後,除了於 側壁與仰拱交界處出現塊體介面裂隙外,在處置隧 道側壁與起拱線線處出現張力破壞。經第二階段開 挖後,亦可觀察到處置隧道頂拱壁面裂隙,及處置 隧道仰拱與坑道交界處有顯著的張力破壞,且相較 於深度 500m之分析案例,其張力破壞範圍相對較 大,且在處置坑中段位置亦有張力破壞產生。

# V. 結論

本研究透過離散元素分析軟體 UDEC 建構處置坑 道開挖損傷數值模型,基於數值模型參數率定所需,另 蒐整了國內外有關處置母岩之力學特性,尤其是裂隙形 成應力與裂隙損傷應力之合理範圍,以作為處置坑道開 挖損傷條件之判定依據。在處置坑道開挖分析部分,係 結合了 voronoi 多邊形塊體與有限差分網格建立處置 坑道開挖模型,透過應力路徑分析,有助於處置隧道與 處置坑道在開挖過程中可能的破壞機制。

# 参考文獻

- [1] 台灣電力公司 (2019),我國用過核子燃料最終處置 技術可行性評估報告,TPC-SNFD2017-V1。
- [2] 楊長義 (2016),台灣潛在母岩破壞強度特性與處置 坑道破裂關係之研析,科技部補助專題研究計畫成 果報告,MOST 105-NU-E-032-001-NU。
- [3] 趙振宇 (2005),台灣地區花崗岩內之裂隙流特性研究-高岩覆條件之花崗岩節理面導水特性研究(I) NSC94-2623-7-014.
- [4] Brace, W. F., Paulding, B. W., Scholz, C. (1966). Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *Journal* of Geophysical *Research*: 71(16): 3939-3953.
- [5] Diederichs, M. S. (2003). Rock fracture and collapse under low confinement conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*: 36(5), pp. 339-381.
- [6] Diederichs, M. S., Kaiser, P. K. and Eberhardt, E. (2004). Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*: 41(5): 785-812.
- [7] Diederichs, M. S. and Martin, C. D. (2010). Measurement of spalling parameters from laboratory testing. *In: Proceedings of Eurock 2010*, Lausanne, Switzerland.
- [8] Ghazvinian, E. Perras, M. Diederichs, M. and Labrie, D. (2013). The effect of anisotropy on crack damage thresholds in brittle rocks. *In: Proceedings of the 47th* US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, California, USA: American Rock

Mechanics Association.

- [9] Ghazvinian E. (2015) Fracture initiation and propagation in low porosity crystalline rocks: implications for excavation damage zone (EDZ) mechanics (PhD Thesis). Kingston, Canada: Queen's University.
- [10] Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B (2002). Hoek – Brown failure criterion—2002 edition. In: Hammah R, Bawden W, Curran J, Telesnicki M (eds) Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium (NARMS-TAC), University of Toronto Press, Toronto, pp 267 – 273.
- [11] Kazerani T, Zhao J. (2010). Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure. International *Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34(18), 1877-1895.
- [12] Pestman, B. J. and Van Munster, J. G. (1996). An acoustic emission study of damage development and stressmemory effects in sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*: 33(6): 585-593.

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

計畫編號:109-2623-E-007-006-NU 計畫主持人:田能全 e-mail:nctien@mx.nthu.edu.tw 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

# 摘要

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

**關鍵詞**:平流-延散、管柱實驗、數學模式、延散度、遲 滯係數、分配係數

#### Abstract

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

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

# I. 前言

回顧人類文明發展的歷史,對於資源利用與環境改 變衝突之爭議從不間斷,隨著人類大規模的開採資源, 導致環境衝突越來越頻繁,且產生的問題更多且複雜, 然而地下介質被視為是一個可以供給資源與能源且具 有提供儲存廢棄物空間的場所。世界各國積極的展開研 究與行動,希望可藉由再生能源逐步取代傳統能源,目 前,化石燃料和核能等傳統能源仍是目前能源市場的主 要貢獻者,約占整體的百分之八十。核能發電運轉後所 產生的放射性廢棄物無疑將成為一大問題,儘管人類對 於核電廠的運作及產物,已投入大量的人力、物力進行 深入的研究,但對於選擇處置的場址依然遭遇到強烈反 抗的阻力。面對反對的聲浪及放射性廢棄物處置的安全 問題一直是公眾關注和科學研究的熱門話題,特別是在 日本 311 福島事件後,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。

無論未來我國能源政策如何改變或調整,過去40年 核能電廠運轉所產生的放射性廢棄物,是我們國人都必 須務實面對的課題;亦即將如何妥善保護環境,同時滿 足社會對核電廠與放射性廢棄物安全處理的要求。用過 核燃料含有萬年以上之長半化期核種,其處置之安全性 必需考量能將其與人類生活圈長久隔離。因此,用過核 燃料的安全最終處置工作,將是重要且關鍵的議題,也 同時是引起社會爭議的最大問題。以『多重障壁』與『深 地層處置』概念為目前國際核能發電的國家,所採用作 為用過核燃料的安全最終處置的主要方式,其主要由 「人工障壁」與「天然障壁」所構成;其中,人工障壁 係由包封用過核燃料或高放射性廢棄物的堅固金屬容 器,和金屬容器外所填入能遲滯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;良好的母岩-地下水系統可稀釋及遲滯核 種,因此母岩扮演著長期天然障壁的角色。

當高放射性廢棄物(簡稱高放)中的放射性核種自用 過核子燃料釋出,則會隨著地下水流動,在深地質環境 下遷移,最後可能進入人類生活圈,對人體造成輻射危 害,這整個「核種遷移」的過程,基本上是放射性廢棄 物應要瞭解的核心課題。在多重障壁的概念下,放射性 核種遷移至人類生活圈之主要可能途徑乃是以地下水 為媒介,由於放射性廢棄物長期貯存於地質環境下,在 受到地下水入侵後,即可能將已經劣化的放射性廢棄物 包裝容器溶蝕,將放射性核種瀝濾(leaching)出來,並 隨著地下水的傳輸而進到人類的生活圈內。 為了探討放射性核種在孔隙介質中的遷移行為,在 實驗室內可利用具可反覆驗證之科學基礎,經由一些特 定的程序來分析一個系統,進而解決未來數萬年因放射 性廢棄物處置場衍生的的工程問題:首先是【系統測量】, 包括訂定分析目標核種、決定欲分析的系統變數(粒徑、 孔隙率、流速、氧化還原條件等)並量測所需的核種數據 (濃度或活度);再來是【分析資料】,包括建構變數間的 相關性及交互作用;之後是【系統模式】,用來建構一 個數學模式來描述及探討變數間的關係;還有【系統模 擬】,是將不同的參數值代入模式中,藉由對模擬結果 與實驗觀察的比較來修正建構的模式;最後是【系統最 佳化】,用以找出最合適的系統參數值而代入數學模式 進行模擬分析來達成吾人所定的目標。

本計畫目的旨在,除了開發與建立一套標準化的平 流-延散管柱實驗裝置以外,並進行重要核種於碎裂岩體 中不同地下水流速下的傳輸行為與數學模擬驗證之研 究;目的在探討臺灣的放射性廢棄物,在進行地質處置 後,受地下水入侵,導致放射性核種外釋情形,並模擬 重要核種在不同地下水流速(低與高流速)的地下水中的 遷移行為。

# Ⅱ. 主要內容

# 2.1 管柱法-平流-延散實驗

本計畫將在實驗室中利用一套石英玻璃管柱裝置 (長 30~50 公分,直徑 0.8~2 公分),進行不同核種(絕 Cs、 鍶 Sr、碘 I 或鎝 Tc)之一維平流-延散傳輸行為。試驗 方法首先將特定乾密度之介質材料填入圓柱狀之石英 玻璃管柱中,並以合成地下水使達成水飽和之條件。此 外,利用高精密可控制流量的蠕動幫浦(Kappa 10P, Industrial Co.,Ltd),將含有核種濃度 CO 之溶液,由入流 側注入,並在流出側以一套自動分液收集器收集滲出液, 量測滲出液的濃度,以濃度為縱座標,時間為橫座標, 所得之曲線圖稱為濃度突破曲線(breakthrough curve)。另 外,亦可將濃度改為相對濃度(C/CO),時間則可用流出 液體積或孔隙體積數(流出液體積/多孔介質孔隙體積) 轉化為時間因子來表示。管柱實驗所量測之濃度突破曲 線,利用平流延散方程式之解析解,即可反推傳輸參數 -延散係數及遲滯係數。

因此,本計畫將與核能研究所核種遷移實驗室合 作,除了將利用非反應性-放射性核種「氚(Tritium,T)」 作為水的示蹤劑,了解單純核種於水中在多孔介質中的 傳輸行為以外,且可利用非反應性核種(HTO)平流-延散 實驗之突破曲線,與不同核種因不同條件(孔隙率與流速) 影響,可能受到離子交換及吸附等作用造成之遲滯現象, 突破曲線將可能發生改變(延緩),其實驗結果可明瞭在 同粒徑之不同岩體顆粒(花崗岩或硬頁岩),在2種不同 孔隙率中與在不同地下水流速(低與高流速)傳輸的情形。



#### 2.2 高解析度固相分析技術

花崗岩取自 K 區,通过 XRD 的分析顯示,花崗岩 的主要礦物成分包括石英,斜長石,長石,針鐵礦,黑 雲母和伊利石。通过 XRF 确定,作為氧化物存在的花崗 岩的主要元素是 SiO2,Al2O3,K2O,Na2O,CaO、MnO, MgO,TiO2,P2O5 和 Fe2O3



#### III. 結果與討論

### 3.1 管柱裝填

將花崗岩破碎至小於 1mm 粒徑後分層壓實填入柱 體,每層進行打毛處理保證柱體不出現水流分層現象, 柱體填裝後在上下端填裝布流層其水流均勻布流作用, 對柱體的相關物理參數進行測量計算,測量結果如下表 所示

介質₽	長度 (cm )↩	直徑 (cm )↩	裝填量 (g)↔	躄積 (cm³)≁	密度+) (g/cm <sup>3</sup> ) +)	孔隙體積 (mL)↔	孔隙率 (%)₽
花崗岩↩	30¢	1.6₽	<b>8</b> 5.41₽	60.3↩	1.42+	28.65+	47.5₽

將切換閥僅向儲層 2 (GW) 敞開,以確保在 ADE 實驗之前壓實花崗岩中每個孔隙空間中的水飽和。 填 充管柱用的 GW 以約 3 mL / min 的流速洗脫約 10 孔體 積 (Pore Volume~300mL)。 在此水飽和期間,每 30 分鐘從每根管柱中取樣 5 mL 流出液。 通過電感耦合等 離子體發射光譜法 (ICP-OES, iCAP 7000, Thermo) 測 量廢水中 Na, Mg, Ca 和 K 的濃度,使濃度變化在相應 液相濃度的 5%以內,並且確定已經達到水飽和

#### 3.2 HTO 測試

為了表徵動態柱系統中主要的物理傳輸過程,使用 了非反應性放射性示踪劑 (HTO) 來找出壓實在玻璃柱 中的花崗岩的有效孔隙率和延散度。收集並測量流出物 以繪製一系列向上/向下注水(吸附/解吸)過程中不同流 速下的穿透曲線。循環分兩個步驟進行。第一個步驟是 手動循環步驟。實驗過程是,首先,a)如圖1所示,在 自動分餾收集器中連續收集流出物,一個循環超過2至 3 個孔隙體積,包括上/下注水;然後重複不同的流速, b)暫時停止泵,並通過液體閃爍計數器(Packard 3170 AB/TR,美國)對流出液的等分試樣(5mL)取樣以測 量 HTO 活性。在第一次注水過程中,兩個控制閥均向2 號油箱打開,通過管柱的流速預計控制在約5、3和1mL /min,本次測試採採用 5 mL/min。在向上注水過程中, 有2至3個孔體積的液相通過管柱後,在向下注水過程 中將 HTO 從管柱中衝出,其中的開關閥打開至1號油 箱。每60秒通過自動餾分收集器收集一次流出物,表2 顯示該向上註水/向下注水過程已建立,並重複了兩次以 上。 氚水 (HTO) 用作保守示踪劑或非反應示踪劑,因 為它代表了所有在固相中均未顯示保留的化學元素。使 用液體閃爍分析儀(LSA, Perkin Elmer Tri-Carb 3170 TR /SL) 測量樣品,計數效率為 91-92%。將 10 mL 樣品與 10 mL 閃爍混合物 (Packard LLT USA) 在 20 mL 聚乙烯 計數瓶中合併。實驗中使用的所有化學藥品均為分析純 度等級,在整個實驗中均使用去離子水(DIW)作為流 體。



本研究計畫規劃3年執行時程,在本年度(第1年), 首先建立進行管柱 ADE 實驗裝置之設置,填充材料為 破碎花崗岩,粒徑約1mm,柱體材料採用高強度透明玻 璃,長 30 cm,購置客製化之專用幫浦,以削減幫浦推 進流體可能產生之壓力,並自行設計多切閥開關,可在 實驗過程中,將注入液體任意傳換為水或核種溶液,流 出液的收集,則採用自動分液器,可調整分液間隔,使 實驗順利進行。

為測試實驗裝置是否成功安置,採用 HTO 做為示 蹤劑,理論上,HTO 不會與花崗岩產生吸附反應,因此, 在儀器設立初期,為良好之測試劑,不僅如此,在往後 的實驗中,HTO 也扮演許多律定管柱特性的角色。

本次測試實驗相當成功,穿越曲線分布良好,也成 功擬合出管柱特性參數值,由於之後預計進行具吸附性 之核種實驗,其數據可能較為複雜,本次測試試驗算是 一個試金石,預計本套實驗裝置,可在第2年度的實驗 中,發揮有效之作用。

# 參考文獻

- Hansen FD, Hardin EL, Orrell A (2011) Geologic disposal options in the USA. International High-Level Radioactive Waste Conference. American Nuclear Society Albuquerque NM pp:934–940
- [2] NEA (2012) NEA Sorption Project. Phase III: Thermodynamic sorption modelling in support of radioactive waste disposal safety cases. OECD-NEA, Paris
- [3] SKB, 2004. RETROCK Project. Treatment of geosphere retention phenomena in safety assessments. Scientific basis of retention processes and their implementation in safety assessment model (WP2). SKB Technical Report R-04-48. SKB, Stockholm, Sweden
- [4] Muurinen A (1994) Diffusion of anions and cations in compacted sodium bentonite. VTT Publications 168, Espoo, Finland
- [5] Tachi Y, Yotsuji K, Suyama T, Ochs M (2014) Integrated sorption and diffusion model for bentonite. J Nucl Sci Technol 29: 454–460
- [6] Altmann S, Tournassat C, Goutelard F, Parneix J-C, Gimmi T, Maes N (2012) Diffusion-driven transport in clayrock formations. Appl Geochem 27(2): 463–478
- [7] Robinet JC, Sardini P, Coelho D, Parneix JC, Prêt D, Sammartino S, Boller E, Altmann S (2012) Effects of mineral distribution at mesoscopic scale on solute diffusion in a clay-rich rock: Example of the Callovo-Oxfordianmudstone (Bure France). Water Resour Res 48 (7) W05554. http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011352
- [8] IAEA (1985) Deep underground disposal of radioactive wastes: near-field effects. Technical Report Series No 251.Vienna
- [9] Alexander WR, Smith PA, McKinley IG (2003) Modelling radionuclide transport in the geological environment. In: Scott EM (ed) Modelling radioactivity in the environment. Elsevier Amsterdam pp 109–145
- [10] Jörg G, Bühnemann R, Hollas S, Kivel N, Kossert K, Winckel SV, Gostomski CLV (2010) Preparation of radiochemically pure Se-79 and highly precise determination of its half-life. Appl Radiat Isot 68(12): 2339–2351
- [11] Neretnieks I (1980) Diffusion in the rock matrix: an important factor in radionuclide retardation. J Geophys Res 85(B8): 4379–4397
- [12] Compère F, Porel G, Delay F (2001) Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity. J of

Contaminant Hydrology 49(1-2): 1-21

- [13] Guha H, Saiers JE, Brooks S, Jardine P, Jayachandran K (2001) Chromium transport, oxidation, and adsorption in manganese-coated sand. J of Contaminant Hydrology 49(3-4):311-334
- [14] Fesch C, Simon W, Haderlein SB, Reichert P, Schwarzenbach RP (1998) Nonlinear sorption and nonequilibrium solute transport in aggregated porous media: Experiments, process identification and modeling. J of Contaminant Hydrology 31(3-4):373-407
- [15] EUR (2005) Treatment of radionuclide transport in geosphere within safety assessments (Retrock). Final report June (2005) Contract No. FIKW-CT-2001-20201 EUR 21230 EN
- [16] Sardini P, Siitari-Kauppi M, Beaufort D, Hellmuth KH (2006) On the connected porosity of mineral aggregates in crystalline rocks. Am Mineral 91(7): 1069–1080
- [17] Pala'gyi, S`tamberg K (2014) Transport parameters of I- and IO3-determined in crushed rock column and groundwater system under dynamic flow conditions. J Radioanal Nucl Chem 302:647–653
- [18] Stamberg K, Pala'gyi S', Videnska' K, Havlova' V (2014) Interaction of 3H+ (as HTO) and 36Cl- (as Na36Cl) with crushed granite and corresponding fracture infill material investigated in column experiments. J Radioanal Nucl Chem 299:1625–1633
- [19] Pala'gyi K, S`tamberg D, Vopa'lka (2015) A simplified approach to evaluation of column experiments as a tool for determination of radionuclide transport parameters in rock-groundwater or soil-groundwater systems. J Radioanal Nucl Chem 304:945-954
- [20] Plassard F, Winiarski T, Petit-Ramel M (2000) Retention and distribution of three heavy metals in a carbonated soil: comparison between batch and unsaturated column studies. J Contam Hydrol 42(2-4):99–111
- [21] Maraqa MA, Wallace RB, Voice TC (1997) Effects of degree of water saturation on dispersivity and immobile water in sandy soil columns. J Contam Hydrol 25(3-4):199–218
- [22] Lee CP, Wu MC, Tsai SC, Liu CY, Tsai TL, Pan CH, Yang MS (2015) Numerical analysis of transport and retardation for cesium in crushed granite using multistage advection-dispersion column experiments. J Radioanal Nucl Chem 304:377-386
- [23] Hemond HF, Fechner EJ (1994) Chemical fate and transport in the environment. Academic Press. New York
- [24] Martinus Th, Van Genuchten (1981) Technical Report Non-Equilibrium Transport Parameters from Miscible Displacement Experiments
- [25] Toride N, Leij FJ, Genuchten MTh Van, Technical Report No.137 1995 The CDXTFIT Code for estimating Transport parameters from Laboratory on field tracer experiments Version 2.0
- [26] Toride N, Leij FJ, Genuchten M Th Van, Technical

Report No.137 1999 The CDXTFIT Code for estimating Transport parameters from Laboratory on field tracer experiments Version 2.1

- [27] Tsai TL, Lee CP, Lin TY, Wei HJ, Men LC (2010) Evaluation of sorption and diffusion behavior of selenium in crushed granite by through-diffusion column tests. J Radioanal Nucl Chem 285:733-739
- [28] Jan YL, Tsai SC, Li YY (2014) Determination of sorption and diffusion parameters of Se(IV) on crushed granite. J Radioanal Nucl Chem 301:365-371
- [29] Cheng HP, Li MH, Li S (2003) A sensibility analysis of model selection in modeling the reactive transport of cesium in c rushed granite. J Contam Hydrol 61(1-4):371–385
- [30] Yunfeng Shi, Haoqi Yu, Yanqin Hu, Hesheng Liu, Neng-Chuan Tien, Yudan Wang, Weigang Liu, Jie Kong, Chuan-Pin Lee (2021) Study on Advection-Dispersion Behavior for Simulation of HTO and Se Transport in crushed granite, submitted to Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry.

# 異向性岩體之裂隙水力-力學耦合特性研究

# A study on the hydraulic-mechanical coupled behavior of a fracture in anisotropic rock mass

計畫編號:109-2623-E-009-001-NU 計畫主持人:翁孟嘉 e-mail:mcweng@nctu.edu.tw 計畫共同主持人:吳柏林 計畫參與人員:徐文杰 執行單位:國立陽明交通大學土木工程學系(所)

# 摘要

本年度計畫延續 108 年度計畫之研究成果做為基礎, 加入岩體異向性之影響,採用 DECOVALEX-2019 Task B 之標準分析模型,模擬裂隙變化與流體互制行為。本 研究計畫之研究項目可分為三大部分包含:(1)文獻蒐集 與歸納、(2)分離元素分析、(3)有限元素分析。本研究先 使用等向彈性岩體並考慮單一裂隙進行定流量注水模 擬,模擬結果將與其他團隊結果進行基準比較。研究所 得之注水點水壓歷時曲線、正向位移與剪位移分佈均接 近其他團隊模擬所得結果,足以驗證模式之可信度。而 後依據模式之參數設定,建立分離元素法及有限元素法 之岩體水力-力學耦合模式並採用橫向等向性分析模 型進行數值分析。

**關鍵詞:**水力一力學耦合行為、異向性岩體、分離元素 法、有限元素法。

#### Abstract

This project is to continue the research results of the 2019, adding the influence of rock anisotropy, and using the DECOVALEX-2019 Task B to simulate fracture changes and fluid interaction behavior. This project can be divided into three parts including: (1) literature collection and review, (2) separated element analysis, (3) finite element analysis. This study first uses isotropic elastic rock mass and considers a single fracture to perform a constant flow water injection simulation. The simulation results will be benchmarked with the results of other teams. The water pressure duration curve, the positive displacement and the shear displacement distribution of the water injection point obtained from the study are close to the simulation results of other teams, which are sufficient to verify the credibility of the model. Then, according to the parameter setting of the model, the rock mass hydraulic-mechanical coupling model of the separated element method and the finite element method is established, and the lateral isotropic analysis model is used for numerical analysis.

**Keywords:** Hydraulic- mechanical coupled behavior, anisotropic rock mass, discrete element method, finite element method.

#### I. 前言

DECOVALEX (Development of Coupled model and their Validation against Experiment)是一項由多國研究團

隊組成,並共同執行的國際研究計畫案。主要的研究範 疇包含熱水力(Thermal-Hydro-mechanical)以及熱水化 (Thermal-Hydro-Chemical)對於高放射性廢棄物之深層 地質處置的研究與應用。DECOVALEX 源於 1992 年, 至今已有多項重要的成果發表,包含耦合數值模型的研 發、考慮裂隙之岩體破壞行為、回填材料與緩衝材料之 熱水力耦和行為等多項成果。參與研究的國家包含加拿 大、中國、芬蘭、法國、日本、德國、西班牙、英國、 韓國、捷克以及美國。台灣也在 2016 年由台電出資,正 式加入此國際研究團隊。

DECOVALEX 每一個階段的計畫執行期為 4 年, DECOVALEX (D-2019)有 7 個研究主題,包含:Task A-氟體在低滲透岩體之流動、Task-B-裂隙因注水事件造成 的再活化、Task-C 考慮熱力化耦合之地下水回流分析、 Task-D 膨潤土水力耦合之工程障壁分析、Task-E 處置隧 道之升尺度實驗與模擬、Task-F 緊密岩體中之水流模擬 以及 Task-G 處置隧道之開挖擾動帶所造成的水力傳導 係數改變評估,本研究將針對 TaskB 議題做討論說明。 DECOVALEX 的 TASK B 共分為 3 個研究階段:第 1 個 階段為數值模型研究階段,包含軟體的開發與各研究團 隊的初始結果比對(Benchmark simulation)。第 2 個階段 為次要裂隙再活化模擬與實驗結果比較,而最後一個階 段為主要斷層的再活化模擬。

Mont Terri 位於瑞士境內,鄰近法國與瑞士的邊境。 瑞士的高放專責機構 Nagra 所屬的地下地質實驗室正位 於 Mont Terri 山區。美國的 Lawrence Berkely National Laboratory (LBNL)於 2016 年起開始在該區域執行裂隙 注水試驗。這些試驗在 DECOVALEX 的架構下,主要 的研究目的有二:

(1)評估裂隙再活化所需之驅動臨界水壓。

(2)評估裂隙再活化後空間的改變與水壓的關係。

由於瑞士 Mont Terri 地下實驗室的 Opalinus Clay 岩性為頁岩,而現階段台灣除結晶岩外,並未排除黏土 質處置母岩(頁岩)之可能性,由於黏土質岩層具有異向 性之特性,因此於第一階段相互驗證可行後,應適當納 入岩體異向性問題以完整詮釋黏土質母岩之行為,特別 是透過 HM 耦合,應進一步研究。

因此,本研究主要延續108 年計畫Task B 之標準 分析模型,並參考 Opalinus Clay 岩體特性納入橫向等 向性岩體之影響,以模擬裂隙產生、變化與流體流動互 制行為,進行地下水滲流量與流場的分析。進而持續探 討異向性岩體之探討裂隙發展與地下流體間之關係。

# Ⅱ. 主要內容

# 2.1 等向性概念模型

美國能源局於 2016 年提出加強型地熱系統 (Enhanced Geothermal System, EGS)研究案, 資助國際產、 官、學研究機構進行相關研究。研究主軸為數值模型的 開發與模式比對(benchmark comparison),希望藉由此項 研究工作,能為 EGS 提供更精確的預測模式以及對熱、 水、力耦合機制有更深入了解,參與此研究項目的團隊 及使用的分析軟體詳如表 2-1。該研究計畫(DOE technical report, 2016) 共包含七個子項目:一.含裂隙斷層 之水壓與滲透係數關係;二.利用剪力擾動斷層進行應力 控制型滲透係數研究;三.注水引致斷層之開口寬與剪切 位移研究;四.使用 Penny-Shaped crack 進行熱、水、力 耦合研究;五.裂隙中之非晶矽溶解與沉澱分析;六.岩體 裂隙注水之水、力耦合分析;七.近地表斷層注水活動所 造成之地表變形研究。本計畫選用子項目六(岩體裂隙注 水之水、力耦合分析)作為第一階段概念模型之數值分析 研究課題,分析方法與假設詳述如下。

## 表 2-1:美國能源局 EGS 計畫參與團隊及各團隊使用 分析軟體

Code(s)	Team Affiliation	Team Members
FALCON	Idaho National Laboratory	Robert Podgorney, Hai Huang,
		Mitch Plummer, Yidong Xia
FLAC3D	Itasca Consulting Group	Jason Furtney, Christine Detournay, Azadeh
		Riahi, Branko Damjanac
TOUGH, FLAC3D	Lawrence Berkeley National	Jonny Rutqvist, Eric Sonnenthal,
	Laboratory	Jens Birkholzer
NUFT, GEOS	Lawrence Livermore National	Charles Carrigan, Pengcheng Fu,
	Laboratory	Bin Guo, Yue Hao, Souheil Ezzedine
FEHM	Los Alamos National Laboratory	Sharad Kelkar
PFLOTRAN	Oak Ridge National Laboratory	Charlotte Barbier, Yarom Polsky
GeoFrac-Mech,	The University of Oklahoma	Ahmad Ghassemi, Qinglu Cheng,
GeoFrac-Stim		Quan Gan, Kai Huang, M.R. Safari,
		Varahanaresh Sesetty, Qingfeng Tao
STOMP	Pacific Northwest National	Mark White, Signe White,
	Laboratory	Diana Bacon, Tim Scheibe
TOUGHREACT,	Pennsylvania State University	Derek Elsworth, Yi Fang,
FLAC3D		Kyungjae Im, Baisheng Zheng
CFRAC_Stanford,	Stanford University	Roland Horne, Jack Norbeck, Yang Wong
GPRS		
CFRAC_UT	The University of Texas at Austin	Mark McClure, Kit-Kwan Chiu
MULTIFLUX,	University of Nevada, Reno	George Danko, Davood Bahrani
TOUGH2, NUFT, 3DEC		

本研究擬透過裂隙注水行為探討多孔介質岩體裂隙之水壓變化以及其對於鄰近裂隙所造成之應力再分佈行為,並使用簡化的二維模型(平面應變)進行數值分析。數值模型考慮一個單一裂隙,長40公尺、傾角45度(dip angle),初始水平與垂直應力分別為13Mpa 與20Mpa,初始水壓為10Mpa,如圖2-1,其中,庫倫滑移破壞包絡線的紅色箭頭與藍色箭頭所指方向,分別為注水與抽水活動所造成之應力路徑移動方向。注水時,應力路徑往左移動,即接近破壞包絡線之方向,因此,此類型活動會提高斷層再活化(fault reactivation)之潛勢。第一階段數值模型將岩體假設為等向彈性材料,裂隙則使用庫倫滑移準則(Coulomb slip criterion)模擬裂隙注水時之水,力耦合行為。岩體與裂隙均具有導水能力,其中, 岩體之水力傳導係數為4x10-19 m2,而裂隙之水力傳導係數(KH)則遵循立方律(power law)。

圖 2-2 與圖 2-3 分別為第一階段所使用之 COMSOL 與 3DEC 所呈現的數值模型。如前所述,本模型為一個 相對簡單的裂隙岩體模型,主要考慮一個長度與高度為 160 m,厚度為 10m 的塊體,內部包含一個傾角 45°的裂 隙。注水條件為定流量注水,注水量為 6x10-8 m/s,注 水時間 150 天,注水段位於裂隙中央。另外,為了可以 精確的模擬裂隙及其附近岩體的水力耦合行為,又可以 控制網格數量在合理範圍內,本模型於靠近裂隙的地方 使用較小的網格而遠離裂隙的地方網格較大。



#### 圖 2-1:數值模型示意圖與庫倫滑移破壞包絡線

#### 表 2-2: 第一階段分析模型使用參數

Parameter (unit)	Magnitude
Shear modulus [G (GPa)]	15
Poisson's ratio $(v)$	0.25
Undrained Poisson's ratio	0.33
Matrix permeability $[k_m \text{ (m}^2)]$	$4.0 imes10^{-19}$
Matrix porosity $(\phi_m)$	0.01
Biot's coefficient $(\alpha)$	0.44
Water viscosity $[\mu (Pa s)]$	$3.547 \times 10^{-4}$
Fluid compressibility (MPa <sup>-1</sup> )	$4.2  imes 10^{-4}$
Thermal expansion coefficient of solid $[\alpha_s (K^{-1})]$	$2.4  imes 10^{-5}$
Thermal diffusivity of intact porous rock $[c^T (m^2/s)]$	$1.1  imes 10^{-6}$
Fluid density $[\rho_w (kg/m^3)]$	1000
Heat capacity of fluid $[c_w (J/kg K)]$	4200
Initial reservoir temperature (K)	420
Injection water temperature (K)	400
Initial joint normal stiffness $[k_n (GPa/m)]$	0.5
Initial joint shear stiffness $[k_s \text{ (GPa/m)}]$	50
Fracture aperture initial [bini (mm)]	1
In-situ stress (MPa)-y direction	20
In-situ stress (MPa)-x direction	13
Initial reservoir pore pressure (MPa)	10
Injection rate (m3/s)/m thickness of reservoir	$6.0  imes 10^{-8}$
Friction angle, dilation angle	30°, 2.5°
Fracture cohesion [C (MPa)]	0

**Crack open relationship**   $p = b_{tnl} - \frac{9b_{nl}\sigma'_n}{\sigma_{nc} + 10\sigma'_n} + \frac{\tau - \tau_{sc}}{K_s} tan\varphi_d + \frac{(P_r - P_{r0})}{10 \times \frac{7\pi \ddot{G}}{24}}$ Initial pressure po = 10 MPa  $A = \pi r^2$ Initial pressure po = 0 MPa  $A = \pi r^2$ Initial pressure po = 0.6E-7 m^3/s (2) Injected water temp. = 400 degK (isothermal) (2) Injected water temp. = 400 degK (isothermal) (2) Injected water temp. = 400 degK (isothermal) (3) Injected water temp. = 400 degK (isothermal) (3) Injected water temp. = 400 degK (isothermal)





圖 2-3: 第一階段 3DEC 模型之岩體(左圖)與裂隙(右圖)

#### 2.2 異向性模型

第二階段之分析擬將岩體異向性納入數值模型中, 使用横向等向性模型(transversly isotropic model)模擬岩 體之異向性力學行為。如圖 2-4, 假設等向平面位於 XV 面,此種平面可用於描述岩體中的層面(bedding plane), 當施力方向沿著等向平面之走向時(即沿著X軸或V軸), 則可量測到相對高的岩體楊氏模數(Young's modulus), 反之,若施力方向垂直於等向平面,則會量測到較低的 楊氏模數。本研究初步假設橫向等向性之強軸方向為前 述基準案例之參數,而弱軸方向則為強軸方向之1/3;以 圖 2-4 為例,兩軸向之剪力模數分別為 Gx=15 GPa(強 軸)、Gz=5 GPa(弱軸),其餘力學參數亦據此定義給定。 而後為評估模型層面方向之影響,本研究定義裂隙與層 面之夾角為α,如圖2-5所示;並建立不同α角度之數 值模型案例進行評估,如圖 2-6 所示,包括 α=0°、α=45°、 α=90°、α=135°四種不同數值模型案例。除上述變動之外, 其餘設定皆與第一階段模式相同。





圖 2-5: 數值模型案例裂隙與層面夾角定義示意圖



#### 2.3 初始條件與邊界條件

本研究使用之現地應力值,詳如表 2-3。在考慮到裂 隙之位態(沿著X軸向西傾斜)後,我們將 yy之值設定 為 10MPa, 而 xx 與 zz 則與 DOE 設定值相同,分別為 10Mpa 與 20Mpa,由於裂隙之走向朝向正北(v 軸方向), 因此裂隙面上之初始正向應力與初始剪應力只會受到 x 方向與 Z 方向初始應力控制(與 y 方向初始應力無關)。 裂隙面上之初始水壓力為10MPa,本模擬不考慮垂直應 力梯度與垂直水力梯度。

表 2-3	: 參數研究所	使用之現地應	力值
	XX	уу	ZZ
In-situ Stress	13 MPa	10 MPa	20 MPa

力學邊界條件方面,我們假設為所有的邊界均為滾 支承邊界(roller boundary),意即邊界平面上的法向量方 向位移為零。而水流方面的邊界條件則是使用定水壓邊 界,意即邊界上的水壓力固定為10 MPa。

# III. 結果與討論 3.1 第一階段數值模擬 - 等向性概念模型

本階段模式將使用等向彈性岩體,並考慮單一裂隙 進行定流量注水模擬,模擬結果將與其他團隊結果進行 基準比較(benchmark comparison)。由於各團隊使用的數 值模型均不相同,且每個模式在處理水、力耦合之程序 以及基本假設也不盡相同,因此,本研究首先針對 3DEC 模型,進行一系列的參數敏感度分析與有限元素 COMSOL 模擬結果進行比較,分析參數包含裂隙初始開 口寬(initial aperture)以及裂隙正向勁度(joint normal stiffness), 如表 3-1。

如圖 3-1 所示為注水點水壓歷時曲線,在考慮不同 開口寬,相同裂隙正向勁度的條件下,初始開口寬愈小, 所得之水壓增量愈大,此結果與流量 $(q_i)$ 與水力梯度 $(\emptyset_i)$ 關係相吻合,開口寬愈小,裂隙之滲透係數愈小,在等 流量情況下,就會得到較大的水力梯度,進而在注水點 反應出較高的水壓力。而裂隙正向勁度對於開口寬變化 以及水壓變化影響結果整理於圖 3-2, 裂隙的開口寬變 化量(正向位移變化量)係由應力變化量除以裂隙正向勁 度獲得,因此,勁度愈小,所得之開口寬增量愈大。而 開口寬愈大,所對應的儲水係數(storativity)愈大,反應 出的水壓力愈小。我們進一步發現,裂隙正向勁度對於 開口寬變化有較顯著之影響,其對於孔隙水壓之影響較 不明顯,孔隙水壓之變化,主要受到初始開口寬的控制。 藉由此參數敏感度分析結果可知,水壓壓時曲線與開口 寬歷時曲線可分別透過初始開口寬與裂隙正向勁度進 行參數律定,經過比對,案例5的模擬結果與其他團隊 所得結果最為接近,如圖 3-3。我們發現,開口寬變化歷 時曲線呈現兩種趨勢, COMSOL 與 3DEC model 所得結 果顯示,開口寬變化在注水初期(0-15 天)有較明顯之增 量,而15天之後,其增量趨緩,呈線性上升,而其他團 隊所得結果顯示,開口寬增量從一開始就呈現線性上升 趨勢。儘管如此,所有團隊分析所得之開口寬變化量均 落於同一個量級區間。

表 3-1:參數敏感度分析案例			
case	Initial aperture (mm)	Joint normal stiffness (Gpa/m)	
1	0.01	0.5	
2	0.008	0.5	
3	0.05	0.5	
4	0.008	1.5	
5	0.008	3	
6	0.1	0.5	



圖 3-1:不同開口寬所得之注水點水壓歷時曲線



圖 3-2:不同裂隙正向勁度所得之注水點開口寬歷時曲 線與水壓歷時曲線。



\*各團隊名稱:NCTU-本研究 COMSOL 模擬結果;OU-University of Oklahoma; PSU-Pennsylvania State University;Stanford-Stanford University;3DEC model – 本研究 3DEC 模擬結果

#### 3.2 第二階段數值模擬 - 異向性模型

本章節將探討異向性岩體,在進行與前述案例同樣 的注水條件時,其水、力耦合之行為。岩體異向性組成 律採用橫向等向性模式(transversely isotropic model),總 共探討四種不同角度之岩體弱面分佈,如圖 2-6。另外, 本階段使用之裂隙水、力參數與第一階段模式相同(使用 表 3-1 案例 5 之參數)。

#### (1) 3DEC 分析模型

圖 3-4 分別比較不同案例在注水過程中,注水點之 位移反應(開口寬與剪切位移)。首先,裂隙之剪切位移必

定沿著裂隙平面上發展,另外,由異向性岩體特性可知, 弱面法向量方向具有較小之彈性模數,即該方向利於岩 體變形,因此,當裂隙的傾角方向與弱面的法向量平行 時,可構成最有利裂隙剪切位移發展之條件(α=90 度), 反之,弱面法線方向與裂隙傾角垂直時,則不利於裂隙 剪切位移發展(α=0 度),上述兩個案例可分別得到最大 與最小裂隙剪切位移(不考慮等向模式)。另外,在α=135 度的案例中,裂隙面法向量與最大主應力平行,造成弱 面受壓,不利於剪切位移發展,綜上所述可知,剪切位 移的大小發展與弱面傾角關係為 90 度>45 度>135 度>0 度,如圖 3-4(C)。而正向位移增量之發展趨勢, 洽與剪 切位移發展趨勢相反,正向位移朝向裂隙法向量方向, 因此,在彈性變形階段,理想情況之正向位移量的變化 趨勢可能為0度>45度=135度>90度。然而,當裂隙進 入到塑性變形階段,由於膨脹角(φ)的作用,裂隙會在產 生剪切位移時,提供額外的正向位移增量(亦稱為剪脹), 因此,裂隙的正向位移增量為彈性正向位移與剪脹正向 位移的總和。值得注意的是,裂隙的彈性正向位移增量 與裂隙的受力情形有關,在裂隙仍承受壓力情況下,其 正向位移的變化量受到裂隙正向勁度控制,而在裂隙已 被完全打開的情況下(即兩接觸塊體已完全分離, $\Delta \sigma=0$ ), 則裂隙受到之額外水壓力全部改由岩體承受,此時裂隙 的正向位移增量受到岩體的體積模數控制。圖 3-11 分別 將裂隙彈性變形與剪脹變形繪於不同圖形上,剪脹位移 之變形趨勢與裂隙之剪切位移相同(圖 3-4(C)),而正向 位移增量之大小關係為 45 度>0 度>90 度>135 度,此關 係與上述推論略有不同,其原因可能與最大主應力施加 方向有關,當最大主應力施加於弱面法向量方向時(135 度),弱面承受最大壓應力,此條件不利於裂隙之正向位 移發展,反之,弱面承受最小主應力時(45度),有利裂 隙的正向位移發展,而另外兩個案例(0度與90度),弱 面與最大主力應都呈現斜交狀態,此兩種情造成的裂隙 正向位移增量非常接近。由此結果推論,裂隙正向位移 增量似乎與最大主應力方向與弱面夾角有關,而弱面與 裂隙夾角(α)對於裂隙正向位移之影響則有限。

圖 3-6 為考慮不同裂隙與弱面之夾角(α)所得之岩體 位移分佈圖,由此圖可發現,各個案例在注水過程當中, 岩體均承受到不同程度的剪切錯動反應,當剪位移方向 (裂隙傾角方向)與弱面法向量平行時(α=90 度),岩體出 現較大的剪位移反應,反之(α=0 度),岩體剪切錯動反應 趨於平緩。我們進一步分析岩體沿著裂隙傾角方向與沿 著裂隙法線方向之位移分佈趨勢發現(圖 3-7),在靠近裂 隙附近之岩體位移主要由剪切行為控制(90 度>45 度 >135 度>0度),而在法線方向上,注水對於遠處岩體之 位移反應則以α=0度之案例所得結果較為顯著,整體而 言,岩體位移發展趨勢與剪切錯動反應均與弱面方向有 著密切的關聯性。

圖 3-8 比較不同 α 案例所得之岩體體積應變 (volumetric strain)分佈圖,此圖上暖色系表示岩體受拉, 冷色系(或灰色)表示岩體受壓,我們清楚發現,岩體受壓 側均集中於弱面法向量方向,其中以案例 α=45 度所觀 測到之受壓發展範圍最為顯著,上述結果表明,注水過 程中,岩體受壓反應會沿著弱面法線方向發展,且若最 小主應力方向與弱面法向量平行,則受壓趨勢會更加顯 著。而各個案例所預測之岩體水壓分佈趨勢則較為相近, 如圖 3-9,由於模式僅於力學彈性變形行為考慮岩體之 異向性,而水流模式則使用等向水流模型,因而造成這 些案例所得之水壓分佈並無顯著差異。



圖 3-4:(A)弱面方向與裂隙夾角示意圖;(B)注水點開 口寬歷時曲線;(C)注水點剪切位移歷時曲線









圖 3-8: 不同α之岩體體積應變分佈圖



圖 3-9:不同α之岩體水壓分佈圖(單位:Pa)

# (2) COMSOL 分析模型

圖 3-10 顯示裂隙內寬隨注入時間增加之變化情形, 其中黑色實線為前年度基準數值問題中等向性之之分 析結果,其餘案例則為本研究不同層面夾角之分析結果。 可知初始裂隙內寬為 1 mm,隨時間增加,等向性條件下 180 天後開張約 2.6 mm,而不同層面角度之裂隙內寬開 張變化皆小於等向性條件,約介於 1.8mm 至 2.3mm 之 間。圖 3-11 顯示裂隙內壓力隨注入時間增加之變化情形, 其中黑色實線為前年度基準數值問題中等向性之之分 析結果,其餘案例則為本研究不同層面夾角之分析結果。 基準案例中等向性條件下裂隙壓力為隨時間增加 180 天 後逐漸增加至 19.5 MPa,而不同層面角度之裂隙壓力變 化皆小於等向性條件,約介於 16.5MPa 至 18.5MPa 之 間。


圖 3-10:不同層面夾角案例之裂隙內寬隨時間變化圖



圖 3-11: 不同層面夾角案例之灌注壓力隨時間變化圖

圖 3-12 為中心局部分析區流線(紅線)及等勢能線 (色階)於不同層面夾角之分佈情形,圖中顯示,流體由裂 隙中心向外流動,壓力由裂隙內逐漸遞減。進一步觀察 等勢能線隨空間變化,可明確發現等勢能壓力型態與層 面之方向有極大之關連性。



圖 3-13 顯示不同層面夾角分析案例剪應力(q)之空 間分布圖,圖 3-16 為不同層面夾角分析案例剪應變 (deviatoric strain)分布圖,圖 3-18 則為不同層面夾角分 析案例體積應變(volumetric strain)分布圖。

由圖 3-13、圖 3-16 與圖 3-18 中可發現剪應力、剪 應變與體積應變隨不同層面角度變化呈現顯著之異向 性行為,為更量化呈現剪應力與其他分析結果之空間數 值變化,茲將模型於不同軸向作切面 1 至 4,如圖 3-14。 據此剪應力、剪應變與體積應變於不同切面下之變化分 別如圖 3-15、圖 3-17 與圖 3-19 所示,其中黑色實線為 前年度基準數值問題中等向性之之分析結果,其餘案例 則為本研究不同層面夾角之分析結果,由四組不同切面 可知剪應力集中區域會隨不同層面角度改變,因此於不 同切面條件下呈現不同分佈排序。

繪製各案例分析結果中心點數值與不同層面角度 則如圖 3-20 所示,圖 3-20 (a)至圖 3-20 (d)分別呈現裂隙 內壓力、剪應力、剪應變與體積應變隨不同層面夾角之 變化,紅色虛線則表示等向性條件之參考組。由圖中可 以發現呈現出一致性之高低趨勢,顯示於本案例之大地 應力與地質參數條件下,當層面與裂隙夾角為 135 度時, 可能發生最大剪應力、最大剪應變與體積應變之最不利 狀況。



圖 3-13: 不同層面夾角分析案例剪應力分布圖



圖 3-14: 數值模型案例切面分析示意圖



1.6E-0

1.4E-03

1.6E-0

1.4E-0

1.2E-0



圖 3-18: 不同層面夾角分析案例體積應變分布圖

<sup>1.2</sup>E-0 1 05-03 1.0E-03 Nolumetri 8.0E-04 8.0E-04 6.05-0 4.0E-04 4.0E-04 2.0E-0 2.0E-04 0.0E+00 0.0E+00 200 Dist (a) 切面1 (b) 切面2 1.8E-03 1.8E-03 1.6E-03 1.6E-03 1.4E-03 1.4E-03 1.2E-03 1.2E-03 1.0E-03 1.0E-03 eunion , 0 8.0E-04 5.0E-04 6.0E-04 4.0E-04 4.0E-04 2.0E-04 2.0E-04 0.0E+00 0.0E+00 (c) 切面3 (d) 切面4





## IV. 結論

本研究建立分離元素法及有限元素法之岩體水力 一力學耦合模式並採用橫向等向性分析模型進行數值 分析。由於各數值方法使用的模式均不相同,且每個模 式在處理水、力耦合之程序以及基本假設也不盡相同, 因此應基於各數值方法針對問題進行修正。本研究所得 結論包括:

- 1. 本研究先使用等向彈性岩體並考慮單一裂隙進行 定流量注水模擬,模擬結果將與其他團隊結果進行 基準比較(benchmark comparison)。研究所得之注水 點水壓歷時曲線、正向位移與剪位移分佈均接近其 他團隊模擬所得結果,足以驗證模式之可信度。
- 2. 裂隙水流模式依循立方律,裂隙水力傳導係數與開 口寬立方成正比,而岩體的導水能力則與滲透係數 有關,依據模式之參數設定,裂隙之水流傳輸速度 遠大於岩體,因此裂隙內之水壓力幾乎呈線性分佈, 且注水點與裂隙邊緣之水頭壓力差甚小,而岩體內 水壓則以拋物線方式由裂隙逐漸向附近岩體內部

遞減。

 由於本研究使用等向水流模式進行流場分析,因此 岩體水壓分佈不受異向性影響。。

#### 參考文獻

- 台灣電力公司(2010),我國用過核子燃料最終處置 初步技術可行性評估報告,SNFD2009。
- [2] 台灣電力公司(2012),用過核子燃料最終處置計畫 一潛在處置母岩特性調查與評估階段,成果報告。
- [3] Bond, A, Bruský, I, Chittenden, N, Feng, XT, Shao, H, Lang, P, Lu, R, McDermott, C, Neretnieks, I, Pan, PZ, Šembera, J, Shao, H, Yasuhara, H, Zheng, H (2016). Development of approaches for modelling coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical processes in single granite fracture experiments: Environ Earth Sci 75: 1313.
- [4] Graupner B., Rutqvist J. and Gugliemi Y., Fault Slip test – Modelling the induced slip of a fault in argillaceous rock, Description of Decovalex-2019 Task B, August 2016.
- [5] Guglielmi Y (2016). In-situ clay faults slip hydromechanical characterization (FS experiment), Mont Terri underground rock laboratory. Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBNL-XXXX March.
- [6] Guglielmi, Y, Elsworth, D, Cappa, F, Henry, P, Gout, C, Dick, P, Durand, J. (2015) In situ observations on the coupling between hydraulic diffusivity and displacements during fault reactivation in shales. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 120, 7729–7748, doi:10.1002/2015JB012158.
- [7] Guglielmi, Y., Cappa, F, Lanc, H, Janowczyk, JB, Rutqvist, J, Tsang, C-F, Wang, JSY (2014) ISRM suggested method for step-rate injection method for fracture in-situ properties (SIMFIP): Using a 3component Borehole Deformation Sensor. Rock Mechanics and Rock Engineering 47, 303–311.
- [8] Harris, AF, McDermott, CI, Bond, A, Thatcher, K, Norris, S. (2016). A non-linear elastic approach to modelling the hydro-mechanical behaviour of the SEALEX experiments on compacted MX-80 bentonite. Environ Earth Sci 75: 1445.
- [9] Itasca ICG. 3 Dimensional Distinct Element Code. 2013 Itasca consulting Group Inc.
- [10] Lang, PS, Paluszny, A, and Zimmerman, RW. (2015). Hydraulic sealing due to pressure solution contact zone growth in siliciclastic rock fractures. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(6), 4080– 4101.
- [11] Mokni, N, Barnichon, JD. (2016). Hydro-mechanical analysis of SEALEX in-situ tests — Impact of technological gaps on long term performance of repository seals. Engineering Geology 205 (2016) 81– 92.
- [12] Rutqvist, J, Zheng, L, Chen, F, Liu, H-H, Birkholzer, J (2014) Modeling of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes with Links to Geochemistry Associated with Bentonite-Backfilled Repository Tunnels in Clay Formations. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, 167–186.
- [13] Yoon, JS, Stephansson O, Zang A, Min KB, Lanaro F. (2017), Discrete bonded particle modelling of fault

activation near a nuclear waste repository site and comparison to static rupture earthquake scaling laws, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 98, 1-9.

[14] Yoon, JS, Zimmermann G, Zang A, Stephansson O. (2014) Discrete element modeling of fluid injectioninduced seismicity and activation of nearby fault, Candian Geotechnical Journal 52:1457-1465.

## 核燃料處置場之地下孔隙擴散 THM 模型建立與最佳化分析 The development and optimization of porous THM model for nuclear waste repository

計畫編號:109-2623-E-024-001-NU 計畫主持人:林大偉 e-mail:david@mail.nutn.edu.tw 計畫參與人員:鄭富安 執行單位:國立臺南大學機電系統工程研究所

#### 摘要

現今用過核燃料最終處置場的設置理論與技術已 漸趨成熟並達到商業規模,然而仍有部份現象探討極有 限。事實上,要能有效控制用過核燃料的近場條件應從 其緩衝材料孔隙及母岩裂隙之 THM 現象之模型建立進 行。本計畫之目的為完成開發以相似用過核燃料最終處 置場熱-水-力孔隙 THM 耦合模型最佳化處置場廢棄物 罐配置之預估。本計畫將利用自行發展之相似用過核燃 料最終處置場熱-水-力孔隙 THM 耦合模型,實際預測處 置場廢棄物罐間最大容許溫度分布與配置距離之極限。

**關鍵詞**:孔隙 THM 模型、SCGM 最佳化方法、Brinkman 模型、孔隙熱傳實驗、熱擴散長度

#### Abstract

The purpose of this project is to develop and validate the similar porous THM model of nuclear waste repository. The installed canister of nuclear waste repository will be optimized in this process. This optimal process is based on the similar porous THM model developed by our team and combined with the SCGM optimizer. The similar porous THM model is built by the Brinkman model conjugated with porous heat transfer model and the thermal dispersion length fitted from experiment. The scale-up in-situ THM model of nuclear waste repository is developed based on the conceptual of KBS-3V. The maximum installed array of canister will be predicted and satisfied the requirement of temperature distribution of nuclear waste repository. This porous THM model is the first proposed method to predict the phenomena of heat transfer in the complex porous medium.

**Keywords:** porous THM model, SCGM optimizer, Brinkman model, porous heat transfer experiment, thermal dispersion length

#### I. 前言

用過核燃料最終處置場及其汙染之管控需藉由裂 隙及孔隙之熱傳與相關地物資訊找出合適的儲存技術 與其場址,其中包括地質學、核能工程、熱力學、機械 工程,以及水力理論等。雖然現今的相關設置理論與技 術已達到商業規模,卻尚有部份現象未善加探討,如岩 層裂隙狀況、孔隙熱傳及相關熱應力影響、儲存用過核 燃料洩漏至環境的可能性、用過核燃料週遭環境的溫度 影響,以及地下水的分布狀況。若能從其地質層孔隙及 裂隙之 THM 現象之模型建立進行,預計將能有效控制 用過核燃料的近場條件,因此,本計畫將以力學性質、 孔隙流與熱傳間的關係著手,預期將可以建立完整且詳 細之熱傳模式。

最終處置場之存放方式國際上主要依據瑞典 SKB 公司發展之 KBS-3 處置概念,在廢棄物罐置放方式又 可分為水平置放(KBS-3H)跟垂直置放(KBS-3V)2 種。目 前國內以 KBS-3V 為處置設計標準。

Ballarini 等人以實驗及 THM 模擬砂-膨鬆土混合 物與黏土二種緩衝材料基於熱擴散及膨脹時之熱傳、多 相流與力學效應。由此可知,不同濕度、含水量、相對 擴散度與緩衝材料之熱傳導係數有極其重要之影響,特 別是過渡飽和情況下緩衝材料之狀態為處置場研究中 極重要方向[2]。緩衝材料中之熱傳現象上孔隙將扮演重 要之角色,而母岩之裂縫是否可視之為管流均為很重要 之基礎研究。Wang 等人[3] 建立了一種新的裂縫孔徑 熱致一般變化(thermal-induced normal change)的關聯性 以探討儲集層因溫度較低的工作流體注入而降溫,進而 影響到儲集層之孔隙率,並基於此關聯性建立了一控制 位移方程的解析解。而 Wittig 等人[4]探討孔隙率對於阻 力係數以及 Nu 的影響,其雷諾數之範圍是 10 到 250, 結果阻力係數與 Nu 在雷諾數較大的情況下,隨著孔隙 率增加而增加、隨著顆粒表面積增加而降低,但在雷諾 數較小之情況下則完全相反。Yang 等人[5]探討多孔結 構在相同孔隙率下,不同的顆粒尺寸水平(particle size level)之隨機性,對於流動及熱傳性質之影響。結果顆粒 尺寸的增加將使通透率增加與 Nu 降低,當顆粒尺寸水 平增加至5,通透率及Nu 將停止變化。Yang 其研究團 隊亦在 2016 年發表過另外一篇文章[6]利用多重鬆弛時 間 (multi-relaxation-time,MRT) 之晶格波茲曼 (Lattice Blotzmann Method, LBM)模擬具有不同粒徑的無規則多 孔介質的流動與熱傳,提出了一套新的熱傳關係式,並 與現有之經驗式以實驗做了比較,而結果顯示 Nu 與雷 諾數之間的指數是 0.786, 且 Nu 隨著孔隙率增加而增 加。Chen 等人[7]利用一種簡單的單一鬆弛時間 LBM 彌補以往模型上的不足。許多科學家專注研究於多孔介 質中之熱擴散現象。Ozgumus 等人[8]探討孔隙對於多 孔介質熱分散的影響。結果發現在較低的雷諾數下(小於 10),縱向及橫向的熱擴散係數是可忽略的。

同樣地,廢棄物罐所在之不同深度 Kedzierski 等學 者[9]在探討地熱模型時曾討論深度對於熱傳係數及壓 力之影響,其探討 Nu 數值之經驗式乃是使用 Colburn 於 1979 年文章中所開發的經驗式,其適用範圍為 104< Re 以及 0.7 < Pr< 160,其深度探討範圍為 503 米到 2098 米,結果發現從 503 米到 2098 米的深度增加,熱傳係 數增加了 70%,並發現運動黏度對於熱傳係數之影響非 常大。

類似於最終處置場中之熱-水力及應力相關互相耦 合之問題,包含岩層裂縫、細微孔隙、深層壓力之物理 及化學,橫跨熱流、地質、化學反應、材料及力學等領 域。Jiang 等人[10]利用兩個能量平衡方程式,以三維暫 態模型模擬出地熱系統在地底下岩石與流體之間的熱 交換過程。Heinze 等人[11]提出了一個非平衡局部熱傳 模型(Local thermal non-equilibrium models, LTNE),探討 雙重孔隙率條件下流體與岩石之熱傳,結果表明相比於 標準的流體-岩石模型,低滲透率的水亦須被考慮,否則 儲存之熱量將被低估。

為了在建立模型材料時,可以更了解水的熱傳特性, 並藉由相關之研究探討模型之正確性,亦有許多學者提 出相關研究,例如 Lei 等人[12]利用了一個超臨界水的 實驗分析水平流與垂直流的熱傳特性,藉由控制壓力、 質量流率以及熱通量改變管內壁溫度並觀察之,並發現 對於水平流的衰減型熱傳遞來說,浮力有顯著的影響。

而關於熱分散性之相關研究如 He 等人[13]以實驗 結合模擬研究水在單一裂縫斷面的熱傳現象,斷面粗糙 度對於局部熱傳係數有很大的影響,但對於裂縫中流動 水的溫度以及裂縫內側溫度的影響非常小,而孔徑及流 速對於局部熱傳係數也有影響,但影響程度不及裂縫表 面粗糙度。

各種其他相關研究亦不斷被提出,如 Laura 等人利 用 TOUGH-FLAC 及 FLAC-TOUGH 二種模擬軟體預 測最終處置場之含鹽自然條件下長期之 THM 行為[14]。 以及瑞典核燃料與廢棄物處理公司設置了一系列評估 模式與方法討論在膨鬆土於不同濕潤度下預測結果之 不準度以評估可能之風險[15]。

最終處置場中有需要探討廢棄物罐、緩衝材料陣列 尺寸比例之最佳化配置與設置。Kim 等人以基因演算法 基於緩衝材料之密度、含水量、母岩透水度等條件完成 一THM 模型後,進行最終處置場之最佳化設計[16]。

本計畫將利用自行發展之相似用過核燃料最終處 置場熱-水-力孔隙 THM 耦合模型,實際預測處置場廢 棄物罐間最大容許溫度分布與配置距離之極限。

#### Ⅱ. 主要內容

#### 實驗系統:高溫高壓試驗系統

在本研究中,藉由一高壓測試管路,以模擬緩衝材 料狀態,此高壓系統可探討不同之孔隙率、層流狀態、 流速及壓力等操作過程之研究。於實驗設備進行水壓力、 流量及粒徑之測試,探討工作流體的特性,例如熱交換 效率、熱對流係數、熱分散性及取熱量等。

利用高壓泵浦以定流定高壓方式注入於測試段內, 並利用孔隙介質試驗,以了解不同介質粒徑、流量、儲 集層壓力等之相關特性。

#### 緩衝材料之孔隙熱傳模型建立與實驗擬合熱分散性

本研究以數值模擬方式探討水於多孔介質中熱傳 之研究,其所建構的分析模型設定為壓力、流場與溫度 場之耦合類型,數學模型包含連續方程、Brinkman 動量

方程、能量平衡方程等。  
連續方程式:  

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \rho_f) + \nabla \cdot (u \rho_f) = Q_{br}$$
(1)  
動量平衡方程式:  

$$\frac{\rho_f}{\epsilon} \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla u) \frac{u}{\epsilon} \right)$$
  

$$= -\nabla P + \nabla \cdot \left[ \frac{1}{\epsilon} \left\{ \mu (\nabla u + (\nabla u^T)) - \frac{2}{3} \mu (\nabla u) I \right\} \right]$$

$$-\left(\frac{\mu}{\kappa} + \frac{Q_{br}}{\varepsilon^2}\right)u + F \tag{2}$$

多孔介質熱傳之統御方程式係由平均體積法求得, 使孔隙和介質之間能個別獲得固有的平均性值,在介質 與流體之間的熱傳平衡方程式已被廣泛的用於分析多 孔介質之熱傳。因此以傅立葉定律(Fourier's Law)描述在 多孔介質中完全飽和之介質與流體,如下所示:

介質能量平衡方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ (1-\varepsilon)\rho_p C_{p,p} T_p \right] - (1-\varepsilon)\nabla \cdot \left( k_p \nabla T_p \right) = 0 \tag{3}$$

流體能量平衡方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varepsilon \rho_f C_{p,f} T_f \right] + \nabla \cdot \left( \rho_f C_{p,f} D T_f \right) - \varepsilon \nabla \cdot \left( k_f \nabla T_f \right) = 0 \quad (4)$$

式中ρ為密度、u 為流體的流速、Qbr 為質量力、ε 為孔隙 率、μ為流體的動力黏度、κ 為滲透率、F 為強制力項、 Cp 為常壓比熱及 k 為熱傳導係數。

熱-水-力耦合後修正之應力之計算:

$$\sigma_{ii}^c = \sigma_{ii} - \alpha \Delta P \delta_{ii} - 3\alpha_T K \Delta T \delta_{ii}$$
<sup>(5)</sup>

式中 $\alpha$ 為Biot 數、 $\alpha_T$ 為熱擴散係數、K為容積彈性模數 (bulk modulus)、 $\delta_{II}$ 為克羅內克函數(Kronecker delta)。

於此模型中,測試段表面設定為一恆定熱源對其內 部加熱。分別改變入口流速、系統壓力與內部介質粒徑, 觀察出口溫度及內壁溫度的變化。

藉由該孔隙模型,將可模擬一封閉區域中之流體經 由緩衝材料後由孔隙模型計算熱傳分布之現象。所要比 較之結果為不同孔隙條件及平流速度下之溫度分布,本 計畫將利用實驗記錄出之溫度以計算沿著緩衝材料之 整體溫度分布以調整模型中之熱分散性擬合出模擬結 果。計算式如下所示:

$$\theta = \frac{T - T_{in}}{T_{material} - T_{in}} \tag{6}$$

初步先測試不同壓力下之結果已確定實驗系統足 以模擬 1000 公尺深之地底壓力之現象。本團隊先探討 30MPa 及 10MPa 下之狀況。結果可以觀察到壓力對熱 傳之影響極微,由此可以證明以實驗系統在 100 大氣壓 左右建立的孔隙模型足以模擬地底之狀況。亦觀察到孔 隙的變化影響,且發現空管(裂隙流)與孔隙條件之影響 則有顯著之差異。而流量對熱傳分布為最主要之影響, 由此可知,本計畫將規劃在實驗與模擬擬合上將進行 10MPa 附近不同壓力下空管與不同孔隙率條件之不同 流量之熱傳分析。

孔隙模型中之熱擴散性質為一經驗值,類似熱對流 係數必須依賴實驗獲得。故本計畫以實驗結果擬合模型 建立合理之孔隙熱傳模型即為此緣故。孔隙熱傳中之熱 擴散性之定義如下:

熱擴  
散性 
$$\alpha_{mean} = \frac{k_{eff}}{C_{p,eff}}$$
 (7)

有效 
$$k_{eff} = \varepsilon \cdot k_f + (1 - \varepsilon) \cdot k_p$$
  
熱傳導  $+ \frac{k_{disp,xx} + k_{disp,yy} + k_{disp,zz}}{3}$  (8)

有效  

$$C_{peff} = \varepsilon \cdot \rho_f \cdot C_{p,f} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_P \cdot C_{p,p}$$
 (9)  
比熱

縱向 k<sub>disp,xx</sub>

熱分散  
傳導
$$=\frac{\left(\lambda_{lo}\cdot\overline{ux}^{2}+\lambda_{tr}\cdot\overline{uy}^{2}+\lambda_{tr}\overline{uz}^{2}\right)\cdot\rho_{f}\cdot C_{p,f}}{\left(\overline{ux}^{2}+\overline{uy}^{2}+\overline{uz}^{2}\right)_{max}^{2}}$$
(10)

橫向 
$$k_{disp,yy}$$
  
熱分散 =  $\frac{(\lambda_{tr} \cdot \overline{ux}^2 + \lambda_{lo} \cdot \overline{uy}^2 + \lambda_{tr} \cdot \overline{uz}^2) \cdot \rho_f \cdot C_{P,F}}{(\overline{ux}^2 + \overline{uy}^2 + \overline{uz}^2)_{max}^2}$  (11)

先前研究完成之在空管、粒徑為1.54mm 及2.03mm 情況下,已建立 Brinkman 模型。實驗設備亦已建立, 完成在7.5MPa 空管條件時,流量為0.33、0.66、0.99 與 1.32 g/s 之實驗,繼而將模型擬合實驗結果,獲得此條 件下之熱擴散係數。藉由調整模型中的縱向與橫向熱分 散性(λ<sub>lo</sub>與λ<sub>tr</sub>)使模型之模擬情況可擬合實驗之取熱現 象,並與實驗比較出入口溫差及取熱量以確認模擬之正 確性。經校驗後發現,實驗與模擬之出入口溫差比較結 果,其平均誤差值皆小於0.001%;而實驗與模擬之取熱 量比較結果,其平均誤差值皆小於0.72%。由上述結果 可看出經由使模擬結果與實驗數據吻合可建立合理之 熱分散性質。

#### 處置場模擬模型建立

本計畫將以實驗擬合之地下孔隙 THM 模型放大至 現地尺度模型以實際應用於現地之處置場系統,由於地 質構造、特性、物理與化學條件之複雜,位於不同場址 之母岩結構均不相同。建立合理的現地數值模型將有助 於了解地底熱流現象與各種操作參數設定,進一步預測 合理溫度分布、最佳化廢棄物罐配置,並評估該處置場 系統之運轉年限之可行性。

本計畫之處置場現地配置資料來自瑞典 KBS-3V 處置概念及 SKB 設計報告[1-5]。處置場之週期陣列配 置,申請人提出一四角型陣列模型。每一角落有一 1/4 廢棄物罐處置措施,朝中心分別為緩衝材料及母岩。廢 棄物罐處置抗兩兩間初始距離為 6m,廢棄物罐深度為 500m。廢棄物罐假設為一熱源,四面假設為等溫邊界並 上下二面假設為對流熱傳邊界。分別改變緩衝材料孔隙 率、平流流量,以獲得溫度的變化,模擬模型如圖 1 所 示。

本計畫基於 SKB 設計報告建立之相似用過核燃料 最終處置場熱-水-力孔隙 THM 耦合模型,以預測熱分布 與應力之變化,並可預測最佳之廢棄物罐陣列配置結果。

#### 表1 模型之尺度參數及材料性質

太武山花崗片麻岩體			
母岩密度	2.63 kg/m <sup>3</sup>		
彈性模數	42 GPa	泊松比	0.17
母岩渗透率	4.1×10 <sup>-12</sup> m/s	母岩孔隙率 (有效孔隙率)	0.54(0.015)
母岩熱傳導係數	2.85-2.94 W/mK	比熱	730-903 J/kg-K
地温梯度	1.7 K/100m	地表温度	20.8°C
<b>緩街材料(MX-80)</b>			
緩衝材料孔隙率	0.8	緩衝材料滲透率	1×10 <sup>-12</sup> m/s
緩衝材料熱傳導係數	0.6-1.3 W/mK(飽和)	缓衡材料密度	1600 kg/m <sup>3</sup> [17]
緩衝材料外径	1650 mm	緩衝材料高	6836 mm (廢棄物端上方 1500 mm, 下方 500mm)
熱膨脹係數	2.2E-4 1/K[18]		
彈性模數	12MPa[17]	泊松比	0.3[17]
廢棄物罐重	26800 kg	廢棄物罐高	4835 mm
廢棄物罐外徑	1050 mm	廢棄物維熱	1315W

#### 太武山花崗片麻岩材料參考台電 SNFD2014 支援報告[19]



圖1 核廢料終級處置場模型示意圖

#### 模擬及最佳化方面

本研究使用簡易共軛梯度法最佳化方法透過最佳 化過程重複相似孔隙 THM 模型模擬以求出最佳之設計。 將以此最佳化規劃方法演算出在已知處置深度及岩層 孔隙狀態下最適合之廢棄物罐配置,以符合處置場之近 場溫度分布要求。針對初始模組進行最佳化設計,即可 獲得一最佳化之模組,同時獲得相對之最佳化參數。

最佳化方法:簡易共軛梯度法(Simplified Conjugated Gradient Method, SCGM)

簡易共軛梯度法於計算目標函數時,將有助敏感性 分析。先對每個設計參數進行初始猜測,其次在迭代過 程中的共軛梯度係數和搜尋方向進行評估,依此過程不 斷更新設計參數。當目標函數達到設計要求,最佳化過 程完成。其主要程序如下所示:

$$a_k^{n+1} = a_k^n - \beta_k^n \cdot \xi_k^{n+1} \quad , k = 1, 2, \dots, n$$
 (12)

其中 $a_k$ 是設計參數, $\beta_k$ 是迭代搜尋的步距, $\xi_k$ 是迭代搜尋的方向。

迭代搜尋的方向為線性組合的最速下降方向與目 標函數的梯度有關,其方程式如下所示:

$$\xi_k^{n+1} = \left(\frac{\partial J}{\partial a_k}\right)^{n+1} + \gamma_k^{n+1}\xi_k^n , \ k = 1, 2, \dots, n$$
(13)

其中 J 是目標函數,γ是共軛梯度係數,共軛梯度係數 計算如下:

$$\gamma_k^{n+1} = \left[ \frac{\left(\frac{\partial J}{\partial a_k}\right)^{n+1}}{\left(\frac{\partial J}{\partial a_k}\right)^n} \right]^2 , k = 1, 2, \dots, n$$
(14)

步距 $\beta_k$ 可以假設為一個固定值,

$$\beta_k = C \quad , \quad k = 1, 2, \dots, n$$
 (15)

其中,C 值的大小係根據所研究之最佳化問題而決定。 簡易共軛梯度法的步驟如下:

- (1) 定義設計參數*a<sub>k</sub>*,*k*=1,2,...,*n*。
- (2)使用多重物理量軟體計算目標函數J,當目標函數 達到設計要求,該求解過程將終止,否則跳到步驟 3。
- (3) 執行數值敏感度分析,首先給一個△ak擾動值。然後計算目標函數的改變所得到的比值△J,接下來可以直接計算梯度函數在各個設計參數的數值微分如下所示:

$$\frac{\partial J}{\partial a_k} = \frac{\Delta J}{\Delta a_k} \tag{16}$$

利用方程式(12-14)計算各個設計參數 $a_k$ , k=1,2,...,n之 共軛梯度係數 $\gamma\gamma$ 和共軛梯度搜尋方向 $\xi_k$ 。

- (4) 對於所有設計參數給予步距 $\beta_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ 。
- (5)使用方程式(12)更新下一個迭代時的所有設計參數, 然後回到步驟2。

俟數值結果得到最佳化後,將利用數值模擬建立新的模型,將根據此模型調整系統進行最佳化操作條件之熱交 換分析。

#### 進行步驟

本計畫以基於孔隙熱傳模型及實驗室尺度地底高 壓取熱系統之相關研究,以高壓地熱模型實驗獲得之取 熱結果擬合出以 Brinkman 模型為基礎之地熱取熱模型 完成孔隙及裂隙條件下之熱分散關係,建立以水為工作 流體之孔隙熱傳儲集層取熱模型。進而根據清水地區之 產能測試結果,放大尺度建立單井之相似產能預估模型 以獲得現地規模取熱模型之取熱效率,再結合自行開發 之地熱電廠潛能關係式,藉以提出各單井之發電潛能預 估。進行步驟如下(圖 2):

- (1) 地下孔隙熱傳實驗平台建立
- (2)利用地下孔隙熱傳實驗,填入不同介質粒徑,並改變水相關壓力及流量等參數,探討緩衝材料之溫度分布。
- (3) 以高壓地下孔隙熱傳實驗獲得之熱傳結果擬合出以 Brinkman 模型為基礎之孔隙 THM 模型,完成孔隙 及裂隙條件下之熱分散關係,建立以水為工作流體 之相似用過核燃料最終處置場熱-水-力孔隙 THM 耦合模型。
- (4) 放大尺度建立相似處置場模型。
- (5) 最佳化程式參數、目標函數建立與測試。
- (6) 以最佳化方法建立最佳化廢棄物罐配置陣列。



III. 結果與討論

本計畫根據 SKB 設計報告及台電 SNFD2014 支援 報告之參數,以孔隙 THM 模型為基礎,建立一週期性 核廢料桶陣列模型。本研究首先討論不同廢棄物桶熱源 及不同岩層中流場速度,在不同條件下之溫度分布圖如 圖 3 與圖 4。圖 3 為在不同熱源及不同流速下之處置場 的溫度分布圖。在圖 3 (b)中的流速,相較圖 3 (a)與圖 3 (c)放大了 10 倍。圖 4 為不同熱源及不同流速下之處置 場之地下滲水流速變化圖。比較圖 3 (a)與(b)及圖(b)與(c), 當岩層滲水流速較大時核廢料桶之溫度自然下降;當核 廢料桶熱量較高時,溫度即明顯上升。詳細溫度分布如 圖 5 所示。



圖 3 第十年時不同熱源及不同流速下之處置場之溫度 分布圖 (a)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下滲水初始 流速:3.16 m/yr;(b)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下 滲水初始流速:31.6 m/yr;(c)廢料桶熱源:3945 W、岩 層內地下滲水初始流速:3.16 m/yr



圖 4 第十年時不同熱源及不同流速下處置場之地下滲水流速變化圖 (a)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下滲水初始流速:3.16 m/yr;(b)廢料桶熱源:1315 W、岩層 內地下滲水初始流速:31.6 m/yr;(c)廢料桶熱源:3945 W、岩層內地下滲水初始流速:3.16 m/yr

為了更了解在處置場中不同深度及距廢棄物桶不同位置之溫度與地下滲水流速分布,圖5與圖6分別描述在廢料桶底端(模型高度 1050mm)、中間(4000mm)、 項部(5920mm)3個不同位置下,廢棄物桶中沿模型斜對 角之剖面不同溫度與流速之分布,參見圖1。圖5為處 置場中不同深度及距廢棄物桶不同位置之溫度分布圖。 圖6為處置場中不同深度及距廢棄物桶不同位置之地下 滲水流速分布圖。比較圖5(a)與(b),依據台電支援報告 之參數,當核廢料桶熱量為1315W且廢料桶間距為6m 時,岩層滲水流速為31.6m/yr條件下,最大之核廢料桶 壁面溫度位於底部(模型高度1050mm位置),為348K。 比較圖5(a)當流速小時,表面溫度則迅速升高。



圖 5 處置場中不同深度及距廢棄物桶不同位置之溫度 分布圖 (a)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下滲水初始 流速:3.16 m/yr;(b)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下 滲水初始流速:31.6 m/yr



圖 6 處置場中不同深度及距廢棄物桶不同位置之地下 滲水流速分布圖 (a)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下 滲水初始流速:3.16 m/yr;(b)廢料桶熱源:1315 W、岩 層內地下滲水初始流速:31.6 m/yr。

圖7及圖8為隨時間變化下,在3個不同深度之處 置場溫度及地下滲水流速變化圖。本研究觀察至10年 後之溫度及流速變化狀況。依據台電支援報告之參數, 當核廢料桶熱量為1315W且廢料桶間距為6m時,岩層 滲水流速為 31.6m/yr 條件下,最大之核廢料桶壁面溫度 位於底部(模型高度 1050mm 位置),此條件下持續十年 之處置場內溫度可維持一平衡狀態。



圖 7 在不同深度下隨時間改變之處置場溫度變化圖 (a) 廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下滲水初始流速:3.16 m/yr;(b)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下滲水初始流 速:31.6 m/yr



圖 8 在不同深度下隨時間改變之處置場內地下滲水流 速變化圖 (a)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地下滲水初 始流速:3.16 m/yr;(b)廢料桶熱源:1315 W、岩層內地 下滲水初始流速:31.6 m/yr

隨著時間推移,依圖 7(b)可知在核廢料桶熱量為 1315W 及處置場內地下滲水初始流速為 31.6m/yr 條件 下時,廢料桶表面溫度升高至 348K 即可維持平衡,且 在十年內均保持一平衡狀態。此時,因溫度上升將在廢 料桶表面產生一熱應力。此熱應力將對廢料桶表面產生 壓迫,本研究亦關注此應力變化造成之影響。由圖9可 觀察到廢料桶表面之應力最大值在十年時為 12MPa 即 120 大氣壓,當廢料桶之表面應力分布可被掌握時,工 程設計上則可適當調整廢料桶之材質、幾何外型與加工 方式,以承受因溫度造成緩衝材料膨脹所產生之應力。



圖9處置場之應力分布圖

依上述之討論可知此處置場之廢料桶間距可依場 址之地下水滲流速度及廢料桶熱量之不同而具有一最 佳值。依據台電支援報告之參數,當核廢料桶熱量為 1315W且岩層滲水流速為31.6m/yr條件下,圖10為最 佳化之結果。由圖10可觀察到隨著廢料桶間距之縮小, 廢料桶表面溫度逐漸上升。至間距為 3250mm 時,表面 溫度達安全規範 373K。依照最佳化之結果,相同面積之 處置場可提升存放廢料桶之容量達 341%。



圖 10 廢料桶間距之最佳化結果

#### IV. 結論

本計畫以基於孔隙熱傳模型及實驗室尺度地底高 壓熱傳系統之相關研究,以高壓地下孔隙模型實驗獲得 之熱傳結果擬合出以 Brinkman 模型為基礎之孔隙熱傳 模型,完成孔隙及裂隙條件下之熱分散關係,建立以水 為工作流體之孔隙熱傳模型。進而根據 KBS-3V 設計及 相關詳細尺寸,建立處置場模型,以獲得現地規模 THM 模型之溫度與應力分布,再結合自行開發之最佳化簡易 共軛梯度法,以最佳化處置場內廢棄物罐之配置。

本計畫所開發之孔隙 THM 模型可實際掌握岩層與 緩衝材料之熱傳與孔隙變化,獲得詳細之溫度、應力與 流場變化,並根據此結果獲得最佳化之間距及可提升之 儲存容量。

#### 參考文獻

- SKB, KBS-3H Complementary studies, 2008ariant. POSIVA 2012-50.ation model-Site descriptive modeling SDM-Site Laxemar, SKB, TR-12-01, 2012.
- [2] E. Ballarini, B. Graupner, S. Bauer, Thermalhydraulic-mechanical behavior of bentonite and sandbentonite materials as seal for a nuclear waste repository: Numerical simulation of column experiments, Applied Clay Science 135, 289-299, 2017.
- [3] S. Wang, Z. Huang, Y.S. Wu, P. H. Winterfeld, and L. E. Zerpa, "A semi-analytical correlation of thermalhydraulic-mechanical behavior of fractures and its application to modeling reservoir scale cold water injection problems in enhanced geothermal reservoirs," Geothermics 64, 81-95, 2016.
- [4] K. Wittig, P. Nikrityuk, and A. Richter, "Drag coefficient and Nusselt number for porous particles under laminar flow conditions," Int. J. Heat and Mass Transfer 112, 1005-1016, 2017.
- [5] P. Yang, Z. Wen, R. Dou, and X. Liu, "Heat transfer characteristics in random porous media based on the 3D lattice Boltzmann method," Int. J. Heat and Mass Transfer 109, 647-656, 2017.
- [6] P. Yang, Z. Wen, R. Dou, and X. Liu, "Effect of random structure on permeability and heat transfer characteristics for flow in 2D porous medium based on MRT lattice Boltzmann method," Physics Letters A 380, 2902-2911, 2016.
- [7] S. Chen, B. Yang, and C. Zheng, "A lattice Boltzmann

model for heat transfer in porous media," Int. J. Heat and Mass Transfer 111, 1019-1022, 2017.

- [8] T. Ozgumus and M. Mobedi, "Effect of pore to throat size ratio on thermal dispersion in porous media," Int. J. Thermal Sciences 104, 135-145, 2016.
- [9] P. Kędzierski, Z. Nagórski, and T. Niezgoda, "Determination of local values of heat transfer coefficient in geothermal models with internal functions method," Renewable Energy 92, 506-516, 2016.
- [10] F. Jiang, J. Chen, W. Huang, and L. Luo, "A threedimensional transient model for EGS subsurface thermo-hydraulic process," Energy 72, 300-310, 2014.
- [11] T. Heinze and S. Hamidi, "Heat transfer and parameterization in local thermal non-equilibrium for dual porosity continua," Applied Thermal Engineering 114, 645-652, 2017.
- [12] X. Lei, H. Li, W. Zhang, N. T. Dinh, Y. Guo, and S. Yu, "Experimental study on the difference of heat transfer characteristics between vertical and horizontal flows of supercritical pressure water," Applied Thermal Engineering 113, 609-620, 2017.
- [13] Y. He, B. Bai, S. Hu, and X. Li, "Effects of surface roughness on the heat transfer characteristics of water flow through a single granite fracture," Computers and Geotechnics 80, 312-321, 2016.
- [14] Laura Blanco Martín, Ralf Wolters, Jonny Rutqvist, Karl-Heinz Lux, Jens T. Birkholzer, Comparison of two simulators to investigate thermal-hydraulicmechanical processes related to nuclear waste isolation in saliferous formations, Computers and Geotechnics 66, 219-229, 2015.
- [15] S. Finsterle, B. Lanyon, M. Åkesson, S. Baxter, M. Bergström, N. Bockgård, W. Dershowitz, B. Dessirier, A. Frampton, Å. Fransson, A. Gens, B. Gylling, I. Hančilová, D. Holton, J. Jarsjö, J.-S. Kim, K.-P. Kröhn, D. Malmberg, V. M. Pulkkanen, A. Sawada, A. Sjöland, U. Svensson, P. Vidstrand and H. Viswanathan, Conceptual uncertainties in modelling the interaction between engineered and natural barriers of nuclear waste repositories in crystalline rocks, Geological Society, London, Special Publications 482, 261-283, 2018.
- [16] Min-Seop Kim, Jun-SeoJeon, Min-Jun Kim, Jaewon Lee, Seung-Rae Lee, A multi-objective optimization of initial conditions in a radioactive waste repository by numerical thermo-hydro-mechanical modeling, Computers and Geotechnics 114, 10316, 2019.
- [17] S. Norris, J. Bruno, M. Van Geet, E. Verhoef, (Eds) Radioactive Waste Confinement: Clays in Nature and Engineered Barriers, Geological Society, London, Special Publications 443, 2016. http:// doi.rog/10.1144/SP443.19
- [18] R. Elisa, K.T. Leena, 2009, Bentomap: Survey of bentonite and tunnel backfill knowledge -state-of-theart, VTT Working Papers 133, Julkaisija-Utgivare Publisher.
- [19] 我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告, SNFD-TR2014,台灣電力公司,2015。

#### 填補區域多邊貯存設施到最終處置的空白:

#### 區域中期貯存多邊協力機制的多邊監管型態與運作連結

## Filling Gaps between the Regional Multilateral Storage Facilities to Final Disposal - Multilateral Regulatory Types and Operational Linkages for the Regional Multilateral Interim Storage Cooperation Mechanism

計畫編號:109-2623-E-218-001-NU 計畫類別:■個別型計畫□整合型計畫 計畫主持人:曾雅真 e-mail:paristwo@stust.edu.tw 執行單位:南臺科技大學

#### 摘要

本計畫運用文獻回顧、比較分析與情境規劃分析 法(scenario analysis), 勾勒用過核燃料暨放射性廢物 (SFRW)自區域中期貯存直接運送最終處置設施,以及 再處理用過核燃料產生之高放廢物,運至最終處置設 施,所可能發生的45種監管連結情境。系統性歸納分 析結果顯示,對客戶國最有利的監管情境次第,分別為 「一去不返」,「海外滯留」,以及「責任履諾」模式。

若客戶國因各種因素,無法運作本土中期貯存設 施或最終處置設施,「一去不返」模式是對客戶國最有 利的處理方式。其次,如客戶國因各種因素,暫時無法 運作本土中期貯存設施,但是可以在一定時間之後順 利選址、興建並啟用其最終處置設施,則客戶國或可採 行「海外滯留」模式。客戶國「責任履諾」模式,又可 分為「無縫責任履諾」模式,以及結合「海外滯留」情 境的「迂迴責任履諾」模式,後者有待更深入的研析, 方有定論。

國際後端多邊化概念倡議至今已歷十五年,但尚 未有具體的制度建構。在缺乏導引下,現行 IAEA 各種 監管準則暨監管獨立原則,多適用以單一國家為管轄 範圍的獨立監管機構,成為吾人組建區域後端多邊協 力機制的重大挑戰。本研究之多國監管機構融合模式 (M 情境),以及地主國獨立監管模式 (H 情境),或是現 階段可供參酌,並且相對可行的監管連結模式,似有持 續深入探索的必要性。

建議我國宜參照 IAEA 於 2018 年發佈的 GSG-12 《監管機構對於核安全之組織、管理與人員配製》,以 及 GSG-13 《監管機構對於核安全之功能與程序》安 全導則,作為立院審議「核能安全委員會組織法」的制 度構建指南,以強化未來組建「核能安全委員會」的國 際接軌能量,強化監管信譽,爭取本土暨夥伴國家的認 同,鋪陳我國順利參與區域後端多邊協力機制的基礎。

**關鍵詞:**核燃料循環,後端,中期貯存,最終處置,監 管機構,情境分析。

#### Abstract

This project uses literature review, comparative analysis, and scenario analysis to outline 45 regulatory linkage scenarios. Among them, the most favorable scenario for the client country could be roughly summarized as "noreturn"," oversees stay' and "responsible fulfillment" models.

If the client country is unable to operate its local interim storage facilities or final disposal facilities due to various factors, the spent fuel and radioactive waste (SFRW) "noreturn" model is the most beneficial way for the client country. This kind of regulatory arrangement will greatly reduce the regulatory burden on the client country's regulatory body.

If the client country is temporarily unable to operate the local interim storage facility due to various factors, but the final disposal facility can be successfully selected, constructed and operated after a certain period of time, the client country could strive to adopt the "overseas stay" model.

The "Seamless responsibility fulfillment " model is the most direct path for the client country to fulfill the responsibilities of the Joint Convention. The model of "securing responsibility and fulfilling promises" needs more in-depth research and analysis before a conclusion can be reached.

It is suggested that Taiwan should refer to the GSG-12 and GSG-13 issued by the IAEA in 2018 as the guidelines for the legislation process of the "Nuclear Energy Safety Committee Law" to enhance the regulatory effectiveness, and strengthen regulatory credibility of Taiwan, to lay the foundation for Taiwan's smooth participation in the regional back-end multilateral cooperation mechanism.

**Keywords:** Nuclear fuel cycle, back-end, interim storage, final disposal, regulator, scenario analyses

#### I. 前言

中期貯存(storage)在核燃料循環後端(back-end of the nuclear fuel cycle)扮演承先啟後的角色。中期貯存意 謂,將有意回取(with the intention of retrieval)之用過核 燃料(spent fuel)或放射性廢物(radioactive waste),貯放 在可為其提供屏障(containment)的設施(IAEA, 1997: article 2.t);經過貯存後的用過核燃料,或是置入不回 取的最終處置(disposal)設施,或是經過再處理 (reprocessing),將其產出物製成 MOX 混合燃料後,再 把剩餘的高放廢物(High Level Waste, HLW)置於最終 處置設施。

自 2005 年國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)提交核燃料循環多邊化報告 (Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle)以來 (IAEA, 2005),組建核燃料循環後端(back-end of the nuclear fuel cycle)多邊化的多種倡議,即如雨後春筍般 湧現。目前,國際社會現行運作中的核燃料循環後端多 邊管理倡議,在匯集各方共識上固然初見成果,但是 SFRW 中期貯存期限延宕,已形成嚴肅的核安全挑戰 (IAEA, 2019b: 1)。未來國際(區域)中期貯存之多邊協力 機制,如若未能與最終處置設施,進行緊密的安全監管 連結,則可能發生中期貯存之用過核燃料暨放射性廢 物(SFRW),無法順利進入最終處置階段的困境。不過, 現有的國際後端多邊化倡議,對於區域中期貯存多邊 協力機制監管連結的相關議題,仍有待具體的探索。

有鑑於此,本計畫擬就現行核燃料循環後端多邊 化倡議,運用文獻分析法、情境規劃分析法(scenarios analysis),以及專家諮詢暨訪談,前瞻分析區域中期貯 存多邊協力機制與最終處置設施監管連結的互動情境。 情境規劃分析法是美國蘭德公司(RAND Corporation) 用以擘劃美國冷戰戰略的研究方法,現被 IAEA 廣泛 運用於核領域之規劃分析。本計畫用以動態描繪區域 中期貯存多邊協力機制多邊監管型態運作連結之各種 情境分析。

本計畫的研究發現,將補充現有區域中期貯存多邊 機制的學理論述,相關研究成果,更可豐富我國參與區 域中期貯存多邊倡議之相關資訊,充實我國監管效能, 俾在必要時,作為我國接軌區域中期貯存多邊倡議的 參考。

#### Ⅱ.主要內容

#### 一、監管機構之定義與內涵

國際原子能總署(IAEA)定義,監管機構(regulatory body)是由一國政府所指定,為執行監管程序(regulatory process)之法定權威機構或機構體系(authority or a system of authorities),其監管程序包括核發授權執照、 並由此管制核子,輻射,放射性廢物暨運輸安全(IAEA, 2019a: 194); 原來之監管機關(regulatory authorities)-詞,已經停止使用(IAEA, 2019a: 194)。《核安全公約》 (Convention on Nuclear Safety) 第 2.2 條規定, 監管機 構乃是由締約方政府授予法定權力,頒發許可證,並對 核設施的選址、設計、建造、調試、運行或退役進行監 管的任何一個或幾個機構(IAEA, 1994: artivle 2.2); 《聯合公約》(Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)第 2.k 條規定,監管機構是由締約方授予 監管用過核燃料或放射性廢物管理安全的法定權力, 包括頒發許可證權力的一個機構或幾個機構(IAEA, 1997: article 2.k)。關於監管機構的組織與職掌, IAEA 於 2018 年分別修正原有安全導則,並發佈 GSG-12《監 管機構對於核安全組織、管理與人員之配製》 (Organization, Management and Staffing of the Regulatory Body for Safety)(IAEA, 2018a),以及GSG-13《監管機 構對於核安全之功能與程序》(Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety)等兩項一般安全導則 (general security guidance) (IAEA, 2018b)。另針對放射 性物質之運輸,亦於 2018 年發佈 SSR-6 修正一版的 《放射性物質安全運輸條例》(Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material) (IAEA, 2018c)。這些 新發佈的 IAEA 文件,均對於監管機構之構成目標與 職掌,有更為嚴謹的要求。

#### (一) 監管機構的基本特性

IAEA 強調,監管機構必備的七大特性,包括(一) 獨立性(indepedence),(二)安全承諾(Commitment to safety),(三)依公共利益行事(Acting in the public interest),(四)開放性,(五)透明性,(六)一致性(Openness, transparency and consistency),以及(七)持續改進的承 諾(Commitment to continuous improvement)(IAEA, 2018a: 5-12)。安全承諾是指監管機構應保護人類暨環 境免於受幅射的受有害影響(IAEA, 2018a: 10)。

監管機構的獨立,包含來自政治、立法、財務與 職能的三面獨立性。首先,在政治決策上,監管機構之 決策應免於受到不當影響,不受來自政治環境或經濟 狀況,或來自政府部門,授權方或其他組織的壓力 (IAEA,2018a:7)。其次,在立法獨立部份,政府應透過 法律制度,建立暨維持監管機構,並應賦予其法律權力, 提供其對核設施暨核活動,履行監管之法定義務,所必 需的能力與資源(IAEA,2018a:7)。最後,監管機構之財 務預算,亦應保障其執行職能之所需(IAEA,2018a:7)。

在公共利益行事特性部份,為維持其權威暨信譽, 監管機構應建立並與公眾進行有效溝通暨協商(IAEA, 2018a:11)。其型式包括,(一)討論公眾關注的論壇,(二) 討論安全技術與法規的論壇,(三)使公眾能夠表達其關 切,並提供專用於公共資訊的特定管道。(四)監管機構, 應仔細分析並透過專業與即時的方式,處理公眾提供 的任何資訊(IAEA, 2018a:11)。

IAEA 定義,監管機構的開放性,透明性與一致性, 是指監管機構所公佈之法規與指南,應清晰明確,並應 以授權方可以清楚理解的方式編寫(IAEA, 2018a: 11)。 IAEA 認為,監管機構與各方的有效溝通,將有助於確 保監管機構在建立或修改監管框架時,可以考慮不同 的觀點。IAEA 要求,監管機構的法規,應確保與防範 輻射風險相稱的一致性,可預測性,透明暨衡平性。並 且,監管機構應制定政策,以促進資訊的廣泛共用,以 確保最高的安全標準,同時適當考慮對敏感資訊的保 護。因為監管機構對公眾的透明與開放,將會增強公眾 的信心和信任(IAEA, 2018a: 11)。

#### (二) 監管機構的職掌

IAEA 定義,監管機構的七大職掌,包括(一)制訂 相關規章與導則(Regulations and guides),(二)通知與授 權(notification and authorition),(三)審查與評定(review and assessment)核設施暨核活動,(四)視察(inspection) 核設施暨核活動,(四)執法(enforcement),(五)緊急預防 與應變(emergency preparedness and response),(六)公眾 溝 通 ,以及(七)與其他攸關單位進行諮商 (communication and consultation with interested parties) 等(IAEA, 2018b: 8-103)。

首先,監管機構制訂的規章與導則,應與該國法律 制度一致,切合被規制之核設施與核活動的性質暨範 圍,這些規章、導則與相關標準,在確保人員暨環境免 於受到幅射危害,它們旨在提高核安全,並建立與有關 各方的信任,是監管機構確保監管控制(regulatory control)穩定,明確暨一致的手段(IAEA, 2018b: 9)。

再者,通知與授權是指,任何意圖運轉核設施或開 展核活動的人員或組織,都必須向監管機構提出申請 通知書,由監管機構審核,並酌情授權所請,核發授權 執照(IAEA, 2018b: 27)。通知的目的,是向監管機構提 供個人或組織意圖運營核設施或開展核活動的初始資 訊,監管機構應使用在通知過程中所收到的資訊,更新 核設施與核活動記錄,以及決定應用的監管控制級別 (IAEA, 2018b: 30)。授權之目的,是讓監管機構在核設 施或核活動的全程週期內,建立有效的安全監管措施, 以要求申請人保證其符合所有的核安全要求(IAEA, 2018b: 30)。需要通知與監管機構的授權項目,包括選 址與場址評估(siting and site evaluation),設計(design), 施工 (construction), 調試 (commissioning), 運行 (operation),除役或或關閉(decommissioning or closure), 以及由監管控制中解除(release from regulatory control) 等(IAEA, 2018b: 45)。

第三,監管機構必須定期或不定期審查與評定核 設施或是全程之核活動,包括選址與場址評估,設計, 施工,調試(commissioning),運行,除役或或關閉,以 及自監管控制中解除等階段,由被授權方所提供的相 關資料,以確定核設施與核活動,是否遵守監管要求, 以及授權執照所規定的核安全條件。監管機構對核設 施與核活動進行審查與評定,是為確認其安全之可接 受性,確認提交資訊的完整性,在必要時,審查與評定 過程應包括現場檢查,以核實檔案的內容(IAEA,2018b: 45)。 第四,監管機構必須進行核設施與核活動的視察, 以核實被授權方遵守監管要求,以及授權執照所規定 的要件(IAEA,2018b:70-71)。執行監管視察,旨在對授 權方之核設施或核活動的狀態進行獨立檢查,以確保 被授權方符合監管機構所規定或批准的安全目標 (IAEA,2018b:72)。

第五,執法乃是監管機構在法律範圍內,制訂與實施政策,以應對被授權方不遵守監管要求或授權執照 規定的行為(IAEA, 2018b: 92),執法方式包括開立口頭 或書面違規通知(verbal or HLWitten notification of noncompliance),書面警告或是裁定(HLWitten warnings or directives),處罰(penalties),限制或是中止核活動 (restriction or suspension of activities),更改,中止或撤 銷授權(modification, suspension or revocation of the authorization)(IAEA, 2018b: 94)。監管機構執法的主要 目標,在於迅速識別並糾正不符合安全需求情事,提供 高度保障,確保被授權方在授權過程之所有步驟,均符 合核安全要求,並且在核設施之全週期或核活動的所 有階段,均符合核安全目標與授權條件(IAEA, 2018b: 93)。

第六,監管機構承擔核設施或幅射緊急情況之預 防與應變責任。監管機構所發揮之功能,包括(一)確保 現場應急安排,(二)確保與非現場緊急應變組織的協 調,(三)建立暨維護內部安排,以進行緊急應變準備 與反應,(四)履行緊急應變所被分配的職責(IAEA, 2018b:98)。監管機構並應在規章與導則、通知與授權、 審查與評定、視察與執法等過程中,均應審查緊急應變 的規範與計畫(IAEA, 2018b: 98-101)。

最後,監管機構應制定暨實施公眾溝通與諮商策 略,致力於高度透明化與公開化,確保對敏感資訊的適 當保護,以解決利益攸關者對核子輻射的合理關切與 核安全問題,使監管機構能夠做出明智的決定,以確保 其免遭受核安全的不當影響(IAEA, 2018b: 104)。

#### (三) 監管機構的國際協作

核安全具有全球互賴的影響性,任何一方之作為, 可能構成對各方的衝擊,嚴重的核事故,更可能造成全 球範圍的重大衝擊,故而 IAEA 特別強調建構全球核 安全建制(global security regime)的重要性(IAEA, 2016: 16)。

首先,IAEA 認為,監管機構應依據國際協議,參 加一系列的國際合作活動。這些國際協議與安排包括: (一)建立並確保核安全之共同義務與機制的國際公約, (二)促進核設施與核活動中採用良好作為的行為準則 (codes of conduct),(三)IAEA 安全標準,(四)國際同 儕審查(peer reviews),以及國際暨區域的協定與網絡 (International and regional agreements and networking), (五)與其他國家暨相關國際組織所進行的多邊與雙邊 合作,俾能經由融合取向(harmonized approaches)以提 升核安全,由知識分享與經驗回饋,提高核安全審查與 視察的品質暨效度(IAEA, 2018a: 30-31)。 再者,IAEA要求,監管機構應積極參與國際工作 小組(working groups),向國際組織與其他國家,提供建 議與援助,以協助建立有效的監管機構並執行嚴格的 安全標準以供全球應用。相對地,參加此類活動,是促 進經驗交流以及比較國際慣例的重要手段(IAEA, 2018a: 31)。

第三,各國之主管部門(national authorities),應在 該國監管機構的協助下,與鄰國、其他有關國家以及相 關政府間國際組織,建立多邊或雙邊的核安全資訊的 交換安排,以履行核安全義務並促進國際合作(IAEA, 2018a: 31)。

第四,監管機構可以透過網絡與和多邊或雙邊協 議,進行資訊交流,監管活動互助,定期人員培訓與會 議等國際合作。國際多邊合作可能涉及不同路徑,例如 區域路徑,基於核設施之設計類型的路徑,或核安全涉 及之常見問題的路徑(IAEA, 2018a: 31)。

最後,IAEA 要求監管機構應加入特定的區域組織, 作為國際核安全資訊交換網絡中的國家聯絡點 (national point of contact),以確保向此網絡提供資訊之 品質,並確保與其他政府組織進行有效的資訊傳遞交 流(IAEA, 2018a: 31)。

#### 二、IAEA 的構想

#### (一) IAEA 對於區域中期貯存機制的構想

國際原子能總署於 2005 年公佈核燃料循環多邊化 專家小組報告,針對核燃料循環後端的中期貯存與最 終處置,提出多邊化管理的概念分析成果(IAEA, 2005a)。(請參見表一/表二)

IAEA 認為建構區域用過核燃料中期貯存系統,涉 及三種利害關係方。也就是提供區域用過核燃料中期 貯存服務的地主國(hosting country),將其用過核燃料運 往地主國進行中期貯存的客戶國(customer countries), 以及對貯存有興趣的第三方國家(third party countries) (IAEA, 2005b: 2)。

表一 處理用過核燃料之多邊化方案

		ک ا
万	内	意義
案	容	
	再	用過核燃料仍含有大量的鈾與鈽等放射性元素,自用
	虚	過核燃料中,提取可進一步使用的放射性同位素,即是
	理	所謂的再處理;放棄本國再處理能力是取得再處理服
服	工	務保證的前提,不涉及設施的所有權。
務	中	中期貯存意指在有回取(retrieval)的意圖下,將用過
保	期	核燃料或放射性廢物存放在具有保護作用的設施中;
證	貯	中期貯存服務保證主要是針對核電廠營運者所提供的
	存	保證。
	最	意指將用過核燃料等核材料放置在最終處置庫的地下
	終	設施,通常位於地面以下數百公尺深處,並且能夠確保
	處	放射性核元素與生物環境長期隔離的穩定地質構造;
	~ 晋	最終處置服務保證意指,向某國或是該國的核電廠營
	-	運者保證,用過核燃料(或是經再處理後返回的高放射
		性廢物)將確實在國內或在國際上得到及時的最終處
		置。

	-	
	再	將現有國家的再處理設施轉換為「多國設施」意指,將
	處	各國現有之相關設施,轉變成為國際擁有暨管理的國
	理	際實體,並且該實體將成為全球再處理市場的新興市
多		場參與者。
威	中	中期貯存設施的多邊管控意指,將一國中期貯存設施
設	期	轉置多邊管理後,中期貯存設施所在的地主國,將自夥
施	貯	伴國接收用過核燃料,並貯存在地主國的中期貯存設
	存	施內。
	最	最終處置設施的多邊管控意指,一國現有最終處置庫
	終	轉置於多邊管控後,多邊最終處置庫設施所在的地主
	處	國,將自夥伴國接收用過核燃料,並進行最終處置。
	置	
	再	
	處	再處理之聯合設施意指,建造新的多國再處理聯合設
	理	施,並由該等多國設施管理機構,提供再處理服務。
聯	中	
合	加	中期貯存聯合設施意指,設立區域或多國中期貯存共
設	貯	同使用設施。
施	存	
	最	
	故	最終處置聯合設施意指,創設國際多邊最終處置設施。
	處	
	一罟	
次小	<u></u> 里   力 :	E・上斗 本 八 レ 軟 冊 (治 FA 古 2012, IAEA 2005)

料來源:本計畫分析整理(曾雅真, 2013; IAEA, 2005)

表二 IAEA 中期貯存之多邊化模式

永一 IALA   カバイベン 近に狭大						
模式	類型	運作型態				
I 不涉及設施 所有權的服務 保證	I.1 由供應方提供 的額外中期存服 務	供應核電廠核燃料的商業 實體,提供收回並貯存用 過核燃料服務,直到該用 過核燃料進行再處理或最 終處置為止。				
	I.2 由國際政府組 合實體提供的服 務保證	國際政府組合實體不持有 或不取得所有權;接收某 批用過核燃料,並且無限 期地暫時貯存該等核物 料。				
	<ul> <li>I.3 由 IAEA 提供</li> <li>的服務保證</li> </ul>	由IAEA提供中期貯存服 務				
II 轉換現有國家	設施為多國設施	多國設施地主國,自夥伴 國接收用過核燃料,並且 將之貯存於地主國的中期 貯存多邊設施內。				
III 建造新的多邊	皇聯合設施	設立區域或者多國化的中 期貯存共同使用設施				

資料來源:本計畫研究整理 (IAEA, 2005)。

#### (二) IAEA 對於監控模式的構想

如何確保當事方能夠穩妥地執行核燃料循環多邊 化機制,乃是重要的核安全挑戰。IAEA 核燃料循環多 邊化專家小組主席培勞(B. Pellaud)於 2006 年建議,構 建 IAEA 監控模式(IAEA Monitoring model),要求在當 事方的商業暨政府協議之上,由 IAEA 提供涉及技術 設計(technical design)、核安全(nuclear safety)、環境 (environment)、核保安(nuclear security)暨財務管理 (financial management)的監控功能(Pellaud, 2006: 47-50)。

培勞認為, IAEA 多邊化監控模式不可與 IAEA 執 行的核保防監督措混為一談(Pellaud, 2006: 50)。故而應 是由 IAEA 之核能部(Department of Nuclear Energy)與 核安全暨核保安部(Department of Nuclear Safety and Security)派員,組成臨時內部工作小組(ad-hoc internal teams),對多邊設施進行監控作業,包括派員對多邊設 施進行物理或是目視檢測,採取環境樣本,防止可能之放射性物質洩漏,甚至在特殊情況下,進行遠程監控, 將數位監控訊號傳送到 IAEA(Pellaud, 2006: 50)。當有發現異狀時,IAEA 監控小組以機密型式通知其夥伴, 並且以機密方式,向 IAEA 秘書長與夥伴國進行年度 報告(Pellaud, 2006: 50)。

培勞提出的 IAEA 監控多邊設施建議,已經將 IAEA 從有限的核能規範建議者,轉化為核能規範的執 行者,更隱涵 IAEA 擴張監管權限,具備改正暨批核 多邊設施監管作業的意涵。培勞的 IAEA 監控多邊設 施建議,雖沒有進一步的發展,可是已經為區域中期貯 存多邊協力機制與最終處置設施的監管連結,提供初 始的概念發想。

#### 三、各種區域中期貯存多邊倡議提出的監管構型

區域中期貯存設施概念,啟蒙自1970年代,當時 IAEA就曾提出多種構想(IAEA,2004:8-9),演變至今, 各項創建國際(區域)多邊中期貯存機制倡議,構成 IAEA監控模式、區域監管機構全面監管模式、區域監 管機構有限監管模式、多國監管機構融合模式、以及地 主國獨立監管模式等五種區域中期貯存協力機制的監 管構型。

此五項區域中期貯存協力機制的監管構型,對於 中期貯存至最終處置的監管連結型態,例如中期貯存 協力機制之監管機構(regulatory body)與設施地主國、 夥伴國及與非夥伴國之監管機構的互動,分別有不同 的規畫(請參見表三)。

	代衣性	监官機傳	與設施	丹秒件	兴非移
	倡議		地主國	國的監	伴國之
			之監管	管連結	監管互
			連結		動
IAEA	IAEA	LAFA	LAEA	IAEA	IAEA
監控	IAEA /IMRSS	IAEA	IAEA 於答	監管融	v.s. 非
模式	/11/1/055		西市	合	夥伴國
區域監		區域協力	區域監	區域監	區域監
管機構	AMMAO	機制內設	管機構	管機構	管機構
全面監		之監管部	全面監	之監管	v.s. 非
管模式		門	管	融合	夥伴國
區域監		地主國監	反比巴	历出野	地主國
管機構	AAAS	管機構+	區域監	區域監	監管機
古限許	/GNF	國際監管	官諮詢	官諮詢	構 v.s.
高雄士		諮詢委員			非夥伴
日代八		會			威
名同时		多國監管	4	*	
<b>夕回</b> 一 答 機 堪	NTI	機構地主	多國監	多國監	地主國
日城伸	/DSFS	國+夥伴	管融合	管融合	监管機
殿白侯		國監管機			構 V.S.
ΣL		構的法規			非夥伴
		暨工作融			威
		合			
铅施州					地主國
<b>以</b> 他地 士國獨	NPT	地主國監	獨立監	獨立監	監管機
上四调		管機構	管機構	管機構	構 v.s.
山血百			之間的	之間的	非夥伴
保氏			互動	互動	國

表三 區域中期貯存協力機制的監管構型

資料來源:本計畫研究整理。

#### (一) IMRSS:為 IAEA 監控模式之構型

德國學者哈費勒(Wolf Hafele)暨美國學者斯塔 (Cha的uncey Starr)於1999年建議,仿照商業銀行的運作 概念,由各國共同建立「國際可取回貯存監控系統」 (The International Monitored Retrievable Storage System, IMRSS),將各國用過核燃料暨多餘的鈽,貯存於一個 受到國際監管的中期貯存設施。在此設施內,各國對於 其用過核燃料暨鈽的所有權,並不會受到影響,並且得 以依據核能和平使用原則或最終處置的需要,隨時取 回該用過核燃料或鈽(Bunn, et al. 2001: 70)。

IMRSS將設立多國政府組合實體(consortium),其 董事會由各國代表組成,該政府組合實體之運作,是依 據一套共同的核安全暨核保防等監管標準(Bunn, et al. 2001:71)。此種觀點揭示了區域多邊貯存機制採行 IAEA監控模式的樣貌,構成本研究IAEA監控模式之構 型。

#### (二) NPT:為地主國獨立監管模式之構型

美國民營企業於2000年倡議,在美國成立「核不擴 散信託」(Non-Proliferation Trust, NPT),以商業活動型 式,由該機構接受其他國家委託,以每公斤1500美元的 收費標準,運送非美國產出之用過核燃料一萬噸,至俄 羅斯進行中期貯存。NPT計畫打算運用該收入,在俄羅 斯建造中期設施暨最終處置設施,並支持俄羅斯的環 保工作,但條件是俄羅斯不得再處理他國的用過核燃 料(Bunn, et al. 2001: 74-75)。雖然NPT計畫並未違反美 國嚴格限制他國將美國產製之核燃料進行再處理的原 則,但美國仍對此有所顧慮,NPT計畫因此無疾而終 (Bunn, et al. 2001: 75)。此外,俄羅斯同時推展再處理 他國用過核燃料,且無需回運再處理後所產出之鈽暨 高放射性廢物的MINATOM計畫,亦使美國疑慮俄羅 斯的用心(Bunn, et al. 2001: 75-76)。NPT與MINATOM 計畫故而皆未能成行。

NPT計畫與MINATOM計畫均是以俄羅斯作為中 期貯存之設施地主國,並且賣斷用過核燃料的所有權, 直接在俄羅斯進行最終處置,故而不存在監管連結的 問題,突顯提供跨國中期貯存服務之設施地主國的監 管主導性,構成本研究地主國獨立監管模式之構型。

#### (三)AMMAO:為區域監管機構全面監管模式之構型

日本東京大學提出「亞洲多邊核燃料循環管理組 織」(Asian Multilateral Nuclear Fuel Cycle Management Organization, AMMAO)構想,倡議建立涵蓋核燃料循 環前端之鈾精煉,以及後端再處理與中期貯存之東亞 全面性核燃料多邊化組織。

AMMAO 構想將核燃料循環多邊化合作界定為三 種類型。分別是(一)僅限於提供核安全、核保安與核保 防合作服務但不涉及設施產權的 A 型多邊化合作,(二) 不轉讓地主國設施產權予核燃料循環多邊化合作組織 的 B 類型合作,以及(三)核燃料循環多邊化組織持有多 邊設施產權的 C 類型合作。參與上述三種多邊化合作 型態的國家,分別稱為(一)夥伴國(partner states)、(二) 設施地主國(host states),以及(三)設施廠址國(site states) (Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 28)。 所有的合作參與國應締結核燃料循環多邊化框架公約 (framework convention),成立「亞洲多邊核燃料循環管 理組織」(AMMAO),AMMAO也必須與 IAEA 暨所有 會員國,簽署各種雙邊協議,以順暢合作的運作。作為 區域多邊合作設施營運之主導方,AMMAO 亦應與設 施地主國與設施廠址國,分別簽署管理協定與營運協 定。最後,無論是 B 型合作或是 C 型合作,AMMAO 之設施均採國際政府組合實體(international consortium) 型式(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 28)。

