

全民的原能會



主辦單位:科技部、行政院原子能委員會 協辦單位:逢甲大學

中華民國 109年 9月29日

【議程及場地】	3
【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	15
02-資安政策下之核電廠關鍵數位資產安全防護之探討	
03-除役中核能電廠之適職方案管制要求與國際實施現況研究	32
04-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	42
05-除役階段前期的水化學狀態對於結構組件腐蝕行為的影響評估	67
06 核設施除役後場址仍有處理/貯存設施者之輻射劑量管制及分析研究	70
【放射性物料安全科技】	75
01-地化模式應用於放射性廢棄物處置安全評估之研究	77
02- 關鍵性裂面受地震力破裂之延伸行為研析	
03-次要斷層帶或剪裂變形受震位移量評估方法研究	
04-放射性核種於多層非均質地質介質遷移快速預測工具發展與安全評估應用	90
05-裂隙再活化之水力-力學耦合特性研究	97
06-如何監管核能後端區域協力設施:東亞後端協力監管機制的功能設計與能力建構	<b>毒挑</b>
戰	101
07-用過核子燃料最終處置緩衝材料乾溼循環過程下熱-水(TH)耦合水力傳導模式	113
【輻射防護與放射醫學科技 I】	123
01-輻災受影響地區環境復原及民眾返鄉標準之實務研究(II)	
02-組織等效比例計數器應用於混合輻射場之劑量特性研究(II)	131
03-調查評估醫療院所關鍵群體之肢端及眼球水晶體等價劑量研究	136
04-系統化與客製化的飛航輻射劑量研究(I)	138
05-能階式放射影像感測器之讀出電路晶片設計與系統整合(II)	143
06-台灣與境外水稻的放射性核種分佈之初探	146
07-應用放射性核種檢測技術探討台灣地區香蕉鉀40含量之差異分析	155
【輻射防護與放射醫學科技 II】	163
01-臨床標靶放射藥物治療應用於輻射安全管理實務與衛教建議之研究	165
02-運鐵蛋白受體蛋白(TfR)表現型癌腫正子斷層造影劑錯-89-運鐵蛋白之臨床前動物	研
究	168
03-以新穎前驅物開發硼中子捕獲治療造影劑[18F]FBPA	173
04-123I-MIBG 造影與臨床心肌灌注/心肌血流定量檢查結合在預測心衰患者發生致	命
性心律不整或心因猝死的臨床價值	174
05-用於硼中子捕獲治療之多重含硼寡肽之設計與合成	176

06-I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用	
【政策推動與風險溝通 I】	
01-利用實境技術增進人類與機器人之互動以輔助輻射作業之應用(II)	
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	
03-大氣常壓微電漿技術合成矽量子點	
04-離子佈植技術合成金屬奈米粒子之新穎製程開發與機制探討	
05-以電漿處理提升 HfO2 為基礎鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性	
06-半導體元件輻射效應與抗輻射製程研究	
07-文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃描系統之優化及其應用	
08-放射線處理在九重葛、玉葉金花及日日春誘變育種上之應用	
09-輻射照射處理於農業之應用	216
【政策推動與風險溝通 Ⅱ】	
	=1>
01-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)	
01-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)	
01-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) 02-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 03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究	
01-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) 02-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 03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究 04-核案虛擬一點通	
01-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) 02-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 03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究 04-核案虛擬一點通 05-核能管制機關作為獨立機關之法制與實務研究:借鏡本國獨立機關之建	
<ul> <li>01-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)</li> <li>02-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</li> <li>03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究</li> <li>04-核案虛擬一點通</li> <li>05-核能管制機關作為獨立機關之法制與實務研究:借鏡本國獨立機關之建 驗</li> </ul>	
<ul> <li>01-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)</li> <li>02-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</li> <li>03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究</li> <li>04-核案虛擬一點通</li> <li>05-核能管制機關作為獨立機關之法制與實務研究:借鏡本國獨立機關之建 驗</li> <li>06-原子能民生應用數位影音教材製作與推廣研究</li> </ul>	
<ul> <li>01-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)</li> <li>02-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</li> <li>03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究</li> <li>04-核案虛擬一點通</li> <li>05-核能管制機關作為獨立機關之法制與實務研究:借鏡本國獨立機關之建 驗</li> <li>06-原子能民生應用數位影音教材製作與推廣研究</li></ul>	221 225 230 234 建置與運作經 238 243 246
<ul> <li>01-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)</li> <li>02-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</li> <li>03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究</li></ul>	
<ul> <li>01-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)</li> <li>02-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</li> <li>03-動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究</li></ul>	

### 議程

時間:109年9月29日(星期二)

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)	
14:20~15:00	分組成果發表(II)	各領域場地
15:00~15:30	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	10:20~14:30
2.放射性物料安全科技	阿基米德廳	10:20~14:50
3.輻射防護與放射醫學科技(I)	拉斐爾廳	10:20~14:50
4.輻射防護與放射醫學科技(II)	達文西廳	10:20~14:30
5.政策推動與風險溝通(I)	米開朗基羅廳	10:20~15:10
6.政策推動與風險溝通(II)	尼采廳	10:20~15:30

場 地 1:核能與除役安全科技																					
會場地	也點: 亞歷山ス	大廳																			
提力	18 L at H	評審	計 畫	劫行幽閉	计量力程																
场入	마리. (BÎ	委員	主持人	书孔 7 1 753、1991	計重石稱																
	10.20.10.40		工胡正	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																
~	10.20~10.40	+	工初止	工程系	加凡尼加速腐蝕評估																
刀	10.40-11.00	<b>孚</b> 綺	江酝培	中央警察大學國境警察	資安政策下之核電廠關鍵數位資產安																
紐	10.40~11.00	<b>闷思 * 陳建</b>	江珈坪	學系	全防護之探討																
歿去	11.00.11.20		宇士发	龙華科技大學化工與材	除役中核能電廠之適職方案管制要求																
T I	11:00~11:20		木入侖	料工程系	與國際實施現況研究																
1	源	源	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																
	11.20~11.40	、 吴	灰八旦	學系	之位移的離心模型及數值模型模擬																
	11:40~13:00	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方	文方		綜合討論(	午餐供應便當)
	12.00 12.20	郭	并户业	國立清華大學工程與系	除役階段前期的水化學狀態對於結構																
分	13:00~13:20	榮伽	茶示优	統科學系	組件腐蝕行為的影響評估																
組	12.20 12.40	<u>74</u> ].	苏业的	國立清華大學原子科學	核設施除役後場址仍有處理/貯存設施																
發	13.20~13.40	楊清	祭世釟	技術發展中心	者之輻射劑量管制及分析研究																
表 11	13:40~14:00	历		中場休息	、(供應點心)																
11	14:00~14:30			綜合討論	及計畫頒獎																

場地	場 地 2:放射性物料安全科技																				
會場地	也點: 阿基米征	恵廰																			
場次	時間	評審	計畫	執行機關	計畫名稱																
		委員	主持人																		
~	10:20~10:40		林文勝	國立臺灣大學水工試驗所	地化模式應用於放射性廢棄物處置安 全評估之研究																
分組	10:40~11:00	-h	楊長義	淡江大學土木工程學系	關鍵性裂面受地震力破裂之延伸行為 研析																
殺表	11:00~11:20	陳文泉	李錫堤	國立中央大學應用地質研 究所	次要斷層帶或剪裂變形受震位移量評 估方法研究																
	11:20~11:40	*、黄慶	陳瑞昇	國立中央大學應用地質研 究所	放射性核種於多層非均質地質介質遷 移快速預測工具發展與安全評估應用																
	11:40~13:00	村、謝榮春、魏聰揚、鄭武民	<b>《村、謝榮春、魏聰揚、</b>	《村、謝榮春、魏聰揚、如		綜合討論(4	午餐供應便當)														
	13:00~13:20				翁孟嘉	國立交通大學土木工程學 系 (所)	裂隙再活化之水力-力學耦合特性研究														
分組	13:20~13:40				、魏聰揚、朝	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、如	、魏聰揚、如	、魏聰揚、朝	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、朝	、魏聰揚、如	、魏聰揚、如	、魏聰揚、如	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、鄭	、魏聰揚、鄭	曾雅真
發 表 II	13:40~14:00		楊樹榮	國立屏東科技大學土木工 程系	用過核子燃料最終處置緩衝材料乾溼 循環過程下熱-水(TH)耦合水力傳導模 式																
	14:00~14:20			中場休息	(供應點心)																
	14:20~14:50			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: 拉斐爾屬	ŧ					
爆次	時間	評審	計畫	劫行機關	計書名稱		
		委員	主持人	-77471 J 7784 1919			
	10.20-10.40		苦康山	長庚大學放射醫學研	輻災受影響地區環境復原及民眾返鄉		
~	10.20~10.40		里厅丨	究院	標準之實務研究(II)		
万	10.40-11.00	4	盐芏议	國立清華大學原子科	組織等效比例計數器應用於混合輻射		
洲	10.40~11.00	局配	可力俗	學技術發展中心	場之劑量特性研究(II)		
發去	11.00.11.20	玫	莜車子	國立清華大學核子工	調查評估醫療院所關鍵群體之肢端及		
	11.00~11.20	* `	杂志丁	程與科學研究所	眼球水晶體等價劑量研究		
1	11.20.11.40	町 志	盐煤的	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		
	11:20~11:40 宏	宏	可不到	程與科學研究所	(I)		
	11:40~13:00	陳健		綜合討論(-	午餐供應便當)		
	12.00 12.20	懿	非巫折	國立清華大學原子科	能階式放射影像感測器之讀出電路晶		
	15:00~15:20	、 李	衣百召	學技術發展中心	片設計與系統整合(II)		
分	13.20-13.40	境和	庙应取	國立屏東科技大學環	台灣與境外水稻的放射性核種分佈之		
組	15.20~15.40	7.2	休炭主	境工程與科學系	初探		
發	13.40-14.00	施建	林职讲	國立屏東科技大學科	應用放射性核種檢測技術探討台灣地		
表	13.40*14.00	之樑	林主英	技管理研究所	區香蕉鉀40含量之差異分析		
II	14:00~14:20			中場休息	. (供應點心)		
	14:20~14:50			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	也點: 達文西周	ē			)										
場次	時間	<b>評審</b> 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱										
10:20~10:40	諶鴻遠	國防醫學院核子醫學 科	臨床標靶放射藥物治療應用於輻射安全管 理實務與衛教建議之研究												
分組	10:40~11:00	魏孝范	劉仁賢	國立陽明大學生物醫 學影像暨放射科學系	運鐵蛋白受體蛋白(TfR)表現型癌腫正子 斷層造影劑鋯-89-運鐵蛋白之臨床前動物 研究										
發 表 I	11:00~11:20	<b>斤*、江啟動</b>	張智偉	臺北榮民總醫院國家 多目標醫用迴旋加速 器中心	以新穎前驅物開發硼中子捕獲治療造影劑 [18F]FBPA										
	11:20~11:40	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	<b>赵、林昆儒</b>	117、林昆儒	10、林昆儒	11、林昆儒	、林昆儒	、林昆儒	、林昆儒	、林昆儒	、林昆儒	、林昆儒	張智勇	臺北榮民總醫院核醫 部	123I-MIBG 造影與臨床心肌灌注/心肌血 流定量檢查結合在預測心衰患者發生致命 性心律不整或心因猝死的臨床價值
	11:40~13:00			綜合討論	<b>侖(午餐供應便當)</b>										
分	13:00~13:20	及偉、謝	潘伯申	淡江大學化學系	用於硼中子捕獲治療之多重含硼寡肽之設 計與合成										
組發	13:20~13:40	「栢倉	邱百誼	秀傳醫療社團法人秀 傳紀念醫院神經科	I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用										
表 11	13:40~14:00			中場休	、息 (供應點心)										
	14:00~14:30			綜合討	論及計畫頒獎										

場地	5:政策推動爭	與風險津	ț通(I)						
會場	也點: 米開朗县	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		陳湘鳳	國立臺灣大學機械工程學 系暨研究所	利用實境技術增進人類與機器人之互 動以輔助輻射作業之應用(II)				
分	10:40~11:00		蔡坤諭	國立臺灣大學電機工程學 系暨研究所	X-ray微影鄰近效應修正技術與高精 度高深寬比元件製作應用				
組發表	11:00~11:20	陳志平 *、萬一怒、張剛瑋、陳孝輝、	江偉宏	國立臺灣科技大學化學工 程系	大氣常壓微電漿技術合成矽量子點				
I	11:20~11:40		趙得勝	國立清華大學原子科學技 術發展中心	離子佈植技術合成金屬奈米粒子之新 穎製程開發與機制探討				
	11:40~12:00		巫勇賢	國立清華大學工程與系統 科學系	以電漿處理提升 HfO2 為基礎鐵電記 憶體之可靠度與抗輻射性				
	12:00~13:00			綜合討論(4	午餐供應便當)				
	13:00~13:20		張廖貴 術	國立清華大學工程與系統 科學系	半導體元件輻射效應與抗輻射製程研 究				
分	13:20~13:40		陳孝輝、	休孝輝、	~孝輝、	孝輝、	孝輝、	陳東和	國立故宮博物院登錄保存 處
組發表Ⅱ	13:40~14:00	葉文冠	陳錦木	國立中興大學園藝學系 (所)	放射線處理在九重葛、玉葉金花及日 日春誘變育種上之應用				
	14:00~14:20			中場休息	(供應點心)				
	14:20~14:40		王紹鴻	國立嘉義大學微生物免疫 與生物藥學系	輻射照射處理於農業之應用				
	14:40~15:10			綜合討論	及計畫頒獎				

場地	易 地 6:政策推動與風險溝通(II)													
會場	會場地點: 尼采廳													
堪力	時間	評審	計 畫	劫行機關	計畫名稱									
动入	H() (B)	委員	主持人	-7747 J 7786 1999										
	10.20 10.40		苦重兴	國立政治大學公共行政學	核電廠除役利害關係群體意見探詢與									
	10.20 10.40		英不皿	系	溝通機制之設計及執行(II)									
	10.40~11.00		林承宇	世新大學廣播電視電影學	結合多媒體敘事效果分析提昇公民參									
分	10.40 11.00		111111	系	與核能公共議題整合計畫									
組	11.00~11.20		張鼻校	國立臺灣師範大學圖文傳	動態視覺圖像與實境技術建構核能資									
發	11.00 11.20		M Q H	播系(所)	訊之研究									
表	11.20~11.40	王	蘇萬生	國立臺灣科學教育館推廣	核睾虚擬一點通									
Ι	11.20 - 11.40	里德		組										
	11:40~12:00	*		國立清華大學诵識教育中	核能管制機關作為獨立機關之法制與									
		尹學	翁曉玲	心	實務研究:借鏡本國獨立機關之建置									
		禮			與運作經驗									
	12:00~13:00	、張自立、囲	、張自立	、張自立	、張自立	、張自立	、張自立	、張自立	、張自立	、張	、張		綜合討論(+	午餐供應便當)
	13.00-13.20									留士嬉	國立臺灣藝術大學廣播電	原子能民生應用數位影音教材製作與		
	13.00~13.20		平文疗	視學系(所)	推廣研究									
	13.20-13.40	局桂	随序均	龙華科技大學多媒體與遊	百仕民之拉能谢朝射知洪宫道筋日									
	13.20~13.40	田、	林乃巧	戲發展科學系	亦且以之物肥兴相利邓毗旦寻即日									
分	13:40~14:00 昭 弦	0-11:00 傅 國立清華	國立清華大學原子科學技	針對不同族群設計開發原子能科普教										
組		昭 銘	到何何	術發展中心	育學習課程(II)									
發表	14:00~14:20			中場休息	(供應點心)									
II	14.20 14.40		计形知	南華大學自然生物科技學	北投石產區天然環境輻射探討及其推									
	14:20~14:40		体杆省	条	廣教材製作									
	14:40~15:00		楊永年	國立成功大學政治學系	核三廠鄰近社區核安溝通之研究									
	15:00~15:30			綜合討論	及計畫頒獎									



## 【會議室配置】



## 【交通資訊】



## 捷運公館站一(羅斯福路):254

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



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

公館 (羅斯福路基隆路口):671

公館(基隆路):1、207、254、275、275(副)、650、672、673、907、南港軟體園區通勤專車(雙和線)
 仁愛路二段:214、248、606
 信義杭州路口(往101):0東、20、22、204、670、671、信義幹線、信義新幹線、1503



### 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·隨即於右側即可見集思台大會議中心。

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·隨即於右側随即於右側即可見集思台大會 議中心。

# 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 The investigations of galvanic corrosion accelerating on dissimilar weldment nuclear components in the transition phase decommissioning

計畫編號: 108-NU-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、Prihatno Kusdiyarto、陳振宇、李异翃 執行單位:國立台灣科技大學

### 摘要

本研究使用鎳基 IN-82/IN-182 合金作為 GTAW 及 SMAW 銲接填料,製作 A508/IN-182/316L 異質銲接件。透 過耐蝕能力評估,探討稀釋率及各區域金屬於加速腐蝕環 境中的材料損失,建立實驗系統、評估材料減薄量的方法。 實驗結果顯示,異質銲接件中之三種材料中,因 A508 低合 金鋼為相對活性較高之金屬,含有最多的鐵元素且具最低 的腐蝕電位,在浸泡試驗中發生最嚴重的腐蝕。雖然 316L 不銹鋼也具有較多的鐵含量,但與 IN-182 有相近的絡含量, 使其與 IN -182 有相近的腐蝕電位及耐腐蝕性能。在局部 動電位極化之數據結果顯示,愈靠近 IN-182 緩衝層時有愈 大的腐蝕電流密度,亦即產生較嚴重的腐蝕程度,且在浸泡 試驗之腐蝕深度結果顯示,愈靠近 IN-182 緩衝層已有愈 大的腐蝕電流密度,亦即產生較嚴重的腐蝕程度,且在浸泡 試驗之腐蝕深度。當陽極金屬發生嚴重的加凡尼腐 蝕時,因距離效應有愈靠近陰極金屬產生愈嚴重的腐蝕。

關鍵詞:異質銲接,加凡尼腐蝕,電化學,氯化鈉。

### Abstract

In this study, nickel-based IN-82/IN-182 alloy was used as GTAW and SMAW welding filler to produce A508/IN-182/316L dissimilar weldments. The effect of microstructure and resistance on crevice corrosion and galvanic corrosion was thoroughly studied. In this stage, the effect of dilution rate and different weld zone on the thinning rate was investigated. To carry out the most proper way to prepare specimens and evaluate the corrosion rate.

The results show that the low alloy carbon steel, A508, has the lowest corrosion potential among the dissimilar weld. Due to high iron content, the fusion boundary reveals that the A508 side was suffered by galvanic corrosion. The other reason is inferred to the low chromium and nickel content of A508. Although the fusion boundary also was observed at the IN-182/316L interface, the corrosion rates of both metals are similar. This phenomenon could be attributed to the similarity of chromium content. In the comparison of the anodic polarization test and immersion test, the A508-side fusion boundary shows the tendency to have higher corrosion current density and the depth of corrosion attack. Overall, the corrosion rate is concerning the active surface area of A508, which has a relatively lower corrosion potential. Therefore, the more close to the weld metal, the more severe corrosion was investigated at the A508 base metal.

Keywords: dissimilar weldments, galvanic corrosion, electrochemical.

### I. 前言

在核電廠、石化及化工等行業,各種設備因使用環 境不同,會利用相對應的金屬材料,因此經常須利用銲 接方式進行設備的連接。由於設備為相異材料組成,且 銲接的材料也十分多元,這種由不同金屬的銲接稱為異 質銲接(dissimilar metal weld, DMW)。隨著材料的成分、 結構差異,而有不同的材料物理、化學性質,可能導致 長期在嚴苛的腐蝕環境中,使得管件劣化及失效。在核 電廠中的沸水式反應爐 (boiling water reactor, BWRs)以 及壓水式反應爐 (pressurized water reactor, PWR),為容 納核燃料的厚鋼壓力容器,達到輻射阻隔的效果,使放 射性物質遠離環境。反應爐壓力容器及其噴嘴通常使用 低合金鋼 (low alloy steel, LAS) 製成。此種鋼料具有所 需的機械強度且相對便宜[1,2],其他組件如蒸汽產生器及 熱交換管等,大多使用鎳基合金或不銹鋼製成,低合金 鋼與不銹鋼的接合,銲接填料常選用鎳基 IN-182 及 IN-82 合金<sup>[3]。</sup>

核電廠經長時間的運轉,終究需面臨除役。雖在除 役初期設備已停止運轉,但反應器之組件中仍存放大量 的靜滯冷卻水,銲接組件的因長時間浸泡,會導致加凡 尼腐蝕(Galvanic Corrosion)的產生。文獻<sup>[4]</sup>指出,在 A508 與 309/308LSS 的銲接件中,在靠近熔合邊界的低合金 鋼之細晶區(FR)被認為是最容易產生加凡尼腐蝕的區域。 加凡尼腐蝕產生的狹縫,可能再誘發間隙腐蝕,使得銲 接件腐蝕程度加劇。此外腐蝕生成物沉澱於水溶液底部 或成為成為懸浮物,都會使得異質銲接件呈現有別於單 一腐蝕機制的樣態。故須進一步探討異質銲接件在靜滯 水溶液環境下,材料成分對於腐蝕程度及材料減損對於 銲接組件壽命的影響。

為此,本研究使用 A508 低合金鋼與 316L 不銹鋼作 為母材,透過鎳基 IN-182 及 IN-82 合金進行開槽對接,以 放電線切割加工(wire electrical discharging machine, WEDM) 切取垂直填料銲方向之式片,透過 EDS 測量整體銲接件的 成分趨勢,對浸泡試驗後材料腐蝕深度及局部區域的電化 學量測進行綜合分析評估。

### Ⅱ. 主要內容

本研究之實驗流程圖,如圖 1 所示。異質銲接件所 使用之母材為 A508 Gr.1 及 316L 板材製成異質銲接 件,異質對接的緩衝層及填料層分別使用鎳基 182 合 金(ERNiCrFe-3),底端對接處使用鎳基 82 合金 (ERNiCr-3),材料成分如表 1 所示。銲接後以放電線切

割加工切取垂直填料銲方向之試片。以 A508/IN-182/316L 之異質銲接件作為電化學待測試片,試片尺 度設定在長 60 mm、寬 25 mm、厚為 5 mm, 如圖 2(a) 所示。浸泡試片於圖 2 (a) 所示試樣不同位置採取,採 取後試片如圖 2 (b) 所示。依據 ASTM G31 規範,試 片尺度設定在長 50 mm、寬 25 mm、厚為 4.85 ± 0.05 mm。依裁切位置不同,分為 A508/IN-182、A508/IN-182/316L、IN-182/316L 三種異質銲接件。浸泡試驗使 用 3.5% NaCl(aq) 為浸泡水溶液,加速模擬核電廠除役 後之異質銲接管線設備浸置在高電解質環境中之情形。 利用能量散佈光譜成分分析(JOEL JSM-6390LV),得知 銲接件整體之成分趨勢,分析位置如圖 3(a) 所示。並 透過恆定電位儀(GAMRY G750)之動電位極化法進行局 部的耐蝕性分析,電解液為 3.5% NaCl (aq),分析位置 如圖 3 (b) 所示。浸泡試驗後試片利用表面輪廓儀 (Kosaka-ET200)測得腐蝕後之深度,量測路徑如圖 3(c) 所示。利用 X 射線繞射分析儀 (Bruker D2 PHASER),分 析浸泡試片之表面腐蝕生成物。最後分別利用成分分布及 平均腐蝕深度之結果與電化學之局部動電位化數據相互 對照,以觀察試片局部成分對電化學(Ecorr、Icorr)的敏感 性,和電化學(Icorr)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 (a) 為 A508/IN-182 試片經浸泡後未清洗之 巨觀表面,A508 表面覆蓋黑色生成物,在末端處有一 明顯弧型面積區為試片放置於鐵氟龍插槽所產生的些 微間隙腐蝕。清洗後 A508 表面呈現灰白色的基材, IN-182 表面亦無明顯腐蝕的發生。文獻<sup>[5]</sup>指出,銲接件中 愈靠近陰極金屬 (IN-182) 的陽極金屬 (A508) 會因距 離效應,產生愈大的腐蝕電流及腐蝕深度。因此在 A508/IN-182 試片浸泡二個月與浸泡三個月的試片,可 觀到於 A508 與 IN-182 之接合處,A508 側皆出現明 顯因腐蝕所造成的狹縫,如圖 4 (b) 所示。

由於 IN-182 和 316L 在試驗溶液的腐蝕特性相 似, A508 為唯一相對陽極,因此含 316L 在本實驗系 統中所有的試片,如圖 4 (c) 所示,皆呈現相似的腐蝕 反應機制。不同的是相較於 A508/IN-182 組合的試片, A508/IN-182/316L 組合的試片在浸泡一個月的試片,就 可發現 A508 與 IN-182 之接合處的 A508 側已產生 明顯的狹縫。

在試片 A508 低合金鋼母材區出現經浸泡試驗後 之黑色生成物,經 XRD 分析為 Fe3O4。由於其氧化層 具有不溶於水、鹼性及乙醇等溶液的特性,得以保護 A508 底材,減少腐蝕。IN-182 及 316L 則因含有較多 鉻元素,產生 Cr2O3 保護層,因而達到耐腐蝕的效果。 在異質銲接件上,此二種金屬相對於 A508 低合金鋼又 為陰極金屬,因此在整體銲接件中均未見腐蝕的發生。

由上述提到 A508/IN-182/316L 組合相較於 A508/IN-182 的試片在浸泡一個月的試片,就可觀察到 A508 與 IN-182 之接合處的 A508 側已產生明顯的狹 縫。藉由表 2 所見,A508/IN-182 與 A508/IN-182/316L 各 組合有不同比例的陰、陽極金屬之曝露面積,利用試片單面 面積算出陽/陰極面積比,A508/IN-182 組合之陽/陰極比值 為 2.8, A508/IN-182/316L 組合之陽/陰極比值為 0.37。 由此結果判斷, A508/IN-182/316L 試樣中具有較少的 陽極金屬卻必需供給較多電子予陰極金屬形成還原電 流,因此兩種試片組合中 A508/IN-182/316L 組合中的 A508 會產生較大的腐蝕速率。再利用光學顯微鏡觀察 浸泡試驗後之 A508/IN-182 界面 A508 側出現狹縫微觀 結構,截面金相取樣位置,如圖 4(b) 所示。從圖 5(a) 為 靠近縫隙之 A508/IN-182 界面,圖 5(b) 至圖 5(d) 為縫 隙內部,皆可觀察到加凡尼距離效應,腐蝕深度有愈靠近 IN-182 愈深的腐蝕深度。因此由截面金相中觀察到此縫隙 為加凡尼腐蝕所造成的狹縫,並非其他因素所造成之裂縫。

### ii. 異質銲接件 A508/IN-182 與 A508/IN-182/316L 之試片減薄量

試片包含 A508/IN-182 兩種金屬的銲接件,試片 浸泡一個月與浸泡二個月的減薄厚度相似,顯示減薄 厚度最大約 15 μm,如圖 6(a)。圖 6(c) 為浸泡三個 月之試片正面減薄厚度,增加為前兩個月之浸泡試片 減薄量的 2 倍,約 30 μm。由圖 6(b) 顯示,在浸泡 一個月之試片反面(朝下)的 mid 及 bottom 減薄厚 度可觀察到靠近 IN-182 與 A508 接合處之 A508 母材呈現些微的局部腐蝕現象。甚至在浸泡二個月之 試片反面減薄厚度中觀察到,局部腐蝕的現象變得更 加顯著。由圖 6(d) 顯示,浸泡三個月之試片反面 bottom 之減薄厚度中,觀察到最大的減薄量約 100 μm。由以上數據結果顯示,試片正面可觀察到 A508 母材減薄厚度有愈靠近陰極金屬 (IN-182) 減薄量 愈大的趨勢,呈現局部腐蝕型態。

試片包含 A508/IN-182/316L 三種金屬的銲接件, 浸泡一個月與二個月減薄厚度並無太大差異,正面減 薄量約 24 μm, 如圖 7 (a) 所示。由浸泡三個月之試 片顯示出最大減薄厚度,增加為前兩個月之浸泡試片 減薄量的 2.5 倍約 61 µm, 如圖 7(d) 所示。由圖 7 (b)、(c)、(e) 中之反面減薄量測圖,浸泡一個月至二 個月之腐蝕厚度約從 15µm 增加至 26µm ,也產生 較明顯的局部腐蝕。浸泡三個月減薄量最大達到 120 µm。由圖 7 與圖 6 二種組合的試片之減薄後厚度數 據顯示,正面減薄量皆大於反面。由於本試驗試片放 置浸泡容器底部,在試片與電解液進行反應後,產生 的生成物也沉澱於容器底部,造成反應溶液中的電解 質濃度不均,如圖 8(a) 所示。利用文獻<sup>[6]</sup>所論述的觀 點,位於容器上部之電解液存在較少生成物導電度較 佳;而有較多的反應後生成物(例如 Fe2O3)沉澱的容 器底部,該區域電解液的電阻高於上部。因此造成試 片正反面呈現減薄厚度不一。此外 A508/IN-182/316L 及 A508/IN-182 浸泡三個月試片反面皆有不規則的 減薄厚度發生。文獻<sup>[7]</sup>中指出,將鍛件淬火到 60℃ 或 沸腾的水中,都會有殘餘應力的存在。如圖 8(b) 巨 觀照片所見,浸泡後的試片局部區域有顏色較深黑點 構成的帶狀腐蝕之表面形貌。由於 A508 母材在銲接 前,有經過熱處理,將板材中較大應力消除,但在淬 火後仍會有較小的殘留應力存在,使得材料局部有較 高的能量。經浸泡試驗,因優先腐蝕,試片表面產生 較大的腐蝕深度,即黑點。同時發現這些腐蝕形貌,

由文獻<sup>[8]</sup>提到,在銲接時,靠近 IN-182 填料區的 A508 母材受到高溫熱影響。因此對局部 A508 母材 形同回火的過程,使得材料因加工殘留的應力被消除, 因而較無明顯的帶狀腐蝕形貌,如圖 8 (b) 中兩黃色 方框處所示。

### iii. 異質銲接件成分分析

利用 EDS 分析銲接件局部成分變化,如圖 9(a) ~ 圖 9(c) 所示。由異質銲接件的 A508 與 IN-182 的接合處的 IN-182 緩衝層開始出現鉻含量,IN-182 及 316L 皆含有約 16.89 wt.%。在 A508 與 316L 鐵含量分別達到約 87.5 wt.% 及 64.5 wt.% 以上, 但在 IN-182 的鐵含量約只有 7 wt.%,因此在 A508 及 IN-182 之接合處呈現鐵含量下降趨勢,在 IN-182 與 316L 之接合處呈現鐵含量上升的趨勢。 在 IN-182 含有最高的鎳含量約 66 wt.%,但在 A508 及 316L 的鎳含量分別為 0 wt.% 及 8.25 wt.%,因此可以觀察到在此異質銲接件的鎳含量與鐵 含量的分布呈現相反的趨勢。

### iv. 電化學分析

IN-182 與 316L 兩種材料腐蝕電位差甚小,且 正於 A508,故試片之 IN-182 及 316L 均未發生減 薄。圖 10(a) 為銲接件以 0.25 cm<sup>2</sup> 局部量測動電位 極化之區域示意圖,量測數據列於表 3,在母材區域 動電位極化曲線差異不大,故以 1-1~1-8 測試區域 代表 2-1~2-8 及 3-1~3-8 測試區域,如圖 10(b)。 顯示在母材區與熱影響區之顯微結構雖有不同,對於 電化學試驗的影響不大。因此針對包含 A508/IN-182 及 IN-182/316L 之測試區域數據進行觀察,結果顯 示同是涵蓋 A508/IN-182 之紅色框線的 1-2、2-3 及 3-3 測試區域,涵蓋陽極金屬 A508 面積越小, 亦即陰極金屬 IN-182 面積越大時, A508/IN-182 的 測試區域之腐蝕電流密度增加。數據顯示測試區域 2-3 有最大之腐蝕電流密度為 382 nA/cm<sup>2</sup>,並觀察 到 2-3 測試區域之腐蝕電位為 -0.51 V,腐蝕電位正 於其它測試區域(1-2 及 3-3)。測試區域 2-3 中所涵 蓋較大的 IN-182 緩衝層,使兩金屬混合電位由約 -0.8 V 朝正至 -0.5 V。藉由整體 0.25 cm<sup>2</sup> 局部量測 動電位極化之數據,顯示 A508 與 IN-182 腐蝕電 位相差約 0.5 V,導致嚴重的腐蝕發生於 A508。測 試面積包涵 IN-182 與 316L 為藍色框線的 1-6、2-5 和 3-5 測試區域,由於 IN-182 與 316L 有較相 似的電化學性質,兩者呈現相似的孔蝕腐蝕型態,並 未發生明顯的加凡尼腐蝕,如圖 10(c) 所示。

### v. 局部成分對電化學(Ecorr、Icorr)的敏感性

異質銲接件在銲接過程中,會將部分 A508 母材加 熱至熔融進行接合,導致靠近 A508 母材的 IN-182 緩 衝層呈現鐵、鎳元素相互混合,IN-182 緩衝層之局部成 分有與 A508 母材成分相互稀釋的情形發生。可以觀察 到鐵、鎳成分與局部電化學試驗在 A508/IN-182 組合呈 現正相關,當鐵含量大於鎳含量時,會有較大的腐蝕電 流密度、較正腐蝕電位。但 316L 加入時,A508/IN-182/316L 組合卻沒有表現出同樣的趨勢,同樣也富含大 量的鐵元素的 316L,卻顯示出與 IN-182 有較接近的 電化學性質,電位大約皆在 -0.2 V 至 -0.4 V。其原因如 圖 11 (a) 及 圖 11 (b) 所見,利用成分分析及電化學數 據結果作圖,從鉻含量的分佈發現,IN-182 與 316L 的 鉻含量非常接近。根據文獻<sup>[4]</sup>中所提及,由於 309/308L SS 會形成具保護性氧化鉻膜,所以檢測到總陰極電流 覆蓋其整個金屬表面。因此本實驗結果顯示,鉻含量使 得原本是鐵基的 316L 不銹鋼,提升了耐腐蝕性質,並 與 IN-182 在 A508/IN-182/316L 組合中同為 A508 的 陰極金屬。

### vi. 電化學(Icorr)與浸泡試驗的相關性

銲接試片經浸泡後,如圖 6、圖 7 所見,同一試片 呈現正、反兩面不同之腐蝕深度。為此本研究統一使用 試片的正面之腐蝕深度做為局部平均腐蝕深度數據,如 表 4 及表 5 所示。此數據利用動電位極化試驗規畫之 各測試區域的範圍內,所測得之原始量測腐蝕深度數據 之平均值為腐蝕深度,再與腐蝕電流密度數據製成對照 圖,如圖 12、13 所示。由於電化學試驗與試浸泡試驗 的試片不同,熔融界面呈現不一致的情況,以紅色虛線 的試片不同,熔融界面呈現不一致的情況,以紅色虛線 簡一種化時,如圖 10 (a) 的 2-3 測試區域所示,只涵 蓋了較多的 IN-182 面積與較少的 A508 面積,因此呈 現相較於 2-1、2-2 測試區域較大的腐蝕電流密度,而在 浸泡試驗利用 α-step 量測的數據時,發現該區域卻無 腐蝕深度。所以導致在圖 12、13 中,2-3 區域雖然有 較大的腐蝕電流密度卻無腐蝕深度的情況發生。

如圖 12(a)、(b) 所見,依 Stenta 及 Basco 之報告 [9], 電解質的導電性較優時, 腐蝕深度會呈現均勻腐蝕 型態。因此由本實驗結果顯示,A508/IN-182/316L 組合 浸泡一個月與浸泡二個月試片之浸泡後,因腐蝕深度無 太大差異,所以各局部之平均腐蝕深度的差異也非常微 小。若更仔細地取各試片 mid 量測路徑之各測試區域 取得之平均腐蝕數據發現,A508 的平均腐蝕深度有從 IN-182 填料區向 A508 母材區方向減少有微小化的趨 勢,浸泡滿一個月平均腐蝕深度由 17.9 µm 增加至 18.6 µm, 浸泡滿兩個月平均腐蝕深度由 19.4 µm 增加 至 22.0 µm。由表 4 浸泡滿三個月的數據,可以觀察到 top 及 bottom 量測路徑之各測試區域取得之平均腐蝕 深度數據,平均腐蝕深度加深的情況更加顯著,且 A508 的平均腐蝕深度同樣呈現由 IN-182 填料區向 A508 母材區方向減少的微小化趨勢,前者(top 量測路徑)之 平均腐蝕深度由 45.7 μm 增加至 65.8 μm, 落差約 20 μm;後者(bottom 量測路徑)由 50.9 μm 增加至 59.7 μm,落差約 9μm。但在表 4 中浸泡三個月之試片,可 以看到 mid 量測路徑之平均腐蝕深度,卻是由 63.0µm 下降至 60.4 μm。原因由文獻<sup>[7]</sup>推測結果,在量測腐蝕深 度時,發現A508 之局部區域出現較粗糙的表面,如圖 8(b)。測量出數據相對於整體試片有較大的腐蝕深度, 將較深的腐蝕深度值加入平均數據中,因此顯示出不同 的結果。

由圖 13 (a)、(b) 所示,本實驗結果顯示,在 A508/IN-182 組合觀察到浸泡一個月與二個月的各局部 區域之平均腐蝕深度差異甚小,由於此試片組合的陽極 金屬多於陰極金屬,因此相較於 A508/IN-182/316L 組 合的加凡尼現象減弱許多,呈現均勻腐蝕的型態。圖 13 (c)顯示浸泡三個月的各測試區域取得之平均腐蝕深度, 有更嚴重的加凡尼腐蝕發生。如表 5 數據中 top 量測 路徑之平均腐蝕深度由 15.9 µm 增加至 17.1 µm,呈現 出加凡尼腐蝕效應所造成的腐蝕深度變化,僅在靠近 IN-182 陰極金屬,會有較大的腐蝕深度。但在 mid 和 bottom 量測路徑之數據則無法顯示出相同的趨勢,原因 由文獻<sup>[7]</sup>推測結果,由於 A508 母材表面微小的局部殘 留應力造成材料表面能量不同,使各局部腐蝕的情形不 一。

綜合上述對照圖的平均腐蝕深度及腐蝕電流之趨勢,可以發現隨著電化學測試區域之腐蝕電流密度增加, 在浸泡試驗中相對應之區域內之平均腐蝕深度也隨之 增加,整體依然呈現加凡尼腐蝕之趨勢,證明電化學動 電位極化試驗中,就可以預測出越靠近陰極金屬處的陽 極金屬會受到愈嚴重的腐蝕,顯示出愈大的腐蝕深度。

### IV. 結論

- i. 異質銲接件中之耐腐蝕能力與基材內的鐵含量呈現負相關。鎮基 182 合金 (IN-182)與 316L 不銹鋼基材中的鉻元素含量相近且較低合金鋼高,具有較優良的耐腐蝕能力。鎮基 182 合金與 316L 不銹鋼的腐蝕電位相近,兩種材料之接合處未觀察到加凡尼腐蝕。
- ii. 在涵蓋 A508/IN-182 異質介面之測試區域,因 A508 具有較低的腐蝕電位,成為水溶液腐蝕之陽 極區域。相較於 IN-182,熔融界面之 A508 陽極金 屬的所佔試片面積愈小,產生的加凡尼腐蝕電流密 度愈大。
- iii. 比較異質銲接件局部動電位極化與長期浸泡試驗 之結果,由於陰極金屬的面積比率在 A508/IN-182/316L 試片中較大,熔融介面之 A508 低合金 鋼側受到加凡尼腐蝕之腐蝕深度與程度,較 A508/IN-182 試片嚴重,呈現陽極金屬所占的面積 比率愈小,加凡尼腐蝕愈嚴重。
- iv. 透過長期浸泡試驗得知,異質銲接件之 A508 側受 到加凡尼腐蝕之腐蝕深度,由於電阻效應呈現由 A508/IN-182 介面 向 A508 母材方向逐漸遞減的 趨勢。電化學動電位極化數據之腐蝕電流密度(Icorr), 亦可發現相同的趨勢。

### 參考文獻

- H. T. Wang, G. Z. Wang, F. Z. Xuan, C. J. Liu, and S. T. Tu, "Local mechanical properties of a dissimilar metal welded joint in nuclear power systems" Mater. Sci., pp. 108-117, 2013.
- [2] M. C. Kim, S. G. Park, K. H. Lee, and B. S. Lee, "Comparison of fracture properties in SA508 Gr.3 and Gr.4N high strength low alloy steels for advanced pressure vessel materials" Int. J. Press. Vessels Pip., pp.60-66, 2015.
- [3] R. A. Page, "Stress Corrosion Cracking of Alloys 600 and 900 and Nos. 82 and 182 Weld Metals in High Temperature Water", Corrosion, Vol. 39, No. 10, p. 409, 1983.
- [4] 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 oflow alloy steel A508 and its welded 309/308L stainless steel overlayer", Corrosion, Vol. 154, p. 49, 2019.

- [5] H. R. Copson, "Distribution of Galvanic Corrosion", Trans. Electrochem. Soc., Vol. 84, p.71, 1943.
- [6] X. G. Zhang "Uhlig's Corrosion Handbook Ch.10 Galvanic Corrosion", p. 123, 2011.
- [7] D. A. Tanner and J. S. Robinson, "Reducing residual stress in 2014 aluminium alloy die forgings", Marerial & Design, Vol. 29, pp. 1489-1496, 2008.
- [8] 洪源璟,"異質銲接件經 GTAW 覆銲處理後殘留 應力分布",國立台灣科技大學機械工程系,碩士 論文,pp. 42 - 38, 2018.
- [9] A. Stenta, S. Basco, A. Smith, C. B. Clemons, D. Golovaty, K. L. Kreider, J. Wilder, G.W. Young, and R. S. Lillard, "One-dimensional approach to modeling damage evolution in galvanic corrosion", Corrosion Science., Vol. 88, pp. 36-48, 2014.

表 1	母材及銲接金屬的化學成分(wt.9	%)	c
-----	-------------------	----	---

元素 材料	С	Si	Mn	Р	S	Fe	Ni	Cr	Mo	Ν	Cu	Ti	Со	Al	Cb+Ta	Nb+Ta	other
A508 Gr.1	0.23	0.21	1.04	0.011	0.006	Bal.	0.06	0.09	0.01	-	0.09	-	-	-	-	-	-
316L	0.023	0.6	0.64	0.035	0.001	Bal.	10.1	16.7	2.01	0.01	0.26	-	-	-	-	-	-
182合金	0.04	0.4	5.45	0.005	0.004	4.24	73.5	14.7	-	-	0.01	0.01	-	-	-	1.52	0.27
82合金	0.009	0.11	3.18	0.004	0.003	0.35	73.6	20	-	-	< 0.01	0.35	< 0.1	0.1	2.64	-	-

### 表 2 A508/IN-182 與 A508/IN-182/316L 各陰陽極金屬比例。

試片	A508	IN-182 1 cm	A508	N-182 316L 1 cm	
陽、陰極金屬	A508	IN-182	A508	IN-182/316	
陽極金屬面積比計算式	$\frac{39743}{54239} = 0.733$		$\frac{15181}{55126} = 0.275$		
陽、陰極金屬面積比(%)	73.3 %	26.7 %	27.5 %	72.5 %	
陽/陰面積極比	2.7	: 1	1:2.6		

### 表 3 0.25 cm<sup>2</sup>局部動電位極化之數據。

Layer 1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
$I_{corr} (nA/cm^2)$	457	298	59.4	54.1	64.6	68.1	64.7	25.5
E <sub>corr</sub> (V vs. SCE)	-0.82	-0.84	-0.31	-0.38	-0.35	-0.28	-0.24	-0.20
Layer 2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
$I_{corr} (nA/cm^2)$	124	176	382	25.4	23.2	19.9	14.1	12.1
$E_{corr}$ (V vs. SCE)	-0.85	-0.85	-0.51	-0.30	-0.27	-0.17	-0.28	-0.23
Layer 3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8
$I_{corr}$ (nA/cm <sup>2</sup> )	491	293	161	19.7	16.0	16.9	12.4	10.9
E <sub>corr</sub> (V vs. SCE)	-0.86	-0.87	-0.88	-0.31	-0.27	-0.30	-0.23	-0.21

表4 A508/IN-182/316L 浸泡後之平均腐蝕深度(µm)。

		100	<b>u</b> )			
浸泡時間(月)	X(mm) Y(mm)	38 ~ 33	31 ~ 26	24 ~ 19	17 ~ 12	10 ~ 5
	5	23.9	21.2	0	0	0
1	12.5	17.9	18.6	0	0	0
	20	19.9	18.9	19.3	0	0
	5	22.1	28.3	0	0	0
2	12.5	19.4	22.0	0	0	0
	20	16.8	18.2	16.4	0	0
	5	48.7	65.8	0	0	0
3	12.5	63.0	60.4	0	0	0
	20	50.9	53.3	59.7	0	0

		(F)			
浸泡時間(月)	X(mm) Y(mm)	28 ~ 23	21 ~ 16	14 ~ 9	7 ~ 2
	5	14.6	14.5	0	0
1	12.5	13.5	14.5	0	0
	20	12.2	13.1	14.1	0
	5	12.5	13.8	0	0
2	12.5	13.5	10.9	0	0
	20	11.3	11.7	10.1	0
	5	15.9	17.1	0	0
3	12.5	45.9	31.5	0	0
	20	25.7	34.6	15.3	0

表 5 A508/IN-182 浸泡後之平均腐蝕深度(μm)。



圖1 實驗流程圖。

### A508/IN-182



### A508/IN-182/316L



IN-182/316L



(b)



(a) 圖 2 (a)電化學及浸泡試片取樣位置、尺寸、(b)異質銲接件試片組合。







圖 3 (a)腐蝕深度量測路徑之示意圖、(b) EDS 測量位置示意圖、(c)電化學測試位置示意圖。



(a)

清洗前

清洗後



(b)



圖 4 (a) A508/IN-182 試片浸泡後觀其巨觀表面、(b)腐蝕所造成的狹縫及截面金相取樣位置、 (c) A508/IN-182/316L 之試片浸泡後觀其巨觀表面。



圖 5 A508/IN-182 界面狹縫截面金相圖, (a) 圖 4(b)中的 A 位置、(b) 圖 4(b)中的 B 位置、(c) 圖 4(b)中的 C 位置、 (d) 圖 4(b)中的 D 位置。



 (a)
 (b)
 (c)
 (d)

 圖 6 A508/IN-182 之試片減薄量,(a)一個月A508/IN-182 正面、(b)一個月A508/IN-182 反面、(c)三個月A508/IN-182 反面、(d)三個月A508/IN-182 反面。



圖 7 A508/IN-182/316L 之試片減薄量 (a)一個月 A508/IN-182/316L 正面、 (b)一個月 A508/IN-182/316L 反面、 (c)二個月 A508/IN-182/316L 反面、 (d)三個月 A508/IN-182/316L 正面、 (e)三個月 A508/IN-182/316L 反面。



圖 8 (a)腐蝕後之浸泡容器底部懸浮或沉澱腐蝕生成物、(b)腐蝕後之表面形貌。



圖 9 (a) 鉻、(b) 鐵,與(c) 錄含量之趨勢分布圖。





圖 10 (a)0.25 cm<sup>2</sup> 局部動電位極化之區域示意圖、(b)0.25 cm<sup>2</sup>之動電位極化曲線(layer 1)、(c)試片 IN-182/316L 經電化 學試驗後之孔蝕腐蝕形貌。



圖 11 局部鉻含量對局部電化學 (a) Ecorr、(b) Icorr之作圖。



圖 12 A508/IN-182/316L 於 Y 軸 12.5 mm 處各局部平均腐蝕深度與局部電化學(Icorr)之對照圖(a)浸泡一個月、(b)浸泡 二個月、(c)浸泡三個月。



圖 13 A508/IN-182 於 Y 軸 12.5 mm 處各局部平均腐蝕深度與局部電化學(Icorr)之對照圖(a)浸泡一個月、(b)浸泡二個 月、(c)浸泡三個月。

### 資安政策下之核電廠關鍵數位資產安全防護之探討 Research on the Protection of Critical Digital Asset in Nuclear Power Plants Under the Information Security Policy

計畫編號: MOST 108-NU-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

數位資產之概念仍在持續發展,關鍵數位資產則為 關鍵系統之子元件,包含數位設備、電腦、通訊系統和 網路等。數位資產或關鍵性數位資產為組織必須保護以 防止未經授權傳輸的檔案和資料。本研究目的係基於資 安政策的脈絡下,探討核能電廠數位化系統之資安威 脅,並聚焦於「工業控制系統」之威脅及防護作為,以 做為我國核安管制參考。

**關鍵詞:**核能安全、氣隙網路、關鍵數位資產、工業控 制系統

### Abstract

Digital Asset is still a developing concept, and Critical Digital Asset is a sub-component of key systems, including digital devices, computers, communication systems and networks. Digital assets or critical digital assets are files and materials that the organization must protect against unauthorized transmission. The purpose of this research is to explore the security threats of the digital system of nuclear power plants based on the context of the security policy, and focus on the threats and protections of the "industrial control system" as a reference for Taiwan's nuclear security control.

**Keywords:** Nuclear Security, Air-Gap Network, Critical Digital Assets, Industrial control system.

### I. 前言

針對關鍵數位資產之全球資通安全事件頻傳,台灣 也不例外。各國努力避免因為依賴電腦與網路而導致被 惡意行為者利用進行資料竊取或攻擊行動。

2018 年 5 月 9 日,美國中央情報局局長哈斯佩爾 (Gina Haspel)在參議院的任命聽證會上指出,恐怖分 子正在努力取得核材料,而核能電廠與此等威脅有關的 就是恐怖分子會先藉由網路或是電腦系統駭入,以竊取 相關機敏資料並發掘可以突破的弱點,及進行後續之針 對關鍵基礎設施的攻擊。

2019 年 10 月 30 日,由「印度核電有限公司」 (NPCIL)管理之「庫丹庫拉姆核電廠」(KKNPP) 亦發現歸因於某國行為者的惡意軟體攻擊。且調查顯 示,受感染的 PC 用戶為了管理目的而連接到網際網路 之連接網絡(network),該網絡與關鍵內部網路是隔離 的。雖然此攻擊可能無法直接進入核電廠的控制網路, 而與震網(Stuxnet)攻擊模式不盡相同。但可在核電廠網 路上建立持久存在,並伺機進行供應鏈等攻擊,例如利 用軟體更新過程或其他潛在機會轉移到隔離網路中,而 能在將來進行毀滅性攻擊,且特別難以防範的就是「工 業控制系統」之安全防護作為。

#### Ⅱ. 主要內容

網際網路普及且進入物聯網的時代,網路之實體安 全隔離仍存有漏洞;同時,也衝擊到實體與網路聚合之 關鍵基礎設施,例如核能電廠等之網路環境,有惡意行 為者之網路攻擊迭有所聞,特別是針對工業控制系統。

基於此等資訊與網路科技發展而總是伴隨威脅之 脈絡,本研究之主要內容在於彙整國際核能資安管制及 外國關鍵數位資產防護工作之相關作為;蒐集國際核能 電廠受到可攜式儲存媒體入侵、工業控制系統可能遭受 破壞之有關威脅與案例;進而探討在我國推動之資安戰 略及政策下,核能電廠對於可攜式儲存媒體及工業控制 系統應有之整全防範機制與措施。

在關鍵基礎設施之資訊安全政策內涵與發展方 面,進行對關鍵基礎設施與工業控制系統,核能電廠儀 控設備系統架構之風險分析和評估、強化縱深防禦之必 要性與其限制,建立全面性安全計劃和意識,資訊安全 管制等之分析;

在核能電廠關鍵數位資產及攻擊態樣分析方面,分 別探討了工業控制系統面臨之威脅,分析可能之攻擊場 景與攻擊者,USB攻擊之分類等;

在國際核能工業控制系統與各國關鍵數位資產安 全防護作為方面,進行對美國工業控制系統管制與關鍵 數位資產防護工作,歐盟資安管制與關鍵數位資產防護 工作,加拿大資安管制與關鍵數位資產防護工作,澳洲 資安管制與關鍵數位資產防護工作等之分析;

在國際核電廠之工業控制系統有關威脅與案例分 析方面,探討震網病毒對於伊朗核電廠攻擊,烏克蘭變 電站之資訊安全攻擊,南韓水力與核電公社(KHNP)之網 路攻擊,德國核電廠系統之惡意軟體攻擊等之分析;

在核電廠對於工業控制系統應有之防範機制與措施方面,進行對核電廠工業控制系統的脆弱性,保護工 業控制系統免受攻擊之努力作為,工業控制系統安全架 構與發展方向,政策與程序措施等之分析;

在核能電廠關鍵數位資產資通安全計畫審查導則 等有關文件之檢討方面,進行對美國核能管制委員會 RG5.71 導則概要,我國數位資產資通安全計畫實施與檢 討,數位資產資通安全計畫維護與檢討/法規,數位資產 資通安全計畫維護與檢討/技術等之分析。

### III. 結果與討論

進行分析或解決的問題:

第一、核能電廠數位化系統之資安威脅的來源有那 一些行為者?而必須進行分析駭客、駭入行動主義者、 電腦罪犯、企業間諜、內鬼、契約商、及恐怖分子等七 種罪犯之性質與企圖。

第二、探討可攜式儲存媒體之不當存取的可能情 形?以及這些不當存取行為與各式不同攻擊,例如後 門、阻斷服務攻擊、電子郵件欺騙、IP 位址欺騙、鍵盤 側錄器、邏輯炸彈、實體攻擊、嗅探、特洛伊木馬、病 毒、蠕蟲、殭屍等 12 種攻擊途徑之關聯性?

第三、分析數位資產資通安全之不當存取的防護措 施及可行之管制作為,尤其是有關工業控制系統之安全 防護作為。

第四、基於所提出之防範與管制作為,重新檢視我 國核電廠有關資安法規之內容與思考可能改進方向,而 使其更符合動變數位環境之安全需求。

第五、關鍵數位資產之安全防護與管制作為必須與 《資安戰略》及已通過之《資通安全管理法》接軌,進 而能構築更全面之核能電廠關鍵數位資產之安全防護 措施。

### IV. 結論

資訊安全就是國家安全,本計畫之執行是在整全之 資安即國安戰略與政策下,配合原能會關切核電廠關鍵 數位資產安全之不當存取等風險,可能面臨之攻擊威 脅,而找出關鍵數位資產之漏洞,參考國際核能資安管 制做法,強化工業控制系統安全,以做為我國核安管制 參考。

### 參考文獻

- Ahmed, Osman., Asad Rehman and Ahmed Habib, "Industrial control system (ICS) Cybersecurity Advice, Best Practices." Control Engineering. MAY 12, 2019.
- [2] Anderson, R.J. Emission Security. Security Engineering, 2nd Ed. Wiley Publishing, 2008.
- [3] Baiardi, F. and D. Sgandurra. "Assessing ICT Risk Through a Monte Carlo Method." Environment Systems and Decisions, 33 (2013).
- [4] Bowman, Matthew. "Cyber Security for Nuclear Power Plants." July 2012.
- [5] Breiki, Majed Al. "Cyber Security Design Methodology for Nuclear Power Control & Protection Systems."
- [6] Cheol-Kwon, Lee. "Introduction of a Cyber Security Risk Analysis and Assessment System for Digital I&C Systems in Nuclear Power Plants." IFAC Proceedings Volumes. Vol. 46, Issue 9. 2013.
- [7] Cherdantseva, Y. et. al. "A Review of Cyber Security Risk Assessment Methods for SCADA Systems." Computers & Security, Vol. 56. 2016.
- [8] Kotenko, I. and A. Chechulin. "A Cyber Attack Modeling and Impact Assessment Framework." Proceeding of the 5th International Conference on Cyber Conflict, Tallinn, Estonia, June 4-7, 2013.

- [9] McCrory, F. Mitch. "Cyber Informed Risk Analysis (CIRA) for Nuclear Power Cyber Security." Proceeding of the Institute of Nuclear Materials Management Annual Meeting, Washington, DC, March 17-18, 2015.
- [10] Padée, Adam., Michał Wójcik, Arkadiusz Ćwiek, Konrad Klimaszewski, Przemysław Kopka, Sylwester Kozioł, Krzysztof Kuźmicki, Rafał Możdżonek, Wojciech Wiślicki, and Tomasz Włodarski. "On preventing and Detecting Cyber Attacks in Industrial Control System Networks." Journal of Telecommunications and Information Technology. No.2. 2019.
- [11] Senate Select Committee on Intelligence. Open Hearing: Nomination of Gina Haspel to be the Director of the Central Intelligence Agency. May 9, 2018.
- [12] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Regulatory Guide 5.71 (New Regulatory Guide): Cyber Security Programs For Nuclear Facilities. January 2010.
- [13] W. Ahn, et. Al. "Development of Cyber-Attack Scenarios for Nuclear Power Plants Using Scenario Graphs." International Journal of Distributed Sensor Networks, 32 (2015).

### 除役中核能電廠之適職方案管制要求與國際實施現況研究 The study of fitness for duty for the decommission nuclear power plant

計畫編號:MOST 108-NU-E-262-001-NU 計畫主持人:宋大崙 e-mail:tlsung@mail.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:龍華科技大學化工與材料工程系

### 摘要

核能電廠除役階段,核子事故的風險會因用過核子 燃料冷卻時間、貯存方式及位置而有所不同,因此管制 可根據除役階段不同而調整。適職性藥檢及酒測,對於 可能會從事犯罪或是因為濫用藥物而導致行為失控,作 出對用過核子燃料危害或未經核准的行為(例如企圖破 壞或與外部破壞者共謀擔任內應)加以預防。適職性的疲 勞管理,可避免核子保安人員降低他們的警覺性或執行 識別和迅速應變核能電廠保安威脅所需的功能的能力。 因此,本研究認為除役中的電廠應考量核子保安而維持 適職性的規定,可依照除役中電廠不同階段風險減少而 調整。

關鍵詞:除役核能電廠、適職性方案、藥檢及酒測。

### Abstract

During the decommissioning phase, the state (cooling) and location (storage) of used nuclear fuel will affect the nuclear risk. Therefore, the regulation to maintain nuclear safety will be different according to the different stages of decommissioning. Applicable drug testing and alcohol testing could prevent the crimes or uncontrolled behavior due to drug abuse. Appropriate fatigue management can prevent nuclear security personnel from reducing their alertness or performing the functions needed to identify and respond quickly to security threats to nuclear power plants. Therefore, this study suggests that power plants under decommissioning still need to maintain the FFD's (fitness for duty) requirements, but due to the reduction of power plant risks during decommissioning, the FFD's (fitness for duty) requirements would be reduced.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Decommission, Fitness For Duty.

### I. 前言

適職性(Fitness for Duty, FFD),較正確的說明應該 是工作表現(work performance),但為了達到員工工作表 現,此處是指員工能安全及有效率的狀況完成其工作。 尤其是高度安全工作,員工必須展示其適職才能保證工 作環境的安全,及不致危害自己或他人之安全。主要考 量的因素為使用禁藥或飲酒會使員工之工作表現降低, 或是長期工作導致疲勞,使身體狀況無法因應工作需求。

除了上述員工工作表現會影響安全操作外,核能電 廠管理對於大眾身體健康十分重要,且有具高放射性的 物質,除了電廠的安全外,防止竊取及破壞,更需要加 強核子保安。於核子保安來說,深度防禦是重要的依據, 人員適職性可從4方面著手:(1)人員素質:可以從教育、 經驗、訓練、合格考驗;(2)藥檢及酒測(3)行為觀察 (Behavior Observation) (4)疲勞管理。因此目前運轉中的 電廠多數參考美國於1989年7月7日頒佈(1990年元月 3 日生效)的核能電廠持照者適用的適職方案法規 10CFR26 的規定執行管制。包括適職方案(FFD)-藥檢及 酒測、FFD-疲勞管理(Fatigue management program, FMP)。 除了運轉執照的工作外,為了電廠安全所設定的保安或 實體防護需求所制定的內部緩解方案,也需要 FFD-藥檢 及酒測與 FFD-疲勞管理。核子安全及核子保安,對於人 員的要求,美國核管會曾提出信賴(trustworthiness)及可 靠(reliability)的概念,結合人員背景調查(犯罪紀錄)、適 職性方案、內部緩解(Insider Mitigation Program, IMP)及 行為觀察方案(Behavior Observation Program),其中適職 性方案就是重要的一環[1]。

除役中的電廠,因為永久停機無運轉所以無分裂的 危險性,核子燃料移到核子用過燃料池,進而核子用過 燃料因為衰變,其衰變熱降低,最後進入乾式貯存設施, 因此風險性依時間或階段不同而降低。對於運轉中所要 求的規定與除役中的要求規定,因風險性不同,且標的 物不同,許多規定如緊急應變整備、實體防護、網路保 安皆有許多資料討論,美國也針對除役中電廠提出相關 法規草案及討論[2-4],本計畫著重於適職性方案於除役 中的電廠管制要求之探討,藉由美國所提出的草案及網 路上的資料整理及分析對於台灣除役中的電廠適職性 管制要求提出建議。

### Ⅱ. 主要內容

本研究由運轉中電廠的規定如美國 NRC 的 10CFR26 適職性規定,IAEA、芬蘭、加拿大及其他國家 規定來討論,並將台灣法規相關規定比較。

美國核管會是國際上公認核能法規較為嚴整,因此 首先討論美國核管會所推動的除役管制,其除役管制立 法時程包括下列各項:

- 已於2015年11月頒布提議立法預告(Advance Notice of Proposed Rulemaking, 簡稱ANPR)(聯邦公報編號 80FR72358)。(2015/12/9召開公開會議)
- 已於2017年3月15日頒布提議立法管制基礎 (Regulatory Basis),並提供各界民眾和團體於90天內 提供評論意見。按美國核管會不會對每一位民眾之 意見提供回復或定期編輯評論意見,但會在研訂最 終監管基礎時會考慮所有收到的各界人士所提供之 意見。(ADAAMS編號ML17047A413)。(2017/5/8-5/10召開公開會議)
- 已於2017年5月9日頒布提議立法管制分析 (Regulatory Analysis),並提供各界民眾和團體於90 天內提供評論意見。(ADAAMS 編號 ML16271A511)[2]。
- 最終版提議立法管制基礎已於2017年11月頒布。 (ADAAMS編號ML17215A010)[3]。
- 5. 最終版提議立法管制基的管制分析已於2018年2月 頒布。(ADAAMS編號ML17332A075)[4]。

以下是美國核管會的適職方案文件整理。

#### 2.1美國核管會NRC適職方案管理

美國NRC針對適職性的要求,主要是法規10CFR26, 及其他相關參考資料[5],所謂適職是對於核能電廠深度 防禦重要的策略,其法規的框架可以提供保證在保護區 獲得出入許可的人員能安全地完成其工作。在10CFR26 內,適職性包含藥物或其他物質的使用不影響工作(藥檢 及酒測);精神(mentally)及身體健康(physically)的能力可 以完成工作;最後不會因為疲勞(累積或急性)而減弱其 工作能力。

#### 2.1.1 適用範圍

針對10CFR26法規及相關的法規討論,首先是適用範圍。

### 2.1.2 核子反應器:

是根據<u>10 CFR 50.57</u>授權經營核動力反應堆的許可 證持有者,以及在NRC根據<u>10 CFR 52.103 (g)</u>作出調 查後**獲得10 CFR 第52部分的合併許可證的持有人**,且在 收到燃料組件形式的特殊核材料之前實施FFD計劃。此 對於永久停機進入除役中的電廠,使用10CFR50 所申請 執照者不適用,但以10CFR52申請綜合執照者則適用。

#### 2.1.3 用過核子燃料

用過核子燃料屬於除了運轉電廠者外,戰略特殊核材料(Strategic Special Nuclear Material, SSNM),以10CFR70 規定使用或運輸SSNM的許可證持有者,除本部分的第I (疲勞管理)和K部分(建廠者)外,均應符合本部分的要求。但 是用過核子燃料儲存裝置則不適用此規定。

### 2.1.4 核子保安需求

依據 10CFR73 實體防護法規需求,此法規主要是為保 護特殊核子材料(SNM)在固定廠址,傳送及使用這些特 殊核子材料的反應器,因此包括運轉中的反應器、用過 燃料池及乾式貯存裝置。適用於 10CFR50,10CFR52, 10CFR70 申請執照者,因此適用於除役中的電廠。適用 於 10CFR50,10CFR52,10CFR70 申請執照者。10 CFR 73.55 (b) ii(B) 要求持照人必須納入 10CFR26 之 FFD 方案。10 CFR 73.55 (b) (9) 條文如下:

"10 CFR 73.55 (b) (9) The licensee shall establish, maintain, and implement an insider mitigation program and shall describe the program in the Physical Security Plan. (i) The <u>insider mitigation program</u> must monitor the initial and continuing <u>trustworthiness and reliability</u> of individuals granted or retaining <u>unescorted access authorization</u> to a protected or vital area, and implement defense-in-depth methodologies to minimize the potential for an insider to adversely affect, either directly or indirectly, the licensee's capability to prevent significant <u>core damage</u> and <u>spent fuel sabotage</u>. (ii) The insider mitigation program must contain elements from:

- (A) The access authorization program described in § 73.56;
- (B) The fitness-for-duty program described in part 26 of this chapter;
- (C) The cyber security program described in § 73.54; and
- (D) The physical protection program described in this section. "

反應器運轉時及除役中採取適職方案是為了保證 工作人員在職務上能夠安全運轉不致發生意外事故,造 成人民健康損害,或發生事件時緊急應變可以發生預期 效能,將損害降至最低。此外,為了實體防護,保安的 要求,採取深度防禦的防護措施,避免內部人員直接或 間接造成損害或核子燃料被竊取,因而採取10CFR26適 職方案,但是IMP法規並未規定沒有具體說明這些要素 是什麼。

### 2.1.5 人員考量

包括運轉人員、緊急應變計畫中之保建物理人員、 消防人員、系統維護人員、保安人員及授權無人陪同之 人員。除此之外,特殊核子材料的相關人員,如運送、 授權無人陪同、測量、警衛等;保安人員及保安授權相 關人員;FFD計畫人員(如實施該計劃的管理人員,技術 人員,收集人員,醫療審查官員和藥物濫用專家),還有 以上相關項目之廠商。詳見10CFR26.4。

### 2.1.6 藥檢及酒測 (Drug and Alcohol Testing)

10CFR26.31 說明藥檢及酒測,受測分為幾個類別:(1) 授權前(pre-access):在人員首次授權時需接受藥檢及酒 測,以確保人員篩選。這部分的規定在10CFR 26 第 C 章節。(2)根據(法律)事由(For cause)回應個人觀察到的 可能濫用藥物的行為或身體狀況,或者在收到個人參與 藥物濫用的可靠信息後,如10CFR26.5 所述。(3)事件發 生後(Post Events):一旦實際發生人為錯誤的事件,人為 錯誤可能導致或促成該事件,如果事件導致以下情況, 則應對發生人為錯誤的個人進行測試 -如人員重大健康 損傷、輻射劑量超標或核子反應器損壞。(4)追蹤(Follow up)追蹤驗證個人是否繼續戒除藥物濫用。(5)隨機測試 (Radom):在統計上隨機測試,測試個體在群體中具有相 同的被選擇和測試概率。10CFR26.31(d)(2)(vii)中規定須 確保用於隨機抽樣選擇個體的抽樣過程規定,每年進行 的隨機抽樣測試的數量,至少相當於在 FFD 計劃的人員 數量的 50%。檢查藥品項目(10CFR26.31(b))主要是 5 類:(1)大麻(marijuana metabolite),(2)可卡因代謝物 (cocaine metabolite),(3)阿片類藥物(opiates)(可待因 (codeine),嗎啡(morphine),6-乙酰嗎啡(6acetylmorphine)),(4)安非他命(amphetamines)(安非他 命(amphetamines),甲基苯丙胺(methamphetamine)),(5) 苯環利定(phencyclidine),其他藥物檢測則是依據執法機 關及醫院所建議的,如美國 DEA(毒品管制局)[6]所列出 I-V 類的藥物及其詳細的毒品名。

藥品的測試規定(見於 10CFR26.163)[7],如果測試 者超過初始測試標準值得 50%或更多,則需進行確認測 試,如果超出確認標準值,則是判定為違反規定。表 1 與表2分別是初始測試之標準值(Initial Test Cutoff Levels) 與確認測試標準值(Confirmatory Test Cutoff Levels)。

### 表 1 INITIAL TEST CUTOFF LEVELS FOR DRUGS AND DRUG METABOLITES

Drug or metabolites	Cutoff level [nanograms (ng)/mL]
Marijuana metabolites	50
Cocaine metabolites	300
Opiate metabolites	2000
Phencyclidine (PCP)	25
Amphetamines	1000

### 表 2 CONFIRMATORY TEST CUTOFF LEVELS FOR DRUGS AND DRUG METABOLITES

Drug or metabolites	Cutoff level (ng/mL)
Marijuana metabolite <sup>1</sup>	15
Cocaine metabolite <sup>2</sup>	150
Opiates: Morphine Codeine 6-acetylmorphine <sup>3</sup>	2000 2000 10
Phencyclidine (PCP)	25
Amphetamines: Amphetamine Methamphetamine <sup>4</sup>	500 500

<sup>1</sup>As delta-9-tetrahydrocannabinol-9-carboxylic acid.

<sup>2</sup>As benzoylecgonine.

<sup>3</sup>Test for 6–AM when the confirmatory test shows a morphine concentration exceeding 2000 ng/mL.

<sup>4</sup>Specimen must also contain amphetamine at a concentration equal to or greater than 200 ng/mL.

酒精的測試規定(10CFR26.103),如果初始測試顯 示 BAC 為 0.02%或更高,則必須進行酒精確認測試, 其測試與時間關係如表 3。

	表	3	酒精測試規定	
--	---	---	--------	--

測試與管理	BAC 結果	測試結果判定
初始測試		
(Initial Test)		
	<0.02%	合於規定
		(negative test
		results)
	>=0.02%	進行確認測試
確認測試		
(Confirmatory		
Test)		
	>=0.04%	違反規定
		(positive test
		results)
	>=0.03%	在初始測試前
		已工作1小時,
		違反規定
	>=0.02%	在初始测试前
		已工作2小時,
		違反規定
管理人員作為		
	0.02%>BAC>0.	雖在初始測試
	01%	前已工作 3 小
		時,合於規定,
		且不處罰,但必
		須诵報 FFD 答
		理人員,日山
		FFD 來法定是
		不通於任務的
		口题水江防的
		兀戍

違反規定的處罰,敘述於10CFR26 之D章節26.75, 將其簡要整理:對於藥檢測試發現違反規定,將會因為 是否累犯,接受的處罰有所不同:第一次違反;14 天停 權;第二次違反5年停權;第三次違反就永久停權。但 是如果是在保護區內違犯規定,則至少是5年的停權。 文獻[8-10]是美國 NRC 進行 FFD 方案時,藥檢的報告。

### 3.1.6 疲勞管理 (Managing Fatigue)

10 CFR 26 Subpart I 是疲勞管理,相關的法規可以 參考:

- (1) NEI , NEI 06-11 , Managing Personnel Fatigue at Nuclear Power Reactor Sites[11]
- (2) NRC Regulatory Guide 5.73 , FATIGUE MANAGEMENT FORNUCLEAR POWER PLANT PERSONNEL[12]

疲勞被定義為由於休息不足導致的人的認知和運動功能的退化[13]。急性疲勞(Acute Fatigue)是指過去 24 小時內發生的原因造成的疲勞,例如睡眠受限,持續的 清醒和任務需求。累積疲勞(Cumulative Fatigue)意味著 由於休息不足導致的連續睡眠 - 覺醒期間的疲勞增加。 由於工作表現不佳是疲勞造成,因而最簡單的解決方式 是休息。此部分只適用於運轉中的核能電廠,適用於可 以無需陪伴之出入通行者,及跟緊急整備計畫中需匯報 給緊急應變技術支援中心(Technical Support Center) 或 緊急操作設施(Emergency Operations Facility)的所有人 員,包含工作小時控制(10CFR26.205)適用於維護(僅 限風險)、營運(僅限風險重大)、化學(僅限緊急應變)、 保建物理(僅限緊急應變準備)、消防隊(負責了解火災 和抑製劑對安全停機能力影響的人員)、安全部隊(武裝) 及主管風險重大維護或運營的個人。上述人員之工作小 時規定如表4,間隔休息時間則必須大於10小時,不 大於10小時者,需要排程作業人員注意,並在9天工 作時間內,需要有34小時的休息時間。

表 4 工作小時

Time frame	Limits on hours of work
24 hours	16 hours
48 hours	26 hours
7days	72 hours

以上的規定會因為電廠載運轉或是大修而不同,班 表之期間不同如 8、10 或 12 小時的連續工作期間,還 有就是工作內容如維護、運轉、保建物理、化學、消防 員保安等不同而有所不同。表 5 列出休假日的規定,表 6 是大修期間的規定。除了工作小時的規定,疲勞管理 包括如疲勞評估 (Fatigue Assessments)及其訓練,報告 及稽查(Audits)。

表5工作期間、工作內容與休假日之關係

	Shift Cycle	Days off per week*
(i)	8 hr	1
(ii)	10 hr	2
(iv)	12 hr maintenance	2
(iii)	12 hr operations	2.5
(v)	12 hr security	3

表 6	大修期	間最少	休假日	3規定
-----	-----	-----	-----	-----

Group	Days off*
Maintenance 26.4(a)(4)	1 in 7
Operations 26.4(a)(1)	3 in 15
Security 26.4(a)(5)	4 in 15

\* 這期間是接續而非滾動,可以適用於 8、10、或 12 小時班別,仍須 滿足9天內達 34 小時的休息。

### 2.2 台灣有關適職、隱私權及相關規定

適職方案主要是藥檢及酒測,與疲勞管理,而藥檢 及酒測與人權相關,因此本節將台灣藥檢及酒測、疲勞 管理與個人資料保護法等相關規定,整理討論與核電廠 FFD方案執行上的相關資料。目前找到資料如表7。

表7 台灣法規與藥檢及酒測	、疲劳管理與個人資料保護	
---------------	--------------	--

法規	藥檢酒測/疲勞管
	理/個人資料保護
涉及國家安全或重大利益公務	藥檢酒測/個人資
人員特殊查核辦法	料保護
個人資料保護法	個人資料保護
採驗尿液實施辦法	藥檢-毒品危害防
	制条例
特定人員尿液採驗辦法	藥檢
航空器飛航作業管理規則	藥檢、酒測、疲勞
	管理
職業安全衛生法中無酒精檢驗規	酒測

定;但高架作業勞工保護措施標準	
有	
道路交通管理處罰條例	酒測
汽車運輸業管理規則	酒測
鐵路行車規則	酒測
勞動基準法	疲勞管理
毒品危害防制條例	毒品的種類範圍
核子反應器運轉人員執照管理辨	藥檢及酒測
法	

#### 2.2.1 個人資料保護

由於酒測及藥檢可能觸及個人隱私部分,受到個人 資料保護法的保護,個人資料包含健康檢查...等資料, 不得搜集處理或利用,但第六條規定,有以下情形者, 不在此限,而第一項就是有法律明文規定者,不在此限。 因此"涉及國家安全或重大利益公務人員特殊查核辦法" 及"特定人員尿液採驗辦法",可屬法律規定者。"涉及國 家安全或重大利益公務人員特殊查核辦法",其適用人員 有附表列出,其中雖有原能會並無台灣電力公司,而"特 定人員尿液採驗辦法",其特定人員有附表,其中第五項、 經濟部之"(一)台電公司發電、輸電、變電、配電之裝修、 運轉、操作及電力調度等工作人員"。...(三)經濟部所屬 各機關、機構負責鍋爐、煉爐、高壓氣密設備、有毒工 業原料及氣體、點焊、輻射機具、檢疫、重要車輛駕駛 及其他涉及公共安全工作人員。(四)前三款業務涉及之 承包廠商實際進廠或操作之僱用人員。第六項交通部 包含陸運、空運、及海運駕駛人員...,而第一項內政部, 警察人員保安警察部分,只有"(六)執行中央憲政機關首 長安全警衛任務維護工作之警察人員",並無核能電廠保 安警察為特定人員之條款。核能電廠屬於"台電公司發電、 輸電、變電、配電之裝修、運轉、操作及電力調度等工 作人員",包含台電人員及其承包商,而範圍除了發電等 外,涉及公共安全工作人員,也包括。因此核能電廠除 役後,無法分類為發電、運轉、操作,但可能以涉及公 共安全工作人員,來歸類。而「核子反應器運轉人員執 照管理辦法」第27條運轉人員執勤時,應接受酒精及毒 品抽測。因此運轉人員有明確之法律依據。"採驗尿液實 施辦法",是依附在"毒品危害防制條例",非一般工作人 員。核能電廠除役期間,將在發電範圍外不適用發電工 作人員,其適用範圍可依據"特定人員尿液採驗辦法"之 經濟部"涉及公共安全工作人員",範圍包括台電人員及 包含其承包商。除役期間,運轉人員執照,可能由持有 核子燃料操作證照人員(Certified fuel handler)負責燃料 之吊送及緊急應變之處理,因此如有相關證照規定,需 納入藥檢及酒測之規定。

#### 2.2.2 酒測與藥檢

台灣"航空器飛航作業管理規則"第 199 條有明確 規定【民航局得以定期或不定期方式對前項飛航作業 人員實施麻醉藥物及酒精檢測。麻醉藥物及酒精檢測 檢查標準如下:

一、麻醉藥物檢測:尿液樣本反應呈陰性。

二、酒精濃度檢測:血液中酒精濃度不得超過百分之 零點零二或吐氣中酒精濃度不得超過每公升零點
<u>一毫克</u>。】

依照特定人員尿液採驗辦法,主管機關每年應對 所屬或監督之特定人員實施不定期檢驗,必要時得另 實施受僱檢驗、懷疑檢驗、意外檢驗、入伍檢驗、復 學檢驗或在監(院、所、校)檢驗。前項檢驗以隨機 檢驗之方式辦理者,其抽檢率每年應達百分之二十五 以上。但連續兩年之陽性檢出率均低於百分之一時,

其抽檢率可**降低至百分之十**。

藥物檢測種類,將依照毒品危害防制條例,將分4 類:毒品依其成癮性、濫用性及對社會危害性分為四 級,其品項如下:

- 第一級海洛因、嗎啡、鴉片、古柯鹼及其相類製品。
- (2) 第二級罌粟、古柯、大麻、安非他命、配西汀、潘 他唑新及其相類製品。
- (3) 第三級西可巴比妥、異戊巴比妥、納洛芬及其相類 製品。
- (4) 第四級二丙烯基巴比妥、阿普唑他及其相類製品。

#### 2.2.3 疲勞管理

台灣主要是依據勞動基準法,來進行規定。基本 上依照勞動基準法之規定,將可以避免其人員傷害或 意外事故。

依照勞動基準法第34條規定:勞工工作採輪班制 者,其工作班次,每週更換一次。但經勞工同意者不 在此限。依前項更換班次時,至少應有連續十一小時 之休息時間。但因工作特性或特殊原因,經中央目的 事業主管機關商請中央主管機關公告者,得變更休息 時間不少於連續八小時。

依照勞動基準法第35條規定:勞工繼續工作四小時,至少應有三十分鐘之休息。但實行輪班制或其工 作有連續性或緊急性者,雇主得在工作時間內,另行 調配其休息時間。

依照勞動基準法第36條規定:勞工每七日中應有 二日之休息,其中一日為例假,一日為休息日。雇主 有下列情形之一,不受前項規定之限制:一、依第三 十條第二項規定變更正常工作時間者,勞工每七日中 至少應有一日之例假,每二週內之例假及休息日至少 應有四日。二、依第三十條第三項規定變更正常工作 時間者,勞工每七日中至少應有一日之例假,每八週 內之例假及休息日至少應有十六日。三、依第三十條 之一規定變更正常工作時間者,勞工每二週內至少應 有二日之例假,每四週內之例假及休息日至少應有八 日。

航空飛航組員除依照勞動基準法以外,因為國際 線飛行時間較長,及出任務的場所(機場位置)不是固 定,因此有許多規定保障飛航組員休息時間,以免疲 勞。

#### 2.2.4與美國NRC規定與台灣相關法規之比較

與美國NRC在藥檢與酒測相關法規相較,由於台灣 藥物使用管制很嚴,因此看出來台灣在藥物檢測的規定 屬於較為寬鬆,如藥物抽檢比例是規定FFD計畫中人員 的50%,而特定人員尿液採驗辦法則是判定為特定人員 之25%,且可以調降至10%。而酒精檢測,美國NRC規定 是吐氣超過百分之0.02,需進行酒精確認,台灣航空器 操作人員則是吐氣百分之0.1,交通處罰百分之0.15,顯 示台灣管制較為嚴格,應該是國人對於酒醉肇事之容忍 度較小。比較顯示美國NRC的規定較為細密,可以提供 國內執法時之參考。

在疲勞管理方面,工時控制、班次中的休息時間及 休息日的天數的規定是為了員工在進行工作時,不致因 為疲勞而發生人員傷害或事故,航空器飛航組員的規定 較微細密,因為其任務特殊。原則上可以依照台灣勞動 基準法進行管制,如有特殊需求再做詳細的規定。

#### 2.3 其他國家FFD 相關規定

對於FFD的規定,藥檢及酒測牽涉到隱私權,而疲 勞則是勞工工作工時,所以多數國家並無特別針對核能 電廠之規定,而是有工作場所之討論與規定[14-16],或 核能電廠的藥檢測試報告[17]。IAEA僅有在報告提及, 未有詳盡的的說明。芬蘭在核子保安有規定藥檢及酒測, 加拿大針對適職方案中的藥檢及酒精、疲勞管理及保安 則有專責法規給核能電廠遵守,對於除役中電廠並無特 定規範。

# 2.3.1 IAEA

IAEA的導則對於適職性的解讀不多,以下針對數個 導則的內容說明:

- Regulatory Inspection of Nuclear Facilities and Enforcement by the Regulatory Body, GSG-13
   --說明實體防護的Inspection -FFD 及其效率 [18]
- (2) Review and Assessment of Nuclear Facilities by the Regulatory Body, GSG1.2
   --Guidelines on fitness for duty in relation to hours of work, health and substance abuse[19]
- (3) The Operating Organization for Nuclear Power Plants , NS-G-2.4[20]

--制訂規定-FFD 之藥物及酒精

(4) Recruitment, Qualification and Training of Personnel for Nuclear Power Plants, NS-G-2.8 [21]
--濫用藥物及酒精者不可以從事安全相關工作

# 2.3.2 芬蘭及歐洲

芬蘭在核子保安規定中[22],為了確保核設施的安 全,在核設施工作的任何人或在安全組織成員的要求下, 有義務進行測試以檢測酒精或其他任何毒品。

而歐洲其他多數國家多遵守個人隱私權保護 (European Convention on Human Rights (ECHR)),原則上 在保護其他人的權力及自由下的實施工作場所藥物檢 測,是遵守European Workplace Drug Testing Society (EWDTS)之European Guidelines for Workplace Drug Testing in Urine 2015-11-01 Version 2.0[16]的規定。網路 上有找到英國核電廠的報告: Drug and alcohol tests for staff working at nuclear power stations (2016)[17]提到 Sellafield Limited - 酒測及藥檢的陽性結果: Alcohol - 1 人, Benzodiazepines - 1人, Cocaine - 5人, Cannabis - 5 人, Norbuprenorphine & Monoacetylmorphine - 1人, Cocaine, MDMA & Cannabis - 1人

#### 2.3.3 加拿大

加拿大針對FFD提出REGDOC-2.2.4適職方案,有3 卷:第1卷:疲勞管理[23];第2卷:藥檢及酒測[24];第 3卷:核子保安人員醫療,生理和心理健康[25]。 分別敘述如下:

# 2.3.2.1 Human Performance Management Fitness for Duty: Managing Worker Fatigue

加拿大也認為工作時間表是管理疲勞的重要因素, 因為它們為睡眠的時間和持續時間設定了界限。影響疲 勞的工作時間表的關鍵方面是夜間工作,延長輪班,連 續輪班的數量以及輪班之間的休假。即使遵守工作時間 的限制,工人也可能感到疲憊。由於工作和工作之外的 因素會影響疲勞,因此工人與雇主共同負責管理疲勞。 疲勞管理的工作時數與休息恢復的規定。與美國NRC相 較,是一致的。

# 2.3.2.2 Human Performance Management Fitness for Duty: Managing Alcohol and Drug Use

加拿大認為酒測與藥檢是核子保安重要的項目,加 拿大核子保安條例中第38 條要求"每個被許可人應制定 監督意識計劃並持續實施,以確保其主管接受培訓,以 識別可能對安全構成風險的所有人員(包括承包商)的 行為變化。採取監測酒精和藥物使用或濫用的措施是確 保員工適應職責的關鍵組成部分。核能電廠應建立,實 施和維護一個流程,以識別和管理具有臨時或持續限制 員工酒精或藥物使用或濫用,以免無法勝任和安全地履 行其指定的職責。該流程應包括主管在其認為時採取的 行動 - 通過自我報告,同伴報告,觀察到的行為,身體 狀況,適合職業的篩選或評估,健康專業人員的報告或 在收到可靠信息後 - 由於酒精或吸毒或濫用,員工可能 無法勝任並安全履行其指定的職責。

監管的職位分為安全關鍵和安全敏感的職位,安全 關鍵職位應包括:(1)根據第I類核設施規則第9(2)條需 要核發認證的員工,不包括經認證的輻射防護人員(2)現 場核反應部隊(NRF)成員。安全敏感的職位應包括: (1)經過認證的輻射防護人員(2)保安人員:包含核保安 人員(NSO)和指定的非NRF人員(3)緊急應變小組(ERT) /消防隊。

藥檢及酒測是安全關鍵職位人員就職前必須完成 (預配置)。所有處於安全關鍵或安全敏感位置的員工,如 觀察到行為或其他可能因素下,可以在合理的環境下要 求測試(合理的理由);而這些員工事故後提交原因測試 之酒精和藥物測試(事故原因);在確認濫用藥物或依賴 性問題後,提交後續檢測(確認之後續檢測);並要求所有 持有安全關鍵職位的員工提交隨機酒精和藥物測試(隨 機)。被許可人的抽樣過程用於選擇這些員工進行隨機測 試,應確保至少每12個月進行一次的隨機測試數量至少 相當於適用員工人口的25%。

2.3.2.3 Human Performance Management Fitness for Duty: Nuclear Security Officer Medical, Physical and Psychological Fitness 加拿大為了確保核子保安人員 (Nuclear Security Officer, NSO)的醫療,身體和心理健康,而訂定的法 規。核子保安條例中有規定,需有足夠數量的核子保安 人員,以使被許可人在許可活動的設施中能夠遵守規定 並執行以下:

- (a) 控制人員,物資和陸地車輛的移動;
- (b)對人員,物資和陸地車輛進行搜索,以查找武器, 爆炸性物質以及核材料;
- (c)在設施和保護區的外圍進行預防性的步行和地面 車輛巡邏,以檢查是否違反安全規定和漏洞;
- (d) 應變並評估警報事件;
- (e) 逮捕並拘留無武裝的入侵者;
- (f) 觀察並報告武裝入侵者的行動; 和
- (g)操作保安設備和系統。 本法規規定在授權某人擔任NSO之前,被許可人應 從該人獲得醫療,身體和心理證明。
- (1)醫學評估:應包括醫學檢查,視力測試和聽力測試。 NSO至少應每兩年接受一次所描述的醫學評估。
- (2) 體能測試:應為運動,本體感覺和靈活性三個平面的靜態平衡,經CNSC批准的NSO體能測試或同等標準,包括搜索站、快走站、爬樓梯站以及抬起/搬運站等測試。NSO應每十二個月進行一次身體健康測試。
- (3) 心理證明:心理評估應包括訪談和測驗。合格的心 理學家應確定在評估中使用的訪談和測驗。

# 2.3.4日本

依據2015年2月8日輻射應變醫學網路會議認可『基於健康檢查結果的適職性評價和工作限制導則』。日本 (FFD)管理的五個條件。它們是

- (1) 確認所有工人定期接受健康檢查;
- (2)確認所有需要經過健康檢查推薦的治療或進一步 檢查的工作人員到醫療機構;
- (3) 確認所有需要治療的工人至少在NPP工作時繼續 接受必要的治療;
- (4)根據定期健康檢查的結果,將根據需要對病情進行工作限制或調整;
- (5) 定期審查和修訂工作限制或住宿的內容。

#### 2.4 除役中電廠的特性及FFD之規定考量

除役中的電廠其風險降低, 由於核子燃料不在運轉,所以如果用過核子燃料移出反應器,進入用過燃料 池或乾式貯存設施,其風險性降低。美國NRC建議在除 役期間使用針對某些技術領域的分級方法提供有效的 監管框架。

## 2.4.1 除役期間分級

美國NRC將除役期間放射性風險降低的程度分為 四級:

- 永久停止運轉和從反應器容器中移除所有用過核 子燃料。
- (2) SFP中的用過核子燃料充分衰變,使其無法在絕熱 加熱條件下10小時內達到點火的溫度。
- (3) 將所有用過核子燃料轉移到乾式儲存設施。

(4) 從廠址移除所有用過核子燃料。

但這種分法,與台灣電廠的現況不符合,因為目前 除役的核一廠,仍有用過燃料擺放在爐心,與美國第一 級階段不同,可以多設一級,第零級。但由於已經停機 超過10個月,因此當燃料移出爐心,可能是跳過第一級, 直接進入第二級階段。

# 2.4.2 FFD-藥檢及酒測

美國在考量除役中電廠之FFD時,主要是因為美國 適職方案的法規10CFR26 對於除役中的電廠,不同的法 規有不同的適用性,美國申請運轉執照可以依據10 CFR50.57 『運轉執照頒發』授權經營核能發電反應器的 持照人,或根據10 CFR52 『核電廠的許可證,認證和批 准』所頒發建造運轉之綜合執照(combined license to construct and operate, COL)。10CFR26的規定適用於以 10 CFR50.57 『運轉執照頒發』授權經營核能發電反應器 的持照人,但不適用於該反應器之除役持照人;根據10 CFR52 『核電廠的許可證,認證和批准』所頒發建造運 轉之綜合執照(combined license to construct and operate, COL),則適用於其除役的期間。為此,NRC提出一些解 決方案。

雖然有以上的不一致,不論是以10CFR50或 10CFR52之許可執照持有人,都必須確認實體防護對於 設計基準威脅(Design Basis Threat, DBT),根據實體防 護之內部緩解方案(Insider Mitigation Program, IMP)的 論點,可依據10 CFR 73.55 (b)(9),不論是以10CFR50 或10CFR52之許可執照持有人皆必須建立、維護和實施 IMP,且適用於前述之持照人;因此美國目前之除役持 照人均遵守10 CFR26要求。但是10 CFR 73.55 (b) ii(B) 要求持照人必須納入FFD方案。10 CFR 73.55 (b)(9) 條文如下:

"10 CFR 73.55 (b) (9) The licensee shall establish , maintain , and implement an insider mitigation program and shall describe the program in the Physical Security Plan..... (ii) The insider mitigation program must contain elements from:

- (A) The access authorization program described in § 73.56;
- (B) The fitness-for-duty program described in part 26 of this chapter;
- (C) The cyber security program described in § 73.54; and
- (D) The physical protection program described in this section. "

但是,10 CFR 73.55 (b) (9)沒有具體說明這些要素 是什麼。持照人IMP的目的是幫助確保持照人的保護區 (protected area, PA)或緊要區 (vital area, VA)的 無人陪同進出授權 (unescorted access authorization, UAA)或無人陪同進出 (unescorted access, UA)的個 人仍然值得信賴和可靠,並且不會對設施造成威脅。 NRC認知到IMP要求,包括10 CFR 26方案的適當要素, 適用於所有向PA或VA授予UAA或UA的人員。尤其運轉 中電廠有許多操作設施,需要保護。但是,除役中電廠 與運轉中電廠營運設施相關的風險相較,除役設施相關 的風險顯著降低。因此上述的IMP要求,應該有所修正。 除役中電廠其用過核子燃料池及其安全系統成為持照 人防禦DBT保安任務的主要焦點,因為當核動力反應器 不再運轉時,大多數原來的設限的安全目標已不需要。 因此,NRC打算通過建立一套適當的FFD條款來澄清10 CFR 73 (b)(9)合併納入IMP法規敘述,以便向PA或VA 授予UAA或UA保證個人是值得信賴和可靠的(部分是 通過避免藥物濫用來證明)。除了工作人員,保安人員部 分,NRC指出,10CFR73附錄B(第I.B.1.b.(4)節)包 含解決保安人員吸毒成癮問題的要求。同一附錄的第 IB2.a節要求保安人員『展現精神警覺和做出良好判斷能 力』。雖然沒有特別用作法規制定的依據,但繼續進行藥 物和酒精檢測,將支持持照人繼續遵守10 CFR73附錄B 的規定。

NRC 決定將做兩種可能的立法,第一種是不採取 作為,第二種要求適用於功率反應器IMP的FDD要素。

#### 2.4.2.1第一種 不採取作為

不採取行動的替代方案不會解決在除役期間,10 CFR26對10 CFR 50和10 CFR 52持照人適用範圍不一致 的問題。這個替代方案對10 CFR26 FFD適當要素併入持 照人的IMP也不會澄清。根據10 CFR 73.55(b)(9)(ii) (B)的要求,持照人將繼續界定其10 CFR 26方案中 的那些要素包含在其IMP中。NRC觀察到,最近除役的 反應器持照人通常繼續實施10 CFR26除I(疲勞管理)和 K(建造)外的所有子部分要素。

#### 2.4.2.2第二種要求適用於功率反應器IMP的FFD要素

此方案將提出法規制定,以修訂10CFR 26.3,以改 正除役期間10 CFR26在10 CFR50和10 CFR52的適用不 一致的問題。這將確保對處於類似位置的核動力反應器 設施的處理方式相同。法規制定還將澄清支持持照人 IMP的10 CFR26的FFD要素。該澄清將適用於10 CFR50 和10 CFR52設施,但在10 CFR50反應器設施除役期間變 得尤為重要,因為10 CFR 26 FFD方案要求目前不適用 於這些設施。此外,NRC將要求所有核子動力反應器持 照者根據10 CFR 73.55 (b) (9)(ii)(B)的規定,實施相同 的FFD方案要素以支持其IMP。擬議的法規將重點關注 10CFR26要素 對具有保安相關職責或在持照人廠址例 行無人陪同進出SFP區域的個人的適用性。這方案可讓 內部人員在除役廠址影響放射性破壞的可能性降低,以 及用過核子燃料造成的危害降低。這些變化將確保在整 個核能電廠中始終如一地實施FFD方案要素,以保證合 理保證反應器廠址的個人,特別是除役廠址的個人仍然 值得信賴和可靠。由於除役中電廠風險及標的減少,因 此在除役時間範圍內滿足IMP要求的FFD元素的個體數 量將會減少。NRC 的工作人員建議採取第二方案。

## 2.4.3 疲勞管理

與3.4.1節相同,現行,有關"聯邦法規"(10 CFR 26)法案"項目10"適職方案"I"管理疲勞" 部分的 要求適用於根據10 CFR 52,"核電廠的許可執照,認證 和批准"的10 CFR 50之所有國內生產和使用設施"許 可執照"持照人,及被"授權經營核電廠和所有複合許 可執照持有人(COL),在委員會成立之後則見諸 CFR 52.103(g)。10 CFR 26 主要是建立員工免於藥物和酒精 的而致造成障礙的預防及檢查要求,但仍然有其他原因 會造成障礙,其中疲勞管理就是解決之方案之一。

NRC在10 CFR 26中增加了章節1 "疲勞管理",在 整體FFD方案範圍內,持照人依據I章節之要求需提供, 弭補疲勞降低個人對安全警覺性和履行職責的能力,與 維護公共健康和安全相稱合理保證,疲勞管理規定還減 少了保安人員疲勞對共同防禦和安全產生不利影響的 可能性,但,該項的法規制定範圍並未考慮到除役的動 力反應器。

10CFR26章節I的範圍確保執行與保護公共健康和 安全或共同防禦和保安具有顯著職責的人員適當的工 時控制,包括負責重大風險運轉作業或維護工作的人員; 對應變很重要負責保健物理、化學和消防隊工作的人員, 對維護設施的保安至關重要保安人員。NRC人員意識到, 在永久停止運轉並從反應容器中移除燃料的核子動力 反應器,可能發生的事故的頻譜明顯較小,且放射性釋 出廠外的風險也顯著低於運轉中的反應器,與運轉中反 應器相比,除役中電廠顯然減少或減除了需要複雜和快 速應變的問題,這主要是源於除役電廠可能性事故的演 進相當緩慢的原因,也因而可能減少了,除役反應器在 保護公共健康、安全、共同防禦及保安上的工作與數量。 即使如此,除役反應器內維持兩組人員的功能有可能對 保護公共健康、安全或共同防禦與保安仍具有重要意義: 保安人員和經認證的燃料操作人員 (Chief Fuel Handlers, CFHs)。當設施進入除役狀態時,持照人會對設施的保 安計劃進行許多更改,計劃主要更動是在,除役反應器 中必須保護的目標組的數量明顯少於運轉中的反應器, 雖然標的集大幅減少,但保安人員仍必須同樣類似如運 轉中反應器,作出應對設計基準威脅足夠的應變。除役 反應器繼續使用深度防禦概念(例如,車輛障礙物,入 侵偵測,安保人員武裝等)以確保該設施免受外部威脅, 當對保安計劃更改時,美國NRC會審查並確定這些更改 是否也象徵降低保防措施的有效性,如果設施保安計劃 的更改涵蓋保防有效性的降低,則美國NRC必須求證計 劃的更改。

一旦持照人過渡到除役,廠區管理代表就會從有照 的運轉人員替換為CFH,負責監督、指導照射過核燃料 的監測,存儲,操作和冷卻作業,其方式需確保公共健 康和安全,這些人也負責制定緊急行動級別宣告,是否 能成功完成除役設施中CFH應具備的認知和行為,取決 於這些人員是否有能力保持警戒,分析問題,準確決策, 並如一個團隊般的有效溝通和工作。

對於保安人員,根據美國核管會於2003年4月29日 頒佈的命令(編號EA-03-038),主題為『強化適用於核能 設施保安部隊人員有關適職補救措施』該命令附件2(補 救措施):要求經營核動力反應器持照者應遵守以下CM, 以確保部分核設施保安人員在疲勞狀態下不被分配到 值班,這可能會降低他們的警覺性或執行識別和迅速應 變核能電廠保安威脅所需的功能的能力。工作時間控制 適用於履行下列職能的人員:保安部隊的武裝人員、中 央警報站操作員、輔助警報站操作員、保安值班監督員 和監督員。

對於疲勞管理,NRC 提出3個方案(1)不採取行動, (2)業者對疲勞管理的自願性倡議,以及(3)以法規制定方 式規範對除役動力反應器的適職方案(FFD)疲勞管理 作要求。

#### 2.4.3.1第一種 不採取行動

不採取行動的選擇將保留現行法規的適職方案FFD 條款,根據10 CFR 50,10 CFR 26第I章節所包含的疲勞 管理條文將繼續不適用於除役許可執照持有人,然而, 在NRC委員會根據10 CFR 52.103 (g)作出釋義後,規 定條文將繼續適用於10 CFR 52的複合執照COL持有人, 這種不一致性在管制基準的附錄D"藥物和酒精測試" 中得到了解決。

#### 2.4.3.2第二種 產業自發性疲勞管理倡議

在此選項中,NRC人員將考慮產業此類的自發性倡 議,如NEI 15-08[26]提出的內容其中包括產業給除役設 施持照人的建議指引,該指南是以GL 82-12為基準,對 一些工作時間規則進行了具體更改,這些更改對應了10 CFR 26第I章節中放寬總體計劃的要求,NEI提出的指引 方針適用於指定執行保安工作職責相關人員,但沒對 CFH有所著墨,在2008年最終版法規中,NRC結論認為, 除限制保安人員工作時間的命令外,前GL 82-12管制框 架尚未對解決其他工作人員的疲勞管理一起生效或一 體適用,此外,NRC表示,以GL 82-12為基礎的管制框 架在有效的疲勞管理上的要求並不充分也不完整的, 2008年最終版法規的制定發展得出的結果主要聚焦在 運轉中反應器,如果採用此選項,則需進一步深入分析 GL 82-12和NEI 15-08在除役持照人管理疲勞方面充分 性。

# 2.4.3.3第三種法規制定,以便規範除役動力反應器的適 職疲勞管理的要求

在這個選項中,採用一套分級的FFD方案要素來支 持在反應器運轉期間和除役期間都適用的持照人IMP。 NRC將尋求以法規制定方式,規範新的除役動力反應器 疲勞管理要求,NRC將根據10CFR50和10CFR 52,修訂 10CFR 26,以適用於除役反應器的保安人員和CFH。

NRC人員建議採取(選項1) 無行動,將10 CFR 26 第I部分(疲勞管理)的適用範圍直接擴展到除役許可執 照持有人。

#### 2.4.4 除役反應器申請豁免

在2013年和2014年進入除役的五個反應器中,有兩 個反應器廠區(Crystal River核能電廠和Vermont Yankee 核能電廠)就根據10 CFR 50.54 (p)更改了他們的實體 保安計畫,取消原來依照10 CFR 26第I章節(疲勞管理)的 要求,這些廠區選擇用比較不太嚴格的方案取代他們的 疲勞管理計畫,管理保安人員,NRC審視了這些廠區保 安計畫的變更,並同意這些計畫。

### 2.4.5 小結

除役中電廠,其原運轉中電廠之適職性規定應該適 用,因為這是確保核設施安全及核子保安。但因為由於 除役中電廠風險降低,可以依照除役中的環境做適當變 更。

# III. 結果與討論

本研究討論各國管制要求及除役中的電廠與運轉 中電廠的不同,參考美國 NRC 將除役期間放射性風險 降低的程度分為四級加上台灣現況為五級:

- (0) 永久停止運轉尚未從反應器容器中移除所有用過核 子燃料。
- 永久停止運轉和從反應器容器中移除所有用過核子 燃料。
- (2) SFP 中的用過核子燃料充分衰變,使其無法在絕熱 加熱條件下10小時內達到點火的溫度。
- (3) 將所有用過核子燃料轉移到乾式儲存設施。
- (4) 從廠址移除所有用過核子燃料。

可以看出除役中的電廠,由於用過核子燃料狀態 (冷卻時間)或是位置(乾貯)等,而會有不同的風險 考量。

依照適職性的意義,是為了確保人員提供核安及核 子保安的保證。因此除役中的電廠工作人員,遵守適職 性的相關規定,才能有效達成任務,同時達到核安及核 子保安。但是除役中的電廠爐心不再運轉,運轉員或其 他人員對於核設施操作減少或無,核安全風險降低,人 員適職性在核子保安的重要性相對增加。因此除役中電 廠適職性之考量,可以依照根據實體防護之內部緩解方 案(Insider Mitigation Program, IMP)的論點,建立、維 護和實施 IMP,納入適職性 FFD 方案。IMP 的目的是幫 助確保持照人的保護區 (protected area, PA) 或緊要區 (vital area, VA)的無人陪同進出授權 (unescorted access authorization, UAA)或無人陪同進出(unescorted access, UA)的個人仍然值得信賴和可靠,並且不會對 設施造成威脅。 NRC 認知到 IMP 要求,包括 10 CFR 26 方案的適當要素,適用於所有向 PA 或 VA 授予 UAA 或 UA 的人員。除役期間,用過核子燃料的狀態及位置 是重要考量因素,對具有保安相關職責或在持照人廠址 例行無人陪同進出用過核子燃料(SFP)區域的個人的適 用性。可以降低內部人員在除役廠址影響放射性破壞, 以及降低用過核子燃料造成的危害。依照環境特性,實 施 FFD 方案要素,可以保證反應器廠址的個人,特別是 除役廠址的個人仍然值得信賴和可靠。由於除役中電廠 風險及標的減少,因此在除役時間範圍內滿足 IMP 要求 的 FFD 元素的個體數量也將會減少。

台灣法規訂定沒有像美國 NRC 如此詳盡,但是搜 尋其他國家發現,除加拿大外,IAEA 的規定也是僅概 念式的描述。對於藥檢及酒測,歐洲雖然有在進行,但 是因為牽涉到人權及隱私權,其報告多無法得到全貌, 目前是以工作場所需求而制定規定。台灣個人資料保護 法雖有保護,但是對於可能危害公共安全的人員,是有 法律可以要求藥檢及酒測。在疲勞管理面,台灣可以依 據勞動基準法,其他各國也是依照相關勞工的工作規定, 來管理疲勞問題。

# IV. 結論

核能電廠除役階段,核子事故的風險會因用過核子 燃料冷卻時間、貯存方式及位置而有所不同,因此管制 可根據除役階段不同而調整。適職性方案應該以核子保 安之角度,實體防護之內部緩解方案(Insider Mitigation Program, IMP)來建立、維護和實施。台灣除役中的電 廠,適職性方案的藥檢及酒測應該繼續適用,但是適用 的人員及場所,可能因除役過程的需求而有所修正。疲 勞管理部分除核子保安人員及緊急應變人員依照原有 規定,確保人員在疲勞狀態下不被分配到值班,避免降 低他們的警覺性或執行識別和迅速應變核能電廠保安 威脅所需的功能的能力,其他人員則可依照台灣勞動基 準法的規定。

# 參考文獻

- [1] Joe Rivers, Insider Mitigation Program for Nuclear Facilities, 網址 https://www.inmm.org/INMM/media/Documents/Prese nations/Reducing%20the%20Risk/Rivers\_Mitigation.p df,於2019/08/24上網閱讀。
- [2] NRC, "Regulatory Improvements for Power Reactors Transitioning to Decommissioning RIN Number: 3150-AJ59, Regulatory Basis Document" ADAAMS 編號 ML17215A010 (2017)
- [3] NRC, "Regulatory Analysis for Regulatory Basis: Regulatory Improvements for Power Reactors Transitioning to Decommissioning RIN 3150-AJ59" ADAAMS 編號 ML17332A075 (2018)
- [4] NRC, "Regulatory Analysis for the Proposed Rule: Regulatory Improvements for Production and Utilization Facilities Transitioning to Decommissioning RIN 3150-AJ59" ADAAMS 編號 ML18012A024 (2018)
- [5] NEI , "Fitness for Duty Program Guidance for New Nuclear Power Plant Construction Sites" , NEI 06-06 (2009)
- [6] DEA, https://www.dea.gov/drug-scheduling 於 2019/08/24 拜訪。
- [7] NRC, DRAFT REGULATORY GUIDE DG-5040 "URINE SPECIMEN COLLECTION AND TEST RESULT REVIEW UNDER 10 CFR PART 26, FITNESS FOR DUTY PROGRAMS ", ADAAMS 編 號 ML16120A435 (2017)
- [8] NRC, Fitness for Duty in the Nuclear Power Industry Annual Summary of Program Performance Reports CY1994 , NUREG/CR-5758 PNL-10638 BSRC-700/95/005 Vol.5 (1995)
- [9] NRC, Presentation for the Drug Testing Advisory Board, A Direct Contribution to Safety and Security, (2013)
- [10] NRC, Presentation to the Drug Testing Advisory Board (HHS/SAMHSA) Drug Testing at Commercial Nuclear Power Plants and Fuel Facilities, (2018)
- [11] NEI, "Managing Personnel Fatigue at Nuclear Power Reactor Sites", NEI 06-11, ADAAMS 編號 ML16309A163 (2016)
- [12] NRC , Regulatory Guide 5.73 , " FATIGUE MANAGEMENT FORNUCLEAR POWER PLANT PERSONNEL" (2009)

- [13] Thomas J. Balkina, William J. Horreyb, and etc, "The challenges and opportunities of technological approaches to fatigue management", Accident Analysis and Prevention 43 565 – 572 (2011)
- [14] Anya Pierce, "Regulatory aspects of workplace drug testing in Europe" Drug Testing and Analysis, 4, 62-65 (2012)
- [15] European Workplace Drug Testing Society, "European Guidelines for Workplace Drug Testing in Urine", (2015) http://www.ewdts.org/data/uploads/documents/ewdtsurine-guideline-2015-11-01-v2.0.pdf
- [16] Department of Health, Queensland, "Fitness for duty: Alcohol and other drugs Guideline "QH-GDL-440:2017 (2017)
- [17] "Drugs Test Sellafield Nuclear Power Station, Drug & Alcohol Testing Hartlepool Nuclear Power Station" UK contact DATS on 01642 93 網頁 https://www.drugalcoholtesting.co.uk/nuclear.html 2019/08/05 拜訪
- [18] IAEA, "Regulatory Inspection of Nuclear Facilities and Enforcement by the Regulatory Body", GSG-13 (2018)
- [19] IAEA, "Review and Assessment of Nuclear Facilities by the Regulatory Body", GSG1.2 (2002)
- [20] IAEA , "The Operating Organization for Nuclear Power Plants" , NS-G-2.4(2001)
- [21] IAEA , Recruitment , Qualification and Training of Personnel for Nuclear Power Plants , NS-G-2.8(2002)
- [22] Ministry of Trade and Industry, Finland , Nuclear Energy Act, 990/1987; "protection against particular hazards", amendments up to 342/2008 included (2008)
- [23] Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) , Fitness for Duty, Volume I: Managing Worker Fatigue , REGDOC-2.2.4 (2017)
- [24] Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) , Fitness for Duty, Volume II: Managing Alcohol and Drug Use , REGDOC-2.2.4 (2018)
- [25] Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) , Fitness for Duty, Volume III: Nuclear Security Officer Medical, Physical and Psychological Fitness , REGDOC-2.2.4 (2018)
- [26] NEI , "Managing Personnel Fatigue at Decommissioning Reactors", NEI 15-08, ADAAMS 編 號 ML15350A153 (2016)

# 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(I) Centrifuge modeling and numerical simulation on the deformation of structure and pipeline by fault slipping (I)

計畫編號:MOST 108-2623-E-008-001-NU 計畫主持人:洪汶宜 e-mail:wyhung@ncu.edu.tw 計畫參與人員:Dicky Pratama Soegianto、鍾承哲、黃俊學 執行單位:國立中央大學土木工程學系

# 摘要

活動斷層錯動造成的地表永久變位,是鄰近斷層之 結構物與地下基礎需要關注的議題。例如,在1999 年發 生於台灣的集集地震及土耳其的 Kocaeli 地震和 Duzce 地震,這樣的大地震造成生活上嚴重的危害。以上三次 的地震,則讓人們開始不僅僅只注意土壤沉積物本身, 也開始注意斷層破裂帶上鄰近結構物與地下基礎的影 響。此外,自然中的土壤沉積物很難是均勻且均質地, 像是在部分土層底部具有較堅硬質地的土壤,例如軟岩 層。在斷層錯動過程中,剪裂帶通過軟岩層與一般土層 也會引發一連串複雜的交互行為。

本研究以離心模型模擬正斷層與逆斷層在土層底 部為軟岩層錯動時,地表砂土層的互制行為,並進行了 八組試驗。軟岩層之土層材料採用水泥拌合砂土混合而 成的複合土層進行模擬。過程中,運用多組的無圍壓縮 試驗以及直剪試驗,以評估不同水泥比例下之土層強度。 且在試驗前,所有複合土層材料都必須養護七天。當土 層之水泥混合比例為5%水泥,其強度為0.975 MPa,可 模擬軟岩層剛性破壞後之行為。此時,莫爾庫倫破壞準 則之土層摩擦角為43.5 度及凝聚力為148 kPa;上覆土 層為石英矽砂,目標相對密度 80%時土壤乾單位重為 15.6 kN/cm<sup>3</sup>。模型總高為100毫米,相當於在重力場80 g之離心力場中,原型尺度8公尺。

試驗結果顯示:(1)岩層與總土層厚度比,為引發正 斷層與逆斷層錯動剪裂影響範圍的主要因素。以正斷層 錯動為例,隨著岩層厚度的增加,影響區域也增加;在 土層厚度比 30% 時,斷層破裂帶影響範圍最大。(2)從 地盤到土表的破裂傾角是受到上部砂土層厚度影響;亦 表示在正斷層錯動過程,傾角是受岩層厚度之影響。(3) 在逆斷層錯動過程中,穿越砂土層的剪裂帶延伸傾角是 由岩層中斷裂帶傾角所控制。(4)在正斷層錯動過程,當 底部為岩層時,上部砂土層不會產生剪裂帶。

關鍵詞:地工離心機、正斷層、逆斷層、複合土層。

#### Abstract

Permanent ground displacement due to the fault slip is a concern to infrastructures adjacent to the active fault. For instance, severe serious damage happened during the big earthquake like Chi-Chi earthquake in Taiwan and Kocaeli and Duzce in Turkey at 1999. This 4 disasters are the turning point on put more concern on the behavior of the fault slip to either to the soil deposit itself or the building and infrastructure located in the fault affected zone. Furthermore, natural soil deposit is rarely homogeneous and uniform, some part of the soil has higher strength layers, like soft rock stratum, at the bottom of the soil strata, causing some complex behavior while the fault rupture is propagating through both soft rock and soil strata.

In this study, 8 tests, utilizing centrifuge modeling technique to simulates the reverse fault and normal fault condition to observe the mechanism of soft rock layer underneath affect will affect the surface of sandy soil layer. The soft rock layer will be simulated using the mixture of accelerated sand-cement mixture. Uniaxial compression tests and direct shear tests are conducted to evaluate the strength of the different proportion of cement. All the mixture is cured for 7 days before it tested. The 5% cement mixture is selected due to its uniaxial compression strength of 0.975 MPa, which can simulate soft rock and have a brittle mode as the post-failure behavior. The Mohr-Coulomb failure criterion is 43.5 degrees and 148 kPa of friction angle and the cohesion. The upper layer stratum is pluviated quartz sand with 37 degrees of friction angle at it density of 15.6  $kN/m^3$ . The total height of the model is set to 100 mm, which is corresponded to 8 meters in the prototype scale in 80 g centrifugal acceleration field.

Based on the whole experiment results, it show that: (1) the ratio of the rock stratum to the whole soil deposit thickness plays a major role for the length of the affected zone in both reverse fault and normal fault simulation; although, the affected zone for the normal fault reach maximum length when the sandy soil ratio at 30%. (2) The inclination from starting tip position to the end of the crack is affected by the thickness of the sandy soil layer on top for the reverse fault; On the other hand, it is affected by the thickness of rock stratum in normal fault condition. (3) For reverse fault condition, the rupture shear band inclination through the sandy soil is depends on the inclination of the crack propagates in the rock layer. (4) There are no rupture shear band propagates in sandy soil layer in normal fault condition, when there is a rock layer underneath.

