

103 年原子能科技學術合作研究計畫 成果發表會論文集



主辦單位：科技部、行政院原子能委員會

協辦單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

中華民國 104 年 7 月 17 日

目錄

議程及場地	iii
核能安全科技	
※沸水式核電廠蒸汽乾燥器銲道龜裂之破裂力學評估	1
※Early HWC/ONLC 對沸水式反應器起爐應力腐蝕龜裂防制效益之評估研究	4
※動態應變時效對冷作加工鎳基合金 600 於模擬 BWR 加氫水化學水質環境之劣化行為研究	7
※啟動過程中實施 HWC/ONLC 對於沸水式反應器不銹鋼組件應力腐蝕龜裂防制研究	13
※各種運轉與貯存條件下的核燃料機械行為模擬分析	16
※反應器壓熱震熱水流分析技術建立與暫態事故對壓力容器熱流影響評估	20
※燃料束 CFD 分析之紊流模式適用性與保守性研究	25
※核能電廠意外事件中氫爆效應評估	33
※反應器壓力熱震問題之決定性與機率破裂力學分析程序與相關法規研究	38
※核電廠電子元件輻射傷害之可靠性研究	41
※海嘯對結構物衝擊分析與審查技術建立之研究	48
放射性物料安全科技	
※以無機凝集劑處理水中模擬放射性懸浮顆粒及其減容技術研究	60
※核能電廠除役過程中高活度廢液處理與減廢之審查技術評估	66
※化學氧化還原金屬除污以及廢液再生處理系統技術開發	83
※應用模擬移動床技術於放射性廢酸處理回收技術開發	87
※放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料吸附參數研究	92
※核電廠除役時用過燃料池意外事故安全研究	98
※使用無線射頻辨識(RFID)技術於放射性廢棄物之環境	103
※先進國家地底實驗室岩力實驗之規劃與成果研析	104
輻射防護與放射醫學科技(I)	
※高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立	109
※專用型乳房掃描儀 ^{18}F -FDG 造影之最適劑量研究	114
※Image-based 個人化核醫治療劑量評估系統開發之先期研究	117
※福島核電廠事故對台灣環境輻射之影響評估	120
※醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接研究 (I)	121
※給核醫成像應用之多通道讀出系統晶片電路設計	125
※SPECT 腦造影之臨床影像定量分析研究和影像處理工具之開發	137
※Ga-68-PET 專屬核種發生器之智財權與商業運轉模式之研究	141
輻射防護與放射醫學科技(II)	
※建立初發性精神分裂症患者在多巴胺轉運體定量造影分析模式	144
※多巴胺轉運體與血中神經元滋養因子在初發精神分裂症患者藥物治療前後之變化	147
※微波熱增敏治療藥物開發與臨床前療效評估研究	151
※大中華及國際核子醫學領域之應用與分析(II)	152
※核子醫學領域之應用發展趨勢與國內外市場分析	154
※高階醫用複合生長因子骨材符合臨床前測試基準之規劃研究	156
※高階醫用複合生長因子骨材臨床前體內植入試驗之應用療效及安全性評估	158
輻射防護與放射醫學科技(III)	
※發展 liposomal Re-188 運用於卵巢癌治療：實驗動物模式建立與療效評估	161
※多模組分子影像評估銻-188-微脂體結合化療藥物於轉移性肺癌及頭頸癌之療效	163

※以氟-18-FP-(+)DTBZ PET 及碘-123-FP-CIT SPECT 評估和厚朴酚衍生物治療 6-OHDA 誘發巴金森氏病動物模型之神經修復效果.....	166
※結合銻-188-微脂體、化學治療、標靶藥物及遠隔放射治療應用於轉移性大腸直腸及口腔癌治療.....	168
※ ^{99m} Tc-Sestamibi 心肌灌注 SPECT 血流儲存指標的定量與臨床驗證.....	174
※發展銻-111 標誌蛙皮素胜肽類似物於金奈米粒子之技術及其生物體分佈.....	177
※運用 4-[¹⁸ F]-ADAM/animal PET 研究中藥的神經保護作用(I).....	179
人才培訓與風險溝通	
※從國際組織之標準檢驗我國核能安全管制與緊急應變之法制密度.....	182
※推動核安管制資訊公開與建立危機溝通路徑圖之研究.....	190
※關鍵群體之低放射性核廢料認知與風險溝通平台.....	195
※核能安全民意調查之執行與研析.....	200
※工程科系學生之「安全核能學程」課程推廣 (II).....	205
※核能安全與輻射防護東部科普實務推動.....	211
※編撰核工原理概論中文教材並推廣核能知識.....	214
※科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(I).....	216
※核能安全知識之整合行銷傳播策略.....	219
※核能意外事故銻輻射防護暨安全處置低階放射性廢棄物之編輯研究.....	223
※輻射與核子事故防護教材互動式學習網站之研究.....	226
※民眾緊急應變電子書 APP 開發.....	230

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

首頁>施政與法規>施政績效>原子能科技學術合作研究計畫 項下下載

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

議程及場地

時間：104 年 07 月 17 日（星期五）

地點：劍潭海外青年活動中心教學大樓

（台北市中山北路四段 16 號）

會議議程

時間	議程	地點
08:30～09:20	報到	2 樓 325 室
09:20～10:30	開幕典禮	
09:20～09:30	開幕致詞	
09:30～10:30	劉紹臣院士－「台灣氣候變遷：衝擊、減緩、調適」專題演講	
10:30～10:40	中場休息	
10:40～12:00	分組成果發表(I)	各領域場地
12:00～13:00	綜合討論(午餐)	各領域場地
13:00～14:40	分組成果發表(II)	各領域場地
14:40～14:50	中場休息	
14:50～16:30	分組成果發表(III)	各領域場地

各領域場地

領域	地 點	時間
1.核能安全科技	2 樓 322 室	10:40~16:10
2.放射性物料安全科技	2 樓 323 室	10:40~14:40
3.輻射防護與放射醫學科技(I)	2 樓 324 室	10:40~14:40
4.輻射防護與放射醫學科技(II)	1 樓 313 室	10:40~14:40
5.輻射防護與放射醫學科技(III)	1 樓 314 室	10:40~14:40
6.人才培訓與風險溝通	2 樓 325 室	10:40~16:30

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 1：核能安全科技					
會場地點：2 樓 322 室					
場次	時間	評審 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分 組 發 表 I	10:40~11:00	張欣（*）、吳文方、陳建源、廖俐毅、張武侯	高進鎰	龍華科技大學 機械工程系	沸水式核電廠蒸汽乾燥器銲道龜裂之破裂力學評估
	11:00~11:20		王美雅	清華大學 原子科學技術中心	Early HWC/ONLC 對沸水式反應器起動階段之應力腐蝕龜裂防制效益模擬研究
	11:20~11:40		喻冀平	清華大學 核子工程與科學所	動態應變時效對冷作加工鎳基合金於模擬 BWR 加氫水化學之劣化行為研究
	11:40~12:00		葉宗洸	清華大學 核子工程與科學所	啟動過程中實施 HWC/ONLC 對於沸水式反應器不銹鋼組件應力腐蝕龜裂防制研究
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分 組 發 表 II	13:00~13:20		陳紹文	清華大學 核子工程與科學所	各種運轉與貯存條件下的核燃料機械行為模擬分析
	13:20~13:40		施純寬	清華大學 核子工程與科學所	反應器壓熱震熱水流分析技術建立與暫態事故對壓力容器熱流影響評估
	13:40~14:00		馮玉明	清華大學 核子工程與科學所	燃料束 CFD 分析之紊流模式適用性與保守性研究
	14:00~14:20		白寶實	清華大學 核子工程與科學所	核能電廠意外事件中氫爆效應評估
	14:20~14:40		綜 合 討 論		
	14:40~14:50		中 場 休 息		
分 組 發 表 III	14:50~15:10		丁 鯤	龍華科技大學 化工與材料工程系	反應器壓力熱震問題之決定性與機率破裂力學分析程序與相關法規研究
	15:10~15:30		張廖貴術	清華大學 工程與系統科學系	核電廠電子元件輻射傷害之可靠性研究
	15:30~15:50		吳祚任	中央大學 水文與海洋科學所	海嘯對結構物衝擊分析與審查技術建立之研究
	15:50~16:10		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 2：放射性物料安全科技					
會場地點：2 樓 323 室					
場次	時間	評審 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分 組 發 表 I	10:40~11:00	邱賜聰（*）、陳渙東、黃慶村、陳鴻斌、魏聰揚	黃耀輝	成功大學 化學工程學系	以無機凝集劑處理水中模擬放射性懸浮顆粒及其減容技術研究
	11:00~11:20		劉文仁	義守大學 材料科學與工程學系	核能電廠除役過程中高活度廢液處理與減廢之審查技術評估
	11:20~11:40		王詩涵	義守大學 化學工程學系	化學氧化還原金屬除污以及廢液再生處理系統技術開發
	11:40~12:00		梁明在	義守大學 化學工程學系	應用模擬移動床技術於放射性廢酸處理回收技術開發
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分 組 發 表 II	13:00~13:20		吳銘志	成功大學 地球科學系	放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料吸附參數研究
	13:20~13:40		王曉剛	義守大學 機械與自動化工程系	核電廠除役時用過燃料池管制安全技術之研究
	13:40~14:00		王多柏	臺北科技大學 電子工程系	使用無線射頻辨識(RFID)技術於放射性廢棄物之環境
	14:00~14:20		楊長義	淡江大學 土木工程學系	先進國家地下實驗室岩力實驗之規劃與成果研析
	14:20~14:40		綜 合 討 論		

* 為該場會議主持人

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場次 3：輻射防護與放射醫學科技(I)					
會場地點：2 樓 324 室					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:40~11:00	黃景鐘（*）、邱志宏、張似璵、吳東信	許榮鈞	清華大學 核子工程與科學所	高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立
	11:00~11:20		鄭媚方	臺灣大學 醫學院放射線科	專用型乳房掃描儀 18F-FDG 造影之最適劑量研究
	11:20~11:40		莊克士	清華大學 生醫工程與環境科學系	Image-based 個人化核醫治療劑量評估系統開發之先期研究
	11:40~12:00		陳清江	義守大學 醫學影像暨放射科學系	福島核電廠事故對台灣地區環境輻射之影響評估
	12:00~13:00		綜合討論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		蘇振隆	中原大學 生物醫學工程學系	醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接研究
	13:20~13:40		盧志文	清華大學 工程與系統科學系	給核醫成像應用之多通道讀出系統晶片電路設計
	13:40~14:00		魏誠佑	彰濱秀傳紀念醫院 神經內科	SPECT 腦造影之臨床影像定量分析研究和影像處理工具之開發
	14:00~14:20		孫智麗	台灣經濟研究院 生物科技產業研究中心	Ga-68-PET 專屬核種發生器之智財權與商業運轉模式之研究
	14:20~14:40		綜合討論		

*為該場會議主持人

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場次 3：輻射防護與放射醫學科技(II)					
會場地點：1 樓 313 室					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:40~11:00	黃文盛(*)、林武智(*)、張正、周鳳英、王子威、陳榮治	王世楨	臺北榮民總醫院 核醫部	建立初發性精神分裂症患者在多巴胺轉運體定量造影分析模式
	11:00~11:20		周元華	臺北榮民總醫院 精神病部	多巴胺轉運體與血中神經元滋養因子在初發精神分裂症患者藥物治療前後之變化
	11:20~11:40		黃重傑	秀傳紀念醫院 外科	微波熱增敏治療藥物開發與臨床前療效評估研究
	11:40~13:00		綜合討論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		李碧芳	成功大學 醫學系核醫科	大中華及國際核子醫學領域之應用與分析(II)
	13:20~13:40		洪茂欽	慈濟技術學院 放射醫學科學所	核子醫學領域之應用發展趨勢與國內外市場分析
	13:40~14:00		陳天牧	國防醫學院 整形外科	高階醫用複合生長因子骨材符合臨床前測試基準之規劃研究
	14:00~14:20		曾靖嫻	臺北醫學大學 生醫材料暨組織工程 研究所	高階醫用複合生長因子骨材臨床前體內植入試驗之應用療效及安全性評估
	14:20~14:40		綜合討論		

*為該場會議主持人

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場次 3：輻射防護與放射醫學科技(III)					
會場地點：1 樓 314 室					
場次	時間	評審 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分 組 發 表 I	10:40~11:00	羅彩月(＊)、 程紹智、林昆儒、王信二	莊其穆	陽明大學 醫學系婦產學科	發展 liposomal Re-188 運用於卵 巢癌治療：實驗動物模式建立與 療效評估
	11:00~11:20		李易展	陽明大學 生物醫學影像暨放射系	多模組分子影像評估錄-188-微 脂體結合化療藥物於轉移性肺癌 及頭頸癌之療效
	11:20~11:40		魏孝萍	長庚大學 醫學影像暨放射科學系	以氟-18-FP-(+)DTBZ PET 及碘 -123-FP-CIT SPECT 評估和厚朴 酚衍生物治療 6-OHDA 誘發巴 金森氏病動物模型之神經修復效 果
	11:40~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分 組 發 表 II	13:00~13:20		陳裕仁	馬偕紀念醫院 放射腫瘤科	結合錄-188-微脂體、化學治療、 標靶藥物及遠隔放射治療應用於 轉移性大腸直腸及口腔癌治療
	13:20~13:40		吳道正	臺北榮民總醫院 內科部心臟內科	Tc-99m Sestamibi 心肌灌注 SPECT 血流儲存指標的定量與 臨床驗證
	13:40~14:00		陳傳霖	陽明大學 生物醫學影像暨放射系	發展銥-111 標誌蛙皮素胜肽類似 物於金奈米粒子之技術及其生物 體分佈
	14:00~14:20		馬國興	國防醫學院 生物及解剖學研究所	運用 4-[18F]-ADAM/animal PET 研究中藥的神經保護作用(I)
	14:20~14:40		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 6：人才培訓與風險溝通

會場地點：2 樓 325 室

場次	時間	評審 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:40~11:00	邵耀祖（*）、翁曉玲、王居卿、朱慶琪、張自立	程明修	東吳大學 法律學系	從國際組織之標準檢驗我國核能安全管理與緊急應變之法制密度
	11:00~11:20		高仁川	臺北大學 法律學系	推動核安管制資訊公開與建立危機溝通路徑圖之研究
	11:20~11:40		黃東益	政治大學 公共行政學系	關鍵群體之低放射性核廢料認知與風險溝通平台
	11:40~12:00		梁世武	世新大學 公共關係暨廣告學系	核能安全民意調查之執行與研析
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		楊文都	高雄應用科技大學 化材系	工程科系學生之「安全核能學程」課程推廣 (II)
	13:20~13:40		黃朝曦	國立宜蘭大學 資訊工程研究所	核能安全與輻射防護東部科普實務推動
	13:40~14:00		李境和	義守大學 醫學影像暨放射科學系	編撰核工原理概論中文教材並推廣核能知識
	14:00~14:20		李 敏	國立清華大學 工程與系統科學系	科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(I)
	14:20~14:40		綜 合 討 論		
	14:40~14:50		中 場 休 息		
分組發表 III	14:50~15:10		蔡智勇	臺北市立大學 教育學系	核能安全知識之整合行銷傳播策略
	15:10~15:30		張一知	臺灣師範大學 化學系	核能意外事故銻輻射防護暨安全處置低階放射性廢棄物之編輯研究
	15:30~15:50		古建國	臺北市立大學 應用物理暨化學系	輻射與核子事故防護教材互動式學習網站之研究
	15:50~16:10		陳彥均	龍華科技大學 多媒體與遊戲發展系	民眾緊急應變電子書 APP 開發
	16:10~16:30		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

沸水式核電廠蒸汽乾燥器銲道龜裂之破裂力學評估

Fracture Mechanics Evaluations of Weld Cracking in BWR Steam Dryer

計畫編號：103-2623-E-262 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：高進鎰

e-mail：kuenting@mail.lhu.edu.tw

計畫參與人員：蘇允良

執行單位：龍華科技大學機械工程系

摘要

沸水式核電廠蒸汽乾燥器銲道龜裂是一個美國核管單位所發布的重要議題，主蒸汽管生波共振也是造成蒸汽乾燥器破裂的一項原因。本報告主要闡述蒸汽乾燥器在承受主蒸汽管聲波共振下的評估流程，同時亦參考及整理國外針對發生聲波共振機制相關研究。而依據國內電廠型式，可依循評估流程研判是否可能發生聲波共振的狀況，同時可找出在特定的蒸汽流速下，共振發生時所產生的壓力波頻率。

此外，由於蒸汽乾燥器的幾何結構較為複雜，文中針對此進行有限元素模型合理之簡化，且進行模態分析以提取既有劣化紀錄的部位之自然振頻，藉以比對並假設其為當聲波共振時的壓力波頻率，故可反推共振下的蒸汽流速，提供電廠運轉參考。

關鍵詞：蒸汽乾燥器、聲波共振、有限元素

Abstract

Mark I steam dryer is not safety related components belong reactor internal, the design is based on ASME SECTION III, SUBSECTION NG. Recent 10 years, the steam dryers in Mark I plants have shown failure and cracks in the fillet welds and nearby structure. Extensive metallurgical and analytical evaluations (e.g., detailed finite element analyses, flow-induced vibration analyses, computational fluid dynamics analyses, 1:16 scale model testing, and acoustic circuit analyses) concluded that the root cause of this steam dryer failure and cracks were due to high cycle fatigue driven by flow induced vibrations associated with the higher steam flows during extended power uprate (EPU) conditions (~18% above the original rated power).

Indications were also identified in the Taiwan Chinshan Nuclear Power Plant Unit 2 steam dryer during April 2009 refueling outage steam dryer visual examinations. The evaluation of the structural integrity of steam dryer is very important to prevent the loose parts. This project will conduct the flaw evaluations of cracked steam dryer of Chinshan NPP considering fluid induced vibration, acoustic oscillation, dynamic analysis. The evaluation process will be established for reference of regulatory.

Keywords: steam dryer, acoustic fluctuating pressure, flaw evaluation, fatigue crack growth

I. 前言

本報告主要針對沸水式反應器(Boiling Water Reactor, 簡稱 BWR)之組件—蒸汽乾燥器(Steam Dryer)進行聲波共振結構完整性的分析與探討，該組件位於反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel)內部頂部位置，主要功能是再次驅除下方汽水分離器出口蒸汽的剩餘水分，迫使流進主蒸汽管的氣體呈乾燥狀態。而奇異公司(GE)所設計的蒸汽產生器屬於焊接結構，並不屬於反應器安全相關組件，其基本設計可以承受設計基準事件而不產生鬆脫件，但仍需考慮蒸汽乾燥器潛在劣化可能性，若因腐蝕、疲勞裂紋造成組件碎片，極有可能經過蒸汽分離器或噴射泵進入爐心。

參考蒸汽乾燥器之檢測紀錄及劣化歷史，美國 Quad Cities 電廠曾因運轉功率提升狀況下，檢測出蒸汽乾燥器產生裂紋的情形，奇異公司也因此發布了 SIL No. 644[1]破損肇因報告，基於此事件，美國電力研究院(EPRI)偕同奇異公司進行了相關問題的分析，並於 BWRVIP-139[2]報告中就針對各類型的蒸汽乾燥器，描述其組件的相對應力分布情形，而重點在於乾燥器外側表面；對於不同的乾燥器設計亦提出了詳細的檢測建議。

經由 Quad Cities 二號機蒸汽乾燥器評估過程，確認震盪負荷與反應器頂蓋/蒸汽管線/釋放閥之構造所導致的聲波共振(Acoustic Resonance)特性有關。因此本報告基於國內電廠安全性的考量，進行相關文獻及評估方法、流程之研究，同時配合國內電廠使用之機型，重新建構有限元素分析模型。而因蒸汽乾燥器結構較為複雜(具多孔板結構)，故亦針對模型合理性簡化加以探討，以期未來可依此為架構作更進一步之研究探討。

II. 蒸汽乾燥器次組件及其分析模型介紹

蒸汽乾燥器之氣櫃(Bank)是以平行的方式排列並焊於蓋板(Cover Plate)上，而蓋板週圍則焊於上支撐環(Upper Support Ring)，藉以傳遞氣櫃自重及所承受之外力負荷於上支撐環，而上支撐環結構藉由支撐支架(Lifting Rod)將整體負荷傳遞至反應器壓力槽，相關相對位置可參考圖 1 蒸汽乾燥器之組態[3]，外圍罩板(Bank Hood)主要為圓弧型式，氣櫃內部則具有垂直支撐罩板(Interior Vertical Hood Support Plate)，以焊接的方式緊繫外部罩板及氣櫃內部多片多孔板(Perforated Plate)，藉以提供氣櫃模組之勁度，而在多孔板下方則設計排水渠道(Drain Channel)與排水管相接。

2.1 氣櫃之多孔板與其等效實心板驗證

為探討蒸汽乾燥器之氣櫃內多孔板結構是否會影響整體組件勁度，導致分析模型無法反映出真正潛在之裂紋發生位置，故為求分析完整性，本報告亦針對單片多孔板幾何及其自然振動頻率進行分析。此外，為提高分析模型之分析效率，採用等效實心板的方式亦在本報告中說明。

蒸汽乾燥器氣櫃內的多孔板可以區分為兩種型式；分別為方形孔陣列(Square Penetration Pattern)以及三角形孔陣列(Triangular Penetration Pattern)，國內電廠所採用型式之蒸汽乾燥器屬於三角形孔陣列(參閱圖 2)。針對多孔板的部分，一般傳統設計均採用等效實心板模擬將是最佳的方式。依據 Kaap 等[4]以及 Myung、Seon [5]之文獻中提出了如何對多孔板殼進行獲取等效實心板殼的步驟，後者的研究是先數值計算得多孔圓柱殼與圓柱殼之間相同模態之共振頻率比值，而將頻率比值正歸化後，配合其與彈性係數(Elastic Constant)具有之比例關係，在各種孔帶減弱係數(ligament efficiency)變化下，經由統計迴歸的方式，獲得多孔板之楊式模數(Young's Modulus)與其等效實心板殼之經驗公式，該公式如下：

$$E^*/E = 0.1610 + 1.7421\phi - 20.365\phi^2 + 2.2733\phi^3 - 1.1471\phi^4 \quad (1)$$

其中 E^* 為等效實心板殼之楊氏模數， ϕ 為孔帶減弱係數(兩孔最短水平間距/兩孔圓心水平間距)。由於電廠所使用的蒸汽乾燥器型式以及其多孔板之設計尺寸(孔半徑、間距)已知，故將其帶入上式，可獲得等效之實心板的楊式模數。

該公式是由多孔圓柱殼推導得之，蒸汽乾燥器氣櫃多孔板則為平板，為探討精確性，本報告直接採用有限元素模型進行模態分析。圖 2 為有限元素模型，在相同尺寸(長與寬)、材料性質以及邊界條件下進行多孔板與實心板進行模態分析比較，圖 3-4 分別顯示使用實際多孔板模型與等效實心板模型之模態 1 及模態 3 的振幅。兩者的頻率及其比值結果整理於表 1，發現其比值結果皆約為 0.85。若依據設計圖之尺寸計算孔帶減弱係數 ϕ ，其值約為 0.65，將此值代入(1)式中，可得 $E^*/E=0.85$ ，也就是原始多孔板的楊氏模數乘上 0.85 後，即可採用等效實心板模擬。

2.2 蒸汽乾燥器有限元素分析模型

由於蒸汽乾燥器位於蒸氣流場環境，且其結構(板殼)複雜，故整體或局部受變動的外在負荷下，必須確認那些組件容易被低頻或高頻的負荷所激發。根據奇異公司針對美國 Quad Cities 電廠之蒸汽乾燥器評估過程，其認定外在變動負荷主要與反應器頂蓋、蒸汽管線以及安全釋壓閥(Safety and Relieve Valve, SRV)所導致的聲波(Acoustic)有關[6]，故本報告將以國外所分析之同型電廠進行分析驗證比較，藉此確認根據國內電廠使用之蒸汽乾燥器，依其設計型式所建立之有限元素模型是否符合正確的要求。

分析模型是以奇異公司(GE)所設計之 183-BWR/4 型為主，材質設定為 304 不銹鋼，分析範圍主要在於氣櫃、蓋板及上支撐環三種次組件，其中於氣櫃內部包含了垂直支撐罩板以及排水渠道。整體有限元素模型主要

採用軟體 ANSYS 建構，各乾燥器各部位組件是以三維板殼元素(Shell Element)為主，僅有支撐環的部分是使用三維實體元素(Solid Element)，如圖 5(底部仰視圖，含內部支撐罩板)所示。

III. 結果與討論

本節藉由有限元素模型在模態分析中，探討計算結果與奇異公司針對 BWR/4 型蒸汽乾燥器的結果加以比對，以確認本模型之適用性，未來可應用此模型進行相關之結構破裂力學分析。同時可界定蒸汽乾燥器各次組件在高低頻負荷(聲波共振)下被激發之可能性。

模態分析的結果如圖 6 所示，最大振幅出現於外罩板上，其振頻為 61.4Hz，與奇異公司針對 BWR/4 型蒸汽乾燥器的結果加以比對有些許差異(45.1Hz)，主因在於本模型的外罩板屬於弧形，而奇異公司建立的分析模型外罩板屬於斜狀罩板，雖屬同型的乾燥器具有氣櫃幾何上的差異。其次比對蓋板位置的自然振動頻率，奇異公司的計算結果約為 155Hz，而本分析結果為 161.9Hz，此結果則相當接近。同型之蒸汽乾燥器除了氣櫃外型不同外，其餘設計位置及幾何尺寸皆相同，此外，在底部渠道的自然振動頻率為 187.5Hz。

IV. 結論

本計畫進行多孔板以等效實心板的驗證分析，主要可應用於未來蒸汽乾燥器更進一步之反應譜分析。因量測聲波壓力不易執行，且蒸汽乾燥器位於反應器頂蓋位置，流體流場較為紊亂，藉此或許可引入隨機的概念建立功率密度函數(PSD)模擬可能之負載情形。

從另一個角度來看，當蒸汽流速的改變，Strouhal Number ($St \approx S_0$)以及支管內徑 d 不變的狀況下，其共振基頻便隨之成反比變化，藉此再由有限元素的模態分析的分析結果，探討蒸汽乾燥器在特定頻率下所對應的模態，確認次組件模態振幅反應位置是否可能發生潛在性之疲勞裂紋成長。

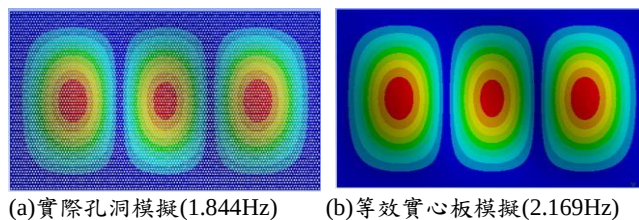
References

- [1] BWR steam dryer integrity, Services Information Letter, SIL 644, Rev.1, GE Nuclear Energy, November 9, 2004.
- [2] BWR Vessel and Internals Project: Steam Dryer Inspection and Flaw Evaluation Guidelines, EPRI, 2005.
- [3] Carlos Gavilan Moreno, Chapter 5, Turbulence, Vibrations, Noise and Fluid Instabilities. Practical Approach, "Computational Fluid Dynamics", book edited by Hyoung Woo Oh, ISBN 978-953-7619-59-6, Published: January 1, 2010 under CC BY-NC-SA 3.0 license.
- [4] D. L. Kaap, E. G. Lovell and R. L. Engelstad, "Natural Frequencies of Plates with Uniform Perforations", 16th International Modal Analysis Conference, p.1061-1067, 1998.

- [5] Myung Jo Jhung and Seon Oh Yu, "Study on Modal Characteristics of Perforated Shell Using Effective Young's Modulus," Nuclear Engineering and Design, Vol.241, p.2026-2033, 2011.
- [6] 翁炯立、張漢洲、劉家銓，核電廠主蒸汽管聲波共振評估，2012SIMULIA Regional User Meeting, 2012.

表 1 多孔板等效實心板模態分析比較

模態	共振頻率 f_p (多孔板)	共振頻率 f_s (實心板)	f_p/f_s
1	1.086	1.278	0.85
2	1.357	1.596	0.85
3	1.844	2.169	0.85
4	2.550	3.001	0.85
5	2.856	3.358	0.85
6	3.125	3.675	0.85
7	3.467	4.079	0.85
8	3.587	4.219	0.85
9	4.253	5.002	0.85
10	4.585	5.396	0.85
11	5.125	6.029	0.85
12	5.514	6.484	0.85
13	5.785	6.803	0.85
14	5.901	6.945	0.85
15	6.203	7.298	0.85
16	6.244	7.342	0.85
17	6.895	8.109	0.85
18	7.412	8.724	0.85
19	7.484	8.806	0.85
20	7.746	9.110	0.85



(a)實際孔洞模擬(1.844Hz) (b)等效實心板模擬(2.169Hz)

圖 4 多孔板第三模態

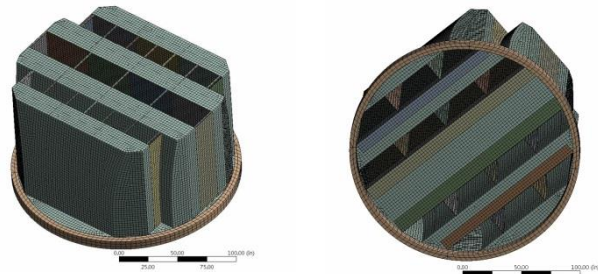
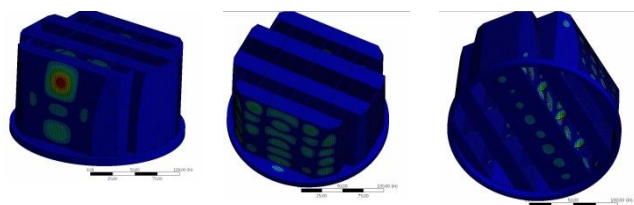


圖 5 蒸汽乾燥器有限元素模型



(a) 外罩板
67.4Hz

(b) 蓋板
161.3Hz

(c) 底部渠道
187.5Hz

圖 6 蒸汽乾燥器模態分析

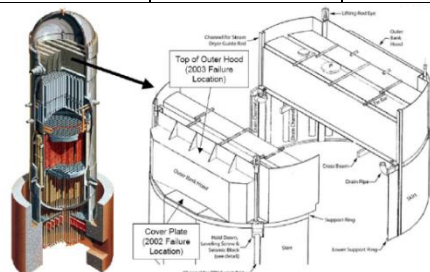


圖 1 沸水式反應器蒸汽乾燥器[3]

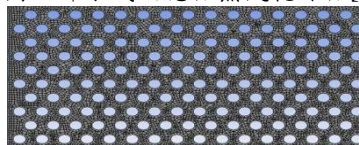
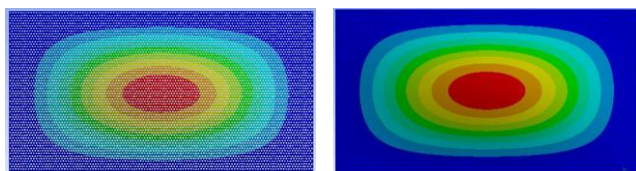


圖 2 多孔板模態分析之有限元素模型



(a)實際孔洞模擬(1.084Hz) (b)等效實心板模擬(1.278Hz)

圖 3 多孔板第一模態

Early HWC/ONLC 對沸水式反應器起爐應力腐蝕龜裂防制效益之評估研究

Assessing the Effectiveness of Early HWC/ONLC for IGSCC Mitigation in BWR Environments during Startup

計畫編號：103-NU-E-007-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王美雅

e-mail：meywang@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：葉宗洸、洪靚軒、李宗翰

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

基於沸水式反應器有限的現場水化學監測資料，起動時期不同功率變化對於前述 BWR 主循環水迴路還原氧化劑濃度與組件裂縫成長速率的影響目前僅能依賴數值模擬分析的方式進行評估。而本實驗室擁有具備此分析功能的工具-DEMACE。本研究針對沸水式反應器起動或停機過程中，如實施 HWC 時，評估組件材料實施 Pt 被覆後，分析主冷卻水迴路中關鍵氧化還原劑(氫、氧、過氧化氫)濃度、組件腐蝕電位與裂縫成長速率的變化情形。

關鍵詞：起動、停機、加氫水化學、應力腐蝕龜裂、裂縫成長速率、貴重金屬。

Abstract

In view of the limited, measurable water chemistry data, the impact of operating power level during plant start-up on the water chemistry and component corrosion in a BWR can only be theoretically evaluated through computer modeling. In this project, the well developed computer code DEMACE will be modified and used to investigate the impact of various power level on the redox species concentrations, electrochemical corrosion potential and crack growth rates of components in the primary coolant circuits of Taiwan BWRs during the startup and shutdown operation with EHWC.

Keywords: Start-up, Shutdown, Hydrogen Water Chemistry, Stress Corrosion Cracking, Crack Growth rate、Noble Metal.

I. 前言

近幾年來，為了解決壓力槽內部組件的劣化，各國研究機構無不投入極大心力來進行組件防蝕的研究。由於運轉中電廠內部組件不易更換，加氫水化學(Hydrogen Water Chemistry, HWC)技術即被廣泛應用[1-2]，降低組件材料的電化學腐蝕電位(Electrochemical Corrosion Potential, ECP)，藉以抑制 SCC 的發生。加氫水化學於 1970 年代在瑞典首先提出，80 年代進行測試，1984 年在美國首次商業應用，在 90 年代已被廣泛接受，成為 BWR 主冷卻水迴路組件抑制 SCC 產生的主要技術。目前全世界已有四十座以上的 BWR 電廠採用了加氫水化學技術。然而在實行數年後，發現採用中度或更高的注

氫量(通常大於 0.6 ppm)時，會有提昇主要蒸汽管路輻射劑量的副作用，輻射劑量提高主要來自 N16 增加，及因 Co60 析出而造成停機劑量的上升[3]，除此之外，HWC 對於壓力槽上方空間及側板上部過氧化氫濃度偏高的區域，仍然有 IGSCC 的問題發生[4]。目前有些 BWR 電廠則採取貴重金屬被覆配合低注氫技術，另外有些 BWR 電廠則已採用中度注氫的 HWC 技術。HWC 和貴重金屬被覆技術都必須配合注氫才能抑制 IGSCC，通常需要有效的飼水流量進入爐心才能開始注氫的過程。因此都會在爐水加熱後至正常操作的溫度才會開始加氫，HWC 現今只用於額定功率運轉操作或是爐心溫度達於 450 oF 以上(依 HWC 系統的設計而定)。台灣核一、二廠機組則等到功率提升至 90%後才開始實施注氫。而在上一個燃料周期結束後要再開始起動新一個燃料周期時，反應器爐水內含有大量殘存的過氧化氫及溶氧。已有實驗數據顯示在電廠起動(Start-up)時或是停機(Shutdown)過程的中間溫度比額定溫度的氧化性環境易造成較高的沿晶應力腐蝕龜裂速率[5]。參與 EPRI BWR 化學監測計畫的 BWR 電廠截至 2010 年 2 月，共有 46 座電廠實施 HWC 以抑制 IGSCC，其中 31 座採用貴重金屬技術，剩餘 15 座採用中度注氫技術。單純採用加氫水化學的電廠，為了能使爐水中的氧化劑能夠大量減少而使 ECP 降低，也許 2 ppm 的注氫量是必要的。透過貴重金屬被覆技術，可以降低注氫需求量至 0.2~0.4 ppm，但氫氧的比值要達到 2 以上才可，反之可能加劇組件腐蝕。HWC 配合貴重金屬被覆的防蝕方法，需在有氫注入的環境下才可發揮作用。當有足夠飼水開始注入爐心時，才有氫氣注入，從停機到啟動過程中因大量殘存的過氧化氫及溶氧，可能使得裂縫成長加速。實驗室系統測試的結果，採用經 NMCA 或 OLNC 處理的不銹鋼試片確實在 200 °F~400 °F 時確實可以達到氫氧原子比達二以上，而未被覆試片的 ECP 在同樣的條件下無法有效降低，可證明如果 BWR heat-up 或是 early start-up 時進行注氫，確實可以降低被覆 Pt 組件的 ECP。

II. 主要內容

基於沸水式反應器(BWR)有限的現場水化學監測資料，如要了解 BWR 起動期間或是低功率運轉時對於前述 BWR 在 NWC 與 HWC 狀態的水化學與組件腐蝕影響目前僅能依賴數值模擬分析的方式進行評估，而本實驗室擁有具備此分析功能的工具-DEMACE[11-13]。本計畫以一年的時間應用 DEMACE 程式，針對國內 BWR

核電廠，進行國內BWR核電廠實施起動或停機過程中，如同時實施HWC及NMCA/ONLC，評估組件材料實施Pt被覆後，個別水化學成分與IGSCC指標（電化學腐蝕電位與裂縫成長速率）變化的理論計算，分析主冷卻水迴路中關鍵氧化還原劑(氫、氧、過氧化氫)濃度、組件腐蝕電位與裂縫成長速率的變化情形分析。

本研究使用DEMACE進行BWR的水化學模擬時，將整個主冷卻水迴路區分成十二個區域，其他未列入的區域均已被簡化並納入十二個區域的爐水路徑長度考量中，以減低數值計算的複雜性。如圖1所示，整個迴路劃分為十二個區域。

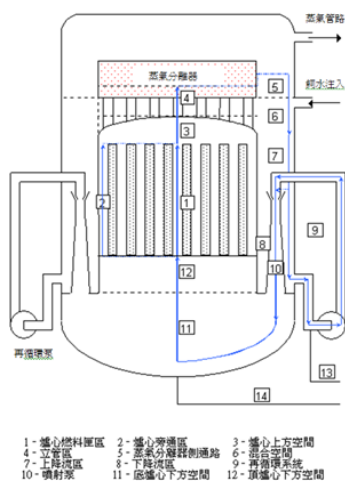


圖1、核電廠主冷卻水迴路壓力槽內部組件幾何位置示意圖

III. 結果與討論

核電廠於實施HWC下，與經Pt被覆後，針對其水化學以及組件腐蝕特性的變化進行研究。本階段考慮各氧化還原反應因Pt催化所受到的影響，採用各氧化還原反應在Pt實施後的 i_0 增值因數(FI)，如表1所示。另外，在Pt處理後 i_p 值會成為原有的4倍。

表1 各主要氧化還原反應之 i_0 增值因數

	增值因數 F_I
O_2	12.6
H_2O_2	4.6
H_2	13.7

選擇BWR PCC中4處重要位置，分析這些位置在起動過程中因實施HWC與Pt被覆後，不同的功率變化(3.8%、5.2%、8.4%、10.8%、11.3%)下，其氧化還原劑濃度分佈及ECP隨注氫濃度變化的情形。

氫濃度：飼水未注氫前，爐水本身已有少量的氫存在，這些溶氫的生成主要是源自於爐心中的輻射分解效應。根據圖2的結果顯示，上降流區、再循環系統及底爐心下方空間出口的溶氫在特定注氫量之後，溶氫隨著注氫量增加至2.0 ppm而增加。比較特別之處，除了尚未產生蒸氣的3.8%及5.2%兩功率，其他三個功率在於爐心上方空間的溶氫值較低，主因在於經過爐心燃料匣區沸騰區的氣體交換過程，在不同的功率下，注氫量個別在0.2、0.3及0.4 ppm，6.7%、8.4%及10.8%、11.3%溶氫量降至最低。

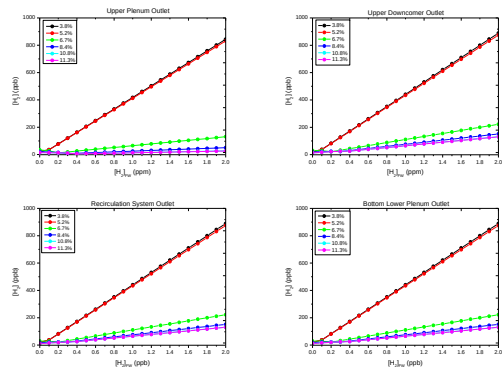
過氧化氫濃度：BWR爐水中另一個重要的氧化劑為

過氧化氫，直接由輻射分解效應而生成的產物。過氧化氫濃度結果如圖3所示。 H_2O_2 是一高氧化性的物質，只有少數ppb也會使得ECP高於 E_{crit} ，須將 H_2O_2 完全消耗才能達到較低的ECP值。在爐心上方空間區域，其 H_2O_2 濃度隨著注氫量增加而減少。隨著注氫濃度的增加， H_2O_2 的消耗與生成之間的競爭變化的明顯化。此區在尚未產生蒸氣的功率下，需要0.1 ppm注氫量才足夠。 H_2O_2 濃度在功率6.7%時較高，在3.8%功率時較低。在上降流區出口處，一般水化學狀態下，11.3%功率下的 H_2O_2 濃度較高，而3.8%功率較低。當開始實施HWC，在10.8%及11.3%功率下的 H_2O_2 濃度需要0.4 ppm注氫量。相較於上降流區的數值，再循環系統及底爐心下方空間出口處的 H_2O_2 濃度，在不同的注氫濃度下，都小於1 ppb以下，變異不明顯。

氧濃度：在一般水化學環境狀態下，核一廠在額定功率時的PCC中的溶氧量大致維持在150至200 ppb左右。在爐心燃料匣區的非沸騰區域溶氧量高達350 ppb以上，這主要是來自高輻射劑量下爐水的輻射分解效應。在起動過程中的氧濃度結果如圖4所示。當HWC實施後，PCC中的溶氧量隨著飼水注氫量的增加而遞減，與功率變化無關。在一般水化學環境狀態下，四個區域出口處的溶氧量約在200 ppb以上，在同一注氫量下，6.7%功率下的溶氧量較高，而3.8%功率下的溶氧值較低。對於3.8%及5.2%功率下，注氫量約為0.1 ppm就可以使溶氧遞減效益最為明顯，而10.8%及11.3%約為0.4 ppm，而8.4%功率則須0.3 ppm，6.7%功率則須0.2 ppm。

ECP：在國內BWR的PCC中4處重要位置，其ECP值隨注氫濃度變化的情形，結果如圖5所示。在爐心上方空間的出口處，非常接近頂部導板位置，德國1座沸水式反應器曾在此處發生IGSCC的問題。模擬結果顯示，此處在起動運轉下的五個不同功率，NWC時的ECP值約在0.2~0.3 VSHE附近。在上降流區的出口的趨勢類似於爐心上方空間出口，而此處靠近爐心側板腰部，同樣是一處容易發生IGSCC的位置。再循環系統是BWR最早出現IGSCC的位置，由於這個區域幾乎不受到明顯的輻射劑量影響，因此全區的ECP差異性不大，故可以出口處的ECP反應代表此系統大部份區域的變化。根據模擬結果顯示，四個區域的趨勢類似，對於3.8%及5.2%功率下，注氫量約為0.1 ppm可使此處的ECP遠低於 E_{crit} ，而10.8%及11.3%約為0.4 ppm，而8.4%功率則須0.3 ppm，6.7%功率則須0.2 ppm。

CGR：在國內BWR的PCC中4處重要位置，其CGR值隨注氫濃度變化的情形，結果如圖6所示。在爐心上方空間的出口處，非常接近頂部導板位置，德國1座沸水式反應器曾在此處發生IGSCC的問題。模擬結果顯示，此處在起動運轉下的五個不同功率，NWC時的CGR值約在 $3 \sim 6 \times 10^{-8}$ cm/sec附近。在上降流區、再循環系統及底爐心下方空間的出口的趨勢類似於爐心上方空間出口，根據模擬結果顯示，NWC時的CGR值小於 6×10^{-8} cm/sec，對於3.8%及5.2%功率下，0.1 ppm的注氫量可使此處的CGR低於 1×10^{-10} cm/sec，而10.8%及11.3%約為0.4 ppm，而8.4%功率則須0.3 ppm，6.7%功率則須0.2 ppm。



動態應變時效對冷作加工鎳基合金 600 於模擬 BWR 加氫水化學水質環境之劣化行為研究

Effect of cold work on DSA behavior of Inconel 600 alloy in simulated BWR coolant environment with hydrogen water chemistry

計畫編號：103-NU-E-007-005-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：喻冀平

e-mail：gpyu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：杜建甫 黃嘉宏 黃俊源

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

討由前期的研究顯示出冷加工過後的合金 600 在攝氏 200 度模擬 BWR 水質的飽和空氣水環境下具有藍脆 (Blue brittleness) 效應。藍脆為動態應變時效 (Dynamic strain aging, 簡稱 DSA) 的特徵之一。藍脆現象的出現，表示金屬材料會提前頸縮，為機械性質上的劣化行為。所以得知動態應變時效如何影響不同冷加工量合金 600 的機械性質為重要研究方向。本研究主要進一步探討合金 600 在模擬 BWR 加氫水化學 (Hydrogen water chemistry, 簡稱 HWC) 水質環境下的動態應變時效特性和機械性質的影響。利用在加氫水化學的水質環境下慢速拉伸試驗 (Slow strain rate tensile, 簡稱 SSRT)，可以得到應力應變曲線圖 (Stress-strain curve diagram)，以用來判斷機械性質。故本研究目標在以應力-應變曲線來探討加氫水化學中氫在動態應變時效現象中扮演了何種角色，與飽和空氣水環境中進行拉伸是否具有不同的劣化機制。為了能準確判斷動態應變時效中差排和溶質原子交互作用的影響，採用一組單軸拉伸冷加工去做塑性變形來確保試片加工量的均勻性。用慢速拉伸試驗以應變速率 $10^{-6}/s$ ，來觀察加氫水環境的影響。再改變不同的冷加工量和溫度，來觀察動態應變時效影響合金 600 機械性質行為。在 HWC 下，已經發現機械性質會有已下幾種現象：藍脆、有 D 型態的鋸齒流應力、在單軸拉伸冷加工的試片發生了應變局部化促進破裂現象和在攝氏 300 度下有最低的截面積縮減率。

關鍵詞：動態應變時效、慢速率拉伸試驗、英高鎳 600、冷加工、藍脆、加氫水化學。

Abstract

In previous research, the phenomenon of blue brittleness occurred on the cold-rolled Alloy 600 tensile test in simulated BWR air-saturated coolant environments at 200°C. Blue brittleness is the manifestation of dynamic strain ageing (DSA). When blue brittleness of metal occurred, Alloy 600 would be necking early which indicated degradation of mechanical properties. The objectives of this study are to understand the characteristics of DSA observed on Alloy 600 under simulated BWR coolant environments with hydrogen water chemistry

(HWC) and its influence on mechanical properties. Stress-strain curves were obtained from the slow strain rate tensile (SSRT) test to evaluate mechanical properties. Cold work by uniaxial tension can produce specimens with uniform plastic deformation, by which the interaction of solute atoms with dislocations can be studied when DSA occurred. Effects of HWC on DSA can be understood from tensile test of different amount of cold work and temperature at a strain rate of $10^{-6}/s$. The effect of mechanical properties in HWC were investigated, such as: Blue brittleness, the intense strain-localization-induced fracture for cold-worked specimens by uniaxial tension and the minimum value of reduction of area at 300°C.

Keywords: dynamic strain ageing、slow strain rate tensile test、Alloy 600、cold work、blue brittleness、hydrogen water chemistry.

I. Introduction

Owing to its long-term suitability, excellent corrosion resistance and high temperature mechanical properties, Inconel 600 is widely used in the operating boiling water reactors (BWRs) and pressurized water reactors (PWRs) as reactor pressure vessel (RPV) head penetrations, steam generator tubes and recirculation inlet nozzle. Recently, it was recognized that hydrogen water chemistry (HWC) is an effective measure to mitigate components cracking in operating BWRs. However, due to the limited protection areas of HWC, fatigue crack growth and stress corrosion cracking are inevitable [2, 3].

The dynamic strain ageing (DSA) behavior is generally understood as the interaction between diffusing solute atoms and mobile dislocations as proposed by Cottrell in 1950s [4]. There are many physical manifestations of DSA, such as work hardening, negative strain rate sensitivity, blue brittleness and strain localization. For materials in severe conditions, typically in BWR environments, strain localization could induce failure and might trigger unpredictable catastrophe. Although models of strain localization have been proposed [5-9], complete understanding on deformation mechanisms remains puzzling. Hence, the effect of cold work and temperature on DSA was investigated. Four different cold work levels

were employed to see the effect of various dislocation density on deformation process during DSA at temperatures ranging from 200°C to 300°C. The difference of mechanical properties and serration types was discussed for the SSRT tests in HWC and oxygenated environment.

II. Experiments

Inconel 600 alloy employed in this study was supplied by Bodycote plc Inc. To release the stress of alloy during manufacturing, mill-annealing of the sample was carried out at 843°C for 1 hr. Its chemical composition is shown in Table 1. As-received specimens were used for cold rolling to 10%, 20% and 30% reduction in thickness in multiple passes. Uniform cold work 10% (U10%) specimens were carried out by uniaxial tensile test in air at room temperature with strain rate 10^{-5} s^{-1} . The SSRT specimens designed for cold work were shown in Fig. 1.

SSRT test in HWC environment with strain rate 10^{-6} s^{-1} was conducted in an autoclave connected to a simulated boiling water reactor circulation loop, as shown in Fig. 2. Conditions of hydrogen water chemistry (HWC) were summarized in Table 2. Testing temperature were 200, 275 and 300°C. The filtered nitrogen was injected into the water tank to decrease the oxygen and hydrogen level, and then the mixed 80% $\text{N}_2 + \text{H}_2$ was injected to maintain hydrogen concentration about 130ppb. All samples had been immersed in autoclave for 168 hours. When the specimen surface reach equilibrium state at testing temperature, the tensile test was conducted.

After testing, the fracture surface was examined by a scanning electron microscope (SEM). The microstructures of specimens were observed by TEM (JEOL JEM-ARM200FTH) operated at 200 kV. TEM examinations were performed for tested U10% CW under 200°C specimens. The tested specimens taken from the gauge region were ground to about 0.07 mm thickness, and then 3 mm diameter disk. The disks were subsequently electropolished to electron transparency with a 3% perchloric acid/methanol solution at -10°C and DC 23-26 V.

III. Results and discussion

3.1 Microstructural characterization

The OM images from three principle plane are shown in Fig. 3. Coarse column-like grains with smaller equiaxed grains inside are observed on S-T plane for the as-received specimens, as shown in Fig. 3 (a). Uniform distributed equiaxed grains are seen on S-L plane with 10%, 20%, 30% and U10% CW specimens, as shown in Fig. 3 (b), (c), (d) and (e), respectively. However, the smaller grains are observed inside the column-like grains in etching metallography. The grains distorted by cold work have different orientation and higher grain boundary energy. Therefore, it reveals that cold-worked specimens have more homogenous grain size than as-received specimen. A great amount of black spots are presented and identified as intrinsic carbide inclusions. The carbide belts are existed in all cold-rolled specimens. However, the carbide belts in

U10% CW specimens are not perpendicular to plane direction.

The TEM images (Fig. 4) of the thin twin boundaries which form by widening stacking fault reveal that the number of dislocations may interact with twin boundaries during DSA occurred. The interaction for Alloy 600 will be discussed in later chapter.

3.2 Characteristics of serrated flow

The true stress-strain curves were shown in Fig. 5. At 200°C, the serrated flow of type B appeared oscillation slightly. At the temperatures ranging from 275°C to 300°C, an interesting phenomenon indicated that the serrations of type B have a regular oscillated flow which increased the stress slowly and dropped down at peaked quickly. Type A serrations were seen in onset of all curves but only dominates in 20% CW specimens at 200°C and 275°C. The reason may be attribute to the first mobile dislocations at onset of plastic deformation. The serrations which appeared like type D were commonly seen in alloy 600 except for 30% cold-rolled specimens. The yield point of U10% specimens are so obvious on stress-strain curves, as shown in Fig. 6. The yield-point phenomena may be associated with strain aging. However, only the U10% CW specimen tested at 200°C exhibits a sharp yield point. It indicates that the interaction between dislocations and solute atoms is weak at room temperature. When the solute atoms have enough diffusion rate at higher temperature (275°C and 300°C), the serrated flow will occur at yield point.

3.3 Mechanical properties in the DSA temperature range

Fig. 7 shows the variation of mechanical properties for cold-worked alloy 600 with constant strain rate (10^{-6} s^{-1}) at tested temperatures. The measured temperature dependencies of yield strength, ultimate tensile strength (UTS), elongation to fracture and reduction of area (RA %). The amount of cold work for U10% and 20% are larger than 10%. But the elongation and ultimate tensile strength of 10% CW specimen are performed better than U10% and 20% CW. It indicates that the strengthening mechanism of 10% CW may have other strengthening factor. The TEM images (Fig. 4) show the stacking fault which accompanies the three layers atomic thickness of the twin may induce the higher work hardening, as shown in Fig. 8.

The interesting fractographs are observed in the Fig. 9. It reveals that the tested U10% specimen at 300°C occurred the intense strain-localization-induced fracture and the large deformation localized near the surface which fracture was along 54°. Fig. 10 shows the fractography of the U10% CW specimens which observed fracture mode was dimpled rupture. This kind of fracture surface is characterized a ductile fracture. The reduction of area and elongation have the minimum value at 300°C when this phenomena occurred. Furthermore, the slant fracture has been clearly investigated a relationship between band types and fracture surfaces: type B and C bands for slant fracture surfaces and type A bands for cup-cone fracture surfaces [10]. It can be found that the uniform distribution of stress increment only happen in the tested U10% specimen at 300°C, as shown in Fig. 11 and 12. Thus it suggests that the uniform pre-strained specimens which have the yielding point will bring the regularly type B until fracture. The uniform hopping PLC band propagation from the beginning of

yielding to rupture may result that the stress localize and fracture is along 54° between the specimen axis and the slant surface. In this study, the blue brittleness occurred at 200°C for cold-rolled specimens. The strain localization not occurred obviously at 200°C. Therefore, the blue brittleness could mitigate the strain-localization-induced fracture.

3.4 Effect of environment on DSA behavior

The effect of different environments also is an important factor. Because the oxide films may affect the mechanical properties. In this study, the result of stress-strain curves and mechanical properties will compare HWC with oxygenated water loop coolant environment. The significant interest of them is put on the elastic region in the stress-strain curve, as shown in Fig. 13. For the oxygenated water loop coolant environment, the unusual elastic region appears in the 10%, 20% and 30% CW specimens at 200°C (Fig. 13(a)). For HWC, the 10%, 20%, 30% and U10% CW specimens also observe the nonlinear elastic region at 300°C (Fig. 13(c)). When this unusual elastic region occurred, the flow stress-time curves also appear some regular peaks which have same frequencies as elastic region (Fig. 13(b)). This phenomenon may be associated with oxide films. The film/substrate system which uniaxial tensile tested until the thin film fractures have been reported [11]. In addition, to assure high adhesion between the film and substrate, interlayer are deposited on this system. The thickness of substrate system had been controlled in the plain stress conditions. The result of film/substrate system is that the size of the kink in load–extension curve depends the share of the load on the film.

In this study, assuming the oxide films are not different at same tested temperatures, oxide film/substrate system is plane stress conditions and has high adhesion between the film and substrate, the size of the kink depends on the ratio of the thickness ratio. It indicates that the thickness of film may be too thin to observe the kink or grow too fast to measure. However, the frequencies of kink may associated with the oxide film growth and this growth may affect the serrated flow even the strain localization.

Compared to the serrations flow between two environments, as shown in Fig. 5 and 14, the results of previous report showed that the mixed type A-, B- and C-serrations occur in 10% CW Alloy 600 at 200°C. The occurrence of type C serrations in 10% CW specimen tested at 200°C was associated with non-uniformed distribution of dislocation densities. However, type C serrations disappears in HWC for all cold-worked specimens in the range of temperature from 200°C to 300°C. It suggests that the peaks which originated from oxide films may get mixed up with the type A serrations, because type C serrations usually occurred at higher temperature [12].

Compared to the mechanism properties between two environments, as shown in Fig. 7 and 15, the blue brittleness occurred in both environment at 200°C. It suggests that the DSA behavior may affect ductility of the cold-rolled Alloy 600 more than oxidation under loading.

The kink appears in the oxygenated water loop coolant environment at 200°C and in HWC at 300°C have not been expected in this study. It seems that there will be other phenomena identified in the future researches in DSA behaviors correlated oxide films growth mechanism.

Table 1. Chemical compositions of Nickel-base alloy 600 (wt%)

Content	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	Co	S	Cu	Al
Alloy 600	70.87	14.86	5.974	0.036	0.403	0.50	0.02	0.001	0.004	0.08

Table 2. Conditions of the hydrogen water chemistry loop

Test parameters	Hydrogen water chemistry
Pressure, MPa	10
Temperature, °C	200, 275, 300
Conductivity (inlet), μScm^{-1}	0.063
Conductivity (outlet), μScm^{-1}	0.075
[H ₂] (inlet), ppb	150.0
[H ₂] (outlet), ppb	133.0
pH (inlet)	7.06
pH (outlet)	6.42
Auto-bleed exchange rate, time/hour	1

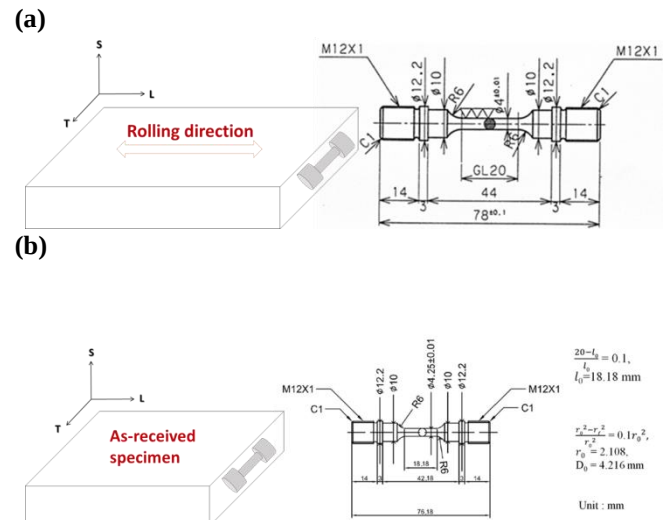


Fig. 1 (a) Cold rolled and (b) cold work by uniaxial tension of 10% specimen designed for slow strain rate tensile (SSRT) test (unit: mm).

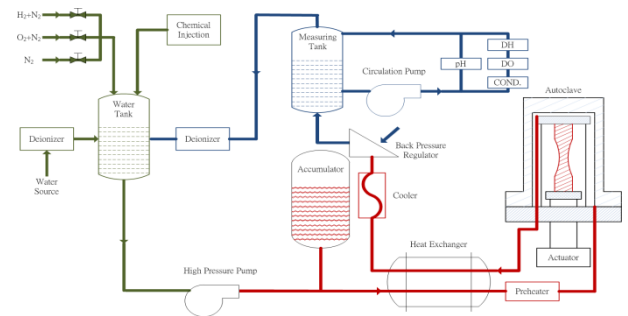


Fig. 2 Schematic diagram of SSRT system with a high-temperature, high-pressure water loop

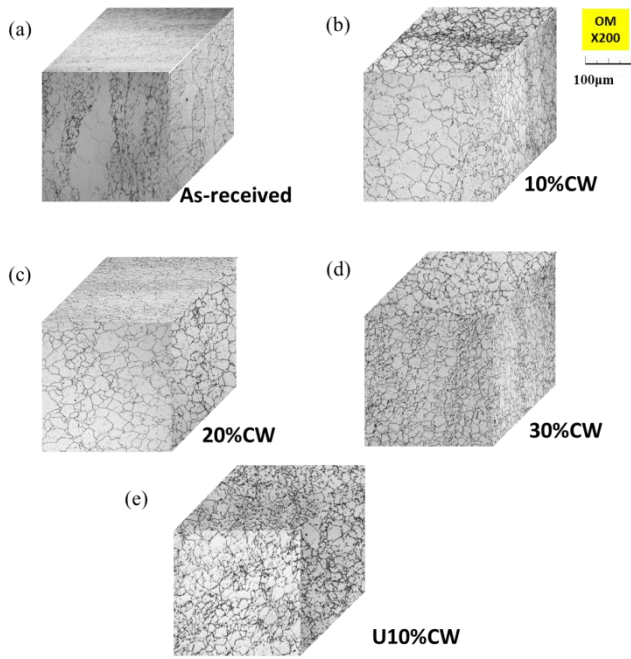


Fig. 3 The optical micrographs (200x magnification) of (a) as-received and (b) 10%, (c) 20%, (d) 30% and (e) U10% CW Alloy 600 at the transverse, longitudinal and short transverse (T-L-S) directions.

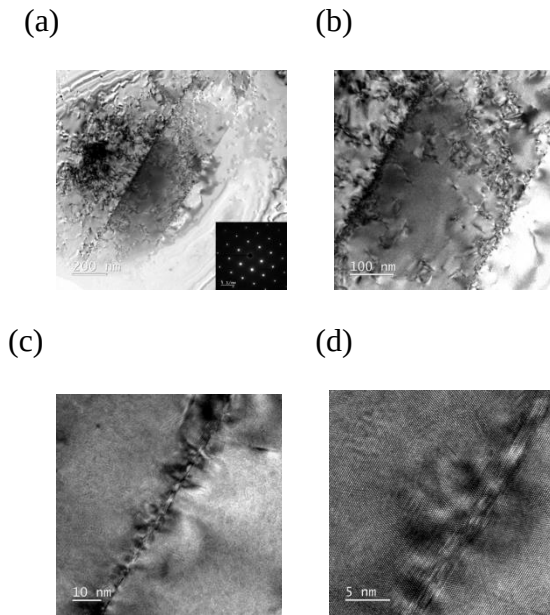


Fig. 4 TEM images of U10% CW Alloy 600 strained to fracture with strain rate 10^{-6} /s at 200°C show the small twin boundaries, (a) 15k x, (b) 40k x, (c) 250k x and (d) 800k x.

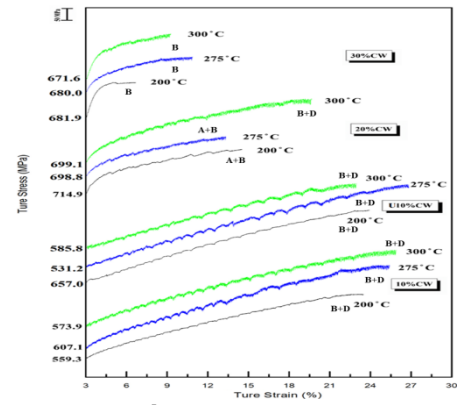


Fig. 5 True stress vs. elongation curves: 10%, 20%, 30% and U10% CW Alloy 600 in the range of temperature from 200°C to 300°C in HWC.

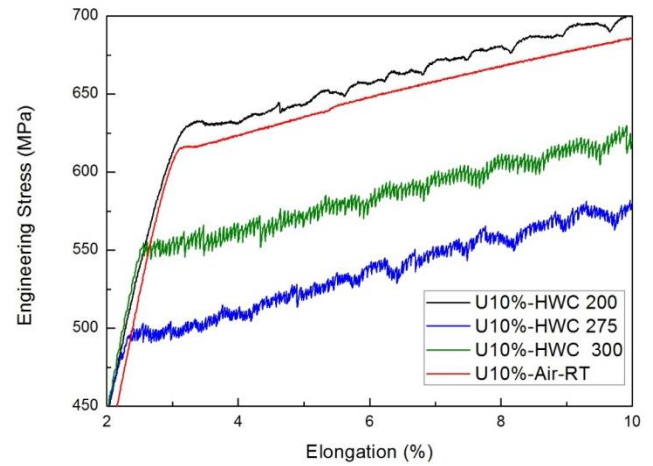


Fig. 6 The temperature dependence of (a) yield strength, (b) ultimate tensile strength and (c) elongation (d) reduction of area for 10%、20%、30% and U10% CW Alloy 600 obtained at the strain rate of 10^{-6} s^{-1} .

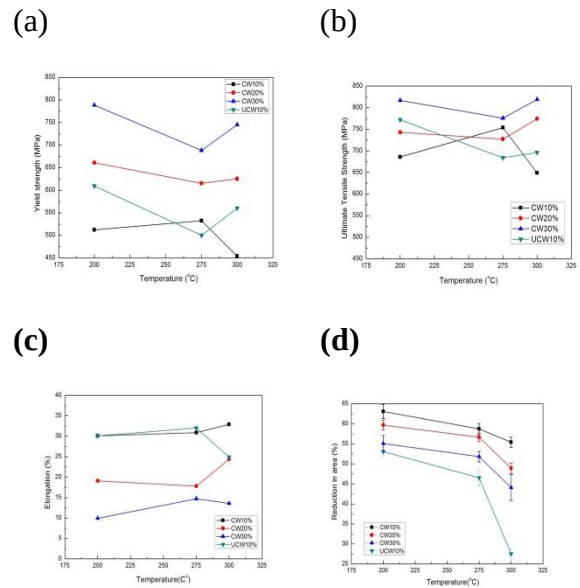


Fig. 7 The temperature dependence of (a) yield strength, (b) ultimate tensile strength and (c) elongation (d) reduction of area for 10%、20%、30% and U10% CW Alloy 600 obtained at the strain rate of 10^{-6} s^{-1} .

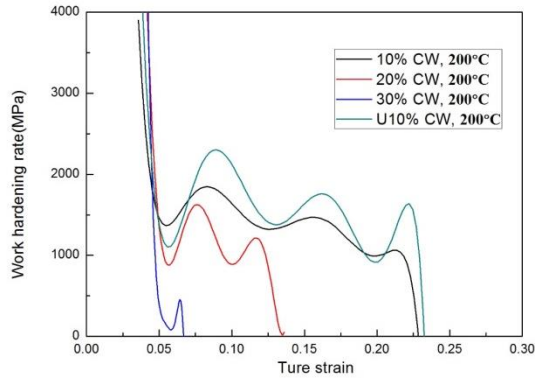


Fig. 8 Variation of work-hardening rate as a function of true strain at different cold work at 200°C.

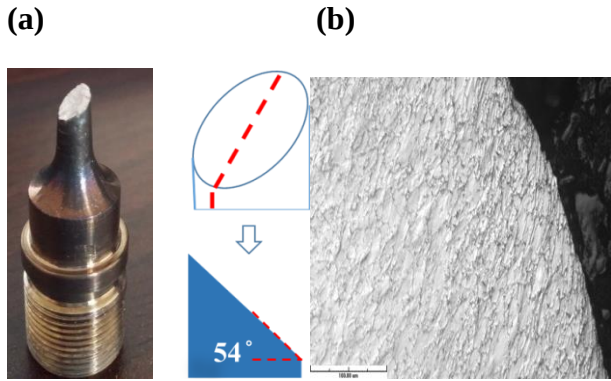


Fig. 9 (a) The tested U10% specimen at 300°C occurred the intense strain-localization-induced fracture and (b) the large deformation localized near the fracture surface which fracture is along 54°.

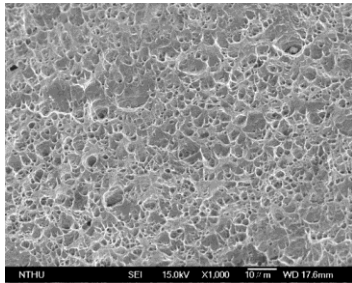


Fig. 10 SEM fractographs of U10% CW Alloy 600 tensile tested in hydrogen water chemistry at 200°C. (Strain rate = 10^{-6} s^{-1})

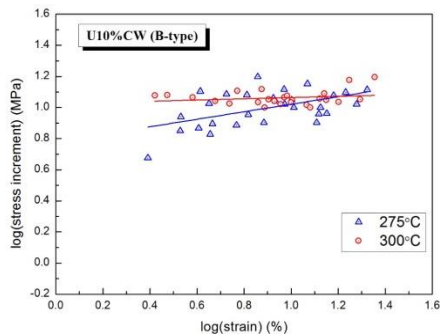


Fig. 11 The strain dependence of stress increment ($\Delta\sigma$) for various temperatures at the constant strain rate (10^{-6} s^{-1}) for type B serrations: U10% CW Alloy 600.

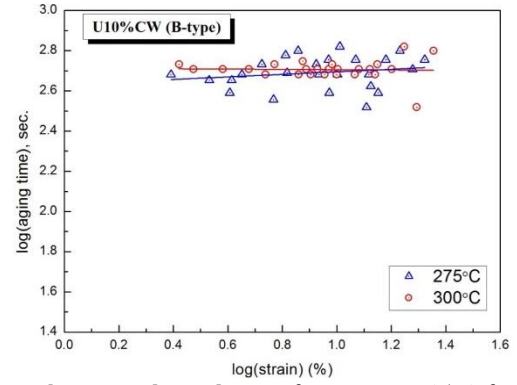


Fig. 12 The strain dependence of aging time (Δt) for various temperatures at the constant strain rate (10^{-6} s^{-1}) for type B serrations: U10% CW Alloy 600.

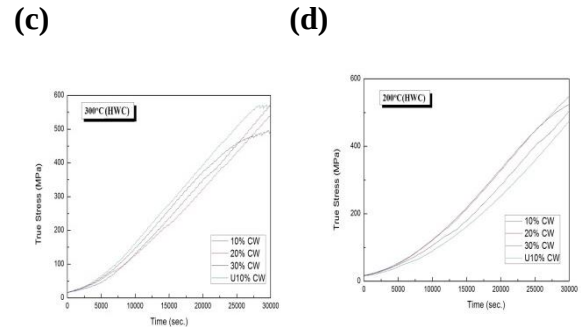
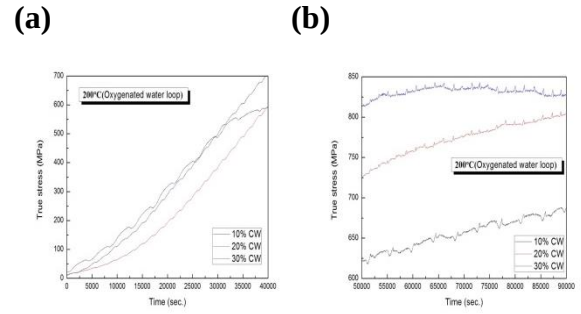


Fig. 13 The true stress-time curve obtained from an oxygenated water environment at 200°C (a-b) with strain rate $10^{-6}/\text{s}$ and hydrogen water chemistry at (c) 300°C, (d) 200°C.

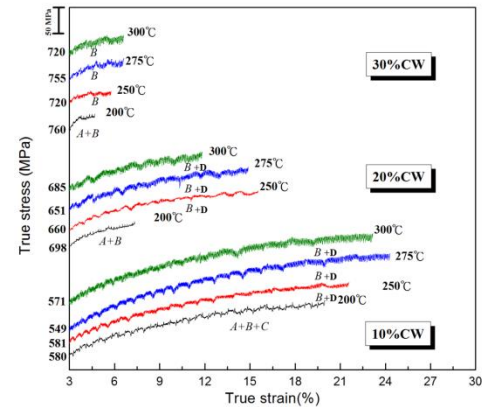


Fig. 14 True stress vs. elongation curves: 10%, 20% and 30% cold-rolled Alloy 600 in the range of temperature from 200°C to 300°C with strain rate $10^{-6}/\text{s}$ in the oxygenated water loop coolant environment.

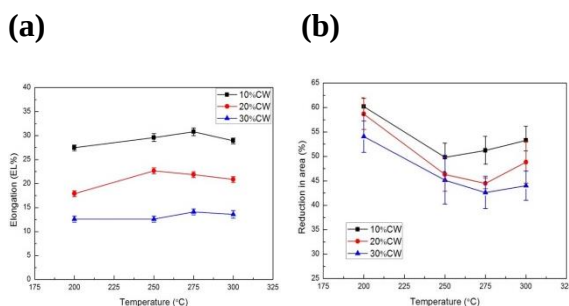


Fig. 15 The temperature dependence of (a) elongation (EL %) and (b) reduction of area (RA %) of cold-rolled Alloy 600 obtained at the strain rate of 10^{-6} s^{-1} in the oxygenated water loop coolant environment.

IV. Conclusions

- (1) DSA was observed in pre-strained Inconel 600, which was subjected to slow strain rate ($10^{-6}/\text{s}$) tensile test in hydrogen water chemistry at temperature between 200°C to 300°C .
- (2) The different serrations may be attributed to the amount of cold work, distribution of dislocation densities and the tested temperatures for alloy 600 which strained in hydrogen water chemistry. The results showed the unapparent type B in cold-worked Alloy 600 at 200°C .
- (3) In the range of temperature from 200°C to 300°C , reduction of area reached the minimum at 300°C . Especially at 300°C , the fracture of cold-worked Alloy 600 with uniaxial tensile of 10% strain is due to the intense strain-localization-induced fracture.
- (4) The mechanical properties and serrations were affected by the effect of different environments, for instance, the stress increment of serrations obtained from oxide films, the blue brittleness occurred in the oxygenated water loop coolant environment at 200°C and the values of reduction of area were minimum in HWC at 300°C .
- (5) The DSA behavior may affect ductility of the cold-rolled Alloy 600 more than oxidation under loading.

Acknowledgements

This research was funded by the National Science Council of the Republic of China under the contracts 103-NU-E-007-005-NU. The authors also appreciate the instrumental support of National Tsing Hua University, Taiwan, R.O.C, Material Science and Engineering department (TEM). The Institute of Nuclear Energy Research of the Republic of China is also acknowledged for the assistance of SSRT.

References

- [1] Y.-T. Huang, "冷加工對鎳基合金 600 於模擬 BWR 水質之動態應變時效影響研究" 清華大學工程與系統科學系學位論文 (2013) 1.
- [2] H. Hänninen, M. Ivanchenko, Y. Yagodzinskyy, V. Nevdacha, U. Ehrnstén, P. Aaltonen, TR Allen, PJ King and L. Nelson (Eds.), Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power

Systems-Water Reactors, TMS, Warrendale, PA, USA, 2005.

- [3] I.S. Kim, M. Chaturvedi, "Serrated flow in Inconel 625" Trans. Jpn. Inst. Met. 28/3 (1987) 205.
- [4] A. Cottrell, "LXXXVI. A note on the Portevin-Le Chatelier effect" Philosophical Magazine 44/355 (1953) 829.
- [5] P. McCormick, "Theory of flow localisation due to dynamic strain ageing" Acta Metallurgica 36/12 (1988) 3061.
- [6] L. Kubin, K. Chihab and Y. Estrin, "The rate dependence of the Portevin-Le Chatelier effect" Acta Metallurgica 36/10 (1988) 2707.
- [7] L. Kubin and Y. Estrin, "Evolution of dislocation densities and the critical conditions for the Portevin-Le Chatelier effect" Acta metallurgica et materialia 38/5 (1990) 697.
- [8] Y. Estrin, "Dislocation theory based constitutive modelling: foundations and applications" Journal of Materials Processing Technology 80 (1998) 33.
- [9] Y. Estrin and P. McCormick, "Modelling the transient flow behaviour of dynamic strain ageing materials" Acta metallurgica et materialia 39/12 (1991) 2977.
- [10] H. Wang, C. Berdin, M. Mazière, S. Forest, C. Prioul, A. Parrot and P. Le-Delliou, "Portevin-Le Chatelier (PLC) instabilities and slant fracture in C-Mn steel round tensile specimens" Scripta Materialia 64/5 (2011) 430.
- [11] S. Zhang, D. Sun, Y. Fu and H. Du, "Toughness measurement of ceramic thin films by two-step uniaxial tensile method" Thin solid films 469 (2004) 233.
- [12] S.H. Hong, H.Y. Kim, J.S. Jang and I.H. Kuk, "Dynamic strain aging behavior of Inconel 600 alloy" Superalloys 1996 (1996) 401.

CORROSION MITIGATION OF BWR STRUCTURAL MATERIAL BY HWC/ONLC DURING REACTOR STARTUP PROCESSES

計畫編號：103-NU-E-007-006-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：葉宗洸

e-mail：tkyeh@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：王美雅、苑主用

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

本實驗模擬反應器啟動及停機過程的溫度及水化學條件，針對 304 不銹鋼試片進行電化學腐蝕電位量測。在啟動的過程中，在溶氧或是溶氫下，透過電化學分析，瞭解 304 不銹鋼試片於模擬沸水式反應器啟動過程下，使用白金被覆處理對於組件的應力腐蝕龜裂特性影響。

關鍵詞：應力腐蝕龜裂、反應器啟動、304 不銹鋼、白金被覆、加氫水化學。

Abstract

The project aims to study the impact of HWC/ONLC during startup process by immersing austenitic 304 stainless steel into pure water environment to reduce the ECP. The corrosion potentials and corrosion current densities of 304SS were conducted in pure water under different temperatures with different dissolved oxygen or hydrogen concentrations. In addition, the specimens with Pt coating will also be conducted via electrochemical polarization experiment at high temperature pure water environments.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Reactor Startup, 304 Stainless Steel, Pt, Hydrogen Water Chemistry

I. 前言

沸水式反應器在運轉多年後，其組件材料遭受沿晶應力腐蝕的情況日益嚴重，因此許多沸水式反應器電廠已採用加氫水化學技術，藉以防止沿晶應力腐蝕發生。由於輻射分解效應，在反應器於定額功率運轉時，爐水為氧化性環境，需加過量的氫氣才會使腐蝕電位降低至臨界腐蝕電位以下，然而過量的氫氣會使人員輻射劑量大幅提升，但若在加氫環境中添加白金被覆，則可使加氫量大幅下降，亦可達到相當低的腐蝕電位。然而，反應器啟動階段的核能電廠爐心組件因無法注入氫氣，使得爐水氧化性相對較高，因此維持高腐蝕電位的狀態，導致組件較易出現應力腐蝕龜裂的起始現象，美國 EPRI(Electric Power Research Institute)為降低此一階段加氫的需求量，於啟動過程中添加白金，同時亦可提升加氫水化學的可用度。然而，在氧化性的環境中添加白金，不會使腐蝕被抑制，反而會由於白金催化氧化劑的

反應而使腐蝕情形大幅提升。

II. 主要內容

本研究透過模擬 BWR 水環境，且為氧化性水環境下，白金被覆以及沒有白金被覆，在不同溫度下的電化學分析。

為模擬核電廠組件之真實情形，實驗所使用的試片為 304 不銹鋼，其成分分析如表一，所有試片皆先經過敏化熱處理，然後在溫度 288 °C、溶氧量 300 ppb 之高溫含氧水環境下預長氧化膜約 14 天；預長氧化膜完成後，會將一些試片置入 90 °C、100ppm 白金的水中沉積 24 小時，再來會將被覆白金及沒有被覆白金試片放入高溫高壓水循環系統中(壓力 8.28MPa、溶氧量 300ppb)，使用三極系統對試片做及畫掃描(高溫高壓水循環系統如圖一所示)，試驗之溫度包括、250 °C 及 288 °C，此外，會以 SEM 及 EDX 觀察氧化膜及白金被覆情形。

III. 結果與討論

圖二為預長氧化膜的 SEM 圖，可以看到在 14 天的溶氧環境下，所長出來的膜非常均勻，且氧化膜顆粒大小相近，範圍介於 0.5 至 1 μm ，圖三是白金被覆的 SEM 及 EDX 圖，從 SEM 中看出白金的大小不均勻，分不雜亂，但從 EDX 圖可得白金的分佈非常均勻，因此不能確定的是其厚度是否一致，也不確定厚度不一所造成的影響。

圖四是白金被覆及氧化膜試片在 300ppb 溶氧下的極化曲線，其所算出來的腐蝕電位(ECP)、腐蝕電流密度(icorr)、交換電流密度(ECD)列在表一。

在沒有經過白金被覆處理的試片來看，288 °C 的腐蝕電位雖然較 250 °C 來的低，但其腐蝕電流密度 2.19 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 比 250 °C 的 1.24 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 還高。對白金被覆的試片來說，與未處理的試片結果相同，但值得注意的是 288 °C 的腐蝕電流密度 (17.36 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 比 250 °C (2.75 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 高出許多。此外，不管在什麼溫度底下，在溶氧值達 300ppb 的環境底下，白金被覆的腐蝕電位、腐蝕電流密度接比沒有做白金被覆的試片要高。

從圖四亦可算出交換電流密度，在溶氧的環境底下，有白金被覆的交換電流密度明顯較大，可以證實白金被覆是只會催化氧化劑及還原劑的再結合，再缺乏還原劑

的情況下，反而會催化氧化劑的反應，使交換電流密度因為催化的關係而提升，此外溫度較高的效應亦會使交換電流密度提升。

IV. 結論

1. 在氧化性水環境中，白金被覆試片的腐蝕情形遠比沒有白金被覆的試片來的強烈，由腐蝕電位、腐蝕電流密度及交換電流密度的比較可以證實。
2. 證實白金被覆不只會催化氧化劑及還原劑的再結合，在缺乏還原劑的情況下，會加速氧化劑的反應，大大提升了腐蝕的可能性。
3. 在不同溫度下(250 及 288°C)，溫度較低的环境腐蝕情形相較溫度高的環境緩和。

參考文獻

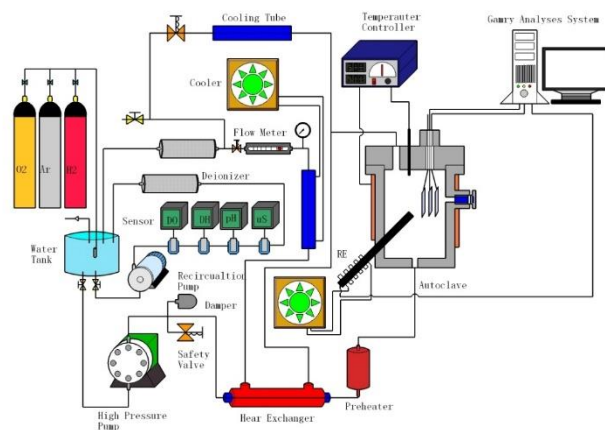
- [1] S. Hettiarachchi, "BWR SCC Mitigation Experiences with Hydrogen Water Chemistry," Proceedings of the 12th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Salt Lake City, UT, U.S.A., August 14-18, 2005, p. 685-699.
- [2] R. L. Cowan, "The mitigation of IGSCC of BWR internals with hydrogen water chemistry," Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, BNES, Bournemouth, England, Oct. 13-17, 1996, p. 196 (1996).
- [3] S. E. Garcia, et al., "Effect of Hydrazine, Carbohydrazide and Hydrogen Injection on Noble Metal Treated Stainless Steel ECP and IGSCC Mitigation During BWR Startups," 2010 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Quebec City, Canada, October 3-7, 3.09P (2010).
- [4] A. Abe, et al., "Mitigation of SCC Initiation on BWR Core Internals by Means of Hydrogen Water Chemistry during Start-Up," Nuclear Science and Engineering, 149, 312 (2005).
- [5] K. Ishida, et al., "Applying Hydrogen Water Chemistry to Boiling Water Reactor during Normal Operation and Start-up to Mitigate Stress Corrosion Cracking at Shimane Nuclear Power station's Unit 2," 2008 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Berlin, Germany, September 14-18, L04-3 (2008).
- [6] Susan E. Garcia, Andrew D. Odell and Joseph F. Giannelli, "Early Hydrogen Water Chemistry in the Boiling Water Reactor: Industry-first Demonstration," 2012 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Paris, France, September 23-27, P2-64-82 (2012).

表一 304 不鏽鋼成分分析

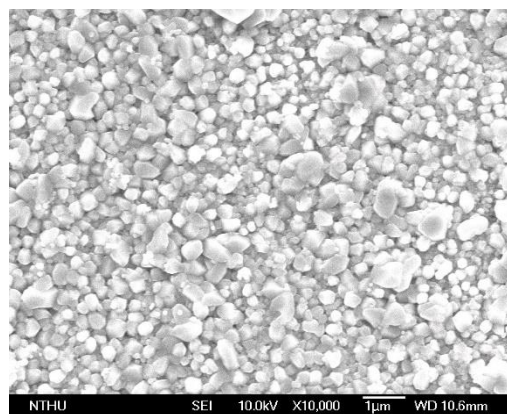
Fe	C	Cr	Ni	Mn	S	P	Si	Mo	Cu
Bal.	0.04	18.34	8.10	1.59	0.004	0.0033	0.41	0.29	0.41

表二 腐蝕電位、腐蝕電流密度及交換電流密度比較表

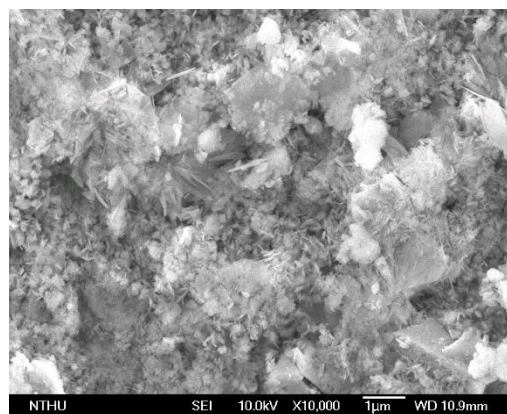
試片	溫度 (°C)	溶氧 (ppb)	ECP (mV _{SHE})	i_{corr} (μA/cm ²)	ECD (μA/cm ²)
預氧化	288	300	98.1	2.19	0.084
白金被覆	288	300	172.7	17.36	0.330
預氧化	250	300	112.4	1.24	0.022
白金被覆	250	300	171.7	2.75	0.044



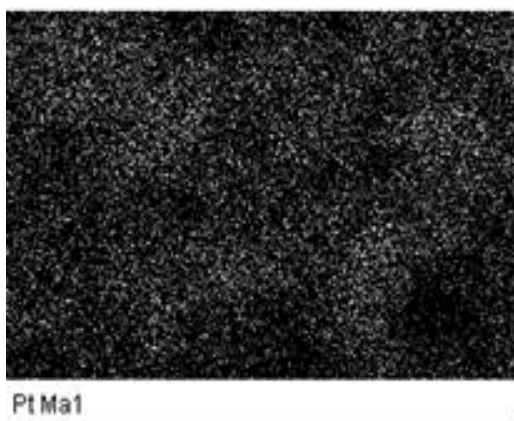
圖一 高溫水循環示意圖



圖二 預長氧化膜 SEM 圖

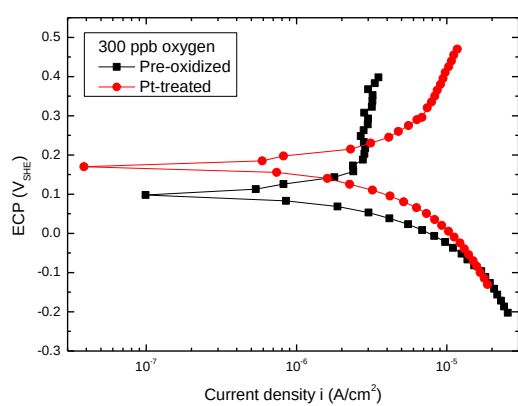


(a)

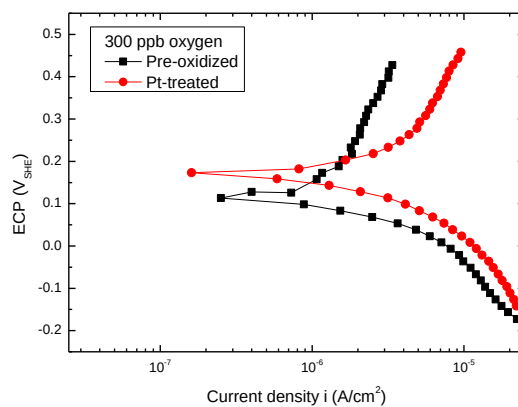


(b)

圖三 白金被覆(a)SEM 圖 (b)EDX 圖



(a) 288°C



(b) 250°C

圖四 溶氧 300ppb 在不同溫度之極化掃描(a)288°C
(b)250°C

各種運轉與貯存條件下的核燃料機械行為模擬分析

Simulation of Mechanical Behaviors of Nuclear Fuel under Different Operation and Storage Conditions

計畫編號：103-2623-E-007-010-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳紹文 教授

e-mail：chensw@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：郭封均、蔡明倫、黃偉倫、劉芳霖、劉時湧、

李宛芸、王亭懿、張靖、黃俊富、林郁格、傅采詩、林明松

執行單位：國立清華大學 核子工程與科學研究所 / 工程與系統科學系

摘要

核燃料與護套屬於核能安全的第一道關卡，其機械行為將決定燃料與放射性產物能否妥善密封之關鍵。有鑒於日本福島事故中，用過核燃料貯存狀況受到矚目，未來國內外可能採用之各種乾溼式貯存條件，實施前皆需要嚴謹的驗證以確保安全無虞。本研究將針對核燃料與護套在各種運轉與貯存的條件下，利用 FRAPCON 及 FRAPTRAN 等模擬程式，作詳盡的暫態及穩態分析，模擬不同條件將導致的內部壓力(plenum pressure)，承受應力(cladding hoop stress)，應變(axial and hoop strain)，與溫度。

本研究利用燃料棒暫態分析程式(FRAPTRAN)與燃料棒穩態分析程式(FRAPCON)結合來分析金山核能電廠在主蒸氣隔離閥關閉時的暫態情況分佈等，在暫態分析中第 300 秒主蒸氣隔離閥由全開歷經 3 秒到全關，在 303 秒時控制棒全下急停，模擬結果顯示在暫態過程中燃料棒的行為均在安全操作範圍下。在先前的工作中，本研究使用的 TRACE 程式結果，當作邊界條件輸入 FRAPCON-3.4 程式中，計算燃料池的護套燃料棒的數據。FRAPCON-3.4 程式結果顯示鋁合金護套(Zircaloy-2)的氧化層厚度在 3.5 天後接近 10 CFR 50.46 法規所規定之限制值，故建議在此之前可採取適當冷卻措施。

關鍵詞：最多選擇 6 個詞以內。此外，使用 FRAPTRAN 與 FRAPCON 建立國聖電廠單一燃料棒的模組，再藉由 TRACE 的分析結果作為 FRAPTRAN 的輸入邊界條件以模擬燃料棒局部詳細的機械行為與效能。在本研究中有三種條件的假設：第一為正常的乾貯狀況、第二為全堵塞以及第三全掩埋，以上三項假設條件的模擬結果皆在法規標準之下，然而在全掩埋的情況中在第 23.6 天時，護套的環向應變可能超越法規的極限且在第 23.9 天護套的節點 6 環向應力衰退至 0。

關鍵字：MSIVC、用過燃料池、乾式貯存、FRAPTRAN、FRAPCON、TRACE

Abstract

We use TRACE, FRAPTRAN and FRAPCON to study the postulated accidents of Chinshan Nuclear Power Plant and Kuosheng Nuclear Power Plant, which are Main stream isolation valve closure, Spent Pool Cooling System Failure, Dry Storage Fully-blockage case and Dry Storage

Fully-covered case.

We took TRACE results as FRAPTRAN or FRAPCON initial boundary condition input. By the results, we evaluated the safety under fuel rods operating and storage. According to the result of FRAPTRAN, control rods scrammed the core at the 303th second and this case was under the safe operation range. Furthermore, the result showed that fuel rods uncovered at 2.7 days after cooling system failure. And zirconium-water reaction happened at 3.5 days after cooling system failure. Finally, in the normal case and fully-blockage case was both under the safety criterion. However, the hoop strain was over and reduced to zero at 23.9 days after accident happened in fully-uncovered case.

Keywords: Use maximum 6 terms.

I. 前言

1.1 研究目的

自 2011 年的福島事故，國內外皆對於核能電廠作完整且嚴謹的檢視，對於複合性災害或人為因素影響之事故能有更進一步的防範，故本研究以此為目的，設定嚴苛的事故條件，藉以模擬發生嚴重複合性災害時之情形，研究核燃料棒之機械行為，以檢視核電廠是否有能力在嚴苛的事故條件下，保護核燃料棒的完整性。

1.2 電廠介紹

國聖核能發電廠（簡稱核二廠）是 GE 公司所設計發展的第六代沸水式反應爐，每小時能產生 985 磅壓力的飽和蒸汽 1,245 萬磅。圍阻體為第三代，也是 GE 公司所設計。

金山核能電廠（簡稱核一廠）的兩部機組是由 GE 公司建造，合計輸出功率為 1272MW，其為沸水式反應器，爐心內的燃料棒產生核分裂輸出的熱功率加熱水，使水沸騰增加壓力推動渦輪機進而發電。

1.3 分析工具 - TRACE

TRACE 是由美國 NRC 發展的熱水力核能電廠安全分析程式，其本身主要建立於 TRAC 與 RELEP5 以及綜合其他程式而成，NRC 將其視為未來重要的熱水力核能安全分析程式。

1.4 分析工具 - FRAPTRAN&FRAPCON

FRAPTRAN 以及 FRAPCON 是計算溫度、壓力、隨著時間變化的燃料棒形變和燃料棒功率，以及冷卻水的邊界條件的程式。其中包含了三種程序包，分別為 FRPCON、FRACAS-I、MATPRO，FRPCON 為主要的程式，包含了所有的熱模型和 FRACAS-I 力學模型，所有材料特性、參數則是放在 MATPRO 程序包中。FRAPTRAN 在護套的有效塑性應變較大則會用膨脹模式，膨脹模式(BALON2)計算護套局部不規則的應變，膨脹模式(BALON2)預測在膨脹節點斷裂有兩樣標準，一是當護套的環向應力超過經驗上的極限，二是預測護套的環向應變超過 FRAPTRAN 應變極限。

II. 主要內容

2.1 假設 MSIVC

在本研究中探討假設主蒸汽隔離閥關閉(MSIVC)暫態，是所有蒸汽閥關閉的最嚴重假設情形，當主蒸汽閥完全關閉時蒸汽之路竟遭受阻斷，反應爐系統壓力會由正常運轉值迅速竄升，造成爐心空泡下降液態水增加，中子緩速的效果增加進而產生一個正反應度，使得熱功率迅速上升。在正常運轉情況下，當 MSIV 之開度達到 87%時即會引發反應器急停信號，但在過壓暫態安全分析下，假設此信號失效，直到高中子通量信號或爐頂高壓力急停信號出現，反應器才急停，且假設安全釋壓閥只有安全閥之功能而無釋壓閥之功能，以上設計都是對過壓暫態的特殊假設，以挑戰系統壓力承受的程度進而提供分析的保守度，最後由控制棒插入與安全釋壓閥之開啟使系統壓力不再上升，此外反應器的高壓力信號也會使再循環泵跳脫。

2.2 過燃料池冷卻系統失效

在核能電廠的分析中，核電廠的安全分析為非常重要的工作。在福島電廠的事件中，因為發生地震與海嘯，可能使得用過燃料池的冷卻系統失效，因此用過燃料池的狀況需要重新評估。在福島事件後，民眾對核能電廠的安全性越來越關心，核能研究所使用 TRACE 程式[1]完成了假設金山核電廠用過燃料池的冷卻系統失效情況下的安全分析。在安全分析中，燃料護套的狀況對整個核能電廠也有重要的影響。為了進一步了解護套在此情況下較詳細的數據和性能，使用了 FRAPCON-3.4 程式[2]-[4]來作後續的分析。

2.3 假設乾貯事故

乾貯系統的安全性是台電公司考慮的重點之一，用過核燃料在移出爐心後，會被儲存在用過燃料池數年，以持續冷卻用過核燃料的衰變熱，但在早期電廠的用過燃料池並未設計成可以容納核電廠 40 年的運轉全數燃料，所以台電公司計畫建造乾貯系統在國聖電廠。本研究將假設乾貯系統遇到一連串的極端意外災害如地震、豪大雨造成土石流，因此乾貯系統事故中假設最極端的全掩埋與全堵塞將在本研究中模擬且討論。

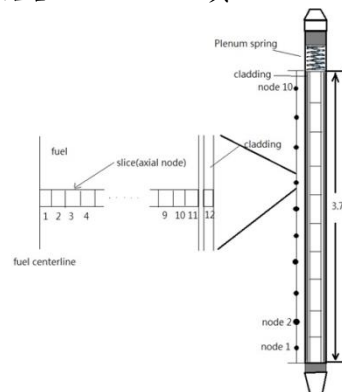
2.4 研究方法

研究方法皆透過 TRACE 模擬後的結果作為

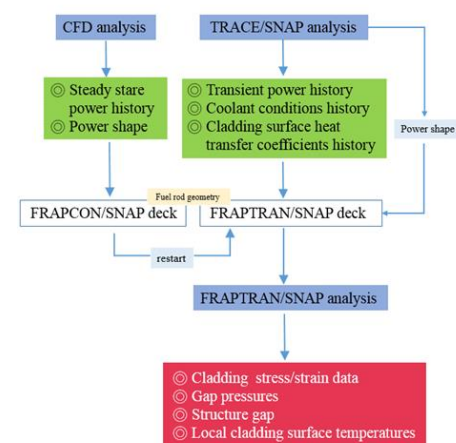
FRAPTRAN 或 FRAPCON 的輸入參數，因 TRACE 是模擬完整電廠的系統模擬程式，FRAPTRAN 或 FRAPCON 需要有電廠的冷卻條件、功率變化以及熱傳係數的重要輸入參數，再做局部且詳細的燃料棒暫態分析。特別的是在第二個模擬事故先使用 IFA-431 燃料棒數據重複驗證 FRAPCON-3.4 所算出來之結果，再使用 TRACE 程式計算結果，圖一至圖三為模擬流程與燃料棒在 FRAPTRAN 中的模型構造。



圖一：結合 FRAPTRAN 與 FRAPCON 的流程圖



圖二：燃料棒在 FRAPTRAN 中的構造圖



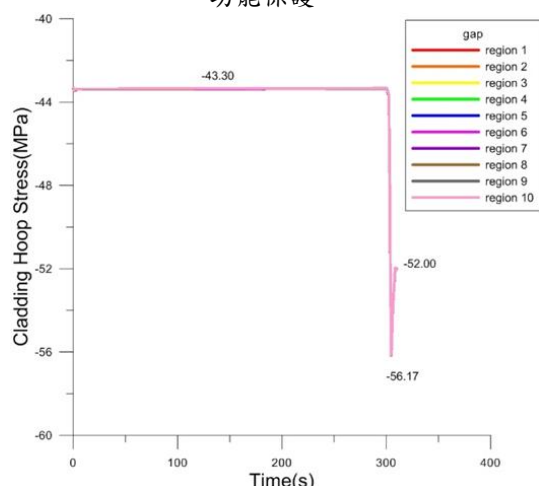
圖三：乾貯系統的模擬流程

III. 結果與討論

3.1 假設 MSIVC 事故

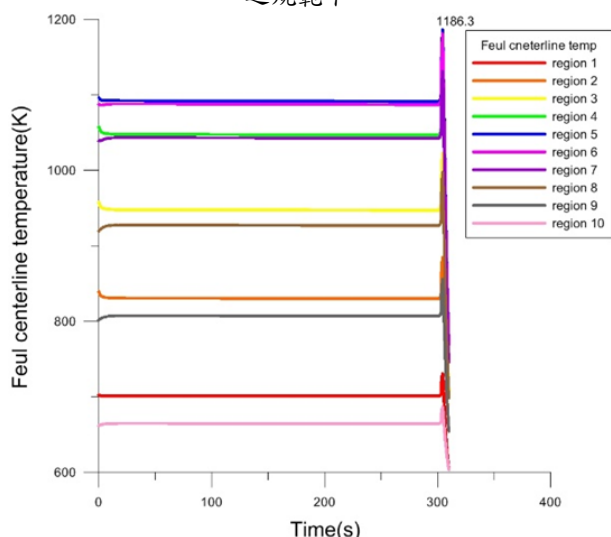
圖四顯示護套的環應力的模擬結果，每一節點之環向應力結果幾乎相同，因此曲線圖幾乎重疊一起，在主蒸汽隔離閥關閉前(300 秒前)每一節點的環向應力皆約為 43.3MPa，當假設狀況產生後，其最大應力值約為 56.17MPa，此值亦低於材料可承受之最大應力，因此這

證明發生此假設條件下，護套的受環向應力影響的完整性依然可以被控制棒全插入急停與安全釋壓閥之安全功能保護。



圖四：各節點的護套環向應力變化

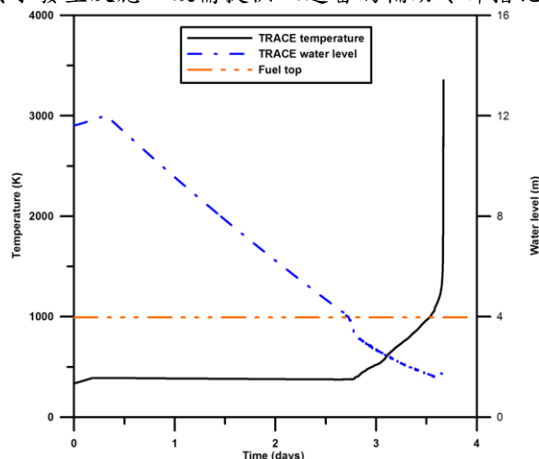
圖五顯示燃料中心線溫度的變化，燃料中心線溫度峰值為節點 5 的 1186.3K，其峰值依然在安全操作的範圍下，護套平均溫度或內部溫度之峰值皆在 10CFR50.46 之規範下。



圖五：燃料中心線溫度變化

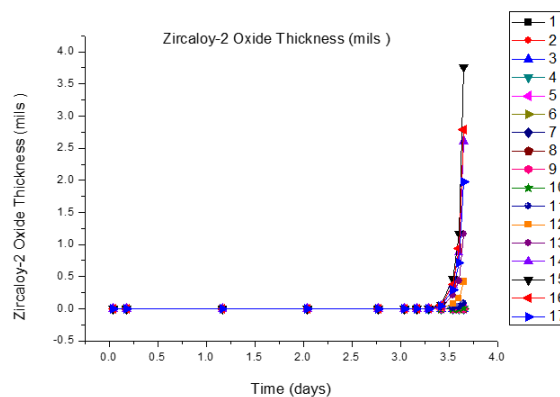
3.2 假設用過燃料池的應用分析

圖六中顯示在冷卻系統壞掉後 2.7 天燃料裸露，3.5 天護套溫度達 1088.56 K 後，燃料護套的金屬可能會開始與水發生反應，故需提供以適當的輔助冷卻措施。



圖六: TRACE 護套溫度與水位

圖七為鈳護套 (Zircaloy-2) 的氧化層厚度，10 CFR 50.46 法規的規定是氧化層厚度增加必須低於 17%，在此分析中，也就是不得大於 4 mils，在圖二十顯示在 3.5 天後接近 10 CFR 50.46 法規所規定之氧化層厚度，根據以上的結果，建議在此之前可採取適當冷卻措施。



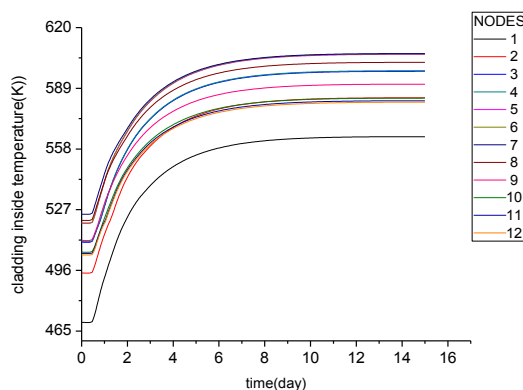
圖七：鈳合金護套的氧化層厚度隨著時間的變化

3.3 假設乾貯事故

在乾貯部分分為三個狀況：穩態條件、假設全堵塞以及假設全掩埋。在穩態條件即為正常的貯存狀況，幫助我們確認乾貯系統可以保持長時間的移熱效果。假設全堵塞事故是空氣的進出口皆被堵塞的情況，因此沒有空氣流進或流出，但混凝土護箱依然有靠熱傳導移熱的功能，在此情況中移熱的效果較正常情況糟糕一些，但是護套的溫度還是會趨於穩態。而在假設全掩埋事故與假設全堵塞事故不同，其貯存桶因可能因故遭全掩埋，造成混凝土護箱的熱傳導移熱功能喪失(此乃極端假設)，燃料的溫度可能會持續上升。

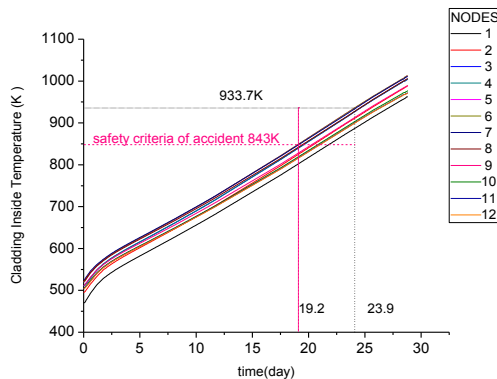
當乾貯桶在正常移熱情況下，TRACE 計算其定值溫度的結果，大約耗費四天趨於穩態的溫度，此穩態溫度將當作假設全堵塞以及假設全掩埋事故的初始溫度值，在穩度溫度下，TRACE 模擬結果護套的最高溫為 523.85K，其低於乾貯系統的安全標準(673K)。

FRAPTRAN 的模擬結果如下：護套內側的溫度分布如圖八所示，最高的護套溫度為 609K，在假設全堵塞的事故中，護套溫度達到 609K 後即趨於穩態狀態，當護套溫度上升時，環向應變與環向應力的上升趨勢，同時護套間隙寬度亦是 FRAPTRAN 重點的模擬結果參數，但在假設全堵塞條件中，護套間隙寬度幾乎保持常數沒有明顯變化。



圖八：護套內側溫度變化

在假設全掩埋事故中，假設所有的貯存桶都被泥石流或其他天然災害製造之物質所覆蓋，使得混凝土護箱對外的熱傳移熱功能喪失之極端嚴苛假設。圖九所示在假設全掩埋事故中護套內側的溫度變化，因為假設全掩埋事故設定熱無法由乾貯桶中移出，所以護套的溫度持續地升高，而溫度在19.2天時升高到安全規範的843K，由FRAPTRAN的模擬結果來看護套在23.9天後溫度攀升至933K，依據上述的模擬結果顯示，如遭遇假設全掩埋事故的極端保守假設狀況，建議在24天內排除全掩埋之狀況，仍有充足安全餘裕。



圖九：護套內側溫度變化

IV. 結論

4.1 假設 MSIVC 事故

設定假設 MSIVC 事件在 300 秒發生，維持 3 秒後控制棒全降下急停爐心以及安全釋壓閥行安全功能足以維護燃料棒之完整性且符合 10 CFR 50.46 之規範，以下為本研究的重要結論：

(1)於計算結果中護套內的氣體壓力與間隙寬度的沒有造成膨脹或破壞的現象。

(2)各節點的護套環向應力最大約為 56.17MPa，此值仍然在材料的安全範圍下

(3)護套的氧化層厚度仍在 10 CFR 50.46 規定的，護套本身厚度的 17%以下，因此依然在安全操作範圍下。

(4)在模擬結果中燃料中心線最高溫度點為 1186.3K 而護套溫度峰值發生點與溫度分部情況同燃料中心線之情況，其峰值在節點 5 發生，溫度為 600.44K。

4.2 假設用過燃料池冷卻系統失效

TRACE 程式分析結果表示在冷卻系統壞掉後 2.7 天燃料裸露，3.5 天燃料的護套可能會開始與水發生反應，FRAPCON-3.4 分析結果則顯示在冷卻系統壞掉後 3.5 天護套應力驟降至 0，氧化層厚度則是在 3.5 天後接近 10 CFR 50.46 法規所規定之 17% 的厚度。顯示 FRAPCON-3.4 之分析結果與 TRACE 程式分析結果相似，故當此極端假設狀況下，建議在 3.5 天以內可採取適當冷卻措施。

4.3 假設乾貯事故

穩態、假設全堵塞以及假設全掩埋，模擬結果顯示穩態條件完全在正常貯存規範條件下（673K）；在假設

全堵塞條件下，護套內側溫度也低於規範條件下，在暫態之後護套的環向應力會上升至固定常數。以上兩項條件皆顯示燃料棒仍然保持完整無損壞。而在假設全掩埋條件下：

- (1) 護套內側溫度在 19.2 天時達到安全規範的溫度（843K）。
- (2) 而護套膨脹現象在 20 天後發生，護套的環向應力在 23.6 天達到規範條件。
- (3) 護套內外壓力差在 23.9 天時下降至零，且護套 6 的環向應力可能下降至零。

本研究假設全掩埋狀況乃採用極端保守之完全絕熱條件，在現實狀況中並不可能達到完全絕熱之條件，因此本研究之計算結果屬於極端保守，即使真的發生全掩埋狀況，只需在 24 天內將全掩埋狀況排除無須擔心。

參考文獻

- [1] USNRC, "TRACE V5.0 USER'S MANUAL", vol 1, Input Specification, 2010
- [2] D. D. Lanning, C. E. Beyer, C. L. Painter, "FRAPCON-3: Modifications to Fuel Rod Material Properties and Performance Models for High-Burnup Application." "NUREG/CR-6534, Volume 2, PNNL-11513, Richland, WA, USA, 1997
- [3] G.A. Berna, C.E. Beyer, K.L. Davis, D.D. Lanning, "FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup." "NUREG/CR" -6534, Volume 3, PNNL-11513, Richland, WA, USA, 1997
- [4] D.D. Lanning, C.E. Beyer, G.A. Berna, "FRAPCON-3: Integral Assessment", NUREG/CR-6534, Volume 4, PNNL-11513, Richland, WA, USA, 1997
- [5] Draft Rule Language for 10CR50.46c, USNRC Adams ML110970044, April 2011
- [6] Che-Chung Tseng, Ka-Yu Huang, "FRAPCON-2 Predictions of the Fuel Centerline Temperatures in IFA-431 and IFA-432 Assemblies", INER, LUNG-TAN, TAIWAN, 1985
- [7] Jong-Rong Wang, Hao-Tzu Lin, Yung-Shin Tseng, and Chunkuan Shih, "Application of TRACE and CFD in the spent fuel pool of Chinshan nuclear power plant", applied mechanics and materials, vol 145, pp78-82, 2012
- [8] USNRC, "TRACE V5.0 USER'S MANUAL", vol 1, Input Specification, 2010
- [9] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, J.M. Cuta, "FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods" NUREG/CR-7023, Vol. 1, PNNL-19400, Vol. 1, Richland, WA, USA, 2010
- [10] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, "FRAPTRAN 1.4: Integral Assessment" NUREG/CR-7023, Vol. 2, PNNL-19400, Vol. 2, Richland, WA, USA, 2010
- [11] J. R. Wang, Y. Chiang, Y. S. Tseng, H.T. Lin, C. Shih, and S. W. Chen. MODELING AND APPLICATION OF TRACE IN THE KUOSHENG BWR/6 NPP DRY-STORAGE SYSTEM.
- [12] C. Shih, Y. S. Tseng, "The final report of parallel validation study for KSDSS," 2013.
- [13] Taipower Co., "FSAR of Kuosheng NPP Dry Storage System," 2013.

反應器壓熱震熱水流分析技術建立與暫態事故對壓力容器熱流影響評估

Develop the Thermal-Hydraulic Analysis Methodology to Evaluate the Influence of Pressurized-Thermal-Shock in PWR Transient and Accident

計畫編號：103-2623-E-007-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：施純寬

e-mail：ckshih@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：曾亭綱、康景翔

執行單位：國立清華大學核工所

摘要

壓熱震對壓水式反應器於事故或暫態期間的完整性有顯著影響之現象，當壓熱震導致反應器壓力槽破損，將導致更嚴重的冷卻水流失與後續救援的問題。為了能改善以往僅利用 RETRAN、RELAP5 等軟體進行熱流分析而可能導致的流場分析誤差，本研究嘗試利用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics)針對於核三廠降流區進行模擬，並利用 ROCOM 系統之實驗數據進行分析技術校驗，以確保本研究所建立之馬鞍山電廠反應器模型具有相當的精確性。本研究順利完成分析技術之校驗、馬鞍山電廠分析模式的建立，並利用蒐集所獲得的 MSLB 與 SBLOCA 事故資訊，進行了事故狀態下省略程度不同之反應器壓力槽模型之溫度變化分析，其結果顯示，降流區內部中子屏蔽板與冷熱端環路的幾何關係，將導致部分壓力槽內壁具有較高的降溫速率，並導致爐壁之溫度梯度。上述結果顯示透過計算流體力學分析技術將有助於掌握更精確的流場現象與爐壁之溫度不均現象，以更進一步的提供相關熱流參數來改善後續之應力分析精度。

關鍵詞：壓熱震、CFD、MSLB、SBLOCA

Abstract

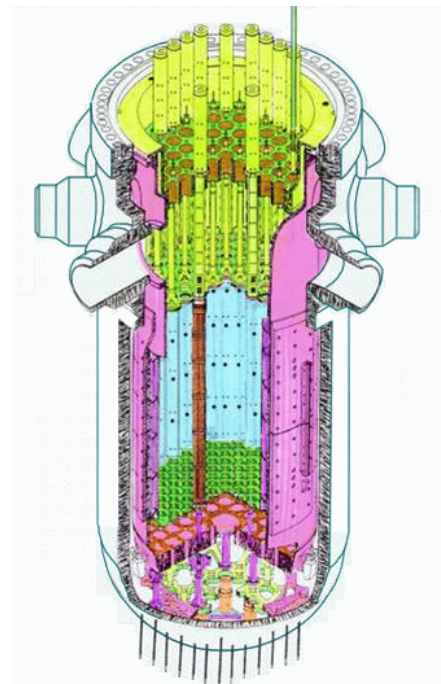
Pressurized thermal shock (PTS) is a key issue of the vessel integrity for pressurized water reactor (PWR) during a transient accident. It would lead to loss of coolant and subsequent rescue problems when the pressure vessel damaged due to PTS condition. The CFD (computational Fluid Dynamics) is selected in this project to simulate and calculate the detail of flow behavior in the part of downcomer of Maanshan nuclear power plant (NPP) in order to improve the flow analysis error of RETRAN and RELAP5 in the past. The analysis process and validation is based on the data from ROCOM facility test to ensure the accuracy of model establishment of Maanshan power plant. After one year operation, the validation of analytical techniques and establishment of Maanshan power plant analytical model are successfully completed. The analysis of temperature distribution in the pressure vessel is also calculated with the information of MSLB and SBLOCA accident. It shows that the geometry of neutron shielding plate and hot and cold loops inside the downcomer would lead to higher cooling rate in some parts of pressure vessel wall in the results. This finding not only can prove that the

CFD can be a useful analysis tool for PTS analysis to catch the detail flow behaviors and temperature imbalance on the PRV vessel, but also be provide more accuracy data to improve the quality in stress analysis field.

Keywords: PTS, CFD, MSLB, SBLOCA.

I. 前言

壓水式反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)之主要設計理念係利用高壓的一次側工作流體將核燃料之核反應熱攜至蒸汽產生器的二次側，以確保反應器爐心出口之一次側工作流體為次冷態，進而減低核燃料因為流道內空泡所產生的中子效率降低及表面沸騰可能導致的燃料護套氧化問題。為了達成此一設計理念，壓水式反應器藉由爐心冷卻系統(Reactor Cooling System, RCS)將流經蒸汽產生器降溫後的高壓一次側工作流體由冷端環路(Cold-Legs)注入反應器內，並流經反應器槽壁與爐心側板所形成的環形降流區後由爐心下方流經燃料，經過燃料的加熱後再由上內部阻件的底板經由熱端環路(Hot-Legs)流至蒸汽產生器而形成完整的一次側循環(圖 1)[1]。



圖一、馬鞍山電廠示意圖

然而為了確保反應爐壓力邊界之完整性，並防止其於運轉或暫態事故下避免裂紋成長而導致裂穿之狀況，電廠依據 NRC 之 10CFR50.61[2]準則與相關研究成果，制定了 RCS 完整性之運轉限制區域[3, 4]、緊迫性壓熱震[5]與預期性壓熱震[6]之相關程序書。以防止出現系統發生壓熱震時對反應器造成損壞。

除了依賴上述的壓熱震處置程序與運轉限制確保機組之安全外，為了更進一步地評估壓熱震對反應器壓力槽可能造成的破壞，以符合近年來逐步提升的核安要求。許多的研究團隊亦對此議題進行了相關分析能力的建立與現象研究。其中，ICAS (International Comparative Assessment Study)，曾於 1996 年[7]針對核電廠機組運轉狀況改變而產生的壓熱震問題，針對確性破壞機制、機率性破壞機制以及熱水流特性之影響進行研究，並指出機率破壞與熱流評估的精確性將嚴重影響壓熱震分析之準確度。

上述結果意味著，近期廣受壓熱震分析領域採用，同時整合系統熱流分析、機率風險評估(PRA)與機率評估技術(FAVOR, PASCAL, VISA-ii 等)之壓熱震分析技術，可能因為採用了較傳統的系統分析程式(System codes)而導致後續機率破壞分析的結果發生失準。因此，本研究擬藉由 CFD 分析技術，進行壓水式反應器壓熱震之熱水流分析技術建立與驗證，以建立一套合適之熱水流分析技術，並就我國電廠於各個重要暫態事故對反應器之爐壁影響進行深入之探討。

II. 模式建立與方法校驗

本計畫原擬於三年期間將逐年針對壓熱震議題進行階段性的分析技術發展、校驗與應用分析之工作，本期之主要工作係包括資料蒐集、模式建立與分析技術發展與 SBLCOA 案例測試等工作，而經由本期(第一期)之執行，業已完成各項工作，以下除了將針對第一年執行所獲之相關資料蒐集與分析技術、模型之建立等成果進行說明外，亦將就 MSLSB 事故與 SBLOCA 案例逐一進行研究成果之說明。

2.1 統御方程式

而對於以上假設的流體，連續方程式和統御方程式如下：

連續方程式 (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = \dot{m}$$

其中 $t = \text{time}$

$\rho = \text{密度}$

$\vec{U} = \text{流體速度向量}$

$\dot{m} = \text{流體質量產生或消散率}$

動量方程式 (Momentum Equation)

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla P + \rho \vec{g} + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U})$$

其中， $t = \text{time}$

$\rho = \text{密度}$

$\vec{U} = \text{流體速度向量}$

$\dot{m} = \text{流體質量產生或消散率}$

$P = \text{流體壓力}$

$\vec{g} = \text{重力向量(Gravitational Vector)}$

$\mu = \text{流體黏滯度(Viscosity)}$

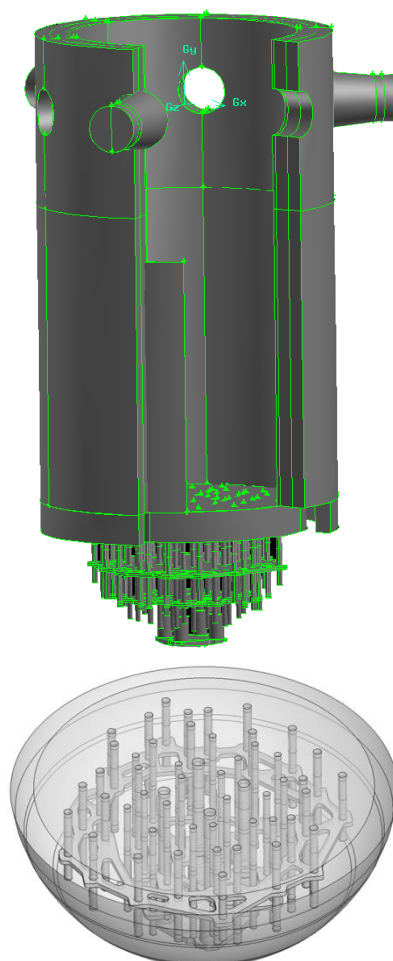
2.2 分析模式建立與網格測試

基於所蒐集而得之幾何資訊，本研究利用前處理軟體進行幾何模型之建立，此一分析區域主要係爐心冷端環路至爐心底板之區域，並藉由詳實之幾何模式來增進分析結果之可靠度。

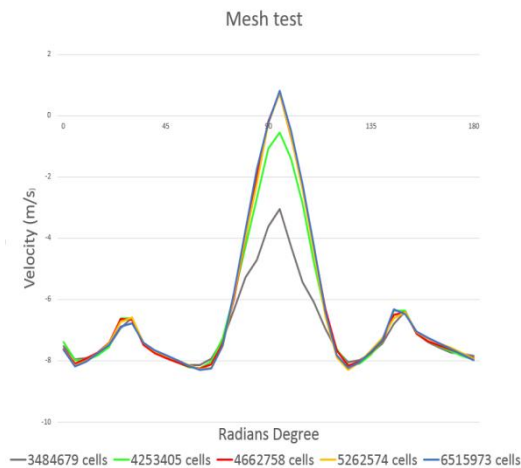
而更進一步的網格測試結果顯示，在選用超過 450 萬的格點時，模擬所得之結果將不受網格分佈之影響，故於後續之分析中，將利用 526 萬之網格設置條件來進行相關之熱流分析。

2.3 分析技術校驗

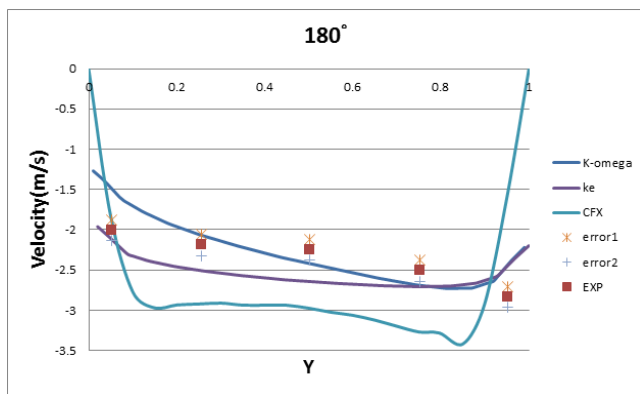
為確保本分析工作所選用之軟體、數值模式、網格條件與邊界設置等皆能符合需求，本研究選用已廣泛用於相關校驗之 ROCOM 實驗參數來進行相關模式之精確度驗證。如圖四所示，在將降流區之相關分析結果與 ROCOM 及以往利用 CFX 進行模擬之分析結果相比後可以發現，本研究之分析軟體在搭配 $k-\omega$ 紊流模式後可以獲得與實驗結果相符且保守之速度分佈，這意味著在進行後續之降流區分析時，將可獲得更為保守之爐壁降溫速率。



圖二、幾何模型示意圖



圖三、網格測試結果比較圖



圖四、分析技術平行驗證結果

III. 結果與討論

本研究在完成相關分析模式之開發後，即針對已選定之分析案例進行模擬分析，以下將就本年度完成之 MSLB、SBLOCA 與 SO-1 案例進行結果說明與討論。

3.1 MSLB 事故分析

當系統發生 MSLB 事故時，壓水式反應器之某一個循環迴路之蒸汽產生器將因為二次側斷管之事故而出現過度冷卻之狀況，並導致回流之系統溫度發生下降，而值得注意的是本事故下之冷端環路進口壓力將不會有明顯的改變。圖六為經由 CFD 分析所得之爐壁最高與最低溫度之趨勢圖，可預期的是當事故發生時，爐壁溫度將會隨著時間的推展而逐漸降低，直到冷端環路之溫度回昇後才會跟著回昇。然而因為冷卻水在降流區內係為逐步流動之狀況，因此爐壁將會因為處於整個流場位置之不同而有不同程度的降溫趨勢。也因此，圖六中所示之爐壁溫度差，亦將隨著事故發展而逐步增加，再緩慢縮小，而預期此一以往無法由 RETRAN 單一節點分析模式獲得的結果亦將有助於機率破壞力學分析預測能力的提昇。

3.2 SO-1 事故分析

如圖 5b 所示，若當系統發生類似小破口之釋壓閥卡開事件時，其整體溫壓趨勢將出現類似一次側小破口之狀況，使得反應器一次側持續因為失水而降溫降壓。但最大的不同是，釋壓閥卡開之狀況可能因為卡開之作

用因為不明原因消失而復歸，導致原本持續降溫降壓的系統，在處於相對低溫之狀況下，面臨一釋壓閥關閉後造成的壓力遽昇現象。圖七為此事故下分析所得之爐壁溫度變化，整體與事故邊界條件之響應係與前一事故相同僅降溫幅度較大，故不再此加以詳述。但由於此一事故所維持之時間較長，故相較於 MSLB 事故而言，其對於爐壁之影響將更為明顯故有其討論之必要。

圖八為 SO-1 事故發生 1000、4000 與 6000 秒後爐壁於腹帶區冷卻速之代表性爐壁與降流區溫度分佈圖。由圖中之結果可以清楚的發現，隨著冷卻水的逐漸降溫，爐壁溫度亦將因為共軛熱傳而逐漸對內散熱，然而由於傳導能力與壁厚之效應，使得爐壁部分仍存在有明顯的內外溫度差。此一發現更再次的證實前述(圖六)之事故期間爐壁溫度之不均勻性，而此點亦將是未來進行反應器壓熱震分析時恐需考慮的原因之一。

3.3 SBLOCA 事故分析

相較於上述 SO-1 係來自於 Beaver Valley 申照作業中所使用之極保守案例，我國核三廠出現類似事故之案例預期將可以長時間小破口事故導致廠內全黑事故之案例來進行對應(圖 5c)。雖然相較於 so-1 所具有的極大溫差與保守性，此一 SBLOCA 事故可視為與我國電廠較相近之案例。

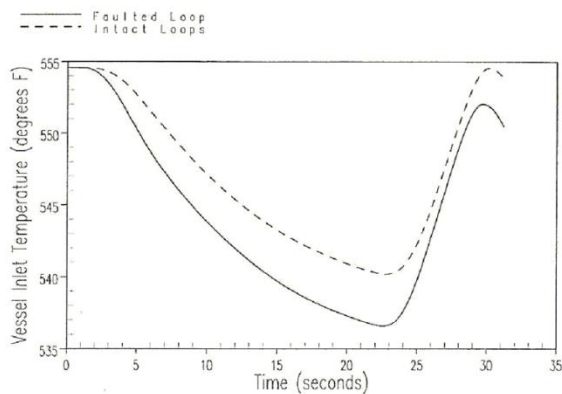
圖九為此事故下之溫度變化趨勢，相較之下，吾等可以發現在爐壁外側之最高溫度將與其它部分具有較明顯之差異。此一差異係因為相較於冷端環路進口處直接接受到冷卻作用之故，位於對流較差且遠離冷端環路之區域將會因為傳導效應較差所造成的冷卻延遲而具有較為和緩的溫度變化趨勢，但此一趨勢隨著事故的推展仍會隨著熱量的持續流失而使爐壁內外之溫度差縮小。

而此結果意味著，在較為符合我國電廠之事故狀況下，事故初期的爐壁或許存在較大的溫度差，但由於此時的溫度尚未低於材料之塑性變態點，故預期仍不會有對結構之完整性造成太大的衝擊，而隨著溫度的下降與溫差的減少，即使事故後期材料更趨於脆性材料，但因為溫度差所造成的熱應力效應亦已逐步消退。

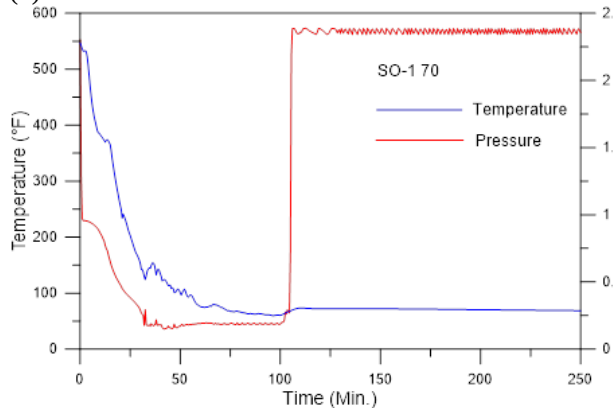
IV. 結論

本研究計畫藉由計算流體力學分析技術之應用，對我國核三廠進行完整之壓熱震熱水流分析技術發展，並依原計畫期程之規劃完成資料蒐集、分析技術建立、精確度校驗。而在完成相關技術之建立後，本研究更利用已發展之分析模式與技術針對核三廠於 MSLB、SO-1 與 SBLOCA 等事故進行分析；分析結果顯示，藉由 CFD 技術之導入，確有助於 PTS 分析之細微掌握，尤其是在整體溫降趨勢、爐壁均溫性等部分，皆可由 CFD 之引入獲得助益。未來，我國除了持續投入 CFD 於熱流分析技術之精進外，亦應著手建立完整之機率破壞力學分析技術，以期藉由完整之技術掌握與配合性，來解析各個電廠之壓熱震效應。

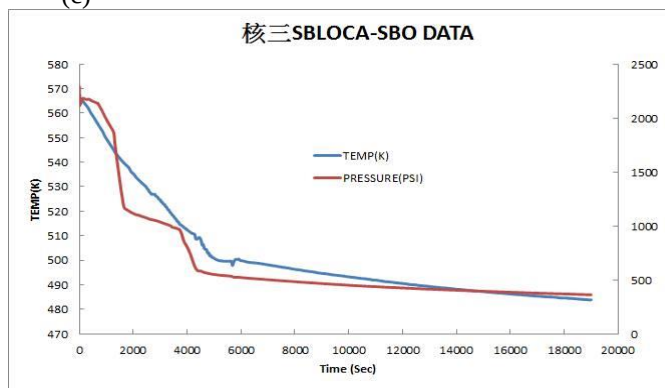
(a)



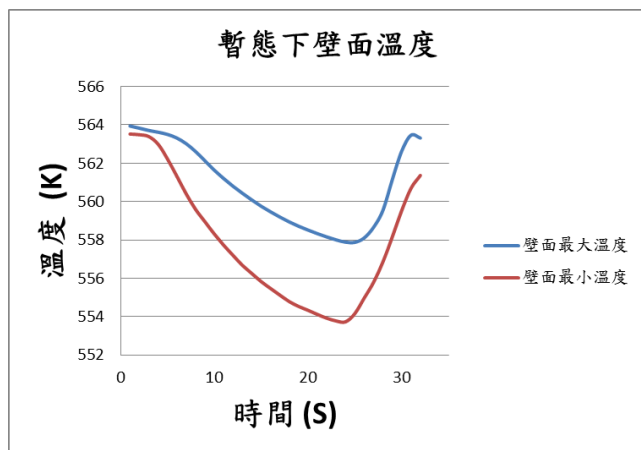
(b)



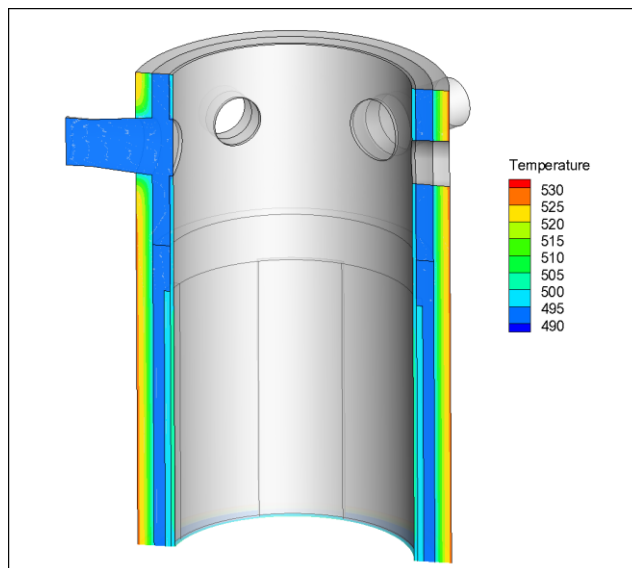
(c)



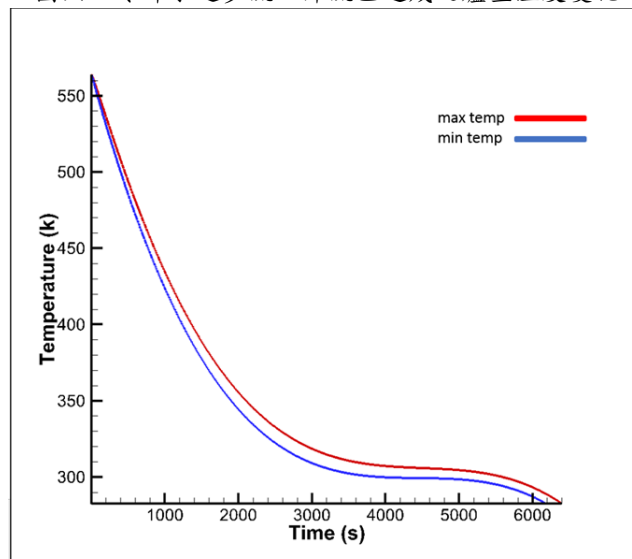
圖五、各暫態案例之事故邊界條件(a)MLSB、
(b)SBLOCA、(c)SO-1



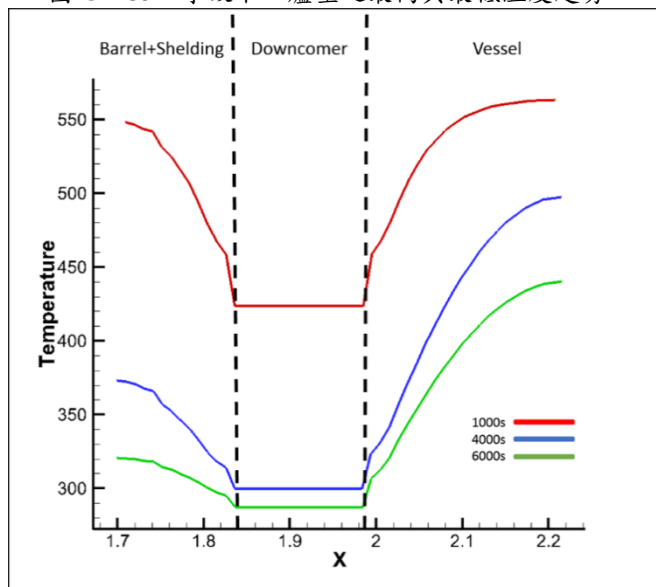
圖六、MLSB 下爐壁之溫度差異



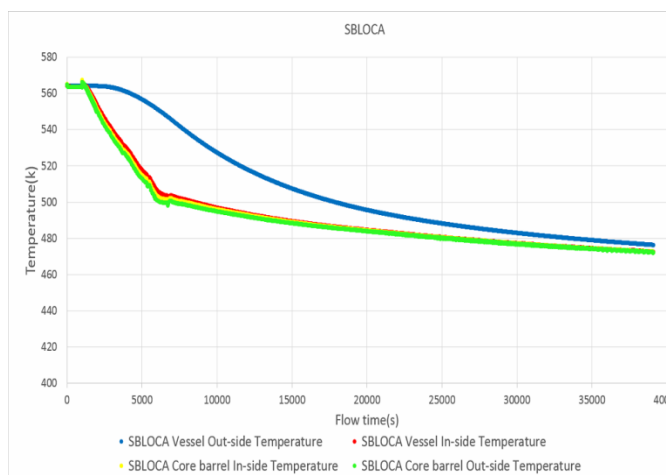
圖六、冷卻水逐步流入降流區造成之爐壁溫度變化



圖七、so-1 事故下，爐壁之最高與最低溫度趨勢



圖八、so-1 事故下，爐壁與冷卻水之溫度分佈圖



圖九、SBLCOA 事故下，爐壁溫度分佈圖

參考文獻

- [1] 台灣電力公司，“馬鞍山電廠工程圖” M1-0042-0011.001。
- [2] NRC, “Use of code cases N-588, N-640 and N-641 in developing pressure-temperature operating limits,” NRC regulatory issue summary, 2004-04.
- [3] 台灣電力公司，“馬鞍山電廠運轉程序書-RCS 完整狀態圖” 507.37 Rev. 3, 中華民國 101 年 11 月 2 日。
- [4] 台灣電力公司，“馬鞍山電廠運轉程序書-RCS 完整性狀態圖基礎說明 ” 301.37 Rev. 0, 中華民國 100 年 3 月 16 日。
- [5] ASME, “EN-N-588 Alternative to Reference Flaw Orientation of Appendix G for Circumferential Welds in Reactor Vessels Section XI Division 1,” 2004.
- [6] ASME, “EN-N-640 Alternative Reference Fracture Toughness for Development of P-T Limit Curves Section XI Division 1; ANNULLED SUPP 4,” 2004.
- [7] B.R. Bass, C.E. Pugh, J. Sievers, and H. Schulz, “Overview of the International Comparative Assessment Study of Pressurized Thermal-Shock in Reactor Pressure Vessels,” Int. J. Pressure Vessels and piping, vol 78, p.p. 197-211, 2001.

燃料束 CFD 分析之紊流模式適用性與保守性研究

Investigation of CFD Model and Analysis Review Guideline in Rod Bundles

計畫編號：103-NU-E-007-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：馮玉明

e-mail：ymferng@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：林志宏、曾永信、曾嫻淇

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

安全分析一直是核電廠設計、運轉與安全不可或缺的重要工具。傳統式的核電廠安全分析，端賴系統分析程式，並運用保守度或安全餘裕補足模式之不足以確保核電廠之安全。近年來在電腦運算與儲存能力突飛猛進的助益下，核能安全分析界逐漸地應用計算流體力學(CFD)程式進行相關之分析。國內既有電廠運轉安全相關改善案或者廠家引進新型燃料之相關安全分析上，也出現使用 CFD 程式進行全部或部份分析的案例，並進行分析法制化或申照之工作。CFD 程式應用於核電廠安全分析，最重要的是理論模式與格點模式的選取。然而，核電廠複雜的幾何配置與熱水流現象已超過 CFD 程式內建一般理論模式的適用範圍。不過，對於核能安全分析而言，預測保守的紊流模式比與預測準確的紊流模式更為重要。因此，管制單位對於利用泛用型 CFD 程式進行核電廠安全分析案例之審查，就必須審慎為之。對於管制單位審查而言，此乃是一項極大的挑戰。故國內管制單位對於 CFD 相關之研究，需及早地進行。因此，本研究計畫擬針對模擬燃料管束流(Fuel Bundle Flow)的幾何配置進行 CFD 紊流模式之分析與驗證，並探討不同紊流模式對 CFD 分析結果之影響及其適用性與保守性，作為建立 CFD 分析燃料管束流案例(如用過燃料池熱水流分析)之模式與評估審查的基礎，提供管制單位參考。

關鍵字：核電廠安全分析、計算流體力學、燃料管束流、紊流模式

Abstract

Safety analysis is one of essential tools for the design, operation and safety of nuclear power plants (NPPs). Traditional safety analysis for NPPs depends on system codes with more conservative assumptions or margins to ensure the plant safety, which would scarify the operation flexibility and efficiency. With advantages of dramatic progress in computer power, CFD is gradually adopted in the nuclear safety analysis. In addition, Taipower has licensed some safety analysis cases using or partially using the CFD. The most important things for the CFD simulations are the establishment of mesh and models, especially for the application of turbulence models, including numerical treatment for near wall boundary. The thermal-hydraulic phenomena related to the reactor safety are so complicated that the models adopted in the commercial CFD may not reasonably capture these characteristics. Independent simulations and cross-check

are necessary for the regulator staff to review the CFD issues. Therefore, it is crucial for the regulatory staff to investigate the CFD modeling and assessment. The objective of this project is to model the characteristics of fuel bundle flow, including the investigations on the CFD methodology and the influence from different turbulence models. These simulation results can assist the regulator staff in providing the basis of review guidelines for this issue.