用過核燃料的國際中期貯存服務,也受到 AMMAO的關注。AMMAO倡議認為,應提供長達一 百年的國際中期貯存服務(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 24),但如果參與國未就成立區 域最終處置設施有所共識,則中期貯存於AMMAO 之 各國用過燃料,將會送回各國(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 19)。依據東京大學的評估,哈 薩克與俄羅斯,是被AMMAO視為可以提供中期貯存 服務的國家(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 183)。

最後,AMMAO 框架下,將會設立區域核監管機 構,統籌 3S 暨出口控制事務,執行 AMMAO 核保防 檢查,並進行核安全與核保安之同儕審查(peer review) (Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 170-171)。整體而言,就是創建一個區域型的超國家核監管 機構,構成本研究案之區域監管機構全面監管模式之 構型。

#### (四)GNF 倡議:GNF 國際政府組合實體模式為本研 究區域監管機構有限監管模式之構型

美國智庫AAAS資助的全球核未來(Global Nuclear Future, GNF)計畫,擬籌設容量為10,000至15,000噸的東 亞區域中期貯存設施,其貯存時間至少為75年以上 (Sloan, 2017: 18)。

AAAS對於東亞區域中期貯存協力機制的運作提 出雨種模式,分別是實體公司路徑(cooperate entity approach),以及國際政府組合實體路徑(international consortium approach),而在不同的路徑中,設施地主國 監管機構所扮演的角色並不相同(Sloan, 2017: 16-23)。

GNF倡議的國際政府組合實體模式,構成本研究 區域監管機構有限監管模式之構型。GNF倡議的國際 政府組合實體模式下,AAAS建議,設立由各國代表暨 IAEA指定官員所組成的聯合委員會(Joint committee), 以監督地主國暨各締約夥伴國均能遵循IAEA之3S等 相關規範。聯合委員會的職掌包括:(一)進行獨立審查, 以確保地主國與用戶國對核保防監督協議之遵循,(二) 就地主國所貯之存之本國或國際核材料,核發轉運執 照,(三)會同地主國監管機構,核發涉及核設施興建、 擴建與相關運輸網絡的執照,(四)批准經費使用,以及 確保中期貯存設施的商業營運(Sloan,2017:40)。在GNF 倡議的國際政府組合實體模式下,聯合委員會成為督 導地主國/夥伴國的太上監管機構。

#### (五) DSFS 倡議:為多國監管機構融合模式之構型

美國核威脅倡議(Nuclear Threat Initiative)組織,自 2013年啟動「用過核燃料發展戰略」(Developing Spent Fuel Strategies, DSFS)倡議,旨在匯集環太平洋國家的 專家學者,共同應對安全管理用過核燃料所涉及的核 安全暨核不擴散問題。自2014年至今,定期舉行年度 研討會,但自2019年起,DSFS轉而關注最終處置庫 選址的技術暨非技術層面、乾貯長期監測與運輸、知識 管理與地下研究設施之研發等具體問題,並且從應對 長期貯存的挑戰出發,開始評估中期貯存、運輸與最 終處置的監管轉換(hands-off)問題(NTI, 2019)。

為擴大協力成果,美國 NTI 的 DSFS 倡議,已 開始初步探索協力方之間的規範融合,構成本研究 多國監管機構融合模式之構型。

#### 四、區域中期貯存協力機制連結最終處置機制之潛在 監管路徑

本研究參考 IAEA 對用過核燃料區域中期貯存機制 的三種服務選項(IAEA, 2005b: 2), 勾勒區域中期貯存 協力機制,監管連結最終處置之三種可能的監管連結 型式,其路徑暨涉及的監管機構,請參見表四。

哈侄尘八	哈侄疋问	取於处直改他	哈住沙风的监官
		方	機構
	1.自區域中		
nh /=	期貯存協力	<b>中</b> 人 回	夕 · 自 上 山 · 中 十
路徑一	機制到客户	各尸國	多遼甲期貯仔設
限期運回	國之中期貯	最終處置設施	施監管機構→客
客戶國*	存設施或最		户國監管機構
	終處置設施		
		2.1.1產出之高	多邊中期貯存設
	2.1 自區域	放射廢物,直接	施監管機構→再
路徑二	中期貯存協	送回客户國之	處理設施地主國
再處理	力機制到區	最终处置设施	監管機構→客户
	域中期貯存		國監管機構
	多邊設施地	2.1.2 產出之高	多邊中期貯存設
	主國的再處	放射廢物, 逕送	施監管機構→再
	理設施	區域中期貯存	處理設施/最終處
		設施地主國之	置地主國監管機
		最終處置設施	構
		2.1.3產出之高	多邊中期貯存設
		放射廢物,轉送	施監管機構→再
		第三方最終處	處理設施地主國
		置設施	監管機構→第三
			方多邊最終處置
			監管機構
		2.2.1 第三方再	多邊中期貯存設
		處理產出之高	施監管機構→第
		放射廢物,直接	三方再處理設施
		送回客户國之	監管機構→客户
		最終處置設施	國監管機構

表四 區域中期貯存協力機制連結最終處置的路徑

防领刑卡

防领土人 具故虎里机长 防领洪卫站防驾

	2.2 自區域	2.2.2 第三方再	多邊中期貯存設
	中期貯存協	處理產出之高	施監管機構→第
	力機制到第	放射廢物,轉回	三方再處理設施
	三方的再處	區域中期貯存	監管機構→原多
	理設施	設施地主國之	邊中期貯存設施
		最终处置设施	地主國監管機構
		2.2.3 第三方再	多邊中期貯存設
		處理產出之高	施監管機構→第
		放射廢物,逕送	三方再處理設施
		第三方最終處	監管機構→第三
		置設施	方最終處置設施
			監管機構
		3.1直接送往區	多邊中期貯存設
		域中期貯存設	施監管機構→最
路徑三	3.區域中期	施地主國之最	終處置設施地主
多邊直接	貯存協力機	终处置设施	國監管機構
最終處置	制到多邊最	3.2送往第三方	多邊中期貯存設
**	終處置設施	的多邊最終處	施監管機構→第
		置設施	三方最終處置設
			施監管機構

資料來源:本計畫分析整理(IAEA, 2005b)

\*限期貯存後運回客戶國; \*\*限期貯存後進行最終處置

本研究依據上述區域中期貯存協力機制監管連結 至最終處置機制的三種路徑,並就下列四大變項:(A) 監管機構間的監管協力,(B)監管法規融合,(C)監管機 構間的公眾參與暨資訊連結,以及(D)用過核燃料運輸, 描繪區域中期貯存多邊協力機制至最終處置機制的監 管連結具體面貌。

#### 五、四十五類區域中期貯存協力機制至最終處置之監 管連結情境

本計畫首先以 IAEA 所提出的 IAEA 監控模式為對 照基礎,比較分析「國際可取回貯存監控系統」(The International Monitored Retrievable Storage System, IMRSS)、核不擴散信託(Nonproliferation Trust, NPT)計 畫、日本 AMMAO 倡議、美國智庫 AAA 建立東亞區 域中期貯存機制的 GNF 概念,與美國智庫 NTI 的 DSFS 等五項倡議,產出區域中期貯存協力機制監管構型。

繼而,運用情境規畫分析法(scenarios analysis),參照 IAEA 區域中期貯存協力機制之三種服務型態,探 索區域中期貯存多邊協力機制與最終處置設施所可能 發生的監管連結情境。

自區域中期貯存協力機制的五項監管構型出發,結 合 IAEA 區域中期貯存協力機制連結最終處置之三種 路徑,構成本研究擬探索之45 類監管連結情境。(請參 閱表五)

最後,自監管協力、監管法規融合、監管機構間的 公眾參與暨資訊連結,以及用過核燃料運輸等四大分 析變項,具體勾勒45種情境監管連結之具體面貌。

#### 表五 區域中期貯存協力機制連結最終處置的監管連結情境

	路	路徑二 再處理						路征	涇三	
	徑	區域	多邊協力	1設施	第三方設施			多邊	最终处	
	-	地主	國再處理	2次路	再處理次路徑			置		
	原		徑							
	在									
	地									
	威									
	品									
	奴									
	虎									
	<i>处</i> 罢									
	且	nh /m	nh tai	nh tai	助师	nh tai	nh tai	114	呐価	
	崎価	哈徑 211	- 哈徑	哈伦 010	哈伦 201	哈徑	- 哈徑	必		
	徑	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1	2.2.2	2.2.3	徑	3.2	
IAE	1							3.1		
IAC A BE	т	т	т	т	т	т	т	т	т	
A 监	1-	2 1 1	212	213	221	222	223	31	3.2	
官倶	1	2.1.1	2.1.2	2.1.5	2.2.1	2.2.2	2.2.5	5.1	5.2	
式(I)										
區域										
監官										
機構	CR-	CR-	CR-	CR-	CR-	CR-	CR-	CR-	CR -	
全面	1	211	212	213	221	222	223	31	3.2	
監管	-	2.1.1	2.1.2	2.1.5	2.2.1	2.2.2	2.2.5	5.1	5.2	
模式										
(CR)										
區域										
監管										
機構										
有限	LR-	LR-	LR-	LR-	LR-	LR-	LR-	LR-	LR-	
監管	1	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1	2.2.2	2.2.3	3.1	3.2	
模式										
(LR)										
多國										
監管										
機構										
融合	M-	M-	M-	M-	M-	M-	M-	M-	M-	
植式	1	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1	2.2.2	2.2.3	3.1	3.2	
M										
設施										
地主										
心工										
凶烟	H-	H-	H-	H-	H-	H-	H-	H-	H-	
上监	1	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.2.1	2.2.2	2.2.3	3.1	3.2	
官限										
式										
(H)	1									

資料來源:本計畫研究設計。

#### III.討論與結果

本研究首先以 IAEA 所提的 IAEA 監控模式為對 照基礎,回顧分析過往多邊化倡議,對於中期貯存多邊 機制的既有構想,進而歸納出 IAEA 監控模式、區域全 面監管模式、區域有限監管模式、多國監管機構融合模 式,以及地主國獨立監管模式等,五種區域中期貯存協 力機制的監管構型。

繼而,運用情境規畫分析法(scenarios analysis),參 照 IAEA 區域中期貯存協力機制之三種服務型態,探索 用過核燃料暨放射性廢物,自區域中期貯存至最終處 置過程中,可能產出之各種監管連結情境。各情境分別 就監管機構間的監管協力、監管法規融合、監管機構間 的公眾參與暨資訊連結、用過核燃料運輸等四大主要 分析變項,解構區域中期貯存至最終處置過程的四十 五種監管連結情境。在建構分析模式與描繪各種監管 連結情境的過程中,為降低資訊去蕪存菁過程的遺珠 之憾,另採行專家諮詢與訪談,以增加情境分析法的研 析效度。

本計畫執行過程中,適逢 IAEA 發布涉及中期貯存 設施的新規範,爰此,特別將其修正重點,補充載入本 研究的最後一部分,敬供各界參酌。以下擬就現行 IAEA 涉及中期貯存設施的新規範(一),COVID-19下 核燃料循環後端多邊化倡議之最新發展(二),以及四 十五種區域中期貯存連結最終處置監管情境之歸納分 析(三),進行系統性的描述與解析。

#### 一、 涉及中期貯存設施的 IAEA 新規範

IAEA 是國際核能規約的主要造法者。IAEA 分別 在推展核能和平使用、防阻核能軍事擴散的核保防,以 及核子安全標準制定等三大領域,扮演國際核能的造 法者、執行者暨監督者等多重角色(曾雅真,2012:72)。 IAEA 首先促成各種國際核事務公約,例如《核安全公 約》、《聯合公約》、《核材料實物保護公約》與《關於核 損害民事責任之維也納公約》暨其修正議定書等國際 條約,鼓勵各國參加入這些國際條約。IAEA 並利用上 述各項條約的締約方審議會議,執行相關的國際造法 功能(Handl,2003:26)。最後,IAEA 利用制定各種 IAEA 的 各種 導則,例如《基本安全原則》(Safety Fundamentals)、「安全要求」(Safety Requirements)與「安 全導則」(Safety Guides)所構成的核安全規範網絡,建 構有效保護人類與環境免於游離輻射危險的全面性核 安基石(IAEA,2006: para.1.5)。

自 2011 年日本福島核災之後, IAEA 即著手進行 各種安全導則的更新作業,嚴密核安全、核保防與核保 安的規則嚴謹度性。並於 2018 年先後頒佈涉及監管機 構之組織、管理暨功能職掌的 GSG-12 與 GSG-13 導則 (IAEA, 2018a; IAEA, 2018b),以及涉及核材料運輸規則 的 SSR-6 (Rev.1)修正版。最重要者,乃在是本計畫執行 過程中,於 2020 年頒佈第 SSG-15 (Rev. 1)號之「用過 核燃料的中期貯存」(Storage of Spent Nuclear Fuel)修正 版,對於中期貯存設施的核安全、核保防與核保安,有 更為嚴密的要求。

IAEA 對於 SSG-15 (Rev. 1)規則的修正方向, 主要在於(一)加強核事故管理,(二)防止內部暨外部危 害(hazards),以及(三)切實消除導致放射性物質過早釋 放或放射性物質大量釋放狀況發生的可能性(IAEA, 2020: preface)。更重要者,乃是 SSG-15 (Rev. 1)新增 1.7 段,以 SSG-15 (Rev. 1)規則,取代 2012 年出版的 SSG-15(IAEA, 2020: para. 1.7)。<sup>1</sup> 另外,SSG-15 (Rev. 1)規則新增3.31A,3.31B,5.21A, 6.37B 等條文。新增的SSG-15 (Rev. 1)安全規則3.31A 段,要求提高中期貯存設施的核安全暨核保安之防護, 在用過核燃料中期貯存設施的建造和運轉期間,需要 設計與安裝物理保護系統,以防止暨檢測未經授權人 員的入侵,俾能防止中期貯存設施為內部或外部所破 壞(IAEA, 2020: 3.31a)。新增的第3.31B 段,要求用過 核燃料中期貯存設施營運組織,應向監管機構證明其 管理措施,均已達到包括實物保護系統在內之核保安 暨核安全的目的(IAEA, 2020: 3.31b)。

新增的 SSG-15 (Rev. 1)第 5.21A 段要求,在用過 燃料 中期 貯存設施與其他核設施同處於共同廠址 (colocation)的情況下,其安全評定,應考量每個設施或 核活動,對其他設施所導致的潛在危害,以及外部事件 對所有設施與核活動的影響;在安全評定中,對此種情 況的評定,應證明其在每個設施上,都能實現所需要的 安全功能(IAEA, 2020: para.5.21A)。

SSG-15 (Rev. 1)安全規則新增的第 6.37A 段要求, 應於用過核燃料之中期貯存設施,設計排熱系統(heat removal systems)。該規則要求,當中期貯存設施初次接 收用過核燃料時,該排熱系統應能可靠地冷卻所貯存 的用過核燃料,其排熱能力,應確保所有已達到的溫度, 不超過最高容許溫度;而且,中期貯存設施其他與安全 相關組件之溫度,不應超過在正常操作情況、預期的操 作事件暨核事故情況 (包括設計基準事故),以及設計 延伸條件情況下的容許溫度,例如:(a)多次故障導致 強迫冷卻系統的持續喪失;(b)根據概率風險評估選擇 的故障組合(例如,預期操作事件或假定事故與共同原 因的故障組合,這些故障會影響旨在緩解事件的系統)。 SSG-15 (Rev. 1)安全規則新增的第 6.37 段落,要求排熱 系統,應針對所有運轉狀態與核事故情況進行設計。為 了提高核事故管理能力,用過核燃料中期貯存設施的 設計應包括,允許使用非永久性設備的功能,並應考慮 採取被動措施,例如將高熱衰減的用過核燃料燃料組 件包件(fuel assembly packages),均匀地分配到低热衰 减用過核燃料燃料組件包件(IAEA, 2020: para. 6.37a)。

#### 二、 COVID-19 下核燃料循環後端多邊化倡議之最新 進展

雖然 2020 年全球受到 COVID-19 新冠肺災肆虐的 影響,但是 IFNEC 的多國處置庫合作倡議,以及美國 智庫 NTI 之 DSFS 倡議所推動的「環太平洋用過核燃 料管理夥伴」(Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership),均透過視訊會議,有不同程度的進展。

IFNEC 於 2020 年 3 月 8 日,召開「多國最終處置 庫概念」(Multinational Repository Concept) 視訊會議。

6.90, 6.96–6.99, Table 2,6.118, 6.125, 6.127, 6.136, 6.137, 6.138, 6.142, 6.151, I.4, I.11,I.12, I.16, I.21, I.22, I.25, I.26, I.29, I.33, I.35-I.37, I.46, II.3, VI-1 段。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> SSG-15 (Rev. 1)規則所涉及之修正條文包括:1.3, 1.5, 1.7, 3.3, 3.9, 3.12, 3.19, 3.20, 3.24, 3.25, 3.26, 3.28, 3.29, 3.31, 4.2, 4.6, 4.11, 4.12, 5.1, 5.21, 5.23, 6.2, 6.4, 6.8–6.10, 6.29, 6.31–6.34, 6.37, 6.41, 6.42, 6.44, 6.46, 6.48, 6.49, 6.52, 6.57, 6.58, 6.60, 6.61, 6.67, 6.70–6.74, 6.81, 6.89,

並於 2020 年 11 月 4-5 日,針對 SFRW 之深層鑽孔最 終處置(deep borehole disposal)技術,進行線上會議。同 時亦強化 IFNEC 與經濟合作暨發展組織之核能署 (Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, OECD/NEA)的互 動,擬於 2021 年 2 月 24 日,召開核燃料循環後端策 略暨考量(Strategy and Considerations for the Back-End of the Fuel Cycle)線上會議。未來 IFNEC 與 OECD/NEA 的具體互動成果,仍有待持續觀察。

NTI的 DSFS 倡議,以「環太平洋用過核燃料管理 夥伴倡議」名義,在 NTI/DSFS 倡議下成立地下實驗室、 中期貯存與選址等三個工作小組,並持續以視訊會議 方式,進行概念溝通與研究協力。在本計畫主持人曾雅 真教授的引介之下,工業技術研究院業已於 2020 年參 與 NTI「環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議」的地下實 驗室工作小組(URL Working Group),並持續參與各項 活動。比較值得注意之處,在於日本與南韓等鄰國,雖 受到不同程度的疫情影響,仍不懈地參與「環太平洋用 過核燃料管理夥伴倡議」活動。日本原子力研究開發機 構的幌延深地層研究中心,並藉由 NTI/URL 架構,主 動邀請「環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議」的其他參 與方,協同該中心,進行共同研究。目前 NTI「環太平 洋用過核燃料管理夥伴倡議」所取得的合作成果,遠超 出其他核燃料循環後端多邊化倡議。

觀察目前在 COVID-19 新冠肺災肆虐下的核燃料 循環後端多邊化倡議發展,美國主導的 IFNEC 以及美 國智庫 NTI 所推動的「環太平洋用過核燃料管理夥伴」, 仍持續推動全球/區域規模的後端多邊協力機制。未來 美國創建國際/區域核燃料循環後端協力機制的企圖心, 值得持續觀察。

#### 三、歸納分析:區域中期貯存協力機制連結最終處置之 四十五類監管情境

如前述,本研究分別以 IAEA 監控模式(I 情境)、 區域監管機構全面監管模式(CR 情境)、區域監管機構 有限監管模式(LR 情境)、多國監管機構融合模式(M 情 境)、以及地主國獨立監管模式(H 情境)等,五種區域中 期貯存協力機制監管構型為基礎,透過監管機構間的 監管協力、監管法規融合、監管機構間的公眾參與暨資 訊連結、用過核燃料運輸等四大主要分析變項,解構用 過核燃料暨放射性廢物(SFRW)自區域中期貯存直接送 最終處置,或於再處理後,將產出之高放廢物(HLW), 送最終處置設施,所可能發生的 45 種監管連結情境。 經系統性分析該 45 種監管連結情境的結果,對客戶國 最有利的情境,大致可歸納為「一去不返」,「海外滯留」, 以及「責任履諾」等三種連結模式。(參閱表六)

(一) 客戶國 SFRW「一去不返」模式

歸納分析 45 種監管連結情境可以發現,客戶國若 因各種因素,無法運作其本土中期貯存設施,或是最終 處置設施,則採取 SFRW「一去不返」模式,乃是對客 戶國最有利的處理方式。也就是客戶國 SFRW 經送至 區域中期貯存設施後,即不再返回客戶國的設施,此種 監管連結將會大大地減輕客戶國監管機構的監管負荷。

在四十五種監管連結情境中,對客戶國最有利的 「一去不返」情境排序,依序是 H-3.1 > M-3.1 > LR-3.1 > CR-3.1 \ I-3.1. \ H-3.2 \ M-3.2 \ LR-3.2 \ CR-3.2 \ I-3.2 \ H-2.1.2 \>M-2.1.2 \>LR-2.1.2 \>CR-2.1.2 \>I-2.1.2 \>H-2.1.3 \> M-2.1.3 \LR-2.1.3 \CR-2.1.3 \I-2.1.3 \H-2.2.2 \M-2.2.2 \ LR-2.2.2 \CR-2.2.2 \I-2.2.2 \H-2.2.3 \M-2.2.3 \LR-2.2.3 \ CR-2.2.3〉I-2.2.3〉。對客戶國較有利的情境 3.1 與 3.2 群組意謂,客戶國 SFRW 在區域中期貯存設施存放一 定時間後,直接送往區域中期貯存設施地主國或第三 方之最終處置設施。情境 2.1.2 與 2.1.3 群組意謂,客 戶國 SFRW 在區域中期貯存設施存放一定時間後,直 接於區域中期貯存設施地主國的本土再處理設施進行 再處理,再將其產出之 HLW,運至該地主國或第三國 的最終處置設施。情境 2.2.2 與 2.2.3 群組意謂,客戶 國 SFRW 在區域中期貯存設施存放一定時間後,將送 交第三方再處理設施進行再處理,其產出之 HLW,再 運回區域中期貯存設施地主國或第三國的最終處置設 施,進行最終處置。(參閱表六)

在五種區域中期貯存協力機制監管構型中,地主 國獨立監管模式(H 情境),係最貼近現行各國監管連結 的較佳選項;但缺點是各國的監管效能不一,監管標準 或有歧異,在缺乏國際條約、IAEA 或區域組織約束下, 其監管協力的穩定與一致性惟恐不足,恐有阻礙監管 協力流暢度之虞。其次,經由多國組合實體夥伴國家間 之法規融合,所構成的多國監管機構融合模式(M 情境), 其多國組合實體設施,乃是由設施所在的地主國執行 監管任務,表面上雖可以完整的法規融合,作為協力的 前提,但缺點一如地主國獨立監管模式(H情境),如若 各夥伴國監管協力的穩定暨一致性不足,則亦有可能 阻礙監管協力的流暢度。第三,在地主國監管機構之上 設置國際監管諮詢委員會的區域監管機構有限監管模 式(LR 情境),固然具備良善的協力監管效能,亦可促 成相關夥伴國家間的法規融合,監管協力具備一定的 穩定性與一致性;但在監管資訊透明暨公眾參與層面, 可能造成國際監管諮詢委員會,以及地主國監管機構 的角色混淆與職掌衝突,更有可能引發地主國監管權 威暨信譽受損的可能。第四,區域監管機構全面監管模 式(CR 情境),完全統攝客戶國、地主國與夥伴國的監 管職掌,俾美區域的超國家監管機構,或可具備高度的 協力監管效能,完整的法規融合,以及高度穩定且一致 的監管協力,更可以提升資訊透明暨公眾的參與程度; 不過,相關會員國間能否達到監管協力的全面整合,仍 取決於相關國家的整體利害考量、整合意願與決心,更 何況組建區域組織全面監管模式,需投入極高的資源 與心力。最後,與現行各國監管現況歧異最大者,乃是 IAEA 監控模式(I 情境)。它固然會產出最高的核安全、 核保安與核保防等 3S 效益,卻可能在區域中期貯存設 施地主國,產生「監管租界」現象(亦即「界中界」的 概念),也就是在設施地主國境內,另外產出具有"排他 性"之國際組織監管職權,衝擊地主國的主權與監管權 威暨信譽,是否能為地主國所接納,仍難有定論。

值得注意之處是,上述情境之客戶國、區域中期貯 存或再處理設施地主國,以及第三方再處理設施或最 終處置設施地主國,若存在監管法規融合歧異的情況, 則客戶國申請方,將會遭遇各方適用法規歧異的加乘 效果,也必需符合各方最嚴格標準的3S監管核照程序。

#### (二)客戶國 SFRW「海外滯留」模式

如若客戶國因各種因素,暫時無法運作本土中期 貯存設施,但是可以在一定時間後順利選址、興建並啟 用其最終處置設施,則客戶國或可採行 SFRW「海外滯 留」模式。也就是客戶國 SFRW 在區域中期貯存設施 存放一定時間後,再送交他方再處理,並且在爭取最長 的海外滯留時間之後,才將再處理產生的 HLW,送返 客戶國進行最終處置。

依據客戶國 SFRW 可以在海外滯留時間的長短, 並參照最貼近現行各國監管情境之連結路徑,對客戶 國較有利的情境分別是 H-2.1.1 > CR-2.1.1 > LR-2.1.1 > M-2.1.1 \I-2.1.1 \H-2.2.1 \CR-2.2.1 \LR-2.2.1 \M-2.2.1 \ I-2.2.1 >。在「海外滯留」的各種情境中,時間最長的海 外滞留情境是:SFRW 在區域中期貯存一定時間後,送 交區域中期貯存之本土再處理設施或第三方再處理設 施進行再處理,再將產出之 HLW,運返客戶國興建的 本土最終處置設施。在五種區域中期貯存協力監管構 型中,IAEA 監控模式(I 情境)的履約效能最高,但客户 國受到 IAEA 監管的絕對壓力, SFRW 在海外滞留的時 間彈性,最有限。在區域組織全面監管模式(CR 情境) 中,由於客戶國亦受到超國家監管機制的統攝,故而 SFRW 海外滞留時間,亦少有討價還價的空間。其次, 在區域監管機構有限監管模式下(LR 情境),由各夥伴 國代表暨國際專家所組成之國際監管諮詢委員會,也 會發揮相當的履約運返壓力,限制客戶國 SFRW 在海 外的滞留時間。相較之下,在多國監管機構融合模式(M 情境),以及地主國獨立監管模式下(H 情境),設施地主 國是主要的監管機構,享有較高的監管職權,因此存在 客戶國 SFRW 延長滞留海外時間的談判空間。(參閱表 六)

值得注意之處是,上述情境之客戶國、區域中期貯 存或再處理設施地主國,以及第三方再處理設施或最 終處置設施地主國,若存在監管法規融合歧異的情況, 則客戶國申請方,將會遭遇各方適用法規歧異的加乘 效果,也必需符合各方最嚴格標準的 3S 監管核照程序。

(三) 客戶國 SFRW「責任履諾」模式

《聯合公約》前言要求,當事國必須擔安全管理用 過核燃料暨放射性廢物最終責任,因此客戶國產出之 SFRW,如若沒有其他多邊後端協力機制,可以作為本 土最終管理責任的妥協,則客戶國 SFRW,在歷經特定 時間的區域中期貯存之後,必須運回本國進行最終處 置。此種客戶國 SFRW「責任履諾」模式,又可分為「無 縫責任履諾」,以及結合「海外滯留」情境的「迂迴責 任履諾」。 「無縫責任履諾」模式,是將歷經區域中期貯存的 客戶國 SFRW,回運客戶國的最終處置設施,此種連結, 乃是客戶國履行《聯合公約》責任的最直接路徑。在此 情境下,參照最貼近現行各國監管情境之連結路徑,較 利於客戶國 SFRW「責任履諾」模式的排序,依序是 H-1〉CR-1〉LR-1〉M-1〉I-1。其中,H-1地主國獨立監 管情境,幾乎在現有的商業模式下即可順利運行。相較 於 H-1 情境,CR-1多國監管融合情境,經由參與夥伴 國的法規融合,尤可保有區域協力監管運作的穩定性, 可調監管協力建構的優質基礎。至於LR-1(區域監管機 構有限監管)、M-1(區域監管機構全面監管)與 I-1(IAEA 全面監管)情境,都需要不同程度之超國家制度的整合, 方得運行,其成功與否端賴相關國家的整體利害考量、 整合意願與決心。(參閱表六)

結合「海外滯留」情境(亦即結合海外中期貯存暨 再處理路徑)所構成的「迂迴責任履諾」模式,乃是在 不違逆當事國安全管理 SFRW 最終責任的前提下,考 量客戶國本土特殊情況,極大化客戶國 SFRW 海外滯 留時間的極端安排,當事國付出之財務成本、本土社會 成本與國際聲譽成本,與「無縫責任履諾」模式不可同 日而語,有待更深入的研析,方有定論。(參閱表六)

考量現行各國監管連結之便捷性,「迂迴責任履諾」 模式對客戶國較為有利的排序,是H-2.1.1 CR-2.1.1 〉 H-2.2.1 > CR-2.2.1 > LR-2.1.1 > M-2.1.1 > LR-2.2.1 > M-2.2.1 \ I-2.1.1 \ I-2.2.1 \。 對客戶國而言, H-2.1.1 與 CR-2.1.1 情境,幾乎可在現有的商業模式下即可順利執行, 同時客戶國與地主國之監管連結相對比較單純。H-2.2.1 與 CR-2.2.1 雖也可在現有的商業模式下順利執行, 但其監管協力連結涉及包括客戶國、地主國與第三方 再處理設施在內的地主國,多重連結下所涉及監管運 作的穩定性、法規融合度,以及核照流程順暢度,都會 增添諸多不確定性。至於 LR-2.1.1、M-2.1.1、LR-2.2.1、 M-2.2.1、I-2.1.1 與 I-2.2.1 等情境,都需要不同程度的 超國家制度整合,其成功有賴相關國家的整體利害考 量、整合意願與決心,前置規畫與國際溝通談判時間可 能會曠日廢時,對於有迫切 SFRW 中期貯存需求的客 户國而言,是相對不利的因素。

表六 區域中期贮存協力機制連结最终處置之監管路徑情境歸纳分析								
區域	再處理		區域/第三	最终處置				
中期貯存			方中期貯存					
區域中期	區城中期	第三方	區城/第三	客戶國	區域中期貯	第三方設施		
貯存設施	貯存設施	設施地	方設施地主		存設施地主	地主國		
地主國	地主國	主國	國		國			
SFRW				SFRW (1)				
SFRW	SFRW		HLW 弹性 空間	HLW(211)	HLW (212)	HLW(213)		
SFRW		SFRW	HLW 弾性 空間	HLW(221)	HLW (222)	HLW(223)		
SFRW					SFRW(3.1)			
SFRW						SFRW(3.2)		
	表六 圖 區域 中期貯存 區域中期 貯存設施 地主國 SFRW SFRW SFRW SFRW SFRW	表六         医域         月周           医域         月周         月周           空域中期時         区域中期         日本           宮崎市         中方会込金         中方会込金           SFRW         SFRW         SFRW           SFRW         日本         日本           SFRW         日本         日本           SFRW         日本         日本           SFRW         日本         日本	表穴 医域中期貯存協力機制           医域         再麦理           単期貯存         「「」」」」」           医成中期         三成中期           ア市交洗         文化・           沙古介交洗         文化・           沙古介交洗         文化・           シェ国         上国           SFRW         SFRW           SFRW         SFRW           SFRW         二	表穴 医域中期貯存協力機制送結最終處           医域         再處理         医域第三           中期貯存         予考点         医域第二           防存改札         第三方         医域第二           防存改札         貯存改札         次札           防存改札         貯存改札         交札           防子放         支援         國           SFRW           國           SFRW         SFRW          ULW 弾性           SFRW          SFRW         Z           SFRW          S         SFRW           SFRW           S	表六 医域中期貯存協力機制送結最終處置之監管路           医域 中期貯存         再處理 方年期防存         医域第二 方中期防存           医成年期         第三方         医域第二 方中期防存           即存改佈         第二方         医成年期           防存改佈         政地地         方改地地上           防存改佈         第日         國           SFRW         上回         國           SFRW         SFRW         出W弾柱 空間         HLW(211)           SFRW         SFRW         第日         HLW(211)           SFRW         SFRW         空間         HLW(211)           SFRW         I         空間         HLW(211)           SFRW         I         空間         HLW(211)	表六 医域中期防存協力機制達結最終處王之監管路径情境歸           医域常用         再處理         医域常二         上級第二         未非處置           中期防存		

資料來源:本計畫研究設計 說明一:一去不返

說明二:海外灣留 -

說明三:無縫責任履諾

說明四:迂迴責任履諾

說明五:HLW 弹性空間意謂,再處理後產出的HLW,在送回客戶圖最終處置之前,或可再送區域或第三方中期 貯存設施。此乃極大化客戶圖 SFRW 海外滯留時間之「迂迎責任履諾」極端安排。 此外,客戶國若與區域中期貯存設施地主國暨再處 理的第三方,若存在監管法規融合歧異的情況,則客戶 國申請方,將會遭遇各方適用法規歧異的加乘效果,並 且必需符合各當事方最嚴格標準的 3S 監管核照程序。

### IV. 建議:前瞻國際監管制度發展趨向,為 我國的雙軌處置路徑預留調整空間

檢視 IAEA 持續更新準則的趨向可以發現,除了關 切用過核燃料暨放射性廢物的核安全暨核保防之外, 更鼓勵各核能使用方,對核保安課題投以必要的關注。 證諸現有各項後端多邊化倡議的制度建構主張,遵循 IAEA 核安全暨核保防規範,配合 IAEA 核保防檢查, 乃是各種後端多邊化協力倡議的基本訴求。但是這些 起源於二十一世紀初葉的後端多邊化倡議,對防阻核 實物為恐怖份子所利用,並沒有投以更多的關切。相對 之下, IAEA 現今運用準則更新的方式, 補強中期貯存 設施的監管重點,此舉將左右未來區域後端多邊化機 制的核保安強度。未來我國如有意參與區域後端多邊 協力機制,建議宜維持良好的核保防表現,緊密依循 IAEA 核安全要求,並強化核保安意識,自概念發想暨 設計階段,即應參照 IAEA 的核保安準則建議,強化我 國核設施的核安全、核保防與核保安等 3S 信譽, 俾能 爭取更多夥伴國家的支持,順利加入區域多邊中期貯 存協力機制。

再者,現有區域後端多邊化管理倡議多強調客戶 國、夥伴國、地主國與 IAEA 之核安全、核保安、核保 防,以及第三方責任賠償等各項核規範的融合接軌,以 為創建多邊協力機制的基礎。觀察本研究之四十五種 情境,在各方未進行最基本的監管規範融合下,當事客 戶國將遭遇監管法規岐異的加乘效應。自申請 SFRW 進 入區域多邊協力設施進行中期貯存,直至最終處置階 段,為取得各當事攸關方監管機構的核照允准,客戶國 申請方都必需滿足各當事國 3S 監管核照程序的最嚴格 標準。未來我國如有意參與區域後端多邊協力機制,建 議宜主動以 IAEA 準則為典範,參考日本、南韓、加拿 大、澳洲等可能組成區域後端多邊化管理機制的潛在 成員國之法制架構,啟動我國監管法規的國際同步融 合進程,俾能減緩不必要的法規岐異成本,提高我國與 潛在夥伴國的法規融合度, 鋪陳我國順利加入區域多 邊後端協力機制的基石,並且提升我國核設施與核活 動的核安全品質。

第三,IAEA 尚未對跨國合作的多邊監管機構職能, 提出具體的準則建議,本研究之多國監管機構融合模 式(M 情境)以及地主國獨立監管模式 (H 情境),可說 是現階段相對可行的監管連捷模式,值得我國以此為 方向,持續進行深入研析。若將規範個別國家監管職權 的 IAEA 監管規則,直接適用於跨國合作的後端多邊監 管機制,則中期貯存設施地主國境內,不無會發生「監 管租界」的可能情境,或是產生區域超國家監管機構取 代國家本土監管機構的超國家情境。

國際後端多邊化概念自 2005 年 IAEA 率先倡議後,至今已歷十五年,但尚未有具體法規與制度的建構

方向。IAEA 的「國際核反應器暨核燃料循環創新計畫」 International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, INPRO), 在 2015 年 5 月 26-29 日, 於維也 納舉行第十屆對話論壇(10th INPRO Dialogue Forum), 討論「核燃料循環之後端合作途徑」(Cooperative Approaches to the Back End of the Nuclear Fuel Cycle: drivers and legal, institutional and financial impediments), 隨後即啟動該主題的合作研究計畫 (Collaboration Project Study),探索組建後端多邊協力機制所需要克服 的制度建構、法規融合與經濟效益等問題(INPRO, 2015)。直到 2021 年元月, INPRO 該計畫仍在執行中 (INPRO, 2021), 惟尚未有具體的研究報告出爐。在缺乏 具體導引下,現行 IAEA 各種監管準則暨監管獨立原 則,多適用於以單一國家為管轄範圍的獨立監管機構, 這些適用於單一國家的監管規範,形成組建區域中期 貯存機制的重大挑戰。相對地,在 IAEA 尚未就跨國監 管機構職能提出具體規畫之前,本研究之多國監管機 構融合模式(M 情境),以及地主國獨立監管模式 (H 情 境),或可謂為現階段相對可行的監管連結模式,似有 持續深入探索的必要性。

最後,建議我國宜參照 IAEA 於 2018 年分別發佈 的 GSG-12《監管機構對於核安全之組織、管理與人員 配製》,以及 GSG-13《監管機構對於核安全之功能與 程序》安全導則,作為立法院審議通過「核能安全委員 **會組織法」的制度構建指南,以強化未來組建「核能安** 全委員會」的國際接軌能量,提升我國監管效能,強化 監管信譽。尤其是, IAEA 於 GSG-12 暨 GSG-13 準則, 強調國家監管機構為維持其權威暨信譽,應建立溝通 暨協商管道,並與公眾進行持續並有效地溝通與協商 (IAEA, 2018a: 11)。除了提供各種公共資訊,尚宜舉辦 討論公眾關注議題暨核安全技術與法規的論壇,組建 公眾能夠表達其關切的有效溝通管道(IAEA, 2018a: 11)。 IAEA 認為,監管機構與各方的有效溝通,將確保監管 機構得以多元的視角,建構或修改監管框架,更能強化 公眾信心暨信任(IAEA, 2018a: 11)。爰此,建議我國宜 參照 IAEA 準則與其他國家的成例,就涉及監管機構職 掌的各項改組作業,預先籌擘,期能進一步強化我國監 管機構效能,爭取本土群眾信任暨信心,爭取夥伴國家 肯定, 鋪陳我國順利參與區域後端多邊協力機制的基 礎。

#### 参考文獻

- [1] 曾雅真,2013年6月,「用過核燃料之國際多邊化管 控趨勢-兼論我國處理用過核燃料策略的契機」, 政治科學論業,第56期,頁1-38。
- [2] 曾雅真,2012年6月,「和平利用核能之國際造法 趨勢-IAEA 核燃料循環多邊化倡議的實踐與影 響」,問題與研究,第五十一卷第二期,頁69-100。
- [3] AAAS, 2017. Projects, Publications, Meetings & Donors to the Academy 2016-2017. http://amacad.org/sites/default/files/academy/multim edia/pdfs/projectsActivities2016.pdf. IAEA, 1994.
   "Convention on Nuclear Safety", INFCIRC/449. https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc449.pd f.

- [4] IAEA. 1997. "Joint Convention on the Safety of Spent fuel management and on the Safety of Radioactive Waste Management," INFCIRC/546. http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs /1997/infcirc546.pdf.
- [5] IAEA, 2004. Developing Multinational Radioactive Waste Repositories: Infrastructural Framework and Scenarios of Cooperation, TECDOC No. 1413, http://www.arius-world.org/pdfs\_pub/IAEA-TECDOC-1413.pdf.
- [6] IAEA, 2005a. "Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle: Expert Group Report submitted to the Director General of the International Atomic Energy Agency," INFCIRC/640, February 22, 2005. http://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/mna-2005 web.pdf.
- [7] IAEA, 2005b. Technical, Economic and Institutional Aspects of Regional Spent Fuel Storage Facilities, IAEA-TECDOC-1482. https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\_1482\_web .pdf
- [8] IAEA, 2016. Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety, GSR Part 1 (Rev. 1). <u>https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1713web-</u>70795870.pdf.
- [9] IAEA, 2018a. Organization, Management and Staffing of the Regulatory Body for Safety. GSG-12. https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1801\_web.p df.
- [10] IAEA, 2018b. Functions and Processes of the Regulatory Body for Safety. GSG-13. https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1804\_web.p df.
- [11] IAEA, 2018c. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, SSR-6 (Rev.1). https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798\_we b.pdf.
- [12] IAEA, 2019a. IAEA Safety Glossary: 2018 Edition. STI/PUB/1830. https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830\_we b.pdf.
- [13] IAEA, 2019b. Storing Spent Fuel until Transport to Reprocessing or Disposal, NF-T-3.3. <u>https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1846\_web.p</u> df
- [14] IAEA, 2020. Storage of Spent Nuclear Fuel, SSG-15 (Rev. 1). <u>https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1882\_web.p</u>df.
- [15] INPRO, 2015. "Terms of Reference for INPRO Collaboration Project Study on Cooperative Approaches to the
- [16] Back End of the NFC: Drivers and Institutional, Economic and Legal Impediments," https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Shared%20Doc uments/ToR-INPRO-CP-BE.pdf.
- [17] INPRO, 2021. "INPRO Collaboration Platform," https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/Pages/cps.aspx.
- [18] Lim, Eunjung. 2016. "Multilateral approach to the

back end of the nuclear fuel cycle in Asia-Pacific?" *Energy Policy*, Vol. 99, pp. 158-164.

- [19] NTI, 2013. "Key Takeaways: Paris Workshop on NTI's Developing Spent Fuel Strategies," Paris, December 10, 2013. https://www.nti.org/about/projects/developing-spentfuel-strategies/event/key-takeaways-paris-workshopdeveloping-spent-fuel-strategies/
- [20] NTI, 2014. "Key Takeaways: Taipei Workshop on Developing Spent Fuel," June 26, 2014. Taipei , Taiwan. http://www.nti.org/about/projects/developing-spentfuel-strategies/event/key-takeaways-taipeiworkshop-developing-spent-fuel-strategies
- [21] NTI, 2015. "Key Takeaways: Singapore Workshop on Developing Spent Fuel Strategies," Dec. 4, 2015. Singapore. http://www.nti.org/about/projects/developing-spentfuel-strategies/event/key-takeaways-singaporeworkshop-developing-spent-fuel-strategies.
- [22] NTI, 2016. "Key Takeaways: Honolulu Workshop on Developing Spent Fuel Strategies," Aug. 16-18, 2016. Honolulu, Hawaii. http://www.nti.org/about/projects/developing-spentfuel-strategies/event/key-takeaways-honoluluworkshop-developing-spent-fuel-strategie.
- [23] NTI, 2017. "Key Takeaways: NUMO-NTI Tokyo Workshop on Developing Spent Fuel Strategies," May 29, 2017-June1, 2017. Tokyo, Japan. http://www.nti.org/about/projects/developing-spentfuel-strategies/event/regional-workshopunderground-research-laboratories/
- [24] NTI, 2018. "Key Takeaways: NTI-KORAD Gyeongju Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Workshop," September 6, 2015-September 7, 2018. https://www.nti.org/about/projects/developing-spentfuel-strategies/event/key-takeaways-nti-koradgyeongju-pacific-rim-spent-fuel-managementpartnership-workshop/
- [25] NTI, 2019. "Summary of the Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership Working Group Meeting," February 27-28, 2019. https://media.nti.org/documents/DSFS\_NTI-SNL\_Workshop\_Summary\_2019\_final.pdf.
- [26] Pellaud, B. 2007. "Multinational approaches relevant to spent fuel management," In IAEA, Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors -International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, Vienna: IAEA, pp. 41-54.
- [27] Rosner, Robert, Lenka Kollar, and James P. Malone. 2015. The Back-End of the Nuclear Fuel Cycle: Establishing a Viable Roadmap for a Multilateral Interim Storage Facility. American Academy of Arts and Sciences. Cambridge, Mass.: American Academy of Arts & Sciences.
- [28] Sloan, Robert D. 2017. Multinational Storage of Spent Nuclear Fuel and Other High-Level Nuclear Waste: A Roadmap for Moving FoHLWard, Cambridge, Mass.: American Academy of Arts & Sciences.

- [29] Tazaki, Makiko, and Yusuke Kuno. 2014. "Feasibility Analysis of Establishing Multilateral Nuclear Approaches (MNAs) in the Asian Region and the Middle East," *Sustainability*, Vol. 6, No. 12, pp. 1-20.
- [30] Tosoni, Edoardo, Ahti Salo, and Enrico Zio, 2018.
   "Scenario Analysis for the Safety Assessment of Nuclear Waste Repositories: A Critical Review," *Risk Analysis*, Vol. 38, No.4, pp755-776.
- [31] Von Hippel, Peter Hayes, Jungmin Kang and Tadahiro Katsuta, 2017. "Future Regional Nuclear Fuel Cycle Cooperation in East Asia: Energy Security Costs and Benefits," *Energy Policy*, Vol. 39, No. 11, pp. 6867-6881.

# 輻射防護與放射醫學科技(I)

應用加馬能譜分析技術檢測台灣特種農產品之放射性核種分佈並評估國民輻射劑 量

## Quantifying Radionuclide Activity of Special Agricultural Products in Taiwan and Assessing National Radiation Dose using Gamma Spectroscopy

計畫編號:109-2623-E-010-003-NU 計畫主持人: 吳杰 e-mail: jaywu@ym.edu.tw 計畫參與人員:曾畇蓁 執行單位:國立陽明交通大學

#### 摘要

國民輻射劑量的來源包括天然輻射與人造輻射,其 中天然輻射主要來自宇宙射線與岩石礦物中所含的天 然放射性核種。本計畫考量環境輻射度量技術的進步與 國民生活水平以及飲食習慣的改變,協助主管機關針對 飲食中所含天然放射性核種進行檢測技術之建立與區 域分佈之研究,以獲取台灣特種農產品中放射性核種含 量數據,並依此建立攝入特種農產品所造成的國民輻射 劑量。

根據本研究的成果我們得以了解台灣特種農產品 所含天然放射性核種的活度濃度與分佈,包括:菸草、 香菇與咖啡,並藉由國家攝食資料庫與 ICRP 119 號報告 的分齡劑量轉換因子評估國民的約定年有效劑量。研究 成果得以提供主管機關作為國民輻射劑量之參考依據

#### Abstract

The sources of national radiation doses include natural radiation and anthropogenic radiation. Natural radiation mainly comes from cosmic rays and natural radionuclides contained in rock and minerals. This project takes into account the advancement of environmental radiation measurement technology and the changes in eating habits, and to establish the database of regional distribution of natural radionuclides contained in diets, so as to obtain radionuclides in Taiwan's agricultural products.

Based on the results of this study, we were able to understand the activity concentration and distribution of natural radionuclides contained in Taiwan's agricultural products, including tobacco, mushrooms, and coffee, and assessed by the age-specific dose conversion factor of the National Ingestion Database and ICRP Report No. 119. These results can provide the authority as a reference basis for the radioactive protection.

#### I. 計畫目標

近年來因為日本福島核電廠事故造成民眾對核災 與核食的重視,行政院原子能委員會常年致力於台灣地 區環境輻射監測,其中包含食品及飲用水放射性含量偵 測計畫,用以先期作業評估環境中自然背景輻射對國民 有效劑量的影響。然而,鑒於國內已多年未再重新評估 國民輻射劑量,依現行設備與度量技術之進步,應執行 新的國民劑量調查,故本計畫將針對台灣特種農產品, 並配合考量環境輻射度量技術的進步與國民生活水平、 飲食習慣改變,透過計畫執行目標,協助主管機關獲取 更多食品中放射性同位素含量與國民劑量之數據。

#### Ⅱ. 重要成果

在國內菸草的活度濃度方面,台灣菸草中所含 K-40 的活度濃度介於 537 Bq/kg 至 2182 Bq/kg 之間;在鈾系 與釷系核種方面,鈾系元素含量範圍為 1.80~7.57 Bq/kg、 釷系部分介於 1.10~6.52 Bq/kg。

本研究中鈾系含在國內菌菇類的活度濃度結果方面,台灣、土耳其與希臘 K-40 的平均活度濃度分別為 829 Bq/kg、 570 Bq/kg與 1156 Bq/kg,台灣的結果較土 耳其菌菇類的活度濃度高,而與希臘的結果差異在 4% 以內,國內菌菇中釷系量為 4.98~8.72 Bq/kg、釷系介於 3.81~4.64 Bq/kg。

在咖啡豆的活度濃度結果方面,咖啡豆所含的 K-40 介於 0.59 至 0.72 Bq/g, Espinosa 等人研究墨西哥當地種 植咖啡豆的天然放射性核種發現 K-40 的活度濃度為 0.475 至 1.265 Bq/g,與本研究的結果一致。

在國民劑量的評估方面,如表一所是,根據本研究的結果可知,吸食菸草而因鈾系核種導致之年有效劑量為 2.80~4.93  $\mu$  Sv/y, 針系核種則介於 5.3~6.46  $\mu$  Sv/y; 菌菇中因 K-40 所導致成年人的年有效劑量介於 13.96~107.6  $\mu$  Sv/y; 台灣成年民眾飲用咖啡導致的年有效劑量年有效劑量為 41.02~50.56  $\mu$  Sv/y。隨著年紀的上升,成年人因食用台灣農產品中天然放射性核種所造成的體內劑量隨之下降,主要的原因為劑量轉換因子的下降。

本研究收集了國際最新輻射度量相關資訊,建立一 套完整的食品中天然放射性核種檢測技術,包含樣品前 處理、乾燥技術等,以及實驗室內部檢測食品標準作業 流程,以提升國內食品中放射性核種的檢驗能量。實驗 室將持續的以建構專業的檢驗分析技術、確保嚴謹的品 質管制程序與精進實驗室的管理系統,替國民的輻射劑 量把關。

#### III. 展望

(透過本研究我們可以得知台灣種植之菸草、椴木香菇、香菇、杏鮑菇與咖啡豆中所含天然放射性核種的含量,以及國外咖啡豆的放射性核種含量,並藉以評估國

民食用上述農產品可能導致的國民劑量,以提供國人因 飲食所導致體內劑量的基線值。

實驗室將持續的以建構專業的檢驗分析技術、確保 嚴謹的品質管制程序與精進實驗室的管理系統,提升並 精進放射性核種含量與劑量評估之研究能量。在實務方 面,預計朝向收集更多樣化與廣泛日常食品,以評估更 完整之國民劑量。

表一、食用台灣農特產品導致之各年齡層約定有效劑量 (µSv/y)

特種農產品。	< <b>1歲</b> ₽	1~2歲₽	<b>2</b> ~7歲÷	7~ <b>12歲</b> ₽	12~17歲₽	> <b>17歳</b> ₽	AVG
菸草↔	0+3	0+2	0+2	0+2	0+3	20.60+2	20.60
香菇↩	545.67₽	160.750	89.37₽	97.25₽	121.19	37.06	175.21@
椴木香菇┙	492.76₽	146.32+	94.31₽	<b>79.48</b> ₽	109.81~	33.93+	159.43
杏鮑菇₽	1472.780	495.27₽	<b>396</b> .71₽	392.16₽	411.33₽	156.60	554.140
台灣咖啡→	48.89+2	15.87+	259.30	111.48+	248.68+	45.49₽	121.78
國外咖啡∂	46.95₽	16.47+	269.730	116.90~	259.33₽	45.92₽	125.88
AVG	52 <b>1.61</b> ¢	166.940	221.88	159.45+	230.07~	56.60₽	ę.

## 公眾曝露劑量約束之實務作業與管制研究 Practical Implementation of the Dose Constraints in the management of Public Exposures to Ionizing Radiation

計畫編號:109-2623-E-000-000-NU 計畫主持人:蔡惠予 e-mail:huiyutsai@mx.nthu.edu.tw 執行單位:國立清華大學核子工程與科學研究所

#### 摘要

輻射和放射性物質有許多有益的應用,包括核能發 電到醫藥、工業和農業用途,面向十分多元,然而這些 應用對工作人員(occupation)、公眾(the public)和環境 (environments)可能造成的輻射風險必須加以評估,並在 必要時加以控制並使之符 合安全要求(safety requirements)。

國際原子能總署 (International Atomic Energy Council, IAEA)針對「輻射源的輻射防護和安全:國際基 本安全標準(Basic Safety Standards, BSS)」於 2014 年出 版編號 GSR Part 3 報告,該報告針對輻射防護(radiation protection) 提出應將環境考慮納入放射性釋放的評估和 管理。其後,為達成此目標,國際原子能總署與聯合國 環境署(United Nations Environment Program)合作擬定安 全導則(safety guide), 2018年出版三份相關報告, 目的 在於幫助各國專家和政府組織加強保護人 與環境,使 人與環境免受輻射的有害影響。實際上,這些導則就是 為實施「國際基本安全標準」中的要求,所提供的實際 執行方針。本計畫已有系統性地回顧國際基本安全標準 與三份安全導則,結合 ICRP 所建議的最適化原則 (optimization principle), 針對公眾曝露劑量約束(dose constraint)之實務作業與管制作法進行研析,其次針對各 國家落實之管理辦法與相關作為指引進行收集與彙整, 最後依據台灣實務需求研擬具體輻防措施與建議,作為 主管機關未來實施公眾劑量約束之參考。

**關鍵詞:**公眾曝露;劑量約束;最適化原則;輻射安全標 準;輻射防護

#### Abstract

Radiation and radioactive materials could be used in many beneficial applications. These applications are very diverse from nuclear power generation, medicine and pharmaceutical, to industrial and agricultural applications. However, the radiation risks from these applications to the occupational people, the public, and the environment should be evaluated and should keep them optimal. Hence, implement these applications shall meet safety requirements.

The International Atomic Energy Council (IAEA) published the GSR Part 3 report in 2014 on "Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: Basic Safety Standards (BSS)", which addressed radiation protection in human and environments and considerations in the assessment and management of radioactive releases. Subsequently, in order to achieve this goal, the IAEA and the United Nations Environment Program worked together to develop a safety guide, and then published three related

reports in 2018 to help national experts and government organizations strengthen radiation protection to keep people and environments safe from the harmful effects of radiation. In fact, these guidelines are the practical implementations of the requirements of the International Basic Safety Standards. We did systematical review of the international basic safety standards and three safety guidelines in this project and combined the optimization principle recommended by the ICRP together to analyze the practical implementations for the dose constraints of public exposure. We also collected and evaluated the management methods and relevant guidelines implemented by several other countries, and to develop specific radiation protection recommendations based on Taiwan's practical needs, as a reference for the future implementation of the public dose constraint in Taiwan.

**Keywords:** public exposures; dose constraints; optimization principle; radiation safety standards; radiation protection

#### I. 前言

輻射和放射性物質有許多有益的應用,包括核能發 電到醫藥、工業和農業用途,面向十分多元,然而這些 應用對工作人員(occupation)、公眾(the public)和環境 (environments)可能造成的輻射風險必須加以評估,並在 必要時加以控制並使之符合安全要求(safety requirements)。

國際原子能總署 (International Atomic Energy Council, IAEA)針對「輻射源的輻射防護和安全:國際基 本安全標準(Basic Safety Standards, BSS)」於 2014 年出 版編號 GSR Part 3 報告[1],該報告針對輻射防護 (radiation protection)提出應將環境狀況納入放射性物 質釋放的評估和管理,歐盟也將此概念放在<2013/59/ Euratom>所制定的基本安全標準中,以管理因游離輻射 曝露而引起的風險[2]。其後,為達成此目標,國際原子 能總署與聯合國環境署 (United Nations Environment Program)合作擬定安全導則(safety guide), 2018 年出版 三份相關報告[3-5],目的在於幫助各國專家和政府組織 加強保護人員與環境,使人員與環境受輻射的有害影響 可以降到最低。實際上,這些導則就是為實施「國際基 本安全標準」中的要求,所提供的實際執行方針。

國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection)所提出的輻射防護體系[6],其 中三個重要原則是正當化(justification)、最適化 (optimization)、與限制化(limitation),然而在計畫曝露 (planned exposure)情境下,針對輻射工作人員或是一般 公眾的輻射防護,可以從兩方面著手,一是管制人員的 劑量以符合劑量限度,一是管制或限制射源的狀況或條件,以使得人員的劑量符合劑量限度。為達成此輻射防護目標,衍生出相關的劑量管制用詞,包括劑量限度(dose limits)、劑量約束(dose constraint)與參考水平(reference level)。

對於最適化原則落實於法規層面或實際執行導則, 各國的做法各有不同且有很彈性的空間,因此本計畫的 研究目的即是以系統性的方式回顧國際基本安全標準 與三份安全導則,結合 ICRP 所建議的最適化原則 (optimization principle),研析公眾曝露劑量約束之實務 作業與管制作法,進而針對各國家落實之管理辦法與相 關作為指引進行收集與彙整,最後依據台灣實務需求研 擬具體輻防措施與建議,作為主管機關未來實施公眾劑 量約束之參考。

#### Ⅱ. 公眾曝露劑量約束之架構

#### 1. 輻射防護系統

根據 ICRP 103 號報告[6]所建議的輻射防護系統, 應就曝露情節、曝露類型、與輻射防護原則等三個面向, 來了解公眾曝露劑量約束所位在的層級。在輻射防護系 統中,曝露情境以曝露發生的狀況,可分為計畫曝露 (planned exposure)、緊急曝露圖(emergency exposure)、既 存曝露圖(existing exposure);曝露類型則以人員的身份 可區分為職業曝露圖(occupational exposure)、公眾曝露 圖(public exposure)、醫療曝露圖(medical exposure);輻射 防護原則所闡述的理念則分為正當化、最適化、限制化。 公眾曝露之劑量約束,則是屬於計畫曝露情節中,針對 公眾群體所要落實的最適化輻射防護原則。

若將曝露情境與曝露類型作為兩個維度來分析輻 射防護原則之適用性[1,6],則可用表一來說明。輻射防 護原則中的正當性適用於所有曝露情境與所有曝露類 型;最適化則可用劑量約束與參考水平來實踐之;限制 化則僅有計畫曝露情境下的職業曝露與公眾曝露才適 用。表一紅字表示劑量限度、藍字則與最適化相關(含 劑量約束與參考水平),表中的劑量值則是指劑量約束 的範圍,都是以有效劑量(effective dose, *E*)表示之,至於 公眾曝露的劑量約束,ICRP 與 IAEA 建議應小於1mSv。

曝露類型	職業曝露	公眾曝露	醫療曝露
曝露情境			
計畫曝露	劑量限度	劑量限度	(劑量限度不適用) 診斷參考水平。
	劑量約束(1-20 mSv)	劑量約束(<1 mSv)	(劑量約束 <sup>d</sup> ) (1-20 mSv)
緊急曝露	參考水平 a	參考水平	不適用
既存曝露	不適用b	参考水平	不適用

表一、劑量限度	、劑量約束	· 參考水平與曝露情境	、曝露類型之關係
---------	-------	-------------	----------

a 長期恢復行動(long-term recovery)應視為計畫曝露情節下的職業曝露

b因緊急事故後而變為已存在的輻射源,當進行長期補救行動(long-term remediation operations) 或在受影響區域長期受備清理而接受的曝露,應視為職業曝露

c指接受醫療檢查的病患

d 僅限於醫學研究中的安慰者、照顧者和自願者

輻射防護原則中的限制化與最適化都是以有效劑 量來規範,最大區別是劑量限度以人員為管制對象,最 適化則是以輻射源為管制對象。輻射防護原則應用於職 業曝露之管制/管理是考量個別工作人員之有效劑量,應 用於公眾曝露之管制/管理是考量個別工作人員之有效劑量,應 (representative person)之有效劑量。綜合以上所述,公眾 曝露的劑量約束僅適用於計畫曝露情境,並且對代表人 所造成的有效劑量應小於 1 mSv。

#### 2. 計畫曝露情境之公眾曝露劑量約束

計畫曝露情境可分為二種情形:(1) 正常運作與(2) 潛在曝露。正常運作下的計畫曝露情境有下列特性:

- 計畫曝露情境是由於輻射源的計畫操作、或輻射源於計畫導致曝露的計畫活動引起的曝露情況。
- 由於可以在開始有關活動之前就提供保護和安 全措施,因此可以從一開始就限制相關的曝露 及其發生的可能性
- 在計畫曝露情境,控制曝露的主要手段是通過
   設施、設備和操作程序的良好設計、與培訓來實
   現。
- 在計畫曝露情境下,某種程度的曝露預計可能 會發生。

潛在曝露的特性則為:如果預計曝露不必然發生, 但是可能是由於事故、可能發生但不確定發生的事件、 或一系列事件導致的,則稱為潛在曝露。故此,有三種 類型的潛在曝露:

- 潛在曝露發生範圍只影響少部分個體,只影響 個體的健康風險,且發生在計畫曝露情節下。範 例:照射時進入照射室內。
- 潛在曝露發生範圍影響個體數目多,影響個體 的健康風險與其他危害。範例:核反應堆發生重 大事故或放射性物質的惡意使用。
- 潛在曝露發生在未來。範例:深層處置庫中處理 固體廢物的情況下:有可能在將來發生具不確 定性。

關於輻射防護體系所論及的約束(constraints),分為 劑量約束與風險約束(risk constraints)都是與輻射源相關 的值。劑量約束是針對每個受控制的特定輻射源而設立 的,旨在劑量約束之目的,為確保所有受控輻射源在計 畫曝露情境的運作下之劑量總和,仍低於劑量限度(dose limit)。

計畫曝露情境下,對公眾曝露所設定的劑量約束, 需由與輻射源相關的劑量約束與參考水平的大面向去 思考會有哪些影響因子?當輻射源造成的劑量區間落 在小於 1mSv之下時,其曝露情境之特性有二:(1)此曝 露不會帶來個人的直接益處,但對社會是有益的;(2)計 畫曝露情境下,輻射源是受到控制的;輻射源造成的劑 量區間落在小於 1mSv之下的輻射防護要求為:輻射曝 露量的資訊是可獲得的,且需定期檢討曝露途徑及曝露 量。

#### 3.公眾的成員

根據 IAEA《安全標準叢書》第 GSG-10 號[4]對公 眾的定義,公眾(the public)的組成來源包含當地的居民、 遠離當地的居民、居民的後代。

公眾曝露的輻射防護管理是使用參考水平或劑量 約束,參考水平或劑量約束是管理人員的有效劑量,因 此當需要評估劑量時,則是針對公眾群體的代表人去評 估其有效劑量。至於代表人是指公眾群體的哪些人?通 常是指公眾群體中受到較高曝露的人群。代表人應具備 的特性則應由申請者(設施經營者)根據國家法規並與監 管機構達成協議,而代表人的習慣數據則應代表該設施 所在地區的典型人口習慣。

#### 4.公眾曝露的責任歸屬

公眾曝露的責任可歸因於政府、設施經營者。

政府(或監管機構)的責任為應建立或批准「劑量約 束,和「風險約束」,以用於優化公眾的保護和安全。在 確定或批准某一慣例中有關輻射源的限制時,政府(或監 管機構)應酌情考慮以下四點:

- (a) 與公眾曝露有關的輻射源與實踐的特性;
- (b) 相似輻射源之良好的運作實踐;
- (c) 在設計和規劃階段,估算的其他授權的實踐或 未來可能授權的實踐之劑量貢獻,以便在開始 輻射源運行後,對公眾的總劑量不應超過劑量 限值;
- (d) 相關利益團體的意見。

設施經營者對公眾曝露的責任,設施登記者應與供 應商合作,於輻射源使用的四個階段(設計、規劃、運行、 除役),考慮最適化原則,如以下要點:

- (a) 任何影響公眾曝露的條件可能發生的變化,例 如輻射源的特性和用途的變化、環境擴散條件 的變化、曝露途徑的變化、或用於確定代表人所 用參數值的變化;
- (b) 有良好的實踐在相似輻射源運作或相似實踐時;
- (c) 在輻射源的生命週期間,排放的放射性物質可 能在環境中增建和積累;
- (d) 劑量評估的不確定性,特別是如果輻射源和代 表人在空間或時間上分開考量,對劑量貢獻的 不確定性。

設施經營者對輻射源的責任為建立、實施和維護以 下項目:

- (a) 針對公眾曝露的輻射防護與安全,根據法規標 準的要求以制定政策,程序和組織安排;
- (b) 確保以下的措施:(1)最適化輻射防護與安全,(2) 根據授權,限制公眾從這些輻射源而來的曝露;
- (c) 確保此類輻射源的安全;
- (d) 提供適當和充足的資源(包括設施,設備和服 務),以保護公眾的輻射安全,並與曝露的可能 性和程度相稱;
- (e) 對具有與公眾輻射防護與安全有關的職能人員 進行適當培訓的方案,並根據需要進行定期再 培訓,以確保必要的能力水平;
- (f) 提供適當的監測設備, 監測方案和評估公眾曝 露的方法;
- (g) 監測方案有充分與足夠的記錄;
- (h) 根據與輻射源有關的輻射風險的性質和嚴重程 度製定應急計畫,應急程序和應急安排。

#### Ⅲ.公眾曝露的射源管理與劑量約束

計畫曝露情境下針對公眾曝露的管理,就是管理輻 射源所造成的劑量,其邏輯顯示於圖一,公眾曝露的劑 量限值是每年不可超過1 mSv,因此針對單一輻射源對 公眾群體代表人之劑量約束則可訂在 0.1~1 mSv 之間, 劑量約束值以下,則是可以實踐最適化的輻射防護原則。 當單一輻射源對代表人的有效劑量低於0.01 mSv/y 時, 則可對該射源解除管制。

當輻射源為多個來源時 (圖一左上小圖),則應確 認所有輻射源對代表人所造成的有效劑量總和不可超 過劑量限值(1mSv/y)。



圖一、計畫曝露情境對公眾曝露之輻射源管理

ICRP 針對劑量約束的建議值列表二,針對放射性 廢棄物處置與長半衰期放射性廢棄物處置,劑量約束建 議為低於 0.3 mSv/y; 針對長期曝露, 劑量約束應小於 1 mSv/y,但以不超過 0.3 mSv 最為適合;針對長半衰期 核種的長期曝露,當無法使用劑量評估方法推算劑量時, 可設劑量約束應小於 0.1 mSv/y, 劑量評估方法是用於推 定在任何可能的情況下之劑量組合,以確保劑量結果符 合規範。劑量約束值可由主關機關參考表二訂定之,亦 可可慮適合國家的狀況另訂約束值。

表二、公眾曝露之劑量約束

類別	ICRP 103	ICRP 60
一般情況 (general)	根據狀況來設計	-
放射性廢棄物處置 (radioactive waste disposal)	≤0.3 mSv/y	≤0.3 mSv/y
長半衰期放射性廢棄物處置 (long-lived radioactive waste disposal)	≤0.3 mSv/y	≤0.3 mSv/y
長期曝露 (prolonged exposure)	<~1 & ~0.3 mSv/ya	<~1 & ~0.3 mSv/ya
長半衰期核種之長期曝露 (prolonged component from long-lived nuclides)	≤0.1 mSv/y <sup>b</sup>	≤0.1 mSv/y <sup>b</sup>

nSv 最為適合。由主管機關訂定之 8當劑量評估方法不可用時,可設此值。劑量評估方法是用於推定在任何可能的情況下之劑量組合,以確保劑量結果

#### IV.設施和活動之預期性輻射環境影響評估

「環境影響評估」是指政府決策過程中的一種程 序,用於識別、描述、和評估預期的特定活動或設施對 環境的重要性並其影響與風險。至於輻射環境影響評估, 則有多種方法可以使用,包括不同的計算工具與輸入資 料。實際執行上,有以下的權責區分:

- 主管機關:提供導則(指南);
- 申請人:提議評估方法,確認其複雜程度與細 節,並符合主管機關的導則;
- 主管機關與申請人:共同決定合適的方法以滿 足其擬議的目的。

輻射環境影響評估的方法設計與計算精細度,會影 響到申請者所需準備的工作量,因此需在工作量與精細 程度之間取得平衡:(1) 針對事故發生的可能性小的狀 況,就用簡易的評估方法以評估劑量,可行的作法是由

專業學協會或廠商制定通用原則,用簡單且保守的方法 評估之。(2)針對需精細計算的狀況,則需要發展複雜的 評估方法,至於劑量模型的詳細程度和評估所用的數據, 就應該在政府決策過程或授權過程中逐漸發展。

關於預期輻射環境影響評估之方法是屬於預期性 的(prospective),需先建立模型與參數,因此需收集足夠 的細節來假設模型與選擇參數,並能夠被獨立驗證,其 後建立數學計算模型來進行劑量評估,需考慮以下幾項 要點:放射性核種在環境中的擴散、放射性核種通過環 境隔室的轉移、食物鏈中人類和生物群對放射性核種 吸收、體內曝露和體外曝露對人類造成的輻射劑量。最 後,比較計算結果與測量結果,驗證所選的計算模型是 否適用,此外也須在「實際可行」與「精細程度」之間 取得平衡。公眾曝露之預期輻射環境影響的評估流程請 參見圖二。



圖二、公眾曝露之預期輻射環境影響的流程

#### V. 歐洲 ALARA 網絡

為了達成最適化原則所倡導的合理抑低(as low as reasonable achievable, ALARA), 歐盟成立了歐洲 ALARA 網絡(European ALARA Network) [7](Fennell, 2011),旨在提倡 ALARA 文化於職業曝露與公眾曝露的 情境中,並促進不同輻射防護的部門落實 ALARA 原則。 歐洲 ALARA 網絡於 2019 年末出版書籍《輻射防護最 適化:合理抑低實用指南》[8],此書闡述最適化可透過 執行合理抑低的概念來達成,詳細列出計畫曝露情境、 既存曝露情境、緊急曝露情境等三種情境中有關「合理 抑低程序(ALARA process)」的元素(或構成要素),進而 說明如何在三種情境中實踐「合理抑低程序」。由於公眾 曝露的劑量約束僅聚焦於計畫曝露情境,因此本計畫針 對此部分深入鑽研。

ALARA 的流程共有五個階段,圖三顯示流程概念。 首先須對曝露情況進行了解與收集相關的影響參數,其 次是引用適當的劑量模型進行劑量評估,這個階段所評 估出的初始劑量,則放入下一階段的 ALARA 分析,分 析項目包括劑量與人事時地物之關係分析、確認有哪些 輻射防護措施可加入系統、評估這些輻射防護措施的效 力、選定決策標準後對防護措施進行排序、進行敏感性 分析,綜合 ALARA 分析結果,選定擬執行的方案。待 此方案執行後,需有後續追蹤並反饋經驗,這些資訊則 是下一次迭代放入 ALARA 分析系統中,此後便會在步 驟(3)~步驟(5)反覆迭代。



圖三、ALARA 的流程

ALARA 流程中的利益相關者,包括(a)主管機關, (b)被許可人或其他輻射雇主,(c)製造商、供應商、設計 者,(d)輻射防護專業人士,(e)專業協會和 ALARA 網絡, (f)受曝露的工作人員,(g)公眾。

圖三 ALARA 流程的步驟(2)初始劑量評估之細節 可參見圖四,此圖僅顯示通用原則,因此需要針對特定 情況進行設定與調整,例如評估包含輻射源(例如輻照 器、X 光機)的建築物外部的公眾曝露。劑量評估需要 對放射性核種在環境中的行為和可能受曝露公眾的習 慣設立假設條件,有兩種方法來達成此目的:方法一是 使用簡單的謹慎假設進行評估,以確保劑量不太可能被 低估(使用通用代表人和相關的通用行為或習慣數據); 方法二是使用有關站點周圍已知人群的知識和數據對 劑量進行實際估計或最佳估計(即特定站點的評估)。為 了適當地實施 ALARA 流程,其目標應該是方法二的假 設,即實際地估計公眾劑量,並避免過度保守的假設和 高估。



圖四、初始劑量評估過程

放射性物質的排放限值通常是在確保對「代表 人」(即公眾)的有效劑量不超過規定值,通常在0.1 至1mSv/y的範圍。由於評估每一個單獨個體(公眾)的 劑量是不實際可行的,因此有必要界定一個具有代表 性的個體來代表公眾。代表人的有效劑量即從設施排 放放射性物質的污染,得到最大曝露量的個體,其輻 射劑量代表該群體所接受的劑量。

圖三 ALARA 流程的步驟(3b)~(3d),有兩個時間切 入點,分別是在設計階段與在設計或運行階段,有不一 樣的考慮要點。在設計階段,如果對代表人所估計的劑 量超出劑量約束,則應採取措施降低劑量。主要應通過 對排放物採取行動來減少公眾曝露。在設計或運行階段, 如果代表人的估計劑量低於劑量約束,則仍應應用最適 化過程。

#### VI. 公眾劑量評估工具

公眾劑量評估工具最具代表性的 ResRad 家族程式 (ResRad family codes),考慮五種情境下的劑量評估:

- (a) 針對受放射性物質污染的土壤,用於評估位於其上 方的人類個體輻射曝露
- (b) 針對受放射性物質污染的土壤,用於評估位於與土 壤有一定距離的人人類個體輻射曝露
- (c) 針對受污染的建築物或建築物內有受污染家具或 設備,用於評估建築物中人類個體輻射曝露
- (d) 放射擴散裝置(radiological dispersal device, RDD) 事故後,用於評估事故早期、中期或晚期的人類輻 射曝露
- (e) 用於評估陸地或水生生態系統中非人類生物區系(包括動植物)的輻射曝露

ResRad 系列程式是在阿岡國家實驗室開發的,用於 分析由於殘留放射性物質的環境污染引起的潛在人類 和生物區系輻射曝露。程式提供九種主要曝露途徑,主 要可分為三大類:

- (a) 體外曝露;
- (b) 吸入途徑:懸浮粒子、氡氣;
- (c) 攝入途徑:土壤、水、植物、肉類、奶類、水產食物。

該程式使用曝露途徑分析來評估輻射曝露和相關 風險,並得出污染源介質中放射性核種濃度的清除標准 或授權限值。RESRAD系列程式已被全球 100 多個國家 的監管機構、風險評估群體和大學廣泛使用。

#### VII. 結論

本計畫有系統地整理出公眾曝露劑量約束管制邏 輯,公眾曝露劑量約束僅適用於計畫曝露情境,並且是 針對公眾中的代表人所評估的個人有效劑量,劑量約束 值可依輻射源或核種的特性定在 0.1 mSv/y 或 0.3 mSv/y。訂定公眾曝露劑量約束目的是在於啟動最適化 的行動,因此都應以預期性的評估來進行輻射環境影響 評估,當設施正常運作下,就以劑量約束來管理,若考 慮事故的發生可能性則以風險約束來管理。最適化行動 的參與者包括主管機關與申請者,包括在設施設計階段 與運行階段,應有相應的輻射防護措施與決策。

台灣的法規若朝向 ICRP 103 號報告[6]修訂,在公 眾曝露劑量約束的設計上,可參考澳洲的法規架構,而 最適化執行的方法則可參考歐洲 ALARA 網絡出版《輻 射防護最適化:合理抑低實用指南》[8]。

#### 參考文獻

- IAEA. (2014). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (No. General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3) (pp. 1 – 471).
- [2] EU. (2014). COUNCIL DIRECTIVE

2013/59/EURATOM, Brussels: European Union.

- [3] IAEA. (2018). Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities (No. General Safety Guide No. GSG-10) (pp. 1 - 104).
- [4] IAEA. (2018). Radiation Protection of the Public and the Environment (No. General Safety Guide No. GSG-8) (pp. 1 - 76).
- [5] IAEA. (2018). Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment (No. General Safety Guide No. GSG-9) (pp. 1 – 94).
- [6] ICRP. (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. (No. ICRP Publication 103). Annals of the ICRP (Vol. 37, pp. 1 - 332).
- [7] Fennell, S. (2011). Survey on the Use of Dose Constraints and Reference Levels Made in the Context of the European ALARA Network (pp. 1 – 14).
   Presented at the ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection.
- [8] European ALARA Network. (2019). Optimization of Radiation Protection: ALARA: a Practical Guidebook (pp. 1 - 174).

## 除役核電廠輻射劑量評估之廠址特定參數及其不確定性分析研究 Study of Site-Specific Parameters and Uncertainty Analysis of Radiation Dose Assessment for Decommissioning of Nuclear Power Plants

計畫編號:109-2623-E-007-008-NU 計畫主持人:趙得勝 e-mail:dschao@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人:梁正宏 計畫參與人員:林亞勳、余岳倫 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

#### 摘要

在核電廠釋出廠址之前,必須依循 MARSSIM 指引 進行廠址的土壤或建物的最終狀態調查。設施經營者必 須依據管制限值建立以濃度為基準的符合性驗證標準, 亦即導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Level, DCGL), 此為除役廠址特性調查過程中 最重要的一項評估指標。為此,建構可靠的輻射劑量評 估技術係為核電廠除役過程中非常重要的工作,除可用 來評估除役現場工作人員的劑量值之外,也可用於決定 最終廠址狀態調查時進行符合性驗證的調查基準。然而, 由於廠址輻射劑量評估牽涉數量龐大的參數,如何建立 廠址特定參數並依參數重要性給定保守數值,將是影響 輻射劑量評估結果正確性的重要關鍵。本研究已針對建 構除役廠址特定模型所需的廠址特定參數及其它高重 要性參數的篩選機制進行研析,並深入探討這些參數的 調查與量測方法。本研究利用 RESRAD 程式針對國際 除役案例進行 DCGL 的計算驗證,並據此比較確定性與 概率性 DCGL 的差異,由此確認採用確定性 DCGL 應 可具有足夠的保守度。此外,本研究也使用不確定性分 析的方法來進行參數篩選與取值標準之適切性分析,由 結果可知 PRCC 相關係數之標準對於 DCGL 的影響不 大,而分佈函數百分位取值標準則對於 DCGL 有顯著的 影響。

**關鍵詞**:核電廠除役、輻射劑量評估、廠址特定參數、 導出濃度指引水平、最終狀態偵檢

#### Abstract

Before the release of nuclear power plant site, the final status survey of soil and buildings at the decommissioning site should be conducted in accordance with the MARSSIM guidelines. The licensee must establish a concentrationbased criterion for compliance demonstration according to the regulatory dose limit, i.e. the derived concentration guideline level (DCGL), which is the most important evaluation indicator during the site characterization survey process. Therefore, it is important to establish reliable radiation dose assessment techniques in the decommissioning process of nuclear power plants. In addition to being used to assess the radiation dose of the personnel in decommissioning field, it can be also used to determine the criterion of the compliance demonstration in final site status survey. However, since the modeling of the site radiation dose assessment should involve a large number

of parameters, the selection of the site-specific parameters and the values of high priority parameters would be an important key to affect the correctness of the radiation dose assessment results. This study conducted the review and analysis of the site-specific parameters and other high priority parameters required for the construction of a decommissioning site-specific dose assessment model. A thorough analysis was also conducted to understand the investigation and measurement methods of these sitespecific parameters. This study also used the RESRAD program to demonstrate the DCGL calculation for the international decommissioning case. Based on this, we also compared the difference between the deterministic and probabilistic DCGLs and verified that the deterministic DCGL should be sufficiently conservative. In addition, we also used the method of uncertainty analysis to analyze the appropriateness of the criteria for the parameter selection and the parameter value assignment. As a result, we can understand that the criterion of PRCC correlation coefficient only has minor effect on DCGL, while the percentile of the distribution function for parameter value assignment has a significant impact on DCGL.

**Keywords:** Decommissioning of Nuclear Power Plants, Radiation Dose Assessment, Site-Specific Parameters, Derived Concentration Guideline Level (DCGL), Final Status Survey (FSS)

#### I. 前言

為能順利執行除役廠址執照終止的符合性驗證,除 役廠址必須依據特定廠址特性建構可靠的輻射劑量評 估模型,除可用於廠址的放射性特性評估之外,也可藉 此建立導出濃度指引水平 (Derived Concentration Guideline Level, DCGL),以做為評估除役廠址之土壤或 建物所殘留的放射性污染可符合管制限值的指標 [1]。 RESRAD-ONSITE 程式 (以下簡稱 RESRAD) 可用於評 估位於放射性污染土壤層上方之個體的輻射劑量及癌 症風險,除了可針對土壤中特定射源與曝露途徑進行輻 射劑量評估之外,也可直接藉由劑量限值與計算求得的 劑量/土壤濃度比值 (Dose/Soil-concentration Ratio, DSR) 來推算不同核種的 DCGL 濃度限值。然而, RESRAD 程 式計算牽涉極為複雜的輻射曝露模式及為數眾多的參 數,總計約有145個,包括:地質、氣候、水力等物理 型參數、與受體的行為及曝露情境相關的行為型參數、 以及與攝食及受體代謝特徵相關的代謝型參數等,而其 中某些參數又具有與廠址及核種相依的特性,更進一步

地增加參數選擇的複雜度。因此,為能建立正確的廠址 特定劑量評估模型,有必要深入瞭解 RESRAD 程式中 各計算模型的基本原理並熟悉其各項功能與建構程序、 各類劑量的評估方法、以及程式中各參數所代表的物理 意義,同時也必須建立適當的廠址特定參數及重要參數 的選擇策略,此將是除役廠址劑量評估與 DCGL 計算的 重要關鍵。

鑒於國內在過去並未曾實際執行過核電廠的除役 作業,值此國內的除役核電廠正進入廠址特性調查的初 始階段,在此停機過渡階段,除了設施經營者應完備及 精進其廠址特定劑量評估模型並建立可靠的 DCGL 轉 換技術之外,管制機關也應強化劑量評估技術的專業知 識與平行驗證能力,據此合理且嚴謹地審查經營者所提 出的評估結果。因此,本研究計畫係利用 RESRAD 程式 進行除役核電廠輻射劑量評估之關鍵參數篩選及其不 確定性分析研究,首先針對國際除役廠址劑量評估案例 進行分析,藉此建立劑量評估模型之廠址特定參數及其 它高重要性參數的篩選機制,並進一步研析這些參數的 的調查與量測方法。接著,本研究則以國際除役案例做 為分析標的,除針對參數選定程序中之參數篩選與取值 標準進行適切性分析之外,也將利用概率性分析方法進 行重要性參數的不確定性分析,藉此分析與比較確定性 DCGL 與概率性 DCGL 的計算結果。藉由本研究的執行, 除可精進除役核電廠 DCGL 的計算分析之外,相關的研 究成果也可做為國內在執行廠址劑量評估之管制與審 查作業時的參考。

#### Ⅱ. 研究方法

除役核電廠進行最終狀態調查時,必須建立正確的 DCGL 數值,用以進行廠址釋出前的符合性驗證。 RESRAD 程式是目前國際上最常被使用於計算 DCGL 數值的程式,計算時最重要的步驟為依據廠址特性制訂 廠址特定參數,同時也必須決定其它歸屬於高重要性等 級參數的保守數值。本研究計畫除了將深入地分析比較 國際重要除役核電廠所採用的廠址特定參數之外,也將 針對這些廠址特定參數的調查與量測方法進行研析。另 外,本研究也將針對參數選定程序中的敏感型參數篩選 與取值標準進行適切性分析,藉此獲知這些標準改變對 於 DCGL 的影響。最後,本研究也則將參考國際除役案 例,除進行確定性 DCGL 的計算驗證之外,同時也將採 用 RESRAD 程式的概率性輻射劑量風險分析模式來進 行確定性 DCGL 與概率性 DCGL 的分析比較。本研究 計畫規劃的工作項目及研究流程如圖 2.1 所示。



#### III. 結果與討論

#### 3.1 參數選定程序

圖 4.1 所示為廣泛被採用的參數選定程序,其係參 考自 S.W. Taylor 等人於 2003 年所發表的論文 [2]。過 去許多國際上的除役電廠在進行除役廠址 DCGL 計算 時,也都是採用此參數選定程序來決定其參數值,如: Yankee Nuclear Plant Station . Maine Yankee Atomic Power Company、Haddam Neck Plant 等 [3-5]。如圖所示,在 決定模型參數數值之前,首先可參照 NUREG/CR-6697 報告將參數依據其屬性區分為行為型 (Behavioral Parameter)、代謝型 (Metabolic Parameter)、以及物理型 (Physical Parameter (P)) 等三類; 物理型參數與廠址相依 且會隨著廠址而改變,而行為型與代謝型參數通常是為 了因應輻射劑量評估的需求,係針對一般個體所設定的 平均值。因此,物理型參數相對於行為型與代謝型參數 具有較高的重要性。為了判定各參數的重要性,接著即 可依據參數相關性 (relevance)、數值可取得性 (data availability)、參數類型 (parameter type)、劑量影響 (variability of radiation dose) 等四個量化評估標準進行 參數的量化評分,並依其分數將參數依其重要性分為等 級1、等級2、等級3三個等級 [6]。對於行為型與代謝 型參數,其值係與所定義的平均個體及曝露情境相關, 且因不屬於特定廠址相關的參數,一般可採用足以代表 關鍵受曝群體的平均數值來給定其數值;同樣地,當物 理型參數被判定歸屬於等級3時,亦表示其係屬於不會 顯著影響劑量值的參數。因此,針對行為型與代謝型參 數以及等級3的物理型參數,在決定其參數值時可直接 引用 NUREG/CR-5512 Vol. 3 中所提供的参考數值或採 用 RESRAD 程式內建的預設值即可 [7]。另一方面,為 了建構廠址特定的劑量評估模型,計算前必須先利用調 查或量测方法建立與該特定廠址特性相關的物理型參 數,當這些參數已經存在廠址特定的量測數值時,則應 優先考慮直接採用這些量測數值。除此之外,針對無法 取得廠址特定數值之等級1與等級2的物理型參數,則 必須考慮採用 RESRAD 程式中的概率性分析功能來進 行不確定分析,藉此判定該類參數的敏感性,並依分析 所得的相關係數數值與分佈函數百分位標準來適當地 給定保守數值。當等級1與等級2參數完成概率性分析 之後,即可依據概率性分析結果所得之 PRCC 相關係數 的絕對值 (>0.25 或 < 0.25) 來判定參數的敏感程度。 若屬敏感型參數 ( PRCC >0.25),則可再依其正或 負相關係特性來決定參數取值時的分佈函數百分位;正 相關時 (PRCC > 0.25) 取 75%百分位的參數值, 負相 關時 (PRCC < -0.25) 則採 25%百分位的參數值。

上述的PRCC相關係數之參數篩選標準與分佈函數 百分位之參數取值標準雖為國際上所慣用的標準,然這 些標準對於確定性 DCGL 分析結果的影響目前仍不可 知,亦即其適切性仍有進一步研究的價值。同樣地,採 用確定性或概率性分析所得的 DCGL 以及使用 Peak of the Mean 或 Mean of the Peak 劑量值所得的 DCGL 差異 也都未有深入的保守性分析或已知的明確趨勢,因此本 研究中也會針對上述的取值標準適用性與 DCGL 計算 方法進行比較與分析。



圖 3.1、RESRAD 程式參數選定程序

#### 3.2 廠址特定參數量測方法

如圖 3.1 所示,進行 RESRAD 劑量評估計算時,當 除役核電廠已依據廠址的特性建立相對應的參數值時, 第一優先應考慮直接採用這些量測或分析數值,而不需 要再進行概率性劑量分析,而這些參數有些必須直接在 現場進行量測,有些則必須根據過去的氣象、水文及地 質資訊進行分析。為了瞭解進行 DCGL 計算時應建立的 廠址特定參數,本研究也針對國際上除役核電廠進行 RESRAD 劑量評估時所使用的輸入參數進行分析,並從 中篩選各電廠所建立的廠址特定參數,表 3.1 即歸類列 示美國 Yankee Nuclear Plant Station (YNPS) 核電廠在進 行 RESRAD 計算時所採用的廠址特定參數,其餘 La Crosse Boiling Water Reactor (LACBWR) . Zion Nuclear Power Station (ZNPS) . Maine Yankee Atomic Power Company (MYAPC) 也整理於本研究計畫的期末報告之 中 [3, 4, 8, 9]。由表列資訊可知,大部份的廠址特定參 數類別為物理型參數,而參數屬性大多以氣象及水文地 質參數為主,且這些廠址特定參數的等級錯落於等級1 ~3 之間;此意謂廠址特定參數之目的為用於建構專屬 於廠址特定的劑量評估模型,並非僅限定於高重要性的 等級1參數。

表 3.1、Yankee Nuclear Plant Station 核電廠所採用之廠 址特定參數

	參數	單位	參數屬性	參數類別	參數等級
1	Area of Contaminated Zone	m <sup>2</sup>	射源特性參數	物理型	2
2	Contaminated Zone Erosion Rate	m/yr	水文地質參數	物理型 (或行為型)	2
3	Humidity in Air	g/m <sup>3</sup>	氣象參數	物理型	3
4	Average Annual Wind Speed	m/s	氣象參數	物理型	2
5	Precipitation	m/yr	氣象參數	物理型	2
6	Irrigation Rate	m/yr	氣象參數	行為型	3
7	Evapotranspiration Coefficient	-	氣象參數	物理型	2
8	Runoff Coefficient	-	氣象參數	物理型	2
9	Contaminated Zone Total Porosity	-	水文地質參數	物理型	2
10	Unsaturated Zone Total Porosity	-	水文地質參數	物理型	2
11	Unsaturated Zone Effective Porosity	-	水文地質參數	物理型	2
12	Saturated Zone Total Porosity	-	水文地質參數	物理型	1
13	Saturated Zone Effective Porosity	-	水文地質參數	物理型	1
14	Saturated Zone Hydraulic Gradient	-	水文地質參數	物理型	2
15	Well Pumping Rate	m <sup>3</sup> /yr	人類攝入參數	行為型 (或物理型)	2
16	Watershed for Nearby Stream or Pond	m <sup>2</sup>	水文地質參數	物理型	3

由於進行廠址特定參數的量測分析有賴於高度專 業的量測技術,需耗費相當高的成本及人力資源的投入, 上述歸納的國際案例所採用之廠址特定參數或許可做 為未來國內除役核電廠進行劑量評估模型建立時的參 考。此外,為了瞭解建構這些廠址特定參數的方法,本 研究也由各除役電廠的除役計畫 [3,4,8,9] 或 RESRAD Data Collection Handbook [6] 進行研析,並歸 納表列中各廠址特定參數的物理意義與量測方法於本 研究計畫的期末報告之中。

#### 3.3 DCGL 計算分析

#### (1) 國際除役案例之 DCGL 計算驗證

為了精進對於除役核電廠 DCGL 之計算能力,本研 究實際使用 RESRAD 程式進行國際除役廠址之土壤 DCGL 基準值的計算驗證,計算時所採用的參數值係引 用來自於 Yankee Nuclear Plant Station 核電廠執照終止 計畫中所提供的數值 [3],依序於 RESRAD 程式設定視 窗中輸入土壤濃度、分配係數、計算時間、污染區、覆 蓋層與污染區水力參數、飽和區水力參數、未飽和區水 力參數、行為參數、攝食參數、污染食品的儲存時間、 劑量轉換因子、植物、肉類、牛奶轉移因數、水產食品 的生物累積因數等參數值。完成計算之後,則依據計算 求得的平均劑量峰值與核種濃度的比值 (亦即 DSR 劑 量/土壤濃度比值) 來決定 DCGL。RESRAD 程式中有許 多參數均與核種相依,必須分別依據這些核種及其子核 種給定特定的參數值,如:分配係數、吸入與攝食劑量 轉換因子等。根據 Yankee Nuclear Plant Station 核電廠所 提供的輸入參數,本研究即利用 RESRAD-ONSITE 7.2 版的程式進行土壤 DCGL 計算,計算時所採用的體外輻 射劑量轉換因子資料庫來源為 FGR-12 報告,而體內輻 射劑量轉換因子則為 FGR-11。表 3.2 所示即為 Yankee Nuclear Plant Station 核電廠與本研究針對各關鍵核種計 算所得之 DSR 劑量/土壤濃度比值與 DCGL 比較,結果 顯示兩者僅具有相當微小的誤差,推估其誤差來源可能 為程式版本及部分核種之劑量轉換因子的差異所致。

表 3.2、Yankee Nuclear Plant Station 核電廠之土壤 DSR 與 DCGL 計算驗證結果比較

	YNPS核電廠 (RESRAD 6.21)		本研究 (RESRAD 7.2)		
	DSR (mrem/y per pCi/g)	DCGL (pCi/g)	DSR (mrem/y per pCi/g)	DCGL (pCi/g)	DCGL計算誤差(%)
H-3	6.79E-02	3.7E+02	7.22E-02	3.5E+02	-5.40
C-14	4.52E+00	5.5E+00	4.06E+00	6.2E+00	12.73
Fe-55	8.57E-04	2.9E+04	9.11E-04	2.7E+04	-5.34
Co-60	6.21E+00	4.0E+00	6.48E+00	3.9E+00	-2.5
Ni-63	3.07E-02	8.1E+02	3.45E-02	7.3E+02	-9.88
Sr-90	1.45E+01	1.7E+00	1.73E+01	1.4E+00	-17.65
Nb-94	3.46E+00	7.2E+00	3.46E+00	7.2E+00	0.00
Tc-99	1.76E+00	1.4E+01	1.97E+00	1.3E+01	-7.14
Ag-108m	3.44E+00	7.3E+00	3.45E+00	7.3E+00	0.00
Sb-125	7.82E-01	3.2E+01	7.79E-01	3.2E+01	0.00
Cs-134	5.02E+00	5.0E+00	5.31E+00	4.7E+00	-6.00
Cs-137	2.92E+00	8.6E+00	3.14E+00	8.0E+00	-7.5
Eu-152	2.43E+00	1.0E+01	2.45E+00	1.0E+01	0.00
Eu-154	2.63E+00	9.5E+00	2.65E+00	9.4E+00	-1.05
Eu-155	6.29E-02	4.0E+02	6.27E-02	4.0E+02	0.00
Pu-238	7.48E-01	3.3E+01	8.43E-01	3.0E+01	-9.09
Pu-239	8.30E-01	3.0E+01	9.36E-01	2.7E+01	-10.00
Pu-241	2.54E-02	9.8E+02	2.96E-02	8.5E+02	-13.26
Am-241	8.59E-01	2.9E+01	9.72E-01	2.6E+01	-10.34
Cm-243	7.85E-01	3.2E+01	8.57E-01	2.9E+01	-9.38

#### (2) 確定性與概率性 DCGL 之分析比較

前述之 DCGL 計算結果係藉由輸入所有參數的確 定數值之後計算求得,而採用此方法的參數值,屬非敏 感型參數可採參考值或程式預設值;屬廠址特定參數應 使用量測值或評估值;如經不確定性分析之後判定屬敏 感型參數,則應由其參數分佈函數取其保守值。確定性 DCGL 的計算結果每一核種只會求得確定的單一數值, 計算結果相對而言可能較易受到參數不確定性而影響 其保守度。另一方面,在概率性 DCGL 計算方面,對於 敏感型參數則會透過取樣的方式來降低其不確定性可 能造成的影響,藉由多次重覆取樣的統計分析結果,取 其 Peak of the Mean 或 Mean of the Peak 劑量值,並進行 其對應的 DCGL 計算。針對 Yankee Nuclear Plant Station 核電廠之案例,本研究也利用確定性與概率性分析進行 DCGL 的數值比較,如表 3.3 所示。其中,概率性分析 係先經由不確定性分析確認敏感型參數,針對各敏感型 參數並依 NUREG/CR-6697 來指定其分佈函數及對應的 分佈函數參數,並由概率性分析計算來分別求取其 Peak of the Mean 及 Mean of the Peak 劑量,最後即可轉換求 得對應的 DCGL。如表所示,除 C-14 核種之外,其餘核 種之確定性 DCGL 都較概率性分析之 Peak of the Mean 及 Mean of the Peak 的 DCGL 結果還低,亦即對於大部 分核種採用確定性分析應可獲得具較高保守度的 DCGL。 另一方面,概率性分析結果也顯示利用 Peak of the Mean 及 Mean of the Peak 劑量所求得的 DCGL 極為接近,此 係由於這些核種的尖峰劑量大多發生在時間起始點,致 使兩者的差異並不顯著。

表 3.3、本研究針對 Yankee Nuclear Plant Station 核電廠 之確定性與概率性 DCGL 比較

14.255	Deterministic DCGL	IGL Probabilistic DCGL			
校悝	DCGL (pCi/g)	DCGL by Peak of the Mean (pCi/g)	DCGL by Mean of the Peak (pCi/g)		
H-3	3.462E+02	6.32E+02	6.31E+02		
C-14	6.160E+00	8.48E+00	4.66E+00		
Fe-55	2.745E+04	3.55E+04	3.53E+04		
Co-60	3.860E+00	4.78E+00	4.78E+00		
Ni-63	7.255E+02	1.32E+03	1.32E+03		
Sr-90	1.443E+00	2.24E+00	2.23E+00		
Nb-94	7.217E+00	8.56E+00	8.56E+00		
Tc-99	1.270E+01	2.43E+01	2.43E+01		
Ag-108m	7.254E+00	8.54E+00	8.53E+00		
Sb-125	3.211E+01	3.80E+01	3.81E+01		
Cs-134	4.712E+00	6.51E+00	6.51E+00		
Cs-137	7.966E+00	1.17E+01	1.17E+01		
Eu-152	1.020E+01	1.21E+01	1.21E+01		
Eu-154	9.436E+00	1.12E+01	1.12E+01		
Eu-155	3.987E+02	4.69E+02	4.69E+02		
Pu-238	2.967E+01	4.61E+01	4.60E+01		
Pu-239	2.672E+01	4.17E+01	4.12E+01		
Pu-241	8.461E+02	1.34E+03	1.03E+03		
Am-241	2.573E+01	4.03E+01	3.65E+01		
Cm-243	2.916E+01	4.22E+01	4.22E+01		

#### 3.4 參數篩選與取值標準之適切性分析

#### (1) DCGL 隨 PRCC 相關係數之變異性分析

PRCC 相關係數的標準係為用於判斷參數敏感性的 重要依據,為了探究其變異性對於 DCGL 計算的影響, 本研究則在進行參數不確定性分析時調整此參數,以確 認 PRCC 之大小對於所篩選之敏感型參數數量及其 DCGL 之影響。表 3.4 所示為各核種所對應敏感型參數 數量隨 PRCC 改變之情形, PRCC 之設定值愈小, 會有 較多的參數被列入敏感型參數;反之, PRCC 之設定值 愈大,則敏感型參數之數量會變少。因此,PRCC 愈小 代表結果會愈趨保守,並且可能改變最後的 DCGL 計算 結果。表 3.5 所示則為依據不同 PRCC 所篩選之敏感型 參數,並以75% (PRCC>0)或25% (PRCC<0)決定參 數值代入計算所求得的 DCGL,由結果顯示部分核種的 DCGL 確實隨 PRCC 變大而增加,然其變異幅度並不大。 因此,目前國際上所採用的 PRCC=0.25 的標準可適當地 匡列出敏感型參數,且該標準的改變對於最終所決定的 DCGL 影響亦不顯著,應為可接受的做法。

#### (2) DCGL 隨分佈函數取值標準之變異性分析

除了 PRCC 之外,當敏感型參數確定之後,接下來 即須依據各參數的 PRCC 的結果來決定分佈函數的取值 標準。目前國際上常被採用的做法為當 PRCC 為正時, 取該參數分佈函數 75%所對應的數值;當 PRCC 為負時, 則取分佈函數 25%所對應的數值。因此,參數分佈函數 的取值標準將會影響 DCGL 的計算結果,亦有必要針對 該標準的變異性影響進行分析。表 3.6 所示即為 DCGL 隨參數取值標準的計算結果,此計算係依據 PRCC = 0.25 所篩選的參數進行取值標準調整,對於 PRCC > 0 的參 數取值百分位設定為 60、70、75、80、90,而 PRCC < 0 的參數則設為 40、30、25、20、10。由計算結果可知, DCGL 確實會隨取值標準改變而出現顯著的變動,當取 值標準愈接近 100%或 0%時,各核種對應的 DCGL 會明 顯變小,亦即可產生更為保守的 DCGL 標準;反之,當 取值標準愈遠離 100%或 0%,則其結果將會愈不保守。 因此,參數取值標準為 DCGL 計算的關鍵影響因子,雖 75%或 25%已為國際上慣用且可接受的標準,然如除役 廠址在進行特性調查時出現嚴重的瑕疵或該廠址存在 高度不確定性的特性時,管制機關或可依此提高參數取 值標準,藉此強化除役廠址特性調查的管制。

表 3.4、敏感型參數數量隨 PRCC 相關係數之變異性分 析結果

核種	YNPS核電廠	本研究				
	PRCC =0.25	PRCC =0.15	PRCC =0.20	PRCC =0.25	PRCC =0.30	PRCC =0.35
H-3	3	4	4	4	4	4
C-14	3	5	3	2	1	0
Fe-55	2	3	2	2	2	2
Co-60	3	4	3	3	3	3
Ni-63	3	3	3	3	3	3
Sr-90	2	5	3	2	2	2
Nb-94	2	2	2	2	1	1
Tc-99	3	5	3	3	3	3
Ag-108m	1	2	2	1	1	1
Sb-125	2	3	2	2	1	1
Cs-134	5	5	5	4	3	2
Cs-137	5	5	5	5	4	4
Eu-152	1	2	2	2	1	1
Eu-154	1	2	2	1	1	1
Eu-155	2	3	3	1	1	1
Pu-238	2	3	2	2	2	2
Pu-239	2	2	2	2	2	2
Pu-241	3	3	3	3	3	2
Am-241	2	2	2	2	2	2
Cm-243	3	3	3	3	3	3
0111-243	5	5	5	5	5	5

表 3.5、DCGL 隨 PRCC 相關係數之變異性分析結果

核種	DCGL as function of PRCC (pCi/g)						
	PRCC =0.15	PRCC =0.20	PRCC =0.25	PRCC =0.30	PRCC =0.35		
H-3	3.462E+02	3.462E+02	3.462E+02	3.462E+02	3.462E+02		
C-14	6.226E+00	6.160E+00	6.160E+00	6.160E+00	8.901E+00		
Fe-55	2.745E+04	2.745E+04	2.745E+04	2.745E+04	2.745E+04		
Co-60	3.860E+00	3.860E+00	3.860E+00	3.860E+00	3.860E+00		
Ni-63	7.255E+02	7.255E+02	7.255E+02	7.255E+02	7.255E+02		
Sr-90	1.315E+00	1.352E+00	1.443E+00	1.443E+00	1.443E+00		
Nb-94	7.217E+00	7.217E+00	7.217E+00	7.217E+00	7.217E+00		
Tc-99	1.198E+01	1.270E+01	1.270E+01	1.270E+01	1.270E+01		
Ag-108m	7.253E+00	7.253E+00	7.254E+00	7.254E+00	7.254E+00		
Sb-125	3.194E+01	3.211E+01	3.211E+01	3.211E+01	3.211E+01		
Cs-134	4.712E+00	4.712E+00	4.712E+00	5.028E+00	5.028E+00		
Cs-137	7.966E+00	7.966E+00	7.966E+00	8.216E+00	8.216E+00		
Eu-152	1.020E+01	1.020E+01	1.020E+01	1.020E+01	1.020E+01		
Eu-154	9.436E+00	9.436E+00	9.436E+00	9.436E+00	9.436E+00		
Eu-155	3.959E+02	3.959E+02	3.987E+02	3.987E+02	3.987E+02		
Pu-238	2.967E+01	2.967E+01	2.967E+01	2.967E+01	2.967E+01		
Pu-239	2.672E+01	2.672E+01	2.672E+01	2.672E+01	2.672E+01		
Pu-241	8.461E+02	8.461E+02	8.461E+02	8.461E+02	8.461E+02		
Am-241	2.573E+01	2.573E+01	2.573E+01	2.573E+01	2.573E+01		
Cm-243	2.916E+01	2.916E+01	2.916E+01	2.916E+01	2.916E+01		

表 3.6、DCGL 隨參數分佈函數取值標準之變異性分析 結果

核種	DCGL as a function of Percentile Value (pCi/g)					
	60% or 40%	70% or 30%	75% or 25%	80% or 20%	90% or 10%	
H-3	4.253E+02	3.708E+02	3.462E+02	3.247E+02	2.854E+02	
C-14	7.392E+00	6.544E+00	6.160E+00	5.831E+00	5.244E+00	
Fe-55	3.397E+04	2.963E+04	2.745E+04	2.512E+04	1.967E+04	
Co-60	4.742E+00	4.172E+00	3.860E+00	3.528E+00	2.709E+00	
Ni-63	1.275E+03	8.911E+02	7.255E+02	5.749E+02	3.108E+02	
Sr-90	2.177E+00	1.675E+00	1.443E+00	1.225E+00	7.979E-01	
Nb-94	8.441E+00	7.652E+00	7.217E+00	6.761E+00	5.670E+00	
Tc-99	1.879E+01	1.459E+01	1.270E+01	1.094E+01	7.362E+00	
Ag-108m	8.483E+00	7.692E+00	7.254E+00	6.797E+00	5.701E+00	
Sb-125	3.754E+01	3.404E+01	3.211E+01	3.009E+01	2.525E+01	
Cs-134	6.251E+00	5.243E+00	4.712E+00	4.162E+00	2.920E+00	
	1.138E+01	9.106E+00	7.966E+00	6.819E+00	4.404E+00	
Eu-152	1.193E+01	1.082E+01	1.020E+01	9.554E+00	8.010E+00	
Eu-154	1.104E+01	1.001E+01	9.436E+00	8.840E+00	7.411E+00	
	4.659E+02	4.226E+02	3.987E+02	3.737E+02	3.136E+02	
Pu-238	4.168E+01	3.358E+01	2.967E+01	2.588E+01	1.791E+01	
Pu-239	3.753E+01	3.023E+01	2.672E+01	2.330E+01	1.612E+01	
Pu-241	1.183E+03	9.560E+02	8.461E+02	7.389E+02	5.127E+02	
Am-241	3.599E+01	2.908E+01	2.573E+01	2.248E+01	1.560E+01	
Cm-243	3 916E+01	3 249E+01	2 916E+01	2 584E+01	1.859E+01	
#### IV. 結論與建議

建立正確的劑量評估模型對於除役核電廠是至關 重要的一項工作,可藉此建立以濃度為基準的符合性驗 證標準或導出濃度指引水平 (DCGL),並確保除役核電 廠廠址在釋出之前可符合管制機關所制定以劑量為單 位的管制限值。本研究計畫係聚焦於建構除役廠址特定 RESRAD 劑量評估模型所需的廠址特定參數及其它高 重要性參數的篩選機制,主要工作重點如下:(1) 針對國 際上目前被多數除役廠址使用的參數選定程序進行研 析,藉此瞭解參數篩選方法及敏感型參數取值標準;(2) 蒐集並研析國際除役案例之廠址劑量評估模型,並彙整 各除役廠址所建立的廠址特定參數群集;(3)研析各類 廠址特定參數之物理意義及調查與量測方法;(4)使用 RESRAD 程式進行國際除役案例之 DCGL 計算驗證,藉 此精進 DCGL 之計算;(5) 進行參數篩選與取值標準之 適切性分析,藉此瞭解 PRCC 相關係數與參數分佈函數 百分位取值標準變異性對於 DCGL 的影響。藉由本研究 之成果,可歸納以下幾點結論與建議供國內未來進行劑 量評估模型建立與除役管制時參考:

- (1)經由分析得知,國際除役廠址所建立的廠址特定參數 數量與種類不一,大多數的廠址特定參數屬物理型參 數,且以水文與地質類型的參數居多,然廠址特定參 數涵蓋等級1~3各級別的參數。因此,廠址特定參數 並不限定於等級1的重要參數,而應以建構可適當描 繪廠址特性的參數為優先。此外,廠址特定參數的量 測方法多元,建議應廣泛蒐集相關的資料與技術文件, 並隨時掌握國際除役廠址的相關做法。
- (2) RESRAD 程式為建立 DCGL 標準的有用工具,除可 計算確定性 DCGL 之外,也可進行概率性 DCGL 的 計算。此外,RESRAD 程式的不確定性或概率性分析 方法也可有助於篩選劑量評估模型的敏感型參數,可 適當地提高 DCGL 計算的保守度。此外,針對高敏 感且不易量測或量測變異度高的敏感型參數,直接採 用量測方法建立其廠址特定參數有時未必是最為適 當的做法,或可藉由不確定分析並以較嚴謹的取值標 準來定義其保守數值。
- (3) 由參數篩選與取值標準的不確定性分析結果可知, PRCC 相關係數的變異性對於 DCGL 的影響較小, 而參數分佈函數百分位的取值標準對於 DCGL 則有 顯著的影響。目前國際上普遍採行的標準 (PRCC = 0.25、75%或 25%百分位) 仍屬保守且可接受的做法, 國內未來應可繼續採用。然而,在特殊的情境或條件 之下,如必須施加更為嚴謹的管制手段時,調整參數 分佈函數百分位的取值標準應可取得更為保守的 DCGL 標準。

# 參考文獻

- "Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM) (Revision 1)", NUREG-1575 Rev. 1, EPA 402-R-97-016 Rev. 1, DOE/EH-0624 Rev. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2002).
- [2] S.W. Taylor, L.C. Smith, R.K. Carr, A. Carson, E. Darois, "Developing Site-Specific Derived Concentration Guideline Levels for Multiple Media at

the Connecticut Yankee Haddam Neck Plant", WM' 03 Conference, Tucson, AZ, February 23-27, (2003).

- [3] "Yankee Nuclear Plant Station License Termination Plan", Yankee Atomic Power Company, Rowe, Massachusetts (2004).
- [4] "Maine Yankee Plant License Termination Plan", Maine Yankee Atomic Power Company, Vermont, Massachusetts (2005).
- [5] "Haddam Neck Plant License Termination Plan", Connecticut Yankee Atomic Power Company, East Hampton, CT (2002).
- [6] C. Yu, D. LePoire, E. Gnanapragasam, J. Amish, S. Kamboj, B.M. Biwer, J.-J. Cheng, A. Zielen, S.Y. Chen, "Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes", Argonne National Laboratory, NUREG/CR-6697, ANL/EAD/TM-98, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (2000).
- [7] "Residual Radioactive Contamination From Decommissioning: Parameter Analysis", NUREG/CR-5512, Vol. 3, SAND99-2148, Sandia National Laboratories, U.S. Nuclear Regulatory Commission, August (1999).
- [8] "La Crosse Boiling Water Reactor License Termination Plan", LaCrosse Solutions, Genoa, Wisconsin (2016).
- [9] "Zion Station License Termination Plan", Zion Solutions, Zion, IL (2018)

#### 建築材料輻射劑量調查及輻防管理研究

# Radiation dose investigation and radiation protection management research of building materials

計畫編號:109-2623-E-007-009-NU 計畫主持人:許芳裕 e-mail:fyhsu@mx.nthu.edu.tw 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

#### 摘要

本計畫藉由蒐集 IAEA 等國際組織建議及各國之管 制作法與具體規定,研析國際組織及各國對建材輻射安 全之現行管制作法,以了解我國天然放射性物質管理辦 法與國際組織建議做法之異同,可作為後續國內法規精 進之參考。此外,亦對國內石材等建材進行劑量調查, 掌握國內建材輻射之影響程度,並提出業者自主管理作 法規範建議,作為後續主管機關對業者自主管理作為之 建議及執行狀況評核之參考依據。

關鍵詞:天然放射性物質、天然石材、建材、輻射安全。

#### Abstract

This project analyzed the current regulations of radiation safety on the production and using of building materials by international organizations and countries through the collection of recommendations from international organizations, such as IAEA, and the regulations and specific management regulations of various countries. Also to understand the management measures regarding building materials that recommended/ implemented by international organizations and in Taiwan. Similarities and differences between domestic and international management measures will be summarized and proposed as a reference for follow-up regulations in Taiwan by this work. In addition, this project also conducted dose surveys on domestic stone and other building materials, grasp the degree of radiation influence of domestic building materials, and propose the recommendations of selfmanagement practices, as a follow-up authority's advice on the self-management measures of production, processing and sales of building materials, as well as the reference basis for its assessment of implementation status.