**Keywords:** Centrifuge modelling, normal fault, reverse fault, multiple soil strata

# I. 前言

地球是由眾多的板塊拼合成的,而板塊間相互運動 會產生碰撞或推移。在碰撞過程中,蓄積許多能量。當 能量強烈釋放時,將造成地表變形及強烈震動,此變形 錯動即為斷層錯動,強烈震動則稱為地震。而斷層錯動 與地震在臺灣、印尼、和日本等環太平洋板塊地震帶, 所發生機率更高。

然而,斷層錯動的發生我們無法預期,當斷層錯動 發生在近地表或是海床上,將會造成地震危害甚至引發 海嘯。像是發生在 2004 年印尼 Sunda 地震、2011 年日 本 Tohoku 地震、以及 2018 年印尼 Palu 地震都引起了 海嘯,造成危害。另一方面,當斷層錯動發生在隱沒帶 或是島嶼中央,如1999 年臺灣集集地震、土耳其 Kaocaeli 地震及 Dunce 地震、還有 2008 年中國汶川地震;皆對 於地表及地下結構物造成損害。這四次的地震,可說是 地表斷層研究的轉捩點,使這方面研究的更加積極,讓 人員傷亡及破壞降低。

一般我們很難有機會看到真實地層剖面,所以我們 將使用離心模型試驗能模擬與現地應力條件相同狀態, 並透過斷層試驗箱的模擬,能觀察土層材料在斷層活動 過程中的運動行為。因此,本研究的目的是觀察斷層剪 裂帶影響至地表的破壞行為,並研究斷層對複合土層 影響。將進行數次的試驗,以找出正斷層與逆斷層對複 合土層作用與破裂行為。本研究將分析斷層剪裂帶在兩 種不同性質地層中,剪裂帶傾角發展的變化,且這幾組 試驗將觀察斷層剪裂帶對不同比例之土層影響。底層使 用石英砂與水泥混合土層來模擬軟岩層,而上部土層為 砂土層。而在進行離心模型試驗前,將會做元素測試研 究其行為,以確定土層的強度能用於模擬軟岩層。

# Ⅱ. 主要內容

本研究模擬土壤之材料為均質石英砂,如圖1所示。 另外,每層中放入染色之黑色石英砂,如圖2所示;可 清楚顯示出土層中的變形。其砂顆粒分佈如圖3所示。 根據該圖,石英砂的平均直徑為0.19mm、有效粒徑為 0.16mm、均勻係數(Cu)為1.325、曲率係數(Cc)為 0.964。根據統一土壤分類系統(USCS),此石英砂分類 為不良級配砂(SP)。其詳細物理性質參見表1。而試 驗之目標相對密度80%時土壤乾單位重為15.6 kN/cm<sup>3</sup>。



圖1 石英砂



圖2 黑石英砂



表1 石英砂基本物理性質

Specific Gravity	2.65
Minimum Dry density (kN/m <sup>3</sup> )	13.5
Maximum Dry density (kN/m <sup>3</sup> )	16.3
Coefficient of Uniformity, Cu	1.33
Coefficient of Curvature, C <sub>c</sub>	0.96
Mean Particle Size, D <sub>50</sub> (mm)	0.19
USCS Classification	SP

另外將使用水泥混砂來模擬軟岩地盤,採用石英砂 搭配 5%卜特蘭水泥第一型,並且加入水泥急結劑與些 許水來增加固結反應。我們施作無圍壓縮試驗得出楊氏 模數為 218.93 MPa,以及直剪試驗得出凝聚力和摩擦角 分別為 43.4 度和 142.9 kPa。

本研究利用軟岩地盤及砂實降法(pluviation method) 模擬斷層錯動模擬試驗箱內之土層,其離心模型試體為 中等緊密砂土層與軟岩層之離心模型。研究中使用的試 驗儀器與設備包含地工離心機、斷層錯動模擬試驗箱、 表面掃描裝置、移動式雪降儀及試驗中所需的感測器。

本研究所採用之地工離心機試驗設備是由法國的 Acutronic公司設計製造之665-1型,試驗設備大致上可分為:

- (1) 心機機械主體(centrifuge mechanical assembly)。
- (2) 供應系統(power supply system)。
- (3) 使用之桌面控制系統(operator desk controller)。

離心機旋轉標稱半徑為 3 m (從旋轉中心至掛台底), 荷載容量為100g-ton,可將1 ton 的試驗試體及設備放置 在離心機掛台上飛行至100g(重力加速度)。目前裝載完 離心振動台後,其荷載重量修正為 80g-400kg,最高轉 速 250 RPM。中央大學地工離心機掛台尺寸為 100cm×80cm×120cm(寬×深×高),地工離心機全貌如圖4 所示。

實降法(pluviation method)常被用來製作乾砂試體, 像是標度槽或離心模型試體,其優點是我們能在短時間 內製作出較均勻的乾砂試體。本試驗使用移動式實降機 實降製作,如圖6所示,其實降法製作出的試體混合較為 均勻,可忽略水平向與垂直向骨材顆粒間之交互影響。 實降以分層方式進行,土樣每實降一層,土層高度微小 上升,因此砂層與砂層間之影響(layering effect)也可忽略。 表面掃描裝置將放置於斷層錯動模擬試驗箱上方, 以觀察離心機飛行過程中表面變形的變位移,如圖7所 示。該設備由3個部分組成,分別是臺車架、馬達和2個 LDT( 雷射位移感測器)。馬達控制水平方向台車移動 速度為9 cm/s。將放置兩個LDT在設備上,一個LDT記 錄x方向,而另一個y方向記錄表面的高度;並且在斷層 錯動模擬過程中,表面掃描裝置每分鐘都將進行掃描。



圖4 中央大學地工離心機



(a) 斷層錯動模擬試驗箱側面



(b) 斷層錯動模擬試驗箱俯視



(c) 斷層錯動控制馬達圖5 斷層錯動模擬試驗箱



圖6 表面掃描裝置

離心模型將使用和原型相同之材料進行模型試驗, 考慮顆粒尺寸及模型間的尺寸效應。但不同尺寸的模型 其顆粒尺寸效應也不盡相同,因此以離心模型試驗之結 果來解釋原型的力學行為,它可以在實驗室內部將現場 條件行為模擬為較小的模型規模。離心建模的原理是通 過旋轉施加離心加速度來增加重力加速度,以增加土層 材料之應力,藉此可在較小比例模型中模擬原型應力狀 態,而無需更改材料的特性。靜態條件下比例因子的主 要推導如下:

- (1)  $\sigma_p = \sigma_m$
- (2)  $\rho \times g \times h_p = \rho \times g \times h_m \times N$
- (3)  $h_p = h_m \times N$

簡而言之,離心模型模擬將透過增加人工重力場, 增加模型應力狀態,將相似於原型中的應力狀態,而長 度的比例因子會是重力場的N倍。使用相同材料,這將 有助於獲得與原型相同的彈性模數,進而產生相似的應 變。因此,其應力應變關係,如表2所示。

表2 相似伴��係表(孚宗正,1994年)			
物理量	單位	因次比(離心模型/原型)	
加速度	m/sec <sup>2</sup>	Ν	
長度	М	1/N	
應力	kPa	1	
應變	-	1	
密度	kg/cm <sup>3</sup>	1	
質量或體積	kg or m <sup>3</sup>	1/N <sup>3</sup>	
單位重	N/m <sup>3</sup>	Ν	
<u></u> л	N	$1/N^{2}$	
時間	S	1/N	
頻率	1/s	N	

表<br />
表<br />
2 相似律關係表(李崇正,1994年)

模型配置下層為軟岩層,其上部為砂土層,且在正 斷層試驗會在最底層放置壓克力塊,以提升正斷層向下 剪動的空間,如圖7、8所示。試驗的主要變因是砂層厚 度與總地層厚度比,並分別施作正斷層模擬試驗與逆斷 層模擬試驗,試驗流程圖如圖9所示,其試驗配置如表3 所示;根據示意圖,坐標原點定於上盤尖端為初始位置。

試驗於80 g加速度場中進行,其現場尺寸為模型之 80倍。當模型的加速度達到80g時,開始進行斷層錯動模擬,並於每分鐘進行一次表面掃描,以描繪表面形變量。 另一方面,側面將透過相機每3秒間隔拍攝一次圖像紀 錄剪動過程。根據位移計讀數,一旦上盤的垂直位移達 到50mm模型比例時(原型為4m),試驗完成。

試驗完成後,將離心機直接停止至1g,並於試驗結 束後拍攝表面及剖面照。以比較試驗前後之表面輪廓, 及切除軟岩盤上之砂土層,以便瞭解岩層上方之破裂行 為。









Test Code	Cemented Stratum Height [B] (mm/m)	Sandy Stratum Height[A](mm/m)	Total Height
	fieight [D] (init/iii)	fieight[74] (mm7 m)	(H) (mm/m)
Reverse Fault S	imulation		
R-C0-S10	0	100 / 8	
R-C5-S5	50 / 4	50 / 4	100 / 8
R-C7-S3	70 / 5.6	30 / 2.4	1007.0
R-C9-S1	90 / 7.2	10 / 0.8	
Normal Fault Si	mulation		
N-C0-S10	0	100 / 8	
N-C5-S5	50 / 4	50 / 4	100 / 8
N-C7-S3	70 / 5.6	30 / 2.4	10070
N-C9-S1	90 / 7.2	10 / 0.8	

#### 數值模擬

數值模擬是在計算機程式中普遍用於模擬難題的 主要模擬之一。如今,這種方法非常流行,因為電腦的 計算能力能夠更快,更有效地計算出困難的工程問題。 為了能夠在程式中模擬困難的問題,對計算程序的理解 亦是必要的。

對於數值模型,本研究選擇使用離散元素(DEM)方 法來模擬試驗結果。對於斷層模擬,DEM具模擬粒狀材 料的優勢。用於此數值模擬為顆粒流程式(PFC2D),其程 式中,PFC2D程序中使用了一些假設:

- 1. 顆粒是剛性且圓形的
- 2. 顆粒接觸在一個點上
- 3. 允許顆粒在接觸點上彼此重疊
- 4. 所有重疊相對於粒子的尺寸而言都很小
- 5. 粒子之間的接觸處存在鍵結
- 每個組塊體是由一組重疊的粒子組成,這些粒子可為 具有可變形邊界之剛體。

## III. 結果與討論

根據試驗配置表,共進行八次離心模型試驗,以觀 察斷層對地表變位及斷層對複合土層影響行為,且這幾 組試驗將觀察斷層剪裂帶對不同比例之土層影響;可看 到斷層錯動時之土層表面輪廓變化,及試驗過程的變形 行為。另外,將定義斷層垂直錯動率(r)為斷層垂直位移 距離與土層總厚度之比值,如下式:

# $r = \frac{h}{H} \times 100\%$

r= 斷層垂直錯動率

h= 斷層垂直位移距離

H= 土層總厚度

表面傾斜角由微分方法計算,將表面的一次微分為 表面傾斜角,負傾斜角定義為表面順時針方向旋轉,反 之亦然。

$$\theta = \frac{dy}{dx}$$

其中本研究對土層表面變形行為,將使用相對位移 法確定受影範圍的邊界位置。由上盤高程之斷層落距相 對位移作為基準點;而下盤之相對位移是由第一次的高 程掃描位置來當基準點,如圖 10 所示。以此方法是因為 在正斷層模擬中表面傾斜角很小,導致難以量測斷層影 響區域的起點和終點。



首先,將進行了四項逆斷層試驗,另外再進行了四 項正斷層試驗,以觀察岩層如何影響剪裂帶延伸;主要 控制為砂層或岩層厚度與總地層厚度之比。

#### R-C0-S10 試驗

第一組 R-C0-S10 試驗,為模擬地層僅由砂土層組 層之土層狀況,亦為試驗對照組。該試驗將檢查結果並 與先前之試驗應證,並成為本研究試驗之對照組。

斷層錯動期間,地表變化如圖 11 所示。在剪裂帶發展的初期階段,所有表面都被上盤推上,形成了平緩的緩坡。一旦垂直錯動達到 7.4%,土壤表面將急遽產生高程變化,這表示在地表產生地壘。變化過後,地壘高程不再增加,而在 x=104.3% H處,開始產生另一條表面裂痕,表面傾斜隨著模擬的繼續而持續增加。當斷層重錯動達到 12.5%時,將在陷落區後產生一個張力區域,而該張力區域由每個峰後傾角所示。在此部分中, 一些土體滑動到陷落區域,是由於上層土壤水平運動造成。當達到 31.3% H時,張力區位置向後移動,更接近在斷層初始位置。但如張力區向後移動,更接近 積動並覆蓋陷落區。當斷層垂直錯動低於 30%時,隨 著結束前完全覆蓋。而根據模擬之地表發展,上盤與下 盤受影響區域之邊界位置無明顯變化。

根據表 4 與圖 12 顯示,斷層模擬過程中,受影響區域邊界位置發展達 7.4 %時,下盤受影響區域最終位置有些微的增量,而此增量可能是在模擬過程中發生滑動。在試驗最後,下盤受影響最遠位置則為 148.0% H。 在錯動過程初期,高程邊界將向負值移動,而在試驗完成時,邊界移回下盤側。根據試驗結果,當垂直錯動超 過 20.1% 在 x = -20% H時,將達到最大影響位置;垂 直錯動達到 33.6% 在 x = -21.5% H時,達到最遠影響 範圍;垂直錯動超過 42.5% 時,邊界條件開始向下盤移 動,而最終在試驗結束時,影響邊界達 x = -9.7% H位 置。根據此結果,受影響區域的最大範圍取上下盤最遠 處,可得出為總影響範圍 169.6% H。

斷層模擬試驗結束後,地質剖面圖如圖 13 和圖 14 所示,分別是側窗及側窗之剖面。但因多數黑砂與白砂 在上盤位置混合在一起,難以透過壓克力透明視窗觀察 到土層地下剖面,因此加入側窗附近之剖面。儘管上盤 側的砂是混合的,但混合砂之斷層剪裂帶與正常狀態間 的邊界仍能清楚可見。根據該結果,CSRO-R1 破裂帶從 初始斷層尖端開始,並向上發展至地表,產生兩斷層剪 裂帶。在此剖面中,CSRO-R1 的破裂帶透過側窗觀察與 CSRO-R2 的破裂帶結果一致,其破裂亦從斷層尖端開始。 根據剖面結果,較高位置的剪切帶在經過第7號和第8 號黑色層後,剪裂帶會向下彎曲;是受到剪裂過程中, 土層滑動的影響導致。此外,張裂帶周圍的黑色層較薄, 這顯示此部分土體受張力應變產生些許向下滑動。最後, 表面剖面與地表掃描結果相不同,這可能是由邊界效應 所致。

根據圖 15 中所示之側向輪廓,試驗中產生四條斷 層剪切帶,其中兩條 CSR0-R3 及 CSR0-R4 皆未發展至 地表面,僅發展到第7層黑砂;而 CSR0-R1 和 CSR-R2 之剪切帶發展至地表。隨著深度變化,其影響區域面積 也隨之減小。另外,部分土壤受到應變與滑動,張力區 域的輪廓更加粗糙,其邊界繪製如圖 145(b)。最後,試 驗終止之表面狀況如圖 12 所示,張力區域比滑動區域 之表面粗糙。根據影像追蹤,滑動區末端影響區為 21.6% H,而受影響之張力區域末端位置為 121.5% H。此結果



圖 11 R-C0-S10 試驗之表面變化

表4R-CO-S10 受影響區域邊界關係表

Fault Throw (r) (%H)	End of affected Zone on Hanging Wall (%H)	End of affected Zone on Footwall (%H)	Total Affected Length (%H)
0.0	0	0	0
2.5	2.9	109.8	112.7
5.1	0.0	128.0	128.0
7.4	6.9	137.5	144.4
10.1	1.6	137.9	139.5
12.5	-6.2	137.5	143.7
15.1	-10.8	138.0	148.8
17.6	-11.2	141.2	152.4
20.1	-19.6	142.1	161.7
22.7	-20.6	141.3	161.9
25.2	-18.6	140.8	159.5
27.8	-18.1	141.8	159.9
31.3	-16.0	142.7	158.6
33.6	-21.5	141.7	163.2
35.8	-17.7	143.1	160.8

38.0	-19.8	142.3	162.0
40.3	-20.5	143.4	163.9
42.5	-19.2	147.9	167.1
44.7	-13.5	144.0	157.5
46.9	-10.8	143.1	153.9
49.2	-10.0	144.8	154.8
50.4	-9.7	148.0	157.7



圖 12 R-CO-S10 受影響區域邊界關係圖



(a) 透過壓克力視窗之側視圖





(a) 近窗地層剖面照



(b) 剖面之影像追蹤

圖 14 R-C0-S10 土層剖面近側窗段



(a)中心地層剖面



圖 15 R-C0-S10 土層剖面中心段





(b) 表面圖

圖 16 地表視圖

(c)斜視圖

#### R-C5-S5 試驗

此試驗土層厚度為總土層厚度之50%,變更下覆土 層為軟岩層,以觀察軟岩層對表面之影響。試驗過程中, 地表面的變化如圖 17所示,其變化與對照組試驗相像, 當上盤擠壓土體,會將土層推動,表面隨之傾斜。當斷 層垂直錯動達9.8%時,於12.7%H 位置處開始產生 破裂,而是因為表面上出現剪裂帶而產生的。試驗結果 與Test-CSRO相比,陷落區位於下盤側產生。在試驗過 程中,出現另一斷層剪裂帶,向外推擠而形成另一較高 之懸崖。再進一步試驗過程中,當斷層落距達27.7%時, 產生另一個新的張力區,這表面傾角則出現另一峰值; 此峰值隨著斷層落距的增量而增加,而在第三個峰值, 於初始斷層尖端位置表面產生張力區。此外土體表層土 幾乎都推向下盤側。

表 5 與圖 18 中,顯示試驗中受影響區域的邊界座 標的轉變,且在試驗過程中受影響區域之邊界有所位移。 斷層錯動期間,在上盤側的邊界將向前推移,當斷層落 距達到 7.3%,邊界座標達到最遠位置 x = -8.1%H處。 斷層持續錯動,上盤之邊界將逐漸向下盤推移,直至 x=14%H處;邊界座標的位移是因為下層岩盤能為頂部 較軟砂土層提供支撐,而下盤位置影響區域邊界達 7.4%H處,表面開始產生陷落則達到最大狀態。在斷層 錯動初期階段,斷層剪裂帶延伸處會形成平緩坡,這是 因為斷層僅會在土層破裂後產生。因此,在下盤 7.4%H 位置之後,不受斷層活動之影響,並且最遠影響位置為 x = 177.1%H, 而總影響區域範圍為 184%H。

圖 19、20 為地層剖面圖,分別為近窗剖面圖和中心 剖面圖。近窗剖面可看到在岩層中有四個裂痕,在砂層 產生兩斷層跡;其中這兩條剪裂帶是從岩層剪裂帶延伸 的。

第一條剪裂帶 CSR5-C1,其剪裂帶未發展至地表, 停在岩層中;第二條 CSR5-C2 則完整在軟岩層中發展, 並在砂層造成 CSR-R1 破裂帶;而 CSR-C4 剪裂帶分別 通過上盤及下盤;最後 CSR5-C3 剪裂帶則位在 CSR5C2 與 CSR-C4 之間。根據照片顯示, CSR5-C3 剪裂帶 與 CSR5-C4 剪裂帶間岩層存在許多變形, 在剪裂帶完整 發展下,於剪裂帶後之岩層會產生位移,並在砂層中產 生剪裂破壞。而 CSR-R2 剪裂帶位於第一條剪裂帶之後, 且為 CSR5-C3 剪裂帶延伸,這些斷層剪裂帶,我們皆能 從側窗觀察到這些斷層破裂跡。另外試驗中, CSR-R3 與 CSR5-R4 剪裂帶在岩體分裂後, 根據近窗剖面能看到在 岩石尖端會產生多條剪裂帶。另外, 在剖面中還能觀察 到與試驗對照組相似之邊界, 但其中兩黑色薄層產生兩 道張力裂縫,該張力部分導致 CSR5-R4 剪裂帶向下彎 曲,類似於試驗對照組中的 CSR0-R2 剪裂帶。

砂岩和岩層邊界之表面和斷層破裂跡如圖 21 所示, 在上盤部分,表面上明顯產生表面張力區;其張力區域 寬度為 37%H,該寬度橫跨整個模型寬度。根據影像追 蹤結果,在試驗結束時,受影響區域邊界從上盤 32.6% H處至下盤邊界 151.7%H,總受影響範圍 119.1%H。

表 5 顯示 R-C5-S5 試驗過程中受影響邊界發展。當 垂直錯動達 2%時,在岩層中產生第一個剪裂帶 RC5-C1, 當垂直錯動達 6%時,剪裂帶出現至砂層。當垂直錯動 13%剪裂帶 RC5-R2 則將開始影響地表。在接下來錯動 過程,砂層中的黑色層則混合至其他層,使其難以觀察 到地層之變形行為。





(a) 中心剖面





Fault Throw (r) (%H)	End of affected Zone on Hanging Wall (%H)	End of affected Zone on Footwall (%H)	Total Affected Length (%H)
0.0	0	0	0
2.0	14.7	152.2	137.5
4.8	-5.2	163.9	169.1
7.3	-8.1	170.8	178.8
9.8	-2.4	169.8	172.2
12.4	-2.3	173.7	175.9
14.8	3.1	177.1	174.0
17.4	-2.4	173.7	176.1
20.1	-6.9	172.6	179.5
22.5	0.6	172.8	172.1
25.1	2.4	172.5	170.2
27.7	1.6	172.3	170.6
30.2	3.0	173.9	170.9
31.5	4.5	174.0	169.5
33.6	4.5	172.9	168.4
35.8	7.3	174.4	167.0
38.1	5.8	176.3	170.5
40.3	8.7	177.1	168.5
42.5	8.6	176.3	167.6
44.8	6.8	174.1	167.4
47.6	1.6	171.5	169.9
49.9	14.0	174.4	160.4





(a) 俯視圖

(b) 岩層俯視





# R-C7-S3 試驗

此RC7S3試驗為總土層厚度的70%為軟岩層,砂層 則為總厚度另外的30%。錯動期間表面變化如圖22所示。 與其他組試驗相比,其主要特徵是地表面上產生的坡斜 率更高,並影響下盤側的面積更多。另外,當垂直錯動 達到19.6%H時,表面產生一個坑洞,並隨土層前進,該 坑洞會緩慢被覆蓋。隨著斷層錯動量的增加,將出現一 緩坡,表示斷裂的產生,但並未穿破岩層。而當垂直錯 動達到14.7%時,坡的斜度為2-3度,高度為4-5%H。並 且表面狀態與R-C0-S10和R-C5-S5試驗不同,表面上沒 有張力應變痕跡,這是因為表面上產生了坑洞。

根據表面掃描結果,表6和圖23中為錯動過程中受 影響區域邊界關係。當斷層垂直錯動達到7.1%,則下盤 側受影響區域的邊界直到試驗結束才有顯著增減,而受 影響區域位於下盤側的最遠坐標位於212.2%H,並且試 驗邊界將持續向前推移。

另外在試驗結束後,我們能從地層剖面觀察斷層斷 裂跡之發展行為,如圖24所示。根據近窗地層剖面輪廓, 在岩層中形成的三個主要裂隙和一個斷層剪切帶。 RC7-C1裂紋是位在下盤側影響範圍最廣的裂紋,與斷層 傾角相比,傾斜度較小。RC7-C2斷層跡於上盤處產生, 並與位在下盤之RC7-C3斷層跡分開,並在兩裂隙間產生 很多裂紋。在本試驗中,最大剪力破壞裂痕RC7-R3受到 張力的影響,因為頂部的黑砂層較薄,在破裂點附近則 聚集了一些黑砂。

在中心剖面,如圖25所示,可看到砂層的砂流入岩 層中形成的裂縫的行為。位於砂岩邊界之岩層部分受相 鄰的兩裂隙影響,產生些微旋轉破壞。根據影像追蹤, RC7-R2剪切帶在砂層中的發展路徑則與近窗剖面發展 略有不同,這可能是因為出現一個很小的裂隙使其土層 扭曲變形。

圖26顯示了土表狀況和岩層與砂層間表面邊界上 的裂縫痕跡,在藍標示處上可清楚看一條長裂痕,這是 因為RC7-C1裂紋傾角以平緩角度接近邊界,導致砂層以 平緩的角度發展。根據影像追蹤,上盤最遠端影響邊界 位於30.3%H,而下盤最遠的位置為202.9%H,因此,總 受影響區域為233.3%H。





圖23 R-C7-S3試驗受影響區域邊界關係圖



Г

Fault Throw (r) (%H)	affected Zone on Hanging Wall (%H)	End of affected Zone on Footwall (%H)	Total Affected Length (%H)
0.0	0	0	0
2.0	12.7	174.3	161.6
4.5	14.8	200.2	185.4
7.1	12.7	208.0	195.3
9.6	8.3	210.0	201.8
12.1	10.1	210.5	200.4
14.7	11.7	211.1	199.4
17.1	13.9	211.1	197.2
19.6	13.5	212.2	198.7
22.2	14.6	210.9	196.3
24.7	14.7	210.5	195.8
27.3	14.6	210.4	195.8
31.2	10.9	209.3	198.3
33.4	17.1	210.1	193.0
35.6	15.1	210.9	195.8
37.8	20.7	210.2	189.5
40.1	23.2	211.0	187.8
42.2	23.3	211.0	187.7
44.4	23.8	210.9	187.1
46.8	24.0	211.3	187.3
48.9	26.9	210.4	183.5
50.0	25.5	210.3	184.7



(a) 近窗地層剖面照



圖24 近窗剖面圖



(a) 中心地層剖面照



## 原子能科技學術合作研究計畫成果發表會精簡報告





# R-C9-S1試驗

本試驗項目,主要由軟岩層組成且模擬砂土層很薄時的狀態,將砂層縮小至總覆土厚度10%,以觀察表面 變形。

斷層錯動期間地表的變化如圖27所示,根據地表掃描,此錯動並不會造成地壘,但會造成一長緩坡。這與先前三項逆斷層試驗結果相比,同樣會有此錯動行為, 但在本次試驗中地表並不會形成翹曲。當垂直錯動達4.7 %時,地表出現三條破裂,斷裂跡發生在上盤的方向。 在地表面上出現的斷裂的位置分別為175%H、145%H和 -1.0%H,隨著上盤不斷升高,陡峭度不斷增長,直到高 程9.9%,但下盤並沒有大變化。當垂直錯動超過7.3%時, 在x = 135%H處表面上會產生另一個翹曲,而在x = 140 %H時會在表面上產生地塹,因為在另一方向上產生了2 個裂隙。當垂直錯動達到17.8%時,岩層會分別從上下 盤處斷裂,此裂隙使砂土流入該裂隙,並在x = 75%H位 置產生新孔洞。當垂直錯動達到41.6%,岩石強度不夠 就發生了岩石崩解的情形。 表7與圖28為表面掃描之受影響區域邊界關係。根 據地表變化,當垂直錯動達7.3%時,上盤影響邊界達最 遠處x=-3.6%H,當垂直錯動超過9.9%,受影響區域的 邊界位置便開始向正向位移,直到x = 223.0%H為最大 影響位置,本次試驗總受影響區域為226.6%H。

試驗結束之土層剖面如圖29、30所示,從剖面可看 到在岩層中產生了兩個主要裂隙。下盤側RC9-C1破裂跡 緩慢地發展影響地表;當RC9-C1破裂跡完整發展至地表, 在RC9-C2開始發展之前,上盤岩層即會向前推動並影響 表面狀況。砂岩邊界上砂土表面裂痕如圖29所示,根據 結果,在近窗側紅色圈標示下盤上的裂縫。同時,靠近 箱壁之高程沒有明顯變化,因為在表面上僅形成緩坡。



# 圖28 R-C9-S1試驗受影響區域邊界關係圖

Fault Throw (r) (%H)	End of Effected Zone on Hanging Wall (%H)	End of Effected Zone on Footwall (%H)	Total Affected Length (%H)
0	0	0	0
2.2	92.6	217.7	125.2
4.7	-0.2	223.0	223.2
7.3	-3.6	222.9	226.5
9.9	-2.9	222.6	225.5
12.5	-2.2	222.2	224.4
15.3	4.1	222.1	218.1
17.8	3.9	222.2	218.3
20.4	6.3	222.2	215.9
23.1	6.0	222.0	216.0
25.8	8.9	221.3	212.4
28.3	9.7	221.5	211.9
31	12.4	221.5	209.1
33.7	15.6	221.6	206.0
36.3	16.0	221.9	205.9
39	17.9	221.5	203.6
41.6	20.0	221.8	201.8
44.2	21.0	220.6	199.6
46.8	23.3	220.8	197.4
48.2	23.5	220.9	197.4

表7 R-C9-S1受影響區域邊界關係表



(a) 近窗剖面



圖29 近視窗剖面圖



(a) 土層中心剖面



圖30 土層中心剖面圖



(a) 砂層俯視



(b)岩層俯視



## N-C0-S10試驗

本試驗將是正斷層模擬中由單一砂土層所組成的 對照試驗,逐分鐘掃描之表面梯度表面影響區域結果如 圖32所示。當斷層垂直錯動為4.7%時,產生第一條剪裂 帶影響至表面。並且透過表面掃描,在x=-23.1%H處表 面梯度峰值與掃描高程線突降可觀察之。當垂直錯動率 超過12.4%,表面產生第一次滑動,隨著斷層高程的增 加,使下盤受影響區域的末端逐漸退縮,是因為砂層無 法承受其自身的重量,而這樣產生的裂隙將影響兩側受 影響區域的邊界。

表8和圖33表面掃描之受影響區域邊界關係。隨著 上盤土層逐漸降低,受影響區域在上盤末端位置則逐漸 擴張影響。根據結果,本試驗受影響區域的長度在試驗 結束時為1.684%H。另外根據圖34,在近窗剖面可觀察 到兩主要斷層剪裂帶,即NCO-R2和NCO-R4;另個斷層 破裂跡NCO-R3則中斷了NCO-R2發展,並發展另一破裂 跡。此外,每條剪裂帶的傾斜度隨著其向上傳播而變得 更陡峭。且根據圖34、35可發現於中心剖面之剪裂帶數 目與近側窗剖面相同,但是它有更多的次要剪裂帶,由 主要剪裂帶分支並向上盤側發展,且比近側窗地層輪廓 更明顯。

在第一次掃描時,剪裂帶已經發展至第六層,但無 法到達地表面,該剪裂帶之破裂處則在後期被覆蓋。 Bransby(2008)進行的實驗中也觀察到了這種現象。而另 一個NCO-R2破裂跡是從NCO-R1中間發展出來的,隨著 斷層錯動持續至3.8%,地表土層將覆蓋NCO-R1破裂跡。 當r=12.9%H時,在表面上出現NCO-R4破裂跡後,土層 中就沒有其他剪裂帶發展。



表8 N-C0-S10受影響區域邊界關係表

秋011 C0 B10 文办音些《边外關冰秋			
Fault Throw-	End of Affected Zone	End of Affected Zone	Total Affected
( <b>1</b> ) + <sup>1</sup>	on Hanging Wall	on Footwall 🖉	Length↔
(%H)+ <sup>2</sup>	(%H)+ <sup>2</sup>	(%H)+ <sup>2</sup>	(%H)₽
0.0+2	0.00	0.0+3	0.0+3
-2.2*	-6.6+	49.20	55.8₽
-4.70	-24.6+	56.60	81.3
-7.40	-31.80	56.50	88.30
-9.9+2	-37.5+	55.80	93.3₽
-12.40	-49.1@	55.3¢	104.3
-15.0+2	-50.0+	54.7₽	104.70
-17.9¢	-60.40	56.9÷	117.2+
-20.3+2	-56.60	57.40	113.90
-23.10	<b>-6</b> 7.7¢	71.60	139.3 <i>e</i>
-25.7+	-68.7+	71.70	140.50
-28.20	-71.80	69.40	141.3 <i>e</i>
-30.8+2	-72.5+	69.80	142.30
-33.3+	-72.80	65.40	138.24
-35.80	-78.3@	66.1 <i>₽</i>	144.5₽
-38.40	-76.2+	66.5 <i>0</i>	142.70
-41.00	-83.90	67.40	151.30
-43.5~	-81.9+	67.1	149.0
-46.1~	-92.00	68.80	160.8
-48.50	-86.40	<b>69</b> .5¢	156.00
-51.30	-96.5+	71.80	168.4~













## N-C5-S5試驗

此N-C5-S5試驗中,覆土層的一半厚度由軟岩層替 代,以觀察土壤表面的變形及軟岩對受影響區域的範圍 和影響。斷層活動過程中地表條件的變化如圖37所示, 初期在岩層中產生裂隙,當垂直錯動達到2.0%時,表面 上出現小坑洞,而在孔旁產生一個"峰",這是因為在斷 層錯動期間,岩層某些部分轉動,造成表面產生峰。當 垂直錯動超過14.9%之後,岩塊會向下滑動,由地表掃 描顯示,上盤與下盤表面,試驗中皆發生了滑動,並導 致在下盤受影響區域的末端向後推移,這與對照組試驗 類似。

圖38和表9為受影響區域邊界關係;由關係可知,隨 著斷層垂直錯動的增加,受影響區域的長度越來越大。 錯動初期,上盤受影響區域影險範圍顯著增加,當到達 15.2%時,才停止影響,最終表面之總影響範圍為200%H。

透過近窗剖面及中心剖面,如圖39、40所示。下盤 NC5-C1破裂跡從初始位置(x=0)開始發展,當其到達 岩石與上層土層邊界時,於x = 6.7%H之破裂跡將貼近 平行於土層輪廓線。另外,於上盤中心位置,還有兩裂 隙NC5-C2與NC5-C3破裂跡,而裂縫間會產生一個洞穴, 導致砂層灌入。



(r)+ <sup>1</sup>	on Hanging Wall₊≀	on Footwall∉	Length↔
(%H)₽	(%H)↔	(%H)₽	(%H)₽
0.0+2	0.0+2	0.00	0.040
-2.30	-73.7+	30.24	103.9+
-5.00	-105.90	29.80	135.7+
-7.50	-114.2+	32.40	146.6+2
-10.040	-117.7+	31.80	149.50
-12.50	-122.90	34.70	157.60
-15.2+2	-131.40	35.20	166.5₽
-17.70	-123.70	38.60	162.3¢
-20.3+2	-128.5+	38.24	166.60
-22.90	-133.24	39.80	173.00
-25.40	-133.70	41.90	<b>1</b> 75.7₽
-28.3	-131.90	45.40	177.2~
-31.0+2	-127.5+	48.40	175.9¢
-33.4+2	-124.6+2	49.40	174.0+2
-36.1+2	-129.1+	52.14	181.3+
-38.7+2	-132.1+2	53.9¢	186.14
-41.20	-132.8+2	55.7₽	188.50
-43.70	-133.40	58.9¢	192.3¢
-46.4+2	-135.6+	60.947	196.5+
-48.90	-130.6+2	64.1~	194.6
-51.20	-133.6+2	66.4~	200.0¢



(a) 近視窗剖面圖



圖39 近窗剖面圖



(a) 中心剖面圖





#### N-C7-S3試驗

本次試驗為上覆土層以總厚度30%為砂土層,70% 為軟岩層之土層,試驗中,斷層錯動期間表面變化關係 如圖42所示。在第一次掃描中,r=2.4%,位於x=15% H處表面上形成了一個坑洞,表示岩層已產生裂縫。當r = 20.1%時,上盤形成另一個洞。當r=25.9%時,坑洞 的大小固定直到試驗結束。

表10和圖43顯示了受影響區域範圍,隨著斷層錯動 量的增加,下盤末端受影響區域位置逐漸擴張。根據表 面掃描數據,表面坡度為38度,這樣滑動是因為砂土無 法承受自身的重量,並產生了接近其摩擦角的坡度。另 一方面,上盤的受影響區域顯示,當增加到x = -149.7%H(r = 15.0%時)將突然移動至x = -133%H(r = 20.1%時),該現象應是在上盤產生坑洞,隨著錯動持續進行, 受影響區域的末端位置將移回;直到試驗結束,邊界位 置達x = 159.4%H。

圖44和圖45為近窗剖面及中心剖面地層圖,在岩層 中觀察到五個大裂縫,這是由於岩石層由於高程差而彎 曲而產生的。下盤在x=0.2H邊界處產生NC7-C1破裂跡, 而在試驗結束時,產生的溝股被頂部砂層及滑動岩塊完 全填滿。另外,NC7-C4破裂跡岩塊破裂並在地表上產生 孔洞,並且也有部分岩體在地表面上露出。





#### N-C9-S1試驗

本組試驗以最少量的砂土層與最厚的軟岩層作為 試驗配置,模擬過程中表面狀況變化如圖47所示。第一 次掃描(r=2.4%)期間,位於x=40%H處,會產生一個峰值,隨後趨緩,隨著靠近上盤邊界逐漸減小。當r= 7.6%,下盤土層滑動停止,這因為於岩層上的砂層厚度 非常薄;導致岩石層的尖端露出在外,導致掃描表面傾 角讀數在接下來突降。

表10和圖48為受影響區域的關係。當r=5%時,下 盤高處受影響區域的末端位置停止增加,並在57.5%H 時,保持不變直到試驗結束,這是因為上層砂土層非常 薄,砂土承受其自重後停止滑動。

試驗之地層剖面如圖49和圖50所示,在錯動結束時, 岩層上產生了兩主要破裂跡NC9-C1和NC9-C2,並將岩 石層分為三個部分。 NC9-C1破裂跡位於下盤,其破裂 跡發展至地表面時,傾斜度更大。位於上盤NC9-C2破裂 跡,發展至中間就停止了,並向邊界方向發展更多次級 裂隙。

另外在第一掃描期間明顯觀察到地表影響,當垂直 錯動達6.9%時,NC9-C1破裂跡使岩塊分裂,到達7.3% 時,NC9-C2破裂跡則使另一側岩層分裂。在錯動過程中, 雖然大多數岩層不會發展到邊界,但在岩層中會造成一 些小型岩塊。在第11次掃描中,達33.8%在表面產生一 孔洞,隨著時間進行,孔洞越來越寬。過程中,某些部 分在下盤岩層往下滑動,因此在砂層上產生了褶皺。





圖48 N-C5-S5試驗受影響區域邊界關係圖 表10 N-C5-S5受影響區域邊界關係表

Fault Throw 4	End of Effected Zone	End of Effected Zone	Total Affected
(r)+ <sup>1</sup>	on Hanging Wall+	on Footwall₊⁄	Length 🗸
(%H)₽	(%H)+ <sup>2</sup>	(%H)÷	(%H)+ <sup>3</sup>
0.040	0.047	0.0+2	0.040
2.40	-104.5+	52.80	157.3+2
5.00	-116.3+	56.1₽	172.4
7.6₽	-121.00	57.0₽	177.9÷
10.30	-125.80	56.9¢	182.7+2
12.8+2	-128.2+2	57.1¢	185.3+2
15.40	-132.3+	57.5₽	189.8₽
17.9¢	-133.90	57.1₽	191.0
20.2+2	-135.80	57.1₽	192.9
23.14	-138.40	56.7₽	195.1₽
25.6	-139.5+	56.9₽	196.3+2
28.2+2	-139.9+	56.8₽	196.8₽
31.2+	-142.30	57.40	199.7₽
33.70	-143.00	57. <b>6</b> 0	200.6
36.3₽	-144.1	57.20	201.30
38.80	-144.80	58.00	202.70
41.40	-144.24	57.7+	202.04
44.0₽	-135.8+	57.7 <i>e</i>	193.6₽
46.5₽	-138.0+2	58.7¢	196.7₽
49.20	-141.30	58.40	199.7 <i>\varphi</i>
50.0₽	-141.10	57.7 <i>e</i>	198.9



(a) 近視窗剖面圖





中心剖面圖 (a)





(a) 砂層俯視



#### 綜合討論-逆斷層

在逆斷層模擬過程比較各測試條件,岩石層性質對 於地表變形有顯著的影響。根據地表行為,在R-CO-S10、 R-C5-S5、R-C7-S3與R-C9-S1試驗分別達到7.5%、7.2%、 7.7%和7.3%的垂直錯動高程後,地表開始產生裂隙。 地表裂隙的產生是斷層破裂跡何時完全傳播到砂土層 的重要指標之一,這也表示當垂直錯動率低於10%時, 逆斷層會在地表產生裂隙。Tali(2018年)所進行的研究中 也觀察到了這種現象,由此,當斷層剪裂帶到達地表時, 岩石層還不會受到影響。

將各試驗結果與對照組試驗R-CO-S10進行比較,可 觀察到岩層的厚度會顯著改變地表變形。當岩層厚度比 為50%時的R-C5-S5試驗,其張力區域的範圍會減小,並 且岩層會將陡峭的岩石推入下盤區域並擴大受影響的 範圍。在R-C7-S3試驗中,當垂直錯動達20.3%會在岩層 中產生裂隙,而地表上形成坑洞。

受影響區域邊界的變化如圖53,當垂直錯動率(r) 達到7.7%時,在下盤達到最大影響範圍後有相同的趨勢。 當岩層與總厚度比從0%、50%、70%和90%逐漸增加時, 在最遠位置分別為148.0%H、177.13%H、212.2%H和223 %H,這表示較厚的岩石層影響到下盤側,而在上盤側, 随著模擬的進行,則有不同之趨勢。

表面裂隙在岩層表面上的位置如圖58所示, 能觀察 到R-C5-S5和R-C7-S3試驗中上下分離之距離比R-C9-S1 更靠近初始斷層位置,這可能是由於岩層受垂直壓力不 同所致。隨著上覆土壓力的增加,斷層跡傾斜的角度也 變得更加陡峭,隨著砂土層厚度的減小,下盤側的傾斜 度αRCf分別為38度、29度和23度,對應之砂層厚度分別為 50%、30%和10%。最後,在圖59為岩層到斷層頂端傾 斜角(α<sub>RSf</sub>), 軟岩層中的簡裂帶將影響砂層剪裂帶的傾斜 度。儘管R-C5-S5試驗中岩層檢裂帶以較陡的角度接近, 但在岩層的某些部分使其土層受彎曲並使其傾斜更緩 和。透過這兩種方法來評估總影響區,以評估在模擬過 程中對的表產生之最壞條件。根據這兩個結果,隨著砂 土層厚度的減小,受影響區域的增加。





試驗代碼	上盤影響範圍 (%H)	下盤影響範圍 (% H)	總影響 範置長 (%H)	
R-C0-S10	-21.5	148.0	169.6	
R-C5-S5	-8.1	177.1	185.2	
R-C7-S3	8.3	212.2	204.0	
R-C9-S1	-3.6	235.9	239.5	

表11 總影響範圍比較表

# 綜合討論-正斷層

根據每組試驗之表面位移及傾斜角關係圖,我們 可比較出不同砂土層厚度比例有所不同,但在相同都 是在初期就產生對表面的影響與破壞,在所有試驗中 都產生坑洞;在第一次掃描時(約r=2%)皆能發現坑洞 的產生,這是因為軟岩層受到彎曲並產生裂隙,使砂 土層流入岩縫。對於三組試驗;N-C5-S5、N-C7-S3和 N-C9-S1,坑洞分別位於4.7%H、17.6%H和40.8%H, 隨著軟岩層厚度的增加,坑洞的位置會越接近下盤 側,坑洞的深度也隨之越深。在只有砂層的N-C0-S10 試驗中,由於純砂沒有膠結作用,因此砂顆粒移動較 容易,使得過程到結束都有顯著滑動。

另外,除了N-C9-S1試驗以外,所有受影響區域的 最終位置皆逐漸朝正坐標方向移動,如圖52所示。此例 外是因為砂土層厚度非常薄,其滑動達停止的速度加快; 當r=4.5%,達最大影響範圍為58.7%H。最後到試驗結 束時,對於N-C0-S10、N-C5-S5和N-C7-S3試驗,最終受 影響區域範圍幾乎相似,分別為71.8%H、66.4%H和71.5 %H。另一方面,表受影響邊界關係圖可看到與其他不 同的狀況,僅有砂層的N-C0-S10試驗中,斷層上盤破裂 影響位置於初始與結束時,破裂點差距甚大。

其中受影響範圍影響區,在最薄的砂層N-C9-S1試驗,在上盤最明顯影響位在67%H時。但其他試驗中的 滑動線大多在更後面累積。因此,在正斷層模擬中,砂 土層的厚度會影響受影響區域的最終位置;在下盤側有 最遠影響位置是N-C0-S10試驗,而上盤側有最遠位置是 N-C7-S3試驗。

而圖22、23及24中顯示了所有試驗表面破裂行為 比較,分別顯示軟岩層與砂層破裂行為。隨著軟岩層 變厚,砂層的破裂點逐漸遠離初始位置,而儘管破裂 點初始位置不同,下盤裂紋的最終發展幾乎相同;但 位於上盤處,砂土上覆土厚度影響,覆土壓力的升高 會影響裂紋擴展。

圖25為評估斷層跡之土層滑動角度的示意圖,其 破裂跡的起算點是從初始斷層破裂尖端位置開始,砂 土層傾斜的起始是從軟岩層的破裂尖端定義。從圖26 所示,隨著軟岩層厚度的增加,裂紋傾角(α<sub>NCf</sub>)減 小,這是裂紋尖端的位置往上盤移動,導致其減小。 圖27則是砂土層與軟岩層之間傾角(α<sub>NSf</sub>),其最大傾 角在N-C0-S10中超越50度;而在N-C7-S3和N-C9-S1 中,土層傾角更接近於砂土材料的摩擦角38度。

最後總結受影響區域隨砂土層厚度變化,如圖28 所示。在本研究中總厚度的30%砂土層,其在正斷層 影響最廣的範圍,一旦增加過30%,受影響的區域亦會 減小。這表示砂土層厚度和軟岩層厚度均對受影響範 圍有強烈的相關。



圖61 地表破裂行為俯視比較圖





ection





圖65 軟岩層斷裂傾角 (α<sub>NCf</sub>) 比較圖







表12 總影響範圍比較表

試驗代碼	上盤影響範圍 (%H)	下盤影響範圍 (% H)	總影響 範圍長 (%H)
N-C0-S10	-96.5	83	179.5
N-C5-S5	-135.6	77.9	213.5
N-C7-S3	-159.4	75.6	235.0
N-C9-S1	-158.5	57.0	215.5

#### 數值模擬

這裡將說明無為壓縮試驗(UCS)模型的參數及模擬 的 UCS 試驗的結果。對於材料測試,不僅要輸入重要的 參數,還要測試粒徑的大小。由於 DEM 計算的邊界中 生成的粒子數量,因此使用這種方法模擬沙子的真實直 徑並不難。因此,在粒徑的增量也是主要參數。

UCS 模型依據 Potyondy 等人(2004 年)提出的 BPM (黏結顆粒模型)。其模組步驟為:

- 1. 建立球顆粒
- 2. 重新調整內應力
- 3. 減少流動顆粒
- 4. 施加鍵結

試驗中,球顆粒粒徑倍增係數從5倍、7.5倍、10倍 和 20倍,這也有助於減少未來模擬的計算時間。表 11 為球體參數,結果顯示於表 12中。在 PFC 中模擬的 UCS 測試的應力應變關係為如圖 5555 至圖 6 所示。試驗裂 紋分佈如圖比較實際 UCS 樣品中的破壞 (圖 6.5)。因 此,由於裂紋擴展和行為幾乎相同,因此用於膠結砂層 的參數可以用作離心機故障模擬中的材料參數。

表13 輸入參數

Specification			
Particle Density	2650 kg/m <sup>3</sup>		
Particle friction	0.8 (ф=42°)		
Ratio of Normal to shear	1/2		
stiffness	1/3		
Input Porosity	0.1		
Wall's normal stiffness	10 <sup>15</sup> N/m		
Parallel bond normal	$0 \times 10^5  \text{N/m}$		
Strength	9 × 10 IN/III		
Parallel bond Shear	$0 \times 10^5  \text{N/m}$		
Strength	7 ^ 10' 1N/111		

表 14 UCS 結果

Normal Stiffness kn (N/m)	UCS Strength (kPa)	Young's Modulus (MPa)		
Particle Multiplic	ation Factor =	7.5 (r=0.67 mm)		
$1.5 \times 10^{-10}$	1030	152.9683		
1.6 × 10 <sup>10</sup>	950.28	169.3517		
$1.7 \times 10^{-10}$	904.48	164.8077		
$1.8 \times 10^{-10}$	895.69	164.1323		
1.9 × 10 <sup>10</sup>	113.1	189.1775		
Particle Multiplication Factor= 10 (r=0.89 mm)				
$1.5 \times 10^{-10}$	960.18	213.9068		
1.6 × 10 <sup>10</sup>	877.39	149.6911		
$1.7 \times 10^{10}$	1153.2	245.2522		
$1.8 \times 10^{-10}$	1052.6	314.9646		

1.9 × 10 <sup>10</sup>	1118.9	252.6045		
Particle Multiplication Factor = 20 (r=1.8 mm)				
1.5 × 10 <sup>10</sup>	975.27	362.7979		
1.6 × 10 <sup>10</sup>	1012.2	405.8914		
1.7 × 10 <sup>10</sup>	949.85	334.2745		
$1.8 \times 10^{-10}$	1005.1	336.6493		
$1.9 \times 10^{10}$	1015.8	463 9119		



圖 71 球顆粒粒徑 20 倍





d. UCS 試驗 圖 72 試驗成果

# IV. 結論

在本研究中,進行離心模型試驗之前先進行了幾項 材料試驗,進行了無圍壓縮試驗與直剪試驗,以找出模 擬的砂水泥混合物強度以及砂和水泥的比例,以模擬軟 岩層。在離心機模型試驗中,逆斷層進行了4項試驗, 正斷層進行了4項試驗。當砂層與岩層間的厚度比發生 變化時,選擇模型尺寸為100mm(相當於原型尺寸的8 m)的覆土厚度,以觀察表面形變。而本研究的目的是: (1)根據厚度比的變化觀察表面影響區的範圍; (2) 觀察斷層活動過程中下方軟岩層會如何影響表面狀況。 因此,根據結果與討論,可以得出以下幾點結論:

1.軟岩層厚度與土層厚度比,是影響表面範圍的重要因素。對於逆斷層模擬,隨著土層厚度的減小,受影響區域範圍將增加,且最大影響範圍為239.5%H,其岩土層的厚度比為9:1。在正斷層模擬中也可看到相同的趨勢,儘管在受影響區域的範圍縮小之前即有最大值,即在岩層與砂岩層的厚度比為7:3時,其影響範圍為235.0%H。當比率為9:1時,總土層受影響的範圍則為215.5%H。

2.在逆斷層模擬中,當斷層垂直錯動達7.7%時,影響區末端位置在下盤側達到最大影響。在上盤側,岩層 提供了一個良好的基礎層,導致斷層受影響的區域末端 位置朝向下盤側位移。

3.在逆斷層模擬中,下盤剪切帶發展皆受到上覆土層的影響,隨著砂層厚度比從 50%降低到 10%,破裂跡傾角從 40 度降低到 23 度,而剪切帶傾角從 38 度降低到 23 度。另外,在上盤側破裂跡的發展則與上覆土層無關,且其發展比斷層傾角更陡,傾角約在 69-72 度之間。 4.在正斷層模擬中,只有純砂層之試驗中才產生唯 一的斷層剪裂帶。岩層厚度比從 50%增加到 90%時,岩 層中會產生裂隙,導致砂流入裂隙中;當岩層厚度增加 時,裂縫的位置會更深入下盤側,這使岩層之斷裂跡角 從 78.4 度降低到 65 度。

5.在正斷層模擬過程中,岩層與砂層厚度皆會影響 受影響區域的邊界位置,隨著砂層厚度比從 100%降至 10%,其砂層滑動傾角(α<sub>Nsf</sub>)由 58.3 度降低至 36 度。 因此,受影響區域邊界取決於砂土層的厚度。

6.在正常斷層模擬中,土層無法承受來自正斷層錯動時地表張力,而在模擬過程中,砂層會流入岩層裂隙中,導致總體積下降造成坑洞。

7.根據受影響區域邊界的關係,可發現其影響範圍 最大位置,並不發生在試驗結束時。

8.離心機模型試驗中所使用的砂與水泥混合物(5%的水泥混合物)其強度可以模擬軟岩層。

9.在逆斷層模擬中,近窗剖面與中心剖面之破裂跡 有些微不同,這表示在上覆土層有不同滑動行為。

10.使用 PFC2D 的 UCS 模擬參數,可用於模擬本研究所使用的軟岩層材料。

# 參考文獻

- Ahmadi, M., M. Moosavi, and M.K. Jafari, "Experimental investigation of reverse fault rupture propagation through wet granular soil", Engineering Geology, Vol. 239: pp. 229-240 (2018).
- [2] Anastasopoulos, I. and G. Gazetas, "Foundation– structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 5(3): p. 253-275, (2007).
- [3] Anastasopoulos, I., et al., "Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 8, pp. 943-958 (2007).
- [4] Anastasopoulos, I., et al., "Normal Fault Rupture Interaction with Strip Foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 3, pp. 359-370, (2009).
- [5] Ashtiani, M., A. Ghalandarzadeh, and I. Towhata, "Centrifuge modeling of shallow embedded foundations subjected to reverse fault rupture", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 3, pp. 505-519 (2016)
- [6] Baziar, M.H., et al., "Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 65, pp. 151-164 (2014).

- [7] Bransby, M., et al., "Centrifuge modelling of reverse fault-foundation interaction", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 607-628, (2008).
- [8] Bransby, M., M. Davies, and A. Nahas, "Centrifuge modelling of normal fault-foundation interaction", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 585-605 (2008).
- [9] Burridge, P. B., Scott, R.F., Hall, J.F., "Centrifuge Study of Faulting Effects on Tunnel", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115 (7), pp. 949-967 (1989)
- [10] Collins, B. D., Sitar, N., "Geotechnical Properties of Cemented Sands in Steep Slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, Vol 139 (10), pp. 1359-1366 (2009)
- [11] Chang, Y.Y., et al., "Use of centrifuge experiments and discrete element analysis to model the reverse fault slip". *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 2b, pp. 79-89 (2013).
- [12] Chen, Y.-G., et al., "Surface rupture of 1999 Chi-Chi earthquake yields insights on active tectonics of central Taiwan", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 91: p. 977-985 (2001).
- [13] Dobereiner, L., Engineering Geology of Weak Sandsotnes, Ph. D Dissertation, University of London, 1984
- [14] Faccioli, E., et al., "Fault rupture-foundation interaction: selected case histories", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 557-583 (2008).
- [15] Huang, C., Chan, Y.C., Hu, J.C., Angelier, J., 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).
- [16] Jalali, H. H., Rofooei, F. R., Attari, N. K. A., 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)
- [17] Kelson, K.I., et al., "Representative styles of deformation along the Chelungpu fault from the 1999

Chi-Chi (Taiwan) earthquake: Geomorphic characteristics and responses of man-made structures", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 91, No. 5: p. 930-952 (2001).

- [18] Kanji, M. A., "Critical Issues in soft rocks", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 6, pp. 186-195 (2014)
- [19] Kawashima, K., et al., "Reconnaissance Report on Damage of Bridges in 2008 Wenchuan, China, Earthquake", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 13, No. 7, pp. 965-996 (2009).
- [20] Lin, M.L, Chung, C.F., Jeng, F. S., 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)
- [21] Potyondy, D. O, et al., "A bonded-particle model for rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 8, pp. 1329-1364 (2004).
- [22] Rojhani, M., et al., "Centrifuge modeling of buried continuous pipelines subjected to reverse faulting". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 49, No. 6, pp. 659-670 (2012).
- [23] Taylor, R.N., "Centrifuges in modelling: principles and scale effects," *Geotechnical centrifuge technology*, pp.19-33, 1995.
- [24] Yao, C.F. and J. Takemura, "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).
- [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,中壢(2013)。
- [26] 陳榮華,「以離心模型模擬正斷層及逆斷層通過黏 土地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,中壢(2013)。
- [27] 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,中壢(2014)。

# 除役階段前期的水化學狀態對於結構組件腐蝕行為的影響評估 Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號:MOST 108-NU-E-007-001-NU 計畫主持人:葉宗洸 e-mail:tkyeh@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人:王美雅 計畫參與人員:葉育維 傳肇偉 執行單位:國立清華大學工程與系統科學系

# 摘要

核電廠運轉執照屆期後將進入除役階段,如因反應 器爐心內的燃料無法移至用過燃料池,燃料仍暫置於反 應爐內,使得爐心中的組件將因爐心燃料持續釋出衰變 熱而處於較高的冷卻水溫度下。水化學對於 BWR 壓力 槽內部結構組件的完整性有決定性的影響,需考量此一 期間反應爐之爐水環境條件與原設計所主要考量的運 轉環境應會有所差異,因此主冷卻水迴路中的水化學變 化對於反應爐內組件及暫存之用過燃料是否會因狀態 與時程的改變,而產生不同的材料腐蝕效應及影響,需 進行探討與評估,以了解此期間對爐內組件材料及結構 完整性可能造成之影響。在本研究中,SS 304 材料試片 進行動態電位極化掃描實驗,分析 SS 304 在這些環境中 的電化學腐蝕行為。研究結果顯示敏化熱處理過後的 SS 304 試片已達重度敏化程度,表示材料易發生沿晶應力 腐蝕龜裂。極化掃描實驗結果顯示,在過氧化氫與溶氧 的氧化性環境下,SS 304 會有較高的腐蝕速率,在溶氫 環境下則有較低的腐蝕速率,而越高的溫度,也會使 SS 304 有更高腐蝕速率的趨勢。

關鍵詞:SS 304、敏化熱處理、水化學、除役。

#### Abstract

Due to the operation license expiration, the nuclear power plant will enter the decommissioning stage. If the spent fuels are still placed in the core, the structural components stay at a higher water temperature due to decay heat of spent fuels. Water chemistry has a decisive influence on the integrity of the internal structural components of the BWR vessel. It is necessary to consider the corrosion behaviors of the structural components and spent fuels during early stage of decommissioning. The temporary status of the spent fuels placed in reactor core could be maintained for several years. Therefore, the water chemistry change in the primary coolant circuit is important to the integrity of the components and the spent fuel in the reactor during the early stage of decommissioning. In this study, the corrosion potentials and corrosion current densities of sensitized 304 SS were tested by potential dynamic polarization experiment, at three different temperatures with dissolved oxygen, hydrogen peroxide or hydrogen conditions. The result of corrosion potential and corrosion current density of 304 SS reveal that, in corrosive environment, such as dissolved oxygen and hydrogen peroxide conditions, the corrosion rate of 304 SS is higher. In dissolved hydrogen condition, the corrosion rate of 304

SS is lower.

Keywords: SS 304, sensitized heat treatment, water chemistry, Decommissioning.

## I. 前言

核一廠運轉執照屆期後將進入除役過渡階段前期, 因核一廠反應器爐心內的燃料無法移至用過燃料池,用 過燃料仍暫置於反應爐內,使得爐心中的元件將因爐心 燃料持續釋出衰變熱而處於較高的冷卻水溫度下,而機 組將維持於大修運轉模式。長時間停機下的爐心燃料 續行少量的中子與加馬射線產生,進而引起輻射分解 效應,導致過氧化氫的生成,進而分解成氧,使得爐水 存在多量的氧化劑。且因大修運轉模式下,壓力槽為開 放模式,空氣中也有大量的氧氣溶解於水中,因此爐水 中存在著大量的過氧化氫與氧氣存在。再者,爐水導電 度也相對比較高,但因爐水溫度不若運轉時為高,處在 較低的清況下。

#### Ⅱ. 主要內容

應力腐蝕龜裂為應力與特定環境共同作用所引發 的材料破裂現象,而應力腐蝕發生的必要因素有三:一 是足夠的張應力,加上腐蝕的環境與易受影響的高敏感 性材料,三者同時存在才有 SCC 的產生,欲防制及減緩 SCC 的發生須從其中任一項改善做起。張應力會促成 SCC 的發生,壓應力則會抑制其產生。爐心中的組件必 須承受材料本身的結構應力,及支撐燃料架、承受高壓, 高流速爐水所造成的震動等,都是組件的壓力來源。此 外,多數組件的結構無可避免地經過施工研磨、鑽洞以 及銲接等製程,組件表面的晶格結構產生破壞,造成殘 留應力,造成 SCC 發生的可能。由於輻射分解效應,導 致大量的過氧化氫生成,而存在高濃度的氧化劑,形成 腐蝕性環境。包括溫度、流速以及氧化性,都是影響環 境的因子。一旦材料的腐蝕電位低於臨界腐蝕電位值則 不易發生 SCC。而腐蝕環境的改善取決於溶解在水中的 氧及過氧化氫的濃度。若能降低爐水中氧及過氧化氫的 含量,組件上的電化學腐蝕電位就可以降至低於 IGSCC 的臨界電位,進而抑制 IGSCC 的發生。

沃斯田不銹鋼在銲接後於高溫冷卻時,在 500 oC 至 850 oC 溫度區間會在晶界上有碳鉻化合物析出的傾向, 造成晶界附近鉻元素被大量析出,此晶界的狹窄鉻乏區 具有較高的活性,易使材料發生 IGSCC 此為敏化現象。 經由上述得知,SCC 發生的三種因素:張應力、腐蝕的環 境及敏感性材料,三者環環相扣缺一不可,故為防制 SCC發生只要去除任一項筆因,即可達到防治 SCC 目 的。在本研究中,首先以 DL-EPR 測試其材料腐蝕敏感 性,同時在不同的環境下,包含腐蝕性較強的過氧化氫、 溶氧等水化學環境中,探討經過敏化熱處理後的 SS 304 的材料敏感性,並以動態電位極化掃描實驗分析其在不 同水化學環境中的電化學腐蝕行為。

# III. 結果與討論

為了瞭解敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304,在不 同環境條件(10 ppm 過氧化氫、除氧、溶氧與溶氫環境) 及不同溫度條件(室溫 30°C、60°C 與 80°C)下的腐蝕現 象,將試片放置於 1 M 的碳酸氫鈉水溶液中,調整環境 條件與溫度條件並進行動態電位極化掃描,再從極化曲 線圖中分析其電化學行為以及相關基本的電化學參數。

圖 1 為敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室温 30°C、60°C 與 80°C/除氧環境下的極化曲線結果,表 1 為從極化曲線圖中分析出的電化學參數。在除氧環境中, 溫度越高極化曲線會越往右下角偏移,代表腐蝕電位隨 著溫度上升而降低,而腐蝕電流密度則隨著溫度上升而 上升。

圖 2 為敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室温 30 ℃、60 ℃ 與 80 ℃/10 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>環境下的極化曲線結 果,表 2 為從極化曲線圖中分析出的電化學參數。在 10 ppm 過氧化氫的環境中,腐蝕電位與腐蝕電流密度的變 化與除氧條件下的結果有著相同的趨勢,隨著溫度上升, 腐蝕電位會下降而腐蝕電流密度會上升。由於過氧化氫 屬於強氧化劑,會加速金屬試片的氧化反應速率,從圖 可以觀察到 SS 304 在過氧化氫條件下的腐蝕電流密度 比除氧條件下的結果大,而隨著溫度上升,腐蝕電流密 度的上升幅度也較大。

圖 3 為敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室温 30 °C、60 °C 與 80 °C/溶氧環境下的極化曲線結果,表 3 為從極化曲線圖中分析出的電化學參數。腐蝕電位與腐 蝕電流密度的變化趨勢與除氧與過氧化氫條件相同,溫 度的上升會導致腐蝕電位的下降與腐蝕電流密度的上 升。氧氣在水化學環境中同樣是扮演氧化劑的角色,會 加速金屬試片的氧化反應速率。從圖可以觀察到在 60 °C 與 80 °C 的溶氧環境下, SS 304 的腐蝕電流密度皆比除 氧條件下的結果高,但在室溫下,除氧與溶氧環境下有 著接近的腐蝕電流密度。

圖 4 為敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室温 35 ℃、60 ℃ 與 80 ℃/溶氫環境下的極化曲線結果,表 4 為從極化曲線圖中分析出的電化學參數。在溶氫環境中, 隨著溫度的上升,腐蝕電位有下降的趨勢,但腐蝕電流 密度卻沒有明顯的趨勢。當溫度條件從室溫提升至 60 ℃ 時,試片的腐蝕電位有了大幅度的下降,電位差為 479 mV,而 60 ℃ 與 80 ℃ 條件下的腐蝕電位下降幅度較小, 僅有 31 mV。

# IV. 結論

在氧化劑的環境下,室溫時的過氧化氫因分解為氧 的速率較低,在室溫下的測試條件顯現比溶氧環境下的 腐蝕電流密度要高。較高溫度下,兩者氧化劑對於腐蝕 電流密度的影響差異不大。

在所有的溫度條件下,溶氫條件下的 SS 304 皆有最低的腐蝕電位與腐蝕電流密度(相對於同溫度的其他條件),代表氫氣的注入有助於抑制 SS 304 的腐蝕行為。

# 參考文獻

- [1] Fumio Umemura, Masatsune Akashi, and Teruaki Kawamoto, "Evaluation of IGSCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steels Using Electrochemical Reactivation Method", 防蝕技術, 29, 163-169(1980)
- [2] Denny Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", 2nd ed.
- [3] Electromical Corrosion "Handbook of Environmental Degradation of Materials" (Second Edition) (2012).
- [4] 柯賢文編著,腐蝕及其防治,初版,全華出版社, 民國 84年.
- [5] Y. J. Kim "Effect of Noble Metal Addition on Electromical Polarization Behavior of Hydrogen Oxidation and Oxygen Reduction of Type 304 Stainless Steel in High-Temperature Water", Corrosion, Vol. 55, No. 5(1999) 456~461. °



圖1敏化且預長氧化膜處理後的SS 304 在室溫 (30°C)、60°C與80°C/除氧環境下的極化曲線



圖 2 敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室温 (30°C)、60°C 與 80°C / 10 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 環境下的極化曲線



圖 3 敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室溫 (30℃)、60℃與 80℃/ 溶氧環境下的極化曲線



圖 4 敏化且預長氧化膜處理後的 SS 304 在室溫 (30℃)、60℃與 80℃/ 溶氫環境下的極化曲線

表1電化學參數 - 除氧環境

SS 304 –	ECP	i <sub>corr</sub>	Slope - β <sub>c</sub>
Deaerated	$(V_{SHE})$	$(nA/cm^2)$	
RT30 °C	0.233	6.05	-0.087
60 °C	0.082	290.7	-0.082
80 °C	0.054	307.9	-0.065

表2電化學參數 - 10 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

SS 304 – 10	ECP	icorr	Slope - β <sub>c</sub>
ppm H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	$(V_{SHE})$	$(\mu A/cm^2)$	
RT30 °C	0.064	0.015	-0.098
60 °C	-0.008	1.01	-0.171
80 °C	-0.025	1.57	-0.189

表3電化學參數 - 溶氧環境

SS 304 – DO	ECP	i <sub>corr</sub>	Slope - β <sub>c</sub>
	$(V_{SHE})$		
RT30 °C	0.270	$5.67 \text{ nA/cm}^2$	-0.077
60 °C	0.117	$1.37 \ \mu A/cm^2$	-0.123
80 °C	0.027	1.57 μA/cm <sup>2</sup>	-0.110

表4 電化學參數 - 溶氫環境

SS 304 – DH	ECP (V <sub>SHE</sub> )	$i_{mixed}$ ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> )	i <sub>corr</sub> (pA/cm <sup>2</sup> )	Slope - β <sub>c</sub>	Slope $-\beta_a$
RT35 °C	-0.180	1.470	5.03	-0.139	0.014
60 °C	-0.659	141.3	37.9	-0.099	0.040
80 °C	-0.690	214.3	5.29	-0.103	0.037

# 核設施除役後場址仍有處理/貯存設施者之輻射劑量管制及分析研究 Study of the dose regulations and assessment for nuclear power plant decommission and partial site release for radioactive waste storage

計畫編號: MOST 108-2623-E-007-001-NU 計畫主持人: 蔡世欽 e-mail: sctsai@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人: 張似瑮 計畫參與人員: 黃昱翔 賴柏辰 執行單位: 國立清華大學原子科學技術發展中心

# 摘要

核電廠除役的安全管制是目前原能會首要的任務。 根據我國法規,核子反應器設施除役後之場(廠)址,其輻 射劑量非限制性使用情況下,對一般人造成之年有效劑 量不得超過 0.25 毫西弗。然除役場址若僅部分釋出, 場址仍保留有廢棄物處理/貯存設施情況時,尚缺乏相關 的劑量管制研究及分析。本報告參考 NRC 的案例以及 考量國內的實際情況提出兩個方案,並進行對應的劑量 評估分析。方案一:採納 NRC 案例的原則,將低放貯存 設施及用過核子燃料貯存設施的劑量貢獻併入 0.25 mSv 的除役標準;方案二:將低放貯存設施及用過核子燃料 貯存設施個別依照劑量拘束值管制。本計畫針對這兩個 方案的劑量貢獻進行評估,探討其最適化之設計建議及 可行性,也舉辦專家顧問演講及研討會,集思廣益,提 供管制單位制訂法規參考。

關鍵詞:核能電廠除役、劑量管制標準、劑量分析

### Abstract

The safety regulation for the decommissioning of nuclear power plants now is the primary task of AEC in our country. According to our regulation criteria, the dose of a nuclear facility after decommissioning to the publics should not exceed 0.25 mSv per year for the condition of nonrestricted use. However, it is lack of relevant research and analysis for the circumstances that decommissioning site is partially released for the existing of radioactive waste storage facilities. In this study, two alternatives referring USNRC sample case and the actual situation of our country are considered. One is that the dose contributions from lowlevel storage facilities and spent nuclear fuel storage facilities is incorporated into the decommissioning regulation limit, that is, 0.25 mSv. The other one is that the low-level storage facilities and spent nuclear fuel storage facilities are regulated by their individual dose constraint. The radiation dose is analyzed for the two alternatives and the optimal design and feasibility were therefore explored. In this study, we also held expert consultant lectures and seminars to brainstorm ideas and reference for regulation formulation.

Keywords: nuclear power plant decommission, dose regulation standards, dose assessment

# I. 前言

核電廠除役之安全管制是目前原能會首要的任務。 除役之安全管制工作包括:除役計畫審查、除役作業檢 查、除役作業 輻射安全管制及環境輻射監測等工作,除 須進行相關除役關鍵安全議題之審查與驗證技術研究 發 展外,亦亟需就除役作業之安全管制,研習國際核能 先進國家核電廠除役之實務技術與經驗,進 行管制人 力培訓,提昇管制技術能力,以確保除役作業安全。

以首要面對除役的核一廠而言,108 年進入除役執 行工作,自 108 至 132 年,期程 25 年,細分為停機、 除役拆廠、廠址最終狀態偵檢以及廠址復原等階段。台 電公司必須提出最終狀態偵 測(FSS)報告,交由主管機 關原能會審查,並由主管機關並執行複驗偵測,以確認 FSS 報告合乎 除役標準。根據我國「核子反應器設施管 制法施行細則」第 17 條的規定,核子反應器設施除役 後之場(廠)址,其輻射劑量應符合下列標準:

- 限制性使用者,其對一般人造成之年有效劑量 不得超過1毫西弗。
- 非限制性使用者,其對一般人造成之年有效劑 量不得超過 0.25 毫西弗。

根據我國目前的規劃,廠址最終狀態偵檢以及廠址 復原等階段的同時,也包括用過核子燃料乾貯設施與低 放射性廢棄物貯存庫的興建。因此除役後核設施原場址 若仍有放射性廢棄物處理貯存設施,其輻射劑量管制應 該考量此情況,探討最適化的劑量管制標準。

# II. 主要內容

## 2.1 美國 NRC 管制單位除役計畫導則案例研析

美國核管會(NRC)所出版的除役計畫相關文獻是我 國執行除役工作最主要的參考依據。在NUREG-1757 " Consolidated Decommissioning Guidance"除役綜合導則 NUREG-1757 第 1 冊的 第 15 章,以及第二冊更新版, 特性調查、偵檢與輻射標準之決定"Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria",附 錄 K 中,特別加入場址部分釋放(partial site release, PSR) 的輔助導則,對本計畫極具參考價值。該附錄 K 提出 的虛擬案例是假定場址部分釋放,設置保留區貯存低放 射性廢棄物。該低放廢棄物貯存倉庫對周圍居民的可能 曝露途徑為直接輻射及地下水傳輸。其中,直接輻射的 設計基準是 0.05 mSv/a,或是考慮在保留區與外釋區之 間設置圍堤,將場址的關鍵暴露族群劑量降至 0.01 mSv, 只佔 0.25 mSv 除役限值的 4%。在這條件下,除役的導 出 濃度 指 引 水 平 DCGLs (Derived Concentration Guideline Level, DCGL)推導可依照 0.25 mSv 原先劑量 標準。而根據地下水模式推算,劑量峰值為 0.05 mSv, 出現在 15 年後,因此案例中將 0.25mSv 劑量配額分為 0.2(表土直接輻射)及 0.05(地下水)分開推導 DCGLs,然 後從中取保守值。

由上述的案例分析了解,美國 NRC 對於除役後核 設施原場址若仍有放射性廢棄物處理貯存設施,除役的 DCGL標準需扣除該廢棄物設施的輻射劑量貢獻後進行 推導,此原則經與陳士友教授及余家禮博士討論後得到 確認。以下本報告將根據我國目前的規劃,針對也包括 用過核子燃料乾貯設施與低放射性廢棄物貯存庫的興 建,進行模擬案例分析,並根據分析結果提出最適化的 劑量管制方案,提供管制單位制訂法規參考。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,年度原子能科技學術研討暨成果發表會 精簡報告範例格式。

# 2.2 放射性廢棄物貯存設施之輻射劑量評估方法蒐集與 研析

本計畫假定:保留低放貯存設施及用過核子燃料貯 存設施的案例,考量這兩項輻射來源的直接輻射與向天 輻射造成之劑量。考量的程式為:直接輻射劑量有 MicroShield 及 QAD 系列程式,向天輻射劑量有 SKYDOSE;用過核子燃料貯存設施則是採用 SCALE/MAVRIC 序列來進行混合式輻射遷移計算,可 以與目前已有的 DORT/MCNP 程式比較。

# III. 結果與討論

#### 3.1 低放貯存設施劑量分析結果

假設低放貯存設施存放 50,000 桶(半徑 28.6 cm, 高 88.4 cm) 55 加侖桶的廢棄物,假定核種為 <sup>60</sup>Co,每 桶活度由表面劑量率反推為 3.642×10<sup>8</sup> Bq。貯存設施內 堆疊 3 層廢棄物桶,尺寸估計為 6544 cm×6544 cm×265.2 cm,總活度約 492.16 Ci。設施外牆與屋頂的混凝土密度 2.3 g/cm3,厚度 35 cm。以上述貯存庫的條件估算 18 個 不同距離設施邊界處的輻射劑量,分別是距外牆 1、3、 5、7、9、12.5、17.5、22.5、27.5、32.5、37.5、42.5、47.5、 55、65、75、85、與 95 m。分析結果如圖 3.1 所示。

圖 3.1 中的 Total 是直接輻射與向天輻射的總和, Direct 是直接輻射劑量, Skyshine 是向天輻射劑量。設 施邊界的直接輻射劑量是利用 MicroShield 依貯存庫的 假設條件估算得到 Abosrbed Dose Rate (mGy/hr) With Buildup, 再乘上 ICRP Publication 74 中 Table A.21 提供 的 Conversion Coefficient 得到 Ambient Dose Equivalent。 以 95 m 處直接輻射劑量為例,計算如下:

$$4.889 \times 10^{-5} {}_{mGy/hr} \times \frac{1_{Gy}}{1000_{mGy}} \times 1.16_{Sv/Gy} \times \frac{1000_{mSv}}{1_{Sv}}$$
$$\times 8760_{hr/yr} = 0.4968_{mSv/yr}$$

其中 Conversion Coefficient 的值考慮 Photon Energy

是 <sup>60</sup>Co 衰變時產生的 1.17 MeV 與 1.33 MeV 光子的平 均能量 1.25 MeV 得到 1.16 Sv/Gy。

設施邊界的向天輻射劑量是利用 SKYDOSE 依貯存 設施的假設條件,計算 SKYSHINE DOSE (rad/photon), 再乘上兩倍的廢棄物上表面活度,與 ICRP Publication 74 中 Table A.21 提供的 Conversion Coefficient,得到 Ambient Dose Equivalent。以 95 m 處向天輻射劑量為例, 計算如下:

$$1.9574 \times 10^{-22} rad/photon \times \frac{1_{Gy}}{100_{rad}} \times 1.16_{Sv/Gy} \\ \times \frac{1000_{mSv}}{1_{Sv}} \times \frac{2_{photon/sec}}{1_{Bq}} \times 492.16_{ci} \\ \times 3.7 \times 10^{10}_{Bq/Ci} \\ \times e^{-0.02716 \times 1.5 \times (88.4 \times \frac{3}{2})} \times 3600_{sec/hr} \\ \times 8760_{hr/orr} = 0.01175_{mSn/orr}$$

其中廢棄物上表面的活度,是考慮總活度經3層55 加侖桶一半厚度指數衰減後的活度。廢棄物的 Mass Energy-absorption Coefficient 參考 NIST (National Institute of Standards and Technology) 中的 Ordinary Concrete,光子能量同樣考慮 1.25 MeV 得到 2.716×10<sup>-2</sup> cm<sup>2</sup>/g。廢棄物的密度約 1.5 g/cm<sup>3</sup>。



圖 3.1 低放射性廢棄物貯存設施邊界的輻射劑量

由圖 3.1 的結果顯示:低放貯存設施的劑量主要來 自直接輻射,在設施屋頂混泥土結構的屏蔽下向天輻射 的劑量貢獻不到 1/100,可以忽略不計。整體輻射劑量在 約 100 m 處為 0.75 mSv。

#### 3.2 用過核子燃料貯存設施劑量分析結果

參考自原能會網站核一廠用過核子燃料目前貯存 容量為 6,150 束,再加上停機後兩機組內各別尚有 408 束燃料在反應器壓力槽內,總計共有 6,966 束用過核子 燃料,在此假設貯存設施射源項總量為 7,000 束用過核 子燃料。

先對單一金屬護箱作表面劑量率分析,其能譜與劑 量率結果如圖 3.2。圖 3.2 顯示:金屬護箱劑量率分布在 護箱側邊,以加馬為主要劑量率貢獻,約為中子劑量率 的兩倍;而護箱頂部則以中子為主要貢獻,加馬劑量率 約低於中子劑量率一個數量級。在中子能譜方面,護箱 側邊包含有慢中子能群至快中子能群間的分布,以快中 子能群佔比較多,護箱頂部則主要皆為快中子能群;加
馬能譜方面,不論是護箱側邊或是頂部區域,皆主要為 0.1-1 MeV 的加馬能群 (燃料光子射源主要為 0.6-0.7 MeV 能群,結構光子射源主要為 1.17-1.33 MeV 能群)。

考慮整體乾貯設施對廠外劑量率貢獻。設施屏蔽計 算模型同時包含 100 多組護箱,內裝填 7,000 束用過核 子燃料,貯存設施包含側邊的進氣通道、迷道設計與頂 部的出氣通道。計算設施往外 100 m 處劑量率分布結果, 如圖 3.3。整體乾貯設施劑量率分布以加馬劑量為主要 貢獻,在 30 m 處劑量率呈現平緩分布,推測是受到設施 煙囪設計之影響,整體輻射劑量在約 100 m 處,值為 4.19×10<sup>-2</sup> mSv。



圖 3.2 單一金屬護箱表面能譜與劑量率



圖 3.3 用過核子燃料貯存設施周遭劑量率分布

#### 3.3 最適化之輻射劑量管制及可行性分析

綜合上述之研究,本報告參考 NRC 的案例以及考 量國內的實際情況提出兩個方案,並進行對應的劑量評 估分析。方案一:採納 NRC 案例的原則,將低放貯存設 施及用過核子燃料貯存設施的劑量貢獻併入 0.25 mSv 的除役標準;方案二:將低放貯存設施及用過核子燃料 貯存設施個別依照劑量拘束值管制,不併入 0.25 mSv 的 除役標準。以下謹針對這兩個方案的劑量貢獻進行評估, 並探討其最適化之設計建議及可行性分析。

#### 3.3.1 方案一:併入 0.25 mSv 的除役標準

參考 NRC 的案例,將設計基準訂為 0.05 mSv/a,甚 至為了不影響除役 DCGL 的劑量配額,考慮在保留區與 外釋區之間設置圍堤,將場址的關鍵暴露族群劑量降至 0.01 mSv。在此情況下,保留區的距離及圍堤的厚度成 為輻射劑量管制的主要考量。而用過核子燃料貯存設施 的輻射劑量貢獻約為低放的 1/100,因此在此僅考率低 放設施的影響。

利用圖 3.1 的結果,推估低放設施總劑量與距離的 趨勢線如下:

$$H^{*}(10) = 1368.6x^{-1.713}$$
$$x = \left[\frac{H^{*}(10)}{1368.6}\right]^{\frac{1}{-1.713}}$$

其中x是低放貯存設施外牆與設施邊界的距離。根 據此公式,若要將低放貯存設施的劑量影響降至 0.05 mSv,則保留區距離約需 390 m。若欲降至 0.01mSv 則 保留區距離約需 1000 m。

若考慮以在邊界 50 m 處興建圍堤來降低輻射劑量。 首先利用上式得到 50 m 處的總劑量約 1.68 mSv/yr,再 利用下式估算水泥牆的厚度:

$$H^{*}(10)_{rear} = H^{*}(10)_{incident} e^{-\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{shielding}\rho t}$$
$$t = \frac{-\ln \frac{H^{*}(10)_{rear}}{H^{*}(10)_{incident}}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{shielding}\rho}$$

其中t是圍堤的厚度。根據上式在 50 m 處增設 57 cm 的圍堤可以將劑量降至 0.05 mSv 以下;若欲降至 0.01mSv 則圍堤厚度要超過 1m。

參考上述的分析結果,若採用 NRC 將低放設施的 劑量貢獻降至 0.01mSv 以下,則約要有超過 1000m 的保 留區,或是興建超過 1 m 的圍堤,考量我國目前核一廠 的現狀,有相當的執行難度。若將貯存設施的劑量貢獻 提升至 0.05 mSv,併入 0.25 mSv 的除役標準,則除役的 DCGL 還餘有 0.20mSv 的配額可供使用,保留區距離 390 m 或是 57 cm 的圍堤也尚屬可行。

#### 3.3.2 方案二:不併入 0.25 mSv 的除役標準

根據 ICRP 103 號報告中提出劑量限值(dose limit)及 劑量拘束值(constrain)的概念,劑量限值是根據劑量 vs 風險的科學,考量所有的曝露源所訂定出來的總劑量限 值;而為了方便於輻射管制,根據單一射源又再訂定劑 量拘束值。以一般人的輻射劑量防護而言,ICRP 提出的 劑量限值為 1 mSv,並建議可以針對不同單一射源訂定 不同的劑量拘束值來做為管制標準,而個別的劑量拘束 值不宜再彼此併入考量,以免導致過度嚴苛的輻射劑量 管制,也不符合 ICRP 輻射防護原則及精神。根據此考 量,若核設施除役後場址仍有低放及用過核子燃料貯存 設施應另行規定其劑量拘束值,且不應併入 0.25 mSv 的 除役標準。

過去我國曾經訂定「低放射性廢料貯存設施管制規 範」,該規範雖然已於民國 92 年 7 月 30 日廢止,而該 規範第三條曾訂定:「核電廠內的低放貯存設施,其所造 成在廠界外之居民年有效等效劑量不得超過 0.05 毫西 弗,且併入合計該廠對廠界外居民所造成之總劑量,不 得超過原子能委員會核定之劑量限值」。此0.05 mSv 即 是劑量拘束值的概念。因此本方案建議:將0.05 mSv 訂 定為核設施除役後場址仍有低放及用過核子燃料貯存 設施的劑量管制,且不併入0.25 mSv 的除役標準。

#### 3.4 訓練課程與研討會

本計畫與財團法人中華民國輻射防護協會合作,邀 請國內外專家顧問前來演講,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。 課程及研討會內容謹簡述如下:

1. RESRAD 系列程式訓練複習及進階課程

- 複習課程講師為核能研究所黃玶吉博士與清 華大學原科中心劉鴻鳴博士兩位具 RESRAD 模擬經驗且熟悉核電廠輻射實務之講師。
- 進階課程由美國阿岡國家實驗室余家禮博士
   與鄭靜枝博士來臺講授,5天的課程中學員們
   有豐富的上機實作經驗。
- 由兩位進階課程講師、台電、原能會、清大等 與除役相關代表人員參與技術討論。本計畫人 員與余家禮、鄭靜枝兩位專家針對本計畫研擬 最適化的劑量管制標準進行討論。
- 吴全富博士專題演講 2019 核能電廠的除役技術研 討
  - 時間:2019年8月27日
  - 主辦單位:財團法人中華民國輻射防護協會、 清華大學核子工程與科學研究所
- 3. 尹學禮顧問專題演講 輻射劑量分析方法簡介
  - 時間:2019年10月8日
  - 主辦單位:財團法人中華民國輻射防護協會、 清華大學原子科學技術發展中心
- 4. 2019 劑量評估程式應用研討會
  - 時間:2019年12月9日-10日
  - 主辦單位:財團法人中華民國輻射防護協會、
     財團法人核能與新能源教育研究協進會、清華
     大學原子科學技術發展中心
  - 協辦單位:清華大學核子工程與科學研究所
  - 研討會中參與本計畫之研究生賴柏辰及黃昱 翔分別上台簡報。賴柏辰的題目為:乾貯設施 輻射場特性分析與 QAD 程式相關應用,黃昱 翔的題目為:低放貯存場 SKYDOSE 輻射影 響評估。會中並充分討論評估除役場址的輻射 劑量管制需求。

# IV. 結論

本計畫進行國際法規的蒐集,輻射劑量評估程式的 探討及研析,以從中探討最適化的劑量管制標準。綜合 本次之研究,參考 NRC 的案例以及考量國內的實際情 況,本報告提出兩個方案,並進行對應的劑量評估分析。 方案一:採納NRC案例的原則,將低放貯存設施及用過 核子燃料貯存設施的劑量貢獻併入 0.25 mSv 的除役標 準;方案二:將低放貯存設施及用過核子燃料貯存設施 個別依照劑量拘束值管制,不併入 0.25 mSv 的除役標 準。報告中並針對此兩方案的劑量貢獻進行評估,並探 討其最適化之設計建議及可行性分析。在我國電廠除役 時部分釋出作為核廢料貯存設施的法規目前尚付之闕 如之際,本計畫的成果將提供管制單位制訂法規必要的 參考依據。

# 参考文獻

- 台灣電力股份有限公司, "核一廠用過燃料乾式貯 存設施安全分析報告," 97年1月。
- [2] 行政院原子能委員會網站:核能電廠用過核子燃料 貯 存 表 https://www.aec.gov.tw/%E7%84%A6%E9%BB%9E %E5%B0%88%E5%8D%80/%E4%B9%BE%E5%B C%8F%E8%B2%AF%E5%AD%98%E7%AE%A1% E5%88%B6/%E7%AE%A1%E5%88%B6%E5%8B %95%E6%85%8B/%E6%A0%B8%E8%83%BD%E 9%9B%BB%E5%BB%A0%E7%94%A8%E9%81%8 E%E6%A0%B8%E5%AD%90%E7%87%83%E6%9 6%99%E8%B2%AF%E5%AD%98%E8%A1%A8--218 224 3436 3502.html
- [3] 陳士友,「核能電廠除役技術研討-輻射特性,偵查 及殘餘劑量」,國立清華大學演講簡報資料,2018 年4月30日。
- [4] Abelquist, E.W., Decommissioning Health Physics : A Handbook for MARSSIM Users, 2nd ed. 2014.
- [5] AECL, "QAD-CGGP-A Point Kernel Code System for Neutron and Gamma-Ray Shielding Calculations Using the GP Buildup Factor" RSICC CCC-645
- [6] C.J. Werner1, et. al, "Monte Carlo N Particle® Transport Code System Version 6.2," LA-UR-17-29981, Los Alamos National Laboratory report, 2017
- [7] IAEA TRS-389, "Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes", TRS-389, 1998.
- [8] iTRS-NURAL, "EASY-QAD A Visualization Code System for Gamma and Neutron Shielding Calculations, Version 2.0.1" RSICC CCC-744
- [9] K.V. Subbaiag and R. Sarangapani, "GUI2QAD-3D: A graphical interface program for QAD-CGPIC program", Annals of Nuclear Energy, 33, P.22-29
- [10] OECD/NEA ," R&D and Innovation Needs for Decommissioning of Nuclear Facilities, "OECD/NEA No. 7191, 2014.
- [11] ORNL, "SCALE Code System," ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.2, 2017.
- [12] Peplow, D.E. "MAVRIC: Monaco with Automated Variance Reduction Using Importance Calculation," ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, Sect. S6, 2011.
- [13] USNRC, "Consolidated Decommissioning Guidance: Decommissioning Process for Materials Licensees, Final Report," NUREG-1757 Vol. 1, Rev. 2, 2006.
- [14] USNRC, "Consolidated Decommissioning Guidance:

"Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria," NUREG-1757 Vol. 2, Rev. 1, 2006.

- [15] USNRC, "Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM), NUREG-1575 Rev. 1, 2002.
- [16] USNRC, "Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual (MARSAME), NUREG-1575, Supp.1, 2009.
- [17] USNRC, "Multi-Agency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual (MARLAP), NUREG-1576, 2004.
- [18] Yu, C., et al., "Development of Probabilistic RESRAD 6.0 and RESRAD-BUILD 3.0 Computer Codes," NUREG/CR-6697, 2000.
- [19] Yu, C., et al., 2001, User's Manual for RESRAD Version 6, ANL/EAD-4, Argonne National Laboratory, Argonne, 2001.

# 放射性物料安全科技

# 地化模式應用於放射性廢棄物處置安全評估之研究 Application of geochemical model in safety assessment of radioactive waste disposal

計畫編號: MOST 108-2623-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

本研究進行地化模式應用研究,包括地化模式發展、模 式內的化學熱力學資料庫的來源、核種溶解度模擬、核種表 面絡合吸附研究及模擬,以及活度係數方程式選擇和應用。 研究成果可以作為放射性廢棄物處置場安全評估應用。

**關鍵詞:**核種、地化模式、熱力學資料庫、安全評估、 放射性廢棄物處置

#### Abstract

In this study, the application of geochemical model was studied, including the development of geochemical model, the source of chemical thermodynamics database, nuclide solubility simulation, nuclide surface complexation adsorption research and simulation, and activity coefficient equation selection and application. The sduty results can be used for safety assessment of radioactive waste disposal sites.

**Keywords:** nuclide, geochemical model, thermodynamic database, safety assessment, radioactive waste disposal.

# I. 前言

放射性廢棄物處置概念係利用工程障壁及天然障 壁所形成的多重障壁系統,其中工程障壁系統(EBS) 的功能是預防和/或阻止放射性核種從放射性廢棄物中 外釋到母岩和生物圈中。然而,處置場環境(例如周圍 水的 pH、Eh 和離子組成)影響放射性廢棄物處置場 EBS 功能。因此,EBS 中放射性核種傳輸的定量預測對評估 放射性核種外釋相關風險至關重要。過去用於放射性放 射性廢棄物處置安全評估,有關地下水和放射性核種傳輸 的計算,通常要求經驗方法處理異相間反應,如等溫線性模 型(Kd 方法)。分配係數(Kd)可描述放射性核種在特 定 pH、Eh 和周圍水體離子組成的異相介面行為,但在 變化的環境條件下,Kd 值可能無法反映出放射性核種 在動態地球化學環境下的化學行為。近年來研究表面絡 合模型解釋水化學和礦物的離子組成隨時間的變化及 其對放射性核種遷移的影響已逐漸具有成果(Zavarin and Bruton, 2004)。包含表面絡合反應納入反應化學傳輸 模型可以作為評估 EBS 的放射性核種於水-礦物間地化 傳輸模擬,以提供更強大異相介面地化反應的基礎。因 此,吸附/解吸反應(即表面絡合模型)可以應用於放射 性核種通過 EBS 的水文地球化學傳輸模擬,可以水環境 化學觀點利用礦物表面絡合模型的化學熱力學及平衡 常數資料評價核種反應化學傳輸之特性。

地球化學模擬係為安全評估之重要工具,在於其符

合處置場功能安全評估的兩方面特徵:(1)地化模式可 以模擬未來發生什麼化學物種會被形成及未來可能的 地化環境狀態。例如,一個處置高放射性廢棄物的處置 場將來會發生什麼化學環境變化?地化模式是目前能 預測這類問題的重要工具。(2)多種地球化學作用將會影 響處置場的安全性。高放射性廢棄物處置之後,該處置 空間的熱力學條件因為環境條件因素變化將發生改變, 進而使得礦物發生反應以達到新的平衡。而一旦放射性 核種發生外釋,核種將會與各種礦物發生化學反應,若 該反應過程能使得核種形成吸附或沉澱反應,將會阻滯 核種的遷移,減緩傳輸至生物圈之時間(朱晨,2017; Altmann, 2008)。所以本計畫研究地化模式之放射性核種 地化反應、放射性核種溶液相-礦物間之化學熱力學資料, 分析核種和礦物間的水化學離子組成及物種形成,成果 可作為放射性廢棄物最終處置功能安全評估與安全分 析應用,並精進核種地化反應及情節分析審驗技術。

# II. 主要內容

#### 2.1 主要核種分析

本研究為探討國內高放射性廢棄物之主要核種,針 對台電公司提出之重要核種。

針對前述主要核種,以化學元素週期表列出如下, 紅色元素符號並劃有底線者,共有 22 個(如圖 1)。該主 要核種是否可於地化模式進行模擬,本研究進行分析。



元素符號並劃有底線者)

#### 2.2 地化模式發展與核種地化反應模擬

2.2.1 地化模式發展

地化模式常以化學反應之熱力學資料為基礎,將地 化反應轉為化學反應數學方程式,經由數學演算法寫成 數值模式後,再編成電腦程式即為地化模式,如: PHREEQCI(USGS, 2017; Parkhurst and Appelo, 1999)、 WATEQ4F(Ball and Nordstrom, 1991)、MINEQL(Westall,

1976) FITEQL(Heberlin and Westall, 1996) MINEQL+(Schecher and McAvoy, 1992) 

MINTEQ(Felmy et al., 1983) · MINTEQA2(Allison et al., 1991) · EQ3/6(Wolery and Jarek, 2003)等。地化模式可應用於高 放地質處置工程與天然障壁之安全評估,作為水-岩交互 作用與核種於近場和遠場之反應化學傳輸之研究工具。 本研究整理目前能夠處理複雜化學反應之地化模式如。 這些模式主要由輸入、輸出、反覆運算演算法及化學熱 力學資料庫等幾個模組組成。其中,輸入部份一般有初 始溶液的組分總濃度和參加反應的固相、氣相等組成, 輸出模組則主要有各平衡組分、物種的濃度、溶液與固 相和氣相間的物質交換量等。反覆運算演算法模組用於 非線性方程組的求解,基本上都是採用改進的 Newton-Raphson 反覆運算法。化學熱力學資料庫模組包括標準 狀態(25 ℃, 1 atm)下的熱力學平衡常數、各種溫度變化 下的平衡常數、反應自由能隨溫度變化之多項式係數值、 活性係數計算所需的參數、水溶液中各物種的化學計量 係數等。

執行地化模式模擬需要準備事項包括:(1)地化模式 (2)化學熱力學資料庫、化學動力學以及表面參數資料(3) 研究區域內的化學與物理性質實測數據。關於地化模式 模擬,需要注意事項包括:(1)化學分析數據是否足夠精 確以支持模擬研究?(2)化學熱力學資料庫是否有包含 所選取的關鍵核種、表面絡合物和礦物?(3)化學熱力學 資料庫中關於重要反應的平衡常數值是否足夠精確?(4) 離子強度之數值足夠小能適用於模擬模式中的活度係 數模型?後續針對核種地化模擬之化學熱力學資料庫 來源、表面絡合化學模型及地化模式中活性係數模型, 進行研究與討論。

# 2.2.2 地化模式的化學熱力學資料庫(TDB)

美國 USGS 發展之 PHREEQC 模式內涵熱力學資料 庫,除了 PHREEQC、WATEQ4F與 MINTEQ 外,目前 已有美國 Lawrence Livermore 國家實驗室發展化學熱 力學資料庫,該資料庫源自 EQ3/6,目前已可於 PHREEQC 模式使用。惟核能先進國家以各種地化模式 為基礎,發展可適用於 PHREEQC、EQ3/6、目前法國 ANDRA/RWM 開發之 ThermoChimie 化學熱力學資料庫 相關完整,已與其他模式進行地化應用,包括:PhreeqC、 Chess、Crunch(Steefel, 2009)、Toughreact(Xu et al., 2011), 這些讀取的相容性將視需求性再擴充至其他模式,包括 Medusa(Puigdomenech, 2012)、 Geochemist's workbench(Bethke and Yeakel, 2014)等。

其他研究機構也開發了各種化學熱力學資料庫,包括由經濟合作與發展組織(OECD)NEA (Grenthe et al., 1997; Guillaumont et al.,2003; Hummel et al., 2005; Martinez et al., 2019)開發的 NEA 之化學熱力學資料庫 (TDB)。德國研究機構開發針對超鈾元素開發的化學熱力學資料庫 THEREDA(Richter et al., 2015)。日本 JNC 的 TDB (Yui et al., 1999),英國的 HATCHES(Cross and Ewart, 1991), Nagra/由瑞士放射性廢物管理署開發的 PSI 化學熱力學資料庫(Hummel et al., 2002)和由 Mol (比利時)的 SCK.CEN 發展的 MOLDATA 化學熱力學資料庫,用於 ONDRAF/NIRAS 在安全分析案例使用(Wang et al., 2011)。開發這些化學熱力學資料庫是為了支持放射性廢

棄物處置場安全分析和功能評估所需的地球化學建模, 所以該完整化學熱力學資料庫,使得高放廢棄物處置地 化反應化學熱力學資料具備完整地球化學反應資料。本 研究特對於法國 NDRA/RWM 已發展化學熱力學資料庫 THERMOCHIMIE-TDB、德國研究機構開發針對超鈾元 素開發的化學熱力學資料庫 THEREDA、NEA 之化學熱 力學資料庫(TDB)進行研究及蒐集。

#### 2.2.3 核種地下水環境中化學型態和溶解度模擬

本研究根據前述化學熱力學資料庫,利用 THEREDA 之 化 學 熱 力 學 資 料 庫 (THEREDA\_PIT\_PHRC\_R-07.dat),利用 THEREDA 之 化學熱力學資料庫案例(Bok et al., 2013)進行核種 Th(+4), Np(+4), Pu(+4)於 NaCl、CaCl<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、KHCO<sub>3</sub>等水溶 液中之化學型態和溶解度模擬。另針對台電公司出版 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地下水質,該地下水水質係為K 區潛在場址現場地下水水質,針對核種 Th(+4), Np(+4), Pu(+4)於該地下水水質情況下之化學型態和溶解度模擬。

#### 2.2.4 核種表面絡合化學模型

表面絡合是一種描述吸附現象的理論。這些吸附現 象會發生在鐵、鋁、二氧化矽和錳氫氧化物、黏土礦物 以及腐殖物質的表面上。在此基礎上,目前已經提出四 種模型,即恒電容模型、擴散雙層模型、三層模型和電 荷分佈多點絡合模型進行表面絡合化學反應。以黏土礦 物為例,沿黏土礦物網格構造表面 Si-OH 和 Al-OH 破鍵 之水解作用,產生如羥基的「表面電荷」,這些表面電荷 可以是正電荷、負電荷,主要取決於矽酸鹽構造和溶液 的 pH 值和鹽度。表面電荷的位置解離氫原子後,會與 陰陽離子(包含核種離子)產生絡合反應。本研究利用前 述 PHREEQC 內建化學熱力學資料庫 Wateq4F.dat, 模擬 氫氧化鐵吸附鈾核種表面絡合反應; 蒐集 Np4+核種於 MX-80 膨潤土表面絡合反應常數,於 pH 變化下,分析 MX-80 膨潤土吸附 Np4+核種之 Kd 值隨 pH 變化;另針 對台電公司 K 區潛在場址現場地下水水質,模擬 Np4+核 種於地下水水質條件下於MX-80膨潤土表面絡合反應。

#### 2.2.5 地化模式中活性係數模型之選擇及應用

地下水進入到深層地質處置場之後,放射性核種若 釋出將與水文地質材料發生地化反應。考慮到處置場化 學反應中發生的離子相互作用,需要使用活性係數來修 改化學活度以代表所產生化學物種的真實濃度。

通常,活性係數隨著溶液的濃度而變化。不同的活 性係數模型可能會讓活性係數產生明顯的變化。本研究 回顧活性係數的理論,並比較了活性係數模型的適用濃 度範圍。使用四個地化模式 PHREEQCI,MINEQL+, MINTEQA2 和 EQ3/6 來測試模式適用性,並說明應用 於處置場系統設定之差異。並可作為處置場系統應用地 化模式選擇合適模型之指導。

#### 2.3 核種地化情節審驗技術

本研究提出核種地化情節審驗技術,有關核種地化 情節安全評估審驗技術目前考量之方法,包括放射性廢 棄物處置場的定律式之評估及概率式評估方法,基本上 該評估方法使用兩種主要的化學參數資料,包括:

- 放射性核種溶解度,以做為限制核種源項濃度之 判斷依據。這可以利用地化模式進行地化反應模 擬。
- 2. 放射性核種吸附反應及吸附係數,用於估算處置 場系統各部分(包括近場或工程障壁)中的放射 性核種吸附。包含微觀的表面絡合吸附反應及離 子交換反應,這些反應可以利用地化模式進行模 擬。另外對於吸附係數,通常係以分配係數 Kd 值 或遲滯因子 Rd 參數的形式表示,由於 Kd 值為定 值,一般利用概率性式評估方法,假設 Kd 值屬於 概率分布函數(如對數常態分佈),並產生多個 Kd 值或推薦之 Kd 值進行核種遷移安全評估模擬分 析。

#### 2.4 地化模式應用於安全評估

放射性核種的物種型態分佈是為瞭解其在處置場 地質介質中地球化學反應的平衡結果,這些組成成分及 地下水水質可以做為反應化學傳輸模擬遷移機制及遷 移過程的基礎資料。必須將現地及實驗室實驗和地球化 學模擬研究相結合,才有可能對核種在高放廢物處置庫 中的化學反應行為進行描述和預測。現階段地化模式已 經得到了一定程度的發展,但未來仍有較大的發展空間。 在研究中應注意以下:

1. 建立詳細的地球化學模型前,須確定建立何種模型

建立地球化學模型進行研究之前,必須做如下考慮 (1)模型中包含哪些組成分;(2)模型中包括哪些類型的地 球化學反應;(3)模型中是否包含化學反應動力學過程或 是啟用局部平衡假設;(4)是否有其他過程需要模擬。 2. 活性係數的計算

選定適當的化學熱力學資料庫對於是否能產生適 當的物種活性係數有相當重要的影響,熱力學資料庫中 提供的離子特定參數對於改良 Debye-Hückel 方程式適 用性有相當重要的關係,且熱力學資料對影響模式模擬 時產生的物種分佈型態,將反應出活性係數的正確性, 例如在稀薄溶液(I<0.1m)中,若不恰當的熱力學資料庫 造成離子強度差異將可能導致高電荷物種活性係數的 誤差。故熱力學資料庫選定要特別謹慎。

 反應的熱力學平衡常數需要進一步補充和完善其所 用熱力學資料庫

各種礦物及土壤的表面絡合模型的平衡常數目前 還不多,應組織專家進行編評以確定推薦值。同時土壤的 成分複雜且因產地而異,使得表面絡合模型的平衡常數 有很強的地域性,因此需要各國研究者根據自己所研究 的物件建立自己的資料庫。

- 表面絡合反應納入反應化學傳輸模型評估放射性廢 棄物處置安全評估
- 將地化模式之化學場(C)與熱力-水力-應力(THC)模式 耦合,進一步結合成THMC完全耦合模式

# III. 結果與討論

台電公司主要核種,共有22個化學元素,包括:C-14、Cl-36、Ni-59、Se-79、Sr-90、Zr-93、Nb-94、Tc-99、Pd-107、Sn-126、I-129、Cs-135(Cs-137)、Pb-210、 Ra-226、Ac-227、Th-229(Th-230、Th-232)、Pa-231、 U-233(U-234、U-235、U-236、U-238)、Np-237、Pu-238(Pu-239、Pu-240、Pu-242)、Am-241(Am-243)、Cm-245(Cm-246)。法國ANDRA/RWM發展化學熱力學資料 庫 THERMOCHIMIE-TDB Version 9b0

(www.thermochimie-tdb.com),目前已更新至Version 10a, 該資料庫包含基本的主要元素、數量眾多的核種和毒性 化學元素,可產生之2300個化學反應產物。該資料庫已 包含台電公司主要核種21個化學元素,該資料庫未包括 台電公司所列主要核種Ac-227。可考慮核種水合、氧化 還原、溶解/沉澱反應。但該THERMOCHIMIE-TDB資料 庫對於表面絡合反應尚未建立;德國發展的化學熱力學 資料庫THEREDA化學資料庫,該資料庫已包含台電公 司主要核種16個化學元素,該資料庫未包括台電公司所 列主要核種Zr-93、Nb-94、Pd-107、Sn-126、Pb-210、Ac-227。該資料庫使用Pitzer方法適用於高濃度的鹽水系統, 用以計算的活性係數進行濃度轉換為活度。同樣可考慮 核種水合、氧化還原、溶解/沉澱反應。但該THEREDA 資料庫對於表面絡合反應,需由使用者自行建立於輸入 檔中;OECD的NEA建立的化學熱力學資料庫NEATDB, 該資料庫已包含台電公司主要核種16個化學元素,該資 料庫未包括台電公司所列主要核種Nb-94、Pd-107、Ra-226、Ac-227、Pa-231、Cm-245(Cm-246)。TDB數據的適 用性僅限於中低離子強度的環境和低溫(低於100°C)。 此外,NEATDB數據並未涵蓋安全評估所需的所有物種 和化學熱力學量。為了應用到實際系統中,可能需要用 戶通常從其他化學熱力學資料庫中獲取的其他數據,以 確保所選的最終狀態是一致的,並代表目標系統的化學 反應。目前該資料庫系統可考慮核種水合、氧化還原、 溶解/沉澱反應。但該NEA TDB資料庫同為未包含表面 絡合反應,需由使用者自行建立於輸入檔中。

Th(+4)、Np(+4)、Pu(+4)於NaCl、CaCl2、Na2CO3、 KHCO3等水溶液中之化學型態和溶解度模擬發現: Th(OH)<sub>4(s)</sub>主要溶解離子為Th<sup>4+</sup>(aq)、Th(OH)<sub>4(aq)</sub>水合物, Th4+總溶解濃度隨pH增加而減小,其中pH=9.134時為 1.259x10<sup>-9</sup>M; Np(OH)<sub>4(s)</sub>主要溶解離子為帶4價的  $NpC1^{+3}_{(aq)} \cdot Np(OH)^{+3}_{(aq)} \cdot Np(OH)_2^{+2}_{(aq)} \cdot Np(OH)_3^{+}_{(aq)} \cdot$ Np(OH)<sub>4(aq)</sub>、Np<sup>+4</sup><sub>(aq)</sub>,及經過氧化還原作用後形成帶5價 電荷的NpO2+(aq)、NpO2(OH)(aq)、NpO2(OH)2-(aq)水合物, 溶解出Np4+總溶解濃度隨pH增加而減小,其中pH= 9.134 時為1.001x10<sup>-9</sup>M; Pu(OH)<sub>4(s)</sub> 主要溶解離子為  $PuCl^{+3}_{(aq)}$   $\sim$   $Pu(OH)_{4(aq)}$   $\sim$   $Pu(OH)_{3^{+}(aq)}$   $\sim$   $Pu(OH)_{2^{+2}(aq)}$   $\sim$ Pu(OH)<sup>+3</sup>(aq)、Pu<sup>+4</sup>(aq)水合物,Pu<sup>4+</sup>總溶解濃度隨pH增加而 減小,其中pH=9.134時為1.484x10<sup>-11</sup>M。台電公司K區潛 在場址現場地下水水質,核種Th(+4), Np(+4), Pu(+4)於 該地下水質情況下之溶解濃度分別是1.923x10-9M、 1.000x10<sup>-9</sup>M \ 1.482x10<sup>-11</sup>M \

氫氧化鐵吸附鈾核種模擬,主要存在型態仍以U(6) 為主,並以UO<sub>2</sub><sup>+2</sup>的型態發生各種水合、表面絡合吸附反 應,該吸附量(8.133 $\mu$ mol/(mol Fe(OH)<sub>3</sub>))配合鈾總溶解濃 度(3.232e-06 M)求出氫氧化鐵礦物在pH= 6.732、 pe=14.123狀態下之Kd值為0.27cm<sup>3</sup>/g;Np<sup>4+</sup>核種於蒙脫 土的表面絡合反應模擬,主要存在量以Np(4)為主,以 Np<sup>4+</sup>的型態發生各種水合、表面絡合吸附反應,MX-80 膨潤土含有83.5%蒙脫土情況下,利用表面絡合反應之 吸附量配合Np<sup>4+</sup>總溶解濃度發現Kd值隨pH改變,並非定 值,顯現出pH值越大Kd值越大,如圖2;Np<sup>4+</sup>核種於地 下水水質條件下於蒙脫土表面絡合反應模擬,發現四種 價數的Np,主要存在量以Np(4)及Np(5)為主,分別以Np<sup>4+</sup> 及NpO2<sup>+</sup>型態發生各種水合反應,表面絡合吸附反應以 Np<sup>4+</sup>型態發生,該表面絡合反應之吸附量,配合Np<sup>4+</sup>總 溶解濃度求出目前pH(8.996)、pe(4.068)狀態下之Kd值為 36.7cm<sup>3</sup>/g。

地化模式中活性係數模型之選擇及應用發現,低濃 度淡水之活性係數值無需經由活性係數方程式進行修 正,可以濃度值可代表其化學活性。高離子強度的溶液, Pitzer方程較可以正確描述活性係數。



圖 2 Np4+於 MX-80 膨潤土的表面絡合反應之吸附 Kd 值隨 pH 變化

本研究提出核種地化情節審驗技術,包括:定律式 之評估及概率式評估方法,基本上該評估方法使用兩種 主要的化學參數資料,包括:放射性核種溶解度及放射 性核種吸附反應及吸附係數。其中:放射性核種溶解度 作為限制核種源項濃度之判斷依據,可以利用地化模式 模擬得到;放射性核種吸附反應及吸附係數,用於估算 處置場系統各部分(包括近場或工程障壁)中的放射性 核種吸附及微觀的表面絡合吸附反應、離子交換反應, 這些反應可以利用地化模式進行模擬。分配係數 Kd 值 可利用概率性式評估方法,假設 Kd 值屬於概率分布函 數(如對數常態分佈),並產生多個 Kd 值或推薦 Kd 值進 行核種遷移安全評估模擬分析。

地化模式應用於安全評估,這些組成成分及地下水 水質可以做為反應化學傳輸模擬遷移的基礎。必須將現 地試驗、將實驗研究和地球化學模擬研究相結合,才有可 能對核種在高放廢物處置庫中的化學反應行為進行描 述和預測。建議未來應注意以下:

- 建立詳細的地球化學模型之前,必須確定建立何種模型:模擬之前必須先確實瞭解問題,然後將問題依據使用電腦之模式。簡化成為能充分代表欲解決問題且又能表達原來的自然環境條件之概念模型。
- 2.活性係數的計算:選定適當的化學熱力學資料庫對於 是否能產生適當的物種活性係數有相當重要的影響, Pitzer方程式已被用於許多地球化學模擬模式,在處理 涉及較高濃度溶液的環境問題時。
- 3.反應的熱力學平衡常數需要進一步補充和完善其所用 熱力學資料庫:法國 ANDRA/RWM 發展化學熱力學資 料庫 THERMOCHIMIE-TDB,德國發展的化學熱力學資 料庫 THEREDA 化學資料庫,OECD 的 NEA 建立的 化學熱力學資料庫 NEA TDB 仍須進一步補充。各種

礦物及土壤的表面絡合模型的平衡常數目前還不多, 應組織專家進行研究以確定推薦值。

- 4.表面絡合反應納入反應化學傳輸模型評估放射性廢棄 物處置安全評估:吸附/解吸反應(即表面絡合模型) 可以應用於放射性核種通過工程障壁及地下水環境的 水文地球化學傳輸模擬,以水環境化學觀點利用礦物 表面絡合模型的化學熱力學及平衡常數資料評價核種 反應化學傳輸之特性。
- 5.將地化模式之化學場(C)與熱力-水力-應力(THC)模式 耦合,進一步結合成THMC完全耦合模式:高放射性 廢棄物處置場封閉後化學場具有特別重要的作用,核 種於處置場工程與天然障壁於長時間水-岩交互作用 下之化學物種形成與水質演化問題、及處置場因熱-水 -力耦合造成的化學演變,可以藉由THMC完全耦合 模式計算推求。

#### IV. 結論

本研究執行地化模式模擬,評估:(1)化學分析數據 支持模擬研究(2)化學熱力學資料庫應包含所選取的關 鍵核種、表面絡合物和礦物(3)化學熱力學資料庫重要反 應及平衡常數(4)離子強度之數值適用於地化模式的活 性系數模型。完成主要核種、地化模式發展介紹、地化 模式的化學熱力學資料庫、核種地下水環境中化學型態 和溶解度模擬、核種表面絡合化學模擬、地化模式中活 性係數模型之選擇及應用,並提出核種地化情節審驗技 術及地化模式應用於安全評估應注意事項。研究成果可 以作為放射性廢棄物處置場安全評估應用。

# 参考文獻

- Zavarin, M., and Bruton, C. J., 2004. A nonelectrostatic surface complexation approach to modeling radionuclide migration at the Nevada test site: Iron Oxides and Calcite. Technical Report UCRL-TR-208673, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.
- [2] 朱晨、G.M.安德森、吕膨,2017,地球化學模擬理 論及其應用,科學出版社,北京。
- [3] Altmann, S., 2008. 'Geo' chemical research: A key building block for nuclear waste disposal safety cases, Journal of Contaminant Hydrology 102, p174 – 179.
- [4] USGS. 2017. PhreeqcI--A Graphical User Interface for the Geochemical Computer Program PHREEQC, http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\_coupled/phr eeqci/.
- [5] Parkhurst, D. L. and Appelo, C. A. J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2) — A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations: U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 99-4259, p. 310, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- [6] Ball, J. W. and Nordstrom, D. K., 1991. WATEQ4F-User's manual with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters: US geological survey open-file report 90 – 129, p 185.
- [7] Westall, J.C., J.L. Zachary, and F.M.M. Morel,

MINEQL: A Computer Program for Calculation of Chemical Equilibrium Composition of Aqueous System. Tech Note 18. Cambridge, MA: MIT, 1976.

- [8] Heberlin, A.L., Westall J.C., 1996. FITEQL: A computer program for determination of equilibrium constants from experimental data, Version 3.2, Report 96-01, Department of Chemistry, Oregon State University.
- [9] Schecher, W. D. and McAvoy, D. C., 1992. MINEQL+: A software environment for chemical equilibrium modeling, environmental research software (ERS), Edgewater, MD.
- [10] Felmy, A.R., Girvin D. and Jenne E.A., 1983. MINTEQ: A Computer Program for Calculating Aqueous Geochemical Equilibria. Washington, DC: EPA.
- [11] Allison, J. D., Brown, D. S. and Novo-Gradac, K. J., 1991. MINTEQA2/PRODEFA2: A geochemical assessment model for environmental systems (Version 3.0), USEPA, Athens.
- [12] Wolery, T.J., and R.L. Jarek. 2003. "Software User's Manual for EQ3/6, Version 8.0." U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management. Las Vegas, Nevada. Software Document Number 10813-UM-8.0-00.
- [13] Steefel, C.I., 2009. Software for Modeling Multicomponent Reactive Flow and Transport. Report technique Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [14] Xu, T., Spycher, N., Sonnenthal, E., Zhang, G., Zheng, L., Pruess, K., 2011. TOUGHREACT Version 2.0: a simulator for subsurface reactive transport under nonisothermal multiphase flow conditions. Comput. Geosci. 37 (6), 763 – 774.
- [15] Puigdomenech, I., 2012. Make Equilibrium using Sophisticated Algoritms (MEDUSA) Program. Inorganic Chemistry Department Website. <a href="http://www.kemi.kth.se/medusa/">http://www.kemi.kth.se/medusa/</a>>
- [16] Bethke, C.M. and Yeakel, S., 2014. The Geochemist's Workbench, Release 10.0. Essentials Guide. Aqueous solution, LLC, Champain, Illinois, USA.
- [17] Grenthe, I., Plyasunov, Andrey, V. and Spahiu, K., 1997. Estimations of medium effects on thermodynamic data. In: Grenthe, I., Puigdomenech, I. (Eds.), Modelling in Aquatic Chemistry. OECD NEA, OECD.
- [18] Guillaumont, R., Fanghanel, J., Neck, V., Fuger, J., Palmer, D., Grenthe, I., R and, M., 2003. Chemical thermodynamics 5: update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium, NEA OECD, Elsevier.
- [19] Hummel, W., Anderegg, G., Rao, L., Puigdomenech, I. and Tochiyama, O., 2005. Chemical thermodynamics
  9: chemical thermodynamics of compounds and complexes of U, Np, Pu, Am, Tc, Se, Ni and Zr with selected organic ligands. NEA OECD, Elsevier.
- [20] Martinez, J.S., Santillan, E.-F., Bossant, M., Costa, D., Ragoussi, M.-E., 2019. The new electronic database of the NEA thermochemical database project. Appl. Geochem. 107, 159-170.
- [21] Richter A., F. Bok, V. Brendler, 2015. Data compilation and evaluation for u(iv) and u(vi) for the

thermodynamic reference database THEREDA, HZDR-065, Herausgegeben vom, Germany.

- [22] Yui, M., Azuma, J. and Shibata, M., 1999. JAEA Thermodynamic database for perfomance assessment of high-level radioactive wastes disposal system. JAEA Technical Report, JAEA TN 8400 99-070.
- [23] Cross, J.E. and Ewart, F.T., 1991. HATCHES a thermodynamic database and management system reprint. Radiochim. Acta 52 (53), 421 422.
- [24] Hummel, W., Berner, U., Curti, E., Pearson, F.J. and Thoenen, T., 2002. Nagra/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01. Universal Publishers.
- [25] Wang, P., Anderko, A., and Turner, D.R., 2001a. Thermodynamic modeling of the adsorption of radionuclide on selected minerals: I. Cations, Industrial & Engineering Chemistry Research, 40, 4428-4443.
- [26] Wang, P., Anderko, A., and Turner, D.R., 2001b. Thermodynamic modeling of the Adsorption of Radionuclides on Selected Minerals. II: Anions, Industrial & Engineering Chemistry Research, 40, 4444-4455.
- [27] Bok, F., C. Bube, X. Gaona, C. Marquardt, H. Moog, S. Wilhelm, 2013, Th(IV), Np(IV) and Pu(IV) solubility in NaCl, CaCl2, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and KHCO<sub>3</sub> solutions - THEREDA test calculation, Germany.

# 關鍵性裂面受地震力破裂之延伸行為研析 Analysis of cracking behavior of critical fractures triggered by earthquake

計畫編號: MOST 108-NU-E-032-001-NU 計畫主持人:楊長義 e-mail: yang@mail.tku.edu.tw 計畫共同主持人:李家瑋 計畫參與人員:何佳謙 執行單位:淡江大學土木工程系

## 摘要

在用過核燃料之最終深層地質處置安全考慮中,於 地震力作用中,須避免處置孔受周圍足以觸動 10cm 位 移的大型關鍵裂面所剪切,以確保廢料罐的完整性。一 個裂面原來可能尚未切到處置孔,但可能在遭受大地震 的外力作用後,使裂面發生新的破裂而延伸切入處置孔, 改變了處置孔的安全性。因此,本研究先研析 SKB 模擬 既有裂面受震破裂之技術及關鍵結論;同步推導建立一 套邊界元素法(BEM)程式,可平行模擬處置孔周邊各型 裂面之破裂軌跡及探討其對處置孔之威脅性。

**關鍵詞:**處置孔、關鍵性裂面、地震動態應力、破裂軌 跡、邊界元素法。

### Abstract

The FPC criterion of SKB is adopted to determine the accepted deposition holes. The accepted hole is required to avoid intersecting by any large fracture which is able to be trigged large shear movement by earthquake dynamic stress. However, the fractures may generate a new cracking after large earthquake events and propagate into the hole. This research aims to study the cracking path of the fracture around the deposition holes. The predicted cracking path of granite at site Taiwan is modelled using a BEM (boundary element method) with the theory of fracture mechanics.