Keywords: Nuclear Reactor Safety, CFD, Fuel Bundle Flow, Turbulence Models

I. 前言

I.1 研究背景

安全分析一直是核電廠設計、運轉與安全不可或缺的重要工具。傳統式的核電廠安全分析，端賴使用系統分析程式，並運用保守度或安全餘裕補足模式之不足以確保核電廠之安全，而犧牲了電廠的運轉彈性與效率。近年來核能安全相關分析專家，在電腦運算與儲存能力突飛猛進的助益下，逐漸地應用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)程式於核電廠相關之安全分析[1-3]。在可見的未來，國內既有電廠運轉安全相關改善案或者廠家引進新型燃料之相關安全分析上[4]，會出現使用 CFD 程式進行全部或部份分析的案例，並進行分析法制化或申照之工作。CFD 主要是利用質量、動量與能量守恆方程式(Conservation Equations)以及適當的紊流模式等來模擬局部熱水流特性。近二十多年來，CFD 已成功地運用在非核能之領域，包含汽車業、航空業以及渦輪機械(Turbo-Machinery)等。然而，CFD 不是一門很快上手且容易精通的學問(quick- and-easy science [3])，現階段 CFD 仍不是如傳統系統分析程式一般，屬於一個成熟的安全分析工具[1]。若要應用於核電廠安全分析，其模式必須經過嚴格地校驗[3,5]。

核電廠安全分析相關之熱水流物理現象，除了單相流特性外，還有不同於上述領域之流體混合與熱分層、雙相流與沸騰熱傳、化學燃燒(Chemical Combustion)、物種遷移(Specie Transport)與紊流擾動(Turbulent Mixing)等複雜之物理現象以及長時間的暫態模擬等。以現今 CFD 的發展而言，在單相流方面，CFD 雖然已有比較成熟的理論模式與成功的應用案例。不過，對於核電廠複雜的幾何配置(Geometric Layout)與熱水流現象，像是燃料棒束(Rod Bundle)、葉片/格架(Vane/Grid)配置、安全注水(Safety Injection)的歧型管等幾何配置以及自然對流(Natural Circulation)、熱輻射(Thermal Radiation)、流

體分離(Flow Separation)等紊流擾動與化學燃燒等物理現象，仍需要研究更適用的紊流模擬模式與熱輻射模式等，才能得到較保守且準確的預測結果。而在雙相流與沸騰熱傳以及冷凝(Condensation)等模擬模式方面，更是已超過現有CFD程式能準確模擬的能力範圍。

對於核能安全分析而言，CFD能改善傳統分析程式之不足或是與系統分析程式結合，以提昇安全分析準確性之應用範圍。因此，各國核能界CFD分析團隊(包含管制單位、國家級實驗室以及核電相關製造廠家等)，已開始積極地進行相關實驗以及CFD模式發展與校驗工作。目前國外已有利用CFD程式執行乾式貯存(Dry Storage)相關安全分析，並進行申照工作。國內亦有核能研究所在乾式貯存、液壓池(Suppression Pool)與用過燃料池(Spent Fuel Pool)之熱水流分析上，使用CFD程式進行分析工作。同時，亦利用離線方式將CFD結合RETRAN軟體之方式，完成核一廠高壓注水系統誤動作事故之分析，這些分析成果亦已進行申照工作。由於適合CFD安全分析之核能相關課題類別相當繁多且模擬之物理現象也非常複雜[6,7]，並無法針對所有課題進行CFD安全分析模式與評估之研究。因此，本研究計畫擬針對模擬燃料管束流(Fuel Bundle Flow)的幾何配置進行研究。

此外，CFD程式應用於核電廠安全分析，其中最重要的是最佳理論模式與格點模式的選取。前期計畫「我國核能電廠CFD安全分析模式與評估審查導則之先期研究」，已完成燃料管束流之三維分析網格模式之研究與泛用型(Generic)基本紊流模式之初步分析(包含k-e, k-w等)[8]；然而，核電廠複雜的幾何配置(Geometry Layout)與熱水流(Thermal-Hydraulic)現象已超過泛用型CFD程式內建之一般理論模式的適用範圍[2]由是之故，本計畫擬探討燃料管束流幾何配置CFD分析之紊流模式適用性與保守性研究。對於核能安全分析而言，預測保守的紊流模式比與預測準確的紊流模式更為重要。如Liu等人[8]研究結果所示，k- ω 、RSM基本紊流模式可以合理吻合實驗數據，並掌握格架/葉片強化移熱能力的特性。不過，其卻低估格架/葉片引導冷卻水遠離燃料棒而劣化移熱能力，並造成熱點出現於燃料棒表面之現象。此紊流模式有其準確性但缺少保守性，似乎不能符合核能安全分析的要求。因此，完整的紊流模式其保守性評估就有其重要性。

管制單位對於利用CFD程式進行核電廠安全分析案例之審查，就必須審慎為之，而同行審查(Peer Review)是一個必要且有效的方式[10]。對於管制單位審查而言，乃是一項極大的挑戰。故國內管制單位對於CFD相關之研究，需及早地進行。進行CFD理論模式研究、分析與驗證，並探討CFD分析結果之影響及其適用性與保守性，作為日後建立CFD分析燃料管束流幾何配置案例(例如，用過燃料池熱水流分析)之模式與評估審查的基礎，提供管制單位參考。本計畫除了上述目的外，亦能在CFD應用於核電廠相關安全分析上，落實技術本土化並達到國際同步化之目標。此外，本計畫研究過程亦能訓練CFD與核能安全分析兩者兼顧之人才，對於核能分析人才的養成，亦是本計畫的目的之一。

1.2 研究目的

本研究計畫擬針對模擬燃料管束流(Fuel Bundle

Flow)的幾何配置進行CFD理論模式進行研究、分析與驗證，並探討不同紊流模式對CFD分析結果之影響。不同紊流模式有其處理近壁行為的模式，而不同紊流模式在邊界層內與邊界層外有不同的表現，有時不同紊流模式在邊界層外的結果其實相差無幾，與實驗數據也相當符合，但邊界層近壁的變化梯度(Gradient)卻可能與真實情況有誤差。因此，本研究利用CFD分析程式進行穩態(Steady state)熱流模擬，並引用Mantlik等人[11]的單相流燃料管束流之次通道實驗的各設計參數以建立模型，包括幾何形狀、邊界條件、以及流體性質，以計算分析流場、溫度場等各熱傳參數與分布並比較。Baglietto等人[12]則以此實驗進行計算驗證。計算所得結果將可作為日後建立CFD分析燃料管束流幾何配置案例(例如，用過燃料池熱水流分析)之模式與評估審查導則基礎之先期研究，提供管制單位參考。

II. 主要內容

如前所述，在CFD分析法進入核電廠安全分析領域並進行執照化(或申照)前，許多模式驗證之研究(包含實驗執行與模式精進等)必須完整地進行，這些CFD模式包括格點模式、物理現象模擬模式、數值求解方法以及不準度評估模式等。適合CFD分析之核能相關範圍高達22類以上，課題種類相當繁多且模擬之物理現象也非常複雜，實不可能針對所有分析課題進行完整之研究與模擬。因此，本研究計畫擬先針對模擬燃料管束流(Fuel Bundle Flow)的CFD分法論(Methodology)進行完整的研究、分析與驗證，並探討不同格點模式對CFD分析結果之影響與CFD應用的可行性等。

II.1 物理模型

現行的壓水式核反應器 PWR (Pressurized Water Reactor)爐心內燃料束多以平行四方陣列方式擺放，此擺設方式導致燃料束中間流道形成三角狀，稱三角通道(triangular array)，通道中流場影響燃料散熱甚鉅，燃料表面附近之流體溫度與速度變化梯度正係熱通量(Heat Flux)與剪應力(Shear Stress)表徵，因此本報告著重於壁面剪應力、速度和流場分析，分別與Mantlik等人的實驗數據作比較。燃料與中間通道配置圖如圖 III.11 所示。

II.2 統御方程式

本研究中所模擬的物理現象，必須利用統御方程式來計算，並將所獲得之結果加以分析。對於一般尺度的流體流動現象，可利用Navier-Stokes方程式來描述。基於各守恆定律所推導出來的方程式包含：質量守恆方程式、動量守恆方程式及能量守恆方程式。

1. 質量守恆方程式 (Conservation of Mass; Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad \text{II - 1}$$

其中

t: time

ρ : density

u_i : velocity in i direction

2. 動量方程式 (Conservation of Momentum;
Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad \text{II - 2}$$

其中

P : static pressure

τ_{ij} : stress tensor

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad \text{II - 3}$$

3. 能量守恆方程式 (Conservation of Energy; Energy
Equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho E + P) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + u_j (\tau_{ij})_{eff} \end{aligned} \quad \text{II - 4}$$

其中

k_{eff} : effective conductivity

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{u_i^2}{2} \quad \text{II - 5}$$

II.3 紊流模型

目前核能界所進行之分析工具大多採用商用 CFD 程式包含 ANSYS-CFX、FLUENT 與 STAR-CCM+等，這些泛用型(General Purpose)CFD 程式主要是利用守恆定律所推導的質量、動量與能量守恆方程式以及紊流模式等來模擬三維空間局部的熱水流特性。由於紊流屬於時變(Time Varying)的流場特性，工業上的分析工作一般均採用 Reynolds- Averaged Navier-Stokes 紊流模式(RANS Turbulence Models)求解流場平均的特性(Mean Characteristics)，以減少龐大的計算，並使 CFD 能實際應用於工業分析上。根據求解域(Solution Domain)之幾何形狀與流場特性，常用的 RANS 紊流模式有 Spalart-Allmaras 模式 [13]、 $k-\varepsilon$ 模式 [14]、RNG (ReNormalization Group) $k-\varepsilon$ 模式 [15]、Realizable $k-\varepsilon$ 模式 [8]、 $k-\omega$ 模式 [16]、SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 模式 [17] 以及 RSM(Reynolds Stress Model)模式 [18] 等。不同之紊流模式各有其適用的範圍，且採用不同之紊流模式可能會出現不同的預測結果。因此，不同模式的分析是研究工作中重要的一環，本計畫對於紊流模式的適當選取上，將下列幾項紊流模式於本計畫研究進行探討與分析，並可作為 CFD 相關分析案例之基礎依據與參考。

1. 標準 $k-\varepsilon$ 模式是一般工業界最常用的紊流模式，其適用於高 Reynolds number 且高等向性(Isotropic)的流體。但其在壁面上的處理計算，是引用 WF 來進行，對於分離流(separated flow)問題之誤差值仍較大。所以才有所謂的 Low-Reynolds number $k-\varepsilon$ 模式或以加強壁面處理模式(Enhanced wall treatment)來進行分析。

2. Realizable $k-\varepsilon$ 模式與標準 $k-\varepsilon$ 模式相比之下，其在紊流黏性(Turbulent viscosity)以及 ε 方程式分別新增加了公式，所以對於旋轉流(Swirling Flow)、高逆壓梯度(Reverse Pressure Gradient)、流動分離(Flow Separation)與二次流(Secondary Flow)等現象有很好的模擬能力。
3. $k-\omega$ 模式是為考慮低雷諾數、可壓縮性和剪切流傳播而進行改良的雙方程式紊流模型，其適用於自由剪流(Free Shear Flow)、圓柱繞流(Flow around a Cylinder)與噴射流(Jet Flow)等流體之模擬。
4. RSM 模式是直接求解 Reynolds Stress 之分量，其非常適用高強度渦流、旋轉與非等向性之流體，它對於複雜流動有著更高精度預測的能力。但計算成本因其需求解更多的方程式，而需要花費更多的計算時間。如圖 4 所示，其是以 RSM 模式模擬流體在燃料管束中次通道(subchannel)的流動特性。
5. Low-Re $k-\varepsilon$ 模式 [19,20] 最主要是考慮當局部紊流 Reynolds number 低於 150 時，上述所提及採用 WF 的 $k-\varepsilon$ 模式並不適用的情況下，可選擇使用的一種紊流模式。採用 WF 計算近壁面的速度時，其是採用對數定律分布，從壁面到第一格點間的剪應力是均勻的，而在此區域內紊流動能的產生與耗散是達平衡狀態。然而，實際上在非常靠近壁面的區域，紊流動能是強烈地被衰減掉，而此時的耗散率則應是達到最大值。因此，在近壁區的流體特性方面，其分子的黏性作用將會非常的顯著。而核能安全所重視之一即為剪應力，故如何藉由 CFD 正確地預測近壁之熱水流行為，對於合理預估結果之正確性與保守性而言，Low-Re $k-\varepsilon$ 模式的選用與分析亦將是本研究計畫重要的課題之一。

II.4 邊界條件與數值模擬設定

於壁面邊界條件的設定方面，所有壁面皆為無滑移邊界條件，由於入口條件雷諾數為 64300，帶入空氣流體性質計算後得入口速度為 16.734 m/s，而出口條件設為錶壓力等於零。表 II.1 列出基本邊界條件設定，表 II.2 為離散方程式中所設定的數值方法與收斂判定。圖 II.1~II.4 分別為燃料束通道之幾何、網格及邊界條件示意圖。

表 II.1 基本邊界條件設定

邊界	各邊界條件
入口 Inlet	流速 $v = 16.734 \text{ (m/s)}$ 溫度 $T = 298 \text{ (K)}$
出口 Outlet	錶壓力 Gauge Pressure = 0
牆壁	絕熱 $P = 0 \text{ (W)}$ 牆壁邊界條件
除牆壁外之交界面	對稱邊界條件

表 II.2 數值方法與收斂判定

壓力速度耦合法	SIMPLEC
離散方程式中 各項離散化方法	二階迎風法 (Second-Order Upwind)
紊流模型中近壁面處理	Enhanced Wall Function
收斂結果判定	殘差值皆小於 10^{-4}

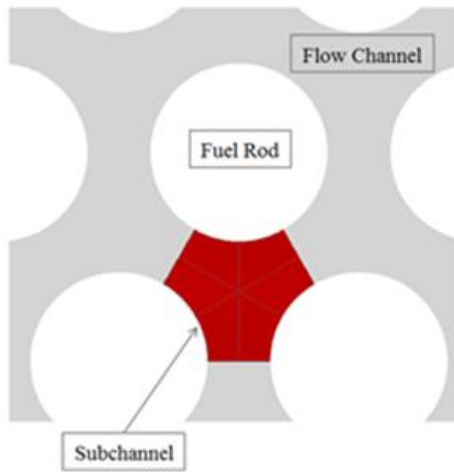


圖 II.1 燃料與中間通道配置圖

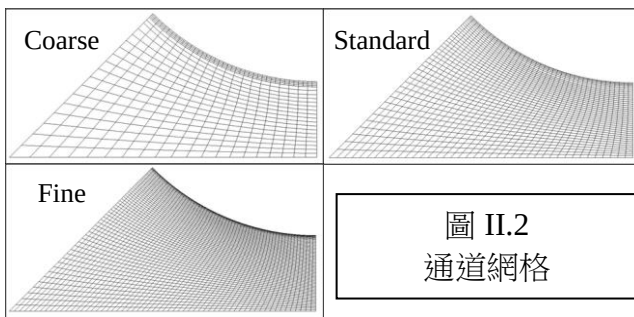


圖 II.2
通道網格

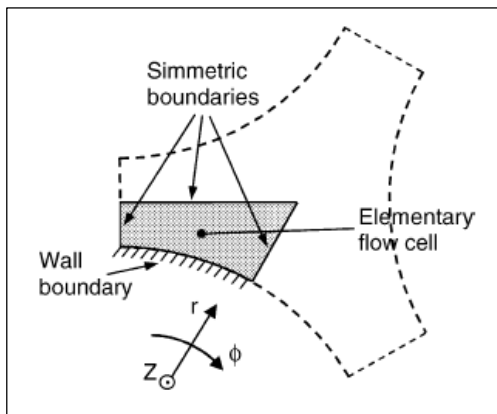


圖 II.3 燃料組件圖[12]

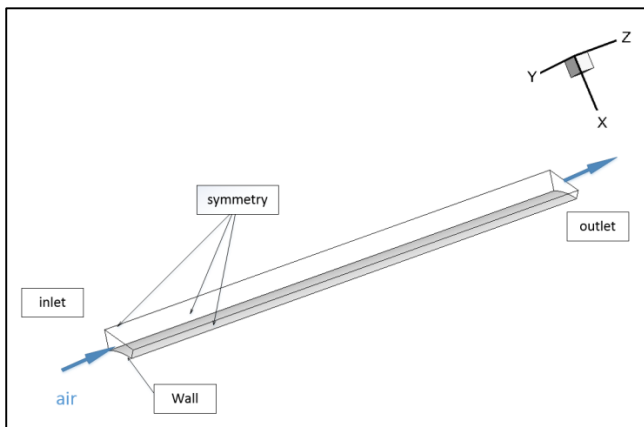


圖 II.4 燃料束通道之邊界條件

III. 結果與討論

為了建立一套 CFD 安全分析模式，需採用 CFD 模擬結果與實驗數據進行驗證，比較 CFD 不同紊流模型 (RANS) 和實驗數據的差異，並分別進行不同紊流模型之差異性分析，以探討紊流模式之影響。本研究以 Mantlik et al.[24] 實驗進行比對，其分別是通道橫切面的流體方向、壁面剪應力和三個角度 (0° 、 15° 、 30°) 切線的速度分布。本模擬使用六種紊流模式，分別是標準 $k-\epsilon$ 模式、Realizable $k-\epsilon$ 模式、Low-Re $k-\epsilon$ 模式 SST $k-\omega$ 模式、標準 $k-\omega$ 模式、RSM 模式。

III.1 無因次化壁面剪應力結果

實驗數據比對結果為圖 III.1 所示，CFD 模擬結果為在 Z 軸長度 5.6m 的壁面剪應力對平均剪應力的比值，採無因次化表示，如圖 III.2 所示。圖中可看出 Baglietto 等人[12]所模擬的 Linear $k-\epsilon$ 模式變動幅度比實驗大，經過修正後為 Modified SZL 模式，Modified SZL 模式結果與實驗非常相近。

大範圍來看，壁面剪應力與角度呈正向關係，但壁面剪應力在角度 20° 時達到最大值，之後緩緩下降，到角度 20° 時達到第二低點，再緩緩上升。原預測角度 30° 為三燃料組件之間通道的中心，故應為迴流最多最亂區域，致使壁面剪應力最大，但明顯最大壁面剪應力卻在角度 20° 處，故最多迴流發生處應不是在角度 30° 而是在角度 20° 。

如圖 III.3 所示為模擬與實驗結果之比對，其結果顯示實驗數據所形成之震盪反較 CFD 不同紊流模式分析結果要來得大，而其中 Low-Re $k-\epsilon$ 模式之分布趨勢與實驗數據分布較為接近，其可能之原因為 Low-Re $k-\epsilon$ 模式多加考量壁面近格點內的紊流耗散項。再以 Y 軸拉小數字範圍以便觀察更仔細，如圖 III.4 顯示，Realizable $k-\epsilon$ 模式與標準 $k-\epsilon$ 模式的趨勢線相近，幾近呈現為同一趨勢變化。SST $k-\omega$ 模式為標準 $k-\omega$ 模式之延伸模式，其趨勢變化走向也相似，只標準 $k-\omega$ 模式震盪幅度大，SST $k-\omega$ 模式平緩，較接近實驗，比較特別是唯 RSM 模式在近壁區的壁面剪應力比平均值偏高，為先升再降，明顯與實驗不同。

III.2 通道切面速度模擬結果

在通道 5.6m 處的切面平面上以 Z 軸為轉軸，從平面中短邊開始旋轉，定義 0° 起始點，到長邊 30° 停止，依序擷取不同角度上切線的速度值，而依照角度總共分成 0° 、 15° 、 30° 三項案例作比較。

速度 0° 結果

文獻[12]中平面 0° 上的速度切線值為圖 III.5，從圖中可清楚看到速度隨著切線距離 Y(mm) 增加，速度在近壁區增加非常迅速，之後趨勢變緩，平穩增加，最後在尾端趨近於平穩。擷取數據與 CFD 模擬結果比對後，如圖 III.6 所示。圖中實驗數據依樣比任何其他 CFD 紊流模式高，其中 RSM 模式雖是最貼近實驗數據，但近壁區的模擬卻無法符合實際情況；在近壁區速度本應逐漸趨近於零，但 RSM 仍保有一定的速度，這說明了 RSM 模式在近壁區的模擬有缺陷。RSM 在高強度渦流、旋轉和非向性流體中模擬得宜，可在流線圖中模擬出渦流現

象，這是其他紊流模型無法模擬出的現象，但 RSM 在壁面處卻無法得到好的結果，圖 III.3 的壁面剪應力結果中可以看出，RSM 模式的壁面剪應力會在近壁處增加，違反常理。

除了 RSM 模式，其他紊流模型都與實驗相差較大，為了更清楚差異，圖表採速度無因次化顯示，如圖 III.7 所示。實驗的速度變化較平緩，由於 Realizable $k-\epsilon$ 模式為標準 $k-\epsilon$ 模式修正後的方程式，兩模式仍維持相同的趨勢，只 Low-Re $k-\epsilon$ 模式變化大，近壁區速度攀升較快；SST $k-\omega$ 模式和標準 $k-\omega$ 模式並無差別，與標準 $k-\epsilon$ 模式大致相同，其實除了 RSM 模式和 Low-Re $k-\epsilon$ 模式以外，各模式均大致相同。

速度 15° 結果

文獻[12]之結果來看速度在 0°、15°、30° 的趨勢線其實相差不遠，只是數值會隨著角度改變而有些差異，15° 的平均速度比 0° 的平均速度高，最高值達到 18.3m/s 附近，如圖 III.8 所示。而 0° 速度的最高值為 17m/s，如圖 III.5 所示。圖 III.9 為 CFD 模擬結果與實驗數據的比照圖，其中 15° 的模擬與 0° 情況相同，仍以 RSM 模式最貼近實驗，但近壁區模擬卻無法符合實際情形；Realizable $k-\epsilon$ 模式與標準 $k-\epsilon$ 模式維持相同的趨勢，Low-Re $k-\epsilon$ 模式起伏最大，近壁區速度低，短距離內迅速攀升，特別是 Low-Re $k-\epsilon$ 模式在 Y=9mm 處有先降後升的特徵，可能為收斂不完全；SST $k-\omega$ 模式和標準 $k-\omega$ 模式屬同一種方程式，雖 SST $k-\omega$ 模式有經過修正，在近壁區改採 $k-\epsilon$ 模式，但 $k-\omega$ 方程式仍影響較大，使 SST $k-\omega$ 模式和標準 $k-\omega$ 模式並無差別。圖 III.10 無因次化後的速度圖，與速度並無太大差別，只 CFD 任何紊流模式模擬的變動幅度比實驗大，而從圖中可看出仍以 RSM 模式較符合實際。

速度 30° 結果

30° 的結果和前兩角度的趨勢相同，速度持續隨著 Y 距離增加而增加，而平均速度也升高，最高大速度已達到 20m/s，比前兩個角度都來的大，如圖 III.11CFD 模擬結果，如圖 III.12 與圖 III.13 與前兩案例相同，依趨勢不同主要分成四種結果：RSM 模式、Realizable $k-\epsilon$ 模式與標準 $k-\epsilon$ 模式、Low-Re $k-\epsilon$ 模式、SST $k-\omega$ 模式和標準 $k-\omega$ 模式。紊流模型中，RSM 模式最符合實驗；第二種情況為 Realizable $k-\epsilon$ 模式與標準 $k-\epsilon$ 模式，速度攀升快，中期後減緩；第三種情況為 Low-Re $k-\epsilon$ 模式，近壁區攀升最快，但後來趨緩，在 13.5mm 處又大幅度攀升；第四種情況為 SST $k-\omega$ 模式和標準 $k-\omega$ 模式，位在第二種和第四種中間。

III.3 流線場結果

文獻[12]中提到流線圖，在角度約 20° 處有一大迴流，印證了壁面剪應力的結果。圖 III.14 為通道流場比較圖，(a)為實驗數據[12]；(b)為 RSM 模式；(c)為標準 $k-\epsilon$ 模式。CFD 也模擬了流場現象，但在所有紊流模式中，只 RSM 模式(圖 III.14(b))最貼近實驗，唯獨其模擬出迴流，或許是因為 RSM 模式是所有模式中唯一有假設流體非等向性做運算的模式。但 RSM 模式雖模擬出迴流，卻

與實驗相差極大，實驗中只有一大迴流位在角度 20° 處；RSM 模式卻有許多小型迴流沿著牆壁排列。迴流的結果也影響在壁面剪應力的結果上，RSM 模式是所有模式中唯一壁面剪應力在角度 0° 處最高，依後緩緩下降，從角度 10° 開始持平，也許是諸多小迴流的緣故，致使壁面剪應力的比值持平。

雖然流現場結果無法完全精準於實驗，但 RSM 模式能模擬出迴流，如圖 III.14(b)，結果這件事仍是一大發現，可往 RSM 模式方向進行研究，也許 RSM 模式經過修正後能預測一大迴流。只壁面剪應力也須進行驗證，因最大壁面剪應力在角度 0° 處，之後隨著角度增加而下降的趨勢並非如實際情況。除了 RSM 模式外其餘紊流模式約莫如標準 $k-\epsilon$ 模式，如圖 III.16 無法完整模擬迴流，且流體成等向性。

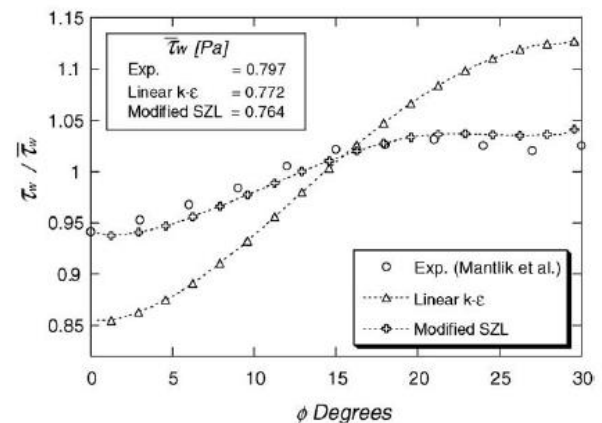


圖 III.1 實驗與不同紊流模式之壁剪應力分布[12]

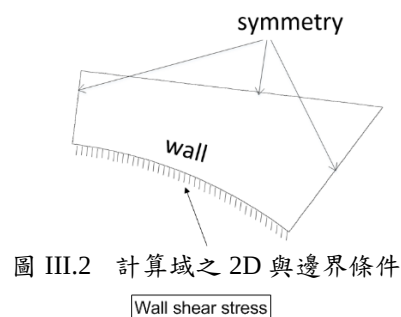


圖 III.2 計算域之 2D 與邊界條件

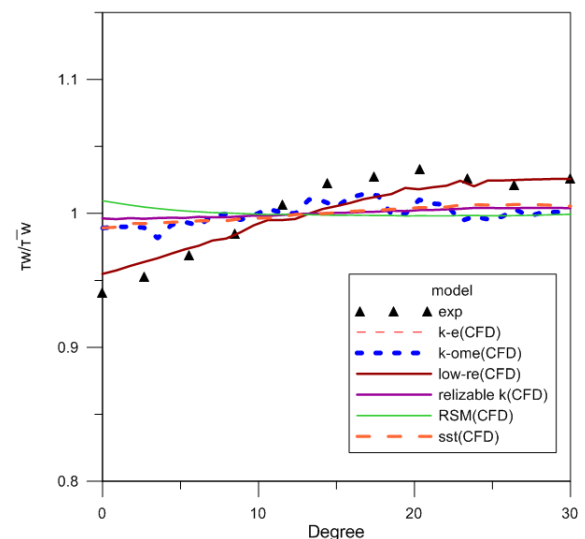


圖 III.3 壁面剪應力比較圖

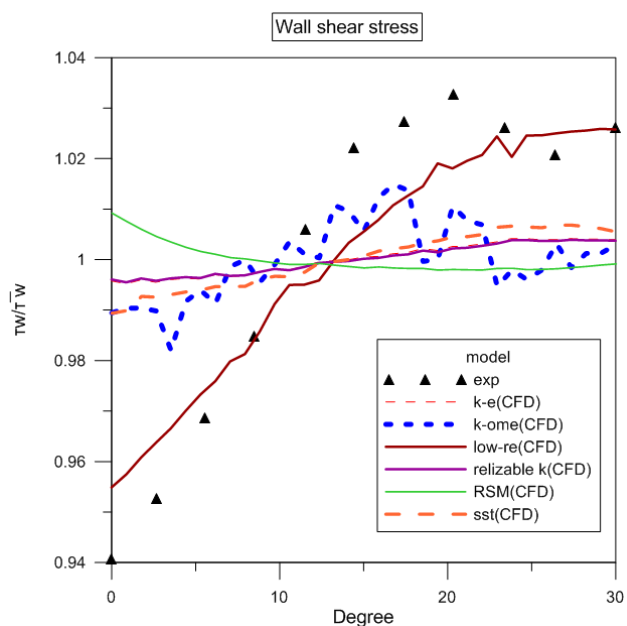


圖 III.4 壁面剪應力比較放大圖

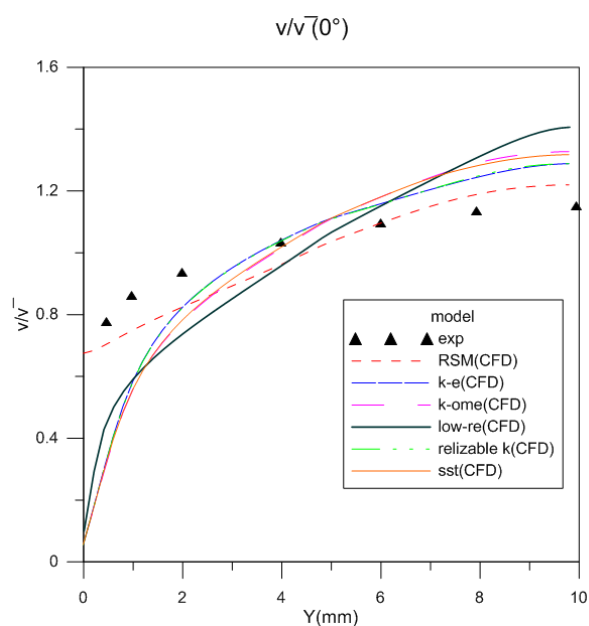


圖 III.7 含葉片通道流道截面速度分布圖 (m/s)

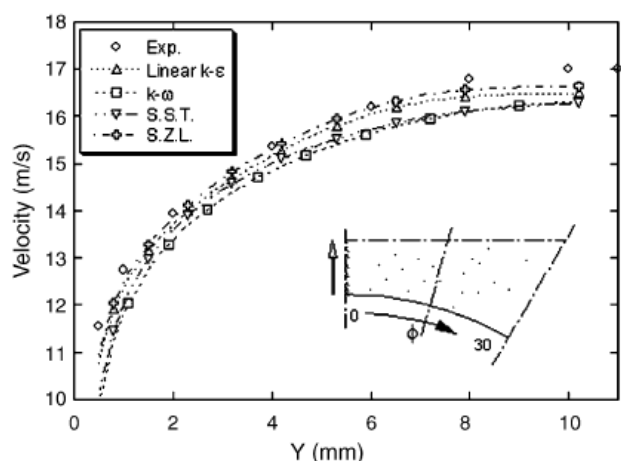


圖 III.5 實驗數據之 0° 切線速度圖[12]

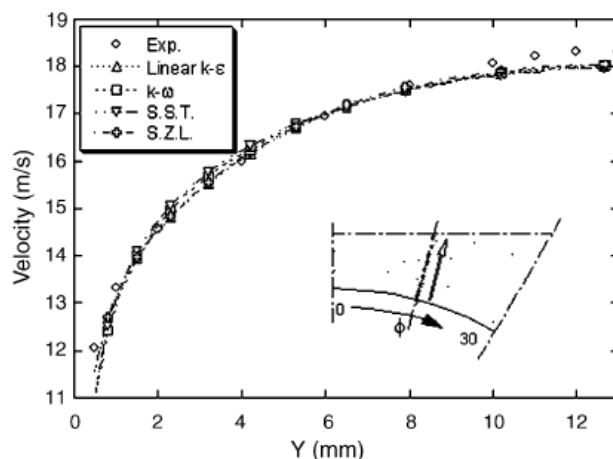


圖 III.8 實驗數據之 15° 切線速度圖[12]

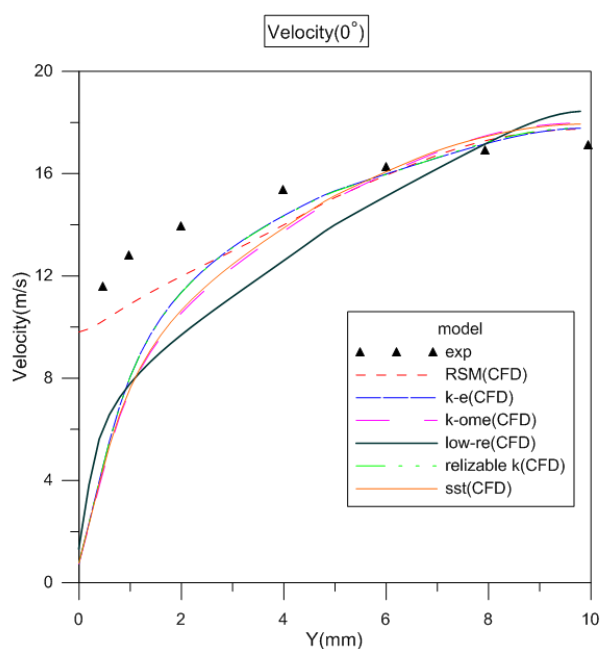


圖 III.6 CFD 與實驗結果驗證於 0° 切線速度圖

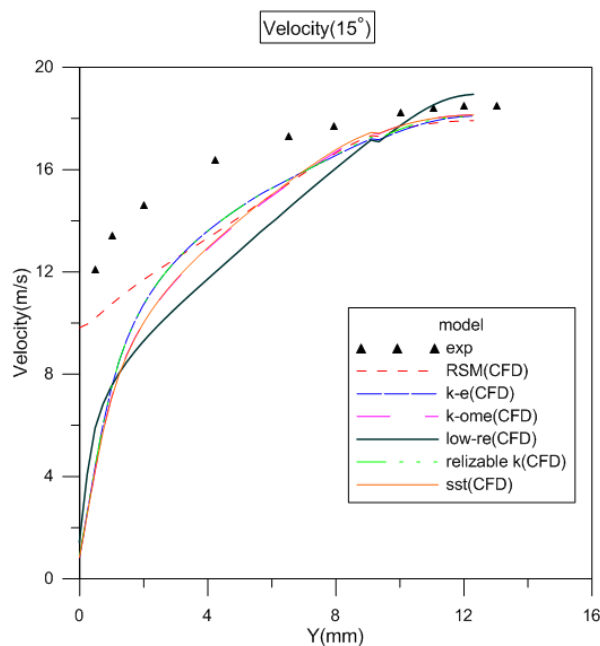


圖 III.9 CFD 與實驗結果驗證於 15° 切線速度圖

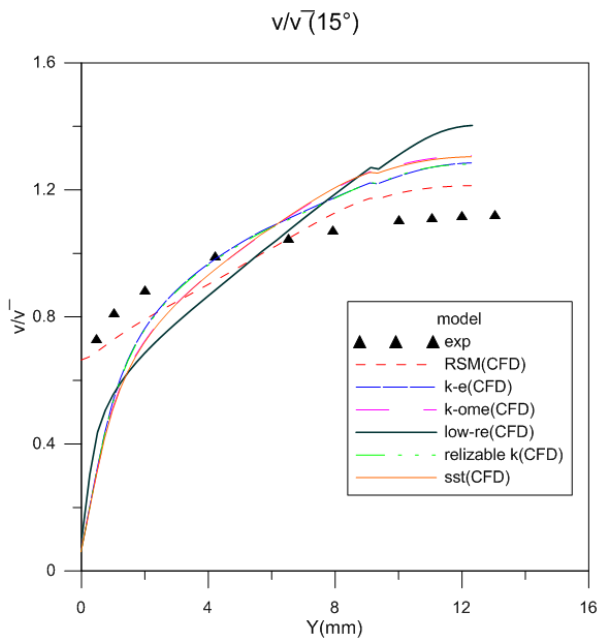


圖 III.10 CFD 與實驗結果驗證於 15° 切線速度圖

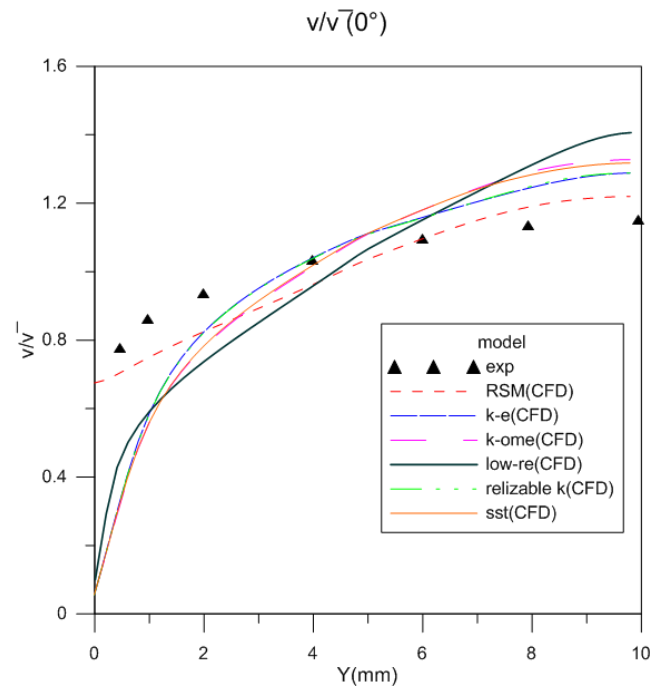


圖 III.13 CFD 與實驗結果驗證於 30° 切線速度圖

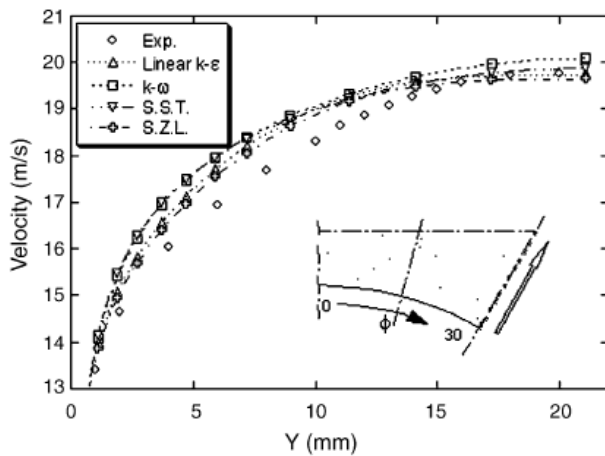


圖 III.11 實驗數據之 30° 切線速度圖[12]

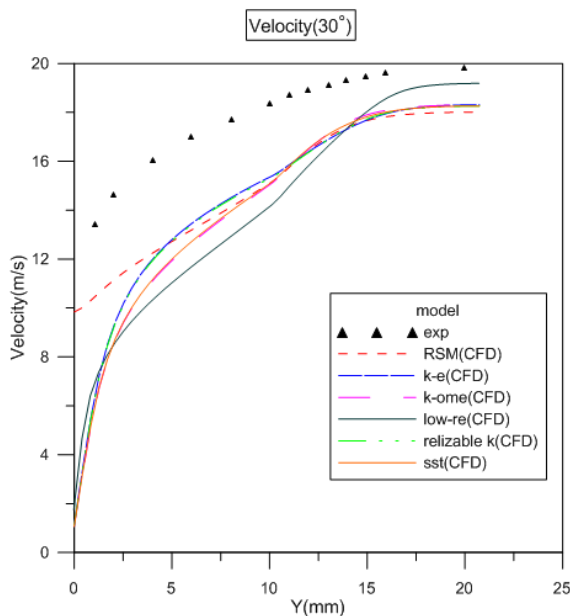


圖 III.12 CFD 與實驗結果驗證於 30° 切線速度圖

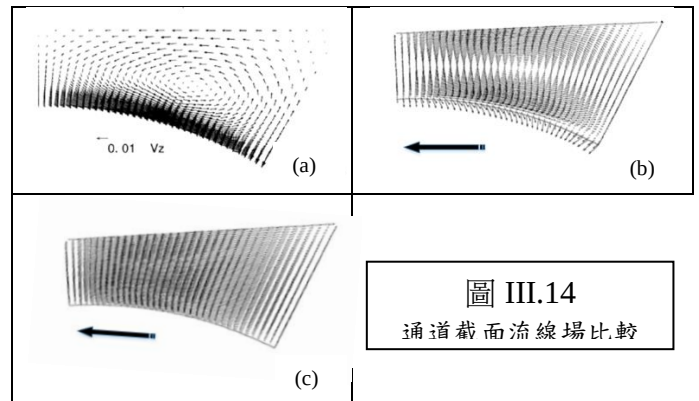


圖 III.14
通道截面流線場比較

IV. 結論

為增進計算流體力學應用於燃料組件之分析技術與未來相關審查導則之發展，本研究藉由 CFD 分析技術針對燃料束進行了不同紊流模式的建立與計算分析。並透過 ASME V&V 20-2009 中所規範的不準度評估方式，完成了上述兩種不同燃料束類型之網格靈敏度測試，進而順利地建立網格不準度之量化技術。研究結果顯示，利用 ASME V&V 20-2009 所建議的評估方式進行網格最佳化計算，且 RSM 紊流模式在二次流模擬方面有較佳的結果，而壁剪應力方面則以 Low Reynolds number $k-\epsilon$ 紊流模式有較好的預測。預期透過本研究之持續精進，除有助於增進核能界對計算流體力學之應用性外，更可協助管制單位發展未來用以評估計算流體力學結果之審查導則。

參考文獻

- [1] International Atomic Energy Agency, "Use of computational fluid dynamics codes for safety analysis of nuclear reactor systems," IAEA-TECDOC- 1379, 2003.

- [2] Nuclear Energy Agency, "Assessment of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Problems," NEA/CSNI/R(2007)13, January 2008.
- [3] Nuclear Energy Agency, "Best Practice Guidelines for the use of CFD in nuclear Reactor Safety Applications," NEA/CSNI/R(2007)5, May 2007.
- [4] M.E. Conner, E. Baglietto, A.M. Elmahdi, "CFD methodology and validation for single-phase flow in PWR fuel assemblies," Nuclear Engineering and Design, 240, 2088-2095(2010).
- [5] NRC, "Computational Fluid Dynamics Best Practice Guidelines for Dry Cask Applications," NUREG-2152, March 2013.
- [6] International Atomic Energy Agency, "Use of computational fluid dynamics codes for safety analysis of nuclear reactor systems," IAEA-TECDOC- 1379, 2003.
- [7] Nuclear Energy Agency, "Best Practice Guidelines for the use of CFD in nuclear Reactor Safety Applications," NEA/CSNI/R(2007)5, May 2007.
- [8] C.C. Liu, Y.M. Ferng, C.K. Shih, "CFD evaluation of turbulence models for flow simulation of the fuel rod bundle with a spacer assembly," Applied Thermal Engineering, 40, 389-396 (2012).
- [9] S.K. Choi, S.O. Kim, "Turbulence modeling of natural convection in enclosures: A review," Journal of Mechanical Science and Technology, 26, 283-297(2012).
- [10] E. Colombo, F. Inzoli, H. Ninokata, E. Merzari, "Protocol of analysis for CFD cycle process: toward supporting licensing in the IRIS project," The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Kanazawa City, Ishikawa Prefecture, Japan, September 27-October 2, 2009.
- [11] Mantlik, F., Heina, J., Chervenka J., "Results of local measurements of hydraulic characteristic in triangular pin bundle."UJV-377-R, Rzez, Czech Republic(1976.).
- [12] E. Baglietto, H. Ninokata, "A turbulence model study for simulating flow inside tight lattice rod bundles, " Nuclear Engineering and Design 235,773 – 784 (2005).
- [13] Yuh-Ming Ferng, Chen-Wei Chi, "CFD investigating the air ingress accident occurred in a HTGR_simulation of thermal-hydraulic characteristics," Nuclear Engineering and Design, 245, 28-38(2012).
- [14] Yuh-Ming Ferng, Kun-Yueh Lin, Chen-Wei Chi, " CFD investigating thermal- hydraulic characteristics of FLiNaK salt as a heat exchange fluid," Applied Thermal Engineering, 37, 235-240 (2012).
- [15] Y.M. Ferng, W.C. Lin, C.C. Chieng, "Numerically investigated effects of different Dean number and pitch size on flow and heat transfer characteristics in a helically coil-tube heat exchanger," Applied Thermal Engineering, 36, 378-385 (2012).
- [16] Y.M. Ferng, C.H. Liu, "Investigating the burning characteristics of electric cables used in the nuclear power plant by way of 3-D transient FDS code," Nuclear Engineering and Design, 241, 88-94 (2011).
- [17] Y.M. Ferng, B.H. Lin, "Predicting the wall thinning engendered by erosion- corrosion using CFD methodology," Nuclear Engineering and Design, 240, 2836-2841 (2010).
- [18] C. J. Liu and Y.M. Ferng, "Numerically simulating the thermal-hydraulic characteristics within the fuel rod bundle using CFD methodology," Nuclear Engineering and Design, 240, 3078-3086 (2010).
- [19] Yuh-Ming Ferng, Kun-Yueh Lin, Chen-Wei Chi, " CFD investigating thermal- hydraulic characteristics of FLiNaK salt as a heat exchange fluid," Applied Thermal Engineering, 37, 235-240 (2012).
- [20] Yuh-Ming Ferng, Chen-Wei Chi, " CFD investigating the air ingress accident occurred in a HTGR_simulation of thermal-hydraulic characteristics," Nuclear Engineering and Design, 245, 28-38(2012).

核能電廠意外事件中氫爆效應評估

Nuclear power plant hydrogen explosion effects assessment.

計畫編號：103-NU-E-007-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：白寶實 教授

e-mail：bspei@hotmail.com

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

福島電廠由於發生外部複合型災變(九級強震及引發強大海嘯)，造成長時段電廠全黑事故，冷卻系統故障而喪失爐心最終熱沉，繼而導致燃料棒高溫融化之爐心熔毀事故。在排汽洩壓過程中除了造成輻射物質外釋至空氣，而爐心融損時亦不斷累積產生氫氣，最終引發氫氣濃度於反應器廠房頂部聚積過高，而產生氫爆破壞反應器廠房，致使該事故震驚全球，其危害影響至為深遠。因此本研究吸取日本 311 核災教訓，擬戮力執行本計畫中規劃之兩項研究重點工作，期對核電廠嚴重事故後，氫氣之擴散行為及其造成災害之緩抑，達到預期效果。本研究擬進行之重點工作為氫氣於圍阻體內之擴散遷移、濃度累積與產生氫爆之研究分析，其作法為對核電廠所具之不同圍阻體進行分析及實驗研究，國內不同核電廠之圍阻體，當發生爐心融損時，產生之氫氣於圍阻體內部擴散遷移，濃度累積以及氫氣爆炸風險評估之研究，可以提供國內核電廠及管制單位進行有效之核電廠嚴重事故下之氫氣經營管理作為，以及減抑氫爆威脅之作法，以大幅提升核能電廠安全度。

關鍵詞：氫氣、安全分析、氫氣再結合裝置、GOTHIC。

Abstract

During FUKUSIMA accident, the earthquake causes a powerful tsunami. It broken the ECCS and make cooling system loss ultimate heat sink, finally cause the core meltdown. Because of the high pressure in RCS, it is necessary reduce the pressure inside the core or it will break the vessel. When Pressure Relief Valve actives, the radioactive materials will also release to the reactor building, hydrogen also produce by the reaction of Zirconium-water, lead to the hydrogen concentration at the top of the reactor building too high, and hydrogen explodes and destroyed the reactor building, This incident drove the whole world's attention and extremely astonished everyone. From the experience of 311 Event, this research focus on two issues, in order to achieve the desired effect, the first research point was: the hydrogen behavior inside of the containment building and the hydrogen concentration when accumulates in the top of the containment, hydrogen explosion occurred risk assessment.

This project tries to research the movement of hydrogen inside different types of containments due to core melting, and to predict the risk of hydrogen explosion. Based on the results of this research, some suggestions can be proposed to Atomic Energy Council and Taiwan's nuclear power plants for the improvements of nuclear safety.

Keywords: Hydrogen, Safety analysis, PAR, GOTHIC.

I. 前言

核能電廠於事故發生時，圍阻體為核能電廠安全深度防禦最後一道實體防線，其安全性不言而喻。為了避免類福島事故後氫氣爆炸的產生，本研究將研究重點放置於事故後氫氣之產生率隨時間演變的情況；以及氫氣洩漏進入一次圍阻體及二次圍阻體後，其濃度擴散及遷移行為之討論。本研究將結合 MAAP 與 GOTHIC 程式來進行研究對象核電廠在發生類福島事故後，其爐心熱流變化分析，進一步計算當爐心發生裸露時，蒸氣與燃料束鋁合金之氧化反應下所會產生之氫氣量，以及其釋氫率之時變情形；並將其做為邊界條件輸入進入 GOTHIC 程式，進一步算出圍阻體內部可能氫氣爆炸之時間與位置；在此些危險區域放置 PAR 或運用 FCVS 達到保護圍阻體之效果。

氫氣爆炸是種深具震撼力與摧毀力的爆炸現象，對核能電廠危害性甚大。這是因為當今的核電廠設計皆設計有厚實的圍阻體，以作為輻射產物外釋之最後防線；然而雖然圍阻體可以承受飛行器的撞擊無虞，但在內部因氫氣快速燃燒而導致的氣體膨脹現象，將導致圍阻體、管路與設備的損壞，故當氫爆發生後將導致事故的控制性與後續的回復難度增加。

本研究第一年規劃將會完成核能一、二、三廠 MAAP 程式輸入模式之建立，以及 MARK I、MARK III、乾式三類圍阻體(核一二三廠所使用)之 GOTHIC 程式輸入模式，並用 MAAP 程式及 GOTHIC 程式對福島氫爆事故作全程模擬。

II. 主要內容

為了建立目前國內圍阻體分析模式，必須清楚了解各個系統的幾何構造、功能及其設計參數。由於本研究為了得到較為保守的分析結果，故採用了一些假設條件。

核能一廠

核能一廠採用奇異公司所設計製造的沸水式反應爐 BWR-4 型(Boiling Water Reactor-4, BWR-4)，其所採用的 Mark-I 圍阻體同樣為奇異公司所設計。圍阻體為 BWR 的特殊安全設施(Engineered Safety Features, ESF)之一，其內部結構主要由鋼筋混凝土組成，其結構如圖 1 所示。主要設備包括乾井(Dry Well)、通洩集管(Vent Header)、通洩管(Vents)、下通管(Downcomer)、抑壓池(Suppression Pool)、反應器廠房(Reactor Building)等。

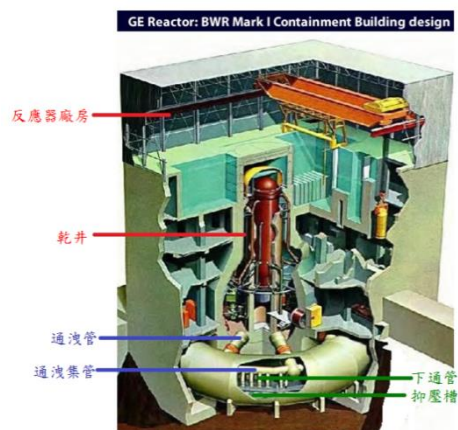


圖 1、核能一場圍阻體結構示意圖

核能二廠

核能二廠採用奇異公司所設計發展的 BWR6 型沸水式反應爐(Boiling Water Reactor, BWR)，其所採用的 MARK-III 圍阻體同樣為奇異公司所設計。圍阻體為 BWR 特殊安全設施((Engineered Safety Features, ESF)之一，其內部結構主要由鋼筋混凝土構成，其結構如圖 2 所示。主要設備包括乾井(Dry Well)、通洩環溝(Vent Annulus)、水平通洩管(Horizontal Vents)、抑壓池(Suppression Pool)、圍阻體(Containment)與乾井真空釋放系統(Drywell Vacuum Relief System)等。

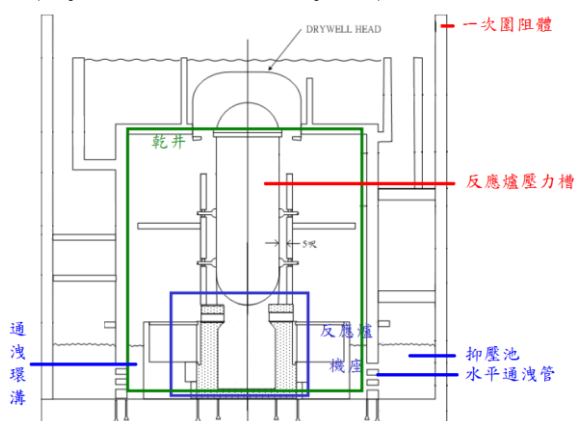


圖 2、核能二廠圍阻體結構示意圖

核能三廠

核能三廠採用美國西屋公司製造之壓水式核反應器(Pressurized Water Reactor, PWR)。圍阻體是 PWR 的特殊安全設施(Engineered Safety Features, ESF)之一，鋼筋混凝土組成為其主要內部結構，其結構如圖 3 所示。主要設備包括圍阻體(Containment)大量的被動熱沉結構、再循環集水池(Recirculation Sump)，及圍阻體除熱系統(Containment Heat Removal System)。

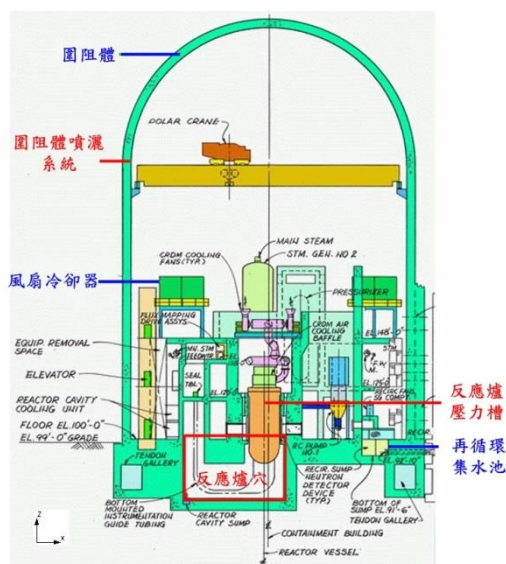


圖 3、核能三廠圍阻體結構示意圖

III. 結果與討論

目前針對國內現有電廠之 MAAP 程式輸入模式已經建立完成，並且參考了歷年核電廠年度演習劇本與現有福島之事故序列進行比對與驗證。在圍阻體模型資料搜集上，與台電公司進行合作取得珍貴且完整的圍阻體結構圖，藉由此結構圖表建立起完善的 GOTHIC 程式模型，其成果如同圖 4、5、6 所示。

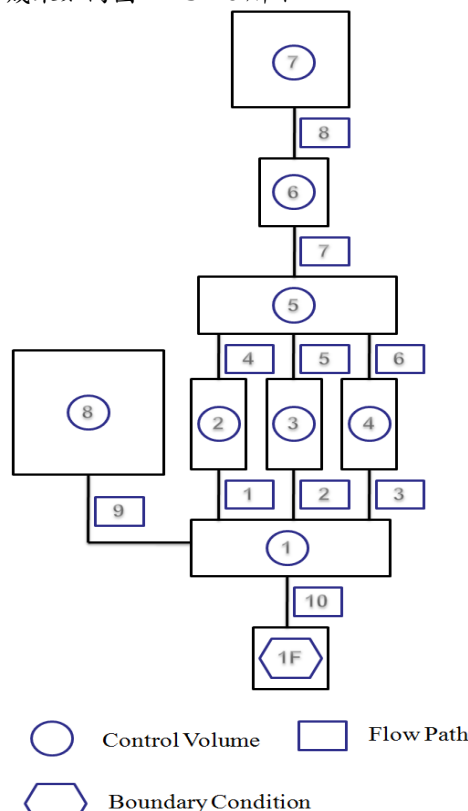


圖 4、核一廠 GOTHIC 接結模式圖

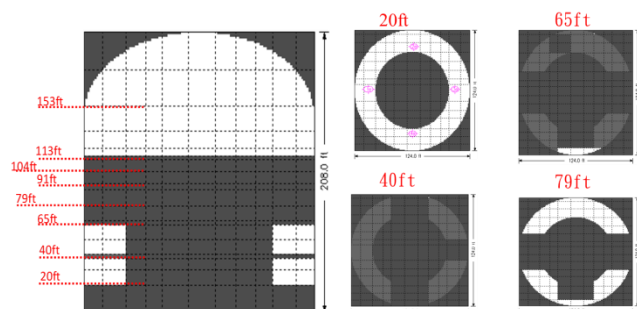


圖 5、核二廠 GOTHIC 模型圖

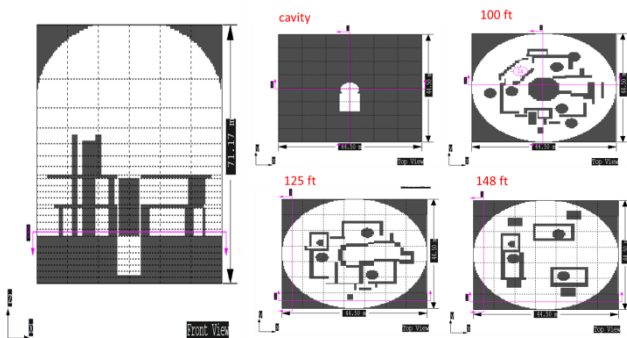


圖 6、核三場 GOTHIC 模型圖

核能一廠

針對福島事故之發生序列，本研究也應用了 MAAP 程式進行模擬，並且計算出類福島事故下爐心氫氣釋放率等重要數據，如同圖 7 所示，氫氣將會在福島事故後 3000 秒大量釋出。再將此數據輸入至 GOTHIC 程式進行氫氣在圍阻體內之擴散分析後，其結果如同圖 8 所示；當事故發生後開始產生氫氣，約 2400 秒左右氫氣擴散且濃度分布於反應器廠房的最上層已累積氫氣濃度超過 4%，已達有氫氣燃燒，甚至氫氣爆炸之安全顧慮氫氣濃度限值。故當爐心燃料裸露後，在 2400 秒內應進行排氫氣或稀釋氫氣之手段。

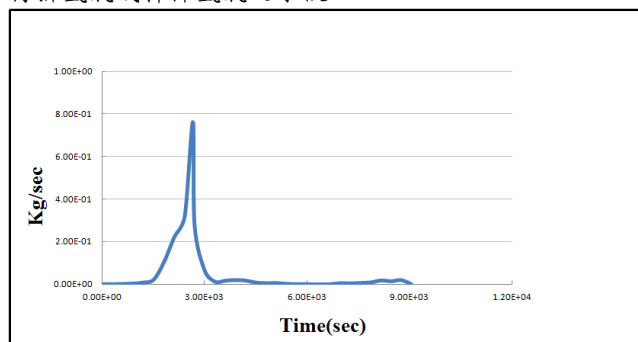


圖 7、模擬福島事故下之氫氣釋放率

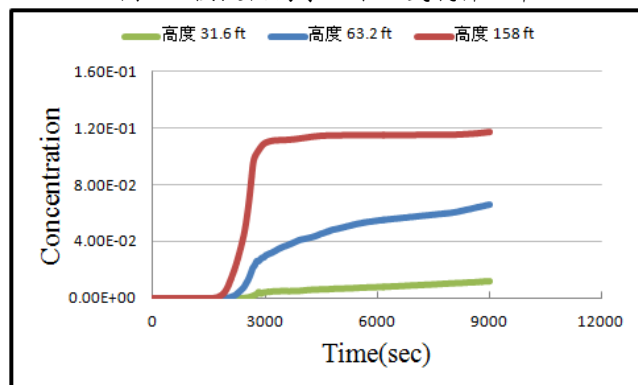


圖 8、模擬福島事故下之圍阻體氫氣濃度變化

IV. 結論

在圍阻體模型資料搜集上，與台電公司進行合作取得珍貴且完整的圍阻體結構圖，藉由此結構圖表建立出完善的 GOTHIC 程式模型，其成果可以精確計算出氫氣於建築結構不同下之擴散行為。

針對福島事故之發生序列，本研究也應用了輸入 MAAP 程式進行模擬，並且計算出類福島事故下爐心氫氣釋放率等重要數據，氫氣將會在福島事故後 3000 秒大量釋出。再將此數據輸入至 GOTHIC 程式進行氫氣在圍阻體內之擴散分析後，其結果如同前述；當事故發生後開始產生氫氣，約 2400 秒左右氫氣擴散且濃度分布於反應器廠房的最上層已累積氫氣濃度超過 4%，已達有氫氣燃燒，甚至氫氣爆炸之安全顧慮氫氣濃度限值。故當爐心燃料裸露後，在 2400 秒內應進行排氫氣或稀釋氫氣之手段，

核能二廠

根據 GOTHIC 分析之結果顯示，如圖 9、10，GOTHIC 程式計算結果與 MAAP5 程式計算結果在趨勢上大致相同，程式計算結果曲線有些許差別，造成此結果的原因推測第一是模型計算公式不同，MAAP 程式在計算公式上，主要求解質量與能量方程式，而 GOTHIC 程式除了計算質量與能量方程式外，再求解動量方程式與 k-e 紊流模式。第二，MAAP 程式以單一控制體積模擬各隔間，GOTHIC 程式對於空間結構的建立上較為細膩，並針對濃度變化劇烈區域採用較好的隔點分佈。從 MAAP 程式所提供之氫氣產生速率做為邊界條件的曲線裡可以發現在 17000 秒氫氣大量注入，造成溼井和 Compartment(A)有一濃度的峰值，而氫氣往上擴散造成濃度快速的下降，所以 Compartment(A)氫氣峰值濃度較溼井氫氣峰值濃度來得小。整體而言，雖然兩程式計算結果曲線有些許差別，但對於預測氫氣峰值發生的時間點是相同的。

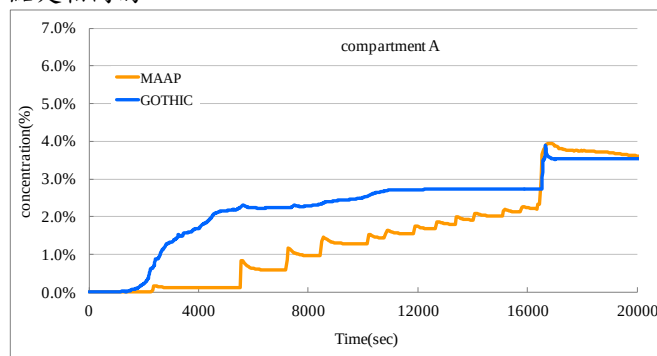


圖 9、compartment A 之氫氣濃度時變圖

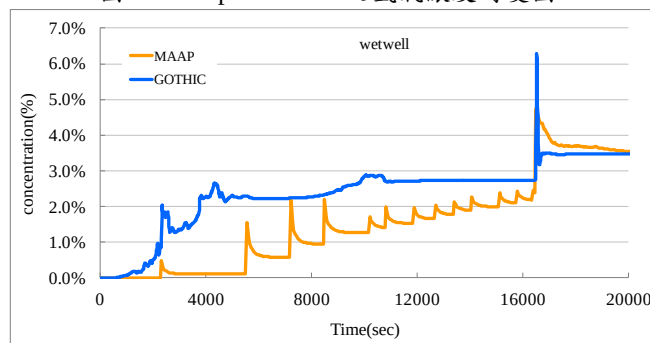


圖 10、wetwell 之氫氣濃度時變圖

核能三廠

本研究另以核能三廠之乾式圍阻體為主體，進行核能三廠發生類福島事故後氫氣擴散分析輸入模式建立與分析工作。核能三廠假想發生類福島事故後，考慮 PRT 洩漏將會把氫氣排放進入圍阻體，因此在氫氣的分析上我們考慮氫氣將會由 100ft 之結構空間內部往外排放，為求得氫氣在反應器廠房中各樓層的分佈情況，並探討其分析結果合理性與是否有氫爆危機。福島事故為一加長型電廠全黑事故，因此本研究採用 MAAP5 程式在電廠全黑事故下，在事故發生後不進行任何補水動作，使事故後果更為嚴重來模擬類福島事故，所產生之氫氣產生率作為 GOTHIC 分析模式邊界條件。

而 MAAP 所計算之核三廠全黑事故下，其作動時序如同表 1 所示，在此事故下核能三廠之爐心水位如同圖 11 所顯示，爐心將會在事故後約 4 萬秒裸露並且產生氫氣，而氫氣之產生量顯示於圖 12，與圖 11 進行對照後可以發現爐心裸露之時間點與其產生氫氣的速率，在六萬秒後爐心將會完全融毀並且使壓力容器失效，本研究並不計算後期熔毀爐心重置(relocation)之氫氣產生。

表 1、核三廠於類福島事故下之 MAAP 作動時序表

time(min)	events
$T_0 = 0$	Scram, feed water pump trip, NSCW active
$T_0 + 5$	Loss Offsite Power
$T_0 + 20$	Tsunami attack, NSCW trips
$T_0 + 40$	(Loss AC and DC power, SBO)
$T_0 + 50$	AFS by turbine supply coolant to SG, SG PORV open
$T_0 + 100$	AFS Trip
$T_0 + 105$	S.G. pressure down to 8.8 kg/cm ² , Fire auxiliary feed water pump active
$T_0 + 115$	Fire auxiliary feed water pump trip

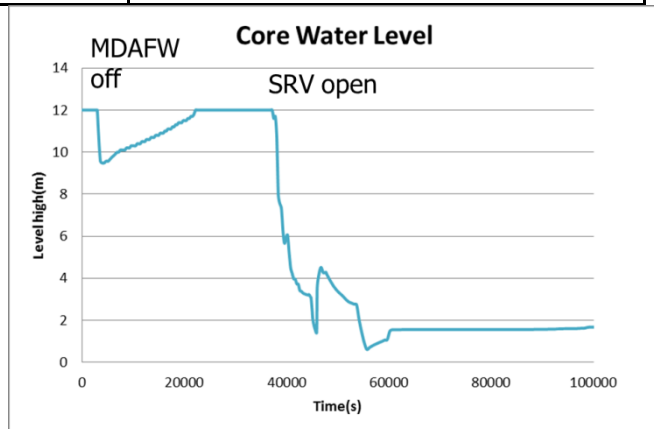


圖 11、類福島事故下核三廠之爐心水位模擬結果

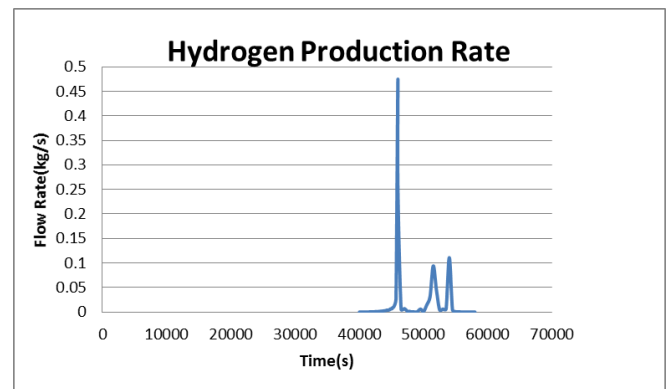


圖 12、類福島事故下核三廠之氫氣產生率模擬結果

GOTHIC 與 MAAP 之氫氣濃度計算結果比對如同圖 13 所示，分析之結果顯示 GOTHIC 程式計算結果與 MAAP5 程式計算結果在趨勢上大致相同，程式計算結果曲線有些許差別，造成此結果的原因推測是模型計算公式不同，MAAP 程式在計算公式上，主要求解質量與能量方程式，而 GOTHIC 程式除了計算質量與能量方程式外，結構上的切分也不太相同，MAAP 程式以 3-4 個控制體積模擬各隔間，GOTHIC 程式對於空間結構的建立上較為簡單，因此在濃度之變化上較為平穩，但在氫氣峰值上之數據與 MAAP 相近。從 MAAP 程式所提供之氫氣產生速率做為邊界條件的曲線裡可以發現在 46000 秒氫氣大量注入，造成濃度快速的上升，並且快速的到達峰值。整體而言，雖然兩程式計算結果曲線有些許差別，但對於預測氫氣峰值是相同的。

GOTHIC 程式計算各樓層之濃度時變之結果顯示於圖 14，取出各層的濃度時變圖結果發現，在樓層 1(100ft-125ft)的濃度時變圖，其顯示在模擬時間 6000 秒左右(SBO 事故發生後的 46,000 秒，也就是 12.7 小時)，濃度峰值超過 8%，圍阻體會有氫爆威脅，濃度超過限值的時間大約為 1500 秒左右，濃度會再下降於限值以下。造成此峰值的原因是短時間內氫氣的沖放帶有大量動量，氫氣快速排出並且使空氣/氫氣快速混合而降低濃度，而具速度的氣體迅速往高處遷移，而隨著動量的消耗，可發現愈往上的樓層峰值的效應愈小。

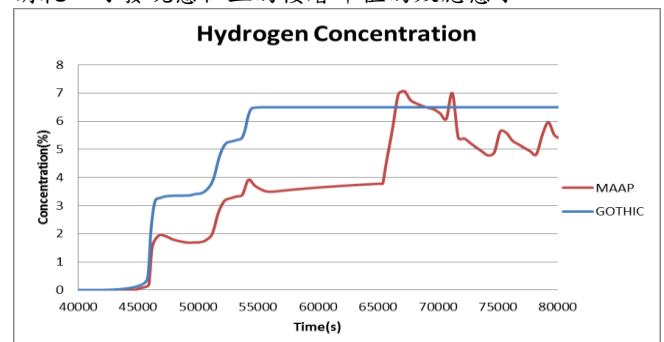


圖 13、MAAP 與 GOTHIC 之氫氣濃度計算結果比對

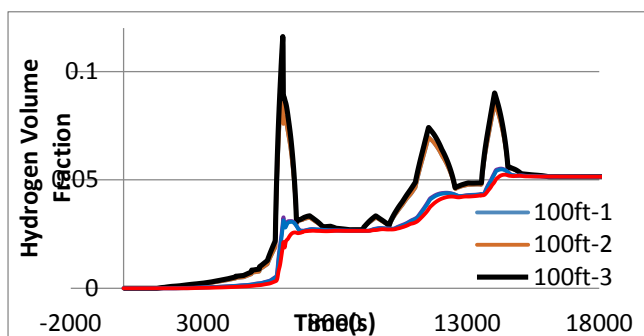


圖 14、以切割體積計算乾式圍阻體之氫氣濃度結果圖

結論

針對核一廠之福島事故分析，將會考慮目前核能一廠圍阻體與抑壓池直接排氣系統(DTVS)之 GOTHIC 程式分析輸入模式建成，並且精確建立一次圍阻體內部透過抑壓池與圍阻體廠房之間的氫氣排放狀況進一步了解並計算圍阻體中氫氣累積處濃度變化與其遷移狀態，並提出系統改善措施，以消弭氫爆威脅。

核能二廠 MARK-III 型圍阻體氫氣擴散濃度分析結果顯示，GOTHIC 程式預測在模擬時間 17000 秒左右(嚴重事故發生後的 35,000 秒，也就是 9.7 小時)，氫氣濃度峰值超過 4%，圍阻體會有氫爆威脅，但濃度超過限值的時間很短，大約為幾百秒左右，濃度會再下降於限值以下。若事故發生後，操作人員有對爐心進行任何補水動作，或是反應器廠房預先設置氫氧再結合裝置，即使反應器爐心產生氫氣，都將使電廠免於氫爆威脅，可保電廠安全無虞。

MAAP 與 GOTHIC 之核三廠乾式圍阻體氫氣擴散濃度分析結果顯示，MAAP 程式預測在模擬時間 650000 秒左右(18 小時)，圍阻體會有氫爆威脅，而以 GOTHIC 程式進行單一體積分析也顯示在 54200 秒時，氫氣濃度將會超過 4%。而考量到結構變化而建立之切分體積模型，也在 SBO 後 46000 秒超過 8%，一系列結果皆顯示在類福島事故下，核能三廠會有氫氣爆炸的風險存在。考慮到圍阻體結構複雜性，氫氣濃度超過限值的位置與時間皆在可預測範圍，由於結構之影響，在較高之樓層氫氣濃度會再下降於限值以下。

參考文獻

- [1] 林亮宇，「日本福島電廠 2 號機及 3 號機事故 MAAP5.0.0 模擬分析」，國立清華大學核子工程與科學研究所，碩士論文，民國 101 年。
- [2] 彭柏皓，「核能二廠 MARK-III 型圍阻體熱水流分析模式建立」，國立清華大學核子工程與科學研究所，碩士論文，民國 100 年。
- [3] 莊敏傑，「核三廠 MAAP5 程式輸入資料檔建立報告」，核能研究所，2011
- [4] 台灣電力公司第二核能發電廠，「沸水式反應器核能電廠訓練教材」，台灣電力公司，民國 84 年 12 月。
- [5] Electric Power Research Institute, “MAAP USERS MANUAL”, 2008
- [6] Electric Power Research Institute, “GOTHIC: Containment Analysis Package User Manual”, version 7.2a, NAI 8907-02 Rev.17, January 2006.

反應器壓力熱震問題之決定性與機率破裂力學分析程序與相關法規研究

Studies on the deterministic and probabilistic analysis procedures and related regulatory guide of the pressurized thermal shock of the reactor pressure vessel

計畫編號：103-NU-E-262-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：丁鯤

e-mail：kuenting@mail.lhu.edu.tw

計畫參與人員：吳進興、阮英俊、林文進、龔立軒、魏志丞

執行單位：龍華科技大學化工與材料工程系

摘要

壓力熱震事件(pressurized thermal shocks, 簡稱 PTS)是壓水式反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, 簡稱 RPV)結構完整性評估(structure integrity)中一項重要的安全議題。再加上壓力槽腹帶區(belt region)因多年快中子照射的轉脆劣化問題, 這些效應使得潛在可能存在的裂縫迅速成長。所以美國聯邦法 10CFR50.61 對 PTS 有詳細的規範與要求, 持照者(Licensee)必須提出驗證之機率破裂力學分析技術, 以做為 PTS 事件分析具可靠度之工具。

因機率破裂力學的計算與分析具有相當的不準度, 因此為驗證所發展技術的可靠性, 世界核能先進國家先後組成數組同儕分析對比測試(Round Robin Test), 以提升技術之精進。本計畫之目的則以 Favor 軟體, 針對同儕分析進行對比驗證, 以強化對軟體的認知與應用的正確性, 建立本土機率破裂力學之分析能量, 確保核能安全。

關鍵詞：壓力熱震事件、壓力槽結構完整性、材料輻射脆化、機率破裂力學、決定性破裂力學、10CFR50.61

Abstract

The pressurized thermal shock (PTS) events were the critical safety issue for the structural integrity evaluation of reactor pressure vessel (RPV) in PWR. Both the combinations of tensile stress due to PTS and embrittlement of RPV belt region due to neutron irradiation, the potential cracks may easily be initiated and propagation. 10CFR50.61 defined PTS events and the screening criterion and proposed the applications of probabilistic fracture mechanics (PFM) to PTS events.

Due to the uncertainties of PFM, several international round robin tests were organized to promote the analytical capabilities of PFM in the applications of PTS considering the aging effects of RPV. This project will use WinPraise and Favor software of Lunghwa University to join these tests to assure the reliable technique of PFM.

Keywords: Pressurized thermal shock events、irradiated embrittlement, reactor pressure vessel structural integrity, probabilistic fracture mechanics, deterministic fracture mechanics, 10CFR50.61.

I. Introduction

Pressurized Thermal Shock (PTS), one of many potential threats to the structural integrity of Reactor Pressure Vessel (RPV), has been studied for more than 30 years [1]. PTS is caused by several reasons, break of main steam pipelines, inadvertent open valve etc., then the emergency core cooling water inject into the RPV, including with the high pressure inside the RPV make the appearance of PTS. There are two approaches in analyzing the RPV under the PTS, the first is deterministic analysis, and the second is probabilistic analysis.

Deterministic analysis includes thermal, stress and fracture mechanics analysis. Many researchers, for example Elisabeth K. et al. [2], Myung J.J. et al. [3], IAEA TECDOC [4], Guian Q. et al. [5] etc., performed calculation the distribution of thermal, stress and stress intensity with wall thickness and time.

The deterministic results combining with main uncertainty parameters (initial reference temperature, crack density, size, aspect ratio, neutron fluence, Cu, Ni content of RPV material) are used as the input of the second approach to work out the probabilistic of crack initiation. From Western to Eastern and US, there were many researches were conducted to calculate probabilistic analysis such as probabilistic structural integrity of PWR RPV under PTS, Myung J.J. et al. [3], comparison of pressure vessel integrity analyses and approaches for VVER 1000 and PWR vessels for PTS conditions Oya O.G. [6], and probabilistic assessment of VVER RPV under pressurized thermal shock, Vladislav P. et al. [7].

In this study, FAVOR 12.1[8] was used to study PTS transient of round robin program named Probabilistic Structural Integrity of a PWR Reactor Pressure Vessel (PROSIR) with a PWR [9]. The results presented the good agreement with other participants and also the effect of initial RT_{NDT} , Cu content wt% to the conditional probability of crack initiation.

II. Probabilistic Fracture Mechanics Analysis

The division of beltline includes axial welds, circumferential welds and plates region, each of them has its own embrittlement parameters as shown in Figure 1 [10].

In deterministic analysis, the coolant temperature pressure, and heat transfer coefficient distribution with time are basic input. In addition, the geometry, thermo-mechanical of

RPV is used to work out thermal, stress and stress intensity factor distribution with wall thickness during the transient. In FAVOR, the 1-D model with finite element method is used to perform deterministic calculation.

FAVOR Model

In probabilistic fracture mechanics analysis, with a postulated flaw the probability of crack initiation and vessel failure are calculated based on Monte Carlo method. The reference temperature RT_{NDT} in FAVOR is calculated based on Regulatory Guide 1.99 ver. 2.

$$RT_{NDT} = \text{Initial } RT_{NDT} + \Delta RT_{NDT} + \text{Margin} \quad (1)$$

where ΔRT_{NDT} means the mean value of the adjustment in reference temperature caused by irradiation and can be expressed as in the following equation.

$$\Delta RT_{NDT} = (CF)f^{(0.28-0.10\log f)} \quad (2)$$

where CF (°F): the chemistry factor, a function of copper and nickel content. f (10^{19} n/cm², $E > 1$ MeV) is the neutron fluence at any depth in the vessel wall and the values can be obtained from the surface of neutron fluence as $f = f_{\text{surf}} (e^{-0.24x})$. f_{surf} (10^{19} n/cm², $E > 1$ MeV) is the neutron fluence at the inner surface of the vessel. x (inches): the depth into the vessel wall measured from the vessel inner surface.

where Margin (°F): the quantity.

$$\text{Margin} = 2\sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_{\Delta}^2} \quad (3)$$

σ_I : the standard deviation for the initial RT_{NDT} . σ_{Δ} : the standard deviation for ΔRT_{NDT} .

The conditional probability of crack initiation of certain K_{Ic} implemented in FAVOR is express as:

$$P(K_{Ic} \leq K_I) = \begin{cases} 0; & K_I \leq a_k \\ 1 - \exp\left\{-\left[\frac{K_I - a_k}{b_k}\right]^{c_k}; & K_I > a_k \end{cases} \quad (4)$$

$$a_k = 19.35 + 8.335 \exp[0.02254(T - RT_{NDT})](ksi\sqrt{in})$$

$$b_k = 15.61 + 50.132 \exp[0.008(T - RT_{NDT})](ksi\sqrt{in})$$

$$c_k = 4$$

PROSIR Model

Shift formula equations are separated to calculate for base metal and weld.

Base metal:

$$\Delta RT_{NDT} = [17.3 + 1537*(P-0.008) + 238*(Cu-0.08) + 191*Ni^2Cu]*\phi^{0.35} \quad (5)$$

Weld:

$$\Delta RT_{NDT} = [18 + 823*(P-0.008) + 148*(Cu-0.08) + 157*Ni^2Cu]*\phi^{0.45} \quad (6)$$

Irradiation decrease through the RPV wall:

$$f = f_0 e^{-0.125x} \text{ for } 0 < x < 0.75t, \text{ and } x \text{ in } 10^{-2}m. \quad (7)$$

$$K_{Ic} = 36.5 + 3.1 \exp[0.036(T - RT_{NDT} + 55.5)] \quad (8)$$

$$K_{Ic} \text{ max} = 220 \text{ MPa.m}^{0.5}$$

Reactor Vessel and Transient description

The dimensions, fundamental characteristics of

reactor vessel, postulated crack in this study are shown in Table 1. The assumed transient in this study presented as the Fig. 2 based on transient 3 (TR3) of Probabilistic Structural Integrity of a PWR Reactor Pressure Vessel [9]. The pressure and temperature decrease simultaneously right after the transient began. Then the typical PTS is showed with the temperature increase slowly, the pressure increase quickly and maintain from the 7000th second after the starting of transient.

III. Results and Discussion

3.1. Deterministic Results

In this study, one postulated flaw is given for PWR with a specific size and shape to check whether they are initiated or not during the PTS transients. Deterministic analysis includes thermal, stress and fracture mechanics analysis. Then variation of temperature, stress and variation of stress intensity factor K_I (SIF) along with wall thickness at different time steps are results of this analysis. Those results are essential input for probabilistic calculation. Fig. 4a, Fig. 4b, and Fig. 5 showed the variation of temperature, hoop stress, and stress intensity factor at 3600, 7200 second along with wall thickness, respectively. The interface between the cladding and the base metal is obvious in those three figures because of the different heat conductions. In Fig. 4a, the temperature of the step at 3600 second is higher the temperature at 7200 second because of the cooling. The outer wall is hotter than the inner because of the inner coolant temperature.

3.2. Probabilistic Fracture Mechanics Results

Probabilistic analysis calculates the probability of crack initiation based on flaw data (flaw density, size and location), RPV beltline embrittlement (neutron fluence, Cu, Ni, P content), and the parameters obtained in deterministic analysis (the distribution of hoop stress, stress factor intensity with wall crack). Conditional probability of crack initiation (CPI) calculated for the weld and plate in the upper shelf of RPV is shown in Fig. 6a, Fig. 6b. The CPI calculated by FAVOR is only fair agreement with the other participants because there are differences in calculating reference temperature RT_{NDT} , conditional probabilistic of crack initiation, and attenuation of fluence through the reactor pressure vessel wall of the method used in FAVOR and PROSIR.

Fig. 7a presents the variation of CPI with the initial RT_{NDT} and show that the higher initial RT_{NDT} the higher value of CPI mean the probability of crack initiation is directly proportional to the initial RT_{NDT} . This trend is also the same with variation of CPI along with Cu content in RPV material from 0.12 to 0.32 wt% showed in Fig. 7b, the CPI increases linearly. But from 0.32 to 0.52 wt% of Cu content, the CPI does not change this show that the Cu content larger than 0.32%wt does not affect to CPI.

IV. Conclusions

One transient in the round robin proposal of the RPV PROSIR with postulated flaw is performed deterministic and probabilistic analyses using FAVOR 12.1. The results are compared with other from PROSIR. The deterministic results are in good agreement with the other results. The

CPI result is not the same with the other because of the different method used in FAVOR to probabilistic analysis. The changed in the CPI values when different input parameters such as Cu content wt% and initial RT_{NDT} were used for analyzed show that those parameter had significant effect to the probability of crack initiation.

References

- [1] Myung JJ, Young HC, Yoon SC, Jong MK, Jong WK. PFM Round Robin Analysis on RPV Integrity during PTS by Korean Participants. The 8th International Workshop on the Integrity of Nuclear Components 2010.
- [2] Elisabeth K, Cornelia S, Albert S, Roland H. Life management of reactor pressure vessels under pressurized thermal shock loading: deterministic procedure and application to Western and Eastern type of reactors. Int J Pressure Vessels Piping, 2001, 78, p.85-98.
- [3] Myung JJ, Chang HJ, Seok HK, Young HC, Hho JK, Sung GJ, Jong MK, Gap HS, Tae EJ, Taek SC, Ji HK, Jong WK, Keun BP. Round Robin Analysis for Probabilistic Structural Integrity Reactor Pressure Vessel under Pressurized Thermal Shock. J Mech Sci Technol, 2005, 19, p.634-648.
- [4] IAEA TECDOC 1627. Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment, "Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel", 2010.
- [5] Guian Q, Markus N. Procedures, methods and computer codes for the probabilistic assessment of reactor pressure vessels subjected to pressurized thermal shocks. J Nucl Eng Des, 2013, p. 35-50.
- [6] Oya OG, Uner C. Comparison of pressure vessel integrity analyses and approaches for VVER 1000 and PWR vessels for PTS conditions. J Nucl Eng Des, 2003, p. 231-241.
- [7] Vladislav P, Miroslav P, Dana L. Probabilistic assessment of pressurized thermal shocks. J Nucl Eng Des, 2013.
- [8] William PT, Dickson TL, Yin S. Fracture Analysis of Vessels-Oak Ridge FAVOR, v12.1, Computer Code: Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations, 2012.
- [9] Claude F. PROSIR Probabilistic Structural Integrity of a PWR Reactor Pressure Vessel. Round Robin Proposal; 2003.
- [10] VT Padmanabhan, R Ramesh, V Pugazhendhi. Countercurrents.org, 2012.

Table 1 Reactor vessel characteristic and flaw data

Item	Typical 3-loop PWR
Inner radius	1994 mm
Wall thickness	200 mm
Cladding thickness	7.5 mm
Stress free temperature	300°C
Flaw type	Longitudinal surface breaking semi-elliptical crack
Crack depth a	19.5 mm
Crack length 2l	117 mm

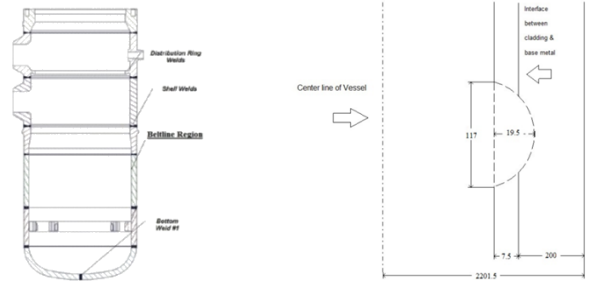


Figure 1 Beltline region of PWR RPV

Figure 2 Postulated crack dimension (mm)

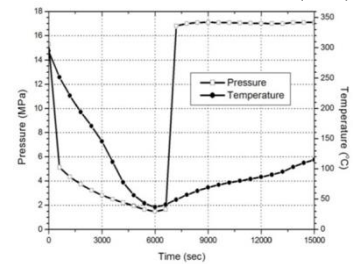


Figure 3 Transient histories of PTS

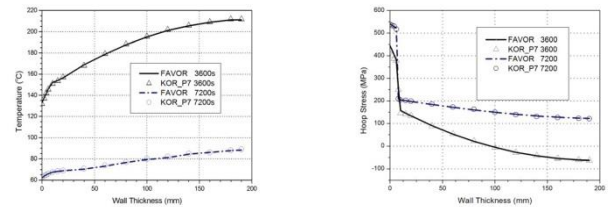


Figure 4 Variation of temperature and hoop stress along with wall thickness at 3600, 7200 second, (a) and (b).

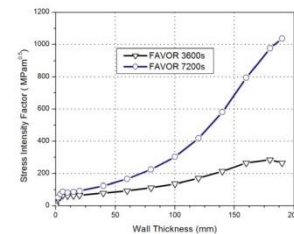


Figure 5 Variation of stress factor intensity along with wall thickness at 3600, 7200 second

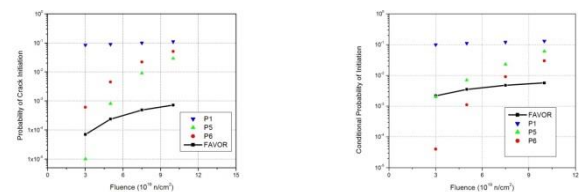


Figure 6 Variation of conditional probability of crack initiation with neutron fluence at weld and plate, (a) and (b).

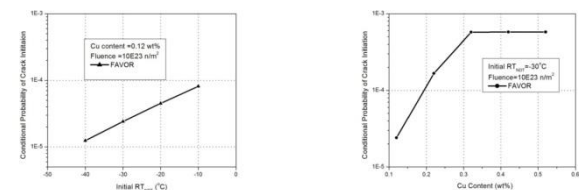


Figure 7 Variation of conditional probability of crack initiation with initial RT_{NDT} and Cu content at weld, (a) and (b).

核電廠電子元件輻射傷害之可靠性研究

Reliability study of electronic devices with radiation damage in nuclear power plant

計畫編號：103-NU-E-007-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：張廖貴術

e-mail：lkschang@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：呂君章、張瑞軒

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

由於儀電系統電子卡片所引起之急停佔了相當比例，核能電廠儀電系統電子卡片電子元件的輻射效應評估是很重要的研究課題。本計畫對核能電廠使用重要儀電系統之電子卡片電子元件，探討並建立其輻射傷害評估的方法及設備。本研究計畫之主要目的，係就核三廠固態邏輯介面控制系統之 Auxiliary Logic Module(ALM) 電子卡片的關鍵元件 Hex inverting Schmitt Trigger，進行抗輻射實驗和可靠度評估。本計畫完成國內核能電廠電子卡片老化劣化資料之蒐集，抗輻射實驗方法之建立，元件可靠度評估等，期望增進核能電廠營運安全。

關鍵詞：核能電廠、電子卡片、元件、輻射。

Abstract

Since the reactor trips caused by the printed circuit boards of electrical instrument systems occur at a high percentage probability, the assessment of radiation effects on the electronic devices in printed circuit boards of the instrumental system in a nuclear power plant (NPP) is a very important research topic. The study and set-up of the assessment procedures and facility for the electronic devices in printed circuit boards of the instrumental system used in a nuclear power plant were performed in this project. The main aim of this project is to carry out the radiation hardness test and reliability assessment for Hex inverting Schmitt Trigger in Auxiliary Logic Module (ALM) of SSILS in Maanshan NPP. Some major tasks have been completed such as, the survey of printed circuit boards of the instrumental system used in a NPP, the set-up of radiation hardness test, the assessment of reliability for the key devices, which may improve the safety of operation in a NPP.

Keywords: nuclear power plant, electronic card, device, radiation.

I. 前言

根據美國核能電廠操作研究所之調查(Institute of Nuclear Plant Operation, INPO)，對儀電系統電路卡片引起急停之調查，結果顯示於 2008 年共有 6 次，約佔全部 48 次急停的 13%；於 2007 年共有 8 次，約佔全部 51 次急停的 16%。由於儀電系統電路卡片所引起之急停，於 2005~2007 年共有 32 次，大約佔 15%。因此，核能電廠控制系統電子卡片的零組件老化劣化問題，是很重要的研究課題。核能電廠因為儀控電子卡片的故障或誤

動作，可能造成電廠工作人員的困擾以及電廠營運上的損失，甚至發生電廠非預期性的跳機。國內現有的核能電廠皆已運作多年，許多控制系統電子卡片的零組件已有老化現象，因而若引起系統異常及故障事件，對電廠正常營運影響很大。因此，如何找出有效的對策，預防電子卡片故障之產生，降低其故障率，進而增進核電廠控制系統的可靠度為一項重要之研究課題。

電子卡片經過長期使用後，其功能特性表現即容易出現衰變的現象，此乃受制於其使用環境因素對電子卡片特性產生老化的影響。為掌握電子卡片使用的可靠度，就必須要了解造成電子卡片特性老化的限制因素，並進而尋求預防改善之道。從文獻的報導中得知，電子卡片的可靠度常由電子元件所決定。而電子元件的可靠度被定義為該電子元件得以滿足其原先設計功能的能力，並常以可供使用的年數予以表示。又與可靠度相關的失效現象常被發現來自於內在應力與外在應力的影響所產生的失效機制(failure mechanism)括號空格，這些失效機制常常造成電子元件的損壞，以至於發生電子元件起使電壓漂移(threshold voltage shift)，大漏電流(leakage current)，過度時間延遲(time delay)，或雜訊過大(noise)等現象，這些現象之組合也是間接或直接造成電子卡片特性產生老化的主因。

雖然電子零組件的種類相當多，其構成材料亦有所不同，但經過長時間使用後，受到各種不同應力的影響常造成該元件的組成產生變化，形成所謂的「質變」現象，此時若繼續加以使用則更容易受到來自於工作環境溫度及濕度的影響，加速其質變速度，最終造成電子零組件特性功能失效的結果。因此，調整變化電子零組件工作環境溫度及濕度的方法，常被一般的電子零組件製造廠商利用於早期篩選淘汰已具潛在質變的不良品，藉以提昇電子零組件產品使用的可靠度。另一方面，電子卡片電路設計的缺失亦為常見的電子卡片失效的主要肇因。然而在平常的工作環境中，前述肇因所產生的失效現象不易被查覺，唯有在工作環境產生變化時，電子卡片老化與電路設計缺失造成的失效現象才會逐一浮現。

在核電廠電子卡片預知維護技術中，為及早發掘電子卡片失效的潛在肇因，防範電子卡片失效的產生，一般除了進行加速電子卡片老化實驗外，同時也發展運用變化環境溫度與電子卡片量測相結合的測試方法，並驗證其為電子卡片預知維護的可行性。

應用於核能電廠安全相關系統之重要電子卡片組

件，係用以保護、控制反應爐或安全相關設備，以防止事故發生，因此此類組件特性對核能電廠運轉安全影響深遠。由於核能電廠儀電電子卡片組件在安裝期間，曾經歷許多老化環境，包括溫度、濕度和輻射環境等等，這些老化環境將導致儀電組件之電氣特性或材料之物理特性隨著時間而劣化，進而影響電子卡片安全功能。

過去經驗顯示，儀電電子卡片組件的老化使得許多安全相關系統之運轉與維護面臨極大的困境。由於安全相關系統在確保核能電廠運轉安全和效益上，佔有重要地位，因此電子卡片組件老化問題的解決已變得日益迫切。

國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)之儀電工作小組曾於 1998 年在維也納召開研討會，初步確立核能電廠儀電組件老化管理導則，並選擇感測器、電纜及接頭、電驛、電子元件等四項，作為探討對象，闡述其老化機制、發展中的測試與評估方法，以及老化管理相關技術和策略，以期降低儀電組件老化帶來的威脅。

目前國內運轉中之核能電廠，其安全相關儀電組件維護均面臨著老化與淘汰兩項根本問題。一般而言，老化係因儀電組件之物理特性隨時間改變，而淘汰係因儀電組件之原始製造商已不生產且無法提供備品及後續維修服務。依據我國核能管制法規規定，這些安全相關儀電組件必須依據美國聯邦法規 10CFR50 附錄 B 品保要求製造，並通過嚴謹驗證程序後才能使用。

由於國外曾發生三哩島與車諾比等核能事故，無論國內外對於核能電廠而言，輻射這個議題一直是受到整個社會所重視，尤其是近期的日本福島事故，事故的發生突顯出輻射安全之重要性，輻射除了對民眾健康影響外，輻射對電子元件特性的影響是相當大，因此當事故發生時的高輻射強度將會影響整個電子儀控系統對核能電廠之控制。

隨著半導體電子元件之製程快速發展，以半導體元件為輻射之偵檢器早已應用在輻射監測上，主要也是因為半導體元件受到輻射照射後，其特性上的變化相當的敏感，其中以金氧半場效電晶體(MOSFET)作為輻射劑量計早已有許多研究報告提及。而近年來半導體工業之蓬勃發展，電子元件的品質都相當穩定，而且在價格上便宜，因此利用 MOSFET 來量測輻射劑量具有相當準確性的優點。從過往之文獻指出，MOSFET 經由輻射照射後，因為輻射產生的氧化層陷阱電荷(Qot)以及界面陷阱電荷(Qit)導致，其汲極電流(drain current, Id)會減小，且汲極電流的減少量會隨著劑量的增加而增加，MOSFET 輻射照射後的再現性(reproducibility)很好。

本研究主要在於分析核三廠 SSILS-ALM 電子卡片關鍵 CMOS 元件(Hex inverting Schmitt Trigger & Hex Inverter)經輻射照射之後之效應。首先我們先了解金氧半導體(MOS)元件的輻射效應機制，其主要之機制為控制二氧化矽氧化層(SiO₂)與二氧化矽與矽基板之介面層(SiO₂-Si)之電荷效應。因此元件在游離輻射照射後，導致 oxide trapped charge 及 interface trapped charge 的量增加，這種電荷的效應造成了臨界電壓(threshold voltage)的漂移，此影響的效應與所受到整體輻射劑量成一合理之線性測量比例，此即為金氧半導體與輻射效應之重要研究機制。因此基本上可應用上述之功能機制，利用金

氧半場效電晶體直接接受輻射照射，以臨界電壓之偏移量，來表示所遭受之輻射劑量。同樣地會對於 CMOS 元件來探討其電性飄移與對應之輻射劑量。

核能電廠因為儀控電子卡片的故障或誤動作，可能造成電廠工作人員的困擾以及電廠營運上的損失，甚至發生電廠非預期性的跳機。國內現有的核能電廠皆已運作多年，許多控制系統電子卡片的零組件已有老化現象，因而若引起系統異常及故障事件，對電廠正常營運影響很大。由於核能電廠儀電電子卡片組件在使用期間，曾經歷許多老化環境，包括溫度、濕度和輻射環境等等，這些老化環境將導致儀電組件之電氣特性或材料之物理特性隨著時間而劣化，進而影響電子卡片安全功能。

本研究計畫之主要目的，係就核三廠固態邏輯介面控制系統之 Auxiliary Logic Module 電子卡片的 CMOS 關鍵元件 Hex inverting Schmitt Trigger 與 Hex Inverter，分析輻射照射後元件特性之變化。除了檢測關鍵元件的抗輻射(radiation hard)能力，並量測元件特性偏移對應所受輻射劑量之關係，建立相關的輻射效應資料，反之也能夠將關鍵 CMOS 元件做為輻射偵檢器使用，應用在輻射監測上。輻射實驗相關數據能可供電廠參考，能夠增加電子卡片系統安全，並預防電子卡片故障之產生，降低其故障率，進而增進核電廠控制系統的可靠度，以預防發生電廠非預期性的跳機，對電廠安全與營運有很大效益。

II. 主要內容

根據核三廠電子卡片 Auxiliary Logic Module(ALM)的歷年檢修紀錄，選取關鍵元件分析，並進行相關可靠度實驗。統計核三廠 SSILS-ALM 電子卡片歷年檢修紀錄，我們可以發現 Hex inverting Schmitt Trigger 和 Hex Inverter 為更換最多的 IC 元件，於是後續研究進行這兩種 IC 元件可靠度實驗。

對 Hex inverting Schmitt Trigger 和 Hex Inverter 的功能進行分析，來決定研究的參數。

1. Hex inverting Schmitt Trigger

Hex inverting Schmitt Trigger 是由六組反相施密特觸發電路所組成，如圖 1 與圖 2。

(a) 當輸入為正飽和時，即 $VO = +V_{sat}$ 時

非反向輸入端之上臨界電壓(voltage of upper threshold)為 $V_U = R_2 * V_{sat} / (R_1 + R_2) = \beta V_{sat}$ ，上式 $\beta = R_2 / (R_1 + R_2)$ 為反相施密特觸發電路之正回授因數值(positive feedback factor)。輸出要由 $+V_{sat}$ 轉態為 $-V_{sat}$ 之條件為 $V_{in} > V_U$ ，即 $V_{in} > R_2 * V_{sat} / (R_1 + R_2)$ 。

(b) 當輸入為負飽和時，即 $VO = -V_{sat}$ 時

非反向輸入端之下臨界電壓(voltage of lower threshold)為 $V_L = R_2 * (-V_{sat}) / (R_1 + R_2) = (-V_{sat}) * \beta$ ，輸出要由 $-V_{sat}$ 轉態為 $+V_{sat}$ 之條件為 $V_{in} < V_L$ ，即 $V_{in} < R_2 * (-V_{sat}) / (R_1 + R_2)$ 。

綜合以上分析比較，可知道上臨界電壓與下臨界電壓為對稱相等(即 $V_U < V_L$)，其完整電路及輸入-輸出轉移特性曲線，如圖 3 所示。因為反相施密特觸發電路之轉移特性曲線具有封閉性的磁滯效應(hysteresis effect)，故稱為磁滯曲線，如圖 3 所示，且曲線變化方向為順時針旋轉，其中 V_H 定義為磁滯電壓又稱為磁滯寬度，即 $V_H = V_U - V_L = 2V_{sat} * \beta$ 。

當輸入 V_{in} 為一弦波信號或其他非方波信號時，若輸入信號電壓大小超過上或下臨界電壓(V_U 或 V_L)時，其輸出信號為方波。故反相施密特觸發電路又稱為波形整形電路，其功能特性可應用於方波產生電路，如圖 4。

2. Hex Inverter

當輸入 V_{in} 為低電壓時，則輸出 V_{out} 為高電壓，當輸入 V_{in} 為高電壓時，則輸出 V_{out} 為低電壓，典型的反相器輸入電壓與輸出電壓的關係圖，稱為電壓轉換曲線， V_{IH} (可容許之最小高電位輸入電壓) 及 V_{IL} (可容許之最大低電位輸入電壓)定義為 VTC 中斜率等於 -1 所對應的兩個輸入電壓，如圖 5 所示。當 $V_i > V_{IH}$ 或 $V_i < V_{IL}$ ，反相電路皆能正確將輸入電壓反相。當 $V_{IL} < V_i < V_{IH}$ 則進入模糊區間，理想的情形在轉換過程中能無延遲精確的翻轉，但實際元件中存在轉換的過渡區，此時反相電路無法將輸入電壓正確反相，是實際應用時必須避免發生的情況，其延遲特性是元件性能測量的指標。

3. 主要量測參數-propagation delay

時脈觸發邊緣到正反器輸出所需的時間稱為傳遞延遲時間(propagation delay time)，輸出電壓由高至低者以 t_{PHL} 表示，輸出電壓由低至高者以 t_{PLH} 表示，兩者時間不一，如圖 6 所示。

(1) t_{PHL} (high-to-low propagation delay)

輸入方波信號轉換電壓後，直到輸出信號由高電位(V_{OH})下降至 $(V_{OH}+V_{OL})/2$ 所需的時間。

(2) t_{PLH} (low-to-high propagation delay)

輸入方波信號轉換電壓後，直到輸出信號由低電位(V_{OL})上升至 $(V_{OH}+V_{OL})/2$ 所需的時間。

4. 實驗量測步驟

步驟一：依前述元件之電路接線，直流供應電源為 5V，並將訊號產生器的輸出振幅設為 5V 且頻率為 1MHz 的方波作為電路的輸入信號。

步驟二：以示波器的 CH1 和 CH2 分別觀察電路的輸入信號和輸出信號波形。

步驟三：由輸入信號和輸出信號之波形，記錄 t_{PHL} 和 t_{PLH} 。實際波形如圖 7 所示。

5. 游離輻射照射條件

本實驗之輻射源為清華大學原子科學技術發展中心鈷 60 射源為照射源，鈷 60 會透過 β 衰變放出能量高達 315 keV 的高速電子成為鎳 60，同時會放出兩束伽馬射線，其能量分別為 1.17 及 1.33 MeV。將 ALM 電子卡片的關鍵元件 Hex inverting Schmitt Trigger 與 Hex Inverter 以及用來分析的 CD4007 元件進行輻射照射實驗，在實驗前將元件原始數據量測並紀錄，接著元件以鈷 60 射源照射，分別以 3.4 krad/h、33.4 krad/h 與 320.7 krad/h 三種不同之劑量率的輻射照射，總照射時間為 19 小時，使得元件之累積輻射劑量之範圍涵蓋約從 3 krad~3 Mrad，得到一個大範圍的累積輻射劑量，詳表 1，照射完後量測元件之特性飄移，在此範圍內可得到輻射劑量對應元件特性之變化。

從美國核電法規 RG1.029 指出，對 MOS 的積體電路而言，其抗輻射程度範圍需從輻射劑量 1 krad 至 10 Mrad，本研究中採用輻射總劑量範圍皆符合此規範。因此能夠瞭解元件抗輻射能力，並可利用元件參數漂移量對應 3 krad~3 Mrad 範圍內之輻射劑量之關係，可將元

件應用做為輻射之偵檢器使用，而量測參數之選用與其劑量率效應在本研究有相關背景資料。而從美國軍事規格 MIL-STD-883H 的 METHOD 1019.8 中指出，對於輻射照射測試而言其劑量率須低於 180 krad/h，而在本研究中探討輻射劑量率效應時也符合此標準。

III. 結果與討論

從核三廠電子卡片 ALM 的歷年檢修紀錄，選取關鍵元件 Schmitt Trigger 與 Inverter，輻射照射實驗分別在不同輻射劑量，及相同總劑量且不同劑量率的照射對元件電性的變化現象。

電子元件對輻射效應是相當敏感的，接下來將探討對元件照射後反應在電性上之變化。圖 8 為輻射照射前後 Hex inverting Schmitt Trigger 的輸入電壓對應輸出電壓之電壓轉換關係圖。從中發現到經輻射照射累積劑量 1 Mrad 後，其電壓轉換的特性已有大大的不同，其上下臨界電壓皆往左漂移約 2 V，確實 Hex inverting Schmitt Trigger 對輻射相當敏感。

圖 9 為 Hex inverting Schmitt Trigger 的上下臨界電壓之漂移對應所遭受之輻射劑量圖。元件經輻射照射後，其上下臨界電壓皆隨著輻射劑量的增加而更往左漂移，而其下臨界電壓衰退之程度又較上臨界電壓嚴重，在輻射劑量約 35 krad 時，上臨界電壓衰退 10%，在輻射劑量約 15 krad 時，下臨界電壓衰退 10%。

圖 10 為 Hex inverting Schmitt Trigger 輸出的高低電壓準位對應所遭受之輻射劑量圖。其輸出之低電壓準位並不隨著輻射劑量增加而影響，但輸出之高電壓準位，卻無法維持原始的高準位，而隨著輻射劑量之增加下降。在輻射劑量 2 Mrad 約時，輸出之高電壓準位衰退 10%。

圖 11 為 Hex inverting Schmitt Trigger 的傳導延遲時間對應所遭受之輻射劑量圖。無論是 t_{PLH} 參數與 t_{PHL} 參數皆對輻射照射相當敏感，其延遲的現象相當明顯，尤其是 t_{PLH} 參數的漂移量，在累積劑量 3 Mrad 時 t_{PHL} 增加約 100 ns，而 t_{PLH} 增加約 400 ns。在輻射劑量約 100 krad 時， t_{PHL} 參數增加 10%，在輻射劑量約 8 krad 時， t_{PLH} 參數增加 10%。

圖 12 為 Hex inverting Schmitt Trigger 的靜態消耗電流值對應所遭受之輻射劑量圖。量測元件的靜態消耗電流值，隨著輻射劑量增加而變小，而且其電流值減少相當多，其趨勢與先前量測到之上下臨界電壓值之衰退相當一致。在輻射劑量約 5 krad 時，靜態消耗電流值衰退 10%。

IV. 結論

本計畫對於核三廠固態邏輯介面控制系統之 Auxiliary Logic Module 電子卡片的 CMOS 關鍵元件 Hex inverting Schmitt Trigger、Hex Inverter，進行輻射照射實驗。將元件在經過 3 krad~3 Mrad 之照射後，其電性上之變化進行探討，進而得到電性參數變化與所對應的輻射劑量關係。對 Hex inverting Schmitt Trigger 與 Hex Inverter 而言其傳導延遲時間、靜態消耗電流的變化量、Hex inverting Schmitt Trigger 的上下臨界電壓漂移量、Hex Inverter 的最大電壓增益點之漂移量以及 CD4007 元件起始電壓漂移量，對輻射累積劑量來說相當敏感，而

且其再現性很好。在輻射劑量低於 30 krad 以下時，大部分元件的電性參數已達 10%的衰減程度，甚至超過 10%。而元件輸出之高電壓準位則要在輻射劑量 1 Mrad 以上時才會達到 10%的衰減程度。

參考文獻

- [1] TR5-43 ,TR5-47 , Review of Circuit Card/Board Related Failures That Contributed to Automatic and Manual Scrams
- [2] H. S. Blanks, "Temperature dependence of component failure rate," Microelectronics and Reliability, vol. 20 (1980) 219-246.
- [3] M. Campbell, "Monitored burn-in improved VLSI reliability," Computer design vol. 24 (1985) 143-144.
- [4] C. Canali, F. Fatini, S. Gaviraghi, and A. Senin, "Reliability problems in TTL-LS devices," Microelectronics and Reliability, vol. 21 (1981) 637-651.
- [5] K. L. Chiang, P. O. Lauritzen, "Thermal instability in very small p-n junctions," IEEE Transactions in Electron Devices, ED-18, (1970) 94-97.
- [6] S. S. Dimitrijevic, N. D. Stojadinovic, and Z. D. Pruić, "Analysis of temperature dependence of CMOS transistors, threshold voltage," Microelectronics and Reliability, vol. 31 (1981) 33-37.
- [7] D. L. Denton, and D. M. Blythe, "The impact of burn-in on IC reliability," The Journal of Environmental Sciences, vol. 29 (1986) 19-23.
- [8] B. L. Draper, D. W. Palmer, "Extension of high temperature electronics," IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, CHMT-2, (1979) 399-404.
- [9] F. P. Heiman, and H. S. Miller, "Temperature dependence of n-type MOS transistors," IEEE Transactions in Electron Devices, ED-12, (1965) 142-148.
- [10] S. E. Nordquist, J. W. Haslett, and F. N. Trifimenkoff, "High temperature leakage current suppression in CMOS integrated circuits," Electronics Letters, vol. 25 (1989) 1133-1135.
- [11] 李春林, "臺灣電力公司核能二廠局部能階偵測系統電子卡片 INER-LPRM-1、INER-LPRM-2、及 INER-LPRM-3 檢證程序書," 第一版, 編號 CGID-DP-86005, Feb, 1998, 1-54.
- [12] Datasheet CD40106BF3A - CMOS HEX SCHMITT TRIGGERS - Texas Instruments.
- [13] 劉榮超, "電子卡片研製與驗證 ppt" 中科院電子系統所.
- [14] 7300 印刷電路板研製檢證規範.
- [15] 徐懷瓊、曾樹湖、孫元龍, "儀控技術叢書之二-固態邏輯介面控制系統"
- [16] 彭鴻霖, "可靠度技術手冊 失效物理分析技術"
- [17] MIL-HDBK-217F _Reliability Prediction of Electronic Equipment 35-36.
- [18] Kececioglu, D. and Jacks, J. Q., "The Arrhenius, Eyring, inverse power law and Combination models in accelerated testing" , Reliability Engineering,(1983)
- [19] Parker, T. P. and Webb, C. W., "A Study of Failure Identified During Board Level Environmental Stress Testing," IEEE Transaction on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 15, No. 6, pp. 1086-1092(1992).
- [20] Robert R. Dixon, "Thermal Aging Predictions From An Arrhenius Plot With Only One Data Point" ,IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-15 No.4, August 1980.

表 1 累積輻射劑量之範圍涵蓋約從 3 krad~3 Mrad 之照射條件

Exposure time	Dose effect		
	320.7 krad/h (6.75cm)	33.4 krad/h (25cm)	3.4 krad/h (72cm)
1hr	320.7 krad	33.4 krad	3.4 krad
1hr53min	604 krad	62.9 krad	6.4 krad
3hr	962.1 krad	100.2 krad	10.2 krad
4hr	1282.8 krad	133.6 krad	13.6 krad
7hr	2244.9 krad	233.8 krad	23.8 krad
10hr	3207 krad	334 krad	34 krad

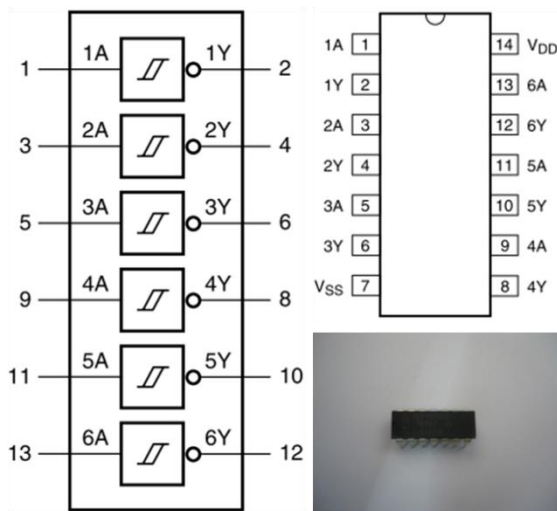


圖 1 Functional diagram & Pin configuration ,

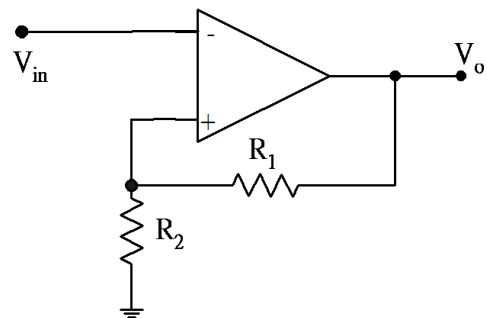


圖 2 Inverting Schmitt Trigger Circuit

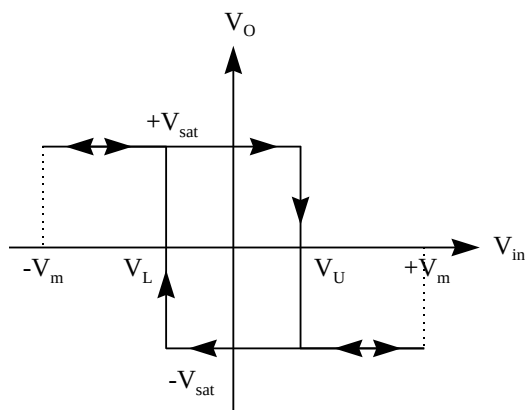


圖 3 反相施密特觸發電路之轉移特性曲線，

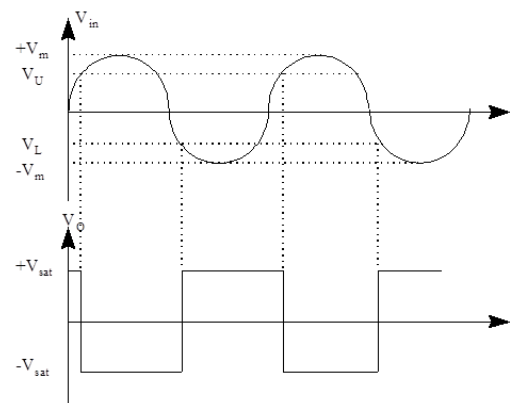


圖 4 Input & output waveforms

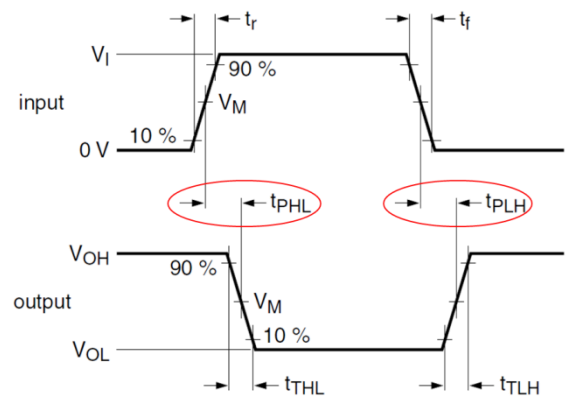
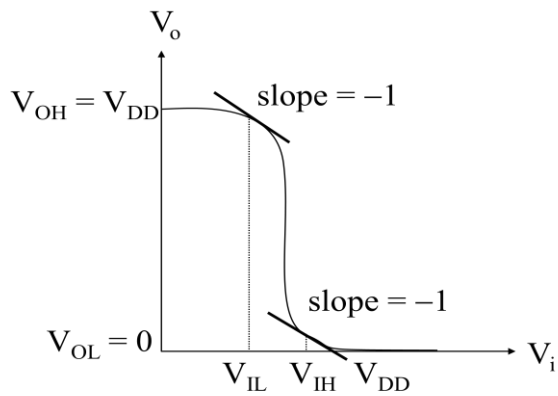


圖 5 電壓轉換曲線，圖 6 傳遞延遲時間示意圖

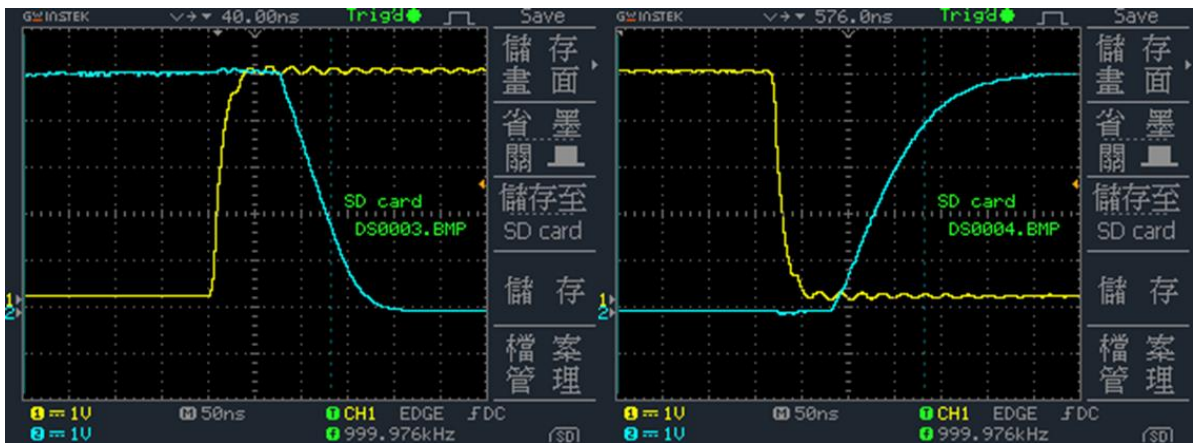


圖 7 Actual Waveforms (Input waveform :yellow , Output waveform :blue)

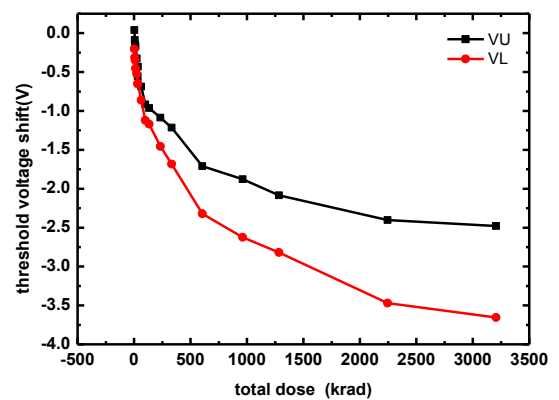
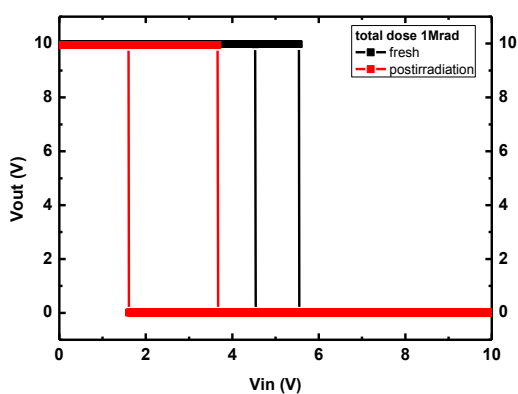


圖 8 輻射照射前後 Hex inverting Schmitt Trigger 的輸入電壓對應輸出電壓之電壓轉換關係圖，
圖 9 Hex inverting Schmitt Trigger 的上下臨界電壓對應所遭受之輻射劑量圖

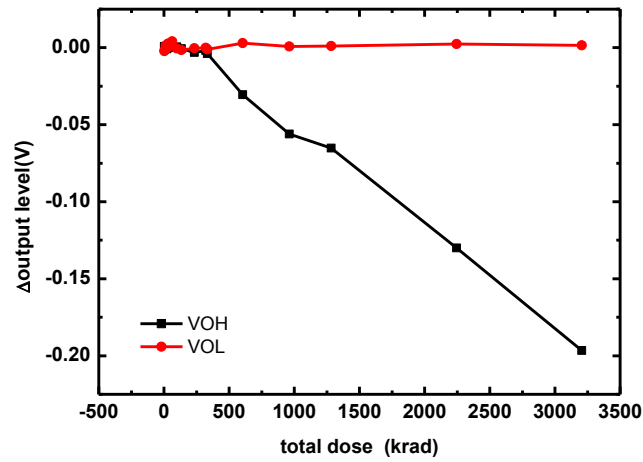


圖 10 Hex inverting Schmitt Trigger 輸出的高低電壓準位對應所遭受之輻射劑量圖，

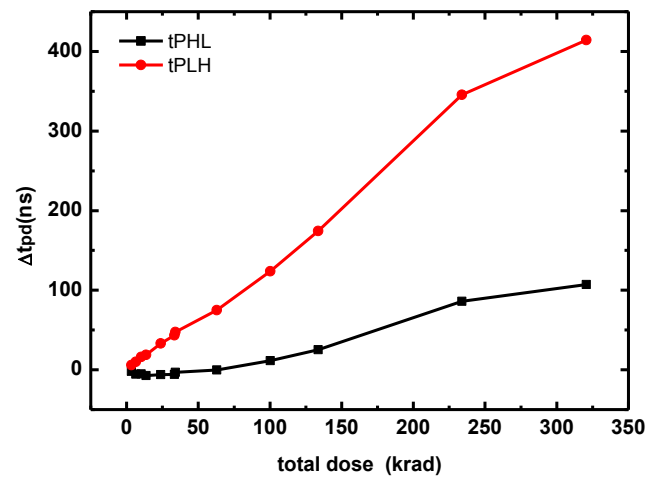


圖 11 Hex inverting Schmitt Trigger 的傳導延遲時間對應所遭受之輻射劑量圖

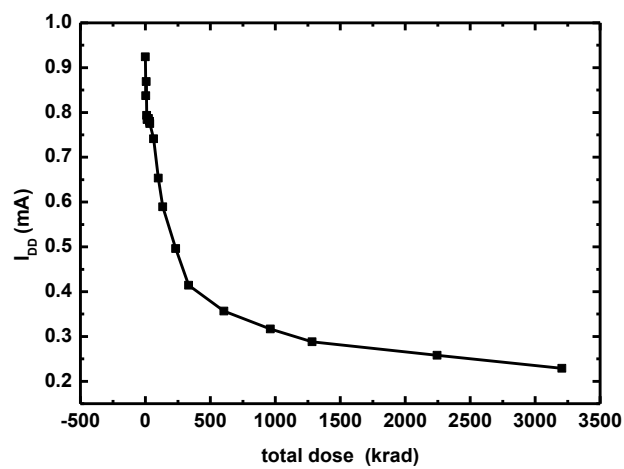


圖 12 Hex inverting Schmitt Trigger 的靜態消耗電流值對應所遭受之輻射劑量圖

海嘯對結構物衝擊分析與審查技術建立之研究

Establishing the Analysis and Review Techniques for Tsunami Impact on Structures

計畫編號：103-NU-E-008-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳祚任、王仲宇

e-mail：tsoren@ncu.edu.tw

計畫參與人員：吳祚任、王仲宇、鄭喆宇

執行單位：國立中央大學水文與海洋科學研究所

摘要

本研究旨在建立離島或沿海處置場區海嘯對結構物衝擊分析與審查技術。將三維 Splash3D 模式結合賓漢雙黏性流模式，以分析海嘯對結構物之衝擊。其中海嘯湧潮之流場，以及其與結構物之互制部分，採求解三維 Navier-Stokes 方程式，並輔以大渦模擬（Large Eddy Simulation, LES）予以描述。在複雜之碎波液面部分，採用二階 Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) 之流體體積法（Volume of Fluid, VOF）重建自由液面。在夾砂效應以及結構物基礎沖刷之問題，本計畫將以二次式賓漢流模式予以分析。該模式中，以降伏應力及兩黏性參數表示泥砂受水流沖刷之啟動過程以及運動行為。在進行分析之前，本文將先進行數值模式與實驗之驗證，包括海嘯撞擊結構物時受力及自由液面之準確性，並接續分析結構物排列對海嘯衝擊力之影響。研究重點並將包括海岸土堤受海嘯侵蝕後，其夾砂水流對於海嘯衝擊力之影響。另一方面，由 2004 年南亞海嘯及 2011 年東日本海嘯之記錄可發現，具有攻擊力之海嘯湧並非僅有一次，而持續數次。其中，破壞力最大之經常出現在前三次中，為此，本研究亦將分析往返三次以上海嘯與衝擊力之關係。

關鍵詞：海嘯湧潮、流體體積法、賓漢流模式、流體結構互制、上溯。

Abstract

This study aimed to establish the analysis and review techniques for tsunami impact on the structure at the disposal site on an island or at the coastal area. We will combine the Splash3D model with the three-dimensional quadratic Bingham viscous flow model to analyze the impact of the tsunami on structures. The Navier-Stokes equations will be adopted to describe the flow field of Tsunami bore as well as its interaction with the structures. Large Eddy Simulation (LES) will be used for the turbulence closure. As for the complex breaking wave, the second-order Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) the volume of fluid (VOF) reconstruction will be used to reconstruct the free surface. The sand erosion effects and local scour problem will be analyzed by the quadratic Bingham flow model. In this mode, the sediment suspension and motion are described by the yield stress and two viscous parameters. Prior to analysis, this study will first conduct an accuracy verification on the force acting on the structure and the splashing free-surface, and followed by the analysis of the structures arrangement to the tsunami

impact force. This study will also focus on seawall erosion by the tsunami, and the effect of muddy water to the impinging force. On the other hand, observed from the 2004 South Asian tsunami and the 2011 East Japan tsunami, the powerful tsunami bores will attack the coastal area not only once, but several times. Among them, the most destructive tsunami bore often appeared in the first three. For this, this study will also analyze the relationship between the impact forces with the first three back-and-force tsunami bores.

Keywords: Tsunami bore、Volume of Fluid、Bingham model、FSI、Run-up.

I. 前言

2011 年 3 月 11 日所發生之東日本海嘯事件使國人逐漸重視海嘯之威脅。該事件由海溝型地震所引發，地震矩規模為 Mw 9.0。地震引發高達 10 公尺以上之沿岸海嘯入射波。根據 2012 年 6 月 13 日本警察廳所公開之資料顯示，本次事件死亡人數 15861 人、失蹤 2939 人，受到海嘯攻擊而全毀之建築物共 130429 棟，半壞之建築 262818 棟，較輕微之破壞之建築有 717538 棟總計約百萬之建築受到影響，緊鄰震央之宮城縣、岩手縣、福島縣等所受之影響為最大，死亡人數和建築物之毀損，三縣總和之死亡人數與建築物毀損數皆約占全國總數之九成。而海嘯湧潮（tsunami bore）侵襲內陸之畫面，也首次由直升機由空中拍攝到。

由 NHK 之記錄畫面（圖 1-a 至圖 1-d）可清楚觀察到，當海嘯波上溯至仙台地區內陸時，是以類穩態（quasi-steady）之海嘯湧潮型態呈現，並以驚人之速度朝內陸前進。圖中可觀察到海嘯湧潮上有許多漂流物，如樹枝、房屋及碎片、汽車等，且亦以類似等速度前進，期間漂流物並無再度捲入潮身之行為。然而海嘯湧潮強大之推移力可將所經過之結構物扭曲或破壞（如圖 1-c），此行為類似台灣常見之土石流災害。由圖中溫室受破壞之過程可觀察到，海嘯湧潮之潮頭可將溫室撞擊、破壞、並捲入潮身，捲入之溫室殘骸受並無法立刻浮出水面（如圖 1-d）。由此現象可明顯觀察到，海嘯湧潮之潮頭（bore front）具有相當強之紊流強度、旋度、以及推移力，而潮身（bore body）則持續推移障礙物。這組合為三維之現象，並且具有相當強之紊流強度。

對於海嘯湧潮，在早期之研究主要是以理論或實驗進行研究。實驗方面主要觀察與海嘯湧潮有相似性值之潰壩湧潮（dam-break bore）之行為。然而，為要使潰壩湧潮具備類穩態之特性，其所需要之潰壩實驗必須要以

長潰壩來進行，困難度相當高。理論方面則將問題簡化為深度積分之線性淺水波方程式予以推導理論公式 Arnason (2005) [2]，其準確性有限。此外，由於流場加速度在垂直方向上之分量強烈，若單以傳統深度積分法之數值模式予以分析 (Ting and Kim, 1994 [53] ; Abul-Azm, 1994 [1]; Zhuang and Lee, 1996 [57]; Losada et al., 1996 [32]; Ertekin and Becker, 1996 [12]; Tang and Chang, 1998 [52]; Huang and Dong, 1999 [18])，將無法完整描述海嘯湧潮上溯時之碎波與結構物之交互作用。

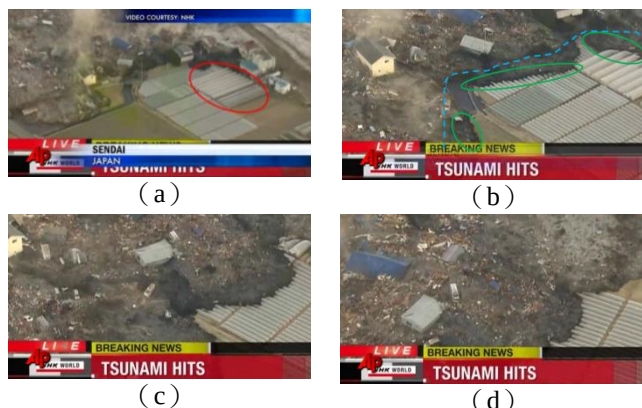


圖 1，(a) 海嘯湧潮即將到達溫室之位置。圖中紅線為溫室之位置。(b) 海嘯湧潮到達溫室之位置。海嘯已越過結構物抵達溫室，圖中綠線代表海嘯湧潮之潮頭位置，藍色虛線後方為海嘯湧潮之潮身。(c) 海嘯湧潮衝擊溫室。(d) 被海嘯湧潮吞沒之溫室。出處 (<http://www.youtube.com/user/AssociatedPress/videos?query=Tsunami+Slams+Northeast+Japan>)

此外，海嘯湧潮具備 5 種特性，使之與傳統海嘯長波以及河川洪水等研究有所區隔。以下羅列海嘯湧潮之特性，以及與本計畫之關連性。

1. 初始衝擊力大
2. 對結構物衝擊持續時間長
3. 回溯再次衝擊結構物
4. 對結構物周圍底床具有強烈冲刷力
5. 多次攻擊之特性

海嘯湧潮初期發生於乾燥底床，亦即結構物面臨海嘯湧潮之衝擊時，將不具備下游端靜水壓之支撐，因此結構物不僅要承受海嘯湧潮之動壓，亦要承受靜壓，此動壓與靜壓之合，將遠大於傳統利用經驗公式所求得之結構物於洪水中受力之值。從諸多日本 311 海嘯事件之影片中可以看出，結構物往往在面臨第一波海嘯波攻擊時，其結構先受破壞，之後才由後續之海嘯湧潮持續搬移。換言之，利用傳統洪水之經驗公式所求得之結構物受力需要修正，然而如何修正，將是本研究之重點。

海嘯湧潮可持續相當長之時間，亦即海嘯之半週期。一般而言，大規模海嘯之週期大約為 1 小時，因此單一海嘯湧潮約可持續 30 分鐘。在這 30 分鐘內，結構物將持續遭受破壞。

海嘯湧潮具有退水階段(亦稱為回溯階段)之特性，而此階段之破壞力往往不亞於漲水階段。此特性代表當考慮結構物承受海嘯之攻擊，不僅結構物正面需面臨海

嘯之破壞，其背面亦需考慮海嘯之破壞力。傳統近岸結構物之設計，多強調迎水面之結構物強度，而忽略背面之保護。此設計對於一般風浪有效，然而其無法保護結構物所面臨之海嘯破壞力。

海嘯具有強烈之底床冲刷力，特別是結構物周圍之局部冲刷，這現象普遍出現在土地表面無鋪面之結構物周圍。海嘯冲刷造成之破壞可於 2004 年南亞大海嘯之案例中發現，Borrero et al. (2005) [6] 於印度 Kalapakkom 校舍發現深 1.5 公尺、寬 5 公尺之海嘯冲刷坑，ITST (International Tsunami Survey Team, 2005 [19]) 於印尼 Banda Aceh 發現沿岸許多結構物周圍之土壤受到海嘯淘刷破壞，斯里蘭卡沿海之房屋周圍亦有明顯之海嘯冲刷痕跡 (圖 2)。除此之外，2011 年於日本發生之 311 海嘯同樣導致日本沿海多處地區土壤液化及建築物周圍之冲刷。海嘯對土堤有強烈淘刷力。當海嘯湧潮越堤後，其不僅對具有表面保護工海堤具有強烈破壞力，對於無保護工之土堤則大多直接冲刷並摧毀。被冲刷後之土堤，其泥砂混入海水後，其泥水之有效密度將大於海水之密度，並增大局部海水動量。然而海嘯湧潮在侵蝕土堤之過程，亦將消耗部分動量，因此如何評估此一綜合性結果，將是本研究之重點之一。



圖 2，斯里蘭卡沿岸房屋周圍土壤受海嘯淘刷痕跡。出處 (http://coastal.usc.edu/plynett/Sri%20Lanka%20Tsunami%20Damage/slides/d2_scur5.html)

海嘯具有多次攻擊之特性。海嘯波大多有兩波以上之攻擊。大規模之海嘯波則可往復長達數小時。攻擊力最強之海嘯波多為前三海嘯波，其後雖逐漸變小，然而其不斷反覆攻擊之效應，會使原本可留存之結構物強度逐漸弱化，最終破壞殆盡。此效應也是一般洪水所不具備之特點。

本研究主要目標為建立海嘯對結構物衝擊分析與審查技術，計畫執行時間為兩年，將以先進且可靠之計算流體力學模式 Splash3D 進行分析，並達到下列四點目標：

1. 建立含夾砂效應之三維海嘯數值模型 (103 年)。
2. 建立與分析結構物排列對海嘯衝擊力影響之數值模型 (103 年)。
3. 建立與評估三維海嘯基礎冲刷數值模型。
4. 建立與分析海嘯往返三次以上對海嘯衝擊力之模型。

在海嘯湧潮與結構物之交互作用之模擬中，自由液面之計算會影響整體流場與水位，現有計算自由液面之數值方法有 HF (Hight Function)、MAC (Marker and Cell)、LSM (Level Set Method)、SPH (smoothed Particle Hydrodynamics)、VOF (volume of fluid) 等五種方法。各方法皆有其擅長之處，限於篇幅，不一一介紹。其中以 VOF 法為發展較成熟，且準確性較高。

VOF 法最早由 Hirt and Nichols (1981) [[16]] 提出。此法以流體於網格中所佔之體積分率作為判定流場之氣體與液體之交界面，並由計算體積分率之變化追蹤自由液面之運動情況。例如體積分率 f 所標示之網格為水時，其體積分率為 1，若為空氣，則為 0，因此自由液面之體積分率介於 0 至 1 之間。網格內之流體體積分率可決定網格內之液面斜率，並以此建立液面分布。

VOF 適用於處理多相位之流場，並可處理碎波。Kothe et al. (1999) [[23]] 將自由液面重建之精確度提升至二階精確度。Heinrich (1992) [[15]] 以 Nasa-Vof 2D 模擬由堅硬塊體滑入水面所產生之海嘯，與實驗所量測之塊體滑移速度為模式之輸入值，模擬之結果與實驗相近。之後 Liu et al. (2005) [[30]] 以 LES 紊流模式與 VOF 方法進行塊體滑移入水槽而產生海嘯波之三維模擬，與實驗之結果比對相當接近。Lohner et al. (2006) [[32]] 以 VOF 方法模擬三維潰壩水體與圓柱之交互作用。Vincent et al. (2007) [[55]] 以 VOF 處理模擬潰壩水體與漂浮在水面之圓柱粒子之交互作用，模擬之結果與實驗和理論相當吻合。本次研究將以 VOF 方法處理多相流之問題。

當海嘯入侵沿岸時，將直接對於沿岸結構物（如橋墩、堤防等）造成衝擊。而海嘯行進時，亦會對底床產生沖刷作用，並捲起泥砂，此類沖刷稱為一般沖刷 (general scour)。一般沖刷係指底床在未設置任何構造物時，水流對底床沖刷進而造成底床高程下降之情況。此時水流驅使河床泥砂運移，而泥砂也影響水流流況，兩者相互依存。當海嘯行經結構物時，更將在結構物周圍產生局部沖刷 (local scour) 與束縮沖刷 (constriction scour)。局部沖刷主要因為底床上設置結構物，造成馬蹄形渦流以及局部流場改變，迫使水流於結構物前方產生壅水，並使流速與流向劇烈變化，引起渦流或極強之底床剪力，進而造成底床局部沖刷。束縮沖刷則是指海嘯行經密集結構物時，水流因通水斷面減少而導致周圍之水流加速，造成結構物周圍底床沖刷。

過去探討洪水與沖刷深度關係之文獻繁多，但多以發展區域性之經驗公式為主，如 Lacey 公式 (1930) [[25]] 中，沖刷深度為流量、沉積物粒徑及經驗參數之函數。然而此類模式以穩定均勻流況為主，無法處理結構物周圍之沖刷情形。其後學者則多以實驗求得地區性之經驗或半經驗公式。此類公式僅可適用於特定水理條件，且需要校準和驗證甚多之數值參數，對於稍微複雜之結構物組合，將無法直接分析。

早期沖刷研究主要著重於水流與結構物之交互作用，流經結構物周圍之水流會形成複雜之三維沖刷系統，此類沖刷流場與底床泥砂交互作用則產生沖刷，沖刷現象乃為空氣、水流與泥砂之三相問題，因此對於自由液面變化、沖刷坑之生成與發展以及對底床沉載運移為研究之重要課題，此類問題以橋墩局部沖刷最為繁多。最

初研究沖刷問題多以實驗為主軸，Melville and Raudkivi (1977) [[37]] 將圓形橋墩至於平床、未平衡沖刷坑及平衡沖刷坑等定床中，量測墩前之流速分布與墩前周圍近底床處之流速、紊流強度與底床剪應力強度之分布，其結果發現墩前會形成明顯之向下水流，該現象會隨著沖刷坑增大而增強，同時墩前之渦流效應亦隨沖刷坑變大而增加。Dey et al. (1995) [[10]] 利用五孔皮拖球 (five-hole pitot sphere) 量測沖刷坑內之三維流場，其實驗過程將橋墩周圍流場分為上下游流場，由水流連續方程式配合試驗量測資料，將橋墩上游各流速分量表示為圓柱座標之函數形式，而橋墩下游各流速分量則以直角座標之函數型式表示，以估算橋墩周圍沖刷坑內之三維流場。Sheppard et al. (2004) [[51]] 以清水沖刷橋墩發現懸浮載濃度對於沖刷深度有明顯之效應。Ettema et al. (2006) [[13]] 發現實驗設計之大尺度之紊流效應非常重要，因為該效應則直接影響平衡之沖刷深度。

三維數值模擬方面，Mao (1986) [[34]] 應用改良之勢能流理論與輸砂之連續方程式模擬均勻流場於圓柱下之泥砂沖刷情形。Olsen and Melaaen (1993) [[43]] 以有限體積法求解穩態不可壓縮之 Navier-stokes 方程式，並使用 $k-\varepsilon$ 紊流模式模擬水流經橋墩周圍之流況，其結果表示該模式可合理模擬墩前向下射流及墩側之加速水流，但對於墩前馬蹄型渦流之模擬並不顯著，後續為求解對流-擴散方程式，以計算底床高程之變化，但其模擬時間甚短，僅計算出橋墩兩側初期之沖淤情況。近年由於電腦計算能力提昇，Olsen and Kjellesving (1998) [[44]] 延續 Olsen and Melaaen (1993) [[43]] 之研究，採用 $k-\varepsilon$ 紊流模式，以有限體積法求解非穩態不可壓縮之 Navier-stokes 方程式，模擬水流流經橋墩之流況，其模式可對墩前壅水、墩側加速水流以及橋墩周圍馬蹄型渦流等現象作出適當之模擬，並以相同之方法模擬長時間之底床變化，模擬適切之橋墩周圍底床平衡沖刷坑。Richardson and Panchang (1998) [[46]] 使用非穩態三維數值模式 (FLOW-3D) 模擬平床與固定沖刷坑床形之橋墩周圍水流流況，其模擬結果與 Melville and Raudkivi (1977) [[37]] 之實驗結果比較，其流速與流體粒子之運動皆有良好一致性。Roulund et al. (1999) [[48]] 以求解沉載連續方程式模擬橋墩周圍底床之變化，其模擬底床時間僅達 5 分鐘之久。Brørs (1999) [[7]] 利用有限元素法求解 RANS 方程式以及 $k-\varepsilon$ 紊流模式，在此研究中，輸砂模式可同時求解底床載 (bed-load) 以及懸浮載 (suspended-load) 之傳輸量。Li and Cheng (2000) [[27]] 求解輸砂公式與 Navier-Stokes (NS) 方程式，並配合大渦模擬 Smagorinsky sub-grid scale (SGS) 紊流模式，以模擬紊流場之行為，其模式假設靠近底床之剪應力近似於離壁之剪應力，以計算平均沖刷坑大小。Zhao et al. (2010) [[56]] 以沖刷圓柱實驗與求解三維 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式與採用 $k-\omega$ 紊流方程式模擬水流與不同圓柱之柱高與半徑比與沖刷深度之關係，其模擬結果與實驗有良好一致性。然而上述前人研究多以定床沖刷坑探討流況，且與繁多之經驗公式與模式結合，但真實之沖刷坑變化與流況則會隨時間變化。

為了避免過度使用經驗公式，Zhao and Frenando

(2007) [[57]] 使用輸砂模式中兩相流之概念，發展尤拉兩相流模式，並將其模式嵌入 FLUENT 商業流體計算軟件中，以模擬線管周圍之沖刷。其結果與實驗數據比較有良好之一致性。然而上述之研究皆大多忽略自由液面之影響，因此只適用於無劇烈上下起伏之流況。多數引起結構物損毀之猛暴型洪水為特色之一，即為水面有劇烈之擾動，因此上述之模式並不適用。為克服此限制，於計算底床之變形時必須與自由液面之計算耦合。Liu and García (2008) [[31]] 發展三維流體體積法 (VOF)，並結合 $k-\varepsilon$ 紊流模式，以描述含自由液面之情況。其在模擬水與泥砂之交界面運動情形方面，採用變動貼壁網格法，結合輸砂模式，以考慮底床載和懸浮載。其結果二維之射流方面與實驗值比對有良好之一致性，而在三維大尺度之垂直圓柱模擬方面，其沖刷模擬也有合理之結果。然而此模式因採用變動貼壁網格法，當模擬較複雜之地形或沖刷坑時，會有計算網格不易收斂之情形。此外，該模式僅可描述單一底泥，無法處理實際問題中隨處可見之泥砂分層現象。

自然界中許多物質具有非牛頓流體 (Non-Newtonian fluid) 之特性，如火山熔岩、牙膏、河川底泥等，此類黏性物質具有臨界剪應力，該臨界剪應力又稱為降服應力 (yield stress)，或稱賓漢降服 (Bingham yield)，此臨界剪應力即代表該物質之塑性特性。當黏性流體之剪應力小於降服應力，則運動行為類似固體；若剪應力大於降服應力，則物質之運動行為近似牛頓流體。本研究目的為將泥砂之運動行為以賓漢流形態加以描述。前人發展出本構模式 (rheological model) 以描述黏塑性行為，其中以賓漢塑性模式 (Bingham plastic model) 最廣為人知。

如前所述，為表示非牛頓流體之行為，最重要為定義臨界剪應力，且該黏性流體之剪應力需大於臨界剪應力才發生形變。Bird et al. (1983) [[5]] 研究兩平板間賓漢流體之運動行為，並推導求得解析解，此解析解能表示賓漢流體之流場特性。Liu and Mei (1989) [[28]] 將賓漢模式應用於模擬不同泥石流 (debris flow) 之流況，其中假設流體為均勻流、慣性力非常微小、水深與波長比率非常小、波振幅至水深為有限，並依此假設建立微擾法 (perturbation method) 之解析解。Ng and Mei (1994) [[38]] 將賓漢流應用於探討泥石流之滾地波 (roll waves) 效應。Huang and Garcia (1998) [[17]] 以二維賓漢模式研究緩慢變量流且使用 matched-asymptotic 攝動法修正賓漢流之波前 (wave front)。Balmforth and Liu (2004) [[4]] 使用 Herschel-Bulkley 之本構關係式研究二維流體薄膜 (fluid film) 於斜板之滑動情況，並定義起動滾地波之臨界雷諾數。Mei and Yuh (2001) [[36]] 研究三維賓漢緩慢流於橢圓渠道之流變情況與於橫斷面中發現賓漢流之靜止區域 (dead zone)。然而上述文獻為將賓漢流研究用於泥石流之模擬，且以實驗方式研究賓漢流體之運動行況，將無法完整呈現真實賓漢流之速度與變化。後續研究則將賓漢之本構關係式建立於數值模式中，以克服實驗尺度之限制。O'Brien and Julien (2000) [[42]] 使用 Julien and Lan (1991) [[22]] 所發展之模式將高含砂水流視為賓漢流模擬並觀察其流變過程，且將該模式開發商業軟體 FLO-2D，該模式為求解二維動量方程式與控制不同之迴圈系統 (routing scheme)。Shao

and Lo (2003) [[50]] 採用 SPH 方法求解非牛頓牛體之自由液面變化。然而前人以賓漢模式模擬泥砂運動行為之研究相當鮮少，主要由於模式需同時描述流體與固體，真實之情況更包含空氣、水與泥砂三相之交界面運動，本研究將賓漢流中固體之行為以一極高之黏滯流體代替，並以引式法求解高黏滯項，突破穩定性之限制，以描述賓漢流中之固體運動行為。

綜上所述，茲將本計畫與前人沖刷研究之差異羅列如下：

前人之數值模擬研究大多忽略自由液面之影響，且多以定床探討沖刷坑周圍之流況，因此只適用於穩態流場之沖刷模擬。然而真實之沖刷問題大多發生於猛暴型之洪水事件，如海嘯與河川洪水，其自由液面具有上下起伏之劇烈變化之特性，且沖刷坑亦會隨時間變化。因此本研究將以 VOF 方法與賓漢模式求解自由液面與沖刷坑隨時間變化之過程。

前人模式仰賴經驗參數與沖刷深度公式，模式需經過校準與驗證相當數量之模式參數方可使用。而本研究之賓漢流變模式將藉由賓漢降伏應力、塑性黏滯係數 (Liu and Mei, 1989) [[28]] 及一極高黏滯係數，三個參數描述泥砂受水流影響之流變行為。

過去因電腦計算能力限制，沖刷模式多以單機模擬且應用於實驗案例，鮮少應用於真實尺度之案例模擬。本研究將運用平行電腦模擬真實尺度之沖刷案例，並與現地資料直接驗證。

若海岸周圍建有堤防，特別是土堤，在受到海嘯侵襲並受損後，其泥砂將混入海嘯中。上述之夾砂效應將更進一步改變海嘯之破壞力，因此，建立含夾砂效應之三維海嘯數值模型是為本研究之重點之一。

本計畫將三維 Splash3D 模式結合賓漢雙黏性流模式，以分析海嘯對結構物之衝擊。其中夾砂效應以及結構物基礎沖刷之問題，本計畫將以二次式賓漢流模式予以分析。該模式中，以降伏應力及兩黏性參數表示泥砂受水流沖刷之啟動過程以及運動行為。在進行分析之前，本文將先進行數值模式與實驗之驗證，包括海嘯撞擊結構物時受力及自由液面之準確性，並接續分析結構物排列對海嘯衝擊力之影響。另一方面，由 2004 年南亞海嘯及 2011 年東日本海嘯之記錄可發現，具有攻擊力之海嘯湧並非僅有一次，而持續數次。其中，破壞力最大之經常出現在前三次中，為此，本研究亦將分析往返三次以上海嘯與衝擊力之關係。

II. 主要內容

本研究採用國立中央大學水文與海洋科學研究所海嘯科學實驗室所發展之 Splash3D 模式為平台進行研究與發展。Splash3D 模式可求解大渦模擬動量方程式 (Large Eddy Simulation, LES)，並以區段線性 (Piecewise Linear Interface Calculation) 流體體積法 (Volume of Fluid, VOF) 進行自由液面與底泥運動之模擬。

2.1 控制方程式

本研究所求解之方程式以動量方程式及不可壓縮連續方程式，其中不可壓縮連續方程式如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

不可壓縮流之動量方程式如下：

$$\frac{\partial(\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})) + \mathbf{g} \quad (2)$$

式中之 $\mathbf{u}$ 為速度向量， ρ 為密度， P 為壓力， μ 為動力黏滯係數， $\mathbf{g}$ 為重力加速度。

2.2 大渦模擬動量方程式

本研究使用之紊流模式為 LES，為 Deardroff (1970 年) [錯誤! 找不到參照來源。[11]] 發展之方法，以空間濾波方式，先濾掉模擬中無法表示之小尺度漩渦，再以次網格模 (SGS) 式計算小尺度之漩渦。以下為經空間濾波後改寫之連續方程式與動量方程式。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial X_i} + \bar{g}_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\bar{\mu}_{eff} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial X_i} \right] \right] \quad (4)$$

式中之 over-bar 代表經過空間濾波，下標 $i, j=1, 2, 3$ 為 X, Y, Z 方向， $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ 和 $\bar{P}$ 為經過濾波之 i 方向速度、 j 方向速度與壓力， $\bar{\mu}_{eff}$ 為 LES 之有效黏滯係數，其定義如下式：

$$\bar{\mu}_{eff} = \mu + \mu_{SGS} \quad (5)$$

式中之 μ_{SGS} 為次網格尺度 (sub-grid-scale) 之紊流黏滯係數。在 Smagorinsky (1963) [[52]] 之模式中， μ_{SGS} 之強度與剪應力、濾波特徵長度、密度有關，並表示如下式：

$$\mu_{SGS} = \rho (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (6)$$

式中， $\bar{S}_{ij} = (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial X_i})$ 代表剪應變率， C_s 為模式之參數， Δ 代表 SGS 模式之能解析之尺度，其大小與網格尺度有關， Δ 之定義如下式：

$$\Delta = (\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3)^{1/3} \quad (7)$$

ΔX_i ($i=1,2,3$) 為網格於 X, Y, Z 三方向之網格長度 (Pope, 2001) [[43]]。

當處於等向 (isotropic) 紊流情況下， C_s 值 ~ 0.2 。在不同之流況與數值模式下， C_s 之值並非定值，其值大約介於 0.1 至 0.2 之間。Lin and Li (2003) [[29]] 建議當有自由液面之流況時， C_s 值定為 0.15。

LES 模式在接近無滑移邊界 (no-slip) 之固體邊界時，紊流因邊牆效應而減弱，須以 Cabot and Moin (2000) [[8]] 所提出之邊牆函數修正：

$$\frac{\mu_{SGS}}{\nu} = \rho \kappa y_w^+ (1 - e^{-y_w^+/A})^2 \quad (8)$$

$$y_w^+ = \frac{y u_*}{\nu} \quad (9)$$

式中 ν 為流體之運動黏滯係數， κ 為馮卡門常數 ($\kappa = 0.41$)， $A = 19$ ， y 為緊鄰邊牆之網格中心至邊牆之距離， u_* 為剪力速度。

2.3 流體體積法 (VOF)

本研究以 VOF 處理自由液面，其假設流場中包含 m 種流體於網格中且彼此不會相互融合，定義第 m 種於網格中之流體密度為 ρ_m^0 ，則其質量守恆方程式如下

式：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \rho_m) = 0 \quad (10)$$

$\mathbf{u}$ 為速度向量，式中之 ρ_m 以體積分率 f_m 與此流體密度 ρ_k^0 表示如下：

$$\rho_m = \frac{M_m}{V} = \left[\frac{V_m}{V} \right] \times \left[\frac{M_m}{V_m} \right] = f_m \rho_m^0 \quad (11)$$

式中 M_m 為第 m 種流體之質量， V 表示網格體積， V_m 為第 m 種流體於網格所佔之體積。假設各流體之密度 ρ_m^0 皆為定值，將上式改寫為：

$$\frac{\partial f_m}{\partial t} + \nabla \cdot (f_m \mathbf{u}) = 0 \quad (12)$$

以上式計算網格之體積分率 f_m ，並以 f_m 判斷第 m 種流體於該計算網格之比例。以含有水與空氣之模擬範圍為例， f_m 等於 1 代表網格中充滿水，介於 0 至 1 之間則為水與空氣共存之網格，即自由液面所在之網格，若為 0 則代表充滿空氣之網格。

為避免交界面之數值擴散問題，以 PLIC (Kothe et al., (1996) [[23]]; Rider and Kothe, (1998) [[47]]) 計算為流體交界面之網格，並重新建構流體間之交界面。

PLIC 適用於含自由液面之網格，自由液面被視為一可傾斜之水平面。以體積分率計算含自由液面之網格單位法線向量 $\mathbf{n}$ ：

$$\mathbf{n} = \nabla f_m \quad (13)$$

經標準化改寫為：

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla f_m}{|\nabla f_m|} \quad (14)$$

若自由液面之網格由線性平面單位組合而成，可以下式描述：

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x}_p - C_p = 0 \quad (15)$$

式中， $\mathbf{x}_p$ 為自由液面上任一位置， C_p 為一常數可由下式求出：

$$F(C_p) = V_v(C_p) - f * \nabla \approx 0 \quad (16)$$

式中之 $V_v(C_p)$ 為含自由液面網格之流體體積， ∇ 為網格體積， f 為流體體積分率。利用牛頓法疊代求出 C_p ，即可求出自由液面之形狀。

2.4 賓漢雙黏性流之本構關係式

許多自然界的物質都具有非牛頓流體 (Non-Newtonian fluid) 之特性，諸如河川底泥、雪崩、火山熔岩等，甚至常用的牙膏亦為此種流體。其中部分物質稱為黏塑性物質且具有臨界剪應力，而此臨界剪應力表示該物質之塑性特性。此臨界剪應力又稱為降服應力 (yield stress)，或稱為賓漢降服 (Bingham yield)。如前所述，若剪應力小於該值，則其行為類似固體，且其分子間之固結力相當強大。當剪應力大於該臨界值，則該物質之行為近似牛頓流體。有許多本構模式 (rgeological model) 可以用以描述黏塑性行為，然而其中以賓漢塑性模式 (Bingham plastic model) 最為簡單且廣為人知。如同賓漢模式所描述，若剪應力尚未超過降服應力，則該物質無形變發生。藉由賓漢流變模式中之

兩個參數：賓漢降服應力、塑性黏滯係數，其流變行為可以完整描述。其中非線性之應力—應變關係式可表示為：

$$\tau = 2\mu\bar{D} \quad (17)$$

式中 τ 為剪應力張量， $\bar{D}$ 為剪應變率。黏滯係數 μ 為 $\bar{D}$ 之函數：

$$\mu = \mu(\bar{D}) \quad (18)$$

其關係式為：

$$\mu(\bar{D}) = \mu_B + \frac{\tau_0}{2\sqrt{\frac{1}{2}\bar{D}:\bar{D}}}, \text{ if } \frac{1}{2}\tau:\tau > \tau_0^2 \quad (19)$$

$$\mu(\bar{D}) = \mu_\infty \text{ and } \bar{D} = 0, \text{ if } \frac{1}{2}\tau:\tau > \tau_0^2 \quad (20)$$

其中，if μ_∞ 為一無限大值，代表固體行為。此非線性關係將導引該物質區分為兩種區域，其一為剪力區 (Shear zone)，其二為固體區 (Plug zone)。

如前所述，賓漢雙黏性流模式中對於 μ_∞ 將以一極大之數值帶入，以表現賓漢流中 Plug zone 之特性。因此在流變關係式中， μ 將具有兩個數值，此亦為賓漢雙黏性流之由來。在本研究中， μ_∞ 將設定在 $10^5 \sim 10^{12} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，其值將遠大於水之黏滯係數 $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

2.5 高含砂流變理論本構關係式

自然界之河川底床通常並非為均勻之泥質底床，尤其河川越往上游，則含較大顆粒之泥砂比例越高。為真實模擬河道中之砂石碰撞及土石流流況，本研究採用 O'Brien 及 Julien (1985) [[39]]所發表之高濃度泥砂流變理論，其中泥砂之總剪應力由以下五項剪應力構成：

$$\tau = \tau_{co} + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (21)$$

其中

τ_{co} ：凝聚降伏應力 (cohesive yield stress)

τ_{mc} ：莫耳庫倫剪應力 (Mohr-Coulomb shear stress)

τ_v ：黏滯剪應力 (Viscous shear stress)

τ_t ：紊流剪應力 (Turbulent shear stress)

τ_d ：離散剪應力 (Dispersive shear stress)

將式 (17) 之非線性之應力—應變關係式考慮此效應，加入二次剪應變率係數項後表示為：

$$\tau = 2\mu(\bar{D})\bar{D} = \sqrt{2}\tau_0 + \mu_b \cdot 2\bar{D} + \mu_c \cdot (\bar{D})^2 \quad (22)$$

此二次流變模式除了能夠描述顆粒間的凝聚力、沉積顆粒與流體間之黏滯係數外，還可描述顆粒間之碰撞效應及紊流消散作用。其中 τ_0 代表凝聚降伏應力與莫耳庫倫剪應力所合成之賓漢降伏應力， μ_b 為代表黏滯剪應力之黏滯係數，而 μ_c 為消散係數，此係數表現泥砂之顆粒間相互碰撞所造成之能量消散作用以及泥流本身內部所產生紊流消散之影響。

根據 Bagnold's 應變係數，一般泥砂間之紊流應力與二次剪應變率成正比。當流體內部含有許多大顆粒之砂石時，此顆粒碰撞項變會產生較大之作用；相反的，當流體內部多數為細顆粒之泥砂時，流體之運動情形便會受降伏應力與黏滯係數影響。

$$\mu_c = \rho_m l_m^2 + a_1 \rho_s \lambda^2 d_s^2 \quad (23)$$

來表示，其中

ρ_m ：含泥砂流體之密度

l_m ：含泥砂流體之 Prandtl 混和長度係數，趙(2004)

[[66]] 提到 Julien et al. (1991) [[22]]假設 $l_m = 0.4$ 倍土石流動深度：

a_1 ：為一經驗常數，Bagnald 之建議為 0.001

ρ_s ：泥砂顆粒之密度

d_s ：顆粒之粒徑

λ 由 O'Brien 等人 (1993) [[40]]引用 Bagnald (1954)

[[3]]定義如下：

$$\lambda = \left[\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \quad (24)$$

C_* ：最大體積濃度 ($C_* \sim 0.615$)

C_v ：體積濃度

2.6 賓漢流參數校驗方式建議

由前述兩小節可知，賓漢流模式中所包含之參數為降伏應力 τ_0 、黏滯係數 μ_b 且為計算泥流、土石流、以及高含砂之冲刷過程，在考慮顆粒碰撞之效應後，另有一消散係數 μ_c ，此三參數為決定流體流變特性之關鍵，因此如何決定及校驗為使用此賓漢流模式進行模擬時之重點。

降伏應力以及黏滯係數之訂定，主要分為兩種方法：其一為現地推估，其二為取樣試驗，其中又各包含數種不同方法，可適用於不同之情形。現地推估部分，參考林銘郎 (2003) [[60]]文章內提到 Johnson & Rodine (1984) [[21]]提出之臨界邊坡法：

$$\tau_y = T_c \gamma_m \sin \delta \quad (25)$$

T_c ：臨界流動深度 (m)

δ ：堆積坡度 ($^\circ$)

以及特殊大石塊尺寸法進行初步之估計，其中臨界邊坡法僅需臨界流動深度及堆積坡度之現場資料，即可推求出賓漢降伏應力。而特殊大石塊尺寸法則適用於具有大石塊之情形，一般較常用於特殊情況之土石流及石流，Jeyapalan (1983) [[20]]提出可由黏滯係數與含水量之關係式，推測出黏滯係數之參考值：

$$\mu_b = 1500 \left(\frac{90}{\omega} \right)^{3.2} \quad (26)$$

ω ：Water content

而土石流三參數可由現地推估以及於實驗室取樣試驗而得。表 2 為現地推估之土石流參數整理表 (吳政貞, 2003) [[67]]，現場估計之降伏應力為 600 Pa 至 3800 Pa，黏滯係數為 8 Pa·s 至 810 Pa·s。消散係數部分，Julien 及 Lan (1991) [[22]]提出此係數 μ_c 可用式 (23) 表示，並使用 Govier 等人 (1957) [[14]]、Savage 等人 (1983) [[49]]及 Bagnold (1954) [[3]]之不同粒徑與體積濃度之實驗資料計算，所得之消散係數介於 $1.9\text{e-}3$ 至 $3.1\text{e-}6$ 間。

取樣實驗部分，則為採取現地或實驗之材料，於實驗室使用流變計進行降伏應力與黏滯係數之量測，目前

本研究為建立海嘯對結構物衝擊及審查機制，海嘯源之設置參考核二廠安全分析報告中所提之 10.28 公尺設計海拔標準另加 6 公尺之海嘯防護能力為藍本進行情

表1，現地推估之土石流參數整理表（吳政貞，2003）
[[67]]。

54

					flow
--	--	--	--	--	------

表2, 取樣實驗之土石流參數整理表(吳政貞, 2003)[[67]]

學者	年份	降伏應力 τ (Pa)	黏滯係數 μ (Pa·s)	單位重 γ (ton/m ³)	推估方法
Dai	1980	0.6~83	0.01~0.1	1.08~1.54	旋轉式流變計
Kang & Zhang	1980	0.4~40	0.02~0.32	1.26~1.66	旋轉式流變計
Qian	1980	0.15~15	-	1.36~1.84	旋轉式流變計
Fei	1981	0.11~40	-	1.17~1.78	旋轉式流變計
O'Brien & Julien	1988	0.15~100	0.04~10	1.17~1.74	旋轉式流變計
Phillips and Davies	1991	50~300	20~238	2.01~2.07	cone-plate rheometer
Major and Pierson	1992	12~405	0.2~27.9	1.73~2.09	旋轉式流變計
Zou	1996	36~550	0.186~4.3	1.71~1.92	旋轉式流變計
詹錢登	1997	2.5~30	0.008~0.06	1.41~1.71	管式流變計
Hubl and Steinwendtner	2000	60.6~14.62	1.6~7.4	1.93~2.15	belt conveyor
Wang, Fei and Chen	2000	16.4~274.7	-	1.89~2.19	旋轉式流變計
		16.6~56.8	-	1.61~1.69	旋轉式流變計
Hubl and Steinwendtner	2001	36~79	2.5~6.3	1.83~1.99	belt conveyor
		89~305	1.8~12.9	1.83~1.99	belt conveyor

2.7 海嘯源設置

海嘯源設置之分析方法經過反覆檢討後，設置下列之模擬，首先參考以試誤法決定可上溯至目標高程之海嘯源及海岸線處邊界入流條件如圖 6，擷取海岸線處之海嘯湧潮深度及速度後，將其作為入流邊界條件帶入高解析度模擬如圖 7，擷取目標結構物所在高程之流速 4.54 m/s 與水深 2 公尺作為之後探討案例所使用之初始值。

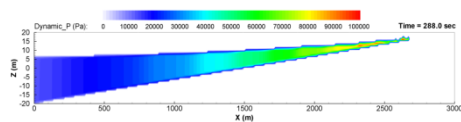


圖 6, 海嘯波上溯模擬。色階表示水體之動壓，單位 Pa

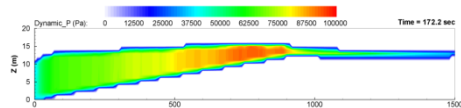


圖 7, 自海岸線處入流之海嘯波上溯模擬。色階表示水體之動壓，單位 Pa

2.8 結構物排列之設置

確定海嘯源之參數後，為了解結構物排列對海嘯衝擊力之影響，本研究針對結構物之排列、結構物總數、海嘯湧潮攻角等變數之改變進行模擬及分析，以了解不

同之結構物排列對海嘯衝擊力之影響。

模擬域之設定 X 方向 100 公尺長 ($X=0.0$ 至 $X=100.0$)，Y 方向 80 公尺長 ($Y=-40.0$ 至 $Y=40.0$)，Z 方向 6 公尺 ($Z=0.0$ 至 $Z=6.0$)，網格解析度為 0.5 公尺，方足以描述圓柱結構物， $X=0.0$ 之邊界條件為入流邊界條件依上一節所得之海嘯源參數帶入湧潮水體厚度 2 公尺湧潮流速 4.5388 m/s， $X=100.0$ 之邊界條件為壓力為零的開放邊界， $Y=-40.0$ 及 40.0 之邊界條件為無摩擦邊界 (Free-Slip)， $Z=0.0$ 之邊界條件為無滑動邊界 (No-Slip)， $Z=6.0$ 之邊界條件為壓力為零之開放邊界，結構物柱徑參考核二廠乾貯之柱徑設置為 4.25 公尺、柱高 5.95 公尺，由於 4.2 節所探討之案例，模擬範圍及邊界條件均相同，因此以水平排列情況下結構物間距 1 倍柱徑之模擬域示意圖作為代表呈現邊界條件之設定，圖 10 為模擬域側視圖，圖 11 為模擬域上視圖。

結構物排列改變之案例設置，以結構物柱徑作為結構物之間距設置三種間距，分別為間距 0.5 倍柱徑、1 倍柱徑、2 倍柱徑，以此三種案例及水平排列及交錯排列進行，探討當間距以及排列方式改變時對於結構物受海嘯衝擊之影響。

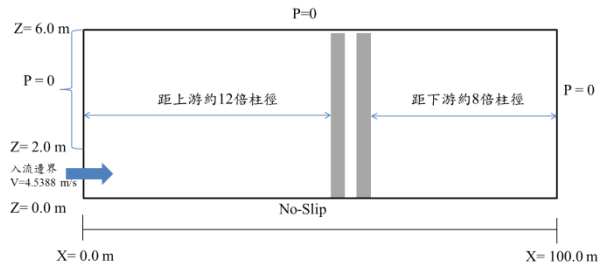


圖8, 模擬域側視圖。

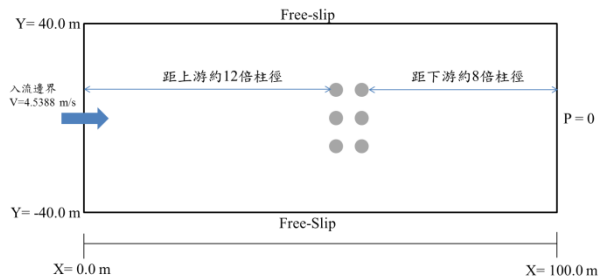
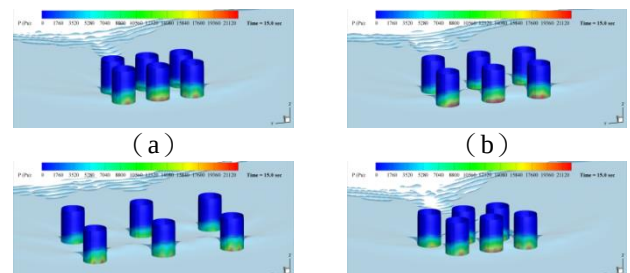


圖9, 模擬域上視圖。

III. 結果與討論

為了解結構物排列對海嘯衝擊力之影響，本研究針對結構物之排列、結構物總數、海嘯湧潮攻角等變數之改變進行模擬及分析，以了解不同之結構物排列對海嘯衝擊力之影響。



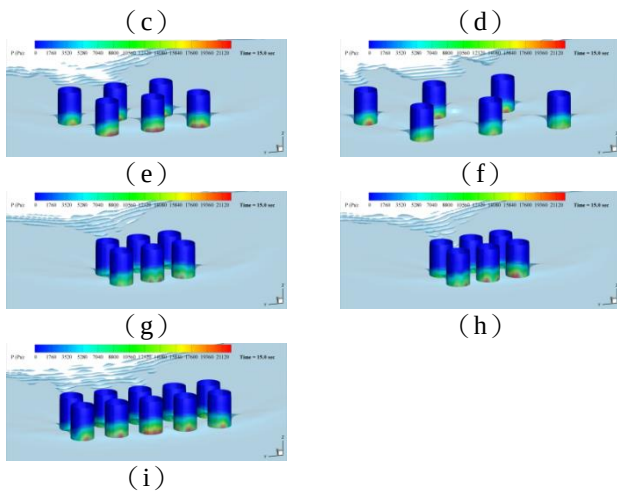


圖10，海嘯湧潮衝擊結構物，三維壓力分布圖。色階表示柱體承受之壓力，單位 Pa，(a) 水平排列，間距0.5倍柱徑，(b) 水平排列，間距1倍柱徑 (c) 水平排列，間距2倍柱徑 (d) 交錯排列，間距0.5倍柱徑，(e) 交錯排列，間距1倍柱徑 (f) 交錯排列，間距2倍柱徑 (g) 水平排列，間距0.5倍柱徑，攻角5度 (h) 水平排列，間距0.5倍柱徑，攻角10度 (i) 水平排列，間距0.5倍柱徑，結構物總數10座。

3.1 模擬結果

圖 10 為各案例之三維壓力分布圖，水平排列 (圖 10-a 至 10-c)、交錯排列 (圖 10-d 至 10-f)、改變海嘯湧潮之攻角 (圖 10-g 至 10-h)、增加結構物數量 (圖 10-i)，藉由改變這些變數並觀察各排列情況下，結構物所受總壓力情況，觀察結果可發現水平排列時下游側結構物所受之水壓力較交錯排列時小，改變海嘯湧潮攻角對於結構物受壓力之影響較不明顯，在同為水平排列之情況下，增加結構物之總數使得結構物受壓力增加。

為更了解結構物受海嘯湧潮侵襲時所承受之壓力因此繪製各案例之壓力歷線，圖 11 為水平排列情況下結構物之壓力歷線，左圖為上游側結構物之歷線，右圖為下游側之歷線，由歷線圖可觀察出水平排列情況下，上游側結構物所受之壓力約為 100000 Pa 下游側為 50000 Pa。圖 12 為交錯排列情況下之結構物之壓力歷線，左圖為上游側結構物之歷線，右圖為下游側之歷線，由結果可知交錯排列情況下，上下游側所承受之壓力相近約為 100000 Pa。圖 13 為改變海嘯湧潮攻角時，結構物之壓力歷線，由歷線圖可知，上游側所承受之壓力約為 100000 Pa，下游側之壓力約為 50000 Pa，圖 14 為水平排列情況下，結構物總數增為 10 座之壓力歷線，由歷線圖可知，上游側承受之壓力約 120000 Pa，下游側約為 50000 Pa。

3.2 小結

依上述之模擬結果可觀察出，將結構物總數增加之案例所承受之壓力最大，交錯排列時下游側結構物所受之壓力與上游側相近；因束縮效應影響，當結構物間距縮小時，海嘯湧潮所受阻力變大，而使結構物受力隨之增加；受阻滯效應影響，當結構物間距固定時，結構物總數增加，將使結構物受力增大。

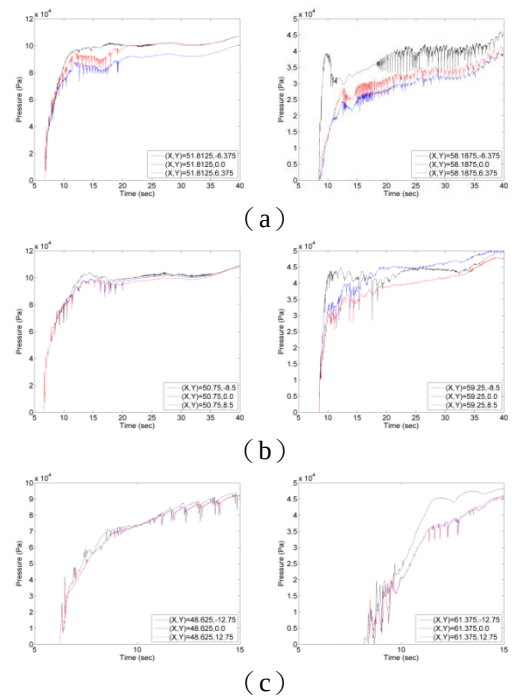


圖11，海嘯湧潮衝擊水平排列結構物，壓力歷線圖。圖中之 (X,Y) 為圓柱底面圓心位置，橫軸為時間，單位秒，縱軸為柱體所受壓力，單位 Pa。(a) 間距0.5倍柱徑，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線 (b) 間距1.0倍柱徑，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線 (c) 間距2.0倍柱徑，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線。

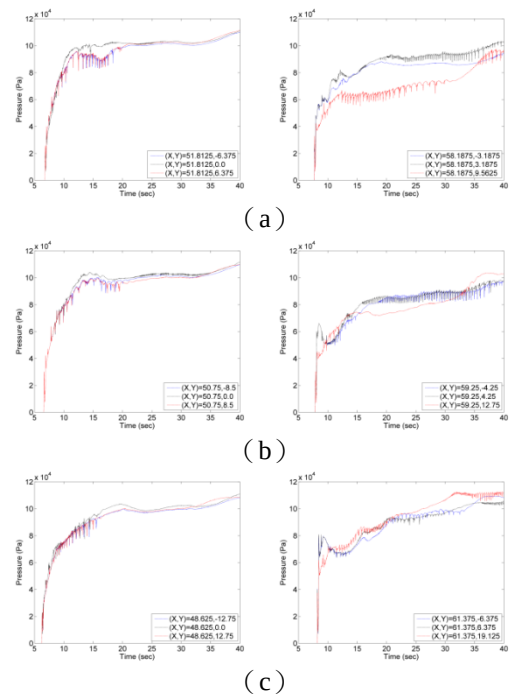


圖12，海嘯湧潮衝擊交錯排列結構物，壓力歷線圖。圖中之 (X,Y) 為圓柱底面圓心位置，橫軸為時間，單位秒，縱軸為柱體所受壓力，單位 Pa。(a) 間距0.5倍柱徑，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線 (b) 間距1.0倍柱徑，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線 (c) 間距2.0倍柱徑，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線。

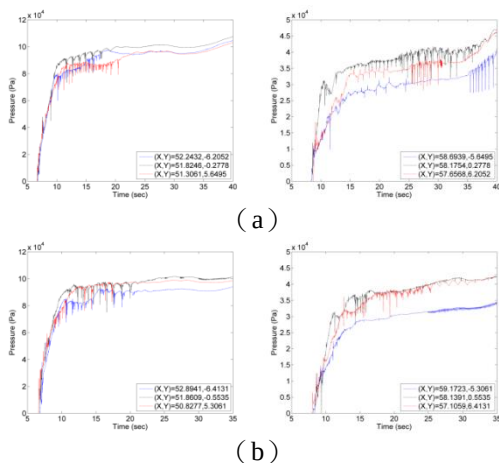


圖13，海嘯湧潮以不同攻角衝擊結構物，壓力歷線圖。圖中之 (X,Y) 為圓柱底面圓心位置，橫軸為時間，單位秒，縱軸為柱體所受壓力，單位 Pa。(a) 間距0.5倍柱徑，攻角5度，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線 (b) 間距0.5倍柱徑，攻角10度，左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線。

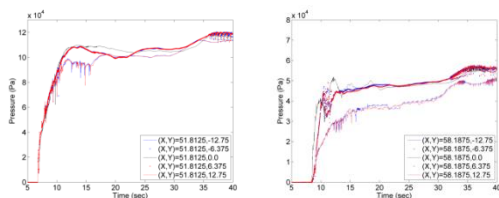


圖14，海嘯湧潮衝擊水平排列，間距0.5倍柱徑，結構物總數10座，壓力歷線圖。圖中之 (X,Y) 為圓柱底面圓心位置，橫軸為時間，單位秒，縱軸為柱體所受壓力，單位 Pa。左圖為上游側之壓力歷線，右圖為下游側之壓力歷線。

結論

本研究主要目標為建立海嘯對結構物衝擊分析與審查技術，針對海嘯侵襲近岸結構物之特性進行模式開發，並於兩年間達成下列四項目標，建立含夾砂效應之三維海嘯數值模型、建立與分析結構物排列對海嘯衝擊力影響之數值模型、建立與評估三維海嘯基礎沖刷數值模型、建立與分析海嘯往返三次以上對海嘯衝擊力之模型，本年度已完成建立含夾砂效應之三維海嘯數值模型及建立與分析結構物排列對海嘯衝擊力影響之數值模型，藉由模擬成果瞭解水平排列之結構物所承受壓力略小於交錯排列之情況、若結構物間距縮小因束縮效應影響海嘯湧潮所受阻力增強，結構物承受壓力變大、結構物間距固定時，結構物總數增加將因阻滯效應影響使結構物承受之壓力增大。

參考文獻

- [1] Abul-Azm, A. G. "Diffraction through wide submerged breakwaters under oblique waves." *Oc. Engng.*, 21, 683-706, 1994.
- [2] Arnason, H., "Interactions between an Incident Bore and a Free-Standing Coastal Structure." PhD dissertation, University of Washington, 2005.