**Keywords:** NORM, nature stone, building material, radiation safety.

## I. 前言

天然輻射原本就存在於人類生活的環境中,其中的 地表輻射來源包括鈾系列、針系列及鉀 40 等天然放射 性核種,也普遍存在於一般的土壤及岩石中。在台灣, 常以天然的石材與石礦製品作為建材,這些建材也自然 含有鈾系列、針系列及鉀 40 等天然放射性核種,這也是 背景輻射的來源之一。不同產地的石材與石礦製品,可 能含有的天然放射性核種的活度濃度分布也不盡相同。 石材與石礦製品雖然含有天然的放射性物質也會產生 輻射,但只要符合天然放射性物質管理辦法規定,即無 影響公眾安全之虞。 近年國際間對天然放射性物質(NORM)應用對公 眾造成潛在輻射曝露問題日益重視,國際輻射防護組織 就相關議題及影響已進行調查研究,並提出排除/豁免管 制基準及管理建議。為了解IAEA等國際組織對建材輻 射安全之現行管制作法,本計畫蒐集國際組織建議及各 國之管制作法與具體規定,了解我國天然放射性物質管 理辦法與國際組織建議做法之異同,作為後續法規精進 之參考;此外,亦對國內石材等建材進行劑量調查,以 掌握國內建材輻射之影響程度與業者自主管理狀況。

#### Ⅱ. 主要內容

本計畫藉由蒐集 IAEA 等國際組織建議及各國之管 制作法與具體規定,研析國際組織及各國對建材輻射安 全之現行管制作法,以了解我國天然放射性物質管理辦 法與國際組織建議做法之異同,作為後續國內法規精進 之參考。亦將對國內石材等建材進行劑量調查,掌握國 內建材輻射之影響程度,並提出業者自主管理作法規範 建議,作為後續主管機關對業者自主管理作為之建議及 執行狀況評核之參考依據。工作項目包括:

- 針對國內石材與石礦製品等建材進行訪查與評估 其造成之輻射劑量影響。本計畫針對石材與石礦製 品等建材可能造成之輻射劑量影響評估方法,透過 主管機關(行政院原子能委員會)協助,與相關石材 公會與石礦製品公會合作,分為石材樣品輻射劑量 率現場訪查實測、石材樣品放射性核種檢測分析及 建材使用情境劑量評估等三部分。
- 2. 蒐集、研析國際組織及各國對建材之管制建議或排除/豁免管制標準。國際原子能總署(IAEA)於 2015年提出 SSG-32報告,對室內建材輻射安全防護及及管制作法提出建議。本計畫蒐集相關 IAEA 等國際組織及各國對建材之管制建議或排除/豁免管制標準,以及相關劑量評估方法與評估結果(如參考文獻),進行深入研析。
- 3. 彙整比較各國之天然放射性核種管制作法、提出具 體建議,作為後續法規精進之參考。本計畫彙整各 國之管制作法、天然放射性核種活度濃度規定及自 主管理作法,分析國際現行建材天然輻射之管制精 神、作法與管理趨勢,比較其與我國天然放射性物 質管理辦法中對建材管理做法之異同處,並提出具 體建議,作為後續法規精進之參考。
- 對建材業者之自主管理作法提出規範建議。除了輻射劑量影響評估外,本計畫亦規畫未來由業者(公會)對石材樣品與石礦製品等建材進行自我把關之自主管理做法,包括自主管理條件、自主管理事項

等進行評估與提出規範建議,以確保在業者之自主 管理下,石材樣品與石礦製品作為建材使用時確實 無影響公眾安全之虞。

#### III. 結果與討論

#### 3.1 輻射劑量率實測

本計畫總計現場實測 52 件石材樣品,量測距石材 表面不同位置之輻射劑量率結果列,依天然放射性物質 管理辦法規定,量測建材表面 0.1 公尺(10 cm) 處之輻射 劑量率(不含背景值),所有石材中量測值均小於 0.2 μSv/h,最大淨劑量率者為 0.175 μSv/h。

#### 3.2 放射性核種活度濃度檢測

天然石材建材之放射性核種活度濃度檢測,經獲得 大部分業者同意,實測劑量之52件石材樣品中,總計取 樣45件花崗岩石材建材樣品(包括花蓮22件、新北市, 及台南市9件),樣品敲碎後裝於容器,帶回清華大學原 子科學技術發展中心之放射性核種分析實驗室,進行放 射性核種檢測,分析其所含之鈾(<sup>238</sup>U)、釷(<sup>232</sup>Th)及鉀(<sup>40</sup>K) 等天然放射性元素活度濃度。石材建材活度濃度指數(I) 計算公式如下:

$$I = \frac{C_U}{300^{\frac{1}{2}} c_{\chi_{f}}} + \frac{C_{Th}}{200^{\frac{1}{2}} c_{\chi_{f}}} + \frac{C_K}{3000^{\frac{1}{2}} c_{\chi_{f}}}$$

上述式中(1)I為建材活度濃度指數,其中CU、CTh、 CK分別代表材料中之鈾、針系列及鉀之核種活度濃度, 單位為貝克/公斤(Bq/kg),而活度濃度因子於鈾系列核種 為300貝克/公斤、針系列核種為200貝克/公斤、鉀核 種為3000貝克/公斤。(2)使用於建築物主體結構之建材 活度濃度指數(I)須小於1,使用於建築物室內裝飾之建 材活度濃度指數(I)須小於3,使用於建築物室外裝飾及 公路、橋樑或機場跑道等室外設施主體結構之建材活度 濃度指數(I)須小於4。

核種活度濃度分析結果,主要以鉀(<sup>40</sup>K)之活度濃度 分布較高,活度濃度指數(I)最大值為 3.0。因所有石材建 材量測表面 0.1 公尺(10 cm) 處之輻射劑量率(不含背景 值)值均小於 0.2 μSv/h,故此部分之核種活度濃度分析 結果僅做為參考,不做為判斷使用用途之依據。

#### 3.3 石材樣品等建材使用情境之劑量評估

利用對石材樣品等建材之實測的輻射劑量率數據, 考量居室佔用因數與位置佔用因數,評估之不同使用情 境之年劑量結果,以及利用 45 件石材樣品核種活度濃 度分析的結果,代入 MicroShield 程式計算不同使用情 境時,距離石材樣品等建材不同位置處的劑量率結果, 並考量居室佔用因數與位置佔用因數,所評估之不同使 用情境之年劑量結果,整體而言所評估之年劑量均小於 1 mSv/y。

#### 3.4 蒐集、研析國際組織對建材之管制建議標準

國際原子能總署(IAEA)於 2015 年提出 SSG-32 報告,對室內建材輻射安全防護及及管制作法提出建議。 本計畫蒐集相關 IAEA 等國際組織及各國對建材之管制 建議或排除/豁免管制標準,以及相關劑量評估方法與評 估結果(如參考文獻),進行深入研析。SSG-32 報告對建 材之管制建議重點彙整如下:

- (1) SSG-32 要求應建立由於建築材料等商品中的放射 性核種引起的曝露的特定參考基準,並應表示為年 有效劑量,通常不超過 1mSv。約 1mSv 的參考基 準僅適用於從建築材料曝露於加馬射線所獲得的 劑量(不包括從建築材料釋放到室內空氣中的<sup>222</sup>Rn 或<sup>220</sup>Rn 的任何其他劑量)。
- (2) 曝露於建築材料的加馬射線對劑量的主要貢獻來 自<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th及其子核種和<sup>40</sup>K。建築材料的法 規或準則主要基於與<sup>40</sup>K,<sup>226</sup>Ra 和建築材料中的 <sup>232</sup>Th。
- (3)各國之主管部門應增加建築材料中鐳含量的標準, 以控制氣的發射率。
- (4)各國之主管部門應建立一個程序來確定含有天然 核種的建築材料是否符合參考水平。該程序需要確 定建築材料中天然來源的放射性核種的活度濃度, 然後確定活度濃度指數。
- (5)對於需要進一步評估的建築材料,國家主管部門應要求計算因使用建築材料而產生的加馬射線體外曝露的劑量。劑量評估應考慮到土壤中天然來源的放射性核種導致的室外曝露的背景水平。這種評估應由建築材料製造商準備,並應提交給國家主管部門。
- (6)對於需要評估的建築材料,應將建築材料引起的加馬射線體外曝露計算出的有效劑量與參考基準進行比較。如果計算出的有效劑量小於參考基準(1mSv),則該建築材料不應受到使用限制。如果計算出的有效劑量超過了1mSv的參考水平,則國家主管部門應決定採取適當措施,其中包括對此類建築材料的預期用途設置特定的限制。
- (7)如果在建築物中發現高水平的加馬輻射,可通過在 牆壁或地板表面上使用屏蔽材料來降低輻射水平。
- (8)下圖描述了建議的建築材料加馬射線體外曝露的 控制系統流程圖(圖1)。



圖 1. 關於建築材料的加馬射線體外曝露控制系統的流 程圖

## 3.5 彙整比較各國之天然放射性核種管制作法、提出具 體建議

國際間對天然放射性物質(NORM)應用對公眾造 成潛在輻射曝露問題日益重視,目前各國多依據國際原 子能總署(IAEA)於2015年提出之SSG-32報告對室內建 材輻射安全防護及管制建議:建立由於建築材料等商品 中的放射性核種引起的曝露的特定參考基準為 1 mSv。 此1 mSv 的參考水平僅適用於從建築材料曝露於加馬射 線所獲得的劑量,不包括從建築材料釋放到室內空氣中 的<sup>222</sup>Rn 或<sup>220</sup>Rn 的任何其他劑量。

各國之主管部門均建立確定建築材料中天然來源的放射性核種的活度濃度指數(I)的程序來確定含有天然核種的建築材料是否符合參考水平。各國訂定之活度 濃度指數(I)的計算公式與我國相同,均參考 IAEA SSG-32 的建議。

我國目前對於由於建築材料等商品中的放射性核 種引起的曝露的特定參考水平及天然來源的放射性核 種的活度濃度指數(I)的評估程序與國際各國作法相同, 因此建議沿用,並持續關注 IAEA 與 ICRP 等國際組織 在未來可能提出之建材天然輻射議題與管制做法。

#### 3.6 對天然石材建材業者之自主管理作法提出規範建議

本計畫規畫由業者(相關石材公會)進行自主管理, 對石材樣品等建材進行自我把關,以確保使用石材樣品 作為建材無影響公眾安全之虞。規劃之自主管理做法內 容包下列內容:

- (1) 輻射偵檢裝備要求與偵檢步驟(SOP)
- (2) 實施活度濃度分析之樣品取樣方法
- (3) 判斷是否符合安全規定之方法
- (4) 輻射安全自主管理認可方式
- (5)人員教育訓練/宣導

#### IV. 結論

本計畫已完成石材樣品現場訪查,總計進行 52 件 石材建材之輻射劑量率實測。現場訪查檢測結果,檢測 之天然石材建材表面 0.1 公尺(10 公分)處之輻射劑量率 均小於 0.2 µSv/h(不含背景值),均符合我國天然放射性 物質管理辦法之規定;雖然依法不需再進行活度濃度指 數(I)的檢測與評估,但經與業者溝通後,獲同意取得 45 件石材樣品進行活度濃度檢測分析。在石材建材之年劑 量評估上,以實測值評估與核種活度計算評估之年劑量 均小於 1 mSv。此外,藉由蒐集 IAEA 等國際組織建議 及各國之管制作法與具體規定,研析國際組織及各國對 建材輻射安全之現行管制作法,以了解我國天然放射性 物質管理辦法與國際組織建議做法之異同,可作為後續 國內法規精進之參考。本計畫亦提出業者自主管理作為之建 議及執行狀況評核之參考依據。

#### 參考文獻

- 行政院原子能委員會,天然放射性物質管理辦法, 2017年9月。
- [2] CEN. Construction Products: Assessment of Release of Dangerous Substances — Radiation from Construction Products — Dose Assessment of Emitted Gamma Radiation. CEN, 2017.
- [3] CEPMC. Position paper. European Commission Services considerations with regard to natural radiation sources Basic Safety Standards Directive. TG DS 11-06. Council of European Producers of Materials for Construction. Brussels, January 2011.
- [4] de With, G., 2017. Development of an assessment

method for building materials under Euratom scope. Health Phys. 113, 392 - 403.

- [5] de With, G., Smetsers, R., Slaper, H., de Jong, P., 2018. Thoron exposure in Dutch dwellings - an overview. J. Environ. Radioact. 183, 73 - 81.
- [6] Euratom. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 Laying Down Basic Safety Standards for Protection Against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation. Euratom, 2014.
- [7] European Commission. Radiation Protection 96: Enhanced radioactivity of building materials; 1999.
- [8] European Commission, Radiation protection 112, Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, EC Luxembourg, 1999.
- [9] Higgy RH, El-Tahawy MS, Abdel-Fattah AT, Al-Akabawy UA. Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings. J Environ Radioact 50:253-261; (2000).
- [10] Markkanen M (1995). Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity. STUK-BSTO 32, Helsinki, 1995.
- [11] ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.
- [12] IAEA. IAEA Safety Standards Series No. SSG-11: Radiation Safety in Industrial Radiography, Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2011.
- [13] IAEA. IAEA Safety Standards Series No. GSR-Part3: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2014.
- [14] IAEA. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32: Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2015.

# 系統化與客製化的飛航輻射劑量研究(2/2) Systematization and Customization of Aviation Dose Assessment (2/2)

計畫編號:109-2623-E-007-010-NU 計畫主持人:許榮鈞 e-mail:rjsheu@mx.nthu.edu.tw 計畫參與人員:楊子毅、黃昱翔、賴柏辰 執行單位:國立清華大學核子工程與科學研究所

#### 摘要

在一般民航機飛航高度上,宇宙射線造成的輻射劑 量率遠高於地表,因此對於飛航人員的累積劑量評估不 可忽視。本團隊自主完成開發國內第一套飛航劑量評估 程式(NTHU Flight Dose Calculator),在此基礎上,本計 畫利用二年期間(108-109)進行宇宙射線飛航輻射劑量 的系統化與客製化研發。第一年系統化是深入探討飛航 輻射與相關參數的靈敏度分析、比較美日歐常見評估程 式的差異、以及更新 NTHU 飛航劑量評估程式,主要是 增加多航線批次作業的能力,以利航線變化影響分析的 探討,上述工作皆順利完成。本年度(第二年)客製化研究 著重於探討如何配合航空公司的實務需求,開發快速的 自動分析工具以利大量航線資料庫的讀取與分析,並完 成國內二家國際航空公司(華航/長榮)飛航人員歷年輻射 劑量的評估與比較,上述工作也皆順利完成。彙整前述 二年的結果與經驗,立基於本團隊自行開發且經驗證的 飛航劑量評估程式,可以確認在技術支援層面上,本團 隊有信心已做好台灣未來將飛航劑量納入職業暴露管 制範疇的準備。

關鍵詞:宇宙射線、飛航劑量、系統化、客製化。

#### Abstract

Airline crews and frequent flyers are exposed to elevated radiation levels on their flights due to galactic cosmic ray induced secondary radiation in the atmosphere. Based on the self-developed NTHU Flight Dose Calculator, this project extended our development roadmap to reflect on the need for systematization and customization of aviation dose assessment. The first-year study focused on the systematization of the influencing parameters and performed associated sensitivity studies, as well as comparison of assessment codes used in US, EU, and Japan. Activities in this year focused on the customization of the dose assessment approach to address the practical needs of airlines. As a demonstration, the collective and average effective doses received by pilots of China Airlines and EVA Air were estimated based on data in publicly available civil aviation annual statistical reports. The results and experience obtained in this work will be beneficial to future implementation of aviation dose assessment and management in Taiwan.

**Keywords**: galactic cosmic rays; aviation dose assessment; systematization; customization.

#### I. 前言

雖然宇宙射線對於絕大部分居住在海平面的人口

造成的輻射劑量不大,但是在典型的民航機飛航高度上, 宇宙射線造成的輻射劑量率不可忽視,其中銀河宇宙射 線在大氣層引發的二次輻射是最主要的貢獻。ICRP 建議 將飛航人員所受宇宙射線輻射劑量視為職業暴露以加 強評估與管理,歐盟在 1996 率先採行相關規定與劑量 管理,其他先進國家亦逐步採取類似措施[1]。

#### Ⅱ. 主要內容

本團隊長期投入宇宙射線與天然輻射相關的研究 與測量,經由科技部與原能會的補助,本團隊完成第一 套本土自行開發的飛航劑量評估程式(稱之 NTHU Flight Dose Calculator)[2]。基於一系列複雜的 FLUKA 宇宙射 線在大氣層的模擬計算[3],我們成功建立一套全球三維 大氣層宇宙射線各成分的輻射資料庫,透過合適數學模 型與擬合,結果可用於大氣層任一選定位置的能譜與劑 量率計算或是沿飛航路線的累積積分。圖 1 顯示 NTHU Flight Dose Calculator 第 2.6 版的數個主要使用者操作 介面與重要功能的展示。在此基礎上,本計畫利用二年 期間進行宇宙射線飛航輻射劑量的系統化與客製化研 發,工作項目與重要成果如下節彙整所述,其中特別著 重本年度研發成果的介紹。關於程式開發的理論基礎、 數值方法、以及相關實務應用更詳細的介紹,建議讀者 參考計畫期末報告與主要作者楊子毅的博士論文[4]。



圖 1: NTHU Flight Dose Calculator 第 2.6 版的主要使用 者操作介面與重要功能的展示。

#### III. 結果與討論

本研究第一年主要著重在三個方面探討。第一個方 面為比較美日歐飛航劑量計算程式的差異,本研究挑選 了美國的 CARI-7A[5]、歐洲的 EPCARD[6]及日本的 EXPACS[7],分別計算11條從台灣直飛的航線,結果顯 示各程式評估之劑量對於短程航線幾乎完全相同,而對 於長程航線在太陽活度小時以 EPCARD 劑量最高, EXPACS 最低;在太陽活度大時,則以 CARI-7A 劑量最 高,仍是 EXPACS 最低。整體來看,本團隊開發之程式 的計算結果與其它程式趨勢一致,且劑量數值落在中間 合理範圍。第二個方面為探討資料庫參數的關係與靈敏 度分析,探討範圍包括各種輻射成分有效劑量率隨高度、 緯度、經度與垂直截止剛度改變對有效劑量率的影響。 第三個方面為更新了 NTHU 飛航劑量評估程式,除了資 料庫更新與程式除錯之外,並加入三個全新的功能,分 別是多航線批次作業的能力、所有預定航班之劑量加總 功能、和沿航線加總之累積能譜估算,以利航線變化影 響分析與人員劑量的評估,也可用來探討飛航電子元件 的輻射效應。

本年度計畫著重飛航劑量客製化研究,探討如何配 合國內航空公司的需求,以利本土飛航從業人員的個人 劑量評估與管理,同時針對台灣兩家最大的航空公司華 航及長榮為例,評估機師歷年的集體與平均有效劑量。 本年度完成三項主要工作:(1)快速的自動分析、(2)航線 資料庫的應用與分析、(3)台灣飛航人員劑量分析。上述 工作項目皆順利完成並總結如下:

(1)快速的自動分析:現有 NTHU Flight Dose Calculator 的圖形化介面易於使用,但是透過滑鼠點選 操作不適合用於大量重複性的操作計算,例如本研究必 須分析每年超過數萬條的航段。考量此一限制,立基於 已經驗證的宇宙射線資料庫,本團隊完成開發了一套使 用 Python 語言的程式,此版本具有快速自動批次化的飛 航路線劑量分析能力,可滿足本研究設定目標為飛航人 員年劑量分析的應用。為了配合批次分析所處理的大量 資料,本研究還提供了兩個輔助程式 RouteMaker.py 及 OutputAnalyzer.py,分別用來協助使用者處理程式計算 前與計算後之大量資料。圖2示範以 RouteMaker.py處 理之台北往紐約 EVA32 航線 100 次實際飛行之軌跡。 圖3示範以 OutputAnalyzer.py處理之台北往紐約 EVA32 航線 100 次實際飛行之高度、垂直截止剛度、有效劑量 率隨時間變化趨勢和有效劑量累積直方圖。



圖 2:RouteMaker.py處理之台北往紐約 EVA32 航線 100 次實際飛行之軌跡。



圖 3:OutputAnalyzer.py 處理之台北往紐約 EVA32 航線 100 次實際飛行之高度、垂直截止剛度、有效劑量率隨 時間變化趨勢和有效劑量累積直方圖。

(2)航線資料庫的應用與分析:更新後的程式具備自 動化處理及計算航線的能力,讓我們可簡單的做到大數 據的分析,在此我們將使用該像新功能搭配網路上公開 或付費的航線資料庫(如 Flightware.com [8]),利用此類 資料庫進行台灣重要飛航路線的劑量評估,並使用包括 相關係數(Correlation Coefficient)與散佈圖(Scatter Plot) 等統計分析技巧深入探討並量化飛航劑量與重要參數 的關係。本研究挑選台灣飛行距離最長的航線做為分析 對象,即長榮航空於2015年6月19日啟用的台北桃園 (TPE)來往休士頓(IAH)航線(大圓航線距離約為 12776 公里),探討該航線在2017年整年當中去程與回程的劑 量分佈情形。以台灣出發之最長航線為例,長榮航空台 北(TPE)來往休士頓(IAH)航線的大圓航線距離約為 12776 公里,探討該航線在 2017 年整年當中去程 340 班 與回程 340 班的劑量分佈情形。圖 4 顯示台北飛往休士 頓的340班EVA52航班之平均有效劑量為54.6±7.8μSv, 低於回程的 340 班 EVA51 航班的 64.4±7.8 uSv, 兩者差 了約18%,此差異主要來自於飛行時間的影響,前者的 平均飛行時間約為 13.1 小時,後者約為 15.6 小時。另 外,圖5彙整顯示影響航班人員有效劑量之各項參數組 所成的散佈圖與相關係數矩陣,清楚呈現並量化飛航劑 量與重要參數的關係。



圖 4:台北往返休士頓(a)去程(b)回程之飛航軌跡和有效 劑量累積直方圖。



圖 5:台北往返休士頓航班影響有效劑量之各項參數組 所成的散佈圖與相關係數矩陣。

(3)台灣飛航人員劑量分析:交通部民用航空局每年 會發布民航統計年報,以此資料為基礎,本研究利用新 版NTHU Flight Dose Calculator 分析華航(CI)與長榮(BR) 一整年總共數萬條的航段劑量,藉此嚴謹估算國內飛航 人員因其職業所處工作環境所受的平均年輻射劑量,並 進一步探討過去歷年的變化。感謝輻防處同仁協助洽詢 民航局,本團隊已完整收集 2006-2018 國內民航年報檔 案(pdf 格式) [9],並成功進行表格資料格式的轉換,再 透過前述開發之自動分析功能完成資料讀取與計算。

基於統計年報所提供之機師人數與各航線飛行次 數資料,加上NTHU Flight Dose Calculator所計算之各 航線劑量,即可評估台灣機師的集體劑量,最後只要將 集體劑量除上機師總人數就可得到平均劑量,計算方法 過程可用下式來描述:

$$\bar{E} = (\sum_{i=1}^{N} d_i \times f_i \times p_i) / N = E_c / N$$

其中E為平均劑量, $E_c$ 為集體劑量,N為總機師人數,n為考慮之航段i的總數,航段代表著兩航點之間單次起飛 降落的區段,計算式中會以航段來表示是因為程式只能 計算單一起降機場的情況,但實際上飛機的航線可能包 含多個不同航點,在此情況下需將該航線拆分成多個航 段分別處理,d為基於大圓航線假設所評估之劑量,f為 為年報提供之飛行次數,一年採用 52 週做計算,並根據 報告內的註解來考慮各種特殊情況,p為每次飛行的機 師人數,我們參考美國 14CFR91 與 14CFR117 之規定 [10,11],對於飛行時間8小時以內的航線派遣2位機師, 8到 12 小時派遣三位,12 小時以上則派遣4 位。

圖 6 呈現了 2018 年的分析結果,詳細考慮了民航 年報內兩家航空公司在該年內所有的定期客運航班、定 期貨運航班以及不定期包機航班的貢獻,其中華航共包 含了 87381 個航段,而長榮則包含了 64148 個航段。依 照前述建議的方法,我們計算出集體有效劑量,最後在 除上華航的機師人數 1336 位和長榮的 1177 位之後,得 到華航與長榮的機師年平均有效劑量分別為 1.84 mSv 和 2.12 mSv,長榮略高於華航。此外,為了我們利用與 計算劑量相同的方法,一併計算了平均負責航段數、平 均飛行距離及平均飛行時間,可看出華航機師的年平均 飛行時間(550 h)與飛行距離(4.7×10<sup>5</sup> km)皆少於長榮的 結果(581 h, 5.2×10<sup>5</sup> km),因此長榮機師平均有效劑量較 高,但華航的機師平均負責航段數(140 次)則略多於長榮 (122 次)。最後,我們將兩航空公司的平均有效劑量數值, 分別以機師人數做加權平均後,得出 2018 年國際航線 台灣機師的平均有效劑量為 1.97 mSv。

Airline (number of aircrafts)	C	hina Airlines (85	))		EVA Air (79)	
Type of flights	Passenger	Cargo	Charter	Passenger	Cargo	Charter
Number of separate flight segments	186	138	44	136	55	20
Total number of flight segments <sup>a</sup>	69062	17264	1055	58542	5170	436
Total flight distance (km)b	1.9×10 <sup>8</sup>	7.0×107	2.7×10 <sup>6</sup>	2.0×10 <sup>8</sup>	2.0×107	8.0×10 <sup>5</sup>
Total flight time (h) <sup>c</sup>	2.2×10 <sup>5</sup>	8.0×104	3.4×10 <sup>3</sup>	2.3×105	2.3×104	1.0×103
Total effective dose (mSv)4	561	322	5	719	106	1
Collective number of flight segmentse	146367	38220	2119	131165	11631	872
Collective flight distance (man·km)*	4.5×10 <sup>8</sup>	1.7×10 <sup>8</sup>	5.6×10 <sup>6</sup>	5.6×108	5.0×107	1.6×10 <sup>6</sup>
Collective flight time (man·h)*	5.3×105	2.0×105	6.8×10 <sup>3</sup>	6.2×105	5.7×104	2.0×103
Collective effective dose (man·mSv)*	1657	783	11	2237	255	3
Total number of pilots		1336			1177	
Average flight segments per pilot		140			122	
Average flight distance per pilot (km)		4.7×105			5.2×10 <sup>5</sup>	
Average flight time per pilot (h) b		550			581	
Average individual effective dose for pilots of (mSv)		1.84			2.12	
Average individual effective dose for all pilots (mSv)	1.97					
<sup>a</sup> Total number of flight segments is calculated as the sum of $\sum_{i}$	(Flight freque	ncy per year o	f route segme	nt i)		
b Estimated by assuming a great-circle distance for each flight	segment					
Estimated by assuming a constant ground speed for each flight	nt segment					

<sup>d</sup> Estimated route-by-route using the NTHU Flight Dose Calculator

\* Collective flight segments, distance, flight time, and effective dose are c each flight segment (2, 3, or 4, it depends on the flight time).

圖 6:2018 年華航與長榮機師之累積與平均飛行距離、 飛行時間與有效劑量。

重複前述的流程,我們分別分析了 2006 到 2018 年 共 13 年的數據,並將結果整理呈現於圖 7,從 13 年的 機師年平均有效劑量趨勢變化中(圖 7d2)大致可區分成 三個時期,分別是(a)2008 年後的明顯的下降趨勢、 (b)2010 年的突增、以及(c)2011 到 2018 年的穩定增長趨 勢,分別介紹如下。

第一段時期(2006~2009),此時期是因為受到金融危 機(2008)影響,在金融危機之前(2006~2008),總航段數 穩定變化量低於 3%,但機師人數卻由 2006 年的 1764 人減少為 2008 年的 1631 人,下降了 8%,導致了這三 年的年均有效劑量結果反而從 2006 年的 3 mSv 小幅度 上升到 2008 年的 3.2 mSv;然而在 2008 年金融危機後 (2008~2009),全球的經濟衰退,不僅衝擊了與貿易相關 的貨運部分,客運的旅客人數也有明顯的減少。此現象 會反應在總航段數的變化上,2009 年因為總航段數明顯 減少,僅有 103418 條,相比 2008 年的 118161 條降低了 12.5%,縱使機師人數也跟著從 2008 年的 1631 變為 2009 年的 1578 人下降了 3.2%,但仍然造成平均有效劑量的 下降,從 2008 年的 3.2 mSv 降到 2009 年的 2.5 mSv,降 幅達 24%。然而 2008 到 2009 年的飛機數目沒有明顯變 動,從 2008 到 2010 年都是持平的 115 架次。

第二段時期(2010),於 2010年的年均有效劑量有明 顯的突增,在仔細檢視過年報資料後發現,2010年是機 師人數 13 年來的最低點,僅有 1564 人,加上 2010 年 長榮航空統計年表內的定期貨運總航班數明顯增加到 23837 條,是 2009年(10556 條)的 2 倍以上,造成了 2010 年長榮的機師年均劑量飆高到 4.06 mSv,導致台灣機師 的年均劑量也因此升高到 2.89 mSv,遠高於 2009年的 2.46 mSv,增長幅度約為 17.5%。

第三段時期(2011~2018),為金融危機後穩定發展的時期,除了在2013年有稍微減少外,各項數值大致上都穩定的上升,飛機數和機師人數由2011年的122架飛機1669位機師負責,上升到2018年的168架飛機由2513位機師負責,漲幅38%和51%。而集體結果則依序為2011年103591航段、集體飛行時間106man·h和集體有效劑量3.37man·Sv,到2018年的151475 航段、造

成集體飛行時間 1.4×10<sup>6</sup> man·h 和集體有效劑量 4.95 man·Sv,漲幅依序為 46%、42%、47%。年均結果為集 體結果和機師人數的比值,根據上述結果,在穩定發展 時期各項數值有了明顯的漲幅(集體結果的 42%~47%), 但也多聘用了更多的機師(漲幅 51%)來分攤工作,讓年 均結果僅有小幅度變化,從 2011 年的機師年均航段數 62、年均飛行時間 599 h、年均有效劑量 2.02 mSv,到 2018 年的機師年均航段數 60、年均飛行時間 565 h、年 均有效劑量 1.97 mSv,數值都略為減少,減少幅度依序 為 3%、6%、2%。



圖 7:2006 到 2018 年機師與飛機總數變化、台灣機師 每年的集體與平均航段數、飛行時間與有效劑量。

#### IV. 結論

針對銀河宇宙射線的劑量評估,本團隊已完成開發 第一套本土自主的飛航劑量評估程式,在此基礎上,配 合台灣航空公司與管制單位的需求,本研究以二年期間 進行宇宙射線飛航輻射劑量的系統化與客製化研發。彙 整二年成果,本計畫完成了系統化工作,包括深入探討 飛航輻射與相關參數的關係與靈敏度分析、比較美日歐 常見評估程式的差異、以及更新 NTHU 飛航劑量評估程 式,主要是增加多航線批次自動處理的能力。今年度最 重要的工作是完成評估台灣兩家最大的航空公司(華航 及長榮)所有機師的年均有效劑量,相關結果將可提供航 空公司與主管機關參考。本團隊完整收集了 2006-2018 國內民航年報檔案,並成功進行表格資料格式的轉換, 再透過前述開發之自動分析功能完成資料讀取與劑量 計算分析。表 1 總結 13 年來的各項數值的變化範圍與 平均值,飛機數在13年來都穩定上升,從109架上升 到168架,機師人數則是呈現先降後升的趨勢,最低點 落在 2010 年僅有 1564 位機師,比起最多的 2018 年的 2513 人少了 1000 人左右,平均值為 1903 位,而在 2011 年確實受到金融危機影響而大幅縮減了總航班數(僅 103635), 2018 年的總航班數(151475)幾乎為當時的 1.5 倍,集體有效劑量平均值為4252 man·mSv。而年均飛行 時數的變動範圍從 565 到 904 小時,平均值 674 小時, 年均航段數範圍為 130 到 173,平均每位機師每年負責

149個航段,而年均有效劑量範圍為1.70到3.29mSv, 13年來的平均值為2.29mSv,此數值明顯高於一般人的 法規輻射劑量限值1mSv。

表 1:2006 到 2018 年台灣飛機與機師人數、每位機師 負責航段數、集體及平均飛行時間和有效劑量分佈範圍 與 13 年之平均值。

	min (year)	Max (year)	Average
Aircrafts	109 (2006)	168 (2018)	133
Pilots (man)	1564 (2010)	2513 (2018)	1903
Total number of flight segments	103635 (2011)	151529 (2018)	128035
Collective flight times (man h)	1×10 <sup>6</sup> (2011)	$1.5 \times 10^{6}$ (2007)	$1.3 \times 10^{6}$
Collective effective doses (man·mSv)	3117 (2013)	5589 (2007)	4252
Avg. flight segments per pilot	130 (2017)	173 (2010)	149
Avg. flight times per pilot (h)	565 (2018)	904 (2008)	674
Avg. effective doses per pilot (mSv)	1.70 (2015)	3.29 (2007)	2.29

# 参考文獻

- ICRP, "Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP Publication 132," Ann. ICRP, vol. 45, 2016.
- [2] A.-L. Li, W.-F. Pan, and R.-J. Sheu, "Development, validation and demonstration of the NTHU flight dose calculator," Radiat Prot Dosim, 180, 134-137, 2018.
- [3] A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, and J. Ranft, "FLUKA: A Multi-Particle Transport Code," CERN-2005-10 CERN-2005-10 (2005), INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773.
- [4] 楊子毅,新版宇宙射線飛航劑量評估程式的開發與 應用,國立清華大學博士論文(2020)
- [5] K. Copeland, "CARI-7A: Development and validation," Radiat Prot Dosim, 175, 1-13, 2017.
- [6] V. Mares, T. Maczka, G. Leuthold, and W. Rühm, "Air crew dosimetry with a new version of EPCARD," Radiat Prot Dosim, 136, 262-266, 2009.
- [7] T. Sato, Analytical Model for Estimating Terrestrial Cosmic Ray Fluxes Nearly Anytime and Anywhere in the World: Extension of PARMA/EXPACS, PLOS ONE, 10(12): e0144679.
- [8] FlightAware: <u>https://www.flightaware.com/</u>
- [9] 交通部民用航空局, "民航統計年報," 2006-2018.
- [10] Federal Aviation Administration. General operating and flight rules. Washington, DC: US Government Publishing Office; 14 CFR Part 91, 2014.
- [11] Federal Aviation Administration. Flight and Duty Limitations and Rest Requirements: Flight crew Members, DC: US Government Publishing Office; 14 CFR Part 117, 2017.

#### 植物對放射性銫汙染的濃縮移除作用研究

# Study on the enrichment and removal of contaminated radioactive cesium by plants

計畫編號:109-2623-E-007-011-NU 計畫主持人:蔡世欽 e-mail:sctsai@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人:莊愷瑋 計畫參與人員:廖晨羽 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

#### 摘要

烏克蘭車諾比核電廠事故及日本福島事故中,採用 植生復育技術對於絕 137 污染的土地進行整治,取得非 常良好的績效。植生復育的研究除了污染整治之外,同 時探討污染物從土壤吸收到植物體中的轉移機制,並且 進而了解,如何透過控制施肥等方式,降低已污染土地 上的農作物對污染物的吸收,提供污染地區民眾建議作 法,以俾能夠在事故後盡快恢復生產。本研究首先蒐集 國際間各類植物吸收絕 137 效果之研究成果,進行閱讀 及研析;接著探討各種植物各部位生長時吸收絕 137 的 濃縮效果及機制。最後,彙整上述研析結果,本研究提 出:千日紅(圓仔花)、尾穗莧和百日藕,可以作為銫汙染 植生復育的台灣本土植物,這個建議將提供主管單位做 為施政的重要參考依據。

**闌鍵詞**:放射性絕、土壤-植物轉移、放射毒性、植生復 育

#### Abstract

In the Chernobyl nuclear accident in Ukraine and the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power station in Japan, the phytoremediation technology used to rectify the land contaminated by Cs-137 achieved very good performance. Besides that, phytoremediation technology also investigated the transfer mechanism of Cs-137 from the soil to the plant, which would furtherly understand how to reduce the absorption of Cs-137 by crops on contaminated land by controlling fertilization, etc., to provide suggestions for people in Cs-137 contaminated to resume production as soon as possible after the accident. In this study, at first, we collect and analyze the research results of the absorption effects of various plants to Cs-137 from international academic database. Then, we explore the removal effect and transfer mechanism of Cs-137 absorbed in various parts of plants. Finally, we summarize the results of the above research and recommended that Amaranth (Amaranthus vulgaris), Amaranthus caudatus and Zinnia elegans, can be used as Taiwanese native plants to removal Cs-137 from soil. The results of this study would provide an important knowledge base to Administration Office as reference.

Keywords: radiocesium, soil-plant transfer, radiotoxicity, phytoremediation

#### I. 前言

自從20世紀50年代以來,美蘇等國際強權發展核武並 進行核試爆,造成大量放射性核種外釋進而污染生態環 境。這些放射性核種中, 絕 137 的放射活度高, 且半化 期達 30 年,因此常常是環境輻射偵測及污染處理的指 標核種。後來國際強權之間雖然彼此制約禁止大氣核爆 然而隨著世界各先進國家發展核能發電,核電廠運轉過 程中若發生意外事故,仍會有相當數量的放射性核種排 放至環境中。1986 年蘇聯烏克蘭車諾比核電廠爆炸事故 及 2011 年日本福島第一發電廠因地震引發海嘯導致核 電廠輻射外釋事故,是史上兩個最嚴重的核電廠事故, 事故後大量放射性核種外釋造成環境汙染,善後措施迄 今仍在進行中,且嚴重性超過原先的預期。 绝137 的污 染問題中,以土壤污染最為棘手。處理土壤污染的方法 可分成物理、化學及生物等三類。其中物理及化學方法 費用昂貴,且造成土壤結構的破壞、降低土壤中的生物 活性及肥力,且處理過程會衍生二次廢棄物,不利於大 範圍土地污染的整治。銫汙染土壤通常在表層深度十公 分內,為了去除土壤當中的銫,工程上常用的方式是移 除表土等方式,但是其成本較高,且大量受汙染的土壤 存放上的困難,因此植生復育(phytoremediation)被認為 是好的除去汙染的方法。在車諾比核電廠事故及日本福 島事故中,採用植生復育對於銫137 污染的土地進行整 治,取得非常良好的績效。植生復育的研究除了污染整 治之外,同時探討污染物從土壤吸收到植物體中的轉移 機制。此研究同時可以進而了解,如何透過控制施肥等 方式,降低已污染土地上的農作物對污染物的吸收,提 供污染地區民眾建議作法,以俾能夠在事故後盡快恢復 生產。

無機物的植生復育策略大致上可以分成(1)植生萃 取(Phytoextraction)(2)植生穩定(Phytostabilization)(3)根 圈過濾(Rhizofiltration),根圈過濾是指能夠將汙染物截 流在根圈,使汙染物較不易進入食物鏈。進一步是植物 能夠把汙染物吸收進入植物體內,固定在根部,被稱為 植生穩定。最理想的情況為植生萃取,植物能夠將汙染 物轉移至地上部,將地上部收穫移除,便可以除去土壤 的汙染物。

# II. 主要內容 本研究工作之內容如圖 2.1 2.1 美國 NRC 管制單位除役計畫導則案例研析



圖 2.1 本研究之內容及流程

#### III. 結果與討論

3.1 植物吸收&轉移銫 137 機制研析

#### 3.1.1 銫在土壤之吸附機制

絕易被土壤顆粒固定,因此主要積聚在土壤表層深 度十公分內。絕在土壤中的分布與移動受到很多因素影 響,如土壤質地、土壤有機質、土壤黏粒和土壤水分的 類型等等。

土壤黏粒受不同黏土礦物組成性質會有很大的差 異,黏土礦物主要由層狀矽酸鹽所組成,包括高嶺石、 伊萊石、蛭石、蒙特石皆屬之,是由二氧化矽四面體與 氧化鋁八面體所組成的,層狀矽酸鹽黏土礦物進一步分 為1:1和2:1層狀黏土礦物。1:1型是由一個氧化矽四面 體與氧化鋁八面體所組成、而2:1型是由兩面氧化矽四 面體中間夾一層氧化鋁八面體所組成。1:1型以高嶺石 為例,收縮膨脹能力差且陽離子交換容量(Cation Exchange Capacity; CEC)較低,導致吸附能力低;2:1型 黏土礦物又可以區分為膨脹型黏土礦物和非膨脹型黏 土礦物,膨脹型黏土礦物如蒙特石、蛭石,非膨脹型黏 土礦物如伊萊石、白雲母、綠泥石,具有較高的CEC、 表面積和吸附能力。

以伊萊石為例來說明銫在黏土礦物的吸附機制。伊 萊石的非膨脹矽酸鹽礦物當中,層間由鉀離子緊密結合, 當水分子侵入,層間結構邊緣會產生局部擴展的楔形區, 由原先的的基本間距10Å擴大到14Å,被稱為 frayed edge sites(FES)。

銫能夠吸附在黏土礦物上的位點主要分為三部分: 平面位點(planer site)、夾層位點(interlayer site)和 FES, 若在區分細一點的話可以再區分出邊緣位點(edge site) 和水合中間層位點(hydrated interlayer),前者和平面位點 (planer site)有相似的吸附特性、後者則和 FES 相似(圖 3.1.1)。銫吸附上去後難以脫附是因為其 FES 存在,FES 對銫的選擇性吸附起到關鍵作用。(Park et al., 2019b)



圖 3.1.1 絕吸附在黏土礦物上的位置點 (a) 3 位置; (b) 5 位置(Park et al., 2019b)

當水合的 Cs<sup>+</sup>選擇性地吸附到 FES 上,接著 Cs<sup>+</sup>脫 水並向位於中間層的 K<sup>+</sup>提供水分子,然後中間層中的 K<sup>+</sup> 和與 FES 交換的 Cs<sup>+</sup>由於水合能較低的位置最後,選擇 性吸附到 FES 上的 Cs<sup>+</sup>遷移到伊萊石的夾層中(圖 3.1.2) (Fuller et al., 2015)。



圖 3.1.2 伊萊石 FES 對銫吸收並向夾層遷移示意 圖(Fuller et al., 2015)

#### 3.1.2 植物吸收及轉移分子機制

重金屬從土壤轉移至植物的比率以TF(transfer factor) 值來表示,定義如下:

Transfer Factor =  $\frac{\text{Cs activity in plant(Bq/kg weight)}}{\text{Cs activity in soil(Bq/kg weight)}}$  (3.1)

除了比活度 Bq/kg 外,也常有文獻因為只檢測穩定 型態的銫-133,所以改使用濃度單位。

由於銫並非植物所必須的營養素,在生理上對植物 無利用價值,一般認為植物體中不具有專供的銫進入的 運輸途徑,銫會被植物所吸收主要藉由植物本身所需的 大量營養元素—鉀的相關轉運途徑。圖 3.1.3 顯示各種 鉀轉運蛋白的作用下銫進入植物的通道模型(White and Broadley, 2000)。

根據圖 2.1.3, 鉀轉運蛋白包括:

- 陽離子轉運蛋白 VIC(Voltage-independent cation channels)
- KT/KUP/HAK 基因蛋白家族主導的高親和力 鉀轉運蛋白
- KIR (inward-rectifying K+ channels)中的 AKT 蛋白

• DACC 蛋白 (depolarization-activated Ca2+ channels)

而吸收後大部分的銫離子由 KORC 通道蛋白 (outward-rectifying K+ channels)轉移至木質部。(White and Broadley, 2000)

近幾年因為分子生物的發展,以作為模式植物的阿 拉伯芥(Arabidopsis thaliana)和水稻(Oryza sativa)因為具 有較完整的 DNA 序列資料,因此相關研究文獻較多, 在植物上銫吸收銫的分子機制相關研究也利用這些資 料作為理論依據。阿拉伯芥是一種野生型阿拉伯芥屬植 物,台灣海拔兩千公尺也有亞種葉芽筷子芥(A. halleri ssp. Gemmifera)。這種植物對於重金屬有高累積性,而且 會把重金屬堆積在葉毛上。此外,它也是第一個基因組 被完整測序的植物,因此被應用於探討許多植物性狀的 流行分子生物學工具。



圖 3.1.3 銫離子被根細胞吸收並轉移至木質部的機制。

應用阿拉伯芥屬植物進行實驗,探討植物吸收絕的 研究顯示:不同絕濃度下銫的吸收速率當中分成兩種模 式(Genies et al., 2017; Rai and Kawabata, 2020):

高親和力轉運系統 (high-affinity transport system):
 主要在的低鉀環境(微莫耳濃度範圍)呈現,以
 KT/KUP/HAK為主要的轉運蛋白,其中對具代表性的為高親和力鉀轉運蛋白 HAK (High-affinity transport mechanism for potassium),其在低鉀的環境中對銫鉀的分辨能力差。

2. 低親和力轉運系統 (low-affinity transport system) 主要在外界鉀充足環境下(毫莫耳濃度範圍),對於不同 陽離子分辨能力較差,如陽離子通道蛋白 VIC (Voltageindependent cation channels)。

另一方面,水稻當中也具有相似的例子,學者 Rai 等人(2017)誘變種稻品種,從中篩選到低銫吸收(low Cs accumulation)的突變株 *lcs-1、lcs-2、lcs-3*,發現三者皆是在水稻第四條染色體上 OsHAK1 的位置產生突變。另外使用銫-137 標定位置,可以從影像觀察到主要堆積在水稻根部(圖 3.1.4)。



圖 3.1.4、 *lcs* 突變株的外表型和<sup>137</sup>Cs 的放射自顯影 圖像。(a)水稻穀粒中的 Cs 濃度。(b)糙米的穀物產量。 (c,d)種子成熟期水稻地上部中絕(c)和鉀(d)的 濃度。星號表示在 Tukey 檢定下具有顯著差異。(e,f) 低 Cs 吸收突變株 *lcs-3*(e)和對照組(f)的植株形態。 (g)在含 10 ppb 的<sup>137</sup>Cs (100 kBq l<sup>-1</sup>)水耕溶液中處理 18 小時幼苗吸收放射性絕的影像。 (Rai *et al.*, 2017)

#### 3.2 土壤鉀肥對植物吸收銫之影響

過去車諾比事故後進行的研究表明,施用鉀肥是有效降低農產品被放射性銫汙染的對策(Fesenko et al., 2007)。

2011 年福島事件後,Kato et al.(2015)進行水稻田間 試驗,實驗地點在距事故地點福島第一核電廠 60-200 km 的八塊田,土壤類型以火山灰土(Andosols)、低地土壤 (lowland)和水田土壤為主。實驗結果顯示:大部分情況 下鉀肥施用有效降低水稻銫吸收,可交換性鉀與土壤轉 移至糙米的轉移係數呈顯著負相關,而在可交換性鉀大 於 150 mg/kg 後趨勢不顯著,因此作者建議將水稻種植 前田間土壤可交換性鉀增加至 200 mg/kg。

在關於土壤背景鉀提高了之後,由於植物體對於鉀 的反應造成對銫的吸收影響。Kubo et al. (2017)實驗中發 現:放射性銫主要在蕎麥營養生長時被吸收、較低的土 壤可交換性鉀會導致土壤可交換性銫提高、在低可交換 性鉀的環境下蕎麥提高了對於銫的吸收轉運能力,因此, 為了防止放射性銫累積,學者認為施用鉀作為基肥是必 要的。Ishikawa et al.(2018)調查水稻各部位在不同鉀處理 下不同生育期銫的累積,結果顯示:銫會堆積於穗頸, 越低鉀情況下作物體內銫越容易移動。

#### 2. 低親和力轉運系統 (low-affinity transport system): 3.3 其他土壤環境因子對於植物吸收土壤銫影響

根據 Yoshikawa et al., (2020)研究顯示:土壤在湛水 環境下,放射性銫更易於被植物吸收,而單以沙質壤土 為例來說,乾燥時 TF 為 0.082 - 0.12、湛水潮濕時 TF 為 0.33 - 0.45(Frissel et al., 2002)。水分含量會使得銫易轉 變為容易被植物利用的型態。

Suzuki et al. (2020)的研究中,在火山灰土(Andosols) 中所種植的水稻,從土壤轉移至糙米轉移率比 gray lowland 的土壤高。而有機質的存在,會使得土壤當中絕、 土壤黏粒、鉀、植物之間的關係更為複雜,高的土壤總 碳含量會削弱鉀在黏土礦物位點的吸附,絕因為有機質 的擾動也較不易被黏土礦物所吸附,但是施用有機肥具 有可交換性鉀能提供植物吸收,進而降低栽培植物的絕 吸收(Kubo et al., 2019)。Sun et al. (2019)使用樹皮發酵後 製成的土壤改良劑(ermented bark amendment; FBA),並 輔以銨鹽,結果發現:水稻銫吸收上升。作者建議可以 使用此配方搭配適當植生復育植物使用。

#### 3.4 對銫 137 核種移除效果的本土植物建議及說明

#### 3.4.1 植物品種篩選策略

過去的研究有許多學者研究不同植物在不同條件下 對於銫吸收轉移能力的探討(Burger et al., 2018),主要都 以植物體銫濃度與土壤銫濃度的比例來做為評估標準, 常以濃度比 CR(concentration ratio)或轉移係數 TF(transfer factor)來表示,單位依照各文獻不同而選擇使 用植物乾/鮮重、使用放射性銫比活度或穩定銫同位素濃 度等。Willey et al.(2005)套用植物分類學的理論,使用 RMEL(residual maximum likelihood) 方法建立模型,分 析 273 筆植物分類單位中銫濃度的數據,該方法可以用 來整理來自不同實驗的數據。(Beresford and Willey, 2019; Beresford et al., 2020)。

隨著分子生物的發展,對於植物分類上有很大的貢獻,能夠把過去依照性狀、外觀所區分的分類重新歸類, 更能依照植物演化順序來排序。Willey et al.(2005)發現: 植物中以石竹目(如蓼科莧科石竹科等)、十字花目、菊目 的植物銫累積最高,而禾本目及豆目銫累積較低。平均 來說,一般植物從土壤轉移至植物地上部的比率(TF)的 通用值是 0.07,單子葉植物的 TF 約為 0.035,真雙子葉 植物則約為 0.085(Willey, 2010),單子葉植物普遍比真雙 子葉植物銫累積來的低(Willey, 2010; Beresford and Willey, 2019)。

#### 3.4.2 從植生復育角度探討植物品種

理想中適合用來從事植生復育的植物應該考慮以下 幾個因素:種子易取得、栽培方式簡單、根系對污染物 吸收能力高、轉移至地上部能力高、對污染物有良好的 吸收速率、單位面積對汙染物的提取量大,適合大規模 栽培。而想要提取量高一般也需要較大的生物量,像是 過去歐洲會使用向日葵作為植生復育材料的原因主要 由於本身菊科植物銫累積就比較高,再加上其本身與一 般草本栽培種花卉、作物當中算是生物量大的 (Dushenkov et al., 1999),不少品種株高可以達2-3 公尺。 Dushenkov et al.(1999)實驗發現:莧屬植物銫累積濃度可 以達很高,但是產量較低;向日葵銫累積較低,但產量 大,所以要挑選植生復育品種時亦須要將這些條件納入 評估。

在過去調查當中,高累積的植物很多是多年生植物 (Tamaoki et al., 2016),長年下來累積是高的,但生長速 度緩慢單位時間當中吸收速率往往不見得高。而水耕栽 培是一種在實驗室較方便調節植物生長的方式(Ikeura et al., 2014),可以排除土壤的干擾,但是由於一些銫累積 較高的植物屬於較耐旱、耐鹽鹼植物,和實際田間定會 有所誤差,但其在篩選該植物鉀通道對於銫的分辨能力 方面亦不可或缺。

#### 3.4.3 從農作物(稻米及蔬果類)角度探討植物品種

農作物品種篩選和植生復育因為需求不一樣,例如 有些作物本身就比較偏好鉀,鉀的需求量就比其他作物 來的大,本來就具有比較多鉀運輸通道,因此絕有更多 機會藉此被植物吸收、轉移至植物地上部。若是汙染已 產生,該地區依舊需要種水稻或其他特定作物時,除了 使用分子生物的方法來育成低銫吸收的品種及田間土 壤管理方式,也可以透過現有的研究資料來評估如何減 低該種作物銫吸收風險。

以蠶豆盆栽實驗(Lai et al., 2016)為例,蠶豆植株內銫 累積,與土壤絶處理濃度、生長時間、銫吸收率呈現正 相關。隨著生育期增加銫累積也隨之增加,且易轉移至 新的器官。進入開花期後蠶豆銫吸收率下降,但總濃度 依然增加,最終由根系吸收的銫在成熟期平均達9.6%轉 移至種子貯存。因此Lai 等人建議:蠶豆這種生育期較 短的品種能夠有助於減少銫累積。

另一方面,由於鉀與銫兩者化學上是同族元素,因 此由大部分銫進入植物都是透過鉀的運輸路徑。然而鉀 對植物而言是必須營養元素而銫不是,絕對於植物而言 沒有生理作用。因此,若只吸收鉀而不吸收銫,那就是 植生復育區理想的農作物。因此,DF值(Discrimination factor;DF)就常常被用來評估作物吸收銫能力相對於吸 收鉀能力的參考指標:

$$DF(Cs) = \frac{([Cs]/[K])plant}{([Cs]/[K])solution}$$
(3.2)

DF 值代表銫相對於鉀富集程度,值越高表示銫越富 集。可以用來評估該植物運輸通道辨別銫和鉀的能力, 也可以說是當值越高,表示運輸通道把銫視為鉀的程度 越高。DF 值在銫和鉀在植物研究上,有被用來比較不同 植物品種的植物之間的比較、同植株不同部位的比較等 等。

Kondo 等人(2015)進行水稻盆栽實驗(品種 Oryza. sativa L. cv. Hitomebore),並計算水稻各部位 DF 值,結 果發現:其水稻根部遠大於地上部,而地上部之中,糙 米相對最為富集,接著是枯葉再來才依序是莖桿、穗軸、 穎殼、活性葉。其他關於大規模田間作物品種篩選,如 Penrose et al. (2017)篩選了四個品種的牧草(共 397 種個 品系),在兩個地方進行種植(Edinburgh 和 Aberystwyth, 其中後者土壤可交換性鉀較高),就發現多年生黑麥草具 有最高的銫累積,且變異大。

#### 3.4.4 評估適用於絕植生復育的台灣本土植物物種

本研究根據 Willey(2010)中 273 筆植物分類單位的 數據,以及 Beresford and Willey(2019)中 301 筆植物分 類單位的數據,整理出高銫累積植物,主要是蓼科、莧 科、石竹科、十字花科、菊科植物為主(如表 3.1),其中 台灣本土就有或者有在栽培的植物包括:尾穗莧(莧科 Amaranthus caudatus L.,俗稱紅莧)、千日紅(莧科 Gomphrena globosa,俗稱圓仔花)、茼蒿(菊科 Glebionis coronaria)、菸草(茄科 Nicotiana tabacum)、甜菜(莧科藜 亞科 Beta vulgaris)、藜(莧科藜亞科 Chenopodium album, 俗稱紅心藜、赤藜)、百日菊(菊科 Zinnia elegans,又稱 百日草)、芥菜(十字花科 Brassica juncea Coss var. folia Bailey)、藜麥(莧科藜亞科 Beta vulgaris)、油菜(十字花科 Brassica napus (turnip))等。另外其實文獻中有提及大洋 蹄(蓼科 Rumex obtusifolius)亦是銫極為高累積的植物品種,但它是台灣入侵外來種,大羊蹄的根莖化學物質具 有強烈的毒他作用,會阻礙向日葵及大豆的種子發芽; 且其死亡後留下來的殘株能夠使大麥、玉米、黃豆、向 日葵及小麥的發芽率降低(林務局資料)。

另一方面,菸草非屬上述幾科,確也是一種高鉀累 積植物,但是考量台灣對於菸草種植有管制,因此不適 合當植生復育建議作物。茼蒿、甜菜、芥菜本來就是蔬 菜作物亦不適合。藜(C. album)台灣在野外有一些分布, 台灣本土的台灣藜(紅藜 Chenopodium formosanum)為其 同屬植物,目前未有關於銫的調查文獻。藜麥用途和紅 扇屬植物,目前未有關於銫的調查文獻。藜麥用途和紅 劇個似,為一種雜糧作物。尾穗莧,種子和葉可食用, 會被稱作紅莧是因為其穗呈現紅色且美觀,也常被當作 園藝觀賞植物。油菜在台灣有不小的栽培面積,能夠作 為綠肥、蔬菜、油料,亦有進行育種研究,從多篇收集 的文獻來看,不同栽培種的銫累積品種,在培育室進行 栽種研究。

表 3.1 各種植物對 Cs137 吸收及累積效果資料彙整

科	屬	種	中文名稱	類別	用途	TF
菊科	Chrysanthemun	n coroarium L.	苘蒿	栽培種	蔬菜	0.7441
	Zinnia	elegans	百日菊	栽培種	景觀/綠肥	0.3463
	Lactuca	sativa L. lettuce	萵苣	栽培種	蔬菜	0.2140
	Helianthus	annuus	向日葵	栽培種	景觀/綠肥	0.0683
莧科	Amaranthus	caudatus	尾穗苋	外来種	雜糧	1.0736
	Chenopodium	album	藜	原生種	雜糧	0.3334
	Gomphrea	globosa L. cv. Alba	千日紅	栽培種	園藝景觀	0.4554
茄科	Nicotiana	tabacum Samsum	菸草	栽培種	嗜好類	0.5014
十字花科	Brassica	oleracea (Sprouts)	抱子甘藍	栽培種	蔬菜	1.0322
	Brassica	napus (turnip)	油菜/蕪菁	栽培種	蔬菜	0.5306

#### 3.4 舉辦專家討論會議

本計畫期中及期末舉辦兩次研討會,及臺灣大學實驗林管理處舉辦兩場研討會,並邀請計畫主辦單位輻射 偵測中心前來參加,針對本計畫相關資料彙整研析並進 行綜合討論,以確保並提升本計畫的專業品質。會議內 容如下:

- 1. 期中研討會(嘉義大學)
  - 莊愷瑋教授:「重金屬在土壤中的型態分佈與 植物有效性的評估」
  - 廖晨羽:「植物對銫吸收與累積之初步探討」文 獻研析
- 期末研討會(臺灣大學實驗林管理處溪頭自然教育 園區)
  - 江博能博士:有機酸對土壤銫137 釋出移動的 影響
  - 陳秋萍 博士:台灣不同植被林相的土壤碳庫
     分佈
  - 莊愷瑋教授:土壤重金屬污染調查的採樣策略 與評估

#### IV. 結論

基於上述的討論,本研究建議:千日紅(圓仔花)、尾 穗莧和百日菊作為銫汙染植生復育的台灣本土植物。千 日紅生命力強,常出現在野外,亦能作為景觀植物、百 日菊作為景觀及綠肥植物且種子較易取得,搭配栽培管 理方式、土壤改良劑使銫移動性上升,可以達到最佳的 效果。

# 参考文獻

- [1] 葉茂生。2005。台灣植物資源在糧食生產上之開發利用。台灣植物資源之多樣性發展研討會專刊(花蓮區農業改良場編):pp.117-140。
- [2] Alemán F, Caballero F, Ródenas R, Rivero RM, Martínez V, Rubio F 2014: The F130S point mutation in the Arabidopsis high-affinity K<sup>+</sup> transporter AtHAK5 increases K<sup>+</sup> over Na<sup>+</sup> and Cs<sup>+</sup> selectivity and confers Na<sup>+</sup> and Cs<sup>+</sup> tolerance to yeast under heterologous Expression. Front Plant Sci., 5,430. doi: 10.3389/fpls.2014.00430
- [3] Beresford NA, Willey N 2019: Moving radiation protection on from the limitations of empirical concentration ratios. J. Environ. Radioact., 208 – 209, 106020. doi: 10.1016/j.jenvrad.2019.106020
- [4] Beresford NA, Barnett CL, Guillén J 2020: Can models based on phylogeny be used to predict radionuclide activity concentrations in crops? J. Environ. Radioact., 218,106263. doi:10.1016/j.jenvrad.2020.106263
- [5] Burger A and Lichtscheidl I 2018: Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation. Plant Cell Physiol., 618,1459 - 1485. doi:0.1016/j.scitotenv.2017.09.298
- [6] Chen G, Hu Q, Luo Le, Yang T, Zhang S, Hu Y, Yu L, Xu G 2015: Rice potassium transporter OsHAK1 is essential for maintaining potassium-mediated growth and functions in salt tolerance over low and high potassium concentration ranges. Plant Cell Environ., 38, 2747 2765. doi:10.1111/pce.12585
- [7] Cristaldi A, Conti GO, Jho EH, Zuccarello P, Grasso A, Copat C, Ferrante M 2017: Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. Environ. Technol. Innov., 8,309-326. doi:10.1016/j.eti.2017.08.002
- [8] Dushenkov S, Mikheev A, Prokhnevsky A, Ruchko M, Sorochinsky B 1999: Phytoremediation of Radiocesium-Contaminated Soil in the Vicinity of Chernobyl, Ukraine. Environ. Sci. Technol. 33,469 – 475. doi:10.1021/es980788+
- [9] Fesenko SV, Alexakhin RM, Balonov MI, Bogdevitch IM, Howard BJ, Kashparov VA, Sanzharova NI, Panov AV, Voigt G, Zhuchenka YM 2007: An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident. Sci. Total Environ., 383:1 - 24. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.05.011
- [10] Frissel MJ, Deb DL, Fathony M, Lin YM, Mollah AS, Ngo NT, Othman I, Robison WL, Skarlou-Alexiou V,

Topcuoğlu S, Twining JR, Uchida S, Wasserman MA 2002: Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium. J. Environ. Radioact.,58,113 – 128. doi:10.1016/S0265-931X(01)00061-3

- [11] Genies L, Orjollet D, Carasco L, Camilleri V, Frelon S, Vavasseur A, Leonhardt N, P. Henner 2017: Uptake and translocation of cesium by *Arabidopsis thaliana* in hydroponics conditions: Links between kinetics and molecular mechanisms. Environ. Exp. Bot., 138,64 – 172. doi:10.1016/j.envexpbot.2017.03.013
- [12] Grabov A 2007: Plant KT/KUP/HAK Potassium Transporters: Single Family – Multiple Functions. Ann. Bot., 99,1035 – 1041. doi:10.1093/aob/mcm066
- [13] Hampton C, Broadley M, White P 2005: Short review: the mechanisms of radiocaesium uptake by Arabidopsis roots. Nukleonika, 50,3 - 8. doi:10.1104/pp.64.3.374
- [14] Ikeura H, Narishima N, Tamaki M 2014: <sup>133</sup>Cesium uptake by 10 ornamental plant species cultivated under hydroponic conditions. Environ. Pollut., 3(3),21 - 26. doi:10.5539/ep.v3n3p21
- [15] Ishikawa J, Fujimura S, Kondo M, Murai-Hatano M, Goto A, Shinano T 2018: Dynamic changes in the Cs distribution throughout rice plants during the ripening period, and effects of the soil-K level. Plant Soil., 429,503 – 518. doi:10.1007/s11104-018-3700-z
- [16] Ishikawa S, Hayashi S, Abe T, Igura M, Kuramata M, Tanikawa H, Iino M, Saitō T, Ono Y, Ishikawa T, Fujimura S, Goto A, Takagi H 2017: Low-cesium rice: mutation in *OsSOS2* reduces radiocesium in rice grains. Sci. Rep., 7,2432. doi:10.1038/s41598-017-02243-9
- [17] Kanter U, Hauser A, Michalke B, Dräxl S, Schäffner AR 2010: Caesium and strontium accumulation in shoots of Arabidopsis thaliana: genetic and physiological aspects. J. Exp. Bot., 61(14),3995 – 4009. doi:10.1093/jxb/erq213
- [18] Kato H, Onda Y, Teramage M 2012: Depth distribution of Cs-137, Cs-134, and I-131 in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. J. Environ. Radioact., 111,59 – 64. doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.003.
- [19] Kato N, Kihou N, Fujimura S, Ikeba M, Miyazaki N, Saito Y, Eguchi T, Itoh S 2015: Potassium fertilizer and other materials as countermeasures to reduce radiocesium levels in rice: Results of urgent experiments in 2011 responding to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Soil Sci. Plant Nutr., 61, 179 - 190. doi:10.1080/00380768.2014.995584
- [20] Kondo M, Makino T, Eguchi T, Goto A, Nakano H, Takai T, Arai-Sanoh Y, Kimura T 2015: Comparative analysis of the relationship between Cs and K in soil and plant parts toward control of Cs accumulation in rice. Soil Sci. Plant Nutr., 61:144 – 151. doi:10.1080/00380768.2014.973348
- [21] Kubo K, Nemoto K, Kobayashi H, Kuriyama Y, Harada H, Matsunami H, Eguchi T, Kihou N, Ota T, Keitoku S, Kimura T, Shinano T 2015: Analyses and countermeasures for decreasing radioactive cesium in

buckwheat in areas affected by the nuclear accident in 2011. Field Crop. Res., 170:40 – 46. doi:10.1016/j.fcr.2014.10.001

- [22] Kubo K, Fujimura S, Kobayashi H, Ota T, Shinano T 2017: Effect of soil exchangeable potassium content on cesium absorption and partitioning in buckwheat grown in a radioactive cesium-contaminated field. Plant. Prod. Sci., 20(4):396 - 405. doi:10.1080/1343943X.2017.1355737
- [23] Kubo K, Kobayashi H, Fujimoto R, Ota T, Shinano T 2019: Towards the partial resumption of agriculture with buckwheat cultivation in fields physically decontaminated of radioactive cesium after the nuclear power plant accident in 2011: a case study in Yamakiya District, Fukushima. Plant. Prod. Sci., 22(2),159 - 167.

doi:10.1080/1343943X.2018.1543546

- [24] Lai JL, Fu Q, Tao ZY, Lu H and Luo XG 2016: Analysis of the accumulation and redistribution patterns of cesium in *Vicia faba* grown on contaminated soils. J. Environ. Radioact., 164,202 – 208. doi:10.1016/j.jenvrad.2016.07.036
- [25] Ogasawara S, Eguchi T, Nakao A, Fujimura S, Takahashi Y, Matsunami H, Tsukada H, Yanai J, Shinano T 2019: Phytoavailability of <sup>137</sup>Cs and stable Cs in soils from different parent materials in Fukushima, Japan. J. Environ. Radioact., 198,117 – 125. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.12.028
- [26] Penrose B, Beresford NA, Crout NMJ, Lovatt JA, Thomson R, Broadley MR 2017: Forage grasses with lower uptake of caesium and strontium could provide 'safer' crops for radiologically contaminated areas. PLoS One, 12(5),e0176040. doi:10.1371/journal.pone.0176040
- [27] Qi Z, Hampton CR, Shin R, Barkla BJ, White PJ, Schachtman DP 2008: The high affinity K<sup>+</sup> transporter AtHAK5 plays a physiological role in planta at very low K<sup>+</sup> concentrations and provides a caesium uptake pathway in arabidopsis. J. Exp. Bot., 59(3),595 - 607. doi: 10.1093/jxb/erm330
- [28] Rai H, Yokoyama S, Satoh-Nagasawa N, Furukawa J, Nomi T, Ito Y, Fujimura S, Takahashi H, Suzuki R, Yousra ELM, Goto A, Fuji S, Nakamura S, Shinano T, Nagasawa N, Wabiko H and Hattori H 2017: Cesium uptake by rice roots largely depends upon a single gene, *HAK1*, which encodes a potassium transporter. Plant Cell Physiol., 58(9),1486 - 1493. doi:10.1093/pcp/pcx137
- [29] Rai H and Kawabata M 2020: The dynamics of radiocesium in soils and mechanism of cesium uptake into higher plants: newly elucidated mechanism of cesium uptake into rice plants. Front. Plant Sci., 11,528. doi:10.3389/fpls.2020.00528
- [30] Sarwar N, Imran M, Shaheen MR, Ishaque W, Kamran MA, Matloob A, Rehim A, Hussain S 2017: Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. Chemosphere, 171, 710-721. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.12.116
- [31] Shaw G, Bell JNB 1989:The kinetics of caesium absorption by roots of winter wheat and the possible

consequences for the derivation of soil-to-plant transfer factors for radiocaesium. J. Environ. Radioact., 10,213 – 231. doi:10.1016/0265-931X(89)90026-X

- [32] Sun X, Kobayashi S, Tokue A, Itabashi H, Mori M 2019: Enhanced radiocesium uptake by rice with fermented bark and ammonium salt amendments. J. Environ. Radioact., 202, 59-65. doi:10.1016/j.jenvrad.2019.02.008
- [33] Suzuki S, Imura T, Kobayashi Y, Usui M, Miyazaki N, Sano T 2020: Radiocesium transfer from Andosols to brown rice in the northern and northwest areas of Tochigi Prefecture, in the first 3 years following the 2011 Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. 66(3), 515 526.

doi:10.1080/00380768.2020.1760692

- [34] Tanaka K, Takahashi Y, Sakaguchi A, Umeo M, Hayakawa S, Tanida H, Saito T, Kanai Y 2012: Vertical profiles of iodine-131 and cesium-137 in soils in Fukushima Prefecture related to the fukushima daiichi nuclear power station accident. Geochem. J., 46,73 - 76. doi:10.2343/geochemj.1.0137.
- [35] Tamaoki M, Yabe T, Furukawa J, Watanabe M, Ikeda K, Yasutani I, Nishizawa T 2016: Comparison of potentials of higher plants for phytoremediation of radioactive cesium from contaminated Soil. Environ. Control Biol., 54(1), 65 69. doi:10.2525/ecb.54.65
- [36] White PJ, Beoadley MR 2000: Tansley Review No. 113 Mechanisms of caesium uptake by plants. New Phytol., 147, 241 - 256. doi:10.1046/j.1469-8137.2000.00704.x
- [37] Willey NJ, Tang S, Watt NR 2005: Predicting intertaxa differences in plant uptake of cesium-134/137. J. Environ. Qual., 34,1478 - 1489. doi:10.2134/jeq2004.0454
- [38] Willey NJ 2010: Phylogeny can be used to make useful predictions of soil-to-plant transfer factors for radionuclides. Radiat. Environ. Biophys., 49:613 – 623. doi:10.1007/s00411-010-0320-2
- [39] Yoshikawa N, Nakashima K, Suzuki Y, Miyazu S, Suzuki K, Nogawa N, Harada N 2020: Influence of irrigation water intake on local increase of radiocesium activity concentration in rice plants near a water inlet. J. Environ. Radioact. 225,106441. doi:10.1016/j.jenvrad.2020.106441

# 物聯網 IoT 技術應用於輻射源安全管制之研究 The study on applications of IoT-related techniques for Radiation source safety control

計畫編號:109-2623-E-035-001-NU 計畫主持人:簡儀欣 e-mail:yhchien@fcu.edu.tw 計畫共同主持人:葉俊良 計畫參與人員:劉子瑜 執行單位:逢甲大學材料科學與工程學系

#### 摘要

近年物聯網技術蓬勃發展,應用面亦為各領域爭相 研究之課題,透過物聯網應用,可以利用網路對機器、 装置、人員進行集中管理,亦可搜尋物件位置、軌跡追 蹤,防止失竊以及輻射劑量監測。另可藉由物聯網所收 集之資訊,聚整為巨量資料進行數據分析,提供主管機 關及相關單位作為管制依據、研判及決策參考。因此本 計畫將進行物聯網 IoT 技術應用於輻射源安全管制之研 究,蒐集相關資訊與評估可行性方案。此外由於識別用 之 RFID 電子標籤可能受輻射及應用場域影響導致訊號 失效或破損問題(暴露於輻射、熱、冷,以及可能被非法 棄置的環境,如海洋),必須從嚴苛環境之應用情境的角 度來評估適合的 IoT Senosor/訊號傳輸模組以獲得可靠 的訊息回饋及定位,因此本計畫也將 IoT 應用終端之可 能失效模式解析與突破策略納入考量,從構裝、耐候性 及可靠度的角度來做整合型的先期研究評估。本先期評 估計畫之成果將做為導入後續期程計畫之研究基礎,協 助輻射安全管制主管機關進行數位轉型與管制落實。

**關鍵詞**:物聯網、輻射源、輻射安全管理

#### Abstract

Due to the development of internet of things (IoT) is getting mature recently, the IoT technique has been applied in various fields. In the application in nuclear safety, a control system could manage the equipment, device as well as workers through IoT-based techniques, and we could also search and track the position of nuclear and radioactive materials to prevent illicit trafficking and the failure of nuclear facilities or containment units. In this proposal, the present development of the IoT techniques applied in the nuclear safety is studied. By studying the IoT-based techniques and the application scenarios, we would conclude feasible plans for the application of IoT techniques in the nuclear safety in Taiwan. Besides, owing to the performance of RFID tags or other terminal devices used for identification or detection might be influenced by surrounding environments, the failure mode, package, and the reliability of the terminal devices should be also considered and studied. The information and results collected will be the basis of the following research projects and could be the guideline of IoT application in nuclear safety for the related authorities.

Keywords: internet of things (IoT), nuclear materials, nuclear safety.

#### I. 前言

輻射的和平應用隨著社會經濟的進步與科技發展 顯著增加,包含核能發電、醫用放射治療、工業放射照 相、農業照射品種改良、測井以及採礦等等應用,影響 範圍廣大,因此相關安全管制機制須確實,才能保障工 作人員安全及有效增進經濟效益。由於使用輻射源需保 證持續管制措施,意指執行法規監督輻射源生命週期的 每一階段,皆具有效及完善的管理制度,如此方能支持 輻射源廣泛使用。這必須由管理機構、製造商、販賣者、 使用者及運送者協力合作,才能對於高風險輻射源進行 有效及成功的法規管制。若能運用新世代數位科技,及 早評估與布局相關基礎設施建置,將能落實防範因使用 輻射源所產生之健康與安全的不正當風險危害。

隨著 5G 通訊開始廣泛使用,前所未有的通訊速度 和強大的邊緣設備功能相結合時,許多裝置都會在物聯 網環境下透過網路互相通訊,包括汽車、工業自動化設 備、醫療植入裝置,以及可穿戴裝置、智慧家庭裝置等 新興應用。由於新世代之通訊發展,這些超快速的邊緣 網路也將對如何管理設備、數據、應用程式和工作流程 以及它們如何連接到傳統和雲端環境產生變革性的影 響。藉由端、網、雲之整合,物聯網設備將可用於追蹤 物件、監控庫存、收集用戶和設備訊息,並提供可影響 智慧環境中的所有資源即時數據。

近年物聯網 IoT 技術逐漸趨於成熟,衍伸出許多不同情境應用,本計畫期望將來能夠導入 IoT 技術應用於 輻射源安全管制,因而進行相關先期研究。國內目前尚 未使用物聯網 IoT 相關技術於輻射源安全管制領域,且 此應用包含感測器、無線通訊、監控介面等部分,每一 部分都有多種不同原理及優缺點的技術可供選擇,皆須 加以評估。因此本計畫針對國內相關部門應用 IoT 技術 於公共安全之推動實績與國外 IoT 技術應用於輻射源安全管制之案例進行資料彙整,再依照輻射安全管制應射 全管制之案例進行資料彙整,再依照輻射安全管制應用 之主要情境、輻射安全管制困難處、可運用技術之關鍵 資訊與可能方案進行研究,適當地對各技術進行評估與 初步篩選略納入考量,從構裝、耐候性及可靠度的角度來 做整合型的先期研究評估。

### Ⅱ. 主要內容

本計畫研究重點著重於 IoT 技術應用案例搜尋,以 初步釐清相關架構,已進行以下項目的資料蒐集,重點 彙整如下:

1. 國內相關部門應用 IoT 技術於公共安全之推動實績 在已彙整之國內公共安全物聯網案例中,空氣品質 監測系統與應用(如圖1)主要透過空氣之監測,達到智慧 治理、污染溯源;水情監測系統應用(如圖 2)藉由水文觀 測、水利建築物監控、水資源管理等資訊運算,提供防 汛決策支援、即時災損評估、水災預警預報;台電蘭嶼 地區環境輻射監控(如圖 3)將環境輻射進行連續自動監 測,而偵測數值透過無線傳輸傳送至放射試驗室之數據 傳送接收平台,並上傳至平台上達到核能資訊透明化。 從國內案例中得知物聯網技術之感知層、傳輸層、應用 層此三架構是必要存在的,在輻射安全管制場域中,應 用層已確定為「輻射源的安全管制」, 感知層為「輻射偵 測器」,在此前提下如何將偵測到的數據良好傳輸,並即 時且智慧地處理,為其開發重點。此外結合原能會的輻 射管制需求可以分成輻射源清點管理(移動性輻射源、固 定型輻射源)、人員監管、排放監測等(如圖 4),亦以此 需求進行國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制之 現況瓶頸與技術難題評估。



圖 3、全臺各地環境輻射自動監測資訊



圖 4、原能會的輻射源管制需求

# 國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制之現況 瓶頸與技術難題

國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制需要根 據實際應用場域細節做評估,包含移動性輻射源運送車 輛內外部環境、固定型輻射源標籤管控、人員被動式臂 章、無線射頻裝置或現場攝影機架設之需求及可行性等。 於109 年結案報告中已列出物聯網技術導入輻射源安全 管制之現況瓶頸與難題為無線模組選擇、電池續航力、 訊號干擾問題、感測器與訊號發送/接收器之損耗(輻射 對材料影響、防輻射材料種類)等項目,最終彙整出較為 重要的無線通訊模組之傳輸距離與頻寬比較(如圖 5)、通 訊協定技術比較(如表 1),以作為將來實際應用情境之技 術選擇。



圖 5、無線通訊模組之傳輸距離與頻寬比較圖

表 1、通訊協定技術比較表

				101 · C 11	1111012012012	
技術	頻率	數據速率	範圍	功率	成本	電池壽命
Zigbee	2.4 GHz	250 kb/s	10 0m	低 (發射功率 僅1 mW)	中 (ZigBee模組成 本在6美元左右 )	兩節5號電池可 以維持長達6個 月到2年左右的 使用時間
藍牙	2.4 GHz	1, 2.1, 3 Mb/s	100 m	低	低	
LoRa	<1 GHz	2 ~ 550 kb/s	市區: 2~5 km 郊區: 15 km	低 (接受電流 僅10 mA 睡眠電流 200 nA)	中 (5美元)	
NB-IoT	180 kHz	0.1~1 Mb/s	15km	中 (0.25W)	低 (模組價格不超 過5美元)	NB終端的待機 時間可以達到 10年
Sigfox	<1 GHz	很低	市區: 10km 郊區: 50km	低	ф	

#### 3. 國外 IoT 技術應用於輻射源安全管制之案例

通過與主管機關(原能會)討論後,確認其輻射管制需求 與韓國核能安全研究所(Korea Institute of Nuclear Safety)、美國能源部國家核子保安總署(NNSA)的案例較 為相似,因此著重於此兩個案例的查詢與彙整。

#### a. 韓國 Korea Institute of Nuclear Safety (KINS)案例

KINS 的業務功能主要分成六大部分(如圖 6),從進口/生 產到處置所有階段的放射源總體安全管理、相關證照/執 照管理、輻射相關人員管理到輻射環境監測皆有對應的 業務功能,其中 <u>RADLOT(移動性輻射源)、IERNET(排 放監測)</u>的功能與原能會的需求較為相似,如圖七所示, RADLOT 是基於從 GPS 收集的位置資訊對 NDT 輻照設 備輻射源做實時跟踪的系統,其目的在於監視輻射源位 置並跟踪輻射源的移動、確認輻射劑量率與終端檢測設 備狀況,以及如果丟失或失竊,能夠迅速找到輻射源, 因此對於移動性輻射源可以參考韓國案例對應之業務 流程。



圖 6、KINS 主要業務功能



圖 7、RADLOT 的系統組成

# b. 美國 DOE/NNSA; Pacific Northwest National Laboratory 案例

DOE 根據可移動輻射源設備的特徵提出對應之安全性 監管挑戰(如表 2),例如在廣泛的地理區域內運輸和使用 時,會因遠程訊號的傳輸限制,導致通知警報和監管機 能失效,因此提出警報通信方法和可靠性的注意事項。 同時 DOE 也已經建置測井用放射源跟踪系統(如圖 8), 對於原能會提出的移動性輻射源監管需求,可以參考此 系統的架構,從輻射源訊號透過藍牙傳輸至儲存箱外, 再藉由 RF 天線傳輸至中控系統處理,讓使用者/管理者 能夠獲得監控資訊。

#### 表 2、移動輻射源的安全監管挑戰

	移動設備的特徵	安全性監管的挑戰
•	便攜式設備,可以從存儲設施轉移	初山大岗府要公司从内入业时公
	到運輸車輛·再到工作地點	• 超击仔储位直郸團的女主性監官
	左廣泛的地理區域內運輸和使用	• 在運輸和使用期間有限的遠程警報
	任風之的地理區或內建輸和使用	通知和監視
·	在工作現場使用的時間長度不同	• 在運輸和使田過程中依賴人工程序
	用於惡劣的地方,有時甚至是偏遠	和揭作昌湛涌
	的地方	仰床旧桌再進
		• 解決"延遲"的選項有限
·	相對較小的設備/容器	<ul> <li>應變決策權限可能難以確定</li> </ul>
·	在操作過程中輻射源是處於暴露狀	前進位署司社会社座総体国立国
	態	• 設備Ш直可能Ш於應變範圍之外
需強	能化的安全注意事項	
•	跟踪設備/容器並監視輻射源的存在	

- 警報通信方法和可靠性
- 耗電量(電池壽命)
- 傳感器和通訊組件的空間有限



圖 8、测井用放射源跟踪系统

美國與韓國案例比較如圖 9,可以知道輻射源追蹤系統 是因應主管機關所需求的業務流程來做設計,因此物聯 網 IoT 技術應用於輻射源安全管制需要依據原能會實際 應用情境進行確認與規劃。





圖 9、美國與韓國案例比較

#### Ⅲ. 結果與討論

1. 國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制之推動 策略

運用 IoT 技術到輻射源安全的管制須注意,即時化、 遠距化、智慧化三項重點。即時化與感測器佈建位置、 數量有關,遠距化和終端裝置傳輸功率、傳輸距離、封 裝材質、周遭環境的干擾,以及使用通信網路的類型有 關,而智慧化指的則是雲端運算分析、主動決策示警等 應用層面的設計。由 IoT 物聯網於輻射應用之現況,可 由以下幾點作為後續建議方案的重點參考:

- 需定義清楚應用情境,與關鍵問題,由優先權最高 之應用需求端進行方案展開。
- 依據蒐集資料,目前國內在放射源監管的領域內, 並沒有針對輻射源識別、定位與追蹤的物聯網應用, 亦沒有完善的整套流程,放射源的危險標識還是使 用吊牌或者名牌等方式,因此需依據監管業務流程 設計,並導入數位工具進行安全性監管。
- 把 RFID 以及輻射劑量儀兩者之間相結合,並使用 到放射源的在線監管範疇內,是射頻識別技術的一 種創新的運用,與互聯網的結合使用也是今後放射 源監管發展的長遠選擇。
- 可能運用系統與架構: 通過 RFID 區分放射源的 ID 進行放射源識別,通過輻射劑量儀測出該放射源的 劑量值,並結合放射源自帶 GPS,將位置資訊展現 在GIS 的地圖上呈現。
- 通過射頻技術識別特定範圍內所有的放射源 ID, 並 測出輻射劑量值。通過檢測儀判斷是否存在不在特 定範圍內的劑量值,存在即進行報警(包括低閾值 和高於閾值)。
- 可能應用的功能模組:輻射源劑量檢測裝置、放射 源影像監控、無線通訊模組、資訊管理、自動報警、 遠程、定位等執行監控。
- 模組封裝外殼防輻射材質的部分,須搭配核能或輻 射相關研究單位諮詢討論以確認是否有認證或可靠 度測試相關資源協助。由核能所釋出資料初步評估 有屏蔽防護與塗覆防護兩種方式,其中屏蔽防護為 在輻射源和關鍵部件之間以可隔離輻射之材料將輻 射隔離,這類常用屏蔽材料有不銹鋼、鉛合金、鎢 合金、鑄鐵、混凝土、水等。鉛屏材料類型、形狀和 用量取決於輻射類型、輻射源強度以及可容許的劑

量率。而塗覆防護則是在電子器件、感測器、信號 通訊單元等對輻射敏感的元件或部位的表面塗覆或 包覆一層防護材料,以材料機械性能的變化作為輻 射損傷劑量的評價指標,在常用的有機材料中:聚 四氟乙烯和聚醯胺等材料的輻射損傷劑量在  $10^2 \sim 10^3$  Gy,密封用人造橡膠和聚丙烯等的在  $10^4$  Gy 以上, 矽酮、礦物油和聚苯材料等潤滑油的在 10<sup>4</sup>~10<sup>8</sup>Gy, 氯丁酚醛等粘合劑的在 5×10<sup>5</sup>~10<sup>7</sup>Gy 之 間,未來將根據使用材料的目的,選擇適當的塗覆 材料。

RFID 元件若由耐高溫陶瓷材質封裝, 可重複耐 235°C 高溫處理,具有 IP68 防塵水封裝,亦可適用 於金屬材質設備上。

物聯網導入應用4個階段及組成要素,如表3所示, 須包含裝置研發、系統整合、資料分析運用服務,以及 共通性的應用服務整合。而導入的流程如前所述,需要 依據主管機關的監管業務流程做設計,需要從上而下, 從應用端需求情境展開,到網路,到端,然後再回到實 際與使用者的應用服務層的流程, IoT 物聯網於輻射應 用之建議架構如圖 10, 而放射源追蹤系统開發策略與程 序如圖 11 所示。

表3、物聯網導入應用4個階段及組成要素

	裝置研發	系統整合	資料分析 運用服務	應用服務(共 通性)
2	<ol> <li>對不裝用</li> <li>約</li> <li>第</li> <li>1</li> <li>1<td>共 設 用 設 二 、 一 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、</td><td><ol> <li>與地方合作界定問題解決 需求</li> <li>匯流大資料分析建立智能 管理試驗模組或資訊系統</li> <li>因應最新管制趨勢,與地 方篩選試驗場域,建立應 用模式</li> </ol></td><td>新興應用 服務 + 空間圖像化 平臺 + 跨單位環境 感測數據 共享機制</td></li></ol>	共 設 用 設 二 、 一 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	<ol> <li>與地方合作界定問題解決 需求</li> <li>匯流大資料分析建立智能 管理試驗模組或資訊系統</li> <li>因應最新管制趨勢,與地 方篩選試驗場域,建立應 用模式</li> </ol>	新興應用 服務 + 空間圖像化 平臺 + 跨單位環境 感測數據 共享機制



圖 10、IoT 物聯網於輻射應用之建議架構

策略進程	開發程序
第一期: 初步設計與工程單元評估	<ul> <li>概念設計</li> <li>需求定義</li> <li>初步設計</li> <li>工程單位</li> </ul>
第二期: 關鍵設計和原型單元	<ul> <li>□ 原型單元</li> <li>□ 原型小型試驗</li> <li>□ 詳細設計</li> <li>□ 裝置驗證和確認</li> <li>□ 關鍵設計</li> </ul>
第三期: 技術轉讓, 製造和部署	□ 技術轉讓 □ 小批量試生產 □ 生產批准

圖 11、放射源追蹤系统開發策略與程序

#### 國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制之建議 方案與成本效益分析

因此本計畫建議後續由優先順序第一之移動性輻 射源監控為主要展開項目,參考國外案例將放射源線上 監控系统分階段規劃與進行,如下建議:

●著重在終端應用圖資呈現平台的使用情境確認、欲監管之業務功能模組評估調查,如雲端運算分析、主動決策示警<u>以對應導入物聯網 IoT 技術後</u>,對於巨量資料處理及應用建議方案。

●依實際業務流程進行端網雲系統、網路通訊 架構與方案評估調整,以及端網訊號通訊之介面評 估(NB-IoT、GSM、GPRS、BLE、RFID基站..)以對 應應用物聯網 IoT 技術,監控射源運送車輛,防止 輻射源失竊之推動策略與建議方案。

 依據情境所確認的業務流程進行硬體設計與 工程單元試做評估,包含 GPS、輻射劑檢測儀、RFID 識別、網路通信、傳輸功率、傳輸距離、封裝材質、 周遭環境的干擾等概念性驗證,再針對硬體<u>對於感</u> 測器續航力、抗輻射能力與資料傳輸之影響進行優 化建議方案評估。

由於本年計畫尚未與主管機關進行使用情境細節 確認、欲監管之業務功能模塊評估調查,因此初步以國 外案例作為參考,進行包含輻射偵測元件、RFID 電子標 籤、能判斷標籤狀態與處理訊號匹配電路的微處理器 (MCU)、無線傳輸與 GPS 定位模組、以及充電電池的終 端裝置硬體成本評估,此功能區塊僅以終端模組相關訊 號處理與傳輸部分的硬體設計作考量,並無涵蓋業務功 能模組相關軟韌體開發評估。輻射源追蹤系統終端模組 初步估計物料清單,單純整體硬體約為3萬8千元/組, 其中不涵蓋軟韌體開發(因為需依照業務流程模組而定)、 輻射量校正量測、電路佈局+洗板+打件費用,此預估成 本為初步驗證模組,若能定義清楚應用流程以及量體, 會更有參考依據,此外後續軟體撰寫與追蹤平台系統設 計須與主管機關詳細討論應用情境與業務流程後方可 進行成本評估。

#### IV. 結論

本計畫進行物聯網 IoT 技術應用於輻射源安全管制 之研究,蒐集相關資訊與評估可行性方案。包含國內相 關部門應用 IoT 技術於公共領域之推動實績、國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制之現況瓶頸與技術難題 解析、國際間應用 IoT 技術對於輻射源安全管制之資訊 彙整、國內導入 IoT 技術應用於輻射源安全管制之推動 策略與建議方案,以及國內導入 IoT 技術應用於輻射源 安全管制之成本效益分析等內容。

目前也初步以國外案例作為參考,以終端模組相關 訊號處理與傳輸部分的硬體設計作考量進行成本估算, 然而此成本評估未包含相關軟體程式開發撰寫,或是硬 體縮裝開發成本之估算,僅可驗證從端模組到電信伺服 器的訊號呈現與傳導方式。整個考量若做到如韓國或美 國系統則須包含底層的硬體,韌體,包裝到上網、資訊 顯示及記錄、連結圖資顯示紀錄、網路資料庫、web based 顯示程式及專有伺服器等等,整體系統設計須與主管機 關詳細討論應用情境與業務流程後方可進行成本評估。 本先期評估計畫之成果將做為導入後續期程計畫之研 究基礎,協助輻射安全管制主管機關進行數位轉型與管 制落實。

#### 参考文獻

- [1] A. Rayes, S. Salam, Internet of Things From Hype to Reality, Springer Nature Switzerland AG 2019
- [2] 行 政 院 環 境 保 護 署 網 站 : https://www.epa.gov.tw/Index
- [3] 水資源物聯網入口網網站: <u>https://iot.wra.gov.tw/</u>
- [4] 民生公共物聯網網站: https://ci.taiwan.gov.tw/
- [5] 台灣電力公司環境輻射監測網站: https://wapp4.taipower.com.tw/nsis/web/index.html
- [6] 台灣電力公司低放貯存場 109 年輻射監測計畫: <u>https://wapp4.taipower.com.tw/NSis/web/N5\_P109.p</u> df
- [7] 蘭 嶼 地 區 環 境 輻 射 監 測 : http://211.75.103.196/lanyu.html
- [8] 行政院原子能委員會: <u>https://www.aec.gov.tw/</u>
- [9] 百佳泰 Allion Labs 網站 <u>https://www.allion.com.tw/aiot/heat-map-analysis/</u>
- [10] Sok Chul KIM (Ph.D), Response Supporting System for Deterring Illicit Trafficking of Nuclear and Radioactive Materials, Korea Institute of Nuclear Safety
- [11] Byung Soo Lee (Korea Institute of Nuclear Safety), Abu Dhabi Conference: Successful Korean Initiatives for Strengthening Safety and Security of Radioactive Sources, 27-31 Oct. 2013
- [12] Kurt Silvers (Pacific Northwest National Laboratory), Mobile Source Tracking Projects (Global Threat Reduction Initiative)
- [13] 核電廠除役階段之輻射安全管理與規劃技術研究 (1/4)

# 公眾與職業曝露劑量約束之實務作業與管制研究 Policy & Practice for Optimization of Dose Constraint for Public and Workers

計畫編號:109-2623-E-039-001-NU 計畫主持人:袁明豪 e-mail:mhyuan@mail.cmu.edu.tw 計畫參與人員:周仕麒、梁嘉容、梁嘉晏 執行單位:中國醫藥大學職業安全與衛生學系

#### 摘要

本計畫研究目標針對公眾與職業曝露劑量約束,進 行實務作業與管制策略之文獻回顧,並利用「全國輻射 工作人員劑量資料庫」分析,提出相關職業曝露劑量約 束最適化(Optimisation)管制策略之具體建議。

本研究分析英國游離輻射防護法有關輻射風險評 估與其劑量約束相關指引;亦納入南韓、阿拉伯聯合大 公國、玻利維亞之輻射工作人員劑量約束策略,進行政 策分析與比較。劑量約束代表良好管理的工作場所的劑 量水平,並不是劑量限度。因此,各國採取劑量約束或 風險評估策略包括(1)當輻射工作人員曝露劑量達 15 mSv/yr或0.5 mSv/month、(2)該工作類別之95%以上曝 露劑量,(3)取 70-90%劑量限度(20 mSv/yr),即 14-18 mSv/yr等。另外,有關劑量曝露風險評估方法應針對單 一射源劑量率、個人劑量資料庫、曝露情境、模擬工具 之程序建構曝露劑量約束。

從1999年至2019年臺灣輻射工作人員曝露分布資 料顯示 1E 反應器運轉、2A 放射診斷、3B 工業放射照 相、3G 所有其他工業應用、6C 其他等五個工作類別, 曝露劑量 10-20 mSv/yr 人數超過35 人次。比較90%、 95%與99%曝露劑量值>1 mSv/yr 的工作類別包括:1E 反應器運轉、1G 核燃料循環研究、2C 核子醫學、2E 所 有其他應用、3B 工業放射照相,這些可視為優先劑量約 束管理族群。然而,目前臺灣輻射工作人員仍需細項分 類,較有助於後續評估各類輻射工作人員之95%曝露劑 量,作為良好管理或合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)的劑量約束參考。

關鍵詞:最適化、輻射工作人員、劑量約束、合理抑低

#### Abstract

This study reviewed current international practices on dose constraint of public and occupational exposure and examine the National Dose Database for Radiation Workers in Taiwan for identifying the representative group. Then the optimisation strategy of dose constraint for occupational exposure were proposed for consideration.

First, the study examined the radiation risk assessment of the UK's Ionising Radiations Regulations (2017) and their guidance for dose constraint and then compared with other regulation practices of the dose constraint for radiation workers and public from South Korea, United Arab Emirates and Bolivia. The value of a dose constraint represents a level of dose which should not be exceeded in a well-managed workplace. Therefore, several approaches were adopted to establish dose constraint, such as (1) exposure dose above 15 mSv/yr or 0.5 mSv/month, (2) 95% of exposure dose for the sub-group and (3) 70%-90% of dose limit (20 mSv/yr). Furthermore, the radiation risk assessment requires the estimated radiation dose rates for individual source, personal dosimetry, possible accident situations, their likelihood and potential severity and risk assessment tool to establish dose constraint for each worker's group.

From the 1999-2019 National Dose Database for Radiation Workers in Taiwan, the exposure dose of subgroup of IE, 2A, 3B, 3G and 6C excesses 10-20 mSv/yr over 35 person during 21 years. The sub-groups for 90%, 95% and 99% dose above 1 mSv/yr include 1E, 1G, 2C, 2E, 3B, which could be priority sub-groups for establishing dose constraint. However, current database may require significant improvement for more specific sub-category to better identify the 95% exposure dose as dose constraint to represent a well-managed workplace and as low as reasonably achievable (ALARA) principle.

**Keywords:** Optimisation, Radiation worker, Dose constraint, ALARA (As low as reasonably achievable)

#### I. 前言

國際輻射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP) 2007 年第 103 號建議書 (Recommendations of the International Commission on Radiological Protection)提出游離輻射防護之新趨勢 (ICRP, 2007)。輻射防護應顧及計畫(Planned)、緊急 (Emergency)、既存(Existing)等三類曝露狀況,再針對各 種曝露狀況上的不同公眾曝露、職業曝露、和醫療曝露, 進行正當化(Justification)、最適化(Optimisation)或限制化 (Limitation)之原則與行動規劃。

劑量約束與參考水平為對一射源造成個人劑量之 一種前瞻性及射源關聯(Source-related)的限制,它代表 一射源造成之劑量最大之個人的基本防護基準,被視為 在對該射源防護最適化中的劑量之上限(ICRP,2007)。射 源為產生或可產生游離輻射之來源,包括放射性物質、 可發生游離輻射設備或核子反應器及其他經主管機關 指定或公告之物料或機具。

對於職業曝露,劑量約束為用於限制特定射源之最 適化過程,考慮方案中選擇範圍的個人劑量值。對於公 眾曝露,劑量約束為公眾成員可能接受規劃的作業或任 何列管射源造成年劑量的上限。另外,關於計畫曝露狀 況中的公眾曝露,ICRP 第 101 號報告書(2007)提出了代 表人(Representative person)的新概念。代表人表示的是 假想受到較高曝露群體之個人,用以代替以往的關鍵群 體之平均成員(Average member of the critical group)的基 本概念。

選定劑量約束或參考水平為最適化(Optimisation)過 程之重要步驟與目標。最適化方案代表在主要曝露的情 境下達到合理抑低的防護水平。因此這並不表示當劑量 在一特定水平以下時,可以決定停止最適化的程序。當 劑量高於此一水平,即代表防護並非最適化。在規劃時 應確保與該射源相關的劑量不超過該約束值;防護的最 適化將建立一個劑量低於該約束值的可接受的水平。

ICRP 第 103 號建議書指出正當化原則必須確保任 何擬決定要改變輻射曝露狀況時,合理抑低。在考量正 當化的實踐,防護最適化係指某特定途徑引起的個人曝 露劑量,受曝的人數以及曝露的可能性(潛在曝露),在考 慮經濟和社會等因素影響,應保持在合理的管制程度, 且不應當超過劑量約束或參考水平。限制化之應用則是 針對計畫曝露之來源進行管制。

本年度研究目標針對公眾與職業曝露劑量約束 (Dose constraint),進行實務作業與管制策略之文獻回顧, 並利用「全國輻射工作人員劑量資料庫」分析,提出相 關職業曝露劑量約束最適化(Optimisation)管制策略之合 理抑低(As Low As Reasonably Achievable, ALARA)具體 建議。

#### Ⅱ. 主要內容

#### 1. 分析各國之 ALARA 劑量約束管制實務作業

本研究目標針對公眾與職業曝露劑量約束(Dose constraint),探討國際間各國之合理抑低相關管制策略、 實務作業,了解其法規設立、採納的方式、劑量約束最 佳化的管制條件等面向,特別針對以下四個國家之實務 做法進行分析比較:

- (1) 英國(UK): 游離輻射防護法(The Ionising Radiations Regulations, 2017)
- (2) 韓國(Korea):核電廠輻射工作人員劑量約束(Kong et al., 2021)
- (3) 阿拉伯聯合大公國(UAE):輻射工作人員之劑量約 束(FANR, 2004)
- (4) 玻利維亞(Bolivia):輻射工作人員之劑量約束 (Mariaca, 2008)

# 建立計畫與現存曝露途徑之公眾與職業工作人員之 劑量分布

依據 2020.5.11 行政院原子能委員會全國輻射工作 人員劑量資料庫中心提供從 1999 至 2019 年之「全國輻 射工作人員劑量資料庫」,依據工作分類(1:核燃料循環、 2:醫用、3:工業用、4:天然射源、6:其他)、有效劑 量(《游離輻射防護安全標準》第4條定義:「有效劑量」 為強穿輻射產生之個人等效劑量與攝入放射性核種產 生之約定有效劑量之和。)進行篩選,有效筆數共 896,903 筆,進行曝露劑量分布之分析。

進一步鑑別不同工作類別之 90%、95%、99%曝露 劑量值,找出關鍵曝露族群。並以統計分析方法針對性 別、年齡、工作類別等變項進行交叉分析,探討輻射工 作人員之曝露劑量在前述統計變項影響下之分布情形。 針對類別與連續變項,曝露數據非常態分布時,以 Wilcoxon rank-sum/Mann-Whitney U 檢定進行雙樣本中 位數差異檢定。以 p<0.05\*、 p<0.01\*\*\*,p<0.001\*\*\*表示統計達顯著差異;而針對連續與連續變項則以線性相關分析,r可表示統計上相關程度。R = 0.5-0.75表示中度相關\*、0.75以上表示強相關\*\*。

#### III. 結果與討論

#### 1. 各國之 ALARA 劑量約束管制實務作業

#### <u>英國</u>

根據英國安全衛生執行署(HSE)發布游離輻射防護 法(The Ionising Radiations Regulations 2017),相關有關 劑量約束管制條款如下:

第8條 輻射風險評估(8. Radiation risk assessments):

 輻射風險評估程序能作為建構劑量約束的基礎,雇 主在建立劑量約束時可考慮過去操作經驗與專業 機構建議。

第9條 曝露限制(9. Restriction of exposure):

- 要求雇主合理抑低勞工職業曝露,建立劑量約束。
- 劑量約束代表良好管理的工作場所的劑量水平,並 不是最高劑量。
- 應正式啟動研究之劑量須確保曝露劑量< 15 mSv/yr或官方評估建議值。
- 雇主依據過去操作經驗、專業機構建議,在第八條
   風險評估階段設定劑量約束。
- 針對職業曝露之劑量約束僅適用單一射源且曝露 劑量值較多(即每年幾毫西佛)的情況。核電廠須 建立與良好管理執行相關的劑量數據庫;對於以下 類型的輻射工作(員工曝露劑量較低)不適用:
  - (a) 放射診斷、核子醫學、大多放射醫學曝露
  - (b) 大多非核工產業
  - (c) 教學研究活動
- 即便是對於一些曝露劑量較高的特殊行業(如:工 業放射照相)也不一定適合使用劑量約束,除非有 足夠代表性表示其管理得當。
- 針對公眾曝露之劑量約束主要建議對於單個新射源的最適化約束不超過每年 0.3 mSv。

第35條員工責任(35. Duties of employees):

- 員工不可有意識地曝露在超出工作目的的輻射曝
   露
- 員工或承攬商應完整、適當使用 PPE、回報 PPE 問 題、還回 PPE

#### <u>南韓</u>

先前以劑量限度作為管制方式僅能集中將個體劑 量的分佈縮小到較低水平,若調整加入劑量約束的做法 進行管理,則個人的曝露劑量超出劑量約束是可接受的, 且只要採取一些額外管理方式可讓整體的曝露水平降 低。概念如 Figure 1 所示。



Figure 1. 執行劑量約束管理策略之前後差異比較(Kong et al., 2021)

韓國核電廠分為 Pressurized water reactors (PWRs)壓 水反應器與 Pressurized heavy water reactors (PHWRs)重 水式反應器,並將工作人員依照輻射管制區與頻繁進出 或運輸工作進行一級與二級之管理對策,如 Table 1 所 示。主要的管理策略以有效劑量的年平均限值(20 mSv /yr)的 80%和 90%分別作為 PWRs 的第一級和第二級管 理之劑量約束;以 70%和 80%分別作為 PHWRs 的第一 級和第二級管理之劑量約束,並額外考量氚的劑量約束 以限制 PHWRs 的體內曝露。

從 2009 至 2018 年南韓核電廠員工的職業曝露劑量 分布結果分析得知,由於執行積極的輻射保護策略,即 便總監測員工數增加,但人員曝露劑量仍呈現下降趨勢, 表示已成功達到 ALARA 的防護原則。

Table 1.	南韓核電廠之職業曝露劑量約束管制(Kong et
	al., 2021)

Classification		Radiation worker		Persons with frequent access or engaging in transport	
		PWR <sup>a</sup>	PHWR <sup>b</sup>	PWR	PHWR
Effective dose	Primary	16 mSv/y	14 mSv/y	4 mSv/y	3 mSv/y
	Secondary	18 mSv/y	16 mSv/y	5 mSv/y	4 mSv/v
Equivalent dose	Lens of the eye Hands, feet, and skin	120 mSv/y 400 mSv/y		12 mSv/y 40 mSv/y	
Tritium concentration in the human body <sup>c</sup>	Limitation on work Prohibition of work	1,850 3,700	) Bq/cm <sup>3</sup> ) Bq/cm <sup>3</sup>	1,85	0 Bq/cm <sup>3</sup> 0 Bq/cm <sup>3</sup>

# 阿拉伯聯合大公國(UAE)

對於職業曝露劑量管理應視實際情況而定,因此根 據不同性質之工作任務分別制定合適的劑量約束管制, 如 Table 2 所示。而對於公眾而言,劑量約束應足夠低, 以確保從所有相關人員的劑量總和保持在劑量限度內, 例如:下水道放射性廢棄物的輻射劑量約束應足夠低, 以確保任何公眾尤其是污水處理勞工,都不會曝露到官 方劑量限度以上的更大劑量。

另外,劑量管理策略還包括了制訂調查水平,考量 有效劑量、攝入量、單位面積或體積的污染量,針對不 同的工作任務、肢端曝露、懷孕或哺乳女性分別訂有劑 量約束,若每個月曝露劑量超過該值則應啟動調查。

1able 2. UAL 職業劑 重約 宋官埋(FANK, 200
-----------------------------------

Occupational	Investigati on Level, mSv/mon	Dose Constra int, mSv/yr
工業放射照相、核子醫學、 放射治療	0.5	6
放射診斷、輻射照相檢測 (量測計、輻射掃描、測井)	0.3	3
手持式劑量計	5	
懷孕或哺乳婦女	0.1	

#### 玻利維亞

以95%曝露劑量為參考,建立劑量約束,並相信: 如果95%都能夠達到一定的有效劑量值,則剩下的5% 也應該能夠調整工作條件以減少其曝露劑量。各工作類 別之劑量分布與95%曝露劑量如Table 3 所示。

Table 3. 玻利維亞曝露劑量分析結果(Mariaca, 2008)

	Nuclear Gauges	Well Logging	Radiotherapy	Industrial Gammapraphy	Total (practices included)
Analyzed data	208	199	770	938	2115,00
Mean	0,50	0,50	0,64	1,10	0,82
Maximum	0,77	1,10	18,95	42,43	42,43
Minimum	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Mode	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Percentile 95	0,50	0,50	1,16	3,01	1,68
Quarterly dose constraint proposed	0,50	0,50	1,16	3,01	1,68
Annually dose constraint proposed	2,00	2,00	4,65	12,05	6,73

#### 小結

#### 英國游離輻射防護法(啟動調查劑量進行風險評估)

- 正式啟動調查劑量(15 mSv/yr or 官方評估建議值), 進行輻射風險評估
- ▶ 輻射風險評估程序建構劑量約束
- 劑量約束正面表列需進行類別:
  - 核能电廠
  - 工業放射照相
  - 放射介入治療
- 公眾暴露劑量約束 0.3 mSv/yr

#### 南韓核電廠輻射工人(劑量限制的 70-90%)

- 電廠分為壓水式與重水式
- 工人分為輻射管制區工人與頻繁進出或運輸工作
   工人
- 管理分為一級與二級
- 輻射工人劑量約束取 70-90%的劑量限制(20 mSv/yr),即 14-18 mSv/yr
- 頻繁進出或運輸工作工人劑量約取 3-6 mSv/yr

#### 阿拉伯聯合大公國 (每月啟動調查劑量)

- 啟動調查劑量(0.1-5 mSv/mon),審視員工保護安排 (protection arrangements)
  - 劑量約束正面表列需進行類別:
    - 工業放射照相、核子醫學、放射治療
    - 放射診斷、輻射照相檢測(量測計、輻射掃描、 測井)
    - 手持式劑量計
    - 懷孕或哺乳婦女
- 公眾暴露劑量約束 0.1-0.3 mSv/yr

#### 玻利維亞 (實際曝露分布 95%)

- 劑量約束正面表列需進行類別:
  - 核量測計(gauges)
  - 測井
  - 放射治療
  - 工業放射照相

#### 2. 我國輻射工作人員劑量分析

本研究依據臺灣輻射工作人員曝露分布資料(依據 2020.5.11 提供之 1999-2019 年「全國輻射工作人員劑量 資料庫」),發現在工作類別 1 核燃料循環中有超過一成 之工作人員曝露到較高的有效劑量,尤其 1E 反應器運 轉類別甚至有高達 0.3%的比例分布在>20 mSv/yr 之有 效劑量曝露。進一步分析超出 20 mSv/yr 曝露工作人員 皆在 1999-2003 年發生,即輻防法公告前後(輻防法 2002 年公告、輻射工作人員的劑量限度下修於 2008 年)。

在工作類別2醫療領域中,2A放射診斷、2C核子 醫學、2D放射治療三個工作類別被鑑別出有較多人次 曝露於較高的有效劑量(10<D≤20),尤其2A放射診斷有 10個人次曝露超過20mSv/yr。2C核子醫學、2D放射 治療各有1及3人次曝露劑量>20mSv/yr。2E為所有不 屬於2A、2B、2C、2D之醫療應用。

在工作類別 3 工業用及 4 天然射源中,發現 3B 工 業放射照相這類,有 264 人次曝露於較高的工作劑量 (10<D≤20),更有高達 81 (0.3%)人次曝露超過 20 mSv/yr。 進一步分析超出 20 mSv/yr 曝露工作人員,在 2000、2001、 2003、2006 年皆由超出 10 人以上,近年有獲得改善。 3G 所有其他工業應用(不屬於 3A 至 3F)中有 35 人次曝 露劑量為 10-20mSv/yr,而有 15 人次曝露劑量超過 20 mSv/yr。

工作類別 6 其他的工作人員有效劑量分析包括 6A 教育機構、6B 獸醫、與 6C 其他如原能會、核能研究所、 同步輻射研究中心、研究機構、輻防與偵測等服務業及 其他不屬於本表之項目者。在 6B 獸醫類別中發現有 1 人次曝露的有效劑量介於 16-17 mSv/yr;亦鑑別出 6C 其 他類別中有 36 人次曝露於較高的有效劑量(10<D≤20), 且有 4 人次的有效劑量超過每年 20 mSv。

#### <u>交叉分析</u>

本研究針對臺灣輻射工作人員曝露狀況進行分析, 挑出各工作分類中曝露高劑量(超過 10 mSv/yr)之人次, 並依各工作分類之人員曝露劑量計算 90%、95%、99% 之劑量值。結果發現在 1E 反應器運轉、1G 核燃料循環 研究、2A 放射診斷、2C 核子醫學、2D 放射治療、3B 工 業放射照相、3G 所有其他工業應用、6C 其他等工作類 別顯示較多的人次曝露超過 10 mSv/yr ,亦鑑別出五個 工作類別:1E 反應器運轉、1G 核燃料循環研究、2C 核 子醫學、2E 所有其他應用、3B 工業放射照相之 90%以 上曝露劑量值較高(>1 mSv/yr),值得關注。

另外,考量個體差異相關類別與連續變項對劑量曝 露之影響,將性別、年齡納入與各工作類別進行交叉分 析比對。發現在所有工作類別中,只有 6A 教育機構之 工作性別比例為女性多於男性,其他工作分類均為男性 多於女性,而在性別調整下,核燃料循環(1E、1G)、醫 用(2A、2C、2D、2E)、工業用(3A、3B、3D、3E)、其他 (6A、6C)之劑量分部結果顯示顯著。在年齡調整下,核 1E、1G、2A、2B、2C、2D、3A、3B、3G、6A、6C之 劑量分布結果顯示顯著。

# IV. 結論

- 我國劑量約束管制之最適化策略,宜參考國際目前 劑量約束管制趨勢以及流行病學之相關研究結果, 比對我國輻射工作人員曝露狀況分析結果。
- 2. 從 1999 年至 2019 年臺灣輻射工作人員曝露分布資料顯示 1E 反應器運轉、2A 放射診斷、3B 工業放射照相、3G 所有其他工業應用、6C 其他等五個工作類別,曝露劑量 10-20 mSv/yr 人數超過 35 人次。
- 比較 90%、95%與 99%曝露劑量值>1 mSv/yr 的工作 類別包括:1E 反應器運轉、1G 核燃料循環研究、 2C 核子醫學、2E 所有其他應用、3B 工業放射照相。
- 4. 本研究之劑量約束最適化建議策略:
  - (1) 公眾曝露劑量約束值 0.3 mSv/yr。
  - (2) 當輻射工作人員曝露劑量達 15 mSv/yr 或 0.5 mSv/month 或該工作類別之 95%以上曝露劑量 值時,應依正式啟動進一步風險評估,研究輻射 劑量。
  - (3) 風險評估方法應針對單一射源劑量率、個人劑 量資料庫、曝露情境、模擬工具之程序建構曝露 劑量約束。
  - (4) 輻射工作人員劑量約束可依 95%曝露劑量分布 決定,亦可直取 70-90%劑量限度值(20 mSv/yr), 即 14-18 mSv/yr。
- 建議「全國輻射工作人員劑量資料庫」之工作類別 可再細項分類,將有助於後續評估各類輻射工作人 員之95%曝露劑量,作為ALARA劑量約束參考。

#### 參考文獻

- [1] Federal Authority for Nuclear Regulation (2012), Radiation Safety (FANR-RG-007): Regulatory Guide, Abu Dhabi, United Arab Emirates. https://www.fanr.gov.ae/en/Documents/RG\_007.pdf
- [2] Kong, TY, Kim, SY, Jung, YH, Kim, JM, Cho, MH (2021). Administrative dose control for occupationally-exposed workers in Korean nuclear power plants. Nuclear Engineering and Technology. 53(1), 351-356.
- [3] Mariaca, R. S. (2008), Dose constraint for Industrial Gammagraphy developed by Regulatory Authorities, Buenos Aires (Argentina); IRPA 12: 12. International Congress of the International Radiation Protection Association; Buenos Aires (Argentina). https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\_P ublic/42/103/42103452.pdf
- [4] UK Health and Safety Executive (2018). Work with ionising radiation: Ionising Radiations Regulations 2017. Norwich, UK.
- [5] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. (2007). Ann ICRP, 37(2-4), 1-332. doi:10.1016/j.icrp.2007.10.003

# 溫泉水中放射性氡氣量測技術之建立及不同地質區溫泉水氡氣之量測 Investigation and Creation of Educational Materials for Radioactivity in Natural Environment of Producing Area of Hokutolite in Taiwan

計畫編號:109-2623-E-343-001-NU 計畫主持人:林群智 e-mail:cclin@nhu.edu.tw 計畫共同主持人:丁健益、Vivek Walia、李佩倫 計畫參與人員:林世榮、李坤龍、涂聿真、孫瑞崎、陳靖垟 執行單位:南華大學自然生物科技系

#### 摘要

地殼中之鈾系和針系元素可進入溫泉水中,並衰變 而產生氣氣,而泡湯已成為國人常見的休閒活動之一, 但溫泉水中逸出之氣氣(特別是<sup>222</sup>Rn)可造成其潛在之健 康風險。此外,溫泉水中的氡氣亦可應用於探測鈾礦、 地震監測、溫泉水之水文狀況及環境污染之評估等研究, 因此,溫泉水中氡氣活度的量測為重要之研究課題。

本研究擬以砂半導體偵檢器RAD-7評估其系統洩漏 率和偵測效率之效應,並探討溫泉水量測影響之相關參 數(如:水樣溫度、酸鹼值、測量時間)對其精確度及準確 度之影響,以確定最佳量測條件,進而以該條件針對不 同地質之溫泉水進行實際量測。

結果顯示, RAD-7以WAT250模式量測10分鐘後, 百 分誤差即<25%,50分鐘後,百分誤差<10%百分誤差與 量測時間相關性之趨勢線可得百分誤差低於30%之最小 量測時間(tm)約為5.9分鐘,考量戶外量測之省時、便利 及準確度等因素,本研究之環境量測時間採取50分鐘。 以岩石氡氣標準射源(rock source)所測得之系統洩漏率 及儀器偵測效率整體評估為99.19±7.47%。以<sup>226</sup>Ra標準 溶液配製之<sup>222</sup>Rn標準射源,經HCl和NaOH調整pH值,移 入RAD-7偵檢器量測水中氡氣之250 mL專用樣品瓶中, 密封存放30天,以WAT250模式量測,發現所測值約為標 準品之(52.5±8.9)%~(83.6±11.0)%,<sup>222</sup>Rn在不同溫度及 pH值下之逸出率在(53.2 6.9)%~(84.3±11.1)%之間,且 隨pH提高而下降,約pH7時為最低值,在同一pH值下, 溫度越高所測值也越高,此外,隨pH增加時,溫度之影 響變大,在pH9時,所測值間的差異最大。將不同溫度 (20~80℃)下逸出率與pH間之關係以趨勢線逼近,可得 到各條件下高度相關(r2=0.9907~1.0000)之趨勢線方程 式,並進一步得到pH、溫度及逸出率之逼近曲面。利用 RAD-7以WAT250模式量測綠島朝日溫泉泡湯池、綠島 朝日温泉海水、烏來野溪温泉、地熱谷和中崙濁水潭等 溫泉,量測時間50分鐘,進而利用前述逼近曲面所得之 採樣點之逸出率可校正所得<sup>222</sup>Rn濃度各為26658±2770 (Bq/m<sup>3</sup>)、6791±1073 (Bq/m<sup>3</sup>)、214±38 (Bq/m<sup>3</sup>)和2123±576  $(Bq/m^3)$  °

**關鍵詞**:溫泉水、放射性、氣氣、背景輻射、天然放射 性物質

#### Abstract

Uranium- and thorium-series isotopes are able to dissolve

in hot spring waters and decay into radon. Hot spring bath has been a common activity for the public in Taiwan, and the radon (especially <sup>222</sup>Rn) emanated from uranium- and thorium-series nuclides dissolved in hot spring water could potentially cause health risk. In addition, radon in hot spring water can be applied to explore uranium, monitor hydrologic conditions (e.g., flow path, recharge volume and flow rate), investigate environmental pollution and observe earthquake. Accordingly, the measurement of radon in hot spring water is a significant issue.