**Keywords**: deposition hole, critical fracture, earthquakedynamic stress, cracking path, boundary element method.

# I. 前言

國際處置高放射性廢棄物處置中,在避免廢料罐防 護功能失效狀況之一:「廢料罐之破壞強度須高於剪應 力」。瑞典 SKB 研究指出:廢料罐之破壞,可能是斷層 帶發生地震作用,觸發處置孔周圍的既存裂面產生了超 過10cm 的剪切位移錯動,見圖1,而導致緩衝材及廢料 罐圍阻系統完整性的失效(SKB 2009,2011),甚至使地下 水滲入量超過安全規定。

SKB 從模擬結果詳細指出該被注意的裂面,見圖 2 是:當裂面圓心位置落在(i)距主要變形帶 100m~200m 區 間、且其半徑大於 75m,或是(ii)落在距變形帶 200m 外、 且其半徑大於 150m,此二者皆有被大地震觸發再度活 動而引起超過 10cm 剪位移量之潛力,尺寸符合此二狀 況者之裂面稱為關鍵性裂面(critical fractures),或在芬蘭 Posiva 稱之為目標裂面(target fractures)兩者同義,見文 獻 Munier & Hokmark(2004), Falth & Hokmark(2006)。 在實務上,SKB 是預計以全圓周交會準則 FPC (Full Perimeter Criterion)來篩選可否接受的處置孔位:即當裂 面與處置隧道構成全圓周交會(FPI)之關係,且又切過某 一個廢料罐的孔位時,則該孔位必須予以放棄 (Munier, 2006;楊長義等,2017)。



圖1.關鍵性裂面受地震力而錯動剪切處置孔示意



圖 2. SKB 規定距低傾角斷層帶不同距離之關鍵性裂面 半徑

然而在 SSM 審查中也指出 EFPC 準則可能尚有一 些疑慮,例如圖 3. (a)之裂面狀況,其與處置隧道已構成 全圓周交會 (FPI)關係、雖尚未切到處置孔之孔位,但可 能在 50 年運轉期中或處置後,該 FPI 裂面遭受大地震 的動態應力作用後,使得裂面尖端發生破裂而使其長度 延伸發展(crack propagation),致使裂面切入處置孔而呈 如圖 3(b)之狀況,依 FPC 準則之棄孔條件,轉而變為是 屬於應該被放棄的。

另SKB訂定了相關設計前提:「穿過處置孔的裂面之 連貫的流通性必須足夠低」。因此,通常裂面尺寸越大, 或裂面之聯通性愈高,滲水量越高。在為確保緩衝材不 被流失之安全功能考慮,須防止由裂隙入滲於處置孔內 之地下水流量太大而發生膨潤土被淘蝕流失。

在目前北歐大陸 SKB 或 Posiva 兩高放處置先進單 位尚不能明確地了解地震動態應力與裂面破裂之關係。 在多震的台灣卻是必然須面對裂面受地震力錯移或產 生破裂延伸增長(fracture propagation)、甚或切進入處置 孔構成棄孔條件,此等問題是本案之重要研究動機。

本案主要分兩部分進行研究,(1)研析 SKB 探討裂 面受震破裂延伸之模擬方式,並歸納其關鍵分析因素及 其重要成果;(2)以台灣離島潛在母岩現地應力場環境, 建立模擬之 BEM 數值方法,初步探討座落在處置坑周 遭裂面,受額外地震動態應力作用後之破裂延伸軌跡問 題,期初步了解在本土花崗質母岩之破裂軌跡行為,進 而了解該注意的選孔問題。



圖 3. 與處置隧道整個圓周交會之 FPI 裂面受震破裂可 能延伸之狀

# Ⅱ. 主要內容

利用邊界元素法(BEM)之在分析岩石破裂軌跡之優勢,見圖4、圖5,BEM模型僅使用在邊界(岩體及裂面)元素;在每一步追蹤新生破裂 亦僅需增配予1個新的元素。結合破壞力學(fracture mechanics)理論,可利用台灣離島潛在母岩之力學性質與其現地應力(楊長義,2015),去模擬探討位在處置坑(deposition hole)附近 之各種幾何型態裂面:例如針對裂面之長短、與處置 孔夾角及距離遠近,在受額外地震力作用後之破裂以 及延伸的軌跡等問題。可初步了解母岩的破裂延伸行 為及其威脅處置坑的關鍵幾何因素。





根據最大主應力破壞準則,裂面其新的破裂方向會 與裂縫尖端最大主應力的主方向互相垂直。透過座標轉 換,其裂縫尖端的圓周應力可表示成

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) [K_I \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{3}{2}K_{\Pi}\sin(\theta)]$$
  
$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) [K_I \sin(\theta) - K_{\Pi}(3\cos(\theta) - 1)]$$

當應力 $\sigma_{r\theta} = 0$ 時,則 $\sigma_{\theta\theta}$ 則會是主應力,因此其主方向  $\theta = \theta_p$ 可藉由方程式為零求得且表示如下

$$K_{I}\sin(\theta_{p}) + K_{II}(3\cos(\theta_{p}) - 1) = 0$$

透過方程式的計算可求出裂縫的初始開裂角度θ<sub>p</sub>。接著 在裂縫尖端處沿著開裂方向θ<sub>p</sub>延伸一小段裂縫,當作是 新成長的裂縫,之後重複以上的步驟來分析新產生裂縫 尖端處的裂縫開裂方向θ<sub>p</sub>,並且分析到主應力小於材料 強度或裂縫延伸至邊界為止。

如圖6脆性岩石試體內之單獨一個既有裂面(此處稱 為Griffith裂縫)在單軸壓縮外力作用下會:(1)最先,在 Griffith裂縫兩尖端附近以特定角度(或近乎垂直於既有 裂縫方向)產生一道初始張力破裂(tensile crack),而後漸 次延伸成長(propagation),最後轉向最大主要壓應力方向, 而形成側翼破裂(wing crack);(2)其次,次要破裂 (secondary crack) 較慢會出現,它是一種剪力破裂(shear crack)。故知,通常張力破裂是優先於剪力破裂,在含眾 多Griffith裂縫之間,當這些張力破裂或剪力破裂互相串 連後,則形成巨觀的破裂面。



圖6. 既有裂裂縫在單壓下裂縫尖端附近之破裂形態

本研究假設一均質等向性處置岩體900m×900m範圍 內(如圖7),材料性質採我國本土花崗岩之力學性質:彈 性係數E=51000MPa、柏松比0.22。 其內有一道傾斜45 度之既有裂面、長度L=200M,在受到垂直向、及水平向 單向、或雙向應力加壓後之破裂軌跡發展趨勢。其中, 在四個受力邊界上只要給予配置各28個邊界元素,將既 有裂面視為一個邊界並在裂面上配置了12個邊界元素。



圖 7.分析邊界上(900 X 900m)及裂面上之邊界元素配置

# III. 結果與討論

- 本研究由文獻模擬分析得知,在地震力作用下當地震 規模大於7.0,在水平面上、及在平行於水平最小主應 力方向的垂直面上,會產生較多的新生破裂;但在平 行於水平最大主應力之垂直面上則沒有嚴重新生破 裂。並且,當地震規模小於6.0時,僅造成微少新生的 破裂。
- 2. 由瑞典 SKB 數值模擬文獻回顧,獲知在 Forsmark 場 區地震規模 M7.0之地震力增量之變化,在1秒左右, 在水平最大主應力方向的地震動態應力(dynamic stress)增量可增加7.7MPa,但同時在水平最小主應力 方向大約減少17.3 MPa,在鉛垂向則應力變化不大; 且地震規模 M6.0的地震動態應力增減則不明顯。
- 3. 本文 BEM 程式確可驗證,單獨一個既有裂面在單軸 壓力作用下,會最先在裂縫兩尖端附近以特定角度或 近乎垂直於裂縫方向而產生初始張力破裂,而後漸次 成長延伸,最後轉向最大主要壓應力方向形成側翼破 裂。
- 4.本文模擬所用邊界元素法(BEM),除在岩體四個受力 邊界給予極少量邊界元素;亦將處置隧道、處置孔、 裂面三者視為邊界而予少量邊界元素,以本案坑道 BEM 模型為例,計僅使用38個元素;在每一步追蹤新 生破裂亦僅需增配予一個新的元素,故在處理處置坑 道之岩盤或裂面破裂縫成長問題上相當具有優勢。
- 5. 當裂面坐落在孔底附近,在水平地震力作用下:在處置孔左側的下降裂面、以及處置孔右側的上升裂面之破裂軌跡有機會轉向貫入處置孔。在處置孔左側的上升裂面以及右側的下降裂面之新生破裂軌跡方向則

是朝遠離處置孔延伸發展。



6.因處置孔是一鉛垂向設施、又裂面破裂軌跡最終會趨向外力方向,所以不論對坐落在處置孔左、右側之上升型或下降型裂面,當作用力在鉛直向則破裂軌跡遠離處置孔發展;但當作用力在水平向(見下二圖)則破裂軌跡趨向處置孔發展,有可能貫入處置孔的機率;故知關鍵裂面受地震力之破裂軌跡主要受作用外力方向之控制。



#### IV. 結論

在本研究確認邊界元素法(BEM)模擬應可作為分析 裂面破裂的一套有效的平行驗證工具。未來可將之發展 於異向性(anisotropic)岩盤,例如花崗片麻岩體內其裂面 破裂軌跡應受葉理方向高度影響。亦可擴展於分析多條 裂面相互影響之破裂軌跡分析,並採用不同的破裂準則 判定。

# 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] 楊長義(2015),先進國家地底實驗室岩力實驗之規 劃與成果研析,科技部/原能會合作研究計畫報告 (NSC 103-NU-E-032-001-NU)。
- [3] 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/原能會合作研究計畫 報告(MOST 105-NU-E-032-001-NU)。
- [4] 楊長義、陳昱儒、楊晏瑜(2017),核廢料罐處置孔 位之選定準則,第十七屆大地工程學術研討會,宜 蘭。
- [5] Backers T., T. Meter, P. Gipper and O. Stephansson (2014), Rock Mechanics- Assessing probability and extent of blind faults and fault-end growth around the KBS-3 repository at Forsmark, SSM Technical Note 2014:58.
- [6] Bennet, D.G. (2012), Initial review of SR-site : Main report, Technical Note 2012:24, SSM.
- [7] Backers T., T. Meter, P. Gipper and O. Stephansson (2015), Rock Mechanics- Assessing the likelihood and extent of fracture growth in KBS-3 repository at Forsmark, SSM Technical Note 2015:30.
- [8] Chen J.T., H.-K. Hong and S.W. Chyuan (1994), Boundary element analysis and design in seepage problems using dual integral formulation. Finite Elements in Analysis and Design 17: 1-20.
- [9] Chen J.T., C.Y. Yueh, Y.L. Chang and C.C. Wen (2017), Why dual BEM is necessary? Engineering Analysis with Boundary Elements 76: 59-68.
- [10] Chen J.T. and H.-K. Hong (1999), Review of dual boundary element methods with emphasis on hypersingular integrals and divergent series. Applied Mechanics Review, ASME 52(1): 17-33.
- [11] Fälth, B. and H. Hokmark (2006), Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modelling, SKB R-06-48, SKB.
- [12] Chyuan S.W., J. H. Lin, J.T. Chen and D.C. Liu (2000), Dual boundary element analysis for fatigue behavior of missile structure, Journal of the Chinese Institute of Engineers 23(3): 339-348.
- [13] Hökmark H, B. Fälth, R. Munier and D.M. Ivars(2015), Memo- Comment on SSM' s review of SKB' s earthquake modelling, SKB.
- [14] Munier R. and H. Hokmark (2004), Respect distance, Rational and means of computation. SKB R-04-17, SKB.
- [15] SKB(2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark –Main report of the SR-Site project (Volume I), Technical note TR-11-01, SKB.
- [16] SKB(2009), Design premises for a KBS-3V repository bsed on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analysis, TR-09-22.
- [17] Yoon, J.S., O. Stephansson, A. Zang, K.B. Min and F.

Lanaro(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.

# 次要斷層帶或剪裂變形受震位移量評估方法研究

# Study on coseismic displacement measurement method for secondary fault zone or shear zone

計畫編號: MOST 108-NU-E-008-001-NU 計畫主持人: 李錫堤 e-mail: ct@ncu.edu.tw 計畫參與人員: 高嘉謙 執行單位: 國立中央大學應用地質研究所

#### 摘要

放射性廢棄物處置設施之地震影響可包括強地動 之影響、斷層錯動與地變形之影響。大地震產生同震地 表位移對位於斷層上或附近的結構物造成重大損害,並 將影響未來結構,除非適當的結構設計或減輕此種危害, 將影響未來結構,除非適當的結構設計或減輕此種危害, 的機率式斷層位移危害度分析,可以估算斷層錯動時引 起的地表破裂或位移量。因此,本研究銜接放射性廢棄 物處置設施之地震影響評估方法回顧,接續再進行次要 斷層帶位移量評估方法研析及實際應用。本研究研選良 好之地表破裂分佈函數,如最大位移、平均位移、錯移 量的空間變異性以及對運算機率式斷層位移危害度分 析至關重要的其他隨機變量,以便實例分析。

關鍵詞:放射性廢棄物處置、斷層位移危害度分析。

#### Abstract

Seismic impact to radioactive waste disposal facilities may include strong ground-motion impact, fault displacement and ground deformation impact. Coseismic surface displacements associated with large earthquakes have caused significant damage to structures located on or near faults and will impact future structures unless proper structural design or avoidance legislation mitigates this hazard. A method have been proposed by Youngs et al. (2003) to estimate fault displacement in a probabilistic manner, and called probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). It is one such procedure that provides an estimate of expected levels of slip on a fault due to surface rupture. Thus, this study continue the review of seismic hazard assessment for radioactive waste disposal facilities, and proceeds with the analysis of assessment methods and practical application for secondary fault zone. We carefully select surface rupture distribution function, maximum and average displacement, spatial variability of slip, and other random variables that are the key to implementing PFDHA.

**Keywords:** Radioactive waste disposal, Fault displacement hazard analysis.

# I. 前言

台灣地區位處活動造山帶(Tsai et al., 1977; Teng, 1990),斷層及地震活動頻繁,因此工程建設須謹慎考慮 結構物之耐震設計。地震影響工程設施安全的要項可包 括:強地動之影響、斷層錯動與地變形之影響,及次生 災害之影響等。因處置窖位於地下深處,地振動及海嘯、 山崩、土壤液化等次生災害常不構成控制因素,斷層錯 動與地變形成為處置窖最需考量的地震影響。

地變形主要出現在主斷層的錯移帶及其兩側一定 範圍。因為處置設施在選址時就會避開主要斷層,所以 主斷層的變形帶也不是處置窖耐震設計上考量的重點。 而在主斷層以外,難免遭遇到不易探查得到的次要斷層 帶或剪裂變形帶。這一些次要斷層帶或剪裂帶在地震時 有可能受震而發生位移,影響結構物之安全。

本研究銜接放射性廢棄物處置設施之地震影響評 估方法回顧,接續再進行次要斷層帶或變形帶受震位移 量評估方法研析及實際應用。本計畫將著重在實際運用 上,研析適宜的位移預估式,包含(1)斷層破裂位置及位 移量蒐集,(2)主斷層地表破裂機率與地震規模關係式與 主要斷層位移隨距離之衰減函數,(3)次要斷層地表破裂 機率與地震規模及距離關係式與次要斷層位移隨距離 之衰減函數,(4)配合槽溝開挖等方法更新斷層模型,(5) 機率式斷層位移危害度分析流程等,確保斷層位移危害 度分析的結果能實際而有效的被應用到台灣或相近地 質條件的地區。

#### Ⅱ. 主要內容

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

機率式斷層位移危害度分析之地震法(簡稱地震法),地震法源自於機率式地震危害度分析(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis),參照 PSHA 之理 論公式,分析某一場址,在一特定的時間內,發生超過 某一斷層位移值的機率。假設地震的發生是一種自然隨 機過程而符合卜桑模式,則在T時間內,至少有一次位 移值 D 超越d 的機率如下:

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

上式中, ν(d)為位移值 D 超越 d 的單位時間(年)平 均發生次數。

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

$$\nu_{k}(d) = \sum_{n} N_{n}(m_{0}) \int_{m_{0}}^{m_{u}} f_{n}(m) \left[ \int_{0}^{\infty} f_{kn}(r|m) + P_{kn}^{*}(D > d|m, r) dr \right] dm$$

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

位移衰減函數*P*<sup>\*</sup><sub>kn</sub>(*D* > *d*|*m*,*r*)與地動衰減函數略 有不同:

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

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

小結以上,主斷層位移預估式,其需藉沿主斷層線 破裂位置及其對應位移量之統計資料建立。次要斷層位 移預估式,其為評估遠離主斷層線之位移衰減,一般與 地震規模及距主斷層線之距離有關。而位移預估式是除 丁斷層模型外最關鍵的參數,其來自於實際地表破裂資 料,然而有造成地表破裂之地震事件不多,其破裂有精 確量測資料者更為稀少,故使用全球的資料合併分析是 目前可行之解,但能否適合世界各地計算斷層位移危害 度,需進一步探討。

#### (1) 斷層破裂位置及位移量蒐集

2018 年 2 月 6 日於花蓮縣政府東北方近海發生芮 氏規模 6.0 之地震,為震源深度 10 公里的淺層地震。根 據 CMT 震源機制分析結果,本次地震屬於逆衝斷層並 帶有左移分量,有兩組可能的破裂面方向,分別為走向 北 35°東、向西北傾約 56 度,以及走向北 70°西、向南 傾約 69 度,根據經濟部中央地質調查所於災區現場進 行的地表地質、大地變形觀測及無人飛行載具所得到的 結果,判定本次地震與琉球海溝的隱沒系統有關,進而 誘發米崙斷層與嶺頂斷層的活動(盧詩丁等,2018)。

台灣東部地震研究中心團隊於地震後於2月7日至 3月14日對地震後所造成之地表變形、破裂及坡地災害 等進行地表調查工作,並將調查結果分為地表破裂、道 路裂隙、道路/建物破壞、邊坡裂隙或滑動以及坡地災害 等五大類。Huang et al. (2018)及 Hsu et al. (2018)亦針對 野外調查,彙整地表破裂資料,並詮釋破裂行為,本計 畫經放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧 整理相關研究,已有可用之經驗式,但仍需確認是否適 用台灣,故本計畫進一步分析相關預估式及其變異性, 計算各項危害度分析所需的參數,並以 2018花蓮地震 的地表破裂資料檢核預估式。依主斷層與次要斷層位移 分述如下:

#### (2) 研析主斷層地表破裂預估式

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

上述中關於最大位移量(MD)或平均位移量(AD)的 推估部分為關鍵參數,一般以經驗公式推估,例如 Wells and Coppersmith (1994)利用全世界蒐集而得之各類斷層 (正、逆、平移斷層整合)資料提出各斷層類型可能造成之 地表位移量,該經驗公式至今仍廣為使用,其與地震規 模、斷層錯動造成地表破裂長度有關。Moss and Ross (2011)將台灣集集地震(1999)以及中國汶川地震(2009) 等8個逆斷層錯動事件列入資料庫內進行分析並提出評 估之經驗公式。Leonard (2010)亦將穩定大陸地區(Stable Continental Regions)、傾向滑移斷層(dip-slip)和走向滑移 斷層(strike-slip)分類並回歸出斷層總長度(L)與平均位移 量(AD)的關係式。因台灣陸域斷層多屬逆斷層與走向滑 移斷層居多,故本計畫優先探討相關經驗式,最大位移 量或平均位移量單位均為公尺,m為地震矩規模,L單 位為公里。

Wesnousky (2008)與 Biais (2013)整理 1857 至 2010 年有地表破裂的地震事件,繪製地震破裂痕跡圖,並附 有沿斷裂走向觀察到的同震滑動相關描述,故本計畫整 理其地震矩規模與平均位移量(AD)並與上述預估式整 併,這些觀測資料有助於我們篩選各個預估式。資料變 異性或資料不確定性為機率式危害度分析中必須研討 之範疇,而 Leonard (2010)之預估式並未提供其位移量 變異性,即預估式的殘差之標準差,故本計畫以 Wesnousky (2008)與 Biais (2013)之資料庫重新計算其標 準差並整理各預估式標準差,本計畫亦以此資料庫重新 建立位移預估式。

0206 花蓮地震於米崙斷層沿線造成多處地表位移, 本研究以 Huang et al. (2018)及 Hsu et al. (2018)所提供的 地表破裂資料與位移預估式進行比較,因台灣未有本土 之位移預估式,若直接於國際期刊選用全球通用之經驗 式,有適用度的疑慮,故藉此次地震引致地表破裂資料, 可檢視預估式是否符合台灣的破裂資料。花蓮地震在臨 海處更造成數十公分的位移量,本計畫判定其為主要地 表位移,因米崙斷層延伸至海域,可能有其他主要地表 位移,但目前無相關資料,故將此筆資料與現有預估式 比較,此花蓮事件之主要地表位移仍可以現有經驗式計 算。

#### (3) 研選次要斷層地表破裂相關機率模式

上節討論之位移量均著重於主斷層線上之值,正斷層、逆斷層以及平移斷層均有其對應之資料庫及據以推 估而得之經驗公式,而當欲計算位移之位置遠離主斷層 線(off-fault displacement、distributed fault displacement 或 secondary displacement),一般認知上主斷層線上之位移 量大多大於遠離斷層線之位移,且隨距離愈大其對應之 位移量愈小,對應之位移數量級亦不同,沿主斷層線上 之位移量常用公尺為其單位,而遠離斷層線之位移則常 以公分計。

由於次要斷層破裂之位移量資料相當少,因為有記錄該處有地表破裂但不一定有記錄其位移量,因此對於計算位移量,Youngs et al. (2003)僅能仰賴少量資料進行迴歸分析,其先計算正規化後位移量與距離(單位為公里),並針對上盤與下盤分別進行分析。Petersen et al. (2011)比照沿主斷層線之位移推估方法進行經驗公式之推導,並建立兩個經驗公式以計算遠離斷層線之位移量, 其一為建立地震規模(m)、距主斷層之最短距離(r)與次要斷層之位移量(d)之關係,d、r之單位分別為公分和公尺, m為地震矩規模。

 $\ln(d) = 1.4016m - 0.1671\ln(r) - 6.7991$ 

標準差為1.12(取自然對數後之值) 另一方法為利用次要斷層之位移量(d)與主斷層線 平均位移量(AD)之關係建立另一計算隨距主斷層之最

平均位移重(AD)之關係建立另一計具隨距王斷層之取 短距離(r)增加而位移衰減之經驗公式,其中 d、r 之單位 公尺,m 為地震矩規模。

 $\ln(d/D_{ave}) = -0.1826\ln(r) - 1.5471$ 

標準差為 1.14 (取自然對數後之值)

次要斷層位移預估式採 Petersen et al. (2011), 其發 表兩種不同之預估式,並有不同之網格大小,為目前最 佳之預估式。本計畫彙整 20180206 花蓮地震現地勘查 報告、Huang et al. (2018)及 Hsu et al. (2018)將每一筆資 料與現地照片交叉比對,確認數值資料的合理性並繪製 分布圖,位移量分為水平與垂直位移量,拉張量與壓縮 量,可知位移量大致隨著遠離主斷層線而遞減。此外, 因資料點可能受人造物影響,故自由場之位移更有其準 確性,但其資料相對稀少,故本研究重新彙整所有位移 資料,挑選受人造物影響較低的位移資料點,如道路位 移,分類受人造物影響較大的資料點,如橋梁位移與牆 面破裂等,本計畫將位移資料分成三類,其中第一類為 自由場地表破裂(如:田地破裂),有42筆資料。第二類 為受人造物影響較低的,例如地板及柏油路的位移,有 128 筆資料。而第三類包含牆壁以及橋樑等非直接性的 破壞,有17筆資料。最後將第一類與第二類位移資料對 斷層面計算最短距離(Rrup),並與位移預估式必較,第三 類因包含諸多結構物響應故不納入分析,得知資料點大 致都在正負一個標準差以內且符合隨距離遞減的趨勢, 故再後續進行斷層位移危害度分析時可使用其經驗式。

#### (4) 更新斷層模型範例

本計畫蒐集斷層相關最新研究以更新斷層模型,以 六甲斷層與烏山頭水庫為例,臺灣嘉南農田水利會於 2018年進行「六甲斷層後續調查及烏山頭水庫壩體安全 改善設計」之計畫,根據六甲斷層過去相關調查及研究 文獻,並利用地形判釋、地表地質調查、地球物裡探測、 地質鑽探成果以及兩處槽溝開挖調查,研判六甲斷層於 烏山頭水庫壩址周邊及南延至台南藝術大學區段並未 切穿至地表,屬盲斷層形式,而由六重溪莿桐崎剖面及 烏山頭水庫北側工研院台南六甲院區開挖場址發現之 六甲斷層斷層露頭及其轉石,證明局部六甲斷層尖端已 切穿或接近地表,因此將中央地質調查所所劃定之六甲 斷層跡由台南市白河區莿桐崎,南至工研院台南六甲院 區分為北段,長度約13.3 公里,而工研院台南六甲院區 至南藝大南端區分為南段,長度約4.8 公里,合計六甲 斷層總長度約為18.1 公里。依據地質鑽孔岩心及槽溝 開挖採樣之碳十四定年成果,並參考全新世以來全球海 水面變動幅度、古沉積環境,建立地區之地殼垂直變動 速率作為長期滑移速率計算之基礎。結合槽溝與鑽井之 計算結果,推斷六甲斷層上盤長期地殼抬升速率介於 5.93~6.78 mm/yr之間。由鑽孔之斷層泥與斷層角礫界面, 估計斷層面之傾角約為30度,若以此角度及前人調查 結果所得之下盤長期地殼抬升速率為4.9±0.2 mm/yr 進 行估算,則六甲斷層於本計畫範圍之長期滑移速率約為 3.10~4.16 mm/yr。綜合各調查成果與前人研究,歸納出 六甲斷層分布圖與相關參數。

# (5)建立機率式斷層位移危害度分析流程及建議應用程式

本計畫以 fortran 程式語言撰寫相關應用程式,並以 六甲斷層為例,計算萬層位移危害度。六甲斷層為一向 東傾斜之逆衝斷層,其斷層之機率密度函數、斷層參數 與邏輯樹將與專家之經驗與專業認可後進行分析,危害 度分析將針對斷層位移量於斷層帶之分布、斷層位移量 以及斷層滑動方向對場址影響程度之不確定性分析,其 中機率密度函數、斷層參數以及位移衰減式,針對斷層 之位移危害度分析即可利用上述方法進行探討,並依斷 層破裂長度,滑移速率以及迴歸年等,定出危害度曲線。 六甲斷層之地震規模分布模式採特徵地震模式,主斷層 發生破裂之機率模式與位移量預測公式均採 Moss and Ross(2011), 主斷層線上於 10000 年再現期可能之最大 位移為 4.21 公尺,可能之平均位移為 2.37 公尺。六甲 斷層之次要斷層地表破裂可能對烏山頭水壩造成威脅, 故以六甲斷層對壩體影響為例,次要斷層地表破裂之機 率模式與位移量預測公式均採 Petersen et al. (2011),計 算六甲斷層對烏山頭壩體造成次要位移之危害度曲線, 根據各再現期位移量估算結果,100 萬年再現期可能之 位移為12~16公分,10萬年再現期之可能位移量皆約略 小於等於1公分。

#### Ⅲ. 結果與討論

結構物之地震影響可包括強地動之影響、斷層錯動 與地變形之影響,及各種次生災害之影響等。對於機率 式斷層位移危害度分析而言,先確認鄰近控制斷層之斷 層類型,計算場址與主要斷層間的最短距離,其斷層之 機率密度函數、斷層參數與邏輯樹將與專家之經驗與專 業認可後進行分析。本研究參考 Youngs et al. (2000)建 立本土機率式斷層位移危害度分析流程,已針對適用不 同斷層類型的相關經驗公式整理並撰寫計算程式,包含 Moss and Ross (2011)對逆斷層建議之經驗式、Petersen et al. (2011)針對平移斷層議之經驗式與 Youngs et al. (2003) 對正斷層建議之經驗式等,細節含其地表破裂分佈函數, 如最大位移、平均位移、位移量的空間變異性以及對運 算機率式斷層位移危害度分析相關參數,其中危害度分 析中的位移預估式為計算之關鍵,本研究以20180206花 蓮地震現地勘查報告、Huang et al. (2018)及 Hsu et al. (2018)所提供的地表破裂資料與位移預估式進行比較,

因台灣未有本土之位移預估式,地表破裂事件並不足以 建立單一預估式,故藉此次花蓮地震引致地表破裂資料, 檢核預估式是否符合台灣的破裂資料,次要斷層位移預 估式採 Petersen et al. (2011),本研究重新彙整所有位移 資料,挑選受人造物影響較低的位移資料點,如道路位 移,移除受人造物影響較低的位移資料點,如道路位 商破裂等,並與位移預估式比較結果顯示資料點大致都 在正負一個標準差以內且符合隨距離遞減的趨勢,故再 後續進行斷層位移危害度分析時可使用其經驗式。

# IV. 結論

(1)放射性廢棄物處置是必須考量斷層位移之危害, 量化其危害度對選址相關評估甚為重要。建立機率式斷 層位移危害度分析流程及進行示範案例分析有助於處 置設施之場址篩選,並有助於場址規劃及設計。因此, 若能借助國外經驗,納入台灣地區更多的地表破裂資料 來選擇適當之經驗式,能兼具學術研究與產業應用價值, 也適合發表在國際一流期刊上。比較台灣地區位移衰減 與國外不同地域的異同及探討區域間位移特性差異的 原因,亦具有學術研究上的價值。

(2)危害度分析中的次要斷層位移預估式為計算之 關鍵,本研究以20180206花蓮地震現地勘查報告、Huang et al. (2018)及 Hsu et al. (2018)所提供的地表破裂資料與 位移預估式進行比較,因台灣未有本土之位移預估式, 地表破裂事件並不足以建立單一預估式,故藉此次花蓮 地震引致地表破裂資料,檢核預估式是否符合台灣的破 裂資料,次要斷層位移預估式採 Petersen et al. (2011), 本研究重新彙整所有位移資料,挑選受人造物影響較低 的位移資料點,與位移預估式比較結果顯示資料點大致 分布於正負一個標準差以內且符合隨距離遞減的趨勢, 故再後續進行斷層位移危害度分析時可使用其經驗式。

(3)蒐集台灣地區所適用之機率式斷層位移危害度 分析經驗公式,可供國內各單位進行工程設計及結構風 險分析使用。因為諸多經驗公式提供之參數不足或經驗 公式可靠度較低,故謹慎篩選經驗式,否則計算結果不 足以提供工程設計。

# 参考文獻

- [1] Line, C., Snyder, D., & Hobbs, R. (1997). The sampling of fault populations in dolerite sills of Central Sweden and implications for resolution of seismic data. Journal of Structural Geology, 19(5), 687-701.
- [2] Long, J. C., & Ewing, R. C. (2004). Yucca Mountain: Earth-science issues at a geologic repository for highlevel nuclear waste. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 32, 363-401.
- [3] McCalpin, J. P. (1998). Statistics of Paleoseismic Data, Final Technical Report, National Earthquake Hazards Reduction Program, U.S. Geological Survey, 54.
- [4] Moss, R. E. S., & Ross, Z. E. (2011). Probabilistic fault displacement hazard analysis for reverse faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(4), 1542-1553.
- [5] Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., & Frankel, A. D. (2011). Fault displacement hazard for strike-slip faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(2), 805-825.

- [6] Pezzopane, S. K., & Dawson, T. E. (1996). Fault displacement hazard: A summary of issues and information : Seismotectonic Framework and Characterization of Faulting at Yucca Mountain, Nevada, U.S. . Geological Survey Administrative Report prepared for the U.S. Department of Energy., Chapter 9: pp. 160.
- [7] Stepp, J. C., Wong, I., Whitney, J., Quittmeyer, R., Abrahamson, N., Toro, G., . . . Sullivan, T. (2001). Probabilistic seismic hazard analyses for ground motions and fault displacement at Yucca Mountain, Nevada. Earthquake Spectra, 17(1), 113-151.
- [8] Teng, L. S. (1990). Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. Tectonophysics, 183(1-4), 57-76.
- [9] Tsai, Y. B. (1977). Tectonic implications of the seismicity in the Taiwan region. Memoir Geol. Soc. China, 2, 13-41. Retrieved from https://ci.nii.ac.jp/naid/10029008522/en/
- [10] Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), 974-1002.
- [11] Wesnousky, S. G. (2008). Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(4), 1609-1632.
- Wheeler, R. L., Schwartz, D., & Sibson, R. (1989).
   Persistent segment boundaries on Basin-Range normal faults. US Geol. Surv. Open-File Rept. 87-673, 432-444.
- [13] Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., . . . Swan, F. H. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). Earthquake Spectra, 19(1), 191-219.
- [14] 盧詩丁、陳建良、陳致言、劉彥求、陳柏村、許晉 瑋、莊釗鳴、鄭智仁、陳思婷、黃志遠、呂貞怡 (2018) 20180206 花蓮地震地質調查報告,經濟部中央地質 調查所。

# 放射性核種於多層非均質地質介質遷移快速預測工具發展與安全評估應用 A fast predicting tool for radionuclide migration in a layered geological medium and its application for safety assessment

計畫編號:MOST 108-2623-E-008-002-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 副教授 計畫參與人員:張正弘、廖中翊 執行單位:國立中央大學應用地質研究所

# 摘要

在高放射性廢棄物的最終處置的安全評估工作,預 測放射性核種外釋後在水文地質系統污染團遷移行為是 重要的工作。解析解模式為放射性核種長時間遷移行為 的快速預測工具。文獻中的解析解模式大都考慮單層的 均質介質,然而,真實的水文地質系統很少為均質,放 射性核種的遷移會經過多層地質介質,使得放射性核種 衰變鏈的遷移行為變得更為複雜。

本計畫目的為發展放射性核種衰變鏈於非均質多層 地質介質遷移的解析解模式,所發展的解析解模式與文 獻解析解比較確認其準確性。經驗證的解析解模式應用 於探討放射性核種衰變鏈於2層與3層非均質地下水系 統的遷移行為模擬可以了解多層非均質對放射性核種 移的影響。結果顯示多層非均質性對放射性核種的濃度 空間分布有非常顯著的影響,但對吸附性較小的核種此 影響相對較小。最後,解析解模式結合放射性輻射劑量 評估模式進行假設的高放射性廢棄物處置場的安全評估。

**關鍵詞:**放射性核種衰變鏈、多層非均質地質介質、污染團遷移、解析解模式、安全評估。

#### Abstract

In safety evaluation of deep geologic nuclear waste repository systems, predictions of plume migrations of radionuclides in hydrogeological systems are important. Analytical models serve as fast tools for predictions of longterm radionuclide plume migrartion behavior. Analytical solutions available in the literature are mostly derived assuming a single-layer homogeneous medium. Real hydrogeological systems are seldom homogeneous with their properties usually spatially variable, thus making the transport behaviors of radionuclide decay chain becomes more complicated when the distinct layers have different physical and chemical properties.

The objective of this project is thus designed to develop a novel analytical model for predicting the long-term plume migration behavior of a radionuclide decay chain in layered heterogeneous geological media. The accuracy and robustness of the developed model is confirmed by comparing with an analytical solution for a single-layer groundwater system available in the literature. Two application examples that simulate the plume migrations of radionuclide decay chain in two- and three-layer groundwater system are considered to investigate the effects of layered heterogeneity on radionuclide decay chain transport. Results shows the simulated spatial profiles of the radionuclide concentrations are significantly affected by layered heterogeneity, whereas the effect of layered heterogeneity on radionuclide decay chain transport shows small for radionuclide with a low sorption capacity. Ultimately, combination of our newly developed analytical model with the radiological dose assessment model is used to perform safety evaluation of a hypothetical deep geologic nuclear waste repository system.

**Keywords:** radionuclide decay chain; layered heterogeneous geological mdia; plume migration; analytical model; safety assessment.

# I. 前言

高放射性廢棄物最終處置為台灣目前亟須面對的 重要工作,由於實務上無法觀測放射性核種從廢棄物 處置區域外釋後的長期傳輸行為,因此核種傳輸數學 模式結合現地的試驗、量測與觀測常用來做為放射性 最終處置設施運轉期間與封閉後長期穩定及安全評估 的重要工具。數學模式工具主要藉由控制容積(control volume)的核種量的守恆的概念下納入考慮各種現象、 以描述處置設施、近場(near field)及遠場(far field)地下 環境系統中的物理、化學與生物等各種機制(mechanism) 與過程(processes),以達到合理有效進行放射性廢物處 置場址的長期穩定及安全評估,探討面臨安全疑慮情 境(如核種洩漏的發生)下對人類生活圈的環境衝擊與 可能的人體健康影響。

核種傳輸數學模式大都以移流-延散方程式 (advection-dispersion equation,簡稱 ADE)為基礎,因為 考慮核種隨時間與空間變化,因此移流-延散方程式為 偏微分方程式,根據求解偏微分方程式方法可將核種 傳輸數學模式區分為解析解(analytical solution)模式與 數值解(numerical solution)模式。解析解的優點為計算 較為快速且可隨意計算任意時間與任意位置的解,無 須多個時間段的迭代演算。數值解的優點為可以模擬 不規則幾何形狀與非均質(heterogeneous)的地下環境系 統。放射性處置場址的安全評估時,通常關心的時間尺 度長達數萬年或百萬年,而空間尺度則從處置場至人 類的生活圈也可能是幾十至幾百公里的距離,因此利 用數值解模式進行放射性處置場址的長期安全評估, 其模擬所需的計算時間可能達數週、數月甚或數年,以 模擬實務而言,這樣的計算時間基本上是不被接受的。 解析解模式其時間與空間都連續的優點對長時間與大 空間尺度的問題計算是可行的預測工具。

放射性核種在地下水傳輸過程中通常會發生序列 衰變(sequential decay)而產生一系列的子核種產物,形 成核種衰變鏈(decay chain),數學模式通常須採用 N 個 互相耦合的聯立 ADEs 來描述 N 個核種成員的衰變鏈 遷移行為,在數學上求解 N 個聯立 ADEs 偏微分方程 組非常困難,因此文獻中只有非常有限的放射性核種 衰變鏈遷移解析解(例如: van Genuchten, 1985; Pérez Guerrero et al., 2010; Sudicky et al., 2013; Chen et al., 2012; 2016; 2019)。但這些解析解模式考慮均質(homogeneous) 的單層(single-layer),然而真實的水文地質系統通常不 會是均質(Gureghian and Jansen, 1985; Liu et al., 2000), 非均質地質介質為自然界風化、沉積等地質作用的結 果,當放射性核種於水文地質系統遷移時,通常會經過 不同物理或化學性質多個非均質區域,此時核種的遷 移行為就會受非均質區域的物理與化學性質而改變, 使得污染團的移動變化將變得更為複雜。然而,目前多 層的核種傳輸解析解模式非常稀少且大部份只能適用 模擬單一核種的傳輸 (Barry and Parker, 1987; Leij et al.,1991b; Leij and van Genuchten, 1995; Liu et al.,1998; Li and Cleall, 2011, Chen et al., 2016) •

國際上現有的放射性核種多層非均質介質遷移的 解析解模式主要是 Gureghian and Jansen (1985),但其缺 點為在層與層的交界面上無法滿足核種傳輸通量(flux) 守恆,因此常造成解析解預測的不正確(Leij et al.,1991b; Leij and van Genuchten, 1995),另外他們的解析解模式 只能考慮3個核種成員的衰變鏈。

上述的文獻回顧說明發展具滿足層與層交界面上核 種傳輸通量守恆的放射性核種衰變鏈多層地質介質傳輸 解析解的重要性,因此本計畫的目的為發展前瞻層與層 界面通量守恆的放射性核種於多層非均質地質介質遷移 的解析解模式做為快速預測工具並結合所發展的解析解 模式進行劑量與安全評估應用。

### Ⅱ. 解析解模式

本計畫考慮圖 1 所示的多層非均質水文地質介質系統,其總層數為 $N_L(m=1,2,...,N_L)$ ,各層具有不同的物理與化學性質,考慮放射性核種衰變鏈的總核種數目 $N_s$ ( $i=1,2,...,N_s$ ),假設地下水流動為穩態(steady state)且如圖 1 所示沿著 x 軸方向由左至右的均匀流動,主要傳輸機制包括移流(advection)、延散(dispersion)、一階衰變 (first-order decay)與線性等溫平衡吸附(linear isotherm adsorption)等機制過程。要同時描述總核種數目 $N_s$ 的放 射性核種衰變鏈於 $N_L$ 層非均質地層的遷移通常須利用  $N_s \times N_r$  個移流-延散方程式來描述,數學上表示為:

$$D_m \frac{\partial^2 C_{1,m}(x,t)}{\partial x^2} - v_m \frac{\partial C_{1,m}(x,t)}{\partial x}$$
$$-\lambda_{1,m} R_{1,m} C_{1,m}(x,t) = R_{1,m} \frac{\partial C_{1,m}(x,t)}{\partial t}$$

(1a)

$$x_{m-1} \le x \le x_m$$
  $1 \le m \le N_L$ 

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

 $2 \le i \le N_s$   $x_{m-1} \le x \le x_m$   $1 \le m \le N_L$  (1b) 此處  $C_{i,m}(x,t)$  為衰變鏈第 i 個核種於第 m 層的水溶液相 濃度, x 為空間座標, t 為時間,  $x_m$  為第 m 層與第 m+1層交界的空間座標,  $D_m$  為第 m 層的延散係數(dispersion coefficient),  $v_m$  為第 m 層的地下水滲流速度(seepage velocity),  $\lambda_i$  為第 i 個核種的一階衰變常數(first-order decay constant),  $R_{i,m}$  為第 i 個核種於第 m 層的遲滯因子 (retardation factor)。



圖 1 放射性核種衰變鏈於多層非均質地質介質遷移的 示意圖。

假設水流為穩態,則層與層交界處地下水流動連續 方程式在數學上可表示為: ØmVm = Øm+1Vm+1
(2)

$$m, m \neq m+1, m+1$$

此處 $\phi_m$ 為第第m層地層的孔隙率(porosity)。

式(la)與(lb)須在適當的初始與邊界條件求解,計畫 考慮下列的初始與邊界條件:

$$C_{i,m}(x,t=0) = 0 \quad 1 \le m \le N_L \quad 1 \le i \le N_s \tag{3}$$

計畫採用入流邊界源的方式來描述核種的來源,根 據Higashi and Pigford (1980)處理高放射性廢棄物處置場 的核種來源相的概念,考慮垂直地下水流方向的處置場 每單位截面積包含一定的核種來源量,核種的外釋量是 正比於留存於處置場內的瞬間核種量,因此在處置場內 每一個衰變鏈核種存量可用下列一組聯立方程式與初始 條件來描述:

$$\frac{dM_1(t)}{dt} = -\lambda_1 M_1(t) - \gamma_1 M_1(t) \tag{4}$$

$$\frac{dM_i(t)}{dt} = \lambda_{i-1}M_{i-1}(t) - \lambda_i M_i(t) - \gamma_i M_i(t) \ 2 \le i \le N_s$$
 (5)

$$M_i(t=0) = M_i^0 \quad 1 \le i \le N_s$$
 (6)

此處 $M_i^0$ 為衰變鏈第i個核種成員於初始時間每單位面 積的核種量。

由於第三類邊界條件相對於第一類邊界條件才會滿 足核種通量的守恆,考慮在入流邊界處上衰變鏈的每一 核種的傳輸量守恆,表示為

$$\phi_1 v C_i(x=0,t) - \phi_1 D_x \frac{\partial C_i(x=0,t)}{\partial x} = \gamma_i M_i(t)$$
(7)

另外在層與層交界處(*x<sub>m</sub>)*須滿足每一核種的濃度相等 與核種通量守恆,可表示為:

$$C_{i,m}(x = x_m, t) = C_{i,m+1}(x = x_m, t) \quad i = 1, ..., N_S$$

$$m = 2, ..., N_L - 1 \quad (8)$$

$$-\phi_m D_m \frac{\partial C_{i,m}(x = x_m t)}{\partial x} = -\phi_m D_{m+1} \frac{\partial C_{i,m+1}(x = x_m, t)}{\partial x}$$

$$i = 1, ..., N_S \quad m = 2, ..., N_L - 1 \quad (9)$$

為方便解析解推導,考慮每一放射性核種無窮遠處為零 $C_{i,m}(x \to \infty, t) = 0$   $i = 1, 2, ..., N_s$  (10)

針對式(1a)與(1b)共 $N_s \times N_L$ 聯立偏微分方程組與其 對應的初始條件(3)與邊界條件(6)-(9),本計畫依循 Chen et al. (2016b)的求解概念來求解本計畫總核總數目 $N_s$ 的 放射性核種衰變鏈於 $N_L$ 層非均質地質介質的傳輸問題。 求解方法主要利用 Laplace 積分轉換法以消除 $N_s \times N_L$ 偏 微分方程式中的時間項,可轉換為聯立的 $N_s \times N_L$ 二階常 微分方程組,利用二階常微分方程式求解方法即可求解 得在每一個放射性核種在每一層的通解,然而每一放射 性核種在每一層將有二個未知常數要決定,因此總共有  $2 \times N_s \times N_L$  個未知常數要決定,這 $2 \times N_s \times N_L$  未知常數可 由(3)-(6)總共 $2 \times N_s \times N_L$  條件惟一決定,代入解得的未 知常數值可得在轉換區域上每一物種在各層的濃度,最 後藉由 Laplace 積分轉換之逆轉換即可得原區域各物種 濃度。

# III. 結果與討論

#### 3.1 解析解驗證

計畫中發展解析解模式的FORTRAN計算程式,在 應用解析解模式執行相關模擬工作前,本計畫先進行解 的驗證以確認解析解的正確性與FORTRAN計算程式的 準確性。解析解的驗證案例是考慮一個由Higashi and Pigford (1980)所提出的用來證明他們所發展的解析解的 應用性的示範案例。此示範案例考慮在高放射性廢棄物 處置場的核種衰變鏈<sup>238</sup> Pu→<sup>234</sup> U→<sup>230</sup> Th→<sup>226</sup> Ra 的水 文地質傳輸。van Genuchten (1985)利用示範案例也做為 他所發展的解析解的示範例, Higashi and Pigford (1980) 未考慮核種的延散傳輸機制,因此本計畫與van Genuchten (1985)的一維解析解進行比較以確認所解析 解的正確性。示範案例考慮高放射性廢棄物處置場址容 納大約 5×10<sup>4</sup> Ci/GW(e) yr 的 <sup>238</sup> Pu ,因此假設只有 5×10<sup>4</sup> Ci的第1核種(<sup>238</sup>Pu)在處置場址在初始外釋,第 2、3、4核種主要來自在處置場址與地質介質中的<sup>238</sup> Pu。 為了確認本計畫所發展的解析解的正確性,由於van Genuchten (1985)為多物種單一區域地下水系統傳輸的 解析解,本計畫所發展為多物種多區域地下水系統傳輸 的解析解,因此在本計畫考慮2個區域,並且假設2個區 域有相同的參數,比較的模擬情境與參數如表1,圖2為 不同時間下, van Genuchten (1985)與本計畫所發展的模 式4個核種的濃度隨空間變化的比較,圖中顯示兩個解析 解在4個物種的濃度空間剖面有非常好的吻合。另外本計

畫也發展了數值模式進行兩區域有不同參數下解析解與 數值解的比較,結果也呈現解析解與數值解一致(未於此 處呈現),證明了本計畫所發展的解析解的正確性與解析 解對應FORTRAN計算程式的準確性。

表 1 解 析 解 模 式 於 四 個 子 物 種 的 核 種 衰 變 鏈  $(^{238}Pu \rightarrow ^{234}U \rightarrow ^{230}Th \rightarrow ^{226}Ra)$ 的應用案例參數,採用 Higashi and Pigford (1980)的模擬案例,此案例後續也為 van Genuchten (1985)做為應用案例。

ii Oenuenten (1705) 政构态用来内	
參數	值
Domain length, $L$ [m]	60
Seepage velocity, $\mathcal{V}$ [m year <sup>-1</sup> ]	100
Dispersion coefficient, $D [m^2 year^{-1}]$	1,000
Effective porosity, $\phi$ [-]	0.4
Retardation factor, $R_i$ [-]	
<sup>238</sup> Pu	10,000
<sup>234</sup> U	14,000
230 Th	50,000
<sup>226</sup> Ra	500
Decay constant, $\lambda_i$ [year <sup>-1</sup> ]	
<sup>238</sup> Pu	0.0079
<sup>234</sup> U	0.0000028
<sup>230</sup> Th	0.0000087
<sup>226</sup> Ra	0.00043
Source decay constant, $\gamma_i$ [year <sup>-1</sup> ]	
<sup>238</sup> Pu	0.0089
<sup>234</sup> U	0.0010028
<sup>230</sup> Th	0.0010087
<sup>226</sup> Ra	0.00143
Source concentration, $C_{i,0}$ Ci/m <sup>3</sup>	
<sup>238</sup> Pu	$5 \times 10^{5}$
<sup>234</sup> U	0
<sup>230</sup> Th	0
<sup>226</sup> Ra	0





原子能科技學術合作研究計畫成果發表會精簡報告

空間剖面有非常好的吻合。

## 3.2 解析解應用

經驗證的解析解可以應用來模擬放射性核種衰變鏈 於多層非均質地質介質的傳輸,以了解多層非均質地質 對核種衰變鏈傳輸個別成員核種濃度的影響,首先考慮 雨層的水文地質系統,應用模擬的案例與多物種單層傳 輸解析解驗證案例相同,但不同於驗證案例只考慮單層, 應用模擬案例考慮兩層的地下水系統,兩層的交界處位 於x = 20 m處,相關模擬情境與參數與表1相似。但為 探討多層非均質地質介質的影響,第1層的參數維持與 驗證案例相同,延散係數仍為 1,000 m<sup>2</sup>/year, 但第 2 層 的延散係數值分別考慮了 500 、1,000 與 1,500 m<sup>2</sup>/year 等三種不同情況,當第2層的延散係數值為1,000 m<sup>2</sup>/year 時,此時地下水系統可視為單一層的情況。圖3為時間 1,000年下,4個放射性核種的濃度空間剖面分布圖,由 圖中可發現多層非均質性對放射性核種的濃度空間分布 有非常顯著的影響,當延散係數由 1,000m<sup>2</sup>/year 減少為 500 m<sup>2</sup>/vear 時, <sup>238</sup>Pu於 x=60 m 處的濃度減少為 1,000m<sup>2</sup>/year 時的 0.013 倍,當延散係數由 1,000m<sup>2</sup>/year 增加為 1,500 m<sup>2</sup>/year 時, <sup>238</sup> Pu 於 x=60 m 處的濃度增 加為 1,000m<sup>2</sup>/year 時的 5.54 倍,延散係數 500m<sup>2</sup>/year <sup>238</sup>Pu於 x=60 m 處的濃度差距為 1,500 m<sup>2</sup>/year 時的 431.65 倍。圖中也發現多層非均質地質對 226Ra 的傳輸 影響非常的小,其主因推測是因為 <sup>226</sup>Ra 有較小的遲滯 因子。

模擬案例(表 1 與表 2)的進一步應用考慮 3 層的地下水系統,第 1 層與第 2 層的交界位於x = 20 m處,第 2 層與第 3 層的交界位於x = 40 m處,第 1 層的延散係數仍為 1,000 m<sup>2</sup>/year,第 2 層與第 3 層分別各考慮延散係數值 500 m<sup>2</sup>/year 與 1,500 m<sup>2</sup>/year。圖 4 為時間 1000 年下 4 個放射性核種的濃度空間分布圖,從圖中可看出 多層地質介質的影響,第 2 層為 500 m<sup>2</sup>/year 與第 3 層為 1,500 m<sup>2</sup>/year 時兩者結果差異不大顯示延散是整體核種流經各層受層的次序影響較小。

表 2 採用 van Genuchten (1985)解析解模式於四個子物 種 的 核 種 衰 變 鏈 ( $^{238}$  Pu $\rightarrow^{234}$ U $\rightarrow^{230}$ Th $\rightarrow^{226}$ Ra)的 Bateman-type 邊界源係數。

Species, i	$b_{i,m}$			
	<i>m</i> =1	<i>m</i> =2	<i>m</i> =3	<i>m</i> =4
<sup>238</sup> Pu, $i = 1$	1.25			
$^{234}$ U, $i = 2$	-1.250	1.250		
$^{230}$ Th, <i>i</i> = 3	0.444*10-3	0.593	-0.594	
<sup>226</sup> Ra, $i = 4$	-0.517*10-6	0.121*10-1	-0.123*10-1	0.179*10-3

# 3.3 輻射劑量評估

放射性廢棄物處置場的安全評估需要估計來自包括 攝食受污染水灌溉的農產品、受污染地表水生長的魚貝 類與受污染的地下水等不同途徑的有效劑量(effective dose),本計畫所發展的解析解僅能預測地下水中核種的 濃度,因此計算來自攝食受污染地下水的輻射暴露僅是

圖 2 單層  ${}^{238}$ Pu  $\rightarrow {}^{234}$ U  $\rightarrow {}^{230}$ Th  $\rightarrow {}^{226}$ Ra 放射性核種衰 變鏈傳輸模擬,圖中顯示兩個解析解在4個物種的濃度

全部劑量評估的一部份,然而在許多案例中輻射劑量主 要由攝食受污染地下水貢獻。

第 *i* 個放射性核種的劑量估算可利用下式計算: effective dose of nuclide  $i = IR \cdot C_i \cdot DF_i$  (11) 此處 effectivedose of nuclide*i* 代表第 *i* 個核種的有效劑量 [Sv/year], *IR* 為水的攝入率(rate of water intake)[L/day],  $C_i$  為濃度[Bq/L],  $DF_i$  為第 *i* 個核種的成人劑量係數 (ingestion dose coe\_cient of nuclide *i* for the adult age group) [Sv/Bq], 不同核種的  $DF_i$  可參考 ICRP(2012)。

表3為在不同延散係數下,考慮時間為1,000年時,案例A、B、C與D在位置x=50m處由模式計算得的4個核種的濃度,表3也包含各核種的劑量係數 $DF_i$ 。考慮水的攝入率為2L/day(90百分比),根據表3的案例A、B、C與D在位置x=50m處的4個核種濃度與劑量係數 $DF_i$ ,可計算得相關有效劑量值如表4。

表 3 不同的延散係數,考慮時間為1,000 年時在位置 x=50 m處的4 個核種濃度。

Species	Concentration [Bq/L]			
DCF <sub>i</sub> (Sv/Bq)	$D_{Z2} = 500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$ $D_{Z3} = 500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$	D <sub>Z2</sub> =500 m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup> D <sub>Z3</sub> =1500 m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>	$D_{Z2} = 1500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$ $D_{Z3} = 500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$	$\begin{array}{c} D_{\rm Z2} = 1500 \ {\rm m^2year^{-1}} \\ D_{\rm Z3} = 1500 \ {\rm m^2year^{-1}} \end{array}$
<sup>238</sup> Pu 2.3*10 <sup>-7</sup>	0.365*10-7	0.160*10 <sup>-6</sup>	0.428*10-6	0.145*10-5
<sup>234</sup> U 4.9*10 <sup>-8</sup>	0.281*10 <sup>-5</sup>	0.208*10-4	0.890*10-4	0.482*10-3
<sup>230</sup> Th 2.1*10 <sup>-7</sup>	0.221*10 <sup>-9</sup>	0.186*10-8	0.932*10-8	0.596*10-7
<sup>226</sup> Ra 2.8*10 <sup>-7</sup>	0.106*10-4	0.108*10-4	0.108*10-4	0.110*10-4

表 4 不同的延散係數,考慮時間為 1,000 年時在位置 x = 50 m處的 4 個核種劑量。

	Dose [Sv/year]				
Species	$D_{Z2} = 500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$ $D_{Z3} = 500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$	D <sub>Z2</sub> =500 m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup> D <sub>Z3</sub> =1500 m <sup>2</sup> year <sup>-1</sup>	$D_{Z2} = 1500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$ $D_{Z3} = 500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$	$D_{Z2} = 1500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$ $D_{Z3} = 1500 \text{ m}^2 \text{year}^{-1}$	
<sup>238</sup> Pu	0.159*10 <sup>-3</sup>	0.695*10 <sup>-3</sup>	0.186*10-2	0.631*10-2	
<sup>234</sup> U	0.261*10-2	0.192*10 <sup>-1</sup>	0.825*10-1	0.447*10 <sup>0</sup>	
<sup>230</sup> Th	0.877*10 <sup>-6</sup>	0.738*10 <sup>-5</sup>	0.370*10-4	0.237*10 <sup>-3</sup>	
<sup>226</sup> Ra	0.562*10 <sup>-1</sup>	0.571*10 <sup>-1</sup>	0.572*10 <sup>-1</sup>	0.584*10-1	









圖 3 <sup>238</sup>Pu→<sup>234</sup>U→<sup>230</sup>Th→<sup>226</sup>Ra放射性核種在第 二層中不同延散係數下 1000年時沿著 x 軸濃度空間剖 面的比較。





圖 4  ${}^{238}$ Pu  $\rightarrow {}^{234}$  U  $\rightarrow {}^{230}$  Th  $\rightarrow {}^{226}$  Ra 放射性核種在案 例 A、B、C 與 D 中不同延散係數下 1000 年時沿著 x 軸 濃度空間剖面的比較。

# IV. 結論

本計畫發展多物種多區域傳輸解析解以做為放射性 核種於多層非均質地質介質遷移的為快速預測工具,藉 由 Laplace 轉換後,結合高斯消去法與求解聯立二階常 微分方程式的方法可依序解得解析解。計畫中也撰寫所 得解析解相對應的 FORTRAN 程式以執行計算,計畫 中的解析解與文獻中單一區域的解析解比較,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的 放射性核種衰變鏈於2層與3層非均質地下水系統的遷 移的模擬可以了解多層非均質對放射性核種。還應用的 放射性核種衰變鏈於2層與3層非均質地下水系統的遷 結果顯示多層非均質性對放射性核種的濃度空間分布有 非常顯著的影響,但對吸附性較小的核種影響較小,根 據3層地下水系統的4個案例,計畫中進一步計算輻射 劑量以了解多層非均質性對劑量的影響。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。

# 参考文獻

- Chen, J.S., Liu, C.W., Liang, C.P., Lai, K.H., 2012b, Generalized analytical solutions to sequentially coupled multi-species advective-dispersive transport equations in a finite domain subject to an arbitrary time-dependent source boundary condition, J. Hydrol., 456-457, 101-109.
- [2] Chen, J.S., Liang, C.P., Liu, C.W., Li, L.Y., 2016, An analytical model for simulating two-dimensional multispecies plume migration, Hydrol. Earth Sys. Sci., 20, 733-753.
- [3] Chen, J.S., Hsu, S.Y., Li, M.H., Liu, C.W., 2016b, Assessing the performance of a permeable reactive barrier-aquifer system using a dual-domain solute transport model, J. Hydrol., 543, 849-860.
- [4] Clement, T. P., 2001, Generalized solution to multispecies transport equations coupled with a firstorder reaction network, Water Resour. Res., 37, 157-163, doi:10.1029/2000WR900239.
- [5] Gureghian, A.B., Jansen, G., 1985, One-dimensional analytical solutions for the migration of a threemember radionuclide decay chain in a multilayered geological medium. Water Resour. Res., 21(5), 733-742.
- [6] ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
- [7] Leij, F., Dane, J. H., van Genuchten, M. Th., 1991b, Mathematical analysis of one-dimensional solute transport in a layered soil profile. Soil Sci. Soc. Am. J., 35(7-8), 944-953.
- [8] Leij, F., van Genuchten, M. Th., 1995, Approximate analytical solutions for solute transport in two-layer porous media. Transp. Porous Media, 18, 65-85.
- [9] Li, Y. C., Cleall, P. J., 2011, Analytical solutions for advective-dispersive solute transport in doublelayered finite porous media. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 35, 438-460.
- [10] Liu, C.X., Ball, W.P., Ellis, L.H., 1998, An analytical solution to the one-dimensional solute advectiondispersion equation in multi-layer porous media. Transp. Porous Media, 30(1), 25-43.
- [11] Liu, C., J. E. Szecsody, J. M. Zachara, and W. P. Ball, 2000, Use of the generalized integral transform method for solving equations of solute transport in porous media, Adv. Water Resour., 23(5), 483–492, doi:10.1016/S0309–1708(99)00048-2.
- [12] Lunn, M., Lunn. R.J., Mackay, R., 1996, Determining analytic solution of multiple species contaminant transport with sorption and decay, J. Hydrol., 180, 195-210.
- [13] Pérez Guerrero, J.S., Pimentel, L.G.G., Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., 2009, Analytical solution for multi-species contaminant transport subject to sequential first-order decay reactions in finite media, Transport Porous Med., 80, 357–373.
- [14] Pérez Guerrero, J.S., Skaggs, T.H., van Genuchten, M.Th., 2010, Analytical solution for multi-species contaminant transport in finite media with timevarying boundary condition, Transport Porous Med.,

85, 171-188.

- [15] Quezada, C.R., Clement, T.P., Lee, K.K., 2004, Generalized solution to multi-dimensional multispecies transport equations coupled with a first-order reaction network involving distinct retardation factors, Adv. Water Res., 27, 507-520.
- [16] Srinivasan, V., Clememt, T.P., 2008a, Analytical solutions for sequentially coupled one-dimensional reactive transport problems-Part I: Mathematical derivations, Adv. Water Resour., 31, 203-218.
- [17] Srinivasan, V., Clememt, T. P., 2008b, Analytical solutions for sequentially coupled one-dimensional reactive transport problems-Part II: Special cases, implementation and testing, Adv. Water Resour., 31, 219-232.
- [18] Sudicky, E.A., Hwang, H.T., Illman, W.A., Wu, Y.S., 2013, A semi-analytical solution for simulating contaminant transport subject to chain-decay reactions, J. Contam. Hydrol., 144, 20-45.
- [19] van Genuchten, M.Th., 1985, Convective–dispersive transport of solutes involved in sequential first-order decay reactions, Comput. Geosci., 11, 129–147.

# 裂隙再活化之水力-力學耦合特性研究 A study on the hydraulic-mechanical couplings between fracture reactivation

計畫編號:108-2623-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、徐文杰 執行單位:國立交通大學土木工程學系(所)

# 摘要

就工程設計與分析而言,核廢料深層地質處置為岩 體之熱力-水力-力學-化學耦合行為(THMC coupling behavior)。為建立其力學耦合數值分析模型,須考慮其 互制行為。其中又以岩石水力-力學(H-M)耦合行為最 為顯著。DECOVALEX 計畫為一核廢料隔離實驗與耦 合模式對比驗證之國際合作計畫,在最新一期之 DECOVALEX-2019 Task B 即以岩體在外在應力與水力 作用下,導致斷層或裂隙再活化,其水力特性之改變。 瑞士 Mont Terri 地下實驗室曾針對潛在母岩進行封塞高 壓灌注實驗,求取既有斷層或裂隙再活化之水力傳輸性 質,作為本課題之驗證實驗。本研究主要基於分離裂隙 模式的觀念,利用分離元素法中元素可分離的特性,建 構其水力-力學耦合模型,並採用 Task B 之標準分析模 型,來模擬裂隙產生、變化與流體流動互制行為,以探 討其合理性。進而探討裂隙發展、延伸與地下流體間之 關係。

**闌鍵詞:**水力一力學耦合行為、斷層再活化、分離元素 法、有限元素法。

#### Abstract

Prediction of coupled thermo-hydro-mechanicalchemical (THMC) processes in rock mass is an essential part of the performance and safety assessment of geologic disposal systems for radioactive waste and spent nuclear fuel. Among them, the hydraulic-mechanical (H-M) coupling behavior is the most significant. The DECOVALEX project is an international research and model comparison collaboration for advancing the understanding and modeling of coupled processes in geological systems. DECOVALEX-2019 Task B addresses important issues related to potential creation of permeable flow paths for contaminant transport in otherwise low permeability rocks. Such flow paths could be created by reactivating faults of various sizes by hydraulic and mechanical disturbance during operational or post-closure period. Faults might be reactivated by pore pressure changes. The underground laboratory of Mont Terri in Switzerland has carried out high-pressure injection test in rock mass to obtain the hydraulic transmission properties of existing fault reactivation. This study adopts discrete element method to develop, compare and validate models for activation of faults, including mechanical responses and associated changes in fault permeability. Then we will explore the relationship between fracture propagation and variation of pore pressure.

**Keywords:** Hydraulic- mechanical coupling behavior, fault reactivation, 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 (2019)有7個研究主題,包含:Task A-氣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Task B 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)評估裂隙再活化之後,其空間大小的改變與水壓的關係。

本研究之研究目的主要建構水力-力學耦合模型,並 採用 Task B 之標準分析模型,來模擬裂隙變化與流體流 動互制行為,以探討其合理性。

# Ⅱ. 實驗與模擬分析

針對 DECOVALEX-2019 Task B 內容說明下:瑞士 Mont Terri 地下實驗室位於瑞士 St. Ursanne,其深度約 300m。就地質條件而言,岩石實驗室位於 Mont Terri 背 斜南翼的 Opalinus clay 內。Opalinus clay 之岩性為頁岩, 並間夾砂岩及碳酸鹽岩。Opalinus Clay 的沉積年代約為 1.74 億年,屬侏羅紀。Opalinus clay 出露於岩石實驗室 之岩層,其傾角為 42°傾向 SSE 方向。

Mont Terri 地下實驗室於 2015 年 6 月至 11 月針對 潛在母岩進行雙封塞灌注實驗,實驗選定於 BFS2 鑽孔 中進行,在主斷層的上方,內部和下方進行了總共 5 次 高壓脈衝實驗(High-Pressure Pulse test,圖 1)。其步驟為 首先以雙封塞封堵實驗段,接下來注入少量高壓水,以 達到高壓脈衝效果,並量測水壓消散情形,配合正向和 剪切變形量測裝置,同時精確測量滲透率和流變性,求 取封塞段之水力傳輸性質及斷層活動性。之後階段性提 高試驗壓力,以求取不同階段之水壓消散情形。實驗過 程中,並於臨近鑽孔 BFS1 進行壓力和位移監測。此外。 並於主斷層周圍的三個鑽孔 (BFS4、5 和 6) 監測其孔 隙壓力變化。



圖 1: Mont Terri 地下實驗室雙封塞高壓灌注實驗儀器 及步驟

在 DECOVALEX-2019 Task B 中,選擇了鑽孔 BFS2 的兩個不同的試驗段進行數值模擬。選擇此兩個試驗段 的原因是由於實驗中觀察到斷層再活化的數據。並分為 以下 3 個階段:

- 階段(1)初始標準分析模型建構:針對單一裂隙激發進行基準計算;
- 階段(2)次要斷層再活化模擬:針對實驗觀察得之 次要斷層激發進行數值分析;
- 階段(3)主要斷層再活化模擬:針對實驗觀察得之 主要斷層斷層激發進行數值分析。

針對階段(1)之標準分析模型,其分為二維及三維模型,以三維模型為例(圖3),其尺寸為20m×20m×20m, 現地應力在垂直向為為7.0 MPa,水平方向分別為6.0 MPa及3.3 MPa。模型中存在單一裂隙,其傾角為65°。 灌注實驗作用於裂隙中心,其初始壓力為0.5 MPa,之 後依圖1之灌注實驗步驟逐步提升壓力。岩體之密度為 2450 kg/m<sup>3</sup>,體積模數及剪力模數分別為5.9 GPa及2.3 GPa,並視其不具滲透性,其他所需材料參數如表1所 示。表中FM1為考慮裂隙產生剪切破壞時,裂隙內寬增 加與應力呈線性關係,所需之材料參數;FM2為考慮裂 隙產生剪切破壞時,裂隙內寬受剪賬影響所需之材料參 數。



圖 2: 各鑽孔之監測結果



圖 3: DECOVALEX-2019 Task B 之標準分析模型

Maturial	Demonstern	Valu	ie
Material	Material Farameter		FM 2
	Normal stiffness, kn (GPa/m)	20	20
	Shear stiffness, ks (GPa/m)	20	20
	Cohesion (MPa)	0	0
Fault	Static Friction Angle (°)	22	22
(Elasto-plastic)	Dilation angle (°)	0	10
	Tensile strength	0	0
	Initial aperture (µm)	0	10
	Initial creation aperture (µm)	28	0
	Bulk Modulus, K (GPa)	5.9	5.9
Host Rock	Shear Modulus, G (GPa)	2.3	2.3
(Elastic)	Bulk density, pR (kg/m <sup>3</sup> )	2450	2450
()	Permeability	0	0
	Density (kg/m <sup>3</sup> )	1000	1000
Fluid	Compressibility (Pa <sup>-1</sup> )	4.4e-10	4.4e-10
	Dynamic Viscosity (Pa s)	1.0e-3	1.0e-3

表1:分析模型之材料參數

圖4與圖 5分別為所使用之 3DEC 數值模型。本模型為一個相對簡單的裂隙岩體模型,主要考慮一個邊長20m 的立方塊體,內部包含一個傾角 65° 的裂隙,注水點位置位於裂隙正中央。如圖 5 所示,靠近裂隙的地方所使用的網格較小而遠離裂隙的地方所使用的網格較大。此舉的用意在於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。





圖 5:3DEC 網格

圖 6 為基於 Task B 所建構之 COMSOL 之有限元素 數值模型、裂隙面與監測點位置圖,圖 7 則為基於模擬 案例輸入於灌注點之灌注壓力曲線變化圖。本模型為一 個相對簡單的裂隙岩體模型,主要考慮一個邊長 20 m 的 立方塊體,內部包含一個傾角 65°的裂隙,注水點位置 位於裂隙正中央。表 1 所示為模擬所需之參數。其中岩 體的部分將之假設為彈性介質,而裂隙則是用彈塑性庫 倫摩擦準則來模擬。本研究將針對裂隙的膨脹角與裂隙 的開口寬對於水力耦合的行為做探討。





## III. 結果與討論

3DEC 與 COMSOL 模擬所得結果與比較詳如圖 8、 圖 9,包含觀測點壓力歷時曲線與注水點位移曲線。圖 8 於 P2 點之觀測壓力變化曲線與現地量測結果可以發 現:3DEC 之模擬結果可反應孔隙水傳遞至 P2 點時,水 壓急遽升高之現象,COMSOL 之模擬結果則呈階段式升 高,惟 COMSOL 與 3DEC 之模擬結果較現地實驗值為 高。圖 9 則為注水點位移曲線,因模擬之灌注壓力略偏 大之緣故,因此 COMSOL 模擬所得之裂隙位移量亦較 3DEC 之結果高。



圖 8:不同軟體注水點與觀測點 P2 之水壓歷時曲線



#### 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 DECOVALEX-2019 Task B 之 標準分析模型進行數值分析,進一步與雙封塞高壓灌注 實驗與結果進行對照與驗證。結果顯示:

- 將 3DEC 模擬結果與現地量測資料做比較,模擬結果 可以大致的描述現地量測之壓力及位移變化。由現地 觀測得知,觀測點 P2 位置之水壓在大約 380 秒左右 產生明顯的水壓上升, 3DEC 模擬可合理反應此現象, 初始破裂面在注水期間呈現向外延伸之趨勢,當破裂 面延伸至觀測點時,觀測點之水壓即呈明顯上升。
- COMSOL 之模擬結果呈階段式升高,由於其無法模擬破裂面行為,其變化與注水點壓力變化較相似。整 體而言,COMSOL 與 3DEC 之模擬結果較現地實驗 值為高,仍待未來進一步改善。

# 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.

# 如何監管核能後端區域協力設施: 東亞後端協力監管機制的功能設計與能力建構挑戰 How to Regulate the Regional Nuclear Back-end Shared Facility? – Functional Designs and Challenges of Capabilities-Building for the East Asian Back-end Multilateral Regulatory Mechanism

計畫編號: MOST 108-2623-E-218-001-NU 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),檢視九項核燃料循環多邊化倡議 勾勒後端協力監管機制各種可能的制度面貌與運作態 樣。

研究發現,區域後端協力監管機制的監管設計,不 但必需滿足以 IAEA 規範為最低門檻的核安全、核保 防與核保安,又要保證監管機構能夠在資源充沛的前 提下,行使監管獨立權限。在本計畫規劃的 16 種多邊 設施監管情境中,計有十三種情境,也就是 IAEA 直接 監管、區域組織監管、參與國共組聯合監管單位,以及 透過聯合委員會(Joint committee)督導地主國監管機構 等情境,將會在地主國境內製造「監管租界」,導致後 端多邊設施地主國領土內,產生監管二元化現象,致使 後端多邊協力機制的監管獨立性受到挑戰,陷入監管 效能不彰的困境。相較之下,由地主國監管機構會同國 際諮詢委員會(International Advisory Council)執行監管 任務等三種情境,則是兼備國際規範融合度與監管獨 立原則的較佳監管模式。

此外,計畫主持人進一步外溢個人獨力積累之研究貢獻,向美國華府智庫 NTI/DSFS 地下實驗室工作 小組正式引薦,工業技術研究院與台灣電力公司,將與 美、日、韓、澳洲等四國研究團隊,並列為「環太平洋 用 過 核 燃 料 管 理 夥 伴」(Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)地下實驗室工作小組(URL Working Group)正式成員。

為因應國際/區域後端多邊服務協力機制的可能 發展,建議我國就內國法的國際融合度,進行必要的調 整,並為我國內/外雙軌處置路徑預留調整空間。

**關鍵詞:**核燃料循環,後端,監管租界,監管獨立,情 境分析。

# Abstract

With methods of literature review, comparative analysis and scenario analysis, this research project has outlined possible institutional arrangements and functional types of the multilateral back-end regulatory mechanism.

This research project found that the design of the regional back-end cooperative regulatory mechanism has to meet both the principle of the nuclear regulatory authorities' independence and IAEA's minimum standards relatives to the nuclear safety, nuclear security and nuclear safeguards. Thirteen among sixteen back-end multilateral regulatory scenarios outlined by our research project, namely the IAEA direct regulatory, regional organization's regulatory, collective regulatory by the participants' states, and the domestic regulatory under the joint commission supervision models in the host state, will generated regulatory concession within the host state. Such cases will introduce the special situation of dual regulatory in the host state and put the back-end multilateral cooperation mechanism into a dilemma of nuclear regulatory ineffectiveness. In contrast, three rest scenarios, varied from models of host state regulatory authorities with assistance of the International Advisory Council, will be relative better models for meeting the requirement of international regulatory norms inclusion and the he principle of the nuclear regulatory Independence.

In addition, the project director, professor Yea Jen TSENG, has introduced Taiwan Power Company and the Industrial Technology Research Institute to the Underground Laboratory Working Group (URL working group) under NTI/DSF "Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership". Both institutions will be official members of the URL working group with partners from the USA, Japan, South Korea and Australia.

This research plan suggests that Taiwan should make necessary adjustments in terms of regulatory legal harmonization, which will make rooms for Taiwan's dual track approach.

**Keywords:** Nuclear fuel cycle, back end, regulatory concession, independence of Regulatory body, scenario analysis.

# I. 前言

獨立而且有效的監管機構,乃是確保核安全 (nuclear safety)的基石。經濟合作暨發展組織核能署 (Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency,簡稱 OECD/NEA) 於 2017 年提醒各國,監管機構正面臨核發先進核能技 術許可執照,強化公眾信心,以及協助新興核電國家的 挑戰(World Nuclear News, 2017)。對照國際社會核能多 邊化成果的快速發展,如何監管核能後端多邊化之合 作機制,已是不得不未雨綢繆的重要課題(IFNEC, 2018)。

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書 (Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle)以來 (IAEA, 2005),組建國際/區域後端協力機制的各種核燃 料循環後端多邊化倡議,如雨後春筍般湧現,更有針對 東亞國家創建區域多邊協力機制之具體構想。可是各 種後端多邊化倡議,均聚焦於營運課題,對於如何監管 核能後端區域協力的設施與運作,藉以確保核安全、核 保安(nuclear security),以及核保防(nuclear safeguard), 則少有勾勒具體規畫。

本研究計畫的執行,旨在透過情境規劃分析法 (senerio analyse),建立本土性的研究論述,自台灣的角 度,檢視後端多邊化監管機制的運作邏輯,探索東亞後 端多邊化監管機制的可能樣貌,繼而建立自主的研究 能量。在實務層面,此項研究將有助於掌握世局走向, 作為國家面對未來發展的參考,精進我國評估各種後 端多邊化核能監管機制的衡量基準。

#### II. 主要內容

# IAEA 安全要求(safety requirements):監管 框架與監管機構的義務

日本福島核災事故後,益發突顯核能監管機構守 護核安全(nuclear safety)、核保安(nuclear security)與核 保防(nuclear safeguard)等三個「S」的重責大任。甚至 有專家以為,核能監管機構應負責第四個「S」,也就是 承擔社會(society)責任(Vestergaard, 2018)。

以核安全角度而言,在明確國家政策(National policies)、國家策略(national strategies)與法制架構(legal framework)的支持下,監管架構(Regulatory framework) 對管理營運單位實施獨立且嚴格地管控,是確保後端 管理安全的最低保證。IAEA 於 2016 年修正並公佈 GSR Part 1 (Rev. 1)《促進核安全之政府、法律與監管 框架》(Governmental. Legal and Regulatory Framework for Safety)安全要求(safety requirements),明訂政府必須 確保監管機構在核安全相關決策下的有效獨立性,維 持監管機構與其他實體的職權分離,才能在沒有不適 當壓力或制約的情況下,履行監管職權,並且賦予監管 機構得以要求營運單位,遵循監管單位各項監管要求 的權限。最後,結合各種國際規約暨內國法涉及核安全、 核保安與核保防的各種規定,GSR 特定安全要求,監 管機構應透過計畫審核與執照的核發,確保核安全無 虞(IAEA, 2016: 3-8)。

整體而言,核安全監管機構得運用核照(licensing)、 審查(review)、視察(inspection)與糾正(corrective action) 等執法手法,確保核設施的安全。並且,審查並核發包 括中期貯存與最終處置等核設施之選址、設計、建造、 調試、運行、停止運轉與退役關閉等活動執照,乃是 核安全監管機構確保核安全的首要職掌。非經核安全 監管機構核發執照,核設施經營方不得實施核設施的 上述各項活動。

為此,核安全監管機構應公佈明確可遵循之申請 程序,制定申請書格式,審核程序,並詳盡各項安全 之必要條件。申請執照時,核設施經營方需向核安全 監管機構提交充分的核安全證明,經核安全監管機構 審查與評定後,方能取得活動執照。此外,在核設施 壽期的不同階段或活動期間,有可能因為原核照 條件調整,而導致執照修改、更新、中止或撤銷的監 管決定。為此,GSR 特定安全要求規定,監管機構在 修改、更新、中止或撤銷執照決定時,必須考慮視察 (inspections)、審議(reviews)與評定(assessments)等監管 行動的結果,並考量核設施運轉的實踐表現(IAEA, 2016:24-26)。監管機構的決策過程與監管要求,需具 有穩定性與一致性,並且必須防止監管機構工作人員 的個人決策主觀性,俾能建立各方信任(IAEA, 2016: 22)。

此外,監管機構必須按照監管過程的各個階段, 對特定核設施或活動進行審查與評定,藉以確認核設 施暨相關活動,是否已遵守監管要求暨審照之相關規 定。在審查與評定核設施或活動的過程中,監管機構 必須考慮十九項因素。包括:(1) 監管要求,(2)相關危 險的性質與分類,(3)廠址條件與運行環境,(4)與安全 有關的核設施基本設計或活動的開展情況,(5)被授權 方(authorized party)或其供應商提供的記錄,(6)最佳的 實踐(best practice),(7)適用的管理系統,(8)運行設施 或開展活動所需的能力與技能,(9)工作人員、公眾與 環境的防護安排,(10)緊急情況的準備與應變安排,(11) 核保安的安排,(12)核材料的衡算與控制系統,(13)適 用縱深防禦概念考量下的各種內在不確定性之意義(如 放射性廢物的最終處置),(14)放射源、放射性廢物與 用過核燃料的管理安排,(15)關係安全展示的各種相關 研發規劃或計畫,(16)本國與國際的運行經驗回饋,以 及類似核設施與活動之相關運行經驗回饋,(17)監管視 察所彙編的資料,(18)來自研究結果的資訊,以及(19) 終止運行的安排(IAEA, 2016: 29)。

其次,監管機構也必須對核設施與相關的活動進 行視察,藉以核實被授權方確實遵守監管要求與執照 所規定的條件。監管視察的類型,包括定期視察與無預 警視察(IAEA, 2016: 30)。監管視察不能降低被授權方 對核安全所負的主要責任,而且不能替代被授權方依 其職責所開展的控制(control)、監督(supervision)與核實 (verification)活動(IAEA, 2016: 30)。監管機構必須記錄 視察的結果,並須採取適當的行動(包括必要時採取的 執法行動)。視察的結果則必須作為監管過程的回饋資 料,並提供給被授權方(IAEA, 2016: 30)。此外,監管機 構不但有權進行獨立視察,並且監管視察的內容,必 需涵蓋監管機構職責的所有領域。監管機構執行視察 時必須考量的八大要點包括:(1)重要結構、系統與部件 及材料的核安全,(2)管理系統,(3)運行活動與程序, (4)運行活動記錄與監測結果,(5)承包商與其他服務提 供者的聯絡,(6)工作人員的能力,(7)核安全文化,(8) 與相關組織開展聯合視察的必要聯繫(IAEA, 2016: 30-31)。

在確定存在風險,並考量核照批准過程中可能隱 含的未可預知風險,監管機構有必要採行糾正措施, 不過,該項糾正違規行為的處分,必須映照核安全之比 例原則(IAEA, 2016: 31)。監管機構必須制訂或通過詳 細的規定或導則,藉以明確監管判斷、決定、相關行 動,以及所依據的原則、要求暨相關安全標準。監管 機構的執法措施可包括,有記錄的口頭通知、書面通 知、施加補充監管要求與條件、書面警告、罰款,以 及撤銷批准執照。但是,如若在經過糾正之後,被授 權方仍未能充分合作以修正違規舉措時,則監管執法 得以起訴被授權方(IAEA, 2016: 31)。最後,如果有立 即發生核安全事件之可能,則現場視察員得以立即採 取糾正措施(IAEA, 2016: 32)。

值得注意的是,GSR 特定安全要求規定,監管機 構必需考量相關國際安全標準、技術標準暨相關經驗, 審查內國核安全的各項相關條例與導則,並進行必要 的修訂,俾使其保持在最新狀態。同時,監管機構也 必須向有關各方與公眾,通報其條例導則暨相關的安 全標準,並確保相關條例導則之可取得性。最後,有關 核設施暨其相關活動可能涉及的輻射危險,以及監管 機構處理的相關過程與決定,也必需一併通報與揭露 (IAEA, 2016: 32)。

#### 二、現有國際核燃料循環後端多邊化之管理倡議<sup>1</sup>

國際社會現有討論核燃料循環後端多邊化協力 管理的各種想法、倡議、論壇與推動單位,計有 INPRO 的核燃料循環後端合作途徑協作計畫、IFNEC 的多國 處置庫合作倡議、歐洲的 EURAD 計畫、部份歐洲國 家的 ERDO-WG 計畫、美國 AAAS 智庫的 GNF 倡議、 NTI 有關東亞區域的 DSFS 倡議、ARIUS 的提倡、南 澳地方設立國際最終處置庫,以及東京大學的 AMMAO 計畫等九項,各項倡議的進展不一。(參閱表 一)

首先,某些倡議已經停止推動,或是無疫而終。 INPRO 的核燃料循環後端合作途徑協作計畫與美國 AAAS 智庫的 GNF 倡議,已超過一年多的時間沒有集 會討論或出版研究成果。ARIUS、南澳地方與東京大學的AMMAO計畫,均已停頓,或是沒有受到各國政府的青睐。這些停頓,為區域後端多邊協力機制的未來發展,投下不小的陰影。

不過,美國專家學者仍持續推動區域後端多邊協 力機制,其反映的永續規畫視野,值得持續關注。 IFNEC 與 NTI 已另闢蹊徑,在重組發展方向後,持續 擴大活動。例如 IFNEC 在執行委員會(Executive Committee)下,設立管理小組(steering group), 廣納美 國、俄國、中國、日本、東歐國家與阿根廷等國專家學 者,分別主導基礎設施發展 (Infrastructure Development Working Group, IDWG)、核燃料可靠服務 (Reliable Nuclear Fuel Services Working Group, RNFSWG)暨核供應與客戶國交往(The Nuclear Supplier and Customer Countries Engagement Group, NSCCEG)等三個工作小組。NTI 有關東亞區域的 DSFS 倡議,也以「環太平洋用過核燃料管理夥伴倡議」 (Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)名義, 在 NTI/DSFS 倡議下成立國際聯合地下實驗室、運輸 暨中期貯存,以及選址等三個工作小組,期以相對宏遠 的觀點,與穩健的步伐,逐步推展區域後端多邊協力機 制。

第三,相較於美國的持續努力與開創新局,西歐國 家對於區域後端多邊協力機制的熱情,則相對冷淡。一 方面吾人觀察到西歐國家代表已退出 IFNEC 決策圈, 再者,歐洲原子能共同體投注資源於發展放射性廢物 最終處置技術的 EURAD 計畫,以及部份歐洲國家所 組建的 ERDO-WG 計畫未受到歐盟(European Union, EU)鼎力支持,似乎暗示,歐盟與英國、法國、德國等 西歐核心國家,目前的發展重點,在於扶植內國家層次 的本土最終處置規畫。

第四,日本與南韓等鄰國,仍積極參與國際核燃料 循環多邊化倡議的各種活動,其所展示的企圖心,不容 小覷。日本於 2019 年提議,由經濟合作暨發展組織之 核 能署 (Organization for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, OECD/NEA)籌辦, 邀集 G-20 國家共組「最終處置圓桌論壇」(Roundtable on Final Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel),至 2020 年六月,已舉行兩次年度會議 (OECD/NEA, 2020)。南韓也持續參加 IFNEC 與 NTI/DSFS 活動。證諸日本與南韓有可觀的核產業能量, 兩國未來主導東亞區域後端多邊化協力機制的潛力與 企業,值得吾人留意。

最後,美國與日本暨南韓等國,至今仍鍥而不捨持 續推動全球/區域規模的後端多邊協力機制發展。未來 全球強權暨東亞核心國家,創建國際/區域核燃料循環 後端合作協力機制的企圖與可能成就,不容吾人輕視。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>本節內容乃在計畫主持人過去研究計畫發現的基礎上(曾雅真, 2017),進行增補。

倡議名稱	倡議內容	建議的多邊協力管理機制	進展成果
IAEA/INPRO	探索建立後端管理機制	探索中	成立「核燃料循環之後端合作途徑」協作研究 計畫(Collaborative Project),定期集會研商。但 自 2019 年後已無集會。
IFNEC/CFS	建立國際後端處置設施	多國組合實體	定期集會觀念溝通。組織改組。設有三個小組: 基礎設施發展(IDWG)、核燃料可靠服務 (RNFSWG)、核供應與客戶國交往(NSCCEG)。
EURAIOM/EURAD	支援歐盟國家處直技術研發 建立助測出直要累訊於	<u></u> 一 夕 冈 仰 人 宠 融	2020 推動, 接續 JOPKAD 的研究計畫。
AAAS/GNF	建立東亞多國中期貯存設施	夕四組合員短 實體公司或國際政府組合實 體	足朔朱曹観恣溝通。 觀念溝通與訪談,出版研究成果。自 2019 年 後無活動。
NTI/DSFS	建立亞太最終處置機制	多國組合實體	定期集會觀念溝通。2020年,在NTI/DSFS東 亞聯合實驗室的倡議下,由台灣、美、日、韓、 澳洲等五國共組的「環太平洋用過核燃料管理 夥伴」(Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)地下實驗室工作小組(URL Working Group)國際研究團隊,即將有突破性 的進展。
ARIUS	呼籲建立多國後端合作設施	無	宣揚後端多邊合作。
南澳政府	在南澳地方設立多國使用中 期貯存暨最終處置設施	多國組合實體	法律否決。南澳洲議會於 2017 年 11 月通過法 律,禁止運用政府預算,資助各種有關在南澳 洲建造或營運最終處置設施的任何活動。
АММАО	成立亞洲多邊核燃料循環管 理組織	區域組織+國際工業組合實體	2013 年提出,未持續推動。

表一 現有國際後端多邊化的之管理倡議

參考資料:計畫主持人自行研究整理;曾雅真,2017。

#### 三、建立區域後端協力監管機制的參考模型

#### (一) 國際社會的核安全監管機制

目前國際社會的核安全監管機制,計有 IAEA 濃縮鈾銀行(IAEA LEU Bank)為代表的超國家在地監管模式,歐洲原子能共同體(European Atomic Energy Community, EURATOM)為代表的規範造法與政策輔導模式,以及主權國家監管架構三種模式。(參閱表二)

座落於哈薩克但為IAEA所控制的IAEA濃縮鈾銀 行,構成超國家委託在地監管模式代表。在此模式下, 哈薩克政府的核監管單位,依據「在哈薩克境內設立 IAEA 低濃縮鈾銀行設立協議」(Agreement between the International Atomic Energy Agency and the Government of the Republic of Kazakhstan regarding the Establishment of the Low Enriched Uranium Bank of the International Atomic Energy Agency in the Republic of Kazakhstan,以 下簡稱LEU Bank 設立協議) (IAEA, 2017a), 以所謂「適 當當局」(the appropriate authorities)之名,負責IAEA濃 縮鈾銀行設施的核安全、核保安與核保防的監管工作 (IAEA, 2017a: article 1.a and article 14.1)。IAEA要求哈 薩克應及時修正各項內國法規,將IAEA各種規範納入 其內國法律體系,而且IAEA經與哈薩克諮商後,有權 進行核安全和核保安查核,以確認IAEA核安全與核保 安規則在哈薩克法律體系的適用情況(IAEA, 2017a: article 14.2),藉以確保哈薩克各項核監管法規,皆符合 IAEA要求。參照LEU Bank 設立協議之超國家委託在

地監管模式,名義上系以後端多邊設施地主國之監管 單位,對其領土內之超國家多邊核設施進行各種監管 工作,但後端多邊設施地主國必需隨時依照IAEA相關 核安全、核保防與核保安規範的調整與變動,採行必要 的立法與修正措施,俾滿足地主國核監管單位執法與 IAEA規範同步化的義務(曾雅真,2019:24)。實際上地 主國在核安全、核保安與核保防法制架構與IAEA同步 化的狀態下,看似監管獨立的後端多邊設施地主國,似 已產生地主國監管替代現象,無異於IAEA之代理監管 機構。

規範造法與政策輔導模式,是以EURATOM為代 表。EURATOM會員國之核監管工作,仍由各會員國政 府機構負責,不過EURATOM的理事會指令 2011/70/EURATOM<sup>2</sup>與2014/87/EURATOM<sup>3</sup>,是 EURATOM會員國安全管理用過核燃料暨放射性廢物 (spent fuel and radioactive waste, SFRW)與核設施安全 之各項內國法規的法源(曾雅真,2014)。EURATOM另 外於2007年設立由EURATOM會員國之核安全高級官 員、監管機構,以及具備核安全專長高級公務員所組成 的歐洲核安管制者組織(The European Nuclear Safety Regulators Group, ENSREG),該項獨立的專家諮詢組織 設立的目的,在協助各會員國建立持續改善的條件,達 成核安全與安全管理放射性廢物的共識,同時提供必 要的專業諮詢建議與同儕審查服務(ENSREG, 2018)。

最後,主權國家監管模式,則是由各國的核能監 管機構,據其內國法,透過核照、審議、視察與糾正等

 <sup>2</sup> 全名為"Council Directive 2011/70/EURATOM of 19 July 2011: Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste." (EURATOM, 2011)
 3 全名為"2014/87/Euratom of 8 July 2014 : Amending Directive

<sup>2009/71/</sup>Euratom Establishing a Community Framework for the Nuclear Safety of Nuclear Installations." (EURATOM, 2014)

措施,確保本國的核安全管理。

表二 國際社會之監管框架模式

-			
	超國家在地監	區域規範造法輔導	主權國家
	管模式 (IAEA	模式 (EURATOM)	監管模式
	LEU Bank)		
監管框	國際協議	EURATOM 相關規範	內國法
架依據			
监管適	核安全公約、聯	EURATOM 指令與內	內國法
用規範	合公約、IAEA	國法	(及國際規
	各种规範與設		範)
	施地主國內國		
	法		
核設施	依 IAEA 規範	依EURATOM規範同	內國立法
地主國	同步修正地主	步修正地主國相關法	程序
修法義	國相關法規。	規。	
務			
監管	隸屬於 IAEA	隸屬於 EURATOM 會	隸屬於設
對象	之後端核設施	員國之核設施	施地主國/
			內國之核
			設施
監管執	適當核能監管	设施地主國監管機關	內國監管
行單位	機關(或核設施		機關
	地主國監管機		
	闗)		
監管輔	魚	ENSREG	無
導單位			

參考資料:計畫主持人自行研究整理。

#### (二) 美日智庫的後端區域管理暨監管機制規畫方案

# 1. 日本東京大學的「亞洲多邊核燃料循環管理組織」 (Asian Multilateral Nuclear Fuel Cycle Management Organization, AMMAO)

日本東京大學之國際核保防研究學會擬議,組建 涵蓋核燃料循環前端與後端的多邊路徑(multilateral nuclear approach MNA),在滿足核不擴散,核安全與核 安保、永續性暨可行性要求下,設立「亞洲多邊核燃料 循環管理組織」(Asian Multilateral Nuclear Fuel Cycle Management Organization, AMMAO),建立涵蓋核燃料 循環前端鈾精煉,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(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 5-6)。

AMMAO構想將核燃料循環的多邊化合作分為三 種類型,分別是(A)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,(B) 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(C)核燃料循環多邊組織持有多邊 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(1)設施地主國(host states) (2) 夥伴 國(partner states)與(3)設施廠址國(site states) (2) 夥伴 國(partner states)與(3)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),而AMMAO亦應與IAEA暨所有會 員國,以及必要的技術擁有方,簽署各種必要協定,以 順暢合作的運作。AMMAO與地主國或是設施國,另簽 署設施管理與營運協議,由國際工業組合實體 (International Cooperative Industrial consortium)負責營 運地主國內的核設施或是設施國的核設施(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 22-24)。

AMMAO會員國, 需嚴格遵守核不擴散規定, AMMAO暨會員國與IAEA, 需另行簽署區域核保防協 定(Regional Safeguard Agreement), 在AMMAO內設置 區域核保防部門(Regional Safeguards Department); AMMAO與會員國要簽署核不擴散協定, AMMAO與 非會員國簽署全面核保防協定(comprehensive nuclear agreement) (Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 22-24)。

在核不擴散、再處理與最終處置需減少環境負荷 等考量下,AMMAO建議,結合運用(1)國際中期貯存, (2)再處理,以及(3)直接最終處置等三種方法,管理用 過核燃料。不過AMMAO堅持,用過核燃料產生國,必 需負責用過核燃料的直接最終處置,以及再處理所產 出的高放射性廢物 (Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 6)。

AMMAO擬提供用過核燃料的國際中期貯存服務。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),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,將送回 各國(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 19)。依據東京大學之評估,哈薩克與俄國,是被 AMMAO視為可以提供中期貯存服務的國家(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 183)。

在AMMAO框架下,擬設立區域核監管機構,統籌 核安全、核保防、核保安暨出口控制事務,執行 AMMAO核保防檢查,進行核安全與核保安同儕審查 review) 暨 視 察 (inspection)(Nuclear (peer Nonproliferation Study Committee, 2013: 170-171) • AMMAO設置區域核保防部門,是一個比較特殊的單 位,它會同地主國或是設施國之監管單位,審核各種相 關資訊(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 54)。不過針對該區域核保防部門、地主國,或設施國 之監管單位的責任分工,則沒有明確的說明。至於核保 安與核安全領域,AMMAO要求所有會員國加入核安 全公約、核保安公約,並遵守各種國際相關規範 (Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 56-85) • 一般而言, AMMAO區域監管單位的職權, 只限於核保 防、同儕審查(peer review)暨視察(inspection)(Nuclear Nonproliferation Study Committee, 2013: 29),既未涉及 核安全之核照(licensing)、審查(review),以及糾正 (corrective action)等執法項目,也沒有就AMMAO區域 監管單位與地主國或設施國之國家監管機構的職掌互 動,有具體的安排。

整體而言,AMMAO區域監管單位,乃是一個有限 職權的區域監管設計,仍有許多精進空間。

# 美國智庫AAAS建立區域多邊中期貯存設施的後端 協力監管機制運作模式

美國智庫美國文理學院(American Academy for Arts and Sciences, AAAS)的GNF倡議,對於區域中期貯 存協力機制設計兩種模式,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),不同模式有不同 的監管機制安排(Sloan, 2017: 16-23)。

在實體公司模式下,GNF倡議規畫,實體公司模式 所涉及的相關活動,都必須嚴格遵循IAEA以及地主國 核安全、核保防與核保安等相關規範,此外,公司董事 會應包括有IAEA資深官員(Sloan, 2017:18)。實體公司 職員則必須具有核安全、核保防與核保安專業,並且經 過地主國的核監管單位核可。多邊中期貯存實體公司 的所有作為,需受到設施地主國之獨立運作監管機構 的監管。

不過,GNF倡議又提出地主國監管機構的必要特 點。包括地主國監管機構是依據地主國法律,由七人或 九人所組成的獨立監管機構,其監管委員乃是依據地 主國的嚴格監管程序所選任,任期為五年(Sloan, 2017: 36)。但是,地主國的獨立監管機構,需與IAEA章程所 律定的目標與任務,保持高度一致性,並且需由兩位 IAEA資深官員,會同其他國際放射性廢棄物管理專家, 共同組成國際諮詢委員會(International Advisory Council),對區域後端合作協力機構的管理階層,提出 必要建言權(Sloan, 2017: 36)。國際諮詢委員會的任務, 在於關注用過核燃料中期貯存與長期最終處置的「最 佳範例」(best practices),以及其他相關問題。GNF倡議 建議,國際諮詢委員會可由地主國專家組成,但在可能 的情況下, 宜由來自IAEA與美國、俄國、英國、法國、 德國、加拿大、日本、南韓暨瑞典之核監管機構的領導 階層人員來擔任(Sloan, 2017: 37)。

據GNF倡議規畫的實體公司模式,地主國監管機 構的職掌,包括核發用過核燃料暨其他高放廢物之中 期貯存使用執照,以及相應的運輸執照。地主國監管機 構要對多邊設施進行核安全視察,適用可能超越核安 全公約(Convention on Nuclear Safety)、聯合公約(Joint Convention)<sup>4</sup>或是實物保存公約(Convention on the Physical Protection of Nuclear Material)所規範的IAEA 要求,以確保符合核材料核算與控制,實體保護,以及 任何其他有關地主國法規的要求。在執照核發程序上, 地主國監管機構應就用過核燃料或高放射性廢物之移 動,設施之運輸,出售,回收,或以任何目的之使用或 購買計畫,提出具體的審核標準與監管架構,審核標準 尚包括核安全,輻射防護,用過核燃料暨其他高放射性 廢物的運輸,以及第三方責任等問題。地主國要建立清 晰透明的監管框架,且需嚴格依據客觀標準,進行無偏 差的用過核燃料或高放射性廢物人員的僱用決策,更 要建立執法系統,以確保遵循相關法規,以及用過核燃 料暨高放射性廢物管理活動之許可條款(Sloan, 2017: 38)。涉及用過核燃料或高放射性廢物之運輸核照程序, 則由地主國監管機構與IAEA官員共同決策(Sloan, 2017:18)。

在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核安全、核保防與核保安等相關規範。 聯合委員會職掌包括進行獨立審查,以確保地主國與 用戶國對核保防監督協議之遵循;就地主國所貯存之 本國或國際核材料,核發轉運執照;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; 批准經費使用,以及確保無歧視的中期貯存設施的商 業營運(Sloan, 2017: 40)。由此觀之,在GNF倡議的國際 政府組合實體模式下,聯合委員會的性質近乎是督導 地主國/夥伴國的太上監管機構。

	AMMAO	AA	AS
管理	區域組織+國	實體公司模式	國際政府組合實
機構	際組合實體		體
監管	國際協議	設施地主國內國	設施地主國內國
框架		法	法
依據			
監管	核安全公約、	高於國際規範標	核安全公約、聯
適用	聯合公約、	準之設施地主國	合公約、IAEA 各
規範	IAEA 各種技	內國法。(國際規	種技術規範與內
	術規範與內國	範 PLUS)	國法。
	法。		
核設	依 IAEA 規範	依國際規範同步	依 IAEA 規範同
施地	同步修正地主	修正。(國際規範	步修正地主國相
主國	國相關法規。	PLUS)	關法規。
修法			
義務			
監管	地主國之核設	設施地主國之核	設施地主國之核
管制	施或聯合設施	設施	設施
對象			
監管	区域核监管機	設施地主國核監	聯合監管:設施地
模式	時	管機關	主國核監管機關
			+聯合委員會
			(Joint Committee)
監管	無	國際諮詢委員會	聯合委員會:由
輔導		(International	IAEA 資深專家
		Advisory	與各國代表所組
		Council):由 IAEA	成。
		資深專家與各國	
		放射性廢物管理	
		專家所組成。(美、	
		俄、英、法、德、	
		加、日、南韓暨瑞	
		典之核監管機構	
		的領導階層人員)	

表三 美日區域多邊監管框架之初步構想

參考資料:計畫主持人自行研究整理。

of Radioactive Waste Management)

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> 《用過核燃料管理安全和放射性廢物管理安全聯合公約》(Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety

#### 四、區域後端協力監管機制之情境規畫

本研究計畫首先以超國家在地監管模式(IAEA 模 式)、規範造法與政策輔導模式(EURATOM 模式),以 及主權國家監管架構作為核安全監管模式的規劃基礎。 不過,在超國家在地監管模式下,看似監管獨立的後端 多邊設施地主國,似已產生地主國監管替代現象,為降 低誤判機率,擬將情境設定為「IAEA 直接監管」。其 次,參考日本東京大學 AMMAO 構想暨 AAAS/GNF 倡 議,畫分出四類後端協力管理機構,分別為 IAEA、區 域組織、多國(政府)組合實體,以及多國企業法人。繼 而對映出四種監管類別,分別是 IAEA 直接監管、區域 組織監管、參與國聯合監管,以及設施地主國監管。

由此分別勾勒多邊監管機制的特徵與能力建構 挑戰的十六種情境: Ii, Ir, Ic, Ie, Ri, Rr, Rc, Re, Mi, Mr, Mc, Me, Hi, Hr, Hc, He。(請參閱表四) 關於這十六種情 境的命名,請參閱表五。

管機	•理/營運機構 &構	IAEA (i)	區域 組織(r)	多國(政 府)組合 實體(C)	多國 企業(E)
監管	IAEA直接監 管(I)	Ii	Ir	Ic	Ie
模式	區域組織監 管(R)	Ri	Rr	Rc	Re
	參與國聯合 監管(M)	Mi	Mr	Mc	Me
	設施地主國 監管(H)	Hi	Hr	Hc	He

表四 16類區域後端協力監管情境

資料來源:計畫主持人規劃分析。

此謂的多國(政府)組合實體(multilateral entity),是 由後端協力機制參與國與設施地主國簽署國際協議所 構成,它是後端協力機制的管理/營運機構;多國(政府) 組合實體協議必需明訂多國(政府)組合實體的註冊國。 多國企業 (multilateral cooperate entity),是指由企業出 資所組成的區域後端協力多國企業,在設施地主國註 冊;或是利用地主國原有設施作為多國企業後端協力 設施,或是在地主國另行興建後端協力設施。多國企業 為區域後端協力設施的管理/營運機構。

表五	16類[	區域後	端協力	監管	機制	情境

情	情境說明	命名
境		
Ii	IAEA監管, IAEA為管理/營運機構	
Ir	IAEA監管,區域組織為管理/營運機構	
Ic	IAEA監管,多國(政府)組合實體為管理/營	IAEA 監 管
	運機構	模式
Ie	IAEA監管,多國企業為管理/營運機構	
Ri	區域組織監管, IAEA為管理/營運機構	
Rr	區域組織監管,區域組織為管理/營運機構	
Rc	區域組織監管,多國組合實體為管理/營運機	區域組織
	構	監管
Re	區域組織監管,多國企業為管理/營運機構	模式
Mi	多國組合實體聯合監管,IAEA為管理機構	
Mr	多國組合實體聯合監管,區域組織為管理/營	
	運機構	<b>冬與國聯</b>
Mc	多國組合實體聯合監管,多國組合實體為管	合监管模

	理/營運機構	式
Me	多國組合實體聯合監管,多國企業為管理/營	
	運機構	
Hi	設施地主國監管,IAEA為管理/營運機構	
Hr	設施地主國監管,區域組織為管理/營運機構	10 1/2 1/2 X
Hc	設施地主國監管,多國組合實體為管理/營運	設施地主
	機構 *	國監官榠
He	設施地主國監管,多國企業為管理/營運機構	

資料來源:計畫主持人規劃分析。

確認十六種情境之後,本研究復依據各項國際規範,設定下列十一項分析指標,分別勾勒分析上述十六種監管情境的機制特徵與挑戰。十一項分析指標包括: (A)後端多邊協力監管機構之構成,(B)後端多邊協力監 管機構與全球核安全建制之互動,(C)後端多邊協力監 管的適用規範,(D)後端多邊協力監管機構的獨立性, (E)後端多邊協力監管機構之職掌,(F)緊急應變措施, (J)核保安考量,(H)核保防考量,(I)同儕審查規畫,以 及(J)幅射防護與資訊揭露等。

#### Ⅲ.討論與結果

#### 一、區域協力監管機制情境分析

總體而言,區域後端協力監管機制的監管設計,既 要滿足以 IAEA 規範為最低門檻的核安全、核保防與 核保安,又要具備 IAEA「促進安全的政府、法律與監 管 架 構 」 (Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety General Safety Requirements) 所 揭諸的特定安全要求 - 亦即監管機構必須保有監管 的獨立性,以及財務、人力與技術資源的充分支持。不 過,衡諸目前各種國際/區域多邊協力倡議監管機制的 設計,多在強調參與國與地主國能否在不同制約下,充 份遵循 IAEA 的三「S」。此種只專注於三「S」的設計 偏差,反而忽略了 IAEA 再三闡述的,監管獨立原則, 才是確保核安全、核保防與核保安的根本。

第一,檢視上述十六種後端多邊協力監管情境, 可以發現,由 IAEA 直接監管、區域組織監管,以及多 國聯合監管所衍生的十二種監管情境(li, Ir, Ic, Ie, Ri, Rr, Rc, Re, Mi, Mr, Mc, Me),將會在地主國境內製造「監 管租界」,致使後端多邊設施地主國領土內,發生「監 管工元化」的特殊現象。也就是本土監管機構的部分監 管職權,透過監管轉讓授權協議,讓渡給外來監管機構 (IAEA、區域組織,或多國聯合監管機構),因而產生 部分「監管替代」現象。此種情境恐有損及 IAEA 強調 的監管獨立原則之虞,間接削弱地主國監管機構職權, 損及地主國監管機構威望,更無法提振「監管租界」內, IAEA 或區域組織監管單位的監管獨立性與領導力,導 致後端多邊協力機制陷入監管效能不彰的困境。這種 隱患,不單會削弱各國參與後端多邊協力機制的動因, 更可能致使後端多邊協力設施,陷入不安全的境域。

不過,積極面言之,上述十二種情境的監管二元化 特殊情況,將可致使參與國的內國法與國際規範,產生 「同步化」的外溢效果。為消除設施地主國境內監管二 元化的現象,設施地主國的內國法規,勢將被迫同步融
合 IAEA 的各項規範,遵循 IAEA 架構下所簽署的各 項國際公約,促使設施地主的內國法制與時俱進。此種 外溢效果,將會進一步擴及後端協力設施參與國的境 內監管架構,引導所有參與國全面遵循 IAEA 的各項 規範與 IAEA 主導的各項國際規約,繼而帶動內國監 管法制變革,並透過決策透明化與公眾溝通程序,贏得 公眾信任。

然而這些正面效果,卻未能彌補監管二元化下,多 邊監管機制因為監管獨立性受損,所遭致的多重挑戰。 尤其在 Ii 與 Rr 情境下, IAEA 或區域組織, 不但是後 端協力機制的監管方,也是營運方,營運權與監管權同 時集中在同一機構,已與監管獨立原則,大相逕庭。此 外,在Ir與Ri情境下,IAEA與區域組織互為後端多 邊機制的營運方或監管方,表面上雙方或許都有充份 與獨立的監管職權,來監管對方的營運活動。但是,對 設施地主國而言,監管法規與監管轉讓授權協議不但 專業並且繁瑣,又以多邊設施地主國受制於「監管租界」 的挑戰,境內監管租界外的設施監管自成一格,此種情 境,將致使地主國對本土核設施的監管威望與監管職 權,受到嚴重挑戰,更有可能造成地主國境內訊息揭露 與公眾參與的「一國兩制」現象,凡此皆可能損及地主 國監管機構的監管獨立性。當地主國監管職權威望不 彰,並且陷入監管獨立性受損的挑戰時,勢必無法取得 公眾的信任與信心,而原被寄予厚望的 IAEA 或區域 組織監管機構,也會因為受限於「監管租界」職權,無 法全面取代地主國監管機構,統籌應對緊急應變與核 保安暨保防等情事。

第二,參與共同組織聯合監管單位的 Mi, Mr, Mc, Me 等四種情境,除了重蹈 IAEA 與區域組織在地主國 製造「監管租界」的監管二元化現象外,由各參與國共 同出資營運的多國聯合監管單位,可能遭遇無法維持 監管獨立性的挑戰。在這四種情境下,聯合監管單位的 適用法規因無前例可循,故而必需透過參與國共同的 討論決議之。而無論是採用 IAEA 規範,或是自行構建 新規則,似都無法避免聯合監管單位的參與造法。具有 造法權的聯合監管單位,再結合監管的行政執法權,不 · 啻創造出一個難受控制的超國家機關。衡量如今國際 社會發展趨向,在多邊主義受挫的情勢下,期望各國能 達成共識,並在現有體制外創造出一個超國家監管機 構, 似難有正面的期待。而且 Mi, Mr, Mc, Me 等四種 聯合監管情境,非但不能解除地主國遭遇監管二元化 的困難,更不具備促成各參與國追求高標準管制的內 在優點,很可能因為參與國的權益分配不均,或者參與 國透過組織管理與經費預算控制等管道,企圖影響聯 合監管單位的監管獨立性,致使聯合監管單位淪為國 家利益競逐的祭品。

第三,依據 AAAS/GNF 倡議的國際政府組合實體 模式建議,Hc 情境是透過由各國代表暨 IAEA 指定官 員所組成的聯合委員會(Joint committee),作為督導地 主國監管機構的太上監管單位。AAAS/GNF 倡議原始 構想,在於監督地主國暨各締約夥伴國,高度遵循 IAEA 核安全、核保防與核保安等相關規範。聯合委員 會職掌包括進行獨立審查,以確保地主國與用戶國對 核保防監督協議之遵循;就地主國所貯存之本國或國 際核材料,核發轉運執照;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;批准經 費使用,以及確保無歧視的中期貯存設施的商業營運 (Sloan, 2017: 40)。在 AAAS/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監管機構的 太上監管機構。此種情境卻不免重蹈前述十二種情境 (Ii, Ir, Ic, Ie, Ri, Rr, Rc, Re, Mi, Mr, Mc, Me)的「監管租 界」困境,造成地主國監管機構職權替代或是被削弱的 境遇。

綜上,在監管機構具備充份資源以獨立行使監管 專業職權的前提下, Ii, Ir, Ic, Ie, Ri, Rr, Rc, Re, Mi, Mr, Mc, Me 與 Hc 等十三種情境,也就是 IAEA 直接監管、 區域組織監管、參與國共組聯合監管單位,以及透過聯 合委員會(Joint committee)督導地主國監管機構的構想, 並不適宜作為未來後端協力監管機制的參考模式。

第四,相較之下,在Hi,Hr與He 三種情境下,由 地主國監管機構會同 IAEA 資深官員暨國際上著名專 家學者組成的國際諮詢委員會(International Advisory Council)來執行監管任務,較不易遭遇監管二元化的挑 戰。透過在地主國監機構內,設置國際諮詢委員會的方 式,督促地主國監管機構,將IAEA 倡導的國際規約融 入本土法制,適時檢討並更新適用法規,精進地主國監 管機構的獨立監管職權,完善其授權發照、審查評定、 視察、執法等與專業表現,強化其透明化與公眾溝通效 能,更可以在運輸、卸載、醫療處置與工作防護,以及 環境監測與公眾防護措施等方面,促成參與國與地主 國的合作,達成核安全、核安保暨核保防的縝密要求。

第五,Hi,Hr與He三種情境是兼備國際規範融 合度與監管獨立原則兼備的較佳監管模式(請參閱表 六)。

由設施地主國自行監管,並以IAEA為管理機構的 Hi情境,構成IAEA+國際諮詢/地主國監管模式。地主 國監管的主要法源依據為地主國與IAEA簽署的地主 國/IAEA後端多邊設施設立條約,由地主國獨立監管, 設於領土內的後端多邊設施。但是地主國內國法規,必 需隨著IAEA規範的變動,進行同步修正。此外,地主 國也必需在內國監管機構內,設立有IAEA資深官員暨 國際放廢管理專家參與的國際諮詢委員會,針對地主 國監管機構之監管作為,提出建議。另外,依據地主國 /IAEA後端多邊設施設立條約,地主國需定期接受強制 同儕審查,並且必需加入IAEA主導下的各種核不擴散、 核安全、核保防與核保安,以及涉及第三方責任賠償等 議題的各項國際公約。

由設施地主國自行監管,並以區域組織為管理機 構的Hr情境,構成區域組織+國際諮詢/地主國監管模 式。地主國監管的主要法源依據為地主國與區域組織 締結的地主國/區域組織後端多邊設施設立條約,由地 主國獨立監管,設於領土內的後端多邊設施。但是地主 國內國法規,必需隨著區域組織規範的變動,進行同步 修正。並在地主國監管機構內,設立有 IAEA 資深官員 暨國際放廢管理專家參與的國際諮詢委員會,關注地 主國監管機構的監管作為,並提出建議。此外,依據地 主國/區域組織後端多邊設施設立條約,地主國需定期 接受區域組織或其他組織的同儕審查,也必需加入區 域組織已簽署的各種核不擴散、核安全、核保防與核保 安,以及涉及第三方責任賠償等議題的各項國際公約。

由設施地主國監管,以多國企業為管理機構的He 情境,是融合所有國際規範且具備獨立監管特色的國 際諮詢/地主國監管模式。依據地主國法令規章,在地 主國境內之多國企業後端設施,將委由地主國監管機 構獨立監管。地主國需在監管機構內,設立有 IAEA 資 深官員暨國際放廢管理專家參與的國際諮詢委員會。 並依據該國際諮詢委員會建議,修正地主國的內國法 規,定期接受同儕審查,藉以強化監管機構的職權與監 管效能,並且必需加入 IAEA 及/或區域組織主導下的 各種核不擴散、核安全、核保防與核保安,以及涉及第 三方責任賠償等議題的各項國際公約。

監管	IAEA+地主國監	區域組織+地主國	地主國監管模式
模式	管模式/國際諮詢	監管模式/國際諮	/國際諮詢(He)
	(Hi)	詢 (Hr)	
監管	IAEA 與地主國	區域組織與地主	設施地主國內國
框架	簽署 IAEA 後端	國簽署區域組織	法。
依據	多邊設施設立條	後端多邊設施設	
	約、地主國內國	立條約、地主國內	
	法。	國法。	
監管	地主國內國法	地主國內國法	設施地主國內國
適用			法
法規			
核設	地主國依 IAEA	地主國依區域組	依國際諮詢委員
施地	規範變動,同步修	織規範變動,同步	會建議,修正內
主國	正內國相關法規。	修正內國相關法	國法。
修法		規。	
義務			
監管	IAEA 後端多邊	區域組織後端多	设於內國之後端
標的	設施*	邊設施*	多邊設施*
監管	授權發照、審查評	授權發照、審查評	授權發照、審查
職權	定、視察、執法、	定、視察、執法、	評定、視察、執
	資訊透明化與公	資訊透明化與公	法、資訊透明化
	眾溝通。	眾溝通。	與公眾溝通。
監管	有 IAEA 官員參	有 IAEA 官員參與	有 IAEA 官員參
諮詢	與暨國際放廢專	暨國際放廢專家	與暨國際放廢專
單位	家參與的國際諮	參與的國際諮詢	家參與的國際諮
	詢委員會。	委員會。	詢委員會。
監管	地主國監管機關	地主國監管機關	地主國監管機關
執行			
單位			
強制	定期接受 IAEA	定期接受區域組	依國際諮詢委員
同侪	或其他組織的同	織或其他組織的	會建議。
審查	儕審查。	同儕審查。	

#### 表六 東亞後端多邊協力監管的最佳模式: 兼備國際規範融合與地主國監管獨立原則

參考資料:計畫主持人自行研究整理。

\*透過國際協將地主國原有設施轉化為後端多邊設施;或是在地主國 新建後端協力設施。

#### 二、IAEA 倡議監管機制須具備監管獨立職權之意涵

為防阻個人、社會與環境受到用過核燃料暨放射 性廢物(spent fuel and radioactive waste, SFRW)之游離 幅射的危害,避免因為用過核燃料暨放射性廢物 (SFRW)的不當管理對後代子孫產生過當負擔,並且為 滿足防止核武擴散(nuclear non-proliferation)等三個基 本原則,國際社會普遍以為,SFRW 在中期貯存後,宜 將其置放在能夠確保放射性元素與生物環境長期隔離 之穩定地質構造的深層地下最終處置設施。故而,中期 貯存與最終處置不但是後端安全管理的重點,亦是 IAEA 核安全、核安保暨核保防關注的焦點。

IAEA 是國際核能規範的主要造法者。IAEA 分別 在推展核能和平使用,防保核子用於軍事目的,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 所頒佈的各種建議暨行為準則,無論就其內涵或實踐 功能觀之,皆已超越一般軟法(soft law)規則,成為一種 具備類強制力與類遵循(compliance)的法律規範(Handl, 2003:17),而 IAEA 也運用核安全公約的締約方審議會 議,執行相關的國際造法功能(Handl, 2003:26)。整體 而言,IAEA 基本安全原則(Safety Fundamentals)、安全 要求(Safety Requirements)與安全導則(Safety Guides)所 構成的核安全標準,已為有效保護人類與環境免於輻 射危險,奠定堅實而全面的基石(IAEA, 2006: para.1.5)

IAEA 希望促進與支持全球核安全的全面監管框 架(framework),以確保核燃料循環全壽期的安全。監管 框架包括相關立法、規約與導則(guidance),以及強有 力的安全領導和管理計畫。其目標有二,首先是確保建 立與維持一個可操作暨有效獨立的監管機構,其獨立 監管職權的行使,必須透過立法途徑受到保障,並且必 須賦予充足的資源,以及具備適當資格的稱職人員,履 行監管責任與職權(Williams, 2003: 57)。另一項目標, 是加強成員國監管機構的透明度、公開性、獨立性、技 術能力與有效性(IAEA, 2017b: 7)。《核安全公約》與《聯 合公約》,均明確規定締約方需建構立法、監管框架以 及監管機構的義務。我國雖非《核安全公約》與《聯合 公約》之締約方,但歷年來仍自願撰寫並經美籍專家審 查後(曾雅真 2017: 39-40),發佈「國際核能安全公約中 華民國國家報告書」(行政院原子能委員會,2016),以 及「依據用過核子燃料與放射性廢棄物管理安全聯合 公約國家報告書」(行政院原子能委員會,2017)。

汲取福島核災事故的教訓,2014 年舉行的第六次 《核安全公約》締約方審議會議,要求公約的締約方審 慎面對五大挑戰。第一、如何盡量縮小締約方之間安全 認知的差距;第二、如何協調促成緊急應變計畫與措施; 第三、如何盡可能的運用運轉經驗、監管經驗,以及國 際同儕審查服務,來強化核安全;第四、如何強化監管 機構的獨立性、安全文化、透明度與公開性。最後,如 何促使所有國家承諾並參與國際合作 (IAEA, 2014: 5)。 可以發現監管單位之獨立性、安全文化、透明度與公開 性,乃是確保核安全之重要基礎,更受到 IAEA 與國際 社會的普遍重視。

為提高 IAEA 會員國的全面性監管框架效能, IAEA 提供同儕審查(peer review)服務,以提升會員國 的監管基礎結構與效能。以後端為例,主要有「整合性 放射性廢物暨用過核燃料管理、除役與治理的審查服 務」(Integrated Review Service for Radioactive Waste and Spent Fuel Management, Decommissioning and Remediation, ARTEMIS,以下簡稱 ARTEMIS 同儕審查 服務)。ARTEMIS 同儕審查服務創立於福島核災後的 2014 年,目的是向設施營運者、監管機構與國家決策 者,提供 SFRW 管理、除役與治理計畫的同儕審查與 諮詢建議。其審查項目包括 SFRW 管理、控制放射性 核素的環境排放、核設施除役,以及放射性污染場地的 復原(IAEA, 2020a)。《聯合公約》2018 年第六次締約方 會議,特別強調 ARTEMIS 同儕審查服務對於各締約 方強化 SFRW 安全管理的重要性(IAEA, 2018: para. 22)。

透過強化國家監管框架的效能,尤其是強化監管 機構的高透明度與公開性,得以建構公眾對監管機構 之獨立性、勝任力、完整性與公正性的信任(trust)與信 心(confidence),進而對於促進核安全品質,以及相關政 策之推展,產生正面的效果(IAEA, 2017b: 8)。IAEA 揭 示,監管機構應勝任其專業知識、客觀性、可靠性、透 明度與回應敏捷度,尊重利益攸關方且在與其互動的 過程中公平行事,一旦公眾認為監管機構具有這些能 力,可以進一步增強公眾對監管機構的信任。可是監管 機構若不努力確保獨立性、勝任力與完整性,將很容易 失去公眾的信任與信心,故而監管機構對維持其獨立 性與專業能力,需不斷努力,不能有絲毫懈怠(IAEA, 2017b:8)。更有其者,IAEA 提醒,公眾參與過程的基 礎,奠基於彼此的互信,如果任何利益攸關方在特定的 程序中無法信任監管機構,則它可能無意充分參與程 序,進而削弱公眾參與程序的正當性(IAEA, 2017b: 8)。 一個失去正當性的措施,將造成核安全、核安保與核保 防的重大瑕玼。

由此可知,國家監管架構如果未能透過法律,確保 監管機構的財務與人力資源,保障監管機構能夠獨立 且專業地執行監管任務,缺乏透明與公眾溝通品質,將 難以取信於公眾與利益攸關方,不單將嚴重損及核安 全、核安保與核保防的品質,造成各種隱患;更有甚者, 失能且聲譽受損的國家監管機構,亦未能贏得其他國 家監管機構的信任與信心,將是未來該國參與國際後 端協力機制的重大挑戰。

#### 三、引薦台灣參與 NTI/DSFS 地下實際室工作小組

2020年,在美國華府智庫「核威脅倡議組織」 (Nuclear Threat Initiative, NTI)「用過核燃料發展策略」 (Developing Spent Fuel Strategies, DSFS)之東亞聯合實 驗室的倡議下,由美、日、韓、澳等四個國家級研究機 構共組的「環太平洋用過核燃料管理夥伴」(Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)地下實驗室工作小 組(URL Working Group)的建制化發展,於 2020 年六月 加速進行。然台灣核燃料循環後端當事方之台灣電力 公司,以及進行後端管理相關技術研發的行政院原子 能委員會核能研究所暨工業技術研究院,對此發展,尚 無積極回應。 就此項發展,計畫主持人曾雅真教授於2020年7 月27日召開諮詢會議,邀請來自台灣電力公司、行政 院原子能委員會核能研究所暨工業技術研究院專家, 諮詢後端多邊化協力機制發展的相關問題。並傳遞NTI 將加速建制化「環太平洋用過核燃料管理夥伴」(Pacific Rim Spent Fuel Management Partnership)地下實驗室工 作小組(URL Working Group)的未來科研方向,以及參 與國代表組織可參與地下實驗室工作小組董事會 (board)運作之訊息。

會後,工業技術研究院表達參與「環太平洋用過核 燃料管理夥伴」地下實驗室工作小組之積極意願,台灣 電力公司則擬以協同身份,會同工業技術研究院參與 NTI「環太平洋用過核燃料管理夥伴」地下實驗室工作 小組台灣團隊。行政院原子能委員會核能研究所則婉 謝暫不參與。

2020 年 8 月 20 日,NTI 召開跨國視訊會議與會代 表計有來自美國、加拿大、日本、南韓與澳洲等專家, 另工業技術研究院與台灣電公司代表,亦在計畫主持 人協調下代表與會。該次會議初步通過地下實驗室工 作小組章程,同意台灣參與 NTI「環太平洋用過核燃料 管理夥伴」地下實驗室工作小組,並將在章程清稿後, 交付各參與單位簽署。

本計畫主持人除向美國華府智庫 NTI/DSFS 地下 實驗室工作小組正式引薦臺灣相關單位,並順應我國 相關當事方意願,協助工業技術研究院參與代表,爭取 將臺灣與美、日、韓、澳洲等四國研究團隊,並列為該 小組之正式成員,業已獲 NTI/DSFS 地下實驗室工作 小組的積極回應。未來 NTI/DSFS 的發展與成果,值得 密切關注。

## 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

首先,參酌 IAEA 推動核燃料循環多邊化倡議,以 及現有的各項後端多邊協力機制倡議,多在強調核不 擴散作為安全管理 SFRW 的重要性,尤其日本東京大 學的 AMMAO 構想, AMMAO 會員國, 需嚴格遵守核 不擴散規定。並且, AMMAO 暨會員國與 IAEA, 也必 需另行簽署區域核保防協定(Regional Safeguard Agreement), 在 AMMAO 內設置區域核保防部門 (Regional Safeguards Department)專責核保防事務。 AMMAO 專注於核保防的組織設計,雖在實際運作上 有待更細緻的規畫,但是衡量其他類似倡議,均可以發 現奉行核不擴散精神,遵循核保防規範,以及配合 IAEA 核保防視察,乃是多項後端多邊協力機制倡議的 基本訴求。未來如果我國有意參與國際/區域後端多邊 協力機制,建議宜維持良好的核保防表現,俾能爭取更 多夥伴國家的支持,順利加入機制運作不斷創新的國 際/區域後端多邊協力機制。

再者,在財務、人力與技術資源充分支持下保有監 管的獨立性,遂行資訊透明化與公眾參與溝通,其最終

目的是赢得國內公眾信任與信心,累積在地監管機構 之國際聲譽,俾能構建有力的決策正當性資本 (legitimacy capital),有效且順利執行國家後端管理決策, 鋪陳未來參與國際/區域後端多邊協力機制的監管信譽。 秉持此種認知,建議我國監管機構宜參考國內外實踐 經驗,省察《核安全公約》、《聯合公約》以及 IAEA 之 GSR Part 1 (Rev. 1)「促進安全的政府、法律與監管架 構」(Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety General Safety Requirements)安全標準所要求的 組織獨立運作原則,持續提高並維繫資訊透明化與公 眾溝通品質,並與被授權方(licensees)保持足夠距離 (OECD/NEA, 2006: 10), 經營得之不易的監管信任與信 12 0

其次,目前各類區域後端多邊化管理倡議的共同 主張,均強調參與國/地主國與 IAEA 之核安全、核安 保、核保防,以及第三方責任賠償等各項核規範標準的 全面融合。而且自2011年日本福島核災後,例如日本、 南韓、中國大陸與加拿大、澳洲等周邊國家,均順應 「IAEA 核安全行動計畫」(IAEA Action Plan on Nuclear Safety),修正補充核安全規範,強化核監管機構效能。 無論就融合 IAEA 規範或是提升核安全強度的角度, 我國核能監管機制,均有同步於 IAEA 暨週邊國家之 核安全架構的必要性與需求性。

最後,為因應國際/區域多邊後端服務協力機制的 可能發展,建議我國就內國法的國際融合度與監管機 關效能提升等方向,進行必要的調整,並為我國內/外 雙軌處置路徑預留調整空間。5就法制面而言,我國應 以《核安全公約》(Convention on Nuclear Safety)、《用 過核燃料暨放射性廢物管理安全聯合公約》(Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)與各項 IAEA 各項規範為藍本,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 法制架構,全面重新建制我國的監管法制架構。就強化 监管機關效能而言,行政院已經決定,將行政院原子能 委員會改組為「核能安全委員會」,未來將待立法院通 過「核能安全委員會組織法」後,完成我國核監管機關 的組織調整。建議利用此一時機,能夠運用立法途徑, 保證核監管機關在人力、預算與技術資源取得的有力 支持,確保我國監管機構的獨立專業監管能力、勝任力 與全面性,贏得公眾與利益關係方的充份信任與信心, 全面確保我國核能後端設施安全,爭取夥伴國家認同, 鋪陳我國順利參與國際/區域後端多邊協力機制的關鍵 基石。

代方案(台灣電力公司,2016:2)。。

<sup>5</sup> 據「放射性廢料管理方針」,放射性廢料之最終處置,採境內、境 若境外處置各方面條件均已成熟可行,則可作為境內處置之平行替 外並重原則 (行政院原子能委員會,1997: 第8 條);並且應繼續推 動低放射性廢料之境外處置計畫(行政院原子能委員會,1997:12.3條) 依據台電公司「低放射性廢棄物最終處置計畫書」(修訂二版)之規劃,

#### 參考文獻

- [1] 行政院原子能委員會,1997,「放射性廢料管理方 針」,(86)台科字第33951號,民國86年9月2日。 <u>http://erss.aec.gov.tw/law/LawContentDetails.aspx?i</u> <u>d=FL015688&KeyWordHL</u>=
- [2] 行政院原子能委員會,2016,「國際核能安全公約 2017 年 中 華 民 國 國 家 報 告 」 <u>https://www.aec.gov.tw/share/file/regulation/4U2rW</u> <u>SCINSscwh1ZHeiVZQ .pdf</u>
- [3] 行政院原子能委員會,2017,「依據用過核子燃料 與放射性廢棄物管理安全聯合公約國家報告書」, <u>https://www.aec.gov.tw/share/file/fcma/snQu1U~m1</u> <u>nCjXJh2QeZq4Q\_.pdf</u>.
- [4] 台灣電力公司,2016,「低放射性廢棄物最終處置計畫「替代/應變方案」之具體實施方案(公開版),
   https://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index 07 d-1.pdf
- [5] 曾雅真,2012,「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51卷,第2期,頁69-100。
- [6] 曾雅真,2013,「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」, 《政治科學論叢》,56期,頁1-37。
- [7] 曾雅真,2014,「歐洲原子能共同體及其會員國 權力的競合:以國際用過核燃料暨放射性廢物管 理建制為例」,《政治科學論叢》,第62期, 頁 115-154。
- [8] 曾雅真,2017年,國際規範擴散的障礙與挑戰-以臺灣接納 IAEA 用過核燃料暨放射性廢物管 理安全聯合公約為例,問題與研究,第五十六卷 第三期,頁 29-55。
- [9] 曾雅真,2017,「放射性廢棄物管理區域合作國際資訊先期研究」期末報告。行政院原子能委員會放射性物料管理局。 https://www.aec.gov.tw/share/file/information/Eyb 4YIWQYgJezRxtGqo2Og\_.pdf
- [10] 曾雅真,2018,「伊朗核協議對國際核燃料供應 建制發展的影響」,政治科學論叢,第78期,頁 69-104。
- [11] 曾雅真,2018,「組建超國界後端服務保證管理 機制之研析-以 IAEA 核燃料銀行模式為基點之 多邊後端管理情境分析」期末報告。原子能科學 作 究 畫 技 術 合 研 計 https://www.grb.gov.tw/search/planDetail?id=1242 6401; 摘要版請參閱107年原子能科技學術合作 研究計畫成果發表會論文集,頁 99-114。 https://www.aec.gov.tw/share/file/law/3V1ZyBIxU fGweqa7mLJT5w .pdf •
- [12] 曾雅真,2019,「核能規範國際法治化?IAEA 於 哈薩克設立低濃縮鈾銀行設立協議的探索」、《政 治學報》,第68期,頁1-37。
- [13] European Union, 2011. "Council Directive 2011/70/EURATOM of 19 July 2011: Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive

Waste," Official Journal of the European Union, L 199: 48-56.

