

105 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 106 年 6 月 29 日

目錄

議程及場地	iii
-------------	-----

核能安全科技

※應力分析與 CFD 耦合之流沖振動(FIV)模式發展與應用	1
※沸水式核能電廠之 TRACE/FRAPTRAN/SNAP 嚴重事故分析方法建立與應用	6
※圍阻體內部降壓導致局部氫氣濃度增高效應之實驗研究	12
※提昇地下管路薄化定位監測技術	15
※純水中 304 不銹鋼表面氧化膜結構與白金被覆效率之關聯性研究	20
※金屬添加技術對於 BWR 組件防治應力腐蝕龜裂之效益分析	23
※電廠中低壓電纜老化檢測與評估研究	26
※核電廠之地下管路檢測機器人研製	31

放射性物料安全科技

※設施核種遷移機制與參數實驗方法精進之研究	36
※核廢料於吸附及緩衝材料之微結構分析	41
※聚合技術固化放射性粒狀離子交換樹脂之研究	46
※深地層環境下放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料核種吸附參數研究	51
※放射性廢棄物長期貯存與最終處置之比較研究	56
※乾式貯存設施密封鋼筒不銹鋼材料應力腐蝕發生條件研究	59
※乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬	64
※乾式貯存系統裝載破損燃料之熱流分析技術發展與現象研析	70
※地化模式應用於高放處置熱力-水力-力學-化學耦合作用之研究	76
※台灣潛在母岩破壞強度特性與處置坑道破裂關係之研析	80

輻射防護與放射醫學科技(I)

※後福島民眾防護行動規範研擬之一	85
※後福島民眾防護行動規範研擬	88
※給低劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片設計	93
※個人化核子醫學體內劑量評估—釷 90 影像實證研究	103
※核醫乳房正子攝影個人劑量系統之研發	108
※非醫療用途安檢設備之輻射安全管制建議研析	113
※微型輻射劑量計之量測與製程研究	121
※三度空間數位乳房斷層攝影檢查與二度空間標準乳房 X 光攝影檢查	126
※核醫用全身電腦斷層輻射劑量之風險評估	128
※採用低劑量 CT 於不同年齡病患接受 PET/CT 與 SPECT/CT 診察之可行性探討	133

輻射防護與放射醫學科技(II)

※運用 [^{18}F]FE-PE2I 正子造影技術評估神經異種移植	139
※開發 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ TRODAT-1 在精神疾病造影多巴胺轉運器之影像分析技術	143
※阿茲海默症早期診斷藥物— ^{18}F 標誌組蛋白去乙酰化酶抑制劑之動物模式與造影研究	147
※發展新穎氟 18 組蛋白去乙酰化酶抑制劑作為中樞神經系統造影劑之研究	148
※以 [^{18}F]FEONM/microPET 及多重分子影像模式評估薑黃素結合游離輻射於原位多型性神經膠母細胞瘤大鼠模式之療效探討	150
※結合銻-188-微脂體、化學治療藥物應用於轉移性大腸直腸癌及黑色素瘤治療	152
※以正子斷層攝影搭配新式氟化分子早期診斷腦部發炎之可行性研究	156
※探討奈米藥物銻-188-微脂體多次劑量於卵巢癌細胞代謝再調控-以及對於細胞和粒線體自噬，粒線體型態變化之研究	158

※開發具腦部發炎偵測力之新式小分子	160
※超順磁氧化鐵奈米粒子與奈米藥物銻-188-微脂體之診療開發及	162
※多劑量銻-188-微脂體奈米核醫藥物合併化療藥物對人類頭頸癌及攝護腺癌小鼠模式之療效 評估	164
人才培訓與風險溝通	
※從核能資訊公開到開放政府資料—制度的區隔與匯流	171
※深耕中學生核能知識	177
※輻射防護科普實務推動及成效探討-II	179
※大學醫護保健類科學生輻射防護知識增能計畫	184
※龍華科技大學核工學程推廣	186
※科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(III)	188
※民意調查與議題溝通之執行與研析	192
※原子能安全與輻射防護新媒體教材 製作與行銷	199
※雲端學習 幸「輻」生活 東部核能知識推廣	201
※開發新住民核子防護與輻射應用之學習教材與活動推廣之研究	204
※核能議題溝通策略之性別分析	209

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

105 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會議程 議程及場地

時間：106 年 6 月 29 日（星期四）

地點：國立臺灣師範大學公館校區理學大樓 E 棟
(台北市文山區汀州路四段 88 號)

發表會議程（議程仍以當日現場公告為主）

時間	議程	地點
09:40~10:20	報到	1 樓
10:20~11:40	分組成果發表(I)	各領域場地
11:40~13:00	綜合討論(午餐)	各領域場地
13:00~15:30	分組成果發表(II)	各領域場地
15:30~15:50	中場休息	
15:50~16:00	優良計畫頒獎(各場次主持人)	各領域場地

各領域場地

領域	地 點	時間
1.核能安全科技	E101	10:20~14:50
2.放射性物料安全科技	E102	10:20~15:10
3.輻射防護與放射醫學科技(I)	E201	10:20~15:10
4.輻射防護與放射醫學科技(II)	E301	10:20~15:30
5.人才培訓與風險溝通	E202	10:20~15:30

105 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： E101					
場次	時間	評審 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:20~10:40	*龔繼康、陳建源、吳文方、廖俐毅、翁榮洲	馮玉明	國立清華大學工程與系統科學系	應力分析與 CFD 耦合之流沖振動(FIV)模式發展與應用
	10:40~11:00		陳紹文	國立清華大學核子工程與科學研究所	沸水式核能電廠之 TRACE/FRAPTRAN/SNAP 嚴重事故分析方法建立與應用
	11:00~11:20		許文勝	國立清華大學原子科學技術發展中心	圍阻體內部降壓導致局部氫氣濃度增高效應之實驗研究
	11:20~11:40		楊旭光	國立中山大學機械與機電工程學系（所）	提昇地下管路薄化定位監測技術
	11:40~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20	*龔繼康、陳建源、吳文方、廖俐毅、翁榮洲	葉宗洸	國立清華大學工程與系統科學系	高溫純水中 304 不銹鋼組件氧化膜結構與白金被覆效率之關聯性研究
	13:20~13:40		王美雅	國立清華大學原子科學技術發展中心	貴重金屬添加技術對於 BWR 組件防治應力腐蝕龜裂之效益分析
	13:40~14:00		王天戈	國立清華大學工程與系統科學系	核能電廠中低壓電纜老化檢測與評估研究
	14:00~14:20		林顯易	國立臺北科技大學自動化科技研究所	核電廠之地下管路檢測機器人研製
	14:20~14:50		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

105 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： E102					
場次	時間	評審 委員	計 畫 主持人	執行機關	計畫名稱
分 組 發 表 I	10:20~10:40	*劉文忠、黃慶村、陳渙東、魏聰揚、陳鴻斌	蔡世欽	國立清華大學原子科學技術發展中心	處置設施核種遷移機制與參數實驗方法精進之研究
	10:40~11:00		李志浩	國立清華大學工程與系統科學系	核廢料於吸附及緩衝材料之微結構分析
	11:00~11:20		鄭大偉	國立臺北科技大學資源工程研究所	無機聚合技術固化放射性粒狀離子交換樹脂之研究
	11:20~11:40		吳銘志	國立成功大學地球科學系（所）	深地層環境下放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料核種吸附參數研究
	11:40~12:00		劉大綱	國立成功大學海洋科技與事務研究所	放射性廢棄物長期貯存與最終處置之比較研究(II)
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分 組 發 表 II	13:00~13:20		張惠雲	國立高雄大學土木與環境工程學系	乾式貯存設施密封鋼筒不銹鋼材料應力腐蝕發生條件研究
	13:20~13:40		白寶實	國立清華大學核子工程與科學研究所	乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬
	13:40~14:00		曾永信	國立清華大學原子科學技術發展中心	乾貯系統裝載破損燃料之熱流分析技術發展與現象研析
	14:00~14:20		林文勝	國立臺灣大學水工試驗所	地化模式應用於高放處置熱力-水力-力學-化學耦合作用之研究
	14:20~14:40		楊長義	淡江大學土木工程學系	台灣潛在母岩破壞強度特性與處置坑道破裂關係之研析
	14:40~15:10		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

105 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 3：輻射防護與放射醫學科技(I)					
會場地點：E201					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:20~10:40	*黃景鐘、邱志宏、郭瓊文、張似璫、趙自強	董傳中	長庚大學放射醫學研究院	後福島民眾防護行動規範研擬之一
	10:40~11:00		吳杰	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	後福島民眾防護行動規範研擬
	11:00~11:20		盧志文	國立清華大學工程與系統科學系	給低劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片設計
	11:20~11:40		吳東信	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	個人化核子醫學體內劑量評估—釷 90 影像實證研究
	11:40~12:00		莊克士	國立清華大學生物醫學工程與環境科學系	核醫乳房正子攝影個人劑量系統之研發
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		許芳裕	國立清華大學原子科學技術發展中心	非醫療用途安檢設備之輻射安全管制建議研析
	13:20~13:40		張廖貴術	國立清華大學工程與系統科學系	微型輻射劑量計之量測與製程研究
	13:40~14:00		王建國	國立成功大學醫學系放射線學科	三度空間數位乳房斷層攝影檢查與二度空間標準乳房 X 光攝影檢查之劑量比較
	14:00~14:20		楊邦宏	臺北榮民總醫院國家多目標醫用迴旋加速器中心	核醫用全身電腦斷層輻射劑量之風險評估
	14:20~14:40		楊晴晴	慈濟學校財團法人慈濟科技大學醫學影像暨放射科學系	採用低劑量 CT 於不同年齡病患接受 PET/CT 與 SPECT/CT 診察之可行性探討
	14:40~15:10		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

105 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 4：輻射防護與放射醫學科技(II)					
會場地點： E301					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:20~10:40	*陳家杰、謝栢滄、魏孝萍、程紹智、黃文盛	馬國興	國防醫學院生物及解剖學研究所	運用[18F]FE-PE2I 正子造影技術評估神經異種移植在巴金森氏症動物模式之治療效果
	10:40~11:00		周元華	臺北榮民總醫院精神部	開發 99mTc-TRODAT 在精神疾病造影多巴胺轉運器之影像分析技術
	11:00~11:20		忻凌偉	國立臺灣大學醫學院藥學系暨研究所	阿茲海默症早期診斷藥物—氟-18 標誌組蛋白去乙酰化酶抑制劑之動物模式與造影研究
	11:20~11:40		陳傳霖	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	發展新穎氟 18 組蛋白去乙酰化酶抑制劑作為中樞神經系統造影劑之研究
	11:40~12:00		黃正仲	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	以[F-18]FEONM/microPET 及多重分子影像模式評估薑黃素結合游離輻射於原位多型性神經膠母細胞瘤大鼠模式之療效探討
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20	*陳家杰、謝栢滄、魏孝萍、程紹智、黃文盛	陳裕仁	財團法人臺灣基督長老教會馬偕紀念社會事業基金會馬偕紀念醫院放射腫瘤科	結合銻-188-微脂體、化學治療藥物應用於轉移性大腸直腸癌及黑色素瘤治療
	13:20~13:40		吳駿一	中國醫藥大學生物醫學影像暨放射科學系	以正子斷層攝影搭配新式氟化分子早期診斷腦部發炎之可行性研究
	13:40~14:00		莊其穆	國立陽明大學醫學系婦產學科	探討奈米藥物銻-188-微脂體多次劑量於卵巢癌細胞代謝再調控 (metabolic)
	14:00~14:20		許銘華	國立清華大學原子科學技術發展中心	開發具腦部發炎偵測力之新式小分子
	14:20~14:40		王雲銘	國立交通大學生物科技學系(所)	超順磁氧化鐵奈米粒子與奈米藥物銻-188-微脂體之診療開發及應用
	14:40~15:00		李易展	國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系	多劑量銻-188-微脂體奈米核醫藥物合併化療藥物對人類頭頸癌及攝護腺癌小鼠模式之療效評估
	15:00~15:30		綜 合 討 論		

105 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

場 地 5：人才培訓與風險溝通					
會場地點：E202					
場次	時間	評審委員	計畫主持人	執行機關	計畫名稱
分組發表 I	10:20~10:40	*陳志平、鄧希平、尹學禮、朱慶琪、張自立	高仁川	國立臺北大學法律學院	從核能資訊公開到開放政府資料
	10:40~11:00		張一知	國立臺灣師範大學化學系（所）	深耕中學生核能知識
	11:00~11:20		戴明鳳	國立清華大學物理學系（所）	核能安全與輻射防護科普實務推動及成效探討(II)
	11:20~11:40		潘愷	國立臺北護理健康大學嬰幼兒保育系（所）	大學醫護保健類科學生輻射防護知識增能計畫
	11:40~12:00		宋大崙	龍華科技大學化工與材料工程系	龍華科技大學核工學程推廣
	12:00~13:00		綜 合 討 論 (午餐供應便當)		
分組發表 II	13:00~13:20		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(III)
	13:20~13:40		梁世武	世新大學公共關係暨廣告學系	民意調查與議題溝通之執行與研析
	13:40~14:00		單文婷	國立台灣藝術大學廣播電視學系	從「新」開始—原子能安全與輻射防護新媒體教材製作與行銷
	14:00~14:20		黃朝曦	國立宜蘭大學資訊工程研究所	樂活學習「核」家安心 東部核能知識推廣
	14:20~14:40		古建國	臺北市立大學應用物理暨化學系	開發新住民核子防護與輻射應用之學習教材與活動推廣之研究
	14:40~15:00		蔡智勇	臺北市立大學教育學系	核能議題溝通策略之性別分析
	15:00~15:30		綜 合 討 論		

*為該場會議主持人

應力分析與 CFD 耦合之流沖振動(FIV)模式發展與應用

FIV model development and application by coupling stress analysis and CFD

計畫編號：NSC 105-2623-E-007-001-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、賴科維、黃品鈞

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

流沖振動(Flow-induced vibration)為電廠重要組件老化與劣化的主因之一。FIV 劣化機制基本上屬於應力與流力之流固耦合或交互作用 (Fluid structure interaction)。近年來，國外核能安全相關研究單位已開始研究 CFD/Stress analysis 流固耦合模式應用於核電廠重要組件老化與劣化安全分析之可行性，以增進核能電廠之運轉安全以及重要組件設計改善。基於增進國內運轉多年核能電廠之安全並增加民眾的信心，國內核能電廠重要組件相關之老化與劣化分析亦應該開始發展 CFD/Stress analysis 流固耦合模式，並研究其可行性以及分析結果之保守性。由是之故，本計畫擬發展單向與雙向 CFD/Stress analysis 流固耦合之 FIV 分析模式並以核電廠應用最廣重要組件的管束流為主，分析的流況亦包含層流與紊流以及單相與雙相，並評估單向/雙向流固耦合應用於電廠複雜幾何配置之可行性以及保守性。

關鍵詞：流沖振動、流固交互作用、計算流體力學/應力耦合分析

Abstract

Flow-induced vibration (FIV) is one of the main aging and degradation mechanisms for the key components in the nuclear power plant, which essentially belongs to the fluid/stress coupling or fluid-structure interaction (FSI). Recently, the safety analysis experts begin to study the applicability of CFD/Stress analysis coupling methodology in the safety analyses of degradation in the key components of nuclear power plant in order to enhance the operation safety and to improve their design. Therefore, it is crucial for us to develop the similar coupling models in the degradation simulation of key components in the nuclear power plant as well as to investigate their applicability and conservative. Therefore, this project develops one-way and two-way, respectively, CFD/Stress analysis coupling methods for the bundle flow in the flow conditions of laminar or turbulent as well as single-phase or two-phase. The majority of this project is to assess the applicability and conservative for these two kinds of fluid/solid coupling methods in the nuclear safety analysis.

Keywords: Flow-induced vibration (FIV), Fluid structure interaction (FSI), CFD/Stress analysis coupling analysis

I. 前言

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

在實驗研究方面，Koopmann[1]於 1967 年即實驗觀察圓柱體受流體橫向作用之影響與流場之變化；Griffin[2]亦曾實驗研究圓柱體於不同流體中，其下游渦旋的形狀變化；King 與 Johns[3]研究兩個圓柱體間彈性振動所引起干擾流動等特性；Ongoren 與 Rockwell[4]曾利用氬氣氣泡技術觀察以正弦軌跡的圓柱振動於渦漩流場內之變化；Jendrzejczyk 等人[5]以實驗方式研究雙圓柱體並排於流場時，可能之運動模式；Assi 等人[6]利用 water channel 進行一個圓柱體受上游圓柱體尾流 (Wake)之流沖振動相關實驗；最近 Kim 與 Alam[7]亦執行實驗以研究兩個平行排列圓柱體流沖振動之特性以及提出抑制振動之可行方式。

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

柱體之流沖振動現象；最近 Han[18]等人也進行四方排列圓柱體之流沖振動的相關分析研究。

應力分析與流體分析基本上是基於守恆定律(Conservation law)進行多維局部(Multi- dimensional and localized)的物理特性模擬。NEA/CSNI/R13(2007)報告[1]曾提及，應用這兩大領域於核能安全分析是需要專業人才與大量電腦資源。因此，早年核能安全分析僅能分別採用應力分析或稱計算固體力學(Computational Solid Mechanics, CSM)與 CFD 分析進行組件老化與劣化之研究。或者先進行 CFD 分析，以提供相關熱水流特性與作用力源項，進行相關應力分析與組件受損分析，此為單向之簡化流體/固體分析方法論(如圖 I-1 所示)。近年來，電腦計算與儲存能力大幅進步，雙向的 CFD/Stress analysis 流固耦合分析方法論(如圖 I-2 所示)已變為可能，使得流固耦合分析結果更接近於實際物理特性。然而，雙向流固耦合耗費大量的電腦計算資源，此外核能安全分析之精神主要在於分析模式的可行性與保守性，此為一般 CFD/Stress analysis 流固耦合分析之其他領域應用所不同之處。由是之故，本計畫擬用三年之時間，發展單向與雙向 CFD/Stress analysis 流固耦合之 FIV 分析模式並以核電廠應用最廣重要組件的管束流為主，分析的流況亦包含層流與紊流以及單相與雙相，並評估單向/雙向流固耦合應用於電廠複雜幾何配置之可行性以及保守性。此為第一年的計畫，主要乃進行 FIV 相關模式及分析結果之文獻蒐集、彙整與研究；評估適用於 CFD/Stress analysis 單向與雙向流固耦合之分析軟體；單向流固耦合分析模式建立與校驗。

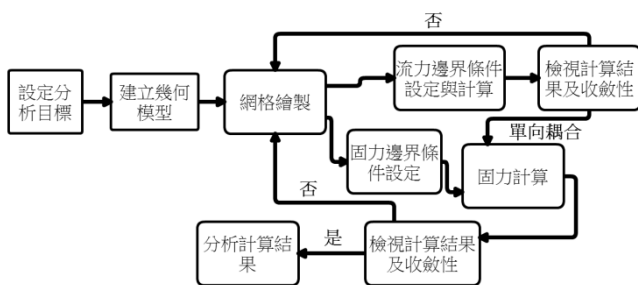


圖 1-1 單向流固耦合分析流程圖

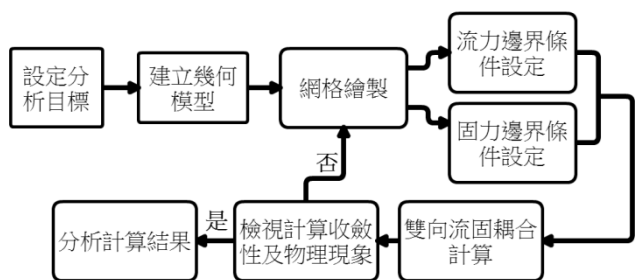


圖 1-2 雙向流固耦合分析流程圖

II. 主要內容

流固耦合分析的方法又分為單向耦合與雙向耦合，單向耦合計算的方法是將 CFD 計算之結果匯入到應力

軟體內，做結構的計算，最後利用計算之結果，分析結構的強度是否能承受流場的變化。而雙向流固耦合，除了將 CFD 計算之結果匯入給應力軟體計算之外，應力軟體計算之結構的改變也會回傳給 CFD 軟體，進而改變流場的變化，並交互疊代，直到算出結果，最後再利用計算之結果來比較雙向與單向耦合的優缺點，並評估其保守性，增加核電廠安全評估的完整性。

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

在最簡單的流固耦合測試中，本研究使用二維分析方法來模擬單根圓柱的震動，其示意圖如下，小圓為圓柱，直徑為 10mm，大圓為方便網略生長切出之範圍，直徑為 40mm，流場全長為 200mm，寬為 100mm，圓柱中心距入口 50mm 距離出口 200mm。其雷諾數大小設定在 200，流速為 0.02m/s

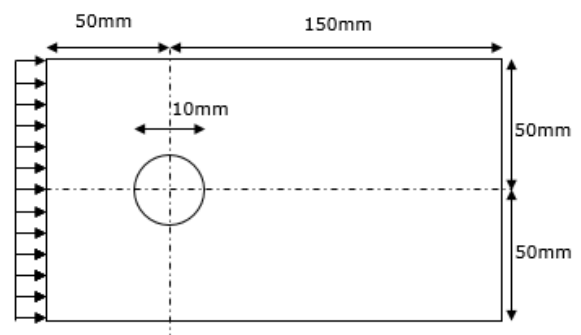


圖 II-1 流場全域圖

利用 Fluent 與 Mechanical 求解時均須建立網略，而網略的品質，與計算精準有密切關聯。Fluent 劃分網略

的原則以劃出正交網格為主以減少誤差，在近壁處則會將網格加密，以觀察壁面複雜之流體現象。而在進行網格靈敏度分析時，將圓周切成不同等分，來觀察分離點與渦旋脫離的現象。本研究第一階段測試中，將圓周劃分成三種不同等分的案例來分析，其劃分的數目依序是 80、120、160。而總網格數如下表 1。而圖 II-2 為流場網格劃分圖，圖 II-3 為壁面網格示意圖。

表 1 不同圓周畫分之總網格數與最大扭曲度

	圓周 80 等分	圓周 120 等分	圓周 160 等分
總網格數	24200	29500	49855
最大扭曲度 f	0.498	0.499	0.50

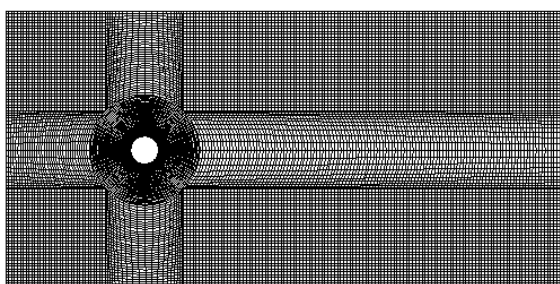


圖 II-2 流場網格劃分

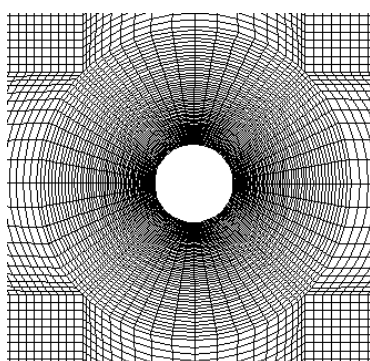


圖 II-3 近壁面之網格

III. 結果與討論

根據文獻回顧， $k-\epsilon$ model 並不能模擬非穩態渦流，故在紊流模式的測試中，本研究選擇了 LES model 與 $k-\omega$ model 做紊流模式的測試，並將圓周切成 80、120、160 做網格靈敏度測試。圖 III.1 為模擬之升力、阻力係數隨時間分布圖，其結果顯示，LES model 計算出來的升力係數之振幅在 0.6 左右，而 $k-\omega$ model 計算之振幅為 0.5，此外，若將圓柱切成 160 個格點計算出來的阻力係數會較 120 個格點與 80 格點為高，與圖 III.2 參考論文之升力、阻力隨時間變化圖相比，將圓柱切成 120 個格點且使用 LES model 來計算，其結果是相近的。表 1 為與前人之實驗、模擬對照表，在阻力係數上不只與 Han[19] 等人相近，且與 Wille[20] 之實驗值相近，略為高估阻力係數的原因推測為計算誤差，之後會針對不同數值方法

作靈敏度分析。而本模式在升力係數的計算方面，與前人的數值模擬結果相比是較為低估的，但並沒有實驗值的量測，故無法得出誰的結果較為準確。在紊流模式的比對中，由於 LES model 以空間平均為基礎，在網格尺度之上的渦流可進行精細的模擬，並非如 $k-\omega$ model 屬於時間平均的模擬，若紊流模擬的精確，則會更接近實際值，這也是需要選擇合適的紊流模式之主因，因此，在升力係數的表現 LES model 會較 $k-\omega$ model 更接近實驗值，也印證了 LES model 在大型渦流的模擬是準確的。而在靈敏度測試的結果顯示，若圓周分割的格點太少則升力係數會遠低於實驗值，若分割得太密，則阻力係數會更高於實驗值，依此結果顯示，在使用 LES model 時，網格個數需分割到一定個數，而分割的太密則會造成模擬更不準確，此結果推估為時間步的問題，由於在紊流模擬中，時間的特徵長度與空間的特徵長度可以決定紊流渦流的大小或特徵，所以網格尺寸變小，時間步也須跟著調整(例如:若尺寸變為原來的二分之一，則時間步則需調整為原本的四分之一)，但此作法會增加電腦的運算量，並不符合經濟效益，故在日後的模擬中，使用 LES model 且圓周分割成 120 格是較為理想且具有效益的做法。

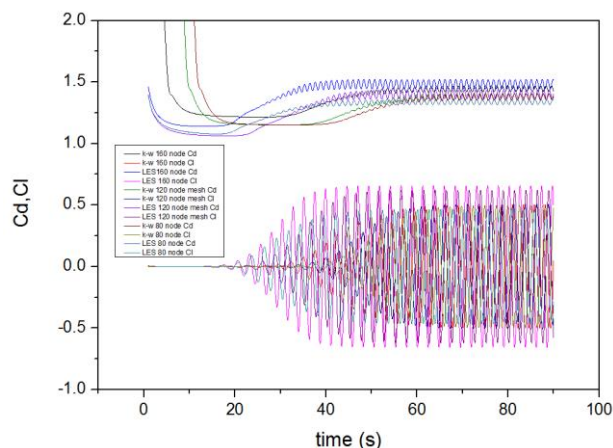


圖 III-1 模擬之升力、阻力係數隨時間變化圖

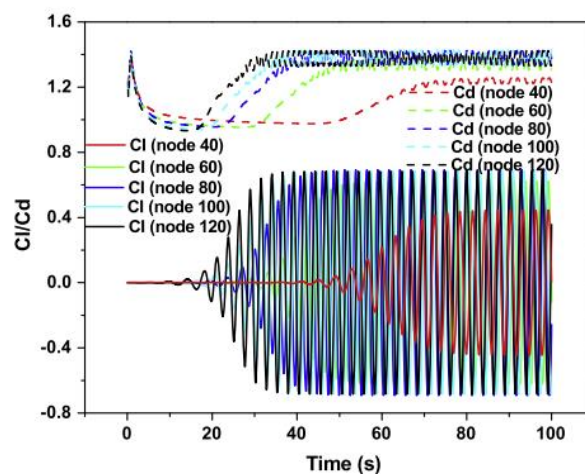


圖 III-2 參考論文之升力、阻力係數隨時間變化圖[19]

表 2 單根圓柱在雷諾數=200 之平均阻力係數
Fixed cylinder at Re = 200

Fixed cylinder	平均阻力 係數	升力係數 震幅	渦流頻率
Wille(Exp.)[20]	1.30	X	X
Li et al.[21]	1.34	0.69	0.384
Han et al.[19]	1.32	0.68	0.386
LES 80 格點	1.33	0.50	0.39
LES 120 格點	1.37	0.62	0.39
LES 160 格點	1.45	0.66	0.42
SST k- ω 80 格點	1.36	0.48	0.39
SST k- ω 120 格點	1.35	0.50	0.39
SST k- ω 160 格點	1.43	0.50	0.42
LES 120 格點(雙向)	1.42	0.63	0.39

圖 III.3 為雷諾數與阻力係數之關係圖，圖中，黑點為實驗值，而紅點為模擬計算的結果，有圖中可以看到，在雷諾數低於 2000 時，模擬的阻力係數值與實驗量測的結果非常接近，而超過 2000 時，雷諾數會有偏低的傾向，由於在高雷諾數時，渦流的尺寸會較低雷諾數時來的小，對於網格與次網格模型的需求也相對的提高，在後續的研究中，若需要模擬高雷諾數的研究，則需要選取適合的次網格模型。此外，分離點(separation point)對於阻力係數有重要的影響，在雷諾數小於 10 時，不會有分離現象產生，就模擬來說，確實也與實驗的結果一樣，並沒有分離的現象發生。而雷諾數小於 200000 時，此時的分離點大約在角度等於 80° 至 85° 左右，本研究模擬的結果顯示，在雷諾數等於 200、1000、2000 之分離點皆落於 85° 至 90° ，此結果與實驗值相當接近，故在阻力係數的表現中，也與實驗相當接近，略為高估的原因為此模擬為二維模型，流體並沒有 Z 方向的流動，故在 Z 方向的流體行為並不能顯現出來。而雷諾數等於 5000、10000、50000、100000 的模擬中，分離點落在 130° 左右，此與實驗值相差甚遠，故造成阻力係數嚴重的低估，此原因推測為過度區的分離點預測是極為複雜的物理現象，所以在周向的網格密度顯得非常重要，若日後探討的問題之雷諾數介於此區間時，調高周向網格密度是勢必要採取的作法。當雷諾數超過 200000 時，流體形成完全發展紊流(fully development turbulence)，由實驗結果顯示，此時的分離點大約在 120° ，而 CFD 模擬結果約在 110° 造成了阻力係數的高估，此原因與過度區雷同，為網格周向密度不夠密。

綜合以上結果可以歸納出，在雷諾數小於 2000 時，將周向網格分割成 120 格即為可行的做法，若日後需探討高雷諾數的研究，則可增加網格密度，但必須縮小時間步，此作法勢必得增加電腦的計算量，對電腦的需求也相對的升高。

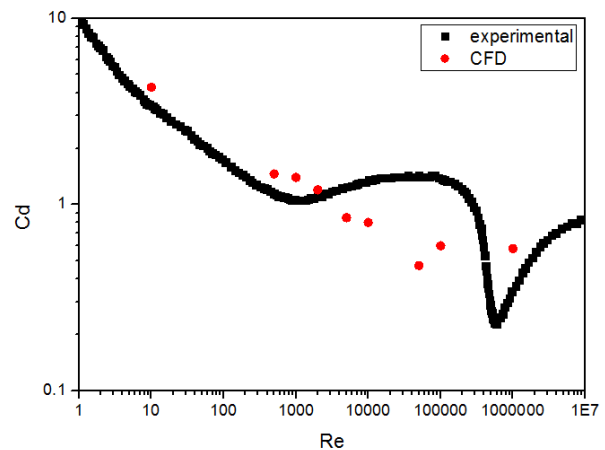


圖 III.3 雷諾數與阻力係數之關係圖

IV. 結論

固力分析與流力分析基本上是基于守恆定律 (Conservation law) 進行多維局部 (Multi-dimensional and localized) 的物理特性模擬。NEA/CSNI/R13 (2007) 報告曾提及，應用這兩大領域於核能安全分析是需要專業人才與大量電腦資源。因此，近十年來流固耦合分析才逐漸應用於核能安全分析上。而國外核能安全相關研究單位已開始研究流固耦合技術應用於核電廠重要組件完整性之安全分析，以增進核能電廠之運轉安全。而就現階段的研究而言，ANSYS 的軟體的確能夠就流沖振動進行模擬，而本研究在探討單根圓柱振動的情形時，以前人文獻資料為參考依據，著手進行模擬流場的測試，模擬現象與文獻趨勢、流場基本現象皆能夠互相的吻合，顯示流沖振動的分析模式已初步建立，而未來工作是將兩根串聯圓柱的振動分析模擬結果與國外期刊比對來完成模式校驗，待校驗完成後，幾乎已確定了本模式的建立完成，即可將此分析模式應用於核三廠的熱交換器，建立熱交換器的模型作二維彈性圓柱振動模擬，並分析可能造成安全疑慮之原因，增進核電廠安全。

參考文獻

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

- circular cylinders,”*J. of Fluids and Structures*, 22, 819(2006)
- [7] S. Kim, M.M. Alam, “Characteristics and suppression of flow-induced vibrations of two side- by-side circular cylinders,”*J. of Fluids and Structures*, 54, 629(2015)
- [8] M. Hurlbut et al., “Numerical solution for laminar two dimensional flow about a cylinder oscillating in a uniform stream,”*ASME J. of Fluids Eng.*, 104, 214(1982)
- [9] S. Mittal, T.E. Tezduyar, “A finite element study of incompressible flows past oscillating cylinders and airfoils,”*Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, 15, 1073(1992)
- [10] T. Ichioka et al., “Two-dimensional flow analysis of fluid structure interaction around a tube row and tube arrays in cross-flow,”*3rd ICONE*, Kyoto, 1995.
- [11] V. Kassera, K. Strohmeier, “Simulation of tube bundle vibrations induced by cross flow,”*J. of Fluids Structures*, 11, 1997
- [12] K. Schroder, H. Gelbe, “Two-dimensional CFD-simulation of flow induced vibration excitation in tube bundles,”*Chem. Eng. And Proc.*, 38, 621(1999)
- [13] S. Mittal, V. Kumar, “Flow-induced oscillations of two cylinders in tandem and staggered arrangements,”*J. of Fluids and Structures*, 15, 717(2001)
- [14] W. Jester, Y. Kallinderis, “Numerical study of incompressible flow about transversely oscillating cylinder pairs,”*J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 126, 310(2004)
- [15] G.V. Papaioannou et al., “On the effect of spacing on the vortex-induced vibrations of two tandem cylinders,” *J. of Fluids and Structures*, 24, 833(2008)
- [16] E. Longatte et al., “Methods for numerical study of tube bundle vibrations in cross-flows,” *J. of Fluids and Structures*, 18, 513(2003)
- [17] B.S. Carmo et al., “Computational simulation of the flow-induced vibration of a circular cylinder subjected to wake interference.” *J. of Fluids and Structures*, 41, 99(2013)
- [18] Z.L. Han et al., “Flow-induced vibration of four circulation cylinders with square arrangement at low Reynolds numbers,”*Ocean Eng.*, 96, 21(2015)
- [19] Xiangxi Han, Wei Lin, Youhong Tang, Chengbi Zhao, Karl Sammut, “Effects of natural frequency ratio on vortex-induced vibration of a cylindrical structure,2015”,*Journal of Computers & Fluids*, Volume 110, 2015 ,pp62-76
- [20] Berger, E., and R. Wille (1972). "Periodic Flow Phenomena," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Van Dyke, M., et al., editors, Palo Alto, CA, 1972, pp 313-340
- [21] Xiangxi Han, Wei Lin, Youhong Tang, Chengbi Zhao, Karl Sammut, “Effects of natural frequency ratio on vortex-induced vibration of a cylindrical structure,2015”,*Journal of Computers & Fluids*, Volume 110, 2015 ,pp62-76

沸水式核能電廠之 TRACE/FRAPTRAN/SNAP 嚴重事故分析方法建立與應用 Development and application of severe accident analysis models for boiling water reactors using TRACE/FRAPTRAN /SNAP codes

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳紹文

e-mail：kkk@ntust.edu.tw

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

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

本研究針對國內之沸水式金山核能電廠(BWR)建立分析模式，利用美國核管會(U.S.NRC)的最先進的熱水流分析程式 TRACE、燃料暫態分析程式 FRAPTRAN、以及圖形化介面 SNAP 程式等，結合爐心熱流計算與材料應力分析，發展嚴重事故 SBO 之暫態模式，用以建立沸水式核能電廠之嚴重事故分析方法與燃料暫態安全分析。利用 TRACE-SBO 模式的各項分析結果作為邊界條件，已引入 FRAPTRAN 建立燃料暫態分析模式，以分析燃料與護套在上述 SBO、採用 URG 措施、及假設爐心隔離冷卻系統 RCIC 或消防補水失效等極端狀況之燃料暫態機械行為，包括燃料的溫度、應力、應變、與氧化層等，用以評估爐心系統安全餘裕及燃料完整性等。根據目前的分析結果，當 SBO 時若 RCIC 失效，在採用 URG 措施進行之狀況下，TRACE 分析結果為不論水位、溫度、爐心壓力等一切皆在安全範圍，而 FRAPTRAN 分析結果亦顯示所有燃料暫態行為皆在安全無虞的狀況。然而當假設 SBO 加上爐心隔離冷卻系統 RCIC 或消防補水失效等極端狀況時，或甚至於 SBO 加上側板洩漏、RCIC 與消防注水皆失效狀況下等，可能導致爐心與燃料護套接近或超過法規限制值，故建議在此時間之前應尋求適當冷卻補水措施。本研究分析結果將有助於了解沸水式電廠在極端假設模擬事故之系統狀況，以加強安全管制。

關鍵詞：金山電廠、沸水式反應器(BWR)、TRACE 程式、FRAPTRAN 程式、電廠全黑狀態(SBO)。

Abstract

The TRACE/FRAPTRAN/SNAP codes were utilized to construct the ChinShan NPP model and simulate the SBO accident with scenarios of RCIC failure. Important transient parameters of reactor core and fuel rod under the assumed scenarios such as core pressure, water level, fuel centerline temperature, cladding temperature, cladding hoop stress and strain, etc. have been estimated and analyzed. Based on the simulation results, the strategies of URG have been examined and applicability has been tested. The present results can be used as a reference for reactor operations and management.