- [3] Bagnold, R. A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear." *Proc., Royal Society of London, series A, Vol. 225*, pp. 49-63, 1954.
- [4] Balmforth, N. J. and Liu, J. J., "Roll waves in mud," *J. Fluid Mech.*, Vol. 519, pp. 33-54, 2004.
- [5] Bird, R. B., Dai, G. C., and Yarusso, B. J., "The rheology and flow of viscoplastic materials," *Rev of Chemical Engrg.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-70, 1983.
- [6] Borrero, J., Yeh H., Peterson, C., Chadha, R. K., Latha, G. and Katada, T., "Learning from earthquakes: The great Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami of December 26, 2004", *EERI Special Earthquake Report*, 2005.
- [7] Brørs, B., "Numerical modeling of flow and scour at pipelines," *J. Hydr. Eng.* Vol. 125, pp. 511-523, 1999.
- [8] Cabot, W., Moin, P., "Approximate wall boundary conditions in the large-eddy simulation of high Reynolds number flow." *Flow Turb. Combust.* 63, 269-291, 2000.
- [9] Dai, J., Chen, W. and Zhou, B., "An experimental study of slurry transport in pipes," *Proc. of International Symposium on River Sedimentation*, pp. 195-204, 1980.
- [10] Dey, S., Bose, S.K. and Sastry, G.L.N. 1, "Clear water scour at circular piers: a model," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 12, pp. 869-876, 1995.
- [11] Deardorff, J. W., "A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers." *J. Fluid Mech.*, 41 (2), 452-480, 1970.
- [12] Ertekin, R. C. and Becker, J. M., "Nonlinear diffraction of waves by a submerged shelf in shallow water." In: Chakrabarti, S. et al. (Eds), *Offshore Mech. and Arctic Engng.* 1996, vol. I Pt. B, ASME, New York, 31-39, 1996.
- [13] Ettema, R., Kirkil, G. and Muste, M., "Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 132, No. 1, pp. 33-40, 2006.
- [14] Govier, G. W., C. A. Shook, and E. O. Lilge, "The properties of water suspension of finely subdivided magnetite, galena and ferrosilicon," *Trans. Can. Inst. Mining and Met*, vol. 60, pp.147-154, 1957.
- [15] Heinrich, P., "Non linear water waves generated by submarine and aerial landslides." *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 118, 249 - 266, 1992.
- [16] Hirt, C. W. and Nichols, B. D., "Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free surface boundaries," *J. Comput. Phys.*, pp.201-225, 1981.
- [17] Huang, X. and Garcia, M. H., "A HerschalyHulkley model for mud flow down a slope," *J. Fluid Mech.*, Vol. 374, pp. 305-333, 1998.
- [18] Huang, C.-J. and Dong, C.-M., "Wave deformation and vortex generation in water waves propagating over a submerged dike." *Coast. Engng.* 37, 123-148, 1999.
- [19] International Tsunami Survey Team (ITST) "The 26 December 2004 Indian Ocean tsunami: Initial findings from Sumatra," *Western Coastal and Marine Geology*, U.S. Geological Survey, 2005, Internet

- Resource,
<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatra05/>.
- [20]Jeyapalan J. K. et al., "Investigation of Flow Failures of Tailings Dams", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 2, pp. 172-189, 1983.
 - [21]Johnson, A.M. and J.R. Rodine, "Debris flow. In Slope instability." D. Brunsten and D.B. Prior (editors) . John Wiley and Sons Ltd., Chap. 8, pp. 257-361, 1984.
 - [22]Julien, P. Y. and Lan, Y., "Rheology of hyperconcentrations", *J. Hydraul. Eng. ASCE*, Vol. 117, pp. 346-353, 1991.
 - [23]Kothe, D. B., Rider W. J., Mosso, S. J., Brock, J. S., and Hochstein, J. I.,
 - [24]Volume tracking of interfaces having surface tension in two and three ." Technical Report AIAA 96-0859, AIAA 1996. Presented at the 34rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
 - [25]Lacey, G., "Stable channels in alluvium," Paper 4736, Minutes of the Proc., Institution of civil Engineers, William, 1930.
 - [26]L'Hermite, R., and Turnon, G., "Vibration of Fresh concrete," Technical Publication No. 2. Centre d'Etudes et de Recherches de L'Hermite Industrie des Lians Hydraulique, Paris, 1948.
 - [27]Li, F., and Cheng, L., "Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents," *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol. 127, No. 2, pp. 106-112, 2001.
 - [28]Liu, K.F. and Mei, C.C., "Slow spreading of a sheet of Bingham fluid on an inclined plane," *J. Fluid Mech.* Vol. 207, pp. 505-529, 1989.
 - [29]Lin, P., and Li, C. W., "Wave-current interaction with a vertical square cylinder." *Ocean Engineering*, 30 855-876, 2003.
 - [30]Liu, P. L. F., Wu, T. R., Raichlen, Synolakis, C. E. and Borrero, J. C., "Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses," *J. Fluid Mech*, pp. 107-144, 2005.
 - [31]Liu, X. and García, M. H., "A three-dimensional numerical model with free water surface and mesh deformation for local sediment scour," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 203-217, 2008.
 - [32]Lohner, R., Yang, C., and Onate, E., "On the simulation of flows with violent free surface motion", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 195, pp. 5597-5620, 2006.
 - [33]Losada, I. J., Silva, R., and Losada, M. A., "3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters." *Coast. Engng.*, 28, 229-248, 1996.
 - [34]Mao, Y., "The interaction between a pipeline and an erodible bed," PhD dissertation, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1986.
 - [35]Major J. J., and Pierson T. C., "Debris Flow Rheology: Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries," *Water Resources Research*, Vol. 28 (3) , 841-857, 1992.
 - [36]Mei, C. C. and Yuhi, M., "Slow flow of a Bingham fluid in a shallow channel of finite width," *J. Fluid Mech.*, Vol. 431, pp. 135-159, 2001.
 - [37]Melville, B. W., and Raudkivi, A. J., "Flow characteristics in local scour at bridge piers," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 373-380, 1977.
 - [38]Ng, C. and Mei, C.C., "Roll waves on a shallow layer of mud modeled as a power-law fluid," *J. Fluid Mech.* Vol. 263, pp. 151-183, 1994.
 - [39]O'Brien, J. S., and Julien, P. Y., "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." *Proc. of the Specialty Conference on Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow Hazards in Utah*, Utah Water Research Laboratory, pp. 260-279, 1985.
 - [40]O'Brien, J. S. et al., "Two dimensional water flood and mudflow simulation", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No.2, pp.244-261, 1993.
 - [41]O'Brien, Jim S. and Pierre Y. Julien, "Laboratory Analysis of Mudflow Properties," *Journal of Hydraulic Engineering* Aug 1988, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887, 1988.
 - [42]O'Brien, J.S. and Julien, P.Y., "On the importance of mudflow routing," *Proceedings of the 2nd International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation*, Taipei, Taiwan, Aug. 16-18, pp. 677-686, 2000.
 - [43]Olsen, N. R. B., and Melaaen, M. C., "Three-dimensional calculation of scour around cylinder", *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 119, No. 9, pp. 1048-1054, 1993.
 - [44]Olsen, N. R. B., and Kjellesvig, H. M., "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth," *J. Hydraul. Res.*, Vol. 36, No. 4, pp. 579-590, 1998.
 - [45]Pope, S. B., "Turbulent flows." Cambridge University Press, 2001.
 - [46]Richardson, J. E. and Panchang, V.G., "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers," *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 124, No. 5, pp. 530-540, 1998.
 - [47]Rider, W. J. and Kothe, D. B., "Reconstructing Volume Tracking." *J. Comp. Phys.*, 141, 112-152, 1998.
 - [48]Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J. and Michelsen, J. "3D mathematical modeling of scour around a circular pile in current," *Proc., 7th Int. Symposium on River Sedimentation and 2nd Int. Symposium on Environmental Hydraulics* 98, Hong Kong, 1999.
 - [49]Savage, S. B., and S. McKeown, "Shear stress developed during rapid shear of concentrated suspension of large spherical particles between concentric cylinders," *J. Fluid Mech.*, vol. 127, pp. 453-472, 1983.
 - [50]Shao, S. and Lo, E. Y. M., "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface," *Advances in Water Resources*, Vol. 26, pp. 787-800, 2003.
 - [51]Sheppard, D.M., Odeh, M. and Glasser, T., "Large scale clear-water local pier scour experiments," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 130, No.

- 10, pp. 957-963, 2004.
- [52] Smagorinsky, J., "General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic equations. Mon." *Weather Rev.* 91, 99-164, 1963.
- [53] Tang, C. J. and Chang, J. H., "Flow separation during solitary wave passing over submerged obstacle." *J. Hydr. Engng.* 124, 742-749, 1998.
- [54] Ting, F. C. K. and Kim, Y.-K., "Vortex generation in water waves propagation over a submerged obstacle." *Coast. Engng.* 24, 23-49, 1994.
- [55] Vincent, S., Randrianarivelo, T. N., Pianet, G., and Caltagirone, J. P., "Local penalty methods for flows interacting with moving solids at high Reynolds numbers", *Computers & Fluids*, 36, pp. 902-913, 2007.
- [56] Zhao, M., Cheng, L. and Zang, Z., "Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents," *Coastal Engineering*, Vol. 57, pp. 709-721, 2010.
- [57] Zhao, Z. and Fernando, H. J. S., "Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler-Euler coupled two phase model," *Env. Fluid Dyn.*, Vol. 7, No. 2, pp. 121-142, 2007.
- [58] Zhuang, F. and Lee, J. J., "A viscous rotational model for wave overtopping over marine structure." *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE*, pp. 2178-2191., 1996.
- [59] 杜昀, 「以移動球法量測土石漿體及新拌混凝土之流變性」, 博士論文, 國立雲林科技大學工程科技研究所博士班, 2004。
- [60] 林銘郎, "土石流災害之地質環境探討", 土石流地質調查與防災對策研討會論文集, 第 6-1-6-28 頁, 2003。
- [61] 余昌益, 「高含砂水流流變參數之實驗研究」, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文, 1997。
- [62] 周憲德, 「石門水庫淤泥之流變特性」, 國立台灣大學土木工程學系碩士論文, 1984。
- [63] 沈長壽, 「幾種毛管黏度計泥漿流體流變試驗的比測」, 泥漿體流體比測組, 山地研究, 第八卷, 第三期, 第 137-146 頁, 1990。
- [64] 詹錢登, 「土石流的發生與運動」, 土木技術第一卷第一期, 第 132-144 頁, 1998。
- [65] 詹錢登、余昌益、吳雲瑞, 「含砂濃度對含砂水體流變參數的影響之初步研究」, 第一屆土石流研討會論文集, 第 179-190 頁, 1997。
- [66] 趙啟宏, "土石流之數值模擬及流變參數特性之探討", 碩士論文, 國立台灣大學土木工程學研究所, 2004。
- [67] 吳政貞, 「土石流流況數值分析-以溪頭為例」, 碩士論文, 國立台灣大學土木工程學研究所, 2003。

以無機凝集劑處理水中模擬放射性懸浮顆粒及其減容技術研究

Study on the treatment of simulated radioactive solutions by inorganic coagulants and investigation of sludge volume reduction technology

計畫編號：103-2623-E-006-005-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃耀輝

e-mail：kkk@ntust.edu.tw

計畫參與人員：吳品倫、陳怡如、施育仁、黃君平

執行單位：國立成功大學化學工程系

摘要

本研究以碳酸-溶氧進料系統與濃度為 1.25-5 mM 亞鐵溶液進行碳酸亞鐵沉澱並合成 α -FeOOH。瓶杯實驗顯示在僅含溶氧系統中，酸性條件下形成 γ -FeOOH，而鹼性環境則生成 Fe_3O_4 。在碳酸溶氧共存系統中，於酸性至中性(pH 6~7)環境下，生成 α -FeOOH 與 γ -FeOOH 混合物，而在鹼性環境同樣生成 Fe_3O_4 。經由探討 $[\text{CO}_3^{2-}] / [\text{Fe}^{2+}]$ 莫耳比對系統影響發現溶液中溶氧不足下，需 3 小時才能完全氧化亞鐵，另 ORP 電位可做為亞鐵氧化反應的指標性因子。之後利用 Fenton 流體化床(FBR-Fenton)均質化顆粒處理亞鐵廢水並生成鐵氧化物，以碳酸溶氧進料，當 pH_{eff} 大於 6 時，鐵去除率與結晶率，分別達到 96.7%及 65.9%。在低截面負荷(小於 3.21 kg-Fe/m²·h)時，鐵去除率可達 80~90%，而結晶率則介於 50~65%，當截面負荷上升，因溶氧不足，鐵去除率與結晶率大幅降低至 31.7%與 20.4%，系統最高負荷約在 3.21 kg-Fe/m²·h。吾人進一步在碳酸溶液中加入氧化劑過氧化氫，形成碳酸-過氧化氫進料系統，研究發現，當 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 莫耳比提升至 0.5~0.9 時，鐵去除率與結晶率分別達 98.5%及 78.5%。碳酸-過氧化氫進料系統截面負荷約在 2.41-3.21 kg-Fe/m²·hr。本研究計劃後續使用該鐵氧化物進行水溶液中除銹實驗。結果顯示， ΔG 在 15、30、50℃ 吸附實驗下皆為負代表鐵氧化物吸附認為自發反應；而 ΔH 為正值反映系統為吸熱反應。在 30℃ 時大吸附量為 28.01 mg/g。此外，共離子試驗顯示鐵氧化物吸附帶 2 價電的鹼土族離子。經 24 小時吸附平衡後，BT9 對各離子去除率順序為： $\text{Mg} > \text{Sr} > \text{Ba} > \text{Ca}$ 。含 Ca、Sr 共或含 Mg、Sr 共同離子吸附皆符合二階動力式。Ca 和 Ba 對於移除 Sr 沒有太大影響，當共離子莫耳比達 100 時，鹼土族離子大大降低 Sr 去除率，離子間競爭效應明顯顯現。

關鍵詞：溶氧，碳酸亞鐵，流體化床，截面負荷，共離子，鹼土族離子

Abstract

This study aimed to treat the wastewater with 1.25 - 5 mM of ferrous ions with carbonate and oxygen to form ferrous carbonate precipitation and goethite. The jar-test showed that γ -FeOOH was formed at acidic pH, whereas Fe_3O_4 was generated at basic pH in the absence of carbonate ions. γ -FeOOH was produced initially and then reacted with ferrous ions to form Fe_3O_4 as purging with nitrogen to remove dissolved oxygen. A mixture of

α -FeOOH and γ -FeOOH was synthesized at weakly acid pH in the presence of carbonate and dissolved oxygen. Besides, ORP could be an indicator of the extent of ferrous oxidization. In FBHC, when pH_{eff} was higher than 6, the iron removal and iron crystallization ratio in carbonate-dissolved oxygen system could achieve 96.7% and 65.9%, respectively. With 3.21 kg-Fe/m²·h of actual surface loading, the iron removal and iron crystallization ratio could reach 80~90% and 50~65%, respectively. In order to provide sufficient oxidant, hydrogen peroxide was applied in this study. The results indicated that when $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ increased from 0.5 to 0.9, the iron removal and iron crystallization ratio could achieve 98.5% and 78.5%, respectively. In carbonate-hydrogen peroxide system, the actual surface loading was in the range of 2.41~3.21 kg-Fe/m²·hr. The iron oxide was utilized to adsorptive removal of strontium in solution during which the effect of co-existing ions was discussed. Results of strontium adsorption show that ΔG at 15, 30, 50 °C under test are negative values which mean that adsorption are spontaneous. ΔH is positive reflecting that the system is an endothermic reaction. The maximum adsorption capacity is 28.01 mg /g on iron oxide at 30°C. After 24 h, the equilibrium adsorption for alkaline earth metal follows a sequence: $\text{Mg} > \text{Sr} > \text{Ba} > \text{Ca}$.

Keywords: Dissolved oxygen, Ferrous carbonate, Surface loading, Co-existing ions, Alkaline earth metal

I. 前言

有鑑於 2011 年 3 月 11 日日本大地震後，福島核能廠大量輻射污染物排放至海水，高濃度輻射廢水隨著洋流遷移至全球各角落。核廢水中可能潛在污染土壤、地下水甚至飲用水的元素，對於台灣以核能為發電重心的國家，發展一套有效移除含輻射污染物之水及廢水處理技術乃刻不容緩之事。含輻射污染物之水產生時，採用凝集沉降法在處理水中含放射性懸浮顆粒上具操作及設備簡易之優勢，台灣核能所已試著開發含鐵無機凝集劑來應用於含 Sr 輻射污染水之處理，後續將以提昇污泥減容技術，使其密度提高並降低含水率為目標，有助於貯存與處置時的安全與空間需求。

本研究計畫已開發一種高純度、大比表面積之均質鐵氧化物-針鐵礦為吸附材進行水中除銹研究。鐵元素廣泛應用於生活中，廢水處理技術中 Fenton 法礦化有機物後產生含鐵污泥，未經後續處理排入環境中將會造成紅水、黑水現象，此外鐵污泥沉積在管線或環境中造成對

民生或工業供水上的危害，被動、植物攝食進入生物體內亦會損害健康。鐵於水溶液中以亞鐵或三價鐵形式存在，三價鐵溶解度遠低於亞鐵，因此含鐵廢水常以三價鐵形式沉澱，而亞鐵氧化受環境 pH 影響甚鉅，透過提升 pH 可氧化亞鐵並形成氫氧化物沉澱，亞鐵與三價鐵鹽皆為混凝沉澱法慣用的混凝劑，因此結合本實驗室近年發展之流體化床均質結晶技術，轉變為低含水率的均質顆粒，成分為針鐵礦(α -FeOOH)，可作為除鋇吸附材，為一種具有資源化潛力之鐵氧化物。

在核能工業中，反應產生 ^{90}Sr 是一種重要放射性核種，是由核能反應之核裂變後所產生的物質。吸附法是水處理技術中相對高效且成本低廉的處理程序，如移除 ^{90}Sr 及 ^{137}Cs 等放射元素，可藉由吸附材表面性質控制達到安定化輻射污染物效果。適當吸附材不僅須具備高容量及選擇能力，同時共離子效應之優劣更是考驗其處理效率的重要因子。

本 103 年度原子能科技學術合作研究計劃提出「以無機凝集劑處理水中模擬放射性懸浮顆粒及其減容技術研究」。基於先前研究成果中所選定實廠資源化產物 BT 吸附除 Sr 之優異效能，本計畫以人工合成鐵氧化物作為含鐵無機凝集劑處理放射性懸浮顆粒，並以流體化床均質結晶技術(FBHC)作為鐵氧化物合成技術以達污泥減容目標：

II. 實驗方法與步驟

2.1. 實驗流程

本研究計畫分為兩大部分，一是以流體化床結晶技術生產均質針鐵礦顆粒吸附材，二是以該材料應用做為水中除鋇離子之研究。瓶杯試驗使用 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 配製亞鐵溶液，並調整 pH 至 3，取 500 mL 置於各燒杯中。使用 NaHCO_3 配製碳酸溶液，取 500 mL 逐漸加入步驟(1)已裝有亞鐵溶液之燒杯中。開啟 Jar test，設定 100 rpm，以 1 M NaOH 調整混合溶液 pH 值。紀錄反應過程 pH、DO、ORP、導電度。保鮮膜封口靜置一天，取上清液過濾測溶解性鐵，並記錄 pH、DO、ORP、導電度。

流體化床均質結晶(FBHC)反應器為玻璃材質製成的長柱狀反應器，分為上、下管兩部分，並以傾斜一定角度的突擴口相連接，下管下方為半球狀之玻璃空體，如圖 1 所示，下方連接回流的管子，上方和下管連接面有設有數個小洞，具有使回流的流體進行水流分配使流場均勻，並防止較大的顆粒向下沉降堵住回流管的功能。流體化床之下管長約 80 公分、直徑約 2 公分；上管長約 15 公分(至出口)、直徑約 4 公分。回流管由上管接至下方半球體之底部，而下管設有兩個進料口和進料槽相接，並以蠕動泵補將進料打入下管。流體化床所需的水力條件的操控即靠兩股進料和回流幫浦來提供及控制。反應器配接三個蠕動幫浦分別作為亞鐵進料、碳酸進料及回流使用，並於上管出口處採取水樣進行分析及進行 pH 監測。特定反應時間後於出口口採兩次樣品，分別以加酸消化與濾紙過濾，濾紙過濾之鐵濃度代表可溶解性鐵或鐵離子平衡濃度($[\text{Fe}]_s$)，加酸消化後稀釋分析所得為總鐵濃度($[\text{Fe}]_t$)，代表可溶解性鐵加上淤泥狀態之鐵成分濃度，取得以上兩項水質分析後，可依照以下公式分別計算鈣去除率(Fe-removal, %)，結晶比例

(CR%)。

$$\text{Fe removal (\%)} = \left(1 - \frac{[\text{Fe}]_s \times Q_t}{[\text{Fe}]_{in} \times Q_{Fe}}\right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{CR\%} = \left(1 - \frac{[\text{Fe}]_t \times Q_t}{[\text{Fe}]_{in} \times Q_{Fe}}\right) \times 100 \quad (2)$$

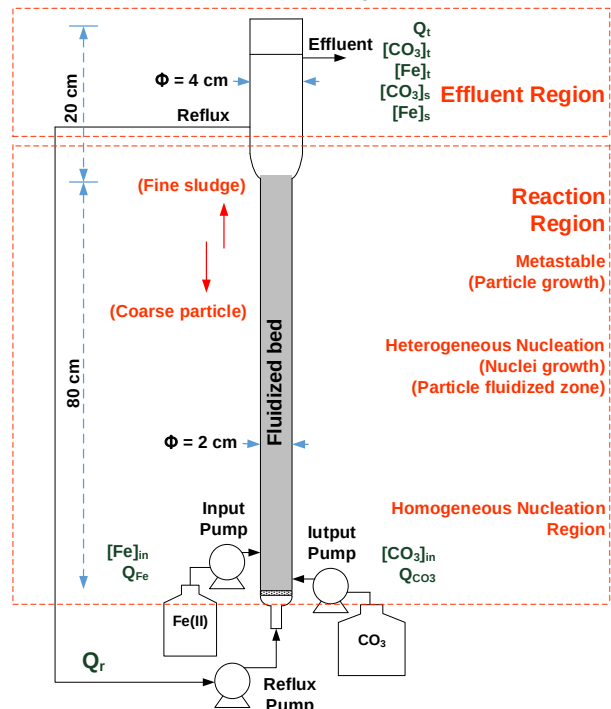


Fig. 1 Apparatus of FBHC

吸附實驗步驟如下。配置特定鋇離子與吸附質濃度之溶液後，置入 10 mL 之 PP 離心管，並投入 0.05 g 鐵氧化物吸附材及 10 mL 配置的吸附質溶液，將離心管置入旋轉裝置進行均質混合(35 rpm)，並以恆溫冰箱控制溫度進行吸附實驗。隨時間取樣所得溶液過濾後，進行量測 pH 值，並將樣品酸化後上機以 ICP-OES 量測各種金屬離子之殘餘濃度。

2.2. 分析儀器

本研究採用感應耦合電漿原子發射光譜儀(型號：thermo, fisher icap-6500)，以測定水溶液中鋇離子等金屬(Ca、Mg、K)及部分非金屬元素的濃度，測定的濃度範圍可從 ppb 至 %。總有機分析儀(Sievers InnovOx Laboratory TOC Analyze)測定樣品的無機碳濃度，以此換算總碳酸濃度。以掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM，型號：JSM-6770F)鑑定鐵氧化物均質結晶之表面形貌與元素定性。以 X 光繞射分析儀(X-ray Diffraction Analyzer; XRD，型號：Ultima IV, Rigaku)鑑定吸附材結構晶相，並評估材料純度。

III. 結果與討論

3.1. 流體化床均質顆粒化技術

FBHC 與傳統混凝法之間反應器設計差異，除批次與連續式進料不同，進料混合方式致使在反應流場分布

不同，另外回流稀釋作用亦會改變反應器內過飽和度，故 FBHC 實際操作與混凝法差異甚鉅，此節就 pH_{eff} 對鐵去除率與結晶率影響進行討論，反應條件條列如下：

- (1) $[\text{Fe}^{2+}] = 1.25 \text{ mM}$ (70 mg-Fe L^{-1})
- (2) $[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{Fe}^{2+}] = 1.2$
- (3) $\text{pH}_{\text{eff}} = 5.40 \sim 7.10$
- (4) 進料流量： $Q_{\text{Fe}} = Q_{\text{CO}_3} = 120 \text{ mL min}^{-1}$
- (5) $R = 0 \text{ mL min}^{-1}$
- (6) $\text{HRT} = 2 \text{ min}$
- (7) 截面負荷 = $3.21 \text{ kg-Fe m}^{-2}\text{h}^{-1}$
- (8) 上流速度 = 下管 40.84 m h^{-1} ，上管 10.21 m h^{-1}
- (9) 初始 $\text{DO} = 8.08 \text{ mg-O}_2 \text{ L}^{-1}$

由圖 2 可見，當 pH_{eff} 小於 6，鐵的去除率與結晶率大幅降低，顯示在 $\text{HRT} = 2 \text{ min}$ 水力條件下，亞鐵氧化速率較低不足以完全氧化，以溶解度較低的三價鐵形式從溶液中去除，溶液中溶氧尚有飽和溶氧值的 50%，不如 pH_{eff} 大於 6 時劇烈，鐵去除率僅達 54.5~78.2%，而鐵結晶率僅約 41%~55.8%；當 pH_{eff} 大於 6 時，高 pH 環境提高亞鐵氧化速率，同時消耗較多溶氧， pH_{eff} 大於 6 時溶液處於低溶氧狀態，因而提高的鐵去除率與結晶率，分別達到分別達到 96.7% 及 65.9%，由結果可知對於此系統較適當的 pH_{eff} 應操作在 6 以上。

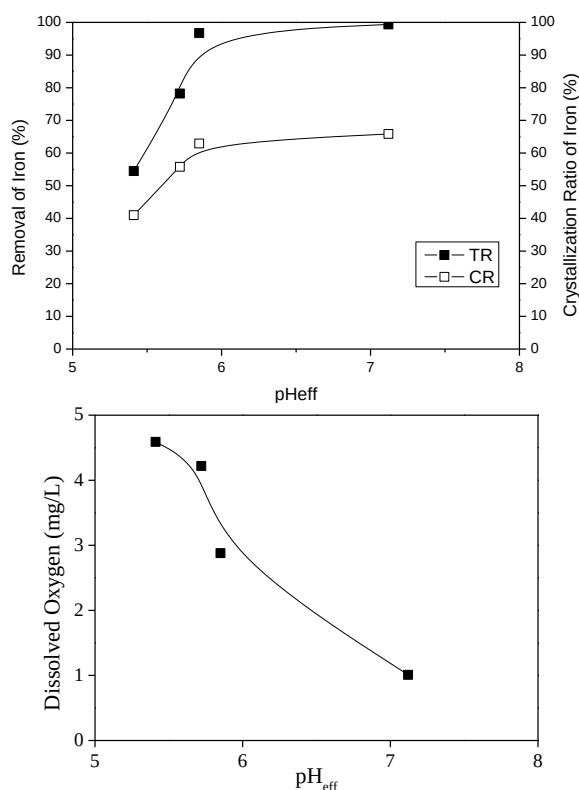


Fig. 2 pH_{eff} 對鐵去除率與結晶率及溶氧變化

截面負荷為流體化床顆粒化技術中的一項參數，其計算方式為污染物進料濃度乘上污染物進料流量再除以反應器截面積(以流體化床下管截面積為準)，可視為反應器單位時間單位截面積可處理的污染物總重，此參數用以衡量該反應器對於污染物處理量的上限，在實務應用上更可估算每日處理水量的多寡。結果如圖 3，在較低截面負荷(小於 $3.21 \text{ kg-Fe m}^{-2}\text{h}^{-1}$)時，鐵去除率可達

80~90%，而結晶率則介於 50~65%，當截面負荷上升，鐵去除率與結晶率隨之大幅降低，分別降至 31.7% 與 20.4% 附近，此因受限於系統中溶氧不足，在較高截面負荷(大於 $3.21 \text{ kg-Fe m}^{-2}\text{h}^{-1}$)時系統已處於低溶氧狀態，顯示反應器實際能處理的負荷量並不高，欲維持較高去除率與結晶率須使系統截面負荷低於 $3.21 \text{ kg-Fe m}^{-2}\text{h}^{-1}$ 。

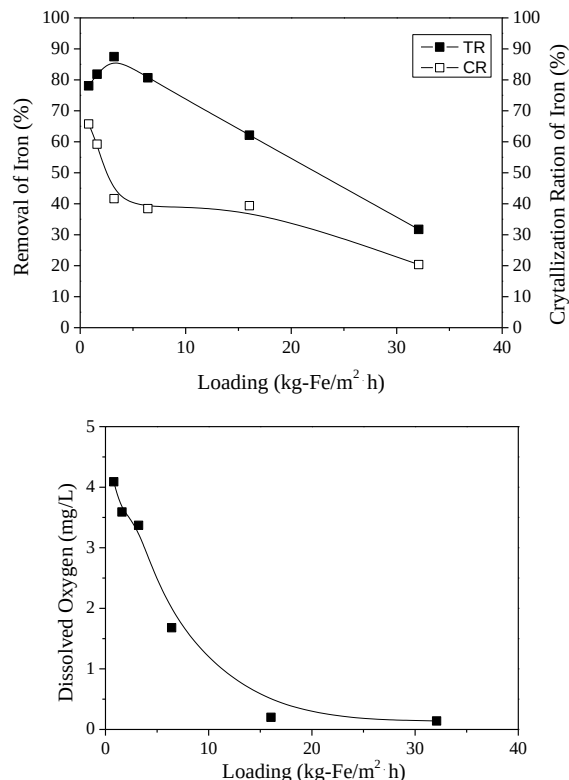


Fig. 3 截面負荷對鐵去除率與鐵結晶率溶氧的影響

XRD 鑑定結果如圖 4，顯示流體化床均質顆粒化技術產物組成為 $\alpha\text{-FeOOH}$ 與 $\gamma\text{-FeOOH}$ 的混合物，推測原因為進行變因探討實驗的過程中，反應條件不一致，當 pH_{eff} 較低時，傾向生成 $\gamma\text{-FeOOH}$ ，若控制反應條件一致，產品組成可為純 $\alpha\text{-FeOOH}$ 。BET 分析結果顯示，產品比表面積達 $85.45 \text{ m}^2/\text{g}$ ，孔洞體積為 $0.058 \text{ cm}^3/\text{g}$ ，平均孔徑為 2.69 nm 。

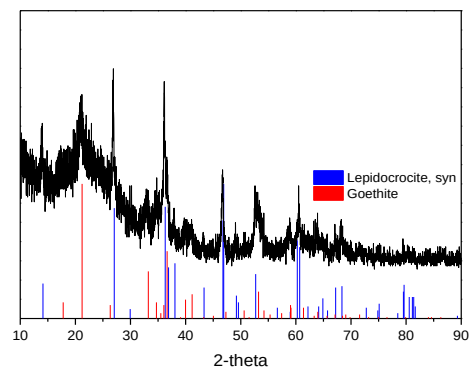


Fig. 4 碳酸-溶氧進料系統均質顆粒 XRD 鑑定圖譜

流體化床均質顆粒化技術以連續式進料提供穩定的進料，但受限於溶液中溶氧限制，使得反應器所能承受

的截面負荷僅 $3.21 \text{ kg-Fe m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ，故為提供穩定氧化劑來源，加入過氧化氫作為氧化劑，快速氧化亞鐵以達到處理亞鐵廢水的目標，此與 Fenton 法反應途徑類似，其中碳酸可提高針鐵礦與過氧化氫反應速率。改變 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 由 0 至 1.5 進行實驗，由於加入氧化劑過氧化氫，預期亞鐵將完全氧化為三價鐵，因此參考氫氧化鐵溶解度曲線，將反應 pH 調整至 3 左右。

如圖 5 所示，當 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 為零，即系統中無過氧化氫時，亞鐵氧化仰賴溶液溶氧，在 pH 3 環境下，亞鐵氧化速率極低且僅受溶氧濃度影響，受限於溶液中自身溶氧不足，鐵去除率與結晶率僅分別達 66% 與 50%；當加入過氧化氫快速氧化亞鐵，在 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 莫爾比提升為 0.5 至 0.9 時，鐵去除率與結晶率顯著提升達到 98.49% 與 78.46%，過氧化氫作為有效氧數目為 1，理論上欲完全氧化亞鐵應需要等莫爾的過氧化氫，但實驗結果顯示 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 莫爾比提升為 0.5 對於亞鐵的去除率已達到 95%，推測此現象因亞鐵與過氧化氫進行 Fenton 反應，亞鐵氧化成三價鐵，產生之 $\cdot\text{OH}$ 再攻擊亞鐵使氧化，故 1 莫爾過氧化氫實際能氧化 2 莫爾亞鐵，因而 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 莫爾比僅提升至 0.5 鐵去除率便有大幅提升；當 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 莫爾比再提高至 1.1 至 1.5 時，鐵去除率開始下降，快速氧化亞鐵也使得沉澱驅動力過強，致使鐵結晶率降低，推測此因加入過量過氧化氫，導致過量的 $\cdot\text{OH}$ 產生，引發 Fenton 反應中的掃除效應(Scavenging effect)，過量 $\cdot\text{OH}$ 攻擊過氧化氫本身而降解，使得亞鐵氧化效率降低，鐵的去除率因此而下降。碳酸-過氧化氫進料系統進行 FBHC 之鐵氧化物產物，BET 分析結果顯示，產物之比表面積為 $165.88 \text{ m}^2/\text{g}$ ，平均孔徑為 36.17 nm 。SEM 表面微觀形貌如圖 6。

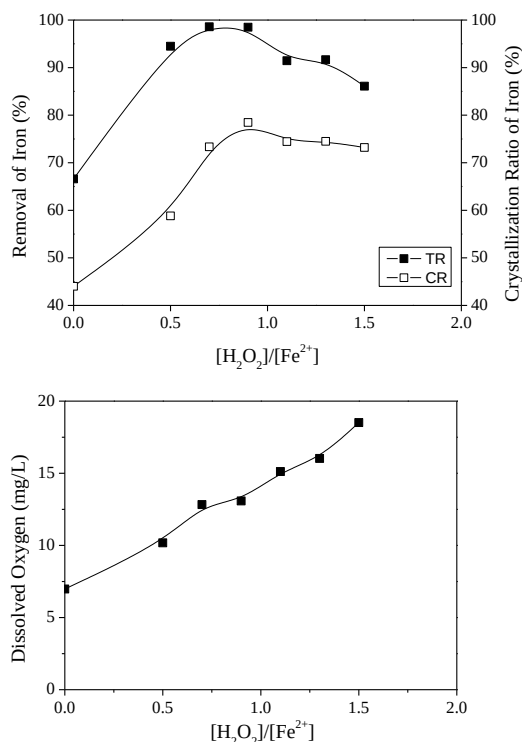


Fig. 5 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{Fe}^{2+}]$ 對鐵去除率與結晶率及溶氧影響

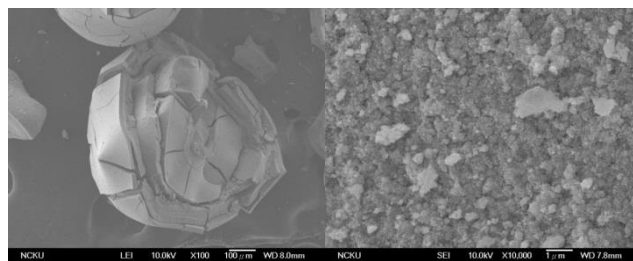


Fig. 6 SEM 表面型態分析(左)碳酸-過氧化氫進料系統產品 (x100)，(右)碳酸-過氧化氫進料系統產品 (x10,000)

3.2. FBHC 鐵氧化物吸附除鋇實驗

本研究針對鋇離子在不同 pH 值條件下，進行平衡吸附實驗。實驗條件為吸附材-鐵氧化物 5 g L^{-1} ，起始 Sr 濃度 10 ppm，溫度控制在 298 K，pH 值控制在範圍 7~12 之間，實驗結果如圖 7 所示，所有 pH 條件於 6 小時後達平衡。且實驗在一小時內反應速度極快，而後漸趨於平緩。隨著初始 pH 值升高，達平衡時鋇的移除率上升，由於鐵氧化物吸附材表面隨溶液 pH 值提升帶愈多負電，而促進鋇離子吸附量。當調整 pH 至 9.02 以上，BT9 吸附除鋇效率即達 99% 以上。

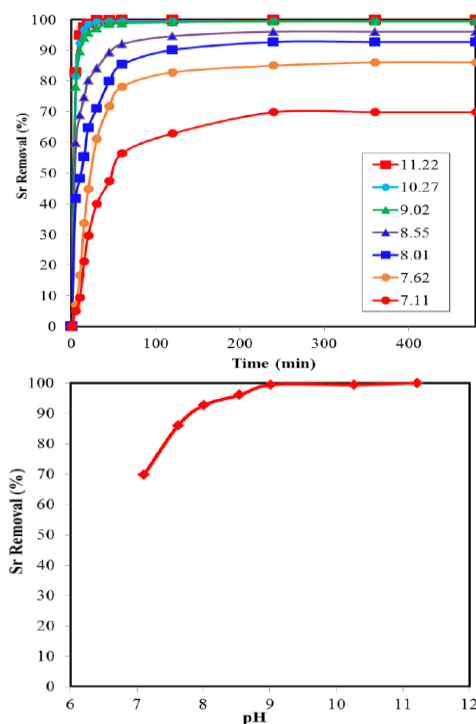


Fig. 7 鋇去除率隨時間在不同 pH 值下變化 (iron oxide = 5 g L^{-1} , $[\text{Sr}] = 10 \text{ ppm}$, 溫度 = 298 K, pH = 7~12)

為尋找本計劃所合成鐵氧化物材之吸附鋇離子熱力學參數 (ΔG 、 ΔS 、 ΔH)，調整在不同溫度、不同的鋇初始濃度下，反應 24 小時得不同溫度下之等溫吸附曲線。溶液 pH 控制在 11，選擇 288、303 與 323 K 等溫度下求得等溫吸附曲線如圖 8。實驗結果顯示鐵氧化物對鋇吸附量隨著溫度上升而增加，初步推測此系統為吸熱反應。根據熱力學原理求取不同溫度下的 ΔG 、 ΔS 及 ΔH ，再以 $\ln K^0$ 對 $1/T$ 作圖求其斜率及截距，再乘上理想氣體常數 R ($8.314 \text{ J K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) 可得自由能值。 K^0 根據 Khan and

Singh(1986)提出以 $\ln q_e/C_e$ 對 q_e 作圖，並將趨近線外插至 $q_e = 0$ 時，縱軸值即 K^0 。而不同溫度下的 K^0 、 ΔG 、 ΔS 、 ΔH 值列於表 1。

$$\Delta G = -RT \ln K^0 = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (3)$$

利用 Langmuir 等溫吸附線公式代入實驗數據中。以 C_e/q_e 對 C_e 作圖(C_e 為平衡濃度， q_e 為平衡吸附量， K_L 為 Langmuir 常數)，其斜率可算出最大吸附量。在 30 °C 時鐵氧化物吸附除鋇之最大吸附量為 28.01 mg g⁻¹。

$$q_e = q_{\max} \left(\frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \right) \quad (4)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max}} + \frac{1}{K_L q_{\max} C_e} \quad (5)$$

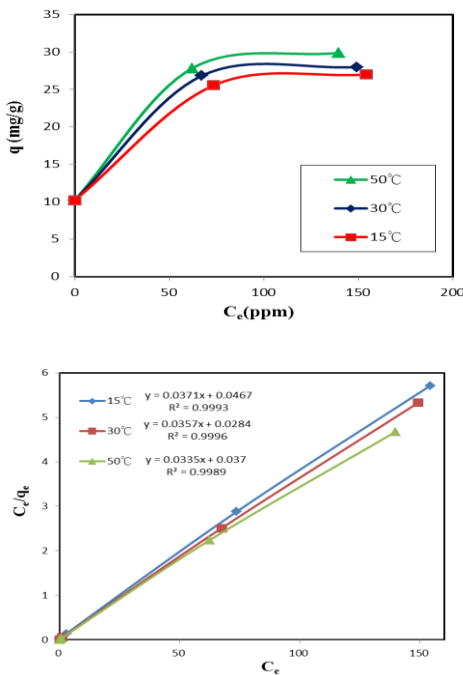


Fig.8 鐵氧化物吸附除鋇之等溫吸附曲線

Table 1 鐵氧化物 (pH11)吸附鋇離子的熱力學參數

	K_0	ΔG (kJ/mol)	ΔS (J/mol·K)	ΔH (kJ/mol)
15°C	11.04	-5.75		
30°C	12.00	-6.26	27.49	2.14
50°C	12.19	-6.72		

天然水體系統中包含複雜溶質，在吸附材應用處理存在於如海水富含多種陽離子之環境中污染物，勢必考慮共離子競爭效應。在本節中探討含 Ca、Mg、K 等離子水溶液中除 Sr 之共同離子效應。本實驗設定初始 pH 為 9，添加鐵氧化物吸附材 0.05 g，溫度設定 25 °C。取 [K]、[Mg]、[Ca] 各為 0.114 mM 為共離子成分進行吸附 0.114 mM 之 Sr。結果顯示鐵氧化物對 K 離子幾乎不吸附，但對 Sr、Ca、Mg 具相當吸附能力。經過 24 小時吸附達平衡後，鐵氧化物對 Sr、Ca、Mg 去除率分別為 38.1、61.7、

42.3%。圖 9 以不同 [Metal]/[Sr] 比例分別比較 Ca 與 Mg 兩種離子存在於水溶液中，鐵氧化物吸附除鋇之二階反應模式行為。

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2 t} \quad (6)$$

以 1/q 對 1/t 作圖下所得斜率與截距可還算反應速率與平衡濃度值，如表 2 及 3 所整理。結果顯示 Ca 影響 Sr 吸附鐵氧化物之效應明顯大於 Mg，雖共離子效應存在於此兩種測試離子實驗，隨著莫耳比例越高，反應速率明顯下降，然而 Ca 在莫耳比達 100 時，其速率反而上升，顯然 Sr 吸附在太多 Ca 競爭下，其反應極快速達平衡。此應可以水合離子現象解釋，Mg 在水溶液中其水合半徑相對大，相對 Sr 在吸附速度上理應緩慢，而 Ca 則得快速飽和鐵氧化物表面。因此當提升 Ca 濃度時，其高批覆能力使鐵氧化物有效表面迅速下降，而導致 Sr 亦快速反應達平衡。如圖 10 三種共離子效應，最終 Sr 離子去除率以 Ca 提高莫耳比之影響最大。

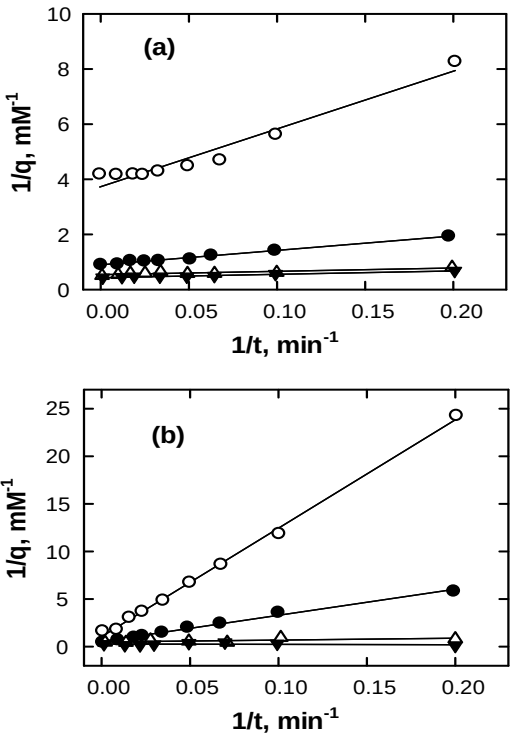


Fig. 9 鐵氧化物於不同(a) Ca、(b) Mg 對 Sr 比例下吸附除鋇之二階動力學關係。([Metal]/[Sr] = ○ 100, ● 10, △ 1, ▼ 0)

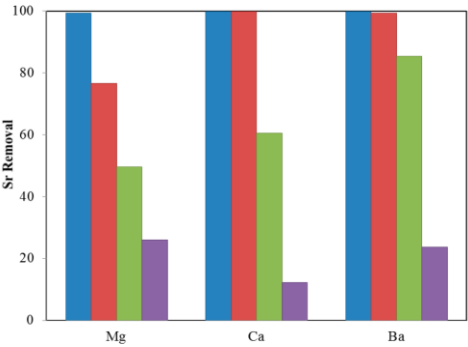


Fig. 10 Sr 去除率於 Mg、Ca、Ba 溶液中去除率變化

Table 2 鐵氧化物於不同 Mg/Sr 比例下吸附除 Sr 之動力學參數

[Ca]/[Sr]	q _e	K ₂ , mM ⁻¹ min ⁻¹	R ²
0	1.99	0.374	0.91
1	1.93	0.203	0.95
10	1.16	0.14	0.99
100	0.24	0.752	0.95

Table 3 鐵氧化物於不同 Mg/Sr 比例下吸附除 Sr 之動力學參數

[Mg]/[Sr]	q _e	K ₂ , M ⁻¹ min ⁻¹	R ²
0	1.99	0.37	0.91
1	1.51	0.19	0.99
10	0.98	0.04	0.99
100	0.52	0.03	0.99

IV. 結論

4.1. FBHC 技術

足量過氧化氫以氧化亞鐵為三價鐵，並將 pH 調整至 3。當 [H₂O₂]/[Fe²⁺] 為零，亞鐵氧化仰賴溶氧，鐵去除率與結晶率僅分別達 66% 與 50%。[H₂O₂]/[Fe²⁺] 莫爾比提升至 0.5~0.9 時，鐵去除率與結晶率跟著提高，可達 98.5%、78.5%。當 [H₂O₂]/[Fe²⁺] 莫爾比再提高至 1.1 至 1.5 時，鐵去除率開始下降，且沉澱驅動力過強，致使鐵結晶率降低，推測此與過量 •OH 產生，引發 Fenton 反應掃除效應有關。透過改變進料濃度測試反應器的截面負荷結果顯示，碳酸-過氧化氫系統實際可承受的截面負荷亦為 3.21 kg-Fe/m²·hr。XRD 鑑定碳酸-過氧化氫進料系統產品為純度較高之 α-FeOOH。

4.2. 鐵氧化物吸附除鋇與共離子效應

熱力學分析顯示 ΔG 在 15、30、50 °C 吸附實驗下皆為負值，代表鐵氧化物在這三個溫度下，吸附鋇皆為自發性反應；而 ΔH 為正值反映了此系統為吸熱反應。在 30°C 時鐵氧化物對鋇離子最大吸附量為 28.01 mg g⁻¹。BT9 對於 K 離子幾乎不吸附，可吸附帶 2 價的 Sr、Ca、Mg。無論是含 Ca、Sr 共同離子吸附或是含 Mg、Sr 共同離子吸附，皆符合二階動力式。鐵氧化物對金屬離子 Sr、Ca、Mg、Ba、K 吸附去除率為 76.5，49.4，88.6，72.9，1.3%。

參考文獻

[1] Cundy, A.B., L. Hopkinson, and R.L. Whitby, Use of iron-based technologies in contaminated land and groundwater remediation: A review. *Science of The Total Environment*, 2008. 400(1): p. 42-51.

[2] Fenton, H.J.H., Oxidation of tartaric acid in presence of iron. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 1894. 65: p. 899.

[3] Haber, F. and J. Weiss, The catalytic decomposition of hydrogen peroxide by iron salts. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1934. 147(861): p. 332-351.

[4] Hiemstra, T. and W. Van Riemsdijk, Fluoride adsorption on goethite in relation to different types of surface sites. *Journal of colloid and interface science*, 2000. 225(1): p. 94-104.

[5] Inglezakis, V.J., Stylianou, M., and Loizidou, M., 2010, Hydrodynamic Studies on Zeolite Fluidized Beds, *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 8, A126.

[6] Jiang, W., Lv, J., Luo, L., Yang, K., Lin, Y., Hu, F., Zhang, J., Zhang, S., Arsenate and cadmium co-adsorption and co-precipitation on goethite. *Journal of Hazardous Materials*, 2013. 262: p. 55-63.

[7] Liou, M.J. M.C. Lu, Catalytic degradation of explosives with goethite and hydrogen peroxide. *Journal of Hazardous Materials*, 2008. 151(2): p. 540-546.

[8] Mejía Gómez, J.A., de Resende, V.G., Antonissen, J., De Grave, E., Characterization of the effects of silicon on the formation of goethite. *Corrosion Science*, 2011. 53(5): p. 1756-1761.

[9] Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Biscans, B., Cabassud, M., Domenech, S., 2003. A thermochemical approach for calcium phosphate precipitation modeling in a pellet reactor. *Chem. Eng. J.* 94, 41-50.

[10] Refait, Ph., Reffass, M., Landoulsi, J., Sabot, R., Jeannin, M., Role of phosphate species during the formation and transformation of the Fe (II-III) hydroxycarbonate green rust. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007. 299(1): p. 29-37.

[11] Song, Y., Hahn, H.H., Hoffmann, E., 2002. Effects of solution conditions on the precipitation of phosphate for recovery A thermodynamic evaluation. *Chemosphere* 48, 1029-1034.

[12] Usman, M., Abdelmoula, M., Faure, P., Ruby, C., Hanna, K., Transformation of various kinds of goethite into magnetite: Effect of chemical and surface properties. *Geoderma*, 2013. 197-198(0): p. 9-16.

[13] Wang, X. Liu, F., Tan, W., Feng, X., Koopal, L.K., Transformation of hydroxycarbonate green rust into crystalline iron (hydr) oxides: Influences of reaction conditions and underlying mechanisms. *Chemical Geology*, 2013. 351: p. 57-65.

核能電廠除役過程中高活度廢液處理與減廢之審查技術評估

Reviewing technology assessment for treatment and reduction of high-level liquid waste during nuclear power plant decommissioning process

計畫編號：103-2623-E-214 -002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：劉文仁

e-mail：jurgen@isu.edu.tw

計畫參與人員：劉權津、周韋均、孫培凱、鐘明宏、廖國鈞

執行單位：義守大學材料科學與工程學系

摘要

基於日本東京電力公司的福島第一核電廠於 2011 年 3 月 11 日發生事故後，我國政府於 2011 年 11 月 3 日提出新能源政策，指出既有核能電廠將不再延役，而依據「核子反應器設施管制法」之定義，除役係指核子反應器設施永久停止運轉後，為使設施及其土地資源能再度供開發利用，所採取之各項措施。我國目前有三座運轉中之核能電廠，分別為核一廠、核二廠及核三廠，每廠各有二部機組，其停止運轉年限以四十年估算，核一廠 1 號機將於 2018 年 12 月 5 日停止運轉，依「核子反應器設施管制法」第 23 條規定，台電公司必須於 2015 年 12 月 5 日前陳報原能會除役計畫書。截至目前為止，國內從未進行過核能電廠除役的相關實務作業，因此在技術上勢必高度仰賴國外曾經有過除役經驗的專家，且屆時核一廠作為國內首座面臨除役的電廠，必定更受外界之矚目。由於除役日期逐漸逼近，對管制單位而言，除役審查工作的準備已是刻不容緩。

截至 2015 年 1 月 5 日各國已停止使用之核反應器資料顯示，目前國際上有幾個國家具有較多核能電廠的除役經驗，包括美國、加拿大、英國、德國、法國、義大利及日本等地，其中日本由於地緣關係，其相關法規的制定常成為我國的參考指標之一，本研究將根據日本獨立行政法人原子力安全基盤機構[JNES，於 2014 年 3 月 1 日與原子力規制庁合併為原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)]所發行的核能電廠除役相關調查報告內容及美洲國家之美國、加等國核能管制單位之相關除役報告資料，針對有關除役過程中「高活度廢液處理與減廢」技術進行重點摘錄，可以獲知並歸納核能管制單位對「核能電廠除役高活度廢液處理與減廢之審查技術」的相關審查項目與要求，而其相關實務經驗將有助於我國未來進行除役審查之作法與制度之擬定。

本年度(2014.01.01~2014.12.31)主要完成蒐集、翻譯並分析整理日本、美國、加拿大等國核能電廠的除役相關報告資料，可以瞭解日、美、加等國在審查方面的組織、程序和作法，對未來國內管制單位進行核能電廠除役計畫在「核能電廠除役高活度廢液處理與減廢之審查技術」方面，提供初步建議。

關鍵詞：核能電廠、除役、拆解、高活度廢液、整治。

Abstract

Following the disaster at Fukushima Daiichi Nuclear

Power Station (NPS) of TEPCO (Tokyo Electric Power Company) on 11 March 2011, the strategy of our government proposed the new energy policy on 3 November 2011 that the operating nuclear power plants would not be considered to be extended operation. Checking the definition of decommission in Nuclear Reactor Facilities Regulation Act, “Decommissioning” shall denote that after the permanent cessation of operation of nuclear reactor facilities, the various measures that shall be implemented to enable that facilities and the site to be developed and utilized again. There are three nuclear power plants in Taiwan, and each has two units. If use 40-years operating license to evaluate the date of permanent shutdown for decommission, the unit 1 of 1st nuclear power plant will be permanent shutdown on 5 December 2018. Based on the article 23 of Nuclear Reactor Facilities Regulation Act, the decommissioning plan of the unit 1 of 1st nuclear power plant for Taiwan Power Company (TPC) referred to in the preceding paragraph shall be submitted to Atomic Energy Council (AEC) by the licensee three years prior to the scheduled permanent cessation of operation of nuclear reactor facilities before 5 December 2015. Up to date, there is no nuclear power plants decommissioning experience in Taiwan, therefore the decommissioning tasks would highly depend on the overseas experts whom possessed these technology and experiences. Simultaneously, decommissioning of the unit 1 of 1st nuclear power plant is the first time in Taiwan would attract more public attention. Due to the decommissioning date is close, the reviewing preparation become more and more urgent.

From the statistics for the permanent shutdown of nuclear power plants around the world until 5 January 2015, it was found that several countries possessed more decommissioning experiences such as United States, Canada, England, Germany, France, Italy and Japan. Among these countries, the laws and regulations of Nuclear Energy Safety Organization (JNES, merged with the Secretariat of the Nuclear Regulation Authority and renamed to Nuclear Regulation Authority on March 1st, 2014) in Japan is often considered for our reference by geopolitical relations. In this project, we will mainly analyze and summarize the treatment and reduction of high-level liquid waste technology during nuclear power plant decommissioning process from the decommissioning technical reports of Japan, United States and Canada. By the way, we will investigate and summarize the relative reviewing items and requests for treatment and reduction of

high-level liquid waste during nuclear power plant decommissioning process via collecting and analyzing these decommissioning technical reports. Additionally, these decommissioning technology and experiences will be helpful to formulate the suitable reviewing technology assessment in Taiwan.

Within this year (2014.01.01~2014.12.31) of the project, we have mainly collected, interpreted and investigated the treatment and reduction of high-level liquid waste technology during nuclear power plant decommissioning process from the decommissioning technical reports of Japan, United States and Canada. Simultaneously, we will summarize decommission reviewing organizations, procedures and practices from these countries, and propose preliminary recommendations of the treatment and reduction of high-level liquid waste technology during nuclear power plant decommissioning process for AEC reference.

Keywords: Nuclear Power Plant, Decommission, Dismantling, High-level liquid waste, Remediation

I. 前言

基於政府在 100 年 11 月 3 日所宣佈之新能源政策，既有核能電廠將不再延役，而依據「核子反應器設施管制法」之定義，除役係指核子反應器設施永久停止運轉後，為使設施及其土地資源能再度供開發利用，所採取之各項措施。我國目前有三座運轉中之核能電廠，分別為核一廠、核二廠及核三廠，每廠各有二部機組，其停止運轉年限(運轉壽命四十年估算)如表一所示。

表一、我國核能電廠停止運轉年限		
廠別	機組	停止運轉年限
核一廠	一號機	107年12月05日
	二號機	108年07月15日
核二廠	一號機	110年12月27日
	二號機	112年03月14日
核三廠	一號機	113年07月26日
	二號機	114年05月17日

因此，核一廠 1 號機將於 107 年 12 月 5 日停止運轉，依「核子反應器設施管制法」第 23 條規定，台電公司必須於 104 年 12 月 5 日前陳報原能會除役計畫書。截至目前為止，國內從未進行過核能電廠除役的相關實務作業，因此在技術上勢必高度仰賴國外曾經有過除役經驗的專家，且屆時核一廠作為國內首座面臨除役的電廠，必定更受外界之矚目。由於除役日期逐漸逼近，對管制單位而言，除役審查工作的準備已是刻不容緩。

II. 主要內容

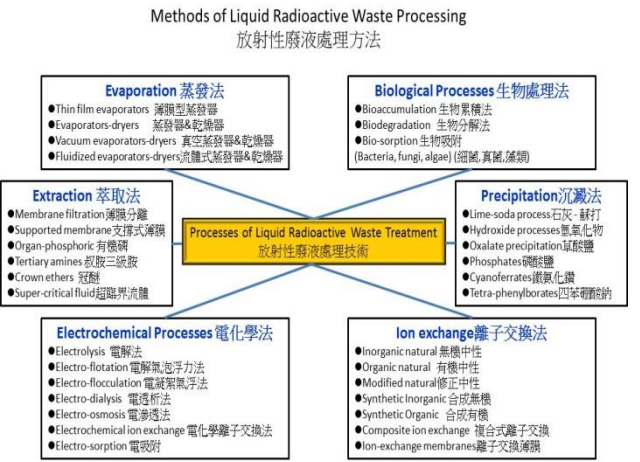
本計畫主要為蒐集、探討及整理處理放射性廢液之技術文獻，並針對日本、美國、加拿大等地之除役報告資料，有關除役過程中「高活度廢液處理與減廢」技術進行重點摘錄，可以獲知並歸納核能管制單位對「核能電廠除役高活度廢液處理與減廢之審查技術」的相關審查項目與要求。雖然各國管制作法迥異，除役程序繁複，期望本計畫能夠從龐雜的資料中循序漸進地提供「核能

電廠除役高活度廢液處理與減廢之審查技術」具體可行的建議。

III. 結果與討論

4-1 處理放射性廢液之技術文獻蒐集、探討及整理

Grazyna Zakrzewska-Trznadel^[2]歸納出目前處理放射性廢液的各種方法，如圖一所示，包含了(1)加熱蒸餾(Thermal evaporation), (2)生技製程(Biotechnological processes), (3)萃取(Extraction), (4)電化學製程(Electrochemical processes), (5)沉澱(Precipitation), (6)離子交換(Ion exchange)等。放射性廢液一般包含懸浮性(Suspended)及溶解性(Dissolved)的污染物。懸浮性污染物沉降(Sedimentation)、過濾、離心等技術進行分離污染物，而溶解性污染物則採用沉澱、離子交換樹脂、蒸餾、活性碳吸附等等技術進行分離污染物。文獻^{[3]-[41]}分析中發現：針對放射性廢液處理與減廢具備高競爭力之薄膜分離技術(Membrane technologies)特別值得注意，薄膜分離技術對放射性廢液之處理具備高去污因子、高減廢、低耗能的優勢；同時薄膜分離系統相當簡易，在適合的溫度和壓力條件下即可進行操作。因此，本團隊乃針對此薄膜分離技術，進行深入的剖析。



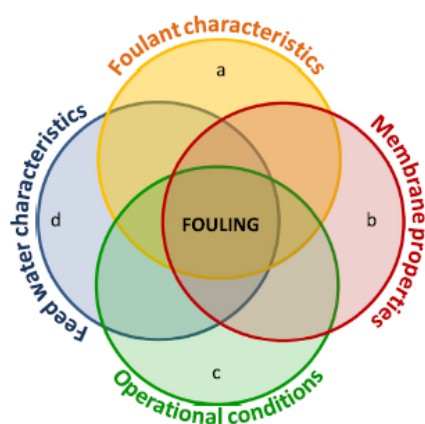
圖一、目前處理放射性廢液的各種方法^[2]

考慮放射性物質對人體健康和周圍環境的潛在危險，適當的放射性廢物管理安全是必要的。以目前現有傳統的處理技術如沉澱法、離子交換法和加熱蒸發法等，應用於放射性廢液的處理，仍存有很多缺點尚待克服，包括能耗高、二次廢物的形成，例如，沉澱池內污泥，廢離子交換吸附劑和再生溶液等。除此之外，還有很多其他限制如在蒸發器中發生發泡和霧沫夾帶量下降現象，在溶劑萃取過程中失去溶劑和產生二次廢物或造成離子交換柱床的堵塞等。薄膜分離技術的最新成果顯示可以成功取代許多沒有效率之傳統處理技術。但是，在某些情況下，薄膜分離技術也可以與傳統處理技術結合，改善污水和淨化效率。

薄膜分離技術^[4]中的薄膜是具有選擇性分離功能的材料，利用薄膜的選擇性，進行分離液體中不同組成的分離、純化、濃縮的過程稱作薄膜分離。它與傳統過濾方式不同，主要是因為薄膜可以在分子範圍內進行分離，並且這過程是一種物理過程，不需發生相轉變和添加助

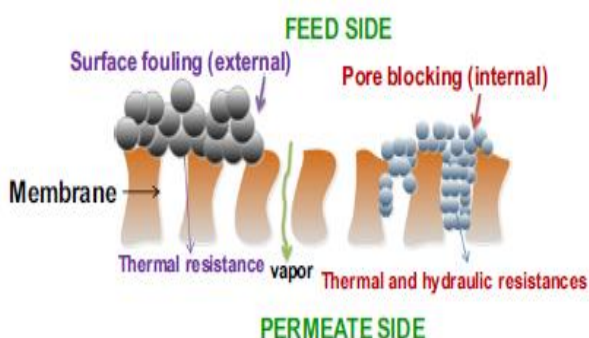
劑。薄膜的孔徑一般為微米級，依據其孔徑的不同（或稱為截留分子量），可將薄膜分為微濾(Ultrafiltration, UF)膜、超濾(Ultrafiltration, UF)膜、奈濾膜(Nanofiltration, NF)和逆滲透(Reverse osmosis, RO)膜等，而根據材料的不同，又可分為無機膜和有機膜，無機膜主要為陶瓷膜和金屬膜，其過濾精度較低，選擇性較小，但耐高溫及抗輻射。有機膜則主要由高分子材料做成的，選擇性較大，如醋酸纖維素、芳香族聚醯胺、聚醚砜、聚氟聚合物等。

而影響薄膜分離除汙能力的因子，基本上可分為四個方面：(1)汙染物特性(如濃度、分子大小、溶解度、疏水性、電荷等)；(2)薄膜性質(如親水性、表面粗糙度、孔隙度大小與分佈、表面電荷、表面官能基等)；(3)操作狀況(如流體通量、流體溫度、流速等)；(4)飼水(Feed water)特性(如溶液化學性質、PH值、離子性強度、是否有機/無機物質並存於溶液中等)，如圖二所示。



圖二、影響薄膜分離除汙能力的因子^[3]

薄膜分離技術中，除垢機制基本上可以分為外部的表面汙垢(Surface fouling)形成及內部的孔洞堵篩(Pore blocking)形成兩種模式，如圖三所示。其中外部的表面汙垢將影響熱傳之熱阻係數，而內部的孔洞堵篩則影響熱傳之熱阻係數及流體之流動阻力係數。



圖三、汙垢沉積位置分為外部的表面汙垢(Surface fouling)及內部的孔洞堵篩(Pore blocking)^[3]

茲將上述幾種薄膜分離技術原理簡述如下：

(1)微濾(Microfiltration, MF)又稱微孔過濾，它屬於精密過濾，其基本原理是篩孔分離過程。微濾膜的材質

分為有機和無機兩大類，有機聚合物主要為醋酸纖維素、聚丙稀、聚碳酸酯、聚砜、聚醯胺等高分子材料，無機膜材料主要為陶瓷和金屬等材料。鑒於微孔濾膜的分離特徵，微孔濾膜的應用範圍主要是從氣相和液相中截留微粒、細菌以及其他污染物，以達到淨化、分離、濃縮的目的。微孔過濾(MF)也是一種低壓(通常為 10-50psi)的薄膜分離技術。它的過濾能力僅介於一般過濾器和超濾(UF)之間，通常只被用來分離 0.05~10 μm 的懸浮物質，其他水的溶解物質都能透過 MF 膜。對於微濾而言，膜的截留特性是以膜的孔徑來呈現，故微濾膜能對大直徑的菌體、懸浮固體等進行分離，因此，可作為一般液體的澄清、保安過濾、空氣除菌等功能。微濾也通常被使用於超濾的預處理和粒狀介質過濾的後處理。

(2)超濾(Ultrafiltration, UF)是介於微濾和奈濾之間的一種膜過程，膜孔徑在 0.05 μm 至 1000 分子量之間。超濾是一種能夠將溶液進行淨化、分離、濃縮的薄膜分離技術，超濾過程通常可以理解為與膜孔徑大小相關之篩分過程。以膜兩側的壓力差作為驅動力，以超濾膜為過濾介質，在一定的壓力下，當水流過膜表面時，只允許水及比膜孔徑小的小分子物質通過，達到溶液的淨化、分離、濃縮的目的。利用低壓 10-150psi 及半透膜來分離高分子物質(分子量 1000~300000)的薄膜技術就是「超濾(UF)」。

(3)奈濾(Nanofiltration, NF)是介於超濾(UF)與逆滲透(RO)之間的一種薄膜分離技術，其截留分子量在 80-1000 的範圍內，孔徑為幾奈米，因此稱奈濾。基於奈濾分離技術的優越特性，其在製藥、生物化工、食品工業等諸多領域顯示出廣闊的應用前景。對於奈濾而言，薄膜的截留特性是以對標準 NaCl、MgSO₄、CaCl₂ 溶液的截留率來表徵，通常截留率範圍在 60%-90%，相對應之截留分子量範圍在 100~1000，故奈濾膜能對小分子有機物與水、無機鹽進行分離，同時進行脫鹽與濃縮的步驟。除此之外，NF 具有 RO 與 UF 之特性，薄膜對兩價離子與分子量大於 300 具有高去除率，單價離子在高濃度時僅有 0-20% 之去除率。二者的結構雖略有不同，功能的重點對象也略有差異，但具有下列的共同特點：

- 它是一項液體對液體的分離技術，能源消耗低廉。
- 過程無熱或化學劑作用，溶液本質不受影響。
- 利用具不同分子量阻擋能力的不同 UF 及 NF 膜，可使不同分子量的篩選，對於超濾而言，膜的截留特性是以對標準有機物的截留分子量來表徵，通常截留分子量範圍在 1000-300000，故超濾膜能對大分子有機物（如蛋白質、細菌）、膠體、懸浮固體等進行分離，廣泛應用於液體的澄清、大分子有機物的分離純化、除熱源等功能。

(4)逆滲透(Reverse osmosis, RO)是利用逆滲透膜只能透過溶劑(通常是水)而截留離子物質或小分子物質的選擇性，以膜兩側靜壓為驅動力，而進行對液體混合物的分離過程。逆滲透是薄膜分離技術的一個重要組成部分，因具有產水水質高、運行成本低、無污染、操作

方便運行可靠等諸多優點，而成為海水和苦鹹水淡化，以及純水製備的最節能、最簡便的技術，目前已廣泛應用於醫藥、電子、化工、食品、海水淡化等諸多行業。逆滲透技術已成為現代工業中首選的水處理技術。

當兩項不同濃度的濃液，被半透膜間隔，依自然現象，濃度較低的溶液會往度較高的一側滲透。純水往鹽水方面滲透，就是典型的例子。但如果在鹽水的一方施加足夠的壓力（亦即大於滲透壓），那麼，就會產生鹽水往純水方面滲透的反常現象，稱之為「逆滲透(RO)」，此項技術的特點是：

- 是液體對液體的分離技術，過程中無相的轉變。
- 屬物理性分離，超過 99.0%的鹽類及微生物都能完全去除。

逆滲透的截留物件是所有的離子，僅讓水透過膜，對 NaCl 的截留率在 98%以上，出水為無離子水。逆滲透法能夠去除可溶性的金屬鹽、有機物、細菌、膠體粒子、發熱物質，也即能截留所有的離子，在生產純淨水、軟化水、無離子水、產品濃縮、廢水處理方面，逆滲透技術已經應用廣泛。

(5)電透析膜 (Electro Dialysis, ED)

在外加直流電場的作用下，利用離子交換膜，使水中離子進行定向遷移，以進行脫鹽的功能，就是「電透析」(ED)。由於離子交換膜對水中的離子具有選擇透過性，陽離子膜允許溶液中的陽離子通過而阻擋陰離子；反之，陰離子膜會阻擋陽離子。「電透析膜」技術就是利用此一特性，達到淡化或濃縮的目的。

接著簡單介紹一些薄膜分離技術應用的系統：

● 澄清純化技術---超/微濾膜系統

澄清純化分離所採用的膜主要是超/微濾膜，由於其所能截留的物質直徑大小分佈範圍廣，被廣泛應用於固液分離、大小分子物質的分離、脫除色素、產品提純、油水分離等工藝過程中。超/微濾膜分離可取代傳統工藝中的自然沉降、板框過濾、真空轉鼓、離心機分離、溶媒萃取、樹脂提純、活性炭脫色等工藝過程。澄清純化技術可採用的膜分離元件主要有：陶瓷膜、平板膜、不銹鋼膜、中空纖維膜、捲式膜、管式膜。採用薄膜分離澄清純化的優點：

- (1)、可得到絕對的真溶液，產品穩定性好；
- (2)、過濾分離效率高；
- (3)、分離效果好，產品品質高，運行成本低；
- (4)、縮短生產週期，降低生產成本；
- (5)、過程無需添加化學藥品、溶媒溶劑，不帶入二次污染物質；
- (6)、操作簡便，占地面積小，勞動力成本低；
- (7)、可拓展性好，容易實現工業化擴產需求；
- (8)、設備可自動運行，穩定性好，維護方便。

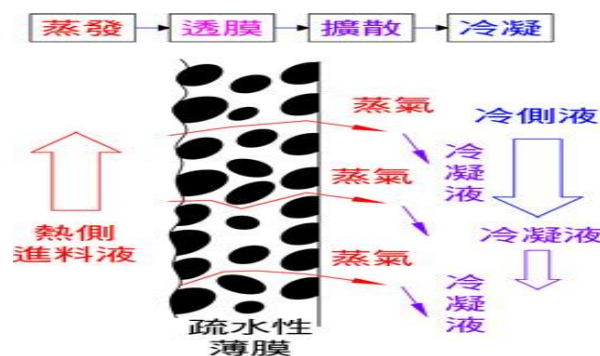
● 濃縮提純技術---奈濾膜系統

薄膜分離技術在濃縮提純工藝上主要採用截留分子量在 100—1000 的奈濾膜。奈濾膜的主要特點是對二價離子、功能性糖類、小分子色素、多肽等物質的截留性能高於 98%，而對一些單價離子、小分子酸、醇等有 30~50%的透過性能，常被應用於溶質的分級、溶液中低分子物質的洗脫和離子組分的調整、溶液體系的濃縮等物質的分離、精製、濃縮工藝過程中。奈濾膜分離技術常被用於取代傳統工藝中的冷凍乾燥、薄膜蒸發、離子交換除鹽、樹脂工藝濃縮、中和等工藝過程。濃縮提純技術可採用的膜元件主要有：捲式膜、管式膜。採用奈濾膜分離技術濃縮提純的優點：

- (1)、能耗極低，節省濃縮過程成本；
- (2)、過程無化學反應、無相變化，不帶入其他雜質及造成產品的分解變性；
- (3)、在常溫下達到濃縮提純目的，不造成有效成分的破壞，工藝過程收率高；
- (4)、可完全脫除產品的鹽分，減少產品灰分，提高產品純度；
- (5)、可回收溶液中的酸、堿、醇等物質；
- (6)、設備結構簡潔緊湊，占地面積小；
- (7)、操作簡便，可實現自動化作業，穩定性好，維護方便。

● 薄膜蒸餾 (Membrane Distillation, MD)系統

薄膜蒸餾技術顧名思義即蒸餾法與薄膜法結合的一種分離技術，主要作用原理是以非揮發物質的水溶液為蒸餾對象，當一疏水性微孔高分子薄膜將不同溫度的冷熱水流體分隔開時，由於表面張力的作用，膜兩側的水溶液都不能通過膜孔進入另一側，但是熱流端的水蒸氣因膜兩側之水蒸氣壓差驅動下，會通過膜孔從熱流端進入冷流端、然後在冷流端冷凝下來成為高純度蒸餾水，工作原理如圖四所示。



圖四、薄膜蒸餾技術之工作原理

薄膜分離技術之應用範圍如圖五所示。其中經由多階段(Multi-stage)逆滲透(Reverse osmosis)應用於放射性處理時，已被證實具備高去污和滯留係數的淨化能力，同時廢液體積呈現顯著的減少。三階段逆滲透裝置(如圖六)於波蘭的放射性廢物管理廠(Radioactive Waste Management Plant, RWMP) Swierk，使放射性廢液之比

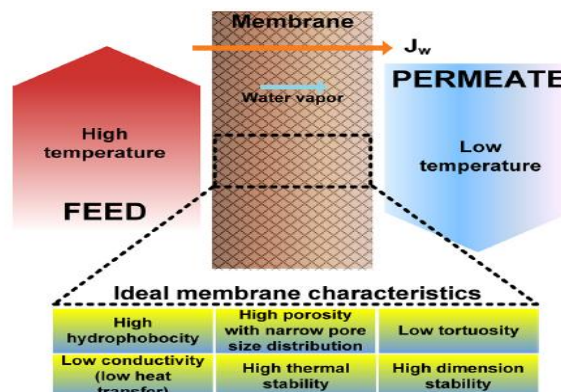
	Cut-offs of different liquid filtration techniques							
	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000	
Micrometer logarithmic scaled								
Angstroms logarithmic scaled	1	10	100	1000	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Molecular weight (Dextran in kD)	0,5	50	7.000					
Size ratio of substances to be separated	Viruses			Bacteria		Yeast		Sand
	Solved salts		Pyrogens			Pollen		
	Sugar					Human hair		
	Atomic radius		Albumin (66 kD)	Red blood cells				
Separating process	Reverse osmosis		Ultra filtration					
	Nano filtration			Micro filtration		Particle filtration		

The diagram illustrates a three-stage ultrafiltration process for retentate concentration. The feed stream V_1 enters a large blue tank labeled '8 m³'. From this tank, the retentate stream V_2 passes through a valve and a pump to Stage 1, which is a yellow rectangular unit labeled 'SU 720R 8" 1 X 2'. The permeate from Stage 1, V_3 , is at $P_1=20$ bar and is recycled back to the feed tank. The retentate from Stage 1, V_4 , is pumped to Stage 2, another yellow unit labeled 'SU 720R 8" 1 X 2'. The permeate from Stage 2, V_5 , is at $P_2=20$ bar and is recycled back to the feed tank. The retentate from Stage 2, V_6 , is pumped to Stage 3, a yellow unit labeled 'SU 810 4" 2 X 2'. The permeate from Stage 3, V_7 , is at $P_3=30$ bar and is recycled back to the feed tank. The final retentate from Stage 3, V_8 , is pumped to a 'To the retentate reservoir'. The permeate from Stage 3, V_9 , is pumped to a 'To the permeate reservoir'. The permeate from the permeate reservoir, V_{10} , is recycled back to the feed tank. The retentate from the permeate reservoir, V_{11} , is recycled back to the feed tank. The diagram also shows control points: 'Antiscalant' is added to the feed tank and Stage 1; 'Salt' is added to the permeate reservoir. Instrumentation includes flow meters (FR 1, FR 2, FR 3, FR 4, FR 5), pressure indicators (PIC 1), and control valves (X1, X2).

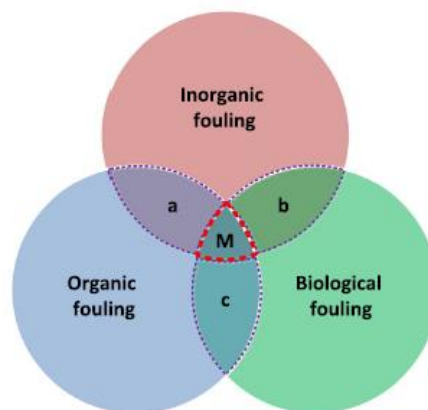
表三、薄膜分離技術之優缺點比較表

處理技術	優點	缺點
Micro-filtration MF 微濾	➢ 低壓操作 (100-150kPa) ➢ 高恢復性 (99%) ➢ 可作為逆滲透之前處理 ➢ 可使用無機薄膜，具耐高溫、抗輻射、化學穩定等性質 ➢ 使用空氣回沖下低汙垢存留	➢ 於廢液含高固態成分時，回沖頻率增加，影響處理速率
Ultra-filtration UF 超濾	➢ 可從粒狀及膠狀廢液中分離溶解鹽類物質 ➢ 可使用無機薄膜，具耐高溫、抗輻射、化學穩定等性質 ➢ 操作壓力小於 1 MPa	➢ 汙垢存留；需要化學清洗或回沖 ➢ 有機薄膜會有輻射損傷問題
Reverse Osmosis RO 逆滲透	➢ 可分離溶解鹽類物質 ➢ 除汙因子介於 100-1000 ➢ 減容因子介於 100-1000 ➢ 成本低 ➢ 可大規模操作	➢ 基於滲透壓，需要高壓操作系統 ➢ 汙垢存留；無法使用化學清洗或回沖，只能更換RO膜
Membrane Distillation MD 薄膜蒸餾	➢ 可移除所有溶解鹽類物質 ➢ 除汙因子高，大於10000 ➢ 不需壓力驅動操作 ➢ 成本低 ➢ 可使用無機薄膜，具耐高溫、抗輻射、化學穩定等性質	➢ 限制使用於非揮發性化學溶液中

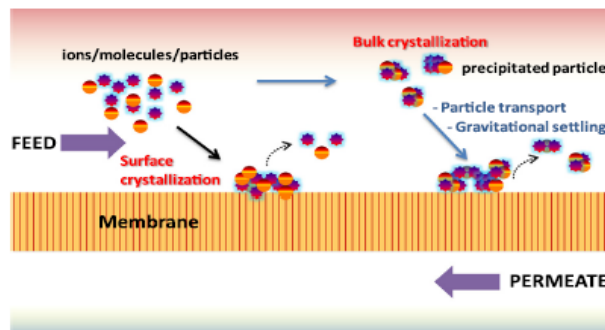
率薄膜蒸餾材料之特質，其中理想高效率薄膜蒸餾材料之特質具備(1)高疏水性；(2)具備窄小孔洞分布的高孔隙性；(3)低扭曲性；(4)低熱傳導性；(5)高熱穩定性；(6)高尺寸穩定性等。



薄膜蒸餾技術採用之除汙材料，如圖八所示，可細分為有機除汙材料、無機除汙材料、生技除汙材料等三種。圖九為利用無機除汙材料進行之薄膜蒸餾示意圖，在除汙過程中，表面出現非均質(Heterogeneous)結垢及材料內部均質(Homogeneous)結垢之現象。

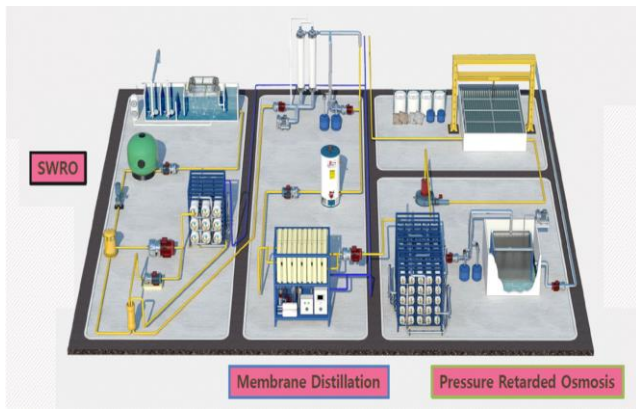


圖八、薄膜蒸餾技術採用之除汙材料^[3]

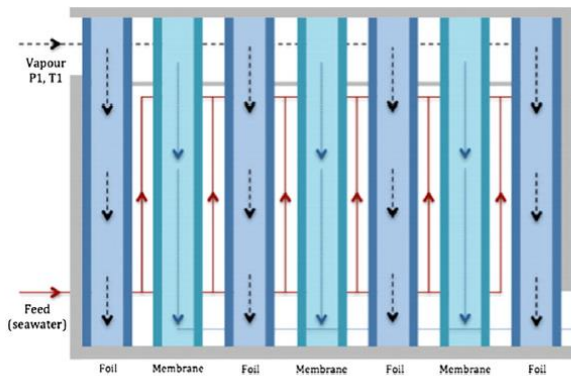


圖九、利用無機除汙材料進行之薄膜蒸餾示意圖^[3]

70

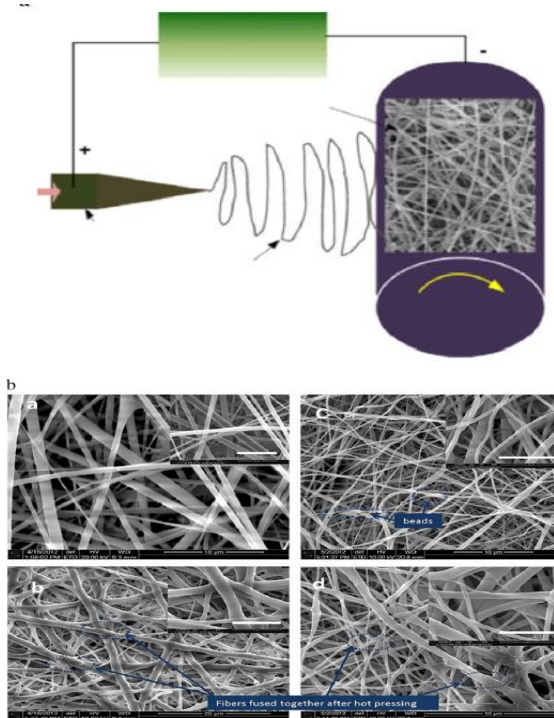


圖十、第三代薄膜蒸餾(Membrane Distillation, MD)技術淨化水質示意圖^[6] (www.globalmvp.org).

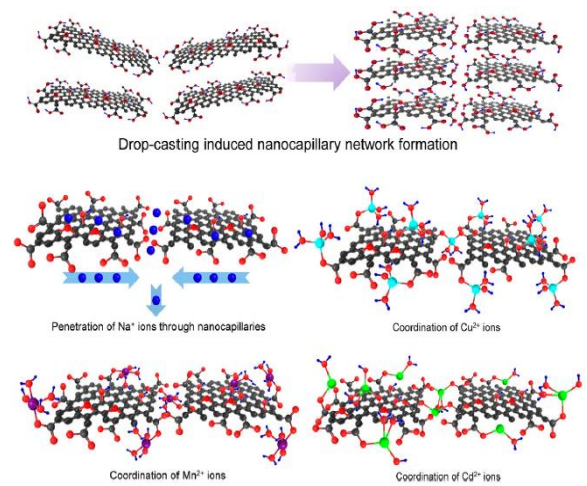


圖十一、真空式多功能薄膜蒸餾(Vacuum multi-effect membrane distillation, V-MEMD)模組示意圖^[6]

基於理想高效率薄膜蒸餾材料之特質，許多文獻研發各式高效率薄膜蒸餾之材料。如下圖十二~圖十六所示。



圖十二、以電紡(Electro-spinning)方式製作奈米纖維作為薄膜(Membrane)材料^{[6],[26]}



圖十三、具備離子選擇性(Ion selectivity)機制的石墨烯氧化薄膜(Membrane)材料^[6]

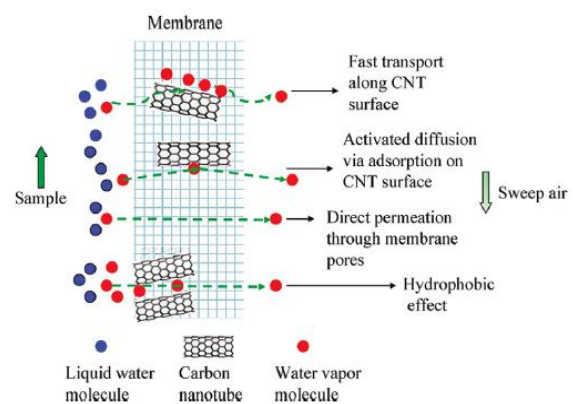
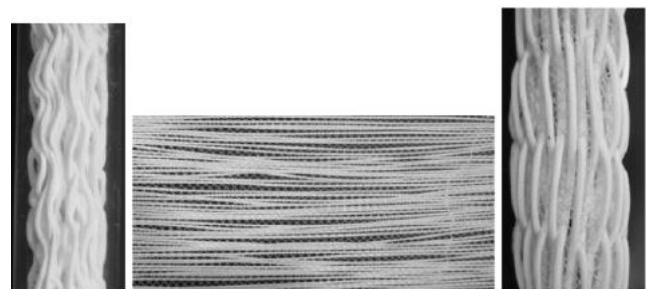
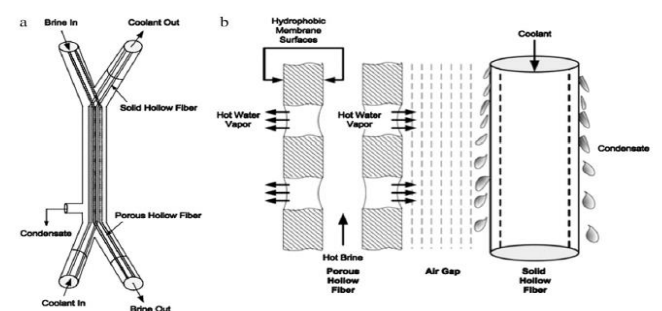


Fig. 6. MD mechanism for the membranes containing CNTs in their matrix [57].

圖十四、內含奈米碳管(Carbon nano-tubes, CNTs)之薄膜(Membrane)材料^[6]



圖十五、各式中空式纖維薄膜(Hollow fiber membrane)^[6]



圖十六、中空式及具備熱回收機制之纖維薄膜(Hollow fiber membrane)設計^[6]

除了上述之薄膜分離技術外，近年來更有開發各式新穎分離技術如「超臨界流體(Super-critical fluid)處理技術」、「廢水電解處理技術」、「高效能無機吸附劑技術」、「電吸附(Electro-sorption)技術」、「支撐式液膜(Supported liquid membrane)技術」、「組合式(Hybrid)技術」等，在人力與時間不足的情況下，將不在此闡述這些新穎技術之目前研發成果。

目前全世界採用薄膜分離技術進行放射性廢液處理的國家很多，茲將其整理分列如下：

加拿大方面：Chalk River Laboratory (Canada) - mixed radioactive wastes (MF, spiral wound and tubular RO modules)

Bruce Nuclear Power Station in Canada - RO, UF - aqueous wastes from steam generator chemical cleaning

英國方面：Sellafield (G.B.) - UF installation for removal of actinides and dewatering of radioactive sludge

Harwell (G.B.) - separation of the precipitate from water after flocculation (ultrafiltration)

匈牙利方面：Nuclear Power Plant in Paks (Hungary) - boric acid recovery (ultrafiltration, polysulfone membranes)

德國方面：Hanau (Germany) - processing of low-level liquid wastes from fuel production plant (ultrafiltration)

法國方面：Cadarache Nuclear Research Centre and Harwell - UF complexation

美國方面：Nuclear power stations in USA, e.g. Nine Mile Point, Wolf Creek, Comanche Peak, River Bend, Salem, Seabrook, Callaway, Diablo Canyon - RO or UF

澳大利亞方面：ANSTO, Australia - RO

從國外核能電廠的除役經驗來看，一座核能電廠從確定停止運轉到完全除役可能耗時 20~30 年之久，期間電廠必須提出有關待拆除設施及拆除方法、核燃料物質管理、因核物料產生放射性廢棄物的處理、除役程序、輻射曝露管理、安全評估、應維持功能及性能的系統設備以及執行組織等資訊及計畫供管制單位審核，以確保整個除役工作能順利且安全地進行。由於除役勢必衍生大量高活度放射性廢液，查明並引用放射性廢棄物分類與解除管制基準的法規，對縮減除役時間與有效管理是必要的步驟。基於時間有限及本團隊研究人力較少之條件下，可能無法大範圍蒐集、研讀及分析，目前僅篩選環境條件較類似於我國核能電廠之已除役機組資料進行研讀分析與整理，提供未來進行除役計畫審查之參考。

除役廢棄物減量策略包括來源減量、防止污染擴散、循環與再利用及廢棄物管理最適化。任何廢棄物減量策略第一個步驟是使放射性廢棄物產生最小化，當產生放射性廢棄物無法避免時，應用適當廢棄物管理技術是最後一個步驟。放射性產生與擴散機會最小化可使放射性廢棄物產生最小化，減廢是核設施整個生命週期必須維持的活動，建立適當政策與文化以達到廢棄物減廢是電廠管理的主要責任。因此，透過「薄膜分離技術」可將無可避免之高活度放射性廢液進行減容處理將是非常必要之措施，當然期間產生之高活度廢棄物將進行隔離置放，並考慮後續最終儲放處理。傳統處理方法一般採

取經蒸發器濃縮處理後，其蒸餾液再經過濾器及除礦器處理後，符合排放標準，始得排放。其殘餘濃縮廢漿即成為濕性固態廢棄物，再以水泥固化。關於液體廢棄物的廢棄物轉移模式，在解體建築物的放射性物質質量方面，應考量：假設切割／解體伴隨的水中浮游物(水中溶解物)的產生比例，及該設施的液體廢棄物處理設備的性能。

放射性廢棄物管理優先順序依序為避免產生、減廢、再利用、循環、能源回收及最終處置。物質或廢棄物管理主要著重於隔離、除污及解除管制程序，若隔離、除污及解除管制程序適當作好，除役程序所產生的放射性物質需處理與處置於放射性廢棄物處置場的數量可大幅降低。

放射性廢液可包含懸浮物、乳劑、洗滌劑和離子等型態物質，一般包含 ^3T , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{51}Cr , ^{59}Ni , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{94}Nb , ^{95}Nb , ^{99}Tc , ^{106}Ru , ^{121}Te , ^{129}I , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{144}Ce and $^{152-155}\text{Eu}$, ^{241}Pu , ^{242}Cm 等放射性同位素。而高活度廢液放射性物質來源主要包含：液體廢棄物方面，系統保有水的排水廢液、解體前後的系統除汙廢液、水中切割金屬的廢液、濕式切割混凝土的廢液，及清潔工作人員衣物等的洗滌廢液。

4.2 日本在高活度廢液處理與減廢之技術分析整理與分類

4.2.1 日本概況及審查方面的組織、程序和作法

目前日本已有 11 座核能電廠(含小型發電用反應器)永久停止運轉，其中 1 座完成除役、4 座進行除役中、6 座進行災後除汙檢測中，其餘分別為廠址開放準備中或安全貯存準備中。

日本目前將使用核能之設施、放射性廢料分類及儲放放射性廢料的策略如圖十七及圖十八所示，其中可以清楚得知核電廠設施之放射性廢料基本上可分成非常低活性(Very Low-Level)、低活性(Low-Level)、相對高活性(Relatively high-Level)等三種，而其儲放放射性廢料的相對應方法則分別為近表面溝渠式(Near-Surface Trench)、近表面孔洞式(Near-Surface Pit)、次表面式(Sub-Surface, 50~100 深度)等三種。

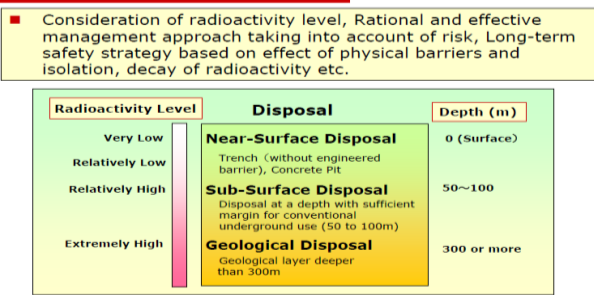
Utilization of Nuclear Energy and Radioactive Waste Categorization of Waste and Disposal

Nuclear Facilities	Examples of Waste	Category of Waste by Level of Radioactivity		Method of Disposal
Nuclear Power Plant	Concrete, metal	Low-Level Radioactive Waste	Very Low-level	Near-Surface (Trench)
	Liquid waste, filters, used equipment, other used material		Low-Level	Near-Surface (Pit)
	Control rods, core internals		Relatively High-Level	Sub-Surface ⁽¹⁾
U-Enrichment/Fuel Fabrication Plant	Used material, sludge, used equipment	High-Level Radioactive Waste	Uranium Waste	Near-Surface (Trench, Pit), Sub-Surface, Geological ⁽²⁾
Reprocessing/MOX Fuel Fabrication Plant	Parts of fuel elements, filters, liquid waste		Waste including TRU	Near-Surface (Pit), Sub-Surface, Geological
Reprocessing Plant	Vitrified waste	High-Level Radioactive Waste		Geological
All Plants	Most of waste from decommission	Level below the Clearance Level		Recycle, Dispose as industrial waste

Regulation is enforced.

Note: (1) 50 to 100m deep (2) 300m deep or more

圖十七、日本使用核能之設施及其放射性廢料分類^[7]

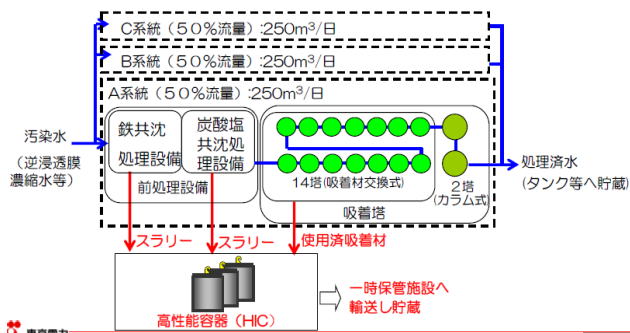


圖十八、日本核能設施之放射性廢料儲放策略^[7]

在日本的反應器管制條例中指出：放射性廢棄物應該依其所屬型態(如氣體、液體、固體)進行排放、處理、儲存或終期處置時，需遵循相對應之方法。以液體放射性廢棄物為例，強調排放時須使用排放設施、處理時需儲放於避免液體放射性廢棄物外露之儲放桶、需於避免液體放射性廢棄物外露之焚化爐內進行焚化步驟、儲存或終期處置時需包裝或固化於避免液體放射性廢棄物外露之儲放桶。

日本東京電力公司(Tokyo Electric Power Company, TEPCO)的福島第一核電廠(Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant)於2011年3月11日發生事故後，全世界處理固態、液態、氣態等放射性廢料優良技術齊聚一堂，應該可說是「精銳盡出」，加上日本東京電力公司必須公開資訊，應該可以從中搜尋到一些平時廠商保密又寶貴的技術與經驗，作為除役時放射性廢料處理的借鏡。

日本東京電力公司採用日本東芝(Toshiba)公司及美國 Kurion 公司推出之「多核種除去設備(Multi-nuclide Removal Equipment), ALPS, Advanced Liquid Processing System)」技術，如圖十九所示，進行放射性廢液處理，除了氫以外可除去 62 種放射性物質(Rb-86, Sr-89, Sr-90, Y-90, Y-91, Nb-95, Tc-99, Ru-103, Ru-106, Rh-103m, Rh-106, Ag-110m, Cd-113m, Cd-115m, Sn-119m, Sn-123, Sn-126, Sb-124, Sb-125, Te-123m, Te-125m, Te-127, Te-127m, Te-129, Te-129m, I-129, Cs-134, Cs-135, Cs-136, Cs-137, Ba-137m, Ba-140, Ce-141, Ce-144, Pr-144, Pr-144m, Pm-146, Pm-147, Pm-148, Pm-148m, Sm-151, Eu-152, Eu-154, Eu-155, Gd-153, Tb-160, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-242, Cm-243, Cm-244, Mn-54, Fe-59, Co-58, Co-60, Ni-63, Zn-65)。鑒於國內核能電廠除役，亦產生放射性廢液，建議國內除役作業相關單位能預先了解此項技術。



圖十九、福島第一核電廠多核種除去設備示意圖

至於廢液中之氫去除，乃採用美國 Kurion 公司推出之輕水(重水)聯合電解催化交換(CECE, Combined Electrolysis Catalytic Exchange)技術，其機制簡述如下：

1、以含氫輕水(重水)為原料提取純氫的生產方法，其特徵在於包括下列步驟：

A、第一階段 -- 氫-水(液)交換階段

採用兩段六級級聯式對氫氣(電解產生氫氣)與含氫輕水進行液相催化交換反應，每一段設置三級交換反應器，交換反應器中的催化劑採用疏水催化劑，含氫輕水(重水)被加壓的氫(氫)氣霧化成微小霧滴順流自上而下通過催化床，在催化床中進行氫-水(液)交換反應，氫從液相轉移到氣相中，該流程是在 40℃~50℃ 溫度和 0.1MPa~0.25MPa 壓力條件下進行，每一段和每一級反應結束通過冷卻進行氣液分離，分離的氣體送入低溫蒸餾階段，液體加熱進入下一級和下一段；

B、第二階段 -- 低溫蒸餾階段

(1)低溫吸附

對含氫氫(氫)氣進行低溫冷凍乾燥處理，除去 O₂、N₂ 等雜質後，再進行氫(氫)正(O)態-仲(P)態轉化(即 OP 轉化)，然後繼續降溫，溫度降到-247℃~-249℃時，將含氫氣液混合物送入低溫蒸餾段；

(2)液氫(氫)低溫蒸餾

對含氫氣液混合物進行初蒸餾，初精餾塔入口溫度為-247℃~-249℃，塔頂下部溫度為-249℃~-251℃，塔底溫度為-243℃~-245℃，壓力為 0.35MPa~0.50MPa，初蒸餾將氫(氫)化氫由 0.5PPmHT(DT)濃縮到 0.02% HT(DT)；排出的氫(氫)氣作為循環氣經循環氣貯槽膨脹後返回氫-水(液)交換階段；對得到濃縮的 HT(DT)進行精蒸餾，精餾塔入口溫度為-247℃~-249℃，塔頂溫度為-248℃~-250℃，塔底溫度為-245℃~-247℃，壓力為 0.35MPa~0.45MPa，將其從 0.02% HT(DT)進一步濃縮到 95% HT(DT)；濃縮的 95% HT(DT)經換熱升溫至 40℃~60℃的條件下進行歧化反應，所用催化劑為 Pt、Pd 或 Ni/Cr₂O₃，反應結束後再經換熱降溫至-246℃~-248℃繼續進行精蒸餾，濃縮到 99% T₂；

(3)回收

回收採用催化合成燃燒製程，從初精餾塔塔頂上部排出的氣體與空氣混合燃燒，生成的輕水(含微量氫)冷凝後匯集。

其他日本幾個核能發電廠的除役狀況^[50]描述如下：

● 東海核能發電廠 (Tokai Nuclear Power Station) 除役起訖時間：2001 年 12 月 4 日~2018 年 3 月

日本東海核能發電廠是隸屬於石墨減速二氧化碳冷卻反應器，於 1966 年 7 月 25 日開始營業運轉，是日本最早的商業用發電廠。1998 年 3 月 31 日，結束營業運轉；於 2001 年 3 月 29 日，將反應器內核燃料完全取出，2001 年 6 月完成了將全部核燃料搬至英國再處理廠的作業程序，2001 年 10 月 4 日，根據當時的反應器等

反應器管理法，向日本經濟產業省提出「反應器解體」申請，並於 2001 年 12 月 4 日展開除役工程。

公眾承受劑量的安全評估說明：除設計畫書應記載電廠區域之公眾承受劑量的安全評估，在平常隨放射性氣體廢棄物、液體廢棄物釋放的劑量中，電廠區域之一般公眾有效承受劑量值：氣體廢棄物 1 年約為 0.002 毫西弗、液體廢棄物則是 1 年約 0.006 毫西弗，遠低於一般公眾每年 1 毫西弗的劑量限度。此外，事故對一般公眾所造成的有效劑量最多約 0.007 毫西弗，因此不會對電廠區域之公眾造成顯著性的放射線曝露風險。目前於東海核能發電廠產生之液體廢棄物(包含超鈾廢料)均暫時儲放於桶內，其中一部分的液體廢棄物已完成由「蒸發法」濃縮固化於桶內，其餘液體廢棄物則視輻射半衰期長短分類置放，於適合時期進行放射性物質之分離處理及處置。

● 普賢核能發電廠 (Fugen Nuclear Power Station) 除役起訖時間：2008 年 2 月 12 日~2028 年

普賢核能發電廠屬於先進高溫反應器 (ATR: Advanced Thermal Reactor)，是以重水減速沸水式壓力管型的自主開發反應器，從 1967 年開始由反應器、核燃料開發事業團 (現在的 JAEA) 進行開發，於 1970 年 12 月開始建設，並正式利用鈾鈾混合氧化物燃料 (MOX 燃料) 作為發電用熱中子反應器，於 1979 年 3 月開始正式運轉。在 2003 年 3 月 29 日運轉結束時，普賢發電廠開始正式運轉以來，以平均 1 座熱中子反應器的 MOX 燃料使用規模，達到了世界最大使用 MOX 燃料規模的實績。另外，從普賢發電廠的用過核子燃料中回收的鈾，更以燃料再次使用的方式，實現了日本首創的核燃料循環技術，率先帶動了日本的鈾利用技術。

目前其部分的液體廢棄物已完成經由「蒸發法」濃縮固化於桶內，其餘液體廢棄物則視輻射半衰期長短分類置放，於適合時期進行放射性物質之分離處理及處置。

➤ 中部電力濱岡核能發電廠 1、2 號機 (Hamaoka Nuclear Power Station) 除役起訖時間：2009 年 1 月 30 日~2036 年

濱岡核能發電廠從 1976 年的 1 號機以後，現在已經運轉至 5 號機。1 號機在 1974 年 6 月 20 日開始運轉，2 號機在 1978 年 3 月 28 日開始運轉，雖於 2005 年 1 月 28 日開始評估是否進行耐震強度提升的工程，但由於 1、2 號機的工程均需耗費相當多的時間與費用，因而判定該工程不符合經濟效益，故於 2009 年 1 月 30 日結束運轉進行除役。

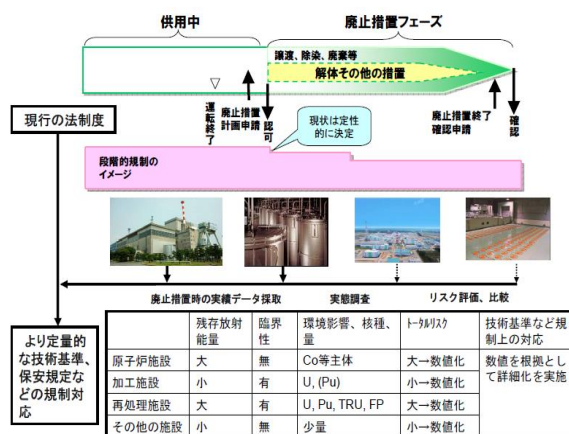
在遭受核燃料污染之污染物處理方面成果：解體工程準備期間所產生的放射性廢棄物 (氣體、液體及固體) 與運轉中相同，應視廢棄物的種類、性質等，進行適當的處理。反應器區域設備解體拆除期間之後所產生的放射性廢棄物 (氣體、液體及固體)，應在反應器區域設備著手解體拆除之前，制定處理的方法。放射性固體廢棄物應依輻射等級及性質區分及處理，並在除役結束前

進行廢棄，且應於反應器區域設備著手進行解體拆除之前確定棄置場所。不需以放射性物質處理的物質應盡可能再生利用，非放射性的廢棄物應盡可能再生利用，或以產業廢棄物進行適當的廢棄。目前其部分的液體廢棄物已完成經由「蒸發法」濃縮固化於桶內，其餘液體廢棄物則視輻射半衰期長短分類置放，於適合時期進行放射性物質之分離處理及處置。

4.2.2 除役安全管制之現況^[50]

日本 JNES 於平成 18 (2006 年) 核能電廠除役相關調查報告中，現行核子反應器設施除役的管制程序除役期間，核子反應器設施的「事業與設置許可」仍有效。但取得除役計畫認可後，將開始分階段解除運轉時的分管制，進行除役措施，如圖二十所示。

其分階段解除管制的項目、除役計畫之記載事項(特別是與確保安全有關之事項)，詳細內容請參考相關參考文獻^[50]，不在此贅述。



圖二十、現行核子反應器設施除役的管制程序^[43]

4.2.3 除役安全基本原則^[50]

確保核設施除役安全之方法，依據日本國內外核能電廠過去的除役經驗，進行了相關資訊的蒐集、歸納與彙整。例如，原子力安全委員會所整理的「核子反應器設施解體相關安全確保基本觀念」。如圖二十一所示，除役中的核能設施不再需要運轉時基於安全所需而要求的停止及冷卻功能，而是著重於設施內殘留的放射性物質，以避免其對周邊環境造成影響為重要對策。

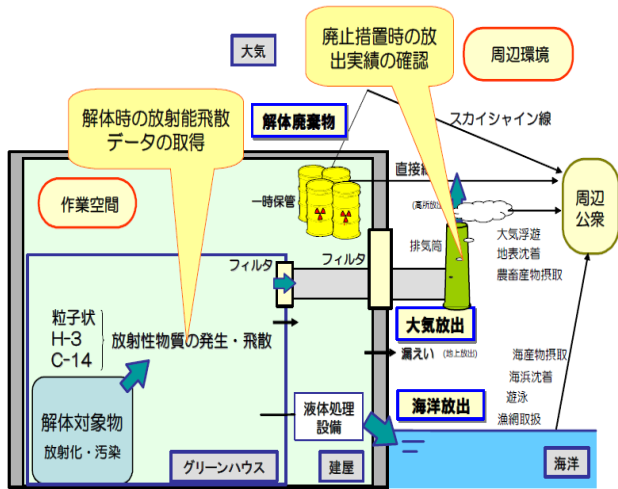
雖然將用過核燃料及核燃料移出後，輻射值會隨之降低，但拆除受污染設備時，還是須特別留意污染物質的動向。即，有有必要注意：防止放射性物質向外擴散，選擇適當的施工方法、善用既有的間隔牆壁及過濾器設備、以及充分運用設備以防止污染擴大等。

另外，對於設施內從業人員的輻射防護，應考量反應器內具高放射性濃度設備的拆除作業，實有必要採取適當的輻射防護措施。

拆除作業開始前，也應先評估分佈於設施內的放射性物質，並依據放射性物質的劑量，分別進行正常拆除時與事故發生時的民眾曝露評估，並加以確認其安全性。

尤其是核子反應器設施，因放射性物質大多會集中在反應器本體與其周圍附近，故有必要在確保安全的情況下，進行評估拆除的方法，這點非常重要。

關於曝露評估，則參考原子力安全委員會以使用中設施作為評估對象的導則。



圖二十一、正常民眾曝露之基本觀念^[43]

隨著解體與拆除工程的進行，會產生放射性廢棄物，故事前需先規劃好具體的處理與處置方法，以及事後的處置場及保管所等。進行拆除工程時，也應依廢棄物的放射性物質濃度、特性等區分作適當處理、處置，並確實掌握其流程。

不過，由於核子反應器設施分有許多類型，如實驗用反應器等，污染程度及範圍不盡相同。因此，屏蔽、換氣設備及污染防護牆等方面，其確保安全程度也大不相同。除此此外，製作、加工及再處理設施等所謂的核燃料循環設施亦有許多類型，其輻射種類(Inventory)也多，故有必要針對每一個設施的種類，考量確保安全的對策。尤其是含有長半衰期的核種，特別需要考慮到拆除時，於反應器內部的曝露等。

除了針對輻射安全，例如：高處作業對策、石棉及PCB等有害廢棄物、防火對策、觸電防護對策，以及粉塵干擾對策等一般安全方面，亦需有充分考量。

基於確保安全，在處理解體中之放射性物質以及進行各項作業時，應維持並管理必要廠房、設備及機器之所需運轉期間及系統功能，這點非常重要。另外，放射性物質會隨著施工的進行而移動到過濾器，故須試圖維持及管理包括過濾器等在內的換氣設備及輻射管理設施等。

4.3 美國在高活度廢液處理與減廢之技術分析整理與分類

4.3.1 美國概況及審查方面的組織、程序和作法^{[50],[52]}

目前美國已有33組核能電廠(含小型發電用反應器)永久停止運轉，其中12組完成除役、10組處於屏蔽隔離/安全貯存中、6組進行除役中，其餘分別為廠址開放準備中或安全貯存準備中。

除役的方式，基本可分為「立即拆除(DECON)」，「安全貯存(SAFSTOR)」及「長期封存(ENTOMB)」等3種。其中又以立即拆除方式(需要5~10年)或安全貯存方式(需要30~50年)為主流。就法令上原則而言，僅規定應於60年內完成除役，故可選擇2種方式。另外，從經濟的觀點來看，立即拆除方式較為符合效益，但亦有核能電廠考量到用過核燃料及放射性廢棄物的貯存地點、處置場尚未完備，而選用安全貯存方式。近年來，有部分的核能電廠為趕在熟悉電廠設備及操作方面的專業人員退休前，而決定提前除役。

美國的管制法規：美國核能管制的聯邦法規是將權限授予各州的聯邦政府及機關，以一般規定的形式，通過立法(聯邦規定)施行法令。核物質處理與利用之相關的聯邦法規，即核能法(AEA)是將許認可權限授予核能管制委員會(NRC)，其遵照聯邦規定法令之第10項(10 CFR: NRC 規定)，經由各項管制的實施，施行法令。這些NRC規定並透過NRC所出版的法規指引(RG)、NUREG等管制導則，以及業界出版的國家工業規格等，進行了內容上的補全。

依據美國核管會(NRC)規定，當經營者決定永久停止運轉時除役程序開始，除役程序由數個主要步驟所構成，包括通知、停止運轉後除役活動報告(PSDAR)提交與審查、執照終止計畫提交與審查、執照終止計畫執行及除役完成。

美國聯邦規定中與核能發電設施除役有關的法規包含：第10項(10 CFR: 能源)、第29項(29 CFR: 勞工)、第40項(40 CFR: 環境保護)，以及第49項(49 CFR: 運輸)。10 CFR，一般稱作NRC規定，是規定許認可基準(含安全基準)的施行法。核能法依此規定，透過NRC所進行的諸多管制，施行法令。

這些規定中確立了所有與除役相關的規定，包括：除役許認可、輻射防護、副產物物質許認可、低放射性廢棄物的包裝、運送及處置等。訂定核能設施除役一般要件的相關規定之「除役措施規定(Decommissioning Rule)」，其Part 30、40、50、70及72係以適用於取得NRC許認可的核設施，為其制定目的。依除役規定之要求，制定適當的除役計畫，並經由實施該除役計畫終止執照，使得廠址解除管制，得以無限制使用。

美國法規中10CFR Part 61放射性廢棄物掩埋的執照要求包含四項功能性目標，其詳細內容請參考相關參考文獻^[53]，不在此贅述。

放射性廢棄物掩埋的執照要求中10CFR 61.55的現行放射性廢棄物分類準則最為重要，合法強制監管期間須建立運轉限制濃度值以達成ALARA(As Low As Reasonably Achievable)目標。高活度廢液經過分離及減容處理後之廢液，如達可排放至周圍環境標準得進行排放。至於分離過程中衍生之高活度分離組件則需進一步壓縮減容、固化，並暫時置放場區內等候後續處理，待除役結束前再搬出廢棄設施。

低放射性廢棄物係指高放射性廢棄物(用過核燃料)以外的放射性廢棄物，依「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第3條規定，依其放射性核種濃

度分類為：A 類、B 類、C 類、超 C 類。

表四、單一長半衰期低階放射性廢料核種濃度值^[52]

核種	濃度值
C-14	8Ci/m ³
C-14 (活化金屬內)	80Ci/m ³
Ni-59 (活化金屬內)	220Ci/m ³
Nb-94 (活化金屬內)	0.2Ci/m ³
Tc-99	3Ci/m ³
I-129	0.08Ci/m ³
TRU(半衰期大於5年之超鈾α核種總和)	100nCi/g
Pu-241	3,500nCi/g
Cm-242	20,000nCi/g

表五、單一短半衰期低階放射性廢料核種濃度值^[52]

核種	濃度值(Ci/m ³)		
	第一行	第二行	第三行
半衰期小於5年之所有放射性核種總和	700	N/A	N/A
H-3	40	N/A	N/A
Co-60	700	N/A	N/A
Ni-63	3.5	70	700
Ni-63 (活化金屬內)	35	700	7,000
Sr-90	0.04	150	7,000
Cs-137	1	44	4,600

- A類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度低於(含)表四濃度值之十分之一倍及低於(含)表五第一行之濃度值者；或廢棄物所含核種均未列入表四及表五者。
- B類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度高於表五第一行之濃度值且低於(含)第二行之濃度值者。
- C類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度高於表四濃度值十分之一倍且低於(含)表三之濃度值者；或高於表五第二行之濃度值且低於(含)第三行之濃度值者。
- 超C類廢棄物：指低放射性廢棄物所含核種濃度高於表四之濃度值者；或高於表五第三行之濃度值者。

放射性廢棄物(含運轉中會產生的物質)必須依照其性質及輻射等級，進行容積減少、固化等處理後，先臨時保管於貯存庫，待除役結束前再搬出廢棄設施；另外，必須在開始進行反應器區域解體拆除工程前，先確定棄置地點，若無法確定時，則應延長安全貯存期間，而不需以放射性物質處置的物質及非放射性的廢棄物，則應盡可能再次利用。除役產生大量各式各樣物質類型，這些物質能被以放射性廢棄物處理與處置或被除污

後作為非放射性物質釋出，因此核設施除役階段廢棄物管理比運轉階段更具有挑戰性。

法規指引：NRC 為補全聯邦政府法規條例，出版了(RG：Regulatory Guide)及 NUREG 法規指引。RG 履行 NRC 的特定條例外，還是一份詳細記載 NRC 人員使用手法的導則書，以評估讓 NRC 人員能接受的具體方法、界定問題及假想事故；NUREG 則是記述與管制問題相關之技術性準則的報告書。詳細內容請參考相關參考文獻^[52]，不在此贅述。

4.3.2 執照終止之放射性準則^[52]

10 CFR Part 20 主要是針對執照終止之放射性準則的相關規定，共有六個小節；10 CFR Part 50.82 “Termination of License” 主要為針對執照終止之相關規定，摘錄針對動力用核子反應器之相關規定。其詳細相關規定重點內容請參考相關參考文獻^[52]，不在此贅述。

4.4 加拿大在高活度廢液處理與減廢之技術分析整理與分類

4.4.1 加拿大概況及審查方面的組織、程序和作法

目前加拿大已有 6 座核能電廠永久停止運轉並進行除役中，其餘分別為廠址開放準備中或安全貯存準備中。

加拿大地大物博，在世界各國土地面積中，其大小僅次於俄羅斯，且加國天然資源豐富，能源方面除有充沛水力之外，還蘊藏化石及鈾等礦產，電力供應不但能自給自足，還能輸出到其他國家(如臨近的美國)，在此優渥的條件下，現今核能發電扮演的角色雖然僅佔整體電力之一成五左右，但加拿大在規劃長期整體能源混比及未來推展乾淨能源(如風力、天然氣取代煤炭等)的同時，核能仍是其多樣化能源選項中的一環。

與世界各擁有核能發電的國家相同，加拿大政府在日本福島事件發生後也迅速地因應並採取加強核能安全的措施，雖然核能安全管理主管機關(CSNC)專案小組最後的結論顯示加拿大核能電廠是安全的，對於民眾安全、健康或環境的風險是輕微的，且發生具類似日本那種威脅性地震的機會幾可忽略，然而從長期全國性民意對核能支持不到 5 成的調查結果顯示，政府的努力似乎並沒有產生太多的作用(除了具有九成以上核能機組所在的安大略省之外)。

加拿大是擁有大量製造核能及核子武器的能力卻拒絕生產核子武器的第一個國家，並積極參與國際提倡核能和平用途的活動。而加拿大之核能屬於聯邦政府管轄的範疇，聯邦政府結構如圖二十二所示。它的角色包括了研究與發展，以及監管在加拿大所有的核子材料和核子活動。對於加拿大境內的核子活動，政府最優先考慮其對健康、安全及環境的影響。政府已經建立了完善的立法框架，著重於保護健康、安全及環境。相關法令如下：

- 與監管有關的「核能安全及管制法(Nuclear Safety and Control Act)」
- 與核子研究與發展有關的「核能法 (Nuclear Energy Act)」
- 與廢棄物有關的「核燃料廢棄物法(Nuclear Fuel Waste Act)」
- 與責任有關的「核子責任法案(Nuclear Liability Act)」

雖然聯邦政府對核能有重要的責任，投資發電的決定權在省級政府。它是由各省與相關省級能源機構/能源設施一致決定是否應該建立新的核電廠。加拿大政府認為核能是多元化能源結構中的重要組成。它已經採取必要的評估，以確保長期發展核能作為永續性的能源，以符合我們現在及未來對能源的需求。如果管理得宜，核能可以有效並明顯促進永續發展目標。加拿大的核能計劃是加拿大經濟和能源結構的重要組成。

加拿大自然资源部(Natural Resources Canada)促進加國天然資源的永續發展和合理使用。它負責確保加拿大能源的未來，透過制定政策和計劃，來提升加拿大人的經濟和環境福祉。加拿大自然资源部的能源局(Energy Sector)負責制定加拿大所有能源的政策。核能組(Nuclear Energy Division)屬於能源局內的單位，負責制定和執行加拿大政府的核能政策。它在能源政策上提供意見，以及加拿大核能產業的組織、立法及財政架構。並與鈾和放射性廢物組(Uranium and Radioactive Waste Division, URWD)緊密合作。

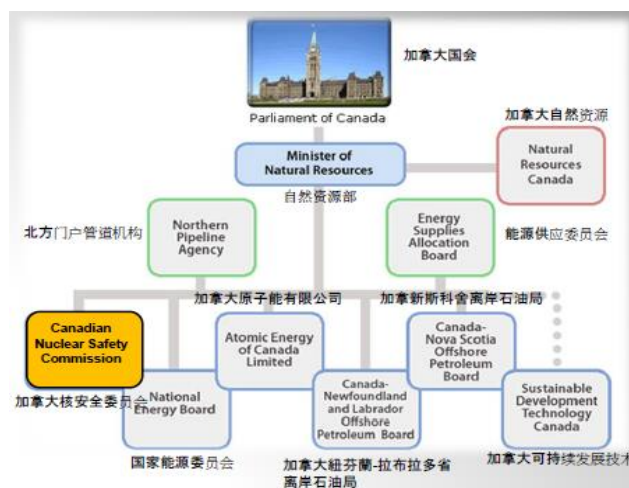
有兩個組織在加拿大的核能計劃中發揮關鍵作用，他們透過自然资源部部長對加拿大議會報告。這兩個組織為：

(1)加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)是隸屬於加拿大政府的獨立的核能監管機構。CNSC 的使命是監管核能及核子材料的使用，以保護健康、安全及環境，並尊重加國和平利用核能的國際承諾。依據核能安全及控制法，CNSC 於 2000 年 5 月成立，提供一個反映健康、安全及環保科學新知的現代監管架構。加拿大是少數具有完整的核燃料生產及發電整個過程的功能性基礎設施的國家，CNSC 已經成功管制加拿大核能產業超過 60 年的時間。

(2)加拿大原子能有限公司 (Atomic Energy of Canada Limited, AECL)成立於 1952 年，是發展核能和平應用的國營企業(Crown Corporation)。它的任務包含兩個不同的作用：公共政策及商業的作用。公共政策的作用包括：進行核子研究及發展、生產醫學用的同位素、核廢料管理。大多數的研發活動都在喬克河實驗室(Chalk River Laboratories)進行，該所設有國家研究通用反應爐(National Research Universal Reactor)。而其商業作用是設計、開發、應用並整修採取加壓重水反應爐(Pressurized Heavy Water Reactor)技術(CANDU)建造的核子反應爐系統。AECL 提供產品及服務給全世界的核子機構。它的 4800 名員工提供尖端核子服務、研發、設計和工程、施工管理、專業技術、廢料管理，以及支援 CANDU 反應爐產品的退役。

加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety

Commission, CNSC)負責監管加拿大的核能產業，保護環境、加拿大居民的健康及安全，並履行加拿大和平地運用核能的國際義務，CNSC 管制核能及材料的運用。CNSC 成立於 2000 年，依據核能安全管制法 (Nuclear Safety and Control Act)，其經由自然資源部長 (Minister of Natural Resources) 向國會報告。CNSC 的成立是為了取代 1946 年成立的原子能管制局 (Atomic Energy Control Board, AECB)。CNSC 的授權審理委員會 (Commission Tribunal) 最多指定 7 名常任理事成員 (permanent member)，他們的決策將由超過 800 名員工來落實。這些員工根據法規的要求去審查執照的申請，並向委員會提出建議，強制執行核能安全管制法、條例，以及任何 CNSC 所要求的條件。



圖二十二、加拿大聯邦政府結構^[28]

根據核能安全管制法，CNSC 有四大任務，包括：

- (1)監管加拿大核能的開發、生產及使用，以保護環境、健康及安全；
- (2)監管核物質的生產、持有、使用及運輸，以及規定設備的生產、持有、使用和規定資訊；
- (3)履行包括核能及物質的開發、生產、運輸和使用的國際管制措施，包括不擴散核子武器和核爆炸裝置的措施；
- (4)宣傳 CNSC 相關活動的科學、技術和管理資訊，以及核物質的開發、生產、持有、運輸及使用對環境、人民的健康和安全的影響。儘管大多數人想到核能產業，第一個就想到核能發電廠，還有其他與核子有關但在不同形式的核子設施下進行的各類活動。

下列為 CNSC 所管制的機構，從連結中可得知更多關於不同產業的資訊，包括主要的 CNSC 持照公司及相關規章：

- 核能發電廠
(<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/about/regulated/powerplants/>)
- 重水生產工廠
(<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/about/regulated/heavywater/>)

- 鈾礦及製造廠
(<http://nuclearsafety.gc.ca/eng/about/regulated/minesmills/>)
- 處理及研究設施)
http://nuclearsafety.gc.ca/eng/about/regulated/processing_research/)
- 核物質和放射裝置
(http://nuclearsafety.gc.ca/eng/about/regulated/nuclearsubstance_radiation/)
- 加拿大的放射性廢料管理
(http://nuclearsafety.gc.ca/eng/about/regulated/radioactive_waste/)

CNSC 的監管架構中的組成可分為兩大類：要求 (Requirements) 及指導原則 (Guidance)。

(1)要求：具強制性，持照人或申請人必須符合這些要求才能取得或者繼續持有執照或證書，以使用核材料或運作核能設施。要求的監管工具包括：

- 核能安全管制法：成立 CNSC 的法案，並授予 CNSC 監管核能產業的權力。
- 法令規章：制定法定要求。
- 規範性文件：提供比規章更詳細的規定，持照人及申請人必須達成這些規定，以符合 CNSC 的規定需求。

(2)指導原則：對持照人及申請人提供指引，以符合 CNSC 所要求的方向。指導原則的監管工具包括：

- 指導文件：對持照人及申請人提供實際地指導，以符合 CNSC 的監管要求。
- 工作人員審查程序 (Staff Review Procedures)：CNSC 工作人員進行監管審查時所使用的內部工作文件。工作人員審查程序確保監管審查的一致性。
- 資訊文件 (INFO-Documents)：提供廣大公眾及其他利益相關者用白話文描述核能的相關問題、監管要求及過程的出版品。資訊文件也提供支持及監管架構的其他進一步資料。

依據加拿大環境評估法 (Canadian Environmental Assessment Act) 及其條例，由 CNSC 負責環境評估，以確保核能計畫對環境是安全的。在這些計畫開始實行之前，透過環境評估來預測提議計畫對環境的影響。環境評估提供了公眾參與 CNSC 或持照公司活動的機會，包括與原住民磋商 (Aboriginal consultations)。CNSC 的環境評估過程與其他聯邦部門和機構的評估過程不同，因為授權審理委員會負責作出大部份的環境評估決定。環境評估的過程是由環境、社會經濟和文化議題的觀點，全面的檢視提議的計畫。環境評估幫助決策者考慮環境因素，以及可能對原住民團體和公眾的潛在影響，因此能有助於減少或避免對環境的潛在不利影響。環境評估提供公眾及原住民參與的機會。團體或個人皆可基於對當地及傳統知識的瞭解，針對提議計畫的地點、潛在環境影響及噪音問題提供重要訊息，並提出問題。這有助於提升環境評估的品質。

環境評估的類型有 3 種：篩選 (Screenings)、綜合研究 (Comprehensive studies) 和審查小組 (Review panels)。每一種類型都提供系統的方法來記錄提議計畫對環境的影響，並確定是否需要消除或減輕產生的負面影響，是否需要修改計畫或建議作更進一步的評估。篩選法通常用於不太可能對環境造成重大不利影響的計畫。綜合研究通常用於大型複雜的計畫，有可能對環境產生重大不利影響，而且也可能造成公眾關注及擔憂的計畫。如果提議計畫可能對環境產生重大不利的影響，或如果它的潛在影響是不確定的，或者為公眾所關注，則送交擬訂計畫給審查小組或調解員。審查小組是由具有專門知識經過篩選的專家團隊所組成，審查小組進行環境評估後會提交建議給環境部長 (Minister of the Environment) 以及主責機構 (Responsible Authority, RA)，作為他們做決策的參考。主責機構主要的角色是負責監管計畫，並確保環境評估完成的聯邦政部門或機構。聯合審查小組是由聯邦政府、其它層級政府或機構如 CNSC 等共同對計畫作審查而組成的。通常聯合審查小組是在瞭解備忘錄 (Memorandum of Understanding) 下成立，並在公眾檢驗後才作最後的決定。

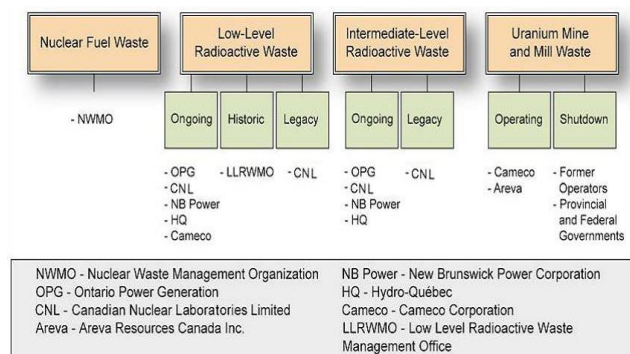
環境評估也有助於決定替代方案、方法或地點，以及其他進行計畫的方式，以幫助減少任何對環境的潛在不利影響。環境評估會考量社區重視的環境特點及品質。這包含評估環境因素 (如空氣、水和土地) 及人類因素 (也就是人類健康、交通及原住民權益)。

後福島事故之安全加強安全運轉是所有國家核能工業界之最高優先度，正如所有具有核能發電國家一般，加拿大核能安全委員會(CNSC)於 2011 年 3 月 11 日發生日本福島第一核能電廠事故後，立即成立專案小組，針對境內核能電廠進行安全評估並於同年 10 月發表專案報告，從這份報告中可以綜觀加拿大針對福島事故所採取的一系列做為。首先在福島事故後立即做為包括：啟動位於首都渥太華的緊急運轉中心，以 24 小時輪班的方式監看事故發展的狀況並收集早期性的評估報告，以提供正確資訊給加拿大政府相關單位。CNSC 並要求各核子設施持照者應立即對照本次事故之經驗，檢查各核能電廠救援設施之整備性(readiness)，此檢查需涵蓋地震預防、消防能力評估、後備電源、減緩氬氣效應及照射過燃料區之冷卻。另外亦建立專案小組來評估各電廠對於事故狀況之運轉、技術、法規要求符合性以及緊急應變計畫的妥適性。依據前述專案小組的報告其再評估的範圍包括 7 項：確認廠外事件的強度、事故基準事故的適切性、考量超越基準事故的狀況、執行嚴重核子事故處理的情形、持照者的緊急應變計畫、加拿大全國性的核子緊急應變管理、及加拿大核能安全委員會的架構及管制流程。CNSC 報告也強調，檢視此 7 項再評估範圍的精神仍是以深度防禦(defense-in-depth)的策略為主，亦即必須確保第一線的防護和控制功能得以發揮，以便能利用實體屏蔽來確實保障放射性物質不被外釋；即使萬一失效，仍有適當的方法來偵側、補救、及改正，以保護大眾安全。CNSC 專案小組最後的結論顯示加拿大核能電廠是安全的，其影響到民眾安全、健康或環境的風險是輕微的，專案小組並確認各電廠距離各海底板塊都相當遙遠，因此發生具威脅性地震的機會幾可忽略。

至於其他專案小組所做出的改善建議，例如防止未經過濾的排放、提升氫氣及其他可燃氣之控制能力、設備及儀器之妥適性及存活性、核安及輻防法規之強化等事項，將可進一步合理地降低核子事故的風險。

加拿大核廢料管理方面完成中低級放射性廢料長期儲存：主要包含 2012 年 1 月 24 日成立了聯合評估專家組；2013 年 9 月開始了為期 4 周的建築許可證環境評估公開聽證會；成立歷史管理站：希望角—格蘭比角，建造長期廢料管理設施(高級廢料及核燃料長期儲存)；2010 年 5 月開始進行網站選擇，有 21 個社區有興趣參與，其中薩斯卡通省 3 個社區，安大略省 18 個社區。

加拿大之核廢棄物規劃：加拿大用過核燃料及放射性廢料之長期管理權責機關，如圖二十三所示，其中加拿大之中低階核廢棄物之處置係由各電力公司及加拿大原子能公司(Atomic Energy Canada Limited, AECL)負責，目前廢棄物均暫存於各設施之地表位置。安大略電力公司(OPG)於 2005 年起在該公司所屬西部廢棄物處置場，規劃一座深層地底儲存場，預計可容納 20 萬立方公尺的中低階核廢棄物，此計畫已於 2011 年 4 月送出執照申請書給加拿大核能安全委員會(CNSC)審查，目前此項審查作業仍在進行中。預估在取得 CNSC 執照許可後，可望於 2018 年開始營運，以儲存位於安大略省 20 部機組(18 部運轉中，2 部永久停機)所產生之所有中低階核廢棄物。至於在用過核子燃料之高階廢棄物處置方面，根據核子燃料廢棄物法之規定指出，2002 年由加拿大電力公司及 ACEL 共同成立了加拿大核廢棄管理機構(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)，主要職責為開發各種儲存及廢棄可行方案，並提供給政府決定，以後續實施處置作業。NWMO 於 2005 年公佈 3 種設計概念及技術選項，首先是在現有 7 個電廠廠址中延長乾式貯存設施的放置年限，NWMO 評估是可行的；其次是開發集中式的長期儲存設施，基本與 12 個已經在使用中的國家類似；最後的選項則是深層地底最終處置場，且必要時仍可以取出核子用過燃料再做處置。此一深層處置的方式，又被稱做是最佳階段式管理(Adaptive Phased Management)，已於 2007 年為加拿大政府所接受，而 NWMO 則於當年指出安大略、魁北克、新伯倫瑞克、或薩克其萬省需自願性設置此最終處置場。目前約有 21 個場址在 NWMO 的評估中，預計 5 年內會縮小範圍到最後 1-2 地點，而開始營運的時間預估為 2035 年。



圖二十三、加拿大用過核燃料及放射性廢料之長期管理權責機關^[47]

加拿大預測 2010 年與 2050 年之各式核廢棄物存量如表六所示，顯示在約 40 年期間，其核廢棄物容量並沒有顯著增加，代表加拿大政府非常積極進行核廢棄物減容處理。至於，中低階核廢棄物及用過核子燃料之處置原則上將採用地底深層儲存的方式，此方法與世界主要國家也類似，目前中低階核廢棄物處置場正積極由管制機關進行審查中，而最終處置場規劃開始運轉的時間為 2035 年，相當具有挑戰。我國未來或可以邀請加國專家，或是主管核廢棄物處置專責機構(NWMO)人員，彼此交換管制法規及實務經驗，吸取該國的長處，做為規劃我國核廢料處置的參考。

表六、加拿大核廢棄物存量預測(2010 年 vs 2050 年)^[47]

Waste category	Waste inventory to end of 2011	Waste inventory to the end of 2050
High-level radioactive waste (used nuclear fuel)	9,075 cubic metres	20,000 cubic metres
Intermediate-level radioactive waste	32,906 cubic metres	67,000 cubic metres
Low-level radioactive waste	2,338,000 cubic metres	2,594,000 cubic metres
Uranium mill tailings	214,000,000 tonnes	Not available

Source: Inventory of Radioactive Waste in Canada, LLRWMO, March 2012

從加拿大核能安全委員會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)的網站資料得知：高活度廢液經過分離及減容處理後之廢液，如達可排放至周圍環境標準得進行排放。至於分離過程中衍生之高活度分離廢棄物(固體或液體)則需進一步壓縮減容、固化於儲放桶或容器內，並暫時置放場區內等候後續處理，待除役結束前再搬出廢棄設施。

4.4.2 加拿大除役計畫導則^[53]

本法規指引為了加拿大核能安全委員會(CNSC)在加拿大所授權核准之作業，提供關於除役計畫預備工作之導則。本指引亦提供在法規指引 G-206(Financial Guarantees for the Decommissioning of Licensed Activities)中所討論的計算財務保證之基礎。詳細內容請參考相關參考文獻^[53]，不在此贅述。

IV. 結論

台灣的土地面積狹小，天然資源貧乏，且高度仰賴進口能源，加上政府減少排碳的承諾，此時更不應輕易放棄包含核能在內任何一項可以使用的能源。世界擁有核能發電的國家政府(包含台灣)，在日本福島事件發生後，已經迅速地因應並採取加強核能安全的措施。台灣的核能安全管理相關主管機關(原能會)強調核能電廠仍是安全的，對於民眾安全、健康或環境的風險是輕微的，且發生類似日本那種威脅性地震的機會幾可忽略。然而從長期全國性民意對核能支持調查結果顯示，我國政府的努力似乎對民意並沒有產生太多的作用，然而，在面臨如此強大的反對核能民意壓力下，政府似乎仍應該思考如何有效地傳遞正確的訊息給民眾，減輕大眾的疑慮。

日本東京電力公司(Tokyo Electric Power Company, TEPCO)的福島第一核電廠(Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant)於 2011 年 3 月 11 日發生事故後，全世界處

理固態、液態、氣態等放射性廢料優良技術齊聚一堂，應該可說是「精銳盡出」，加上日本東京電力公司必須公開資訊，應該可以從中搜尋到一些平時廠商保密又寶貴的技术與經驗，作為除役時放射性廢料處理的借鏡。

在蒐集、分析、整理眾多處理放射性廢液之相關資料中顯示：薄膜分離技術對放射性廢液之處理具備高去污因子、高減廢、低耗能的優勢；同時薄膜分離系統相當簡易，在適合的溫度和壓力條件下即可進行操作。而透過「薄膜分離技術」可將無可避免之高活度放射性廢液進行減容處理將是非常必要之措施，當然期間減容後殘留之其他高活度廢棄物(固體或液體)將進行隔離置放，並考慮後續最終儲放處理。日本東京電力公司採用日本東芝(Toshiba)公司及美國 Kurion 公司推出之「多核種除去設備 (Multi-nuclide Removal Equipment), ALPS, Advanced Liquid Processing System)」技術，進行放射性廢液處理，除了氫以外可除去 62 種放射性物質。至於廢液中之氫去除，乃採用美國 Kurion 公司推出之輕水聯合電解催化交換(CECE, Combined Electrolysis Catalytic Exchange)技術。鑒於國內核能電廠除役時，亦產生放射性廢液，建議國內除役作業相關單位能預先了解此二項技術。

目前世界主要使用核能的國家，對中低階核廢棄物及用過核子燃料處置，原則上均採用地底深層儲存的方式，且中低階核廢棄物處置場正積極由管制機關進行審查中。我國未來或可以邀請主要使用核電的各國專家，或是主管核廢棄物處置專責機構人員，彼此交換管制法規及實務經驗，吸取該國的長處，做為規劃我國核廢料處置的參考。

參考文獻

- [1] <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/ShutdownReactorsByCountry.aspx>.
- [2] Grażyna Zakrzewska-Trznadel, “Advances in membrane technologies for the treatment of liquid radioactive waste”, Desalination, 321(2013) 119-130.
- [3] Leonard D. Tijing, Yun Chul Woo, June-Seok Choi, Sangho Lee, Seung-Hyun Kim and Ho Kyong Shon, “Fouling and its control in membrane distillation—A review”, Journal of Membrane Science, 475(2015) 215-244.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_technology
- [5] D. Rana, T. Matsuura, M.A. Kassim, A.F. Ismail, “Radioactive decontamination of water by membrane processes — A review”, Desalination, 321 (2013) 77-92.
- [6] Enrico Drioli, Aamer Ali, Francesca Macedonio, “Membrane distillation: Recent developments and perspectives”, Desalination 356 (2015) 56-84.
- [7] Kuniyoshi Soda, “Safety regulation and activity of NSC for disposal of radioactive waste”, National Report of Japan for the Fifth Review Meeting at Toyo University, Tokyo, Japan, on February 23, 2010.
- [8] A.W. Mohammad, Y.H. Teow, W.L. Ang, Y.T. Chung, D.L. Oatley-Radcliffe, N. Hilal, “Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects”, Desalination 356 (2015) 226-254.
- [9] Senliang Liao, Chunfeng Xue, Yonghong Wang, Junlan Zheng, Xiaogang Hao, Guoqing Guan, Abudula Abuliti, Hui Zhang, Guozhang Ma, “Simultaneous separation of iodide and cesium ions from dilute wastewater based on PPy/PTCF and NiHCF/PTCF electrodes using electrochemically switched ion exchange method”, Separation and Purification Technology 139 (2015) 63-69.
- [10] Nicolas Combernoux, Luc Schrive, Véronique Labed, Yvan Wyart, Emilie Carretier, Adeline Benony-Rhodier, Philippe Moulin, “Study of polyamide composite reverse osmosis membrane degradation in water under gamma rays”, Journal of Membrane Science 480(2015)64-73.
- [11] Lan Zhang, Jiying Wei, Xuan Zhao, Fuzhi Li, Feng Jiang, Meng Zhang, “Strontium(II) adsorption on Sb(III)/Sb₂O₅”, Chemical Engineering Journal 267 (2015) 245-252.
- [12] Satyabrata Mishra, Falix Lawrence, C. Mallika, N.K. Pandey, R. Srinivasan, U. Kamachi Mudali, R. Natarajan, “Kinetics of reduction of nitric acid by electrochemical method and validation of cell design for plant application”, Electrochimica Acta 160 (2015) 219-226.
- [13] Pankaj Kandwal, Prasanta Kumar Mohapatra, “A highly efficient solvent system containing chlorinated cobalt dicarbollide in NPOE-Dodecane mixture for effective transport of radio-cesium from acidic wastes”, Journal of Membrane Science 469(2014) 59-66.
- [14] Wuhua Duan, Jing Chen, Jianchen Wang, Shuwei Wang, Xiaogui Feng, Xinghai Wang, Shaowei Li, Chao Xu, “Application of annular centrifugal contactors in the hot test of the improved total partitioning process for high level liquid waste”, Journal of Hazardous Materials 278 (2014) 566-571.
- [15] Salem Alzahrani, Abdul Wahab Mohammad, “Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: A review”, Journal of Water Process Engineering 4 (2014) 107-133.
- [16] Takeshi Nishimura, Harutaka Hoshi, and Akitoshi Hotta, “Current research and development activities on fission products and hydrogen risk after the accident at Fukushima Daiichi nuclear power station”, Nuclear Engineering Technology, 147(2015) 1-10.
- [17] P. Jagasia, P.K. Mohapatra, D.R. Raut, P.S. Dhami, V.C. Adya, A. Sengupta, P.M. Gandhi, P.K. Watal, “Pertraction of radio-cesium from acidic feeds across supported liquid membranes containing calix-crown-6 ligands in a fluorinated diluent”, Journal of Membrane Science, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2015.02.037>.
- [18] F. Zare, M. Ghaedi, A. Daneshfar, Shilpi Agarwal, Inderjeet Tyagi, Tawfik A. Saleh, Vinod Kumar Gupta, “Efficient removal of radioactive uranium from solvent phase using AgOH MWCNTs nanoparticles: Kinetic and Thermodynamic study”, Chemical Engineering Journal, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.002>
- [19] Dien Li, Daniel I. Kaplan, Anna S. Knox, Kimberly P. Crapse, David P. Diprete, “Aqueous ⁹⁹Tc, ¹²⁹I and

- ¹³⁷Cs removal from contaminated groundwater and sediments using highly effective low-cost sorbents”, *Journal of Environmental Radioactivity* 136 (2014) 56-63.
- [20] François Caron, Stefan Siemann, Rémi Riopel, “Characterization of the Natural Organic Matter (NOM) in groundwater contaminated with ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs using ultrafiltration, Solid Phase Extraction and fluorescence analysis”, *Journal of Environmental Radioactivity* 138 (2014) 331-340.
- [21] Bimala Pangeni, Hari Paudyal, Katsutoshi Inoue, Keisuke Ohto, Hidetaka Kawakita, Shafiq Alam, “Preparation of natural cation exchanger from persimmon waste and its application for the removal of cesium from water”, *Chemical Engineering Journal* 242 (2014) 109-116.
- [22] T.L. Yankovich, K.J. King-Sharp, J. Carr, E. Robertson, R.W.D. Killey, N.A. Beresford, M.D. Wood, “Spatial analysis of Carbon-14 dynamics in a wetland ecosystem (Duke Swamp, Chalk River Laboratories, Canada)”, *Journal of Environmental Radioactivity* 137 (2014) 173-180.
- [23] Ding Chen, Xuan Zhao, Fuzhi Li, “Treatment of low level radioactive wastewater by means of NF process”, *Nuclear Engineering and Design* 278 (2014) 249-254.
- [24] Wuhua Duan, Jing Chen, Jianchen Wang, Shuwei Wang, Xiaogui Feng, Xinghai Wang, Shaowei Li, Chao Xu Institute, “Application of annular centrifugal contactors in the hot test of the improved total partitioning process for high level liquid waste”, *Journal of Hazardous Materials* 278 (2014) 566-571.
- [25] Mamdoh R. Mahmoud, Ayman F. Seliman, “Evaluation of silica/ferrocyanide composite as a dual- function material for simultaneous removal of ¹³⁷Cs⁺ and ⁹⁹TcO₄⁻ from aqueous solutions”, *Applied Radiation and Isotopes* 91 (2014) 141-154.
- [26] Leonard D.Tijing, June-Seok Choi, Sangho Lee, Seung-Hyun Kim, Ho Kyong Shon, “Recent progress of membrane distillation using electrospun nanofibrous membrane”, *Journal of Membrane Science* 453 (2014) 435-462.
- [27] “IAEA international peer review mission on mid-and-long-term roadmap towards the decommissioning of tepco’s fukushima daiichi nuclear power station units 1-4”, mission report, 2013.04.15-22, <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/misionreport230513.pdf>
- [28] François Rinfret, Regulatory Program Director, Canadian Nuclear Safety Commission, “Canada Country Seminar”, April 17, 2014.
- [29] N. Turanov, V.K. Karandashev, V.M. Masalov, A.A. Zhokhov, G.A. Emelchenko, “Adsorption of lanthanides(III), uranium(VI) and thorium(IV) from nitric acid solutions by carbon inverse opals modified with tetraphenylmethylenediphosphine dioxide”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 405 (2013) 183-188.
- [30] Chengyong Li, Maowen Xu, Xiucheng Sun, Shan Han, Xiaofei Wu, You-Nian Liu, Jianhan Huang, Shuguang Deng, “Chemical modification of Amberlite XAD-4 by carbonyl groups for phenol adsorption from wastewater”, *Chemical Engineering Journal*, 229 (2013) 20-26.
- [31] A. El-Shrakawy, Y.Y.Ebaid, W.C.Burnett, SoaadK.Aldaihan, “A rapid and inexpensive method for ²²⁶Ra and ²²⁸Ra measurements of high TDS ground waters”, *Applied Radiation and Isotopes*, 77 (2013) 89-93.
- [32] Jacques de Sanoit, Thuan Quang Tran, Michal Pomorski, Sylvie Pierre, Christine Mer-Calfati, Philippe Bergonzo, “Design of an electrochemically assisted radiation sensor for α -spectrometry of actinides traces in water”, *Applied Radiation and Isotopes*, 80 (2013) 32-41.
- [33] Shu-Chao Wu, Chao-Yang Sun, Wen-Ni Wang, Ying-Ting He, Sheng-Hong Hu, Cun-Jiang Zheng, “Separation of strontium from associated elements with selective specific resin and extraction chromatography”, *Chinese Chemical Letters*, 24 (2013) 633-635.
- [34] Guogang Jia and Jing Jia, “Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology”, *Journal of Environmental Radioactivity*, 106 (2012) 98-119.
- [35] N. Casacuberta, M.Lehritani, J.Mantero, P.Masque, J.Garcia-Orellana, R.Garcia-Tenorio, “Determination of U and Th α -emitters in NORM samples through extraction chromatography by using new and recycled UTEVA resins”, *Applied Radiation and Isotopes*, 70 (2012) 568-573.
- [36] M. In ’es G.S. Almeida, Robert W.Catrrall, Spas D.Kolev, “Recent trends in extraction and transport of metal ions using polymer inclusion membranes (PIMs)”, *Journal of Membrane Science* 415-416 (2012) 9-23.
- [37] Bryce E. Johnson, Peter H. Santschi, Raymond Shane Addleman, Matt Douglas, Joe Davidson, Glen E. Fryxell, Jon M. Schwantes, “Optimization and evaluation of mixed-bed chemisorbents for extracting fission and activation products from marine and fresh waters”, *Analytica Chimica Acta*, 708- (2011) 52-60.
- [38] Ritu D. Ambashta, Mika Sillanpaa, “Water purification using magnetic assistance: A review”, *Journal of Hazardous Materials*, 180 (2010) 38-49.
- [39] L. Benedik, U.Repinc, M. Strok “Evaluation of procedures for determination of Ra-226 in water by α -particle spectrometry with emphasis on the recovery”, *Applied Radiation and Isotopes*, 68 (2010) 1221-1225.
- [40] Ch. Siva Kesava Raju, M.S. Subramanian, “A novel solid phase extraction method for separation of actinides and lanthanides from high acidic streams”, *Separation and Purification Technology*, 55 (2007) 16-22.
- [41] E. Philip Horwitz, Mark L. Dietz, Renato Chiarizia, Herbert Diamond, Sherrod L. Maxwell, III, Matthew R. Nelson, “Separation and pre-concentration of actinides by extraction chromatography using a supported liquid anion exchanger application to the characterization of high level nuclear waste solution”, *Analytica Chimica Acta*, 310 (1995) 63-78.