- [14] European Union, 2014. "Council Directive 2014/87/Euratom of 8 July 2014 : Amending Directive 2009/71/Euratom Establishing a Community Framework for the Nuclear Safety of Nuclear Installations," Official Journal of the European Union, L 219: p. 42–52.
- [15] IAEA, 2006. "Fundamental Safety Principles," IAEA Safety Standards Series No. SF-1. Vienna: IAEA. https://wwwpub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1273\_we b.pdf
- [16] IAEA, 2016. Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety General Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1 (Rev. 1). <u>https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1713web</u> -70795870.pdf
- [17] IAEA, 2017. Communication and Consultation with Interested Parties by the Regulatory Body, General Safety Guide GSG-6. https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1784\_web.p df.
- [18] IFNEC, 2018. "IFNEC IDWG Workshop on New Challenges Facing Regulators," March 26, 2018. <u>https://www.ifnec.org/ifnec/jcms/g\_10265/ifnecidwg-workshop-on-new-challenges-facingregulators</u>
- [19] European Union, 2011. "Council Directive 2011/70/EURATOM of 19 July 2011: Establishing a Community Framework for the Responsible and Safe Management of Spent Fuel and Radioactive Waste," Official Journal of the European Union, L 199: 48-56.
- [20] OECD/NEA, 2020. "International co-operation for the development and advancement of high-level radioactive waste and spent fuel disposal". <u>https://www.oecd-nea.org/news/</u>

## 用過核子燃料最終處置緩衝材料乾溼循環過程下 熱-水(TH)耦合水力傳導模式

## Thermal-hydraulic (TH) coupled hydraulic conductivity models of buffer material for spent nuclear fuel final disposal under drying and wetting process

計畫編號: MOST 108-NU-E-020-001-NU 計畫主持人:楊樹榮 e-mail:sryang@mail.npust.edu.tw 計畫參與人員:蔡旻峰、張育馨 執行單位:國立屏東科技大學

#### 摘要

國際間針對高階核廢料多採深層地質最終處置 法,而黏土常被用來作為高放射性核廢料緩衝材料。本 計畫回顧不同水力傳導度求得方法,並設計能夠模擬近 場環境且可量測緩衝材料於不飽和狀態下之水力傳導 度的試驗儀,利用水汽平衡法求得土壤水份特性曲線, 再採用水平土柱法做土壤吸滲試驗,並根據土壤水份特 性曲線及水平土柱法所得之擴散係數求得不飽和土壤 水力傳導度,藉以探討核廢料衰變熱對於緩衝材料水力 傳導度的影響,並回顧國際間常用熱-水(TH)耦合下水力 傳導模式,評估各模式對 BH 膨潤土不飽和狀態下水力 傳導度擬合度。

研究結果顯示,試驗所得之土壤水分特性曲線與 vG model 所擬合之曲線相近,而不飽和土壤水力傳導度在 單位重 1.7 g/cm<sup>3</sup>時與 vG model 所擬合之曲線相近亦相 近,在單位重 1.6 g/cm<sup>3</sup>及 1.8 g/cm<sup>3</sup>之不飽和水力傳導 度與 BC model 及 vG model 皆有差異。

**關鍵詞:**緩衝材料、深層地質最終處置、土壤水份特性 曲線。

#### Abstract

The fuel rods used after the nuclear power plant are high-level nuclear waste. Clayey soils are often used as buffer material in an engineered barrier system for isolation of high-level radioactive wastes (HLW) in a repository. In the current proposal for deep geological disposal of the high-level radioactive wastes in Taiwan, compacted bentonite is used to contain the metallic waste canisters and separate the waste from the host rock and backfill materials. The major roles of the buffer material are to reduce the groundwater flow, to protect the overpack from degradation, and to minimize the migration of radionuclides. The drying and wetting process of the buffer considered as a hydro-process occurring at elevated temperatures in the near-field of a repository affects the migration of radionuclides. Thermal-hydraulic (TH) properties of buffer material affects this saturation process. To evaluate the influence of decay heat on hydraulic conductivity of buffer material, an equipment will be designed to simulate the environment of repository near-field а and thermal-hydraulic (TH) coupled models often used in the literature will be reviewed to evaluate their suitability on unsaturated hydraulic conductivity of BH bentonite.

**Keywords:** Buffer material, deep geological disposal, thermal-hydraulic (TH) coupled models

#### I. 前言

世界各國對高放射性核廢料處置曾提出多種方 案,如外太空處置、深海處置、海島處置、冰層處置及 深層地質處置等等,目前國際間針對高階核廢料多採用 深層地質最終處置法,而我國高放射性核廢料最終處置 措施在經專家學者評估後,深層地質處置亦為可行性方 案之一 [1-3]。深層地質處置是將高階核廢料置入廢料 罐中,將周圍佈滿已緊密壓實的不飽和 BH 膨潤土,做 為緩衝材料並深埋於深層處置場後密封,一般深度為 500 至 1000 公尺的地下深處。在處置場開放運作後,地 下水將從周圍壓力較高的地區向低壓區流動,而地下水 最先接觸的將是回填材料,緊接著會影響到緩衝材料 [4],同時考慮處置場近場環境經日積月累受地下水或海 水的侵蝕,或是高階核廢料進行熱衰變而產生高溫對緩 衝材料的影響。

因此為觀察緩衝材料的吸力行為,探討 BH 膨潤土 是否適合做為回填深層地質處置場的緩衝材料,本計畫 沿用 106 與 107 年度計畫所設計一個能夠模擬近場環 境,且可量測緩衝材料於不飽和狀態下之水力傳導度的 試驗系統,利用三種單位重 (1.6、1.7 及 1.8 g/cm<sup>3</sup>) 經 夯實的試驗土體,分別進行不同的環境溫度 40、60 及 80℃,進行水汽平衡法取得土壤吸力、體積含水量及飽 和度之關係,並利用水平土柱法以含水量與剖面位置之 數值推算出土壤擴散係數,以評估土體在不同單位重與 不同環境之下的不飽和水力傳導度。

研究成果除可做為未來緩衝材料現場厚度與乾單 位重設計之依據,並且可充分瞭解核廢料高溫衰變熱對 緩衝材料熱力-水力(TH)特性,以利建立我國本土化的用 過核子燃料最終處置緩衝材料再飽和過程的審查重 點,確保深層地質最終處置場廢棄物處置設施之安全。

#### Ⅱ. 試驗材料與研究方法

2.1 試驗材料

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

表1BH 膨潤土物理性質

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

#### 2.2 研究方法

本研究利用水平土柱法概念並加以改良,將土柱置 於四周皆有加溫功能的恆溫烘箱中,模擬核廢料衰變熱 對於緩衝材料影響的近場環境,探討近場環境中地下水 遭受衰變熱之溫度變化以及其對緩衝材料穩定性之影 響,同時,為了模擬地下水壓對土柱所產生之影響,將 在土柱內打入水壓。研究變因包含單位重土與溫度,研 究流程如圖1所示。



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

#### 2.2.1 水汽平衡法(Vapour Equilibrium Technique)

本研究利用水汽平衡之原理,使土壤試體孔隙間壓 力與環境濕度達到平衡,即為水汽平衡法。本試驗參考 Schneider [5]所提出不同溫度下鹽溶質之相對濕度,選擇 可達到預期吸力之適合的溶質進行試驗,如表2所示。

#### 表2 飽和溶液於不同溫度下之相對濕度與吸力值

	Temperature			
	40°C		60°C	
Saturated	RH	Suction	RH	Suction
solution	(%)	(MPa)	(%)	(MPa)
NaCl	74.9	41.8	74	46.3
$K_2SO_4$	96.8	4.7	96	6.3
$Mg(NO_3)_2$	48	106.1	40.5	138.9
KCl	82.5	27.8	80.1	34.1
MgCl <sup>-6</sup> H <sub>2</sub> O	32	164.7	30	185.1
NaNO <sub>3</sub>	70.8	49.9	67	61.6
LiCl	10.8	321.7	10.2	351

#### 2.2.2 水平土柱法

土柱法又分為垂直土柱法與水平土柱法,水平土柱 法的試驗早在 1950 年代就被提出,用水平土柱測定不 飽和土壤水份擴散度實驗,普遍使用的方法是 Bruse 和 Klute 提出的水平土柱法,即利用一個半無限長水平土 柱吸滲實驗,將乾單位重一致、初始含水量均一的土壤 裝填在一水平土柱中,在土柱一端維持一個定水頭的供 水,並使水份在土柱中做水平吸滲運動,且忽略重力作 用,隨著時間增加,土壤各垂直剖面的含水量持續變 化,因此該方法稱之為暫態剖面法,根據一维水平流動 的偏微分方程式,引入 Bohzmann 變換後,求得計算公 式,再由實驗資料列表計算值。經推導後,不飽和土壤 擴散度可由下式求得:

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

其中, $D(\theta)$ 為土壤擴散係數; $\theta$ 為土壤體積含水  $\lambda = \frac{x}{6}$ 

量;  $\sqrt{t}$  ,  $x = 濕潤鋒的位置, t = 入滲時間; <math>\Delta\lambda$  為兩剖面間溼潤鋒前進之距離;  $\Delta\theta$  為兩剖面間之含 水量差。

擴散係數 
$$D(\theta)$$
跟水力傳導度  $K(\theta)$ 關係如下:  
 $D(\theta) = \frac{K(\theta)}{c}$  (2)

其中 C 為比水容積,係為土壤含水量與基質吸力之 比值,如下式所示:

$$C = \frac{\Delta\theta}{\Delta\phi} \tag{3}$$

其中 $\Delta \varphi$  =兩剖面間基質吸力差。

2.2.3 Brooks and Corey model

Brooks and Corey (1964) model,又簡稱 BC model, 係採用五種不同性質之砂質土壤做試驗,利用實驗所得 之參數擬合 model,為最早提出之土壤水份特性曲線模 式之一[5]。此模式假設曲線在吸力小於進氣吸力值時為 一定值,吸力大於進氣吸力值時呈一指數關係(Brooks and Corey, 1964),如式(4)。

$$S = \begin{cases} 1 & \varphi < \varphi_b \\ \left(\frac{\varphi_b}{\varphi}\right)^{\lambda} & \varphi \ge \varphi_b \end{cases}$$

$$(4)$$

其中,S 為飽和度; $\varphi$ 為土壤吸力值; $\varphi_{2}$  参數為進氣吸 力值(air-entry pressure); $\lambda$  參數為孔隙尺寸分佈指數 (pore size distribution index),與土壤中之孔隙分佈有 關。又以吸力與體積含水量之關係表示,如式(5)。

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(\alpha \varphi)^{\lambda}} & \varphi < \mathbf{0} \\ \theta_s & \varphi \ge \mathbf{0} \end{cases}$$
(5)

其中, $\theta_a =$ **飽和含水量**(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\theta_{n=\mathcal{R}}$ 餘含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)。

2.2.4 van Genuchten model

van Genuchten (1980) model,簡稱 vG model,係 採用五種不同性質之砂質土壤及黏土做試驗,利用實驗 所得之數據提出一含有三個參數之模式,如式(6)[5]。

$$S = \frac{1}{[1 + (oup)^n]^m}$$
(6)

其中,S 為飽和度; α 為進氣吸力值之倒數(1/ Ψb); m 參數為控制曲線對稱性之參數;n 參數與土壤孔隙分 佈有關,可改變土壤水份特性曲線之斜率。又以吸力與 體積含水量之關係表示,如式(7)。



其中, $\theta_r = 10$  能和含水量(cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\theta_r = \mathcal{R}$  餘 含 水 量 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>); $\varphi_{r} = \pm$  集吸力; m=<sup>1-1</sup>

#### Ⅲ. 結果與討論

3.1 熱力-水力(TH)下土壤水份特性曲線(SWCC) 本研究利用水汽平衡法及水平土柱法所量測的土 壤吸力與含水量之結果,探討溫度及含水量對吸力之影響。圖2至圖22為BH 膨潤土分別在單位重1.6 g/cm<sup>3</sup>、 1.7 g/cm<sup>3</sup>、1.8 g/cm<sup>3</sup>的條件下,NaCl、KCL、MgCl<sub>2</sub>・ 6H<sub>2</sub>O、NaNO<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、LiCl、Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>等七種鹽溶液, 在溫度40℃與60℃試驗水汽平衡法之重量變化圖。









當試體剛壓實完的濕度小於玻璃容器內之濕度 時,試體放入容器內,在玻璃罐內試體含水量會隨時間 而增加,試體的溼度會逐漸與玻璃容器內之濕度達到平 衡。反之,在當試體的濕度大於玻璃容器內之濕度時, 試體放入容器中,其試體含水量會受到玻璃罐中鹽溶液 所產生之濕度影響而下降。

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

圖 23 至圖 25 為 BH 膨潤土分別在溫度 40℃、60℃ 及 80℃之土壤水份特性曲線(SWCC)。由圖中可知,隨 著吸力的提高,單位重對 SWCC 的影響越不明顯,只有 在較低吸力情況下,單位重對 SWCC 的影響較明顯。





圖 26 至圖 28 為單位重 1.6 g/cm<sup>3</sup>、1.7 g/cm<sup>3</sup>、1.8 g/cm<sup>3</sup> 於不同溫度下的 SWCC。由驗結果得知,不同溫 度下在吸力大於 10 Mpa 下, SWCC 差異性不大。







3.2 熱力-水力(TH)下不飽和土壤擴散係數

本研究利用水平土柱法試驗並根據 Bohzmann 轉換 公式(1)計算土壤擴散係數,進而根據式(2)求取不飽和土 壤水力傳導度。40℃、60℃與80℃各單位重之土壤體積 含水量與擴散係數如圖 29 至圖 31 所示。由圖中可知, 在相同含水量下,單位重對土壤擴散係數影響有限。



圖 30 60℃不同單位重體積含水量與擴散係數比較圖



3.3 不飽和土壤水力傳導度

本研究根據水汽平衡法所求得之土壤 SWCC 與水 平土柱法所求得之土壤擴散係數,利用式(2)土壤擴散係 數與水力傳導度關係式,求得不飽和水力傳導度之值。 於溫度 40℃及 60℃及於單位重 1.6 g/cm<sup>3</sup>、1.7 g/cm<sup>3</sup>、1.8 g/cm<sup>3</sup> 飽和與不飽和時之水力傳導度及含水量關係如圖 32 至圖 34 所示,由圖中可知,不同溫度與單位重下, 隨著含水量提高,水力傳導度愈大。且含水量越高,單 位重 1.6 g/cm<sup>3</sup>之水力傳導度大於單位重 1.7 g/cm<sup>3</sup>及 1.8 g/cm<sup>3</sup>,然而,溫度對水力傳導度影響較不穩定,其原因 為孔隙水的粘滯度會受到溫度變化而有影響,導致土壤 水力傳導度變化極大。



圖32 不同溫度單位重1.6 g/cm<sup>3</sup>之土壤水力傳



圖 34 不同溫度單位重 1.8 g/cm<sup>3</sup>之土壤水力傳

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

模式擬合結果如圖 35 至圖 40 所示。圖中黑圓點為 實驗數據,藍色線段為利用 vG model 擬合之土壤水份 特性曲線,紅色線段利用 BC model 擬合之土壤水份特 性曲線。由圖 35 至圖 40 可知,本試驗利用水汽平衡法 所得出之數據與 vG model 曲線較為符合,而 vG model 所擬合之飽和含水量與實驗量測之飽和含水量也較相 近,而 BC model 之擬合 R<sup>2</sup>較為不佳。



圖 35 BH 膨潤土單位重 1.6 g/cm<sup>3</sup> 於 40℃套用不同 SWCC model



圖 36 BH 膨潤土單位重 1.7 g/cm<sup>3</sup> 於 40℃ 套用不同 SWCC model



圖 37 BH 膨潤土單位重 1.8 g/cm<sup>3</sup> 於 40℃ 套用不同 SWCC model



圖 38 BH 膨潤土單位重 1.6 g/cm<sup>3</sup> 於 60℃ 套用不同 SWCC model



圖 39 BH 膨潤土單位重 1.7 g/cm<sup>3</sup> 於 60℃ 套用不同 SWCC model



圖 40 BH 膨潤土單位重 1.8 g/cm3 於 60℃套用不同 SWCC model

#### IV. 結論

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

#### 参考文獻

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

# 輻射防護與放射醫學科技(I)

## 輻災受影響地區環境復原及民眾返鄉標準之實務研究之二 The study on returning-home and environment recovery for people affected by a nuclear accident (II)

計畫編號: MOST 108-2623-E-182 -001 -NU 計畫主持人:董傳中、趙自強 e-mail:cjtung@mail.cgu.edu.tw 計畫參與人員:林智琪、陳德音 執行單位:長庚大學放射醫學研究院

#### 摘要

在全面緊急事故之復原階段,即使事故善後已達一 定程度,仍有必要對環境中污染之放射性核種,採取必 要之中長期復原措施。有關核能災害中長期措施的基本 原則,應由相關人員充分協商討論,然後依據實際環境 監測、劑量評估、健康評估、除污措施、廢棄物處置、 既存曝露(existing exposure)基準等,進行優化分析以尋 求最有利的復原應變。本兩年期計畫針對復原階段之最 優化措施進行研議,包括:蒐集國際重大輻射災害復原 時期之劑量評估、環境復原、民眾返鄉、農林漁牧業產 品管制等實務經驗,參考國際最新規範,研擬相關導 則。計畫分兩年執行,前一年(107年)研究重點為:蒐集 綜整國際重大輻射災害相關處置經驗及研究資料,包括 災害復原時期之(1)民眾與環境劑量評估;(2)環境清理準 則和方法;(3)疏散或移居民眾返鄉之劑量限度標準;(4) 受影響地區農漁林牧業產品劑量監控與追蹤管制。本年 度(108年)研究重點為:依據第一年之研究成果產出以下 草案:(1) 核子事故污染調查區之環境輻射偵測技術指 引以及(2) 核子事故後疏散民眾返鄉暨返校行動指引。

#### Abstract

In the recovery phase of an emergency response to a nuclear accident, even if the recovery of the accident has reached a certain level, it is still critical to take necessary medium and long-term recovery measures for the contaminated radionuclides in the environment. The basic principles of long-term measures for nuclear accident should be fully negotiated and discussed by department concerned, and then optimized and analyzed based on actual environmental dose monitoring, dose assessment, health check, decontamination measures, waste disposal, existing exposure standards, ... to optimize recovery strategy. This two-year project is to study and optimize recovery measures including: collecting recovery experience of major international radiation accidents, dose assessments, recovery measures, returning-home policies, agriculture recovery, and refer to the latest international standards and develop relevant guidelines for Taiwan. The previous year (Year 107) research focus on collecting international experiences about radiation accidents and research data, including (1) public and environmental dose assessment during the recovery phase; (2) decontamination guidelines; (3) dose limit standards for evacuated or returning residents; (4) Dose monitoring and control of agricultural, fishery, forestry and animal products in contamination areas. The focus of this year's

(Year 108) research is: based on the research results of the first year, the following drafts will be produced: (1) Environmental radiation detection technical guidelines for nuclear accident investigation areas and (2) returning home and school of evacuated people after nuclear accidents guidelines.

**Keywords:** Fukushima, nuclear accident, radiological accident, recovery, returning-home

#### I. 前言

核子事故應變分兩階段實施-緊急應變階段(如圖 一,緊急曝露)、復原應變階段(過渡期)。在全面緊急 (general emergency)事故發生後之早期,應把握快速、保 守的原則,(1)立即於事先設定之預防行動區 (precautionary action zone, PAZ)內,採取預防性疏散,以 防止民眾發生確定效應(deterministic effects);(2)盡速於 事先設定之緊急防護區(urgent protection zone, UPZ) 內,採取適當之緊急防護行動-包括疏散、掩蔽、服用 碘片、食物管制、人員醫護、暫時移居等,以降低民眾 發生機率效應(stochastic effects)的風險;(3)當環境監測 值超過事先設定之操作干預基準(operational intervention level, OIL, 分 OIL1、OIL2、OIL3、OIL4、OIL7、OIL8) 時,於熱區(hot spots)內採取對應的緊急防護行動。本計 畫前期兩年計畫已參考國際原子能總署建議之通化 (generic)操作干預基準,考量周邊國家訂定之優化 (optimized)操作干預基準,評估納入我國相關法規中實 施,並已依據研究成果對原能會提出建議書。

#### II. 主要內容

福島事故發生至今已超過七年,期間日本政府除了 實施大規模的復原措施一包括電廠除役、水污染處理、 環境監測、環境除污、食物檢測、食物管制、食物解除 管制、復原行動工作人員輻射防護等之外,另外訂定了 解除疏散及暫時移居的劑量基準,以及實施解除疏散及 暫時移居的過程與方法,確保了從緊急曝露(emergency exposure)移轉至既存曝露(圖一)的品質保證。由於我國 和日本的民情與制度十分接近,因此這些措施與標準均 可提供寶貴的參考價值。本計畫將詳細檢討日本的復原 應變措施,參考國內外相關文獻[1-16],研擬訂定我國 的核子事故污染調查區之環境輻射偵測技術指引與核 异事故後疏散民眾返鄉暨返校行動指引,以提供主管機 關參考使用。



將轉移為計畫曝露(工作人員)或既存曝露(一般民眾)。

圖二進一步說明了從緊急曝露移轉至既存曝露的 劑量考量,當核子事故地區經過長時間等待放射性核種 清除或衰减,或是經過主動除污,可依年劑量(一公尺高 度空氣劑量率)分為長期無法解除疏散區、暫時無法解除 疏散區、或是低於民眾返鄉參考基準之預備解除疏散 區,而最終之長期環境復原目標,則為每年一毫西弗以 下。而返鄉的客觀條件,必須滿足 1.符合劑量標準、2. 完成公共設施、3.實施環境除污、及 4.尊重個人意願等 條件,並須提供 1.災民劑量監測、2.災民健康照護 3.災 民心理輔導及4.各種諮詢服務等災民服務。



#### III. 結果與討論

為完成核子事故災民返鄉之心願,核子事故地區可 經由核子事故污染調查區之環境輻射偵測技術指引以 及核子事故後疏散民眾返鄉暨返校行動指引達成民眾 返鄉的客觀條件,並提供各種災民服務。

一、核子事故污染調查區之環境輻射偵測技術指引

本指引為提供核子事故復原行動之流程及環境輻 射偵測技術指引,福島事故發生至今已超過七年,期間 日本政府除了實施大規模的復原措施,且我國和日本的 民情與制度十分接近,因此這些措施與標準均可提供本 計畫許多參考,本指引主要參考日本環境省之除污指引 [16],研擬訂定我國的核子事故污染調查區之環境輻射 偵測技術指引草案,以提供主管機關參考使用。

圖三:核子事故復原行動之流程

決定污染調查區(intensive contamination survey area)的範圍。

政府應制定除污計畫(decontamination plan),指定輻 <u>射劑量(空氣劑量率)有可能超過每小時0.23 微西弗(</u>此 數值係日本所訂除污標準,我國應考量國情、民眾活動 與居住習慣、及背景劑量率等實際情況,重新評估我國 除污劑量率標準)的區域為污染調查區。空氣劑量率乃 以閃爍偵檢器量測空氣中加馬輻射劑量率(微西弗/小 時),以代表人員體外曝露的程度,亦代表環境污染的 狀況。此操作基準的導出方式將在下一節:核子事故後 疏散民眾返鄉暨返校行動指引中細述。

#### 實施污染調查區內的環境輻射偵測,以確定污染區 域及除污區域(decontamination zone)。

在核子事故後各污染調查區確定之後,若非短期無法 返鄉區域,則可進一步定出除汙區域與除污目標以進行 除污。政府可指派權責人員於污染調查區內佈點量測空 氣劑量率,若超過每小時0.23 微西弗(此數值亦為日本 所訂除污標準)即指定為「除污區域」。

若為了評估成年人的生活環境污染程度,污染調查 區內可以行政區塊如鄉鎮里鄰等單位來劃分,並以區塊 內的平均空氣劑量率是否超過 0.23 微西弗/小時來確定 除污區域(如圖四)。而評估兒童的生活環境污染程度, 則以污染調查區內的公共設施如學校和公園來劃分,以 設施內的平均空氣劑量率是否超過 0.23 微西弗/小時來 確定除污區域(如圖五)。

評估成年人的生活環境污染程度行政區內可以網格 佈點,而以行政區塊進行輻射偵測的方法,應考慮下列 因素:

- 1. 土地使用和周遭條件,在行政區內以網格佈點,每 個行政區均勻佈置至少二十個點。以所有佈點的測 量平均值,代表該行政區的劑量率,並決定是否除 污。
- 避免在局部的高污染區佈點,例如樹下(雨水降落 2. 處)、排水溝(污染匯聚處)等。
- 增加在居民的生活佔用區佈點,例如住宅密集區。 3.
- 4. 森林對居民的輻射劑量影響很小,不需要佈點。

為了提高測量的效率,可以使用車輛進行偵測。 5. 評估兒童的生活環境污染程度行政區內可在公共設

施佈點,在除污區域內以公共設施進行輻射偵測的方法 為:

在行政區內的孩童設施佈點,譬如學校和公園。每 1. 一學校或公園內,大約佈5個點。以所有佈點的測 量平均值,代表該設施的劑量率,並決定是否除污。

 避免在局部的高污染區佈點,例如樹下(雨水降落 處)、排水溝(污染匯聚處)等。



圖四:評估成年人的生活環境污染程度行政區內可以網 格佈點[16]



圖五:評估兒童的生活環境污染程度行政區內可在公共 設施佈點[16]

#### • 除污前後的詳細環境輻射偵測技術指引

確定除污區域後,下一件事就是尋找除污目標,除污 目標的污染指標以<u>表面污染密度</u>表示,此密度為蓋格計 數器量測物質的表面之活度(貝克/平方公分),以代表 物質的表面污染程度。在表面污染密度難以測量時,亦 可以表面劑量率(微西弗/小時)作為替代方案。表面污 染密度或表面劑量率亦可進而估計除污目標除污前後 的效果。

實施除污前與除污後,均須再進行詳細的測量,測量 分為兩類。第一類測量為空氣劑量率,目的為確認除污 是否達成目標,第二類測量為表面污染密度,用於評估 除污成效,所有測量資訊應詳實記載,包括:

- 測量狀態:如測量地點,測量儀器,測量時間和日 期,測量人員,與天氣狀況。
- 測量結果:包含測量點,測量對象,測量條件,測量結果。
- 測量點示意圖。
   除污結果的評估分為整體除污區生活空間的空氣
   劑量率、除污區內個別設施的空氣劑量率、以及各個除

污工作的表面濃度與密度。方法為

- 在同一測量點,除污前後各測量一次,並扣除背景值。
- 丙次測量時偵測器需固定,探頭的位置、方向、高度應保持一致、探頭與人體間的距離應維持不變。
- 生活空間的空氣劑量率評估,以劑量減少率作為指標。

劑量減少率(%)=(1-除污後劑量率/除污前劑量率)\*100

 表面污染密度的評估,以除污因子作為指標 除污因子 = 除污前表面污染/除污後表面污染

#### • 輻射偵測器相關細節

閃爍偵檢器應每年至少進行一次校正,如果難以進行 此項校正,可(如圖六)用校正過之偵檢器與待校正之偵 檢器放在同一位置的量測結果進行比較。蓋革計數器應 每年至少進行一次校正。偵檢器每日操作前應檢查剩餘 的電池電量、管線和連接器的斷裂、高壓的狀態、以及 開關的可操作性等。並應在背景輻射不變的相同位置進 行測試,以確認測量值沒有太大的變化。偵檢器電源打 開後,應待讀數穩定後再讀取數值。在測量之前,應確 認偵檢器的背景值是否顯示異常。對於可以設置時間常 數的偵檢器,應在執行測量前等待三倍的時間常數後再 測量。



圖六:閃爍偵檢器如果難以每年進行一次校正,可用校 正過之偵檢器與待校正之偵檢器放在同一位置的量測 結果進行比較。[16]

為防止偵檢器遭受污染,偵檢器的主體和配件最好用 薄塑膠包覆(圖七),此包材在變髒或破裂時應予更換。



圖七: 偵檢器的主體和配件最好用薄塑膠包覆[16] 閃爍偵檢器之空氣劑量率測量程序如下所示:

- 1. 確認測量點位置。
- 握住偵檢器探頭,使之平行於地面,並盡量遠離身 體。
- 等待超過三倍的時間常數後,開始讀取離地面1 公尺高度(如果是小學校園或公園則為50公分) 的空氣劑量率。
- 4. 待儀表數值穩定後,讀取其平均值。
- 5. 填寫平均值於空氣劑量率記錄表上。



蓋革計數器之表面污染密度測量程序如下所示(圖 八):

- 握住計數器探頭,使靠窗面朝向待測物的表面,並 盡量遠離身體。
- 等待超過三倍的時間常數後,開始讀取待測物表面
   1公分處的計數率。
- 3. 待儀表數值穩定後,讀取其平均值。
- 填寫平均值於表面污染密度記錄表上。
- 可使用準直儀包覆蓋革計數器,以去除加馬輻射的 影響。
- 6. 可使用間隔套確保蓋革計數器與待測物表面的距 離維持固定。另可使用屏蔽套以減少加馬輻射的影響,污染物之貝他計數率為不加屏蔽套之計數率。



圖八: 以蓋革計數器測量表面污染密度。[16]

當無法以蓋革計數器測量表面污染密度時,可以閃爍 偵檢器測量表面劑量率作為替代方案,測量程序如下所 示(圖九):

- 握住偵檢器探頭,使之平行於待測物表面,並盡量 遠離身體。
- 等待超過三倍的時間常數後,開始測量待測物表面
   1公分距離的劑量率。
- 待儀表數值穩定後,讀取平均值,並填寫於表面劑 量率記錄表上。
- 4. 可使用準直儀去除加馬輻射的影響。



圖九:以閃爍偵檢器測量表面劑量率。[16]

#### 二、核子事故後疏散民眾返鄉暨返校行動指引

在2011年3月11日福島第一核電站發生事故後,日 本政府向福島第一核電站半徑20公里範圍內的居民以 及年度累積劑量估計高於20毫西弗的區域發布了疏散 指示。在2012年六月統計,總共疏散了約十六萬居民, 圖十顯示了統計至2014年10月福島縣還在撤離的人 數,當時還有超過十二萬居民仍在外鄉,可見疏散民眾 返鄉實在是一個艱鉅的工作。本行動指引目的為協助核 子事故後疏散民眾返回家園與學童返回校園提供具體 行動指引。而返鄉的客觀條件,必須滿足1.符合劑量標 準、2.完成公共設施、3.實施環境除污、及4.尊重個人 意願等條件,並須提供1.災民劑量監測、2.災民健康照 護3.災民心理輔導及4.各種諮詢服務等災民服務。



#### <u>符合劑量標準</u>

參考國際原子能總署(IAEA)與日本原子力規制委員 會 NRA[14,17],本計畫訂定核子事故後疏散民眾返鄉 劑量標準為代表人年劑量小於二十毫西弗,與計畫曝露 不同,不受年有效劑量限度一毫西弗所限,但疏散民眾 返鄉後的額外曝露劑量,長期目標為年有效劑量小於一 毫西弗。核子事故後疏散學童返校劑量標準為年劑量小 於一毫西弗。並根據代表人估計地區平均年劑量,將疏 散地區劃分為以下三個區域:

- 1. 預備解除疏散區,年劑量小於二十毫西弗。
- 暫時無法解除疏散區,年劑量介於二十毫西弗與五 十毫西弗之間。
- 3. 長期無法解除疏散區,年劑量大於五十毫西弗。

由前述之返鄉與返校劑量標準,我們可以推導出其操 作基準,以離地1公尺高度之空氣劑量率標準為準,民 眾返鄉之操作基準每小時為3.84 微西弗,學童返校之 操作基準每小時為1 微西弗。圖十一詳述了操作基準之 推導方法[14]。假設民眾一天在家16小時,在室外8小 時,並假設一百平方米之木造房屋可屏蔽60%之劑量, 即可推得每小時3.84 微西弗相當於年劑量二十毫西 弗。同理每小時0.19 微西弗相當於年劑量一毫西弗。 再加上每小時0.04 微西弗的背景值即可得環境除污標 準每小時0.23 微西弗。(此數值係日本所訂除污標準)

#### • (二) 尊重個人意願

災民所受劑量壓力將影響其返鄉意願,比較圖十與圖 十二,可以發現污染越多、劑量越高的地方其災民返鄉 意願越低,因此政府應尊重疏散民眾個人返鄉意願,並 協助解決疏散民眾返鄉所面臨的問題。尤其是公共設 施,政府應建立返鄉民眾生活支持計畫,完成日常生活 機能所需公共設施,如電力、燃氣、供水、污水處理、 運輸和通訊系統、並確保返鄉民眾的醫療保健。



#### • 劑量監測與除污

在災民返鄉後政府應協助建立返鄉民眾個人劑量監 測,尤其是孕婦或兒童,內容包括:分發個人劑量計以 進行個人劑量監測,並向返鄉民眾解釋他們所測量的劑 量結果的含義。並向拒絕攜帶個人劑量計的人說明估計 的個人曝露劑量及方式。

災民通常不太能了解劑量的意義,而是關心自己的健 康風險,因此,政府應建立一個包含個人劑量和健康狀 況的數據庫,內容包括:建立用於解釋個人劑量計使用 方法以及曝露劑量結果的系統;建立個人劑量數據,環 境監測結果以及各種減少輻射的防護措施之間的關 係;比較個人劑量數據和健康狀況數據。並依據個體劑 量數據與輻射對健康的影響進行適當的說明。

除了劑量評估之外,政府亦應提供返鄉民眾必要的輻 射防護,包括:

- 根據居民的日常生活進行環境監測,特別注意在通 勤區和與兒童有關的設施附近進行監測,並制定精 確的輻射圖,在地圖上指示高輻射劑量的位置;
- 2. 與各行政區的重建活動相結合來進行除污活動;
- 3. 依據個人劑量計數據找出並且清除污染源;
- 4. 在難以除去污染源的情況下屏蔽其污染源。

圖十三顯示了福島除污區域除污前後比較,通常在道路上,放射性核種傾向於水平式擴散,但在草地和森林裡,放射性核種傾向於水平式擴散,因此除污時須將受污染表土移除,另置於中長期廢料處置場所,或將表土與裡土置換,以去除或屏蔽土壤污染造成之劑量。圖十四顯示了汙染調查區在2012年至2015年間對代表人的估計地區平均年劑量[17],由此可見日本政府對除污的成果十分有效。

#### • (四) 災民健康照護、心理輔導及各種諮詢服務

政府應提供返鄉民眾健康保健和諮詢。諮詢團隊可由 當地政府官員、社區代表、醫生、公共衛生護士、護士 和護理人員組成;諮詢團隊成員(諮詢員)必須具有足夠 的能力來滿足返鄉民眾的需求,尤其是減少輻射劑量的 健康諮詢和建議。使返鄉民眾認識到自己的劑量,並確 保自己的健康,對於做出不返鄉決定的民眾,諮詢員也 需協助他們解決與輻射嚴露相關的焦慮,並通與協商 重建他們的生活條件;諮詢員另一件重要的任務,是 持返鄉民眾建立日常生活和生活計畫,解決長期疏散引 起的焦慮,並協助返鄉民眾改善其生活條件(例如,家 鄉和社區的恢復和振興);通常,核子事故後重創的可 能不只是地區的經濟,也可能影響全國的經濟。由圖 五可見福島事故後福島與日本農產品(小黃瓜)價格都 受到影響[17],因此如何讓災民重新恢復經濟能力也是 返鄉和地區乃至全國振興的重要任務。



此外,諮詢員並非全知全能,政府應建立諮詢員支持 系統,以解決返鄉民眾廣泛和各種各樣的需求。支持系 統具有以下功能:

- 發展由輻射防護、環境監測、衛生/醫療/福利工作 人員等組成的專家網絡;
- 2. 為諮詢員實施培訓,以增加他們對輻射的知識;
- 3. 提供返鄉民眾健康護理和個人劑量有關的資訊;
- 4. 支持諮詢員活動和當地重建活動的進度;

加強和支持衛生/醫療/福利工作人員的社區導向活動,並為他們實施風險通報培訓。



最後,提供返鄉民眾必要的風險評估,包括輻射基 本常識,準確的信息,並以易於理解的方式進行傳播。 支持專家學者的相關研究,以解決人們對輻射曝露和健 康的擔憂,並建立人們對政府的信任。

### 參考文獻

- Valentin, J., The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. Vol. 37. 2007: Elsevier Oxford.
- [2] OECD, N., Chernobyl: assessment of radiological and health impacts. 2002 update of Chernobyl ten years on. Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development, Paryż, 2002.
- [3] Kai, M., Experience and current issues with recovery management from the Fukushima accident. Annals of the ICRP, 2015. 44(1\_suppl): p. 153-161.
- [4] Rosenthal, J. and A. Mendonça, The radiological accident in Goiânia: the initial remedial actions. Health physics, 1991. 60(1): p. 7-15.
- [5] Higley, K.A., Environmental consequences of the chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience. Report of the chernobyl forum expert group 'environment' STI/PUB/1239, 2006, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria ISBN: 92-0-114705-8, 166 pp, 40.00 Euros (softbound). Radiation Protection Dosimetry, 2006. 121(4): p. 476-477.
- [6] Urabe, I., et al., Radiation protection lessons learned from the TEPCO Fukushima No. 1 NPS accident. Journal of Nuclear Science and Technology, 2014. 51(2): p. 136-149.
- [7] Nagasaki, S., Radioactive Waste Management After Fukushima Daiichi Accident, in Reflections on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident. 2015, Springer, Cham. p. 297-308.
- [8] Fesenko, S. and B. Howard, Guidelines for remediation strategies to reduce the radiological consequences of environmental contamination. 2012: IAEA.
- [9] Guide, I.S., Remediation Process for Areas Affected by Past Activities and Accidents. SG-Nº WS-G-3.1, 2007.
- [10] Sugiyama, D., T. Fujita, and T. Hattori, Fundamental Consideration on Reference Levels in Radiological Protection for Implementation of Practical Off-site

Remediation. 2013.

- [11] Clement, C.H., 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. 2010: Elsevier.
- [12] Sugiyama, D. and T. Hattori, Radiological protection from radioactive waste management in existing exposure situations resulting from a nuclear accident. Radiation protection dosimetry, 2013. 153(1): p. 74-79.
- [13] Cool, D., Review of the ICRP system of protection: the approach to existing exposure situations. Annals of the ICRP, 2015. 44(1\_suppl): p. 179-187.
- [14] IAEA, The Fukushima Daiichi Accident. 2015: IAEA.
- [15] Ahn, J., et al., Reflections on the Fukushima Daiichi nuclear accident. 2015: Springer-Verlag GmbH.
- [16] Ministry of the Environment, J., Decontamination Guidelines. . Second ed. 2013.
- [17] NRA, Practical measures for evacuees to return their homes. 2014.

## 組織等效比例計數器應用於混合輻射場之劑量特性研究(II) Study on the dose characteristics of tissue Equivalent proportional counter used in mixed radiation field (II)

計畫編號: MOST 108-NU-E-007-004-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

組織等效比例計數器(TEPC)具有可於一次同時測 得不同 LET 輻射的能量沉積特性,即可同時評估混合輻 射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻,此方 法相較於傳統方法便利,而使得此法於國際間逐漸受到 青睞與使用。本研究利用 TEPC 可測得混合輻射場中不 同 LET 輻射之微觀能量沉積能譜特性,以二年期的時 間,精進現有使用 TEPC 之技術,藉由分析探討不同 LET 輻射在 TEPC 所造成之劑量貢獻,與以傳統方法測得之 熱中子、快中子及光子等的劑量做比較,進一步建立以 TEPC 同時評估混合輻射場中個別輻射之劑量貢獻之新 技術。本期計畫為二年期計畫之第二年,研究計畫完成 後,可將此技術提供做為未來反應器、高能量粒子加速 器設施之作業場所針對中子與光子混合輻射場之輻射 劑量度量與評估之參考。

**關鍵詞:**組織等效比例計數器、混合輻射場、中子劑量、 線性能量、微劑量計。

#### Abstract

The tissue equivalent proportional counter (TEPC) has the ability to simultaneously measure the energy deposition characteristics of different LET radiation, which can simultaneously evaluate the dose contribution of different LET radiation (such as photons and neutrons) in the mixed radiation field. Traditional methods are usually complicated to make this TEPC method gradually favored and used in the international community. In this study, TEPC can be used to measure the microdosimetric energy spectrum characteristics of different LET radiation in mixed radiation field. By using the technology of TEPC, the TEPC is used to analyze the effects of different LET radiation on TEPC Contribution, and compared with the traditional method of measurement of thermal neutrons, fast neutrons and photons and other doses to compare. This project is the second year of a two-year project, and further establish the TEPC technique to assess the radiation in the radiation field of the contribution of individual radiation in mixed radiation field. It is expected that this technology will be used as a reference for the measurement of the radiation dose of neutron and photon radiation in a mixed field as a workplace for reactor and high energy particle accelerator facilities.

**Keywords:** TEPC, mixed radiation field, neutron dose, lineal energy, microdosimeter.

### I. 前言

本研究利用 TEPC 可測得混合輻射場中不同 LET 輻射之微觀能量沉積能譜特性,以全程二年期的時間(本 期為第二年期),精進現有使用 TEPC 之技術[5],藉由 分析 TEPC 測得混合輻射場中不同 LET 輻射之微觀能 量沉積能譜深入探討不同 LET 輻射在 TEPC 所造成之 劑量貢獻,進一步建立以 TEPC 同時評估混合輻射場中 個別輻射之劑量貢獻及其輻射品質之技術,並將此技術 提供給主管機關,做為未來反應器、高能量粒子加速器 設施之作業場所針對中子與光子混合輻射場之輻射劑 量度量與評估之參考。

#### Ⅱ. 主要內容

2.1 以TEPC 評估輻射劑量

因 TEPC 可測得混合輻射場中不同 LET 輻射之微 劑量(微觀能量沉積)能譜特性,使 TEPC 具有可於一次 同時測得不同 LET 輻射的能量沉積,藉由此特性之測量 結果可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與 中子)之劑量貢獻。利用 TEPC 測得混合輻射場之線性能 量 y 分布能譜後,可利用以下公式計算出輻射劑量 (absorb dose D, dose equivalent H):

$$D = \sum_{i} y_{i} f(y_{i}) \cdot c \tag{1}$$

$$\overline{Q} = \frac{\sum_{i} y_i f(y_i) \cdot Q(y)}{\sum_{i} y_i f(y_i)}$$
(2)

 $H = D \cdot \overline{Q} \tag{3}$ 

其中 f(y) 則為機率密度(probability density),亦稱為 線性能量分佈(lineal energy distribution)。C 則為每單位 線能之劑量轉換因子(包括效率修正因子),單位為 Gy per keV/µm。

#### 2.2 TEPC 系統建置、精進測試與校正

本研究以自製 TEPC,搭配新建置之低壓(真空)氣體 供應系統(low pressure gas flow system)、高壓電源供應器 (high voltage, HV)、低雜訊前置放大器(pre-amplifier)、線 性放大器(amplifier)、多頻道分析儀(MCA)以及鋂-241 阿 伐、銫-137 加馬校正射源等設備,於全程計畫二年期之 第一年(107 年),已加強 TEPC 真空度防護及使用低雜訊 信號裝置進行測試等方法,精進相關 TEPC 測量技術(y 值可測至 0.1 keV/µm)。 本研究採用之TEPC為一組織等效材料構成之腔體, 外層再覆予鋁蓋及壓克力蓋以分別提供TEPC之真空度 及保護,當用於輻射場之劑量量測時,入射輻射將於其 行徑過程中與TEPC之組織等效氣體、材料組成發生作 用,其將影響該入射輻射於空腔中產生之游離及後續收 集、再處理所得之訊號大小。為確認本研究所使用之自 製TEPC於不同能量及輻射之偵測效率,利用蒙地卡羅 PHITS 程式進行相關模擬,並將其模擬結果與實際量測 結果相互比較,以得偵測效率修正因子。

針對低 LET 輻射對 TEPC 偵測效率之評估,本研究 以光子能量 33、53、73、100、139、250 及 662 keV 等 七種不同能量群分別探討 TEPC 之偵測效率;對於高 LET 輻射,則以已知能譜之 Cf-252 含與不含重水緩速體 (moderator)分別探討 TEPC 之偵測效率,再與相同能量 輻射於空氣中之劑量模擬結果比較,以得其相應之偵測 效率。其中 PHITS 模擬光子、Cf-252 於 TEPC 及空氣中 之偵測效率示意圖如圖 2.1 所示。



圖 2.1 PHITS 模擬光子及中子於 TEPC 偵測效率幾合 示意圖:(a)模擬空氣中之劑量結果、(b)模擬 TEPC 之劑量結果

#### 2.3 以TEPC 測量混合輻射場之劑量

本研究於第一年找出最佳測量條件後,以 TEPC 實 測低 LET 輻射如銫-137、鈷-60 不同能量之 X 光之 y 分 布以及含高 LET 輻射之 Cf-252 輻射場(包括中子及光子 輻射)之 y 分布,並依據所測得之 y 分布結果,及公式(1) 至(3)的方法評估來自不同 LET 輻射之劑量貢獻,建立 以 TEPC 實測混合輻射場中不同 LET 輻射之輻射品質 與劑量之新技術。

因光子-中子混合輻射場為一連續能量分佈,其中光 子輻射將於到達 TEPC 靈敏體積作用且被紀錄前,依能 量之不同會產生光電效應、康普吞效應、成對發生等作 用;中子輻射則因發生彈性或非彈性作用(如 $(n, \gamma)$ 、(n,p)、 $(n, \alpha)$ 等反應),將二次粒子或串擊粒子之能量沉積於靈 敏體積中,因而產生不同線性能量之微劑量能譜。

本研究為鑑別個別輻射之微劑量能譜,設計1公分 厚度之硼物質(B2O3)之套筒,密度為2.47g/cm<sup>3</sup>,並以一 層壓克力包覆於TEPC之靈敏體積(如圖2.2),以吸收光 子-中子混合輻射場(如 D2O 中子輻射場)之熱中子。當 TEPC 度量中子輻射場時,含硼物質之 TEPC 將吸收熱 中子,並得未含熱中子之微劑量能譜 ywithB;未含硼物 質之 TEPC 量測結果將包括熱中子之微劑量能譜 ywithoutB,故藉由分析兩者量測結果,並考量硼物質造 成中子能譜改變之效應(F),將由式(9)及(10)得該輻射場 之熱中子、除熱中子外之中子微劑量能譜:

$$y_{th,n} = (y_{withoutB} - y_{withB}) \times F \tag{4}$$

$$y_{other,n,\gamma} = y_{tot} - y_{th,n} \tag{5}$$



圖 2.2 未含硼套筒之 TEPC (A)、含硼套筒與幾合(B)

針對光子-中子混合輻射場之光子微劑量能譜鑑別, 本研究將自製 TEPC 置於核能研究所之 X 光參考輻射場 不同 X 光射質輻射照射;另亦將 TEPC 置於國立清華大 學銫 137 參考輻射場,並將 TEPC 量測所得之個別微劑 量能譜歸一化至單位劑量,分析及探討不同光子射質之 微劑量能譜特性,以獲得 TEPC 之光子微劑量能譜參考 模型 ymod,γ,故光子-中子混合輻射場之光子微劑量能譜 y<sub>7</sub>即可由下式獲得:

$$y_{\gamma} = y_{other,n,\gamma} - y_{mod,\gamma} \tag{6}$$

本年期(108 年)計畫以 TEPC 實測不同混合輻射場 之不同 LET 輻射(包括中子及光子)之 y 分布,並以第一 年之方法評估來自不同 LET 輻射之劑量貢獻,再與傳統 劑量計評估之劑量結果做比較。本期計畫建立以 TEPC 實測混合輻射場中不同 LET 輻射之輻射劑量的最新技 術。

2.6 TEPC 用於 BNCT 混合輻射場之射束品保、品管及劑 量評估

目前清華大學 THOR-BNCT 超熱中子射束品質保 證、品質管理,係以 20 cm<sup>3</sup>之壓克力假體置於射束口前, 並利用中子活化、雙游離腔及分裂游離腔等技術,分別 量測假體深度 2 cm、5 cm、10 cm 處之混合輻射場之物 理量,以確認超熱中子束之品質。本研究探討 TEPC 用 於清華大學 THOR-BNCT 超熱中子射束品質保證、品質 管理與輻射劑量分佈之可行性,以提供 BNCT 射束品質 與劑量驗證。

將 TEPC 敏感體積以含硼物質套筒覆蓋,以評估是 否存在熱中子(E<0.5 eV)對微劑量能譜的貢獻。如圖 2.3 所示,一個 30×30×25 cm<sup>3</sup> 的水箱體置於 THOR-BNCT 射束口前, 並將 TEPC 放置在距射束口 4.5 cm 深度的 水箱中,並以 1.2 MW 功率之超熱中子束進行照射,以 模擬常規射束品質保證、品質管理程序,並將測得微劑 量分佈進行後續分析與評估。

另外,本研究亦探討 TEPC 於 BNCT 混合輻射場之 輻射劑量,其射源能譜取自於 MCNP 蒙地卡羅之模擬結 果,並將其結合 PHITS 程式執行後續不同輻射粒子之遷 移計算。又 BNCT 之劑量來源包括光子、中子、質子、 阿伐粒子及鋰回跳粒子等貢獻,因此,除模擬腔壁材料 為 A-150 外,同時亦模擬前述 A-150 滲雜 50 ppm 硼原 子之腔壁材料,以評估熱中子與含硼材料作用後衍生之 <sup>10</sup>B(n,α)<sup>7</sup>Li 核反應劑量,並與 TEPC 量測結果比較。

#### III. 結果與討論

3.1 微劑量計於混合輻射場之個別輻射鑑別3.1.1 微劑量能譜之光子輻射鑑別

將 TEPC 置於核能研究所之光子參考輻射場(含窄 與寬能譜)及國立清華大學-137 參考輻射場進行照射,並 將 TEPC 量測所得之個別微劑量能譜歸一化至單位劑量 之結果如圖 3.1 所示, TEPC 量測高能量或低能量光子 之微劑量能譜皆落於 0.1 至 15 keV/µm 區間範圍,且能 譜形態相似,惟光子隨能量高低不同,對 TEPC 作用產 生光電效應、康普吞效應及成對效應之機率不同,而有 微劑量能譜分佈上之差異。考量 TEPC 對不同射質光子 輻射具有相似之微劑量能譜特性,本研究以其平均值建 立微劑量能譜之光子輻射鑑別模型,以探討光子-中子混 合輻射場中個別輻射對微劑量能譜之響應特性。



將 TEPC 置於核能研究所之 Cf-252 參考輻射場中 (未加重水球),並對其照射給定之中子劑量(本研究為照 射條件為 1.44 mSv),以量測該參考輻射場之微劑量能 譜。為鑑別該混合輻射場之中子與光子劑量,依據 ANSI/HPS N13.11 建議之鉲-252 輻射場之光子比例,推 算該輻射場之光子劑量約為 0.07 mSv。另將本研究建立 之光子輻射鑑別模型以等比例關系套入 TEPC 所量測之 微劑量能譜,可得到如圖 3.2 之結果。其顯示 5 至 20 keV/µm 線能之間,呈現光子與中子微劑量能譜之交集, 藉由光子輻射鑑別模型可有效區別個別輻射之響應。分 析 TEPC 評估輻射劑量之結果,較參考輻射場給定劑量 高估約 4.0%;如以單一線能(例如 20 keV/µm)作為個別 輻射之鑑別,則較該輻射場高估約 5.3%。



圖 3.2 以光子輻射鑑別模式分割 TEPC 量測 Cf-252 之 光子及中子微劑量能譜

3.1.2 微劑量能譜之中子輻射鑑別

為鑑別混合輻射場之熱中子及其他能量之中子,本研究設計含硼物質之套筒,進行模擬與量測分析。針對 微劑量能譜模擬部分,係採用 PHITS 模擬含與未含硼套 筒於 D2O 中子輻射場之微劑量分佈進行數據處理。對於 包含硼與未含硼套筒之微劑量分佈及差異如圖 3.3 及 3.4。



圖 3.3 模擬含與未含硼套筒於 D<sub>2</sub>O 中子輻射場之微劑 量分佈



圖 3.4 模擬 D<sub>2</sub>O 中子輻射場之含與未含硼套筒之微劑 量能譜差異(不含硼-含硼)

由含硼與未含硼套筒之微劑量能譜模擬結果指出, D<sub>2</sub>O 中子場之熱中子與硼物質主要發生 $(n, \alpha)$ 反應,其產 生之二次粒子除無法遷移至 TEPC 內之靈敏體積,而誘 發之  $\gamma$  輻射則因與靈敏體積週遭物質作用而增加低線 性能量粒子(電子)進入靈敏體積之貢獻,該貢獻及較高 線性能量粒子(質子或回跳核)吸收亦可由模擬結果得知。 如圖 3.5 所示,線性能量低於 10 keV/ $\mu$ m 範圍,有明顯 劑量增加之現象;而含硼套筒時,高於 10 keV/ $\mu$ m 範 圍,則因硼物質吸收熱中子(全部被吸收)產生之二次粒 子未能進入靈敏體積,而全數皆未被紀錄;此時,大於 10 keV/ $\mu$ m 則主要為高能中子的貢獻。



圖 3.5 模擬含硼與未含硼之熱中子微劑量能譜差異及 熱中子微劑量能譜

當考慮硼物質對熱中子之影響,可對含硼與未含硼 套筒於 D<sub>2</sub>O 中子輻射場之微劑量能譜差異進行修正即 得熱中子微劑量能譜分佈如圖 3.6。另將未含硼套筒之 微劑量能譜模擬結果扣除前述所得之熱中子部分,即可 得除熱中子以外中子之微劑量能譜,如圖 3.7。



圖 3.6 修正包含與未含硼套筒於 D2O 中子輻射場之微 劑量能譜差異所得熱中子微劑量能譜



圖 3.7 藉由含與未含硼套筒於 D2O 中子輻射場之中子 微劑量能譜鑑別

3.2 比對與分析 TEPC 劑量計量測之結果

TEPC 測量 <sup>252</sup>Cf 輻射源中子/光子輻射場照射之劑 量評估測試,由研究結果得知,TEPC 對不同 LET 輻射 包括光子、熱中子、超熱中子與快中子等均能有效測量 其造成之輻射劑量;對於裸 <sup>252</sup>Cf (未包覆 D<sub>2</sub>O 重水球) 輻射場,以TEPC 評估的劑量結果與照射場給予之已知 照射劑量相比,差異分別為 7%(光子)和 4%(中子),與 給予之已知照射劑量有不錯的一致性。

3.3 微劑量計用於 BNCT 射束品保、保管及劑量評估

本研究將 TEPC 用於評估 THOR-BNCT 射束常規射 束品質保證、品質管理程序,並模擬常規程序之照射條 件實驗佈局,亦利用 TEPC 對中子與光子能譜識別技術, 區分光子、熱中子和除熱中子外之中高能中子微劑量分 佈,以個別探討與驗證個別輻射劑量。

表 3.4 TEPC 及常規雙游離腔技術之輻射量測結果

Methodology	Current (pA)	Gamma-ray dose (Gy/h)	Neutron dose (Gy/h)	γ/n ratio
TEPC		3.4	0.4	8.0
Paired IC	Mg(Ar):42.35 TE(TE): 38.50	4.9	0.7	7.0

如表 3.1 及圖 3.8 所示為 TEPC 與目前 THOR-BNCT 常規射束品質保證、品質管理程序之量測結果。



圖 3.8 以含硼與未含硼套筒鑑別 THOR-BNCT 輻射場之 光子、中子微劑量能譜

3.4 本研究之檢討與建議事項彙整

- (1)於首次充填組織等效氣體時,TEPC 將存在混雜外界空氣之不純氣體,致影響量測品質。為減少此現象發生,於進行 TEPC 量測前,建議將連續充填組織等效氣體至少3次以上,以避免不純氣體伴隨組織等效氣體進入 TEPC 腔體中而導致 TEPC 計測的不穩定。
- (2)本研究於每次 TEPC 充填組織等效氣體後即進行量 測內建 Am-241 之能譜,探討每次量測之 alpha-edge 差異性,其結果表示,TEPC 量測之平均值為 811±13, 相對量測數據差異介於 4.0%範圍內,可推論表示本 研究使用之 TEPC 量測系統再現性及穩定性佳。
- (3)本計畫高 LET 輻射之校正使用 Am-241 輻射源,該 輻射源放出平均能量 5.405 MeV 之阿伐粒子將通過 組織等效球壁上之孔洞,並穿過組織等效氣體之氣腔 後沉積其部分能量,經計算驗證推估阿伐粒子於該組 織等效氣腔之最大能量損失為 175 keV,推算之線性 能量(yp)為為 131 keV/μm,對應於 TEPC 量測能譜峰 值頻道(yp)為 802,其餘能譜頻道之線能可由 y=0.163h 轉換。
- (4)已使用 TEPC 實測清華大學開放水池式反應器之中 子光子混合場,相關研究結果已彙整投稿並被接受於 國際會議(第三屆輻射劑量學及其應用國際會議, ICDA-3)中發表。
- (5)以 TEPC 實測清華大學開放水池式反應器之中子光 子混合場,及核研所 252Cf 中子輻射源等高能設施產 生之中子-光子混合輻射場之不同 LET 輻射(包括中 子及光子)之線性能量 y 分布,並比對與分析 TEPC 與其他常用之傳統劑量計(如中子佩章、金箔及雙游 離腔等不同量測方式)之結果。
- (6) TEPC 對不同 LET 輻射包括光子、熱中子與快中子 等均能有效測量其造成之輻射劑量;光刺激發光中子 佩章(OSLN)原廠 Landauer 公司提出的有效中子能量 量測範圍在 40 eV 至 5 MeV。
- (7)為鑑別混合輻射場之熱中子及其他能量之中子,本研究設計含硼物質之套筒,進行模擬與量測分析。TEPC

具有可於一次同時測得不同 LET 輻射的能量沉積特 性,可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子 與熱中子及快中子)之劑量貢獻,此方法相較於傳統 方法僅能分別評估光子與熱中子劑量或光子與快中 子劑量來得更便利。

- (8)利用 TEPC 對中子與光子能譜識別技術,可區分光子、熱中子和除熱中子外之中高能中子微劑量分佈, 以個別探討與驗證個別輻射劑量;TEPC亦可利用於 BNCT 射束品保、保管及劑量評估。
- (9)本研究已精進現有使用 TEPC 之技術,藉由分析探討 不同 LET 輻射在 TEPC 所造成之劑量貢獻,與以傳 統方法測得之熱中子、快中子及光子等的劑量做比較, 進一步建立以 TEPC 同時評估混合輻射場中個別輻 射之劑量貢獻之技術。
- (10)本計畫之成果將可提供給主管機關,做為未來反應 器等高能設施作業場所針對混合輻射場之中子與光 子輻射劑量度量與評估標準技術建置及劑量管制之 參考。

#### IV. 結論

組織等效比例計數器(tissue equivalent proportional counter, TEPC) 具有一次同時測得不同 LET 輻射的能量 沉積特性,可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻,此方法相較於傳統方法便利, 於國際間逐漸受到青睞與使用。本計畫精進現有使用 TEPC 之技術,藉由分析探討不同 LET 輻射在 TEPC 所造成之劑量貢獻,建立以 TEPC 同時評估混合輻射場中 個別輻射之劑量貢獻之技術。本計畫規劃為二年期計畫 本年期(108年)為二年期之第二年,整體而言,計畫全程 均已依原規劃進度已完成相關研究工作。

#### 參考文獻

- Nam U.W., Park W.K. Lee J. et al., Calibration of TEPC for CubeSat Experiment to Measure Space Radiation. J. Astron. Space Sci. 32(2), 145-149, 2015.
- [2] Nam UW, Lim CH, Lee JJ, Pyo J, Moon BK, et al., Development and Characterization of Tissue Equivalent Proportional Counter for Radiation Monitoring in International Space Station, J. Astron. Space Sci. 30, 107-112, 2013.
- [3] Rossi, H., Zaider, M. Microdosimetry and its applications, Springer, NY, U.S.A., 1996.
- [4] European Commission, Design, construction and use of tissue equivalent proportional counters, Radiat. Prot. Dosim. 61(4), 1995.
- [5] Hsu F. Y., Tung C. J. and Watt D. E.. Microdosimetric spectra of the THOR epithermal neutron beam for boron neutron capture therapy, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 104, No. 2, pp.121-126, 2003.
- [6] Pihet, P., Menzel, H. G., Schmidt, R., Beauduin, M., Wambersie, A. Biological weighting function for RBE specification of neutron beams. Radiat. Prot. Dos. 31, 437-442, 1990.
- [7] Coutrakon, G., Cortese, J., Ghebremedhin, A., Hubbard, J., Johanning, J., Koss, P., Maudsley, G., Slater, C. R., Zuccarelli, C. Microdosimetry spectra of the Loma Linda proton beam and relative biological effectiveness comparisons. Med. Phys. 24, 1499-1506., 1997.

- [8] Waker A. and Taylor G. Sensitivity and uncertainty in the measurement of H\*(10) in neutron fields using an REM500 and a multi-element TEPC. Radiat. Prot. Dos. 161(1-4), 205-209, 2014.
- [9] ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60.
- [10] ICRP. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103.
- [11] Rogus, R., Harling, O., Yanch, J., Mixed field dosimetry of a epithermal neutron beams for boron neutron capture therapy at the MITR-II research reactor, Med. Phys., 21(5), p1611-1625, 1994.
- [12] Attix F.H.. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. John Wiley & Sons INC, 463-501, 1986:
- [13] Barquero, R. Mendez, R. Vega-Carrillo, H. R. etc. Neutron spectra and dosimetric features around an 18MV linac accelerator. Health Phys. 88(1):48-58. 2005.
- [14] Hsu F.Y., Chiu M.C., Chang Y.L., Yu C.C. and Liu H.M.. Estimation of photon and neutron dose distributions in the THOR BNCT treatment room using dual TLD method, Radiation Measurements, Vol. 43 (2-6) pp.1089-1094, 2008.
- [15] Hsu F.Y., Tung C.J., Chen J.C., Wang Y.L., Huang H.C. and Zamenhof R.G.. Dose rate scaling factor estimation of THOR BNCT test beam, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 61, pp.881-885, 2004.

## 調查評估醫療院所關鍵群體之肢端及眼球水晶體等價劑量研究 Investigation and evaluation of the equivalent doses of the extremities and the lens of the eyes in critical groups of medical institutions

計畫編號: MOST 108-NU-E007-005-NU 計畫主持人: 蔡惠予 e-mail: huiyutsai@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人: 許芳裕 執行單位: 國立清華大學核子工程與科學研究所

#### 摘要

國際原子能總署出版報告,指出工作人員的肢端皮 膚等價劑量限值為每年500 mSv,現行用於輻射工作人 員的劑量監測之人員劑量佩章,所量測之個人等效劑量 H<sub>p</sub>(0.07)無法真實反映未受鉛衣包覆下之肢端皮膚劑量。 本研究回顧國際文獻,提出肢端皮膚劑量測量方法,與 輻射防護建議措施,並彙整各國輻射防護指南之作法。

因應國際放射防護委員會提出眼球水晶體劑量限 值下修的建議,本研究目的為針對眼球水晶體職業輻射 防護提出劑量評估方法,提出合理抑低措施建議,並依 據劑量限值的下修,回顧國際上法規標準調整的作法。

**關鍵詞:**國際原子能總署,國際放射防護委員會,職業 曝露,肢端劑量,眼球水晶體劑量。

#### Abstract

The International Atomic Energy Council (IAEA) has suggested that the dose limit to the extremity is 500 mSv per year. Current measurements toward the personal dose equivalent of the skin,  $H_p(0.07)$ , can not be accurately recorded when extremities are directly exposed to the radiation without the protection of the lead apron. This study aims to review the related researches, to suggest the proper dose measurements to the extremities, to provide suggestions of the radiation protection methods to the extremities, and to summarize the practical measures from the guidance of the radiation protection to the extremities by different countries.

International Commission on Radiological Protection (ICRP) has suggested an occupational radiation dose reduction to the lens of the eye previously. This study aims to comply with that latest suggestions by recommending appropriate eye lens dose measurements, by suggesting adequate radiation protection measures to the eye lens, by reviewing the methods of the legislation to the new eye lens dose limit internationally.

**Keywords:** IAEA; ICRP; occupational exposure; extremity dose; eye lens dose.

#### I. 前言

國際原子能總署(The 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)」出版報告,指 出工作人員的肢端皮膚等價劑量(equivalent dose)限值為 每年 500 mSv,眼球水晶體等價劑量限值從每年 150 mSv 下修至每年 20 mSv(五年期間的平均值),然而可容許 單年的年劑量限值至 50 mSv。台灣現行對於輻射工作人 員的劑量量測為要求其佩戴人員劑量佩章,劑量佩章需 配戴在鉛衣下之胸口處,其所量測之個人等效劑量 Hp(0.07)無法真實反映未受鉛衣包覆下之肢端皮膚劑量。 我們於本研究內有系統性地回顧國際協會的文獻來探 討,對臨床醫療院所輻射從業人員近距離執行輻射作業, 如核子醫學製藥及注射相關作業、透視 X 光攝影等,評 估輻射作業對人員所造成的肢端及眼球水晶體之職業 曝露劑量。針對眼球水晶體等價劑量限值之改變,國際 間正在討論應如何執行眼球水晶體之人員等價劑量監 控,以及人員劑量佩章所測量而得之 Hp(3)來監控眼球水 晶體等價劑量的適當性。

#### II. 主要內容

本研究目的為建立醫療輻射從業人員之肢端與眼 球水晶體等價劑量評估模式,並研擬具體輻防措施與建 議,作為主管機關未來修訂相關法規之參考。本研究已 完成以下面向:(一)蒐集研析國際報告對於醫療輻射從 業人員之肢端與眼球水晶體等價劑量評估模式;(二)建 議醫療輻射從業人員肢端與眼球水晶體等價劑量之量 測方法與評估方式;(三)探討醫療職業輻射作業造成的 肢端與眼球水晶體等價劑量水平;(四)提出肢端與眼球 劑量合理抑低措施建議與眼球水晶體法規標準調整之 可行性評估。

#### III. 結果與討論

國際報告對於醫療輻射從業人員之肢端與眼球水 晶體等價劑量評估模式:我國醫療輻射從業人員中,可 以分為放射診斷、放射牙科、核子醫學、放射治療及其 他應用等五大類別。其中核子醫學部門執行核醫藥物製 備及注射的藥師及護理師為肢端劑量監測之關鍵族群, 此外,執行透視影像引導介入性流程之放射科醫師,為 肢端與與眼球水晶體等價劑量監測之關鍵族群;ICRP 依 據輻射造成器官的劑量分佈狀況,分為均匀的(uniform) 與不均勻的(non-uniform)等兩種情況:輻射劑量均勻分 佈於器官中的狀況,用器官的平均劑量來代表 ICRP60、 103 號報告所規範的器官等價劑量;然而在輻射劑量分 佈不均匀的情況下,用整個器官的平均劑量(organ averaged dose) 並無法客觀地反應出器官可能受到的輻 射損害,這種狀況下應修正器官等價劑量的計算方法, 即應找出器官對輻射最敏感的區域,且此區域有最大劑 量(highest dose)處,指定為「重要體積(significant volume)」,以重要體積內的劑量平均值作為器官等價劑

量的代表值。ICRP26 號報告指出:在不均勻場下,重要 體積的深度 d 處,為實務層面的管制考量下可量測的個 人等效劑量 $-H_p(d)$  (d:重要體積之深度,單位:mm), 就肢端而言,由於皮膚基底層位於人體深度 0.07 mm 處, 故使用人員等效劑量  $H_p(0.07)$ 作為管制;就眼球水晶體 而言,ICRP 建議以深度 3 mm 處作為代表眼球水晶體之 重要體積。

醫療輻射從業人員肢端與眼球水晶體等價劑量之 量測方法與評估方式,目前國際上對於輻射工作人員的 肢端劑量和眼球水晶體劑量的評估方式主要為使用劑 量計量測之,所使用之劑量計種類可分為主動式劑量計 與被動式劑量計兩類,相較於主動式劑量計的大體積和 顯著的重量,被動式劑量計之形態大致為直徑小於 0.5 cm 且厚度小於 0.1 cm 的圓柱體,於肢端或眼球水晶體 劑量量測時,可更為輕鬆方便地固定於需量測劑量之人 體部位,且可以於相同劑量量測區域布點多個被動式劑 量計以評估劑量的分佈狀況與確定劑量極端值所在之 位置等資訊。又因其重量輕的優勢,將不會對所量測人 員造成佩戴上的負擔和執行工作上的干擾。

醫療職業輻射作業造成的肢端與眼球水晶體等價 劑量水平,在核子醫學部門,藥物的屏蔽裝置大多屬於 圓筒狀,對於不同指節會有不同的貢獻,手部最大劑量 與佩戴指環劑量計位置之劑量,兩者之間差距約為4倍。 在透視影像引導介入性流程,放射科醫師之肢端等價劑 量,則會因手術複雜程度而有不同的貢獻;眼球水晶體 的個人等效劑量  $H_p(3)$ 於執行單次神經血管類流程 (neurovascular interventional radiology, neuro-IR)之中位 劑量為 5.31  $\mu$ Sv,於執行單次驅幹類流程(general interventional radiology, general-IR)之中位劑量為 18.9  $\mu$ Sv,此外,若工作人員於執行流程時有佩戴鉛眼鏡 (with glasses)以防護眼球水晶體之曝露,相較未佩戴鉛 眼鏡 (without glasses)的狀況,將分別於神經血管類流程 和驅幹類流程中顯著減少28%和 36%。

肢端與眼球劑量合理抑低措施,針對醫學部門工作 人員,建議落實鉛屏蔽之使用與加強教育訓練,尤其是 執行備藥或注射的工作人員,藉由熟練其操作技術,達 到減少受到放射性藥物的曝露;建議將佩戴在手指基部 的皮膚等價劑量乘上4倍,以推算估手部最大等價劑量; 針對透視影像引導介入性流程之放射科醫師,建議在不 損失手術品質的前提下,可以減少透視時間、減少透視 時影像的幀數,以及優化檢查程序,並提升輻射防護觀 念與劑量計佩戴方式之指南;因應 ICRP 對於眼球水晶 體輻射防護劑量建議值的下修,目前在法規的調整上有 兩種方法:兩階段式與直接式,目前已完成修法且採取 直接式的國家有瑞士、英國、荷蘭和澳大利亞,立法時 也應考量對現實層面的衝擊,如經費開銷和人員訓練等。

#### IV. 結論

依據行政院原子能委員會於民國107年發佈的全國 輻射工作人員劑量資料統計年報中指出,放射診斷類別 與核子醫學類別之輻射從業人員之集體劑量佔總醫療 集體劑量的八成以上的集體劑量,關鍵群體為執行透視 影像引導介入性流程之操作醫師,與核子醫學製藥及注 射作業的工作人員。在核子醫學部門,因為工作人員的 手指有可能直接接觸非密封性射源,手指指節與放射線 藥物距離不同,因此在不同的指節會有不同的劑量表現; 可以透過確實使用鉛屏蔽與落實加強教育訓練,以達到 減少肢端等價劑量之目的。在透視影像引導介入性流程 中,其肢端的等價劑量主要來自於病人體的散射輻射, 因此會在手指上配戴指環劑量計,並朝向病人體的方向 進行量測,並可根據單次檢查造成操作醫師的職業曝露 劑量,與該醫師的年度執行數量,推估肢端等價劑量作 為參考,判斷是否有超過年劑量限度之虞。

依據國際原子能委員會 1731 號報告中的輻射工作 分類,輻射工作人員所涉及的行業有:醫療、工業、教 育研究和獸醫業,當中醫療行業職業人員為危險族群。 在眾多醫療行為中,又以透視影像引導介入性流程之平 均作業劑量最高,主要由於醫師站位接近病人,會接受 到大量來自病人的散射輻射,且因手術複雜程度而影響 作業時間的長短,最終導致工作人員所接受到的眼球水 晶體等價劑量之統計數據範圍較大,且眼球水晶體的年 累積劑量存在超過新劑量限值之虞。為了配合臨床工作 人員的輻射防護工作,市面上已存在不同種類的輻射防 護器具。為達到良好的輻射防護效果,建議工作人員佩 戴之鉛眼鏡應符合國際建議之鉛當量規格,且佩戴時盡 量貼近雙頰,並在佩戴鉛眼鏡的狀況下習慣性使用鉛玻 璃屏風。在法規限值的調整上有兩種方法包括兩階段式 與直接式,無論哪種立法方式,都須考慮對關鍵群體的 單位在人力與經費上之衝擊。

#### 参考文獻

- [1] IAEA, 2013. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the eye.
- [2] IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards General Safety Requirements Part 3.
- [3] ICRP, 2012. ICRP publication 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Annals of the ICRP.
- [4] Lian, M.-E., Tsai, Y.-H., Li, I.-G., Hong, Y.-H., Chang, S.-L., Tsai, H.-Y., 2020. Occupational radiation dose to the eye lens of physicians from departments of interventional radiology. Radiat. Meas. 106276. https://doi.org/10.1016/J.RADMEAS.2020.106276
- [5] Martin, C.J., 2016. Strategies for assessment of doses to the tips of the fingers in nuclear medicine. J. Radiol. Prot. 36, 405 - 418. https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/3/405

## 系統化與客製化的飛航輻射劑量研究(1/2) Systematization and Customization of Aviation Dose Assessment (1/2)

計畫編號: MOST 108-2623-E-007-005-NU 計畫主持人:許榮鉤 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

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 將飛航人員視為輻射工作人員,歐盟在 1996 率先採行 相關規定與劑量管理。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(NTHU Flight Dose Calculator v1.0),在此基礎上,本 研究規劃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。第一年系統化是深入探討飛航輻射 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。第二年客製化研究將探 討如何配合航空公司的需求,以利飛航從業人員的個人 劑量管理。另外,本研究也探討了次級宇宙射線各成分 的航線累積能譜資訊,相關成果可做為未來實際量測的 儀器選擇與數據分析。

關鍵詞:宇宙射線、飛航劑量、評估程式精進。

#### Abstract

Daily exposure to cosmic radiation is generally considered to be of minor importance for most people on Earth. However, airline crews and frequent flyers are exposed to elevated radiation levels on every flight. Galactic cosmic-ray induced secondary particles in the atmosphere constitute the largest source of this radiation exposure. The ICRP has recommended aircrew exposure to cosmic radiation being included as occupational exposure and, since 1996, aircraft crew in the EU have been classified as occupationally exposed workers that imposes requirements on air carriers to assess and manage their exposure to cosmic radiation. Based on the self-developed NTHU Flight Dose Calculator, this project performed an in-depth analysis of aviation dose assessment. The first-year study focused on the systematization of the important parameters and associated sensitivity studies, including the update of our dose calculator to have a batch processing capability for multiple flights. Assessment codes used for calculating doses to aircrew in US, EU, and Japan were studied and compared. The goal of second year will be on the code customization according to air carrier's needs. In addition, the spectra of various components of secondary cosmic rays accumulated during a flight were examined in this study for experimental designs of on-board measurements.

Keywords: Cosmic rays; aviation dose; dose assessment.

#### I. 前言

國際放射防護委員會 ICRP 在 2016 年出版了 132 號 報告[1],主題是 Radiological Protection from Cosmic Radiation in Aviation。該報告中指出,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 劑量率約在 2-10 μSv/h 左右,劑量率的大小主要受高度、 經緯度與太陽活度的影響,詳細輻射場的特性非常複雜。 這樣的劑量率範圍相較於許多地面的游離輻射設施的 周遭環境明顯高出不少,因此飛航人員接受輻射的平均 年劑量可能與輻射工作人員相當甚至超過,值得關注並 仔細評估與管理。

#### Ⅱ. 主要內容

綜觀文獻,近年先進國家對於飛航劑量研究的資料 不少,但發表之結果通常只著重在各自國家最有興趣的 航線,因此並無針對台灣地區的飛航劑量分析數據。另 外,台灣的地磁緯度與先進歐美日等國主要城市差異甚 大,他國資訊直接延伸外插到低地磁緯度區域亦不無疑 問。針對台灣有興趣的飛航輻射資訊,本團隊搜尋國內 資料只能找到少許簡短說明,主要數據來自 1993 年輻 射偵測中心引進美國聯邦航空總署 CARI-2 程式所分析 的結果[2],內容只包含7條航線,其中以台北紐約國際 航線的劑量最高,來回一次約接受 0.156 mSv。相較其他 國家所呈現的完整資訊,此一數據涵蓋航線太少,而且 缺乏考量實際飛行日期(太陽活度11年週期)的影響。另 外,CARI-2程式相當老舊,該程式是基於一個簡化解析 的輻射遷移程式,缺乏考慮許多重要影響宇宙射線的因 素。以近年國際文獻對於宇宙射線的了解以及輻射遷移 模擬技術的進展,上述 20 多年前的數據值得重新評估 並擴充。其次,歐美日各國對於飛航劑量評估皆盡量使 用該國自行開發之工具,除了技術自主之外,主要考量 在於未來配合當地航空公司需求客製化的方便性。因此, 本團隊建議應該以最新技術重新嚴謹評估此一議題,增 加飛航劑量資訊的廣度與深度,並使用國內自行開發並 經驗證的飛航劑量評估工具,以利台灣未來將飛航劑量 列入職業暴露管制的準備。

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)[3]。基於一系列複雜的 FLUKA 宇宙射 線在大氣層的模擬計算[4],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。我們使用該程式 分析 11 條由台灣飛往國內外重要航點單趟所受宇宙射 線的輻射劑量[5],結果彙整如圖1所示。該結果基於最 新蒙地卡羅技術且經嚴謹驗證,並考量了太陽活度與航 線變化的影響,應可用於取代目前原能會網站上相對老 舊的飛航劑量參考數據。



圖 1:使用 NTHU Flight Dose Calculator 分析 11 條由台 灣飛往國內外重要航點單趟所受宇宙射線的輻射劑量

#### III. 結果與討論

本研究規劃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。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[6]、歐洲的 EPCARD[7]及日本的 EXPACS[8],分別計算 11 條從台 灣直飛的航線,如圖 2 所示,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 (469 MV)時以 EPCARD 劑量最高,EXPACS 最低;在 太陽活度大(1019 MV)時,則以 CARI-7A 劑量最高,仍 是 EXPACS 最低。造成 EXPACS 劑量偏低的原因與使 用的轉換因子不同有關,EXPACS 選用 ICRP-116[9]號 報告之劑量轉換因子,而其餘程式則主要使用 ICRP-74[10]號報告之數值。整體來看,本團隊開發之 NTHU Flight Dose Calculator 的計算結果與其它程式趨勢一致, 且劑量數值會落在中間,代表計算結果在合理範圍。

第二個方面為探討資料庫參數的關係與靈敏度分 析,針對台灣地區的有效劑量率隨高度變化趨勢,如圖 3 所示,可看出總有效劑量隨高度升高而增加,若進一 步觀察步同高度時各成分粒子對劑量的貢獻佔比,可發 現在地表時以牟子為最大宗,而在飛航高度附近則為中 子與質子站了最主要的貢獻,隨著高度的繼續升高,質 子變成最主要的劑量來源,重粒子的貢獻也明顯增加, 直到約30公里以上氦核取代質子成為最大的劑量來源, 而其餘粒子在15 公里之後的劑量率不升反降。接著我 們也比較了緯度與經度改變對有效劑量率的影響,隨著 續度增加,垂直截止剛度明顯下降,讓劑量率隨之升高; 而隨著經度改變,垂直截止剛度也略有變化,且會反應 在劑量率的變化上。由於比起經緯度的改變,垂直截止 剛度才是影響劑量率最大的主因,因此我們將 FLUKA 計算的 20 個地理位置格點對應之垂直截止剛度與有效 劑量率做圖,發現兩者呈現出類似反 S 的形狀,可使用 Sigmoid 擬合曲線描述兩者間的關係,例如圖 4 顯示在 11.6 公里高空之中子劑量率的擬合曲線。

第三個方面為更新了 NTHU 飛航劑量評估程式,如 圖 5 所示,除了對原版本程式的錯誤進行修正,也更改 了大圓航線的計算條件,此外為了擴充程式的可用性及 功能性,也重新進行了一系列 FLUKA 模擬來建構全新 資料庫,更新擬合參數資料庫與圖形控制介面,新增對 介子及重粒子的劑量計算,並擴充計算高度上限到 70 公 里,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。

#### 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,本 研究規劃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。本年度已完成系統化工作,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。下 一年度研究方向將著重於探討如何配合航空公司的需 求,以利飛航從業人員的個人劑量管理,預計針對台灣 兩家最大的航空公司華航及長榮,評估所有機師的年均 有效劑量,相關結果將可提供航空公司與主管機關參考。

#### 参考文獻

- ICRP, "Radiological protection from cosmic radiation in aviation. ICRP Publication 132," Ann. ICRP, vol. 45, 2016.
- [2] AEC,高空飛行之宇宙射線劑量評估,輻射防護簡 訊第15期,中華民國輻射防護協會,1993.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Z.Y. Yang, R.J. Sheu\*, "Effects of Flight Route Variation and Great-Circle Approximation on Aviation Dose Assessment for Popular Flights from Taiwan", Radia Prot Dosim, 184, 79-89 (2019).
- [6] K. Copeland, "CARI-7A: Development and validation," Radiat Prot Dosim, 175, 1-13, 2017.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] ICRP, "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116," Ann. ICRP, vol. 40, pp. 2-5,

2010.

[10] ICRP, "Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74," Ann. ICRP, vol. 26, 1996.



圖 2:11 條台灣重要直飛航線使用美日歐飛航劑量評估程式計算宇宙射線造成之有效劑量的比較



圖 3:(左)最小及(右)最大太陽活度時,在台灣(121°E 23.5°N)宇宙射線造成之有效劑量率隨高度變化



#### (a) Actual flight route: Taipei → New York

#### (b) Great-circle: Taipei → New York A NT HU Flight Dose Calculator v2.6 AN N THU Flight Dose Calculator v2.6 -User Specified Orthodrome Location Personnel Dose Database User Specified Orthodrome Location Personnel Dose Database NTHU Hight Dose Calculato The flight dose calculator designed with user-friendly featu -Flight Route es can be used for assessing and investigating radiation exposure of air travel due togalactic cosmic radiation. It was based on a database generated by a series of high-fidelity FLUKA simulations in which in composition of primary cosmic rays, the effects of the earth's geomagnetic field and the solar activity are properly modeled. Program has been benchmarked by comparing its predictions with data in literature and from other codes. Airport ICAO Departure Destination 2017 • Month 7 • Year Departure airport RCTF Latitude 40.64 N (-S) Latitude 25.08 9808 Attude m Longitude 121.23 Longitude -73.78 E (-W) 982 kmh 8 Destination airport KJFK Speed Attitude 106 Atitude 13 m Show route Calc te Save -Flight Information -Airport Search -Taiwas 2017 - Month 7 - Batch Country 16 16 Taipei-NewYork . Add Airport Taoyuan Intl, Taipei (mysuh) (h/NSh) ule Calculate Save 14 ICAO Code 14 RCTE 12 12 -Selected Components -Rate Rate ron 2 Proton 2 Electrons 2 Mu 10 00 10 tron / Proton / Electrons / Muo Dose Photon / Pione / Heavy lons / Total Photon / Piont / Heavy lons / Total 8 8 Attude Rigidity Cumulative Spectr Attude V Rigidity Cumulative Spectra 6 0 4 Effar 4 Flight Dose (µSv) Flight Dose (µSv) Neutron Proton Electron: Muon: Neutron Proton Electron± Muon± (km) (mm) 26.5 29.92 4.89 2.23 29.1 24.55 4.54 2.14 Photon Pion± Heavylons Total 6.03 0.08 0.09 69.73 Photon Pion± Heavylons 5.63 0.07 0.06 Total 66.08 Time (min) Time (min) (c) GCR dose rates and spectra at locations of interest (d) Personnel dose: schedule & flight tracking data . -User Specified Orthodrome Location Personnel Dose Database User Specified Orthodrome Location Personnel Dose Database -Flight Shedule -Flight Tracking Data Gene No 6 PilotA\_TrackingData.lis Browse . Point Number of flights For each flight: From To YYYY MM Attitude Spee Number of flights For each flight TrackingDataFilename YYYY MM Point 2 Dubai dat 2017 6 LosAngelés dat 2017 6 Franklurt dat 2017 7 Amsterdam dat 2017 7 Nerwork dat 2017 8 Beijing dat 2017 8 Beijing dat 2017 8 HongKong dat 2017 8 Sydney, dat 2017 8 1 Tokyo, dat 2017 8 1 Singapore, dat 2017 9 11 CRTP OMDB 2017 6 11567 932 1 RCTP KLAX 2017 6 10309 990 3 RCTP FDADE 2017 7 10458 814 4 RCTP FLHAM 2017 7 14486 817 5 RCTP KHAK 2017 7 1908 982 6 RCSS ROES 2018 2017 8 919 478 7 RCTP XEAA 2017 8 9476 815 8 97 777 74008 883 97 777 7447 81036 883 97 777 7447 811240 890 108 1187 936 11 8127 936 11 817 936 11 817 936 11 817 936 11 817 936 11 817 936 11 RCTP 94434 2017 8 pint 1 Point f Info. & control 5 6 19 38 54 50 -34 25 +\*\*\*\*/-\*5 Year 1997 - Month 6 -127 -122 -117 0 151 121 \*\*E/-\*W Ahitude (m) 20300 11900 20000 364 21 11000 et Paste data 4.5296 6.8512 0.0456 2.0165 Total (uSwh) 26.8968 0.0568 Add new point 0 9780 2 5538 6.4744 0.0183 0.0116 0 5991 NORDIN Galculate Calculate Proton 1.7854 2.7853 14.3955 0.0063 0.0045 0.6278 271.15 ±13.55 Total Effective Dose (µSv) Total Effective Dose (µSv) 325.96 ±15.55 0.5846 0 5958 1.1931 0.0044 0.0038 0.3173 tra at point No 1 0.1123 0.2554 0.0216 Dose Assessment Report PilotA Schedule sment Report PilotA TrackingData.do Muont 0.2108 0.0231 0.1087 Dose Asse (m<sup>25</sup> <sup>×10</sup>, 20) Spectra-Converted Dose: 29.93µSv Spectra-Converted Dose: 69.68 µSv (#/cm<sup>2</sup>.∆u) (10) 8 θ ---- Ne atroa Netton Proton Electrons Hout Spectra ( Spectra ( Pioto 1.5 Pin+ Heatly lo Cumulative S Cumulative 0.5 0 100 105 10-10 10<sup>4</sup> 10-Energy (MeV) Energy (MeV)

圖 5: 更新之 NTHU Flight Dose Calculator 第 2.6 版的主要使用者介面與功能展示

## 能階式放射影像感測器之讀出電路晶片設計與系統整合(II) Readout Circuit Design and System Integration for Multi-Energy Radiation Image Detector (II)

計畫編號: MOST 108-2623-E-007-006-NU
計畫主持人: 裴晉哲
e-mail: jjpeir@mx.nthu.edu.tw
計畫共同主持人: 盧志文
計畫參與人員: 印秉宏、孫健智、薩蒂亞、熊子翔、余宗樺、 游旻穎、林志瑋、吳展良
執行單位: 國立清華大學

#### 摘要

在本計畫中,吾人設計並實現能階式放射影像感測 器之讀出電路晶片設計與系統整合,這項研究提出了一 種採用 0.11-µm CIS 技術設計並原型化的 184×184 光學 下影像感測器。此影像感測器具有全局快門操作和內置 於 8 像素配置中的 ADC 的原型傳感器具有低噪聲,低 功耗,快速響應時間和較小的信號處理電路面積的特點。 像素陣列中還嵌入了兩組存儲器,以節省外部存儲器的 成本。通過八段自動曝光和帶有可編程增益控制的暗電 平調節,可實現 126 dB 的動態範圍。影像感測器已成功 感測銫 137 及鈷 60 兩種射源。

**關鍵詞:**放射影像感測系統、讀出電路、放大器、類比 數位轉換器、數位資料處理器。

#### Abstract

In this project, we designed and implemented a readout chip for low-dose radiation image detectors. This study proposes a  $184 \times 184$  optical image sensor designed and prototyped using the 0.11-µm CIS technology. The prototype sensor with a global shutter operation and an ADC-embedded in an eight-pixel configuration features low noise, low-power consumption, fast response time, and a smaller signal processing circuit area. Two sets of memory are also embedded in the pixel array to save the costs of external memory. A dynamic range of 126 dB is achieved with eight-segment automatic exposure and dark level adjustment with programmable gain control. The proposed image sensor was successfully used to detect the radiation sources, Cs 137 and Co 60.

**Keywords:** radiation image system, readout circuit, amplifier, analog-to-digital converter (ADC), digital signal processor.

#### I. 前言

數位放射影像設備比傳統放射影像設備具有多項 優點,例如可以較低的輻射劑量提供更好的影像品質, 快速成像,輕薄短小,而且數位放射影像設備亦可提供 臨床醫師以電子化方式進行影像的檢視、擷取、傳送、 分析,大幅提高醫院醫事效率,所以數位放射影像設備 已成為醫學影像市場未來的主流[1-6]。本計畫接續前一 年的計畫設計並實現一個使用 CMOS Image Sensor 設計 能階式放射影像感測器之讀出電路晶片。

#### Ⅱ. 主要內容

圖 1 為吾人提出的影像感測器的實現方塊圖。 嵌 入式 ADC 時序,單次曝光,多次曝光和時序發生器可 生成用於影像採集的控制信號。可以通過發送命令指令 對影像感測器進行編程。暫存器組用於對感測器進行編 程。通過 SPI 介面上傳命令指令。影像數據通過輸出介 面依次逐列讀取。為了節省功耗和內存,影像感測器被 設計為從(slave)設備,並且僅在主設備發送請求命令時 才讀取影像數據。



圖 1 吾人提出的影像感測器的實現方塊圖。

電源彈跳會導致嚴重的系統噪聲。全差分讀取設計 可通過同時採樣信號來實現較高的系統抗擾性。圖2(a) 顯示了用於 8 像素讀取的單斜率 ADC 的示意圖。每個 像素包含一個 PD 和一個電荷轉移門 (MTG)。ADC 由 一個全差分自動歸零比較器,兩個耦合電容器(CR)和 一個單脈衝發生器組成。全局斜坡發生器通過耦合電容 器(CR)為比較器的輸入提供差分斜坡信號,以進行 A /D轉換,並且全局計數器跟踪A/D轉換時間。本設計 中的轉換增益可以通過設置 CR 值來控制。由 17 位分段 線性 RDAC 構成的斜坡發生器為 A/D 轉換提供 256 (8 位) 電平。可以調整共模電壓和斜坡信號的滿量程以實 現相對較高的動態範圍。圖2(b)示出了讀出電路的操 作時序。自動曝光期間,每個像素在不同的曝光時間下 曝光,並以不同的漸變範圍讀取。自動曝光後,為8像 素曝光選擇適當的曝光時間和漸變範圍。因此,可以實 現 120 dB 的動態範圍。 8 像素曝光是流水線式全局快 門,可在讀出期間進行曝光。 ADC 輸出 8 位圖像數據, 對於每次 A / D 轉換,一個 PD 的電荷被轉移到比較器 的一個輸入,而連接到比較器另一輸入的另一個 PD 用 作虛擬設備,用於差分操作以消除從電源線耦合的電源


圖 2 (a) 用於 8 像素讀取的單斜率 ADC 的示意圖。
 (b) 讀出電路的動作定時。

# III. 結果與討論

使用 0.11 µm CIS 製程製作此讀出電路晶片,圖 3 為讀出電路晶片照相圖。圖 3 為將製作好的晶片焊在電 路板上作量測用。圖 5 為將電路板連接到電腦螢幕感測 做光學影像感測測試,將手移到晶片上方,可看到電腦 螢幕顯示感測到的手。做完光學影像感測後,將閃爍晶 體放在感測晶片上方,射源放在在閃爍晶體上面如圖 6, 準備做射源感測。先做銫 137 的感測,圖 7 為讀出晶片 送出的數位資料,將感測資料轉換成能譜如圖 8。做完 銫 137 的感測後換不同的射源做感測,圖 9 和圖 10 為 感測鈷 60 的讀出數位資料及讀出的能譜。



圖 4 讀出電路晶片照相圖



圖5量測電路板。





圖 7 將閃爍晶體放在感測晶片上方,射源放在在閃爍 晶體上面準備做射源感測。





圖 11 感測鈷 60 的能譜。

# IV. 結論

這一年吾人以 0.11 µm CIS 製程實現一個 184×184 放射影像感測讀出電路晶片並完成整個放射影像感測 系統,此影像感測器已成功感測銫 137 及鈷 60 兩種射 源。這項研究提出了一種採用 0.11-µm CIS 技術設計並 原型化的 184 × 184 光學下影像感測器。此影像感測器 具有全局快門操作和內置於 8 像素配置中的 ADC 的原 型傳感器具有低噪聲,低功耗,快速響應時間和較小的 信號處理電路面積的特點。像素陣列中還嵌入了兩組存 儲器,以節省外部存儲器的成本。通過八段自動曝光和 帶有可編程增益控制的暗電平調節,可實現 126 dB 的動 態範圍。

# 参考文獻

- [1] Available on website : www2.itis.org.tw/book/download\_sample.aspx?pubid =65226047.
- [2] Available on website : <u>http://iekweb2.iek.org.tw/IEKConf/Client/confinfo.as</u> <u>px?mode=confinfo&conf\_no=217609829</u>.
- [3] R. Irsigler, J. Anderson, J. Alverbro, J. Borglind, C. Frojdh, P. Helander, S. Manolopoulos, H. Martijn, V. O'Shea, and K. Smith, "X-ray imaging using a 320 x 240 hybrid GaAs pixel detector," *IEEE Trans. Nucl, Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 507-512, Jun. 1999.
- [4] S. Steadman, F. M. Serrano, G. Vogtmerier, A. Kemna, E. Oezkan, W. Brockherde, and B. J. Hosticka, "A CMOS photodiode array with in-pixel data acquisition system for computed tomography," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 7, pp. 1034-1043, July 2004.
- [5] B. Mikulec, "Development of segmented semicondcutor arrays for quantum imaging," Nul. Instrum. methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip., vol. 510, pp. 1-23, Sep. 2003.
- [6] I. Willekens, B. Dierickx, N. Buls, C. Breucq, A. Schiettecatte, J. D. mey, and C. Bourgain, "Superiority of multi-energy color X-ray for breast spectrum radiography," in *European Society for Radiography Congress*, Mar. 2011.
- [7] X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo, and E. Pernigotti, "Medipix2: A 64-k pixel readout chip with 55- m square elements working in single photon counting mode," *IEEE Trans. Nucl, Sci.*, vol. 49, no. 5, pp. 2279-2283, Oct. 2002.
- [8] R. Ballabriga, M. campbell, E. H. M. Heijne, X. Llopart, and L. Tlustos, "The Medipix3 prototype, a pixel readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance," *IEEE Trans. Nucl, Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 1824-1829, Oct. 2007.
- [9] R. Ballabriga, M. campbell, E. H. M. Heijne, X. Llopart, and L. Tlustos, "Medipix3: A 64-k pixel detector readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance," Nul. Instrum. methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip., vol. 633, pp. S15-S18, May 2011.
- [10] M. Locker, P. Fischer, S. Krimmel, H. Kruger, M. Lindner, K. Nakazawa, T. Takahashi, and N. Wermes,

"Single photon counting x-ray imaging with Si and CdTe single chip pixel detectors and multichip pixel modules, " *IEEE Trans. Nucl, Sci.*, vol. 51, no. 4, pp. 1717-1723, Aug. 2004.

- [11] M. Perenzoni, D. Stoppa, M. Malfatti, and A. Simoni, "A multispectral analog photon-counting readout circuit for x-ray hybrid pixel detectors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 7, pp. 1438-1444, July 2008.
- [12] K. Spartiotis, A. Leppanen, T. Pantsar, J. Pyyhtia, P. Laukka, K. Muukkonen, O. Mannisto, J. Kinnari, and T. Schulman, "A photon counting CdTe gamma- and x-ray camera," Nul. Instrum. methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip., vol. 550, pp. 267-277, May 2005.
- [13] J. S. Iwanczyk, E. Nygard, O. Meirav, J. Arenson, W. C. Barber, N. E. Hartsough, N. malakhov, and J. C. Wessel, "Photon counting energy dispersive detector arrays for x-ray imaging," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 535-542, Jun. 2009.
- [14] B. P. Ginsburg and A. P. Chandrakasan, "A 500 MS/s 5 b ADC in 65-nm CMOS," *IEEE Symp. VLSI Circuits*, Jun. 2007, pp. 174–175.
- [15] Y. K. Chang, C. S. Wang, and C. K. Wang, "A 8-bit 500 KS/s low power SAR ADC for bio-medical application," *IEEE ASSCC Dig. Tech. Papers*, Nov. 2007, pp. 228–231.
- [16] Liu, C.-C., Chang, S.-J., Huang, G.-Y., and Lin, Y.-Z.:
  'A 10-bit 50-MS/s SAR ADC with a monotonic capacitor switching procedure', *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2010, 45, (4), pp. 731–740
- [17] Y. Zhu, C. H. Chan, U. F. Chio, S. W. Sin, S. P. Martins, and F. Maloberti, "A 10-bit 100MS/s reference-free SAR ADC in 90nm CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 6, pp. 1111-1121, Jun. 2010.
- [18] Hariprasath, V., etal. 'Merged capacitor switching based SAR ADC with highest switching energyefficiency', *Electron. Letters*, 2010, 46, pp. 620–621
- [19] C.-Y. Liou and C.-C. Hsieh, "A 2.4-to-5.2fJ/conversion-step 10b 0.5-to-4MS/s SAR ADC with Charge-Average Switching DAC in 90nm CMOS," *ISSCC Dig. Tech. Papers*, pp. 280-281, Feb. 2013.
- [20] H.-Y. Tai, Y.-S. Hu, H.-W. Chen, and H.-S. Chen, "A 0.85fJ/conversion-step 10b 200kS/s Subranging SAR ADC in 40nm CMOS", *ISSCC Dig. Tech. Papers*, pp. 196-197, Feb. 2014.
- [21] Yuan, C.; Lam, Y.: "Low-energy and area-efficient trilevel switching scheme for SAR ADC", *Electronics Letters*, 2012, vol.48, pp. 482-483.
- [22] Sanyal, A.; Sun, N.; "SAR ADC architecture with 98% reduction in switching energy over conventional scheme", *Electronics Letters*, 2013, vol.49, pp. 248-250.

# 台灣與境外水稻的放射性核種分佈之初探 Study on the distribution of radionuclide activity of rice in Taiwan and abroad.

計畫編號:MOST 108-NU--E-020-002-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、吳銘志、林聖淇 計畫參與人員:黃韋翔、洪浩珅、蔡享駿、張智全、何紹碩 執行單位:國立屏東科技大學環境工程與科學系

#### 摘要

本研究選擇台灣的 11 個稻田,通過加馬射線光譜 法成功地测定了水稻種植前、後灌溉水,水稻不同組成 (根、莖、葉和未去殼稻穀)以及相應土壤樣品的<sup>226</sup>Ra、 <sup>232</sup>Th、<sup>40</sup>K 和 <sup>137</sup>Cs 的放射性核種活度。灌溉水 <sup>40</sup>K 活度 0.34 - 6.62 Bq/L, 平均值為 3.34±1.66 Bq/L。66 個土壤 樣品,<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和<sup>226</sup>Ra 的活度濃度分別為 591±134、 45.4±10.2 和 30.9±6.6 Bq/kg。40K 的活度高於世界平均水 平 420 Bq/kg,但<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra的活度分別與世界平均 水平 45 和 32 Bq/kg 相似。2 個地點 137Cs 活度濃度為 5.57±1.29 Bq/kg。水稻種植前後各土壤放射性核種的活 度濃度差異不顯著。耕作前後,40K、232Th 和 226Ra 彼此 呈正相關。水稻根,莖,葉和未脫稻殼的<sup>40</sup>K 活度分別 為 238±59、368±226、404±1996、99±12 Bq/kg。<sup>232</sup>Th 活度分別為 12.6±3.9、0.79±0.23、3.83±2.91、0.43±0.12 Bq/kg,而<sup>226</sup>Ra 活度分別為 10.7±2.9、0.94±0.60、 4.43±4.22、0.49±0.09 Bq / kg。<sup>137</sup>Cs 根, 莖和未脫稻殼 的活度分别為 1.67-1.86、0.072-0.128、0.10-0.31 Bq/kg。 水稻土壤-穀物的 TFs 在 <sup>40</sup>K 範圍為(1.21-2.86)×10<sup>-1</sup>, 232Th 範 圍 為 (0.07-0.11)×10<sup>-1</sup>, <sup>226</sup>Ra 範 圍 為 (0.11-0.29)×10<sup>-1</sup>。<sup>137</sup>Cs 為(0.16-0.61)×10<sup>-1</sup>。<sup>40</sup>K 和 <sup>226</sup>Ra 的TF值分別與土壤<sup>40</sup>K和<sup>226</sup>Ra的活度顯著負相關(<sup>40</sup>Kr = 0.92 , p < 0.001 , n = 11;  $^{226}$ Ra r = 0.976 , p = 0.024 , n = 4)。30 個市售稻米樣品,<sup>40</sup>K,<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 稻米樣品 的放射性核種活度分別為 24.05±10.21、1.00±0.28 和 1.15±0.25 Bq/kg。估計稻米年度有效劑量為 <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 分別為 6.80±2.89、10.53±2.97 和 14.74±3.14 μSv/y,放射性核種的總有效劑量為 17.82±11.56 μSv/y。 總有效劑量比天然輻射年劑量 290 µSv/y 世界平均值低 一個數量級。稻米 40K, 232Th 和 226Ra 而導致的終身終 生癌症風險(ELCR)分別為為(5.21±2.21)x10-5, (0.91±0.26)x10<sup>-5</sup> 和 (4.06±0.87)x10<sup>-5</sup>。總 ELCR 為 (7.65±3.35)x10<sup>-5</sup>,比準則限值 10<sup>-3</sup>小一個數量級。

**關鍵詞:**天然放射性核種<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra、人工放射性核種<sup>137</sup>Cs、水稻田土壤放射性核種活度、水稻根、莖、葉、與稻穀放射性核種活度、傳輸因素。

#### Abstract

In this study, 11 sites were selected from paddy fields in Taiwan. The radionuclide activities of <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, and <sup>137</sup>Cs were successfully measured via gamma-ray spectrometry on irrigation water, rice plant compartments (root, stem, leaf, and un-hulled grain) and on corresponding

soil samples before and after rice plantation. The activity of irrigation water only detected <sup>40</sup>K that ranged from 0.34 -6.62 Bq/L with mean 3.34±1.66 Bq/L. In total, 66 soil samples were detected and the activity concentrations were 591±134, 45.4±10.2, and 30.9±6.6 Bq/kg for <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, and <sup>226</sup>Ra, respectively. Activity of <sup>40</sup>K was higher than world average activity 420 Bq/kg, but activities of <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra were similar to world average 45 and 32 Bq/kg, respectively. In 2 sites 6 samples was detected <sup>137</sup>Cs with activity concentration 5.57±1.29 Bq/kg. In rice plant, the <sup>40</sup>K activities were 238±59, 368±226, 404±1996, 99±12 Bq/kg for root, stem, leaf, and un-hulled grain, respectively. While <sup>232</sup>Th activities were 12.6±3.9, 0.79±0.23, 3.83±2.91, 0.43±0.12 Bq/kg, <sup>226</sup>Ra activities were 10.7±2.9, 0.94±0.60, 4.43±4.22, 0.49±0.09 Bq/kg, respectively. The activities for <sup>137</sup>Cs were 1.67-1.86, 0.072-0.128, 0.10-0.31 Bq/kg for root, stem, and grain, respectively. Rice soil-to-grain TFs were observed in the ranges of  $(1.21-2.86) \times 10^{-1}$  for  ${}^{40}$ K, (0.07- $(0.11) \times 10^{-1}$  for <sup>232</sup>Th,  $(0.11-0.29) \times 10^{-1}$  for <sup>226</sup>Ra, and  $(0.16-0.61) \times 10^{-1}$  for <sup>137</sup>Cs. Results showed that the selected radionuclide distributions in rice are dependent on rice compartment type and radionuclides species. TF values for <sup>40</sup>K and <sup>226</sup>Ra had significantly negative correlation with soil <sup>40</sup>K and <sup>226</sup>Ra activities, respectively (<sup>40</sup>K r=0.92, p<0.001, n=11; <sup>226</sup>Ra r=0.976, p=0.024, n=4). Thirty rice samples were collected from local markets including 24 local rice and 6 imported rice. Radionuclide activities were 24.05±10.21, 1.00±0.28, and 1.15±0.25 Bq/kg for <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, and <sup>226</sup>Ra for the total rice samples. Annual effective doses from rice consumption were estimated to be 6.80±2.89, 10.53±2.97, and 14.74±3.14 µSv/y for <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th, and <sup>226</sup>Ra, respectively, and total effective dose was  $17.82\pm11.56$  µSv/y for the selected radionuclides. These values were one order of magnitude less than the 290 µSv/year world average of the ingestion exposure from natural sources. The excess lifetime cancer risk (ELCR) due to the consumption of detected rice was  $(5.21\pm2.21)$  x  $10^{-5}$ , (0.91±0.26) x  $10^{-5}$ , and (4.06±0.87) x  $10^{-5}$  for  ${}^{40}$ K, <sup>232</sup>Th, and <sup>226</sup>Ra, respectively. The total ELCR was  $(7.65\pm3.35) \times 10^{-5}$ , which was one order of magnitude less than the guideline limit  $10^{-3}$ .

**Keywords:** Natural radionuclides <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th and <sup>226</sup>Ra, artificial radionuclide <sup>137</sup>Cs, paddy field soil radionuclide activity, rice root, stem, leaf, and rice radionuclide activity, Transfer factor (TF).

#### I. 前言

稻米是全球熱帶國家主要的主食作物,世界上一半 以上的人口都以稻米為主要食物,依賴稻米作為其主要 熱量來源(即稻米供應其熱量總攝入量的三分之一或更 多),大約90%的大米都是在亞洲生產和消費(Uchida et al.,2009)。稻米也是台灣人民的主要食物,因此,民眾 經由食用稻米,攝入放射性核種所造成之體內劑量為主 要來源(Wang et al.,1998)。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,研究水稻中的傳輸機制和這些放射性核種的分佈 有助於了解土壤和水稻之間的吸收,交換和傳輸模型。 它還可以作為台灣和附近地區消費水稻人群劑量評估 的參考(Wang et al.,1998)。

因此,傳輸因子(植物活度與土壤活度的比例,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)

天然存在的元素與人工放射性核種為類似物質,藉 此增加我們對人工放射性核種的信息。歐美等國家已廣 泛研究放射性核種傳輸因子應用於食品鏈的各種組成 部分,但關於放射性核種應用於稻米傳輸的研究非常有 限(Karunakara et al., 2013)。大多數稻米是在淹水條件下 生產的,放射性核種的TF很可能受到土壤條件的影響, 因此,稻米的 TF 值應與其他穀物的 TF 值分開考慮 (Uchida et al., 2009)。影響稻米傳輸的參數,如土壤的性 質,放射性核種的化學和物理形態,植物種類,植物部 位等(Bergeijk et al., 1992; Avery, 1996; Krouglov et al., 1997; Wang et al., 1998; Karunakara et al., 2013; Alsaffar et al., 2015; Asaduzzaman et al., 2015; Fujimura et al., 2015),以及土壤中核種衰變效應以及灌溉水管理的差異 (Uchida et al., 2009)。由於土壤之物理化學性質、稻子之 部位與放射性核種的化學和物理形態影響放射性核種 的累積與傳輸。本研究預期探討稻田中土壤與稻米各部 位放射性核種(<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th、<sup>40</sup>K、<sup>137</sup>Cs)的活度與計算傳 輸因子。

# Ⅱ. 主要內容

本計畫的研究目標是採集台灣北、中、南、東部的 稻穀,探討不同區域稻殼與稻米的放射性核種分佈現況, 瞭解台灣地區稻穀所含放射性核種分佈之背景資料。同 時將採集稻穀的所對應之土壤與環境水體樣本進行採 樣工作,探討不同品種稻穀、土壤與環境水體樣本進行採 材性核種的分佈現況,了解放射性核種元素在農田環境 -水稻間的對應關係。除此之外,本研究亦著重針對加馬 (Gamma)放射性核種定性與定量用於水稻檢測技術之開 發,在稻殼與稻米植體灰化後,放射性核種分佈的檢測。 在台灣北部、中部、南部與東部等地,採集至少涵蓋 2 個不同灌溉水源(水庫集水區與溫泉水體)的水稻進行檢 測分析作業。於此同時,田間環境試樣一併進行採樣與 分析工作,以利後續探討放射性核種在環境-水稻間的流 佈。最後,比較台灣稻米與境外稻米(由日本或東南亞區 域進口之市售包裝米)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。

# III. 結果與討論

#### 土壤基本性質

表 1 摘錄水稻種植前後的土壤特性,水稻種植前後 pH、EC、CEE 和 OM 值無明顯差異( $p = 0.12 \cdot 0.94$ )。土 壤樣品的 pH 值介於 5.00 至 8.28 之間,平均值為 6.71±0.84,屬於弱酸性。土壤 CEC 值為 1.25 至 13.02 meq/100 g,平均為 6.16±3.29 meq/100 g-乾土,而 EC 為 92 至 1582 µS/ cm,平均為 553±443 µS/cm。土壤樣品的 OM 在 2.3%至 14.0%之間,平均值為 6.45±2.69%。儘 管土壤性質是變化的,但是在農業用地中,以上基本性 質數值與文獻的數值範圍。

土壤的砂粒、坋粒和粘粒的平均百分比分別為 36.3±14.1%,45.6±9.9%和18.1±8.5%。這些分率結果顯 示稻田收集的大多數農業土壤主要是坋粒和砂粒。根據 美國農業部的土壤質地分類,土壤可區分為壤土和坋質 壤土。在選定的水稻田之間,水和土壤特性的結果存在 顯著差異。

表1 灌溉水與種植前後土壤基本性質

	- TE 190-1-2	、 住伍川 及一 4	任于任人
項目	Water properties	Soil properties (BP)*	Soil properties (AP)**
pН	7.80±0.49(7.17-8.80)	6.70±1.08(5.00-8.28)	6.71±0.53(5.78-7.69)
EC	586±398(263-1665)	638±435(138-1582)	466±440(92-1365)
SS (mg/L)	16±28 (1-108)		
TS (mg/L)	463±365(164-1525)		
COD (mg/L)	15.5±15.8(2.0-65.0)		
CEC		6.29±3.35(1.25-13.0)	6.03±3.28(1.25-12.65)
(mcq/100g)			
OM (%)		6.41±2.46(2.30-11.60)	6.48±2.94(3.23-13.97)

Note: sand 36.3±14.1%, 13.1%-60.1%; Silt 45.7±9.9%, 26.8%-63.3%; Clay 18.1±8.5%, 9.0%-36.5%.