Keywords: Chinshan NPP, SBO, TRACE, FRAPTRAN

I. 前言

2011 年日本福島事故後，國內外對於核能電廠皆重新作完整嚴謹的檢視，期望類似福島事故之複合性災害或其他因素影響之事故能有更完善的防範。有鑑於此，本研究設定針對類福島事故之電廠全黑 SBO 條件，加上極端嚴苛的假設事故狀態，例如假設爐心隔離冷卻系統 RCIC 及消防補水失效等，藉以模擬驗證國內的 URG 措施的有效性及發生極端的複合性災害時之情況，分析研究核燃料與護套之機械行為，以檢視國內 BWR 核電廠在此嚴苛的假設事故條件下，燃料與護套的暫態行為與完整性。

TRACE 程式介紹

TRACE 是由美國 NRC 發展的熱水流分析程式，主要可用於核能電廠系統安全分析模擬，其前身主要為 TRAC 與 RELAP 等程式結合而成，可結合一維與三維之分析計算能力，NRC 將其視為未來重要的核能安全熱水流分析之主要程式。

FRAPCON 介紹

FRAPCON 程式為美國核管會(U.S.NRC)所委託發展用來計算高燃耗中穩態運轉下輕水式反應器單根燃料棒的材料特性和性能，是使用 Fortran 90 所編寫的電腦程式。本程式可計算溫度、壓力、燃料棒形變和燃料棒功率，以及冷卻水的邊界條件。

FRAPTRAN 程式介紹

FRAPTRAN 是利用 Fortran 語言由 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)發展，主要功能是計算輕水式反應器單一燃料棒在運轉的暫態或者假設的事故中的暫態的反應。FRAPCON 與 FRAPTRAN 是一組搭配的程式，前者的功能主要是高燃料的單一燃料棒在穩態的反應，後者則是計算燃料與護套的溫度、護套的應變與應力以及護套內氣體壓力在給定的功率和冷卻條件隨時間變化的暫態計算。

II. 主要內容

假設事故介紹

本報告分析條件與模擬假設主要參照 103 年核一廠核安演習劇本與 1451 程序書，並設定 3 個假設案例，探討核一廠若處於全黑事件(Station Blackout, SBO)，且第五台柴油發電機及 RCIC 運轉一段時間後失效之情況下，爐心水位是否能滿足成功準則。同時，在分析電廠 SBO 狀況下無處置措施與執行救援措施之案例比較中，將針對下列重要參數進行探討[1-3]：

- (1) 爐心水位
- (2) 反應器壓力
- (3) 燃料護套溫度與應力或應變

為滿足爐心水位成功準則，暫態事故模擬期間爐心水位須高於燃料頂端高度(TAF, 9.36m)，確保燃料不發生裸露並避免護套受損之風險。本報告中，所有模擬案例之初始條件，皆為核電廠處於正常運轉狀態下。此研究首先針對核一廠分析下列假設案例：(1)案例一：假設 SBO 事故，假設 RCIC 運轉一小時後失效而執行斷然處置(URG)措施；(2) 案例二：假設 SBO 事故時，假設喪失 RCIC 與消防注水能力狀況、等；以及更極端的假設 (3) 案例三：電廠 SBO 狀況時，假設無法停機且爐心側板發生洩漏，並假設無法啟動任何爐心冷卻系統之狀況，對其做安全性分析。利用以上案例，以驗證斷然處置之事故和能力，並分析燃料護套之機械性質與護套完整性。

案例一：假設 SBO+RCIC 失效+URG 措施

針對核一廠分析 SBO 事故並執行斷然處置措施，初始 300 秒暫態模擬電廠穩態測試，並於模擬時間 300 秒時假設一假想地震侵襲廠區，造成反應爐急停、主蒸汽管路隔離，此時 RCIC 啟動，案例一參照 EOP 將爐心降壓至 35kg/cm²；於事故發生後 30 分鐘，緊急柴油發電機無法運轉，喪失所有交流電源，發生電廠全黑事件，案例一則依照斷然處置策略，執行控制降壓使爐心壓力降至 15kg/cm²；事件後一小時 RCIC 及 HPCI 失效，此時案例一參照 URG 執行緊急降壓，爐心壓力降至 3 kg/cm²，並執行圍阻體排氣，案例一亦於模擬時間 5000 秒時備妥後備水源，並進行替代注水。

案例二：假設 SBO+ RCIC 失效+無消防注水

起始部分的時序與案例一前半部分相同，初始 300 秒暫態模擬電廠穩態測試，並於模擬時間 300 秒時假設一假想地震侵襲廠區，造成反應爐急停、主蒸汽管路隔離，此時 RCIC 啟動，在一小時後 RCIC 失效後無其他動作。此外，在案例一當中採用的降壓、venting 措施與消防注水等動作，在本案例中皆假設不執行，故本案例為一個極端嚴重事故之假設狀態。

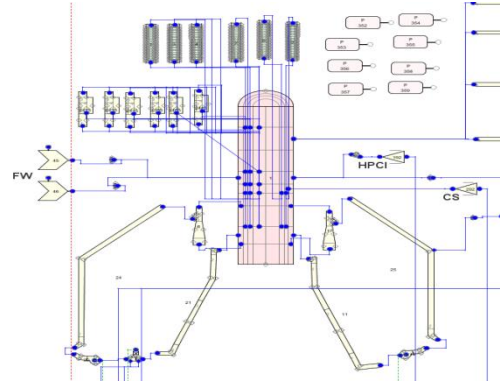
案例三：假設 SBO 未停機+側板洩漏+無 RCIC 無注水

依據先前的案例研究的設定條件，假設爐心受地震或腐蝕影響，爐心從輕微洩漏狀況轉為爐心側板完全斷裂，裂縫深 0.0254m，破口 360°環狀，面積設為 11.13m²，再加上假設電廠遭遇天災引起的電廠全黑狀況，除了假設喪失外電之外，並假設無法啟動緊急爐心冷卻系統(ECCS)與假設無法停機(如：預期暫態未急停 ATWS)等複合式嚴重事故狀態。

TRACE 模式建立

本模式是由 TRAC 轉換得到 TRACE 初步基本模型，再依照 RETRAN 模式做基礎，建立 TRACE 控制系統模式，同時為確認模式中數值之正確性，再與核一廠起動測試數據資料及 RETRAN 讀入數值做比較及修正，並進行穩態計算，反覆修改直到收斂數值與電廠數值相同。在控制系統方面，參考核一廠 RETRAN 輸入檔案，加入三元飼水控制系統，其運算邏輯皆相同。TRACE 模式建立後，根據電廠資料針對爐心功率、頂槽壓力、爐心流量、再循環流量、窄幅水位、飼水流量及蒸汽流量等參數作設定，並於參數設定完成後進行穩態計算，

並觀察各參數穩定性，重複比對 RETRAN 輸入參數並做修正，確定穩態之建立，表一為核一廠測試數值。



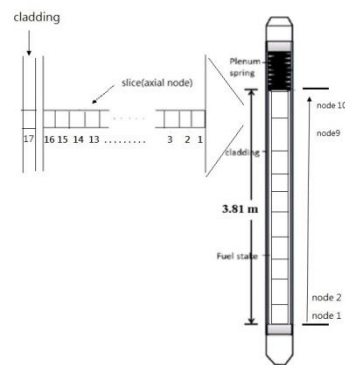
圖一：金山電廠 TRACE 模式之爐心示意圖

表一：核一廠 100%功率暫態初始值

參數	Test	RETRAN	TRACE
功率(MWt)	1775	1775	1775
頂槽壓力(psia)	1007	1007	1006.9
飼水流量(lbm/sec)	2119	2117	2108
蒸汽流量(lbm/sec)	2021	2117	2108

FRAPTRAN/FRAPCON 模式建立

FRAPTRAN 是模擬單根燃料棒受到熱應力之行為，專用於輕水式反應器的暫態事故模擬，如：冷卻水流失事故(LOCA)與 RIA 事故等[4-5]。圖二表示 FRAPTRAN 中金山電廠的單根燃料棒幾何模型，燃料棒 3.81 公尺，軸向由下到上分為 10 個節點，徑向則以環形結構分成 17 個節點，其中，由圓心向外 1 至 15 個節點模擬燃料丸行為；最後第 16、17 節點分別模擬護套內側與外側之護套機械行為。參考美國 NRC 的燃料棒安全規範 10CFR50.46[6]，規範如下：一是護套溫度的峰值不能超過 2200°F，二是護套氧化層的厚度最大值不能超過護套本身厚度的 17%，三是氫氣產生量的最大值不能超過總量的 1%，四是維持冷卻的幾何形狀，五是維持長時間的冷卻。



圖二：金山電廠燃料棒之 FRAPTRAN/FRAPCON 格點示意圖

下圖三為 TRACE/FRAPCON/FRAPTRAN 之分析流程示意圖。在執行 FRAPTRAN 燃料棒行為模擬時，需要輸入幾項重要參數作為邊界條件：(1) TRACE 輸出檔，作為熱水流參數之邊界值；(2) FRAPCON 輸出檔，作為燃料棒燃耗值之初始條件；(3)FRAPTRAN 還需輸入燃

料棒的幾何參數等。此外，FRAPTRAN 模擬計算燃料與護套的熱焓時所用的參考溫度為 298.15K。

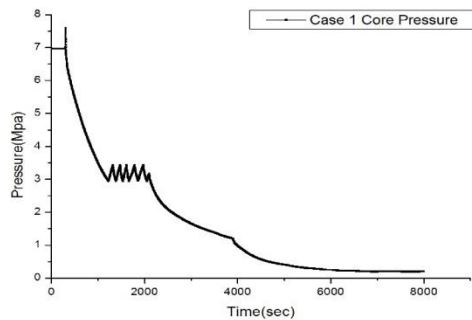


圖三：TRACE/FRAPCON/FRAPTRAN 結合模擬流程圖

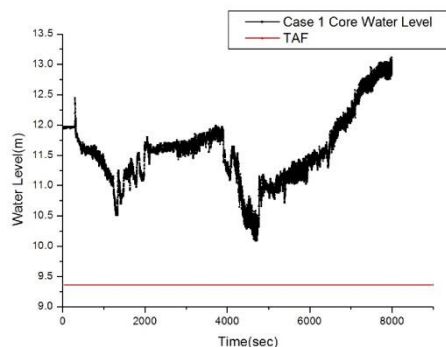
III. 結果與討論

案例一模擬結果

案例一分別於 305 秒及 2100 秒依照 EOP 及 URG 策略執行控制性降壓，除大量移除衰變熱外亦保持爐心水位不低於 TAF，當後備水源備妥後即執行緊急降壓，將爐心壓力降至 3kg/cm^2 以利進行低壓注水，並於約 7988 秒爐心回復滿水位，8000 秒模擬停止。圖四、五為案例一之爐心壓力、爐心水位模擬結果。



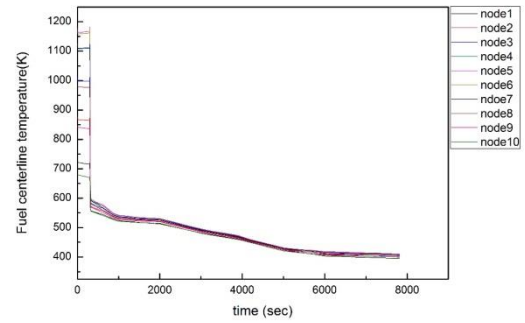
圖四：案例一爐心壓力



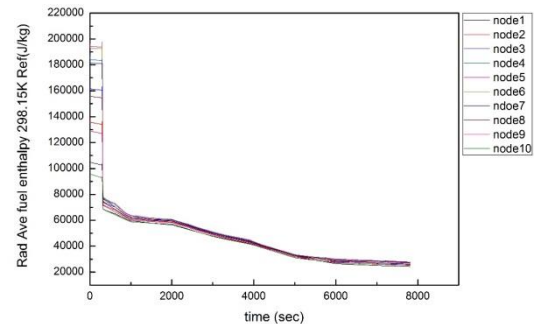
圖五：案例一爐心水位

本研究利用先前 TRACE 之熱水流模擬結果(案例一)作為邊界條件，代入 FRAPTRAN 進行案例一之燃料與護套暫態分析。圖六顯示燃料中心線溫度變化，隨著 URG 時序進行，模擬結果顯示燃料溫度順利安全降溫，無安全疑慮。圖七顯示徑向平均熱焓量變化，在順利實施 URG 狀況下，熱焓量的結果同樣符合法規限值。同樣地，圖八護套環向應變在事故發生後(300 秒)，隨著

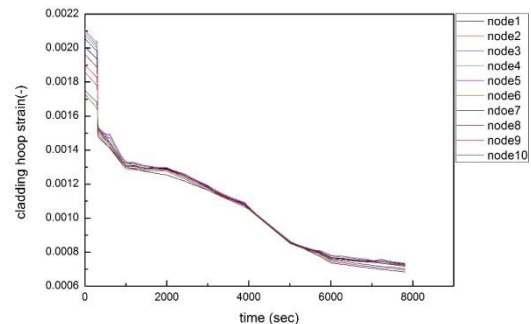
URG 步驟的實施而有緩和下降的趨勢。



圖六：案例一燃料中心線溫度變化



圖七：案例一徑向平均熱焓量變化



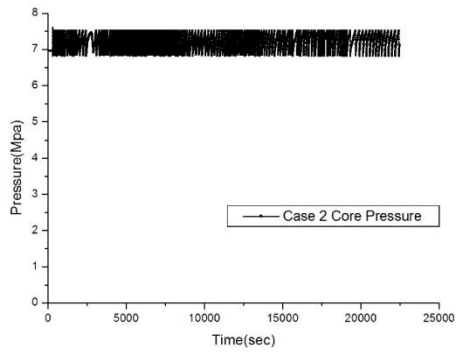
圖八：案例一內側護套溫度變化

案例二模擬結果

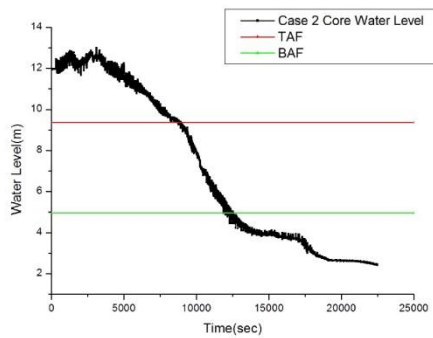
案例二因假設不執行任何救援策略，當反應爐急停後，爐心因衰變熱持續產生使得爐心內冷卻水持續蒸發而使壓力上升並維持於釋壓閥洩壓頂點(7.51Mpa)，而在 3905 秒 RCIC 停止運轉後，反應爐無任何補水措施，冷卻水的持續蒸發亦使爐心水位持續下降，最終於約 8811 秒時爐心水位低於 TAF(9.36m)，此時燃料頂部裸露且爐心移熱能力降低，燃料護套持續升溫，於 16221 秒達 1088°K (1500°F)，燃料護套與水蒸氣產生激烈銹水反應，最終於 22426 秒達 1477°K (2200°F)，23010 秒模擬終止。圖九、十分別為案例二爐心壓力、爐心水位模擬結果。

利用先前 TRACE 之案例二熱水流模擬結果，代入 FRAPTRAN 進行案例二之燃料與護套暫態分析。圖十一顯示燃料中心線溫度變化，在沒有實施 URG 下，假設 RCIC 失效及後續冷卻注水(包括消防注水等)接失效的情況下，爐心移熱功能將喪失，在約 9000 秒處燃料

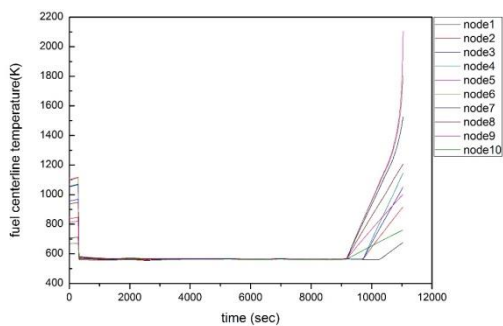
溫度急速爬升，並迅速達到 2000K 以上。



圖九：案例二爐心壓力

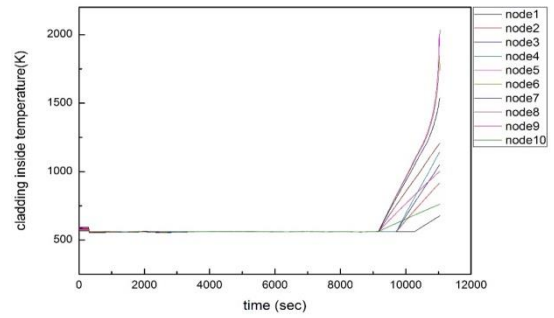


圖十：案例二爐心水位

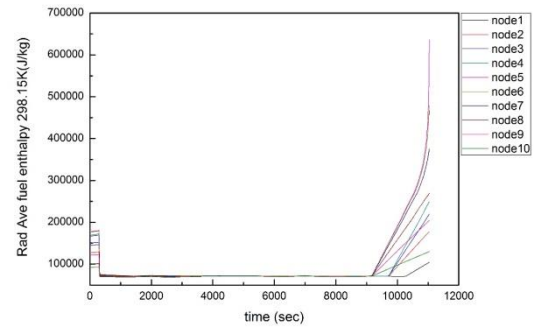


圖十一：案例二燃料中心線溫度變化

圖十二顯示護套內側溫度變化，與燃料中心線溫度相同趨勢，並且節點 5、6 溫度可能攀升超過 1473.15K。圖十三顯示徑向平均熱焓量，同樣在節點 5 處可能超過 150 cal/g。



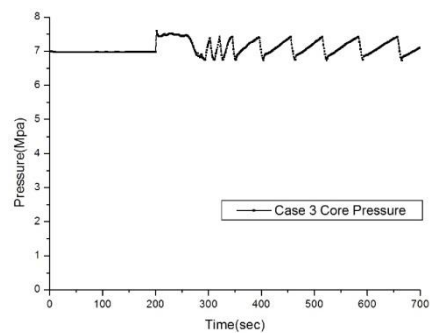
圖十二：案例二護套內側溫度變化



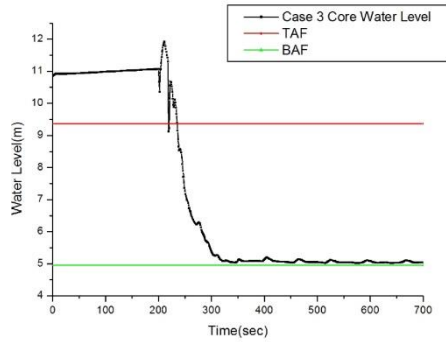
圖十三：案例二燃料丸與護套間隙寬度變化

案例三模擬結果

案例三之模擬條件為假設極端複合型事故，假設電廠發生 SBO 且爐心側板有洩漏產生，並假設反應爐未停機，同時亦假設 RCIC 無法順利啟動，且無法獲得任何冷卻水補充，由模擬結果可知，電廠於事件發生後 4 秒爐心水位即低於 TAF 高度，並於事件後 177 秒燃料護套溫度達 1500°F。圖十四、十五為本案例三之爐心壓力、爐心水位模擬結果。

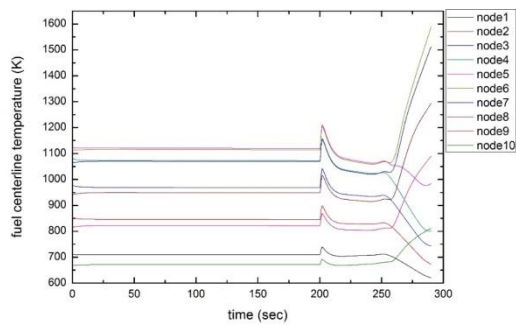


圖十四：案例三爐心壓力

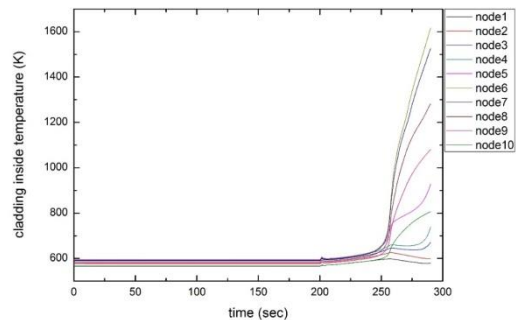


圖十五：案例三爐心水位

藉由先前 TRACE 之案例三熱水流模擬結果，代入 FRAPTRAN 進行案例三之燃料與護套暫態分析。圖十六顯示燃料中心線溫度變化，最高溫度為節點 6 接近 1600K，離安全限值 3078.15K 還有一段距離，顯示燃料尚未達到熔損的可能，在暫態事故發生後，溫度開始產生劇烈變化。但圖十七顯示內側護套溫度的變化，同樣結果顯示在節點 6 的溫度最高，接近 1600K。

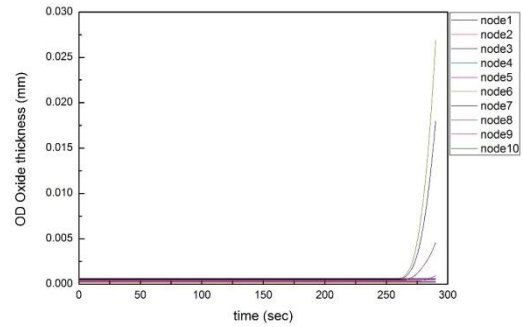


圖十六：案例三燃料中心線溫度變化

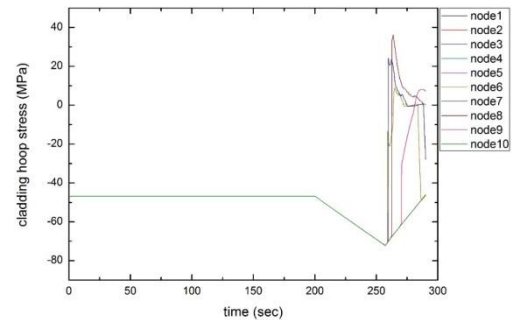


圖十七：案例三護套內側線溫度變化

圖十八顯示護套外側氧化層厚度變化，結果顯示有三處節點有上升的趨勢，但在模擬結束前皆尚未達到安全標準護套厚度的 17%。圖十九顯示護套環向應力變化，在節點 6 處 290 秒時環向應力達到 0，在 FRAPTRAN 的計算邏輯，當護套中的任一節點的環向應力上升後又下降至 0 時，程式將停止運算。



圖十八：案例三外徑護套氧化層厚度



圖十九：案例三護套環向應力變化

IV. 結論

本研究結合 TRACE/FRAPTRAN/SNAP 程式，針對沸水式金山電廠假設 SBO 狀況模擬三種極端假設的複合式假設事故案例，分別探討電廠整體熱水流行為模式及燃料棒的機械行為，用以驗證斷然處置有效性。而由本研究模擬案例之結果可知：

(1) 當發生電廠全黑 SBO 事件，電廠約有 8800 秒備妥緊急注水系統或替代電源，以維持電廠處於安全狀態，若無法及時處置(如喪失各種水源包括消防水源等)，則可能於事件發生後 10000 秒後發生爐心溫度升高等狀況。

(2) FRAPTRAN 在更嚴苛且保守的假設下(SBO 加上 RCIC 失效後熱傳係數快速下降)，結果顯示只要有如 URG 等緊急注水措施執行，爐心與燃料皆能安全無虞。假設在沒有任何注水(如喪失消防注水等)的情況，則必須在事故發生後 8 千秒內做其他緊急冷卻處置以確保燃料與護套完整性。

(3) 若電廠發生類福島之 SBO 事件，只要能即時執行斷然處置措施，即可有效確保電廠安全。

(4) 若發生 SBO 及其他極端假設狀況如爐心側板洩漏等，須即時啟動其他備援注水系統，以確保電廠爐心與燃料護套之狀態。

參考文獻

- [1] 台灣電力公司第一核能發電廠編印，"沸水式核能電廠訓練教材"，1994
- [2] 徐郁芬、梁國興、洪煥仁，"核一廠 RELAP5-3D 模式建立與測試"，2005

- [3] 李京翰、施純寬、王仲容，”核一廠 TRACE 模式的建立與驗證”，2009
- [4] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, and J.M. Cuta, FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods, NUREG/CR-7023, Vol. 1,2011.
- [5] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, “FRAPTRAN 1.4: Integral Assessment” N
- [6] Draft Rule Language for 10CFR50.46 , USNRC Adams ML110970044, April 2011UREG/CR-7023, Vol. 2,PNNL-19400, Vol. 2, Richland, WA, USA,2010

圍阻體內部降壓導致局部氫氣濃度增高效應之實驗研究

Experimental study of the locally hydrogen concentration changes during containment pressure changing

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許文勝

e-mail：wshsu@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：許文勝、楊岳強

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

本研究以實驗量測氫氣擴散分佈與濃度累積之現象，採用簡單圓柱型槽體，並以氦氣取代氫氣為工作流體，藉由不同實驗設定，量測槽體內各區域氫氣濃度隨時間之變化，了解其流動與濃度擴散特性。針對壓力對氫氣濃度之影響，在本實驗的壓力範圍內，壓力效應對氫氣濃度變化的影響低於溫度效應。而在高溫蒸汽對氫氣濃度之影響結果發現，由於高溫環境下，氫氣與空氣的浮力效應減弱而擴散效應增強，所以相較於低溫環境，槽體底部呈現較高的氫氣濃度。

關鍵詞：氫氣擴散、氫氣濃度、壓力。

Abstract

This study established experiments to measure hydrogen diffusion and accumulation in a cylindrical vessel. For hydrogen safety concerns, we used helium as a working fluid instead of hydrogen. Our experimental results showed that a higher helium concentration was accumulated in the top of the vessel because helium has lower density than air. However, the experiments with different pressure in the vessel didn't alter the trend of axial hydrogen distributions. As for the experiments with high temperature vapor injection, the hydrogen concentration in the bottom of vessel was higher than the other experiments because the buoyancy decreased and diffusion effect increased under the high temperature condition.

Keywords: hydrogen diffusion, helium, pressure.

I. 前言

若核能電廠發生嚴重事故，長期喪失爐心餘熱移除能力造成燃料溫度升高超過 1500°F 時，燃料護套的鋁與水之氧化反應會急遽加速而產生大量氫氣，並累積在圍阻體內部。此外，因機組喪失熱移除能力，圍阻體內部會累積大量水蒸汽，使圍阻體在一高壓狀態下。

為防止圍阻體過壓失效，電廠會採用圍阻體排氣系統進行降壓，但透過圍阻體排氣系統降低圍阻體壓力的同時，可能會使圍阻體內部水蒸汽冷凝，造成局部區域的氫氣濃度升高，至於氫爆是否會發生則與氫氣在圍阻體中擴散分佈與濃度累積現象有關。為了探討氫氣濃度爬升量與壓力下降之關係，本計畫以實驗方式量測氫氣於槽體內擴散分佈與濃度累積之現象，而實驗所得數據，未來可經由電腦模擬分析進行驗證，以進一步作為後續

核電廠安全評估的參考。

II. 主要內容

本研究旨在了解氫氣於圍阻體內之擴散遷移、濃度累積的情況，藉由建立壓力與蒸汽對氫氣濃度影響之實驗，以觀察整體氫氣濃度的分佈變化與趨勢，故分別進行「壓力」與「蒸汽」對氫氣濃度之影響實驗。前者僅探討不同氫氣注入流量之比較；後者則探討含有水蒸汽之空氣與注入時間。

實驗規劃與流程，藉由 Labview 軟硬體控制界面，設定質量流量計控制參數，用以控制氫氣、空氣、水蒸汽注入量與注入時間。並且在所量測時間範圍內，圓柱鋼槽內氣體壓力感應器、溫度及濕度感測棒，以及在不同位置的抽氣通道(連接至氫氣分析儀)，同時將分析訊號及時回傳，再以電腦程式對數據進行處理分析，觀察每秒各參數的變化。

主要設定兩種邊界條件：

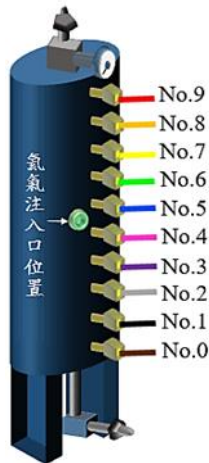
- 壓力對氫氣濃度之影響實驗：控制氫氣注入量以達到控制壓力的目的。其邊界條件參數設定為：
 - 圓柱鋼槽內維持室溫。
 - 注入氫氣流量分別為 8 L/min 與 10 L/min，總注入時間為 600 秒，槽體內壓力分別達 1.3 barg 及 1.6 barg。
 - 總量測時間為 1800 秒。
- 蒸汽對氫氣濃度之影響實驗：注入含有水蒸汽之空氣並使用加熱線圈維持槽體溫度以保持蒸汽濃度。邊界條件參數設定：
 - 圓柱鋼槽內維持室溫 23 °C 與 100 °C 環境。
 - 注入含有水蒸汽之空氣 5 L/min，總注入時間為 120 秒。
 - 前項注入完後，接著注入氫氣流量 5 L/min，總注入時間為 600 秒。
 - 總量測時間為 1800 秒。

III. 結果與討論

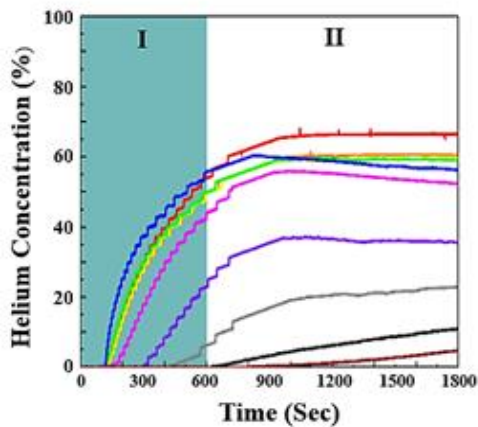
- 實驗階段(一)：壓力對氫氣濃度之影響實驗(如圖 1(a), (b), (c))
 - (1) 儀器反應時間-當氫氣開始注入槽體時，約 120 秒左右開始量測到腔體內之氫氣濃度。
 - (2) 浮力+擴散-靠近氫氣注入口附近的上升幅度最大，但停止氫氣注入後約 200 秒，才呈現明顯的下

降。

- (3) 浮力-由於氦氣密度比空氣小，槽體內頂部附近呈現較高的氦氣濃度。
- (4) 擴散-停止氦氣注入後，由於濃度梯度的影響，中間部份的氦氣逐漸往底部擴散，氦氣濃度逐漸下降，而底部氦氣逐漸上升。但頂部位置的氦氣濃度梯度接近於 0，未有明顯變化。
- (5) 壓力影響-增加槽體壓力，對槽體不同高度之氦氣濃度隨時間變化的趨勢無明顯差異。



1(a) 槽體量測示意圖



1(b) 氦氣濃度分佈(壓力 1.3 barg)

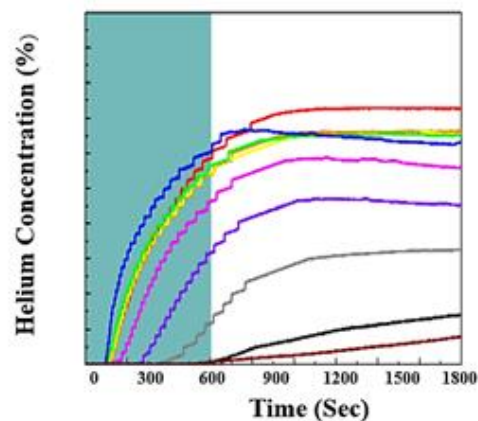


圖 1(c) 氦氣濃度分佈(壓力 1.6 barg)

➤ 實驗階段(二): 蒸汽對氦氣濃度之影響實驗(如圖 2)

- (1) 從有、無水蒸汽實驗的比較結果得知，在常溫下含有水蒸汽時，由於相近的環境溫度，其蒸汽壓相近，呈現相近的濕度和壓力。
- (2) 從有、無水蒸汽實驗的比較結果得知，在常溫下含有水蒸汽時，由於水蒸汽凝結，其環境與無水蒸汽相似(如前項所述)，氦氣濃度隨時間變化的曲線呈現相同趨勢。
- (3) 從室溫及高溫水蒸汽實驗的比較結果得知，同樣含有水蒸汽的條件下，高溫高壓環境，注入常溫的氦氣後，槽體底部呈現較高的氦氣濃度，槽體頂部呈現較低的氦氣濃度。此趨勢在觀察時間內均維持不變，這是由於高溫環境下，氦氣與空氣的浮力效應減弱而擴散效應增強所造成。

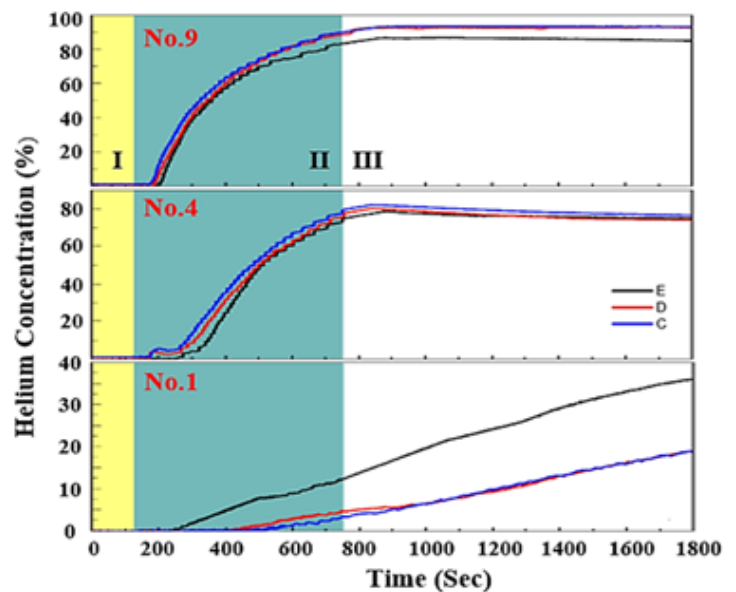


圖 2 氦氣濃度分佈

(藍線-C 無水蒸汽；紅線-D 23 °C 水蒸汽；黑線-E 100 °C 水蒸汽)

(4) IV. 結論

- (1) 壓力影響-在本實驗的壓力範圍內，增加槽體壓力，對槽體不同高度之氦氣濃度隨時間變化的趨勢無明顯差異。
- (2) 無論是否注入水蒸汽，由於相近的環境溫度，其蒸汽壓相近，呈現相近的濕度和壓力，氦氣濃度隨時間變化的曲線呈現相同趨勢。
- (3) 在氦氣進入槽體初期，其濃度分佈由浮力主導，故槽體頂部氦氣濃度逐漸升高，直到頂部與其它空間的混合氣體密度差異縮小，浮力效應減弱，轉由擴散效應主導，因此後期的濃度分佈呈現底部升高，中間部份降低的趨勢。
- (4) 同樣含有水蒸汽的條件下，高溫高壓環境，注入常溫的氦氣後，槽體底部呈現較高的氦氣濃度，槽體頂部呈現較低的氦氣濃度。此趨勢在觀察時間內均維持不變，這是由於高溫環境下，氦氣與空氣的浮力效應減弱而擴散效應增強所造成。

- (5)在本實驗的壓力範圍內，壓力效應對氬氣濃度變化的影響低於溫度效應。

參考文獻

- [1] 白寶實、洪振育、林正中，「核電廠圍阻體排氣效應探討」，國立清華大學核子工程與科學研究所，104年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會論文集，民國 105 年 5 月。
- [2] Z. M. Shapiro, and T. R. Moffette, “Hydrogen Flammability Data and Application to PWR Loss-of-Coolant Accident “, WAPDSC-545, Bettis Plant, September 1957.
- [3] 白寶實，「核能電廠意外事件中氬爆效應評估」，國立清華大學核子工程與科學研究所，103 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會論文集，民國 104 年 7 月。
- [4] 洪振育，「AP1000 先進型核能電廠圍阻體熱水流安全分析方法論」，國立清華大學工程與系統科學研究所，博士論文，民國 105 年 3 月。

提昇地下管路薄化定位監測技術

Enhancement of Underground Pipeline Inspection for Nuclear Power Plant

計畫編號：NSC 105-NU-E-110-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊旭光

e-mail：skyang@mail.nsysu.edu.tw

計畫參與人員：陳文安、黃光輝、曾駿翔

執行單位：國立中山大學機械與機電工程學系

摘要

核電廠內管路眾多，其中最難以檢/監測的是地下管路。國內核電廠也一直針對地下管路檢測/監測技術進行研究，更注意國內、外之相關研究。有鑑於此，本計畫係藉由對各種檢測/監測技術特性之探討，以評估出較適用於國內核電廠地下管路且可行之非破壞性檢測/監測技術。因此研究重點著重於尋求較適用於國內核電廠環境與設備特性之檢測/測試技術，並以文獻及技術特性之探討為主。其中檢測/監測技術分為非直接性檢測技術：如透地雷達檢測法、緊密電位法、包覆破損檢測法、塗層導電度檢測/監測法等；以及直接性檢測技術：如導波檢測法、輻射照相檢測與音洩檢測/監測等。本研究針對地下管線薄化與定位等兩個目標參數，探討不同設備與方法，蒐集、整理與分析不同形式之作動原理、優劣特點以及適用範圍，以提昇國內核電廠地下管路薄化與定位之檢測/監測技術。

關鍵詞：核電廠、地下管路、薄化、定位、非破壞檢測技術

Abstract

Among the pipelines inspection in a nuclear power plant, the toughest inspection is for underground pipeline. The most difficult to detect is underground pipeline. The nuclear power plants in Taiwan also pay a lot of attention to the development of underground pipeline inspection. Thus, the purpose of this one year research is to evaluate the features of all possible inspection techniques for underground pipeline based on the special environment and equipment of the nuclear power plant in Taiwan. Inspection techniques, for example, ground penetrating radar, potential method, cladding faults detection, coating conductivity detection, ultrasonic thickness measurement, 3D laser outer corrosion scan, automatic ultrasound inner wall thickness imaging, guided wave inspection, radiographic inspection and acoustic emission will be evaluated. This research would focus on wall thickness-thinning and position-located measuring ability of the underground pipeline inspection methods; in addition, suitable nondestructive testing methods would be recommended to the plant. After finishing the research, underground pipeline inspection skills in nuclear power plants in Taiwan would be enhanced.