- [42] Katsumi Ebisawa, "Current status of seismic safety project at JNES", 2010.11.24
- [43] Japan nuclear energy safety organization(JNES)於平成 18 (2006 年)核能電廠除役相關調查報告。
- [44] "Cost Estimation for Decommissioning", OECD 2010 NEA No. 6831, ISBN 978-92-64-99133-0
- [45] 日本獨立行政法人原子力安全基盤機構網站, <http://www.jnes.go.jp/english/>
- [46] 美國核管會網站, <http://www.nrc.gov/>
- [47] 加拿大核能安全委員會網站, <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/readingroom/factsheets/decommissioning-of-nuclear-power-plants.cfm>
- [48] Holger Tietze-Jaensch, Stephan Schneider, Yuliya Aksyutina, Dirk Bosbach, Rene Gauthier and Alexander Eissler, "Principles of Product Quality Control of German Radioactive Waste Forms from the Reprocessing of Spent Fuel: Vitrification, Compaction & Numerical Simulation – 12529", WM2012 Conference, February 26 – March 1, 2012, Phoenix, AZ
- [49] 方湜惠, "超臨界 CO₂ 萃取移除廢水中重金屬之高級淨水技術", 逢甲大學環境工程與科學所, 2001 年碩士論文
- [50] 白寶實、許文勝、李宜娟、楊雋之, "核能電廠除役計畫審查技術之研究", 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告, 2012 年 12 月
- [51] 馬志銘, "參加 2013Waste Management 國際研討會心得報告", 行政院原子能委員會放射性物料管理局出國報告, 2013.04.08
- [52] 裴晉哲, 劉千田, "核能電廠除役廢棄物審查技術之研究", 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告, 2013 年 12 月
- [53] 周鼎, 張淑君, "主要國家核子反應器設施除役相關法規研究", 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告, 2012 年 12 月
- [54] 姚品全, 陳昭睿, "六價鐵於高濃度頑抗有機廢液處理技術之研究", 大葉大學, 行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告, 2010.11.30
- [55] 劉明忠, 邱顯郎, 梁天瑞, 蕭向志, 朱偉朋, 邱垂彥, 方慶隆, 丁宇, 張金和, "考察美國除役中核能電廠", 經濟部出國報告, 2013.02.06
- [56] 楊文都, 林國明, "具金屬螯合功能之表面修飾奈米無機材料的製備與特性分析", 高應大化材系, 行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告, 2010.12.15
- [57] 邱顯郎, 蕭向志, 顏昌發, 張靜, 邱心怡, 謝瑋師, "赴義大利參加 EPRI 核電廠除役會議", 台灣電力公司出國報告, 2012.12.22
- [58] 劉東山, "核能電廠除役", 台電核能月刊, 100 年 5 月 341 期, PP. 16-31
- [59] 張禕庭, "赴日本研習核能電廠稽察管制技術", 行政院原子能委員會出國報告, 2013.10.22
- [60] 核能電廠除役之安全管制規劃, http://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_11_3.pdf
- [61] 施建樑, "核能電廠除役規劃與管理", 核能研究所簡報, 2011.11.08, http://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_11_2.pdf
- [62] 陳鴻斌, "核設施除役及廢棄物管理技術之發展與應用", 行政院原子能委員會 99 年度政府科技計畫期末(成果效益)報告
- [63] 邱太銘, "國外核子動力反應器設施除役概況", 核能研究所簡報, 2012.08.03, http://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_11_1.pdf
- [64] 吳景輝, "歐盟壓力測試同行審查結果及我國核安管制做為", 中華民國核能學會第 29 屆第 1 次會員大會, 2012.12.28, http://www.chns.org/upload/download1/u1358737562_7288b2.pdf
- [65] 王琅琛, "台電公司核能電廠因應福島事故之斷然處置措施說明與介紹", 核能學會清大演講簡報, 2013 年 4 月 25 日, http://www.chns.org/upload/download1/u1369019445_9791ea.zip

化學氧化還原金屬除污以及廢液再生處理系統技術開發

計畫編號：103-NU-E-214-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王詩涵、梁明在

e-mail：shwang@isu.edu.tw

計畫參與人員：王詩涵、梁明在、杜佳簇、蔡東佑、陳亮廷

執行單位：義守大學化學工程學系

摘要

國內核廢料之儲存空間即將用盡，因此核廢料之後續處理為環境永續發展之一大考驗。由於放射性廢棄物主要污染於物質表面，去除物質表面即可達到除污之目的。本研究旨在開發一種高效率之清除金屬表面污染物方法，並應用於後續污染物之清理，以原子吸收光譜儀(Atomic Absorption Spectroscopy)及電位滴定法來分析金屬表面除污效果。本研究以 Ce(IV) 作為氧化劑，並輔以電位，探討不同參數對金屬表面除污速率之影響。分別利用電化學及化學法測得金屬表面除污速率為 $2.5 \mu\text{m/hr}$ 及 $8.4 \mu\text{m/hr}$ ，以化學輔助電化學氧化法測得速率為 $32.7 \mu\text{m/hr}$ 。由實驗結果得知，化學輔助電化學氧化法之除污速率遠大於化學輔助及電化學氧化法，有別於過去化學除污法須於 $40\text{--}50^\circ\text{C}$ 的反應條件，可有效促進金屬表面之除污效率，同時探討以電化學法移除鐵金屬離子移除，並解決後續所產生大量二次廢棄物的問題，可做為未來不鏽鋼除污的參考。

關鍵字：金屬除污、電化學、鈰

I. 前言

於核電廠中因許多物質被放射性污染，尤其在核一、二號機於運轉 40 年必須辦理除役之先期作業規劃，除役時有許多除污工作必須進行，待除污的物質種類很多，其中又以不鏽鋼及混凝土為大宗，本研究配合除役計畫開發不鏽鋼除污技術。

除污方法有許多種，可分為機械-物理法、化學法、電化學、熔煉法、生物法等，但這些技術常交叉使用。於選擇除污技術時，針對不同之待除污物件，包括其形狀、材料種類及性質、污染種類及成份及除污後該物質是否再使用進行評估，除了除污效率外，並須優先考慮其安全性、並有合理之處理成本、儘量減少衍生之二次廢棄物以及其實際應用之可能性，藉由可自動化減少人力操作，藉以避免曝露之危險，期望對人員及環境受到最低之衝擊[1]。

II. 簡介

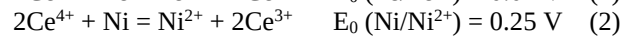
2.1 化學及電化學除污法

本研究以化學法進行不鏽鋼等金屬除污技術之開發，化學法是利用化學藥品溶解移除放射性污染物，並以溶解、氧化/還原、錯合及表面濕潤等方式除去帶有放射性污染物。

傳統有效的化學法大致上分為 two-steps 及 one-step，前者之主要為氧化還原反應，classical oxidation-reduction

process (簡稱 CORD)，其反應步驟包括先以酸、鹼氧化材料表面之氧化步驟，再以錯合物促進還原溶解，其中常用草酸跟進行還原溶解，最後須要以樹脂或強氧化劑分解錯合物及溶出之離子，其主要目的是降低工作區域的輻射劑量，以提高工作人員之安全，並減低污染擴散之風險，常見的方法有 EPRI DFD 程序、HP/CORD D UV 程序、HOP 程序及 T-Ozon 程序[2]，核能研究所已對此類研究有相當經驗，且應用於各國電廠中；後者多利用強氧化劑直接將氧化層及金屬層溶解之，常加入鈰進行反應至不鏽鋼材上，以後者的除污速率較快，常應用於解體後之待除污物質之表面污染物移除，其除污因子(decontamination factor, DF)可達 10^4 [3]。

本質上，化學除污技術為一腐蝕現象，一般在酸中之腐蝕反應如 Fig. 1 之(a)，但其反應慢，最早之氧化還原無機金屬對是以 $\text{Cr}^{6+}/\text{Cr}^{3+}$ 增進表面腐蝕速率，R.E. Lerch 等人，利用 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 之標準還原電位(1.46 V)之特性，作為強氧化劑，催化表面之除污反應，以電廠中常出現之 SS304 為例，其主要之成份為 Fe-Cr 及 Ni 金屬，當 Ce^{4+} 參與反應時，其反應狀況如下所示[4]



由方程式(1)-(3)顯示，因為 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 具有高還原電位，因此很容易對其他金屬進行腐蝕，其反應示意圖如 Fig. 1(b)所示。

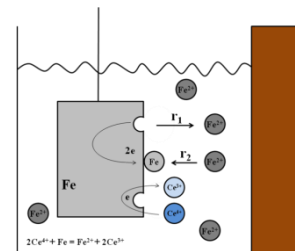


Fig. 1 待除污金屬表面(a)腐蝕及(b)添加 Ce^{4+} 腐蝕反應示意圖

電化學除污為電解拋光技術之應用，當迴路中施加電流時，將待除污之物件連接在陽極上，進行電解拋光，當反應發生時，金屬即氧化溶出，具有放射性污染物則隨之溶出。



電化學除污可有以下三種型式：浸泡式、電解隔離法與電解液抽吸法；無論化學除污技術或電化學除污技術，皆會產生廢液，因此除污劑之再生可減少二次廢棄物生成量，因此如何將被還原成 Ce(III) 再生為 Ce(IV) 成為重

要的課題，亦為本研究所關注重點之一，但安排在未來的研究中進行。

電解液中，除了 Ce(IV) 為重要的課題之外，如何除去反應液中之離子為重要的課題，而反應液中最主要的離子除了銻離子之外，其最大宗的為受污染之金屬片之材料，若以不鏽鋼為例，則以鐵離子及鎳離子為主，隨著反應除污量增加，反應液中之離子濃度並隨之增加，最終達飽和濃度，而影響除污反應之效率，因此如何有效移除主要金屬離子，鐵離子，是一重要的課題。

2.2 金屬離子移除技術

目前廢水處理技術中，金屬離子之移除主要以樹脂吸附或螯合劑處理之，無論是螯合劑或樹脂皆為衍生廢棄物，將製造另一種污染，但其清除效率較高，而電化學反應，可以有效降低二次廢棄物之生成。

在廢水處理的技術中，常用的電化學法進行金屬離子移除的方式，稱為電化學誘導沉澱(electrochemical induced precipitation)，然而其操作 pH 值主要以 $\text{pH} > 2.5$ 為主，於 $\text{pH} > 5.0$ 以上有較高且穩定之移除效率，在本研究中需考慮化學氧化還原法中所使用之反應清潔液，其成分主要以強酸為主，且 pH 極低，在 Fig. 2 鐵之 Pourbaix Diagram 中顯示，當 pH 極低時不易有 Fe(OH)_2 之生成，因此，此種方法不適用於本系統中。

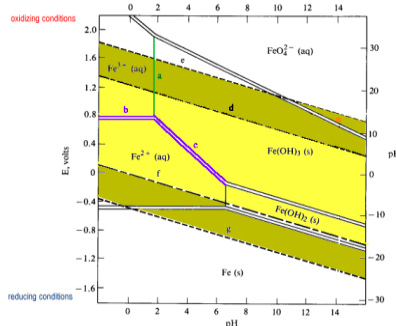


Fig. 2 鐵的 Pourbaix diagram (A. Courtney, 2008)

在 Fig. 2 鐵之 Pourbaix Diagram 中，儘管不同鐵離子濃度影響其沉澱電位，當電位約莫 -0.5 V 時，開始有鐵金屬析出。一般常用鐵為陰極，但因為過電位低，氫氣常伴隨金屬鐵放電吸附於金屬鐵中造成其容易剝落，通常加高溫度降低其氫氣產生量，及可提高其附著力 [5]。

III. 結果與討論

3.1 化學除污法

本研究針對可切割之大量不鏽鋼進行研究，因此除污之效率及是否生成二次廢棄物將為重要評估的對象。由於銻離子及鎳離子對之未來後續處理造成環境衝擊，因此本研究以具有高平衡電位 (1.46 V vs. SHE) 之 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 做為氧化劑，進行金屬表面除污，先測試當純粹化學腐蝕，隨時間變化鐵離子自不鏽鋼中溶出，其腐蝕速度以 1.0 M Ce^{4+} 溶液的最高且穩定，若換算為不鏽鋼之厚度損失 8.4 $\mu\text{m/hr}$ ，如 Fig. 3 (a) 所示。

3.2 電化學除污

若不添加氧化劑，純粹以電化學進行表面腐蝕，分

別以待除污材料做為工作電極，以石墨片為對電極， Ag/AgCl 電極做為參考電極，進行單槽式三電極反應之測試，在 Fig. 4 顯示，當施加電位大於 0.75 V vs. Ag/AgCl 時，即有明顯的氧化電流產生，因此先以 0.8 V vs. Ag/AgCl 之施加電位，以不鏽鋼片為陽極在硫酸中，於室溫下進行電化學腐蝕反應，結果顯示，其腐蝕速率為 2.5 $\mu\text{m/hr}$ ，如 Fig. 3(b) 所示，若純粹在酸中，其腐蝕速率相當低，如 Fig. 3(b) SS/PVC 所示。

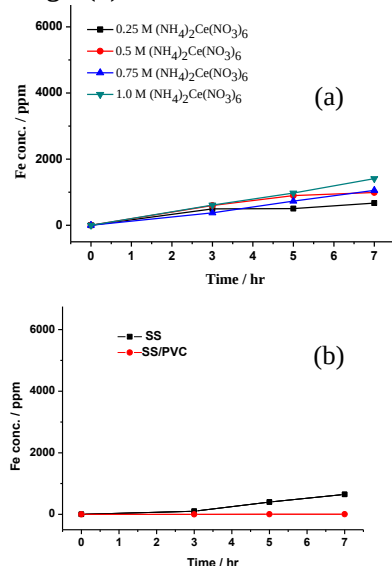


Fig. 3 不同表面腐蝕方法其溶出鐵離子濃度對時間變化之關係圖，(a)化學除污法；(b)純粹電化學除污法。

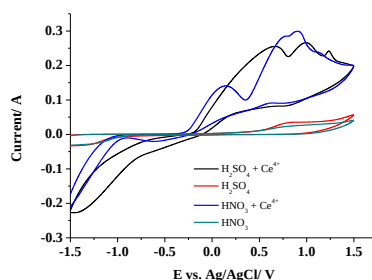


Fig. 4 腐蝕酸溶液中有無添加銻離子之循環伏安圖。

3.3 腐蝕酸液

本研究嘗試選擇硫酸及硝酸進行分析，從塔弗分析 (Fig. 5) 結果顯示，在兩種不同酸，硫酸及硝酸中的腐蝕電位分別為 1.19 V 及 0.83 V，且腐蝕電流在硝酸中約為在硫酸中的 3 倍，顯示在硝酸溶液中較容易進行腐蝕，同時因腐蝕電流大，代表其腐蝕速率較高，在缺氧的狀態，其腐蝕效率較低，因此本研究針對含氧的系統進行除污。

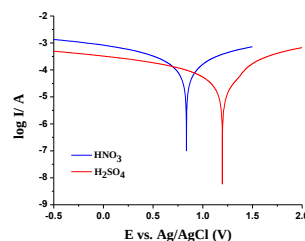


Fig. 5 在不同腐蝕酸液中之塔弗曲線。

3.4 化學輔助電化學除污法

為了增加除污速率，同時探討在不同電解速率及氧化劑濃度隨時間的變化，若是純粹以化學氧化法進行反應， Ce^{4+} 的濃度，250 mM Ce^{4+} 溶液於3 hr以內降至約50 mM以下，使其氧化能力降低，反之若於反應系統中加以電解，0.75 M及1.0 M的 Ce^{4+} 溶液最終仍然可以維持在380 mM以上，可以減緩 Ce^{4+} 的decay率，藉以延長反應液的壽命。

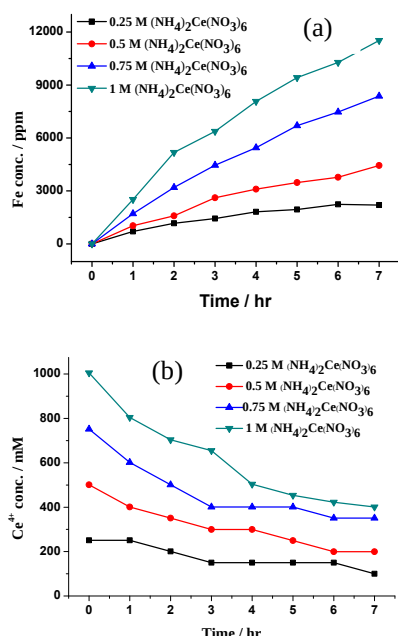


Fig. 6 不同反應溶液對化學輔助電化學氧化除污速率之影響，(a)不同氧化劑濃度對金屬氧化速率之影響；(b) 不同氧化劑濃度之穩定度。

5.5 鐵離子對反應之影響

隨著反應的時間增長，溶液中的鐵離子濃度亦隨之提升，最終將會達到飽和且影響後續表面腐蝕除污的能力，因此針對溶液含有不同鐵離子濃度對表面腐蝕速率進行調查，Fig. 7 結果顯示，當濃度達到約700 mM時，將嚴重影響除污的能力，因此未來在大量不鏽鋼除污之際，須隨時監控溶液中離子濃度

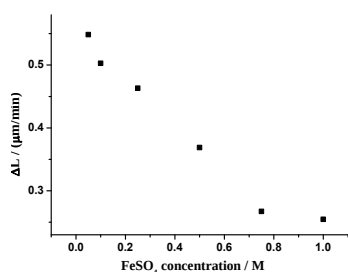


Fig.7 鐵離子濃度對不鏽鋼表面除污能力之影響。

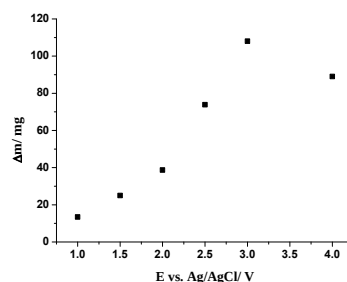


Fig. 8 施加電位與溶液中鐵移除能力之關係

但因為在反應的過程中，藉由電位的施加，將部份的鐵金屬沉積至陰極表面，可使溶液持續保持遠低於飽和狀態，因此若於除污過程中，能將固體的金属廢棄物直接移除，可達到減容的效果，且無須進行過去後續錯合物分解及離子交換樹脂之處理，降低二次廢棄物之產生，惟 Ce^{4+} 之再生需要另案研究，若此可以有效解決目前除役後極大量不鏽鋼除污反應所產生後續二次廢棄物的問題。

5.6 鐵離子之移除

為了避免高濃度鐵離子於溶液中造成除污效率的降低，因此利用電位的施加移除溶液中的鐵離子，使其於陰極析出。利用石墨電極為陰極，在常溫下已施加一電位，探討不同施加電位下，每分鐘移除100 mL硝酸鐵溶液中之鐵離子效率，由Fig2 鐵的Pourbaix diagram中得知，當陰極電位大於1.3V，其鐵則會以鐵金屬固體的形式存在，無論在任何pH皆如此，本研究所得之溶液pH值約為-0.4，當陰極施加電位大於0.5 V時，皆可獲得鐵金屬的沉積。

為了配合不鏽鋼表面氧化除污的工作，其反應施加電位為1.0 V以上，因此探討不同陰極電位為對鐵離子之移除能力，其移除速率隨陰極電位增加而增加，結果顯示，在不外加電化學反應系統時，除污系統中亦可達到13.4 mg/min的移除速率，如Fig. 8所示，因此可以依實際之需求，評估導入電化學金屬移除系統之必要性，可有效的延長溶液使用壽命。

5.7 不鏽鋼表面除污

綜合上述之研究結果，在常溫下，以1 M $\text{Ce}(\text{IV})$ 在 HNO_3 中，具有最高的氧化除污速率，比較化學除污法、電化學除污法即化學輔助電化學除污法，其除污速率分別：電化學法： $1.2 \times 10^{-2} \mu\text{m/hr}$ < 化學法： $2.6 \mu\text{m/hr}$ < 化學輔助電化學法： $32.7 \mu\text{m/hr}$ 。

IV. 結論

本研究已建立一化學輔助電化學氧化除污的模式，藉由此方法成功的以化學輔助電化學氧化法清除不鏽鋼表面，同時探討金屬離子移除的方法，有別於過去化學除污法須於40-50°C的反應條件在常溫下進行反應，及後續所產生大量二次廢棄物的問題，藉此了解反應參數對表面腐蝕之影響，有利於未來除污之進行，唯反應時將產生 $\text{Ce}(\text{III})$ ，其再生的工作需於未來進行，如此將建立完整的解決方案，對於除役時大量的不鏽鋼除污裨益良多。

V. 誌謝

感謝國科會 NSC 103-NU-E-214-001-NU 的經費支持，電化學暨奈米生醫感測實驗室全體人員之協助

參考文獻

- [1] 羅上庚，放射性廢棄物處理與處置，中國環境科學出版社，2007.
- [2] http://www.eu-decom.be/network/eundetraf/pdf/Session9_Decontamination%20Techniques_presentationSCK.pdf, 2001
- [3] Klein, M., Rahier, A., Mandoki, R., Ponnet, M., IAEA, (1998)27.
- [4] Bard, A. J., and Faulkner, L. R., "Electrochemical Methods-Fundamentals and Applications. 2nd ed.," John Wiley & Sons, New York (2001).
- [5] 田中正三郎，應用電化學，復漢出版社，1994.
- [6] Courtney, A., <http://www.wou.edu/las/physci/ch412/pourbaix.htm>, 2008
- [7] Maeda, Y., Sato, K., Ramaraj, R., Rao, T. N., Tryk, D. A., Fujishima, A., "The Electrochemical Response of Highly Boron-Doped Conductive Diamond Electyodes to Ce^{3+} Ions in Aqueous Solution," *Electrochim. Acta*, 44 (1999) 3441-3449.
- [8] NEA Task Group, Decontamination techniques Used in Decommissioning Activities, 1998.
- [9] Ran, X.W., Zang, Y., "Loop Cleanup with Redox Decontamination Technique", IAEA, (1998)51
- [10] Randle, T. H., and Kuhn, A. T., "Kinetics and Mechanism of the Cerium(IV)/Cerium(III) Redox Reaction on A Platinum Electrode," *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 79 (1983) 1741-1756.
- [11] Raju, T., Ahmed Basha, C., "Electrochemical Cell Design and Development for Mediated Electrochemical Oxidation $Ce(III)/Ce(IV)$ System," *Chem. Eng. J.*, 114 (2005) 55-65.
- [12] Spotnitz, R. M., Kreh, R. P., Lundquist, J. T., Press, P. J., "Mediated Electrosynthesis with Cerium(IV) in Methanesulphonic Acid," *J. Appl. Electrochem.*, 20 (1990) 209-215.
- [13] Suwa, T.; Kuribayashi, N.; Tachikawa, E., "Development of Chemical Decontamination Process with Sulfuric Acid-Cerium (IV) for Decommissioning", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 25(1988)574-585
- [14] Fujitani, R.; Enda, M., Morisue, T., "Redox Decontamination Technique Development.2. Redox Decontamination System Using Pilot-Plant," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 26(1989)449-458
- [15] The EPRI DFDX Process Process-Final Report, TR TR-1013280, 2006.
- [16] 田福助，電化學理論與應用，高立出版社，2004.
- [17] 魏聰揚，鍾人傑，謝榮春，草酸除污處理放射性污染金屬廢料之程序開發，核能季刊，42(2002)98-107.
- [18] 陳得三，TFT-LCD 製程銹蝕刻模擬廢液之四價銻回收： $Ce(IV)$ 電再生特性，屏東科技大學環境工程與科學博士論文，2009.

應用模擬移動床技術於放射性廢酸處理回收技術開發

Development of the Application of SMB on Recovering Radioactive Wasted Acids

計畫編號：103-2623-E-214 -004 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：梁明在

e-mail：mtliang@isu.edu.tw

計畫參與人員：林智雄、林宗緯

執行單位：義守大學化學工程學系

摘要

本計畫擬利用模擬移動床技術嘗試從核能設施除役所產生的廢酸中分離出放射性核種，以利廢酸的回收使用以及放射性核種的濃縮減容。在方法技術之前，本計畫選用一般廢酸中最難分離的 Ni/Co 做為本計畫的研究標的，以確認模擬移動床技術在金屬離子分離的可行性。本計畫選用 Dowex-m4195 萃淋樹脂，並調查了鈷、鎳、鐵、以及銻離子的吸附行為。結果顯示在 pH = 2.7 的條件下，滯留性依序為 Ni > Co > Fe > Ce；但是在 pH = 0 的條件下，則 Ce 與 Fe 以及 Co 與 Ni 則不具選擇性。在 pH = 2.7 的條件下，Ni 與 Co 的選擇性為 1.61，而 Fe 與 Ce 的選擇性為 4.46。因此在利用 SMB 進行 Ni 與 Co 的分離或是 Ce 與 Fe 的分離時，pH = 2.7 的條件下是具有可行性的。隨後，本計畫也以模擬移動床進行了鈷與鎳的分離研究，並成功以不同組態設計的 SMB 獲得高濃縮比的 Ni 或 Co，但是回收率偏低。回收率偏低主要係因為在 pH = 2.7 或是 pH = 0 的條件下，Ni 並不易從樹脂上脫附，進一步改善 SMB 設備的耐酸條件，應可提高 Ni 與 Co 的純度以及回收率。

Abstract

This project is to employ the simulated moving bed to the separation of radioactive components from the wasted acids produced in decommission. Before confirming the feasibility of the SMB process, this project uses the separation of nickel and cobalt as the model to study the feasibility of SMB process. Dowex-m4195 was selected as the extracting resin to study the adsorption isotherms of cobalt, nickel, ferrum, and cesium. At pH = 2.7, the retention of metal ions follows the following order, Ni > Co > Fe > Ce. It is also found that the selectivity of Ni and Co is 1.61 and that of Fe and Ce is 4.46. However, no selectivity is observed at pH = 0. This implies the feasibility of the separation of Ni and Co at pH = 2.7. Several designs of SMB configuration were therefore tested for the separation of Ni and Co. The experimental results shows that highly purified of Ni and Co can be obtained with low recovery. This is presumed that Ni is difficult to be removed from the resin at pH = 2.7 and pH = 0.0. Further enhancement of the acid-resistance of the SMB equipment could improve the purity and the recovery of the separation.

Keywords: Simulated Moving Bed, Separation of Ni and Co, Extracting Resin

I. 前言

核能設施除役過程當中將會產生大量的放射性酸性廢液，如果可以有效將這些廢酸予以再生或處理，則不但可以循環酸液降低成本，更可以大大減低後續固化容量。除役過程必須以酸處理的材料主要有不銹鋼與碳鋼，因此廢酸中將含有大量的鐵、鎳、銻(催化劑用)以及少量的放射性核種，如銻、鈷、錳等。如果可以將這些少量的核種予以分離，則廢酸便可以利用各種技術加以還原後再循環利用。傳統上，在酸中將金屬予以分離的主要方法為溶劑萃取法、離子交換樹脂法、萃取層析(extraction chromatography, EXC)技術則在成功開發出萃淋樹脂(Levextrel resins 或 extretting resins)後成為新一代的清淨技術選項[1, 2]。三種技術當中，溶劑萃取技術的成本低技術成熟，但是對環境危害最大。離子交換樹脂以及萃取層析技術，一般都是批次操作所以產能低，因此目前金屬回收業所使用之離子交換樹脂或固體吸附劑的樹脂效能不高。但是，如果可以將製程予以連續操作便可有效提升樹脂與吸附劑效能，降低成本，順利將技術推廣於廢酸再生的應用。

離子交換或是萃取層析的工業應用成熟，商業化產品也非常多樣，其在工程設計上可分為固定床、流體化床，以及移動床三種。其中移動床技術屬於連續操作，所以樹脂效率高，產生的廢液濃度高，也可以隨時在操作過程中線上清洗再生，因此樹脂壽命長。離子交換以及萃取層析都需要使用固體吸附劑，離子交換係利用固體上的離子與廢液中離子交換能力的不同，而萃取層析則利用離子在通過固體床時的滯留性不同而達到分離的目的。因此，萃取層析的吸附劑必須易於脫附，而離子交換樹脂的再生則一般需要更強的酸來進行。圖 1 與圖 2 是兩種不同的移動床概念設計，離子交換樹脂較適合於使用圖 1 的設計，而萃取層析技術則一般採用圖 2 的設計。圖 1 一般以連續式吸附稱之，而圖 2 則以模擬移動床稱之。另外，萃取層析一般採用耐強酸的樹脂作為擔體，因此也適用在強酸下操作使用[3]，所以萃取層析也可適合於除役過程的廢酸回收。

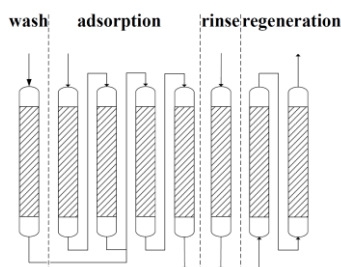


圖 1、連續逆向吸附裝置示意圖

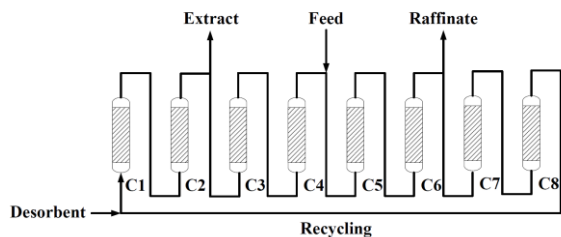


圖 2、連模擬移動床層析裝置示意圖

II. 主要內容

為建立金屬離子在螯合樹脂中的吸附及脫附模式，本計畫採用單支管柱(1.6 cmID × 9.0 cm)進行鈷、鎳、鐵、以及鈰離子的吸附及脫附實驗。本計畫針對不同 pH 值的酸進行脫附為實驗操作條件，再經由模擬計算金屬離子的吸附參數，以應用於後續模擬移動床研究。

本計畫將 Dowex-m4195 萃淋樹脂填充於八支管柱當中，以進行鈷與鎳離子的分離試驗，各出入口及填充管柱配置如圖 3 所示。本計畫使用三種不同組態的 SMB 進行試驗。第一種組態為 1-2-2/3，清洗液進入第一管柱，用以脫附殘餘的鈷離子，pH 為 0 的硫酸水溶液進入第二管柱，並於流經第三管柱時，用脫附將鎳離子並攜帶至 Ni-Rich 出口，流動相(Desorbent)進入第四管柱，用以脫附管柱中的鈷離子，模擬廢酸液進入第六管柱，並於流經第七及第八管柱時，鈷離子及鎳離子吸附於管柱中，但是鈷離子於管柱中的滯留性較低，因此容易被流動相脫附並收集於 Co-Rich 出口，而做為強吸附物質的鎳離子則被滯留於管柱中，如圖 3(A)所示位置。當試驗時間達到切換時間後，各出入口將切換至下一填充管柱，如圖 3(B)所示位置。當試驗時間達到下一個切換時間後，各出入口將切換至下一填充管柱，以此類推。SMB 各出入口於每 4 分鐘切換一次，稱為一個階段，切換八個階段稱為一個循環。

第二種組態為 2-2/2/2，pH 為 0 的硫酸水溶液進入第一及第二管柱，用以脫附鎳離子並再生管柱，流動相(Desorbent)進入第三管柱，用以脫附管柱中的鈷離子，模擬廢酸液進入第七管柱，並於流經第八管柱時，鈷離子及鎳離子吸附於管柱中，但是鈷離子於管柱中的滯留性較低，因此容易被流動相脫附並收集於 Co-Rich 出口，而做為強吸附物質的鎳離子則被滯留於管柱中，如圖 4 所示位置。

第三種組態為 2/2-2-2，模擬廢酸液進入第一管柱，並於流經第二至第四管柱時，鈷離子及鎳離子吸附於管柱中，但是鈷離子於管柱中的滯留性較低，因此容易被流動相脫附並收集於 Co-Rich 出口，而做為強吸附物質的鎳離子則被滯留於管柱中，pH 為 0 的硫酸水溶液進入第五管柱，並於流經第六管柱時，用以將鎳離子脫附並攜帶至 Ni-Rich 出口，流動相(Desorbent)進入第七管柱，並於流經第八管柱之後，隨即回流至第三管柱，用以脫附管柱中的鈷離子，並收集於 Co-Rich 出口，如圖 5 所示位置。

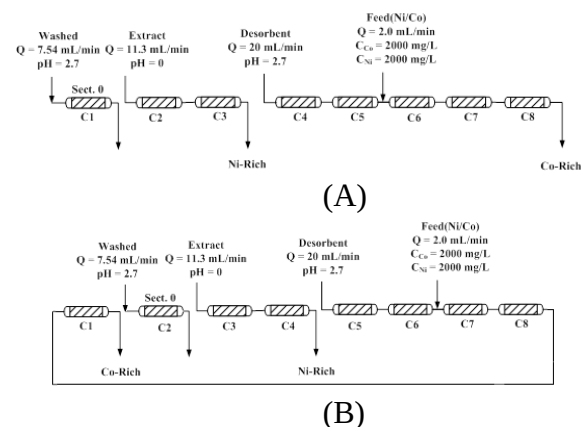


圖 3、組態為 1-2-2/3 的 SMB 出入口及管柱配置圖

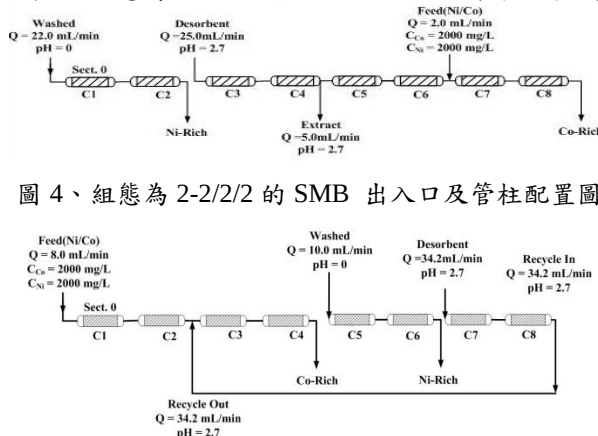


圖 5、組態為 2/2-2-2 的 SMB 出入口及管柱配置圖

III. 結果與討論

3.1 金屬離子之吸附行為探討

本研究共針對四種金屬離子，Ce、Fe、Ni、Co，進行在 pH = 0 以及 pH = 2.7 條件下的吸脫附行為調查。圖 6 與 7 為四種金屬離子通過 1 x 10 cm 填充管柱的突破曲線，而表 1 與表 2 則是依據吸脫附的突破曲線所模擬而得之吸附與脫附常數以及其相應之軸擴散係數。

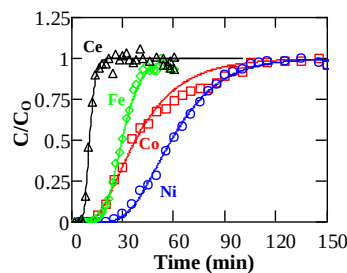


圖 6 在 pH = 2.7 下，四種金屬離子的突破曲線

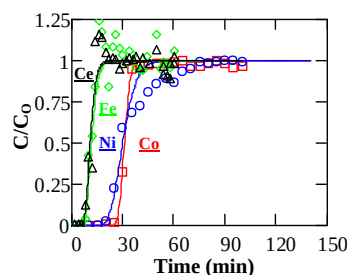


圖 7 在 pH = 0 下，四種金屬離子的突破曲線

表 1 離子在萃淋樹脂中的吸附常數與軸擴散係數

	adsorption	
	Henry Constant	Dispersion Coefficient ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
Co(pH = 2.7)	16.5	8.5
Co(pH = 0.0)	13.5	0.22
Co (pH = 2.7; H ₃ PO ₄)	16.5	16
Ni(pH = 2.7)	26.5	4.0
Ni(pH = 0.0)	13.0	1.2
Fe(pH = 2.7)	5.8	0.8
Fe(pH = 0.0)	1.6	0.8
Ce(pH = 2.7)	1.3	0.9
Ce(pH = 0.0)	1.3	0.9

表 2 離子在萃淋樹脂中的吸附常數與軸擴散係數

	desorption	
	Henry Constant	Dispersion Coefficient ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)
Co(pH = 2.7)	6.0	9
Co(pH = 0.0)	1.8	150
Co (pH = 2.7; H ₃ PO ₄)	3.2	80
Ni(pH = 2.7)	8.0	45
Ni(pH = 0.0)	0	45
Fe(pH = 2.7)	9.0	30
Fe(pH = 0.0)	1.0	150
Ce(pH = 2.7)	1.2	30
Ce(pH = 0.0)	1.0	30

3.2 連續式分離試驗結果

藉由鎳離子與鈷離子的吸附與脫附試驗，本計畫 SMB 試驗規劃如表 3 至表 5 所示的試驗條件。本計畫將 Dowex-m4195 樹脂填充於 1.6 cmID × 4.5 cm 的管柱中，並以計量泵將模擬廢酸溶液、移動相、脫附液及清洗液分別經由 Feed、Desorbent、Extract 及 Washed in 入口泵入系統中，定時自 Washed out、Ni-Rich 及 Co-Rich 出口取樣後，以感應耦合電漿發射光譜儀(ICP-AES)分析鎳離子與鈷離子的含量，試驗結果如表 6 至表 8 所示。

當 SMB 組態設定為 1-2-2/3，切換時間為 4 min (第 1 組試驗)時，Co-Rich 出口收取的樣品(後稱 Co-R 樣品)含有 89.28 mg/L 的鈷離子以及 27.67 mg/L 的鎳離子，Ni-Rich 出口收取的樣品(後稱 Ni-R 樣品)含有 216.5 mg/L 的鈷離子以及 294.2 mg/L 的鎳離子，顯示本計畫所規劃設計的 SMB 設備可初步分離模擬廢酸中的鎳離子與鈷離子，但是效果分離效果並不顯著。此外，Washed out 出口收取的樣品(後稱 W 樣品)仍然含有 2.86 mg/L 的鈷離子以及 41.11 mg/L 的鎳離子，表示管柱中仍然有金屬離子殘留，無法完全脫附，且鎳離子的殘留量較高。為了提高分離效果，本計畫嘗試將 Extract 入口流量由 11.3 mL/min 提高至 18 mL/min，並調整切換時間。結果顯示，比較第 1 組至第 4 組試驗可知，當 Extract 入口流速增加時，會使得 Co-R 以及 W 樣品中鎳離子的含量明顯減少，推測可能是高流速的硫酸水溶液流經管柱時，可脫附管柱中較多的金屬離子所致，但是切換時間對於鎳離子的含量影響不大。本計畫進一步再提高 Extract 入口流量至 22 mL/min，如第 5 及第 6 組試驗所示。結

果顯示，再次提高 Extract 入口流量以及調整切換時間，只能減少 W 樣品中金屬離子的含量，已經無法再減少 Co-R 樣品中的鎳離子濃度了，但是也將 Co/Ni 的比例提高到大約為 100/15 了，但是 Co 的回收率偏低。

為了有效將脫附管柱中的鎳離子，本計畫隨後採用 2-2/2/2 組態進行試驗。結果顯示，當切換時間為 8 min 時，Extract 出口收取的樣品中，鎳離子濃度為 3.019 mg/L，當切換時間增加至 12 min 時，鎳離子的濃度下降至 1.115 mg/L，而 Ni-R 樣品中含有較多的鎳離子，Co-R 樣品中含有較多的鈷離子，顯示管柱中的鎳離子可被脫附較完全。由於 Extract 出口所測得的金屬離子含量極低，因此本計畫進一步嘗試將 Extract 出口關閉，僅收集 Ni-R 樣品以及 Co-R 樣品，並試驗不同切換時間對於分離效果的影響。結果顯示，關閉 Extract 出口對於系統無明顯影響。

本計畫最後嘗試使用組態為 2/2-2-2 的 SMB 進行試驗，同時將廢酸模擬液的入口流速由 2 mL/min 提高至 8 mL/min，移動相入口流速提高至 34.2 mL/min，移動相流經第八管柱之後，隨即回流至第三管柱，用以脫附管柱中的鈷離子。結果顯示，Ni-R 樣品中，鈷離子的比例大幅降低，但是 Co-R 樣品中，鎳離子的比例仍然偏高，顯示鎳離子無法有效從管柱中被脫附。顯示本設計可以獲得 Ni/Co 比例大約 93/11 的樣品，但是 Ni 的回收率偏低。本計畫隨後嘗試將 Washed 入口流速由 10 mL/min 提高至 15 mL/min，結果導致 Ni-R 樣品中鈷離子的比例再次提高，使得分離效果降低，但不影響 Co-R 樣品中金屬離子的比例。本計畫再嘗試將 Desorbent 入口端的流量由 34.2 提高至 38.5 以及 43.0 mL/min，結果對於 Ni-R 樣品以及 Co-R 樣品中金屬離子的比例無明顯影響。

IV. 結論

本計畫各分項工作獲致以下結論：

- Dowex-m4195 樹脂在 pH 值為 2.7 的條件下，可有效對鎳、鈷、鐵以及鈾離子進行吸附，並且具有選擇性，適合應用於廢酸處理的後續研究。
- 使用 pH 值為 2.7 以及 pH 值為 0 的硫酸作為溶劑進行金屬離子的吸附時，可以發現硫酸的濃度對鈷與鈾離子的影響較小，但對鎳與鐵離子的影響較大。
- 以磷酸取代硫酸，作為溶劑進行金屬離子的吸附時，磷酸對於鈷離子的吸附行為幾乎不會產生任何的影響。
- 在 pH = 2.7 的條件下，鎳離子與鈷離子的脫附具有選擇性，但是鎳離子脫附不易，若要將鎳離子脫附完全，則需使用 pH 值為 0 的硫酸水溶液，才能夠有效將 Fe 從樹脂表面脫附。
- 在 pH = 2.7 的條件下，鐵離子與鈾離子的脫附具有選擇性，但是鐵離子脫附不易，若要將鐵離子脫附完全，則需使用 pH 值為 0 的硫酸水溶液，才能夠有效將 Fe 從樹脂表面脫附。
- 利用搭載萃淋樹脂的模擬移動床進行分離模擬廢酸溶液中鎳離子與鈷離子的研究顯示，利用不同組態設計的 SMB 可以提高或降低 Co/Ni 比例，但是回收率偏低，未來應繼續篩選出適當的樹脂以及操作條件，並進行最佳化，才能對電廠除役過程的減

容以及廢酸的回收再利用，做出貢獻。

128-132。

[3] Dietz, M.L., Horwitz, E. P., Bond, A.H., Extraction Chromatography: Progress and Opportunities, in Metal-Ion Separation and Preconcentration, ed. By Bond, A., et al., ACS Sym. Series, 1999.

參考文獻

- [1] 梁勇、王瑞祥、劉俊，高純稀土化合物製備的現狀與發展，上海有色金屬，25 (2004) 188-191。
[2] 廖春發、聶華平、焦芸芬、梁勇，萃取色層技術分離提純析土的現狀與發展，過程工程學報，6 (2006)

表 3、1-2-2/3 組態 SMB 試驗之操作條件

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6
Feed (mL/min)	Co (mg/L)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Ni (mg/L)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Flow rate	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Desorbent (mL/min)	pH _{H2SO4}	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	Flow rate	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Extract (mL/min)	pH _{H2SO}	0	0	0	0	0	0
	Flow rate	11.3	18.0	18.0	18.0	22.0	22.0
Washed (mL/min)	pH _{H2SO}	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	Flow rate	7.54	7.54	7.54	7.54	7.54	7.54
ΔT (min)		4	6	7	8	10	12

表 4、2-2/2/2 組態 SMB 試驗之操作條件

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6
Feed (mL/min)	Co (mg/L)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Ni (mg/L)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	Flow rate	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Desorbent (mL/min)	pH _{H2SO4}	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	Flow rate	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Recycle (mL/min)	pH _{H2SO}	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	Flow rate	5.0	5.0	0	0	0	0
Washed (mL/min)	pH _{H2SO}	0	0	0	0	0	0
	Flow rate	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
ΔT (min)		8	12	8	12	15	15

表 5、2/2-2-2 組態 SMB 試驗之操作條件

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Feed (mL/min)	Co (mg/L)	2000	2000	2000	2000
	Ni (mg/L)	2000	2000	2000	2000
	Flow rate	8.0	8.0	8.0	8.0
Desorbent (mL/min)	pH _{H2SO4}	2.7	2.7	2.7	2.7
	Flow rate	34.2	34.2	43.0	38.5
Recycle (mL/min)	pH _{H2SO}	2.7	2.7	2.7	2.7
	Flow rate	34.2	34.2	34.2	34.2
Washed (mL/min)	pH _{H2SO}	0	0	0	0
	Flow rate	10	15	10	10
ΔT (min)		15	15	15	15

表 6、1-2-2/3 組態 SMB 樣品中鎳離子與鈷離子含量

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6
Washed	Co (mg/L)	2.86	0.13	0.47	0.476	0.248	0.199
	Ni (mg/L)	41.11	14.5	8.32	6.673	4.969	3.846
Ni-Rich	Co (mg/L)	216.5	135.5	121.3	128.6	136.6	83.6
	Ni (mg/L)	294.2	224.9	203.7	203.9	268.4	176.8
Co-Rich	Co (mg/L)	89.28	77.83	78.63	99.28	101.2	104.3
	Ni (mg/L)	27.67	14.8	13.2	16.7	15.5	19.5

表 7、2-2/2/2 組態 SMB 樣品中鎳離子與鈷離子含量

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6
Washed	Co (mg/L)	77.95	67.4	77.1	64.1	81	117.8
	Ni (mg/L)	161.4	165	163.9	144.2	177.4	219.2
Ni-Rich	Co (mg/L)	10.55	4.1	0	0	0	0
	Ni (mg/L)	3.019	1.115	0	0	0	0
Co-Rich	Co (mg/L)	114	133.6	102.2	115.4	131.4	106
	Ni (mg/L)	38.6	52.9	41.73	54.55	63.6	31.2

表 8、2/2-2-2 組態 SMB 樣品中鎳離子與鈷離子含量

		Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Ni-Rich	Co (mg/L)	111.5	142	172.3	176.5
	Ni (mg/L)	929.5	814.8	1022	1013
Co-Rich	Co (mg/L)	442.1	450.4	390.1	417.5
	Ni (mg/L)	197.5	209.8	178.1	167.5

放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料吸附參數研究

Study on Adsorption Parameters of Buffer Backfill Material in Radioactive Waste Disposal Sites

計畫編號：103-NU-E-006-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳銘志

e-mail：mcwu@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：李傳斌、涂又琳、潘春花

執行單位：國立成功大學地球科學系

摘要

本研究計畫主要在探討膨潤土 (bentonite) 對放射性核種銻 (Sr, strontium)、銫 (Cs, cesium) 與鈷 (Co, Cobalt) 的吸附特性，以及其受不同地下水環境之影響的吸附行為差異分析；俾以提供後續放射性廢棄物最終地質處置場址選址工作之依據。其中，主要的研究對象--膨潤土，係採取目前已經商業化之產品--美國懷俄明州產之 MX-80 膨潤土，以及臺灣日興土 (台東產膨潤土的一種)；並利用已知的地球化學條件，模擬人工合成地下水，藉以探討膨潤土與現階段已公告的候選母岩 (烏坵花崗岩與台東硬頁岩等)，在固定配比混合後 (膨潤土 50%+母岩 50%；膨潤土 75%+母岩 25%)，分析其對關鍵核種銻、銫、鈷之吸附能力的優劣。分析結果顯示，在等比例混合物中，膨潤土大 (等) 於 50% 時，對銻、銫、鈷吸附率平均約 90% 以上；而溶液中鈉離子大於 0.1M 時，對銻、銫、鈷的吸附競爭效應相當明顯；即等比例膨潤土混合物對銻、銫、鈷的吸附率大幅降低。

關鍵詞：吸附、硬頁岩、花崗岩、MX-80 膨潤土、日興膨潤土。

ABSTRACT

The buffer/backfill materials for radioactive waste disposal repository site were made of pure bentonite or bentonite-rock mixtures. This study was subjected to discuss the sorption capability of buffer/backfill materials to the important radionuclides such as Cs, Sr and Co by batch method for mixture of the host rock (Taitung argillite and Kingmen granite) with either the U.S. Wyoming MX-80 bentonite or the Taiwan domestic Zhi-Shin bentonite in various proportion (0~100%). According to the experimental results, the distribution coefficients (K_d) of Cs, Sr, and Co obtained for the bentonite-rock mixtures had shown an approximate value to that of pure bentonite; for mixtures to have more than 50% of mixing proportion for bentonite to argillite or granite. Furthermore, it was obviously found that sorption to Cs Sr and Co for bentonite-rock mixtures decreases as ionic strength increased from 0.001 to 1M in NaCl solutions. According to the experimental process, in synthetic groundwater, it would be quite convenient and helpful to assess the distribution coefficients (K_d) of Cs, Sr, and Co to the buffer/backfill materials by batch

sorption experiments with bentonite-rock mixtures of fixed proportion.

Keywords: Sorption, Argillite, Granite, MX-80 bentonite, Zhi-Shin bentonite.

I.前言

就低放射性廢棄物的處置而言，其中存在著半衰期較長的放射性同位素乃以銫 (^{137}Cs)、銻 (^{90}Sr) 為主。因此，監測此二核種即成為放射性廢棄物管理與監測的重要工作。一般而言，低放射性廢棄物的處置，以 300 年為期；其乃因銫 137 的半衰期為 30 年，而銻 90 的半衰期為 29.12 年。如此，在使其經過 10 個半衰期的衰變後，才再被釋回生態圈中，方可視之為安全無虞。由此看來，如何使處置場達到最佳的圍阻效果，確保放射性廢棄物在其衰變至可被接受活度前，不會返回生態圈；為此，處置場的構築便扮演著一個舉足輕重的角色。

目前，針對放射性廢棄物的處置，各國均偏向採用以固化體為中心之多重障壁系統 (multi-barrier system)。其中，填充於固化體四周之緩衝材料 (buffer material)，在遲滯放射性核種向外擴散遷移及穩定固化體上，扮演著相當重要的角色。理想的緩衝材料需兼具物理特性 (低透水性、熱傳特性、膨脹潛能及力學強度等) 與化學特性 (吸附性、化學緩衝性等) 之優點 (Pigford, 1993)。基於物理與化學雙重特性的要求下，國際間所共同選擇的緩衝材料，以黏土中之膨潤土 (bentonite) 為主；主要乃因其具有高可塑性，膨脹性，以及低透水性等，可直接影響緩衝材料之施工及物性的要求。

截至目前為止，世界上各國在放射性廢棄物處置場的施工設計中，針對緩衝/回填材質的設計選定，分別有以膨潤土與石英砂的混合物 (如：瑞典與日本所採用者) 或以膨潤土與粉壓花崗岩的混合物 (如：加拿大所採用者) 為主。此外，國內部分研究顯示，膨潤土與石英砂的混合物 (固定比例混合) 除了可以維持物理特性之穩定度外 (陳文泉, 2002; 郭明峰, 2004; 吳柏林, 2005)，亦可提其高對放射性核種的吸附性 (許俊男, 1995; Jan et al., 2006; Lee et al., 2012)；因此，緩衝材質的施工設計，除了需維持以上所述的特性 (物理與化學) 外，若可透過與膨潤土的適當混合比例，亦可解決處置場在施工時所產生之大量當地的廢棄石

塊。

本計畫在分析研究工作中，主要將以探討各種膨潤土及其與母岩的等比例混合物，對放射性核種銨及鈾的吸附特性與差異；冀期得以提供日後低放射性廢棄物處置場選址工作之依據。目前將以採取已經商業化之產品--美國懷俄明州產之 MX-80 膨潤土，以及臺灣日興土（台東產膨潤土的一種）為主要研究對象。經與現階段已公告之候選場址之母岩（金門烏坵花崗岩與台東達仁硬頁岩等），依固定配比混合後，利用已知條件或已經長期地下水質分析之地球化學條件，模擬人造地下水（曹瑞軒，2011），分析探討膨潤土及其混合物，對放射性核種銨及鈾的吸附行為及其可能產生之差異性，並探討其化學緩衝性，俾以作為日後可能處置場址施工條件之重要參考。

II. 主要內容

一、材料

1. 岩石樣品：

- (1) **台東硬頁岩**：計畫執行期間（103.01~103.12），前往台東縣達仁鄉楓港溪上游南岸河床露頭（圖 1.a）採集的硬頁岩樣本，約 3 公斤。
- (2) **金門花崗岩**：計畫執行期間（103.01~103.12），向工研院綠能所申請鑽探所得金門烏坵 W 區之花崗岩岩心樣品（圖 1.b），約 1 公斤。



圖 1、臺灣本土母岩：(a)台東硬頁岩，(b)金門花崗岩。

2. 商業化膨潤土：

- (1) **美國膨潤土**：美國懷俄明州產之 MX-80 膨潤土。
- (2) **臺灣日興土**：台東樟原礦區之膨潤土。

其化學成分組成如表（1）所示。

表 1、膨潤土之化學成分組成（吳冠漢，2004）。

成分(%)	美國 MX-80	臺灣日興土
SiO ₂	55~64	55.43
Al ₂ O ₃	18~21	20.11
Fe ₂ O ₃	2.5~2.8	5.54
CaO	0.1~1.0	2.55
Na ₂ O	2.5~2.7	0.72
MgO	2.5~6.2	1.71
K ₂ O	0.2~0.4	1.35

3. 液相材料：

主要為利用不同成分的液相載體，作為本計畫探

討核種吸附行為的差異。

- (1) **去離子水**：逆滲透去離子水，美國 Millipore 公司出品之 Mill L-SQ 型製水設備製造。
- (2) **氯化鈉（NaCl）濃度**：0.001M~1M，99%純度以上德國 Merck 公司出品。
- (3) **合成地下水**：以台東（達仁）及金門（烏坵）地區之地下水的地球化學條件，主要以 Na、K、Ca、Mg、Cl、S 等離子，人工合成模擬當地之地下水，相關成份如表（2）所示。

表 2、台東（達仁）和金門（烏坵）地下水組成成分。

化合物*(g/5L)	台東（達仁）	金門（烏坵）
NaCl	2.6882	49.3818
KCl	0.1357	-
CaCl ₂ · 2H ₂ O	2.4295	-
MgCl ₂ · 6H ₂ O	4.9724	-
BaCl ₂ · 2H ₂ O	0.2211	-
Na ₂ SO ₄	0.8878	3.3841
K ₂ SO ₄	-	1.8952
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	-	17.0028
NaNO ₃	-	118.3358
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	2.6882	22.3077
I(M)	2.71E-02	6.39E-01

*99%純度以上德國 Merck 公司出品

4. 核種（穩定同位素）：

- (1) **銨（Cs）**：氯化銨 CsCl，99%純度以上德國 Merck 公司出品。
- (2) **銨（Sr）**：硝酸銨 Sr(NO₃)₂，99%純度以上德國 Merck 公司出品。
- (3) **鈷（Co）**：氯化鈷 CoCl₂，99%純度以上德國 Merck 公司出品。

二、實驗方法

本計畫工作主要包括兩個部分，即：(1)固相材料分析，(2)批次吸附實驗。其中，為了解岩石樣品的基本材料特性，以 N₂-BET 進行比表面積分析，以 XRD 進行繞射分析，並進行陽離子交換容量（CEC）分析等，建立台東硬頁岩與金門花崗岩的基本特性。此外，利用 ASTM 批次吸附實驗標準方法，進行核種吸附實驗，並以不同的比例（膨潤土+母岩 0~100%），將美國 MX-80 膨潤土（B）與台東日興土（Z）混合台東硬頁岩（A）與金門花崗岩（G）。

1. 固相分析：

(1) N₂-BET 比表面積分析：

將三種不同粒徑 0.25 ~ 0.4 mm，0.105 ~ 0.149 mm 和小於 0.074 mm 的粉碎岩石，利用 ASAP 2020（N₂-BET）儀器，進行比表面積的測量分析。

(2) XRD 繞射分析：

X 光繞射分析係以結晶體對 X 射線產生繞射的

原理，主要用於各種固體的物相組成分析，以及微觀結構之觀察，如：結晶狀態、結晶度、結晶組成成份、晶格常數及平均晶粒大小等。以 X 射線繞射儀進行岩石樣品的礦物組成分析，為主要分析結晶礦物的方法。為了解天然母岩中的礦物成份，本研究利用 X 射線繞射儀，進行硬頁岩和花崗岩的礦物成份分析，並且利用 JP-CDS 中的 International Centre for Diffraction Data 軟體(PCPDFWIN Version 1.30, August 1997)，鑑定 XRD 之圖形找出硬頁岩和花崗岩中的主要組成礦物 (Breen et al., 1997)。

2. 批次吸附實驗：

為反應放射性廢棄物處置場的放射性核種遷移行為，本計畫進行緩衝材料或模擬母岩對不同核種（銻、鋇、鈾）的批次吸附實驗，並利用其在不同 pH、Eh 及濃（活）度中的量測，觀察核種在與母岩或緩衝材料中的分布情形。

就岩石樣品方面，主要乃是將所採集回來之硬頁岩與花崗岩經粉碎與球磨之後，將通過 20 號篩網（粒徑在 0.297-0.840 mm）的岩石顆粒予以收集後，以為進行後續的吸附實驗。

(1) 固定比例（0、25、50、75、100%）的混合岩石樣品（膨潤土+岩石）吸附實驗：

本計畫以 ASTM (2001) 吸附實驗標準方法作為依據，先將秤好 1 克 (1.00±0.05g) 之膨潤土，以固定比例（0、25、50、75、100%）混合岩石樣品（膨潤土+岩石），分批放入 50 mL 離心管中，再以定量 30 mL 自動分注器，將已配製為初始濃度 (C₀) 10 ppm 之銻、鋇、鈾溶液，分別加入離心管內後，將離心管置放於恆溫震盪器槽內，並以 200 rpm 的振盪頻率，均勻混合，待 7 天後將離心管取出，以高速離心機 (~10000 rpm)，進行離心 15 分鐘，使其固液完全分離後，取上部澄清液 10 mL 後，再以原子吸收光譜儀 (AA) 及感應耦合電漿發射光譜儀 (ICP-OES) 分析其溶液中之銻、鋇、鈾的濃度 (C)，同時分析及記錄其溶液之 pH、Eh 值的變化；並以三重複的方式，進行實驗，俾利確認實驗結果。

(2) 不同濃度（0.001M~1M）氯化鈉 (NaCl)：

於固定比例（0、25、50、75、100%）的混合岩石樣品實驗(1)後，再以相同固定比例混合的岩石樣品，進行 Na 離子競爭行為的實驗；分析與探討銻、鋇、鈾三個核種，在不同濃度（0.001M~1M）氯化鈉 (NaCl) 溶液中吸附行為的差異變化情形。

(3) 合成地下水：

於固定比例（0、25、50、75、100%）的混合岩石樣品實驗(1)後，再以金門（烏坵）和台東（達仁）兩地區地下水之地球化學條件，分別製作模擬當地水質之合成地下水，進行批次吸附實驗，分析與探討銻、鋇、鈾三個核種，在不同合成地下水中吸附行為的差異變化情形。

為分析與探討銻、鋇、鈾三個核種在不同條件下吸附行為的差異變化情形，可以由其吸附率 S (%)

與分配（吸附）係數 K_d (mL/g) 來表示，其 S (%) 與 K_d (mL/g) 之計算式如下：

$$S(\%) = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$K_d = \frac{(C_0 - C)}{C} \cdot \frac{V}{M} \quad (2)$$

式 (1) 及式 (2) 中 C₀ 為初始濃度 (ppm)，C 為實驗進行 7 天後溶液核種的剩餘濃度 (ppm)，V 為加入試驗管柱中之液相的體積 (mL)，M 為定比例固相混合岩石樣品之重量 (g)；吸附實驗條件如表 (3) 所示。

表 3、批次吸附實驗條件說明

核種	Cs	Sr	Co
時間	7 天		
震盪頻率	200 rpm		
固/液相	1g/30mL		
混合固相 (重量比)	1. A ；	5. B+A (1:1, 1:3, 3:1) ；	
	2. G ；	6. B+G (1:1, 1:3, 3:1) ；	
	3. B ；	7. Z+A (1:1, 1:3, 3:1) ；	
	4. Z ；	8. Z+G (1:1, 1:3, 3:1)	
液相	1. DIW (去離子水)		
	2. NaCl (氯化鈉濃度：0.001~1M)		
	3. GW (合成地下水；台東、金門)		
度量儀器	AA* ¹	ICP - OES* ²	ICP - OES

*¹ Atomic Absorption (原子吸收光譜儀)

*² Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometer

III. 結果與討論

1. 材料固相分析

(1) N₂-BET 比表面積分析

本研究利用氮氣 (N₂) 來測定不同岩樣的比表面積。表 (4) 所示為不同粒徑大小的硬頁岩與花崗岩比表面積測定結果。由表中可發現，不同粒徑大小的硬頁岩樣品之比表面積均大於花崗岩樣品的 1~2 個級數 (order)；初步分析瞭解，硬頁岩的細微孔隙較花崗岩多，故其比表面積較大，將有利於對放射性核種之吸附。

表 4、不同粒徑之花崗岩和泥岩的比表面積

粒徑大小 (mm)	N ₂ -BET (m ² /g)	
	硬頁岩	花崗岩
0.250~0.400	6.44	0.07
0.105~0.149	7.13	0.21
< 0.074	9.13	1.96

(2) XRD 繞射分析

利用 X-射線繞射儀及 X-射線繞射圖譜，進行硬頁岩（台東）與花崗岩（金門）之主要礦物組成分析。分析資料經整理後得表 (5)；其中，硬頁岩以石英、長石、雲母、綠泥石及伊利石為主要成份

礦物；而花崗岩主要的組成礦物分別為石英、長石及雲母類礦物。從分析結果中得知，石英（SiO₂）同時為硬頁岩及花崗岩的主要礦物組成。

表 5、硬頁岩與花崗岩主要礦物組成

礦物名稱	岩石樣品	
	硬頁岩	花崗岩
石英	●	●
鈉長石	●	●
黑雲母	●	●
白雲母	●	●
綠泥石	●	
伊利石	●	

2. 批次吸附實驗

(1) 固定比例（0、25、50、75、100%）的混合岩石樣品（膨潤土+岩石）吸附實驗：

由於膨潤土具有較佳的化學緩衝效果（林哲毅，1997；張皓鈞，2011），因此，混合膨潤土的樣品在最後的實驗結果 pH 變動並未隨著不同核種而有所改變，按銨、鋇、鈷的化學緩衝實驗結果顯示，pH 均在 7.8~9.5 之間，而 Eh 值均為正值（> 0 mV）。此外，由表（6）和（7）膨潤土以固定比例（0、25、50、75、100%）混合岩石樣品的吸附率 S（%）和分配係數 K_d 值顯示，膨潤土對銨、鋇、鈷核種的吸附效應遠大於岩石樣品（花崗岩和硬頁岩），且混合比例大於 50% 以上的混合樣品與 100% 膨潤土對銨、鋇、鈷的吸附率 S（%）和分配係數 K_d 值並無太大的差異，吸附率均大於 90% 以上。

以不同膨潤土實驗結果相比較，MX-80 膨潤土對銨的吸附率（99%）較高於臺灣日興土（84%），此可能與臺灣日興土為鈣型膨潤土，與 2 價鋇離子有競爭的關係所致。若以硬頁岩與花崗岩的實驗結果顯示，硬頁岩對銨、鋇、鈷核種的吸附率則遠大於花崗岩。按 XRD 結果顯示硬頁岩中具有伊利石與綠泥石等黏土礦物，根據文獻顯示，黏土礦物對放射性核種具有較佳的吸附效果。

表 6、固定比例（0、25、50、75、100%）混合岩石樣品（膨潤土+岩石）吸附率 S（%）與分配係數 K_d 值（mL/g）。

MX-80 膨潤土（B）									
A	100% (B)		75% (3B+A)		50% (B+A)		25% (B+3A)		0% (A)
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)
Cs	94	470	94	470	93	399	92	345	94
Sr	99	2970	99	2970	99	2970	90	270	33
Co	99	2970	99	2970	99	2970	93	399	55
G	100% (B)		75% (3B+G)		50% (B+G)		25% (B+3G)		0% (G)
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)
Cs	94	475	93	402	94	435	92	332	1.12
Sr	99	2970	99	2970	99	2970	85	174	4.59
Co	99	2970	99	2970	99	2970	82	133	3.34

表 7、固定比例（0、25、50、75、100%）混合岩石樣品（日興土+岩石）吸附率 S（%）與分配係數 K_d 值（mL/g）。

臺灣日興土（Z）									
A	100% (Z)		75% (3Z+A)		50% (Z+A)		25% (Z+3A)		0% (A)
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)
Cs	96	725	97	952	97	952	97	883	94
Sr	84	163	81	132	79	112	72	76	33
Co	99	2970	99	2970	99	2970	98	1914	55
G	100% (Z)		75% (3Z+G)		50% (Z+G)		25% (Z+3G)		0% (G)
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)
Cs	96	725	95	556	92	330	83	146	1.12
Sr	84	163	82	138	75	91	62	50	4.59
Co	99	2970	99	2970	98	1763	96	691	3.34

(2) 不同濃度（0.001M~1M）氯化鈉（NaCl）：

於固定比例混合岩石樣品實驗後，並以其實驗結果，吸附率 S（%）與分配係數 K_d 值之較佳比例（50%、75%）進行模擬溶液中具不同 Na 離子濃度（0.001~1M）時之吸附銨、鋇、鈷的競爭實驗。

實驗的結果整理如表（8、9），於不同 Na 離子濃度（0.001~1M）實驗中可發現，固定比例（50%、75%）混合岩石樣品對銨、鋇、鈷的吸附效應均受到 Na 離子濃度的增加而降低，其中以對銨的吸附效應影響最大。此外，根據吸附率 S（%）與分配係數 K_d 值結果顯示，當 Na 離子濃度大於 0.1M 時，固定比例混合岩石樣品（50%、75%）對銨、鋇、鈷的吸附效應，均明顯地降低；K_d 值明顯降低了約一個級數。

表 8、不同 Na 離子濃度（0.001~1M）於定比例（50、75%）混合岩石樣品（MX-80 膨潤土+岩石）之吸附率 S（%）及分配係數 K_d 值（mL/g）。

(a) MX-80 膨潤土+硬頁岩								
B+A	NaCl (M)							
	0.001		0.01		0.1		1	
50%	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	99	2970	95	571	79	114	41	21
Sr	85	166	89	239	45	25	0	0
Co	99	2970	99	2970	96	651	95	541
75%	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	98	1768	96	759	82	139	44	23
Sr	82	134	90	268	51	31	0	0
Co	99	2970	99	2970	98	1331	96	662

(b) MX-80 膨潤土+花崗岩								
B+G	NaCl (M)							
	0.001		0.01		0.1		1	
50%	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	99	2970	96	684	73	81	29	12
Sr	77	98	87	208	40	20	0	0
Co	99	2970	99	2970	88	211	85	168
75%	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	99	2970	96	654	79	116	38	18
Sr	85	171	91	293	48	27	0	0
Co	99	2970	99	2970	97	1025	97	844

表 9、不同 Na 離子濃度（0.001~1M）於定比例（50、75%）混合岩石樣品（日興土+岩石）之吸附率 S（%）及分配係數 K_d 值（mL/g）。

(a) 日興土+硬頁岩

Z+A	NaCl (M)							
	0.001		0.01		0.1		1	
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
50%								
Cs	99	2970	97	926	79	111	43	22
Sr	56	38	56	38	45	24	0	0
Co	99	2970	99	2970	95	569	95	533
75%								
Cs	99	2970	97	995	79	111	45	25
Sr	64	52	62	49	47	27	0	0
Co	99	2970	99	2970	97	1093	95	599

(b) 日興土+花崗岩

Z+G	NaCl (M)							
	0.001		0.01		0.1		1	
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
50%								
Cs	99	2970	97	995	70	70	30	13
Sr	48	28	53	34	41	21	0	0
Co	99	2970	98	1371	91	309	84	154
75%								
Cs	99	2970	97	995	77	103	40	20
Sr	59	42	61	47	49	29	0	0
Co	99	2970	99	2970	96	753	94	504

(3) 合成地下水：

為了更真實地反應放射性廢棄物處置場的放射性核種遷移行為，本計畫以台東（達仁）和金門（烏坵）地下水之地球化學條件，並以 Na、K、Ca、Mg、Cl、S 等離子做為模擬當地之合成地下水之主要元素，進行銻、鋇、鈷之吸附實驗。

實驗結果整理如表（10、11），並由吸附率 S（%）及分配係數 K_d 值的結果發現，不同地下水濃度（台東與金門），於固定比例（75%）混合岩石樣品，對銻、鋇、鈷的吸附效應均受到離子強度增加而降低；其結果相似於當 Na 離子濃度大於 0.1M 時，對銻、鋇、鈷的吸附效果有明顯降低之情形。除了離子強度的競爭關係之外，亦可發現其他的離子，如：K、Ca、Mg、Cl、S 等，亦可能影響對銻、鋇、鈷的吸附行為。其中，以對鋇的吸附效應影響最大，其可能與地下水中含有高濃度鈣離子而大大地降低了對鋇的吸附率（~0%）。

IV. 結論

本研究計畫主要在探討膨潤土對放射性核種銻、鋇、鈷的吸附特性，以及其受不同地下水環境影響之差異吸附行為分析，藉以提供後續選址工作之依據。

結果顯示在等比例混合（膨潤土）大（等）於 50%（膨潤土 50%+母岩 50%，膨潤土 75%+母岩 25%）時，對銻、鋇、鈷的吸附率平均約 90% 以上。而溶液中鈉離子大於 0.1M 時，對鋇及銻的吸附競爭效應相當明顯，即等比例混合（膨潤土）對銻、鋇、鈷吸附率大幅降低，其成果亦將可作為日後處置場規劃設計條件之重要參考。

表 10、模擬台東地球化學條件之合成地下水於固定比例混合岩石樣品對銻、鋇、鈷的吸附率 S（%）與分配係數 K_d 值（mL/g）。

台東

B	100%		75%		0%	
	(B)		(3B+A)		(A)	
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	88	228	88	227	45	24
Sr	59	44	50	30	10	3
Co	95	608	91	303	53	34
Z	100%		75%		0%	
	(Z)		(3Z+A)		(A)	
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	82	137	87	204	45	24
Sr	42	22	39	19	10	3
Co	95	548	90	277	53	34

表 11、模擬金門地球化學條件之合成地下水於固定比例混合岩石樣品對銻、鋇、鈷的吸附率 S（%）及分配係數 K_d 值（mL/g）。

金門						
B	100% (B)		75% (3B+G)		0% (G)	
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	48	28	45	25	3	1
Sr	0	0	0	0	0	0
Co	72	77	57	40	0	0
Z	100% (Z)		75% (3Z+G)		0% (G)	
	S(%)	K _d	S(%)	K _d	S(%)	K _d
Cs	47	27	41	21	3	1
Sr	0	0	0	0	0	0
Co	78	103	64	53	0	0

參考文獻

- [1] Pigford, T.H.. The Engineered Barrier System: Performance Issues, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 249, 657-662 (1993).
- [2] Jan, Y.L., S.C. Tsai, J.C. Jan, C.N. Hsu, *J. of Radio. Nuclear. Chem.* 267 (2006) 1.
- [3] Lee, C.P., M.C. Wu, T.L. Tsai, H.J. Wei, L.C. Men. Comparative study on sorption additivity of individual and coexisting cesium and selenium on bentonite/quartz sand mixtures, *International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*, 2, 1, ISSN:2226-3217 (2012).
- [4] 許俊男，低放射性廢料處置場址特性參數審查評估之研究—銻、鋇、鈷在省產黏土礦物中擴散參數之研究，原能會物管局專題研究報告（1995）。
- [5] 林哲毅，「從緩衝材料觀點研究放射核種在膨潤土中的吸附與擴散行為」，碩士論文，國立清華大學原子科學研究所，新竹（1997）。
- [6] 工研院，「小坵嶼地下水文調查工作報告」，共105頁（2001c）。
- [7] 陳文泉，「高放射性廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究」，博士論文，國立中央大學土木系，中壢（2004）。
- [8] 郭明峰，「皂土-碎石混合物之壓實性質」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢（2004）。
- [9] 吳柏林，「放射性廢料處置場中砂-皂土混合緩衝材

料之壓實性質」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢（2004）。

- [10] 吳冠漢，「緩衝材料於近場環境下之體積穩定性研究」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢（2004）。
- [11] 曹瑞軒，「模擬低放射性廢棄物處置場於工程障壁地下水化學分析」，碩士論文，國立臺灣大學生環系，台北（2011）。
- [12] 張皓鈞，「放射性廢棄物最終處置場緩衝材料與混凝土障壁的交互作用」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢（2011）。

核電廠除役時用過燃料池意外事故安全研究

Safety assessment on the accidents of spent fuel pool during decommissioning

計畫編號：103-NU-E-214-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王曉剛

e-mail：skwang@isu.edu.tw

計畫參與人員：王曉剛、陳美惠

執行單位：義守大學機械系

摘要

核電廠除役時，因為反應器壓力槽已停機燃料退出，影響大眾安全最重要之設備乃用過燃料儲存池(spent fuel pool)。本研究主要之工作包括：

1. 研究並評估熱移除系統能力減弱或喪失對於用過燃料池(燃料棒)的影響。此部分以計算流體力學軟體 FLUENT 計算，估算出之時間約為 80 小時，此結果與國外分析類似。

2. 研究並分析屏蔽物(阻圍體)因除役工作遭移除，放射性物質外釋的可能影響。此部分實際施行將使用世界通用之 RESRAD 軟體計算各種核種在附近位置與時間之濃度關係變化。但此軟體中之重要參數“面積因子”與發射源型態與天候有關，故此研究以流體力學方式估算面積因子與發射面積、顆粒大小、風速等參數之關係，其結果將可提供相關單位在人員疏散決定及其他研究之考量。

關鍵字：電廠除役，用過燃料池，CFD 軟體，RESRAD 軟體，面積因子。

Abstract

This study performs an evaluation of the potential accident risks in spent fuel pools at decommissioning plants in Taiwan. This study includes two parts:

(A) A thermal-hydraulic analyses, based on a modeling approach of a typical decommissioning plant with design assumptions and industry commitments, is performed by using CFD simulations to evaluate the behavior of spent fuel rods stored in the spent fuel pool at decommissioning plants; specifically, the time for the water level to drop to 1 meter above the top layer of fuel bundles. The heat-up time thus evaluated is ~ 80 hours which is comparable and conservative as compared with similar studies performed abroad.

(B) The second goal is to analyze the release and dispersion of the radioactive fission products once the spent fuel rods are damaged due to loss of cooling. A feasible and efficient way of doing this is using the popular waste management code RESRAD with a modification of one of the most crucial parameters – “area factor” in order to perform the

current study. A mechanistic model based on fluid mechanics is presented with consideration of size of the source, wind speed, particulate diameter, and perception scavenge to evaluate the area factor. Therefore, RESRAD can be used with the area factor according to the conditions suitable to Taiwan nuclear power plants.

Keywords: decommission, spent fuel pool, CFD code, RESRAD, area factor.

I. 前言

核電廠除役時，因為反應器壓力槽已停機燃料退出，影響大眾安全最重要之設備乃用過燃料儲存池(spent fuel pool)。在運送至最終儲存場之前，用過燃料尚繼續產生核反應餘熱(decay heat)，因此於電廠除役時確保此儲存池之正常水位以達散熱效果為保護燃料棒安全之首要目標。燃料棒當冷卻水喪失時，核反應餘熱將快速提升燃料棒溫度而使得鋳合金棒套(zircaloy)與空氣或水蒸氣產生氧化而釋放出大量之熱能(每公斤鋳合金釋放 106 ~ 107 Joules 之能量)，而發生火災。此類事故原本被認為極不可能發生，但日本福島核災證實此事故的確發生，燃料棒燃燒造成大量之銫(Cs-137)排放至大氣中[1]，而台電核一廠之阻圍體正是與福島類似之 GE Mark-I 阻圍體，而其中之用過燃料棒池亦類似，故於核一廠除役時對於用過燃料儲存池之安全要有一安全審核機制與技術。本研究主要之工作為二：

(A) 評估熱移除系統能力減弱或喪失對於用過燃料池的影響。此熱移除系統能力減弱或喪失之原因可能為外在或內在以及突發事件引起燃料池嚴重失水而使燃料棒暴露，例如廠外或廠內之電源喪失，極端氣候例如颱風海嘯等，廠內失火，冷卻系統喪失，冷卻水流失，地震，重物墜落，飛機撞擊，龍捲風，恐怖組織攻擊，使燃料棒無法降溫，而導致鋳合金棒套與空氣或水蒸氣產生氧化而發生火災，甚至於燃料棒之再臨界(re-criticality)等極端結果之可能性及其發生概率等定性定量分析。研究重點在於意外產生時(燃料池無冷卻作用時)水位降低至 1 公尺之時間。本研究引用計算流體力學(Computational fluid dynamics, CFD)方法，發展對貯存池本身的熱流分析技術，並建立貯存池之幾何數學模型，且利用多孔性的模擬技巧(Porous medium)的技術來模擬實際眾多數目的燃料束，以達成最佳化的數值模擬工作；用過燃料池液面與空氣間的熱傳與質傳現象，採用等效熱傳係數(Effective heat transfer coefficient)的技巧簡化處理之。

(B) 研究並分析屏蔽物(阻圍體)因除役工作遭移除，放射性物質外釋的可能影響。因為除役時阻圍體也許已不存在而喪失防止放射性物質溢出之功能，故產生放射性物質外溢時其對環境與大眾安全影響之估算應更為保守與細密。此部分實際施行將使用世界通用之 RESRAD 軟體計算各種核種在附近位置與時間之濃度關係變化。但此軟體中之重要參數”面積因子”與發射源型態與天候有關，故此研究以流體力學方式估算面積因子與發射面積、顆粒大小、風速等參數之關係，其結果將可提供相關單位在人員疏散決定及其他研究之考量。

II. 主要內容

(A) 評估熱移除系統能力減弱或喪失對於用過燃料池的影響

對於本研究所探討的燃耗燃料貯存池而言，基本上可將其視為類似矩形體組合之幾何形狀。在一般的情況下，池中的流體同時受到強制與自然對流兩種效應的影響。在除役時假設因各種因素產生之意外事故，而使得各種池水冷卻、給水系統失效，而使得池水溫度上升，進而蒸發而導致水面下降，使得燃料裸露產生鋁合金燃燒而釋放出放射線物質，固本研究以最保守估計池水下降至燃料棒上方一公尺之處所需時間。由於熱傳、質傳的效應，使貯存池的部份熱能及水汽會經由此自由表面傳導至周圍環境的空氣中，為了考量結果的精確性，必須將貯存池傳遞的熱能於以定量。本研究將物理域的定義僅限於在於貯存池本身，並選用適當的熱傳導係數 (Heat Transfer Coefficient)、質傳對流及擴散係數 (Mass Transfer and Diffusion Coefficients) 作為邊界條件 (Boundary Condition) 來描述熱能及水汽散逸至周圍環境空氣中的情況。

對於池中燃料棒幾何形狀的定義就遠比貯存池來的複雜許多。基於燃料棒的數目過巨，倘若將其每根幾何形狀皆納入模型中，對於執行計算工作的計算機而言，恐怕無法負荷，或計算誤差累積過多而使得計算結果存疑。替代的途徑則是將所有燃料棒視為一個整體或數個區域，並採用多孔介質技術來描述實際上流體流經燃料棒所得的流動阻力。因此當池中燃料棒密度不同時，流體的流動阻力，隨而有不同的值表現出來，且流體流動的能力在三度空間內的各方向也會不盡相同。至於溫度場在池中引發的自然對流現象，擬採用布西尼斯克近似論 (Boussinesque Approximation) 來模擬重力差造成之浮力 (Buoyancy Force) 引發的自然對流現象。

由於大多臨界熱通率的經驗或半經驗公式均針對高壓力、高流量的系統條件而訂立，因此縱觀許多經驗公式後，我們選用適用於用過燃料池內部低壓力、低流量的經驗公式[2]來估算臨界熱通率，經驗公式(適用於低壓力、低流量)：

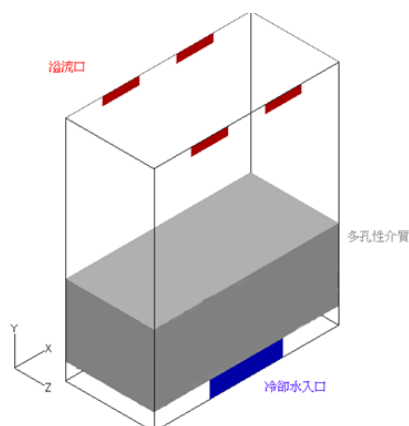
$$\frac{q''}{10^6} = \frac{0.0063 H_{fg} \left(\frac{G}{10^6} \right)^{0.51} (1 - x_{exit})}{D_e^{0.1}}$$

其中

G = (mass flux) , D = (hydraulic diameter) , x = 熱力學乾度(Thermodynamic quality)

數值方法

用過燃料池外觀如圖一所示，擁有兩個入水口及四個冷卻水溢流口。入水口距燃料隔架 1 公尺左右，乃是供餘熱移除系統(RHR Cooling System)注入冷卻水使用。



圖一 用過燃料池內部示意圖

在燃料池的模型建立方面，假設燃料池上方有一熱沉(heat sink)，此熱沉用來模擬池水與空氣的熱量傳遞與質量傳遞。根據數學模式所述，液面水溫為定值下，推算空氣在一大氣壓下、空氣溫度 20℃、20% 的相對溼度時，自然對流下的等效熱傳係數隨溫度變化如圖五所示。在圖五中可以發現，等效熱傳係數會產生一個極小值，此現象是因為在低溫時，熱傳與質傳效應成長趨勢並不明顯，但表面溫度與外界的差值已經變化成兩倍，甚至四倍，故會產生一個極小值出現。若考慮蒸發質傳效應對池水水位的影響，隨著溫度的增加池水的蒸發率也會隨著溫度做變動，便如圖六所示。再考慮風扇吹拂燃料池液面的強制對流效應，便如圖七所示。因為目前 CFD 處理隨溫度變化的等效熱傳係數尚有些問題待克服，是故暫且以液面平均溫度相對應的等效熱傳係數，求解不同條件下的用過燃料池內部流場及溫度場。

根據動量方程式裡的滲透率 與壓力降的關係，可簡單的以 Darcy 定律表示

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{\mu \times \bar{V}}{\kappa}$$

值越低代表多孔性的模擬技巧越密實，流阻較大。越高代表多孔性的模擬技巧越空洞，流阻較小。根據推算燃料匣內部的流速範圍約在 0~20cm/s。

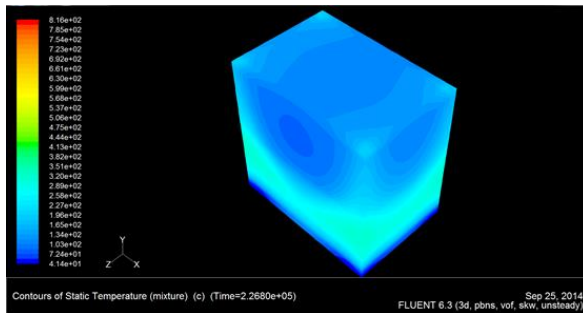
反應爐停機後約 24 小時後，衰變熱數值開始穩定為一定值。因此採用 quasi steady state 的方法，假設在模擬的有限時間內衰變熱為一定值。

本研究燃料池支模型為 11 x 11 x 7.5 m, 用過燃料池擁有兩個入水口及四個冷卻水溢流口。入水口距燃料隔架 1 公尺左右，分為上中下層，上層為 11 x 5.8 x 7.5 m 的水層，中間為多孔性界質(Porous)，為 11 x 4.2 x 7.5 m 的發熱源 (6.58 Mwt，以除役時所有燃料棒之平均儲存時間 15 年計算)，下層為水層 11 x 1 x 7.5 m。

FLUENT 軟體之邊界條件設定如下：設 20%濕度，攝氏 20℃，將四周、底面牆壁設為絕緣，只有將上方設為 Outflow(出口), 在 Models 點選 Energy 產生上層及下層

皆設為 Fluid, Fluent fluid materials: water-liquid(H₂O), 中間設為 Fluid, 為 Porous zone + Source terms, Heat generation rate = 18989.89 W/m³ (6.58*10⁶ W / (11*4.2*7.5) m³ = 18989.89 W/m³。Solid materials: steel (不銹鋼), 整體設為紊流。水池之周圍與底部以半無窮大介面(水泥)模擬之, 其熱傳模式假設為自然對流, 熱傳係數定為 5 W/m².K.

由模擬結果例如圖二得知, 多孔性介質表面達 100 度需要 12 小時, 燃料池表面 100 度大約為 63 小時, 估算池水完全達到飽和溫度, 所需時間約為 37.5 小時。



圖二 63 小時之側視圖

至於燃料棒束上方一公尺處池水因沸騰而蒸發之時間, 則以燃料上之臨界熱通量(critical heat flux, CHF)假設之, 因為此為最大熱通量, 故計算出之蒸發時間將為保守值。可求得完全蒸發至燃料棒束上方一公尺處約需 45.5 小時, 故加上池水達飽和狀態時間, 共需約 83 小時。美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commissions, NRC)曾經對用過燃料池喪失冷卻系統而導致池水喪失與燃料棒裸露而導致鋁合金燃燒之意外事故做過一系列之研究[3], 對於壓水式反應器(PWR)其結果為當燃料棒至少在池中儲存 60 天以上時, 燃料棒裸露時間約為 100 小時, 本研究以沸水式反應器(BWR)為研究對象, 但結果與 NRC 之研究結果接近, 本研究當有適度之可信度。

(B)研究並分析屏蔽物(阻圍體)因除役工作遭移除, 放射性物質外釋的可能影響

當燃料棒因燃料池水位降低燃料棒裸露而導致鋁合金因氧化燃燒, 放射線物質則將隨電廠在地之風向傳播至下風地區, 對人身造成威脅。放射線物質空污之傳播是相當複雜的問題, 美國能源部(DOE)從 20 多年前就致力研發放射線物質各種傳播途徑之研究, 其中以模擬軟體 RESRAD(residual radioactive material guidelines)已被各國廣泛使用, 台電及國內研究機構也使用多年, 然 RESRAD 產生之背景為蘇聯車諾比事故, 故其空污傳播方面之研究以考慮長期且大面積(遠程)之影響, 例如車諾比事故後, 因大氣層擴散將放射線物質傳輸至歐洲與美國, 故重視空氣中放射線物質之濃度與放射源濃度比值等相關問題。為求分析簡單, RESRAD 對放射線物質在大氣中之濃度是基於假設發射源為無窮大面積之污染放射源, 再以一修正因子估計真實有限污染放射源對下游地區放射線濃度之影響。此重要之參數為”面積因子”(area factor), 其定義為[4]

Area factor = (有限面積污染源產生之空污濃度)/(無窮大面積污染源產生之空污濃度)

在 RESRAD 軟體中此面積因子是以 $A1/2/(A1/2 + DL)$ 近似之, 其中 A 是污染源面積, DL 為擴散長度, 大致與污染源與下游測量點距離有關, 並與風速、風向、放射源顆粒大小、以及其他影響粒子傳輸之因素例如重力、降雨量等。此假設與分析方法當用於遠方大面積之長期之環境影響應屬合理, 因為以遠處觀測之, 污染放射源無疑可視為”點”放射源, 但以台灣核電廠而言, 產生放射線物質外洩(例如燃料池燃料失火釋放出放射線浮懸物)對外界影響是立即的, 且因台灣狹小, 研究放射源擴散之範圍不需如 RESRAD 廣泛, 大致以放射源數十公里甚至幾千幾百公尺處人煙密集處即為嚴重影響地區, 故 RESRAD 中視放射為點放射源及內建之面積因子之計算可能無法估算本計畫中場區附近放射線濃度之放射線濃度之要求。故本研究在此部分, 將以探討 RESRAD 之面積因子, 並結合流體力學粒子浮懸與傳輸, 加上因天候(例如風向風速, 降雨量等因素)而導致之粒子沉積等效果, 求出一適用於”面發射源”對於附近空污濃度之影響, 將來再以電廠當地之地理環境與天候資料, 計算出空污濃度。

本研究以”點”放射源為基礎, 進而以解析方法導出”線”放射源對風向下游處空屋濃度之分布, 最後再以近似方法求出”面”放射源之相關結果。最早提出對於點放射源之擴散研究為 Sutton[5], 假設一位於(0, 0, 0)之點放射源之放射強度為 Q_p , 則其附近(x, y, z)處之平均濃度為

$$\bar{\chi}_p(x, y, z) = \frac{Q_p}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

其中 σ 為擴散係數(dispersion coefficient), σ_y 與 σ_z 均為 x 之函數, u 為平均風速, x, y, z 分別為下風(downwind), 側風(crosswind), 垂直地面(vertical)方向。

此方程式可對 y 方向積分, 形成一”線”放射源(line source)其強度為 Q_L , 一長度為 $2y_1$ 之線放射源對下風處之平均濃度為

$$\bar{\chi}_L = \frac{Q_L}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \int_{-y_1}^{y_1} \exp\left[-\frac{(y-t)^2}{2\sigma_y^2}\right] dt$$

上式可將其簡化成

$$\bar{\chi}_L(x) \approx A \bar{Q}_L x^{-s}$$

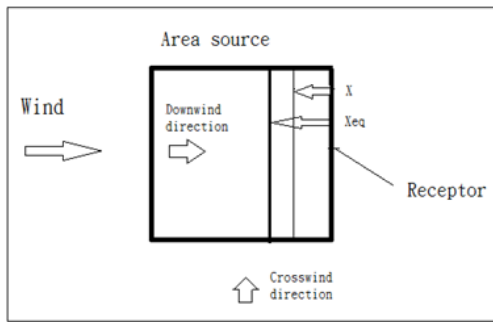
其中 $\bar{Q}_L$ 為限放射源之每單位長度放射強度, s 可表示為擴散係數之函數, 則此線放射源可沿下風處將面發射源以現發射源積分而求得

$$\bar{\chi}_A(x) \approx A Q_A \int_0^x \xi^{-s} d\xi = A Q_A x_{eq}^{-s}$$

其中 Q_A 為面發射源之強度, x_{eq} 為量測點距面發射源之等效距離(equivalent length), 可表示為

$$x_{eq} = (1-s)^{1/s} x$$

換言之, 一個面發射源對於量測點所測量之濃度可以假設為距離量測點上風等效距離之線放射源代表之, 以簡化面積分之複雜。此幾何關係可由圖三表示之。



圖三 面放射源幾何圖形

在 RESRAD 程式中，面積因子之取決有考慮到懸浮粒子因重力及天候(降雨降雪量)而產生之沉積(deposition)而停止繼續擴散，在此研究中此類沉積以流體力學理論估算沉積速度 V_d ，其中分為因重力而產生之乾式沉積(dry deposition)以及因為天候而產生之濕式沉積(wet deposition)。在乾式沉積中，放射源因沉積而減少之放射強度為

$$Q_{dry}(x) = V_{d,dry} \chi(x)$$

其中 $V_{d,dry}$ 為因重力而產生之向下沉積速度， $\chi(x)$ 為在 x 處之表面污染濃度。對於微小顆粒之沉積可用 Stokes law 表示之

$$V_{term} = \tau g$$

其中 V_{term} 為粒子終端速度(terminal velocity)， τ 為一特徵時間長度，由 Stokes law 可得

$$\tau = \frac{d^2 \rho_p}{18 \mu_a}$$

其中 d 是粒子直徑， ρ_p 是粒子密度， μ_a 為空氣黏滯力。結合上兩式可得乾式沉積速度

$$V_{d,dry} = \frac{d^2 g \rho_p}{18 \mu_a}$$

濕式沉積亦可以沉積速度表示之，在濕式沉積中，放射源因沉積而減少之放射強度為

$$Q_{wet}(x) = V_{d,wet} \chi(x)$$

其中 $V_{d,wet}$ 為因降雨量而產生之向下沉積速度，此速度取決於年降雨量、雨滴大小、以及雨滴在空中降落長度。其中雨滴直徑可用平衡重力與表面張力求得

$$d_R = (3\sigma / \rho_R)^{1/2}$$

其中 d_R 為雨滴直徑， σ 為表面張力， ρ_R 為與低密度。假如娘降雨量為 $R(\text{cm/year})$ ，則平均雨滴降落密度為 $6.06E-1 \times R/d_R^3 (\text{raindrops/m}^2.\text{s})$ 。對於每一個雨滴從高度 H 降落，則此雨滴可吸附之放射線強度為

$(\pi d_R^2/4)H \chi_{ave}(\text{curies})$ ，根據點放射源之發散理論[4]，當高度距地表 $\sim 3\sigma_z$ 以上放射濃度下降至 $\sim 1\%$ ，固可合理假設濕式沉積產生於距地表 $3\sigma_z$ 處，且此高度之平均濃度可用地表濃度之一半近似之，則可得到濕式沉積速度

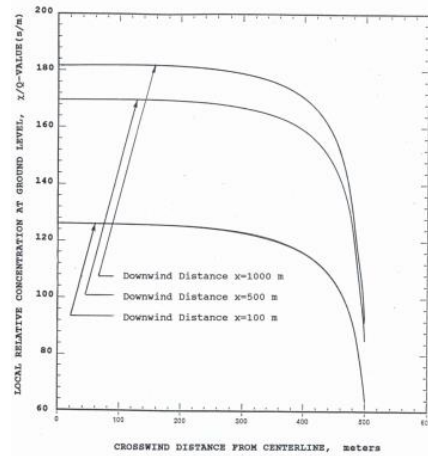
$$V_{d,wet} = 1.52 \times 10^{-7} \sigma_z R$$

故加入因重力與雨水關係而減低放射源強度後之發射強度為

$$Q_{eff}(x) = Q - (V_{d,dry} + V_{d,wet}) \chi(x)$$

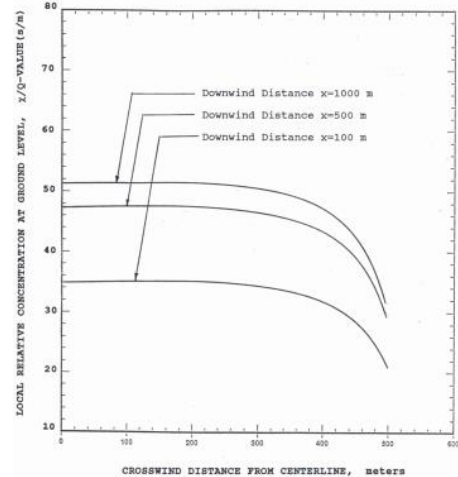
此 Q_{eff} 可以修正加入重力與降雨量之面發射源強度。

本研究以數值分析方法求出面發射源在發射源下風地表處放射線濃度之數值 $\chi(x)$ ，並以 $\chi/Q\text{-value}$ $[(\text{ci}/\text{m}^3)/(\text{ci}/\text{s}.\text{m}^2)]=(\text{s}/\text{m})$ 表示之，本研究計算之風速為 1, 2, 5, 10 m/s，懸浮顆粒大小為 1, 2, 5, 10, 20, 50 μ ，面發射源之大小($L \times L$)之 L 為 1 至 10000 m。此計算首先以 $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ 之面發射源為計算比較基礎，首先比較風速對放射性物質濃度之影響，圖四為小顆粒子 (1 μ) 在低風速(1 m/s)時下風處不同距離之相對濃度比值。在此圖中下風處 $x = 1000 \text{ m}$ 代表面發射源下風終端邊緣處，故所計算之濃度值最高。粒子因重力與雨水而產生之沉積速度分別為 $4.86E-5 \text{ m/s}$ 與 $2.12E-4 \text{ m/s}$ ，故當懸浮粒子顆粒小時 ($d \sim 1 \mu$) 沉積主要因為雨水，而重力因素可忽略。風速對濃度之影響有二：風速越高越容易使發射源之粒子懸浮，但亦使懸浮物漂浮遷移更遠距離而使得濃度下降，濃度對速度以 $\sim 1/U^2$ 而下降。



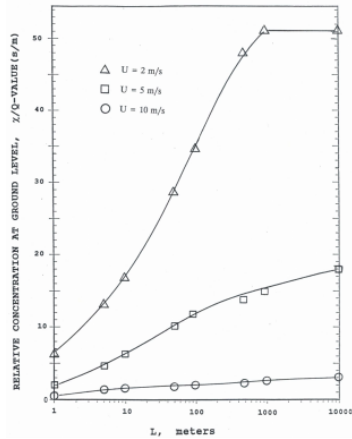
圖四 下風地表處相對濃度 ($dp = 1 \mu$ and $U = 1 \text{ m/s}$)

浮懸粒子對濃度之影響示於圖五。此計算顯示，當風速下降至 $U \sim 1 \text{ m/s}$ 時無法使發射源之粒子($d = 20 \mu$)懸浮至空中。在此顆粒大小下，重力與雨水沉積速度分別為 $1.95E-2 \text{ m/s}$ 與 $2.12E-4 \text{ m/s}$ ，故此時粒子沉積主要是由於重力，雨水之關係可以忽略。因為此大小顆粒之沉積速度幾乎為小顆粒粒子($d = 1 \mu$)之 100 倍，故計算之濃度亦下降，但當風速高時，預測之濃度與粒子大小之關係不大，至於風速對濃度之影響還是以近乎 $\sim 1/U^2$ 而下降。



圖五 下風地表處相對濃度 ($dp = 20 \mu$ and $U = 2 \text{ m/s}$)

面發射源面積對濃度之影響示於圖六。面積大小由 1×1 至 $10000 \times 10000 \text{ m}^2$ 。此計算顯示，在面發射源下風邊緣處之相對濃度與面積大致呈現線性增加關係，而與風速平方成下降關係。相對濃度在面積增加至一定值後呈現一極值而不再增加，這代表當面發射源面積夠大時，在下風處所量測之濃度近似於無窮大之面發射源產生之濃度。



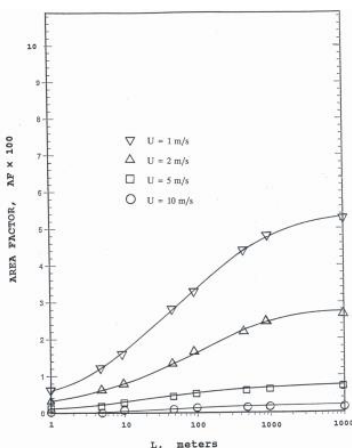
圖六 發射源面積對相對濃度之關係 ($d_p = 20 \mu$)

最後，面積因子(area factor)之計算可由有限面積之發射源相對濃度除以上述之相對濃度極值，此極值可將濃度方程式中 $\chi(x)$ 對 x 微分而求得，此極值產生於 $\chi/Q \sim 1/V_d$ ，故

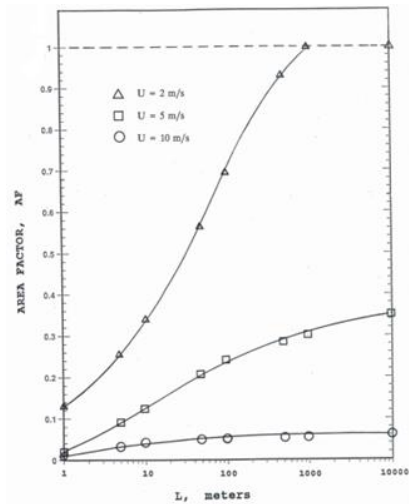
$$AF = \frac{(\chi/Q)_{finite}}{(\chi/Q)_{max}} = (\chi/Q)/(1/V_d)$$

各種風速與顆粒大小之面積因子之關係示於圖七。由此些圖可知，當風速高且粒子顆粒小時會導致濃度減少而使得面積因子下降，反之，當風速低且粒子顆粒大時，粒子沉積現象顯著而導致當放射源面積達到一極值時濃度會達到一最大值。

此面積因子可直接使用於 RESRAD 軟體中，且各種核種之衰變均考慮於 RESRAD 中，故實際使用於預測因為燃料棒燃燒產生放射線物質對附近環境之安全影響分析時，必須先考慮火災發生時可能產生放射線物質之面積(面發射源)，以及產生顆粒之大小，再參考當地當時之天候，則可估算電廠附近放射線空汙對距離甚至時間之關係，以作為安全評估與地方政府緊急計畫參考。



圖七 面積因子 ($d_p = 1 \mu$)



圖八 面積因子 ($d_p = 20 \mu$)

III. 結果與討論

本研究主要之研究結果有兩部分：

1. 研究並評估熱移除系統能力減弱或喪失對於用過燃料池(燃料棒)的影響。此部分以計算流體力學軟體 FLUENT 計算，估算出水面下降至燃料棒上方 1 公尺處之時間約為 80 小時，此結果與國外分析類似。
2. 研究並分析屏蔽物(阻圍體)因除役工作遭移除，放射性物質外釋的可能影響。此部分實際施行將使用世界通用之 RESRAD 軟體計算各種核種在附近位置與時間之濃度關係變化。但此軟體中之重要參數”面積因子”與發射源型態與天候有關，故此研究以流體力學方式估算面積因子與發射面積、顆粒大小、風速等參數之關係，其結果將可提供相關單位在人員疏散決定及其他研究之考量。

參考文獻

- [1] Stohl et al., “Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition,” Atmos. Chem. Phys. Discuss., 11, 28319-28394, 2011, <http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/11/28319/2011/acpd-11-28319-2011.html>.
- [2] Jason Chao, 1980, “COBRA-3C/PERTR”.
- [3] Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants, NUREG-1738, US NRC.
- [4] Gilbert, T., et al., A manual for implementing residual radioactive material guidelines, ANL/ES-160, DOE/CH/8901, prepared by Argonne National Laboratory for U. S. Department of Energy (June 1989).
- [5] O. Sutton, “The theoretical distribution of airborne pollution from factory chimneys”, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 73: 426, 1947.

使用無線射頻辨識(RFID)技術於放射性廢棄物之環境 Using RFID Technology in the Environment of Radioactive Waste

計畫編號：103-2623-E-027-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王多柏

e-mail：tpwang@ntut.edu.tw

計畫參與人員：黃敬翔、許為青

執行單位：國立臺北科技大學電子工程系

摘要

本計畫以“被動式長距離抗金屬標籤”為基礎，進行 RFID 標籤用於貯存體材質之實務評估與驗證、金屬體環境中 RFID 讀取率之研究，以及 RFID 讀取器 Reader 的放置位置，以達到最佳的有效讀取距離，在放射性環境中，放射線對 RFID 電氣特性影響也是需要實際量測與驗證。

關鍵詞：無線射頻辨識、放射性廢棄物。

Abstract

The plan to "passive long-range anti-metal label" as the basis for the placement of RFID tags practice of storing body material evaluation and validation studies metal body environment of RFID read rates, and Reader's RFID reader, effective to achieve the best reading distance, in radioactive environments, radiation effects on the electrical characteristics of RFID also need actual measurement and verification.

Keywords: RFID、Radioactive Waste.

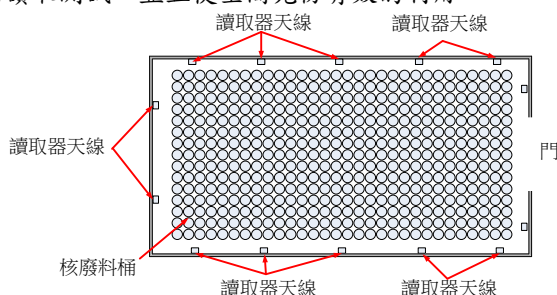
I. 前言

為因應核能發電系統的穩定發展，對於發電後所產生之放射性核廢料之長期貯存、管制、與監測等處置議題，一直以來都是被政府以及人民所關注的重要研究課題，在於現有的傳統貯存方式之外，本計畫提出加入無線射頻辨識(Radio-Frequency Identification, RFID)技術提升管理的方便性和可靠性

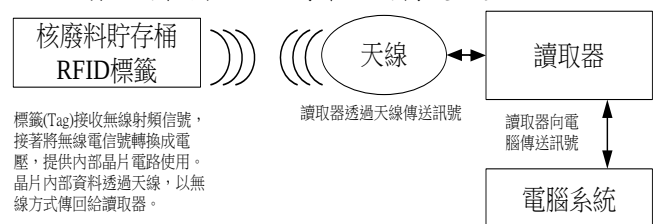
II. 主要內容

由於核廢料桶越堆越多，因此，擬採用系統方式做統一管理，達到安全、有效率、可資料追蹤的方式。

下圖所示為長期貯存空間示意圖，規劃了貯存與貯存空間 RFID Reader 的放置位置，為了達到最佳的有效讀取距離，我們擬在貯存空間放置 RFID Reader 做標籤的讀取測試，並且使空間充份有效的利用。



如下圖所示為無線射頻辨識系統示意圖，使用讀取器的需求資訊，確定讀取器/標籤的相對位置關係，包括讀取器和標籤的距離、相對角度等，須將標籤至於讀取器可以讀取的範圍內，並有最佳的角度位置。



III. 結果與討論

僅使用單一天線讀取金屬罐，如金屬罐堆疊兩層以上，位於內部的金屬罐會發生讀不到的問題，這是因為金屬屏蔽效應造成的影響。如果要改善這種情形，需要使用至少 2 個或以上的天線來完成才行。

目前，使用金屬罐來做 RFID 的測試，將來可以實測於核廢料桶，且在海洋氣候與放射性環境中的儲存場，鹽度、濕度與放射線對 RFID 電氣特性影響也是需要實際量測的，以及多天線的干擾與分析，都是需要經過測試。

IV. 結論

在放射性核廢料長期貯存的空間規劃與考量方面，儲存桶所擺設的相位置對於 RFID 的讀取率亦會受到影響，這部分也需要依照實際空間做規劃。我們擬釐清無線射頻辨識(RFID)標籤用於貯存體材質之評估與分析，與實施無線射頻辨識(RFID)系統之多樣識別標籤進行實際的環境對效能讀取率之研究。其中又以 Reader 天線用於放射性廢棄物貯存環境之設計和無線射頻辨識(RFID)系統對長期貯存與貯存空間充份利用之規劃作為其中首要的兩個要件。

參考文獻

- [1] 有話好說，2013。http://talk.news.pts.org.tw/2013/03/blog-post_19.html
- [2] 蘭嶼貯存場廢料桶檢整重裝作業管制現況，行政院原子能委員會，2011。
- [3] 林丁丙，“天線課程講義”。
- [4] 核廢料存放，核能與科技，2013。
- [5] 王多柏，“無線射頻辨識(RFID)技術用於放射性廢棄物長期貯存、管制、與監測之研究”，102 年度國科會計畫，2013。

先進國家地底實驗室岩力實驗之規劃與成果研析

Study on the Rock Mechanics Programme and Experimental Results of URLs

計畫編號：103-NU-E-032-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊長義

e-mail：yang@mail.tku.edu.tw

計畫參與人員：楊智凱

執行單位：淡江大學土木工程系

摘要

本研究收集與研析：(1)芬蘭 Posiva 公司累積 30 年設計開發 Olkiluoto 最終地質處置場之規畫試驗公開資料庫的研究報告、及建造 ONKALO 地下設施與驗證試驗經驗，精簡節錄其每一本報告之重點並簡化整理成一單頁面參考資訊；(2)瑞典 SKB 在 Äspö 地底實驗室執行之岩力相互耦合試驗經驗，整理其試驗經驗與結論；並(3)根據現階段我國地質處置場之規劃概念、及現有最具可行性且資料較完整之離島花崗岩現地實際試驗資料，嘗試規劃與進行比對，以提供我國未來在規劃相關的地下試驗或地底實驗室配置之參考。

關鍵詞：地質處置場、地底實驗室、岩石力學實驗。

Abstract

Learning URL's experimental experiences is a shortcut to well make Taiwan URL planning and construction the final repository design. This research focuses on studying the rock mechanics experiment programme and results in ONKALO in Olkiluoto and Äspö in Sweden. The main topics involve the experiment planning, measurement approaches and developing instruments, and test results. The key points of literature research results in URLs are summarized and listed in an one-page sheet.

Keywords: Geological repository, Underground research laboratory (URL), rock mechanics experiment.

I. 前言

地底實驗室(URL)是設立於適合當地質處置場之相同地盤或類似地盤內，通常位在地下幾百公尺深處的母岩，是用來驗證及開發深層地質處置(DGR)的相關技術，其真實性是一般僅在表層岩盤之研究所無法替代的。透過 URL 研究工作，期望可以提供有關地質處置場在建造、營運、封閉、長期安全評估之所有實用資料。

URL 的類型分二種(NEA,2013)：(A)依附在既有地下坑洞內，額外規劃新開挖的「一般性的地底實驗室」(Generic URL)進行特定的實驗，如加拿大 Mine-by Experiment，目的僅止確認在其他地方建置處置場時的知識或方法，不用作真正廢料處置場。(B)在處置場場址或附近建造於一處有「特定場址地底實驗室」(Site-specific URL)，如芬蘭 ONKALO 地下研究實驗室，以進行實驗探索研究或成為處置場的初期建設，可供好幾年實驗之設施空間。世界上對深層地質處置之花崗岩場址性能問題的研究，領先研究的國家例如芬蘭(Posiva

的 Olkiluoto 最終處置場)、瑞典(SKB 的 Äspö 地底實驗室)，見圖 1.1，長期已投入長達三十幾年且大批的高級研究人力於地底實驗室(URLs)進行實地、長時間、足尺寸的試驗，甚至跨國合作有很強的研究團隊參與。

台灣長久以來在花崗岩質母岩之一般室內、或現場岩力試驗成果則甚是不足，仍急待投入大量本土研究，才能趕上政府規劃於 2029 年進行詳細場址調查或設立台灣本土 URL 進程。要達成此一目的，最快速有效的做法就是汲取先進國家 URL 的試驗研究經驗，包括國外 URL 的規劃經驗、及 URL 研究成果與結論，以減低我國未來假如要規劃本土性 URL 時的犯錯機率，甚至可及早預先思考一套台灣虛擬的 URL 之參考。



圖 1.1 芬蘭 Olkiluoto 處置場與瑞典 Äspö 實驗室

II. 主要內容

2.1 芬蘭 ONKALO 地下研究設施

Posiva 於 2004 年開始佈設 ONKALO 地下研究設施(見圖 2.1)，進行大規模的現場實驗及場址調查工作，以確保其經驗移植到 Olkiluoto 處置場實際運作時之安全性。ONKALO 本身的建造過程就是一個大型的現地試驗，預定 2014 年完成實驗，ONKALO 坑道設施日後則成為部分抵達 Olkiluoto 地質處置場的通道。

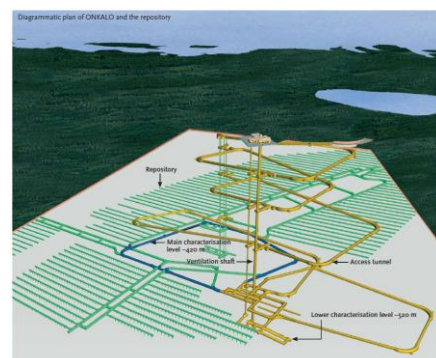


圖 2.1 Olkiluoto 處置場(綠色)與 ONKALO 地底設施

在 ONKALO 所進行的研究(在接近最終處置深度地下-420m 至 437m 之間),可提供了解深層地質處置場的岩盤狀況調查描述、地下水流動行為資訊、及開挖建造對此等狀況的擾動影響程度,以及未來處置場規劃與設計時所需資料。其中,岩石力學技術與驗證研究可用於了解內部岩盤之現地應力方向大小、與岩石強度、及開挖對岩石的損傷。

Posiva 在選定 Olkiluoto 最終處置場與 ONKALO 地下研究設施之前,就曾回顧:(I)加拿大 URL 及(II)瑞典 Äspö URL,其中除收集回顧其(III)岩石力學參數(岩石強度、變形性、現地應力),特別(IV)探討音射(AE)之使用配置,(V)岩石力學模擬與分析,並回顧(VI)岩盤各類監測方法,例如 URL 之音射使用、透地雷達的檢測破裂、微音速儀(Micro-velocity probe)探測岩石損傷裂縫、微震 MS(Microseismic)監測岩石脆性破裂不穩現象、伸張儀及收斂觀測變位改變。此等準備工作,仿照 Posiva 建置 Olkiluoto 最終處置場與 ONKALO URL 所考慮文獻回顧主題,直接也可促使準備規劃 Taiwan URL 之正確方向。

Posiva 公司共有 30 幾年實驗資料,已累積很豐富的研究報告—Posiva report、與詳盡工作報告—working report。而且 Posiva 資料庫也包括與 Äspö URL 合作或參酌加拿大 AECL URL 的成果, Posiva 公司的資料庫應是目前國際上最具全面性考量,更是本報告彙整重點。

在 Posiva 資料庫豐富實驗研究報告中, Hudson and Johansson(2006)將 2005 年以前有關岩石力學領域 80 篇研究大概可分成以下[01]~[15]類主題,可做為台灣岩力試驗規劃之參考。

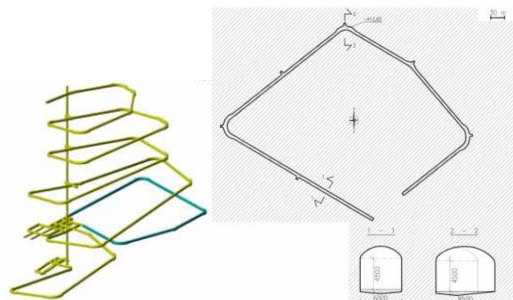
- [01] Olkiluoto 及其他場址與文獻之資料整理
- [02] 岩盤之現地應力情況
- [03] 完整岩石性質
- [04] 弱面性質
- [05] 岩體性質
- [06] 變形區之岩石性質
- [07] 岩體分類經驗
- [08] 岩石之熱力學性質與分析
- [09] 岩石力學模擬與分析
- [10] 岩石力學之規畫
- [11] 開挖效應:應力損傷、EDZ、岩塊破壞
- [12] 現地岩石量測與監測(含微震監測)
- [13] 岩石之長期行為與其開挖後之長期行為
- [14] 預測模型與 URL 試驗之驗證
- [15] 開挖後之穩定安全分析

本報告的單一頁面(one-page)岩力試驗成果表之編號正是沿用此號碼予以編號;本研究有關 Posiva ONKALO 的試驗規劃、試驗方法、試驗成果及建議計綜整成 40 餘個成果表格。在此本文以下僅展示四張,單一頁面成果表樣式(詳細請參見完整報告(楊長義, 2015)):

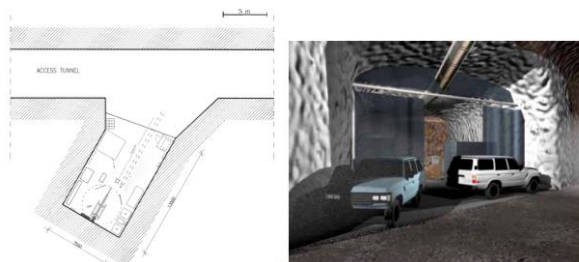
[10]-2 岩石力學之規畫 - 地底實驗室之規劃 (1)

岩盤特性調查隧道(characterisation tunnel)需建在處置隧道(deposition tunnel)的預定深度,大約座落於未來所有處置隧道群之中心代表位置,調查隧道應設計成迴圈型。本調查隧道斷面尺寸為寬 6 米、高 6.7 米,地面特別設計成一凹穴狀可以供排水作用、上鋪碎石的路面,路面坡度 1:100,並且每 250m 並設置斷面較大(寬 8.5 米)的迴轉空間,而短探壺坑(高度 4.5m)則設置於調查隧道通道的旁短小橫坑或稱壁龕(niche)。

[使用提示]:瞭解調查隧道之斷面尺寸及壁龕佈設



[圖說 10]-2-1: 在深 420m 規劃成迴圈型之場址特性調查隧道及隧道內每 250m 設迴轉空間



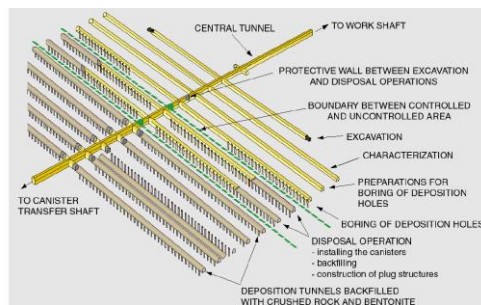
[圖說 10]-2-2: ONKALO 佈設在迴圈型通道旁橫坑(長 13 公尺)的探查試驗間

[範本 1] 彙整 Posiva 岩力試驗成果頁面報告

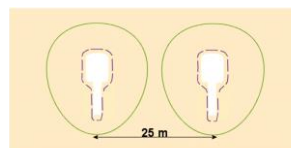
[10]-4 岩石力學之規畫 - 處置隧道群之開發次序

在一條兩線道中央隧道之兩側配置相互平行的魚骨狀配置之處置隧道群,兩個處置隧道之間距,須考慮避免開挖應力重分配(stress redistribution)之重疊互制問題,相隔至少 25m [曾經考慮間隔 40m(SKB SR-site 採用 40m)];又考量施工效益,處置隧道之長度最好不超過 350m,長度大多在 95m~165m。處置隧道群之開發次序,考慮處置作業與開挖作業可同步進行,且互不干涉,係由廢料桶輸送豎井端之處置隧道先儲存運轉之後並回填,同步並陸續擴充建造新的處置隧道群。而梳子內兩兩處置坑(deposition hole)之間距,以處置深度 400m 深為例,若考慮熱(thermal effect)效用目前訂為 11m 間格(針對 Olkiluoto 電廠燃料)及 8.6m 間格(針對 Loviisa 電廠燃料),是故應依不同核種來源而有區別(SKB SR-site 採用 6m,台灣採取 SKB SR-site at Forsmark 間格觀念(台灣應還須檢視岩石熱力性質與 Forsmark 異同))。

[使用提示]:瞭解處置隧道之長度限制及間距或處置坑間格概念



[圖說 10]-4-1: 逐步建造處置隧道群的概念(Anttila et al., 1999)



[圖說 10]-4-2: 兩條處置隧道之間隔 25 公尺(實線:應力重整範圍、虛線:開挖損傷區 EDZ)

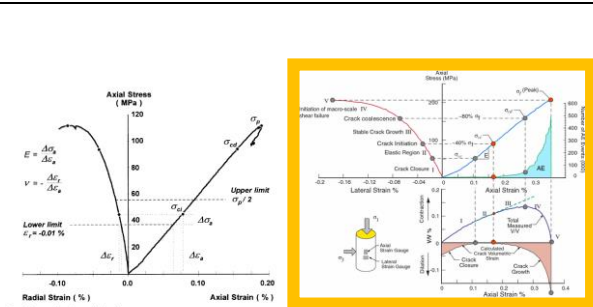
[範本 2] 彙整 Posiva 岩力試驗成果頁面報告

031-3 完整岩石性質

1997 年(WR-97-07e、WR98-77、POSIVA-97-04)取自深度 400~450m 及 550~600m 處 132 個雲母片麻岩(雲母平均含量 30%)、12 個偉晶花崗岩試體(直徑 62mm)，進行單軸及三軸壓縮試驗，並配合音射 AE(acoustic emission)技術監測破裂行為，獲得完整應力應變曲線(complete stress-strain curve)，指出應考慮試驗力學參數值之變異性，並建議需考量量理方向及雲母含量所造成的異向性及變異問題。

訂立岩石應力應變曲線的參數計算：彈性係數 E 值係取自 -0.01% 徑向應變處到 1/2 尖峰強度處兩點間之割線；張力強度 σ_t 以巴西人法試驗獲得；破裂損傷應力 σ_{cd} 定義為體積應變由壓縮轉為膨脹處之應力(不穩定破裂)；初始破裂應力(crack initiation stress) σ_{ci} 定義為總體積應變為零處之應力， σ_{ci} 可用以預測岩石長期現地強度(一般 $\sigma_{ci}/\sigma_{cd} = 0.4 \sim 0.6$)。圍束壓力小於 5MPa(或單壓)屬第二類(Class II)岩石不穩定破壞，意即過尖峰強度後岩石發生脆性破裂，但當圍壓高於 15 MPa 後可稍微穩定岩石峰後的脆性破壞行為。

[使用提示]：瞭解針對岩石材料之長期強度最多僅到破裂損傷應力 σ_{cd} ，不同於一般岩石工程僅取尖峰強度 UCS。圍壓大於 15 MPa 後可穩定岩石不穩定破壞行為，故處置場位置不宜太淺；彈性係數 E 係取自 -0.01% 徑向應變處到 1/2 尖峰強度處兩點間之割線模數。



【圖說 031-3-1：訂定獲取岩石彈性模數與破裂應力之定義

【範本 3】彙整 Posiva 岩力試驗成果頁面報告

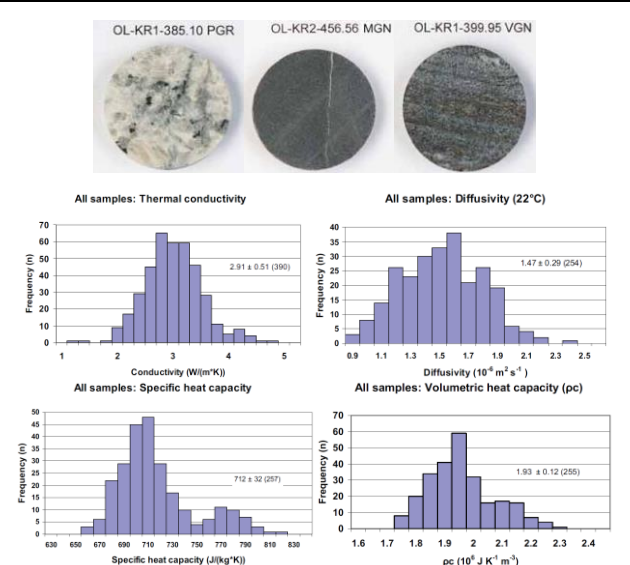
081-2 岩石之熱力學性質與分析

1994~2010 年之間芬蘭在 Olkiluoto 的 12 個鑽孔(深度 400~500m)、共進行 392 個岩心熱力性質試驗(WR 2011-17)。

在 25 °C 下，三類主要岩石平均熱傳導係數(thermal conductivity)為 2.91 Wm⁻¹K⁻¹，分散在 2.66~3.20 W⁻¹K⁻¹ 之間(標準偏差 0.4~0.6 Wm⁻¹K⁻¹)，偉晶花崗岩(Pegmatitic granite, PGR)最高、雲母片麻岩(Mica gneiss, DGN)最低。

在 25 °C 下，平均比熱(specific heat capacity)為 712 J·kg⁻¹K⁻¹(標準偏差 19~41 J·kg⁻¹K⁻¹)，脈狀片麻岩(Vained gneiss, VGN)及雲母片麻岩最高、偉晶花崗岩最低。平均熱擴散係數(Diffusivity)為 1.47×10⁻⁶ m²s⁻¹，分散在 1.34~1.75×10⁻⁶ m²s⁻¹ 之間(標準偏差 0.1~0.3×10⁻⁶ m²s⁻¹)，偉晶花崗岩最高、雲母片麻岩最低。

[使用提示]：瞭解 Posiva 熱力學性質試驗結果均具有標準分布特性，這是國內對任何岩石性質試驗所需檢視的重複性，片狀岩石之熱力學性質也須注意量理之異向性問題。



【圖說 081-2-1：Olkiluoto 偉晶花崗岩(PGR)之熱膨脹試驗係數(楊長義等，2014)

【範本 4】彙整 Posiva 岩力試驗成果頁面報告

2.2 Äspö 硬岩實驗室- 岩力耦合作用

Äspö 地下硬岩實驗室(Äspö HRL, Äspö Hard Rock Laboratory)座落於瑞典 Oskashamn 自治區的 Simpevarp 地區，整體工程包含開挖一條開挖起自 Simpevarp 半島的坑道一直挖到 Äspö 小島南端，螺旋迂迴向下達到 460m 深長度共 3600m，配置有一主要的豎井及二通風豎井與地面聯結。

目前 Äspö 地下硬岩實驗室吸引 8 個國家之九個研究單位協同研究。主要工作在開發技術與試驗方法驗證上，目前對特定議題進行的研究在 220m~460m 間已執行 21 個實驗計畫，主要在了解熱、水、力學、生化學耦合作用問題，如圖 2.2 所示：

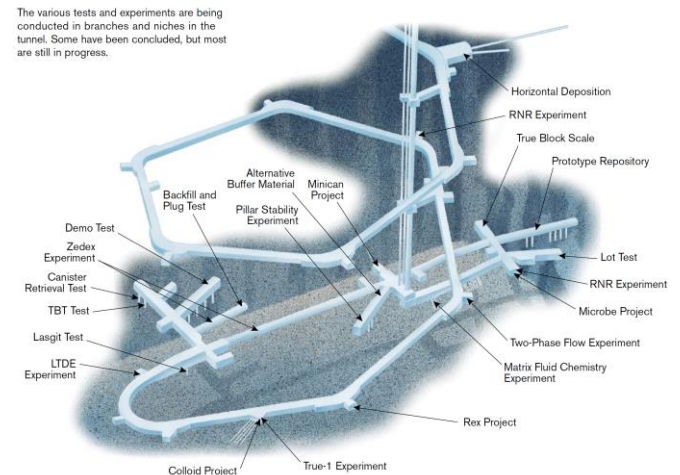


圖 2.2 瑞典 Äspö 硬岩實驗室於深度 220m~460m 處所規劃進行的各項現場實驗

其中，與岩石力學相關的有：(I) **APSE** (Äspö Pillar Stability experiment; Äspö 岩柱穩定性實驗)，在深度 450M 處進行岩柱穩定性實驗，目的在證明目前對岩石破裂剝落的預測能力、皂土緩衝材膨脹所產生之壓力對岩盤之效應、及比較各種預測熱與力耦合作用的模擬分析能力(詳見本案主持人 2013 年國科會/原能會研究報告 NSC-102-2623-E-032-002-NU)。(II) **Zedex** (Zone of Excavation Disturbance Experiment): 試驗目的在比較高應力地下，以 D&B 開挖法與以 TBM 法造成開挖擾動區(EDZ, Excavation-disturbed zone)差異。

Zedex 開挖擾動區之實驗：

Zedex 試驗目的，在比較高應力地下，以 D&B (Drilling and Blasting)開挖法與以 TBM(Tunnel-boring machine)法造成開挖擾動區(EDZ, Excavation-disturbed zone)之差異。包括，瞭解不同開挖法對 EDZ 區域力學及滲透性質之改變、EDZ 範圍；並測試各類量化檢視出 EDZ 範圍大小的方法(例如以 AE 音射技術可行性)與技術設備(例如以穿透性雷達執行的效果)。

EDZ 的範圍與性質，受(i)開挖方法 (ii)現地應力大小與其方向(iii)岩體強度與變形性(iv)周邊地下水壓力。故在 1994~1996 年，此一 Zedex 實驗係在深度 420m 處，開挖兩相互平行直徑 5m 的圓形實驗隧道，見圖 2.3，其

一是使用 D&B 法開挖(半圓形但底部水平)、另一者以 TBM 法開挖(圓形),又採 D&B 法隧道僅距原 TBM 隧道 25m,期使位於均質的 Åspö 閃長岩內地質條件相似,並特別使隧道軸向與最大水平應力安排成相互夾高角度關係,期盼可以產生較嚴重的開挖擾動 EDZ。

(A)鑽炸法 D&B 之開挖過程

以鑽炸法 D&B 開挖步驟,共分 11 輪開炸水平且直徑 5m 的圓形隧道(水平地面),與最大水平主應力夾角約為 45 度。前 2 輪不列入試驗內容,旨在去除進洞段的複雜應力幾何效益之干擾、並使後續開挖輪進研究可形成如平面應變條件。後續 4 輪開挖以低炸能鑽炸技術(low-shock energy smooth blasting)開炸,剩餘 5 輪以正常勻炸法(normal smooth blasting)技術開炸,開挖斷面 17.7m^2 ,實驗隧道長度 38.5m。

佈設於平行於 D&B 隧道軸向(開挖前)、部分由 TBM 隧道鑽向 D&B 隧道,探測孔長度可達數十公尺(40m~50m);及 D&B 隧道徑向(開挖後)之短孔監測探測孔(孔徑 86mm)配置,以探測裂損傷 EDZ 的延伸範圍與其他性質之改變。

(B)試驗結果比較

結果顯示,開挖隧道勢必造成應力重新分佈,隧道周邊損傷區 EDZ 性質之永久改變依使用量測方法不同而異。開挖隧道時會造成新裂縫之出現,(1)以 D&B 開挖可發生深入地板達 80cm 裂縫最長(染色劑可深入 50cm),深入側壁約 30cm 深。(2)以 TBM 開挖隧道則新裂縫多在 3cm 以內,地板、側壁、天花板差不多,損傷均勻。

EDZ 岩石之損傷裂縫密度高處,使得波速下降透水性增加,但很難證明 EDZ 岩石滲透性之增大(後來建議應量整個隧道斷面之導水係數(transmissivity))。

若用 AE 量測法,D&B 開挖 AE 事件可達 1m 遠、TBM 開挖則在數十公分,EDZ 是核種傳輸的優勢通道。EDZ 之外的擾動區(EdZ, excavation disturbance zone)多為彈性變形,故使用 D&B 或 TBM 開挖之 AE 事件非常少(都是既有裂隙之滑移),圖 2.4,雖有應力調整但材料性質不變。由 Zedex 經驗貢獻到實務上是:若用 TBM 開挖可假設岩石滲透係數沒太大改變;但若是用一般 D&B 開挖,地面深 1m 內的岩石滲透係數可提高 100 倍。

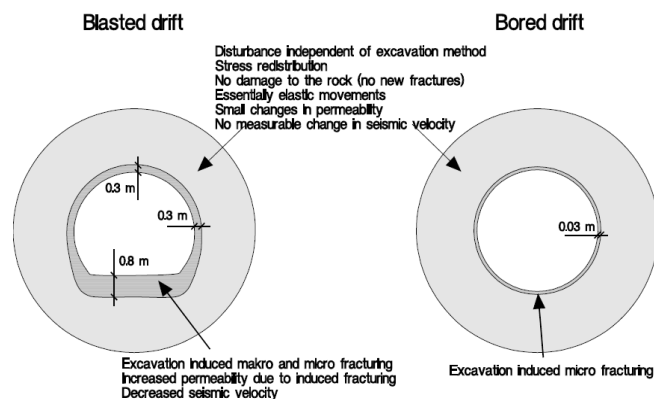


圖 2.3 以 TBM 與 D&B 開挖造成 EDZ 範圍(及 EdZ)

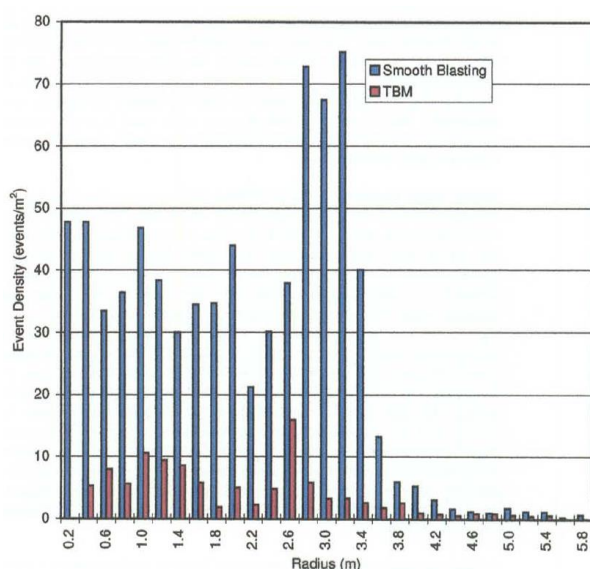


圖 2.4 TBM 與 D&B 開挖損傷 AE 事件比較

III. 結果與討論—應用於我國深層地質處置

本節依據台電(2010)論文所述公開資料為例,核能研究所於 2002 年提出之我國未來處置場設施配置初步概念設計,如圖 3.1 所示。處置場配置可分為地表設施、運輸通道、與地下設施三大部分:

- (1)處置場全長 1340m、寬 800 m(處置面積約 1.1km^2),可容納 2700 個廢料罐。
- (2)處置深度:地下設施預定位於地下 300~1000m。
- (4)處置隧道:隧道高度 4.1m/4.9m、寬度 3.6m、每一區 6 條相互平行隧道(長 320m),處置隧道間隔 40m(我國參考 SKB SR-site 採用)。
- (5)處置坑:處置坑深度 7.91m、直徑 1.75m、間距 6m(我國參考 SKB SR-site 採用)。
- (6)廢料罐:外徑 1.05m、高 4.91m 銅質外殼,內裡為鑄鐵之圓柱狀處置容器。

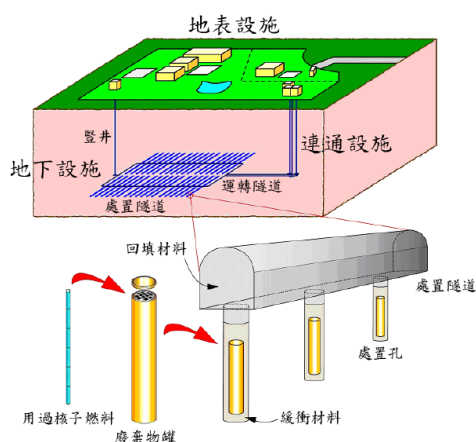


圖 3.1 我國暫定的處置場配置(台電, 2010)

3.1 我國岩盤之現地應力

根據台電(2003, 2004, 2006, 2010, 2012)工作成果報告及楊明宗等(2004),已經利用水力破裂法初步得知我國離島地區之現地應力資料,在深度 238、292、306、430(m)之最大、最小水平應力(σ_H, σ_h)分別為

(8.41,4.54)·(9.84,6.25)·(10.68,5.73)·(14.43,9.38) MPa， σ_H 方向大約在 N53°W~N76°W 之間；本文並進一步與本島地區之坪林隧道水力破裂法量測的現地應力結果比較如圖 3.2 所示，獲知離島地區最大主應力都比坪林隧道還高。

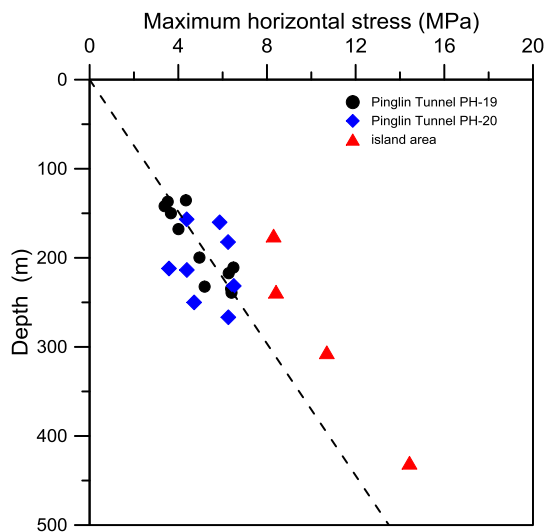


圖 3.2 我國離島與坪林隧道之水平最大主應力

3.2 我國的離島花崗岩母岩單壓強度分佈

根據公開於原能會網站(<http://www.aec.gov.tw/>核物料管制/管制動態/用過核子燃料最終處置管制動態)資料顯示：台電「我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段潛在母岩特性調查」有關報告，可查得離島地區的花崗質母岩之完整岩石強度性質(台電,2010)，台電在離島地區共完成 6 口深度達 500m 的鑽探(BH01~06)。91 年計畫為第一孔(BH01)、及第二孔(BH02)，93 年度計畫為第三孔(BH03)、第四孔(BH04)，其平均單壓強度，可獲知其完整岩石單壓強度(UCS)散佈在 58.97~106.56MPa，其算術平均為 UCS=82.77MPa，Hudson(1989)整理世界資料為 100~260MPa。

經本文另再增補金門大橋資料及離島深孔試驗資料，可將離島花崗岩質岩石 UCS 與深度關係可畫如圖 3.3，圖中顯示此地層岩石之 UCS 有隨深度而增加的趨勢，但因資料有限其規律本文目前尚難確定。

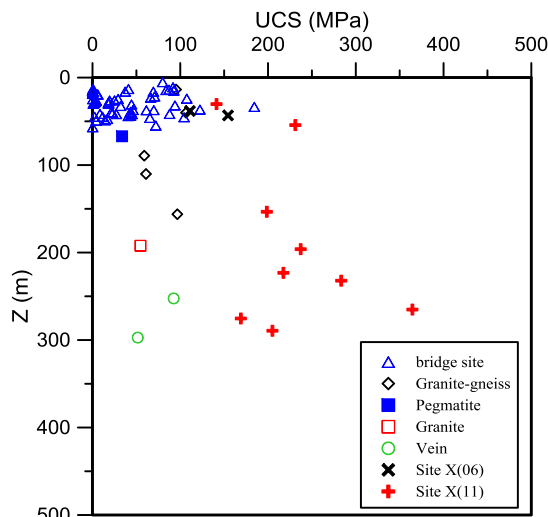


圖 3.3 離島花崗岩質岩石單壓強度與深度之關係

IV. 結論

參考芬蘭 Olkiluoto 處置場經驗，台灣未來在規劃深層地質處置場有關岩力實驗之完整性查核項目至少應包含：

- [1] 岩盤之現地應力
- [2] 完整岩石力學性質
- [3] 裂面性質與分佈特性研究
- [4] 節理岩體行為模式
- [5] 岩體分類應用修正
- [6] 既有變形弱帶之岩石性質
- [7] 開挖應力損傷效應
- [8] 現地量測與監測規劃
- [9] 岩石之長期穩定性行為
- [10] 預測模型與其經 URL 試驗結果之驗證

但因深層的地質處置之座落深度較深，岩石力學行為是屬於如圖 4.1 所示「應力控制」(stress-controlled)之強度破壞問題，故 (1) 現地應力(in-situ stress)與(2)完整岩石(intact rock)強度試驗資料相對重要，目前本研究依已公開可取得台電研究報告中試驗數據之資料品質，討論此二者對台灣在未來深層地質處置場或地底 URL 規劃時應注意的問題(詳參文獻[4])。

未來如為本土深地層處置技術發展及驗證，仍值得繼續朝規畫 Taiwan URL 之研究需要發想。以利思考規劃 2029 年台灣本地 URL 的屬性(一般或特定場址特性 URL)之抉擇，並利規劃出真正需要的岩力試驗項目；或若僅以參與它國 URL 協同研究以吸取實作經驗，亦應及早找尋 URL 合作目標國，例如與韓國或日本實質長期合作實驗。

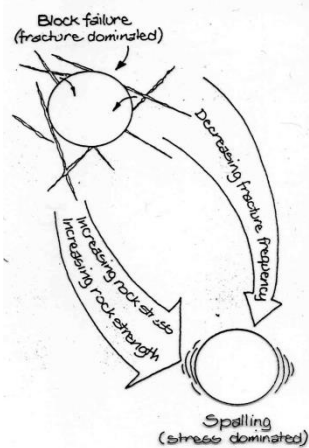


圖 4.1 深層地質處置是應力控制的岩力問題

參考文獻

- [1] NEA (2013), *Underground research laboratories (URLs) and geological disposal of radioactive waste*, IGSC, OECD/NEA.
- [2] Hudson, J. A. and E. Johansson(2006), *Summary of rock mechanics work completed for Posiva before 2005*, POSIVA 2006-04, Posiva Oy, Finland.
- [3] 台灣電力公司(2010)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告，SNFD2009。
- [4] 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，科技部補助專題研究計畫成果報告：NSC 103-NU-E-032-001-NU。

高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立

Neutron Dose Assessment and Spectrum Measurement Technology for Accelerators

計畫編號：103-2623-E-007-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許榮鈞

e-mail：rjsheu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：許永政、林郁琦、張淑君

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

台灣將於近年內增加幾座大型的加速器設施，包括台灣光子源計畫的 3 GeV 電子同步輻射加速器、長庚醫院 235 MeV 質子癌症治療機、其它醫院規劃的質子或重離子加速器的癌症治療機、部分大學內規劃中的加速器中子源或其它用途的設施等。因加速器的輻射場有一些不同於傳統核設施或射源的特性，例如複雜多樣的混合場、輻射能量高，而且帶有時間結構，因此容易對於輻射度量的可靠度與準確度造成困難，特別是中子能譜的問題；瞭解中子能量的分布是準確輻射劑量評估不可或缺的要素，特別是以中子劑量為主的醫用質子或重離子加速器。台灣近來最有興趣的四種加速器，分別是 3 GeV 電子加速器、235 MeV 質子加速器、400 MeV/A 碳離子加速器、30 MeV 質子加速器，本計畫針對這幾種加速器進行高能加速器誘發中子產率計算、中子能譜模擬分析與中子量測技術的建立進行研究與探討，並開發可行的量測技術，相關成果可進一步提升國內高能加速器輻射安全評估與度量技術的能力。

關鍵詞：高能加速器、蒙地卡羅計算、中子能譜儀。

Abstract

The dose assessment and measurement technology for accelerator radiation becomes more and more important in Taiwan. The accelerators of interest in this study include a 3 GeV electron synchrotron, a 235 MeV proton therapy accelerator, a 400 MeV/A carbon ion therapy accelerator planning, and a 30 MeV high-current proton cyclotron. The radiation field from an accelerator operation is different to that from nuclear power plants or common radiation sources in many aspects, such as the field is mixed with many radiation particles, has wide energy distributions of its constituents, and usually shows some specific time structures. These problems cause challenging difficulties in measuring and evaluating the properties of radiation accurately, especially for the neutron spectrum. This project conducted a comprehensive study on the characteristics of the prompt radiation fields induced by the operation of four above-mentioned accelerators. In addition to many high-fidelity simulations of radiation generation and transport, a high-efficiency neutron spectrometer was established to help determine neutron spectra at accelerator environments.