#### 灌溉水放射性核種的活度

表 2 為灌溉水放射性核種分析,水樣同時檢測到放 射性核種  ${}^{40}$ K,但  ${}^{232}$ Th 和  ${}^{226}$ Ra 則低於偵測極限。 ${}^{40}$ K 活度範圍為 0.34-6.62 Bq/L,範圍約 19 倍。 ${}^{40}$ K 濃度的 平均值為 3.34 ± 1.66 Bq/L。

表 2 灌溉水放射性核種分析				
地區	地點	鉀-40Bq/kg		
	萬丹	1.38		
地下水	斗南	3.51		
	壯圍	3.73		
	關山	2.44		
	侯伯里	4.09		
나 주 수	莿桐	3.68		
地画小	土溝里	6.62		
	二崙	3.77		
	池上	0.34		
调度水	四重溪	2.56		
@ 水小	礁溪	4.62		

#### 土壤放射性核種活度

表 3 摘錄水稻種植前後土壤的放射性活度。水稻種 植前後放射性核種的活度無顯著差異(p=0.29-0.84)。結 合水稻種植前後放射性核種活度為一總體整體樣品,40K 平均活度(591±134 Bq/kg)高於世界土壤放射性活度平均 值(420 Bq/kg)。然而,  $^{232}$ Th和  $^{226}$ Ra (分別為 45.4±10.2 和 30.9±6.6 Bq/kg)的活度與全球平均值(分別為 45 和 32 Bq/kg)相似(UNSCEAR, 2000)。 $^{40}$ K 活度顯著高於  $^{232}$ Th 和  $^{226}$ Ra(p <0.001)。在台灣東北部兩個點檢測到的  $^{137}$  Cs 的活度為 5.57±1.29 Bq/kg,其活度低於其他三個放射性 核種活度。 $^{137}$  Cs 的活度與幾個國家所研究的活度相當。 將土壤活度與文獻活度進行比較顯示,本研究的活度在 全世界其他地區檢測到的活度範圍內(Asaduzzaman et al., 2014, 2015; James et al., 2011; Alsaffar et al., 2015; Aswood et al., 2013)。

對於選定的放射性核種,土壤的活度變化範圍倍數為 2.0 到 3.3。<sup>226</sup>Ra,<sup>232</sup>Th 和 <sup>40</sup>K 的活度在土壤中分佈 不均勻,而這通常歸因於地質變化(Alsaffar et al., 2015)。 水稻種植後 <sup>40</sup>K 的平均活度略有增加,這可能是由於農 民大量使用氮、磷、鉀肥料以提高稻穀產量(Alsaffar et al., 2015)。

圖 la 至 lc 顯示水稻種植前後  ${}^{40}$ K、 ${}^{226}$ Ra、 ${}^{232}$ Th和  ${}^{137}$ Cs 的活度均具有顯著的線性相關性 (r=0.55-0.86, p=0.005-0.020)。這顯示短期農業操作並未改變土壤放射性核種的活度。表4列出了水稻種植前後  ${}^{40}$ K, ${}^{232}$ Th和  ${}^{226}$ Ra 的放射性核種活度的相關係數。 ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th和  ${}^{226}$ Ra 的放射性核種活度的相關係數。 ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th和  ${}^{226}$ Ra 的放射性核種,其活度取決於當地地質,因此同一地點的土壤具有相似的組成。對於可能受水稻種植和施肥影響的  ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th和  ${}^{226}$ Ra 核種,水稻種植前的係數 略高於種植後的係數。此外,水稻種植前後的灌溉水  ${}^{40}$ K 活度與土壤  ${}^{40}$ K活度無顯著相關性(分別為r=0.36和-0.07, p=0.24和 0.84)。這種關係可以證明放射性核種的活度受到地質變化的影響,而核種活度不受灌溉水和短期農業操作的影響。

表 3 水稻種植前後土壤放射性核種統計摘錄與差異

(Bq/kg)	種植前	種植後	p 值
<sup>40</sup> K	574±125(350-804) ª	609±142(366-829) <sup>a</sup>	0.29
<sup>232</sup> Th	45.9±11.2 (18.5-60.0) <sup>a</sup>	45.0±9.3(26.8-60.3) <sup>a</sup>	0.72
<sup>226</sup> Ra	30.8±7.4(12.4-40.4) <sup>a</sup>	31.1±5.9 (19.4-41.2) <sup>a</sup>	0.84
<sup>137</sup> Cs	5.86±1.08 (4.17-7.10) <sup>b</sup>	$5.29 \pm 1.52 (3.53 - 6.82)^{b}$	0.48
<sup>a</sup> (n=33); <sup>b</sup> (n	n=6)		

表 4 土壤放射性核種活度相關係數							
	鉀-40	釷糸	鈾系	銫-137			
鉀-40		0.85	0.75	0.91			
釷系	0.93		0.87	0.24			
鈾系	0.82	0.97		0.57			
銫-137	0.58	0.83	-0.57				

備註: 左下角為種植前係數, 右上角為種植後係數



(c)

圖 la-lc 鉀-40、 針系、 鈾系 與 銫-137 之 線 性相 關

#### 植體放射性核種活度

水稻植株分割為四個部分,包括根、莖、葉和未去 殼的穀物。表5摘錄水稻植體各部位活度的平均值和標 準偏差。除2個莖和3個葉樣本的<sup>40</sup>K活度比相應的土 壤活度高之外,土壤的活度(表3)高於水稻各組成活度。

根、莖、葉和稻穀的<sup>40</sup>K 活度分別為 173 至 362、 149 至 820、161 至 749 和 86 至 125 Bq/kg。而 <sup>232</sup>Th 的 範圍分別為 6.9 至 17.9、0.59 至 1.04、0.69 至 8.06 和 0.28 至 0.56 Bq/kg,而 <sup>226</sup>Ra 的範圍分別為 6.1 至 14.3、0.30 至 2.21、0.63 至 12.63 和 0.39 至 0.59 Bq/kg。2 個樣本中 檢測到 <sup>137</sup>Cs 活度,根、莖和穀物的平均活度分別為 1.77、 0.10 和 0.21 Bq/kg,但葉部低於檢測極限。<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>137</sup>Cs 核種根累積的活度高於莖、葉和稻穀。未去殼 稻穀對 <sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>40</sup>K 含有最低的活度。另外,對 於 <sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>40</sup>K,稻葉的活度高於莖的活度,類似 於植物中的放射性核種活度分佈。

表 5 亦列出了國外文獻研究中的水稻各部位的活度。

與文獻中稻穀的活度相比,<sup>40</sup>K和<sup>137</sup>Cs的活度在研究值 的範圍內。但是,<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra的活度低於研究的活度。 在本研究中,水稻中高活度的<sup>40</sup>K活度可能是由於水稻 中大量使用的氮、磷、鉀肥料導致土壤中的高活度所致。 <sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra的低活度可能是由於土壤中的低活度引起 的。其他人也研究了食物樣品中類似的變異性(Ababneh et al., 2009; Hosseini et al., 2006)。

圖 2 顯示了在水稻不同部位中分布的活度百分比。 水稻中 <sup>40</sup>K 的分布與 <sup>137</sup>Cs、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 的分布不同。 根、莖、葉和穀物的 <sup>40</sup>K 平均百分率分別為 23.0±6.7%, 31.9±9.2%, 35.2±9.8%和 9.9±3.5%。根、葉和莖的百分 比顯著高於稻穀(p <0.001)°<sup>40</sup>K 的分佈百分比反映了 <sup>40</sup>K 從根部到植物其餘部分的轉移和運輸(Alsaffar et al., 2015)。根部 <sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 和 <sup>137</sup>Cs 平均累積了 76-86%, 稻葉中總共累積 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 的 11.5%和 17.5%, 莖部 累積了 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 的總數的不到 5.1%和穀物。<sup>137</sup>Cs 的 4.8%和 10.0%分別累積在莖和穀粒中。通常,穀物 累積最低放射性核種活度為 <sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra。根部可能比 水稻其他部位高,但通常在地上部植物部分是放射性核 種運輸的天然屏障(Chang et al., 2005)。此外,放射性核 種從根部到地上部的傳輸速率取決於植物各部位 (Pulhani et al., 2005; Tsukada et al., 2002)。

本研究中核種活度分布的百分比與文獻中指出的 分布明顯不同。例如,Alsaffar 等(2015)研究指出,根部 累積的<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th和<sup>40</sup>K的百分比分別為47%、57% 和13%。稻穀的百分比分別為9%、8%和7%,稻殼的 百分比分別為14%、11%和21%。稻稈百分比分別為 30%、24%和59%。此研究值顯示<sup>40</sup>K在稻稈中累積的 百分比較高,與本研究結果中莖、葉總百分比的67%相 似。對於<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra,根的百分比最高,而稻穀的百 分比最低,這與我們的結果相似。Lindahl et al. (2011) 表明,與地上植物部分相比,<sup>226</sup>Ra 保留在根中。 Lakshmanan and Venkateswarlu (1988)也觀察到稻穀中最 低的放射性核種活度。不同的分佈行為可能是由於土壤 和水稻的位置和物理特性、氣候條件和數量以及土壤中 用於提高農作物產量的肥料種類不同所致(Karunakara et al., 2013)。

表5水稻植體放射性核種活度(Bq/kg)

$^{40}$ K         238±59(11)         368±226(11)         404±196(11)         99±12 (11)         PS $^{215}$ Th         12.65.39(11)         0.79±0.23(3)         3.83±2.91(6)         0.43±0.12(4)         PS $^{226}$ Ra         10.7±2.9(11)         0.94±0.60(9)         4.43±2.2(8)         0.44±0.04(4)         PS $^{127}$ Cs         1.67-1.86 (2)         0.072-0.128 (2)          0.10-0.31 (2)         PS $^{48}$ K         1/47.4±57.1         611±237a         229±86b         72.2±20.0e         Alsaffar et al., 2015 $^{236}$ Ra         7.8±1.94         5.04±1.46a         2.32±0.97b         1.42±0.55c         Alsaffar et al., 2015 $^{236}$ Ra         7.8±1.94         5.04±1.46a         2.32±0.97b         1.42±0.55c         Alsaffar et al., 2015 $^{216}$ Th         6.88±1.38         2.9±0.66a         1.35±0.33b         1.03±0.31c         Alsaffar et al., 2015 $^{216}$ Cs         3.0±2.209         1.4±1.04 a         ±         1.3±0.47 c         Karumakarn et al., 2013 $^{117}$ Cs         0.18±0.03         0.15±0.10.9±0.7e         0.15±0.1.05±0.31 b=504         Wang et al., 1998 $^{117}$ Cs         0.18±0.03         0.15±0.10.19±0.7e         0.15±0.1.05±0.31 b=504         Wang		root	stem	leaf	un-hulled grain	Reference
2137         12.6±3.9(1)         0.79±0.23(3)         3.83±2.91(6)         0.43±0.12(4)         PS           226 Ra         10.7±2.9(1)         0.94±0.60(9)         4.43±2.2(8)         0.49±0.09(4)         PS           137 Cs         1.67.1.86 (2)         0.072-0.128 (2)          0.10-0.31 (2)         PS <sup>40</sup> K         147.457.1.         611±237.a         29±860         72.2±20.0e         Alsaffar et al., 2015 <sup>20</sup> Ra         7.8.1.94         5.041.1.46a         2.32±0.07b         1.42±0.55c         Alsaffar et al., 2015 <sup>20</sup> Ka         6.88±1.38         2.91±0.68a         1.35±0.33b         1.03±0.31c         Alsaffar et al., 2015 <sup>20</sup> Ka         9.9±234         523±230.a         ±         152±56 c         Karumakara et al., 2013 <sup>107</sup> Cs         3.0±2.09         1.4±1.04 a         ±         1.3±0.47 c         Karumakara et al., 2013 <sup>116</sup> Ka         48±14         85±16-290±56c         37±15-240±48f         52±10.310±59d         Wang et al., 1998 <sup>116</sup> Cs         0.18±0.03         0.15±0.1.0.19±0.7e         0.15±0.1.0.56±0.3f         52±0.310±59d         Wang et al., 1998 <sup>116</sup> Cs         0.18±0.03         0.15±0.1.0.19±0.7e         0.15±0.1.0.31±0.56         Askafuz	<sup>40</sup> K	238±59(11)	368±226(11)	404±196(11)	99±12 (11)	PS
226 Ra         10.7±.2 (11)         0.94±0.60(9)         4.43±4.2(8)         0.49±0.09(4)         PS           137 Cs         1.67.1.86 (2)         0.072-0.128 (2)          0.10-0.31 (2)         PS           *0K         1.47.4.57.1         611±237.6         229±86b         72.2±0.0e         Alsaffar et al., 2015           *0K         1.75.1.86 (2)         5.041.1.46a         2.32±.0.7b         1.24±0.5c         Alsaffar et al., 2015           *2 <sup>30</sup> Th         6.88±1.38         2.91±0.68a         1.35±0.33b         1.03±0.5c         Alsaffar et al., 2015           *1 <sup>30</sup> K         199±234         523±230.a         ±         1.52±56 c         Karunakara et al., 2013           *1 <sup>30</sup> Cs         0.8±0.03         0.15±0.1.0.19±0.7e         3.7±1.240.4t         5.2±1.0.310±59d         Wag et al., 1998           *1 <sup>30</sup> Cs         0.8±0.03         0.15±0.1.0.9±0.7e         0.15±0.1.0.5±0.3f         5.2±10.310±59d         Wag et al., 1998           *1 <sup>30</sup> Cs         0.8±0.03         0.15±0.1.0.9±0.7e         0.15±0.1.0.5±0.3f         5.2±10.310±59d         Wag et al., 1998           *1 <sup>30</sup> Cs         0.8±0.03         0.15±0.1.0.9±0.7e         5.2±0.1.0.5±0.3f         5.2±0.310±59d         Wag et al., 1998           *1 <sup>30</sup> Cs         0.8±0.03         0.15±0.1.0.9±0.7e	<sup>232</sup> Th	12.6±3.9(11)	0.79±0.23(3)	3.83±2.91(6)	0.43±0.12(4)	PS
137 Cs         1.67-1.86 (2)         0.072-0.128 (2)          0.10-0.31 (2)         PS           *%K         147.4±57.1         641±237a         229±86b         72.2±20.0e         Alsaffar et al., 2015           *37Ra         7.841.94         5.041.1,46a         2.32±0,97b         1.420.55c         Alsaffar et al., 2015           *37Ra         7.841.94         5.041.1,46a         2.32±0,97b         1.420.65c         Alsaffar et al., 2015           *37Ra         6.88±1.38         2.91±0.68a         1.35±0.30b         1.03±0.31c         Alsaffar et al., 2015           *4K         199±234         523±230 a         ±         1.52±56 c         Karunakara et al., 2013           *17Cs         0.62:09         1.4±1.04 a         ±         1.3±0.47 c         Karunakara et al., 2013           *4%K         48±14         85±16-290±56c         37±15-240±48f         52±10.310±59d         Wang et al., 1998           *137Cs         0.18±0.03         0.15±0.1.019±0.7e         0.15±0.1.056±0.3f         52±10.310±59d         Wang et al., 1998           *137Cs         0.18±0.03         0.15±0.1.019±0.7e         0.15±0.1.056±0.3f         52±10.310±59d         Wang et al., 1998           *137Cs         0.18±0.03         0.15±0.1.019±0.7e         52±0.0.310±59d	<sup>226</sup> Ra	10.7±2.9(11)	0.94±0.60(9)	4.43±4.22(8)	0.49±0.09(4)	PS
$^{69}$ K         147.4±57.1         641±237a         229±86b         72.2±20.0c         Alsaffar et al., 2015 $^{208}$ Ra         7.8±1.94         5.04±1.46a         2.32±0.97b         1.42±0.55c         Alsaffar et al., 2015 $^{208}$ Ra         7.8±1.94         5.04±1.46a         2.32±0.97b         1.42±0.55c         Alsaffar et al., 2015 $^{208}$ Ka         2.91±0.68a         1.35±0.30t         1.03±0.31c         Alsaffar et al., 2015 $^{408}$ K         199±234         523±230 a         ±         152±56 c         Karunakara et al., 2013 $^{408}$ K         48±10         1.410.4 a         ±         1.3±0.47 c         Karunakara et al., 103 $^{408}$ K         48±14         85±16-290±56c         37±15-240±48f         52±10.310±59d         Wang et al., 1998 $^{1320}$ Ca         0.18±0.03         0.15±0.10.9±0.76         0.15±0.10.36±0.37         52±10.310±59d         Wang et al., 1998 $^{408}$ K         59.046.0-92.21.54c         59.046.0-92.21.54c         Asaduzzaman et al., 15         59.046.0-92.21.54c         Asaduzzaman et al., 15	<sup>137</sup> Cs	1.67-1.86 (2)	0.072-0.128 (2)		0.10-0.31 (2)	PS
$2^{20}$ Ra         7.8±1.94         5.04±1.46a         2.32±0.97b         1.42±0.55c         Alsaffar et al., 2015 $^{235}$ Th         6.88±1.38         2.91±0.68a         1.35±0.33b         1.03±0.31c         Alsaffar et al., 2015 $^{40}$ K         199±234         523±230 a $\pm$ 152±56 c         Karunakaru et al., 2013 $^{40}$ K         48±10 a $\pm$ 1.3±0.47 c         Karunakaru et al., 2013 $^{40}$ K         48±14         8±16=209±56 a         37±15=240±48 f         52±10.310±59d         Wang et al., 1098 $^{110}$ Cs         0.18±0.03         0.15±0.1.019±0.7e         0.15±0.1.05±0.3f         52±10.310±59d         Wang et al., 1098 $^{40}$ K         59±0.05±0.5±0.75         52±0.0310±59d         Wang et al., 1098         59±0.6.0=92.21.54c         Asaduzzaman et al., 15	40K	147.4±57.1	641±237a	229±86b	72.2±20.0c	Alsaffar et al., 2015
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	<sup>226</sup> Ra	7.8⊥1.94	5.04⊥1.46a	2.32⊥0.97b	1.42±0.55c	Alsaffar et al., 2015
$^{40}$ K         199±234         523±230 a         ±         152±56 c         Karunakara et al.,2013 $^{107}$ Cs         3.0±2.09         1.4±1.04 a         ±         1.3±0.47 c         Karunakara et al.,2013 $^{66}$ K         48±14         85±16-290±56 c         37±15-240±48 f         52±10-310±59d         Wang et al., 1998 $^{107}$ Cs         0.18±0.03         0.15±0.1-0.19±0.7 e         0.15±0.1-0.56±0.3 f         52±10-310±59d         Wang et al., 1998 $^{500}$ K         599.06.0-92.21.5.4 c         Asaduzzaman et al., 15         599.06.0-92.21.5.4 c         Asaduzzaman et al., 15	<sup>232</sup> Th	6.88±1.38	2.91±0.68a	1.35±0.33b	1.03±0.31c	Alsaffar et al., 2015
U37Cs         3.0±2.09         1.4±1.04 a         ±         1.3±0.47 c         Karumakara et al.,2013           * <sup>66</sup> K         48±14         85±16-290±56e         37±15-240±48f         52±10-310±59d         Wang et al., 1998 <sup>103</sup> Cs         0.18±0.03         0.15±0.1-0.19±0.7e         0.15±0.1-0.56±0.3f         52±10-310±59d         Wang et al., 1998 <sup>106</sup> K         59.06.0         92.21.54c         Asaduzzaman et al., 19         59.96.0         92.21.54c         Asaduzzaman et al., 19	40K	199±234	523±230 a	±	152±56 c	Karunakara et al.,2013
<sup>40</sup> K         48±14         85±16-290±56e         37±15-240±48f         52±10-310±59d         Wang et al., 1998 <sup>157</sup> Cs         0.18±0.03         0.15±0.1-0.19±0.7e         0.15±0.1-0.56±0.3f         52±10-310±59d         Wang et al., 1998 <sup>157</sup> K         59.06.0-92.21.54c         Asaduzzaman et al., 15         59.96.0-92.21.54c         Asaduzzaman et al., 15	<sup>137</sup> Cs	3.0±2.09	1.4±1.04 a	±	1.3±0.47 c	Karunakara et al.,2013
<sup>137</sup> Cs 0.18±0.03 0.15±0.1.0.19±0.7e 0.15±0.1.0.56±0.3f 52±10.310±59d Wang et al., 1998 <sup>108</sup> K 59.946.0−92.21.54c Asaduzzaman et al., 15 <sup>278</sup> m	<sup>40</sup> K	48±14	85±16-290±56e	37±15-240±48f	52±10-310±59d	Wang et al., 1998
<sup>40</sup> K 59.9±6.0 – 92.2±5.4c Asaduzzaman et al., 19	<sup>137</sup> Cs	0.18±0.03	0.15±0.1-0.19±0.7e	0.15±0.1-0.56±0.3f	52±10-310±59d	Wang et al., 1998
2060	40K				59.9⊥6.0 - 92.2⊥5.4c	Asaduzzaman et al., 1998
	<sup>226</sup> Ra				$1.5{\pm}0.4 - 2.8{\pm}0.7c$	Asaduzzaman et al., 1998

PS: present study, Within the parenthesis is the detected sample numbers <sup>a</sup>:straw, <sup>b</sup>:husk, <sup>c</sup>:grain, <sup>d</sup> polish rice, brown rice, rachis, fine hull, and coarse hull. <sup>e</sup> stem A (<10 cm) and stem B (> 10cm); <sup>f</sup> young and old leaves.



圖 2 核種活度在水稻植體分佈百分率

#### 放射性核種 TF 轉移因子

表 6 為土壤與植體放射性核種 TF 轉移因子,轉移 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轉移至植體各部位,從 表中可以看出稻穗鉀 40 的 TF 值介於 0.128-0.010 之間, 介於國外文獻的 0.087-0.78 之間;稻穗釷系的 TF 值介 於 0.007-0.017 之間,亦介於國外文獻的 0.000026-0.37 之間;而稻穗銫 137 的 TF 值為 0.061,介於國外文獻的 0.0014-0.16 之間。表 7 土壤與水稻植體放射性核種轉移 因子(TF)統計摘錄,圖 3a-3c 分別顯示天然核種鉀 40、 釷系與鈾系水稻植體放射性核種轉移因子(TF)。鉀 40、 釷系與鈾系根的 TF 值無顯著差異,核種最易累計於根 部。鉀 40 根、莖與葉之 TF 值無顯著差異,3 者之 TF 值大於稻穀 TF 值。針系與鈾系之 TF 值莖大於葉再大於 稻穀。

TFs 是根據土壤和水稻各部位中選定的天然核種和 人工核種的活度計算而得。兩個水稻樣品檢測到<sup>137</sup>Cs, 水稻根、莖和稻穀的<sup>137</sup>Cs TFs 平均值分別為 0.31、0.016 和 0.039。根的 TF 明顯高於莖和稻穀的 TF。如表 7 所 示, TFs 與國外研究的<sup>137</sup>Cs 從土壤轉移到根、莖和穀物 的 TFs 值相當。

表 6 土壤與植體放射性核種 TF 轉移因子

ւե արե	部件	TF 轉移因子				
四品	即亚	<b>鉀-40</b>	釷系	鈾系	<b>銫-137</b>	
	根	0.347	0.289	0.318	0.330	
**	莖	0.385	0.018	0.029	0.050	
<b>礁溪</b>	葉	0.445	0.058	0.095	-	
	稻穗	0.162	-	-	0.061	
	根	0.362	0.268	0.290	-	
枯栖	莖	0.570	-	0.008	-	
刺神	葉	0.236	-	-	-	
	稻穗	0.128	0.007	0.011	-	
	根	0.358	0.385	0.452	-	
任从田	莖	0.459	-	-	-	
供伯主	葉	0.374	0.173	0.464	-	
	稻穗	0.190	-	-	-	
	根	0.281	0.241	0.376	-	
十湯田	莖	0.339	0.020	0.041	-	
工得王	葉	0.891	0.034	0.059	-	
	稻穗	0.140	0.010	0.017	-	
	根	0.270	0.143	0.168	-	
四香湾	莖	0.370	-	0.013	-	
白豆庆	葉	0.284	0.013	0.041	-	
	稻穗	0.172	0.005	0.007	-	
	根	0.324	0.297	0.391	-	
黄昏	莖	0.300	-	0.010	-	
1907.1	葉	0.223	-	0.019	-	
	稻穗	0.140	-	-	-	
	根	0.551	0.299	0.274	-	
B.H. 1.	莖	0.336	-	0.007		
1991 1-1	葉	0.560	0.030	0.054	-	
	稻穗	0.140	0.010	-	-	
文獻	糙米	0.087-0.78	0.000026-0.37	-	0.0014-0.16	

表 7 土壤與植體放射性核種 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>137</sup>Cs 之 TF 轉移因子

	root	stem	leaf	un-hulled grain
40K	0.43+0.14 (0.27-0.68)	0.66+0.41(0.26-1.59)	0.71+0.32(0.223-1.171)	0.184+0.056(0.121-0.286)
<sup>232</sup> Th	0.28+0.08 (0.12-0.38)	0.015+0.005(0.012-0.020)	0.080+0.064(0.021-0.173)	0.009+0.002(0.007-0.011)
<sup>226</sup> Ra	0.35±0.07(0.21-0.45)	$0.029 {\pm} 0.017 (0.008 {-} 0.065)$	0.143±0.146(0.019-0.464)	0.018±0.008(0.011-0.029)
<sup>137</sup> Cs	0.28-0.33	0.014-0.019		0.016-0.061

圖 3a 至 3c 顯示了  $^{226}$ Ra、 $^{232}$ Th 和  $^{40}$ K 水稻各部位的 TF 值的盒狀圖。 $^{40}$ K 的平均根、莖、葉和稻穀的 TF 分 別為 0.43±0.14、0.66±0.41、0.71±0.32 和 0.184±0.056。 莖和葉的  $^{40}$ K TFs 明顯高於稻穀(p <0.001)。但是,  $^{232}$ Th 和  $^{226}$ Ra 的 TF 處於不同的模式。根的 TF 顯著高於莖、 葉和穀粒(p <0.001)。

 ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th和 ${}^{226}$ Ra的土壤-稻穀的TFs分別為 (1.21-2.86)×10<sup>-1</sup>,(0.07-0.11)×10<sup>-1</sup>和(0.11-0.29)×10<sup>-1</sup>。對於 ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th和 ${}^{226}$ Ra,平均TFs值分別為(1.84±0.56)×10<sup>-1</sup>,(0.09±0.02)×10<sup>-1</sup>和(0.18±0.08)×10<sup>-1</sup>· ${}^{40}$ K在穀 粒中的TF值高於 ${}^{226}$ Ra、 ${}^{232}$ Th和 ${}^{137}$ Cs(p<0.001)。此結 果與文獻研究一致,因為鉀是稻田生長和地殼中豐富的 養分。本研究中所選放射性核種的TF與文獻中研究的 TFs和國際原子能機構(2010)建議的值相比。在本研究,  ${}^{40}$ K的TFs在研究的TFs範圍內,但高於白米(脫殼稻米) 的TFs。 ${}^{226}$ Ra和 ${}^{232}$ Th的TFs高於大多數報告值,但低於Asaduzzaman等(2015)和Saeed等(2012)的報告值。 在本研究,從土壤獲得的TFs被檢測出未去殼穀物的活 度與土壤活度的比率。未去殼稻穀比去殼稻穀具有更高 的活度,這可能導致未去殼穀物的 TFs 增加。

<sup>226</sup>Ra的稻穀 TF 高於<sup>232</sup>Th,無統計差異(p=0.115)。 然而,土壤中<sup>232</sup>Th 的活度明顯高於<sup>226</sup>Ra 的活度(表 6, p <0.001)。此關係顯示<sup>226</sup>Ra 的吸收能力大於<sup>232</sup>Th 的吸收, 此結果亦與 Alsaffar 等(2015)的研究結果相似。









(c)

圖 3a-3c 天然核種鉀 40、 針系與 鈾系水稻植 體放射性核 種轉移因子(TF)

#### 影響土壤-水稻 TFs 值得因素

土壤-穀物的 TF 對於評估人類攝入的稻米非常重要。 水稻穀粒中放射性核種的累積可能受到多種因素的影響,例如土壤性質、核種化學性質和水稻植物各部位。 在本研究中,利用灌溉水和土壤的特性以及水和土壤的 活度進行了土壤與穀物之間的 TFs 相關性分析。表 8 列 出具有所選參數的<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra 的 TF 的相關係數。 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra 的 TF 與水和土壤特性無顯著相關性 (p> 0.05), 但<sup>226</sup>Ra 的 TF 與土壤 pH 顯著負相關(p = 0.018)。 <sup>226</sup>Ra 和<sup>232</sup>Th 的 TF 與土壤 pH 顯著負相關.<sup>137</sup>Cs 的 TFs 為2個樣品,未進行相關分析。

在本研究中,取樣地點分布在台灣各地,其地質成 分是變化的。另外,灌溉水為不同的來源,其水性質是 不同的。因此,不同的水、土特性和地質環境導致土壤 與水稻的 TFs 與水土特性的相關性很小。雖然,稻米的 <sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 和 <sup>40</sup>K 的 TF 受土壤 OM、pH、CEC 和 EC 的影響(Alsaffer et al., 2015)。 TFs 取決於土壤特性,取 決於特定場地。

表 8 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 的 TF 與水土壤的特性及水中 <sup>40</sup>K 活度之間的相關係數

Parameters	<sup>40</sup> K (n=11)	<sup>232</sup> Th (n=4)	<sup>226</sup> Ra (n=4)
pH_water	0.37	-0.45	0.13
EC_water	-0.21	0.13	-0.45
SS_water	-0.29	-0.81	-0.61
TS_water	-0.15	-0.18	-0.84
COD_water	-0.09	0.09	0.26
pH <sub>soil</sub>	-0.16	-0.08	-0.98*
EC_soil	-0.29	0.37	-0.81
OM soil	0.14	-0.43	0.27
CEC soil	0.28	-0.66	0.19
Sand soil	0.37	-0.27	0.86
Clay soil	0.06	-0.49	0.27
Silt soil	-0.57	0.44	-0.85
$^{40}K_{water}$	-0.44	-0.10	-0.20

<sup>\*</sup>p <0.05

一般土壤-穀物的 TF 假設與土壤活度呈線性關係, 這意味著在變化的土壤活度下 TFs 保持恆定。然而,本 研究顯示,土壤-穀物的 TFs 與土壤放射性核種活度呈非 線性關係。在本研究中,如圖 3 所示,  $^{40}$ K 和  $^{226}$ Ra 的 TFs 與相應的土壤活度顯著負相關( $^{40}$ K, p < 0.001,  $^{226}$ Ra, p = 0.024)。總共4 個樣品的  $^{232}$ Th 的 TF 與相應的  $^{232}$ Th 土壤活度沒有相關性。但是,當排除一個離異值 TF 時, 其他三個樣品的 TF 與  $^{232}$ Th 土壤活度具有極強的負相關 性(r = 0.97, p = 0.062)。土壤活度的負相關與 Karunakara 等(2013)研究一致。結果表明,穀物中的放射性核種活 度與土壤活度沒有線性關係。因此, TF 是一個可變參數, 顯然與土壤中的放射性核種活度無關(Nisbet and Woodman, 2000)。



圖 3 TFs 與 <sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 之對應土壤活度線性關係

#### 市售稻米放射性活度

表 9 列出從當地市場收集的稻米樣本中 <sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 放射性核種的活度,活度基於乾重。本地和進

口稻米分別為24和6個樣本。在本地和進口樣本之間, <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 的活度無顯著差異(p=0.20-0.93)。總 樣本檢測到<sup>40</sup>K,範圍在13.7 至74.1 Bq/kg之間,範圍 為 5.4 倍。大約 53%的樣本檢測到 226 Ra,範圍在 0.84 至 1.87 Bq/kg 之間,範圍是 2.6 倍。大約 30%的樣本檢 測到<sup>232</sup>Th,範圍在 0.52 至 1.33 Bq/kg 之間,範圍是 2.2 倍。對於<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra,總樣本的平均活度分別為 24.05±10.21、1.00±0.28 和 1.15±0.25 Bq/kg。稻米樣品中 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 的放射性活度差異不顯著(p=0.18)。預計 稻米樣品中會存在天然放射性核種(Asaduzzaman et al., 2015; Stark et al., 2017)。由於其天然核種,預計將在所 有樣品中檢測到 40K (Al-Hamarneh et al., 2016; Alsaffar et al., 2015; Asaduzzaman et al., 2014; Asaduzzaman et al., 2015; Aswood et al., 2017; Hussein, 2019; James et al., 2011; Karunakara et al., 2013; Saeed et al., 2012; Salih, 2018)。然而,文獻中研究一些樣本中檢測到<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra 的頻率以及食品樣品中檢測到<sup>232</sup>Th和<sup>226</sup>Ra的頻率不高 (Alrefae and Nageswaran, 2013; Alsaffar et al., 2015; Asaduzzaman et al., 2014; Asaduzzaman et al., 2015)。表 9 還列出文獻中研究的<sup>40</sup>K、<sup>226</sup>Ra 和<sup>232</sup>Th 稻米的活度。 報告的稻米樣本活度在全球範圍內變化。與文獻中研究 的活度相比,本研究中的 40K 活度較低。例如, Asaduzzaman 等(2015)研究在馬來西亞三個地區測得的 稻米樣品中<sup>40</sup>K的平均活度為 59.9±6.0 至 92.2±5.4 Bg/kg。 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 的平均活度與研究的活度相當(Alrefae and Nageswaran, 2013; Alsaffar et al., 2015), 但低於馬來西亞 的測量值(Asaduzzaman et al., 2015)。但是, <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 的活度可能不相同,例如 Saeed 等(2012)研究的 226Ra 和 <sup>232</sup>Th 的活度分別為 0.53-2.82 和 35-65, 高於本研究 中的活度。

 ${}^{40}$ K 比  ${}^{232}$ Th 和  ${}^{226}$ Ra 具有更高的活度和更寬的範圍, 因為  ${}^{40}$ K 是水稻生長和地殼中豐富的養分(Alrefae and Nageswaran, 2013; Asaduzzaman et al., 2014; Asaduzzaman et al., 2015; Khandaker et al., 2016; Saeed et al., 2012; Salih, 2018)。 ${}^{40}$ K 的變化比  ${}^{232}$ Th  ${}^{226}$ Ra 高。 這可能是由於土壤和水稻的位置和物理特性、氣候條件 和數量以及土壤中用於提高農作物產量的肥料種類不 同(Khandaker et al., 2013)。水稻的活度取決於土壤中的 放射性核種含量,其對水稻植物的可利用性以及水稻植 物種類的代謝特徵(Alrefae and Nageswaran,, 2013; Asaduzzaman et al., 2015)。

表 9 本地和進口稻米樣本中 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra(Bq / kg) 的活度和國外文獻值

Samples and reference	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)
Local (PS) <sup>a</sup>	25.0±11.1	1.07±0.27	1.16±0.28
	(13.7-74.1, n=24)	(0.52-1.33, n=7)	(0.84-1.87, n=12)
Import (PS) <sup>a</sup>	20.3±3.9	0.77±0.23	1.15±0.14
	(14.0-24.8, n=6)	(0.61-0.93, n=2)	(1.00-1.28, n=4)
Wang et al., 1998	52±10 <sup>a</sup> , 67±14 <sup>b</sup>	-	-
Yu and Mao, 1999	15	-	-
Hosseini et al., 2006	7-50	0.02-0.30	-
Saeed et al., 2011	65 110	35 65	0.53-2.82
Alrefac and Nageswaran, 2013	33-101	0.32-0.62	-
Alsaffar et al., 2015	72.2±20.0	$1.03\pm0.31$	$1.42 \pm 0.55$
Asaduzzaman et al., 2015	59.9±6.0 - 92.2±5.4	3.6±1.4 - 7.5±2.7	1.5±0.4 - 2.8±0.7
Karunakara et al., 2013	151.8±55.6	-	-
Wang et al., 1998	52±10 <sup>a</sup> , 67±14 <sup>b</sup>	-	-
Salih, 2018	618.1	51.8	86.1
Humania 2010	161,200,0117,00	0.60.4.66.60.460	0.55 5.70 (2.50)

<sup>a</sup> (PS) Present study, <sup>b</sup> Polish rice, <sup>c</sup> Brown rice, – Did not measured.

#### 放射性影響

每日攝入量和年有效劑量每天攝入的放射性核種 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 被認為是通過食用稻米而在人體中累 積(Alrefae and Nageswaran, 2013; Asaduzzaman et al., 2014; Asaduzzaman et al., 2015; Balonov et al., 2010; Barnett et al., 2009; EPA, 1999; Hussein, 2019; Jackson, 1996; Part, 2011; Radiation and Annex, 2000; Salih, 2018)。 考慮到台灣每年人平均稻米消費量為 45.6 公斤(農委會, 2019)。<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 對於總樣本而言,每天的放 射性活度攝入量分別為  $3.00\pm1.28 \times 0.038\pm0.061 \times 0.077\pm$ 0.066 Bq/d。每日攝入量的順序為 <sup>40</sup>K> <sup>232</sup>Ra> <sup>232</sup>Th, 與 稻米樣本中的活度相似。

表 10 列出  $^{40}$ K、 $^{232}$ Th 和  $^{226}$ Ra 的年有效劑量。攝入  $^{40}$ K、 $^{232}$ Th 和  $^{226}$ Ra 的放射性核種對水稻總有效年劑量分 別為 6.80、10.53 和 14.74  $\mu$  Sv/y、即  $^{232}$ Ra >  $^{232}$ Th >  $^{40}$ K(p <0.05)。本地和進口稻米的年有效劑量分別為 17.7 和 18.2  $\mu$  Sv/y。

對於  $^{40}$ K、<sup>232</sup>Th 和  $^{226}$ Ra,全球平均攝入有效劑量分 別為 220、170 和 120  $\mu$  Sv/y,而 UNSCEAR (2000)報導 累計的總有效劑量為 290  $\mu$  Sv/y。研究樣本中所有檢測 到的放射性核種的年有效劑量遠低於報告的限值 (UNSCEAR, 2000)。在本地樣本中發現的總有效劑量的 最高值為 38.8  $\mu$  Sv/y比 UNSCEAR(2000)累積的數量少 一個數量級。年有效劑量與 Alrefae and Nageswaran (2013)研究的順序相同,但低於 Asaduzzaman 等(2013) 的研究(表 10)。

#### 終生癌症風險評估

最近,癌症被稱為生命威脅疾病,由於各種原因, 該疾病在世界範圍內呈上升趨勢(Alsaffar et al., 2015; Asaduzzaman et al., 2015; Keum et al., 2007; Leung and Shang, 2003; Tsukada et al., 2002a; Tsukada et al., 2002b; Uchida et al., 2009; Wang et al., 1998)。原因之一是輻射對 生物細胞的影響(Alsaffar et al., 2015; Asaduzzaman et al., 2015; Choi et al., 2011; Saeed et al., 2012; Salih, 2018; Uchida et al., 2009; Wang et al., 1998)。因此, 人們努力評 估終生癌症風險(ELCR)(Alrefae and Nageswaran, 2013; Asaduzzaman et al., 2015; Hussein, 2019)。表 10 列出了研 究的放射性核種的 ELCR 值。對於<sup>40</sup>K,檢測到的樣本 的 ELCR 值從 3.0x10<sup>-5</sup> 到 1.61x10<sup>-4</sup> 等。對於 <sup>226</sup> Ra, ELCR 從 2.96x10<sup>-5</sup> 至 6.58x10<sup>-5</sup>。對於 <sup>232</sup>Th, ELCR 從 0.47x10<sup>-5</sup> 至 1.20x10<sup>-5</sup>。檢測到的放射性核種 ELCR 的總範圍為 3.04x10<sup>-5</sup>至 21.0x10<sup>-5</sup>,範圍為 6.9 倍。總 ELCR 比一般 的放射風險建議的 ELCR 限值 10-3 低約一個數量級 (Asaduzzaman et al., 2015; Aswood et al., 2017; Jackson, 1996; Part, 2011; Patra et al., 2013; Salih, 2018; Stark et al., 2017; UNSCEAR, 2000), 並且低於 Asaduzzaman 等 (2015)研究的食用稻米 ELCR 值。

表 10 估計年有效劑量、總有效劑量和因食用稻米 <sup>40</sup>K、 <sup>226</sup>Ra 和 <sup>232</sup>Th 而造成的終生癌症風險以及國外文獻值

Sample,		Eefr (µ	Sv/y)			ELCF	र (10°)	
references								
	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	$E_{\text{eff-T}}$	<sup>40</sup> K	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	ELCR-T
Local, Range	3.9-20.9	5.5-14.0	10.7-23.9	5.0-23.9	2.98-16.1	0.47-1.20	2.96-6.58	3.80-21.0
Average	7.06	11.24	14.78	17.7	5.42	0.97	4.07	7.73
Imported,	4.0-7.0	6.4-9.8	12.8-16.3	4.0-28.9	3.04-5.38	0.55-0.84	3.52-4.50	3.04-9.64
Range								
Average	5.74	8.08	14.62	18.18	4.40	0.69	4.03	7.32
Asaduzzaman	35.6	78.3-166.3	39.5-74.9		25-39	13-37	10-19	
et al., 2015	-54.8							
Alrefae and	23	8		33				
Nageswaran,								
2013								
Salih, 2018	12.36	39.33	79.58					
INSCEAR	170	120	120	200				

# IV. 結論

本研究基於台灣自然田間條件對於土壤向水稻的 放射性核種轉移因子的系統研究。 ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th、 ${}^{226}$ Ra和  ${}^{137}$ Cs下測得的土壤活度分別為 591±134、45.4±10.2、30.9 ±6.6、5.57±1.29 Bq/kg。此外, ${}^{40}$ K、 ${}^{232}$ Th、 ${}^{226}$ Ra之間存 在正相關關係,而在稻米種植前後均無顯著差異,這表 明短期的農耕操作不會改變土壤核種的活度。同樣,在 水稻各部位(根、莖、葉和未去殼稻穀)中, ${}^{226}$ Ra、 ${}^{232}$ Th 和 ${}^{40}$ K 的平均活度分別在 1.5±0.4 至 2.8±0.7、3.6±1.4 至 7.5±2.7 和 59.9±6.0 至 92.2±5.4 Bq/kg。 ${}^{226}$ Ra 和 ${}^{232}$ Th 活 度在水稻植體的分布規律為:根>葉、莖和稻穀,而 ${}^{40}$ K 則依據葉和莖>根和稻穀減少的趨勢。這些結果顯示, 所選放射性核種的吸收量取決於植物各部位,反映了它 們在各個部位的活動性和累積。

<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th、<sup>226</sup>Ra 和 <sup>137</sup>Cs 的平均土壤-穀物 TFs 分 別為( $1.84\pm0.56$ )× $10^{-1}$ ,( $0.09\pm0.02$ )× $10^{-1}$ 和( $0.18\pm0.08$ ) ×10<sup>-1</sup>和 0.039。<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra 的穀物 TFs 與水和土 壤特性及活度無關,這可能是由於水和土壤特性以及地 質條件的變化所致。40K和 226Ra 的 TFs 與相應的土壤活 度呈顯著負相關,類似於研究報告的土壤-植物系統中的 TFs。這項工作的成果將有助於建立 TF 的基準數據庫。 這項研究還測量了從當地市面上採購的稻米樣品中 <sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 和 <sup>40</sup>K 放射性核種的活度。對於 <sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和 <sup>226</sup>Ra,總樣品的平均活度分別為 24.05±10.21、1.00± 0.28 和 1.15±0.25 Bq/kg。40K、232Th 和 226Ra 的估計放射 活度每日攝入量分別為 3.00±1.28、0.038±0.061、0.077± 0.066 Bq/d。攝入<sup>40</sup>K、<sup>232</sup>Th 和<sup>226</sup>Ra 的放射性核種的總 水稻年有效劑量分別為 6.80、10.53 和 14.74 µ Sv/y, 據 估計,通過攝食稻米,總年有效劑量為17.7和18.2 μ Sv/y。本地和進口稻米,發現終身癌症(死亡率)風險低 於放射風險可接受的 10-3 限值。因此,這項研究顯示, 從食用稻米攝入的放射性核種對公共衛生沒有構成威 脅。這項工作的成果將有助於建立一個基準數據庫,說 明食用稻米或其他食品對普通社區造成的放射性輻 射。

# 參考文獻

 Al-Hamarneh, I.F., Alkhomashi, N., Almasoud, F.I., 2016. Study on the radioactivity and soil-to-plant transfer factor of 226Ra, 234U and 238U radionuclides in irrigated farms from the northwestern Saudi Arabia. Journal of environmental radioactivity 160, 1-7.

- [2] Alrefae, T., Nageswaran, T.N., 2013. Radioactivity of long lived gamma emitters in rice consumed in Kuwait. Journal of the association of Arab universities for basic and applied sciences 13, 24-27.
- [3] Alsaffar, M. S., Jaafar, M. S., Kabir, N. A., and Ahmad, N., 2015, "Distribution of <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, and <sup>40</sup>K in rice plant components and physico-chemical effects of soil on their transportation to grains," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, Vol. 8, No. 3, pp. 300-310.
- [4] Asaduzzaman, K., Khandaker, M., Amin, Y., and Mahat, R., 2015, "Uptake and distribution of natural radioactivity in rice from soil in north and west part of peninsular malaysia for the estimation of ingestion dose to man," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 76, No. pp. 85-93.
- [5] Asaduzzaman, K., Khandaker, M.U., Amin, Y.M., Bradley, D., Mahat, R., Nor, R.M., 2014. Soil-to-root vegetable transfer factors for 226Ra, 232Th, 40K, and 88Y in Malaysia. Journal of environmental radioactivity 135, 120-127.
- [6] Aswood, M.S., Jaafar, M.S., Salih, N., 2017. Estimation of annual effective dose due to natural radioactivity in ingestion of vegetables from Cameron Highlands, Malaysia. Environmental Technology & Innovation 8, 96-102.
- [7] Avery, S. V., 1996, "Fate of caesium in the environment: distribution between the abiotic and biotic components of aquatic and terrestrial ecosystems," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 30, No. 2, pp. 139-171.
- [8] Balonov, M., Barnett, C., Belli, M., Beresford, N., Berkovsky, V., Bossew, P., Boyer, P., Brittain, J., Calmon, P., Carini, F., 2010. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environment. IAEA.
- [9] Barnett, C., Belli, M., Beresford, N., Bossew, P., Boyer, P., Brittain, J., Calmon, P., Carini, F., Choi, Y., Ciffroy, P., 2009. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. IAEA-TECDOC-1616. IAEA.
- [10] Choi, Y.-H., Lim, K.-M., Jun, I., Keum, D.-K., Han, M.-H., Kim, I.-G., 2011. Transport behavior and rice uptake of radiostrontium and radiocesium in flooded paddy soils contaminated in two contrasting ways. Science of the total environment 412, 248-256.
- [11] Fujimura, S., Sakuma, Y., Sato, M., Saito, T., Yoshioka, K., Yamauchi, T., Sato, N., and Eguchi, S., 2015, "Difference in Cs-137 concentration of brown rice between the years of 2011 and 2012 in Fukushima Prefecture," *Journal of Radioanalytical* and Nuclear Chemistry, Vol. 303, No. 2, pp. 1147-1150.
- [12] Hussein, A.M., 2019. Gamma Dose Measuring for the Rice Sample in Slemani City Markets, Kurdistan Region–Iraq. Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences 27, 1-7.
- [13] Jackson, P., 1996. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 5 compilation of ingestion and inhalation dose

coefficients (ICRP Publication 72). IOP Publishing.

- [14] James, J.P., Dileep, B., Ravi, P., Joshi, R., Ajith, T., Hegde, A., Sarkar, P., 2011. Soil to leaf transfer factor for the radionuclides 226Ra, 40K, 137Cs and 90Sr at Kaiga region, India. Journal of environmental radioactivity 102, 1070-1077.
- [15] Karunakara, N., Rao, C., Ujwal, P., Yashodhara, I., Kumara, S., Ravi, P., 2013. Soil to rice transfer factors for 226Ra, 228Ra, 210Pb, 40K and 137Cs: a study on rice grown in India. Journal of environmental radioactivity 118, 80-92.
- [16] Keum, D.-K., Lee, H., Kang, H.-S., Jun, I., Choi, Y.-H., and Lee, C.-W., 2007, "Predicting the transfer of <sup>137</sup>Cs to rice plants by a dynamic compartment model with a consideration of the soil properties," *Journal of environmental radioactivity*, Vol. 92, No. 1, pp. 1-15.
- [17] Khandaker, M.U., Nasir, N.L.M., Asaduzzaman, K., Olatunji, M.A., Amin, Y.M., Kassim, H.A., Bradley, D., Jojo, P., Alrefae, T., 2016. Evaluation of radionuclides transfer from soil-to-edible flora and estimation of radiological dose to the Malaysian populace. Chemosphere 154, 528-536.
- [18] Khandaker, M.U., Wahib, N.B., Amin, Y.M., Bradley, D., 2013. Committed effective dose from naturally occuring radionuclides in shellfish. Radiation Physics and Chemistry 88, 1-6.
- [19] Krouglov, S., Filipas, A., Alexakhin, R., and Arkhipov, N., 1997, "Long-term study on the transfer of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr from Chernobyl-contaminated soils to grain crops," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 34, No. 3, pp. 267-286.
- [20] Lakshmanan, A. and Venkateswarlu, K., 1988, "Uptake of uranium by vegetables and rice," *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 38, No. 1-2, pp. 151-155.
- [21] Leung, J., Shang, Z., 2003. Uptake of 137Cs and 90Sr in rice plants. Health physics 84, 170-179.
- [22] Linsalata, P., 1994, "Uranium and thorium decay series radionuclides in human and animal foodchains—a review," *Journal of Environmental Quality*, Vol. 23, No. 4, pp. 633-642.
- [23] Part, N.G., 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources International Basic Safety Standards.
- [24] Patra, A., Mohapatra, S., Sahoo, S., Lenka, P., Dubey, J., Tripathi, R., Puranik, V., 2013. Age-dependent dose and health risk due to intake of uranium in drinking water from Jaduguda, India. Radiation protection dosimetry 155, 210-216.
- [25] Radiation, U.N.S.C.o.t.E.o.A., Annex, B., 2000. Exposures from natural radiation sources. United Nations, New York.
- [26] Saeed, M., Yusof, S. S., Hossain, I., Ahmed, R., Abdullah, H. Y., Shahid, M., and Ramli, A., 2012, "Soil to rice transfer factor of the natural radionuclides in Malaysia," *Rom J Phys*, Vol. 57, No. 9-10, pp. 1417-1424.
- [27] Salih, N.F., 2018. Determination of natural radioactivity and radiological hazards of 226Ra, 232Th, and 40K in the grains available at Penang Markets, Malaysia, using high-purity germanium detector. ARO-The Scientific Journal of Koya

University 6, 71-77.

- [28] Stark, K., Goméz-Ros, J.M., i Batlle, J.V., Hansen, E.L., Beaugelin-Seiller, K., Kapustka, L.A., Wood, M.D., Bradshaw, C., Real, A., McGuire, C., 2017. Dose assessment in environmental radiological protection: State of the art and perspectives. Journal of environmental radioactivity 175, 105-114.
- [29] Tsukada, H., Hasegawa, H., Hisamatsu, S. i., and Yamasaki, S. i., 2002, "Transfer of <sup>137</sup>Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 59, No. 3, pp. 351-363.
- [30] Tsukada, H., Hasegawa, H., Hisamatsu, S., Yamasaki, S., 2002a. Rice uptake and distributions of radioactive 137Cs, stable 133Cs and K from soil. Environmental Pollution 117, 403-409.
- [31] Tsukada, H., Hasegawa, H., Hisamatsu, S.i., Yamasaki, S.i., 2002b. Transfer of 137Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan. Journal of Environmental Radioactivity 59, 351-363.
- [32] Uchida, S., Tagami, K., Shang, Z., Choi, Y., 2009. Uptake of radionuclides and stable elements from paddy soil to rice: a review. Journal of environmental radioactivity 100, 739-745.
- [33] UNSCEAR, 2000. effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York, 453-487.
- [34] USEPA, 1999. Environmental Protection Agency: Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides, Federal Guidance Report N 13. EPA 402-R-99-001, Office of Radiation and Indoor Air.
- [35] Van Bergeijk, K., Noordijk, v. H., Lembrechts, J., and Frissel, M., 1992, "Influence of pH, soil type and soil organic matter content on soil-to-plant transfer of radiocesium and-strontium as analyzed by a nonparametric method," *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 15, No. 3, pp. 265-276.
- [36] Wang, J.-J., Wang, C.-J., Huang, C.-C., Lin, Y.-M., 1998. Transfer factors of 90Sr and 137Cs from paddy soil to the rice plant in Taiwan. Journal of environmental radioactivity 39, 23-34.

# 應用放射性核種檢測技術探討台灣地區香蕉鉀 40 含量之差異分析 Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號:108-NU-E-020-003-NU 計畫主持人:林聖淇 e-mail:linsc0329@ntu.edu.tw 計畫共同主持人:張春梅 計畫參與人員:洪浩珅、黃韋翔 執行單位:國立屏東科技大學災防中心

#### 摘要

香蕉是一種需要大量鉀元素的經濟作物,本研究的 目標是透過台灣地區不同品種之香蕉植體,與所對應之 土壤與環境水體,探討不同品種香蕉、土壤與環境水體 樣本之鉀元素與放射性鉀-40 活度的關係。根據研究檢 測數據得知香蕉植體放射性鉀-40 活度以香蕉皮 1,838±269 Bq/kg(平均值±標準差,n=40) 為最高,其次 是香蕉葉的 1,174±423 Bq/kg(平均值±標準差,n=40),而 香蕉果肉的活度 457±146 Bq/kg(平均值±標準差, n=40) 為最低;其中香蕉葉的放射性鉀 40 活度分佈的變異性 最大,香蕉皮則是最小。在所有香蕉植體(香蕉葉、香蕉 皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度與對應 XRF 鉀檢 測濃度值具有顯著的線性關係,本研究結果得知香蕉植 體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度檢 測值與所對應 XRF 鉀檢測濃度值不因為香蕉植體部位 的不同而有所差異。利用高純鍺偵檢器所測得的香蕉植 體放射性鉀-40 活度來推估理論鉀濃度值的數據資料得 知,該值與香蕉植體 XRF 鉀濃度值相當,兩者的線性方 程式為 y3=1.016x3+525.6 (R<sup>2</sup>=0.993, n=120);而土壤放 射性鉀-40 活度推估鉀濃度的結果明顯與土壤 XRF 鉀濃 度差異甚大,原因可能是土壤樣本的基質組成遠比香蕉 植體(香蕉果肉、葉、皮)要來得複雜,使得在土壤的 XRF 檢測鉀濃度值受到基質的干擾遠大於香蕉植體,因而導 致上述兩者的線性相關性產生差異的現象。本研究得知 利用這種非破壞性的高純鍺偵檢器檢測技術,將香蕉植 體所含放射性鉀-40 推估香蕉的鉀濃度分佈的方法,可 以進一步確認香蕉植體鉀濃度的實際流佈現況。對於日 後香蕉施鉀肥用量的評估與栽種方法的改善,提供另一 種安全又可靠的研究方法。

關鍵詞:香蕉、放射性鉀-40、高純鍺偵檢器。

#### Abstract

Banana is an economic crop that requires a lot of potash fertilizer. The research goal of this study is to explore the relationship between potassium and radioactive potassium-40 activity in different varieties of bananas, soil and environmental water samples through different varieties of banana plants in Taiwan and the corresponding soil and environmental water bodies. According to the research data, it is known that the activity of radioactive potassium-40 in banana plants is  $1,838\pm269$  Bq/kg (mean $\pm$ standard deviation, n=40) of banana peel is the highest, followed by banana leaves at  $1,174\pm423$  Bq/kg (The average value  $\pm$  standard deviation, n=40), and the banana pulp activity of  $457 \pm 146$ 

Bq/kg (mean value  $\pm$  standard deviation, n=40) is the lowest. Among them, the variability of the activity distribution of radioactive potassium 40 in banana leaves is the largest, and its corresponding in the banana peels is the smallest. In all banana plants (banana leaves, banana peels and banana pulp), the K40 activity has a significant linear relationship with the corresponding XRF K detection concentration value. The results of this study show that the radioactive potassium-40 activity detection value of the banana plants, correspondding XRF potassium detection concentration value are not different due to the different banana plant parts. Using the radioactive potassium-40 activity value of banana implants measured by the high-purity germanium detector to estimate the theoretical potassium concentration data, it is known that these values are equivalent to the potassium concentration of banana plants detected by XRF, and their linear equation is v<sub>3</sub>=1.016x<sub>3</sub>+525.6 (R<sup>2</sup>=0.993, n=120). The matrix composition of the soil sample is much more complicated than that of banana plants, which makes the XRF detection of potassium in the soil much more interfered by the matrix than banana plants, which leads to the correlation between the two Phenomena that produce different differences. This study learned that using this non-destructive high-purity germanium detector detection technology to estimate the potassium concentration distribution of the banana plant radioactive potassium-40 contained in the banana plant can further confirm the actual potassium concentration of the banana plant Current status of the spread. It provides another safe and reliable research method for the evaluation of the amount of potassium fertilizer applied to bananas and the improvement of planting methods in the future.

**Keywords:** Banana; Radioactive potassium-40; High-purity germanium detector.

# I. 前言

鉀在自然界中只以化合物形式存在。在雲母、鉀長 石等矽酸鹽中都富含鉀。鉀在地殼中的含量約為2.09%, 居第七位。在海水中以鉀離子的形式存在,含量約為 0.1%。鉀在海水中含量比鈉離子少的原因是由於被土壤 和植物吸收多。鉀也是人體所有組織所需的必需礦物質 有時將其稱為電解質,因為它帶有少量電荷,可以激活 各種細胞和神經功能。在動植物體內也含有鉀。正常人 體內約含鉀175克,其中98%的鉀貯存於細胞液內,是 細胞內最主要的陽離子。

香蕉是一種需要大量鉀元素的經濟作物,本研究的

目標是希望透過台灣地區不同品種(至少3個品種)之香 蕉植體樣本(含莖葉、果實等),與所對應之土壤與環境水 體樣本的採集工作,透過應用高純鍺放射性核種檢測技 術,探討不同品種香蕉、土壤與環境水體樣本之鉀元素 與放射性鉀40的比例關係,讓社會大眾了解放射性鉀 40元素在台灣地理環境與不同香蕉品種植體間的流佈 現況。主要工作項目是著重針對加馬(Gamma)放射性核 種定性與定量用於香蕉檢測技術之開發,考量香蕉部分 植體內的糖度過高,達到完全脫水難度高,採用新鮮植 體均勻化後進行放射性檢測工作。於此同時,環境樣品 一併進行採樣與分析工作,以利後續探討放射性鉀40元 素在環境-植體間的流佈。

鉀是香蕉營養的關鍵元素,最早對香蕉植物汁液進 行分析的參考資料表明植物中鉀的含量很高,而此觀察 已被許多國家證實(Twyford, 1967)。土壤鉀的可利用性 的增加以四種形式存在,文獻資料對每種形式的大約含 量估算如下:礦物質(5000 至 25000 ppm)、不可交換(50 至 750 ppm)、 可交換的鉀(40 至 600 ppm)以及溶解態的 鉀(1 至 10 ppm)。香蕉需要大量鉀肥的農作物,每公頃 需要近1500公斤 K2O。 以印度香蕉為例,其每年生產 香蕉所需要近 60 萬噸的 K2O,換算成鉀肥,即每年約 100 萬噸的 KCl 或 120 萬噸的 K2SO4。在一般天然的香 蕉種植系統中,土壤主要礦物質的風化可能是鉀,鈣, 鎂,磷和微量元素等養分的主要來源。 營養儲量取決於 土壤母岩組成和風化階段。 以喀麥隆的火山灰土壤為 例,高的 Ca 和 Mg 儲量 (與 Caplagioclases,輝石和橄 欖石的存在有關)會影響香蕉的營養,特別是涉及鉀的 陽離子平衡(Delvaux, 1989)。如果土壤中鉀的釋放速率 與植物對鉀的季節性需求不匹配,則會導致鉀的突然短 缺。在這種情況下,香蕉會因為從葉片中將鉀輸送至香 蕉果肉來滿足生長中的需求,但是香蕉葉片系統可能因 此突然崩潰(Turner and Bull, 1970)。

鉀在許多食物中天然存在,並作為補充。它在體內 的主要作用是幫助維持細胞內正常的液體水平。鈉是其 對應物,可維持細胞外部正常的液位。鉀還有助於肌肉 收縮並支持正常血壓。香蕉等效劑量(Banana Equivalent Dose, BED)是一種非正式的電離輻射暴露劑量單位,旨 在向大眾比較通常的輻射劑量與吃下一個平均尺寸香 蕉所受到的天然放射性核素輻射劑量,香蕉包含著天然 放射性的鉀-40 (40K)。1香蕉等效劑量=0.0778 微西弗。 由於人體對鉀的新陳代謝保持了鉀的總量平穩,因此從 香蕉等食物攝入的鉀並不會在人體內蓄積。因此攝入鉀 -40 的放射性劑量也不會在人體內蓄積(Eisenbud et al., 1997; US EPA, 1999)。

# Ⅱ. 材料與採樣方法

屏科大防災中心轄下的『輻射災害放射性分析備援 實驗室』已於民國 105 年初步建置完成,在原能會核技 處與輻射偵測中心的支持下,陸續於民國 106 年與 107 年添購 2 套加馬能譜儀(Gamma-Ray Spectrometer, GRS) 搭配純鍺偵檢器(High Purity Germanium Detector, HPGe), 作為加馬(Gamma)放射性核種定性與定量檢測技術之開 發與提升的基礎。本研究所採集的樣本種類包含灌溉水、 施用肥料、土壤、香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉等;採集時間涵蓋4月、5月、6月與7月;採集地點位於東部(3塊 農地)、中部(3塊農地)與南部(4塊農地),如圖2-2所示; 香蕉品種包含北蕉、新北蕉、北蕉1、北蕉2、台蕉1(烏 龍蕉)、台蕉2、台蕉5、台蕉7與寶島蕉等,計9種。 其中,土壤、香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉樣本分別採集40 個。本研究試驗流程示意圖,如圖2-1所示。



圖 2-1 研究試驗流程示意圖

本研究所採集的香蕉植體樣本的地區,受限於香蕉 屬於熱帶植物,其生長緯度受限,絕大部分都位於中部 以南,因此採集香蕉植體的地點分別位於東部(3 塊農地)、 中部(3 塊農地)與南部(4 塊農地),如圖 2-2 所示。香蕉 植體與土壤樣本收集的時間與地區,如表 2-1 所示。





本研究於 2019 年 4 月至 7 月間,在各縣市的香蕉 園農地採取整株的香蕉植體後,將該樣品在溫室中風乾 約一個月,接著用剪刀將乾燥的香蕉稈切成 1-2cm 的碎 片。為了確定土壤與香蕉植體間關注元素的關係(如鉀), 在收獲樣品植物的相同位置收集 5-20cm 深的土壤樣品 作為後續分析之用。所有樣品的收集時間均為台灣夏季 以前完成(2019 年),並將植物樣品在 70℃下烘箱乾燥 4 小時,直至達到恆重並使用不銹鋼球磨機研磨成細粉末。 對於在植物根部 (5-20cm 深)收集的土壤樣品,手工除 去石塊,礫石和葉子,然後將樣品在陽光下露天干燥 5 天,然後在 105℃烘箱乾燥 2 小時。將這些製備的植體 各部位的樣品與土壤樣本密封在 50 mL 氣密性聚乙烯容 器中稱重,儲存 40 天,並利用加馬能譜儀(GRS)搭配純 鍺偵檢器(HPGe)進行放射性鉀-40 的活度分析。



圖 2-3 香蕉植體與土壤樣本前處理示意圖

本研究使用的高純鍺偵檢器是採用 40%相對效率 的 p 型 HPGe 檢測器,讓樣品通過  $\gamma$  光譜法測定樣品 中 K-40 和 Cs-137 的活性濃度。通過 Gamma Vision (MAESTRO<sup>®</sup>A65-BW/17157560)軟體進行分析光譜。本 研究針對香蕉樣品輻射之檢測將參考衛生福利部公告 之「食品中放射性核種之檢驗方法」以及原能會公告之 「食品緊急計測之放射性含量檢測方法」等資料,依據 作業程序進行食品切割、搗碎等破壞性處理,裝入固定 幾何形狀的計測容器中,並延長計測時間(表定計測時間 30,000 秒以上),進行精確定量確認,目前已得知國內檢 測研究機構的精確之放射性含量最小可測值可低至1貝 克/公斤。環境試樣分析方法則是參考原能會輻射偵測中 心的「化學實驗室管理作業程序」、「水樣加馬能譜分 析直接計測」、「水樣加馬能譜分析直接計測之前處理 操作」、「環境試樣取樣作業程序」、「環境試樣前處 理法」、「環境試樣取樣法」等操作程序。對於提升加 馬(Gamma)放射性核種定性與定量檢測技術,透過實驗 室級純鍺偵檢器數學模式效率校正軟體,避免串級加總 效應(cascade summing effect)發生,原能會輻射偵測中心 (2015)研究發現利用無射源校正軟體可以提高檢測效率, 降低實驗室樣品複雜形狀容器之計測問題。為評估環境 試樣放射性核種分析結果之可能分佈範圍,作為實驗室 進行環境試樣放射性分析之不確定度評估依據,參考原 能會輻射偵測中心的「環境試樣放射性核種分析不確定 度評估作業程序」。

#### III. 主要內容

本研究所採集的樣本種類包含灌溉水、施用肥料、 土壤、香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉等;採集時間涵蓋4月、 5月、6月與7月;採集地點位於東部(3塊農地)、中部 (3塊農地)與南部(4塊農地);香蕉品種包含北蕉、新北 蕉、北蕉1、北蕉2、台蕉1(烏龍蕉)、台蕉2、台蕉5、 台蕉7與寶島蕉等,計9種。其中,土壤、香蕉葉、香 蕉皮與香蕉肉樣本分別採集40個,土壤樣本平均含水 率為21.0%(標準差為4.7, n=40),香蕉植體中含水率以 香蕉皮為最高(平均值90.0%;標準差1.6%, n=40),其 次是香蕉葉(平均值79.2%;標準差2.1%, n=40),而香 蕉肉則是最低(平均值71.6%;標準差2.9%, n=40),如 圖3-1所示。如果依香蕉品種分分為北蕉、台蕉與寶島 蕉三類,不論在香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉都以寶島蕉最 高,依序分別是台蕉與北蕉,如圖3-2 所示。



本研究團隊採用 40 %相對效率的 p 型純鍺偵檢器 (HPGe)針對土壤樣本進行放射性鉀 40 活度進行檢測分 析,統計 40 個土壤樣本放射性鉀 40 活度的平均值為 544 Bq/kg(標準差為 151 Bq/kg, n=40),分析檢測時間為 30,000 秒;相同土壤樣本也使用手持式 XRF 進行檢測 分析,鉀濃度的平均值為 13,958 mg/kg(標準差為 3,975 mq/kg, n=40)。香蕉園土壤放射性鉀 40 活度(x1)與 XRF 鉀濃度(y1)的線性關係如圖 3-3 所示,方程式為 y<sub>1</sub> = 21.91x<sub>1</sub>+2030.7, R<sup>2</sup>=0.6901。其線性相關性不好的原因 可能是因為香蕉園土壤本身基質複雜性高導致 XRF 檢 測數據變異性大導致。



圖 3-3 土壤放射性鉀 40 活度與 XRF 鉀濃度線性關係圖

將香蕉園土壤依據地區分為中部、東路與南部三區, 發現放射性鉀-40 平均活度分別為 406 Bq/kg、492 Bq/kg 與 694 Bq/kg;而 XRF 鉀平均濃度分別為 8,168 mg/kg、 14,271 mg/kg與 17,174 mg/kg,如圖 3-4(a)與圖 3-4(b)所 示。



圖 3-4(a) 不同地區土壤放射性鉀-40 活度圖



圖 3-4(b) 不同地區土壤 XRF 鉀濃度圖

4 月份採集的香蕉植體包含香蕉葉、香蕉皮與香蕉 肉各 10 個,共計 30 個樣本,涵蓋的香蕉品種有北蕉、 台蕉 1(烏龍蕉)、台蕉 2、台蕉 5 與寶島蕉等,計 5 種。 放射性鉀-40 濃度最高的部位為香蕉皮(n=10),平均濃度 為 1,725 Bq/kg(標準差為 320 Bq/kg);而 XRF 檢測分析 的鉀濃度平均值為 56,547 mg/kg(標準差為 10,283 mg/kg)。 依序是香蕉葉(n=10)的放射性鉀-40 濃度,其平均濃度為 1,016 Bq/kg(標準差為 130 Bq/kg);對應之 XRF 檢測分 析的鉀濃度平均值為 34,816 mg/kg(標準差為 4,535 mg/kg)。最低的是香蕉肉(n=10),其放射性鉀-40 平均濃 度為 397 Bq/kg(標準差為 41 Bq/kg);對應之 XRF 檢測 分析的鉀濃度平均值為 12,775 mg/kg(標準差為 850 mg/kg)。

5 月份採集的香蕉植體包含香蕉葉、香蕉皮與香蕉 肉各 10 個,共計 30 個樣本,涵蓋的香蕉品種有北蕉、 台蕉 1(烏龍蕉)、台蕉 2、台蕉 5 與台蕉 7 等,計 5 種。 放射性鉀-40 濃度最高的部位為香蕉皮(n=10),平均濃度 為 1,857 Bq/kg(標準差為 142 Bq/kg);而 XRF 檢測分析 的鉀濃度平均值為 60,037 mg/kg(標準差為 4,651 mg/kg)。 依序是香蕉葉(n=10)的放射性鉀-40 濃度,其平均濃度為 1,400 Bq/kg(標準差為 789 Bq/kg);對應之 XRF 檢測分 析的鉀濃度平均值為 48,238 mg/kg(標準差為 26,072 mg/kg)。最低的是香蕉肉(n=10),其放射性鉀-40 平均濃 度為 545 Bq/kg(標準差為 271 Bq/kg);對應之 XRF 檢測 分析的鉀濃度平均值為 17,460 mg/kg(標準差為 8,491 mg/kg)。 6月份採集的香蕉植體包含香蕉葉、香蕉皮與香蕉 肉各10個,共計30個樣本,涵蓋的香蕉品種有北蕉、 新北蕉、台蕉1(烏龍蕉)、台蕉2與台蕉5等,計5種。 放射性鉀-40濃度最高的部位為香蕉皮(n=10),平均濃度 為2,056 Bq/kg(標準差為177 Bq/kg);而XRF 檢測分析 的鉀濃度平均值為66,793 mg/kg(標準差為6,583 mg/kg)。 依序是香蕉葉(n=10)的放射性鉀-40濃度,其平均濃度為 1,129 Bq/kg(標準差為149 Bq/kg);對應之XRF 檢測分 析的鉀濃度平均值為39,317 mg/kg(標準差為5,611 mg/kg)。最低的是香蕉肉(n=10),其放射性鉀-40平均濃 度為439 Bq/kg(標準差為37 Bq/kg);對應之XRF 檢測 分析的鉀濃度平均值為14,006 mg/kg(標準差為921 mg/kg)。

7 月份採集的香蕉植體包含香蕉葉、香蕉皮與香蕉 肉各 10 個,共計 30 個樣本,涵蓋的香蕉品種有北蕉、 北蕉 1、北蕉 2、台蕉 1(烏龍蕉)、台蕉 2 與台蕉 5 等, 計 6 種。放射性鉀-40 濃度最高的部位為香蕉皮(n=10), 平均濃度為 1,683 Bq/kg(標準差為 288 Bq/kg);而 XRF 檢測分析的鉀濃度平均值為 56,077 mg/kg(標準差為 9,116 mg/kg)。依序是香蕉葉(n=10)的放射性鉀-40 濃度, 其平均濃度為 1,154 Bq/kg(標準差為 163 Bq/kg);對應 XRF 檢測分析的鉀濃度平均值為 39,435 mg/kg(標準差 為 4,719 mg/kg)。最低的是香蕉肉(n=10),其放射性鉀-40 平均濃度為 448 Bq/kg(標準差為 59 Bq/kg);對應之 XRF 檢測分析的鉀濃度平均值為 14,774 mg/kg(標準差 為 1,958 mg/kg)。

表 3-1 香蕉植體與土壤放射性鉀-40 活度相關係數表

	香蕉肉	香蕉葉	香蕉皮	土壤
香蕉肉	1.00	`		
香蕉葉	0.89	1.00		
香蕉皮	0.14	0.10	1.00	
土壤	0.00	-0.18	-0.04	1.00

比對研究樣品(含香蕉葉、果皮、果肉以及土壤等)檢 測出的放射性鉀 40 活度的數據資料得知,其相關係數 以香蕉葉與香蕉果肉的 0.89 為最高,如表 3-1 所示,其 線性方程式為 y=2.56x + 1.81 (R<sup>2</sup>=0.79, n=40)。顯示放 射性鉀-40 活度在香蕉植體與土壤間的活度分佈關係, 並沒有顯著的相關性。



圖 3-5(a) 香蕉肉放射性鉀-40 與 XRF 鉀濃度關係





圖 3-5(c) 香蕉皮放射性鉀-40 與 XRF 鉀濃度關係

比較 4 月份香蕉植體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉)所 屬部位放射性鉀-40 活度(x)與對應之 XRF 鉀濃度(y)的 線性關係,數據資料顯示以香蕉皮放射性鉀-40 活度(x) 與對應 XRF 鉀濃度的線性關係為最高, R<sup>2</sup> 高達 0.981(如 圖 3-5(c)所示),最低的則是香蕉肉放射性鉀-40 活度(x) 與對應之 XRF 鉀濃度,其 R<sup>2</sup> 值為 0.656(如圖 3-5(a)所 示)。茲就5月、6月和7月的香蕉植體(香蕉葉、香蕉皮 與香蕉肉)所屬部位放射性鉀-40 活度(x)與對應 XRF 鉀 濃度(y)的線性關係進行分析與比較,相關資料彙整如表 3-2 所示。根據檢測數據,以各月香蕉植體(香蕉葉、香 蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度(x)與對應 XRF 鉀濃度(y)的關係資料發現,R<sup>2</sup>的數值變化差異較大(R<sup>2</sup> 範圍介於 0.656~0.998), 合併 4~7 月香蕉肉(n=40)的放射 性鉀-40 活度(x)與對應 XRF 鉀濃度(y)的關係得知  $R^2$  值 為 0.982, 香蕉葉(n=40)與香蕉皮(n=40)的放射性鉀-40活 度(x)與對應 XRF 鉀濃度(y)的關係,其  $R^2$  值分別為 0.981 與 0.964。

其中,在5月的香蕉肉樣本中,其放射性鉀-40活度的平均值僅為545 Bq/kg,而2FETCB5(東部台蕉5號 香蕉肉)與2FEPCB(東部北蕉香蕉肉)檢測出的放射性鉀 -40活度分別為1,121 Bq/kg 與984 Bq/kg,其所對應的 XRF 鉀濃度的檢測值分別為35,587 mg/kg 與31,017 mg/kg。而香蕉葉樣本中,其放射性鉀-40活度的平均值為1,400 Bq/kg,而2LSTCB5(南部台蕉5號香蕉葉)檢測 出放射性鉀-40活度僅為400 Bq/kg,其所對應的XRF鉀 濃度的檢測值為13,402 mg/kg。說明香蕉植體(香蕉葉、 香蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40活度檢測值不因為 植體部位的差異而有所不同,原因可能是因為香蕉植體 的基質(以碳水化合物為主,植體部位含水率皆達70% 以上)相對於土壤基質複雜性來說是較均質的。

表 3-2 香蕉植體放射性鉀-40 活度(x)與對應 XRF 鉀濃 度(y)線性關係一覽表

上古日時 白田 八山	日八	送十 · ··································		y=ax+b, R <sup>2</sup>	
植殖即位	月155	除 <b>本</b> 數(Ⅱ) ⁻	a	b	R <sup>2</sup>
	4	10	16.76	6119	0.656
	5	10	31.31	399.0	0.997
香蕉肉	6	10	21.25	4672	0.745
4 /4 / 4	7	10	31.71	560.7	0.923
	4~7	40	30.95	600.1	0.982
	4	10	31.24	3086	0.801
	5	10	33.00	2053	0.998
香蕉葉	6	10	34.49	391.3	0.844
a man	7	10	26.48	8875	0.839
	4~7	40	32.97	1730	0.981
	4	10	32.64	399.2	0.981
香蕉皮	5	10	31.12	1880	0.895
	6	10	34.94	4837	0.975
	7	10	30.72	4236	0.951
	4~7	40	31.56	2056	0.964

綜整 4~7 月所有香蕉植體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉) 部位的放射性鉀-40 活度檢測資料,放射性鉀-40 活度最 高的部位為香蕉皮(n=40),平均活度為1,838 Bq/kg(標準 差為 269 Bq/kg),依序是香蕉葉(n=40)與香蕉肉,其平均 活度分別為 1,174 Bq/kg(標準差為 423 Bq/kg)與 457 Bq/kg(標準差為 146 Bq/kg),值得注意的是香蕉肉與香 蕉葉的放射性鉀-40 活度的分佈比例範圍比香蕉皮都要 來的大,如圖 3-6 所示。進一步比對 4~7 月所有香蕉植 體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度(x2) 與對應 XRF 鉀濃度(y2)的關係(n=120)得知,其線性方程 式為 y<sub>2</sub>=32.77x<sub>2</sub>+525.6, R<sup>2</sup>=0.993, 如圖 3-7 所示。說 明香蕉植體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度檢測值不因為植體部位的差異而有所不同,而且 對於經由非破壞性的高純鍺偵檢器檢測技術,建立香蕉 植體所含放射性鉀-40 活度與香蕉 XRF 檢測鉀濃度值大 小的關係,可以快速地確認香蕉植體鉀濃度的實際流佈 現況。對於日後香蕉施鉀肥用量的評估與栽種方法的改 善,提供另一種安全又可靠的研究方法與技術。



圖 3-6 香蕉植體放射性鉀-40 活度分佈圖



圖 3-7 香蕉植體放射性鉀-40 活度與 XRF 鉀濃度關係 圖(n=120)

自然界中單獨存在的核素約有 20 種,例如存在於 人體中的鉀-40,有極長的半衰期,最長者為Bi-209,大 於 2×1018 年,而鉀-40 是最短的,它的另一個特點是強 度極弱。鉀-40 是鉀元素的一種放射性同位素,原子核不 穩定,可以自發衰變成氫-40,半衰期 1.248×10<sup>9</sup>年。該 反應是地質學上鉀一氫年代測定法的依據,具有廣泛的 用途,地球上的氫氣也有很多來自它的衰變(Juris Meija et al., 2016)。

研究團隊參考放射性鉀-40的半衰期(1.248\*10<sup>9</sup>年)、 亞佛加厥常數(6.02\*10<sup>23</sup>)、香蕉植體中的放射性鉀-40 豐 富度(0.0117%)等的條件下,如表 3-3 所示。茲就本研究 樣本 3LEPCB (6 月東部北蕉香蕉葉)為例,其活度為 1,301 Bq/kg,說明計算推估鉀濃度結果如下所述:

$A/A_0 = e^{-\lambda t}$		•									•	•								•				(	3	-	1	)	)
--------------------------	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	---	---	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	---	---	---	---	---	---

$A = \lambda * n \dots$	(3-2)
A:活度	(Bq/kg)
Ao:初始活度	(Bq/kg)
λ:衰變常數	(1/sec)
n:原子粒子個數	(個)

表 3-3 鉀同位素基本資料一覽表

			衰變									
同位素	豐度	半衰期(t <sub>1/2</sub> )	方式	能量	產物							
				(MeV)	<i>,</i>							
<sup>39</sup> K(K-39)	93.26 %	穩定	定,带 20	個中子								
			β-	1.311	<sup>40</sup> Ca							
${}^{40}K(K-40)$	0.0117 %	1.248*10 <sup>9</sup> 年	3	1.505	<sup>40</sup> Ar							
			$\beta^+$	1.505	<sup>40</sup> Ar							
${}^{41}$ K(K-41)	6.73 %	穩定	定,带 22	個中子								

資料來源: Juris Meija et al.(2016)

根據鉀-40 半衰期為 1.248\*10<sup>9</sup>年,帶入公式 3-1後, 得到鉀-40 的衰變常數如下:

 $\lambda = \ln 2/(t_{1/2}) = \ln 2/(1.248 \times 10^9 \times 86400 \times 365)$ 

 $=1.76*10^{-17} \text{ sec}^{-1}$ 

3LEPCB 的檢測活度為 1,301 Bq/kg, 帶入公式 3-2 後,得到 3LEPCB 樣本的鉀-40 粒子個數如下:

 $n=1,301/(1.76*10^{-17})=7.39*10^{19}$ 

換算成 3LEPCB 樣本的放射性鉀-40 的濃度如下:

40\*7.39\*1019/(6.02\*1023)=4.91\*10-3 g = 4.91 mg/kg

依據自然界鉀-40 的豐度 0.0117 %計算,可以得到 3LEPCB 樣本的理論鉀濃度如下:

4.91 (mg/kg)/0.000117 = 41,952 mg/kg

比對 3LEPCB 樣本的 XRF 鉀濃度檢測值為 42,331 mg/kg,兩者誤差值僅為 0.90 %。顯示在香蕉植體中透 過放射性鉀-40 的活度來推估鉀濃度值的方法有其可靠 性與正確性,這種非破壞性的檢測方法,除了可以節省 大量時間外,亦可以減少傳統濕式化學檢測方法所耗費 的大量人力與化學藥物的使用劑量。本研究根據所有香 蕉植體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活 度檢測資料,利用上述計算方法,可得知每個香蕉植體 樣本的理論鉀濃度值。 藉由高純鍺偵檢器所測得的香蕉植體放射性鉀-40 活度來推估鉀濃度值(y<sub>3</sub>)後,發現該值與香蕉植體 XRF 鉀濃度值(x<sub>3</sub>)相當,兩者的線性方程式為 y<sub>3</sub>=1.016x<sub>3</sub> + 525.6 (R<sup>2</sup>=0.993, n=120),如圖 3-8 所示;而土壤放射性 鉀-40 活度推估鉀濃度的結果明顯與土壤 XRF 鉀濃度差 異甚大。本研究得知利用這種非破壞性的高純鍺偵檢器 檢測技術,將香蕉植體所含放射性鉀-40 推估香蕉的鉀 濃度分佈的方法,可以進一步確認香蕉植體鉀濃度的實 際流佈現況。對於日後香蕉施鉀肥用量的評估與栽種方 法的改善,提供另一種安全又可靠的研究方法與技術。



圖 3-8 香蕉植體理論鉀濃度值與 XRF 鉀濃度檢測值關 係圖

根據研究檢測數據得知香蕉植體核種結果,香蕉植 體中檢測出針-232 與鈾-238,其活度的範圍分別介於 5.3 至 17 Bq/kg 以及 3.1 至 42 Bq/kg 之間,根據數據資料得 知在香蕉葉、香蕉皮與香蕉果肉的檢出率僅約為 26.7%(n=40)。針對香蕉田區之灌溉水、土壤與所施用肥 料的放射性核種活度的檢測結果發現,灌溉水放射性鉀 40 活度的範圍介於 5 至 25 Bq/kg; 土壤放射性鉀 40 活 度的範圍介於 312 至 1,578 Bq/kg(622±273 Bq/kg(平均值 ±標準差,n=40)), 針-232 活度的範圍介於 22 至 127 Bq/kg, 鈾-238 活度的範圍介於 18 至 77 Bq/kg, 在中部與東部 地區土壤中驗出銫-137 活度分別為 6.5 Bq/kg(1SCTCB2)、 3.4 Bq/kg(4SCPCB)與 5.2 Bq/kg (1SETCB5);而肥料(氯 化鉀、台肥硝磷基特4號、台肥保效39號以及台肥硝 磷基特 43 號)的檢測結果因肥料種類差異甚大,其放射 性鉀 40 活度的範圍介於 2,573 至 16,159 Bq/kg,除了氯 化鉀外,其餘三種肥料的鐳 226 活度的範圍介於 67 至 101 Bq/kg,另外台肥保效 39 號與台肥硝磷基特 43 號則 驗出鈾 235 活度值為 13 Bq/kg。本研究栽種香蕉所需之 灌溉水、土壤與肥料的放射性核種分佈資料得知,灌溉 水與土壤除了受到地質條件的影響外,在中部與東部的 土壤樣本中發現人工核種銫 137,濃度分別只有 6.5 Bq/kg(1SCTCB2) 、 3.4 Bq/kg(4SCPCB) 與 5.2 Bq/kg (1SETCB5),初步推測應是冷戰時期核子試爆落塵導致。

## IV. 結果與討論

香蕉農地採集的土壤樣本,經由手持式 XRF 檢測 分析(檢測時間為 180 秒)後,鐵與鉀元素的平均濃度分 別為 13,958 mg/kg(標準差 3,975 mg/kg, n=40)與 25,571 mg/kg(標準差 9,504 mg/kg, n=40),其餘重金屬平均濃度 依序為 408 mg/kg(錳)、83.6 mg/kg(鋅)、66.5 mg/kg(鉻)、 32.2 mg/kg(鎳)、30.1 mg/kg(銅)、20.3 mg/kg(鉛)與 6.6 mg/kg(砷)。研究期間採集香蕉園的土壤樣本重金屬濃度 屬於正常範圍,並無顯著人為污染的現象發生。

透過放射性鉀-40 活度推估理論鉀濃度值與 XRF 鉀 濃度檢測值作比對發現, 3LEPCB 樣本的 XRF 鉀濃度檢 測值(42,331 mg/kg)與理論鉀濃度值(41,952 mg/kg)之間 的誤差值僅為 0.90%。顯示在香蕉植體中透過放射性鉀 -40 的活度來推估鉀濃度值的方法有其可靠性與正確性, 這種非破壞性的檢測方法,除了可以節省大量時間外, 亦可以減少傳統濕式化學檢測方法所耗費的大量人力 與化學藥物的使用劑量。

針對香蕉田區之灌溉水、土壤與所施用肥料的放射 性核種活度的檢測結果發現,灌溉水放射性鉀 40 活度 的範圍介於 5 至 25 Bq/kg;土壤放射性鉀 40 活度的範 圍介於 312 至 1,578 Bq/kg(622±273 Bq/kg(平均值±標準 差,n=40)), 釷-232 活度的範圍介於 22 至 127 Bq/kg, 鈾-238 活度的範圍介於 18 至 77 Bq/kg, 在中部與東部 地區土壤中驗出銫-137 活度分別為 6.5 Bq/kg(1SCTCB2)、 3.4 Bq/kg(4SCPCB)與 5.2 Bq/kg (1SETCB5);而肥料(氯 化鉀、台肥硝磷基特 4 號、台肥保效 39 號以及台肥硝 磷基特 43 號)的檢測結果因肥料種類差異甚大,其放射 性鉀 40 活度的範圍介於 2,573 至 16,159 Bq/kg,除了氯 化鉀外,其餘三種肥料的鐳 226 活度的範圍介於 67 至 101 Bq/kg,另外台肥保效 39 號與台肥硝磷基特 43 號則 驗出鈾 235 活度值為 13 Bq/kg。

# V. 結論

綜整本研究所有香蕉植體(香蕉葉、香蕉皮與香蕉肉) 部位的放射性鉀-40 活度檢測資料,放射性鉀-40 活度最 高的部位為香蕉皮(n=40),平均活度為1,838 Bq/kg(標準 差為 269 Bq/kg),依序是香蕉葉(n=40)與香蕉肉,其平均 活度分別為 1,174 Bq/kg(標準差為 423 Bq/kg)與 457 Bq/kg(標準差為 146 Bq/kg),值得注意的是香蕉肉與香 蕉葉的放射性鉀-40 活度的分佈比例範圍比香蕉皮都要 來的大,如圖 3-9 所示。在所有香蕉植體(香蕉葉、香蕉 皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度與對應 XRF 鉀檢 測濃度值具有顯著的線性關係,得知香蕉植體(香蕉葉、 香蕉皮與香蕉肉)部位的放射性鉀-40 活度檢測值與所對 應 XRF 鉀檢測濃度值不因為香蕉植體部位的差異而有 所不同。利用高純鍺偵檢器所測得的香蕉植體放射性鉀 -40 活度來推估理論鉀濃度值的數據資料得知,該值與 香蕉植體 XRF 鉀濃度值相當,兩者的線性方程式為 y3=1.016x3+525.6 (R<sup>2</sup>=0.993, n=120); 而土壤放射性鉀-40 活度推估鉀濃度的結果明顯與土壤 XRF 鉀濃度差異 甚大。本研究得知利用這種非破壞性的高純鍺偵檢器檢 测技術,將香蕉植體所含放射性鉀-40 推估香蕉的鉀濃 度分佈的方法,可以進一步確認香蕉植體鉀濃度的實際 流佈現況。對於日後香蕉施鉀肥用量的評估與栽種方法 的改善,提供另一種安全又可靠的研究方法與技術。



圖 3-8 香蕉植體部位放射性鉀-40 活度分佈示意圖

# 參考文獻

- [1] Delvaux, B. 1989. Role of constituents of volcanic soils and their charge properties in the functioning of the banana agrosystem in Cameroon. *Fruits* **44**(6): 309-319.
- [2] Eisenbud, Merril; Gesell, Thomas F. Environmental radioactivity: from natural, industrial, and military sources. Academic Press. 1997: 171–172. ISBN 978-0-12-235154-9.
- [3] Juris Meija, Tyler B. Coplen, Michael Berglund, Willi A. Brand, Paul De Bièvre, Manfred Gröning, Norman E. Holden, Johanna Irrgeher, Robert D. Loss, Thomas Walczyk and Thomas Prohask, 2016, "Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report)," Pure and Applied Chemistry, Vol. 88 (3): 265– 91. doi:10.1515/pac-2015-0305.
- [4] Sheppard, S., Evenden, W., and Pollock, R., 1989, "Uptake of natural radionuclides by field and garden crops," *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 69, No. 4, pp. 751-767.
- [5] Turner, D.W. and Bull, J.H. 1970. Some fertiliser problems with bananas. Agricultural Gazette NSW 81: 365-367.
- [6] Twyford, I.T. 1967. Nutrition, a review of principles and practice. Journal of Science and Food Agriculture 18: 177-183.
- [7] U. S. Environmental Protection Agency (1999), Federal Guidance Report 13, page 16.

# 輻射防護與放射醫學科技(II)

# 臨床標靶放射藥物治療應用於輻射安全管理實務與衛教建議之研究 Clinical Targeted radionuclide therapy: radiation safety and related recommendation

計畫編號:MOST 108-NU-E-016-001-NU 計畫主持人: 諶鴻遠 e-mail:shen8484@gmail.com 計畫共同主持人:黃玉儀、林可瀚、邱宇莉 計畫參與人員:林美靖 執行單位:國防醫學院三軍總醫院核子醫學科、 和信治癌中心醫院核子醫學科、 台北榮民總醫院核子醫學科、 高雄榮民總醫院核子醫學科

#### 摘要

利用放射同位素結合具有標靶功能特性的物質製 成放射核種藥物用於治療特定疾病的治療方式是所謂 的標靶放射核種藥物治療 (target radionuclide therapy, 簡稱 TRT)。本研究計畫針對國內現行執行標靶放射藥物 治療目前增長較快的包括鐳-223 治療轉移性骨病灶以 及纪-90 微球體治療肝臟惡性腫瘤等應用其輻射安全之 議題探討並提出相關醫護照護之建議。透過 (1)文獻回 顧與實證評析、(2)問卷調查、(3)專家會議、(4)訪視與相 互觀摩、(5)研討會共同擬定提出針對不同核種藥物(鐳 223 於骨轉移與釔 90 微球於惡性肝病灶)治療醫護衛教 之範例。初步結論:現行臨床標靶放射藥物治療應用鐳 -223 骨轉移標靶治療之病患雖無須隔離但須防止其散 佈自身體內排洩之鐳-223 汙染。病患治療後短期內盡量 避免收集血樣及體液檢體,治療後短期內也不宜進行手 術,如有緊急醫療需求應尋求核醫專業協助評估並針對 執行之醫護人員教育及監測。 釔-90 微球於惡性肝病灶 治療之病患短期內可以簡易之避免近距離之長期相處 原則以防止照護人員之遭受暴露,相較於鐳-223, 釔-90 微球於惡性肝病灶治療之病患其身體較無排洩輻射汙 染之虞。病患治療後盡量避免短期內進行肝臟手術,如 有緊急手術需求應尋求核醫專業協助評估並針對執行 之醫護人員教育及監測。核種藥物治療(包括鐳 223 骨轉 移與記 90 微球惡性肝病灶)病患治療後如短期內身故不 宜立即進行火化或特殊大體處理,如有需求應尋求輻防 專業協助評估並針對相關人員教育避免恐慌。

**關鍵詞:**標靶放射核種藥物治療、鐳-223 治療、釔-90 微 球體治療、輻射安全

#### Abstract

Targeted radionuclide therapy (TRT) is using radiolabeled drug to target the lesion selectively to achieve disease control. This study aims to conduct a research of radiation safety issues for two rapid growing TRT settings in Taiwan, including Ra-223 to treat bony metastases and Y-90 microsphere to treat hepatic malignancies. Through (1) literature review and evidence-based approach, (2) questionnaire survey, (3) expert meetings, (4) siteinterviewing, and (5) seminars, we attempt to establish the templates of certain specific issues of radiation safety in such therapeutic settings. Our preliminary conclusions are: There is no need for patient isolation after Ra-223 treatment while it is necessary to avoid the radiation contamination by restricting the spread of Ra-223 containing blood, body fluid, urine and even the surgical specimens at least in short term (i.e. 1-2 weeks) after Ra 223 treatment. In case of emergent surgical procedure needed, nuclear medicine specialty is recommended for further assessment and medical personnel education. Simple rules of keeping distance and short-time contact is advised for the settings of Y-90 microsphere therapy to avoid healthcare providers being exposed to bremsstrahlung radiation from Y-90. In contrast, there is less concern of radiation contamination in Y-90 therapy. A surgical intervention involving liver should not be done in short term after Y-90 microsphere hepatic arterial embolization. In both settings, cremation and post-mortem procedure should not be done unless cautious survey and approved by radiation physics. To educate post-mortem personnel regarding with radiation safety issues might be needed to avoid public panic.

**Keywords:** targeted radionuclide therapy (TRT), Radium-223 therapy, Y-90 microsphere therapy, radiation safety

# I. 前言

標靶放射核種藥物治療在惡性腫瘤的應用方興未 艾,有別於過去行之有年的碘-131治療於甲狀腺癌,鐳 -223於骨轉移與釔-90微球於惡性肝病灶是近來熱門且 臨床使用量快速成長的兩大標靶核種治療。本計畫著重 在其輻射安全相關衛教之研究,除搜尋放射藥物與國外 相關衛教之資訊,並彙整國內醫療院所及相關專業醫護 暨同仁之意見,期使能夠在未來詮釋或落實相關法規(游 離輻射防護法、游離輻射防護安全標準、游離輻射防護 法施行細則等規範)時,可以提供醫療執行單位及接受標 靶核種治療之病患與家屬及照護者有明確或方便之輻 射安全管理之依據。

# Ⅱ. 主要內容

本計畫透過(1)文獻回顧與實證評析、(2)問卷調查、 (3)專家會議、(4)訪視與相互觀摩、(5)研討會共同擬定 提出針對不同核種藥物(鐳 223 於骨轉移與紀 90 微球於 惡性肝病灶)治療醫護衛教之範例。在文獻回顧與實證評 析中輻射安全相關內容以專家意見最為主要、經由其內 容探討發現常見問題與討論如下:

- (1) 標靶放射核種藥物治療操作人員輻射安全措施
- (2) 標靶放射核種藥物治療前患者評估以增強輻射安 全之管理
- (3) 標靶放射核種藥物治療病患於接受治療後有無輻射曝露他人之劑量限制
- (4) 標靶放射核種藥物治療病患於接受治療程序後排 泄物(糞便、尿液)是否有汙染之考慮? 是否需要針 對輻射汙染之自主管理? 如果考慮有汙染之虞需 要管理之時效多久?
- (5) 標靶放射核種藥物治療後病患之唾液或皮膚毛髮 是否有汙染之考慮,是否需要輻射汙染之管理? 如果考慮有汙染之虞需要管理之時效多久?
- (6) 標靶放射核種藥物治療後病患是否可與性伴侶有 親密行為?如果考慮有汙染之虞需要管理之時效 多久?
- (7) 標靶放射核種藥物治療後病患因醫療需要而進行 身體血液,尿液或體液採檢,檢體是否需特別處 置?處理檢體人員之操作是否需考慮輻射防護之 處理?如果考慮有汙染之虞需要管理之時效多久?
- (8) 標靶放射核種藥物治療後病患如因醫療需要而進 行侵入性之診療,該治療之進行是否有特殊管理 建議? 如果考慮有汙染之處需要管理之時效多 久?
- (9) 標靶放射核種藥物治療治療之病患如果必需接受 血液透析是否需要有特殊輻射安全之管理?如果 考慮有汙染之虞需要管理之時效多久?
- (10)標靶放射核種藥物治療後的病患於短期內身故其 處理方式是否因輻射安全考慮而有所限制?如果 考慮有汙染之虞需要管理之時效多久?

#### Ⅲ. 結果與討論

在問卷調查與專家會議及訪視與相互觀摩後發現 院所間對於輻射安全之管理操作流程存在差異而且衛 教資訊也有出入,經研討會後有以下共識:(1) 操作人員 曝露劑量之監測是必要的,但注射時穿戴鉛衣(圍裙)等 防止輻射曝露裝備或是注射時使用鉛屏蔽並非絕對必 要,建議使用雙層手套、口罩等簡易型防護裝備,PPE 防 護衣,防護面罩等防止輻射汙染之個人用裝備並非必要; (2) 為加強輻射安全之管理,可考慮評估患者大小便自 理能力、大小便順暢情形、個人衛生維持能力(沐浴自理)、 有無特定之共病或目前正在進行之治療(如透析)、是否 有傷口癒合不良情形或最近之骨折;(3) 接受治療後有 無輻射曝露他人之劑量限制,對於鐳 223 而言無劑量限 制但對於孕婦及嬰幼兒可考慮限制,對於釔 90 微球而 言雖無劑量限制但建議考慮限制接觸距離(>1-2 公尺)或 容許短時間接觸(通常允許探訪 30 分鐘以內,但孕婦或 幼兒則盡可能要求不能在術後兩天內接觸);(4) 標靶治

療病患於接受治療程序後排泄物(糞便、尿液) 對於鐳 223 而言有汙染之考慮,因其劑量甚低,建議排入馬桶 中多沖幾次就可以,但針對無法自理者或失禁者必須特 殊處理(例如尿布應妥善棄置),管理之時效至少1週, 對於記 90 微球而言雖無汙染之虞,但仍建議排泄物排 入馬桶中多沖幾次;(5) 鐳-223 骨轉移標靶治療後病患 之唾液或皮膚毛髮雖無實證其造成汙染之考慮,但建議 注意個人沐浴及衛生,且應禁止至公眾浴池或泡湯,有 關個人衣物是否需與家人或其他人衣物分開洗滌之建 議雖非必要,但也可考慮,至於個人飲食是否與家人或 朋友分開之建議雖非必要,但也可考慮,管理之時效約 1週,對於記90 微球而言則無相關建議;(6) 鐳-223 骨 轉移標靶治療後病患是否可與性伴侶有親密行為? 雖無 實證其造成對方遭輻射汙染之考慮,但雖允許性行為, 仍建議需穿戴安全套且需避孕,不宜親吻以避免唾液造 成汙染,管理之時效少於1週,對於記90 微球而言則 無相關建議;(7) 鐳-223 骨轉移標靶治療後病患因醫療 需要而進行身體血液,尿液或體液採檢,治療後病患短 期內(約1週)身體血液,尿液或體液可能含有鐳-223,雖 其劑量低,但並非完全不需要注意,其檢體可能需要標 記輻射警示(明示或暗示)且檢體需密封防濺灑之處理, 至於檢體運送及存放輻射屏蔽則不建議。處理檢體人員 曝露劑量之監測因檢體內劑量可能很低而非必要,至於 穿戴鉛衣(圍裙)等防止輻射曝露裝備或使用鉛屏蔽則不 建議,使用雙層手套、口罩等簡易型防護裝備可考慮, 管理之時效 1-2 週,對於釔 90 微球而言則無相關建議; (8) 核種藥物治療(包括鐳 223 骨轉移與釔 90 微球惡性 肝病灶)後病患如因醫療需要而進行侵入性之診療,該治 療之進行是否有特殊管理建議視侵入程度與區域分別 考量,針對微侵入性診療(如內視鏡) 無需管理,而明顯 侵入性診療(如剖腹,開胸等)則需管理,侵入性診療後 之器械清理應該有特殊管理,侵入性診療後之廢棄物需 依據核醫輻射廢棄物之管理,侵入性診療後所採得標本 或檢體需特別處理(如前述),而執行侵入性診療操作人 是否需有輻射防護端視情況而定,管理之時效 1-2 週, 但鐳 223 聚積於骨骼而釔 90 微球主要在肝臟,是否應 考慮分彆在骨骼及肝臟手術需要管理之時效更久須經 由實測或諮詢核醫專家再行決定;(9) 鐳-223 骨轉移標 靶治療之病患如果必需接受血液透析建議安排盡量在 治療後 24-48 小時候,其廢液需收集管理且設備需個人 專用(i.e.管制時程內僅由該個案專用),操作人員無需特 殊防護,管理之時效至少1週,對於記90微球而言則 無相關建議;(10) 接受核種藥物治療(包括鐳 223 骨轉 移與記 90 微球惡性肝病灶)後病患如短期內身故,如採 取土葬並無限制,但如採取火葬則需了解其火化後骨灰 之可能輻射劑量而加以限制,另外大體處理(包括腹部及 臀部脫肛穢物清洗)廢棄物保存與操作人員須注意避免 輻射汙染,處理人員曝露劑量之監測需進一步研究,至 於穿戴鉛衣(圍裙)等防止輻射曝露裝備或使用鉛屏蔽則 不建議,使用雙層手套、口罩等簡易型防護裝備可考慮, 管理之時效2週以上。

## IV. 結論

臨床標靶放射藥物(包括鐳 223 骨轉移與釔 90 微球 惡性肝病灶)治療之病患雖無須隔離但須防止其散佈自 身體內排洩之鐳-223 汙染,故其體液及排泄物須妥善處 了並針對照護者衛教。病患治療後短期內盡量避免收 集血樣及體液檢體,如有緊急醫療需求應尋求核醫專業 協助評估,短期內也不宜進行手術,如有緊急醫療需求 應尋求核醫專業協助評估並針對執行之醫護人員教育 及監測。病患治療後如短期內身故不宜進行立即火化或 特殊大體處理,如有需求應尋求核醫專業協助評估並針 對執行之禮儀人員施行教育避免社會大眾之恐慌。

鑒於臨床標靶放射藥物治療逐漸成為現代癌症治 療之新趨勢,持續推動普及輻射安全及相關衛教知識對 於非放射專業之醫護人員與民眾(尤其病患及家屬)有其 必要性。輻射安全管理與放射藥物資訊如何能夠在現行 法規落實應該是政府管理部門之重大施政方針,建議結 合產學密切合作成為國家常設智庫以即時結合新資訊 與科技政策實施之依據。而針對國人接受不同放射核種 藥物治療之體內該藥物動力學及生物分佈數據資訊,可 考慮建構平台積極蒐集資訊加以建立作為確保輻射安 全之參考資訊。

# 參考文獻

- [1] Keisuke Yoshida, Tomohiro Kaneta, Shoko Takano, Madoka Sugiura, Tsuyoshi Kawano, Ayako Hino, Tou Yamamoto, Kazuya Shizukuishi, Masato Kaneko, Christian Zurth, Tomio Inoue. Pharmacokinetics of single dose radium-223 dichloride (BAY 88-8223) in Japanese patients with castration-resistant prostate cancer and bone metastases. Ann Nucl Med 2016; 30:453-460.
- [2] Brenda Pratt, Cecilia Hindorf, Sarah Chittenden, Christopher Parker, Glenn Flux. Excretion and wholebody retention of radium-223 dichloride administered for the treatment of bone metastases from castration resistant prostate cancer. Nucl Med Comm 2018; 39(2):125 – 130,
- [3] Sarah J. Chittenden, Cecilia Hindorf, Christopher C. Parker, Valerie J. Lewington, Brenda E. Pratt, Bernadette Johnson, and Glenn D. Flux. A Phase 1, Open-Label Study of the Biodistribution, Pharmacokinetics, and Dosimetry of 223Ra-Dichloride in Patients with Hormone-Refractory Prostate Cancer and Skeletal Metastases. J Nucl Med 2015; 56:1304-1309.
- [4] Sten Nilsson, Roy H. Larsen, Sophie D. Foss, Lise Balteskard, Kari W. Borch, Jan-Erik Westlin, Gro Salberg, Oyvind S. Bruland. First Clinical Experience with A-EmittingRadium-223inthe Treatment of Skeletal Metastases Clin Cancer Res 2005;11:4451-4459.
- [5] Oyvind S. Bruland, Sten Nilsson, Darrell R. Fisher, Roy H. Larsen. High-Linear Energy Transfer Irradiation Targeted to Skeletal Metastases by the A-Emitter 223Ra: Adjuvant or Alternative to Conventional Modalities? Clin Cancer Res 2006; 12:6250s-6257s.
- [6] ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23(3/4). Oxford: Pergamon Press; 1993.

- [7] Carrasquillo JA, O'Donoghue JA, Pandit-Taskar N, Humm JL, Rathkopf DE, Slovin SF, et al. Phase I pharmacokinetic and biodistribution study with escalating doses of Radichloride in men with castration-resistant metastatic prostate cancer. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2013;40:1384 – 93.
- [8] Bayer AG. Xofigo Summary of Product Characteristics (SmPC). 2016.].
- [9] Lassmann M, Nosske D. Dosimetry of 223Ra-chloride: dose to normal organs and tissues. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2013;40:207 – 12.
- [10] Pacilio M, Ventroni G, Cassano B, Ialongo P, Lorenzon L, Di Castro E, et al. A case report of imagebased dosimetry of bone metastases with Alpharadin ((223)Ra-dichloride) therapy: interfraction variability of absorbed dose and follow-up. Ann Nucl Med. 2016;30:163 – 8.
- [11] PacilioM, Ventroni G, De Vincentis G, Cassano B, Pellegrini R, Di Castro E, et al. Dosimetry of bone metastases in targeted radionuclide therapy with alpha-emitting (223)Ra-dichloride. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2016;43:21 – 33.

# 運鐵蛋白受體蛋白表現型癌腫正子斷層造影劑錯-89-運鐵蛋白之臨床前動物研究 Zr-89-transferrin for PET imaging of transferrin receptor protein (TfR)-expressing cancers: pre-clinical animal study

計畫編號:MOST 108-2623-E-010-001-NU 計畫主持人:劉仁賢 e-mail:rsliu@vghtpe.gov.tw 計畫共同主持人:歐陽芳鈺 計畫參與人員:翁茂琦,柯建志,陳怡安,呂承烋 執行單位:國立陽明大學

摘要

標靶及免疫治療是近年來癌症治療的重要方法之 一,為能有效評估單株抗體藥物的生物分佈與標靶抗原 的結合,以預測或監測療效及毒性,引導個人化治療策 略,並協助抗癌藥物發展,除組織細胞免疫化學檢查外, 以帶有同位素的抗體進行活體(臨床前動物試驗及臨床) 核子醫學造影及影像分析極其重要。免疫正子斷層掃描 (Immuno-PET) 結合 PET 高解析度、高靈敏度與定量 優點以及正子同位素標誌單株抗體之專一性,是驗証抗 體標靶性、藥物確效以及輻射劑量測定之理想工具。錯 -89 免疫正子斷層掃描(<sup>89</sup>Zr-immuno-PET)是近年新興 的 PET 分子影像技術。89Zr 半衰期 3.27 天, 與一般單株 抗體的半衰期 2~4 天相當,適合作為標誌抗體,並以 PET 進行約3天左右的追蹤造影,更詳細了解<sup>89</sup>Zr-mAb之 生體分佈及生體內藥物動態。運鐵蛋白受體(transferrin receptor, TfR)為細胞膜蛋白受體負責將攜帶鐵的運鐵蛋 白內轉化進入細胞,供應細胞鐵質。TfR 目前是一腫瘤 標靶治療的重要標的,研究發現癌細胞 TfR 表現量比正 常細胞高,主要為增加吸收癌細胞增生時所需的3價鐵 (Fe<sup>3+</sup>)。以TfR 為標靶發展的治療與造影診斷的策略, 便是因為許多種癌細胞表面的 TfR 表現轉強且內轉化 (internalization)的效率高之故。隨著近一二十年持續 的發展,目前已有多種合併 TfR 抗體與抗癌藥,毒性分 子及治療用放射同位素來進行腫瘤標靶治療,然而在治 療前,準確快速評估及檢測腫瘤 TfR 表現為一非常重要 之任務。現階段的治療前評估仍以腫瘤組織切片免疫染 色位主,而由於鋯-89免疫正子斷層掃描的發展,本計畫 與核研所合作,協助測試核研所開發生產的<sup>89</sup>Zr正子放 射同位素及<sup>89</sup>Zr-Transferrin 放射藥物,進行 PET 造影診 斷腫瘤細胞 TfR 的表現的可行性,我方以高低表現量 TfR 的乳癌細胞進行細胞及動物腫瘤模式驗證,在細胞 可觀察到 TfR 表現與 89Zr-Transferrin 積聚具高度相關, 活體影像雖無法明顯觀察到腫瘤積聚,但分析後仍有 2~6的T/M ratio,故為了更加提昇荷腫瘤小鼠腫瘤內的 積聚效果,本計畫將繼續與核研所方合作,持續改善標 誌條件,並將標誌之產物進行粒徑分析,確保可減少肺 臟黏滯積聚。本計畫展望台灣未來有自行開發生產<sup>89</sup>Zr-Transferrin 的能力,短程目標在於建立臨床前腫瘤動物 驗證,長程建立及提供乳癌患者診療用新藥開發之平台

**關鍵詞**: 鋯-89 免疫正子斷層掃描, 鋯-89-運鐵蛋白, 乳 癌

#### Abstract

In recent years, cancer target or immuno-therapy have been one of the most important regimens for cancer therapy. In order to efficiently evaluate the biodistriution, conjugation with target protein of monoclonal antibody drug, predict the treatment efficacy and toxicity, guide the personalized treatment strategy and augment the development of anticancer drug, clinical and preclinical nuclear imaging is the important tool. Immuno-PET with the high image resolution, high sensitivity, quantitatable property, high specificity of targeting, is an ideal tool to preevaluate the therapeutic efficacy. 89Zr-immuno-PET is a new and potential tool in PET imaging. With the decay half-life of 3.27 days which is similar to the biological half-life of most antibodies, <sup>89</sup>Zr is an applicable and appropriate isotope for antibody labeling. With a three-day imaging tracking, the biodistribution and drug dynamics will be highly depicted. Transferrin receptor (TfR) is a membrane protein in charge of transporting iron-carrying transferrin protein into the cells. The expression of TfR, an important target of cancer target therapy nowadays, is found to be higher in several types of cancers, leading to the development of TfR-based cancer target therapy and imaging in the past decade. Several types of antibody drugs conjugated with anticancer chemodrugs, toxins or therapeutic radioisotopes have been developed for the TfRbased targeting therapy. In this scenario, a rapid and precise evaluation of TfR expression will be a primary task before target therapy. Now the task mainly relies on the immunochemical staining of tumor specimen which is a laborious and time-consuming work. Therefore, with the collaboration with INER , this study aimed to assist and test the radiodrug <sup>89</sup>Zr-Transferrin developed by INER, using animal PET imaging with our cell and animal tumor model of breast cancer. Using breast cancer cell lines with high and low expression of TfR, the cellular accumulation of <sup>89</sup>Zr-Transferrin was correlated with TfR expression. In vivo PET imaging also showed the T/M ratio of 2~6 in breast tumor bearing mouse. To further increase the performance of drug labeling and tumor accumulation, we will keep collaborating with INER to improve the labeling condition analyze and control the particle size, reduce the lung tissue accumulation, and enhance the T/M ratio. The scope of this project is to ensure that Taiwan owns the ability to produce high quality of <sup>89</sup>Zr and its related drug for the test of preclinical animal studies and ultimately establish the diagnosis platform for

breast cancer patients.