Keywords: Nuclear Power Plant, Underground Pipeline, Nondestructive Testing Method.

I. 前言

對於管路檢測，常用的方法為非破壞檢測，非破壞檢測包括直接性檢測與非直接性檢測，直接性檢測方法如導波檢測法（Guided Wave Method）[1]：導波是一種可以沿著管壁長距離傳遞之超音波，在檢測埋地管路時，土壤層與包覆層皆對其傳遞產生相當大的影響，故欲用導波進行檢測時需要開挖許多檢測坑洞，安裝換能器，將訊號線拉至地面設置檢察點，可有效達到埋地管路腐蝕檢測的效能；超音波測厚法[2]：超音波測厚計的原理為探頭將超音波藉著適當的耦合劑傳遞至管路內部，因為管內充滿空氣，其聲阻抗遠高於待測材料，會造成超音波全反射且循原傳遞路徑回到探頭，所以測厚計就可以得到該試件的超音波傳遞時間，將之帶入計算公式，即可得到管路厚度，藉由此方法可以比較正常管路與腐蝕管路之間厚度差異找出問題管路；3D 雷射掃描外部腐蝕成像：針對不同管壁表面狀況安裝任意換能器，乃以 3D 雷射掃描設備進行表面腐蝕成像，將管壁表面資料數據化，再輔以其他方法檢測管路之狀況。非直接性檢測方法如透地雷達法：透地雷達（Ground Penetrating Radar, GPR）[3]是一種能顯示地底影像的裝置，裝置所產生之電磁波能有效的穿透地層，藉由遇到不同介質之界面所造成反射振幅（R）的大小，可經由透地雷達主機轉換成影像；緊密電位法[4]：緊密電位量測法即沿著管路，每三到五公尺，量測地面到管路的電位差別。透過量測每段管路電位，進而了解管路電位是否仍處於金屬腐蝕免疫的電位，確認陰極防蝕系統的可靠程度。陰極防蝕系統與該段管路附近的土壤環境有非常緊密的關係，因此可以透過電位的改變來看出管路包覆破損、土壤性質改變、外來金屬相接，或甚至雜散電流的影響；音洩法[5]：音洩法為利用被動式接收聲源來進行檢測，透過管路上的腐蝕、裂痕生長或承載流體的洩漏，於結構上產生聲源，以高靈敏度的寬頻感測器來接收訊號進行分析，依據各個感測器間接收訊號的時間差進行缺陷定位。

II. 主要內容

檢測/監測技術分為直接性檢測技術，例如導波檢測法、渦電流檢測法、射線檢測法、磁漏檢測法與滲漏檢測/監測法等。非直接性檢測技術，例如透地雷達檢測法、緊密電位法、包覆破損檢測法、塗層導電度檢測/監測法等；以及以下就各種檢測技術之評估說明如下：

- (1) **導波檢測法**：圖 II-1 為導波檢測示意圖，透過環狀陣列探頭激發之訊號沿管線進行檢測，導波檢測具有 3 % 管線截面積損失的檢出能力，用於定位時最大則有 20 公分的誤差。使用導波檢測法檢測裸露管線時，其檢測距離可達 100 公尺以上，但當檢測埋於土壤之地下管線時，其能量衰減極為巨大，檢測距離僅在 2~4 公尺左右，這是導波檢測目前最大的問題，也是許多研究者正在積極解決的問題。綜上，針對通過橋樑、道路或箱涵的地下管線進行檢測時，即可使用導波法，進行即時、單次的檢測，而不受埋管之影響。該技術適用於不鏽鋼、鑄鐵、鋁及碳鋼等材質。

在 2012 年時，葉展嘉[6]對於導波在不同埋地深度衰減之研究中發現一般以導波法進行管線檢測時，其可檢測距離約為 25 m，針對土壤於導波檢測距離的影響而言，埋地深度為 2.0 m 時，其檢測距離縮減為 13.411 m；管線埋地深度為 1.5 m，檢測距離為 13.663 m；另外管線埋地深度為 1.0 及 0.5 m，其檢測距離則分別為 15.481 和 17.807 m。在 2015 年時，Cawle 等人[7]針對導波檢測埋地管線的衰減研究，利用充氣氣囊改變土壤的緊實度，經由底端的壓力感測器量出土壤之壓力，進而模擬出導波於不同埋地深度的地下管線傳波情形，結果顯示當土壤之緊實度越好，則 $T(0,1)$ 及 $L(0,2)$ 模態之衰減率越大，而土壤含水越多時，則 $T(0,1)$ 及 $L(0,2)$ 模態之衰減率越小。

- (2) **渦電流檢測法**：渦電流檢測法精度可以達到 0.02 % F.S. (Full Scale)，即在測量範圍小於 2 mm 的情況下缺陷檢測分辨率可達 $0.4 \mu\text{m}$ ，圖 II-2 為渦電流檢測示意圖，透過磁場的變化致使表面產生渦電流，由渦電流擴散情形分析壁厚，但由於檢測管線時，探頭需與表面貼近小於 1 公分，因此在檢測地下管線上建議搭載於智慧型清管設備上使用。該技術適用於碳鋼、鑄鐵、鐵磁性不鏽鋼材質。
- Bai 和 Tian 等人[8]於 2013 年使用脈衝渦流之訊號，重建缺陷的輪廓，利用頻域重建時適用於較深之缺陷；而利用時域可以重建較淺之缺陷。於傳統的非破壞檢測對包覆層的管線往往需要拆除包覆層才能檢測，但其安裝與拆除不易，故蔣振芳、李上來先生等人[9]發表之「脈衝式渦電流檢測對不拆包覆層設備之應用」以不拆除包覆層之情況下找出減薄腐蝕區，進而提高檢測可信度與準確度。

- (3) **射線檢測法**：圖 II-3 為射線檢測儀器及示意圖，使用射線檢測時，由於缺陷瑕疵存在而導致放射能量吸收不同而成像，其常用的成像範圍在 $342 \text{ mm} \times 432 \text{ mm}$ 之下，解析度可達到 8 位元 (bit) 或是 256 灰階。該技術適用於不鏽鋼、鑄鐵、鋁、碳鋼及高密度聚合物等材質，但考慮輻射衰減的問題，不建議使用於埋地管線檢測中。

在檢測上需要注意放射線的問題，林瑞福[10]，提到檢測某些管線設備與焊道時，使用鈷-192 為射源，然而，鈷之射線能量較鉅高，故在檢測上需要加以屏蔽，嚴重影響場內之運作，故其使用上多為局部、高風險部分的檢測或用於在其他方法中認為其腐蝕可能性較高時會再使用射線檢測法來作進一步確認。

- (4) **磁漏檢測法**：圖 II-4 為磁漏檢測示意圖，磁漏檢測係以永久磁鐵對鐵磁性的管線感應形成磁場，兩極間不同磁性感應器，當腐蝕、破裂發生時會干擾磁場，甚至造成洩漏，其可分辨出 2 mm 大小的球狀缺陷，且其位置準確率為 0.04 %，即檢測長度為 8 m 時其誤差僅 3 mm。目前智慧型清管常搭載磁漏檢測設備進行埋地管線之檢測；該技術適用於碳鋼、鑄鐵、鐵磁性不鏽鋼材質。該技術適用於不鏽鋼、鑄鐵、鋁及碳鋼等材質。

Carvalho 和 Rebello 等人[11]於 2006 年將磁漏訊號結合類神經網路，應用在管線上焊道之檢測，訊號經過處理後可成功判別缺陷種類。朱時梁、吳世先、施能謙[12]於 1997 發表「磁漏法對鐵磁性管件檢測之改進」，核電場汽水分離再熱器進行碳鋼管之磁漏檢測，作系統化之統整，以增加可靠性與準確性。

- (5) **洩漏檢測法**：洩漏檢測法係以管線洩漏時產生的波傳訊號，如圖 II-5 所示，透過信號大小與抵達感應器的時間差來計算洩漏的程度與位置，在檢測上可以偵測出 0.1 加侖/分鐘的洩漏量，檢/監測長度可達數公里。洩漏檢測法的感應器可置於外壁或管內；該技術適用於不鏽鋼、鑄鐵、塑膠及水泥等材質。
- (6) **透地雷達法**：透地雷達法係透過高頻電磁波 1 MHz-2 GHz 進行檢測，其能夠分辨 4-20 cm 大小的缺陷，可用作尋找管線位置、缺陷定位，圖 II-6 為其儀器及檢測原理圖。

Demirci 和 Yigit 等人[14]於 2012 年利用反向投影法結合透地雷達成像，檢測埋地塑膠管的漏水情形，在 B-scan 的 GPR 成像上可以檢出洩漏情形，再經過小波相似性分析後可以更精準的評估洩漏位置。

江健仲[15]於試驗中因土壤之相對介電常數會隨著含水量之增加而提高，因而降低雷達之穿透力；故如果土壤在潮濕之狀態下，利用雷達來偵測其有無孔洞之存在，則會影響施測之結果。同時也發現在營建工程試驗館外之孔洞探測所得之雷達影像圖與在砂箱中利用軟管充滿水與砂模擬掏空時所得之雷達影像圖相似，故得知地質雷達對於土層中孔洞之探測具有可行性，亦可用來探地下管線之漏水情形。

- (7) **緊密電位檢測法與包覆破損檢測法**：這兩種方法皆是作為管線防蝕程度的判斷。管線於土壤中為避免並減少腐蝕造成的風險，多會在外層經過鍍層及陰極防蝕的處理，緊密電位檢測法透過防蝕系統下通電與斷電時的電位，進而了解管線電位是否仍處於金屬腐蝕免疫的電位，圖 II-7 為檢測及原理示意圖，其判斷上是當參考電極差距達 100 mv 時判斷鍍層失效需再補強；包覆破損檢測法係當防蝕層有破損缺陷時，會形成由土壤流向管線的電流，而此電流便會在土壤形成電壓梯度，因此藉由伏特計的指針偏轉方向以估算埋地管線的包覆破損的位置，以 5 % IR 電位降為判斷標準。
- (8) **智慧型清管檢測法**：圖 II-8 為智慧型清管平台示意圖，將檢測平台與儀器由閘門送入，透過馬達驅動或由繫帶拖拉的方式進行管內移動檢測，其收集到的資訊可藉由繫帶或無線網路回傳至電腦進行分析。許多管外

的檢測方法在碰到彎管時都是困難挑戰，但智慧型清管透過多節點的設置，能夠在多彎管的情形下進行檢測。此檢測方法目前國內相當少見，且檢測費用極為高昂，在使用時亦需考慮管徑大小及管內沉積物或腐蝕的影響。目前已知的非破壞檢測方法大多能夠搭載於智慧型清管平台，但智慧型清管的技術多為外國公司所掌握，且都不願意進行技術轉移，故國內相關的研究團隊或產業，實應多加努力研發智慧型清管技術，解決台灣地窄人稠，地面下卻多半密布管線的公共危險。

綜上，針對埋地管線檢測，目前並不存在一體適用之檢測技術，每一種相關技術都有其優點及缺點，因此本計畫建議，必須針對埋地管線的不同特性，建立統整檢測技術，統整相關檢測技術所長，完成埋地管線檢測需求。

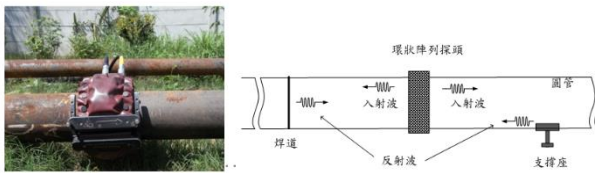


圖 II-1 導波檢測探頭及檢測示意圖

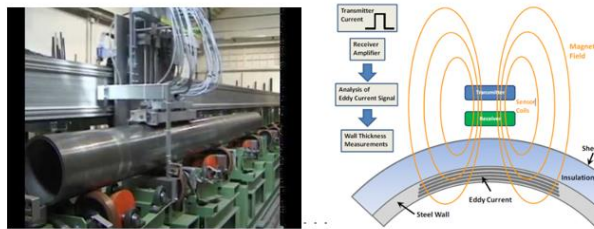


圖 II-2 陣列式渦電流探頭及檢測示意圖



圖 II-3 射線檢測儀器及示意圖

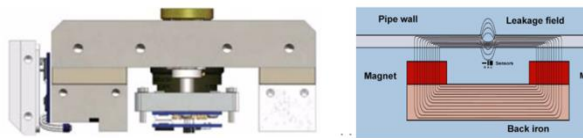


圖 II-4 磁漏檢測示意圖

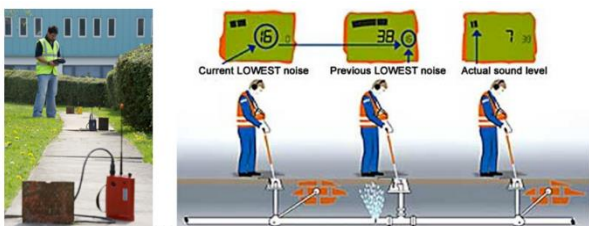


圖 II-5 洩漏檢測示意圖



圖 II-6 透地雷達儀器檢測原理示意圖

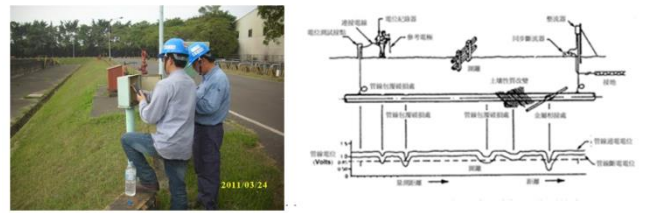


圖 II-7 緊密電位量測及包覆破損定位量測與原理示意圖



圖 II-8 智慧型清管平台實體及檢測示意圖

III. 結果與討論

依現行核電廠的實際情況，多將大型管線（十吋管以上）及壓力管線置於地面上，地面下則多為自流式的管路為主，因此在方法比較上，以十吋以下的管線為探討重點。其中，由於電廠地下管路錯綜複雜，層層相疊，部分檢測方法即不適用於此種現場情況。如前述所提的非直接性檢測中的緊密電位法和包覆破損檢測法就不太適用，因為此兩種方法皆是透過電位差的不同來判斷管線是否破裂或有缺漏，由於地下金屬管線的交疊易導致電位差訊號的錯誤，而透地雷達則多在尋找埋地管線位置，對判斷是否洩漏並無直接幫助，所以此三種方法暫不列入比較之中。

在直接性檢/監測方法中，超音波檢測之檢測範圍為 5~10 m，可用於檢測及監測等功能，其儀器價格及檢測價格分別為 200 萬元及每日 8000 元；渦電流檢測之檢測範圍為探頭 2~8 mm，可用於檢測但無法用於監測，其儀器價格及檢測價格分別為 350 萬元及每日 7000 元；射線檢測之檢測範圍為管厚 1.5 吋，可用於檢測但無法用於監測，其儀器價格及檢測價格分別為 250 萬元及每張 300 元；磁漏檢測之檢測範圍為厚度 20 mm 及寬度 275 mm，可用於檢測但無法用於監測，其儀器價格及檢測價格分別為 200 萬元及每日 7000 元；洩漏檢測之檢

測範圍長達 2 km，可用於檢測及監測等功能，其儀器價格為 100 萬元，以上各直接性檢/監測方法範圍與儀器價格如表 1 所示。另外，在直接性檢/監測方法中，超音波檢測之檢測原理為利用電子脈衝激振壓電晶體，使其產生預設的振動頻率，其檢測頻率範圍為 20-70 kHz，解析度為 3 % 截面積損失，其主要用途為管線測厚、定位；渦電流檢測之檢測原理為利用線圈發射脈衝磁場，穿過管壁和發射端之間的非磁性材料，磁場變化導致管表面產生渦電流，其檢測頻率範圍為 25-40 kHz，解析度為 0.02 % F.S.，其主要用途為管線測厚、定位；射線檢測之檢測原理為利用射線具有穿透物質的能力，因瑕疵存在其對射線的吸收程度不同，使強度改變，形成黑白對比之投影成像於底片上，其檢測能量範圍為 40-70 kV 及 0.1/2/3 mA，解析度為 8 位元及 256 灰階，其主要用途為管線局部探測、缺陷特徵辨識；磁漏檢測之檢測原理為使用高強度永久磁鐵或電磁鐵對鐵磁性金屬感應產生磁場，解析度為 2 mm 大小之缺陷及± 3 mm over 8 meters 之定位能力，其主要用途為儲槽底板厚度腐蝕狀況檢測、管道內部腐蝕狀況檢測；洩漏檢測之檢測原理為當管線發生洩漏時產生聲音訊號，透過信號大小與抵達感應器的時間差來計算洩漏的程度與位置，解析度為 0.1 gpm 之洩漏，其主要用途為管線洩漏程度與位置，直接性檢/監測方法量測參數如表 2 所示。

在非直接性檢/監測方法中，透地雷達之檢測範圍為深度 30 m，可用於檢測但無法用於監測，其檢測價格為每公尺 100 元；緊密電位之檢測範圍為 1 km，可用於檢測但無法用於監測；包覆破損之檢測範圍為深度 6 m，可用於檢測但無法用於監測；智慧型清管之檢測範圍不限，可用於檢測及監測，各非直接性檢/監測方法範圍與儀器價格如表 3 所示。另外，在非直接性檢/監測方法中，透地雷達之檢測原理為透過發射線圈，產生高頻脈電磁波，穿透地層，並利用不同介電性質的界面產生反射訊號，其檢測頻率範圍為 1 MHz-2 GHz，解析度為 4-20 cm，其主要用途為尋找管線位置、地質探勘；緊密電位之檢測原理為透過防蝕系統下通電與斷電時的電位，進而了解管線電位是否仍處於金屬腐蝕免疫的電位，確認陰極防蝕系統的可靠程度，其檢測能量範圍為 -850 mv 至 -1200 mv，解析度為與參考電極差距 100 mv 電位以上，其主要用途為管線防蝕程度判斷；包覆破損之檢測原理為管線以陰極防蝕塗層保護，有破損缺陷時，會形成由土壤流向管線的電流，而此電流便會在土壤形成電壓梯度，藉由伏特計的指針偏轉方向以估算埋地管線的包覆破損的位置，其檢測能量範圍為 75-500,000 ohm.cm，解析度為 5 % IR (12 cm²)，其主要用途為管線防蝕程度判斷；智慧型清管之檢測原理為依搭載的裝置而定，其主要用途為管線探測、檢薄、定位…等，非直接性檢/監測方法量測參數如表 4 所示。

表 1 直接性檢/監測方法範圍與儀器價格

	檢測範圍	檢測	監測	儀器價格 檢測價格
超音波檢測	5~10 m	Y	Y	200 萬 8000 元/日
渦電流檢測	探頭 2~8 mm	Y	N	350 萬 7000 元/日
射線檢測	管厚 1.5 吋	Y	N	250 萬 300 元/張
磁漏檢測	檢測厚度 20 mm 檢測寬度 275 mm	Y	N	200 萬 7000 元/日
洩漏檢測	檢/監測長達 2 km	Y	Y	100 萬

表 2 直接性檢/監測方法量測參數

	檢測原理	檢測頻率/能量 範圍	解析度	主要用途
超音波檢測	電子脈衝激振壓電晶體，使其產生預設的振動頻率	20-70 kHz	3 % 截面積損失	管線測厚、定位
渦電流檢測	線圈發射脈衝磁場，穿過管壁和發射端之間的非磁性材料，磁場變化導致管表面產生渦電流	25-40 kHz	0.02 % F.S.	管線測厚、定位
射線檢測	利用射線具有穿透物質的能力，因瑕疵存在其對射線的吸收程度不同，使強度改變，形成黑白對比之投影成像於底片上	40-70 kV 0.1/2/3 mA	8 位元 256 灰階	管線局部探測、缺陷特徵辨識
磁漏檢測	使用高強度永久磁鐵或電磁鐵對鐵磁性金屬感應產生磁場		缺陷大小 2 mm 定位 ± 3 mm over 8 meters	儲槽底板厚度腐蝕狀況檢測、管道內部腐蝕狀況檢測
洩漏檢測	管線發生洩漏時產生聲音訊號，透過信號大小與抵達感應器的時間差來計算洩漏的程度與位置	被動式量測	0.1 gpm	管線洩漏程度與位置

表 3 非直接性檢/監測方法範圍與儀器價格

	檢測範圍	檢測	監測	儀器價格 檢測價格
透地雷達	深度 30 m	Y	N	100 元/公尺
緊密電位	1 km	Y	N	100 萬/組
包覆破損	深度 6 m	Y	N	150 萬/組
智慧型清管	不限	Y	Y	

表 4 非直接性檢/監測方法量測參數

	檢測原理	頻率/能量	解析度	主要用途
透地雷達	透過發射線圈，產生高頻脈電磁波，穿透地層，並利用不同介電性質的界面產生反射訊號	1 MHz—2 GHz	4-20 cm	尋找管線位置、地質探勘
緊密電位	透過防蝕系統下通電與斷電時的電位，進而了解管線電位是否仍處於金屬腐蝕免疫的電位，確認陰極防蝕系統的可靠程度	-850 mv-1200 mv	與參考電極差距 100 mv 電位以上	管線防蝕程度判斷
包覆破損	管線以陰極防蝕塗層保護，有破損缺陷時，會形成由土壤流向管線的電流，而此電流便會在土壤形成電壓梯度，藉由伏特計的指針偏轉方向以估算埋地管線的包覆破損的位置	75-500,000 ohm.cm	5% IR (12 cm ²)	管線防蝕程度判斷
智慧型清管	依搭載的裝置而定			管線探測、檢薄、定位...等

IV. 結論

本計畫中介紹之數種非破壞檢測方法，除了原理外，其用途、場所與限制條件也不盡相同，需要受過相當訓練的專業人士，經過現場的判斷才能選用適當的方法進行檢測，而地下管路減薄的原因、埋藏的環境亦極為複雜，難以僅僅依靠一種非破壞檢測方法即能完成全域的檢驗，需根據不同的情況輔以數種技術所形成的統整檢測系統進行檢測，方能達到最佳的檢測結果。

除核電廠地下管線外，台灣亦是石油化學工業非常發達的國家，再加上台灣地小人稠，往往許多運送油、水、天然氣之高壓管線皆經過人口稠密之都市區，不久前之高雄氣爆造成數百人傷亡，即是高壓管線經過人流頻繁之三多商圈區域，而其管線已有破損洩漏，卻未即時查出所釀成之悲劇。但是貿然進行開挖檢測，不但引起民怨，亦將使檢測成本大幅提高。若能透過前期的風險評估、資料蒐集，並配合適當的非破壞檢測技術，可

將開挖的成本、對人民的影響降到最低，重要的是能夠使人民生命與財產受到保障。因此，更突顯非破壞檢測技術使用於地下管線的重要。

參考文獻

- [1] J.W. Cheng, S.K. Yang and B.H. Li, "Torsional Guided Wave Attenuation in Buried Pipe," *Materials Evaluation*, Vol. 64, No.4, pp. 412-416, 2006.
- [2] Jr, W.A. Simpson, "Time-Frequency-Domain Formulation of Ultrasonic Frequency Analysis," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 56(6), pp.1776 -1781, 1974.
- [3] J.L. David, and A.P. Annan, "Ground Penetrating Radar for High-resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy," *Geophysical Prospecting*, Vol. 37, pp. 531-551, 1989.
- [4] M.B. Pickell, 1993, "Pipeline Infrastructure II," ASME, New York.
- [5] A. Tobias, "Acoustic Emission Source Location in Two Dimensions by an Array of Three Sensors," *Non-Destructive Testing*, Vol. 9, No. 1, pp. 9-12, 1976.
- [6] 葉展嘉，應用導波於埋地管線檢測之研究，國立中山大機械與機電工程系碩士論文，中華民國 101 年。
- [7] E. Leinov, M. J. Lowe and P. Cawley, "Investigation of guided wave propagation and attenuation in pipe buried in sand," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 347, pp. 96-114, 2015.
- [8] L. Bai, G. Y. Tian, A. Simm, S. Tian, Y. Cheng, "Fast crack profile reconstruction using pulsed eddy current signals," *NDT&E International*, Vol. 54, pp. 37-44, 2013.
- [9] 蔣振芳、李上來、林文宏、彭朋畿、林威、程國樑，脈衝式渦電流檢測對不拆包覆層設備之應用，檢測科技，19：5，中華民國 90 年，09-10，頁 179-187。
- [10] 林瑞福，在自動化之石化工廠進行射線照相之問題，檢測科技，15：3，中華民國 86 年，05-06，頁 120-122。
- [11] A. A. Carvalho, J. M. A. Rebello, L. V. S. Sagrilo, C. S. Camerini, I. V. J. Miranda, "MFL signals and artificial neural networks applied to detection and classification of pipe weld defects," *NDT&E International*, Vol. 39, pp. 661-667, 2006.
- [12] 朱時梁、吳世先、施能謙，磁漏法對鐵磁性管件檢測之改進，檢測科技，19：5，中華民國 90 年，09-10，頁 179-187。
- [13] 吳學鍵、鄭錦智，利用補償公式降低遙場渦電流檢測誤差之研究，技術學刊，卷十七，中華民國 91 年，09-10，頁 239-245。
- [14] S. Demirci, E. Yigit, I. H. Eskidemir, C. Ozdemir, "Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method," *NDT&E International*, Vol. 47, pp. 35-42, 2012.
- [15] 曾俊智，步進式地質雷達應用於孔洞偵測分析與研究，國立雲林科技大學營建工程系碩士論文，中華民國 90 年。

純水中 304 不銹鋼表面氧化膜結構與白金被覆效率之關聯性研究

Correlation Study on platinum deposition efficiency over Type 304 stainless steels with various surface oxide structures in high temperature pure water

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-004-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：苑主用、卓冠秀、蕭佑陸

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

為了延緩 IGSCC，多數的 BWR 電廠均已採用 HWC 技術，並搭配 NMCA 技術。不過，由於各個組件在冷卻水迴路系統中的位置不同，其所面臨的水化學狀態也互有差異，組件表面的氧化層結構更可能因此而不同；對於實施 HWC/NMCA 技術的 BWR 而言，白金分布的程度則有可能受到組件表面氧化層結構的影響，並進而影響其對於氫氧再結合反應的催化性。因此，本研究透過模擬 BWR 水環境下的電化學分析實驗，探討組件表面氧化層結構特性對於白金被覆及其催化效率的影響。本計畫透過 BWR 模擬迴路中針對 304 不銹鋼試片進行電化學腐蝕電位量測，將 304 不銹鋼試片經熱敏化處理後進行預長氧化膜，在各別 300 ppb 過氧化氫、300 ppb 溶氧、100 ppb 溶氫的水化學條件下，進行 288 °C 下 14 天的成長條件。經白金被覆後，進行 288 °C 運轉溫度下 304 不銹鋼試片的電化學量測，透過電化學分析，瞭解組件表面結構特性對於白金被覆及其催化效率的影響。

關鍵詞：應力腐蝕龜裂、電化學腐蝕電位、304 不銹鋼、氧化膜結構、貴重金屬添加。

Abstract

In order to mitigate the problem of stress corrosion cracking (SCC) in the structural components, the technology of hydrogen water chemistry (HWC) or low HWC combined with noble metal chemical application (NMCA) or On-line NobleChem™ (OLNC) has been widely adopted in BWRs around the world. The oxidizing chemistry environment of BWR reactor water is the key factor promoting IGSCC of stainless steel and nickel-based alloys in the reactor coolant system piping and vessel internals. Reactor components at different locations are exposed to different water chemistry conditions. As platinum was applied in the BWRs, the deposition behavior of platinum would affect the corrosion mitigation of the components. The aim of this project is to study the impact of various oxide structures of 304 stainless steel components on the efficiency of platinum deposition in pure water environments. Pre-oxidation treatments were conducted in an autoclave under a 288 oC pure water with various water chemistry condition. The corrosion potentials and corrosion current densities of 304SS and platinum-treated specimens were investigated in 288 oC pure water. Finally, the corrosion behaviors of various the components with noble metal chemical addition would be

also investigated in this study.

Keywords: Stress Corrosion Cracking, Electrochemical Corrosion Potential, 304 Stainless Steel, Oxide Structure, Noble Metal Chemical Addition.

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。在反應器爐心，由於輻射分解效應使得爐水產生大量的過氧化氫，過氧化氫易自我分解為氧及水，使得爐水具有高氧化性。BWR 在運轉時，爐水的溶氧量約為 200 至 400 ppb，高溶氧量是造成 IGSCC 的主要環境因素，如可降低溶氧量，就可降低金屬組件的電化學腐蝕電位，降低發生 IGSCC 的機率。加氫水化學是藉由在飼水中加入氫氣，利用氫氣與氧或過氧化氫在具有輻射的環境下進行再結合反應，降低主冷卻水中溶氧與過氧化氫的濃度，可促進 ECP 值的下降。ECP 是 SCC 裂縫起始與成長的驅動力，ECP 值的降低有助於減少裂縫發生與成長的機率，達到保護 BWR 壓力槽內部組件的目的。

腐蝕環境的改善取決於溶解在水中的氧及過氧化氫的濃度。若能降低爐水中氧及過氧化氫的含量，組件上的電化學腐蝕電位就可以降低至低於 IGSCC 的臨界電位，進而抑制 IGSCC 的發生，HWC 技術的發展即針對此目的而來。目前全世界已有四十座以上的 BWR 電廠採用了加氫水化學技術。然而在實行數年後，發現採用中度或更高的注氫量 (通常大於 0.6 ppm) 時，會有提昇主要蒸汽管路輻射劑量的副作用，輻射劑量提高主要來自 16N 增加，及因 ⁶⁰Co 析出而造成停機劑量的上升 [3]，除此之外，HWC 對於壓力槽上方空間及側板上部過氧化氫濃度偏高的區域，仍然有 IGSCC 的問題發生 [4]。目前有些 BWR 電廠則採取貴重金屬被覆配合低注氫技術，另外有些 BWR 電廠則已採用中度注氫的 HWC 技術。特別值得注意的是國內 2 座核電廠於 2006 年 10 及 11 月已實施 HWC 防蝕技術，注氫量設定為 0.5 ppm，為了提高防蝕的效益，已於 2009 年 5 月及 9 月已將注

氫量提昇至中度，各為 1.0 ppm、1.1 ppm 及 1.2 ppm。

透過貴重金屬被覆技術，雖可以降低注氫需求量至 0.2~0.4 ppm，但氫氧的比值要達到 2 以上才可，反之可能加劇組件腐蝕的程度。而 HWC 配合貴重金屬被覆的防蝕方法，需在有氫注入的環境下才可發揮作用。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。當爐水中過氧化氫及溶氧因貴重金屬白金的催化性被覆而使得組件上發生的氧化還原反應加劇，對於組件的腐蝕效應也會加重。

在不同的組件位置，即使實施加氫水化學，接近爐心的部分區域仍屬高氧化性的區域，部分區域在中度注氫下可維持還原性的環境。國內 BWR 相關的分析結果 [5] 顯示在中度注氫下 ($[H_2]_{FW}=1.0$ ppm)，爐心附近的區域，溶氫值約在 20 ppb 以下，溶氧的數值約在 50~100 ppb，過氧化氫濃度在爐心出口約 150 ppb，而之後的區域約在 50~100 ppb 左右。進到降流區之後的溶氫濃度則接近 150 ppb 左右，溶氧則降至 50 ppb 以下，過氧化氫濃度也降至 50 ppb 以下。這結果也顯示即使在中度注氫下有些區域是氧化性為主，有些區域是還原性為主的環境。如果採用白金被覆技術強化加氫的效果，白金被覆的效率直接影響催化的效果，除了被覆的物質外，被覆的溫度及水的流速等都是影響的因子，即使在加氫的環境中，也可能組件的表面因區域的差異產生不同結構的氧化膜，都可能影響白金被覆的效率，而影響到加氫的防蝕效益。

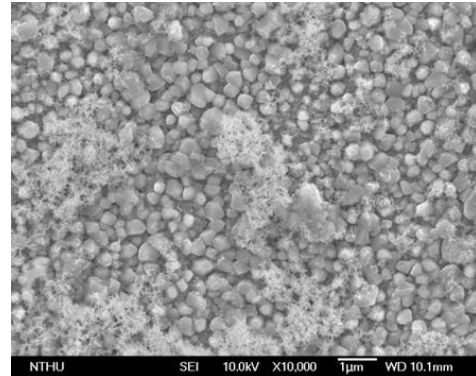
II. 主要內容

為了探討對於實施白金被覆技術的沸水式反應器，是否會對於組件不同的結構形態，產生不同程度的被覆效果，防蝕效益也會有所不同。本計畫透過模擬 BWR 水環境下的電化學分析實驗，探討氧化膜結構對於 BWR 結構組件進行實施白金添加時的應力腐蝕龜裂防蝕行為研究。304 不銹鋼試片經熱敏化處理後進行預長氧化膜，在各別 300 ppb 過氧化氫、300 ppb 溶氧、100 ppb 溶氫的水化學條件下，進行 288 °C 下 14 天的成長條件，後續利用掃描式電子顯微鏡 (SEM)、能量散佈式 X 光頻譜 (EDX) 與拉曼光譜分析 (Raman Spectroscopy) 進行試片表面的分析，確認氧化膜形態。經白金被覆後，透過 ICP-MS 分析被覆量。進行 288 °C 運轉溫度下之 304 不銹鋼試片的電化學量測，透過電化學分析，瞭解白金被覆處理因不同的表面結構產生的差異，對於 304 不銹鋼於模擬 BWR 水化學環境下的腐蝕特性之影響。