In this research, a silicon semiconductor detector, RAD-7, was used to evaluate the integral effect of radon leakage and detection efficiency of the measuring system as well as to investigate the effect of related parameters (i.e., water temperature, pH and measuring time) on precision and emanation of radon in measuring radon in water, which can be used to calibrate measured data of radon in hot spring waters. Besides, the method will be further applied to in-situ measurement to investigate the concentration of radon in hot spring water from different geological areas.

According to the results, by measuring <sup>222</sup>Rn standard with RAD-7 in WAT250 mode, the percent relative error (RSD) is <25% after 10 min, <10% after 50 min. The minimum measuring time ( $t_m$ ) is estimated to be 5.9 min for the RSD to be <30% from the trend curve equation. Considering the requirement of in-situ, real-time and continuous measurement, convenience, sensitivity economy as well as the influence of environment, the measuring time was set as 50 min for environmental samples.

A standard rock source of <sup>222</sup>Rn was used to estimate the integral effect of radon leakage and detection efficiency of the measuring system, which is 99.19±7.47%. A standard source of <sup>222</sup>Rn was prepared from a <sup>226</sup>Ra standard solution with the pH adjusted with HCl and NaOH. The <sup>226</sup>Ra standard solution was sealed for 30 days in a 250 mL vial specific for RAD-7. After measurement in WAT250 mode, the measured data were between  $(52.5\pm8.9)\%$  and  $(83.6\pm11.0)\%$  of the prepared concentration of <sup>222</sup>Rn. The emanation rate of <sup>222</sup>Rn (X%) from standard solution under different pH(1~9) was (53.2±6.9)% ~(84.3±11.1)%, which decreased with pH to a minimum value at about 7. Under the same pH, the emanation rate of 222Rn increases with temperature. Besides, the effect of temperature increases with pH, which makes the highest difference among the measured data at pH9. High correlated (r<sup>2</sup>=0.9907~1.0000) trend curves between <sup>222</sup>Rn emanation rate and pH under different temperature can be obtained. An approximate

curved surface for emanation rate of  $^{222}$ Rn was derived accordingly. The  $^{222}$ Rn concentrations in hot spring water of Zhaori Hot Spring, Wulai Hot Spring, Geothermal Valley and Choshuitan were measured with RAD-7 in WAT250 for 50 min and corrected by  $^{222}$ Rn emanation rate described above as  $26658\pm2770$  (Bq/m<sup>3</sup>),  $6791\pm1073$  (Bq/m<sup>3</sup>),  $214\pm38$  (Bq/m<sup>3</sup>) and  $2123\pm576$  (Bq/m<sup>3</sup>).

Keywords: hot spring water, radioactivity, radon, background radiation, Naturally Occurring Radioactive Materials

#### I. 前言

氦氣為具放射性之惰性氣體,在自然界中主要來自 地殼、土壤和水中鈾系和釷系天然放射性物質(Naturally Occurring Radioactive Materials; NORM)衰變所產生,其 凝固點為-113°C,熔點-71°C,沸點62°C,比重9.96 kg/m<sup>3</sup>, 主要之同位素為<sup>222</sup>Rn [半衰期(T1/2) 3.8 d)、<sup>220</sup>Rn (T<sub>1/2</sub>=55.6 s)和<sup>219</sup>Rn(T<sub>1/2</sub>=3.96 s),其中以<sup>222</sup>Rn最重要, 可釋出5.49 MeV之α射線,其衰變之後子核為金屬,均為 具有高LET之α射源,其中,<sup>214</sup>Po及<sup>218</sup>Po貢獻90%以上之 劑量,因此,氦氣進入肺部後對組織之傷害甚大,在全 球人口所受天然輻射劑量中,室內氡氣之貢獻占約一半, WHO與英國AGIR的流行病學調查均顯示氣氣為僅次於 吸菸的致肺癌環境因子,而且抽煙具有加乘作用(WHO, 2009; AGIR, 2009), 而在非吸菸者群體中, 氮是首位肺 癌成因,因此,2009年WHO即於呼籲世界各國重視,並 以100 Bq/m<sup>3</sup>為室內氡活度改善目標之建議值,甚至低於 目前原子能委員會所建議的改善目標(150 Bq/m<sup>3</sup>),目前 已陸續有國家及國際組織研擬下修室內氣氣標準以符 合WHO的建議。除了地殼中產生之氣氣貢獻室內劑量外 地殼中之鈾系和針系元素也會進入溫泉水中,並衰變而 產生氦氣,特別是火成岩地質區所含之鈾系和釷系 NORM較沉積岩地質高,其地下水或泉水中所含之氣氣 也可能較高,在保加利亞Momin prohod的泉水高達1595 Bq/L (Pressyanov et al., 2007), 葡萄牙Nisa的地下水則高 達3856 Bq/L (Pereira et al., 2015), 而泡湯已蔚為國人的 休閒風氣之一,但溫泉水中逸出之氡氣可造成其潛在之 健康風險。此外,溫泉水中的氡氣亦可應用於探測鈾礦、 地震監測、評估溫泉水之水文狀況(如:流徑、補充量和流 速等)、環境污染研究等(Somashekar et al., 2015),因此, 溫泉水中氣氣活度的量測為重要之研究課題。

目前水體中氡氣之量測常用液體閃爍計數法(LSC)、 射氣法(emanometry)和γ光譜法等。LSC法須將氡氣轉移 至有機溶液中,射氣法須將氡氣轉移至氣態,將樣品密 封後帶回實驗室量測,且須同時考量採樣後至開始量測 的間期和長時間量測過程氡氣衰變的校正。低活度濃度 之樣品應考慮原位(in-situ)量測或在收集後盡快(如:3.8 天內)於實驗室量測(Jobbágy et al., 2017)。

γ光譜法不須相轉移(phase transfer)過程,可用於原 位量測,<sup>222</sup>Rn 之活度由量測其子核<sup>214</sup>Bi和<sup>214</sup>Pb之活度(3 小時可達活度之長期平衡)推算而得,但若<sup>226</sup>Ra亦以高活 度存在水體中,將持續產生<sup>222</sup>Rn,則38天後仍須進行一 次校正,此時,<sup>222</sup>Rn 之量測將受實驗室空氣中之氣氣的 影響,須以不含氣氣之惰性氣體淨化偵檢器和樣品的鄰 近環境(ISO 13164-3, 2013),增加了分析上的複雜性,考 量能量解析度而言,HPGe為常用之儀器,惟價格昂貴, 重量不輕,且操作時則須液態氮冷卻,等同需要經常性 的耗材。

射氣法以惰性氣體、氣流或真空方式藉由幫浦主動 採樣,氣體會先經過過濾器,經去除氣衰變產物和灰塵 後, 氣氣會在閃爍室發生衰變, 其 α 粒子可進而以矽半 導體偵檢器、硫化鋅閃爍體(ZnS:Ag)魯卡斯腔(Lucas Cell) 或游離腔量測,需外加電源,可以連續監測並即時顯示 數據,可做為氡氣活度之量測、預警及改善效果之評估, 因氦氣轉移至氣態之程度受溫度影響,故該方法對水溫 較敏感(ISO 13164-3, 2013),此外,對低濃度氣氣的量測 須檢查偵檢器是否受汙染或有較長半衰期子核(如:<sup>210</sup>Po) 的增建(build-up)效應。 矽半導體偵檢器 RAD-7(DURRIDGE COMPANY Inc.)為常用之連續式氣氣測 量儀器,使用 α 粒子計數器來偵測氦氣活度,利用矽質 半導體將 α 粒子轉為電子訊號並確認其能量大小,可透 過圖譜分辨出<sup>222</sup>Rn 和<sup>220</sup>Rn,可長時間進行戶外量測, 量測結果須對量測所用的時間進行校正,且 RAD-7 儀 器僅能於低濕度環境下測量,因此管路中間須加裝乾燥 器(管),其可測濃度範圍為 4-400000 Bq/m<sup>3</sup>,目前國家 地震工程研究中心及採用此款儀器。閃爍體偵檢器 [如:Smart Radon Monitor (SRM)]為另一種常用之氡氣偵 檢器,靈敏度較半導體偵檢器高,且偵測不受濕度干擾, 不須配備乾燥器,量測濃度範圍為 8-50 MBq/m<sup>3</sup>。游離 腔偵檢器與閃爍器型相似,對於環境濕度無要求,且靈 敏度高,可辨別氡氣衰變過程中所釋放之  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ 射 線訊號,並可快速瞬間判斷氡活性,量測範圍 2-200000 Bq/m<sup>3</sup>,其中, AlphaGUARD DF2000 (Bertin Co., Germany) 為手提式且具有高儲存容量之游離腔型脈衝式氣氣偵 檢器,使用 0.56 L 的偵測體積,配合其水樣採集系統 AquaKIT 可進行戶外原位(in-situ)之即時和連續量測,其 工作原理利用內建幫浦(0.3 L/min)將氡氣趕出水體樣品; 利用一安全容器(security vessel)阻擋水蒸氣,以降低水 蒸氣對偵檢器的影響,並以緊密之封閉式氣體迴圈 (closed loop) 收集氡氣 (Corrêa et al., 2014), 10 min 後 幫浦關閉, 偵檢器則繼續開啟 20 min, 以 flow 模式量測 1 min,利用多階數位訊號處理(digital signal processing; DSP)方式量測氣氣產生之脈衝訊號,每次量測樣品前可 自動量測背景值以供校正,該機型可長期監測氡氣含量, 此外,也可量測並且同時記錄環境溫度、相對濕度和大 氣壓力,欲知氣氣來自溶於水中<sup>226</sup>Ra 的貢獻,可保留 密封之水體樣品,於28天後再次量測;但以價格而言, AlphaGUARD 之整套量測系統超過百萬,屬「高貴」之 量測儀器。

綜合上述各種量測水中氡氣的方法,本研究擬以矽 半導體偵檢器 RAD-7 探討影響溫泉水量測影響之相關 參數,如:測量時間對其精確度之影響;水樣溫度、酸 鹼值對其氡氣逸出率之影響等,以確定最佳量測條件及 不同條件下氣氣測量之校正方法。進而以上述條件實際 量測不同地質之溫泉水。本研究成果可建立溫泉水氣氣 之即地、即時量測技術,應用於各種溫泉水中氣氣量測 之參考,進而評估其可能貢獻之劑量。

#### Ⅱ. 主要內容

本計畫將實驗內容區分為二部分,分別為:

- (i) 矽半導體型偵檢器對溫泉水中氣氣量測條件最佳 化之探討;
- (ii) 不同地質區溫泉水中氡氣活度之實測研究。

### i. 矽半導體型偵檢器對溫泉水中氣氣量測條件最佳化 之探討

本研究以矽半導體偵檢器 RAD-7 探討溫泉水中氣 氟量測方法之建立。其中,RAD-7 於氦氟進入偵檢器量 測前先經其前端之乾燥器去除空氣中之水氣,同時也將 降低水氣中酸或鹼性成分的影響,此外,其電池於充電 後足以在沒有外加電源的情形下運作 2-3 天。因此,該 設計對溫泉水中氦氣量測方法之建立具有優勢。然而, 水樣溫度、酸鹼值對水樣品中氦氣的逸出率以及測量時 間等相關參數對其精確度及準確度之影響亦須探討以 建立最佳化之量測條件。

#### <u>研究材料與方法</u>

#### <sup>222</sup>Rn 標準射源

本研究以 NIST 提供之花崗岩標準品密封靜置存放 30 天,使<sup>226</sup>Ra與<sup>222</sup>Rn 達放射性平衡後備用。每次使 用後須再度密封後靜置存放 30 天方能再次使用。

#### <sup>226</sup>Ra 標準射源

取一 RAD-7 配用之玻璃樣品瓶(體積 V=250 mL), 玻璃樣品瓶以氮氟除氣後立即封蓋。取定量體積且活度 濃度已知之<sup>226</sup>Ra 標準溶液至玻璃樣品瓶,經調整所需 之 pH 值後以去離子水(DW)稀釋至 250 mL,立即加蓋 密封,並以矽油膏(silicone grease)及石蠟膜密封。依此方 法製備數個相同濃度之<sup>226</sup>Ra 標準溶液,將含<sup>226</sup>Ra 之玻 璃樣品瓶(標準樣品瓶)靜置存放 30 天,使<sup>226</sup>Ra 與<sup>222</sup>Rn 達放射性平衡。

#### 量测所需最小時間

以 RAD-7 連接<sup>226</sup>Ra 標準溶液樣品瓶後,啟動儀器 量測氡氣,並觀察所測得數據之精密度隨時間變化之情 形。

#### 量測系統洩漏率及儀器偵測效率整體評估

儀器量測水樣品時,量測系統封閉迴路之氣氣洩漏 率及儀器偵測效率(ɛ)將同時存在,故須整體評估。若系 統封閉迴路之氣氣洩漏率為 f,則氡氣留存於系統封閉 迴路之留存率(R),R=1-f;洩漏率及儀器偵測效率之整 體效應為 Rɛ,可用於氡氣量測時之濃度校正。

RAD-7之乾燥管和管線將形成一閉合系統。樣本於 分析前12小時須將內建之幫浦開啟,使儀器降低濕度, 並保持在乾燥狀態,每次分析時須確保儀器內濕度低於 10%,量測完於乾燥管後方連接活性碳以吸附系統中殘 餘的氡氣。使用儀器內建之WAT 250 模式,開啟幫浦抽 氣量測背景值( $C_0$ ),由密閉系統總體積( $V_T$ ;可由儀器手 冊得之)可得背景活度 $A_0(t)$ 。將 RAD-7 儀器閉合系統連 接花崗岩<sup>222</sup>Rn 標準射源,開啟幫浦抽氣量測氣氣濃度 ( $C_R$ ),幫浦運作模式為分析開始前打氣五分鐘,後靜止 平衡五分鐘,再開始測量,每五分鐘分析一筆資料,計 算其平均值(儀器所記錄的單位為 Bq/L)及百分誤差。由 密閉系統總體積( $V_T$ ;可由儀器手冊得之)可得氣氣活度  $A_1(t)$ ,淨氡氣活度 $A_d(t) = A_1(t) - A_0(t)$ 。觀察百分誤 差低於 30%,可得量測所需最小時間( $t_m$ )。繼續觀察 20%、10%所需之量測時間並記錄之,可做為將來實地量 測時依精密度決定所需量測時間之參考。

由 Bateman equation (式 1) 所得之氣活度理論值  $[A_d(t)_T]$ 的差異,可校正量測系統之量測值 (Lavi & Alfassi, 2005);其中, $\lambda_p$ 與 $\lambda_d$ 各為母核與子核之衰變係數,t為射源密封後至量測結束的時間。

$$\begin{split} A_{d}(t)_{T} &= A_{p}(0) \frac{\lambda_{p}}{\lambda_{d} - \lambda_{p}} \left( e^{-\lambda_{p}t} - e^{-\lambda_{d}t} \right) + A_{d}(0) e^{-\lambda_{d}t} \ (1) \\ & \text{ 由於 }^{226} \text{Ra} \ \textbf{z} + 衰期遠大於其子核 \, ^{222} \text{Rn}, \ \textbf{t} \overrightarrow{x} \ 1 \ \textbf{T} \ \textbf{l} t \\ & \textbf{A}, \textbf{t} \ 2: \end{split}$$

$$A_d(t)_T = A_p(0)e^{-\lambda_d t} \tag{2}$$

當 t≧30 天,<sup>226</sup>Ra 與其子核<sup>222</sup>Rn 達長期平衡,如式 3:

$$A_d(t)_T = A_p(0) \tag{3}$$

#### 水樣品在不同溫度及 pH 值下水中氡氟之逸出率

以上述<sup>226</sup>Ra 標準溶液配製濃度 150 pCi/L 之<sup>226</sup>Ra 標準溶液。以 HCl 和 NaOH 調整 pH 值 (1~9),將各製 備溶液移入 RAD-7 偵檢器量測水中氡氣之專用樣品瓶 (體積為 250 mL)中,不留氣泡,密封存放 30 天,此時 <sup>226</sup>Ra 標準溶液之活度濃度等於<sup>222</sup>Rn 之活度濃度 (C<sub>d,0</sub>=150 pCi/L)。

將專用樣品瓶,浸入恆溫水槽中,並設定不同溫度 (25~80°C)。量測時連接樣品瓶與儀器(由 RAD-7 儀器 廠商所提供之資訊得知其內部體積為 800 mL,本研究 中,外部連接管線小乾燥管體積為 24 mL,已經過軟體 校正),啟動儀器並打入封閉迴路中之空氣使氡氣自 <sup>226</sup>Ra 標準溶液逸出,若氡氣之逸出率為 x,所測得之 <sup>222</sup>Rn 之活度濃度為 C<sub>d</sub>,則逸出率 x 為:

$$\mathbf{x}(\%) = \frac{c_d}{c_{d,0} \times R\varepsilon} \times 100\% \tag{4}$$

故氡氣之量測濃度 C(pCi/L)可修正如式 5。  $C_d$  (pCi/L) =  $C_{d,0} \times xR\varepsilon$  (5)

#### ii. 不同地質區溫泉水中氣氣活度之實測研究

本研究採集北投地熱谷(火成岩地質區)、朝日溫泉 (海底溫泉)、中崙濁水潭(沉積岩地區)及烏來野溪溫泉 (變質岩地區)等不同地質區之溫泉水進行實際量測,其 分析流程如下。溫泉水之溫度、pH及 ORP 值於採樣點 現場量測,並取水面下 50 cm 處之溫泉水樣品至 RAD-7 匹配之玻璃樣品瓶(250 mL),並密封加蓋。取 250 mL 之溫泉水樣品,將溫泉水樣品置於 RAD-7 採用之玻璃 量測瓶中,不留氣泡,將玻璃樣品瓶接上套管後量測其 氣氣濃度。由溫泉水之溫度及 pH 值對應前述實驗中所 得之 pH、溫度及逸出率圖,由式 4 可得知該條件下之逸 出率,由式 5 可得溫泉水中之氣氣濃度。

# III. 結果與討論i. 百分誤差隨量測時間之變化

RAD-7 量測結果之百分誤差低於隨量測時間變化 之關係如圖 1 所示。結果顯示,量測 10 分鐘後,百分誤 差即<25%,20 分鐘後,百分誤差<20%,30 分鐘後,百 分誤差<15%,50 分鐘後,百分誤差<10%。一般環境氣 氣之量測,百分誤差<30%為可接受之條件,由量測數據 可找出百分誤差與量測時間相關性之趨勢線,由此趨勢 線可得百分誤差低於 30%之最小量測時間(tm)約為5.9 分 鐘,考量戶外量測之省時、便利及準確度等因素,本研 究之環境量測時間採取 50 分鐘。



圖 1、RAD-7 在 Water-mode 量測氣氣之百分相對誤差 隨量測時間之變化

#### RAD-7 量测系統洩漏率及儀器偵測效率整體評估

標稱活度濃度為 7548±222 Bq/m<sup>3</sup> 之岩石氡氣標準 射源(rock source)經密封靜置 30 日後,以 RAD-7 之 Sniff mode 量測 50 分鐘後所得之活度濃度為 7487±519 Bq/m<sup>3</sup>, 故所得之量測系統洩漏率及儀器偵測效率整體評估(Rε) 為 99.19±7.47%。

# <sup>226</sup>Ra(<sup>222</sup>Rn)標準溶液在不同溫度及 pH 值下之逸出率

以<sup>226</sup>Ra標準溶液(150 pCi/L)配製之<sup>222</sup>Rn標準射源, 經 HCl 和 NaOH 調整 pH 值,移入 RAD-7 偵檢器量測 水中氣氣之專用樣品瓶(體積為 250 mL)中,密封存放 30 天,以 RAD-7 之 WAT250 模式量測,所得結果如圖 2 所示。其所測得值約為標準品之(52.5±8.9)% ~(83.6±11.0)%,且隨 pH 提高而下降,約 pH7 時為最低 值,至 pH9 時稍微提升,且同一 pH 值下,溫度越高所 測值也越高,此外,隨 pH 增加時,溫度之影響變大, 在 pH9 時,所測值間的差異最大。



將前述所得之量測系統洩漏率及儀器偵測效率整 體評估(Rɛ; 99.19±7.47%)代入式 5 以校正所測值,可 得到<sup>222</sup>Rn 在各條件下之逸出率(X%),其結果如圖 3 所 示。



圖 3<sup>222</sup>Rn 在不同溫度及 pH 值下之逸出率(X%)

該結果顯示,<sup>222</sup>Rn 在不同溫度及 pH 值下之逸出率 在(53.2 6.9)%~(84.3±11.1)%之間,且其變化趨勢隨 pH 提高而下降,約 pH7 時為最低值,至 pH9 時稍微提升, 且同一 pH 值下,溫度越高所測值也越高,此外,隨 pH 增加時,溫度之影響變大,在 pH9 時,所測值間的差異 最大。將不同溫度下逸出率與 pH 間之關係以趨勢線逼 近,將得到各條件下之趨勢線方程式,其相關係數平方 值在 0.9907~1.0000 之間(圖 4)。將 pH、溫度和 <sup>222</sup>Rn 逸 出率(X%)繪製成 3D 圖可得三者之關係圖(圖 5)。



圖 4、不同溫度下,<sup>222</sup>Rn 逸出率(X%)與 pH 之關係





為能得到更多pH和溫度條件下之<sup>222</sup>Rn逸出率,可 利用Matlab程式以cubicfit模擬功能,在現有之數據中插 入更多漸變之數據,其程式指令為:

x=[1.44;2.88;4.91;7;9.07]; xi=[1.44;2.88;4.91;7;9.07]; y=[25 40 60 80]; z=[80 80 81.9 84.3;63.4 64.3 67 68.7;56.9 59.4 59 59.9;52.9 56.7 61 60.6;53.2 59.4 64.1 65.6]; xx=[1.44:0.01:9.07]; yy=[25:0.1:80]; [Y,X]=meshgrid(y,x); [YY,XX]=meshgrid(y,x); ZZ=interp2(Y,X,z,YY,XX); ZZc=interp2(Y,X,z,YY,XX,'cubic'); Originalfit=mesh(X,Y,z); Originalfit=surf(X,Y,z); Linearfit=mesh(XX,YY,ZZ); Linearfit2=surf(XX,YY,ZZ); cubicfit=mesh(XX,YY,ZZc); cubicfit2=surf(XX,YY,ZZc); xlabel('pH'); ylabel('T(°C)'); zlabel('X(%)'); title('cubic simulation);





圖 6、經 Matlab 程式 cubicfit 模擬演算後之 <sup>222</sup>Rn 逸出 率與溫度和 pH 值之關係

# 台灣不同地質溫泉水中之氣氣量測

本研究在綠島朝日溫泉泡湯池、朝日溫泉周圍海水、 烏來野溪溫泉、地熱谷和中崙濁水潭等採樣點所測得之 <sup>222</sup>Rn濃度如表1所示,其pH在1~8之間。其中,朝日 溫泉、地熱谷溫泉屬於酸性硫礦泉,地處火成岩地質區, 烏來野溪溫泉屬於弱鹼性碳酸氫納泉,地處變質岩地質 區,中崙濁水潭溫泉屬於弱鹼性氯化物碳酸氫納泉,地 處泥岩地質區,其<sup>222</sup>Rn逸出率經圖6所得到之模擬曲 面方程式可得到近似值,並可進一步得到校正後之<sup>222</sup>Rn 濃度(表1)。由實驗室之量測可知 RAD-7 量測系統所 測得之數值應經<sup>222</sup>Rn 逸出率之校正,惟實際上要得到 任何 pH 與溫度下之逸出率實有困難,因此,藉由實驗 數值得到模擬曲面不失為一方便實用的方法。將來若能 有更多且範圍更寬廣的實驗數值量測,將可使該模擬曲 面所得之<sup>222</sup>Rn 逸出率更接近實測值,進而得到更準確 之量測結果,且可因應於更極端條件泉質之量測。

Sampling site	Water Temp. (°C)	рН	Mode	Air Temp. (°C)	<sup>222</sup> Rn 濃度 (Bq/m³)	逸 出 率 (%)	校正後 <sup>222</sup> Rn 濃度 (Bq/m <sup>3</sup> )
朝日溫 泉 泡湯池 SPA pool of Zhaori Hot Spring-	42.8	7.40	wat250	33.5	15400±1600	57.8	26658±2770
烏來野 溪溫泉 Wu-Lai River Hot water	61	7.16	wat250	31.9	4050±640	59.6	6791±1073
地熱谷 溫泉 Bei-Tou Thermal valley	74	1.00	wat250	38.6	197±35	92.1	214±38
中崙濁 水潭 (Chung- Lun mud pool)	24	7.44	wat250	29.3	1180±320	55.6	2123±576

# 表1 溫泉採樣點所測得之<sup>222</sup>Rn 濃度

# IV. 結論

本研究之結果可做為未來溫泉水中氣氣量測方法 之基礎,並提供量測數據校正之參考,未來建議可擴大 實驗室中對於 pH、溫度之探討範圍,以提供更廣泛、更 精確的氣氣預測率,用於量測數據之校正。本研究建立 之方法亦可應用於泡湯環境中溫泉水氣氣造成之劑量 之估算,可於未來進一步研究探討,了解泡湯民眾之健 康風險。

#### 致謝

本計畫承蒙原子能委員會暨科技部之經費(MOST 109-2623-E-343-001-NU)支持,以及國家地震工程研究 中心和核能研究究所分析組在氣氣量測上的協助、台北 市工務局水利工程處溫泉股在溫泉水採樣的協助方得 以完成, 謹此 深表致謝。

#### 参考文獻

- AGIR (2009), Radon and Public Health, Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation, Doc HPA, RCE-11, 1–240. Available at www.hpa.org.uk.
- [2] Lavi N., Alfassi Z.B., 2005. Preparation and analysis of 226Ra-222Rn emanation standards for calibrating passive radon detectors. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 265(1), 123-126.
- [3] Leonardi F., Bonczyk M., Nuccetelli C., Wysocka M., Michalik B., Ampollini M., Trevisi R. (2018) A study on natural radioactivity and radon exhalation rate in building materials containing norm residues: preliminary results. Construction and Building Materials. 173:172-179.
- [4] Pereira A.J.S.C., Pereira M.D., Neves L.J.P.F.,

Azevedo J.M.M., Campos A.B.A., 2015. Evaluation of groundwater quality based on radiological and hydrochemical data from two uraniferous regions of Western Iberia: Nisa (Portugal) and Ciudad Rodrigo (Spain). Environ. Earth Sci. 73, 2717-2731.

- [5] Pressyanov D., Dimitrova I., Georgiev S., Hristova E., Mitev K., 2007. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 74(1), 202-204.
- [6] Pressyanov D., Dimitrova I., Georgiev S., Hristova E., Mitev K., 2007. Measurement of radon-222 in water by absorption in Makrofol. Nucl. Instrum. Methods of Physical Research A 574, 202-204.
- [7] Rößler F.A. & Villert J., 2019. On-site determination of the radon concentration in water: sampling & online methods. Bertin Technologies Co. Ltd.
- [8] Somashekar R.K, Deljo D., Shivanna K, Singh M.J., Prakash. K.L, 2010. Radon - Occurrence, estimation and hydrological applications. Radon Contamination in Groundwater and Application of Isotopes in Groundwater Studies, Central Ground Water Board Ministry of Water Resources Government of India South Western Region, Bengaluru.
- [9] WHO (2009), WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva, World Health Organization. Available at www.who.int/en/.

# 台灣與境外食用菇類與栽種介質的放射性核種分布之初探 Study on the distribution of radioactive nucleus of mushroom in Taiwan and abroad.

計畫編號:109-2623-E-020-001-NU 計畫主持人:陳庭堅 e-mail:chen5637@mail.npust.edu.tw 計畫共同主持人:葉一隆 計畫參與人員:黃韋翔、劉詠瑜、蔡享駿、黃朝敏 執行單位:國立屏東科技大學土木工程系

#### 摘要

香菇是人類普遍的食物之一,也是台灣重要的農業 產業。放射性核種很容易在菇類傳輸與累積,不同類型 的菇類與放射性核種有不同的傳輸與累積放射性核種 能力。另外菇類基質(生長培養基)也影響菇類的放射性 核種傳輸與累積。文獻報導的菇類放射性核種的傳輸與 累積主要針對野生菇類,另外台灣對菇類放射性核種的 傳輸與累積研究仍然有限。鑑於食品安全,本研究探討 市售最普遍的三種菇類(香菇、洋菇、金針菇)天然放射 性核種(40K、232Th、226Ra)的傳輸與菇類和種植基質間的 轉移影響因素。同時探討市售菇類成品與菇類種植場天 然核種活度的差異。現地傳輸與活度之樣品採集台灣中 部地區之太空包基質及香菇、段木基質及段木香菇、堆 肥基質及洋菇、木屑基質及金針菇等樣本。研究菇類放 射性核種的活度以及種植基質和菇類之間天然放射性 核種的轉移因子。此外,本研究也針對台灣市售香菇、 洋菇、金針菇以及國外進口香菇進行放射性核種的分 析。

三種菇類(含栽植與市售與進口)核種 40K 活度大小 依序:洋菇 (1557±114 Bq/kg-乾重) > 金針菇 (1098±141 Bq/kg-乾重)> 香菇 (742±130 Bq/kg-乾重),3 種菇類<sup>40</sup>K 活度有顯著差異(p< 0.001)。菇類核種 <sup>232</sup>Th 活度洋菇 (4.82±1.73 Bq/kg-乾重)、金針菇 (4.09±1.60 Bq/kg-乾重) 與香菇 (4.85±1.40 Bq/kg-乾重),3 種菇類 232Th 活度無 顯著差異。菇類核種<sup>226</sup>Ra 活度洋菇(5.41±2.04 Bq/kg-乾 重)、金針菇(4.64±1.97 Bq/kg-乾重)與香菇(5.69±2.27 Bq/kg-乾重),3種菇類<sup>226</sup>Ra活度無顯著差異(p>0.05)。 比較現地採集與市售 3 種菇類(香菇、洋菇與金針菇)核 種活度(40K、232Th 與226Ra),顯示現地栽植菇類與市售 菇類3種天然核種(40K、232Th、226Ra)各別核種活度無顯 著差異。國產與進口乾香菇核種<sup>40</sup>K 活度,平均活度分 別為 837.1±119.2 Bq/kg 和 664.0±128.0 Bq/kg, 國產香菇 40K 活度高於進口香菇 40K 活度(p=0.003)。進口乾香菇 僅有 1 個樣品檢測到核種 232Th 與 226Ra 活度為 2.79 Bq/kg (<sup>232</sup>Th)與 2.06 Bq/kg (<sup>226</sup>Ra),低於國內市售平均活 度 5.34 Bq/kg (<sup>232</sup>Th)與 6.38 Bq/kg (<sup>226</sup>Ra)。現地栽植 3 種菇類(香菇、洋菇與金針菇)核種(<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra) 基質與菇體核種活度的傳輸因子,因基質與菇類有差異 段木栽植香菇<sup>40</sup>K 之 TF 顯著大於太空包栽植香菇、洋 菇與金針菇之 TF 值(p< 0.001)。太空包栽植與段木栽植 香菇以及金針菇<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra之TF顯著大於洋菇TF(p< 0.001)。攝食菇類的<sup>40</sup>K 有效劑量(1.49±0.53 μSv/y)顯著

大於  $^{232}$ Th(0.25±0.08 µSv/y)與  $^{226}$ Ra(0.35±0.14 µSv/y)。3 核種相加之年攝食有效劑量介於 0.82 – 3.50 µSv/y,平均 1.95±0.63 µSv/y,本研究 3 核種相加之年攝食有效劑量 仍在文獻報導的天然核種年攝食有效劑量範圍內。

**關鍵詞**:天然放射性核種(<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra)、香菇、 洋菇、金針菇、傳輸因子、年攝食有效劑量。

#### Abstract

Mushroom is one of the popular foods for the human being, and it is also an important agricultural industry in Taiwan. Radionuclides are easy to transport and accumulate in mushrooms. Different types of mushrooms and radionuclides have different mobility and accumulation capabilities. The mushroom substrate (growth medium) also affects the mobility and accumulation of radionuclides in mushrooms. The mobility and accumulation of mushroom radionuclides reported in the literature are mainly for wild mushrooms. In Taiwan, the researches of radionuclides mobility and accumulation in the mushroom are limited. In view of food safety, this study explored the factors affecting the transport of natural radionuclides (<sup>40</sup>K,  $^{232}$  Th, and  $^{226} Ra$  ) of the three most common mushrooms on the market (Lentinula edodes, Flammulina velutipes, and Agaricus bisporus). The transfer factor (TF) between mushrooms and growth substrates was calculated. At the same time, this study compared the activity concentrations of nuclides for the commercial mushroom products and the mushroom planting in the field. The field samples were mostly collected from the central area of Taiwan. The growth media for Lentinula edodes included flexible freight bags (FIBC bag) packed substrates and the wood. The Agaricus bisporus growth median was compost, and the Flammulina velutipes growth median was sawdust substrates. Also, this study analyzed the radionuclide species of imported Lentinula edodes sold in Taiwan. The quantity order of activity concentration for <sup>40</sup>K were Agaricus bisporus (1557±114 Bq/kg-DM) > Flammulina velutipes (1098±141 Bq/kg-DM) > Lentinula edodes (742±130 Bq/kg-DM) (p<0.001). The activity concentrations for 232Th were Agaricus bisporus (4.82±1.73 Bq/kg-DM), Flammulina velutipes (4.09±1.60 Bq/kg-DM), and Lentinula edodes (4.85±1.40 Bq/kg-DM). The activity concentrations for <sup>226</sup>Ra were Agaricus bisporus (5.41±2.04 Bq/kg-DM), Flammulina velutipes (4.64±1.97 Bq/kg-DM), and Lentinula edodes (5.69±2.27 Bq/kg-DM). The activity concentrations were

insignificantly different among the three mushrooms for <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra. The activity concentrations were insignificantly different among the commercial product and collected from field samples for individual nuclides. The <sup>40</sup>K activity concentrations were 837±119 Bq/kg, and 664±128 Bq/kg for domestic and imported dried Lentinula edodes, respectively that the activity of domestic sample higher than imported samples (p=0.003). Only one sample of imported dried Lentinula edodes detected nuclides <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra with activities of 2.79 Bq/kg (<sup>232</sup>Th) and 2.06 Bq/kg (<sup>226</sup>Ra), which were lower than the domestic Lentinula edodes with an average activity of 5.34 Bq/kg (232Th) and 6.38 Bq/kg (226Ra). The 40K TF values of Lentinula edodes planted in wood were significantly greater than the TF value of Lentinula edodes planted in the FIBC bag, Agaricus bisporus, and Flammulina velutipes. The <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra TFs of Lentinula edodes and Flammulina velutipes were insignificantly higher than Agaricus bisporus. The annual internal effective dose of  $^{40}$ K (1.49±0.53 µSv/y) was significantly greater than  $^{232}$ Th  $(0.25\pm0.08 \ \mu Sv/y)$  and <sup>226</sup>Ra  $(0.35\pm0.14 \ \mu Sv/y)$ . The three radionuclides' annual effective dose ranged from 0.82 to 3.50  $\mu$ Sv/y and with an average of 1.95±0.63  $\mu$ Sv/y. The annual effective dose presented in this study is within the range of the annual effective dose of natural radionuclides reported in the literature.

**Keywords:** Natural radionuclide (<sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, and <sup>226</sup>Ra), *Lentinula edodes, Flammulina velutipes, Agaricus bisporus*, transport factor, annual internal effective dose.

#### I. 前言

菇類是人類日常生活中重要的食物之一,也是台灣 重要農業產業。1960-1970 年代我國洋菇罐頭外銷量在 為世界第一名,曾有洋菇王國的美譽。菇類有豐富營養, 味道鮮美,且含多種生物活性物質,如多醣體、麥角固 醇、核苷酸、蛋白多醣、核酸、有機鍺與纖維素等,具 有抗腫瘤、免疫調節、降血糖、降血壓、降膽固醇、抗 細菌病毒及延緩骨質疏鬆等保健功效(Lindequist et al., 2005)。近年隨著養生風氣之盛行,國人對於菇類產品需 求更是大增。台灣菇類主要產區分布於台中縣、彰化縣 及南投縣,以香菇、洋菇及金針菇為大宗,而近年來也 開發杏鮑菇、秀珍菇、鴻喜菇及珊瑚菇等新興菇類。

天然放射性核種是平常人類內部和外部輻射暴露 的主要來源。由於背景活度、氣候和農業條件不同,食 品中存在的天然放射性核種活度差異很大(Saad, 2017)。 在瑞典,放射性污染涉及不同的生態系統,如高地牧場 和森林,通過將放射性核種轉移到漿果、蘑菇和野生肉 品中,對野生動物和人類食物鏈產生影響(Mascanzoni, 1987)。特別是,當野生動物攝取大量的蘑菇時,研究已 經證明蘑菇通過直接攝食野生動物的肉類有效地將放 射性銫轉移到人類飲食中(Karlen et al., 1991; Johanson and Bergstrom, 1994)。

Mascanzoni (2009)研究結果證實,在森林生態系統 中<sup>137</sup>Cs 可以長期吸收,目前無法證實車諾比事故發生 多年後,蘑菇<sup>137</sup>Cs 的轉移已經減少。相反,蘑菇代表 了將<sup>137</sup>Cs 轉移到人類飲食中的主要途徑,並且仍然對 當地人口消費大量野生蘑菇和來自野生動物的肉類具 有潛在危害。

放射性核種轉移到植物通過以下方式將存在於環境中的放射性核種轉移到植物中:(i)通過根吸收土壤放射性核種,和(ii)通過植物的地上部分直接吸收放射性核種。前者取決於土壤中的放射性核種活度濃度,後者取決於大氣中放射性核種的沉積速率(Karunakara et al., 2013)。因此,研究菇類中的傳輸機制和這些放射性核種的分佈有助於了解栽種基質和菇類之間的吸收,交換和轉移模型。它還可以作為台灣和附近地區消費菇類人群劑量評估的參考(Wang et al., 1998)。

因此,傳輸因子(植物活性與土壤活性的比例,方程 式1)是評估土壤放射性核種傳輸至植物體的比例。

$$TF = \frac{C_j^p(Bq/kg - \pounds \pm)}{C_j^s(Bq/kg - \pounds \pm)}$$
(1)

其中 TF 為轉移因子;  $C_j^p$ :為植物 p 的放射性核種 j 活度;  $C_j^s$ :為土壤 s 的放射性核種 j 活度。Bannai et al. (1994)提出在培養試驗,香菇中放射性核種 <sup>137</sup>Cs 的轉移 因子(TF)為 2.6-21。然而,香菇中相對於土壤的放射性 核種絕活度濃度比率相當低,並且在田間研究中該比率 通常小於 1 (Heinrich, 1992)。共生菌根香菇通常具有比 腐敗真菌更高的 <sup>137</sup>Cs 的 TF,儘管不同的香菇種類也具 有廣 泛不同程度的放射性絕活性(Heinrich, 1992; Sugiyama et al., 1993)。

許多文獻(Heinrich, 1992; Kammerer et al., 1994)描 述了車諾比核事故後在歐洲各地收集的野生香菇和日 本福島第一核電站事故之前(Yoshida et al., 1994)和之後 (Kuwahara et al., 2005)的放射性 Cs 的高累積。從栽種基 質到野生香菇的放射性 Cs 的轉移因子為 5.5 - 13 (Yoshida et al., 1994)、15 (Yoshida et al., 1994)和 9.3 (Kuwahara et al., 2005)。研究結果表明香菇對放射性核 種 Cs 的積累取決於絲狀真菌的種類。Kaduka et al. (2006) 分析土壤到不同蘑菇的<sup>137</sup>Cs 轉移因子,並顯示轉移因 子依賴於香菇的營養群、生物家族、屬和物種 (Bannai et al., 1994; Yoshida and Muramatsu, 1994) • Bulko et al. (2014)評估了車諾比事故後受污染最嚴重的戈梅利地區 森林衍生產品對 <sup>137</sup>Cs 的吸收,發現香菇和野生漿果中 <sup>137</sup>Cs 的累積與土壤的放射性銫污染密度直接相關,這可 以從車諾比輻射落塵及決定土壤中放射性核種可用性 變化的自然和氣候條件來解釋。

在車諾比事故後,在幾種香菇物種中觀察到高水平的<sup>137</sup>Cs 活度(Mascanzoni, 1992; Kammerer et al., 1994; Nikolova et al., 1997),證實了蘑菇累積放射性核種能力的觀察(Grueter, 1973; Haselwandter, 1978)。眾所周知, 香菇主要生長在酸性,富含有機物,營養貧乏和缺乏粘土的森林土壤的上層,那裡可大量吸收<sup>137</sup>Cs (Mascanzoni, 1992; Kammerer et al., 1994; Steiner et al., 2002)。但是對於自然和半自然的環境下的長期吸收資料 甚少,因為大多數研究都集中在耕種地區的農作物上。

森林土壤中<sup>137</sup>Cs向下遷移極其緩慢(Kammerer et al., 1994),大多數車諾比放射性銫在沉積後許多年仍累

積在土壤上層(Nikolova et al., 1997; Gillett and Crout, 2000; Ruhm et al., 1998)。Rafferty et al. (1997)提出微生物 活動和<sup>137</sup>Cs 通過蘑菇分解轉移到新鮮的墊料中是<sup>137</sup>Cs 在森林土壤有機層中的持久存在的基礎。研究顯示菌絲 體具有極好的固定放射性銫的能力(Clint et al., 1991)。在 真菌菌絲體中發現了 30 - 50%的森林生態系統<sup>137</sup>Cs 的 沉積(Desmet et al., 1990)。由於超過 90%的真菌生物質 量為菌絲體位於土壤中,而在果實體中僅佔 10%(Read, 1991),因此菌落體局部切片中<sup>137</sup>Cs 的累積可能導致子 實體的活性更高(Nikolova et al., 1997)。真菌菌根與樹根 之間的相互作用也可能影響雞油菌的吸收機制。並在增 加轉移作用中發揮作用(Kaduka et al., 2006)。

#### Ⅱ. 主要內容

為了食品安全,對菇類、種植基質放射性核種活度 水平以及傳輸因子是值得特別重視。蘑菇的食物類別尚 未深入研究(Nakashima et al., 2015; Orita et al., 2017)。本 研究特別針對此台灣重要蔬果產業探討3種菇類(香菇、 洋菇、金針菇)菇體與基質(太空包、段木、木屑、堆肥) 放射性核種活度以及計算菇體與基質核種傳輸因子(TF)。 本計畫的研究目的採集台灣當地栽種的不同種類菇類 (香菇、洋菇、金針菇),探討採集菇類的放射性核種分 布。探討不同栽種方式(段木栽種、太空包栽種)、不同 栽種介質(段木、木屑、堆肥)及不同種類之香菇(洋菇、 香菇、金針菇)菇類及栽種介質之放射性核種的分佈現況, 了解放射性核種核種在栽種介質-菇類間的傳輸因子與 影響傳輸因子的因素。此外,比較台灣乾香菇與境外進 口乾香菇(日本、東南亞區域進口之市售包裝乾香菇)含 放射性核種分佈的現況與差異,藉以消除國人對於「核 食安全」的疑慮。最終藉由三種菇體的天然放射性核種 活度計算國人的年攝食有效劑量。

#### III. 結果與討論

#### 菇類與基質天然放射性核種分析

表 1 為菇類與基質放射性核種活度。核種 <sup>40</sup>K 活度 以洋菇基質為最高,範圍介於 570.3-698.4 Bq/kg,平均 為 638.5±37.3 Bq/kg。由於洋菇基質主要由稻稈與土壤 組成,故其 <sup>40</sup>K 活度較高。核種 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 活度接近 一般土壤活度,活度範圍分別為 38.82-48.31 和 30.12-37.55 Bq/kg,平均為 43.43±2.83 和 32.59±2.42 Bq/kg。而種植生產洋菇核種 <sup>40</sup>K 活度亦比其他菇類高, 活度範圍 1412.9-1629.4 Bq/kg,平均為 1546.5±78.4 Bq/kg。核種 <sup>40</sup>K 活度次高為金針菇基質,其範圍為 209.1-519.9 Bq/kg,平均為 344.8±107.3 Bq/kg。金針菇 基質主要為木屑、麥皮及米糠,而一般麥皮及米糠的 <sup>40</sup>K 活度分別為 435.18±2.72 和 560.26±20.84 Bq/kg。因此基 質活度由麥皮及米糠為主要的貢獻者。而種植後的金針 菇 <sup>40</sup>K 活度範圍介於 1039.2-1223.6 Bq/kg,平均為 1115.7±67.3 Bq/kg,高於香菇之 <sup>40</sup>K 活度。

相較之下,太空包基質及段木基質其  ${}^{40}$ K 核種活度 比較低,其活度範圍分別介於 154.6-283.5 和 62.30-155.7 Bq/kg,平均為 211.7±43.8 和 88.75±35.60 Bq/kg;而其 相對應的香菇其  ${}^{40}$ K 活度亦比較低,其活度範圍分別介 於 690.8-918.7 和 574.5-688.0 Bq/kg,平均為 817.6±62.6 和 629.8±44.6 Bq/kg。

核種<sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 基質活度除了洋菇基質與土壤核 種活度相近外,其餘 3 種栽植菇類之基質活度遠低於土 壤核種活度。核種<sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 菇體活度金針菇活度顯 著低於另外 3 種栽植方式的活度。

表1 菇類與基質放射性核種活度

核種	菇類	基質活度 Bq/kg-乾重 (n)*	菇類活度 Bq/kg-乾重(n)
<sup>40</sup> K	香菇-包	211.7±43.8 (154.6-283.5)** (14/14)	817.6±62.6 (690.8-918.7) (14/14)
	香菇-木	88.75±35.60 (62.30-155.7) (8/8)	629.8±44.6 (574.5-688.0) (8/8)
	洋菇	638.5±37.3 (570.3-698.4) (12/12)	1546.5±78.4 (1412.9-1629.4) (12/12)
	金針菇	344.8±107.3 (209.1-519.9) (8/8)	1115.7±67.3 (1039.2-1223.6) (8/8)
<sup>232</sup> Th	香菇-包	8.97±1.45 (6.82±12.13) (14/14)	4.57±1.41 (2.72±6.88) (11/14)
	香菇-木	12.05±6.48 (5.52-25.03) (8/8)	4.98±1.77 (2.33-8.18) (6/8)
	洋菇	43.43+2.83 (38.82-48.31) (12/12)	4.72+1.59 (2.54-7.54) (8/12)
	金針菇	5.81±1.95 (4.01-8.93) (8/8)	3.02±0.85 (2.09-4.41) (2/8)
<sup>226</sup> Ra	香菇-包	9.29±1.87 (6.49-11.66) (14/14)	5.36±2.14 (1.59-7.76) (9/14)
	香菇-木	11.67±5.70 (4.71-19.91) (8/8)	5.8512.74 (2.87-9.72) (4/8)
	洋菇	32.59±2.42 (30.12-37.55) (12/12)	5.43±1.91 (2.59-8.60) (8/12)
	金針菇	6.92±2.92 (4.86-12.42) (8/8)	3.38±1.16 (1.94-5.10) (2/8)

\*檢測活度樣品數/總件測樣品;\*\*數據依序為平均值、標準偏差、最小 值與最大值

圖 la-3c 呈現菇體核種<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 活度與基 質活度相關性。圖 la 核種<sup>40</sup>K 在 4 種生長環境菇類植體 與基質活度的相關性,樣品代號:MA-1 太空包栽植香菇、 MA-2 堆肥栽種洋菇、MA-3 段木栽植香菇、MA-4 木屑 栽種金針菇。個別栽植方式的菇體<sup>40</sup>K 栽植活度與基質 的活度並無顯著的相關性(p>0.05)。圖 lb 與 lc 分別為 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 在 4 種生長環境菇類植體與基質活度的相 關性,樣品代號:MA-1 太空包栽植香菇、MA-2 堆肥栽 種洋菇、MA-3 段木栽植香菇、MA-4 木屑栽種金針菇。 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 植體吸收行為相近,太空包栽植香菇、段 木栽植香菇與金針菇的植體活度與基質活度有顯著的 正相關性。雖然洋菇的植體活度與基質活度無顯著正相 關性,但是仍呈現正相關趨勢。可能原因洋菇生長的基 質是混合多種材料基質活度不均匀。

圖 1a-1c 顯示 <sup>40</sup>K 與 <sup>232</sup>Th 以及 <sup>226</sup>Ra 菇體的吸收行 為不同,可歸因元素 K、Th、與 Ra 分子量的差異,導 致在菇體移動性不同。40K 屬於低分子量元素(light element), <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 屬於高分子量元素(heavy element),低分子量相較高分子量元素的移動性高。低 分子量元素<sup>40</sup>K 隨著營養元素被植物吸收而傳輸於菇體; 因而菇體<sup>40</sup>K 活度大於栽培基質<sup>40</sup>K 活度。相反的高分 子量元素<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra不易傳輸,因而菇體<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra 活度低於基質活度。另外元素分子量的不同也影響菇體 活度與基質活度的相關性,菇體<sup>40</sup>K活度與基質活度無 相關性,而菇體<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra活度與基質活度正相關性, 因為菇類吸收<sup>40</sup>K 屬超量吸收,因而並不依賴基質<sup>40</sup>K 活度。然而菇體吸收<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra活度依據作物由土壤 或基質吸收營養元素的線性相關性呈現正相關性。圖 1a-1c 顯示菇類由生長基質至菇體吸收 40K 以及 232Th 與 <sup>226</sup>Ra 的行為不同。







圖1 菇體活度與基質活度相關性

表 2 為市售菇類天然放射性核種活度,市售菇類活 度與表 1 現地栽植菇類活度相似。國產洋菇<sup>40</sup>K 活度最 高,範圍介於 1366.4-1821.1 Bq/kg,平均為 1569.6±149.9 Bq/kg。金針菇<sup>40</sup>K 活度次高,範圍介於 862.7-1518.7 Bq/kg,平均為 1084.4±182.8 Bq/kg。國產及進口香菇<sup>40</sup>K 活度最低,活度範圍分別為 579.8-1008.6 和 410.5-870.5 Bq/kg,平均為 837.1±119.2 和 664.0±128.0 Bq/kg。

表2 市售菇類放射性核種活度

	代4 中自始换加	又别任物性伯及
核種	菇類(樣本數*)	活度 Bq/kg-乾重
	國產香菇 (10/10)	837.1±119.2 (579.8-1008.6)
4012	進口香菇 (14/14)	664.0±128.0 (410.5-870.5)
K	國產洋菇 (10/10)	1569.6±149.9 (1366.4-1821.1)
	國產金針菇(10/10)	1084.4±182.8 (862.7-1518.7)
	國產香菇 (10/10)	5.3±0.9 (4.4-7.1)
232-1-1	進口香菇 (1/14)	2.8
In	國產洋菇 (3/10)	5.2±2.3 (2.7-7.3)
	國產金針菇(6/10)	5.5±1.2 (3.7-6.9)
	國產香菇 (10/10)	6.4±2.0 (3.3-9.3)
226 <b>p</b>	進口香菇 (1/14)	2.1
Ra	國產洋菇 (5/10)	5.4±2.6 (3.1-8.2)
	國產金針菇(8/10)	5.9±1.8 (2.3-8.5)
*(檢測活度	長様品數/總檢測様品)	)

圖 2a 列現地採集與市售香菇核種 <sup>40</sup>K 活度。4 種香 菇活度顯示太空包栽植生產香菇與市售國內乾香菇活 度顯著高於段木栽植香菇與國外進口乾香菇 (p< 0.001)。 太空向栽植生產之香菇<sup>40</sup>K 活度顯著大於段木栽植生產 香菇<sup>40</sup>K 活度(p<0.001)。市售國產乾香菇之<sup>40</sup>K 活度顯 著高於進口乾香菇<sup>40</sup>K 活度(p=0.003)。圖 2b 與表 1-2 之 活度顯示洋菇 40K 活度顯著高於金針菇 40K 活度(p< 0.001), 現地採集樣品與市售產品之<sup>40</sup>K 活度無顯著差 異(p=0.626,金針菇; p=0.666,洋菇)。圖 2c-2d 分別呈現 7 種類別菇類<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra活度。國外進口乾香菇僅有一 個樣品測到<sup>232</sup>Th 核種其活度為 2.79 Bq/kg。國外進口乾 香菇僅有一個樣品測到<sup>226</sup>Ra核種其活度為2.06 Bq/kg, 圖 2c-2d 未呈現國外進口乾香菇核種<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra活度。 圖 2c-2d 顯示現地栽植的金針菇之 226 Ra 與 232 Th 活度顯 著低於其餘各種菇類活度。圖 3a 顯示 3 種菇類 40K 活度 高低順序依序為洋菇(1557±114 Bq/kg)>金針菇 (1098±141 Bq/kg)>香菇(742±130 Bq/kg) (p<0.001)。圖 3b 顯示3種菇類的<sup>232</sup>Th活度,洋菇活度(4.82±1.73 Bq/kg), 金針菇活度(4.09±1.60 Bq/kg)與香菇活度(4.85±1.40 Bq/kg),3 種菇類 <sup>232</sup>Th 活度無顯著差異。圖 3c 顯示 3 種菇類的<sup>226</sup>Ra 活度,香菇活度(5.69±2.27 Bq/kg),金針 菇活度(4.64±1.97 Bq/kg)與洋菇活度(5.41±2.04 Bq/kg),3 種菇類<sup>226</sup>Ra活度無顯著差異。



圖 2a 香菇核種<sup>40</sup>K 活度。樣品代號:1.太空包生產香菇; 2. 段木栽植香菇; 3.市售國內乾香菇; 4.國外進口乾香菇。



圖 2b 現場採集與國內生產市售洋菇與金針菇 <sup>40</sup>K 活度 比較。樣品代號:1.現地栽植的金針菇; 2.市售新鮮之國產 金針菇; 3.現地栽植的洋菇; 4.市售新鮮之國內洋菇。



圖 2c 菇類 <sup>232</sup>Th 活度。樣品代號:1. 現地太空包栽植香菇; 2. 現地段木生長香菇; 3.現地栽植的金針菇; 4.現地 栽植的洋菇; 5.國產市售乾香菇; 6. 國產市售金針菇; 7. 國產市售洋菇。



圖 2d 菇類 <sup>226</sup>Ra 活度。樣品代號:1.太空包栽植香菇; 2. 段木生長香菇; 3.現地栽植的金針菇; 4.現地栽植的洋菇; 5.國產市售乾香菇; 6.國產市售金針菇; 7.國產市售洋菇。



圖 3a 彙整現地與市售 3 種菇類 <sup>40</sup>K 活度。樣品代號:1. 香菇,2.金針菇,3.洋菇。



圖 3b 彙整現地與市售 3 種菇類 <sup>232</sup>Th 活度。樣品代號:1. 香菇,2.金針菇,3.洋菇。



圖 3c 彙整現地與市售 3 種菇類 <sup>226</sup>Ra 活度。樣品代號:1. 香菇,2.金針菇,3.洋菇。

#### 放射性核種傳輸因子(TF)

表 3 列 4 種栽植方式香菇、洋菇與金針菇核種  ${}^{40}$ K、  ${}^{232}$ Th 與  ${}^{226}$ Ra 之傳輸因子(TF)。圖 4a 顯示 4 種栽植方式 與 3 種菇類核種  ${}^{40}$ K 傳輸因素(TF)之盒狀圖。由圖 4a 與 表 3 顯示段木栽植香菇  ${}^{40}$ K 之 TF 顯著大於太空包栽植 香菇、洋菇與金針菇之 TF 值(p< 0.001)。圖 4b 與 4c 分 別顯示 4 種栽植方式與 3 種菇體核種  ${}^{232}$ Th 與  ${}^{226}$ Ra 傳輸 因素(TF)之盒狀圖。由圖 4b-4c 與表 3 顯示太空包栽植 與段木栽植香菇以及金針菇  ${}^{232}$ Th 與  ${}^{226}$ Ra 之 TF 顯著大 於洋菇 TF(p<0.001)。表 1 顯示段木  ${}^{40}$ K 活度顯著低於太 空包與木屑基質  ${}^{40}$ K 活度, 但是段木栽植香菇  ${}^{40}$ K 活度

略低於太空包栽植香菇與木屑栽植金針菇菇體 <sup>40</sup>K 活度, 此顯示菇體吸收核種 <sup>40</sup>K 沒有受限於基質活度。然而堆 肥栽種洋菇 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 之 TF 顯著低於其他方法栽植 香菇與金針菇 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 之 TF 值(表 3)。堆肥基質 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 活度顯著大於太空包與木屑基質 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 活度,但是洋菇菇體 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 活度與太空包 與木屑栽植菇體 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 之 TF 值顯著的低於其 他基質栽植之 TF 值。堆肥栽種洋菇 <sup>40</sup>K 核種的吸收與 核種 <sup>32</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 之吸收行為不同。<sup>40</sup>K 低分子量易移 動與傳輸,菇體吸收超量的 <sup>40</sup>K,主要受菇類的影響。 菇類吸收高分子量核種 <sup>32</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 各種菇體的活度無 顯著差異,與基質的活度無相關性(表 1)。

表3 菇類放射性核種傳輸因子(TF)

核種	菇類(樣本數)	TF
<sup>40</sup> K	太空包栽種香菇 (14)*	4.02±0.87 (2.11-5.30)
	段木栽種香菇 (8)	7.97±2.54 (3.75-10.38)
	堆肥栽種洋菇 (10)	2.43±0.19 (2.03-2.82)
	木屑栽種金針菇(10)	3.56±1.23 (2.00-5.52)
<sup>232</sup> Th	太空包栽種香菇 (14)	0.50±0.12 (0.35-0.79)
	段木栽種香菇 (8)	0.45±0.10 (0.33-0.61)
	堆肥栽種洋菇 (10)	0.11±0.03 (0.07-0.17)
	木屑栽種金針菇(10)	0.53±0.09 (0.42-0.66)
<sup>226</sup> Ra	太空包栽種香菇 (14)	0.56±0.17 (0.24-0.82)
	段木栽種香菇 (8)	0.52±0.13 (0.36-0.74)
	堆肥栽種洋菇 (10)	0.17±0.06 (0.08-0.23)
	木屑栽種全針菇(10)	0.50±0.10 (0.39-0.65)

\*()內檢測活度樣品數



圖 4a 3 種菇的 <sup>40</sup>K 傳輸因素(TF); 1.香菇太空包, 2.香菇段 木生長, 3.洋菇, 4.金針菇



圖 4b 3 種菇的 <sup>232</sup>Th 傳輸因素(TF); 1.香菇太空包, 2.香菇 段木生長, 3.洋菇, 4.金針菇



圖 4c 3 種菇的<sup>226</sup>Ra 傳輸因素(TF); 1.香菇太空包, 2.香菇 斷木生長, 3.洋菇, 4.金針菇

## 核種<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 之 TF 相關性

TF 值是預測核種由植物生長基質傳輸至植體活度 重要參數, 也是推估植物體核種活度與生物體曝露劑量 重要因素。TF 值影響因素的探討也是推估 TF 值與預湔 植物體核種活度重要的因素。菇體核種活度主要來自栽 植基質的活度,因此由菇體 TF 值與基質活度的相關性 可以了解菇體核種吸收的影響因素。圖 5a-5c 顯示核種 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 之 TF 值與 4 種栽植基質核種活度相 關性。4種菇類<sup>40</sup>K的TF與其對應基質核種<sup>40</sup>K活度皆 呈現顯著負相關性(圖 5a),可能植體吸收核種受到其他 主要營養元素的抑制。圖 5b-5c 顯示 4 種菇類 232Th 與 <sup>226</sup>Ra之TF值與4種栽植基質核種活度無顯著正相關性 (p=0.06-0.37, <sup>232</sup>Th; p=0.08-0.75, <sup>226</sup>Ra)。TF 值與基質核 種相關性顯示<sup>40</sup>K 與<sup>226</sup>Ra 以及<sup>232</sup>Th 的吸收核種的行為 不同。226Ra 與232Th 的吸收行為符合核種由基質傳輸至 植體的線性概念模式。此模式假設植體的活度與基質的 活度成正相關(圖 1b-1c),基質的核種活度高植體容易吸 收與傳輸,因此植體的活度與基質的核種活度成正相關 性。由 TF 計算公式(1)顯示 TF 的數值與植體活度正相 關,與基質活度負相關。因此符合核種的線性傳輸模式 時,植體核種的活度與基質的活度成正相關,但是 TF 值與基質核種活度無相關性。香菇、洋菇與金針菇核種 <sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 在 4 種基質之結果符合線性傳輸概念模式 關係。4 種菇類核種 <sup>40</sup>K 活度與基質核種 <sup>40</sup>K 活度無顯 著相關性,但是<sup>40</sup>K的TF值與基質的活度顯著的負相 關(圖 la),顯示菇類吸收<sup>40</sup>K 時受到其他離子的抑制。



圖 5a 栽植香菇、洋菇與金針菇<sup>40</sup>K 的 TF 與基質核種活 度相關性。樣品代號:1.太空包栽植香菇; 2.洋菇; 3.斷木
栽植香菇;4.金針菇。



圖 5b 栽植香菇、洋菇與金針菇<sup>232</sup>Th 的 TF 與基質核種 活度相關性。樣品代號:1.太空包栽植香菇; 2.洋菇; 3.斷 木栽植香菇;4.金針菇。



圖 5c 栽植香菇、洋菇與金針菇<sup>226</sup>Ra 的 TF 與基質核種 活度相關性。樣品代號:1.太空包栽植香菇; 2.洋菇; 3.斷 木栽植香菇;4.金針菇。

### 國內香菇與境外香菇人工放射性核種之分析

台灣食品放射性核種法規主要針對人工核種<sup>131</sup>I、 <sup>134</sup>Cs 與 <sup>137</sup>Cs 三種核種進行檢測, 食品放射性核種 <sup>131</sup>I 活度需低於 100 Bq/kg, <sup>134</sup>Cs 與 <sup>137</sup>Cs 活度總和需低於 100 Bq/kg。本研究針對國內生產與國外進口市售菇類 (國內乾香菇10件、國外乾香菇14件、國內生產新鮮金 針菇10件與國內生產新鮮洋菇10件)進行檢測,天然核 種<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 活度呈現於表 1, 結果於菇類與基 質天然放射性核種分析討論。人工核種活度結果顯示國 內市售乾香菇與新鮮洋菇及金針菇人工核種活度皆低 於最低偵測活度(MDA),代表國內種植的香菇、洋菇及 金針菇未受人工輻射的污染。市售國外香菇14件中,6 件進口自日本及1件進口自韓國的市售香菇檢測到人工 核種<sup>137</sup>Cs,日本進口乾香菇<sup>137</sup>Cs活度範圍 3.03 - 7.76 Bq/kg 與平均值 5.17±1.86 Bq/kg, 韓國的市售香菇<sup>137</sup>Cs 活度 5.65 Bq/kg。進口乾香菇 137Cs 活度皆遠低於法規許 可標準(134Cs與137Cs活度總和)100 Bq/kg。菇體低人工 核種活度可能來自於輻射落塵污染的土壤被菇類吸收。 此低人工核種活度遠低於法規許可標準,對國人攝食造 成人工核種曝露應不致引起核食安全疑慮。

### 攝食菇類天然與人工核種暴露劑量

評估食物攝食造成核種對人體的危害可以藉由計

算攝食菇類的有效劑量(μSv/y),評估危害程度。攝食菇 類的有效劑量依據方程式2計算:

$$D_{\rm eff} = \Sigma C_{\rm i} \times M \times DF \tag{2}$$

其中 D<sub>eff</sub>、C<sub>i</sub>、M、DF 分別代表每年有效劑量(Sv/y)、 菇體核種 i 活度(Bq/kg-乾重)、每年攝食重量(kg-乾重/ 年)、核種 i 活度轉換因素(Sv/Bq)。本研究檢測 3 種菇 類(香菇、洋菇及金針菇)以及 3 種天然核種( $^{40}$ K、 $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra)之活度。農委會統計資料顯示國人每人每年食 用菇類數量為 2.35 kg-鮮重/年,假設不同菇類平均含水 率 90%,因此每人食用菇類重量 0.235 kg-乾重/年。核種 轉換因子如下:  $^{40}$ K= 6.2x10<sup>-9</sup> Sv/Bq、 $^{232}$ Th=2.3x10<sup>-7</sup> Sv/Bq 與  $^{226}$ Ra=2.8x10<sup>-7</sup> Sv/Bq。

表 4a-4c 列 3 種菇類(香菇、洋菇及金針菇)以及 3 種天然核種( $^{40}$ K、 $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra)之攝食菇類的有效劑量 ( $\mu$ Sv/y),含栽植與市售樣品。 $^{40}$ K 攝食菇類的有效劑量 大小依序洋菇 > 金針菇 >香菇。 $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra 攝食菇 類的有效劑量 3 種菇類無顯著差異(表 4b-4c)。表 5 分別 列香菇、洋菇及金針菇 3 核種  $^{40}$ K、 $^{232}$ Th、 $^{226}$ Ra 攝食有 效劑量之總和( $\mu$ Sv/y)。有效劑量介於 0.82 – 3.50  $\mu$ Sv/y, 有效劑量大小依序洋菇> 金針菇 >香菇。

表 4a 香菇、洋菇及金針菇  $^{40}$ K 攝食菇類的有效劑量 ( $\mu$ Sv/y)

菇類	平均值	sd	範圍	樣本數
香菇	1.08	0.19	0.60-1.47	46
金針菇	1.60	0.21	1.26-2.21	18
洋菇	2.27	0.17	1.99-2.65	22

表 4b 香菇、洋菇及金針菇  $^{232}$ Th 攝食菇類的有效劑量 ( $\mu$ Sv/y)

菇類	平均值	sd	範圍	様本數
香菇	0.26	0.08	0.13-0.44	33
金針菇	0.22	0.09	0.11-0.37	14
洋菇	0.26	0.09	0.14-0.41	15

表 4c 香菇、洋菇及金針菇 <sup>226</sup>Ra 攝食菇類的有效劑量 (μSv/y)

菇類	平均值	sd	範圍	樣本數
香菇	0.37	0.15	0.10-0.64	33
金針菇	0.31	0.13	0.13-0.56	16
洋菇	0.36	0.13	0.17-0.57	17

表 5 香菇、洋菇及金針菇 3 核種 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 攝食 菇類的有效劑量之總和(μSv/y)

菇類	平均值	sd	範圍	樣本數
香菇	1.54	0.44	0.82-2.26	46
金針菇	2.04	0.33	1.52-2.97	18
洋菇	2.72	0.34	2.06-3.50	22

考慮檢測的栽植與市售所有香菇、洋菇及金針菇之 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 的年攝食有效劑量列於表 6。攝食菇 類 <sup>40</sup>K 的有效劑量總和(1.49±0.53  $\mu$ Sv/y)顯著大於 <sup>232</sup>Th(0.25±0.08  $\mu$ Sv/y)與 <sup>226</sup>Ra(0.35±0.14  $\mu$ Sv/y)。3 核種 相加之年攝食有效劑量介於 0.82 – 3.50  $\mu$ Sv/y,平均 1.95 ±0.63  $\mu$ Sv/y。依據 3 核種相加之年攝食有效劑量中間值 的比例,<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 分別佔年攝食有效劑量的百 分比為 67.8%, 13.5%與 18.7%。Lin et al. (1996)評估台灣 因天然輻射年有效劑量為 1.56 mSv/y,其中地表輻射為 284  $\mu$ Sv/y。Falandysz et al. (2017)檢測21種可食用菇類, 評估吃1kg鮮重的菇體<sup>40</sup>K的年攝食有效劑量0.22 – 1.2  $\mu$ Sv。Baeza et al. (2004)檢測72種菇類樣品,評估吃菇 類<sup>40</sup>K的年攝食有效劑量0.29 – 6.6  $\mu$ Sv/y。本研究3核 種相加之年攝食有效劑量介於0.82 – 3.50  $\mu$ Sv/y,仍在文 獻報導的天然核種年攝食有效劑量範圍內。

表 6 攝食所有菇類<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 的有效劑量(μSv/y)

茲類	平均值	sd	範圍	中間值	樣本數
<sup>40</sup> K	1.49	0.53	0.60-2.65	1.29	86
<sup>232</sup> Th	0.25	0.08	0.11-0.44	0.26	62
<sup>226</sup> Ra	0.35	0.14	0.10-0.64	0.36	66
總和	1.95	0.63	0.82-3.50	1.92	86

### IV. 結論

本研究檢測國人消費量最大3種菇類(香菇、洋菇與 金針菇)天然核種(<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra)與人工核種(<sup>131</sup>I, <sup>134</sup>Cs和<sup>137</sup>Cs)活度。檢測結果顯示國內栽植樣品與市售 產品3種菇類人工核種活度皆低於最小偵測活度。天然 核種<sup>40</sup>K活度(國內現地栽植樣品與市售產品以及國外 進口)大小依序:洋菇(1557±114 Bq/kg-乾重)>金針菇 (1098±141 Bq/kg-乾重)>香菇(742±130 Bq/kg-乾重)。

洋菇、金針菇與香菇 <sup>232</sup>Th 活度分別為 4.82±1.73、 4.09±1.60、4.85±1.40 Bq/kg-乾重,3 種菇類 <sup>232</sup>Th 活度無顯著差異。洋菇、金針菇與香菇 <sup>226</sup>Ra 活度分別為 5.41± 2.04、4.64±1.97、5.69±2.27 Bq/kg-乾重,3 種菇類 <sup>226</sup>Ra 活度 無顯著差異。全部樣品菇體 <sup>226</sup>Ra 活度 5.36±2.15 Bq/kg-乾重顯著大於 <sup>232</sup>Th 活度 4.67±1.53 Bq/kg-乾重 (p=0.037)。

比較現地採集與市售 3種菇類(香菇、洋菇與金針菇) 核種活度( $^{40}$ K、 $^{232}$ Th與 $^{226}$ Ra)。現地栽植菇類與市售菇 類活度無顯著差異。比較國產與進口乾香菇核種活度 ( $^{40}$ K、 $^{232}$ Th與 $^{226}$ Ra)。國產香菇 $^{40}$ K活度837.1±119.2 Bq/kg 高於進口香菇 $^{40}$ K活度664.0±128.0 Bq/kg (p=0.003)。  $^{232}$ Th與 $^{226}$ Ra其活度無顯著差異。國外進口乾香菇僅有 一個樣品測到 $^{232}$ Th核種其活度為2.79 Bq/kg。國外進口 乾香菇僅有一個樣品測到 $^{226}$ Ra核種其活度為2.06 Bq/kg 進口乾香菇僅有1個樣品檢測到核種 $^{232}$ Th與 $^{226}$ Ra,活 度分別為2.79 Bq/kg ( $^{232}$ Th)與2.06 Bq/kg ( $^{226}$ Ra),低於國 內市售平均活度5.34 Bq/kg ( $^{232}$ Th)與6.38 Bq/kg ( $^{226}$ Ra)。

現地栽植 3 種菇類(香菇、洋菇與金針菇)核種( $^{40}$ K、  $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra)基質與菇體核種活度的傳輸因子,因基質 與菇類有差異。段木栽植香菇  $^{40}$ K 之 TF 顯著大於太空 包栽植香菇、洋菇與金針菇之 TF 值(p< 0.001)。太空包 栽植與段木栽植香菇以及金針菇  $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra 之 TF 顯著大於洋菇 TF(p< 0.001)。香菇、洋菇與金針菇核種  $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra 在 4種基質之結果符合線性傳輸概念模式關係。 4 種菇類核種  $^{40}$ K 活度與基質核種  $^{40}$ K 活度無顯著相關 性,但是  $^{40}$ K 的 TF 值與基質的活度顯著的負相關,顯示菇類吸收  $^{40}$ K 時受到其他離子的抑制。本研究 3 核種 相加之年攝食有效劑量介於 0.82 – 3.50 µSv/y,仍在文獻 報導的天然核種年攝食有效劑量範圍內。

- [1] Baeza, A., Hernández, S., Guillén, F. J., Moreno, G., Manjón, J. L., and Pascual, R., 2004, "Radiocaesium and natural gamma emitters in mushrooms collected in Spain," *Science of the total environment*, Vol. 318, No. 1-3, pp. 59-71.
- [2] Ban-nai, T., Yoshida, S., and Muramatsu, Y., 1994, "Cultivation experiments on uptake of radionuclides by mushrooms," *Radioisotopes (Tokyo)*, Vol. 43, No. 2, pp. 77-82.
- [3] Bulko, N., Shabaleva, M., Kozlov, A., Tolkacheva, N., and Mashkov, I., 2014, "The <sup>137</sup>Cs accumulation by forest-derived products in the Gomel region," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 127, No. pp. 150-154.
- [4] Clint, G., Dighton, J., and Rees, S., 1991, "Influx of <sup>137</sup>Cs into hyphae of basidiomycete fungi," *Mycological Research*, Vol. 95, No. 9, pp. 1047-1051.
- [5] Desmet, G., Nassimbeni, P., and Belli, M., 1990, "Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments," No.
- [6] Falandysz, J., Zhang, J., and Zalewska, T., 2017, "Radioactive artificial <sup>137</sup>Cs and natural <sup>40</sup>K activity in 21 edible mushrooms of the genus Boletus species from SW China," *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 24, No. 9, pp. 8189-8199.
- [7] Gillett, A. and Crout, N., 2000, "A review of <sup>137</sup>Cs transfer to fungi and consequences for modelling environmental transfer," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 48, No. 1, pp. 95-121.
- [8] Grueter, H., "Radioactive fission product <sup>137</sup>Cs in mushrooms in W. Germany during 1963--1970," in *Chemical and radionuclide food contamination*, ed, 1973.
- [9] Haselwandter, K., 1978, "Accumulation of the radioactive nuclide <sup>137</sup>Cs in fruitbodies of basidiomycetes," *Health Physics*, Vol. 34, No. 6, pp. 713-715.
- [10] Heinrich, G., 1992, "Uptake and transfer factors of <sup>137</sup>Cs by mushrooms," *Radiation and environmental biophysics*, Vol. 31, No. 1, pp. 39-49.
- [11] Johanson, K. J. and Bergström, R., 1994, "Radiocaesium transfer to man from moose and roe deer in Sweden," *Science of the Total Environment*, Vol. 157, No. pp. 309-316.
- [12] Kaduka, M., Shutov, V., Bruk, G. Y., Balonov, M., Brown, J., and Strand, P., 2006, "Soil-dependent uptake of <sup>137</sup>Cs by mushrooms: experimental study in the Chernobyl accident areas," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 89, No. 3, pp. 199-211.
- [13] Kammerer, L., Hiersche, L., and Wirth, E., 1994, "Uptake of radiocaesium by different species of mushrooms," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 23, No. 2, pp. 135-150.
- [14] Karlén, G., Johanson, K. J., and Bergström, R., 1991, "Seasonal variation in the activity concentration of <sup>137</sup>Cs in Swedish roe-deer and in their daily intake," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 14, No. 2, pp. 91-103.
- [15] Karunakara, N., Rao, C., Ujwal, P., Yashodhara, I.,

Kumara, S., and Ravi, P., 2013, "Soil to rice transfer factors for <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>40</sup>K and <sup>137</sup>Cs: a study on rice grown in India," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 118, No. pp. 80-92.

- [16] Kuwahara, C., Fukumoto, A., Ohsone, A., Furuya, N., Shibata, H., Sugiyama, H., and Kato, F., 2005, "Accumulation of radiocesium in wild mushrooms collected from a Japanese forest and cesium uptake by microorganisms isolated from the mushroom-growing soils," *Science of the total environment*, Vol. 345, No. 1-3, pp. 165-173.
- [17] Lin, Y.-M., Chen, C.-J., and Lin, P.-H., 1996, "Natural background radiation dose assessment in Taiwan," *Environment International*, Vol. 22, No. pp. 45-48.
- [18] Lindequist, U., Niedermeyer, T. H., and Jülich, W.-D., 2005, "The pharmacological potential of mushrooms," Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, Vol. 2, No. 3, pp. 285-299.
- [19] Mascanzoni, D., 1987, "Chernobyl's challenge to the environment: a report from Sweden," Science of the total environment, Vol. 67, No. 2-3, pp. 133-148.
- [20] Mascanzoni, D., 1992, "Determination of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in mushrooms following the Chernobyl fallout," Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, Vol. 161, No. 2, pp. 483-488.
- [21] Mascanzoni, D., 2009, "Long-term transfer of <sup>137</sup>Cs from soil to mushrooms in a semi-natural environment," Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, Vol. 282, No. 2, pp. 427-431.
- [22] Nakashima, K., Orita, M., Fukuda, N., Taira, Y., Hayashida, N., Matsuda, N., and Takamura, N., 2015, "Radiocesium concentrations in wild mushrooms collected in Kawauchi Village after the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," PeerJ, Vol. 3, No. p. e1427.
- [23] Nikolova, I., Johanson, K. J., and Dahlberg, A., 1997, "Radiocaesium in fruitbodies and mycorrhizae in ectomycorrhizal fungi," Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 37, No. 1, pp. 115-125.
- [24] Orita, M., Nakashima, K., Taira, Y., Fukuda, T., Fukushima, Y., Kudo, T., Endo, Y., Yamashita, S., and Takamura, N., 2017, "Radiocesium concentrations in wild mushrooms after the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: follow-up study in Kawauchi village," Scientific reports, Vol. 7, No. 1, p. 6744.
- [25] Rühm, W., Steiner, M., Kammerer, L., Hiersche, L., and Wirth, E., 1998, "Estimating future radiocaesium contamination of fungi on the basis of behaviour patterns derived from past instances of contamination," Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 39, No. 2, pp. 129-147.
- [26] Rafferty, B., Dawson, D., and Kliashtorin, A., 1997, "Decomposition in two pine forests: the mobilisation of <sup>137</sup>Cs and K from forest litter," Soil Biology and Biochemistry, Vol. 29, No. 11-12, pp. 1673-1681.
- [27] Read, D. J., 1991, "Mycorrhizas in ecosystems," Experientia, Vol. 47, No. 4, pp. 376-391.
- [28] Saad, M. H., 2017, "Study of natural radioactivity in Lake Miri in South West of Sudan," Journal of Taibah University for Science, Vol. 11, No. 4, pp.

613-616.

- [29] Steiner, M., Linkov, I., and Yoshida, S., 2002, "The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems," Journal of environmental radioactivity, Vol. 58, No. 2-3, pp. 217-241.
- [30] Sugiyama, H., Iwashima, K., and Shibata, H., 1990, "Concentration and behavior of radiocesium in higher basidiomycetes in some Kanto and the Koshin districts, Japan," Radioisotopes, Vol. 39, No. 11, pp. 499-502.
- [31] Wang, J.-J., Wang, C.-J., Huang, C.-C., and Lin, Y.-M., 1998, "Transfer factors of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs from paddy soil to the rice plant in Taiwan," Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 39, No. 1, pp. 23-34.
- [32] Yoshida, S. and Muramatsu, Y., 1994, "Accumulation of radiocesium in basidiomycetes collected from Japanese forests," Science of the Total Environment, Vol. 157, No. pp. 197-205.
- [33] Yoshida, S., Muramatsu, Y., and Ogawa, M., 1994, "Radiocesium concentrations in mushrooms collected in Japan," Journal of environmental radioactivity, Vol. 22, No. 2, pp. 141-154.

# 台灣菸草(美濃地區)與土壤背景放射性物質<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th 與<sup>226</sup>Ra 之初探 Preliminary study on <sup>238</sup>U, <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra of tobacco and soil background radioactive materials in Mino, Taiwan.

計畫編號:109-2623-E-020-002-NU 計畫主持人:葉一隆 e-mail:yalung@mail.npust.edu.tw 計畫共同主持人:林聖淇 計畫參與人員:黃韋翔、劉詠瑜、戴伯宇、徐智泓 執行單位:國立屏東科技大學土木工程系

# 摘要

菸草煙霧中的放射性問題在科學出版社中越受到 關注,並且受到醫學媒體的關注。煙草含有微量的<sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po和<sup>226</sup>Ra同位素,這些同位素來自鈾和針衰變系列, 具有放射性和致癌性。其相關產品經吸菸,因內部攝入 造成體內輻射劑量。通過吸煙吸入一些天然存在的放射 性核種被認為是導致肺癌的重要原因之一。本研究將菸 草植體前處理後,進行放射性核種的檢測分析作業。本 計畫的研究目標是根據台灣地區菸草品種之植體樣本 (含莖、葉、根),與所對應之土壤,探討不同品種菸草、 土壤樣本之<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K的關係,了解放射性<sup>232</sup>Th、 <sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K等元素在環境-植體間的流佈。

本計畫結果發現台灣菸草土壤中放射性核種<sup>40</sup>K、 <sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th的活度範圍分別為589-762、32-43和49-59 Bq/kg。對於<sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th,根部的平均活度分別為 446.5、5.41和5.69 Bq/kg•乾重; 莖中的平均活度分別為 699.8、9.64和7.61 Bq/kg•乾重; 菸葉中的平均活度分別 為792.5、6.79和6.15 Bq/kg•乾重。對於<sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th 其傳輸因子(TF)分別為0.42-1.42、0.10-0.49和0.06-0.23。 莖和葉的40K核種其TF值明顯高於根的TF值。226Ra和 <sup>232</sup>Th核種其TF值在根、莖和葉之間無顯著差異。經相關 性分析,菸草植株(根、莖和葉)對於<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K等 核種對於土壤中的<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K經相關性分析,僅 莖與葉之<sup>40</sup>K與土壤活度有相關性。經分析除菸草莖<sup>40</sup>K 和<sup>232</sup>Th的和<sup>226</sup>Ra的葉片外,煙草的TF值與土壤活度無關 估計吸煙引起的輻射劑量時,成年人(吸煙者)因吸入而 產生的每年對肺的有效劑量總計平均為0.645至1.623 mSv/y(平均為1.194 mSv /y)。由於吸入1.26 mSv/y,可以 將有效劑量與全世界平均暴露於自然輻射源的劑量進 行比較。吸煙引起的終生癌症風險平均為4.82×10-3。

**關鍵詞:**體內輻射劑量、放射性核種、傳輸因子、終生 癌症風險。

#### Abstract

The issue of radioactivity in tobacco smoke has attracted more and more attention in scientific publishing houses, and it has also attracted the attention of medical media. Tobacco contains trace amounts of <sup>210</sup>Pb, <sup>210</sup>Po and <sup>226</sup>Ra isotopes, which come from the decay series of uranium and thorium, which are radioactive and carcinogenic. The related products have been ingested internally to cause radiation doses in the body after smoking. Inhalation of some naturally occurring radionuclides through smoking is considered to be one of the important causes of lung cancer. In this study, after pre-treatment of tobacco plant, radionuclide detection and analysis were carried out. The research goal of this project is to explore the relationship between  $^{232}$ Th,  $^{226}$ Ra and  $^{40}$ K of different tobacco varieties and soil samples based on plant samples (including stems, leaves and roots) of tobacco varieties in Taiwan and the corresponding soil, and to understand the radioactivity of  $^{232}$ Th ,  $^{226}$ Ra and  $^{40}$ K and other elements spread between the environment and the implant.

The activity concentrations of naturally occurring radioactive nuclides, 40K, 226Ra, and 232Th, in tobacco compartments (root, stalk, and leaf) and the corresponding soil were measured collected from southern Taiwan. The soil-to-plant transfer factors (TFs) were determined for the detected radioactive nuclides. The activity concentration ranges were 589–762, 32–43, and 49–59 Bq/kg for <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, and <sup>232</sup>Th in soils, respectively. The average activity concentrations in roots were 446.5, 5.41, and 5.69 Bq/kg, in stalks were 699.8, 9.64, and 7.61 Bq/kg, and in leaves were 792.5, 6.79, and 6.15 Bq/kg for <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, and <sup>232</sup>Th, respectively. The transfer factors (TF) were 0.42-1.42, 0.10-0.49, and 0.06-0.23, for <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, and <sup>232</sup>Th, respectively. The <sup>40</sup>K TFs for stalk and leaf were significantly higher than TFs for root. The TFs of <sup>226</sup>Ra and <sup>232</sup>Th were insignificantly different among root, stalk, and leaf. The activity concentrations of tobacco comportments were independent on soil activity (except stalk and leaf for <sup>40</sup>K). The TFs of tobacco compartments were independent on soil activity concentrations except stalk for <sup>40</sup>K and <sup>232</sup>Th and leaf for <sup>226</sup>Ra. In estimating the radiation dose induced from smoking, the annual effective dose to lungs due to inhalation for adults (smokers) total averaged 0.645 to 1.623 mSv  $y^{-1}$  (average 1.194 mSv  $y^{-1}$ ). The effective dose can be compared with the average world-wide exposure to natural radiation sources due to inhalation of 1.26 mSv y<sup>-1</sup>. Excess lifetime cancer risk due to smoking was also averaged to the value  $4.82 \times 10^{-3}$ .

**Keywords:** radiation dose in the body, radionuclide, transfer factor, lifetime cancer risk.

### I. 前言

眾所周知,天然輻射是全世界人類暴露於輻射的主 要來源。由於新鮮菸葉中存在鈾和針系列天然放射性核 種,其含量超過人類常用食品中常見的含量,因此吸煙 是輻射暴露的研究的一個方向。菸草植體所含原始放射 性核種濃度的主要機制與土壤和磷肥的根系吸收有關, 菸葉中的<sup>40</sup>K是由於土壤或肥料的根吸收。菸草屬於草本 植物,比木本植物更容易積聚放射性核種。

煙草中放射性核種累積的主要途徑是農民用的肥料,這是一種粘稠的毛狀突起,厚厚地覆蓋菸葉的兩側。 雨不會沖走它們,它們在煙草中的存在取決於菸草的來 源煙草種植的土壤中使用了多少肥料和鈾和鐳的天然 核種。

绝放射性同位素<sup>137</sup>Cs 和<sup>134</sup>Cs 在車諾比反應爐事 故發生四年後仍然留在土壤中,研究證實煙草葉片中的 銫放射性同位素<sup>137</sup>Cs 和<sup>134</sup>Cs 是由於根系吸收而不是 由於葉片沉積在葉片上。土壤是農作物放射性核種的直 接來源,土壤中的放射性核種含量主要與土壤母質、肥 料施用,以及人工核污染等有關。與所有的食品相比較, 煙葉中的天然<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 和<sup>40</sup>K等放射性核種含量較高, 進而導致對人體的健康產生危害。天然存在的放射性核 種存在於所有人類環境中,包括土壤、水、食物和空氣, 我們的身體含有天然放射性物質(Aswood et al., 2013)。

植物成分累積和分佈的放射性核種活度受許多因 素的影響,例如土壤核種活度、土壤理化性質、植物類 型和成分以及農田的工作條件。植物攝取放射性核種的 能力表示為轉移因子(TF),這是評估食用食物或吸入含 放射性核種(例如香煙)的植物時人體攝入和吸入核種活 性濃度的重要參數。

放射性核種傳輸到植物通過以下方式將存在於環 境中的放射性核種傳輸到植物中:(i)通過根吸收土壤, 和(ii)通過植物的地上部分直接吸收。前者取決於土壤中 的放射性核種活度濃度,後者取決於大氣中放射性核種 的沉積速率(Karunakara et al., 2013)。

因此,傳輸因子(植物活性與土壤活性的比例,方 程式-1)是評估土壤放射性核種傳輸至植物體的比例。

$$TF = \frac{C_i^p(Bq \ kg^{-1}, dry \ weight)}{C_i^s(Bq \ kg^{-1}, dry \ weight)}$$
(1)

Ra在環境中天然存在,但其濃度極低並且在自然 條件下獲得的TF數據有限(Li et al., 2006; Narayana et al., 1995; Radhakrishna et al., 1996; Sasaki et al., 2002; Uchida and Tagami, 2007; Yunoki et al., 1993)。為了保護 公眾健康,估計放射性向環境的釋放非常重要,特別是 如果釋放的放射性進入食物鏈時(El-Taher and Al-Turki, 2014)。傳輸因子(TF)是放射學評估的重要因素。植物對 土壤中放射性核種的吸收通常用TF來描述,TF是植物和 土壤中放射性核種活度的相對比率(Bq/kg乾重植物對 Bq/kg乾重土壤)。通常,TFs取決於各種因素,包括土 壤性質(例如有機物含量、pH、Ca、K和粘土礦物)、植 物種類以及其他環境條件,差異很大(Gaffar et al., 2014)。

一些研究評估吸煙者其吸煙的放射性危害。有研究 進行田間菸葉的放射性核種危害,但缺乏土壤和煙草植 物成分的TF吸收的放射性核種。本研究調查了田間煙草 植物成分(根、莖和葉)和相對應土壤中的天然放射性核 種<sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th。計算每種成分的轉移因子,並檢 查活性成分和煙草成分的TFs與土壤活度的關係。此外, 評估乾燥菸葉其放射性危害。

### II. 主要內容

本研究探討菸葉中的放射性核種含量與種植地區的土壤天然背景輻射濃度的相關性。使用加馬射線能譜分析法測定從美濃地區不同地點採集的土壤樣品中<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra和<sup>40</sup>K的活度濃度。除此之外,還對所研究的土壤進行了<sup>226</sup>Ra當量活動,吸收加馬劑量率,有效劑量率和外部危害指數的估算。因為土壤中的放射性核種通過土壤-植物系統進入食物鏈,最終進入人體。

### III. 結果與討論

#### 土壤基本性質

表1列土壤基本性質。pH值介於6.03至6.35,場址 S-1屬鹼性,S-2與S-3屬弱酸性。各場址平均導電度範圍 介於451至640 μS/cm,總平均為548±78 μS/cm。各場址 有機質含量範圍介於2.11至3.73%,總平均為 $3.08\pm0.70$ %。三場址之質地不同,砂粒百分比29-63%、坋粒百分 比29-57%與黏粒百分比8-17%。三場址土壤質地分類分 別為壤土(S-1)、坋質壤土(S-2)、與砂質壤土(S-3)。

表1 土壤種植前基本性質

G II II	1	EC	OM	砂粒	坋粒	黏粒	194 A.L.
Sampling site	рн	(µS/cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	貨地
S-1	7.91±0.01	550±8	$3.73 {\pm} 0.05$	35.47	47.16	17.37	壤土
<b>S-</b> 2	$6.03 \pm 0.02$	640±12	3.39±0.06	28.99	56.97	14.04	<b>坋質壤土</b>
S-3	$6.35 \pm 0.04$	451±6	2.11±0.09	62.67	29.21	8.12	砂質壤土
Total mean⊥sd	$6.76{\pm}0.82$	$548 \pm 78$	$3.08 \pm 0.70$	-	-	-	-

備註:pH 為酸鹼值;EC 為導電度;OM 為有機質;取樣場址代號:S-1 (六堆文化園區);S-2 (高樹東興村);S-3(高樹泰山村)

#### 土壤放射性核種活度

表2列三場土壤種放射性核種活度三重覆平均值與 標準偏差值。各場址放射性核種<sup>40</sup>K活度範圍介於625至 753 Bq/kg之間,平均為702±58 Bq/kg。核種<sup>40</sup>K是屬於天 然核種,<sup>40</sup>K的活度會隨著土壤鉀元素總量而變化。場址 S-2與S-3之核種<sup>40</sup>K活度顯著大於場址S-1核種<sup>40</sup>K活度。 各場址放射性核種<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra核種活度範圍分別為50.6 至58.5 Bq/kg及33.8至39.7 Bq/kg,總平均活度分別為 55.1±4.0及36.3±3.1 Bq/kg。場址S-2核種<sup>232</sup>Th活度顯著大 於場址S-1核種<sup>232</sup>Th活度。三場址核種<sup>226</sup>Ra活度三場址 無顯著差異。土壤<sup>40</sup>K和<sup>232</sup>Th的活度分別高於全球平均 值的活度400和30 Bq/kg,<sup>226</sup>Ra的活度濃度接近全球平均 水平35 Bq/kg (UNSCEAR, 2000)。各地土壤中天然存在 的放射性核種的活度變化取決於該地區的地質和地理 條件,以及施用於農田的肥料的量及種類。

表2土壤放射性核種活度

Sampling site	40K (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)
S-1	625±30 <sup>b</sup>	50.6±1.8 <sup>b</sup>	33.8±1.3
S-2	729±6 <sup>a</sup>	58.5±1.3ª	39.7±2.7
S-3	753±7 <sup>a</sup>	56.3±3.1 <sup>a,b</sup>	35.4±1.5
Total	702+58	55.1+4.0	36.3+3.1
P value	p< 0.001	p=0.028	p=0.056

活度以 mean±sd 表示

### 植體放射性核種活度

本研究菸草植體區分為根、莖與菸葉三部位、分別 量測天然核種活度。表3列菸草植體各部位放射性核種 活度。菸草各部位天然核種的活度範圍分別為317 -1066 (<sup>40</sup>K) 、 3.4 - 11.7 (<sup>232</sup>Th)和3.6 - 16.7 (<sup>226</sup>Ra) Bq/kg 。 取樣地點和植體各部位的<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra的活度有顯 著的差異。莖與葉<sup>40</sup>K活度顯著大於根<sup>40</sup>K活度(p<0.001)。 場址S-2的根部<sup>40</sup>K活度顯著大於S-1與S-3根<sup>40</sup>K活度 (p=0.004)。場址S-2與S-3之莖部與菸葉<sup>40</sup>K活度顯著大於 場址S-1莖與葉40K活度(p<0.001)。三場址植體各部位 <sup>232</sup>Th活度無顯著差異(p=0.15)。<sup>226</sup>Ra莖部活度顯著大於 根部活度(p=0.02)。場址S-2根<sup>232</sup>Th活度顯著大於S-3活度 根部三場址<sup>226</sup>Ra活度無顯著差異(p=0.51)。莖<sup>232</sup>Th與 <sup>226</sup>Ra活度三場址大小順序相同: S-1> S-2> S-3(p<0.003)。 菸葉<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra活度場址S-1與S-3顯著大於場址S-2 (p<0.006)。菸草的各部位和採樣點中天然存在的放射性 核種的活度變化,主要是由於成分和土壤類型不同以及 環境條件所致。各採樣點之間卻有顯著差異。

土壤和菸草各部位的 $^{40}$ K活度均顯著高於 $^{226}$ Ra和  $^{232}$ Th。土壤中 $^{232}$ Th的活度顯著高於 $^{226}$ Ra(p< 0.001)。但 是, $^{232}$ Th和 $^{226}$ Ra的活度對於菸草各部位均無顯著差異,這些發現可以解釋如下:

- 土壤中<sup>40</sup>K的活度遠高於土壤中<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th的活度,<sup>40</sup>K 是輕元素(light element),而<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th 是重元素(heavy element),因此<sup>40</sup>K 具有比<sup>226</sup>Ra高的移動性 (Hafsi et al., 2014; IAEA, 2014; Kumar et al., 2008; Zeng and Brown, 2000)。因此植體的活度有相同的趨勢, 植體<sup>40</sup>K 活度顯著大於<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th 活度。
- <sup>40</sup>K 在水中的溶解度高於 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th。另外 <sup>232</sup>Th 在天然水中溶解度很低,並且強烈吸附在礦物表面 上(Roy, 2006; IAEA, 2014; Zeng and Brown, 2000; Azeeze et al., 2019)。雖然土壤 <sup>232</sup>Th 活度顯著大於 <sup>226</sup>Ra 活度(p<0.001),菸草植體各部位 <sup>232</sup>Th 與 <sup>226</sup>Ra 活度無顯著差異(p=0.28 – 0.66)。

圖1a-1c為菸草植體與土壤<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra活度間 的相關性,除了菸草莖和葉<sup>40</sup>K活度與土壤活度顯著正相 關(p<0.05)。大多數菸草植體組成與對應土壤<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 和<sup>40</sup>K的活度弱線性相關性(p>0.05)。相關性顯示菸草各 植體部位<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th的活度不受土壤活度的影響。因為 放射性核種<sup>226</sup>Ra和<sup>232</sup>Th從土壤到菸草的吸收轉移受到 土壤物理及化學特性(例如鉀含量、陽離子交換能力、鈣 和有機質含量)及其受到植物種類(例如草本與木本)以 及核種可被植物的吸收性影響以及植物物種的代謝特 徵(Aswood et al., 2013; Guillen et al., 2017)。

土壤<sup>40</sup>K活度與菸草莖與葉<sup>40</sup>K活度呈正相關, 說明 菸草地上部<sup>40</sup>K的吸收具有線性關係。菸草植體各部位  $^{226}Ran^{232}Th活度與土壤活度無顯著相關性。另外整合菸$  $草植體各部位(根、莖、葉)的活度, <math>^{40}K活度與^{226}Ran$  $^{232}Th活度顯示弱相關性(r = 0.15 (^{226}Ra), r = 0.16 (^{232}Th))。$  $然而^{226}Ran^{232}Th活度顯著正相關(r=0.85, p<0.001; 圖2),$ 此說明菸草吸收<sup>40</sup>K與吸附收<sup>226</sup>Ran<sup>232</sup>Th的機制不同,

如菸草植體各部位核種活度的說明。

表4為國外文獻菸葉天然放射性核種活度,本研究 菸葉天然核種<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra之活度與國外文獻進行 比較顯示,本研究的活度在全世界其他地區檢測到的活 度範圍內。

表3 菸草植體放射性核核種活度

<b>C</b> 14-	<sup>40</sup> K				<sup>232</sup> Th			<sup>226</sup> Ra		
Sile	根	踅	葉	根	蓝	葉	根	莖	葉	
S-1	402±10 <sup>a,b</sup>	592±33°	577±83c	5.7±0.3 <sup>a,b</sup>	11.1±0.6ª	6.6±0.4ª	6.0±1.2	14.6±2.1ª	7.3±0.4ª	
S-2	598±77ª	$707 \pm 27^{b}$	740±64b	$7.1{\pm}0.8^{\circ}$	$7.1 \pm 0.6^{b}$	$4.1{\pm}0.7^{b}$	5.5±1.0	$9.3{\pm}1.9^{b}$	$4.1{\pm}0.5^{b}$	
S-3	$339{\pm}28^{\text{h}}$	$800{\pm}16^a$	1061±5a	$4.3{\pm}0.6^{\rm b}$	$4.7{\pm}0.4^{\circ}$	$7.7{\pm}0.9^{a}$	4.7±1.0	$5.0{\pm}0.5^{\text{b}}$	$9.0{\pm}1.0^{a}$	
Total	446⊥120	700⊥89	793⊥210	5.7±1.3	7.6⊥2.7	$6.2 \pm 1.7$	$5.4 \pm 1.2$	9.6⊥4.3	$6.8 \pm 2.1$	
р	0.004	< 0.001	< 0.001	< 0.01	0.001	0.006	0.51	0.003	0.001	
活度以	mean ±	Ŀ sd 表:	示; p 值	代表場	址差異					

Roo Ster  $\infty$ 1000 <sup>40</sup>K activity (Bq/kg)  $\Delta^{\Delta}$ 800 ê 600 8 Δ  $\diamond$ 400 0 000 200 <del>+</del> 550 600 . 650 750 800 Soil 40K activity (Bq/kg) (a) 15







(c)圖 1 菸草植體活度與土壤活度的關係圖



圖 2 菸草植體各部位 226 Ra 與 232 Th 活度與 TF 相關性

表4 國外文獻菸葉天然放射性核種活度

樣本數	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	文獻
N=9	475-1067 (793)	3.47-10.21 (6.79)	3.14-8.52 (6.15)	本研究
N=4	556-1236 (908)	4.30-11.9 (8.17)	4.42-12.4 (6.08)	Boumala et al., 2019
N=14	517-2401 (1360)	2.6-8.9 (5.4)	1.9-9.5 (4.5)	Shousha and Ahmad, 2016
N=31	801-1567 (1051)	3.75-30.9 (14.86)	1.59-41.5 (10.84)	Ridha and Hasan, 2016
N=17	273-2080 (823)	1.80 - 7.57 (3.38)	1.10 -6.52 (3.83)	Papastefanou, 2009
N=7	78-95 (85)	29.8-41.0 (35.3)	2.32-3.40 (2.97)	Shafik et al., 2019
N-24	569-1043 (685)	3.6-10.1 (6.98)	5.41-13.24 (8.76)	EI-Aziz et al., 2005

小括號內數字為平均值

#### 放射性核種傳輸因子(TF)

表 5 為土壤與植體放射性核種 TF 傳輸因子,傳輸 因子值越高表示土壤中的放射性核種易藉由植物生長 所需營養元素而從土壤中攝取並傳輸至植體各部位。40K、 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 的土壤到植物 TF 的範圍分別為 0.421 -1.423、0.096 - 0.491 和 0.056 - 0.225。從土壤到菸草各部 位的 TF 值,主要歸因於不同的土壤特性和煙草各部位 的活度。土壤中放射性核種與菸草各部位之間的相互作 用非常複雜,取決於土壤特性、植物類型和氣候條件。 由於 40K 在土壤中的高移動性及其在水中的高溶解度, <sup>40</sup>K 的土壤-菸草各部位 TF 值明顯高於 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th (Roy , 2006; IAEA, 2014; Kumar et al., 2008; Zeng and Brown, 2000)。Azeeze et al. (2019) 解釋說植物對 <sup>40</sup>K 的 生物需求很高,如果存在足夠量的植物,則吸收的可溶 性鉀比需要的更多。土壤對菸草的核種<sup>40</sup>K 其 TF 值以 莖和葉為最高;土壤對菸草的根、莖及葉之核種<sup>226</sup>Ra 和<sup>232</sup>Th其TF值無顯著差異。

菸草植物天然核種 TF 值的結果與常見土壤到植體 天然核種的 TF 值相反。在土壤與植物天然核種 TF 研究, 穀物作物和非葉植物作物根係的 TF 值高於葉部與差部, 因為作物的根部更容易累積營養元素與天然核種。特別 是高原子量元素如  $^{226}$ Ra 和  $^{232}$ Th,水溶性很低不易隨營 養元素被植物吸收傳輸至植物地上部。其根部與土壤的 放射性核種緊密接觸,因此根部直接從土壤中吸收了最 大量的放射性核種。菸草是草本植物,對土壤到草本植 物植體部位的研究顯示核種從土壤轉移到植物葉片和 莖部的 TF 值比根系高。此外, $^{232}$ Th 的土壤活度顯著高 於  $^{226}$ Ra (p< 0.001),但菸草中的  $^{232}$ Th 的土壤活度顯著高 於  $^{226}$ Ra (p< 0.001),但菸草中的  $^{232}$ Th 與  $^{226}$ Ra 活度差異 不顯著(p = 0.313)。導 Ra 莖與葉的 TF 值(0.230±0.114) 顯著高 Th 莖與葉的 TF 值(0.127±0.050)(p=0.002),因為 核種在細胞中的吸附其被細胞壁吸附而限制了其轉移 率,並 Th 在自然水體溶解度很低(IAEA, 2014)。天然核 種從土壤傳輸轉移到植物各部位的 TF 值顯示菸草各部 位(根、莖、葉)<sup>226</sup>Ra 的 TF 值分別高於 <sup>232</sup>Th 的 TF 值(表 5)。

圖 3a-3c 為顯示草植體各部位(根、莖、葉)<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、 <sup>226</sup>Ra 其 TF 值與土壤活度的相關性。其中莖 <sup>40</sup>K 的 TF 值與土壤活度顯著正線性關係, 莖 232Th 的 TF 值與土壤 活度呈負線性關係, 而葉 226Ra 的 TF 值與土壤活度顯著 負線性關係。一般研究假設植物從土壤中吸收核種屬於 線性關係,表明在高土壤活度下植物的活度較高。圖 1a-1c顯示菸草<sup>232</sup>Th與<sup>226</sup>Ra活度隨土壤活度隨機變化, 除了<sup>40</sup>K 的莖與葉活度遵循線性假設,代表<sup>40</sup>K 的莖與 葉活度隨土壤活度線性增加。假設植體活度與土壤活度 遵循線性正相關性,代表在很寬的土壤活度範圍,TF 的數值保持恆定或 TF 值在很小的範圍內變化。因此由 變異係數(CV 值,標準偏差/平均值 x100%)也可以了解 菸草各部位與場址 TF 的變異。根的 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 其 TF 值的 CV 值介於 21%-26%。葉的 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 其 TF 值的 CV 值介於 21%-35%。 莖的 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 其 TF 的 CV 值分別為 6%、51%、48%。<sup>40</sup>K 的莖的 CV 值最小,說明場址 TF 值變異小。232Th 與 226Ra 的莖的 CV 值最大說明場址 TF 值變異大(表 5)。

表 5 土壤與菸草植體放射性核種傳輸因子(TF)

ւեթե	<sup>40</sup> K				<sup>232</sup> Th			<sup>226</sup> Ra		
70,80	根	莖	葉	根	莖	葉	根	莖	葉	
S-1	0.65±0.04	0.95±0.02	0.93±0.18	0.112±0.003	0.219±0.004	0.131±0.010	0.177±0.029	0.434±0.067	0.216±0.020	
S-2	0.82±0.10	$0.97{\pm}0.03$	1.02±0.10	0.122±0.012	0.121±0.03	0.070±0.011	0.139±0.025	0.233±0.032	0.104±0.008	
S-3	0.45+0.04	1.06+0.01	1.41+0.01	0.077+0.014	0.083+0.003	0.137+0.010	0.133+0.030	0.141+0.017	0.253+0.030	
Total	0.64+0.17	0.99+0.06	1.12+0.24	0.103+0.022	0.141+0.058	0.113+0.032	0.150+0.034	0.269+0.130	0.191+0.067	
TF 值以	mean	± sd ≹	支示							



(b)



圖 3 土壤 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 活度與菸草植體部位 TF 值 的相關性

#### 菸葉放射性危害評估

菸葉中各放射性核種的放射性含量對於通過輻射 危害指數評估對人體健康的放射性危害影響很重要。指 標鐳當量活度(Raeq)用於比較植體中<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K 的活度水平,並考慮了與它們相關的加馬輻射危害。根 據公式(2)計算:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43 \times C_{Th} + 0.077 \times C_{K}$$
(2)

其中  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ 和  $C_K$ 分別是放射性核種 <sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 和 <sup>40</sup>K 測得的活度。調查菸葉的  $Ra_{eq}$ 值的計算結果為 52.6 至 101.7 Bq/kg,平均為 76.6 Bq/kg,低於建議的 370 Bq/kg 限值。鐳當量活度的允許最大值應小於 370 Bq/kg, 以將 UNSCEAR (1982)報告的民眾年度有效劑量限制在 1 mSv。

對於年度有效劑量  $H_E$  (Sv/y),假定成年人抽煙吸 入菸草質量 8.985 kg/y (每天 30 支香煙,每支香煙 0.82 克菸草)。捲菸煙霧中所含的放射性核種活度(Bq/kg)的 75%被部分吸入並沉積在肺組織中,而約 25%保留在香 菸過濾嘴和煙灰中(Khater, 2004)。根據方程式(3)計算成 年吸煙者吸入的年有效劑量  $H_E$  (Sv/y)。

$$H_{\rm E} = 0.75 \times M_{\rm T} \times C_{\rm i} \times DF \tag{3}$$

其中 M<sub>T</sub> (kg/y)表示每年因抽煙吸入菸草的質量; C<sub>i</sub> (Bq/kg)表示捲菸放射性核種的活度;DF (Sv/Bq)表示 劑量的轉換係數,放射性核種 <sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 轉換 係數分別為 4.66×10<sup>-9</sup>、2.90×10<sup>-6</sup> 和 2.50×10<sup>-5</sup>(UNSCEAR, 2008; Eckerman et al., 1989)。<sup>40</sup>K 的年有效劑量範圍為 14.9 至 33.5  $\mu$ Sv/y (平均 24.9  $\mu$ Sv/y), <sup>226</sup>Ra 的年有效劑量範圍為 67.8 至 199.5  $\mu$ Sv/y (平均 132.6 $\mu$ Sv/y); <sup>232</sup>Th 的年有效劑量範圍為 529.6 至 1436  $\mu$ Sv/y (平均 1036  $\mu$ Sv/y)。菸草樣品中 <sup>226</sup> Ra、<sup>232</sup>Th 和 <sup>40</sup>K 的活度產生的 總年度有效劑量為 0.65 至 1.62 mSv/y (平均 1.19 mSv/y), 低於全球平均暴露於自然輻射源的總平均劑量 2.4 mSv/y,並低於因吸入產生的劑量 1.26 mSv/y (UNSCEAR, 2008)。

如果一生長時間暴露在引起癌症的物質中,那麼一 生中就有過量的致癌風險(ELCR)。假設劑量和隨機效應 之間存在線性關係,進行的 ELCR 因子可以根據方程式 (4)估算(Taskin et al., 2009):

$$ELCR = H_E \times DL \times RF \tag{4}$$

其中,H<sub>E</sub>是等效的年度有效劑量;DL 是平均預期 壽命(假定為 80.7 年),RF 是每 Sievert 的致癌症危險因 子,一般民眾假設為 0.05 (ICRP, 1990)。本研究菸草樣 品計算的 ELCR 值範圍為 2.60×10<sup>-3</sup> 至 6.55×10<sup>-3</sup> (平均值 為 4.82×10<sup>-3</sup>)。

表 6 為本研究中從菸葉計算出的放射性危害指數, 並與參考文獻報導的吸菸評估的菸葉放射危害的危害 指數進行比較。本研究 Racq、HE和 ELCR 的值可與相同 條件下(每天 30 支香煙和相似的預期壽命香煙)消費捲菸 的報告值相近。本研究評估的平均 ELCR 因子高於 Shousha and Ahmad (2016)平均值,但低於 Boumala et al. (2019)與 Akinyose et al. (2018)的評估值。

表 6 菸草計算的放射性危害指數

Ra <sub>eq</sub> (Bq/kg)	$H_E \left(\mu S v / y \right)$	ELCR x 10 <sup>-3</sup>	Reference
52.6-101.7 (76.6)	645-1623 (1194) <sup>a,*</sup>	2.60 - 6.55 (4.82) (80.7 y)	Present Study
54.2-109.5 (88.3)	440-2290 (1390)*	1.55-8.01 (4.88) (70 y)	Boumala et al., 2019
45.2-204.4 (116.5)	500-2500 (1270)*(2 packs/d)	1.97-9.25 (4.70) (72.7 y)	Shousha and Ahmad, 2016
	2778-4036 (3537)		Shafik et al., 2019
18.50-87.21 (39.51)	16.4-44.7 (24.97) <sup>c</sup>	0.54-130 (76)x10 <sup>-6</sup>	Ridha and Hasan, 2016
	152-401 (252) °		Papastefanou, 2009
21.9-54.9 (38.95) 日	1671-6057 (3996) HE: 年右於劑量,	6.0-20.3 (14.1) (70 y) 以 30 支/天 為其進	Akinyose et al., 2018 ,吸煙蜜為75%

### IV. 結論

土壤中<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K的活度範圍分別為11.94-18.24 Bq/kg、8.80 - 12.36 Bq/kg和 247.65 - 338.26 Bq/kg。 植物作物中<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K的活度範圍分別為 3.14 -8.52 Bq/kg、3.47-10.21 Bq/kg和 475-1067 Bq/kg。菸 草植體各部位<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K的活度不受土壤中活度 的影響,這表明放射性核種從土壤到菸草植體各部位的 吸收轉輸主要受土壤理化性質影響植物的吸收能力以 及不同植物物種的代謝特徵影響。本研究獲得土壤-菸草 植體各部位(根、莖、葉)的TF值,並且40K的土壤-菸草 植體各部位TF植明顯大於226Ra和232Th。226Ra的TF大於 <sup>232</sup>Th的TF值。此差異受核種分子量以及水溶性的影響。 估計吸菸引起的輻射劑量,可以得到成年人(吸煙者)因 吸入而每年獲得的肺部40K、226Ra和232Th有效劑量分別 為0.025、0.13和1.04 mSv/y,總共1.19 mSv/y。此有效劑 量與全世界因為吸入天然輻射源平均劑量1.26 mSv/y相 近。終生癌症風險平均值為4.82×10-3。這項研究得到的 曝露處量可以作為連續吸菸中天然存在的放射性核種 的曝露的基礎,以保護人們免受吸煙引起的風險。

- [1] Abd El-Aziz, N., Khater, A., and Al-Sewaidan, H., "Natural radioactivity contents in tobacco," in *International Congress Series*, 2005, pp. 407-408.
- [2] Akinyose, F., Tchokossa, P., Orosun, M., Oluyde, S., Umakha, M., Ochommadu, K., Olaniyan, T., and Ajibade, O., 2018, "Radiological Impacts of Natural Radioactivity in Locally Produced Tobacco Products in Ibadan, Oyo State, Nigeria," *Momona Ethiopian Journal of Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 59-75.
- [3] Aswood, M. S., Jaafar, M. S., and Bauk, S., 2013,

"Assessment of radionuclide transfer from soil to vegetables in farms from Cameron Highlands and Penang,(Malaysia) using neutron activation analysis," *Applied Physics Research*, Vol. 5, No. 5, p. 85.