Keywords: High-energy accelerators, Monte Carlo simulations, neutron spectrometers.

I. 前言

近年來大型加速器的應用在台灣越來越多，例如長庚醫院質子治療中心有一座 235 MeV 質子加速器與四間照射室，目前正在進行試車並準備臨床試驗；還有國家同步輻射研究中心台灣光子源計畫的 3 GeV 電子同步加速器，目前已完成加速器的組裝，並陸續開始階段性試車；另外，國內未來幾年可能還將增加數座大型的加速器設施，例如台北榮總考慮引進的 400 MeV/A 碳離子加速器，利用其絕佳的物理與生物劑量特性提供更有效的癌症治療；國內亦有多家醫院表示興趣，積極規劃引進類似質子或重粒子加速器作為癌症治療的新利器，除此之外，還有部分大學也考慮建置加速器設施來產生足夠強度的中子源以取代傳統的研究用反應器，作為科學研究或醫療用之中子源替代方案，因為加速器中子源有多項特殊優點並可排除絕大部分反核的聲浪。舉例說明，日本京都大學利用大電流輸出(1 mA)之 30 MeV 質子加速器撞擊鈹靶，透過適當射束整形體(Beam Shaping Assembly)的設計，可產生超過 1×10^9 n/cm².s 的超熱中子束以供硼中子捕獲癌症治療(BNCT)所用，目前已測試成功進入臨床治療階段；另外，國際上也有幾座大小不等的散裂(Spallation)中子源設施，利用高能質子加速器產生大量中子作為多種科學研究的用途。

未來數年內台灣可能出現幾座不同類型的大型加速器設施，但是相對而言，國內對於各種較高能加速器輻射場的研究與經驗仍有所不足，本計畫針對高能加速器輻射場特性進行有系統的探討與比較，主要包括各種加速器的中子產率計算、中子能譜分析，以及中子能譜量測技術的建立，期望能進一步提升國內中子評估與度量技術的能力，有鑑於未來實際應用的可能性，本研究同時探討四種特別有興趣的加速器類型，目前設定的研究標的與其規格有：<1>3 GeV 電子加速器(最大輸出 30 W)、<2>235 MeV 質子加速器(最大輸出 300 nA)、<3>400 MeV/A 碳離子加速器(最大輸出 2×10^9 particle per second)、<4>30 MeV 質子加速器(最大輸出 1 mA)。括號內的最大射束輸出主要參考相關加速器設計報告或國外類似設施的數據，本研究針對上述加速器條件以中子產率及中子能譜分析為切入角度，深入探討這幾種加速器的輻射場特性。

II. 主要內容

當帶電粒子加速器運轉時，不論是刻意導引主射束撞擊靶體或是意外損失的射束撞擊周遭物質，包括射束棄置器或其他加速器組件及屏蔽材料時，結果都將伴隨產生複雜的二次輻射場。加速器產生的中子或加馬射線輻射場與傳統核設施或射源有很大的不同，其輻射能量可高達與原始帶電粒子一樣，而且輻射場本質不穩定，並帶有特定時間結構，因此對於傳統中子或加馬射線輻射度量的可靠度造成嚴重挑戰，特別是中子能譜的測量問題。中子在質子與重粒子加速器設施運轉時是最主要的輻射劑量來源；質子或重粒子產生中子的機制為：當質子或重粒子與原子核內質子或中子發生所謂強子串級(Hadronic Cascade)現象，依入射粒子能量不同包含了 Intranuclear Cascade、Extranuclear Cascade、Pre-equilibrium Reaction、Evaporation Reaction 以及 De-excitation 這幾種機制，在這些過程中會因直接撞擊而擊出高能中子或後續原子核能量重新分配蒸發出低能中子。粒子撞擊作用直接產生之高能中子的角度分布傾向於前向性，後續原子核蒸發出低能中子的角度分布比較偏向同向性，中子不帶電，因此穿透力強，經強子串級造成之二次中子對質子與重粒子加速器輻射屏蔽是最主要的挑戰。另一方面，電子作用產生中子機制為：高能電子經電磁串級(Electromagnetic Cascade)產生大量高能量加馬射線，再由加馬射線與物質作用以光核反應(Photonuclear Reaction)產生二次中子。光核反應依入射光子能量分為三種主要機制，分別為 Giant Resonance、Quasi-deuteron Effect、High-energy Photospallation，雖然光核反應較其它光子反應機制(Photoelectric Effect、Compton Scattering、Pair Production)而言截面相當小，約略百倍以下，且對大多數物質而言，此反應有很高的能量閾值，但光核反應產生的高能量中子相當具有穿透力，極可能是加速器厚屏蔽牆外主要的輻射劑量貢獻者，因此在高能電子加速器環境二次中子仍不可忽視。

為了可靠地評估加速器運轉產生的中子輻射劑量，如何正確地決定中子能譜是一個關鍵的問題，實際工作場所的中子能譜測量本身就是一個很大的困難，此外，評估不能只仰賴計算，因為計算過程與假設條件可能出錯的地方很多，實驗度量的驗證絕對是不可或缺，因此，建立加速器環境中中子能譜的測量儀器亦是本研究的重點之一。多球體的中子能譜儀是一種常見的中子輻射場能譜測量技術，但是在複雜環境下的實際應用上有很多問題必須克服，例如最主要的核心偵檢器效率不足、偵測時間太久、加速器輻射場隨時間變化太快、以及能譜解析方法的可靠度問題等等。中子與物質作用的反應機率通常隨著中子能量增加而快速下降，因此受限於高能中子與物質作用機率遠較低能中子為低，高能中子的測量問題也是加速器環境中能譜測量中必須克服的課題，因為高能中子的通率劑量轉換因子貢獻相對較大。目前一般常見的中子偵檢器是在熱中子偵檢頭外圍包覆適當中子緩速體(Moderator)，讓中子先與緩速體作用減速成熱中子後再與熱中子偵檢頭反應留下訊號，原則上越厚的緩速體可以緩速更高能量中子，使得中子偵檢器的能量響應函數往中子能量較高的方向移動；但同時緩速體也減低了熱中子抵達中心偵檢頭的機率，因此在達到

一定厚度後即會抵銷加厚中子緩速體的正效應，使得在 20 MeV 以上的中子偵測效率極低。市面上亦有少數可供度量高能中子的商用輻射偵檢器，在中子緩速體內加入重金屬，利用高能入射中子與重金屬發生強子串級效應後的二次中子增加來提高偵檢器量測到中子的機率。此外，值得注意的是，傳統中子劑量偵檢器的運作建立在「中子能量響應函數」與「中子通率-劑量轉換因子」二者對中子能量曲線的相似性上，當入射中子能量超過 20 MeV 時，中子偵檢效率會隨著能量上升而降低，相反地，中子通率-劑量轉換因子卻是隨能量增加而上升，因此對於中子劑量需要更謹慎的評估與修正。本研究基於過往本實驗室中子度量的基礎，建立一套實際可用於加速器環境的高效率中子能譜儀，搭配中子遷移計算的能力，期望能可靠地評估工作環境的中子能譜。

III. 結果與討論

加速器引發中子產率驗證計算中，我們採用 FLUKA 與 MCNPX 二組計算結果來與實驗值相互驗證比對，由於二者分別基於不同的物理模型與截面資料庫，計算結果的比較有利於最後設計與分析品質的驗證。對於實驗端，我們選擇文獻上加速器能量較接近的實驗結果作為參考值，分別為 30 MeV 質子撞擊厚度銅靶[Nakamura et al., 1983]、2 GeV 電子撞擊厚度銅靶[Lee et al., 2005]、256 MeV 質子撞擊厚度鐵靶[Meier et al., 1990]及 400 MeV/A 碳離子撞擊銅靶[Sato et al., 2007]，其中 Nakamura 等人在 1983 年進行的實驗使用 NE-213 偵檢器以 FERDO Unfolding Code 求得中子能譜，其餘三個實驗均採用 Time-of-flight(TOF) Method。計算時靶的幾何尺寸皆完全遵照文獻中實驗的設置，FLUKA 計算中選用 PRECISION 模式，盡可能仔細模擬粒子與物質的作用；而 MCNPX 則盡可能採用可得的評估後截面資料庫，例如 LA150 質子截面資料庫與光核反應資料庫，其餘缺少截面資料庫的狀況下則使用預設之核子模型估計。

四種射束撞擊靶材後中子產率的計算結果顯示，在 30 MeV 質子撞擊銅靶的情況下，FLUKA 使用核子模型計算出的結果趨勢與實驗端雖大致相同，但整體而言仍略為低估中子產率；另一方面，基於評估過截面資料庫計算的 MCNPX 結果則與實驗值相當吻合。2 GeV 電子撞擊銅靶的計算中，FLUKA 與 MCNPX 計算結果相當一致，而趨勢與實驗值亦大致相同，但計算值較實驗值為偏低，在低能量區間，角度越小時此現象更為明顯。在文獻中 Lee 等人利用 MCNPX 2.5d 計算在低能量區間出現了相同趨勢，因此推論此一差距可能來自實驗的誤差或者計算程式本身物理模型與截面的影響所致。至於 256 MeV 質子撞擊鐵靶的計算中，FLUKA 與 MCNPX 計算結果與實驗值皆相當吻合，顯示二者的結果是可信的。最後 400 MeV/A 碳離子撞擊銅靶的狀況，計算結果與實驗值趨勢大致吻合，但是在約 20 MeV 到 400 MeV 的高能中子區間，FLUKA 與 MCNPX 計算結果均與實驗值有明顯差異，尤其是沿射束方向產生的中子能譜更為明顯，顯示核子模型並無法將 Knock-out 之中子產生機制精確地詮釋。

本研究分別針對四種加速粒子與三種靶材<1>銅、<2>不銹鋼 304、<3>軟組織(ICRU Four Component)進行中子產率探討，瞭解不同射束種類與不同靶材所引發的中子產生情形。由於四種不同射束造成的中子產率及其能量與角度分布特性不盡相同，對於輻射防護的考量也有差異，本研究利用 FLUKA 與 MCNPX 計算射束撞擊銅靶後產生的中子產率，在同一靶材的條件下，四種加速粒子按照其所造成的中子數目由少至多排列為：30 MeV 質子、3 GeV 電子、235 MeV 質子、400 MeV/A 碳離子；若在同一加速粒子條件下，三種靶材按照產生的中子數目由少至多排列則為軟組織、不銹鋼 304、銅，其中不銹鋼與銅的中子產率比值大約在 0.7 至 0.8 倍之間，軟組織則明顯是三者之中最不容易產生中子的材料。若考慮到射束強度造成的差異，則可以發現四種射束所造成的中子數目排序會依靶材不同而變化，在銅與不銹鋼的組合中，四種射束按照其每秒所造成的中子數目由少至多排列為：30 MeV 質子、235 MeV 質子、3 GeV 電子、400 MeV/A 碳離子；靶材為軟組織時則為：30 MeV 質子、235 MeV 質子、400 MeV/A 碳離子、3 GeV 電子。

由於各種射束-靶材組合所引發的中子能量分布不盡相同，而高能中子相較於低能量的中子具有更強的穿透性，因此不能僅以中子數目來判斷輻射場的威脅，本研究利用 FLUKA 與 MCNPX 分別計算各種射束-靶材組合在一公尺外的平均中子能譜分布，並且將固定之射束與不同靶材所引發的中子能譜變化情形繪於圖中，利於輻射防護上實務的使用。觀察 FLUKA 與 MCNPX 計算之 30 MeV 質子引發的中子能譜，可以發現中子能譜呈現 Maxwellian 分布，當靶材為銅與不銹鋼時中子能量最多落於 2 MeV，而靶材為組織時則多落於較高的 4 MeV 至 5 MeV 之間。3 GeV 電子所引發的中子能譜中，當靶材為銅與不銹鋼時中子能譜同樣呈現 Maxwellian 分布，中子能量多落於 1 MeV；特別是靶材為組織時，FLUKA 與 MCNPX 計算結果之間出現明顯差異，FLUKA 計算之中子能譜集中在較高能量的 100 MeV 左右，MCNPX 計算的中子能譜則有兩個峰值，一為 10 MeV，另一則為 100 MeV 的能量區間，造成此現象的原因可能來自於光核反應截面資料庫，MCNPX 使用之 LA150 光核反應截面包含 ^{12}C 與 ^{16}O 等組織中主要的同位素，另一方面 FLUKA 對於閾值能量高於 Quasi-Deuteron 反應的光核反應機制已能夠有不錯的表現，但是缺乏截面數據 Giant Resonance 機制的模擬還有待改進，特別是較輕的原子核之間可能有相當大的差異，很難以核子模型來描述[Fasso et al., 1997]。透過文獻上 FLUKA 所計算之 ^{17}O 與 ^{18}O 的光核反應截面與 KAERI 評估截面的比較[Fasso et al., 2005]，FLUKA 計算之 $^{17}\text{O}(\gamma, \text{xn})$ 截面與評估截面在峰值處有接近兩倍的差距，但另一方面 FLUKA 所計算之 $^{18}\text{O}(\gamma, \text{xn})$ 截面則與評估截面較為接近，因此推測 FLUKA 預測的 Giant Resonance 截面是造成 FLUKA 與 MCNPX 計算 3 GeV 電子照射引起之中子能譜差異的主因，而基於 LA150 光核反應截面資料庫計算的 MCNPX 之結果應相對較為可靠。關於較高能量的重荷電粒子方面，235 MeV 質子所引發的中子能譜中，當靶材為銅與不銹鋼時，除了集中在 1 MeV 至 2 MeV 能量區間的蒸發中子以外，還有

部分經由 Spallation Process 產生能量最高達入射粒子初始動能的高能中子；當靶材為軟組織時中子能量則傾向分布於高能區間，其原因可能來自於靶材的質量數，對於輕原子核($A < 16$) FLUKA 以 Fermi Break-up Model 取代 Evaporation Model 模擬核子由原子核射出的過程，因此才未見以 Maxwellian 分布，而是集中在 1 MeV 至 2 MeV 能量區間的蒸發中子範圍[Agosteo, 2009]。400 MeV/A 碳離子撞擊銅靶與不銹鋼靶相對產生較多的高能中子，而當靶材為軟組織時，中子能量則集中於高能區間；此外，由於核子模型預測重離子行為的困難，FLUKA 與 MCNPX 計算結果之間有相當的差異，依據驗證計算的結果，本研究認為 FLUKA 所預測的結果應較為準確。

準確的中子能譜量測能力在中子屏蔽以及中子劑量評估等應用領域，均為重要之技術，在國內即將完成興建的高能質子治療機與台灣光子源興建計劃中，可能產生能量高達數百 MeV 之高能中子。由於中子穿透力較強，而且中子的劑量轉換因子較大，常常會造成屏蔽外較高的輻射劑量貢獻。也就是說，即便是為數不多的中子，亦可能造成輻射防護相關隱憂並產生較為嚴重之生物損傷；另一方面，由於中子為不帶電之中性粒子，且其能量分布極為廣泛，同時與物質之作用機制複雜，導致準確的中子能譜量測技術具有較高之技術門檻。國際間針對中子能譜量測所發展之技術，大致可區分為中子活化分析、飛行時間、質子回跳、核反應、以及中子緩速等種類。本研究所採用之中子能譜量測工具有兩套，分別為商用型的波那球中子能譜儀(Bonner Sphere Spectrometer)以及本研究自行開發之波那圓柱中子能譜儀(Bonner Cylinder Spectrometer)。

本研究所採用之波那球中子能譜儀，係採用由德國 PTB 國家實驗室開發之球狀 He-3 比例計數器(型號 SP-9)，內充 2 大氣壓 He-3 氣體以及 1 大氣壓 Kr 作為淬熄；該球體直徑為 32mm，有效體積 17.157cm³，外壁由 0.5mm 之 SS-304 組成，並於 SP-9 偵檢器外圍包覆密度為 0.946(g/cm³)聚乙烯(PE)作為緩速；緩速球尺寸分別為 3 吋、3.5 吋、4 吋、4.5 吋、5 吋、6 吋、7 吋、8 吋、9 吋、9.5 吋與 10 吋等 11。此波那球偵檢系統須由使用者自行提供外加高壓，經過計數率隨不同高壓之測試後發現，此波那球系統之計數率高原區約產生在 1200 伏特，因此，本研究選定 1200 伏特作為系統外加高壓設定。

除商用型波那球中子能譜儀外，本研究另延伸波那球能譜儀概念，同時針對波那球能譜儀系統靈敏度較低之缺點進行新型態波那圓柱中子能譜儀開發；波那圓柱系統主要由兩組件構成，分別為(1)Reuter-Stokes 之 He-3 比例計數器；以及(2)Precision Data Technology (PDT)之 100B 模組，其中，比例計數器之有效長度(Active Length)為 45.72 公分，圓柱直徑為 2.54 公分，管壁由 0.5 公厘之不鏽鋼(SS-304)組成，內填充 99.9%以上之高純度 He-3 氣體，壓力為 4 大氣壓，根據原廠提供參考資料顯示，該比例計數器對熱中子量測效率為 54 cps/nv，該數值約為一般中子偵檢器之 10 倍以上，主要因其具有較大有效體積(213.78 cm³)以及較高氣壓；而高靈敏度正是本研

究採用此型比例計數器之主要原因，其可應用於中子通量較弱或變動較大之中子輻射場，非常適合使用於輻射場較為動態的加速器廠區。

波那圓柱能譜儀系統之核心組件為上所述之 He-3 比例計數器以及 PDT-100B 模組，其餘部分則是密度為 $0.946(\text{g}/\text{cm}^3)$ 之不同厚度的聚乙烯緩速體；與波那球不同的是，圓柱形聚乙烯厚度採用的是公制單位，本研究一共設計了 0 公分(Bare)、1.5 公分、2 公分、2.5 公分、3 公分、3.5 公分、4 公分、5 公分、6.5 公分、8 公分、9 公分、與 10 公分等 12 種不同厚度之聚乙烯；此外，本研究另於四組聚乙烯緩速體內加入鉛金屬，希望藉由高能中子與鉛金屬發生的中子生成反應，提升高能中子之偵測效率。與波那球一致的是，厚度較薄的波那圓柱偵檢器對低能量中子具有較高的反應度；厚度較厚的偵檢器則對高能量中子反應度較高。

本研究透過 MCNPX 進行偵檢器與平行入射中子射源之響應函數計算，入射中子能量由 10^{-9} MeV 橫跨至 10^5 MeV 共 14 個數量級，並將此能量區分為 72 個不同能群。在進行響應函數計算時，除假設中子平行入射外，另假定中子射源與偵檢器之空間物質為真空，亦即，不因中子源與偵檢器之間的相對位置改變而導致響應函數需重新計算，距離因素則利用校正室內的空氣散射因子進行修正或予以忽略。

觀察波那球中子能譜量測系統對單能入射中子之響應函數可發現，對外加上不同厚度聚乙烯緩速體後，其響應函數在中低能區間隨能量增加而上升，此趨勢一直持續到約 20MeV 能量中子，之後該響應函數便大幅減少，衰減約 1 至 2 個數量級；反之，若在聚乙烯緩速球中增加若干厚度金屬層，將可使高能區間的中子反應大幅提升；除此之外，裸偵檢器之響應函數最為特殊，由於無任何外加緩速體，其趨勢與 He-3 氣體之(n,p)反應截面趨近一致，其對熱中子區間的反應度亦較其他厚度偵檢器明顯。

觀察不同緩速體厚度之波那圓柱系統對單能中子反應之響應函數可發現，緩速體厚度在波那圓柱與波那球系統中所扮演的角色極為類似，因此，厚度相近之緩速體所造成的緩速效果及其所對應之響應函數，在約 20MeV 以下之中子能量，兩套系統有著相似的趨勢；不同的是，由於波那圓柱系統搭配靈敏度較高的中子偵檢器，導致其量測效率比波那圓柱系統高了約 20 倍，此部分可由響應函數的反應度數量級觀察得知。另外一個類似的趨勢，則是增加金屬層對於高能中子(>20MeV)的反應效率增加，對波那圓柱系統而言，所有含重金屬的波那柱皆有明顯的變化，而增加 0.5 公分的鉛金屬約可造成比 10 公分厚緩速體高約 1 個數量級的反應度。

本研究利用 UMG 程式進行 Cf-252 能譜解析，透過核研所標準中子校正實驗室完成的量測數據以及自行計算之響應函數作為 UMG 程式輸入檔，並利用 MAEXD 去旋積方程式完成波那球能譜解析，依序以下列 4 種條件之能譜解析結果進行比較。(1)不包含裸偵檢器、不包含延伸能量偵檢器系統量測結果，緩速體厚度由 3 英吋

至 10 英吋之量測結果；(2)包含裸偵檢器、不包含延伸能量偵檢器系統量測結果，緩速體厚度由 0 英吋至 10 英吋之量測結果；(3)包含裸偵檢器、包含延伸能量偵檢器系統量測結果，緩速體厚度由 0 英吋至 10 英吋之量測結果；(4)以模擬結果取代量測數值之波那球系統能譜解析結果。由結果可發現，若剔除量測與模擬誤差較大的裸偵檢器量測結果，本研究所完成之解析能譜與國際標準 Cf-252 能譜(ISO-8529-1 提供)具有高度的一致性，所有能量區間之解析結果均幾乎重合，整體通量誤差為 1.5%；而一旦包含誤差較大之裸偵檢器量測結果，能譜解析結果之誤差將微幅上升，尤其在低能量區間，誤差約可達到 10%~20%，若考量大於 0.01MeV 中子能量以上能群通量(佔中子數量 97.4%)，則整體能量區間的差異約為 1.7%；至於將量測誤差達到 20%以上之含金屬的延伸能量系統納入考慮，則將導致無法正確解析能譜，MAXED 程式會因無法利用使用者提供的資訊獲得良好的解析解而造成解析結果謬誤。

另一方面，利用波那圓柱系統完成的量測結果與響應函數計算結果進行 Cf-252 能譜解析，依序以下列 4 種條件之能譜解析結果進行比較。(1)不包含裸偵檢器、不包含延伸能量偵檢器系統量測結果，緩速體厚度由 1.5 公分至 10 公分之量測結果；(2)包含裸偵檢器、不包含延伸能量偵檢器系統量測結果，緩速體厚度由 0 公分至 10 公分之量測結果；(3)包含裸偵檢器、包含延伸能量偵檢器系統量測結果，緩速體厚度由 0 公分至 10 公分之量測結果；(4)以模擬結果取代量測數值之波那圓柱系統能譜解析結果。由結果可發現，波那圓柱系統雖然具有約 20 倍的靈敏度效益，但卻造成了部分能譜解析誤差，尤其在低能中子區域，能通率可達約 2 倍的差異；而加入裸偵檢器量測結果後，其能譜解析結果在低能區域的差異更加明顯，差異可達 5~10 倍，代表裸偵檢器量測結果對於極低能量中子通量有決定性的影響；而在加入延伸能量系統之量測結果後，其解析結果不至於產生太大的改變，這是由於波那圓柱系統之含金屬量測結果與模擬結果誤差僅有 4.44%，因此可獲得與不包含延伸能量系統一致的能譜解析結果。若考慮數量佔 Cf-252 能譜 97.4%之中子(能量 0.01MeV 以上)，則波那圓柱系統之能譜解析結果亦大幅改善，在不包含裸偵檢器量測結果時，能通率整體誤差為 10.2%；考慮裸偵檢器後，能通率整體誤差為 15.1%；併入考慮延伸能量金屬球後，整體誤差為 16.2%。若直接以模擬結果取代量測數值進行解析能譜，該能譜與國際標準能譜(ISO-8529-1)各能量區間吻合程度良好，能通率整體誤差僅為 3.3%，證實波那圓柱系統之能譜解析程序亦正確無誤。前三種情形之能譜解析結果所產生之能譜解析差異，主要來源是量測上產生的誤差導致；至於第四種之能譜解析差異，則主要由入射中子束角度不同於平行射束所造成。

IV. 結論

本研究計畫已針對四種有興趣之加速器(3 GeV 電子、235 MeV 質子、400 MeV/A 碳離子、30 MeV 質子加速器)進行誘發中子產率計算與中子能譜模擬分析，同時透過 FLUKA 與 MCNPX 程式完成一系列的比較，過程中探討兩套計算機程式於不同輻射場計算上的優缺

點與適用性；此外，在商業化波那球的基礎上，本研究開發了高靈敏度的波那圓柱系統，並透過實驗驗證，完成了中子量測技術的建立與開發。立足於目前的基礎上，本研究未來將持續朝向加速器物質活化之分析探討，其內容包含了核種種類、數量、殘存活度與劑量及其隨時間之變化等，詳細的規劃如下所列：

(1)物質活化計算：高能帶電粒子撞擊物質產生活化問題比中子產率更為複雜，因為它還必須追蹤每一個核反應的產物及其後續的衰變。物質活化的程度會受粒子種類、射束能量、照射歷史、靶體材料組成與形狀等因素的影響，因此相關驗證計算更複雜但是不可或缺，我們將收集文獻中類似加速器規格的活化實驗數據做為驗證基礎；同樣針對前述四種加速器，利用數值模擬探討它們各自可能的活化現象，並比較活化產物同位素的種類與數量(Nuclide Inventory)及其隨空間與時間變化的情形，分析核種特性與變化趨勢作為加速器安全分析與未來除役參考的依據。

(2)活化劑量分析：瞭解加速器運轉產生的核種與數量之外，為了確保加速器維護人員的輻射安全，我們也必須知道停機之後殘存活性所造成的劑量問題。由於高能加速器引發核反應管道多，導致放射性核種數量也多，每一個放射性核種的位置以及隨時間的變化也不同，精確可靠的分析異常複雜，更何況是要考慮多種截然不同的加速器；但是隨著電腦科技的進步，開始有一些輻射遷移程式嘗試加入活化分析的功能，由原始粒子撞擊物質產生各種核種為出發點，配合收集完整的核種資料庫，評估放射性核種隨時間的變化，更進一步追蹤其衰變放出的特性輻射(Beta or Gamma)與靶體周遭環境的作用，我們將有系統的評估這些計算方法的可靠度與優缺點，仔細分析比較不同加速器種類活化問題的特性，建立可靠的資料庫或經驗公式，提升加速器物質活化分析的水準，當然這方面適當的驗證比較亦不可或缺。

(3)加速器輻防建議：加速器的應用越來越多，加速器種類與能量也越來越高，相關輻射防護問題愈趨複雜，本研究未來將深入探討四種台灣即將運行或可能引進之加速器的輻射安全議題，經由有系統的模擬計算、比較分析、同時加強中子度量技術，計畫成果彙整應能提升國內高能加速器中子劑量評估與物質活化分析的能力，並針對未來持續引進之各類新型加速器輻射安全提出適當建議。

參考文獻

- [1] Ferrari, A., Sala, P.R., Fassò, A., Ranft, J., (2005). "FLUKA: a Multi-particle Transport Code", CERN 2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773.
- [2] Pelowitz, D.B., (Ed.), 2005, "MCNPX User's Manual, Version 2.5.0", LA-CP-05-0369, Los Alamos National Laboratory.
- [3] Meier, M.M., Goulding, C.A., Morgan, G.L., Ullmann, J.L., (1990). "Neutron Yields from Stopping-Length and Near-Stopping-Length Targets for 256-MeV Protons", Nucl. Sci. Eng. 104, 339-363.
- [4] Satoh D, Kurosawa T, Sato T, Endo A, Takada M, Iwase H, Nakamura T, Niita K. Reevaluation of secondary neutron spectra from thick targets upon heavy-ion bombardment. Nuclear Instruments & Methods in

Physics Research Section A 583: 507-515; 2007.

- [5] Lee, H.S., Ban, S., Sanami, T., Takahashi, K., Sato, T., Shin, K., Chung, C., (2005). "Angular Distribution Measurements of Photo-Neutron Yields Produced by 2.0 GeV Electrons Incident on Thick Targets", Radiat. Prot. Dosim. 116, 653-657.
- [6] Nakamura, T., Fujii, M., Shin, K., (1983). "Neutron Production from Thick Targets of Carbon, Iron, Copper, and Lead by 30-MeV and 52-MeV Protons", Nucl. Sci. Eng. 83, 444-458.
- [7] A. Mitaroff, PhD Thesis, "Design, calibration and tests of an extended range Bonner sphere spectrometer," CERN. (2002)
- [8] Fasso A, Ferrari A, Sala P. Total giant resonance photonuclear cross sections for light nuclei: a database for the FLUKA Monte Carlo transport code. Proc 3rd Specialists' Meeting on Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities: 61; 1997.
- [9] Fasso A, Ferrari A, Sala PR. Photonuclear reactions in FLUKA: Cross sections and interaction models. In: RC Haight, MB Chadwick, T Kawano, P Talous eds. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Pts 1 and 2. Melville: Amer Inst Physics; 2005; 1303-1306.
- [10] Agosteo S. Radiation protection constraints for use of proton and ion accelerators in medicine. Radiation protection dosimetry 137: 167-186; 2009.

專用型乳房掃描儀 ^{18}F -FDG 造影之最適劑量研究

The Optimal Radiation Dosing Using ^{18}F -FDG in INER BreastPET Imaging

計畫編號：103-NU-E-002-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：鄭媚方

e-mail：meifang@ntuh.gov.tw

計畫參與人員：曾凱元主任、黃俊升教授、詹美齡博士

執行單位：國立台灣大學醫學院放射線科

摘要

1994 年 Weinberg IN 與 Thompson CJ 發表了第一篇論文關於乳房專用正子掃描儀 (dedicated positron emission mammography, PEM)，並在 1996 年驗證了此掃描儀在臨床上的使用。文獻報告也指出 PEM 比起全身型正子掃描儀、磁振造影 (MRI) 在同側局部乳房病灶的診斷上有更高的靈敏度、特異度，且對於 T1a 腫瘤 ($>1\text{mm}$, $\leq 5\text{mm}$) 偵測率可達 100%，因此 PEM 被視為乳癌術前診斷工具之一。在台灣過去這幾年來核能研究所詹美齡博士領導的團隊所研發的乳房專用正子掃描儀 (INER BreastPET) 系統已逐漸由雛型系統而進入與產業界之銜接。初步假體測試結果也有空間解析度可達 1.6 mm FWHM 之優異表現，與國外 Naviscan 廠牌之產品有不分軒輊的成效。乳房專用正子掃描儀具有高於傳統環形 PET 系統的偵測靈敏度，所需求之核醫藥物劑量可以減少，且影像仍能維持一定品質。

我們共收集了 40 位臨床已證實 (經組織切片證實) 有乳癌之病患進行全身性及 INER BreastPET F-18 FDG 正子掃描。比較 INER BreastPET 在不同造影時間下與全身性正子掃描所能偵檢病變之大小、個數等特性。藉此，選定此掃描儀的最佳臨床造影參數。由於 PEM 的敏感度夠，因此，注射 FDG 之後 60-90 分鐘照相皆可，而且越晚對比越好。我們研究證實所有全身性正子掃描所偵測到的腫瘤都可以再 INER BreastPET 看到，而且，INER BreastPET 比全身性正子掃描可以偵測到更多 (18%) 的腫瘤。我們可以偵測到小至 0.7 cm 大小之腫瘤，甚至連一個良性腫瘤相當低的攝取率都能偵測到。不過，我們也有一些尚待改善之處，例如只有矢狀切面而無水平切面之展示，還有就是我們還缺乏量化指標，良性腫瘤與惡性腫瘤之間的區隔確實需要量化指標來達成，這是未來我們可以改進的部分。

如何得到最多的診斷資訊並又能大幅降低病患輻射劑量是本研究最重要的課題，期 INER BreastPET 能合理抑低女性之乳房正子攝影吸收輻射劑量、減少輻射傷害，達成最可觀之效益，造福婦女健康。

關鍵字：乳癌、乳房專用正子攝影儀、核研乳房正子攝影儀、臨床試驗、輻射劑量

Abstract

In the past several years, the R&D team of Institute of Nuclear Energy Research (INER) lead by Dr. Jan ML has successfully produced a dedicated breast positron

emission tomography scanner (PEM), the INER BreastPET. The prototype has passed through the stringent testing and safety check up by the Electronic Testing Center, Taiwan. The tested spatial resolution of 1.6 mm FWHM is nearly equal to the capability of an FDA approved PEM, the Naviscan PEM Flex Solo II. The higher resolution of the INER BreastPET compared to conventional whole body PET implies that lower dose of radiotracer may be administered without affecting image quality.

We have started enrolling biopsy proven breast cancer women in this trial. After informed consent had been obtained, each patient underwent whole body PET (WB-PET), followed by INER BreastPET after intravenous FDG injection. All patients received surgery within two weeks of the PET imaging. A total of 30 patients were imaged using this sequence. To determine the best imaging time and protocol, the imaging sequence is changed to INER BreastPET first, then WB-PET starting July 2014. The preliminary results from the INER Breast PET were compared with WB PET and those from ultrasonography and pathology for index lesions in the first 29 patients. The index lesion size on imaging was compared to size on surgical pathology. Analysis of the data revealed INER BreastPET can detect 7 more (18%) lesions than WB-PET, these small lesions (smallest was of 0.8x0.8x0.8cm in size) were not seen by either WB-PET or ultrasonography. All patients tolerate the INER BreastPET well. With further collection of more clinical data in the future, we expected INER BreastPET can be used in routine clinical setting with acceptable radiation dosimetry.

Key words: breast cancer, dedicated breast positron emission tomography, INER BreastPET, clinical trial, radiation dose

I. 前言

Breast cancer has ranked the 4th among the cancer mortality rate in women in Taiwan since 1996. It is important to develop an effective imaging modality in the detection of breast tumors. At present, mammography and breast ultrasonography are most the most frequently tools. However, the sensitivity of mammography for malignant lesions is highly variable, ranging from 98% in women with fatty breast parenchyma to 36% in women with dense breasts, with the latter frequently encountered in Asian population or young high-risk women. In addition to high cost, another concern regarding screening MRI is that the

increased sensitivity of MRI may result in a high recall rate, unnecessary biopsies, and patient anxiety. Moreover, approximately 15% of patients cannot tolerate MRI because of claustrophobia, renal disease, metallic implants, body habitus or general medical condition.

The aforementioned imaging methods are based on morphologic characteristics. FDG PET has been considered as a tool for staging of patients with distant disease, restaging for patients with loco-regional recurrence or metastasis, and monitoring therapeutic response in breast cancer. However, WB-PET has limited sensitivity for small tumors or regional lymphadenopathy. To improve image resolution, the first feasibility study using dedicated PEM was reported in 1994 by Weinberg IN and Thompson CJ *et al.* using BGO and large position-sensitive photomultipliers.

In the past several years, the R&D team of INER leads by Dr. Jan ML has successfully produced a dedicated breast positron emission tomography scanner, the INER BreastPET. The tested spatial resolution of 1.6 mm FWHM is nearly equal to the capability of the FDA approved PEM, the Naviscan PEM Flex Solo II, and significantly better than can be achieved with conventional WB-PET scanners.

INER BreastPET has the following characteristics: (1) prone imaging which facilitates close proximity of breast tissues to detector surfaces during image acquisition, hence improves lesion detectability without the need for breast compression and reduces patient's discomfort; (2) image acquisition of axillae; (3) planar tomography reconstruction to generate 3-dimensional tomographic breast images; (4) ability to display images on line; (5) images produced have a voxel size of 0.82x0.82x1.64mm; (6) cost reduction using low cost photomultiplier tubes without compromising image resolution.

PEM may fulfill the need for primary cancer breast imaging in the following clinical scenarios: (1) women with dense breasts and/or suspected lesions, (2) identification of additional lesions in patients with known breast cancer, (3) assessment of mammographically suspicious lesions in patients unable to tolerate MRI, (4) presurgical planning for determination of extent of disease.

The goal of imaging in breast cancer is to develop an imaging algorithm that maximizes specificity and sensitivity while minimizing cost and radiation exposure. The higher resolution of the INER BreastPET compared to conventional WB-PET implies that lower dose of radiotracer may be administered without affecting image quality.

II. 主要內容

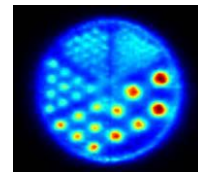
The goal of this clinical pilot study was to establish the diagnostic performance of the INER BreastPET. Preliminary clinical trial using this prototype PEM was conducted under protocol approved by the institutional review board at National Taiwan University Hospital. Since the close proximity of INER BreastPET to the breasts may reduce the required scan duration than in conventional WB-PET. The optimal imaging time and imaging acquisition parameters of INER BreastPET were determined during the first two years of the clinical trial. Also, PEM detectors were separated from breast tissue by

only a few millimeters compared to the large rings used in WB-PET, thus provided higher geometric photon efficiency that may reduce the requirements on injected activity and acquisition time, but reaching equivalent counting statistics. Therefore, we aimed to test the optimal radiation dosing without affecting the imaging quality of the study and to reduce as much radiation by reducing the administered injected activity as possible.

In the first year, 5 patients with confirmed (tissue proven) primary breast cancer were enrolled in this study. After informed consent has been obtained, a WB-PET and INER BreastPET were performed in each patient. The images from the both studies were compared. Lesions greater than 5mm were detected by the INER BreastPET. In the second year, 35 more patients were enrolled. All patients underwent further staging procedures recommended by the guidelines, including MRI, ultrasound of the axillae, sentinel lymph node scintigraphy followed by sentinel lymph node biopsy, bone scan, chest radiography, and ultrasound of the abdomen.

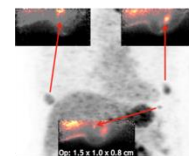
III. 結果與討論

Before enrolling patients, spatial resolution of the INER BreastPET was reassessed with microDerenzo phantom filled with 24 μ Ci FDG placed midway between the PEM detector heads. The phantom has rod diameters of 1.2, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, and 4.8mm. Tests were repeated for assessing reproducibility. It can be seen that rods ≥ 1.6 mm are clearly visualized.



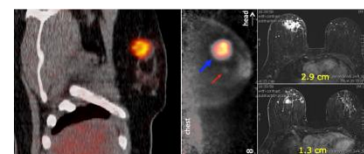
The preliminary results from the INER Breast PET were compared with WB-PET and those from ultrasonography and pathology for index lesions in 40 patients. The index lesion size on imaging was compared to size on surgical pathology. Analysis of the data revealed INER BreastPET can detect 7 more (18%) lesions than WB PET, these small lesions (smallest was of 0.8x0.8x0.8cm in size) were not seen by either WB PET or ultrasonography. All patients tolerated the INER BreastPET well.

Positive scan with bilateral lesions



71 year old patient with bilateral breast cancers. Invasive ductal ca were seen on right side (Grade III, one) and left side (Grade II, two).

Positive scan: an extra uptake demonstrated by PEM but not WB PET or sonography



A 58 year old patient with one mass in right breast (invasive ductal ca, blue arrow). The PEM study showed a small uptake (red arrow, middle) which is not seen in WB PET/CT (left) or sonography but can be demonstrated as a satellite tumor by MRI (right lower) with 1.3 cm in size.

However, the following issues need to be further addressed to improve the INER BreastPET:

1. The images cannot be viewed in three orthogonal planes (i.e. tomographic images) for better lesion localization.
2. Lack of semi-quantitative parameters, i.e. lesion to background ratio, average or mean uptake value, to aid in the differential diagnosis of lesions or in evaluating therapeutic response (another potential future clinical application).

IV. 結論

This is the first report of the feasibility study using this new prototype PEM developed by INER in Taiwan. Although this PEM cannot evaluate the extent of disease outside breasts, it can be used as a complementary screening tool for breast cancer imaging. The patients can tolerate the scan well. More lesions (18%) can be detected by this PEM than WB PET. Moreover, the higher resolution of the INER BreastPET implies that lower dose of radiotracer may be administered without affecting image quality. With further collection of more clinical data in the future, we expected this may contribute to patient management.

參考文獻

- [1] Mandelson MT, Oestreicher N, Porter PL et al. Breast density as a predictor of mammographic detection: comparison of interval- and screen-detected cancers. *J Natl Cancer Inst* 2000; 92: 1081-1087.
- [2] Sardanelli F, Podo F. Management of an inherited predisposition to breast cancer. *N Engl J Med* 2007; 357: 1663; author reply 1663.
- [3] Sardanelli F, Boetes C, Borisch B et al. Magnetic resonance imaging of the breast: recommendations from the EUSOMA working group. *Eur J Cancer* 2010; 46: 1296-1316.
- [4] Warner E, Plewes DB, Hill KA et al. Surveillance of BRCA1 and BRCA2 mutation carriers with magnetic resonance imaging, ultrasound, mammography, and clinical breast examination. *JAMA* 2004; 292: 1317-1325.
- [5] Berg WA, Zhang Z, Lehrer D et al. Detection of breast cancer with addition of annual screening ultrasound or a single screening MRI to mammography in women with elevated breast cancer risk. *JAMA* 2012; 307: 1394-1404.
- [6] Berg WA, Blume JD, Adams AM et al. Reasons women at elevated risk of breast cancer refuse breast MR imaging screening: ACRIN 6666. *Radiology* 2010; 254: 79-87.
- [7] Hodgson NC, Gulenchyn KY. Is there a role for positron emission tomography in breast cancer staging? *J Clin Oncol* 2008; 26: 712-720.
- [8] Schwarz-Dose J, Untch M, Tiling R et al. Monitoring primary systemic therapy of large and locally advanced breast cancer by using sequential positron emission tomography imaging with [18F]fluorodeoxyglucose. *J Clin Oncol* 2009; 27: 535-541.
- [9] Radan L, Ben-Haim S, Bar-Shalom R et al. The role of FDG-PET/CT in suspected recurrence of breast cancer. *Cancer* 2006; 107: 2545-2551.
- [10] Thompson CJ, Murthy K, Weinberg IN, Mako F. Feasibility study for positron emission mammography. *Med Phys* 1994; 21: 529-538.
- [11] Bowen SL, Wu Y, Chaudhari AJ et al. Initial characterization of a dedicated breast PET/CT scanner during human imaging. *J Nucl Med* 2009; 50: 1401-1408.
- [12] Tafral L, Cheng Z, Uddo J et al. Pilot clinical trial of 18F-fluorodeoxyglucose positron-emission mammography in the surgical management of breast cancer. *Am J Surg* 2005; 190: 628-632.
- [13] Berg WA, Weinberg IN, Narayanan D et al. High-resolution fluorodeoxyglucose positron emission tomography with compression ("positron emission mammography") is highly accurate in depicting primary breast cancer. *Breast J* 2006; 12: 309-323.
- [14] Avril N, Rose CA, Schelling M et al. Breast imaging with positron emission tomography and fluorine-18 fluorodeoxyglucose: use and limitations. *J Clin Oncol* 2000; 18: 3495-3502.
- [15] Schilling K, Narayanan D, Kalinyak JE et al. Positron emission mammography in breast cancer presurgical planning: comparisons with magnetic resonance imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2011; 38: 23-36.

Image-based 個人化核醫治療劑量評估系統開發之先期研究

Development of an image-based patient-specific dose evaluation system for nuclear medicine therapy

計畫編號：103-NU-E-007-008-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：莊克士

e-mail：kschuang@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：陸正昌、林信宏、詹美齡

執行單位：國立清華大學醫環系

摘要

在此計畫中主要是要提升個人劑量系統運用與改進影像量化的精確度，我們完成：(1) **時間活度曲線 (time-activity curve; TAC) 測量方法的驗證**—我們將不同活度的 Tc99m 射源放在假體中，並於假體四周貼上 TLD，每隔一鐘頭計讀一次，經過三次寄讀後，利用之前研發之方法成功測出假體內的活度變化。(2) **SPECT 影像衰減修正 (attenuation correction)**—利用 FBP 重建影像的活度分佈計算衰減因子 (attenuation factor; ACF)，再對各角度的投影數據作衰減補償再重新 FBP。經過不斷修正與重建的疊代過程，當 ACF 趨近於定值就算修正完成。我們將前後兩次的 ACF 值相加平均作為新的 ACF 來修正衰減效應，可以去除假影並加速收斂。與傳統的衰減修正法張氏法進行。結果顯示利用本法修正後的影像品質比張氏法 (Chang method) 高，定量的結果也較張氏法準確。初步成果已寫成論文並投稿至國際 SCI 期刊 (*Phys. Med. Biol.* [1])。

關鍵詞：個人劑量，衰減修正，時間-活度曲線，

Abstract

The aim of this project is to further the application of image-based dosimetry system and improve the quantitative accuracy in nuclear imaging. We finished: (1) **validation of the method in estimating time-activity curve** – We used a phantom of various Tc-99m activities with TLD placing on its surface. From repeated TLD measurement at each hour for three times, we successfully compute the activity changes inside the phantom using method developed previously. (2) **attenuation correction (AC) in SPECT** – We used the activity distribution from reconstructed image to compute the attenuation factor (ACF), to compensate the attenuation of projection data for each angle, and then to perform reconstruction on the compensated projection. The iterative process of ACF computation and reconstruction terminates when ACF reach a stable condition. By averaging the previous two ACF to generate a new ACF, we successfully improve the convergence rate and remove artifact in high density area. Preliminary results show better image quality and higher quantitative accuracy than conventional Chang's method in attenuation correction.

Part of the results was summarized as a regular paper and submitted to *Phys. Med. Biol.* (SCI) [1].

Keywords: patient-specific dosimetry, attenuation correction, time-activity curve

I. 前言

之前本實驗室發展出一個 image-based 個人化劑量評估程式，名為 SIMDose。若要求得整個身體的輻射劑量，則必須有器官在不同時間的活度分布資訊。不同時間的活度分布可由 PET 或 SPECT 持續的對病人進行掃描得到，需要耗費相當多的人力與物力。這個計劃的主要目的是利用 TLD 貼在體外表皮，去測量不同時間點到的劑量，再推知各器官的活度分布。

在 SPECT，由於無法得知射源的正確位置，光子在物體內的吸收便無法正確估計與回復，因此會影響重建後的影像品質以及正確活度分佈的呈現。

II. 主要內容

我們以 TLD 貼在身體表面數個位置(數目由射源器官的多寡決定)，測量到內部器官所發出的輻射劑量。藉由 SIMDose 算出各個射源器官到 TLD 的 S 值 (cGy/MBqs)，經由簡單的矩陣運算，可推出各個射源器官的總衰變數。令 S_{ij} 值代表在 j 射源到第 i 顆 TLD 所造成的能量沉積， S_{ij} 可利用 SIMDose 方法計算而得。則身體四周 TLD 的劑量可以表示為

$$\begin{cases} D_1 = \tilde{A}_1 S_{11} + \tilde{A}_2 S_{12} + \tilde{A}_3 S_{13} + \tilde{A}_B S_{1B} \\ D_2 = \tilde{A}_1 S_{21} + \tilde{A}_2 S_{22} + \tilde{A}_3 S_{23} + \tilde{A}_B S_{2B} \\ D_3 = \tilde{A}_1 S_{31} + \tilde{A}_2 S_{32} + \tilde{A}_3 S_{33} + \tilde{A}_B S_{3B} \\ D_4 = \tilde{A}_1 S_{41} + \tilde{A}_2 S_{42} + \tilde{A}_3 S_{43} + \tilde{A}_B S_{4B} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\tilde{A}_i$ 代表在器官 i 所發生的總衰變量， D_i 為 TLD_i 所測得的劑量。由於 S_{ij} 已知，利用簡單聯立方程式求解，可得到各個器官的總衰變數，將它再除以測量時間就是活度。若於不同時期持續用 TLD 分段去測量表面劑量，並據以算出各個器官的 TAC。定義 percent sum of square error (PSSE) 為

$$PSSE = \sqrt{\frac{\sum_i (S_i - C_i)^2}{\sum_i S_i^2}} \times 100\%$$

(2)

在此 S_i 與 C_i 分別代表實際值與計算值；PSSE 可用來評估計算誤差。

定義 ACF (attenuation correction coefficient) 為

$$ACF(t, \theta) = \frac{P_0(t, \theta)}{P_A(t, \theta)} = \frac{\sum_{LOR(t, \theta)} f(x, y)}{\sum_{LOR(t, \theta)} f(x, y) \exp[-\sum_{(x, y)} \mu(x', y') \Delta s]} \quad (3)$$

其中 $f(x, y)$ 為重建影像中的活度， μ 為衰減係數，由 CT 影像得知。則補償過的投影數據可由下式算出

$$P_c(t, \theta) = P_m(t, \theta) \cdot ACF(t, \theta) \quad (4)$$

其中 P_m 為測量得到之投影數據。再將 P_c 拿去重建出新影像，得到新 ACF。如此重複疊代，直到 ACF 趨近定值便達到衰減修正之目的。如此作在高密度區域容易產生假影。我們便將前次的與心算出的 ACF 取平均，便可取消假影且達到快速收斂。

III. 結果與討論

我們完成以熱發光劑量計(Harshaw TLD-100H)貼在圓柱假體 (直徑=20 公分;長=16.8 公分) 的表面(如圖一所示)。圓柱假體內有三顆直徑為 5.8 公分的圓柱(其中 A_3 為空氣，其餘都充滿水)。在經過 CRC-35R (Capintec Inc.) dose calibrator 計讀後，將不同活度的 Tc99m 注入假體的 A_1 , A_2 , A_B 中(表一)，照射每小時以 Harshaw 3500 TLD reader 讀取 TLD 劑量，經運算後得到各個射源的活度(A_i)。經連續三小時實驗後可畫出其 TAC。在 4 種(type01-type04) 不同活度分布下所得之 TAC，繪於圖二，估計出的活度變化與原本的趨勢一樣，兩者基本上差異不大，四次實驗的 PSSE 分別為 5.15%, 6.83%, 1.45%, 與 13.16%。

我們利用一個胸腔假體(圖三)來驗證衰減修正的方法。圖四、五與六分別為沒有 AC、Chang 氏疊代方法、及我們方法的影像。可以看出新方法的影像背景(身體軟組織)較為均勻，而器官輪廓較清楚且對比也高。

IV. 結論

SPECT 給人的印象就是只能用於定性分析，由於光子在待測體內的衰減問題無法有效解決，SPECT 的定量功能一直無法讓人信服，阻礙了診斷效能的提升。傳統衰減問題都採用張氏法(Chang's method)來修正，因修正不足遂演變為疊代張氏法(iterative Chang's method)，但該法在疊代次數超過 3 次時就會有發散現象出現。我們計畫所提出的方法可以修正 SPECT 影像中衰減所造成的假影，且在衰減補償達到穩定時就自動停止疊代，並無發散的問題。本計畫成果用於 SPECT 的衰減修正，可以提高影像量化的效果，在癌症分期或其它疾病嚴重性的判斷更準確。本計畫成果應用於醫療，必能提升國人健康照護的水準。

參考文獻

- [1] CC Lu, SL Dong, HH Lin, KS Chuang, YC Ni, and ML Jan (2015) Time-Activity Curve Estimation on Intake of Radiopharmaceuticals from External Measurement with TLD, *Phys. Med. Biol.* (SCI, submitted)

表一、四種TLD實驗中，射源的活度分布

Source	Time (h)	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
A_B	1	0.0	0.0	456.4	17.3

A_1	2	0.0	0.0	406.6	153.5
	3	0.0	0.0	362.3	136.8
	1	382.1	0.0	0.0	180.7
A_2	2	340.5	0.0	0.0	161.0
	3	303.3	0.0	0.0	143.5
	1	0.0	389.2	0.0	81.0
A_2	2	0.0	346.8	0.0	72.2
	3	0.0	308.9	0.0	64.3

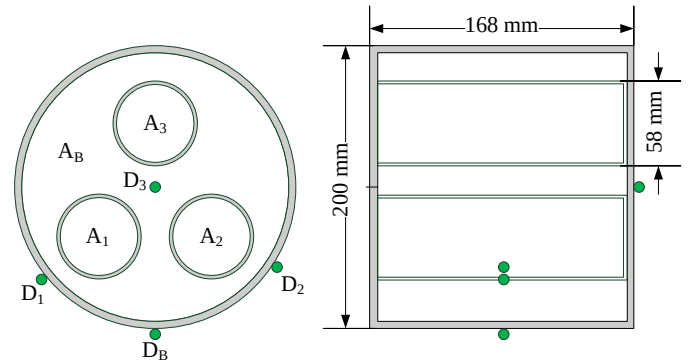
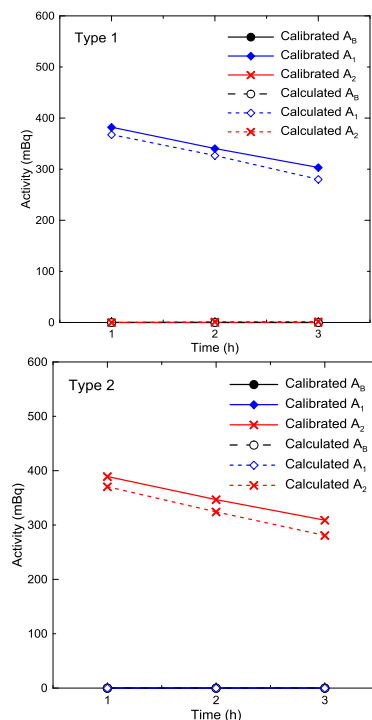


Figure 1. (a) Axial and (b) lateral views of a real phantom with three source organs (A_1 , A_2 , A_B) and four TLDs (D_1 – D_3 , D_B) placed around the phantom. A_B was the background activity. The phantom was filled with water except A_3 which was simply air. The activities within each organ were uniformly distributed. The locations of TLD in the experiment were marked by “•”.



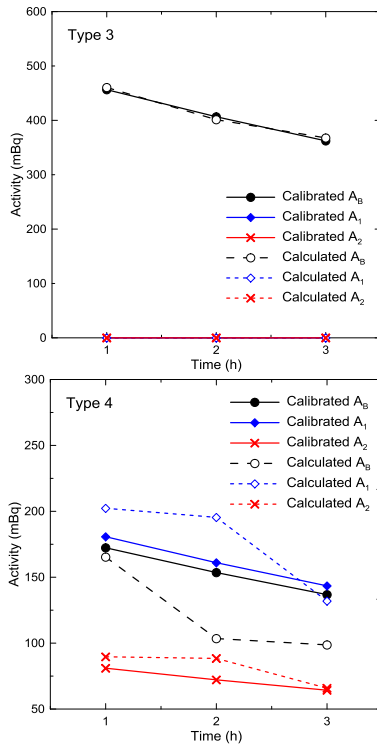


Figure 2. The TAC of various sources for experiments in (a) type 1, (b) type 2, (c) type 3, and (d) type 4. The solid lines represent the calibrated data and dash lines are calculated from TLD readings.

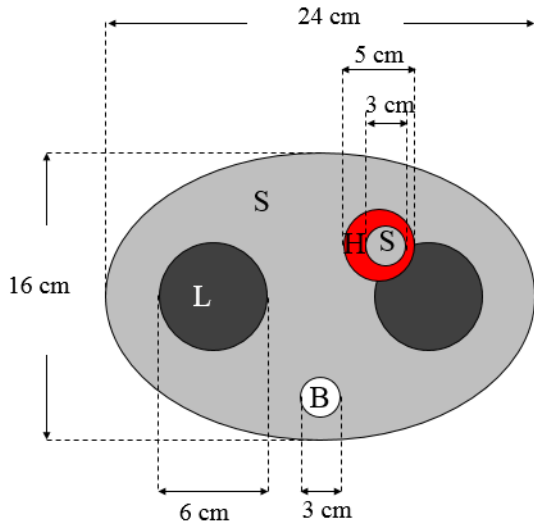


Figure 3. The thorax phantom was filled with ^{99m}Tc and the activity ratios among the four tissues S: B: H: L were 1: 0: 5: 0.

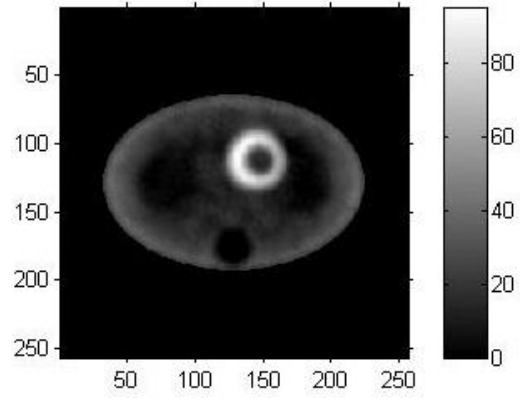


Figure 4. Image without attenuation correction.

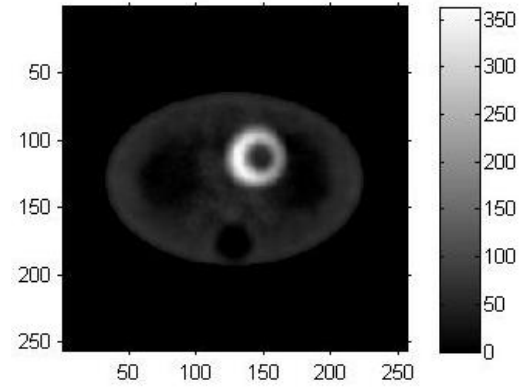


Figure 5. Image with Chang's iterative attenuation correction.

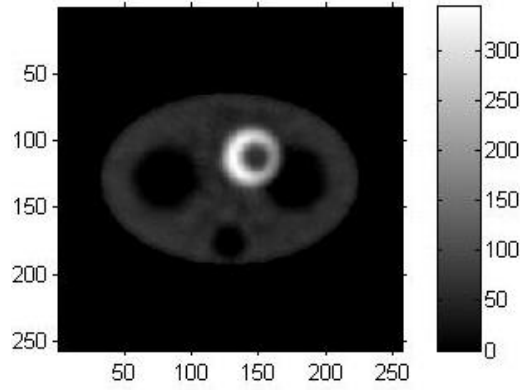


Figure 6. Image with proposed AC method.

福島核電廠事故對台灣環境輻射之影響評估

Environmental Radiation Impact of Fukushima Nuclear Event To Taiwan.

計畫編號：103-2623-E-214-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳清江

e-mail：ccjiang@isu.edu.tw

計畫參與人員：邱婷萱

執行單位：義守大學 醫放系

摘要

本研究主要目的為客觀的深入探討福島核電廠事故對台灣地區環境輻射造成之影響，其中分別用了輻射源項分析、大氣擴散評估模式、海洋擴散評估模式、國內各環境輻射監測單位結果、收集由災區進口食品監測數據等，依劑量評估模式評估對國民造成的最大有效劑量。

關鍵詞：311 大地震、福島核電廠事故、環境輻射監測、劑量評估

Abstract

The main purpose of this study is focused on the environmental radiation impact of the Fukushima nuclear power plant accident to Taiwan. This study include the radiation source term analysis, assessment of gases effluent by atmospheric dispersion model, evaluation of oceanic pollution, collection of environmental radiation monitoring and foodstuff survey data. Finally we evaluate the maximum effective dose may caused to the people in Taiwan according to the dose assessment model.

Keywords: 311 Earthquake、Fukushima nuclear power plant accident、Environmental radiation monitoring. Dose assessment.

I. 前言

福島核電廠距台北約 2200 公里，事故發生後，國內執行環境輻射監測單位包括原能會輻射偵測中心、核能研究所、清華大學、中央研究院以及台電核能部門立即加強環境輻射監測作業，對主管地區的環境加強取樣分析及評估，5 個單位分析結果顯示，在 2011 年 3- 6 月期間有少量碘 131、銫-134 及銫 137 飄至台灣。

II. 主要內容

在台灣地區的抽氣、水盤等環境試樣測得微量由福島核電廠外釋的放射核種，包括碘-131、銫-134、銫-137 等，經體內、外暴露途徑分別作劑量評估。

III. 結果與討論

福島核災發生至今已 4 年，經收集大氣擴散模式、洋流擴散模式、環境監測結果進行各方面的評估，對於災後放射性污染的疑慮，我們有了全面性的了解。從地理位置來說，日本和台灣相距約 2200 公里，事故初期的氣流並未吹向台灣，本次事件外釋輻射屬於地域性落塵，因此對台灣環境輻射的影響相當微小。

IV. 結論

評估福島核事故對於國人造成的體內外劑量，因福島意外事故對台灣地區居民造成的最大個人有效劑量約為 2×10^{-4} 毫西弗/年，僅為 1986 年車諾比核電廠事故對台灣地區居民造成劑量的 1/5，遠低於法規規定之一般民眾接受人造輻射 1 毫西弗/年的劑量限值，約為台灣地區天然背景輻射劑量每人每年 2 毫西弗的萬分之一，不會對大眾的健康帶來任何影響。

參考文獻

- [1] 行政院原子能委員會輻射偵測中心，101 年台灣地區核能設施環境輻射偵測年報，
- [2] 行政院原子能委員會輻射偵測中心，101 年。
- [3] 衛生福利部食品藥物管理署-日本輸入食品每日輻射檢測結果，102 年。
- [4] Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C.,
- [5] Eder, B., 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. Atmos. Environ.
- [6] 39, 6957 - 6975.
- [7] Huh, Chih-An, Shih-Chieh Hsu, Chuan-Yao Lin, Fukushima-derived fission nuclides
- [8] monitored around Taiwan: Free tropospheric versus boundary layer transport, Earth and Planetary Science Letters 319-320 (2012) 9 - 14
- [9] Huh, Chih-An, Chuan-Yao Lin, Shih-Chieh Hsu, Regional Dispersal of
- [10] Fukushima-derived Fission Nuclides by East Asia Monsoon, A synthesis and review. Aerosol and Air Quality Research, 13, 537-544., 2013
- [11] Hsu, Shih-Chieh, Chih-An Huh, Chuen-Yu Chan, Shuen-Hsin Lin, Fei-Jan Lin, and
- [12] Shaw Chen Liu, Hemispheric dispersion of radioactive plume laced with fission nuclides
- [13] from the Fukushima nuclear event, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 39,
- [14] L00G22, doi:10.1029/2011GL049986, 2012
- [15] Kobayashi, Takuya, Haruyasu Nagai, Masamichi Chino and Hideyuki Kawamura,
- [16] Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 50, No. 3, 255 - 264., 2013

醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接研究 (I)

The Study on Integrating the Radiation Dose and Digital Imaging and Communications in Medicine for Digital X-ray Photography (I)

計畫編號：103-NU-E-033-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蘇振隆

e-mail：jlsu@cycu.edu.tw

計畫參與人員：李憲旻、潘家鴻、郭銘芳、倪于晴

執行單位：中原大學生物醫學工程學系

摘要

在生活環境中，除天然環境的背景輻射外，目前有超過 95% 之人為輻射源自進行醫療影像診斷所產生，其已成為自然環境輻射外之最大輻射來源。隨著造影設備之日異更新，相關醫療輻射防護之議題也越受到重視。接受的輻射劑量越多，造成輻射傷害之機率也會越高，但照射劑量不足，所呈現出來的影像無法提供疾病正確診斷而必須重照時，病患所接受的輻射量也將會增加。因此，適當的劑量在放射診斷影像上是很重要的議題。為鼓勵國內醫療器材產業朝高階創新產品發展，政府也積極推動高階影像器材之發展方案，目前已有多家廠商投入醫療用數位 X 光攝影儀之開發，造影系統如何輸出正確成像內容及可靠劑量資訊，且能同時符合醫學數位影像及通信標準(DICOM)之規範是目前國內所欠缺的。

本案為 2 年期之研究計畫，主要係於醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接研究：本年度已依據進度完成符合數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件及與系統參數之連結（管電壓、管電流等）的輻射劑量與影像物件輸出資訊研析，已完成工作有：(1) 研析與促使劑量抑低相關醫用數位 X 光攝影儀 DICOM 的影像格式標籤。(2) 透過與醫界實務使用經驗結合，並針對數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像物件進行測試及完成符合輻射劑量監視與國際影像格式之之可行性研究。後續，本計畫將針對此提出建議報告，以作為國產放射類高階醫療系統規格之檢視參考。

關鍵詞：數位 X 光攝影儀、醫學數位影像及通信標準、輻射劑量、管電壓、管電流

Abstract

Digital radiography Systems are currently most common type of digital imaging used in radiology departments for reducing the retake rate and radiation dose. This wonderful technology replaces conventional screen-film system. However, many hospitals get used to operate the radiography processes in the conventional X-ray tube conditions. Neither the relations among the image quality, tube voltage and tube current have been systematically explored nor has the effective dose of patient been evaluated. To maintain image quality while reducing the radiation dose is very important. In addition, government encourages medical device industry towards high-end innovation and product development. There are a

number of manufacturers into medical digital X-ray photographic apparatus in the development, imaging how the system output imaging information and reliable dose information, and can also comply with the digital Imaging and Communications in Medicine standard (DICOM) the specification is currently lacking. The Study is really necessary for assisting the development of related technology.

This year, the project has been completed the work. The main purpose is to integrate the digital X-ray photographic apparatus of DICOM images objects and system parameters link (tube voltage (KVp), tube current (mAs), etc.) of the radiation dose and image objects output information. The major items of work in this project including: (1) Holding meeting to discuss about the low-dose related medical digital X-ray photographic apparatus DICOM image format tag. (2) With the medical community through the combination of practical experience, and for the digital X-ray photographic apparatus of the radiation dose and DICOM image objects for testing and verification, to complete the dose monitor compliance with the international standard image format of viable options. Next year, the study will also make recommendations to the report as a type of high-level radioactive domestic medical equipment system specification to view and control and radiation protection requirements of reference.

Keywords: Digital X-Ray, DICOM, Radiation Dose, Tube Voltage (kVp), Tube Current (mAs).

I. 前言

以放射線造影技術來進行疾病的診斷，在醫學上是非常有力的工具，相關醫療設備及醫學技術進步迅速，每年國內也都有新技術及設備引進。根據 GBI Research 研究報告指出，2009 年全球醫用 X 光影像診斷設備之市場約為 35.7 億美元，其中，包含傳統 X 光影像設備 (Analog X-ray system) 及數位 X 光影像設備 (Digital X-ray system)，且數位 X 光影像設備約佔所有 X 光影像設備之 9 成。隨著醫學診斷影像技術精進、研究領域擴增及新興國家基礎醫療設施建構等市場需求增加情況下，讓許多醫療院所已慢慢由傳統洗片式 X 光機逐漸升級為數位 X 光影像系統，也因此帶動了 X 光影像設備市場的成長，預估 2016 年將會達到 47.8 億美元以上。

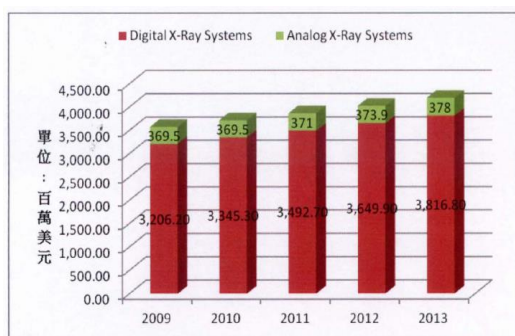


圖 1、2009-2013 年全球醫用 X 光機市場規模預測
(來源：工研院 IEK(2012))

傳統 X 光攝影以底片接收穿透患者之 X 光，再利用顯影液、定影液將底片上的潛像黑化而形成灰階影像，傳統底片式 X 光影像系統因無法滿足醫學影像儲存及通信系統(PACS)用於儲存、取得、傳送與顯示之需求，故傳統底片式 X 光影像系統已逐漸淘汰。數位 X 光攝影利用直接或間接式之轉換技術將穿透人體組織的 X 光轉為數位訊號，再將其重組為二維影像後，直接顯示於高解析度之顯示器，數位成像系統已成為 X 光影像設備之市場主流。2010 年行政院生技產業策略諮議委員會議決議全面推動數位 X 光造影系統等高階醫學造影設備作為台灣高階醫學影像器材產業發展產品；目前有多家廠商已投入醫療用數位 X 光攝影儀系統之開發。

隨著造影設備日新月異，相關醫療輻射防護議題也越受重視。接受的輻射劑量越多，造成輻射傷害之機率也將會越高，但照射劑量不足，所呈現出來的影像無法提供疾病正確診斷而必須重照時，病患所接受的輻射量也會增加。Image Gently 與 Image Wisely 之低劑量 X 光攝影已是國際趨勢，遵守 ALARA 原則，若病患為孩童，使用 Society for Pediatric Radiology 公布之 Image Gently 參考資料，病患為成人時，使用 Radiological Society of North America 之 Image Wisely 指導方針。整個影像鏈，除放射醫師、醫學物理師及放射技師外，儀器製造商、病患及家屬等均應注重劑量紀錄與抑低。AAPM 會議也指出利用每次造影之影像所呈現輻射曝露、劑量、造影程序設定等相關資訊，醫院端可即時監視病人之劑量。因此，適當的劑量在放射診斷影像上是很重要的議題。原子能委員會為保障民眾健康，積極推動醫療曝露品質保證作業，藉以提升國內輻射醫療曝露之品質。可見，在維持放射影像品質同時，降低患者接受之輻射劑量為世界潮流。然而，造影系統如何能輸出造影資訊及可靠之劑量資訊且同時符合醫療數位影像傳輸協定規範是國內所欠缺的，透過此橋接研究的進行，可有效控制在檢查時之非預期輻射劑量曝露，故確有必要進行。

II. 主要內容

本計畫主要係以完成數位 X 光攝影系統之 DICOM 影像物件研析及輻射劑量曝露與影像品質評估等相關工作，使造影系統能輸出符合 DICOM 標準規範之正確造影內容及可靠劑量資訊，以期能有效控制其進行造影檢查時之非預期的輻射劑量曝露；其完成之工作項目，包括有：(a) 探討研析數位 X 光攝影儀之 DICOM 輸出

影像物件格式與標籤；(b) 數位 X 光攝影儀之輻射劑量評估與影像物件驗證，透過與醫界實務經驗結合，進行符合劑量監視與 DICOM 影像物件格式之可行性研究。以下就上述重點工作項目進行說明之：

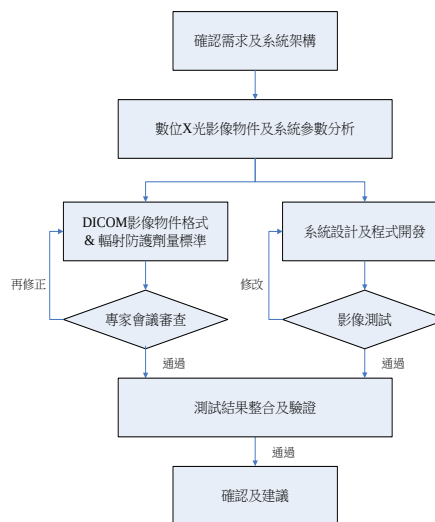


圖 2、主要執行流程及步驟

(a)數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤研析：

為使數位 X 光攝影儀輸出影像物件能完整展現，並符合臨床使用之需求及達到劑量監視目標，本年度邀請資通信等領域專家、臨床放射技術師及放射科醫師參與影像物件格式標籤之研討，並參照 DICOM 標準、AAPM TG 116、游離輻射防護法及原能會公告之輻射醫療曝露品質保證作業流程，配合相關數位 X 光攝影儀器開發，並於計畫期間舉辦會議進行討論，以符合輻射劑量曝露防護並實際應用於放射類造影儀器設備上。

DICOM 影像物件檔頭欄位包含有許多重要資訊，DICOM 對檔頭的規定，有一般性及針對不同類影像的特殊性。一般性檔頭包含有病患姓名、基本資料及檢查日期等欄位，特殊檔頭則依據影像特性而有特定欄位。影像資料如同傳統影像一般，紀錄了每幅圖像的值；而影像屬性部分，包含病患姓名、病歷號碼、檢查項目、日期及造影儀器等訊息，其中與劑量有關的資訊為曝露指標(Exposure indicator)，每一家廠商對曝露指標的表示方式與定義，皆不相同。儀器在定期校正情況下，曝露指標可提供臨床放射師作為技術條件調整之參考。

DICOM 影像物件會因影像特性而有不同影像檔頭模組定義；以數位 X 光攝影儀影像為例，資訊個體包含 Patient, Study, Series, Frame of Reference, Equipment 及 Image；不同資訊個體，又分別對應不同模組。除上述部份，尚包含參考框資訊個體，主要用以記錄連續影像的參數，如各影像間的時間間隔，或各影像間的厚度，影像碼號等相關資訊。本計畫依據 DICOM 標準第 3 部：資訊物件定義、第 5 部：資料結構及編碼，以及第 6 部：資料辭典規定，透過原始影像解碼所得資訊及參數，以研析 X 光攝影儀之影像物件與輻射劑量間的關係。

在標準 DICOM 影像物件中，檔頭資訊對於影像及造影相關資訊的呈現非常重要，為使數位 X 光攝影儀能將影像完整的展現，必須選取正確的檔頭，本計畫依據 DICOM 標準第 3 部規定之數位 X 光影像 IOD 模組屬性的定義(M：必要、U：可有可無及 C：依某條件才有的模組)選擇所需對應模組內容，並依據所對應模組(參閱 DX 影像 IOD 模組 Reference 處)規定，選擇對應的欄位。以下針對各資訊模組定義及其內容，列述如下：

表 1、數位 X 光影像 IOD 模組屬性

IE	Module	Reference	Usage
Patient	Patient	C.7.1.1	M
	Clinical Trial Subject	C.7.1.3	U
Study	General Study	C.7.2.1	M
	Patient Study	C.7.2.2	U
	Clinical Trial Study	C.7.2.3	U
Series	General Series	C.7.3.1	M
	Clinical Trial Series	C.7.3.2	U
	DX Series	C.8.11.1	M
Frame of Reference	Frame of Reference	C.7.4.1	U
Equipment	General Equipment	C.7.5.1	M
Image	General Image	C.7.6.1	M
	Image Pixel	C.7.6.3	M
	Contrast/Bolus	C.7.6.4	U
	Display Shutter	C.7.6.11	U
	Device	C.7.6.12	U
	Intervention	C.7.6.13	U
	Specimen	C.7.6.22	U
IE	Module	Reference	Usage
Image	DX Anatomy Imaged	C.8.11.2	M
	DX Image	C.8.11.3	M
	DX Detector	C.8.11.4	M
	X-Ray Collimator	C.8.7.3	U
	DX Positioning	C.8.11.5	U
	X-Ray Tomo Acquisition	C.8.7.7	U
	X-Ray Acquisition Dose	C.8.7.8	U
	X-Ray Generation	C.8.7.9	U
	X-Ray Filtration	C.8.7.10	U
	X-Ray Grid	C.8.7.11	U
	Overlay Plane	C.9.2	C - Required if graphic annotation is present
	VOI LUT	C.11.2	C - Required if Presentation Intent Type (0008,0068) is FOR PRESENTATION. Shall not be present otherwise. See Note 8.
	Image Histogram	C.11.5	U
	Acquisition Context	C.7.6.14	M - See A.26.5
	SOP Common	C.12.1	M

(b)數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像驗證：

為因應國內相關醫療器材製造商及核能研究所於數位 X 光攝影儀之先期開發，本計畫選定國內投入研發之數位 X 光攝影儀作為標的，並以 GE, Siemens 等廠商之數位 X 光攝影儀所產出影像物件進行研析，並已透過自行開發之驗證系統以資料表連結方式來擷取儀器端參數及相關設定。而數位 X 光攝影由照射、原始成像、處理、傳輸到顯示，有多個參數會影響其顯示之結果，在維持放射影像品質的同時，降低患者接受之輻射劑量為世界潮流。然而，造影系統如何輸出造影資訊及可靠之劑量資訊，且同時符合醫療數位影像傳輸協定規範是國內所欠缺的。因此本計畫依據數位 X 光攝影儀之實際產出影像物件資訊（如儀器參數、影像變數、管電壓(KVp)、管電流(mAs)及輸出劑量等資料），且針對數位 X 光攝影儀器的使用者操作軟體，建立實體連結參數；並參考 DICOM 標準第 3 部對應之影像模組規定及依循原子能委員會之輻射管制與防護要求進行驗證，以完成數位 X 光攝影儀器之輻射劑量與影像物件驗證。

III. 結果與討論

本計畫係以完成「醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接的研究」為預期目標，其目的為探討及研析造影系統如何輸出符合臨床診斷所需造影內容及可靠劑量資訊且同時能符合醫學數位影像及通信標準規範，而讓數位 X 光攝影儀等設備之輸出影像物件能符合 DICOM 標準，有效控制檢查時非預期之輻射劑量曝露，並透過整合學研單位研發能量，協助相關技術之開發。年度工作項目包括；(1) 研究探討數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤；(2) 數位 X 光攝影儀輻射劑量與 DICOM 影像物件之格式標籤驗證。表 2 所示即為可用來描述有關輻射劑量值(Radiation Dose)之資訊屬性，該屬性讓資訊系統可儲存病人於治療過程所接受之游離輻射照射量。

表 2、輻射劑量模組屬性

Attribute Name	Tag	Attribute Description
Anatomic Structure, Space or Region Sequence	(0008,2229)	Anatomic structure, space or region that has been exposed to ionizing radiation. Zero or one item shall be included in this Sequence.
>Include 'Code Sequence Macro' Table 8.8-1		No Baseline Context ID is defined.
Total Time of Fluoroscopy	(0040,0300)	Total duration of X-Ray exposure during fluoroscopy in seconds (pedal time) during this Performed Procedure Step.
Total Number of Exposures	(0040,0301)	Total number of exposures made during this Performed Procedure Step. The number includes non-digital and digital exposures.
Distance Source to Detector	(0018,1110)	Distance in mm from the source to detector center. Note: This value is traditionally referred to as Source Image Receptor Distance (SID).
Distance Source to Entrance	(0040,0306)	Distance in mm from the source to the surface of the patient closest to the source during this Performed Procedure Step. Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habits.
Entrance Dose	(0040,0302)	Average entrance dose value measured in dGy at the surface of the patient during this Performed Procedure Step. Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habits.
Entrance Dose in mGy	(0040,8302)	Average entrance dose value measured in mGy at the surface of the patient during this Performed Procedure Step. Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habits.
Exposed Area	(0040,0303)	Typical dimension of the exposed area at the detector plane. If Rectangular: row dimension followed by column; if Round: diameter. Measured in mm. Notes: 1. This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habits. 2. This attribute is used in the X-Ray Acquisition Dose Module with units in cm (see Section C.8.7.8 Table C.8-33).
Attribute Name	Tag	Attribute Description
Image and Fluoroscopy Area Dose Product	(0018,115E)	Total area-dose-product to which the patient was exposed, accumulated over the complete Performed Procedure Step and measured in dGy*cm ² , including fluoroscopy. Notes: 1. The sum of the area dose product of all images of a Series or a Study may not result in the total area dose product to which the patient was exposed. 2. This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habits.
Comments on Radiation Dose	(0040,0310)	User-defined comments on any special conditions related to radiation dose encountered during this Performed Procedure Step.
Exposure Dose Sequence	(0040,030E)	Exposure Dose Sequence will contain Total Number of Exposures (0040,0301) items plus an item for each fluoroscopy episode not already counted as an exposure. Zero or more items shall be included in this sequence.
>Radiation Mode	(0018,115A)	Specifies X-Ray radiation mode. Enumerated Values: CONTINUOUS PULSED
>KVp	(0018,0060)	Peak kilo voltage output of the x-ray generator used. An average in the case of fluoroscopy (continuous radiation mode).
>X-Ray Tube Current in μA	(0018,8151)	X-Ray Tube Current in μA. An average in the case of fluoroscopy (continuous radiation mode).
>Exposure Time	(0018,1150)	Time of x-ray exposure or fluoroscopy in msec.
>Filter Type	(0018,1160)	Type of filter(s) inserted into the X-Ray beam (e.g. wedges). See C.8.7.10 and C.8.15.3.9 (for enhanced CT) for Defined Terms.
>Filter Material	(0018,7050)	The X-Ray absorbing material used in the filter. May be multi-valued. See C.8.7.10 and C.8.15.3.9 (for enhanced CT) for Defined Terms.
>Comments on Radiation Dose	(0040,0310)	User-defined comments on any special conditions related to radiation dose encountered during the episode described by this Exposure Dose Sequence Item.

本計畫執行過程中，與核能研究所皆保持良好互動及需求討論，本計畫已依據年度執行進度完成相關文獻及醫學數位影像及通信系列標準之蒐集與彙整，並完成低輻射劑量 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤的研析及召開會議討論。在數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像物件格式標籤驗證部分，亦完成不同廠家之低輻射造影設備產出影像物件且針對所取得之輸出影像物件進行彙整，並透過自行開發之 DICOM 影像物件讀取系統進行讀檔及檔案格式的解析，如圖 2 所示。

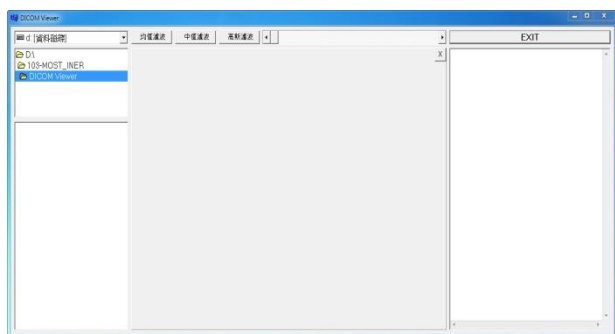


圖 2、本計畫案所開發之 DICOM Viewer 介面

系統執行時，使用者可以自左側窗格的路徑資料，選取欲檢視之 DICOM 影像的縮圖，即可顯示所選取之影像於 DICOM 影像格式驗證系統之圖像顯示區塊中，右側窗格顯示內容即為該 DICOM 影像檔之檔頭資訊，如圖 3 所示。本系統亦提供空間濾波與對比增強等。

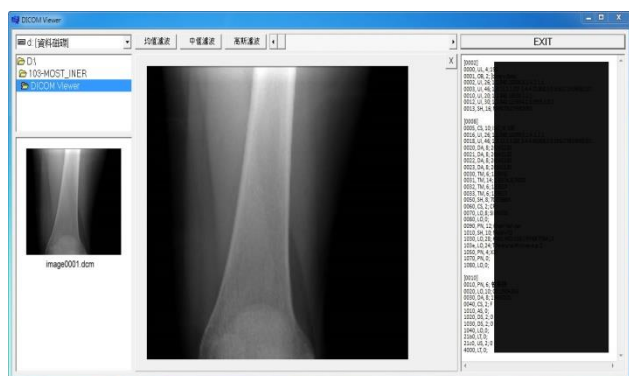


圖 3、DICOM Viewer 執行時之介面

隨著造影設備的日異更新，相關醫療輻射防護議題也越受到重視，國內醫療器材產業也逐漸朝向高階創新醫療造影設備及週邊產品發展。本研究為 2 年期計畫，本年度已依據執行進度完成相關文獻及醫學數位影像及通信標準之蒐集與彙整，並完成低輻射劑量 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤研析及輻射劑量與 DICOM 影像物件格式標籤之初步驗證。數位乳房斷層攝影可提供無法於二維影像呈現之病灶特性，其應用也受到本計畫需求單位重視。後續本計畫也會針對其造影設備輸出影像格式及標籤進行分析，以因應核能研究所及相關器材廠商之先期開發。後續本計畫將會依據成果提出建議報告，以作為國產放射類高階醫療設備規格之檢視及提供輻射管制與防護要求的參考。

IV. 結論

本計畫主要為探討低輻射相關造影儀器設備如何輸出符合臨床診斷需求之造影內容及可靠劑量資訊，且同時能符合醫學數位影像及通信標準，並能有效控制在檢查時非預期之輻射劑量曝露。本計畫研究內容從數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件的研析、輻射劑量曝露及造影系統參數連結之驗證，邁向成熟有效的相關產學整合，以取得醫療診斷市場先機。尤其，高階醫療影像器材開發為目前國家經濟推展目標，因其費時費力且需跨領域合作，透過本計畫相關工作的進行，可開啟研究單位及學術機構之合作契機，有效整合雙方研發力量，並以驗證技術，開發具市場利基之高階醫療影像器材，以彌補關鍵技術缺口，同時尋找可配合台灣優勢項目且易成功之方式，縮短台灣開發高階醫療器材時程，健全上中下的產業鏈，加速推動我國高階醫器產業發展。

此外，本計畫提供碩士班研究生 2 人參與合作研究之機會，參與計畫之工作人員也學習到與業界合作的技巧、增強撰寫程式能力、資料處理程式之設計及論文撰寫能力，且能增進其實務經驗，有利國內碩士之培育，提升整體研究人力與研究素質，且研究生畢業後可從事相關行業。此外，藉由 DICOM 及醫療器材驗證機制之推動，亦可使參與研發者可有一致的標準從事醫療器材產品開發，甚至進而促進各廠商之合作。

數位乳房斷層攝影(Digital Breast Tomosynthesis)可提供無法於 2D 影像所呈現之病灶特性，本計畫之執行成果可應用於數位乳房斷層攝影(DBT)之 DICOM 影像物件格式及標籤，若能進一步針對數位乳房斷層攝影儀進行研析並依據醫療器材開發流程，研討符合劑量監視與國際影像格式標準之可行性方案，並針對國產放射類造影設備規格檢視及輻射管制與防護提出建議，這將會更有助於發展，期能在政府鼓勵創新技術整合與研發的政策下加速研發成果，使開發出的產品更具有競爭力，以台灣自製之產品及關鍵技術，進而將台灣製造之數位 X 光影像整機系統推向國際市場。因此，本計畫後續也將數位乳房斷層攝影設備之相關研析列為下階段目標。

參考文獻

- [1] J. Anthony Seibert, Digital radiography: CR versus DR? Time to reconsider the options, the definitions, and current capabilities, Applied Radiology, 2007.
- [2] 蘇振隆、蔡育秀、劉建財、郭銘芳：引進及推動健康醫療資訊標準，經濟部標準檢驗局成果報告，2007。
- [3] Oosterwijk, DICOM Basics, Third Edition, OTech Inc. 2000.
- [4] ISO 12052, Health informatics - Digital imaging and communication in medicine (DICOM) including workflow and data management, 2006.
- [5] DICOM 3.0, Digital Imaging and Communications in Medicine, ACR-NEMA, 2015.
- [6] 游離輻射防護法，2002。
- [7] 輻射醫療曝露品質保證標準，2011。
- [8] AAPM TG 116, An Exposure Indicator for Digital Radiography, Report of AAPM Task Group 116, 2009.

給核醫成像應用之多通道讀出系統晶片電路設計

Multi-Channel Readout SOC Design for Nuclear Medicine Imaging

計畫編號：103-NU-E-007-007-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：盧志文

e-mail：cwlu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：莊博智、郭亘倫、馮紹霖、傅嘉韋、楊越德、

賴李沛毅、黃俊浩、張祐綱、張文軒、周育諒、林京樺

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

吾人在本計劃中設計並實現一個給正子斷層掃描應用之多通道讀出電路單晶片。電路架構包括 16X16 個具有權重增益的電流感測放大器、四個電阻放大器、四個峰值偵測保持電路、四個類比數位轉換器及一個數位訊號處理器，SiPM array 的輸出電流直接接到 16X16 個具有權重增益的電流感測放大器的輸入，具有權重增益的電流感測放大器可以感測 SiPM array 的輸出電流並且將其電流照所要的權重大小放大，本計畫中吾人也提出一個高速之峰值偵測保持電路以提高影像畫質，因為有峰值偵測保持電路的關係，所以不需要取樣速率高的類比數位轉換器。

Abstract

In this project, we designed and implemented a multi-channel readout SOC for Positron Emission Tomography (PET) applications. The architecture includes 16X16 current sensing amplifiers with weighted gains, four summing resistance amplifiers, four peak-detect-and-hold circuits, four ADCs, and a DSP. The output currents of SiPM array are directly applied to the inputs of the current sensing amplifiers with weighted gains. The current sensing amplifiers with weighted gains can sense the SiPM current and amplify the sensed current with weighted gains. To improve the image resolution, we designed and implemented a high-speed peak detect and hold (PDH) circuit. Because the peak detect and hold circuits are used in the readout circuit, high sampling-rate ADCs are not required in this architecture.

Keywords: Positron Emission Tomography (PET) system, readout circuit, SOC, amplifiers, peak-detect-and-hold circuit, and ADC.

I. 前言

現代醫療儀器發展快速，正子電腦斷層掃描儀 PET 的臨床應用和傳統以解剖為主的放射診斷影像結合成一體，用以作疾病的診斷、監測、療效評估及預後等使其發揮的更淋漓盡致。

PET 系統需 Scintillator Elements 偵測光子，偵測光子後可由 multi-channel photomultiplier tubes (PMTs) 獲得所需要的空間解析度，或是由 SiPM (Silicon Photomultiplier) 來將光轉換成電流。本計劃的核醫成像讀出電路是要應用在 SiPM-based PET 系統中。目前在全世界學術研究單位中，法國的 Institute

Pluridisciplinaire Hurbert Curien (IPHC) 及中國大陸華中科技大學有不錯的研究成果，法國的 IPHC 有晶片設計能力，不過他們只設計讀出電路系統的前端電路而已 [1-15]。華中科技大學雖然已完成完整的 animal PET 系統，不過他們沒有晶片設計能力，他們是買一些 IC 做系統組裝測試。感謝科技部的補助，經過近一年的努力，我們已完成讀出電路系統的前端電路和類比數位轉換器。

II. 主要內容

類比前端電路：

圖（一）是一個傳統的 PET 前端電路並包含類比置數位轉換器(ADC) [1]。PET 系統需 Scintillator Elements 偵測光子，偵測光子後可由 multi-channel photomultiplier tubes (PMTs) 獲得所需要的空間解析度，或是由 SiPM (Silicon Photomultiplier) 來將光轉換成電流。本計畫的核醫成像讀出電路是要應用在 SiPM-based PET 系統中。目前在全世界學術研究單位中，法國的 Institute Pluridisciplinaire Hurbert Curien (IPHC) 及中國大陸華中科技大學有不錯的研究成果 [1-17]。法國的 IPHC 有晶片設計能力，不過他們只設計讀出電路系統的前端電路而已。而中國大陸華中科技大學已完成完整的 animal PET 系統，也有執行過老鼠的成像測試，不過他們沒有晶片設計能力，需要買一些 IC 做系統組裝測試。本計畫的執行目的即是將這些文獻所未完成的積體化 PET 讀出電路，以嶄新的電路架構，來設計 readout circuit 和 ADC 的晶片並實測。

吾人提出的第一個核醫成像讀出晶片電路架構是配合核研所的系統需求，此架構是應用在 16x16 之 SiPM 陣列電流的讀出，每一個 SiPM cell 需要一個相對應的 current sensing cell 來感測出此 SiPM cell 的感應電流，16x16 SiPM array 就需要 256 個 current sensing cells，圖（二）為吾人提出的核醫成像讀出晶片電路系統架構圖，此系統需一個 16 x 16 current sensing amplifiers 去感測一個 16x16 SiPM array 電流，如圖（三）所示，每一個 current sensing cell 將感測到的電流分成 x 及 y 方向的電流，每一個方向電流又分成 2 個(a 和 b)輸出，電流大小照其所在位置有不同的增益，其增益大小為 weighted-gain，256 個 current sensing cells 中，x 方向屬 a 的 16 個電流相加，產生 $I_{xa1}, I_{xa2}, I_{xa3}, \dots, I_{xa16}$ ，x 方向屬 b 的 16 個電流相加，產生 $I_{xb1}, I_{xb2}, I_{xb3}, \dots, I_{xb16}$ ，y 方向屬 a 的 16 個電流相加產生 $I_{ya1}, I_{ya2}, I_{ya3}, \dots, I_{ya16}$ ，y 方

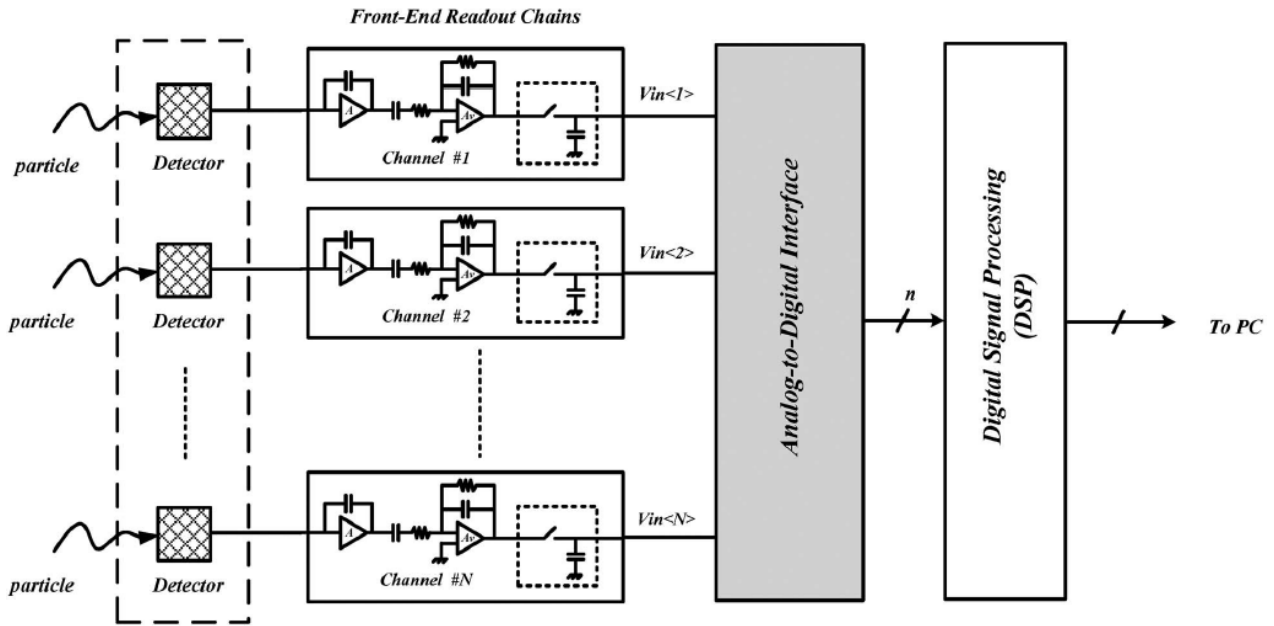
向屬 b 的 16 個電流相加產生 $I_{Yb1}, I_{Yb2}, I_{Yb3}, \dots, I_{Yb16}$ ，此 4 組電流送到 4 個 Summer Resistance Amplifiers 以下列 4 個方程式做適當的權重相加產生 4 個電壓：

$$V_{Xa} = R \cdot (I_{X1} + 2I_{X2} + 3I_{X3} + \dots + 15I_{X15} + 16I_{X16}) \quad (1)$$

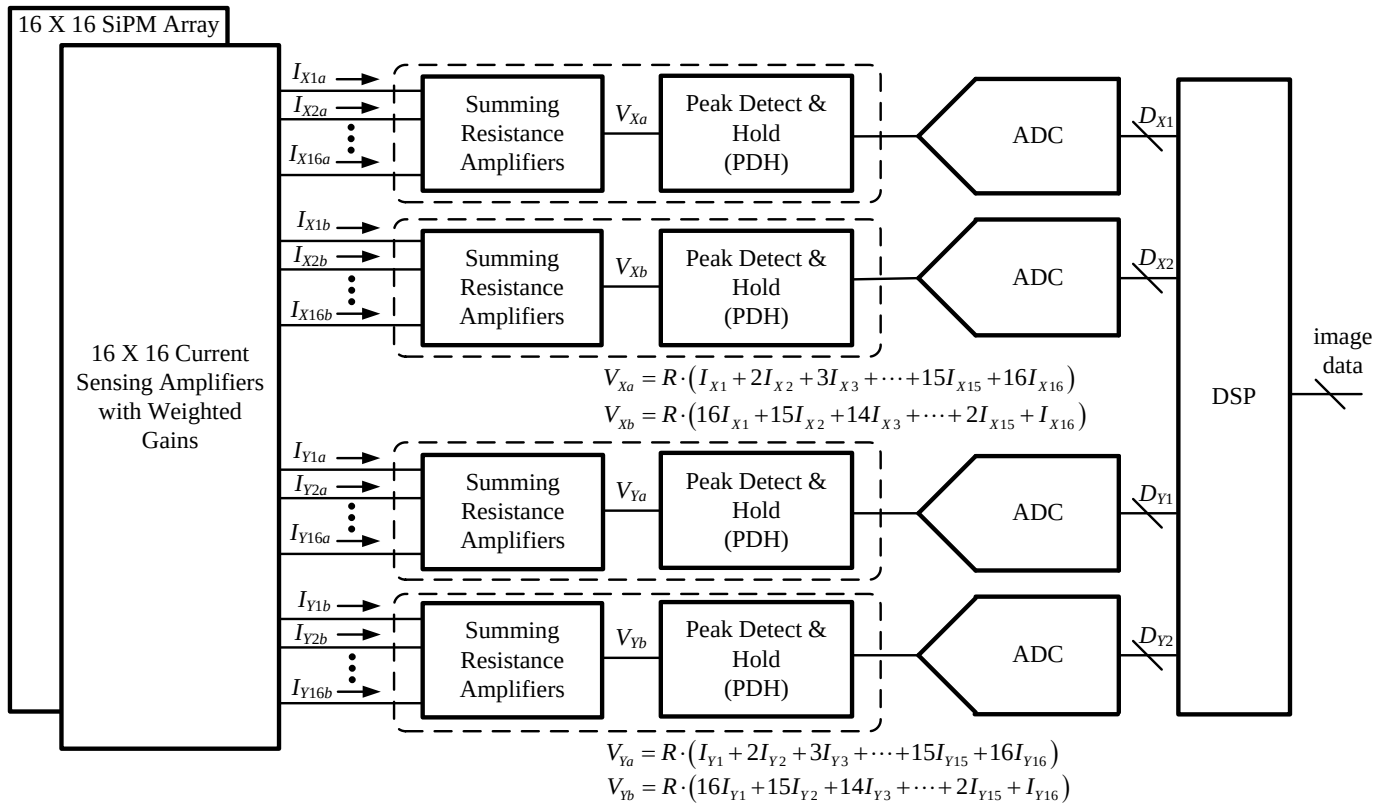
$$V_{Xb} = R \cdot (16I_{X1} + 15I_{X2} + 14I_{X3} + \dots + 2I_{X15} + I_{X16}) \quad (2)$$

$$V_{Ya} = R \cdot (I_{Y1} + 2I_{Y2} + 3I_{Y3} + \dots + 15I_{Y15} + 16I_{Y16}) \quad (3)$$

$$V_{Yb} = R \cdot (16I_{Y1} + 15I_{Y2} + 14I_{Y3} + \dots + 2I_{Y15} + I_{Y16}) \quad (4)$$



圖（一）一個傳統的 PET 前端電路並包含類比數位轉換器（ADC）。



圖（二）吾人提出的核醫成像讀出晶片電路系統架構圖。

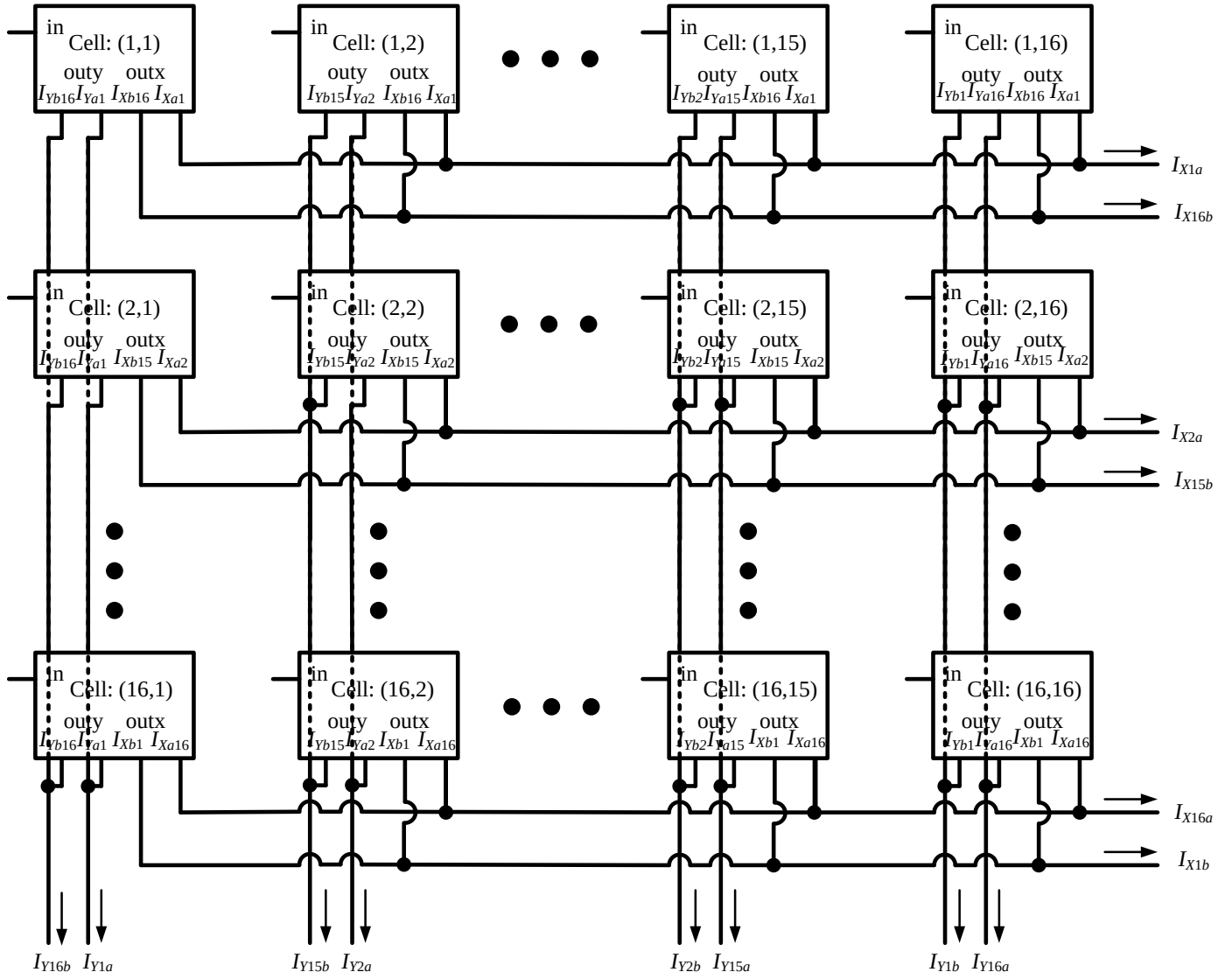


圖 (三) 一個 16 x 16 current sensing amplifiers。

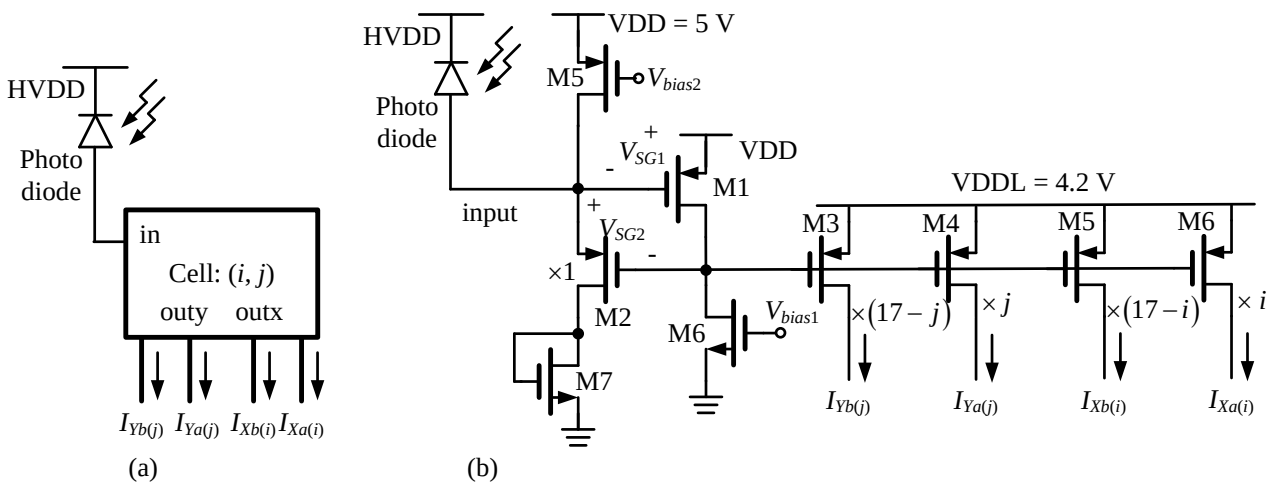


圖 (四) 第 (i,j) 個 current sensing cell，圖(a)為符號，圖(b)為電路圖。

吾人所用的成象方法乃是感測此 4 個電壓的峰值就可確定 SiPM array 是那幾個 SiPM cells 有感應到電流，所以此 4 個電壓再送至 Peak Detect and Hold (PDH) 電路取出峰值電壓，之後由類比/數位轉換器(ADC)轉換成數位資料送到數位資料處理器(DSP)做影像處理。

圖 (四) 為第 (i,j) 個 current sensing cell，(a)圖為符號，一個輸入及 4 個輸出，(b)圖為電路圖，相對應的 SiPM cell 陽極接到此 current sensing cell 的輸入端，M1-M2 組成的負迴授電路降低輸入阻抗，輸入端的電壓保持在 $VDD - V_{SG1}$ 的電壓， V_{SG1} 的電壓大小由 V_{bias1} 控

制，我們可控制 V_{bias1} 大小使 V_{SG1} 等於 0.8 V，如此輸入電壓保持在 $5 - 0.8 = 4.2$ V，M3-M6 的 source 端接 4.2 V 的直流電壓，由於 M2-M6 有相同的 V_{SG} 電壓，M2-M6 組成 current steering，為了產生 weighted current，不同位置的 current sensing cell 有不同的輸出電流大小，對某一個 (i, j) current sensing cell，其 M2-M6 的電晶體 size 大小關係為：

$$\frac{(W/L)_3}{(W/L)_2} = 17 - j \quad (5)$$

$$\frac{(W/L)_4}{(W/L)_2} = j \quad (6)$$

$$\frac{(W/L)_5}{(W/L)_2} = 17 - i \quad (7)$$

$$\frac{(W/L)_6}{(W/L)_2} = i \quad (8)$$

如此設計就可產生 weighted currents。

傳統的 Peak Detect & Hold (PDH) 需要一個 operational amplifier，為了有較好的準確度，opamp 的 open-loop gain 要足夠高，一級的 cascode opamp 的輸出範圍太小了，所以必須使用 two-stage opamp，但是一個 two-stage opamp 需做頻率補償，使得 two-stage opamp 的頻寬較窄，而且功率消耗也較大，為了得到高速的 Peak detect and hold 功能，吾人不使用 opamp，吾人設計了一個 novel peak detect and hold (PHD) circuit，此 PHD 電路結合了 summing resistance amplifier，使得電路不僅 detect and hold 速度更快，電路也更 compact，圖(五)為 summing resistance amplifier + peak detect & hold circuit，此電路是把 $I_{X1a}, I_{X2a}, I_{X3a}, \dots, I_{X16a}$ 等 16 個電流做相加並偵測出相加之後的 peak 值以電壓的形式儲存在電容上，最後此電路以電壓形式送出其 peak 值。16 個輸入電流送到 MP2a 的 drain 端，M1-M2 組成的負迴授電路降低輸入阻抗，由於 16 個輸入電流都同時送到 MP2a，所以流進 MP2a 的電流為所有 16 個輸入電流的總和，每次偵測前先對儲存電容做 reset，reset 完後，一有電流流到 MP2a 的 drain 端，輸入電壓會先上升，MP1a 就導通並對電容 C1 充電，電容 C1 上升促使 MP2a 的 drain 端電壓下降，由於 M1-M2 組成的負迴授電路，使得電容 C1 上的電壓和輸入電流的關係為：

$$V_{C1} = V_{GS, MP2a} = V_t + \sqrt{\frac{2(I_{X1a} + I_{X2a} + \dots + I_{X16a})}{\mu_n C_{OX} (W/L)_{MP2a}}} \quad (9)$$

此時電容 C1 只能被 MP1a 充電，沒有放電路徑，所以當 $I_{X1a}, I_{X2a}, I_{X3a}, \dots, I_{X16a}$ 等 16 個電流和減少時，MP1a 的閘極電壓下降，MP1a 就關閉，電容 C1 電壓不會下降，也就是說電容 C1 儲存的電壓就是 $I_{X1a}, I_{X2a}, I_{X3a}, \dots, I_{X16a}$ 16 個電流和相對應的 peak 電壓值。由於 MP3a 的閘極電壓連接到電容 C1 的上板，所以只要 MP3a 工作在飽和區，MP3a 的 drain 電流 I_{MP3a} 為

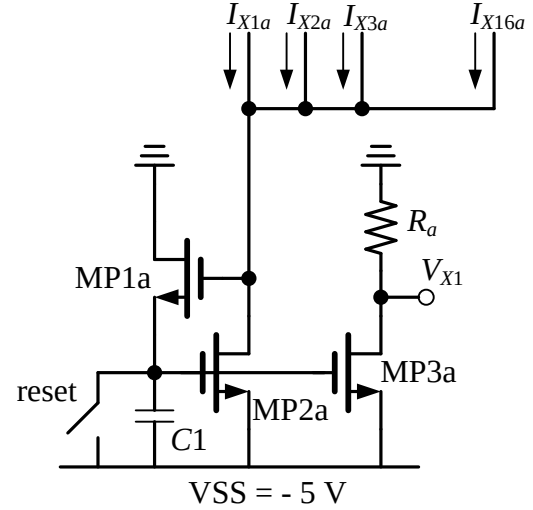
$$I_{MP3a} = \frac{(W/L)_{MP3a}}{(W/L)_{MP2a}} (I_{X1a} + I_{X2a} + \dots + I_{X16a})_{peak} \quad (10)$$

也就是說，MP3a 的 drain 電流 I_{MP3a} 和 MP2a 的 drain 電流比值為 MP3a 和 MP2a 電晶體的 size 大小的比值。MP3a 的 drain 電流流過電阻 R_a ，所以此電路的輸出電

壓 V_{X1} 為：

$$V_{X1} = -I_{MP3a} \cdot R_a = -\frac{(W/L)_{MP3a}}{(W/L)_{MP2a}} \cdot R_a \cdot (I_{X1a} + I_{X2a} + \dots + I_{X16a})_{peak} \quad (11)$$

由於輸出電壓和 $I_{X1a}, I_{X2a}, I_{X3a}, \dots, I_{X16a}$ 16 個電流和的 peak 值成正比，所以此電路為 summing resistance amplifier + peak detect & hold circuit，而且此電路不須做頻率補償，所以此電路有很寬的頻寬，偵測出來的 peak 值更準確。



圖(五) Summing resistance amplifier + peak detect & hold circuit。

類比數位轉換器設計：

本計劃設計了一個十二位元非同步連續漸進式類比數位轉換器(A 12-bit 10M S/s asynchronous SAR ADC)。使用全合併電容開關式架構(Merged capacitor switching based SAR ADC)如圖(六)，達到低功耗且較高速的比較過程[18]。在較複雜的數位控制設計中提出低轉態頻率的數位邏輯架構，在功耗降低方面更有明顯的改善。使用 TSMC018um 製程，以及 1.2 伏特的低壓設計，並達到輸入訊號全範圍。

軌帶式開關使用如圖(七)之架構[21]。在設計概念上由於此架構屬於中速的 SAR ADC，故在提高速度的前提下，其 1.8V 的供應電壓能有效增加開關驅動能力，使軌帶式開關的頻寬與運作速度符合規格，並且達到輸入訊號全範圍(Full Range)。

具前端放大器(pre-amplifier)的比較器對回踢雜訊的抵銷效果極佳，如圖(八)。第一級前端放大器可以有效地提高比較器對於輸入電壓的解析度且經由 M_1 、 M_2 的閘極進入門閘器；當第二級門閘器(Latch)進行正回授將輸出端分別拉至“gnd”以及“ V_{DD} ”時，由於 M_1 、 M_2 的汲極變化並不會影響到其閘極，故對於比較器第一級並不會有任何影響，因而不產生任何回踢雜訊。然而，由於前端放大器需要一個靜態電流來完成，對於整體 SAR ADC 的功耗影響甚鉅，故在此提出另一個無靜態電流且能有效抑制回踢雜訊之比較器架構，在消除回踢雜訊的同時，同時達到低功耗以加強 SAR ADC 的轉換效率。

同步時脈產生器使用十三組 DFF 組成邏輯迴路，輸

入 clk_c 與 $start$ 後可完成與 clk_c 同步之邏輯控制時脈。
 14 個週期之 clk_c 可完成一次類比轉數位的過程，當轉換速度(clk_s)為 100k Hz 時，則須輸入控制時脈(clk_c)1.4M Hz。由圖 (九) 可知：由 $start$ 決定何時開始產生時脈，且所有 DFF 皆由 clk_c 觸發；由 clk_s 重置，形成一組位移暫存器(Shift Register)；位移結束後取最後一個 DFF 輸出的 clk_{12} 拉回第一組 DFF 的輸入端，使時脈產生器自動進入下一筆類比數位轉換的時脈移位。時脈序列如圖 (十) 所示。當 $start$ 訊號"high"時，經反向器觸發第一個 DFF 使輸出 clk_s 為零，同時重置所有 DFF 使 $clk_{1\sim12}$ 皆為零。接著 clk_{12} 則=1 並進入移位暫存器依

序產生 $clk_{1\sim12}$ 的控制訊號。最後，當移位結束， $clk_{12}=0$ 則使第一個 DFF 輸出 clk_s 為零並再次重置所有 DFF，使之進行下一筆資料的時脈產生。

此次使用的合併電容開關式架構，在 DAC 電容下板總計有四個訊號開關，分別為輸入訊號、共模電壓、正參考電壓、負參考電壓(V_{in} 、 V_{cm} 、 V_{ref+} 、 V_{ref-})，故在開關邏輯的設計上較傳統的架構複雜許多。邏輯經簡化後如圖 (十一) 所示。其中 Buffer 主要是用來增加推力；Delay chain 與 Delay inverter 主要功能則是增加延遲時間。

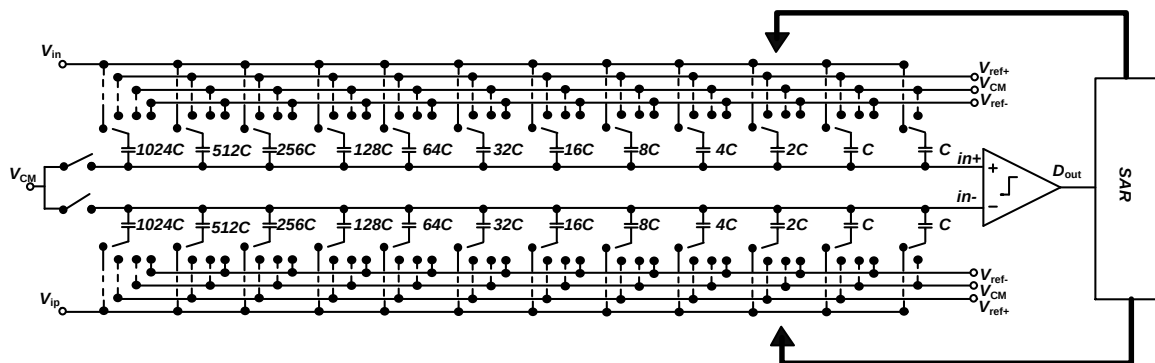


圖 (六) A 12-bit 100k S/s synchronous SAR ADC 架構。

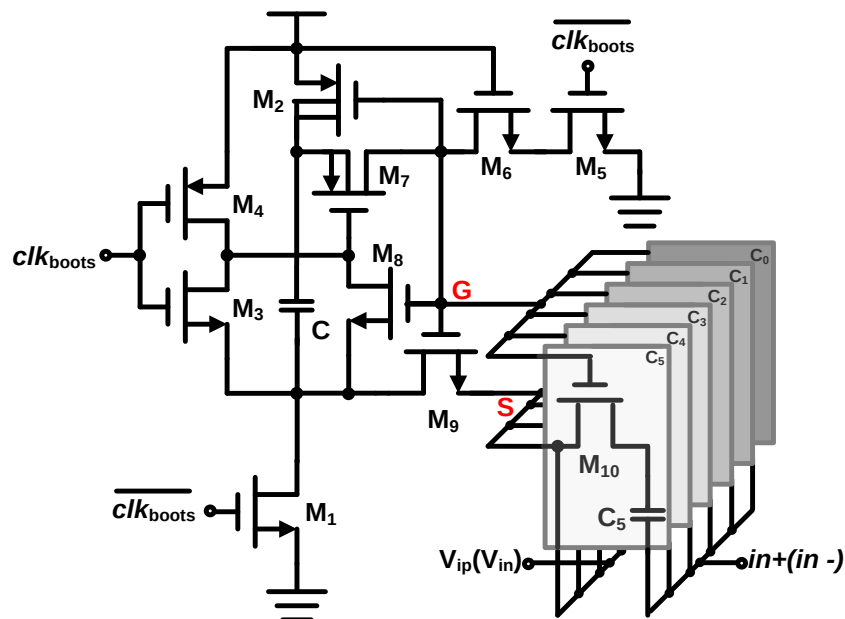
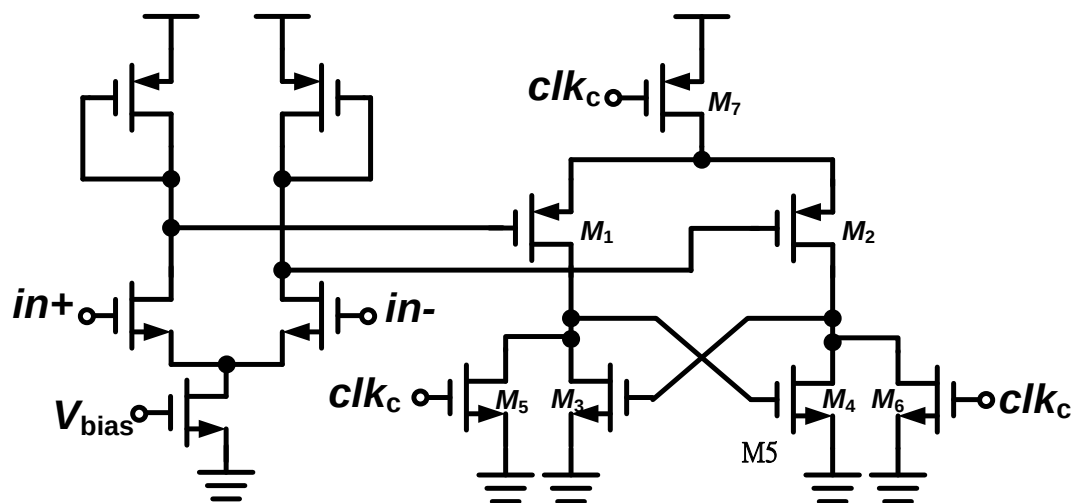
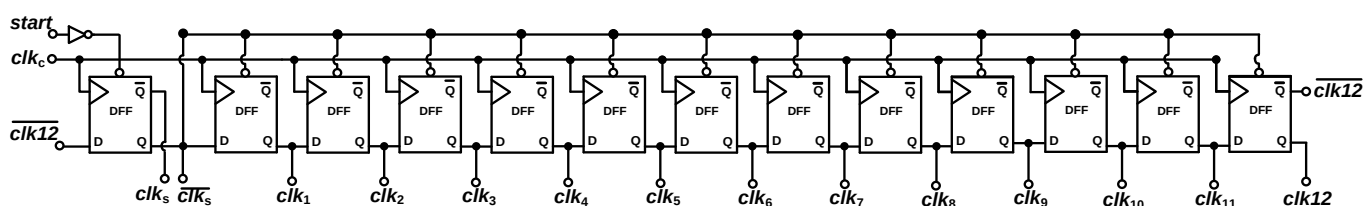


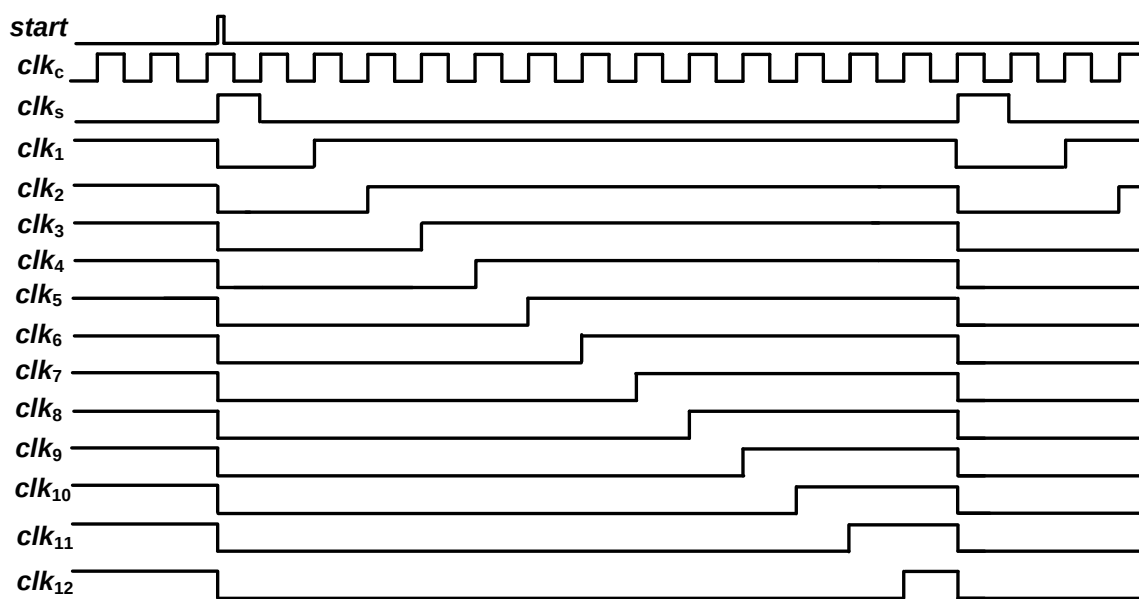
圖 (七)、靴帶式開關架構。



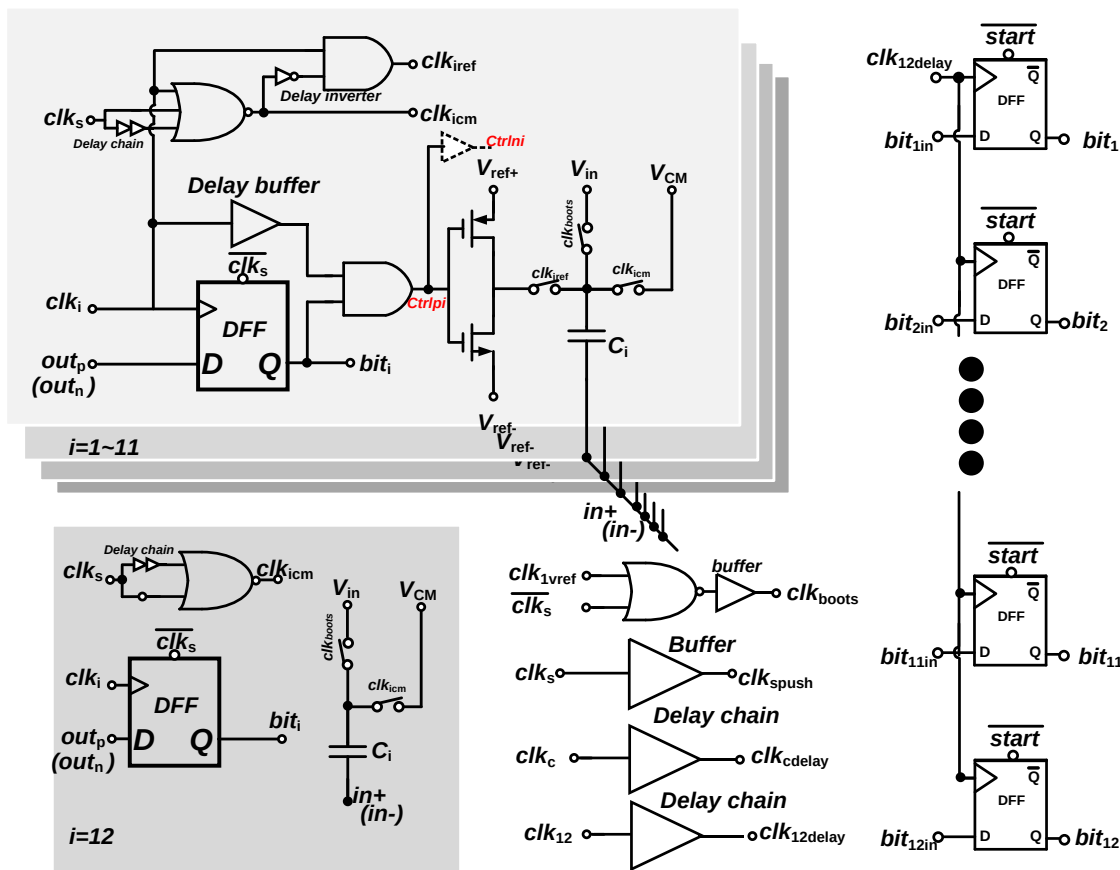
圖（八） 具前端放大器之比較器架構。



圖（九） 12-bit 同步時脈產生器架構。



圖（十） 12-bit 同步時間序列。



III. 結果與討論

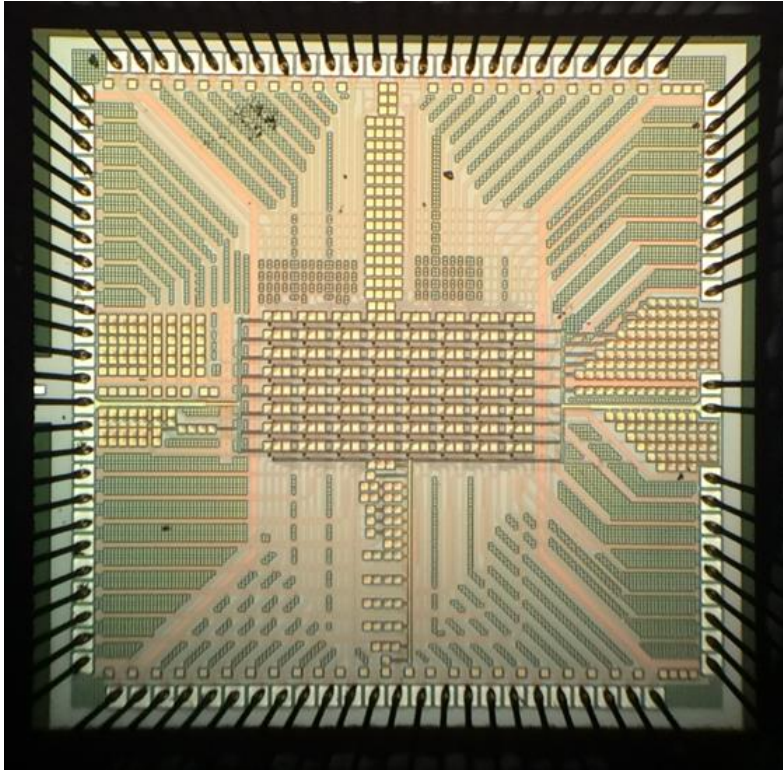
類比前端電路

十二位元同步時脈低功耗 SAR ADC 量測結果

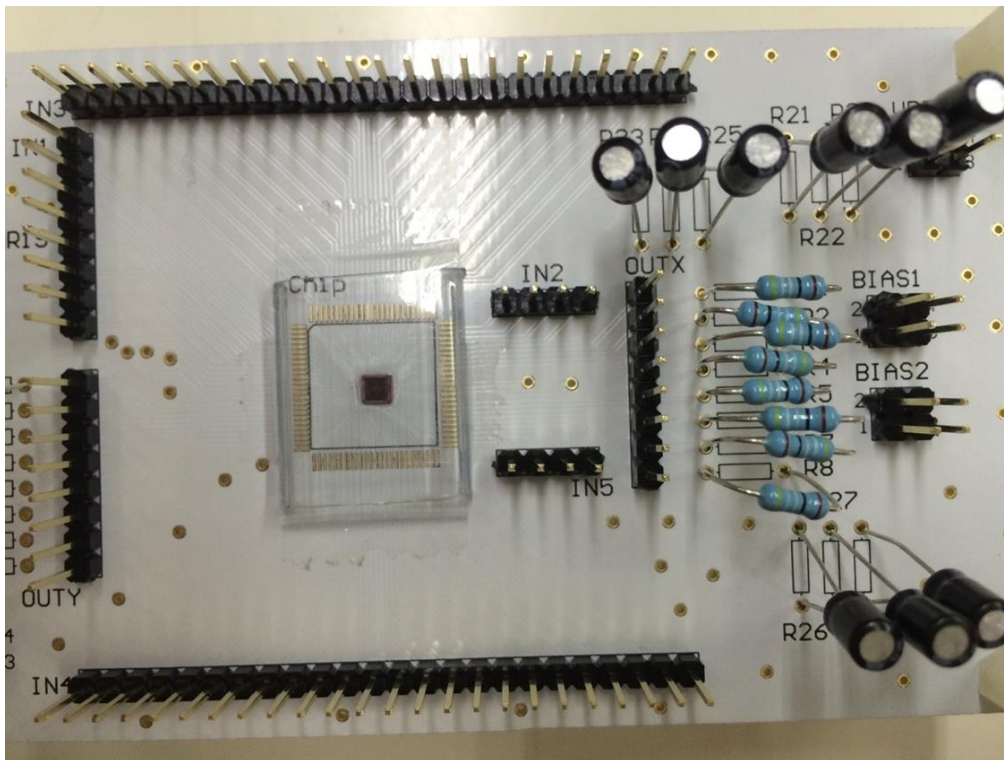
在 1V 的供應電壓下，輸入 $V_{PP} = 1.9V$ 差動訊號正弦波(SIN)，並取 131072 個數位輸出進行動態參數分析。

此次完成的 12bit, 100kS/s 低功耗同步 SAR ADC 在奈奎氏取樣率下且全範圍輸入電壓可達 $2 \times V_{DD}$ 的 95% 之正弦訊號，其有效位元數可達 9.99，同時總功耗為 $5.0859 \mu W$ ，符合低功耗的設計。其佈局後模擬與量測結果比較如表（一）。

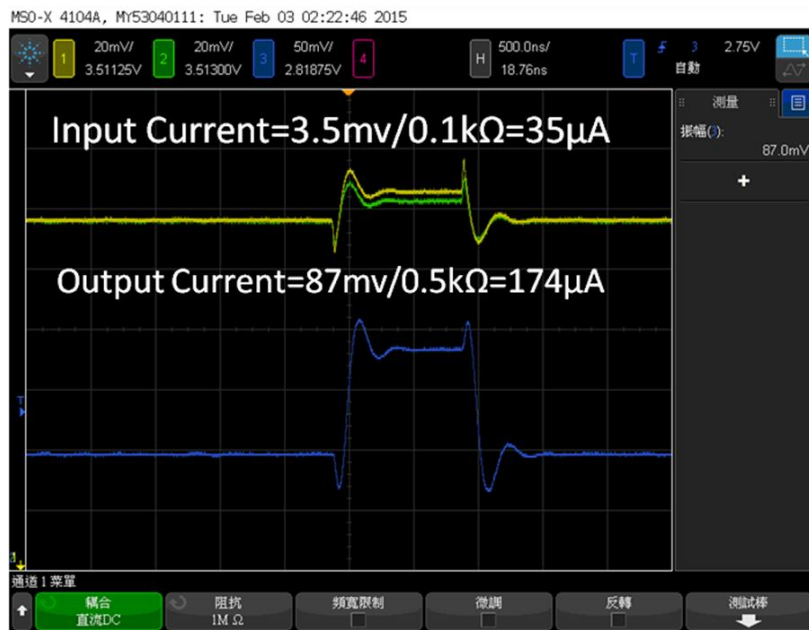
本計畫執行的成果為設計並製作出一顆給正子電腦斷層掃描儀使用之前端 16x16 讀出電路晶片，而此讀出晶片之後的類比置數位轉換器，吾人亦以 IC 設計與製作之技術，實現出一顆十位元連續漸進式類比數位轉換器，可以將讀出電路所偵測到的類比訊號轉換成數位訊號，提供給後級的數位處理電路作分析，即可將掃描的圖像呈現出來。癌症的早期偵測是一項相當重要的醫療技術，然而往往需要使用精密且昂貴的電子設備，目前本計畫所設計之正子斷層造影讀出電路已成功地有初步的成果，相信對臺灣的學術研究、國家發展及醫療技術會有很大的貢獻。



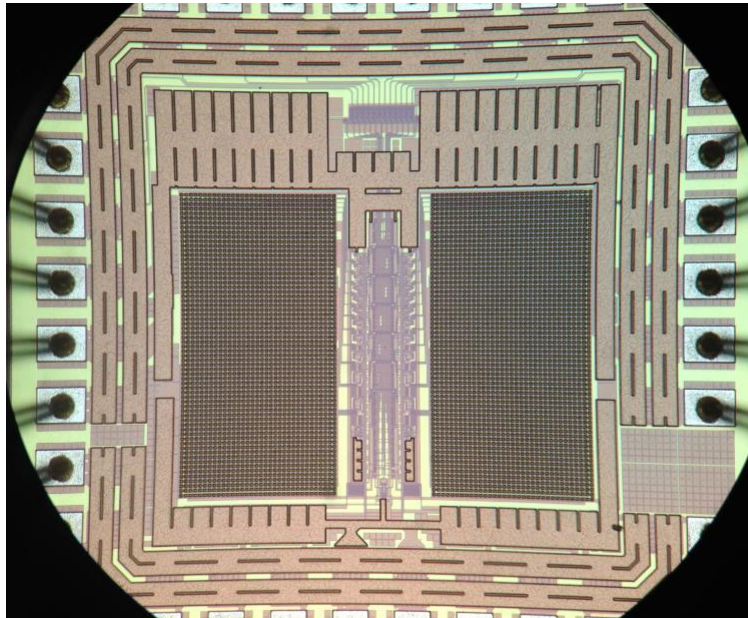
圖（十二）類比前端電路為晶片照相圖。



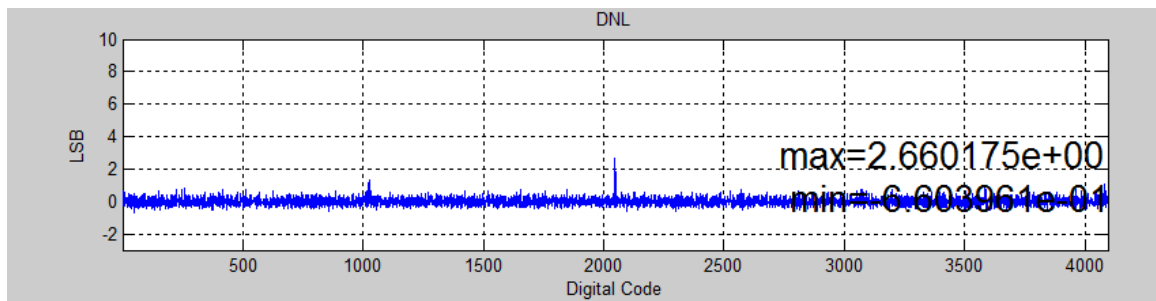
圖（十三）含類比前端電路晶片之 PCB 圖。

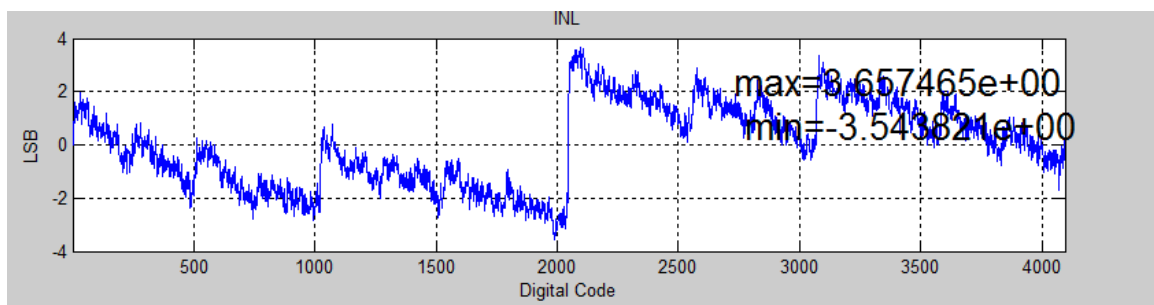


圖（十四） 類比前端電路晶片量測結果。

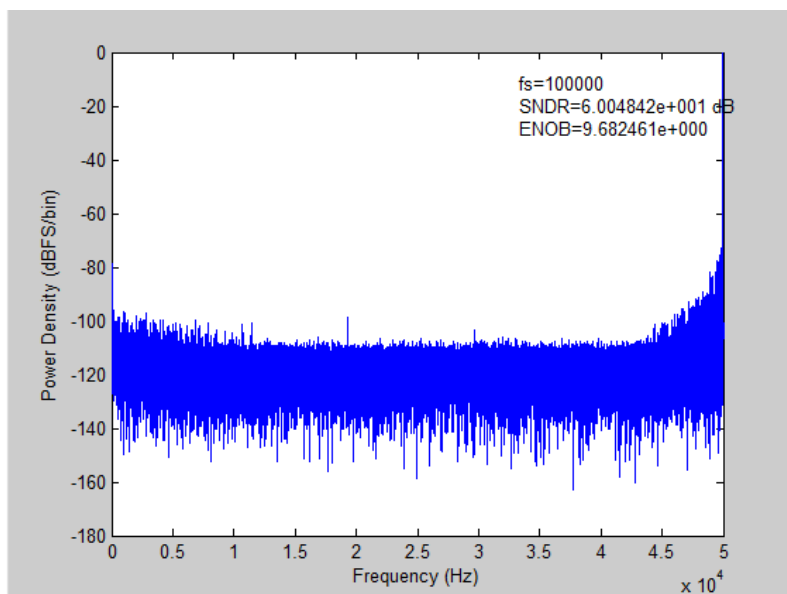


圖（十五）十二位元同步時脈低功耗 SAR ADC 晶片照相圖。

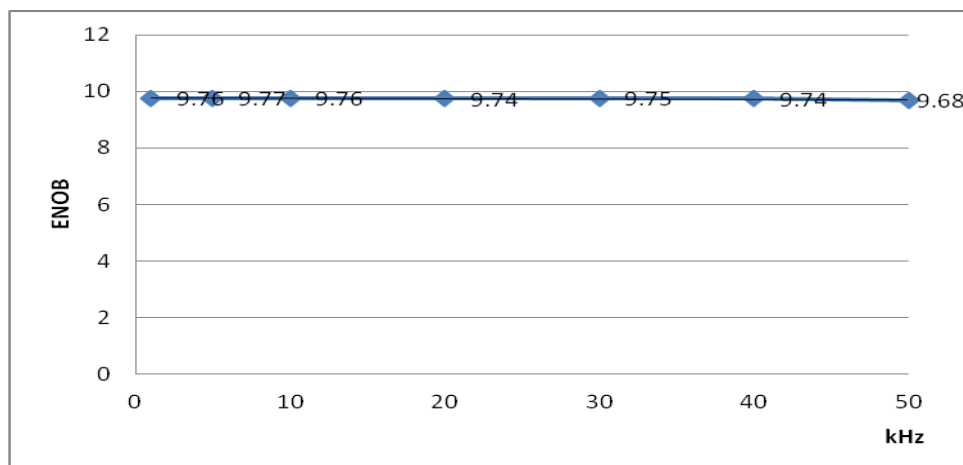




圖（十六） 12bit SAR 積分非線性誤差 DNL/ INL 量測結果。



圖（十七） 12bit SAR Nyquist-rate 50kHz 輸入 SIN 波下之有效位元數。



圖（十八） 12bit SAR 改變輸入 SIN 波頻率量測之有效位元數。

表（一） 12-bit 佈局後模擬與量測結果比較

	Post-simulation	Measure Result
Process	TSMC 018	
Supply Voltage(V)	1.2	1
Sampling Rate(S/s)	100k	100k
Input Vcm(V)	0.6	0.6
Input Range(V)	2	1.9
static DNL(LSB) @(mini , max)	(-0.333 , 0.333)	(-0.66 , 2.66)

static INL(LSB) @ (mini, max)	(-0.299, 0.265)	(-3.54, 3.66)
ENOB(bit)@nyquest	11.87	9.68
Power(W) (Vdd+Vref+Vcm)	4.5 μ	5.0859 μ
$FOM = \frac{Power}{2^{ENOB} \times f_s}$ (fJ/Con.-step)	12.02	62

IV. 結論

本計畫執行的成果為設計並實現一個給正子斷層掃描應用之多通道讀出電路單晶片。電路架構包括16X16個具有權重增益的電流感測放大器、四個電阻放大器、四個峰值偵測保持電路、四個類比數位轉換器及一個數位訊號處理器，SiPM array的輸出電流直接接到16X16個具有權重增益的電流感測放大器的輸入，具有權重增益的電流感測放大器可以感測SiPM array的輸出電流並且將其電流照所要的權重大小放大。吾人在此年度計畫所設計的SiPM array電流感測電路具有放大作用，實驗結果此電流感測電路可將SiPM array的電流放大5倍，所以吾人設計的多通道讀出電路單晶片應用在正子斷層掃描時不需高輻射劑量就可以做影像偵測，大幅降低病人對輻射的恐懼。本計畫中吾人也提出一個高速之峰值偵測保持電路以提高影像畫質，因為有峰值偵測保持電路的關係，所以不需要取樣速率高的類比數位轉換器。在之後這項計畫的延續，還有許多階段的研發工作尚須努力，包括晶片效能的改善和系統的整合並測試，才能使國內此一新型儀器可以順利的推出。

參考文獻

- [1] W. Gao, D. Gao, C. Hu-Guo, and Y. Hu, "Design of a 12-Bit 2.5 MS/s Integrated Multi-Channel Single-Ramp Analog-to-Digital Converter for Imaging Detector Systems," IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement. Vol. 60, NO. 6 pp.1942-1951, Apr. 2011.
- [2] N. Ollivier-Henry, W. Gao, N. A. Mbow, D. Brasse, B. Humbert, C. HuGuo, C. Colledani and Y. Hu, "Design and Characteristics of a Full-Custom Multichannel Front-End Readout ASIC Using Current-Mode CSA for Small Animal PET Imaging," IEEE Transactions On Biomedical Circuits and Systems. Vo1.5, No.1, pp.90-99, Feb. 2011.
- [3] X. C. Fang, N. Ollivier-Henry, W. Gao, Ch. Hu-Guo, C. Colledani, D. Brasse, B. Humbert and Y. HU, "IMOTEPAD: 64-Channel Front-End ASIC for Small Animal PET Imaging," Nuclear Instruments and Methods Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 634, No. 1, pp. 106-112, Apr. 2011.
- [4] C.-M. Kao and Q. Xie and Y. Dong and L. Wan and C.-T. Chen, "A High-Sensitivity Small-Animal PET Scanner: Development and Initial Performance Measurements," IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 56, No. 5, pp. 2678-2688, Oct. 2009.
- [5] W. Gao, D. Gao, C. Hu-Guo, T. Wei and Y. Hu, "Design and Characteristics of an Integrated Multichannel Ramp ADC Using Digital DLL Techniques for Small Animal PET Imaging," IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 58, No. 5, pp. 2161-2168, Sept. 2011.
- [6] M. Emery, S. Frank, J. Britton, A. Wintenberg, M. Simpson, M. Ericson, G. Young, L. Clonts, and M. Allen, "A multi-channel ADC for use in the PHENIX detector," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 44, no. 3, pp. 374-378, Jun. 1997.
- [7] E. Delagnes, D. Breton, F. Lugiez, and R. Rahmanifard, "A low power multi-channel single ramp ADC with up to 3.2 Ghz virtual clock," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 54, no. 5, pp. 1735-1742, Oct. 2007.
- [8] W. Gao, D. Gao, D. Brasse, Ch. Hu-Guo, and Y. Hu. Precise Multiphase Clock Generation Using Low-litter Delay-Locked Loop Techniques for Positron Emission Tomography Imaging, IEEE Transaction on Nuclear Science. Vo1.57, No.3, pp.1063-1070, June 2010.
- [9] M. Mota and J. Christiansen. A high-resolution time interpolator based on a delay locked loop and an RC delay line. IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vo1.34, No.10, pp.1360-1366, 1999.
- [10] W. Gao, Member, IEEE, D. Gao, T. Wei, H. Zeng, Y. Duan, S. Lu, L. Shen, W. Xu, Q. Xie and Y. Hu, "Design of a Monolithic Multi-Channel Front-End Readout ASIC for LYSO/SiPM-based SmallAnimal Flat-Panel PET Imaging," IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 2447-2450, 2011.
- [11] Q. Xie, C. M. Kao, Z. Hsiao, and C. T. Chen, "A new approach for pulse processing in positron emission tomography," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 4, pp. 988-995, Aug. 2005.
- [12] R. Fontaine, M. A. Tetrault, F. Belanger, N. Viscogliosi, R. Himmich, J. B. Michaud, S. Robert, J. D.Leroux, H. Semmaoui, P. Berard, J. Cadorette, C. M. Pepin, and R. Lecomte, "Real time digital signal processing implementation for an APD-based pet scanner with phoswich detectors," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 3, pt. 1, pp. 784-788, Jun. 2006.
- [13] A. Fallu-Labruyere, H. Tan, W. Hennig, and W. K. Warburton, "Time resolution studies using digital constant fraction discrimination," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 579, pp. 247-251, Aug. 2007.
- [14] P. D. Olcott, A. Fallu-Labruyere, F. Habte, C. S. Levin, and W. K. Warburton, "A high speed fully digital data acquisition system for positron emission tomography," in Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec., 2006, vol. 3, pp. 1909-1911.
- [15] L. Arnold, R. Baumann, E. Chambit, M. Filliger, C. Fuchs, C. Kieber, D. Klein, P. Medina, C. Parisel, M. Richer, C. Santos, and C. Weber, "TNT digital pulse processor," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 3, pt.1,

- pp. 723–728, Jun. 2006.
- [16] S. Surti, A. Kuhn, M. E. Werner, A. E. Perkins, J. Kolthammer, and J. S. Karp, "Performance of Philips gemini TF PET/CT scanner with special consideration for its time-of-flight imaging capabilities," *J. Nucl. Med.*, vol. 48, pp. 471–480, 2007.
 - [17] R. F. Muzic and J. A. Kolthammer, "Pet performance of the Gemini TF: A time-of-flight PET/CT scanner," in *Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.*, Oct. 2006, vol. 3, pp. 1940–1944.
 - [18] V. Hariprasath, J. Guerber, S. H. Lee, and U. K. Moon, "Merged capacitor switching based SAR ADC with highest switching energy-efficiency," *Electronics Letters*, vol. 46, pp. 620–621, 2010.
 - [19] A. M. Abo and P. R. Gray, "A 1.5-V, 10-bit, 14.3-MS/s CMOS pipeline analog-to-digital converter," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 34, pp. 599–606, 1999.
 - [20] M. Dessouky and A. Kaiser, "Input switch configuration suitable for rail-to-rail operation of switched op amp circuits," *Electronics Letters*, vol. 35, pp. 8–10, 1999.
 - [21] L. Chun-Cheng, C. Soon-Jyh, H. Guan-Ying, and L. Ying-Zu, "A 10-bit 50-MS/s SAR ADC With a Monotonic Capacitor Switching Procedure," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 45, pp. 731–740, 2010.