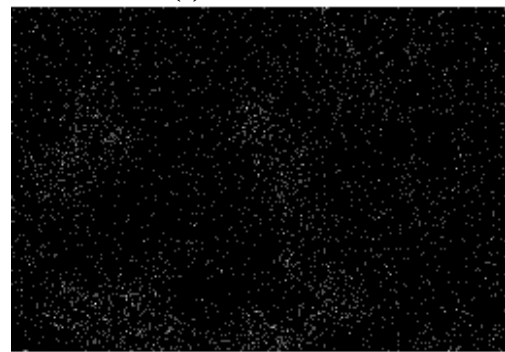
III. 結果與討論

氧化膜實驗條件皆為溫度 288 °C，水環境為 1 ppm 溶氧底下放置 14 天，氧化膜試片以 SEM 觀察氧化膜顆粒的分布及成長情形，可以發現表面長出一層緻密的氧化層，氧化膜顆粒約在 0.6 至 1 μm 間，利用 EDX 做表面的成分分析，可以發現其成分主要是鐵及鉻的氧化物，並含少量的碳，此為外層氧化膜。內層氧化膜可以從外層氧化膜的間隙中看到，顆粒大小約在 0.1 μm 以下，且緻密度高於外層氧化層，除了鐵及鉻的訊號外，亦發現鎳訊號的存在。由文獻回顧中推測，內層氧化層的組成成分應為 NiFe_2O_3 和 Fe_3O_4 所混合的氧化物，而外層

氧化層主要應為 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。150 °C 下被覆的白金顆粒明顯多且密集，由圖 1 可見。除了利用 EDX 分析來確認表面的小顆粒即為白金顆粒外，圖 1(b) 的 mapping 結果白金訊號的密集區，剛好與 SEM 上覆蓋在氧化膜上的白色網狀區重疊，也藉此確認這些覆蓋在氧化膜上的小顆粒為白金顆粒。



(a) 鉑金被覆 SEM



(b) Mapping 結果

圖 1 鉑金被覆 SEM 圖

本實驗比較在 150 °C 水環境下被覆白金與 304 不銹鋼氧化膜試片的差異，水環境溫度設定在 200 °C、250 °C、288 °C，並經歷氧氣、氫氣、過氧化氫等不同的水化學狀態的變化，圖 2 為極化掃描曲線的結果。在同一個水化學環境下，反應速率會隨著環境溫度的增加而加速，因此在 288 °C 的氧化性環境所面臨的腐蝕速率會大於 200 °C，也因此氫氣注入的時機需要盡可能提早，避免在溫度升至 250 °C 以上才開始注氫，以免這段時間加速裂縫的起始，使組件材料面臨不可逆的腐蝕問題。過氧化氫在高溫水環境的化學反應比氧氣複雜許多，可能同時有氧化性環境及還原性反應進行，因此在腐蝕電位及腐蝕速率上，普遍無法反映出被覆效果的差異，僅在 288 °C 的高溫時，會有催化效果的差異。經同一程序被覆白金的試片，在 288 °C 不同水化學條件 (溶氧、溶氫、過氧化氫) 下所形成的氧化膜各自不同，因此極化掃描實驗後可發現各試片的陽極電流密度也不同 (溶氫環境 > 過氧化氫環境 > 溶氧環境)。此外，各試片經白金被覆後，其腐蝕電流密度的變化程度也各自不同 (過氧化氫環境 > 溶氧環境)。從交換電流密度看來，白金被覆催化氧化劑 (氧氣及過氧化氫) 環氧反應的效果高於催化還原劑 (氫氣) 氧化反應的效果，被覆有可能反而提升組件的

腐蝕速率。

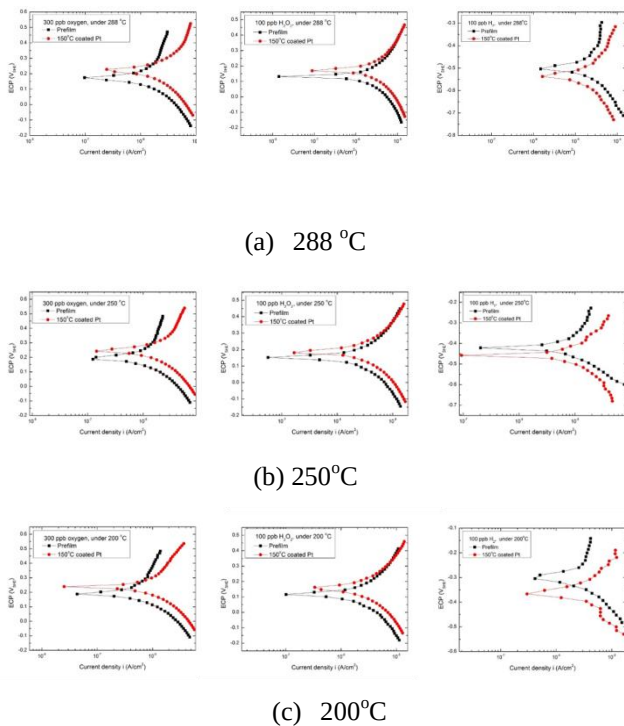


圖 2 在不同溫度(200、250、288 °C)及水化學環境下
prefilm 與白金被覆極化掃描

IV. 結論

透過模擬 BWR 水環境下的電化學量測實驗，探討在反應器運轉過程中，結構組件在不同的水化學條件下，包含 300 ppb 過氧化氫、300 ppb 溶氧、100 ppb 溶氫等條件，透過電化學分析，瞭解白金被覆處理因不同的表面結構產生的差異，進而瞭解 Pt 被覆處理對 304 不鏽鋼於模擬 BWR 水化學環境下的腐蝕特性之影響。

經同一程序被覆白金的試片，在 288°C 不同水化學條件（溶氧、溶氫、過氧化氫）下所形成的氧化膜各自不同，因此極化掃描實驗後可發現各試片的陽極電流密度也不同（溶氫環境>過氧化氫環境>溶氧環境）。此外，各試片經白金被覆後，其腐蝕電流密度的變化程度也各自不同（過氧化氫環境>溶氧環境）。從交換電流密度看來，白金被覆催化氧化劑(氧氣及過氧化氫)環氧反應的效果高於催化還原劑(氫氣)氧化反應的效果，被覆有可能反而提升組件的腐蝕速率。

參考文獻

- [1] R. L. Cowan, Nuclear Engineering International, January 1986, p. 26.
- [2] M. E. Indig, "Recent Advances in Measuring ECPs in BWR Systems," Proc. 4th Intl. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, NACE, Jekyll Island, GA., Aug. 6-10, 1989, p.4-411.
- [3] R. L. Cowan et al, GE Nuclear Energy, Vallecitos Center, "Effects of Hydrogen Water Chemistry on Radiation Field Buildup in BWRs," Nuclear

Engineering and Design, vol.166, p. 31-36 (1996).

- [4] Nuclear Regulatory Commission, Cracking of Vertical Welds in the Core Shroud and Degraded Repair, NRC Information Notice 97-17, April 4, 1997.
- [5] M. Y. Wang and T. K. Yeh, "Predicted Impact of Power Uprate on the Water Chemistry of Kuosheng Boiling Water Reactor," Nuclear Engineering and Design, 238, 2746. (2008).

金屬添加技術對於 BWR 組件防治應力腐蝕龜裂之效益分析

Effect of Noble Metal Coating Technique on SCC Mitigation for 304 Stainless Steel Components in BWR Environments

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-005-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：苑主用、林柏勳、鄭照光

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

目前全世界已有六十座以上的 BWR 電廠採用了加氫水化學技術。採用中度或更高的注氫量(通常大於 0.6 ppm)時，會有提昇主要蒸汽管路輻射劑量的副作用，輻射劑量提高主要來自 ^{16}N 增加，及因 ^{60}Co 析出而造成停機劑量的上升，氫氣的儲存及需裝設 ECP 監測系統等。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。目前約有 30 座以上的 BWR 電廠已採取貴重金屬被覆配合低注氫技術。貴重金屬被覆目前共有三種方式，電廠停機過程時採用的 NMCA，電廠額定功率運轉時採用的 ONLC，以及管路除汙後採用的 LTNC。其中 ONLC 實行溫度較高，NMCA 及 LTNC 在較低溫度下施行被覆，貴重金屬被覆形貌的差異及被覆程度等都會影響對於組件的應力腐蝕龜裂行為。基於沸水式反應器有限的現場水化學監測資料，如採用貴重金屬添加技術以降低注氫需求量對於前述 BWR 主循環水迴路還原氧化劑濃度與組件腐蝕電位的影響目前僅能依賴數值模擬分析的方式進行評估。本計畫透過模擬計算，評估組件材料實施不同催化性添加技術(NMCA, ONLC, LTNC)，透過催化性模式的建立，分析主冷卻水迴路中被覆差異對於 BWR 組件電化學腐蝕電位的影響研究。

關鍵詞：應力腐蝕龜裂、電化學腐蝕電位、催化性被覆。

Abstract

In order to mitigate the problem of stress corrosion cracking (SCC) in the structural components, the technology of hydrogen water chemistry (HWC) or low HWC combined with noble metal chemical application (NMCA) or On-line NobleChem™ (OLNC) has been widely adopted in BWRs around the world. Hydrogen water chemistry can be very effective, but it has the very undesirable side effect of increasing the radiation level in the main steam due to a change in the stable chemical form of N16. There are some other drawbacks to HWC, including increased drywell shutdown dose rates, large hydrogen storage and the expense of ECP monitoring. Numerous noble metal addition technologies include NMCA, OLNC and LTNC. The deposition temperatures in the NMCA and LTNC cases were lower than that in ONLC case. Due to the difference in the noble metal addition technologies, the deposition morphology and amount of noble metal would be different. As noble metal was applied

in the BWRs, the deposition behavior of noble metal would affect the corrosion mitigation of the components. In view of the limited, measurable water chemistry data, the various catalytic effect on the water chemistry and component corrosion in a BWR can only be theoretically evaluated through computer modeling. In this project, the DEMACE code were modified and used to investigate the impact of the oxidants (oxygen and hydrogen peroxide) on the electrochemical corrosion potential and crack growth rates of components with various catalytic coating in the primary coolant circuits of the BWRs during the rated operation. Keywords: Stress Corrosion Cracking, Electrochemical Corrosion Potential, Catalytic Coating.

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。在反應器爐心，由於輻射分解效應使得爐水產生大量的過氧化氫，過氧化氫易自我分解為氧及水，使得爐水具有高氧化性。BWR 在運轉時，爐水的溶氧量約為 200 至 400 ppb，高溶氧量是造成 IGSCC 的主要環境因素，如可降低溶氧量，就可降低金屬組件的電化學腐蝕電位，降低發生 IGSCC 的機率。加氫水化學是藉由在飼水中加入氫氣，利用氫氣與氧或過氧化氫在具有輻射的環境下進行再結合反應，降低主冷卻水中溶氧與過氧化氫的濃度，可促進 ECP 值的下降。ECP 是 SCC 裂縫起始與成長的驅動力，ECP 值的降低有助於減少裂縫發生與成長的機率，達到保護 BWR 壓力槽內部組件的目的。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 °F 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。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。而從 PSI 2014 年的報告中，美國及歐洲的 BWR 電廠，採用 ONLC 的 BWR 有增加的趨勢，而採用 NMCA 的電廠逐漸減少[3]。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，但氫氣的比值要達到 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。

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，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。作者近幾年的研究曾針對有關國內 2 座核電廠進行功率提升時 HWC 效益的評估，也使用 DEMACE 進行爐心流量及功率變化對 HWC 效益的初步分析，此部分負責爐心熱流分析是使用 ZEBRA 程式來協助。也曾針對起動過程中，在不同溫度運轉的較低功率環境下，探討氧化性環境對於爐心組件及管線系統之裂縫成長速率評估。之前的計畫也曾評估當電廠可在起動時進行注氫，如已有催化性金屬被覆時，其 HWC 防蝕效果的評估。目前台灣的 BWR 都未進行 NMCA 或是 ONLC(Online Noble Chem™ Application)，GE BWR 確實有大部分的電廠為了減少注氫量而採取貴重金屬被覆，2000 年左右開始進行貴重金屬化學添加 (Noble Metal Chemical Addition, NMCA) 技術，而 2006 年之後發展出線上添加貴重金屬 (Online NobleChem™, OLNC) 技術，以及管路除汙後採用的低溫貴重金屬 (Low Temperature Noble Chem, LTNC) 技術。未來台灣的電廠是否會進行催化性金屬被覆等相關技術都還在評估中，為了能提供評估的結果，本計畫針對已實施催化性被覆之沸水式反應器採用不同的貴重金屬被覆方式，分別對於組件材料應力腐蝕行為的研究。另外，配合不同溫度的貴重金屬被覆實驗，進行 304 不鏽鋼試片的電化學分析，分析結果作為模擬模式的輸入資訊，做為貴重金屬被覆的因子修正參數。

III. 結果與討論

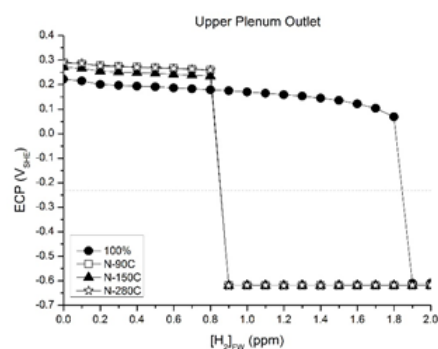
將 1 ppm 白金粉末($\text{Na}_2\text{Pt}(\text{OH})_6$)透過熱水沉澱法將白金被覆於預長氧化膜試片上，沉積溫度及時間包含 90 °C/24 hrs、150 °C/24hrs、280 °C/1 week。之後將白金被覆試片(NMCA)及預長氧化膜試片(Prefilm)置入高壓釜進行高溫電化學分析，分別於 288 °C 水環境下，包含 300 ppb 溶氧、100 ppb 過氧化氫、100 ppb 溶氫的水化學狀態下進行實驗。核電廠於實施貴重金屬被覆，考慮不同的被覆技術，因被覆溫度的差異，針對其水化學以及組件腐蝕特性的變化進行研究。經由本實驗結果考慮各氧化還原反應因 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(FE)。另外，也考慮在 Pt 處理後 ip 值的改變，其結果顯示於表 1。

表 1、主要氧化還原反應之 i_0 增值因數

Pt 被覆溫度	$F_E(\text{H}_2)$	$F_E(\text{O}_2)$	$F_E(\text{H}_2\text{O}_2)$	$F_E(\text{M})$
90°C	1.76	9.22	1.24	1.19
150°C	1.65	3.06	2.16	1.25
280°C	1.48	3.77	3.43	1.33

針對主冷卻水迴路 (PCC) 中重要位置在 HWC 與採用不同溫度進行貴重金屬被覆時，討論其氫、氧、過氧化氫的個別濃度以及組件之 ECP 變化情形。ECP 是用來判斷組件材料是否遭致 IGSCC 或 IASCC 侵襲的重要指標，美國核能管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 已認可 $-0.23 \text{ V}_{\text{SHE}}$ 為敏化 304 不鏽鋼於 BWR 環境中的臨界腐蝕電位 (E_{crit})，因此 ECP 的預測遠比化學成份濃度的預估重要而直接。 $-0.23 \text{ V}_{\text{SHE}}$ 只是一個參考電位，視環境與材料本身的差異，確實的臨界腐蝕電位應是一電位範圍而非單一數值。模擬的結果將針對四個重要位置 ECP 與注氫濃度的關係來討論。

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 1 所示。不同的 Pt 被覆溫度，透過電化學分析的結果顯示，對於氫氣的催化效果差異不大，90 °C 被覆的結果對於氧氣的催化效果較為明顯，過氧化氫的催化效果顯現於 280 °C 被覆下。透過模擬分析結果發現對於不同 Pt 被覆溫度，核電廠不同位置組件顯現出的電化學腐蝕電位，依序為 90 °C 被覆 > 280 °C 被覆 > 150 °C 被覆，在低溫被覆下顯現出較高的電位。在注氫效益的分析上，三者顯示出一致的結果，可降低有效注氫量。



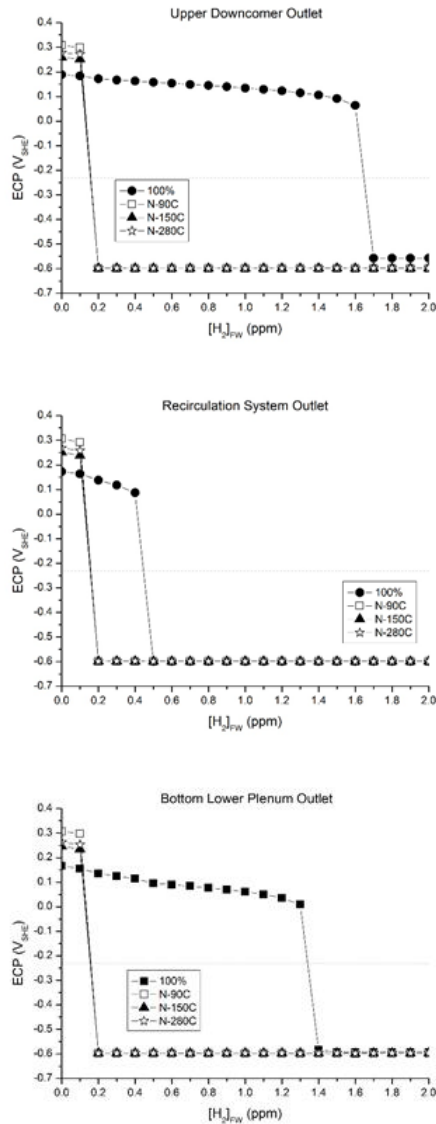


圖 1 經由不同白金被覆處理後，因 HWC 實施後，各重要位置之 ECP 與注氫量的關係

IV. 結論

本計畫針對沸水式反應器採用不同的貴重金屬被覆方式時，評估組件材料實施催化性被覆後，分析主冷卻水迴路中氧化還原劑濃度對於組件腐蝕電位的影響變化情形。不同的 Pt 被覆溫度，透過電化學分析的結果顯示，對於氫氣的催化效果差異不大，90 °C 被覆的結果對於氧氣的催化效果較為明顯，過氧化氫的催化效果顯現於 280 °C 被覆下。透過模擬分析結果發現對於不同 Pt 被覆溫度，核電廠不同位置組件顯現出的電化學腐蝕電位，在低溫被覆下顯現出較高的電位。在注氫效益的分析上，三者顯示出一致的結果，可降低有效注氫量。

參考文獻

- [1] R. L. Cowan, Nuclear Engineering International, January 1986, p. 26.
- [2] M. E. Indig, "Recent Advances in Measuring ECPs in BWR Systems," Proc. 4th Intl. Symposium on

Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, NACE, Jekyll Island, GA., Aug. 6-10, 1989, p.4-411.

- [3] S. Ritter, P.V. Grundler, L. Veleza, "Pt deposition behaviour in boiling water reactors: the NORA project," <http://www.psi.ch/lnm/NoraEN/NORA.pdf>, 2014.

電廠中低壓電纜老化檢測與評估研究 Measurement and Evaluation for Low-medium Voltage Cable in Nuclear Power Plants

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-013-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王天戈

e-mail：tkw@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：張廖貴術、柯學超

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

核能電廠儀控系統中低壓電纜設備的老化劣化評估是一項非常重要的研究題目，其中絕緣材料之老化劣化監測則是基礎而先決的工作。本研究計畫之主要目的，係就核能電廠使用重要設備之中低壓電纜，探討並建立其老化評估的方法及設備。主要的工作係對核電廠中低壓電纜進行人為老化實驗並配合溫度、濕度等條件實施、綜合比較各種檢測方法、進行電纜劣化與壽命之評估、及探討電纜絕緣材料老化之物理性質改變機制理論等。研究結果顯示電纜經長期高溫濕度老化，造成電纜電性的劣化。結合絕緣電阻與散逸因數檢測方法，能有效偵測電纜熱濕劣化的行為。依據電纜材料劣化趨勢及程度，並應用 Arrhenius 公式，可以估算其剩餘壽命。本研究計畫所建立之中低壓電纜老化劣化評估方法，可供核能電廠及產業界檢測核能級設備組件所使用，增進核能電廠營運安全，並可深入瞭解絕緣材料老化與劣化效應之物理機制，以期提昇我國之核能科技。

關鍵詞：核電廠、中低壓電纜、絕緣材料、老化、熱濕、評估。

Abstract

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

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

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

I. 前言

核能電廠廣泛使用的EPR電纜，其壽命通常可達數十年以上，但由於有些電纜在使用期間可能經歷較惡劣的環境，包括溫度、溼度及輻射等，而造成這些電纜加速老化，使得實際使用壽命大幅縮短。目前有許多電纜老化現況偵測（Condition Monitoring, CM）方法，如 indenter、OIT、density量測等，已被認為可有效評估電纜老化程度[1-2]，不過這些CM方法只能用於電纜的端點或可接觸（accessible）部分。對於裝置於管線或溝槽內的非接觸電纜（inaccessible cable）而言，當局部遭受濕氣/浸水、高溫、輻射等較惡劣的環境時，並無法使用上述CM方法，來評估電纜老化情形。因此，探討電纜濕氣結合溫度或輻射之劣化行為及偵測方法，對核電廠電纜老化管理及長期運轉工作是很重要的。

電氣偵測方法最大優點在於可直接評估整條電纜功能與電性劣化情形，所以適用於非接觸電纜。對於高壓電纜長期處於溼度/浸水環境下，產生水樹（water trees）現象，而造成電纜加速劣化或失效，目前已有許多文獻研究，但是探討有關低壓電纜濕氣劣化（moisture-related degradation）影響的文獻並不多。經過去研究顯示，低壓電纜因絕緣材料所受到的電壓應力較低，所以不會產生水樹現象[3]。雖然如此，濕氣仍被視為老化因子，足以影響電纜功能與使用壽命，尤其在結合溫度與輻射環境，所造成合成效應的影響[4]，對核電廠電纜老化管理特別重要[5]。

利用絕緣電阻量測，來作為確認電氣設備絕緣性能是否正常，乃目前最被廣泛使用且為一種簡單快速的方法。由於過去認為此種方法對於熱所造成的材料老化較不敏感[5]，所以較少作為電纜絕緣老化現況偵測方法。然而最近文獻已顯示[6]，熱氧化所引起的老化現象，會改變EPR絕緣材料的絕緣阻抗。由於濕氣環境造成良好

傳導路徑，所以利用絕緣電阻量測濕氣結合溫度或輻射所造成的材料老化，可能是很有用的現況偵測方法。另外，在濕氣環境下，散逸因素（dissipation factor或稱Tan delta）為另一種有效的電纜老化現況偵測方法[5,7]，當絕緣材料逐漸老化時，所量測的值也隨之增加。

本研究計畫之目的係探討 EPR 電纜在濕氣結合溫度環境之劣化行為，並藉由量測電纜在不同環境下，所得之電性劣化數據，以評估絕緣材料劣化程度及允收準則，並估算其剩餘壽命。

II. 主要內容

本研究計畫之實驗方法及設備略述如下，

電纜材料，本研究所採用低壓電纜的構造為EPR 600 V 12AWG 3C+14AWG 3C 接地線，外被覆為CSPE（chlorosulfonated polyethylene），EPR絕緣材料厚度約0.76 mm。中壓電纜的構造為EPR 15 kV 4/0 AWG，絕緣材料厚度約5.6 mm。長期高溫浸水老化，將電纜置入75℃（or 98℃ after 500 days）熱水中，低壓電纜持續約2年，中壓電纜持續約3年，以模擬電纜長期溫濕度老化行為，並在此期間施予電性量測。絕緣電阻量測，以絕緣電阻計施加電壓1000 VDC，量測長期高溫浸水等環境下之絕緣電阻變化。靜電容量與散逸因素量測，使用Tettex靜電容量與散逸因素自動量測儀器，施以2.4 kV（3.2 kVAC/mm）電壓，量測電纜在長期高溫浸水環境下，靜電容量、散逸因素之變化趨勢。絕緣材料水分量測，使用三菱化學公司水分分析儀器（Mitsubishi chemical corporation, CA-100 Moisture meter），量測EPR絕緣材料在未老化及長期高溫浸水後之含水量。

III. 結果與討論

3.1 長期溫濕度老化

利用絕緣電阻量測電纜在長期高溫浸水環境，所造成的濕氣劣化行為，如圖 1所示。美國核能級電纜 IEEE 383 驗證標準，規定加速老化後之電纜絕緣強度，最少應大於3.2 kVac/mm (80 Vac/mil)。另在AEIC標準規範，規定加速老化後之電纜絕緣強度，最少應大於10 kVac/mm。可以看出，各種顏色電纜劣化情形類似，其劣化過程可略分成未老化unaged (1000 MΩ 以上)~370 days，部分老化partially aged (變化劇烈)~160 days，完全老化completely aged~210 days。分別標示為tI (unaged): 75℃ for 370 days、tII (partially aged): 75℃ for (500-370) days + 98℃ for (537-500) days、tIII (completely aged), 98℃ for (750-537)days。未老化區域之絕緣電阻很高，通常在1,000 MΩ以上。部分老化區域為開始有少數絕緣電阻偏低現象，造成此區域絕緣電阻變化很大，而此現象發生頻率將隨著時間逐漸增加，直到降低至某一穩定值。在完全老化區域的絕緣電阻較低，大約為100 MΩ，其主要是因為絕緣材料的含水量高且達到飽和。電纜絕緣電阻變化，除了受到周圍環境溫度與溼度的影響外，主要是由於外界水分子長期擴散進入絕緣材料，而導致絕緣材料的含水量增加，使得絕緣電阻下降。另外，量測電纜絕緣電阻，也顯示相同材料但不同的顏料，會影響絕緣材料的電阻值。實驗結果顯示紅色絕緣材料最好，其次為白色，

而最被廣泛使用的黑色絕緣材料，其絕緣電阻值最差。

圖2為EPR電纜以SEM分析孔洞大小(a)僅經高溫老化 (b) 經高溫老化後再浸泡熱水。Cable經長期高溫老化漸有孔洞產生，再進行濕度老化後孔洞才明顯增大，此結果證明確有“水樹”現象。

圖3為經長期高溫濕度老化EPR電纜在不同內外層之水含量。可以看出，絕緣材料外圍，含水量較高。中壓EPR電纜在高溫浸水3年後，經由SEM分析，其絕緣材料(a)未老化(unaged)，從內層到外部在(b) 1-1.5 mm (c) 3-3.5 mm及(d) 4.5-5 mm厚度之空孔變化，如圖4所示。外層材料空孔大小(void size)約50μm，由於空孔密度很高，抵抗水分子侵入的能力可能已完全喪失；距離內層3-3.5 mm材料空孔大小約25 μm，此區域仍可發現許多空孔；距離內層1-1.5 mm（接近導體）材料空孔大小約15 μm，此區域僅有少量空孔。可以看出，絕緣材料外圍，孔洞較大。

電纜絕緣材料老化的過程中，空孔大小與密度的增加，使得外界水分子容易侵入絕緣材料內部，而造成材料耐水性變差及電纜電性的劣化。另外，材料在濕氣劣化時，因形成較大且較多的空孔，使得材料體積膨脹，而在熱老化環境時，由於材料體積收縮，所能觀察到的空孔則很微小。

在中壓EPR電纜也發現約350-450 μm巨型空孔(氣泡)散佈在材料內部，如圖5所示，而電纜也出現腫脹(swell)現象，其直徑增加約5%。對於空孔大小與電纜電性劣化關係，根據Novak及Bartnikas研究發現 [8]，空孔大於50 μm時，將對部分放電有影響，而巨大空孔(如200-500μm)，則對部分放電產生顯著影響。

3.2 靜電容量、漏電流、散逸因素方法比較

圖6為在長期高溫浸水環境兩年後低壓電纜的靜電容量隨老化時間變化圖，可以看出黑色、白色、紅色三條電線在長期高溫浸水環境的靜電容量之變化趨勢一致，均隨著浸水時間增加而穩定的升高，而在10,000小時以後，則維持平穩並緩慢上升。另外，在漏電流的變化也有相同的趨勢，如圖7所示。這可能是電纜絕緣材料的含水量已逐漸達到飽和，所以靜電容量與漏電流上升趨勢較緩和。雖然絕緣材料靜電容量較高時，其漏電流也較大。但是不同顏色絕緣材料之靜電容量與漏電流會有差異。黑色增加最多，其絕緣電阻也減低最多，顯示靜電容量、漏電流及絕緣電阻之間有關聯性。另外，本實驗結果也顯示，電纜在明顯劣化前（10,000小時），靜電容量與漏電流大約增加20%。

電纜在長期高溫浸水環境所測量的散逸因素數據，與絕緣電阻量測相似，均有明顯的指標(indication)，顯示電纜的劣化現象，並可進一步評估電纜現況，如圖8所示。電纜散逸因素在開始的時候是很緩慢的下降，這可能是絕緣材料內部低溫物質如焦油，逐漸蒸發的結果。在此階段，由於外界水分子向絕緣材料內部持續擴散，而當絕緣材料含水量到達某一程度時，造成散逸因素突然升高。在本實驗中，黑色電線在10,000小時，而白色電線在12,000小時的時候，電纜散逸因素有突然升高現象，且絕緣電阻也在此時突然下降。

很顯而易見的，其原因都是絕緣材料受到濕氣侵入，而造成濕氣劣化現象。探討電纜散逸因素與絕緣電阻量測的關聯性（correlation），可得到更充分的資訊，評估電纜濕劣化行為，將比使用散逸因素或絕緣電阻單一方法更好。因此，如果長期收集這些數據，並進行趨勢分析，將可提供有用資訊，有助於預測電纜的剩餘壽命。

從高溫濕度下低壓電纜的靜電容、漏電流、散逸因數對老化時間關係圖綜合比較，各種量測參數結果顯示其老化趨勢一致。靜電容、漏電流、散逸因數等量測參數也常為核電廠偵測電纜所使用。本研究顯示，絕緣電阻與散逸因素兩種檢測方法，由於有明顯的指標（indication），顯示電纜的劣化現象，所以兩者綜合最能有效偵測電纜濕氣劣化的行為。藉由長期偵測與趨勢分析，可作為核電廠非接觸電纜老化管理的現況偵測工具。

3.3 允收準則（Acceptance criteria）

本研究顯示，電纜在長期高溫浸水等環境條件，絕緣電阻量測可有效的評估電纜溫度濕氣劣化行為。如果利用絕緣電阻量測來建立電纜熱濕劣化的允收準則，依據本實驗結果，允收準則大約在100 MΩ至1000 MΩ之間。絕緣電阻高於1000 MΩ，可視為良好，小於100 MΩ表示不良（poor），若在100 MΩ至1000 MΩ之間，表示應注意。另外，由於現場電纜的構造與環境差異，其絕緣電阻變化較大，不易判斷時，此時應該收集較多資料，例如Dissipation factor之突然升高，並利用趨勢分析，以便能訂出合理的允收準則。

3.4 剩餘壽命估算（Remained life estimation）

目前核電廠設備組件之熱老化評估，大多採用Arrhenius模型理論，並假設材料熱老化由單一化學反應所構成，其反應速率決定於材料溫度及材料常數，稱為活化能（activation energy）。此理論是國家標準CNS14166及美國核能管制委員會法規指引R.G.1.89，對熱老化驗證所認定及接受之方法[9]。一般常用的阿氏(Arrhenius)曲線方程式來表示：

$$\ln T_E = \ln A + \frac{E_a}{RT} \quad T_E: \text{預期使用壽命}$$

T: 絕對溫度，R: 氣體常數= 8.314 J/moleK，A: 材料參數，E_a: 材料活化能

請參看圖1，絕緣電阻對高溫濕度老化時間數據，本實驗以黑色電線為例，將電纜在長期高溫浸水環境的濕氣劣化過程，劃分為未老化區域(tI:370days/75℃)、部分老化區域(tII:500-370=130days/75℃ +537-500=37days/98℃)、及完全老化區域(tIII:750-537=213days/98℃)。

因此，由阿氏公式 $T_E = A \cdot \exp(E_a/RT)$,

$$T_E(50^\circ\text{C}) = A \cdot \exp(E_a/R(50+273)),$$

$$T_E(75^\circ\text{C}) = A \cdot \exp(E_a/R(75+273)),$$

$$T_E(98^\circ\text{C}) = A \cdot \exp(E_a/R(98+273)),$$

另外，電纜EPR絕緣材料的活化能保守的選定1.1 eV，則電纜在不同溫度環境條件長期運轉使用之壽命分別如下。

電纜在50℃/100%RH環境條件之壽命：

$$\ln t_I, T_E(50^\circ\text{C})/T_E(75^\circ\text{C}) = \exp(E_a/R) [1/(50+273)-$$

$$1/(75+273)],$$

$$t_I, 50^\circ\text{C}$$

$$= 370 \exp[(1.1/8.617E-5)(1/(50+273)-1/(75+273))] = 17.3 \text{ years}$$

$$\ln t_{II}, T_E(50^\circ\text{C})/T_E(75^\circ\text{C}) = \exp(E_a/R)[1/(50+273)-$$

$$1/(75+273)], T_E(50^\circ\text{C})/T_E(98^\circ\text{C}) =$$

$$\exp(E_a/R)[1/(50+273)-1/(98+273)],$$

$$t_{II}, 50^\circ\text{C} = (500-370)$$

$$\exp[(1.1/8.617E-5)(1/(50+273)-1/(75+273))]+(537-500)$$

$$\exp[(1.1/8.617E-5)(1/(50+273)-1/(98+273))]$$

$$= 6.09+16.85=22.9 \text{ years}$$

$$\ln t_{III}, T_E(50^\circ\text{C})/T_E(98^\circ\text{C}) = \exp(E_a/R)[1/(50+273)-$$

$$1/(98+273)],$$

$$t_{III}, 50^\circ\text{C} = (750-537)$$

$$\exp[(1.1/8.617E-5)(1/(50+273)-1/(98+273))] = 97.0 \text{ years}$$

$$\text{電纜總壽命 } t_{50^\circ\text{C}} = t_I, 50^\circ\text{C} + t_{II}, 50^\circ\text{C} + t_{III}, 50^\circ\text{C}$$

$$= 17.3+22.9+97=137.2 \text{ years}$$

若電纜在65℃/100%RH環境條件之壽命，經由類似的計算，結果如下：

$$t_I, 65^\circ\text{C} = 3.00 \text{ years}$$

$$t_{II}, 65^\circ\text{C} = 3.97 \text{ years}$$

$$t_{III}, 65^\circ\text{C} = 16.79 \text{ years}$$

$$\text{電纜總壽命 } t_{65^\circ\text{C}} = t_I, 65^\circ\text{C} + t_{II}, 65^\circ\text{C} + t_{III}, 65^\circ\text{C}$$

$$= 3.00+3.97+16.79=23.76 \text{ years}$$

電纜壽命經由Arrhenius公式計算結果，雖然兩種溫度（t_{50℃}及t_{65℃}）之總壽命差異很大（分別為137.2年及23.6年），但是其比率是相同的。假如我們選定電纜未老化區域t_I為允收準則，電纜在兩種溫度之剩餘壽命均為87.3%；而選定電纜部分老化區域t_{II}為允收準則，其剩餘壽命均為70.7%。此結果顯示，以絕緣電阻偵測電纜濕氣劣化時，能早期發現電纜有劣化現象，所以是屬於一種先期診斷（prognostic）的偵測技術。

IV. 結論

本研究計畫完成了預期的工作項目，Cable 經長期溫濕度老化，可分成 unaged (1000 MΩ 以上), partially aged (變化劇烈), completely aged。中壓 EPR 電纜在高溫浸水後，由內而外 void 越大。電纜絕緣材料老化的過程中，空孔大小與密度的增加，使得外界水分子容易侵入絕緣材料內部，而造成材料耐水性變差及電纜電性的劣化。材料在濕氣劣化時，因形成較大且較多的空孔，使得材料體積膨脹，而在熱老化環境時，由於材料體積收縮，所能觀察到的空孔則很微小。使用絕緣電阻偵測電纜材料濕氣劣化行為時，依據本實驗結果，允收準則大約在 100 MΩ 至 1000 MΩ 之間。本研究也顯示，絕緣電阻與散逸因素兩種檢測方法，由於有明顯的指標（indication），顯示電纜的劣化現象，所以兩者綜合最能有效偵測電纜濕氣劣化的行為。藉由長期偵測與趨勢分析，可作為核電廠非接觸電纜老化管理的現況偵測工具，此研究成果可直接應用到產業界。

參考文獻

- [1] Kenneth T. Gillen, Roger A. Assink, Robert Bernstein. Condition monitoring approaches applied to a polychloroprene cable jacketing material. Polymer Degradation and Stability 2004; 419-431.