- [4] Azeez, H. H., Mansour, H. H., and Ahmad, S. T., 2019, "Transfer of natural radioactive nuclides from soil to plant crops," *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 147, No. pp. 152-158.
- [5] Boumala, D., Belafrites, A., Tedjani, A., Mavon, C., and Groetz, J.-E., 2019, "Annual effective dose and excess life time cancer risk assessment from tobacco plants," *Perspectives in Science*, Vol. 12, No. pp. 100394.
- [6] Eckerman, K., Wolbarst, A., and Allan, C., 1989, "Richardson limiting values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion," Federal Guidance Report.
- [7] El-Taher, A. and Al-Turki, A., 2014, "Soil-to-plant transfer factors of naturally occurring radionuclides for selected plants growing in Qassim, Saudi Arabia," *Life Science Journal*, Vol. 11, No. 10, pp. 965-972.
- [8] Gaffar, S., Ferdous, M., Begum, A., and Ullah, S., 2014, "Transfer of natural radionuclides from soil to plants in North Western parts of Dhaka," *Malaysian Journal of Soil Science*, Vol. 18, No. pp. 61-74.
- [9] Guillén, J., Baeza, A., 2017, Salas, A., Muñoz-Muñoz, J., and Muñoz-Serrano, A., "Factors influencing the soil to plant transfer of radiocaesium," in *Impact of Cesium on Plants and the Environment*, ed: Springer, pp. 19-33.
- [10] Hafsi, C., Debez, A., and Abdelly, C., 2014, "Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades," *Acta Physiologiae Plantarum*, Vol. 36, No. 5, pp. 1055-1070.
- [11] IAEA, 2014, "The Environmental Behaviour of Radium: Revised Edition (Technical Reports Series No. 476)," International Atomic Energy Agency, Vienna.
- [12] ICRP, 1990, "1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Vol, 21., pp. 1-3.
- [13] Karunakara, N., Rao, C., Ujwal, P., Yashodhara, I., Kumara, S., and Ravi, P., 2013, "Soil to rice transfer factors for <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>40</sup>K and <sup>137</sup>Cs: a study on rice grown in India," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 118, No. pp. 80-92.
- [14] Khater, A. E., 2004, "Polonium-210 budget in cigarettes," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 71, No. 1, pp. 33-41.
- [15] Kumar, A., Singhal, R., Preetha, J., Rupali, K., Narayanan, U., Suresh, S., Mishra, M. K., and Ranade, A., 2008, "Impact of tropical ecosystem on the migrational behavior of K-40, Cs-137, Th-232 U-238 in perennial plants," *Water, air, and soil pollution*, Vol. 192, No. 1-4, pp. 293.
- [16] Li, J., Shang, Z., Yang, J., and Tang, S., 2006, "Radionuclide Transfer Parameter Manual," ed: Atomic Energy Press, Beijing.
- [17] Narayana, Y., Radhakrishna, A., Somashekarappa, H., Karunakara, N., Balakrishna, K., and Siddappa, K.,

1995, "Distribution of some natural and artificial radionuclides in the environment of coastal Karnataka of South India," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 28, No. 2, pp. 113-139.

- [18] Papastefanou, C., 2009, "Radioactivity of tobacco leaves and radiation dose induced from smoking," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 6, No. 2, pp. 558-567.
- [19] Radhakrishna, A., Somashekarappa, H., Narayana, Y., and Siddappa, K., 1996, "Distribution of some natural and artificial radionuclides in Mangalore environment of South India," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 30, No. 1, pp. 31-54.
- [20] Ridha, A. A. and Hasan, H. A., 2016, "Cancer risk due to the natural radioactivity in cigarette tobacco," No.4, pp.54-65
- [21] Roy, R. N., Finck, A., Blair, G., and Tandon, H., 2006, "Plant nutrition for food security," *A guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, Vol. 16, No. p. 368.
- [22] Sasaki, T., Tashiro, Y., Fujinaga, H., Ishii, T., and Gunji, Y., 2002, "Determination of transfer factors of uranium, thorium, radium and lead from soil to agricultural product in Japan for estimating internal radiation dose through ingestion," *Japanese Journal* of Health Physics, Vol. 37, No. 3, pp. 208-221.
- [23] Shafik, S. S. and Shafeq, O. S., 2019 "The Annual Inhalation Radiation Effective Dose Estimations for Hookah Tobacco Smoking of Baghdad's Publics," in *Journal of Physics: Conference Series*, p. 012044.
- [24] Shousha, H. A. and Ahmad, F., 2016, "Lifetime cancer risk of gamma radioactivity results from smoking," *Cancers Review*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-9.
- [25] Taskin, H., Karavus, M., Ay, P., Topuzoglu, A., Hidiroglu, S., and Karahan, G., 2009, "Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kirklareli, Turkey," *Journal* of environmental radioactivity, Vol. 100, No. 1, pp. 49-53.
- [26] Uchida, S., Tagami, K., and Hirai, I., 2007, "Soil-to-plant transfer factors of stable elements and naturally occurring radionuclides (1) upland field crops collected in Japan," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 44, No. 4, pp. 628-640.
- [27] UNSCEAR, 1982, "Ionizing radiation: sources and biological effects. 1982 report to the general assembly, with annexes.
- [28] UNSCEAR, 2008, "Sources and effects of Ionizing radiation.
- [29] UNSCEAR, 2000, "effects of Ionizing Radiation," United Nations, New York, No. pp. 453-487.
- [30] Yunoki, E., Kataoka, T., Michiro, K., Sugiyama, H., Shimizu, M., and Mori, T., 1993, "Activity concentrations of <sup>238</sup>U and <sup>226</sup>Ra in agricultural samples," *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, Vol. 174, No. 2, pp. 223-228.
- [31] Zeng, Q. and Brown, P. H., 2000, "Soil potassium mobility and uptake by corn under differential soil moisture regimes," *Plant and soil*, Vol. 221, No. 2, pp. 121-134.

# 輻射防護與放射醫學科技(II)

探討以卵巢癌特異性抗體 CHI3L1 及其抗原辨識區作為卵巢癌診斷藥物之可行性 Investigate the feasibility of Chitinase-3-like-1 (CHI3L1) specific antibody and its antigen recognition sites as a novel diagnostic medication for epithelial ovarian cancer

> 計畫編號:109-2623-E-002-004-NU 計畫主持人:江盈澄 e-mail:ycchiang@ntuh.gov.tw 計畫共同主持人:陳怡君 計畫參與人員:戴銘謙 執行單位:國立臺灣大學醫學院婦產科

# 摘要

由於缺乏有效且精確的影像學診斷工具,超過百分 之七十的卵巢癌病人在確診時已是晚期,因此發展出卵 巢癌早期診斷的篩檢方式,並特異性的針對腫瘤進行治 療將會是非常有潛力的嶄新腫瘤診療策略。Chitinase-3like protein (CHI3L1)基因功能在於參與細胞增生分化、 血管新生、發炎及組織重塑性的過程。我們先前的研究 發現 CHI3L1 高度表現的卵巢癌患者會有較差的預後, CHI3L1 會促進 Mcl-1 蛋白表現,使卵巢癌細胞對紫杉醇 有抗藥性。CHI3L1 也能透過調控 Akt 與 Erk 訊息傳遞路 徑活化促進β-catenin 與 SOX2 蛋白表現,使卵巢癌細胞 具有癌症幹細胞的特性。在本計畫中,我們將 CHI3L1 抗 體結合放射性同位素銦-111 標誌,進行卵巢癌實驗動物 生物分布試驗及診斷造影,研究結果顯示 In-1111-DTPA-C41 在腫瘤部位有較高的累積劑量,本數據可提供未來 卵巢癌診治的新方向。

關鍵詞:卵巢癌診斷、CHI3L1 特異性抗體、同位素應用

### Abstract

The majority of the patients are diagnosed at advanced stage due to lack of effective diagnostic tools. It is the potential strategy to develop the therapeutic drugs of epithelial ovarian cancer and the companion diagnostic tools which will select the target population correctively to manage the malignant tumors specifically. CHI3L1 is with cell proliferation, associated angiogenesis, inflammation and tissue remodeling. Our previous studies showed the epithelial ovarian cancer patients with high CHI3L1 expression had a poor prognosis, and CHI3L1 promotes chemoresistance via inhibition of drug-induced apoptosis by up-regulating Mcl-1. CHI3L1 induces both the Akt and Erk signaling pathways, through the expression of β-catenin followed by SOX2, to promote the properties of ovarian cancer stem-like cells. In this proposal, we developed the specific CHI3L1 antibody conjugated with In-111 to proceed with the distribution tests and NanoSPECT/CT imaging in the ovarian cancer animal models. We found that the higher accumulated dose of In-111-DTPA-C41 in the tumor part. It provides the new direction of ovarian cancer managements in the future.

**Keywords:** Diagnosis of ovarian cancer, specific CHI3L1 antibody, Isotope application

### I. 前言

在婦癌的領域中,卵巢癌逐漸成為一個愈來愈重要 的疾病[1,2]。由於缺乏有效且精確的影像學診斷工具, 超過百分之七十的卵巢癌病人在確診時已是晚期[3-5]。 因此發展出卵巢癌早期診斷的篩檢方式,並特異性的針 對腫瘤進行治療將會是非常有潛力的嶄新腫瘤診療策略。 Chitinase-3-like protein (CHI3L1)基因功能在於參與細胞 增生分化、細胞凋亡、血管新生、發炎及組織重塑性的 過程[6]。我們先前的研究發現 CHI3L1 可以做為卵巢癌 患者的臨床預後指標,CHI3L1 高度表現者會有較差的預 後,CHI3L1 會促進 Mcl-1 蛋白表現,使卵巢癌細胞對紫 杉醇有抗藥性[7]。CHI3L1 也能透過調控 Akt 與 Erk 訊 息傳遞路徑活化促進β-catenin 與 SOX2 蛋白表現,使卵 巢癌細胞具有癌症幹細胞的特性[8]。由此可見,CHI3L1 在卵巢癌扮演相當重要的角色。在本計畫中,我們將 CHI3L1 全抗體,並根據不同抗原的辨識位置設計只含有 Fab 的抗體單元,並結合放射性同位素銦-111 標誌,進 行卵巢癌實驗動物生物分布試驗及診斷造影,評估能否 應用在卵巢癌的診斷與治療。

### Ⅱ. 主要內容

研究目的為測試 CHI3L1 抗體包括 C24、C24 Fab、 C41 及 C41Fab 經放射性同位素銦-111 標誌後,進行藥 物穩定度測試並在活體內 SPECT/CT 造影試驗,作為選 擇安全及有效的使用量之參考資料。使用的疾病鼠動物 模式如下,將 CA5171 卵巢癌細胞接種在 BALB/c mice 實驗小鼠右後肢,待腫瘤成長至 200-500 mm<sup>3</sup>後進行實 驗,包含放射性銦同位素標幟特異性抗體藥物,血漿穩 定度試驗,生物分佈, SPECT/CT 生物造影實驗。

### III. 結果與討論

- 放射性銦同位素標幟試驗物質: In-111-DTPA-C24 標幟效率為 91.64 %, In-111-DTPA-C24-Fab 為 91.35 %, In-111-DTPA-C41 為 100 %, In-111-DTPA-C41-Fab 為 82.72 %。
- 血漿穩定度試驗: In-111-DTPA-C24、In-111-DTPA-C24、In-111-DTPA-C24、In-111-DTPA-C41 體外培養於 4℃生理實驗水中 48 小時至仍有 97.5%以上的穩定度, In-111-DTPA-C41-Fab 的穩定度為 76.73%。
- 3. 生物分佈試驗: 注射至體內 48 小時後, 單純 In-111

並沒有顯著累積在主要臟器及腫瘤。In-111-DTPA-C41以脾臟、腎、肝及腫瘤為主要聚積器官。In-111-DTPA-C24、In-111-DTPA-C24-Fab及In-111-DTPA-C41-Fab主要聚積器官為脾臟、腎及肝臟。

4. NanoSPECT/CT 生物造影實驗:造影時間在 In-111 標幟特異性抗體藥物給藥後第1、4、24、48 小時進行,結果顯示主要聚積在胸腔、腹腔內臟器以及腫 瘤的位置,腫瘤部位的訊號隨時間增加,在注射後 48 小時後訊號仍非常明顯。

# IV. 結論

以銦-111 標幟特異性 CHI3L1 抗體藥物進行藥物動 力學與 nanoSPECT/CT 分子造影,研究結果顯示 In-111-DTPA-C41 在腫瘤部位有較高的累積劑量。本數據可提 供一個具有價值之研究模式,用來測定藥物在生物體中 的分佈過程,將來有機會應用在卵巢癌的診斷與治療。

- [1] R. Siegel, J. Ma, Z. Zou, A. Jemal, Cancer statistics, 2014, CA Cancer J Clin 64(1) (2014) 9-29.
- [2] Y.C. Chiang, C.A. Chen, C.J. Chiang, T.H. Hsu, M.C. Lin, S.L. You, W.F. Cheng, M.S. Lai, Trends in incidence and survival outcome of epithelial ovarian cancer: 30-year national population-based registry in Taiwan, J Gynecol Oncol 24(4) (2013) 342-51.
- [3] R.L. Coleman, B.J. Monk, A.K. Sood, T.J. Herzog, Latest research and treatment of advanced-stage epithelial ovarian cancer, Nature reviews. Clinical oncology 10(4) (2013) 211-24.
- [4] S. Banerjee, S.B. Kaye, New strategies in the treatment of ovarian cancer: current clinical perspectives and future potential, Clin Cancer Res 19(5) (2013) 961-8.
- [5] I. Romero, R.C. Bast, Jr., Minireview: human ovarian cancer: biology, current management, and paths to personalizing therapy, Endocrinology 153(4) (2012) 1593-602.
- [6] J.S. Johansen, N.A. Schultz, B.V. Jensen, Plasma YKL-40: a potential new cancer biomarker?, Future oncology (London, England) 5(7) (2009) 1065-82.
- [7] Y.C. Chiang, H.W. Lin, C.F. Chang, M.C. Chang, C.F. Fu, T.C. Chen, S.F. Hsieh, C.A. Chen, W.F. Cheng, Overexpression of CHI3L1 is associated with chemoresistance and poor outcome of epithelial ovarian carcinoma, Oncotarget 6(37) (2015) 39740-55.
- [8] H.W. Lin, Y.C. Chiang, N.Y. Sun, Y.L. Chen, C.F. Chang, Y.J. Tai, C.A. Chen, W.F. Cheng, CHI3L1 results in poor outcome of ovarian cancer by promoting properties of stem-like cells, Endocrinerelated cancer 26(1) (2019) 73-88.

# 18F-PSMA-1007 之製造與於攝護腺癌之臨床應用 18F-PSMA-1007: Synthesis and Clinical Application in Prostate Cancer

計畫編號:109-2623-E-002-005-NU 計畫主持人:顏若芳 e-mail:rfyen@ntu.edu.tw 計畫共同主持人:蒲永孝 路景竹 黃雅瑤 執行單位:臺大醫院核子醫學部

### 摘要

攝護腺癌在台灣為男性第五順位的癌症,早期診斷 攝護腺癌確認分期並給予正確的 治療,可以顯著的提 升病患的預後,但傳統影像學檢查如核磁共振對於淋巴 結轉移 的偵測效果不佳,骨骼掃描特異性不足,而正子 掃描能提供功能性資訊提升診斷正確率。以鎵 68 標訂 的 prostate specific membrane antigen (PSMA, 68Ga-PSMA)正子造影能在 prostate specific antigen (PSA)極低 的情況下診斷攝護腺癌的復發,而 在初始分期上68Ga-PSMA 正子造影偵測原發腫瘤的能力與核磁共振相當, 偵測淋 巴結轉移的能力亦比傳統影像學檢查優異。然 而鎵 68 半衰期僅 68 分鐘且需孳生器 生產,限制了臨 床上的轉移與使用。以氟 18 標訂的 PSMA 正子藥物可 以大量生產且 半衰期較長允許轉送,正子能量較低,造 影品質可能較為良好,且泌尿道排泄少能 更精準找出 轉移淋巴結以及局部病灶所在。其中以氟 18 標訂之 PSMA-1007 在以往回溯性研究中顯示與 68Ga-PSMA 診 斷效果相當,且能與治療性放射性同位素結合。本研究 目的為完成18F-PSMA-1007之合成,並以前瞻式方式探 討其在攝護腺癌 的診斷能力。

**關鍵詞**:攝護腺癌,正子造影,18F-PSMA-1007,68Ga-PSMA。

### Abstract

Prostate cancer is the 5th common male cancer in Taiwan. Early diagnosis and accurate staging is essential to planning therapy and improving prognosis. However, conventional imaging such as magnetic resonance imaging has low accuracy in detecting lymph node (LN) metastasis, and bone scan has limited specificity in detecting bone metastases. Gallium-68 labeled PSMA positron emission tomography (68Ga-PSMA PET) has been observed to be able to detect primary tumor as excellent as MRI, detect lymph node and bone metastasis better than conventional imaging studies, and detect pathological origin in biochemical recurrence with very low PSA level. Nevertheless, Ga-68 has short half-life (68 min) and was produced by generator, those have limited clinical utilization of 68Ga-PSMA. 18F-PSMA can overcome several limitations of 68GaPSMA: (1) F-18 is cyclotron produced and has longer half-life (119 min), which can be synthesized in greater amount and is transferable to a non-cyclotron PET center; (2) 18F-PSMA PET has better spatial resolution than Ga-68 PSMA due to lower positron range of F-18, (3) 18F-PSMA has better ability to identify pelvic LN due to low urinary excretion. Several retrospective studies have showed

that 18FPSMA-1007 PET has comparable diagnostic ability as 68Ga-PSMA PET and is able to label with therapeutic radioisotope. This prospective study aims to successfully synthesize 18F-PSMA-1007 in our laboratory and pursue its diagnostic ability.

Keywords: prostate cancer, PET, 18F-PSMA-1007, 68Ga-PSMA.

# I. 前言

攝護腺癌是西方國家最常見的男性癌症且占癌症 十大死因第二位。在台灣,攝護腺癌為男性第五順位的 癌症,在2015年有5106位新診斷個案,約為二十年前 的六倍。攝護腺癌本身是一種生長緩慢的癌症,當疾病 侷限在攝護腺及局部淋巴結時,五年存活率接近100%, 但若出現轉移病灶,則五年存活率降至30%。因此早期 診斷攝護腺癌確認分期並給予正確的治療,可以顯著的 提升病患的預後。

### Ⅱ. 主要內容

傳統影像學檢查如 X 光電腦斷層、mpMRI,、bone scan 等在診斷顯著攝護腺癌、轉移淋巴結、做為切片指 引或是復發偵測,皆具有其局限性,也因此更需要新一 代更貼近攝護腺癌之功能性分子影像學檢查已符合臨 床需求。

Prostate-specific membrane antigen (PSMA)為正常攝 護腺組織上皮細胞所表現出的一種醣蛋白(type II membrane glycoprotein),共含有750個胺基酸,其中細 胞內有19個胺基酸,細胞外有24個胺基酸及一個具有 707個胺基酸的大型 domain。PSMA 具有一些酵素的功 能,例如 folate hydrolase I 將 folate 裂解為 γ-linked glutamate。PSMA 不僅會在正常攝護腺組織表現,也會 在唾液腺、十二指腸黏膜以及腎臟的 tubular cell 等正常 組織表現。產生癌病變的攝護腺細胞則會將此醣蛋白轉 至攝護腺管的管端(luminal surface of glands ducts),且其 PSMA 的表現是正常攝護腺細胞的 100 至 1000 倍。 PSMA 過度表現的程度和腫瘤的惡性度成現正相關,例 如疾病的分期或是葛理森分數。此種現象使 PSMA 成為 一個適合的分子影像標的物,因此對於以 PSMA 做為標 的之核子醫學藥物開始被研發。

近二十年來使用放射性同位素鎵 68(Gallium-68, 68Ga)標訂於 PSMA,目前最廣為應用於臨床者為以鎵 68 標訂於 PSMA 抑制物(inbibitor)之 Glu-NH-CO-NHLys(Ahx)-HBED-CC (簡稱 68Ga-HBED-CC 或 68Ga-PSMA-11)。研究已證實 68Ga-PSMA-11 對 PSMA 有高 度的親合度且能被過度現 PSMA 之攝護腺癌細胞有效 的結合,現已為臨床領域中廣泛應用於攝護腺癌診斷的 正子藥物。但是 68Ga 只有 68 分鐘的半衰期,合成後的 成品在不易轉送至其他正子中心使用。

18F-PSMA-1007 具有下列優勢:(1)可以大量生產, 且半衰期較長,允許同時提供製造者與轉送至其他地方 使用,大幅提升運用效能,(2)因正子能量較低,造影品 質可能較為良好,(3)具有較低的泌尿道排泄,能更精準 找出淋巴結以及局部病灶所在,(4) 與治療用的放射性 同位素結合治療攝護腺癌。預期在攝護腺癌未來的臨床 應用上將具有取代 68Ga-PSMA 之潛力。

本研究目的為針對 18F-PSMA-1007,完成合成標準作 業流程,建立品管指標,取得衛服部食藥署許可,進入 臨床運用,期能藉由台大醫院過往豐富的正子藥物合成 經驗,在核研所與科技部的支持下,完成此自精準醫療 於正子藥物開發之先例,立足亞洲,放眼世界,奠定台 灣核子醫學創新之基礎。

### Ⅲ. 結果與討論

1. 完成 F-18 PSMA-1007 的合成, 品管, 三批次安定性 測試, 及 CMC 撰寫

本中心參考文獻方法以 TracerLab Mx-FDG (GE) 進 行 [18F]PSMA-1007 之自動化合成,合成時間大約 41±1 分鐘,產率為 55±9 % (EOS, n=3)。所生產的 [18F]PSMA-1007 注射液根據現有正子藥物歐洲藥典 之品管規格經過品管檢測。所生產之[F-18]FPSMA 注 射液有效期可達 6 小時。

- 完成臺大醫院 IRB 及衛福部新藥臨床試驗 IND 申請 本臨床試驗 (案號: 20190805MINB)在 2019 年 10 月 3 日取得台大醫院臨床試驗/研許可。於 2020 年 6 月 10 日取得衛生福利部臨床試驗許可。並依衛福部審 查意見申請本院 IRB 變更,於 2020 年 7 月 13 日取 得變更同意。
- 3. 臨床試驗病人收納
  - (1) 7/23 開始納入受試者, 共收入 61 位受試者
  - (2) 臨床影像造影 protocol:
    - a. 劑量: 正子造影於注射 F-18 PSMA 2-5Mbq/Kg
    - b. Iv 注射後一至三小時開始全身正子造影
  - (3) 正常影像特點:
    - a. Normal uptake at lacrimal glands, salivary glands, liver, spleen, kidneys, pancreas, bowels (mild). No activity in urinary bladder.
  - (4) 安全性

所納入的 61 位受試者都沒有不良反應被報告 (5) 初期分析及論文發表:

2020/11/21 中華民國核醫學學會年會中發表壁 報論文" The First Experience of F-18 PSMA-1007 PET for Prostate Cancer in National Taiwan University Hospital": 前 22 位受試者的分析.

a. 5 位積極追蹤者 (age: 76.47±4.08 years; Gleason score: 3 3+3, 1 3+4 and 1 4+3; AS period: 4.98 ± 2.97 years; PSA level at PET: mean 3.78 ± 3.00 ng/mL): The SUVmax of prostate lesions were 9.89 ± 6.17. Costal metastases were detected in a patient (SUVmax=12.15; Gleason score 3+3; PSA level at PET: 8.234 ng/mL).

- b. 5 位分期(age: 69.85 ± 7.64 years; initial PSA: mean 31.93 ± 42.54 ng/mL, range 7.95-107 ng/mL): 3 patients with equivocal costal lesions in bone scan were down-staged from M1 to M0, 1 patient was detected to have more metastatic bone lesions, and 1 patient has unexpected solitary sternal metastasis besides pelvic nodes.
- c. 12 位復發病灶偵測 (age: 71.10 ±10.06 years; PSA level at PET: mean 8.81 ± 17.36 ng/mL, range 0.023-61.66 ng/mL; prior therapies: 3 received cryotherapy, 1 received androgen-deprivation therapy, 8 received radiation beam therapy to prostate bed): 1 patient had no detectable lesion (PSA 0.18 ng/mL), 1 had local relapse (LR), 5 had bone metastases, 1 had LR with nodal metastases, 1 had LR and bone metastases, 1 had nodal and bone metastases and 1 had LR with nodal and bone metastases (PSA 0.687 ng/mL), and 1 (PSA 61.66 ng/mL) had LR, nodal, bone and liver metastases). The liver lesion was detected by contrast enhanced CT appeared a cold lesion on PET imaging because of high liver background.

### IV. 結論

(F-18 PSMA-1007 PET has promising ability to detect metastases and recurrence of PCa. Further inclusion of more PCa patients to evaluate its clinical impacts is warranted.

- [1] Silver DA, Pellicer I, Fair WR, Heston WD, Cordon-Cardo C. Prostate-specific membrane antigen expression in normal and malignant human tissues. Clin Cancer Res. 1997;3:81-85.
- [2] Perner S, Hofer MD, Kim R, et al. Prostate-specific membrane antigen expression as a predictor of prostate cancer progression. Hum Pathol. 2007;38:696-701.
- [3] Kranzbuhler B, Muller J, Becker AS, et al. Detection rate and localization of prostate cancer recurrence using (68)Ga-PSMA-11 PET/MRI in patients with low PSA values </= 0.5 ng/ml. J Nucl Med. 2019.</p>
- [4] Uprimny C, Kroiss AS, Decristoforo C, et al. (68)Ga-PSMA-11 PET/CT in primary staging of prostate cancer: PSA and Gleason score predict the intensity of tracer accumulation in the primary tumour. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2017;44:941-949.
- [5] Giesel FL, Cardinale J, Schafer M, et al. (18)F-Labelled PSMA-1007 shows similarity in structure, biodistribution and tumour uptake to the theragnostic compound PSMA-617. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2016;43:1929-1930.
- [6] Giesel FL, Will L, Lawal I, et al. Intraindividual Comparison of (18)F-PSMA-1007 and (18)F-DCFPyL PET/CT in the Prospective Evaluation of Patients with Newly Diagnosed Prostate Carcinoma: A Pilot Study. J Nucl Med. 2018;59:1076-1080.

# 結合光-免疫-微脂體與氟-18 去氧葡萄糖車倫可夫輻射之卵巢癌光動力免疫治療 研究

# Photoimmunotherapy of ovarian cancer using combined <sup>18</sup>F-FDG Cerenkov radiation and photo-immuno-conjugate-associating-liposome

計畫編號:109-2623-E-010-001-NU 計畫主持人:劉仁賢 e-mail:rsliu@vgh.gov.tw 計畫共同主持人:張明誠 計畫參與人員:陳怡安 執行單位:國立陽明交通大學生物醫學影像暨放射科學系

### 摘要

從放射性同位素產生的車侖可夫輻射被認為有可 能用作光動力療法(PDT)的內部光源。本研究原擬將 利用一光-免疫-結合-微脂體 (photo-immuno-conjugateassociating-liposome, PICAL ), 內含 benzoporphyrin derivative monoacid A (BPD) 光敏物質以及上皮生長因子 受體抗體之微脂體奈米顆粒,觀察其搭配車侖可夫輻射 照射下在瀰漫性腹膜內卵巢癌小鼠模型中的治療效果。 然而,光敏劑 BPD 被發現並不符合車侖可夫輻射發光 匹配吸收帶,因此我們首先篩選了幾種具有車侖可夫輻 射發光匹配吸收帶的光敏劑(PS),評估搭配<sup>18</sup>F-FDG 的 抗腫瘤功效。體外研究表明, Chlorin e6 和 Verteporfin 的 CR-PDT 更具抗腫瘤細胞生長的效果。而搭配 Verteporfin 的使用在產生單態氧更有效率,並且在暴露 於<sup>18</sup>F 時可以持續很長時間。與任一單一療法相比,將 <sup>18</sup>F-FDG 和 Verteporfin 治療所產生的車侖可夫輻射結 合起來不僅顯著抑制了 ES2 卵巢癌小鼠模型中腫瘤的 生長,而且還延長了生存中位期。本研究證實<sup>18</sup>F-FDG 於腫瘤中累積並產生的車侖可夫輻射不僅可以作為內 源性光源,並且能激發敏劑以達到有效治療卵巢癌的光 動力治療。

**關鍵詞:**光動力療法、車侖可夫輻射、氟代脫氧葡萄糖、 光敏劑、卵巢癌

### Abstract

Cerenkov radiation (CR) generated from radioactive isotope is considered a promising approach to function as an internal light source for photodynamic therapy (PDT). We originally proposed to apply a photoimmunoconjugateassociating-liposome, PICAL) which contains benzoparphyrin derivative monoacid A (BPD) as a photosensitizer and EGFR antibody to ovarian cancer treatment. However, the photosensitizer BPD was found not to match the CR luminescence matching absorption band. Thus, we first screened several photosensitizers (PS) with suitable absorption band by evaluating in the anti-tumor effect under <sup>18</sup>F-FDG derived CR. In vitro studies demonstrated Chlorin e6 and Verteporfin were more effective PSs for CR-PDT. Moreover, Verteporfin were more efficient in the generation of singlet oxygen and continued for a long time when exposed to <sup>18</sup>F. Combining CR emitted by <sup>18</sup>F-FDG and Verteporfin treatment in an intraperitoneal ES2 ovarian cancer mouse model not only significantly suppressed tumor growth but also prolonged median survival compared to either monotherapy. CR emitted by <sup>18</sup>F-FDG accumulated in tumors can serve as the endogenous light source to achieve the effective PDT for ovarian cancer treatment.

**Keywords:** Photodynamic therapy, Cerenkov radiation, <sup>18</sup>FFDG, photosensitizer, ovarian cancer

# I. 前言

常規的光動力療法通常受限於光的組織穿透力和 腫瘤選擇性。車侖可夫輻射是由放射性衰變產生的帶電 粒子以比光速快的速度通過電介質而發生的(1,2)。各 種醫學相關的放射性同位素發出的車侖可夫輻射不僅 用於臨床前動物光學成像設備中,還能作為內源性光動 力療法的光源(3,4)。最近的研究已證實了它的可行性, 但是,光敏劑組合的效率需要進一步評估。若光敏劑的 吸收光譜在約 400 nm 處有很強的波鋒,稱為 Soret 波 段,車龠可夫輻射便可以作為有效地激發此光敏劑的光 源。基於這些特性,氯黴素 e6 (Ce6),5'-氨基乙酰丙 酸(5'-ALA)和 Verteporfin (VP)已獲 FDA 批准用於 抗癌應用,皮膚病適應症或與年齡相關的黃斑變性。在 這項研究中被用於 CR 誘導的 PDT 抗癌(5,6)。

卵巢癌是最常見的婦科惡性腫瘤之一,預後最差, 死亡率最高,主要是由於大多數卵巢癌患者確診當時即 為疾病晚期和已廣泛的轉移。 卵巢癌的治療策略是手 術,後輔以鉑/紫杉醇的化學療法,但是,抗藥性或腹膜 微轉移的現象最終導致治療失敗(7,8)。儘管幾項研 究表明,光動力療法聯合 5'-ALA 和近紅/紫光可用於卵 巢癌治療,但缺乏腫瘤選擇性和有限的組織穿透光不足 以獲得令人滿意的治療效果(9)。

在正電子發射斷層掃描(PET)中使用最廣泛的示 踪劑是 2-deoxy-2-[F-18] fluoro-D-glucose,<sup>18</sup>F-FDG,它 能在代謝活躍的細胞中積累,可以有效區分惡性腫瘤與 正常組織(10)。因此,<sup>18</sup>F-FDG 所產生的車侖可夫輻 射可在癌細胞中作為理想的光源以激發具有明顯 Soret 區域的光敏劑。此外,由於臨床上是最常見的卵巢癌特 徵是未分化癌和腹膜轉移,所以我們利用 ES2 細胞系建 立了卵巢癌腹膜內異種移植小鼠模型來進行體內評估 (11)。

# II. 主要內容

這項研究旨在研究使用<sup>18</sup>F-FDG 累積在腫瘤中的 車 命 可 夫 輻射 作 為 內 部 光 源 和 幾 種 具 有 匹 配 吸 收 带 的 光 敏 劑 PS 的 組 合,包括 Ce6,5'-ALA 和 VP 的 抗 腫 瘤 功 效。

子目標 1:評估由 <sup>18</sup>F-FDG 產生的車侖可夫輻射誘導的 光動力療法的體外作用

子目標 2:評估各光敏劑受 <sup>18</sup>F 誘發的車侖可夫輻射而 產生之單態氧效率

子目標 3:評估車侖可夫輻射誘導的光動力療法對卵巢 癌的體內作用。

### III. 結果與討論

細胞實驗發現同時使用 <sup>18</sup>F-FDG 和較高濃度的光 敏劑的卵巢癌細胞存活率明顯降低。這當中,搭配 Ce6 或 VP 的組別都能導致更多細胞死亡,分別達到 31.5% 和 21.4%。儘管 5'-ALA 或亞甲基藍的組合組也使細胞 存活率降低了 47.5%和 57.2%,但與單獨用 5'-ALA 或 亞甲基藍處理的細胞相比,沒有發現明顯的加成效應。 這些結果證明,當進行車龠可夫輻射誘導的光動力療法 時,Ce6 和 VP 是更有效的光敏劑。

接下來,我們評估了<sup>18</sup>F 發射的車侖可夫輻射的光 敏劑激發效率。比較相同濃度的光敏劑, VP 在生成單 態氧方面更有效率,並且持續時間較長。此外,當暴露 於固定輻射劑量(3.7 MBq)後,VP 的效率還是略高於 Ce6。後續又將車侖可夫輻射與雷射光進行比較,Ce6 和 VP 在相同濃度下的光激發荧光光譜表示,<sup>18</sup>F 發射的 車侖可夫組的螢光強度比雷射光組高 1.5 倍,證實 <sup>18</sup>F 發射的車龠可夫足以誘導單態氧產生。

透過小動物活體冷光影像監測腹膜腔內的腫瘤生 長。單獨用<sup>18</sup>F-FDG 治療的腫瘤與用 PBS 治療的腫瘤 之間沒有差異,二者腫瘤均迅速增加,這表示我們使用 的<sup>18</sup>F-FDG 劑量對腫瘤細胞無毒性。治療後第5 天,單 獨接受 VP 的小鼠對卵巢癌腫瘤生長有輕微的抑制作用, 而 VP 和 <sup>18</sup>F-FDG 聯合治療與 PBS 處理的對照組相比 有顯著的抑制效果(P = 0.071)。接受 VP 和 <sup>18</sup>F-FDG 聯合治療的小鼠的腫瘤比僅接受<sup>18</sup>F-FDG 的小鼠的腫 瘤少約2倍。此外,與VP處理的小鼠相比,在VP和 <sup>18</sup>F-FDG 處理的小鼠組合中的生長抑制更加明顯(P = 0.016)。PBS 處理的對照組其生存中位數為 14.5 天, VP 和<sup>18</sup>F-FDG 聯合治療組為 18.5 天 (p=0.0062)。 在治療後的任何時間點,各組之間的體重均無顯著差異。 總之,結果顯示與兩種單一療法相比,結合<sup>18</sup>F-FDG 和 VP 之車侖可夫輻射誘導的光動力療法,不僅抑制了腫 瘤生長,而且延長了生存期。

儘管我們的結果表明<sup>18</sup>F-FDG 誘導的光動力治療 結合 VP 產生很好的治療效果,但仍存在一些局限性。 首先,參與光動力治療的這些光敏劑並不具有腫瘤專一 性。若結合單株抗體而進行光動力免疫治療,例如,利 用包含抗表皮生長因子受體(EGFR)的微脂體本身即具 有殺死卵巢癌細胞的能力,因此能提高治療功效(12)。 其次,我們的治療策略是單次注射<sup>18</sup>F-FDG 和光敏劑。 重複注射的治療策略可能增強抗腫瘤效果並更能改善 存活率。但是,必須對輻射劑量,藥物毒性和重複注射 進行安全性評估。

# IV. 結論

本研究證實了具相應吸收光譜的光敏劑被<sup>18</sup>F-FDG 激發後能引發細胞死亡,抑制腫瘤生長和延長生存時間。 此外,我們發現 VP 產生單態氧的效率較高,表示車命 可夫照射激發 VP 因而在腫瘤細胞中能產生更有效的光 動力治療。這些結果不僅重新評估了許多常用的光敏 劑,並能促使發展更多能放射出車命可夫輻射的特異性 放射性探針。

# 参考文獻

- [1] Cherenkov PA. Radiation from high-speed particles.Science. 1960;131(3394):136-42.
- [2] Thorek D, Robertson R, Bacchus WA, Hahn J, Rothberg J, Beattie BJ, et al. Cerenkov imaging - a new modality for molecular imaging. Am J Nucl Med Mol Imaging. 2012;2(2):163-73.
- [3] Kamkaew A, Cheng L, Goel S, Valdovinos HF, Barnhart TE, Liu Z, et al. Cerenkov Radiation Induced Photodynamic Therapy Using Chlorin e6-Loaded Hollow Mesoporous Silica Nanoparticles. ACS Appl Mater Interfaces. 2016;8(40):26630-7.
- [4] Kotagiri N, Sudlow GP, Akers WJ, Achilefu S. Breaking the depth dependency of phototherapy with Cerenkov radiation and low-radiance-responsive nanophotosensitizers. Nat Nanotechnol. 2015;10(4):370-9.
- [5] Baskaran R, Lee J, Yang SG. Clinical development of photodynamic agents and therapeutic applications. Biomater Res. 2018;22:25.
- [6] Abrahamse H, Hamblin MR. New photosensitizers for photodynamic therapy. Biochem J. 2016;473(4):347-64.
- [7] Lheureux S, Karakasis K, Kohn EC, Oza AM. Ovarian cancer treatment: The end of empiricism? Cancer. 2015;121(18):3203-11.
- [8] Bast RC, Jr., Hennessy B, Mills GB. The biology of ovarian cancer: new opportunities for translation. Nat Rev Cancer. 2009;9(6):415-28.
- [9] Wilson JJ, Jones H, Burock M, Smith D, Fraker DL, Metz J, et al. Patterns of recurrence in patients treated with photodynamic therapy for intraperitoneal carcinomatosis and sarcomatosis. Int J Oncol. 2004;24(3):711-7.
- [10] Kostakoglu L, Agress H, Jr., Goldsmith SJ. Clinical role of FDG PET in evaluation of cancer patients. Radiographics. 2003;23(2):315-40; quiz 533.
- [11] Shaw TJ, Senterman MK, Dawson K, Crane CA, Vanderhyden BC. Characterization of intraperitoneal, orthotopic, and metastatic xenograft models of human ovarian cancer. Mol Ther. 2004;10(6):1032-42.
- [12] Mir Y, Elrington SA, Hasan T. A new nanoconstruct for epidermal growth factor receptor-targeted photoimmunotherapy of ovarian cancer. Nanomedicine. 2013;9(7):1114-22.

# 開發腫瘤微環境特異性放射性標記抗體及蛋白質 Development of radiolabeled antibody specific for tumor microenvironment

計畫編號:109-2623-E-010-002-NU 計畫主持人:藍耿立 計畫參與人員:蔡政良、白瓊文、陳裕益、李敦玲、徐維荃 執行單位:國立陽明交通大學

## 摘要

惡性疾病與其腫瘤微環境(TME)的狀態密切相關 [1,2], 腫瘤微環境不僅由腫瘤細胞組成, 還由內皮細胞, 間質細胞和免疫細胞組成。越來越明顯的是,控制腫瘤 生長,調節或破壞腫瘤微環境是必不可少的。為此目的, 我們建議開發特異性針對腫瘤微環境內關鍵靶標的新 型放射性標記蛋白質或抗體。免疫療法已成為治療惡 性疾病最有前途的策略之一[3-5]。為了極大化抗癌免 疫療法與放療相結合的益處,為了最大限度地發揮抗 癌免疫療法聯合放療的益處,我們純化並放射性標記 了一種新型程序性死亡配體 1 (PDL1) 抗體 3F11,以 及其衍生的與 Treg 不敏感的變異性 IL2 或 IL15 融 合免疫細胞因子。我們已經證明了這些抗體的生物活 性,即 PD-L1 結合和免疫刺激效果。 與 MC38 細胞 相比,放射性標記的抗體在 MC38-PDL1 內顯示出增 加的吸收。 這些 PD-L1 特異性抗體顯示出作為抗癌 療法的巨大潛力,值得進一步開發。

**關鍵詞:**腫瘤微環境,程序性死亡配體-1(PDL1),免 疫細胞因子。

### Abstract

Malignant diseases are vastly associated with the state of their tumor microenvironment (TME), which composed of not only the tumor cells, but also endothelial, stromal and immune cells. It is becoming more evident that to control tumor growth, modulating or destructing TME is essential. To this goal, we developed novel radiolabeled anti-PD-L1 antibody specific for critical targets within TME. Immunotherapy has become one of the most promising strategies for treating malignant diseases. To maximize the benefit of anticancer immunotherapy combined with radiotherapy, we purified and radiolabeled a novel programmed death ligand-1 (PDL1) antibody, 3F11, as well as its derived immunocytokine fused with either Treginsensitive mutant IL2 or IL15. We had demonstrated the bioactivity of these antibodies, which are PD-L1 binding and immune stimulation. Radiolabeled antibodies displayed a treed of increased uptake within MC38-PDL1 as compared with parental MC38 cells. These PD-L1 specific antibodies displayed great potential as anticancer therapeutics and worth further development.

**Keywords:** Tumor microenvironment, programmed death ligand-1 (PDL1), immunocytokine

# I. 前言

惡性疾病與其腫瘤微環境(TME)的狀態密切相關 [1,2],腫瘤微環境不僅由腫瘤細胞組成,還由內皮細胞, 間質細胞和免疫細胞組成。越來越明顯的是,控制腫瘤 生長,調節或破壞腫瘤微環境是必不可少的。為此目的, 我們建議開發特異性針對腫瘤微環境內關鍵靶標的新 型放射性標記蛋白質或抗體。免疫療法已成為治療惡 性疾病最有前途的策略之一[3-5]。為了極大化抗癌免 疫療法與放療相結合的益處,為了最大限度地發揮抗 癌免疫療法聯合放療的益處,我們純化並放射性標記 了一種新型程序性死亡配體 1 (PDL1) 抗體 3F11,以 及其衍生的與 Treg 不敏感的變異性 IL2 或 IL15 融 合免疫細胞因子。我們已經證明了這些抗體的生物活 性,即 PD-L1 結合和免疫刺激效果。 與 MC38 細胞 相比,放射性標記的抗體在 MC38-PDL1 內顯示出增 加的吸收。 這些 PD-L1 特異性抗體顯示出作為抗癌 療法的巨大潛力,值得進一步開發。

# Ⅱ. 主要內容

惡性腫瘤與其微環境 (TME) 的狀態密切相關, TME 不僅由腫瘤細胞組成,還包括內皮細胞、基質細 胞和免疫細胞。越來越明顯的是,為了控制腫瘤生長, 調節或破壞 TME 是必不可少的。腫瘤異質性進展並 導致 TME 內參與者的改變,包括成纖維細胞、間充質 基質細胞、週細胞、血液、淋巴和免疫細胞。 TME 的 特徵包括腫瘤細胞的持續增殖和非腫瘤細胞的募集以 支持腫瘤細胞的擴張,以及與腫瘤細胞代謝紊亂相關 的缺氧和酸性條件。晚期腫瘤的 TME 是極其異質的, 涉及由 TME 內細胞之間的旁分泌和自分泌相互作用 介導的複雜信號轉導。外泌體在這一過程中發揮著重 要作用,它甚至可能將 TME 鄰近的正常細胞轉化為 惡性細胞。腫瘤細胞不受控制的增殖導致缺氧區域和 腫瘤細胞代謝從有氧糖酵解途徑轉變為無氧糖酵解途 徑,導致 TME 內的酸中毒[6,7]。缺氧還會引發新血管 形成和基質細胞和免疫細胞的募集,以支持腫瘤細胞 的存活。鑑於 TME 成分在腫瘤進展中的關鍵作用,開 發創新療法以調節甚至破壞 TME,從而乾擾腫瘤進展 具有重要意義。

放射治療通常用於癌症治療。據估計,超過 50% 的癌症患者將在其疾病的某些階段接受這種治療方式。 從歷史上看,輻射的生物學結果一直集中在其對癌細 胞的 DNA 損傷和直接殺傷作用上。越來越多的文獻 說明了輻射的 TME 調節作用,就其對基質、內皮和免 疫細胞的影響而言,這些細胞對輻射的反應與腫瘤細 胞完全不同。使用具有免疫能力的小鼠,科學家們能夠 證明輻射的免疫增強作用,這會導致放療的全身抗癌 作用,即所謂的 Abscopal 反應[8,9]。除了其殺腫瘤作 用外,輻射還可對腫瘤相關的成纖維細胞和血管細胞 造成顯著損害,從而增強對腫瘤的控制。雖然腫瘤照射 顯著減少了腫瘤細胞和支持成分,包括血管生成內皮 細胞、成纖維細胞和免疫抑制細胞,但它也會產生缺氧 TME,觸發缺氧誘導因子 1α 的上調和下游基因的後 續表達.

儘管大多數放射治療是針對大體腫瘤或高風險區 域的外部射束進行的,但免疫放射治療正成為一種有 吸引力的策略,可以將輻射特異性地傳遞到分子靶點。 鑑於 TME 的複雜性及其成分在腫瘤控制中的關鍵作 用,開發免疫放射療法以破壞腫瘤支持細胞並將 TME 重新調節到對腫瘤細胞更不利的區域將是必不可少的。 為此,我們提議對幾種靶向腫瘤進展中的關鍵分子的 生物療法進行放射性標記。

免疫療法已成為治療惡性疾病最有希望的策略之 一。從 2011 年開始, FDA 批准了一種抗 CTLA-4 抗 體 (ipilimumab (Yervoy))、兩種抗 PD-1 抗體 (nivolumab (Optivo) • pembrolizumab (Keytruda)) 和三種抗 PD-L1 抗體 (atezolizumab (Tecentriq)、 avelumab (Bavencio) 和 durvalumab (Imfinzi))[10-12]。 CTLA-4、PD-1 和 PD-L1 是免疫檢查點,調節免疫系 統的活性,從而在對腫瘤細胞的免疫反應中發揮關鍵 作用。由於出色的臨床結果,免疫檢查點的阻斷已成為 一種有吸引力的抗癌策略。然而,免疫檢查點抑製劑非 常昂貴,並且當用作單一療法時只能達到大約 15-25% 的腫瘤反應率。免疫調節劑與常規抗癌治療相結合仍 有很大的改進空間。放射療法廣泛用於治療癌症患者, 越來越多的證據表明,將放射療法和免疫療法結合起 來具有巨大的潛力。為了最大限度地發揮抗癌免疫療 法與放射療法相結合的益處,我們對專有的抗 PDL1 抗體以及其衍生的與 Treg 不敏感的變異性 IL2 或 IL15 融合免疫細胞因子進行放射性標記,並檢查其生 物活性分佈。

### Ⅲ. 結果與討論

我們已經成功表達並純化了抗 PD-L1 抗體 3F11, 以及其衍生的與 Treg 不敏感的變異性 IL2 或 IL15 融合免疫細胞因子。我們研究了抗體及其衍生的免疫 細胞因子的生物活性。他們都表現出高親和力的 PD-L1 結合。變異型 IL2 或 IL15 融合抗 PDL1 所產生之免疫 細胞因子對 CTLL-2 細胞顯示免疫刺激作用。我們還通 過放射性標記這些抗體和免疫細胞因子並研究它們在 接種 MC38 和 MC38-PDL1 細胞的小鼠中的生物分 佈,並檢查它們的腫瘤靶向作用。 MC38-PDL1 腫瘤的 放射性吸收有增加的趨勢,顯示 3F11 以及其衍生的融 合免疫細胞因子具有腫瘤微環境靶向作用。

### IV. 結論

我們的數據表明這些腫瘤靶向抗體 3F11,以及其 衍生的與 Treg 不敏感的變異性 IL2 或 IL15 融合免 疫細胞因子可以進一步發展為臨床抗癌療法。我們還 需進一步利用蛋白質工程以提高生物活性、蛋白質穩 定性以及提高產量。更多生物分佈實驗將用以進一步 探討抗 PDL1 免疫細胞因子的體內抗癌作用。

- A.R. Lim, W.K. Rathmell, J.C. Rathmell, The tumor microenvironment as a metabolic barrier to effector T cells and immunotherapy, Elife 9 (2020). 10.7554/eLife.55185.
- [2] C.S. Garris, J.J. Luke, Dendritic Cells, the T-cellinflamed Tumor Microenvironment and Immunotherapy Treatment Response, Clin Cancer Res (2020). 10.1158/1078-0432.CCR-19-1321.
- [3] S.C. Edwards, W.H.M. Hoevenaar, S.B. Coffelt, Emerging immunotherapies for metastasis, Br J Cancer 124 (2021) 37-48. 10.1038/s41416-020-01160-5.
- [4] S. Rameshbabu, B.W. Labadie, A. Argulian, A. Patnaik, Targeting Innate Immunity in Cancer Therapy, Vaccines (Basel) 9 (2021). 10.3390/vaccines9020138.
- [5] G.B. Montenegro, S. Farid, S.V. Liu, Immunotherapy in lung cancer, J Surg Oncol 123 (2021) 718-729. 10.1002/jso.26347.
- [6] B. Wang, Q. Zhao, Y. Zhang, Z. Liu, Z. Zheng, S. Liu, L. Meng, Y. Xin, X. Jiang, Targeting hypoxia in the tumor microenvironment: a potential strategy to improve cancer immunotherapy, J Exp Clin Cancer Res 40 (2021) 24. 10.1186/s13046-020-01820-7.
- [7] V.L. Codony, M. Tavassoli, Hypoxia-induced therapy resistance: Available hypoxia-targeting strategies and current advances in head and neck cancer, Transl Oncol 14 (2021) 101017. 10.1016/j.tranon.2021.101017.
- [8] Z. Shan, H. Wang, Y. Zhang, W. Min, The Role of Tumor-Derived Exosomes in the Abscopal Effect and Immunotherapy, Life (Basel) 11 (2021). 10.3390/life11050381.
- [9] S. Tubin, W. Yan, W.F. Mourad, P. Fossati, M.K. Khan, The future of radiation-induced abscopal response: beyond conventional radiotherapy approaches, Future Oncol 16 (2020) 1137-1151. 10.2217/fon-2020-0063.
- [10] Z.N. Willsmore, B.G.T. Coumbe, S. Crescioli, S. Reci, A. Gupta, R.J. Harris, A. Chenoweth, J. Chauhan, H.J. Bax, A. McCraw, A. Cheung, G. Osborn, R.M. Hoffmann, M. Nakamura, R. Laddach, J.L.C. Geh, A. MacKenzie-Ross, C. Healy, S. Tsoka, J.F. Spicer, D.H. Josephs, S. Papa, K.E. Lacy, S.N. Karagiannis, Combined anti-PD-1 and anti-CTLA-4 checkpoint blockade: Treatment of melanoma and immune mechanisms of action, Eur J Immunol 51 (2021) 544-556. 10.1002/ejji.202048747.
- [11] Y. Liang, L. Li, Y. Chen, J. Xiao, D. Wei, PD-1/PD-L1 immune checkpoints: Tumor vs atherosclerotic progression, Clin Chim Acta 519 (2021) 70-75. 10.1016/j.cca.2021.04.010.
- [12] K.K. Jain, Personalized Immuno-oncology, Med Princ Pract (2020). 10.1159/000511107.

# 攝護腺癌造影劑 <sup>18</sup>F-PSMA-1007 的研製 The Development of <sup>18</sup>F-PSMA-1007 for Prostate Cancer Imaging Agent

計畫編號:109-2623-E-075-001-NU 計畫主持人:張智偉 e-mail:cwchang@vghtpe.gov.tw 計畫共同主持人:黃文盛 計畫參與人員:洪鈞澤、李庚穎 執行單位:臺北榮民總醫院正子臨床中心

# 摘要

本計畫已利用三台不同型號的自動化合成器成功 合成符合歐洲藥典規範之[<sup>18</sup>F]PSMA-1007,並進行了臨 床試驗;未來申請衛福部查核通過後,應可以正式將 [<sup>18</sup>F]PSMA-1007應用於臨床攝護腺癌正子造影檢查。

**關鍵詞:**[18F]PSMA-1007、攝護腺癌正子造影檢查。

### Abstract

We have successfully synthesized [<sup>18</sup>F]PSMA-1007 in compliance with European Pharmacopoeia specifications using three different types of automated synthesizers, and conducted clinical trials; [<sup>18</sup>F]PSMA-1007 could be applied in clinical for prostate cancer PET imaging in the future after obtaining approval by the Ministry of Health and Welfare.

Keywords: [18F]PSMA-1007, prostate cancer PET imaging

# I. 前言

本中心 2010 年以自動化合成器(Eckert-Ziegler Modular-Lab system)成功合成符合歐洲藥典規範之 [<sup>11</sup>C]sodium acetate 並通過衛福部查核,2016 年自行編寫 合成程式,以同一設備成功合成符合美國藥典規範之 [<sup>18</sup>F]FDG,2018 年又開發成功符合品管項目之 [<sup>18</sup>F]FDG,2018 年又開發成功符合品管項目之 [<sup>18</sup>F]Fallypride 正子藥物。本計畫撰寫[<sup>18</sup>F]PSMA-1007 自動化合成程式,以Eckert-Ziegler Modular-Lab system 自動化合成器及 Neptis 自動化合成器成功合成符合歐洲 藥典規範之[<sup>18</sup>F]PSMA-1007;並制訂可注射人體的 [<sup>18</sup>F]PSMA-1007品管規範,同時利用 Neptis 自動化合成 器生產三批次符合歐洲藥典規範的[<sup>18</sup>F]PSMA-1007,未 來進一步經衛福部查核後,應可以應用於臨床攝護腺癌 正子造影檢查,提供本院泌尿科醫師更多診斷資訊、嘉 惠更多攝護腺癌疾病方面的患者,以提供治療方針。

# Ⅱ. 主要內容

Neptis 自動化合成器按手冊說明,測試合成器功能 是否正常及所需氣體是否正常後,依序組裝所需試劑及 耗材;而 Eckert-Ziegler Modular-Lab system 自動化合成 器按管路圖安裝各個試劑及耗材之後,送入[<sup>18</sup>F]HF 分別 經40及60分鐘合成後,即可得到[<sup>18</sup>F]PSMA-1007。

# III. 結果與討論

Eckert-Ziegler Modular-Lab system 自動化合成器以

40 mM TBAHCO3 solution in 80% CH3CN/water 混合溶 液沖提出<sup>18</sup>F至反應瓶而形成[<sup>18</sup>F]TBAF,合成 [<sup>18</sup>F]PSMA-1007 產物,此合成不必使用 semi-preparative HPLC 純化粗產物,只利用水及不同比例酒精水溶液清 洗 C18 cartridge 就可以除去主要不純物[18F]F-,如果清 洗 C18 cartridge 的水體積不足,會使[18F]PSMA-1007 產 物含較多的[18F]F-,造成[18F]PSMA-1007 產物的放射化 學純度低於95%。因此,本計畫執行冷測試時,測試以 氮氣將 15c.c.水推送至 C18 cartridge 的時間, 確保所有 的水都經過 C18 cartridge,以除去主要不純物[18F]F-。在 前驅物的吡啶官能基上設計一 N(CH3)3TFA 為 good leaving group,使[18F]F-標幟反應只需一步就可以合成 [<sup>18</sup>F]PSMA-1007, 再配合在 PS-H<sup>+</sup>及 C18 cartridge 進行 簡易的固相萃取法,即可得符合歐洲藥典規範,放射化 學純度大於 99%的[<sup>18</sup>F]PSMA-1007, 而 Neptis 自動化合 成器則按手冊說明,測試合成器功能是否正常及所需氣 體是否正常後,依序組裝所需試劑及耗材,即可得到符 合歐洲藥典規範,放射化學純度大於 99%的 [<sup>18</sup>F]PSMA-1007 •

### IV. 結論

利用 Neptis 自動化合成器已成功合成三批次符合歐 洲藥典規範,放射化學純度大於 99%的[<sup>18</sup>F]PSMA-1007, 未來將三批次的生產文件送衛福部核備通過審查後,可 正式供泌尿外科醫師為攝護腺癌病患進行 PET/CT 及 PET/MR 檢查。

- [1] O'Keefe DS, Su SL, Bacich DJ, et al. Mapping, genomic organization and promoter analysis of the human prostate-specific membrane antigen gene. Biochim Biophys Acta 1998; 1443: 113-27.
- [2] Jens Cardinale, René Martin, Yvonne Remde, Martin Schäfer, Antje Hienzsch, Sandra Hübner, Anna-Maria Zerges, Heike Marx, Ronny Hesse, Klaus Weber, Rene Smits, lexander Hoepping, Marco Müller, Oliver C. Neels and Klaus Kopka. Procedures for the GMP-Compliant Production and Quality Control of [18F]PSMA-1007: A Next Generation Radiofluorinated Tracer for the Detection of Prostate Cancer. Pharmaceuticals 2017; 10(4): 77.

# 開發可用於乳癌之硼中子捕獲治療含硼試劑 Development of Breast Cancer Targeting Boron Delivery Agent for Boron Neutron Capture Therapy

計畫編號:109-2623-E-032-002-NU 計畫主持人:潘伯申 e-mail:138020@gms.tku.edu.tw 計畫參與人員:石龍祥、陳妤芸 執行單位:淡江大學化學系

### 摘要

硼中子捕獲治療法(Boron Neutron Capture Therapy, BNCT)的原理乃是藉由低能熱中子照射<sup>10</sup>B 原子並造成 核分裂之後所產生高能量粒子 (<sup>7</sup>Li, and <sup>4</sup>He)來破壞癌症 細胞<sup>。1</sup>研究顯示,如果能夠再針對目前的含硼 BNCT 遞 送試劑在運送特性與癌細胞/正常細胞的選擇性上予以 改進,BNCT 的治療效果將更進一步改善。<sup>2</sup>因此,本研 究計畫的兩個終極目標將為,第一:利用 Ugi-四成分反 應合成兩個系列的含多硼酸官能基之小分子化合物,第 二:利用生物實驗來評估所合成之化合物是否能夠成為 理想 BNCT 試劑。

**闌鍵詞:**硼元素,含硼化合物, 硼中子捕獲治療, 癌症,多組成化學

### Abstract

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) utilizes low thermal energy to irradiate the boron-10 isotope, which generates highenergy particles (<sup>7</sup>Li, and <sup>4</sup>He) to destroy the tumor cell. One of the key to the success of BNCT relies on the boron delivery agent that fulfills the following criteria: (a) blood/ tumor ration greater than three; (b) tumor/ normal cell ration greater than 3; (c) low toxicity. The specific aims of this research includes: (a) Constructs libraries of multiple boron-containing analogs via highly efficient Ugi four components reaction (Ugi-4CR); (b) Subject the synthesized multiple boron-containing analogs to series of biological assays. These assays will verify the hypothesis that multiple boron-containing analogs could serve as the ideal boron delivery agent for the BNCT.

**Keywords:** Boron, Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), Ugi fourcomponent reaction, cancer

### I. 前言

乳癌是女性致命的癌症類型,全球每年診斷出近 200 萬例病例。3目前治療乳癌的選擇有是化學療法、手 術、內分泌療法、放射治療、標靶治療。然而,除了標 靶治療(Herceptin)之外,這些選擇中的大多數會導致 顯著的不良副作用。再者,但並非所有患者都適用標靶 治療。例如,三陰性乳癌,為乳癌的一種亞型,其特徵 為孕酮受體 (PR)、雌激素受體 (ER)、人表皮生長因子 受體 2 (HER2) 等生物標靶皆為陰性。因此,三陰性乳 癌患者不適合使用 Herceptin。現今,除了外科手術外, 化療為三陰性乳癌患者的主要治療選擇。然而,能找到 對三陰性乳癌有選擇的低毒性含硼藥物,經由 BNCT 治 療後,能降低對正常組織的傷害,對於三陰性乳癌的患 者而言會是一個不錯的選擇。

多組成反應具有高效率、環保等優勢。本實驗室已 針對此反應方式開發出了合成含硼化合物的客製化條 件,而研究成果已發表多篇論文與專利。<sup>4</sup>本研究以 peptide 為起始物透過 Ugi 多組成反應,合成具有 peptide 骨架的衍生物。並藉由多組成反應與peptide 序 列反應獲得結構多樣性的化合物。此策略如果成功將可 以有效率地合成含硼之 peptide 衍生物,有利於生物實 驗平台篩選適用於 BNCT 之化合物。此研究策略有以 下 3 個重點:(1)peptide 可以視為導彈,將含硼化合物 帶入癌細胞;(2) DOTA 螯合劑能夠標定(<sup>177</sup>Lu 與<sup>111</sup>In 等同素),觀察含硼化合物於動物體內的分布;(3)其餘官 能基則是攜帶大量的硼原子。綜合上述,此分子對於 BNCT 的應用,不僅能觀察含硼化合物於體內的分布, 還同時具有治療的效果。

### Ⅱ. 主要內容

本研究以含溴化合物 (3) 作為關鍵起始物,待取得 化合物 (7) 之後,最後再將溴與硼酯進行耦合反應取得 含硼化合物並於氧化條件下反應獲得目標產物 (8) (Scheme 1) 經由高解析度質譜儀鑑定後,確認有取得目 標分子量,目前我們正在使用 HPLC 純化中。待純化完 成之後,便會轉交原能會進行動物實驗。



Scheme 1. 合成策略

# III. 結果與討論

透過多組成反應取得化合物 (5) 之後,其上之 Boc 保護基便可以在酸性條件下去保護得到化合物 (6) (Scheme 2)。





在取得化合物 (6) 之後,利用標準的 peptide coupling 反應條件便可以將其與 DOTA 耦合得到化合 物 (7)。反應所得之粗產物經由酸鹼鹽萃取、DCM/n-Hex 再結晶、ether 再沉澱的方式移除予以純化。經<sup>1</sup>H-NMR、<sup>11</sup>B- NMR、高解析度質譜鑑定後,確認成功取 得化合物 (7) (Scheme 3)。



Scheme 3. Ugi-Peptide 與 DOTA 的合成

化合物 (7) 即可利用的硼化反應取得化合物 (8) (Scheme 4),此反應之粗產物可先使用 DCM/H<sub>2</sub>O 進行 萃取。目標產物 (8) 會溶於水層中。藉由冷凍乾燥機 移除水及反應溶劑(DMF)之後,將 DCM 加入粗產物 中。由於(8)並不溶解於DCM(但是副產物會),因此可以藉此取得純化的目標產物(8)。經<sup>1</sup>H-NMR鑑定, 確認此沉澱物為目標化合物(8)。



Scheme 4. 化合物 (7) 之硼化反應

化合物 (8) 可以透過兩步驟的溫和非氧化條件將 硼酯官能基轉換成對應的硼酸化合物 (Scheme 5)。此 反應之粗產物可以利用 DCM/HCl 萃取,目標產物 (9) 會存在於水層中。因此利用冷凍乾燥機將水去除之 後,便可以得到半純化的產物。最後,利用 ether、 ethyl acetate 等溶劑進行再沉澱純化之後,便可以得到 產物 (9)。經由高解析度質譜鑑定後確定有目標分子 量。目前此粗產物正在使用 HPLC 純化中。



# IV. 結論

本研究成功地合成目標產物且其衍生的合成策略 尚未有被報導過。因此,我們預計將會在蒐集完成相關 資料之後申請專利。而粗產物 (8)目前已經初步藉由 HPLC 分離完畢,正在等待中研院高解析度質譜鑑定結 果。一旦確認目標產物分子量,將會委請原能會同位素 組幫忙進行同位素標定,並執行相關動物實驗。

- Malouff, T. D., Seneviratne, D. S., Ebner, D. K., Stross, W. C., Waddle, M. R., Trifiletti, D. M., Krishnan, S. *Front. Oncol.* 2021, 11, 601820.
- [2] Barth, R. F., Mi, P., Yang, W. Cancer Commun. (Lond). 2018, 38(1), 35.
- [3] Kumar, P., Aggarwal, R. Arch. Gynecol. Obstet. 2016, 293(2), 247–269.
- [4] 中華民國專利號 I707685, 2020; United States Patent No. 10,689,404 B1 2020

# 研究免疫檢查點療法合併受體放射核種治療對前列腺腫瘤微環境之調控機制 Modulation of Tumor Microenvironment with Immune Checkpoint Blockade Therapy Enhances Therapeutic Effect of Peptide Receptor Radionuclide Therapy against Prostate Cancer

計畫編號:109-2623-E-195-001-NU 計畫主持人:陳裕仁 e-mail:chenmdphd@gmail.com 計畫參與人員:張明誠、陳亮丞、吳駿一 執行單位:馬偕紀念醫院放射腫瘤科

# 摘要

近年來,諸多臨床試驗証實受體放射核種治療可增 加末期轉移性荷爾蒙抗性前列腺癌病人的治療效果,其 中鎦-177 標誌前列腺特異膜抗原(177Lu-PSMA-617)是目 前最受關注的精準療法。利用前列腺細胞膜抗原過度表 現於前列腺癌的特性, 鎦-177-前列腺細胞膜抗原-617 可 特異性聚集在腫瘤處,透過鎦-177發射出貝他粒子穿透 2 mm 內的組織,進而產生腫瘤毒殺作用。利用免疫檢 查點抑制劑對抗細胞程序性死亡蛋白-1/細胞程式死亡-配體1在臨床上已應用於多種癌症治療,本計畫目的是 要研究受體放射核種結合免疫療法在前列腺癌的療 效。研究結果顯示錮-177標誌前列腺特異膜抗原放射合 種標誌純度大於98%,治療效果方面,低濃度及高濃度 的鎦-177-前列腺細胞膜抗原-617 對腫瘤抑制效果沒有 差異,體重測量也無差別。生物分佈顯示鎦-177-前列腺 細胞膜抗原-617 在肝、腎及骨頭有大量吸收,腫瘤內吸 收在 4 小時高但在第 16 天時吸收低,藥物動力學數據 顯示鎦-177-前列腺細胞膜抗原-617在血中半衰期約4小 時。結合鎦-177-前列腺細胞膜抗原與細胞程序性死亡蛋 白-1/細胞程式死亡-配體1抗體的療效、老鼠存活率、副 作用及腫瘤為環境內免疫細胞的變化在正進行中。

**關鍵詞:**前列腺癌、鎦-177-前列腺細胞膜抗原-617、治 療效果、生物分佈、藥物動力學

### Abstract

Peptide receptor radionuclide therapy (PRRT) using <sup>177</sup>Lutetium-labeled prostate-specific membrane antigen (<sup>177</sup>Lu-PSMA-617) in metastatic castration-resistant prostate cancer (mCRPC) patients shows promising results with therapeutic benefit and low toxicity profile, currently attracting much attention in the area of precision medicine. Specific delivery of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 to tumor site is through the binding to PSMA, a highly expressed receptor in prostate cancer, and emission of beta particles from <sup>177</sup>Lu can produce a short distance toxic effect within 2 mm. Immune checkpoint blockade therapy using antibodies against PD-1/PD-L1 in the clinical practice demonstrates a broad-spectrum activity of these agents various cancer types. The purpose of this study is to investigate potential of PRRT combined therapeutic with immunotherapy using <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 and PD-1/PD-L1 inhibitors for prostate malignancy. Our study demonstrated the purity of radiolabeling <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 is >98%.

There was no difference in therapeutic effect after low- and high-dose <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 treatment. <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 did not show significant toxicity on body weight measurement. The bio-distribution profile of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 showed high uptake levels in the liver, kidney, and bone. Tumor uptake is high at 4 h and declined at the16<sup>th</sup> days. Pharmacokinetic data showed the half-life of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in blood is about 4 hours. The effect of combinatory strategy using <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 and PD-1/PD-L1 inhibitors by evaluating tumor control, murine survival, side effect and immune responses in tumor microenvironment is ongoing.

**Keywords:** prostate cancer, <sup>177</sup>Lutetium-labeled prostate specific membrane antigen (<sup>177</sup>Lu-PSMA-617), therapeutic effect, bio-distribution, pharmacokinetic

# I.前言

new therapy promising for metastatic A castration-resistant prostate cancer (mCRPC) patient- the targeted radiation therapy known as 177Lu-PSMA-617achieves significant survival benefit and only mild side effects, supporting the therapeutic potential of Peptide Radionuclide Therapy Receptor (PRRT) (1-4).<sup>177</sup>Lu-PSMA-617 is a radiolabeled small molecule that selectively binds to prostate-specific membrane antigen (PSMA)- a common receptor on prostate cancer cells (5, 6). Lutetium-177 (<sup>177</sup>Lu) is a reactor produced radionuclide that emits a medium-energy  $\beta$ -emitter and low-energy  $\gamma$ -rays. The shorter  $\beta$ -range of <sup>177</sup>Lu (< 2 mm) allows high activities irradiation delivery for smaller tumors.

Immunotherapy has been shown a promising breakthrough in cancer treatment. The advent of PD-1/PDL1 inhibitors, named immune checkpoint blockade (ICB), contributes to the biggest advance in cancer treatment in the last decades (7, 8). To date, a few clinical trials evaluating the PD-1/PD-L1 inhibitors in prostate cancer showed remarkable and durable responses, suggesting ICB therapy can restore the sensitivity of antiandrogen therapy and act synergistically (9-11). Our previous study demonstrated the therapeutic efficacy of single or combined ICB therapies in lung metastatic mouse model, showing that anti-PD-L1 presents better tumor control than anti-PD-1 treatment and sequential use of anti-PD-L1 and anti-PD-1 is the most effective therapeutic regimen (12).

# Ⅱ. 主要內容

We propose that specific targeting of radionuclide <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 combined with mono- or dual treatment of PD-1/PD-L1 inhibitors can reverse tumor-mediated immune suppressive tumor microenvironment and synergize therapeutic efficacy with minimized side effects for malignant prostate cancer. Therapeutic efficacy will be examined by IVIS imaging and survival analysis, while side effects will be evaluated by mice weights, white blood cells counts, liver function and kidney function indicators. Live image and bio-distribution of radionuclide labeled PSMA-617 will be performed by nanoSPECT/CT and Auto-Gamma counter respectively. Tumor microenvironment will be revealed by comprehensive immune cells profiles either in tumor site (prostate) or in the circulation (spleen and bone marrow) by flow cytometric analysis.

### III. 結果與討論

To establish syngeneic prostate orthotopic mouse model, we constructed Stable clones expressing human PSMA and green fluorescence protein (GFP) (Myc-CaP-hPSMA-GFP) cells). Myc-CaP cells infected with pLenti-C-mGFP lentiviral vector with p2A peptide sequence between the two ORFs to result in pLenti-C-mGFP-hPSMA-GFP plasmid. The results showed the plasmid was transfected into Mvc-CaP cells photographed by fluorescence microscopy and nearing 50% of cells expressed GFP using flow cytometry detection. In this part, we did not obtained purify stable clone for further prostate animal study.



Radionuclide labeling of the PSMA-617 ligand was also performed in National Yang-Ming University. Thirty-seven MBq non-carrier <sup>177</sup>LuCl3 was mixed with sodium acetate solution and ascorbic acid, and then PSMA-617 solution was added into the radioactive solution. The radiolabeling efficiency was checked by iTLC When radiolabeling efficiency was lower than 95%, the <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 were purified with C-18 cartridge. The radiolabeling results demonstrated that <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 efficiency were 94.2% after labeled and >98% after purified, respectively.



fail to establish stable clone Due to of Myc-Cap--hPSMA-GFP cells, the further studies of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 combine with immune chechpoint blckers to evaluate expression of immune cells in tumor microenvironment were dampened.. Mouse TRAMP-C1 prostate cancer cell line express PSMA, next we used TRAMP-C1 implanted into C57BL/6J animal model to evaluate the therapeutic effect of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617. There was no difference between 100 and 300 µCi <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in tumor volume during day 0 to day 16 after injection. The body weight did not showed any change during day 0 to day 15 after injection. At day 16, the body weight was dropped in both of 100 and 300  $\mu$ Ci groups mice.



At day 16, , the mice were sacrificed to collect organs radioactivity will be detected by Auto-Gamma counter to analye the bio-distribution of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617. The bio-distribution profile of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in mice bearing prostate cancer showed high uptake levels in the tissues of the liver, kidney, and bone. The accumulation of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in tumor declined at the 16<sup>th</sup> day is noted.



The healthy and tumor-bearing mice were sacrificed at 4 hours and collected organs of interest for radiation counting to analyze bio-distribution. The bio-distribution profile in mice showed highly expressed in the tissues of kidney, tumor, bone and bone marrow.



The pharmacokinetics of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 were also analyzed at 0.5, 1, 2, 4 ,24, and 72 hours of blood collecting. The results showed radioactivity was decreased to nadir at 4 hours and sustained to 72 hours. This indicated that the half-life of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in blood is within 4 hours.



### IV. 結論

In our study, we did not establish stable clone harboring hPSMA-GFP gene expression in Myc-Cap cells for further experiments. Alternatively, we utilized another syngeneic animal model TRAMP-C1 cell expressing PSMA to replace our original materials and to explore the therapeutic effect, bio-distribution and pharmacokinetics of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617. The results show that <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 treatment had no different effects on tumor growth and The accumulation body weight change. of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 in tumor is high at 4 h and declined at the 16 day. Most of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 was accumulated in the tissue of liver, kidney, and bone. The half-life of <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 is about 4 hours in blood. The evaluation of bio-distribution, therapeutic effect and tumor microenvironment by <sup>177</sup>Lu-PSMA-617 combined with anti-PD1 or anti-PD-L1 is ongoing.

### 参考文獻

- Zhang J, Kulkarni HR, Singh A, Baum RP. Complete Regression of Lung Metastases in a Patient With Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer Using 177Lu-PSMA Radioligand Therapy. Clin Nucl Med. 2019.
- [2] Yordanova A, Linden P, Hauser S, et al. Outcome and safety of rechallenge [(177)Lu]Lu-PSMA-617 in patients with metastatic prostate cancer. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2019;46:1073-1080.

- [3] Yadav MP, Ballal S, Sahoo RK, Dwivedi SN, Bal C. Radioligand Therapy With (177)Lu-PSMA for Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. AJR Am J Roentgenol. 2019;213:275-285.
- [4] Heck MM, Tauber R, Schwaiger S, et al. Treatment Outcome, Toxicity, and Predictive Factors for Radioligand Therapy with (177)Lu-PSMA-I&T in Metastatic Castration-resistant Prostate Cancer. Eur Urol. 2019;75:920-926.
- [5] Bradley CA. [(177)Lu]PSMA-617 radionuclide therapy shows promise. Nat Rev Urol. 2018;15:468.
- [6] Pillai MRA, Nanabala R, Joy A, Sasikumar A, Russ Knapp FF. Radiolabeled enzyme inhibitors and binding agents targeting PSMA: Effective theranostic tools for imaging and therapy of prostate cancer. Nucl Med Biol. 2016;43:692-720.
- [7] Wilky BA. Immune checkpoint inhibitors: The linchpins of modern immunotherapy. Immunol Rev. 2019;290:6-23.
- [8] Fritz JM, Lenardo MJ. Development of immune checkpoint therapy for cancer. J Exp Med. 2019;216:1244-1254.
- [9] Fay AP, Antonarakis ES. Blocking the PD-1/PD-L1 axis in advanced prostate cancer: are we moving in the right direction? Ann Transl Med. 2019;7:S7.
- [10] Rekoske BT, Olson BM, McNeel DG. Antitumor vaccination of prostate cancer patients elicits PD-1/PD-L1 regulated antigen-specific immune responses. Oncoimmunology. 2016;5:e1165377.
- [11] Shi X, Zhang X, Li J, et al. PD-1/PD-L1 blockade enhances the efficacy of SAGM- CSF surface-modified tumor vaccine in prostate cancer. Cancer Lett. 2017;406:27-35.
- [12] Liu SY, Huang WC, Yeh HI, et al. Sequential Blockade of PD-1 and PD-L1 Causes Fulminant Cardiotoxicity-From Case Report to Mouse Model Validation. Cancers (Basel). 2019;11.

# 高能質子治療設施與放射性固態廢棄物之輻射安全分析研究 Radiation Safety of Proton Therapy and Radioactive Waste

計畫編號:109-2623-E-182A-001-NU 計畫主持人:陳顯鑫 e-mail:hsin0426@gmail.com 計畫共同主持人:黃筱傑 執行單位:長庚醫療財團法人林口長庚紀念醫院

### 摘要

行政院原子能委員會(以下簡稱原能會)推動輻射防 護管制不遺餘力,為保障人員及環境之輻射安全,以專 業的輻射安全管制與稽查方式,強化各輻射工作場所自 主管理,期能合理抑低輻射工作人員劑量,進而提升輻 射醫療品質。原能會推動輻射醫療曝露品質保證作業, 針對放射診斷、核子醫學與放射治療相關設施已訂定相 關法規並施行多年,成效良好。

高能粒子放射治療設施於近十年內在國際與國內 快速興建發展,國內目前已有林口長庚紀念醫院與高雄 長庚紀念醫院兩家醫學中心之質子治療設施執行病人 治療,未來預計還有數家醫療院所將興建高能粒子治療 設施。原能會為了高能粒子放射治療設施之輻射安全管 制(包含訂定醫療曝露品質保證作業與放射性固態廢棄 物之輻射安全相關法規),故委託本院質子治療中心進 行研究並提供建議,作為提供未來國內施行中與有意興 建高能粒子治療設施之醫療院所一重要資訊。

本計畫針對質子治療過程中可能產生之放射性固 態廢棄物,建立質子治療設施中子活化評估方法,並建 立高純鍺偵檢器之度量方法,同時實際測量質子治療病 人使用之射程補償器、銅檔塊、治療用之固定裝置。

依據研究結果提出輻射防護管制建議,作為主管機 關管制之參考。藉由本計畫之研究合作,期能提出高能 粒子放射治療設施之輻射安全管制所需之研究成果與 相關建議,協助原能會提升醫療輻射安全品質,確保輻 射作業人員與民眾之安全。

關鍵詞:射程補償器、銅檔塊、質子治療。

#### Abstract

The Atomic Energy Council (AEC) is the safety authority over the atomic energy related affairs in our country. In addition to strictly enforcing nuclear safety regulation, nuclear emergency preparedness and response, radiation protection, environmental radiation monitoring, and properly planning the management of radioactive waste, the AEC also actively promotes scientific and technological research and innovation in the field of nuclear energy. Patients can be treated in Chang Gung Memorial Hospitals in Linkou and Koashuang branch now. High energy particle therapy facilities are under constructed in recent years. The issues about radiation safety and radioactive waste are needed to be investigated. The purpose of this study is to evaluate the radiation safety of proton therapy and radioactive waste. There are two targets in our study:

- (1) To evaluate neutron activation distribution of proton therapy with simulation and measured methods.
- (2) To provide the suggestion of regulation of the radiation safety filed in proton therapy facility.

**Keywords:** Range compensator, brass aperture, proton therapy.

#### I. 前言

質子治療為利用帶電之質子與物質作用之布拉格 尖峰(Bragg Peak, BP)特性(圖 1),單能布拉格峰後之劑量 為零,但是其能峰寬度無法涵蓋腫瘤大小,因此透過改 變不同能量及不同權重後,產生一擴展布拉格尖峰 (Spread-out Bragg peak),便可對於不同大小的腫瘤進 行治療。質子治療的好處在於,將高能粒子絕大部分之 能量釋放於治療體積內,殺死癌細胞,同時可減少周邊 正常組織所接受之輻射劑量。



圖1、高能粒子之布拉格尖峰特性

傳統光子治療因其隨深度衰減之特性,讓周圍組織 皆會接受到低劑量(圖 2 左),若使用質子治療則可將高 劑量拘限在腫瘤的位置,並且周圍組織只會有局部區域 皆受到輻射劑量;圖 2 為神精外胚層母細胞瘤之兒童患 者接受光子或質子全脊髓照射劑量分佈圖,圖 2 右為質 子治療之劑量分佈圖,沒有顏色的區域代表無輻射劑量 之區域,研究指出可減少兒童癌症患者未來得到第二個 癌症之風險。



圖 2、光子(圖左)、質子或碳離子(圖右)治療之治 療計畫劑量分佈比較差異

林口長庚質子暨放射治療中心為台灣第一間設置 質子治療設備之醫學中心,民國 99 年 11 日原能會核准 林口長庚之高強度輻射設施安裝許可,並於民國 100 年 1月 11 日動土建造,經過 3 年建造、試運轉及原能會現 場檢查後,民國 103 年 6 月取得高強度設施設備使用許 可;在通過衛福部要求之臨床試驗後,順利於民國 104 年 10 月正式治療病人。截至民國 110 年 2 月底,總計 2970 位病人接受質子治療。

病人在接受質子放射治療過程中會使用固定裝置、 補償器(compensator)與射束順型銅檔塊(beam shaped block);這些裝置在治療照野中經由高能粒子輻射作用 後被活化後,轉變成放射性同位素而放出會產生其他游 離輻射。這些被活化的設施組件與檔塊,必須受到輻射 偵檢器監測與管制,確保其放射性活度或劑量率經過足 夠長時間的衰變至安全範圍後,才能進行廢棄物處理, 這是為了確保輻射作業工作人員與相關臨床工作人員 之安全與健康。本研究將分別進行評估與實際測量,以 提供原能會管制上之建議。

### Ⅱ. 主要內容

本計劃之目的將針對病人在接受質子放射治療過 程中會使用之固定裝置、射程補償器(compensator)與射 束順型銅檔塊(beam shaped block),經由高能粒子輻射照 射後活化,轉變成放射性同位素之種類及活度分析。研 究中將使用蒙地卡羅模擬以質子照射銅檔塊、射程補償 器將產生之放射性核種,並在建置高純鍺偵檢器測量系 統後,實際測量臨床病人在質子療程結束後之補償器與 射束順型銅檔塊,所剩餘之核種活度作為輻射安全管制 之建議。

# 2.1 使用蒙地卡羅模擬銅檔塊被質子照射後產生之放射 性核種

本研究使用 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission)模擬在使用 230 MeV 質子平行射 束照射銅檔塊,粒子數目為 10<sup>7</sup>,分析可能產生之所有放 射性核種,銅檔塊材料組成為 60.5%的銅、39.4%的鋅、 0.05%的鐵、0.05%的鉛。由於臨床會使用三片厚度分別 為 2 公分之銅檔塊來保護腫瘤外之正常組織,因此模擬 時亦使用相同情況。 由於射程補償器的組成為 85.5%的碳、14.4%的氫, 成分相對單純,韓國學者 Se-Jin Ra 等人於 2011 發表在 Journal of the Korea Physical Society 中,已列出所有可能 產生之放射性核種,在此研究中不再模擬。

### 2.2 高純鍺偵檢器(HPGe)測量系統之建置

高純鍺偵檢器系統包含高純鍺偵檢器、前置放大器、 放大器、多通道分析系統與高壓系統,本研究使用 ORTEC 公司生產之高純鍺偵檢器,型號為 GEM15-70-SMP,該型號的高純鍺偵檢器系統將前置放大器、放大 器、多通道分析系統與高壓系統整合於 DigiDART 設備 中。

操作高純緒偵檢器系統前會先填充液態氮,讓高純 緒偵檢器的晶體溫度維持在 77K的狀態,操作時會連接 到筆記型電腦,並且使用軟體 Gamma Vision V7 來進行 樣品之量測與分析數據,圖六為其操作介面。高純緒偵 檢器系統建置包括能量校正、效率校正及最小可偵測活 度。

### 2.3 射程補償器的測試

選取臨床病人在療程結束後,儲存於地下三樓放射 性廢棄物儲藏室中三、六、九個月以上之射程補償器三 片,以高純鍺偵檢器進行測量八小時後,分析其中是否 含有放射性同位素之存在,及分析其放射性活度。根據 測量結果推定射程補償器在治療結束後多久可進行廢 棄處理作業。

#### 2.4 銅檔塊的測試

選取臨床病人在療程結束後,儲存於地下三樓放射 性廢棄物儲藏室中之銅檔塊六片,這六片之存放時間從 4個月到6年不等,以高純鍺偵檢器進行測量八小時後, 分析其中是否含有放射性同位素之存在,及分析其放射 性活度。根據測量結果推定銅檔塊在治療結束後多久可 進行廢棄處理作業。

由於在治療室的機頭設置中,銅檔塊在多葉式準直 儀下方,大部分的質子都停止於多葉式準直儀中,只有 4 mm 的環形面積會被質子照射(圖3中紅色部分),為 了修正幾何效率,使用蒙地卡羅程式模擬其效率值,以 確保定量之準確性。



圖 3、銅檔塊實際在治療中被質子照射之區域 (紅色範圍)

### III. 結果與討論

3.1 使用蒙地卡羅模擬銅檔塊被質子照射後產生之放射 性核種

本研究使用 GATE (Geant4 Application for Tomographic Emission)模擬在使用 230 MeV 質子平行射 束照射銅檔塊,可能產生之所有放射性核種如表 1。活 化之放射性核種的產生率與質子射束的能量(Proton energy)、質子射束的能量通量(Proton fluence)、作用 的截面積(Interaction cross section)有關。依照表 1 中 產率推測,在六個月存放後,估計有 Mn-54、Co-56、Co-57、Co-58、Co-60、Zn-65 等六種放射性同位素會有最高 之活度(表 2)。

	Production / 106 proton	Half-life	Photon energy	ı	ayer distribution	n
isotopes	Production / 10° proton	(Day)	(keV)	Layer1	Layer2	Layer3
Cu-62	2.32E+04	6.76E-03	1172	33.82%	30.33%	35.86%
Ni-59	1.82E+04	2.78E+07	pure ß	35.32%	33.28%	31.40%
Co-57	1.26E+04	2.72E+02	122	40.42%	36.30%	23.29%
Cu-61	1.18E+04	1.39E-01	656	32.58%	30.88%	36.54%
Co-58	1.16E+04	7.09E+01	810	39.18%	34.75%	26.08%
Fe-55	8.56E+03	9.97E+02	1345	46.71%	37.36%	15.93%
Co-56	8.18E+03	7.73E+01	846	43.43%	37.51%	19.06%
Cu-64	7.97E+03	5.29E-01	pure ß	35.47%	30.83%	33.70%
Zn-63	7.92E+03	2.67E-02	669.62	32.80%	29.12%	38.07%
Zn-65	5.47E+03	2.44E+02	1115	32.68%	29.03%	38.29%
Mn-53	5.45E+03	1.37E+09	pure ß	53.07%	36.59%	10.34%
Mn-54	4.60E+03	3.12E+02	834	50.23%	37.13%	12.65%
Cu-60	3.72E+03	1.65E-02	1332	33.39%	32.73%	33.88%
Ni-57	2.56E+03	1.48E+00	1377	40.94%	37.69%	21.37%
Mn-52	2.56E+03	5.59E+00	1434	57.46%	35.27%	7.27%
Cr-51	2.50E+03	2.77E+01	935	59.85%	34.39%	5.76%
Zn-62	2.42E+03	3.83E-01	596	31.13%	29.62%	39.24%
Co-60	2.32E+03	1.93E+03	1173 &1332	42.55%	34.83%	22.62%
Co-55	2.11E+03	7.30E-01	931	48.80%	38.73%	12.48%
Ni-63	1.99E+03	3.65E+04	pure β	41.21%	32.72%	26.08%

表1、GATE 模擬質子射束照射銅檔塊後產生之核種

lsotopes	Half-life (day)	A <sub>o</sub> (mBq)	Activity after 6 month (mBq)
'Mn54'	312	1.18	0.79
'Co56'	73	8.49	1.66
'Co57'	271.8	3.17	1.99
'Co58'	70.9	12.96	2.18
'Co60'	1921.2	0.096	0.091
'Zn65'	244	0.90	0.54

表2、照射後存放六個月,可能會有較高活度之核種

由於射程補償器的組成為 85.5%的碳、14.4%的氫, 成分相對單純,依照韓國學者 Se-Jin Ra 指出會有 C-10、 C-11 及 Be-7 等放射性核種。

3.2 高純鍺偵檢器(HPGe)測量系統之建置

高純鍺偵檢器之能量校正使用液態射源,包括 Cd-88、Cs-137、Co-60 標準射源,校正結果如圖 4。

高純鍺偵檢器效率校正目的是要建立放射性核種 活度的定量關係,量測時擺設如圖 4,收集不同能量之 標準射源,其能峰之計數達到 1000,再依照下列公式計 算效率。公式中 A 代表標準射源之活度、I 代表光子強 度、t 則代表計測的時間。

 $\varepsilon = \frac{counts}{A * I * t}$ 



圖 4、高純鍺偵檢器能量校正之擺設狀況與結果

另外也使用蒙地卡羅模擬偵檢器幾何形狀及標準 射源,計算偵檢效率,圖5顯示量測與計算值相近。



圖 5、高純鍺偵檢器效率校正之結果

最小可偵測極限依照下列公式推算為 3 Bq。  $MDA = \frac{LLD}{\varepsilon \cdot i \cdot t} = LLD \cdot \frac{1}{\varepsilon_{intrinsic} \cdot \varepsilon_{geomtry} \cdot 0.9997 \cdot 86400}$  $= 261.89 \cdot \frac{1}{0.05825 \cdot 0.0175 \cdot 0.9997 \cdot 86400}$ 

= 2.974 Bq or 2.5699 x 10<sup>5</sup> decay /day

#### 3.3 射程補償器的測試

選取臨床病人在療程結束後,儲存於地下三樓放射 性廢棄物儲藏室中三、六、九個月以上之射程補償器三 片,以高純鍺偵檢器進行測量八小時後,圖6為扣除背 景之能譜圖,未測得C-10、C-11或Be-7。根據測量結 果推定射程補償器在治療結束後三個月即可進行廢棄 處理作業。



圖 6、射程補償器在測量 8 小時後之能譜圖(已扣除背景)

### 3.4 銅檔塊的測試

由於在治療室的機頭設置中,銅檔塊在多葉式準直 儀下方,大部分的質子都停止於多葉式準直儀中,只有 4 mm 的環形面積會被質子照射(圖3中紅色部分),為 了修正幾何效率,使用蒙地卡羅程式模擬在挖空圓形直 徑(5、10、12、16、20 cm)面積或挖空方形面積(5x5、 10x10、12x12、16x16、20x20 cm<sup>2</sup>)下外加4 mm 情況 下,因幾何產生之效率值變化,表3顯示隨著挖空的面 積變大,效率值下降。利用此結果可確保定性分析之準 確性。

Isotones	Fnergy	Decay	Branching	Half-life	Circle Square									
ratio	ratio	(Day)	5x5	10x10	12x12	16x16	20x20	5x5	10x10	12x12	16x16	20x20		
Mn54	834.8	E.C + β·	0.99976	312.4	1.93%	1.63%	1.50%	1.21%	1.01%	1.80%	1.53%	1.32%	1.07%	0.77%
6056	846.7	E C + 0.	1	77 77	1.77%	1.68%	1.52%	1.25%	0.98%	1.68%	1.49%	1.34%	1.05%	0.78%
0000	1238.2	0.686	0.686	//.2/	1.89%	1.76%	1.56%	1.28%	1.00%	1.76%	1.59%	1.33%	1.11%	0.88%
Co57	122.06	E.C	0.856	271.79	0.69%	0.78%	0.82%	0.68%	0.60%	0.72%	0.75%	0.72%	0.56%	0.47%
Co58	810	E.C + β <sup>.</sup>	0.99	70.86	1.66%	1.53%	1.46%	1.10%	0.89%	1.53%	1.44%	1.23%	0.98%	0.72%
Co60	1173.2	β.	0.9997	1925	1.91%	1.75%	1.54%	1.15%	0.97%	1.71%	1.52%	1.27%	1.05%	0.82%
Zn65	1115.5	E.C + β·	0.506	244.26	1.70%	1.49%	1.36%	1.10%	0.93%	1.54%	1.44%	1.25%	1.03%	0.82%

表3、使用蒙地卡羅程式模擬之幾何效率

選取臨床病人在療程結束後,儲存於地下三樓放射 性廢棄物儲藏室中之銅檔塊六片,這六片之存放時間從 4個月到6年不等,以高純緒偵檢器進行測量八小時後, 結果只有在照射後4個月的銅檔塊中測得 Co-57、Mn-54、Zn-65,圖7為扣除背景後之能譜,推算 Co-57、Mn-54、Zn-65之活度分別為9.41、4.19、28.15 貝克。依照 一定活度或比活度以下放射性廢棄物之比活度限值(表 4),保守放置三年後,應可小於比活度限值。



Radio- nuclide	half life	energy	intensity	count	error	efficiecny	activity (Bq)	error
Co-57	271.4d	122.061	85.6	4096	6	4 0.01753	9.4	0.00
Mn-54	312.2d	834.848	99.976	395	5 40	0.00325	4.19	0.00
Zn-65	243.9d	1115.539	50.04	954	4 11	6 0.002336	28.15	0.03

圖 7、銅檔塊在測量 8 小時後之能譜圖 (已扣除背 景),並估算活度值

限值核種	每年外釋 廢棄物活 度限值	每年外釋超 過一公噸之 廢棄物比活 度限值	每年外釋一 公噸以下之 廢棄物比活 度限值		
	(貝克)	(貝克/克)	(貝克/克)		
Mn-54	1.E+6	1.E-1	1.E+1		
Co-56	1.E+5	1.E-1	1.E+1		
Co-57	1.E+6	1.E+0	1.E+2		
Co-58	1.E+6	1.E+0	1.E+1		
Zn-65	1.E+6	1.E-1	1.E+1		

表4、一定活度或比活度以下放射性廢棄物之比活度限 值

# IV. 結論

射程補償器經由高能質子照射後高能質子射束在 經過射程補償器後會產生放射性同位素 C-11【半衰期為 20.4 分鐘】、C-10【半衰期為 19.2 秒】、Be-7【半衰期 為 53.2 天】,建議射程補償器於病人療程結束後,存放 於放射性廢棄物儲藏室中三至六個月,在測量射程補償 器廢棄物表面劑量率達背景劑量率後進行回收。

銅檔塊目前的結果顯示,有機會在放置三年後,進 行抽測,在測試完成後,依照一定活度或比活度以下放 射性廢棄物之比活度限值進行回收。

- Jermann M. "Particle Therapy Statistics in 2014.", International Journal of Particle Therapy. 2, 1 (Jun. 2015), 50 - 54.
- [2] Paganetti H. 2016. Proton Therapy Physics. CRC Press.
- [3] Sisterson J.M. "Selected radiation safety issues at proton therapy facilities. 12th Biennial Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division.
- [4] Ra S.J., Jung M.H., Kil J.K., and Kim K.R., "Radioactivation Effect on a Polymer by Proton Beam Irradiation.", Journal of the Korean Physical Society.

(2011).

- [5] Kettern K., Coenen H.H. and Qaim S.M. "Quantification of radiation dose from short-lived positron emitters formed in human tissue under proton therapy conditions.", Radiation Physics and Chemistry. (2009).
- [6] Tárkányi F., Ditrói F., Csikai J., Takács S., Uddin M.S., Hagiwara M., Baba M., Shubin Y.N. and Dityuk A.I. "Activation cross-sections of long-lived products of proton-induced nuclear reactions on zinc.", Applied Radiation and Isotopes. 62, 1 (Jan. 2005), 73 – 81.
- [7] Chen H., Matysiak W., Flampouri S., Slopsema R. and Li Z. "Dosimetric evaluation of hybrid brass/stainless-steel apertures for proton therapy.", Physics in medicine and biology. 59, 17 (Aug. 2014), 5043 - 5060.
- [8] Tsoulfanidis N. and Landsberger S. 2015. Measurement and Detection of Radiation, Fourth Edition. CRC Press.
- [9] Tereza Hanušová, Kamila Johnová, Matěj Navrátil, Jiří Valenta and Lutz Müller. "Activation of QA devices and phantom materials under clinical scanning proton beams—a gamma spectrometry study.", Physics in Medicine & Biology. 63, 115014 (2018).
- [10] Claus Maximilian Bäcker, Christian Bäumer, Marcel Gerhardt, Sedef Ibisi, Kevin Kröninger, Christian Nitsch, Jens Weingarten, Beate Timmermann. "Evaluation of the activation of brass apertures in proton therapy using gamma-ray spectrometry and Monte Carlo simulations.", Journal of Radiological Protection. 40 (2020).

# 輻射災害緊急應變期終止條件之評估研究

# Evaluation of the termination conditions of emergency response for nuclear accidents

計畫編號:109-2623-E-182-001-NU 計畫主持人:董傳中 e-mail:cjtung@mail.cgu.edu.tw 計畫共同主持人:趙自強 執行單位:長庚大學放射醫學研究院

# 摘要

核子事故緊急應變階段之民眾劑量屬於緊急性曝 露,復原階段之民眾劑量屬於既存性曝露。從緊急性曝 露轉換為既存性曝露,需要一段過渡期,過渡期結束後 緊急應變階段隨即終止。

本計畫研究日本福島核子事故如何從緊急性曝露 轉換為既存性曝露,如何規範緊急應變之終止條件。研 究內容包括:(1)國際上對於緊急應變階段之終止條件; (2)過渡期工作之管理策略與項目。

關鍵詞:福島、核災、緊急應變終止、過渡期

### Abstract

Emergency exposure arises from the nuclear accident which requires prompt actions to avoid adverse consequences. Existing exposure arises from the residual contamination which derives from a nuclear accident. Interim period is needed for the transition from an emergency exposure to an existing exposure. At the end of this period, emergency exposure can be declared to be terminated.

The transition from an emergency exposure to an existing exposure requires preparatory actions for remediation and recovery of a nuclear emergency. The objectives of this project are to study (1) the remediation and recovery plans and (2) the conditions for the termination of an emergency exposure.

**Keywords:** Fukushima, nuclear accident, emergence response termination, transition phase.

### I. 前言

核子事故之應變分兩階段實施一緊急階段與復原 階段[圖一],緊急階段之工作為採取緊急應變行動,復原 階段之任務為採行環境復原行動。國際放射防護委員會 (ICRP)劃分人員曝露情境(exposure situation)為[圖二]: 計畫性曝露(planned exposure situation)、緊急性曝露 (emergency exposure situation)、緊急性曝露 (emergency exposure situation)、緊急性曝露 (emergency exposure situation)、既存性曝露(existing exposure situation)。核子事故緊急階段之人員曝露屬於 緊急性曝露,緊急階段結束後之復原階段的人員曝露屬 於既存性曝露(民眾)與計畫性曝露(工作人員)。從緊急性 曝露轉換到既存性曝露或計畫性曝露,需要一段規劃與 準備的時間,稱之為過渡期(transition phase)[圖三]。過渡 期內除了要規劃復原行動、達成既存性曝露與計畫性曝 露之劑量指引外,並且要實施補救措施(remedial action)、 以防止環境污染擴散或擴大;過渡期結束後緊急階段即 告終止。

本計畫之目的有二,即研究:(1)核子事故緊急階段

之終止條件,以及解除緊急行動之劑量指引與作業基準; (2)過渡期內之準備工作與規劃項目。研究方法則以2011 年3月11日發生之福島核子事故為例,探討如何從緊 急性曝露轉換到既存性曝露或計畫性曝露,並且研析國 際上如何規範核子事故緊急應變之終止條件與管理辦 法,以便做為規劃我國核子事故應變整備之參考。



圖一、核子事故之應變時序



圖二、緊急性曝露、計畫性曝露、既存性曝露之關係

# Ⅱ. 主要內容

緊急階段何時終止?復原階段何時開始?這要取 決於[圖三]:(1)緊急應變行動是否完善?疏散民眾是否 可以返鄉?(2)復原計畫是否擬定策略?(3)政府分工與 民眾參與是否規劃妥當?(4)經費、人力、物力是否安排 就緒?