Keywords: <sup>89</sup>Zr-immuno-PET, <sup>89</sup>Zr-Transferrin, breast cancer

# I. 前言

癌症的治療,在多方評估病患的癌症種類、惡性 度及病患本身健康狀況,得以決定一對病患最有效的 治療選擇。過去的癌症治療除了手術切除外,仍以化 學藥物治療和放射治療為主。化學治療乃利用藥物去 抑制細胞的 DNA 合成複製,使得細胞無法順利進行分 裂,達到腫瘤生長停滯及腫瘤細胞死亡,然而因為此 些藥物同時對正常細胞亦有作用,諸多副作用如造血 系統和落髮仍無法避免<sup>1</sup>。放射線應用於癌症治療的原 理,乃利用高能放射線行經腫瘤細胞時產生交互作 用,將能量傳遞於癌細胞或周遭分子,引發癌細胞死 亡,使手術後的殘餘或無法手術切除之腫瘤得到更近 一步的控制<sup>2</sup>。

近年來,利用標靶及免疫療法來治療癌症的技術日 益進步且逐漸廣泛應用於臨床。標靶治療乃以小分子化 合物,胜肽,蛋白或抗體阻斷癌細胞某些訊息傳遞路徑, 進而抑制癌細胞生長,由於標靶藥物本身即具備對其對 應之靶蛋白有高度專一特異性,若靶蛋白在腫瘤細胞大 量特異表現,則標靶藥物除了可有效抑制腫瘤生長,亦 可降低正常細胞的傷亡及減少副作用,延長患者壽命, 在近年可稱得上是一成熟的抗癌藥物<sup>3</sup>。在臨床應用例 子,如針對表現表皮生長因子受體(EGFR)突變之癌症病 患,標靶治療可將無疾病惡化時間延長到 11-13 個月<sup>4</sup> <sup>7</sup>。晚期黑色素瘤使用化療藥物 dacabarzine 治療後有效 延遲壽命僅 5-7 個月<sup>8</sup>,然而使用標靶治療黑色素瘤帶 有 BRAF V600E 突變之患者,無疾病惡化時間可延長到 9-11 個月 9.10。

以抗體為標靶藥物在近年來有爆發性的發展,目前 針對新的標靶抗體藥物,已有數百種新的單株抗體正在 進行臨床開發與試驗中。隨著標靶治療在臨床的應用越 來越廣泛,目前除了以切片檢體診斷是否有標靶藥物所 要靶向的分子的表現之外,以放射性同位素標誌之單株 抗體 (monoclonal antibody, mAb) 搭配核醫造影來診斷 靶向分子表現量的技術也日趨成熟,目前已有多種核醫 診斷抗體開發出來並在臨床使用如<sup>68</sup>Ga-HER2<sup>11</sup>,<sup>99m</sup>Tcanti-VCAM1<sup>12</sup>等。此些核醫診斷抗體藥物能有效評估單 株抗體藥物的生物分佈與標靶抗原的結合,以預測或監 測療效及毒性,引導個人化治療策略,並協助抗癌藥物 發展,除組織細胞免疫化學檢查外,活體(臨床前動物 試驗及臨床)影像分析極其重要。近幾年,將正子同位 素(如 <sup>64</sup>Cu, <sup>89</sup>Zr, <sup>68</sup>Ga)標誌於抗體標範藥物再搭配正子 造影的免疫正子斷層掃描(Immuno-PET)已有長足的進 步,其結合 PET 高解析度、高靈敏度與定量優點以及正 子同位素標誌單株抗體之專一性,是驗証抗體標靶性、 藥物確效以及輻射劑量測定之理想工具<sup>13</sup>。以正子同位 素鋯-89 來進行免疫正子斷層掃描(<sup>89</sup>Zr-immuno-PET) 是近年新興的 PET 分子影像技術。以元素物理特性來說: <sup>89</sup>Zr 半衰期 3.27 天,與一般單株抗體的半衰期 2~4 天相 當,非常適合用來追蹤抗體在體內較長時間組織分布。

其正電子最大能量約 89 萬 7 千電子伏特,如此在遇到 負電子互毀前的平均行進距離約 1.18 毫米,相較於釔-86 的 2.46 毫米、鎵-66 的 8 毫米、鈷-55 的 5.7 毫米、碘 -124 的 3.3 毫米還要來得短,受到的干擾較小,具有較 高 PET 影像的分辨率,另外,<sup>89</sup>Zr 所放出的伽瑪射線能 量為 909keV,低於 <sup>18</sup>F 的 1656keV,干擾也較少,因此 就核物理特性而言,<sup>89</sup>Zr 是相當理想的正子放射核種。 故以 <sup>89</sup>Zr-mAb 搭配 PET 進行約 3 天左右的追蹤造影, 為一了解生體分佈及生體內藥物動態的一大利器。

#### II. 主要內容

c-myc 為一細胞之重要轉錄因子,藉由調控下游基 因的表現,多方面影響細胞的生長、分化、凋亡及細胞 週期。其也為一致癌基因,常在癌細胞中發現其有高量 表現,進而影響其所調控基因以及訊息傳遞途徑,是細 胞產生癌變的重要角色<sup>14</sup>。運鐵蛋白受體(transferrin receptor, TfR)為一重要 c-myc 所調控之下游基因。運鐵 蛋白 (TF) 是一個能夠結合鐵的單體糖蛋白,主要生理 功能為結合、運輸三價鐵離子,控制體液中游離鐵離子 濃度,提供可利用的鐵和防止鐵在血液中的沉積。TfR 則 負責將攜帶鐵的運鐵蛋白內轉化進入細胞,供應細胞鐵 質。TfR(又簡稱為CD71或p90)屬第2型穿膜醣蛋白, 以 homodimer 存在, 分子量 180 kDa。TfR 在幾乎所有 體內細胞都有表現,特別在分裂的細胞表現量較高,而 在癌細胞的表現量又比正常細胞高,過去研究指出因為 腫瘤細胞內鐵代謝異常,導致 TfR 表現量增高,增加吸 收癌細胞增生時所需的3價鐵(Fe3+)。以TfR為標靶發 展的治療與造影診斷的策略,便是因為許多種癌細胞表 面的 TfR 表現轉強且內轉化 (internalization) 的效率高 之故。目前已發現攝護腺癌、肝癌、淋巴癌、肺癌及乳 癌具有此特性,也因此針對 TfR 高表現的腫瘤,進行腫 瘤標靶治療也獲得相當成效,如體外實驗發現利用 TfR1 的單克隆抗體可有效抑制血液惡性腫瘤生長15,而使用 拮抗抗體 A24,可針對 T 細胞白血病的 TfR1 做有效競 爭結合導致 TfR1 解體,使得癌細胞鐵缺乏來做為治療 策略<sup>16</sup>,而非拮抗型抗體雖可與TfR1結合,但過去研究 發現無法完全抑制 Tf 的攝取,僅有少數研究發有可有 效抑制腫瘤生長 17。雖然光抗體本身無法獲得良好的腫 瘤控制,然而針對抗體對 TfR1 的高度專一特異結合能 力,許多團隊也嘗試在抗體上結合抗癌藥物,藉由抗體 標靶至腫瘤處,也將抗癌藥物攜至腫瘤,將原本無標靶 性的抗癌藥,也可專一的積聚在腫瘤細胞內,降低正常 細胞對於抗癌藥物的暴露,提高整體腫瘤控制率<sup>18</sup>,如 TfR 抗體 (5E9) 結合抗癌藥 doxorubicin (ADR)被證實 有效被人類血液腫瘤細胞株 Daudi 及 Raji 攝入, 達到毒 殺效果<sup>19</sup>。另外,將抗體結合治療用放射同位素如β蛻 變核種 Y-90,也獲得良好抗癌結果, Sugyo 團隊即利用 此法,有效將<sup>90</sup>Y 帶至小鼠腫瘤模式胰臟癌細胞,並累 積在腫瘤細胞中,有效抑制腫瘤生長<sup>20</sup>。其他可與抗體 結合的抗癌分子的選擇,如植物毒素 ricin<sup>21</sup>, saporin<sup>22</sup>, 細菌毒素如 pseudomonas exotoxin (PE)23, diphtheria toxin (DE)<sup>24</sup> 等。此些組合也在不同的惡性腫瘤看到效果,如 表皮腫瘤,神經膠質瘤等。

由近年持續發展的 TfR 腫瘤標靶聊的成果,可看出

此標的癌症控制有可預期的未來。而在標靶治療前的篩檢,發展<sup>89</sup>Zr-transferrin或<sup>89</sup>Zr-TfR mAb 搭配正子造影 來檢測並定量腫瘤 TfR 的表現,為目前亟需開發的核醫 檢測技術,勢必可做為腫瘤 TfR 的標靶治療更快速更精 準的前檢測,協助得到更有效的標靶治療效果。原子能 科技學術合作研究計畫 108 年度一般型計畫研究,輻射 防護與放射醫學科技領域(N3)第 14 項研究主題「<sup>89</sup>Zr 抗體藥物(TfR)體內分佈研究工作」,擬推動<sup>89</sup>Zr 相關研 究題材,確認藥物於體內之藥物動力學與輻射劑量等分 析工作,與國際現階段發展重點吻合。基於此,本原子 能合作計畫嘗試研製<sup>89</sup>Zr-transferrin,作為 TfR immuno-PET 造影藥物,進行罹癌小動物 PET 造影並完成<sup>89</sup>Zrtransferrin 體內生物分佈試驗。

## 材料與方法

#### 細胞培養及小鼠乳癌模式建立

本研究取得三株人類乳癌細胞 MCF-7 (ATCC® HTB-22<sup>TM</sup>)、MDA-MB-231 (ATCC® HTB-26<sup>TM</sup>)及 SKBR-3 (ATCC® HTB-30<sup>TM</sup>)。其中 MCF-7 及 SKBR-3 細胞株 使用培養基 MEM (Minimum Essential Medium), MDA-MB-231 使用 L15,培養時培養基外加 10%胎牛血清, 適 當 濃度抗生素(100 units/mL penicillin, 10 µg/mL streptomycin)並將細胞培養於 37°C,5% 二氧化碳環境 的細胞培養箱中。建立小鼠乳癌模式時,將培養的細胞 以磷酸緩衝液清洗,再以胰蛋白酵素將細胞打下成單一 細胞,加入培養液並利用倒立顯微鏡觀察計算細胞數目, 離心後去除上清液並加入適當的培養液調整濃度。種植 細胞時,於 6~8 周雌性嚴重免疫缺陷小鼠(SCID)或雌性 裸鼠 (nu/nu mice) 腹側右下乳房脂肪墊種植 2×10<sup>6</sup> 細胞 /100µl,根據過去經驗,腫瘤生長至第 6~7 周體積可達 約 100 mm<sup>3</sup>,即可進行進一步實驗。

#### TfR (CD71)蛋白表現

腫瘤細胞中 TfR (CD71)之基因表現量以西方墨點法 量測,方法步驟如下。細胞溶解於 lysis buffer 後加入適 量 protease inhibitor,以低溫離心 12,000 轉 3 分鐘取出 上清液即完成蛋白萃取。定量後量取蛋白 50 µg,加入 SDS Loading Sample Buffer 置於 100℃的乾浴槽中 8 分 鐘以解開蛋白質多級結構,再注入製作好的 SDS-PAGE 中,以固定電壓 130 V 跑 90 分鐘。蛋白質轉漬時,將分 離完成蛋白質電泳的 SDS-PAGE 取出轉責至 NC 膜 (nitrocellulose paper) 上, 再將 NC 膜置於 blocking solution 中作用 1 小時,以 TBST buffer 清洗膜 10 分鐘 3 次後,加入初級抗體溶液並置於 4℃冰箱振盪器中 overnight。TBST buffer 清洗 10 分鐘 3 次。加入二級抗 體 anti-Rabbit HRP 並室溫作用 2 小時,以 TBST buffer 清洗 10 分鐘 3 次後偵測蛋白質表現,利用 Western Lightning Plus-ECL 和二級抗體結合產生冷光,再以冷光 螢光影像擷取系統(Luminescence/ Fluorescence Imaging System) LAS-4000 偵測蛋白質的表現量。

# 藥物製備

<sup>89</sup>Zr 由核研所迴旋加速器以 13MeV 的質子束撞擊<sup>89</sup>Y 箔靶產生(<sup>89</sup>Y(p,n)<sup>89</sup>Zr),之後以 TTA (4,4,4-trifluoro-

1-(2-thienyl)-1,3-butanedione)二甲苯溶劑萃取靶材中的 <sup>89</sup>Zr,再用 HNO<sub>3</sub>/HF 溶劑將 Zr 帶入水相,通過陽離子 交換,以 1M HCl,0.01M 草酸鹽洗出 <sup>89</sup>Zr-oxalate<sup>25</sup>。Apotransferrin 經由 p-isothiocyanato-benzyl-desferrioxamine 功能化後,與 <sup>89</sup>Zr-oxalate 進行螯合,成為 <sup>89</sup>Zr-DFO-Transferrin。

#### 體外細胞攝取實驗

為得知細胞對<sup>89</sup>Zr-Transferrin 攝取,先將細胞以每 個 well 內有 5×10<sup>5</sup> 的細胞數培養在 6-well 培養皿,次日 先移除培養液,以 1ml HBSS 沖洗後,加進 0.5 ml HBSS 內含 0.1μCi 之<sup>89</sup>Zr-Transferrin 進行培養 4 或 24 小時, 之後以冰 HBSS 快速沖洗雨次,收集細胞後以 γ-counter 測定活度。

#### 活體 PET 造影

荷有腫瘤之小鼠以尾靜脈方式注入體積為 100~150µl,活性為200µCi<sup>89</sup>Zr-transferrin,之後於30、 60、90、120分、4小時、24小時及48小時分別以 microPET/CT進行全身造影。造影時,將小鼠以趴躺姿 勢固定於造影台,四肢伸展固定,以2% isofluorane 氣 體麻醉劑持續麻醉動物 (O<sub>2</sub>氣體流量:2 mL/min; isofluorane 氣體流量:2 mL/min)。將小鼠之中心點對準 microPET 定位雷射中心後始可進行掃描。所得影像圈 選腫瘤以及背景組織及各重要器官量測放射活性。所得 資料可計算腫瘤/背景組織吸收比,以及腫瘤與各器官 組織<sup>89</sup>Zr-transferrin活性之動力學(時間活性分佈圖)

#### III. 結果與討論

本研究取得三株人類乳癌細胞:MCF-7、MDA-MB-231 及 SKBR-3。為得知三乳癌細胞株使否表現運鐵蛋 白受體 (Transferrin Receptor, TfR),本研究在萃取細胞蛋 白後進行西方墨點法,偵測細胞TfR 的表現狀況 (抗體: Anti-Transferrin Receptor antibody (ab84036)),結果如下 圖一:在三細胞株中, MDA-MB-231 及 SK-BR-3 有明 顯 TfR 表現, MCF-7 則表現相對低量之 TfR,本研究將 以 MDA-MB-231 建立動物原位乳癌模式,以進行後續 <sup>89</sup>Zr-Transferrin 小動物正子造影以及生物分布實驗。



圖一、人類乳癌細胞株中 TfR 蛋白表現

本研究欲以<sup>89</sup>Zr標誌運鐵蛋白並測試其腫瘤積聚能 力,為製備<sup>89</sup>Zr-transferrin,先進行 DFO-transferrin 接合 試驗:將 transferrin 與市售的 Df-Bz-NCS 混合後,於鹼 性下進行接合,形成 Transferrin-NCS-Bz-DFO,並利用 PD10 管柱進行純化。經純化及分析確認後,可提供 <sup>89</sup>Zr 放射性標誌試驗。進行 <sup>89</sup>Zr-transferrin 標誌時,分別於反 應小瓶加入放射性 <sup>89</sup>Zr 及 HEPES Buffer 等,並加入 Transferrin-NCS-Bz-DFO,接著利用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 調整反應液 pH 值為  $7.0\pm0.2$ ,並於 25℃進行反應 60 分鐘。製備完 之 <sup>89</sup>Zr-transferrin 進行 Radio-TLC 分析,結果顯示標誌 效率僅為 6.73% (圖二),而 HPLC 的結果亦顯示絕大部 分為 free <sup>89</sup>Zr (圖三),故決定以 Vivaspin 10k 進行離心純 化,純化後成品放射化學純度為提升為 90.19% (圖四)。







圖四、經 vivaspin 純化後的<sup>89</sup>Zr-Transferrin-NCS-Bz-DFO 放射化學純度分析

為得知 TfR 不同表現量的乳癌細胞株 MDA-MB-231 與 MCF7 對 <sup>89</sup>Zr-Transferrin 的積聚是否具關連性, 本研究進行兩株細胞之細胞藥物積聚測試。在加入<sup>89</sup>Zr-Transferrin 進細胞共同培養 4 或 24 小時後,去除上清液 收集細胞測定放射活度,結果如下圖五所示。在 4 及 24 小時,具 TfR 高表現的 MDA-MB-231 細胞相較於 MCF-7 有較高的 <sup>89</sup>Zr-Transferrin 積聚,在 24 小時的積聚更有 顯著高於 MCF7 30%之多,顯示 <sup>89</sup>Zr-Transferrin 積聚明 顯與 TfR 的表現相關。

進行<sup>89</sup>Zr-transferrin 活體造影時,先將藥物經由尾 靜脈注射藥物於荷腫瘤小鼠後,於 1,4,24 小時等時間 點,利用小動物 PET/CT 觀察全身及腫瘤內積聚結果。 藥物初期明顯積聚於肝臟,腫瘤部位則在 1.5 小時後開 始提高 T/M ratio (5.61), 並在第3天有最高的 T/M ratio (7.58), 一周後則降為 5.56 (圖六)。



圖五、<sup>89</sup>Zr-Transferrin 活體外細胞攝取積聚測試



圖六、PET/CT of <sup>89</sup>Zr-Transferrin in MDA-MB-231 tumorbearing nude mouse

# IV. 結論

本計畫旨在協助測試核研所開發生產的<sup>89</sup>Zr正子放 射同位素及<sup>89</sup>Zr-Transferrin 放射藥物,目前核研所方具 有初步接合及標誌的成果,我方以高低表現量 TfR 的乳 癌細胞進行細胞及動物腫瘤模式驗證,在細胞可觀察到 TfR 表現與<sup>89</sup>Zr-Transferrin 積聚具高度相關,活體影像 雖無法明顯觀察到腫瘤積聚,但分析後仍有 2~6 的 T/M ratio,故為了更加提昇荷腫瘤小鼠腫瘤內的積聚效果, 本計畫下一步預計將改善標誌條件,並將標誌之產物進 行粒徑分析,確保可減少肺臟積聚;目標將達到類似 <sup>111</sup>In-DTPA-transferrin 於腫瘤內積聚,以及提昇腫瘤/肌 肉比的效果。目前國外已有<sup>89</sup>Zr 接合抗體並注射至小鼠 體內觀察體內分布相關臨床前研究結果,本計畫參考國 外研究趨勢,選擇開發<sup>89</sup>Zr-Transferrin 及乳癌具專一性 標靶效果進行深入研究,希望能建立及提供乳癌患者診 療用新藥開發之平台。此研究計畫銜接核研所同位素組 <sup>89</sup>Zr 全新同位素射源的開發,利用國內目前唯一的中型 迴旋加速器,分批產出研發用<sup>89</sup>Zr提供臨床前小動物體 內研究,成果除可提供國內臨床前藥物開發非常高的參 考價值,也能指出核醫臨床藥物選擇全新方向。

# 參考文獻

 Laurence L. Brunton, R. H.-D., Björn C. Knollmann. Goodman and Gilman's the Pharmacological Basis of Therapeutics. 12 edn, 1-9 (New York: McGraw-Hill, 2011).

- Beyzadeoglu, M., Ozyigit, G. & Ebruli, C. in *Basic Radiation Oncology* 145-173 (Springer Berlin Heidelberg, 2010).
- [3] Sharkey, R. M. & Goldenberg, D. M. Targeted therapy of cancer: new prospects for antibodies and immunoconjugates. *CA Cancer J Clin* 56, 226-243 (2006).
- [4] Zhou, C. *et al.* Erlotinib versus chemotherapy as firstline treatment for patients with advanced EGFR mutation-positive non-small-cell lung cancer (OPTIMAL, CTONG-0802): a multicentre, open-label, randomised, phase 3 study. *Lancet Oncol* 12, 735-742, doi:10.1016/S1470-2045(11)70184-X (2011).
- [5] Kim, S. T. *et al.* Randomized phase II study of gefitinib versus erlotinib in patients with advanced non-small cell lung cancer who failed previous chemotherapy. *Lung Cancer* 75, 82-88, doi:10.1016/j.lungcan.2011.05.022 (2012).
- [6] Vergote, I. B. *et al.* Randomized phase III study of erlotinib versus observation in patients with no evidence of disease progression after first-line platinbased chemotherapy for ovarian carcinoma: a European Organisation for Research and Treatment of Cancer-Gynaecological Cancer Group, and Gynecologic Cancer Intergroup study. *J Clin Oncol* 32, 320-326, doi:10.1200/JCO.2013.50.5669 (2014).
- [7] Despierre, E. *et al.* Epidermal Growth Factor Receptor (EGFR) Pathway Biomarkers in the Randomized Phase III Trial of Erlotinib Versus Observation in Ovarian Cancer Patients with No Evidence of Disease Progression after First-Line Platinum-Based Chemotherapy. *Target Oncol* 10, 583-596, doi:10.1007/s11523-015-0369-6 (2015).
- [8] Bhatia, S., Tykodi, S. S. & Thompson, J. A. Treatment of metastatic melanoma: an overview. *Oncology* (*Williston Park*) 23, 488-496 (2009).
- [9] Liu, M. *et al.* Efficacy and safety of BRAF inhibition alone versus combined BRAF and MEK inhibition in melanoma: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Oncotarget* 8, 32258-32269, doi:10.18632/oncotarget.15632 (2017).
- [10] Long, G. V. et al. Combined BRAF and MEK inhibition versus BRAF inhibition alone in melanoma. N Engl J Med 371, 1877-1888, doi:10.1056/NEJMoa1406037 (2014).
- [11] Keyaerts, M. *et al.* Phase I Study of 68Ga-HER2-Nanobody for PET/CT Assessment of HER2 Expression in Breast Carcinoma. *J Nucl Med* 57, 27-33, doi:10.2967/jnumed.115.162024 (2016).
- [12] Broisat, A. *et al.* Nanobodies targeting mouse/human VCAM1 for the nuclear imaging of atherosclerotic lesions. *Circ Res* **110**, 927-937, doi:10.1161/CIRCRESAHA.112.265140 (2012).
- [13] Bailly, C. *et al.* Immuno-PET for Clinical Theranostic Approaches. *Int J Mol Sci* 18, doi:10.3390/ijms18010057 (2016).
- [14] Dang, C. V. *et al.* The c-Myc target gene network. *Semin Cancer Biol* **16**, 253-264, doi:10.1016/j.semcancer.2006.07.014 (2006).
- [15] Trowbridge, I. S. & Lopez, F. Monoclonal antibody to transferrin receptor blocks transferrin binding and inhibits human tumor cell growth in vitro. *Proc Natl*

Acad Sci USA 79, 1175-1179 (1982).

- [16] Callens, C. *et al.* Recent advances in adult T-cell leukemia therapy: focus on a new anti-transferrin receptor monoclonal antibody. *Leukemia* 22, 42-48, doi:10.1038/sj.leu.2404958 (2008).
- [17] White, S., Taetle, R., Seligman, P. A., Rutherford, M. & Trowbridge, I. S. Combinations of anti-transferrin receptor monoclonal antibodies inhibit human tumor cell growth in vitro and in vivo: evidence for synergistic antiproliferative effects. *Cancer Res* 50, 6295-6301 (1990).
- [18] Luria-Perez, R., Helguera, G. & Rodriguez, J. A. Antibody-mediated targeting of the transferrin receptor in cancer cells. *Bol Med Hosp Infant Mex* 73, 372-379, doi:10.1016/j.bmhimx.2016.11.004 (2016).
- [19] Braslawsky, G. R. *et al.* Adriamycin(hydrazone)antibody conjugates require internalization and intracellular acid hydrolysis for antitumor activity. *Cancer Immunol Immunother* **33**, 367-374 (1991).
- [20] Sugyo, A. *et al.* Evaluation of Efficacy of Radioimmunotherapy with 90Y-Labeled Fully Human Anti-Transferrin Receptor Monoclonal Antibody in Pancreatic Cancer Mouse Models. *PLoS One* 10, e0123761, doi:10.1371/journal.pone.0123761 (2015).
- [21] Laske, D. W. *et al.* Intraventricular immunotoxin therapy for leptomeningeal neoplasia. *Neurosurgery* **41**, 1039-1049; discussion 1049-1051 (1997).
- [22] Rodriguez, J. A. *et al.* Binding specificity and internalization properties of an antibody-avidin fusion protein targeting the human transferrin receptor. *J Control Release* **124**, 35-42, doi:10.1016/j.jconrel.2007.08.020 (2007).
- [23] Batra, J. K. *et al.* Antitumor activity in mice of an immunotoxin made with anti-transferrin receptor and a recombinant form of Pseudomonas exotoxin. *Proc Natl Acad Sci USA* 86, 8545-8549 (1989).
- [24] Martell, L. A., Agrawal, A., Ross, D. A. & Muraszko, K. M. Efficacy of transferrin receptor-targeted immunotoxins in brain tumor cell lines and pediatric brain tumors. *Cancer Res* 53, 1348-1353 (1993).
- [25] Link, J. M. a. K., K. A. and Eary, J. F. <sup>89</sup>Zr for antibody labeling and positron emission tomography. *Journal of Labelled Compounds and Radiopharmaceuticals* 23, 1297--1298 (1986).

# 以新穎前驅物開發硼中子捕獲治療造影劑[<sup>18</sup>F]FBPA The Development of [F-18]FBPA by a novel precursor as a PET imaging agent for Boron neutron Capture Therapy

計畫編號: MOST 108-2623-E-075-001-NU
計畫主持人:張智偉
e-mail: cwchang@vghtpe.gov.tw
計畫參與人員:黃文盛、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

將 BPA 中的酸基及胺基的氫原子,分別以 t-butyl、 Boc 保護基團保護,形成前驅物 N-叔丁氧羰基-硼苯丙 胺酸叔丁酯(N-tert-butoxycarbonyl-BPA tert-butyl ester (N-Boc-BPA(OBu<sup>t</sup>)),再以[<sup>18</sup>F]F<sub>2</sub>標幟合成[<sup>18</sup>F]FBPA,原 本預期可提高放射化學產率,但使用此修飾的前驅物, 得到之[<sup>18</sup>F]FBPA 放射活度產量,不如預期,顯示 t-butyl、Boc 保護基團並不會減少 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 的消耗 量,因此影響<sup>18</sup>F 標幟產率的主要原因不是保護基,而 是決定於所形成的 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 放射活度產量,因此使 用 N-Boc-BPA(OBu<sup>t</sup>)前驅物,無法提高 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 放射 活度,加上要花時間進行水解,不但無法將[<sup>18</sup>F]FBPA 放射活度產量提高,反而產量減少,無法供更多腦瘤、 頭頸癌病患使用。

**關鍵詞:**[<sup>18</sup>F]FBPA,N-叔丁氧羰基-硼苯丙胺酸叔丁酯, CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F

#### Abstract

The plan tried to synthesize [<sup>18</sup>F]FBPA by using the precursor N-tert-butoxycarbonyl-BPA tert-butyl ester (N-Boc-BPA (OBu<sup>1</sup>)), which is expected to improve the radiochemical yield of [<sup>18</sup>F]FBPA. However, the yield of [<sup>18</sup>F]FBPA radioactivity is not increased as expected when N-Boc-BPA (OBu<sup>1</sup>) was used as a precursor. It showed that t-butyl and Boc protecting group would not decrease the consumption of [<sup>18</sup>F]hypofluorite. The labelling efficiency of <sup>18</sup>F was determined by activity amount of [<sup>18</sup>F]hypofluorite. It took extra time to perform hydrolysis after labelling so that worsen the radiochemical yield of [<sup>18</sup>F]FBPA. It will not be able to provide more activity of [<sup>18</sup>F]FBPA to more brain tumor, head and neck patients.

**Keywords:** [<sup>18</sup>F]FBPA, N-tert-butoxycarbonyl-BPA tert-butyl ester, CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F.

# I. 前言

以 BPA 合成[<sup>18</sup>F]FBPA 活度產量,已不敷臨床所 需,延緩了病患接受 BNCT 的時效,而 2014 年日本研 究團隊 Sadahiro 等人指出,將 BPA 中的酸基及胺基的 氫原子,分別以 t-butyl、Boc 保護基團保護,以[<sup>18</sup>F]F<sub>2</sub> 合成[<sup>18</sup>F]FBPA,可提高放射化學產率為 Ishiwata 等人合 成方法(現行方法)的 2~4 倍,因此,本中心嘗試利用新 前驅物,合成[<sup>18</sup>F]FBPA,期望可以提高放射化學產率。

# Ⅱ. 主要內容

先合成出前驅物 (N-tert-butoxycarbonyl-BPA

tert-butyl ester (N-Boc-BPA(OBu<sup>t</sup>))), 再以自動化機械臂 合成粗產物[<sup>18</sup>F]FBPA,經半製備級 HPLC 純化後,得到 [<sup>18</sup>F]FBPA。

# III. 結果與討論

CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 跟修飾的前驅物反應,形成 2-[<sup>18</sup>F]Fluoro-4-borono-N-Boc-(OBu<sup>4</sup>)phenylalanine,經6N HCl水解兩個保護基,得到[<sup>18</sup>F]FBPA 產物,但除了形成 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F外,也同時形成K<sup>18</sup>F(約佔50%的<sup>18</sup>F放射 活度),其中<sup>18</sup>F<sup>-</sup>會去攻擊取代前驅物的boron ester 基, 亦即在苯環上的第四號碳,進行去硼化反應,形成 4-[<sup>18</sup>F]Fluoro-N-Boc-(OBu<sup>4</sup>)phenylalanine,再被酸水解而 得 4-[<sup>18</sup>F]Fluoro-phenylalanine。

# IV. 結論

使用 N-Boc-BPA(OBu<sup>1</sup>)作為合成[<sup>18</sup>F]FBPA 的前驅物,得到之[<sup>18</sup>F]FBPA 放射活度產量,不如預期,顯示t-butyl、Boc 保護基團並不會減少 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 的消耗量,因此並非影響<sup>18</sup>F 標幟產率的主要原因,而是決定於所形成的 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 放射活度產量,使用N-Boc-BPA(OBu<sup>1</sup>)前驅物,無法減少 CH<sub>3</sub>COO<sup>18</sup>F 的損耗,加上要花時間進行水解,不但無法將[<sup>18</sup>F]FBPA 放射活度產量提高,反而產量減少,縱使將有機溶劑 CHCl<sub>3</sub>換成 CF<sub>3</sub>COOH,仍然無法得到更高活度的[<sup>18</sup>F]FBPA,因此無法供更多腦瘤、頭頸癌病患使用。

# 参考文獻

- Ishiwata K, Ido T, Mejia AA, Ichihashi M, Mishima Y. Synthesis and radiation dosimetry of 4-borono-2-[<sup>18</sup>F]fluoro-d, l-phenylalanine: a target compound for PET and boron neutron capture therapy. Appl Radiat Isot. 1991; 42: 325-8.
- [2] Sadahiro Naka, Yoshinori Miyake, Yasukazu Kanai, Yoichiro Oota, Hiroki Kato, Eku Shimosegawa, Mitsunori Kirihata and Jun Hatazawa. A novel method for synthesis of 4-Borono-2-[<sup>18</sup>F]fluoro -L-phenylalanine. J Nucl Med May 2014 vol. 55 no. supplement 1, 1164.
- [3] Mairinger S, Stanek J, Wanek T, Langer O, Kuntner C. Automated electrophilic radiosynthesis of [<sup>18</sup>F]FBPA using a modified nucleophilic GE TRACERlab FX FDG. Appl Radiat Isot. 2015; 104: 124-7.
- [4] Nickles RJ, Daube ME, Ruth TJ. An <sup>18</sup>O<sub>2</sub> target for the production of [<sup>18</sup>F]F<sub>2</sub>. Int J Appl Radiat Isot. 1984; 35:117-22.

# <sup>123</sup>I-MIBG 造影與臨床心肌灌注/心肌血流定量檢查結合在預測心衰患者發生致命 性心律不整或心因猝死的臨床價值

# The Clinical Investigation of <sup>123</sup>I-MIBG SPECT Combined with Myocardial Perfusion and Myocardial Blood Flow Quantitation to Predict the Occurrence Fatal Arrhythmia or Sudden Cardiac Death in Patients with Heart Failure

計畫編號: MOST 108-2623-E-075-002-NU 計畫主持人:張智勇 e-mail: cychang11@vghtpe.gov.tw 計畫共同主持人:黃文盛、羅力瑋 計畫參與人員:何巧玲 執行單位:臺北榮民總醫院核子醫學部

# 摘要

相關研究已經驗證了<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 在心衰竭診 斷和預後的臨床價值。<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 與心肌血流定 量結合將可更準確預測心衰竭患者的心臟猝死風險。

我們招募了兩組受試者:正常成人組和患者組,進 行模擬運動態和休息態心肌灌注造影,並計算心肌血流 定量和冠狀動脈血流儲備分率。小於 0.05 的 p 值被認為 是顯著的。

這 14 名正常受試者和 26 名患者接受檢查時,並無 顯著的副作用。正常組和患者組在模擬運動態和休息態 的平均 MBF 和 CFR 存在差異。用 MBF 和 CFR 值準確 地量化了每個患者的心肌缺血程度,並對每個患者的三 個主要冠狀動脈分支(LAD、LCX、RCA)的病變嚴重程 度進行了準確評估。第二年計畫預算將用來進行 <sup>123</sup>I-MIBG SPECT 檢查。

**關鍵詞:**生物影像指標、心衰竭、<sup>123</sup>I-MIBG

# Abstract

Related researches have validated the clinical values of <sup>123</sup>I-MIBG SPECT in diagnosis and prognosis of chronic congestive heart failure (CHF). Combination of <sup>123</sup>I-MIBG SPECT and myocardial blood flow (MBF) quantitation may provide an objective image index to predict the risk of sudden cardiac death in CHF patients.

Two groups of subjects were recruited: a normal adult group and a CHF patient group. Myocardial perfusion imaging was performed druing a dypiridamole stress and a resting state. MBF and coronary flow reserve (CFR) were calculated by a dedicate software. A p-value less than 0.05 was considered significant.

No significant side effects of Dipyridamole have been observed during the measurement of MBF and CFR using Dipyridamole stress in 14 normal subjects and 26 CHF patients. MBF and CFR at rest and with Dipyridamole stress were accurately calculated using a two-compartment model and an algorithm. The average MBF and CFR at rest and under Dipyridamole stress differed between the normal group and the patient group. The degree of myocardial ischemia was accurately quantified for each patient, in terms with MBF and CFR values, in the three major coronary artery branchs (LAD, LCX, RCA), and the severity of disease were accurately assessed in each vessel territory for each patient. We will finish the <sup>123</sup>I-MIBG SPECT exam in the second year budget.

Keywords: imaging biomarker > heart failure > <sup>123</sup>I-MIBG

# I. 前言

國外相關臨床研究已證實<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 心臟檢 查應用於檢測心臟交感神經支配活度異常的價值。臨床 應用上,將心肌灌注/心肌血流定量檢查與<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 檢查結合所獲得客觀的核醫影像檢查指標,能夠 應用於指引慢性心臟衰竭患者的正確處置與預測未來 發生心因猝死的風險。然而,國內因<sup>123</sup>I-MIBG 藥物尚 無藥廠可生產供應臨床檢查需求,<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 心 臟檢查尚未在國內醫院開展,使得台灣醫療在慢性心衰 的診斷與治療落後歐美與日本等先進國家。核能研究所 已通過衛生福利部的 PIC/S GMP 查核,獲得藥證許可, 正積極採取行動供應<sup>123</sup>I-MIBG,以幫助台灣醫療快速 推動<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 的臨床應用進展。在本研究計畫 中,我們提出以新型的 CZT SPECT 心臟專用相機,建 立適合國人的<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 造影參數與影像品質保 證流程,讓<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 檢查能夠進一步有更精準 的檢查結果,計畫同時規劃收集對照組與心衰患者進行 臨床驗證,通過心衰族群與<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 檢查的關 聯性分析,提供治療指引。本計畫的實施能夠建立 <sup>123</sup>I-MIBG 影像品質保證流程,同時累積國內<sup>123</sup>I-MIBG 檢查的相關臨床經驗。

# II. 主要內容

a) 心肌血流定量:

目前已收案 14 位正常人及 26 位病患,使用 Dipyridamole stress 測量心肌血流及冠狀動脈血流儲備 的過程中未觀察到明顯的 Dipyridamle 副作用。使用雙 腔室模式 經過疊代運算後可精準算出休息態和 Dipyridamole stress 下的心肌血流和冠狀動脈血流儲備 分率。雙腔室模式計算出的正常人組和病患組之間,休 息態和 Dipyridamole stress 下平均的心肌血流和冠狀動 脈血流儲備分率均有差異,簡言之,病患組的冠狀動脈 血流儲備分率和 Dipyridamole stress 下的心肌血流都比 正常人組低,而這種血流定量的方法也準確量化了每位 病患心肌缺血的程度,在三個主要血區域(LAD, LCX, RCA)的心肌血流和冠狀動脈血流儲備分率的數值,也精 確反應出每位病患在各條血管的疾病嚴重程度。

# III. 結果與討論

總結目前的結果,已經從本院篩選出合適病患 26 位及 14 位正常人。這些受試者均已完成除了<sup>123</sup>I-MIBG 檢查之外的其他檢查。至於後續<sup>123</sup>I-MIBG 人體研究的 部份,第一經費年度之病患尚無法做<sup>123</sup>I-MIBG 檢查, 配合核能研究所的<sup>123</sup>I-MIBG 將於將於第二經費年度進 行;本研究將繼續收案並且做 MIBG 之檢查,以讓最 後之結果有更準確之比較分析。目前的假體實驗結果也 將配合後續收案的<sup>123</sup>I-MIBG 之檢查一起分析,並持續 追蹤病患,以讓最後的結果能有更準確之信效度。

#### IV. 結論

正常組和心衰竭組的 MBF 和 CFR 值不同。第二年 度預算將進行<sup>123</sup>I-MIBG SPECT 檢查,將可提供心衰竭 患者更完整的預後評估。

# 参考文獻

- [1] Jacobson AF, Senior R, Cerqueira MD, et al. Myocardial iodine-123 meta-iodobenzylguanidine imaging and cardiac events in heart failure. Results of the prospective ADMIRE-HF (AdreView Myocardial Imaging for Risk Evaluation in Heart Failure) study. J Am Coll Cardiol. 2010;55:2212 - 21.
- [2] Al Badarin FJ, Wimmer AP, Kennedy KF, Jacobson AF, Bateman TM. The utility of ADMIRE-HF risk score in predicting serious arrhythmic events in heart failure patients: incremental prognostic benefit of cardiac 123I-mIBG scintigraphy. J Nucl Cardiol. 2014;21:756 62, quiz 3 55, 63 5.
- [3] Nakajima K, Nakata T, Yamada T, et al. A prediction model for 5-year cardiac mortality in patients with chronic heart failure using <sup>123</sup>I-metaiodobenzylguanidine imaging. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2014;41:1673 – 82.

# 用於硼中子捕獲治療之多重含硼寡肽之設計與合成 Design and Synthesis of Multiple Boron-containing Oligopeptide as the Boron Delivery Agent for Boron Neutron Capture Therapy

計畫編號:108-2623-E-032-001-NU 計畫主持人:潘伯申 e-mail:138020@gms.tku.edu.tw 計畫共同主持人:李銘忻 執行單位:淡江大學化學系

# Abstract

In this project we aim to synthesize libraries of multiple boron-containing analogs by employing Ugi-four component reaction (Ugi 4-CR) (Scheme 1). These Ugi-4CR analogs would possess four key signatures: (a) a <u>di-peptide</u> skeleton that mimic basic metabolite (that allows the compound to be transported via POT pathway); (b) <u>boron</u> functional groups that could form the boronic acid-fructose complex with exceptional hydrophilicity; and (c) a <u>DOTA</u> appendage (that allows the Ugi-4CR analogs to be labeled by radioactive isotopes, such as <sup>177</sup>Lu and <sup>111</sup>In). The progress of this project is listed below.

**Keywords:** Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), DOTA, Ugi, Multicomponent reaction, radiolabeling, cancer

#### I. Introduction

The vast majority of traditional chemotherapies often come with the severe side effects (i.e. hair lost, dry skin). Thus, the search for the alternative methods to treat cancers becomes prominent in the field of cancer research. Unlike the other second-generation radiotherapies, Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) utilizes low thermal energy to irradiate the boron-10 isotope, which generates high-energy particles (<sup>7</sup>Li, and <sup>4</sup>He). These particles travel approximately equals to the average cell radius (10 µM) (Figure 1). Due to its limited path of travel, it is possible to destroy the targeted tumor cell tissue while leaving the normal cell tissue unharmed. As the result, BNCT has been considered as one of the ideal cancer treatment.<sup>1</sup> Although promising results have been collected in many clinical studies, there is still a substantial margin of improvement can be made in BNCT. 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. Although efforts of finding the ideal boron delivery agents started decades ago, there is not a single boron delivery agents fulfill all the requirements to date.2-7 In this regards, we propose a new category of boron-containing analogs, which might be possess the potential of being the ideal boron delivery agent for the BNCT.



Figure 1. Illustration of Radiotherapy by BNCT.

#### **II. Research Objective**

The specific aims of this research includes: (a) Constructs libraries of multiple boron-containing analogs *via* highly efficient Ugi four components reaction (Ugi-4CR);<sup>8</sup> (b) The desire products are linked to the DOTA component that could be further radio-label for the *in-vivo* studies.

### **III. Results and Discussion**

The strategy to construct the core molecular skeleton is shown in **scheme 1**. In this strategy, the Ugi-4CR was executed to obtain the core structure (i.e. **8**). Unlike the general observation, where a microwave irradiation condition would often give a higher yield, the conventional oil bath heating method was later found to be more suffice as it gave a higher yield (74%).



Scheme 1. Synthesis of Compound 8.

With the condition shown in **Scheme 1**, three additional analogues 9-11 were obtained and the yields are summarized in **Scheme 2**.



Scheme 2. Synthesis of Ugi-4CR Analogues

With the key compounds **8-11** in hand, a TFA deprotection protocol was executed to give the precursors needed for the attachment of DOTA. These precursors were later coupled with DOTA to give the final products **12-15**. (Scheme 3).



Scheme 3. Synthesis of Ugi-4CR with DOTA



Compound 16-19, quantitative

Scheme 4. Deprotection of DOTA via TFA procedure.

The standard deprotection of DOTA by using TFA procedure was executed (**Scheme 4**). The final products 16-19 were obtained in quantitative yield. These products are currently being purified by HPLC.

#### **IV. Conclusion**

In this project, we have successfully developed series of synthetic methodologies to construct the desire boron-containing products. The final products will be subjected to radiolabeling and biological testing once the HPLC purification process is completed. Through the support of this grant, an US Patent is granted (US 10,689, 404 B1). The following research proposals will be built based on this US Patent. In addition, the ROC Patent is also filed for the approval.

# 参考文獻

- (a) Barth, R. F. J. Neurooncol. 2003, 62, 1. (b) Busse, P. M.; Harling, O. K.; Palmer, M. R. J Neurooncol. 2003, 62, 111.
- [2] Srivas tava, R. R.; Singhaus, R. R.; Kabalka, G. W. J. Org. Chem. 1999, 64, 8495. (b) Das, B. C.; Das. S.; Li, G.; Bao, W.; Kabalka, G. W. Synlett. 2001, 9, 1419. (c) Kabalka, G. W.; Yao, M-L. Appl Organomet. Chem. 2003, 17, 398. (d) Diaz, S.; Gonzalez, A.; De Riancho, S. G.; Rodriguez, A. J. Organomet. Chem. 2000, 610,

25.

- [3] Gabel, D.; Foster, S.; Fairchild, R. G. Radiat. Res. 1987, 111, 14.
- [4] (a) Vicente, M. G. H. Curr. Med. Chem. Anti-Canc. Agents 2001, 1, 175. (b) Bregadze, V. I.; Sivaev, I. B.; Gabel, D.; Wohrle, D. J. Porphyrins. Phthalocyanines 2001, 5, 767. (c) Evstigneeva, R. P.; Zaitsev, A. V.; Luzgina, V. N.; Ol'shevskaya, V. A.; Shtil, A. A. Curr. Med. Chem. Anti-Canc. Agents 2003, 3, 383.
- [5] Barth, R. F.; Adams, D. M.; Soloway, A. H.; Alam, F.; Darby, M. V. *Bioconjug. Chem.* **1994**, *5*, 58.
- [6] Olsson, P.; Gedda, L. Goike, H. *Anticancer Drug Des.* **1998**, *13*, 279.
- [7] Endo, Y.; Iijima, T.; Yamakoshi, Y.; Kubo, A.; Itai, A. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* **1999**, *9*, 3313. (b) Lee, J-D.; Lee, C-H.; Nakamura, H.; Ko, J.; Kang, S. O. *Tetrahedron Lett.* **2002**, *43*, 5483. (c) Valliant, J. F.; Schaffer, P.; Stephenson, K. A.; Britten, J. F. *J. Org. Chem.* **2002**, *67*, 383.
- [8] Hsiao, C-Y.; Huang, S-Q.; Lien, W-H.; Hsu, C-Y.; Hsieh, K-L.; Lin, M-H.; Wu, M-J.; Fu, C-C.; Chen, H-C.; Fang, H-P.; Li, C-J.; Pan, P-S. *Res. Chem. Interm.*, 2017, 43, 3585

# I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用 Diagnostic value and clinical application of the I-123 MIBG for very early dementia with Lewy bodies

計畫編號: MOST 108-NU-E-442-001-NU 計畫主持人:邱百誼 e-mail: paiyibox@gmail.com 執行單位:秀傳醫療社團法人秀傳紀念醫院神經科

## 摘要

失智症是最常見的神經退化疾病,也是神經科學領 域中最常被研究的主題之一。根據國際阿茲海默協會 (Alzheimer's Disease International, ADI)於 2015 年所發 表的世界阿茲海默報告指出,失智症已造成巨大的社會 經濟負擔。失智病患的早期與明確的診斷是這類疾病研 究與防治的第一步。

路易氏體失智症(dementia with Lewy bodies, DLB) 是僅次於阿茲海默症(Alzheimer's disease, AD)之第二 常見的退化性失智症。由於 DLB 不僅在認知功能上產 生嚴重障礙,更會在許多情緒行為方面產生諸多異常, 同時造成病患與家屬極大的困擾,因此 DLB 的早期診 斷(尤其是失智前期)與防治是相當重要也逐漸受到重視 的議題。

在剛出爐之最新版的國際 DLB 診斷準則中,I-123 MIBG 已經名列 DLB 主要的診斷生物指標(biomarker)之 一。然而針對可能因為 DLB 引起之失智前期,即輕度智 能障礙(mild cognitive impairment, MCI),還甚少研究討 論其臨床表現與生物指標之相關性或是轉變為失智的 預測性。目前的假說認為 I-123 MIBG 的吸收缺損可能 在極早期的 DLB 即表現出來,然而針對還未失智之 DLB, 也就是可能是 DLB 引起之極早期病患,I-123 MIBG 之 研究甚少,也僅只於少數病例報告,例如 Fujishiro 等人 2012 年的兩個 amnestic MCI 病患。因此對於 DLB 極早 期病患的 I-123 MIBG 與臨床表現或其他生物指標之相 關性是非常值得探討的議題,甚至可能成為推測失智惡 化的重要預後指標。

本研究將用二年的時間,蒐集 DLB 與 non-DLB 病 患共 120 位(包括 DLB 59 與 non-DLB 61 位),進行完整 的生物指標評估並進行至少一年的追蹤,以評估 I-123 MIBG 在 DLB 的診斷價值、了解 I-123 MIBG 與其它生 物指標的相關性以及 I-123 MIBG 是否具有預測病人進 一步轉化為 DLB 失智症的預後角色。

**關鍵詞:**失智症、路易氏體失智症、輕度智能障礙、生物指標

# Abstract

Dementia is the most common neurodegenerative disorder and the most frequently studied subject in the field of neuroscience. According to the report of Alzheimer's Disease International (ADI) on 2015, fighting for dementia has caused tremendous financial burden all over the world. Early and accurate diagnosis of dementia disorders is the first step of prevention, management, and research of dementia.

Dementia with Lewy bodies (DLB) is the second most common degenerative dementia. The combination of severe cognitive and behavioral symptoms of patients with DLB has great impact on themselves as well as their caregiver. Therefore, early and accurate diagnosis of DLB has gradually become an important issue for the prevention and management of dementia disorders.

The newest consensus for the diagnosis of DLB on 2017 has indicated that the I-123 MIBG being one the most valued diagnostic biomarkers. The impairment of I-123 MIBG was believed to be observed in the early stage of DLB based on the finding by Fujishiro et al. on 2012. However, few studies have investigated the presentation of I-123 MIBG in very early stage of DLB. Besides, rare studies have speculated the predictive value of I-123 MIBG for progression of DLB.

In this study, we will use two years to enroll 120 patients (59 DLB and 61 non-DLB), perform detailed biomarker assessments for them and follow-up at least for one year. We aim to study the diagnostic value of I-123 MIBG in very mild DLB, the relationship of I-123 MIBG and other biomarkers and the predictive value of I-123 MIBG for the progression of DLB.

Keywords: dementia; dementia with Lewy bodies; mild cognitive impairment; biomarker

# I. 前言

失智症是最常見的神經退化疾病,也是神經科學領 域中最常被研究的主題之一。根據國際阿茲海默協會 (Alzheimer's Disease International, ADI)於 2015 年所發 表的世界阿茲海默報告指出,全球罹患失智症的人口在 2015 年會增加九百九十萬人而來到四千六百八十萬人, 其中約有一半的病人在亞洲;而其總醫療花費將高達八 千一百八十億美元,造成巨大的社會經濟負擔。如何早 期而正確地診斷,給予合適的治療、預後評估與安養成 了各國重要的醫藥衛生的難題。

#### Ⅱ. 主要內容

(1) 病患選擇方面,由於 I-123 MIBG 尚在食藥署審查當 中,因此尚未有病患執行此項檢查。因此自 107 年 3 月計畫通過開始,已經從本院失智症中心篩選出 合適病患 120 位。為了避免受到巴金森病(PD)干擾 (因為 PD 病患之 I-123 MIBG 吸收也是大部分異常), 因此在 non-DLB-MCI 中排除 PD-MCI 個案。

- (2) 診斷 DLB 的方法需要主要臨床特徵(認知起伏、視 幻覺、快速動眼期睡眠異常行為、與巴金森症)與生 物特徵(Tc-99m Trodat-1 brain SPECT, Tc-99m ECD brain SPECT,與 MRI),才足以區別 DLB與 non-DLB。診斷認知退化程度則需要詳細的神經心理檢 查。
- (3) 研究步驟首先是將重要的生物指標如 Tc-99m Trodat-1 brain SPECT、Tc-99m ECD brain SPECT、 MRI、詳細的神經心理、與血液指標如α-Synuclein 等在 DLB 與 non-DLB 兩組病患做比較。

#### III. 結果與討論

由於 I-123 MIBG 今年初雖然食藥署已經通過審查, 然而尚未供應病患執行此項檢查。因此自 107 年 3 月計 畫通過開始,已經從本院失智症中心篩選出合適病患 120 位。這些受試者均已完成除了 I-123 MIBG 之外所有 的生物指標(如 MRI、詳細的神經心理、與血液指標包括  $A\beta 40 \times A\beta 42 \times Tau 與 \alpha$ -synuclein)。

比較 DLB 與 AD 以及 Normal control 之背景資料, 結果顯示三組在年齡、性別、教育程度、CDR-SB 等基 本資料均有顯著不同。

比較 DLB 與 Non-DLB 之臨床表徵與血液指標包括 A  $\beta$  40、A  $\beta$  42、Tau 與  $\alpha$  -synuclein 顯示只有  $\alpha$  -synuclein 在區別 DLB 與 non-DLB 上面有顯著差異。然而這樣的 差異病不夠讓人滿足,如果加上新發展的簡易臨床動作 障礙量表,可非常有效地分辨兩組,而得到相當好的診 斷區辨準確性。

#### IV. 結論

總結目前之結果,雖然由目前的初步結果來看, MIBG 攝影在區別早期之 DLB 與非 DLB 在本研究尚無 結果,而在血液生物指標上面 DLB 與 AD 或是 DLB 與 normal control, α-synuclein 檢測均可以得到顯著統計差 異,如果加上簡易量表一起來提高準確率,效果將非常 顯著。因此這樣新型的的組合式診斷方式,勢必可以運 用在往後的診斷研究上面,可以推廣至一般的臨床應用, 用來提高臨床與研究診斷之正確性。

# 參考文獻

- [1] McKeith, IG, Boeve BF, Dickson DW, Halliday G, Taylor JP, Weintraub D, ... & Bayston A. Diagnosis and management of dementia with Lewy bodies Fourth consensus report of the DLB Consortium. Neurology 2017; 10: 1212.
- [2] Nagayama H, Hamamoto M, Ueda M, Nagashima J, Katayama K. Reliability of MIBG myocardial scintigraphy in the diagnosis of Parkinson's disease. J Neurol Neurosurg Psychiatry 2005;76:249–251.
- [3] Yoshita M, Arai H, Arai H, et al. Diagnostic accuracy of I-123-meta-iodobenzylguanidine myocardial scintigraphy in dementia with Lewy bodies: a multicenter study. PLoS One 2015;10:e0120540.
- [4] Tiraboschi P, Corso A, Guerra UP, et al. (123) I-

2betacarbomethoxy-3beta-(4-iodophenyl)-N-(3fluoropropyl) nortropane single photon emission computed tomography and (123) Imetaiodobenzylguanidine myocardial scintigraphy in differentiating dementia with Lewy bodies from other dementias: a comparative study. Ann Neurol 2016;80:368–378.

- [5] Fujishiro H, Nakamura S, Kitazawa M, Sato K, & Iseki E. Early detection of dementia with Lewy bodies in patients with amnestic mild cognitive impairment using 123 I-MIBG cardiac scintigraphy. Journal of the neurological sciences 2012; 315: 115-119.
- [6] Chiu MJ, Yang SY, Chen TF, Chieh JJ, Huang TZ, Yip PK, ... & Horng HE. New assay for old markersplasma beta amyloid of mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. Current Alzheimer Research 2012; 9: 1142-1148.
- [7] Chiu MJ, Yang SY, Horng HE, Yang CC, Chen TF, Chieh JJ, ... & Liu HC. Combined plasma biomarkers for diagnosing mild cognition impairment and Alzheimer's disease. ACS chemical neuroscience 2013; 4: 1530-1536.
- [8] Yang SY, Chiu MJ, Lin CH, Horng HE, Yang CC, Chieh JJ, ... & Liu BH. Development of an ultra-high sensitive immunoassay with plasma biomarker for differentiating Parkinson disease dementia from Parkinson disease using antibody functionalized magnetic nanoparticles. Journal of nanobiotechnology 2016; 14: 41.
# 政策推動與風險溝通(I)

# 利用實境技術增進人類與機器人之互動以輔助輻射作業之應用(II) Using Reality Technology to Enhance the Interactions between Humans and Remote Robots to Assist Radiation Operations

計畫編號: MOST 108-2623-E-002-001-NU 計畫主持人:陳湘鳳 e-mail:ssmith@ntu.edu.tw 計畫參與人員:郭振宇、黃俊琪、謝子傑 執行單位:國立台灣大學機械系

# 摘要

傳統的遠端操作系統通常不具備 3D 空間資訊,使 用者僅依靠遠端回傳的平面影像進行操作。因此無法得 知遠端環境與遠端機器人正確的空間關係。本研究建立 一個掃描機器人,可即時重建遠端 3D 場景,並利用擴 增實境技術(augmented reality, AR)添加視覺上的輔助, 增加使用者遠端操作的準確度。在 AR 環境中,使用者 可與虛擬機器人進行互動,通過拖拉末端位置追蹤器, 經過逆運動學的計算,控制遠端機械手臂的操作。在操 作機械手臂執行任務時,加入 AR 輔助提示,給予使用 者正確的操作方向與距離資訊。因為實體機器人可能暴 露在輻射環境下進行作業,而機器人中所使用的電子設 備皆為精密的零件,非常容易受到輻射的影響而損壞。 為了評估機器人零件在輻射環境下,是否能正常的運作, 本研究對伺服馬達、電路控制板、相機、行動電源等, 進行輻射劑量的照射實驗,了解各電子零件的輻射容許 劑量,以供未來遠端機器人設計參考。

關鍵詞:遠端機器人、擴增實境技術、輻射劑量。

#### Abstract

Traditional remote operating systems usually do not have 3D spatial information. Users only rely on returned 2D images for operation. Therefore, correct spatial relationship between the remote environment and the remote robot cannot be known. This research built a scanning robot that could reconstruct remote 3D scenes in real time and used augmented reality (AR) technology to add visual aids to increase operation accuracy. In the AR environment, users can interact with the virtual robot, by dragging the end effector. Inverse kinematics was used to control the operation of the remote robot arm. When manipulating the robot arm to perform tasks, AR auxiliary information was added to give users the correct direction and distance information. Because the physical robot might be exposed to radiation, and the electronic devices used in the robot were all high-precision parts, they were very susceptible to damage due to radiation. In order to evaluate whether the electronic parts could operate normally in a radiation environment, this research also conducted radiation dose exposure experiments on servo motors, circuit control boards, cameras, and power banks, to understand the allowable radiation dose for each electronic part. The result could be used as a reference for future remote robot design.

Keywords: remote robot, augmented reality technology,

radiation dose.

# I. 文獻探討

近年來,一些研究學者利用虛擬實境 (virtual reality, VR) 技術,與擴增實境(augmented reality, AR)技 術建立虛實模型,以增進遠端機器人的操作精準度。例 如,Zhong, et al. [1]建構了一個包括三輪移動平台的遠 端機器人,並在平台上方安裝一個6個自由度機械手臂。 並且使用 VR 建立使用者介面,機械手臂的所有控制都 在 3D 虛擬環境中顯示。Lipton, et al. [2]使用 Unity3D 結 合 Oculus Rift,建立一個 VR 虛擬控制室,使用者可在 虛擬控制室中看見真實機器人所拍攝到的影像,透過手 持控制器來操控真實機器人。實驗結果顯示,其操作速 度快於直接操作遠端真實機器人。

Yew, et al. [3] 建立一個 AR 遠端機器人系統,需 預先對操作環境建模,加入攝影機拍攝到的場景做虛實 結合。遠端機械手臂搭載相機,相機拍攝到的影像通過 無線傳輸到 AR 環境中。AR 環境包含遠端回傳的影像、 虛擬機械手臂與視覺輔助,使用者穿戴頭戴式顯示器查 看 AR 環境,並依照視覺輔助,使用手持控制器進行遠 端操作。

Brizzi, et al. [4]使用深度攝影機捕捉真實場景,並在 使用者端重現。通過穿戴式裝置,將上肢的動作映射至 遠端機械手臂,並加入了三種視覺輔助提示。結果顯示, 該系統對於不熟悉遊戲或 VR/AR 環境的人有很大的幫 助,但對於熟悉的人而言幾乎沒有幫助,是一款適用於 新手的操作系統。Lee and Park [5]提出一個使用觸覺裝 置,進行操作並給予觸覺回饋的 AR 遠端操作系統。該 系統具有即時的三維感測與環境重建功能。使用者可以 根據虛擬機器人與重建之場景進行遠端操作。並加入虛 擬導引,通過限制運動來達到有效的引導使用者操作。 結果顯示加入虛擬導引顯著的提升效能,但有部分的使 用者表示過度的觸覺回饋會降低操作效能。

傳統的遠端操作系統通常不具備 3D 空間資訊,使 用者僅依靠遠端回傳的影像進行操作。並且在操作遠端 機器人時,使用者無法看到遠端機器人本體,因此僅能 通過遠端回傳的資訊與使用者的經驗,判斷遠端機器人 的位置。近年來,即時定位與地圖構建(simultaneous localization and mapping, SLAM)技術,可幫助機器人在 未知的環境中,藉由裝載的感測器獲得外界環境資訊, 而得之遠端機器人的位置與姿態。

Newcombe, et al. [6]提出的 KinectFusion 方法,是 基於深度相機的即時追蹤與三維重建算法。運算流程由 四個步驟組成。第一步驟讀入深度影像,並轉換為頂點 與法向量。第二步驟根據第一步驟所得到的頂點與法向 量,和前一幀的位置姿態,藉由光線投射法從重建的模 型投影出點雲。利用迭帶最近點(iterative closest point, ICP)求解當前的位置姿態。第三步驟根據第二步驟所得 到的結果將點雲融合到網格模型中。這一步驟使用截斷 符號距離函數(truncated signed distance functions, TSDF)。 第四步驟根據當前位置姿態對重建的模型做投影得到 當前視角下的點雲與法向量,用於下一幀的計算。由於 該算法使用 ICP 求解位置姿態, ICP 的限制也表現在 KinectFusion 上。建模過程中,若是相機視野範圍內的 環境空間限制不完全時, ICP 算法會失效,而導致建模 過程的中斷。

Labbé and Michaud [7]提出基於外觀的即時建圖 (real-time appearance-based mapping, RTAB-Map)。基於 外觀的閉環檢測中,比較特徵的計算量會隨著地圖增加 而變大,進而影響到運算時間。該研究使用記憶體管控 的方法來加速運行。該研究假設頻繁被訪問的定位點更 容易形成閉環,因此將最近與經常出現的定位點保存於 工作記憶體中(working memory, WM),將其他定位點移 到長期記憶體中(long-tern memory, LTM),不參與閉環 檢測運算。當閉環被檢測到時,可以將與之相臨的定位 點重新放入 WM 中,參與閉環檢測。研究結果顯示該方 法能有效控管記憶體,使計算時間不隨著定位點的增加 而增長。

Mur-Artal and Tardós [8]提出的 ORB-SLAM2 是一 套可以使用單目、雙目及彩色深度相機(RGB-D)的 SLAM 開源算法。該系統包含三個主要執行緒,第一個 稱為追蹤(tracking),這一執行緒通過提取影像特徵,匹 配至區域地圖,並最小投影誤差來定位相機。第二個稱 為區域定位(local mapping),這一執行緒管理區域地圖, 根據新生成的關鍵幀(keyframe)生成地圖點,通過區域光 束平差法(bundle adjustment, BA)優化關鍵幀。第三個稱 為閉環檢測(loop closing),檢測大型閉環並通過圖優化 來消去累積誤差,這一執行緒會啟動第四執行緒。第四 執行緒做全域 BA 優化。將該系統與其他現有的系統比 較,測試結果顯示使用 BA 相比於使用 ICP 或是直接追 蹤法更精確,且計算量更少,不需要使用 GPU 運算,使 用一般 CPU 即可達到即時追蹤。丟失追蹤後能快速找 回,追蹤定位穩定性佳,姿態變化流暢不容易跳動。但 其建構的地圖為稀疏點雲,無法由稀疏點雲看出相機拍 攝的場景內容。

以上研究說明將 VR 及 AR 技術引入機器人遠端操 作系統中,不僅增強了機器人的工作能力,而且拓展了 遠端操作的應用領域。VR 遠端操作系統通常藉由預先 建模讓使用者在已知環境進行任務操作。但對於未知環 境通常以 2D 影像提供遠端資訊,讓使用者依照回傳的 影像進行任務操作。AR 系統相較於 VR 系統多了座標 的整合與視覺的提示。在 AR 系統中藉由座標整合,可 以得知遠端機器人與遠端場景的正確空間資訊,根據任 務需求給予視覺輔助提示,如夾爪至目標物的路徑與距 離提示。本研究操作環境為未知,考慮到 AR 能給予使 用者更多空間資訊與輔助,因此本研究選擇 AR 作為遠 端操作系統實現的方法。

# Ⅱ. 座標整合

座標整合的意義在於給予使用者正確的空間感,錯 誤的座標整合將會造成使用者距離認知錯誤,進而造成 操作失誤或減低操作效率。本研究基於虛實模型建立一 個 AR 遠端操作系統。虛實模型分為使用者、遠端機器 人與 AR 環境。AR 環境用於整合使用者與遠端機器人, 因此需要座標整合來整合虛擬環境與真實環境。通過虛 擬連結真實,讓使用者在AR環境中有正確的空間資訊。

本研究使用 Unity3D 建立 AR 環境,在 AR 環境中 整合 HTC Vive、遠端機器人與 Intel RealSense D435 深 度攝影機等硬體。HTC Vive 用於捕捉使用者的位姿與操 作,使用 Intel Realsense D435 捕捉遠端環境,在 AR 環 境中進行座標整合。以下列出本研究將整合的各個座標 系:

- HTC Vive
- Uinty3D (AR 環境)
- 遠端機器人
- 遠端環境
- Intel RealSense D435 彩色影像
- Intel RealSense D435 深度影像

# III. 遠端操作系統

遠端操作系統功能根據遠端機器人硬體設備可分為三部分,第一部分為移動平台的控制,通過控制左右輪正反轉與速差使遠端機器人於未知場景中活動。第二部分為機械手臂,除了探索未知環境外,遠端機器人還可以進行一些簡單的操作,第三部分為定位與三維重建,通過 D435 捕捉遠端場景深度與彩色影像,回傳至遠端操作系統,運用 ORB-SLAM2 定位,並根據定位結果重建遠端場景。

使用者操作如圖 1 所示,使用 HTC Vive 頭戴式顯 示器撷取使用者的位姿作為 AR 環境的顯示,並使用 HTC Vive 控制器操作遠端機器人。操作模式分為移動平 台模式與機械手臂模式。首先使用者通過 AR 遠端機器 人系統,操作遠端機器人於未知環境中工作。一開始需 要先掃描環境,尋找目標物。圖 2(a)與(b)為使用者在 AR 環境中所看到的景象。圖 3(a)與(b)為在真實環境中遠端 機器人的姿態與位置。在 AR 環境中亦可使用 AR 輔助 功能夾取方塊, AR 輔助提示包含夾爪末端到方塊的直 線路徑與距離,如圖 4 所示。

虛擬機器人根據末端追蹤器的位置與角度,通過逆 運動學算出每個馬達應旋轉的角度,並將資訊傳遞給遠 端機器人,使遠端機器人與虛擬機器人同步動作。使用 者可以使用左手控制器之 Trigger 顯示 AR 輔助提示。 AR 輔助提示給與使用者夾爪末端到目標物之直線路徑 與距離,引導使用者正確的操作夾爪。使用者在 AR 環 境中可以通過變換視角來觀察重建場景與虛擬機器人 之關係。使用者亦可以近距離觀察重建場景中的物體, 可以得到放大物體的效果。AR 輔助提示可以幫助使用 者精準地操作遠端機器人。



圖 1: 使用者操作示意圖



(a) 掃描環境 (AR 環境)



(b) 尋找標的物(AR 環境) 圖 2: 機器人在 AR 環境中掃描環境並移動到標的物處



(a) 掃描環境 (真實環境)



(b) 尋找標的物(真實環境) 圖 3: 機器人在真實環境中掃描環境並移動到標的物處



圖 4: AR 輔助夾取方塊

## IV. 電子零件輻射照射評估

因為實體機器人可能暴露在輻射環境下進行作業, 為了評估機器人相關零件在輻射環境下,是否能正常的 運作,需要對機器人所需的伺服馬達、電路控制板、相 機、行動電源等,進行輻射劑量的照射實驗。這對於在 輻射環境下工作之機器人非常重要,可確定遠端機器人 在輻射環境下可正常運作的時間。以下為本究所測試之 電子零件: Arduino uno, Arduino nano, Arduino Teensy 3.2, MG996R 伺服馬達,直流減速馬達, KT iwatch 網路攝影 機,行動電源。屏蔽用零件為一個尺寸為長 87mm x 寬 87mm x 高 86mm,厚度均為 6mm 的中空鉛盒,如圖 5 所示。



圖 5: 屏蔽用鉛盒

# 4.1 實驗方法

本實驗利用龍潭核能研究所之水下腔體照射,將待 照射物放入密閉腔體內,使腔體沉入水中進行鈷 60 輻 射照射,累積劑量與照射時間長短成正比。使用表1之 電子零件檢測方式,作為判定零件是否損壞之標準。

表1:電子零件檢測方式

項目	檢測方式
Arduino UNO nano Teensy3.2	程式碼燒入、執行是否正常
伺服馬達 (MG996)	旋轉至指定角度數次並量測誤差
直流减速馬達	輸入額定電壓是否正常旋轉
KT iwatch 網路攝 影機	測試畫面是否有色偏及黑點產生
行動電源	測試是否正常充放電

#### 4.1.1 田口法

本研究採用田口法進行實驗設計,將輻射會影響電 子零件之變因列出,找出每一種因素的影響程度,並改 良機器人之設計。田口法以工程角度去事先了解品質問 題,利用簡單的直交表(orthogonal array),規劃出一套有 系統之實驗設計,搭配簡潔的變異數分析,並以訊號干 擾比(signal-noise ratio, S/N)來分析實驗數據,達到以較 少的實驗數組合、較低的成本與較少的時間,使設計者 輕易的找出產品或實驗最佳組合,達到品質特性穩健化 之目的。 本研究運用田口法的步驟,來探討機械手臂的電子 零件設計變因,找出每一種變因受輻射照射影響的程度。 控制變因包括:

- 1. 輻射劑量(50、100、150 戈雷)
- 2. 不同的控制板(uno 板和 nano 板)
- 3. 不同的馬達(伺服馬達與直流馬達)
- 4. 鉛板屏蔽與否。

表 2 為參數因子與水準對照表。依據田口式直交表 實驗方法,1 個因子搭配 3 個變動水準,3 個因子搭配 2 個變動水準,可採用直交表 Lo如表 3 所示來設計實驗。

表 2: 參數因子與水準對照表

因子	設計參數	Level 1	Level 2	Level 3
Α	輻射劑量	50	100	150
В	微控制板	uno	nano	
С	馬達	伺服	直流	
D	电路鉛板屏蔽	鉛	無屏蔽	

表 3: Lo 直交表

	А	В	С	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	1	2	1
4	2	1	2	2
5	2	2	1	1
6	2	2	1	2
7	3	1	2	2
8	3	2	1	1
9	3	1	2	1

# 4.1.2 田口法實驗結果

經由田口法測試,找出最佳化的設計參數,然而九 組實驗結果顯示,在最大的輻射劑量下,所有的電子零 件仍皆無損壞。代表在本研究所選用的市售電子零件至 少能承受輻射累積劑量 150 戈雷。然而本研究目的希望 能找出電子零件最大劑量容忍度,因此另外進行累積劑 量照射實驗的。

## 4.1.3 累計照射

本次實驗將各項電子零件進行累積劑量照射,照射 方法為密閉腔體水下照射,由100及150 戈雷為每次照 射區間劑量大小,每次區間照射完畢後隨即檢測電子零 件是否受損,照射次數總共分為11 個區間,前兩次區間 為150 戈雷,各別約花費45 分鐘達到該劑量,其餘區 間皆以100 戈雷間隔,各別花費約30 分鐘達該劑量, 照射累積劑量達1200 戈雷後停止。本次使用之電子零 件為全新一批,未將田口法實驗使用之電子零件做摻雜。

## 4.1.4 累計照射實驗結果

累計照射實驗照射結果如表 4 所示, Arduino uno 在累積劑量 600 戈雷時, 無法燒入程式碼, 判定為損壞。 MG996R 伺服馬達在累積劑量 1100 戈雷時, 無法轉動, 判定為損壞。行動電源在累積劑量 400 戈雷時, 無法對 其他裝置進行充電,且電量指示燈顯示異常,判定為損 毀。其他的電子零件在累積劑量達 1200 戈雷時,皆能夠 正常運作,因此判定為正常。

項目	累積劑量(戈雷)	狀態
arduino UNO	600	損壞
arduino nano	1200	正常
arduino Teensy3.2	1200	正常
MG996R 伺服馬達	1100	損壞
直流减速馬達	1200	正常
KT iwatch 網路攝影機	1200	正常
行動電源	400	損壞

表 4: 電子零件損壞狀態

#### IV. 結論

本研究建立一個以 AR 遠端掃描機器人系統,用於 危險或未知環境的掃描與任務操作。遠端機器人為一移 動平台搭載機械手臂,具備移動與夾取放置的能力,藉 由加裝深度攝影機捕捉遠端場景,回傳至本地端即時建 立三維點雲模型。使用者可在本地端,以不同的角度與 距離觀察 AR 環境,藉由操控 AR 環境中之虛擬機器人, 精準地操控遠端真實機器人的動作。

另外,為了評估這些市售的各電子零件在輻射環境 下,是否能正常的運作,本研究對機器人所需的伺服馬 達、電路控制板、相機、行動電源等,進行輻射劑量的 照射實驗,了解目前各零件的輻射容許劑量。進行的輻 射照射場地為桃園縣龍潭核能研究所百萬居里鈷 60 照 射廠。照射實驗的結果得知,當累積劑量達 400 戈雷時, 行動電源損壞;當累積劑量達 600 戈雷時,arduino UNO 損壞;當累積劑量達 1100 戈雷時,MG996R 伺服馬達損 壞,而當累積劑量達 1200 戈雷時,直流減速馬達、KT iwatch 網路攝影機、Arduino nano、Arduino Teensy3.2 皆 能夠正常使用。由此可知,目前大部分的電子零件皆能 承受高劑量的輻射照射。

# 參考文獻

- [1] G. Zhong, Y. Kobayashi, Y. Hoshino, and T. Emaru, "Intuitive teleoperation of nonholonomic mobile robot with a manipulator based on virtual reality and WiFi," presented at the IET International Conference on Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012), Shenzhen, China, 2012.
- [2] J. I. Lipton, A. J. Fay, and D. Rus, "Baxter's homunculus: virtual reality spaces for teleoperation in manufacturing," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 3, no. 1, pp. 179-186, 2018.
- [3] A. W. W. Yew, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, "Immersive augmented reality environment for the teleoperation of maintenance robots," Procedia CIRP, vol. 61, pp. 305-310, 2017.
- [4] F. Brizzi, L. Peppoloni, A. Graziano, E. D. Stefano, C. A. Avizzano, and E. Ruffaldi, "Effects of augmented reality on the performance of teleoperated industrial assembly tasks in a robotic embodiment," IEEE

Transactions on Human-Machine Systems, vol. 48, no. 2, pp. 197-206, 2018.

- [5] D. Lee and Y. S. Park, "Implementation of augmented teleoperation system based on robot operating system (ROS)," presented at the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018.
- [6] R. A. Newcombe et al., "KinectFusion: real-time dense surface mapping and tracking," presented at the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Basel, Switzerland, 2011.
- [7] M. Labbé and F. Michaud, "Appearance-based loop closure detection for online large-scale and long-term operation," IEEE Transactions on Robotics, vol. 29, no. 3, pp. 734-745, 2013.
- [8] R. Mur-Artal and J. D. Tardós, "ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras," IEEE Transactions on Robotics, vol. 33, no. 5, pp. 1255-1262, 2017.

# 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 X-ray Lithography Proximity Effect Correction Technologies and Applications in High-precision High-aspect-ratio Component Fabrication

計畫編號:MOST 108-2623-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、李建霖、柯志瑋、葉冠霆、莊孟翰、 許益綸、蘇品元 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(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。

**關鍵詞**:X-ray微影,電子束微影,鄰近效應修正,高深 寬比,光罩。

#### Abstract

As compared to deep ultraviolet lithography (DUVL) and extreme ultraviolet lithography (EUVL), most regular process materials are relatively transmissive to the exposure wavelengths in X-ray lithography. This makes it capable of fabricating high-aspect ratio structures, such as those in high-performance diffractive optical elements and MEMS devices. The difficulties and complexities of nonlithographic processes such as deposition and etching can be significantly alleviated. However, high-performance devices usually also require very precise critical dimension control. The patterning fidelity of Conventional 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 electron scattering phenomena in X-ray mask fabrication and nearfield 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.

**Keywords:** X-ray lithography, electron 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σ為部分同調係數,等於照明和投影光學元件 之間的 NA 比 (即 σ= NAp/NAi) [8]。由於材料上的重大 困難,進一步降低 DUV 波長和增加浸潤液的折射率在 經濟上已被認為不可行,而 NAp 和o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鍵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 氯離子束直寫製像;(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(如 圖 5 [16])。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。於本計畫中,已初步進行了氦離子束微影模 擬,透過氦離子束散射模型和光阻模型(如圖 7-9 及表 2) 加上適當的光阻門檻值,可求得預測曝光結果(如圖 10 及表 3),由表 3 的誤差(小於 5%)可見氦離子束微影於製 像控制的能力。除了使用基於光阻之奈米結構製造技術 外,利用高能離子束銑削製造亦是種可行方案,利用氦 離子束直接銑削可以省去光阻塗佈、曝光和顯影的製程, 顯著降低製程的複雜性(如圖 6)。其製程控制的穩定性也 可從其高解析度和低臨界尺寸變異的實驗結果中窺見 (如圖 11-13 及表 4), 惟直接銑削方式所需時間長, 較適 合用於小面積(<10 微米平方)之原型製作及測試。綜合 上述氦離子束直寫微影及銑寫初步研究結果,顯示此方 法具有製造高解析、高精度 X-ray 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。初步的 X-ray 微影繞射模擬和鄰近 效應修正結果如圖 14-16 及表 5-7,根據表 7 所示,使用 鄰近效應修正後能有效降低 X-ray 微影的製像誤差,未 來將會研發平行加速運算技術,以加快實際 X-ray 微影 模擬速度及拓展應用波段。

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 X-ray 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。除 X-ray 實驗站外,同時考慮使用另一條波長 為 12.4 奈米(軟 X-ray)的光束線,用於初步製造高長 寬比結構。兩條光束線的詳細參數總結於表 8、9。

#### IV. 結論

本研究計畫完成了第一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及製 程複雜度,並在第二項工作項目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。 而第三項 X-ray 微影技術用於精密高深寬比結構,亦有 初步和國家同步輻射研究中心確認 X-ray 光源及微影設 備參數,並確立未來實際進行 X-ray 微影將使用之方法, 同時引入儀科中心人員協助實驗設備之建置。

#### 參考文獻

- 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] Bor-Yuan Shew, Jui-Tang Hung, Tai-Yuan Huang, Kun-Pei Liu and Chang-Pin Chou, "High resolution x-ray micromachining using SU-8 resist," J. Micromech. Microeng. 708–713, 2003

			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	子	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
		X-ray 光罩製程		Vroy他剧机供
	2	所需之粒子束散		A-lay 佩彩設備
1		射模擬		<b>参</b> 製取住化
1	2	X-ray 光罩製程	<b>六 赴 敕 珊</b>	
	3	研發	又厭定吐	
	4		X-ray 微影能量	
	4		分布模擬	
	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	3	粒子束鄰近效應	<b>文獻較理</b>	X-ray 微影模型
	5	修正技術	入廠正理	校正技術
	4		X-ray 微影修正	
	-		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
				电元件测试

表1計畫規劃時程



圖1 浸潤式光學投影式微影系統



圖 2 三種間距分割製造流程:(左)雙重曝光,(中)雙重製 像,(右)自對準雙重製像



圖 3 截至 6 奈米半間距節點的 DRAMs 和微處理單元 之可能微影製程方案



圖 4 截至 6 奈米半間距節點的洞型圖像之可能微影製 程方案



圖 5 傳統 X-ray 光罩製作流程[16] (a)氣相沉積 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (b)背面濕蝕刻 (c)濺鍍 Cr/W 金屬層 (c)光學微影 (d)乾 蝕刻 Cr/W 吸收層並去除光阻 (f)蝕刻背面殘餘基板留 下薄膜



圖 6 利用氦離子束直接銑削之 X-ray 光罩製作流程



去	1	<b>氛離子車掛射描擬之材料社構詳細來暫</b>
衣	1	刻砷了木取剂保强人们们临伸计细参数

層數	材料	厚度(微米)
1	ZEP 520A	0.22
2	Au	0.8
3	SiN (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	1.3
4	Silicon	500



圖 8 氦離子束散射模擬結果



圖9 氦離子束於圖5結構中之能量擴散函數

表 2 圖 10 模擬結果					
Circle	1	2	3	4	5
Design	1975	1286	1031	888	794
Simulation	1995	1305	1035	900	810

Error

1.0% 1.5% 0.4% 1.4%

2.0%



圖 10 氦離子束微影模擬測試圖案-波帶片

表 3	氦離子り	束銑削	X-ray	光罩	測試參數
-----	------	-----	-------	----	------

曝光設備	Zeiss ORION NanoFab HIM
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 厚度(奈米)	50
W厚度(奈米)	50
基板	Silicon



圖 11 長/寬 5-50 奈米矩形陣列測試圖案(左), 氦離子束銑削結果(右)



表 5 X-ray 微影模擬結果(未進行鄰近效應修正)

目標尺寸(奈米)	45
設計尺寸(奈米)	45
模擬結果(奈米)	35.51
誤差	21.09%



圖 16 X-ray 繞射模擬能量分布(鄰近效應修正後)

表 6 X-ray 微影模擬結果(鄰近效應修正後)

目標尺寸(奈米)	45
設計尺寸(奈米)	61.72
模擬結果(奈米)	43.09
誤差	4.24%

表 7 BL18B1 光束線參數

Operational (general use)	Yes
%Time available (general use)	75%
Experiments	X-ray Micromachining, LIGA
Source	Bending Magnet
Ring Current(mA)	300 mA
Average Beam Lifetime	Infinite Under NSRRC Top Up Conditions
Critical Photon Energy	~2 keV (~6 Å)
Spot Size	100 mm (H) x 8 mm (V)
Optics	None
Flux	3 x 10E(11)
Other Instrumentation	Clean Room
X-ray Scanner	Jenoptik DEX01 (4" substrate)

# 表 8 BL21B2 光束線參數

Source	U9
Acceptance Angle H x V (mrad)	0.25 x 0.25
Monochromator	6m-CGM
Energy (eV)	5~100
Wavelength (nm)	12.4~248 nm
Average Beam Lifetime	Infinite Under NSRRC Top Up Conditions
Focused Mirror	Si
Focused Beam Size H x V (µm)	200 x 40
Resolving Power	Ε/ΔΕ
Flux (photons/sec)	10 <sup>12</sup>

# 大氣常壓微電漿技術合成矽量子點 Synthesis of Si Quantum Dot using Atmospheric-Pressure Microplasmas

計畫編號: MOST 108-2623-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

近年來矽量子點因具備優異的物理及化學特性,已 被報導可應用於光電元件、感測材料、能源、催化與生 醫相關技術等領域。然而目前矽量子點的主要製備方式 製程所需時間長、前驅物成本高、操作溫度高等因素不 利於工業化大量生產,加上反應機制不清楚不易控制產 物結構及材料特性,尚無法實現產業應用。本計畫主要 目的為建立開發大氣常壓微電漿矽量子點合成技術及 光致發光感測應用。本計畫構想包括(1).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;(2).利用臨場拉曼光譜研究電漿 反應合成矽量子點;(2).利用臨場拉曼光譜研究電漿 反應合成矽量子點;(2).利用臨場拉曼光譜研究電漿 反應合成矽量子點;(2).利用臨場拉曼光譜研究電漿

**關鍵詞:**矽量子點;大氣常壓電漿;合成;拉曼光譜; 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 ; Raman ; photoluminescence.

# I. 前言

量子點材料約於 1980 年代被發現,然而直到近十 年來,量子點材料才被報導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,例如

韓國三星正積極開發量子點顯示器。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(Silicon quantum dots; SiQDs)為零維的矽奈米 材料,一般為尺度小於10nm 的矽奈米結構,具有有良 好的化學與物理特性性。由於其特殊的奈米尺寸,電子 受到邊界束縛而產生量子侷限效應和邊界效應,進而衍 生獨的光學、物理與化學特性,如光致發光 (photoluminescence),已被報導可應用在光電元件、感測 材料與生醫相關技術等領域。矽為地球含量相當高的元 素,為目前半導體製程主要使用的材料,經適當處理對 環境友善,且對人體無明顯生物毒性,因此矽量子點為 相當優良的量子點材料之一。矽量子點為零維度的奈米 材料,其尺寸被定義為小於10 nm。矽量子點近年來逐 渐受到注視,是由於其擁有奈米材料的結構性質,且具 有良好的化學與物理穩定性。再者,由於其奈米尺寸的 大小,電子受到邊界束縛而產生量子侷限效應和邊界效 應,進而衍生出與半導體相似的性質,以及獨特的光學、 物理與化學特性,加上發光性質稳定性好、毒性低以及 生物相容性較好等,引起了物理、化學、生物等领域科 學研究者的廣泛關注。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。

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。本計畫構想利用大氣常壓微電漿進行高產率矽 量子點合成技術開發。台灣量子點相關技術開發較晚, 關鍵量子點材料仍仰賴國外進口,因此開發具高穩定性 及高發光效率的量子點材料對產業發展相當重要,進行 量子點材料相關學術研究及產業技術對國家的永續發展有重大的影響。本計畫研究目標為開發大氣常壓微電 漿矽量子點合成技術,進行電漿反應可行性研究,產物 材料分析及光學特性研究,及電漿反應動力學研究。最 終目標為希望開發台灣產業可使用的矽量子點合成技 術。

# Ⅱ. 主要內容

本研究使用四乙氧基矽烷(tetraethoxysilane, TEOS) 分子當作前驅物,藉以了解電漿反應如何將前驅物經化 學途徑轉換成矽量子點奈米結構。接著,本計畫進一步 探討在大氣常壓微電漿系統下,如何利用電漿參數控制 矽量子點的奈米結構,及如何影響產物物理或化學層面 的特性。本研究將根據之前的研究經驗設計大氣常壓微 電漿反應裝置,主要部件包括直流電 DC 高壓電源,氣 體流率控制器(MFC),化學耐高溫耐酸鹼玻璃反應槽, 電子電路控制裝置及數據紀錄/控制用電腦,經組裝後進 行反應測試。以下簡單扼要介紹反應流程:首先,配製 20 毫升四乙氧基矽烷(tetraethoxysilane, TEOS)溶液作為 矽前驅物,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  $150 \, \mathrm{k}\Omega$  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。氯氯氯體流 率約為 25 sccm (standard cubic centimeter per minute), 電 聚電流約為 5~9 毫安培,兩電極間距離為1公分,經過 5~60分鐘的電漿反應。

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。

# 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 漿反應裝置,主要部件包括直流電 DC 高壓電源,氣體 流率控制器(MFC),化學耐高溫耐酸鹼玻璃反應槽,電 子電路控制裝置及數據紀錄/控制用電腦,經組裝後進行 反應測試。以下簡單扼要介紹反應流程:首先,配製20 毫升四乙氧基矽烷(tetraethoxysilane, TEOS)溶液作為矽 前驅物,接著進行大氣常壓微電漿反應。電漿反應系統 的陽極為白金片(platinum),經由150 kΩ的電阻連接到 電流供應器;陰極則是對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9毫安培,兩電極間距離為1公分,經過60 分鐘的電漿反應。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。將合成 之矽量子點水溶液,在UV燈源激發下,可觀察出明顯 的藍色發光現象,與文獻結果符合(圖1左)。



圖 1. (左) 前驅液四乙氧基矽烷(tetraethoxysilane, TEOS) 及 SiQD 溶液在日光(左)及 UV 燈(右)下之照片。(右) 前 驅物進行電漿反應前後之 UV 可見光吸收圖譜。

首先,由光激發光分佈分析(PL mapping)與 UV V-vis 吸 收光譜數據證實利用 TEOS 為矽前驅物成功利用大氣常 壓微電漿反應器合成出矽量子點,因其材料在未經過微 電漿處理之前並未有光激發光(圖 2 左)與 UV 吸收峰(圖 1 右)的出現,而當經過電流為 7 毫安培與反應時間 30 分鐘微電漿處理後,由光激發光分佈分析結果顯示出其 放射光與激發光分別在 410 nm 與 340 nm (圖 2 右),且 UV-vis 吸收光譜指出在 278 nm 及 324 nm 波長具明顯 吸收現象,並分別被歸因為 C=C 的 $\pi \rightarrow \pi*$ 與 C=O 的 n  $\rightarrow \pi*$  鍵結轉變(圖 1 右)。



圖 2. (左)前驅物未進行電漿反應之 PL mapping 圖。(右) 前驅物進行電漿反應之 PL mapping 圖。

此外,我們更對其電漿物理參數作進一步的調控, 首先為時間參數,我們調控反應時間從5分鐘到60分 鐘,由結果顯示,其發光強度(圖3左)與濃度(產率)(圖 3右)會隨著反應時間的增加而增加,這是因為提高反應時間可以使系統有更多時間去進行反應以提升矽量子點的發光強度與濃度。



圖 3. (左) 前驅物進行電漿反應後之隨時間變化之 PL 圖 譜。(右) 前驅物進行電漿反應後之隨時間變化之 UV 可 見光吸收圖譜。

接著,我們對其電流參數進行調控,我們利用不同 電流參數分別為5、7、9 毫安培在反應時間為30分鐘 下進行電漿反應,由結果顯示,其發光強度(圖4左)與 濃度(產率)(圖4右)亦會隨著電流的提高而增加,其原因 為當我們提高電流時,可使其電漿功率提升,並且系統 中會有更多的電子被提供以有利於矽量子點的合成。



圖 4. (左) 前驅物進行在不同電流下電漿反應之 PL 圖譜。 (右) 前驅物進行在不同電流下電漿反應之 UV 可見光吸 收圖譜。

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,圖5左 為穿透式電子顯微鏡影像,結果顯示本研究經由大氣常 壓微電漿處理後成功將矽烷前驅物合成出矽量子點,並 均勻分散在溶液中。此外,我們亦利用影像分析及電腦 軟體代入高斯函數,並建立趨勢線以計算出粒徑大小約 為5.68 ± 0.81 nm (圖5右)。



圖 5. (左) SiQD 之 TEM 照片。(右) SiQD 之粒徑分析圖。

# IV. 結論

本年度執行成果良好,已完成建立微電漿反應器, 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。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發光現象, UV-vis 吸收光譜數據證實產物為矽量子點,在 310 nm 及 375 nm 波長具明顯吸收現象,與文獻結果符合。目 前研究顯示前驅物轉換量子點產率較低,約為 20%,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。

参考文獻

# 離子佈植技術合成金屬奈米粒子之新穎製程開發與機制探討 Study of Metallic Nanoparticle Synthesis by A Novel Method Based on Ion Implantation Technology

計畫編號:MOST 108-NU-E-007-003-NU 計畫主持人:趙得勝 e-mail:<u>dschao@mx.nthu.edu.tw</u> 計畫共同主持人:梁正宏 計畫參與人員:李俊叡、林亞勳、蔡長勳、潘品辰、張皓淯 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

# 摘要

金屬奈米粒子具有獨特於塊體材料的物性與光學 特性,在許多應用領域具有高度發展潛力。本研究已利 用離子佈植技術,成功開發離子束合成法及離子佈植誘 發缺陷輔助合成法,用以合成金屬奈米粒子並進行其特 性分析。針對離子束合成法,利用離子佈植將金離子植 入於二氧化矽基材之中,並藉由熱退火製程合成金奈米 粒子。由此獲知退火條件為金奈米粒子微結構的重要影 響參數,也證實金奈米粒子所獨具之表面電漿子共振及 光致發光增強特性。針對離子佈植誘發缺陷輔助合成法, 首先將氦離子佈植於單晶矽基材,並經由後續的缺陷退 火、銀薄膜沉積、銀金屬擴散等製程合成銀奈米粒子於 單晶矽基材之中。研究結果顯示此法可形成孤立且尺寸 較小的銀奈米粒子;再者,空腔為形成銀奈米粒子的必 要媒介,形成空腔的臨界氦離子佈植通量約為9×10<sup>15</sup> cm<sup>-</sup> 2。上述兩種方法都是基於離子佈植技術所發展而來,兩 者各有其優劣,應視實際應用需求選擇適用的方法。 關鍵詞:離子佈植、金屬奈米粒子、離子束合成、表面 電漿共振、光致發光。

## Abstract

Metallic nanoparticles have recently attracted considerable interest in some application fields due to its unique physical and optical properties. In this project, based on ion implantation technology, two kinds of methods were successfully developed to synthesize metallic nanoparticles and analyze their properties, i.e. ion beam synthesis and defect-assisted synthesis. For the ion beam synthesis, Au ions were implanted into SiO<sub>2</sub> substrate and Au nanoparticles were then formed within substrate by different thermal annealing conditions. The results indicated that annealing temperature and ambient are important factors to affect the microstructure of Au nanoparticles, and also proved the unique properties of Au nanoparticles including surface plasmon resonance (SPR) and photoluminescence (PL). In regard to the method of defect-assisted synthesis, He ions were first implanted into Si substrate, and then and Ag nanoparticles were synthesized in Si substrate through subsequent defect annealing, Ag thin film deposition, and Ag metal diffusion processes. The results showed that this method can form isolated and smaller metallic nanoparticles. Nanovoids are the necessary medium for the nucleation and growth of Ag nanoparticles, and the threshold implant fluence of He ions to form nanovoids is about  $9 \times 10^{15}$  cm<sup>-2</sup>. In summary, both the methods developed in this study can be used to synthesize metallic nanoparticles, but each has its own pros and cons. One should select the suitable method depending on the actual application requirements. Keywords: Ion Implantation, Metallic Nanoparticles, Ion

Beam Synthesis, Surface Plasmon Resonance (SPR), Photoluminescence (PL).

# I. 前言

奈米尺度的材料或結構相較於與巨觀尺度會顯現 出截然不同的新穎物性,如:機械性質、電性、光學、 化學、以及生物特性等,藉此可發展或實現獨特且創新 的應用。金屬奈米粒子的合成與特性應用在近年來已日 漸受到愈來愈多的關注,相關的研究成果也呈現指數型 的成長 [1,2]。目前已經有許多不同的技術被提出用於 製作低維度的奈米結構材料,其中又以利用離子佈植技 術合成奈米粒子的方法最受矚目,此方法又可稱為離子 束合成法 (ion beam synthesis), 如圖 1 所示。相較於其 它方法,離子束合成法具有佈植離子的能量、劑量可被 精準地控制、製程與現有的積體電路製程相容、可形成 各式的奈米粒子、合成的奈米粒子具有穩定的物性與化 性等優點。然而,離子束合成法仍然存在一些問題需要 克服,如:離子佈植製程的輻射損傷會造成矽晶材料的 非晶化、被植入的高濃度金屬原子也可能會影響矽晶材 料的磊晶再成長 (epitaxial regrowth) [3, 4]。

為了解決這些問題,M.S. Martin 等人即於 2014 年 提出離子佈植誘發缺陷輔助合成銀奈米粒子的新型作 法,如圖 2 所示 [5]。此方法係藉由低通量的氦離子佈 植來控制材料中空孔缺陷的數量與位置,利用這些空孔 缺陷來輔助金屬原子進行異質磊晶成長,進而形成金屬 奈米粒子。此方法仍然可保有離子佈植製程易於控制的 優勢,且只需要植入極低通量的氦離子,可大大地降低 材料因過度晶格損傷所致的非晶化程度,同時也不會因 為過多的金屬離子存在而影響奈米粒子的磊晶成長,可 有效地改善傳統離子束合成法可能面臨的晶格損傷及 其衍生的相關問題。然而,此一新穎性的製程概念目前 的發展仍處於研究階段,除了金屬奈米粒子的生成機制 未盡明確之外,目前已完成的驗證結果也僅限於特定的 實驗條件。因此,為能開發適用的金屬奈米粒子合成方 法,本研究計畫將分別採用兩種方法來進行金屬奈米粒 子的合成,同時也將嘗試評估所合成之金屬奈米粒子的 光學與物理特性,藉此深入地瞭解離子束合成法與離子 佈植誘發缺陷輔助合成金屬奈米粒子製程的作用機制 及其重要的影響因子,並可獲知最佳化的製程條件且有





# Ⅱ. 實驗方法

本研究計畫的工作流程圖依離子束合成法與離子 佈植誘發缺陷輔助合成法略有不同,主要的步驟包括材 料準備、離子佈植照射、熱退火處理、金屬薄膜濺鍍、 以及金屬奈米粒子光學與材料特性分析。對於離子束合 成法,採用4吋n型單晶砂(Si)基板,並使用濕氧化 法成長二氧化矽 (SiO<sub>2</sub>) 薄膜於 Si 基板上, SiO<sub>2</sub> 薄膜厚 度約為150nm。針對離子佈植誘發缺陷輔助合成法,初 始材料則選擇 4 吋 n 型單晶 Si 基板。對於離子束合成 法,由於金奈米粒子已被證實可具備優異的光學特性, 因此本研究選擇採用金離子,設定的佈植能量為 60 keV, 佈植通量則為 5×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup>。此外,為能產生更多的 多餘矽缺陷以用於發光,除單一金離子的植入之外,本 研究也嘗試使用砂/金離子序列共佈植,先進行矽離子佈 植之後,再進行金離子佈植,佈植能量分別為25keV及 60 keV, 通量則同為 5×10<sup>16</sup> ions/cm<sup>2</sup>。另一方面, 在離子 佈植誘發缺陷輔助合成製程中,離子佈植的目的係為了 在 Si 基板中產生空孔缺陷,用以做為金屬奈米粒子異質 磊晶成長的侷限邊界。由過去的研究顯示,氦離子可在 材料內部產生高密度的空孔缺陷,因此本研究即選擇採 用氦離子佈植來做為產生空孔缺陷的離子源,並適當地 改變離子佈植參數,如:離子能量與佈植通量。本研究 所採用的離子佈植條件詳列於表1之中。

	表	1	`	離子佈植條件
<ul><li>(a) 糖子束会成法</li></ul>				

Parameter	Ion Species	Fluence (#/cm <sup>2</sup> )	Ion Energy (keV)	Ion Current (µA)	Implantation Time
Single Ion Implantation	Au	5×10 <sup>16</sup>	60	1.5	1 hr 38 m
Sequential	1st step: Si	5×1016	25	1	2 hr 26 m 40 s
Ion Implantation	2nd step: Au	5×1016	60	1	2 hr 26 m 40 s

(b) 離子佈植誘發缺陷輔助合成法

Ion Species	Fluence (#/cm <sup>2</sup> )	Ion Energy (keV)	Ion Current (µA)	Implantation Time
He	5×1015	100	15~40	73 m
	5×1015		15 ~ 35	48 m 44s
He	9×1015	40	$15 \sim 40$	1 h 25 m
	2×1016		35 ~ 48	2 h 13m

# III. 結果與討論

# 1. 離子束合成金奈米粒子

圖 3 所示為金佈植試片在退火前後的吸收光譜變化, 由結果可以發現當退火溫度高於 650 ℃ 時,即可於 520 nm 處出現一特定的吸收峰,可推知金奈米粒子應已於 退火試片中形成。圖 4 所示分別為未退火試片以及 1100℃ 退火試片的 TEM 影像,在未經退火的試片中, 可以發現許多由金原子彼此集結所形成的團聚物 (clusters),且其平均粒徑較小。另一方面,由 1100℃ 退 火試片的 TEM 分析可知,由於退火導致的奧斯瓦爾德 成長過程 (Ostwald ripening process),促使金原子進一步 地因擴散行為而發生集結成長的現象,因而可形成狀似 於圓形的奈米粒子,其尺寸分佈約介於數 nm 至幾十 nm 之間。



圖 4、金佈植試片之 TEM 截面影像

為了驗證金奈米粒子的 SPR 效應可有效地增強材 料的發光訊號,本研究也針對金佈植試片進行 PL 光致 發光能譜的量測。圖 5 所示為未退火與不同退火溫度試 片之 PL 光譜量測結果,可以發現 在 320、370、460 和 620 nm 附近出現了四個特徵峰。明顯地,這些 PL 特徵 峰的強度在退火之後才出現,且隨著退火溫度的升高而 增加,並且在退火溫度升至 1100℃ 時達到最大,尤其是 與 ODC 發光中心相關的 PL 特徵峰,由此證實金奈米粒 子所具備的 SPR 效應應為另一個造成 PL 特徵峰強度增 強的重要原因。

除了單一金離子佈植條件之外,本研究也嘗試加入 矽/金序列共佈植的實驗條件,藉以產生更多的多餘矽缺 陷用以增強發光。圖 6 所示為矽/金序列共佈植試片的 PL 光譜隨退火溫度的變化,結果顯示可產生更為連續且 發光強度更為明顯的 PL 特性能峰,且其發光強度亦隨 著退火溫度的上升而增長,此說明金奈米粒子的存在可 使得其 ODCs 相關的 PL 能峰強度和熱穩定性獲得改善。 圖 7 則顯示砂/金序列共佈植試片的 TEM 截面影像。明 顯地,在 900℃ 和 1100℃ 退火的矽/金序列共佈植試片 中依然可以形成金奈米粒子,但是在兩個高佈植通量的 矽/金離子佈植之後,在 SiO2 表面下佈植深度附近區域 造成了嚴重的輻射損壞,並於退火之後留下明顯的空孔 缺陷。



圖 6、矽/金序列共佈植試片之 PL 能譜量測結果



圖 7、 矽/金序列共佈 植試片之 TEM 截面影像

#### 2. 離子佈植誘發缺陷輔助合成法

為了確認空腔可在適當的氦離子佈植條件及缺陷 退火之後形成,本研究採用三種不同的佈植條件:100 keV  $\cdot$  5×10<sup>15</sup> #/cm<sup>2</sup> ; 40 keV  $\cdot$  5×10<sup>15</sup> #/cm<sup>2</sup> ; 40 keV  $\cdot$ 2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup>, 並皆以 950°C、1 小時進行缺陷退火。根 據過去的研究,氦原子於單晶矽中局部濃度須達到 3× 10<sup>20</sup> #/cm<sup>3</sup> 才足以經由退火製程形成空腔 [9]。由 SRIM 模擬結果推算,100 keV、40 keV 之 5×10<sup>15</sup>#/cm<sup>2</sup> 氦離子 佈植之氦原子濃度尖峰濃度未達 3×10<sup>20</sup> #/cm<sup>3</sup>,以致在 後續的缺陷退火過程中氦原子團簇時無法達成核臨界 尺寸,於 TEM 分析時確實並未偵測到氦氣泡或空腔。 另一方面,圖8所示則為40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 氯離子 佈植試片,經缺陷退火 950°C、1 小時後的 TEM 截面 影像,明顯觀察到深度約為350nm處即有空腔形成。



圖 8、40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 氦佈植試片經缺陷退火之 橫截面 TEM 影像:(a) 低倍率;(b) 局部放大

完成缺陷退火 (950°C、1小時) 形成空腔之後,接 著即進行金屬薄膜沉積及擴散退火,擴散實驗則以三種 佈植參數進行:100 keV、5×10<sup>15</sup> #/cm<sup>2</sup>;40 keV、9×10<sup>15</sup> #/cm<sup>2</sup>;40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup>,於爐管中進行氮氣退火 750 °C、1 小時。圖 9 為 40 keV、9×10<sup>15</sup> #/cm<sup>2</sup> 試片經擴散 退火之後的橫截面 TEM 分析結果,此試片之佈植劑量略 高於空腔形成之臨界劑量,確實於 TEM 中觀察到一空 腔形成,同時伴隨的差排數量也明顯減少。使用能量色 散 X 射線光譜 (Energy Dispersive x-ray Spectroscopy, EDS) 分析,證實空腔中黑色顆粒為銀奈米粒子,而在空 腔以外之區域並無銀的訊號。圖 10 則為更高佈植劑量 40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 試片之橫截面 TEM 分析結果,可以 發現於擴散退火階段,空腔數量並無明顯增減,同樣地 也經由 EDS 分析證實空腔內已形成銀奈米粒子。與圖 8 結果比較,僅進行缺陷退火之後的真空空腔較趨向球狀, 而經擴散退火填入銀原子之空腔則較趨向立方體。圖 10 (b) 所示之黃色虛線線條為矽晶格與銀晶格之間的莫爾 干涉條紋,此條紋間距為 9.6 Å,根據下列公式:  $L_{111} = \frac{d_{Si(111)}d_{Ag(111)}}{1}$ 

(1)

dsi(111)-dAg(111) 其中 L 為莫爾條紋間距、dsi 為矽晶面間距、dAg 為銀晶 面間距 [7]。又 d<sub>Si(111)</sub> 約為 3.135 Å、d<sub>Ag(111)</sub> 約為 2.385 Å,由公式計算可求得 Liii 為 9.5Å,與 TEM 分析所測 得之間距 9.6 Å 相當一致,由此可推知銀奈米顆粒在空 腔中係以矽 { 111 } 面進行異質磊晶 (hetero-epitaxial)。針 對圖 10 (b) 之空腔形狀進行方向分析,其形狀乃因表面 能影響所致,在空腔成長階段時,表面能大的面成長速 率慢,反之表面能小的面成長速率快,故最終穩定形狀 之面趨向表面能較小之面。圖 11 為 40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 試片之 SIMS 縱深分析與橫截面 TEM 影像的對照圖,可 以發現銀原子之縱深分佈在深度約 450 nm 處明顯出現 一峰值,可證實其為銀奈米粒子所貢獻之訊號。



圖 9、40 keV、9x1015 #/cm<sup>2</sup> 氦離子佈植試片經缺陷退 火及鍍銀後擴散退火之橫截面 TEM 影像:(a) 低倍率; (b) 局部放大;(c) 與(d) 銀奈米粒子及其 EDS 分析



圖 10、40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 氦佈植試片經缺陷退火及 鍍銀後擴散退火之橫截面 TEM 影像:(a) 低倍率;(b) 局部放大;(c) 與(d) 銀奈米粒子及其 EDS 分析



圖 11、40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 氦佈植試片經缺陷退火及 鍍銀後擴散退火之 SIMS 縱深分析與橫截面 TEM 影像

本研究另外也進行單一擴散退火製程的實驗,亦即 氦離子佈植試片不另行進行缺陷退火,直接濺鍍 100 nm 銀薄膜之後進行擴散退火熱處理。圖 4.20 所示為單一擴 散退火製程試片的 SIMS 縱深分析,約於深度 400 nm 左 右可發現兩個銀原子分布的尖鋒,位於較深處之分布尖 峰與圖 12 所示之尖峰位置相近,與預先進行缺陷退火之 銀奈米粒子帶深度相當,應可歸因於銀奈米粒子形成所 致。另一方面,大約於 370 nm 深度附近可發現另一個 銀原子的分布尖峰。由於此試片並未進行缺陷退火,可 能導致尚有大量缺陷仍存在於矽晶體之中,在擴散退火 熱處理階段,單晶砂之缺陷恢復與銀原子擴散同時進行, 而銀原子則可能在此過程中被捕獲於 TEM 中無法解析 的更小缺陷。圖 13 所示為單一擴散退火製程試片的橫截 面 TEM 影像。在未進行缺陷退火熱處理的試片,可於 TEM影像中發現較多的銀奈米粒子捕獲於較小之空腔中 如圖 13(a) 與 (b) 所示,銀奈米粒子亦會形成於如圖 13 (c) 所示之大空腔中,此現象可能因 Hen-Vm 團簇尚未成 長至穩定大小,即捕獲銀原子而開始發生異質磊晶所致。 此外,本研究同樣針對此試片進行莫爾條紋分析,如圖 13(d),所測得之莫爾條紋約為 9.8Å,與圖 100 之測量 值相當,故此試片中的銀奈米顆粒仍以砂 {111} 進行異 質磊晶,此乃因銀原子以表面能最小之 {111} 面進行化 學吸附有較低之自由能,與空腔形狀、大小,以及有無預 先進行缺陷退火無關。因此,針對超過臨界劑量之佈植 試片,預先進行缺陷退火時,氦原子有足夠的熱動能進 行一連串之複雜團簇行為,最終於氦原子濃度尖峰深度 形成空腔鍊,並於後續金屬擴散退火熱處理時捕獲銀原 子。另一方面,針對單一擴散退火製程的試片,氦原子之 團簇行為與銀原子擴散同時進行,並於矽晶體形成微小 空腔或是其它類型的微小缺陷,並捕獲銀原子進行異質 磊晶,這也導致 SIMS 分析結果可能出現較寬分布尖峰。



圖 12、40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 未進行缺陷退火之氦佈植 試片,經鍍銀及擴散退火後之 SIMS 縱深分析



圖 13、40 keV、2×10<sup>16</sup> #/cm<sup>2</sup> 未進行缺陷退火之氦佈植 試片,經鍍銀及擴散退火後之橫截面 TEM 影像:(a) 與 (b) 小型空腔中的銀奈米粒子;(c) 大型空腔中的銀奈 米粒子;(d) 銀奈米粒子之莫爾條紋

# IV. 結論

本研究已成功利用離子束合成法及離子佈植誘發 缺陷輔助合成法成功合成金與銀奈米粒子,除針對兩種 不同方法的作用機制進行探究之外,也進一步地獲知金 屬奈米粒子所展現的獨特光學與微結構性質。為利於國 內相關機構未來在探索新型應用時的參考,茲歸納上述 兩種方法之優劣分析如表 2 之中,期可做為國內生醫、 光電、電子等產業未來在評估與開發相關前瞻應用技術 時的重要參考。

表 2、兩種金屬奈米粒子合成方法之優劣分析比較

方法及特徵比較	離子束合成法	離子佈植誘發缺陷輔助合成法
離子佈植製程	須開發特定金屬離子源,且須進 行極高通量的離子佈植	僅須採用較常見的氦離子 <u>佈</u> 植, 且 <u>佈</u> 植劑量中等
金屬種類	只要具備適用的金屬離子源,即 可形成不同種類的金屬 <u>奈</u> 米粒子	金屬 <u>奈</u> 米粒子的種類會受限於 金屬原子與基材 <u>的共晶溫度</u>
<u>奈米粒子特性</u>	金屬 <u>奈米粒子較易</u> 團聚,尺寸較 大且不易控制	可形成孤立且尺寸較小的金屬 <u>奈</u> 米粒子
辐射损伤问题	高通量的金屬離子 <u>佈植會</u> 導致基 材嚴重的輻射損傷,可能會影響 金屬 <u>奈</u> 米粒子的特性	中通量的氦離子 <u>佈</u> 植造成較輕 微的輻射損傷
基材選擇性	金屬離子 <u>佈</u> 植製程並不受限於基 材,基材的可選擇性相對較高	基材種類取決於可 <u>形成空腔的</u> 材料,或須要再進行製程開發

# 参考文獻

- [1] A.L. Stepanov, Rev. Adv. Mater. Sci. 27 (2011) 115.
- [2] N. Kulkarni and U. Muddapur, Journal of Nanotechnology 510246 (2014) 1.
- [3] A. Meldrum et al., J. Mater. Res. 16 (2001) 2670.
- [4] E. Rimini, *Ion Implantation: Basics to Device Fabrication*, Kluwer, Boston (1995).
- [5] M.S. Martin et al., Scientific Reports 4 (2014) 6744.
- [6] V. Raineri, S. Coffa, E. Szila´gyi, J. Gyulai, E. Rimini, *Physical Review B*. 61 (1999) 937-945.
- [7] P.B. Hirsch et al., *Electron Microscopy of Thin Crystals*, Plenum Press, New York (1967).

# 以電漿處理提升 HfO<sub>2</sub> 為基礎鐵電記憶體之可靠度與抗輻射性 Improved Reliability and Anti-Radiation for HfO<sub>2</sub>-based Ferroelectric Memory by Plasma Treatment

計畫編號: MOST 108-2623-E-007-002-NU 計畫主持人: 巫勇賢 e-mail: yunhwu@gapp.nthu.edu.tw 計畫參與人員: 陳坤意、蔡宜珊、許俐雯、賴亭潔 執行單位: 國立清華大學工程與系統科學系

#### 摘要

本計畫於矽基板上以 HfZrOx 鐵電材質製作 FeFET 鐵電記憶體,探討在不同劑量的<sup>60</sup>Coγ-ray 輻射照射下 FeFET 鐵電記憶體的耐久度、可靠度及資料保存 (retention)能力的表現。研究結果發現當總游離劑量在 300 krad-10 Mrad之間,隨著輻射劑量增加,引起鐵電 材質中的晶格變形,加上氧空缺的形成,使得初始的Pr 數值逐漸衰減。儘管如此,但照射輻射對於記憶視窗並 無負面的效應。在資料保存能力方面,不論輻射劑量高 低,其資料保存能力隨時間衰減的速率幾乎沒有差別, 在 25 °C之下延長至十年時其電流開關比仍有 2.2×10<sup>3</sup>, 表示資料保存能力幾乎不受輻射的影響。然而在反覆操 作下,因為氧空缺的增加造成耐用性下降,照射輻射 300 krad 的試片其記憶視窗會由初始的 1.60 V衰減成 10<sup>6</sup> 次 之 0.52 V。未來的改善方向為加強 HfZrOx 及矽基板中間 之介面層的品質,減少缺陷密度,從而提高可靠度。

**關鍵詞:**γ射線輻射、鐵電材質、鐵電記憶體、耐久度

、資料保存時間、可靠度。

#### Abstract

HfO<sub>2</sub>-based ferroelectric field effect transistors (FeFET) on Si were employed as the platform to investigate the impact of  ${}^{60}$ Co  $\gamma$ -rays radiation on memory characteristics. For pristine state, the memory window by  $\pm$ 4 V sweeping for non-irradiated devices is 1.48 V which does not degrade with total ionizing dose (TID) of 300 krad and 10 Mrad radiation dose even though the remnant polarization (P<sub>r</sub>) decreases due to radiation-induced oxygen vacancies (Vo) and lattice distortion in the ferroelectric material  $HfZrO_x$  (HZO). With the radiation dose level, the devices still hold the current ratio between "1" and "0" state of  $2.2 \times 10^3$  by extrapolating to 10 years at 25 °C, which is comparable to that of non-irradiated devices. The most adverse effect of radiation is the deteriorated endurance caused by the increased number of Vo during cycling test (+5.5 V, -5 V/10 µs) as evidenced by the degraded memory window of 0.52 V at 10<sup>6</sup> cycles from initial 1.60 V for devices with 300 krad radiation dose. Further robust HZO and SiOx interfacial layer against radiation is required to suppress the bond break so that the reliability can be improved.

**Keywords:** ferroelectric, HfZrO<sub>x</sub>, FeFET memory, endurance, retention, reliability.

I. 前言

目前主流的非揮發記憶體為 3D-NAND 快閃記憶 體。3D-NAND已是成本相當經濟且成熟的記憶體技術, 儘管如此,即使外加電壓已在 3.3 V以下,其記憶胞內 的操作電壓仍大於10V。為了在晶片上提供10V以上 的記憶體操作電壓,通常在周邊電路會設計 charge pump 之電壓倍增電路。然而,當記憶體操作電壓與外加電壓 差異越大時, charge pump 電路的功率消耗會急遽地增加, 造成不必要的能源耗損。為了進一步實現高效能之綠能 非揮發記憶體,目前有四大前瞻性的記憶體技術受到產 業界的矚目,包括(1)相變化隨機存取記憶體 (Phase Change RAM, PCM)、(2) 磁阻式隨機存取記憶體 (Magnetoresistive RAM, MRAM/STT-RAM)、(3) 電阻式 隨機存取記憶體 (Resistive RAM, ReRAM)以及(4) 鐵電 記憶體(Ferroelectric Memory)。這些前瞻性的記憶體技 術可以彌補電腦系統中 DRAM 與硬碟(HDD)間明顯的 運算速度差異,可視為儲存系統等級的記憶體(Storage Class Memory, SCM) •

與其他前瞻技術相較之下,鐵電記憶體具備非揮發 性,擁有極佳的操作速度(10-100 ns 等級)、功率消耗(每 位元消耗能量1-10 fJ)以及可靠度(超過10<sup>12</sup> endurance)。 事實上,以電晶體搭配鐵電材質電容(1T1C)之鐵電記憶 體早已由富士通半導體自 1999 年起商業化量產。這種 稱為 FeRAM 之鐵電記憶體是以 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PZT)作為 鐵電材質量產,可惜該記憶體在資料讀取時是所謂的破 壞性讀取(destructive reading),必須在讀取資料後再寫入 正確的資料,造成額外的功率消耗。此外,常見的鐵電 材質如 PZT、SrBi<sub>2</sub>Ta<sub>2</sub>O<sub>9</sub> (SBT)[1]、Sr<sub>2</sub>(Ta,Nb)<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、 Pb<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>11</sub>、(Bi,La)<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (BLT)並不相容於目前的積體 電路製程[2],在大容量與低價化的障礙都比現行的記憶 體高。故即使已經發展多年仍無法擴大市場。

儘管如此,鐵電記憶體本質上的高速運作仍吸引了 科學家與工程師持續的研發,近年來以鐵電材質為基礎 所開發的新一代記憶體-鐵電電晶體(Ferroelectric FET, FeFET)採用非破壞性的讀取方式克服了 FeRAM 的限制, 並實現了低功耗與高速操作的綠能記憶體,在新世代的 記憶體技術中極具潛力。FeFET 記憶體為單一電晶體架 構,不需要額外的電容,製程上僅需將閘極氧化層改以 鐵電材質取代即可。其運作原理是在 FeFET 的閘極施加 高於 coercive 電壓(Vc)可改變鐵電層內的極化方向,進 而決定通道是強反轉(inversion)或是加強通道的聚積 (accumulation)狀態,導致元件之臨界電壓(threshold voltage,  $V_{TH}$ )有所變動,可作為邏輯 1 或 0 的儲存。邏 輯 1 或 0 所對應的 VTH 差異稱為記憶視窗(memory window, MW)。目前大多數報導的 FeFET 記憶體其操作 電壓可在 4 V-6 V以下,操作速度小於 100 ns,明顯優 於傳統的快閃記憶體。

## Ⅱ. 主要內容

輻射主要會為半導體元件帶來三種影響,包括(a) Displacement Damage、(b)總游離劑量(Total Ionizing Dose, TID)與(c)單粒子效應(Single Event Effect, SEE)。 其中太空環境的游離輻射所造成的效應稱為總游離劑 量,其對半導體元件氧化層的影響尤其明顯,以N型通 道 MOSFET 元件來說,開極施加足夠大的電壓能使元件 導通,但是經過輻射照射後,高能粒子如電子、質子、 γ射線等通過氧化層時原子會游離化並產生電子電洞對 (electron-hole pairs)。此時因電子遷移速率較電洞快速, 電子以非常快的速度離開氧化層。未能重新復合 (recombination)的電子及電洞將會被捕捉至氧化層,在氧 化層及矽基板介面的捕捉電荷在元件關閉狀態時有可 能形成反轉層(inversion layer)造成漏電流提升及臨界電 壓(threshold voltage)偏移,若臨界電壓偏移量過大則會 造成元件失效。

傳統快閃記憶體是以電荷儲存於浮動閘極(floating gate)或電荷儲存層(charge trapping layer)與否作為判斷 資料 0 與 1 的依據。然而這樣的儲存機制易受到 alpha particles、宇宙射線(cosmic rays)、重離子(heavy ions)、γ 射線或 x-rays等因素之影響導致電荷流失與資料反轉, 即所謂的軟錯誤(soft error),而通常在記憶體的電路中採 用 error-correcting code (ECC)技術來更正軟錯誤。

然而,由於鐵電記憶體是以鐵電材質內的極化方向 作為判斷資料0與1的依據,因此產生 soft error 的機率 大幅降低,具有極高的抗輻射特性,故除了一般的高密 度資料儲存之應用外,亦可應用於太空衛星、核能產業 與醫療電子,因此長久以來吸引了學界與業界的廣泛興 趣。更重要的是,鐵電記憶體較高的抗輻射性也使得 ECC 的電路設計更為簡化。本計畫以 HfO2為基底之鐵 電層 HfZrOx與相容於積體電路之製程,探討 FeFET 鐵 電記憶體之抗輻射能力及相關機制,期盼開發低功率、 高速操作、非揮發性且具備高可靠度與抗輻射性之 FeFET 鐵電記憶體。

#### Ⅲ. 結果與討論

#### (A) 基本鐵電記憶體電性分析

本計畫之實驗規劃分為兩個階段,第一階段以 12 nm HfZrOx 鐵電層(ALD HfO2:ZrO2 = 1:1 cycle ratio, 250 °C成長溫度)進行矽晶元上鐵電記憶體製程參數之探討。 實驗採用閘極優先製程(Gate first process),由汲極(D)及 源極(S)包圍閘極電極(G)。第二階段則以最佳化的鐵電 記憶體參數為基礎進行不同總游離計量測並分析記憶 體可靠度與輻射計量之關聯性。本計畫共設計三種鐵電 記憶體樣品,其中包括以鈷 60γ-射線照射總游離計量為 300 krad 與 10 Mrad 之樣品以及未照輻射的樣品則作為 對照組。

■ 1 顯示三種實驗樣品在±4 V 直流電壓下來回掃描的 IDs-VGs轉換特性,電壓以 50 mV/sec 速度增加。在 IDs-VGs轉換特性曲線中展現逆時針方向的遲滯曲線,證明了 HfZrOx 薄膜的鐵電性。此外,隨著輻射照射也可 觀察到三個現象:(a)元件關電流提升、(b)元件飽和電流 提升和(c)次臨界斜率幾乎沒有改變。對(a)來說,這是因 為輻射所引發的電荷(charges)聚積在場氧化層附近,其 靠近活化區域(activation region)使得電流在源極及汲極 間形成漏電流路徑[1]。對(b)來說,輻射在氧化層所產生 的缺陷電洞(trapped holes)形成了額外的區域,降低了通 道串聯電阻使汲極飽和電流提升,如圖2所示[3]。對(c) 來說,次臨界斜率幾乎不變的原因來自介面缺陷密度 (interface state density)不受輻射而影響。

本研究之記憶體視窗(MW)是以定電流(constant current)方式計算來回掃描時臨界電壓差值,而未照射輻 射之鐵電記憶體、照射鈷 60 y-射線 300 krad 之鐵電記憶 體與照射鈷 60 γ-射線 10 Mrad 之鐵電記憶體其記憶體 視窗大小分別 1.45 V、1.60 V與 2.75 V, 元件的開闢比 (ON/OFF ratio)則分別為 2.6×10<sup>4</sup>、7.8×10<sup>3</sup>與 5.7×10<sup>4</sup>。 從此結果可以發現經過輻射照射元件的記憶體視窗並 未隨著輻射劑量增加而減少,這與先前傳統鐵電材料 SBT 做成的輻射元件實驗結果並不相同[1]。事實上,記 憶體視窗與缺陷電荷捕捉(charge trapping)的數量有直接 關聯,缺陷電荷捕獲效應在氧化層厚度較厚的元件上會 有顯著的效應,因其氧化層有極性會吸引電子電洞對從 電極與矽基板注入,此實驗採用 12 nm 之 HfZrOx 則受 到較小的捕獲缺陷電荷效應。從電流電壓特性曲線可以 看到照射鈷60 γ-射線元件的平帶電壓(flat-band voltage) 往負方向平移,原因來自鈷 60 γ-射線照射期間留下許 多氧空缺在HfZrOx之中。

# (B) 鐵電薄膜殘存極化值與操作次數之關聯性

圖 3、圖 4、圖 5 分別顯示了三種實驗樣品之鐵電 電極矩切換電流(FE-dipole switching current)隨著操作次 數(脈衝切換次數)之變化,而此量測所施加的脈衝條件 為+5.5/-5 V、10 µs, 最高的操作次數達 106。未照射輻 射之鐵電記憶體在初始的操作下即顯示了明顯的峰值, 代表 HfZrOx 薄膜鐵電性的形成。當重複操作次數增加, 峰值電流隨操作次數增加,並且有峰值平移的現象,因 為鐵電的唤醒(wake-up)效應,電極矩轉換電流隨著輻射 劑量增加而減少。為了深入探討照射游離輻射後鐵電材 料的鐵電性表現,本研究採用 PUND (Positive-Up-Negative-Down) 方法量化殘存極化值 (remnant polarization, Pr),計算結果如圖 6。在初始的操 作下,未照射輻射的實驗樣品其 Pr 值為 6.9 μC/cm<sup>2</sup>,而 當輻射量增加至 300 krad 與 10 Mrad 時,則 Pr值則分別 降為 5.7 μC/cm<sup>2</sup> 與 2.5 μC/cm<sup>2</sup>。造成初始 Pr 值隨輻射量 增加而降低的現象主要是因為鈷 60 γ-射線照射的期間, 輻射產生大量電子電洞對(electron-hole pairs, EHP)在鐵 電層薄膜,其高能粒子使得Hf-O與Zr-O鍵結產生斷裂, 並留下許多氧空缺(oxygen vacancy, Vo+)在整個 HfZrOx 薄膜。氧空缺留在整個 HZO 薄膜導致晶域釘札(domain pinning),使得電偶極不易隨外加電場改變而調變其方向, 故照射鈷 60 γ-射線之鐵電記憶體之 Pr值會比未照射輻 射之鐵電電晶體還要小[4]。當重複操作次處增加後,所 有樣品的 Pr值都因為去晶域釘札(domain depinning)而增 加,在105次操作後剩餘極化值達到穩定。輻射所產生 的氧空缺導致照射輻射元件之 Pr值下降, 而輻射所產生 的氧空缺與輻射照射劑量成比例,因此在 HfZrOx 薄膜 中需要花更久的時間做喚醒效應。

#### (C) 鐵電薄膜殘存極化值與輻射照射之關聯性

從圖 6 可知,隨著輻射劑量增加,HfZrOx 鐵電薄膜 之 Pr值亦呈現下降趨勢,這也意謂著其鐵電性有劣化的 現象,為了瞭解造成此現象的原因,本研究採用高解析 度 X 光繞射儀進行薄膜的晶格排列與晶相分析,試圖由 結晶的狀態來解釋鐵電性與輻射的相依現象。X光光源 為銅靶(Cu Ka, 波長為 0.15418 nm), 掃描的繞射角度由 2θ = 20 至 80 度,掃描間隔為 0.1 度。使用 X 光結晶繞 射圖分析材料的結晶結構,並依照繞射圖形發生的位置 (20)及該峰值相對應的繞射強度(intensity)為參考依據判 斷材料的結晶相。從 X 光結晶繞射圖,如圖 7,通常 HfO2 system 在 30.5 度峰值時會視為鐵電(orthorhombic, o)晶 相形成。如**圖 8**所示,當輻射照射劑量增加至 10 Mrad, 鐵電正交晶相 o-phase 往更大的 2θ 偏移 0.19 度,高能量 的輻射可能導致晶格變形並降低鐵電性,也就是照射輻 射後元件之 Pr值減少可能的原因來自結晶結構改變。值 得一提的是鐵電記憶體的記憶體視窗主要是由矯頑電 場(coercive field)和鐵電薄膜的厚度所決定,  $\mathcal{O}$  Pr 值影響 較小[5],因此即使照射輻射後元件之 Pr值減少,但相較 於未照射輻射之元件其記憶視窗並未劣化。

#### (D) 鐵電記憶體耐久度與輻射照射之關聯性

**Β**9顯示未照射輻射與照射鈷 60 γ-射線總游離劑 量300 krad之鐵電記憶體在5.5 V/-5 V方形脈衝及10 µs 的脈衝間隔下,重複性操作次數與寫入/抹除之臨界電壓 差值的關係。未照射輻射之鐵電記憶體其臨界電壓差值 在重覆性操作 10<sup>6</sup>次後幾乎維持不變,然而照射鈷 60 γ-射線總游離劑量 300 krad之鐵電記憶體隨著操作次數增 加記憶體視窗變小,其初始值為1.36V,而重覆性操作 10<sup>6</sup> 次後臨界電壓差值減少至 0.52 V。兩種記憶體之 IDs-VGs特性曲線圖隨著重複操作次數的演進如圖 10 所 示。可以觀察到操作次數增加,寫入/抹除方向的臨界電 壓以非對稱的形式靠近,此非對稱靠近的臨界電壓可以 從能帶圖(band diagram)解釋。圖 11(a)描繪出閘極施加 正偏壓情況下之鐵電記憶體能帶圖,此時電子有相當高 的機率從 P 型矽基板穿隧至鐵電 HfZrOx 層,然而在 P 型矽基板中電子屬於少數載子,因此能躍遷至氧化層的 電子數量屬於少數,鐵電 HfZrOx 層電子的捕捉效應也 較不明顯。從電性上來看,臨界電壓在重複操作後仍能 維持不變;相反地,如圖 11(b),在施加負偏壓情況下, P 型矽基板中電洞為多數載子,此時電洞會從基板躍遷 出去至 HfZrOx 薄膜, 並作為照射γ-射線後所留下氧空缺 裡的捕捉載子(trap carriers),不只是電洞會注入 HfZrOx 鐵電薄膜,鐵電薄膜中的電子也會穿隧至基板,導致電 荷捕捉效應,並造成臨界電壓偏移。

## (E) 鐵電記憶體資料保存能力與輻射照射之關聯性

資料保持(retention)是室溫環境下量測,在開極不施 加電壓的情況下讀取不同狀態的高低電流值。圖 12 顯 示三種實驗樣品的資料保持時間,量測時間長達 10<sup>4</sup>秒, 並作資料保存十年線預估。所有樣品都在經過 10<sup>4</sup>秒長 時間放置後保持穩定,此外,從延長十年線可以預估照 射鈷 60 γ-射線總游離劑量 300 krad 與 10 Mrad之鐵電 記憶體的電流開關比達到 2.2×10<sup>3</sup>和 1.2×10<sup>3</sup>。文獻報導 兩項影響短記憶保持力的主要原因:(a)去極化電場與(b) 閘極漏電流。去極化電場的方向與極化方向相反,因此 會消耗鐵電層的極化值,而減少記憶保持時間。去極化 電場與下列參數相關,其中 ε代表鐵電層之介電常數、 CIs與 CF則分別代表介面層與鐵電層所貢獻的電容:

$$E_{dp} = P_r C_F \left[ \epsilon \left( C_{IS} + C_F \right) \right]^{-1} = P_r \left[ \epsilon \left( \frac{C_{IS}}{C_F} + 1 \right) \right]^{-1}$$

由於本研究所採用的 HfZrOx 鐵電層因其 coercive field 很大而不受去極化電場影響[6]。另一方面,電偶極 的極化作用會吸引電子從閘極電極極基板兩側注入,並 形成漏電流途徑,這對記憶保持力穩定度影響很大。

#### IV. 結論

本次計畫以 HfZrOx 鐵電薄膜製作鐵電記憶體並討 論不同程度之總游離劑量對鐵電記憶體的影響。從 ID-VG 特性圖中可以發現總游離劑量越高的鐵電記憶體 其記憶體視窗越大,以及經游離輻射照射之鐵電記憶體 漏電流提升、飽和電流提升和次臨界擺幅幾乎沒有改變 等現象,此外,鐵電記憶體之介面陷阱密度也不會因游 離輻射照射而惡化。此外,游離輻射照射也造成 HfZrOx 中產生氧空缺並使得 Pr 值減少以及鐵電記憶體之平帶 電壓偏移的現象。本研究更進一步由 X 光繞射分析確認 受游離輻射照射 10 Mrad之鐵電薄膜其鐵電正交晶相偏 移 0.19 度,可見高能量的游離輻射可能導致晶格變形並 降低鐵電性。在記憶體可靠度方面,從資料保存時間來 看,游離輻射照射 300 krad 之鐵電記憶體其起始狀態記 憶體視窗與未受游離輻射照射之鐵電記憶電晶體相近, 保留時間延長至十年線時其電流開關比仍有 2.2×10<sup>3</sup>。然 而,從耐久度來看,游離輻射所產生的缺陷使受游離輻 射照射之鐵電記憶電晶體在重複施加 10<sup>6</sup> 次脈衝後,記 憶體視窗減少至 0.52 V。整體而言,本計畫從實驗結果 驗證以 HfZrOx 鐵電薄膜製作之鐵電記憶體具抗游離輻 射特性,未來可以加強 HfZrOx 及矽基板中間之介面層 的品質,進而提升耐久度。

# 參考文獻

- [1] S. A. Yan, Y. Xiong, M. H. Tang, Z. Li, Y. G. Xiao, W. L. Zhang, W. Zhao, H. X. Guo, H. Ding, J. W. Chen, and Y. C. Zhou, "Impact of total ionizing dose irradiation on electrical property of ferroelectric gate field-effect transistor," J. Appl. Phys., vol. 115, no. 20, p. 204504, 2014.
- [2] J. Müller, T. S. Böscke, U. Schröder, S. Mueller, D. Bräuhaus, U. Böttger, L. Fre, and T. Mikolajick, "Ferroelectricity in simple binary ZrO<sub>2</sub> and HfO<sub>2</sub>," Nano Lett., vol. 12, no. 8, pp. 4318-4323, 2012.
- [3] R. L. Pease, S. D. Clark, P. L. Cole, J. F. Krieg, and J. C. Pickel, "Total dose response of transconductance in MOSFETs at low temperature,"IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 41, no. 3, pp. 549-554, 1994.
- [4] K. Klyukin and V. Alexandrov, "Effect of intrinsic point defects on ferroelectric polarization behavior of SrTiO<sub>3</sub>," Phys. Rev. B, vol. 95, no. 3, p. 035301, 2017.
- [5] H.-T. Lue, C.-J. Wu, and T.-Y. Tseng, "Device modeling of ferroelectric memory field-effect transistor (FeMFET)," IEEE Trans. Electron Devices, vol. 49, no. 10, pp. 1790-1798, 2002.
- [6] N. Gong and T.-P. Ma, "Why is FE-HfO<sub>2</sub> more suitable than PZT or SBT for scaled nonvolatile 1-T memory cell a retention perspective," IEEE Electron Device Lett., vol. 37, no. 9, pp. 1123-1126, 2016.