SPECT 腦造影之臨床影像定量分析研究和影像處理工具之開發

Quantitative Analysis of Clinical SPECT Cerebral Images and Development of Image Processing Tool.

計畫編號：103-2623-E-758-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：魏誠佑

e-mail：yuyu@seed.net.tw

計畫參與人員：洪光威、許百靈、詹美齡

執行單位：秀傳醫療財團法人彰濱秀傳紀念醫院

摘要

TRODAT-1 在 2005 年被台灣衛生署批准為對紋狀體區突觸前神經末梢處之多巴胺轉運體(dopaminergic transporters)之標示顯影劑，適用於檢測巴金森氏症(Parkinson's disease, PD)，於 2010 年被台灣中央健保局納入為醫療保險給付用藥，然而 TRODAT-1 的臨床應用拓展尚面臨種種挑戰，臨床實際上的需要尚待更多的研究工作來完成，其中包括針對於一般型 SPECT 準直器正常人數值值的建立，造影參數最佳化，定量分析工具的開發，標準臨床數據採集的質控和影像分析處理品保流程的訂定，和 PD 定性/定量診斷方式的標準化。此研究計畫將納入 30 位正常人進行一般型 SPECT 準直器的數據採集，以建立和年齡相關的正常人數值，包括：SBR=specific binding ratio, CPR=caudate to putamen ratio, 再依年齡差距對定量值的影響關係校正，以建立獨立於年齡差的正常人數值。同時依先前的假體實驗為基礎，對造影參數進行最佳化和符合臨床要求的採集質控，和優化後的技術進行定量影像重建，並以研究為目的的免費影像分析軟件開發影像定量分析工具，加入影像處理流程的品保要求，做為將來 TRODAT-1 SPECT 造影和影像分析的指南。

關鍵詞：TRODAT-1 單光子造影，多巴胺轉運體，巴金森氏症，影像質控，影像處理品保

Abstract

In the year of 2005, TRODAT-1 has been approved as a SPECT imaging tracer in Taiwan to evaluate the uptake of dopaminergic transporters in striatum area of brain as an indicator for detection of Parkinson's disease (PD). In 2010, the tracer was further permitted by Taiwan National Health Insurance Administration to receive Medicare reimbursement. However, over 8 years of period, the clinical expansion of TRODAT-1 SPECT is still very limited by many challenges. Most of clinical barriers came from the practical need to facilitate quantitative and qualitative interpretation confidence for consistent diagnostic performance for SPECT systems only capable of standard collimators, such as LEHR and LEGP, including collimator-dependent normal database, optimization of imaging parameters, comprehensive tool for quantitative imaging analysis, guideline for quality control of image acquisition and quality assurance of image analysis and optimized approach for PD diagnosis.

This reach project will recruit 30 normal healthy volunteers under different age categories (40 to >80 years) to receive TRODAT-1 SPECT equipped with standard collimators (LEHR and LEGP). Image data will be analyzed to create age-dependent normal database, including quantitative variables as TBR=target to background ratio (caudate and putamen), SBR=specific binding ratio, and CPR=caudate to putamen ratio. The values will then be utilized to obtain the calibration curve for age-independent normal database. TRODAT-1 SPECT data acquisition will use the optimized parameters from the previous phantom study. TRODAT-1 SPECT images will be reconstructed with an optimized reconstruction algorithm previously develop for myocardial flow quantitation with SPECT. A data analysis tool will be built by using public accessible image processing software (Amide). With the addition of quality assurance steps, a comprehensive guideline for TRODAT-1 SPECT imaging.

Keywords: TRODAT-1 SPECT, dopaminergic transporters, Parkinson's disease, image quality control, image processing quality assurance.

I. 前言

本研究旨在利用目前核醫領域可獲得免費的腦部影像分析軟體(如: Amide, 由 Stanford University 所開發)，加上 SPECT 腦部影像重建技術的改良，從雙方面來完成定量影像分析的流程，發展進行影像定量所需之工具，同時透過低能 parallel-hole 準直器(包括: low energy high resolution, LEHR 和 low energy general purpose, LEGP)來進行人體數據採集，以建立影像重建和定量分析的標準流程，正常人數值和教學病例，一方面將提高判讀方便性及臨床醫師應用，另一方面亦可幫助國內推動院際影像資源分享的達成。

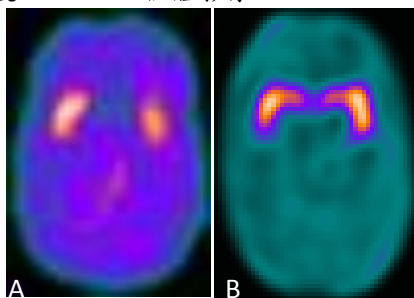
II. 主要內容

本研究計畫將採用許百靈博士為 SPECT 心肌血流定量所研發的定量影像重建技術[11]，經過必要調整後發展專為 TRODAT-1 SPECT 所研發的定量影像重建法。影像分析方面利用目前核醫領域由 Stanford University 所開發免費分享的功能性影像分析軟體 Amide 來進行針對 low energy parallel hole 準直器 (包括: LEHR 和 LEGP)建立正常人數值, Amide 以 Windows 平台為基礎，內建可調整 6D image registration 和針對腦部不同

部位 (caudate, putamen 和 cortical shell)能自行建立可調式 3D region of interests (ROI)模板功能，兩項功能搭配使用，可有效降低病患之間的腦部大小的差異性對定量分析所造成的誤差，達到準確半自動影像定量之目的。

計畫擬定通過院內 IRB 同意後，採集 30 位正常人數據，每組再依年齡分為 5 組：41-50 歲(n=6)，51-60 歲(n=6)，61-70 歲(n=6)，71-80 歲以上(n=6)，80 歲以上(n=6)。納入條件：40 歲以上、正常臨床評估指標(UPDRS=0、HY stage=0、MMSE>28)、MRI 腦部影像無發現異常。排除條件：已表現巴金森氏症、曾發生中風或腦部疾病者、MRI 腦部影像發現異常。每組受試者分別以 LEHR 準直器採集數據，數據採集 protocol 為將受試者施打 25 mCi 後 4 小時進行 TRODAT-1 SPECT 採集，經過影像定量重建後，針對每位受試者先以 SPM 研究軟體先對 SPECT 及 MRI 影像作準確對位，再以受試者各自的 MRI 影像和 SPM 所提供的 MRI 影像模板進行對位及形狀調整獲得調整參數組，再將參數組同時應用於 SPECT 及 MRI 影像以獲得和 SPM MRI 影像模板大小同等的影像。以 Amide 讀取 SPM MRI 影像模板，並以 ROI 工具繪製左右腦的 caudate 和 putamen 區為 ROI 模板，以分析 TRODAT-1 SPECT 影像的 SBR=specific binding ratio 及 CPR=caudate to putamen ratio，以建立和準直器採用以及年齡相關聯的正常人 SBR 和 CPR 值範圍，此值將和先前以 fan-beam 準直器的研究所產生的值做比較[2]，並進一步取得相對於 41-50 歲正常值的年齡差修正函數，以建立獨立於年齡差的正常值範圍。影像採集所是用的參數將使用從先前和美國專家許百靈博士以 Striatum Brain 假體實驗優化後的參數，包括：matrix size=128x128, energy windows=140±10% keV, 118±12% keV, orbits=360-degree circular close to head or automated non-circular, angles=64, time/stop=40 sec and collimators=LEHR/LEGP。圖(二)為優化前和優化後影像品質的差異。影像數據收集程序將同時要求造影儀器品管(camera quality control)數據通過臨床標準的要求，做為原始數據本身準確性的依據，同時將進行影像處理工具的穩定性測試，依實際需要做優化調整，並且發展影像品保(image quality assurance)流程，做為將來 TRODAT-1 影像分析品質保證的標準參考。

圖(二): A) 為 parallel-hole 準直器造影參數優化前之 striatum 假體影像, B) 為 parallel-hole 準直器造影參數優化後之 striatum 假體影像。



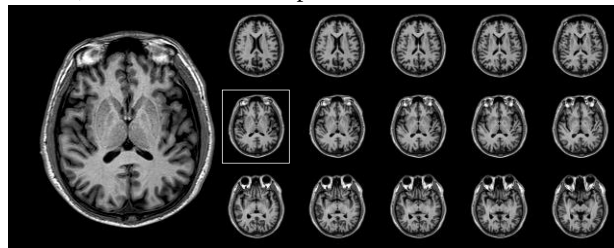
III. 結果與討論

1. 此研究總共採集 43 位受試者，其 13 例雖未曾發生腦部疾病，但因為 MRI 腦部影像可發現腦部異常而排除，

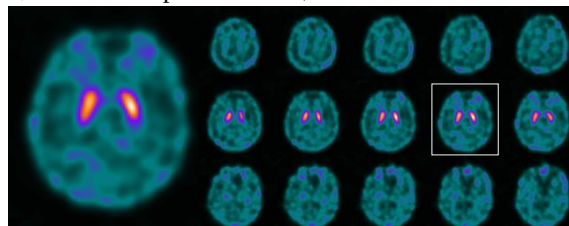
因此正常人入選共 30 位，依年紀分組為 40-49 歲=7 位、50-59 歲=7 位、60-69 歲=8 位、70 歲以上=8 位。

1. 以下為一正常人的 MRI 及 SPECT 影像。

a) 3D-T1 MRI 為高品質影像可提供腦部的結構，並可清楚區分 caudate 及 putamen 的位置所在

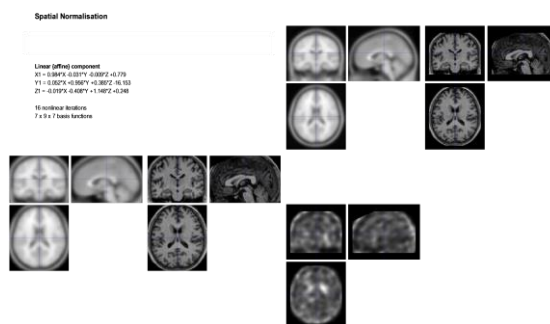


b) 定量重建的高品質 SPECT 影像可清楚看見腦部紋狀體(striatum)部位的攝取，但無法進一步區分 caudate 及 putamen 兩部位

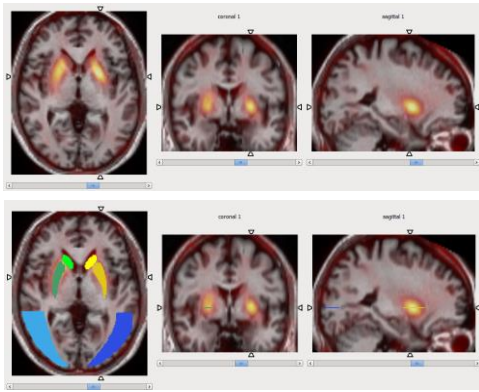


2. 以下為使用 SPM 及 Amide 影像處理工具進行 SBR 及 CPR 計算的一展示實例。

a) 左圖及右上圖為 MRI 影像和 SPM MRI 模組的對位及調整大小的結果，右下圖為將調整參數應用至 SPECT Trodat-1 影像的結果，整體結果顯示 MRI 和 SPECT 影像對位及影像大小一致。



b) 使用 Amide 工具對調整後的 MRI 及 SPECT 進行圖像融合，並利用處於背景的 MRI 影像，定位 SPECT 紋狀體中 caudate 及 putamen 應於的位置 (上圖)。使用固定的 ROI 套上 SPECT-MRI 融合圖像，再根據 MRI 圖像的 caudate 及 putamen 部位進行微調可在 SPECT 影像中獲得正確的 ROI 位置(下圖)。由於 SBR 及 CPR 測量的準確性和 ROI 位置存在直接關聯性，因此對於不同受測者，此方法學可提高 SBR 及 CPR 值測量的一致性與準確性。

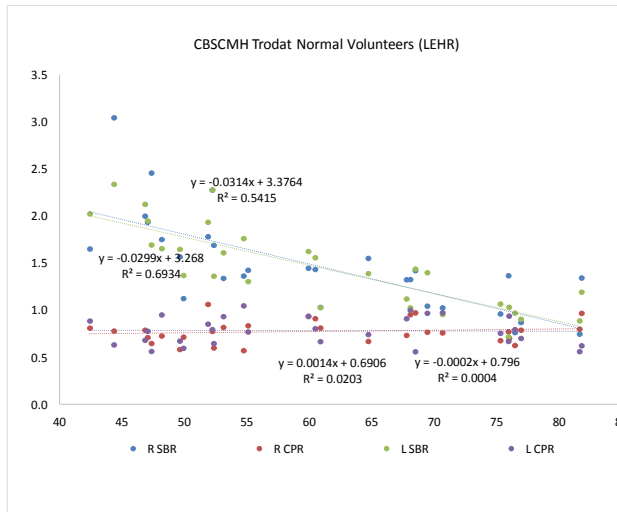


c) 通過計算

$SBR = [(caudate + putamen) - background] / background$ 及 $CPR = [caudate / putamen]$ 公式計算，獲得右腦 $SBR = 1.94$ 、右腦 $CPR = 0.71$ 、左腦 $SBR = 1.95$ 、左腦 $CPR = 0.78$ 。

IV. 結論

1. 下圖為 30 位正常人的左右腦 SBR 及 CPR 值對應年紀的散點圖及經線性吻合的直線圖。可發現左右腦的 SBR 值可隨著年紀增加而下降，關聯係數平方皆大於 0.49，為高度關聯，表示正常人的年紀愈大則左右腦紋狀體中的多巴胺載體能力下降，而左右腦的 CPR 值並不會隨著年紀增加而產生變化，則表示年紀增加時，caudate 及 putamen 的多巴胺載體能力所下降的程度為一致。

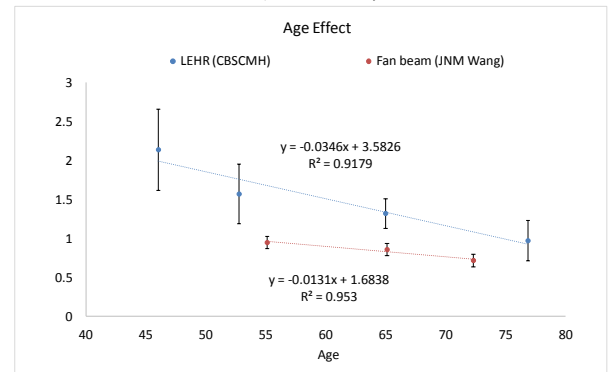


2. 下表為 30 位正常人的左右腦 SBR 及 CPR 平均值及標準差，各年齡層間的差異性存在統計學意義 (All $p < 0.001$)。

	Age	LEHR Right SBR	LEHR Right CPR	LEHR Left SBR	LEHR Left CPR
mean	40-49yr	46.030	2.141	0.745	1.965
	50-59yr	52.759	1.573	0.770	1.662
	60-69yr	64.978	1.324	0.845	1.324
	70-79yr	76.851	0.974	0.763	0.967
SD	40-49yr	2.185	0.523	0.061	0.260
	50-59yr	1.770	0.382	0.165	0.358
	60-69yr	4.010	0.190	0.114	0.235
	70-79yr	3.584	0.260	0.103	0.146

3. 下圖為 30 位正常人，以 LEHR 準直器進行 SPECT 數據採集及定量技術進行影像重建，依 10 年尺度對年齡進行分層的 SBR 值和平均年紀的關係圖，經直線模型吻合發現正常人從 45 歲開始，每增加 10 歲

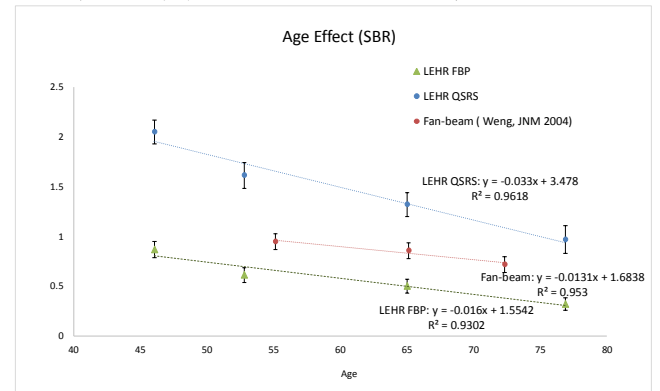
腦部紋狀體的多巴胺載體能力愈低值下降 17.1% ($\Delta SBR = 17.1\%$, $R^2 = 0.918$)，與先前文獻以 fan-beam 準直器 SPECT 數據採集及非定量影像重建相比 ($\Delta SBR = 11.9\%$, $R^2 = 0.953$)，兩種方法皆可測量多巴胺載體能力下降和年齡層的關係且皆為高相關程度，但 (LEHR+定量重建技術) 的方法擁有較大的變化尺度，表示對於多巴胺載體能力下降的評估可更靈敏。另外，由於 LEHR 的計數率較低 (約為 fan-beam 的 1/3)，使得 (LEHR+定量重建技術) 的方法也因為圖像噪聲高的問題而增加測量的不確定性，使得 (標準差/平均值) 高於 (fan-beam+非定量重建) 的方法，未來如何降低 LEHR 準直器使用所圖像噪聲的問題需要再進行進一步研究，但本研究的正常人 SBR 值的範圍仍可提供臨床一個標準值的參考。



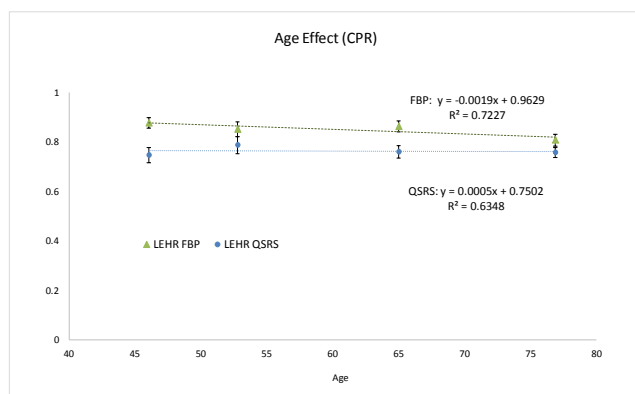
V. 後續研究成果

針對降低圖像噪聲問題，我們發展以更有效率的方式降低圖像噪聲，於圖像重建過程中除了原來應有的物理校正 (組織衰減、散射、空間分辨率、同位素衰減)，我們根據泊松模型 (Poisson model) 模擬 SPECT 圖像中的噪聲的大小與表現特徵，並在疊代過程中以較緩慢的步驟移除圖像噪聲 [12-13]，因此在有效移除噪聲得基礎下亦可同時保持圖像該有的空間解析度。我們因此針對 30 位正常人數數據進行重新圖像重建，並重新分析 SBR 與 CPR 等指標。

1. 下圖為使用高效率噪聲演算法的 SBR 值，結果顯示有效降低同年齡層的標準差值，因此可進一步提高正常人數數據庫未來在臨床使用的可靠性。



2. 下圖為使用高效率噪聲演算法的 CPR 值，結果顯示正常人的 CPR 值與年齡無相關。



参考文献

- [1] Huang WS, Lin SZ, Lin JC, Wey SP, Ting G, Liu RS. Evaluation of early-stage Parkinson's disease with 99mTc-TRODAT-1 imaging. *J Nucl Med*. 2001 Sep;42(9):1303-8.
- [2] Weng YH, Yen TC, Chen MC, Kao PF, Tzen KY, Chen RS, Wey SP, Ting G, Lu CS. Sensitivity and specificity of 99mTc-TRODAT-1 SPECT imaging in differentiating patients with idiopathic Parkinson's disease from healthy subjects. *J Nucl Med*. 2004 Mar;45(3):393-401.
- [3] Shyu WC, Lin SZ, Chiang MF, Pang CY, Chen SY, Hsin YL, Thajeb P, Lee YJ, Li H. Early-onset Parkinson's disease in a Chinese population: 99mTc-TRODAT-1 SPECT, Parkin gene analysis and clinical study. *Parkinsonism Relat Disord*. 2005 May;11(3):173-80.
- [4] Yen TC, Tzen KY, Chen MC, Chou YH, Chen RS, Chen CJ, Wey SP, Ting G, Lu CS. Dopamine transporter concentration is reduced in asymptomatic Machado-Joseph disease gene carriers. *J Nucl Med*. 2002 Feb;43(2):153-9.
- [5] Tzen KY, Lu CS, Yen TC, Wey SP, Ting G. Differential diagnosis of Parkinson's disease and vascular parkinsonism by (99m)Tc-TRODAT-1. *J Nucl Med*. 2001 Mar;42(3):408-13.
- [6] van Dyck CH, Seibyl JP, Malison RT, Laruelle M, Wallace E, Zoghbi SS, Zea-Ponce Y, Baldwin RM, Charney DS, Hoffer PB. Age-related decline in striatal dopamine transporter binding with iodine-123-beta-CITSPECT. *J Nucl Med*. 1995 Jul;36(7):1175-81.
- [7] Pirker W, Asenbaum S, Hauk M, Kandlhofer S, Tauscher J, Willeit M, Neumeister A, Praschak-Rieder N, Angelberger P, Brücke T. Imaging serotonin and dopamine transporters with 123I-beta-CIT SPECT: binding kinetics and effects of normal aging. *J Nucl Med*. 2000 Jan;41(1):36-44.
- [8] Seibyl JP, Marek K, Sheff K, Zoghbi S, Baldwin RM, Charney DS, van Dyck CH, Innis RB. Iodine-123-beta-CIT and iodine-123-FPCIT SPECT measurement of dopamine transporters in healthy subjects and Parkinson's patients. *J Nucl Med*. 1998 Sep;39(9):1500-8.
- [9] Dickson JC, Tossici-Bolt L, Sera T, Erlandsson K, Varrone A, Tatsch K, Hutton BF. The impact of

reconstruction method on the quantification of DaTSCAN images. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2010 Jan;37(1):23-35.

- [10] Tossici-Bolt L, Dickson JC, Sera T, de Nijs R, Bagnara MC, Jonsson C, Scheepers E, Zito F, Seese A, Koulibaly PM, Kapucu OL, Koole M, Raith M, George J, Lonsdale MN, Münzing W, Tatsch K, Varrone A. Calibration of gamma camera systems for a multicentre European ¹²³I-FP-CIT SPECT normal database. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2011 Aug;38(8):1529-40.
- [11] Hsu BL, Chen WJ, Chen FC, Tsai MF, Chen CC, Wu TC, Hung GW. Quantitation of Myocardial Blood Flow with Quantitative Dynamic SPECT/CT. *Ann Nucl Med and Mole Ima*. 2012 25:190-200.
- [12] Soares EJ, Glick SJ, Hoppin JW. Noise characterization of block-iterative reconstruction algorithms: II. Monte Carlo simulations. *IEEE Trans Med Imaging*. 2005;24:112-21.
- [13] Dutta J, Ahn S, Li Q. Quantitative statistical methods for image quality assessment. *Theranostics*. 2013;3:741-56. Review.

Ga-68-PET 專屬核種發生器之智財權與商業運轉模式之研究

Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號：103-2623-E-301-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：孫智麗

e-mail：juliesun@tier.org.tw

計畫參與人員：劉依蓁、林彥宏、魏于翔

助理人員：羅翠玲、李佳玲、湯佑蓉

執行單位：台灣經濟研究院生物科技產業研究中心

摘要

新藥開發具有研發過程時程長、風險高和高投入成本等特性，且在國際上競爭者眾，相對在核醫藥物的開發上，因為開發者較一般藥物少，因此相對競爭程度較低之優勢，而國內已研製成若干核醫藥物，在技術上已受到國際相當的肯定，具有產業化發展之潛力。本計畫蒐集 Ga-68-PET (Gallium-68-Positron Emission Tomography)專屬核種發生器之專利技術、臨床應用、相關市場資訊以及個案研究，藉由系統性分析提出 Ga-68-PET 專屬核種發生器之商業運轉模式及策略建議。

關鍵詞：Ga-68、技術移轉、商業運轉模式、商品化策略、產業分析。

Abstract

The characteristics of drug development process are high-risk, high-cost and the process often takes long-time. In contract of the intense competition in the pharmaceutical industry, radiopharmaceutical technology is both potential and promising internationally, a relatively niche. This project is aimed to collect and analyze IP, clinical and market information related to Ga-68-PET, in order to do feasibility study of Ga-68-PET commercialization.

Keywords: Ga-68, Technology licensing, Business model, Commercialization, Industrial analysis

I. 前言

核醫藥物的應用包括診斷用途以及治療用途，而 Ga-68 發生器，係一種高產率且低污染的放射性同位素產生裝置，而且具有構造簡單、使用容易等特性，為一種能夠有效減少醫療院所或研究單位負擔及成本開銷的新核子醫學設備。近年來美國核醫年會 (SNMMI)與歐洲核醫年會 (EANM)對於核子醫學所使用的放射性核種中，均認為 Ga-68 核種未來將扮演極重要角色與高度發展潛力。

新藥開發具有研發過程時程長、風險高和高投入成本等特性，且在國際上競爭者眾，相對在核醫藥物的開發上，因為開發者相對較一般藥物少，因此相對競爭程度較低，而國內已研製成若干核醫藥物，具有產業化發展之潛力。為了協助國內 Ga-68-PET 專屬核種發生器及其相關核醫藥物之產業化發展。本研究藉由蒐集

Ga-68-PET 專屬核種發生器之專利技術、臨床應用、相關市場資訊以及個案研究，期望透過資料彙整與研究分析，針對我國 Ga-68-PET 專屬核種發生器之研究成果提出商業營運模式及發展策略，作為國內相關研發單位之參考。

II. 主要內容

(一) Ga-68-PET 專屬核種發生器之產業市場分析

根據 market research reports 資料顯示，全球核子醫學與放射性醫藥品整體市場以年複合成長率 5.5%進行成長，預計到 2020 年整體市場規模可達 90 億美元。若以用途來分，核子醫學與放射性醫藥品可分為治療與診斷兩種用途，治療部分可分為 alpha、beta 與近距離放射治療三種；而診斷部分，則以單光子放射斷層掃描 (SPECT) 與正子放射斷層攝影 (Positron Emission Tomography, PET) 為主，約佔 85%的市場。

根據 markets and markets 資料顯示，診斷部分，目前市場上 SPECT 部分以 Tc-99 為主，PET 市場則以 F-18 為主，除此之外，Ra-223、Ga-68、F-18florbetapir 與 F-18 choline 亦為未來發展方向，其主要應用於心臟病、阿茲海默症(Alzheimer's disease)、乳腺癌與骨癌轉移等診斷應用；治療部分，僅占整體市場的 10%，以 I-131 相關治療為主，其他如 Y-90 與 Lu-177 則是逐漸發展中，應用範圍則包含淋巴瘤、前列腺癌與肝細胞癌等。

而根據 biotechsystems 資料顯示，全球 PET 相關放射性藥物於 2012 年的整體銷售額約為 4.5 億美元，預計 2021 年可達 5 億美元，其中 18F-FDG PET 的銷售額則約 2.3 億美元；另外，由於 PET 掃描儀由於全球需求量大增加，其銷售額預估將由 2012 年的 7 億美元成長到 2021 年的 13.7 億美元。

在未來發展趨勢部分，目前 PET 的使用雖較 SPECT 昂貴，但能提供更為精確的醫療效果，進而減少額外的檢查項目及誤診產生的額外費用，也減少病患的心理壓力及提升醫療品質。隨著 PET/CT 及 PET/MRI 聯合系統的開發，也加速 PET 相關技術開發與應用，成為核醫學的趨勢。Ga-68 在 PET 的應用上，可以期待的方向有市場需求的新藥開發、生物標記的發現與使用、Ga-68 生產和可利用率的提高、影像技術的提升等。Ga-68 PET 的檢測雖然較為昂貴，但半衰期短且能快速檢測的特性，能減少病患的住院時間及固定醫療費用，同時也能節省醫療費用，更能更有效率的使用醫院資源。

隨著 PET/CT 及 PET/MRI 聯合系統的開發也刺激 Ga-68 的研究速度。除了在癌症定位及標靶治療的應用，Ga-68 在心肌灌注掃描和肺灌注或通氣掃描及發炎感染成像也是具有發展潛力。Ga-68 也被預測會成為 99 mTc 在 PET 使用上的類似物，但有更高敏感度、解析度即能動態追蹤等特性，且不需仰賴迴旋加速器製造。相較於迴旋加速器需要龐大的空間擺放及設備投資，Ga-68 的核種發生器只需熱水瓶大小的體積及較低廉的價格，大大增加核醫學的彈性，這也使得在偏遠醫院進行 PET/CT 的檢測是可能的，進而促進個人化醫療的發展。

(二) Ga-68-PET 臨床應用分析

本研究根據與 Ga-68-PET 臨床應用相關之關鍵字，包含 Mild cognitive impairment、Histone Deacetylase (HDAC)、Histone Deacetylase Inhibitor (HDACi)、Gallium (Ga)、Alzheimer's disease、Colorectal Cancer & EGFR、Hydrogel 與 Bone 等，自台灣經濟研究院生物科技產業研究中心內部資料庫彙整分析目前臨床應用之案例，並分析如下表。

表 1、Ga-68-PET 專屬核種發生器相關臨床應用分析

臨床應用	案例數量	Phase I	Phase II	Phase III	Regulatory Filing	Marketed	Terminated
Mild cognitive impairment	3	-	1	-	-	-	2
Histone Deacetylase (HDAC)	19	3	6	-	-	2	8
Histone Deacetylase Inhibitor (HDACi)	2	1	1	-	-	-	-
Gallium (Ga)	4	-	-	-	-	-	4
Alzheimer's disease	33	7	10	2	1	1	12
Colorectal Cancer & EGFR	7	2	1	-	-	2	2
Hydrogel	4	-	2	-	-	2	-
Bone	111	10	17	11	1	30	40

單位：個案數量

資料來源：台灣經濟研究院生物科技產業研究中心內部資料庫。

(三) Ga-68-PET 專屬核種發生器之智財權佈局分析

本計畫藉由連穎科技 MTrends 資料庫，蒐集 Ga-68-Generator 相關專利資料，完成包括專利數分析、國家別分析、公司別分析等專利分析。

根據歷年提出申請專利之專利申請年、專利件數以及專利權人數之變化可得知 Ga-68-Generator INER 的歷年專利產出數量由 2009 年起有增加的趨勢，顯示近年來相關技術發展逐漸活絡。以專利權人所屬國家為基礎，了解『Ga-68-Generator INER』技術領域內各國申請專利件數及專利權人數分佈的情形。利用所屬國專利數佔有率分析表可觀察美國是專利技術發展的重要競爭國家。



資料來源：連穎科技 MTrends 資料庫

圖 1、重要國家之專利件數比較圖

觀察各競爭公司專利產出之活動期，進而可得知各公司投入本技術產業之研發時間以及資源等。發明人數為競爭公司之投入研發發明人數之分析，透過競爭公司技術研發人員投入多寡情況，用以評析該公司對技術之企圖心與競爭潛力。平均專利年齡則為將各專利權年齡總和除以專利件數所得之值。以美國專利權年限 20 年為例，若平均專利年齡愈短，表示此專案之技術受專利權保護時間愈長，享有較長期之技術獨占性優勢。

表 2、公司研發能力詳細數據表

公司名稱	專利件數	活動年期	發明人數	平均專利年齡
GE HEALTHCARE LIMITED	1	1	3	0
HAMMERSMITH IMANET LIMITED	1	1	3	0
Institute of Nuclear Energy Research	1	1	3	2
ITM ISOTOPEN TECHNOLOGIEN MUNCHEN AG	1	1	2	1
WELLS FARGO BANK, NATIONAL ASSOCIATION, AS COLLATERAL AGENT	1	1	1	1
NATIONAL SCIENCE FOUNDATION	1	1	4	22
Massachusetts Institute of Technology	2	1	2	33
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE	1	1	3	32
DUPONT PHARMACEUTICALS COMPANY	1	1	1	32

資料來源：連穎科技 MTrends 資料庫

註：取研發能力前 10 強之公司作為分析標的

(四) Ga-68-PET 技術交易個案研究

自資料庫蒐集 1999~2014 年 Positron Emission Tomography (PET) 相關國際授權案例共 37 筆，其中以診斷應用 (Diagnostics) 技術為主要。進一步分析各案例之交易日期，可發現大部分交易案集中發生在近五年 (2010 年~2014 年)，占整體的 68%，顯示全球在 PET 相關技術之交易有越趨頻繁的趨勢。以疾病種類分析，則以中樞神經系統疾病方面之應用為主要，其次為癌症，其他還包括心血管疾病等 (表 3)。根據個案之交易金額分析，其中兩合作開發案例之開發項目包括前列腺癌、胰臟癌之癌症診斷試劑，其交易金額分別為 30 萬美元及 230 萬美元。另外，另一項應用於 PET 診斷試劑之授權案例 (License)，其交易金額為 400 萬美元。

表 3、PET 交易個案之主要適應症領域分析

適應症	個案數	占整體比例
Central Nervous System	13	35%
Cancer	12	32%
Cardiovascular	4	11%

資料來源：台灣經濟研究院生物科技產業研究中心內部資料庫(9/2014 查詢)。

本研究蒐集 Ga-68-PET 專屬核種發生器相關臨床應用之技術移轉個案，結果如下表所示：

表 4、Ga-68-PET 專屬核種發生器相關技術移轉個案分析

臨床應用	案例數量	交易期間	交易金額
Mild cognitive impairment 診斷	1	2009	-
Alzheimer's disease 診斷	12	2008-2012	130 萬美元
Histone Deacetylase (HDAC)	6	2004-2014	60 萬~3.5 億美元
Histone Deacetylase Inhibitor (HDACi)	5	2004-2014	1.6 億~3.5 億美元
Gallium (Ga)	9	2000-2014	20 萬~2,420 萬美元
Alzheimer's disease	471 (2000 年以後)	2000-2014	10 萬~20 億美元
Colorectal Cancer & EGFR	5	2005-2013	6.26 億美元
Hydrogel	20	1994-2013	10 萬~2,100 萬美元
Bone	379	1974-2014	10 萬~137 億美元

資料來源：台灣經濟研究院生物科技產業研究中心內部資料庫(9/2014 查詢)。

本研究自台經院內部資料庫蒐集 Ga-68 技術相關之廠商交易個案，藉由個案分析發現全球對於 Ga-68 放射性藥物的開發以及臨床應用之研究投入有逐漸增加的趨勢，尤其近年來已有許多 Ga-68-radiotracers 進入臨床試驗階段，其中德國廠商 ITG Isotope Technologies Garching GmbH 於 2013 年 12 月授予美國廠商 Radiomedix 有關 68Ge/68Ga 產生器以及 iQS Ga-68 流體標誌模組於臨床及研究應用在美國的獨家銷售權利，此合作將使得此技術更接近實際應用階段。

III. 結果與討論

藉由本研究之技術授權個案研究，有關 Ga-68 技術移轉個案之合作模式包括合作開發、技術授權、授予特定區域之銷售權等，考量我國之核醫藥物發展階段以及進行臨床試驗的費用高昂，非一般研究單位可承擔，因此建議國內 Ga-68 相關技術可授權跨國核醫藥物大廠，進行後續臨床試驗、藥物上市申請等產業化發展，並於產品成功上市根據產品銷售額收取權利金，而有關技術轉移之收入則可支持後續研究開發，持續研究創新發展。目前國際上已有研發及銷售 Ga-68 核種發生器及相關核醫藥物之廠商，包括 IGG100 (U.S.)、Eckert & Ziegler (U.S.)、ITG Isotope Technologies(Germany)、Obninsk (Russia)、Cyclotron Co (Russia)、iThemba Labs (Africa) 等六家廠商，為我國研究單位的潛在合作對象。

由於 Ga-68 核種可用於正子造影，提供高解析度影像，具備發展為核醫藥物之潛力。本研究已蒐集放射線成像相關廠商包括 Siemens AG (Germany)、PerkinElmer, Inc. (U.S.)、Bruker Corporation (U.S.)、Bioscan, Inc. (U.S.)、Mediso Medical Imaging Systems (Hungary)、GammaMedica (U.S.)、FUJIFILM Holdings Corporation

(Japan)、Aspect Imaging (Israel)、Miltenyi Biotec GmbH (Germany)、Life Technologies Corporation (U.S.)、Scanco Medical (Switzerland)、Targeson, Inc. (U.S.)等，以上國際跨國大廠可為國內 Ga-68 診斷用核醫藥物之潛在合作對象，建議可主動與國際高階醫學影像設備商進行洽談合作，甚至進一步簽訂合作備忘錄及商討合作模式，以利 Ga-68 診斷用核醫藥物之產業化發展。

IV. 結論

近年來美國核醫年會 (SNMMI)與歐洲核醫年會 (EANM)對於核子醫學所使用的放射性核種中，均認為 Ga-68 核種未來將扮演極重要角色與高度發展潛力。國內已研製成若干核醫藥物，在技術上已受到國際相當的肯定，具有產業化發展之潛力。本計畫蒐集 Ga-68-PET 專屬核種發生器之專利技術、臨床應用、相關市場資訊以及個案研究，提出 Ga-68-PET 專屬核種發生器之商業運轉模式及策略建議如下：

(一)積極與跨國核醫藥物大廠合作

建議國內相關技術可授權跨國核醫藥物大廠，進行後續臨床試驗、藥物上市申請等產業化發展，並於產品成功上市根據產品銷售額收取權利金，而有關技術轉移之收入則可支持後續研究開發，持續研究創新發展。本研究已彙整國際上已有研發及銷售 Ga-68 核種發生器及相關核醫藥物之廠商，為我國研究單位的潛在合作對象。

(二)鎖定高階醫學影像設備商建立合作模式

建議可主動與國際高階醫學影像設備商進行洽談合作，甚至進一步簽訂合作備忘錄及商討合作模式，以利 Ga-68 診斷用核醫藥物之產業化發展。本研究已彙整放射線成像相關廠商，可為國內開發 Ga-68 診斷用核醫藥物單位之潛在合作對象，

(三)建立國際營運模式以開發全球市場

未來 Ga-68 相關技術之產業化策略，藉由與前述國際大廠的研發合作，可考慮成立供應鏈聯盟，進而成立國際合資企業等國際營運模式來開發全球市場，以加速推動 Ga-68 研發成果的商品化與產業化發展。

參考文獻

- [1] 2014 醫療器材產業年鑑，工研院產業經濟與趨勢研究中心(IEK)。
- [2] 連穎科技 MTrends。
- [3] 台灣經濟研究院生物科技產業研究中心內部資料庫。
- [4] Velikyan I. *Prospective of 68Ga-Radiopharmaceutical Development*. *Theranostics*. 2014;4(1):47-80. doi:10.7150/thno.7447.

建立初發性精神分裂症患者在多巴胺轉運體定量造影分析模式

To establish quantitative analysis of dopamine transporter imaging in first episode schizophrenia

計畫編號：103-2624-E-075-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王世楨

e-mail：jwshyh@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：王世楨、周元華、吳東信、楊邦宏

執行單位：台北榮民總醫院核子醫學部

摘要

^{99m}Tc -TRODAT-1 單光子造影劑，為主要偵測腦部突觸前多巴胺轉運器使用。多巴胺轉運器位於腦部紋狀體上，為調控多巴胺濃度之蛋白。多巴胺轉運器的減少與增加，與多巴胺神經元功能調控有關。精神分裂症是一項嚴重的精神疾病，直到今日，我們對於其病因仍不清楚。最近的研究顯示多巴胺轉運器在精神分裂症患者腦中的變化並不明顯，讓我們重新去檢討是否有方法學上的不足，如造影取像流程、影像重建錯誤、或是錯用統計量化分析方法所造成。因此本計畫目的在能以嚴謹的科學方法，建立初發性精神分裂症患者在多巴胺轉運器定量造影分析模式。透過本計畫的完成，將建立起腦神經接受器影像定量技術，改善 ^{99m}Tc -TRODAT-1 Analyzer 軟體平台。將分別取 3、4、5 小時三個時間點的影像，測量出正常人與精神分裂症患者之標準攝取比值，並進行統計分析比較，找出最佳造影時間點。

研究結果發現，10 位正常受試者在注射 ^{99m}Tc -TRODAT-1 後 4 小時和 5 小時進行掃描分析後，其 SUR 值的相關性大於 3 小時與 4 小時的相關性，因此，驗證注射 ^{99m}Tc -TRODAT-1 後 4 小時造影為最佳造影時間。另外，10 位精神分裂症患者在注射 ^{99m}Tc -TRODAT-1 後 4 小時進行造影與分析，精神病患者的 SUR 值皆較正常受試者低，代表多巴胺轉運體的濃度在精神分裂正與正常受試者會有明顯的不同，因此， ^{99m}Tc -TRODAT-1 多巴胺轉運體可對精神分裂症患者進行評估。

關鍵詞： ^{99m}Tc -TRODAT-1、多巴胺轉運器、精神分裂症、單光子掃描。

Abstract

^{99m}Tc -TRODAT-1 is a radiotracer for single photon emission tomography (SPECT) to monitor pre-synaptic dopamine transporter (DATs) in brain. The DAT is a neuronal element that regulates dopaminergic neurotransmission by terminating the action of dopamine (DA) via reuptake. Schizophrenia is a critical psychiatric disease. Until now, the etiology and pathogenesis of this disease is still unclear. In recent studies, the changes of the striatal presynaptic dopamine transporter in schizophrenia are so unapparent that we have to modify our methodology. We will go to review causes such as optimal acquisition protocols、reconstruction parameters and statistical analysis methods. The aim of this study is to investigate the densities of DAT in the striatal dopaminergic system in

patients with schizophrenia and establish an automated Tc- ^{99m} TRODAT-1 quantification system. Then, we will acquire three time points to compare correlation between normal controls and patients by platform of automated quantification system.

In normal data, the result shows that the correlation between SUR calculated through images acquired 4 hours after injection and 5 hours after injection is higher than SUR calculated through images acquired 3 hours after injection and 4 hours after injection, which means optimal acquisition time is 4 hours after injection. On the other hand, 10 patients with schizophrenia are recruited in this study. SUR are calculated through images acquired 4 hours after injection and compared with normal SUR calculated through images acquired 4 hours after injection. The result shows SUR of patients with schizophrenia are obviously lower than SUR of normal, which means ^{99m}Tc -TRODAT-1 can be used to evaluate patients with schizophrenia.

Keywords: ^{99m}Tc -TRODAT-1、dopamine transporter、schizophrenia、single photon emission tomography

I. 前言

胺轉運器位於腦部紋狀體上，為調控多巴胺濃度之蛋白，多巴胺轉運器的減少與增加，與多巴胺神經元功能調控有關，巴金森氏症(Parkinson's Disease, PD)屬神經退化所造成多巴胺神經元功能喪失之疾病，故可以診斷巴金森氏症相關疾病，目前也已經被核子醫學科當成很重要的診斷工具，無論在影像的分析判讀，或是臨床表現分數都有很多相關的研究發展，尤其國內對於 ^{99m}Tc -TRODAT-1 應用在運動神經元相關疾病有很深入的探討，如 Spinocerebellar ataxia [1]、Parkinson's disease[2-3]、Multiple System Atrophy[4]等，但應用在精神疾病相關性研究甚少。

精神分裂症(schizophrenia)是一項嚴重的精神疾病，直到今日，我們對於其病因仍不清楚。近年來研究多巴胺系統與精神分裂症的文章越來越多，僅知多巴胺系統過度活化的理論仍然扮演著相當重要的角色，但是在過去的研究中，大部分的結果均顯示多巴胺轉運器在初發的精神分裂症患者並無顯著之改變，不過對於這項結果並不清楚真正的原因何在。

II. 主要內容

西元 1963 年 Dr.Carlsson 利用動物實驗結果，提出精神分裂症與多巴胺失調假說後[5]，相關的研究陸續開

始，尤其以 2000 年 Dr.Abi-Dargham 的研究團隊，利用突觸後 D₂ receptor 佔有率實驗，去證明精神分裂急性發作期患者其內生性多巴胺濃度(endogenous)，有顯著高於正常人的現象[6]，證明多巴胺調控系統有過度活化的狀態表現。在 2001 年 Dr. Laruelle 利用突觸後造影劑 [¹²³I]beta-CIT 研究年輕的 drug-naive schizophrenia 患者之多巴胺系統，提出患者其多巴胺轉運器的濃度變化與正常人差異不大[7]。在國內相關研究以 2003 年 Dr. Hsiao 研究團隊是第一位用突觸前 ^{99m}Tc-TRODAT-1 影像層面去研究 drug-naive schizophrenia，注射 ^{99m}Tc-TRODAT-1 四小時後取像，利用半定量方式分析結果，發現精神分裂症患者腦中多巴胺轉運器濃度與正常人無顯著之差異，僅有些微左右不對稱之現象。在 2004 年 Dr. Yang 使用同時相雙射源技術，在 drug-naive schizophrenia 患者同時注射突觸後 I-123 IBZM 和突觸前 ^{99m}Tc-TRODAT-1 兩種核醫造影藥劑，發現其多巴胺轉運器與其對照組也無顯著的差異表現[8]。而透過這些文獻的探討，我們發現雖然精神分裂症致病機轉尚未被研究出來，但從精神分裂症死後解剖的資料顯示[9-10]，多巴胺系統在精神分裂症中複雜及異常的角色，值得我們繼續深入研究，尤其最近的研究顯示多巴胺轉運器在精神分裂症患者腦中的變化並不明顯[11-12]，讓我們重新去檢討是否有方法學上的不足。如造影取像流程或是統計量化分析影像錯誤所造成，因此本計畫目的為將以最嚴謹的技術與方法，建立初發性精神分裂症患者在多巴胺轉運體準確的定量造影分析模式。

國外很重視核醫藥物的研製與診斷效益的評估，^{99m}Tc-TRODAT-1 藥物研製上市成功大多重點在巴金森氏症的診斷研究，對於精神病患用藥後其腦中神經傳導物質到底改變了什麼？一直是臨床感興趣的地方，我們不能僅以國外的文獻報導及其治療精神疾病劑量為國人診治，必須要為國人建立更多不具侵入性的腦部影像診斷利器，所以本計畫目的是建立嚴謹的造影技術並研究初發精神分裂症患者在 ^{99m}Tc-TRODAT-1 造影劑吸收分布狀態與正常人之間的差異，並且建立基底核影像定量分析平台，從而建立定量分析精神分裂症患者在 ^{99m}Tc-TRODAT-1 單光子造影標準模式，以提供其他臨床醫師的參考依據與指標，透過此計畫的完成，將有助於推廣 ^{99m}Tc-TRODAT-1 的使用率及提升精神疾病診療率等重要性的里程碑。

本計畫主要建立精神分裂症在 ^{99m}Tc-TRODAT-1 單光子掃描儀標準造影程序，及影像量化分析平台之建置，所以將會進行假體影像品質驗證校正實驗，待驗證過後，再決定每位受試者取像標準流程及影像重建參數值。

核子醫學為一功能性生理影像之實證醫學，我們希望可以了解注射 ^{99m}Tc-TRODAT 最佳取像時間，是否和巴金森氏症患者有相同的生理分布時間？因為在精神分裂症患者多巴胺的吸收可能會增加或不變，我們不能妄自下定論，精神分裂症患者的最佳造影時間為注射 ^{99m}Tc-TRODAT 後三小時或是四小時取像[13-14]。故本計畫將會增加收集三個影像收集時間點，即注射 ^{99m}Tc-TRODAT 後 3、4、5 小時各取一個點，之後我們將使用量化分析系統，統計分析歸納出最佳取像條件與影像重組參數，提供臨床參考。

III. 結果與討論

本計畫總計納入 12 位正常受試者，但有 2 位無法配合三次造影因而排除。10 位受試者皆在注射 Tc-99m TRODAT 後 3 小時、4 小時、5 小時進行造影，使用本部所開發的紋狀體自動化分析軟體進行 caudate、putamen、striatum 的 SUR 值分析，將 3 小時和 4 小時的左右邊 striatum (Striatum_R、Striatum_L) 的 SUR 值進行 paired t test 分析(3hr & 4hr、4hr & 5hr)，結果發現打藥後 4 小時及 5 小時的相關性大於 3 小時與 4 小時的相關性，代表打藥後 4 小時或 5 小時造影較 3 小時為佳，此外，結果顯示大部分的受試者其 4 小時和 5 小時的 SUR 值較為接近，因此，本計畫驗證目前臨床造影標準，打藥後 4 小時造影為最佳造影參數。

由於初發精神分裂症患者並不多，再者，要求精神分裂症患者平躺在床上固定頭部維持 45 分鐘有其困難度，更何況要進行三次的造影，因此，本計畫依據正常受試者的分析結果，打藥後 4 小時的最佳照相時間來進行精神分裂症患者的影像收集，總共收集 10 為精神分裂症患者的 4 小時影像，將 striatum 的 SUR 值和正常受試者的 SUR 值進行統計分析，結果發現，並無顯著相關，精神病患的 SUR 值皆較正常受試者低，代表多巴胺轉運體的濃度在精神分裂正與正常受試者會有明顯的不同，因此，TRODAT 多巴胺轉運體可用來對精神分裂症患者進行評估。

IV. 結論

本計畫驗證注射 ^{99m}Tc-TRODAT-1 後 4 小時造影為最佳造影時間，此外，發現精神分裂症患者的多巴胺濃度顯著低於正常受試者，代表著 ^{99m}Tc-TRODAT-1 多巴胺轉運體可對精神分裂症患者進行評估。透過本計畫的完成，將推動 ^{99m}Tc-TRODAT-1 單光子掃描應用在精神分裂症的診斷效益。

參考文獻

- [1] Chin-Song Lu, Hsiu-Chen Chang, Pei-Chi Kuo, et. al, The parkinsonian phenotype of spinocerebellar ataxia type 3 in a Taiwanese family, *Parkinsonism and Related Disorders* 10 (2004) 369 – 373
- [2] Wen-Sheng Huang, Meei-Shyuan Lee, Jiann-Chyun Lin, Cheng-Yu Chen, et. al., Usefulness of brain ^{99m}Tc-TRODAT-1 SPET for the evaluation of Parkinson's disease, *Eur J Nucl Med Mol Imaging* (2004) 31:155 – 161
- [3] Kai-Yuan Tzen, Chin-Song Lu, Tzu-Chen Yen, Shiao-Pyng Wey, and Gann Ting, Differential Diagnosis of Parkinson's Disease and Vascular Parkinsonism by ^{99m}Tc-TRODAT-1, *J Nucl Med* (2001) 42:408 – 413
- [4] Chin-Song Lu, Yi-Hsin Weng, Min-Chi Chen, et. al, ^{99m}Tc-TRODAT-1 Imaging of Multiple System Atrophy, *J Nucl Med* (2004) 45:49 – 55
- [5] Carlsson A, Lindqvist M Effect of chlorpromazine or haloperidol on formation of 3-methoxytyramine and normetanephrine in mouse brain. *Acta Pharmacol Toxicol* (1963) 20: 140 – 144
- [6] Abi-Dargham A, Rodenhiser J, Printz D, Zea-Ponce Y,

- Gil R, Kegeles L S Weiss R, Cooper T B, Mann J J, Van Heertum R L, Gorman J M, Laruelle M Increased baseline occupancy of D2 receptors by dopamine in schizophrenia. *Proc Natl Acad Sci USA* (2000) 97(14): 8104 – 8109
- [7] Lavalaye, J., Linszen, D.H., Booij, J., Dingemans, P.M., Reneman, L., Habraken, J.B., Gersons, B.P., van Royen, E.A., Dopamine transporter density in young patients with schizophrenia assessed with [I-123]FP-CIT SPECT. *Schizophr. Res.* (2001) 44, 59 – 67.
- [8] Yen Kuang Yang, Lung Yu, Tzung Lieh Yeh, Associated Alterations of Striatal Dopamine D2/D3 Receptor and Transporter Binding in Drug-Naive Patients With Schizophrenia: A Dual-Isotope SPECT Study, *Am J Psychiatry* (2004); 161:1496 – 1498
- [9] Bannon M J, Sacchetti P, Granneman J G, The dopamine transporter: potential involvement in neuropsychiatric disorders. In Bloom K (ed.), *Psychopharmacology*. (2000) The Fourth Generation of Progress, online edition. Raven Press
- [10] Dean B, Hussain T, Studies on dopaminergic and GAB Aergic markers in striatum reveals a decrease in the dopamine transporter in schizophrenia. *Schizophrenia Research* (2001)52: 107 – 114
- [11] G. J. E Schmitt, E. M. Meisenzahl, T. Frodl, C. La Fougère, K. Hahn, et. al, The striatal dopamine transporter in first-episode, drug-naïve schizophrenic patients: evaluation by the new SPECT-ligand [^{99m}Tc]TRODAT-1. *J Psychopharmacol* (2005) 19: 488
- [12] 12. Chen, K.C., Yang, Y.K., Howes, O., Lee, I.H., Landau, S., Yeh, T.L., Chiu, N.T., Chen, P.S., Lu, R.B., David, A.S., Bramon, E., Striatal dopamine transporter availability in drug-naive patients with schizophrenia: a case-control SPECT study with [^{99m}Tc]-TRODAT-1 and a meta-analysis. *Schizophr Bull* (2013) 39, 378-386
- [13] Chou YH, Huang WS, Su TP, Lu RB, Wan FJ, Fu YK. Dopamine transporters and cognitive function in methamphetamine abuser after a short abstinence: A SPECT study. *European Neuropsychopharmacology* (2007);17(1):46-52.
- [14] Kao PF, Tzen KY, Yen TC, et al. The optimal imaging time for [^{99m}Tc]TRODAT-1/SPET in normal subjects and patients with Parkinson's disease. *Nuclear Medicine Communications*.(2001);22(2):151-154

多巴胺轉運體與血中神經元滋養因子在初發精神分裂症患者藥物治療前後之變化

計畫編號：103-2623-E-075-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：周元華

e-mail：kkk@ntust.edu.tw

計畫參與人員：王世禎

執行單位：台北榮民總醫院精神醫學部

摘要

多巴胺異常的假說在精神分裂症的病因學中仍然扮演重要的角色，然而最近的研究顯示多巴胺轉運器(dopamine transporter)在精神分裂症患者腦中的變化並不明顯，而腦滋養因子(BDNF)是目前被發現眾多滋養因子中對於腦功能影響最大的因子，早期的研究顯示此因子主要之用途為增加神經元聯會之生長，然而最近的研究顯示其可能之功能亦包括了加速神經元之再生，因此與認知功能、學習等人類行為有著密不可分的關係。過去的研究中顯示，腦滋養因子在精神分裂症患者的血中濃度之變化並不一致，且動物的研究顯示腦滋養因子與多巴胺神經元有明顯的交互作用，因此本研究的目的在於探討腦滋養因子對於多巴胺系統的指標，多巴胺轉運器之影響，並探討二者在精神分裂症的病因學中所扮演之角色。本研究中將利用單光子之技術造影多巴胺轉運器在精神分裂症及正常人的差異。本研究收集了正常人及精神分裂症患者各 28 位，皆接受 99mTc-TRODAT 單光子造影檢查，並採單純的比例法計算多巴胺轉運器的含量，檢查同時留下靜脈血作為測定血中腦滋養因子及可體素之含量。本研究發現精神分裂組患者尾核的多巴胺轉運器量顯著小於正常人組，但血液中腦滋養因子及可體素在兩組並無顯著之差異，進而利用線性混合效果模型分析發現組別在可體素與尾核多巴胺轉運器量有交互作用的現象存在，但在殼核並未出現。各組的線性迴歸分析發現正常人可體素可以顯著的預測尾核多巴胺轉運器量，但精神分裂症患者則無。在過去的研究中發現正常人及憂鬱症患者的可體素與多巴胺轉運器量皆有顯著的關聯，與本研究之結果相異，可能原因為在精神分裂症的病理生理學上可體素及腦滋養因子扮演著不同的角色。

關鍵詞：精神分裂症、多巴胺轉運器、單光子造影、腦滋養因子

Abstract

Dopamine hypothesis plays an important role in the etiology of schizophrenia. However, the role of DAT in the etiology of schizophrenia remains unclear. Brain derived neurotrophic factors (BDNF) is probably the most influential factor to affect cerebral function. Furthermore, BDNF could increase the synaptosis and neurogenesis in the brain. The purpose of this study was to explore the relationship of BDNF and DAT and their role in the

etiology of schizophrenia. Twenty-eight schizophrenia and 28 age- and gender-matched healthy controls (HCs) were recruited. 99mTc-TRODAT with single-photon emission computed tomography (SPECT) was applied for measurement of DAT availability in the brain, which included the putamen and caudate. Ten milliliters of venous blood was withdrawn when the subject underwent SPECT for measuring of the plasma concentration of cortisol and BDNF. DAT availability was significantly decreased in the caudate of schizophrenia compared with HCs, whereas plasma concentration of cortisol and BDNF did not show a significant difference. The linear mixed-effect model revealed that there was a significant interaction of group and cortisol on DAT availability of the caudate, but not BDNF. Linear regression analyses by groups revealed that cortisol significantly predicted DAT availability in the caudate in the HCs, but not in schizophrenia. Considering previous studies, which showed a significant association of cortisol with DAT availability in the HCs and major depressive disorder (MDD), the result replicated a similar finding in HCs. However, the negative finding of the association of cortisol and DAT availability in schizophrenia, which was different from MDD, suggests a different role for cortisol and BDNF in the pathophysiology of schizophrenia.

Keywords: schizophrenia, dopamine transporter, DAT, SPECT, BDNF.

I. 前言

多巴胺失調(dopamine dys-regulation)的理論在精神分裂症(schizophrenia)的研究及病因學中一直扮演著重要的角色(Carlsson, 1988)，過去的研究已經探討了許多關於多巴胺系統指標在精神分裂症病因學中之重要性，包括了多巴胺第一型受體(D1 receptor) (Abi-Dargham et al., 2002; Karlsson et al., 2002; Okubo et al., 1997)、第二型受體(D2 receptor) (Wong et al., 1986)、多巴胺轉運器(dopamine transporter, DAT) (Laakso et al., 2001; Laakso et al., 2000)及精神分裂症急性發作期內生性多巴胺的釋放增加(endogenous dopamine release)等研究(Laruelle et al., 1999)。雖然這些研究的結果並不全然一致，然而卻顯示出多巴胺系統在精神分裂症中複雜及異常的角色。值得注意的是，多巴胺轉運器是主要調節多巴胺濃度的一個蛋白質，然而最近的研究顯示多巴胺轉運器在精神分裂症患者腦中的變化並不明顯(Chen et al., 2013)，因此多巴胺系統在精神分裂症患者病因中所扮演之角色仍有待進一步的釐清。

神經元滋養因子(brain derived neurotrophic factor, BDNF)是目前被發現眾多滋養因子中對於腦功能影響最大的因子(Groves, 1079)，早期的研究顯示此因子主要之用途為增加神經元之再生，然而最近的研究顯示其除了可能加速神經元再生外，亦可加速神經聯會之生長(Gao et al., 2009)，因此與認知功能學習及腦部之可塑性(brain plasticity)等行為有著密不可分的關係(Giralt et al., 1234; Martinowich et al., 1089)。

神經元滋養因子的血中濃度在精神分裂症患者的研究結果並不一致(Favalli et al., 2012)，這可能由於不同疾病之型態或是疾病處在不同的分期。而在動物的研究顯示神經元滋養因子可以減少 tyrosine hydroxylase 之喪失，因而可以有保護多巴胺神經元的作用(Hyman et al., 1991; Spenger et al., 1995; Spina et al., 1992)；反之，若是將腦中的多巴胺神經元破壞，將可能引起神經元滋養因子之表現減少(Seroogy et al., 1994)。這些的研究結果都顯示神經元滋養因子與多巴胺系統之間有明顯的互動及關聯，探討其二者間在精神分裂症患者中的相互作用將有助於我們了解精神分裂症的病因。因此本研究的目的在於探討腦滋養因子對於多巴胺系統的指標，多巴胺轉運器之影響，以探討二者在精神分裂症的病因學中所扮演之角色。

II. 主要內容

本研究經台北榮民總醫院人體試驗委員會通過。精神分裂症患者之收集由精神科轉介。單光子造影多巴胺轉運器則由核子醫學部執行。

一、個案選擇

每位受試者在加入本研究前須接受精神專科醫師以 Mini Neuropsychiatric Interview (MINI) 會談。受試者納入標準如下（受試者的來源將以門診為主，正常人將以報紙刊登廣告及網路招募）：

精神分裂症組：預計納入 28 位，每位受試者須符合下列條件

- 符合美國精神醫學會診斷及統計手冊第四版 (DSM-IV-TR) 中所列精神分裂症之診斷標準，並為第一次發病。
- 無重大內外科病史及藥物濫用史
- 無頭部外傷史
- 年齡為 18-65 歲，男女不拘。

正常受試者組：預計納入 28 位，其條件如下

- 每位受試者自述無任何過去精神科病史。
- 個案過去無使用非法藥物、酒精及抽煙，而造成成癮之行為。
- 過去無重大內外科病史及腦傷之行為。
- 年齡為 18-65 歲，男女不拘。

二、臨床評估

每位受試者須接受臨床問診、認知功能測驗及填答問卷量表，其說明如下：

- 臨床評估主要包括了精神分裂症正性及負性症

狀量表(Positive and Negative Symptoms of Schizophrenia, PANSS)、蒙哥馬利憂鬱症量表。

2. 認知功能測驗包括了：記憶力(verbal memory, face memory)、注意力(attention) 及執行功能(MAZE, Color Trail Test (CTT)) 等三大項。本研究小組過去已有使用認知功能的測驗之經驗並已有成果發表於國際期刊(Chou et al., 2012a; Chou et al., 2012b)。

三、研究進行

正常人組將進行一次單光子造影，主要之目的在於造影多巴胺轉運器。一次腦部磁振造影，主要之目的除了排除腦部的病變。精神分裂症組在進行一次單光子及腦部磁振造影後將接受藥物治療。

四、多巴胺轉運器造影

多巴胺由於控制了人類的認知及運動功能，因此影像學的技術不斷想要造影多巴胺轉運器。TRODAT 是一個由台灣原能會核研所所研發出的核醫藥物，在標定 Tc-99m 後具有臨床使用方便的特性，台灣許多的醫院均可以自行的標記此造影劑(Kung et al., 2007)。相較於過去使用的 123I-β-CIT(Kung et al., 2003)，這個造影劑明顯的具有較好的選擇性，對於臨床研究造影多巴胺轉運器具有良好的使用價值。本研究團隊目前除了已有多篇論文使用此造影劑，且發表在 SCI 國際期刊外(請參見過去五年的研究成果說明)，同時也完成了此造影劑的再測信度，並發表於 SCI 論文(Yeh et al., 2012)。而本研究團隊也是目前在台灣唯一的一個研究團隊利用 PMOD 軟體進行對位之影像分析(下圖)。由於以往利用人工手繪的分析方式，無法明確的標定座核之位置，因此利用 PMOD 可以更明確的看到紋狀體及座核之位置。

分析 99mTc-TRODAT 的方式及步驟如下：

1. 放射線藥物之準備

TRODAT 藥劑將由行政院原能會核能研究所提供，此藥劑亦已經通過衛生署許可在病患進行多巴胺轉運器影像檢查之用。所使用之 Tc-99m 核種乃高純度、高活性新鮮核種，造影前才進行標化，以減少不必要之污染及放射性衰減，未標化之 TRODA 乃經高效率液相層析法評定其純度後，予以乾燥冷凍。

2. 單光子造影過程

在 25 mCi Tc-99mTRODAT 靜脈注射後四小時，多巴胺轉運器以雙頭全功能造影儀配以 fan beam 準直儀針對腦部進行單光子造影，每 3 度造一張，每張 30 秒，收錄資料經 METZ 濾波器處理及衰減校正後，重組成 3D 影像及橫切，矢狀切及冠狀切面斷層影像，以立影像之分析。

3. 影像分析

每位受試者在接受腦部核磁共振檢查後，除了確定腦部無明顯的外傷外，另一項目的是用於腦部解剖構造之定位。影像融合軟體除了採用 SPM 之套裝軟體外，本小組同時採用 PMOD 影像對位軟體，以進行解剖構造包括紋狀體、視丘、小腦及座核之定位。

4. 半定量之計算

造影結果除採目視外，並利用比例平衡法 "Equilibrium-ratio analysis" 計算多巴胺轉運器之可用率 (Binding Potential, BP) 公式如下：

$$BP = B_{max}/KD = C_{ROI}/C_{REF}$$

B_{max} 代表多巴胺轉運器之濃度，KD 代表 Tc-99m TRODAT 對於多巴胺轉運器之親和力，C_{ROI} 代表所要的目標區 (Region of interest) 的放射劑量，在本研究中為兩側基底核。C_{REF} 為選定之參考區 (reference region) 之放射劑量，又稱背景值。在本研究中為大腦枕葉或天幕上方除去基底核及視丘外之大腦區域，或為小腦。此區假設為沒有多巴胺轉運器結合之區域。經由此比例法可得多巴胺轉運器之特異性結合比值，此數值即代表 BP (多巴胺轉運器之濃度及親和力) (Chou et al., 2007; Farde et al., 1989)。

五、統計分析

連續變項將採用 student t-test，類別變項將採用 chi-square，除了採用相關分析外，亦將採用多變項回歸預測模式，同時利用線性混合效果模型分析，以探討治療之結果。是否可為此二項指標所預測，數值將採用 Mean±S.D. 呈現。

III. 結果與討論

Twenty-eight schizophrenia patients and 28 age- and sex-matched HCs completed the study. No participant complained of side effects after injection of Tc-99m TRODAT. The ratio of female-to-male subjects in both groups was 9/19. The mean age was 36.6±7.9 years in the HCs and 36.6±8.1 years in the schizophrenia group. The mean scores on the PANSS were 4.2±3.8, which were within the range of the inclusion criteria (Table 1). The comparison of mean DAT availability between HCs and schizophrenia was: putamen (0.93±0.36 vs. 0.78±0.28) and caudate (0.81±0.40 vs. 0.61±0.27). DAT availability was significantly lower in the caudate (t=2.221, p=0.031) of schizophrenia patients compared to the HCs (Table 2 & Figure 1). Plasma levels of cortisol and BDNF were 7.97±2.51 µU/mL and 445.39±408.03 pg/mL in HCs and 8.86±2.98 µU/mL and 586.03±758.20 pg/mL in the schizophrenia group, respectively. The differences in cortisol (t=-1.21, p=0.232) and BDNF (t=-0.86, p=0.391) were not significant (Table 2 and Figure 1). In the linear mixed-effect model, there was a significant effect of group x cortisol on DAT availability of the caudate (df=-1.21, F=5.133, p=0.028) (Table 3). Linear regression analyses separated by groups showed that DAT availability could be predicted by cortisol but not by BDNF or their interaction in HCs (whole model: r²=0.19, p=0.02; cortisol: β=0.64, p=0.013; BDNF: β=0.22, p=0.418; cortisol*BDNF: β=0.39, p=0.158). This finding was not observed in schizophrenia patients (whole model: r²=0.02, p=0.761; cortisol: β=-0.13, p=0.496; BDNF: β=-0.02, p=0.915; cortisol*BDNF: β=-0.31, p=0.119) (Table 4). Cortisol and DAT availability was significantly correlated in HCs (r=0.44, p=0.020), whereas BDNF was not correlated with DAT availability (r=-0.15, p=0.460). Neither cortisol (r=-0.19, p=0.338) nor

BDNF (-0.02, p=0.927) was correlated with DAT availability of the caudate in schizophrenia (Figure 2).

IV. 結論

在過去的研究中發現正常人及憂鬱症患者的可體素與多巴胺轉運器量皆有顯著的關聯，與本研究之結果相異，可能原因為在精神分裂症的病理生理學上可體素及腦滋養因子扮演著不同的角色。

參考文獻

- Abi-Dargham, A., Mawlawi, O., Lombardo, I., Gil, R., Martinez, D., Huang, Y., Hwang, D.R., Keilp, J., Kochan, L., Van Heertum, R., Gorman, J.M., Laruelle, M., 2002. Prefrontal dopamine D1 receptors and working memory in schizophrenia. *J Neurosci* 22, 3708-3719.
- Carlsson, A., 1988. The current status of the dopamine hypothesis of schizophrenia. *Neuropsychopharmacology* 1, 179-186.
- Chen, K.C., Yang, Y.K., Howes, O., Lee, I.H., Landau, S., Yeh, T.L., Chiu, N.T., Chen, P.S., Lu, R.B., David, A.S., Bramon, E., 2013. Striatal dopamine transporter availability in drug-naïve patients with schizophrenia: a case-control SPECT study with [(99m)Tc]-TRODAT-1 and a meta-analysis. *Schizophr Bull* 39, 378-386.
- Chou, Y.H., Huang, W.S., Su, T.P., Lu, R.B., Wan, F.J., Fu, Y.K., 2007. Dopamine transporters and cognitive function in methamphetamine abuser after a short abstinence: A SPECT study. *Eur Neuropsychopharmacol* 17, 46-52.
- Chou, Y.H., Lin, C.L., Wang, S.J., Lirng, J.F., Yang, K.C., Chien Chang, A., Liao, M.H., 2012a. Aggression in bipolar II disorder and its relation to the serotonin transporter. *J Affect Disord*.
- Chou, Y.H., Wang, S.J., Lirng, J.F., Lin, C.L., Yang, K.C., Chen, C.K., Yeh, C.B., Liao, M.H., 2012b. Impaired cognition in bipolar I disorder: The roles of the serotonin transporter and brain-derived neurotrophic factor. *J Affect Disord* 143, 131-137.
- Farde, L., Eriksson, L., Blomquist, G., Halldin, C., 1989. Kinetic analysis of central [11C]raclopride binding to D2-dopamine receptors studied by PET—a comparison to the equilibrium analysis. *J Cereb Blood Flow Metab* 9, 696-708.
- Favalli, G., Li, J., Belmonte-de-Abreu, P., Wong, A.H., Daskalakis, Z.J., 2012. The role of BDNF in the pathophysiology and treatment of schizophrenia. *J Psychiatr Res* 46, 1-11.
- Gao, X., Smith, G.M., Chen, J., 2009. Impaired dendritic development and synaptic formation of postnatal-born dentate gyrus granular neurons in the absence of brain-derived neurotrophic factor signaling. *Experimental Neurology* 215, 178-190.
- Giralt, A., Rodrigo, T., Martin, E.D., Gonzalez, J.R., Mila, M., Cena, V., Dierssen, M., Canals, J.M., Alberch, J., 2013. Brain-derived neurotrophic factor modulates the severity of cognitive alterations induced by mutant huntingtin: involvement of phospholipase Cγ activity and glutamate receptor expression. *Neuroscience* 158, 1234-1250.
- Groves, J.O., 1979. Is it time to reassess the BDNF

- hypothesis of depression?. [Review] [106 refs]. *Molecular Psychiatry* 12, 1079-1088.
- Hyman, C., Hofer, M., Barde, Y.A., Juhasz, M., Yancopoulos, G.D., Squinto, S.P., Lindsay, R.M., 1991. BDNF is a neurotrophic factor for dopaminergic neurons of the substantia nigra. *Nature* 350, 230-232.
- Karlsson, P., Farde, L., Halldin, C., Sedvall, G., 2002. PET study of D(1) dopamine receptor binding in neuroleptic-naive patients with schizophrenia. *Am J Psychiatry* 159, 761-767.
- Kung, H.F., Kung, M.P., Choi, S.R., 2003. Radiopharmaceuticals for single-photon emission computed tomography brain imaging. *Semin Nucl Med* 33, 2-13.
- Kung, H.F., Kung, M.P., Wey, S.P., Lin, K.J., Yen, T.C., 2007. Clinical acceptance of a molecular imaging agent: a long march with [99mTc]TRODAT. *Nucl Med Biol* 34, 787-789.
- Laakso, A., Bergman, J., Haaparanta, M., Vilkmán, H., Solin, O., Syvalahti, E., Hietala, J., 2001. Decreased striatal dopamine transporter binding in vivo in chronic schizophrenia. *Schizophr Res* 52, 115-120.
- Laakso, A., Vilkmán, H., Alakare, B., Haaparanta, M., Bergman, J., Solin, O., Peurasaari, J., Rakkolainen, V., Syvalahti, E., Hietala, J., 2000. Striatal dopamine transporter binding in neuroleptic-naive patients with schizophrenia studied with positron emission tomography. *Am J Psychiatry* 157, 269-271.
- Laruelle, M., Abi-Dargham, A., Gil, R., Kegeles, L., Innis, R., 1999. Increased dopamine transmission in schizophrenia: relationship to illness phases. *Biol Psychiatry* 46, 56-72.
- Martinowich, K., Manji, H., Lu, B., 1089. New insights into BDNF function in depression and anxiety. [Review] [50 refs]. *Nature Neuroscience* 10, 1089-1093.
- Okubo, Y., Suhara, T., Suzuki, K., Kobayashi, K., Inoue, O., Terasaki, O., Someya, Y., Sassa, T., Sudo, Y., Matsushima, E., Iyo, M., Tateno, Y., Toru, M., 1997. Decreased prefrontal dopamine D1 receptors in schizophrenia revealed by PET. *Nature* 385, 634-636.
- Seroogy, K.B., Lundgren, K.H., Tran, T.M., Guthrie, K.M., Isackson, P.J., Gall, C.M., 1994. Dopaminergic neurons in rat ventral midbrain express brain-derived neurotrophic factor and neurotrophin-3 mRNAs. *J Comp Neurol* 342, 321-334.
- Spenger, C., Hyman, C., Studer, L., Egli, M., Evtouchenko, L., Jackson, C., Dahl-Jorgensen, A., Lindsay, R.M., Seiler, R.W., 1995. Effects of BDNF on dopaminergic, serotonergic, and GABAergic neurons in cultures of human fetal ventral mesencephalon. *Exp Neurol* 133, 50-63.
- Spina, M.B., Squinto, S.P., Miller, J., Lindsay, R.M., Hyman, C., 1992. Brain-derived neurotrophic factor protects dopamine neurons against 6-hydroxydopamine and N-methyl-4-phenylpyridinium ion toxicity: involvement of the glutathione system. *J Neurochem* 59, 99-106.
- Wong, D.F., Wagner, H.N., Jr., Tune, L.E., Dannals, R.F., Pearlson, G.D., Links, J.M., Tamminga, C.A., Broussolle, E.P., Ravert, H.T., Wilson, A.A., Toung, J.K., Malat, J., Williams, J.A., O'Tuama, L.A., Snyder, S.H., Kuhar, M.J., Gjedde, A., 1986. Positron emission tomography reveals elevated D2 dopamine receptors in drug-naive schizophrenics. *Science* 234, 1558-1563.
- Yeh, C.B., Chou, Y.H., Cheng, C.Y., Lee, M.S., Wang, J.J., Lee, C.H., Shiue, C.Y., Su, T.P., Huang, W.S., 2012. Reproducibility of brain dopamine transporter binding with Tc-99m TRODAT-1 SPECT in healthy young men. *Psychiatry Res* 201, 222-225.

微波熱增敏治療藥物開發與臨床前療效評估研究

Thermal sensitization therapy drug development and preclinical efficacy evaluation studies

計畫編號：103-2623-E-442-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃重傑

e-mail：huang120721@gmail.com

計畫參與人員：洪光威、夏建忠、陳柏溶、翁茂琦

執行單位：秀傳醫療社團法人秀傳紀念醫院外科、核能研究所

摘要

本計畫建立F-127與金奈米粒子之結合技術，並建立放射性標誌技術，透過單光子斷層造影（SPECT/CT）確認病灶位置及藥物分佈情形，並利用電磁波將金奈米粒子轉化為熱能，達到熱治療之效益；此外，透過於表面接合抗體評估此藥物於腫瘤合併熱治療與腫瘤專一性治療之組合療效，並與臨床治療方式比較，判定可否減少治療副作用並提升治療效果。

Abstract

The research is to develop the nanocarriers combining pluronic F-127 and gold nanoparticle and conjugated with radio nuclides, which are used to define the positions of diseases and distribution of carriers through SPECT/CT. We also use continuous laser to produce much heat in mice thus to induce the tumor reduction by thermotherapy. In addition, through the conjugation of mAb on carriers' surface, we tried to evaluate the effects of combined therapy and compare with the clinical ways, hope to define whether this combined therapy can reduce side effects and improve therapeutic efficacy of cancers.

I. 前言

Controlled release of therapeutic agents by nanocarriers has received high interest since it provides many advantages such as increasing site-specific therapy and reducing side effect. We have developed new thermosensitive nanocarriers which combine with chemo-thermal therapy by NIR remote-controlled and target therapy in EGFR+ xenografts.

II. 主要內容

The silane-F127(sF-127) was synthesized by stepwise chemical reaction of F127/SA/DMA/

NMP, SOCl_2/TEA and APTES. The hydrophobic gold nanorods (AuR) were prepared by CTAB/ $\text{NaBH}_4/\text{HAuCl}_4/\text{AgNO}_3/\text{L-AA}$ and modified by MPS/ODS. The thermosensitive sF127/AuR (SFGR) nanocarriers were then fabricated by emulsion of sF-127/hydrophobic AuR and Paclitaxel, hydrolysis and condensation of silica formation, covalent bridge with C225 Ab on silica surface and modified with NOTA for Gallium-67 chelation.

III. 結果與討論

The size of SFGRs was 120 nm. Cumulative drug release profiles of FGR and SFGR both exhibited sustained-release behavior but different release rates; it revealed most drugs were well-anchored in SFGRs. Under NIR laser, drugs were burst from SFGRs since absorbing light were transformed to heat and changed SFGR's structure. MTT assays showed high cell viability (>80%) under high concentration of SFGRs. In *in vivo* studies, EGFR+ tumor-bearing mice intravenously(i.v.) injected with SFGRs and NIR irradiated for 2 min were traced at 2,14 d; there were small scars on tumor's skin at 2 d but tumors were vanished at 14 d. After radiochemical purity was >90%, ^{67}Ga -SFGRs were i.v. injected to mice and SPECT/CT imaging was determined.

IV. 結論

SFGRs were successfully developed and showed low toxicity and high biocompatibility; it also demonstrated technical potential for visualizing uptake behavior and chemo-thermal therapeutic with exceptionally high efficiency. Together with a well-regulated design, SFGRs are expected to act as a potential effective chemo-thermal therapy for nano-imaging applications.

大中華及國際核子醫學領域之應用與分析(II)

Investigate and analysis the current status and the development of nuclear medicine in Greater China, and Asia Pacific Region(II)

計畫編號：103-2623-E-006 -009 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李碧芳

e-mail：leelab0315@gmail.com

計畫參與人員：邱南津

執行單位：國立成功大學

摘要

近來核能研究所針對核子醫學(核醫)進行研發，頗具成效。再則，近來研究發現臺灣全民健保總額制度實施後，有核醫醫療需求民眾呈現增加趨勢。此外，目前大中華核醫醫療市場是非常熱絡；再則於2010年12月20日，財團法人海峽交流基金會董事長江丙坤和大陸海峽兩岸關係協會會長陳雲林，簽署《海峽兩岸醫藥衛生合作協議》。海峽兩岸雙方同意在醫藥品臨床試驗、非臨床檢測，以及上市前審查、生產管理、上市後審批等環節逐步採認對方執行結果。

此計畫採用全民健保資料庫分析臺灣核醫醫療服務現況，目前初步完成之研究成果，乃針對正子掃描的醫療服務使用情形進行研究。

可提供正子掃描醫療服務的醫院，以醫學中心為主，其次為區域醫院。使用正子掃描族群以 65 歲以上為主，可發現核醫正子掃描已逐漸普遍用於腫瘤相關疾病的診斷與治療。

關鍵詞：核子醫學、正子掃描、全民健康保險研究資料庫。

Abstract

Institute of Nuclear Energy Research (INER) has recently great success in research and development (R&D) for the need of nuclear medicine. Furthermore, recent studies found that there is an increasing demand for the medical care of nuclear medicine after the execution of the global budget payment system by the National Health Insurance (NHI) in Taiwan. Moreover, the medical market of nuclear medicine in Great China is in full swing. In addition, on 20 December 2010, the chairman of Straits Exchange Foundation, Chiang Pin-kung, and the president of Chinese mainland-based Association for Relations across the Taiwan Straits, Chen Yunlin, had signed the Across-Strait Agreement on Medical, Health Care Cooperation. Both sides of the strait agree to adopt the results of the opposite side gradually in pharmaceutical clinical trials, non-clinical testing, as well as Pre-market review, production management, post-marketing examination and approval, etc.

The aim of this grant is to analyze the status of nuclear medicine medical services in Taiwan by using the National Health Insurance Research Database. Because of the

administrative process according to 「國家衛生研究院全民健康保險研究資料庫資料加值服務申請原則」and 成功大學行政流程進行科研採購。

PET scan is a sensitive, early, non-invasive and accurate imaging to provide and detect serial glucose function change resulting from tumors. The purpose of this study is to analysis the utilization of PET scan in Taiwan by National Health Insurance (NHI) database.

Our results might serve as an international benchmark for estimating the utilization pattern for PET scan in countries around the world, though Taiwanese experience could not apply to all countries.

Keyword

Nuclear medicine, PET scan, national health insurance database

I. 前言

近來核能研究所針對核子醫學(核醫)需要不斷投資研發，頗具成效。再則，近來研究發現臺灣全民健保總額制度實施後，有核醫醫療需求民眾呈現增加趨勢。此外，目前大中華核醫醫療市場是非常熱絡；再則於2010年12月20日，財團法人海峽交流基金會董事長江丙坤和大陸海峽兩岸關係協會會長陳雲林，簽署《海峽兩岸醫藥衛生合作協議》。海峽兩岸雙方同意在醫藥品臨床試驗、非臨床檢測，以及上市前審查、生產管理、上市後審批等環節逐步採認對方執行結果。

因此吾人提出此研究計畫，利用全民健保資料庫分析臺灣核醫醫療服務及核醫醫療需求民眾現況。

II. 主要內容

針對正子掃描的醫療服務使用情形進行研究，本研究乃採用國衛院所提供2007-2012年的100 萬人抽樣歸入檔(LHID2005) 進行研究分析；主要分析內容包括正子掃描檢查申報次數、醫院分局別、醫院權屬別、醫院層級別之描述性統計。

III. 結果與討論

正子掃描檢查以門診申報次數較住院申報次數為多，且

以 65 歲以上人口群最多。若以權屬別來看，門診及住院申報皆是以財團法人醫院居冠，次之為榮民總醫院；若以全民健保局分局別來看，門診及住院皆是以台北分局申報居多；以醫院層級別來看，門診及住院皆是以醫學中心申報最多。

IV. 結論

可提供正子掃描醫療服務的醫院，以醫學中心為主，其次為區域醫院。使用正子掃描族群以 65 歲以上為主，可發現核醫正子掃描已逐漸普遍用於腫瘤相關疾病的診斷與治療。預計將此研究成果投稿於雜誌，以做為未來相關領域研究之參考。

參考文獻

1. Hung MC, Hsieh WA, Chang PW, and Hwang JJ. Utilization of nuclear medicine scintigraphy in Taiwan, 1997–2009. *Ann Nucl Med*. 2011;25:818-24.
2. Chan WP, Liao CH, Hsu CH and Yang CM. Assessing a population's need for scintigraphy: use under universal health insurance in Taiwan. *Nuclear Medicine Communications* 2010, 31:375–379.
3. Hart D and Wall BF. UK nuclear medicine survey 2003–2004. *Nuclear Medicine Communications* 2005 ; 26:937–946.
4. Kuwabara Y, Koizumi K, Ushijima Y, et al. Nuclear medicine practice in Japan: A report of the sixth nationwide survey in 2007. *Annals of Nuclear Medicine* 2009;23:209–215.
5. BF Lee, YT Huang, NT Chiu, and TH Lu. Changing in geographic distribution of nuclear medicine specialists and hospitals in Taiwan. *Ann Nucl Med Sci*. 2011;23:181-188.

核子醫學領域之應用發展趨勢與國內外市場分析

The trend in the international utilization of nuclear medicine

計畫編號：103-2623-E-277-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：洪茂欽

e-mail：art@tccn.edu.tw

計畫參與人員：洪茂欽、楊承領

執行單位：慈濟技術學院放射醫學科學研究所

摘要

本研究旨在瞭解台灣核子醫學診療與核醫藥物的使用發展趨勢及分佈情形，並進行國內外市場比較。結果發現，2000 至 2012 年間平均每年核醫診療量為 250,706 次，約為每千人 10.9 次，核醫總使用量隨時間顯著增加，年增量為 13,168 次。全身骨骼掃描是最常進行的檢查項目，平均每年每千人 4.1 次，佔所有核醫診療的 36.4%；而壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描則增加最為快速，以每年每百萬人 250 次的頻率增加。2000 至 2012 年間平均每年核醫診療醫療費用支出約為 13 億 2 千 8 百萬新台幣，並以每年 1 億 3 千 1 百萬新台幣成長，其中支出最高、成長也最快的項目為全身正子造影，佔所有核醫費用支出的 33.2%，2004 至 2012 年間平均每年支出為 4 億 4 千萬新台幣，並以每年 6 千 2 百萬元速度成長。至於核醫藥物使用量最高者為 Tc-99m MDP，平均每年為 1907 居禮，每年使用量增加 88 居禮。此外，98% 的核醫診療實施於醫學中心及區域醫院，區域醫院的分佈比例有增加的趨勢；59% 的核醫診療量集中於台北市、高雄市及台中市等三大都會區，然而此集中現象有減少的趨勢。整體而言，台灣核醫診療在這 13 年間有明顯的變化，此變化應與人口年齡老化及核醫設施普及化有密切的關係。

關鍵字：核子醫學診療、核醫藥物、全民健康保險研究資料庫

Abstract

This study investigated the long-term trend in the utilization of nuclear medicine in Taiwan. All data of the nuclear medicine records were extracted from the National Health Insurance Research Database between 2000 and 2012. Descriptive statistical analyses were adopted to analyze the use rate and expenditure of nuclear medicine, hospital and region distribution of usage. Linear regression analysis was applied to assay the longitudinal trend in utilization. The annual total number of nuclear medicine procedures was estimated to be 250,706 on average and 10.9 per 1,000 population with annual increment of 13,168 in 2000–2012. Whole-body bone scan was the most commonly performed examination with 4.1 per 1,000 people annually. The stress and redistribution myocardial perfusion scan was increased fastest with 250 increments

per million people per year. In the aspect of medical expenditure, the whole-body positron emission tomography (PET) contributed the highest and was increased fastest with an annual increment of 33 million NTD, and average annual expenditure of 440 million NTD from 2004 to 2012. In addition, 98% of the nuclear medicine procedures were performed in medical centers and regional hospitals, however, the latter tended to increase. Three major metropolitan areas, i.e. Taipei, Kaohsiung and Taichung, account for 59% of nuclear medicine clinics, yet, this phenomenon was decreased over time. Overall, the contents of nuclear medicine have significantly changed in the past 13 years in Taiwan. These changes may be correlated closely with aging of the population and popularization of nuclear medicine.

Key words: utilization of nuclear medicine, National Health Insurance Research Database (NHIRD)

I. 前言

全民健保從 1995 年開辦至今已有逾 99% 的納保率，涵蓋絕大部分的核子醫學診療項目，從腦掃描到鎳-99m TRODAT-1 腦部多巴胺神經元斷層造影等，共計七十餘種診療項目。民眾所有接受健保給付的就醫記錄都會記載在全民健康保險研究資料庫中。本研究即利用此資料庫進行研究，分析台灣於 2000 至 2012 年間各項核醫診療使用量與醫療費用支出的長期趨勢，以及在各級醫院與各地區的分佈趨勢，以做為評估核子醫學資源分佈及未來發展趨勢的重要參考依據。

II. 主要內容

利用全民健康保險研究資料庫 2000 年至 2012 年間的核醫就醫紀錄，分析核醫診療使用率、醫療費用支出、就醫醫院與地區分佈情形，利用問卷調查核醫藥物使用與分佈情形，最後蒐集相關文獻進行國內外市場比較。

III. 結果與討論

2000 至 2012 年間平均每年核醫診療量為 250,706 次，約為每千人 10.9 次，核醫總使用量隨時間顯著增加，

年增量為 13,168 次。最常進行的核醫診療項目為全身骨骼掃描，其次為壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描，其中全身骨骼掃描、壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描、全身正子造影、全身炎症掃描、碘-131 癌症追蹤檢查、碘-131 治療、唾液腺閃爍攝影、三相骨骼掃描及淋巴閃爍攝影逐年顯著增加，尤其以壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描增加速度最快，以每年每百萬人 250 次的頻率增加。梅克爾憩室掃描、動態腎/泌尿功能測定、腎臟掃描、腦質灌注掃描、肺灌注掃描及肺通氣檢查則逐年遞減，其中又以梅克爾憩室掃描減少最明顯。

2000 至 2012 年間平均每年核醫診療醫療費用支出約為 13 億 2 千 8 百萬新台幣，並以每年 1 億 3 千 1 百萬新台幣成長，其中支出最高、成長也最快的項目為全身正子造影，佔所有核醫費用支出的 33.2%，2004 至 2012 年間平均每年支出為 4 億 4 千萬新台幣，並以每年 6 千 2 百萬元速度成長。其次為壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描，在 2000 至 2012 年間平均每年支出 4 億 3 千萬新台幣，並以每年 3 千萬元速度持續增加。

核醫藥物使用量最多的為 Tc-99m MDP，其次為 I-131 及 Tl-201，每年平均使用量分別為 1907、237 及 172 居禮。此外，Tc-99m MDP、I-131、Tl-201、F-18 FDG、Ga-67、Tc-99m MIBI 及 Tc-99m phytate 使用量逐年顯著增加，尤其以 Tc-99m MDP 增加速度最快，以每年 88 居禮增加；Tc-99m pertechnetate、Tc-99m ECD、Tc-99m DTPA、Tc-99m MAA 及 Tc-99m DMSA 使用量則逐年遞減，其中又以 Tc-99m pertechnetate 減少的最明顯。

台灣核醫診療主要集中在醫學中心及區域醫院，分別佔總使用量的 71.9% 及 26.4%，然而醫學中心診療量所佔的比例有減少的趨勢，區域醫院則有增加的趨勢。此外，59.1% 的核醫診療量集中於台北市、高雄市及台中市等三大都會區，然而此集中現象有減少的趨勢，此三大都會區以外區域的核醫使用量則有增加的趨勢，尤其以南部的使用量增加最為明顯，從 2000 年的 12.7% 增加至 2012 年的 18.6%，顯示核醫診療在台灣各區域的普及性逐漸提高。

根據聯合國原子輻射效應科學委員會 2008 年報告 (UNSCEAR 2008 Report)，健康照護等級第一級國家於 1997 至 2007 年間的核子醫學年平均使用率介於每千人 0.4 次至 52.8 次，平均為 22.1 次，本研究顯示台灣在此期間的核醫年平均使用率落在此範圍內，但低於平均值，顯示核醫診療在台灣仍有相當大的成長空間。

本研究發現在台灣最常進行的核醫診療項目為全身骨骼掃描，其次為壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描，此與日本、美國、北京的使用情形相似。

IV. 結論

台灣核醫診療在過去 13 年間有明顯的變化，應用於中老年疾病的診療顯著增加，而施行於相對年輕者的診療則有減少趨勢。全身骨骼掃描、壓力與重分佈心肌灌注斷層掃描與全身正子造影無論在使用量或醫療費用支出都是主要的診療項目，並隨著人口年齡老化而有顯著的增加趨勢。

參考文獻

- [1] Kinuya S, Kuwabara Y, Inoue K, et al. Nuclear medicine practice in Japan: a report of the seventh nationwide survey in 2012. *Ann Nucl Med* 2014; 28:1032–1038.
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume1 Annex A: Medical radiation exposures. 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations; 2010.
- [3] Mettler FA Jr, Bhargavan M, Thomadsen BR, et al. Nuclear Medicine Exposure in the United States, 2005-2007: Preliminary Results. *Semin Nucl Med* 2008; 38:384-391.
- [4] Hongwei S, Jianhua G, Shengzu C. Nuclear medicine scans in Beijing: Insights from the Beijing Quality Control Centre Survey 2005–2006, *Nucl Med Commun* 2007; 28:661–666.

高階醫用複合生長因子骨材符合臨床前測試基準之規劃研究 Polyesters Composite with Platelet Gel for Cranial Bone reconstruction

計畫編號：103-2623-E-016 -002 -NU

計畫類別：☐個別型計畫 ☒整合型計畫

計畫主持人：陳天牧

e-mail：timmo@ms22.hinet.net

計畫參與人員：伍德馨、張光偉、方旭偉、蔡瑞哲、曾靖嬋

執行單位：國防醫學院

摘要

本研究擬應用高生物相容性與低植入風險性的聚酯高分子複合材料，作為骨填補材料，並且結合自體血小板膠做為生長因子的來源，找出最佳化組合比例與條件以促進骨缺損癒合，並且降低產品開發門檻以及加速商品化上市程序。目前有關誘導骨質新生因子之研究由於來源管控不易，且來自異體的生長因子具有免疫方面的高風險性，目前臨床難以找到具有可應用於臨床上作為誘導骨質新生因子來源。

本計畫擬設計高強度及具有常溫孔性可塑彈性骨填補材料結合近來被廣泛臨床應用的血小板膠，合成有效促進骨缺損癒合之高值化醫療複合骨材。此支架具備良好的孔洞聯結性，利於細胞營養物之流通，孔隙度達80%以上，利於搭載生長因子，而且細胞在培養的過程中，仍可維持支架結構的完整性，因此非常適合做為培養骨細胞及攜帶血小板膠之支架。

為完整高值化醫療複合骨材臨床前試驗評估，協助國內臨床醫療應用技術發展，本期研究希望透過臨床應用導向活體動物試驗設計，統計高單價醫用複合骨材植入動物實驗情形，配合顯微放射攝影機造影及組織切片等技術，逐次評估複合生醫成品新生骨形成面積、礦物質沉積狀況…等骨組織型態評估並且完成醫療器材上市查登文件建置。

關鍵詞：聚酯水膠，血小板膠，骨缺損

Abstract

Reconstruction of post traumatic craniofacial bone defect is needed to provide brain protection and to restore esthetic contour. Currently, the most commonly used materials for craniofacial bone defect are autogenous bone graft and methyl methacrylate. Neither are ideal. Various experimental and clinical studies suggest that platelet growth factor may stimulate mesenchymal stem cell to differentiate into osteoblast. In this animal study, we will use polyesters composite carrying platelet gel to reconstruct critical sized calvarial bone defect in rabbit (15mm in diameter). Group 1: the bone defect reconstructed with polyesters composite and platelet gel. Group 2: the bone defect reconstructed with polyesters composite. Group 3: the bone defect not reconstructed. The healing of bone defect will be evaluated by micro-CT scan 1 and 4 months after surgery in vivo. The animals will be sacrificed after CT scan study. The bone defect with surrounding 2-3 mm normal bone will be harvested, evaluation of new bone formation includes (1) Gross

observation, (2) Micro-radiography (3) Histologic study.
Keywords: polyesters composite, platelet gel, cranial bone defect.

I. 前言

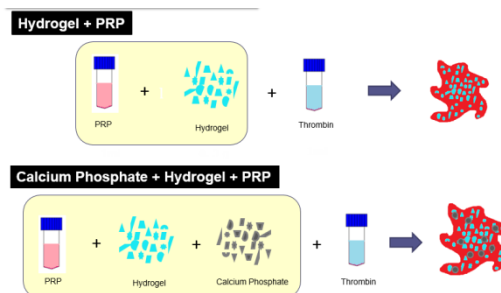
本研究將針對高分子聚合材料(acrylic acid and N-isopropylacrylamide, N, N'-methylenebisacrylamide, ANa)結合 PRP gel 之複合材料進行紐西蘭大白兔動物實驗並且評估股骨缺損修復情形。

II. 主要內容

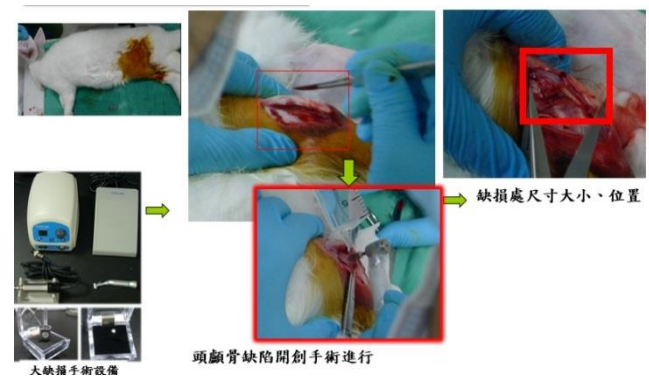
研究目的在於建立大白兔頭腿骨大型骨缺陷手術技術，以符合 ISO10993-6 之規範，建立此醫療用骨材之標準植入動物實驗模式，逐次評估其生物體內安全性。再者，評估新型態血小板奈米水膠做為大型骨缺陷用之植入骨材可行性，降低未來臨床應用的風險，更進一步增進應用於骨再生之修復。

III. 結果與討論

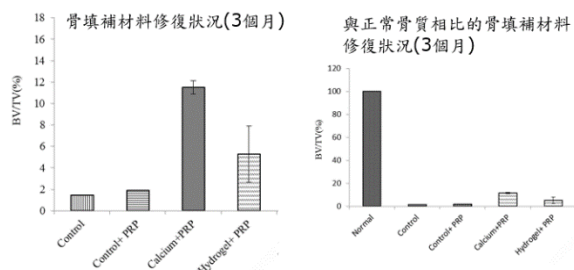
一、含血小板膠材料製作，如下圖示。



二、建立動物股骨手術流程



三、檢體分析



IV. 結論

本研究嘗試建立股骨缺損部位手術模式，新型手術模式能縮短手術時間、較少破壞周邊骨組織與降低動物術後發炎與死亡率，由於大缺損部位尺寸大小控制一致，故於後續分析能減少個體差異，增加實驗數據判斷之準確度。本研究試著將兩種材料填入股骨缺損部位，分別為 PAA-NIPAAm-NM 水膠粉末、市售磷酸鈣粉末，將其與血小板膠混合，作為大型骨缺限骨填補材；水膠粉末混合血小板膠後可做為骨誘導試劑(osteoinductive agent):由術後組織切片結果檢查顯示 PRP 具有有效增強骨新生之能力，組織切片顯示有 osteon 形成；與未添加 PRP 之水膠相比，有較佳之骨新生。最後，本研究成功建立紐西蘭白兔股骨缺陷動物手術模式，並輔以血小板膠奈米複合骨材進行修復，成功完成骨再生評估試驗。

參考文獻

1. G. Faratzis, M. Leventis, E. Chrysomali, et al."Effect of autologous platelet-rich plasma in combination with a biphasic synthetic graft material on bone healing in critical-size cranial defects", The Journal of Craniofacial Surgery, vol. 23, no. 5, pp. 1318-1323, 2012.
2. J. P. Schmitz and J. O. Hollinger."The critical size defect as an experimental model for craniomandibulofacial nonunions", Clinical Orthopaedics & Related Research, vol. 205, no. pp. 299-308, 1986.
3. M. Ohya, Y. Yamada, R. Ozawa, et al."Sinus floor elevation applied tissue-engineered bone : Comparative study between mesenchymal stem cells/platelet-rich plasma (PRP) and autogenous bone with PRP complexes in rabbits", Clinical Oral Implants Research, vol. 16, no. pp. 622-629, 2005.
4. E. M. Younger and M. W. Chapman."Morbidity at bone graft donor sites", Journal of Orthopaedic Trauma, vol. 3, no. 3, pp. 192-195, 1989.
5. K. Watanabe, A. Niimi and M. Ueda."Autogenous bone grafts in the rabbit maxillary sinus", Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, vol. 88, no. 1, pp. 26-32, 1999.
6. U. Schulze-Späte, T. Dietrich, R. A. Kayal, et al."Analysis of bone formation after sinus augmentation using b-tricalcium phosphate", Compendium of Continuing Education Dentistry, vol. 33, no. 5, pp. 364-368, 2012.
7. L. S. D. S. Nunes, R. V. D. Oliveira, L. A. Holgado, et al."Use of bovine hydroxyapatite with or without biomembrane in sinus lift in rabbits: histopathologic

analysis and immune expression of core binding factor 1 and vascular endothelium growth factor", Journal of Oral and Maxillofacial Surgeons, vol. 69, no. pp. 1064-1069, 2011.

8. K. Marukawa, K. Ueki, K. Okabe, et al."Use of self-setting a-tricalcium phosphate formaxillary sinus augmentation in rabbit", Clinical Oral Implants Research, vol. 22, no. pp. 606-612, 2011.

高階醫用複合生長因子骨材臨床前體內植入試驗之應用療效及安全性評估

Biosafety and preclinical efficacy evaluation of orthopedic implant with growth factor combination

計畫編號：103-NU -E-038 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：曾靖嫻

e-mail：chingli@tmu.edu.tw

計畫參與人員：莊謹憶、宮川卓也、黃馨儀

執行單位：臺北醫學大學生醫材料暨組織工程研究所

摘要

為了帶動醫療器材新應用，開創醫材的附加價值及新商機，政府已規劃骨科醫療器材為國內特定疾病創新醫療器材產業，列入我國經濟發展重點項目。但醫療用骨材上市前，需要以符合法規的檢測方法進行臨床前試驗，以實驗數據來降低未來實際臨床應用開發材料之風險。研究團隊開發高生物相容性與低植入風險性的聚酯高分子複合材料，作為骨填補材料，並且結合自體血小板膠做為生長因子的來源，找出最佳化組合比例與條件以達到促進骨缺損癒合，並期望可降低產品開發成本，及加速商品化上市程序。本計畫任務為執行驗證團隊所研製之醫療用複合骨材結合血小板膠，在依據符合 ISO10993-醫療器材生物性評估規範下，完成其作為骨填補材料之安全性評估：如生物相容性、致敏性測試，以法規規範之動物天竺鼠進行測試，結果顯示核能所研發之新型高分子填充骨粉(另名為 hydrogel)不具有致敏性。在功能性測試探討此骨材複合添加血小板膠用於標準動物骨缺損植入實驗，結果亦顯示作為新型醫療用骨材混合血小板膠後，有良好的促進骨癒合效果。

關鍵詞：醫療用複合骨材、生物安全性測試、ISO10993、致敏性、骨修復、血小板膠。

Abstract

For the development of medical device especially the orthopedic implant in Taiwan, this project is focused on the biosafety evaluation of a newly bone filling materials under the medical device regulation which could fulfill the premarketing certification. The orthopedic biomaterials made was fabricated into powder from Institute of Nuclear Energy Research, this powder then combined with platelet rich plasma (PRP) for osteoinduced supplement. The aim of this project contains two tasks, first for establishment the standard operation process following the guidance of ISO 10993 "Biological Evaluation of Medical Devices" for in vitro genotoxicity test and in vivo biosafety evaluation; second perform the sensitization, irritation and acute systemic toxicity in the tested animal in this year; Nowadays bone regeneration of large bone defects are difficult subject. In this study, we have evaluated the possibility for the polymeric power tested in guinea pig for sensitization examination, and showed no irritation or any adverse effect for the skin effect of PRP combined with hydrogel on bone remodeling during cranial bone

regeneration in a rabbit model. New Zealand White rabbits underwent cranial bone regeneration was divided randomly into 2 groups based on their time of sacrifice. Each time point, bone regeneration was evaluated by computer tomography (CT) and histological examination

Keywords: Orthopedic biomaterials, biosafety, ISO10993, sensitization, bone, Platelet-Rich Plasma (PRP), Computer Tomography (CT)

I. 前言

目前對於人工合成材料作為植入式醫療器材開發，需要通過產品驗證以及風險性評估的流程，以增加未來植入人體之後的安全性¹⁻³。所以對於新型態材料的開發不僅要求材料的生物相容性良好，符合 ISO 10993 的驗證規範，對於未來產品量產條件也需要經過 ISO 13485 的優良製造規範，來保證產品的製程品質。而目前依據美國 FDA 植入式醫療器材上市驗證流程⁴，新型醫療用植入物應於上市前備齊完整臨床前試驗資料之規定。此整合型計畫中進行之實驗規劃，皆比照臨床前試驗之相關法規規範：如(I) ISO 10993-1:2009,附錄 A-生物學評估試驗⁵；或(II) 10993-6 Tests for local effects after implantation (植入後局部效應試驗)⁵。希望能藉由此計畫之執行，以證實計畫中使用之核能所研製新型高分子填充骨粉與生長因子做為骨填補材的安全性與醫療價值；未來廠商承接相關之技術轉移，欲進行醫療器材申請查驗登記時，此計畫執行成果可直接提供做為上市前之動物實驗依據，避免重複進行類似實驗，可加速產品之上市。

II. 主要內容

本計畫目的為完成搭載含生長因子之 PRP 複合骨材之骨癒合於動物體內之安全性評估，如體外之生物適應性評估、體內之致敏性及骨植入物之功能性測試如骨修補密度極缺損恢復比例等，以確保於人體複雜狀況下其無不良反應，保護使用者之生命安全；同時具有骨修復之功能。

III. 結果與討論

為了確認本研究所製備之新型高分子填充骨粉(另名為 hydrogel)是否對細胞增生產生不良影響，具有細胞毒性(cytotoxicity)，故本研究使用 MTT 試劑進行細胞活性測試來做評估。將滅菌過之 hydrogel powder 混

合 PRP 後之膠狀物質，濃度浸泡於 DMEM 中 24 小時，溫度維持在 37°C，之後再進行過濾以提取萃取液，其後測試方法以符合 ISO10993-5 之規範進行之：不同批次之 hydrogel 與 PRP 混合後之 MTT 測試結果，顯示添加 PRP 混合之材料在不同時間下，其細胞存活率雖稍低於控制組，但存活率約在 85% 以上，無明顯細胞毒性。

此測試比照 ISO10993 之規範，以天竺鼠為受試動物，評估醫療器材或其萃取物所引發之接觸性過敏或致敏性反應 (ISO10993-10)。完成麻醉後，將動物腹部毛髮剃除。取用 1 ml 試驗物質液浸濕 3*3 cm² 的紗布，利用防水透氣敷料/彈性繃帶(3M, Tegaderm™) 把紗布固定在除毛的腹部皮膚上，防止脫落。本計畫使用核能所製備之高分子填補材料，並以 γ-ray 滅菌後之高分子骨填補材料，進行天竺鼠之極大化過敏性測試，經此試驗測試結果如圖 1 所示，天竺鼠的皮膚外觀未有明顯變化產生。

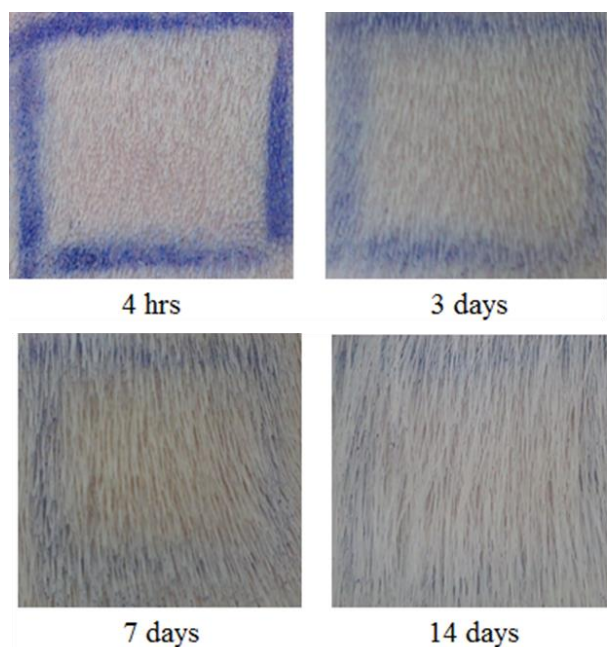


圖 1、天竺鼠之極大化過敏性測試皮膚變化圖。

此材料並未導致皮膚的紅斑或水腫反應 (如圖 7)，並依據皮膚刺激性試驗評分基準 (根據 ISO 10993-10 規範)，辨定此材料之刺激分數為 0，因此可判定此產品不會引發皮膚的過敏反應，確認其無致敏之危險性 (表 1)。

表 1、皮膚的紅腫程度記錄刺激性分數

天竺鼠編號	測試材質	性別	鼠重(g)		體重變化(g)	皮膚刺激性級數(紅/腫)			
			Day1	Day14		4hrs	3days	7days	14days
1-3	Hydrogel	Female	632	735	+103	0/0	0/0	0/0	0/0

使用紐西蘭大白兔 2~2.5 公斤之公兔進行實驗。先將兔子麻醉後，於兔子股骨中心使用特殊鑽鋸器進行約 7 mm 的大缺陷開創。再將特定條件之材料填補入缺陷部位，最後進行外層皮膚縫合。於術後一個月與三個月之時間點，觀察材料狀況與骨生長之情形。待填補材料分別與 Thrombin/PRP 以固定比例混合完成並靜置數分鐘形成膠狀物後，再填補至手術缺陷部位，於術後三個月犧牲動物，取出股骨頭後，檢體以福馬林固定後，將股骨頭對半剖開，觀察材料與組織間之相對位置。圖 2(a)為 control + PRP 組，其缺陷部位由骨髓填充，未有明顯差異；而圖 2(b) 則 hydrogel + PRP 組，由於材料尚未降解，故可觀察到填充部位有白色材料粉末位於骨缺陷內的情形。

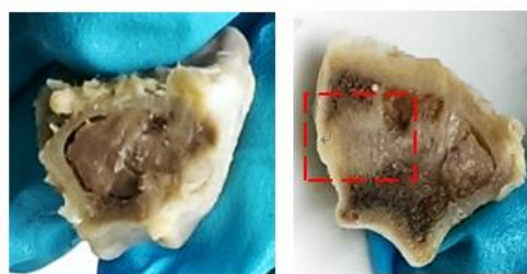


圖 2、股骨缺陷開創手術部位組別(a) control + PRP 及 (b) Hydrogel+ PRP 組。(紅色框為材料填補部位)

圖 3 為骨缺陷部位植入後 3 個月的組織切片圖，使用 H & E 染色方法。在 control 組部分，由於未植入填補材料，使得骨組織與周邊組織生長復原的情況較慢，較少骨組織可以在缺陷部位觀察到 (圖 3(a))。而 Hydrogel + PRP 組及 Calcium phosphate powder + PRP 組於手術後三個月的傷口範圍大大的縮小，有促進骨癒合之效果，並可分辨原有之骨頭與新生骨頭的顏色差異，新生骨頭的顏色會稍微深一點的粉紅色。Hydrogel+ PRP 組織中(圖 3(b))，可清楚觀察到 Hydrogel 與組織間的相互作用無排斥的現象，故其生物相容性良好。Calcium phosphate powder + PRP 組因 Calcium phosphate powder 與骨組織成分相當，故生物相容性佳，癒合情形也良好(圖 3(c))。對於 Calcium phosphate powder + PRP 組來說 Hydrogel + PRP 組的效果相近，故對於骨缺陷的修補來說，在未來有潛力發展成新型大缺陷之骨填補材料。由於含有 PRP，使得研究開發的骨填補材料除了具有 osteoconduction 性質外，也因為富含生長因子而具有 osteoinduction 性質，顯示整體的 osseointegration 性質良好。

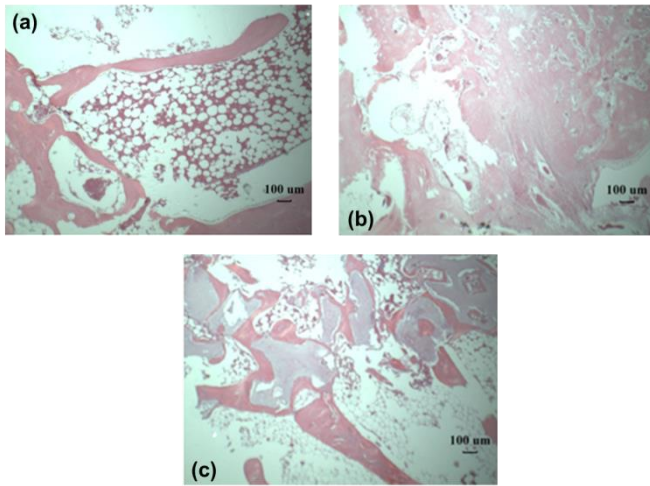


圖 3、股骨缺陷部位之骨生成狀態: (a) control + PRP、(b) Hydrogel+ PRP 組及(c) calcium phosphate+ PRP。(植入後三個月，H&E stain)

IV. 結論

藉由此計畫之執行，已證實計畫中使用之骨材與生長因子做為骨填補材具有良好生物相容性、無皮膚致敏性疑慮及有促進骨新生之效果，證實其安全性與作為骨材之醫療價值。此藉果可提供爾後臨床試驗參考。目前主要執行成果與貢獻如下：(1)成功建立大白兔大腿股骨缺損模式，且進一步結合血小板膠與本研究團隊開發之醫療用高分子骨填補材料，評估其作為新型骨材之可行性。(2)研究成果顯示利用高分子骨填補材料混合血小板膠進行骨缺損填補，有促進骨癒合效果，具有開發為新型骨材商品化的潛力。(3)訓練學生熟悉血小板膠製作，以及動物骨缺損之外科手術程序，使其具有實作經驗以及幫助技藝養成。。

研究亦將核能所自製之骨材高分子填補材料與市售磷酸鈣粉末，其與血小板膠(platelet rich plasma, PRP)混合後，比較其作為骨缺損填補材之體內骨缺損癒合促進效果，結果顯示骨材高分子填補材料混合血小板膠後可做為骨誘導試劑，再者顯示 PRP 有效增強骨新生，有較佳之骨組織再生。與市售之磷酸鈣骨粉功效相當，具商業化潛力。

參考文獻

- [1] Anitua E. The use of plasma-rich growth factors (PRGF) in oral surgery. *Pract Proced Aesthet Dent*. 2001 Aug;13(6):487-93; quiz 487-93.
- [2] Dallari D, Fini M, Stagni C, Torricelli P, Nicoli Aldini N, Giavaresi G, Cenni E, Baldini N, Cenacchi A, Bassi A, Giardino R, Fornasari PM, Giunti A. In vivo study on the healing of bone defects treated with bone marrow stromal cells, platelet-rich plasma, and freeze-dried bone allografts, alone and in combination. *J Orthop Res*. 2006 May;24(5):877-88.
- [3] Zhou J, Lin H, Fang T, Li X, Dai W, Uemura T, Dong J.

The repair of large segmental bone defects in the rabbit with vascularized tissue engineered bone. *Biomaterials*. 2010 Feb;31(6):1171-9.

- [4] FDA Guidance - Class II Special Controls Guidance Document: Dental Bone Grafting Material Devices. 2005.
- [5] ISO 10993-1 Biological evaluation of medical devices -Part 1: Evaluation and testing within a risk management system. 2009.
- [6] CL Tseng, PC Hsu, LG Wei, THs Wu, LH Shen, GW Chang, HW Fang, JC Tsai, YC Shen, CC Wu, TM Chen. The effect of Platelet-Rich Plasma (PRP) mixed with a polymeric bone filling material on sinus floor augmentation in rabbits. *Biomed. Eng.-Appl. Basis Commun*. (2013) 25, 13400041-9.

發展 liposomal Re-188 運用於卵巢癌治療：實驗動物模式建立與療效評估

Development of Re-188 in the treatment of ovarian cancer : Animal model setup and efficacy evaluation

計畫編號：103-NU-E-010-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：莊其穆

e-mail：cmjuang@yahoo.com.tw

執行單位：國立陽明大學醫學系婦產學科

摘要

本年度研究目的在探討不同藥物傳遞路徑對於卵巢癌腫瘤幹細胞的作用效應。利用在免疫缺乏小鼠所建立的 orthotopic 模式，經由腹腔或靜脈注射¹⁸⁸Re-Liposome後，採集腫瘤組織進行培養後分析癌幹細胞比例與相關癌幹細胞特性，藉此驗證微脂體放射藥物對於腫瘤幹細胞的抑制性。分析結果顯示，¹⁸⁸Re-Liposome 經腹腔注射給藥對於卵巢癌幹細胞具有顯著的抑制效果。在相關腫瘤幹細胞分化特性方面，給藥路徑的不同確實影響到卵巢癌幹細胞分化特性。此外，不同藥物傳遞方式對於轉移相關標誌與抗藥性基因表現量的差異則顯示，腹腔給予¹⁸⁸Re-Liposome 可以抑制腫瘤轉移與抗藥性蛋白基因的表現。綜合以上研究結果顯示，利用腹腔注射¹⁸⁸Re-Liposome 可以利用微脂體包覆所提升的EPR 效應，增加放射源在腫瘤的累積劑量，進而針對癌組織內的腫瘤幹細胞進行數量上的抑制效果並降低腫瘤組織內癌幹細胞分化。研究成果對於未來將¹⁸⁸Re-Liposome 應用於抑制復發型與抗藥性卵巢癌方面具有臨床上的助益。

關鍵詞：癌幹細胞、微脂體¹⁸⁸Re、卵巢癌、EPR

Abstract

In this study, we aim to reveal the underlying mechanism of ¹⁸⁸Re-Liposome in the treatment of ovarian cancer, our research focus on evaluating which delivery route provides the best ovarian cancer stem cell (CSC)-killing effect. By establishing an orthotopic immunocompromised mouse model, we delivered ¹⁸⁸Re-Liposome by ip. or i.v. injection. We then abstracted tumors to analyze CSC percentage and other CSC properties to validate the suppression of CSC subpopulation contributed by ¹⁸⁸Re-Liposome. Our results demonstrated that ¹⁸⁸Re-Liposome could substantially suppress the CSC subpopulation measured by CSC surface markers. Also, different delivery routes of ¹⁸⁸Re-Liposome affected the differentiation potential of ovarian CSCs. Besides, different ¹⁸⁸Re-Liposome delivery route resulted in varied gene expressions pertaining to metastatic and drug resistant related genes. Regional delivery of ¹⁸⁸Re-Liposome by i.p. injection significantly suppressed the metastatic and drug-resistant related genes. Taken together, i.p. injection of ¹⁸⁸Re-Liposome enhanced the EPR effects and concentrated the accumulated doses in the tumor regions. Hence, this therapeutic strategy significantly halted the CSC subpopulation and its multi-differentiation potential. This finding may benefit the future clinical application of ¹⁸⁸Re-Liposome in metastatic and chemo – resistant ovarian cancer.

Keywords: Cancer stem cell, ¹⁸⁸Re-Liposome, Ovarian cancer, EPR effect.

I. 前言

卵巢癌是女性的最大殺手，臨床治療後仍有高復發率與高死亡率。傳統卵巢癌治療是以太平洋紫杉醇為主的化療用藥，近年來放射線治療提供了化學治療外，另一種有效的治療途徑。文獻指出，利用局部系統性投遞奈米化紫杉醇對於卵巢癌細胞具有顯著的抑制效果¹，前期研究顯示在卵巢癌動物模式中，微脂體包埋¹⁸⁸Re 透過腹腔給藥在腫瘤內的累積高於經由靜脈注射路徑。在藥效評估方面局部投遞也有對應的腫瘤抑制效應。癌幹細胞在腫瘤治療過程中，對於抗藥性、復發與轉移具有高度相關性²。本研究目地在探討不同傳遞路徑下，微脂體¹⁸⁸Re 是否對透過毒殺卵巢癌幹細胞達到抑制腫瘤生長的效果。

II. 主要內容

本年度研究計畫透過建立適當的卵巢癌動物模式，在經由不同路徑給予放射線治療後，摘取腫瘤組織進行細胞培養與相關癌幹細胞特性分析，主要分析項目包括：利用 Side population assay、Tumor sphere assay 鑑別腫瘤組織內癌幹細胞比例與球體形成能力。透過 Soft agar assay 與 Transwell analysis 探討癌幹細胞轉移與膜穿透能力。癌幹細胞表面標誌則使用 Flow cytometry 方式進行分析統計。運用即時定量基因分析 Stemness genes、EMT markers 與多重抗藥性基因 (MDR) 表現量差異。

III. 結果與討論

利用 Side population 篩選出經放射線處理的卵巢癌細胞，相較於其他給藥路徑，¹⁸⁸Re-Liposome 以腹腔注射的腫瘤組織中有相對最低的癌幹細胞比例 (0.74%)。分析卵巢癌幹細胞特性的結果則顯示，局部治療對於卵巢癌幹細胞形成球體的能力具有顯著的抑制性(約20倍)。其他例如癌轉移特性約抑制 5~10倍、腫瘤幹細胞標誌方面，腹腔注射¹⁸⁸Re-Liposome 對於卵巢癌幹細胞表現CD24、CD44與CD133均有明顯的抑制效果。基因表現定量結果則顯示，相較於控制組，以i.p.方式給予¹⁸⁸Re-Liposome 治療對於癌幹細胞標誌基因、轉移相關標誌與抗藥性基因表現有明顯降低表現的情形。以上結果顯示，利用腹腔注射¹⁸⁸Re-Liposome 透過EPR效應，促進放射藥物在腫瘤內的累積量，進而抑制癌組織內的腫瘤幹細胞生成，並降低癌幹細胞轉移、抗藥性的分化。

IV. 結論

近年來，癌幹細胞議題在腫瘤治療策略與新興藥物開發部份佔有舉足輕重的角色³。本年度研究計畫奠基於過去開發奈米紫杉醇藥物與微脂體銻 188 在免疫缺乏小鼠卵巢癌模式上的顯著療效。藉由腫瘤幹細胞分化與轉移、抗藥性形成等相關研究分析，探討局部給予放射藥物可有效抑制腫瘤復發、轉移以及防止抗藥性癌細胞生成，進而達成提高整體存活與治癒的目標。目前成果似乎說明相關癌幹細胞毒殺特性，未來預計進一步探索微脂體銻 188 對於癌幹細胞有效抑制的機制與其對於腫瘤細胞代謝途徑調控，希望對未來新劑型放射藥物開發提供新穎且具有價值的貢獻。

參考文獻

1. Shen YA, Shyu IL, Lu M, et al: Bypassing the EPR effect with a nanomedicine harboring a sustained-release function allows better tumor control. *Int J Nanomedicine* 10:2485-502, 2015
2. Di C, Zhao Y: Multiple drug resistance due to resistance to stem cells and stem cell treatment progress in cancer (Review). *Exp Ther Med* 9:289-293, 2015
3. Vinogradov S, Wei X: Cancer stem cells and drug resistance: the potential of nanomedicine. *Nanomedicine (Lond)* 7:597-615, 2012

多模組分子影像評估銻-188-微脂體結合化療藥物於轉移性肺癌及頭頸癌之療效

計畫編號：103-NU-E-010-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李易展

計畫參與人員：張志賢、游祥霖、林亮廷、解智雄、杜元亨

e-mail：yjlee2@ym.edu.tw

執行單位：陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

根據衛生福利部國民健康署統計資料顯示，惡性腫瘤居國人十大死因之首，其中肺癌佔國人罹癌發生率第四位。肺癌治療主要仰賴化學治療(62.82%)，然而化學治療的副作用與專一性始終是難以克服的問題。隨著奈米藥物的發展，使用微脂體包裹藥物，再藉由發生於腫瘤新生血管疏漏處的藥物滲透與遲滯增強效應，讓脂溶性化療藥物能輕易地積聚於腫瘤周遭。其次，頭頸部(包含口腔、口咽部及下咽部)癌症高居國人十大癌症第六位，其中以男性為大宗，每年粗估死亡率高達18.89%。頭頸癌發生的位置接近口腔與咽喉，與面部生理機能，如吞嚥、發聲及呼吸等息息相關。因為咽喉部位周遭有脊髓及許多血管、淋巴結，不但增加腫瘤轉移的機會，也造成手術切除的困難度。因此，放射線輔以化學治療也成為重要的治療策略。當前，由核能研究所開發的銻-188-微脂體奈米藥物具備短程體內放射治療的效果，透過Cerenkov光學造影及奈米單光子散射電腦斷層掃描/電腦斷層掃描(nanoSPECT/CT)等多重模組分子影像技術，我們已經探討銻-188-微脂體奈米藥物在肺癌及頭頸癌的小動物原位腫瘤模式的積聚情形，配合生物分布分析的結果，證實此類藥物於單次施打後可以積聚在肺癌及頭頸癌腫瘤細胞。雖然積聚程度上有所不同。但兩種腫瘤模式都顯示可被銻-188-微脂體奈米藥物抑制它們的生長。在療效方面，從Kaplan-Meier生存曲線看出雖然腫瘤生長獲得抑制，但動物存活狀況尚差強人意，顯示雖然該類藥物的療程仍需最適化。總言之，本計畫針對銻-188-微脂體奈米藥物在兩種重要的人類腫瘤之治療效果已獲得初步的結論，相信將對該藥物的臨床試驗提供重要的研究基礎。

關鍵詞：銻-188-微脂體、人類非小細胞肺癌、分子影像、頭頸癌

Abstract

Based on the reports of Department of Health, malignant tumors remain occupying the top rank of mortality and morbidity of Taiwan. Among them, lung cancers and head and neck squamous cell carcinoma (HNSCC) represent top four and top six of Taiwanese cancer types, respectively. Chemotherapy is the primary approach of lung cancer treatment (62.8%), yet the side effects and chemoresistance of chemotherapy are the major difficulties of this method. For the HNSCC, the mortal rate is up to 18.89%, and mostly male, that occurs in oral cavity and Pharynx and Larynx areas. Because of the difficulty of surgery, the external radiation combining chemotherapy is the primary strategy to cure HNSCC, while the problem of this method

is similar to the lung cancer treatment. Using the nanopharmaceuticals that consist of liposomes, targeting on the tumor lesions through the enhanced permeability and retention (EPR) effect is gradually accepted because of the biocompatibility of this agent. Liposome embedded Re-188 radiopharmaceutical has been developed for colon cancer treatment with good preclinical outcome. We have also demonstrate the accumulation of this radiopharmaceutical in HNSCC and lung cancer in tumor-bearing mice, based on the Cerenkov luminescent imaging and nanoSPECT/CT as well as the biodistribution analysis. Although the rate of accumulation in lung cancer and HNSCC is different, the *in vivo* growth of both tumor types is suppressed significantly by liposome embedded Re-188 radiopharmaceutical. For the therapeutic efficacy, the Kaplan-Meier survival curves show the survival rate was enhanced in lung cancer treatment, but was mildly increased in HNSCC treatment. Because the treatment of both tumor types was single dosage of this agent, the current results suggest that the optimization of therapeutic agenda remain to be designed. Taken together, this project has concluded that liposome embedded Re-188 radiopharmaceutical can suppress the tumor growth of lung cancer and HNSCC, but the dosage and treatment agenda need to be investigated in the future. Our data are also critical for the clinical trial using this radiopharmaceutical.

Keywords: Liposome embedded Re-188 radiopharmaceutical, lung cancer, HNSCC, multimodality molecular and genetic imaging, evaluation of therapeutic efficacy

I. 前言

根據衛生福利部國民健康署癌症統計報告，肺癌已經躍升各惡性腫瘤致死率首位；而罹患肺癌之診斷死亡比為1.2 案/死亡，此外，頭頸部(包含口腔、口咽及下咽)癌症國人男性十大癌症死亡率已攀升至第四位，每年粗估死亡率高達18.89%。頭頸癌發生的位置接近口腔與咽喉，與面部生理機能，如吞嚥、發聲及呼吸等息息相關。因為咽喉部位周遭有脊髓及許多血管、淋巴結，不但增加腫瘤轉移的機會，也造成手術切除的困難度。因此，放射線輔以化學治療也成為重要的治療策略。當前，由核能研究所開發的銻-188-微脂體奈米藥物具備短程體內放射治療的效果，並且可經由癌細胞新生血管疏漏特性(新生血管通透性增強及停滯效應)而積聚於病灶處，

抑制腫瘤的生長。整體來說，對於癌症的治療與生長抑制，針對發生轉移後的末期癌症作為主要研究，已成為現今生技製藥產業的重點項目。

本計劃為前一年度之延續，在先前研究中本實驗室除了成功進行奈米級銻-188 微脂體之人類非小細胞肺癌原位腫瘤與原位頭頸部腫瘤小鼠模式的療效評估，並利用體外光學及核子醫學造影技術追蹤。有關肺癌的相關研究已經發表於2014年的Journal of Nuclear Medicine (2014; 55:1-7)，本研究報告將回顧並整理銻-188 對肺癌的研究成果，並討論未來應加強研究的部分。此外，銻-188 可顯著地積聚於原位頭頸癌，而原位頭頸部腫瘤小鼠模式的Kaplan-Meier生存曲線中也可看出單一劑量的銻-188-微脂體藥物治療組與控制組相較之下，前者確實有延長生存的趨勢，但從腫瘤生長曲線觀察，銻-188對頭頸癌的抑制在治療後期顯示抑制效果會下降。這一現象顯示銻-188 藥物的療程應該要再重新設計或調整。

II. 主要內容

本實驗室先前已成功建立人類肺癌及頭頸癌小鼠模式，透過銻-188-微脂體藥物，完成對人類頭頸癌及肺癌的治療效果探討。先前研究證實銻-188-微脂體藥物可透過EPR效應使其專一地累積在植入人類FaDu頭頸癌及H292肺癌腫瘤的小鼠原位接種(orthotopically implantation)，並可以與分子影像相輔相成。透過生物體分布評估分析(Bio-distribution)、療效評估、藥物動力學、輻射劑量評估、以及多模組分子核醫造影分析，具體呈現了銻-188-微脂體藥物抑制人類頭頸癌及肺癌的效果。以期未來送上臨床為癌症病患之一大福音。目前銻-188-微脂體藥物已通過衛生福利部的人體試驗許可，並已進行第零期及第一期的臨床試驗，期望未來與本研究計畫的持續進行相輔相成，成功地將該藥物推廣到世界各國。

總結來說，本計畫之實驗目的可歸納如下：

1. 評估銻-188 微脂體藥物對小鼠之人類非小細胞肺癌原位腫瘤模式的藥物積聚狀況
2. 評估並比較人類非小細胞肺癌的皮下腫瘤及原位腫瘤模式的血管分布情形
3. 分析銻-188 微脂體藥物之體內器官劑量分布
4. 了解人類頭頸癌細胞在接受銻-188-微脂體藥物治療之後的分子抑癌機制
5. 了解銻-188 微脂體藥物於人類頭頸部腫瘤小鼠之生物體分布

III. 結果與討論

第一部分 - 人類非小細胞肺癌相關研究

在非小細胞肺癌方面，我們以NCI-H292細胞為主，先植入三合一報導基因表現載體以建立動物模型，之後利用PEG修飾後的銻-188 微脂體核醫藥物進行治療，核種由核研所提供，與微脂體透過BMEDA整合後以薄層色層分析確認整合效果。首先在第一部我們提供了小動物皮下肺癌模式的實驗結果。先將腫瘤細胞種植於免疫缺

乏小鼠的左大腿側，待四周後長成腫瘤再以尾靜脈注入銻-188-微脂體或是銻-188-BMEDA，利用Nano-SPECT/CT可看到銻-188-微脂體在48小時還有積聚效果，但銻-188-BMEDA則無。但是在小動物的原位腫瘤模式，不管是用IVIS、nanoSPECT/CT或是Cerenkov luminescent imaging冷光影像，其積聚效果都並不顯著，顯示肺部的腫瘤可能血管分布及生長不如皮下來的旺盛。

在原位肺癌腫瘤模式中，我們利用生物分布分析檢測銻-188-微脂體藥物在不同器官的累積，可看到在正常老鼠及荷腫瘤老鼠的肝臟、脾臟、尿液與糞便中有較高的放射量，而左肺葉跟右肺葉則是在荷腫瘤老鼠呈現不同的放射量。有腫瘤之左肺葉相較於無腫瘤之右肺葉其銻-188-微脂體藥物累積有較高的趨勢，但若是正常老鼠則兩肺葉沒有明顯的差距。因為原位肺癌腫瘤跟皮下肺癌腫瘤的藥物積聚情形不同，我們也進一步比較兩者的血管新生情形。首先將老鼠腫瘤自肺葉摘除後，用IVIS之冷光影像確認左肺葉有腫瘤形成。接下來進行組織切片，同時比較皮下腫瘤的組織切片，並觀察血管新生之標記分子CD31的表現量。結果可看出皮下腫瘤可染到較多的CD31血管標記分子，染色點的數量定量結果也顯示此一趨勢。因此，雖是同一肺癌細胞H292，但其確實有引誘血管新生的能力，端看其在體內種植的位置。結果也顯示出原位肺癌其實對銻-188-微脂體藥物非常敏感，因為只要有少量積聚就會讓腫瘤生長速率變慢，且延長動物存活（已於先前報告提出數據）。

在藥物動力學的方面，可看到注射370MBq/100ml銻-188-BMEDA與銻-188-微脂體，並於不同的時間點自尾巴取1 μ l的血來做時間與活性之藥物動力學分析比較，其他資訊包括比較銻-188-BMEDA與銻-188-微脂體之藥物動力分析參數，球狀實質體的輻射吸收劑量與質量的關係。另外，我們也由此評估了不同器官的體內劑量，可看出腫瘤的有效劑量遠高於其他組織的劑量。

第二部分 - 人類頭頸癌相關研究

本實驗室建立原位的頭頸癌模式，將帶有入三合一報導基因的FaDu頭頸癌細胞種入裸鼠下咽部，待其長成腫瘤後，利用PEG修飾的銻-188 微脂體核醫藥物以尾靜脈注入動物體內，並分析其生物體內分布，比較了原位頭頸癌腫瘤的藥物處理生物分布情形，可看到銻-188-BMEDA不會在腫瘤處積聚，但是銻-188-微脂體確有明顯的積聚效果。將結果製圖後如圖八。藥物動力學各項參數也顯示銻-188-微脂體在動物體內有較長的停留，顯示其積聚於腫瘤的效果；同時，利用Cerenkov luminescent imaging可明顯偵測到銻-188-微脂體藥物積聚於原位頭頸癌。腫瘤的訊號可利用IVIS偵測，而藥物於同位置的累積再用microSPECT/CT觀測。

藥物動力學的分析方面，我們分別注射100 μ Ci/100ml銻-188-BMEDA與銻-188-微脂體，並於各時間點自尾巴取1 μ l的血，可看出銻-188-微脂體確實有較好的體內循環或是停留效果。在療程方面可看到，採單一劑量給予，劑量為80%最高耐受劑量(MTD)，共640 μ Ci，每組

共 9 隻小鼠，自治療日起算共 24 日逐週使用生物冷光造影技術追蹤並記錄，結果比較銻-188-BMEDA 與銻-188-微脂體治療 FaDu 頭頸癌腫瘤小鼠的生長分析看出後者有明顯的腫瘤抑制效果。腫瘤的生長速率量測則由其腫瘤的冷光報導基因在 luciferin 作用後的光子訊號計算之。有趣的是，雖然腫瘤生長受到銻-188-微脂體的抑制，但在後期發現腫瘤的生長有追上處理銻-188-BMEDA 的趨勢，顯示單一次劑量處理的限制。最後由生存曲線 Kaplan-Meier 圖表顯示，控制組動物較治療組生存期較短，但並不若肺癌腫瘤的結果明顯。有鑑於此，我們利用免疫病理染色細胞生長標記分子 Ki-67 的表現量，發現在銻-188-BMEDA 跟銻-188-微脂體處理五天後，後者確實可有效抑制細胞生長，但是處理後二十八天則細胞的生長並未受到明顯抑制。因此，這些結果顯示單一劑量的銻-188-微脂體治療頭頸癌可能效果有限，因此未來應該設計不同的治療時程與劑量，以提升腫瘤的抑制效果，但這些研究成果仍顯示，銻-188-微脂體藥物應可抑制人類頭頸癌的生長，對正在進行臨床研究的本藥物是一件令人振奮的消息。

IV. 結論

本計畫之研究成果，就肺癌研究方面已經刊登於 Journal of Nuclear Medicine (Journal of Nuclear Medicine, 2014; 55:1 - 7)。我們建立了肺癌與頭頸癌的原位腫瘤小動物模式對藥物的前臨床研究，可進一步探討腫瘤生長的微環境是否會影響銻-188-微脂體藥物對療效的影響，特別是肺癌的藥物積聚並無法直接由分子影像方式觀測到，但腫瘤的生長抑制與動物壽命卻明顯提升，顯示原位肺癌的生長微環境有助於藥效的發揮。而頭頸癌的治療則是可透過各種分子影像模組看到明顯的藥物積聚，早期腫瘤的抑制也顯著，但是後期則不明顯，似乎也影響了動物的存活時間。因此，頭頸癌的生長環境可能不適合單一劑量的銻-188-微脂體發揮最大效果，必須改善治療劑量及時間，但需進一步的研究探討。有關可能的機制也希望可以在未來的計畫中執行。目前銻-188-微脂體已經進入臨床一期的藥物試驗，也透過核能研究所的合作申請中華民國、美國及歐盟等專利。在社會氛圍對核能有疑慮的情況下，核子醫學的研發應用應該要加強深化，以期改善國人觀念，或者將核能研究的能量導向對人體健康有幫助的醫學研究，將可提高核能應用的接受度。

參考文獻

- Greish, K., *Enhanced permeability and retention (EPR) effect for anticancer nanomedicine drug targeting*. Methods Mol Biol, 2010. **624**: p. 25-37.
- Maeda, H., *The enhanced permeability and retention (EPR) effect in tumor vasculature: the key role of tumor-selective macromolecular drug targeting*. Adv Enzyme Regul, 2001. **41**: p. 189-207.
- Emfietzoglou, D., et al., *Liposome-mediated radiotherapeutics within avascular tumor spheroids: comparative dosimetry study for various radionuclides, liposome systems, and a targeting antibody*. J Nucl Med, 2005. **46**(1): p. 89-97.
- Emfietzoglou, D., K. Kostarelos, and G. Sgouros, *An analytic dosimetry study for the use of radionuclide-liposome conjugates in internal radiotherapy*. J Nucl Med, 2001. **42**(3): p. 499-504.
- Keng, G.H., et al., *Preliminary experience in radionuclide therapy of hepatocellular carcinoma using hepatic intra-arterial radio-conjugates*. Ann Acad Med Singapore, 2002. **31**(3): p. 382-6.
- Edelman, M.J., et al., *Targeted radiopharmaceutical therapy for advanced lung cancer: phase I trial of rhenium Re188 P2045, a somatostatin analog*. J Thorac Oncol, 2009. **4**(12): p. 1550-4.
- Chang, Y.J., et al., *Therapeutic efficacy and microSPECT/CT imaging of 188Re-DXR-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor model*. Nucl Med Biol, 2010. **37**(1): p. 95-104.
- Chen, M.H., et al., *MicroSPECT/CT imaging and pharmacokinetics of 188Re-(DXR)-liposome in human colorectal adenocarcinoma-bearing mice*. Anticancer Res, 2010. **30**(1): p. 65-72.
- Hong, H., et al., *Non-invasive cell tracking in cancer and cancer therapy*. Curr Top Med Chem, 2010. **10**(12): p. 1237-48.
- Cortesi, M., et al., *New prospective for non-invasive detection, grading, size evaluation, and tumor location of prostate cancer*. Prostate, 2010. **70**(15): p. 1701-8.
- Miyagawa, M., et al., *Non-invasive imaging of cardiac transgene expression with PET: comparison of the human sodium/iodide symporter gene and HSV1-tk as the reporter gene*. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2005. **32**(9): p. 1108-14.
- Chen, L.C., et al., *Pharmacokinetics, dosimetry and comparative efficacy of 188Re-liposome and 5-FU in a CT26-luc lung-metastatic mice model*. Nucl Med Biol, 2012. **39**(1): p. 35-43.
- Lin, L.T., et al., *Evaluation of the therapeutic and diagnostic effects of PEGylated liposome-embedded 188Re on human non-small cell lung cancer using an orthotopic small-animal model*. J Nucl Med, 2014. **55**(11): p. 1864-70.
- Bao, A., et al., *186Re-liposome labeling using 186Re-SNS/S complexes: in vitro stability, imaging, and biodistribution in rats*. J Nucl Med, 2003. **44**(12): p. 1992-9.