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

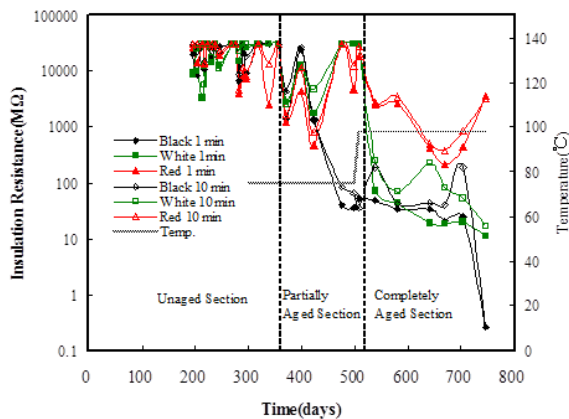
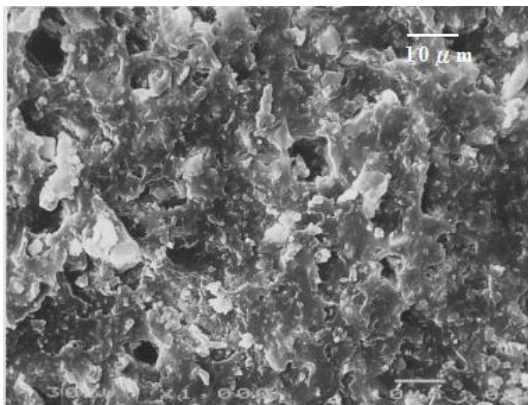
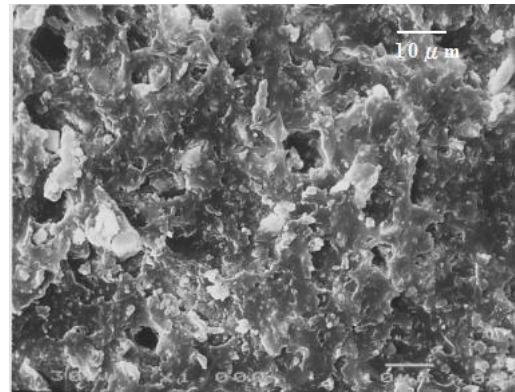


圖 1 在高溫浸水下低壓電纜之絕緣電阻對不同老化時間關係圖



(a)



(b)

圖2 EPR電纜以SEM分析孔洞大小(a)僅經高溫老化 (b)經高溫老化後再浸泡熱水。

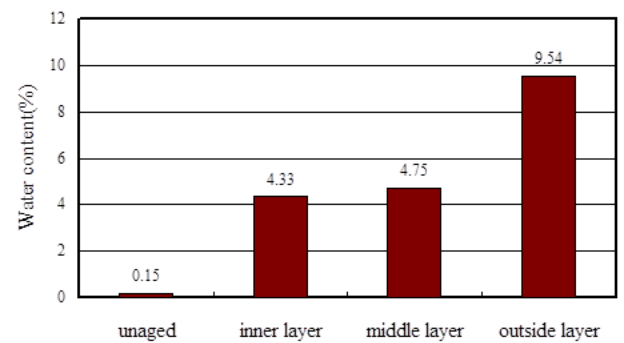
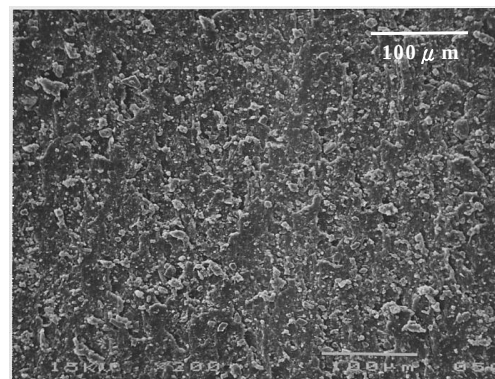
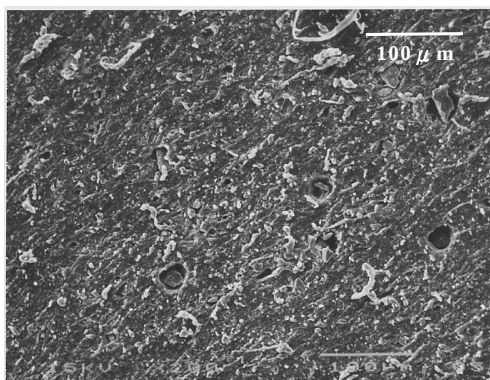


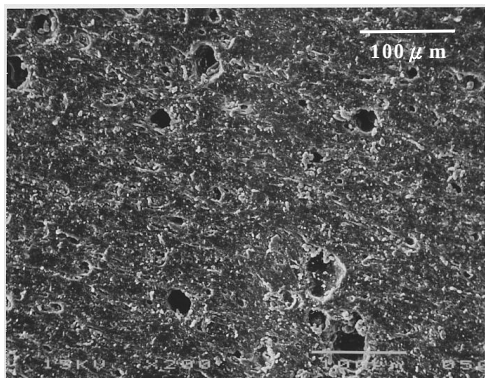
圖 3 經長期高溫濕度老化 EPR 電纜不同內外層之水含量。



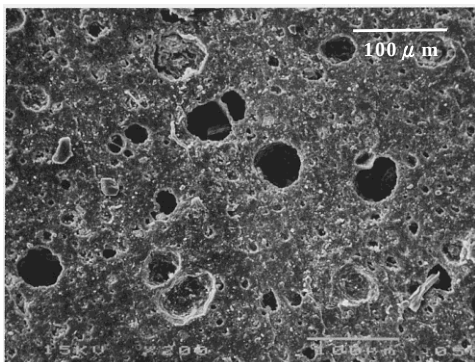
(a)未經老化



(b) 平均空孔大小 15 μ m – 從內層算起 1.0-1.5 mm 處



(c) 平均空孔大小 25 μ m – 從內層算起 3-3.5 mm 處



(d) 平均空孔大小 50 μ m – 從內層算起 4.5-5 mm 處

圖 4 中壓 EPR 電纜經高溫浸水 3 年後，由 SEM 分析其絕緣材料之空孔大小與密度變化

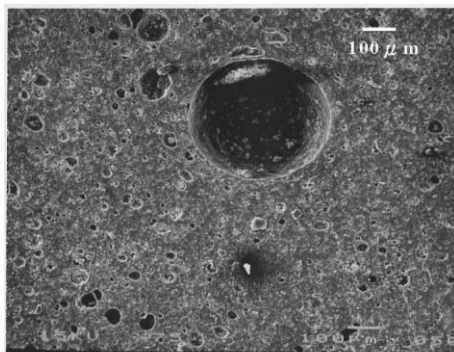


圖 5 中壓 EPR 電纜經高溫浸水 3 年後，由 SEM 分析發

現約 350-450 μ m 巨型空孔(氣泡)散佈在材料內部

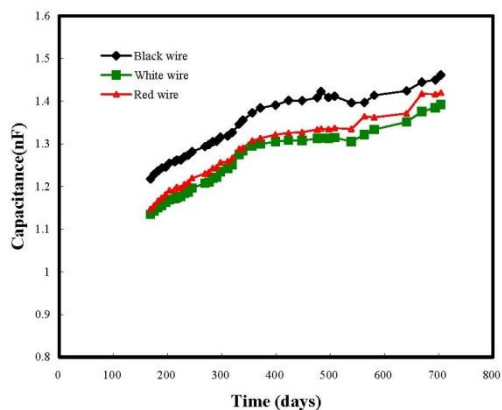


圖 6 在長期高溫浸水環境兩年後低壓電纜的靜電容量隨老化時間變化圖

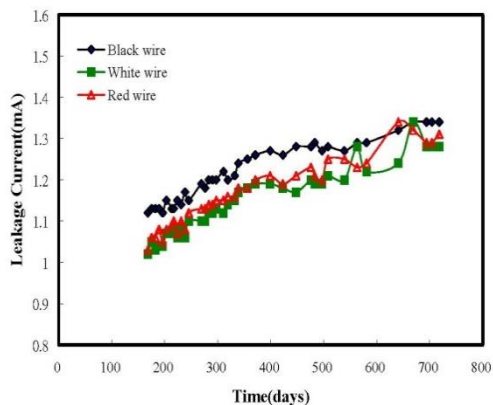


圖 7 在長期高溫浸水環境兩年後低壓電纜的漏電流隨老化時間變化圖

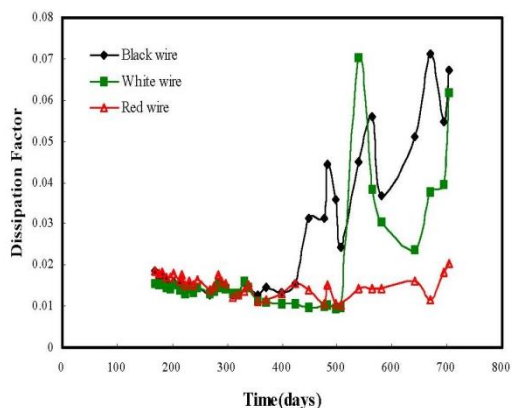


圖 8 在長期高溫浸水環境兩年後低壓電纜的散逸因素隨老化時間變化圖

核電廠之地下管路檢測機器人研製

Development of underground-pipe-inspection robots for nuclear plants

計畫編號：MOST 105-2623-E-027-001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：林顯易

e-mail：sofin@ntut.edu.tw

計畫參與人員：謝名豐、Andres Gaona、Vipul Dubey、鄭仲勝、孟繁立

執行單位：國立台北科技大學自動化科技研究所

摘要

本計畫提出並研製一種多節擴張機構的管道檢測機器人，透過對機器人每單元的擴張機構設計，達到如蛇型機器人螺旋擴展的適應力。在不同大小的管徑時，旋轉每小節單元之間的角度，以每小節的互相約束並擴張至相同角度，使整體成如螺旋的型態貼合管道內壁，且行進的驅動輪可以貼合管道內壁，增加其前進效率，改善了原先如蛇形管道機器人輪子無法貼合在管壁上的問題，提高了機器人在前進上的效率，並降低了整體控制複雜度。

關鍵詞：多節擴張機構，機構設計，管道檢測機器人，螺旋擴展。

Abstract

A pipeline detection robot with multi - section expansion mechanism is proposed and developed. Due to the unique expansion mechanism of each unit the robot has the adaptability, such as the spiral expansion of the snake-like robot. Though rotated the angle between each unit the robot can fit at different sizes, but each section has to be constrained and expanded to the same angle. So that the whole as a spiral type attached to the inner wall of the pipeline, and the driving wheel can be attached to the inner wall of the pipeline to increase its forward efficiency and improve the original snake-like pipe robot wheels can not fit on the wall of the problem, Improve the efficiency of the robot in advance, and reduce the overall control complexity.

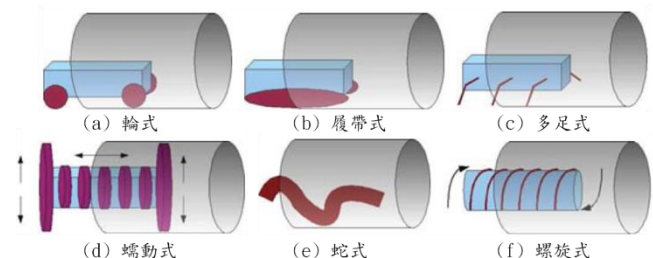
Keywords: Multi - section expansion mechanism,
Mechanical design, Spiral expansion,
In pipe inspection robot.

I. 前言

在運輸液體、氣體方面使用管線輸送是最安全可靠且有效率的運輸方式，在現今生活的環境周遭佈滿了大量的管線，然而大多數的管線皆深埋於地底下，不過管道會隨著長期的大量使用與鋪設的位置環境等問題影響，而這些因素會對管道造成不少問題，如長久的壓力影響到管道變形、長期的使用造成的管道腐蝕與老化等。以核能電廠為例，核能電廠中管道最主要用於冷卻系統，由於核能發電的過程中反應爐會產生極高的能量，因此反應爐會處於極高溫的狀態，必需透過冷卻系統將其降溫，若冷卻系統管路發生洩漏或破損，會導致反應爐無法有效率的降溫，而造成過熱並發生爐心熔毀，因

此管道的定期檢測是必要的，尤其是對核能發電廠的管道狀態十分重要，核能電廠的核安問題，其中的一項大重點就是管道的檢修，但是大多數管道皆埋藏於地底下，使用人力進行檢修非常困難，為了因應核電廠高水壓、高溫的地下管路環境，在受到各種環境限制的情況下，以機器人來進行檢測為最佳選擇。

使用人力檢查除了管道的大小並不適合以人力檢測外，管道內的環境也有可能對人造成危害，由於管道內的環境並不適合使用人力進行檢修，各國皆開始借助機器人進行管道環境的檢測，取代原先以人力執行檢測的工作，目前管道檢測機器人有非常多類型，依主動移動的方式可以分成幾類，輪式：荷蘭 Edwin Dertien 等人開發出名為 PIRATE 的管道機器人[2]，使用兩個 V 型的夾緊機構且可在管內原地旋轉；履帶式：加拿大 INUKTUN 公司研製三履帶式管內機器人 Versatrax Vertical Crawler[3]，採具有擴展性的三腳架，可於水中運行；多足式：足機器人具有較優的越障能力，但本身的控制較為複雜，Andreas Zagler 等人研製的“MORITZ”[4]；螺旋式：韓國 Seungho Kim 等人開發的螺旋驅動機器人[5]，機器人驅動單元採多個傾斜角度相同的輪子組成；蠕動式：日本 T. Tomita 等人研製出以蠕動爬行的管道機器人[6]；蛇式：日本 Toshimichi Baba 等人研製出的蛇形機器人[7]，在管道中以螺旋擴張環繞內管壁增加摩擦力；雖然有很多類型的管道機器人如圖一[1]，但依舊受到許多管道環境的限制，除了通訊上需使用纜線與管道大小限制外，在對於管道中各式的彎、斜、垂直、T 形等管道中，是否能順利通過不會造成卡住等問題，以避免造成施工上更多問題與困難，且須能配合管徑的變化，並受操作員控制前往指定的任意區域。



圖一、各類管道檢測機器人的主動驅動機構

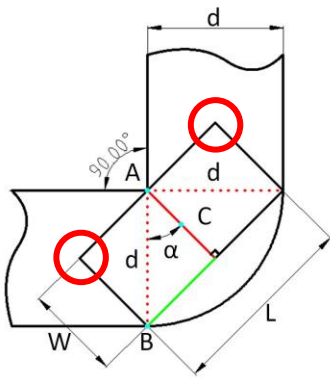
II. 主要內容

本計畫為設計因應適用核電廠高水壓的地下管路

環境，在機器人的開發上需具備有防水與耐壓的能力，且擁有機動性與自主性，以協助對地下管道進行篩檢壞損的檢測，提出核電廠管道機器人的研發構想，以管道機器人機身機構設計包括多節，活動關節，擴張關節為主。目的為了使機器人有較佳的機動性，並且機器人在機構上的設計以增加其適應能力為主要目標，在對於管道中各式的彎、斜、垂直、T 形等管道中，能順利通過不會造成卡住等問題，且須能配合管徑的變化，在對機構上的設計，透過開發多節式管道機器人能更適應管道內彎管與管徑變化等，由於普遍的管道機器人皆受到管道大小與曲率的限制[8]，圖二為管道機器人通行於 90° 彎管 2D 圖，如下圖所示，管道機器人可透過兩個式子定義單元的最大尺寸：

$$L = |2d \sin \alpha| \quad (1)$$

$$W = |d \cos \alpha| \quad (2)$$



圖二、2D 管道機器人通行 90°彎管

d 為管道的直徑， α 為線段 $\overline{AB}$ 與線段 $\overline{AC}$ 之間的夾角， L 為管道機器人單元長度， W 為管道機器人單元寬度，其中 L 與 W 可由式子(1)、(2)求得，若 α 為 45° 角，管道機器人單位長度 L 為 $2d/\sqrt{2}$ 、單位寬度 W 為 $d/\sqrt{2}$ ，由此可以很明顯的看出管道機器人的尺寸受制於管徑 d ，且圈起來的兩處在轉彎過程中會有輪子空轉的問題，這些問題都是必須考慮的。

為了使管道檢測機器人可以不受到管徑的問題限制，以多連桿擴展機構的概念下去設計，多連桿的擴展機構能不再受限於一個很小的管徑範圍，由於機器人整體機構上由多節串聯而成，機器人可以採用蛇型的環繞方式擴張(如圖三)[7]，然而這種方式雖然可以不受管徑限制且靈活性較高，但在控制上因需推算整體姿態而較



圖三、蛇形機器人

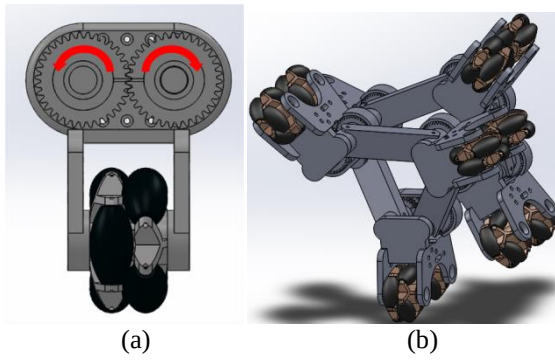
為複雜且行進速度上也十分緩慢，原因是其前進方式採

本體的翻轉，前進的效率較差，為了解決速度上的問題需改使用輪子驅動，但螺旋環繞的機構本身會導致每單元小節的輪子無法貼合在管壁上，造成驅動前進上的問題，為了可使輪子能有效率作用的貼合管壁，擴張的關節採有如圖四所示的 V 型開合，整體結合了日本研發的蛇形管道機器人與荷蘭的 PIRATE[2]，如圖二所示，這樣可確保機構本身在擴張上不會產生輪子歪斜傾角與無法貼合的問題，且能擁有更大的適用管徑範圍，以較高靈活度、較低的控制雜度且較高的前進效率為設計理念，機構的設計方向是以類似彈簧的型態，透過旋轉開合調整整體半徑，每小節的兩側桿臂開合角度成對稱，整體呈螺旋環繞管壁，若將單元數增加即可增加可適應的管徑範圍，以每小節間關節上的輪子驅動，透過馬達轉動直傘齒輪將兩側桿壁打開，對於管道的轉彎部分以機構本身依照管道變化，在每節上皆有安裝彈簧結構，在遇到彎管時使輪子能跟隨著管壁，在 T 型管的情況下，由前端進行導向，導引機器人整體轉向，此種機構整體會有如彈簧的彎曲般活動，透過此種擴展機構，提升了管道機器人在適應管徑上的範圍變大，整體機構上也變得更佳的靈活，能避免許多管道機器人在過急彎時發生卡住等問題。且輪子能與管道同向貼合的設計，這將使得機器人整體在前進上更有效率。

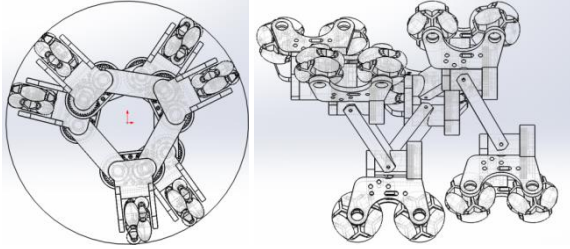


圖四、PIRATE 的管道機器人

整合之前遇到的問題，將兩桿臂移到同一平面上，降低原先前後受力不均的問題。在一開始將管道機器人放置於管道中時，機器人會先擴張至與管道內徑大小，由於設計的管道機器人為多節式，在每一小節的擴張大小十分重要，機器人兩臂的開合運動是透過圖五(a)齒輪轉動，兩齒輪中的凹槽是用以對位，以確保兩側保持對稱關係，透過一側齒輪轉動使兩側齒輪能以相反的方向轉動，借以打開兩側桿臂，因此需控制驅動齒輪馬達轉動的大小，圖五(b)為整體二等角式圖，機器人的每節轉動擴張的大小必需一致，透過讀取 AI 馬達的資料狀態，判別輸出資料，若已達到應有的接觸力大小即停止，以免造成管壁或管道機器人本體的損壞。由於在擴張運動時，會造成輪子在管壁上側向的滑動，輪子採用全向輪，解決機構擴張時與管壁的摩擦力，以免造成卡住或擴張不順的問題，圖六為管道機器人在管中的狀態。



圖五、擴張齒輪 (b)管道機器人二等角 3D 視圖



圖六、管道機器人側面與正面 3D 模型透視圖

為了描述管道機器人在管道中的位置和方向姿態，會在其每單元上定一個座標系統，在移動的方式上，可以將其分為平移與旋轉兩種運動方式，為了同時觀察兩個座標系中管道機器人每小節的相對移動關係，必需要先建立一個共同的基底座標系，並將各座標系上的位置映射到基底座標系上，由此各個位置才能有共同的參考點。

由於管道機器人本身為多節連桿的結構，因此在馬達驅動機器人擴張時，會造成每個連桿的位置依馬達轉動的角度而不同，由於一個座標系會在經過平移及旋轉後表示成另一個座標系，即物件相對於一個座標系可以改為相對於另一個座標系的描述，也就是做一個座標系轉換。座標系的轉換必需要先對管道機器人的多節連桿系統的結構作定義，如圖七所示(z 方向朝紙面向上)。因連結每單元小節的桿與該單元傾 60 度角，如圖八所示。因此 w 與 d 可由以下式子推導：

$$w = l \times \cos 60^\circ \quad (3)$$

$$d = l \times \sin 60^\circ \quad (4)$$

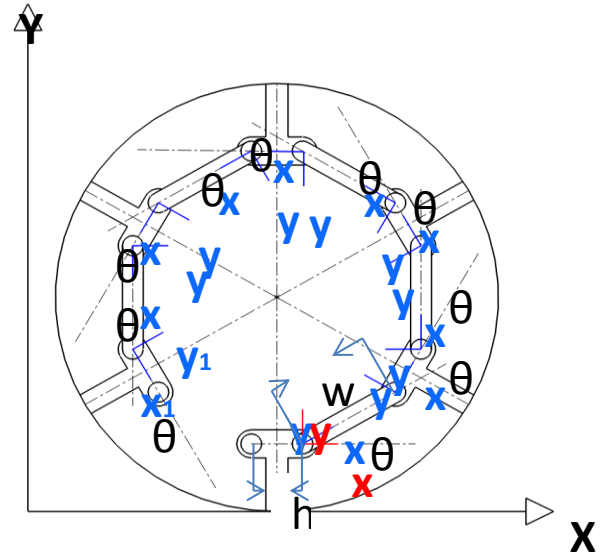
DH 表示法 4 參數意義闡釋：

a_i ：沿 x_i 軸量測 z_{i-1} 與 z_i 軸的距離

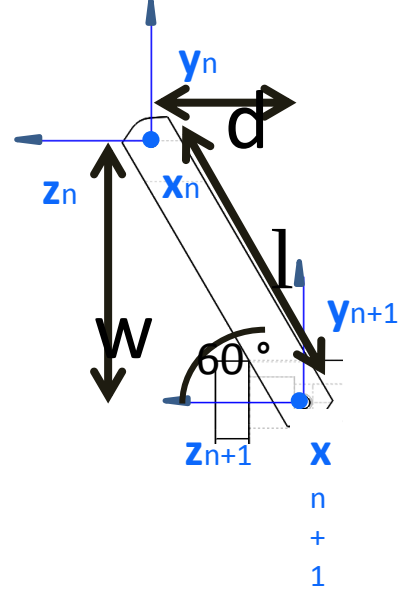
α_i ：垂直於 x_i 軸的平面，量測界於 z_{i-1} 與 z_i 軸的角度

d_i ：沿 z_{i-1} 軸量測 o_{i-1} 到 x_i 與 z_{i-1} 軸交叉點的距離

θ_i ：垂直於 z_{i-1} 軸的平面，量測從 x_{i-1} 與 x_i 軸的角度



圖七、管道機器人的多節連桿系統座標系



圖八、關節連桿

對任何機器人的結構來說，座標系的轉換幾乎是僅用角度為變數的矩陣來表示，然而其他三個參數多是由結構所決定，因此由第 i 個座標系到第 i+1 個座標系的轉換矩陣 T_i^{i+1} 可用式 (5) 來表示。其中式中的 s 是代表 $\sin$ ，而 c 是代表 $\cos$ 。

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & a_i s\theta_i \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

假設有一個在第 i 座標系的位置向量 P^i ，則其在第 i+1 座標系上的表示方式就如式(6)所示。

$$P^{i+1} = T_i^{i+1} P^i \quad (6)$$

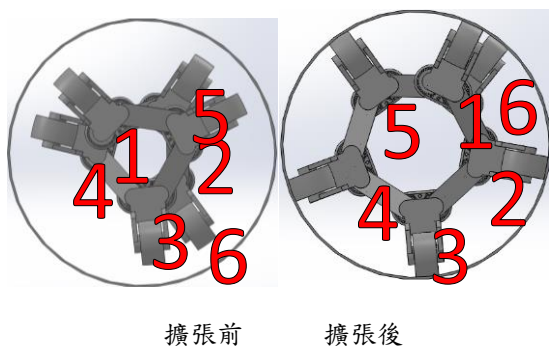
上面推導出了機器人的轉換矩陣，下方圖為九為依據機構給定的各個參數的列表。

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	w	d	θ_2
3	0	h	0	θ_3
4	0	w	d	θ_4
5	0	h	0	θ_5
6	0	w	d	θ_6
7	0	h	0	θ_7
8	0	w	d	θ_8
9	0	h	0	θ_9
10	0	w	d	θ_{10}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

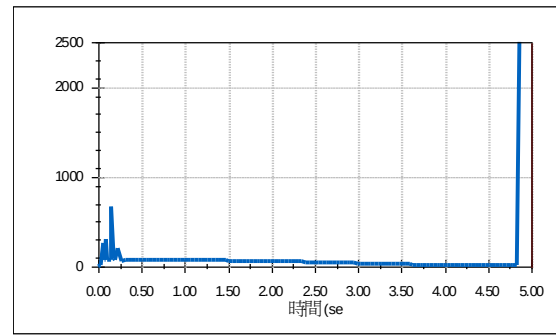
圖九、機構參數

III. 結果與討論

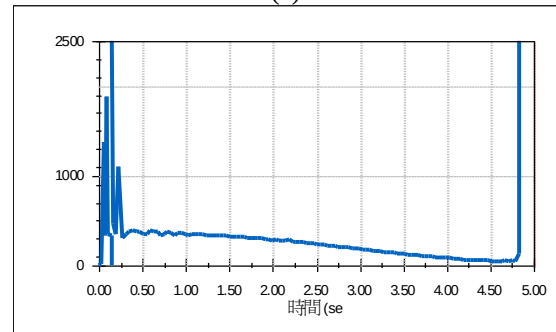
使用 Solidworks 模擬機構擴張狀態，如圖十，前為擴張前，後為擴張後。由此可見擴張後機構可以跟管內壁貼合沒有歪斜的問題，由下方圖表十一所示，很明顯的可以看出在起始時，因機構本身為多節連桿的結構，形狀成環繞的方式，因此在擴張時，每個小節的馬達的轉矩也會有所不同，且由於是多連桿結構，彼此之間會互相影響馬達旋轉所承受的力量，進而造成類馬達在擴張時曲線的不同，如同 Joint 1 與 Joint 6 由於僅有一側連接到其他小節單元，因此在中間區間上馬達需輸出的受力較小，然而相對的 Joint 4 的馬達在擴張時需輸出更大的扭力，因其處於需承受較多力的位置，在曲線最後個小節的馬達扭力，以近乎垂直的成長，因為在擴張至輪子貼合管壁時，為了擁有可以固定在管上的力量，馬達將持續輸出，但由於已達內管徑最大值，因此導致曲線成現此成長，圖十二、十三為實測圖。



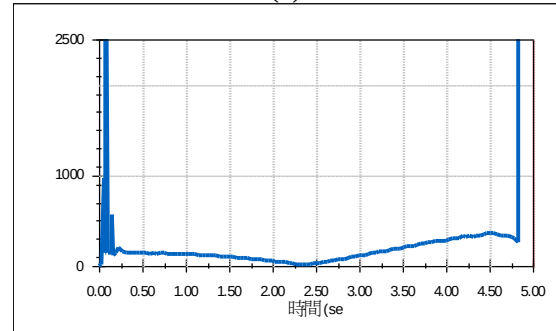
圖十、Solidworks 動作模擬擴張



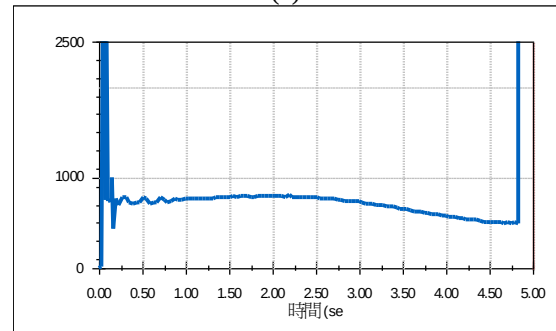
(a)



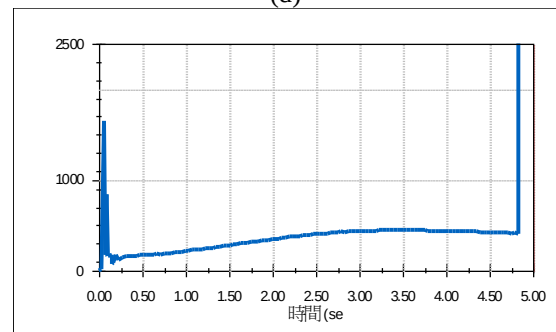
(b)



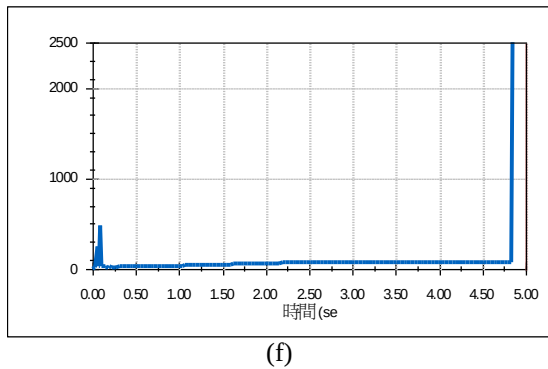
(c)



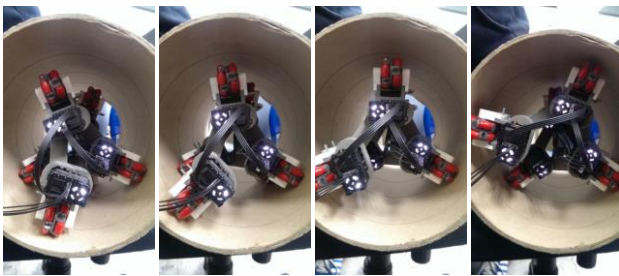
(d)



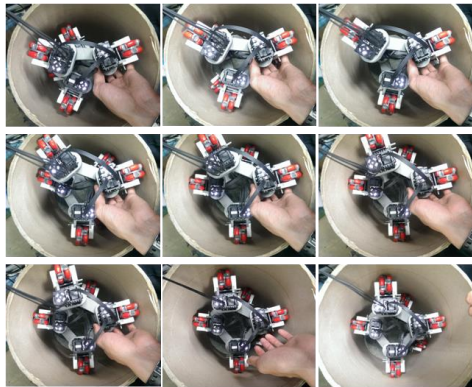
(e)



圖十一、擴張各軸關節受力情況(a) Joint1 (b) Joint2 (c) Joint3 (d) Joint4 (e) Joint5 (f) Joint6



圖十二、實測水平管擴張情況



圖十三、實測垂直管擴張情況

IV. 結論

本目的是為了開發管道檢測機器人，用以輔助人員進行管道檢測的作業，節省在管道檢測工程內的各項花費，計畫的內容是針對機構進行改善修正，傳統型的管道機器人在管徑的擴張上皆受到管徑的限制影響，且過彎時不順暢，會導致管道機器人卡在管內，造成更多不必要的麻煩與花費，且過彎皆會有輪子空轉的問題，為解決這些問題，必須從機構下手修正，目前的研究成果提供了一種類似彈簧型態的機構設計，此種型態的機構，有別於以往的多節管道機器人，由於各軸的擴張角度皆相同，且皆是對同一軸進行旋轉，省去了複雜的姿態控制，如：蛇型管道機器人，由於使用輪子與管道垂直相切驅動，使管道到機器人相較於蛇型有擁有更高的前進效率。環繞的特殊機構，可使機器人不受制於機構本身大小而限制機器人適應的管徑範圍，若管徑過大導致機器人無法環繞超過一圈半，僅需增加小節數便可擴張至更大。由於在兩單元間的連接桿是可活動的，在過彎時相較於輪型與履帶型機器人有更佳的靈活性，但必須採

用旋轉的方式過彎，因為小節與小節的自由度式有限的，會受制於每單元連接桿能移動的方向。

參考文獻

- [1] Josep M. Mirats Tur, and William Garthwaite, "Robotic Devices for Water Main In-Pipe Inspection: A Survey," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 4, pp. 491-508, July 2010.
- [2] Edwin Dertien, Mohammad Mozaffari Fomashi, Kees Pulles, and Stefano Stramigioli. "Design of a robot for in-pipe inspection using omnidirectional wheels and active stabilization," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, Hong Kong, 31 May-7 June. 2014, pp. 5121-5126.
- [3] <http://www.inuktun.com>
- [4] Andreas Zagler, and Friedrich Pfeiffer, "'MORITZ'" a Pipe Crawler for Tube Junctions," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Taiwan, Sep. 14-19. 2003, pp. 2954-2959.
- [5] Seungho Kim, Chang Hoi Kim, Yeong-geol Bae, and Seyoung Jung, "Development of spiral driven type mobile robot for NDT inspection in small pipes of thermal power plants," in *Proc. Intern ational Conference on Control, Automation and Systems*, Korea, Oct. 20-23. 2013, pp. 924-928.
- [6] T. Tomita, T. Tanaka, and T. Nakamura, "D Development of a peristaltic crawling robot for long-distance sewer pipe inspection with consideration of complex pipe line," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Hamburg, Sep. 28-Oct. 2. 2015, pp. 2742-2747.
- [7] Toshimichi Baba, Yoshihide Kameyama, Tetsushi Kamegawa, and Akio Gofuku, "A snake robot propelling inside of a pipe with helical rolling motion," in *Proc. SICE Annual Conference 2010*, Taiwan, Aug. 18-21, pp. 2319-2325.
- [8] Hsiang-Pin Yang, Kuo-Yang Tu, Harutoshi Ogai, "Development of a Pipe Inspect Robot with Multiple Movements," *Institute of System Information and Control National Kaohsiung First University of Science and Technology*, May. 2012, pp. 1-51.

設施核種遷移機制與參數實驗方法精進之研究

On the study of improving the radionuclide migration experiment technique and their transport mechanism for radioactive waste

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-006 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蔡世欽

e-mail：sctsai@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：江佳蓉

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

本研究為兩年的研究計畫，主要是整合過去國內外核種遷移參數室內實驗之最新精進分析技術，以克服高吸附性核種長時間耗時遷移實驗之困難。此外，本研究利用同步輻射中心提供之 XANES(X 光吸收近邊緣結構)及科技部貴儀中心的 X 光光電子能譜儀(XPS)等材料分析技術，分析吸附於地質材料的核種價態，以進一步了解核中遷移過程中的遲滯特性及反應機制。去年第一年初步的成果顯示：XANES 及 XPS 的光譜分析可以鑑別吸附於地質材料不同氧化態的鈾核種，可進一步瞭解核種與固相材料地質材料之間反應的基本特性。本年度為第二年，主要進行以下幾項研究工作：(1)以三種擴散模型分析碘離子穿透擴散實驗，可以在實驗未達到穩態時獲得有效的擴散參數；(2) 利用 RBS(拉瑟福背向散射技術)分析內擴散實驗之濃度分布曲線，求出擴散係數。研究結果顯示：三種模式所得到碘的有效擴散係數 (D_e) 分別介於為 2.87×10^{-12} 至 $4.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 之間，差距在一個級數之內相當接近，確認不同模型所獲得之擴散參數有相當的一致性。RBS 證實可以利用內擴散法的優點，在擴散進行至暫態時即可由擴散分布曲線來推算擴散係數。這些結果對於高放射性廢棄物處置安全評估使用核種遷移參數時提供十分重要的參考依據。

關鍵詞：高放射性廢棄物、穿透擴散、拉瑟福回向散射技術

Abstract

The works of this two-year research project are to conform the improved analysis techniques of measuring coefficients of radionuclides migration in laboratory to overcome the measurement difficulties of radionuclide diffusion with high absorption which is long time consuming. In addition, we develop XANES (X-ray absorption near edge structure) technique provided from NSRRC and XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) from Instrumentation Center/MOST to study the valance of nuclides adsorbed on the materials to further investigate the reaction mechanism of the nuclide migration process. The results of this study in the first year showed that XANES and XPS techniques

could analyze and differentiate the valances of Uranium adsorbed on geological materials. This year is the second year for this project, we conducted two works, which included: (1) Develop three different models to obtain the diffusion coefficient from through-diffusion by analyzing the concentration changes of high concentration and low concentration regions of diffusion cell while the diffusion process in non-steady state; (2) Develop concentration profile analysis method from in-diffusion experiment by RBS(Rutherford Backscattering Spectrometry). The results showed that the effective diffusion coefficients of I- ions for three different models of through diffusion are between 2.87×10^{-12} to $4.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$, which were of a similar order of magnitude. The results also nicely demonstrates the use of RBS to determine diffusion profiles for Cs in granite. These results showed very important fundamental characters of nuclides/mineral reaction, which would be valuable references for the usage of radionuclide migration parameters to the evaluation of high-level radioactive wastes disposal safety.