圖Ⅰ不同輻射照射量與FeFET記憶 體特性曲線之關聯



📓 4 照射 γ-ray 300 krad 之 FeFET 記 憶體其切換電流隨脈衝次數之變化



☑ 7 HZO 鐵電層於不同輻射照射量 之X光結晶繞射圖



TiN

FE-HZO



🖥 9 照射不同輻射劑量之 FeFET 記 憶體其記憶視窗隨脈衝次數之變化









**3 10** 照射 γ-ray 300 krad 之 FeFET 記憶 體其 IDs-VGs特性隨脈衝次數之變化



■8HZO鐵電層於不同輻射 照射量之 o-phase 結晶差異



-1.5

□ 11 (a) 閘極施加正偏壓情況下及 (b) 閘極 施加負偏壓情況下之 FeFET 記憶體能帶圖

■ 12 照射不同輻射劑量之 FeFET 記憶 體其資料保持時間之比較

# 半導體元件輻射效應與抗輻射製程研究 Radiation Effects and Hardening Processes for Semiconductor Devices

計畫編號: MOST 108-2623-E-007-004-NU 計畫主持人:張廖貴術 e-mail: <u>lkschang@ess.nthu.edu.tw</u> 執行單位:國立清華大學工程與系統科學系

# 摘要

抗輻射積體電路(IC)元件在科技研究與工業製造上, 都有很重要的應用。閘介電層製程是發展積體電路金氧 半元件很重要的研究課題之一,而高介電係數材料(high-K)閘極已為先進積體電路所使用。為了改善 high-K 材料 與半導體基材之界面特性,本研究提出由 high-K 的堆疊 與適當退火處理作為閘介電層,以得到很好的金氧半 (MOS)元件特性,及很薄的等效氧化層厚度。本研究計 畫進行了 High-K 閘介電層 MOSFET、鰭式電晶體 (FinFET)、全環繞式電晶體(GAA-FET)之製作與抗輻射 量測,以比較先進元件結構的抗輻射特性。本研究計畫 之成果,可作為抗輻射積體電路製程整合之範例,並瞭 解輻射傷害之物理機制及提出減少傷害的可能方法。 關鍵詞:抗輻射,高介電係數,閘介電層,金氧半元件, 鰭式電晶體,全環繞式電晶體

#### Abstract

The radiation hardening integrated circuit (IC) devices are important for the applications in researches of science and technology and industry production. The research topic of gate dielectric process is crucial for MOS device in IC. High-K gate dielectrics have been implemented in modern property IC. То improve the of high-K material/semiconductor interface, gate dielectric stack and anneal of high-K are studied in this project. Then, MOS devices with excellent characteristics and low EOT can be achieved. In this project, the high-k gated MOSFET, FinFET, and GAA-FET were fabricated, and the radiation hardness of the devices was tested and compared, which can investigate the radiation effects on advanced device structure. The results of this project would provide a good example of the integration of radiation hardening IC process. The physical mechanism of radiation-induced damage on MOS device and the reduction of radiation damage are better understood as well.

Keywords: Radiation hard, high dielectric constant, gate dielectric, MOS device, FinFET, GAA-FET

# I. 前言

半導體晶片大量使用在日常生活及各種裝置,已經 是不可或缺的電子零組件。半導體製造在台灣更是一大 產業,其中積體電路技術水準已領先國際。近年來隨著 太空科技與核能技術的進步,半導體元件技術在該領域 的應用越來越受到人們的重視。隨著積體電路(IC)元件 之奈米化與製程複雜化,介電層的品質要求將更嚴格, 因此絕緣層或閘高介電層之界面、漏電流等特性是當前 研發的重點。由於系統整合晶片(system on chip, SOC)的 發展趨勢,元件之間隔離的困難將增加,所以各種製程 方法正積極進行中,如高速離子植入等。再者,近來電 漿製程已大量使用在超大型 IC 製造、人造衛星使用之 太空元件等,因而輻射或荷電粒子對元件產生的傷害與 防治是非常重要的研究課題。

而半導體元件的發展比較上世紀的傳統元件已經 出現較大的不同,更多的元件結構(如:薄膜電晶體 Thin Film Transistor,多開極電晶體 Multi-Gate Transistor,穿 隧電晶體 Tunnel FET,等等),及越來越多基板種類(Ge, SiGe,GaAs,三五族半導體等等)已經有大量的研究報 告。而關於新元件新材料,對於他們未來應用在太空領 域及核能相關領域的研究仍然是有待探討,其中一個關 鍵是缺乏相關元件對於高輻射環境的可靠度測試。為了 避免半導體元件在高輻射環境下失效造成核子安全事 故或太空系統失效等問題,造成無法挽回的損失,確定 元件在輻射能量傷害下造成的劣化程度及抗輻射能力 非常重要。另外一個關鍵是如何利用相關製程技術提升 元件的抗輻射能力,以期望可以達到高輻射環境的使用 標準。因此,本研究將以金氧半場效電晶體(MOSFET)及 薄膜電晶體(TFT)受輻射傷害之元件可靠度為研究重點。

隨著極大型積體電路(ULSI)技術之發展, MOS 元件 的閘極氧化層厚度要求漸薄,為了改善其電特性及可靠 性,近年來有含氮氧化層(oxynitride)之研發,不但效果 不錯同時也減少 p+-poly gate 硼穿透問題[1]。然而 0.1 µm 以下元件, 閘氧化層厚度之要求必須在 15 以下, 在此情形下,傳統氧化層或其類似之改良材料已不能使 用[2,3]。因為介電層太薄,大量的漏電流將產生,製作 的積體電路(IC)含有嚴重的靜態功率消耗及熱消散問題。 因此增加介電層厚度是必然的路,為了同時保持相當的 單位面積閘極電容,介電材料勢必要使用係數較高的材 料。近年來 Si3N4 已被幾位國際知名的學者製成特性很 好的閘介電層,如使用 JVD [2-4], RTCVD [5] 等。又 Si3N4 介電係數雖較 SiO2 高,厚度也可厚些,但是厚度在 1.5 nm 以下也有明顯的漏電流,如同 SiO2 一樣。為了發展 閘介電層之等效氧化層厚度(EOT)小於 1 nm 以下,更高 介電係數的材料已有不少學者在嚐試,如 Ta2O5, Al2O3, ZrO2[6], HfO2 等。雖然有不錯的效果, 但是由於材料 含氧及金屬,經後續製程之熱循環(Thermal cycle),製成 MOSFET 後仍保有優越電特性就很不容易。因此,本研 究係以含氮氟體進行矽表面之氮化,然後再成長高介電 係數之金屬氧化物使其 EOT 在 1.5 nm 以下。再由適當 之 high-K 成份元素比例及成長後之退火處理,可以得到 特性相當不錯的介電層。因此,應用極薄且高品質的 SixNyO,再成長 high-K metal-oxide, 是本研究要探討的 目標之一。目前我們正進行high-K材料,如HfO2,ZrO2, Al2O3 等,並探討各種材料間混合比例之效應。

本研究計畫之主要目的係開發金氧半場效電晶體

(MOSFET)元件抗輻射製程,探討元件中絕緣層與高介 電層之輻射效應,進行測量分析並以製程方法減少元件 之輻射傷害。本研究計畫之最大宗旨在培育輻射應用技 術與半導體產業之人才,目標有幾項如,High-K 閘介電 層 MOSFET 之製作與抗輻射量測,High-K 成長前以電 漿處理與退火的 MOSFET 元件製作及抗輻射測量, High-K 介電層組成元素比例與成長後退火處理之元件 製作,及研讀有關低能量質子對奈米尺寸半導體元件輻 射效應的文獻。這些研究目標是積體電路元件很重要的 製程研發課題,也將提出抗輻射製程與可靠度分析。

#### II. 主要內容

本實驗的元件製程分成兩部分,分別為金氧半電晶 體製程和電容器製程,其中 SOI 金氧半電晶體的電容無 法被量測,因此另製作相同閘極堆疊的平面電容器,得 以模擬計算出電晶體的等效電容,這兩部分的實驗是同 時進行的,表1為不同閘極結構之金氧半電晶體實驗品 列表對參數表,流程與結構示意圖如圖1所示。實驗樣 品使用八吋P型單晶矽晶片,晶格方向為(100),電阻 值為 8~22 Ω-cm。利用 EBL 微影技術,得以在同一晶 片上精準控制各種不同的電晶體之線寬,蝕刻出通道, 定義出主動區,接著在 RCA 清洗過程中,本實驗樣品不 同的地方就是在此處,在使用 DHF 清理 Native Oxide 時, 為了做出不同閘極結構,分別浸泡不同秒數,進而達到 通道下的 SiO2 絕緣層(BOX)蝕刻,用 H2O2 成長介面氧 化層 IL,接著用 ALD 沉積出高品質的高介電層 HfO<sub>2</sub>, 完成閘極層堆疊。沉積完介電層後,依序進行閘極金屬 沉積、閘極圖形定義與蝕刻、離子佈植、快速熱處理退 火、隔離氧化層覆蓋、接觸窗口定義及蝕刻、連接金屬 沉積以及金屬燒結,完成此實驗元件。鈷(Co-60)以不同 輻射劑量 10k、100k、1000k (rad)照射後,量測元件電特 性變化。依據國家太空中心所提供資料,福衛五號在近 地軌道的輻射環境,經鋁(Al)3mm厚度後,電子元件每 年吸收的 TID 值大約是 10 Krads (Si)。利用 HP 4156B 機 台進行金氧半電晶體的基本電性量測,其量測包括轉移 特性曲線(Id-Vg)、直流特性曲線(Id-Vd)、臨界電壓(Vth)、 最大轉導值(Gmmax)、汲極電流(Id)、次臨界斜率(S.S.)、 汲極引發位能障降低(DIBL);在電容器的量測,主要是 利用 HP 4156B 與 Agilent 4284A 量測 Cgb、Jg-Vg。

#### III. 結果與討論

本研究計畫依照原規畫工作完成了 High-K 閘介電 層 MOSFET 之製作與抗輻射量測, High-K 成長前以電 壞處理與退火的 MOSFET 元件製作及抗輻射測量, High-K 介電層組成元素比例與成長後退火處理之元件 製作,及研讀低能量質子對奈米尺寸半導體元件之輻射 效應等。本實驗之結果分成兩部份去探討,第一部份為 不同輻射傷害對電容器電特性之分析。第二部分為不同 輻射傷害對不同開極結構之電特性分析以及可靠度測 試。以下分別簡要敘述主要的結果。

# 1. 低能量質子對奈米尺寸半導體元件之輻射效應

從最新的研究資料得知 [13],由於能量損失的散亂 (energy loss straggling),低能量(0.5~1.5 Mev)的質子經奈 米尺寸(< 30 nm)的半導體材料,比高能量的情形可能產 生更大的能量釋放,使得元件的輻射效應更加嚴重。

# 不同輻射傷害對 MOSFET、FinFET、GAA-FET 之 電特性比較

首先不同結構 Planar、FinFET、GAAFET 的介電層 材料是一樣,因此單獨討論電容器經不同輻射劑量後, 所產生的輻射傷害影響。

圖 2 為不同輻射傷害對 Planar 轉換特性之對數圖, 萃取出明確的各種數值在表 2°清楚看出輻射傷害前後, On/Off ratio 從 6.45 order 降到 0.45 order,導通電流從  $1.83x10^{-5}A$  降到  $0.85x10^{-5}A$ ,關閉電流從  $1.03x10^{-11}A$  變 為 4.5 x10<sup>-6</sup>A, 萃取的 S.S.則從 174.1(mV/dec)劣化到 3206(mV/dec),皆可看出 Planar 有嚴重的劣化,甚至到 1000k 輻射傷害後,幾乎沒有電晶體特性。另外也發現 V<sub>th</sub> 往負位移嚴重。推測 Planar 閘極靜電控制能力較差 外,受輻射傷害後,造成的介面缺陷,使 V<sub>th</sub> 往負位移。

圖 3 為不同輻射傷害對 FinFET 轉換特性之對數圖, 萃取出明確的各種數值在表 3。清楚看出整體電特性雖 然沒有 Planar 來的嚴重裂化,還是觀察到 On/Off ratio 從 7.37 order 降到 7.02 order,關閉電流從 1.31 x10<sup>-12</sup>A 變為 4.09 x10<sup>-12</sup>A, 萃取的 S.S.也從 91.2(mV/dec)劣化到 96.9(mV/dec),有些微的電性上的劣化。

圖 4 為不同輻射傷害對 GAAFET 轉換特性之對數 圖,萃取出明確的各種數值在表 4。清楚看出 GAAFET 經過輻射傷害後,都維持良好的電特性,不管是 On/Off ratio 在 7.9 左右、導通電流在 2.6x10<sup>-5</sup>A 左右、關閉電流 在 4.5 x10<sup>-13</sup>A、萃取的 S.S.維持在 86.5(mV/dec)左右。 推測 GAAFET 有著很好的靜電閘控能力,能有效抵抗輻 射傷害。

圖 5、圖 6、圖 7 為不同輻射傷害對不同開極結構 轉之導對電壓圖,轉導值代表著電晶體的放大能力。清 楚看出 Planar 在經過 100k 輻射傷害後,嚴重裂化,而 FinFET 與 GAAFET,都可以維持一定的轉導值。

圖 8 為 100k 輻射後對 Planar 汲極電流對汲極電壓 圖,分別取  $V_g$ - $V_t$ =0~2.5V, $V_{Step}$ =0.5V,五種情況來做探 討,汲極的電流量代表著電晶體的驅動能力。經 10k 輻 射後,Planar 在通道夾止區(Pinch Off)後的飽和電流時呈 現崩潰狀態(數據圖略)。隨著輻射提升到 100k,可看出 串阻變大,使得汲極電流的斜率變小。最後是輻射 1000k, 在曲線和飽和電流清楚看到,驅動電流嚴重劣化(數據圖 略)。另外可以發現,隨著輻射傷害增加,汲極區無法有 效控制電流,使  $V_g$ - $V_t$ =0 在飽和電流區不能成水平線。 推測是經輻射傷害後,元件通道損壞,造成通道長度調 變效應(Channel Length Modulation Effect)發生。

圖 9 為 100k 輻射後對 FinFET 汲極電流對汲極電壓 圖,分別取  $V_g$ - $V_t$ =0~2.5V, $V_{Step}$ =0.5V,五種情況來做探 討,汲極的電流量代表著電晶體的驅動能力。可以發現 FinFET 經輻射傷害後,飽和電流有些微的劣化,較 Planar 有好的抗輻射傷害能力。

圖 10 為 100k 輻射後對 GAAFET 汲極電流對汲極 電壓圖,分別取 Vg-Vt=0~2.5V,Vstep=0.5V,五種情況來 做探討,汲極的電流量代表著電晶體的驅動能力。發現 輻射傷害後,不管汲極電流曲線或飽和電流,都無差異。 可以發現 GAAFET 經輻射傷害後,幾乎不受影響,說明 有最好的抗輻射傷害能力。

# IV. 結論

本研究計畫完成了預期的工作項目,由研究資料得知 低能量(0.5~1.5 Mev)的質子使得奈米尺寸(< 30 nm)半導 體元件的輻射效應更加嚴重。經過不同的輻射傷害後, Planar 相對 FinFET 與 GAAFET 而言,有嚴重的劣化, 甚至經 1000k 輻射傷害後,已沒有操作特性。推測立體 式結構,因有更好的靜電控制能力,抗輻射傷害的能力 也大幅提高。另外 GAAFET 在不同輻射傷害下,在導通 電流、關閉電流、On/Off ratio、S.S、Gmmax 都有著更 好的抗輻射能力。從汲極電流與源、汲極轉換特性之對 數圖中發現,經不同輻射劑量後,源、汲極接面有著不 同程度的傷害,以 Planar 最為嚴重,依序是 FinFET 與 GAAFET。由電性結果可以推測,輻射對整體元件都有 傷害,在低劑量時隨機發生傷害外,隨著輻射劑量的增 加,接近閘極邊緣的源、汲極接面傷害最為嚴重。

# 參考文獻

- K.S. Chang-Liao and L.C. Chen., J. Vac. Sci. & Tech. B15(4), p.942 (1997).
- [2] T.P. Ma, IEEE ED-45, p.680 (1998).
- [3] X. Guo et al, IEEE EDL-19, p.207 (1998).
- [4] X. Guo et al, IEEE 1999 IEDM, p.137.
- [5] H.F. Luan et al, IEEE 1999 IEDM, p.141.
- [6] W.J. Qi et al, IEEE 1999 IEDM, p.145.
- [7] Jin-Seong Park, H. Kim, Il-Doo Kim, J Electroceram, at Springerlink.com.
- [8] E. Fortunato, P. Barquinha, and R. Martins, Adv. Mater. 2012, 24, 2945 – 2986.
- [9] Jae Chul Park, et al, Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, Vol. 9, 67-70, 2014
- [10] Chur-Shyang Fuh, Pet al, IEEE Electron Device Letters, vol. 35(11), pp.1103-1105, 2014
- [11] Chih-Hsiang Chang, Po-Tsun Liu, Thin Solid Films, vol.549, pp.36 – 41, 2013.
- [12] Kenji Nomura1, et al, Nature, vol 432, p.488, 2004
- [13] Lujie Zhang, Jingyan Xu, Yaqing Chi and Yang Guo, Appl. Sci., 2019, vol. 9(17), 3475.



圖1 本計畫 MOSFET 之元件製程結構與流程圖

表 1	不同輻射	傷害對不同	] 閳極結構對象	を數表
~v~ +	· · · · J T H / J J	1 0 21 11	1 11 1 1 - 1 1 1 1 - 2 1 - 3	1 30.10

Sample		Planar		1	FinFE	Г	G	AAFE	т
Radiation dose	10k	100k	1000k	10k	100k	1000k	10k	100k	1000k
Sinter		400 °C 30 min							
Contact		TiN 10nm/ Al-Cu 300nm/ TiN 10nm /Ti 5nm							
Activation		RTA 700°C 30s							
Metal gate		TiN 100nm							
High-k		HfO <sub>2</sub> 3nm							
IL				Si	O₂ 1nn	n			
Gate structure		Planar			FinFE1	-	c	AAFE	т
Channel material	Single Crystal-Si								
Substrate	SOI								

#### 表 2 不同輻射傷害對 Planar 電特性比較表

Planar						
Sample	P-10k	P-100k	P-1000k			
I <sub>on</sub> @V <sub>th</sub> +0.75(μA)	18.32	12.53	8.54			
I <sub>off</sub> (A)	1.03*10 <sup>-11</sup>	1.87*10 <sup>-8</sup>	4.5*10 <sup>-6</sup>			
I <sub>on</sub> / I <sub>off</sub> ratio	6.45	3.01	0.45			
S.S.(mV/dec)	174.1	337.1	3206.8			

## 表3 不同輻射傷害對 FinFET 電特性比較表

FinFET						
Sample	Fin-10k	Fin-100k	Fin-1000k			
I <sub>on</sub> @V <sub>th</sub> +0.75(μA)	16.08	14.56	14.29			
I <sub>off</sub> (A)	1.31*10 <sup>-12</sup>	2.54*10 <sup>-12</sup>	4.09*10 <sup>-12</sup>			
I <sub>on</sub> / I <sub>off</sub> ratio	7.37	7.02	6.81			
S.S.(mV/dec)	91.2	94.3	96.9			

#### 表4 不同輻射傷害對 GAAFET 電特性比較表

	GAAFET							
	Sample	GAA-10k	GAA-100k	GAA-1000k				
l <sub>on</sub>	@V <sub>th</sub> +0.75(μA)	27.39	26.11	26.47				
	l <sub>off</sub> (A)	4.32*10 <sup>-13</sup>	4.63*10 <sup>-13</sup>	4.86*10 <sup>-13</sup>				
	I <sub>on</sub> / I <sub>off</sub> ratio	7.92	7.88	7.86				
:	S.S.(mV/dec)	84.2	86.7	87.1				



圖 2 不同輻射傷害對 Planar 轉換特性之對數圖



圖 3 不同輻射傷害對 FinFE T 轉換特性之對數圖



圖 4 不同輻射傷害對 GAAFET 轉換特性之對數圖



圖 5 不同輻射傷害對 Planar 轉導對電壓圖



圖 7 不同輻射傷害對 GAAFET 轉導對電壓圖



圖 8 100k 輻射後 Planar 汲極電流對汲極電壓圖



圖 9 100k 輻射後 FinFET 汲極電流對汲極電壓圖



圖 10 100k 輻射後 GAAFET 汲極電流對汲極電壓圖

# 文物檢測用之 X 光 CBCT 電腦斷層掃描系統之優化及其應用 Optimization and Application of X-ray Cone-beam CT for Cultural Relics Investigation

計畫編號: MOST 108-2623-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

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,增進對各類文物工藝技術或 保存狀況的瞭解,近年來自行設計建置多功能 CT 系統 以檢視文物。本研究計畫主要乃在此既有基礎系統上, 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)技術及相位對比(phase contrast)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、相位對比。

#### 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光派的管電壓值,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. 系統整合

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。

2.3 PCICT 影像技術

X 光和物質的交互作用可由複數折射率表示:

$$n = 1 - \delta - i\beta$$

其中  $1-\delta$  和 β 分別表示此複數折射率 n 的實部和虛部。 而  $\delta$  和相位偏移(phase shift)相關; iβ 決定 X 光的衰減。

 $\Psi(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \mathbf{e}^{i\mathbf{n}\mathbf{k}\mathbf{r}} = \mathbf{E}_0 \mathbf{e}^{i(1-\delta)\mathbf{k}\mathbf{r}} \mathbf{e}^{-\beta\mathbf{k}\mathbf{r}}$ 

上式中對數的第一項表示 X 光穿透物質產生的相 位偏移,第二項表示當波穿透物質(折射率為 n)其振幅的 減少。傳統 X 光成像技術是量測 X 光電磁波的衰減(即 振幅的減少)。因此當物質的折射率有些微的差距時,對 相位偏移產生的差異比吸收造成的差異大,因此 PCICT 影像技術較傳統 X 光吸收成像技術更有機會改善複合 材質的 X 光影像品質。(Auweter 2014)

相位對比技術藉由邊緣增強(edge enhancement)效 果可以改善細微結構的能見度,並有利於分析微小結構、 軟材料及些微差異之衰減係數的複合材料(Kaster 2011)。 因此錐狀X光雖受限於本身多色光特性,導致其解析度 較單色X光光源或是同步輻射光源低,但可藉著相位對 比技術,增強對低原子序材料的影像解析度。

PCICT 有多種實驗方式,例如:晶體干涉法(Crystal interferometry)(Bonse 1965)、以偏光鏡為基礎或稱繞射 增強 (Analyser-based imaging or diffraction enhanced imaging)(Forster 1980) 的 PCICT, 傳播基礎成像

(Propagation-based imaging, PBI) (Sarno 2016)以及 X 光 光柵(X-ray grating methods)法(Pfeier 2006)。由於前二者 皆須單色平行 X 光源,後二者可實行於同步輻射光源 (Birnbacher 2016)和錐狀光源。本實驗室因既有 CT 設備 屬於錐狀 X 光源,因此未來將嘗試 PBI 及 X 光光柵兩 種 PCICT 實驗方法。

## Ⅲ. 結果與討論

#### 本研究目前已完成結果包括:

- 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 於本院所拍攝之許多文物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。
- 進行 CT 系統相關硬體參數校正,包括 X 光管 Y、 Z 軸及傾角;影像偵測器之 X、Y、Z 軸;樣品載 台之 X、Y、Z 軸及θ角等之校正。
- 完成多件金屬及陶瓷文物拍攝,進行各種金屬偽影 (metal artifacts)及線束硬化(beam hardening)校 正方式並比較之。

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,其中象牙球共拍攝 12 組 3600 張投影量。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。

以下為部分優化實例。

案例 1:清五彩龍鳳桃實式瓷酒壺,陶瓷材質

此桃實式酒壺外型特殊,無壺口和上蓋。由肉眼觀 察,僅知壺底部有一注口,一般通稱倒流壺或倒裝壺。 在過去的研究中已知其他的倒裝壺內部有內管與壺底 相通。但是對於此壺之內部構造,仍須利用 X 光之穿透 性來檢視。下圖一為 X 光二維投影影像。由圖 1 顯示此 壺內部有一內管與壺底之注口相通。



#### 圖1 清五彩龍鳳桃寶式瓷酒壺影像及X光二維透視影像

圖 2 為經由 FDK 演算法及疊代演算法所重建之 CT 影像,由圖顯示校正前 CT 重建影像於壺上半部及流的 位置顯示重疊假影,導致無法正確判讀影像資訊。幾何 參數校正包含水平參數(6mm)及旋轉軸參數校正(0.13°), 將此參數帶入 FDK 演算法及疊代演算法,圖 3 為校正 後 CT 重建影像。圖二顯示圖一的假影已去除,顯示經 由幾何參數校正得到清晰的重建影像。



圖 2 <u>清</u>五彩龍鳳桃寶式瓷酒壺 CT 重建影像-校正前



(a) 2D xy recon. slice





(d) 3D CT reconstruction

(b) 2D xz recon. slice

圖 3 <u>清</u>五彩龍鳳桃寶式瓷酒壺 CT 重建影像-校正後

**案例2**:青銅器,金屬材質,南宋紹興豆,西元1146 此為南宋仿夏商周三代再製之青銅器。因不確定其 結構為一體成型或分鑄,以X光CT檢視其內部構造。



圖 4 南宋紹興豆 CT 重建影像-校正前

圖 4 為 CT 重建後之影像,圖中發現有因金屬成分 造成 CT 重建過程產生的金屬假影,雖仍可觀察出此文 物結構非一體成型,而屬於分鑄。但仍需改善金屬假影。 經由 FDK 搭配金屬假影校正,得到圖 5 之 CT 重建校正 影像。原本於圖 4 之假影已經由校正而清除。圖 5 更清 楚顯示分鑄經由鉚釘固定的情況。



圖 5 南宋紹興豆 CT 重建影像-校正後

**案例3**:陶土及金屬複合材質,交趾陶 圖6為初步CT重建影像,由於此文物屬複合材質, 因此在文物邊界處呈現較亮的影像,此因線束硬化效應 造成的杯狀假影現象。另因內含金屬材質,因此在金屬 材質附近,產生金屬假影的影像。





圖 6 交趾陶 CT 重建影像-校正前

圖 7 為經由線束硬化校正及金屬假影校正之影像, 線束硬化之杯狀假影已清除並已減少金屬假影的範 圍。



圖 7 交趾陶 CT 重建影像-校正後

**案例4**: 雕象牙透花人物套球 (圖8),18 世紀,屬 於相同材質之多層結構,為使每層結構及紋飾清晰可見, 拍攝投影量增加至3600 張以提高解析度 (圖9)。由於 大量的投影量,影像重建演算時需 GPU 平行運算技術 及及 CUDA 架構,其中 CUDA 處理核心數達3072,記 憶體需大於190GB 以加速演算。

# 原子能科技學術合作研究計畫成果發表會精簡報告



圖 8 清晚期 雕象牙透花人物套球 故雕 000055

Ivory balls 3D Reconstruction – 3600 projections



圖9象牙球 CT 重建影像

# 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。

# 參考文獻

Abdurahman S., Frysch R., Bismark R. et al., Beam hardening correction using cone beam consistency conditions, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, May. 2018.

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.

Alvarez R. E. and Macovski A., Energy-selective reconstructions in X-ray computerised tomography. *Phys. Med. Biol.*, vol. 21, p. 733, 1976.

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.

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.

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.

Bonse U. and Hart M., An x-ray interferometer. *Appl. Phys. Lett.*, 6, pp. 155–156, 1965.

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

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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

Johnson T. R., Krauss B., Sedlmair M. et al., Material differentiation by dual energy CT: initial experience. *European radiology*;17, pp. 1510–1517, 2007

Kak A. C., and Slaney M., Principles of Computerized Tomographic Imaging. *IEEE Press, New York*, 1988.

Kak A. C., Computerized tomography with x-ray emission and ultrasound sources. *Proc. IEEE*, vol. 67, pp. 1245-1272, 1979.

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.

Kelcz F., Joseph P. M. and Hilal S.K., Noise considerations in dual energy CT scanning. *Med Phys*; 6(5):pp. 418–425, 1979.

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.

Lehmann L., et al., Generalized image combinations in dual kVp digital radiography. *Med. Phys.*, vol. 8, pp. 659–667, 1981.

McCullough E. C., Photon attenuation in computed tomography. *Medical Physics*, vol. 2, pp. 307-320, 1975.

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.

Meganck J. A., Kozloff K. M., Thornton M. M., Broski S. M., Goldstein S. A., Beam hardening artifacts in microcomputed 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.

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

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.

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.

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.

Pfeiffer F., Kottler C., Bunk O., David C., Hard X-ray phase tomography with low-brilliance sources. *Phys. Rev. Letter*, 98, 108105, 2007.

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.

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.

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.

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.

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.

Webb A. R., Introduction to Biomedical Imaging. *Wiley, New Jersey*, 2003.

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.

# 放射線處理在九重葛、玉葉金花及日日春誘變育種上之應用 Application of mutation breeding of Bougainville, Mussaenda and Perwinkle via rray Irradiation

計畫編號: MOST 108-2623-E-005-001-NU 計畫主持人:陳錦木 e-mail:c4flower@dragon.nchu.edu.tw 執行單位:國立中興大學園藝學系

## 摘要

花卉作物具高經濟價值為未來全球農業發展的重 點項目,花卉產品的需求隨經濟發 展而成長,溫帶地區 高所得國家如日本、美國及荷蘭等國市場已達飽和狀態, 未來隨東南亞、中東地區及熱帶美洲國家經濟改善,各 種熱帶花卉的市場需求將逐漸增加。本研究選用熱帶地 區極具發展潛力但品種變化少之花卉作物九重葛、玉葉 金花 及日日春之種子及營養器官進行放射線不同劑量 照射、次數及間隔時間處理來或獲得突變以作為育種之 材料,並探討組織學變化之情形做為育種之基礎。日日 春扦插苗或無根插穗,在 $\gamma$ 射線 80 格雷(Gy)以上皆會全 數死亡,二者半致死劑量約在 70(Gy)。而日日春種子的 可照射劑量非常高,本試驗最高劑量為 240(Gy),且並 未對發芽率造成影響。九重葛 'PB' 品種為 20.35(Gy), Al'品種為 19.22(Gy)。

關鍵詞:日日春、九重葛、玉葉金花、誘變育種。

# Abstract

Flower crops are the major projects of global agricultural development in the future due to its high economic value. The demand of flower products is growing with the economic development. The flower markets of high-income countries in temperate zones such as Japan, the United States and the Netherlands have reached saturation. The demand of tropical ornamenting plants will be increased along with the improvement of economic in Southeast Asia, the Middle East and tropical Americas. In this study, the vegetative organs or seeds of Bougainvillea spectabilis, Mussaenda, Catharanthus roseus which have potential development and less varieties are chose to treat different radiation doses, times and intervals in order to obtain mutations as materials for breeding and discuss the changes of histology as the basis for breeding. All cuttings or rootless cuttings in Vinca will all die when the ray is above 80 Gray (Gy), and the half-lethal dose is about 70 Gray (Gy). The radiation dose of seeds was very high. The highest dose in this test is 240 gray, and it has not affected the germination rate. Bougainvillea 'PB' variety half-lethal dose is 20.35 (Gy) and the A1 'variety is 19.22 (Gy). The half-lethal dose of Vinca seeds irradiation can be explored in the future.

Keywords: Vinca, Bougainvillea, Mussaenda, Mutation breeding.

# I. 前言

日日春[Catharanthus roseus (L.) G. Don]為夾竹桃科

(Apocynaceae)多年生草本植物,原生於非洲馬達加斯加, 具 鮮艷花朵及持續開花特性,為重要的觀賞花卉 (Armitage, 2001; Ball, 1998; Hogan, 2003; National Garden Bureau Inc, 2002; van Bergen and Snoeijer, 1996)。全株 含多種植物鹼亦為重要的藥用植物(Zhou et al., 2009)。由 於全球暖化及熱帶地區國家的經濟快速發展,耐高溫強 光的花卉種類及品種需求量持續增加,因此近年來眾多 花卉種苗公司積極投入熱帶花卉及耐熱品種選育工作 (鶴島, 2005)。日日春、九重葛及玉葉金花喜溫暖強光, 並具耐旱、抗污染、栽培容易及移植適應性佳等特性, 已成為美國重要的花卉作物(Howe and Waters, 1994; USDA, 2010)。陳等人(2011)調查指出日日春為臺灣夏季 最重要的草花,年產量達 230 萬盆,在春夏秋三季開花 良好,市場需求量持續增加。

九重葛原生於南美洲。西元 1786 年 法國植物學家 Philibert Commerçon 繞地球航行時,在巴西裡約熱內盧 (Rio de Janeiro)發現這種植物,並以隨行的探險家 Louis Antoine de Bougainville 之名將此種植物命名為 "Bougainville"。西元 1789 年,由 Antoine Laurent de Jussieu 學者以 'Buginvillea'首次作為屬名刊登在 Genera Plantarium 雜誌上。這個屬名前後又分出不同的 版本,最終在西元 1930 年有 Kewensis 植物引索統一為 'Bougainvillea'。台灣於 1872 年由馬偕博士 Dr. George Leslie Mackay 從英國引進。1901 年日本人田代 安定再次由日本引入之後,其他業主陸續引入新品種, 而在民國 81~82 年間薛聰賢先生從東南亞引進 40 種以 上的新品種。

玉葉金花為茜草科 (Rubiaceae)玉葉金花屬 (Mussaenda) 多年生灌木,原生於熱帶及亞熱帶地區,菲 律賓、中南半島、中國大陸南部、台灣、琉球及日本南 部等地區。適合蔓籬、庭植美化或盆栽,多年來市面上 僅留通紅萼花、粉萼花及雪萼花3個品種,品種少缺乏 變化亟待透過育種增加花型花色,促進景觀花木多樣化 及產業發展。

# II. 主要內容

使用重辦日日春桃園 1 及 4 號之 OP 種子、無根插 穗、發根插穗及實生苗,進行 10、20、40 及 80 Gy 不 同劑量之γ射線照射,處理後材料播種於細泥炭土,存 活後介質使用粗泥炭土搭配珍珠石、蛭石調配至 3:1:1 比 例種植。種植 1 個月後進行致死率、受傷率及各項園藝 性狀調查。重辦日日春種子高劑量照射與突變性狀之型 態調查,植物材料使用自行採收之重辦日日春 1 號及 3 號之 op 種子(open-pollinated),照射後進行播種,播種於 200 格穴盤中。栽培介質使用細泥炭土播種,存活後每 週施用 Peters 液肥,以及亞磷酸控制疫病發生。照射劑 量分別為 160、200、240 格雷(Gy)。重辦日日春  $\gamma$  射線 重複照射,本實驗材料為已照射過一次 $\gamma$ 射線的重辦日 日春桃園 3號(紅蝴蝶)及桃園 4號(夏雪)。繁殖時使用扦 插的方式,將枝條剪下後扦插於128格穴盤之中。發根 後栽培介質使用泥炭土搭配珍珠石、蛭石調配至 3:1:1, 種植後一週開始使用好康多 70 天型顆粒肥,並每週施 用 Peters 液肥 20-20-20,稀釋 1000 倍維持植物營養需 求,以及每週施用亞磷酸1000倍控制日日春疫病。試驗 植株種植於中興大學園藝系溫室。桃園3號、桃園4號 母本做扦插繁殖,扦插枝條約在3週後發根。於照射前 準備日日春無根插穗及扦插苗。將兩種材料使用紙巾包 好,維持濕潤確保枝條的新鮮度,妥善包裝於夾鏈袋中。 照射當天將扦插苗、無根插穗裝袋送至桃園市龍潭區核 能研究所進行照射。使用四種照射劑量,分別為50、60、 70 和 80 格雷(Gy),觀察其死亡率、受傷程度及變異情 形,希望能夠取得不同花 朵型態或花色變異株。調查照 射劑量之半致死劑量推估及各處理劑量對參試植物之 突變率。九重葛不同劑量照射不同材料,試驗材料選用 九重葛'台北红'、'VB'、'重瓣红'、'火炬' A1、PB 及 VB 品種, 取無根插穗或扦插發根苗進行不 同劑量照射,並於照射後7天、14天與67天進行成活 率及變異調查。玉葉金花不同劑量照射不同材料, 選用玉葉金花'粉萼'、'紅萼'及'雪萼'3 個品種 之扦插發根苗進行不同劑量照射,並於照射後7天、14 天與67天進行成活率及變異調查。

#### Ⅲ. 結果與討論

日日春種子經γ射線照射後之發芽與生長,重辦日 日春'桃園三號-紅蝴蝶'種子經四種劑量 $\gamma$ 射線照射,種 子發芽率在 40 Gy 以上之處理,較 20 Gy 以下處理低。 發芽後的實生苗之新生本葉在各劑量輻射處理下皆沒 有發生葉片受傷情形。實生苗經γ射線照射後對生育之 影響,在株高及相對生長率表現上,20 Gy 以上之處理 有顯著的降低。花徑於20Gy以上之處理與對照出現顯 著差異。20 Gy 以下之處理存活率為 100.0%, 40 Gy 處 理為 93.3%, 超過 80 Gy 則生長幾乎停滯, 花苞敗育, 且在第九週後全數死亡。當處理劑量超過10Gy時,新 葉片即出現破裂、畸形、捲曲,隨著劑量提高情形越嚴 重。照射後之植株栽培後並不會馬上顯現出明顯的受傷 狀態,直到植株經過修剪、摘心或隨著栽培時間增加, 較能夠陸續觀察到更多突變性狀。栽培後所觀察到的性 狀多為不穩定,其不穩定性狀包括花朵的條紋、花色、 花瓣數以及花型均有不穩定的特性。而突變性狀的發生 會隨著種植時間的增加在2至3個月內日趨穩定,大部 分植株會恢復至母本的植株樣態,少數個體會維持變異 的特徵。例如圖四之花朵為穩定後花色,與其母本桃園 一號重辦日日春具有明顯差異。九重葛選用2個參試品 種 'PB'及'A1 粉球'進行照射,照射材料為扦插發 根苗,劑量照射為0、10、20、40及80Gy,照射後傷害 時間快於第二天就出現葉緣焦枯之照射傷害症狀,成活 率上隨劑量增加死亡率提高,兩品種 40Gy 以上處理全 死亡,A品種20Gy成活率為59%,B品種成活率為41%。 初步結果推論較佳照射劑量為 20-40Gy 間,接下規畫進 行 20、25、30、35 及 40Gy 處理,以評估更精確之照射 劑量對參試品種死亡率之影響,找出精準之半致死劑量, 供未來照射處理之參考。玉葉金花選用'粉萼'及'紅 萼'2個品種進行試驗,扦插發根苗進行 0、10、20、40 及 80Gy 不同劑量照射,結果在 80Gy 處理後成活率明 顯低於 10%以下,推估再進行 80、90、100 及 110Gy 處 理能找到完全致死的劑量。粉萼'發根苗經伽馬射線處 理 28 天後,存活率最高的為 40Gy 存活率為 69.0%。其 次是 10Gy 以及 20Gy 的處理其存活率都為 66.7%。相對 的無照射劑量的對照組其存活率只有 40.6%。最高劑量 80Gy 則是只有 7.4%。'雪萼'玉葉金花數量太少數據 上也是可以看到劑量的增加,存活率呈遞減的狀態。 '粉萼'玉葉金花植株隨處理劑量增加,存活率呈遞減 的狀態。

# IV. 結論

本研究選用熱帶地區極具發展潛力但品種變化少 之花卉作物九重葛、玉葉金花及日日春之種子及營養 器官進行放射線不同劑量照射、次數及間隔時間處理來 或獲得突變以作為育種之材料,並探討組織學變化之情 形做為育種之基礎。日日春扦插苗或無根插穗,在γ射 線80格雷(Gy)以上皆會全數死亡,二者半致死劑量約在 70(Gy)。而日日春種子的可照射劑量非常高,本試驗最 高劑量為240(Gy),且並未對發芽率造成影響。九重葛 'PB'品種為20.35(Gy),A1'品種為19.22(Gy)。玉 葉金花及日日春種子照射之半致死劑量,未來可繼續探 討。

# 参考文獻

- [1] 盧守耕. 1961. 現代作物育種學. 臺大農學院出版
- [2] 鶴島 久男. 2005. 花壇學講座(17)-10.主な花壇用 花きの育種と品種の發達の譜系(IV)-サルビアと ビンか(カサランサス). 農業あよび園藝 80:602-607.
- [3] Anderson, N.O. 2006. Flower breeding and genetics: Issues, challenges and opportunities for the 21st Century. Springer, London.
- [4] Ahloowalia B S, Maluszynski M and Nichterlein K. 2004. Global impact of mutation- derived varieties. Euphytica 135: 187 – 204.
- [5] Ahloowalia B. 1995. In vitro mutagenesis for the improvement of vegetatively propagated plants. In : Induced mutations and molecular techniques for crop improvement. (In) Proceedings of a symposium, Vienna, 19-23 June, Jointly organized by IAEA and FAO, pp 531 – 41.
- [6] Blazich, F.A., P.H. Henry, and F.C. Wise. 1995. Seed germination of annual vinca responds to irradiation and temperature. HortScience 30:357-359. Chaudhary, S., V. Sharma., M. Prasad., S. Bhatia., B.N. Tripathi., G. Yadav., and S. Kumar. 2011. Characterization and genetic linkage mapping of the horticulturally important mutation leafless inflorescence (lli) in periwinkle Catharanthus roseus. Scientia Hort. 129:142-153.
- [7] Chen, C.M., T.Y. Wei, and D.M. Yeh. 2012. Morphology and inheritance of double floweredness in Catharanthus roseus. HortScience 47:1679-1681.
## 輻射照射處理於農業之應用 Application of radiant irradiation in agriculture

計畫編號:MOST 108-NU-E-415-001-NU 計畫主持人:王紹鴻 e-mail:mailto:shwang@mail.ncyu.edu.tw 計畫共同主持人:朱紀寶、蔡文錫、謝佳雯、吳進益 計畫參與人員:陳柏翰、陳冠中 執行單位:國立嘉義大學微生物免疫與生物藥學系

#### 摘要

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,第一代種植後篩選生長性佳, 產量高之優良單株 70 株進行第二代種植,採收 450 株 (M2) 大豆以 HPLC 分析經酸水解萃取異黃酮含量 發現有突變大豆品系的 Glycitein 與 Genistein 含量顯 著高於原始金珠大豆種原。為保證遺傳特性及高營養成 分,篩選優良第三代單株 100 株進行栽植,並已選取 53 株品系進行第四代栽植,未來預計完成第五世代選 育高功能性大豆品系,並強化大豆生技產品創新研發及 推廣栽植。此外,並利用伽瑪輻射誘變少孢根黴菌及乳 酸菌對未突變金珠大豆分別進行發酵製作天貝與大豆 優格。在 1,000 Gy 伽瑪照射之少孢根徽突變株中,篩 選出具有高蛋白酶或高脂質酶活性菌株;並以 500 Gy 伽瑪照射之乳酸菌突變株中篩選出高胞外多醣產量或 高異黃酮去醣基活性之突變菌株。相關的突變微生物皆 具有開發金珠大豆為功能性高營養價值食品及飲品的 潛力。待選育出遺傳性狀穩定第三代栽植之輻射突變大 豆,其產量足夠優良特性之輻射誘變少孢根黴菌及乳酸 菌,進行所衍生之高功能性大豆品系優化加工,以提升 功能活性,並開發高附加價值產品。

**關鍵詞:**大豆育種,乳酸菌,少孢根徵,伽瑪射線輻射 誘變,異黃酮類,功能性分子。

#### Abstract

To breed soybeans with high isoflavones, the golden pearl (Glycine max Shi-Shi) were mutated by gamma radiation technology. Seventy excellent mutant lines with good growth and high yield were screened for further cultivation. Four hundred and fifty M2 lines were harvested, and T The isoflavone of these seeds were extracted, following by acid hydrolysis and HPLC analysis. The glycitein and genistein contents of mutant lines were significantly higher than those of the original golden pearl soybeans. One hundred excellent lines were selected for the cultivation. From those lines, 53 lines are currently cultivating in the field. Upto the fifth generation, stable genetic growth traits of the highly functional soybean lines will be selected for enhancing the

R&D of soybean in applied biotechnology. Besides, microbes for soybean fermentation were mutated by gamma irradiation simultaneously in this project. The mutants of tempeh fungus Rhizopus oligosporus with high protease and lipase activity, and the lactic acid bacteria with high yield of extracellular polysaccharides or high activity of isoflavone deglycosylation were selected after 1,000 Gy and 500 Gy irradiations, accordingly. These mutant microorganisms show the potential to develop high nutritional value food and drink with new breeding lines of golden pearl soybean. When candidate soybean lines reached the yield for commercial production, the selected R. oligosporus and lactic acid bacteria mutants are able to ferment the best soybean lines from this project, and then some high value-added products will be developed following this project.

**Keywords:** Soybean breeding, Lactic acid bacteria, *Rhizopus oligosporus*, Gamma-irradiation mutagenesis, Isoflavones, Functional molecules.

#### I. 前言

近年應用分子標誌輔助作物育種技術可縮短育種 篩選時間,但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,不易同時選育逆境適應育種及 提升特殊代謝產物的產量,更需較長的育種時間。故利 用物理或化學方式進行誘導突變可創造基因體變異,降 低育種時間及成效,其中以伽瑪輻射誘變技術,可產生 大範圍多元變異,而常被利用於生物誘變 [1]。本團隊以 益生菌組合開發大豆加值加工品,該產品能降低糖尿病 老鼠血糖濃度,而異黃酮種類與延緩或降低血糖濃度有 關 [2]。透過輻射誘變處理,選育高異黃酮量、高蛋白質 產量、高多糖生成或抗氧化物等機能性等新大豆品系及 突變菌種。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

大豆被認為是適合取代動物性來源蛋白的食物來 源,「金珠」十石大豆品系為本校農藝學系劉啟東副教 授選育之高異黃酮非基改大豆,其中以 genistein 以及 daidzein 兩類異黃酮含量最高 [3]。以伽瑪輻射誘變導 致 DNA 斷裂後修補得以達到最多元的遺傳變異,包含 小區域突變、大片段刪除、多倍體等突變,常被應用於 稻、麥、蔬菜、果樹等農作物之改良。伽瑪輻射誘變亦 常見於各類微生物之菌種改良,包含各種工業用細菌與 真菌 [4]。透過伽瑪輻射誘變金珠大豆品系,以提高功能 性產物含量,並配合伽瑪輻射誘變製作高營養大豆發酵 天貝之真菌 Rhizopus oligosporus 以及乳酸菌,篩選具 有高效率轉化大豆異黃酮苷與伽瑪胺基丁酸等功能性 分子之突變微生物,強化金珠大豆與其衍生優良株系大 豆之發酵技術,達到營養功能加值之目的。

#### III. 結果與討論

本校選育之高異黃酮非基改大豆「金珠」(十石)大豆 品系,經過伽瑪輻射誘變照射,分別以 200 Gy、300 Gy 照射金珠大豆各 1,000 粒後,田間栽植採收第一代後發 現,200 Gy 照射大豆播種後植株之田間生長狀況優於 300 Gy 照射大豆。選取 70 株 200 Gy 照射第二代大豆 優良單株進行栽植,後續共採收 450 株第三代中,選取 性狀優良單株 100 株進行第 3 次種植,其中 15 株單株 乾豆總重大於 35 克,大於或等於對照金珠單株乾豆總 重最重者 34.98 克。以本計劃建立之萃取與 HPLC 分析 平台將大豆異黃酮分析,結果顯示以 200 Gy 伽瑪照射 大豆優良單株 SBM013、SBM017、SBM032、SBM036、 SBM082、SBM096 具較高異黃酮含量 (圖一),經伽瑪 射線照射大豆突變株間,單株大豆異黃酮含量產生變異, 可選育高異黃酮突變品系。



圖一、原生及誘變大豆之 daidzin 及 genistin 含量比較。

本研究隨機挑選經 1,000 Gy 輻射照射後無生長差 異之 R. oligosporus 菌株進行酵素活性分析,大豆蛋白 分解試驗結果顯示,10 株候選菌株有 6 株蛋白分解活 性高於野生親株、脂解酶活性也有 4 株活性超過原野 生親株。挑選突變株 SW02、SW08 作為天貝實作與異 黃酮分析之候選株。在天貝芳香味方面,SW08 突變株 具特別堅果香氣,且其糖苷配基異黃酮含量亦有上升之 趨勢 (表一)。

表一、HPLC 分析糖苷配基異黃酮含量。(DW: dry weight)

菌株	Daidzein (µg/g DW)	Daidzin (µg/g DW)	Daidzein/ Daidzin	Genistein (µg/g DW)	Genistin (µg/g DW)	Genistein/ Genistin
WT	128.00	191.33	0.67	214.73	502.67	0.43
SW02	93.17	120.80	0.77	147.53	316.80	0.47
SW08	147.20	129.13	1.14	269.27	375.20	0.72

以 500 Gy 伽瑪輻射照射乳酸菌後致死率可達 99.9%,此輻射劑量可誘發明顯之基因突變。多數輻射照 射存活菌株於生長時仍有良好產酸能力,其產酸界於 pH 4.6-4.0 之間菌落,挑選出培養於 MRS 平板培養基 24 小時後可產出 pH 2.9 之菌落,分別為 L. plantarum (LPL) RA16、RA37、RB29; *P. pentosaceus* (PPT) RA07、 RA30、RB19; *L. pentose* (LPT) RA03、RA36、RB58 等。 以菌落胞外多醣的延展性測試,證實 LPL-RA16、LPL-RB29、PPT-RA07、PPT-RA30、LPT-RA36 與 LPT-R58 的胞外多醣延展長度分別遠高於原始親株。此外,LPL-RA37、PPT-RA30 與 LPT-RA03 培養於金珠大豆豆漿 中發酵 24 小時後,以 HPLC 分析大豆異黃酮之去醣 基異黃酮成分皆顯示高於原始親株,且 LPL-RA37 菌 株提高豆漿中去醣基異黃酮濃度高達 2.21 倍 (表二)。

表二、輻射照射乳酸菌突變菌株轉換金珠豆漿之生成去 醣基異黃酮的比較。

Doctorio	Stuain	Isoflavone aglycones (mg/L)			g/L)
Dacteria	Strain	Glycitein	Daidzein	Genistein	Total
Soy milk only		47.74	11.32	21.37	80.43
LPL	WT	33.89	27.03	50.58	111.50
	RA37	48.73	43.58	85.50	177.81
РРТ	WT	34.49	12.40	28.52	75.41
	RA30	42.31	43.47	80.71	166.49
LPT	WT	38.23	11.58	22.37	72.80
	RA03	36.24	37.14	70.30	143.68

#### IV. 結論

本研究證實利用不同劑量之伽瑪照射可以誘變大 豆與微生物,其中合適大豆誘變之劑量約為 200-300 Gy, 而微生物則可耐受較高輻射劑量,根黴菌 *R. oligosporus* 之誘變輻射強度為 1,000 Gy,而乳酸菌則為 500 Gy。 透過伽瑪照射可篩選到具有提升異黃酮總量之優良金 珠突變品系,其中部分突變品系之總莢數、乾豆總重、 以及 100 粒種子重皆比原始金珠親株佳,具有顯著農 業雜糧開發優勢。同時,利用伽瑪照射亦可成功篩選出 具有提升蛋白酶、脂解酶與 β-葡萄糖苷酶等酵素活性之 *R. oligosporus* 菌株 [5],以及可篩選出具有生產高多醣 體、高活性 β-葡萄糖苷酶、以及高伽瑪胺基丁酸產量之 乳酸菌突變菌株 [6]。

#### 参考文獻

- [1] Predieri, S. (2001). Mutation induction and tissue culture in improving fruits. *Plant cell, tissue and organ culture*, *64*(2-3), 185-210.
- [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] 呂英震、蘇莉雅、楊翰彬、許洪睿、朱紀實、羅至 佑(2016)。大豆十石(金珠)優格於發酵製程異黃 酮及嘌呤之成分變化。嘉大農林學報,13(2),29-40。
- [4] Kostyleva, E.V., Sereda, A.S., Velikoretskaya, I.A. *et al.* Development of schemes of induced mutagenesis for improving the productivity of *Aspergillus* strains producing amylolytic enzymes. *Microbiology* 86, 493 502 (2017).
- [5] 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),刊印中。

[6] 謝佳雯、陳德宇、楊逸善、吳宛庭、謝淨、謝怡蒨 等人(2019)。伽馬射線輻射誘變選育功能性乳酸菌 株。發表於「台灣微生物學會第二十三屆第一次會 員大會暨學術研討會」。國立台灣大學醫學院 102 講堂,2019.11.24。

# 政策推動與風險溝通(II)

## 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) Design and Implementation of Stakeholders' Inquiry and Communication Mechanism for Nuclear Power Plant Decommission Policy - II

計畫編號:MOST 108-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:周美辰、張羽婷、張懷文、詹幃棠、黃宗賢、方怡 捷、黃妍甄 執行單位:國立政治大學公共行政學系

#### 摘要

為了讓政府單位能更精準掌握有關核電廠除役的 社會廣大民意,本研究運用兩種研究方式,首先是大數 據網路輿情分析,了解民眾在各媒體及平台上對於核電 廠除役議題之討論內容與情緒,以及原能會回應情形。 再者,本研究也透過電話問卷調查方式,探詢四區與全 國民眾對於核電廠除役及核廢料處置議題的認知現況、 參與態度和影響因素。

研究結果顯示近年來在網路輿情的回應上,間接回 應與未回應之事件大多非屬原能會職權範圍,在核能相 關議題的回應上,相較前幾年更加即時與明確,在資訊 上亦更加公開透明。電話問卷調查發現四區的民眾相對 於全國民眾在核能專業知識上皆呈現較高的比例,顯示 近年來教育及宣導的成效。惟在對於政府信任的比例皆 呈現較低落的現象;而在核電廠除役的支持度,四區民 眾亦呈現較高的比例。基於以上的研究發現,本研究提 出未來相關機關在除役溝通方面的具體建議。

**關鍵詞:**公共溝通、核能、核電廠除役、輿情分析、大 數據。

#### Abstract

In order to obtain more accurate public opinions on the decommissioning issue, this study conducted public sentiment analysis and a large-scale telephone survey in 2019. Through these investigations, we aimed at understanding the different opinions between the residents of the four districts (Sanzhi, Shihmen, Wanli, and Jinshan) and the rest of the people in Taiwan. In addition, we would like to know if the Atomic Energy Council (AEC) has responded the online discussions actively and promptly. It is our hope that the government agencies would be able to make accurate and comprehensive policy decisions accordingly.

Our public sentiment analysis shows that in response to internet public opinion, most of the indirect and unresponsive events are not within the scope of the authority and power of the Atomic Energy Council. Compared with previous years, the responses of the Atomic Energy Council to nuclear energy-related issues are more immediate and clear, and the information disclosure is more open and transparent. The results of our survey demonstrates that the people in the four districts have a relatively high proportion of knowledge about nuclear energy, indicating that policy promotion and education have been effective in recent years. However, the proportion of trust in government is relatively low compared with the rest of the people in Taiwan, although their support of power plant decommission is higher. Based upon the above results, this study proposes strategies for public communication both in the the four districts and in other areas in Taiwan.

**Keywords:** public communication, the Firs Nuclear Power Plant, nuclear power plant decommissioning, public sentiment analysis, big data.

#### I. 前言

自從 2018 年 12 月及 2019 年 7 月核能第一發電廠 (下稱核一廠)一號機及二號機相繼停止運轉,成為臺 灣首座進入除役階段的核電廠。根據除役計畫書的內容, 預計需耗費約 25 年的時間才能完成除役。在除役拆廠 階段,除了涉及核廢料的貯放問題,除役安全、輻射安 全、未來廠區規劃以及能源供應、核電續用與否等議題, 也都是民眾相當關切的重點。然而不同議題下的利害關 係人及其關切的重點都不盡相同,這使得政府在推行核 電廠除役政策時,必須廣納並考量更多的民意。

如同前述,針對核電廠除役的討論,鄰近核電廠的 三芝、石門、金山、萬里四個行政區(以下簡稱四區) 民眾與全國民眾關心的重點似乎不太相同,在四區的會 議紀錄中發現,其討論的焦點多以未來廠址規劃、核廢 料貯放問題為核心;相較之下從 2018 年「以核養綠」 公投提案理由書中卻發現全國民眾擔心的是供電穩定 等民生相關問題,並延伸到是否續用核電之討論,進而 帶出核電廠除役議題。

此外相較於四區的民眾,全國非四區民眾能觸及除 役議題大多僅能仰賴網路傳媒途徑。因此由於「地緣限 制」與「網路社群媒體」的資訊傳遞,使得四區與全國 民眾對核電政策的認知與態度也有差異。基此,本研究 主要運用大數據網路輿情分析,了解有關核電廠除役相 關網路與情事件及民眾討論情緒;同時透過電話調查問 卷分析四區民眾與全台民眾對於核電廠除役及核廢料 處置議題之認知及兩者差異。最終將大數據分析結果與 電話問卷調查結果加以整理,藉此描繪出更清晰的民意 圖像,以提供政府完整的決策資訊。

#### Ⅱ. 主要內容

本研究以核能議題所涉及之地理範圍、政府規劃的 參與管道,以及因網際網路發展帶動的民意輿論擴散, 發展出本研究欲處理之問題,研究問題如下。

一、影響核電廠除役及核廢料處理議題的網路討 論事件有哪些?而哪些事件影響網路討論的聲量與情 緒?原能會的回應的情況如何?

二、 民眾對當前核電廠除政策的了解有多少?而 影響民眾參與核電廠除役及核廢料處理議題的因素有 哪些?

三、 在核電廠除役及核廢料處理議題上,四區民眾 與全國民眾在認知、態度與關心的事件,其異同之處有 哪些?

而在研究方法上,主要以兩大面向做為研究範圍, 一為大數據與輿情,二為電話問卷調查。大數據輿情分 析藉由設定與核電廠除役與核廢料管理相關之主議題 關鍵字,於資料庫中搜尋,再針對與本研究相關之檢索 結果進行分析,檢索資料回朔到 2016 年 1 月至 2019 年 12 月;電話問卷調查則以計畫行為理論模型為參考,並 設計問卷以了解民眾相關態度以及行為意象,電訪對象 分為三類族群「四區(市話)、全台唯手機族、全國(市 話)調查」,有效樣本數分別為 401、500 及 1,068 筆, 總計 1,969 筆有效樣本。



資料來源:本研究繪製

#### III. 結果與討論

本研究在研究設計上主要透過大數據輿情分析與 電話調查的方式,呈現民眾所關注的議題與參與核電廠 除役相關活動的因素,研究結果及發現如下。 一、 大數據與情分析結果

#### (一) 民眾不易區分核電廠除役之權責

從除役輿情分析的結果來看,原能會官方網站未能 回應民眾輿情事件的部分,主要的權責並不在原能會, 但是一般民眾通常把政府視為一體,不了解核電廠除役 權責劃分而容易歸咎原能會沒有處理。

#### (二) 政府單位對輿情回應程度不一

對於民眾擔憂與多數討論之與情回應,不同政府機 關單位回應表現不一,往往各機關有其本位主義,導致 民眾對某特定議題之權責歸屬不了解,甚至讓民眾產生 誤解。

#### 二、 電話調查結果

#### (一) 核能廠除役議題

在「是否相信政府有專業技術可以進行核電廠除役」 以及「在核電廠除役的議題上相信政府會與民眾溝通」 等兩題中,四區民眾認同的比例皆較低;當民眾被問到 政府是否會在「核電廠除役」議題上在乎一般民眾的想 法時,四區民眾僅有 44.1%的人是抱持正面的態度,反 而比整體的 55.8%降低許多。

#### (二) 核廢料管理議題

四區民眾不太相信政府能夠妥善處理核廢料的問題,也不太相信政府有專業技術進行處理。有關「核廢 料管理」資訊公開,儘管政府透過許多不同管道向當地 居民溝通、宣導、提供資訊,但是四區民眾仍然認為要 獲得核廢料管理的相關資訊並不容易。

#### (三) 知識題

本研究的知識題共設計三題,包括核電廠除役使用 年限、「核一廠」的位置、「使用過的燃料棒」目前放置 於核電廠內,以及為避免放射性物質可服用碘片等。在 所有調查對象中,四區的民眾皆有較高的正確比例,且 均顯著高於整體民眾的正確率,顯示多年來的教育及宣 導有所成效。

#### (四) 綜合題

在核電廠除役的支持度上,四區的民眾有明顯較高 的比例(57.2%)表示支持此項政策,僅有45.5%的人支 持核電廠「延役」。顯示核電廠長期以來對於當地民眾的 影響甚鉅,民眾關注除役議題的程度較高,也傾向支持 盡快完成除役。

#### IV. 結論

依據本研究之分析結果,提出未來在除役溝通方

面之具體建議,以協助提升原能會等機關之政策溝通 效能,進而獲得更多民眾的支持與信任。

#### 一、 在大數據與輿情分析方面

#### (一) 利用事件回應將相關政府機關單位權責劃清

原能會在輿情回應,除安全管制與澄清外,在內容 上可補充監督機關單位與權責釐清,長期而言,可讓民 眾更加了解原能會職責。

#### (二) 建立與核電廠除役相關事件共同回應機制

除了各不同權責機關基於其不同職權及角色的個 別回應之外,建議在行政院層級下架設共同的回應平台, 一方面能夠增加民眾對該議題的了解程度;另一方面也 可以讓民眾對議題檢索時能夠更加容易取得正確資訊。

#### (三)持續觀測分析與情並將延續事件加以釐清與 回應。

在事件回應上,可於回應中提供民眾在事件中檢索 之關鍵字,讓民眾能更快速檢索到原能會提供、回應之 事件,減少謬誤。此外原能會目前針對民眾輿情大多使 用官網與新聞稿回應,而此種方式僅能較為被動等待民 眾上網搜尋,但在多元社群媒體竄起的當代,政府單位 可更主動透過不同管道及媒體,主動出擊,降低民眾疑 慮。

## (四)透過不同管道,釐清原能會在核能安全管制上的角色

過去原能會對於台電違反核能安全的處分公諸於 媒體後,已逐漸建立民眾對於原能會安全管制角色的正 確認知,但能源、核廢處理以及核電廠除役議題事涉專 業性及複雜性,仍有待原能會透過各種不同的體制(如 教育及民政)、傳播管道、以及核安事件,向大眾釐清 本身角色,避免民眾誤解。

二、 在電話調查方面

#### (一) 加強四區民眾溝通的力度

雖然政府機關對四區民眾溝通與互動程度實際上 已高於對其他地區的民眾,但四區民眾對於政府的信任 程度反而較低。因此本研究建議,與當地居民的溝通, 應該先廣泛蒐集民眾所擔憂之議題與建議,並且採取更 多元面對面的溝通方式,例如定期拜訪,加強對當地區 民溝通的效果與力度。

## (二) 具體且更有效回應四區民眾有關核廢料處理的疑慮

核電除役議題上,四區民眾對政府的不信任程度高 於其他地區,在核廢料管理議題方面亦低於其他地區的 信任度。在政治效能感方面,四區民眾也比不認同政府 會在乎一般民眾的想法。因此,除了進行意見蒐集外, 應於溝通後盡快給予直接且明確的回應,避免民眾出現 「溝通僅徒具形式、而無實質意義」的想法,以提高民 眾對政府的信任度及參與意願。

#### (三) 強化核電廠除役相關知識

在溝通、宣導與教育方面,思考如何加強民眾對核 能、核電廠除役及核廢料管理上的基礎知識,也同時應 該提高民眾對除役程序與規劃的了解。

#### (四) 加強宣傳力度並提供不同群體多元參與管道

除了應加強力度與當地居民宣傳外,本研究建議可 以參考其他國家如韓國、德國等國家,針對不同群體, 像是我國核電廠所在的四區民眾以及一般大眾,運用不 同的溝通管道和參與模式,才得以真正與民眾溝通,得 知民意所向。

#### (五) 增加民眾對核電廠除役的正面影響感受

民眾支持核電廠除役會受到「知覺利益」之影響, 亦即若民眾對核電廠除役抱持正面感受時,會越加支持 核電廠除役,特別是對全國民眾而言,知覺利益之影響 更深。故為了使核電廠除役之政策能夠受到廣泛的支持, 須加強民眾對核電除疫政策的正面感受,包括說明除役 之重要性、提供除役資訊等方面,並透過政策行銷等方 式,讓民眾了解核電廠除役的益處。

#### (六)提升四區民眾對政府的信任感,將意向轉化成 實際行動

本研究建議可由當地里長或意見領袖等日常可見 的人物做為橋樑,積極且正面宣傳政府(含原能會、台 電公司等)之作為,再輔以大眾媒體等行銷方式以提升 四區民眾對於政府的信任程度。

#### 参考文獻

- 周崇儒(2003)。淺析組織溝通的原則。中等教育, 54(2),144-157。
- [2] 林國明、黃東益(2004)。公民參與模式及其運用。 載於行政院衛生署(主編),公民參與:審議民主的 實踐與全民健康保險政策(頁215-239)。台北市: 行政院衛生署。
- [3] 許焜發(2008)。由「樂生事件」論教師公民參與之 信念與實踐及其對教育工作的影響。教育實踐與研 究,21(1),1-32。
- [4] 黃東益、朱文妮 (2015),政府信任與低放射性廢 棄物最終處置場接受度:臺閩地區、臺東縣與達仁 鄉之比較,中國行政評論,21卷1期,頁77-110。
- [5] 黃東益、張鐙文(2015)。瞎子也能摸大象?從巨量 資料探勘媒體中的核電印象。於2015兩岸學者論 壇- 〈公民參與與公共政策〉學術研討會發表。
- [6] 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,106-2623-E-004-001-NU。
- [7] 黄俊英(2011)。整合性行銷溝通一强化政策宣導與

溝通的利器。文官制度季刊,3(2),1-23。

- [8] 黃瑞祺(1998)。理性討論與民主:哈伯馬斯之溝通 理論的民主涵義。收錄在蕭高彦、蘇文流編《多元 主義》,337-377。臺北:中央研究院人文社會科學 研究所。
- [9] 黃瑞祺 (2001)。批判社會學 (二版一刷)。台北: 三民。
- [10] 廖洲棚、陳敦源、蕭乃沂、廖興中(2013)。運用巨 量資料實踐良善治理:網路 民意導入政府決策分 析之可行性研究。國發會專題研究成果報告,台北: 國發會。
- [11] 蕭金益(2007)。強化低放最終處置場溝通策略之研究。政治大學行政管理碩士學程學位論文,未出版, 臺北。
- [12] 環境資訊中心(2002)。鄰避效應前瞻:從環境正義 與衝突管理談鄰避效應,2018年7月2日,取自: http://einfo.org.tw/news/taiwan/special/2002/tasp2002
   -10.htm。
- [13] 繆敏志 (1991)。領導,做決定與溝通。學校行政。 高雄市:復文。
- [14] 謝文全(1997)。教育行政-理論與實務(十二版)。 臺北:文景出版社。
- [15] Ahearne, J. F. (1990). Telling the public about risks.
   Bull at Sci, 46(7), 37 39. Assessment Review, 24(6), 617-641.
- [16] Bardach, E. (1998). Getting Agencies to Work Together. Washington, DC: Brookings Institution Press.
- [17] Bond, A., Palerm, J., & Haigh, P. (2004). Public participation in EIA of nuclear power plant decommissioning projects: A case study analysis. Environmental Impact
- [18] Brown, M. B. (2006). Citizen panels and the concept of representation. Journal of Political Philosophy, 14 (2), 203-25.
- [19] Bryson, J. M., & Crosby, B. C. (1992). Leadership for the Common Good: Tackling Public Problems in a Shared Power World. San Francisco: Jossey-Bass.
- [20] Bryson, J. M. (2004). What to do when stakeholders matter: stakeholder identification and analysis techniques. Public Management Review, 6(1), 21-53.
- [21] Carver, S. (2003). The future of participatory approaches using geographic information: Developing a research agenda for the 21st century. Urisa Journal, 15(1), 61-71.
- [22] Chen, C.-L. P., & Zhang, C.-Y. (2014). Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data. Information Sciences, 275(0), 314-347.
- [23] Clarkson, M. E. (1995). A stakeholder framework for analyzing and evaluating corporate social performance. Academy of Management Review,20(1), 92-117. delusion. William & Mary Law Review, 15(3),503-525
- [24] Eaton, C., Deroos, D., Deutsch, T., Lapis G., & Zikopoulos, P. (2012). Understanding Big Data: Analytics for Enterprise Class Hadoop and Streaming Data. New York: McGraw Hill Companies.
- [25] Eden, C., & Ackermann, F. (1998). Analysing and comparing idiographic causal maps. Managerial and organizational cognition: Theory, methods and

research, 192-209.

- [26] Fan, W., & Bifet, A. (2012). Mining big data: current status, and forecast to the future. SIGKDD Explorations, 14(2), 1-5.
- [27] Fischhoff, B. (1995). Risk perception and communication unplugged: Twenty years of process 1.Risk Analysis,15(2), 137-145.
- [28] Friedman, T. L. (2000). The Lexus and the Olive Tree: Understanding Globalization. New York: Anchor.
- [29] Gomes, R. C. (2006). Stakeholder management in the local government decision-making area: evidences from a triangulation study with the English local government.Revista de Administração Contemporânea,10(SPE), 77-98.
- [30] Guthrie, J. W., & Reed, R. J. (1991). Educational administration and policy: Effective leadership for American education(2nd). Boston:Allyn & Bacon.
- [31] Gwin, L. (1990). Speak no Evil : The Promotional Heritage of Nuclear Risk Communication. New York: Praeger.
- [32] Harold, P. G. (1974). Public participation in nuclear power plant licensing: The great
- [33] He, G. Arthur, P. J. Mol, L. Z., & Lu, Y. (2013). Public participation and trust in nuclear power development in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23(C), 1-11.
- [34] Huang, Tong-yi, Chung-an Hsieh. (2013) Practicing deliberative democracy in Taiwan: processes, impacts and challenges, 'Taiwan Journal of Democracy, 9:2, 79-104
- [35] Huang, Tong-Yi, Teng-Wen Chang. (2017). Transforming Governance through Digital Technology: Applying Big Data Analysis to Public Opinion Mining for Public Policy Making. American Society of Public Administration (ASPA) 2017 Annual Conference.
- [36] Huntington, S. P. (1996). The Clash of Civilizations and the Remaking of World Order. New York, NY: Simon and Schuster.
- [37] IAEA. (2005). Standard format and content for safety related decommissioning documents, IAEA Safety Reports Series. No. 45.
- [38] Jeong, K., Lee, K., and Lim, H. (2010). Risk assessment on hazards for decommissioning safety of a nuclear facility, Annals of Nuclear Energy, 37, 1751-1762.
- [39] Jowett, G., & O' Donnell V. (2012). Propaganda and Persuasion. Thousand Oaks, Calif.: Sage Publications.
- [40] Kahane, D., Loptson, K., Herriman, J., & Hardy, M. (2013). Stakeholder and citizen roles in public deliberation. Journal of Public Deliberation, 9(2), 2.
- [41] Karpowitz, C. F., & Raphael C. (2014). Democracy, Deliberation, and Civic Forums: Improving Equality and Publicity. New York: Cambridge University.
- [42] Kettl, D. F. (2002). The Transformation of Governance: Public Administration for Twenty-first Century America. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- [43] Krackharts, David., 1992, "The strength of strong ties: The importance of philos," in Networks and Organizations: Structure, Form, and Action, edited by Nitin Nohria and Robert G. Eccles, Cambridge: Harvard Business School Press.

## 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 Empowering people to have the proper attitude towards the decommission of nuclear power plants: An integrated plan of construction and deconstruction of the media communication strategy

計畫編號: MOST 108-2623-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、許瑋桓、李家萱 執行單位:世新大學廣播電視電影學系(所)

#### 摘要

原子能委員會自 1955 年成立以來即是以「核能安 全」與「原子能民生應用永續發展」為職志的政府單位。 然而,在臺灣這個以「增進民生福祉」而存在的單位, 民眾在接觸或求知相關原子能訊息時,其資訊來源理應 首選的政府單位,在民調上卻是得到民眾「公信力不夠」 的結果。本研究基於這樣的實情,為提升臺灣公民正確 參與核能公共議題,以二年整合型計畫的研究期程,試 圖為原子能委員會擘劃出一套適用且具社會科學檢驗 後的原子能相關訊息傳達模式,促進政府(主管機關)、 常民(一般國民)與媒體(載具)三方對於原子能訊息, 可以正確建構與解構原子能訊息、理性溝通原子能訊息 並能創造原子能正確消息來源等多贏溝通局面的可行 性。本年度研究期程,係以質性研究方法之「多元資料 蒐集方法」作為主要的研究取徑,以「文件分析法」 (document analysis)作為資料蒐集與分析的具體研究方 法;在透過分析過去所有原能會相關行政文件資料、依 據四大報(自由、聯合、蘋果、中時等)與主要的電子 網路媒體(以 youtube 為主要的影音撈取來源)近5年 (2015-2019 年) 來的新聞再現後,以分析文件進行敘 事分析 (narrative analysis) 後解構有關原能會在媒體再 現的敘事結構形式 (patterns), 藉以提供未來原能會在 面對新聞媒體時之較佳應對方式,同時也將此研究成果 作為第二年研究期程培力民眾原子能相關常識的媒體 素養觀依據來源。

**闌鍵詞:**多媒體敘事、效果分析、公民參與、核能議題、 媒體識能。

#### Abstract

The primary missions of the Atomic Energy Council (AEC) since its establishment in 1995 are to protect the public health and safety from nuclear materials and facilities as well as sustainability development of nuclear technology in people's livelihood. However according to the survey, when the public would like to seek or contact related nuclear information, the Council was regarded as lack of credibility. Based on the misconception, this research is aim to enhance the effective participation by the Taiwan public on the nuclear issue. The two-year integrated research plan attempt to set up an appropriate and validated by social science, a nuclear related information communication model. That model will enhance the construct and deconstruct of nuclear information, as well as

ensure correct and rational nuclear information among the government, general public and media.By conducting a two-tear integrated sub-research, qualitative method in document analysis of collecting multiple source documents, focus groups and in depth interview of social science research methods will be used. In the sub-research plan of "The social network construction and communication channel effectiveness in the study of nuclear online communities" and "A research on the nuclear information construction of with motion graphics and virtual reality technology" will also be align to reflect the aforementioned challenges and reality in society. The primary mission of the Council will then be able to realize by reaching a win-win situations in information & communication between the public and media.

Keywords: multi-media narratives, communication effect analysis, civil participation, nuclear public issues, media literacy.

#### I. 前言

我國自民國 44 年(1955 年)成立原子能委員會(以 下簡稱「原能會」)以來,至今已超過一甲子之久;回 顧過去這個以「輻安核安民眾心安、日新又新專業創新」 作為完善國家核能及輻射安全監督機制的單位,從對原 子能相關業務的厚植專業人力、強化意外事故應變能力、 確保原子能和平用途並資訊公開透明、為民眾核能安全 嚴格把關等方針當作願景,不論就其單位對核能相關業 務的專業性、嚴謹度與透明度(依法行政),甚或是對 於國內核能電廠、核子設施及輻射作業場所的安全監督, 毫無疑問係以「增進民生福祉」的核能安全與原子能民 生應用的永續發展盡最大努力為職志。然而,這樣政府 「掛保證」所設立的原子能專業主管機關,就專業度而 言應該是民眾接觸或求知相關原子能訊息時應首選的 「第一品牌」,但事實卻是得到民眾「公信力不夠」的 結果 (蘋果日報,20130311);或者常常在經過某些事 件(含核災、停電、核安抗議事件等)後,這個政府單 位常常會因為國內的政治力(政黨)或媒體立場的不同, 引發民眾對於原能會信任度的嚴重對立與分歧(陳憶寧, 2014)。以原能會所主管的核能議題來說,民眾對於核 能立場的變化會受到一些事件而產生不同立場的民意 與現象(TVBS, 2012;梁世武, 2014;陳欣怡, 2018) 的現實固然可以理解,然而本諸原能會這個「本質中立」 的政府角色,從其設立的宗旨看來,該單位應該是全國 有關原子能專業知識最齊備的單位,縱有「立場之爭」

為何卻無法扮演民眾心中的「知識權威」角色,民眾反 而會隨著議題變化、媒體再現狀況、政黨輪替等諸多因 素「隨之起舞」,沒有正視或意識到諸多涉及原子能本 身「客觀中立」的知識問題,其實可能才是真正解決紛 爭或爭議的關鍵變項,而民眾逕自給予政府單位貼上各 種標籤、不信任、甚至是反對的看法,都可能讓一個簡 單的議題變得複雜,無法回歸理性討論(陳潁峰,2017)。 顯然作為國家唯一原子能業務的主管機關有必要且刻 不容緩必須進行深入的討論與探究真正的原因所在。

本年度研究期程,係以質性研究方法之「多元資料 蒐集方法」作為主要的研究取徑,以「文件分析法」 (document analysis)作為資料蒐集與分析的具體研究方 法;在透過分析過去所有原能會相關行政文件資料(由 原能會提供訊息)、依據四大報(自由、聯合、蘋果、 中時等)與主要的電子網路媒體(以youtube 為主要的 影音撈取來源)的新聞再現(原能會作為被動的被報導 者)後,以分析文件進行敘事分析(narrative analysis) 後解構有關原能會在媒體再現的敘事結構形式 (patterns),藉以提供未來原能會在面對新聞媒體時之 較佳應對方式,同時也將此研究成果作為下一年度(第 二年)研究期程如何培力民眾對原能會正確認知與正確 識讀媒體上核能訊息的素養觀依據來源。以下將針對研 究之文獻討論、研究方法細項與研究結果,分述如下。

#### Ⅱ. 主要內容

本計畫不同於過去原能會計畫均以量化為出發的 研究模式,本研究係以質化之「多元資料蒐集方法」作 為執行的方法,根據 Wolcott 的觀點所提出的質性研究 樹狀圖,主要係強調質性研究的資料來自於日常生活, 資料蒐集的技術大致可以歸類為體驗(experiencing)、 探索 (enquiring) 和檢視 (examining) 三種類型,也就 是觀察(參與觀察、非參與觀察)、訪談(傳記、新聞、 敘事、口述史)與檔案研究(檔案文件、研究文物), 在質性的研究方法中,訪談、觀察和文件資料的蒐集資 料是常用的方法(李政賢譯,2011)。簡單地說,Wolcott 認為研究人員如果要尋求最廣角的視野,不會只依賴研 究單一策略,為了站在研究的有利位置,研究者可以視 需要混合數種主要策略,採取廣義的參與觀察以蒐集足 夠的資料,達到所謂的厚實描述(thick description)及 理論飽和 (theoretical saturation) (李政賢譯, 2011)。 因此,本計畫雖以質性研究為主,仍有必要以具體的多 元資料蒐集方法,以進行較為全面與廣泛的方式尋得有 關原能會過去5年來如何被新聞再現以及本身單位對外 宣傳的所有文本。更細緻地論述具體研究方法的操作, 本計畫將藉由「文件分析法」(document analysis)作為 資料蒐集的研究方法,在經過閱覽過去所有原能會相關 行政文件資料後,依據四大報(自由、聯合、蘋果、中 時等)與主要的電子網路媒體(以 youtube 為主要的影 音捞取來源)的新聞再現完成所設定的研究目標。宜說 明者在於,本計畫此階段雖未進行一手資料調查,惟針 對本計畫所選定的研究主題,本計畫除了對原能會過去 的發展脈絡以歷史性的統計數字整理外,按照 Altheide (1996)指出的質性文件分析法中,研究者可以透過挖 掘歷史文件或日常生活的紀錄、筆記圖片、印刷品、報 紙、雜誌等,勾勒及傳遞研究者內心圖像與文件本身所 賦予深層意義的方法,進而原能會在臺灣媒體再現的實 際運作狀況,以詳實回應本文所設定的研究主軸。而此 亦呼應 Altheide 認為文件分析法得以一種重視概念發展、 結合尋找、確認、恢復和分析文件的關聯性、重要性及 其意義的方法、程式及技巧,進而完整呈現研究命題的 內容。完成文件分析後,再以所整理分析的文件進行敘 事分析 (narrative analysis),解構出有關原能會在媒體 再現的敘事結構形式 (patterns),作為整體故事再現的 討論依據 (蔡素琴、洪雅鳳、劉淑慧,2014),同時也 作為下年度的培力民眾原子能知識的媒體素養觀之主 要依據。

更細緻地討論本研究具體研究方法的操作,本年度 「文件分析法」的研究方法係以閱覽臺灣所有與原能會 媒體再現的相關文件資料後,依據其媒體再現狀況加以 整理外,根據 Altheide (1996: pp. 39-74) 指出的質性文 件分析法中,研究者可以透過挖掘歷史文件或日常生活 的紀錄、筆記圖片、印刷品、報紙、雜誌等,勾勒及傳 遞研究者內心圖像與文件本身所賦予深層意義的方法, 進而揭開與原能會相關的媒體再現資料在臺灣實際運 作狀況,以詳實回應本研究所設定的研究主軸。而此亦 呼應 Altheide 所認定的文件分析法係以一種重視概念發 展、結合尋找、確認、恢復和分析文件的關聯性、重要 性及其意義的方法、程式及技巧,進而完整呈現研究命 題的內容。基此,本研究對於研究資料與文件選取決策 的具體操作,首先便是從研究命題的詳實描述出發;其 次藉由多元資料蒐集的方法,分為平面媒體、電子媒體 與原能會本身宣傳品三大軸線進行資料全面性蒐集。實 際運用文件的方式則對所有蒐集的文件進行具邏輯性 且有意義的編號,並完成文件的樹狀關係圖,以達到 Wolcott 所謂诶體再現的厚實描述;文件編號目的係為 方便研究者進行後續資料處理與分析,所有文件的編號 邏輯係以英文代號加上日期作為編號模式。例如,平面 媒體所蒐集到的文件以 P 為代號(如, P20190101-1、 P20190101-2 類推,如下表所示);屬於電子媒體的代 號為 E; 而與原能會政府部門相關所蒐集的文件代號為 A。研究者則將 P、E、A 以三群樹狀圖的資料整理作為 解構本研究命題核心。本年度根據 P、E、A 資料新聞再 現則述如下:

 平面媒體所蒐集到近5年有關原能會再現新聞文件 (P代號)。

 電子媒體所蒐集到近5年有關原能會再現新聞文件 (E代號)。

3. 原能會近 5 年自行發出相關訊息後所再現新聞文件 (A代號)。

本計畫根據期中進度本會協同研究查核所提意見: 「建議計畫主持人得就原能會本身在媒體上所呈現的 十大形象模式(image patterns)更詳細、更清楚地呈現 每一個 patterns 的細項資料;除了以現有媒體再現的資 料為基礎,建議可以延伸更多新媒體的呈現方式一併討 論;很多議題的新聞再現,原能會並無特定立場,惟常 被無故波及,例如能源政策係屬經濟部業務範疇,卻被 混淆為原能會業務,建議研究中可針對此部分予以強化 分析;以及某些單一事件,如社群媒體以 youtube 傳遞 的"阿嬤問倒原能會"事件、104 年 1 月發生台北車站具 有輻射的謠言等事件,亦請整理分析,作為原能會未來 面對與因應新聞媒體之參考」等內容為基礎,進行分析。 由於本計畫執行係以質性研究方法之「多元資料蒐集方 法」作為主要的研究取徑,以「文件分析法」(document analysis)作為資料蒐集與分析的具體研究方法;在透過 分析過去所有原能會相關行政文件資料、依據四大報 (自由、聯合、蘋果、中時等)與主要的電子網路媒體 (以 youtube 為主要的影音撈取來源)的新聞再現後, 以分析文件進行敘事分析 (narrative analysis)後解構有 關原能會在媒體再現的敘事結構形式 (patterns)。得出 以下結論 (更細內容參閱結案報告書)。

#### III. 結果與討論

原能會近5年在「紙媒」上的媒體再現(發新聞稿 形式內容)模式(patterns),其排名前十名內容:

序號↔	模式↔	再現內容↔	敘事分析↓	
No.₽	patterns₽	representation.	narrative analysis@	
<b>1</b> ₽	官方澄清說	以回應民眾問題、外界的擔憂、	提升民眾對原能會	
	明的内容。	澄清謠傳的理性溝通內容為	之信任程度。	
		主,避免人心惶惶,甚至任民眾		
		或是第三方機構參與↔		
2₽	與民互動內	原能會屬於官方機構,為與民眾	拉近與民眾之距離。	]
	<b>容</b> (含徴片/	互動了解民種想法,因而辦理活		
	答抽好禮)↔	動,並以獎品為誘因,吸引民眾		
		參與+		
3₽	新技術展示	宣導核能在科技上帶來的好	建立原能會專業形	1
	(核能帶來	處,尤其是在醫學上,醫療技術	<b>&amp;</b>	
	的好處)。	的提升能認民眾脫離病痛,讓民		
		眾對核產生好感↔		
4₽	原能業務之	即使遇到過年等國定假日,監測	塑造原能會安全形	1
	現況報告。	系統也不會鬆懈,讓國人安心↔	象↩	
5₽	安全把關核	原能會作為核安的把關者,除了	塑造原能會安全形	1
	安₽	監測系統也有人員留守,保障人	<b>&amp;</b>	
		民安全↔		
<b>6</b> ₽	遇災應變。	原能會以核能運行安全為主	塑造原能會安全形	1
		題,教育民眾防災(地震、火災	& ~	
		等)應變措施↔		
<b>7</b> ₽	官方資訊聲	原能會透過新聞稿發布官方聲	建立原能會專業形	1
	明	明,告知民眾當前運行能源政策	<b>\$</b> ₽	
		狀況↔		
8₽	原子能相關	以原能會發布消息方式,為民眾	塑造原能會安全形	1
	新知教育。	解惑,以降低民眾對核能的恐懼↔	<b>&amp;</b>	
9₽	原能會相關	原能會在執行政策的過程中,主	提升民眾對原能會	1
	成果告知。	動向民眾報告現況,讓民眾掌握	之信任程度。	
		進度,資訊透明↓		
10↩	公開透明∂	將原能會有關輻射檢測數據公	塑造原能會安全形	1
		開,供民眾與各單位檢驗,希望	<b>象</b> ₽	
		能讓民眾安心₽		

原能會近5年在「紙媒」上的媒體再現(被動再現) 模式 (patterns), 其排名前十名內容:

序號↔	模式↩	再現內容。	敘事分析↔
No.₽	patterns₽	<b>representation</b> .	narrative analysis∂
<b>1</b> ¢	公投相關議	多為負面批判內容媒體再現↩	降低民眾對原能會
	題↩		之信任程度。
2₽	他國核電燈	以日本 311 大地震再現為最多↔	降低民眾對核能之
	况~		信任程度。
3₽	核食負面報	以日本 311 大地震再現為最多₽	降低民眾對核能之
			信任程度。
<b>4</b> ₽	廢核議題內	以負面批判內容再現較多₽	造成民眾反核態度。
	容₽		
5₽	核能議題變	藍營以核養綠 vs.綠營廢核之政	造成民眾以政治作
	為藍綠政治	治立場鮮明再現為主↔	為認知,忽略原能會
	角力議題。		專業甲立立场↔
<b>6</b> ₽	能源政策問	尤以替代能源議題再現內容再	造成民眾反核態度。
	題討論。	現較多↔	
7₽	他國能源現	尤以替代能源議題再現內容再	造成民眾反核態度。
	况之討論。	現較多↔	
8₽	核災防範措	以核災防範再現內容為主⇨	造成民眾反核態度。
	施↩		
<b>9</b> ₽	核能職災與	以核能職災造成的健康問題再	造成民眾反核態度。
	健康(尤以罹	現內容為主↔	
	<u> </u>		
<b>10</b> ₽	未來能源之	以未來可能能源、不依賴核能再	形成非核的態度。
	想像↓	垷內谷為王↔	

有關電子媒體近5年內容所涉及原能會的新聞再現 訊息僅有78則,如此較少的樣本數可能係源自本研究 主要的樣本是以現有的電子網路媒體為主,並以youtube 作為影音捞取來源。如此,各家電視新聞台的影音訊息 並不會全部上網放置youtube,因此本研究僅能就現有 的影音內容進行文件分析。宜說明者在於,雖然電子影 音檔資料文件較少(E資料群組),惟當前臺灣的網路 環境與電子媒體,大多以平面媒體的議題設定為跟進報 導;亦即本研究所選定之紙媒的新聞報導,對原能會在 媒體上的新聞再現現況,其實足以反映現實。從以下的 整理便可看出,電子媒體確所再現的內容確實沒有超越 主流報紙媒體的再現範圍。因此本研究針對電子媒體再 現的新聞內容,僅就單一事件、或社群媒體對於原能會 所造成的影響進行分析。

首先,由原能會自行放置 youtube 平台的內容大致 有以下議題(尚不夠形成 pattern 模式): (1)現況報 告:公民參與平台座談影片特輯、(2)新知教育:相關 懶人包訊息、(3)核能帶來的好處,新技術展示、(4) 安全把關、(5)遇災應變、(6)官方資訊聲明、(7)與 民互動、徵片、抽獎活動:原來如此相關影片、(8)新 知教育、(9)成果告知、與(10)核能公開透明等,其 再現問題與前述紙媒的 patterns 所建議事項相同,此不 再贅述。

其次,原能會近5年在電子媒體上的媒體再現(被動再現)議題(以點閱率排名分類,文件數尚不夠形成 pattern 模式)整理如下:(1)公投相關議題,大多負 面批判內容、(2)他國核電慘況,尤以日本311大地震 為多、(3)核食報導、(4)擁核 vs.廢核議題、(5)核能 的藍綠政治角力議題、(6)能源政策與替代能源問題討 論、(7)他國能源現況之討論、(8)天災防範應變措施、 (9)核能職災與罹癌報導、以及(10)核電未來之能 源問題等。猶如前所分析,電子媒體上之報導再現內容, 並無超越紙媒所形成的再現模式,因此電子媒介所形成 問題的建議,與紙媒的媒體再現相同,如本研究上述之 建議。值得一提的是,在電子媒介的再現中,過去5年 有一「單一事件」, 雖是單獨的事件, 在網路社群媒體 上 (youtube) 卻聲量非常高 (點閱超過千則), 即:2015 年1月所發生之「台北車站具有輻射的謠言」事件。(更 早亦有類似單一事件:2013年3月的「核事故宣導阿嬤 問倒原能會官員」事件)。由於網路社群媒體的特性是 可以不斷被轉載,因此雖然該二事件均是單一的事件, 非報導的媒體再現常態,然而類似的媒體文本一再被重 製或複製,對原能會形象亦屬負面。而仔細比對該二事 件與真實情況後,可瞭解 2015 年之事件係屬假新聞, 原能會當時亦做了相當好的危機處理,並實際至台北車 站測量輻射、並招開記者會公諸於民眾,因此該事件並 沒有造成更大的負面效益;後事件後來亦證實當時與該 民眾阿嬤對話的官員並非原能會官員,實情亦不若媒體 所呈現的聳動狀態,惟該案原能會並未如 2015 年案例 般危機處理得好,因此值得以此為借鏡。本研究建議, 面對單一事件,宜以「危機處理」模式進行媒體再現的 對話,並啟動會內跨科室的整合,針對問題給予最快速 的事實澄清,並善用社群媒體快速立即的屬性,將正確 訊息公告之。而此,亦須要會內有專責新聞媒體訊息處 理負責人,對原能會的訊息建構、專業形象、守護安全 形象較能有統一的訊息發布與再現,亦較能有效率達成 目標。相信,若能實踐本研究計畫所建議之事項,對於 未來原能會面對媒體再現,應可建立更好的專業、為民 把關核安的親民形象。當然,所有訊息的呈現與露出, 從敘事傳播的角度,若能輔以有創意的再現方式呈現訊 息,亦可謂原能會的媒體再現大大加分,是未來可以深 入的議題。

#### IV. 結論

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(除了模式2,均為此內容), 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。此 外,模式2是唯一以「軟性」訊息提供的再現模式,可 惜的是,希望拉近與民眾的距離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。 此部分建議:①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」(註:此部 分將於第二年的研究中針對常民對原能會形象深度訪 談後進一步呈現)。②未來能以「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, 以改變其對對原能會的態度。

再從文件分析內容結果可發現,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, 確實常被媒體建構成「擁核」部會,進而忽略原能會本 質為「專業、安全」,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年的新聞媒體再現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,因此本研究 建議,原能會應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:①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。②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。

綜合以上,本研究之成果報告將對原能會未來運用 媒體改造形象有相當助益。

#### 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] 李芳龄譯(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] 蘋果日報(20130311);〈原能會公信力?主委承認: 現在是不夠〉。參考網站: <u>https://tw.news.appledaily.com/politics/realtime/2013</u>0311/170019/%E5%8E%9F%E8%83%BD%E6%9C%83%E5%85%AC%E4%BF%A1%E5%8A%9B%E
  <u>F%BC%9F%E3%80%80%E4%B8%BB%E5%A7%9</u>4%E6%89%BF%E8%AA%8D%EF%BC%9A%E7%8F%BE%E5%9C%A8%E6%98%AF%E4%B8%8D%E5%A4%A0。(上網日期:20180510)
- [18] 羅曉南、余陽洲(主編)(2015),《批判的媒體識 讀三版》。臺北:正中。
- [19] Altheide, D. L. (1996). *Qualitative media analysis*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- [20] 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.
- [21] Buckingham, D. (2000). *The making of citizens: Young people, news, and politics*. London, UK: Routledge.
- [22] Buckingham, D. (2003). Media education: Literacy, learning and contemporary. Cambridge, UK: Polity Press.
- [23] Freire, P. (1972). *Pedagogy of the oppressed*. (Ramos, M. B., Trans.). Harmondsworth, UK: Penguin.
- [24] Kress, G. R. (2003). *Literacy in the new media age*. London: Routledge.
- [25] Kubey, R. W. (Ed.). (1997). Media literacy in the information age: Current perspectives. NJ: Transaction Publishers.
- [26] Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). Naturalistic inquiry. Newbury Park, CA: Sage.

- [27] Livingstone, S. (2002). Young people and new media. London: Sage.
- [28] Masterman, L. (1985). *Teaching the media*. London, UK: Routledge.
- [29] Ritchie, J., & Lewis, J. (2003). *Qualitative research practice a guide for social science students and researchers*. London, UK: Sage.
- [30] 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.
- [31] Semali, L., &. Pailliotet, A. (Eds.). (1999). Intermediality: The teachers' handbook of critical media literacy. Boulder, CO: Westview/Harper Collins.
- [32] 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.
- [33] Spencer, L. M., & Spencer, S. M. (1993). Competence at work: Models for superior performance. New York, NY: Wiley.
- [34] 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.
- [35] Wolcott, H. F. (2001). *Writing up Qualitative Research*. Newbury Park, CA: Sage.

#### 動態視覺圖像與實境技術建構核能資訊之研究

### A Research on the Nuclear Information Construction with Motion Graphics and Virtual Realty Technology

計畫編號: MOST 108-NU-E-003-001-NU 計畫主持人:張晏榕 e-mail: yjc@ntnu.edu.tw 執行單位:國立臺灣師範大學圖文傳播學系

#### 摘要

本計畫試圖擘劃一套適用且具社會科學檢驗後的 原子能相關訊息傳達模式的目標,本子計畫以原子能委 員會主要目標與職志:「核能安全」與「原子能民生應 用永續發展」為敘事主題,並根據總計畫「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」所 提供的資料蒐集與分析結果,試圖構思製作向公眾傳達 的 視覺內容,以動態圖像 (motion graphics) 風格技術 建動態影像,並力求資訊正確與影像內容的美感與吸引 力,本計畫將首先探 究以動態視覺圖像建構核能資 訊 的方法與實作,透過資訊內容蒐集、文字概念設定、風 格版 (style frame) 設定 等製作流程完成影 像製作,並 以焦點團體法分析觀眾認知與情意,製作過程中產生的 角色、世界設計等智慧財產 (intellectual property, 簡稱 IP)與視覺風格都能累積應用,進一步建構原能會正面 形象,期望為此政府機構建立核能資訊多媒體合作產出 與回饋的模式,持續提供訊息 傳達內容。

**關鍵詞:**動態圖像、核能公共議題、媒體素養、智慧財 產

#### Abstract

Following the purpose of the integrated plan to set up a nuclear related information communication model that is appropriate and validated by social science, this project develops narrative content based on the goal of Atomic Energy Council (AEC), which is to protect the public health and safety from nuclear materials and facilities, as well as sustainable development of nuclear technology for people's livelihood. Accordingly, based on the data collection and analysis result from the in "the integrated project by analyzing the multi-media narrative effects to promote civil participation in nuclear public issues", this sub project intent to conceive visual content for public communication with style of motion graphics to produce moving images. The correct information content and attractive visual presentation will be pursued for the best. This project will first explore the method and practice for the production of nuclear information content with motion graphics. Through the workflow such as data collection, concept setup with words, style frames setup, this project will accomplish moving images production of nuclear information. Audiences' cognition and affection will be collected with focus group method. The intellectual properties such as characters and world design, as well as the visual style and elements, that created during the production, can be accumulated and applied for further build up the positive

reputation of AEC. It is the intention to construct information production and feedback mode with multimedia for the public institute to continuously provide content for communication.

**Keywords:** motion graphics, virtual reality, nuclear public issues, media literacy, intellectual property

#### I. 前言

本計畫目標為探究以動態圖像(Motion Graphics) 與虛擬實境(Virtual Reality, VR)技術等多媒體呈現原 子能資訊內容與製作,以及蒐集與分析觀眾接收的認知 與情意。

承接總計畫試圖擘劃一套適用且具社會科學檢驗 後的原子能相關訊息傳達模式,本計畫試圖建構視覺影 像,根據原子能委員會(以下簡稱「原能會」)主要目 標與職志:「核能安全」與「原子能民生應用永續發展」 發展敘事主題,建構原能會視覺形象,提供並回饋總計 畫與另一子計畫對於原能資訊敘事分析和傳播管道的 整合研究,達到多贏的訊息傳達局面。研究與專案實施 的背景動機與問題意識分述如下:

#### 民眾對於核能態度的分歧與知識資訊的客觀中立性無 法建立

核能,或稱原子能,是原子核發生變化時釋放的巨 大能量,在第二次世界大戰之後逐漸成為全世界主要電 力來源之一,但由於對能量巨大的核電廠發生事故的恐 懼,以及對核廢料處理的疑慮,近20年來,民眾對核能 關注程度逐漸提高(王祖恩,2016),加上國內政治力量 與媒體的兩極態勢,民眾立場相當分歧(陳憶寧,2014)。 尤其在特殊事件發生後,例如日本在2011年因大地震 引發海嘯所造成的福島核電廠爐心熔毀、爆炸與輻射外 洩事件,台灣社會與媒體往往集中關注,引起議論,伴 隨著對於核能態度的立場變化(梁世武,2014;李旭淳, 2016)。

民眾對核能的態度與對於核能的知識素養及認知 有顯著的相關(楊國良,2010;李旭淳,2016),另根據 學者對於小學到中學生核能認知與調查的研究中可見, 核能知識隨著所在區域、家庭社經地位的不同顯著差異 (楊淑惠,2014;楊國良,2010),學校探討核能議題的 篇幅、教師的核能知能亦待加強。然而,正確而且客觀 公正的核能知識與資訊從何而來?誠如總計畫所指出, 原能會作為國內在核能與輻射安全相關知識與資訊的 最高專業單位,多年來以增進民生福祉的核能安全與原 子能民生應用的永續發展盡最大努力為職志,理應扮演 民眾心中「知識權威」的角色,然事實並非如此,原因 亟待分析探討與改善,因此總計畫試圖規劃適用且具社 會科學檢驗後的核能訊息傳達模式,本子計畫建構在這 個框架下,在對原能會既有資訊與傳播溝通管道分析的 同時,以清晰易懂的媒材方式重新建構原能會資訊,發 展敘事內容,製作多媒體影像,傳播核能與輻射安全相 關的正確知識,並形透過動態視覺建構原能會形象,形 塑知識權威專業角色,也唯有大多數民眾對於核能與輻 射安全知識有正確認知,方能在議題溝通上有相同基礎, 進行理性客觀的討論。

#### 動態/資訊圖像視覺傳播

近年來,網路媒體漸趨普及,動態視覺化的溝通越 來越不可或缺,對於網路使用族群來說,由於資訊多而 紛雜,結合動態視覺與聲音的動態圖像(Motion Graphics) 或資訊圖像(Info Graphics)成為一種流行且有效的傳播 方式(方彩欣、鄧淑玲,2015),普遍受到年輕世代的喜 愛。

動態圖像(Motion Graphics)名詞的由來,是1960 年代以電腦嘗試製作抽像動態影像的惠特尼兄弟(John and James Whitney)的公司名稱,就稱為動態圖像公司 (Motion Graphics Inc.)<sup>1</sup>。更早可追溯到二十世紀初期 實驗動態影像的創作者,如魯特曼(Walter Ruttmann)、 義格林(Viking Eggeling)等人,但這些創作純然是藝術 上實驗性的自我表現,跟今日商業上的動態圖像應用有 本質上的不同(張晏榕,2015)。

動態圖像的影像製作先驅,首推 1950 年代中期以 後為許多電影製作片頭影像的巴斯(Saul Bass),最著名 的作品有《金臂人》(The Man with the Golden Arm)等。 他是著名的平面設計師,曾為 AT&T 等企業設計形象標 示(Logo),也為電影設計海報,因此自然將平面設計的 概念帶入動態影像製作,對後世這類影像製作影響極大。 在電視普及後,片頭影像的需求愈來愈多,但類比製作 較困難,所需預算仍高,到了 1980 年代,當時主要製作 系統 Quantel<sup>2</sup>逐漸普及,使得成本降低,及至 1990 年代 電腦成為工具後,由電腦軟體製作極為簡易,也由於梅 爾(Trish and Chris Mayer)說明以 Adobe After Effects 製 作特效與動態圖像的書籍《Creating Motion Graphics》出 版,讓動態圖像這個名詞更為普遍。

早年動態圖像曾被認為技術門檻較低,通常做為電影或電視節目片頭,但近年來隨著幾位原先在國外留學或工作於廣告圈的導演返台成立工作室,如 Bito、JL Design、Akitipe等,帶進製作和美學的新概念,引起一陣風潮,動態圖像強調畫面設計與音樂節奏的配合,不強調角色和敘事,除應用在電影和電視節目,也跟平面設計結合,用於各種媒體廣告、頻道包裝、網路行銷等商業層面,擴大了動畫技術應用。在製作上運用的是例如介紹台灣歷史的《台灣吧》就以簡明的資訊與圖像,搭配生動的旁白,引起一陣風潮。本計畫第一年主要運

用動態圖像以及資訊圖象的視覺設計與製作方式,試圖 建構原能會形象,製作以傳播「核能安全」與「原子能 民生應用永續發展」為目的的敘事主題內容,提供原能 會以及本總計畫其他子計畫之應用。

透過動態圖象與資訊圖像的製作,本計畫亦試圖創 造與累積製作過程中產生的角色、世界觀等智財 (Intellectual Property,簡稱 IP), IP 為近年在數位內容 或文化創意產業發展上極受矚目的概念(張晏榕、石昌 杰,2017),一般指的是角色與世界觀的智慧財產權利, 許多商業上的經營方式即透過積極以多角方式推廣公 司所發展出的原創角色與授權,包含漫畫作品的推出、 角色人偶的曝光、與地方政府活動結合、手機遊戲的推 出...等等各種方式提高角色曝光的機會,本計畫並未著 重於 IP 的商業價值,而著重於透過 IP 提升原能會的整 體形象與親和力。

#### 研究目的與問題

承總計畫規劃原子能相關訊息傳達模式之目的,本 計畫試圖建構原子能資訊內容,觀察目前關於核能資訊, 原能會與所經營的社群媒體 Facebook 上的「輻務小站」 較少以動態圖像呈現核能知識的影像,也無規劃虛擬實 境技術產生的內容,因此本計畫將配合總計畫對總計畫 對原能會資訊進行敘事效果分析的結果,規劃在第一年 進行動態圖像與資訊圖像的製作,研究並執行靜態資訊 轉換成為動態圖像與資訊圖像的方法,敘事主題初步設 定主題為「核能安全」與「原子能民生應用永續發展」, 完成3部2分鐘動態影片,並進行觀眾認知與情意的測 量與研究。

根據前述研究背景,本計畫提出研究目的:探討以 動態圖像/資訊圖像建構核能資訊與教材的方法以提升 觀眾對核能資訊的認知與情意。

研究問題如下:

- 如何根據敘事分析以動態/資訊圖像與實境技術重 新建構官方核能資訊?
- 觀眾/使用者對重新建構之官方核能資訊教材與的 認知與情意為何?如何從使用者體驗學習行為反饋 內容設計製作?

#### Ⅱ. 研究與製作方法流程

本計畫進行動態圖像與資訊圖像的製作,首先執行 核能資訊主題設定,目前初步設定敘事內容為「核能安 全」與「原子能民生應用永續發展」,並與原能會提供專 家討論修正內容,並同時進行對具設計與動態影像製作 能力相關系所學生的招募培訓,在完成文字概念設計規 劃後,蒐集圖像資料,製作情緒版(Mood Board),規劃 情緒與風格,完成後同時進行風格設定版(Style Frame) 的製作,以及音樂音效的設定與製作,編輯合成為動態 分鏡(Motion Board)後,完成3部時間長度2分鐘的 動態影片。

2 Quantel 成立於 1973 年,是英國的影視廣播系統與設備製造商。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 根據臺南藝術大學舉辦的「2014 國際論壇:數位影像與實 驗美學的對話」活動中,臺灣藝術大學多媒體動畫藝術系石昌 杰老師演講,主題為:動態圖像與藝術動畫。

完成影片後進行觀眾的認知與情意研究部分,第一 年規劃對象為大學或研究所在學學生,以焦點團體訪談 法進行,預計進行1-2次,每次5-10人的焦點團體訪談, 以供未來計畫修正,研究與製作流程如下圖所示。





本計畫完成之工作項目與成果分述如下:

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 簡報告範九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。

#### 3部時間長度2-3分鐘的動態圖像/資訊圖像影片

本計畫依據民眾較關注的內容首先設定資訊主題, 並與原能會會議討論,決定以「原能會是什麼?」、「輻 射是什麼?」、「核電廠除役是什麼?」做為3部影片之 主題,並討論傳達資訊內容,完成3則文字概念設定, 並完成情緒版製作,以及3組風格設定版,做為動態圖 像/資訊圖像影片風格設定,風格設定版如下圖所示:



圖 2 第 1 部影片初期風格設定版

根據風格設定版,製作動態分鏡,完成3部動態圖 像/資訊圖像影片, 擷取畫面分別如下:



圖 3 第 1 部影片截圖



圖4 第2部影片截圖



圖 5 第 3 部影片截圖

#### 影片觀賞與焦點團體訪談

在3部影片完成後,於2019年12月10日進行1 次焦點團體訪談,邀請參與訪談對象共5位,包含電視 台經理趙先生、10年以上資深動畫師/科技大學多媒體 設計系專任助理教授蘇先生、5年以上經驗資深動態設 計師/設計工作室創辦人徐小姐、傳播研究所碩士班研究 生楊先生、傳播科系大學生張小姐,進行約2小時焦點 團體訪談。

訪談問題主要可針對2個面向:對原能會形象的看 法與對影片內容與形式的看法與建議,以下簡要說明訪 談結果。

在對原能會形象的看法方面,受訪者多半不清楚原 能會職責,對於台電的印象多於原能會,因此在觀賞影 片後對原能會職責的確有較多了解,但對於內容則會希 望能有更深入的探討與實際問題的說明,例如第3部影 片對於除役的流程多所探討,但對於為何除役則未加著 墨。核能問題對於大眾是切身問題,關乎安全之外亦對 國家社會能源政策與社會經濟發展有重大影響,因此建 議未來原能會對於內容上可持更開放的態度,呈現核能 相關問題,破除公家單位較為保守的心態,以獲得民眾 的認同並支持。

對於影片視覺風格的呈現,動畫師與設計師基本上 持肯定態度,但亦建議未來可以對原能會視覺形象,包 含官方網站、臉書粉絲團與形象影片等等做更統合的規 劃,以利民眾的認識。

#### IV. 結論

本計畫完成之成果與應用效益與國家發展及其他 應用方面之貢獻如下:

- 將原本民眾較關注的原子能資訊轉化成為動態影像 以及資訊影像,以提升民眾對原子能資訊的接受與 認知理解。
- 透過質性訪談,了解設計專家與傳播從業人員對原 子能相關知識與資訊以及相關議題的認知需求,以 及影片產製的看法,供未來傳播製作參考。
- 建立國人對於原能會正面形象與專業認知,並傳播 正確核能安全與原子能民生應用的概念。

#### 参考文獻

- 方彩欣、鄧淑玲(2015)。〈跨領域媒體融合~動態
   圖像設計之傳播發展應用探討〉。《設計研究學報》, 16-29。
- [2] 王祖恩(2016)。《核能風險知覺、態度與風險價值 的評估:台灣的實證》。國立台灣大學經濟學研究所 碩士論文。
- [3] 李方中(2016)。《虛擬物理實驗室軟體教材之使用 性評估:以單擺實驗、自由落體實驗為例》。淡江大 學教育科技學系碩士論文。
- [4] 李旭淳(2016)。《核能知識、信任與民眾核電態度 之關聯性研究—以風險與利益認知作為中介變項》。 國立台北大學公共行政暨政策學系碩士論文)。
- [5] 吴紹群(2018)。〈科技元素應用於博物館館校合作

活動之研究:以線上影音、虛擬實境以及 3D 列印 之整合運用為例〉。《博物館學季刊》,32 (1):85-111。

- [6] 林帛諺(2016)。《基於虛擬實境的多使用者火災疏 散模擬系統的開發和研究》,淡江大學資訊工程學 系碩士論文。
- [7] 周芯瑋(2014)。虛擬教材結合實體教具之虛實整合 教學研究一以風光互補發電系統為例。國立台北教 育大學數位科技學系碩士論文。
- [8] 徐道義、陳致維(2017)。〈信息可視化的虛擬實境 表現-以手機遊戲數據分析為例〉。《2017 中華印刷 科技年報》,233-245。
- [9] 張晏榕(2015)。《動畫導論:美學與實務》。新北市: 全華。
- [10] 張晏榕,石昌杰(2017)。〈台灣動畫十年〉。《給下 一輪台灣數位藝術的文件:2006-2016》。台北市: 典藏藝術家庭。
- [11] 陳勇全、廖智冠(2013)。〈昆蟲知識學習之虛擬實 境教材設計與ARCS 探究〉。《數位學習科技期刊》, 5(1),51-68。
- [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本研究〉。《中華傳播學刊》,223-265。
- [13] 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》,45-86。
- [14] 楊中信(1998)。〈虛擬實境〉。《博物館學季刊》,12
   (1),25-30。
- [15] 揚智晶、張華城、楊政達、黃文德、呂姿玲、莊惠 茹(2017)。〈穿越經典—圖書館以虛擬實境推廣閱 讀之個案研究〉。《國家圖書館館刊》,106(2),135-152。
- [16] 楊國良(2010)。高中職學生核能認知與核能態度關係之研究。國立彰化師範大學工業教育與技術學系 碩士論文。
- [17] 鄭泳松、陳建宇、張俊彦(2015)。〈從大體解剖實 驗到虛擬實境:該解剖學教學之新趨勢〉。《台灣醫 學》,19(1),72-82。

### 核案虛擬一點通

計畫編號: MOST 108-2623-E-979-001-NU 計畫主持人:蘇萬生博士 e-mail: wssu@mail.ntsec.gov.tw 計畫共同主持人:陳寶如 助理教授 計畫參與人員:李柏翰老師 執行單位:國立臺灣科學教育館

#### 摘要

本計畫利用科學史脈絡故事性方式呈現以下三點, (1)原子結構的理論與量子理論發展;(2)核能應用;(3) 核能影響與防護。為了核能知識的普及使民眾與學生知 曉有關核子事故緊急應變民眾防護的知識,教育是相當 重要的環節。本計畫在中小學課程學習採取翻轉課堂 (Flipped Classroom)模式,主持人團隊構想了一個課室內 桌遊式遊戲,輻射防護心臟病牌卡活動,透過遊戲化 (Gamification)的方式提高學員輻射防護知識的深度與廣 度,利用體驗課室內充滿樂趣的學習來吸收新知,讓一 般民眾或在學學生都可以對核能有進一步認識。同時在 課後透過「輻射知多少—核輻量與核災警報」學習單配 合行政院原子能委員會的「原來如此」系列影片中的兩 部來進行延伸學習,了解學生的迷思概念,並加入卡牌 的擴增虛擬實境(Augmented Reality Studio)的測試製 作。

本計畫完成的工作包括:從科學史脈絡為出發點選 定 12 個輻射防護關鍵字、製作道具輔以圖像化說明、 入校推廣以及於科學教育館舉辦講座活動等,期望能在 學生們的心中種下一粒種子,對臺灣未來培養核能相關 的專業研究者有所幫助。

**關鍵字**:多重表徵、桌遊學習、遊戲式教學、擴增虛擬 實境。

#### Abstract

This project uses the history of the history of science to present the following three points: (1) the development of atomic structure theory and quantum theory; (2) the application of nuclear energy; (3) the impact and protection of nuclear energy. So as to popularize nuclear energy knowledge and teach people and students about radiation protection, education is a very important part. The project adopts the Flipped Classroom mode in the study of primary and secondary school courses. The host team conceived an indoor board game-style game, radiation protection card card activity, through gamification to improve the depth and breadth of the students' radiation protection knowledge. Use

the fun learning in the experience classroom to absorb new knowledge, so that the general public or students can further understand nuclear energy. At the same time, after the lesson, through the " how much radiation-nuclear radiation and nuclear disaster warning" study sheet and the two in the " So that's why!" series of films of the Atomic Energy Committee of the Executive Yuan to carry out extended learning to understand students' myths and the card test by Augmented Reality Studio (AR).

The project's work includes: selecting 12 radiation protection keywords from the context of the history of science, making props supplemented with graphic explanations, school promotion, and holding lectures at the Science Education Center, etc., hoping to be in the minds of students planting a single seed will help Taiwan's future professional researchers on nuclear energy.

Keywords: Multiple Representation Board game learning Game-Based Learning Augmented Reality Studio.