緊急應變行動包括:疏散、掩蔽、服用碘片、食物 管制、人員醫護、暫時移居等,對應之作業基準分別為: OIL1(掩蔽、疏散、碘片)、OIL2(移居)、OIL3(食物初檢)、 OIL4(人員除污)、OIL7(食物複檢)、OIL8(甲狀腺醫檢), 其中OIL1、OIL3、OIL4、OIL8屬於早期行動,在過渡 期早已結束,只剩下OIL2與OIL7之中、長期行動,需 要在過渡期考慮解除,一旦解除、民眾即可返鄉。基於 此一需求,國際原子能總署(IAEA)依據國際放射防護委 員會建議之劑量指引[圖四],利用劑量評估模式推導出 之作業基準為:大於 OIL2 時解除疏散改為移居,小於 OIL2 時解除移居改為限制住居,小於 OILT 時解除移居 改為既存性曝露,小於 OIL7 時解除國內食品管制,小 於 OILC 時解除國內商品管制,小於 OIL7/10 時解除國 際貿易食品管制,小於 OILC/10 時解除國際貿易商品管 制。



圖三、核子事故過渡期之工作項目



圖四、解除緊急應變行動之劑量指引 與作業基準

國際原子能總署公布之作業基準包括:泛用作業基 準(generic operational level)及特定作業基準(specific operational level)。其中泛用作業基準係假設沸水式核反 應器在嚴重核子事故條件下[圖五],利用污染擴散模式 計算求得;而特定作業基準則針對沸水式核反應器的 19 種預設核子事故條件[圖六],計算所得之結果。國際原子 能總署求得之泛用作業基準為:OIL2=100 mSv/h(10 天 內)或 25 mSv/h(10 天後),OIL7=1000 Bq/kg(<sup>131</sup>I)或 200 Bq/kg(<sup>137</sup>Cs),而特定作業基準之結果則示於圖七、八、 九。由這些圖的比較可知,多數情況下泛用作業基準比 特定作業基準嚴格,因此在無法確認核子事故之條件下, 可採用較為保守之泛用作業基準。此外,除了提供 19 種 核子事故之特定作業基準外,國際原子能總署另外還提 供計算特定作業基準之軟體程式[圖十],以方便使用者 自行計算適用其各自條件之特定作業基準。

假設條件:(BWR之嚴重核子事故)
反應器功率=3000 MW (th)
外釋分率=10% 揮發性分裂產物
外释時間=10小時
氣象=D 類
風向=10小時內改變90%
住屋掩蔽因子=0.4 (地面照射)
住屋掩蔽因子=0.6 (空浮照射)
住屋掩蔽因子=0.5(吸入)
避難所掩蔽因子=0.02 (地面照射)
避難所掩蔽因子=0.3 (空浮照射)
避難所掩蔽因子=0.2(吸入)
碘剂=0.1(吸入之甲狀腺及胎兒劑量)

圖五、適用泛用作業基準之核子事故

#### IAEA設定19種核子事故的外釋條件(1-19),提供 核反應器停機後不同時間(t),計算求得之OIL。 19種條件之前三種為:

- 1. 使用標準燃料的PWR或BWR,在燃料破損之
- 間際釋放階段,估計之放射性活度釋放分率。 2.使用標準燃料的BWR,在燃料破損之壓力糟 熔毀早期階段,從爐心溢出之放射性活度釋
- 放分率。 3. 使用標準燃料的BWR,在燃料破損之壓力糟
- 熔毀後期階段,從爐心釋放之所有放射性活 度的總和。

### 圖六、IAEA 針對沸水式核反應器的 19 種預設核子事故條件



圖七、泛用作業基準(紅色)與特定作業 基準(他色)之 OIL2比較



圖八、泛用作業基準(紅色)與特定作業 基準(他色)之 OIL7(<sup>131</sup>I)比較



圖九、泛用作業基準(紅色)與特定作業 基準(他色)之 OIL7(<sup>137</sup>Cs)比較



圖十、國際原子能總署提供之特定作業 基準計算用軟體

核子事故從緊急階段轉換到復原階段,須滿足以下 條件 [圖十一]:

- ▶ 分析:核子事故緊急應變的情勢與發展
- 評估:緊急性曝露轉換為既存曝露(民眾)與計畫曝露 (工作人員)的期程
- 清通:核子事故過渡期內之民眾溝通事項
- 探討:復原行動產生之放射性廢棄物的安全與有效管理

另外,緊急階段結束復原階段開始前,過渡期所需之規 劃工作包括:

- · 分析:緊急應變結束後之復原計畫
- · 評估:復原階段之既存性曝露與計畫性曝露的目標
- · 溝通:與民眾溝通緊急應變結束後之核子設施處置

• 探討:放射性廢棄物的安全與有效管理策略

待所有這些過渡期之工作完成後,即可宣布緊急階 段結束,開始復原階段工作。這些工作因涉及龐大之資 源與人力安排,專業人員之協助與工作人員之訓練,以 及民眾之溝通與安撫,更重要的是各級政府間之協調, 預計時程與規劃,以及欲達成之階段目標等,這些都需 要時間與耐心,通常需要數個月到不超過一年的時間作 為過渡期。

福島核子事故發生在2011年3月11日,強烈地震 引發之海嘯不但引起福島一廠1、2、3號機爐心熔毀, 且因氫氣洩漏導致1、3、4號機反應器廠房頂部炸毀, 以致造成大量放射性物質外洩。事故發生前後,日本政 府採取之緊急行動包括:20公里範圍內之預防性疏散及 緊急疏散,環測熱區之緊急疏散,20-30公里範圍內民眾 之室內掩蔽,以及食物管制、人員醫務監護等措施。其 後,為了瞭解環境的污染程度與範圍,日本政府實施了 大規模的空中偵測、廣泛的地面偵測、以及細部的人工 偵測,然後將這些偵測結果繪製成醒目圖表,提供各界 作為後續除污與復短作業之依據。圖十一是福島專故之; 圖十二是環境偵測之劑量率分布示意圖。

為了解除緊急應變措施,以及執行復原善後工作, 日本政府劃分了責任區 [圖十三]:(1)中央政府負責特別 除污區(special decontamination area, SDA),細分為 SDA1 綠區(1-20 mSv)、SDA2 黃區(20-50 mSv)、SDA3 紅區(>50 mSv),作為長期無法返鄉、短期難以返鄉、可以很快返 鄉之依據,(2)地方政府負責加強污染監測區(intensive contamination survey area, ICSA),對應於疏散地區以外、 年劑量大於 1 mSv/y 之地區。責任區劃分後,日本政府 根據國際規範,進一步劃分了除污復原之劑量率短期(上限)與長期(下限)目標值,以及達成目標值之分階段劑量 指引 [圖十四]。



圖十一、福島核子事故之環境偵測工具與方法



圖十二、福島核子事故環境偵測之劑量率製圖



圖十三、福島核子事故之特別除污區(SDA)及 加強污染監測區(ICSA)。



圖十四、福島核子事故之除污與復原的劑量率 短期(上限)與長期(下限)目標值及劑量指引。



圖十五、福島核子事故之居民返鄉作業基準 及環境除污作業基準。

核子事故緊急應變之劑量指引多以有效劑量呈現, 然而有效劑量無法直接度量,必須依靠劑量評估求得。 劑量評估分為體外曝露及體內曝露,前者可由環境監測 度量之空氣劑量率(uSv/h)乘以時間之佔用因子 (occupancy factor)及建物之衰減因子(reduction factor)求 得,後者則由環境監測度量之污染濃度(Bq/m<sup>3</sup>或 Bq/kg) 配合攝入(吸入及嚥入)因子(intake factor)求得。利用體外 曝露或體內曝露之評估模式,推得之空氣劑量率或污染 濃度之作業基準(operational level),適用於緊急應變之環 境偵測。以福島核子事故為例,因銫134 與銫137 引起 之體外曝露比重最大,故作業基準常以離地一公尺高度 之空氣劑量率(µSv/h)表示。針對一般居民而言 [圖十五 (左)],假設每天居家時間為16小時、室外活動時間為8 小時、建物之屏蔽衰減因子為 0.4,則對應於年劑量 20 mSv 之劑量率作業基準為 3.8 μSv/h,而對應於年劑量1 mSv 之劑量率作業基準為 0.23 µSv/h (含 0.04 µSv/h 之天 然背景輻射劑量率)。對於學校學生而言 [圖十五(右)], 假設每天在教室的上課時間為7小時、室外活動的時間 為2小時、教室之建物屏蔽衰減因子為0.1,則對應於年 劑量1mSv之劑量率作業基準為1µSv/h。

此外,要解除緊急應變,轉為復原階段,必須先完 成與民眾之溝通,以及規劃放射性廢棄物之有效管理。 圖十六(左)是日本政府舉辦之各種形式的民眾說明會與 溝通會,圖十六(右)是日本政府規劃之放射性廢棄物之 階段性劑量指引目標值。



圖十六、(左)福島核子事故舉辦之各種溝通會。 (右)福島核子事故訂定之廢棄物劑量指引值。

### Ⅲ. 結論

我國目前仍有核能電廠運轉中,同時燃料池中仍然 存放著用過核燃料,因此無法完全排除發生核子事故的 潛在風險。日本福島核子事故發生後,國際間全面展開 應變計畫之檢討,並且研擬更有效的民眾防護措施。本 計畫之研究,將參照國際最新指引,提出緊急應變階段 之終止條件與相關管理建議,以提供主管機關參考使用。

# 參考文獻

- [1] IAEA GSG-11, Arrangements for the Termination of a Nuclear or Radiological Emergency, International Atomic Energy Agency 2018.
- [2] The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 3/5: Emergency Preparedness and Response, International Atomic Energy Agency 2015.
- [3] Reassessment of Fukushima nuclear accident and outline of nuclear safety reform plan (interim report).

Nuclear Reform Special Task Force, December 14, 2012.

- [4] Michiaki Kai, Experience and current issues with recovery management from the Fukushima accident. ICRP Symposium 2013.
- [5] The radiological accident in Goiania. International Atomic Energy Agency 1988.
- [6] Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group, IAEA 2006.
- [7] Itsumasa Urabe, Takatoshi Hattori, Takeshi Iimoto & Sumi Yokoyama, Radiation protection lessons learned from the TEPCO Fukushima No.1 NPS accident. Journal of Nuclear Science and Technology 2013.
- [8] Act on special measures concerning the handling of environment pollution by radioactive materials discharged by the NPS accident associated with the Tohoku district - off the pacific ocean earthquake that occurred on March 11, 2011.
- [9] Guidelines for remediation strategies to reduce the radiological consequences of environmental contamination, IAEA Technical Reports Series No. 475, 2012.
- [10] Remediation process for areas affected by past activities and accidents, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-3.1, IAEA 2007.
- [11] Daisuke Sugiyama, Tomonari Fujita and Takatoshi Hattori, Fundamental consideration on reference levels in radiological protection for implementation of practical off-site remediation, International Experts' Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, 29 January 2013.
- [12] Application of the Commission' s recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency, ICRP Publication 111, 2008.
- [13] Daisuke Sugiyama, Takatoshi Hattori, Key issues on radiological protection from radioactive waste management in existing exposure situation, IRPA 13, Glasgow, 17 May 2012.
- [14] Donald A. Cool, The approach to existing exposure situations, review of the ICRP system, 2nd International Symposium on the System of Radiological Protection, October 23, 2013.
- [15] Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. National Report of Japan, October, 2011.
- [16] The Fukushima Daiichi accident post-accident recovery, Technical Volume 5/5, International Atomic Energy Agency 2015.
- [17] Annex I of Technical Volume 5: Evolution of reference levels for remediation and development of a framework for post-accident recovery, International Atomic Energy Agency 2015.
- [18] Final Report, The follow-up IAEA international mission on remediation of large contaminated areas off-site, the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan. 14 21, October 2013. International Atomic Energy Agency 2014.

# 質子治療機之輻射安全與品質保證作業研究 Radiation Safety and Quality Assurance of Proton Machine Policy

計畫編號: MOST 109-2623-E-992-006-NU 計畫主持人: 李財福 e-mail: tflee@nkust.edu.tw 計畫共同主持人: 謝楊威 計畫參與人員: 梁顥曦、曾譯寬、蘇子翔、 謝融霆、陳家瑜、邱昱豪 執行單位: 國立高雄科技大學電子工程系

### 摘要

本研究收集國內外指標性質子治療機器品質保證 資料,進行質子治療機之輻射安全與品質保證作業研究。 合作單位為高雄長庚質子治療中心,依照筆尖射束掃描 (Proton Pencil Beam scanning, PPBS)技術規劃出每日、每 週、每月及每年的品質保證作業項目,其項目區分為劑 量性、機械性、影像性與輻射安全性。本計畫依照量測 項目資料進行數據化分析和圖像化報表建立,制訂質子 治療機器品質保證程序書,提供我國質子治療中心品質 保證項目之建議。

關鍵詞:質子、筆尖型射束掃描、品質保證

### Abstract

This research refers to the quality assurance data of the domestic and foreign proton treatment centers, and focuses on the analysis of radiation safety and quality assurance operations for proton therapy. We planed the items of daily, weekly, monthly and annual quality assurance operations based on the technology of the proton pencil beam scanning (PPBS) used by the Kaohsiung Chang Gung Proton Therapy Center. Those are divided into dosimetric, mechanical and safety verification system. Based-on the characteristic of data, the data analysis and graphical report output were performed systematicly. We completed the quality assurance procedures for the proton therapy machine, which can provide suggestions on the quality assurance programs for domestic proton centers.

Keywords: Proton, pencil beam scanning, quality assurance.

# I. 前言

質子治療品質保證作業目標是在讓病患接受放射 治療的過程中使其整體的輻射劑量不確定性小於±5%, 且其整體的空間位置不確定性須小於±5毫米[1]。透過醫 療曝露品質保證(Quality Assurance)能夠使醫療輻射擁 有優質的品管作業,因此醫療專業品人員應例行性的進 行品質保證校驗作業,確保輻射治療設備的品質維持在 水準之上,提升醫療輻射曝露品質,讓病患治療的過程 能得到合理抑低的醫療曝露。

## Ⅱ. 主要內容

國際間目前沒有統一規範的質子治療設備品質保 證項目與作業程序,本研究參考國際輻射單位與度量委 員會第78號報告及美國醫學物理學會第179號與224 號報告[2-4]。本研究以書面審查及現場訪查的方式進行 品保校驗工作,內容有治療儀器設備特性、劑量校驗方 法與施行校驗頻次、誤差容許值等數據結果[5-7],合作 單位高雄長庚質子治療中心採用日本住友重工 (Sumitomo Heavy Industries, Inc.)生產的質子治療設備進 行 PPBS 作為臨床治療技術[8]。本研究執行品保劑量量 測設備為平行板游離腔 (PTW Advanced Markus Chamber)及 CROSS II (Liverage Biomedical Inc, Taiwan), 設備如圖 1。



(a)

(b)

圖 1 機器品質保證在劑量性量測作業採用的設備 (a)平行板游離腔驗證絕對劑量輸出穩定度;(b) CROSS II 驗證筆尖式掃描射束特性

此外,建立數據圖像化分析功能,將不同項目量測 的結果進行數據化與圖像化的建立,即時提供各項目的 量測結果回饋給品保人員進行分析與管理。

### III. 結果與討論

高雄長庚醫院質子治療中心參照 AAPM TG-224 號 報告制定機器品質保證標準規範,將品質保證系統分為 劑量性、機械性、影像性及輻射安全連鎖性等,校驗頻 次可分為每日、每週、每月及每年等不同項次;校驗容 許誤差值分為穩定性、再現性與功能性,來評估劑量準 確、機械精準、影像品質與輻射安全連鎖功能等四部份, 圖 2 所示。



劑量性評估項目是用來確認放射治療劑量的劑量 系統之運作是否為穩定輸出狀態,主要針對質子射束物 理特性布拉格峰(Bragg peak)進行校驗;評估劑量穩定性 和再現性的校驗項目包含劑量輸出、百分深度劑量、焦 斑射束大小、焦斑位置偏移與射束掃描速度,量測分析 結果如圖 3。影像性評估項目是用來確認治療設備的成 像系統之影像品質;機械性評估項目為確認治療設備在 馬達驅動機械之運動位置準確性;輻射安全連鎖性評估 項目為確認輻射性及機械性在緊急停止的功能,提供治 療環境場所相關人員的安全性。











(e)

圖 3 劑量性量測 (a)射束劑量輸出穩定度;(b)射束百 分深度劑量穩定度;(c) X 軸方向之射束大小穩定度; (d) 焦斑位置偏移大小;(e)射束掃描速度控制穩定度。

數據圖像化界面能即時提供量測資訊,讓專業品保 人員進行管理及分析,並呈現感興趣時段的品保結果, 系統能夠判斷每日評估結果是否超出之誤差容許值,若 超出合理範圍便自動顯示紅色,顯示此為異常數值,讓 品保人員能立即掌握機器的品質校驗概況,如圖4。





# IV. 結論

本計畫依照量測項目資料進行數據化分析和圖像 化報表建立,制訂質子治療機器品質保證程序之建議書, 提供我國質子治療中心品質保證項目之建議。

- [1] R. J. Shalek., et al., "Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or gamma rays in radiotherapy procedures," MedPh, 1977. vol. 4, p. 461.
- [2] Z. Li., et al., "Prescribing, Recording, and Reporting Proton-Beam Therapy," International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2009. vol. 73, p. 1602.
- [3] J. P. Bissonnette, P. A. Balter, L. Dong, et al., "Quality assurance for image-guided radiation therapy utilizing CT-based technologies: a report of the AAPM TG-179," Medical physics, 2012. vol. 39, pp. 1946-1963.
- [4] Arjomandy, B., et al., AAPM task group 224: Comprehensive proton therapy machine quality assurance. 2019. 46(8): p. e678-e705.
- [5] Ding, X., et al., A novel daily QA system for proton therapy. Journal of applied clinical medical physics, 2013. 14(2): p. 4058-4064.
- [6] Lambert, J., et al., Daily QA in proton therapy using a single commercially available detector. Journal of applied clinical medical physics, 2014. 15(6): p. 5005-5015.
- [7] Rana, S., et al., Development and long-term stability of a comprehensive daily QA program for a modern pencil beam scanning (PBS) proton therapy delivery system. Journal of applied clinical medical physics, 2019. 20(4): p. 29-44.
- [8] Kohno, R., et al., Development of Continuous Line Scanning System Prototype for Proton Beam Therapy. International Journal of Particle Therapy, 2017. 3(4): p. 429-438
# 政策推動與風險溝通(I)

# 應用於低軌道衛星之抗輻射類比/數位混合晶片電子設計自動化開發

A radiation hardening analog-to-digital mixed-signal circuit and electronic design automation development for low orbit satellite

# applications

計畫編號:109-NU-E-002-001-NU 計畫主持人:陳信樹博士 e-mail:hschen@ntu.edu.tw 計畫共同主持人:蔡坤諭博士 計畫參與人員:陳昱霖、古正宇、蔡佳勳、錢盛偉 執行單位:國立台灣大學電機系電子工程研究所

## 摘要

本計畫透過重新設計混合訊號電路佈局的 方式來達到電路抗輻射。建立抗輻射電晶體模型 以及使用佈局繞線電子設計自動化程式的開發, 來加速設計流程。使用的製程為商用 CMOS 0.18µm 製程。在不同操作電壓下,透過單顆電晶 體不同佈局的方式,量測電晶體電流與電壓的曲 線圖。透過鈷 60 照射後了解總電離劑量效應對 商用 CMOS 製程電晶體的影響。量測結果明顯 地看出漏電流與累積總劑量的關係 [1]。在 NMOS 的部分,累積總劑量越多,漏電流越大, PMOS 的部分,累積總劑量越多,漏電流越大的 趨勢。

**關鍵詞:**抗輻射、混合訊號電路佈局、總電離劑 量、電子設計自動化

#### Abstract

This project implements radiation-hardened circuits by redesigning the mixed-signal circuit layout. It accelerates designing flow by building radiation-hardened transistor model and through placement and routing electronic design automation (EDA) tool. It is based on a commercial CMOS 0.18µm process. Using different layouts of single transistors, the current vs. voltage curves of the transistors are measured under various operating voltages. The impact of the total ionized dose (TID) effect on the transistors in the commercial CMOS process after cobalt 60 (Co-60) irradiation is studied. Measured results show that the relationship between the leakage current and the cumulative total dose [1]. For NMOS devices, the more accumulated total dose is, the greater of leakage current exists. For PMOS devices, the more accumulated total dose is, the smaller of leakage occurs.

**Keywords:** Radiation hardening, mixed-signal layout, total ionized dose, electronic design automation.

# I. 前言

在太空中運作的衛星,因為失去大氣層的保 護會受到太空輻射的影響,衛星裡的電子零件和 材料會和輻射交互作用,產生總劑量效應(Total Dose Effect, TDE)與單事件效應(Single Event Effect, SEE)[2]。

總劑量效應(TDE)有位移損傷 (Displacement Damage, DD)和總電離劑量(Total Ionized Dose, TID),位移損傷是因為輻射造成晶 格缺陷,使電晶特性改變[3][4],而總電離劑量 是當電晶體經過輻射照射後,開極氧化層捕獲電 荷,導致開啟電晶體的臨界電壓改變[5],當電荷 累積在淺溝槽絕緣處(Shallow Trench Isolation, STI)夠多時,所累積的電荷形成兩個平行寄生漏 電路徑,就如同平行寄生的電晶體,使電晶體。 汲極端(drain)到源極端(source)漏電流增加[6]。

在抗輻射電晶體模型建立的部分,透過自 行開發的最佳化軟體工具,曲線擬合 SPICE 模 型的電性,建立出 Technology Computer Aided Design (TCAD)電晶體模型。使用正規化方均根 差(Normalized Mean Square Error, NMSE),做最 佳化使 TCAD 電晶體電性能夠符合 SPICE 模型 的電性。在佈局繞線程式開發的部分,透過自行 開發電子設計自動化軟體工具 來進行(Place and Routing, P&R)的自動化方式產生佈局(layout)。

#### Ⅱ.主要內容

封閉式佈局電晶體(Enclosed Layout Transistors, ELT)已長期被用來抵抗總電離劑量 (TID)的影響,其結構可以減少源極端到汲極端 的漏電流的洩漏路徑[6]。封閉幾何結構的電晶體 和保護環(guard ring)可以消除引起的漏電流,封 閉幾何結構幾本型態有兩種,第一種稱作環型 (annular)又稱凹形(re-entrant)或無邊形(edgeless), 第二種封閉幾何結構可以稱環形源(ringedsource),如圖一(b)所示[7]。

在實驗設計方面,選擇不同型態封閉式佈

局電晶體作為實驗組,傳統電晶體如圖一(a)呈現, 作為實驗對照組,將不同型態的電晶體,如圖一 (b)(c),集成到同一晶片上,作為固定的平台, 在照射輻射前,先量測電晶體電性,主要觀察電 晶體汲極端電流 Id,固定汲極與源極間端電壓, 調整閘極(gate)端電壓。

本計畫提出之測試抗輻射佈局,如圖一(c), 想法是仿照環形源(ringed-source)的想法,即圖一 (b)的架構,將電晶體的汲極端或是源極端,以多 晶砂(polysilicon)環繞保護,並且符合設計規範驗 證(Design Rule Check, DRC)。選擇環形源(ringedsource)是因為可以較容易符合設計規範驗證 (DRC),至於環型(annular)的結構在設計規範驗 證(DRC)上限制較環形源(ringed-source)多。在結 構上環形源(ringed-source)與傳統型即圖一(a), 較為接近更容易做比較,因此選擇環形源 (ringed-source)的架構即圖一(b)來和傳統電晶體 及本計畫嘗試的仿環形源電晶體架構即圖一(c) 作為本次實驗的出發點。

在量測基本電晶體電性之後,將晶片去照 射輻射,步驟如圖二為鈷 60 伽瑪射線照射流程 圖。選用鈷 60 伽瑪射線作為輻射源,選擇某一 劑量率進行照射。將照射後的待測物取出,量測 照射後電晶體電性變化的數據並記錄。重複上述 步驟改變不同總劑量(不同照射時間)照射待測物, 量測並記錄之,最後探討不同電晶體佈局對抗輻 射能力之影響。

在電晶體模型建立的部分,如圖三為本計 畫電晶體模型建立的流程圖。在一開始,先建立 一個基本的 TCAD 電晶體模型,並做參數化。最 佳化的過程中,調整電晶體參數,並依照參數建 立模型、執行 TCAD 元件模擬。模擬完後,使用 NMSE 公式計算 TCAD 及 SPICE 模型的電性誤 差,若誤差過大,將重新調整參數,直到電性誤 差小於設計的容忍值,最為最佳化之結果。

在佈局繞線開發,一開始會先設定電晶體 放置(placement)的參數與規範(design rule),並進 行最佳化。placement 完成後,將進行繞線(routing) 的參數設定及最佳化,若無法進行 routing,將會 重新調整 routing 的順序或參數,直到所有的線 段都可以連接完,在 routing 最佳化完後將會產 生出一組電路布局(layout)。



圖一 (a)傳統電晶體 (b)環形源電晶體 (c)仿環形源電晶體

圖四(a)為使用 TCAD 軟體自行開發出的 TCAD 電晶體模型,其中電晶體開級長(gate length)為 0.18μm,電晶體開級寬(gate width)為 5μm,電源電壓 VDD 為 1.8V。圖四(b)呈現最佳 化後電晶體電性的結果,NMSE 的誤差約在 1%。 圖四(b)上為電晶體 on state 的電性結果,紅線為 商用 CMOS 0.18μm 製程模擬結果,藍線則是使 用 TCAD 軟體最佳化後結果,圖四(b)下則呈現 電晶體 off state 的電性結果。

以 NAND 閘作為例子,圖五 (a)為 NAND 電路圖和電晶體尺寸,圖五(b)呈現佈局繞線自動化的結果。淺色部分是初始擺放位置,經過電子設計自動化程式演算法計算及優化,深色部分則是最佳化後結果。

圖六則是 placement 後 MOS 與 MOS 間的 routing 自動化結果,將先前 placement 最佳化後 結果進行 routing,分別呈現使用 poly layer 和 metal 1 layer 繞線之結果。



圖二 鈷 60 伽瑪射線照射流程圖



圖三 電晶體模型建立流程圖



圖四 (a)自行開發之電晶體模型 (b)電晶體模型建立最佳化結果



圖五 (a)NAND 閘電路圖和電晶體尺寸 (b)NAND 閘 placement 自動化



圖六 NAND 閘 routing 自動化

# III. 結果與討論

圖七為本計畫下線的晶片圖,電晶體尺寸 (W/L)分別有 5μm/0.18μm和 5μm/2μm,虛線上 半部為 NMOS,下半部為 PMOS,共 10 顆電晶 體,分別將不同的佈局之電晶體放置在晶片中。

圖八則呈現電晶體鈷 60 伽瑪射線前量測 電性圖(I-V curve)結果,固定汲極端及源極端之 電壓,改變閘極端的電壓,量測汲極端的電流, 將量測結果取對數和模擬結果做比較,誤差在 10%以內。初步模擬及量測各個電晶體,汲極電 流(drain current)對 閘極電壓(gate voltage)特性, 模擬結果及量測結果相符。

經過鈷 60 伽瑪射線照射後,第一次實驗量 測發現電晶體有很明顯的漏電流產生,在不同佈 局的電晶體上現象相同,與預期實驗結果有落差, 於是經過檢討與改進進行第二次實驗。第二次實 驗與第一次實驗流程相同,選定某一劑量率進行 照射,不同之處在累積總劑量,第二次實驗以 lkrad、5krad、10krad、20krad 作為觀察點,在 NMOS 的部分累積總劑量越多,漏電流的比例也 逐步成長,實驗結果如圖十所示,在 PMOS 的部 分,則因為臨限電壓的漂移與電流是成反向,因 此累積總劑量越多,漏電流是呈現下降趨勢,實 驗結果如圖十一呈現。表一為本次實驗相關參數。





圖八 鈷 60 伽瑪射線照射前電晶體電性圖



(b)

圖十 鈷 60 伽瑪射線後 NMOS 電性圖與 不同總劑量關係 (a)W/L = 5µm /2µm and (b) W/L = 5µm /0.18µm





(b)

圖十一鈷 60 伽瑪射線後 PMOS 電性圖與 不同總劑量關係(a)W/L=5μm/2μm) and (b) W/L=5μm/0.18μm

表一	•	寶	驗相	鬬	參	數	及	晶	片	規	格	表
----	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---

	Spec.
Technology	0.18µm
Total chip area (mm <sup>2</sup> )	1.2mm*1.2 mm
Supply voltage (V)	1.8
Input voltage range(V)	0~1.8
Variation	<10%
Total dose(rad)	1k • 5k • 10k • 20k

# IV. 結論

本計畫重新設計混合訊號電路佈局的方式 來達到電路抗輻射。並執行抗輻射電晶體模型以 及佈局繞線電子設計自動化程式的開發,來建立 加速抗輻射電路設計流程。使用的製程為商用 CMOS 0.18µm 製程。從實驗結果來看,明顯的 看出漏電流與累積總劑量的關係,在 NMOS 的 部分,累積總劑量越多,漏電流越大的趨勢, PMOS 的部分,累積總劑量越多,漏電流越小的 趨勢。

# 参考文獻

- He Baoping, Wang Zujun, Sheng Jiangkun, and Huang Shaoyan, "Total Ionizing Dose Radiation Effects On NMOS Parasitic Transistors In Advanced Bulk CMOS Technology Devices," Journal of Semiconductors, vol. 37, no. 12, pp. 124003-1 - 124003-6, Dec. 2016.
- [2] 黃楓台及林俊良"太空輻射對衛星任務影響及因應之道"台灣原能會核能所能源資訊平台 http://eip.iner.gov.tw/msn.aspx?datatype=Y W5hbHlzaXM%3D&id=MTk3# ftn2
- [3] NASA Analog Missions https://www.nasa.gov/analogs/nsrl/whyspace-radiation-matters
- [4] Alter Technology https://wpoaltertechnology.com/displacement-damagetesting/
- [5] H. J. Barnaby, "Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies," IEEE Trans. Nucl. Sci, vol. 53, no. 6, Dec. 2006.
- [6] N. Nowlin, J. Bailey, B. Turfler, and D. Alexander, "A Total-Dose Hardening-By-Design Approach For High-Speed Mixed-Signal Cmos Integrated Circuits," International Journal of High-Speed Electronics and Systems., vol. 14, no. 2, pp.367-378, 2004.
- [7] R. N. Nowlin, S. R. McEndree, A. L. Wilson, and D. R. Alexander, "A New Total-Dose-

Induced Parasitic Effect in Enclosed-Geometry Transistors," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 6, pp. 2495–2501, Dec. 2005.

[8] C.-M. Zhang, F. Jazaeri, G. Borghello, S. Mattiazzo, A. Baschirotto, F. Faccio, and C. Enz, "Characterization and Modeling of Gigarad-TID-Induced Drain Leakage Current of 28-nm Bulk MOSFETs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 66, no. 1, pp. 38–47, Jan. 2019.

# X-ray 微影鄰近效應修正技術與高精度高深寬比原件製作應用 II X-ray Lithography Proximity Effect Correction Technologies and Applications in High-precision High-aspect-ratio Component Fabrication II

計畫編號:109-NU-E-002-002-NU 計畫主持人:蔡坤諭 e-mail:ktsai@ntu.edu.tw 計畫參與人員:錢盛偉、蔡佳勳、李建霖、柯志瑋 執行單位:國立臺灣大學電機工程學系暨研究所

#### 摘要

相對於深紫外光微影(deep ultraviolet lithography, DUVL)與極紫外光微影(extreme ultraviolet lithography, EUVL), X-ray 微影(X-ray lithography, XRL)因其低於 10 奈米之曝光波長對一般物質具有相當高的穿透能力,非 常適用於製作高深寬比的元件,例如高性能光學繞射元 件與微機電元件等,可大幅減少微影之外鍍膜與蝕刻等 製程的複雜度與困難度。然而高性能元件的寬度控制也 需要相當精準,傳統 X-ray 微影受光罩製作誤差及近場 繞射種種效應的影響,造成製像誤差過大,影響元件性 能。本計畫嘗試研究 X-ray 光罩製程中的帶電粒子束散 射,與 X-ray 曝光近場繞射等現象作高精度模擬模型校 準,及高效能數值最佳化方法作鄰近效應修正(proximity effect correction), 並於國家同步輻射研究中心進行實際 X-ray 微影,驗證製作高精準度高深寬比元件。本年度研 究中,我們提出一種利用氦離子束直寫進行關鍵微影製 程之 X-ray 光罩製作方法以降低製像誤差,並建立粒子 束散射模擬和 X-ray 曝光近場繞射模擬以利後續光罩圖 案修正和製作。國家同步輻射研究中心之 X-ray/EUV 微 影設備參數亦有初步確認。

**關鍵詞:**X-ray微影,帶電粒子束微影,鄰近效應修正, 高深寬比,光罩。

#### Abstract

Compared to deep ultraviolet lithography (DUVL) and extreme ultraviolet lithography (EUVL), most traditional process materials are relatively transmissive to the sub-10nm exposure wavelengths in X-ray lithography. This property makes it capable of fabricating high-aspect-ratio structures, such as those in high-performance diffractive optical elements and MEMS devices. The difficulties and complexities of non-lithographic processes such as deposition and etching can be significantly alleviated. However, high-performance devices usually also require exact critical dimension control. The patterning fidelity of Conventional X-ray lithography is susceptible to mask fabrication errors and near-field diffraction effects. The device performances are adversely affected. This project aims at investigating the charged particle scattering phenomena in X-ray mask fabrication and near-field diffraction in X-ray exposure for high-precision simulation model calibration and efficient numerical optimization techniques for proximity effect correction. Exposure experiments will be conducted at NSRRC for the fabrication of the precision high-aspect-ratio structures. In this project,

a method utilizing helium ion beam direct-write patterning to perform the critical process of X-ray/EUV mask fabrication is proposed to improve patterning fidelity. The particle beam scattering simulation and X-ray/EUV nearfield diffraction simulation are also established to construct the subsequence correction process for the mask pattern designed. The X-ray lithography equipment parameter has been confirmed at National Synchrotron Radiation Research Center.

**Keywords:** X-ray lithography, charged particle beam lithography, proximity effect correction, high-aspect-ratio, photomask.

#### I. 前言

摩爾定律描述計算硬體歷史上的一個長期趨勢:積 體電路上可以相對低價置入的電晶體數量大約每兩年 增加一倍[1]。英特爾公司的聯合創始人和名譽主席 Gordon E. Moore 博士首先在 1965 年的一篇開創性文章 中提出[2],並 IEDM[3]、SPIE 微影技術研討會[4]和 ISSCC[5]中持續討論近40年。在所有演講中,微影作為 半導體製造中定義電路圖像的關鍵製程,始終被認為是 限制摩爾定律持續有效的關鍵技術和經濟因素之一。甚 至可以說,摩爾定律的過去和未來與微影技術的不斷發 展和突破有著非常密切的聯繫。

目前,領先的積體電路製造商所採用的光學投影式 微影技術(OPL),使用深紫外線(DUV)波段的曝光波長 (波長=193 nm)、NA 接近 0.95 的高數值孔徑投影透鏡、 離軸照明和浸潤技術(n=1.437)[6],使得在一次曝光能中 解析出密度高達 45 nm 的半間距(HP)的電路圖案。一個 典型的光學式投影微影系統和浸潤式透鏡的示意圖如 圖 1 所示[7]。由於波的繞射,最小可分辨的半間距是

$$0.5 \frac{\lambda}{\mathrm{NA}_{\mathrm{p}} \cdot n \cdot (1 + \sigma)}$$

其中 $\sigma$ 為部分同調係數,等於照明和投影光學元件 之間的 NA 比(即 $\sigma$ =NAp/NAi)[8]。由於材料上的重大 困難,進一步降低 DUV 波長和增加浸潤液的折射率在 經濟上已被認為不可行,而 NAp 和 $\sigma$ 也已提高到接近其 理論極限(均為1.0),因此,人們普遍認為45 奈米半 間距技術節點(商業上又稱 "28 奈米節點")是單次曝光 OPL 的最後一個節點。2011 年版的《國際半導體技術藍 圖》(ITRS)[9]中已經預測到,後續將採用雙重和多重 製像技術,使 OPL 解析度擴展到 32 奈米、22 奈米和 16 奈米半間距技術節點。圖 2 所示為各種間距分割製造流 程和結果的示意圖。目前(截至 2016 年),26 奈米至 32 奈米半間距的前瞻製程節點(又稱"14 奈米節點"或 "16 奈米節點")確實採用了雙重製像技術。然而,在 12 奈米半間距節點以下,利用多重製像 OPL 相關的製程複 雜度和成本很可能無法衡量[10][11],非 OPL 技術,如 極紫外投影光刻技術(EUVPL)[12]和電子束直寫微影 技術(EBDWL)[13]等無光罩曝光技術,也應在 2017 年 至 2021 年期間深入研究,以取代或協助 OPL[14](如 ITRS 2015 年微影技術藍圖中的圖 3 和圖 4[15]),同時 和本計畫之時程相呼應。然而,與傳統中 EUVPL 和 EBDWL 於製造奈米級結構的能力相當強的印象相反, 兩者在 12 奈米半間距節點以下也都存在一些解析度問 題。

相對於深紫外光微影(deep ultraviolet lithography, DUVL)與極紫外光微影(extreme ultraviolet lithography, EUVL),X-ray 微影(X-ray lithography, XRL)因其曝光波 長對一般物質具有相當高的穿透能力,非常適用於製作 高深寬比的元件,例如高性能光學繞射元件與微機電元 件等,可大幅減少微影之外鍍膜與蝕刻等製程的複雜度 與困難度。然而高性能元件的寬度控制也需要相當精準 傳統 X-ray 微影受光罩製作誤差及近場繞射種種效應的 影響,造成製像誤差過大,影響元件性能。本計畫嘗試 研究 X-ray 光罩製程中的電子束散射,與 X-ray 曝光近 場繞射等現象作高精度模擬模型校準,及高效能數值最 佳化方法作鄰近效應修正,並在未來於國家同步輻射研 究中心進行實際 X-ray 微影,驗證製作高精準度高深寬 比元件。

## Ⅱ. 主要內容

本計畫旨在研究 X-ray 光罩製造中的電子散射現象 和 X-ray 曝光中的近場繞射現象,以便進行高精度的模 擬模型校準,以及用於鄰近效應修正的高效數值最佳化 技術,特別是藉由延伸為極紫外光(EUV)和電子束直寫 (EBDW)微影技術密集開發的各種製像模擬和解析度增 進技術,以用於奈米積體電路的大量製造。

本計畫規劃三個年度,並且為確實達成本計畫的主要目標,另外仔細定義出三項工作項目(如表 1)。這三項分別是 (1) X-ray 光罩製程和電子束近鄰近效應修正及 氦離子束直寫製像;(2) X-ray 近場繞射模擬和 X-ray 微 影鄰近效應修正;(3) X-ray 微影技術用於精密高深寬比 結構。透過仔細設計這些工作項目來銜接過去開發的鄰 近效應修正方法[3][4][5]和鄰近效應建模與模擬方法 [6][7][8][9],以結合 X-ray 微影光罩和粒子束微影對 Xray 光罩製作的需求,並且研究微影製像真確度與所製 造結構性能的相互影響[10][11][12]。

#### Ⅲ. 結果與討論

傳統的 X-ray 光罩製造通常利用電子束微影製作。 在 X-ray 光罩製程和電子束近鄰近效應修正及氦離子束 直寫製像中,本計畫研究並提出替代方案—利用氦離子 束直寫方法製作光罩。氦離子束直寫相較於傳統電子束 有幾項優勢,如較小的聚焦範圍,較低的鄰近效應,以 及較低的曝光劑量。因此,理論上擁有使用氦離子束微 影製作能有更高的解析度、較佳的製像真確度和產能。 此外,本計畫預計建立利用 EUV/X-ray 光源的 achromatic Talbot lithography(ATL)曝光腔體,ATL 是一 種光學微影技術[16],能夠以高產量製造高解析度的週 期性結構。它類似於極紫外光干涉微影技術(EUV-IL), 但它的優點是藉由引入更多的入射光束的繞射階數已 提高曝光效率。此外,由於多波長的自成像,ATL 在一 定條件下可以獲得相當大焦深的穩定圖像及頻率倍增 的效應。ATL 的機理及相應的光罩設計原理如圖 5-7。 於本年度成果中,透過擴展第一年度建立的氦離子束微 影模擬機制,進一步模擬所需的 ATL 光罩結構的氦離 子束散射模型和光阻模型(如圖 8-12 及表 2)以建立實際 製作時的參數基準及未來製程最佳化的依據。利用氦粒 子束直寫微影及高能離子束銑削製作 ATL 光罩原型的 結果如圖 13-15 所示, 氦離子束於奈米等級結構製造的 適用性及製程穩定性可由圖中高解析度和低臨界尺寸 變異的實驗結果窺見;由於 ATL 微影技術的產能大致 和光罩大小成正相關,因此除了小面積的原型製作(<1 微米平方),亦嘗試進行較大範圍(1-10 微米平方)的樣本 製作以測試大面積製程開發的可行性,此本計畫提出一 種先微影所需圖案及支撐框架後蝕刻的製程(如圖 17-18) 以提高樣本的強度避免在後續製程或使用上破裂。綜合 上述氦離子束直寫微影及銑寫研究結果,顯示此方法具 有製造應用 EUV/X-ray 光源之 ATL 光罩的潛力。

而在 X-ray 近場繞射模擬和 X-ray 微影鄰近效應修 正工作項目中,主要探討 X-ray 微影中的近場繞射模擬 方法,關鍵模型參數的校正,以及高效能的鄰近效應修 正技術。為提高 X-ray 繞射模擬精準度以利後續微影模 擬及修正,於光罩附近的電磁場分布採用較嚴謹的有限 時域差分電磁模擬來計算,離光罩較遠至光阻內的能量 分佈則是由近場(菲涅爾)繞射公式計算,以求在保持 精度的同時提升模擬速度。至於 X-ray 微影鄰近效應修 正的部分,本計畫開發一修正程序,用以補償由 X-ray 繞射引起的幾何製像失真,以減少邊緣放置誤差,提高 整體製像的真確度。本計畫運用第一年度建立的模擬技 術應用至 ATL,初步的 ATL 繞射模擬結果如圖 19-20,, 未來將會研發加速運算技術及長距離模擬技術,以加快 實際 ATL 模擬速度及拓展應用波段和最佳化參數如距 離等。

最後在 X-ray 微影技術用於精密高深寬比結構方面, 經本計畫評估後,將申請利用 NSRRC 現有的 EUV/Xray 波段光束線及實驗設備,並與國家同步輻射研究中 心的人員合作調整設備、儀器參數以提升後續實際微影 驗證之可行性。此外,本計畫與國研院儀科中心(TIRI)合 作,建造 ATL 腔體,在本工作項目中將使用該腔體在國 家同步輻射研究中心進行 ATL 曝光,以製造高深寬比結 構,詳細設計和製造的腔體如圖 20-21。

#### IV. 結論

本研究計畫完成了第二年度預期的工作項目,於第 一項 X-ray 光罩製程和電子束近鄰近效應修正及氦離子 束直寫製像中,我們利用氦離子束直寫進行關鍵微影製 程之光罩製作並開發可用於 ATL 光罩之製程,並在第 二項工作項目建立 ATL 近場繞射模擬以利後續光罩圖 案修正和製作。而第三項 X-ray 微影技術用於精密高深 寬比結構,亦有和 TIRI 合作建置 ATL 腔體,並和國家 同步輻射研究中心確認EUV/X-ray 光源及相關實驗設備 參數,已確立未來實際進行 ATL 將使用之程序。

# 参考文獻

- J. R. Maldonado, M. Peckerar, "X-ray lithography: Some history, current status and future prospects," Microelectronic Engineering 161, 87-93, 2016
- [2] G. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Electronics 38(8), 1965
- [3] G. Moore, "Progress in digital integrated electronics," IEDM Tech Digest p. 11-13, 1975
- [4] G. Moore, "Lithography and the future of Moore's Law," Proc. SPIE Vol. 2437, May 1995
- [5] G. Moore, "No exponential is forever: But forever can be delayed!", ISSCC 2003
- [6] B. J. Lin, "Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing," J. Microlithography, Microfabrication, and Microsystems, Vol. 3, No. 3, 377–395, Jul. 2004
- [7] ASML Images Customer Magazine, 2010.
- [8] A. K.-K. Wong, Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography, SPIE Press, 2001
- [9] International Technology Roadmaps for Semiconductors, 2011 edition.
- [10] H. Yaegashi et al., "Novel approaches to implement the self-aligned spacer double-patterning process toward 11-nm node and beyond," Proc. SPIE 7972, 79720B, 2011
- [11] L. Liebmanna, A. Chua, and P. Gutwinb, "The daunting complexity of scaling to 7NM without EUV: Pushing DTCO to the extreme," Proc. of SPIE Vol. 9427, 942702, 2015
- [12] C. Wagner et al., "EUV lithography at chipmakers has started: performance validation of ASML's NXE:3100," Proc. SPIE 7969, 79691F, 2011
- [13] B. J. Lin, "Marching of the microlithography horses: Electron, ion, and photon: Past, present, and future," Proc. SPIE Vol. 6520, 652002-1, 2007
- [14] Y. Borodovsky, "ArF lithography extension for critical layer patterning," LithoVision 2010, San Jose, CA/USA, 2010
- [15] International Technology Roadmaps for Semiconductors, 2015 edition.
- [16] Kazazis, Dimitrios, Li-Ting Tseng, and Yasin Ekinci. "Improving the resolution and throughput of achromatic Talbot lithography." Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena 36.6 (2018): 06J501

			1	
			研究項目	
年	禾	X-ray 光罩製程	X-ray 近場繞射	X-ray 微影驗證
度	Ŧ	及粒子束散射之	模擬與微影鄰近	製作高精度高深
		建模舆修正	效應修正	寬比元件
	1	文獻整理		文獻整理
	2	X-ray 光罩製程 所需之粒子束散 射模擬		X-ray 微影設備 參數最佳化
1	3	X-ray 光罩製程 研發	文獻整理	
	4		X-ray 微影能量 分布模擬	

表1 計畫規劃時程

	1	文獻整理		文獻整理
	2	粒子束散射模型		X-ray 微影製程
	2	校正技術		改善
2	2	粒子束鄰近效應	十郎数田	X-ray 微影模型
-	3	修正技術	又厭從垤	校正技術
	4		X-ray 微影修正	
	4		技術	
	1			文獻整理
				高性能光學繞射
	2			元件和/或微機
				電元件設計
3				高性能光學繞射
5	3			元件和/或微機
				電元件製造
				高性能光學繞射
	4			元件和/或微機
				電元件測試



圖 1 浸潤式光學投影式微影系統



圖 2 三種間距分割製造流程:(左)雙重曝光,(中)雙重製 像,(右)自對準雙重製像



圖 3 截至 6 奈米半間距節點的 DRAMs 和微處理單元 之可能微影製程方案



圖 4 截至 6 奈米半間距節點的洞型圖像之可能微影製 程方案



is since our due to the outbound by and eventually intege and the matic distance  $Z_A$ , creating a stationary image.

圖 5 ATL 架構和光罩設計的示意圖[16]







圖 7 ATL 光罩製作結果[16]

表2 氦離子束散射模擬之材料結構詳細參數

層數	材料	厚度
1	ZEP 520A	40 nm
2	SiO2	60 nm
3	SiN (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	100 nm
4	Silicon	1 um







Ion Trajectories





Comparison of PSF w/wo Si



Energy distribution	- 1800	Comparison of Drawn Layout and Wafer Patter
800 · • • • • • • • • • • • • • • • • • •	1800	0.4 O O Dawn layout Simulated Wafer Pattern (SIGN4 thin tim)
<sup>700</sup> , • • • • • • • • • • • •	1400	0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
<sup>600</sup> • • • • • • • • • •	1200	• • • • • • • • • • • • • • • • • •
	1000	≥ > 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	800 (0)	O O
300	600	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••
	100	-02 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	100	-0.3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
	200	-0.4 0 0 0 0 0 0 0 0 0
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 x (nm)		-0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.4 x(nm)









圖 19 多波長之 2D ATL 電磁模擬結果

2D simulation result of single

wavelength ( $\lambda = 13.5$  nm)

2D simulation result of multiple

wavelength ( $\lambda = 13.23 - 13.77$  nm)

Schematic of simulated

periodic structures



圖 20 多波長之 3D ATL 電磁模擬結果



Schematic and detailed design of chamber for EUV ATL

圖 21 ATL 實驗腔體架構及設計

# 開發遠端 3D 建模掃描機器人並建立輻射劑量地圖以輔助核電廠除役 Development of a Remote Scanning Robot for 3D Modeling and the Establishment of a Radiation Dose Map to Assist in the Decommissioning of Nuclear Power Plants

計畫編號:109-NU-E-002-003-NU 計畫主持人:陳湘鳳 e-mail:ssmith@ntu.edu.tw 執行單位:國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

#### 摘要

遠端探索機器人可代替人類前往核能設施作環境 探索。但機械手臂若因人為操作失誤或未知外力撞擊而 受損,導致桿件變形、馬達旋轉誤差,使機械手臂失去 精度,此時無法使用建立好的逆運動學模型,計算機械 手臂末端執行器之位置。相機與機器人的相對位置錯誤 使用者無法正確的在虛擬環境中操控遠端機器人,因此 需要修正運動學模型或重新建立運動學模型。本研究使 用 ORB-SLAM2 (Oriented FAST and rotated BRIEF-Simultaneous localization and mapping 2) 對機械手臂末 端執行器進行定位。並將機械手臂末端執行器位置誤差 修正分成三軸機械手臂與馬達平台旋轉兩部分。三軸機 械手臂使用神經網路(neural networks, NN) 建立末端執 行器姿態與馬達轉動角度之逆運動學模型,馬達平台旋 轉則使用線性回歸進行建模,有效減少所需資料量。本 研究對機械手臂末端執行器進行定位。本研究所開發之 機械手臂在核電廠進行掃描測試,成功地將核能設施汽 機廠房作 3D 掃描建模。並以遠端操抓取圓球的實驗測 試手臂精準度。原本變形之機械手臂無法夾取直徑 30 mm 圓球。重新建立運動學模型後,碰觸標靶的誤差為 6.6±3.58 mm,證實本研究機械手臂運動學模型重建方 法的有效性。

**關鍵詞:**遠端探索機器人、核電廠掃描、SLAM、運動學 模型

#### Abstract

Remote exploring robots can be utilized to explore dangerous or unknown environments for human. However, if the robot is damaged due to some operational errors or there is irrecoverable deformation in robotic arms, the motion accuracy of the robot needs to be reassessed. If there is a permanent deformation in robot arms, the existing inverse kinematics model can no longer be used. As a result, it is necessary to calibrate the existing kinematics model or rebuild a new kinematics model. This study uses ORB-Simultaneous localization and mapping 2 (ORB-SLAM2) to locate the end effector of a robotic arm. The position error correction of the end effector is divided into two parts: a three-axis manipulator and a motor platform. This study uses a neural network (NN) to establish an inverse kinematics model of the end effector's posture for the three-axis robotic arm, and the motor platform rotation is modeled by linear regression, effectively reducing the amount of information required. This study successfully scans a nuclear facility and build a 3D model of the environment. The accuracy of the end effector of the rebuilt kinematics model in the pickingball-and-touching-target experiment is  $6.6 \pm 3.58$  mm, which confirms the effectiveness of the rebuilt kinematics model in this study.

**Keywords:** Remote exploring robots, nuclear power plant scanning, SLAM, kinematics model

# I. 前言

為了讓人類可以在安全的地方探索遠端未知環境, 許多研究使用 VR (virtual reality)或 AR (augmented reality) 操控遠端機器人,以讓使用者能有身歷其境的感覺,例 如 Yamada [1]以及 Chen and Chen [2]使用 VR 操控遠端 機器人,讓使用者可以自由選擇視角去觀察目標,不會 被末端執行器阻擋視線。Frank, et al. [3]讓使用者透過平 板或手機 AR 操作機器人,AR 可以給予使用者提示以 輔助操作,加速使用者進行任務,但使用者只能跟隨手 持裝置視角。這些研究都證實 VR 以及 AR,除了能讓 人身歷其境的探索遠端環境外,還可以提高使用者操作 效率。

遠端探索機器人主要有兩個問題:探索遠端未知環 境的導航問題,以及機械手臂末端執行器上之相機與機 器人的相對位置問題。機器人在遠端未知環境的導航問 題中已有許多研究提出 SLAM 方法解決,而機械手臂末 端執行器與機器人的相對位置問題,可透過校正手臂運 動學模型參數或重新建立逆運動學模型解決,因此需要 使用感測器定位測得機械手臂末端執行器與機身之相 對位置。但鮮少研究針對遠端未知環境中之機械手臂運 動學模型進行校正或重建,先前研究大多是於已知環境 內,架設位於機器人外的感測器,量測末端執行器姿態 以校正或重建機械手臂運動學模型。近幾年有研究將 RGB-D 相機裝於末端執行器上,使用 RGB-D 影像透過 SLAM定位末端執行器以進行手臂運動學模型之參數校 正,但沒考慮機械手臂變形的情形。雖然這種定位方法 無須額外架設感測器,但這些研究仍僅於已知環境進行, 並未提出適用於遠端未知環境中之方法。

本研究接續先前研究,Kuo [4]所建立之遠端機器 人及遠端環境重建系統,提出一個建立遠端未知環境中 之機械手臂之逆運動學模型的方法,讓機器人在手臂未 知變形,但仍未毀損的情形下,使用者仍能夠直覺地操 控機械手臂繼續探索任務。在機械手臂的零件生產、組 裝過程中,或是經過長時間工作過後都會產生形變誤差, 因此許多研究開發不同的方法來校正機械手臂,或是建 立新的逆運動學模型以正確地操作機械手臂。

# Ⅱ. 運動學模型重建結果測試

為了解本研究重建運動學模型結果能否適用於桿 件變形的情形,本研究將針對此變形機械手臂建模,以 測試重建運動學模型前後的精準度。建立機械手臂逆運 動學模型的過程中,即時透過 Unity 界面觀察手臂運行 現況,使用者可以看到末端執行器實際姿態(圖一(a)中錄 色末端執行器),以及在 VR 中末端執行器目標姿態(圖 一(a)中紅色末端執行器),看出機械手臂失去精準度。經 校正後,末端執行器實際姿態與 VR 中末端執行器目標 姿態大幅靠近,如圖一(b)所示。校正後之機械手臂在核 能設施汽機廠房內進行環境掃描 (圖二)。使用者可控制 機器人在環境中任意移動並進行掃描。掃描結果可重現 核能設施汽機廠房之廠景(圖三)。



(a) 校正前



圖二、在核能設施汽機廠房內進行環境掃描



(a) 將機器人顯示在虛擬環境中



(b) 校正後 圖一、Unity 界面中手臂運行現況



(b) 掃描重建之場景圖三、核能設施汽機廠房環境掃描結果

本研究並對重建運動學模型前後進行夾取放圓球 的任務,如圖四所示。機械手臂校正前的測試中,5 次 實驗皆沒有成功夾取圓球,代表著機械手臂的誤差的確 大到無法夾取直徑 30mm 的圓球。機械手臂運動學模型 重建後的測試中,5 次實驗都有成功夾取圓球、沾取顏 料以及碰觸標靶,平均碰觸標靶的誤差為6.6±3.58 mm。



(a) 實際場景



(b) 掃描重建之場景 圖四、圓球放取精度實驗

# III. 結果與討論

本研究遠端機器人使用之四軸機械手臂,未來如果 使用更高自由度的機械手臂,就能夠建立更完整的逆運 動學模型,使末端執行器姿態與目標姿態完全相同。這 樣在機器人移動時,推算所得新的虛擬機器人也會是正 確的位置。最後實驗證明,校正後之機械手臂可正確掃 描核設施汽機廠房,及做圓球放取之動作。

# 參考文獻

- [1] H. Yamada, *Tele-operation Construction Robot Control System with Virtual Reality Technology*. 2009, pp. 639-644.
- [2] G. S. Chen and J. P. Chen, "Applying virtual reality to remote control of mobile robot," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 293, pp. 383-390, 2014.
- [3] J. A. Frank, M. Moorhead, and V. Kapila, "Mobile mixed-reality interfaces that enhance human–robot interaction in shared spaces," *Frontiers in Robotics And AI*, vol. 4, no. 20, pp. 1-14, 2017.
- [4] C.-Y. Kuo, Development of an Augmented Reality 3D Reconstruction Telerobotic System. M.S. Thesis, National Taiwan University, 2019.

# 大氣常壓微電漿技術合成矽量子點(II) Synthesis of Si Quantum Dot using Atmospheric-Pressure Microplasmas (II)

計畫編號:109-NU-E-011-001-NU 計畫主持人:江偉宏 e-mail:whchiang@mail.ntust.edu.tw 執行單位:國立台灣科技大學化工系

# 摘要

矽量子點(Silicon quantum dots; SiQDs)因具備優異 的應用特性,可應用於光電元件、感測材料、能源、催 化與生醫相關技術等領域。目前矽量子點的主要製備方 式製程所需時間長、前驅物成本高、操作溫度高等因素 不利於大量生產,加上反應機制不清楚,尚無法實現產 業應用。本計畫主要目的為建立開發大氣常壓微電漿矽 量子點合成技術。本計畫構想包括利用低成本矽烷分子 為前驅物,以高能量密度大氣常壓微電漿進行液態化學 反應合成矽量子點.利用光譜研究電漿反應過程中矽量 子點合成的化學機制及反應動力學。本研究計畫所開發 的技術將提供學術界矽量子點基礎研究的平台,以及矽 量子點未來產業應用的重要基石。

**關鍵詞**:矽量子點;大氣常壓電漿;合成;光致發光光 譜

#### Abstract

In recent years, silicon quantum dots (SiQD) have attracted much attention due to their superior physical and chemical characteristics, making them useful for the applications of optoelectronics devices, sensing, energy and catalysis. In addition, they are non-toxic and biocompatible and potentially applicable in biosensing and biomaging. However, the current conventional methods to synthesis SiQD usually involve high temperature, toxic chemicals, and expensive and time-consuming procedures, hampering their commercialization. Consequently, the development the scalable synthesis of SiQD is critical for both fundamental study and applications. The goal of our study is to develop a scalable method to synthesize SiQD using atmospheric-pressure microplasmas. Moreover the growth mechanism and kinetics of SiQD by microplasmas will be studied by in situ Raman spectroscopy.

**Keywords:** Silicon quantum dot ; Atmospheric pressure ; Synthesis ; Photoluminescence.

# I. 前言

大氣常壓微電漿(microplasma)是一種可在大氣常 壓下穩定產生的微型化電漿,其電漿體直徑可控制在微 米(µm)等級,因此具有高能量密度的特性。搭配微反應 器(microreactor)設計,前驅物在電漿內之滯留時間可調 控在微秒(µs)至奈秒(ns)之間,可應用於金屬、合金、以 及無機奈米粒子(nanopartilce)的合成。大氣常壓微電漿 相較於傳統電漿的優勢在於不需要低壓或高真空度的 環境即可操作,因此更易於人員操作且設備系統簡易與 低成本。本計畫為第二年延續計畫,本研究利用有機 矽烷分子:3-(2-氨基乙基氨基)丙基三甲氧基矽烷 ([3-(2-Aminoethylamino)propyl]trimethoxysilane (AEAPTMS) 與電解質 (氫氧化鈉 (NaOH)、抗敗血酸 (Ascorbic acid (A.A.))作為合成前驅物構想利用大氣常壓微電漿進行高 產率矽量子點合成技術開發。本計畫研究目標為開發大 氣常壓微電漿矽量子點合成技術,進行電漿反應可行性 研究,產物材料分析及光學特性研究,及電漿反應動力 學研究。最終目標為希望開發台灣產業可使用的矽量子 點合成技術。

量子點材料可以應用在許多的領域,應用範圍包括 顯示器、LED 照明等消費型電子產品、太陽能電池、催 化、藥物輸送、及生醫顯影(bioimaging)應用等。根據市 場調查報告(工研院 IEK 報告, 2016/12 月)預估, 2026 年 全球量子點相關元件應用市場可達 100 億美元以上,因 此全球企業紛紛投入量子點應用開發。目前合成技術較 為成熟的皆為無機量子點材料,大多含有具毒性的重金 屬,考量到生物安全性與環境保護等需求,開發低環境 污染、低生物毒性的量子點逐漸成為一大重要研究課題。 此外目前量子點合成技術製備過程繁瑣高耗能且高成 本,不利於綠色環保製程要求,因此開發低成本高產率 對環境友善的量子點合成技術為量子點產業應用的重 要目標。矽量子點為零維尺度小於10nm 的矽奈米結構, 具有獨特光學、物理與化學特性,如光致發光 (photoluminescence),已被報導可應用在光電元件、感測 材料與生醫相關技術等領域。矽為地球含量相當高的元 素,為目前半導體製程主要使用的材料,經適當處理對 環境友善,且對人體無明顯生物毒性,因此矽量子點為 相當優良的量子點材料之一。矽量子點的發光範圍廣可 從可見光到近紅外光,且量子效率可達80%,非常適合 光電元件產業應用。更重要的是,相較於含重金屬的無 機量子點材料,矽量子點具低環境污染、低生物毒性、 高生物相容性特性,考量生物安全性與環境保護等議題, 矽量子點比傳統無機量子點更適合生醫產業應用。然而 目前矽量子點的主要製備方式製程所需時間長、前驅物 成本高、操作温度高等因素不利於工業化大量生產,且 不易控制產物結構及材料特性,尚無法實現產業應用。 台灣量子點相關技術開發較晚, 關鍵量子點材料仍仰賴 國外進口,因此開發具高穩定性及高發光效率的量子點 材料對產業發展相當重要,進行量子點材料相關學術研 究及產業技術對國家的永續發展有重大的影響。

### II. 主要內容

	本研究利用有	下機矽烷分	分子:3-(2-氨基	七基氨	基)丙基
Ξ	甲	氧	基	矽	烷
([3-(	2-Aminoethylam	ino)propyl	ltrimethoxysila	ne (AEA	PTMS)

與電解質 (氫氧化鈉 (NaOH)、抗敗血酸 (Ascorbic acid (A.A.))作為合成前驅物,藉由調控不同電解質的種類與 濃度,經由微電漿系統反應後,生成可調控發光波長的 矽量子點。此外,本計畫更進一步探討大氣常壓微電漿 系統下,如何將前驅物經化學途徑轉換成矽量子點奈米 結構,並利用調控電漿的物理參數與反應系統的化學參 數達到控制矽量子點的表面結構、尺寸大小及發光特性 等。

本研究將根據之前的研究經驗設計大氣常壓微電 浆反應裝置如圖 1,主要部件包括直流電 DC 高壓電源, 氣體流率控制器(MFC),化學耐高溫耐酸鹼玻璃反應槽, 電子電路控制裝置及數據紀錄/控制用電腦,經組裝後進 行反應測試。以下簡單扼要介紹反應流程: 首先,以0.2 毫升 3-(2-氨基乙基氨基)丙基三甲氧基矽烷(AEAPTMS) 作為矽的前驅物來源與 0.1M 氫氧化鈉(NaOH)或抗敗血 酸(A.A.)作為電解質,並加入超純水配置總體積為 12.5 毫升前驅物溶液,接著進行大氣常壓微電漿反應(請参考 圖 4.)。電漿反應系統的陽極為白金片(platinum),經由 150 kΩ的電阻連接到電流供應器; 陰極則是對氫氣施以 高電壓產生的自由電子和帶電離子及中性分子所組成 的氣體,通過內徑為180 微米的不銹鋼毛細管導入到溶 液界面。 氫氣氣體流率約為 25 sccm (standard cubic centimeter per minute), 電漿電流約為 5~9 毫安培, 兩電 極間距離為 1.5 公分, 經過 5~60 分鐘的電漿反應。 矽量 子點之產率計算,首先將合成好的樣品進行旋轉濃縮處 理以得到固體樣品,經由靜置乾燥後,扣其空瓶重以得 產物的重量(製程如圖2所示),並利用 egl(總產物重/總 反應物重)計算其產率: 並對其固體樣品加入不同體積 的超純水對其做濃度的計算,首先可以從 UV-可見光吸 收圖譜觀察到矽量子點 n → π\*吸收峰約在 340-350 nm,接著針對各個樣品在不同濃度下最高值吸收峰對其 做檢量線之計算,因此藉由此檢量線圖譜,我們可以有 效對矽量子點做樣品濃度的調控。

本計畫進行研究電漿參數(電流、電壓、功率、反應 時間)對產物產率及材料結構及特性的影響,主要物理參 數為時間、電流。產物光學性質研究將採用 PL 及 UV 吸收光譜,PL 描述物質吸收電磁波躍遷到較高能階的激 發態後返回基態且放出螢光的過程。透過光致發光 PL 光譜分析 SiQD 能隙的結構及大小,了解產物的光致發 光性質,判斷 SiQD 光致發光穩定性及波長和光致發光 強度的關係。另外利用 UV 吸收光譜研究產物吸收特性, 矽量子點通常在紫外光範圍存在吸收带,因此,我們可 以根據此微小的特徵峰加以定性分析所合成出來的產 物是否為矽量子點。同時可以利用此吸收峰進行產率估 算,將以 UV 吸收光譜量測並根據標準品減量線定量電 漿反應產物矽量子點之濃度及產率。產物奈米形貌利用 穿透式電子顯微鏡(Transmission electron microscopy, TEM)進行產物的微結構高解析分析,TEM 電子顯微鏡 提供材料內部的形態及原子的晶格排列,利用高能電子 束加速穿透厚度非常薄的樣品上,和樣品中之原子碰撞 產生不同角度之散射,此不同角度之散射和樣品密度、 厚度有關,散射後之電子以不同的路徑通過透鏡光圈, 形成明暗對比的影像,因使用 TEM 可以觀察樣品之精 細結構,常被用於材料之分析方法。



圖 1. (左) 微電漿反應器示意圖。(右)進行為電漿反應時 之微電漿反應器。



圖 2. 計算產率之實驗流程示意圖。

#### Ⅲ. 結果與討論

本研究將根據之前的研究經驗設計大氣常壓微電 浆反應裝置,主要部件包括直流電 DC 高壓電源,氣體 流率控制器(MFC),化學耐高溫耐酸鹼玻璃反應槽,電 子電路控制裝置及數據紀錄/控制用電腦,經組裝後進行 反應測試。以下簡單扼要介紹反應流程:首先,以 0.2 毫升 3-(2-氨基乙基氨基)丙基三甲氧基矽烷(AEAPTMS) 作為矽的前驅物來源與 2.5 毫升 0.1M 氫氧化鈉(NaOH) 溶液作為電解質,並加入 9.8 毫升超純水配置總體積為 12.5 毫升前驅物溶液,接著進行大氣常壓微電漿反應。 電漿反應系統的陽極為白金片(platinum),經由 150 k $\Omega$ 的電阻連接到電流供應器;陰極則是對氫氣施以高電壓 產生的自由電子和帶電離子及中性分子所組成的氣體, 通過內徑為 180 微米的不銹鋼毛細管導入到溶液界面。 氫氣氣體流率約為 25 sccm (standard cubic centimeter per minute),電漿電流約為7毫安培,兩電極間距離為1.5 公分,經過 30 分鐘的電漿反應,可成功合成出矽量子 點水溶液。並在 UV 可見光吸收圖譜中有明顯的矽量子 點吸收峰,此外,利用 UV 燈源激發可觀察出明顯的藍 色發光現象,與文獻結果符合(圖 3)。

為了對矽量子點做有效的發光波長調控,在固定系

統中矽前驅物 3-(2-氨基乙基氨基)丙基三甲氧基矽烷 (AEAPTMS)的濃度下,藉由改變電解質的種類與濃度, 將氫氧化鈉溶液以抗敗血酸溶液替代,並對其調控濃度, 經由大氣常壓微電漿反應後且改變時間,可得發光波長 分別為 435、510、550、590 與 670 奈米的矽量子點。 亦可從 UV 可見光吸收圖譜中觀察到明顯的矽量子點 n  $\rightarrow \pi*吸收峰,此外,利用 UV 燈源激發可觀察出明顯$ 的藍色到紅色發光現象,與文獻結果符合(圖 4)。



圖 3. 氫氧化鈉製程所得(a)前驅物進行電漿反應前後之 UV 可見光吸收圖譜 (內圖為前驅物(左)與矽量子點(右) 在 UV 燈源激發下照片)(b)前驅物未進行電漿反應之 PL mapping 圖 (c) 矽量子點之 PL mapping 圖。



圖 4. 抗敗血酸製程所得 (a)不同發光波長矽量子點之 UV 可見光吸收圖譜 (內圖為不同發光波長矽量子點在 UV 燈源激發下之照片) (b)不同發光波長矽量子點之 PL 光譜。

穿透式電子顯微鏡通常用來分析產物其粒子大小、 粒徑分布、形貌、分散狀態及結晶度,因此,本研究利 用穿透式電子顯微鏡對矽量子點做進一步分析,我們亦 對以抗敗血酸作為電解質合成不同發光波長之矽量子 點對其做穿透式電子顯微鏡影像分析如圖 5 所示((a).藍 光矽量子點、(b).綠光矽量子點、(c).紅光矽量子點), 可從影像中觀察到綠光與紅光發的矽量子點外圍分散 顆粒較小的石墨烯量子點(晶格面距 0.24 nm 對應於 1120 晶格面),而藍光矽量子點並無此現象,並計算矽 量子點粒徑大小分別為: 5.96 ±1.29 nm、4.91 ±0.72 nm、 13.76 ±3.7 nm。



圖 5.抗敗血酸製程所得(a)藍光矽量子點、(b)綠光矽量子 點、(c)紅光矽量子點之TEM影像分析(d)藍光矽量子點、 (e)綠光矽量子點、(f)紅光矽量子點之粒徑大小分析。

利用 X 射線光電子能譜儀檢測,可以分析矽量子點 的元素組成以及表面官能基的種類。在上述拉曼分析中, 已提到隨著矽量子點的發光波長增加時,由計算 ID/IG 可以得知矽量子點表面含氧官能基的增加,為了更進一 步對其分析,我們進行的 XPS 的檢測,由圖 6 (a-e)可分 析各個矽量子點在 C1s 的表面化學鍵結,分別對應 Si-C (282.9 eV)、Si-C (283.5 eV)、C-C/C=C (284.3 eV)、C-N (285.2 eV)、C-OH/C-O-C (286.3 eV)、C=O (287.7 eV), 並對其計算含氧官能基的比例(C-OH/C-O-C 和 C=O), 可得隨著發光波長的增加含氧官能基的比例也會隨之 增加(如圖 6(g)所示),因此我們可以了解到含氧官能基 對其發光波長影響的重要性。



圖 6. 抗敗血酸製程所得(a)藍光矽量子點 (b)綠光矽量 子點 (c)黃光矽量子點 (d)橘光矽量子點 (e)紅光矽量子 點之X射線光電子能譜Cls鍵結分析 (g) 含氧官能基比 例計算。

# IV. 結論

本年度執行成果良好,已完成文獻蒐集與分析, 完成建立微電漿反應器,延續上一年度計畫成果。利用 四乙氧基矽烷(tetraethoxysilane, TEOS)等)為矽前驅物, 可成功合成出矽量子點,在趕上電漿合成條件之後,目 前研究顯示前驅物轉換量子點產率約為50%,未來將進 行電漿反應動力學研究,研究調整反應参數以提高前驅 物轉換量子點產率。此外本年度成果發現,有效利用有 機矽烷分子:3-(2-氨基乙基氨基)丙基三甲氧基矽烷 ([3-(2-Aminoethylamino)propyl]trimethoxysilane (AEAPTMS) 與電解質(氫氧化鈉(NaOH)、抗敗血酸 (Ascorbic acid (A.A.))作為合成前驅物,藉由調控不同電解質的種類與 濃度,經微電漿系統反應後,可成功合成出可調控發光 波長的矽量子點。將合成之矽量子點水溶液,在UV 燈 源激發下,可觀察出明顯的藍色到紅色發光現象,並對 其做光致發光檢測,確實證明發光波長分別在435、510、 550、590 與 670 nm。此外,亦從 UV 可見光光譜可以 觀察到矽量子點的 $n \rightarrow \pi^*$ 吸收峰,約在340~350 nm, 與文獻符合。從 XPS 的 Cls 圖譜計算其含氧官能基比 例,可觀察到此現象,先前文獻已提出相似的觀點,因 此可以從本研究了解到矽量子點表面含氧官能基對發 光波長的影響性。本研究中,利用矽量子點在 UV 可見 光圖譜中計算檢量線,並對其做產率的計算,約為 10~25%,未來將進行電漿反應動力學研究,研究調整反 應参數以提高矽量子點的產率。

開發遠端視訊操作裝置用於移動機器人與機器手臂控制

# Development of Tele-Operating Devices for control of Mobile Robots and Robot Arm

計畫編號:109-NU -E-992-001 -NU 計畫主持人:杜國洋 e-mail:tuky@nkust.edu.tw 計畫參與人員:博士生:林紘宇、洪哲斌 碩士生:蔣毓哲、劉威廷、黃立昇 執行單位:國立高雄科技大學電機工程系

## 摘要

本研究計畫已開發適用於核電廠幅射區機器手臂 的離型,另外也針對常用於機器人的三個模組:馬達、 電池與攝影機進行輻射照射測試。照射實驗是前往核能 所進行的鈷 60 照射。針對照射測試,本研究計畫研發一 套進行動態測試設備,使模組在照射時可量測其運轉情 況。本研究規劃三套,分別受 10、30 與 70 戈雷照射, 實驗持續 5 個小時,實驗結果具體了解馬達、電池與攝 影機受不同幅射劑量的影響程度。

**關鍵詞**:核能電廠、輻射區、機器手臂、移動機器 人、遠端視訊機器手臂操作、鈷60照射。

#### Abstract

In this research project, the prototype of a robot arm for radiation region in nuclear power plant is developed. In addition, three modules usually used for robots including servo motor, battery and IP camera are tested in radiation region by Cobalt 60 irradiation. For the dynamic test, we developed a set of equipment to save their data during the module running. We install three sets of servo motor, battery and IP camera under gore levels 10, 30 and 70, respectively. After 5 hours dynamic test, the experiment exactly concludes how servo motor, battery and camera are influenced by different radiation levels.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Radiation, Robot arm, Mobile Robot, Tel-Operating Robot Arm Control, Cobalt 60 irradiation.

# I. 前言

本研究計畫設計實現嶄新形式的機器手臂,其馬達 控制器與馬達組合在一起,而且透過 CAN Bus,只要串 接連線即可與主控制器通訊,整個機器手臂的結構變得 非常精簡,在輻射區易於屏蔽,期望研發一套適合用於 核電廠輻射區的機器手臂。此外,本計畫也設計研發一 套動態量測裝置,可在幅射區長時間紀錄受測試設備與 模組的運轉狀況。計畫中前往核能所的輻射照射廠,利 用這套裝置測量攝影機、智慧型馬達與電池受輻射照射 的運轉過程,本研究計畫的成果包括,三種模組受輻射 影響的動態現象。

## II. 機器手臂設計與實現

本研究計畫第二次重新設計新的六軸機械手臂(圖 2-1),它由六個伺服旋轉軸所構成,本機械手臂是使用 MT-03 伺服馬達(圖 2-2),此伺服馬達的特點是,其中包 括驅動器,並有 CAN Bus 與外界通訊,因此機器手臂的 主控制器與各關節馬達的通訊連結可用串接的方式,簡 單化各關節馬達的通訊連結,而且驅動器與達一體成型, 整個機器手臂的結構變得很精簡,很方便進行輻射屏蔽。

機器手臂設計成能夾取旋轉半徑 1 公尺內的物品, 其設計重點在於為了利於好取放物品,則將末端三軸間 的距離縮短以利機械手臂能在末端點順利到達欲到的 位置,而設計期間也需考慮機構、馬達和軸承間的配合, 使設計出的產品不會造成零件間產生干涉。



圖 2-1 機械手臂



圖 2-2 MT-03 伺服馬達

但目前本機械手臂因當初未考慮到連桿過長、末端點 較重及選用材料過薄等問題,導致目前機械手臂動作時 搖晃過大,為了解決此問題,我們將增加第二和第三連 桿的強度,如(圖2-3)所示,此設計能夠強化連桿並解 決作動時搖晃過大的問題。



圖 2-3 重新設計後的機械手臂

# Ⅲ. 輻射照射實驗

#### 實驗方法

本實驗利用龍潭核能研究所照射廠之水下腔體照射,將 待測平台(圖 3-1)分別依照輻射強度 10、30、70 戈雷放 置在相對的位置上(圖 3-2),本實驗待測平台放置電池、 馬達、攝影機,其規格與實驗方式如表 3-1,使其進行鈷 60 輻射照射 5 個小時(圖 3-3),累積劑量與照射時間長 短成正比,並將感測器的偵測數據透過 40 米實體傳輸 線傳送至照射場外無輻射區域的電腦,以實現即時監控 待測平台之狀態並儲存其資料,與輻射照射前所得到的 資料做比對並分析輻射對待測物瞬間或累積影響。本實 驗著重於輻射對電池、馬達與攝影機之影響。

為了瞭解所有模組進行鈷 60 照射後是否造成永久 性破壞,在經過5個小時照射後,電池、馬達與攝影 機亦在無輻射情況下,測試其功能是否仍然正常。

平台細項	實驗方式
3S/11.1V/460mAh	連續充放電,分析
鋰電池	电池效率之变化
RX-64 馬達	對轉速做 Sin 波控
	制,分析馬達各項
	參數之變化
網路攝影機 IPC603	分析輻射對攝影機
	咸測元件之影響

表 3-1 待測平台與實驗方式



圖 3-1 待測平台



圖 3-210、30、70 戈雷



圖 3-3 輻射源

# 電池實驗方法

利用充電器(圖 3-4)對電池(圖 3-5)做連續充放電, 並在迴路中連接放置在輻射區外的電壓電流感測器(圖 3-6)將電壓、電流、充放電時間回傳至電腦,並透過回 傳值計算充電效率之容量效率(3-1),最後將得到與計 算出來的資料與對照組進行比較與分析。容量效率η<sub>c</sub> 定義為放出電荷量與充入電荷量之比例,如下式:

$$\eta_{C} = \frac{I_{out} \times t_{discharge}}{I_{in} \times t_{charge}} \times 100\%$$
 3-1

其中η<sub>C</sub>為容量效率、I為電流大小、t為充電時間或放 電時間。



圖 3-4 SKYRC D100 V2C 鋰電池平衡充電器



圖 3-5 3S 11.1V 460mAh 鋰電池



圖 3-6 MDC-100A 電壓電流感測器

# 馬達實驗方法

利用 ROBOTIS 公司所出的 RX-64(圖 3-7)伺服馬 達作為實驗對象,利用電腦持續送出 Sin 波的目標速度 來控制馬達,並利用伺服馬達上的感測器來得到溫 度、電壓、速度、負載之數據回傳至電腦,然後再藉 由方程式計算與轉換得到電流(3-2) 等資料再透過這些 資料計算出馬達的轉換效率(3-3、3-4、3-5)最後對實驗 組與對照組相互進行比分析與比較。

$$I_{mA} = \frac{p_{max} \times r}{V} \qquad 3-2$$

-4 -5

其中ImA為電流、pmax為馬達最大輸出功率 48.1 瓦特且 不考慮能量損失、r為馬達力量比例,然後我們就可以 根據所收集到的數據計算馬達的轉換效率 E。

$$E = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \qquad 3-3$$

其中PIN為輸入功率,POUT為輸出功率。

$$P_{IN} = I \times V \qquad 3$$
$$P_{OUT} = \tau \times \omega \qquad 3$$

其中I流經馬達電流、V流經電達電壓、τ扭矩,單位為 (N•m)、ω角速度,單位為(弧度/秒)(rad/s)。



圖 3-7 RX-64 伺服馬達

#### 攝影機實驗方法

為了方便遠距離接收攝影機的影像資料,實驗使 用網路攝影機,以便在照射廠外的電腦可以經由網路 連續收集攝影機擷取影像的資料。此外,為了瞭解輻 射對攝影機擷取影像的色彩空間的影響,擷取的影像 主要是紅、綠與藍三種顏色(Red、Green 與 Blue),如 圖 3-1 待測平台上的色卡。

#### 實驗結果

根據實驗過後得到的資料,我們得到待測物受輻 射照射5個小時間的所有數據,將實驗數據與對照數 據做比對分析,得到以下結果。

#### 電池實驗結果

在照射前,先對電池進行相關的性能測試,包括 每次充、放電的電流變化、花費時間、容量效率與總 時間變化,圖 3-8、3-9、3-10與 3-11 分別為其時間軌跡。













圖 3-11 照射前電池每次充放電的總時間變化

在先掌握電池為照射前的性能後,接著就要探討 受鈷 60 照射的性能變化,圖 3-12、3-13、3-14 與 3-15 為在 10 戈雷照射下每次充、放電的電流變化、花費時 間、容量效率與總時間變化,圖 3-16、3-17、3-18 與 3-19 為在 30 戈雷照射下每次充、放電的電流變化、花 費時間、容量效率與總時間變化,圖 3-20、3-21、3-22 與 3-23 為在 70 戈雷照射下每次充、放電的電流變化、 花費時間、容量效率與總時間變化。從歷史軌跡圖可 以觀察到只有受 70 戈雷照射的充放電效率才有明顯影 響,如圖 3-22 所示,充放電容量效率降至 75%左右。





圖 3-22 70 戈雷平台每次充放電的容量效率變化



圖 3-23 70 戈雷平台每次充放電的總時間變化

表 3-210 戈雷照射後,在無輻射情況下測試 電池充放電的變化

10戈雷平台	電流(mA)	時間(s)		
充電	330	289	總時間	634(s)
放電	220	345	容量效率	79.9(%)

表 3-3 30 戈雷照射後,在無輻射情況下測試電池充放 電的變化

30戈雷平台	電流(mA)	時間(s)		
充電	188	354	總時間	691(s)
放電	158	337	容量效率	80.3(%)

表 3-470 戈雷照射後,在無輻射情況下測試電池充放 電的變化

70戈雷平台	電流(mA)	時間(s)		
充電	430	122	總時間	214(s)
放電	460	92	容量效率	80.7(%)

電池在經過5小時鈷60照射後,為了確認電池是 否兆成永久性破壞,在無輻射情況下,又對三組電池 禁行充放電實驗,表 3-2、3-3 與 3-4 分別是三個電池 的實驗結果,結果顯示三組電池的充放電效率都是將 近 80%,此次照射,無論是 10、30 與 70 戈雷強度的 實驗,都未對電池造成永久破壞。

# 馬達實驗結果

本研究驗評估馬達受輻射照的影響是量測其運轉 效率,如方程式(3-3)~(3-5),其意義是由馬達輸出的機械 能除以輸入馬達的電能。

在進行輻射照射前,先行量測馬達的轉換效率,如

圖 3-24 所示, 在受 10 戈雷照射的前期、中期、後期與 實驗後轉換效率如圖 3-25、3-26、3-27 與 3-28 所示, 圖 3-29、3-30、3-31、3-32 與 3-33 是 30 戈雷照射的轉換效 率,圖 3-34、3-35、3-36、3-37 與 3-38 是 70 戈雷照射 的轉換效率。所有圖顯示轉換效率在 62%與 15%間變化, 無論是多少戈雷照射,均無差異。



圖 3-28 10 戈雷實驗後馬達轉換效率



攝影機受輻射照射的影響因數較複雜,因此另起 一章進行較多不同分析,而且在剛開始沒多久,受 30 與 70 戈雷照射的攝影機陸續斷訊,在輻射廠外的電腦及無 法接收攝影機的影像資料,實驗顯示攝影機無法在 30 與 70 戈雷的輻射劑量下正常工作。為了確認無法正常工作 的真正原因,在經過5小時的照射後,兩組攝影機又在 無輻射的情況下進行測試,測試結果攝影機恢復正常取 像功能,因此可以判斷攝影機網路通訊的問題,30 與70 戈雷的輻射劑量令攝影機的網路通訊喪失功能。

只有受 10 戈擂照射的攝影機圖可以正常工作,4-1 是照射前的影像,圖 4-2 是照射中的影像。由圖 4-2 可 以觀察到影像資料受輻射照射時,會產生雪花片的現象, 因此本研究針對此現象詳細分析。



圖 4-2 照射中攝影機擷取的影像

本研究實驗針對受 10 戈雷輻射照射的影像進行 分析,本研究提出兩種分析方法:一是傅立葉轉換的分 析,二是在 HSV(Hue Saturation Value)色彩空間分析, 以下分別說明。

會進行傅立葉轉換分析是想要觀察影像資料受輻 射照射中的變化。圖 4-3 與 4-5 是輻射照射前與中的影 像資料,其直方圖分別是圖 4-4 與 4-6,要觀察其差異是 很難的,因此將圖 4-3 與 4-5 分別進行二維的傅立葉轉 換,分別得到圖 4-7 與 4-8。將圖 4-7 與 4-8 相減後,再 進行反傅立葉轉換可以得到圖 4-9。圖 4-9 的結果說明 照射前與照射中的直方圖差異大部份在 50 以下,由此 判斷照射中會影響攝影機擷取影像的色彩值。為了詳細 比較其差異,將圖 4-4 與 4-6 的最大值設定在 30000,分 別得到圖 4-10 與 4-11,兩圖比較可以看出受輻射照射會 產生鈍化的結果。



圖 4-3 照射前攝影機擷取影像的灰階圖





圖 4-5 受 10 戈擂照射後攝影機擷取影像的灰階圖





圖 4-7 圖 4-3 的傅立射轉換



圖 4-8 圖 4-5 的傅立射轉換





由傅立葉轉換發現受輻射照會影響色彩的變化,因 此針對色卡的紅綠藍三種顏色,將其色彩值從 RGB 轉 換至 HSV(Hue Saturation Value)色彩空間,因為在 HSV 的色彩空間的 H 值(Hue)較具顏色本質,因此可的分析 顏色成分受輻射照射的影響。

HSV 色彩空間的分析是就紅、綠與藍三個色塊攝影 機所擷取的影像分析其 H 值, 圖 4-12 與 4-13 分別是照 射前與照射中紅色色塊 H 值的直方圖,圖 4-14 與 4-15 分別是照射前與照射中綠色色塊 H 值的直方圖,圖 4-16 與 4-17 分別是照射前與照射中藍色色塊 H 值的直方圖。 由三類的直方圖可以歸納色塊的 H 值,照射前較集中, 在照射中擴散到較廣的範圍,例如:由圖 4-12 與 4-13 的 比較,可以得知紅色色塊在照射前 H 值集中在 165 至 170 間,但照射中 H 值擴散到 150 至 180 間。綠色與藍 色色塊也有類似現象,由此歸納受輻射照射時顏色的彩 度會產生變化。





	照射前	照射中	减少	减少
			像素	比例
紅色	150851	137384	13467	0.0892
綠色	150851	132105	18746	0.1243
藍岛	150851	148154	2697	0.0179

表 4-1 不同顏色受輻射照射時的影響程度

若將所有色塊集中射起比較,由圖 4-18 與 4-19 的 比較,也發現照射時,顏色的像素有減少的現象。經由 程式詳細分析紅色色塊照射前的總像素數量為 150851, 照射時的總像素變為 137384,減少數量為 13467,減少 比例為 0.0892。



圖 4-20 照射實驗結束後,攝影機擷取的影像恢復正常

在照射實驗結束後,又在無輻射情況下,利用攝影 機擷取影像,受10、30與70戈雷照射的三個攝影機都 恢復正常,其擷取的影像如圖4-20所示。

#### V. 結論

為了評估鋰電池、伺服馬達、IP 攝影機等在輻射環 境下,是否能照常運作,所以進行輻射劑量的照射實驗, 進而了解零件是否會因輻射造成影響。進行的場地為桃 園縣龍潭核能研究所百萬居里鈷 60 照射廠。

首先在實驗室架設三組實驗平台並且在無輻射環 境照射下進行實驗,作為對照組。第二在廠中架設三組 實驗平台,其測量到的戈雷量分別為10、30、70戈雷, 進行時長5小時的實驗,最後,將廠中受輻射照射過後 的實驗器材在無輻射的環境下做一次實驗。

#### 電池實驗結果

在與實驗前測試資料和照射實驗的資料結果得知, 鋰電池在10 戈雷實驗平台下,無損毀且無明顯變化,且 在實驗後的資料與實驗前的資料對比也無明顯變化,30 戈雷實驗平台下其容量效率、充放電總時間因累積劑量 增大而下降,其容量效率約下降4%,充放電一次的總時 間從原本的660秒慢慢下降至560秒,但在實驗後的資 料與實驗前的資料對比並無明顯變化。30 戈雷實驗平台 下其容量效率、充放電總時間因累積劑量增大而下降, 其容量效率約下降6%,充放電一次的總時間從原本的 282 秒慢慢下降至217秒,但在實驗後的資料與實驗前 的資料對比並無明顯變化。

#### 馬達實驗結果

首先觀察實驗中馬達是否會因為輻射的長時間照 射而有所化,但就現場的各項數據顯示(電壓、電流、轉 速等等)馬達效率並無因為受到長時間照射而有所影響。 再來我們比對了馬達在受到不同劑量的輻射源照射就 結果顯示其三種劑量的輻射源(10、30、70)無明顯的證據 顯示馬達因為在較高輻射的環境下而在效能上有所降 低。最後比對了三組馬達分別在實驗前、實驗中、實驗 後馬達各項數據的變化來觀察馬達是否會因遭到輻射 照射後而造成永久性的損傷,但結果而言三組馬達效率 在任何時段均沒有受到影響,因此我們猜測

1. 馬達可以承受更高輻射量的輻射照射

2. 實驗場所發出的輻射源並不會造成累積

#### VI. 結論

本研究計畫已開發適用於核電廠幅射區機器手臂 的雛型,另外也針對常用於機器人的三個模組:馬達、 電池與攝影機進行輻射照射測試。照射實驗是前往核能 所的鈷 60 照射。

針對照射測試,本研究計畫研發一套進行動態測試 設備,使模組在照射射量測其工作情況。整個照射實驗 經歷5個小時,馬達在10、30與70戈雷照射的情況下, 三顆的轉換效率都不受影響,可見這樣的輻射劑量不影 響馬達的運轉,電池的影響也類似,只有受70戈雷照射 的電池其充放電效率降低6%,可見這樣的輻射劑量對 於電池工作5個小時也沒有影響。

唯有攝影機受到照射的影響較大,受 30 與 70 戈雷 照射的攝影機,在照射沒多久後即無法擷取影像,經由 之後的實驗研判,是攝影機的網路通訊功能受到輻射影 響,無法正常工作。最後只剩下受 10 戈雷照射的攝影機 能正常工作,經由兩種分析方式:傅立葉轉換分析與 HSV 色彩空間的分析,發現輻射照射會影響攝影機擷取 顏色的彩度,而且維持原色彩的像素會減少,其中綠色 的減少最多,藍色的減少最少,也就是綠色受幅射的影 響最大,藍色的影響最少。

實驗結果引發一個議題是,受輻射照射的影響程度 是否可以據以估測幅射劑量。很可惜本次實驗只有一個 受 10 戈雷照射的攝影機可進行實驗,沒有其他劑量可 以對照比較。若有其他幅射劑量的照射比較,或許會有 具體的結論,這是一個未來有趣的研究課題。

# 政策推動與風險溝通(II)

# 放射線誘變在經濟蘭花品種改良之研究 Study of mutation breeding of orchid by radiation mutagenesis

計畫編號:109-NU-E-005-001-NU 計畫主持人:張正 e-mail:chenchang@dragon.nchu.edu.tw 計畫參與人員:廖美秀、洪惠娟 執行單位:國立中興大學園藝學系

# 摘要

本研究由中興大學園藝學系,臺中區農業改良場及 核能研究所合作執行,以文心蘭及石斛蘭為對象進行蘭 花誘變育種,本年度建立誘變可用植物材料,測試放射 線的劑量,進行誘變株篩選以建立誘變庫,已完成的項 目有興大福氣文心蘭放射線誘變試驗,用溫室成熟苗照 射 20 G 伽瑪射線,開花時會產生唇瓣具鋸齒的變異花 朵。檸檬綠文心蘭組織培養苗以伽瑪放射線照射測是半 數生長量(RG50),用迴歸分析的結果為92.2 Gy。從各 種劑量照射後栽培 6-8 個月的蘭花苗,共挑選出 105 株 外型不同的擬變異株。檸檬綠文心蘭類原球體經伽瑪射 線放後及石斛蘭莖節扦插之芽體經伽瑪射線照射之溫 室苗,皆在篩選變異株之中,要到下一個年度中才會有 結果。

關鍵詞:文心蘭;50%生長量;誘變株;類原球體

#### Abstract

This research was carried out in cooperation with the Department of Horticulture of Chung Hsing University, the Taichung District Agricultural Improvement Farm and the Institute of Nuclear Energy. Oncidium and Dendrobium were used for orchid mutation breeding. This year, the plant materials for mutagenesis were established and the radiation dose was tested. Mutagenic strains are screened to establish a mutagenesis database. The completed projects include Oncidium radiation mutagenesis test. The mature seedlings in the greenhouse are irradiated with 20 G gamma rays, which will produce mutant flowers with serrated lips when blooming. Oncidium Lemon Heart seedlings measured half the growth (RG50) by gamma radiation, and the result of regression analysis was 92.2 Gy. From the orchid seedlings cultivated for 6-8 months after various doses of irradiation, a total of 105 pseudo-mutant plants with different appearances were selected. Oncidium Lemon Heart PLBs after gamma irradiation and the gamma-irradiated greenhouse seedlings of the buds of Dendrobium stem node cuttings are all selected among the mutants, and the results will not be available until the next year.

Keywords: oncidium orchid; RG50%; mutation plant; protocorm-like bodies (PLBs)

# I. 前言

經濟蘭花為臺灣現今花卉作物中最重要的種類,年 產值佔花卉品項第一並能大量外銷到世界各國,為臺灣 具世界競爭力的農業產品。蘭花育種方法主要是採用雜 交育種法,需經歷漫長無菌種子發芽與試管內育苗,達 到開花前需經歷長達數年幼年期。本計畫結合中興大學 園藝學系和台中區農業改良場兩個進行蘭花育種的單 位,以自行研發的蘭花品種及重要待改良的商業品種為 標的,與原子能委員會核能研究所進行技術合作,透過 放射射誘變的技術,在現有成熟蘭花育種技術,與自行 研發品種基礎,加速蘭花品種育成效率,開創具新穎性 蘭花品種,提升臺灣蘭花育種技術及全球競爭能力。

#### Ⅱ. 主要內容

本研究由中興大學園藝學系,臺中區農業改良場及 核能研究所合作執行,以經濟蘭花文心蘭及石斛蘭為對 象進行蘭花誘變育種,本年度建立放射線誘變可用植物 材料部位的篩選,測試不同蘭花種類及部位對放射線的 劑量的反應,進行放射線照射後篩選誘變株以建立誘變 庫,供來年進行高階誘變優良性狀選抜。

#### III. 結果與討論

1.興大福氣文心蘭放射線誘變

興大福氣文心蘭 PLB 於照射後第一個月處理組及 對照組外觀無明顯差異,皆能正常增殖。瓶苗處理組與 對照組外觀無明顯差異,長出側芽亦無畸形或出現條斑 現象。溫室栽培苗照射前已抽花梗之植株於照射後第一 個月開花,相較對照組之植株其花朵畸形、唇瓣邊緣呈 現鋸齒狀。照射後第三個月及第四個月已開花植株之花 梗長度低於對照組。

#### 2.檸檬綠文心蘭組織培養苗放射線誘變

利用迴歸分析計算檸檬綠文心蘭組織培養苗之放 射線照射株之葉數、葉長、葉寬,從照射當月起到第3 個月的相對生長率與劑量之預測迴歸方程式,皆呈現隨 著劑量增加而減少的趨勢,比較方程式相關係數平方值  $(R^2)$ 與顯著值(P):葉長之相關係數 R 的平方值為 0.81, 較葉數、葉寬相關係數 R 的平方值 0.44、0.45 接近 1, 且其顯著值 P 為 0.01(<0.05),表示葉長之相對生長率 與劑量較相關,利用葉長判斷  $\gamma$  射線照射檸檬綠文心蘭 瓶苗的半數生長率劑量較適合。葉長分析出之預測迴歸 方程式 y = -0.5465x + 100.39計算半數生長劑量(RG50) 值為 92.2 Gy。

隨著照射劑量增加,檸檬綠文心蘭照射株受到損傷 之情形亦呈現增加趨勢。照射後第二個月之 80 及 160 Gy 照射株頂端死亡現象最為嚴重。照射株假球莖生成 率與高度隨著劑量增加而呈現減少趨勢。在劑量 10 Gy 至 80 Gy 的植株中,畸形現象不僅呈現在照射株的假球 莖上,照射株頂芽甚至長出新的假球莖(頂芽活化),而照 射株株及側芽新葉亦觀察到葉緣黏合不展開,或呈現細 長型圓筒狀的葉子。

照射母植於照射後第一個月陸續生長出2公分以上 之側芽。40 Gy 之側芽生成率由第一個月0%,升高至第 二個月的41.3%,而在照射後第三個月,處理40 Gy 以 下的劑量,其側芽生成率皆高於50%,但80 Gy 及160 Gy 皆仍無2公分以上側芽生成,40 Gy 處理組不僅側芽 生成率最高,其單株平均側芽數也位居第一。於照射後 第三個月觀察到一株10 Gy 植株的側芽具有黃色條斑。

檸檬綠文心蘭組織培養苗放射線照射後經6-8個月 溫室栽培,挑選出110株外型有變的植株,分別為10Gy 有16株、20Gy有24株、40Gy有18株、80Gy有12 株、35Gy有15株有、50Gy有10株、65Gy有9株、 100Gy有1株、0Gy對照組有5株,為誘變庫組成株。

3.檸檬綠文心蘭類原球體誘導增殖及放射線誘變

截取檸檬綠文心蘭植株花序頂端進行類原球體誘 導培養,24週後生成類原球體,26週後類原球體增殖且 伴隨著類原球體發芽,分別繼代培養,類原球體以每1 個月進行一次繼代培養發育生長為小苗,供後續大量 進行檸檬綠文心蘭組織培養苗放射線誘變試驗使用。檸 檬綠文心蘭類原球體在照射一個月後,並無出現 PLBs 團粒因照射死亡的現象,從外觀型態觀察,20 Gy 以下 的照射劑量再生蘭苗較多,25 Gy 以上的照射劑量再生 蘭苗較少,在80 Gy 以上的照射處理幾再不會再生蘭苗, 後續的誘變株篩選因時間的關係要在下個年度執行。

#### 4.石斛蘭之放射線誘變照射

台中 2 號紅雀石斛蘭(TC2)單節扦插苗照射 4 個多 月後,小芽(<3 mm)比大芽(10~51 mm),有較高的死 亡率,且存活芽數極少。在 40 Gy 的處理,芽長 3~9 mm 的級別,觀察到 2 芽體與對照組略有差異,1 芽體的葉 片微皺葉色淡綠且有輕微斑駁及1 芽的葉色淡綠。

台中 3 號金島石斛蘭(TC3)單節扦插苗照射 4 個月後,無論有照射處理株或没有照射的對照株的芽體死亡 率高,與台中 2 號紅雀石斛蘭(TC2)相比,台中 3 號金島 石斛蘭(TC3) 整體的生長勢較弱,不合適來進行放射線 照射誘變育種。

#### IV. 結論

1. 參與之工作人員獲得之訓練

本人長期進行花卉領域教學與蘭花育種的研究工 作,由本研究計畫初次接觸核能誘變育種,將核能之放 射線這一個強力方法,應用於花卉育種,可開拓本人的 花卉育種的視野,有助於精進教學及研究工作。

執行本研究計畫可以訓練並專精蘭花栽培、蘭花繁 殖及蘭花育種作業的學士級研究助理及博士及助理各 一名,學習文心蘭盆花與切花栽培,蘭花組織培養之類 原球體誘導增殖及再生培養等專業知識,石斛蘭扦插繁 殖的方法。為國家培育具有學術背景的蘭花育種人才。 學士及助理在完成工作後考上研究所再精研蘭花研究, 博士級助理在半年的工作後,已經取得教職在泰國農業 大學任教花卉學。

 完成之研究成果及未來研究規劃 本年度研究計畫,著重在建立蘭花放射線誘變育種 方法學的劑量測量與蘭花照射後的反應,並建立篩選誘 變株建立庫,由於蘭花的生長速度慢,應在一年內尚不 會開花(除了興大福氣文心蘭),故難以有完整的誘變株 的開花階段以進行品種選抜,但可以經單株篩選建立蘭 花的誘變庫,於來年進行高階性狀選抜。

檸檬綠文心蘭因染色體行為複雜花粉活力極低,難 以進行雜交育種,培育第接替檸檬綠文心蘭的切花品種 惟有依賴誘變育種技術,方有可行性。放射線的誘變具 有高變異效率,而誘變庫建立與栽培場域及方法籌建, 約需要一年的時間,也是本計畫執行的時間得以完成。 要進行誘變株的切花性狀選抜等工作,預計需要再有一 年之久,得以完成一個文心蘭切花栽培與生產週期,得 以評估誘變庫中變異株的性狀是否符合切花生產之目 標。

## 參考文獻

- 傅仰人、楊雅淨、鄭隨和.2009. 聖誕紅新品種桃園 核研 1 號及 2 號之育成. 桃園區農業改良場研究 彙報 64:27-37.
- [2] Ahloowalia, B. S. and M. Maluszynski. 2001. Induced mutations - A new paradigm in plant breeding. Euphytica 118: 167-173.
- [3] Datta, S. K. 2012. Success Story of Induced Mutagenesis for Development of New Ornamental Varieties, p. 15-26. In: Kozgar, M.I. and S. Khan(Eds.). Induced Mutagenesis in Crop Plants. Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability Volume 6 (Special Issue 1). Global Science Books, UK.
- [4] Datta, S.K., J.A.T. Silva. 2006. Role of Induced Mutagenesis for Development of New Flower Colour and Type in Ornamentals, p.640-645. In: Teixeira da Silva, J. A(ed.). Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology Volume I. Global Science Books, UK.
- [5] Ibrahim, R., Z. Ahmad, S. Salleh, A. A. Hassan, and S. Ariffin. 2018. Mutation Breeding in Ornamentals, p. 175-209. In: Huylenbroeck, J. V(ed.). Ornamental Crops. Springer Nature,
- [6] Okamura, M., A. Tanaka, M. Momose, N. Umemoto, J. A. Teixeira da Silva, and T. Toguri. 2006. Advances of Mutagenesis in Flowers and their Industrialization, p. 619-628. In: Teixeira da Silva, J. A(ed.). Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology Volume I. Global Science Books, UK.
- [7] Yamaguchi, H. 2018. Mutation breeding of ornamental plants using ion beams. Breeding Science 68:71-78.

# 以伽瑪輻射誘變進行大豆育種並改良發酵益生菌與食用麴菌(2) Application of γ-ray irradiation on soybean breeding and on microorganism improvement of lactic acid bacteria and tempeh fungus

計畫編號:109-NU-E-415-001-NU 計畫主持人:王紹鴻 e-mail:shwang@mail.ncyu.edu.tw 計畫共同主持人:朱紀實、蔡文錫、謝佳雯、吳進益 計畫參與人員:林巧玲、林采宜、潘冠妤 執行單位:國立嘉義大學微生物免疫與生物藥學系

# 摘要

大豆種子富含多種人類與動物有用之營養成分,包 含高量油質、蛋白質以及異黃酮等功能性分子。已知異 黄酮具有多元人體健康促進功效,卻主要以含配醣體的 形式存在,可透過微生物發酵去除醣基成為人體易吸收 之去醣體異黃酮。本計畫利用本年度建立之大豆異黃酮 微量分析平台,延續 108 年度初步篩選伽瑪輻射誘變 之高異黃酮突變金珠大豆成果,持續選育出第五代遺傳 性狀穩定之高產量且高異黃酮含量之 14 株誘變品系, 其單株大豆產量高於原金珠大豆 1.5 倍重量;而第四代 種子甲醇萃取液的異黃酮含量在 1.36~2.44 mg/g 遠高 於一般市售大豆。本計畫同步以伽瑪輻射誘變篩選具有 高葡萄糖苷酶活性之少孢根黴菌以及乳酸菌,分別透過 建立之真菌固態發酵與細菌液態發酵方法進行微生物 生物轉化無配醣基異黃酮之優良品系。本研究最終選育 高異黃酮量及高蛋白質產量、含高γ-胺基丁酸或抗氧化 物等機能性新大豆品系,並篩選出具有開發潛力之少孢 根徽菌與乳酸菌突變菌株及建立相應生物轉化之發酵 平台與產品製程,將可供應日漸增長的素食市場需求的 植物性蛋白質市場需求。

**關鍵詞:**伽瑪輻射誘變、大豆、少孢根黴菌、乳酸菌、 異黃酮、微生物生物轉化。

#### Abstract

Soybean seeds are rich in a variety of nutrients that are beneficial to humans and animals, including high amounts of high-quality oils, proteins, and bioactive molecules. Among these molecules, isoflavones are known to have multiple health promotion effects for human and are mainly in the form of glycosides. Microbial fermentation can remove the glycosides from isoflavone glycone to form isoflavone aglycone for higher bioavailability in the human intestines. This year, with a trace analysis platform on isoflavones, the selected high isoflavone soybean mutants by γ-radiation mutagenesis of Golden pearl soybean in 2019 were bred continuously, and some fifth generation soybeans showed the stable traits with high yield and high isoflavone content. Fourteen varieties produced 1.5-fold more weight in average per plant than that of the original Golden pearl. The isoflavone content in methanol extract of the fourthgeneration seeds ranged 1.36~2.44 mg/g, far higher than commercial soybeans. Moreover, y-radiation mutagenesis was also applied to Rhizopus oligosporus and lactic acid bacteria to screen for those with high  $\beta$ -glucosidase activity,

then the microbial biotransformation with the higher activity was carried out with the established fungal solid fermentation or bacterial liquid fermentation to produce the best yield of isoflavone aglycone. Finally, the high-yield soybean varieties with high isoflavones, high  $\gamma$ aminobutyric acid and antioxidant molecules were selected, as well as good candidates of *R. oligosporus* and lactic acid bacteria mutants. To meet the growing demand for plantbased beneficial protein products in the vegetarian market, the manufacturing process will be optimized with the fermentation platforms for biotransformation of soybeans.

Keywords:  $\gamma$ -irradiation mutagenesis, Soybean, *Rhizopus* oligosporus, Lactic acid bacteria, Isoflavone, Microbial biotransformation.

# I. 前言

近年基因轉殖技術不斷進展,但是基改作物的安全 性仍有爭議;傳統之引種與雜交組合的篩選技術,無法 選育大範圍變異造成同時逆境適應且提升特定代謝產 物,更需要較長的育種時間。為達成染色體大範圍多元 變異,本團隊利用伽瑪輻射誘變技術計畫在短時間選育 出具有特色之大豆品系,並已篩選出具有高產量與高異 黄酮之金珠大豆突變品系 [1]。大豆高抗氧活性物質中 以異黃酮類的酚類化合物最具有健康促進功效,經乳酸 菌製成產品能降低糖尿病老鼠血糖濃度,且異黃酮種類 與延緩或降低血糖濃度有關 [2]。大豆異黃酮常以配醣 體的形式存在。透過微生物轉化方式提升大豆中去醣體 異黃酮含量,進而提升異黃酮在生物的利用率。本年度 計畫旨在篩選穩定高異黃酮含量金珠大豆品系,並利用 微生物轉化伽瑪誘變之高異黃酮大豆品系,提升生物可 利用異黃酮類產物,同時增加具有重要生物活性之  $\gamma$ -氨基丁酸 (GABA) 含量。未來可應用在開發高經濟價 值新型大豆品種,並利用微生物進行生物轉化以提升功 能性成分含量,強化植物性蛋白質開發,達到功能性營 養加值及保健功效。

# Ⅱ. 主要內容

本計畫為延續 108 年度初步成果並進一步針對所 篩選出優秀且性狀穩定之金珠大豆突變品系,整合微生 物活性功能分子轉換技術,著重於應用已建立大豆異黃 酮類之微量分析平台技術,篩選性狀穩定之優良金珠大 豆候選突變品系 (F2M1 與衍生品系,F3-F5 篩選)。以單 顆誘變金珠大豆高異黃酮類與抗氧化活性分析篩選平
台挑選出秀異大豆育種品種,最終本研究選育高異黃酮 量及高蛋白質產量、含高γ-胺基丁酸 (GABA) 或抗氧 化物等機能性等新品種,未來應用在開發高經濟價值新 型大豆品種,供應日趨成熟的植物性蛋白質市場需求。

### III. 結果與討論

本研究透過伽瑪輻射誘變技術改良具有高異黃酮 成分之金珠(十石)大豆,經 200 Gy 照射種植篩選,108 年度已選出第二代高英數和多粒英特性 450 株 (M2)。 109 年針對第二代大豆種子以甲醇萃取後製成濃縮萃 取物以 HPLC 分析配合 254 nm UV 偵測常見大豆異 黃酮含量用於選育高異黃酮突變株 (表一)。為確保遺傳 特性穩定性,選取 100 株 M2 進行第三代種植,以混 合優良株方式採收 M3 大豆 (表一,最佳10株),並續 將具潛力之 53 個混收組於春夏進行第四代種植並挑 選平均單株產量 >20g 者共有 68 個混收組。秋冬進行 第五代續種混收組,其中 20 個優良組單株重高於 16 克且百粒重 >17.5 克,高於對照組原始金珠大豆之表現, 具有推廣種植之價值,且其中有二個組合 (S017-A1 及 S023-A1) 之 M1 具有高異黃酮含量特性,可能成為功 能性大豆之種原。

表一、第二代種子濃縮萃取樣品異黃酮濃度分析 (μg/g)

Cada	β-glycosides		Aglycones			SIM	
Code	Daidzin	Glycitin	Genistin	Daidzein	Glycitein	Genistein	SOM
S001-A	1297	339	1349	58	ND	54	3097
S002-A	1941	404	2195	139	44	118	4841
S004-A	1439	370	1638	49	ND	47	3543
S006-A	1257	309	1288	60	29	51	2994
S007-A	1456	378	1519	67	ND	65	3485

表二、	突變金珠	<b>七豆第五代種</b> :	植性狀前 20	0 優良組合
-----	------	-----------------	---------	--------

Code	5株總萊數	5株>2粒莢數	5株種子重,g	100 種子重, g
S017-A1	393	363	125.27	19.33
S023-A1	443	333	107.56	19.15
S025-A1	481	353	106.06	18.07
S026-A1	400	305	84.94	18.43
S067-A1	436	320	87.40	17.47
S077-A2	362	293	86.45	21.08
S077-A4	617	493	145.41	18.15
S078-A1	208	164	156.47	18.65
S080-A1	578	490	142.30	18.08
S085-A1	592	411	143.50	21.52
S087-A1	461	358	102.23	20.35
S092-A1	476	349	112.70	17.77
S096-A1	625	419	114.36	19.30
S097-A1	412	342	93.97	18.97
S100-A1	519	410	113.52	21.06
S101-A1	360	273	87.14	21.62
S117-A1	493	418	129.90	17.75
S123-A1	461	347	110.09	18.32
S128-A1	468	337	94.46	20.12
S135-A1	435	322	161.17	18.15
金珠	471	416	82.10	17.23

108 年挑選經 1,000 Gy 輻射照射少孢根黴菌菌株 後挑選具有高蛋白分解活性或高脂解酶活性之菌株,其 中以 SW02、SW06、SW08 具有開發潛力,將金珠大豆 以此三突變菌株經三天發酵製成大豆天貝,分別具有不 同香氣,以 SW08 氯味優於其餘菌株與原始親株產品。 將製成天貝冷凍乾燥磨粉後甲醇萃取微量分析,可發現 β-glycosides 與 malonyl-glucosides 異黃酮明顯降低而 易被人體吸收之 aglycones 濃度升高 (圖一),相關結果 已發表國內期刊 [3]。



圖一、HPLC分析未發酵大豆 (NC) 以及接種 WT、 SW02、SW06 與 SW08 菌株發酵天貝之異黃酮變化

針對大豆發酵乳產品開發之研究,透過田口式直交 法評估三株伽瑪誘變乳酸菌 LPLRA16、LPLRB29、 LRTRA03 與蔗糖影響發酵豆乳的關鍵變化,並確定最 佳之 LPLRA16、LPLRB29、LRTRA03 的添加菌數濃度 以及蔗糖濃度組合。最後以反應曲面法評估發酵豆乳產 出含有 GABA 活性物質的最適發酵豆漿條件 (圖二)。 此外,在此優化發酵條件下,分析產物中 aglycones 異 黃酮含量為 183.19 μg/mL,明顯高於原金珠豆漿 7.37 μg/mL,大幅提升 aglycones 濃度達 24.9 倍,其中的 genistein 經優化後可提升 13 倍,達到 95.61 μg/mL。



圖二、以蔗糖濃度中心點繪製 LPLRB29、LRTRA03 的添加量對於發酵豆乳 GABA 濃度之反應曲面示意圖

### IV. 結論

本研究證實伽瑪輻射誘變可有效針對大豆、根黴菌、 乳酸菌產生性狀之高度變異,透過本計畫所建立之快速 微量功能性分子分析平台與酵素活性分析,本團隊確實 篩選出具有開發潛力之高異黃酮大豆、具高蛋白酶、高 脂質酶以及 β-葡萄糖苷酶活性之少孢根黴菌與乳酸菌 之變異株,更值得注意的建立優化之發酵條件,可用於 生產具有開發潛力之功能性產品。本計畫承續前一年建 立之伽瑪輻射誘變技術,並以一年期間持續選育出性狀 穩定之高功能性且具高產量之大豆品系,再加上挑選出 具開發價值之少孢根黴菌突變株以及乳酸菌突變株,並 已著手建立具有高附加價值之高功能性大豆發酵產品。

### 参考文獻

- [1] 王紹鴻,朱紀實,蔡文錫,謝佳雯,& 吳進益.(2020, 28th September). 108 年原子能科技學術合作研究計 畫成果發表會論文集. Paper presented at the 108 年 原子能科技學術合作研究計畫成果發表會,台北市 集思台大會議中心。
- [2] Yuan, H.D., Leu, Y.C., Chen, C.H. *et al.* The protective effects of the novel soy yogurt product in streptozotocin-induced hyperglycemic mice. BIT'S 4<sup>th</sup> Annual World Congress of Diabetes. Kaohsiung, Taiwan, November 26-28, 2015.
- [3] 陳冠中, 吳進益, & 王紹鴻. (2020). 應用伽瑪輻射 誘變改良少孢根黴優化天貝之糖苷配基異黃酮含 量. 嘉大農林學報, 17(2), 33-48。

# 以碳酸鹽動力學評估硼同位素在海洋酸化之角色 To Evaluate the Role of Boron Isotope in the Ocean Acidification by Carbonate Dynamics

計畫編號:109-NU-E-110-001-NU 計畫主持人:黃蔚人 e-mail:wjhuang29@mail.nsysu.edu.tw 計畫共同主持人:游鎮烽、黃國芳 計畫參與人員:劉厚均 執行單位:國立中山大學海洋科學系

### 摘要

海洋酸化的指標,除了酸鹼度(pH)以外,碳酸鈣飽 和度(carbonate saturation state)也逐漸受到重視。然而, 在古氣候學中,硼同位素是否能作為碳酸鈣飽和度的指 標,目前仍不清楚。本計畫在20℃、25℃以及30℃下, 起始碳酸鈣飽和度為6、8、10、12的海水(去除生物作 用)中,培養碳酸鈣六周後,企圖了解其海水中碳酸鹽晶 體中硼同位素與海水中碳酸鹽飽和度之關係。本研究發 現,碳酸鈣飽和度的降低主要發生在前三周,後三周的 變化較小;培養溫度20℃實驗中碳酸鈣飽和度皆降得較 30℃多。由於我們企圖模擬接近自然環境中的碳酸鈣飽 和度,並透過長時間的培養方式,收集到的碳酸鈣沉澱 訊號會受到海氣交換以及培養容器中蒸發再凝結的影 響,同樣的因子也可以在硼同位素以及鍶同位素反映出 來。我們推測,海洋表層水中無機碳酸鈣的非生物自然 沉澱,可能也受到海氣交換的影響。本計畫已經建立流 暢的合作團隊,成功完成一套可準確控制碳酸鈣飽和度 之無機碳酸鈣沈澱實驗以及高精準分析海水及碳酸鈣 之硼同位素質譜分析術,未來將可作為研究海洋酸化對 碳酸鈣沉澱及溶解相關研究之重要方法。

關鍵詞:海洋酸化、硼同位素、鍶同位素、碳酸鈣

### Abstract

In addition to pH, carbonate saturation state is the other Ocean Acidification (OA) index and has gained more and more attention. However, in paleoceanography, the application of boron isotope on carbonate saturation station as an OA index is still unclear. This study cultured seawaters for CaCO<sub>3</sub> precipitation (no biological activity) with omega saturation of 6, 8, 10, and 12 in containers of water under temperatures of 20°C, 25°C, and 30°C for six weeks. The result showed that Omega values decreased more in the first three weeks and the last three weeks. Controlling temperatures affected the reduction of omega; more in 20°C than the one in 30°C. As we applied omega values close to the natural condition and cultured the water for a long time, the results also reflected air-sea gas exchange signals and evaporation and precipitation in the sealed culturing containers. The same factors can also occur in natural conditions. We suggest that abiotic CaCO3 precipitation may also be affected by the air-sea gas exchange in the surface water. This study established a smooth team that completes the mechanism to control seawater omega for the precipitation of CaCO<sub>3</sub> and the

high precision analysis for seawater and  $CaCO_3$ . This method can be essential to study the effect of OA on  $CaCO_3$  precipitation and dissolution.