Keywords: High-level Radioactive Wastes, Through Diffusion, Rutherford Backscattering Spectrometry

I. 前言

圖 1.1 為整體高放射性廢棄物核種遷移實驗實施方法之規劃。其中，本計畫即是其中實驗方法標準化的精進及固相吸附物種的分析這兩項研究。本計畫為期兩年，今年為第二年。在第一年的工作中主要進行 XANES 及 XPS 分析，以蒙脫石(montmorillonite)純礦物材料進行測試，建立含有不同正六價及正四價鈾氧化物標準樣品的光譜，然後再以本研究各種材料的吸附樣品來進行比對。而本年度主要針對 TD 穿透擴散實驗方法的精進及驗證，以及建立 RBS 內擴散的實驗技術為主。室內實驗室量測核種擴散係數大都是以穿透擴散實驗(through-diffusion, TD)為主，這個方法可以量測核種在多孔地質材料中的有效擴散係數 D_e 及遲滯因數，然而整個穿透擴散過程需要長達一年以上甚至數年，方能得到穩態擴散曲線進行分析，對於 U, Np, Pu, Am, Cm 等錒系核種，這些核種價數多，對氧化還原環境極為敏感、生成的化合物形態複雜且很難量測，遷移速度又極為緩慢，在維持實驗條件及度量方面都會面臨困難。日本原子力研究開發機構

(NUMO)在平成 24 年(2012 年)的研究報告中(參考文獻 1)，彙整核種遷移參數實驗及模式研究實施方法，提出參數實驗方法精進與核種遷移機制分析的整合建議，如圖 1.2 所示。圖中所提擴張型 TD 及擴張型 RD 就是修正後的 TD 擴散實驗技術。Zhang(參考文獻 2)，Chen(參考文獻 3)等人則進一步提出理論模式及解析解。本研究整合這些解析解及其擬合分析，先以碘離子的擴散實驗來予以驗證。因為 I-129 (半化期 1.6×10^7 年)是用過核子燃料中的重要核種。I-129 在地下水環境中主要是 I^- ，陰離子型態。由於擴散實驗的注入槽或擴散槽有固定濃度(Constant Concentration, CC) 或可變濃度(Variable Concentration, VC)兩種條件，因此本研究設計三種不同模型(即 CC-CC、CC-VC 和 VC-VC)之擴散實驗，分別探討 I^- 在壓實膨潤土塊中的擴散參數，並對不同模型之結果進行交互比對與驗證。

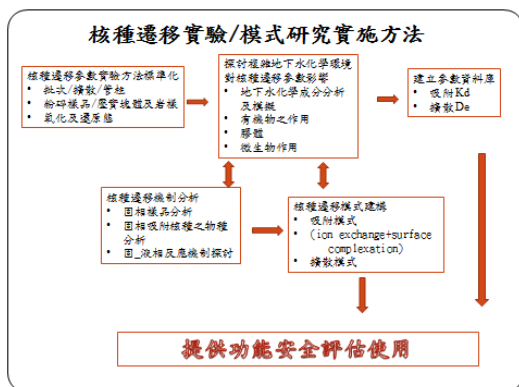


圖 1.1 整體核種實驗實施方法之規劃

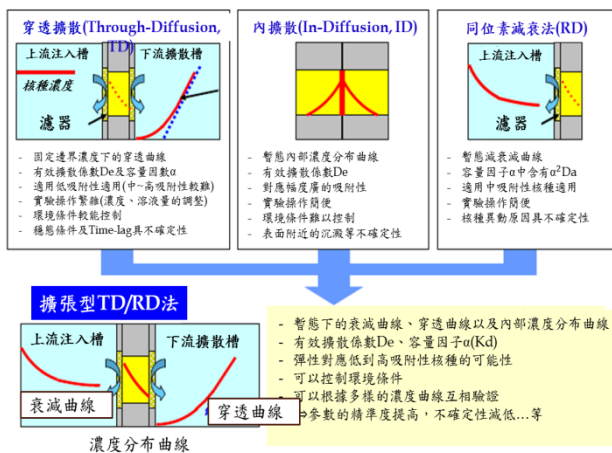


圖 1.2 日本 NUMO 報告建議之精進及整合核種擴散實驗方法(參考文獻 1)

另一方面，內擴散(in-diffusion, ID)也是本研究納入整合的擴散實驗方法(參考文獻 4、5)。內擴散法的優點

是擴散在暫態時，即可由擴散分布曲線來推算擴散係數，時間較為節省，但是內擴散曲線不易度量，過去的研究大部分須將實驗試體削成薄片後個別度量其活度，這適用於壓實黏土或沉積岩試體，對於花崗岩類的樣就不適合，而且削片試樣濃度度量時的誤差較大，相對所推算的擴散係數也較不準確。本研究利用本中心(原科中心)加速器實驗室提供的拉瑟福回向散射技術(RBS)，來量測這項技術是將阿伐粒子加速後撞擊標靶，由量測回跳之阿伐粒子能量變化，再藉著能譜分析軟體，可進一步求出擴散係數。

II. 主要內容

2.1 三種擴散模型之穿透擴散實驗及分析模式

本研究參考 Chen 等人提出修正的穿透擴散實驗及分析模式(參考文獻 3)，此模式包括三組不同的起始及邊界條件如圖 2.1，其中，

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

代入上述三個模式的起始及邊界條件，經過拉普拉斯轉換等方法，可分別解出高低濃度區的濃度隨時間變化函數 $C_A(t)$ 及 $C_B(t)$ ，將這兩個濃度隨時間變化作圖，可推算出對應的擴散係數如表 2.1(參考文獻 3)。

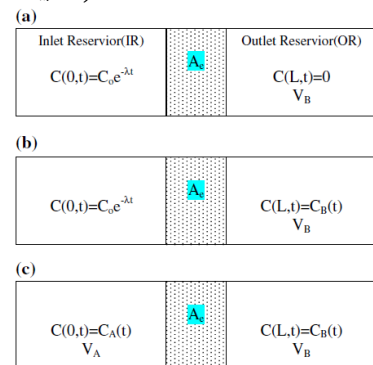


圖 2.1 穿透擴散實驗三組不同的起始及邊界條件修正分析模式(參考文獻 3)

表 2.1 三組穿透擴散分析模式對應的解析解及擴散係數(參考文獻 3)

Table 8 Summary of three through-diffusion models and proposed methods for D

Diffusion model	Equation	Plotting	D
CC-CC model	$\frac{C}{C_0} = \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi x}{2L} e^{-\frac{n^2\pi^2 D t}{4L^2}}\right) e^{-\lambda t}$	CC-CC method	$D = -\frac{d \ln C}{d \ln t}$
	$\frac{C}{C_0} = \frac{M_1}{p+1} e^{-\lambda t} + \frac{L}{2\sqrt{D\lambda}} \left\{ \coth\left(\frac{x}{2}\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) - \tanh\left(\frac{x}{2}\sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n\pi} e^{-\frac{n^2\pi^2 D t}{4L^2}} e^{-\left(\frac{n^2\pi^2 D}{4L^2} + \lambda\right)t} \right\}$	$\frac{C}{C_0}$ v.s. $e^{-\lambda t}$	
CC-VC model	(1) Semi-analytical solution $\frac{C}{C_0} = \frac{1}{p+1} \left\{ \cosh(mx) - \frac{M \cosh(mL_2) + \cosh(mL_1)}{M \cosh(mL_1) + \cosh(mL_2)} \sinh(mx) \right\}, \frac{C}{C_0} = \frac{M}{p+1} \frac{M \cosh(mL_2) + \cosh(mL_1)}{M \cosh(mL_1) + \cosh(mL_2)}$ where $M = \frac{m^2 D}{V_1(V_1+V_2)}$ and $m = \sqrt{\frac{V_1+V_2}{D}}$ (2) Analytical solution $\frac{C}{C_0} = e^{-\lambda t} + \frac{\alpha V_1}{2\beta} (V_1 - V_2) - \frac{1}{2} (V_1 + V_2), \frac{C}{C_0} = e^{-\lambda t} + \frac{\alpha}{2\beta} (V_1 + 2V_2) (V_1 - V_2) - \frac{1}{2} (V_1 + V_2)$ where $\gamma_1 = e^{-\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} + \frac{1}{V_1 V_2}\right)t}$, $\gamma_2 = e^{-\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} + \frac{1}{V_1 V_2}\right)t}$, and $\beta = \sqrt{\alpha^2 (V_1^2 + 4V_2^2)}$	CC-VC method	$D = -\frac{d \ln C}{d \ln t}$
	$\ln \left[1 - \frac{C}{C_0} e^{\lambda t} \right]$ v.s. t		
VC-V model	(1) Semi-analytical solution $\frac{C}{C_0} = \frac{M_1 V_1}{(p+1)M_1 V_1 + (p+1)M_2 V_2}, \frac{C}{C_0} = \frac{V_1}{(p+1)M_1 V_1 + (p+1)M_2 V_2} [M_2 \cosh(m_1 L) + \sinh(m_1 L)]$ where $M_2 = \frac{M_1 \cosh(m_1 L) + \sinh(m_1 L)}{M_1 \cosh(m_1 L) + \sinh(m_1 L)}, M_1 = \frac{m_1^2 D}{V_1(V_1+V_2)},$ and $m_1 = \sqrt{\frac{V_1+V_2}{D}}$ (2) Analytical solution $C_A = \frac{V_1 C_0}{V_1} \left\{ e^{-\lambda t} + \frac{(V_1 - V_2) \left[-V_1^2 V_2 + 2V_1^2 V_2 - V_1 V_2 V_2 + V_1 V_2^2 - 2V_2^2 V_2 \right]}{2\beta V_1} + \frac{\beta (V_1 + V_2) (V_1 + V_2)}{2\beta V_1} \right\}$ $C_B = \frac{V_2 C_0}{V_2} \left\{ e^{-\lambda t} + \frac{(V_1 - V_2) \left[V_1 V_2 + 2V_1 V_2 + 2V_2 V_2 - \beta (V_1 + V_2) \right]}{2\beta V_2} \right\}$ where $V = V_1 + V_2$, $\alpha = \frac{\alpha D}{V_1}$, $\beta_1 = \sqrt{V_1^2 V_2^2 - 2V_1^2 V_2 V_2 + V_1^2 V_2^2 + 4V_1^2 V_2^2}$, $\gamma_1 = e^{-\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} + \frac{1}{V_1 V_2}\right)t}$, and $\gamma_2 = e^{-\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2} + \frac{1}{V_1 V_2}\right)t}$	(1) VC-VC method $D = -\frac{d \ln C}{d \ln t}$ (2) VC-VC IR method $D = -\frac{\alpha d}{\lambda} \frac{V_1 V_2}{(V_1 + V_2)}$ (3) VC-VC OR method $D = -\frac{\alpha d}{\lambda} \frac{V_1 V_2}{(V_1 + V_2)}$	

2.2 RBS 內擴散實驗

圖 2.2 為清華大原科中心加速器實驗室 RBS 的構造示意圖。一束能量為 2MeV 能量的阿伐粒子由左側加速射入後，先行進入真空度維持在 10^{-7} torr 以下的腔室 (chamber)，然後垂直地轟擊待測靶材的表面；另在與入射阿伐粒子呈 θ 夾角 (一般設定在 160°) 方向之處，則安裝有矽晶面障式偵測器 (silicon surface barrier detector)，用以收集經由靶材背射而來的阿伐粒子，然後再將該訊號依序傳送至放大器 (amplifier)、多頻道分析儀 (multiple channel analyzer, 簡稱 MCA)、與個人電腦 (personal computer) 進行能譜分析工作。

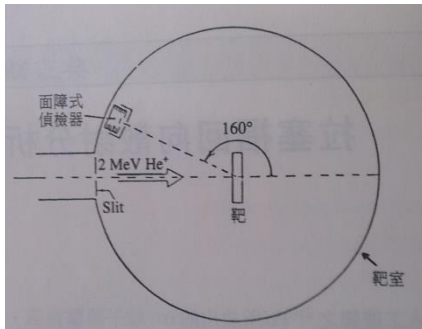


圖 2.2 RBS 基本裝置圖(參考文獻 6)

本研究以 Cs 離子進行花崗岩擴散的 RBS 能譜分析。實驗以 CsNO_3 配置成 10^{-2}N 溶液，然後分別置入花崗岩薄片進行擴散，擴散時間為 14 天。之後取出試體靜置風乾後，以 RBS 裝置進行分析。因為花崗岩為非均質的材料，因此每個試體分別取三處來進行 RBS 分析。花崗岩材料的化學組成是 K, Na, Mg, Ca 的鋁矽酸鹽，截止能譜大致分在 1.5MeV 以下，而 Cs 的截止能譜大致在 1.8 MeV 左右，因此可以與花崗岩材料元素明顯鑑別。

III. 結果與討論

3.1 三種擴散模型之穿透擴散實驗及分析結果

本實驗分別以 KI 來備製 I 載體，並以離子層析儀(IC)進行物種分離及濃度分析，在 10-1000 ppm 間的檢量線

迴歸值均達到 0.99 以上。實驗結果如圖 3.1 至圖 3.5，及表 3.1 實驗結果顯示：對 I 離子而言，三種模式所得到的有效擴散係數 (D_e) 分別介於為 2.87×10^{-12} 至 $4.61 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ 之間，差距在一個級數之內相當接近。本研究結果確認不同模型所獲得之擴散參數有相當的一致性，未來可以將之應用於高吸附性，擴散緩慢的核種，節省人力、物力與時間，提升核種擴散係數之可靠度與信心度。

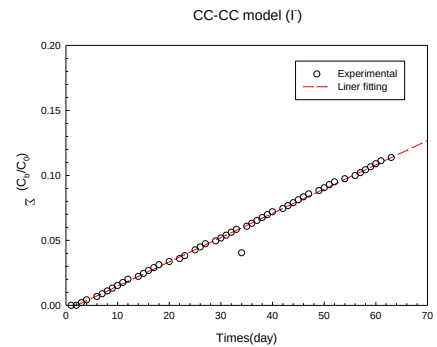


圖 3.1 CC-CC 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析

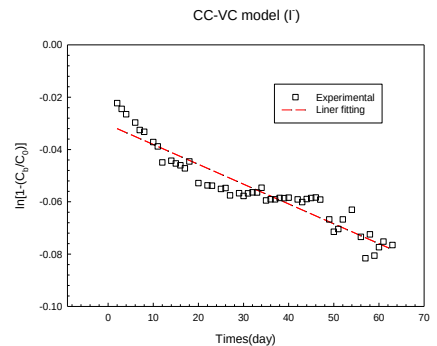


圖 3.2 CC-VC 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析

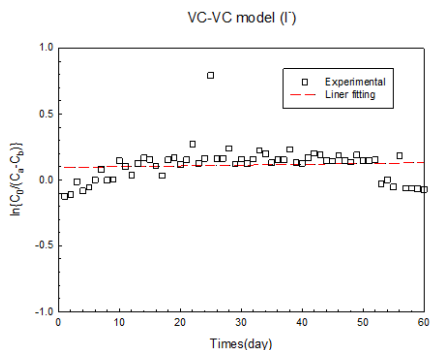


圖 3.3 VC-VC 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析

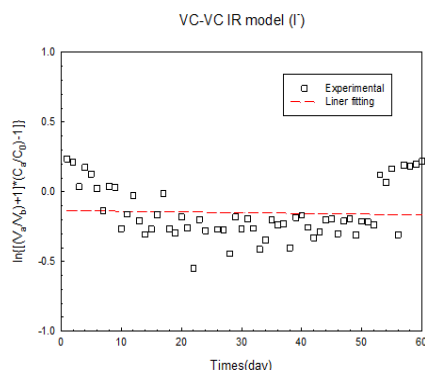


圖 3.4 VC-VC IR 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析

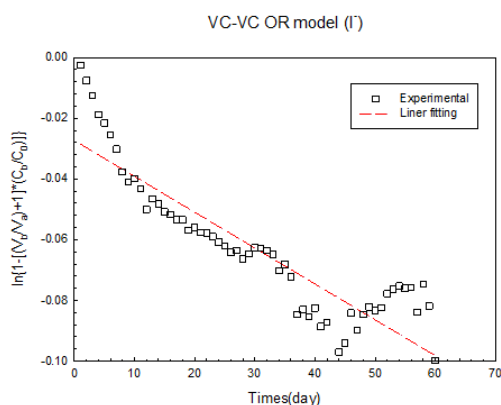


圖 3.5 VC-VC OR 模式之實驗結果及解析解擬合曲線分析

表 3.1 三種擴散模型獲得之有效擴散係數

擴散模型	有效擴散係數(D_e , 單位 m^2/s)
CC-CC	2.87×10^{-12}
CC-VC	5.62×10^{-13}
VC-VC	4.61×10^{-13}
VC-VC (IR)	4.03×10^{-13}
VC-VC(OR)	9.15×10^{-13}

3.2 RBS 內擴散實驗結果

圖 3.6 為花崗岩試片上三個位置的 Cs 能量分布。根據 RBS 理論顯示 Cs 有往試體深度擴散的現象。三個位置中,第二及第三個位置(黑點及紅點)的擴散行為較一致,而與第一個位置(綠點),這可能是因為 Cs 被不同位置的

礦物吸附後所導致的結果。此擴散現象可以用一個半無限擴散數學模式來予以解析。假定邊界條件花崗岩試片表面的銫離子濃度 $C = C_0, x = 0, t > 0$, 無限遠處 $C = 0, x \rightarrow \infty, t > 0$, 起始條件 $C = 0, x > 0, t = 0$ 。因此可以解出試片中銫離子的濃度 $C(x,t)$ 為, 如(3.1)及(3.2)式之誤差及誤差互補函數(參考文獻 7):

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (3.1)$$

$$1 - \frac{C(x,t)}{C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (3.2)$$

$$\operatorname{erf}^{-1}\left\{1 - \frac{C(x,t)}{C_0}\right\} = \frac{1}{\sqrt{4Dt}}x \quad (3.3)$$

經過整理後以(3.3)式繪圖, 其直線斜率為 $\frac{1}{\sqrt{4Dt}}$, 可以據此分析出擴散係數 D 值, 如圖 3.7。

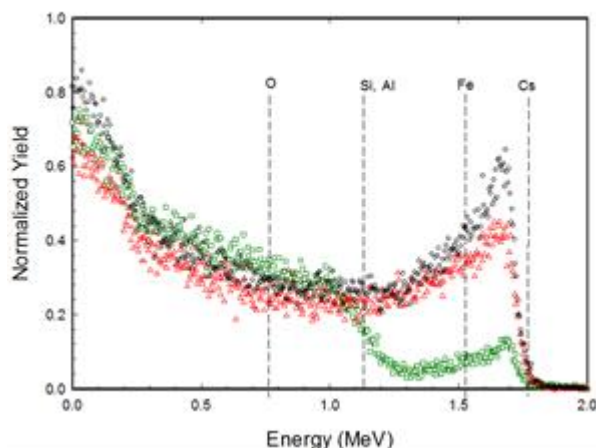


圖 3.6 花崗岩試片上三個位置的 Cs 能量分布

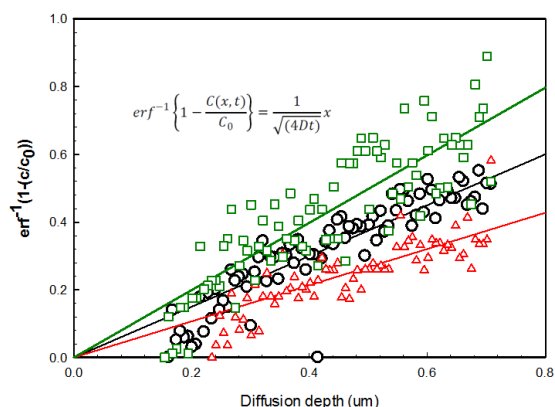


圖 3.7 花崗岩試片上三個位置 Cs 的擴散係數分析

由圖 3.7 推算出 Cs 的擴散係數分別為 $2.06 \times 10^{-19} m^2 s^{-1}$ 、 $3.58 \times 10^{-19} m^2 s^{-1}$ 及 $7.19 \times 10^{-19} m^2 s^{-1}$, 數值均在同一個數量

級， 10^{-19} 。由 RBS 獲得核種在花崗岩材料的擴散係數，相關研究報告可以比較的很少。Alonso 等人曾經利用 RBS 進行 Eu、Re 及 U 在黏土岩層中的擴散研究(參考文獻 3)，其結果在 $10^{-15}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 到 $10^{-17}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 之間。相較於黏土岩層，花崗岩可視為非均質孔隙介質(non-homogeneous porous material)，孔隙率低且孔隙間區繞度高，因此其擴散係數可能會比低於黏土層中的測量結果。由於 RBS 確實可以利用內擴散法的優點，在擴散進行至暫態時即可由擴散分布曲線來推算擴散係數，時間較為節省，本研究是以建立技術為首要目標，後續研究中將在不同實驗條件下探討各個核種的擴散結果。

IV. 結論

核種遷移是評估核廢料處置是否安全最重要的課題。本研究為兩年的研究計畫，以精進核種遷移實驗及分析技術為目標。在第一年研究成果中，探討核種於地質材料的吸附物種及吸附機制。初步結果顯示：對典型一價銻核種的吸附，XANES 及 XPS 均一致顯示吸附結果為一價物種；對可能形成不同價數化合物的鈾核種，XANES 及 XPS 的光譜也可以進行鑑別，這些分析成果對於進一步探討核種遷移過程中的遲滯特性及吸附反應，提供相當重要的參考資訊。本年度為第二年，主要工作在建立三種擴散模型之穿透擴散實驗及分析模式，以及利用 RBS 建立內擴散的實驗及分析技術。實驗結果顯示：對 I 離子而言，三種模式所得到的有效擴散係數(D_e)分別介於為 2.87×10^{-12} 至 $4.61 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$ 之間，差距在一個級數之內相當接近；RBS 證實可以利用內擴散法的優點，在擴散進行至暫態時即可由擴散分布曲線來推算擴散係數。透過本研究對擴散參數實驗方法的精進，可以解決國內最終處置核種遷移實驗參數取得之技術問題，節省人力、物力與時間，提升核種擴散係數之可靠度與信心度。

參考文獻

- [1]. 独立行政法人日本原子力研究開発機構，地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書，平成 24 年 3 月。
- [2]. Zhang M., et al, 2006, "Determining the transport properties of rock specimens using an improved laboratory through-diffusion technique. In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 932 : 135-142.
- [3]. Chen, C.L., et al, 2014, "Intercomparison of diffusion coefficient derived from the through diffusion experiment using different numerical methods," J Radioanal Nucl Chem 300:393-407.
- [4]. U. Alonso, et al, 2009, "Diffusion coefficient measurements in consolidated clay by RBS micro-scale profiling", Applied Clay Science 43 : 477-484.
- [5]. Alonso, U., et al, 2003, "Study of the contaminant transport into granite microfractures using nuclear

ion beam techniques," Journal of Contaminant Hydrology, 61: 95- 105

- [6]. 吳秀錦，拉瑟福回向散射分析及其應用，材料分析，十五章，413-432 頁，民國八十七年。
- [7]. J. Crank, The Mathematics of Diffusion, 1975.

核廢料於吸附及緩衝材料之微結構分析

The crystallographic study of radwaste absorbed on buffer materials

計畫編號： MOST- 105-2623-E-007-007 -NU

計畫類別： ☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫主持人：李志浩

e-mail：chlee@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：李志浩、劉衛蒼

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

本研究主要是利用同步輻射光以微結構分析角度，來探討蒙托土(Montmorillonite)及膨潤土緩衝材料吸附機制及作用原理，並開發新型核種吸附材料，合成適當無機化合物來吸附核種，探討其吸附機制及原因。結合第一原理計算實施理論計算，以量子力學之密度泛函理論為基礎，進行電子結構計算和分子動力學模擬，利用市售模擬套裝密度泛函理論軟體 VASP 來計算放射性核種吸附於材料之電子結構，計算鍵結能量、電荷密度分佈、能帶、電子態密度等數據，瞭解吸收機制。比較實驗與理論計算之結果，確認合成之吸附材料與放射性核種吸附機制，進而可以預測吸附材料在不同環境如溫度及濃度下之吸附能力，進一步研發針對不同放射性元素之吸附材質，將有益於放射性廢料最終處理。

關鍵詞：同步輻射光，微結構分析，密度泛函理論，核廢料吸附。

Abstract

To understand the chemical bond between the radwaste isotopes and soils is the key to predict the retention of nuclide ion under long term storage. In this work, Montmorillonite and bentonite (MX-80) are the rock of interest since they are potential host soils for radioactive waste repository in Taiwan. The synchrotron radiation X-ray absorption spectroscopy and X-ray diffraction study was carried out to understand the microstructure of radwaste absorption on buffer materials. First principle calculation using density function theory is to predict the chemical structure of the absorption system. In addition to study these soils, we would like to synthesis new sorption material for the isotopes of fission products.

Keywords: synchrotron radiation, crystallography, density function theory, radwaste absorption.

I. 前言

放射性核種吸附及緩衝材料有助於核廢料最終處置，目前瑞典採用膨潤土(Bentonite, MX-80)作為緩衝材料，原因為膨潤土具有高傳導性、高密度、高飽和度、高離子吸附能力、高穩定性與回漲能力佳，對水之傳導性與介質之傳輸能力低。但卻發現常因核廢料罐之高溫，造成膨潤土劣化而尚失吸附放射性核種能力[1-24]。本研究以微結構分析角度，來探討緩衝材料(如蒙托土 Montmorillonite 膨潤土)劣化原因，另參考最新文獻[18]開發新型核種吸附材料(如 potassium niobate; $K_4Nb_6O_{17}$)，

現階段以研究吸附中期半衰期放射性元素(如 ^{137}Cs)為主要目標，合成適當無機化合物來吸附核種，探討其吸附機制及原因。 $K_4Nb_6O_{17}$ 為一種人工合成岩石“SYNROC”。它具有層狀結構，當其內部離子與廢料離子交換後，其晶格起了變化，結構變強，可以將廢料核種永久鎖於其晶格內。但是此一材料太貴一點，最有名的 SYNROC 為 $Na_2Al_2Ti_6O_{16}$ freudenbergite 結構，[25-27] 亦為陶瓷結構，不像常用處理核廢料之硼玻璃經照射後會有結晶析出之問題。但是 $Na_2Al_2Ti_6O_{16}$ 所含之鈉離子容易形成不穩定相而析出。 $K_4Nb_6O_{17}$ 則採用鉀以取代鈉，其形成相將較穩定。

核廢料於土壤及岩中微結構影響核廢料核種之遷移及離子交換之參數，分析核種與花崗岩或膨潤土或混凝土等之化學鍵結，在不同 pH 質及溫度下之值，為其基本性質。另以微結構出發並輔以第一原理計算(first principle)以評估微結構與核種吸附參數之關係。微結構之測量以 X 光繞射、散射及同步輻射 X 光吸收光譜術測定。其結果將與巨觀吸附值比較[21-23]，以便將來以第一原理計算核廢料吸附之持久性。

II. 主要內容

本研究為一年期研究計畫，以鈷核種為分析核種，實驗吸附材料為蒙托土(Montmorillonite)及懷俄明膨潤土(MX-80)，另參考文獻資料，由反應物 KOH 以及 Nb_2O_5 經水熱法合成 $K_4Nb_6O_{17}$ 奈米材料，研究 $K_4Nb_6O_{17}$ 材料吸附鈷及鉍情形。

要分析微奈米尺寸複晶材料，需要更強的 X 光源，同步輻射光源即是最佳的選擇，同步輻射光源之能量是可調整，當入射能量恰可足夠將某元素原子之內層電子激發時，原子內層電子吸收光子能量而躍升至外層空軌域時，會使原子吸收係數遽增，形成一個吸收邊緣能量，當原子之氧化數增加時，該原子之吸收邊緣能量位置，將會造成正能量偏移，此種分析方法稱為 X 光吸收近邊緣結構(XANES, X-ray absorption near edge structure)，可得知放射性原子與鄰近吸附材質之原子間鍵結數目及鍵結角度之間的關係，以及原子之價數等數據。另外，自吸收邊緣以上約 40 eV 一直延伸至 1 keV 的範圍，可見到一些振盪加在平滑的背景吸收曲線上，此種振盪圖形分析稱為延伸 X 光吸收精細結構分析法(EXAFS, extended range X-ray absorption fine structure)，可以測量吸附材料中對某一放射性原子與其周遭鄰近原子之鍵結長度及配位數目之情形。理論計算利用 VASP 程式進

行第一原理計算，計算合成無機物之最佳結構及鍵結強度，與實驗結果比較。

III. 結果與討論

蒙托土(Montmorillonite)及懷俄明膨潤土(MX-80)以及合成 $K_4Nb_6O_{17}$ 材料用於吸附鈾及鈾，鈾溶液採用六價 $UO_2(NO_3)_2$ 之ICP分析標準溶液，濃度稀釋至50ppm，鈾離子溶液由 $CsNO_3$ 配置濃度為0.01M， $K_4Nb_6O_{17}$ 材料吸附情形詳如表一所示，由表一得知對鈾、鈾吸附效果佳，特別對鈾吸附反應，作用1小時後其吸附比達 99%，研判其反應為沉澱而非吸附作用。

表一- $K_4Nb_6O_{17}$ 吸附核種吸附比

吸附核種	液相濃度	吸附比 ($C_0 - C_i$)/ $C_0 \times 100\%$ absorption rate (%)
U	4.35ppm	91
Th	0.02ppm	99
Cs	0.01M	10 分鐘內幾乎100%, 待測中

3.1 XRD 分析

利用同步輻射中心 17A 實驗站來收集樣品 XRD 圖譜，首先探討蒙托土在不同溫度中其結構變化情形，將圖譜轉為以銅靶波長(1.5418Å)為標準，變溫結果如圖一所示，在 X 光繞射角度為 5-8 度時，發現溫度大於 80°C 時其層間水結構開始變化，其峰強度由大變小，研判其層間水因加熱而變少；而在 150°C 後，其峰強度又增強，研判層間結構重組後讓其訊號又增強。針對吸附鈾之蒙托土進行變溫實驗，結果如圖二所示，發現溫度大於 100°C 時其層間水結構開始變化，原因研判也是其層間水因加熱而變少，所以在高溫(>100°C)使用蒙托土吸附核種時，會發現其結構產生變化，溫度是必須要考慮的因素之一。另探討吸附鈾之蒙托土改變不同 pH 值，結構是否會有影響，本實驗 X 光繞射位置並無明顯變化。

在室溫時探討含鈾土壤吸附鈾情形，發現含鈾之蒙托土及膨潤土樣品 X 光繞射角度值小於未含鈾之土壤，代表其含鈾土壤層間水之晶面間距變大；另對鈾之土壤樣品，僅在膨潤土土壤中造成層間水之晶面間距變大，但對蒙托土則造成層間水之晶面間距變小，原因待查證，結果可能是鈾離子較鈾離子尺寸大不易進入層間水，進一步需利用理論計算來證明。

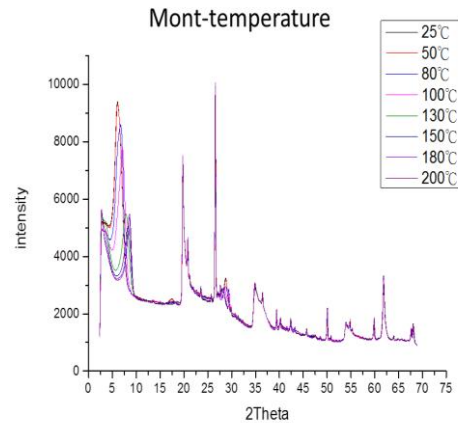
另對 $K_4Nb_6O_{17}$ 進行 XRD 分析，結果如圖三 所示，原 $K_4Nb_6O_{17}$ 之 d(晶格大小) 1.1040 nm，吸附 U 後 d 為 0.9110 nm，吸附 Th 後 d 為 0.9248 nm，晶格變小代表核種進入後容易包在其中，不易再釋出。

3.2 X 光吸收近邊緣結構 (XANES) 分析

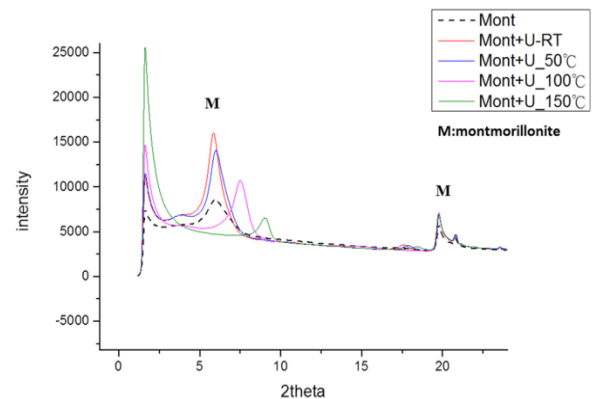
3.2.1 鈾核種吸附分析結果

利用國家同步輻射研究中心 7A 光束線實施鈾核種 XANES 分析，正規化 XANES 光譜圖如圖四所示，取正規

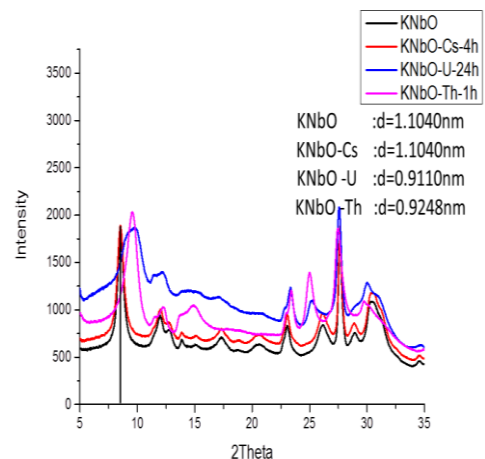
化後吸收曲線躍升處其斜率最大位置之能量點，將吸收曲線一階微分，取頂點處即是吸收邊緣能量位置，利用已知氧化鈾 UO_2 (17 170.815 eV)、 UO_3 (17 172.233 eV) 標準品吸收邊緣能量位置，來標定含鈾之蒙脫石(17172.861 eV)及膨潤土(17172.217 eV)吸收邊緣能量位置。



圖一 蒙脫土變溫XRD圖譜(2Theta:1-70)

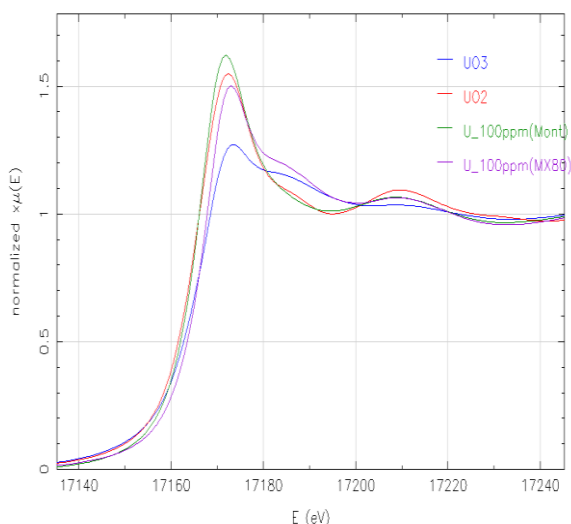


圖二 含鈾之蒙脫土變溫 XRD 圖譜



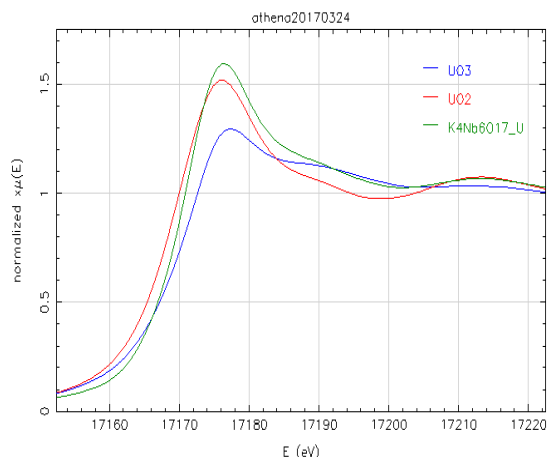
圖三 $K_4Nb_6O_{17}$ XRD圖譜

本實驗採用六價 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液與土壤反應，由結果顯示，鈾吸附於蒙脫石大於六價氧化態 0.628 eV，利用最小平方方法估計氧化態價數為 6.6，代表鈾吸附於蒙脫石失去電子產生氧化反應；另膨潤土其價數小於六價氧化態 0.016 eV，估計氧化態價數為 5.7，代表鈾吸附於膨潤土得到電子產生還原反應。