以氟-18-FP-(+)-DTBZ PET 及碘-123-FP-CIT SPECT 評估和厚朴酚衍生物治療 6-OHDA 誘發巴金森氏病動物模型之神經修復效果

Visualization of Restorative Effect of Honokiol derivative on Neurotoxicity in 6-OHDA-induced Hemiparkinsonism Mice using [¹⁸F]FP-(+)-DTBZ PET and [¹²³I]FP-CIT

計畫編號：103-2623-E-182-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：魏孝萍

e-mail：spwey@mail.cgu.edu.tw

計畫參與人員：翁啟昌、陳佩玫

執行單位：長庚大學醫學影像暨放射科學系

摘要

以第二型囊泡單胺轉運體 (VMAT2) 為標靶之 [¹⁸F]FP-(+)-DTBZ PET 掃描，已被使用在人類及神經毒劑誘發之動物模型，以偵測巴金森氏病之病理發展。VMAT2 造影可作為有利的生物指標，測定治療藥物對於巴金森氏病之多巴胺功能下降的保護效果。本研究以 [¹⁸F]FP-(+)-DTBZ PET 檢視和厚朴酚 (MH101) 衍生物，MH101，對 6-羥基多巴胺 (6-OHDA) 誘導巴金森氏病小鼠之神經毒性保護效果，並以體內法自動輻射曝光顯影實驗 (ex-vivo autoradiography) 及免疫組織化學染色 (immunohistochemistry) 驗證活體影像之準確性。
關鍵詞：第二型囊泡單胺轉運體、[¹⁸F]FP-(+)-DTBZ、巴金森氏病、MH101、6-羥基多巴胺、體內法自動輻射曝光顯影實驗。

Abstract

[¹⁸F]FP-(+)-DTBZ positron emission tomography (PET) imaging targeting cerebral vesicular monoamine transporter subtype 2 (VMAT2) has been successfully used to determine the pathological progress of Parkinson's disease (PD) in human and neurotoxin-induced animal models. VMAT2 imaging may serve as a valuable biomarker to measure the effectiveness of therapeutic drugs aiming to preserve declined dopaminergic function of PD. This study evaluated the restorative effect of honokiol derivative, MH101, on 6-hydroxydopamine (6-OHDA)-induced neurotoxicity in a hemiparkinsonism mouse model using [¹⁸F]FP-(+)-DTBZ in-vivo PET imaging. Ex-vivo autoradiography (ARG) and tyrosine hydroxylase immunohistochemistry (TH-IHC) studies were carried out to confirm the abundance of dopaminergic neurons.
Keywords: Vesicular monoamine transporter subtype 2, [¹⁸F]FP-(+)-DTBZ, Parkinson's disease, MH101, 6-hydroxydopamine, ex-vivo autoradiography.

I. 前言

巴金森氏病 (Parkinson's disease; PD) 是常一種常見的神經退化性疾病，為腦部多巴胺神經元受損或退化導致多巴胺分泌不足所引發的運動功能障礙症候群 [1]，臨床上會出現運動遲緩 (bradykinesia)、震顫

(resting tremor)、肌肉僵直 (rigidity)、姿態不穩 (postural instability) 等病徵 [2]。PD 的致病機制目前仍然不明。為了進一步研究 PD 的致病機制、疾病發展過程，以及 PD 治療藥物的開發，許多模擬 PD 的動物模型被提出並進行相關的研究 [3]，其中以神經毒劑 6-羥基多巴胺 (6-OHDA) 誘導多巴胺神經元損傷的小動物為最被廣泛應用在相關研究的動物模型之一。

在發展恢復多巴胺神經元的藥物研究方面，有科學家發現許多植物富含的多酚化合物 (polyphenols)，其抗氧化及抗發炎作用具有神經保護作用 [4-7]，其中由傳統中藥植物厚朴 (Magnolia officinalis) 樹皮提煉出來的多酚成份厚朴酚 (magnolol) 以及和厚朴酚 (honokiol) 已被證實能夠拮抗 6-OHDA [8] 或 MPTP [9] 誘導而產生類巴金森氏症異常 (旋轉行為、平衡失調) 的行為，並具有神經保護作用 [10]。因此，本研究使用氟-18 標誌 FP-(+)-DTBZ ([¹⁸F]9-fluoropropyl-(+)-dihydro tetra-benzazine) microPET 評估 6-OHDA 處理之 PD 小鼠經 MH101 治療後之腦部 VMAT2 分布。

II. 主要內容

6-OHDA 巴金森氏病動物準備

實驗動物採用 10-11 週齡 NMRI 雄性小鼠。以 1.5% isoflurane 氣體麻醉後，再以動物立體手術定位儀搭配頭骨鑽洞之手術對動物右腦側紋狀體 (striatum) 進行定位，座標為 AP: - 0.9 mm; ML: - 1.9 mm; DV: - 2.2 mm (相對於 bregma)。以 infusion pump 將 6-OHDA 溶液 (濃度為 15 μ g/ μ l，溶於生理實驗水中，內含 0.02% 維生素 C) 緩慢注射至小鼠腦中 (1 μ l/min)。

MH101 治療

將 MH101 溶解於玉米油中，配置濃度為 0.5 mg/ml。將欲進行治療的動物先以 1.5% isoflurane 氣體麻醉後，以腹腔注射 (劑量為 5 mg/kg) 方式對動物進行治療，連續治療 14 天。

氟-18-FP-(+)-DTBZ 製備

氟-18-FP-(+)-DTBZ 由林口長庚醫院核子醫學科迴旋加速器中心使用美國 Avid Radiopharmaceuticals 公司提供的前驅物製備。

氟-18-FP-(+)-DTBZ microPET 造影

小鼠造影前先於尾靜脈留置 PE50 管以供完整注射放射

藥物。在 isoflurane 氣體麻醉下，小鼠靜脈注射氟-18-FP-(+)DTBZ (0.6 mCi, 0.1 ml) 30 分鐘後進行 20 分鐘 PET 造影。

氟-18-FP-(+)DTBZ microPET 影像分析

氟-18-FP-(+)DTBZ PET 影像分別與小鼠之 MRI template 進行對位並進行空間標準化 (spatial normalization) 後，將所有動物之影像以 template 上內建之感興趣區域 (volume of interests, VOI) 進行不同腦區影像數值的分析，包括左右側紋狀體、中腦以及參考區域小腦，用於後續特异性結合比值的計算。

氟-18-FP-(+)DTBZ 自動輻射顯影

將經過氟-18-FP-(+)DTBZ 活體造影之各動物組別犧牲、腦部組織切片後，將一半載有組織之玻片貼於磷光板曝光 24 小時。最後將磷光板放入 FujiFilm FLA-5000 影像分析儀進行影像掃描及定量。另一半之切片 (10 μ m) 置於 -80°C 冰箱保存供免疫組織染色 tyrosine hydroxylase (TH) 使用。

III. 結果與討論

在 6-OHDA 損傷組，normal、vehicle、7 day after 6-OHDA lesioned 及 21 day after 6-OHDA lesioned 組，Survival ratio 依序分別為 $1.00 \pm 0.03\%$ 、 $1.01 \pm 0.03\%$ 、 $0.56 \pm 0.07\%$ 及 $0.35 \pm 0.03\%$ 。在 MH101 治療組，vehicle + oil、6-OHDA + oil、6-OHDA + MH101 (1 mg/kg) 及 6-OHDA + MH101 (5 mg/kg) 組，Survival ratio 依序分別為 $1.00 \pm 0.01\%$ 、 $0.38 \pm 0.08\%$ 、 $0.59 \pm 0.06\%$ 及 $0.68 \pm 0.13\%$ 。與 7 day after 6-OHDA lesioned 組比較，延長損傷 14 天未接受治療的 21 day after 6-OHDA lesioned 組，其 Survival ratio 下降 21%；以 MH101 (5 mg/kg) 治療 14 天之 6-OHDA + MH101 (5 mg/kg) 組，其 Survival ratio 上升 12%。自動輻射曝光顯影實驗之中 vehicle + oil、7 day after 6-OHDA lesioned、6-OHDA + oil 及 6-OHDA + MH101 (5 mg/kg) 組，其 % PSL/mm² of intact side 依序分別為 $1.00 \pm 0.02\%$ 、 $0.43 \pm 0.12\%$ 、 $0.30 \pm 0.07\%$ 及 $0.58 \pm 0.12\%$ 。6-OHDA 損傷使 [¹⁸F]FP-(+)DTBZ 攝取下降；MH101 具有神經恢復效果，其結果與 PET 造影趨勢一致。免疫組織化學染色結果顯示酪胺酸羥化酶得表現量與自動輻射曝光顯影實驗結果吻合。

IV. 結論

本研究計畫完成以 [¹⁸F]FP-(+)DTBZ PET 活體影像掃描方式來檢測 6-OHDA 誘發巴金森氏病動物模型施以 MH101 治療後，其腦部 VMAT2 數量的改變，驗證核醫分子影像在活體檢測 MH101 恢復受損神經的能力，並以自動輻射曝光顯影實驗及免疫組織化學染色驗證 PET 活體影像之準確性。本研究計畫結果亦顯示 6-OHDA 會隨時間增加持續傷害多巴胺神經系統。腹腔注射低劑量 (1 mg/kg) MH101 治療 14 天，能拮抗多巴胺神經系統持續受 6-OHDA 損傷，具有神經保護的作用。而給予高劑量 (5 mg/kg) 之 MH101 治療，除了具有神經保護作用外，更有神經修復的功效驗證核醫分子影像在活體檢測 MH101 恢復受損神經的能力，並據以運用影像更快速地發展及篩選檢測這一類衍生藥物神經藥理表現。

參考文獻

- [1] Hornykiewicz O. Biochemical aspects of Parkinson's disease. *Neurology* 1998; 51(2 Suppl 2): S2-S9.
- [2] Calne DB, Snow BJ, Lee C. Criteria for diagnosing Parkinson's disease. *Ann Neurol* 1992; 32 Suppl: S125-S127.
- [3] Duty S, Jenner P. Animal models of Parkinson's disease: a source of novel treatments and clues to the cause of the disease. *Br J Pharmacol* 2011; 164(4): 1357-1391.
- [4] Faust K, Gehrke S, Yang Y, Yang L, Beal MF, Lu B. Neuroprotective effects of compounds with antioxidant and anti-inflammatory properties in a Drosophila model of Parkinson's disease. *BMC Neurosci* 2009; 10: 109.
- [5] Moosmann B, Behl C. The antioxidant neuroprotective effects of estrogens and phenolic compounds are independent from their estrogenic properties. *Proc Natl Acad Sci USA* 1999; 96(16): 8867-8872.
- [6] Ramassamy C. Emerging role of polyphenolic compounds in the treatment of neurodegenerative diseases: a review of their intracellular targets. *Eur J Pharmacol* 2006; 545(1):51-64.
- [7] Soto-Otero R, Méndez-Alvarez E, Hermida-Ameijeiras A, Muñoz-Patiño AM, Labandeira-Garcia JL. Autoxidation and neurotoxicity of 6-hydroxydopamine in the presence of some antioxidants: potential implication in relation to the pathogenesis of Parkinson's disease. *J Neurochem* 2000;74(4): 1605-1612.
- [8] Chen HH, Lin SC, Chan MH. Protective and restorative effects of magnolol on neurotoxicity in mice with 6-hydroxydopamine-induced hemiparkinsonism. *Neurodegener Dis* 2011;8(5):364-374.
- [9] Muroyama A, Fujita A, Lv C, Kobayashi S, Fukuyama Y, Mitsumoto Y. Magnolol protects against MPTP/MPP(+)-induced toxicity via inhibition of oxidative stress in in vivo and in vitro models of Parkinson's disease. *Parkinsons Dis*. 2012;2012:985157.
- [10] Levites Y, Youdim MB, Maor G, Mandel S. Attenuation of 6-hydroxydopamine (6-OHDA)-induced nuclear factor-kappaB (NF-kappaB) activation and cell death by tea extracts in neuronal cultures. *Biochem Pharmacol* 2002; 63(1): 21-29.

結合銻-188-微脂體、化學治療、標靶藥物及遠隔放射治療應用於轉移性大腸直腸及口腔癌治療

Combination of ^{188}Re -liposome, chemotherapy/target therapeutic agents, and teletherapy for metastatic colorectal and oral cancer

計畫編號：103-2623-E-195-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳裕仁

e-mail：chenmdphd@gmail.com

計畫參與人員：游祥霖、劉欣怡、羅佳茜

執行單位：馬偕紀念醫院放射腫瘤科

摘要

惡性腫瘤的高致死率主要來自腫瘤出現轉移，開發轉移性腫瘤的治療策略一直是極具挑戰性和急迫性的課題。傳統上針對轉移性腫瘤的治療包括放射治療、化學治療、少部份手術切除，近年來標靶藥物的開發也廣被應用於有效控制腫瘤生長與抑制腫瘤轉移的發生。針對轉移性腫瘤，必須系統性給與化療藥物或標靶藥物，但此治療策略最主要的限制在於治療藥物所引發的副作用以及細胞毒性。奈米微脂體的發展改善了這個問題，以奈米微脂體作為治療藥物載體可提高藥物在腫瘤特異性的聚積並增加藥物的滯留時間，大幅增加藥物的療效同時也降低藥物造成之副作用。除了治療應用外，奈米微脂體包覆放射性核種，例如銻-188，可同時兼具治療與影像監測雙重的功能。我們先前的研究顯示合併遠隔放射治療與近距放射治療 (^{188}Re -liposome) 在人類食道癌 BE-3 細胞中達到顯著效果，本研究期望開發轉移性大腸直腸癌與口腔癌的治疗方針，利用合併遠隔放射治療與近距放射治療(^{188}Re -liposome)、的治疗方式，以提高腫瘤毒殺專一性並涵蓋轉移性腫瘤及淋巴分布範圍，組合出最佳療程。目前研究結果顯示，遠隔放射治療在短時間可增加銻-188 微脂體在肺轉移食道癌細胞的聚積量。在轉移性腫瘤生長抑制效果方面，合併遠隔放射治療與銻-188 微脂體對於體積較小的肺轉移食道癌細胞抑制生長效果最佳，當轉移性腫瘤體積過大時，遠隔放射治療對腫瘤抑制的幫助變降低，但單獨給與銻-188 微脂體治療仍有不錯療效。此外，合併遠隔放射治療與銻-188 微脂體均無產生明顯生物毒性，表示此合併治療策略之副作用為可

接受範圍內。

關鍵詞：遠隔放射治療、近距放射治療、 ^{188}Re 微脂體、大腸直腸癌、口腔癌

Abstract

Treatment of metastatic malignant tumor is a challenging issue and urgently required as more than 90% deaths are due to direct or indirect effects of metastases. Traditional approaches for metastatic cancer treatment is similar to those used for primary tumors, including radiotherapy, chemotherapy, and surgery in rare cases. The major disadvantages for systematic administration of chemotherapy or targeted therapy drugs are the side effects and toxicity profiles. Nanoliposomes have been used as effective carriers for drug delivery due to their long circulating character and the enhanced permeability and retention effect at tumor sites. Thus, liposome-based drug delivery systems provide enhanced efficacy and reduced toxicity of chemotherapy or targeted therapy agents. In addition to therapeutic application, liposomes encapsulated with radionuclide (such as rhenium-188, ^{188}Re) possess both therapeutic (beta particle emission) and imaging (photon emission) functions. Our previous study demonstrates that the combination of radiotherapy (external beam radiotherapy, EBRT) and ^{188}Re -liposome (internal beam radiotherapy, IBRT) is promising in esophageal cancer. In this study, the optimal treatment sequencing and combination of EBRT, IBRT, chemotherapy/targeted therapies will be extended and explored in metastatic oral and colorectal

cancer to provide adequate coverage of metastatic foci and regional lymphatics and target tumor simultaneously. Current data indicated EBRT treatment increased the uptake of ^{188}Re -liposome at early time point in lung metastatic esophageal cancer xenografts. For tumor growth inhibition effect, combination of EBRT and ^{188}Re -liposome efficiently suppressed lung metastatic cancer cells when tumor volume is still small; however, lung metastatic esophageal cancer cells with bigger tumor volume showed no synergistic effect after EBRT and ^{188}Re -liposome combination. Biological toxicities examination data demonstrated combination of EBRT and ^{188}Re -liposome had acceptable adverse effects and is worthy to develop clinical application.

Keywords: external beam radiotherapy, internal beam radiotherapy, ^{188}Re -liposome, colorectal cancer, oral cancer

I. 前言

行政院衛生署統計公佈，民國 102 年十大癌症死亡率排名中大腸直腸癌為第三，口腔癌為第五。大腸直腸癌與口腔癌均為好發轉移的腫瘤類型，發生轉移的大腸直腸癌病人其五年存活率將由 64% 降至 12%，而口腔癌病人發生轉移其五年存活率便由 90% 降至 25-40%。顯示轉移性腫瘤為臨床治療最棘手的問題。

針對轉移性腫瘤，合併性治療策略包括手術切除、化學治療、放射治療、標靶治療為不可避免的治療方式，由於化學藥物之非特異性的聚積常導致病人整體不適，且合併化學治療與其他治療常出現難以接受的副作用，因此，我們期望利用微脂體(Liposome)特異性聚積在腫瘤處的特性，利用標幟核種銻-188(^{188}Re)的微脂體作為體內放射治療的治療策略，進一步合併體外放射治療，期望在無顯著生物毒性/副作用的條件下，達到更好的腫瘤控制效果。

II. 主要內容

建立肺轉移口腔癌之動物模式

我們先前動物模式結果顯示，人類口腔食道癌 BE-3 細胞可特異性聚積銻-188 微脂體，故先選擇此細胞建立肺轉移小鼠模式。利用穩定表現 Luciferase 基因之 BE-3 細胞，以尾靜脈注射方式注入裸鼠體內，每週觀察 Luciferase 在小鼠體內訊號分布情形與訊號強弱。我們發現，利用尾

靜脈注射方式建立肺轉移小鼠模式的成功機率不盡理想，僅約三成。另外三成小鼠易發生尾椎部位轉移。此外，尾靜脈注射後一週可觀察到肺部訊號，但此時細胞在肺部成長未呈現線性生長速度，須待四周後才可觀察到 Luciferase 訊號線性增長（圖一）。

分析銻-188 微脂體合併體外放射治療後之活度生物分布

為了解體外放射治療是否影響銻-188 微脂體生物活性分布，我們利用 NanoSPECT/CT 影像分析觀察。首先，利用尾靜脈注射方式建立肺轉移小鼠模式，待四週後，小鼠以腹腔注射 Luciferrin 確定 BE-3-luciferase 細胞於肺部聚積之訊號，將小鼠分為有無接受放射治療兩組。接受放射治療之肺轉移小鼠於肺部局部照射 1Gy，連續三天，於第三天運送小鼠至核研所以尾靜脈注射方式注入銻-188 微脂體（500 uCi），注射核種後 1h 與 24h 進行 NanoSPECT/CT 分析。影像結果顯示肺轉移小鼠注射核種後短時間在肺部呈現特異性聚積，接受放射治療後肺部活性依然存在（圖二）。由於肺轉移小鼠對於氣體麻醉較為敏感，接受放射治療組中其一小鼠肺部訊號較低，但於截取影像同時死亡，故較低訊號是否為真須待驗證。

分析銻-188 微脂體合併體外放射治療後之生物劑量分布

與上述實驗步驟相同，注射銻-188 微脂體 1 小時與 24 小時後，先擠出尿液，以二氧化碳方式犧牲老鼠後，取出各項器官組織，包括大腦、心臟、肺、食道、肝、胃、大腸、小腸、胰臟、脾、腎、睪丸、肌肉、皮膚、骨頭、骨髓、血液、糞便共十九樣。結果顯示體外放射治療可降低銻-188 微脂體短時間後於血液中分布量，在肺中分布量同樣也較低（表一）。由於此次實驗肺部腫瘤尚未大幅成長（尾靜脈注入細胞後一週），放射治療對銻-188 微脂體生物劑量分布的影響可能需在大的肺部腫瘤情況下較能觀察出差異性。

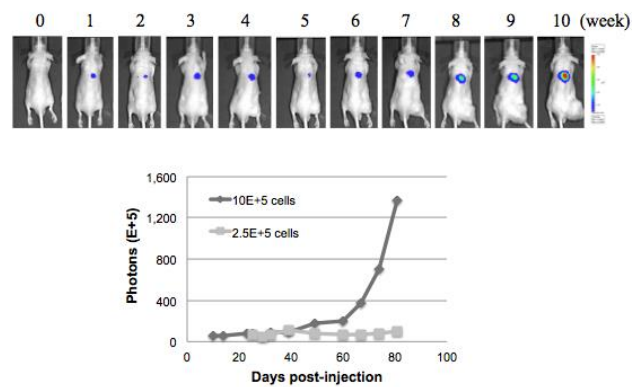
結合體外/體內放射治療之療效分析

我們觀察結合體外/體內放射治療隊不同腫瘤大小的療效分析。待尾靜脈注射 BE-3-luciferase 細胞一週（小腫瘤）或四週（大腫瘤）後，於馬偕醫院進行連續三天體外放射治療（每天 1

Gy)，經過二小時運送時間，於核研所進行體內放射治療，以尾靜脈注射銻-188微脂體(250或300 uCi)，一週後每週一次紀錄老鼠體重、腫瘤大小及活體影像。結果顯示老鼠體重隨時間減輕，有無放射線存在並無顯著差異，小的肺轉移腫瘤生長抑制在合併治療組中抑制效果最好，大的肺轉移腫瘤生長抑制在合併治療組中卻沒有更好的效用（圖三）。顯示大的肺轉移腫瘤接受單一銻-188微脂體治療效果最為顯著。

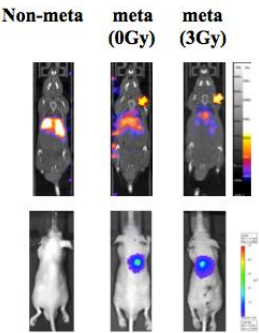
結合體外/體內放射治療之生物安全性分析

與療效實驗步驟相同，利用眼窩採血方式收集血液用於血球計數分析，剩餘血液進行離心取出血漿，新鮮測量肝功能指數ALT以及腎功能指數CRE。結果顯示合併治療和單獨治療相比，不會造成更高的免疫及肝腎功能傷害(圖四)，顯示合併治療或單一治療均無產生副作用。

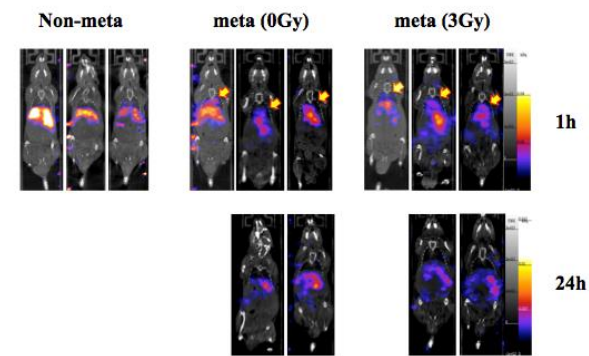


圖一、建立食道癌肺轉移小鼠。尾靜脈注射穩定表現luciferase基因之BE-3細胞後，僅有三成小鼠可於肺部生長。IVIS影像顯示注射後一週即可觀察到冷光訊號，但須待四週後，冷光訊號才呈現線性增加。

(A)



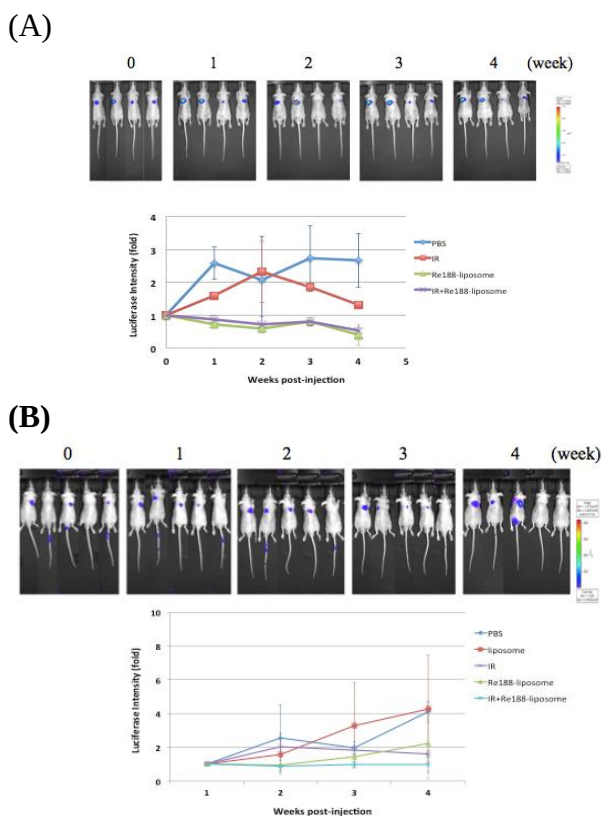
(B)



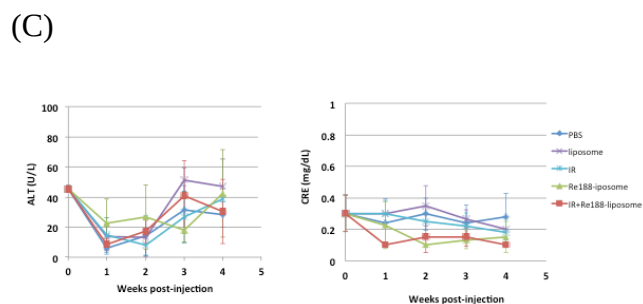
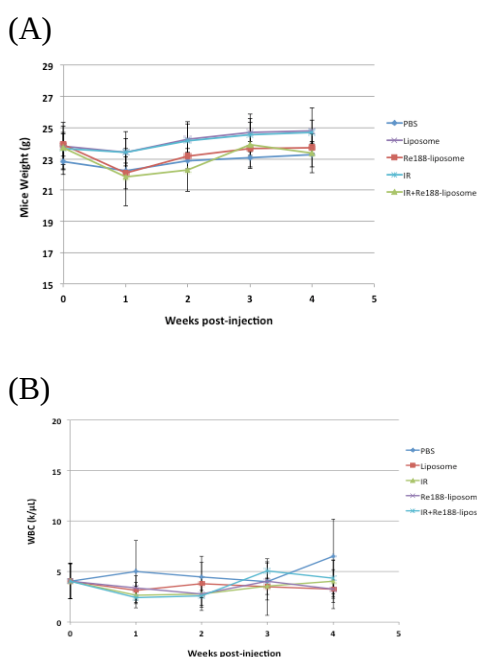
圖二、食道癌肺轉移小鼠銻-188微脂體活體影像。(A)相較於無腫瘤小鼠，肺轉移食道癌小鼠注射銻-188微脂體1h後確實發生肺部銻-188微脂體活度聚積(箭頭標示處)。(B)獨立三隻小鼠驗證肺轉移BE-3-luciferase細胞可特異性吸收銻-188微脂體(箭頭標示處)，長時間則無差異。

表一、有無放射治療合併之銻-188微脂體生物劑量分布

¹⁸⁸ Re-liposome	No tumor		Lung meta (0 Gy)		Lung meta (3Gy)	
	1 h	24 h	1 h	24 h	1 h	24 h
Organ						
Brain	0.52± 0.04	0.07±0.06	0.43± 0.60	0.16±0.04	0.63± 0.05	0.24±0.08
Heart	3.41± 0.83	1.58±1.15	4.28± 0.19	1.37±0.18	2.16± 0.20	1.54±0.67
Lung	5.67± 0.24	1.83±1.64	9.26± 1.51	2.61±0.46	6.60±1.07	2.47±0.52
Esophagus	2.47± 0.99	0.56±0.42	3.60± 0.61	0.97±0.14	3.69±0.03	1.24±0.40
Liver	20.64± 13.93	15.08±0.62	14.66± 1.22	15.34±2.41	10.61±4.29	13.35±6.44
Stomach	1.74± 0.23	0.90±0.34	1.76± 0.17	1.47±0.18	1.27±0.21	1.68±0.59
SI	5.43± 0.01	4.86±1.87	5.78± 0.62	6.54±2.63	2.36±1.00	7.24±0.90
LI	1.41± 0.06	2.83±1.24	1.60± 0.19	3.38±0.92	1.00±0.06	1.82±0.04
Pancreas	1.61± 0.30	0.49±0.24	2.29± 0.25	0.84±0.14	1.83±0.78	0.94±0.41
Spleen	9.94± 1.77	15.83±1.05	12.79± 0.69	12.84±2.18	10.73±2.09	14.06±5.11
Kidney	5.43± 1.04	2.86±1.97	9.40± 0.02	4.52±0.48	5.10±1.08	4.12±1.39
Testis	0.37± 0.19	0.19±0.12	0.57± 0.06	0.27±0.07	0.48±0.09	0.24±0.09
Muscle	0.28± 0.07	0.13±0.10	0.38± 0.10	0.36±0.21	0.23±0.03	0.33±0.05
Skin	0.48± 0.07	0.24±0.09	0.41± 0.02	0.43±0.12	0.55±0.08	0.49±0.11
Bone	0.30± 0.30	0.14±0.11	0.49± 0.13	0.20±0.12	0.20±0.03	0.30±0.12
Bone marrow	4.70±4.92	1.71±0.70	6.02± 2.69	1.12±0.02	2.05±0.03	1.00±0.15
Urine	18.02± 5.74	7.58±1.61	18.70± 0.38	12.69±1.17	15.10±8.33	7.35±4.61
Blood	23.79± 6.6	2.63±2.83	40.94± 1.42	6.07±1.09	13.56±13.47	7.81±3.20
Feces	2.73± 3.86	9.83±4.19	1.64± 0.95	23.89±7.05	2.63±3.55	21.32±23.36



圖三、合併體外/體內放射治療之腫瘤生長抑制分析。(A)大體積之肺轉移食道癌小鼠。(B)小體積之肺轉移食道癌小鼠。肺部冷光訊號定量結果顯示，合併體外/體內放射治療對於大體積肺轉移腫瘤生長抑制效果，與單獨體內放射治療無明顯差異。合併體外體內放射治療對於小體積肺轉移腫瘤則效果最佳。



圖四、合併體外/體內放射治療之生物安全性分析。(A)小鼠體重。(B)白血球數。(C)肝功能與腎功能指標。針對小體積肺轉移食道癌小鼠，不論小鼠體重、白血球數、肺功能指標ALT、腎功能指標CRE於單一治療或合併體外體內放射治療均落於安全數值範圍中。

III. 結果與討論

目前研究結果證實肺轉移食道癌 BE3 細胞可特异性攝入銻-188 微脂體。合併體外體內放射治療後，生物劑量分析顯示體外放射治療可降低銻-188微脂體短時間於血液中分布量，於肺的聚積劑量在放射線照射後同樣較低。

合併體外體內放射治療之療效分析顯示，針對體積小的肺轉移食道癌細胞，合併治療方式對腫瘤生長控制優於單一治療方式，當肺轉移食道癌細胞較大時，合併治療方式效果較差，單獨給與銻-188微脂體即達到抑制腫瘤生長效果。在生物安全性方面，白血球數與肝腎功能指標均顯示合併治療相較於單一治療方式，不會產生更高的生物毒性，指標數值均落於正常數值範圍之內。

IV. 結論

合併體外體內放射治療可有效抑制小體積肺轉移腫瘤生長速度，效果較單一放射治療方式更佳，且生物安全性評估上均為可接受的安全範圍內。

參考文獻

1. Siegel R, Naishadham D, Jemal A: **Cancer statistics, 2013.** *CA Cancer J Clin* 2013, **63**(1):11-30.
2. Wang HM, Chang TH, Lin FM, Chao TH,

- Huang WC, Liang C, Chu CF, Chiu CM, Wu WY, Chen MC *et al*: **A new method for post Genome-Wide Association Study (GWAS) analysis of colorectal cancer in Taiwan.** *Gene* 2013, **518**(1):107-113.
3. Tsai MH, Tsai CW, Tsou YA, Hua CH, Hsu CF, Bau DT: **Significant association of cyclin D1 single nucleotide polymorphisms with oral cancer in taiwan.** *Anticancer Res* 2011, **31**(1):227-231.
4. Lin CC, Lin HC: **Effects of surgeon and hospital volume on 5-year survival rates following oral cancer resections: the experience of an Asian country.** *Surgery* 2008, **143**(3):343-351.
5. Fried D, Mullins B, Weissler M, Shores C, Zanation A, Hackman T, Shockley W, Hayes N, Chera BS: **Prognostic significance of bone invasion for oral cavity squamous cell carcinoma considered T1/T2 by American joint committee on cancer size criteria.** *Head Neck* 2013:1-6.
6. Javed F, Al-Hezaimi K, Al-Rasheed A, Almas K, Romanos GE: **Implant survival rate after oral cancer therapy: a review.** *Oral oncology* 2010, **46**(12):854-859.
7. Watters AL, Epstein JB, Agulnik M: **Oral complications of targeted cancer therapies: a narrative literature review.** *Oral oncology* 2011, **47**(6):441-448.
8. Ito Y, Nakanishi H, Kodera Y, Hirai T, Nakao A, Kato T: **Characterization of a novel lymph node metastasis model from human colonic cancer and its preclinical use for comparison of anti-metastatic efficacy between oral S-1 and UFT/ LV.** *Cancer Sci* 2010, **101**(8):1853-1860.
9. Stec R, Bodnar L, Smoter M, Maczewski M, Szczylik C: **Metastatic colorectal cancer in the elderly: An overview of the systemic treatment modalities (Review).** *Oncol Lett* 2011, **2**(1):3-11.
10. Edwards MS, Chadda SD, Zhao Z, Barber BL, Sykes DP: **A systematic review of treatment guidelines for metastatic colorectal cancer.** *Colorectal Dis* 2012, **14**(2):e31-47.
11. Montagnani F, Chiriatti A, Turrisi G, Francini G, Fiorentini G: **A systematic review of FOLFOXIRI chemotherapy for the first-line treatment of metastatic colorectal cancer: improved efficacy at the cost of increased toxicity.** *Colorectal Dis* 2011, **13**(8):846-852.
12. Montagnani F, Chiriatti A, Turrisi G, Francini G, Fiorentini G: **A systematic review of FOLFOXIRI chemotherapy for the first-line treatment of metastatic colorectal cancer: improved efficacy at the cost of increased toxicity.** *Colorectal disease : the official journal of the Association of Coloproctology of Great Britain and Ireland* 2011, **13**(8):846-852.
13. Pohl A, Zhang W, Ning Y, Manegold PC, Lurje G, Lenz HJ: **Targeting metastatic colorectal cancer in 2008: a long way from 5-FU.** *Oncology (Williston Park)* 2008, **22**(4):456-462; discussion 462-453, 467-458, 474 passim.
14. Ahn JH, Kim TW, Lee JH, Min YJ, Kim JG, Kim JC, Yu CS, Kim WK, Kang YK, Lee JS: **Oral doxifluridine plus leucovorin in metastatic colorectal cancer: randomized phase II trial with intravenous 5-fluorouracil plus leucovorin.** *American journal of clinical oncology* 2003, **26**(1):98-102.
15. Reina JJ, Aparicio J, Salvador J, Pica JM, Rueda A, Lorenzo A, de la Puente CG, Borrega P, Moreno-Nogueira JA: **A multicenter phase II study of irinotecan (CPT-11) alternated with 5-fluorouracil and leucovorin as first-line treatment of patients with metastatic colorectal cancer.** *Cancer chemotherapy and*

16. Seium Y, Stupp R, Ruhstaller T, Gervaz P, Mentha G, Philippe M, Allal A, Trembleau C, Bauer J, Morant R *et al*: **Oxaliplatin combined with irinotecan and 5-fluorouracil/leucovorin (OCFL) in metastatic colorectal cancer: a phase I-II study.** *Annals of oncology : official journal of the European Society for Medical Oncology / ESMO* 2005, **16**(5):762-766.
17. Broadbridge VT, Karapetis CS, Price TJ: **Cetuximab in metastatic colorectal cancer.** *Expert Rev Anticancer Ther* 2012, **12**(5):555-565.
18. Ye LC, Liu TS, Ren L, Wei Y, Zhu DX, Zai SY, Ye QH, Yu Y, Xu B, Qin XY *et al*: **Randomized controlled trial of cetuximab plus chemotherapy for patients with KRAS wild-type unresectable colorectal liver-limited metastases.** *J Clin Oncol* 2013, **31**(16):1931-1938.
19. Andreadis C, Vahtsevanos K, Sidiras T, Thomaidis I, Antoniadis K, Mouratidou D: **5-Fluorouracil and cisplatin in the treatment of advanced oral cancer.** *Oral oncology* 2003, **39**(4):380-385.
20. Ruggeri EM, Carlini P, Pollera CF, De Marco S, Ruscito P, Pinnaro P, Nardi M, Giannarelli D, Cognetti F: **Long-term survival in locally advanced oral cavity cancer: an analysis of patients treated with neoadjuvant cisplatin-based chemotherapy followed by surgery.** *Head & neck* 2005, **27**(6):452-458.
21. Cassell A, Grandis JR: **Investigational EGFR-targeted therapy in head and neck squamous cell carcinoma.** *Expert opinion on investigational drugs* 2010, **19**(6):709-722.
22. Oude Blenke E, Mastrobattista E, Schiffelers RM: **Strategies for triggered drug release from tumor targeted liposomes.** *Expert Opin Drug Deliv* 2013, **10**(12):1711-1722.
23. Kostarelos K, Emfietzoglou D: **Tissue dosimetry of liposome-radionuclide complexes for internal radiotherapy: toward liposome-targeted therapeutic radiopharmaceuticals.** *Anticancer research* 2000, **20**(5A):3339-3345.
24. Hafeli UO, Roberts WK, Meier DS, Ciezki JP, Pauer GJ, Lee EJ, Weinhaus MS: **Dosimetry of a W-188/Re-188 beta line source for endovascular brachytherapy.** *Med Phys* 2000, **27**(4):668-675.
25. Argyrou M, Valassi A, Andreou M, Lyra M: **Rhenium-188 production in hospitals, by w-188/re-188 generator, for easy use in radionuclide therapy.** *Int J Mol Imaging* 2013, **2013**:290750.
26. Moghimi SM, Hamad I: **Liposome-mediated triggering of complement cascade.** *J Liposome Res* 2008, **18**(3):195-209.
27. Fanciullino R, Ciccolini J: **Liposome-encapsulated anticancer drugs: still waiting for the magic bullet?** *Curr Med Chem* 2009, **16**(33):4361-4371.
28. Chang YJ, Chang CH, Chang TJ, Yu CY, Chen LC, Jan ML, Luo TY, Lee TW, Ting G: **Biodistribution, pharmacokinetics and microSPECT/CT imaging of 188Re-bMEDA-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor animal model.** *Anticancer Res* 2007, **27**(4B):2217-2225.

^{99m}Tc-Sestamibi 心肌灌注 SPECT 血流儲存指標的定量與臨床驗證

Development of Coronary Flow Reserve Index with Quantitative ^{99m}Tc-Sestamibi Myocardial Perfusion SPECT and the Clinical Validation with N13-Ammonia PET

計畫編號：103-2623-E-075-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：e-mail：dcwu@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：吳道正、胡蓮欣、楊邦宏、徐景龍、陳穎柔、許百靈

執行單位：台北榮民總醫院 心臟內科/核醫部

摘要

本研究計畫擬通過臨床上的常規門控心肌灌注 SPECT 檢查獲得可以偵測心血管病的血流指標，我們研究團隊先前發明以動態 SPECT (dynamic SPECT) 進行心肌血流定量的技術，得到 stress 和 rest 心肌血流值 (ml/min/g) 和心肌血流儲備值(CFR)，初步和心導管做比較後證實使用 SPECT 也能和正子造影(PET)一樣，成功解決了傳統灌注對於多條血管病變所產生低估冠心病問題，因此提了高 SPECT 核醫心臟檢查的臨床應用價值。此研究擬定以 N13-Ammonia PET 所測得的 MBF/CFR 做為金標準，在 10 位為正常人或低冠心病風險病患身上，同時進行 N13-Ammonia MBF/CFR 和 MIBI SUV 測量，將 SPECT stress SUV，rest SUV 和 CFR-index 後和 N13-Ammonia PET 做比對，證實 MBF/CFR 和 SUV/CFR-index 的關係，並實際運用於 9 位冠心病患，以驗證 SPECT SUV/CFR-index 方法的臨床可行性。

關鍵字：心肌血流定量，^{99m}Tc-Sestamibi 門控 SPECT、標準攝取值、心肌血流儲備值指標。

Abstract

Previously our group developed the technique of using dynamic SPECT for myocardial blood flow (MBF) quantitation to obtain MBF values with the unit of (ml/min/g) and coronary flow reserve (CFR) with ratio of stress MBF and rest MBF. The initial validation demonstrated that SPECT MBF/CFR with Tc99m-Sestamibi (MIBI) tracer has the same capability of PET MBF/CFR to detect multi-vessel coronary artery disease (CAD), successfully resolving the issue of CAD underestimation by traditional myocardial perfusion imaging (MPI).

This research further improved the imaging technique to enable the quantitation of CFR measurement with static ECG-gated SPECT acquisition by utilizing the previously developed image reconstruction method to quantify the myocardial uptake in unit of Bq/ml and to calculate standardized

uptake value (SUV) with additional correction for MIBI extraction fraction in myocardium and cardiac motion and output that affect the accuracy of SUV values. The CFR-index was used to calculate by the ratio of stress/rest SUV values.

For initial clinical validation, this research used MBF/CFR measured from N13-Ammonia PET as the gold standard. Ten normal healthy volunteers received both N13-Ammonia PET and MIBI SPECT to obtain the relation of stress PET MBF and stress SPECT SUV, rest PET MBF and rest SPECT SUV, PET CFR and SPECT CFR-index. The method of SPECT SUV/CFR-index was then validated for CAD detection.

Keywords: myocardial flow quantitation, ^{99m}Tc-Sestamibi ECG-gated SPECT, standardized uptake value, coronary flow reserve index.

I. 前言

以正子 PET 造影進行心肌血流定量應用於心血管病的診斷在國外已經普遍使用且已成為無創心血管病診斷的金標準，但在台灣由於正子藥物昂貴與不普及等問題，無法效仿國外在臨床上使用 PET 心肌血流定量。近年來 SPECT 心肌血流定量的技術已經被成功開發，證實通過動態 SPECT 的採集與完善的物理校正亦可進行心肌血流定量的工作，且臨床價值高於傳統 SPECT 心肌灌注檢查，但目前的 SPECT 與 SPECT/CT 系統約 1/3 可以進行動態 SPECT 掃描，而 2/3 儀器無法進行，因此發展應用門控 SPECT 進行心肌血流定量方法俱臨床必要性。

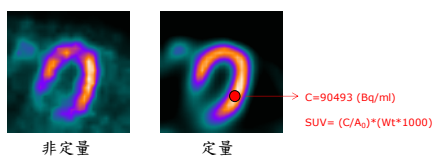
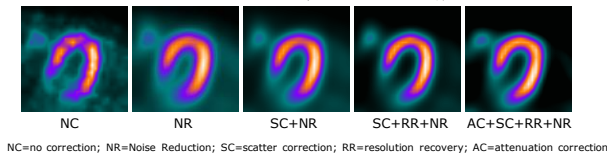
II. 主要內容

本研究計畫通完整物理校正對門控 SPECT 影像進行定量重建，先去除影像中物理干擾問題，再通過動態心臟假體的研究獲得部分容積效應與心壁厚度的關聯性，從而修正部分容積效應導致 MIBI 絕對攝取的低估，以獲得準確的 MIBI 攝取值，再通過標準攝取值(standard uptake value, SUV)計算公式獲得心肌標準攝取值，並以 MIBI 的 Extraction Fraction 修正低估負荷時的標準攝取值，同時以靜息的 rate pressure product (RPP)修正靜息的

標準攝取值，再以(stress SUV/rest SUV)計算出CFR-index。通過 10 為正常自願者，將 MIBI SUV/CFR-index 與 NH₃ PET 的血流指標進行比對，以驗證 MIBI SUV/CFR-index 與 NH₃ PET 的關聯性，並通過 9 位心血管病患者與正常自願者比對，以驗證 MIBI 血流指標可成為偵測心血管病的潛力。

III. 結果與討論

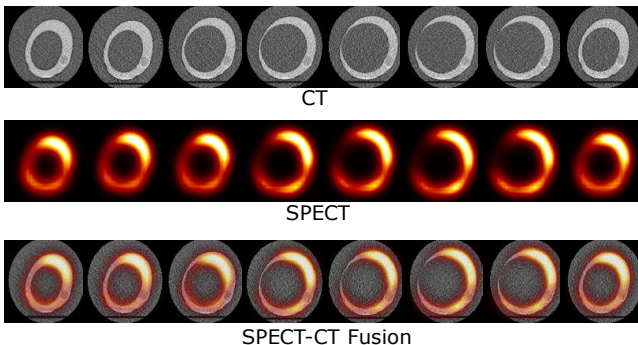
通過 QSRS SPECT 影像定量重建技術可獲得心肌的 MIBI 絕對攝取量，但仍需要解決部分容積效應問題。下圖為各項物理校正對圖像產生的影響。



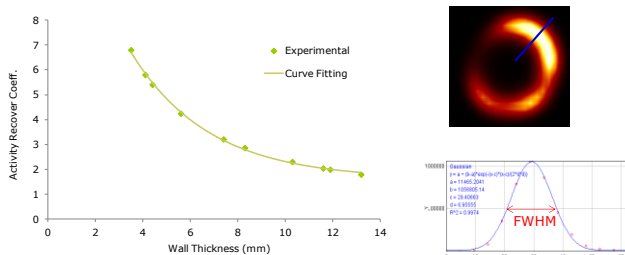
雖然影像已經是定量，但部分容積效應仍可造成對於絕對攝取量的低估，下圖為動態心臟假體填充均勻的^{99m}Tc水溶液，當心壁厚度變薄時，影像上的絕對攝取量亦形成低估的情況如下圖：



動態心臟假體



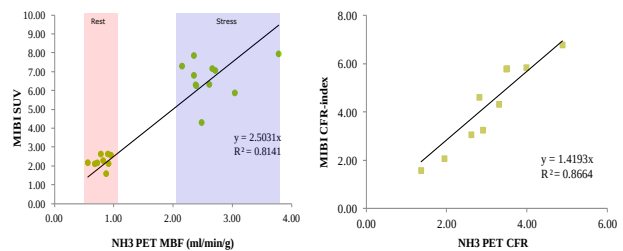
通過動態心臟假體實驗數據可獲得心壁厚度與絕對攝取量的低估程度關聯性，進而計算可獲得與厚度相關的絕對濃度恢復係數曲線如下圖。



此修正曲線可應用於修正人體心肌部分容積效應

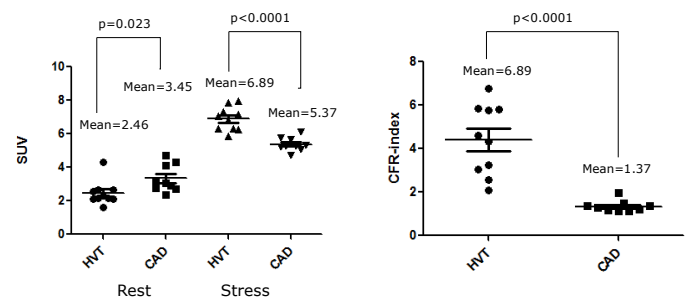
的問題，以獲得準確的心肌標準攝取值。本研究通過正常自願者的 MIBI SUV 與 NH₃ PET 血流的比對，證實 rest/stress MIBI SUV 與 rest/stress NH₃ 絕對血流、MIBI CFR-index 與 NH₃ CFR 皆俱很好的關聯性如下圖。

健康自願者



本研究過正常受測者與心血管病患者比對顯示兩族群的 MIBI SUV 與 CFR-index 存在統計學差異如下圖，因此 MIBI 血流指標俱可應用於偵測心血管病的潛力。

健康自願者 vs 心血管病患者



IV. 結論

本研究初步證實無法進行動態 SPECT 掃描的機器亦可通過臨床的心肌門控 SPECT 掃描可獲得準確的 SUV 與 CFR-index 值，此方法學可應用於心血管病的偵測。未來研究方向應該加大病例數，以再確認 MIBI SUV 與 CFR-index 的臨床價值。同時需要研究此方法學對於心血管病診斷的敏感性(sensitivity)與特异性(specificity)、在心血管病治療處置指導的臨床價值、在心血管病治療處置指導的臨床價值與在心血管病療效評估的臨床價值。

參考文獻

- [1] Ziadi MC, Dekemp RA, Williams K, et al. Does quantification of myocardial flow reserve using rubidium-82 positron emission tomography facilitate detection of multivessel coronary artery disease? J Nucl Cardiol 2012 Aug;19(4):670-80.
- [2] Herzog BA, Husmann L, Valenta I, et al. Long-term prognostic value of 13N-ammonia myocardial perfusion positron emission tomography added value of coronary flow reserve. J Am Coll Cardiol 2009;54: 150-6.
- [3] Murthy VL, Naya M, Foster CR, et al. Improved cardiac risk assessment with noninvasive measures of coronary flow reserve. Circulation 2011;124:2215-24.
- [4] Hsu B, Chen FC, Wu TC, Huang WS, Hou PN, Chen CC, Hung GU. Quantitation of myocardial blood flow and myocardial flow reserve with ^{99m}Tc-sestamibi

dynamic SPECT/CT to enhance detection of coronary artery disease. *Eur J Nucl Med Mol Imagin.* 2014;41(12):2294-306.

- [5] Hung GU, Chen WJ, Chen FC, Hsu BL. Tc99m-Sestamibi dynamic SPECT/CT for myocardial flow (MBF) quantitation in normal subjects. *J Nucl Med* 53(1):411P 2012.
- [6] Chen WJ, Chang TT, Liu WJ, Hung GU, Lin CY, Hsu BL. Dynamic SPECT/CT protocol to characterize time activity curves from post injection of Tc99m-Sestamibi (MIBI) myocardium perfusion tracer. *J Nucl Med* 52(1):490P 2011.
- [7] Sherif HM, Nekolla SG, Saraste A, Reder S, Yu M, Robinson S, Schwaiger M. Simplified quantification of myocardial flow reserve with flurpiridaz F 18: validation with microspheres in a pig model. *J Nucl Med.* 2011 Apr;52(4):617-24.

發展銨-111 標誌蛙皮素胜肽類似物於金奈米粒子之技術及其生物體分佈

Development of In-111 labeled active targeting bombesin peptide analogue on gold-nanoparticle and biological evaluation in a tumor-bearing animal model

計畫編號：103 - NU - E - 010 - 002 - NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳傳霖

e-mail：clchen2@ym.edu.tw

計畫參與人員：詹振勳、林萬里、孟凡傑

執行單位：國立陽明大學醫放系

摘要

利用固相胜肽合成法合成序列為 MLHGVAWQC 之胃泌素類似胜肽，將此特定序列為之胜肽結合於金奈米粒子並修飾上分子量 2000 之 PEG 及標誌上銨 111 得到 ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs 標靶胜肽奈米金粒子藥物，利用細胞攝取，生物分佈及影像驗證其作為奈米標靶藥物之可行性，研究顯示此奈米藥物有不錯之體外穩定度。於人類攝護腺癌及乳癌細胞的細胞攝取結果細胞-培養基活度比 (cell-to-medium count ratio, C/M 比) 在 24 小時分別為 6.09 ± 0.58 及 5.26 ± 0.73 。生物分佈結果顯示腫瘤-肌肉活度比 (tumor-to-muscle count ratio, T/M 比) 在注射 ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs 後 4 及 24 小時後分別為 3.88 ± 2.01 及 8.00 ± 2.99 ，顯示此一 ^{111}In -標誌奈米金粒子於細胞攝取及生物分佈結果相驗證對於表現胃泌素釋放胜肽受體之腫瘤細胞及荷腫瘤動物之專一結合能力、未來將有做為腫瘤熱治療藥物之可行性。
關鍵詞：奈米金，胃泌素，銨 111。

Abstract

Gold nanoparticles have a number of useful properties that make them highly attractive agents for cancer therapy and molecular imaging, particularly their low toxicity and biocompatibility. Gastrin-releasing peptide receptor (GRPR) is highly expressed in a significant number of human malignancies such as prostate, breast and non-small cell lung cancer. The bombesin (BBN), a 14-amino acid peptide that is an analogue of human gastrin-releasing peptide (GRP), binds to gastrin-releasing peptide receptors (GRPR) with very high affinity and specificity. In this project, gold nanoparticles will be conjugated with bombesin analogue, a 9-amino acid peptide (MLHGVAWQC) and labeled with radionuclides In-111 to afford active targeting radio-peptide-gold-nanoparticles (^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs). The radiochemical purity of ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs was higher than 90%. The in vitro stability of nanoparticle was showed the >80% in serum for 67 h. The cell-to-medium ratio of PC-3 and MB231 cells was 6.09 ± 0.58 and 5.26 ± 0.73 at 24 h, respectively. The result of biodistribution showed tumor-to muscle ratio (T/M ratio) was respectively 3.88 ± 2.01 and 8.00 ± 2.99 at 4 and 24 h after i.v. injection of ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs. This preclinical study show that the novel BBN modified radiolabeled gold nanoparticle possess specific

accumulation in human prostate cancer (PC-3). The results of this study may provide valuable information for targeted cancer therapy from bench to clinics.

Keywords: gold nanoparticle, bombesin, gastrin releasing peptide receptor, thermotherapy, cancer therapy

I. 前言

奈米金粒子具生物相容、低毒等特性，使其可應用在光熱治療、分子影像、疾病治療等領域。另外惡性腫瘤如攝護腺、乳癌及非小細胞肺癌等常過度表現胃泌素釋放胜肽受體，而蛙皮素胜肽對此類胃泌素釋放胜肽受體具有高度的親和力，因此蛙皮素胜肽之類似物修飾於奈米金上將有潛力作為主動標靶的奈米治療藥物，及應用於腫瘤之熱治療領域，運用短鏈 9 個胺基酸的蛙皮素胜肽之類似物 (其序列為 MLHGVAWQC) 結合上 DTPA 及雙硫基進而修飾於奈米金粒子上，並藉由放射性銨-111 (^{111}In) 標誌得到 ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs 標靶胜肽奈米金粒子藥物，生物分佈及藥物動力學結果，評估活體生物分佈做為放射標靶治療及腫瘤熱治療藥物之可行性。

II. 主要內容

利用固相胜肽合成法合成序列為 MLHGVAWQC 之胜肽，在與硫辛酸衍生物 (Maleimido-Lipoamide) 及 DTPA 反應，其產物可利用質譜儀及核磁共振儀來驗證。透過 PEG-Lipoamide 及 DTPA-BBN-Maleimido-Lipoamide 的結合，可得到最後的化合物 BBN-PEG-DTPA-AuNP。以動態光散射儀測量粒徑，並與 In-111 標幟，並透過離心來純化，得到放射性標靶奈米金粒子 ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs。此一 ^{111}In -標誌奈米金粒子於人類攝護腺癌 (PC-3) 及乳癌 (MB231) 細胞之攝取情形，並將此一 ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs 於荷人類攝護腺腫瘤 (約 100 mm^3) 的裸小鼠，於 1, 4, 24 及 48 小時等時間點進行生物分佈實驗。

III. 結果與討論

^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs 其放射化學純度試超過 90%。藥物的體外穩定度在血清 67 小時後，其放射純度仍大於 80%。在細胞攝取中於人類攝護腺癌及乳癌細胞的細胞-培養基活度比 (cell-to-medium count ratio, C/M

比) 在 24 小時分別為 6.09 ± 0.58 及 5.26 ± 0.73 。生物分佈結果顯示腫瘤-肌肉活度比 (tumor-to-muscle count ratio, T/M 比) 在注射 ^{111}In -DTPA-BBN-AuNPs 後 4 及 24 小時後分別為 3.88 ± 2.01 及 8.00 ± 2.99 。

IV. 結論

本研究成功將蛙皮素 (BBN) 胜肽修飾於奈米金粒子，並建立放射性銨-111 之標誌及純化方法，其生物實驗顯示此一 ^{111}In -標誌奈米金粒子於細胞攝取及生物分佈結果相驗證對於表現胃泌素釋放胜肽受體之腫瘤細胞及荷腫瘤動物之專一結合能力、未來將有做為腫瘤熱治療藥物之可行性。

參考文獻

1. Waksal HW. Role of an anti-epidermal growth factor receptor in treating cancer. *Cancer Metastasis Rev.* 1999;18(4):427-436.
2. Murphy CJ, Gole AM, Stone JW, et al. Gold nanoparticles in biology: beyond toxicity to cellular imaging. *Acc Chem Res.* 2008;41(12):1721-1730.
3. Van Cutsem E, Kohne CH, Hitre E, et al. Cetuximab and chemotherapy as initial treatment for metastatic colorectal cancer. *N Engl J Med.* 2009;360(14):1408-1417.
4. Cho EC, Glaus C, Chen J, Welch MJ, Xia Y. Inorganic nanoparticle-based contrast agents for molecular imaging. *Trends Mol Med.* 2010;16(12):561-573.
5. Melancon MP, Lu W, Yang Z, et al. In vitro and in vivo targeting of hollow gold nanoshells directed at epidermal growth factor receptor for photothermal ablation therapy. *Mol Cancer Ther.* 2008;7(6):1730-1739.
6. Au L, Zhang Q, Cogley CM, et al. Quantifying the cellular uptake of antibody-conjugated Au nanocages by two-photon microscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry. *ACS Nano.* 2010;4(1):35-42.
7. Lu W, Xiong C, Zhang G, et al. Targeted photothermal ablation of murine melanomas with melanocyte-stimulating hormone analog-conjugated hollow gold nanospheres. *Clin Cancer Res.* 2009;15(3):876-886.
8. Tkachenko AG, Xie H, Coleman D, et al. Multifunctional gold nanoparticle-peptide complexes for nuclear targeting. *J Am Chem Soc.* 2003;125(16):4700-4701.
9. Cherukuri P, Glazer ES, Curley SA. Targeted hyperthermia using metal nanoparticles. *Adv Drug Deliv Rev.* 2010;62(3):339-345.
10. Moody TW, Jensen, R.T. Bombesin receptor antagonists. *Drugs of the Future* 1998, 23:1305.
11. Ting G, Chang CH, Wang HE. Cancer nanotargeted radiopharmaceuticals for tumor imaging and therapy. *Anticancer Res.* 2009;29(10):4107-4118.
12. Vallabhajosula S, Kuji I, Hamacher KA, et al. Pharmacokinetics and biodistribution of ^{111}In - and ^{177}Lu -labeled J591 antibody specific for prostate-specific membrane antigen: prediction of 90Y-J591 radiation dosimetry based on ^{111}In or ^{177}Lu ? *J Nucl Med.* 2005;46(4):634-641.
13. Chuang KH, Wang HE, Cheng TC, et al. Development of a universal anti-polyethylene glycol reporter gene for noninvasive imaging of PEGylated probes. *J Nucl Med.* Jun 2010;51(6):933-941.
14. Lin YY, Li JJ, Chang CH, et al. Evaluation of pharmacokinetics of ^{111}In -labeled VNB-PEGylated liposomes after intraperitoneal and intravenous administration in a tumor/ascites mouse model. *Cancer Biother Radiopharm.* 2009;24(4):453-460.

運用 4-[¹⁸F]-ADAM/animal PET 研究中藥的神經保護作用(I)

Investigating the neuroprotective effect of Chinese herbal medicines using 4-[¹⁸F]-ADAM/animal PET(I)

計畫編號：103-NU-E-016-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：馬國興

e-mail：kuohsing91@yahoo.com.tw

計畫參與人員：呂紹瑋、林家望

執行單位：國防醫學院生物及解剖學研究所

摘要

憂鬱症 (depression) 可能導致國家、社會及經濟蒙受極大的危害與損失，許多研究已證實憂鬱症會造成腦中血清素轉運體 (serotonin transporter) 密度降低，進一步了解致病機轉以選擇適當的治療藥物有其實際的需要，因此，本計畫目的為利用動物正子斷層攝影 (animal-PET) 搭配 4-[¹⁸F]-ADAM 建立臨床前篩藥平台 (preclinical screening platform)，以評估中草藥於憂鬱症大鼠模式之腦中血清素轉運體神經保護 (neuroprotection) 作用。先前本實驗室發現三種中草藥—川芎、黃柏與黃芩可降低類憂鬱症小鼠模式的血中 corticosterone 濃度、緩解強迫游泳試驗 (force swimming test, FST) 的絕望程度、與改善類憂鬱症小鼠之大腦海馬迴神經新生的減少。本計劃將運用動物正子斷層攝影搭配 4-[¹⁸F]-ADAM 評估川芎對類憂鬱症大鼠腦中血清素轉運體之神經保護作用。經由此計畫驗證川芎在大鼠腦部的神經保護效應，並可研究 4-[¹⁸F]-ADAM/animal-PET 是否可作為臨床前藥物篩選平台的工具。

關鍵詞：慢性壓力、對類憂鬱症大鼠模式、川芎、小動物正子造影

Abstract

Depression may lead to national, social and economic harm and loss seriously. Many studies have proven that depression may cause the reduction of brain serotonin transporter (SERT) density. Further understanding of the pathogenesis and finding of the treatment are imperative needed. The purpose of this project is to assess the neuroprotective effect of the Chinese herbal medicines (CHMs) in depression-like rat model using the animal positron emission tomography (animal-PET) coupled with 4-[¹⁸F]-ADAM. Previously, we found three CHMs, Rhizome Chuanxiong, Radix Phellodendri and Radix Scutellaria, may reduce the blood corticosterone concentration, relieve the despair in force swimming test (FST), and improve the neurogenesis of hippocampus in the depression-like mice model. In this project, the animal-PET coupled with 4-[¹⁸F]-ADAM will be used to monitor the status of serotonin transporters in depression-like rat model with or without the Rhizome Chuanxiong treatment. After implement this project, the neuroprotective effect of these Rhizome Chuanxiong in serotonergic system will be elucidated and the feasibility of the drug screening platform using 4-[¹⁸F]-ADAM/animal-PET may be clarified.

Keywords: chronic mild stress, depression-like rat model, Rhizome Chuanxiong, animal-PET.

I. 前言

長期慢性壓力可能造成如憂鬱症 (depression) 等精神性疾病，而導致罹病之病患失去生活能力，甚至因病自殺造成國家、社會及經濟蒙受極大的危害與損失，已成為不可忽視的重要研究課題。

憂鬱症的病理機轉仍然不是相當清楚；然而，許多研究已證實憂鬱症會造成海馬迴神經幹細胞新生數量下降，導致受損神經細胞因長時間缺乏修補與替換而造成退化現象 [1]。另一方面，憂鬱症會影響腦中血清素系統，包括血清素 (serotonin) 濃度以及血清素轉運體 [serotonin transporter (SERT)] 密度降低 [2]。血清素轉運體是位於血清素神經元突觸前的一種蛋白質，主要功能為調控突觸血清素濃度，為評估血清素神經元完整性的重要生物指標 [3, 4]。此外；因為血清素轉運體為抗憂鬱劑之主要結合標的，其在憂鬱症所扮演的角色也特別引起關注 [5-7]。

以往學者探討憂鬱症所引發之神經退化，僅能藉由憂鬱症病患遺體以傳統方法評估，但這些傳統研究方式 (例如：腦區切片染色法) 往往對於憂鬱症病患在罹病後不同時間點之體內生化轉變無法及時瞭解，所得到的觀察結果無法與活體腦中的變化相吻合，對於憂鬱症病患經治療後各階段的反應也難以評量。

因此，適當的放射性結合物 (radioligand) 配合正子斷層攝影，對於人類罹患憂鬱症後產生之影響及相對應於血清素轉運體之變化，應可提供直接且深入之及時性資訊。最近我們研究團隊已發展一種使用 [¹⁸F] 標誌的新血清素轉運體放射性藥物：4-[¹⁸F]-ADAM (Shiue et al., 2003b)，先前在齧齒類與非人類靈長類的數據已顯示 4-[¹⁸F]-ADAM 對血清素轉運體具有高度的專一性 (specificity) 及親和力 (affinity) [8]。運用創新技術建立可靠的評估平台，藉以篩選具抗憂鬱潛力之候選藥物，同時提供憂鬱症病患神經退化之及時資訊，實有其迫切之必要性。

II. 主要內容

本計畫中我們將更進一步運用 4-[¹⁸F]-ADAM 配合小動物正子斷層攝影，研究慢性壓力誘導之類憂鬱症老鼠之血清素轉運體變化，並且研究川芎對於類憂鬱症大鼠之血清素系統是否具有神經保護作用。

本研究使用 Sprague Dawley 大鼠 (SD rat) 進行研究。大鼠分成 3 組，第 1 組為對照組。第 2 組以慢性壓力引發憂鬱症，操作時程表詳列於表 1. [9]。第 3 組以慢性壓力引發憂鬱症，施壓期間以胃管灌食 150 mg/kg 川芎，連續灌食 35 天，每天 1 次。

各組動物在實驗進行前與實驗開始 Day 35 接會測量並記錄體重變化。Day 34 進行強迫游泳試驗 [forced swimming test (FST)]。Day 35 進行 4-[¹⁸F]-ADAM/animal-PET 造影，評估各組大鼠腦中血清素轉運體的變化。各組動物再 Day 35 會進行抽血，並以 LC-MS-MS 測量血液中 corticosterone 濃度。所有的實驗程序皆符合國防醫學院動物管理委員會所制訂之倫理規範。

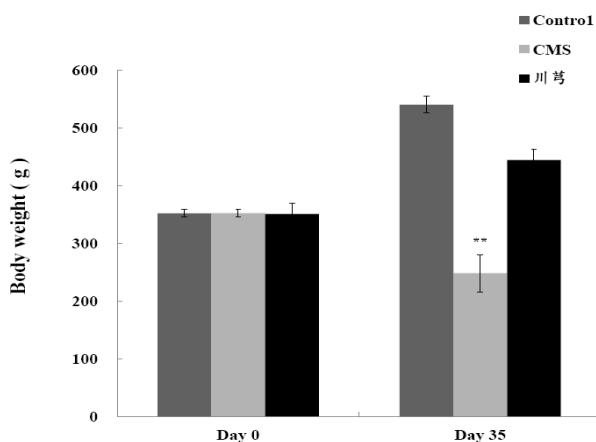
表 1. 慢性壓力模式操作時程表

	Thursday	Friday	Saturday	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday
Daytime	Confinement to a restricted space	Reversed light/dark cycle	Damp bedding	Reversed light/dark cycle	Confinement to a restricted space	Reversed light/dark cycle	Damp bedding
Night	Water deprivation		Food deprivation		Water deprivation		Food deprivation

III. 結果與討論

(一) 體重變化 (Body weight change)

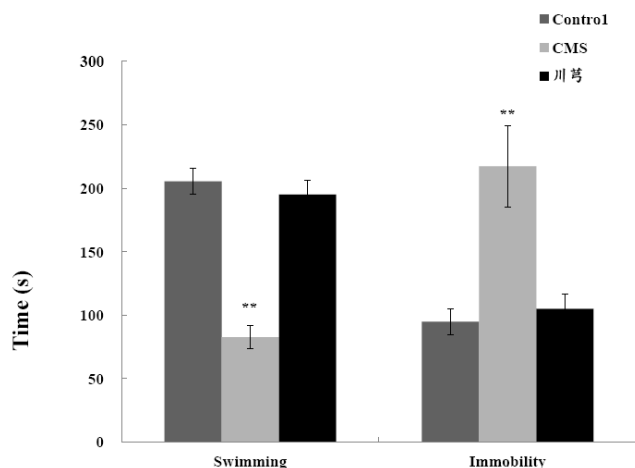
正常大鼠經過 35 天後體重較第 0 天增加 53%，慢性壓力組大鼠體重則較第 0 天明顯減少 29%，與正常組大鼠體重比較也有顯著差異 (** $p<0.01$ ；圖一)。顯示慢性壓力可能會影響大鼠食慾，進而造成體重減少。川芎組(慢性壓力並每日灌食川芎之大鼠)經過 35 天後體重較第 0 天不但不會減少，而且增加 26.6%，川芎 (Rhizome Chuanxiong) 能改善慢性壓力造成之體重下降。



圖一、控制組、慢性壓力組與川芎組大鼠於實驗第 0 天與第 35 天體重變化 (mean $\pm$ SD, $n=6$; ** $p<0.01$ ，第 35 天慢性壓力大鼠體重與控制組比較顯著減少)。

(二) 強迫游泳試驗 (Force swimming test, FST)

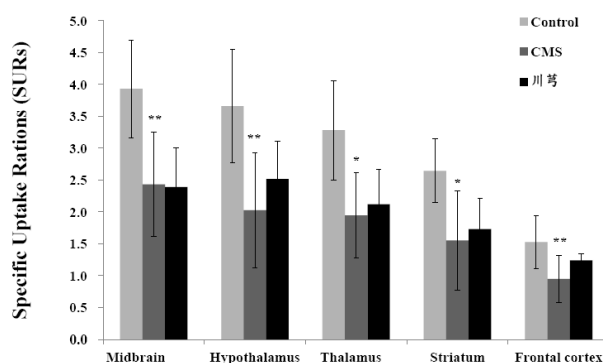
本實驗於實驗開始第 35 天將大鼠放入水中後，第一次完全靜止不動為開始分析紀錄 5 分鐘 (300 秒) 內游泳與靜止情形 (圖二)。慢性壓力大鼠游泳時間 82.7 秒與靜止時間 217.3 秒，與正常大鼠游泳時間 205.3 秒與靜止時間 94.7 秒，比較皆有顯著差異，代表慢性壓力大鼠憂鬱症產生的絕望反應明顯高於正常大鼠。川芎組(慢性壓力並每日灌食川芎之大鼠)游泳時間 195 秒與靜止時間 105 秒，川芎 (Rhizome Chuanxiong) 能改善慢性壓力造成之絕望感。



圖二、控制組與慢性壓力組大鼠強迫游泳測試之比較圖，途中分別記錄兩組大鼠游泳時間與靜止時間 (mean $\pm$ SD, $n=6$; ** $p<0.01$)。

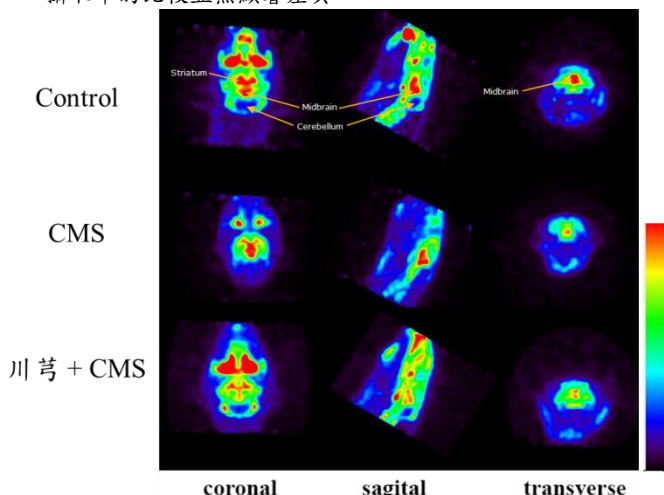
(三) 4-[¹⁸F]-ADAM/animal-PET 造影結果

使用 4-[¹⁸F]-ADAM 搭配 animal PET 觀察慢性壓力大鼠 (CMS) 與控制組大鼠 (Control) 腦部血清素轉運體 (serotonin transporter, SERT) 之表現情形。影像量化分析結果顯示慢性壓力大鼠各腦區之專一攝取率 (specific uptake ratios, SURs) 皆低於正常大鼠 (圖三)。4-[¹⁸F]-ADAM/animal-PET 造影之結果顯示，本計畫目前已成功建立慢性壓力誘導之憂鬱症大鼠，且造成慢性壓力大鼠腦部血清素轉運體表現量下降。川芎 (Rhizome Chuanxiong) 能改善慢性壓力造成之腦部血清素轉運體下降。慢性壓力 (CMS) 大鼠之專一攝取率 (Midbrain: 2.4 ± 0.8 ; Hypothalamus: 2.0 ± 0.9 ; Thalamus: 1.9 ± 0.7 ; Striatum: 1.6 ± 0.8 ; Frontal cortex: 0.9 ± 0.4)，與正常大鼠之專一攝取率 (Midbrain: 3.9 ± 0.8 ; Hypothalamus: 3.7 ± 0.9 ; Thalamus: 3.3 ± 0.8 ; Striatum: 2.6 ± 0.5 ; Frontal cortex: 1.5 ± 0.4) 比較皆有顯著差異。代表慢性壓力誘導類憂鬱症大鼠的血清素轉運體明顯低於正常大鼠。川芎組 (慢性壓力並每日灌食川芎之大鼠) 之專一攝取率 (Midbrain: 2.4 ± 0.6 ; Hypothalamus: 2.5 ± 0.6 ; Thalamus: 2.1 ± 0.5 ; Striatum: 1.7 ± 0.5 ; Frontal cortex: 1.2 ± 0.1)；此外，川芎組與慢性壓力組在對 4-[¹⁸F]-ADAM 攝取率的比較並無顯著差異。



圖三、正常組 (Normal) 與慢性壓力組 (CMS) 大鼠經 4-[¹⁸F]-ADAM 之正子影像量化分析結果，慢性壓力操作組大鼠各腦區之專一攝取率 (specific uptake ratios, SURs) 皆低於正常組大鼠 (** $p<0.01$; * $p<0.05$)。川芎組(慢性壓力

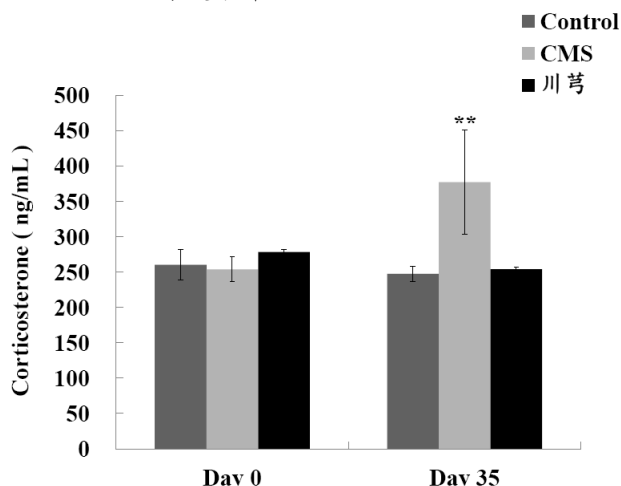
並每日灌食川芎之大鼠)與慢性壓力組在對 4-[¹⁸F]-ADAM 攝取率的比較並無顯著差異。



圖四、正常組 (Normal) 與慢性壓力組 (CMS) 大鼠經 4-[¹⁸F]-ADAM 之正子影像，慢性壓力操作組大鼠各腦區之專一攝取率 (specific uptake ratios, SURs) 皆低於正常組大鼠 (** $p < 0.01$; * $p < 0.05$)。川芎組(慢性壓力並每日灌食川芎之大鼠)與慢性壓力組在對 4-[¹⁸F]-ADAM 攝取率的比較並無顯著差異。

(四) 血液中 corticosterone 濃度

使用 LC-MS-MS 測量血中 corticosterone 濃度，慢性壓力組 (CMS) 大鼠第 35 日血中 corticosterone 濃度高於正常組大鼠 (** $p < 0.01$; * $p < 0.05$)。川芎組(慢性壓力並每日灌食川芎之大鼠)與慢性壓力組比較，血中 corticosterone 濃度下降。



圖五、慢性壓力組 (CMS) 大鼠第 35 日血中 corticosterone 濃度高於正常組大鼠 (** $p < 0.01$; * $p < 0.05$)。川芎組(慢性壓力並每日灌食川芎之大鼠)與慢性壓力組比較，血中 corticosterone 濃度下降。

IV. 結論

本實驗室已成功完成第一年計劃，內容如下：

- (1). 建立慢性壓力造成之類憂鬱症大鼠模式。
- (2). 建立強迫游泳試驗，評估慢性壓力造成之類憂鬱症大鼠之絕望感。
- (3). 建立 LC-MS-MS 測量血中 corticosterone 濃度試驗，評估慢性壓力造成之高血中 corticosterone 濃度。
- (4). 建立 4-[¹⁸F]-ADAM/animal-PET 造影，並藉由正子

造影技術評估慢性壓力造誘導類憂鬱症大鼠腦中血清素轉運體之改變情形。

- (5). 藉由正子造影技術評估川芎 (Rhizome Chuanxiong) 能改善慢性壓力造成之體重下降與絕望感，但對血清素轉運體並無顯示具有神經保護效果。

參考文獻

- [1] Wang, S.H., Zhang, Z.J., Guo, Y.J., Sui, Y.X., Sun, Y., 2010. Involvement of serotonin neurotransmission in hippocampal neurogenesis and behavioral responses in a rat model of post-stroke depression. *Pharmacol Biochem Behav* 95,129-137.
- [2] Bligh-Glover, W., Kolli, T.N., Shapiro-Kulnane, L., Dilley, G.E., Friedman, L., Balraj, E., Rajkowska, G., Stockmeier, C.A., 2000. The serotonin transporter in the midbrain of suicide victims with major depression. *Biol Psychiatry* 47, 1015-1024.
- [3] Nielsen, K., Brask, D., Knudsen, G.M., Aznar, S., 2006. Immunodetection of the serotonin transporter protein is a more valid marker for serotonergic fibers than serotonin. *Synapse* 59, 270-276.
- [4] Zhou, F.C., Tao-Cheng, J.H., Segu, L., Patel, T., Wang, Y., 1998. Serotonin transporters are located on the axons beyond the synaptic junctions: anatomical and functional evidence. *Brain Res* 805, 241-254.
- [5] Kugaya, A., Seneca, N.M., Snyder, P.J., Williams, S.A., Malison, R.T., Baldwin, R.M., Seibyl, J.P., Innis, R.B., 2003. Changes in human in vivo serotonin and dopamine transporter availabilities during chronic antidepressant administration. *Neuropsychopharmacology* 28, 413-420.
- [6] Meyer, J.H., Wilson, A.A., Ginovart, N., Goulding, V., Hussey, D., Hood, K., Houle, S., 2001. Occupancy of serotonin transporters by paroxetine and citalopram during treatment of depression: a [¹¹C]DASB PET imaging study. *Am J Psychiatry* 158, 1843-1849.
- [7] Meyer, J.H., Wilson, A.A., Sagrati, S., Hussey, D., Carella, A., Potter, W.Z., Ginovart, N., Spencer, E.P., Cheok, A., Houle, S., 2004. Serotonin transporter occupancy of five selective serotonin reuptake inhibitors at different doses: an [¹¹C]DASB positron emission tomography study. *Am J Psychiatry* 161, 826-835.
- [8] Shiue, G.G., Choi, S.R., Fang, P., Hou, C., Acton, P.D., Cardi, C., Saffer, J.R., Greenberg, J.H., Karp, J.S., Kung, H.F., Shiue, C.Y., 2003. N,N-dimethyl-2-(2-amino-4-¹⁸F-fluorophenylthio)-benzylamine (4-¹⁸F-ADAM): an improved PET radioligand for serotonin transporters. *J Nucl Med* 44, 1890-1897.
- [9] Willner, P., 2005. Chronic mild stress (CMS) revisited: consistency and behavioural-neurobiological concordance in the effects of CMS. *Neuropsychobiology* 52, 90-110.

從國際組織之標準檢驗我國核能安全管制與緊急應變之法制密度

Scrutiny of the Legal System of Taiwan's Nuclear Safety Regulation and Emergency Response under the Standard of International Organization

計畫編號：103-2623-E-031-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：程明修

e-mail：cmshiou@scu.edu.tw

計畫參與人員：林昱梅

執行單位：東吳大學法律學系（所）

摘要

台灣天然資源並不豐富，且身處海島及多地震帶上，自需著重能源議題，並對前述大自然所帶來之嚴峻挑戰全力以赴；簡言之，核能安全及緊急事變之法制層面上，吾人究應如何因應？為使原子能法制能完善因應目前社會情勢之需要，加強保護民眾之權益，原子能委員會曾於2002年提出「原子能基本法」草案。基本法雖尚未予以立法，惟各式具體管制法規卻早已實定法化。是本研究將設想：國內法令該如何隨未來基本法之制定，同時調整配套？而於觀察法規內容妥適性之過程中，不可避免地，需研究參酌相關國際組織所形成之標準，以期許我國機制能積極地隨全球脈動前進。其中，本研究將從IAEA 要求之安全基準切入，並將成果與我國類似制度進行比較對照，檢視現行法令何處具有不足之處；進而在以電力充沛作為維繫經濟發展之前提下，讓民眾之「生命、健康及財產」亦能充分受有保障，保持整體國力繼續在穩定中求取成長。

關鍵詞：核能安全、緊急應變、IAEA安全基準。

Abstract

Taiwan as a sea-island country on the seismic belt without plentiful natural resource, we should lay great stress on resource issues, and do more efforts to the severe challenge from Mother Nature. Briefly, what should we do for the legal system of nuclear safety and emergency accident? In order to make the atomic legal system perfectly suit with the modern society, and reinforce the protection for people's interests, Atomic Energy Council has drafted Atomic Basic Law (hereinafter referred to as "Basic Law") in 2002. Though Basic Law has not been legislated yet, different regulatory laws in atomic area have

already taken effect. Therefore, this research tries to find out: how to adjust these national regulation with the enactment of Basic Law in future. During the process of reviewing these regulations, this research will inevitably refer to those standards enacted by relative international organizations that makes our legal system improve with the global pulse. Furthermore, this research will compare the safety standards between the IAEA and Taiwan, and survey whether there are any insufficiency in current regulations. Finally, on the premise that recognize the plentiful electricity is the foundation of economic development, this research will find the way to keep people's lives, healthy, and property being well-protected, and whole country growing steady.

Keywords: Nuclear Safety, Emergency Response, IAEA Safety Standard

I. 前言

2011年3月11日，日本發生芮氏規模9.0級之超大地震，並引發海嘯，造成福島第一核電廠大規模之設備毀損、爐心熔毀及輻射外洩等重大災害，成為1986年蘇聯車諾比爾核電廠事件以來最嚴重之核安事故。

台灣天然資源難謂豐富，且身處海島及多地震帶上，自需著重能源議題，並對前述大自然所帶來之嚴峻挑戰全力以赴；簡言之，核能安全及緊急事變之法制層面上，吾人究應如何因應？

承前，本研究將整理IAEA安全基準，對應前述議題（含核子反應器設施之興建及運轉管制、停役及除役管制，緊急事故之整備措施、應變措施、復原措施及組織及任務），並將成果與我國前開制度進行對照，檢視現行法令有何不足之處。

II. 主要內容

壹、整理IAEA相關安全基準

考量本安全基準官方中譯本品質，尚欠穩定，本研

究乃對照英文及日文版本，重行翻譯。按 IAEA 安全基準得給予我國相關法規許多指引。在具體應用上，除能作為將來核能法制發展之基石，亦可作為開展核子能領域發展各論之基礎材料。植基於此，除能將核能安全法制藉由內部加以完善外，亦能使我國關於核能安全法制進程，與各核能先進國拉近。

而相關具體內容詳言如下。

首先，安全基本原則係 IAEA 整體核能安全基準之建構基礎，亦為擴大核能安全與核能保安各項基準之理論基礎。其設立目的即係希望成為所有會員國制定核能安全政策之主架構，進而保護民眾與環境免受游離輻射之有害影響。為達此目標，IAEA 制訂了十項安全基本原則，摘要如後。**第一條之安全責任：**針對致生輻射風險增加的設施及作業，應由其負責人或組織，負起安全責任。**第二條之政府角色：**此，政府須建立並維持一套有效之核安法律架構，且具備獨立運作之法規管制機構；前開架構若能建立，便能有助對增加輻射風險之設施及作業進行管制，並可清楚釐清責任。**第三條之安全領導與管理：**於增加輻射風險之設施及作業，其組織內各部門皆應建立並維持對核能安全之有效領導與管理。**第四條之設施及作業合理性：**各項設施及作業所能產生之利益，須大於其所帶來之輻射風險，始得被認具合理性。**第五條之防護最佳化設計：**此係指當各項安全措施應用於增加輻射風險之各項設施及作業之上，而於該等設施及作業之壽命期間，皆得在正常使用之情形下，發揮該安全措施所能提供「合理可達成之最高安全」水準。**第六條之個人風險的限制：**具備前述最佳化和合理化之防護，並不代表每個人皆免於不可接受之輻射傷害，因此輻射劑量與風險須控制於特定限值內。**第七條之現今及未來世代保護：**輻射風險不僅可能穿越國界，更可能長期存在；在判斷輻射風險控制措施之妥適性時，即須同時考慮現今與未來二世代可能受到之影響。**第八條之事故預防：**必須盡所有的努力以預防及減輕核子或輻射事故。**第九條之緊急應變計畫。****第十條之減少現有或未受監管輻射風險之防護行動：**由於某些輻射風險之產生，可能來自未受監管之各種設施及作業，在此種情況下，若具有一定輻射風險，即應考慮採取合理之防護措施，以減輕輻射曝露量。

其次，就設施及活動管理系統之安全規定，係欲就「建立、實施、評定與改進管理系統」等營運方面提出種種安全要求，希冀管理系統能綜合安全、健康、環境、安保、品質及經濟等多方面之要素。可分六部分如後述：**一、管理系統：**須以下述方式促進和支援強而有力之安全文化，如（一）確保組織範圍內已對重要安全文化問題達成共識；（二）提供組織得以支援人員和團隊安全，並有成效地執行任務之手段，並考慮人員、技術與組織間的相互配合；（三）在組織各級部門內培養進修及研究之態度；（四）提供該組織藉以不斷尋求發展和改進安全文化之手段。且管理系統之文件須含以下內容：（一）組織政策說明；（二）管理系統描述；（三）該組織結構描述；（四）說明職能、責任制、權限及此等管理、實施和評定工作之相互聯繫；（五）說明如何準備、審查、執行、記錄、評定和改進工作之說明流程及補充資料。**二、管理責任：**各級管理部門須實踐針對建立、實施、評定及持續改進管理系統所作出之承諾，並為執行

前開活動分配適當資源；基此，則由高等管理部門建立個體價值、制度價值及對該組織之行為期望，以支援管理系統之運作，並須於宣傳此等價值與期望中身為表率。

三、資源管理：高等管理部門須確定執行該組織活動及建立、實施、評定和持續改進管理系統所需之資源數量，且須提供之；此外，亦須將該組織資訊及知識視為資源加以管理。就人力資源之運用，高等管理部門須確定各級人員之能力要件，並提供培訓或採取其他措施，以達要求之能力水準；同時，亦須對採取前開措施之有效性進行評價，確保達到並保持適當之職業水準。針對基礎設施和工作環境，高等管理部門尚須確定、提供、維護和重新評價安全開展工作和滿足要求所需的基礎設施和工作環境。**四、程序之進行：**針對程序之進行，須確定管理系統中就實現組織目標、滿足所有要求之手段和傳遞產品之各所需過程，業經規劃、實施、評定和持續改進。且管理系統中尚須建立後述程序：（一）文件管理：須對文件進行管理（二）產品控制（三）記錄管理（四）採購（五）溝通（六）組織改革管理。**五、衡量、評定與改善：**為確認各程序間達到預期結果之能力，並指明改善之機會，須就管理系統之有效性進行監測與衡量。承前，若發生不合適情形，究該如何進行糾正和預防措施？首先，須確定發生不合適情形之原因。其次，須確認、分隔、控制和記錄不符合規定要求之產品及程序，並在該組織範圍內向適當管理層提出報告。

再者，緊急應變之安全規定，係要求各國對核子或放射緊急事變預作適當水準之準備及回應。其旨在最大限度內，減少任何核子或放射緊急事變對居民、財產與環境之影響。針對細部內容，分述如後：**一、原則與目標：**（一）防護目標：使劑量保持在一定閾值以下，從而防止發生對個人之決定影響，並採取所有合理措施減少目前和將來於居民中出現之隨機效應。（二）安全目標：透過放射源所致放射危害之有效防禦，保護個人、社會和環境免於危害。**二、一般要件：**（一）基本責任，國家須預先確定管制機關、國家及地方之應變部門與營運者間，於緊急暴露狀態之權責分工。（二）威脅評估，須進行全盤之安全分析，以找出所有放射源，並估計設施內工作人員和場址外群眾可能受到之輻射劑量，並估計對環境之潛在影響。**三、功能要件：**（一）建立應變管理，在不損害連續運行之安全功能的情形下，須迅速實施和管理現場應變；並須有效管理場址外之應變回應，同時協調現場應變。（二）確定、通報與啟動，營運者應迅速確定適當之應變等級或應變水準。營運者亦須向場址外通報點所發出通知，向其提供適當之最新資訊。場址外應變部門在接獲通報後，須迅速啟動與緊急事變等級或緊急事變水準相對應，預先策劃且協調之應變。至若萬一發生跨國緊急情況時，通報國必須立即直接或透過 IAEA 通知可能受影響的那些國家，並提供有關緊急情況性質及任何有關跨國影響之資訊，且對其他國家和 IAEA 要求提供資料、作出回應，嘗試盡可能地減輕影響。（三）緩解行動之採取，應對當地官員和第一線應變人員，迅速提供輻射防護之專門技術支援與服務，以就緊急情況進行應變。前開之源與服務須包含即時諮詢，並派遣包括輻射專家在內之應急小組，以評估涉及放射性物質或易裂變材料之威脅及輻射狀況，並減輕輻射影響及處理應變人員之曝露量。（四）緊急防護行動

之採取，前開安排須包含：採取適當行動，保護應變之工作人員；通知永久居民、暫住居民和特殊居民群體或負責前開居民之人員；採取緊急防護行動；保護食品及水之供給；對農場或果園產品及當地生產牛奶之直接消費進行限制；對被疏散者進行監測和除汙；照料被疏散者；通告特別設施並對進出進行管制並限制空中、水上、陸路和鐵路交通。（五）資訊提供、指示發布、大眾警告之發出，於宣佈緊急等級後，須迅速向大眾警告該等緊急事態，並通知其應採取之行動。又前述資料如下：危險性質、將如何警告或通知居民及在發生核子或放射性緊急事態時需採取之行動；提供前開資料之際，須使用這些緊急區域所用之主要語文，並定期對此等大眾宣傳計畫之有效性進行評估。（六）應變人員之保護，須包括：有關不斷評估和記錄應急工作人員所受劑量的安排；有關確保按照既定導則和國際標準控制所受劑量和污染的程式；以及有關提供在預期危險狀況下進行應急回應所需的適當的專用防護設備、程式和培訓的安排。（七）初期評估，須於初始階段及整個應變期間，對危險程度與可能發展作出評價，並須進行輻射監測、環境取樣和評估，以便迅速確定後續危險並完善應變策略。（八）醫療應變之管理，須於適當時期，採取措施針對應急工作人員和群眾，檢測因核子或放射性緊急事態所生之輻射照射造成的癌症發生率，並提供適當治療；其次，須讓醫務人員（包括普通開業醫師和應變工作人員）瞭解輻射照射之醫學症狀及若懷疑具核子或放射性緊急事態時所需採取之適當通知程序及其他即時行動。（九）大眾即時報告，須採取所有實際可操作之措施，於核子或放射性緊急事態期間，為大眾提供有益、即時、真實、一致之適當資訊，以滿足大眾和新聞媒體對資訊之要求。（十）農業對策、食物攝取對策及長期防護措施之實施於採取農業對策、食物攝取對策和長期防護措施之際，須制定符合國際標準之最優化國家干預水準及行動水準，並適當修改以配合當地及本國情況，例如：1、通過干預，防止個人和集體吸入劑量；2、輻射和非輻射之健康風險，及與前開干預有關之經濟與社會成本與利益。（十一）減輕緊急事態及其應變之非輻射影響，在緊急區範圍內之管轄區須作出安排，以便在已落實相應農業對策或長期防護行動之事件後，證明、最佳化及審定各種不同干預水準或行動水準之合理性。（十二）回復工作之進行，須依有條不紊之方式，並按照國際標準和準則，來計畫並推動從應變階段，經長期回復工作，至正常社會及經濟活動之復原。四、基礎要件：（一）管理機關，須利用法令或規約來建立管理機關，以擬定、維持和管理針對核子或放射性緊急事態之準備工作及應變行動等安排。應變安排須明確劃分責任、權力，以便於所有階段中進行協調。（二）組織，須對所有主要應變部門間之組織關係和相互聯繫，作出規定。（三）應變協調，應在營運者與地方、地區和本國政府間作出有關協調應變之安排，並擬定工作上相互聯繫之議定書。前開安排須包含負責應變服務之部門和負責對常規緊急事態作出應變之部門，並明確記錄在案。（四）計劃及程序，為此須制訂計畫或作出其他安排，以協調國家對各種可能的核子和放射性緊急事態之應變。（五）後勤支援及設施，為執行前節所規定之功能，必須提供適當手段、儀器儀錶、用品、設備、通信系統、設施和

文件（如程式、清單、電話號和手冊），以便在應變時可能遇到之假想情況（如放射性之工作及環境條件）下使用。（六）培訓、訓練及演習，營運者和應變部門須作出安排，選擇人員並提供培訓，以確保此等人員掌握必要之知識、技能、能力、設備、程序，且使其執行所承擔應變功能。

貳、針對核能安全管制，與 IAEA 標準進行比較

我國核能安全管制之法體系，係採取如日本分散臚列之設計。換言之，乃透過原子能法作為核能管制與管制組織之基礎性法律，指引其他為數眾多之管制性法律，共同構成核能安全管制法體系。若以我國各法令為經，前開國際基準關心之重點為緯，持各類重點觀察我國相關法體系與國際規範之落差，可得結論如下：一、核子原料、燃料及反應器之管制部分：（一）管理系統，部分規範未能提出清楚且具體之操作步驟，且未促進安全文化，似與國際潮流有所違背，應予加強。（二）管理責任，見諸我國核子原料、燃料及反應器之管制法體系，卻未得見建立個體價值、制度價值及對該組織之行為期望，鼓勵所有工作人員參與和不斷改進管理系統等規定，此部分則與國際基準有所歧異，尚待吾人調整改進。（三）資源運用，觀諸我國相關規範，發現培訓部分似有不足。且未對組織資訊及知識資源，進行完整規劃，僅得於各零星法條中窺見一二，與國際基準尚有些許差距，值得繼續發展。（四）程序進行，我國相關產品採購規範，似未能提出清楚且具體之選購標準及品保責任，而難認符合前開要求，以確保機組運行順暢及人民安危。（五）品質管控，規範不足，未能有效評價各程序於滿足和實現目標、戰略、計畫及宗旨之有效性。二、游離輻射防護之管制部分：（一）管理系統，部分規範未能對作業設備規格及如何評估，詳細予以規範，是如何認此等輻射作業之防護水準已得確保工作人員及附近居民之安危？（二）管理責任，僅得見「學術機構輻射防護委員會導則」針對相關人員職責，詳加進行規範，至其他設施又該如何運作及分工，則未見諸統籌明文，而與國際基準所要求之水準，有段落差，尚待改進。（三）資源運用，觀諸我國相關規範，發現培訓部分似有不足。且亦未將組織資訊及知識視為資源加以管理，僅能於各零星法條中窺見一二，與國際基準尚有些許差距，值得繼續發展。（四）程序進行，未就相關產品採購規範，提出清楚且具體之選購標準及品保責任，而難認符合前開要求，以確保機組運行順暢及人民安危，而有盡速訂定以符國際基準，並保護人民安危之必要。（五）品質管控，有關如何普查、如何查核、如何協調處理之，多僅以抽象空泛之名詞寥寥帶過，實難謂明確。

參、針對緊急應變，與 IAEA 標準進行比較

我國核能緊急應變之法體系，並未如前述核能安全管制法體系，由原子能法作為緊急應變之基礎性法律，指引其他為數眾多之相關法令，而係由核子事故緊急應變法各章及其子法，共同建構核能緊急應變法體系。若以前開基準關心之重點為經，我國各相關法令為緯，持各類重點觀察我國相關法體系與國際規範之落差，可得結論如下：一、基礎工程部分：（一）應變計畫，我國相關規範似未能對應提出清楚且具體之應變步驟，而

難認符合前開基準，以確保工作人員及附近居民之安危。

(二)後勤支援及設施，我國相關規範似未能就相關設施之整備設定門檻，詳加說明；基此，似未能符合國際基準，以確保緊急應變之順遂。(三)培訓、訓練及演習，我國相關法令未能之針對應變培訓詳加規範，確保相關人員掌握必要之知識及技能，有關核定將隨主管機關恣意裁量搖擺。二、具體執行部分：(一)緩解行動及緊急防護行動之採取，我國法令似未能有效提出具體應變方式，僅見平鋪直敘之詞彙堆疊，實難從中得見相關人員究應如何具體應變之明確指引，是何以確保緊急事變下人身及環境之維護？(二)資訊提供、指示發布、大眾警告之發出，我國法令所定內容未見對大眾通報之詳細規劃，是將何以確保緊急事變下資訊傳遞之完整？(三)民眾防護及醫療應變之管理，未見對民眾防護及醫療應變之詳細規劃，是將何以確保緊急應變之完整應對，保障工作人員及附近居民之生命、身體、健康安全？(四)回復工作之進行，觀諸我國相關法令未能對復原標準之詳細規劃，是將何以確保緊急事變之回復工作得以順利進行？

III. 結果與討論

本研究計劃主要係透過對於國際原子能組織(IAEA)所提出的 IAEA 安全基準，進行分析，而研究分析之重點主要為核能電廠的許可管制措施，以及核子事故發生後的緊急應變措施部分。透過對於 IAEA 安全基準之分析檢討，對於 IAEA 安全基準所採取之態度，及其所採取之應對措施，甚至因而產生的法制上的變革。以期對於我國將來在前開二領域的法制進程上，發揮指引之作用，此為本研究計劃所預期達到的抽象目標。然就具體可能達到的成果而言，IAEA 安全基準在某種程度上，亦提供了我國法在面對核子能安全管制的密度上，提供了比較的基礎。

而本研究係從 IAEA 要求之安全基準切入，然我國並未加入 IAEA，且短時間內尚難成為會員國，而難獲得第一手資訊，僅能透過他會員國，如日本、德國等對於 IAEA 之轉介，取得相關資訊，對本研究而言，實有先天上之侷限，所幸前開二國對於 IAEA 之發展甚為關注，故不至於落後太多資訊。

IV. 結論

原子能委員會曾於 2002 年提出「原子能基本法」草案。基本法雖尚未予以立法，惟各式具體管制法規卻早已實定法化。是本研究將設想：國內法令該如何隨未來基本法之制定，同時調整配套？而於觀察法規內容妥適性之過程中，不可避免地，需研究參酌相關國際組織所形成之標準，以期許我國機制能積極地隨全球脈動前進。

本研究既就 IAEA 之方針，以及歐洲、美國、亞洲等國家之「核子反應器設施管制」及「核子事故緊急應變」兩大部份之法制度進行比較法研究。參與計畫之工作人員，亦藉此機會了解歐洲、美國、亞洲國家在「核

子反應器設施管制」及「核子事故緊急應變」制度設計上之差異，及 IAEA 方針之執行狀況，而能對於本研究計劃的核心議題，即「核子反應器設施管制」及「核子事故緊急應變」有更深入之認識。

放眼本研究計劃最終的成果，乃希冀藉由 IAEA 安全基準之介紹與分析，併同參考美國與日本對於 IAEA 安全基準之回應，提出符合我國現實狀況之核能安全準則。進而在以電力充沛作為維繫經濟發展之前提下，讓民眾之「生命、健康及財產」同能充分受有保障，並使整體核能發電政策與法規能，於不違背憲法第 7 條以下保障各式基本權及增修條文第 10 條第 2 項「經濟及科學技術發展，應與環境及生態保護兼籌並顧」等意旨，保持整體國力繼續在穩定中求取成長。

參考文獻

➤ 中文部分

小林傳司，科技民主與民眾參與--一九九〇年以後日本的經驗，當代，第 217 期，2005 年 9 月，頁 14-23。

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，頁 88-90。

王伯輝，安全文化--推行 ISO 後的省思，臺電核能月刊，第 169 期，1997 年 1 月，頁 88-92。王毓正，淺析核能風險評估與評價--對於迷失於數字而忘卻權衡法益輕重的核能 風險論述之批判，第 193 期，2012 年 2 月，頁 96-99。

王獻極，核能電廠設計程序法則與作業，臺電核能月刊，第 57 期，1987 年 9 月，頁 43-53。

朱景鵬、謝偉智，行政院組織改造推動方向與執行策略，研考雙月刊，第 276 期，2010 年 4 月，頁 463-480。

吳明儒，社會「不」安全制度--風險原則的再省思，國立政治大學社會學報，第 36 期，2004 年 6 月，頁 33-61。

宋餘俠、陳鳳美，行政院組織改造變革管理推動構想，研考雙月刊，第 276 期，2010 年 4 月，頁 20-34。李建良，德國環境行政法上的資訊公開制度，國家政策季刊，第 87 期，2002 年 8 月，頁 36-52。

李貽康，法國核子廢料管理政策，原子能委員會彙報，第 19：6 期，1983 年 12 月，頁 99-105。

李鴻維，地方自治團體參與中央決策程序之研究，國立臺灣大學法律學研究所碩士論文，2001 年。

周桂田，高科技風險：科學與社會之多元與共識問題，思與言，第 38：3 期，2001 年 9 月，頁 75-103。

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，頁 62-65。

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，頁 62-65。

林枝旺、何玉麗，日本核能溝通之作法與啟示，臺灣經濟研究月刊，第 189 期，1993 年 9 月，頁 101-106。

林俊隆，行政程序法與核能安全管理實務之探討之一，臺電核能月刊，第 263 期，2004 年 11 月，頁 16-23。

林俊隆，行政程序法與核能安全管理實務之探討之一，臺電核能月刊，第 263 期，2004 年 11 月，頁 16-23。

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，頁 100-110。

林英，核能安全之趨向與作法，臺電核能月刊，第 3 期，1983 年 3 月，頁 41。

林家德、羅崇功、徐碧璘、何上慈、吳瑞洋、徐銳成、高梓木、洪子傑、許懷石、張啟濱、王輔勳，風險告知法規之研究與應用，台電工程月刊第 721 期，2008 年 9 月，頁 37-52。

侯明亮，核能安全的理論與實際中篇第捌章(五之二)，台電核能月刊，第 354 期，101 年 6 月。

侯明亮，核能安全的理論與實際前篇(一)，<http://info.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/24/SC-234.pdf>，最後瀏覽日期：2015/3/4

侯明亮，核能安全的理論與實際中篇第捌章(五之二)，台電核能月刊，第 354 期，2012 年 6 月。

侯明亮，核能安全的理論與實際前篇(二)，<http://info.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/24/SC-235.pdf>，最後瀏覽日期：2015/3/4。

施能傑，考試權獨立機關化定位的新討論--民主責任政治的檢驗，臺灣民主，第 6：1 期，2009 年 3 月，頁 135-168。

洪鴻智，科技鄰避設施風險知覺之形成與投影：核二廠，人文及社會科學集刊，第 17：1 期，2005 年 3 月，頁 33-70。

原動處核管課，核能法規之類別、效力和採用，臺電核能月刊，第 7 期，1983 年 7 月，頁 29-34。

核燃料營運課譯，簡介美國 1982 年核子廢料政策法，臺電核能月刊，第 8 期，1983 年 8 月，頁

2-7。

翁炯立譯，法國對核能安全的趨勢，臺電核能月刊，第 20 期，1984 年 8 月，頁 34-37。

高漢卿譯，核能法規的挑戰：亞洲各國的未來、美國的經驗，臺電核能月刊，第 176 期，1997 年 8 月，頁 64-69。

張文貞，當科技遇上憲法：憲政主義的危機與轉機，月旦法學，第 116 期，2005 年 1 月，頁 176-190。

莊文淵、紀立民，淺論核能設施之環境影響評估，核研季刊，第 21 期，1996 年 10 月，頁 99-108。

許辰舟，行政決策中的人民參與—參與模型的建構，國立臺灣大學法律學研究所碩士論文，1999 年。

許春鎮，論自治行政之概念及其類型，臺北大學法學論叢，第 59 期，2006 年 9 月，頁 1-57。

郭大榮、許哲源，淺談行政法人內部監督機制，內部稽核，第 55 期，2006 年 6 月，頁 38-45。郭介恒，獨立機關之職權與運作--以美國 FCC 為例，憲政時代，第 35：4 期，第 35：4 期，2010 年 4 月，頁 463-480。

陳宗憶，國家的風險決策與風險決策監督——以建立「風險原則」為中心，國立台灣大學法律學研究所碩士論文，2007 年。陳明仁，獨立機關制度之推動與檢討，研考雙月刊，第 29：6 期，2005 年 12 月，頁 43-56。

陳俊宏，永續發展與民主：審議式民主理論初探，東吳政治學報，第 9 期，1998 年 9 月，頁 85-122。

陳春生，行政法學的未來發展與行政程序法--月旦法學雜誌發行百期誌慶，月旦法學，第 100 期，2003 年 9 月，頁 184-196。

陳春生，核能電廠設立程序之司法審查--以德國法為中心，中山學術論叢，第 16 期，1994 年 6 月，頁 169-211。

陳傳宗譯，美國原子能管制委員會核能法規指引 RG 1.168(DG-1123 之正式版)--核能電廠安全系統數位電腦軟體之驗證與確認、審查與稽核，臺電核能月刊，第 271 期，2005 年 7 月，頁 51-56。

陳愛娥，代議民主體制是民主原則的不完美形式？--加強、補充代議民主體制的可能途徑，思與言，第 4 期，1999 年 3 月，頁 17-47。

陳愛娥，民眾參與的理念與實際--以民眾參與「水庫集水區」的管理為例，中央警察大學法學論集，第 3 期，1998 年 3 月，頁 41-64。

陳愛娥，行政一體原則與行政分殊化的趨勢--評司法院大法官釋字第 613 號解釋對行政一體原則的理解，第 2 期，東吳公法論叢，2008 年 11 月，頁 3-31。

陳愛娥，行政組織法：第五講 行政法人化與行政效能--「行政法人」作為政府組織改造的另一種選擇？，月旦法學教室，第 12 期，2003 年 10 月，頁 61-73。

陳愛娥，行政層級體制與免於部會管轄的空間(ministerialfreie Räume)--逸脫行政層級體制之行政組織的德國案例與其憲法評價，憲政時代，第 35：4 期 2010 年 4 月，頁 481-495。

陳新民，一個新的立法方法--論「綜合立法」的制度問題，法令月刊，第 51：10 期，2001 年 10 月，頁 137-161。陳暉淵，美國聯邦政府獨立機關之分析，競爭力評論，第 10 期，2007 年 7 月，頁 96-113。

陳德新，行政院組織改造之法制配套措施，研考雙月刊，第 276 期，2010 年 4 月，頁 57-62。

陳憶寧，公共議題之遊戲框架初探--以核四議題為例，新聞學研究，第 72 期，2002 年 7 月，頁 85-117。

彭錦鵬，行政法人與政署之制度選擇，考銓季刊，第 53 期，2008 年 1 月，頁 21-36。

曾東澤摘譯，法國核子物料的運輸及相關的安全措施，核能彙刊，第 25：6 期，1989 年 12 月，頁 22-37。

湯簡如、王政德、高良書、江授全，核電廠安全分析方法論法制化，台電工程月刊，第 743 期，2010 年 7 月，頁 24-35。

程明修，制度的終結？--國立大學行政法人化之選擇，法學講座，第 25 期，2004 年 1 月，頁 26-43。

程明修，核能剩餘風險之管制瓶頸，第 193 期，2012 年 2 月，頁 91-95。覃正祥譯，獨立機關結構設計之合憲性辯論--美國最高法院對公開公司會計監理局(Public Company Accounting Oversight Board)獨立機關屬性判決書之介紹與翻譯，檢察新論，第 9 期 2011 年 1 月，頁 75-302。

黃士洋，行政科層體制在民主法治國家中的定位--我國行政機關(構)改革策略的合憲性框架--，國立臺北大學法律學系碩士論文，2003 年。黃昆樹，法國與英國核能管制及法規簡介，臺電核能月刊，第 135 期，1994 年 3 月，頁 2-21。

黃國泰，「能源氣候年代」之國際能源管理發展趨勢與熱潮之成效，永續產業發展，第 58 期，第 2012 年 3 月，頁 23-31。

黃榮志、陳瑋玲，行政組織理論與實務探討--以行政院新機關組織架構為例，研考雙月刊，第 288 期，第 2012 年 4 月，頁 67-80。

楊鈞池，1990 年代日本科技政策決策機制之改革--兼論日本行政改革之意義，中山人文社會科學期刊，第 31 期，2006 年 12 月，頁 35-64。

楊騰芳，核三廠預力系統檢測法規檢討，月旦法學，第 231 期，2002 年 3 月，頁 39-43。

葉俊榮，三哩島事件後美國核能管制之轉型：法律與政策的互動關係，核能彙刊，第 39 期，1989 年 7 月，頁 48-56。

葉俊賢、邱志宏，輻射和放射性同位素應用安全管制的展望，核研季刊，第 42 期，2002 年 1 月，頁 49-55。

董保城，行政法人在臺灣發展之理論與挑戰，憲政時代，第 33：1 期，2007 年 7 月，頁 39-68。

趙國勝，原子能法、原子能法施行細則及核子損害賠償法簡介，原子能委員會彙報，第 22：5 期，1986 年 10 月，頁 25-30。

趙國勝，核能電廠破管防護法規之探討，臺電核能月刊，第 55 期，1987 年 7 月，頁 23-28。

劉彥青，放射性廢棄物處置場選址程序之研究，國立中興大學科技法律研究所碩士論文，2008 年。

蔡秀卿，從行政之公共性檢討行政組織及行政活動之變遷，月旦法學，第 120 期，2005 年 5 月，頁 19-36。

蔡季軒，我國行政獨立機關獨立性之探討：以中央選舉委員會為中心，國立政治大學國家發展研究所碩士論文，2009 年。

蔡茂寅，行政法人化法律問題之研究--以「行政法人法草案」之檢討為中心，警察法學，第 5 期，2006 年 10 月，頁 167-199。

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，第 1 期，2002 年 9 月，頁 23-38。

蔡茂寅，獨立機關之研究--以中央行政機關組織基準法為檢討對象，研考雙月刊，第 244 期，2004 年 12 月，頁 71-80。

蔡進良，中央行政組織法變革之另一取向--日本獨立行政法人制度之引介，月旦法學，第 83 期，2002 年 4 月，頁 171-181。

蔡瑄庭，低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例適用疑義之簡析，臺北大學法學論叢，第 80 期 2011 年 12 月，頁 79-115。

鄭維申、周冬寶，各國用過核燃料法規研究，核能彙刊，第 23：4 期，1987 年 8 月，頁 9-20。

鄭維申、周冬寶，各國用過核燃料法規研究，核能彙刊，第 23：4 期，1987 年 8 月，頁 9-20。

盧志新，由三哩島事件談核能安全之深一層防衛方法，臺電核能月刊，第 409 期，1982 年 9 月，頁 57-62。

賴森本、許哲源，行政法人監督機制之研究，月旦法學，第 116 期，2005 年 1 月，頁 77-94。

薛榮貴譯，三哩島事件後法規對電力公司之衝擊，
臺電核能月刊，第 9 期，1983 年 9 月，頁
52-56。

謝牧謙，日本核能行政體制及相關(社、財)團法人
機構，核研季刊，第 16 期，1995 年 7 月，頁
27-33。

(下述為網路資料)

香港立法會秘書處，
<http://www.legco.gov.hk/yr11-12/chinese/sec/library/1112fs05-c.pdf>，最後瀏覽日期：
2015/3/3

德國之聲中文網資訊：
<http://www.dw.de/iaea%E6%80%BB%E8%A3%81%E8%A6%81%E6%B1%82%E6%97%B6%E5%88%BB%E8%AD%A6%E6%83%95%E6%A0%B8%E8%83%BD%E5%AE%89%E5%85%A8/a-16197320>，最後瀏覽日期：
2015/3/23

➤ 日文部分

下山 憲治，原子力事故とリスク・危機管理 (特集 東日本大震災--法と対策)，ジュリスト，1427 号，頁 100-106，2011 年 8 月。

六車 明，環境と経済(7)原子力法制と心の平和，
20 号，頁 123-144，2011 年 8 月。

卯辰 昇，現代原子力法の展開と法理論，2012 年
3 月，第 2 版。

広瀬 研吉，わかりやすい原子力規制関係の法令
の手引き，2011 年 4 月。

池村 正道，原子力法制とその整理 (特集 東日本
大震災をめぐる動向と復興へ向けた対応)，法律
のひろば，64 卷 9 号，頁 36-42，2011 年 9 月。

西脇 由弘，我が国の原子力の法規制と組織に関
する考察：福島第一事故の教訓を踏まえて，日本
原子力学会誌，53 卷 11 号，頁 765-762，2011 年
12 月。

長谷川 尚子，原子力施設における安全文化への
取組みと今後の方向性(高信頼性組織)，日本信頼
性学会誌：信頼性，34 卷 5 号，頁 318-324，2012
年 7 月。

原子力安全基盤機構，発電用原子炉を対象とした
安全規制におけるリスク情報の適用と評価：リ
スク情報適用を支援する PSA 手法及びデータの
調査・検討 2006 年 3 月。

原子力安全基盤機構，被ばく評価手法の整備，
2008 年 4 月。

原子力安全基盤機構、国際原子力機関，政府、法
律及び規制の安全に対する枠組み：日本語翻訳
版(全般的安全要件 第 1 編 no.GSR part41, IAEA

安全基準：人と環境を防護するために 第 1 編
no.GSR part 1)，2011 年 3 月。

原子力安全基盤機構、国際原子力機関，原子力、
放射線、放射性廃棄物及び輸送の安全のための法
令上及び行政上の基盤：日本語翻訳版，2008 年
12 月。

渡辺 智之、高橋 滋，リスク・マネジメントと公
共政策：経済学・政治学・法学による学際的
研究，2011 年 3 月。

諸葛 宗男、菅原 慎悦，原子力法制システムの国
際化の潮流：シンポジウム「原子力法制システ
ムの改革に向けて」概要，日本原子力学会誌，53
卷 2 号，頁 117，2011 年 2 月。

櫻井 敬子，行政法講座(61)原子力施設の安全規制，
自治実務セミナー，52 卷 8 号，頁 4-7，2012 年 8
月。

➤ 英文部分

Cristian DeFrancia, The continuing role of
item-specific agreements in the IAEA safeguards
system. - In: Nuclear law bulletin

Corner, Adam, Dan Venables, Alexa Spence, Wouter
Poortinga, Christina Demski, and Nick
Pidgeon. "Nuclear power, climate change and energy
security: Exploring British public attitudes" Energy
Policy, 39:4823-4833. 2011

Daniel A. Farber, Jim Chen, Robert R.M. Verchick &
Lisa Grow Sun, Disaster Law and Policy (2nd ed.
2010)

IAEA, Comprehensive audits of radiotherapy
practices : a tool for quality improvement ; [IAEA
workshop Quality Assurance Team for Radiation
Oncology (QUATRO), held in Vienna in May 2005]
Vienna : International Atomic Energy Agency, 2007

IAEA, Fusion energy 2006 : proceedings of the 21st
IAEA conference, Chengdu, 16 - 21 October 2006 ;
the 21st IAEA Fusion Energy Conference was held in
Chengdu, China, from 16 to 21 October 2006 Fusion
Energy Conference <21, 2006, Chengdu>. - Vienna :
Internat. Atomic Energy Agency, 2007

IAEA, Fusion power plant safety : proceedings of a
technical meeting, Vienna, 10 - 13 July 2006 ; 8th
IAEA Technical Meeting on Fusion Power Plant
Safety Technical Meeting on Fusion Power Plant
Safety <8, 2006, Wien>. - Vienna, 2007.5

IAEA, IAEA nuclear energy series, International
Atomic Energy Agency.-Vienna : Internat. Atomic
Energy Agency, 2007-

IAEA, IAEA safety glossary : terminology used in
nuclear safety and radiation protection including the
IAEA safety fundamentals ; multilingual edition /
International Atomic Energy Agency. - Wien : IAEA,
2007-

IAEA, Fissile material management strategies for sustainable nuclear energy : proceedings of an IAEA Technical Meeting on Fissile Material Management Strategies for Sustainable Nuclear Energy held in Vienna, 12 - 15 September 2005 Vienna : Internat. Atomic Energy Agency, 2007

IAEA, Nuclear safety infrastructure for a national nuclear power programme supported by the IAEA fundamental safety principles Vienna : IAEA, 2008 Zusammenfassung / Abstract

IAEA, The Management System for Nuclear Installations, Safety Guide IAEA Safety Standards Series GS-G-3.5, International Atomic Energy Agency: Vienna, 2009

IAEA, GUIDELINES FOR REGULATORY OVERSIGHT OF SAFETY CULTURE IN LICENSEES' ORGANISATIONS, International Atomic Energy Agency: Vienna, 2012

IAEA, Safety Culture during Pre-Operational Phases of Nuclear Power Plant Projects, Safe Report No. 74, International Atomic Energy Agency: Vienna, 2012

INPO, NUCLEAR SAFETY CULTURE ASSESSMENT PROCESS MANUAL, Simplified INPO Principles for a Strong Nuclear Safety Culture, Institute of Nuclear Power Operations 002E, 2009

INPO, Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005, Addendum, Institute of Nuclear Power Operations, 2012

Lorne Sossin, The Puzzle of Independence for Administrative Bodies, 26 Nat'l J. Const. L. 1, 2009

Malgosia Fitzmaurice, David M. Ong & Panos Merkouris, Research Handbook on International Environmental Law, Edward Elgar Pub, December, 2010

Masahito Kinoshita, Towards enhanced nuclear safety in Japan, Nuclear Engineering International Magazine, April 2012, <http://www.neimagazine.com/features/feature-towards-enhanced-nuclear-safety-in-japan/> (last visited: 2015.3.23).

Michael Faure & Albert Verheij, Shifts in Compensation for Environmental Damage, Springer, October, 2007

Stephen Tromans, Nuclear Law: The Law Applying to Nuclear Installations and Radioactive Substances in Its Historic Context, Hart Publishing; 2nd Revised edition, March, 2010

Richard Burleson Stewart & Jane Bloom Stewart, Fuel Cycle to Nowhere: U.S. Law and Policy on Nuclear Waste, Vanderbilt University Press, August, 2011

Walther Enkerlin, Guidance for packing, shipping, holding and release of sterile flies in area-wide fruit fly control programmes : Joint FAO/IAEA

Programme of Nuclear Techniques in Food and Agriculture- Rome : FAO, 2007

White Paper - U.S. Government and Nuclear Energy Industry Response to the Fukushima Accident, <http://www.nei.org/Master-Document-Folder/Backgrounders/White-Papers/US-Government-and-Nuclear-Energy-Industry-Response> (last visited: 2015.3.23).

➤ 德文部分

Dipl. Jur. Ali Kilic, Zur Frage der Zustimmungsbefähigung durch den Bundesrat zu materiell-rechtlichen Änderungsgesetzen in der Bundesauftragsverwaltung, 2011

Gregor Weber., Mediation im Atomrecht : die Mediation als Instrument der Risikoanalyse nach § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG- Berlin : Logos Verl., 2012

Matthias Kettl, Gefahr, Vorsorge und Restrisikominimierung im Atomrecht, 2010 Werner Bischof, Bundesamt für Strahlenschutz-Gesetz, 1. Aufl. 2012.

Wolf-Georg Schürf and Wolf-Georg Scharf, Europäisches Atomrecht: Recht Der Nuklearenergie (de Gruyter Handbook), 2012

Bodo Wiegand-Hoffmeister, Die Umweltstaatlichkeit der Bundesrepublik Deutschland im Spiegel staatsphilosophischer, europäischer, verfassungs- und verwaltungsrechtlicher sowie ... Und Rechtspflege Gastrow, 2011

<http://www.bfs.de/de/bfs/wir/organigramm> (last visited: 2015.3.23).

<http://www.bmu.de/organisation/doc/48506.php> (last visited: 2015.3.23).

推動核安管制資訊公開與建立危機溝通路徑圖之研究

The Research on Improvement of Freedom of Nuclear Safety Regulation Information and Establishment of Crisis Communication Roadmap

計畫編號：103-NU-E-305-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：高仁川

e-mail：lawrck@mail.ntpu.edu.tw

計畫參與人員：張惠東

執行單位：國立台北大學法律學系

摘要

自日本福島核災事件發生以來，世界各國更加重視核安管制的資訊公開、風險和危機的因應與溝通策略乃至相關機制的建立。本研究計畫旨在探討我國當前政府有關核安管制的資訊公開，以及風險與危機溝通法制的缺陷何在，反省到由上而下的決策模式已不足以作為當代公民社會對政府的信任基礎。如何一方面透過風險與危機評估領域的多元化，將社會、經濟、環境、法律、文化等面向納入；另一方面擴大風險評估與危機因應的專業知識參與者，在民主、資訊公開透明的原則下，使抱持不同意見、具備不同專長背景知識的專家，都能參與評估與決策機制，使得政府治理能有更完整的考量，強化政府與民眾的互信，促使民眾接受、理解政府針對因應危機所形成的決策，應有其重要性。同時評估在核安管制資訊公開與危機溝通的法制建構上，我國可能面對之不同的演進方案，所需設計之制度與路徑，並儘速建立核安管制機關的危機溝通作業準則，提供一個國家層級的危機溝通策略與藍圖。

關鍵詞：核安管制、資訊公開、危機溝通、風險評估與溝通。

Abstract

Since the Fukushima Nuclear Accident happened in 2011, the international community emphasized the importance of freedom of information related to nuclear safety regulation, risk response measures and strategies for crisis communication. This research explored what insufficiency could undermine the well-function of Taiwanese government. This research expounded why “the top down approach” is not enough to consolidate the civil society for a solid trust foundation of current government. One the one hand, governance innovation should include social, economic, environmental, legal, and cultural considerations. On the other hand, different knowledge expertise should engage in the risk assessment and crisis response mechanism. Under democracy and transparent principle, citizens should have more access to the nuclear regulatory information to join a meaningful participation in the decision making process. This research not only delineated a roadmap for crisis communication, but also designed a feasible guideline for crisis communication strategies between government and citizens.

Keywords: nuclear safety regulation, freedom of

information, crisis communication, risk assessment and communication.

I. 前言

2011 年福島核災事件發生之後，日本社會進入與輻射共存的時代。此一複合型災難也震撼了全球，促使各國政府重新檢視核安管制的標準、強化危機因應措施與溝通管道、檢討核子損害賠償責任法制與相關公約，甚至確立朝向非核社會的目標邁進。福島核電廠事故的衝擊，主要在於：福島第一核電廠所採用的技術標準，是世界標準的輕水爐、而地震與海嘯的連鎖效應，導致該事故成為全球複合型核災事故的首例、災害後續演變可能有引發多達三千萬人避難的嚴重性、受輻射污染的水大量流出，致使海洋亦受到污染、即使事故發生迄今已超過兩年，對日本民眾的創傷與輻射後遺症，仍未止息。

根據國際原子能總署(IAEA)的報告，福島核災肇因於地震與海嘯這兩種極度危險的外部因素，短時間內前後相繼發生。但於核電廠設計之初，過去在評估外部危險影響時，通常對地震及洪水兩項因素係分開予以考量。此一事故，也使人們瞭解三個基本安全防護功能：反應爐控制、散熱降溫及圍阻體的完整性，可能因電力中斷無法正常運作，以致事故演進到無法控制的程度，最終對核電廠產生嚴重損害與輻射物質外洩。由於國際社會對此一事故的高度關注，「核能安全公約」(Convention on Nuclear Safety, CNS)締約會員國於 2011 年 4 月在奧地利維也納舉行的審議會中，來自不同國家的核能管制者亦討論到福島事故之後，各自的因應計畫與調整措施。其後，各會員國並於 2012 年 8 月召開特別會議，以分享各國經驗檢討、反省之後，從福島事故所獲得的經驗與啟示。而依曾經長年擔任美國核能管制委員會總顧問(General Counsel of the US Nuclear Regulatory Commission, NRC)，目前任職於經濟合作暨發展組織(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)核能署(Nuclear Energy Agency)法律事務部門主任的 Stephen G. Burns 之觀察，其認為：在各國展開其他更進一步的改革之前，國際社會仍將延續在核能安全公約(CNS)體制下，倚賴「專業同儕審查」(peer review)以及強化國際原子能總署(IAEA)之「整合的管制審查服務」(Integrated Regulatory Review Service, IRRS)，以進行對各國核安管制計畫的監督。惟其亦留

意到：核能安全公約(CNS) 相關會員國於 2012 年 8 月所召開的特別會議以及 2012 年 12 月在日本舉辦的部長級會議中，各締約國再度強調確保管制機關在作成管制判斷時，維持有效獨立之重要性，並應採取適當的執行措施、擁有高素質人力與充裕預算、避免管制機關受到情緒性組織影響、重視外部專業資源協助的取得，特別是管制者必須以「透明而公開的方式」(transparent and open manner)來運作。前述核能安全公約(CNS)會員國於 2012 年 8 月特別會議所公布的報告清楚指出：「核安管制文化、人與組織的因素乃是關鍵的因素，其將影響外在事件、設計、嚴重事故的因應管理，究竟如何被予以考量。而所謂核安管制文化、人與組織的因素，也包括核能設施的運作訓練、國家組織的健全功能，及對緊急事故的整備預防與因應措施」。美國災害法權威學者 Daniel A. Farber 亦認為：從核電廠的設計，乃至管制措施落後國際核能實務運作標準，越來越多證據顯示，人為的管制失靈(regulatory failure)乃是構成整個福島核災事故的一部分原因。

從以上說明可知，福島核災並非純粹是自然因素或技術層次的偶然聚合結果。它對二十一世紀現代國家的管制結構、決策模式、治理創新的挑戰，不宜盲斷窄化為擁核、反核的選擇命題。誠如我國社會學家所強調：透過制度性的系統創新，使得科技與風險的關係能在政府、工業團體、公民社會的互動過程中，發展多元的決策與風險溝通機制，形塑公眾主動積極的參與地位、強化公眾對科學的理解，「我們除了需要進行學理、跨國制度與治理系統的探討，也需要反身的比較在地社會的治理與管制結構問題，透過一步步的微調與變革為朝向永續性的典範轉移進行準備。」藉由近年來許多重大經濟開發案、科學園區環評糾紛、土地徵收，以及核四完工運轉引發社會各種強力抗爭之引證，「僵局的風險治理」(hung risk governance)危機均突顯出我國當前政府應重新審視風險與危機溝通機制的缺陷何在，反省到由上而下的決策模式已不足以作為當代公民社會對政府的信任基礎。一方面透過風險與危機評估領域的多元化，而非侷限於科學審查，亦應將社會、經濟、環境、法律、文化等面向納入；另一方面擴大風險評估與危機因應的專業知識參與者，在民主、資訊公開透明的原則下，使抱持不同意見、具備不同專長背景知識的專家，都能參與評估與決策機制，使得政府治理能有更完整的考量。就此，社會學家雖已提出：擬定科技治理白皮書、建構參與式科技評估制度、修訂科技基本法增列公民參與條款、建立未來委員會等理念，自宏觀角度指引了啟動政府治理典範創新的重要步驟與基本機制。然而，如何透過福島核災事故的啟示與各國後續回應措施的觀察，具體集中於核能行政領域，特別是核安管制課題，從組織、程序、制度的觀點，在法律與政策層次尋求落實於行政部門、或是立法部門，以涵納國人在福島核災事故後所展現的新公民意識，促成社會早日凝聚對能源、環境、災害議題的交疊共識，實屬我國當前政府的首要任務。

II. 主要內容

世界各國對福島核災的回應中，以德國梅克爾(Angela Dorothea Merkel)總理的「廢核轉向」最為明確

且激烈。德國何以能轉換其能源政策至非核目標，固然可追溯到 1970 年代中期德國反核運動的興起，乃至與其國內政黨政治之間的分合紛擾不無關係，但可以肯定的是，源於「綠黨」成立以來的社會運動，厚植公民社會的實力，進而在福島事故的觸動下，重新扭轉梅克爾總理的立場。其中，值得令人關注者，乃三一—福島事故發生後不到一個月的時間內，德國公布成立「安全能源供給相關倫理委員會」(Ethik-Kommission Sichere Energieversorgung, Ethical Commission concerned with reviewing "Safe Energy Supply")。該委員會於「安全能源供給」之外，同時結合「倫理」作為其稱謂，彰顯出德國意識到「核能發電是否具有倫理性」之問題，並以之作為該委員會的主要課題。其成員包括前環境部長 Klaus Töpfer、德國學術振興委員會會長 Matthias Kleiner，以及以風險社會理論聞名世界的社會學家 Ulrich Beck，總計共有六位來自執政與在野政黨的政治家、三位自然科學家、四位社會科學研究者、一名哲學家、一位宗教代表、一位產業界代表，其中支持與反對核能的委員約佔各半。該委員會嗣後提出的意見書「德國的能源轉換—朝向未來之綜合性方案」，以倫理觀點貫穿全文，呼籲盡可能及早關閉核能發電設施，其核心概念乃是對於永續發展可能性的堅持，強調當前人類對於生態系，甚至未來世代所具有的责任。此一委員會不只在德國是先例，更可能是世界首創。本計畫認為，其意義對本研究的重要性有三：(1)將倫理觀點與能源安全予以結合，印證前述風險與危機評估領域在內容層次的多元化觀察；(2)在風險與危機溝通機制的確立，跳脫傳統由上而下、從政府向人民傳導訊息的模式，改以由下而上、從公民社會向政府體制的傳導模式，吸納不同專業知識參與者，殊值重視；(3)強化政府核能決策的正當性基礎，消弭社會衝突、形塑國家核安管制與能源安全共識。當然，德國的非核轉向並非短時間內全部停止既存核電設施的運轉，而是以廢核為最終目標漸次轉型，此亦符合我國政府所宣示「穩健減核，逐步邁向非核家園」的政策目標。

何以德國能夠明確地朝向逐步廢核的目標邁進，其中一項重要的理由在於德國早已開始往再生能源的利用，進行國家能源轉型工程。從 1998 年到 2002 年，社會民主黨與綠黨的聯盟(SDP-Green coalition)不僅共同推動逐步廢核的政策，並且也促成再生能源法的制定。雖然在氣候變遷導致嚴重災害之前，仰賴核能發電可以巨幅縮短從化石燃料過渡到再生能源的時間，但延續利用核能的政策，也將使本來得以投入有關再生能源與能源效率發展的資金與技術專業人才，因此轉移到核能產業。但經過車諾比事故(Chernobyl)與福島事故兩個重大核災的震撼，德國的逐步廢核政策似已難以迴轉。儘管危機可以開啟改變政策的契機，然而政策究竟是否改變以回應災害風險的挑戰，仍取決於許多因素，例如：民主政體中不同政黨對危機與災害的評價、政黨聯盟之間的相對結合強度，以及是否有更多新的參與者加入政策的論爭等。相對於德國，中國、法國、英國與美國對福島核災事故的反應，就不若德國強烈。即便鄰近的北歐國家，如：瑞典、芬蘭，也並未追隨德國在福島事故後所採取的終結核能政策。甚至，美國聯邦核能管

制委員會(NRC)在2012年1月更批准了喬治亞洲東部一處新核電廠中兩座核能反應爐的興建許可。從歐巴馬總統在福島事件後所作的宣示來看，美國偏重核安管制的確保與強化，延續倚賴聯邦核能管制委員會，以及其他科學技術委員會的審查，來達成美國核能政策目標。是故，本研究計畫以若干國家作為研究考察對象，評估在核安管制資訊公開與危機溝通的機制建構上，我國未來可能面對之不同的演進方案(scenario)，所需相應設計之制度與路徑。

歐美先進國家從1960年代以來，就積極推動資訊公開立法，並且責成政府部門依照法律的精神，採取具體的行動，維護民眾知的權利。資訊公開法的執行，一方面展現公眾社會進步的精神，卻也對所有政府機關，尤其是主管核能安全的相關部門，帶來組織運作上的挑戰。如何透過制度性的設計與規範，兼顧公共利益與人權保障的均衡，即時回應民眾取得資訊的要求，提升為民服務的效能，落實民主參與的精神，是現階段核安管制機關執行資訊公開業務的重要課題。申言之，科學研究的成果及其應用之於法律或公共政策領域的影響，並非如同在實驗室的真空狀態！科學注入政治場域之後，所引發連鎖效應之複雜程度，既非物理變化亦非化學變化所能描述。從二十世紀晚期西方民主國家的歷史經驗顯示，科學證據本身未必足以形成民眾對政府決策的信任，而仍須仰賴「社會的制度性機制」，始能支撐科學研究的可信性，促成一般民眾對未知事物的理解，接受一定程度的生活風險，甚至政府亦應預先構築風險及危機溝通的步驟與方法。因此，推動核安管制資訊公開並建立危機溝通的策略，實具有高度之重要性。

核安管制機關有責亦有權，將其各項管制規定、決策、意見、及其立論之基礎，獨立地向大眾進行資訊之提供。由於公眾只有在管制和決策過程是透明的情況之下，才會對核能技術的安全利用產生足夠的信心，因此，管制機關應建立一套制度，允許獨立的專家和主要利害相關者（尤其是產業界、勞工團體、和公眾）的專家，提供他們的意見。而且，專家們的意見應予以正式記錄，並予公佈。尤其，專家本身可能亦未清楚意識到他們所做的，並非通常意義下所謂的「科學」工作，而毋寧是一種「混合式的活動(hybrid activity)」，摻雜著科學證據的發現，並包含了許多社會性與政治性判斷的因素。另一方面，於有關科學性的建議諮詢程序進行過程中，為了有效建立社會共識並引導政策的擬定，仍需要專家促成協商、談判與妥協，而並非民眾與專家的二元對抗關係。為促進良性的政府與人民之互動，以達成社會共識的建立，有必要在一般化的資訊公開法制基礎之上，參照涉及不同科技決策的行政領域，從危機溝通的角度，更細緻化充實資訊公開法制的既有規範。

我國推動資訊公開的立法與實施過程，至今未滿十年。核能資訊公開的作業，更涉及各國核能發電的密度、環境保護運動與經濟發展的經驗、公共利益與人權保障的意識、以及中央與地方的分權關係等因素密切相關。根據先進國家相關核安管制機構溝通與推動「公開資訊」的歷史經驗，相關員工對於 FOIA 立法精神與社會溝通

上，皆必須透過對參與同仁的教育訓練，凝聚共識共同編擬標準的作業程序與方法，方能化解阻力。更重要的是，資訊公開作業在執行上，由相關業務單位主動積極告知、並協助民眾取得所需的資訊，往往比啟動法定的作業程序來得事半功倍，節省社會成本。

自民國98年第三次全國能源會議，於「永續發展與能源安全」核心議題中，獲致「建置資訊公開與透明化制度」的共識結論之後，政府即經常強調「政府要加強確保核電的安全，以及改進處理放射性廢棄物的技術，並且強化公開透明、全民監督的機制」。另外，為有效推動核能資訊公開業務，原能會已於2009年10月成立「核能資訊公開作業小組」，專責核能資訊公開業務之規劃與推動。近年以來，原能會曾推動資訊公開的運作機制、資訊申請與回應的規範、釐清資訊公開與縮小限制公開的範圍，與績效評估等已經提出初步具體的規劃，制訂包括「核能資訊公開作業要點」，「處理民眾申請資訊公開作業程序」，「民眾旁聽會議及參與活動作業要點」等規程，也依「核能四廠安全監督委員會」開放民眾旁聽之實際執行經驗，修訂作業要點部份條文及相關附件。

然而，核安管制資訊公開的運作，最重要的關鍵在於是否能獲得社會大眾，尤其是核設施附近居民的支持，民眾有權透過適當的參與和溝通的機制來強化政府與民眾的互信。舉例來說：於當代風險社會之下，如何促使民眾接受、理解政府針對因應危機所形成的決策，仍免不了牽涉個人的、社會的價值觀、文化與官僚傳統等因素，假使行政授權科技專家或特定政府部門進行危機處理決策，而這些專家委員會或特定部門在認定危機是否已經發生或可能即將發，可能涉及須界定科學證據是否充分的關鍵門檻，因此不可避免地需在科學與安全性乃至損害的嚴重性之間進行衡量。這其中潛藏的問題，包括：科學家參與政府決策有無前提條件、科學知識的累積，有其偶然性與不可完全預測的特性、專家參與的決議對行政部門的實質影響、立法對行政授權專家參與的監督是否充分、資訊與程序的公開透明、利益衝突的迴避、司法對專家參與的審查密度、乃至民主與科學之間可能存在的衝突…等等。因此建立適當管道，讓民眾瞭解政府機關決策的內容、決策的依據，以及作成決策所參考的相關文件資料等，也就是有關公眾參與(public participation)的內涵，以及相關制度性機制與配套措施的設計與落實，將會是原能會未來推展資訊公開業務以獲得民眾對核能安全管制信任的關鍵。

鑑於有效的危機溝通更是維持公眾對核安管制機關產生信任的必要條件，而任何有關核能的意外事件，無論其發生在任何地方都非屬平常，即使發生在其他國家也有可能演變成國際級的災害應變。尤其，自日本福島核災事件發生以來，世界各國更加重視危機的因應與溝通策略，乃至相關機制的建立。因此，儘速建立核安管制機關的危機溝通作業準則，提供一個國家層級的危機溝通策略與藍圖(road map)也是必備的事項。

III. 結果與討論

國家與社會的關係並非一成不變，而是必須伴隨不同時代的政治、經濟、社會的情況，而持續不斷轉變。由於當代環境風險具有天災性、公共性、風險傳導特殊性以及溢流性等特色，例如：在環境風險所涉及的公共性越高時，就越難找到可以課責的對象，從而也會使得該當環境風險所具有的外部性增加。就風險傳導的特殊性而言，環境風險的跨域性與其他領域的風險問題不一定相同，環境風險的情況不一定有一定的載體，儘管有些環境風險是依附在人或特定物質的身上，但有些環境風險的問題卻不一定以生物或物品作為載體，最典型的就是氣候變遷的問題。通常此等風險所造成的損害範圍較大，損害的程度也會較為嚴重，同時也難以捉摸，國家要處理這些風險問題要投注的心力及所要花費的成本也較大。因此，從預防環境風險的角度以觀，落實核安管制的資訊公開與建立危機溝通之路徑，應基於對環境風險的重新認識，重視環境風險下各決策主體與社會的網絡式對話，以資訊公開作為強化核安管制的促因與溝通的前提基礎。

申言之，所謂「風險溝通」通常所指的是個人及團體在組織之間交換資訊及意見等相互作用的過程。學理上多認為風險溝通乃是以民主主義與自我決定、知的權利等現代社會主要價值為基礎。本研究更認為：於環境風險行政的正當性考量之下，由於面臨大量決策於未知的問題，對於正當程序的要求將更勝於傳統的環境行政程序。環境風險治理下所做成的決策，必須更能夠回應風險溝通的要求，才能取得決策決策的正當性基礎。

在一般行政程序中，在進行與公領域有關的決策時，必須開啟人民參與程序，使公共監督有機會發揮效用，並輔以決策透明的機制，以確保公共性因素可以為決策所瞭解及接受。另一方面，儘管決策必須相當程度依賴科技，但還是要對結論保持開放的態度，程序中引進是民社會對相關議題的警語及各方利益團體的意見，並使彼此間有緊密的交流。從而，確定國家所要保護的對象及範圍，並根據這樣的程序進一步以辯論的方式釐清爭點，作成適當的結論。最重要的就是要對實質的議題從事辯論。讓一般國民有對其安全有關事項做決定的空間外，也要讓廣大的市民社會有參與溝通的機會，特別是具高度公共性而無法化約成具體個人權利的事項，都必須要踐行程序參與、資訊公開及溝通的機制，以提升決策的正確性，並據以取得更強的正當性基礎。

在風險的背景下，對於程序參與的要求會比非風險領域的行政程序有更高的參與需求。以往資訊多是單方面的傳達，所著重的是「風險訊息」的流動，今日因為強調風險溝通，因此，重視資訊的雙向流動，甚至可能因未涉及多數人，形成多向流動的現象。而資訊法制表現在核安管制與環境風險行政上的重要性，其特徵包括：(1)資訊的掌握可相當程度將環境風險所生不確定性問題「相對化」；(2)資訊甚至可以獨立成為管制工具的一種，而對於資訊的掌握、公開及開示，有助於得到社會的信賴及共識的形成；(3)當政府可以適用「最佳可能獲知的科學」作為基礎，來思索是否採取一定的管制措施，將可以讓這樣的行政行為符合受管制行為與結果間必要連結及合比例性的憲法要求。事實上，「最佳可能獲知的科學」本身，就是資訊的一種；(4)在完整的資訊下，

透過溝通及討論，可以讓人們釐清要使用何等資訊，以及為何要使用此等資訊，換言之，風險溝通中所討論的民眾參與是已有自由流通的資訊為前提的；(5)為了要讓決策者可以因應不同狀況的變化，在環境風險的背景下本於比例原則作成決定，持續蒐集成為決策素材的資訊就是相當重要的基本功；尤其在有關氣候變遷的管制中，科學技術的研究及相關資訊的蒐集及分析更是不可或缺；(6)在資訊流通的正確性上，傳統的公共領域及近年來所興起的網路可以扮演相當重要的角色；(7)為了讓管制者可以順利地進行管制任務，檔案本身的信賴性就是相當重要的問題，有了正確而具有可信賴性的檔案，有助於研究者進行客觀地評估，媒體也可以做客觀地報導來幫助市民理解情況；(8)環境風險的消息本身具有新聞價值，而媒體對於市民意識有強大的影響力及重要性。環境風險的新聞本身並不會有消息阻塞的問題，但在制度上所要確保的是此等新聞的資訊是否可以暢通，相關的資訊是否會被過度誇大，而誤導人民對於風險的感知；(9)為了讓市民與專家間對風險認知的差距縮小，行政部門必須就更多的資訊主動以人民可以理解的詞彙發布，一旦政府以直接與積極的態度對人民提供資訊，將可以期待市民在知識及能力上有提升的可能性。

IV. 結論

本計畫針對核安管制資訊公開提出處理作業流程圖之建議，從正當法律程序的角度，研提核安管制資訊公開的公聽會或聽證會參考程序，認為將現行內部作業準則等行政命令明文法制化有其必要性與價值。從風險評估、風險管理到風險與危機溝通的可行性機制與對策，具體描繪核安危機溝通路徑圖，以供學界、政府與國人參考。

當代政府面對風險治理的特徵，即在如何確立一套「以風險分析為中心」的核能安全控管機制，先以科學為基礎進行「風險評估」，並藉由衡量利害以挑選適當之預防或管控方法來進行「風險管理」，同時透過各方資訊或意見之交流進行「風險溝通」，乃至「危機的因應與溝通機制」。其目的乃希望核能安全立法與政策的訂定，能在符合科學精神的同時，也兼顧各方利益的權衡與公權力的可預測性。本研究確立了以我國仍應以「風險評估」、「風險管理」、「風險溝通」作為核能安全管制政策的核心要素，並進一步透過核能安全風險評估與溝通之聽證程序，逐步建立「核安資訊公開專家諮議會」的資訊公開申請之審駁機制。未來可供參考或落實之研究成果，包括以下幾個重要課題：(1)建立並執行核能安全資訊公開的傳播管道；(2)建立並執行核安管制作業公開說明會乃至相關聽證程序的機制；(3)建立並執行民眾參與監督核能安全的機制；(4)建立並執行明確的會議公開程序與配套措施；(5)建立並執行一個國家層級的危機溝通策略與藍圖（road map）。

參考文獻

- [1] 長谷川公一，黃靖嵐譯，FUKUSHIMA 能拯救世界嗎？轉向非核社會的世界史，思與言，第 51 卷第 1 期，2013 年 3 月。
- [2] IAEA, Progress in the Implementation of the IAEA Action Plan on Nuclear Safety: Report by the Director

General, IAEA Doc. GOV/INF/2012/11-GC(56)/INF/5 (Aug. 9, 2012), available at http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC56/GC56InfDocuments/English/gc56inf-5-att1_en.pdf.