**Keywords:** ocean acidification, boron isotope, strontium isotope, calcium carbonate

### I. 前言

自 1960 年有觀測數據以來,大氣中的二氧化碳分 壓不斷的增加,而且增加速率有逐年變快的趨勢(Doney et al., 2009)。海洋能夠吸收大氣中二氧化碳,是大氣二 氧化碳的匯(sink)。儘管海洋能夠減緩大氣二氧化碳增加 的幅度,隨之而來的代價卻是海洋酸化。由於碳酸鹽系 統自然的變化,當二氧化碳溶入海水中時,最終將釋放 出一個氫離子,也就是與酸鹼度直接相關的指標。

Saturation State  

$$\Omega_{phase} = \frac{\left[Ca^{2+}\right]\left[CO_{3}^{2-}\right]}{K_{sp,phase}^{*}}$$

過去研究海洋酸化 時,通常直覺地認為酸鹼 度(pH)是最重要的指標, 然而近年的研究發現,碳 酸 鹽 飽 和 度 (carbonate

saturation state, Omega,  $\Omega$ )更適合作為海洋酸化的綜合 指標(其定義如左圖)。Waldbusser et al.在 2014 年發現海 水中以碳酸鹽殼體的幼蟲,其生長長度對酸鹼度(pH)的 反應並無明顯趨勢,而是對碳酸鹽飽和度能得到合理的 生長曲線(圖二左)。另一則刊登在 Science 的研究則發現, 靠近海水底層的碳酸鹽殼體還會受到沉積物表層中碳 酸鹽飽和度的影響(Eyre et al., 2018)。

在以硼同位素做為古海洋酸鹼度指標的相關理論 中,主要認為在碳酸鹽殼體中的硼同位素反應的是當時 海水的酸鹼度。同時,前人研究也指出,碳酸鹽殼體動 物如何吸收硼同位素進入殼體目前尚不清楚。

碳酸鹽動力學在海洋酸化的研究中扮演舉足輕重的地位,碳酸鹽系統有四個參數(總驗度[total alkalinity]、溶解無機碳[dissolved inorganic carbon]、酸鹼度[pH]、二氧化碳分壓[pCO<sub>2</sub>])與硼同位素之間關連已經有理論上的證明。

### Ⅱ. 主要內容

本計畫使用培養盒內裝天然海水,去除生物效應後, 將碳酸鹽飽和度控制在6、8、10、12。上述實驗重複在 三種不同溫度(20、25、30°C)。培養過程中監測水中總 鹼度、總溶解無機碳、pH、鹽度、鈣離子濃度、主要陽 離子,以及鍶、硼同位素。培樣時間約四至六周。培養 期滿後,將水樣過濾,取其固體量測其鍶、硼同位素。

### III. 結果與討論

碳酸鹽系統研究亮點:總鹼度與 DIC 的變異之相關 性(圖 3-1-7)可以協助我們了解水中控制碳酸鹽之機制。 無論我們有沒有校正鹽度的影響,該圖中,資料點的斜 率主要受到碳酸鈣結晶作用影響。然而,水中並非單純 只有碳酸鈣沉澱作用。目前我們認為培養盒中的海氣交 換,以及蒸發再凝結,以上多種因子出現的順序,可能 導致一些資料點沿著斜率為1的趨勢辯護,並出現總鹼 度以及 DIC 增加的現象。值得後續實驗注意。



鍶同位素研究亮點:有別於過去的研究,本計畫以極 類似真實海洋化學組成、碳酸鈣飽和度及總鹼度等環境 參數下,進行無機碳酸鈣沉澱實驗,以探討在碳酸鈣結 晶的過程中控制穩定鍶同位素(δ<sup>88/86</sup>Sr)分化的真正機 制。初步結果顯示,在碳酸鈣沉澱速度非常緩慢的情況 下,海水的鍶同位素與碳酸鈣交換達到平衡,因此溫度 與碳酸鈣飽和度對同位素分化的影響效應有限;此時, 碳酸鈣的穩定鍶同位素基本上反應過去海水同位素組 成的變化。

Sr Isotope Fractionation (Δ88/86Sr) & Sr Partition (D<sub>Sr</sub>)



硼同位素研究亮點:於實驗期間 20°C 四組碳酸鈣沈 澱實驗之海水δ<sup>11</sup>B 變化小於 1‰(圖 3-3-1,碳酸鈣硼同 位素變化 1‰相當於海水 0.1 pH unit 的變化),顯示本 實驗之海水δ<sup>11</sup>B 在實驗過程中處於穩定狀態,此為碳酸 鈣沈澱控制實驗最為重要的條件之一。然而如前所述, 本實驗高溫組明顯受到蒸發效應所影響,因此 30°C 實 驗組之海水硼同位素組成變化隨時間變輕的趨勢應與 海水蒸發效應有關(圖 3-3-2)。此高溫實驗組在未來無 機碳酸鈣沈澱實驗應特別注意並加以克服。





圖 3-3-1、四組碳酸鈣飽和度 ( $\Omega$ 6,  $\Omega$ 8,  $\Omega$ 10 及  $\Omega$ 12) 於 20°C 時海水硼同位素比 值隨時間之變化。



本研究已成功建立一套可準確控制碳酸鈣飽和度 之無機碳酸鈣沈澱實驗以及高精準分析海水及碳酸鈣 之硼同位素質譜分析術,未來將可作為研究海洋酸化對 碳酸鈣沉澱及溶解相關研究之重要方法。本研究之結果 亦可進一步瞭解台灣附近珊瑚礁生態系統在未來海洋 酸化程度日益嚴重時,珊瑚骨骼生長可能受到的影響。 本研究雖未能獲取足夠量的碳酸鈣粉末,獲得可靠的微 量元素及同位素數據,但所建立之實驗方法與流程可廣 泛用於校正碳酸鈣內微量元素比及同位素與環境參數 間之關係,未來將能以這些校正後的地化代用指標重建 台灣附近海域之環境變遷史。

### 參考文獻

- [1] Doney, S.C., Balch, W.M., Fabry, V.J., Feely, R.A., 2009. Ocean acidification : A critical emerging problem for the ocean sciences.
- [2] Eyre, B.D., Cyronak, T., Drupp, P., Carlo, E.H.De, Sachs, J.P., Andersson, A.J., 2018. Dissolving before end of century. Science (80-.). 359, 908–911. <u>https://doi.org/10.1126/science.aa01118</u>
- [3] Waldbusser, G.G., Hales, B., Langdon, C.J., Haley, B.A., Schrader, P., Brunner, E.L., Gray, M.W., Miller, C.A., Gimenez, I., 2015. Saturation-state sensitivity of marine bivalve larvae to ocean acidification. Nat. Clim. Chang. 5, 273–280.

# 文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃描系統之優化及其應用(II) Optimization and Application of X-ray Cone-beam CT for Cultural Relics Investigation (II)

計畫編號: 109-NU-E-136-001-NU 計畫主持人:陳東和 e-mail:thchen@npm.gov.tw 計畫參與人員:黃千奇 執行單位:國立故宮博物院

### 摘要

X 光電腦斷層掃描技術(XCT)能以非破壞的檢測 方式獲取文物內部的三維結構訊息,增進對各類文物工 藝技術或保存狀況的瞭解。本研究計畫主要乃在自行設 計建置多功能 CT 系統之既有基礎系統上,研究不同類 型文物檢測之最佳化軟硬體參數,包括機構定位校正, CT 後置數位影像處理,包含二維影像最佳化及 FDK 重 建與疊代演算法,X 光影像之假影,特別是線束硬化 (beam hardening)所造成之假影問題處理等。對於複合材 料,以及紙質、漆器及織品等軟材料,探究利用雙能(dual energy)技術法以改善影像品質。此外,也計畫以新的平 行運算技術 - 圖形處理單元(GPU)及平行運算架構 (CUDA)加速建構 CT 二維切片影像和三維影像。在實際 應用上,則以國立故宮博物院所藏之金屬器、陶瓷、漆 器等各類文物為標本,透過實驗檢測,獲取各類型文物 之影像重建最佳參數。

**關鍵詞**:電腦斷層掃描、文物、X 光、線束硬化、雙能 量

### Abstract

With the aim of studying different types of artifacts housed in the National Palace Museum (NPM), a versatile X-ray cone-beam CT has recently been constructed. This NPM homemade cost effective CT system, dedicated to cultural relics investigation, permits of scrutinizing various kinds of materials in different sizes. Based on the CT system, this project optimizes the CT hardware and software parameters for obtaining better 3D-reconstructed images, including positioning correction of CT mechanism, improvement of 2D image quality and 3D image reconstruction algorithm. As certain relics are composed of different kind of materials such as metal and ceramics, or metal and lacquer, the issues concerning the artifacts, especially those caused by beam hardening, are discussed and treated. Dual energy and phase contrast methods are also explored. Besides, as the CT scanned images contribute to big data which can paralyze the computation, a new parallel dynamic computing technology - the compute unified device architecture (CUDA) with graphic processing unit (GPU) are also be employed for accelerating the CT image reconstruction process.

**Keywords:** CBCT, relics, beam hardening, dual energy, phase contrast, artifacts.

### I. 前言

X 光電腦斷層掃描術 (X-ray Computed Tomography,

簡稱 CT)是非破壞三維影像檢測技術,可以在不接觸、 不取樣及不破壞的情況下,獲取物體內部的三維結構資 訊,因此在材料分析與鑑識上是一項極為有利的工具。 CT 的應用相當廣泛,例如醫學檢驗及工業、半導體檢 测等,而市面上許多套裝 CT 也隨著人體或工業使用之 檢測主體的差異而作不同的設計,在X光能量、功率、 掃描尺寸、影像解析度等都有不同的規範。例如,在醫 用 CT 方面,由於人體的組織成分多以氫、氧、碳、氮、 鈣等輕元素構成,適用之 X 光光源的電壓值約為 70-160kV, 其 X 光光源的電壓電流值、承載人體的測試 基座及影像系統等皆以檢測人體而作考量設計;而其基 座固定且以單一方向前後移動,並藉由高解析度的擷取 影像訊號的感測器(detector)以不同角度旋轉接收人體 三維影像。此外,技術上也必須考量能進行極為快速的 掃描以降低人體所接受的輻射劑量。由於多重特殊考量 與設計,醫用 CT 設備造價甚高,依等級之不同而介於 數千萬至數億台幣之間。工業、半導體檢測用的 CT 系 統,其待測物多為金屬等原子序較高的物質,需要較高 之 X 光光源的管電壓值,且依檢測材料不同有不同的功 率需求,通常管電壓介於 160kV~450kV 之間,電流在 數百個 µA 至數個 mA 左右。

然而,對於文物檢測而言,由於文物類型、大小不 一,其材質種類包含金屬、陶瓷、漆器、紙張等各式各 樣不同材料,因此醫用、工業或半導體檢測用之套裝 CT 並不全然適用。目前國際上有部份博物館已購置 X 光電 腦斷層掃描儀,作為文物非破壞檢測用。國內過去雖有 利用醫院之醫療用電腦斷層掃描儀檢視木乃伊之零星 案例,但博物館界並未建置專屬 X 光電腦斷層掃描儀作 為文物檢測使用,其原因一來是市售 X 光電腦斷層掃描 儀造價昂貴,依儀器性能,從新台幣數千萬到上億等級 者皆有之,一般博物館並無經費購置;再者,CT 涉及 專業知識極廣,而博物館也多缺乏相關科技檢測專業人 才。此外,文物科技檢測為跨人文與科技之領域,需要 博物館各部門人員密切合作,對檢測議題有所共識,方 能進行相關工作,因此也需要長時間溝通交流。雖然國 內生醫領域有不少研究單位也進行 X 光電腦斷層掃描 研究,但一來是對象主要生醫樣品或人體,X光管電壓、 功率和劑量一般多不適用於文物檢測用,且機構掃描尺 寸範圍和樣品載臺也非針對文物而設計,因此,就文物 檢測用而言,這類型的 CT 適用範用有限。

有鑒於此,國立故宮博物院為了能以非破壞的檢測 方式獲取文物內部的三維結構訊息,增進對文物工藝技 術或保存狀況的瞭解,近年來嘗試建置X光電腦斷層掃 描技術檢視文物。由於文物組成材質多元且含各類不同 結構之文物,而如前所述,目前市售 CT 極為昂貴卻未 必符合文物檢視需求,故乃自行設計建置多功能 CT 系統,主要考量除了價格遠較市售低廉外,並可視需要調整系統各項軟硬體元件及參數,使之更符合不同文物類 型檢視之需求。

本計畫主要乃在既有基礎系統上,研究不同類型文 物檢測之最佳化軟硬體參數,包括機構定位校正,CT 後置數位影像處理,包含二維影像最佳化及 FDK 重建 與疊代演算法,X光影像之假影,特別是線束硬化(beam hardening)所造成之假影問題處理等。對於複合材料, 以及紙質、漆器及織品等軟材料,則探究利用雙能量 (dual energy)與相位對比(phase contrast)等方法以獲取最 佳影像品質。此外,也計畫以新的平行運算技術-圖形 處理單元(GPU)及平行運算架構(CUDA)加速建構 CT 二 維切片影像和三維影像。在實際應用上,則以國立故宮 博物院所藏之金屬器、陶瓷、漆器等各類文物為標本, 透過實驗檢測,獲取各類型文物之影像重建最佳參數。

本研究計畫結合基礎研究(如影像重建之方法探究) 與應用研究(如應用於文物工藝史研究),其應用成果將 能開拓文物研究的新視野。在另一方面,此一低成本卻 適合博物館文物非破壞檢測用之 X 光電腦斷層掃描系 統,能夠對國內其他博物館和文物典藏單位提供服務, 或透過合作方式,對國內文化資產領域有所貢獻。

### II. 研究方法

1. 糸統整合

CT 的硬體包含 X 光機、樣品載台、影像系統及整 體的自動化機構平台等。由於各項硬體分別獨立,因此 必須架設在同一平面上,並利用自動化機構控制。各項 硬體各自有不同的操作軟體介面,例如 X 光機是由軟體 A操作,樣品載台與影像系統載台則由軟體 B 操作,CCD 則由軟體 C 操作。由於 CT 是必須藉由控制 X 光機、樣 品載台轉動及影像系統而連續取得影像,因此必須將各 軟體整合,始能以同一軟體 D 操作,以達到連續拍攝、 取得 CT 影像的目的。

### 2. 系統優化

本研究計畫基在前述的基礎上,進行 CT 整體系統 的優化,並提升實際文物檢測之影像品質。本研究計劃 預計有三個主要研究的重點:一.線束硬化校正(beam hardening correction),二. 雙能量(Dual Energy) CT 技術, 以下簡稱 DECT,三. 相位對比(phase contrast imaging) CT 影像技術,以下簡稱 PCICT。

首先由於本實驗室建置 CT 之 X 光光源屬於錐狀 (cone-beam)光源,本院部分藏品屬於複合材料(如金屬與 陶瓷、骨器與石器或鑲嵌器物等複合材質),在 CT 重建 影像上呈現線束硬化造成的線條偽影(streak artifact)或 金屬偽影(metal artifact);因此以線束硬化校正和金屬偽 影校正改善 CT 重建影像品質。其次, DECT 在醫用 CT 上提供更具體地辨別人體組織之特性,本計劃亦期 望以 DECT 技術應用於複合性材料之藏品,以提昇本院 CT 分辨複合材料之技術。再者,現今 PCICT 應用於醫 用 CT 軟組織分辨上有許多貢獻並改善許多錐狀光源的 限制。藉此計畫將 PCICT 技術應用於本院有機材質藏品 (如紙張、象牙或織品等材質)的分析,以使本院 CT 在有 機材質上的結構分析有多樣性的發展。 2.1 線束硬化校正(beam hardening correction)

原理:單光(monochromatic)X 光影像取決於光子與物質 的交互作用,光子可被物質吸收(亦即造成光子能量衰減) 或散射,光子的強度(I, I<sub>0</sub>)可由比爾一朗伯(Beer-Lambert) 定律表示(Kak & Slaney 1988),如下:

$$I(d) = I_0 e^{-\mu d}$$

其中μ為衰減係數,d為物質厚度。而衰減係數和原子 質量(Z)相關。

當多色光(polychromatic)的 X 光光源通過物質時, 使得較低能量的 X 光容易被物質衰減,而高能量的光子 成比例的增加。因此朗柏一比爾定律不再適用,這樣的 現象稱為線束硬化(beam hardening)。為了得到正確的影 像,X 光光子強度的計算須對能量積分(McCullough 1975)(Brooks 1976):

$$I(d) = \int I_{in}(E) e^{-\int \mu(x,y,E) ds} dE$$

多色光 X 光易造成線束硬化現象,可能造成 CT 重 建影像產生條紋偽影,杯形偽影(cupping artifact)或是金 屬偽影。(Kak 1979)

線束硬化校正方式:自 1970 年代迄今有許多討論線束 硬化校正改善偽影的方法,例如:

(1) 鋁當量濾片校正(Al equivalent filtration) (Webb 2003):其優點是以較低的劑量校正線束硬化,某些臨床醫學上採用此法以減低病人輻射劑。例如:小鼠皮質骨中的礦物質密度或骨密度的估算(Meganck 2009)。而鋁當量濾片校正的缺點是影像的灰階值因 X 光光源通過濾片而降低,使得信噪比(signal to noise ratio, SNR)與對比雜訊比(contrast to noise ratio, CNR)較差,進而影響影像品質(Webb 2003)。因此以鋁當量濾片校正,須考量信噪比與雜訊對影像品質產生的影響。

(2)以 DECT 技術改善線束硬化:是在 1976 年由 R. Alvarez 和 A. Macowski 提出的,將衰減係數分別表達 為待測物參數對光電效應及對康普頓散射單獨與能量 相關的函數,再經由能譜分析運算雙能量 X 光影像的光 子強度運算,則可去除線束硬化假影。

(3)後置影像軟體校正,例如:多項式擬合函數 (polynomials fit function)(Jin 2015)、統計疊代法校正 statistical iterative correction (Hsieh 2000) (Abdurahman 2018);及疊代金屬偽影校正法(iterative metal artifact reduction, IMAR)(Park 2016)(Pagniez 2017)。後置影像軟 體校正較多使用於業界及學界的線束硬化校正方法。

由於上述方法以後置影像軟體校正為較有效率的校正 方式,因此預計以多項式擬合函數及疊代金屬偽影校正 法並結合 FDK 演算法搭配 GPU和 CUDA 平行加速運算 作為改善線束硬化校正的方法。

### 2.2 DECT 技術

如前所述,將衰減係數表達為待測物參數與光電效 應及康普頓散射分別僅與能量相關的函數。衰減係數可 經由兩個完全不同能量的 X 光光源擷取的待測物影像 的強度計算得知。 (Alvarez 1976)

DECT 技術除了能校正線束硬化產生的偽影之外, 亦有區分材料的特性。因為雙能量 CT 提供了兩組能量 對待測物的吸收及衰減係數的訊息,因此 DECT 提供更 具體的待測物特徵,改善 CT 影像上的判斷 DECT 技術 對於血管造影能提供高解析度並且改善 SNR 及 CNR (Johnson 2007)。DECT 除了可以提供材料分析之外,經 由不同能量的掃描,透過線性或非線型的混合雙能影像, 能改善單能量 CT 影像。例如:影像在 140kV 產生較 120kV 較佳的 SNR 訊號,但卻造成對比度降低;而 80kV 的影像雖然改善了對比度,但卻產生比 120kV 的影像多 的雜訊。而 DECT 非線性混合影像,平衡了 SNR 及 CNR, 取用了 140kV 較佳的 SNR 訊號及 80kV 較好的 CNR 訊 號。(Holmes 2008) (Yu 2009)

本實驗室因既有 CT 設備屬於單 X 光光源,且影像 擷取器具高靈敏度,X 光之電流差異為數百微米安培(µA) 至數毫安培(mA),因此計畫採用單光源調整能量的方式 進行實驗。

複合性材料文物一般同時具有高原子序及低原子序 之材質,如:木質及金屬材質或玉質及金屬材質。對於 此類文物,當以低能量取得低原子序之X光影像,卻無 法穿透高原子序材料。若當以高能量取得高原子序材料 之穿透X光影像時,卻造成X光完全穿透低原子序材料 無法取得其之灰階訊息。因此對於含高/低原子序之複合 性材質,一般須分別以高/低能量呈現X光影像,本實 驗期待利用雙能量技術,經影像融合,以同一張X光影 像同時呈現高/低原子序複合性材質之結構。

實驗條件:X光能量分別 80kV及 150kV,經由不同 比例之線性及非線性融合之方式進行雙能量影像融 合。

測試樣品:複製懷錶,以紙質方盒盛裝。由於懷錶含 金屬成分,屬較高原子序材質,而紙類之組成多為低原 子序之元素。

(a) 線性融合之公式如下:

$$O(n,m) = [a_1 I_l(n,m) + (100 - a_1) I_h(n,m)]/10 \quad (1)$$

藉由高/低能量之影像灰階深度 Ih 及 II 計算融合比例。

(b)非線性融合之演算法表達如下:

已知某一材料之厚度 t,以 E 表示多色光之 X 光平均 能量;其入射光之強度可藉由下列公式計算而得:

$$I_0 = I e^{\mu(E)t}$$
(2)

以 C 表示投影影像,  $A_1 \mathcal{B} A_2$ 為二維矩陣,  $\varphi$ 定義為 對比消除角度(contrast cancellation angle)。

$$C = A_1 \cos \varphi + A_2 \sin \varphi \tag{3}$$

其中 A<sub>1</sub> 及 A<sub>2</sub> 可由兩種材料 α 及 β 分別於高/低能量 之線性衰減係數表示(Taibi 2003), M<sub>h</sub> 及 M<sub>l</sub> 分別為高/ 低能量之對數影像,可藉由此材料於分別於高/低能量光 譜之平均能量之線性衰減係數而得。

$$A_1 = \frac{\left(M_h \mu_\beta(E_l) + M_l \mu_\beta(E_h)\right)}{R}, A_2 = \frac{\left(M_l \mu_\alpha(E_h) + M_h \mu_\alpha(E_l)\right)}{R}$$
(4)

$$\mathbf{R} = \mu_{\alpha}(E_h)\mu_{\beta}(E_l) - \mu_{\beta}(E_h)\mu_{\alpha}(E_l)$$
(5)

而雙能量影像融合與單能量影像之間的改善評比是 以信噪比(signal to noise ratio,以下簡稱 SNR)與對比雜 訊比(contrast to noise ratio,以下簡稱 CNR)作為比較的 準則。(Diekhoff 2018)

其中

$$SNR = \frac{\text{signal}}{\text{noise}} = \frac{\text{mean}_{\alpha} - \text{mean}_{p}}{\text{standard deviation}_{p}}$$

(6)

其中 mean 為平均訊號強度(mean signal intensity)。 CNR 可表示為:

$$CNR = \frac{\text{signal}}{\text{noise}} = \frac{\text{mean}_{\alpha} - \text{mean}_{ref}}{\text{standard deviation}_{p}}$$

(7)

其中 standard deviationp 於本實驗中設定為聚乙烯 (polyethylene,即塑膠)材質之灰階強度標準差值,而 mean<sub>ref</sub> 為參考背景的平均訊號強度,是以聚苯乙烯 (polystyrene,即保麗龍)材料作為參考背景之平均訊 號強度。

### III. 結果與討論

本研究計畫完成結果包括 CT 技術層面的優化以及 實際文物檢測相關應用,包括:

 - CT 系統機構參數微調校正,包括 X 光源 Y、Z 軸及 傾角;新建影像偵測器載臺之 X、Y、Z 軸;樣品載台 之 X、Y、Z 軸及θ角等。

- 配合雙能量檢測需要,增置X光能譜儀,可進行X光 能量光譜分佈偵測。

- 完成平行運算技術—圖形處理單元(GPU)及平行運算 架構(CUDA),加速建構 CT 三維影像重建。由於許多 文物X光原始 projection 影像數據龐大,在三維影像重 建時若無藉由 GPU 搭配平行運算架構(CUDA)協助進 行,則無法有效率進行相關運算,因此此一平行運算技 術的建置至為關鍵。

- 完成多件金屬、陶瓷文物拍攝,進行各種金屬偽影(metal artifacts)及線束硬化(beam hardening)校正。
- 複合材質文物之雙能量拍攝測試與應用,進行高低能量影像融合。

本計畫執行後,關於 CT 硬體機構旋轉角度精準度 由每 0.2°優化為 0.1°,可取像 3600 張投影量。另因 GPU 加速運算,CT 重建運算效能自 144GB/s 提升為 317GB/s。 影像重建切片張數自 2048x2048x2048 提升至 3888x3888x3888;解析度自 97um 提升至 65um。

以下就應用部份之案例之結果討論說明之。

1. 金屬偽影及束線硬化校正

### 案例1 北魏 銅造釋迦如來坐像

北魏〈銅造釋迦如來坐像〉為旅日華僑彭楷楝(新 田楝一)捐贈給故宮的佛教文物之一,由於捐贈前已列 入日本重要文化財,限於法規,無法出境日本入藏故宮。 目前該文物寄存於日本九州國立博物館(以下簡稱九 博)。本院於2018年先前曾與日本富山大學合作,利用 3D 掃描技術研究其鑄造技術相關問題<sup>1</sup>,不過由於此技 術為表面三維掃描技術,無法獲取內部結構訊息。為了 進一步瞭解佛像的內部構造,故宮與九博共同合作,以 X光電腦斷層掃描技術分析此作品。X 光影像於九搏拍 攝,後續三維影像重建與處理則於本院進行。

本件文物為青銅鎏金,X 光散射較為嚴重,因此有 金屬假影及束線硬化現象。經 FDK 演算及相關校正後, 可得較佳之重建影像。從影像中可判定佛像頭顱下半部 為中空並直貫臺座。



圖1及圖2 北魏 銅造釋迦如來坐像, © NPM



圖 3 北魏〈銅造釋迦如來坐像〉X光CT影像(局部 slice))

### 案例2 亞醜方簋 亞醜方簋是商晚期至西周早期的青銅器,是採分鑄

<sup>1</sup>三宮千佳、外山潔、三船温尚、陳東和,台北・國立故宮博 物院/台北駐日経済文化代表処所蔵銅造釈迦如来坐像の3 Dポリゴンデータによる各部プロポーションの検討と鋳造 技法, FUSUS (Journal of the Society for the History of Asian Casting Technology) 13 号, 2021 年7月出版。 後再合鑄而成。雙耳與器身接合處有溢出銅液現象,明 顯是二次鑄造。從 X 光影像可看出口沿下方部位有多處 裂隙,顯示有修補現象。器底部分也現斷裂修補痕,銘 文不連貫,是由三塊銘文拼接而成,其中一塊斷裂成兩 區塊(小方塊和 L 型區塊)。

此次透過X光斷層影像亦發現,方簋的雙耳形制雖 相同,但仔細觀察仍能看出不論在紋飾、孔隙、接合部 位等皆有細微差異,可以推定兩耳很可能不是在同一條 件背景下所鑄造。



圖 4 及圖 5 商晚期至西周早期 亞醜方簋





圖 6 亞醜方簋 X 光影像

圖 7 亞醜方簋 器底 X 光 影像

案例3 熊足洗

故宮有許多青銅器並非典型商周器型,很可能是在 明、清時期將舊器改製、鑄接而成的新器物,不過由於 缺乏文獻與研究資料,過去也並未受到重視,因此對其 認識有限。透過X光影像的拍攝,可以檢視其改製、鑄 接或修補情況,重新認識、探討其身世。

此件青銅器 X 光散射嚴重,亦需經束線硬化與偽影 校正。透視影像顯示器底有斷裂及修補痕;器底與器身 為鑄接;肉眼觀察,雙側獸首及與四足與器身緊密貼合, 不過 X 光影像透露出貼合縫隙上端透光,可能使用含有 較輕元素成分之黏著劑;此外,器身有裂縫,明顯可判 定獸首與四足皆為後鑄部分。



圖8及圖9 熊足洗





圖10 熊足洗X光影像(器底)

圖 11 熊足洗 X 光影像



圖 12 熊足洗CT影像

案例4 西周中期 鳳鳥紋四足鬲

這件鬲器身有四袋腹,下接柱足,頸部飾長尾鳥紋, 地填雲雷紋,足部飾雲紋及三角紋。鳥紋和柱足形態具 西周時期風格。鬲一般為三足,且腹足不分,而此鬲為 四足,足部和器腹斷隔,到像是鬲鼎。究竟是鬲還是鬲 鼎?

透過X光影像,可以看出此器一側器耳下方器腹上 有一明顯的圓形孔洞補助痕跡,該處內壁亦有龜裂痕。 另外,雙立耳與器身之間存在溢銅,後鑄痕跡明顯。據 此,可以合理推測此器原來應該是一件原來有流嘴「盉」, 流嘴斷失填補,再鑄接雙耳,變成為現在的樣貌了。



圖 13 西周中期 鳳鳥紋四足鬲



圖 14 西周中期 鳳鳥紋四足鬲 X 光影像

### 案例5清晚期 雕象牙透花人物套球

此件象牙套球過去曾紀錄為有 17 層,但經 X 光電腦 斷層掃描影像確認後為 18 層。透過三維影像處理,也 可以數位拆解每一顆球,透視每一顆球的雕刻紋飾。最 外層雕人物閣樓,第2-3層紋飾較為精緻,第4到第9 層紋飾呈星形,第10到14層則只有簡單的圓形,第15 層開始就只剩下開鑿時留下的孔洞。



圖 15 清晚期 雕象牙透花人物套球 故雕 000055

本象牙球先前即已進行影像重建,109 年度繼續優 化影像品質,提升影像解析度,並配合本院110年度「古 物揭密---文物科學鑑識在故宮」展覽,展示利用 X 光 CT 與三維影像重建與拆解技術之成果。



圖 16 雕象牙透花人物套球

### 2. 雙能量 X 光影像測試與應用

如前所述,X光雙能量融合影像與單能量影像間之 改善評比主要是信噪比 (SNR) 與對比雜訊比 (CNR) 作為比較的準則。為進一步瞭解複合材質文物 X 光融合

影像之改善情形,先以金屬結構為主的仿古懷表放置於 紙盒中,分別以 80kV 及 150V 之 X 光拍攝之,再經由 不同比例之線性及非線性融合方式進行雙能量影像融 合。

圖 17a 為以 80kV 拍攝之懷表/紙盒 X 光影像,懷錶 組成主要為金屬,在此能量下並無法穿透其結構,但可 觀察到紙盒影像;圖 17b 為以 150kV 拍攝之影像,因能 量提高使得懷錶齒輪結構清晰可見,但紙質部分已完全 穿透,無法取得紙盒之 X 光影像。透過線性融合得到影 像圖 17c,可同時獲取紙盒及懷表內部齒輪結構影像。 再以非線性融合得到影像圖 17d,提高影像清晰度。





圖 17a 懷表/紙質 X 光影像 80kV







圖 17c 線性融合影像

圖 17d 非線性融合影像

將影像量化分析之 SNR 與 CNR 結果列於表 1,其 中高能量(150kV)影像、低能量(80kV)影像、線性 融合影像(blending image)及非線性融合影像(non-linear blending image)之 SNR 及 CNR,分別以下標 h,l,b及 nlb 表示。由表 1 得知懷表於高能量時有較佳的 SNR; 相反的,紙盒則於低能量時有較佳的 SNR,而兩者皆於 低能量有較佳的 CNR。經由線性影像融合,紙質的 SNR 及 CNR 值相對於高能量時有所提升,而齒輪則沒有較 佳的 SNR 及 CNR,此乃由於為顧及紙盒的訊號而無法 顯著提升齒輪訊號的原因。而透過非線性影像融合,則 顯著提升齒輪及紙質之 SNR 及 CNR。

	懷表	紙盒
<b>SNR</b> <sub>h</sub>	26.2	2.8
SNR <sub>1</sub>	22.2	38.4
<b>SNR</b> <sub>b</sub>	17.9	6.2
<b>SNR</b> <sub>nlb</sub>	359.9	59.0
CNR <sub>h</sub>	29.1	0.0
CNR	52.6	8.0
CNR <sub>b</sub>	23.7	0.41
CNR <sub>nlb</sub>	401.0	17.9

表1 懷表/紙盒組 SNR 與 CNR 量化值比較

案例6 清康熙 內府泥金寫本藏文龍藏經內上護經板

龍藏經是由孝莊太皇太后欽命修造,鑲嵌珠寶、磁 青箋、泥金書、西域字龍藏經一部,共一百八本,內有 釋迦牟尼佛口授口傳諸經。

內上護經板是由複合材料所製作,所用材料包括木、

織品、紙、寶石、顏料等。為了能瞭解其內部結構,利 用 X 光拍攝之。也由於其材料組成多元,必須利用不同 能量的 X 光拍攝之方能觀察不同材料對應的結構。



圖 18 龍藏經上內護經板

圖 19a 為以 150kV,600uA,300ms 之 X 光所拍攝 之內上護經板局部,此能量下可看出寶石與金龕結構影 像,但木質、紙質及其上的彩繪圖案等皆因 X 光直接穿 透而無法觀察其內容;圖 19b 為 X 光降至 70kV 所拍攝 之結果,因能量較低,金龕、寶石部分難以穿透,但木 質、紙質上之彩繪圖像則清楚可見。圖 20 則是 70kV 及 150kV 的非線性融合影像,可同時看到金龕、寶石及彩 繪影像。需要一提的是,依非線性融合參數調整,文物 各部份不同材料的影像品質也會有所變化。





圖 19a 龍藏經內上護經板 X 光影像(局部),150kV

圖 19b 龍藏經內上護經板 X 光影像 (局部), 70kV



圖 20 龍藏經內上護經板 X 光影像 (局部), 70/150 kV 非線 性融合影像

### IV. 結論

本研究為有關運用X光技術於古文物的分析研究, 內容主要是針對文物檢測用之X光電腦斷層掃描系統 進行優化,並實際應用於博物館的各類文物的檢測分析 如青銅器、陶瓷、象牙球等。文物具有歷史、文化、藝術、經濟等各種價值,透過對文物的研究可以瞭解人類 過去活動的種種面貌。本項研究成果對原子能科技在人 文藝術領域的研究有實質的貢獻。

本研究中涉及的 X 光 CT 系統優化技術,除了可以 提供國內博物館界與文資單位文物分析研究之參考外, 也具有其他領域的應用價值,可提供民生工業使用,包 括設計及建置最佳化之 CBCT 硬體機構與參數,並優 化三維影像重建參數;去除金屬、陶瓷文物之 X 光影 像假影問題等。

此外,本計畫之部分研究成果,也於本院 110 年 度「古物揭密—文物科學鑑識在故宮」展覽展出,讓民 眾瞭解此一結合科技與人文領域之內涵。

### 参考文獻

- [1] Abdurahman S., Frysch R., Bismark R. et al., Beam hardening correction using cone beam consistency conditions, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, May. 2018
- [2] Almeida I. P., Schyns L. E. J. R., Ollers M. C., and Elmpt W. V., Dual-energy CT quantitative imaging: a comparison study between twin-beam and dual-source CT scanners. *Medical Physics*, vol. 44, Issue1, pp. 171-179, 2017.
- [3] Alvarez R. E. and Macovski A., Energy-selective reconstructions in X-ray computerised tomography. *Phys. Med. Biol.*, vol. 21, p. 733, 1976.
- [4] Auweter S. D., Herzen J., Willner M. et al., X-ray phase-contrast imaging of the breast—advances towards clinical implementation. *Br J Radiol*, 2014.
- [5] Birnbacher L., Willner M., Velroyen A., et al., Experimental realisation of high-sensitivity laboratory x-ray grating-based phase contrast computed tomography, *Sci. Rep.* 6, 24022, 2016.
- [6] Bongartz T., Glazebrook K.N. and Kavros S. J., Dual-energy CT for the diagnosis of gout: an accuracy and diagnostic yield study, *Ann Rheum Dis.* 74, pp. 1072-1077, 2015.
- [7] Bonse U. and Hart M., An x-ray interferometer. *Appl. Phys. Lett.*, 6, pp. 155–156, 1965.
- [8] Bravin A., Coan P. and Suortti P. X-ray phase contrast imaging: from pre-clinical applications towards clinics. *Phys Med Biol*; 58: R1–35. 2013. Doi: 10.1088/0031-9155/58/1/R1
- [9] Brooks R. A. and Chiro G. D., Beam Hardening in X-ray Reconstructive Tomography. *PHYS. MED. BIOL.*, vol. 21, NO. 3, pp. 390-398, 1976.
- [10] Croton L. C. P., Morgan K. S., Paganin D. M. et al., In situ phase contrast X-ray brain CT. *Medical Physics*, 2018, DOI: 10.4225/03/5a56e4df15309
- [11] Diekhoff T., Engelhard N., Michael Fuchs et al., Single-source dual-energy computed tomography for the assessment of bone marrow oedema in vertebral compression fractures: a prospective diagnostic

accuracy study. European Radiology, pp. 1-9, 2018.

- [12] Flohr T. G., McCollough C. H., Bruder H. et al., First performance evaluation of a dual-source CT (DSCT) system. *Eur Radiol*;16(2), pp.256–268. 2006.
- [13] F<sup>•</sup>orster E., Goetz K. and Zaumseil P., Double crystal diffractometry for the characterization of targets for laser fusion experiments. *Krist. Tech.* 15, pp. 937–945, 1980.
- [14] Hayes J. W., Gomez-Cardona D., and Zhang R., Low-dose cone-beam CT via raw counts domain low-signal correction schemes: Performance assessment and task-based parameter optimization. (Part I: Assessment of spatial resolution and noise performance.) *Medical Physics*, 45, 5, pp. 1942-1956, 2018.
- [15] Henke B. L., Gullikson E. M., and Davis J. C., X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92. At. Dat. Nucl. Dat.Tab., vol. 54, pp. 181-342, 1993.
- [16] Holmes D. R., Fletcher J. G. and Apel A., Evaluation of non-linear blending in dual-energy computed tomography. *Eur J Radiol*. Dec; 68(3): pp. 409–413. 2008.
- [17] Jerjen, I., Revol, V., Kottler, C. & Kaufmann, R. The Benefits and Challenges of Differential Phase Contrast Imaging for Material Science. *International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, pp. 1-8, 2011.
- [18] Jin P., Bouman C. A., and Sauer K. D., A Model-Based Image Reconstruction Algorithm with Simultaneous Beam Hardening Correction for X-Ray CT, *IEEE Transactions on Computational Imaging*, Vol. 1, Issue: 3, Sept. 2015
- [19] Johnson T. R., Krauss B., Sedlmair M. et al., Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *European radiology*;17, pp. 1510–1517, 2007
- [20] Kak A. C., and Slaney M., Principles of Computerized Tomographic Imaging. *IEEE Press*, *New York*, 1988.
- [21] Kak A. C., Computerized tomography with x-ray emission and ultrasound sources. *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 1245-1272, 1979.
- [22] Kastner J., Plank B. and D. Salaberger, Phase Contrast Imaging with High Resolution Cone Beam X-ray Computed Tomography. *In International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*, Wels, Austria, 2011.
- [23] Kelcz F., Joseph P. M. and Hilal S.K., Noise considerations in dual energy CT scanning. *Med Phys*; 6(5):pp. 418–425, 1979.
- [24] Le H. Q. and Molloi S., Least squares parameter estimation methods for material decomposition with energy discriminating detectors. *Med Phys*; 38(1), pp. 245–255. 2011.

- [25] Lehmann L., et al., Generalized image combinations in dual kVp digital radiography. Med. Phys., vol. 8, pp. 659–667, 1981.
- [26] McCullough E. C., Photon attenuation in computed tomography. Medical Physics, vol. 2, pp. 307-320, 1975.
- [27] McCollough C. H., Leng S., Yu L., and Fletcher J. G., Dual-and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications. Radiology. Vol. 276, pp. 637-653, 2015.
- [28] Meganck J. A., Kozloff K. M., Thornton M. M., Broski S. M., Goldstein S. A., Beam hardening artifacts in micro-computed tomography scanning can be reduced by X-ray beam filtration and the resulting images can be used to accurately measure BMD. Bone. vol. 45, pp.1104–1116, 2009.
- [29] Mussmann B., Overgaard S., Torfing T., et al., Agreement and Precision of Periprosthetic Bone Density Measurements in Micro-CT, Single and Dual Energy CT. Journal of Orthopaedic Research, Vol. 35, Issue7, pp. 1470-1477, 2017
- [30] Pagniez J., Legrand L., Khung S., et al., Metal Artifact Reduction on Chest Computed Tomography Examinations: Comparison of the Iterative Metallic Artefact Reduction Algorithm and the Monoenergetic Approach. Journal of Computer Assisted Tomography, Vol. 41, Issue 3 – pp. 446–454, 2017.
- [31] Park H. S., Hwang D., and Seo J. K., Metal Artifact Reduction for Polychromatic X-ray CT Based on a Beam-Hardening Corrector. IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING, vol. 35, NO. 2, pp. 480-487, 2016.
- [32] Pfeier F., Weitkamp T., Bunk O., and David O., Phase retrieval and differential phase-contrastimaging with low-brilliance X-ray sources. Nature Physics, vol. 2, pp.258-261, 2006.
- [33] Pfeiffer F., Kottler C., Bunk O., David C., Hard X-ray phase tomography with low-brilliance sources. Phys. Rev. Letter, 98, 108105, 2007.
- [34] Primak A. N., Ramirez Giraldo J.C., Liu X., Yu L. and McCollough C. H., Improved dual-energy material discrimination for dual-source CT by means of additional spectral filtration. Med Phys;36(4), pp. 1359–1369. 2009.
- [35] Rodriguez-Granillo G. A., Rosales M. A., Degrossi E., Rodriguez A. E., Signal density of left ventricular myocardial segments and impact of beam hardening artifact: implications for myocardial perfusion assessment by multidetector CT coronary angiography. Int JCardiovasc Imaging, vol.26, pp. 345–354, 2010.
- [36] Sarno A., Mettivier G., Golosio B., et al., Imaging performance of phase-contrast breast computed tomography with synchrotron radiation and a CdTe photon-counting detector. Phys Med., 32, pp.

681–690, 2016.

- [37] Simon S., Martin M., Julian L. et al., Dual-energy computed tomography in patients with cutaneous malignant melanoma: Comparison of noise-optimized and traditional virtual monoenergetic imaging. European Journal of Radiology, ,(95), pp. 1-8, 2017.
- [38] Van E., Casteele D., Dyck D. V., Sijbers J., and Raman E., A model-based correction method for beam-hardening artifacts in X-ray micro-tomography. J. X-ray Sci. Technol., vol. 12, pp. 43–57, 2004.
- [39] Webb A. R., Introduction to Biomedical Imaging. Wiley, New Jersey, 2003.
- [40] Yu L., Primak A. N., Liu X. and McCollough C. H., Image quality optimization and evaluation of linearly mixed images in dual-source, dual-energy CT. Med Phys. 36(3): pp. 1019–1024. 2009.
- [41] 三宮千佳、外山潔、三船温尚、陳東和,台北・國立 故宮博物院/台北駐日経済文化代表処所蔵銅造釈迦 如来坐像の3Dポリゴンデータによる各部プロポー ションの検討と鋳造技法,FUSUS (Journal of the Society for the History of Asian Casting Technology) 13号,2021年7月出版。

# 政策推動與風險溝通(III)

# 北部核電廠周遭社區自主輻安防災治理之研究 Research on Community Self-reliance and Disaster Prevention of Nuclear Power Plants in Northern Taiwan 計畫編號: 109-NU -E-006-001 - NU

計畫編號:109-100-E-000-001-100 計畫主持人:楊永年 e-mail:yungnane@mail.ncku.edu.tw 計畫參與人員:林立琁 執行單位:國立成功大學政治學系

### 摘要

政府目前對於核能安全政策秉持著重要的前提與 堅持原則,尤其是「核安守護」與「核廢處理」部分是 跨世代的工程與責任,也盡量在符合世代正義的前提下 管制核能電廠除役作業及核廢料處理問題,以民眾的F2 立場思考並處理相關問題。由於能源政策目前尚有核能 發電選項,又民眾意識的覺醒以及公共安全議題日益被 重視,故核能安全仍是核能電廠周遭社區民眾持續關注 議題。本研究採行的研究方法包括個案研究法、檔案分 析法、田野調查法以及行動研究法。研究目的為提昇北 部核能電廠周遭社區民眾的核能安全認知,建立正確並 普及核安防護知識,並結合社區發展特色,以強化社區 緊急應變能力。為達前揭目的,本研究以社區民眾參與 與核能安全為操作面向,探討政府賦予民眾於政策執行 時可參與,以及溝通的權利與機制,讓民眾能在參與政 府政策過程中,更易了解政策執行內涵,依此提升社區 治理效能。透過與社區民眾互動討論的執行方式,完成 核能安全防災地圖的製作;納入在地元素,包括地方信 仰中心、特殊地景與農作物產等,以及核子事故緊急應 變措施,並將相關資訊以看板以及束口袋等形式產出, 讓核能知識的傳遞具易讀性外也融入日常生活,以漸進 式的方式強化社區民眾對於核能災害緊急應變的效能。

關鍵詞:核能安全、民眾溝通、民眾參與、社區

### Abstract

Taiwan' s government currently holds important premises and principles for nuclear safety policy. In particular, the "nuclear safety protection" and "nuclear waste disposal" are cross-generational projects and responsibilities, try to conform to the premise of generational justice, to consider and deal with the regulation of nuclear power plant decommissioning and nuclear waste disposal from a public perspective. But the extension of nuclear power plant is an important issue for Taiwan. Nuclear energy safety should be an essential topic if the nuclear power plants were counted as one option of energy policy. The research methods include case studies, archival research, field research and action research. Owing to the public concerns, public safety issues have been valued increasingly, especially for communities surrounding north nuclear power plants. The purpose of this study is to improve nuclear safety knowledge of neighboring communities around nuclear power plants. Also, it is to provide community citizens with correct information of nuclear safety protection. It is to increase resiliency of community's emergency response capabilities. In order to achieve the purpose, this study is focus on

community citizens' participation of disaster prevention. Also, it is to explore how to encourage community citizens to participate the nuclear safety communication. Therefore, community citizens are able to participate decision making of government policies and improve effectiveness of nuclear safety policy.

Through the implementation of interactive discussions with community members, the preparation of nuclear energy safety and disaster prevention maps is completed; local elements, including local belief centers, special attractions and crops, and emergency measures for nuclear accidents are incorporated, and related information is displayed on boards and the bags of output. In this way, nuclear safety knowledge could be easily used and understood. And it could be integrated into community citizens' daily life. Community's effectiveness of emergency response to nuclear energy

**Keywords:** nuclear safety, public communication, public participation, community

### I. 前言

本研究計畫主要探討或解決的問題是,如何讓核電 廠周遭社區民眾心安,或深刻感受到政府對他們的關懷; 特別是核電事故發生時的因應作為,透過民眾溝通方式 降低其對核電廠或核輻射的誤解或疑慮。因核能發展及 安全與國家安全、經濟、社會、民生等多個面向均有關 聯。本研究從社區核能安全防災與減災融入社區發展為 講題切入;而社區發展議題選擇必須透過和社區領袖的 討論,始能形成共識;將核能安全減災的理念融入社區 發展願景中,讓社區核安議題能成為社區永續發展助力 發展願景中,讓社區核安議題能成為社區永續發展助力。 奉研究主要目的,在避免出現因核安知識、資訊缺乏與 應變能力不足造成的問題;提供北部核電場周遭社區目 前需要的核安資訊,以避免生命財產威脅及損失。或藉 , 讓核能安全議題的整合能一併落實。

因此,本研究計畫欲探討的問題是針對新北市金山 區與萬里區鄰近核電廠的周遭社區,設計符合社區民眾 需求的核能安全防災地圖。依據研究團隊過去操作經驗, 該份手繪地圖具有社區總體營造意涵,且包含社區地方 特色、特產及文化歷史等資訊,將同時呈現核能安全緊 急應變資訊於地圖上,資訊的高度透明以及其具備的可 讀性,凸顯了本計畫的重要性。

### Ⅱ. 主要內容

本研究是以北部核電廠周遭社區里別為對象,綜合 考量核一及核二廠共同涵蓋範圍,並以尚在營運的核二 廠之緊急應變計畫區為範圍,以距核二廠 0-16 公里的新 北市石門區、金山區及萬里區為選取距離,分別擇定草 里、三界里與野柳里等三里為主要對象,透過與社區 意領袖與民眾溝通,瞭解目前核能電廠緊急應變範圍內 核能如何因應。藉由與其溝通掌握核能安全資訊於社區 該如何實際困境與民眾實質需求。本計畫以資訊公開、核 能安全、公眾參與與溝通為支持架構,藉此模式強化公 眾參與及公私協力程度,提高核能安全成效,做為防災 社區的建構基礎。計畫執行主要以社區工作坊模式進行, 藉由社區參與方式深入在地民眾生活並爬梳地方紋理, 以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。

為強調各社區的特色與需求,實際操作方式是以各 里里名稱為發想,並融合在地特色、特產以及空間環境, 為地圖繪製的主要參酌;而主軸除標註在地民眾熟悉標 的、地景及特產與特色外,同時包含核能安全緊急應變 措施,是與地方政府過去所產出的防災地圖有所區別。 由於政府機關所產出的地圖,常為求呈現資訊一致性, 只能忽略在地特質與環境紋理等特殊性;再者,其所呈 現的資訊專業度過高,容易造成民眾可讀性低的狀況。 故本研究操作模式是透過田野調查以及網路資料蒐集 方式,再依據各(里)社區呈現特色與特質,納入社區民眾 意見,繪製產出防災地圖,除可強化社區民眾對於核能 安全的風險意識,亦能深化北部核電廠周遭社區的風險 治理效能,是本研究核能安全防災地圖繪製基礎,亦是 本研究預期呈現成果。

本研究目的主要以北部核電廠周遭社區(石門區草 里里、金山區三界里以及萬里區野柳里)民眾為主要對象, 其中在萬里區野柳里內有野柳國小,亦是本研究執行的 重點對象,與其的合作關係主要是透過計畫的執行,協 助核能安全基礎教育的落實。透過工作坊的辦理使民眾 能參與政府政策以及社區事務並瞭解其需求,以及目前 緊急應變知識教育的普及程度。工作坊進行主要以里為 單位,依據核能安全緊急應變資訊或在地特色、印象等 繪製成地圖方式呈現,而文宣品的製作則著重考量使用 者的偏好與習性,透過不同的媒體型態或管道呈現給文 宣對象。

而在野柳國小部分則是期待透過融入在地特色與 環境紋理的防災地圖,使核能安全防災內容較易被學童 所接受。而對於所產出的文宣品也慎重考慮產出形式, 除學童對其地使用性能考量外,亦需提高使用效率,使 相關資訊的認知程度能相對提升。另外也結合校園防災 地圖與社區防災地圖,透過從點到面的串聯,強化社區 與國小特色,使得知識的傳遞更深化。於本次研究範圍 中所產出的防災地圖文宣,不論是束口袋或防災地圖 中所產出的防災地圖文宣,不論是束口袋或防災地圖 中所產出的防災地圖文宣,不論是東口袋或防災地圖 之間內容更具友善性與可讀性,專業資訊的傳達更明確 且易於讓民眾所接受。依使用者的角度考量,選用恰當 的圖說內容與管道,使正確資訊有效傳遞。以下則是本 次研究範圍(石門區草里里、金山區三界里以及萬里區野 柳里、野柳國小)的核子事故疏散避難路線圖說:





### III. 結果與討論

本年度研究主要工作項目是透過自助與共助的災 害防救法則概念,進行參與式工作坊,透過民眾參與使 資訊有效傳遞且透明。救災或環境的議題常透過科學技 術方式處理,較少以社會或政治角度分析社區安全議題 研究,也更彰顯本研究計畫的獨特性。本研究所指的防 災治理主要是以社區民眾為主體參與及規劃,以長期生 活在同一區域的利害關係人,針對既有核能安全政策提 出建議或相關對策,並讓政策內容與資訊傳遞方式能更 貼近民眾需求,有助於公共政策的實踐。

本研究主要以北部核電廠緊急應變計畫區範圍內 的社區民眾為主要對象,瞭解目前範圍內的社區核能安 全知識傳遞態樣;以及社區民眾對於相關議題、核能安 全知識以及民眾防護行動的理解程度。工作坊的辦理不 僅可拓展社區參與,亦能在與民眾溝通過程中,瞭解社 區實際需求,以及對於核能安全緊急應變社區民眾知能 的困境與需求。而本研究主要產出為核能安全緊急應變 地圖及其文宣,執行過程中透過與民眾的交流與溝通, 並配合相關研究方法的運用,為完成成果的重要基礎。 透過該模式運作以及產出的成果,將具體普及社區民眾 對於核子事故的防護知識。

本計畫工作項目是以北部核電廠周遭社區為場域, 其執行方式是參照過去經驗與準則進行滾動式修正與 調整。執行過程中現已有過去的溝通經驗以及對於相關 利害關係人的掌握程度,並有各里別的客製化防災地圖 文宣品可供利害關係人參酌,故在執行上相較順利。研 究團隊與本研究中主要是扮演社區與機關間的溝通管 道,並於計畫執行過程中協力資訊的傳遞與觀念養成, 以爭取社區認同與支持。本年度計畫執行仍是以行動研 究法為執行主軸,針對不同對象或群體隨時調整操作模 式以滿足其需求,以達到本研究目的與效益。



## IV. 結論

本研究主要產出成果為符合各里需求的緊急應變 防災地圖,透過文宣產出品包括束口袋以及看板的產出, 呈現各里特色與核能安全資訊。其產出的防災地圖與過 往文宣的差異在於強化核能安全防災資訊內容的友善 性,及文宣品的實用性,並以使用者的角度考量,選用 洽當的文宣內容與管道,以更簡易的方式與管道傳遞相 關資訊予民眾,此些均是本次成果產出時的重要參酌。 而納入北部核電廠周遭社區的參與,與民眾相互溝通瞭 解其需求,其可達成提昇民眾核能安全知識外,亦具備 有教育宣導意義,是研究主要重點與成效。

而除了各里所產出緊急應變地圖文宣外,其在應用 效益部分,尚可分為學術研究、國家發展等面向,期待 相關研究產生其可獲致相關效益;在學術研究方面:社 區公共參與及溝通機制理論架構建構,並進而瞭解中 政府與政方,包括地方政府或社區,對於核能安全的應 變之實際運作與理論的差異。而在國家發展方面:由於 運行民眾參與規劃、民眾溝通,於核電廠鄰近社區 進行民眾參與規劃、民眾溝通,於核電廠鄰近社區 進行民眾參與規劃、民眾溝通,可成為其他核電廠鄰近社區 進行民眾參與規劃、民眾溝通,可成為其他核電廠 新近時的核能安全政策執行與狀況,將有實際的瞭解與認 識,因此對於實務單位(包括中央政府與地方政府),都將 有具體策略或行動方案之建言與回饋。而本計畫亦可依 此對於政府未來有關核能安全策略制定是具實質貢獻。

本研究中主要是透過參與行動研究方式,結合人文 社會與自然科學專業知識,提供政府機關包括行政院原 子能委員會以及新北市政府、萬里區公所、金山區公所、 石門區公所等,以及社區居民等利害關係人,於未來有 關核能安全緊急應變及社區自我治理建構參考。除公部 開外,也可將核能政策規劃建議提供予相關團體。该不 調核能安全緊急應變及社區自我治理建構參考。除公部 開外,也可將核能政策規劃建議提供予相關團體。 。除公式的基本來同與溝通社區之案例比較, 為後續發展核能公共參與與溝通的核能公共參與與 清通 功能或成幾。而對於參與計畫的核能公共參與與溝通 能政策總和實務上核電廠周遭社區公共參與與溝通 式、核能政策地方政府關係的十典政府實際政策 式。同時可讓參與人員對社區核能議題與民眾參與、民 眾溝通以及核能議題地方政治關係能有更多的關注。

### 参考文獻

- 吴明上(2013),日本村山內閣在阪神大地震中的危機管理,人文與社會學報,第三卷,第二期,頁: 23-39。
- [2] 吳嘉苓(2015),永久屋前搭涼棚:災後家屋重建的 建築設計與社會改造,科技、醫療與社會,第20期, 頁:09-74。
- [3] 於幼華(2005),台灣環境議題特論,台北:五南出版社。
- [4] 林宗弘(2012),災後重建的政治:中國 512 地震與 臺灣 921 地震的比較,臺灣社會學刊,第 50 期, 頁:57-110。
- [5] 張四明、戴世偉(2016),新北市防災社區之建構與發展經驗,極端氣候下以灣災害治理,張四明主編,臺北:財團法人二十一世紀基金會,2016年1月出版,頁:169-210。
- [6] 陳敦源(2019),民主治理:公共行政與民主政治的 制度性調和,臺北:五南書局。
- [7] 楊永年(2002),「社區防救災總體營造實施計畫」--木屐寮社區防救災組織研究,主持人,執行期限: 2002/7/1-2002/11/31。委託單位:行政院九二一震

災災後重建推動委員會,生活重建處。

- [8] 楊永年(2020),救災體系,台北:五南出版社。
- [9] 蕭嘉政(2009),災害潛勢地區推動防災社區之調查 研究:以彰化縣為例,彰化縣:國立彰化師範大學 碩士論文。
- [10] 蔡清田(2000),教育行動研究,台北:五南出版社。
- [11] 魏雅蘭(2001),本土性防災社區形成要素之探討 -以長期、龍安、蜈蚣社區為例,臺大:城鄉所碩士 論文。
- [12] Chen, L.C., Liu, Y.C., Chan, K.C.(2006). Integrated Community-Based Disaster Management Program in Taiwan: A Case Study of Shang-An Village. Natural Hazards. 37. 209 – 223.
- [13] Federal Emergency Management Agency.(2011). A Whole Community Approach to Emergency Management: Principles, Themes, and Pathways for Action. FEMA: Washington, D.C.
- [14] Jang, L.J, & Wang, J.J. (2009). Disaster Resilience in a Hakka Community in Taiwan. Journal of Pacific Rim Psychology. 3. 2. 55 - 65.
- [15] Jha, A. K., Barenstein, J. D., Phelps, P. M., Pittet, D., Sena, S.(2010). Safer Homes, Stronger Communities: A Handbook for Reconstruction after Natural Disasters. D.C.: World Bank.
- [16] McIntyre, A.(2008). Participatory Action Research. CA: SAGE.
- [17] O'Leary, M. Ed. (2004). The First 72 Hours: A Community Approach to Disaster Preparedness. New York: iUniverse.
- [18] Tanigawa, K. (2012). 'Lessons learned from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: evacuation, screening and emergency care for the injured following the Fukushima incident'. Paper presented at the Disaster Medical Assistance Team (DMAT) International Conference, 15 September, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan.

# 核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行(III) Design and Implementation of Stakeholders' Inquiry and Communication Mechanism for Nuclear Power Plant Decommission Policy - III

計畫編號:109-NU-E-004-001-NU 計畫主持人:黃東益 教授 e-mail:tyhuang@nccu.edu.tw 計畫共同主持人:董祥開 副教授、傅凱若 助理教授 計畫參與人員:田玉玨、黃妍甄、詹幃棠、林均謙、董皓歲 執行單位:國立政治大學公共行政學系

### 摘要

我國核一廠目前已進入除役階段,伴隨而來的是除 役所帶來技術以外的問題,舉凡如何與民眾進行溝通並 取得民眾的支持,或者是民眾究竟關心哪些除役議題。 為回應此問題,本研究主要以文獻分析、客廳會與焦點 座談會議等方式,廣泛地收集不同公民意見,並將其意 見彙整後反映給政府,以強化未來除役溝通與監督的機 制,進而給予公民更多參與核能議題的空間。

研究結果顯示,公民團體或是在地民眾皆認為目前 政府在資訊公開及除役進度的更新方面必須加強。此外 民眾與公民團體亦各自提出關心議題,前者較關心除役 安全與核廢料的遷出,憂心核廢料是否變成長期存放在 石門地區,並認為應建立罰款機制與保證金制度,確保 能在時間內完成核電廠除役與核廢料移出;後者則著重 於核電廠除役的整體規劃與分工,強調必須檢視當前除 役政策下的治理架構,或是應培力地方政府,讓地方政 府能夠加入除役監管的行動。又基於以上發現,本研究 將提出未來政府在除役溝通方面的具體建議。

**關鍵詞**:社會溝通、核能、核電廠除役、客廳會、焦點 座談。

### Abstract

No.1 nuclear power plants in Taiwan have entered the decommissioning process, and some decommissioning issues are raised subsequently, such as how to communicate with the people and obtain their support, or what decommissioning issues the people care about. In order to response these questions, this research adopted literature analysis, living room and focus group conversations, hoping to widely collect opinions from different citizens, and give citizens more space to participate in the issues of nuclear plant decommissioning.

The results of the research shows that the government should strengthen information disclosure and update the progress of decommissioning. In addition, local folks and civic groups raised issues that they are concerned. The former are concerned about the safety of nuclear plant decommissioning and the removal of nuclear waste. The latter focuses on overall planning and division of labor for nuclear plant decommissioning. Based on the above research findings, this research provides some suggestions on the communication of nuclear plant decommissioning in the future. **Keywords**: social communication, the Firs Nuclear Power Plant, nuclear power plant decommissioning, living room conversations, focus group.

### I. 前言

核能一直是我國長久以來的爭議性議題,國內核電 廠的除役進程更是受到萬眾矚目。現今核一廠雖已完成 進入除役過渡階段前期相關準備及轉換作業,惟在面對 除核電廠除役漫長、複雜的過程,若當地居民不接受除 役計畫或核廢料處置規劃時,將會使得核電廠無法順利 進行除役作業;反之必須透過良好的公民參與機制及民 眾溝通管道,才能促使除役作業能順利完成。

於此背景下,民眾一方面擔心除役過程可能產生的 核安問題,另一方面更期望經由溝通使自身的聲音能被 政府聽到,進而納入政策當中。因此政府不僅應致力於 進行核電廠除役溝通,同時應積極提供足夠的資料,讓 民眾在知情的基礎上進行參與及討論,以避免民眾因不 知情而產生無效溝通或對政府不信任。

過去研究發現,目前我國民眾對於核能除役的理解 程度不一,仍有改善的空間,且因核電廠除役與核廢料 管理議題錯綜繁雜,在處理與管制上涉及多個政府機關 單位,故民眾對於核能政府機關的權責劃分並不清楚, 找錯對象、罵錯人的情形更是屢見不鮮(黃東益、董祥 開、傅凱若,2020)。因此政府在設計溝通方向與策略時, 首先須釐清民眾對於現行除役的理解情形,再進一步針 對不足之處提供民眾訊息,以達到知情的目標,並且了 解民眾對於政府處理核能議題的期待,將其納入除役政 策之參考,以強化我國的除役溝通成效。

有鑑於此,本研究目的在於建立「知情」基礎,讓 民眾對於核電廠除役議題有基本理解,再開啟後續公民 對話與建議,並將公民意見彙整後,提供政府參考,以 建立更符合在地社會脈絡下的溝通模式。為了達成上述 研究目的,本研究首先經由「文獻分析」整理各國在核 電廠除役採取的社會溝通模式,以作為我國參考。其次 預計於石門區辦理「客廳會」對話活動,開啟後續深度 討論與收集在地民眾關心的意見;又在討論前將播放本 團隊設計之宣傳影片,以期參與者在知情基礎上進行對 話。最後則是舉辦「焦點團體」座談,邀請核電廠除役 議題的相關公民團體進行討論,希望凝聚彼此共識。

### Ⅱ. 主要內容

本研究以核能除役進程所涉及之溝通模式、資訊傳 播與教育效果、民眾關心的核能議題為核心,發展出本 文研究目的及欲處理之問題。

- 一、從世界核電除役的成功案例中,了解各國進行社會 溝通的模式為何?有哪些共同的原則以及特色?
- 二、我國政府如何進行核電除役的溝通(我國現況)? 從國際的除役溝通案例比較發現,有哪些策略可供 借鏡以強化我國的除役溝通成效?
- 三、因應我國核能除役現階段與在地情境,如何建構適當的溝通模式?
- 四、 在核能除役的溝通過程中,政府可透過哪些管道傳 遞資訊?如何達到「知情」的目標?因應核能除役 現階段與在地情境,如何轉譯核能除役資訊進行傳 播來形成溝通(教育)效果?
- 五、在地民眾對現行核能除役的議題的理解為何?在 知情的基礎上,在地民眾以及社會團體對於原能會 以及其他政府機關在除役過程的期待為何?

本研究目的希望在核電廠除役議題上,創造良好的 政策溝通方式,在進行溝通對話之前,預計經由核電廠 除役宣傳影片方式傳遞有關除役政策的正確資訊,期望 能在建立知情基礎的前提下,讓民眾發表對於除役政策 的觀點,作為政府執行政策的參考。據此,以下為本研 究之架構(如圖一)。



### III. 結果與討論

本研究在研究設計上主要透過文獻分析、客廳會以 及焦點團體座談等方式,呈現在地民眾等人所關注的除 役議題,研究結果及發現如下。

### 一、 各國核電廠除役社會溝通模式

本研究針對永久停止運轉機組近兩位數的國家,所 採取之核電廠除役社會溝通模式與經驗進行探討,分別 為瑞典、芬蘭、美國、英國、法國、日本、德國等七國 (如表一)。

表一:各國核電廠除役社會溝通模式對照表

國家		社會溝通模式
瑞典	1.	員工工作輔導轉介
	2.	家戶拜訪
	3.	成立 CSR 溝通平台
	4.	投資與支援地方
	5.	無回饋金制度
	6.	設立核能教育資訊中心
	1.	在環境影響評估程序中舉行聽證會與
		開放民眾發表意見
芬蘭	2.	舉行演講、研討會、實地訪查等多元活
		動
	3.	回饋金制度不明
	1.	舉行公開會議
羊岡	2.	成立「社區諮詢小組」(CAPs)
大四	3.	成立公眾溝通專案小組
	4.	回饋金制度不明
	1.	成立「利害關係人團體」(SSGs)
英國	2.	以資金支持方式投資地方。
	3.	無回饋金制度
	1.	成立「地方資訊委員會」(CLI)
法國	2.	邀請參觀除役中核電廠
	3.	回饋金制度不明
	1.	成立專責法人「日本原子力發電環境整
		備機構」(NUMO)
日本	2.	資訊公開與教育宣導
	3.	舉行「福島第一核電廠退役國際論壇」
	4.	回饋金制度不明
德國	1.	在《選址法》中規定在選址過程中必須
		要公民參與
	2.	在決策過程中,在早期納入民眾的聲音
	3.	舉辦「青年工作坊」,特別收集中學生的
		意見
	4.	回饋金制度不明

資料來源:本研究繪製

### 二、 客廳會分析結果-在地民眾觀點

(一) 民眾對於政府推動核能除役的看法

### 1. 無法掌握目前除役拆廠與核廢料處理情形

有關於目前核電廠拆除的實際情形與作業內容為 何,以及拆除後之設備後續處理情形等問題,雖與民眾 的健康與安全息息相關,但是民眾認為在這些資訊的掌 握仍不夠清楚。同樣的情形也反映在核廢料的處理進度, 或是目前最終處置場的選址進度究竟為何等問題。

### 2. 民眾認為除役過程充斥危機

民眾指出核電廠除役過程中,擔憂冷卻系統的安全 性問題,如何確保冷卻系統正常運作,以及整體除役機 組是安全無虞。此外民眾也想要了解政府對於目前執行 除役的態度為何,憂心在核電廠進入除役階段後,政府 因而鬆懈。

### 3. 民眾認為政府無法於 25 年內完成除役

部分民眾指出目前最終處置場尚未完成選址,以及 乾式貯存場也尚未能夠啟用,因此要在 25 年的時間完 成除役,具有一定難度。

### (二) 除役過程中,鄉親所在意的重點及期許

### 1. 除役資訊應透明化

民眾指出很多除役資訊都來自於報紙、電視,很多 關於除役資訊當地民眾是不瞭解的,這樣的情況可能導 致民眾認為政府不願意和民眾溝通的負面印象。

### 2. 提供安全保障及履行除役目標

民眾指出核電廠運轉中,對於民眾而言顧慮較小, 但是當核電廠終止運作後,進入核電廠除役的階段,才 是最令民眾憂心,因為除役看不到過程,反而十分危險。

### 三、 焦點座談會議分析結果-公民團體觀點

(一) 公民團體對於「原能會監督核電廠除役」的看法

### 1. 民眾對於除役資訊仍無法確切掌握

核電廠除役的專業知識對於民眾較為生硬艱澀,難 以掌握其中的真相與脈絡。此外有關原能會提供的除役 相關資訊,民眾仍然無法確切地掌握到這些資訊,有時 甚至是等到新聞媒體報導後,才會有進一步的理解。

### 2. 原能會角色定位較為被動

由於核電廠除役的主要工作屬於台電公司的職權 劃分,而原能會主要負責監督除役安全,因此對於原能 會的挑戰在於本身角色定位屬於監督性質,較容易失去 主動性。

### 3. 原能會必須與民眾建立足夠的信任感

核一廠是台灣首座除役的核電廠,政府過去並無處 理核電廠除役的相關經驗,對於政府而言必須確保這些 工作能順利完成。原能會除了必要的資訊揭露外,也必 須與民眾建立足夠的信任感,說服民眾相信原能會有能 力監督除役安全。

### (二) 公民團體認為在地鄉親所關心的議題

### 1. 核廢料的處理進度與回饋金的發放方式

民眾對於核電廠的核廢料何時會遷出,會是一大擔憂。此外民眾也會對於政府如何處理回饋金產生疑問, 包括回饋金所發放的實際金額,甚至是不同地區之間的 差異,以及回饋金使用方式。

### 2. 在地未來發展的方向

在核電廠除役後,民眾會對地方的復育、再生產生 一些期待與想像,這是民眾可能感興趣與關心,而且願 意積極參與,因此後續的復育以及地方創生也是政府應 該重視的議題。

### 3. 除役工作是否能夠如期完成

核電廠除役的時間是 25 年,但國內最終處置場尚

未完成選址作業,加上乾式貯存場也未啟用。一旦這些 基礎設施無法順利啟用,皆可能拖延核電廠除役的進程。 因此目前的除役期程是否需要隨時滾動修正,以及倘若 以上設施無法如期啟用,政府有何具體應變規劃,這些 皆是執行機關或是監管機關需要思考的議題。

# (三)公民團體對於政府執行「核電廠除役」的期許與建議

### 1. 應列出除役工作的治理框架

目前政府缺乏對於整體除役規劃的框架,此框架應 包含與除役相關的法規與制度,有助於讓民眾了解哪些 除役工作屬於原能會、台電公司或地方政府。另外也應 檢視現存的法規,了解現行的法制架構能否完成除役事 務。

### 2. 原能會應培力地方政府

原能會並不代表是監督核電廠除役的唯一角色,地 方政府也是在地重要的監督機關,因此原能會應積極培 力地方政府,讓地方政府也能夠參與監督,做好預警監 督除役的任務。

### 3. 原能會必須給予民眾對除役的正面想像與可能性

核一廠除役是國內第一座進行除役的核電廠,無法 避開討論關於地方土地以及民眾權益的影響,原能會必 須誠實地告訴民眾,除役後會發生的事情。而建立信任 的最佳方式在於給予民眾對於除役這件事情的正面想 像與可能性。

### 4. 成立具有實權的「除役委員會」或是「除役國家隊」

政府應成立「除役委員會」或是「除役國家隊」,以 較高的組織層級處理除役作業。由中央政府籌組專業團 隊,並納入相關權責機關、地方政府與環保團體等成員, 針對除役議題進行實質討論與規劃。

### IV. 結論

綜觀上述,統整客廳會以及焦點座談與文獻分析 之成果,首先說明地方居民及學者專家對除役政策中 關心的部分以及本研究發現,進而從這些意見中,提 供原能會及有關單位在除役社會溝通上的政策建議。

### 一、 研究發現

#### (一) 在地民眾與公民團體擁有不同的除役關心議題

民眾多關注於除役安全性、核廢料何時能移出當地、 補償金計算與使用方式,以及除役能否準時完成等議題; 公民團體則多關注核電廠除役過程中資訊是否公開透 明、政府在除役過程的專業能力與信任問題,以及現行 公民參與監督管道的缺失。

### (二) 民眾難以確切掌握政府提供的除役資訊

雖然目前原能會在資訊公開擁有多元管道,惟民眾 多半仍是透過新聞報導或是親朋好友傳播得知除役相 關資訊,而非瀏覽政府官方資訊,這和政府在資訊公開 所做的努力產生落差。

### (三) 安全資訊的揭露不夠即時

在安全資訊揭露方面,民眾認為原能會的安全資訊 公開不夠即時。以近期承包商挖破冷卻水管事件為例, 不論是公民團體或是在地民眾皆指出原能會對此事件 反應怠慢,嚴重影響民眾對於原能會監督除役工作的信 任。

### (四) 政府缺乏處理核廢料的法制架構

目前缺乏核電廠除役的法制架構,不利未來除役活 動進展,建議政府應該建立有關核電廠除役工作的具體 框架。此外目前「核廢三法」等法案皆尚未立法通過, 突顯出在現行法源不足的情形下,不利於政府尋覓適當 的核廢料選址場所。

### (五) 民眾與公民團體對政府缺乏信任感

民眾與公民團體對原能會或台電公司較缺乏信任 感,但產生不信任的原因有所差異。居民多認為政府為 做事方便,許多負面消息將不願告知民眾;而公民團體 則著重政府在除役經驗與規劃的不足。

### 二、 研究建議

### (一) 建立符合在地脈絡的溝通方式

石門當地人口組成多由年長者居多,資訊接受仍多 仰賴傳統座談會的資訊傳遞方式,相較於網路媒介,在 地民眾透過實體活動能接獲意見的機會更高。而政府必 須積極建立符合在地脈絡的溝通方式,以即時回應民眾 的疑問或質疑。

### (二) 除役資訊公開與即時傳遞

民眾希望原能會或是台電公司定期能在當地舉辦 大小型公開說明活動,公布目前除役的最新進度,或針 對相關議題進行面對面討論。此外未來在處理除役安全 事件時,原能會應立即將事件釐清,並建立通報機制將 消息公布給民眾知情。最後政府應儘速盤點目前廠內設 施的拆除進度為何,又哪些設施需待核廢料移出廠內後 才能拆除,透過這些資訊整理,方能提供民眾更多除役 執行的相關資訊。

### (三) 建構核電廠除役整體治理架構與法規

目前政府缺乏實質檢視核電廠除役的治理架構,因 此應積極思考現行組織與法規體系能否涵蓋除役過程 的監督、執行以及核廢料的選址、溝通。同時為了確保 核電廠除役能夠順利完成,核廢料勢必為政府必須優先 著手解決的問題。政府應盡速推動核廢三法的合法化, 其中包含原能會主管的《放射性物料管制法草案》、經 濟部主管的《行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例 草案》及《放射性廢棄物管理法草案》,以強化核廢料 管理法制基礎與執行架構。

### (四) 應積極推動與地方的培力與協力關係

原能會雖然是核能管制的最高機關,並非代表僅是 執行除役過程的唯一機關。原能會需要與地方機關展開 合作,抑或者在資訊公開方面,能夠與區公所建立良好 的溝通管道,讓除役資訊能更即時傳遞給民眾。

### (五) 描繪除役後地方未來發展的願景

在除役過程中,必須要讓民眾了解到核電廠除役對 當地未來發展將有何正負面影響,以及在完成除役後當 地能如何進行發展,這些是在地居民有興趣參與討論的 議題,惟目前相關資訊,乃是政府較少與民眾溝通到的 面相。因此有關除役後地方的發展方向與策略,政府實 有必要儘早與民眾密切地溝通規劃,並建立共同願景, 使未來能逐漸地達成地方蓬勃發展的目標。

### 参考文獻

- 余致力(2015)。強化政策溝通之研究(編號:NDC-DSD-103-020-003)。台北市:國家發展委員會。
- [2] 吴盛、王貴英、劉忠誠(2009)。知識傳遞管道豐富 度認知之研究一以 e-learning 的環境來探討。資訊 管理學報,16(3),1-28。
- [3] 李森堙(2011)。檢視生物倫理委員會做為社會溝通機制之理論與現實一以日本人類幹細胞製成生殖細胞相關指針之增修訂過程為例。科技法律透析, 23(6),37-59。
- [4] 林國明(2016)。誰來審議?台灣民眾對審議民主的 支持程度和參與意願。台灣社會學,(31),43-97。
- [5] 范建得、胡中瑋(2007)。生命倫理政策溝通新趨勢: 公共諮詢與參與式管理。法律與生命科學,3,1-11。
- [6] 徐美苓、楊意菁(2011)。台灣全球暖化風險溝通的 常民認知。傳播與社會學刊,15,71-104。
- [7] 秦琍琍、李長潔、張蓉君、徐靖詠(2015)。台灣科 學社群傳播模式的建構:從組織溝通、公眾溝通、 與媒體互動談起。科學傳播論文集,(7),235-259。
- [8] 高佩懃、陳璽尹、徐美苓、劉華美、周桂田(2020)。 在專家、媒體與公眾之間:作為科技風險溝通途徑 的新興科技媒體中心。傳播研究與實踐,10(1), 51-78。
- [9] 張學植、張仁坤、黃薰慧、鄭天德、楊偉甫、吳豐 盛(2017)。瑞典、法國及荷蘭除役及放射性廢棄物 營運設施考察,2020年09月26日,取自: <u>https://report.nat.gov.tw/ReportFront/ReportDetail/det</u> <u>ail?sysId=C10602285</u>。
- [10] 張鐙文、莊文忠(2012)。數位時代媒介使用行為與 政治知識成因之析探:網路與非網路使用族群之比 較分析。競爭力評論,15,65-90。
- [11] 張鐙文、黃東益、李仲彬(2020)。解構影響臺灣民 眾核電政策偏好之關鍵因素:一個整合性架構的初 探。公共行政學報,58,1-54。
- [12] 陳世榮(2007)。探究環境治理中的知識溝通:台灣 氣候變遷研究的網絡分析。公共行政學報,25,1-30。
- [13] 黃東益、陳敦源、蕭乃沂(2006)。政策民意調查: 公共政策過程中的公共諮詢。研考雙月刊,30(4), 13-27。
- [14] 黃東益、董祥開、傅凱若 (2017)。核電廠除役及核 廢料處理議題公衆溝通機制之研究。科技部專題研 究計畫,106-2623-E-004-001-NU。
- [15] 黃東益、董祥開、傅凱若 (2019)。核電廠除役利害 關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行(II)。

科技部專題研究計畫, MOST 108-NU-E-004-001-NU。

- [16] 黃東益、董祥開、傅凱若(2018)。核電廠除役利害 關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行。科技 部專題研究計畫,107-NU-E-004-001-NU。
- [17] 黃東益、李翰林、施佳良(2007)。「搏感情」或「講 道理」?公共審議中參與者自我轉化機制之探討。 東吴政治學報,25(1),39-71。
- [18] 黃俊英(2011)。整合性行銷溝通一強化政策宣導與 溝通的利器。文官制度季刊,3(2),1-23。
- [19] 黃俊儒、簡妙如(2010)。在科學與媒體的接壤中所 開展之科學傳播研究:從科技社會公民的角色及需 求出發。新聞學研究,105,127-166。
- [20] 黃瑞祺(1983)。溝通與批判一哈伯瑪斯社會溝通理 論初探。**鹅湖月刊,99**(10),44-52。
- [21] 黃瑞祺(2010)。溝通、批判和實踐:哈伯馬斯八十 論集。台北市:允晨文化。
- [22] 黃俊英(2011)。整合性行銷溝通一強化政策宣導與 溝通的利器。文官制度季刊,3(2),1-23。
- [23] 楊一晴(2012)。談英國政府對生物科技議題所採社 會溝通機制。科技法律透析,24(4),8-12。
- [24] 葉娟好(2018)。公民網路參與,在政策循環中引入 群眾智慧。政府機關資訊通報,355,6-11。
- [25] 劉文忠(2016)。參加經濟合作發展組織核能署 (OECD/NEA)第17屆核設施除役工作小組 (WPDD)會議,2020年09月26日,取自: <u>https://report.nat.gov.tw/ReportFront/ReportDetail/det</u> <u>ail?sysId=C10504388</u>。
- [26] 鍾玉娟、翁明琪、林庭安(2019)。日本後端營運的 公眾溝通。核能簡訊,180(3),14-31。
- [27] ASN. (2012). The Local Information Committees (CLI) Related to Nuclear Installations. Retrieved September 26, 2020, from <u>http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2012/s</u> iryo55/siryo2-1.pdf.
- [28] Bietrix, P. (2017). Discommissioning Nuclear Power Stations: The Experience of Brennilis. Retrieved September 26, 2020, from <u>http://www.nucleartransparency-watch.eu/wpcontent/uploads/2017/02/3.4-Mr-Bietrix.pdf.</u>
- [29] 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.
- [30] Delli Carpini, M. X. (2000). In Search of the Informed Citizen: What Americans Know About Politics and Why It Matters. *The Communication Review*, 4(1), 129-164.
- [31] Delli Carpini, Michael X. & Scott Keeter (1996). What Americans Know About Politics and Why It Matters. New Haven: Yale University Press.
- [32] Farinella, M. (2018). The Potential of Comics in Science Communication. *Journal of Science Communication*, 17(01), Y01.
- [33] Fennovoima. (2013). *Environmental Impact Assessment Program for a Nuclear Power Plant*. Helsinki: Fennovoima

- [34] García-Cabrero, B., Pérez-Martínez, M. G., Sandoval-Hernández, A., Caso-Niebla, J., & Díaz, C. (2016). Assessing Two Theoretical Frameworks of Civic Engagement. *JSSE-Journal of Social Science Education, 15*(1) 38-52.
- [35] Habermas, J. (1979). *Communication and the Evolution of Society*. Boston: Beacon Press.
- [36] Habermas, J. (1991). The Structural Transformation of the Public Sphere: An Inquiry into a Category of Bourgeois Society. Cambridge: MIT press.
- [37] IAEA. (2009). An Overview of Stakeholder Involvement in Decommissioning, Nuclear Energy Series No. NW-T-2.5. Vienna: IAEA.
- [38] Invernizzi, D. C., Locatelli, G., & Brookes, N. J. (2017). Managing Social Challenges in the Nuclear Decommissioning Industry: A Responsible Approach Towards Better Performance. *International Journal of Project Management, 35*(7), 1350-1364.
- [39] Karch, A. (2012). Vertical Diffusion and the Policy-Making Process: The Politics of Embryonic Stem Cell Research. *Political Research Quarterly*, 65(1), 48-61.
- [40] Krone, K. J., Jablin, F. M., & Putnam, L. L. (1987). Communication Theory and Organizational Communication: Multiple Perspectives. In Jablin, F. M., & Putnam, L. L. (Eds.), *Handbook of Organizational Communication* (pp. 18-40). Newbury Park, CA: Sage Publications.
- [41] Minako. K, Yuko. F. (2015). Science Communication and Politics. In Mazzoleni, G., Barnhurst, K. G., Ikeda, K. I., Maia, R. C., & Wessler, H. (Eds.), *The International Encyclopedia of Political Communication, 3 Volume Set*. New York: John Wiley & Sons.
- [42] Ministry of Employment and the Economy. (2015). Environmental Impact Assessment Procedure for Mining Projects in Finland. Helsinki: Ministry of Employment and the Economy.
- [43] NDA. (2009). NDA Guidance for Site Stakeholder Groups. Retrieved September 26, 2020, from <u>https://assets.publishing.service.gov.uk/government/up</u> <u>loads/system/uploads/attachment\_data/file/453949/Gu</u> <u>idance\_for\_Site\_Stakeholder\_Groups.pdf.</u>
- [44] NRC. (2002a), NRC Public Meetings. Retrieved September 26, 2020, from https://www.nrc.gov/docs/ML0301/ML030140334.pdf
- [45] NRC. (2002b). Enhancing Public Participation in NRC Meetings. Retrieved September 26, 2020, from <u>https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-</u> collections/commission/policy/67fr36920.html.
- [46] NRC. (2003). Report of the Public Communications Task Force. Retrieved September 28, 2020, from <u>https://www.nrc.gov/public-involve/stakeholder-involvement/final-report.pdf</u>.
- [47] Nuclear Legacy Advisory Forum. (2008). Local Arrangements for Stakeholder Engagement. Retrieved September 26, 2020, from <u>https://www.nuleaf.org.uk/wp-</u> <u>content/uploads/2020/01/BP3-2008-Engagement-</u> <u>arrangements.pdf</u>.
- [48] Pescatore, C., & Vári, A. (2007). Stakeholder Involvement in Decommissioning Nuclear Facilities. Paris: OECD.

- [49] Stabulas, A. (2019). An Analysis of United States Nuclear Power Plant Decommissioning Policy and the Public Participation Process. International Development, Community and Environment, 237. Retrieved from https://commons.alarlu.edu/idea\_masters\_papers/227.
- https://commons.clarku.edu/idce\_masters\_papers/237.
- [50] Van Camp, D., & Baugh, S. A. (2016). Encouraging Civic Knowledge and Engagement: Exploring Current Events through a Psychological Lens. *Journal of the Scholarship of Teaching and Learning*, 16(2), 14-28.
- [51] Weeks, E. C. (2000). The Practice of Deliberative Democracy: Results from Four Large-Scale Trials. *Public administration review*, 60(4), 360-372.
- [52] Willie, A. Q. (2019). A Case Study: The First Coastal Nuclear Decommissioning Project in California. Retrieved August 18, 2020, from <u>https://www.researchgate.net/publication/338007704</u> <u>A Case Study The First Coastal Nuclear Decomm</u> <u>issioning Project in California</u>.
- [53] Ytre-Arne, B., & Moe, H. (2018). Approximately Informed, Occasionally Monitorial? Reconsidering Normative Citizen Ideals. *The International Journal* of *Press/Politics*, 23(2), 227-246.

# 結合多媒體敘事效果分析提昇公民參與核能公共議題整合計畫(2/2) Empowering people to have the proper attitude towards the decommission of nuclear power plants: An integrated plan of construction and deconstruction of the media communication strategy (2/2)

計畫編號:109-2623-E-128-001-NU 計畫主持人:林承宇 e-mail:cyou.lin@msa.hinet.net 計畫參與人員:洪茂源、李家萱、黃念雲 執行單位:世新大學廣播電視電影學系(所)

### 摘要

本研究第二年期程主要係為延續第一年所完成之 原能會在(新聞)媒體上 (紙媒、電視媒體與網路媒體三 大類)所再現的十大形象模式(image patterns)後,以 突破過去原能會長久以來所偏重的量化/民調研究模 式,以更深入探索問題本質的定性方法論作為具體的研 究操作方式:除了藉由第一年的多元資料蒐集法之文件 分析法所完成相關媒體再現的深入分析,接續以質性研 究方法的「行為事例訪談法」(Behavioral Event Interview, BEI)與「重要事件訪談法」(Critical Behavior Interviews, CBI)等具體研究方法,作為突破過去深度訪談法與焦 點團體法之框架與盲點,藉以更精準掌握臺灣民眾對於 原能會在新聞媒體再現的認知與態度,進一步以培力臺 灣民眾對有關原子能相關的識讀能力出發,研擬原能會 未來在新聞媒體上再現的較佳模式,同時建構一套符合 原能會專業本質的新聞媒體再現政策溝通,以確實建立 原能會「核能安全」的媒體專業形象,藉此提供原能會 這個國家單位設立之目的,確實與民眾、媒體的關係達 到多贏的訊息傳達局面。本計畫藉由解決民眾與原能會 之間的知識溝與認知溝為基礎,期能為原能會設立目的 在民眾端、媒體端、政府端三方關係在溝通上創造多贏 局面,開創更佳的傳播溝通模式,以落實原能會正向的 媒體互動結果。研究結果顯示,不同受眾均期待原能會 能透過不同的分眾溝通策略,運用不同媒介進行有效的 政策溝通,並期待原能會能以更具創意的溝通模式,在 各種媒體載具上積極呈現原能會對臺灣的重要性與必 要性。此外,不同受眾一致認為透過向下紮根的十二年 國教,融入原能會權責內容於正規教育中,是未來傳達 與建構臺灣新生代對核能議題正確素養觀的最重要途 徑。

**關鍵詞:**多媒體敘事、效果分析、公民參與、核能議題、 媒體識能。

### Abstract

The second-year of this project is based on the 10 image patterns of the Atomic Energy Council (AEC) on the (news) media (including print media, television media, and Internet media) that have been completed in the first year. According to the quantize/polling research model that has been emphasized for a long time, the qualitative methodology to explore the nature of the problem is used

as a concrete method of research operation in this research. In addition to the first year's analysis of documentation of multidisciplinary analysis, the research methods such as Behavioral Event Interview (BEI) and Critical Event Interview (CBI) were used as the focal point of the research methods. We hope to gain a better understanding and attitude toward the news media representation and also to empower Taiwan's people media literacy about the establishment of nuclear power by breaking through the framework and the blind spots from the past in-depth interviews and focus group. To create a media image that is capable of "nuclear energy security", AEC will develop a better model for future representation in the (news) media and build a policy communication system that conforms to the nature of the AEC's profession. In this way, it provides the purpose of establishing AEC: to achieve a win-win relationship between the public and the media. This project also based on resolving the knowledge between the people and AEC, aims to create a win-win situation in communication between people, media, and the government; create a better communication model for implementing positive media interaction. The result shows that different audiences expect effective communication through different communication strategies and different media. Also, they hope that AEC could demonstrate the importance and necessity of the AEC to Taiwan through more creative communication methods. Furthermore, there is a consensus among audiences that the integration of the twelve-year compulsory education and the AEC is the most important way to convey and construct the correct conception (new literacy) of nuclear energy in Taiwan's new generations.

**Keywords:** multi-media narratives, communication effect analysis, civil participation, nuclear public issues, media literacy.

### I. 前言

本年度計畫係以(原)總計畫所規劃命題為核心,在 第一年期程根據過去原能會在(新聞)媒體上的再現模式 進行詳細統整,並以原能會本身對外文宣的再現予以敘 事分析,藉以掌握原能會在媒體上的形象:從過去原能 會所主動提供媒體的訊息透過文件分析法可發現,主流 報紙媒體對於原能會所提供訊息的再現內容,主要偏重 在「訊息告知」層面的報導。而原能會對外發布的訊息 亦都偏重在取得民眾對原能會專業與安全形象的再現

模式,因此所呈現的訊息敘事模式,均顯得太過專業與 生硬,並無法拉近與民眾之間的距離;此現象可能原因 來自原能會本身提供的訊息就僅侷限於此,讓線上記者 無法再以其他形式的敘事方式協助原能會呈現更好的 報導。而唯一以「軟性」訊息提供的再現模式原是希望 拉近與民眾的距離,惟敘事方式卻是相當傳統的「誘因 式」訊息,便形成一種「邊緣說服途徑式」(peripheral route of persuasion)的訊息發布,甚為可惜。因此,本 研究延續過去的建議,原能會發布的訊息、新聞稿,盡 量以軟性的敘事手法作為對外訊息的論述模式,將有助 於原能會給一般民眾因專業而帶來的「生硬形象」;同 時,未來亦能以「中央說服途徑式」(central route of persuasion)的敘事模式發活動訊息、新聞稿等,才能真 正達到拉近民眾距離的傳播效果;亦即,運用「分眾」 (public) 概念提供閱聽人個人對於訊息具有高度的動 機與興趣,而進行互動式溝通模式,以改變其對原能會 的不同認知與瞭解。

又,再從過去的文件分析內容結果發現,過去的主 流報紙媒體報導,對於原能會所專責的核能議題內容著 墨最多,但幾乎對核能議題的再現大多以「負面」再現 方式為主要敘事模式。由於原能會對於擁核或反核並無 特定立場,卻常被主流媒體冠上或建構成「擁核」部會, 進而忽略原能會本質為「專業、安全」的主體。蓋原能 會並無涉擁反核能之立場,甚至能源政策亦係屬經濟部 業務範疇,在媒體報導上常有混淆現象,導致民眾更無 法精準辨識原能會業務無涉能源政策。從過去5年原能 會在新聞媒體再現上,確實可看出這樣的敘事脈絡與事 實。這也確實會造成民眾對於原能會信任之程度、並將 政治立場與擁核態度與原能會結合;換句話說,民眾對 於「反核」的態度越強,對原能會便越不信任,更會忽 略原能會係主司原子能相關「專業與安全」的形象。面 對這樣的新聞媒體再現實情,原能會主要係為「被動」 報導,自然無法干涉新聞媒體的報導自由,因此低一年 研究提出建議,希望原能會可以成立媒體小組或新聞專 責人員,對於上述的新聞再現內容分二部份處理:其一 為針對已被報導的錯誤新聞:與新聞媒體產製者保持訊 息溝通的暢通性,隨時告知新聞產製者(以記者為主) 並隨時重申原能會主司「專業與安全」之立場,無擁核 vs.反核之立場;原能會全然尊重國家政策,同時,僅秉 持「核能安全」為唯一立場。對於非原能會業務範疇(尤 其是隸屬於經濟部之能源政策),必須及時、快速、且 有效地將訊息傳達到各新聞再現的媒體,採取即時回應; 且在自媒體上該新聞再現上及時應對與更新。其二為, 針對與原能會有關/可能有關的事件報導:必須有類似 緊急應變、訊息查核的機制,由專責負責的同仁隨時反 應、應對,並得諮詢媒體專家與學者,隨時擬定回應新 聞稿,應可扭轉過去一直以來被新聞媒體負面再現的窘 況。

在這樣的基礎下,本年度之計畫蓋回歸於本研究總 計畫之目的,以解決原能會應如何翻轉其過去被民眾所 誤解(回歸中立專業、確保核能安全之任務與形象), 透過媒體再現的敘事分析、培力民眾正確原子能媒體識 讀觀、以及閱聽人分析等模式,清楚定位(positioning) 原能會在媒體上的實際角色與專業形象,並能對不同受 眾產生關鍵影響。因此本年度的閱聽人分析、未來媒體 策略實踐、與深化民眾有關原子能(含核能)之媒體識 讀能力等面向,即為本年度延續研究之核心。

在具體的研究進行方式,本年度計畫將區分不同對 象(受眾)進行深入的質化訪談與解析,以區別過去原能 會大致所仰賴的量化/民調模式,藉以瞭解民眾對原能 會形象之認知與態度的調查。對照過去原能會既有的民 調調查結果,以及本研究所整理之過去媒體再現(官方 vs.非官方; 組織內 vs.組織外; 自媒體 vs.傳統媒體等), 針對不同分眾 (publics, 核電廠範圍居民 vs. 一般非核電 廠居民;理工科學背景民眾 vs.非理工科學背景民眾;其 他人口學之變項:依據過去原能會委託民調研究之分析 結果,例如:男性 vs.女性;39 歲以下民眾 vs.40 歲以上 民眾等)進行訪談後分析,以具體掌握本整合計畫之研 究目標。實際進行的訪談進行方式,為突破過去傳統的 「深度訪談法」或「焦點團體法」的訪談框架,本子計 書除了先以傳播學門經常運用的「詮釋現象學」 (hermeneutic phenomenology) 作為分析原能會的傳播 態樣 (communication patterns) 後,針對不同的受眾採 取「行為事例訪談法」(Behavioral event interview, BEI) 與「重要事件訪談法」(critical behavior interviews, CBI) 進行更深入的探討原能會本質屬性之推廣效益,以提供 未來原能會在媒體新聞再現、本身的活動宣傳、議題推 廣等媒體運用的重要依據與參考。

### II. 主要內容

透過第一年期程所依據過去 5 年原能會在(新聞)媒 體上的再現以及本身對外文宣再現的敘事分析後,發現 原能會本身在媒體上所呈現的十大再現模式(patterns) 影響了臺灣民眾對於原子能(包括核能等)知識素養觀。 本年度以此為基礎,根據 Ritchie & Lewis (2003) 的看法, 質化研究應以不超過 50 人訪談為要; 而 Lincoln & Guba (1985) 亦認為訪談取樣人數最少 12 位,最多不超過 20 位,就可以達到飽和點。本計畫的研究為避免遭遇質疑, 例如:樣本取樣少、如何類推、以及如何知道個案具有 代表性等,係以不同典範的思維詢問其問題,就是避免 所謂的「第三類型錯誤」(高淑清,2008),因此在本 年度的計畫中,實際進行的訪談法係以強化過去質化訪 談常用的「深度訪談」或「焦點團體法」訪談模式,加 上運用「詮釋現象學」(hermeneutic phenomenology)作 為分析傳播態樣 (communication patterns) 後,針對不 同受眾採取 BEI與 CBI 等模式進行更深入探究原能會本 質屬性之媒體再現效益,以供未來原能會在媒體宣傳、 議題推廣之重要依據與參考。BEI 主要係為區別核電廠 區居民與非核電廠區居民的對核能的素養觀是否有差 異;CBI 則係為深入瞭解不同人口學變項(包括性別、 職業與教育二者是否理工背景、以及年齡等三變項)。

上述透過對原能會在新聞媒體再現(被動)及本身對 外文宣再現(主動)的敘事分析,藉以掌握原能會在媒體 上的形象現實後;本研究針對民眾對於「能源主管機關 權責」、「能源結構」、「核能供電知識」等三大命題之核 能素養觀,進行樣本代表性的 BEI 與 CBI 訪談,進以分 析臺灣民眾對於原子能主管業務的知識素養觀,據此作 為設計與建構符合未來原能會在媒體上的形象設定與

媒體再現效果。本研究以 Ritchie & Lewis (2003) 所提出 不超過 20 人的訪談為要、以及 Lincoln & Guba (1985) 認為訪談取樣人數最少12位,最多不超過20位即達到 飽和點,開始進行訪談的「素養觀」調查。為避免遭遇 質化(定性)研究普遍受到的質疑(樣本取樣少、如何類 推、以及如何知道個案具有代表性等問題),本研究係 以不同典範的思維詢問其問題(高淑清,2008)。實際 對象依照過去相關文獻所進行的20位訪談對象分類為: (1)第一類型差異對象(A):核電廠範圍居民 vs.一般非 核電廠居民,各訪談1位,並以性別加入變項,共4位; (2)第二類型差異對象 (B):理工科學背景民眾 vs.非理 工科學背景民眾,各訪談1位,並以性別加入變項,共 4 位;(3)第三類型差異對象(C):其他人口學之變項, 依據過去原能會委託民調研究之分析結果,以「年齡」 (18-29 歲以下、30-49 歲、50 歲以上)、「職業」(公部 門 vs.私部門)與「學歷」(高中職以下 vs.大學以上), 共12位。而本研究使用 BEI 與 CBI 進行的主因係不同 於深度訪談法,本研究對不同對象進行訪談的操作,在 於促成本議題更貼近真實、產生議題活化的可能。

CBI 的主要成果是對於受訪者的行動、內在思維、 信念、意圖、對職務的感覺之洞察(李芳齡譯,2002); Sanghi(2007) 認為行為描述訪談(Behavioral description interview) 是行為事件分析(Behavioral event interview) 是一種版本,二者都與關鍵事件技術 (critical incident technique, CIT) 有關,但 BDI 和 BEI 被認為更適合於複 雜的情境。Spencer & Spencer (1993) 認為行為事例訪 談法是情境評斷的重要方法,訪談內容可以提供預測當 事者與議題假設之資源,實施行為事例訪談法有五個步 驟:①自我介紹及解釋:自我介紹及解釋訪談進行的目 的及形式。②瞭解工作職責:讓受訪者描述自己最重要 的工作任務及職責。③找出行為事例:讓受訪者以說故 事的方式,以一個主題為中心,說明自己的成功經驗與 令人感到挫折的事例等。④總結工作特質:要求受訪者 談談他認為做好工作所需要的條件。⑤結束訪談及資料 整理:感谢受訪者接受訪談,以及從訪談中摘錄重要的 事件及心得。Sanghi (2007) 認為行為事件分析是一種 分析技術,其前提是過去的行為是未來行為的最佳預測 指標。

在實施 BEI 行為事例訪談法時,訪談者訪談的重點 是在過去確實的情境中採取措施和行動方面,不是假設 性的答覆,哲理性、抽象性或信仰性的行為。需要採用 STAR 方法來深層次挖掘出具體的行為細節, STAR 方 法主要有4個問題:①情境(Situation):那是一個怎麼 樣的情境?什麼樣的因素導致這樣的情境?在這個情 境中有誰參與?②工作(Task):您面臨的主要任務是什 麼?為了達到什麼樣的目標?③行動(Action):在那樣 的情境下,您當時心中的想法、感覺和想要採取的行為 是什麼?在此,要特別瞭解被訪談人對於情境的認知與 事例的關注點。被訪談人如何看待其他的人(例如,肯 定或是否定)或情境(例如,問題分析與解決的思考)? 被訪談人的感受是什麼(例如,害怕、信心、興奮)? 被訪談人內心想要做的什麼?什麼想法激勵他們?④ 結果 (Result): 最後的結果是什麼? 過程中又發生了什 麼? (李芳齡譯, 2002)。又 STAR 是行為事例訪談法

最好的武器,也是最有效的訪談法,但 STAR 也是一項 比較複雜的技術,其關鍵點在於:①從討論的事件開始; ❷遵循事件本身的時間順序;❸探究相關的時間、地點 與實際狀況,通常有助被訪談人回憶重要的情節;4強 化被訪談者多說有用的素材。通過不斷地強化,可以訓 練被訪談人,如何描述此類事件; 5瞭解訪談過程,被 注意並探究其反應內容。探究思想上的起因 S 和行為過 程A,即實例中的技術問題的解決模式和策略規劃的思 考程式(李芳齡譯,2002)。因此,行為事例訪談就是 讓實務表現者接受深度的行為事例訪談,用以確認該份 工作內容狀況,要求受訪者描述曾面臨最重要的情況, 從受訪者所提供短故事來引述當時的處理情形及其衍 生的結果等,並且從描述中透露該工作最重要的情境, 並以主題分析技術,萃取訪談者身上展現的行為特質。 因此,實際對訪談象與訪談紀錄編碼如下表 1:訪談對 象之編碼整理。

表1:訪談對象之編碼整理↓

编號。	性別↔	類型差異分類。	訪談方式與編碼代號 <b>↔</b>
A10	女。	核電廠範圍居民、非理工背景。	BEI,逐字稿 B20200703RU01。
$A2\varphi$	男↩	核電廠範圍居民、 <u>非理工</u> 背景→	BEI,逐字稿 B20200706RU02。
A3.0	男↩	核電廠範圍居民、理工背景↔	BEI,逐字稿 B20200708RS03↔
$A4 \circ$	女∘	核電廠範圍居民、理工背景↔	BEI,逐字稿 B20200708RS04↔
<b>B</b> 5∉	男↩	非核電廠範圍居民、非理工背景。	BEI,逐字稿 B20200713NU05。
B6₽	女↔	非核電廠範圍居民、非理工背景。	BEI,逐字稿 B20200718NU06。
$\mathbf{B7}_{e^2}$	男↩	非核電廠範圍居民、理工背景。	BEI,逐字稿 B20200721NS07↔
$\mathbf{B8}_{e^2}$	女∘	非核電廠範圍居民、理工背景→	BEI,逐字稿 B20200726NS08↔
C9¢	男↩	22 歲、大學生、私部門、理工背景。	CBI,逐字稿 C20200802PS09↔
C104	男↩	35歲、研究所、公部門、理工背景↔	CBI,逐字稿 C20200808GS10。
C11¢	男↩	55歲、高職、公部門、理工背景↔	CBI,逐字稿 C20200809GU11。
C12+	男₽	27 歲、研究所、私部門、非理工背景。	CBI,逐字稿 C20200813PU12。
C13+	男₽	41 歲、高職、私部門、非理工背景。	CBI,逐字稿 C20200816PU13。
C144	男↩	62 歲、大學、公部門、非理工背景。	CBI,逐字稿 C20200817GS14。
C154	女。	21 歲、大學生、私部門、理工背景。	CBI,逐字稿 C20200821PS15+
C164	女₽	28歲、研究所、公部門、理工背景↔	CBI,逐字稿 C20200823GS16。
C174	女∘	61 歲、高中、公部門、理工背景↔	CBI,逐字稿 C20200827GS17。
C18+	女や	29 歲、研究所、私部門、非理工背景。	CBI,逐字稿 C20200830PU18。
C194	★	44歲、高職、私部門、非理工背景。	CBI,逐字稿 C20200903PU194
C204	女。	60歲、大學、公部門、非理工背景。	CBI,逐字稿 C20200911GU204

**詮釋現象學研究不是以樣本量達成推論之有效性**, 而是以樣本的代表性與豐富度作為考量,藉以提供豐富 且深化的資料;本研究為使樣本數量具代表性,隨著分 析過程增加並在逐漸濃縮與還原本質的過程,達到理論 飽和度,因此選用 20 位訪談者。本研究選擇 4 位核電 廠範圍居民(核電廠緊急應變區 8 公里範圍內 EPZ 為主 要選樣標準)進行 BEI 訪談,並比較相同變項的4位非 核電廠居民進行比對差異性;再以 12 位研究參與者的 不同操作變項作為選樣標準。取樣方式及標準為:1.典 型個案取樣:選擇具代表性的不同類型對象;2.最大變 異取樣:兼顧訪談者性別、教育與工作背景、年齡等不 同屬性;3.效標取樣:對核能與原能會有所認知的對象; 4.滾雪球取樣:在研究過程中,經受訪者推薦,足以呈 現或代表不同類型的樣本。依據上述四項標準取樣結果, 參與者編號方式為訪談模式+時間+變項(居民與否RN、 職業部門 PG、理工與否 US)+序號,例如: B20200703RU01,詳如上表1所示。由於本研究並未涉 及過於敏感的議題,20 位同意接受訪談者,符合 Lincoln 與 Guba (1985) 所認為訪談取樣人數最少 12 位可以達 到飽和點之標準,可確保蒐集足夠及飽和之研究資訊。

本研究事先提供訪談題綱,提供受訪者瞭解,梳理對原 能會在媒體再現上的經驗與感受,訪談地點為首訪者方 便接受訪談的所在地,訪談時間約一小時,處於友善和 對等的環境氛圍。研究者所提問之內容,受訪者皆能暢 所欲言,論述其寶貴經驗且無保留或顧忌。訪談題綱大 致如下:

(1)您對原子能委員會(以下簡稱原能會)的瞭解為何?從何管道最多?。
(2)您是否會主動蒐集有關原能會相關訊息?。
(3)您是否瞭解台灣目前的電力能源政策?(供電狀況)。
(4)您對核能議題的看法?思考自己的這些看法大致從何媒體管道而來?。
(5)您對於能源議題的接收訊息管道為何?。
(6)您對於原能會過去曾在媒體上建構的訊息接觸多少?瞭解多少?。
(7)您覺得原能會可以透過什麼管道讓您接觸到您可以接觸的訊息?。
(8)您覺得原能會可以運用何種方式,讓民眾正確瞭解其業務範疇?。
(9)您對於過去的核電廠公投瞭解的狀況為何?主要瞭解的管道為何?。
(10)您對核廢料的瞭解狀況為何?主要透過什麼媒體管道?或其他方式瞭解?
(11)其他。

### III. 結果與討論

(一)有關資料分析與研究信實度檢視

本研究將訪談內容謄寫成逐字稿,再進行訪談資料、 文件資料之編號與編碼,尋找資料間的關係。研究結果 分析係參照 Patton (2002, 2005)所提出之主題內容分 析進行之:第一階段以「核能」、「安全」、「能源」、 「電力」...等 18 個碼號,經由發現事件與脈絡視框、分 析意義的結構與經驗重建,濃縮精簡及萃取碼號之精華, 歸類為「核能安全」、「能源結構」、「供電穩定」、 「核能再現」、「核能宣導與再現」、「核能教育」、 「核廢料處理」、「核能教育」等8 個意義單元,最後 經過反覆推敲思考,歸納為:能源結構、核廢料安全、 核能教育、供電穩定、核能宣導與再現等5 個主題,並 整合資料、脈絡及理論,與文獻進行討論及對話,提出 研究結論及建議。研究使用輔助軟體為:NVivo 10 版本 進行資料統整與分析。

為建立研究的信實度,本研究詳述研究過程,使研 究步驟可以複製及檢核,訪談不同類型之20位受訪者, 獲得豐富且達到飽和程度的原始資料,進行三角檢證, 每個段落至少引述三位以上受訪者之看法,加上研究者 省思之見解,以及相關文獻之對話,藉以達到厚實描述 的要求,確保研究之信實度。此外,研究者將不同現象 放入括號,避免先入為主,促使研究結果是通過互動而 達成的共識。研究結果同時送請研究參與者協助檢核, 以確認忠實呈現其本意。在研究倫理方面,研究參與者 均以匿名呈現,充分保護研究參與者,避免困擾或任何 傷害之可能。

(二)有關研究結果分析摘要與討論

根據已訪談的 20 份逐字稿內容,以 N-Vivo 10 進行 深度解析獲得結論與建議為(以下內容僅呈現摘要;完 整之訪談原始逐字稿、原分析過程文字稿,均交付原能 會相關業務單位;聚焦何種再現內容→對什麼何種對象 →會產生何種效果):

結果發現不同教育背景、不同人口學變項等因素, 確實會對原能會訊息有不同的解讀;尤其是,不同教育 背景尤甚。而居住環境的不同,對原能會相關訊息的理 解與素養觀雖有不同,但並無明顯差異。整體而言,民 眾對於能源相關的素養觀有待強化;對於核能議題的理 解偏重在關注核廢料的處理;對於供電穩定的部分大致 傾向盡量不使用核能發電,但如果電力不足、空氣汙染 等現實無法解決,則認為可以維持核能發電。不同分眾, 同時均指出項下紮根的 12 年國教將原能會權責的議題 與內容,有創意地融入到正是教材中,是建構國民正確 核能相關素養觀最重要且應該要具體實踐的做法。

### IV. 結論

本研究提出以下原能會在兼顧敘事效果促進臺灣 公民參與原能會相關公共議題上的媒體再現溝通建 議:

- (1)未來原能會的媒體溝通模式,必須以「分眾」為 之。尤其是性別變項、理工與非理工背景的受眾 變項,需作為媒體再現溝通模式的考量。例如, 即使欲呈現涉及原能會相關的科學論述訊息,在 敘事策略與表現上仍應以較為軟性的感性訴求為 敘事模式,才能讓非理工背景的女性對該訊息產 生興趣(A1、A4、B6、C15、C18&C19訪談內 容;詳細內容略)。
- (2)溝通內容得以融入各種文類為創新模式,並非置入方式。例如,以戲劇方式(如電影、迷你劇等) 再現以原能會業務相關專業內容所改編的戲劇, 拉近與民眾的距離,藉此讓不同受眾無形中接受 相關知識觀(可參閱過去不同領域改編的電視劇) (A3、A4、B7、B8、C10、C12、C18 & C19 訪 談內容;詳細內容略)。
- (3)向下紮根的教育內容,從正規教育著手。選定原 能會相關業務中,具有主體性的議題、內容,編 入國中國小高中的教科書中,以有趣的議題方式 培力高中以下的受眾正確知識觀;例如能源結構、 核能供電相關現象等內容,並以容易理解的敘事 模式呈現(A1、A2、A3、A4、B5、B6、B7、B8、 C9、C10、C11、C12、C13、C14、C15、C17、 C18、C19&C20 訪談內容;詳細內容略)。
- (4)透過社群媒體,以簡單敘事清楚呈現核心概念。 新媒體的運用不宜呈現複雜的溝通訊息,方能促成不同群體瞭解原能會;建議若欲以新媒體載具 作為溝通方式,必須使用的敘事模式,除了隱含必要的知識觀,敘事模式必須簡單。例如使用迷因手法、幽默的闢謠方式、輕鬆建構正確核能知識,都是可以嘗試的作法(A4、B8、C9、C10、C12、C15、C18&C19訪談內容;詳細內容略)。
- (5) 媒體溝通仍然是民眾瞭解原能會的主要來源。除此之外,各種的策展、活動、座談會等亦有助民眾瞭解,惟各種媒體再現以外的宣傳模式,仍應與媒體充分結合。例如,辦理原能會的科普策展有助民眾理解原能會,但充分讓主流媒體報導相關訊息則會形成加乘效果(A2、A3、A4、B5、B7、B8、C9、C11、C12、C16、C18&C20 訪談內容;詳細內容略)

### 参考文獻

- [1] TVBS 民調中心(2012), 〈核能發電民調〉。參考 網站:
   <u>https://cc.tvbs.com.tw/portal/file/poll\_center/2018/20</u> <u>180316/d30a815bae520e8022559ca292886036.pdf</u>。 (上網日期:20191130)
- [2] 李政賢譯(2011),《質性研究寫作》。台北:五 南。(原書 Wolcott, H. F. [2001]. Writing up qualitative research. Thousand Oaks, CA: Sage.)。
- [3] 李原玫(2002)。〈以問題解決才能為基礎的結構式 面談問題設計-以C公司Fab工程師為例〉,第八屆 企業人力資源管理實務專題研究成果發表會論文。 桃園:國立中央大學。
- [4] 李芳齡譯(2002)。《績效躍進:才能評鑑法的極致 運用》。台北:城邦文化。(原書 Dubois, D. D. [1993]. Competency-based performance improvement: a strategy for organizational change. Amberst, MA: HRD.)。
- [5] 吴翠珍、陳世敏(2007),《媒體素養教育》。臺 北:巨流。
- [6] 周典芳、陳國明(2005),《媒介素養概論》。臺
   北:五南。
- [7] 林承宇(2017)、〈藥品廣告規範之傳播政治經濟學 取徑分析:跨領域議題規範新思維〉。《傳播與社會 學刊》,第42期,頁189-223。
- [8] 林承宇(2014),〈傳播跨領域研究的方法論習題:
   以「健康素養」為例〉。《傳播與管理研究》, 13(2):
   3-37。
- [9] 高淑清(2008),《質性研究的 18 堂課:首航初 探之旅》。高雄:麗文文化。
- [10] 教育部(2002),《媒體素養教育政策白皮書》。 臺北:教育部。
- [11] 陳欣怡(20180424), 〈遠見民調:推動 2025 非核 家園,民意卻高達 54.7%同意重啟核四〉。參考網 站:<u>http://www.storm.mg/article/429084</u>。(上網日期: 20191130)
- [12] 陳憶寧(2014),〈福島危機中台灣民眾對核能的風險感知與態度:政黨傾向、核能知識、信任與科學傳播的角色〉。《中華傳播學刊》,26:223-265。
- [13] 陳潁峰(2017), 〈地方問責與核能安全治理:以新 北市核能安全監督委員會為例〉。《民主與治理》, 4(2):109-150。
- [14] 張寧、黃崑峰(2015),〈嫌惡性設施的風險知覺〉。
   《中國行政評論》,21(3):21-47。
- [15] 梁世武(2014),〈風險認知與核電支持度關聯性之 研究:以福島核能事故後台灣民眾對核電的認知與 態度為例〉。《行政暨政策學報》,58:45-86。
- [16] 蔡素琴、洪雅鳳、劉淑慧(2014),〈敘事分析方法: 由 Labov 敘事結構與隱喻故事取徑〉。《臺灣諮商心 理學報》,2(1):77-96。
- [17] 羅曉南、余陽洲(主編)(2015),《批判的媒體識 讀三版》。臺北:正中。
- [18] Altheide, D. L. (1996). *Qualitative media analysis*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- [19] Buckingham, D. (1991). Teaching about the media. In

Lusted, D. (Ed.), *The media studies book: A guide for teachers* (pp. 12-35). London, UK: Routledge.