圖四 土壤吸附鈾 XANES 正規化光譜

利用已知氧化鈾 UO_2 (17170.072 eV)、 UO_3 (17172.440 eV) 標準品吸收邊緣能量位置，來標定含鈾之 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ (17171.415 eV) 吸收邊緣能量位置。本實驗採用六價 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 溶液與其反應，由圖五結果顯示，鈾吸附於 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 其價數介於四及六價氧化態，由最小平方方法估計氧化態價數為 5.0，代表鈾離子與 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 反應時鈾由原六價得到電子變為五價，呈現還原反應。

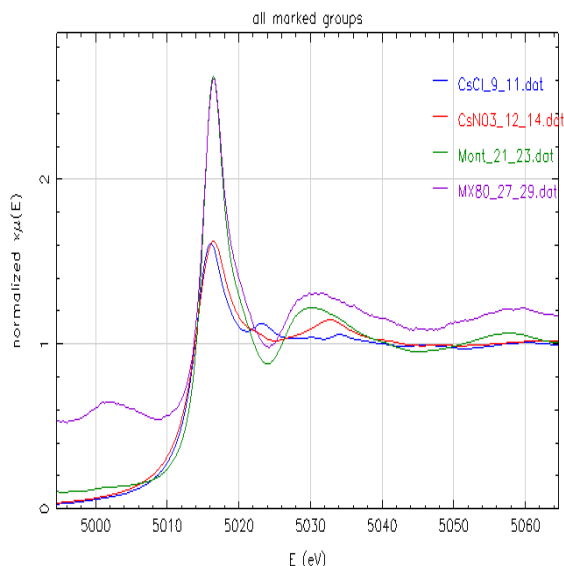


圖五 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 吸附鈾 XANES 光譜

3.2.2. 鉍核種吸附分析結果

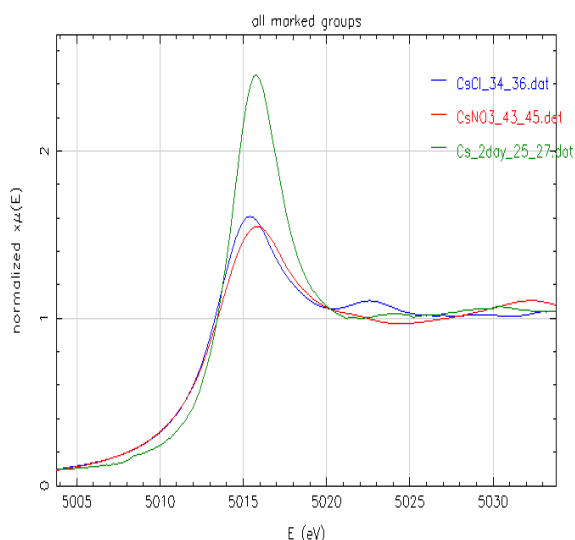
利用國家同步輻射研究中心 16A 光束線實施鉍核種 XANES 分析，土壤含鉍 L_3 能階之吸收曲線如圖六所

示，將鉍 L_3 能階之 XANES 光譜圖一階微分後，得知吸附鉍之蒙脫土及膨潤土，與標定用化合物 CsCl 、 CsNO_3 之氧化態價數相較，其氧化態均大於一價，代表鉍吸附於蒙脫石及膨潤土均會再多失去電子產生更強之氧化反應。



圖六 土壤吸附鉍 XANES 光譜

另探討 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 吸附鉍，其鉍 L_3 能階之 XANES 光譜如圖七所示。由圖得知吸附鉍之 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ ，與標定用化合物 CsCl 、 CsNO_3 之氧化態價數相較，其氧化態均大於一價，代表鉍吸附於 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 均會失去電子產生氧化反應。除了 Cs 外層價電子轉移之外，電子密度也轉移至其外界環境，足以證實 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 吸附鉍離子之強大效力。有鑑於尚無可用於量測鉍離子之 AA 光譜儀，利用 XANES 能譜圖之 edge-jump 數據來估計其中鉍離子濃度，其結果如表二：



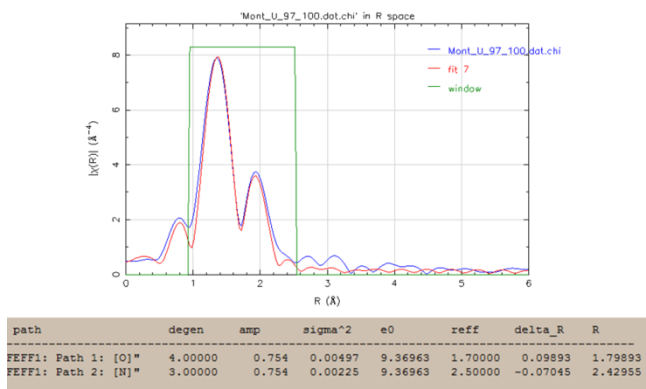
圖七 $\text{K}_4\text{Nb}_6\text{O}_{17}$ 吸附鉍 XANES 光譜

表二 利用XANES能譜圖之edge-jump 數據來估計其中鉍離子濃度

化合物	edge-jump	濃度	備註
CsCl	0.13-0.02=0.11	7.89×10^5	
CsNO ₃	0.22-0.03=0.19	6.82×10^5	
K ₄ Nb ₆ O ₁₇ -U	0.04-0.037= 3×10^{-3}	濃度太低 無法推估	

3.3 延伸 X 光吸收精細結構分析法 (EXAFS) 分析

含鈾之蒙脫土，利用國家同步輻射研究中心 7A 光東線實施鈾核種 EXAFS 分析，由圖八得知 U-O、U-N 鍵長 1.79 Å 及 2.44Å；配位數 4 及 3。本次實驗與相關文獻比較，U-O、U-O 鍵長 1.76 Å 及 2.44Å；配位數 2 及 6，結果不完全相同。其中 U-O 是代表吸附機制中何種鍵結，後續仍須再釐清。



圖八 蒙脫土吸附鈾 EXAFS 圖譜

3.4 第一原理計算結果

利用VASP程式進行第一原理計算，計算前須確定輸入之「INCAR」、「KPOINTS」、「POSCAR」、「POTCAR」及「Job-Vasp」(指行檔)內容，詳如附錄所示，其中「POSCAR」為各原子位置座標，其蒙脫土參考Pierre等人期刊之ICSD 26742資料標定蒙脫土之各原子位置。

KPOINTS 中 k 點越密越多，計算精度也越高，但計算成本也越高，本研究之蒙脫土及 K₄Nb₆O₁₇ 無機材料，其分子間均含數十個原子，計算時將會耗費大量運算時間及成本，如何簡約化使用 k 點的數目是需要探討。目前本研究仍在進行相關計算及演算，對蒙脫土 KPOINTS 運算結果如表三所示，計算結果 k 點僅需使用(4,2,1)即可，以結省計算成本，本研究後續將會持續進行其它參數計算，俾利與實驗結果比較，進而改良吸附材質成分。

表三蒙脫土 KPOINTS 運算結果

KPOINTS	E ₀ 收斂能量
(1,1,1)	-541.12437
(4,2,1)	-543.66484

(8,4,2)

-543.69406

IV. 結論

1. 蒙托土變溫實驗發現溫度大於 80°C 時其層間水結構開始變化，其峰強度由大變小，表示其層間水因加熱而變少；而在 150°C 後，其峰強度又增強，研判層間結構重組後讓其訊號又增強。

2. 另對吸附鈾之蒙托土進行變溫實驗，發現溫度大於 100°C 時其層間水結構開始變化，表示其層間水也因加熱而變少，所以在高溫(>100°C)使用蒙托土吸附核種時，其結構會產生變化，溫度之因素是必須要考量。

3. 由 XRD 圖譜得知，在 X 光繞射角度為 5-8 度時，發現含鈾之蒙托土及膨潤土樣品 X 光繞射角度值小於未含鈾之土壤，代表其含鈾土壤層間水之晶面間距變大；另對鉍之土壤樣品，僅在膨潤土土壤中造成層間水之晶面間距變大，但對蒙托土則造成層間水之晶面間距變小，原因待查證，結果可能是鉍離子較鈾離子尺寸大不易進入層間水。

4. 以水熱法合成 K₄Nb₆O₁₇ 人工岩石，並進行 XRD 分析，結果原 K₄Nb₆O₁₇ 之 d(晶格大小)1.104 nm，吸附 U 後 d 為 0.9110 nm，吸附 Th 後 d 為 0.9248 nm，晶格變小代表核種進入後容易包在其中，不易再釋出。

5. 由 XANES 光譜圖得知，鈾吸附於蒙脫石，其鈾氧化態大於六價 0.628 eV，利用最小平方方法估計鈾氧化態價數為 6.6，代表鈾吸附於蒙脫石失去電子產生氧化反應；另膨潤土其價數小於六價氧化態 0.016 eV，估計氧化態價數為 5.7，代表鈾吸附於膨潤土得到電子產生還原反應。

6. 蒙脫土及膨潤土含鉍，由 XANES 光譜圖得知吸附鉍之蒙脫土及膨潤土，與標定用化合物 CsCl、CsNO₃ 之氧化態價數相較，其氧化態均大於一價，代表鉍吸附於蒙脫石及膨潤土均會因失去電子產生氧化反應。

7. 在第一原理計算方面，原本計畫預計為期二年，後被減為一年期計畫，理論計畫原被規劃於第二年執行，目前尚在進行中，現僅確認蒙脫土各原子位置座標「POSCAR」及進行「KPOINTS」運算，後續仍為持續運算中。

參考文獻

- [1] Arai, Y., McBeath, M., Bargar, J.R., Joye, J., Davis, J.A., 2006. Uranyl adsorption and surface speciation at the imogolite — water interface: self-consistent spectroscopic and surface complexation models. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 2492 – 2509.
- [2] Bargar, J.R., Reitmeyer, R., Davis, J.A., 1999. Spectroscopic confirmation of uranium(VI)-carbonate adsorption complexes on hematite. *Environ. Sci. Technol.* 33, 2481 – 2484.
- [3] Brookins, D.G., 1984. *Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal*. Springer-Verlag, New York.
- [4] Catalano, J.G., Trainor, T.P., Eng, P.J., Waychunas, S.N., 1998. Crystal structure of the uranyl ion in the presence of water. *Am. Mineral.* 83, 1000 – 1008.

- G.A., Brown Jr., G.E., 2005. CTR diffraction and grazing-incidence EXAFS study of U(VI) adsorption onto α -AlO and α -FeO (1_1 02) surfaces. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 3555 – 3572.
- [5] Duff, M.C., Amrhein, C., Bertsch, P.M., Hunter, D.B., 1997. The chemistry of uranium in evaporation pond sediment in the San Joaquin Valley, California, USA, using X-ray fluorescence and XANES techniques. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 73 – 81.
- [6] Fortner, J.A., Kropf, A.J., Finch, R.J., Bakel, A.J., Hash, M.C., Chamberlain, D.B., 2002. Crystal chemistry of uranium(V) and plutonium(IV) in a titanate ceramic for disposition of surplus fissile material. *J. Nucl. Mater.* 304, 56 – 62.
- [7] Kelly, S.D., Kemner, K.M., Brooks, S.C., 2007. X-ray absorption spectroscopy identifies calcium-uranyl-carbonate complexes at environmental concentrations. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 821 – 834.
- [8] Langmuir, D., 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Prentice-Hall, New Jersey.
- [9] Liger, E., Charlet, L., Van Cappellen, P., 1999. Surface catalysis of uranium(VI) reduction by iron(II). *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 2939 – 2955.
- [10] O' Loughlin, E.J., Kelly, S.D., Cook, R.E., Csencsits, R., Kemner, K.M., 2003. Reduction of Uranium(VI) by mixed iron(II)/iron(III) hydroxide (green rust): formation of UO₂ nanoparticles. *Environ. Sci. Technol.* 37, 721 – 727.
- [11] Senko, J.M., Istok, J.D., Suflita, J.M., Krumholz, L.R., 2002. In situ evidence for uranium immobilization and remobilization. *Environ. Sci. Technol.* 36, 1491 – 1496.
- [12] Sherman, D.M., Peacock, C.L., Hubbard, C.G., 2008. Surface complexation of U(VI) on goethite (α -FeOOH). *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 298 – 310.
- [13] Sylwester, E.R., Hudson, E.A., Allen, P.G., 2000. The structure of uranium(VI) sorption complexes on silica, alumina, and montmorillonite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 2431 – 2438.
- [14] Thompson, H.A., Brown Jr., G.E., Parks, G.A., 1997. XAFS spectroscopic study of uranyl coordination in solids and aqueous solution. *Am. Mineral.* 82, 483 – 496.
- [15] Waite, T.D., Davis, J.A., Payne, T.E., Waychunas, G.A., Xu, N., 1994. Uranium(VI) adsorption to ferrihydrite: application of a surface complexation model. *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 5465 – 5478.
- [16] Wan, J.M., Tokunaga, T.K., Brodie, E., Wang, Z.M., Zheng, Z.P., Herman, D., Hazen, T.C., Firestone, M.K., Sutton, S.R., 2005. Reoxidation of bioreduced uranium under reducing conditions. *Environ. Sci. Technol.* 39, 6162 – 6169.
- [17] Yuhei, Y., Yoshio, T., Yutaka, K., Yoshio, W., 2008. High-sensitive measurement of uranium LIII-edge X-ray absorption near-edge structure (XANES) for the determination of the oxidation states of uranium in crustal materials. *Applied Geochemistry*. 23, 2452-2461.
- [18] Sun, Jin; Yang, Dongjiang; Sun, Cuihua; Liu, Long; Yang, Shuanglei; (Alec) Jia, Yi; Cai, Rongsheng; Yao, Xiangdong. Potassium Niobate Nanolamina: A Promising Adsorbent for Entrapment of Radioactive Cations from Water, *Scientific Reports*, 4, 7313 (2014).
- [19] Yang, D. et al. Titanate-based adsorbents for radioactive ions entrapment from water, *Nanoscale*, 5, 2232 – 2242 (2013).
- [20] Kresse G. and Furthmüller J. (1996a) Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set. *Comput. Mater. Sci.* 6, 15 – 50.
- [21] Kresse G. and Furthmüller J. (1996b) Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys. Rev. B* 54, 11169 – 11186.
- [22] Kresse G. and Hafner J. (1993a) Ab initio molecular dynamics for liquid metals. *Phys. Rev. B* 47, 558 – 561.
- [23] Kresse G. and Hafner J. (1993b) Ab initio molecular dynamics for open shell transition metals. *Phys. Rev. B* 48, 13115 – 13118.
- [24] 歐陽湘、戴國邦、董倫道等，我國用過核燃料長程處置計畫-第三階段區域調查前四年工作計畫-第二 2. 工作年度計畫-瑞典 SKB(國外人員訓練)出國報告，核能研究所，1995。
- [25] 李振誥，污染物於破裂岩層之傳輸行為及力學行為研究-行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告，原能會，2003。
- [26] Ringwood A.E. et al., (1979), *Nature* 278, 219.
- [27] Luo S.G. et al. (1998), *Waste Management* 18, 55.
- [28] Li S.Y. et al. (1998), *J. Amer. Ceramic Soc.*, 81, 1938.

聚合技術固化放射性粒狀離子交換樹脂之研究

A Study on Solidification of Simulated Radionuclide Ion Exchange Resins using Geopolymer Technology

計畫編號：105-2623- E-027- 002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：鄭大偉

e-mail：twcheng@ntut.edu.tw

共同主持人：林凱隆

計畫參與人員：曹師維

執行單位：國立臺北科技大學資源工程研究所

摘要

本研究以無機聚合技術固化模擬放射性離子交換樹脂，改善現有之水泥固化法。水泥固化法為目前主要處理廢樹脂的方法，因為此方法操作簡單，費用低廉。離子交換樹脂由於其體積之不穩定性，使得處理方法更加困難。其在固化體中會吸收或釋放水份，發生膨脹及收縮作用；當樹脂膨脹力量大於固化體包覆的力量時，導致固化體膨脹或龜裂，使水泥固化體中的荷載率受到很大限制，經過固化處理後將產生更龐大的體積。在現今最終處置場地難求及處置費用高漲的情況下，水泥固化法有其現實上的問題。本研究即針對前述問題，期望以無機聚合技術開發一個新的放射性廢料的固化材料及方法。

經過前導試驗之成果，以爐石粉為主要粉體並添加抗裂粉體及緩凝劑，與鹼性溶液在常溫下製成爐石基固化體，再將固化體分別經過耐水性、耐候性、耐真菌性、耐輻射性及溶出試驗，測試其機械強度，探討在不同鹼液濃度及樹脂添加量的條件下，對於爐石基固化體之性能影響。為了改良漿體之工作性，且期望提高樹脂含量於固化體中並能更加穩定，因此添加強氧化劑作為樹脂之前處理。實驗結果顯示，爐石基固化體最高樹脂添加含量可達乾基 22.1(wt.)，28 天齡期機械強度為 8.5MPa，而固化體經過耐水性、耐候性及耐真菌性、耐輻射性之機械強度皆高於我國規範標準 1.5MPa；最後再與水泥固化體比較，國內水泥固化體添加樹脂僅為 6(wt.) 乾基，顯示減容因子為 0.19 左右，為水泥固化體之 3.6 倍。

關鍵詞：離子交換樹脂、模擬放射性核種、無機聚合技術、固化。

Abstract

This study aims to use slag-based geopolymer solidified ion exchange resins into solid waste form. However, resin is incompatible with the cement matrix, possibly cause its full disintegration after a long-term storage. Due to geopolymer many superior properties, have a good potential to encapsulate spent resins. In this study, experiment focused on the resin content limit in geopolymeric solid waste form. The geopolymeric solid waste form were studied by blast furnace slag (BFS), as raw materials mixed with alkaline solution at ambient condition. Physical/mechanical properties of geopolymeric

solid waste form prepared with different resin content ratios (calculated in wet base) and $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratios were tested. The results indicated that geopolymeric solid waste form high content of resins for wet base 45 (wt.%), the compressive strength of geopolymeric solid waste form could reached to 8.5 MPa. The morphology and mineral phases of the geopolymeric solid waste form were characterized by SEM, EDS and XRD. The test results of the mechanical performance were in compliance with the set in standards fuel cycle and materials administration atomic energy council of Taiwan. These results gave encouragement that the slag-based geopolymer could be used as a feasible matrix material for the solidification technology of radioactive wastes.

Keywords: Ion exchange resin, Simulated radionuclide, Slag, Geopolymer, Solidification.

I. 前言

離子交換樹脂被廣泛的使用於廢水淨化系統，而核電廠使用粒狀樹脂處理反應爐中之冷卻水。使用過一次即廢棄，屬於濕性固體之低放射性廢棄物[1]。近年來我國核電廠漸漸面臨除役的情況，核能發電減少至全部發電量之 16% 左右[2]。核一、核二廠採用沸水式反應爐，廢樹脂約佔 11%；核三廠採用壓水式反應爐，其中廢樹脂約佔 23%[3]。離子交換樹脂為高分子聚合物以聚苯乙烯和二乙烯苯聚合而成，簡稱 PS-DVB[4]。核電廠使用過後之粒狀樹脂其中含有 ^{137}Cs 及 ^{90}Sr 為核裂變反應之產物，半衰期高達 28 年，產率分別為 6.3% 及 4.5%[5]。

廢樹脂之處理技術包括減容與固化。固化法依其固化劑的材料包括水泥、瀝青或高分子聚合物等[6]。這些固化方法各有優劣點，目前國內的技術多半使用水泥固化。在固化初期，由於水泥需較多的水分促進反應，會先從樹脂中吸水進行水化反應，使樹脂失水而收縮，之後漿體會因水化作用放熱將多餘的水分釋放出來，造成樹脂吸水膨脹，當膨脹壓力大於固化體之強度將使水泥試體破裂[7]。由於上述之疑慮，自 1987 年 7 月以後，台灣停止水泥固化粒狀廢樹脂，且僅能固化乾基樹脂約 6(wt.)，需再研究水泥固化之性質，或是換另一種固化劑。另外高分子聚合物與瀝青的固化可以固化較高含量之樹脂，但是高分子聚合物價格高，操作成本高；瀝青則強度低，而且具有可燃性，故應用於實廠中仍須評估。

無機聚合物(Geopolymer)為一種非晶質或半晶質的

材料，其結構與沸石相似[8]。本研究使用爐石粉為主要基材，此粉體是由高溫熔漿直接以冷水急速淬冷，使其中之矽酸鹽無法形成良好之結晶，化學性質不穩定，具有極高的活性[9]，可作為無機聚合物之主要粉體。將粉體置於鹼性溶液中，使 Si 和 Al 膠體由粉體顆粒表面析出，形成無機聚合物之前趨膠體。隨後添加鹼金屬矽鋁酸鹽溶液以提供足夠矽鋁離子觸發聚合反應，形成無機聚合物的主幹，生成之產物以 SiO_4^- 及 AlO_4^- 組成之三維架狀結構；整體持續進行聚合反應，最後多餘的 Ca^{2+} 離子與 SiO_4^- 及 AlO_4^- 生成針狀 C-S-H 膠體 ($\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) [10]。C-S-H 膠體填塞架狀結構之孔隙，使結構更為緻密且強度提升[11]。其與水泥最大不同是水泥鍵結形式為水合鍵結，無機聚合物則是化學鍵結。

無機聚合物可固定化低電荷陽離子，大部分的金屬將以氫氧化物形式沉澱於無機聚合物中，且兼具良好的抗溶出能力，但不適用於酸性環境下[12]。低放射性廢棄物及中放射性廢棄物被認為可作為無機聚合物固定化之潛勢。故本研究採用無機聚合技術固定離子交換樹脂，探討此技術之可行性。

II. 實驗材料及方法

本研究固定對象為核能級的陽離子樹脂和陰離子樹脂，以爐石粉為主要粉體，並添加固定比例之抗裂粉體及緩凝劑；鹼液則主要是由氫氧化鈉、矽酸鈉溶液配製，混拌製成爐石基固化體。

陽離子樹脂(NRW-100)及陰離子樹脂(NRW-400)含水率之平均值分別為 51.7 % 及 48.7 %。爐石粉粒徑範圍介於 0.53~148 μm 之間，中位徑(D_{50})為 12.4 μm 。抗裂粉體粒徑範圍在 1.26~418.6 μm 間，中位徑(D_{50})為 51.4 μm 。此兩種粉體之化學成分以 XRF 分析如表 1 所示。

表 1 原料粉體之 XRF 分析

成份(wt.%)	爐石粉	抗裂粉體
CaO	57.8	34.3
SiO ₂	27.6	52.6
Al ₂ O ₃	11.0	11.0
SO ₃	1.8	0.1
TiO ₂	0.8	0.8
Fe ₂ O ₃	0.4	0.6
SrO	0.1	0.4

本研究係探討添加樹脂含量對爐石基固化體之各項性質影響，流程如圖 1 所示，以爐石粉為主要粉體，與不同含量濕基樹脂混拌 5 分鐘，待放熱後，另外先將緩凝劑與鹼液攪拌 30 分鐘，樹脂含量增加時鹼液的量會減少，因此需較長時間溶解緩凝劑於鹼液當中；之後再與粉體混拌 5 分鐘後呈均勻漿體。再灌入 $\Phi 5 \times 11 \text{ cm}$ 之 PE 圓柱模具中，室溫養護 28 天後脫模。實驗配比如表 2 及表 3 所示。研究中進行自由水觀察、28 天機械強度、耐水性、耐候性、耐輻射性及耐真菌性等固化體品質測試[13]。另外配製模擬核種樹脂進行溶出試驗。

表 2 鹼液莫爾配比

SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
1	50
0.8	

表 3 固化體配比

試體編號	L/S	S/B	粉體(wt.%)	濕基樹脂 (wt.%)		鹼性溶液 (wt.%)
			爐石粉 + 抗裂粉體	陽離子	陰離子	緩凝劑 + 鹼液
15R	0.66	0.63	54	7.4	7.4	34
25R	0.57	0.50	50	12.3	12.3	28
32R	0.55	0.45	48	15.7	15.7	25
45R	0.60	0.47	39	22.0	22.0	18

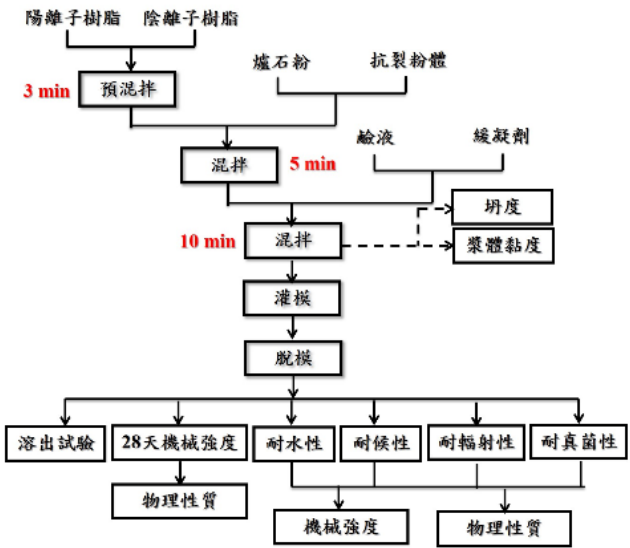


圖 1 爐石基固化體實驗流程

III. 結果與討論

首先探討添加固定比例濕基 15(wt.%)之樹脂，對於固化體 28 天機械強度之影響。由圖 2(a)顯示水泥之 SEM 影像為粒狀，顆粒表面較多細微粉末；爐石基固化體(圖 2b)之影像顯示其中主要是爐石粉及抗裂粉體。

實驗結果(如圖 3)顯示，當爐石基固化體以不同矽鈉比之鹼液製備時，試體之機械強度並未明顯變化；當鹼液中矽鈉比為 1 時(9M15R)，經過耐輻射性試驗後，其機械強度明顯增加 36%。爐石基固化體經養護 28 天、耐候性及耐輻射性試驗後，其機械強度均能高於 20MPa 以上。由 XRD 分析(如圖 4)顯示，爐石基固化體為非晶質相；水泥固化體出現氫氧鈣石(Portlandite)及鈣礬石(Ettringite)之晶相。

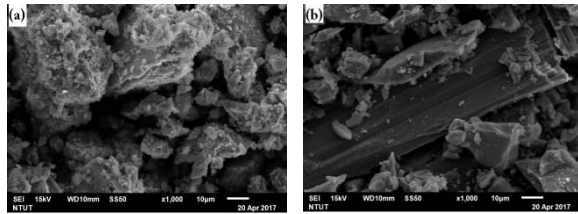


圖 2 固化體之 SEM 影像；放大倍率為 1000 倍(a)水泥；(b)爐石基固化體

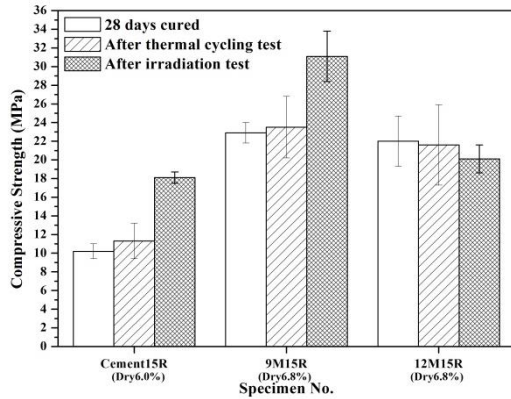


圖 3 爐石基固化體與水泥之比較(樹脂添加量 15%)

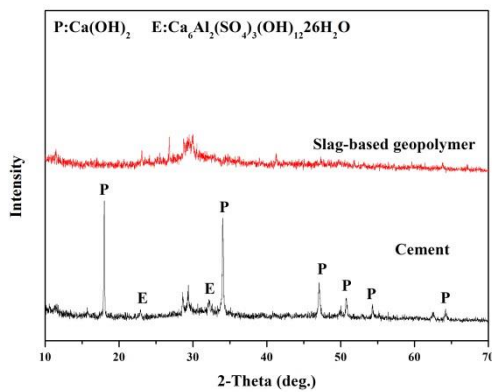


圖 4 爐石基固化體與水泥之 XRD 分析

若固定鹼液之矽鈉比為 1、矽鋁比為 50 時，其鹼度控制在 9 M，添加不同比例樹脂，固化體經不同試驗機械強度之影響，實驗結果如圖 5 所示。當爐石基固化體中添加越多樹脂時，機械強度有顯著減少之趨勢；而經耐水性試驗後，其機械強度皆有增加之趨勢；但是經耐候性及耐真菌性試驗後，其機械強度並未明顯變化；若經耐輻射性試驗後，實驗結果與前述相同，機械強度明顯增加 10-36%。

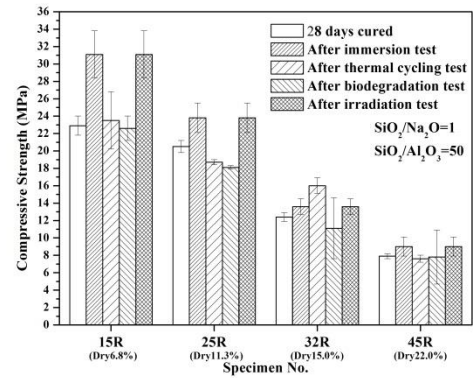


圖 5 添加不同比例樹脂對各項機械強度之影響 (矽鈉比為 1；矽鋁比為 50)

爐石基固化體在添加 45(wt.%)樹脂時，其機械強度均高於 7MPa 以上。當矽鈉比減少至 0.8，其鹼度提升至 12M，綜觀實驗結果如圖 6 所示，機械強度不如前項 9M 高，但皆高於我國規範標準 1.5MPa。

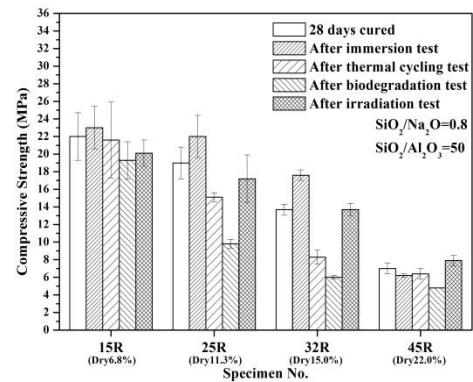


圖 6 添加不同比例樹脂對各項機械強度之影響 (矽鈉比為 0.8；矽鋁比為 50)

如圖 7 所示，高樹脂含量之爐石基固化體經過 XRD 分析，其圖譜與純爐石粉相似，約在 29° 之位置有類似 C-S-H 之晶相。前人文獻指出[14]，在高鹼環境下形成之 C-S-H 膠體，其特徵峰值強度較低，聚合反應速率較緩慢，因此反應至 28 天後，晚期強度逐漸完成並提升。若探討不同矽鈉比對固化體表面巨觀之影響，9M 鹼液所製備之固化體上層會產生一層白華現象 (Efflorescence)，其原因係 9M 鹼度較低，其中多餘之鈣元素尚未反應，形成 CaSO_4 之晶相；12M 固化體並無此現象，故以鹼度較高之鹼液製備高樹脂含量固化體有較良好之趨勢。

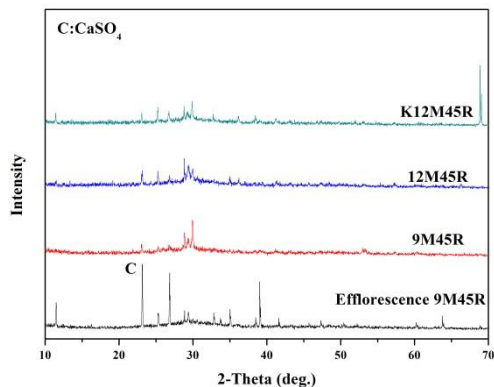


圖 7 高樹脂含量之爐石基固化體 XRD 分析

表 3 樣品微生物生長狀況

9M15R	級別	9M45R	級別
	1		1
12M15R	級別	12M45R	級別
	1		1

固化體接種菌株培養 28 天後，拍照紀錄試體表面之形貌，經由肉眼檢視依照規範判斷試品的生長狀況，並標示等級[13]，實驗結果如表 3 所示。微生物生長狀況判斷為微量等級 1，少於 10%微生物附著於樣品上。若液固比過高導致層析現象，樹脂易集中於試體表面，有些試體將會變成輕度等級 2，有 10-30%微生物附著，但沒有生長繁殖跡象。

表 4 12M45R 模擬核種混床固化體 Cs 離子平均之溶出指數

取樣時間	分析數據(μg/L)	活度(μg)	有效擴散率(cm ² /sec)	溶出指數(L _{Cs})	平均溶出指數 AVG (L _{Cs})
2 h	5.39	10.78	7.90E-15	14.11	13.48
7 h	6.47	12.95	1.51E-14	13.83	
1st day	12.70	25.41	1.73E-14	13.77	
2nd days	17.45	34.90	4.12E-14	13.41	
3rd days	17.63	35.26	6.93E-14	13.16	
4th days	14.19	28.38	6.34E-14	13.20	
5th days	14.40	28.80	8.93E-14	13.11	
19th days	86.72	173.45	3.77E-14	13.43	
47th days	120.93	241.87	5.28E-14	13.28	
90th days	102.16	204.32	3.41E-14	13.47	

表 5 12M45R 模擬核種混床固化體 Sr 離子平均之溶出指數

取樣時間	分析數據(μg/L)	活度(μg)	有效擴散率(cm ² /sec)	溶出指數(L _{Sr})	平均溶出指數 AVG (L _{Sr})
2 h	0.88	1.76	2.68E-16	15.89	16.44
7 h	0.42	0.85	6.99E-17	16.26	
1st day	0.74	1.49	9.73E-17	16.51	
2nd days	1.10	2.19	2.17E-16	15.94	
3rd days	1.41	2.82	4.82E-16	15.40	
4th days	1.12	2.24	6.33E-16	15.71	
5th days	1.32	2.65	9.70E-16	15.42	
19th days	1.23	2.46	1.18E-17	17.38	
47th days	0.61	1.22	1.48E-18	17.91	
90th days	0.61	1.21	1.25E-18	17.95	

以 12M 鹼液並添加濕基樹脂 45(wt.%)之固化體，其銻及銾離子溶出指數分別為 13.48 及 16.44，如表 4 及表 5 所示；各取樣時間的溶出指數差距不會太大，當溶出週期越長時，銾離子的溶出率越少，銻離子則反之。有效擴散率則是相差至萬倍，但爐石固化體之平均溶出指數皆符合規範。

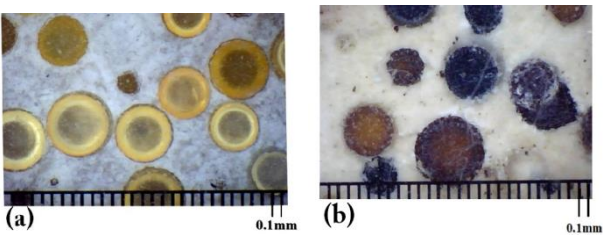


圖 8 以 12M 鹼液製備爐石基固化體之剖面影像 (a)未添加氧化劑；(b)添加氧化劑

圖 8 所示為未添加氧化劑及添加氧化劑之固化體表面情形。由圖所示，未添加氧化劑之固化體並無法緊密的將樹脂固定，僅物理性的將樹脂包覆，使樹脂容易剝落。其原因為固化之樹脂未經過前處理，推論樹脂在固化體中尚有活性，在固化前期吸水而膨脹，待漿體脫水硬化時，樹脂隨之收縮而留下空隙。當添加未添加氧化劑後，樹脂失去活性而發黑，固化體與樹脂緊密結合。添加此氧化劑可增強漿體之工作性及包覆樹脂之黏結特性。圖 9 為未添加氧化劑及添加氧化劑固化體內之樹脂表面的相片。經過前處理後之樹脂(圖 9b)表面較為粗糙且變為親水性，因此可促使膠體與樹脂之相容性增加，更容易附著於樹脂上。