- [3] IAEA, Summary Report of the 5th Review Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety, IAEA Doc. CNS/RM/2011/6/Final (Apr. 2011), available at <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/cns-summaryreport0411.pdf>.
- [4] Stephen G. Burns, The FUKUSHIMA DAIICHI Accident: the International Community Responds, 11 WASH. U. GLOBAL STUD. L. REV. (2012).
- [5] 2nd Extraordinary Meeting of the contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety, available at <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/cns-summaryreport310812.pdf>.
- [6] Daniel A. Farber, Introduction: Legal Scholarship, the Disaster Cycle, and the Fukushima Accident, 23 DUKE ENVTL. L. & POL'Y F. (2012)
- [7] 周桂田，全球化風險挑戰下發展型國家之治理創新——以台灣公民知識監督決策為分析，政治與社會哲學評論，第 44 期，2013 年 3 月。

關鍵群體之低放射性核廢料認知與風險溝通平台

The risk perception and communication platform among key groups in low-level radioactive nuclear waste policy

計畫編號：103-NU-E-004-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃東益

e-mail：tyhuang@nccu.edu.tw

執行單位：國立政治大學公共行政學系

摘要

近年來，各國對於高度爭議的核電相關選址政策，已有許多成功案例，透過審議式的風險溝通，讓公民有機會在資訊充分的公開討論環境下，參與政策的理性對話。而公民彼此的生活經驗與知識，也能透過風險溝通過程相互交流，以強化公共政策的品質。因此，低放射性廢棄物最終處置場的選址過程，除了工程與技術的考量外，也應釐清公民對低放最終處置的不同風險認知，並提供其所需的資訊，以便進行理性知情的政策溝通。有鑑於此，本計畫基於相關文獻，一方面透過量化調查與媒體論述內容分析的研究方法，探究台灣民眾對低放最終處置的風險認知與設施接受度影響路徑，另一方面針對不同關鍵群體的影響路徑差異，與期望獲取的低放射性廢棄物最終處置資訊內容，對照於當前新聞報導與政府網站中，各方對低放射性廢棄物最終處置政策的論述焦點，以提出未來風險溝通平台之建議。俾使多元立場之關鍵群體，能在獲得充分的議題資訊，與相互尊重的民主科學風險管理模式，進行審慎思辯的風險溝通，進而降低地方阻力，同時增加選址決策正當性與長遠穩定性。

關鍵詞：低放射性廢棄物最終處置、關鍵群體、風險認知、風險溝通

Abstract

In recent years, there are many success cases around the world using deliberative risk communication in controversial nuclear power policy, so that citizens have the opportunity to obtain adequate information and participate in rational policy discuss in public. During these risk communication, citizens can communicate their life experiences and knowledge to achieve the quality and stability of nuclear power policy. Therefore, in addition to engineering and technical considerations, the siting of low level radioactive waste final disposal should also clarify the difference among key groups' risk perception and acceptance, as well as provide information they need to promote an informed and rational risk communication. Based on relative literatures, this project use quantization survey to explore the impact path to people's risk perception and degree of acceptance. Then, based on the results of SEM analysis and the kinds of information about low-level radioactive waste final disposal of different key groups, this project use content analysis of news papers and governmental websites to discuss what kind of information contents should this risk communication platform provide. The expected effects of this project including: promoting

the democratization of the sitting of low level radioactive waste operations' final disposal; making the key groups with diverse position to communicate rationally after obtaining adequate knowledge and information, thereby reducing local resistance, smooth the siting work while increasing the legitimacy of decision-making and long-term stability.

Keywords: low level radioactive waste final disposal, key groups, risk perception, risk communication

I. 前言

低放射性廢棄物最終處置場選址的議題不僅涉及客觀的技術安全層次，民眾的風險認知更是影響其設施接受度的重要因素。在民眾對低放射性廢棄物最終處置場普遍存在高風險疑慮的情況下，使其即便瞭解整體社會所需，但獨自承擔高科技環境風險的情況，往往引發其不公平的感受，乃至採取抗爭行動。縱使相關技術研究長期致力於提升最終處置場的安全性，但民眾的風險認知卻是一個多方權衡下的主觀判斷過程（杜文苓、施麗雯、黃廷宜，2007），在此多方權衡過程中，常見的回饋金機制可能產生相反作用（黃東益，2010），或需搭配設施的風險認知、設置決策程序、設廠者的被信任度、公平性、設施本身需求度、社會壓力、公民責任心、社會經濟因素…等其他因素綜合考量（蕭代基、黃德秀，2006），足見低放最終處置場的選址議題，儼然已成為科技社會中的風險溝通問題。

為了克服單向的政策說明、或靜態加總式公民投票的侷限，近年來各國對於高度爭議的核能相關選址政策，已有許多成功案例，透過審議式的風險溝通模式，讓公民有機會透過資訊充分取得與公開討論的環境下，參與政策的理性對話（黃東益，2010）。而公民彼此的生活經驗與知識，也能透過溝過程相互交流，強化公共政策的品質。因此，低放廢棄物最終處置場的選址作業，除了工程與技術的考量外，更需釐清不同關鍵群體風險認知與影響路徑的差異，並提供其所需的資訊，以進行理性知情的溝通。

II. 主要內容

有鑑於過去國內「低放最終處置場選址」相關研究，主要針對公投制度設計、補償機制、專家風險覺知、政策工具（湯京平，2009；蕭代基、黃德秀，2006；黃禎財，2002；許文鴻，2012）。而「風險認知」相關研究，則多偏重環境治理典範的討論（周桂田，2002、2013；杜文苓，2011），均尚未就低放選址議題，進行過全國民眾接受度的調查分析。爰此，本計畫乃透過台灣地區

的量化調查分析，釐清民眾對於低放最終處置場接受度的影響路徑。再針對不同關鍵群體的影響路徑，與期望獲取的低放最終處置相關資訊，甫以自「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」公布之後（從 2006 年 5 月到 2014 年 12 月）的新聞報導及政府網站中，利害相關人對低放射性廢棄物及最終處置的論述內容分析，藉以提出未來低放最終處置溝通平台的建議，俾能透過知情與民主的風險溝通，建立民眾與政府之間的信任關係，強化低放最終處置場的正當性。

綜合以上所述，本計畫的研究問題旨在探究：

1. 台灣民眾對低放射性廢棄物最終處置的風險認知與設施接受度為何？不同人口變項、社經背景的民眾存在什麼樣的顯著差異？
2. 台灣民眾對於低放最終處置場設施接受度的影響路徑為何？不同資訊管道的民眾在上述影響路徑呈現什麼樣的顯著差異？
3. 台灣地區民眾期望獲得的低放最終處置資訊內容為何？不同資訊管道民眾期望獲得的資訊內容有何差異？當前新聞報導與政府網站中各方對低放最終處置的主要論述內容為何？
4. 未來針對不同關鍵群體進行風險溝通的低放最終處置溝通平台有哪些應注意的面向？並加強呈現哪些資訊內容？

III. 結果與討論

本計畫在量化調查部分指出，有八成以上的台灣地區民眾，不同意設置低放射性廢棄物最終處置場，對照國際間五到七成的反對比例（Hine et al.,1997; Sjöberg, 2009）相對偏高。並且當設施距離居住所在地越近，民眾有更強的反對立場。而回饋金的經濟誘因對增強民眾設施接受度的影響並不強烈，甚至可能增加民眾的遲疑。然而，無論是否支持興建，都有部分民眾缺乏參與公投的意願，顯見有其他立場以外的因素，造成民眾對於地方公投的遲疑。此外，台灣民眾也對於低放射性廢棄物最終處置場的風險認知普遍偏高、對相關機關的信任程度普遍偏低，並對於低放射性廢棄物最終處置與選址的相關知識仍有待提升。

而在「性別、教育程度、政黨傾向」三個類別上，呈現出顯著與穩定的設施接受度差異。其中「女性」較「男性」有更高比例的不同意立場，但也有明顯不去投票的傾向。「專科」與「大學以上」教育程度者，有較高比例的同意立場；且教育程度為「專科」者，有較高意願投票同意。而「泛藍」支持者有較高比例的同意立場，「泛綠」支持者則有較高比例的不同意立場，且兩者均有較強的意願參與公投表達意見，顯現低放射性廢棄物最終處置場選址議題在台灣高度政治化的傾向。

進一步分析「性別、教育程度、政黨傾向」這三個類別群體，獲取低放射性廢棄物最終處置相關資訊的主要資訊管道，可以發現資訊主要來自「環保團體」的「女性」與「傾向泛綠」者，有明顯高比例的不同意立場。而資訊主要來自「台灣電力公司」的「泛藍傾向」者，則有明顯高比例的同意立場。然而，教育程度為「大學及以上」者，其資訊除了主要來自「環保團體」，也有「國內學術單位」，反而有明顯高比例的同意立場。而資訊同樣主要來自「國內學術單位」與「原子能委員會」

的「男性」，也有明顯高比例的同意立場。

因此，本計畫乃針對不同資訊管道者的風險認知與設施接受度影響路徑加以比較，經結構方程式模型檢證後發現，「原能會、台電公司與國內學術單位」與「環保團體、國際官方核能組織」兩組資訊管道，形成兩類設施接受度的影響路徑模型。這兩類資訊管道在「低放知識-風險認知」的影響路徑上，雖不顯著但方向相反，故驗證了 Beck (2000) 所指，科技專家與非科技專家在風險認知上的落差。因此單向的知識宣導，較有可能降低資訊主要來自「原能會、台電公司、國內學術單位」者的風險認知。

另一方面，主要資訊管道為「環保團體、國際官方核能組織」者的「風險認知」雖對其「設施接受度」有更強的影響，但其「低放知識」程度越高，其「風險認知」卻也越高，故提升「機關信任」成為降低其風險疑慮的一個重要的中介。這也呼應了相關文獻所指，在過去專家決策的知識與權力不對等的結構下，加深民眾對於政府資訊傳遞與決策的不信任。而從「低放知識」程度越高、「機關信任」越低的影響路徑方向，顯現民眾對原能會與台電公司可信度的質疑，既非源於知識不足、也非知識宣導可以提升，故必要探究其期望獲得的低放射性廢棄物相關資訊為何。

經由將上述兩類資訊管道與民眾期望獲取的資訊內容進行交叉分析後發現，主要資訊管道為「環保團體、國際官方核能組織」的民眾更為關切「程序正義與公民參與問題」，也因此著重於選址計畫與技術安全等資訊的宣導，並不足以降低其風險認知。反之，對主要資訊管道為「原能會、台電、國內學術單位」的民眾，由於其更關切選址計畫與處理技術，可能較能發揮降低風險認知的效果。上述兩種期望資訊內容的分歧，也呈現出未來風險溝通時，應兼顧低放射性廢棄物最終處置相關風險與安全技術問題，與非技術安全層面的程序正義與公民參與問題。

其次，在媒體論述的內容分析部分，綜觀新聞報導與政府網站中，有關低放射性廢棄物最終處置之「選址執行規劃與進度、安全性、潛在風險、程序正義與公民參與、回饋金以及國際範例介紹」等六大主題的論述，可以歸結出以下發現：

第一，關於低放射性廢棄物的討論主題，過去討論的焦點放置於最終處置場址的設置及決定方式，而忽略其他相關議題的重要性。本計畫經由內容分析的實證資料，發現關於低放射性廢棄物的相關議題十分龐雜，除了選址的爭議之外，包括目前放置場址的安全、各類潛在的風險、既有制度的設計及回饋金的發放等，都是值得加以深入探討的主題。換言之，未來政府在進行低放射性廢棄物的風險溝通時，除了針對預定廠址、選址方式等議題進行討論，同時，應該其他相關的議題納入考量，如此才能有助於解決目前低放射性廢棄物的爭議。

第二，關於低放射性廢棄物各方觀點，過去著重的焦點在於政府機關與環保團體之間的對立與抗爭，然而，隨著議題的層級逐漸提升，吸引越來越多個人及團體的關注。經由本計畫的實證資料，發現各類利害關係人基於本身的立場及需求，而對於低放射性廢棄物的看法十分不同，雖然，在大部分的議題之中，行政機關的立場相對一致，但是，仍有出現不一致的情況，而這樣的不

一致，或多或少代表著低放射性廢棄物政策溝通上的問題。

而在行政機關之外，其實，立法機關與監察機關對於低放核放若干政策或措施所顯示出的不滿，同樣也代表著低放射性廢棄物存在若干必須改善的地方，然而，在行政機關改善的幅度與進度不如預期的情況之下，更多的不滿與憂心就直接反應在其他利害關係人的態度之中。在各類利害關係人各執己見，且缺乏有效溝通平台的情況之下，可以預見的是，未來各方的衝突只會加劇而無法降低。尤其是在不同利害關係人堅持己見的影響之下，搭建一個對話的平台，促進各方進行深度的互動，成為化解我國低放射性廢棄物爭議的首要之務。

第三，關於各類利害關係人所提出的客觀論述與標準，由於射性廢棄物物料處理涉及高度技術性議題，所以，過去討論的焦點集中在知識與技術面的討論。但是，經由本計畫的實證資料，發現並非所有議題都有涉及知識或技術面的內容，而是政治面或管理面的問題。加上不同類型的利害關係人所具備的知識或技術並不相等，因此，容易形成對話上的障礙。

IV. 結論

基於上述的研究結果，本計畫針對未來打造不同關鍵群體所設立的溝通平台，提出下列政策建議：

1. 在關鍵群體的指認上，需參酌風險認知理論的個人與社會兩種取向，在個人層次特別關注「性別、教育程度、政黨傾向」三個類別群體的設施接受度差異，加強關切反對立場者的顧慮。但也需加強對立場不甚穩定「20-29 歲」民眾進行溝通，使其能對此議題有更加知情的選擇，而實現世代正義。在社會層次方面，需理解科技專家與非科技專家在風險認知內涵上的差異，並重視「低放知識、機關信任」與相關研究指出的其他重要變項，對不同資訊管道群體的影響路徑，方能針對影響其風險認知的主要顧慮，提供適切的資訊內容。

2. 在風險資訊內容的呈現上，由於不同關鍵群體所具備的知識或技術並不相等，所以，在資訊內容的設計上，也因該要有所區別。不過，必須考量的是，低放射性廢棄物的問題，不僅涉及知識或技術面的資訊，同時，也涉及政治面或管理面的資訊，如何適當的說明或呈現這些面向的資訊，將是未來溝通平台的一大挑戰。

3. 在討論議題的設定上，除了將焦點放置在最終處置場址的設置及決定方式之外，同時，也應該將目前放置場址的安全、各類潛在的風險、既有制度的設計及回饋金的發放等議題一併納入討論。不過，由於議題之間存在高度的關聯性，因此，未來進行溝通的過程中，應該依照議題的重要性與關聯性排定優先順序，從最根本、最關鍵的議題逐項討論，不應全部摻在一起，如此才能有效地、徹底地解決我國長期以來低放射性廢棄物的爭議。

4. 在溝通平台的選擇上，建立及管理一個溝通平台並非易事，特別是關於公共政策討論的平台。目前國發會針對放射性廢棄物處置議題試行「公共政策網路參與平台」，因此本計畫認為未來或許可以增添現存經濟部之「低放最終處置網」網站、民間團體與國際組織官方網站中既有的放射性廢棄物相關資訊，當作各界進行風險溝通的基礎，並開闢政策討論專區與平行監督機制，

以供各界進行互動及討論。

至於未來學術研究可以策進的方向，本計畫建議如下：

1. 有鑑於近半數的樣本沒有主要的資訊管道，也有近三成樣本沒有表示具體期望獲得的資訊。這類民眾性質分歧，難以本計畫測量工具與分析方式探知，或可作為後續研究的發展方向。

2. 由於本計畫為台灣低放射性廢棄物風險認知與設施接受度的初探研究，並無成熟的理論架構與問卷測量工具，建議未來可考量加入「能源素養」、「核能態度」、「替代能源態度」等影響構面，並瞭解民眾對「回饋金」與「地方公投」的認知。亦可進行縱時性的民調分析，以探討不同階段政策工具對設施支持度的影響，作為政府決策的參考依據。

3. 本計畫嘗試利用新聞媒體報導與政府網站資訊，作為理解不同利害關係人對於我國低放射性廢棄物政策論述之依據。雖然獲得上述的研究成果，但作為初探性研究仍有若干不足，如政府網站資料撈取的限制、無法直接訪問各類利害關係人等，因此，建議後續的研究可以從這些地方著手。

綜合以上所述，未來低放最終處置場之風險溝通，除了提升最終處置場選址相關機關的中立性與可信度，也應針對不同關鍵群體提供所需資訊，並分別建立特定的協調與溝通管道。此外，亦應認知到選址計畫與技術安全資訊的單向宣導有其侷限，未來除了擴大民間審議以外，或可研議平行監測與中止之權力，在透明公開的前提下，加強民眾信任與瞭解，方能搭配公投制度與相關配套，化解台灣民眾對低放最終處置場的鄰避情結。

參考文獻

- [1] 杜文苓 (2011)。環境風險與科技政治：檢視中科四期環評爭議。東吳政治學報，29 (2)：57-110。
- [2] 杜文苓、施麗雯、黃廷宜 (2007)。風險溝通與民主參與：以竹科宜蘭基地之設置為例。科技、醫療與社會，5：71-107。
- [3] 周桂田 (2002)。在地化風險之實踐與理論缺口—遲滯型高科技風險社會。臺灣社會研究，45：69-122。
- [4] 周桂田 (2007)。新興風險治理典範之芻議。政治與社會哲學評論，22：179-233。
- [5] 周桂田 (2013)。全球化風險挑戰下發展型國家之治理創新—以台灣公民知識監督決策為分析。政治與社會哲學評論，44：65-148。
- [6] 林佳瑩、徐富珍 譯 (2005)。Earl Babbie 原著。研究方法：基礎理論與技巧。台北市：雙葉書廊。
- [7] 林國明、陳東升 (2004)。公民投票與審議民主。公投民主在台灣學術研討會，台北。
- [8] 邱崇原、湯京平 (2014)。公民投票與鄰避困境—台灣低放射性廢棄物貯存場的選址經驗及南韓之啟示。臺灣民主季刊，11 (4)：1-36。
- [9] 許文鴻 (2012)。低放最終處置場選址之政策工具：多元利害關係人觀點。政治大學公共行政學系碩士論文，未出版。
- [10] 陳守國 (2012 年 5 月 21 日)。核廢料候選場址 公投決定。中央通訊社。
- [11] 湯京平 (2009)。低放最終處置設施候選場址地方

- 公投之研究。原委會物管局委託研究計劃，未出版。
- [12] 黃東益 (2010)。低放最終處置公民參與之研究。原能會物管局委託研究計劃，未出版。
- [13] 黃東益 (2012)。核能設施安全認知與核能政策發展。國科會委託研究計劃，未出版。
- [14] 黃禎財 (2002)。學者專家對低放最終處置風險知覺之研究。中山大學公共事務管理研究所碩士論文，未出版，高雄。
- [15] 蕭代基、黃德秀 (2006)。補償對鄰避效應的影響－以烏坵低放射性廢料最終處置場為例。2006 年環境資源經濟、管理暨系統分析學術研討會，2006 年 9 月 15 日，國立高雄師範大學，高雄市。
- [16] Beck, U. (1994). *The Reinvention of Politics: Towards a Theory of Reflexive Modernization*, Pp. 1 – 55 In U. Beck, A. Giddens and S. Lash (Eds.). *Reflexive Modernization*. Cambridge: Polity Press.
- [17] Beck, U. (2000). *The Cosmopolitan Perspective: Sociology of the Second Age of Modernity*. *The British Journal of Sociology*, 51(1): 79-105.
- [18] Brewer, P. R., & B. L. Ley (2013). Whose Science Do You Believe? Explaining Trust in Sources of Scientific Information about the Environment. *Science Communication*, 35(1): 115-137.
- [19] Chung, Ji Bum, & Kim, Hong-Kyu (2009). Competition, Economic Benefits, Trust, and Risk Perception in Siting a Potentially Hazardous Facility. *Landscape And Urban Planning*, 91: 8-16.
- [20] Devine-Wright, Patrick (2013). Explaining "NIMBY" Objections to a Power Line: The Role of Personal, Place Attachment and Project-Related Factors. *Environment and Behavior*, 45(6): 761-781.
- [21] Fan, M.-F. (2006). Environmental Justice and Nuclear Waste Conflicts in Taiwan. *Environmental Politics*, 15(3): 417- 434.
- [22] Groothuis, Peter A. And Gail Miller (1997). The Role of Social Distrust in Risk-Benefit Analysis: A Study of the Siting of a Hazardous Waste Disposal Facility. *Journal of Risk and Uncertainty*, 15: 241 – 257.
- [23] Hanberger, A. (2012). Dialogue as Nuclear Waste Management Policy: Can A Swedish Transparency Programmed Legitimize a Final Decision On Spent Nuclear Fuel? *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 9(3): 181-196.
- [24] Hine, D. W., G. C. Summers, M. Prystupa, & A. Mckenzie-Richer (1997). Public Opposition to a Proposed Nuclear Waste Repository in Canada: An Investigation of Cultural and Economic Effects. *Risk Analysis*, 17(3):293-302.
- [25] Huang, L., J. Ban, K. Sun, Y. Han, Z. Yuan, & J. Bi (2013). The Influence of Public Perception on Risk Acceptance Of The Chemical Industry And The Assistance For Risk Communication. *Safety Science* 51: 232 – 240.
- [26] Hunter, S. & K. M. Leyden (1995). Beyond NIMBY: Explaining Opposition to Hazardous Waste Facilities. *Policy Studies Journal*, 23(4): 601 – 619.
- [27] Jeleva, M., & S. Rossignol (2009). Political Decision of Risk Reduction: The Role of Trust. *Public Choice*, 139(1): 83-104.
- [28] Johnson G. J., (2007). The Discourse of Democracy in Canadian Nuclear Waste Management Policy, *Policy Sciences*, 40(2), 79-99.
- [29] Koerner, Cassandra L. (2014). Media, Fear, and Nuclear Energy: A Case Study. *Social Science Journal*, 51(2): 240-249.
- [30] Krannich, R. S. & Albrecht, S. L. (1995). Opportunity/Threat Responses to Nuclear Waste Disposal Facilities. *Rural Sociology*, 60(3): 435 – 453.
- [31] Liu, Y., Xie, CL., & She, SX. (2014). Perception of Delayed Environmental Risks: Beyond Time Discounting. *Disaster Prevention and Management*, 23(2): 112-122.
- [32] Mah, Daphne Ngar-Yin, P. Hills, & J. Tao (2014). Risk Perception, Trust and Public Engagement in Nuclear Decision-Making in Hong Kong. *Energypolicy*, 73: 368 – 390.
- [33] Moser, C., M. Stauffacher, T. Smieszek, R. Seidl, P. Krütli, & R. W. Scholz (2013). Psychological Factors in Discounting Negative Impacts of Nuclear Waste. *Journal of Environmental Psychology*, 35: 121-131.
- [34] Nowlin, M. C., & Delozier G. (2011). Reversing Nuclear Opposition: Evolving Public Acceptance of a Permanent Nuclear Waste Disposal Facility. *Risk Analysis*, 31(4): 629-644.
- [35] Perko, Tanja (2012). Modelling Risk Perception and Risk Communication in Nuclear Emergency Management: An Interdisciplinary Approach. Research Supported By the Aspirant Wetenschappelijk Medewerker (AWM) Program Founded By the Belgian Nuclear Research Centre SCKCEN.
- [36] Rothman,S., & S. R. Lichter (1987). Elite Ideology and Risk Perception in Nuclear Energy Policy. *The American Political Science Review*, 81(2): 383-404.
- [37] Rowan, K. E. (1994). Why Rules For Risk Communication Are Not Enough: A Problem-Solving Approach To Risk Communication. *Risk Analysis*, 14(3): 365 – 374.
- [38] Siegrist, M. (1999). A Causal Model Explaining the Perception and Acceptance of Gene Technology. *Journal of Applied Social Psychology*, 29(10): 2093-2106.
- [39] Sjöberg, L. & Britt-Marie Drottz-Sjöberg (2008).Attitudes Towards Nuclear Waste and Siting Policy: Experts and the Public. In Aronld P. Lattefer (Ed.), *Nuclear Waste Research: Siting, Technology And Treatment* (Pp.47-74). Nova Science Publishers, Inc.
- [40] Sjöberg, Lennart (2004). Local Acceptance of a High-Level Nuclear Waste Repository. *Risk Analysis*, 24(3): 737-749.
- [41] Sjöberg, Lennart (2009). Precautionary Attitudes and the Acceptance of a Local Nuclear Waste Repository. *Safety Science*, 47: 542 – 546.
- [42] Skarlatidou, T. Cheng, & M. Haklay (2012). What Do Lay People Want To Know About The Disposal Of Nuclear Waste? A Mental Model Approach to the Design and Development of an Online Risk Communication. *Risk Analysis*, 32(9): 1496-1511.
- [43] Slovic, P. (1999). Trust, Emotion, Sex, Politics, and Science: Surveying the Risk-Assessment Battlefield. *Risk Analysis*, 19(4):689-701.

- [44] Slovic, P. (2012). The Perception Gap: Radiation and Risk. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 68(3): 67-75.
- [45] Spies, S., S. H. Murdock, S. White, R. Krannich, J. D. Wulfhorst, K. Wrigley, F. L. Leistritz, R. Sell, & J. Thompson (1998). Support For Waste Facility Siting: Differences Between Community Leaders And Residents. *Rural Sociology*, 63(1): 65-93.

核能安全民意調查之執行與研析

The Research and Analysis of the Polls of Nuclear Power Safety

計畫編號：103-2623-E-128-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：梁世武

e-mail：wuu@mail.shu.edu.tw

計畫參與人員：杜若婷

執行單位：世新大學公共關係暨廣告學系

摘要

福島事件後，全球核能民意發生變化，對台灣的核能民意也有很大的影響。就我國的核能發展經驗而言，推動時往往出現許多重大的爭議。因此在進行核能政策的調整前，必須充分瞭解政治與社會意見。本研究對全國民眾及核電廠週遭民眾進行調查，希望比較民眾在核能安全議題上的風險認知與態度，並進一步評估民眾的社會角色與環境意識，以透過不同途徑瞭解民眾如何理解與形成核能態度。

在研究方法上，採取問卷調查的方式，舉行兩次電話訪問調查，調查主題包括：人口變項、核能風險認知、核能發電態度、社會角色、意識型態、核能資訊接觸與信任情形。每波調查對象則分為全國民眾與核電廠週遭民眾，全國民眾部分將完成 1068 份有效樣本，核電廠週遭居民部分則將完成 400 份，共計完成 1468 份有效樣本。在第一次調查前將進行問卷討論會，調查後則將進行專家座談會，就調查結果進行討論，擬具核能安全相關政策建議作為原能會施政之參考。而研究成果除了評估也將與國外調查進行比較，並於未來進行長期調查，以追蹤民意趨向。

關鍵詞：核能安全、民意調查、風險認知、社會角色、環境意識

Abstract

After Fukushima accident, the global nuclear energy opinion dramatic punctuation also affects Taiwan nuclear energy opinion. Driven by the pressure from global warming and increasing price of oil, government officials around the world begin to reexamine not only their energy supply policies but also the usage of nuclear energy. However, from the previous nuclear experience in Taiwan, we discover that nuclear issues lead to conflicts frequently. It is extremely necessary to observe public opinions before making nuclear policy decisions. Therefore, this study would survey general public and the residents around nuclear power plants and try to figure out: public perceptions and attitudes toward nuclear safety, and further assess the social role of the public and environment awareness to the public through various approaches to understand how to understand and form attitudes to nuclear power issues.

This study is based on questionnaire survey and telephone survey will be conducted twice annually. The survey issue emphasizes on demographics, nuclear information needs and information behavior, nuclear risk

perception, nuclear attitude etc. The survey object includes general public and local residents around nuclear power. The study would complete 1468 samples, among which 1068 samples are from general public and 400 samples are from local residents. The questionnaire discussion will be held before the survey. Otherwise, expert panel discussion will be held after the survey and it will provide suggestions for nuclear safety policy to ACE. Last but not least, this study will not only compare the research from other countries but also intend to continue the survey in the future in order to track public opinion for nuclear issues.

Key words: nuclear safety, public opinion survey, risk perception, social characteristic, environmental ideology.

I. 前言

2011 年 3 月日本發生福島核子事故，不僅重新將核能的使用變成全球的重要議題，也翻轉了台灣民眾對核能的態度。許多國家為此紛紛進行民意調查，其中包括兩個大規模的跨國民調：分別由 Gallup 與 Ipsos Social Research Institute 所執行，詢問各國受訪者是否支持使用核能以及對核能的喜好程度。結果顯示，雖然福島核子事故對全球民意變動造成重大影響，但這樣的影響也因地區不同有所差異，甚至有些國家民眾對核能態度在 1 年後就回復到福島核子事故前的水準(IAEA, 2012)。

1997 年通過京都議定書後，全球暖化現象日受各國重視，其中能源使用即為控制溫室氣體的核心議題之一(Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997)。自 2003 年起，石化燃料價格飆升，促使各國政府檢討其能源與電力供應政策，核能發電的穩定性，使其成為重要的替代選項之一。

另一方面，核能安全的問題在民眾的心中留下許多疑慮，過去在 1979 年發生三哩島事故，1986 年發生車諾比事故，乃至於 2011 年的福島核子事故，多次的重大核安事故，讓全球不少民眾憂慮與恐慌。除此之外，核電廠對環境的污染與核廢料的處置，也經常受民眾與環保團體的質疑，因此讓核能議題伴隨著許多的爭議性。在國際上，許多國家便透過定期的民意調查方式，持續追蹤掌握民眾的態度變化。

以美國為例，自 1983 年起便透過核能研究所，每年進行核能態度追蹤研究，到 2011 年起更發展為 1 年 2 次的調查。結果顯示，1986 年後的美國民眾，不僅變得越來越偏好使用核能，也傾向認為核能是安全的能源。

2011 年福島核子事故雖然一度拉近美國民眾喜歡與不喜歡核能的比例，但後來又再度拉開差距；在加拿大，自 2003 年起由加拿大核能協會委託 Ipsos-Reid 公司每年出版核能態度研究報告；在瑞典則是自 1986 年起由 SOM 機構每年進行全國性郵寄問卷調查（見附錄一）。

本研究團隊於 2009 年起便開始關注核能安全相關議題，透過「核能安全民意調查模式之建立」研究，建立起核能安全民意調查的基本調查機制；2010 年度接續進行「民眾核能安全認知與態度民意調查」；到 2011 年度執行「核能安全民意調查-核能安全資訊需求與接收行為調查」，比較一般民眾與核電廠周遭居民的資訊需求及接收行為，並提出核能安全資訊傳播策略；在 2012 年以「核能安全管理與緊急應變作為風險溝通之規劃與研究」為題，分析不同情況下對民眾進行風險溝通的作為並提出具體策略；2013 年執行「核能安全議題之性別溝通策略研究計畫」，嘗試分析不同性別民眾對核能安全議題的瞭解並提出溝通策略。

根據過去研究結果綜合顯示，男性比女性較瞭解核能相關議題，較傾向認為核電安全，也比較支持使用核能發電。另一方面，年輕、高學歷者亦相對較瞭解與支持核電。依據 2011 年的研究結果則顯示，核電廠當地居民較全國民眾認為核能安全溝通管道較充足，代表政府對核電廠周邊民眾的溝通較密集。

本次研究除接續 2009-2013 年度之重要調查項目(例如：核電支持度、風險認知、核能知識等)外，亦規劃延續進行 2011 年度核能安全資訊需求及接收相關之跨國比較項目，同時分別調查核電廠周邊民眾和全國民眾，以期瞭解不同屬性的民眾對核能知識、資訊接收、風險認知、環境與經濟意識型態的差異，研究這樣的差異如何影響核電態度或行為，並提出對民眾進行溝通的可行策略。

本研究主要研究目的如下：

- 1.比較不同屬性民眾對使用核能態度的變化。
- 2.探討不同屬性民眾對核能議題瞭解程度的差異，以及如何接收資訊的管道、信任的對象等。
- 3.分析不同意識型態民眾對核能發電風險認知態度。

II. 主要內容

本研究將透過文獻分析、問卷調查法（於 103 年進行 2 次全國與核電廠周邊民眾電話訪問）、專家座談會以及跨年度比較分析方式等進行研究，以下就研究流程、研究設計與架構、抽樣方法與資料分析方法進行說明。

1.文獻蒐集：蒐集近年（重大事件）核能安全、風險認知、資訊接收等相關文獻資料，以瞭解國內外重要核能議題之研究概況（如政府面對重大事件之危機處理情形，媒體傳播何種訊息，以及民眾相關反映等資訊），俾利提出核能民意研究與溝通方法之策略。

2.量化研究：於上下年度各執行一波，以問卷調查方式進行，延續過去研究足供跨國比較題組，再設計與核能議題有關之問卷題目，以及與風險認知、意識型態之題組。問卷設計後邀請專家學者進行問卷討論會，以確保問卷效度，並經前測確定信度後執行調查。每波調查對象包括全國 1,068 位以及核電廠周邊居民共 400 位（每座核電廠周邊各調查 100 位）樣本。

3.資料分析：調查結束後，先進行基本的統計分析，也將著重於歷年調查資料與跨國研究的比較分析，以及不同屬性民眾差異的比較分析。量化分析結果將與專家座談結果彙整後撰寫研究成果。

4.專家座談會：初步研究成果完成後，將舉辦一場專家座談會，邀請核能議題與民意研究的學者專家及原能會相關人員，針對質化與量化的研究成果進行討論，提供核安議題研究與溝通策略之建議。

III. 結果與討論

一、一般民眾對醫療用核能之接受度高，而較偏向不支持核能發電，但反對程度較往年稍減

約 3 成 4 民眾支持核能發電，約 5 成 2 表示反對。與美國比較，我國民眾對核能的支持度明顯較低，反對程度也較高。交叉特性部份，表示反對者以年齡越高者比例顯著較高，教育程度越高或政黨傾向為泛藍者表示反對比例較低。與歷年調查相比較，自 99 年起對核能的支持度及無傾向的比例呈現下降的趨勢，而反對程度則逐年上升，於 102 年之 5 成 9 達到高峰，103 年則略為下降。

約 5 成 9 民眾支持使用醫療用核能，表示反對者則約佔 2 成 7。交叉特性部份，60 歲以上、教育程度為研究所或以上及居住地為宜花東外島者支持比例顯著較高，30-39 歲及居住地為桃竹苗與中彰投者，其反對比例顯著較高。

二、一般民眾認為政府提供資訊不足，但自我評估對核能議題的關心度普遍較低，核能知識也普遍不足。

約 2 成 4 一般民眾表示高度關心核能相關議題，約 7 成 3 表示低度關心核能相關議題。交叉特性部份，以男性表示會關心之比例較高。

僅約不足 1 成一般民眾表示政府提供之核安資訊足夠，8 成 1 民眾表示資訊不足。交叉特性部份，以女性及居住地區在雲嘉南與宜花東及外島之民眾認為政府提供資訊足夠。

一般民眾在核能知識題組各題之答對率皆不足 4 成，其中最高者為「請問您知不知道日本將於這個月重新啟用核能發電呢？」一題，答對率為 3 成 4，最低者為「請問您知道目前我國核子事故緊急應變區範圍是幾公里嗎？」，答對率不足 1 成。

約 8 成 2 一般民眾同意核廢料就算處理過還是會影響人體健康，不同意之民眾則佔 1 成。就交叉特性部份，以 60 歲以上及政黨傾向為泛藍者不同意之佔比顯著較低。

約 4 成 7 一般民眾同意核電較能減少二氧化碳排放，3 成 8 民眾表示不同意。就交叉特性來看，男性、年齡為 20-29 歲、教育程度為研究所以上、居住地為桃竹苗地區、政黨傾向為泛藍及收入在 60,000 - 99,999 元者表示同意的比例顯著較高，女性、40-49 歲、政黨傾向為泛綠及收入為 20,000-39,999 元者表示不同意之比例較高。

三、一般民眾較信任專家與國際單位提供之消息，主要獲得資訊管道則為電視，且仍有過半數民眾對核電未來發展具有信心。

約 4 成 9 民眾獲得核能相關資訊媒介管道佔比為電

視新聞最高，選擇以上皆無者佔比 2 成 5 次之，再其次為電視節目及報紙，佔比 1 成 7。

約 2 成 7 民眾較相信國際性的環保團體，其次為國際性的核能研究機構及國際性的核能組織，佔比各約 2 成。

在信任題組部份，一般民眾對「核能專家」之信任度為 4 成 9 最高，其次為「台電公司」，信任度為 3 成 5；對「國民黨」之信任度為 2 成最低。

約 5 成 1 一般民眾表示相信核能發電未來發展對提升人類整體生活有幫助，表示不相信者則佔約 4 成 1，而無傾向者則僅佔不足 1 成。

四、一般民眾普遍支持核四 1 號機封存，2 號機停工方案

約 6 成一般民眾對於核四 1 號機封存，2 號機停工問題表示支持，約 2 成 4 民眾表示反對。交叉特性部份，年齡為 40-49 歲、教育程度為研究所或以上，以及政黨傾向為泛綠或其他政黨者，表示支持的比例較高；教育程度為國小、政黨傾向為泛藍，以及收入為 19,999 元以下及 100,000 元以上者，表示反對之比例較高。

五、當地居民較偏向不支持核能發電，但反對程度較往年稍減，在核能發電風險認知偏向負面，與一般民眾大致相同。

約 3 成 7 民眾支持核能發電，約 5 成 3 表示反對。與一般民眾比較，結果大致相當。與歷年調查相比較，自 99 年起對核能的支持度小幅減少，無傾向的比例則呈現大幅度下降的趨勢，而反對程度則逐年上升，於 103 年第一次調查之 5 成 3 達到高峰，第二次調查則略為下降。

約 3 成 2 民眾認為核能發電安全，5 成 7 則認為核能發電不安全。與一般民眾比較，結果大致相當。與歷年調查相比較，自 100 年起調查認為核能發電安全者比例明顯下降至 103 年之 3 成 4，而認為不安全的比例則增加至 103 年的 5 成 5。

六、當地居民較信任專家與國際單位提供之消息，主要獲得資訊管道則為電視與地方政府宣導，但民眾對核電未來發展之信心稍低於一般民眾。

約 4 成民眾獲得核能相關資訊媒介管道佔比為電視新聞最高，地方政府宣導佔比 2 成次之，再其次為親朋好友，佔比 1 成 6，與一般民眾稍有不同，顯示當地居民較為重視政府宣導。

約 2 成 9 民眾較相信國際性的核能研究機構，其次為國際性的環保團體及國際性的核能組織，佔比各約為 2 成 6 及 2 成，與一般民眾大致相同。

在信任題組部份，當地居民對「核能專家」之信任度為 5 成 5 最高，其次為「台電公司」，信任度為 3 成 8；對「國民黨」之信任度為 2 成 3 最低，但各信任度皆稍優於一般民眾。

約 4 成 6 民眾表示相信核能發電未來發展對提升人類整體生活有幫助，表示不相信者則佔約 4 成 6，而無傾向者則僅佔不足 1 成，較一般民眾信任度為低。

七、一般民眾對火力發電及太陽能發電風險認知上皆偏正向，僅餘太陽能無法達到預期電力一項，民眾擔心程度較高。

約 6 成 1 民眾認為火力發電安全，2 成 4 則認為火力發電不安全。交叉特性分析部份，男性、個人月收入

為 80,000-99,999 元及無固定收入者認為安全的比例顯著較高，女性、20-29 歲、教育程度為小學或以下及沒有小孩之受訪者認為不安全的比例顯著較高。

約 9 成 5 的一般民眾認為太陽能發電安全，近 1 成的一般民眾認為太陽能發電不安全。

約 6 成 3 的一般民眾擔心太陽能發電無法達到預期的發電效率，3 成的一般民眾則不擔心。

約 2 成 8 的一般民眾擔心太陽能電廠因重大天然災害造成輻射外洩，6 成 3 的一般民眾則不擔心。

約 1 成 6 的一般民眾擔心使用太陽能發電會對環境造成危害，7 成 8 的一般民眾則表示不擔心。

約 4 成 1 的一般民眾擔心太陽能發電整體成本比其他發電方式更高，4 成 8 的一般民眾則不擔心。

1 成 1 的一般民眾擔心繼續使用太陽能發電容易造成社會衝突，8 成 3 的民眾則表示不擔心。

近 1 成的一般民眾擔心繼續使用太陽能發電會對子孫造成不公平，8 成 6 的一般民眾則表示不擔心。

八、一般民眾對發電方式的偏好，依序為太陽能發電、風力發電、火力發電及核能發電。

約 5 成 3 的一般民眾在火力發電、核能發電、太陽能發電及風力發電四種發電方式的偏好上，最偏好的發電方式為太陽能發電。

約 3 成 9 的一般民眾在火力發電、核能發電、太陽能發電及風力發電四種發電方式的偏好上，第二偏好的發電方式為風力發電。

約 5 成的一般民眾在火力發電、核能發電、太陽能發電及風力發電四種發電方式的偏好上，第三偏好的發電方式為火力發電。

約 4 成 9 的一般民眾在火力發電、核能發電、太陽能發電及風力發電四種發電方式的偏好上，第四喜歡的發電方式為核能發電。

九、一般民眾有半數擔心台灣電力不足，但多數願意為此調漲電費。

約 5 成 2 的一般民眾擔心台灣會發生電力不夠的問題，約 4 成 7 的民眾表示不擔心。就交叉特性部份，男性、30-39 歲與 50-59 歲、研究所以上及有小孩之受訪者表示不擔心的比例顯著較高，教育程度為大學及沒有小孩之受訪者表示擔心的比例顯著較高。

約 1 成 9 的一般民眾願意增加 1%-5% 的電費來避免台灣未來可能發生能源不夠的問題，其次為增加 5%-10%，約 1 成 7，無傾向者則佔 2 成 5。

IV. 結論

一、強化核心價值與核電優勢之聯結，推廣核電正面形象

台灣目前由於經濟發展已達一定程度，人民重視土地永續利用、擔心天災影響、社會公平優先，以及重視種族延續等核心價值已逐漸成為主流。此外，透過歷年調查趨勢可以發現，含不願表態及拒答之無傾向比例已逐年降低，顯示民眾意識覺醒，對於相關社會議題已開始投入更多的關心。

為因應大環境的發展，未來進行溝通時，除了回應民眾提出的諸多提問外，應設法將核電於節能減碳方面的優勢，以及造成的汙染特性與侷限性等，與環保意識

和人文關懷的精神進行結合，將核電的正面形象完整建立。

二、透過電視媒體、公聽會或研討會等不同形式，主動進行核安知識及核電優勢之教育宣導

由調查結果可知，無論對核能議題關心程度的高低與否，目前台灣還是有四成以上民眾習於被動透過電視新聞或節目接收核電相關資訊。而當地居民除了電視之外，尚有約二成民眾透過地方政府宣導接收相關資訊。緣此，欲傳達核安資訊，進行知識之傳播與宣導，電視仍須視為第一優先考慮的傳播媒介，輔以在各地召開公聽會或研討會等，以各種不同形式，主動對民眾進行核安知識的宣導和教育，藉以傳達希望民眾了解之項目。

三、廣邀國內外學者參與溝通活動，並多加宣傳，藉以破除民眾之不信任感

由過去的調查結果顯示，國際性的核能機構、環保團體及核能官方組織長期以來一直是民眾最為信任的核安資訊管道。而本研究進行詢問時，超過4成9之一般民眾，認為政府需要主動針對核能相關議題進行與民眾進行研究探討，在溝通管道上除傳統單向媒體如電視、網路及報紙外，亦有一般當地民眾透過舉辦公聽會及研討會瞭解核能相關議題。可發現民眾對於核能相關議題，不再想單方面被動的接收資訊，而希望透過實際互動溝通的方式，來瞭解核能相關議題。

四、配合地方政府深入民間網絡，傳遞宣導相關資訊事半功倍

本研究在調查中發現，部份地方政府與當地社會網絡聯繫頻繁，或透過里幹事與村里長互動，或組織地方志工團隊，故如欲傳遞或宣導核電相關資訊，建議應與在地地方政府結合，本日多加聯繫，未來如有需要發布相關消息，亦可考慮藉由在地官員進行資訊的說明以及發送，以期能達成「與地方溝通時能傳達有效資訊」。

五、未來延續性長時間多角度之追蹤調查，並建立核能相關研究智庫

本調查研究為延續性研究第六年度之調查，由於短期民意較易受到重大特殊事件影響(如2011年福島核災，造成民意劇烈變化，因此建議未來調查應針對相同的受訪者持續進行，朝向固定樣本的長期追蹤調查。做長期的追蹤，利於提供相關單位掌握長期民意趨勢的變化，避免民意因重大事件產生波動，造成資料解讀的侷限性。

參考文獻

- [1] 丘昌泰(1999)。公害社區風險溝通之問題與對策，《法商學報》，第34期，頁17-48。
- [2] 李姣姿(2000)。核能風險認知研究：核電廠附近民眾與台電公司員工之比較。國立陽明大學公共衛生研究所碩士論文。
- [3] 汪明生、朱斌好(1999)。衝突管理。台北：五南。
- [4] 周桂田(2004)，獨大的科學理性與隱沒(默)的社會理性之「對話」—在地公眾、科學專家與國家的風險文化探討。《台灣社會研究季刊》第56期，頁1-63。
- [5] 周桂田(2007)，新興風險治理典範之芻議。《政治與社會哲學評論》，22：179-233。
- [6] 洪鴻智(2005)。科技鄰避設施風險知覺之形成與投影：核二廠。人文社會科學集刊，17(3)，33-70。
- [7] 徐佳士(1987)。大眾傳播理論，台北：正中書局。
- [8] 吳雨潔(2010)。溝通媒介與溝通效能關係之研究——以學校人員與教育行政機關之溝通為例，市立臺北教育大學教育行政與評鑑研究所碩士論文。
- [9] 張世賢(2002)。電子化政府的政策行銷。<http://old.npf.org.tw/PUBLICATION/IA/091/IA-R-091-059.htm>
- [10] 張正揚(2006)。行政溝通媒介與教師教育政策知覺研究—以七項教育政策為例，國立臺北教育大學教育政策與管理研究所碩士論文。
- [11] 曹美玲(2002)。醫療風險溝通與知覺風險間關係之研究，國立高雄第一科技大學風險管理與保險研究所碩士論文。
- [12] 陳光璞(2008)。媒體報導的風險議題與風險溝通—以全球暖化議題為例。世新大學公共關係暨廣告學研究所(含碩專班)碩士論文。
- [13] 陳均龍(2006)。從核四建廠風險認知觀點探討貢寮地區漁業經營對漁村經濟之影響。國立海洋大學海洋資源管理研究所碩士論文。
- [14] 陳志行(2005)。臺灣地區台北縣市民對核能電廠風險認知之研究。國立台北大學資源管理研究所碩士論文。
- [15] 黃禎財(2002)。學者專家對低放射性廢棄物最終處置風險知覺之研究。
- [16] 黃懿慧(1994)。科技風險與環保抗爭——台灣風險認知個案研究。台北：五南。
- [17] 楊禮豪、周桂田(2008)。第十七章：衝突的導火線。台北：教育部教科書。
- [18] 蔡鶯鶯(2004)。建構政府緊急風險溝通(ERC)機制研究：以台灣嚴重急性呼吸道症候群(SARS)流行事件為例，台北：行政院衛生署九十三年度科技研究計畫，頁11-24。
- [19] Accenture (2008). Attitudes Towards Nuclear Power in the United Kingdom-Survey Analysis. Retrieved from <http://www.accenture.com/Countries/UK/Services/NuclearSurvey.htm>
- [20] Bouazza, Abdelmajid (1986). Use of Information Sources by Physical Scientists, Social Scientists, and Humanities Scholars at Carnegie-Mellon University.
- [21] Chung, J. B., & Kim, H. K. (2009). Competition, economic benefits, trust, and risk perception in siting a potentially hazardous facility. Landscape and Urban Planning, 91(1), 8-16.
- [22] Costa-Font, J., Rudisill, C., & Mossialos, E. (2008). Attitudes as an expression of knowledge and "political anchoring": The case of nuclear power in the United Kingdom. Risk Analysis, 28(5), 1273-1287.
- [23] Covello, V.T. vonWinterfeldt, D. and Slovic, P. 1986. Risk Communication: A review of the literature, Risk Abstract. 3(4): 171-182.
- [24] Daggett, C.J. 1989. The Role of Risk Communication in Environmental Gridlock.
- [25] Dervin, Brenda, (1992). From the mind's eye of the user: The sense-making qualitative methodology. in Qualitative research in information management, 61-84.

- [26] Doble, J. (1995). Public opinion about issues characterized by technological complexity and scientific uncertainty. *Public Understand.* 4, 95-118.
- [27] Douglas, Mary. (1992). *Risk and Blame: Essays In Cultural Theory*. London: Routledge.
- [28] Eurobarometer (2007). *Europeans and Nuclear Safety*.
- [29] Eurobarometer (2008). *Attitudes towards radioactive waste*.
- [30] Eurobarometer (2010). *Europeans and Nuclear Safety*.
- [31] Fischhoff, Baruch. (1995). Risk Perception and Communication Unplugged: Twenty Years of Process. *Risk Analysis*, 15(2): 137-145.
- [32] Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., & Combs, B. (1978). How safe is safe enough? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. *Policy Sciences*, 9, 127-152.
- [33] GlobeScan (2005). *Global Public Opinion on Nuclear Issues and the IAEA*. Retrieved from http://www.iaea.org/Publications/Reports/gponi_report_2005.pdf
- [34] Holmberg (2008). *Swedish Opinion on Nuclear Power 2007*. Retrieved from http://www.som.gu.se/rapporter/nuclear/NuclearPower_2007.pdf
- [35] In V.T. Covello. D.B. McCallum. & M.T. Pavlova (Eds). *Effective Risk*.
- [36] Jones, J. M. (2009). Support for Nuclear Energy Inches Up to New High. Retrieved from <http://www.gallup.com/poll/117025/Support-Nuclear-Energy-Inches-New-High.aspx>
- [37] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (1997). Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>
- [38] Lundgren, Regina E., Andera H. McMakin. (1998 - 2004 - 2009). *Risk communication : a handbook for communicating environmental, safety, and health risks*. Columbus, Ohio: Battle Press.
- [39] Morgan, M.G., Fischhoff B., Bostrom A. & Atman C. J., (2002). *A Mental Models Approach*. U.K.: Cambridge University Press.
- [40] National Research Council (1989). *Everybody counts: A report to the nation on the future of mathematics education*. Washington, DC: National Academy Press.
- [41] National Research council. (1989). *Improving Risk Communication*. Washington, D. C: National Academy Press.
- [42] Nuclear Energy Institution. (2010). *Perspective on Public Opinion*. Retrieved from <http://www.nei.org/resourcesandstats/publicationsandmedia/newslettersandreports/perspectivesonpublicopinion>
- [43] Plough, Alonzo, and Sheldon Krinsky. (1998). *Environmental Hazards: Communicating Risks as a Social Process*. Dover. MA: Auburn House.
- [44] Poortinga W., Pidgeon, N.F. and Lorenzoni, I. (2006) *Public Perceptions of Nuclear Power, Climate Change and Energy Options in Britain: Summary Findings of a Survey Conducted during October and November 2005*. Technical Report (Understanding Risk Working Paper 06-02). Norwich: Centre for Environmental Risk.
- [45] Sjoerg, L. (2003). Attitudes and Risk Perceptions of Stakeholders in a Nuclear Waste Siting Issue. *Risk Analysis*, 23(4), 739-749.
- [46] Slovic, P., & Weber, E. U. (2002). *Perception of Risk Posed by Extreme Events*. This paper presented at the meeting Risk Management Strategies in an Uncertain World, Palisades, New York.
- [47] Slovic, P., Fischhoff, B., & Lichtenstein, S. (1986). The psychometric study of risk perception. In: V. T. Covello, J. Menkes, & J. Mumpower (Eds.), *Risk Evaluation and Management*. New York: Plenum Publishing Corporation.
- [48] Slovic, Paul. (2000). *Trust, Emotion, Sex, Politics and Science: Surveying the Risk-assessment Battlefield*, in *The perception of Risk*, Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, VA.
- [49] United States Nuclear Regulatory Commission (2004). *Effective Risk Communication, The Nuclear Regulatory Commission's Guideline for External Risk Communication*. Washington DC.
- [50] Viklund, M. J. (2003). Trust and risk perception in Western Europe: A cross-national study. *Risk Analysis*, 23(4), 727-738.

工程科系學生之「安全核能學程」課程推廣 (II)

Promotion of 「Nuclear Safety Program」 for Engineering Students (II)

計畫編號：103-NU-E-151-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊文都

e-mail：ywd@kuas.edu.tw

計畫參與人員：王柏彬、謝亞儒

執行單位：國立高雄應用科技大學化學工程與材料工程系

摘要

政府為促進原子能科技基礎研究，落實原子能科技上、中、下游研發之整合，乃由科技部和原能會編列經費設置『原子能科技學術合作研究計畫』之核工概論課程及相關學程推廣，將可擴大學生對核工的興趣及專業知能，培育核工人才，強化核電安全營運與管制，並增加畢業後投身核電就業市場之選擇與機會。

本次計畫擬規劃「安全核能學程」，本學程規劃兩年內完成開授四門專業課程。在第二年(103年度)計畫中，已開授「核能與輻射安全」、「原子能民生應用」等課程。「安全核能學程」乃以大學工程科系之大學部三、四年級學生為對象，組成共同學習組織，透過學術資訊的交流，提升教學內容與品質；在實務實習方面，參觀核能發電廠之運轉並讓學生實際參與核能檢測之實習，加強核能發電原理之認知；核能應用方面，則以加強業界專業人士來校演講之策略，透過業界專業人士為學校與廠商的橋樑，並且使學生在修課與討論之餘，更能了解原子能在產業界上的應用，以達到原子能科技之整合。其最終目標為培養兼具專業技術與核能應用概念之工程人才，並建構學術雙方合作技術研發的學習聯盟。

本學程之計畫預計每門核心課程將有超過50位學生修習，該課程教材編訂將朝向多媒體方式編製，透過多媒體教材的結合讓學生更容易吸收上課內容，同時在校內資源共享概念之下將該科教材上傳至學程網站讓學生可隨時瀏覽。完成課程者將頒發證書並登錄人才資料庫供業界作擇才參考。課程最終目標為提升學生在核電就業市場的競爭力。

關鍵詞：安全核能學程、核能與輻射安全、原子能民生應用。

Abstract

To encourage fundamental research on atomic energy, the government of Taiwan has integrated the lower, middle, and upper reaches of development in related fields of science and technology. The Ministry of Science and Technology and the Atomic Energy Council established 『the Academic Cooperative Research Program for Atomic Energy Science and Technology』 to promote academic courses in nuclear engineering and other related subjects.

The program is meant to increase student interest in nuclear engineering, enhance the safe operations and control of nuclear power plants, and expand career options and opportunities in nuclear power. Four professional courses in the 「Nuclear Safety Program」 will be

developed and offered within two years. In the second year (2014) of the program, completed courses will include Nuclear and Radiation Safety as well as Civilian Applications of Atomic Energy. 「Nuclear Safety Program」 is planning the formation of a co-learning group with university juniors and seniors majoring in engineering. Through an exchange of academic information, the content and quality of the courses can be improved. For practical lessons, students will visit nuclear power plants to observe operations and participate in testing at the facilities, to contribute to their understanding of the principles involved in nuclear power. To address the application of nuclear power, industrial experts will be invited for lectures, acting as a bridge between academia and industry. Through lessons and discussion, students will be able to comprehend the application of nuclear power in industry to achieve an integration of atomic energy science and technology. The ultimate objective of this project is to cultivate engineering talent, provide professional skills, develop an understanding of the concepts of nuclear application, and build an alliance between academia and industry in collaborative R&D.

A total of more than 50 students are expected to enroll in each course and teaching materials, will include multi-media to enable students to absorb the course content more easily. Under the concept of school resource sharing, the materials will be uploaded to a course website to enable students to browse them at will. Students that complete the courses will be provided certificates and registered in a database to provide industrial enterprises with reference for the selection of talent. Through this project, the competitiveness of students in the nuclear job market can be enhanced.

Keywords: Nuclear Safety Program, Nuclear and Radiation Safety, Civilian Applications of Atomic Energy.

I. 前言

自十八世紀中葉工業革命以後，工業的進步帶動了經濟繁榮，改善了人類生活水準，因而也加速了人口成長。由於人口成長得太快，地球資源有限人類為了繼續追求經濟發展，不得不過度開發地球的天然資源，大量開採煤、石油和天然氣等化石燃料，以取得能源，這類活動會排放大量的二氧化碳到大氣層中，使大氣層中二氧化碳的濃度上升，雖然C3型植物的光合作用吸收了很大一部份二氧化碳($6CO_2+6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6+6O_2$)，海洋也溶解一部份二氧化碳並固定成碳酸鈣($CaO+CO_2 \rightarrow CaCO_3$)，但二氧化碳的濃度在大氣層中還是不斷快速

上升，根據聯合國跨政府氣候變遷委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change，簡稱IPCC，網址：<http://www.ipcc.ch/>）第三次評估報告指出，全球二氧化碳濃度亦會自西元1992年的360 ppm升至西元2100年的540~970 ppm，這一百多年二氧化碳濃度增加幅度將為過去三百年的2.3~7.6倍。因此在二氧化碳濃度無法維持穩定的情況下，造成了二氧化碳在大氣層中不斷累積，讓二氧化碳更有機會遨遊世界各地，並去攔截地表輻射出的能量，再將之放射出來，造成了地球異常增溫，牽動地球不正常之氣候變遷。因為核能發電並不排放二氧化碳，間接排放量也與再生能源相當，是抑制二氧化碳排放的重要手段之一，更可以滿足京都議定書減量的目標，所以在未來減碳市場上，核能發電佔有一個非常重要的地位，故此，核能發電產業重新被重視，將可視為綠色環保的工業，一方面可保育台灣的環境，一方面更兼顧發展，如此方可永續我國的經濟繁榮[1-10]。

有鑑於311日本福島核災事件，核能發電雖是重要的能源，但核能的安全更值得重視，原子能的相關專業知識必須扎根，人才更須培育。台灣已積極的培育核電人才，以鞏固台灣核能發電的安全，並避免核災發生。唯有「安全核能」才能確保台灣經濟的發展與永續的經營發展。馬英九總統也宣示核電人才的培育是相當重要且不能中斷。雖然，國內大學核工相關科系所培育的核工人才加上台電嚴謹的核能訓練制度，提供台灣核能發電所需的人力，並讓台電運轉中的核能電廠安全可靠的營運，營運績效屢創新高。但由於大學核工相關科系提供的人才斷絕，台電必須花費數倍的時間及經費自行培訓，因此科技部和原能會推動『原子能科技學術合作研究計畫』之核工概論課程及相關學程推廣，以提供台灣核能發電所需人才[11-25]。

II. 主要內容

近五年來國立高雄應用科技大學獲『科技部／原能會「原子能科技學術合作研究計畫」』經費補助，開設核能課程提供選修，對大學工程科系學生授予核工相關專業課程之訓練，學生反應頗佳，修課意願很高，對新知識深感興趣。第一年總修課人數高達近90人；第二年雖降至60餘人；第三年增加至110人；第四年增加為160人；第五年（目前）預估將超過210人，可見日本福島核災對學生選課的影響並非負面的，而是更激起學生對原子能相關專業知識的渴求。學生上課的情形非常積極正面，且感興趣。依過去之經驗，核工相關課程之開設，單一課程的選修人數沒問題，但選修完整學程課程（四門課）的學生較少，乃因對學生來說，四門核工專業課程的負擔太重，同時會排擠到選修其他課程的機會，所以在課程的規劃上須審慎評估。

綜合學生修習核工專業課程之經驗與現行對核能之有條件需求—安全核能。本次核工人才培育計畫擬規劃「安全核能學程」之主軸與內容，預計兩年內完成開授四門專業課程，強化核能安全性之專業知識，並降低學程專業課程的數目（四選二）。在第一年（102年度）計畫中預定開授「核工概論與能源科技」和「原子能與環境」等課程，在第二年（103年度）計畫中預定開授「核能與輻射安全」和「原子能民生應用」等課程，並

結合核能議題之非學分課程講座，期以提高計畫之執行廣度與層面。以及建立學生對核能之基礎理論、原子能工程的基本認知及核能之使用限制與法律規範，並以邀請業界人士演講、實習與核能工廠參觀，提升學生學習興趣。

III. 結果與討論

在103年原子能科技學術合作研究計畫中已完成開授「核能與輻射安全」（103年度）和「原子能民生應用」（103年度）兩門課程。

在103年度的「核能與輻射安全」這門課程中邀請了核能與輻射方面之專家，包括洪明崎先生（演講題目有【核子工程與能源科技】、【核工基礎理論】、【核工科技概論】、【核能發電原理與安全設計】、【輻射安全與防護概念】、【環境輻射度量概念】）和沈錦昌先生（演講題目有【核電廠除役工作及廢棄物與廢水處理】）和黃慶村先生（演講題目有【低放射性廢棄物管理】、【高放射性廢棄物管理】）和蘇獻章先生（演講題目有【游離輻射防護法及其子法】、【核能發電安全嗎？】）和謝牧謙先生（演講題目有【311福島事故與日本核能】、【核子化學工程～鈾轉化自主技術及鈾濃縮程序】）和施清芳先生（演講題目有【用過核子燃料深層地質處置概論】）進行生動的演講，學生們上課相當認真，「核能與輻射安全」課程相關檔案會上傳至國立高雄應用科技大學數位學習平台提供學生下載與瀏覽（國立高雄應用科技大學數位學習平台如圖一所示）。

在103年度的「原子能民生應用」這門課程中邀請了義守大學醫學影像暨放射科學系助理教授李境和先生（演講題目有【核反應基本原理】、【輻射與物質的作用】、【輻射的應用與核能的安全設計】、【輻射安全防護】、【核能對環境的影響】）及核能與輻射方面之專家，包括潘本立先生（演講題目有【核能廢棄物之管理——發電運轉階段】、【核能廢棄物之管理——電廠除役及拆除階段】）和林忠永先生（演講題目有【放射性廢液處理技術發展與應用現況】）和林武智先生（演講題目有【放射性同位素之醫學應用】）和張福麟先生（演講題目有【核種在處置設施的遷移與評估】）和晏子中先生（演講題目有【進步型核電廠之HFE/DCIS之應用】）進行專業的演講，學生們上課相當認真，「原子能民生應用」課程相關檔案會上傳至國立高雄應用科技大學數位學習平台提供學生下載與瀏覽（國立高雄應用科技大學數位學習平台如圖一所示），並完成了一次「X—光繞射分析儀之輻射安全講習」，在「X—光繞射分析儀之輻射安全講習」中邀請了國立高雄醫學大學醫學影像暨放射科學系副教授張寶樹先生進行活潑的演講，學生們發問程度非常地踴躍，「X—光繞射分析儀之輻射安全講習」演講照片如圖二到圖五所示。

在103年原子能科技學術合作研究計畫中除了完成開授「核能與輻射安全」（103年度）和「原子能民生應用」（103年度）兩門課程之外，也建置了國立高雄應用科技大學核工概論課程推廣網站，「核能與輻射安全」（103年度）和「原子能民生應用」（103年度）課程演講照片可前往國立高雄應用科技大學核工概論課程推廣網站觀看（國立高雄應用科技大學核工概論課程

推廣網站如圖六所示)。以及在「核能與輻射安全」(103年度)和「原子能民生應用」(103年度)的這兩門課程中,每門課程都安排一次輻射偵測中心講座和參訪與實習,參與學生對實務參訪活動都非常有興趣,現場互動非常良好,輻射偵測中心網站如圖七所示,輻射偵測中心講座和參訪與實習照片如圖八到圖十六所示。

IV. 結論

在103年原子能科技學術合作研究計畫中已開授了「核能與輻射安全」及「原子能民生應用」兩門課程,每門課程約有超過50位學生修課,且舉辦了一次「X—光繞射分析儀之輻射安全講習」,而且每門課程都安排一次輻射偵測中心講座和參訪與實習。並完成了國立高雄應用科技大學核工概論課程推廣網站之建置。經由103年原子能科技學術合作研究計畫執行的結果希望對國內推廣核工課程及核能專業素養之培育可盡棉薄之力。

在103年原子能科技學術合作研究計畫執行期間結合計畫主持人(國立高雄應用科技大學化學工程與材料工程系楊文都教授)和計畫協同主持人(行政院原子能委員會綜合計畫處編輯訓練科杜若婷科長)與參與課程的所有老師之專長及輻射偵測中心相關同仁的協助,才能勝任本計畫,並感謝『科技部/原能會「原子能科技學術合作研究計畫」』提供經費支持,僅此致謝。

參考文獻

- [1]白寶實(2008),全球暖化下的核能發展,核能環保人月刊。
- [2]劉雅章(2007),全球暖化問題的科學認識,二十一世紀雙月刊。
- [3]羅斯·格爾布斯潘(2001),炎熱的地球:氣候危機,掩蓋真相還是尋求對策,上海譯文出版社。
- [4]許晃雄(1999),人為的全球暖化與氣候變遷,The 4th International Conference of Atmospheric Action Network East Asia。
- [5]馬克·林納斯(2010),改變世界的6°C,天下雜誌。
- [6]維基百科全球暖化網站,網頁:
<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%A8%E7%90%83%E5%8F%98%E6%9A%96>。
- [7]政府間氣候變遷委員會(IPCC)網站,網頁:
<http://www.ipcc.ch/>。
- [8]國立臺灣大學全球變遷研究中心網站,網頁:
<http://www.gcc.ntu.edu.tw/main.php>。
- [9]行政院環境保護署網站,網頁:
<http://www.epa.gov.tw/mp.asp?mp=epa>。
- [10]2009年全國能源會議分組報告(核心議題:能源科技與產業發展,主辦單位:行政院國家科學委員會)。
- [11]鄧光新(1990),核能發電,科技圖書。
- [12]楊昭義、尹學禮(2009),核子工程概論,水牛出版社。
- [13]楊昭義、歐陽敏盛(1997),核能發電工程學,水牛出版社。
- [14]楊昭義、陳勝朗、尹學禮(2010),核能工程技術導論,水牛出版社。
- [15]馬桐泉、張勝雄、陳聖鐘、潘恆堯、駱文傑(2009),核能開發與應用,新文京開發出版股份有限公司。
- [16]方明、劉茵、韓美新(2011),核電大危機,明鏡出版社。
- [17]錢伯章(2010),氫能和核能技術與應用,科學出版社。
- [18]行政院原子能委員會網站,網頁:
<http://www.aec.gov.tw/>。
- [19]行政院原子能委員會輻射偵測中心網站,網頁:
<http://www.trmc.aec.gov.tw/utf8/big5/>。
- [20]行政院原子能委員會核能研究所網站,網頁:
<http://www.iner.gov.tw/siteiner/wSite/mp?mp=INER>。
- [21]台灣電力公司網站,網頁:
<http://www.taipower.com.tw/>。
- [22]中華民國核能學會網站,網頁:
<http://www.chns.org/>。
- [23]李敏(2006),核能發電發展與人力培育,科學月刊。
- [24]李敏(2011),合理、實際的做法—核能,不能輕言放棄的選擇,科學月刊。
- [25]王德義(2004),怕它不如了解它—核能發電淺談,台電核能月刊。



圖一、國立高雄應用科技大學數位學習平台網站 (<http://ilearning.kuas.edu.tw/>)



圖二



圖三

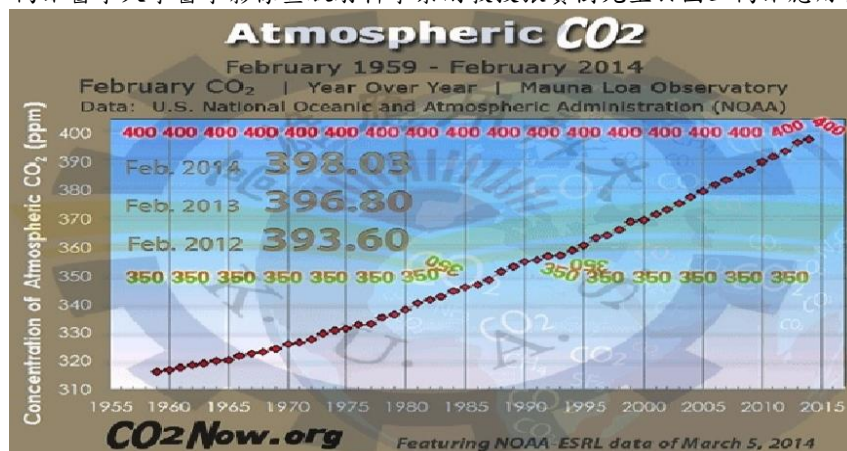


圖四



圖五

圖二~圖五、國立高雄醫學大學醫學影像暨放射科學系副教授張寶樹先生於國立高雄應用科技大學演講情況



圖六、國立高雄應用科技大學核工概論課程推廣網站 (<https://sites.google.com/site/hegaituiguang/>)



圖七、輻射偵測中心網站 (<http://www.trmc.aec.gov.tw/utf8/>)



圖八



圖九



圖十

圖八~圖十、輻射偵測中心講座情況



圖十一



圖十二



圖十三



圖十四

圖十一~圖十四、輻射偵測中心參訪情況



圖十五



圖十六

圖十五~圖十六、輻射偵測中心實習情況

核能安全與輻射防護東部科普實務推動

Nuclear safety and radiation protection practices to promote east science

計畫編號：103-NU-E-197-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃朝曦

e-mail：chhuang@niu.edu.tw

計畫參與人員：張建凱、鄭功蔚、陳柏廷、林彥宇、沈品吟

執行單位：國立宜蘭大學資訊工程研究所

摘要

為平衡台灣東西部差距，本計畫在國立宜蘭大學建立一個可供參觀開放式的東部科普教室，並於宜蘭、花蓮及台東之國中辦理與能源相關的行動能源教室科學營，以能源議題為主的看電影談物理講座，搭配能源相關互動遊戲 APP 和網頁以及教學影片，來提升社會大眾對核能安全與輻射防護教育有正確的認識，消除對核能安全與輻射議題莫名的恐懼和排斥。

透過遊戲式學習(Game-Based Learning)互動 APP 和 5-10 分鐘的數位影音教材，藉由遊戲中豐富的多媒體學習環境和語音的視覺教學，來增加學生的認知並提升民眾和師生對核能安全與輻射之基本知識和其應用的興趣，達到教育推廣的目的。

本計畫統計 11 場以「看電影談物理-科普新體驗能源知識 APP」為主題的 721 份問卷，從問卷顯示：參與學習活動結束後，有高達 96%覺得在參與活動過程中使用 APP 互動小遊戲學生認為有助於增加其科學知識與興趣，93%的學生認同這樣的科普新體驗。

關鍵字：科普教室、科學營、遊戲式學習、核能安全。

Abstract

To balance the gap between eastern and western, our plan establish an open-ended classrooms for eastern science at National Ilan University. Moreover, we hold the energy-related science camp in Ilan, Hualien and Taitung. Base on energy issues dominated cinema Physics Seminar, energy-related interactive APP games as well as instructional videos and web, we can not only improve correct understanding education for public on nuclear safety and radiation protection but also eliminate inexplicable fear and exclusion of radiation safety issues. Through game-based learning interactive APP and 5-10 minute digital textbooks ,we find that rich multimedia learning environment and visual voice in game teaching can not only increase students' awareness but also improve teachers and students s' basic knowledge of nuclear safety ,radiation and its interest in applications .As a result, we achieve educational outreach purposes.

Keywords：science classrooms, science camp, game-based learning, nuclear safety

I. 前言

日本福島核能電廠發生事故後，媒體不斷報導核能電廠爆炸輻射外泄，讓國內核能發電議題再度受到民眾的關切，一般民眾只知道核能電廠會產生游離輻射，對於環境中之游離輻射並不瞭解，因此為提供東部地區一個科普推廣的基地，利用國立宜蘭大學普物實驗室為基礎作為推廣展示空間，也增加民眾對核子事故之輻射影響與防護措施之認知。

辦理與能源相關的行動能源教室科學營，以能源議題為主的看電影談物理講座，搭配能源相關互動遊戲 APP 和網頁以及教學影片，來提升社會大眾對核能安全與輻射防護教育有正確的認識，消除對核能安全與輻射議題莫名的恐懼和排斥。

II. 研究方法

本計畫透過國立宜蘭大學「東部地區科普演講計畫-送科學到東部」講座活動安排。除一般地區學校外，我們也到了通常學者不易落腳，科學活動觸角不易觸及的偏遠學校服務，如東區離島、宜花東山區。

本研究針對台灣東部一些真正鄉村地區或偏遠地區的學校。東部地區共有 12 所大專院校、18 所公私立高中、15 所高職及 70 所國中，及鄰近縣市（如基隆、屏東）之大專校院、高中（職），國民中學之師生為主要之服務對象，我們辦理了 11 場以「能源議題為主的看電影談物理講座」，詳細如下表所示：

日期	項目	人數
2014.12.16	基隆武崙國中演講-物理很酷!	約50
2014.12.05	臺東寶桑國中演講-看電影談物理	約160
2014.11.14	臺東綠島國中演講-看電影談物理	約70
2014.10.22	花蓮國立花蓮女中演講-看電影談物理	約100
2014.10.17	臺東瑞源國中演講-看電影談物理	約60
2014.05.23	臺東卑南國中演講-看電影談物理!	約210
2014.05.19	宜蘭復興國中演講-看電影談物理!	約130
2014.05.02	花蓮縣立東里國中演講-看電影談物理-能源議題	約70
2014.04.30	宜蘭中道中學演講-看電影談物理!	約50
2014.03.19	臺東大武國中演講-看電影談物理	約90
2014.03.07	臺東瑞源國中演講-看電影談物理	約50

將已開發完成主題為能源議題的四支行動裝置電子遊戲 APP 供活動使用，進行科學相關知識之傳播工作。以「看電影談物理-科普新體驗能源知識 APP」的講座為主，前半場透過能量相關的電影引起學生的興趣，後半場則以研究者開發主題為能源議題的四款行動遊戲學習 App 做體感互動學習的實際體驗。在行動遊戲學習過程中融入能源知識，使參與活動的學員在遊戲過程中，學習到能源知識與體驗科學的科技成果。

讓學生從遊戲中得到有效的學習，達到教育目標[1]。由於在學習過程當中具備趣味性和挑戰性，學習者可以獲得滿足感與成就感，同時在遊戲結束後，學習者亦能獲得知識的成長，達成學習目標[2]。

III. 結果與討論

在宜蘭大學建立一個可供參觀開放式的東部科普教室方面，與本校人科中心的物理教室協調好，在本校經德大樓 5 樓籌備一間教室來介紹核能安全、輻射防護等科普相關知識。

將講座活動中 5~10 分鐘之小主題剪輯成教學短片，放置在我們建置的「核能安全與輻射防護東部科普實務推動網站」(網址：<https://sites.google.com/a/chaohsi.com/nsarp/home>)上，提供一般民眾能夠透過網際網路學習獲得正確的知識，同時也將我們自製的行動裝置互動式遊戲 APP 放置網站上，以吸引年輕族群下載體驗核能知識遊戲，從中獲得正確的知識。

本計畫執行期間共累計約 900 人參與，統計資料總計回收 721 份問卷(表 1 為整體問卷結果統計表)，男生 380 份(圖 1 為男生問卷結果統計圖)、女生 341 份(圖 2 為女生問卷結果統計圖)。問卷採用李克特式四點量表分析，藉此了解行動遊戲學習 App 導入學習活動中的成效和滿意度分析，得分兩分以上即表示活動獲得正面回饋。

表 1：整體問卷結果統計表

	您對演講者的主題有初步的認識。	您覺得演講者的演說清楚易懂。	您覺得受益良多並對該科學領域產生興趣。	過程中使用 APP 互動小遊戲有助於您增加該科學知識與興趣。	您未來願意再參加類似的演講活動。
非常同意	403	377	352	368	350
同意	307	319	319	321	316
不同意	5	12	39	20	33
非常不同意	6	7	10	9	13
量表分數	2.54	2.49	2.41	2.46	2.41

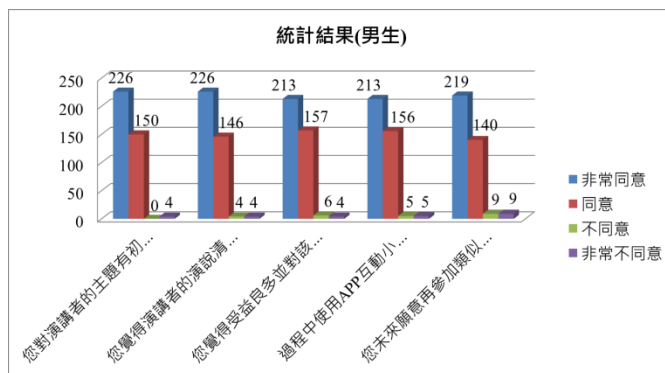


圖 1：男生問卷結果

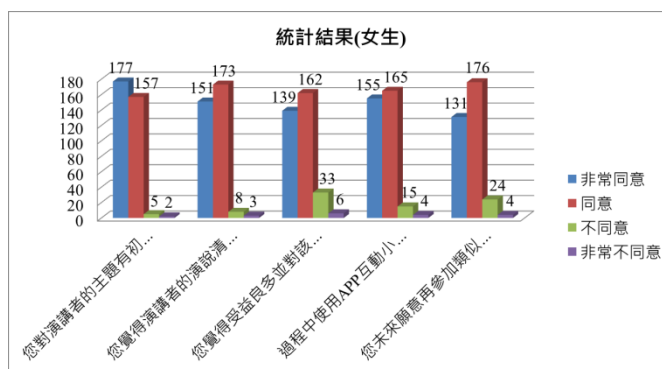


圖 2：女生問卷結果

從學生問卷可以得知，問卷整體量表分數分別為 2.54、2.49、2.41、2.46 和 2.41。在 721 人次的統計資料顯示，參與學習活動結束後，有高達 96% 的學生都表示認同，在學習過程中使用遊戲 App 有助於增加學習興趣與該科學知識，而兩性在認同程度上，「認同」與「非常認同」有很明顯的差異(如圖 3)，也看的出來男生對科學類的議題有較高興趣願意參與，再者因為設計這些 App 的是男生所設計的，因此沒有特別花俏圖樣來吸引到女生們的目光。

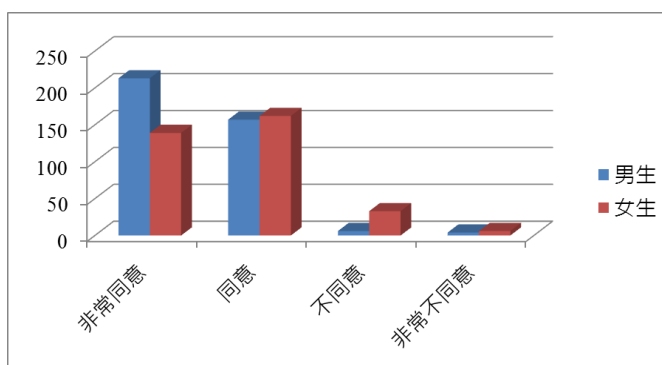


圖 3：兩性認同程度

另外我們將自行開發出來的行動裝置互動式遊戲 APP 融入科普活動中進行推廣，由計畫助理在場介紹正確的核能安全與輻射防護相關知識與遊戲玩法。

IV. 結論

我們在國立宜蘭大學的經德大樓 5 樓籌備一間教室來介紹核能安全、輻射防護等科普相關知識，並且辦理了 11 場與能源相關的演講和 4 場科普活動。

並且建置了「核能安全與輻射防護東部科普實務推動網站」，提供一般民眾能夠透過網際網路學習獲得正確的知識，將講座活動中 5~10 分鐘之小主題剪輯成教學短片，放置在我們建置的「核能安全與輻射防護東部科普實務推動網站」上，將我們自製的行動裝置互動式遊戲 APP 放置網站上，以吸引年輕族群下載體驗核能知識遊戲。

在東部科普演講及活動中的問卷有提到男生普遍喜歡科學類的活動優於女生，並且因為沒使用花俏的樣式來吸引女生們的目光，希望未來透過女同學參與設計 app，來提高女生參與科學學習之意願。

參考文獻

- [1] 陳萌智、何嘉原、吳東誼、王佩馨、嚴士翔,“結合數位學習與數位遊戲之研究—以國小自然科學課程為例”, 吳鳳學報, 18期, 1993, 5。
- [2] 陳似瑋、徐新逸,“行動遊戲學習之現況與發展”, 資訊科技國際研討會論文集, 2009。

編撰核工原理概論中文教材並推廣核能知識

Establishment of Nuclear Engineering Chinese Teaching Materials and Promotion of the Nuclear Energy Knowledge

計畫編號：103-2623-E-214-005-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李境和

e-mail：chlee95@isu.edu.tw

計畫參與人員：俞旻君、余宛真、郭靜憶、徐煒皓、郭淑雅

執行單位：義守大學 醫學影像暨放射科學系

摘要

國內反核聲浪高漲，研修核子工程相關課程的學生逐年減少，未來可能發生核工人才的短缺與斷層，將嚴重影響核能電廠的安全運轉。為培養非核工系學生以核工為第二專長，擬編撰一套優良的中文「核工原理概論」教材，供非核工系學生研習，亦可供行政院原子能委員會為推廣核能知識參考使用。

已完成中文「核工原理概論」教材，內容包括「基礎核物理」、「輻射與物質的作用」、「核反應器與核能」、「核燃料濃縮與再處理」、「中子擴散與緩和」、「核反應器理論」、「核反應器熱移除」、「輻射防護」等八章。利用此教材的部分內容，於「輻射安全防護」、「放射科學概論」與「原子能與環境」等課程講授，獲得學生滿意的良好反應，也達到推廣正確的核能知識。

關鍵詞：核子工程、核反應器、核能。

Abstract

The anti-nuclear voice gradually increases in our country, so the students who study the nuclear engineering curriculum reduce year by year. The trend will result in the shortage and gap of nuclear engineers in the future, it will influence the safety operation of the nuclear power plant. In order to train the students from non-nuclear engineering to obtain the nuclear technology as their second career, it needs a set of fine Chinese 'Introduction to Nuclear Engineering' teaching materials. The text book will be to provide non-nuclear engineering students to study, and also suitable for Atomic Energy Council to popularize nuclear energy knowledge.

A Chinese 'Introduction to Nuclear Engineering' teaching material has been compiled. Its content includes 8 chapters, some of the teaching material had been applied in 'Radiation Safety Protection', 'Introduction to Radiologic Science' and 'Atomic Energy and Environment' course, etc. That resulted in good response from students and promotion of correct nuclear energy knowledge.

Keywords: nuclear engineering, nuclear reactor, nuclear energy.

I. 前言

國內反核聲浪高漲，使得國內清華大學研修核工相關課程的學生逐年減少，未來可能發生核工人才的短缺與斷層，將嚴重影響核能電廠的安全運轉。行政院原子

能委員會(以下簡稱原能會)有鑑於此，又為確保核能電廠安全運轉，提出了「核工概論課程及相關學程推廣」的研究計畫並列為重點型計畫；主要研究內容為：(1)鼓勵大學考量自身特色，於理工科系開設核工原理/原子能民生應用系列課程或核工學程，培養學生對核工的興趣及專業知能，儲備核工人才，強化核電安全與管制。(2)鼓勵技職體系大學設立核工學程，以核工為第二專長，培育核工專業工程師，增加畢業後投身就業市場之選擇與機會。(3)鼓勵跨校合作開課/選課，資源共享。

II. 主要內容

核工原理係以核物理為基礎，需要介紹基礎核物理、輻射與物質的作用、核反應機制與核能、核反應器的種類與構造、核燃料的製造與再處理、中子擴散與緩和、核反應器物理、核反應器的熱傳、及輻射的防護。

為編撰一本適用於一學期的核工原理概論中文教材，內容不宜太多、也不可太繁雜。內容包含：第1章基礎核物理，第2章輻射與物質的作用，第3章核反應器與核能，第4章核燃料濃縮與再處理，第5章中子擴散與緩和，第6章核反應器理論，第7章核反應器熱移除，第8章輻射防護。

推廣正確的核能知識與相關資訊(教學)方面：本規劃開「核工原理概論」選修課(3學分)與原先已有的課程「放射物理」(6學分)、「放射生物學」(2學分)、「放射化學」(2學分)、「輻射度量學」(3學分)、「輻射安全防護」(2學分)，共18學分，可組成為「核工學程」；但不幸地，由於人數未達學校規定開選修課的最少人數15人，造成無法開課，也造成無法成為「核工學程」。所幸，利用已編撰的教材，用於「輻射安全防護」、「放射科學概論」與「原子能與環境」等三門課，也達到推廣正確核能知識的目的。

為了解學生學習後之成效，利用問卷或利用學校學習評量平台，收集學生學習後之滿意度，以作為未來改進參考。

III. 結果與討論

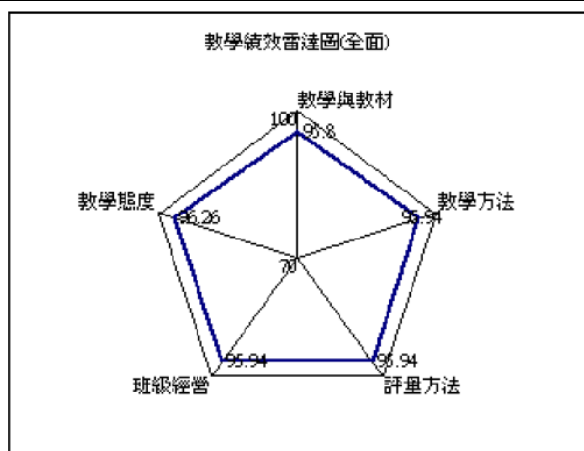
編撰核工原理概論中文教材方面：經數月的研讀與翻譯，已完成核工原理概論中文教材之編撰，內容共八章，已轉交原能會計畫協同主持人。

學校學習評量平台學生滿意度調查的項目有六項分別為：(a)計畫與教材、(b)教學方法、(c)評量方法、(d)

班級經營、(e)教學態度、(f)整體意見。對前五項各有兩小項，學生可對每一小項，提出不記名的滿意度；滿意度又分為：(a)非常滿意(100 分)、(b)滿意(91.4 分)、(c)普通(79.2 分)、(d)不滿意(62.2 分)、(e)非常不滿意(50 分)，然後再以「教學績效雷達圖」顯示。對整體意見，又分為六小項，徵詢學生是否同意；最後，再讓學生提出對老師的建議。三門課學生滿意度調查結果如下：

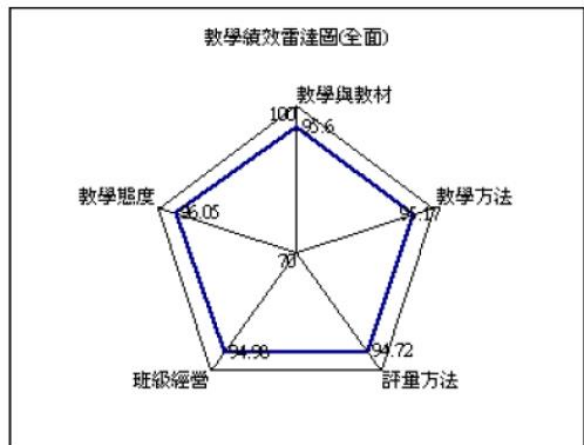
1. 「輻射安全防護」課程調查結果：利用學校學習評量平台調查，修課人數為 55 人、有效性問卷人數為 40 人，學生滿意度調查結果，綜合分數為 95.98 分。

調 查 項 目	得分
(a)計畫與教材	95.74
(b)教學方法	96.04
(c)評量方法	96.04
(d)班級經營	96.04
(e)教學態度	96.04



2. 「放射科學概論」課程調查結果：利用學校學習評量平台調查，修課人數為 65 人、有效性問卷人數為 57 人，學生滿意度調查結果，綜合分數為 95.30 分。

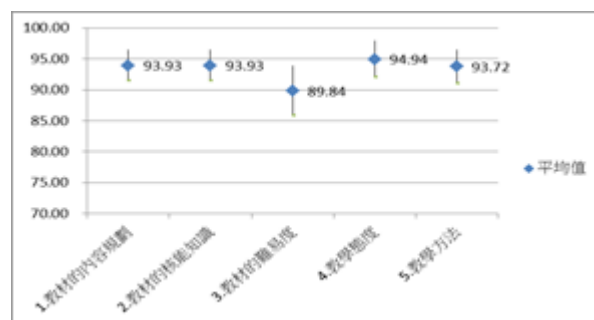
調 查 項 目	得分
(a)計畫與教材	95.67
(b)教學方法	95.40
(c)評量方法	94.65
(d)班級經營	95.52
(e)教學態度	95.46



3. 「原子能與環境」課程調查結果：利用問卷調查，修課人數為 17 人、有效性問卷人數為 17 人，學生滿意度調查結果，綜合分數為 93.27 分。

調 查 項 目	得分
(1)教材的內容規劃	93.93
(2)教材的核能知識	93.93
(3)教材的難易度	89.84
(4)教學態度	94.94
(5)教學方法	93.72

得分的標準差，如下圖：



IV. 結論

- (1) 已完成編撰核工原理概論中文教材，再經彙整與校稿後，可獲得中文的「核工原理概論」專書。
- (2) 該專書可供行政院原子能委員會參考使用、亦可供他校學生使用，以提升核工人才素質。
- (3) 可有效培育國內核工人才、促進國內核能電廠的運轉安全、可有效推廣正確的核能知識與相關資訊。
- (4) 因私立大專院校考量開選修課的成本，開課條件較嚴格。建議原能會思考如何輔導與補助他們開設核能的相關課程，以達到培育國內核工人才與推廣正確核能知識的目的。

參考文獻

- [1] J. R. Lamarsh and A. J. Baratta, 'Introduction to Nuclear Engineering', 3 ed., Prentice-Hall Inc., 2012.
- [2] H. E. Johns and J. R. Cunningham, 'The Physics of Radiology', 4 ed., Charles C Thomas, 1983.
- [3] Herman Cember, 'Introduction to Health Physics', 3 ed., McGraw-Hill, 1996.

科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(I)

Developing, Practically Promoting and Impact Studying of Radiological Experiments in General Science grade

計畫編號：103-NU-E-007-009-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李敏

e-mail：mlee@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：戴明鳳、張似琛、林冠緣、宋昱輝、吳勇慶

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系、物理系

摘要

輻射度量實驗計畫主要為使一般大眾能更清楚認識輻射並謹慎面對輻射，藉由研發適合高中生與大學生的輻射度量課程，可更有效的推廣輻射安全教育。我們研發合適價位與效能的手持式輻射偵測器，將有助於一般民眾更清楚認識輻射。

關鍵詞：科普教育、輻射度量。

Abstract

Studying of radiological Experiment is for the crowd rather than for specialists. We decided to find out more about the knowledge and to spread the education of the environmental radiation safety. In the classes, students(high school and college) will use the detectors which was developed by Hokang Technology Co. Our purpose is that crowd becomes more aware in this radiant Knowledge.

Keywords：the education of Popularization of Science、Radiological Experiments

I. 計畫背景

本構想源起於擔任各級學校科展評審時或受邀科普演講時，常發現 K12 (小學與中等教育) 師生、民眾或非專業學術社群購買了一部名為游離輻射偵測用的偵測器後，即用以隨處偵測週遭環境游離輻射值，更至核電廠或各電廠週圍偵測環境的輻射量。然非專業的偵測員，通常未考量實驗前後應注意的事項和實驗條件，如儀器的適用性、度量校正、偵測位置的考量、所得數值的測後轉換分析等等必需注意的事宜。經常可見將儀器錶頭上所顯示的數值直接作為偵測的結果，隨即在未經具公信認證單位的確認下，隨即將結果投訴給到一般報章雜誌上報導，記者礙於知識和經驗有限，並常疏於考證數據，而直接報導所得的結果，並常聳動地報導超過法規規範的標準值許多。以致常常誤導一般民眾，因而常造成台灣社會諸多不必要的恐慌。

此一結果，源自正規的教育體系內一直未有一套適合 K12 師生和一般大學生學習的基本輻射度量教材和適性的實驗課程，更無供社會大眾體驗學習的實驗，特別是游離輻射的標準和如何獲取準確度量的基本概念。

故規劃邀請本校、核能研究所和輻射偵測中心具輻射度量專長的學者專家合作，將以本校普物實驗課程中

之銑-60 的輻射計數實驗為基礎，大幅改進本實驗教材的內涵，增加幾項與基本輻射度量有關的實驗項目，以使讓學生們有機會對輻射度量的基本常識、輻射物理量的定義、各種偵測器的測量原理和數據分析…等等知識有所認識。

II. 執行內容

清華大學原子科學院和生命科學院，及一般醫學院校相關系所內雖設有與輻射度量有關的課程和教學實驗，但通常僅給專業領域的學生選修，一般學生和社眾無法參與。雖有少數人因工作或業務需求，可透過參加游離輻射研習課程獲取基本知識。但此研習課程多以專題演講的簡報方式授課，也幾乎沒有實驗操作的課程。故亦缺乏實驗實作和深入探究的機會。

因此，本計畫主要為使大眾能清楚了解輻射，藉由規劃適合的輻射度量課程，以更有效的方式進行輻射相關知識的推廣，以提升國人對輻射的認識。具體的工作項目如下：

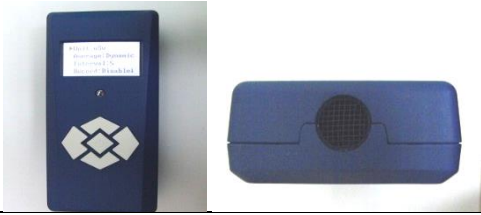
- 1.研發適合一般大學生學習的基本輻射度量教材和適性的實驗課程：本校每學年度有近 1,000 位大學生必修普物實驗課程，擬於普物實驗課程中的基本度量實驗內融入背景輻射知識和日常生活用品之輻射強度的度量實驗，以讓更多學生有機會接觸到輻射度量的基本知識，並瞭解各種輻射度量的定義和使用。
- 2.研發一套適合高中師生實作學習的實驗內容和教材：本校普物實驗室近年來成為全國 K12 師生熱門參訪的實驗室。本計畫所研發的輻射實驗將安排於 K12 的科學活動中，使更多人有機會學習。
- 3.研發之實驗教材先在清華的普物實驗課、相關通識課程和科普推廣活動中進行試教、改善、成果和效益評估等工作。

III. 研發結果

2014 年度清大科普團隊與核康科技股份有限公司合作進行輻射計數器研製的先期可行研究，初步完成以尾端窗型蓋格計數管，成功地自製具數據顯示功能的手持式游離輻射偵測儀的雛形裝置。運用模組化方式設計輻射偵測儀的硬體電路，每一模組均可獨立進行設計與驗證，故可達到平行分工的效益，並縮短產品開發時程。

而此模組化的設計方式亦便於硬體之維修與將來的功能升級。請見表 1。

表 1 核康科技公司所研發的手持式輻射偵測儀

G100 (俄製蓋格管 SBM20)

G150 (美製蓋格管 LND712)

G50 (透明式, 美製蓋格管 LND712)


本團隊並在清華大學原科中心校正實驗室進行 G100 及 G150 輻射偵測儀的校正實驗，兩者在 400mSv/hr 劑量率之下，其反應均呈線性關係，圖 1 為 G100 的線性測試結果。偵測儀偵測數據的再現性與儀器的穩定性也藉由背景輻射的量測而獲得確定。

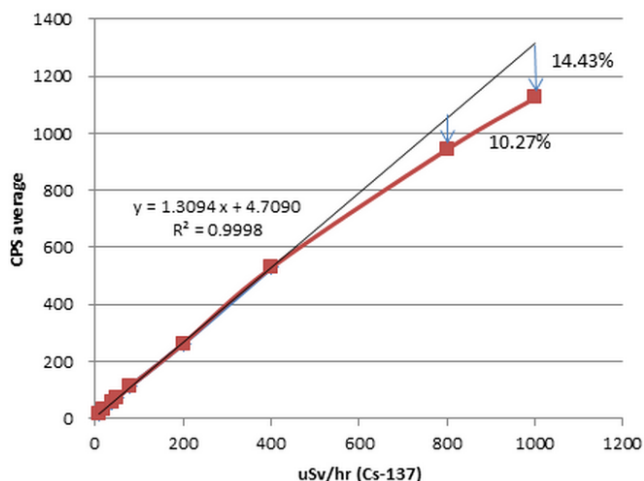


圖 1 G100 線性反應測試結果

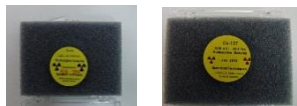
利用完成測試後之輻射偵測儀，並根據本校普物實驗課程中之鈷-60 的輻射計數實驗為基礎，本團隊設計了一份適合一般大學生學習的基本輻射度量實驗教材。由於鈷-60 射源半衰期僅 5.26 年，為增加射源的使用年限，實驗改採半衰期為 30 年的銫-137 射源(表 2(a),(b))。此實驗的目的為認識偵檢器的偵測原理、瞭解偵檢器的使用方式、學習解讀偵測結果、利用偵檢器進行計數統計量測。

實驗內容包括：

1. 使用 G50 偵測儀示範蓋革計數器高原區特性與工作電壓的選定。
2. 使用 G150 偵測儀，並利用銫-137 貝他射源測量核蛻變的帕桑分佈圖，並與常態分佈作對應的比較。
3. 使用 G150 偵測儀測量銫-137 射源與背景輻射，學習正確計數率的計測及量測數據的表達方式與誤差傳播計算。

藉由實驗操作，讓學生們有機會對輻射度量的基本常識、偵檢器的測量原理和數據分析進行學習及吸收。此實驗課程將在 104 學年利用清華大一普物實驗課進行試教，再分析其成效，將修改後教材推廣至其餘各大專院校。104 年度還將研發探討游離輻射特性的實驗。最後還將發展高中端也可適用之輻射偵測與度量教材，培育種子教師進行推廣工作，指導民眾認識輻射與輻射的量測。

表 2 本團隊已備有的各種輻射源

(a) 輻射源 Cs-137, 0.25 μ Ci	(b) 輻射源 Co-60, 1.0 μ Ci
	
(c) 天然輻射源 瓦斯燈燈芯	(d) 天然輻射源 氯化鉀 & 減鈉鹽
	

此外，清華科普團隊與核能研究所合作，利用核研所開發製作的放射線教學套組與 FS99 快速輻射偵查儀及 INER9200 多用途輻射偵測儀(表 3)，研發一套適合 K12 師生實作學習的實驗內容和教材。實驗目的為認識生活中的輻射與學習如何偵測輻射外，並藉由實地測量瞭解不同的輻射有不同的穿透能力、輻射強度與屏蔽的關係、輻射強度與距離的關係等輻射特性。由於一般大眾對輻射容易產生疑慮，因此這部分的教案皆使用天然

輻射源((表 2(c),(d)等)。我們除了將研發的實驗教案推薦給高中物理科與其他相關學科中心的種子教師外，並將與各科種子教師合作適當修改本計畫所規畫開發的教材，以適合不同對象與不同場合使用，並致力於讓全國高中高職的物理教師皆可使用。

表 3 核能研究所開發製作之輻射偵測儀器

核能研究所-EDU2015 放射線教學套組	
	
	
核能研究所-FS99 快速輻射偵查儀	
	
核能研究所-INER9200 多用途輻射偵測儀	
	

IV. 結論

103~104 年度已研發出適合一般大學生學習的基本輻射度量實驗教材並完成適合高中師生實作學習的教案，預計 104 學年度進行試教與修正。104 年度將繼續改進核康公司手持式輻射偵測儀、開發實驗數據記錄與分析 APP、及研發探討游離輻射特性的實驗。此外，將撰寫如何正確度量輻射之教材，與判讀輻射劑量之正確準則及依據，經原能會認可與修正後，推廣至各大專院校及各縣市之高級中學。未來並規劃發展出使用偵檢器正當量測後若發現確有輻射源時，如何指示測量者判斷劑量大小，針對不同劑量如何進行緊急安全防護與危機處理，以避免危害的標準作業流程。此外，亦將撰寫民眾教育推廣課程，製作教育手冊供原能會使用。

核能安全知識之整合行銷傳播策略

A Study of Integrated Marketing Communications Strategies for Nuclear Safety Knowledge

計畫編號：103-NU-E-845-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蔡智勇

e-mail：cytsai@utapei.edu.tw

計畫參與人員：洪祖全、郭俊賢

執行單位：台北市立大學教育學系

摘要

根據過去相關文獻顯示，整合行銷傳播策略大都應用在企業的產品(服務)，對於科學知識傳播的應用相對較少。因此本計畫將整合行銷傳播策略，分析目標市場、整合行銷傳播元素、手法與傳播媒體等。經由完整的分析探究，發展出核能安全知識整合行銷傳播策略，促使不同領域階層的社會大眾，都能有效地接收並理解核能安全知識。此項結果除了提供核能安全知識傳播相關執行單位重要參考外，未來更可延伸作為政府政策傳播的重要參考因素，使得本計畫更具有正面的參考價值。

關鍵詞：核能安全、知識傳播、整合行銷傳播。

Abstract

Previous relevant literature has shown that strategies for integrated marketing communications are primarily employed to market company products (or services), and that applications for communicating scientific knowledge are rare. Therefore, this study used the strategic integrated marketing communications developed and the strategic planning process proposed and to analyze target markets and integrate marketing communication elements with the methods and media used for communications. After conducting comprehensive analysis and investigation, we found that promoting nuclear safety knowledge using integrated marketing communications strategies enabled people in various fields and strata to effectively acquire and understand nuclear safety knowledge. The results of this study possess significant referential value. Specifically, they can provide a reference for units responsible for communicating nuclear safety knowledge as well as governments' future decisions regarding policy communication.

Keywords: Nuclear safety; Knowledge communication; Integrated Marketing Communication.

I. 前言

2011年3月11日，日本發生規模達9.0的地震，造成了許多地面上的建築物倒塌；伴隨著地震緊接而來的是威力強大的海嘯，席捲了日本東岸，此次的災害除了造成人員的大量傷亡外，也嚴重影響了設立於日本東岸的福島核電廠，受到地震加上海嘯的破壞，福島核電廠在幾個小時內，因複合式損害進入無法控制的狀態中，處理災難的過程受到全球注目。本次地震與海嘯交合的天然災害，將「核能」的話題也「震」上了國際檯面，

各國針對日本此次的核能災害紛紛提出了解決辦法與方針，核能發電的利用與否又再次受到了重視。

與日本福島相距約2200公里的台灣對於此次的核災也極其重視，除了地理位置與日本接近，深怕受到福島核電廠的輻射污染外，與日本地形構造相近的台灣，同樣也於海岸邊建造了四座核能電廠，這使得台灣人對於核能災害的意識瞬間提高。面對福島核電廠的事故損害，台灣核電廠也針對此進行補強；相關的環保人士也基於對於核能危機的感受，高舉「停止核能發電」的口號，一時之間「核能」相關話題傳的沸沸揚揚。然而這其中不乏擔心輻射的影響而大量攝取鹽份、或是瘋狂囤積碘片等荒謬之事，由此見得台灣人雖然對於核能災害有所警覺，但是普遍對於核能安全的正確認知仍是不夠，才會流於傳言所困擾。

台灣核能電廠主管的相關單位在第一時間提出了核電廠的安全數據與資料，卻因為用字過於艱澀、第一時間的處理能力以及溝通手法生疏，導致台灣民眾無法接受。現階段關於核能安全傳播，官方單位採取了媒體專訪、新聞稿、媒體餐會、記者會等方式，但效果仍舊不彰，在媒體的調查中，民眾認為官方單位傳播手法過於陳舊，在這個今日資訊科技進步，也大幅改變人們閱讀與接收資訊的時代裡，閱讀資訊的耐心已經逐漸在下降，在太陽花學運中的「懶人包」快速地發揮傳播效果，只簡明扼要地提供讀者結論與重要資訊，使得懶人包在許多重大議題上的發酵效果逐漸加強，「傳播媒體與內容」已是現階段官方在傳播核能安全議題上的重大困境。為此，本研究將拜訪傳播與核能安全領域之專家與學者，透過訪談去了解產業界與官方的傳播策略認知是否有落差，為此本研究將透過專家訪談法來針對現階段核能安全知識傳播的現況與困境作為，此為本研究動機之一。

科學傳播(science communication)是指科學(science)的傳播(communication)，其主要的意涵為將科學(含科學技術)知識、科學觀念、科學方法等推廣、普及於一般大眾(謝瀛春,1997)。其中科學知識是對自然界、社會界的事物和現象的描述與解釋事物和現象的發展都是一個持續變化的過程。如何將科學知識透過傳媒傳播給大眾，期望傳播內容正確、廣泛、深入、快速而有效，實現科學普及與科學的認知普及的境界(謝瀛春,1997)。根據過去科學傳播的實證研究文獻發現，科學家與非科學家之間溝通困難，他們互不相識，歧見甚深(Snow,1980)。由於科學知識傳播是實踐教育功能，

而主要目的是將科學領域知識藉由大眾媒介傳達給一般大眾。但這樣的傳播不能只是依賴學校教育，因為整個社會並非只有學生成員，而大眾媒介才是科學知識傳播的真正教師（McQuail, 1987）。

知識傳播是知識轉移和分享的重要活動，也就是知識擁有者傳遞訊息與知識重建者吸收訊息的互動學習過程。它是一種行為模式，知識擁有者透過不同媒介的傳播過程將知識外化（externalization），而知識重建者藉由吸收學習知識將知識內化（internalization）（Nonaka, 1995）。傳播媒介分為直接傳播及間接傳播，直接傳播是透過人與人的互動學習傳播內隱知識，而間接傳播則是透過書籍、網路、視聽教材等傳播外顯知識（Davenport and Pruzak, 1998）。由於現今科技社會要求能快速且有效地傳播知識，因此知識傳播需具有系統性及整合性的功能，配合電腦的結合可形成快速新的資訊傳播渠道，滿足社會大眾對資訊的大量需求，促進傳播系統的發展。一套完整的科學知識傳播策略將扮演關鍵性的成功因素。（McQuail, 1987）。為此。本計畫將透過完善的傳播策略，將核能安全知識傳達至一般民眾為主要研究動機之二。

在今日這個資訊科技流通、傳播管道多元的時代裡，人們吸收資訊的方式不再只侷限於文字、海報等平面媒體。漸漸地，聲音、影像、及顧客心中的認知、形象都會影響到消費者的消費行為及態度。因此，整合行銷傳播不再只是各種傳播工具（廣告、公關、促銷、活動行銷）概念，而是一項新的「戰術」，而每一個傳播工具都講究戰略的靈活調整，發揮行銷最大的綜效，以期達到長期的消費行為關係。整合行銷傳播可整合不同的傳播工具，透過不同的行銷活動、媒體進行傳播，不僅可保持訊息的一致性，同時可將行銷預算以較低成本達到最大傳播功效。為此，本計畫採用整合行銷傳播策略模式作為核能安全知識傳播的主要策略為主要研究動機之三。

目前使用整合行銷傳播理論的研究相當純熟，但其主要應用多半以產業行銷策略（Tsikirayi et. al., 2013；Casey and Llewellyn, 2012；Olatunji, 2011；黃蕙娟, 2010；潘美君, 2005）、產品（服務）品牌行銷策略（Spiller, 2013；Jankovic, 2012；Nekmat and Gower, 2012；Dissanayake, 2012；Chen, 2011）、企業社會責任形象推廣（Dow and Sungwoo, 2012；Jahdi and Acikdilli, 2009）以及行銷傳播成效（Quesenberry et. al., 2012；Casey and Llewellyn, 2012；Mihart, 2012；Porcu et. al., 2012；Reinold and Tropp, 2012；Wang, 2006；陳耀竹與謝友甄, 2002；張惠蓮, 2007）等研究為主，對於整合行銷傳播策略應用在科學知識傳播之相關研究甚少，尤其是向來被誤解的核能安全知識，更需要整合行銷傳播的觀念來幫助其推廣。為此，本計畫將探究整合行銷傳播策略應用於核能安全知識傳播之創新應用為主要研究動機之四。

有關於核能安全知識的來龍去脈，偶有道聽塗說之情形，為了能讓社會大眾明確瞭解核能安全知識，本計畫應用整合行銷傳播策略，規劃行銷整合傳播、分析目標市場、整合行銷傳播元素、手法與傳播媒體等。經由完整的分析探究，發展出核能安全知識整合行銷傳播策略，促使不同領域階層的社會大眾，都能有效地接收並

理解核能安全知識。此項結果除了提供核能安全知識傳播相關執行單位重要參考外，未來更可延伸作為政府政策傳播的重要參考因素，使得本計畫更具有正面的參考價值。

II. 主要內容

本計畫主要研究設計為文獻分析法與專家調查法。在文獻分析法：本計畫將步驟為蒐集國內外有關核能安全知識、核能安全發展趨勢、知識傳播、整合行銷傳播之相關文獻，並將蒐集之文獻制訂核能安全知識提出整合行銷傳播策略規劃。由於透過文獻分析法要完全地釐清核能安全知識整合行銷傳播本質內涵的界線是困難的，為了提升整體策略規劃的正確性與完整性，本計畫並就其策略規劃內容結果，進行專家調查。而專家調查法分為兩階段來加以進行：第一，透過專家訪談，確認本計畫彙整核能安全知識整合行銷傳播規劃模式與各階段流程的構面與因素。第二，針對這些因素進行模糊德菲法的專家問卷調查，篩選出專家同意的構面與因素。

III. 結果與討論

本研究以核能安全知識傳播文獻為基礎，並輔以專家訪談後，整理出現核能安全的現況、困境，以及專家對未來相關策略的建議。

1. 核能安全傳播的現況：核能安全傳播現況為「核安知識的來源並非官方，而是政論節目與耳語」、「官方單位與民眾實際落差大，各執一詞」、「媒體立場被貼標籤，民眾接收訊息產生選擇性接收」以及「網路社群成熟，懶人包形成快速傳播方式」。
2. 核能安全傳播困境：在核能安全傳播困境方面有「官方目標設定不清、手法錯誤、用字過於制式」、「官方提供的知識過於複雜，民眾只想了解切身問題」以及「主管單位的專業形象受到質疑，政治影響專業能力」。
3. 核能安全傳播建議：專家建議未來方向，包含了「面對反核團體應採取共同參與決策」、「官方應根據民眾問題，調整傳播內容的主軸」以及「核能安全為長期議題，應將科普教育列入傳播方式」。

本研究歷經專家模糊德菲法、探索核能安全知識的傳播的整合行銷規劃所需考量方向。本研究設定門檻值為 6 做為本研究評估準則之篩選標準。而其篩選結果刪除了 30 個評估準則，保留 111 項評估準則作為可能成功因素，佔總評估準則數量的百分比為 78.72%。其結果如下：

1. 確認核能安全行銷背景：對於核能安全知識進行傳播時，必須考量當下政治、經濟、人文社會與傳播資訊等之現況。
2. 核能安全知識的整合：針對核能安全知識中，對於備品、安全機制與電廠設備都需要跟民眾說明清楚。
3. 建立接收者資料庫：目前對於接收者的人口統計資

料需要瞭解外，更需要瞭解接收者目前對於核能安全知識傳播的刻板印象。

4. 確認目標市場：對於核能安全知識傳播時，必須針對核能安全傳播的知識內容瞭解程度進行區隔與定位。
5. 傳播代理業者選擇：主要選擇考量除了企業規模、製播能力與行銷技術外，對於目標、價值觀與溝通是相當重要的。
6. 傳播促銷：共有三個部分，首先是有代言人，對於核能安全知識傳播代言人田見必須考量外表形象、口才善於表達、專業知識可信賴的。其次，在傳播活動類型的選擇上，以科學教育推廣、多媒體方式、活動研習營隊等最佳；最後在傳播媒介選擇上，主要以傳統媒介為主，網路媒介主要使用網路廣告、官方網站、關鍵字為主。
7. 預算設定與分配：關於預算設定上更清楚的考核指標，尤其是合理性、必要性與效益性。
8. 傳播成效評估：主管機關能夠查證此次的傳播內容與手法，是否有效地讓目標群眾接收，調整往後每一次的策略細節。尤其對於反核團體的聲音，逐漸受到社會的關注，此部分能夠提供主管機關在面對反核團體，能有更明確的因應對策。

利害關係人間的信任：而在傳播代理業者、官方單位與民眾之間的信任與條件關係，一般大眾普遍認為似乎不太重要，但經過分析發現，官方單位與民眾間的關係，對於傳播成效的成敗具有關鍵性，若能夠改善官方與民眾之間的關係，將有助於提升民眾對官方的好感及信任度。使用民眾能了解的方式與語言進行傳播內容設定，更能貼近與民眾的生活與距離。

IV. 結論

核能安全傳播已成為公共安全的重要議題，官方單位的傳播手法與策略的重要性自然無庸置疑。不過在對象設定不清以及內容過於複雜的情況下，導致傳播的成效不彰，本研究將從核能安全傳播的現況與困境著手，從現階段的核能安全知識傳播內容進行分析，並進而訪談在核能、行銷、傳播的產、官、學專家共十位，了解目前執行核安傳播的相關單位的困境與現況。此外，本研究的目的在建立一套完整的績效評核指標，評估與調整每一次的傳播策略，此結果能提供未來主管機關執行相關議題傳播時，能有正確的績效評估指標，進而找到最適合的人、用最合適的方法達成目標。

整合行銷傳播策略不同於其他傳播策略，對於傳播目標設定、傳播活動、傳播工具、傳播過程等，都必須資訊的透明化與社會的民主化，改變過去單方向傳播的訴求方式，必須以接收者為主要核心，並且考量利害關係人彼此之間的信任與溝通。此研究結果除了提供現階段官方單位執行的參考外，主管單位對於目標群眾的設定，也能依此指標明確區分，以及完成傳播策略後，據此評估是否達成預設目標。日後學術研究亦可朝擴展構面廣度的方向，對於專業形象與外在形象，如專業度等

相關性，做更深入的研究。

在核能教育中的七項內涵中，其中核能發電與安全、核能發電與經濟、健康與防護以及緊急事故的處理四項與劉振乾（1991）針對核能教育的內涵有部分類似。根據本研究結果，未來主管機關在決策上應先設定傳播對象的知識與教育程度去調整傳播手法以及傳播內容的深淺度、並放下單方面的訴求，試著走進民眾之中瞭解問題癥結點。

由於核能安全屬於公眾議題，在執行傳播策略上的敏感度高，但缺沒有相關實務經驗者能夠指出如何直指問題核心，建議未來主管機關在挑選傳播代理商或是相關單位自己執行時，能夠據此訂定出相關的考核與任用指標，除了考量相關的傳播經驗與企業規模外，也可增加相關知識與相關議題的瞭解程度，方能達到將複雜知識透過淺顯方式呈現的理想境界。此外，現階段的正在進行相關爭議性公眾議題的討論與挑選代理商等計畫，可參考本研究之現況與困境，進行策略規劃與設計。

本研究目標整理出核能安全傳播的困境與現況，未來可以進一步針對這些情況制定出相關的策略與執行方針。透過傳播策略與內容的建立，未來爭議性話題主管機關也能夠採用相關內容，在未來的量化研究可以嘗試證明。

參考文獻

- [1] 張惠蓮（2007）。非營利組織整合行銷傳播績效評估之研究以「社團法人青年創業協會」為例。非政府組織學刊，3：70-101。
- [2] 陳耀竹，謝友甄（2002）。廣告主評選廣告代理商執行整合行銷傳播之研究。廣告學研究，19：55-87。
- [3] 黃蕙娟（2010）。運動賽事整合行銷傳播應用之探討：以2004~2008年ING臺北馬拉松為例。休閒與社會研究，2：1-13。
- [4] 潘美君（2005）。博物館宣傳的新思維：整合行銷傳播。博物館學季刊，19（2）：85-105。
- [5] 謝瀛春（1997）。資訊科技對人文、社會的衝擊與影響。國科會委託研究計畫研究報告。
- [6] Casey, R., Llewellyn, L. P. (2012). Brand Consistency in Social Media: WVU's Eberly Works Toward a Conceptual Framework of Integrated Marketing Communications. International Journal of Integrated Marketing Communications, 4(2):17-26.
- [7] Chen, C.-W. (2011). Integrated Marketing Communications and New Product Performance in International Markets. Journal of Global Marketing, 24(5):397-416.
- [8] Davenport, T. H, Pruzak, L. (1998). Working knowledge: How organizations manage what they know: Harvard Business Press.
- [9] Dissanayake, D. M. N. S. W. (2012). Integrated Communications, Integrated Marketing Communications and Corporate Reputation: Evidences from DELL Computer Corporations. Journal of Arts, Science & Commerce, 3 (1):26-33.
- [10] Dow, R. A., Sungwoo J. (2011). Strategic Management of Channels of Distribution and Integrated Marketing Communications: Essay on the

- Scotch Whisky Industry. *International Journal of Business & Social Science*, 2(22):108-113.
- [11] Jahdi, K. S., Acikdilli, G. (2009). Marketing communications and corporate social responsibility (CSR): marriage of convenience or shotgun wedding? *Journal of Business Ethics*, 88(1):103-113.
- [12] Jankovic, M.(2012). Integrated Marketing Communications and Brand Identity Development. *Management*, 63:91-100.
- [13] McQuail, D. (1987). *Mass Communication Theory: An Introduction*. SAGE Publications Ltd.
- [14] Mihart, C. (2012). Impact of Integrated Marketing Communication on Consumer Behaviour: Effects on Consumer Decision - Making Process. *International Journal of Marketing Studies*, 4(2):121-129.
- [15] Nekmat, E., Gower, K. K. (2012). Effects of Disclosure and Message Valence in Online Word-of-Mouth (eWOM) Communication: Implications for Integrated Marketing Communication. *International Journal of Integrated Marketing Communications*, 4(1):85-98.
- [16] Nonaka, I. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*: Oxford university press.
- [17] Olatunji, R. W. (2011). An Exploratory Study of Level of Adoption of Integrated Marketing Communications by Advertising Agencies in Nigeria. *International Journal of Integrated Marketing Communications*, 3(1):25-32.
- [18] Porcu, L., del Barrio-Garcia, S., Kitchen, P. J. (2012). How Integrated Marketing Communications (IMC) works? A theoretical review and an analysis of its main drivers and effects. *Comunicación y Sociedad*, 25(1):313-348.
- [19] Quesenberry, K. A., Coolsen, M. K., Wilkerson, K. (2012). IMC and The Effies: Use of Integrated Marketing Communications Touchpoints Among Effie Award Winners. *International Journal of Integrated Marketing Communications*. 4(2): 60-75.
- [20] Reinold, T., Tropp, J. (2012). Integrated marketing communications: How can we measure its effectiveness? *Journal of Marketing Communications*, 18(2):113-132.
- [21] Snow, C. P. (1980). *The Two Cultures And A Second Look*. London: Cambridge University Press.
- [22] Spiller, L. D. (2013). Using Metrics to Drive Integrated Marketing Communication Decisions: Hi-Ho Silver. *International Journal of Integrated Marketing Communications*, 5(1):24-38.
- [23] Tsikirayi, C. M. R., Muchenje, B., Katsidzira, Z. (2013). Impact of integrated marketing communications mix (IMCM) in small to medium enterprises (SMEs) in Zimbabwe as a marketing tool. *Research in Business & Economics Journal*, 7:167-178.
- [24] Wang, A. (2006). When Synergy in IVlarketing Communication Oniine Enhances Audience Response: The Effects of Varying Advertising and Product Pubiicity Messages. *Journal of Advertising Research*, 46(2):160-170.

核能意外事故銫輻射防護暨安全處置低階放射性廢棄物之編輯研究

Brochure for avoiding nuclear active cesium in the event of nuclear accident and the treatment of low level nuclear waste

計畫編號：103-NU -E-003 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：張一知

e-mail：rttu@aec.gov.tw

計畫參與人員：張育寧、蔡昀達、林柏成、許益維、余鎮奎

執行單位：國立臺灣師範大學化學系

摘要

本計畫針對核能發電廠若發生意外時，可能產生的銫-137 輻射物質對人體的影響，以及正確的防護方法做說明。包含銫在人體的主要功能，以及人體如何吸收、運送銫離子、以及防護方法等等，都用擬第一人稱的方式敘述，以簡單但清楚正確的方式說明。

科學教育中最具挑戰性的一環，乃為利用一般民眾能理解的方式，解讀生澀的科學知識，以消除民眾對科技的誤解或迷信。

本計畫之創作以具有第二核能發電廠的新北市萬里地區為地點，加上三位國中學生，和一位大學生為主角，共同串起對核能發電廠若有意外事故發生時的正確輻射防護知識。用說故事般的情節，繪製漫畫來呈現科學知識，應能深入中小學的學生心中。

漫畫成果為『阿凱哥之此"銫"非彼"色"』以及『阿凱哥遊蘭嶼』兩冊，分別闡述銫輻射防護及如何安全處置低階放射性廢棄物。

關鍵詞：阿凱哥、此"銫"非彼"色"、遊蘭嶼、銫-137 輻射物質防護、低階放射性廢棄物。

Abstract

A brochure about the protection in the event of nuclear power plant accident have been edited. The main focus is to prevent radioactive damage from cesium-137. The biological function of cesium and the way human body absorb and transport cesium are briefly but actually described in the brochure via first person dialog.

The biggest challenge for science education is to use plane words to explain scientific phenomena to general public and to eliminate the public misunderstanding or superstition about science and technology.

To help the penetration of the brochure, we have created three middle school students and a college student from Wanli district of New Taipei City where is the home for the second nuclear power plant in Taiwan to form a story about the radiation. Overall it presents correct information about the protection against radioactive species and the low level nuclear waste treatment. Comic book type cartoon drawings are the major part of the brochure in order to attract young students.

The results are two brochures one designate for protection against cesium-137 in the event of nuclear accident and the other for the treatment of low level nuclear waste.

Keywords: A-Kai, Cesium-137 protection, Trip to Lanyu, low level nuclear waste treatment.

I. 前言

本計畫為編輯核能意外事故時，對放射性碘、銫等物質的防護出版品，然此類輻射防護出版品其實早有撰寫，但因其多為文字敘述，因而大多偏於深澀，不具核能知識者較難了解。

核能發電廠產生的廢棄物可略分為高階、和低階放射性廢棄物，一般大眾其實並不瞭解高階放射性廢棄物均暫存於發電廠內，現階段的低階放射性廢棄物也存於發電廠內，只有民國 84 年前的低階放射性廢棄物才存於蘭嶼。現今常有報導將之醜化為汙染蘭嶼等等，本計畫亦將針對此編撰動漫畫。

核能並不可畏，但台灣發展核能發電數十年，人民的接受度始終不高，以往的宣傳、推廣應做得不夠，或方法不對。核能發電已經數十年，雖暫時有廢核之聲音，但因我國非能源生產國，核能發電勢必還要使用數十年，應從下扎根式的宣傳、推廣，也就是向中小學生宣傳，讓國民從小既具備正確的核能知識，長大成為公民後才能判斷能源的選項，而非人云亦云。

核能發電廠可能產生的輻射物質，對人體之影響是非常確切的、可防護的，但要廣為人知，必須使用與溝通目標最能接受的方式宣導，本計畫是針對國、高中生編輯，因此將採用動漫畫的方式，以國中生為主角，再用貼近流行之口語化方式加以解說，深耕下一代，讓核能發電的正確知識能深入人心。

II. 主要內容

本計畫因而確認編輯防護出版品的推廣目標為國中生，因此是以簡單、易懂、有趣為原則，同時加上 2012 年熱門的話題：林書豪籃球旋風，決定編輯以籃球開始帶入主題的漫畫，以吸引國中生閱讀並學習。

故事是以具有第二核能發電廠的新北市萬里地區為地點，加上三位國中學生，和一位大學生為主角，共同串起對核能發電廠若有意外事故發生時的正確輻射防護知識。用說故事般的情節，繪製漫畫來呈現科學知識，應能深入中小學的學生心中。

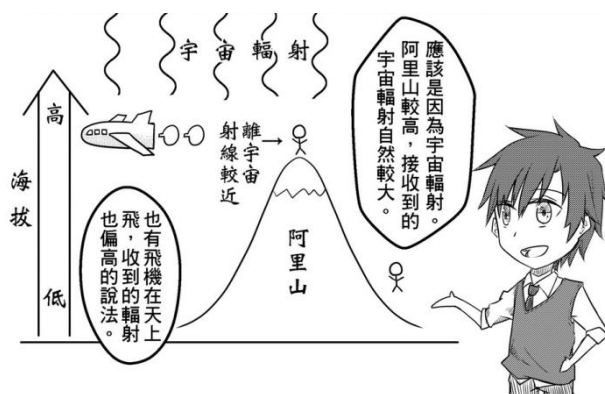
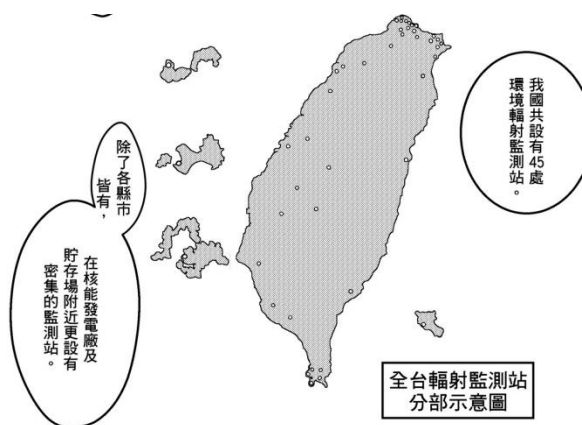
本計畫共完成兩冊漫畫，其為『阿凱哥之此"銫"非彼"色"』以及『阿凱哥遊蘭嶼』兩冊，分別闡述銫輻射防護及如何安全處置低階放射性廢棄物。

漫畫除以印刷形式發行，並製成智慧型手機可下載

之電子書，以擴大讀者基數。漫畫出版品也將推薦給國中教師，於學習能源時發給學生看。

III. 結果與討論

阿凱哥遊蘭嶼



阿凱哥之此“鉈”非彼“色”



不要小看這藍色的便便，它可以讓銫離子在人體內只停留約 30 天



不准小看
我

再加上長半衰期，30 天中只有不到 0.2% 的放射性銫會放出有害物質

IV. 結論

初步推廣時，國中生的接受度很好，若有經費可持續編輯、繪製有關核安等事情，如核能意外事故，各類放射性物種之性質、各類核能電廠的設計及安全性、以及一般大眾最關心的高、低階放射性廢棄物之處理。

輻射與核子事故防護教材互動式學習網站之研究

Development of Nuclear Safety Perceptions website and Teaching Materials for Elementary Schools' Students

計畫編號：103-NU-E-845-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：古建國

e-mail：2007ckku@gmail.com

計畫參與人員：吳咏芯、佟冠誼

執行單位：臺北市立大學應用物理暨化學系

摘要

本研究根據中、小學學教科書關於環境游離輻射內容分析為基礎，編輯輻射防護數位與互動教材，以影片與互動遊戲網站方式呈現；開發 app 遊戲電子書，透過智慧型手機或平板電腦，連結認識輻射、輻射防護及核子事故緊急應變知識等資源庫，以提供社會大眾更多核能安全與緊急應變相關知識，提升學習者興趣，吸引更多人進入網站學習。研究發現學生透過遊戲與活動體驗可以增加輻射知識，其中所設計的互動遊戲確實可以提供學生學習興趣與對輻射知識的好奇心，若有更多時間觀賞動畫影片，配合教師講解輻射知識，學生學習成效更佳。

關鍵詞：輻射教育、核能安全、輻射防護

Abstract

This research team has engaged in the environmental radiation related projects since 2012, successfully completed each objective of the project. The concrete achievement included outlining indicators of radiation related teaching material for elementary schools and high schools, and applied all the related data into developing four-column comics and other comics for elementary schools and also adults' teaching materials. This research aims for a continuation, to undergo digital teaching material for nuclear safety and radiation protection and prevention, and also update the existed website since 2012, and also add on the films and interaction games to attract more viewers to learn about the website. Besides, the related achievements will be developed into application for smart phones, to provide the public rich knowledge about nuclear safety and emergency measures.

Keywords: radiation education、nuclear safety、radiation protection

I. 前言

日本福島四年前一場海嘯所引發核電廠事故，再度喚起世人重新檢視核能與輻射教育，尤其是日本，市面出現介紹輻射知識與教導民眾如何進行防護的教材，宣導民眾須具備相關防護概念。台灣受此事件影響，於防災教育中強調輻射教育與相關防護之實務演練，尤其是核電廠周邊學校，皆會列為演練項目之一，並透過不同教育方式，讓民眾認識核能安全與輻射防護。

福島核災凸顯我們現行課程缺乏輻射相關知識介紹與核子事故防護內容，所以當有教師因應教學需求時，

大多上網收集資料，然眾多資料常令人眼花撩亂，若能針對中小學教師需求、配合學生相關知市與背景，提供教學者輻射與核能安全相關數位教材(含電子書與互動網站)將有助於教學實施。

我們根據環境游離輻射與核安指標訂定、中小學教材分析、開發學生學習書籍與網站製作，藉由數位教材開發將現行教材與民眾核子事故防護知識演練融入其中並經可上網手機或平板電腦連結新增電子書、動畫或小遊戲內容，提供全方位上網工具皆能連結認識輻射、輻射防護及核子事故緊急應變知識等資源庫。

本計畫的目的如下：

1. 開發輻射與核子事故防護電子書
2. 設計輻射與核子事故防護教學動畫影片與互動式遊戲。
3. 建置輻射與核子事故防護教材網站及成效評估

II. 文獻探討

輻射與輻射教育

太陽提供生存的能源，除了我們可以看到或感受到的光和熱之外，也有看不見、摸不到、聞不出來不同波長的輻射。我們生活中的土壤、岩石或天然建材等，甚至連人體內和食物中都存在著輻射。除了天然輻射之外，我們也製造人為輻射，例如醫學檢查的 X 光、鈾 60 或是家用微波爐、電腦、手機或電視都有輻射存在我們生活四週。法國國小到高中課程都有介紹輻射與核能相關知識(楊國良, 2011)；因應福島核電廠核子事故引發國人對輻射恐慌，教育部於 2011 年提供「核能與輻射教育」教學模組，介紹甚麼是輻射、輻射的應用與對人體的影響、輻射防護、環境輻射監控、輻射應用在農業、醫學、工業、生活用品、研究與發電。(教育部環境保護小組, 2011)。另外教育部 95 年度曾經推動大專院校通識教材加入核能、輻射與生活課程之計畫，內容介紹輻射與生活、核能與輻射應用及安全、輻射防護等(徐明德、邱志宏、李若燦、黃俊源、謝婉華)。吳建忠(2001)進行環境放射性的認識調查，以 16 至 19 歲的學生為研究對象，發現學生對於放射性物質的知識普遍不足。巫俊明等人(1998)針對曾經針對醫護人員輻射相關概念進行研究，發現對於輻射概念不正確，建議應該加強醫護人員正確輻射安全與防護概念。

國人對於輻射概念的認識，主要來自於核能發電相關新聞，核能發電已超過 50 年，世界上第一座核能發電機組於 1956 年開始商轉，根據 WNA (World Nuclear Association) 統計，截至 2012 年 8 月全球運轉中的機組

有 435 部，分布在 31 個國家，另外有 13 個國家 60 部機組正在興建。有 15 個國家超過 25% 以上電力來自於核能；歐洲各國平均超過 30% 以上電力來自核能；美國則佔 20% 左右電力台灣核能發電量佔總發電量約 20% 左右。目前中小學課程對核能與輻射相關概念介紹並不多，根據莊淵源（2011）研究桃園縣國小教師在核能發電的知識表現略顯不佳。王敏妃（2013）研究發現國小自然與生活科技領域中，核能相關的教材所佔內容不多。有鑑於學校課程對於輻射與核能知識較為缺乏，可透過教材或研習等方式彌補學校課程不足。曹書豪（2004）研究指出多辦一些相關的進修或研習對教師的核能認知是有幫助。林光賢（2012）透過「中小學教師電力建設研習會」方式傳達電力及核能知識給教師，能提升中小學教師相關概念。陳彥參（2012）對國小五年級學生進行輻射防護的教學之後，學生在輻射防護知識及態度方面都有進步。蔡明諺（2011）研究分析台灣民眾關心核能議題與防護應變能力探討，希望能提升民眾疏散避難之知能。自 2008 年起行政院原子能委員會規劃複合式災害型的核安演習，結合風災、水災、火災、震災、核災、土石流及海嘯等天然與人為災害，希望達到「平時減災」的目的，教育部防災教材亦納入輻射議題，提高核能安全知能與應變能力之能等。

2. 多媒體互動系統與網站

根據 Kulik 研究機構 1985、1986、1991 以及 1994 年的報告，學習者透過自發性的學習，所獲得的學習成果遠比傳統填鴨式的教育方式為佳，另外美國電腦技術研究公司研究發現，若能對學習者同時看到、聽到且有互動行為，可以記住 80% 的學習內容，尤其互動式多媒體符合上述研究，提供學習者多元化視覺與聽覺的刺激有助於學習，由其國內外專家學者一致認為網路多媒體教學可以加速學習者學習速度：例如陳志實（2000）研究發現互動式多媒體教材將過去被動式學習轉化為主動學習，透過網路學習瀏覽的便利性結合動畫、圖片與活潑的文字，可以引發學童學習興趣，增加視覺感官刺激，提昇學習成效。許清姿（2003）研究顯示學生以動畫方式進行學習可得到較大的學習成效。林宜正（2009）研究互動式多媒體輔助教材發現可以提升學生問題解決及理解能力。沈佳燕（2009）探討風能動畫輔助教材之應用發現學生是否利用動畫進行教學，實驗組與控制組學生在能源態度方面有顯著差異。陳月雲（2006）以自編的互動式繪本電子書進行「水中的生物」與「校園的昆蟲」課程教學，發現實驗組學生在學習動機、對科學的態度、閱讀理解能力之表現優於對照組學生，並達到顯著差異。

近年來，以手機或平板電腦為載體的 App 遊戲帶動下，加速互動學習效率，尤其具備隨時上網便利性，透過線上商店下載方式下載遊戲或電子書，且這類遊戲簡單不複雜，易於操作，透過觸摸螢幕選擇、拖放、畫線... 等方式操作，加上特有的陀螺儀與 GPS 硬體配備，吸引遊戲開發者與使用者投入。呂侑穎（2011）研究認為觸控式螢幕有別傳統電腦操作更容易操作，並可提升互動強度與使用者的滿意度。

根據 Fabricatore（2002）與 Malone（1980, 1983）等人進行遊戲內在動機因素的研究，將參與遊戲的動機分為個人動機與人際動機。國內亦有相關研究，例如陳祈年（2005）研究遊戲動機發現個人動機有「表現操控能力與

自我肯定」、「幻想與角色扮演」與「滿足好奇心」，其中沉浸程度越高的人，其「滿足好奇心」也較高；人際動機包括「社交互動」與「尋求挑戰競爭樂趣」，其中沉浸程度越高的人「尋求挑戰競爭樂趣」在此類別也愈高。這就是為什麼家長總覺得子女總想上網玩線上遊戲原因。

另外，Rieber（1996）將玩遊戲的動機分為「進步」、「權力」、「幻想」、「自我」等四種。Rouse（2001）在遊戲玩家的動機研究中指出通常在遊戲進行的「互動」對玩家產生愉悅感，並將玩家參與動機分為挑戰、社交、獨享的經驗與炫耀性等。（引自楊斐羽，2004）。

III. 研究方法

1. 研究對象：新北市某國小高年級學生，學習者經網站操作，再透過問卷收集資料進行分析。
2. 研究工具：質性研究為晤談與資料收集以建置互動式學習系統與網站。量的研究則為學習者測驗。
 - (1) 學習成就測驗編製
本研究問卷經文獻探討及諮詢專家學者之意見後，建立雙向細目表（見表一），問卷採用三選一的選擇題方式表達，每答對一題得一分，答錯不予計分。

表一 學習成就測驗（預試卷）雙向細目表

問卷面向	項目內涵
認識輻射	輻射定義、輻射分類
輻射醫學應用	醫療診斷、應用範圍
輻射農業應用	品種改良、病蟲害防治
輻射工業應用	物料材質改良、應用範圍
輻射研究與檢測	考古、地質研究
輻射與核電	原理、檢測、防護

- (2) 難度、鑑別度分析
本預試問卷第 2、5、6、7、8、10、12、13、14、15、16、17、18、20、22、24、25、26、28、29 題鑑別度均大於 0.3 故題目予以保留，以鑑別度作為取捨之條件，保留鑑別度在 0.20 以上二十題成為正式問卷。正式問卷施測時，將會在編排上，以難度低者排在前面，而後難度逐漸提高，以使受測者能由簡入難來作答。
- (3) 信度分析
本研究問卷之信度處理以 Cranach' α 係數考驗問卷的內部一致性。在環境游離輻射認知問卷部分經 Cranach' α 係數考驗，信度為 0.731，符合自編測驗信度於 0.6 至 0.8 之間。
- (4) 專家效度
內容效度為主，採選擇題三選一方式作答，每答對一題給予一分。
3. 資料處理：分析學習者答對率。

IV. 結果與討論

1. 開發輻射與核子事故防護 app 之電子書

有鑑於手機或平板提供上網條件與隨時隨地皆可下載便利性，提供 APP 電子書，方便學習者下載學習。

- (1) app 可下載電子書



圖一 APP 電子書 (1)



圖二 APP 電子書 (2)

(2)網頁版電子書

於建置網站中提供電子書，根據對象不同分為國小版、國中版與郭小學所開設成人教育班之樂齡版，學習者在教師教學或自學方式翻閱電子書，瞭解輻射相關知識與核安防護相關資料。



圖三 學習教材~國小版



圖四 學習教材~國中版



圖五 學習教材~樂齡版

2. 設計輻射與核子事故防護教學動畫影片與互動式遊戲

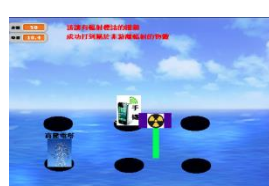
根據文獻，發現透過動畫及互動式遊戲加入學習網站中有助於提升學習者學習成效，將漫畫改成為動畫並搭配互動遊戲，以闖關方式評估學生輻射與核能相關概念學習差異。



圖六教學動畫影片



圖七 輻射打地鼠遊戲(1)



圖八 輻射打地鼠遊戲(2)



圖九 接輻射的遊戲



圖十 吃輻射的遊戲



圖十一 阿福伯遊台灣

因為平板電腦與手機上網便利性，製作互動式 APP 遊戲提供學習者多元學習機會，見圖十二與圖十三。



圖十二 特調果汁 Bar



圖十三 阿福伯遊台灣 APP 版

3. 輻射與核子事故防護教材網站及成效評估

說明：網站：<http://163.21.235.79/rad>。

網站內容為小學生、中學生與樂齡為對象的教材，開發遊戲挑戰區連結點、動畫內容影音區連結點 及互動遊戲互動區連結點。



4.

本網站提供測驗，並比較92位學生於一節課(40分鐘)透過自行瀏覽網站後，比較學生對輻射瞭解，各題答對率，見表二。

表二 網站進行自學前後答對率

	題目	答對率 前測	答對率 後測	前後 差異
1	哪一種是台灣特有的放射性礦石?	50.94%	59.18%	8.24%
2	請問北投石出產在哪兩個地方?	58.49%	69.39%	10.90
3	人體吸收輻射的劑量單位是?	86.79%	95.92%	9.13
4	發現鐳開啟輻射醫學治療大門的人是?	43.40%	53.06%	9.66
5	「電療」、「放療」運用?	35.85%	51.02%	15.17
6	胸部 X 光檢查是何種輻射應用?	26.42%	40.82%	14.40
7	運用輻射來進行花莖矮化品種改良的是?	62.26%	79.59%	17.33
8	用輻射照射來做病蟲害防治是為了讓雄性果蠅失去?	43.40%	51.02%	7.62
9	經過輻射照射後的蒜頭可以?	60.38%	65.31%	4.93
10	拋棄式的醫療用品以輻射來消毒殺菌是在?	47.17%	55.10%	7.93
11	高爾夫球製造時以輻射來照射可以提升球的?	47.17%	57.14%	9.97
12	運用輻射可以檢測古物的?	56.60%	59.18%	2.58
13	哪一個是核能發電的原料?	32.08%	36.73%	4.45
14	為因應核災事故發生原能會擬定?	37.74%	48.98%	11.24
15	請問輻射使用在大蒜時，能夠?	26.42%	38.78%	15.36
16	請問輻射防治害蟲是用在甚麼作物?	11.32%	22.45%	11.13

V. 結論

互動遊戲確實可以提供學生學習興趣與對輻射知識的好奇心。學生透過遊戲與活動體驗，對於輻射知識答對率約增加 10%以上。若有更多時間觀賞動畫影片，配合教師講解將瞭解更多輻射知識。

參考文獻

- [1] 呂侑穎 (2011)，「觸控式遊戲的可玩性因素對於沉浸經驗影響之研究」，南台科技大學多媒體與電腦娛樂科學系碩士論文
- [2] 吳建忠 (2001)。環境放射性的認識之調查分析。化學，59 (2)，189-198。
- [3] 巫俊明、王愛義、張榮華 (1998)。在職醫護人員「輻射安全與防護」推廣課程及相關認知與迷思概念研究。元培學報，2，153-176。
- [4] 沈佳燕 (2009)。以 ADDIE 模式發展國小高年級風能動

畫與繪本輔助教材及對教學成效之研究 (未出版碩士論文)。臺北市立教育大學，臺北市。

- [5] 林光賢 (2012 年 4 月)。深耕核能教育之我見。核能資訊中心核能簡訊雙月刊。135，20-23。
- [6] 林錦華、吳月娥 (2012 年 11 月)。發展國小教師認識環境輻射教材之研究。蔡慧敏 (主持人)，環境教育與低碳生活，2012 中華民國環境教育學術暨實務交流研討會張貼之論文，國立台灣師範大學。
- [7] 南一書局企業有限公司 (2011) 國民小學自然與生活科技六下。台南市：南一書局企業有限公司。
- [8] 翁寶山 (2003)。台灣輻射防護史話。臺北市：行政院原子能委員會
- [9] 徐明德 (2008)。核能、輻射與生活通識教材。
- [10] 陳志寶，《網路多媒體教材及題庫資源管理系統》，交通大學電資所碩士論文，2000。
- [11] 教育部 95 年度委辦大專院校核能、輻射與生活通識課程推動工作計畫。
- [12] 教育部環境保護小組 (2012)。輻射與核能教育。取自 <http://www.edu.tw/environmental/>。
- [13] 莊閔盛 (2004)。高雄市國中教師對核能發電認知與態度之研究 (未出版碩士論文)。國立高雄師範大學，高雄市。
- [14] 曹書豪 (2005)。臺北縣國民小學教師對核能認知與態度之研究 (未出版碩士論文)。臺北市立師範學院，臺北市。
- [15] 陳祈年 (2005)，「動機、可玩性與社交性對於多人線上角色扮演遊戲玩家沉浸經驗之影響」，國立交通大學傳播研究所碩士論文
- [16] 楊國良 (2011)。高中職學生核能認知與核能態度關係之研究。未出版之碩士論文。國立彰化師範大學工業教育教學碩士班，彰化縣。
- [17] 蔡明諺 (2011)。核能災害疏散避難之研究-以龍門核能電廠為例。未出版之碩士論文。中華科技大學土木防災工程研究所在職專班，臺北市。
- [18] 楊斐羽 (2004)。將傳統遊戲玩性原素導入電子遊戲設計之研究。元智大學資訊傳播學系碩士論文
- [19] Fabricatore, C., Nussbaum, M. & Rosas, R. (2002) "Playability in Action Video games. A Qualitative Design Model", Human Computer Interface. Volume 17, 311-368.
- [20] Rouse, D. (2005), "Game Design: Theory and Practice", Jones and Bartlett Publishers, LLC
- [21] Crawford C. (1997), "The Art of Computer Game Design: Reflections of a Master Game Designer", Osborne Media
- [22] Alexander, S. (1984). Why Nuclear Education? A Sourcebook for Educators and Parents. (ERIC No. ED 256 683)
- [23] Showers, D. E., & Shrigley, R. L. (1995). Effects of Knowledge and Persuasion on High-School Students' Attitudes toward Nuclear Power Plants. (ERIC Document Reproduction Service No. EJ 498 251).

民眾緊急應變電子書 APP 開發

Development of an APP for Emergency Response of Nuclear Accident

計畫編號：103-2623-E-262 -002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳彥均

e-mail：chen.mg.lhu@live.com

計畫參與人員：張宇德、王耕晨、黃莉琄

執行單位：龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系

摘要

過去，原子能委員會是透過紙本文宣、網站和年度核安演習，來宣導並演練核能事故的緊急應變。近年來，智慧型手機日漸普及，智慧型手機的電子書和 APP，能夠在民眾的緊急應變上，產生更好的效果。本計畫的目的，就是要開發一款以民眾緊急應變為主題的多媒體電子書。利用新的科技，介紹核能事故時，民眾緊急應變的重要知識，保障民眾在核能事故時的安全。

關鍵詞：緊急應變、多媒體、電子書

Abstract

In the past, the government propagates the plan via literature, website and exercise. Thanks for the popularization of smart-phone, e-book and APP can provide better effects on emergency response. In this project, a e-book APP of emergency response will be created. Important knowledge of emergency response plan will be propagated by new technologies. It will help the public during nuclear plant disaster.

Keywords: emergency response, multimedia, e-book.

I. 前言

自從 2011 年的日本福島核災之後，核能相關問題受到全國的重視。發生核能事故之時，民眾的緊急應變也成為大家所關心的重點。目前，原能會透過以下幾種方式，來宣傳核能事故時的民眾緊急應變方法：

1. 紙本文宣
2. 官方網站
3. 年度演習

近年來，智慧型手機日漸普及，電子書與 APP 的應用也愈來愈廣泛。在核能事故時的民眾緊急應變上，電子書和 APP 具有以下優勢：

1. 發行成本低
2. 可隨身攜帶
3. 不易受複合式災害影響

本計畫的目的，就是要開發一款以核能事故之民眾緊急應變為主題的互動式電子書。利用電子書中的互動功能，來吸引民眾的閱讀。讓民眾了解核能事故的過程，以及民眾緊急應變之時，需要注意的事項。藉此宣傳正確的知識，破除民眾舊有的錯誤觀念。

II. 主要內容

目前台灣所使用的智慧型手機，是以 Google 公司的 Android 系統為主流（約佔 46.64%），其次是 Apple 公司

的 iOS 系統（約佔 29.57%）。Microsoft 公司的 Windows Phone 系統雖然市佔率很低，但是考量到 Microsoft 在該系統的長期發展，以及平板電腦與桌上型電腦等平台。因此，本計畫所製作的民眾緊急應變 APP，鎖定再這三大平台系統上。至於其他系統，例如 BlackBerry 黑莓機等等，則因為在台灣的市佔率，而且前景不佳，所以暫時不列入考慮。本計畫採用了 Unity 引擎，做為電子書的開發工具。此引擎是一個跨平台的開發工具，可以將本計畫所開發的電子書，輸出到 Android、iOS 和 Windows 等平台系統之上。如此，本計畫所開發的電子書，在桌上型電腦、平板電腦、智慧型手機的主流系統之上，都能夠使用。如此，就能夠讓最多的民眾能夠觀看本計畫所開發的電子書。

在本計畫所開發的民眾緊急應變電子書之中，介紹了核能事故之中，完整的民眾緊急應變相關知識。讓民眾能夠了解萬一發生核能事故，該如何保護自己不受輻射傷害。在電子書的內容方面，共有五章，20 小節。詳細內容為：

A. 核能事故簡介

核能事故之分級、預防性疏散、核能事故之過程、政府之疏散規劃

B. 核能事故警報

事故警報、解除警報

C. 居家室內掩蔽

接收最新資訊、避免外出或在外停留、外出注意事項、居家注意事項、飲食注意事項

D. 民眾疏散

住宅注意事項、攜帶物品、交通工具

E. 碘片之使用

碘 131 之危害、碘片之功用、碘片的服用時機、碘片的服用劑量、碘片的存放、其他注意事項

III. 結果與討論

本計畫所製作的電子書，畫面解析度設定在 1920*1080，這個解析度和 Full HD 高畫質影片吻合。由於大部分平板電腦均支援 Full HD 影片的播放，所以能夠支援這個解析度。將電子書的文字、照片、靜態美工圖示和動態展示加以整合。再配上電子書的封面（圖 01）、可以互動展開的動態目錄（圖 02）、章節內容（圖 03 至圖 05）等等。就完成本計畫的多媒體互動電子書。

IV. 結論

本計畫針對民眾緊急應變為主題，開發了一款跨平台的多媒體電子書，可以在各種平版電腦上播放。透過照片、圖片、動畫、聲音等多媒體內容，向民眾介紹緊急應變的相關知識。計畫執行成果與計畫申請書之規劃大致相符，也符合計畫委託單位（原能會）之需求。



圖 01：電子書之封面

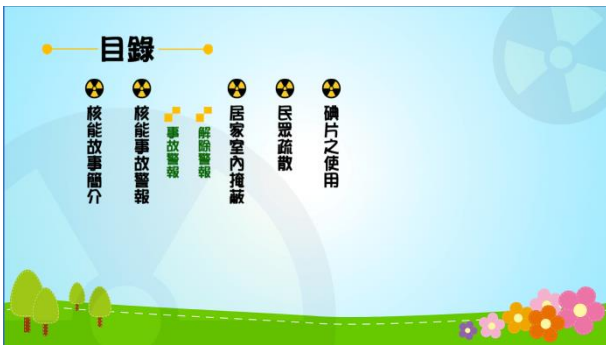


圖 02：電子書之動態目錄



圖 03：電子書之內頁



圖 04：電子書之內頁



圖 05：電子書之內頁