- [20] Buckingham, D. (2000). *The making of citizens: Young people, news, and politics.* London, UK: Routledge.
- [21] Buckingham, D. (2003). *Media education: Literacy, learning and contemporary*. Cambridge, UK: Polity Press.
- [22] Freire, P. (1972). *Pedagogy of the oppressed*. (Ramos, M. B., Trans.). Harmondsworth, UK: Penguin.
- [23] Kress, G. R. (2003). *Literacy in the new media age*. London: Routledge.
- [24] Kubey, R. W. (Ed.). (1997). *Media literacy in the information age: Current perspectives*. NJ: Transaction Publishers.
- [25] Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Newbury Park, CA: Sage.
- [26] Lichtman, M. (2006). *Qualitative research in education: A user's guide*. London, England: Sage.
- [27] Livingstone, S. (2002). *Young people and new media*. London: Sage.
- [28] Masterman, L. (1985). *Teaching the media*. London, UK: Routledge.
- [29] Patton, M. (2002). Qualitative research & evaluation methods (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
- [30] Patton, M. (2005). Qualitative research. In B. Everitt & D. How ell (Eds.), *Encyclopedia of statistics in behavioral science* (pp. 1633-1636). Chichester, England: John Wiley & Sons.
- [31] Ritchie, J., & Lewis, J. (2003). Qualitative research practice a guide for social science students and researchers. London, UK: Sage.
- [32] Sanghi, S. (2007). The handbook of competency mapping: Understanding, designing and implementing competency models in organizations (2<sup>nd</sup> ed.). Thousand Oaks, CA: Sage.
- [33] Semali, L., &. Pailliotet, A. (Eds.). (1999). Intermediality: The teachers' handbook of critical media literacy. Boulder, CO: Westview/Harper Collins.
- [34] Share, J., Thoman, E., & Jolls, T. (2005). *Five key questions that can change the world: Classroom activities in media literacy*. Los Angeles, CA: Center for Media Literacy.
- [35] Spencer, L. M., & Spencer, S. M. (1993). Competence at work: Models for superior performance. New York, NY: Wiley.
- [36] Thoman, E., & Jolls, T. (2005). Media literacy education: Lessons from the center for media literacy. In G. Schwartz & P. U. Brown (Eds.), *Media literacy: Transforming curriculum and teaching* (pp. 180-205). Malden, MA: National Society for the Study of Education.
- [37] Tyler, F. (2001). *Cultures, communities, competence and change.* New York, NY: Kluwer Academic.
- [38] Wolcott, H. F. (2001). *Writing up Qualitative Research*. Newbury Park, CA: Sage.

# 核能與輻射知識之虛擬實境體驗程式開發 Development of Virtual Reality Program of Nuclear and Radiation Knowledge

計畫編號:109-NU-E-262-001-NU 計畫主持人:陳彥均 e-mail:chen.mg.lhu@live.com 計畫參與人員:羅明浩 執行單位:龍華科技大學

### 摘要

核能與輻射知識,是一般人比較不了解的領域。然 而,核能與輻射具有許多應用,和民眾的日常生活相關。 根據過去的經驗,虛擬實境對於兒童和青少年,具有極 高的吸引力。非常適合應用於科展等活動,向民眾宣傳 科學知識。本計畫以食品檢驗為主題,開發了虛擬實境 互動程式。透過這個程式,可以讓民眾了解檢驗食品輻 射殘留的相關知識。

關鍵詞:食品檢驗、輻射殘留、虛擬實境

### Abstract

Nuclear and radiation knowledge are unfamiliar topics for the public. However, there are many applications related to our daily life. According to past experiences, virtual reality is attractive to children and teenagers. It is suitable to propagate knowledge in science fairs. In this project, a virtual reality program of food inspection is developed. The public can understand the inspection of radiation residue using this program.

**Keywords:** Food inspection, radiation residue, Virtual reality.

### I. 前言

原子能科技學。核能與輻射知識,是一般人比較不 熟悉的領域。然而,核能與輻射具有許多應用,和民眾 的日常生活相關。如果民眾缺乏正確的知識,則容易被 坊間流傳的錯誤觀念誤導。因此,向民眾傳遞正確的核 能與輻射知識,是一件相當重要的事情。在 2018-2019 年的開發與展出經驗之中,發現VR對於兒童和青少年, 具有極高的吸引力。非常適合應用於科展等活動,向民 眾宣傳科學知識。過去,本團隊已經針對核電廠事故、 核電廠除役、輻射的民生應用三個主題,製作了 VR 程 式。在本計畫之中,以食品輻射殘留檢驗為主題,開發 VR 互動程式。讓民眾了解食品輻射殘留檢驗的相關做 法,藉此了解相關知識,並且知道食品安全受到嚴格的 把關。

### II. 主要內容

(例)年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式,年度原子能科技年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式,年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式,年度原子能科技年度原子能科技學術研討暨成果發表會精簡報告範例格式,年度原子能科技學術研

計暨成果發表會精簡報告範例格式。本團隊採用 Unreal Development Kit (簡稱為 UDK),來開發本計畫的虛擬 實境體驗。UDK 是 Unreal Engine 的精簡版,該程式引 擎是最知名的商用電玩程式開發引擎。具有最先進的 3D 電腦圖學技術,並且支援所有主流的虛擬實境硬體設備, 足以用來製作本計畫所需要的虛擬實境體驗內容。在虛 擬實境硬體設備方面,本計畫使用了被 Facebook 收購的 Oculus Rift。

本團隊前往核能研究所,參觀了食品放射性檢驗實 驗室。藉此,實際了解食品檢驗的設備,以及相關的檢 驗流程,如圖 01。並且將參訪所取得的資料,做為開發 虛擬實境程式的參考資料。



圖 01:參訪核能研究所

在本計畫所開發的虛擬實境程式之中,使用者可以 針對魚、牛奶、餅乾、茶葉、水果共五種食品,進行輻 射殘留檢驗。並且根據真實的檢驗流程,利用手持式檢 測器檢測食品外表(圖 02),將食品切成碎片(圖 03) 並裝罐測量重量(圖 04),最後放入加馬能譜分析系統 (圖 05),以獲得精準的檢測數據。



圖 02:以手持式掃描器檢測食品外表



圖 03:將食品切成碎片



圖 04:將食品裝入檢測罐並且測量重量



圖 05:將檢測罐放入加馬能譜分析系統

### Ⅲ. 結果與討論

本計畫的成果,授權給原子能委員會免費使用。在 原子能委員會所舉辦的科展之中,進行實際進行展出, 並且開放給民眾體驗使用,如圖 06 所示。吸引了許多參 觀民眾進行體驗。





圖 06: 於科展中開放民眾使用

### IV. 結論

本計畫透過虛擬實境技術,製作食品輻射殘留檢驗 的虛擬實境互動體驗程式,來宣傳相關知識。藉此最新 的虛擬實境技術,增加民眾的興趣,並且透過互動操作, 來加深民眾的印象,以獲得更好的宣傳效果。本計畫的 成果,已經在科展之中,實際開放給民眾體驗,獲得良 好的評價。計畫的整體成果,與原先的規劃大致相符。

# 培育學生之核能素養-網路專題式學習之取向 Facilitating Students'Literacy on Nuclear Energy: The Perspective of Web-enhanced Project-Based Learning

計畫編號:109-NU-E-979-001-NU 計畫主持人:蘇萬生 e-mail:wssu@mail.ntsec.gov.tw 計畫共同主持人:陳世文 計畫參與人員:陳鴻宜、李柏翰、黃真瑱、陳昱佑、 陳柏宏、陳令原 執行單位:國立臺灣科學教育館推廣組

### 摘要

本計畫對小學課程學習上使用專題式學習法 (Project-Based Learning),利用原子能委員會提供之數 位影音資源,結合學校晨光時間設計能源教育主題式 教學,呈現以下三項課程重點:(1)核能知識;(2)生活 應用;(3)環境影響。此外在本計畫種也鼓勵學生參與 2020年全國科學探究競賽及行政院原子能委員會形象 公仔設計徵選活動,以培養學生對於能源議題有更深 入的瞭解與體認,也提供其他學校未來推動能源教育 議題課程發展與實施之參考。本計畫完成的工作包括: 從核能安全為出發點選定9個能源議題、製作道具輔以 圖像化說明及入校推廣等,期望能在學生們的心中種 下 一粒種子,對未來臺灣培養有關核能的專業研究者 有所助益。

**關鍵詞:**專題式學習法、核能知識、生活應用、環境 影響

### Abstract

This plan uses Project-Based Learning for primary school curriculum learning, as well as uses digital audiovisual resources provided by the Atomic Energy Commission, combined the school's morning light hours to design energy education thematic teaching, presenting the following three curriculum highlights: (1) nuclear energy knowledge; (2) daily application; (3) environmental impact. In addition, in this project, students are also encouraged to participate in the 2020 National Science Inquiry Competition and the image doll design selection activities of the Atomic Energy Committee of the Executive Yuan, so as deeper understanding to cultivate students' and understanding of energy issues and provide other schools to promote energy in the future. Reference for curriculum development and implementation of educational issues. The work completed in this project includes: selecting 9 energy topics from the perspective of nuclear energy safety, making props supplemented by graphic explanations and school promotion. It is hoped that a seed can be planted in the hearts of students. It will be helpful for Taiwan to cultivate professional researchers related to nuclear energy in the future.

**Keywords:** Project-Based Learning, Nuclear energy knowledge, Daily application, Environmental impact.

### I. 前言

本計畫旨於培育國小學生的核能科普素養,透過 原子能委員網站所提供的系列影片來配合課程設計, 預期學生在上完這些課程之後能對於核能能源議題有 深層之理解。在109年1-2月之「課程規劃」階段,計 畫主持人與研究團隊共同規 劃課程主題、研擬教學目 標,在討論課程實施之次數與方式後,設計「核能知 識」、「生活應用」以及「環境影響」三個主要課程向 度,每一個向度各有三個主要的學習目標:一、「核能 知識」向度的教學目標(一)能初步瞭解核能發電的 原理。(二)能初略核輻射線的種類與臺灣核電廠的現 況。(三)閱讀與瞭解原子能相關科學家的故事。二、 「生活應用」向度的教學目標(一)能知道放射線在 生活、科學及醫療上的應用。(二)能瞭解核災事故發 生時該有之行動與處置作為。(三)能瞭解能源轉型的 議題與生活之間的相關應用。三、「環境影響」向度的 教學目標(一)能瞭解放射線對人體與環境的影響。 (二)能瞭解核廢料的處理方式與環境之間的相關性。 (三) 瞭解核電廠除役的目的,並加深對能源轉型的 概念。

### Ⅱ. 研究實施進程

在109年3月至6月「課程實踐」階段,利用每周 學校晨光時間實施1個課程主題,共實施9周。實施的 對象主要是國小低年級學生共計29名。在109年9月 至12月「課程應用」階段,將研發成果實施入校授課 推廣,課程活動受到各小學學生們的喜愛,並在教師 們當中也有良好的響應。

### Ⅲ. 核能素養課程內涵

一、核能發電原理:首先請學生觀察三張有關 「火」的圖片(營火晚會、升火、燭火),並說出自己 看到圖片哪些線索。最後統整圖片線索,歸納圖片的 共通性,並說明能源與能量的關係。之後請學生觀賞 「核能發電原理」影片,並由教師進行提問使學生瞭 解核能電廠結構與發電原理。最後讓學生閱讀學習單 的內容,並隨後進行填答。

二、輻射線的種類:首先讓學生觀賞「原來如此-你知道輻射有幾種?」教學影片,並依影片的內容提問 和統整:輻射可以依照能量的高低分成「游離輻射」 和「非游離輻射」、游離輻射如X光、伽瑪射線等,非 游離輻射則如微波、無線電波等。之後為了讓學生了 解生活中的輻射,我們進行:1.腦力激盪:桌上放置 一杯礦泉水和一杯微波過的溫紅茶,詢問學生這兩杯 水會有輻射嗎?2.桌上放置一根香蕉和一個御飯糰,詢 問學生這兩樣東西也會有輻射嗎?3.兩人一組討論:黑 板上布置多張食物的圖片,讓學生分組討論看看哪些 食物會有輻射。請各組一位同學上台分享哪些食物有 輻射,並且說出理 由。4.延伸活動:觀賞影片「原來 如此第3集-食物中有輻射嗎?」、「原來如此 第8集-你 覺得飲用水有輻射嗎?」。5.延伸活動統整:原來食物和 飲用水中都有天然輻射,只是劑量很小,不足 以影響 人體健康。

三、原子能科學家小故事:我們請學生觀賞影片 「《名言啟示錄》著名物理學家系列:倫琴願我的發現 能更好地服務全人類」和閱讀「核醫之父」,以介紹科 學家倫琴、赫畏希的故事。並對學生提問:影片中的 科學家發現了什麼?他的發現對我們有什麼 幫助?

四、放射線在生活的應用:(一)引起動機:請學 生欣賞影片「探索頻道-天外煞星」,從伽瑪射線引導學 生 思考放射線對生活、科學、醫療上的應用,內容包 括: 1.核醫:診斷用核醫藥物,因為用量極少,病患所 受的輻射量小,不會產生任何傷害;治療用核醫藥物, 必須有足夠的輻射量,殺死癌細胞,所以病患所受的 腫 瘤局部輻射量較大,但全身輻射劑量不會太高,為 了治病,仍然可以接受。2.皮膚敷料研究,利用膠原質 和牛之膠質及矽橡膠等材料,製成暫時燒燙傷敷料。3. 掃描與 X 射線一般診斷 X 射線的過程。如胸腔攝影, 利用 X 光管球所發生之 放射線穿過身體到底片上,將 組織構造影記錄在底片上,這就是放射線照相,所照 底片經沖洗後由放射線專科醫師判讀診斷。4.民生應用: 農業上利用輻射照射改變基因,改良農作物,增加收 成產量或使花 卉植株矮化照樣開花,也可照射害蟲, 如果蠅;木材經照射後結構轉強,用於製造槍托;普 通玉石經照射後顏色增艷提高價值;農產品照射後可 以延長保存期限, 如馬鈴薯、大蒜不會發芽; 醫療器 材照射後達到消毒滅菌效果;考古學利用輻射 進行年 代測定,如碳-14 定年法;工業上利用輻射進行非破壞 檢測,例如飛機機 身裂縫檢測、輪船水櫃或油櫃存量 檢測等。 (二)延伸活動觀賞影片:播放「原來如此 第17 集-食物照射會不會殘留輻射」、食品照射。 (三) 概念統整:教師引導學生討論統整概念內容,讓學生 瞭解適當的運用輻射 能量來照射食品,可以達到抑制 發芽、殺蟲滅菌、防腐保鮮的效果,不含放射 性,不 破壞原本的天然養分。另外,許多醫療器材也是運用 輻射照射來達到滅菌的效 果在生活、科學及醫療上都 可以為人類帶來正向的影響。

五、輻射安全與核災事故的行動與處置:(一)引 起動機:介紹歷史上核災事件,如蘇聯克什特姆核廢 料爆炸事故、英國溫斯喬火災、美國三哩島核洩漏事 故、蘇聯車諾比核事故、日本福島電廠核災事故等 (二)腦力激盪:請學生相互討論並分享發生核災事 故時,應該要做些什麼?(三)請學生欣賞影片:「原來 如此第 14 集-聽到核災警報第一件事要做什麼?」、「原 來如此第 24 集-發生核子事故一定要疏散嗎?」。(四) 主題概念統整:教師統整影片內容,讓學生瞭解核事 故發生的行動與處置,聽到核災警報要做:儘快到室 內,進行掩蔽,暴露在室外的食物和飲用水不可食 用。 服用碘片。打開收音機,聽政府機關指示並預做疏散 準備。疏散取決於兩個 重點:「事故有多大?」、「距離 核電廠有多遠?」。

六、能源轉型的意義與影響:(一)文本閱讀:請 學生先閱讀能源轉型科普文本。(二)提問與討論:最 貴與最便宜的發電方式分別是什麼?還有什麼其他的發 電方式也是便宜的?(三)簡報介紹:新能源型態包括 海浪發電、地熱、風力、太陽能、生質能、潮汐、海 藻.....等。(四)欣賞影片:觀賞「20160430【消失的 國界】逆境生創新!荷蘭追求綠色共 識-全國奇想拼創 業/李天怡主持/三立新聞台」(五)概念統整:教師引 攀壁越激烈,越有助各國政府、產業、企業採行加速 能源轉型的作為;相對地,各國政府、產業、企業採 行更積 極的能源轉型作為,則有助延緩氣候變遷對生 活環境之影響。

七、輻射線對人體與生態環境的影響:(一)引起 動機:黑板放置7張圖片,分別為過量的輻射對人體、 動物、植物的 圖片。詢問同學從圖片中看到了什麼。 導引出輻射過量對人體、動植物的影響。(二)有關過 量輻射的影響: 1.腦力激盪: 請學生思考過量的輻射會 為環境和生態帶來什麼污染和問題, 自由發表。 2. 簡 報介紹:輻射過量會為環境和生態有什麼影響。(三) 有關適量輻射的影響: 81.腦力激盪:請學生思考適量 的輻射會為人體和環境帶來什麼影響和幫助, 自由發 表。2.影片欣賞:請學生欣賞影片:「原來如此第9集-輻射如何傷害人體」。(四)概念統整:背景輻射不會 造成人體影響。(五)其他有關生活中輻射的疑問: 1. 腦力激盪:醫院照 X 光會殘留嗎?孕婦照口腔 X 光會有 影響嗎?站在機場 行李 X 光機旁,你會擔心嗎? 2.分組 討論:兩兩一組討論上述3個生活中會遇到有關輻射的 疑問,並分享 討論結果。(六) 解答疑問影片:請學生 觀賞影片:「原來如此第6集-醫院照X光會殘留 嗎? Ň 「原來如此第7集-孕婦照口腔X光會有影響嗎?」、「原 來如此第11集-你會擔心站在機場行李X光機旁嗎?」。 (七)概念統整:1.讓學生瞭解輻射不是病毒,傷害我 們人體的方式是造成細胞內 DNA 的損 傷,人體有高效 能的修復機制,一般天然背景輻射是不會對我們人體 造成傷 害的。 2.讓學生瞭解過量的輻射的確會造成人 體及環境的災害,所以更要注重核能的安全問題。

八、核廢料的問題與處理:(一)引起動機:請學 生欣賞影片:顛覆你想像的「核廢料」!(二)瞭解 核廢料貯存方式:請學生觀賞影片「原來如此一你知 道什麼是乾式貯9存設備?」(三)概念統整:教師 引導學生瞭解乾式貯存的科學意義。

九、核電廠的壽命與處置:(一) 腦力激盪:想一 想,核能電廠除役和一般工廠拆除有什麼不同?拆除需 要 多少年?(二)欣賞影片:請學生欣賞影片:「懶人 包-甚麼是核能電廠除役」、「原來如此 —核電廠除役作 業要花多少年」。(三)概念統整:教師統整影片概念, 幫助學生瞭解核能電廠除役的時間大概要 花費 25 年, 其中準備期 8 年,開始拆廠 12 年、偵測 3 年、恢復 2 年。核能電廠 的運轉會產生輻射汙染物質,拆除前要 先偵測汙染狀況,才能拆除。

### IV. 課程應用成果

在課程實行之後,我們鼓勵學生參加以下活動以 展現學習成果:一、全國科學探究「這樣教我就懂」 競賽活動 學生學習前述課程之後,共同討論訂定主題 「輻照食物照過來」,繪製圖畫且錄製參賽影片,參加 「這樣教我就懂」競賽獲得入選佳績。二、「原能會原 子能公仔設計徵選」競賽 藉由參加原能會所舉辦的原 子能公仔設計甄選競賽活動,讓學生認識公仔的 意義 與設計要素,進而設計原子能公仔作品,學生在競爭 激烈的競賽中獲得佳作之佳績。

### 参考文獻

- [2] 蘇萬生 (2019)。培育學生之核能素養-網路專題式 學習之取向。科技部計畫書。
- [3] 此計畫成果已先行整理發表在臺灣網路科教館之 網頁,標題為:能源教育議題課程的發展與實踐 一科普素養的向下紮根(即參考資料 1);本報告內 容係參酌此文章略加修飾。
- [4] 2020「全國科學探究競賽-這樣教我就懂」國小組 入選作品:輻照食物照過來(入選獎是作品經評選 後分數達 80 分以上,獲得大會頒發入選證明乙張) https://sciexplore.colife.org.tw/vote\_content.aspx?gui d=ea536530-e483-450e-a9d9-7f261d650682&type=pop&group=1&fbclid=IwAR3 NCUdDyn7Vpi9bKr9BoFoCVU\_73 GbjX0H3-OWJac9BNncc3CPoEnZR6\_k
- [5] 2020「全國科學探究競賽-這樣教我就懂」教師組入選作品:核得核能 https://sciexplore.colife.org.tw/vote\_content.aspx?gui d=977e5461-bdfb-4fea-911aa8a8682687b9&type=pop&group=4&fbclid=Iw AR0BXPqDXrwsk4rLaYk1uL00-VO1YjzgpadeAaoYBo-RxpNNsiKLy8FYiA
- [6] 行政院原子能委員會形象公仔設計徵選活動 https://www.aec.gov.tw/newsdetail/board/5270.html

# 原子能民生應用數位內容製作與網路傳播溝通研究 Research on Digital Content Production and Network Communication of Atomic Energy Applications

計畫編號:109-NU-E-144-001-NU 計畫主持人:單文婷老師 e-mail:Wenting@ntua.edu.tw 執行單位:國立台灣藝術大學廣播電視學系

### 摘要

隨著數位網路快速發展與社群媒體普及,科學與社 會間的動態交流變得越來越重要,許多跨領域、創新科 學研究帶給全球社會深遠影響。同樣的,網路社群媒體 的便利性也鼓勵公眾參與、關注科學發展的各種風險問 題,而這也讓科學家與公眾溝通變得更為必要且重要。 近十年,科學傳播出來越來越多的跨域合作模式,尤其 現,讓公眾更接近科學。本研究從線上科普傳播研究的 角度出發,規劃與製作線上科普課程等,並以強化社群 媒體傳播及加強科學家與公眾溝通為目標,期透過參考 國外文獻,為國內科普研究帶來更新穎做法。同時也希 望藉由執行計畫,鼓勵年輕學子、女性研究人才加入科 學傳播研究行列。

**關鍵詞:**科學傳播、線上視頻、科學與媒體、原子能委 員會

### Abstract

With the popularization of social media and the development of the digital network environment, dynamic exchanges between science and society have become more and more important. Many cross-disciplinary and innovative scientific researches have brought far-reaching effects to society. Similarly, the convenience of social media has also Encourage the public to participate and pay attention to various risk issues of scientific development, which also makes it more necessary for scientists to communicate with the public. In the past ten years, more and more crossdomain cooperation models, or the use of digital technology, the production of online videos, and other types of popular science content have emerged, bringing the public closer to science. Based on the above research background, this research began to implement the plan, planning to produce online science courses, strengthening social media communication, and strengthening communication between scientists and the public, etc., and to conduct comparative research with foreign literature. At the same time, it is hoped that by implementing the plan, Encourage more young students and female researchers to join the ranks of science communication research.

**Keywords:** Science Communication, Videonline , Science and Media, Atomic Energy Commission (AEC)

### I. 前言

半世紀前科學傳播研究興起,這個領域一直呈現男 性、科學專家、西方國家發展為主導的景況。但近十年, 學者發現科學傳播研究產生明顯變化,包括研究者身分 的多樣性,科學傳播主導者已不侷限科學專家;跨學科 合作比例大幅增加;科學傳播研究論文數量成長;女性 研究員增加以及科學傳播影響力與日俱增等。這些變化 和網路、數位媒體的出現密切相關,網路普及讓科學傳 播充滿了活力,尤其是跨學科的結合,如科學與傳播學、 人文學、社會學等領域的合作,採用網路傳播工具與科 技技術來轉譯複雜的科學知識,不但成功提高公眾對科 學研究的關注,藉由網路傳播也讓更多公民願意參與科 學討論【1】。

美國科學促進會(AAAS)在2014年曾經對425位 科學家成員如何看待科學傳播進行調查。結果發現科學 家幾乎一致認為,加強科學家對外溝通能力是非常重要 的【2】。主要理由有兩點,其一、科學家對外溝通比較 重視「訊息理解」(message understanding),這確保公眾 能理解科學真相和具備正確概念。其二、科學家需要建 立對科學傳播的正確態度,包括對公眾的信任(building trust with audiences)、有效溝通和使用公眾容易理解的方 式來思考問題(framing issues in ways that allow for effective communication or better understanding)。

而做為一個不斷發展、實踐的領域,科學傳播的主 導者是不是一定要是科學家?尤其社群媒體時代來臨, 人人都可以是訊息的產製者與傳播者,科學傳播能否由 公民主導也是近幾年持續被討論的議題。Guenther 和 Joubert (2017)分析近年來的科學傳播研究發現幾個現 象:研究團隊或主持人為非自然科學背景者增加了,有 更多是公共衛生、風險管理、傳播等專家,或是跨學科 的團隊合作。學者認為這與當代科學研究和社會、經濟 交互影響有很大關係,也推估未來進行科學傳播、說科 學故事者不一定要是專業的科學家,傳播者的背景可能 是多元的。而這樣多元的身分也將加速促成科學傳播成 為大眾文化的一部分,形成大眾科學文化(public science culture)。

本研究也注意到,近年來科學傳播領域開始討論社 群媒體出現大量的科學類「線上視頻」(Videonline)對 科學傳播的影響。Welbourne 和 Grant 在 2015 年發表 一篇名為「YouTube 上的科學傳播:網路視頻受歡迎的 影響因素」(Science communication on YouTube: Factors that affect channel and video popularity),他們針對 YouTube 上 390 個科學視頻進行內容分析,結果發現產 製科學內容者呈現科學家與業餘科學家互相競奪公眾 注意力的情況,另外由專業科學家產製的內容雖然數量 較多、內容豐富,但是由一般公眾或業餘科學家產製的
科學內容視頻則更受到公眾歡迎。這個結果與多年前歐 美科研機構鼓吹科學家成為公共傳播者的初期困境類 似,科學家普遍思慮保守、缺少與公眾互動經驗也讓科 學家傳播效果不如預期。

紐約州立大學助理教授 Stengler 等人 (2019) 研究 指出,透過線上視頻,讓年輕世代和科學研究接觸機會 大幅增加。他觀察分析歐美國家網路上的科學視頻內容 發現,網路視頻內容與電視、電影的發展完全不同,如 敘事風格、對科學專業知識的再現、轉譯、傳播效果等, 因此製作線上視頻模式與過去產製電視電影內容勢必 有所差異。另外他們也提出網路視頻傳播的挑戰,如由 非業餘科學家、一般公眾產製的內容可能造成科學資訊 的錯誤解讀,甚至誤導大眾,產生內容嚴謹度不足之瑕 疵。Stengler 等學者因此(2019)提出兩個建議,其一、 學者認為線上科學傳播視頻內容應以正確傳播、溝通為 目的,或許可考量由專家與非專家合作製播;其二、應 有更多研究關注線上科學傳播的視頻內容(science communication through online video),藉由研究分析找出 線上視頻產製模式、敘事呈現,以提高科學傳播效果。 另外從宏觀面也應討論數位媒體時代,科學傳播對社會、 經濟發展等層面影響【3】。

整體而言,隨著科學傳播從傳統媒體轉向網路環境 發展,科學與社會之間的動態交流變得越來越重要,像 是遺傳學、生態學、人工生物學、納米技術等,這些創 新的科學研究帶給人類社會廣泛影響,也加快科學家學 習與公眾溝通的各種努力。科學與社會發展越來越密切, 讓科學家、媒體記者、公眾和政策制定者有機會集中在 同個向度上產生互動,雖然形成更複雜的科學傳播模式, 卻也實質地讓科學家踏出原本封閉的專業領域,讓科學 向公眾社會流動【4】。

從以上討論,簡要歸納近幾年科學傳播研究領域的 特點大致如下:

- 科學傳播領域不再是以專家、男性或西方國家為主導的景況,更多非科學背景的專家與公民參與。
- (2) 社群媒體已成為科學家對外傳播、和與公眾互動交流的重要工具。
- (3)科學家使用社群媒體傳播的內容越來越新穎多元, 目的是吸引公眾主動接收科學訊息。
- (4) 社群媒體成為科學家爭取發言的平台,無論是傳播 科學知識或更正媒體錯誤報導等,社群媒體是科學 家使用來對外傳播的最佳管道。

109 年本研究計畫即在上述背景下進行具體規劃, 計畫目標有以下幾點:

- 製作以符合社群媒體傳播型態的原子能科普微課程, 強化社群媒體傳播。
- (2)協助科學家使用社群媒體進行更有效的科學傳播, 如原子能政策行銷、科學知識傳播、科學研究討論 等。
- (3)協助科學家藉由社群媒體主動發話,補充媒體報導, 平衡社會視聽。

- (4) 唤起民眾對科學研究與科學政策的關注。
- (5)藉由計畫執行,鼓勵更多女性投入原子能科學傳播, 培育科普內容製作或社群編輯人才。

#### Ⅱ. 主要內容

109 年度本計畫以推動原子能輻射防護民生應 用的科學普及為目標,除了製作線上科普課程、協助科普展的活動拍攝外,為提倡與鼓勵性別平等, 本研究也首次嘗試執行四位原子能科學界女科學家 的自述故事拍攝。109 年度主要執行工作計畫項目 包括以下:

- 重新製作符合社群媒體傳播樣態的 10 部原子 能微課程,便於置放在網路線上傳播。
- (2) 協助原子能委員會製作 8 月份新竹、彰化等地 原子能科普展預告及協拍展覽當天活動內容。
- (3) 從性別平等角度企劃與拍攝全球核能婦女會 (Women in Nuclear Global, WIN)台灣代表四位女 科學家故事。
- (4) 將原子能科普知識製作成形態輕鬆、內容活潑、民眾參與的快問快答。

## III. 結果與討論

本研究此次重製 10 部原子能微課程影片的長 度、形態均為適合網路社群媒體播送之內容,完成 的作品除了交給原能會外,本計畫也與新北市地方 有線電視台新視波、家和、數位天空頻道等合作, 簽訂公共播出契約,節目名稱即是課程名稱「原來 不簡單」,播出頻道為公用 CH3,每天 11:00、20:30 各半小時,播出時間為 109 年4 月至 12 月,收視 區域包括台北市、新北市等新竹以北區域。除了有 線電視播送外,課程內容也同步在地方有線電視台 的臉書粉專播出,推出後引起民眾詢問課程的出處 以及有無後續課程。數位時代來臨,建議後續可以 繼續製播類似微課程影片,強化科普傳播。



另外本研究協助製作新竹、彰化科普展的預告 片以及活動拍攝,也製作當日新聞供原子能委員會 置放平台播出。然而預告或展覽相關新聞僅供原能 會紛專平台播放,建議後續可延伸影片效益,交由 地方電視台等同步播放,增加科普展覽與相關新聞 的觸及率。



本研究計畫於9月完成國內四位原子能女科學家自 述故事拍攝,對象包括廖瑞鶯組長(台灣核能婦女會的 現任會長)、邱娟琇(前任會長)、武及蘭(核研所副研究 員)以及張欣(原子能委員會核管處處長)。記錄影片中除 了突顯 WIN Taiwan 為國內重要組織,除了重視原子科 普知識傳播、協助建立國內原子能研究外、進行國際交 流、建立全國合作網絡等也是重要任務,更重要的是 定由女性科技科學人擔綱的組織,藉由四位優秀女性 的現身說法,一方面讓更多民眾了解國內科技科學界女 性工作者的挑戰與困境,另方面也希望鼓勵更多女性願 意投入原子能科技科學研究領域。本次紀錄片拍攝除了 製作成中文版本,為擴大性別平等傳播效果,也將影片 另製作英文版本,提供原子能委員會置放在網路社群媒 體進行推播。





## IV. 結論

本研究從新興科學傳播研究角度進行計畫執行,深 刻感受到社群媒體對科學傳播的影響力已遠超過以往 電視、廣播等傳統媒體,而值此社群媒體當道的時代, 科學家該如何提升自我表達能力相對重要,正如歐美研 究指出,在科學傳播領域,民眾仍相信「專家說話」。 與此同時,假新聞、假訊息層出不窮,科學家也有公共 責任需傳遞正確資訊,協助平衡社會視聽。另方面對於 女性科技科學人如何藉由社群媒體發聲,鼓勵更多女性 投入原子能科普或科學傳播研究也是值得關注與討論 的議題,本研究今年度完成四位女科學人自述故事,期 盼能接續研究,讓更多女科學家故事被大眾看見。

## 参考文獻

- [1] Guenther, L. and Joubert, M. (2017). 'Science communication as a field of research: identifying trends, challenges and gaps by analysing research papers". JCOM. 16 (02), A02.
- Besley, JC., Oh, S. H., & Nisbet, M. C. (2015). "Predicting scientist' participation in public life".
   Public Understanding of Science, 22(8): 971 – 987. doi: 10.1177/0963662512459315
- [3] Stengler, E. & Sherman, H. (2019). "Research catches up with the unstoppable How to citereality of science communication through online video". JCOM .18 (02), doi:https://doi.org/10.22323/2.18020701.c
- [4] Besley, JC., Oh, S. H., & Nisbet, M. C. (2015). "Predicting scientist' participation in public life".
  Public Understanding of Science, 22(8): 971 – 987. doi: 10.1177/0963662512459315

# 以使用者經驗整合原能會網站內容架構與民眾資訊需求之研究 Developing a user-centered Atomic Energy website through the integration of information architecture and public needs

計畫編號:109-NU-E-128-002-NU
計畫主持人:張伯謙
e-mail:pochien@mail.shu.edu.tw
計畫共同主持人:林頌堅
計畫參與人員:劉碩亭、池宗翰
執行單位:世新大學傳播管理學系

## 摘要

本計畫針對原能會網站的可用性和使用者經驗進 行研究,發掘目前一般使用者在使用原能會網站時對網 站內容與結構的認知、可能遭遇的問題,並且嘗試提出 解決的方法。本計畫邀請原能會網站的十二位會內外使 用者進行受訪,透過訪談與觀察法了解受訪者在使用

原能會網站時的目的、用途以及其使用方式,並請 他們指出使用上的問題,以及對新版網站的看法,然後 利用卡片分類法了解受訪者認知的網站資訊架構。

研究結果發現大多數的受訪者因為工作的關係,屬 於網站的重度使用者,但熟悉的內容和功能,大多侷限 在工作需要的部分。在使用網站時,最常見的問題是資 訊內容命名、分類方式、導覽方式等資訊架構不符合使 用者心中認為的方式,導致不容易學習、不容易再找到 曾經找到的資料、容易出錯,而且效率降低。另外,內 容沒有及時更新,以及要填寫的資料繁瑣、過程複雜, 並且缺乏詳細的圖文解說,也都是受訪者提到的問題。 在卡片分類實驗的部分,大部分受訪者的分類結果,相 較於原能會網站原本的資訊架構,有較多的類別,少部 分受訪者的卡片分布相當不均勻。會內受訪者的分類結 果大多很接近原能會網站原本的資訊架構,並且彼此之 間也很相似。會外受訪者的分類結果,則不但與會內受 訪者以及原能會網站的資訊架構有較大的差異,而且彼 此間認知程度也有所不同。最後,本計畫以所有受訪者 的分類結果做為凝聚性階層叢集分析演算法的輸入,利 用叢集分析所產生的樹狀結構圖找出高關連的卡片叢 集,配合後台 Google Analytics 的流量分析結果,做為未 來進一步改善原能會網站可用性和使用者經驗的參考。

關鍵詞:網站架構、卡片分類、流量分析、使用者經驗

## Abstract

This project conducts research on the usability and user experience of the Atomic Energy Council's website, explores current users' perceptions of the content and structure of the website, and possible problems they may encounter when using the original energy club website, and tries to propose solutions. This project invites twelve users internal and external of the official website to conduct interviews. Through interviews and observations, they understand the purpose, purpose and method of using the website, and inquire them to point out the use questionnaire, and their views on the new version of the website, and then use the card sorting method to understand the information structure of the website that the interviewees perceive.

The results of the study found that most of the interviewees are heavy users of the website because of their work, but the familiar content and functions are mostly limited to the parts required by the work. When using a website, the most common problem is that the information structure such as the naming, classification, and navigation of the information does not conform to the way users think, which makes it difficult to learn, difficult to find the information once found, easy to make errors, the efficiency is reduced. In addition, the content is not updated in time, the information to be filled in is cumbersome, the process is complicated, and the lack of detailed graphic explanations are all problems mentioned by the interviewees. In the part of the card sorting experiment, the classification results of most interviewees have more categories than the original information structure of the original website, and the distribution of cards for a small number of interviewees is quite uneven and varied. The classification results of the interviewees in the conference are mostly close to the original information structure of the original website, and they are also very similar to each other. The classification results of the interviewees outside the meeting are not only different from the interviewees in the meeting and the information structure of the official website, but also different from each other. Finally, this project uses the classification results of all interviewees as the input to the cohesive hierarchical cluster analysis algorithm, and uses the tree structure diagram generated by the cluster analysis to find the high-relevant card clusters, and cooperates with the traffic analysis results of Google Analytics, as a reference for further improving the usability and user experience of the official website in the future.

Keywords: Website structure, card sorting, Web analytics, user experience

## I. 前言

政府網站服務是政府機關在網路世界的虛擬門市,民眾 是政府網站應該服務的對象,過往許多國內外文獻及研 究成果已對政府網站的資訊內容與設計準則與提出建 議,其目的在於提昇網站的服務品質及民眾滿意度(謝寶 煖與周秉貞,2003)。然而,若無法從需求面探討民眾實 際使用政府網站的行為,將使得政府與民眾的溝通成效 降低(李仲彬,2006),有鑑於政府網站常因缺乏訊息一致 性與鬆散的資訊結構導致民眾無法有效取得訊息。因此, 本研究擬從使用者經驗出發,協助原能會瞭解網站的資 訊架構與民眾需求,企圖將核能知識、政策資訊與民眾 需求三者做有效的整合。其中,民眾對政府單位的資訊 需求與服務滿意度必須仰賴良好的資訊架構與使用者 經驗。

國家發展委員會 (2005)在「政府網站版型與內容 管理規範」中說明了網站設計親和性指標,分為「首頁 親和設計」、「任務導向」、「導覽及架構」、「網頁 及內容設計」、「搜尋機制」與「服務可信度」等六項 原則,主要目的在定義政府網站設計原則,訂定網站架 構、 版型設計及內容管理共同規範, 期盼以易用性原則 鼓勵民眾多利用政府網站以及提供政府網站管理者設 計維護網站的指南。由上述原則檢驗原能會網站,發現 網站大致上都符合規範,但這僅能代表網站介面(UI)符 合易用性的原則,但並不代表它的使用經驗設計(UX)符 合使用者的資訊需求與良好的互動品質,也因此本研究 希望透過系統性研究驗證原會網站架構與用戶使用情 境背後的動機與互動結果。原能會網站的資訊架構可以 從其首頁上的網站地圖(site map)以及主導覽列(main navigation bar)觀察得到,該網站的資訊內容主要按照該 機關的服務架構以及機關內人員的專業知識,分為「關 於本會」、「施政與法規」、「核能管制」、「輻射防 護」、「緊急應變」和「服務專區」等,為了提供使用 者更便利的導覽方式,在首頁上設置了便民專區提供使 用者直接進入若干常用的網頁。根據上面的分析,我們 認為在討論原能會網站上的使用者經驗時,也應留意網 站上的網頁分類方式、命名以及其導覽和搜尋等資訊架 構設計是否與一般使用者認知的方式相同,以提供使用 者好用而愉悦的使用者經驗。綜合以上所述,本研究針 對以下的問題進行分析:

- 受試者使用原能會網站的目的與經驗、遭遇的問題 與解決方法為何?
- 2. 機構內外的受試者的經驗有何不同?

## Ⅱ. 主要內容

本次研究所得到的結果,首先根據受訪者訪談的內 容探討原能會網站使用者的使用目的以及其使用方式, 其次是使用上的問題,以及受訪者對新版網站的看法, 最後是透過卡片分類法了解使用者認知上的資訊架構。

使用者經驗評估主要用來衡量使用者在不同使用 情境下與產品的互動過程,並且著重於產品的設計特性 在使用過程中所產生的使用者內部狀態與情緒狀態的 變化,並且可以在不同的互動階段中進行評估,藉以瞭 解因時間演進的動態過程,因而呈現出使用者經驗的複 雜性與豐富性結果(Vermeeren 等人,2010)。主要使用的 方法有觀察法、脈絡訪查法、訪談法、焦點團體法、卡 片分類法、眼球追蹤法、放聲思考法與問卷法等。根據 本研究的研究目的與性質,較適合採取脈絡訪查法,並 以個人訪談勾構出使用者的個人需求、使用情境與行為 模式,藉以獲得完整且詳細的使用者經驗資料。

卡片分類法是讓受試者按照他們過去遭遇的經驗 與當前卡片上資訊內容之反應共同形塑的心智模式,將 提供的卡片分為若干類別。依其操作方式分為「封閉式」 (close sorting)與「開放式」(open sorting)兩類(Wood & Wood, 2008)。封閉式卡片分類法在操作時,研究者除了 準備要進行分類的卡片之外,並且由研究者事先決定類 別數量,並且設定好所有類別名稱,然後交由受試者比 對卡片上的內容與各類別的名稱,根據受試者對這兩類 資訊的理解,將所有的卡片放置到他們認為最合適的類 別內。開放式卡片分類法並不事先設定類別的名稱與數 量,研究者僅提供給受試者要進行分類的卡片,由每一 位受試者自行按照卡片的內容,判斷卡片彼此之間的關 連,將他們認為相關的卡片放置到同一類別內,並在分 類時自行決定類別的名稱與數量。

研究者進行卡片分類法的結果分析時,可以採用質 性方法,或是以量化方法為主(Deibel, Anderson, & Anderson, 2005)。質性方法由研究者依照類別內的卡片 內容、分類規則與類別名稱等分類結果的意義進行解釋, 例如將名稱相似的類別聚為一組的「主旨分析」(gist analysis) (Sanders et. al., 2005)。質性方法需要研究者投 入較多時間與心力進行分析,但可以對受試者的心智模 式提供深入的洞察,例如判斷個別使用者是以主題 (thematic)的方式或是以分類學(taxonomic)的方式分類。 量化方法則是以統計或演算法計算蒐集到的分類結果 之中蘊藏的半隱性知識。與質性分析方法相較,量化分 析方法利用在類別內卡片的出現情形,運用電腦進行自 動或半自動的分析,通常不考慮類別的名稱,無需研究 人員進行編碼,不僅節省大量的人力與時間,並且直接 從分類的結果,減少了人為的主觀偏差。

為了瞭解原能會網站的使用者經驗並且改善其資 訊架構,本計畫進行下列研究步驟:首先,依據研究目 的設計訪談大綱與網站的資訊架構測試,並且從原能會 網站上的主要使用者族群中,邀請有使用經驗的受訪者 進行受訪,然後對每位受訪者進行訪談與測試,蒐集原 能會網站有關的使用者經驗,並利用卡片分類法蒐集使 用者認為網站上提供資訊內容或功能應有的分類與命 名等架構,最後進行分析。此外,本研究也利用 Google Analytics 分析原能會網站 2019 年十二月一日到 2020 年十一月三十日的網站使用流量,藉以驗證上述的分析 結果。

## IV. 結論

本研究利用訪談法、網站分析法(Web analytics)與 卡片分類法探討原能會網站的使用者經驗與資訊架 構。從研究結果可以了解會內同仁相當熟悉而認同目 前依照原能會部門組織設計的網站資訊架構,對於他 們在日常工作的使用上有很大的幫助。但如同先前的 文獻所指出的,以機構內部門結構做為網站的資訊架 構,會導致網站對於機構外的使用者有不理想的使用 者經驗。本研究發現機構外的使用者有不理想的使用 者經驗。本研究發現機構外的使用者在使用原能會網 站的 30 問題包括:不懂網站的內容命名、分類方式與 導覽方式、覺得內容過時,而且所需填寫的資料繁 瑣、過程冗長,需要耗費相當時間和心力等等。

由於原能會網站的潛在用戶組成非常多元,大部 份流量是民間業者使用官方網站進入業務入口網站, 其他使用者則是特定領域,例如:環保團體、新聞記 者與考生,一般民眾大部份是使用社群網站了解原能 會的訊息與互動。由於機構外的使用者對於原能會的 組織與使用的術語並不熟悉,他們使用網站時有目的 性,因此對於與本身需求相關的資訊相當了解,但對 於不是他們日常使用的資訊內容,僅能從名稱上進行 推測其意義,因此有時與網站設計者和主管機構的想 法不同。因此,本研究建議有三點:

一、持續在版面設計的美觀與系統運作的效率上進行 改善之外,原能會可以針對不同目的的使用者規劃出 專屬的子網站,利用卡片分類法等使用者經驗研究方 法了解每個使用族群對於網站的認知與需求,規劃出 適合他們使用經驗與需求的資訊架構;

二、針對初次或不熟悉網站的使用者還可以進一步提 供線上解說和包含大量圖示的說明懶人包。

三、強化網站目標與成效分析工具,依照目前的流量 分析結果,由於缺乏明確的網站目的,因此瞭解網站 各頁面的點擊次數與停留時間並無意義,建議原能會 在服務民間業者之外,應依據現有業務優先順序或民 眾需求逐步建立各項網站目標,例如:訂閱電子報、 下載原子能科普懶人包、與民眾相關的開放資料、民 生議題討論區等。

本研究計畫具體成果為原能會網站使用者經驗分析報 告乙份,包括資訊架構及網站用戶意見叢集分析結 果,共訪談5名內部網站規劃小組成員與7名外部各 領域用戶,參與研究者包括計畫主持人、協同主持人 與碩士級研究助理共三人,目前正著手將研究結果寫 成學術論文。

## 参考文獻

- Vermeeren, A., Law, E. L.-C., Roto, V., Obrist, M., Hoonhout, J., & Väänänen-Vainio-Mattila, K.(2010). User experience evaluation methods: current state and development needs. Paperpresented at the 6th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Extending Boundaries, Reykjavik, Iceland.
- [2] Deibel, K., Anderson, R., & Anderson, R. (2005). Using edit distance to analyze card sorts. Expert Systems, 22(3), 129-138.
- [3] Sanders, K., et. al. (2005). A multi-institutional, multinational study of programming concepts using card sort data. Expert Systems, 22(3), 121-128.
- [4] Wood, J. R., & Wood, L. E. (2008). Card sorting: current practices and beyond. Journal of Usability Studies, 4(1), 1-6.
- [5] 李仲彬. (2006). 電子化政府的公民使用行為:數位 資訊能力與資訊素養之影響分析. 資訊社會研究, 11, 177-218
- [6] 國家發展委員會. (2005). 政府網站版型與內容管 理規範. 台北市: 行政院.
- [7] 謝寶媛, & 周秉貞. (2003). 以顧客導向觀點評估政 府網站之資訊架構. 圖書與資訊學刊, 46, 36-89.

核能研究機關改制行政法人之法制研究(I):

組織定位及監理制度之研析

# Legal Study on the Institute of Nuclear Energy Research transformed into Non-Departmental Public Body (I) : Focus on the Issues of its Organizational Positioning and Supervision System

計畫編號:109-NU-E-007-001-NU 計畫主持人:翁曉玲副教授 共同主持人:鍾秉正教授、紀和均助理教授 計畫參與人員:黃綉雅、徐淑賢 執行單位:國立清華大學

## 摘要

為落實政府組織精簡政策,行政院擬將原子能委員 會改造為三級獨立委員會——核能安全委員會,連帶原 隸屬於原子能委員會之下的核能研究所亦將轉型為行 政法人「國家龍潭原子能科技研究院」。有鑑於核能研究 所作為原子能委員會重要的內部技術科學支援機構,向 來肩負核電廠與輻射安全之調查、檢驗與研究之重要任 務,故其組織轉型勢必對目前職權任務、人事任用、經 費財務等事項造成影響,同時轉型後原子能科技研究院 與核安會之間的監督合作關係亦須釐清。本計畫第一期 內容聚焦於行政法人制度的討論、研析國內六大行政法 人機構的實務運作經驗與績效、介紹國際原子能總署對 核安技術科學支援組織的建議,以及英法德日等國家設 置核能技術科學支援組織之類型等項目,擬從宏觀角度 先行觀察本國行政法人和國外支持管制機關的核能研 究組織的實施經驗,進而研析核能研究機構作為管制機 關內部或外部組織定位的優缺點,期能提出符合我國國 情的核能研究機構設置建議,以利未來核能研究所轉型 規劃之參考。

**關鍵詞:**核能研究所;原子能委員會;行政法人;核能 安全技術科學支援機構。

#### Abstract

To implement the policy of streamlining government organizations, the Executive Yuan of R. O. C. plans to transform the Atomic Energy Council into a third-level independent committee -"the Nuclear Energy Safety Committee", and the Institute of Nuclear Energy Research, which was originally under the Atomic Energy Council, will also be transformed into a non-departmental public body "National Longtan Atomic Energy Technology Research Institute".

Because the Institute of Nuclear Energy Research, as an important internal technical and scientific support organization of the Atomic Energy Council, has always been responsible for the important tasks of investigation, inspection and research of nuclear power plants and radiation safety, its organizational transformation will inevitably affect the current functions and tasks, personnel appointments, funding and other matters. At the same time, the supervisory cooperation relationship between the Atomic Energy Technology Research Institute and the Nuclear Safety Council after the transformation must also be clarified.

The first phase of this project focuses on the discussion of the non-departmental public body system, the analysis of the practical operation experience and performance of the six major non-departmental public bodies in Taiwan, the introduction of the International Atomic Energy Agency's recommendations for nuclear safety technology and scientific support organizations, and introduction of the models of nuclear energy technology and scientific support organizations in Britain, France, Germany, and Japan.

From a macro perspective, we will first observe the implementation experience of domestic non-departmental public bodies and foreign nuclear energy research organizations that support regulatory agencies, and then analyze the advantages and disadvantages of nuclear energy research organizations as internal or external organizations of regulatory agencies.

We hope to put forward suggestions for the establishment of nuclear energy research institutions that are in line with our country's national conditions, so as to benefit the future transformation planning of the Institute of Nuclear Energy Research.

**Keywords:** Institute of Nuclear Energy Research; Atomic Energy Council; non-departmental public body; nuclear energy technology and scientific support organizations

## I. 前言

按2018年5月行政院提出的政府組織改造規劃, 行政院原子能委員會(以下簡稱原能會)將由現行中央 二級機關降編為直屬行政院的三級獨立機關「核能安全 委員會」(以下簡稱核安會),其所屬放射性物料管理 局(以下簡稱物管局)將併入為內部單位;輻射偵測中 心(以下簡稱偵測中心)將降級為所屬四級機關;而原 所屬核能研究所(以下簡稱核研所)則從最初規劃改隸 「經濟及能源部」並更名為「能源研究所」的設計方向, 轉型改制成為行政法人型態之「原子能科技研究院」。 行政院於2018年11月8日第3625次會議亦曾通過「國 家龍潭原子能科技研究院設置條例」草案,決議將核能 研究所改制為行政法人型態之「原子能科技研究院」; 並送立法院審議。然因2020年5月立法院換屆,基於 法案審議屆期不連續原則,「國家龍潭原子能科技研究 院設置條例」草案並未再續審。

由於核安管制機關需要堅強的科學技術支援機制 作後盾,始能順利執行管制任務,故核能研究所之改造 問題,究竟是應仍作為核安會之內部技術與科學支援單 位(Technical and Scientific Support Organizations Providing Support to Regulatory Functions,簡稱 TSO), 抑或是該轉型為外部技術與科學支援機構,例如像是前 述行政法人性質的原子能科技研究院,實值得深入討論。 本計畫將觀察研析國內現有行政法人機構的運作經驗 和幾個核能發達國家的核能科研支援組織制度模式,期 從他們實務運作經驗就核能研究所轉型與否問題進行 深入研析。

## Ⅱ. 主要內容

本研究計畫報告書主要分成以下,分別是第二章: 我國行政法人法制概述;第三章:檢視我國六大行政法 人之組織、職權與運作;第四章:國際原子能總署對「核 能安全和保安支援組織」之設置建議;第五章:德國核 能技術科學支援組織介紹;第六章:英國核能技術科學 支援組織介紹;第七章:法國核能技術科學支援組織介 紹:第八章:日本核能技術科學支援組織介紹;第九章: 結論。前揭各章內容,簡要敘述如下。

一、探討行政法人在行政組織架構上的定位與必要性

行政法人制度係在傳統的行政組織外,另創設之 新組織型態,以其鬆綁傳統行政組織人事、會計等法 令之限制,引進企業經營精神,破除行政運作上無效 率及欠缺彈性的狀況,所創設出新的組織型態。吾人 不妨將此一轉變視為我國行政組織模式的「典範轉 移」(Paradigm sift),但其後續的實踐卻並不如預期 之熱絡。

二、研析國內行政法人之運作現況與挑戰

我國計有「國家表演藝術中心」、「國家災害防救 科技中心」、「國家中山科學研究院」、「國家災害動訓 練中心」、「國家住宅及都市更新中心」,以及甫成立 之「文化內容策進院」。各行政法人之上級監督機關、 組織規模、任務性質與職權範圍等事項有所差異,而且 組織規模、任務性質與職權範圍等事項有所差異,而且 各有特色,故在實務運作上的經驗表現和所面臨的問題 也不盡相同。本研究計畫分析這六個「行政法人」之組 織、人事、經費、職權和與監督機關的互動關係,比較 其差異性。同時亦將探討這些以行政法人模式成立之行 政組織,相較於其他一般性質的行政機關,其等所具備 的優勢和可能面臨的難題,綜整出法制上和實務上問題。

三、國際原子能總署對「核能安全和保安支援組織」之 設置建議

國際原子能總署(IAEA)向來重視核能安全制度, 認為各國政府均應將核設施和放射性物質的安全管理 當作優先任務,故其不僅公布「一般安全管理要求」 (General Safety Requirements)規範,要求政府必須設置法 定專責機關並明訂核能安全(nuclear safety)管理和監督 之職權,同時亦在多份報告書中指出,政府應維護核能 保安(nuclear security)管理制度,給予管制機關和執法 人員充裕的支援和權能,此包括須提供足夠的人力、經 費和技術支援等項目,如此才能有效執行核能保安的管 理、調查、防制、處置等任務,以及例行性的維運、訓 練和評估等工作,確保核能安全和保安體制的效能。

國際原子能總署提出成立「國家核能保安支援中心」 (National Nuclear Security Support Centre, 簡稱 NSSC) 的構想,將擁有核安知識和專業技術之人員團隊與核安 管制機關連結起來,期望此等組織機制可提供給權責機 關重要且專業的資訊、建議和分析方法,協助主管機關 作成正確的判斷和決定,成為支持核能業務主管機關和 執法人員的重要助手。

國際原子能總署於 2018 年曾發佈一份「提供支持 監管職能的技術與科學支援組織」報告書(Technical and Scientific Support Organizations Providing Support to Regulatory Functions, IAEA-TECDOC-1835, 2018),就 技術和科學支援的基本原則、組織形式、服務範圍、以 及維持、管理、發展等事項,提供指導建議。本文將參 考該份報告書內容擇要說明「技術與科學支援組織」(以 下簡稱科技支援組織)與監管機關的關係、組成模式和 其獨立性要求等內容事項。

## (一)技術科學支援組織與監理機關的關係

國際原子能總署認為,政府應提供核安管制機關充 裕的專業技術支援,而此項支援方式必須建立在具體作 為上,例如於法律中明訂或可授權給支援組織的服務範 圍、以及提供經費資助等,如此方能確保技術支援組織 可順利運作。

## (二)技術科學支援組織之類型

關於技術科學支援組織模式,大致可分為兩種類型, 一種是作為管制機關內部單位的技術科學支援組織,例 如像是美國核能管制委員會(USNRC)和加拿大核能安 全委員會(CNSC)等;另一種則是非隸屬於管制機關之 外部的技術科學支援組織,其雖是為管制機關服務,但 卻與管制機關分離,此類設置於機關外部的技術科學支 援組織的組成形式多元,從較小規模擁有特定專業知識 的科研機構,到有廣泛專業知識和能力的大型研究機構 等均屬之,像是法國、德國、南韓等即是採行此種外部 科研支援組織的型式。

前述兩種組織模式各有優缺點。首先,設立內部技 術科學支援組織的優點在於,管制機關易於接觸使用技 術與科學資源,它不需要制訂招標程序或另訂契約來取 得必要的支援服務。此外,內部科研支援組織也熟習管 制機關的業務處理方式,而且兩者工作流程一致,同時 瞭解本國的管制架構。不過,因為缺乏外部競爭,內部 科研支援組織恐怕不會積極地提供最好的服務,因此須 注意員工的工作能力和專業知識是否能維持在最佳狀 態。此外實務上亦常見內部科研支援組織會尋求外援, 例如請求實驗室、大學研究機構或其他外部機構等,以 協助強化其專業技術上之不足。

至於外部科研支援組織之優點,則是組成模式較為

多元。它可以是由政府設置、管制機關設置、或是依法 設置的支援組織,又或是管制機關招標簽約的支援組織; 它亦可能是國家控制的非營利性質或商業屬性的組織 體,像是研究機構;抑或是由公部門、私部門或混合捐 助而成立的支援組織。此等外部的科研支援組織,性質 上,乃係一獨立組織,但其須依據管制機關的正式安排 來運作,並受管制機關的控制和指導等拘束;它雖不直 接參與管制機關的決策過程,但必須充分掌握這些情形, 才能有效執行其支援活動。

## (三)技術科學支援組織之獨立性要求

蓋科研支援組織本身是一個高度科學導向的機構, 它必須擁有自由設定議題、方法、訓練和研究的能力, 以維持卓越的科學水平。因此對專業獨立性的要求,可 以讓科研支援組織更勇於從事前瞻性的研究發展和識 別新出現的議題,而且也可確保科學完整性,以及得到 高度專業化服務和專家研究活動的支持。故倘若科學專 業的獨立性不足,則亦難保科研支援組織的公正性和信 譽。

由於科研支援組織的業務屬性常會涉及管制機關、 受管制當事人和其他利害關係人(團體)等多方利益, 有可能發生利益競合或衝突之情事,因此國際原子能總 署特別重視科研支援組織的利益迴避問題,其在「一般 安全要求」規範中第20項條文明定,應確保那些對管制 機關提供諮詢和服務的科研支援組織本身無利益衝突 的問題。但倘若管制機關只能從那些可能與自身職權發 生潛在利益衝突的組織機構身上取得諮詢或協助的話, 則應對此種諮詢或協助管道進行監督,而且考慮到潛在 利益衝突的問題,亦應就此等諮詢進行審慎評估。

#### 四、國外核能研究機構設置及發展經驗

本計畫進一步研究德國、英國、法國、日本等四個 國家的核能安全管制機關現狀。以下分段述之:

德國設置國有科研支援組織,或是委託民間科研機 構執行管制機關的交辦任務,可謂是相當靈活運用公私 協力的方式來遂行各項管制任務。整體來說,德國的外 部科研支援組織非常多元,經費來源多仰賴政府委託計 畫經費支持,且其研究與政府行政任務緊密結合,研究 成果多能提供給管制機關作為重要決策的依據,充分發 揮輔助管制機關的重要功能,此種模式亦值得我國參考。

英國的核能研究機構群,可以用「專效」為總括之 特色。申言之,英國原子能總署(UKAEA)、核能除役 總署(NDA)以「非政府部門公共機構」為組織架構, 不但人事、財務與研究上,具有專業取向外,而且其經 營團隊的任命與挑選,無疑地,完全向私人企業學習。 一方面,政府對外召聘的對象,是真正核能研究專才, 可以在科技面向,真正領導兩個非政府部門公共機構; 另方面,應聘者要有「法人治理」(corporate governance) 的理念,特別是透過公開競爭程序,候選人要提出三年 經營計畫,讓決策者可以事前了解候選人的經營觀點, 以預判其執行可行性,而且也以執行的績效,做為薪資 福利的認定標準。另外,核能研究與發展的領域,英國 政府不改其志的採納「公私協力制度」,將一些非屬軍 工等級的研發項目,委外給私人企業去研發,有助於英 國企業於核能研究上的領導地位,成為全球供應鏈的重 要一份子;英國企業的彈性、績效,也反饋於英國核能 研究機構群,在資金與技術上的壯大。

法國的原子能研發與應用,包括「原子能與替代能 源總署」(CEA)、「放射性廢棄物管理局」(ANDRA)、 「輻射防護與核能安全研究所」(IRSN)其職務範圍均 涉及到核能運用、核能安全與輻射防護,皆為人體與環 境保護之重要事項,法國採「軍民共用」之管制,因此, 法國立法者授權政府改用高密度的規範模式,不容許三 大核安組織脫離國家的掌握。其次,三大核安組織彼此 之間,形成「既合作也競爭」的關係,中央業務監督部 會可以透過指派或委託其中一個組織進行研究,又可以 指派或委託其他兩個組織進行專業評價,如此一來,滅 少了「球員兼裁判」的不公正可能性,又能促使三個核 安組織在競爭中,加強了自身的專業能力。

就日本核能研究機構,包括原子力研究開發機構 (JAEA)和量子科學技術研究開發機構(QST),其業 務範圍包括了科學基礎及應用研究、設備開發、技術研 發和研究人才培育等事項,所涉業務面向甚廣,故在法 制設計上,此等研究開發機構承接多個主管機關的委辦 事項,其經費來源係由不同的主管機關提供,故亦受多 個主管機關的監督管理,而並非只限於單一主管機關。 此等制度設計與我國目前的行政法人制度不同,其優點 在於研究機構可有較多元的經費管道和較充裕的經費 支持,同時所受上級主管機關指揮監督事項更為明確; 但亦可能因不同主管機關的行事風格和監理標準之差 異,造成研究機構實務運作上的困難。

## Ⅲ. 結果與討論

針對前述主要研究內容,本計畫參酌專家學者們的 意見,並研析國內外相關文獻與法規之後,得出幾項討 論結果,現分述如下。

- 一、設置行政法人之初衷,不外在尋求人事與財政的鬆 鄉,並同時引進企業精神,以達成營運專業導向之 目標。然而,在我國綿密的公務員制度下,改制即 須兼顧人員權益保障;而財政之鬆綁,也意味著行 政法人必須自謀生路。我國制訂有行政法人法,係 為各個行政法人設置法之一般規定,但個別行政法 人之設置仍應就各領域之專業以及適性不同而有 專業化或區別之設置,惟觀諸我國各行政法人之設 置專法,如國家表演藝術中心設置條例、國家災害 防救科技中心設置條例、國家中山科學研究院設置 條例、國家運動訓練中心設置條例、國家住宅及都 市更新中心設置條例、文化內容策進院設置條例, 可以見到其立法模式以及設置機制,係同出一轍, 並未針對各領域之不同而作顯著的分殊化。
- 二、2020年國際原子能總署提出「設置和運作國家核能 保安支援中心修訂報告書」(Establishing and Operating a National Nuclear Security Support Centre, Revision of IAEA-TECDOC-1734),補充2014年首 版的報告內容,其中增加了更多實際運作的條件因

素和改善建議。國家核能保安支援中心主要有以下 幾項核心功能,分別是:1.人力資源開發,此指開 發、教育和訓練核安專業人才。2.技術支援服務, 提供核能保安設備維護管理之技術支援服務,尤其 當此等專業設備於保固服務到期後可能出現的維 修技術服務落差。3.科學支援服務,提供主管機關 和執法人員有關核安全和保安的專業建議、分析研 究、技術測試和評估報告等,協助他們回應在既有 程序和指引中未規範到,但須要有創新思維或專業 分析能力才能應付的科學挑戰。

- 三、研究各國之核能技術科學支援組織,可知:德國採 數個外部科研支援組織,其採公司組織者多以官方 為主要股東或唯一股東;英國則以行之有年之「非 政府部門公共機構」經營模式,與政府機關「公私 協力」,且對外召聘採「公開競爭程序」,候選人 要提出三年經營計畫,讓決策者可以事前了解候選 人的經營觀點,以預判其執行可行性,而且也以執 行的績效,做為薪資福利的認定標準;法國三大核 安組織彼此之間,形成「既合作也競爭」的關係, 三者間互相制衡;日本原子力研究開發機構和量子 科學技術研究開發機構之研究經費來源係由不同 的主管機關提供,故亦受多個主管機關的監督管理。
- 四、從上述外國法比較,並參酌我國情形,就核能研究 所組改行政法人,若與核安管制機關的組改計畫脫 鉤處理,將使原來所受監督管制強度並無明顯改變, 無法使營運制度與財政鬆綁獲得更多彈性,績效亦 未見能因組改而提昇,反而增加更多營運困難。故 原能會與核研所間之權限劃分應清楚。就技術科學 支援機制而論,原能會無論是就請求技術支援或業 務協助方面,均可迅速地與核能研究所溝通聯繫, 而無須另外再通過委外招標等採購程序尋求民間 技術單位協助。整體而言,這種於管制機關內部設 立的科研支援組織具有較好的機動性和行動力,像 是美國、加拿大等國家,就是於核安管制機關內設 有技術科學支援單位。

## IV. 結論

行政組織革新乃是政府改造的重要項目之一,其目 的係為提升政府效能和競爭力,期經由消除組織弊端、 進行組織調整與人員更新之方式,提供更有效率的管理 與服務。由於組織改造是一項極為複雜的系統性工程, 政府於設計思考行政組織改造計畫時,必須缜密評估、 綜合多方面考量,不僅是政治/政策性考量和行政實務面 考量,還須符合本國國情與組織文化,方能規劃出適合 本國的政府組織架構。

我國行政院 2018 年提出政府組織改造方案中,擬 將目前中央二級機關「原子能委員會」改制降編為直屬 於行政院的三級獨立機關「核能安全委員會」,而原隸 屬於原子能委員會的三級機關,如放射性物料管理局、 輻射偵測中心、核能研究所等機關,亦將連動降編或轉 型。此項規劃,明顯與目前世界大多數國家的作法有所 不同,蓋大多數國家係將「核能發展」與「核能安全」 作為國家永續發展優先要務,故在組織設計上,大體上 是讓核安管制機關享有較高的組織層級地位,同時賦予 核安管制機關較大的權限和提供較多的資源。然依照我 國政府目前規劃,原子能委員會一旦降編為三級獨立機 關「核能安全委員會」,可預期的是原能會原有的職權、 人力和經費資源等,恐將隨組織降級之故而遭縮減。此 外,「核能研究所」作為原能會重要技術支援單位,預 定亦將脫離行政機關地位而轉型為行政法人「原子能科 技研究院」,此不僅衝擊核能研究所日後的營運發展, 也考驗主管機關「核安會」日後的監理量能和與轉型後 的原子能科技研究院之間的互動支援關係。

「核能研究所」成立於民國 52 年,自民國 77 年歸 建原能會以來,一直是原能會重要的技術科學支援單位, 其為原能會的下級機關,與上級機關原能會關係密切, 故原能會無論是就請求技術支援或業務協助方面,均可 迅速地與核能研究所溝通聯繫,而無須另外再通過委外 招標等採購程序尋求民間技術單位協助,不易發生有支 援不便或不力的情形。況且基於行政一體原則,兩機關 有共同的任務使命,亦較能溝通理解彼此作法,可即時 相互支援,也無須顧慮利益衝突或迴避的問題。整體而 言,這種於管制機關內部設立的科研支援組織具有較好 的機動性和行動力,像是美國、加拿大等國家,就是於 核安管制機關內設有技術科學支援單位。

當然亦有不少國家的核能技術科研組織係設置於 管制機關之外,本身並非為政府機關,而是以公法人(行 政法人)或私法人(公司或財團法人)形式出現,例如 本計畫中介紹的德國、英國、法國、日本等國家的技術 科研組織模式。此等外部科研支援組織的優點在於組織 設計和人員聘用較為靈活、不受政府高度規管、相關研 究與服務活動較為自由,更適合朝向專業化發展。不過, 大多數外部科研支援組織,仍相當倚賴政府機關的經費 挹注和專案補助,故難免受制於行政機關的指揮監督, 而且也容易發生同時向管制者和被管制者提供服務而 引起利益衝突之疑慮,所以外部科研支援組織在組織設 計上必須要有更完善的配套措施,來維護渠等支援組織 的獨立性。

針對行政院擬將核能研究所轉型為外部科研支援 組織,並以行政法人形式設置原子能科技研究院之規劃, 參與本計畫座談的專家學者們大多表示贊同,並認為此 舉最大的優點在於可解決核研所向來被詬病的「球員兼 裁判」的問題,此因核研所既作為監督機關原能會的下 屬機關,卻又承接台電委託的研究案、技術服務案、檢 測案等,恐有角色混淆、利益衝突之虞。其次,核研所 轉型成為行政法人後,不僅於人事任用上可更彈性靈活, 還可從事更多元的技術研究發展、更自由地進行技術轉 移和與產業界連結,大幅突破目前身為行政機關所受種 種法令的限制。

然而,與談的專家學者們更關心行政法人「原子能 科技研究院」成立後,該機構的營運自主性、經費穩定 性、與原核安管制機關的支援任務關係,以及哪一個部 會機關適合作為其監督機關,例如是改制後的核安會、 經濟及能源部、或科技部。畢竟以目前核研所作為行政 機關的現狀來說,其職權任務和與主管機關原能會的上 下從屬關係十分明確,並且無須擔憂經費來源不足的問 題,但若核研所一旦脫離行政機關的地位之後,其是否 能自給自足、仍能作為核安管制機關—「核安會」堅強 的技術支援機構,並肩負起核安技術研發重要業務,像 是輻射防護、電廠運轉監督、核廢料處理等,尚待深入 研析。此外亦須評估,縮編後的核安會是否能維持監理 效能、其內部有無保留一定的專業技術人員規模之必要, 和成為外圍科研支援組織的原子能科技研究院能否成 為其得力助手等議題,此須有妥善的規劃與配套措施。

我國行政法人法施行 10 年以來,已陸續成立了多 個行政法人,迄今累積不少行政法人組成和運作經驗。 不過,遺憾的是,至今未見運作順利成功的案例。即以 本計畫研析的國內六大行政法人機構來說,雖然它們的 組織架構和法制大同小異,但各行政法人實際上所遭遇 的難題卻各不相同,有的是與主管機關的互動關係不良、 有的是經費不足或自籌收入不易、有的是仍維持公務機 關的狀態、亦有受到各方外界壓力等,各行政法人其實 都有不足為外人道的苦處。

政府組織改造,本不若民間組織變革來的容易,一 來政府多少背有「包袱」,僅是原機關組織存續衍生的 職權、人員編制和權利義務等變革問題就不易解決;二 來則是組織改造成效不易衡量,原本希望經由組織轉型 來擺脫原先僵化的組織制度,但其實走進了另一個新組 織體制後,才發現新制度不見得更好,就像是人事、會 計和採購制度之鬆綁,固然帶來營運上更多的彈性,但 亦可能發生營私舞弊之事,衍生更多爭議。

本計畫認為,核能研究所組改之事,不能與核安管 制機關的組改計畫脫鉤處理,必須先釐清楚核安管制機 關(即未來核安會)的職權任務和其對技術科學支援機 制的想像和所期待發揮的功能後,才能進一步就核研所 是否轉型和如何轉型之事進行討論。故吾人首應審慎思 考管制機關內部是否須要有一個堅強的高專業技術幕 僚單位,以隨時支援核安會的政策制定與個案審議,還 是可委外處理。

其次,須思考核研所既有的任務功能和業務性質, 於轉型為行政法人後是否有能力可自給自足,亦即應分 析有那些業務發展會有較好的經營績效,或有那些業務 仍須要仰賴政府全力且持續性核撥足夠經費始能維持, 例如像是核能安全技術、輻射防護技術、放射性廢棄物 處理技術之業務發展等。

再者亦應思考,核研所轉型成為行政法人後,組織 是否享有更多經營自主權、內部員工得否參與經營權等 問題。如果透過設置法人化組織和制度鬆綁,能讓核研 所追求更專業發展和提升競爭力,則核研所轉型為行政 法人並無不妥;但若轉型後,原來所受監督管制強度並 無明顯改變,營運制度亦無獲得更多彈性鬆綁,績效亦 未見得因此提昇,反而增加更多營運困難,那麼此等轉 型不過就是像「換張身份證」,雖名字改變,但主體內 涵不變,毫無實益,那麼也就無須大費周章,只為了組 織改造而改造。

## 参考文獻

#### 中文文獻

- [1] 黄錦堂,行政組織法論,元照出版社,2021年4月。
- [2] 詹鎮榮,公司協力與行政合作法,新學林出版社, 2014年3月。
- [3] 劉宗德、陳小蘭,官民共治之行政法人,新學林出版股份有限公司,初版,2008年5月。
- [4] 行政法人法立法專輯,行政院人事行政局出版, 2011年12月。
- [5] 紀俊臣、紀和均,臺灣獨立機關與行政法人定位與 職權之法制設計,中國地方自治,第72卷第5期, 2019年5月,頁4-44。
- [6] 薛雅萍,國防行政法人監督機制與盈餘回饋之探討 一以國家中山科學研究院為例,國防雜誌 第33卷 第4期 2018年12月,頁 89-107。
- [7] 劉坤億,效率、課責、政治與法人治理:建置行政 法人制度的四項思考,考銓季刊,第53期,2008 年1月,頁50-62。
- [8] 朱武獻,行政法人之推動現況檢討,台灣法學雜誌, 第222期,2013年4月,頁29-40。
- [9] 呂世壹,行政法人實際運作問題之研析,人事月刊, 第 232 期,2004 年 12 月,頁 61-69。
- [10] 李逸洋,我國與日本推動行政法人制度之比較分析, 研考雙月刊,第244期,2004年12月,55-70。
- [11] 邱惠美,日本獨立行政法人制度初探(上)(下), 政大法學評論,第90、91期,2006年4月。
- [12] 李建良, 論公法人在行政組織建制上的地位與功能, 月旦法學, 第84期, 2002年。
- [13] 陳月春,行政法人推動實例--國立中正文化中心改 制行政法人之簡介,公務人員月刊,2004年3月。
- [14] 陳愛娥,行政任務取向的行政組織法,月旦法學教 室,第5期,2003年3月,頁104-111。
- [15] 陳愛娥,行政法人化與行政效能--「行政法人」作為政府組織改造的另一種選擇,月旦法學教室,第 12期,2003年10月,頁61-73。
- [16] 黃秀蘭,行政法人中監察人所應扮演腳色之體驗, 政府審計季刊,第27卷第1期,2007年,頁31-39。
- [17] 蔡秀卿,日本獨立行政法人制度,月旦法學,第83 期,2002年5月,60-76。
- [18] 蔡進良,中央行政組織法變革之另一取向-日本獨 立行政法人制度之引介,月旦法學,第83期,2002 年5月,頁60-76。
- [19] 許宗力,國家機關的法人化-行政組織再造的另一 選擇途徑,月旦法學,第57期,2000年2月,頁 26-39。
- [20] 李天申,臺灣行政法人制度推動歷程的歷史制度分析,政治科學論業第86期,2020年12月,頁151-190。
- [21] 賴森本、許哲源,行政法人監督機制之研究,月旦 法學雜誌第116期,2005年1月,頁77-94。
- [22] 彭錦鵬,行政法人是公部門競爭力的一條活路,收錄「朱宗慶-法制獨角戲話說行政法人」,傑優文化 事業有限公司,2009年4月。

- [23] 李建良,機關法人化之基礎理論,收錄於「政府機關(構)法人化研討會會議實錄」,行政院研考會, 2002年12月。
- [24] 盛子龍,德國機關法人化問題,收錄於「政府機關 (構)法人化研討會會議實錄」,行政院研究發展 考核委員會,2002年12月。
- [25] 蔡茂寅,機關法人化實務問題之探討-以行政法人 建置原則之探討為中心,收錄於「政府機關(構) 法人化研討會會議實錄」,行政院研究發展考核委 員會,2002年12月。
- [26] 羅龍珠,行政院原能會核能研究所組織轉型之研究 一政府改造觀點,開南大學人文社會學院公共管理 碩士在職專班碩士論文,2017。
- [27] 黃永光,核能研究所轉型為公司治理之可行性研究, 開南大學公共事務管理學系碩士班碩士論文,2006 年。
- [28] 莊光彩,機關行政法人化對員工組織承諾之影響研究一以核能研究所為實證個案,中原大學企業管理研究所碩士論文,2007年。
- [29] 徐永福,政府科技機關績效考評探討—以核能研究 所為例,國立交通大學管理學院碩士在職專班工業 工程與管理組碩士論文,2003年。
- [30] 華英俐,行政法人化之現職員工權益保障問題研究 一以國立大學為例,國立台灣師範大學政治學研究 所碩士論文,2009年1月。
- [31] 蔡植楝,行政法人適用性研究—以國家災害防救 科技中心為例,東海大學行政管理暨政策學系碩士 論文,2011年。
- [32] 黃靖雯,英國政署制度與我國行政法人制度比較研究-以英國蘇格蘭文物保存屬及國立中正文化中 心為例,國立東華大學公共行政研究所碩士論文, 2006年7月。
- [33] 黃 寧,日本獨立行政法人制度研究,國立臺灣大 學國家發展研究所碩士論文,2014年。
- [34] 黃姿綺,國家表演藝術中心國家兩廳院改制行政法 人之成效研究,輔仁大學非營利組織管理碩士學位 學程在職專班碩士論文,2014年。
- [35]朱宗慶,行政法人對文化機構營運管理之影響,以 國立中正文化中心改制行政法人為例,國立台灣大 學管理學院高階公共館李組碩士論文,2005年。
- [36] 陳哲誠,行政機關行政法人化之研究-以國家中山 科學研究院為例,國防大學法律學系碩士論文, 2018年。
- [37] 李天申,準政府組織的課責:以公設財團法人及行 政法人為例,國立臺灣大學政治學研究所博士論文, 2016年。
- [38] 張耘瑄,行政法人董事會組織特性與功能屬性之研究,國立臺灣師範大學公民教育與活動領導學系碩 士論文,2018年。
- [39] 洪政緯,行政法人制度之研究,政治大學法律研究 所碩士論文,2004年。
- [40] 程燕玲,行政機關委外與行政法人化之研究,國立 政治大學行政管理學程碩士論文,2003年。
- [41] 賴恆盈,行政法律關係論,政治大學法律研究所博 士論文,2002年。

- [42] 程明修,國際核安管制與核能研究機構之組織分工 及合作,行政院原子能委員會委託研究,108 年 4 月至 12 月。
- [43] 劉宗德,行政法人設置有關問題之研究,考試院研 究發展委員會委託,2005年4月。
- [44] 郭冠廷,公法人之組織設計與人員任用管理之研究 報告,人事行政局委託,2002年12月。
- [45] 許宗力,國家機關組織法人化之研究-以港務局法 人化為中心,行政院經濟建設委員會委託,1999年 3月。
- [46] 陳耀竹、陳佳慧,中央行政機關附屬研究機構組織 定位與績效評估之研究,行政院研究發展考核委員 會委託,100年3月。

#### 外文文獻

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Establishing and Operating a National Nuclear Security Support Centre, Revision of IAEA-TECDOC-1734, IAEA, Vienna (2020).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Technical and Scientific Support Organizations Providing Support to Regulatory Functions, IAEA-TECDOC-1835, IAEA, Vienna (2018).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2016).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Research Centres in the 21st Century, IAEA, Vienna (2001).
- [5] SIGMA, "Financial Management and Control of Public Agencies." SIGMA Paper No. 32. Paris: CCNM/SIGMA/PUMA 2001 (4), April (available at www.oecd.org/puma/sigmaweb).

# 針對不同族群設計開發原子能科普教育學習課程(III) Designing and Developing Atomic Energy Science Education Curriculum for Different Ethnic Groups (III)

計畫編號:109-NU-E-007-002-NU 計畫主持人:劉鴻鳴 e-mail:hmliu@mx.nthu.edu.tw 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

## 摘要

本計畫主要是延續過去幾年的計畫,根據計畫所執 行的經驗基礎上,希望能開發針對不同族群的教案,並 達成輻射教育更加全面的推廣效果。然而受到新冠肺炎 (COVID-19)的影響,很多原訂的推廣活動被迫推遲、甚 至停止。因此,本計畫遂著重於教材的持續開發,並與 輻射防護協會合作,針對輻射工作人員的再教育訓練課 程進行推廣。

此外,2020年國內因為美國豬肉進口的議題,也引 發一般民眾針對福島核災食品是否進口、以及核災食品 安全性的議題感到興趣,本計畫也编撰「當食品遇見輻 射」教材,做為食品中含有輻射等相關議題進行教育推 廣。

在其他推廣教育中,本計畫持續配合最近幾年所發 展的簡易輻射量測體驗、讓一般民眾能透過儀器的展示 了解生活周遭輻射,以期達到輻射教育推廣目的。

**關鍵詞**:輻射教案、輻射度量、輻射劑量、輻射防護、 輻射應用。

## Abstract

This project is mainly to continue the plan for the past years. According to the experience basis of the implementation of the plan, we hope to develop teaching plans for different ethnic groups to achieve a more comprehensive promotion effect of radiation education.

In order to carry out comprehensive radiation education, this project will continue to educate different ethnic groups (including students, teachers, new residents, indigenous people, older peo-ple or netizens) about the basic knowledge of radiation, and will further design the corresponding curriculum and teaching plans. At the same time, we will leave the teaching plans to the local teacher to continue to use and teaching. In this way, it can become a comprehensive radiation promotion education through the method of sprinking seeds.

The design of the simple radiation measurement experiment course and the development of the teaching plans, and the appropriate teaching plan will be left to the local teachers to continue to use, in order to expand the power of radiation education promotion.

**Keywords:** Radiation teaching materials , Radiation measurement , Radiation dose , Radiation protection , Radiation application.

## I. 前言

多年來,本計畫結合了清華大學原子科學技術發展 中心既有的參觀活動資源,並邀請本校師長、校外廠商、 原子能委員會、核能研究所...等具備輻射度量專長的學 者專家們一起合作,進行基本輻射度量教案之開發設計 (目標以降低教案製作成本,方可提供中小學的師生採 用並進行教學),同時針對不同族群,設計相對應之課 程及實驗講義,達到寓教於樂、親身體驗原子能科普教 育之目的。過去幾年,本團隊所累積接觸的族群、以及 相對應所設計的課程包括:

- (1)針對國中、小學學生:主要課程設計--從「三人成虎」 該到「三隻小豬」;從破解輻射不實傳言切入,該輻 射是甚麼?輻射在哪裡?並透過簡易輻射測量儀器 尋找生活中的輻射,設計校園尋寶遊戲。目前所設計 的教材以「知輻習輻、核家平安」演講與輻射偵測示 範操作為主。
- (2)針對高中學生:主要課程設計--從「孫子兵法」中的「知己知彼、百戰不怠」談起。從輻射的基本特性(部份輻射並受到電磁場影響、不同的輻射有不同的穿透能力、輻射強度隨時間與距離的增加而遞減)談輻射防護的策略,並配合實驗課程。目前所設計的教材以「原子科學探奇之旅」參訪活動、實驗、以及不同課程選單為主。
- (3) 針對一般民眾:主要課程設計--著重於「生活中的輻射」介紹、以及現場Q/A,回復說明各式各樣千奇百怪的問題:從手機電磁波、負離子床墊、低鈉鹽、能量珠、核災食品的疑慮、到醫院X光檢查頻率、輻射致癌風險、甚至房屋出租給檢驗所以後是否有輻射殘留疑慮...等生活中的各類輻射問題。目前所設計的教材以「身歷其境、認識輻射」的體驗活動為主。
- (4)其他:包括各長青學苑的樂齡族群、配合原能會的科學巡迴教育活動(或科普教育團體)所辦理適合學生團體的活動、公家單位的合作推廣(如:消防局)、長期與科博館/天文館合作所辦理適合親子共學的輻射教育推廣活動、甚至主動支援/關懷偏鄉及弱勢團體活動。

本團隊在 2019 年所進行之輻射推廣教育足跡如附 圖 1 所示。今年本團隊仍預計持續進行輻射教育推廣活 度,並持續開發能配合不同對象的教案設計,希望此一 教案能留給當地的老師繼續沿用,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



圖 1: 本團隊在歷年所進行之輻射推廣教育足跡地圖

## Ⅱ. 主要內容

上述原定的計畫目標因為受到新冠肺炎(COVID-19)疫情的影響,許多推廣教育(包括: 演講、參訪、營隊 活動...等)都被迫延期、甚至停辦,因此計畫目標也被迫 進行改變。今年度本計畫遂以課程教材發展為主,再搭 配校外團體利用此教材進行輻射教育訓練;同時增加網 路媒體文章的發表、影片的拍攝作業,希望能透過此一 方式,達到輻射教育推廣的原訂目標。

今年度本計畫所彙整發展的兩個教材,說明如下:

#### 一、輻射新聞議題的解析與探討:

本教材設計的初衷是基於現在社會媒體發達、網路 新聞及各類消息充斥,卻很難解讀各類消息的真真假假, 因此,如何正確判讀輻射相關新聞、以破除假消息、傳 達正確輻射知事實屬重要。

在課程教材的發展上,為顧及趣味性、活潑性、及 認識輻射基本知識,本計畫以「三隻小豬」做為教材主 軸,從原本大家最熟悉的故事內容出發(故事反派角色 大野狼、配合懶惰的豬老大、不夠聰明的豬老二、以及 勤奮又聰慧的豬小弟),由於這是大家耳熟能詳的繪本故 事,因此很少人會去思考: 誰是這一個故事的敘述者?但 如果同一個故事情節,卻由不同人來敘述,其發展過程、 及訊息的導引方向可能會呈現不同的風貌。因此,本計 畫希望透過不同敘述故事的方式,來達到換位思考的訓 練,引導出如何在如今資訊氾濫的網路時代,正確判讀 網路傳播的各路消息。

本計畫所發展的第一個教材是從「三隻小豬」轉換

成「三隻小豬的真實故事」,故事敘述者從豬小弟轉換 成大野狼。故事的前言是:大野狼是一個孝順、而且重 視環保不浪費食材的好孩子。有一天身體感冒的他仍想 努力做一個蛋糕給奶奶吃了,當他想去跟鄰居(三隻小豬) 借一些糖來做蛋糕時,三隻小豬卻不近人情,甚至連蓋 的房子也檔不住他因為感冒所打出的噴嚏而倒塌。從大 野狼的角度來看,他是一個本性善良的孩子,反倒是小 豬一家生性冷漠、小氣,至於吹倒豬老大及豬老二的房 子絕非故意,只能怪他們蓋的房子不夠堅固,竟然抵擋 不了一個小小的噴嚏就倒了。

從這個故事也給了我們一個換位思考的方式,一件 事情的傳播由不同的人來敘述,其敘述的重點就不相同、 思考的方式也會不一樣。針對不同的輻射新聞報導,若 不能了解其真正本質,有可能以訛傳訛,反倒造成不必 要的恐慌。因此,本計畫蒐集網路媒體曾出現的有關輻 射的相關報導,匯集成主題是「輻射新聞議題的解析與 探討」,並編寫成教材,主要內容包括:

- A、生活中常見的輻射:主要從食、衣、住、行日常生活 相關的輻射議題,了解此一新聞議題背後的本質、 以及對於日常生活的影響。蒐集的新聞議題包含: 低鈉鹽所含的鉀40、負離子床墊所含的氡氣、輻射 鋼筋的鈷60、能量石中的鈾釷元素、甚至是空服員 所接觸的宇宙射線問題。
- B、輻射的應用與風險控管:主要從士農工商各行各業 的輻射應用,以及曾發生的輻射意外相關議題,藉 以了解射源管理與輻射防護的重要。蒐集的新聞議 題包含:清華大學輻射污染建築的絕137、核災食品 與輻照食品的差別、非破壞檢驗業者所使用的銥192、 甚至是X光與核醫檢查的劑量問題。
- C、核電廠除役與核廢料的議題:國內核能一廠兩部機 組於2019年7月已屆滿40年運轉期限,國家政策 並決定進行除役,這對於台灣民眾而言是一個全新 的經驗。有別於核能電廠正常運轉時,一般民眾對 於運轉安全的疑慮,核電廠除役過程,一般民眾對 於除役過程是否造成輻射污染擴散、除役所產生的 放射性廢棄物是否能進行安全處置、以及除役完成 後廠址未來的用途規劃(是否會造成該廠址萬年無 法再利用)?這些與核電廠除役所延伸的問題,有必 要針對不同族群更為廣泛的宣導。

上述教材編撰完成後,本計畫順利與「財團法人中 華民國輻射防護協會」合作,並在全台灣北中南各處(台 北、新竹、台中、高雄)開辦輻射教育訓練課程,課程宣 傳推廣海報附圖2所示、並在全台灣北、中、南各處(台 北、新竹、台中、高雄)開辦輻射教育訓練課程,同時接 受個別企業的邀約演講,希望能破除輻射不實新聞消息、 推廣正確的輻射教育。今年總共進行12場次,參與人數 522人,其中男性:394人,女性:128人,統計如表1 所示、活動照片彙整如圖3。

表1:「輻射新聞議題的解析與探討」推廣活動統計

日期	地點	人數(男/女)
2020.03.10	台北場	68人(49/19)
2020.03.17	新竹場	68人(51/17)
2020.03.24	高雄場	48人(40/8)
2020.05.12	台北場	42人(32/10)

2020.05.27	台中場	27人(24/3)
2020.06.09	新竹場	53人(37/16)
2020.06.16	台灣半導體研究	38人(17/21)
	中心	
2020.06.23	高雄場	76人(64/12)
2020.07.16	台中場	35人(25/10)
2020.07.23	工業技術研究院	28人(20/8)
2020.11.23	中壢黑松公司	25人(25/0)
2020.12.09	花蓮台泥和平廠	14人(10/4)
總人數(男:女~3:1)		522人(394/128)



#### 經歷

- ・ 國立清華大學BNCT中心 副主任(兼) 2018/01-今
- ・ 國立清華大學原科中心 一等核能技術師 2010/07-今
- ・ 國立清華大學原科中心 二等核能技術師 1992/08-2010/06
- · 國立清華大學工科系 兼任助理教授 2006/02-2006/07

#### 主辦單位:財團法人中華民國輻射防護協會 🛞

圖 2:「輻射新聞議題的解析與探討」宣傳推廣海報



圖 3:「輻射新聞議題的解析與探討」活動照片彙整

#### 二、有關食物中的輻射疑慮:

這一個教案的編撰發想主要是因應當時國內正面 臨美國豬肉進口議題,一般民眾對於食品安全的疑慮相 當重視,甚至聯想到繼美豬之後、日本的核災食品可能 也即將開放進口,引起相當的恐慌與討論;甚至當時媒 體報導低鈉鹽中的鉀 40 含量很高,以非常危險的聳動 標題要求全面下架。因此,本計畫遂針對食品中可能含 有的天然輻射種類、核災食品可能的殘留量、甚至食品 經過輻射照射處理等相關議題,進行可能接受輻射劑量 分析及風險評估,來釐清有關食物中的輻射疑慮。

本計畫所發展的第二個教材是從「三隻小豬」所延伸 的「三隻小豬進階版」為基本構想,希望能保有教材的 趣味性與連貫性。進階版的故事的最後結局是:大野狼 在狗急跳牆的情況下,竟然發射了核子武器,終於將三 隻小豬打敗。然而大野狼也面臨了一個難題,究竟遭受 核子武器攻擊的地區,當地所生產的食材是否安全(核災 食品議題)?大野狼是否也需要搬離家園呢?

本計畫蒐集食品當中可能出現的輻射議題,編寫成 教材「當食品遇見輻射」,主要內容包括如下:

- A.「和食」還是「核食」:主要從日本進口食品改標 事件談起,再探討日本福島核災食品可能存在的放 射性同位素、以及國內對於「食品中含原子塵污染 安全容許量標準」,最後再依據每年可能食用量評 估食用核災食品可能接受的輻射劑量以及潛在風 險。
- B. 輻照食品: 主要從輻射在農業上的應用談起,介紹 輻射在農業改良、以及輻射在食品保存的應用。並 回應民眾對於輻射殘留的疑慮,探討輻照食品與核 災食品的差異。
- C. 食品中的天然輻射: 主要從低鈉鹽含有鉀40 談起, 探討食品中所含的天然輻射,並針對富含天然輻射 的食品(如: 低鈉鹽、香蕉),依據可能攝食總量來 評估食品中的天然輻射可能造成的劑量。此一同時 也說明各類天然輻射來源、以及天然輻射每年可能 造成的輻射劑量做為比較基礎。

上述教材编撰完成後,也受邀前往新北市稅捐稽徵 處演講,參與人數30人,其中男性:8人,女性:22人, 活動照片如圖4所示。



圖 4: 「當食品遇見輻射」教材推廣活動照片彙整

本計畫為了增加輻射教育推廣的管道,甚至將上述 教材教材內容加以濃縮,撰寫成稿件(食@安心、當食 物遇到輻射-淺談輻射在食品照射的應用),並投稿在輻 防簡訊上,希望透過此一方式能將專題的輻射知識完整 呈現、並增加一般民眾的接觸與獲得的管道。在輻防簡 訊上所發表的文章如附圖 5 所示。

#### 輻射防護簡訊 | Issue 159



图1:臺鑽所生產的「健康減納留」

輻射防護簡訊 | Issue 161

## 當食物遇到輻射

## -淺談輻射在食品照射的應用

作者 劉鴻鳴、周風英 國立濟華大學原子科學技術發展中心

跑不新鲜或不衛生的食物是人類驳病的 常見原因之一, 全世界每年有數百萬、 甚至數千萬人因吃了受污染或變質的食 物而生病, 然而食物在到運你的餐桌之 前可能已經歷了很長的說道, 如何確保 食物在底程中仍能保持食物的新鲜和衛 生至顯靈要.

食物保鲜的關鍵在於抑制網蘭的繁殖, 目前常用的殺菌方法依其特性主要可分 成三大類,包括:

(1) 物理方法:主要是利用物理特性來 達到抑制細菌繁殖所需的環境(如:冷 就冷凍低溫保持法,加熱殺菌法、乾燥 脫水法、或真空包裝法)。

(2) 化學方法:採用化學藥物(如:防 腐劑、殺菌劑、或添加食鹽、總類、水 活化劑、脫氧劑等)的方法來達到殺菌 的目的。

(3) 微生物抑制法:主要應用在發酵食品的生產(如:酒精發酵、乳酸發酵、醋酸發酵等方法),可以抑制纖縮的繁殖。 以上方法是目前食品加工中級菌、貯存 保給的主要方法。但仍有許多食品並不 適用,經過長期的研究與探索,人們發 現輻射處理技術在食品的殺菌處理方面 具有獨特的技術優勢。 輻射的應用已呈現在各行各業,其中輻

物保右

射照射食品係將源離輻射(如:結-60)照射的技術應用在食品的處理 上,以進到延長值存期限(如:大碼, 熱醫液)源。20%與發手)、發展纖細 防腐保鲜(如:紅豆、綠豆、米、釀給之 蟲脂防約]、甚至延緩後熱、增加及味 等目的。輻照食品減的的原理是以輻射 的能量被理生物體中的 DNA 結構。使 得截生物能注再編集繁殖。同時也能過 成檔物低等得止生長外,透得效破 環境成成的的微生物。這時制發穿開 來或長編脫食品的保存期限。

然而,一般民眾對於輻射的認知不足、 對於輻射也心存恐懼。因此對於輻照食 品通常存在輻射是這環留;以及紫養風。 是正改理診疑讓?如果有人品訴你 大實場所質到的進口局於署及大諾是經 過輻射探索這理的食品。你可能會感到 當什,並馬上時額價食品與核災食品副 上等號:當心食品官會有輻積預留。 事實上,輻射照射用於食品之保存已被 多數國家承認是一種食品加工及保存方 法,由 24 個成員國所組成的 "國際輻 照食品研究計畫機構 "於 1970 年~ 1981年間進行了長達10年的輻照食品 的衛生安全性研究,結果顯示未有食品 因輻射照射而產生不良後果的證據,並 證實輻射劑量在 10kGy 以下經照射的 食品是可以安全食用的 • 1980 年 10 月 在日内瓦所召開的 FAO/IAEA/WHO 輻 照食品衛生安全聯合專家委員會 ( Joint Expert Committee on Food on, JECFI)更提出新的建議 輻照食品的線平均吸收劑量在 10kGv 以下,無需進行專理學試驗、無特殊營 着和微生物學的問題。

境中即已存在的天然放射性物質,國 際間包括:Codex、歐盟、美國、紐 澳、加拿大等各先進國家,均無針對

1961 年由聯合屬世界穩積組織 (Food and Agrinature Organization of the United Nations, FAO) 與世界衛生組織 (Wold Health Organization, WHO) 所決問題立 的 屬 際 食 岳 法 典 委 員 會 (Codex Alimentarius Commission, CAC) 專賓協 調合國及原間的各品標率, 建立一套完 整約食品關際標準體系。

圖 5: 「當食品遇見輻射」教材濃縮投稿發表

## 三、持續進行「認識原子能與輻射教育」推廣活動:

在過去幾年持續進行的「認識原子能與輻射教育」 推廣活動,雖受到新冠肺炎疫情的影響,大部分原訂的 活動(包括支援營隊活動、原子能科學探奇之旅、以及 知輻惜輻核家平安...等活動)被迫取消或延後舉行,但 本計畫仍開放個別參訪申請或邀約。今年度的參訪申請 或邀約共計進行6場次,參與人數173人,其中男性: 113人,女性:60人,統計如表2所示、活動照片彙整 如圖6所示。

## 表 2:「認識原子能與輻射教育」活動統計

日期	参訪學校	人數(男/女)
109/04/30	台北科技大學 (大學生)	20人(17/3)
109/07/02	新竹市消防局 (公務機關)	12人(11/1)
109/08/30	中國醫藥大學 (親子活動)	52人(32/20)
109/10/14	勤益科技大學 (大學生含外籍生)	35人(25/10)
109/10/26	財團法人願成教育 基金會(一般民眾)	44人(24/20)
110/01/03	元培醫事科技大學 (大學生)	10人(4/6)
總人數(男:女~2:1)		173人(113/60)



圖 6:「認識原子能與輻射教育」推廣活動照片彙整

## III. 結論與展望

本計畫因為受到新冠肺炎(COVID-19)疫情的影響, 許多原定的推廣教育活動(包括:演講、參訪、營隊活動...等)都被迫延期、甚至停辦,因此計畫目標也被迫進 行改變。今年度本計畫遂以課程教材發展為主,再搭配 校外團體利用此教材進行輻射教育訓練;同時增加網路 媒體文章的發表、影片的拍攝作業,希望能透過網路傳 播、或線上影片的方式,達到輻射教育推廣的原訂目標。 依據目前已完成之教案設計、推廣教育活動...等內容, 總結 2020 年的計畫成果說明如下:

- 本計畫有感於現在社會媒體發達、網路新聞及各類消息充斥,卻很難解讀各類消息的真真假假,因此,本計畫蒐集網路媒體曾出現的有關輻射的相關報導,匯集成主題為「輻射新聞議題的解析與探討」,並編寫成教材,希望能針對輻射相關新聞提供正確判讀、以破除假消息、傳達正確輻射知識。本計畫並與「財團法人中華民國輻射防護協會」合作,將此一教材做為輻射教育訓練課程,進行的場次共計12 場次,參與人數達 522 人。
- 2. 本計畫有感於一般民眾對於食品安全的疑慮,甚至聯 想到繼美豬之後、日本的核災食品可能也即將開放進 口,引起相當的恐慌與討論;甚至當時媒體報導低鈉 鹽中的鉀40含量很高,以非常危險的聳動標題要求 全面下架,引發食品中含有輻射的恐慌。因此,本計 畫遂針對食品中可能含有的天然輻射種類、核災食品 可能的殘留量、甚至食品經過輻射照射處理等相關議 題進行彙整,編寫成教材「當食品遇見輻射」進行推 廣,目前也受邀前往新北市稅捐稽徵處演講,現場人 數雖然因為防疫的關係而只有 30 人,但反應熱烈, 尤其對於輻射儀器的操作示範更感興趣。
- 3. 雖然受到新冠肺炎(COVID-19)疫情的影響,大部分 原訂的活動(包括支援營隊活動、原子能科學探奇之 旅、以及知輻惜輻核家平安...等活動)被迫取消或延 後舉行,但本計畫仍在開放個別參訪申請或邀約,持 續進行過去幾年所大力推行的「認識原子能與輻射教 育」教育活動。今年度的參訪申請及邀約共計進行6 場次,參與人數173人。
- 4. 除了編寫新的教案、並與其他團體合作進行輻射教育 推廣,以及持續進行過去幾年所大力推行的「認識原 子能與輻射教育」推廣活動之外,本計畫也在疫情期 間,思考可能的輻射教育推廣方式。本計畫將上述今 年度的兩個教案內容加以濃縮整理,並撰寫成稿件 (食@安心、當食物遇到輻射-淺談輻射在食品照射的 應用),發表於「輻防簡訊」上,希望透過此一方式能 將專題的輻射知識完整呈現、並增加一般民眾的接觸 與獲得的管道。

本計畫對於未來的展望,由於新冠肺炎疫情的影響, 如何線上、線下同步推廣將是未來的主流。本計畫累積 多年的輻射教育推廣經驗,也希望能逐步朝此一方向轉 型。本計畫在今年度首度嘗試將過去幾年所累積的輻射 Q/A 經驗,編寫成小劇本,希望以輕鬆有趣的方式,將 輻射正確知識以影音多媒體的方式製作,提供多元的輻 射教育推廣管道。目前本計畫已初步完成三段影片,以 「聽劉博士談輻射」為標題,三段影片的主題分別為:

 輻射是甚麼?輻射看不到、摸不到、也聞不到的特性, 讓一般民眾總是談"幅"色變,甚至將輻射和癌症、 甚至畸形突變聯想在一起。本影片主要是透過輻射偵 檢儀器的示範來解釋輻射的本質,也說明我們生活在 這個地球上,輻射無所不在,只要活著就不可能不受 到輻射的影響,因此對於低劑量的背景輻射不必太過 恐慌。

- 2. 輻射安全嗎? 我們從小受到好萊塢電影的影響,「綠 巨人浩克」、「酷斯拉」;以及「車諾比核災」等相 關影片,造成一般民眾認為輻射會造成基因突變、致 癌症發生、也會造成畸形兒的產生....,聽到這些,我 們不禁懷疑:輻射--安全嗎?本影片主要介紹身體接 受輻射暴露後的可能變化、以及各種病變的可能機率。 影片最後的結論是:輻射確實存在著一定的風險和致 癌機率,但輻射的風險與輻射劑量的大小息息相關。 在台灣地區,一般人日常生活中所接受的天然輻射劑 量每年就會達到 1.6 毫西弗左右。倘若一個人因為輻 射作業或其他因素,造成每年額外接受的輻射劑量不 超過1毫西弗,其實風險幾乎可以忽略,不必有太多 的擔心。
- 3. 食品中的輻射問題:古人說「民以食為天」,但現代人更加強調食物要吃得安全,因此加了一副下聯「食以安為先」。食物的安全性是多面向的問題,可能是農藥殘留、可能是非法添加物、也有可能是食物中是否含有輻射的疑慮...。本影片主要是針對媒體報導披露有關台鹽所生產的『健康減鈉鹽』中含有放射性物質(卸-40)超標的疑慮與風險。影片透過實驗量測的方式了解食物中本就存在著天然放射性元素(如:卸-40),並說明在正常飲食的情況下,食物中所含的天然放射性物質並不會造成過多的輻射劑量,這些劑量也已經包含在天然背景輻射劑量之內(台灣地區每年的天然背景輻射劑量約為1.6毫西弗),不會有額外的風險增加,因此不必太多憂慮與擔心。

未來本計畫也希望能將更多一般民眾所關注的輻射 議題、或從過去幾年推廣輻射教育所累積的輻射 Q/A 經 驗中撷取,挑選適當的主題編寫劇本,以專業但不失趣 味的方式拍攝影音短片,做為亦情下推廣輻射教育的有 力工具和管道。