#### I. 前言

核能利用較重的原子進行核分裂反應來獲得能量, 並以熱能形式產生,熱能將水變成水蒸汽,然後推動蒸 汽渦輪發電機,進而產生電力供應大眾生活或工作所需。

在核能帶來電力,便利我們生活的同時,歷史上世 界各地也發生了幾起有關核子事故災害的事件,1986年 4月26號,位於現今烏克蘭靠近白俄羅斯交界處的車諾 比核電廠第四號反應爐,在進行既定維修安檢作業時爆 炸,輻射發生大規模外洩,為歷史上等級最嚴重之核災 事故,也就是至今人們所熟知的「車諾比事件」。

除了車諾比事件外,近幾年重大的核子事故事件便 是2011年3月11日在日本由於大地震所引發的福島第 一核電廠核子事故。倘若真的發生了核子事故的話,可 以做哪些反應措施,該具備哪些正確的應變知識呢,由 此看來了解與核子事故緊急應變民眾防護有關的基本 知識尤其重要。

這些核災事故證明了,人類必須引以為戒,留心注 意防護遵守規則,才能避免重蹈覆轍。核事故的防護需 要從小開始做起,需要將核能防護知識落實到中小學的 教育中,所以我們才會以這些核災的歷史事故為出發點 開始了設計核災防護卡牌的想法,並且希望利用桌遊潛 移默化的效果,來達成核災防護知識的普及與推廣。

#### Ⅱ. 主要內容

計畫合作者-李柏翰老師團隊,李老師在國立臺灣 師範大學附屬高級中學(簡稱師大附中)所開的多元選 修課程中,師生們的互動中常常激發出令人驚艷的想法, 其中在李柏翰老師的量子力學之美和電腦叢集計算課 程中,李老師在讓同學們試玩核子事故卡牌原型版桌遊 後(圖 1),與諸位核心同學的討論隨即有了核子事故卡 牌進階設計的發想,並著手開始進行桌遊的構想和製作, 其中透過不斷地討論和試玩,進行修正及改進。接著幾 個月的時間逐漸完成核子事故卡牌進階版雛型設計,最 後完成合作型核子事故卡牌模型。歷經多次輪番的試玩 驗證後,決定參加在國立嘉義大學蘭潭校區舉行的教師 組壁報競賽,在得到獎項的同時,還獲得國教署彭署長 的稱讚,為這個合作型核子事故卡牌遊戲畫下了一個完 美的註腳!



圖1:高一量子力學之美,電腦叢集計算,進行核子事 故卡牌桌遊學習,大家反應熱烈玩得不亦樂乎,課程中 進行相互討論與學習,並請同學回家試著自己設計一份 能源與環評卡牌。

其中負責與計畫主持人蘇萬生博士一同進入校園 中推廣原子核能卡牌桌遊的講師,是在自然科學領域擁 有豐富的較學經驗,而且和學生互動極佳的蔡耿忠老師。 在蔡老師進行遊戲教學前,我們必須先讓學生們了解 相關核能基本概念以及國際上幾個有名的核災事故作 為其先備知識,如前蘇聯車諾比事件、日本福島核災事 件外,還有前蘇聯克什特姆事件、英國 Windscale 廠的 氣冷石墨反應堆發生放射性物質外釋以及美國三哩島 事件等,由推廣學校的老師們來進行這項建構先備認知 的任務。授課講師介紹核能相關應用加深學生印象,隨 即與學童進行討論與和問題回應(圖 2)。



圖 2:授課講師介紹核能相關應用後,隨即與學童進行 討論與和問題回應。

有了先前核子事故的先備認知及輻射安全防護的先備 知識後,以此為基礎往上在進行新知搭建。蔡老師開始 進行「原子能卡牌桌遊」的教學活動,再這之前首要任 務便是要了解遊戲規則,整組卡牌遊戲的卡牌種類可被 區分為人物、事件、影響和行動等四種類型的卡牌來進 行遊戲。

這款遊戲的定位是屬於互助合作型的桌遊,玩家的 最終目標是根據不同角色分工打出對應的行動卡(降低 事故危害指數),來降低核事故災害所發生的影響,將 分數降到零,而在每一回合結束後再重新抽取影響卡 (增加事故危害指數)及行動卡,以上步驟進行數回合後, 再統計結算剩餘分數,最後分數最低的組別獲勝。透過 蔡老師生動且詳細的介紹個卡牌的遊戲內容及機制,讓 學生們清楚的了解遊戲流程後,接著就是輪到學生們親 身實作體驗此款桌遊了(圖 3)



圖 3: 在一回合的遊戲結束後抽取影響卡並統計分數。

圖 4:將各校男女比例學生參與人數繪製成長條圖。

#### III. 結果與討論

本計畫在進行卡牌桌遊推廣前先讓學生閱讀有關 核事故及核知識簡報念建立其先備知識,接著由蔡老師 透過翻轉課堂的方式進行較學,在原子能卡牌桌遊的遊 戲過程中除了可以學習到與核子事故緊急應變有關的 知識之外,更以混合動作和語言表徵的角色扮演方式, 讓學生們培養溝通協調、團隊合作的能力。本計畫的入 校推廣活動受到各小學學生們的熱烈喜愛,在教師們當 中也有良好的迴響與回饋,(表 1、圖 4)為推廣活動至今 的人數統計。

	男生	女生
	參與人數	參與人數
臺北市士林國小	39	37
臺北市仁愛國小	39	40
臺北市古亭國小	54	47
臺北市吳興國小	28	28
臺北市延平國小	35	35
臺北市東門國小	46	39
臺北市金華國小	0	27
臺北市長安國小	0	34
臺北市新生國小	43	74
花蓮市中正國小	87	71
桃園市大業國小	43	41
桃園市永順國小	37	39
新北市二重國小	36	33
新北市五股國小	45	35
新北市文化國小	42	40
新北市林口國小	42	40
新北市麗林國小	73	74
總計	689	734

表1:計畫結束各校參與人數。



本計畫也藉由「輻射知多少—核輻量與核災警報」 學習單(圖 5)配合行政院原子能委員會的「原來如此」 系列影片中的兩部(圖 6)來進行延伸學習,尤其對輻射、 核能教育加強讓中小學生了解核能面貌、核安資訊。

	年 班 號姓名:	-aft
- 、請	你猜一猜,臺灣輻射量最高的地方是下列哪個地方?請在活號中打	- 123 •
(	)臺灣核一廠、核二廠附近。	6
(	)夏来時蘭嶼部・	
0	) 大臺北地區。	
(	) 其他地區:	
二、 你	a 選擇上面答案的理由是什麼?	
(	) 核能發電廠利用核能發電,所以鄰近輻射量高。	
(	)蘭嶋方掩埋核廢料,輕射量高。	
(	) 大臺北地區人口稠密, 裝設許多手機基地臺, 輻射量高,	
(	)其他原因:	
三、核	災警報發布時,你需要做的事情是什麼,講打勾?	-
(	)趕快疏散到空地。	655
(	) 趕快躲進室內並緊密門窗, •	
(	) 趕快收聽廣播,去寧該現場關心災情,	
(	)其他:	
四 • 你	需揮上面答案的理由是什麼,請打勾?	
(	)空地的輻射量較少,可減少傷害。	
(	) 室內空間可降低輻射量, 減少傷害,	
(	) 去事故現場瞭解災情,提供必要人力協助,	
(	)其他:	
E • 🛣	k核災事故發生後,食物和水還可以食用嗎。正確的講打✓,續誤的	請打x。
(	)放在室內的食物和水可以食用·室外的食物和水不可以·	
(	)放在室外的食物和水只要沒有髒汙,都可以食用。	
(	)放在室内的食物和水不可食用,要拿到太陽下設菌曝曬後才能	食用・

圖 5:「輻射知多少—核輻量與核災警報」學習單測試學 生的迷思概念



圖 6:原來如此第1集(左)和第14集(右)影片主題名稱 (圖取自行政院原子能委員會)。

此外,科教館科普傳播中心大眾科學講座歷年以來 舉辦了多場具專業性的科普演講,邀請國內專家學者擔 任講座開講,讓一般民眾更能了解科技發展的現狀。(108) 年 11 月 1 日邀請臺北醫學大學實驗動物中心的張剛瑋 助理研究員來談「腦、神經、放射線」的主題,讓社會 大眾了解原子能相關的民生和醫療應用,由於此討論議 題與民眾有相當切身直接的相關,所以現場吸引不少樂 齡人士到場參與聆聽。演講結束後,我們順道推廣了合 作型核子事故卡牌桌遊給現場民眾試玩,讓民眾感受到 從遊戲中也能得到新知!另外也可收集民眾對本套卡牌 設計的感覺和回饋建議,我們藉由民眾試玩以及上述的 學習單尋找出的迷思概念,可作為後續研究參考。

另外,為了配合手機高科技的實用性,我們加入了 卡牌的 AR 擴增虛擬實境(Augmented Reality Studio)的 測試製作,利用 HP Reveal App 來完成手機 AR 卡牌辨 識,HP Reveal App 是能夠增強一些虛擬圖形導入的 App, 讓螢幕上的虛擬世界能夠與現實世界場景進行結合與 互動。容易上手且功能強大,任何人都可以創建(無需 任何編碼)以增強現實體驗,此 App 使任何人都可以輕 鬆創建和使用 AR,進一步訓練下一代的卡牌 AR 學習, 如圖 7、8 所示,由學生學習經驗顯示,非常簡單就可 以製作卡牌 AR,增加學習上的趣味。

#### Aurasma is now HP Reveal



圖 7: HP Reveal, (右)手機辨識卡牌來顯示圖片。



圖 8:手機 App 辨識卡牌來顯示想要呈現的答案圖 片,可以像電玩一樣方便好玩。

除了深入校園推廣試玩外,我們也額外開設教師增 能課程,邀請計畫合作夥伴臺北市教育局國小自然領域 輔導團共同參與這次的師培活動,由主任輔導員曾振富 校長(金華國小)帶領輔導員團隊參加,課後老師們感到 受益匪淺,活動上彼此都作了具深度且充分的交流,課 程心法更可以直接帶回教學現場(不限自然領域)轉化 應用,達到推廣的目的。最後,藉由教育現場師生給予 合作型卡牌課程的回饋,以及融合輻射防護知識與核子 事故緊急應變基本認知更是對遊戲的精進貢獻許多良 好的建議,我們團隊將持續精進研究卡牌設計的改進調 整,希望精進版本的卡牌桌遊能在臺灣各地普及,達到 玩中學且寓教於樂的目標。

#### IV. 結論

核災是一種難以估計的災害,加上放射線輻射影響, 各個細節皆需投入大量人力、物力與宏觀的科學思維來 降低傷害,需要長時間的研究經驗累積與集思廣益等, 在本世紀之後有機會成為影響人民最大的災害之一。所 以關於事件預防與事後災害防護佔了相當重要的一環, 尤其臺灣位於環太平洋火山地震帶,發生地震的機率頻 率相對來說較高,所以我們人人皆應對核災防護有基本 認知。是以本遊戲的核心是以遊戲化合作的方式,使玩

家學習不同領域在核災防治中所扮演的角色與合作的 方式,透過遊戲來學習如何彼此協作配合的態度,更能 貼近實際生活中的需求,並且透過各單位之間的協力關 係演練,來達到核災防護國民所應具有基本常識的落 實。

#### 參考文獻

- (參考文獻 張武修(1994)。車諾比爾傳奇。天火 備忘錄,新環境基金會(原載於 80.7/8.地球日誌)。
- [2] 方祖芳、郭成業(譯)(2011)。車諾比的悲鳴(原 作者:斯維拉娜·亞歷塞維奇著)。臺北:馥林 文化。
- [3] 劉水源(1996)。生存危機-環境污染與生態失衡。 臺灣商務印書館。
- [4] 福 島 第 一 核 電 廠 事 故 。 取 自 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/福島第一核電廠事 故。
- [5] 車 諾 比 事 故 , wiki 。 取 自 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/車諾比核事故。
- [6] 克什特姆核廢料爆炸事故。取自 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/克什特姆核廢料爆炸 事故。
- [7] 温斯喬火災事故。取自 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/温斯喬火災事故。
- [8] 三里島事故。取自 https://zh.wikipedia.org/zh-tw/三 里島事故。
- [9] 顏慈瑤、李柏翰、蘇萬生(2019)。遊戲化核能知識 卡牌桌遊推廣。科學研習月刊,58(6)。
- [10] 蘇萬生(2019)。核案虛擬一點通。科技部計畫報告。
- [11] 本報告參考文獻 9 與 10, 並引用相關圖表。

核能管制機關作為獨立機關之法制與實務研究

一借鏡本國獨立機關之建置與運作經驗

## The Legal and Practice Research on Nuclear Safety Regulator as Independent Agency: Reference to the Establishment and Operational Experience of the Independent Agencies of the R.O.C

計畫編號: MOST 108-2623-E-007-003-NU 計畫主持人: 翁曉玲副教授 e-mail: hlweng@mx.nthu.edu.tw 計畫共同主持人: 鍾秉正教授 計畫參與人員: 詹育誠、黃綉雅、徐淑賢 執行單位: 國立清華大學

#### 摘要

2018 年 5 月行政院配合行政院組織改造計畫提出 「核能安全委員會組織法草案」,擬將行政院原子能委 員會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」。由於此項組織改造涉及管制 機關的屬性、組織位階、職權任務和監理量能等變革, 對於我國核能安全確保和建立一個有效運作的核能安 全管制機關將產生重大影響。本研究首先介紹我國最重 要的四個獨立機關的法制與運作經驗 — 即通訊傳播 會、公平交易委員會、中央選舉委員會和國家運輸安全 委員會,期提供它們實際運作狀況供核安委員會參考。 其次,借鏡美、加、英、日等四國的核安管制機關的組 成與權限,和探討國際組織對一個有效的核能管制機關 所建立的規範要求,期改制後的核能安全委員會能符合 國際標準。最後,本計畫則是研析「核能安全委員會組 織法草案」之規範並提出草案修正建議,期能完備核能 安全管制的組織規範及運作機制,提昇核能安全管制效 能。。

**關鍵詞:**原子能委員會、核能安全委員會、獨立機關、 國際核能安全公約

#### Abstract

In May 2018, the R.O.C Executive Yuan proposed the "Draft Organic Law of the Nuclear Safety Committee." As this organizational reform involves changes in the attributes, organizational rank, powers and tasks, and supervision capacity of regulatory agencies, it will have a significant impact on Taiwan's nuclear safety control mechanism. This research first introduces the legal system and operating experience of the four most important independent agencies of the R.O.C-namely, the National Communications Commission, the Fair Trade Commission, the Central Election Commission, and the National Transportation Safety Commission, with a view to providing their actual operating status for reference by the Nuclear Security Commission. Secondly, based on the composition and competence of nuclear security control agencies in the United States, Canada, Britain, and Japan, and explore the regulatory requirements established by an international organization for an effective nuclear safety control agency, it is expected that the reformed Nuclear Safety Committee

will meet international standards. Finally, this research is to analyze the regulations of the "Draft Organic Law of the Nuclear Energy Safety Committee" and propose amendments to the draft, with a view to improving the organizational norm and management mechanism of nuclear safety control and promote the efficiency of nuclear energy safety control.

#### I. 前言

2018 年 5 月行政院新提出政府組織改造規劃 ,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」, 欲 將原子能「管制」與「研發」職權明確分離,以遂行管 制機關獨立性的要求。依此規劃,現行原能會之組織規 模變動甚大,主要涉及下列幾個重大事項:

1. 管制機關的屬性變革

「原子能委員會」雖名為委員會,但性質上係屬於 首長制之行政機關,而非合議制機關。在此次組改規劃 中,原子能委員會將更名為「核能安全委員會」並轉型 為合議制的『獨立機關』,其在委員會組成、職權任務與 其他上級或平行機關間的互動關係上勢將發生不小的 變化。

#### 2. 組織位階變革

原能會在目前機關層級上定位為行政院所屬二級 機關,其下設立放射性物料管理局、輻射偵測中心以及 核能研究所。組改後,原能會除改名為核能安全委員會 外,行政組織上降級為三級機關,原所屬機關物管局則 縮編為核安會內部單位,原所屬三級機關輻射偵測中心 則降為四級機關,而核能研究所則規劃轉型成為行政法 人,組織上脫離了核能安全委員會。

3. 職權任務變革

原能會原職司全國核子反應器設施管制、游離輻射 危害防制、核子事故緊急應變及賠償法訂定、放射性物 料管理、輻射監測及評估、以及原子能科學技術之研究 發展、資源開發與和平使用。組改後,基於「管制與研 發分離」原則,核能科學的研究發展、資源開發與和平 使用等事項,將由其他行政機關或組織負責。於馬政研 時代,前揭事項擬規劃移轉至「經濟及能源部」下管轄; 但當前政府則規劃將核能研究所轉型成為行政法人「國 家龍潭原子能科技研究院」,負責核能安全、輻射防護、 原子能和平用途之科技發展。轉型後的核能安全委員會 僅負責與核能及輻射安全相關的監督、審查及管制及安 全技術發展等事項

#### 4. 監理量能的變動人力

組織改造後,原能會由現在的二級部會降為三級獨 立機關,此等變動亦影響日後核安會整體監理量能,並 主要體現在兩方面:一方面,機關人力精簡及組織縮編, 恐無法負荷日後核電廠除役所需管制及環境監測機制 等任務;另一方面,人事員額和事務官升遷職等上受限, 將不利於對優秀管制技術人力的留用與延攬。

面對前述可預期的問題與挑戰,原能會該如何妥 善因應,以做到在組織、職權、人力上順利無縫接軌 至具獨立機關性質之「核能安全委員會」,實為當前亟 需研究的課題。

本研究計畫的目的,希借鏡國內四個獨立機關─即 通傳會、公平會、中選會和運安會的實際運作經驗,從 法制與實務角度說明此四個獨立機關在組織架構、人事 任命、財政預算、監理權限、與上級機關之監督關係等 法律規定與運作處理經驗,輔以國外核能管制機關獨立 性要求規範,深入探討此等管制機關於實際運作時如何 體現並有效維護機關獨立性,及是否有別於一般行政機 關之問題,以期提供原能會面對機關轉型之思考基礎。

#### Ⅱ. 主要內容

本研究計畫報告書主要分成四大部分,分別是第二 章:我國獨立機關之組織、職權與運作;第三章:外國 核能管制機關介紹;第四章:核安管制機關的有效性與 獨立性之國際標準;第五章:原能會改制「核能安全委 員會」之法制分析;第六章:結論。前揭各章內容,簡 要敘述如下。

本計畫首先針對我國三個中央二級獨立機關,即通 傳會、公平會、中選會,和一個三級獨立機關「國家運 輸安全調查」,就其成立時點、法源依據、委員會組成 方式、委員遴選與資格、機關職權任務、與上級行政機 關和立法機關之關係、經費來源(有無專屬基金)、不 服機關所作行政處分之救濟方式、有無附屬技術支援研 究機構等事項進行比較研究。

其次,本計畫進一步研究美國、加拿大、英國、日 本等四個國家的核能安全管制機關現狀,即研究美國核 能管制委員會(NRC)、加拿大核能安全委員會(CNSC)、 英國核能管制辦公室(ONR)和日本原子力規制委員會, 並分析渠等國家的核能管制機關之組織性質、成員任命、 職權、經費來源、與其他部會機關之關係等事項,藉此 觀察這四個核安管制機關維持獨立性的機制與機會。

又,「核能安全」不只是單一業者的責任,亦與政 府、核安管制機關密切相關,尤其核安管制機關扮演其 中最為重要的把關與守護角色。本計畫第三個重點則聚 焦於國際組織和專家學者們評價一個核能管制機關是 否為「有效能」(effective) 且「獨立」(independent) 所提 出的評估標準,期待透過本章內容介紹,能讓我國核能 管制機關於追求管制效能精進時有更好的參考典範。本 計畫主要參酌國際「核能安全公約」,和國際原子能總 署 IAEA 所發佈的「安全基本原則」( Safety Fundamentals)、「一般安全要求」(General Safety Requirements) 和 「一般安全指引」(General Safety Guide),以及經濟合作暨發展組織(OECD)之核能署 提出的「有效能的核能管制機關特點」報告文件、國外 文獻,介紹國際間如何評定一國核安管制機關的有效性 和獨立性和所樹立的標準原則。判準範圍涵蓋核能管制 機關的設置目的與職權責任、獨立性、機關的安全文化、 核安管制機關的權能、資訊公開與透明程度、有效率的 要件評估(effective) 等。

本計畫最後則是就原能會改制為「核能安全委員會」 可能面臨到的組織、職權、經費、人事員額、與國際間 的交流、人才流失等問題進行研析。尤其對「核安會委 員會的組成」、「管制與研發分離原則」、「有效性的 提昇」、「獨立性的維持」等提出法制上的建議,期能 建立一個具公信力、有堅強的核安技術支持、且具高組 織位階的有效核能安全監理機關。

#### 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、檢視我國四個獨立機關的法制和實務運作之後, 本研究認為,獨立機關之設置,非屬行政機關常態,故 為避免我國獨立機關制度被濫用,造成行政權之政治責 任體系崩解,有關獨立機關的設置、任務功能、業務職 掌、以及與上級機關和司法審查的關係,都必須審慎為 之,並以法律明訂,方屬妥當。

其次,獨立機關的特色在於具高度專業性及獨立性。 所謂專業性,不僅是指獨立機關的成員應具有與其業務 相關之專業學經歷背景,尚須有好的專業技術幕僚或研 究團隊的支持,如此才能做出專業且適當的決定,建立 獨立機關的權威。是以,支持獨立機關設置研究機構, 或與研究機構合作,乃是我國獨立機關亟需努力爭取的 事項。

至於獨立機關最重要的特色就是維持機關自主獨 立運作,不受其他機關指揮監督,然而這點亦是所有獨 立機關在實務運作上所遇最大的難題。本文建議應建立 獨立機關之「獨立性」評估指標,例如職權獨立性、財 務獨立性、人員獨立性、行政處分做成之獨立性等,落 實獨立性之內涵,建立更細緻、完善的獨立自主運作機 制。

二、福島核災後,全世界擁有核電廠的國家,紛紛 檢討其核能安全監管制度與機構。美國核能管制委員會 持續滾動式修正其監管制度,近期提出 2018-2022 戰略 計劃,該計劃概述了 NRC 的職責並列出了目標,期能實 現其兩個戰略目標:(1)確保放射性物質的使用安全 (safe use of radioactive materials); (2) 確保放射性物 質的保安使用(secure use of radioactive materials)。日 本則重新檢討其核能安全管制功能,將原子力安全保安 院自經濟產業省獨立出來,與原子力安全委員會合併, 新成立在性質上類似美國核能管制委員會的獨立管制 機關-原子力規制委員會(NRA),負責管制和監督日 本的核能安全政策與設施安全。此外,日本政府亦將原 先負責核能技術支援的「行政法人原子力基磐安全機構」 整合納入「原子力規制廳」,又主管二個附屬研究機構, 以強化安全監督技術能量。至於英國方面,亦設立核能 管制獨立機關-核能管制辦公室,以確保核能安全與提 高核能安全管制的信任度、透明度與效率。而加拿大在 核能管制上亦維持獨立運作並重視核安技術研究,其提 昇核能安全委員會之行政效能。

考諸世界先進核電國家,對於核能安全管制事項, 皆委由專責的獨立機關執掌。鄰國日本,更肇因於福島 核災事故,將原屬行政法人之核能技術支援機構,重新 整合納入行政機關體系,足見核安管制之重要性。由此 可知,我國未來在核能安全主管機關在設計上,首先應 著重其獨立性,具體而言,從財務獨立、核能安全文化 的建構以及公開透明的管制措施,增進人民對於核能安 全的信賴,使台灣成為世界核電國家的典範!

三、國際間對於一個有效率的核安管制機關所應具 備的條件,不外乎有下列幾項重點,總結如下。

 強調核安管制機關的功能分離,亦即負責核能安 全監督管理的機關,不宜再涉入核能利用與發展的政策 與相關業務,避免發生球員兼裁判之權責自相矛盾衝突 的情形。

2. 核安管制機關應維持高度獨立,在組織上朝向獨 立機關的架構設計。然而,「獨立」並不意味著孤立, 核安管制機關固然應排除來自於政府上級機關或其他 部會機關和業界、利益團體的不當影響,但亦不宜與這 些機關團體完全切割、毫不接觸,核安管制機關適當的 公開資訊、聆聽意見與溝通協調,將有助於促進各方對 管制作為的理解,並贏得信任和尊重,因此「獨立性」 應體現於監管機關不會受到其他不當因素的影響,能獨 立地進行調查並作成決定,如此才能確保安全第一的最 高原則。

3. 提供核安管制機關足夠的權限與支援。核安管制機關必須權責相符並且職權明確,此須要有清楚明確的 立法規範或法律授權等制度配合。同時一個有效率的核 安管制機關亦須擁有充裕的資源與才能,不僅要有充足 的經費,還須有專業員工與高端技術配備,結合權力、 財力、人力、物力,才能發揮高效率的管制效能。

4. 樹立核安管制機關安全文化。安全意識與安全文化,應深植於領導主管與所有員工的心中,內化為行政組織文化,且應落實於各個行政階段與流程,包括調查、審查、處分、決策、和制訂法規、標準與指南等事項。核安機關的安全文化是須要培養與支持的,這包括隨時要有高度的警覺、及時處理、保護善意的糾錯發言等。樹立堅實穩固的安全文化,方能贏得業者與社會大眾的信任與尊重。

 行政資訊公開透明並重視問責制度。核安管制機 關向政府、國會、取得執照者與大眾負責,應有向大家 說明解釋其決策的過程和理由的義務,並且勇於接受各 界對這些決策的挑戰。行政資訊與監管活動的透明化, 可提高管制機關的公信力,使大眾相信管制機關的所有 決策均是建立在可信賴的標準和程序之上。

影響核安管制機關的有效性(效率)與獨立性之因 素很多,不僅涵蓋政治、經濟、環境、社會與科學等各 層面,另須考慮官僚體系文化與人員素質等因素。本計 畫所談乃是國際上多數國家所認同的有效的獨立核安 管制機關之特點,雖不見得全適用於我國情形,但仍值 得我們借鏡思考,要如何提高組織改造後的核能安全管 制委員會的獨立性和管制效能,以符合社會大眾期待與 順應世界主流趨勢。

四、我國的核能該走向什麼道路,近年來社會的意 見屢有擺盪,儘管核四已經宣布停工封存,但後續仍存 有核電廠除役及核廢料處理、輻射安全等專業問題,須 有賴於獨立的核能管制機關監督。有鑑於核能安全管制, 所涉之技術性、專業性及避免政治力介入之特性,加之 台灣地狹人稠,一旦核能安全亮起紅燈,勢必造成國人 恐慌,對國家社經發展產生重大不利影響。是我國核能 安全管制機關的設計,須在組織及運作上賦予其獨立性, 且具有核能安全政策規劃與人事權,並配置足額的專業 技術人員及預算,以確保核能安全此一高度專業的領域 的有關決策,不會任意受到政治干預或上級機關的指揮 干涉。

針對當前環境形勢,國內核電廠預期將如期進行除 役,為首要面對的問題,而核廢料問題更涉及世代正義, 須積極面對核電廠除役後衍生之問題以及核廢料如何 處理,凡此均涉及到須與其他部會進行業務上之協調, 蓋核能相關議題所涉之層面,並非僅靠核能管制機關即 可單獨處理,除了使核能管制機關具備一定的獨立性外, 更須有足夠的層級進行跨部會之業務協調,俾能有效達 成目標,故須成立一個具公信力、且有較高層級的獨立 機關,妥適處理核能安全管制事項,方為適當。此外, 核能安全技術不斷的更新進步,核能安全管制機關應具 備厚實的核能安全科技技術與研發實力,如此才能真正 確保核能安全,發揮有效的監理功能,本草案中遵循的 「核安管制與研發分立原則」,似有待商榷。

#### IV. 結論

2011 年 3 月 11 日日本發生大地震導致福島核電廠 損毀引起嚴重的核能災害事故之後,全世界核電國家無 不加強核能電廠安全監理工作,同時亦重新檢視既有的 核能安全管制機制是否良善、核安法制是否完備,以及 檢驗核安管制機關能否充分發揮監理效能,希望從組織、 法制、監理、執行等方面著手,建立一個以核能安全為 最高指導原則的管理機制,打造一個有效的核安管制機 關。

我國核能主管機關—行政院原子能委員會自 1970 年(民國 59年)成立自今 2020年(民國 109年),其 組織架構並沒有太大變化,最近一次組織法修正是在 1992年(民國 81年),距今將近 30年。2012年起,行 政院開始進行中央機關組織調整計畫,原子能委員會在 這項組改規劃中面臨組織降編的命運,其原因不難推測, 蓋從 2000年主張非核家園的民進黨政府執政並迅速宣 布停建核四之後,核電已不再是國家能源發展重要選項; 2011年發生福島核災,許多民眾擔心核電廠災害發生, 國內民眾反核電情緒高漲,國民黨政府於是在 2014 年 核四完工啟用前宣布核四封存; 2016 年民進黨政府重返 執政, 2017 年初旋即通過電業法修正,新訂第 95 條第 1項規定,明訂「核能發電設備應於中華民國 114 年(2025 年)以前,全部停止運轉。」,明確宣布「廢核」時間 表,核能落幕似成定局,連帶原能會地位也一落千丈, 2018 年 5 月行政院拍板原能會降編為三級機關核安會。 然而 2018 年 11 月底「以核養綠」公投挽救了核電續轉 的命運,成功廢除了前述電業法第 95 條第 1 項條文規 定。雖然核四不見得會重起,核一、核二、核三等三座 核電廠不見得能延役,但可確定的是,最新多數民意仍 希望保留核能作為台灣的能源選項之一,從而期望與核 能輻射有關的安全事項,應受到更嚴密的管理。

對比國外核能管制機關,多以提高核能安全為由去 進行組織改造和強化監理功能,而我國原子能委員會組 改的主要理由,卻是配合中央行政機關組織改造計畫, 且過程中夾雜了複雜的社會因素與政治因素在內,缺乏 以核能安全至上的組織設計思考。從 1998 年政府開始 進行行政院組織改造以來,對於原子能委員會的組改規 劃不是裁併,就是降編,最近一次 2018 年(民國 107 年) 行政院所提出的「核能安全委員會組織法草案」,則是 將原子能委員會降編為三級獨立機關「核能安全委員 會」,對照目前原子能委員會,兩者最大差異即是機關 位階下降、職權萎縮,組織性質上雖定位為獨立機關, 但核安會的組成與職權運作,似仍不出原來原能會組成 與職權的框架,並未朝向建立一個「有效」、「獨立」 的「核能安全」管制機關去認真規劃。

其實本草案將原子能委員會改制成為「獨立機關」 核能安全委員會,同時採行「核能管制與利用分離」原 則,讓核安會之職權聚焦於「核能與輻射安全管制」的 相關事項上,其規劃立意良善,並且符合國際上對核安 管制機關的要求標準。不過該如何落實核安管制機關的 「獨立」精神,則需要借鏡國內獨立機關和國外核安管 制機關的經驗。

關於「獨立機關」的定義與設置方式,從2004年中 央行政機關組織基準法明訂獨立機關組織法源,加上大 法官釋字 613 號解釋之後,已有明確組成條件,係指「指 依據法律獨立行使職權,自主運作,除法律另有規定外, 不受其他機關指揮監督之合議制機關」;而設置獨立機 關的必要性,係為「在法律規定範圍內,排除上級機關 在層級式行政體制下所為對具體個案決定之指揮與監 督,使獨立機關有更多不受政治干擾,依專業自主決定 之空間。」我國目前已設有六個獨立機關,包括二級和 三級的獨立機關,以及依據中央行政機關組織基準法和 特別行政法所設置的獨立機關在內。

從我國第一個獨立機關通訊傳播委員會 2006 年成 立至今(2020),我國實施獨立機關組織體制已近15 年。 獨立機關作為特殊的行政組織類型,過去曾在人事任用、 行政上下層級互動和實務運作上引起不少討論與爭議。 以本計畫研究的通傳會、公平會、中選會、運安會等四 個合議制獨立機關為例,它們職司特別行政任務,職權 行使上遠比其他行政機關更要求獨立自主運作,應完全 排除來自於上級機關、政治人物和團體,以及利益團體 的不當影響。然而,「自主運作」在現實實務上卻沒那 麼容易,因為人情、政治和商業等來自於四面八方的壓 力與影響,常常考驗獨立機關成員的智慧與抗壓力,主 委和委員們能否挺的住,往往是獨立機關維持獨立性的 重要關鍵。其次,獨立機關在行政體制上擁有個案最終 決定權,亦是維持獨立性的關鍵因素,目前本計畫所研 究的四獨立機關已符合此項條件,過去曾一度發生的 「訴願審查」爭議已獲解決。另外獨立機關作為合議制 機關,所有委員們能否平權參與業務運作與個案審議, 發揮各自專業,而不至於運作成為首長制機關,亦為維 持獨立機關有效運作的重點事項。我國目前獨立機關成 員之組成方式各有不同,有全數專任,亦有專任、兼任 並行,或是全數兼任,無論係採何種體制,應重視並強。

我國獨立機關實際運作經驗,將成立的核能安全委 員會固然值得借鏡,但如何建立一個「有效的核安管制 機關」,則更應參考國際標準與他國經驗。國際原子能 總署和 OECD 核能署分別提出了十分具體明確的設置 運作指引和評估標準,供各國政府參考。它們認為「核 安管制機關」不應只是一個法律上的組織名稱而已,更 應強調其功能上的「有效運作」和「有效獨立」,而此 涉及職權、財務、人員、技術和機關安全文化等各方面 的條件。本計畫研究了美國、英國、加拿大和日本等國 家之核能安全管制機關,發現此等國家的核安管制機關 都十分重視核能安全文化,成員任命嚴謹度高、有些還 須再經國會同意,並且除個案自主決定權外甚至還有訴 願審查權(復審權),有相對充裕的經費來源與技術研 究機構支持,可有效提昇核安管制機關獨立運作與效能。 行政院民國 107 年提出的「核能安全委員會組織法

草案」,已相當程度借鏡國外核安管制機關設置原則, 包括朝向核能管制與促進利用分離原則和定位為獨立 機關等方向設計,但整體而言,本草案並未跳脫出現行 原能會既有的運作框架外,而且有關核安會的組織架構 與職權設計,亦缺乏強化機關專業性、獨立性和有效性 的設計思考。本計畫期能引進「建立有效核安管制機關」 的管理設計思維,完備核能安全管制組織及運作機制之 規範,爰提出草案修正建議,供原能會和立法者參考之。

本計畫所提草案修正建議分為甲案和乙案,兩者主 要差別在於核能安全委員會的機關層級位階。甲案係以 提昇我國核能安全管制機關—核能安全委員會的的行 政層級位階至二級獨立機關;乙案則是維持草案所訂核 能安全委員會作為三級獨立機關的規定。至於其他修正 內容與說明,囿於精簡報告篇幅所限,不列於本報告中, 完整內容請詳見本計畫。

#### 參考文獻

- 黄錦堂,行政組織法論,初版,臺北:翰蘆,2005 年5月。
- [2] 葉俊榮,行政組織與人事行政法治之新發展,元照, 初版,2010年9月。
- [3] 台灣能源法學會/行政院原子能委員會著,核能法 體系(一):核能安全管制與核子損害賠償法制, 新學林,2014年4月。
- [4] 林昱梅,核能管制機關之比較研究,收錄於陳春生 主編,法之橋:台灣與法國之法學交會,彭惕業教 授榮退論文集,頁429-465,臺北:元照,2016年 出版。

- [5] 翁曉玲,獨立機關的組織與運作-通傳會二屆運作 的實證經驗,收錄於「獨立機關運作之回顧與前瞻」 一書,國家通訊傳播委員會編印,2010年12月
- [6] 廖義男,獨立機關之監督與權力分立,法令月刊, 第62卷第3期,2011年3月,頁157-158。
- [7] 林昱梅,核電廠之風險管理法制--福島核電廠事故 之省思,臺灣法學雜誌,第193期,2012年2月。
- [8] 詹鎮榮,中央政府組織改造:科層式行政機關精簡 與調整、獨立行政機關之重整,月旦法學教室,第 159期,2015年12月。
- [9] 陳淳文,論獨立行政機關之監督,政大法學評論第 126期,2012年4月。
- [10] 王竹方,核能安全與風險控制,臺灣法學雜誌,第 193 期,2012年2月。
- [11] 周源卿,日本福島核災後之核能安全與相關法制探討,臺灣法學雜誌,第192期,2012年1月。
- [12] 辛年豐,從機關獨立到獨立機關-論公平交易委員 會的現在與未來,公平交易季刊,第19卷,第2期, 2011年4月。
- [13] 廖元豪,「釋字六一三後,獨立機關還剩多少空間?」,臺灣本土法學雜誌,第87期,2006年10月。
- [14] 林子儀,美國總統的行政首長權與獨立行政管制委員會,當代公法理論:翁岳生教授六秩誕辰祝壽論 文集,元照,1993年5月。
- [15] 陳明仁,獨立機關制度之推動與檢討,研考雙月刊, 第29卷第6期,2005年12月。
- [16] 張其祿,獨立管制機關的政治監督與治理:兼論對 我國獨立機關之啟示,公平交易季刊,第17卷,第 2期,2009年4月。
- [17] 蔡茂寅,政策統合機關、獨立機關定位及設立原則 探討,國家政策季刊,創刊號,2002年9月。
- [18] 侯明亮,核能安全的理論與實務中篇第玖章(六之 二),台電核能月刊,2012年11月。
- [19] 石世豪,「政府組織改造下的公平交易委員會—固 守本業或創造再生」,公平交易季刊,第19卷,第 2期,2011年4月。
- [20] 黃錦堂,權力分立之憲法解釋—兼評釋字第520、 585、613、633、645號解釋,法令月刊,第61卷 9期,2010年9月。
- [21] 郭介恒,獨立機關與訴願管轄—最高行政法院 2008 年 12 月 26 日庭長法官聯席會議決議評析,月旦法 學雜誌,第 170 期,2009 年 7 月。
- [22] 程明修、林昱梅,我國核能安全管制法規體制與強 化管制機關獨立性之研究,行政院原子能委員會委 託研究計畫研究報告,2013年12月。
- [23] 賴宇松,日本核能安全管制之生成與演變,國科會 研究計畫,2013年。
- [24] 陳敦源,中央三級機關(署、局)組織運作及二級 機關對其指揮監督之研究,行政院研究發展考核委員會委託研究,2012年。
- [25] 朱鐵吉、吳泉源、施淑芳,核安管制機關安全文化 評估與調查研究計畫,行政院研究發展考核委員會 委託,財團法人核能資訊中心執行,2012年。
- [26] 程明修,從 IAEA「核能安全公約」檢視我國核能

安全管制法體系,行政院原子能委員會委託,東吳 大學執行,2016年。

- [27] 張惠東、程明修、高仁川,核能安全與資訊公開透明專法之研究,行政院原子能委員會委託,東吳大學執行,2016年。
- [28] 程明修、張惠東,我國核子損害賠償法之研修,行 政院原子能委員會委託,東吳大學執行,民國 2011 年
- [29] 程明修,檢討核安管制基本法制與建立核子損害賠 償制度之研究,行政院原子能委員會委託,原子能 委員會執行,2012年。
- [30] Malaika Baco-Dussault, Independence of nuclear regulators in the aftermath of the Fukushima Daiichi Nuclear Accident: A comparative approach. , 2013. A technical paper presented at: IAEA International Conference on Effective Nuclear Regulatory Systems, Ottawa, Ontario 0 資 料 來 源 : https://nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Reading-Room/technical-papers-presentations-andarticles/Malaika Bacon-Dussault\_article\_ENG\_.pdf
- [31] Organisation For Economic Co-operation and Development, The Characteristics of an Effective Nuclear Regulator, 2014, NEA NO. 7185. 資料來源: https://doi.org/10.1787/9789264218741-en
- [32] Organisation For Economic Co-operation and Development, The Safety Culture of an Effective Nuclear Regulatory Body., 2016. 資料來源: https://www.oecd-nea.org/nsd/pubs/2016/7247scrb2016.pdf。

## 原子能民生應用數位影音教材製作與推廣研究 Research on the production and promotion of digital audio-visual teaching materials for atomic energy applications

計畫編號: MOST 108-NU -E-144-001 -NU 計畫主持人:單文婷 e-mail: Wenting@ntua.edu.tw 執行單位:國立台灣藝術大學廣播電視學系

#### 摘要

本計畫參考歐美近年來探討科學家使用社群媒體 進行公共傳播相關研究為脈絡,探討國內政府機構內科 學專家如何借助社群媒體與公眾溝通之實況。面對數位 網路時代,假新聞、偽科學問題越來越嚴重,科學家如 何藉由社群媒體找回媒體發話權,爭取民眾注意也是本 研究關心討論的重點。本計畫首次嘗試邀請原子能委員 會、核能研究所內專家與網紅合力製作科學短影片,共 完成10部專家課程、科學新聞等短影音內容,欲透過科 學短影音達成以下科學傳播目的:提高政府機構內科學 家公共傳播能力、協助科學家善用社群媒體進行更有效 之原子能科學傳播、讓科學家經由社群媒體主動向公眾 發話,補充媒體報導並平衡社會視聽。本計畫更重要的 是鼓勵科學家親身傳播以喚起民眾對科學主動探索或 參與科學政策討論之興趣動機。

**關鍵字:**科學傳播、社群媒體、公眾參與科學、原子能 委員會

#### Abstract

This research project is based on the use of social media by European and American scientists to conduct public communication related research, and explores the actual situation and benefits of how medical experts in government agencies use social media to communicate with the public, especially in the face of fake news and pseudoscience in the digital Internet era. With regard to the problem of proliferation, scientists use social media to dominate the right to speak in order to gain public attention. This research is the first attempt to invite experts from the Atomic Energy Commission and the Institute of Nuclear Energy to jointly produce scientific short films. Through expert courses, scientific news and other short video content, the following goals are achieved: to improve the public communication capabilities of scientists in government agencies, and to assist scientists in using social media to make them more effective. The atomic energy science communication allows scientists to take the initiative to speak through social media, supplement general media reports, and balance social audiovisual. More importantly, through personal communication by scientists, people are interested in actively understanding scientific research or further participating in scientific policy discussions.

**Keywords:** Science Communication, Social Media, Public Participation in Science, Atomic Energy Commission(AEC)

#### I. 前言

數位媒體時代來臨,科學家為有效達到科學傳播目 標,試圖提出多樣化與創新內容來吸引公眾接觸科學。 Dudo等學者[1]考察科學家親身參與科學傳播的五個 目標,具體提出包括有:一、宣傳科學政策;二、提高 大眾對科學的興趣;三、加強大眾對科學的信任感;四、 提供大眾能接受的科學訊息;五、防止科學錯誤報導。 其中科學家最關心的兩個目的就是如何防止媒體錯誤 報導,以及提高大眾對科學的興趣,而這也成為科學家 普遍想要借助社群媒體來主導科學傳播的重要動機

難道媒體上都是錯誤的科學內容嗎?其實不然,過 去有學者直言,科學家與媒體記者的距離是遙遠且難以 溝通的,主要原因在於雙方進行傳播的目的不同。比如 Comrie [2] 認為,科學家希望帶給民眾精確的消息,所 以對於尚未確認的科學研究往往抱持保守態度,但媒體 記者卻能輕易地將不確定的訊息變成新聞報導,尤其是 關於疾病或新藥開發等相關新聞,可能會帶給民眾「虛 假的希望」,這往往也造成媒體與科學家因立場不同產 生衝突。Peters [3] 整理科學傳播研究中有關科學家與 記者的互動關係,總共歸納出六種形容詞,包括「距離」 (distance)、「鴻溝」(gap)、「障礙」(barrier)、 「柵欄」 (fence)、「油和水」 (oil and water) 及「創 造緊張」(creative tension),顯見科學家與媒體長期的 緊繃關係。自然而然當網路普及,數位時代來臨,科學 家們也就開始思考藉由社群媒體找回科學傳播主導權, 讓專家說話。

McClain〔4〕研究發現,科學家想要使用社群媒體 對外傳播的主要理由包括有以下兩點:一是科學家必須 對抗日益嚴重的假新聞 (fake news)、偽科學 (pseudoscience)問題,透過社群媒對外發話,爭取民眾 關注。其次是當民眾從「理解」科學轉向「參與」科學, 公眾當然需要更多公開、平等的機會或平台來接收各種 科學資訊,使其更容易參與科學討論。一般來說,社群 媒體就是最好的傳播平台,也深受歐美科學界重視。例 如荷蘭市議會就針對「科學決策」創立了網路公民諮詢 委員會(citizen advisory committees)、網路公民討論小 組與陪審團 (citizen panels and juries) 等, 讓公民與科學 家在社群媒體上可以充分互動、對話交流。McClain 的 研究結果與科學傳播學者 Kimberley Collins 在 2016 年 發表的一篇調查報告結論類似, Collins 發現許多科學 家不僅使用社群媒體與公眾對話,另方面也開始進行有 「目的性」的科學傳播,她形容「科學家們開始意識到 社群媒體的重要性,不但可以知道別人在做什麼研究, 更重要的是讓別人知道你在做什麼」。簡言之,科學家 們不僅可以選擇傳播「那些」(What)研究內容,也可 以自己決定「如何」(How)傳播。

從以上討論及近年來相關研究文獻,總理可歸納出 近年來科學傳播的幾點發展特色:

(1)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。

(2)科學家使用社群媒體傳播的內容越來越新穎、多元, 目的是吸引民眾主動接收科學訊息。

(3)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,社群媒體無疑是科學家使用來對外傳播的最佳管道。

本研究從105年起執行原子能科技學術合作研究計 畫,一直聚焦探討如何使用數位媒體行銷原子能科學, 讓更多民眾了解原子能民生應用,計畫執行包括內容製 作、社群優化及數位教材推廣等都是本研究執行重點。 108年本計畫更首次嘗試邀請科學家現身說法,與網紅 合作製拍原子能微課程影片,具體實踐歐美科學傳播學 界主張「讓科學家說話」、「主導科學傳播議題」等重 要面向。

簡述 108 年度本研究計畫具體目標有以下幾點: (1)提升原子能委員會內科學家對外傳播能力。 (2)協助科學家使用社群媒體進行更有效的科學傳播,如 政策行銷、科學觀念釐清、科學研究討論等。 (3)協助科學家借助社群媒體主動發話,補充媒體報導,

(4)唤起民眾對科學研究與科學政策之關注。

平衡社會視聽。

(5)藉由計畫執行,鼓勵大專生投入原子能科學傳播,培 育科普內容製作或社群編輯人才,尤其鼓勵女性加入科 普傳播行列。

#### Ⅱ. 主要內容

108 年本計畫主要執行內容包括有:原子能民生應 用數位教材製作、研究推廣與人才培育三部份。主要執 行項目說明以下:

第一,本研究執行初期先與原能會內科學專家進行 訪談,藉此蒐集108年原子能輻射與防護推廣的重要政 策主題,並以此進行微課程內容設計與規劃。另方面也 向會內科學專家介紹歐美研究,包括科學家對外傳播的 方法與目的、科學傳播創新內容、主題與製作型態等。

第二,為強化原能會內科學家對外傳播能力、提高 社群媒體傳播效果,本計畫也整理近年來國內外對科學 家借助網路、社群媒體對外傳播之相關文獻,藉由他山 之石,綜合提出我國政府單位培訓科學家自我傳播之具 體建議。

第三,本研究將執行過程中之參與觀察、深度訪談 和行動研究心得等紀錄撰寫成研究論文進行發表,累積 科學傳播研究文獻並藉由論文討論與學術先進交流。

本研究執行原子能民生應用數位影音教材製作成

果包括如下:

一、協助原子能全國科學展覽活動預告片拍攝、活動紀錄與製作原子能科學展覽專題新聞。本計畫於108年2月、6月、7月均參與拍攝原子能委員會籌劃舉辦的科普展覽活動,期間包括短片內容企劃、拍攝腳本、活動拍攝溝通等,讓團隊與策展專家、研究員們有充分互動機會,彼此理解立場,有助於製作傳播內容。本計畫今年共製作5部科展宣傳短片以及7部新聞專題供粉專傳播宣傳。







放暑假~FUN科學~精彩花絮第二彈

昨天我們的拍攝主題是輻射的測量和災防包的準備,其中在我們的生活 中都有輻射的存在,雖然我們看不到、聽不到、也感覺不到,但是能用 儀器量測出來喔。

...

(/ ◇∇◇)/ 話說那個災防包的遊戲真的超好玩的,災防包這東西是因人 而異的,每個人需要及重要的東西都不盡相同,所以趕快來現場,製作 一個有著自己的 style 的災防包吧!……更多



二、本計畫邀請原子能委員會、核能研究所研究員等 多位專家共同規劃製作10部線上微課程,定名 「原來不簡單」,每部長度約4分鐘,首次嘗試 結合YouTuber與研究員共同製拍原子能科普內 容,以討論、講述原子能科學基礎知識與原子能 科學政策為主。課程目標以有趣、簡易內容為原 則,讓民眾願意接收原子能科學與政策,增加原 子能科普內容傳播效果。





- 三、本計畫除了協助製作原子能數位影音相關教材內容,也在製拍過程進行研究,從科普傳播、民眾 參與科學、公民科學發展等角度進行學術探討。 108年總共發表3篇研究論文。包括有:
  - 108年3月16日參加銘傳大學「2019數位 I世 代傳播研究與實務應用研討會」,發表篇名〈跨 媒體創意應用與科學傳播-歐美實例討論〉研究 論文。
  - 108年6月28日參加中華傳播學會年會,發表 篇名為〈科技發展對公民科學教育與傳播之影響 研究〉研究論文。
  - 申請通過國立台灣藝術大學教師學術專題研究, 108年執行「臺灣政府部門科學家使用社群媒體 與公眾溝通現況調查研究」,獲補助7萬元。
  - 4.108年9月投稿視聽傳播,篇名〈科學家使用社 群媒體與公眾溝通之動機研究〉並在109年1月 刊登。

#### III. 結果與討論

從本計畫完成的工作內容評估對科普傳播、以及參與計畫的人員可獲得之訓練方面來說,本計畫是首次嘗 試製作4分鐘科學政策「微課程」,一方面實踐「讓科學 家說話」,訓練也鼓勵科學家對外傳播,另方面也是參考 行政院人事行政總處因應網路數位培訓趨勢,推廣公部 門數位學習所設置之「e等公務園+學習平臺」為依據進 行內容規劃。然而,要以4分鐘左右的簡短影音內容說 清楚原子能科學政策實屬不易,從議題挑選、科學家解 說員的講稿、解說重點等都與團隊經過多次討論,這些 過程對製作影片者與參與拍攝者來說都是收穫豐富,對 於科普傳播精神也以更進一步體悟。本計畫完成之作品 不僅可提供其他部會成員線上交流學習,也成為原子能 委員會官網、社群媒體上傳播交流的數位影音教材內容。

回顧近幾年歐美科學傳播研究文獻也主張,網路 上的影音內容是吸引民眾主動觸及科學資訊的有效形 式,而本研究此次製拍之影像內容均以有利社群媒體 傳播之型態為主,便利民眾接收與理解。例如上述之 微課程以及協助製作科普展覽的「微新聞」等。先前 文獻討論也指出,科學家與媒體記者的互動關係往往 是緊張且溝通不良,其中原因也在於新聞製作有時 間、篇幅限制,無法讓科學家充分表述,也容易讓科 學報導出現斷章取義問題。本計畫也希望突破此點, 以原子能科學專家角度進行屬於原子能議題的新聞製 作,讓會內科學專家有充分解說政策與表達立場機 會,提供外界完整、正確的新聞內容。

#### IV. 結論

從科學政策行銷研究角度,學者認為科學家比記者 更適合擔任公共傳播者角色。研究發現,民眾對科學家 (尤其是政府機構內任職的)具有較高的信任感,因此 若是科學家親身進行科學政策行銷,不僅能增加與公眾 互動,研究發現更會減低民眾對科學發展之質疑。另外 歐美科普傳播研究,觀察政府機構內的科學家使用社群 媒體的傳播效果,也發現科學家使用社群媒體如臉書、 推特等行銷政府的科學研究,不只能增加政策說服力, 科學家本身與公眾的互動溝通能力也明顯提升。

本研究參考歐美呢科普傳播脈絡進行原子能民生 應用教材製作,製作微課程、微新聞等影像作品推出上 線後頗受好評。值得關注的是,正如多數歐美研究結論, 當科學家開始投入社群媒體進行自我傳播,科學家變身 為公共傳播者,不只更了解如何與公眾溝通也更在意傳 播形態、內容甚至是傳播效果,意即藉由社群媒體傳播, 以會明顯提高科學家主動對外傳播意圖與動機。

#### 參考文獻

- Dudo A, Besley JC .(2016), "Scientists' Prioritization of Communication Objectives for Public Engagement", PLoS ONE, 11(2): e0148867,doi:10.1371/journal.pone.0148867
- [2] Comrie, M. (2000)," Mussel Bound: The New Zealand media and the launch of Lyprinol", International Communication Bulletin, 35(3):12-16.
- [3] Peters HP. (2013)," Scientific sources and the mass media: Forms and consequences of medicalization". The Sciences' Media Connection – Public Communication and its Repercussions, eds Rödder S, Franzen M, Weingart P (Springer, Dordrecht, The Netherlands), pp 217-239.
- [4] McClain CR. (2017)," Practices and promises of Facebook for science outreach: Becoming a Nerd of Trust". PLoS Biol, 15(6): e2002020, https://doi.org/10.1371/journal. pbio.2002020

## 原住民之核能與輻射知識宣導節目 Program of nuclear and radiation knowledge for indigenous people

計畫編號: MOST 108-2623-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:黃莉珺 執行單位:龍華科技大學多媒體系

#### 摘要

核能設施的設置地點,會優先選擇人口較不稠密之 處,這些地方往往也是原住民的生活區。因為數位資訊 較不發達,這些地區的民眾較容易受到親友的口耳相 傳,而對新興科技的某些副作用產生恐懼。本計畫將核 能與輻射知識影片,製作成原住民的族語教學節目。藉 此,以原住民能夠接受的方式,傳播正確的核能與輻射 知識。

關鍵詞:原住民、核能、輻射、影片。

#### Abstract

Areas without densely populated are considered as the higher priority of nuclear facility locations. These areas are usually overlapped with living zone of indigenous people. Due to less digital information, these people are often misled by some misconception and refuse new technologies, such as nuclear. This project transforms videos of nuclear and radiation knowledge into videos of aboriginal languages. The nuclear and radiation knowledge are propagated using the method which indigenous people can accepted.

Keywords: Indigenous people, nuclear, radiation, video.

#### I. 前言

台灣的原住民,大約有 53 萬人,有許多居住在鄉 下與山區等人口較不稠密的地區。和都市地區的民眾相 比,容易具有城鄉之間的數位落差,不容易從網路等新 興科技,取得知識。因此,有必要採用針對原住民,採 用適合的方法,來宣傳核能與輻射知識。以彌補因為城 鄉數位落差,導致原住民不易獲得核能與輻射知識的問 題。

為了讓原住民族更願意觀看政府的宣傳影片,並且 更願意接納影片中的核能與輻射知識,本計畫使用原住 民族最容易認同的方式,來製作並傳播原子能委員會的 宣傳影片。透過原住民的母語教學節目,來宣傳重要的 核能與輻射知識。

#### Ⅱ. 主要內容

在 2017 年的計畫之中,本團隊針對原子能委員會 過去所製作的多媒體影片「原來如此」系列(圖 01), 進行重製。擷取出其中的知識解說段落,轉製成阿美族 與排灣族的族語教學節目。「原來如此」系列影片共 23 集,經過挑選,選出民眾觀看次數較多的主題,共選出 了 17 集,主題如表 01 所列。本計畫將這 17 集的知識 講解影片,重新規劃設計,製作成族語教學節目。本計 畫所製作的族語教學影片,每集時間長度統一為 2 分 鐘。在影片之中,先用族語提出問題,接著由原子能委 員會的專業人士進行講解,最後再用族語說出答案。同 時,也藉由族語的問題和答案,分別介紹一個族語的單 字。如此,新一代原住民也可以認識族語的單字,加強 對於自己族群的認同。於 2018 年,原子能委員會將這 些影片,在原住民電視台上播出。



圖 01:原子能委員會製作之「原來如此」系列影片

表 01:原住民族族語解說影片清單

集數	主題
01	輻射是如何傷害人體?
02	在行進中若發生核災時,如何幫助疏散民眾?
03	去醫院照 X 光,輻射會殘留在體內嗎?
04	目前台灣用過的核子燃料放在哪裡?
05	台灣核能電廠的運轉執照期限是幾年?
06	輻射最多的地方在哪裡?
07	輻射排名第二多的地方在哪裡?
08	你覺得食物中有輻射嗎?
09	機場的行李 X 光機, 會傷害人體嗎?
10	食物為什麼要照輻射?

11	誤食遭受輻射污染的食物,該怎麼辦?
12	當孕婦照口腔 X 光時,會影響胎兒健康嗎?
13	你的身旁有輻射嗎?
14	飲用水有輻射嗎?
15	發生核子事故時,一定要疏散嗎?
16	核電廠拆除要花多少年?
17	核燃料棒跟原子彈一樣嗎?

在 2019 年的計畫之中,本團隊延續之前的作法, 製作更多原住民族群的族語影片,包含了泰雅族與卑南 族。泰雅族的分佈地區,主要是北部和中部的山區;卑 南族則主要是在台東地區。在卑南族語方面,根據部落 的不同,分成南王、下檳榔-初鹿、利嘉、建和-知本四 個版本。由於南王版比較接近原始卑南語,而且也是原 住民電視台所採用的版本。所以在本計畫之中,也採用 了南王卑南語,來進行族語教學。本計畫所製作的影片 之中,總共介紹的單字如表 02 所列。因為不同的原住 民族,具有不同的語言和文化,所以選用的單字略有不 同。完成之族語教學影片如圖 02 所示。

集數	泰雅族語單字	卑南族語單字
01	傷害、引起疾病	身體、疾病
02	發生事故、指導	幫忙、關閉
03	體內、陽光	去照 X 光、殘留
04	存放、內部	放、核子燃料池
05	活著、40 年	期限、40
06	最多、土地	最多、是
07	哪裡、岩盤	在哪裡、第二
08	食物、一點點	食物、很少
09	機場、不必擔心	傷害、擔心
10	照射、消滅	照明、菌
11	該怎麼辦、占醫	污染、就醫
12	懷孕、牙齒	孕婦、劑量
13	生活周遭、天然	周遭、到處
14	飲用水、不礙健康	飲用、損害
15	外洩、離開	疏散、近
16	多少年、結束	拆除、完成
17	一樣、爆炸	一樣、會爆炸

表 02:原住民族族語解說影片清單



在前一年度的計畫之中,本團隊製作了核子事故緊 急應變的虛擬實境體驗,在 2019 年初的科展之中,提 供給參觀民眾使用。由於廣獲民眾的好評,因此,在本 計畫之中,持續替原子能委員會製作了輻射民生應用的 VR 遊戲,介紹輻射的民生應用,如圖 03 所示。利用輻 射照射,殺死食物、化妝品、古物、醫療用品上的有害 細菌、病毒與微生物。本團隊開發的 VR 程式,在全國 科展(圖 04)等多項展覽中展出,提供民眾體驗。



圖 03:輻射照射 VR 遊戲畫面



圖 04:於科展中展示本團隊之 VR 程式

#### Ⅲ. 結果與討論

本計畫已經完成相關影片的製作工作,也讓部分原 住民人士觀看過這些影片。觀看過影片的原住民人士, 對於這些影片可以讓原住民,認識自己的族語,都表示 肯定。也認為可以讓相關的科學知識,觸及更多原住 民。目前,本計畫將製作完成的影片,送交原子能委員 會進行審查。待審查完成之後,就可以在原住民的相關 媒體頻道(如原住民電視台、原住民族委員會或地方政 府原民局的族語 YouTube 頻道等等)進行播出。

#### IV. 結論

本計畫透過製作原住民的族語教學影片,來宣傳核 能與輻射知識。藉此,讓原住民的相關媒體頻道,願意 播放本計畫所製作的影片。同時也讓原住民,願意觀看 本計畫所製作的影片。藉此,達到更好的宣傳效果。計 畫的整體成果,與原先的規劃大致相符。

## 針對不同族群設計開發原子能科普教育學習課程(II) Designing and Developing Atomic Energy Science Education Curriculum for Different Ethnic Groups (II)

計畫編號:108-NU-E-007-002-NU 計畫主持人:劉鴻鳴 e-mail:hmliu@mx.nthu.edu.tw 計畫參與人員:吳勇慶 執行單位:國立清華大學原子科學技術發展中心

#### 摘要

本計畫主要是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。

為了進行全面式的輻射教育推廣,本計畫除了持續 針對不同族群(含學生、老師、新住民、原住民、樂齡 族群及網民等)進行輻射基本知識教育外,並將進一步 規劃設計相對應的教案及課程,同時將教案留給在地師 生繼續延用,且利用推廣時進行交流,以連結進行種子 教師培訓及教案回饋更新,如此將輻射教育方式灑向全 台各級學校及地區,以達成全面式的輻射教育推廣。 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 people 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.

Keywords: Radiation teaching materials , Radiation measurement , Radiation dose , Radiation protection , Radiation application.

#### I. 前言

在過去幾年,清華大學原子科學科普團隊一直致力 於輻射教育推廣,推廣對象包括:國小、國中、高中的 老師及學生,更進一步推廣到社區大學、民間團體、及 樂齡族群,在推廣過程中本團隊也獲得相當多的經驗與 回饋。在過去幾年中,我們舉辦了適合國中小生、高中 生及一般民眾等原子能演講及活動,希望藉此讓更多人 有機會親身體驗原子能的基礎知識;然而,先前的計畫 手要以點的方式往外擴散,盡量以清華原子科普團隊講 師群的力量努力推廣原子能科普教育,但影響層面及範 圍仍屬有限。因此希望能在過去的經驗基礎下,搭配不 同對象的需求來進行教案設計,並再將教案資料留給有 需求的學校或社會各界使用。故本計畫今年與多方團隊 合作,透過合作辦理活動之方式以探究及測試社會各年 齡的需求及可行性,再將需求整合為教案資料,如此才 能將原子能科普教育的種子灑向社會各面向,以成為更 全面式的原子能推廣教育。

基於前言所述,本計畫規劃以清華大學原子科學技 術發展中心為基地,以現有的課程資源與參觀活動為出 發點,邀請本校師長及研究人員、原子能相關單位、校 外企業及廠商、及各界對原子科普教育推廣有興趣的團 體等一同合作,進行基礎原子能科普教育教材之開發設 計、增加及改善基本輻射度量實驗項目(目的以降低教 案製作成本,方可提供各界需求使用),再將開發設計之 教材試用於不同族群的活動上面,以使社會各界有機會 對於輻射、原子能等基本知識、定義、測量及分析等有 所認知,同時活動後的回饋也可協助我們進行教案內容 的調整與擴充,達到寓教於樂、親身學習與體驗原子能 科普教育之目的。

過去兩年來,本團隊陸續推廣的活動包括:(1)辦理 29 場次適合高中生之「2018 原子科學探奇之旅」活動, 讓更多高中師生有機會藉此獲得原子科學基礎知識與 應用;(2)辦理 32 場次適合中小學師生之「2018 知輻習 輻,核家平安 Q&A」演講,藉由演講及示範實驗的方式, 解答師生們常見之疑惑。此外,本計畫也應其他主辦單 位的邀請,配合辦理了 10 場次適合學生團體及一般民 眾之輻射與核能教育推廣活動及講座,讓更多民眾能藉 此了解輻射基礎知識。然而,目前本計畫仍以點的方式 往外擴散,盡一已之力努力推廣輻射教育,但影響層面 仍屬有限。

今年本團隊仍持續進行輻射教育推廣活度,相關活 動說明將詳述於今年度的研究成果中。然而本計畫雖然 以清華大學原科中心為基礎已建立講師群,但仍希望未 來能配合不同對象的教案設計,將教案留給當地的老師 沿用,本計畫僅在每年寒暑假進行種子教師的培訓或教 案更新,如此才能透過類似灑種子的方式,成為全面式 的輻射推廣教育。

#### II. 主要內容

本計畫基於一般師生及民眾無法透過適合的管道 學習及獲得輻射基本知識下,將過去清大原子科普教育 團隊在計畫支持努力下所產出的資源進行新增、改善及 整合,希望社會各界能透過我們的努力,更清楚了解原 子能及輻射相關知識。 本計畫藉由先前計畫的經驗並調整今年的計畫方 向,具體的方法主要包括:(1)設計原子能科普教案;(2) 持續推動認識原子能相關知識之基礎課程及活動;(3)持 續辦理及支援營隊活動;(4)持續辦理及培訓 K12 種子教 師課程;(5)持續進行應邀社會各界需求,辦理演講活動 及輻射度量儀器體驗實驗;(6)探索社會各界需求以精進 教案及活動設計。各項目標執行成果說明如下:

#### 1. 設計原子能科普教案:

在原子能科普教育活動中,我們在輻射基本知識推廣及普級 子能科普教育活動中,我們在輻射基本知識推廣及普級 化於社會各年齡中的經驗回饋,總計設計出四個教案, 包括:(1)根據曾辦理之「知輻習輻,核家平安 Q&A」演 講、活動及園遊會的經驗,設計開發出「校園尋寶遊戲 --動手量輻射」教案;(2)根據曾辦理之「知輻習輻,核 家平安 Q&A」演講及現場學員提問與經驗回饋,彙整出 「認識輻射懶人包--原子能科普知識問答集冊」教案;(3) 將上述問答集冊及動手量輻射教案中,有關輻射及原子 能簡易小知識提出,並仿效「誰是物質王?」桌遊,設 計開發原子能科普知識樸克牌桌遊「誰是輻射王?」的 雛形;(4)在現有清華大學原科中心的參訪活動中,增列 課程講座,彙整成「原子科學探奇之旅」活動教案,提 供課程活動選單,依參訪學校的需求提供課程,並擬定 實驗紀錄與活動學習單。

#### 2. 持續推動認識原子能相關知識之基礎課程及活動:

此項基礎課程,將著重在於 K12(國中小及高中)學 生族群推廣。本計畫針對國中、國小學生活動主要是將 本團隊所開發的簡易輻射度量儀器及商用輻射偵測儀 器帶往各級學校(主要著重在國中、小學的推廣),將上 述所設計的「校園尋寶遊戲--動手量輻射」活動、再搭配 適合各年級程度及需求所推出相對應的演講課程。

本計畫今年推出「2019 知輻習輻,核家平安 Q&A」 免費講座,內容主要聚焦在認識輻射方面(包括:輻射 來源、應用、可能危害、及輻射防護...),進行方式則以 說故事的方式來進行、並搭配相對應的網路新聞媒體事 件來導引學生自問自答,以求進行方式能達到知識化卻 又不失趣味化的目標。活動進行的中場休息時間則進行 校園輻射尋寶遊戲,利用簡易輻射測量儀器讓學生尋找 校園的每個角落,除了讓學生對於學習環境的背景輻射 有所認識之外,也讓學生了解生活中無所不在的天然輻 射、以及天然輻射的主要來源。

本年度在國中、國小的推廣部分總計舉辦 18 場次 (國小4場、國中14場),參與師生總計1340人,各項 統計資料如下表1、活動照片如下圖1所示。

表1:「2019 知輻習輻,核家平安 Q&A」活動統計

日期	地點	人數(男/女)
108/01/02	桃園高原國小	66人(34/32)
108/01/15	臺北永建國小	77人(33/44)
108/01/17	新竹建功國小	23人(12/11)
108/03/11	新竹建功國小	49人(26/23)
總	恩人數-國小	215 人
(男:女	=48.8% : 51.2%)	(105/110)

108/05/22	新北八里國中	85人(45/40)
108/06/13	高雄溪埔國中	68人(37/31)
108/06/14	高雄大社國中	124人(64/60)
108/07/02	花蓮鳳林國中	80人(40/40)
108/07/03	花蓮化仁國中	51 人(27/24)
108/08/08	高雄南隆國中	45 人(18/27)
108/09/16	金門金湖國中	77 人(42/35)
108/09/17	金門金寧國中小	132人(69/63)
108/09/18	金門金沙國中	88人(56/32)
108/09/25	臺南仁德文賢國 中	76人(45/31)
108/09/26	高雄龍肚國中	80人(43/37)
108/10/17	新北雙溪高中	64 人 (31/34)
108/10/18	新北貢寮國中	<b>62</b> 人 (39/23)
108/11/06	彰化原斗國中	93人(46/47)
總人數統計-國中 (里:廿=535%:465%)		1125 人 (602/523)



圖1:「知輻習輻,核家平安Q&A」活動照片彙整

針對高中生部分,本計畫利用過去所執行教學的經驗基礎,並在今年度將原子能相關進階知識、原子能民 生應用、核子設施參觀及輻射量測及體驗活動設計改良 成教案,設計開發以高中生為主的活動「原子能科學探 奇之旅」。活動內容包含三大部分:(a)演講課程(如:輻 射基本知識、輻射應用、輻射防護、認識核能及其應用、 核設施除役、核廢料介紹及處理...等)、(b)實驗課程(動 手量環境輻射、輻射屏蔽、輻射強度與距離的關係、放 射性元素輻射線種類...等)、(c)參訪活動(清華 THOR、 BNCT、THMER、Co60 照射場及全身計測室...等),詳細的課程選單如下圖 2 所示。

課程-A	人在「輻」中要知「輻」
演講 (1~2小時)	輻射因為看不到、摸不到、聞不到的特性,導致一般人對輻射心生 恐懼。但其實我們的生活中本來就充斥著各種天然輻射,甚至為了 特定目的而使用人造輻射。但到底輻射在哪裡,你知道嗎? 1. 介紹生活中的輻射來源。 2. 介紹輻射的各種應用。 3. 瞭解輻射的風險。 4. 瞭解輻射的基本防護。
課程-B	THOR的前世今生-認識核子反應器及其應用
演講 (1~2小時)	清華水池式反應器(THOR)是目前台灣唯一的研究用核子反應器 其運轉原理與一般核能發電廠相同:透過THOR的參訪活動,可以 了解核能發電的基本原理,也會對於核能安全有更進一步的認識。 此外,核能除了發電之外還可做為其他用注,你知道多小呢? 1.核能知多少? 2.核能安全設計。 3.核能的醫學用途(BNCT介紹)。
課程-C	THMER的前世今生談核設施除役
演講 (1~2小時)	<ul> <li>清華大學移動教學反應器(THMER)是一座小型核子反應爐,安裝在一輛特製反應器拖車上,由於國內科技發展轉型,THMER已於民國92年完成除役,並於107年轉為固定點教學車,車內蘊藏著許多設備及用途,你知道多少呢?</li> <li>1.核能知多少?</li> <li>2. THMER的安全設計。</li> <li>3. THMER的用途。</li> <li>4. THMER的除役</li> </ul>
課程-D	何處是兒家?誠實面對放射性廢棄物
演講 (1~2小時)	放射性廢棄物是目前臺灣新聞中的爭議性話題,其對我們生活的影 響常令國人注目。然而放射性廢棄物的來源除了核電廠外,還有哪 裡呢?其處置方式,你知道多少呢? 1. 認識放射性廢棄物。 2. 放射性廢棄物的來源。 3. 放射性廢棄物的處置。
課程-E	小心變成蜘蛛人 – 動手量輻射
實驗 (1~2小時)	藉由動手做實驗的樂趣‧讓我們知「輻」「習」輻‧ 1. 輻射的發現。 2. 蓋格計數器的誕生及其原理。 3. DIY—組装簡易蓋格計數器。 4. 輻射量測實驗。
課程-F	別人到不了的打卡點-參觀『清華大學原科中心設施』
參觀 (2小時)	<ul> <li>了解輻射基本知識與應用後,我們將實地參觀清華原子科學中心設施,藉由親身接觸,讓我們更能從中得到寶貴的經驗。</li> <li>&gt;THOR參觀(30-45min)。</li> <li>&gt;THMER參觀(30-45min)。</li> <li>&gt;BNCT參觀(30-45min)。</li> <li>&gt;站60照射場 參觀(30-45min)。</li> <li>&gt;全身計測室 參觀及體驗(30-45min)。</li> </ul>

圖 2:「原子能科學探奇之旅」課程選單

今年度總計舉辦 11 場次活動,參與人數共 589 人 (男生:337 人,女生:252 人),活動統計如下表 2、 活動照片彙整如下圖 3。活動結束後,我們將活動課程 內容及教案留給有需求的師生,並提供網路上有關原子 能知識的訊息,將研發的實驗教材推薦給高中自然學科 的老師,在與不同老師的交流下逐步調整課程內容、深 度及廣度,以適應不同對象並在不同場合使用,致力於 讓全國高中高職的自然科學教師皆可容易使用本團隊 設計之課程及教案。 表 2:「2019 原子能科學探奇之旅」活動統計

农2·2017赤了肥料手体可~松」。出现他们		
日期	参訪學校	人數(男/女)
108/01/05	觀音高中師生	81 人(42/39)
108/01/18	秀峰高中師生	77人(40/37)
108/01/21	彰化高中師生	39人(38/1)
108/01/22	大溪高中師生	35人(19/16)
108/01/29	景文高中師生	51人(35/16)
108/03/30	竹東高中師生	31人(23/8)
108/04/03	通識中心課程學生	39人(17/22)
108/04/11	裕德高中師生	35 人(23/12)
108/06/11	壽山高中師生	43 人(22/21)
108/11/02	師大附中師生	65人(31/34)
108/11/12	虎尾高中師生	93人(47/46)
總人數 (男:女=57.2%:42.8%)		589 人 (337/252)



圖 3:「原子能科學探奇之旅」活動照片彙整

#### 3. 持續辦理及支援營隊活動:

在各級學校開學上課期間,本計畫主要以辦理演講 活動為主,活動時間通常為2個小時左右(單日可完成); 然而為了讓學生或親子族群能有更多機會延續學習原 子能科普知識的熱誠及連結相關科學知識,激發學生對 於學習科學知識的興趣,我們將所計設的教案及課程 (如:認識輻射、動手量輻射體驗活動...等),特別在寒、 暑假期間或需求單位可安排的時間,與合作單位聯合辦 理營隊活動。

今年度主要與臺南兒童科學館(辦理寒假營)>臺中 科博館(辦理暑假營)>臺北天文館、行政院農委會蓮華 池及特生中心及三所國小(其中新竹玉峰國小是與清大
原住民文化社第二次合作),透過辦理兩天營隊活動的 方式,將原子科學帶入偏鄉地區原住民部落學校,透過 此活動讓原子能科普知識推廣及學習能變得更為有趣、 豐富且多元。今年度本計畫與合作單位成功辦理的營隊 活動為5場次,參與人數共309人(男生:160人,女 生:149人),活動統計如下表3、活動照片如下圖4。

表	3	:	Г	原	子ź	斜	學	科	普	誉	隊	I	活動	統	計
---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	----	---	---

日期	地點(活動名稱)	人數(男/女)						
100/00/01	臺南兒童科學館	25 人						
108/02/01	(元素帝國)	(15/10)						
	臺南兒童科學館	04.7						
108/02/20	(	94 入						
100/02/20	(ホホイト夜三福石工へ	(45/49)						
108/04/27-	彰化漢寶國小(天文館星	110 人						
108/04/28	空小學暨原子科普活動)	(60/50)						
	臺中科博館及車籠埔國							
108/07/22-	區、農委會蓮華池及特	50 人						
108/07/24	生中心	(25/25)						
	(科蓮特科暑期營隊)							
108/11/23-	新竹玉峰國小	30 人						
108/11/24	(原子能科普推廣營隊)	(15/15)						
	總人數							
(男:	女=51.8%:48.2%)	(160/149)						



圖 4:「原子科學科普營隊」活動照片彙整

#### 4. 持續辦理及培訓 K12 種子教師課程:

在 K12 教育之中,授課教師需對於原子能知識有基本認識,才有機會傳授正確的觀念給學生。因此本計畫透過之前建立起與 K12 學校聯繫的管道,利用 K12 教師每年須參與研習及時數的需求,將本計畫所研發的課程、實驗儀器及教案推廣於 K12 學校理科老師或有興趣協助原子能推廣教師。而本年度與中南部地區科學輔導團隊合作,辦理適合教職員的「知輻習輻,核家平安 Q&A」講座,希望透過此研習讓更多 K12 師生對於輻射及核能議題能多一份關心並適度提高原子能相關授課比例。另

外,本計畫也和新竹消防局及臺中科博館合作,透過辦 理演講方式,讓許多有興趣的職員及退休教師能有機會 參與原子能科普,促成日後合作的機會。

本計畫今年辦理的活動總計 6 場次,參與人數共 156 人 (男生:86 人,女生:70 人),活動統計如下表 4、活動照片如下圖 5。

表4:「單位培訓/教師研習」活動統計

日期	地點(活動名稱)	人數(男/女)
108/01/28	新竹市消防局消防員 (單位培訓)	35人(28/7)
108/03/14	台南新興國中教職員 (教師研習)	26人(15/11)
108/03/20	高雄瑞祥國小教職員 (教師研習)	42人(12/30)
108/03/23	台中科博志工及職員 (志工研習)	10人(7/3)
108/05/29	屏東建國國小教職員 (教師研習)	22 人 (11/11)
108/06/26	雲林虎尾教職員 (教師研習)	21人(13/8)
(田・	總人數	156人
(男・う	$f = 51.3\% \cdot 48.7\%$	(80/76)



圖 5:「單位培訓/教師研習」活動照片彙整

## 持續進行應邀社會各界需求,辦理演講活動及輻射度 量儀器體驗實驗:

在過去幾年計畫之中,所辦理的原子能科普活動推 廣對象,著重較多心力於 K12 學生及學生族群的推廣, 但我們同時也接觸到許多家長、社會人士對於原子能科 普知識的好奇與疑惑,然而社會大眾並不知道何種管道 可協助非專業人士進行此類相關知識的諮詢及學習,因 此今年在基於多元族群推廣目標下,除了原本合作對象 外,我們新增了多個合作單位共同來推廣原子能科普知 識,主要推廣內容是將計畫所研發的儀器及教案,調整 為適合一般大眾、多元族群學習的課程。

本計畫與明基友達基金會竹苗輔導團隊及教育部

偏鄉數位應用推動計畫教室合作,辦理適合偏鄉地區客 家族群、樂齡族群、外籍看護、原住民族等少數族群的 教案課程「輻射的深情告白」,推廣主要內容有:輻射基 礎認識、生活中的輻射(含核安食品安全)、輻射的應用、 輻射的防護、核設施介紹及放射性廢棄物的認識,並使 用核研所及團隊研發儀器動手量環境中的輻射、原能會 官方 APP 及原子能 APP 遊戲學習知識,讓學習過程簡 單、輕鬆又有趣,解答了學員原先對輻射的疑慮也提升 民眾對相關議題的認知。

在經費考量下,我們先在臨近清大的竹苗鄉鎮市地 區進行推廣,本活動總計舉辦24 場次,參與人數共446 人(男生:99人,女生:347人),相關活動統計如下表 5、活動照片如下圖6。

表	5	:	Γ	輻	射	的	深	情	告	白	1	活動	統	눍
~~~	-			<b>TH</b>	~11		1/10	1/2	<u> </u>	-		14 3/1	12 U	

日期	地點	人數(男、女)
108/03/21	頭屋數位機會中心	22人(7/15)
108/03/22	北埔數位機會中心	20人(7/13)
108/03/28	頭屋數位機會中心	22人(7/15)
108/03/29	北埔數位機會中心	20人(7/13)
108/04/15	芎林數位機會中心	16人(3/13)
108/04/17	三灣數位機會中心	24 人(4/20)
108/04/18	公館數位機會中心	21 人(5/16)
108/04/22	芎林數位機會中心	17人(3/14)
108/04/23	三灣數位機會中心	24 人(4/20)
108/05/07	新埔數位機會中心	18人(2/16)
108/05/14	新埔數位機會中心	18人(2/16)
108/05/21	銅鑼數位機會中心	15人(2/13)
108/05/23	泰安數位機會中心	12人(7/5)
108/05/24	通霄數位機會中心	15人(2/13)
108/05/28	銅鑼數位機會中心	15人(1/14)
108/05/30	泰安數位機會中心	15人(3/12)
108/05/31	通霄數位機會中心	15人(2/13)
108/06/05	關西數位機會中心	20人(4/16)
108/06/06	關西數位機會中心	20人(4/16)
108/07/04	新埔鹿鳴社區	35人(14/21)
108/07/04	苑裡數位機會中心	15人(2/13)
108/07/15	橫山數位機會中心	16人(2/14)
108/07/17	橫山數位機會中心	16人(2/14)
108/07/18	苑裡數位機會中心	15人(3/12)
(里:+	總人數 = 22.2%:77.8%)	446人 (99/347)



圖 6:「輻射的深情告白」活動照片彙整

## 探索社會各界需求並取得合作管道以精進教案及活動設計:

在教案的開發、演講及諸多的活動辦理下,得到外 界對於計畫內容的許多回饋,對於這些建議,我們逐步 根據社會不同族群之需求調整教案內容及活動方式,以 求能以更為貼近民眾生活動經驗及能理解之方式及方 向,讓更多人能知道及了解原子能相關知識及應用。

在辦理活動之餘,本計畫也參與原子能相關單位、 合作單位所辦理之研習、訓練、會議及討論...等,希望 透過不同形式的參與取得未來計畫合作管道,使原子能 科普推廣能更廣泛推廣於社會當中,而合作過程也有利 於精進教案內容及活動設計,讓社會不同族群、對象都 能有機會接觸及學習到輻射及原子能知識。今年本團隊 的交流場次統計如附表 6、活動照片彙整如附圖 7。

表	6	: Г	行動	科教	館科	學巡	迴教	育	活動	<b>b</b> 統計
---	---	-----	----	----	----	----	----	---	----	-------------

日期	地點	活動名稱
108/07/12-	國立臺灣科學	2019 科學玩意節
108/07/14	教育館	活動
108/07/22-	古井田師約	第59屆全國中小
108/07/28	同雄茂見毘	學科學展覽會
108/11/07-	新竹自強國中	2019 行動科學館
108/11/09	園遊會	科學巡迴教育活動



圖 7:「行動科教館科學巡迴教育」活動照片彙整

## III. 結果與討論

本計畫主要是因應不同族群來設計教案,做為推廣輻 射教育的用途。總結 2019 年的輻射教育推廣場次說明 如下:

- 以校園尋寶遊戲為主題,針對國中/國小師生設計「動 手量輻射」教案,再結合「2019知輻習輻/核家平安 Q&A」演講。此活動共辦理18場次(國小4場、國 中18場)。
- 以清華大學原科中心相關核設施為基礎,設計結合演 講、實驗、參訪的活動、針對高中生設計「2019 原子 科學探奇之旅」教案。此活動共辦理11 場次。
- 利用寒暑假期間與其他團體/組織合作辦理營隊活動,主要推廣於親子及學生族群,共辦理5場次。
- 4. 本計畫因應 K12 教師每年有研習時數的需求,而辦 理 K12 教師及職員之研習,此研習過後也將教案及 研發之實驗儀器模組留給當地教師或轉推薦給其它 自然科學教師使用,以培圳未來原子科學種子教師的 可能,共辦理6場次。
- 5. 本計畫也應其它產官學組織、科教單位等邀請,推廣 授課對象於社會多元族群、偏鄉地區居民、學生團體、 一般民眾之原子能科普教育推廣講座、活動、實驗、 園遊會及營隊等,共同辦理了共63 場次(明基友達 24 場、吉娃斯13 場、臺中社大2 場、科博館21 場、 科教館3 場)。

本計畫依據不同場合及不同族群需求,適當調整/結 合教案內容,讓更多民眾能藉此多元的學習方式,了解 輻射基礎知識,解除過往對於輻射過度擔心及恐懼、以 及以偏概全錯誤認知,達到推廣輻射教育的目的。

## IV. 結論

本計畫對於未來的展望,將著重在以下幾點:

- 將計畫所研發之教案、實驗及課程透過不同活動型式 推廣於社會各族群中,希望能藉此增加彼此多向交流, 讓社會不同族群都能有機會接觸及參與原子能相關 議題及事務的機會,以提升社會整體對於輻射及核能 的正面價值觀。
- 本計畫全力推廣原子能科普知識教育,為顧及偏鄉地 區教育、平衡城鄉差距及性別平等教育,當繼續取得 與更多社教單位、產官學術單位的合作,以讓科普知 識推廣能擴散到全台各地。
- 輻射教育推廣是一種長期且持續性的計畫,除了向下 扎根之外,如何透過活動與意見建議及回饋,逐步調 整溝通內容與方式,才能有機會讓正確的輻射知識傳 遞到民眾的觀念之中。

今年本計畫已完成之推廣對象使用臺灣地圖表述如 圖 8 所示。



圖 8:2019 年計畫完成之推廣對象圖示

## 北投石產區天然環境輻射探討及其推廣教材製作

Investigation and Creation of Educational Materials for Radioactivity in Natural

Environment of Producing Area of Hokutolite in Taiwan

計畫編號:MOST 108-NU -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:趙君行、丁健益、李佩倫

計畫參與人員:黃韋綸、錢冠丞、賴柏傑、陳有歲、康綾珍、陳靖垟

執行單位:南華大學自然生物科技系

#### 摘要

本計畫針對北投石產區之天然放射性物質及環境 輻射進行調查,以提升民眾對於天然放射性物質、當地 背景輻射及輻射安全之認識,以促進我國輻安管理之提 升與民眾參與度。此外,本計畫亦於實驗室及溫泉水中 探討北投石之生成條件,以提供復育北投石條件之參考 本研究發現,北投石產區採樣地區土壤之<sup>238</sup>U活度無顯 著趨勢,但以地熱谷附近較高,<sup>232</sup>Th 活度則由地熱谷至 北投溪下游呈現下降趨勢,且其活度遠高於<sup>238</sup>U活度。 水體溫度由地熱谷至北投溪下游大致呈現逐漸下降之 趨勢,最高溫(約為 73℃)出現在地熱谷內, pH 值由地熱 谷至北投溪下游大致呈現逐漸上升之趨勢,最低值(約為 0.8)出現在地熱谷內,採樣地區之水體 Eh 值>0,顯示該 區水體環境為氧化態。水體之總有機碳含量大致上由地 熱谷至北投溪下游呈現上升趨勢,且在公共使用建築附 近總有機碳含量突然升高,可呈現人為活動的影響。在 某些採樣點之水體中可發現 Pb<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ba<sup>2+</sup>、 Fe<sup>3+</sup>,水體之 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度大致上由地熱谷(>2100 ppm) 至北投溪下游(>610 ppm)呈現下降趨勢,水體之<sup>226</sup>Ra 僅 在少數地點測得,<sup>228</sup>Ra 活度高於<sup>226</sup>Ra,土壤之<sup>238</sup>U活 度無顯著趨勢,但以地熱谷附近較高(>31 Bq/kg),<sup>232</sup>Th 活度則由地熱谷至北投溪下游呈現下降趨勢,且其活度 (>190 Bq/kg)遠高於<sup>238</sup>U活度。由土壤(底泥)之<sup>40</sup>K、<sup>238</sup>U 及 <sup>232</sup>Th 活度估算地表天然放射性核種貢獻之有效劑量 率約為 0.020 ±0.001 ~0.982 ±0.032 (µSv/h),以地熱谷 北側(G1)、地熱谷北側(G3)和北投石產出區域(M6)之劑 量率較高。北投石之生成實驗發現,宜先讓安山岩產生 皮殼,將其置放在水流可噴濺且岩石上部露出水面之環 境中較易生成北投石。

關鍵詞:背景輻射、北投石、有效劑量、地熱谷、 輻射安全、放射性。

#### Abstract

To promote the public's knowledge toward naturally occurring radioactive materials (NORM), background radiation as well as radiation safety, we aim to measure environmental radioactivity and dose in the production area of hokutolite area so that to enhance the management of radiation safety and public participation in Taiwan. In addition, the optimal condition for hokutolite formation was investigated in lab and hot spring water for restoration of hokutolite. The <sup>238</sup>U activity in soil revealed insignificant

tendency along the area from Geothermal Valley toward downstream Beitou Creek, which was highest at Geothermal Valley. The <sup>232</sup>Th activity in soil decreased from Geothermal Valley toward downstream Beitou Creek, which was much higher than 238U. The water temperature decreased from Geothermal Valley toward downstream Beitou Creek and the highest value (~73 °C) occurred at Geothermal Valley. The pH exhibited inverse tendency with water temperature, and the lowest value (0.8) appeared at Geothermal Valley. The redox potential (Eh>0) represented the water environment was oxidative. Total organic carbon (TC) increased from Geothermal Valley toward downstream Beitou Creek and increased abruptly at public used building, which indicated effect of human activities. The  $Pb^{2+}$   $\ Ca^{2+}$   $\$  $Mg^{2+}$  ·  $Ba^{2+}$  ·  $Fe^{3+}$  cations were found in water at some sampling sites. The major anions were Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, which decreased from Geothermal Valley (>2100 ppm) toward downstream Beitou Creek (610 ppm). The <sup>226</sup>Ra was found at a few site, and <sup>22</sup>8Ra was higher than <sup>226</sup>Ra. In soil, the <sup>238</sup>U activity was highest at Geothermal Valley (>31 Bq/kg) and revealed insignificant tendency along the area from Geothermal Valley toward downstream Beitou Creek. The <sup>232</sup>Th activity (>190 Bq/kg) decreased from Geothermal Valley toward downstream Beitou Creek and was much higher than <sup>238</sup>U. Dose rate contribution of natural radionuclides in soil of ground surface was estimated to be 0.020 ±0.001 ~0.982 ±0.032 (  $\mu$  Sv/h), with the peak values found at the northern Geothermal Valley (G1), southern Geothermal Valley (G3) and the production area of hokutolite (M6). The test of hokutolite formation revealed that hokutolite was easier formed by generating deposited hull on the andesite rock and placed by exposing the upper part to the air where could be splashed by hot spring water.

Keywords: background radiation, hokutolite, effective dose, Geothermal Valley, radiation safety, radioactivity.

## I. 前言

北投石於發現於在北投溫泉入流之北投溪下游 150-400 公尺處,全球僅發現於台灣的北投溫泉與日本 秋田縣的玉川溫泉。北投石由於具有來自鐳同位素之放 射性而聞名,日本並將之指定為「特別視為天然紀念物」, 並保護其產區環境;反觀國內,北投石並未受到重視與 保護,近三十年來由於盜採與河道整治,原先溪床中許 多附著北投石之大礫石已不見蹤影,大礫石的消失可能 因為在夏季溪流湍急時缺乏阻擋屏蔽而影響其他安山 岩小礫石上北投石之生成;此外,溫泉池放流水之改變, 以及溫泉旅館和民家之放流水可能其生成環境化學特 性之改變(Lin & Tsai, 2009; Lin & Tsai, 2012),導致北投 石之消失。近來,由於北投石生成之環境已然變遷,欲 復育北投石可於實驗室中利用其主要成份模擬北投石 生成環境,進而探討影響北投石生成之因子及復育條件。 Su 等人(Su et al., 2002)在實驗室中利用水熱法 (hydrothermal process)以 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液並摻雜 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>合成北投石,發現合成 之晶體中具有亮帶與暗帶結構,且暗帶中富含鐵而亮帶 中則缺乏鐵,但北投溫泉當地水質之影響則尚未考量。

由於北投石屬於鉛質重晶石,為重晶石(BaSO4)與硫 酸鉛礦 (PbSO4)的共沉澱結晶物,呈乳白色至黄褐色之 六面菱形晶體 (陳惠芬,2009),多生成於堅硬的新鮮白 化安山岩表面的黄鉀鐵礬(Jarosite; KFe3(SO4)2(OH)6)上, 故其生成亦影響北投石之復育, Bigham 等人(2010)將 2-40°C之硫酸溶液中以 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、 Fe2(SO4)3·n-hydrate (約 21 % H2O)在 pH 2.2 合成黃鉀鐵 礬,歷時10天。黃鉀鐵礬之生長溫度約為80-100°C, pH 值< 2.5 (Das et al., 1996)。先前 Momoshima 等人 (Momoshima et al., 1997)已針對北投石之化學成分利用 ICP-AES 和 γ 光譜進行分析,並比較 <sup>228</sup>Ra 及 <sup>226</sup>Ra 之 活度,發現其中間層(Ba,Pb)SO4之比例較低且 Ba 和 Pb 之比例有變化,顯示其成長條件有顯著變化。此外,根 據先前之研究結果顯示,該處底泥含有微量之天然放射 性元素,主要以鈾系及釷系之核種為主,其成分及含量 簡列如表(1),且與水體環境中之化學條件有關 (Lin & Tsai, 2012) •

$^{226}$ Ra(Bq/g)	(Ba/Pb) <sub>mole</sub>	Source
28-86	1.02-2.73	Momoshima et al., 1997. J. Environ. Radioact.
56-69	1.52-2.26	Tomita et al., 2006. J. Radioanal. Nucl. Chem.
52-85	/	Saito & Nagai, 2007. J. Radioanal. Nucl. Chem.
40-65	1.81-3.24	Chao et al., 2009. Appl. Radiat. Isot.

表1、北投石中<sup>226</sup>Ra之含量

另一方面,由於國內「核科學教育(nuclear science education)」不普及(林群智,2006),民眾對於核能、輻射等知識的認知往往受到不恰當的引喻或刻意扭曲,導致國人耳聞輻射即慌張驚恐,然而,地球自形成以來便處在來自宇宙、地表放射性核種及氣氣所釋出之輻射所壟罩的背景環境中,有些地區的輻射水平甚至比一般地區高數倍至數百倍。其中,Ramsar 當地有 50 個溫泉源頭,溫泉水中之鐳核種於下游之小溪中形成石灰華沈積並被當地居民就地取材製成泥磚作為建材使用,由其背景輻射所推算之年輻射吸收劑量高達 260 mSv/y (Ghiassi-nejad et al., 2002),約為輻射作人員年劑量限度(20 mSv/y)之 13 倍。北投石雖然具有放射性,但根據北投溫泉博物館先前展示之北投石(800 kg)的表面最高劑量低於 1.5  $\mu$  Sv/h,考量在當地環境中之接觸時間,對一

般民眾而言並不具有威脅。

因此,為能釐清民眾之疑慮,提升民眾對天然放射 性物質及背景輻射之認識,本研究亦擬藉由對北投石產 地(包括地熱谷溫泉)之背景輻射進行量測與劑量評估, 探討遊客及當地居民之體外劑量,藉此讓民眾了解當地 天然背景輻射及其安全性。近年來,地熱谷溫泉池在放 水口引入北投溪溪水,且已清運部分底泥,該池溫泉池 直至下游北投石產地之溫泉水及底泥之鈾系及針系的 放射性核種活度推估已經改變,為了將來北投石復育工 作之準備,有必要重新測量以了解當地環境目前之水體 環境的物理及化學性質,並根據其核種分布之情形了解 環境變遷的情形。

## Ⅱ. 主要內容

本計畫將實驗內容區分為三部分,分別為:(i)北投 石產地水體之物理條件(如:溫度、電導度、總溶解固形物) 及溫泉水主要化學成分之分析;(ii)產地溫泉水及底泥中 長半衰期鈾釷系列核種之分析;(iii)於實驗室中進行北 投石生成因子及復育條件之探討。

## i. 產地水體之物理條件及溫泉水主要化學成分之分析

將於各採樣點(圖 1)以溫度計及儀器量測水體之溫 度、酸鹼度、氧化還原電位(ORP)、電導度及總有機碳(TC) 之含量。此外,並以 ICP-AES 量測水體所含  $Pb^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ba^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 之含量,並以沉澱法測量 CI<sup>-</sup>、 $SO4^{2+}$ 等 離子之含量。



#### ii 温泉水及底泥中鈾釷系列及人工放射性核種之分析

將各採樣點之水體以硫酸鋇沉澱法濃集鐳同位素 (<sup>226</sup>Ra/<sup>228</sup>Ra),經HNO<sub>3</sub>溶解後裝罐並置放一個月後,使 <sup>214</sup>Bi與<sup>226</sup>Ra以及<sup>228</sup>Ac與<sup>228</sup>Ra達長期放射性平衡,並 以加馬能譜量測<sup>214</sup>Bi與<sup>228</sup>Ac以求得<sup>226</sup>Ra及<sup>228</sup>Ra活度。另外,各採樣點之土壤(底泥)則於實驗室先置予100 °C之烘箱內乾燥,再以內徑2mm之濾網篩選,裝罐後 置放一個月,使<sup>214</sup>Bi與<sup>226</sup>Ra以及<sup>228</sup>Ac與<sup>228</sup>Ra達長 期放射性平衡,並以純鍺偵檢器執行加馬能譜分析,計 測<sup>214</sup>Bi及<sup>228</sup>Ac放射性活度以求得<sup>226</sup>Ra及<sup>228</sup>Ra 達長 同時測量<sup>7</sup>Be、<sup>40</sup>K、<sup>137</sup>Cs及人工放射性核種(如:<sup>60</sup>Co、 <sup>54</sup>Mn、<sup>137</sup>Cs)等活度,進而以地表土壤測得K-40,Th-232與U-238 核種的活度依式1(ICRU,1994)估 算地表天然放射性核種的貢獻。Da為吸收劑量, 單位為 $\mu$  Gy·h<sup>-1</sup>。Cr 與 CTh、Cu分別代表 <sup>40</sup>K 與 <sup>232</sup>Th、<sup>238</sup>U 系列於土壤中的活度(Bq/kg),式[1] 經 轉 換 後 為 有 效 劑 量 率 (式 [2]; UNSCEAR, 2000),由土壤中人工放射性核種所 造成的地表直接輻射劑量如式[3]所估算,式 中,S=0.36(佔用因數)、K=80 kg/m<sup>2</sup>、H=劑量 轉換因數(mSv.m<sup>2</sup>/Bq.h)、A=土壤中人工放射性 核種活度(Bq/kg)。

$$D_a = (0.0417C\kappa + 0.604C\tau + 0.462Cu) \times 10^{-3}$$
 [1]

$$D_1(\mu Sv/h) = D_a \times 0.7 \times 10^{\circ} \qquad [2]$$

 $D_2(\mu Sv/h) = S \times K \times H \times A \times 10^{-3}$  [3]

#### iii於實驗室中進行北投石生成因子及復育條件之探討

本實驗擬以低溫黃鉀鐵礬合成法(low-temperature jarosite synthesis; Driscoll & Leinz, 2005), 將安山岩基材 置於燒杯中,加入100mL原始溫泉水、Fe2(SO4)3·nH2O (約 17.2 g)和 KOH(約 5.6 g), 在加熱板上以 95°C 加熱 並緩慢攪拌3小時,之後移置烘箱中以60°C加熱12小 時。重複上述步驟2次,但改變 KOH 重量(分別為2.8、 1.4g)進行黃鉀鐵礬合成,並分別以 SEM-EDS 判定晶體 外觀及半定量分析,並以 X 光繞射分析(X-ray diffraction analysis, XRD) 鑑定其結構。將上述產物再以 Ba(NO3-)2、 Pb(NO3-)2 和 (NH4)2SO4 標準溶液為前驅物,並摻雜 Fe(NO3<sup>-</sup>)3標準溶液,利用水熱法進行晶體成長實驗,生 長時間 4 天,並探討 Ba<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>及 SO4<sup>2+</sup> 濃度以及參考 目前研究計畫所得結果,探討在不同溫度(30-95)及 pH 值(0.8-3)下對北投石晶體成長之效應。另以地熱谷溫泉 池中湧出之原始泉水,經調整上述 SO42-濃度、溫度及 pH 值後,探討北投石晶體成長之效應,並與上述以標準溶 液合成晶體之方法進行比較,並利用 Raman 光譜分析晶 體結構及方向。

## III. 結果與討論 i. 產地水體之物理條件及溫泉水主要化學成分之分析

根據溫泉水水體分析實驗結果(圖2),得知採樣地區 之水體溫度由地熱谷至北投溪下游大致呈現逐漸下降 之趨勢,最高溫出現在地熱谷內,該區域地下熱水湧出 形成溫泉水。下游在 H4 至 M5 區域為北投石產區,溫 度約為 30-40 ℃。



圖 2、調查區之採樣點水體的水溫變化

然而,根據圖(3)可觀察到採樣地區之水體 pH 值由 地熱谷至北投溪下游大致呈現逐漸上升之趨勢,最低值 出現在地熱谷內,G16、S1、M6 代表幾處溫泉旅館廢水 注入之位置,最高值約 pH3。其中,藍框標記代表幾處 外來水注入之位置(最高值約 pH3),根據比較無外來水 注入之位置得知注入水對 pH 的影響決定於其本身的酸 鹼值;在溫泉旅館注水處反應其溫泉水混自來水/地下水 的多寡。



圖 3、調查區之採樣點水體的 pH 值變化

根據圖(4)得知採樣地區之水體 Eh 值>0,顯示該區 水體環境為氧化態,但未呈現明顯變化趨勢。藉由溫度、 pH、Eh 之分析結果配合比對可看出外來水的性質和影 響,如外來水溫度與原水差異大時,將產生注水處附近 溫度較大之變化。另外,根據圖(5)可觀察到採樣地區水 體之總有機碳(TC)含量大致上由地熱谷至北投溪下游呈 現上升趨勢,而在 S1、H4、L1 及 P3 之採樣點附近均有 旅館、飯店或圖書館等公共用水排入,可能因此使總有 機碳含量突然升高,故可藉由水體中總有機碳含量呈現 人為活動的影響,特別是在 S1 下游為北投石產生之區 域。此外,採樣地區之水體 Eh 值>0,顯示該區水體環 境為氧化態,TC 較高處附近 Eh 較低,推測為微生物分 解有機物產生之硫化物所影響。



圖 4、調查區之採樣點水體的 Eh 值變化



採樣地區水體之 Pb<sup>2+、</sup>Ca<sup>2+、</sup>Mg<sup>2+、</sup>Ba<sup>2+、</sup>Fe<sup>3+、</sup>Cl<sup>-、</sup> SO4<sup>2-</sup>含量大致上由地熱谷至北投溪下游呈現下降趨勢 (圖 6 和 7)。其中,[Fe<sup>3+</sup>]、[Pb<sup>2+</sup>]與 2012 年之研究結果 相近,但沿溪流之變化較大;[Ca<sup>2+</sup>]、[Ba<sup>2+</sup>]大幅升高。 另外,[Cl<sup>-</sup>]、[SO4<sup>2-</sup>]趨勢相近,在 G16 點因上游生活廢 水注入導致其濃度降低,並與 2012 年之研究結果相近 (Lin and Tsai, 2012),但在銀星橋下游之濃度較高,且在 匯入北投溪上游生活廢水處發生明顯的稀釋作用。SO4<sup>2-</sup> 含量



圖 6、調查區之採樣點水體的主要陽離子濃度



#### ii. 產地溫泉水及底泥中長半衰期鈾釷系列核種之分析

根據溫泉水及底泥中長半衰期鈾釷系列核種之分 析結果,得知採樣地區水體之<sup>226</sup>Ra 活度僅 G1、G3 和 G15 測得,而<sup>228</sup>Ra 活度除了 G12、G14、G16、S3 外, 大致上由地熱谷至北投溪下游呈現下降趨勢,且活度高 於<sup>226</sup>Ra 活度(圖 8),此現象與先前之研究結果相近(Lin and Tsai, 2012)。另外,採樣地區土壤(底泥)之<sup>238</sup>U 活度 無顯著趨勢,但以地熱谷附近較高;<sup>232</sup>Th 活度則由地熱 谷至北投溪下游呈現下降趨勢,且其活度遠高於<sup>238</sup>U 活 度(圖 9)。土壤(底泥)的<sup>40</sup>K、<sup>238</sup>U 及<sup>232</sup>Th 活度如圖 9 所 示,<sup>232</sup>Th 活度以地熱谷北側(G1)、地熱谷北側(G3)和北 投石產出區域(M6)較高,<sup>40</sup>K、<sup>238</sup>U 則在 G3 及 M6 較高。 <sup>7</sup>Be、<sup>60</sup>Co和<sup>137</sup>Cs人工核種則未測得(低於偵測極限)。



圖 9、採樣點土壤(底泥)的 <sup>40</sup>K、<sup>238</sup>U 及 <sup>232</sup>Th 活度

由土壤(底泥)之  $^{40}$ K、 $^{238}$ U及  $^{232}$ Th 活度估算地表天 然放射性核種貢獻之有效劑量率約為 0.020 ±0.001 ~0.982 ±0.032 ( $\mu$ Sv/h),以地熱谷北側(G1)、地熱谷北 側(G3)和北投石產出區域(M6)之劑量率較高,但仍與臺 灣其他地區環境直接輻射劑量率偵測結果(行政院原子 能委員會輻射偵測中心,2018)相近。



圖 10、由土壤(底泥)的 <sup>40</sup>K、<sup>238</sup>U 及 <sup>232</sup>Th 活度估算之 地表天然放射性核種貢獻的有 效 劑 量 率

#### iii. 於實驗室中進行北投石生成因子及復育條件之探討

根據使用溫泉水復育條件實驗結果,得知利用純溫 泉水以室溫蒸發結晶,所得之晶體為淡黃色透明長柱體 (圖 10);利用天然泉水加熱至 90 ℃持溫 5 小時,並與 Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>液體滴定,立即產生大量白色沈澱 物,由於硫酸鋇(鉛)之 Ksp 極小,故此晶體多為粉狀, 後取 200 mL 澄清液體與安山岩以 88 - 90 ℃恆溫加蓋, 並持溫 50 小時後,於安山岩表面以透明長柱狀石膏晶 體析出(圖 11),此與地熱谷泉水區岩石表面多石膏晶體 相符,但並未發現晶體狀之北投石。



圖 11、利用原始溫泉水以室溫蒸發法形成的淡黃色晶體



圖 11、長柱狀透明石膏晶體於安山岩表面之結晶樣態

由於使用天然泉水無法控制及純化學成份,因此均 往往結晶出其它礦物,故本研究更改合成方法及流程: 先以(NH4)2SO4、[Ba(NO3)2+Pb(NO3)2+Fe(NO3)2]熱水滴 定生長法於含有黃鐵鉀礬之安山岩,其研究結果顯示於 岩體表面結晶北投石之晶種(微晶)(圖 12)。



圖 12、生長前後岩體表面之比較圖,生長後可見白色 晶體點狀分佈

此外,再與於北投溪所採集之標本一同放置於天然 場域(青磺泉),模擬天然北投石晶體生長條件,根據觀測 生長情形(圖 13), 可明顯觀察到置於水面上 H1-H4 的表 面均長出晶體,但大塊岩石之陰暗處所放之 H6-H8,因 長期浸於水面下,故未見晶體之生長,僅有 H6 表面出 現黃鉀鐵礬,此因 H6 為安山岩,而 H7-H8 均為礫岩, 且因無蒸發作用,導致未見任何晶體之生成,但此與當 地耆老所記憶之在陰暗溝內可見比較多之北投石晶體 有異,因此推測若未來於在陰暗溝內復育區之岩石擺設, 仍需將岩石半露於水面之上,以利蒸發作用之生成。其 中,H1為自然界所取已帶有皮殼之標本,將其置於水流 未直接沖擊之背濺區生長,其上部岩石酸蝕嚴重(未長期 泡水),與下部呈二層色澤,接近水面區以下晶體較大顆, 顏色較深褐,經拉曼光譜分析得知為北投石晶體(圖 14)。 由此生長行為,確如前人研究及北投當地人的記憶推測 北投石的生長環境可能是「因為北投溪的河道有數道小 瀑布,在飛濺的過程中水分蒸發,加上溪水溫度下降(約 在 42-60 ℃)」。因此,未來於自然場域的岩石擺設宜設 計在溪水的飛濺區,放置大顆岩石,並使其半露於水面, 利用蒸發效應使晶體於晶種上生長。則 H3 原為實驗室 之晶種標本,但未有明顯之皮殼;H2(含黃鉀鐵礬)及 H4(含石膏晶體)則是分別有部份晶體於表面之標本。然 而,不管原先為何種標本,位於水流沖擊區且半露於水

面上,露出水面處均形成明顯之皮殼,此為北投石生長 之重要基礎,雖於拉曼分析上,並未發現北投石晶體之 圖譜,但有可能是因為晶體太小太少,且皮殼之圖譜背 景值相當高,以至無法由圖譜上呈現峰線,但由於可短 期產生所需之皮殼,故可利用其生成後,置於溪水的飛 濺區,以供北投石晶體可附著生長。此外,在其水面處 均長出透明晶體於拉曼分析上其主要成份為石膏(圖 14)。



圖 13、曝曬於陽光下各樣本的生長情形





## IV. 結論

本研究成果可做為未來北投石復育之基礎,以及因 應北投石復育所需之地熱谷區域周邊環境規劃的參考, 由土壤中的貢獻估算該區域地表天然放射性核種貢獻 之有效劑量率仍與臺灣其他地區直接量測之數值相近。 行政院原子能委員會輻射偵測中心,中華民國 107 年 2 月。居民或旅客之有效劑量(<0.088±0.013 mSv/year), 發現與全球平均劑量範圍無異,故釐清當地可能對該地 之輻射水平安全之疑慮,提高將來復育北投石時民眾之 支持,對於北投地熱谷及其周邊之觀光發展亦能有所助 益。

## 參考文獻

- Bigham JM, Jones FS, Özkaya B, Sahinkaya E, Puhakka JA, Tuovinen OH, 2010. Characterization of jarosites produced by chemical synthesis over a temperature gradient from 2 to 40 °C. International Journal of Mineral Processing 94(3 – 4): 121-128.
- Chao JH, Chuang CY, Yeh SA, Wu JM, 2009. Relationship between radioactivity of radium and concentrations of barium and lead in hokutolite. Applied Radiation and Isotopes 67: 650 – 653.
- Das G.K., Acharya S., Anand S., Das R.P., 1996. Jarosites: A Review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 16(3):185-210. DOI: 10.1080/08827509708914135
- Driscoll RL, Leinz RW, 2005. Methods for Synthesis of Some Jarosites. Techniques and Methods 5-D1. U.S. Geological Survey, Virginia USA.
- Ghiassi-nejad M, Mortazavi SM, Cameron JR, Niroomandrad A, Karam PA, 2002. Very high background radiation areas of Ramsar, Iran: preliminary biological studies. Health Physics 82(1), 87-93.
- Lin CC\*, Tsai TL, 2012. Impact of water environmental change and migration of radionuclides on hokutolite conservation in Peito (Taiwan), Radiochimica Acta 100(5), 329-338.
- Lin CC, Tsai TL, 2009. Interpretation for the vanishment of hokutolite from aquatic parameters and radiochemical processes in the environment of Peito Hot Spring Area (Taiwan). Applied Radiation and Isotopes 68(2), 345-354.
- Momoshima N, Nita J, Maeda Y, Sugihara S, Shinno I, Matsuoka N, Huang CW, 1997. Chemical composition and radioactivity in hokutolite (plumbian barite) collected at Peito hot spring, Taiwan. Journal of Environmental Radioactivity 37(1): 85-99.
- Saito, T., Nagai, H., 2007. Estimation of growth rate of hokutolite from Tamagawa hot-spring, Akita, Japan. J. Radioanal. Nucl. Chem. 272, 443 - 446.
- Su HY, Lee JS, Yui SC, 2002. Dopant Effect on Hokutolite Crystals Synthesized with Hydrothermal Process. Western Pacific Earth Sciences 2(3): 301-318.
- Tomita J., Sakaguchi A., Yamamoto M., 2006. Hokutolite collected from riverbed at Peitou Hot Spring in Taiwan: With emphasis on radiochemical studies. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 270(3), 567 – 574.
- 林群智,2006。由核電爭議談核科學主軸之通識教育,通 識教育與跨域研究,第一卷(第一期),19-36。
- 陳惠芬,2009。北投石,台灣大百科全書(available from http://nrch.culture.tw/twpedia.aspx?id=9436)。 臺灣地區放射性落塵與食品調查半年報,行政院原子
- 能委員會輻射偵測中心 ,中華民國 107 年 2 月。

## 核能電廠緊急應變計畫區核安社區風險治理之研究

# Study on nuclear safety communication in the neighborhood of the third nuclear power plant

計畫編號: MOST 108-NU-E-006-001-NU 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

我國能源政策主要是依據「能源發展綱領」為政策 遵循方針,建構安全穩定、效率運用以及潔淨環境的能 源供需系統。而由於能源政策目前尚有核能發電選項核 能,且因民眾意識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。 本研究目的為提昇核能電廠鄰近社區民眾的核能安全 認知,並建立正確並普及核安防護知識,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,也讓民眾能在參與以 及了解政府政策過程中,更易了解政策執行內涵,依此 提升社區治理效能。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。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;納入在地元素以及核子事故緊急應變措施, 並將相關資訊以看板、餐墊以及袋子等形式產出,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。

#### Abstract

Taiwan's energy policy is mainly based on "Energy Development Guideline", which the purpose is to build a safe, stable, effective use and clean environment energy supply and demand system. Energy policy may be revised due to several reasons. 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. Owing to the public concerns, public safety issues have been valued increasingly, especially for communities surrounding 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. The research methods include case studies, archival research, field research and action research. Through the implementation of

interactive discussions with community members, the preparation of nuclear energy safety and disaster prevention maps is completed; local elements and emergency measures for nuclear accidents are in-corporated, and related information is displayed on boards, placemats 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 disasters could be improved in a gradual manner.

**Keywords**: nuclear safety, public communication, public participation, community

## I. 前言

台灣核准設置核能電廠迄今已近 50 年,然民眾長 期對於核能或輻射安全的防護資訊接受度與理解度僅 有一定限度,對於相關資訊的傳遞與接收,存有接收不 對等以及認知上的差異的狀況,是實務上實際遭遇現況。 因此,本研究計畫欲探討的問題是針對屏東縣恆春鎮核 三廠鄰近社區,設計符合社區民眾需求,融入在地特色 的核能安全防災手繪地圖。依據研究團隊過去的經驗, 這份手繪地圖具有社區總體營造的意涵,包含有社區地 方特色,並同時呈現核能安全緊急應變資訊於地圖上。 本研究主要目的,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;意即提供核三廠鄰近社區目 前需要的核安資訊,避免不必要的生命財產威脅或損失。 因此,本研究的操作模式除切合公部門欲強化的公眾參 與施政主軸外,更期待透過本研究能解決長久以來公部 門對於相關政策及資訊傳遞不佳的問題,包括民眾對於 相關政策的接收程度不高或不正確的情形能否改善,以 及資訊傳遞模式與內容呈現或傳遞方式能否更為友善 等。而主要目的除可普及民眾對於核子事故的防護知識 外,更可提昇核能電廠鄰近社區對於核能安全的知能, 透過社區防災與減災的理念,最終可達成強化社區緊急 應變能力之效益。

#### Ⅱ. 主要內容

本研究是以核三廠緊急應變計畫區範圍內的鄰里 社區:恆春鎮茄湖里以及鵝鑾里,以及滿州鄉的港口村及 永靖村等社區民眾為主要對象,透過與民眾溝通,瞭解 目前核能電廠緊急應變範圍內核能安全知識,以及社區 對於可能面臨的風險該如何因應。藉由與社區民眾溝通, 以掌握核能安全資訊於社區傳遞的實際困境與民眾需 求。本計畫是以資訊傳遞、公開透明、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,為防災社區建構基礎;於討論過程 中強化相關觀念,降低民眾對於核子事故發生時過多的 恐慌,亦可促成民眾日常生活習慣的養成,民眾對於緊 急應變計畫內容瞭解程度越高,則日常生活防救災觀念 與知能亦可隨之提升。

本年度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,有效提昇核能電廠鄰 近社區核能安全認知,普及民眾對於核子事故民眾防護 知識,強化社區緊急應變能力。為滿足各社區不同需求, 實際操作方式將融合在地元素與空間環境,為核能安全 緊急應變地圖繪製主要參酌;其繪製內容是以里為單位, 除標註在地民眾熟悉標的或特色等,同時包含核能安全 緊急應變措施,並與地方政府過去產出的防災地圖有所 區別。政府機關過去所產出的地圖,為求呈現資訊一致, 常忽略在地特質與環境紋理等特性;且所呈現的資訊專 業度過高,造成民眾可讀性低的狀況;故為改善上揭公 部門所繪製防災地圖的劣勢,藉由現地勘查蒐集資料方 式,再依據各(里)社區呈現特色與特質,納入社區民眾意 見,繪製產出不同導向的防災地圖,除可強化社區民眾 對於核能安全的風險意識,亦能深化恆春社區風險治理 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。

本研究目的主要以核能三廠鄰近社區民眾為主要 對象,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。而產出的防災 地圖文宣,不論是餐墊、東口袋或防災地圖看板的設置, 均與民眾日常生活結合,除具備實用性外,呈現內容更 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 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,針對既有政策提出建議或 相關對策,達成社區風險治理成效。目前因社會趨勢使 然,民眾參與公共事務的機會增多;再加上社會結構的 複雜化,公務體系等相關單位囿於人力與資源,公共事 務的推動更需納入民眾參與,使得政策內容以及資訊傳 遞方式更貼近民眾需求,始能有助於公共政策的推行。

本研究主要以核能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等的理解程度。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並強化緊急應變能力。

本計畫工作項目是以核能三廠周遭社區為場域,其 執行方式是參照過去準則,以及曾遭遇困境進行修正與 調整。過去在操作相關計畫時,所遭遇問題通常是與社 區利害關係人的溝通協調部分,渠等對於相關議題多半 敏感或不願意多談論,故在初始期間需花費更多資源與 時間,此是為過去計畫執行時屢遭遇困境;然由於現已 有過去的溝通經驗以及對於相關利害關係人的掌握程 度,產出有其他里別之客製化防災地圖文宣品可供參酌 研究團隊是扮演社區與機關間重要溝通管道,且協力資 訊的傳遞與觀念養成,以爭取社區認同與支持。本年度 計畫執行已排除上述相關困境,而行動研究法仍是目前 執行此類型計畫的主軸,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。





## 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,透過符合各村里需求的文宣產出品,包括餐 墊、束口袋以及看板,呈現各村、里防災地圖資訊。其 產出的文宣及內容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。而納入核能三廠鄰近社區的參與, 與民眾相互溝通瞭解其需求,其可達成民眾核能安全知 識提昇之成效外,亦具備有教育宣導意義,是為本年度 計畫主要重點與成效。

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、政府政策以 及其他應用四部分論述。在學術研究方面:由於社區公 共參與及溝通機制的建構,可進而瞭解中央政府與地方 對於核能安全的應變之實際運作與政策的差異。在國家 發展方面:由於本研究是與政府核能安全策略有關,於 核能三廠鄰近社區進行民眾參與工作坊以及社區防災 意識的建置,且截至本年度已執行完畢核三廠緊急應變 計畫區內之村里,可成為其他核能電廠周遭社區典範, 藉以建立全國性公共參與溝通機制,故研究結果與成效 對於國家有關核能安全策略制定具備實質貢獻。而在政 府政策方面:研究過程中,可發現目前的核能安全政策 執行與實際狀況有部分差異,因此對於實務單位,將有 具體策略或行動方案之建言與回饋。至於在其它應用部 分:除公部門外亦可將核能政策規劃建議提供予相關團 體。透過與過去其它社區或未來同區域不同社區之案例 比較,作為後續發展核能公共參與與溝通模式之參考。

## 參考文獻

- 於幼華(2005),台灣環境議題特論,台北:五南出 版社。
- [2] 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。
- [3] 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。

- [4] 楊永年(2020),救災體系,台北:五南出版社。
- [5] 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。
- [6] 蔡清田(2000),教育行動研究,台北:五南出版社。
- [7] 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。
- [8] 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.
- [9] Federal Emergency Management Agency.(2011). A Whole Community Approach to Emergency Management: Principles, Themes, and Pathways for Action. FEMA: Washington, D.C.
- [10] Jang, L.J, & Wang, J.J. (2009). Disaster Resilience in a Hakka Community in Taiwan. Journal of Pacific Rim Psychology. 3. 2. 55 – 65.
- [11] 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.
- [12] McIntyre, A.(2008). Participatory Action Research. CA: SAGE.
- [13] O'Leary, M. Ed. (2004). The First 72 Hours: A Community Approach to Disaster Preparedness. New York: iUniverse.
- [14] 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.