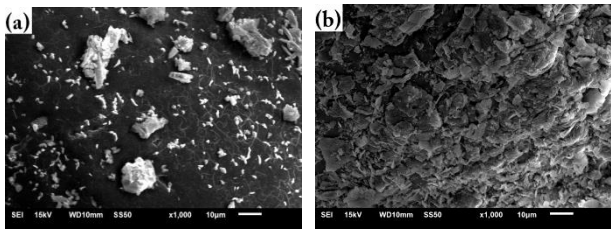


圖 9 以 12M 鹼液製備爐石基固化體內樹脂表面之 SEM 影像；放大倍率為 1000 倍(a)未添加氧化劑；(b)添加氧化劑

高樹脂含量會造成漿體之工作性不佳。圖 10 所示為以添加濕基 45(wt.%)之樹脂，先以氧化劑處理後製成的試體對機械強度之影響。實驗結果顯示，鹼液砂鈉比為 0.8、砂鋁比為 50 時，固化體養護 28 天後，其機械強度可提升至 8.5MPa；試體經過耐候性試驗後，機械強度增加 16.5%。但試體經過耐真菌性試驗後，機械強度減少 71.8%。表 6 為添加氧化劑試體 K12M45R 經過耐候性試驗之試體變化。添加氧化劑後，可能造成鹼度降低且水分含量增加，試體有些收縮且脫水，因此經過耐真菌性試驗後，其影響更顯著。

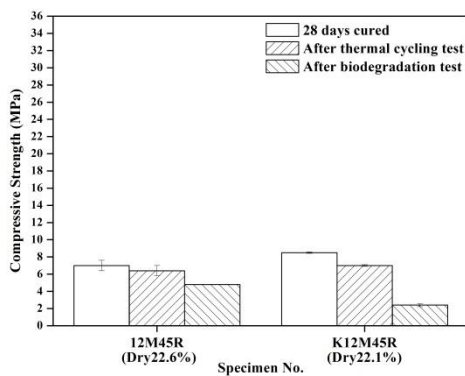


圖 10 有無添加氧化劑對機械強度之影響

表 6 添加氧化劑試體 K12M45R 經過耐候性試驗之試體變化

條件	高度 (%)	直徑 (%)	體積 (%)	重量 (%)
耐候性	-0.28	-0.16	-0.59	-6.99
耐真菌性	-0.63	-0.68	-1.91	-17.43

IV. 結論

爐石基固化體經 28 天養護後，具有良好的機械強度，比水泥固化體高 2.1 倍。影響漿體黏度的主要因素為樹脂添加量，原因在於當樹脂添加量越多時，在混拌過程中會產生放熱反應，樹脂會逐漸釋出水分直到終凝，若液固比與漿體黏度固定時，會導致層析現象。

固化體經各項品質測試後，影響機械強度的主要因素為液固比及樹脂添加量，樹脂添加量較少時，為了控制其漿體黏度，導致漿體之水分過多，因此會破壞試體之結構，造成其機械強度不穩定；添加較多樹脂時，工作性會變差。當樹脂含量增加到濕基 45(wt.%)，也就是達乾基 22.1(wt.%)，其 28 天齡期機械強度達 7.9MPa。而固化體經過耐水性、耐候性及耐真菌性、耐輻射性之

機械強度皆高於我國規範標準 1.5MPa。

添加氧化劑作為樹脂前處理劑，可改善其工作性質，坍度從 12.5cm 增加至 13.5cm，且機械強度亦有增加至 8.5MPa。根據實驗結果分析，爐石基固化體之減容效果與水泥固化體比較，可縮減 3-4 倍的體積，顯示無機聚合固化技術具有相當的潛力。

參考文獻

- [1] Wang J. and Z. Wan, 2015, "Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry", Progress in Nuclear Energy, vol. 78, pp. 47-55.
- [2] 台灣電力公司，歷年發購電量之統計，http://www.taipower.com.tw/content/new_info/new_info-c37.aspx?LinkID=13, 2017。
- [3] 黃慶村、劉增明、田景光，2006，廢離子交換樹脂的處理方法，中華民國發明專利第 I255277 號。
- [4] Jian X., Wu T. and Yun G., 1996, "A study of wet catalytic oxidation of radioactive spent ion exchange resin by hydrogen peroxide", Nuclear Safety, vol. 37, No. 2, pp.149-157.
- [5] Sternat M. R., Charlton W. S. and Nichols T. F., 2011, "Monte-Carlo burnup calculation uncertainty quantification and propagation determination", International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2011) on CD-ROM, American Nuclear Society (ANS).
- [6] Li J. F., Wang J. L., 2006, "Advances in cement solidification technology for waste radioactive ion exchange resins: A review", Journal of Hazardous Materials, vol. 135, pp. 443-448.
- [7] 莊文壽，1992，「放射性廢離子交換樹脂之處理程序」，核研季刊，第四期，第 75-78 頁。
- [8] Davidovits J., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology", Proceeding of Geopolymer '99 Second International Conference, France, pp.9-37.
- [9] 邱俊萍，2002，利用高爐爐石製成無機聚合材料之研究，碩士論文，國立台北科技大學材料及資源工程系碩士班，台北。
- [10] Robayoa R. A., Mejía de Gutiérrez R. and Gordillo M., 2016, "Natural pozzolan and granulated blast furnace slag-based binary geopolymers", Mater. Construcc., vol. 66, pp. 1-8.
- [11] 邱仔安，2016，鹼激發膠結材反應機理之研究，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程系，台北。
- [12] Provis J., 2009, "Immobilisation of toxic wastes in geopolymers", Geopolymers, structure, processing, properties and applications. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, pp. 421-440.
- [13] 原子能委員會核能研究所，2011，低放射性廢棄物均勻固化體之法規精進與測試方法建立。
- [14] 戴于盛，2013，無機聚合綠色水泥之應用開發研究，碩士論文，國立臺北科技大學資源工程研究所，台北。

深地層環境下放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料核種吸附參數研究

Study on Adsorption Parameters of Buffer Backfill Material in Deep Geological Environment for Radioactive Waste Disposal Site

計畫編號：MOST 105-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、康綾珍、潘春花

執行單位：國立成功大學 地球科學系

摘要

本計畫乃延續 103 年與 104 年度針對「放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料對於關鍵核種的吸附與擴散參數」之研究。本計畫旨在利用 ASTM 批次法，進行放射性核種：銫 (Cs)、鈾 (U) 及釷 (Th) 離子之吸附行為的差異研究。

由其實驗分析結果顯示，在不同初始濃度下 (1~10 ppm)，MX-80 (膨潤土) 與 Na-Mont. (鈉型蒙脫石) 在針對釷 (Th) 之 K_d 值均大於銫 (Cs) 與鈾 (U)。此外，由其結果亦發現，吸附實驗後溶液的 pH 改變 (5→10)；因為，Cs 是一價陽離子，其 K_d 值沒有變化，而 Th 因產生沉澱現象而造成 K_d 值大於 Cs 與 U，且 U 可能發生物種改變，而造成其 K_d 值變小。由此可發現環境條件的改變 (pH 或 E_h)，是可能造成核種 (物種) 改變，進而造成吸附行為產生變化；而 K_d 值也會隨之變化。

本研究計畫與核能研究所化學組共同合作完成建置一套厭氧環境裝置 (厭氧手套箱)，並已將配置之臺灣不同地區的模擬地下水靜置於厭氧手套箱中，定期持續以高純度氬氣沖除與循環，將手套箱中之多餘氧氣去除，目前已確認模擬地下水為還原環境 (氧化還原電位 $E_h < 0$ mV，約為 -100 mV)。

with Ar gas, the reduction potential (E_h) of the synthetic groundwater (SGW) was measured to be about -100 mV; thus, it reflects the extremely high reducing situation of groundwater in 300-m depth underground. Results of the above studies provided the advanced information not only in the site evaluation for favorable geological conditions, but also in the safety measures for designing baseline of future site construction.

Keywords: MX-80 bentonite, Cs, U, Th, distribution coefficients.

I. 前言

放射性廢棄物中的放射性核種自廢料體釋出，然後在地質環境遷移，最後進入人類生活圈對人體造成輻射危害，這整個「核種遷移」的過程基本上是放射性廢棄物所要瞭解的核心課題 (圖 1)。在多重障壁的概念下，放射性核種遷移至人類生活圈之主要可能途徑乃是以地下水為媒介，由於放射性廢棄物長期貯存於地質環境下，在受到地下水入侵後，即可能將已經劣化的放射性廢棄物包裝容器溶蝕，將放射性核種溶解或滲濾出來，並隨著地下水的傳輸而進到人類的生活圈內。

關鍵詞：銫、鈾、釷、分配係數、膨潤土 MX-80。

ABSTRACT

This study is a continuous study of the last 2 year's (the year of 2014 and 2015) work; the investigation of the adsorption parameters for buffer/backfill materials to some key nuclides in radioactive waste disposal sites. However, this study was mainly focused on already commercialized bentonite products; MX-80 (a U.S. Wyoming product) and Na-Montmorillonite. According to ASTM batch sorption test method results, it showed that distribution coefficients (K_d) of thorium (Th) was generally higher than that of the cesium (Cs) and the uranium (U); under various initial conditions (1~10 ppm). The synthetic groundwater (SGW) has been successfully prepared in glove box continuously circulated and flushed

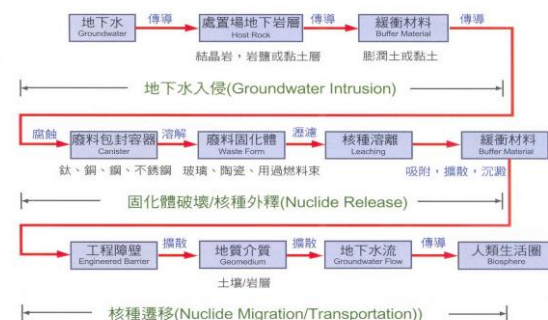


圖 1. 核種從廢棄物固化體遷移到人類生活圈的路徑示意圖

目前推動高放射性廢棄物地質處置計畫之國家，均就其所處的地質條件，選擇合適的處置母岩，來進行其最終安全處置計畫；各國處置母岩及處置概念之扼要說明彙整如表 (1)。除了美國於 2013 年暫停雅卡山計畫之外，其他使用核能國家仍持續發展各項用

過核子燃料/高放射性廢棄物處置計畫。芬蘭已於 2013 年通過在 Olkiluoto 場址興建用過核子燃料/高放射性廢棄物的最終處置場，並預計於 2020 年開始運送相關用過核子燃料/高放射性廢棄物至 Olkiluoto 場址。

表 1. 核能國家用過核子燃料/高放射性廢棄物處置概念

國家	地質環境與熱荷載策略	處置深度 (公尺)
比利時	沉積岩/飽和帶；低於水沸點	250
加拿大	結晶岩/飽和帶；低於水沸點	500
芬蘭	結晶岩/飽和帶；低於水沸點	500
法國	結晶岩或沉積岩/飽和帶； 低於水沸點	400~1000
德國	鹽穹/飽和帶；高於水沸點	870
日本	結晶岩或沉積岩/飽和帶； 低於水沸點	花崗岩：1000 泥岩：500
西班牙	結晶岩或沉積岩/飽和帶； 低於水沸點	泥岩：250 花崗岩：500 鹽岩：600
瑞典	花崗/飽和帶；低於水沸點	500
瑞士	結晶岩或沉積岩/飽和帶； 低於水沸點	花崗岩：1000 泥岩：500
美國	凝灰岩/不飽和帶；前 300~1000 年高於水沸點，然後低於水沸點	300

資料來源：邱太銘，「國外用過核子燃料/高放射廢棄物最終處置現況」，2000。

在設置最終處置場之前，必需經過功能安全評估的分析計算，在各種不同類型的數值模式分析各種不同條件的結果，進而提出一套完整而可靠的辦法。因此，詳細的地質調查分析，便成為安全功能評估中的不可或缺的要件，因為在深地層處置時，該地的地層結構、年代、水文、地震頻率等因素都會影響整個處置場的設置，目前在歐洲各國中，瑞典與芬蘭等以花崗岩為處置母岩的國家，其研究結果顯示：花崗岩對於阻滯核種外釋扮演屏障角色，其功能在提供一個地質上穩定的環境，而比利時與法國選擇對核種具高吸附性的黏土（Boom clay）為處置母岩，另外，日本在 H-12（2000 年）及 H-17（2005 年）報告中，在岐阜縣瑞浪市（花崗岩）及北海道幌延町（泥岩）建立地下實驗室來進行各種地質與水文特性研究。在各國的研究結果顯示：花崗岩（結晶岩）對於阻滯核種外釋，其主要優點在於岩體的緻密完整，地層較為穩定，熱傳導性及機械強度較好，最主要的功能在於提供一個地質及物理化學上穩定的環境，而黏土層的不透水性及對於核種吸附性均優於結晶岩，故兩者均有其優點，在地質調查中均為主要的項目。

放射性廢棄物的處置研究工作一直都是世界使用核能的國家重點科技發展計畫，根據國外相關的研究發現，放射性核種在岩石內的遷移行為，會受到岩石礦物的吸附效應而引起遲滯的效果；由於高放射性廢

棄物處置場因長期位於地底深層，一旦發生地下水入侵而使具毒性放射性核種與地質發生化學反應，進而造成有毒核種的外釋。根據目前的地質調查結果，深層地質處置的環境條件和一般大氣下的實驗條件二者最大的區別，在於其環境中低氧氣濃度與地下水環境中的氧化還原電位值小於 0 ($E_h < 0$ mV)。

因此，在深層地質的環境下，如何由實驗室及野外現場模擬與量測核種遷移行為與過程，可說是核種遷移研究的關鍵議題。為瞭解深地層環境下最終處置場的實際情形，許多國家均開始找尋試驗場址或興建地下實驗室，然而，地下實驗室需投入大量的人力與物力，且還需合各項客觀條件（政治、經濟與環境），由此可見，此項工作極具挑戰性。此外，根據國外相關研究單位（瑞典、芬蘭、日本、瑞士、比利時、西班牙及美國等）的經驗，在地下實驗室興建之前，在實驗室中均會以厭氧手套箱裝置模擬深地層特殊環境（pH、 E_h 、無氧狀態等）下進行還原狀態下放射性核種相關研究，進而探討與模擬核種於深地質環境中的遷移行為。

II. 主要內容

一、材料

本（105）年度計畫為延續前兩年（103&104 年）之計畫，選用與前一年相同膨潤土材料-美國懷俄明州產之膨潤土（MX-80）以及鈉型蒙脫石（Na-Mont），避免造成實驗影響與降低實驗產生之誤差。

1. **美國膨潤土**：美國懷俄明州產 MX-80 膨潤土。Volclay® MX-80 (AMCOL Specialty Minerals 公司)
2. **鈉型蒙脫石**：美國黏土礦物學會標準礦物，SWy-2。Na-Montmorillonite
<http://www.clays.org/SOURCE%20CLAYS/SCdata.html>
3. **液相材料**：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。
4. **核種（穩定同位素）**：
 - (1) **銫 (Cs)**：氯化銫 CsCl，99% 純度以上德國 Merck 公司出品。
 - (2) **鈾 (U)**：硝酸鈾 $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ 標準溶液，美國 Inorganic Ventures 公司出品。
 - (3) **釷 (Th)**：硝酸釷 $Th(NO_3)_4 \cdot 4H_2O$ 標準溶液，美國 Inorganic Ventures 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，為了解膨潤土樣品的基本材料特性，以 XRF（X 光螢光譜分析）與 XRD 繞射分析進行分析，建立美國膨潤土（MX-80）與鈉型蒙脫石（Na-Mont）的礦物成分與元素組成。此外，利用 ASTM (2010) 標準方法，進行批次吸附實驗，包括：銫 (Cs)、鈾 (U) 及釷 (Th) 等核種吸附實驗。

1. 固相材料分析

(1) X 光螢光譜分析 (XRF)：

XRF 分析乃利用 X 光激發樣本而產生特性 X 光螢光。原子中的電子可以透過吸收 X 光的能量，躍遷出原來的軌道，而這個能量必須大於該電子被原子核綁定在原軌道上的能量。當此內殼層軌道上的電子躍遷出去後，位於外殼層軌道，能量較高的電子，將填補這個空缺，並釋放出以光子形式存在的能量（放出螢光），而且放出的這個能量，正好等於兩個殼層之間的能量差。這種因為電子躍遷而放出的螢光，我們稱為元素的特徵 X 光（此螢光也是一種 X 光）。而且在某兩相鄰軌道間，電子躍遷所放出的能量是恆定的，因此只要量測出這個螢光的值，就能夠辨識特定的元素，此為 X 光螢光光譜儀 (XRF) 的基本原理（參考資料：<http://www.actr.com/tw/tw-faq/tw-faq-xrf/43-tw-faq-principle-xrf.html>）

因此，可提供分析樣品中組成元素的種類與含量，具有快速、非接觸、非破壞性及多元素分析等特點。本研究所用的 Micro-XRF 分析儀器可作為微區自動掃描分析（光束大小可至 10 μm），因此，可獲得樣本局部元素分佈影像圖，為非破壞性分析。實驗所用的 X 光光源為鉑 (Rh) 靶 ($\lambda = 0.5437 \text{ nm}$)，標本分析時儀器的條件，管電壓 50 kV，電流為 0.1 mA。

(2) X 光繞射分析 (XRD)：

以 X 射線繞射儀進行美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 的礦物組成分析，為主要分析結晶礦物的方法。為了解美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 中的礦物成份，本研究利用 X 射線繞射儀，進行美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 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 之圖形找出美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 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，本計畫進行美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 對不同核種：銫 (Cs)、鈾 (U) 及釷 (Th) 等的批次吸附實驗，並利用其液相中濃度中的量測，觀察銫 (Cs)、鈾 (U) 及釷 (Th) 核種在與美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 中的分布情形。為分析與探討銫 (Cs)、鈾 (U) 及釷 (Th) 三個核種在不同初始濃度條件下 (1、5、10 ppm) 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：

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

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

III. 結果與討論

一、固相材料分析

(1) X 光螢光譜分析 (XRF)：

表 (2) 顯示美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 的元素分析重量百分比，由結果顯示兩者均是以矽鋁成分之礦物為主，並比較原始購買資訊，可發現其誤差均在 $\pm 5\%$ 之內，可得知該 XRF 定量分析之高可靠度與準確度。

表 2、美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 的元素分析重量百分比。

成分	膨潤土 (MX-80)	鈉型蒙脫石 (Na-Mont)
SiO ₂	58.89 (63.02)	60.19 (62.9)
Al ₂ O ₃	15.06 (21.08)	17.82 (19.6)
Fe ₂ O ₃	3.13 (3.25)	3.34 (3.87)
CaO	1.70 (0.65)	1.55 (1.68)
Na ₂ O	2.20 (2.57)	1.39 (1.53)
K ₂ O	0.59 (0.65)	0.49 (0.53)
MnO	0.08	0.02 (0.006)
MgO	1.59 (2.67)	2.33 (3.05)
TiO ₂	0.20	0.13 (0.009)
P ₂ O ₅	0.07	0.05 (0.049)
*LOI	14.32 (5.64)	15.62 (11.91)
TOTAL	97.83	102.94

*LOI: Loss in Ignition

() 括號內為購買時所列相關資訊

(2) X 光繞射分析 (XRD)：

利用 X-射線繞射儀及 X-射線繞射圖譜，進行美國膨潤土 (MX-80) 與鈉型蒙脫石 (Na-Mont) 之主要礦物組成分析。膨潤土 (MX-80) 分析 XRD 圖譜結果如圖 (2)，並且利用 JP-CDS 中的 International Centre for Diffraction Data 軟體 (PCPDFWIN Version 1.30, August 1997)，鑑定 XRD 之圖形找出膨潤土 (MX-80) 中的主要組成礦物 (Breen et al., 1997)。其結果顯示美國膨潤土 (MX-80) 確實以蒙脫石為主要成份礦物；而 MX-80 則有部分石膏類的礦物，其可能因商業膨潤土需增加其工程性質或黏滯性而外加之礦物。

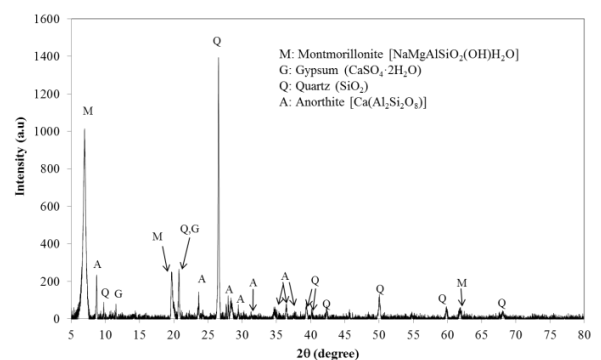


圖 2. MX-80 膨潤土之 XRD 繞射分析圖譜

二、批次吸附實驗

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，實驗後分析膨潤土與鈉型蒙脫石樣品所留下之溶液，其 pH 變動並未隨著不同核種而有所改變，pH 值均在 9~10 之間（5→10），成微鹼性。

圖(3)結果顯示在不同初始濃度下(1~10 ppm)，MX-80 膨潤土與 Na-Mont 鈉型蒙脫石，針對鈷 (Th) 之 K_d 值均大於銫 (Cs) 與鈾 (U)。其結果可能是因為 Cs 是一價陽離子，其 K_d 值沒有變化，而 Th 因產生沉澱現象而造成 K_d 值大於 Cs 與 U，且 U 可能發生物種改變，而造成其 K_d 值變小。

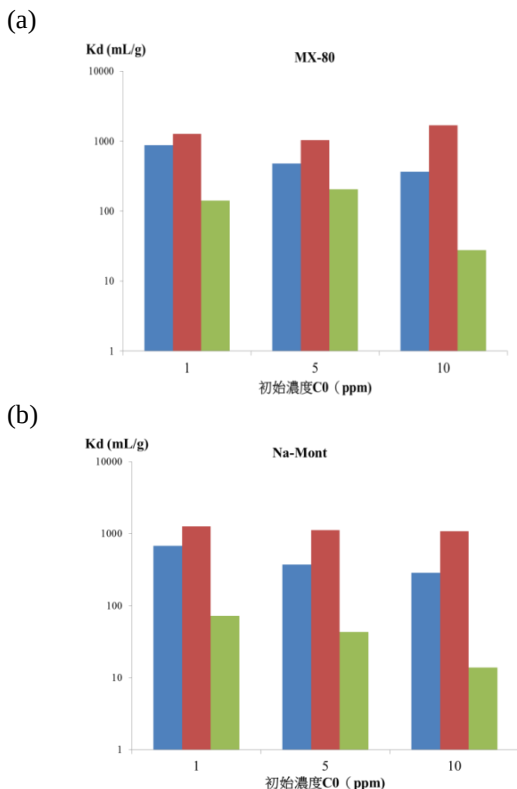


圖 3. K_d 值：銫 (Cs)、鈾 (U) 及鈷 (Th) 在不同初始濃度下 (1~10 ppm)，(a) MX-80 膨潤土；(b) Na-Mont 鈉型蒙脫石。

三、還原條件建立-厭氧手套箱

去(2016)年起，本研究計畫團隊與核能研究所化學組，於 10 月中旬在放射化學實驗室內共同合作完成建置一套厭氧手套裝置（厭氧手套箱），此外，從 11 月起開始將合成地下水放入手套箱內，並持續度量合成地下水中 pH 與 E_h 值，定期以高純度氫氣沖除與循環，將手套箱中之多餘氧氣去除，目前已確認模擬地下水為還原環境（氧化還原電位 $E_h < 0$ mV，約為 -100 mV），如圖(4)顯示，待其地下水氧化還原電位穩定後，將開始進行核種吸附實驗，擬深地層特殊環境（pH、 E_h 、無氧狀態等）條件下進行還原狀態下放射性核種相關研究，進而探討與模擬核種於深地質環境中的遷移行為。

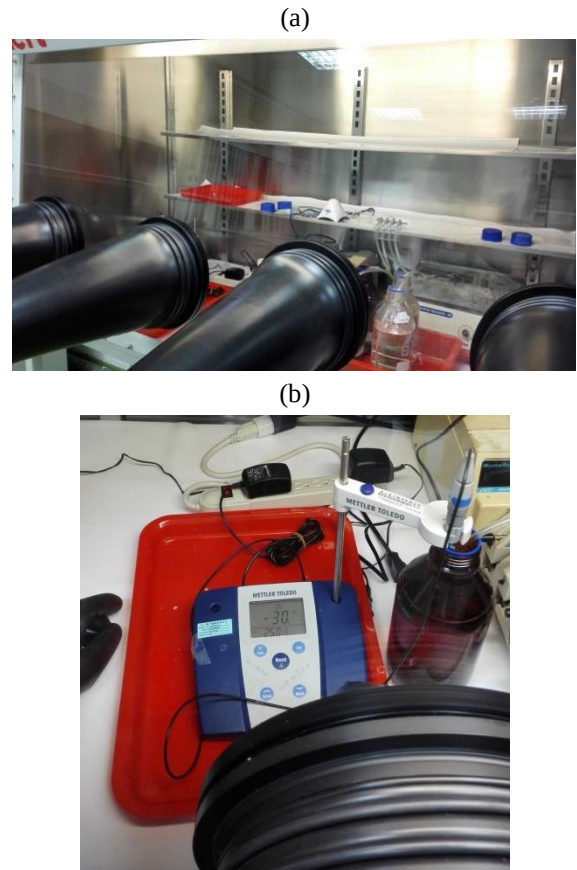


圖 4. 核研所放射化學實驗室內厭氧手套箱裝置：(a) 以高純度氫氣沖除與循環；(b) 氧化還原電位 $E_h < 0$ mV。

IV. 結論

本研究計畫主要探討放射性核種銫 (Cs)、鈾 (U) 及鈷 (Th)，對 MX-80 膨潤土的吸附特性及其受不同地下水環境影響之差異分析，其結果發現吸附實驗後的 pH 改變 (5 → 10)，Cs 因為是一價陽離子，其 K_d 值沒有變化，而 Th 因產生沉澱現象而造成 K_d 值大於 Cs 與 U，且 U 可能發生物種改變，而造成其 K_d 值變小，由此可發現環境條件的改變 (pH 或 E_h)，是可能造成核種（物種）改變而造成吸附行為變化，而 K_d 值也會隨之變化，其成果將可作為日後處置場規劃設計條件之重要參考。

本研究計畫與核能研究所化學組共同合作完成建置一套厭氧手套裝置（厭氧手套箱），目前已將配置之台灣不同地區模擬地下水靜置於厭氧手套箱中，定期持續以高純度氫氣沖除與循環，將手套箱中之多餘氧氣去除，目前已確認模擬地下水為還原環境（氧化還原電位 $E_h < 0$ mV，約為 -100 mV）。後續將開始進行模擬深地層特殊環境（pH、 E_h 、無氧狀態等）條件下進行還原狀態下放射性核種相關研究，進而探討與模擬核種於深地質環境中的遷移行為。

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] Y.L. Tu, Lee, C.P, M.C. Wu, S.C. Tsai, C.Y. Liu, T.L. Tsai. Study the Adsorption Parameters of Buffer/Backfill Materials for Radioactive Waste Disposal Sites. (oral session) The 21st International Conference & Exhibition: " Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future (Global 2015), Sep. 20-24, 2015, Paris, France
- [5] M.C. Wu, Lee, C.P, Y.L. Tu, C.H. Pan, S.C. Tsai, T.L. Tsai, H.J. Wei, C.Y. Liu. Sorption and Diffusion Studies for Cs in Crushed Argillite and Granite via Through-Diffusion Experiments. (oral session) The 21st International Conference & Exhibition: " Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future (Global 2015), Sep. 20-24, 2015, Paris, France
- [6] 許俊男，低放射性廢料處置場址特性參數審查評估之研究－鋇、鉍、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）。
- [7] 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）。
- [8] 工研院，「小丘嶼地下水文調查工作報告」，共105頁（2001c）。
- [9] 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）。
- [10] 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）。
- [11] 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）。
- [12] 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）。
- [13] 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）。
- [14] 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）。

放射性廢棄物長期貯存與最終處置之比較研究

計畫編號：MOST 105-NU -E-006-002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：劉大綱

e-mail：tkliu@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：王毓正、邱鈺萍、李政霆、翁翊棠、張漢群

執行單位：國立成功大學海洋科技與事務研究所

摘要

在核電廠紛紛到達退役年限，核廢料長期貯存或最終處置問題，即將面臨燃眉之急的處境。本研究藉由文獻分析法探討國外放射性廢棄物長期貯存與最終處置之現況，並針對利害關係人進行深入訪談，再以紮根理論分析其在此政策議題上之觀點，最後依據前述研究成果本團隊舉辦以「核廢處置議題中，政府與民間溝通橋樑，應以何種方式搭建」為題的願景工作坊。研究發現國外對長期貯存之定義歐盟為至少為 30 年，而美國可長達 160 年。質性訪談分析指出，由於我國核廢料的處置方案與選址問題，往往被反核團體視為與核能利用存廢的議題息息相關，在此背景局限下核廢料處置之政策討論不僅難以開展，甚至形成始終停留在核能存廢立場之爭之僵局，此對於既已存在的核廢料以及其他與核能利用無關的放射性廢棄物的貯存或最終處置方案與選址而言，皆不是一個良性的處理模式。選址不應該被延遲到暫存貯存設施即將用罄才倉促著手，否則在迫於時間壓力下可能影響到決策的品質，而導致核廢料的輻射風險無法獲得完善的管理與控制。未來核廢管理政策上，應加強開放性透明度和公眾參與，而此參與應包含民眾參與討論核廢處理議題之前，宜先納入民眾參與討論如何建構適當的溝通對話模式與程序。以免因為過度著重在細節性的技術性討論，而忽略了討論適當的溝通與對話模式，不僅阻礙實質議題方面共識的形成，更有可能加深既有的不信任。如何在透明以及完整的法規制度下使具有充足相關知識的民眾參與是受訪利害關係人所關心的。其中，政府明確的角色定位或是交由可信任的第三方監督都有助於建立民眾的信任感。

I. 前言

用過核子燃料及放射性廢棄物的處置及貯存是核能發展中重要的環節之一，對此，國際社會一致認為有必要通過一個以維持用過核子燃料及放射性廢棄物管理方面安全為最高目標的公約：《用過核子燃料及放射性廢棄物管理安全聯合公約》(下稱聯合公約)，作為國

際上針對用過核子燃料及放射性廢棄物管理議題之主要溝通平台。台灣在面臨核廢貯存與處置議題時，應如何取得各利害關係人之間支持，將是我國能源政策即將面臨之重要課題。

II. 主要內容

本研究藉由文獻分析法及質性研究法等，由各國依照《聯合公約》所繳交之國家報告探討國外關於用過核子燃料及放射性廢棄物長期貯存與最終處置之政策與案例，並且從各國之國家報告書中，整理出各國對於短中長期之貯存的定義與標準。進一步針對台灣國內之各個焦點團體進行深度訪談，並以訪談結果進行紮根理論分析，以了解現今國際趨勢及彙整國內對於此議題之多元觀點，綜合上述成果舉辦願景工作坊，邀集各領域權益關係人共同討論，嘗試導入審議式民主之精神，以因應我國未來核電廠即將面臨之放射性廢棄物處置議題能夠遵循「放射性物料管理法」第 17 條之規定符合相關國際公約之要求，並且作為未來台電及原能會政策執行之參考依據。

III. 結果與討論

當前國際社會對於用過核子燃料的處理大多採取水池冷卻、乾式貯存、最終處置三階段進行。其中包含的長期貯存各國在制度面(包含責任歸屬、知識、經驗與資訊管理)及技術面(包含設施壽命、包裝材質)的考量各有不同，並且其運作還必須建立在妥善完成公眾溝通、建立管理組織、確立經費來源等措施的前提下，因此各國對於各自條件的不同訂定了各自長期貯存具有可行性並能確保安全永續經營的年限。

國家或組織	貯存方式名稱	年限
IAEA	短期貯存/長期貯存	小於 50 年/介於 50 至 100 年之間
EC	長期貯存	至少 30 年
美國	短期貯存/長期	60 年/160 年

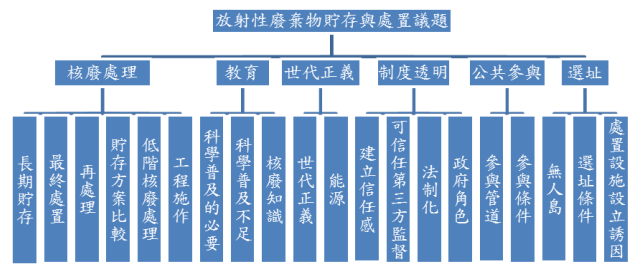
	貯存	
英國	長期貯存	介於 50 至 100 年之間
法國	長期貯存	至少 60 年
荷蘭	長期貯存	至少 100 年
德國	長期貯存	至多 40 年
加拿大	乾式貯存	至少 100 年
日本	暫時貯存	30 至 50 年
芬蘭	暫時貯存	30 至 50 年

目前國際間對於用過核子燃料以及其他具有較高活性的放射性廢棄物所採取的最終處置方式是深地質處置，在處置之前，部分國家如英國、法國及日本會先將其進行再處理，以求將放射性廢棄物的體積及放射性減少；不再進行再處理的用過核子燃料是先進行長期貯存，待至一定的廢熱及輻射量消散之後再來進行深地質處置。大多國家傾向進行安全的長期貯存(50 至 100 年)等待之後制定用過核子燃料的最終處置策略，但瑞典及芬蘭正積極推動直接處置。不管各國如何選擇，用過核子燃料及高階放射性廢棄物唯一的處置方式就是深地質處置。

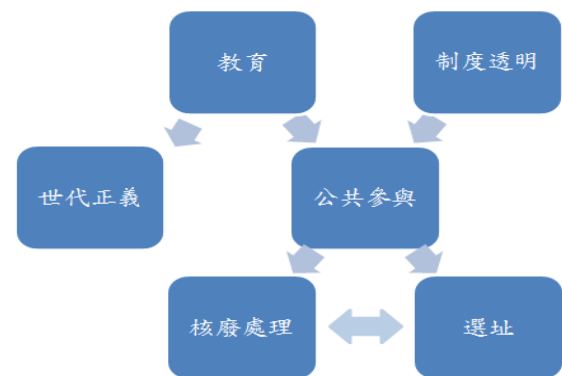
受訪者認為即使台灣現即決定讓所有的核子反應爐除役或提早除役，至今為止所產生的核廢料仍然存在，需要透過完善的貯存與處置設施，以確保核能利用相關的輻射風險能永遠的離開我們的生活圈，達成真正的非核家園。其中，處置設施的設立往往曠日廢時，因此在最終處置之前核廢料需要暫時性的存放，而針對存放的方式，受訪者普遍也都接受國際間常見的乾式貯存。對於目前使用的濕式貯存及未來將使用的乾式貯存，受訪者認同這是核廢處置前的步驟，乾式貯存為貯存中的一個進程，勢必需要進行。不過受訪者仍對於長期的貯存保有疑慮，主要是這個長期貯存設施必須設立一個壽命年限，絕不能無限的延長其運作的時間。

核廢相關資訊的完全公開是建立政策信賴度的一個重要基礎，若民眾與環保團體在此方面對於政府保持著不信任的態度，恐怕仍無法解決信任危機的問題。受訪者認為除了對於政府的不信任，不夠公開透明的資訊可能造成民眾心理上的恐慌，對民眾造成心理因素的影響，可能比因的輻射洩漏問題影響還要明顯，因為不了解，大家對於它過度的恐懼。因此，唯有資訊充分公開，相關專業知識透過科普的方式使人民具備相關的正確認識，以及正視核廢本身特質與各種處理模式潛藏的風險，並完整傳達給民眾，應該是消除心理疑慮較為積極正面的處理方式。

通過紮根理論分析，權益關係人對於放射性廢棄物貯存與處置議題所關心的議題共有 20 項，而這 20 項所關心的議題可以進一步區分為「公共參與」、「制度透明」、「核廢處理」、「世代正義」、「教育」與「選址」六個面向。



本研究亦發現此六項核心議題間存在相互關係，核廢的處理方式以及設施的選址皆需要在完善的公共參與下做決定，其中參與形式的透明以及法規制度的完整是受訪權益關係人所認為一個完善公共參與的條件，再加上政府明確的角色定位或是交由可信任的第三方監督都有助於建立民眾的信任感；完善的公共參與另一個條件是要由具有充足相關知識的民眾來參與，為了這個目標科學的普及以及對民眾的教育是相當重要的，隨著知識的提升，能減少不必要的謠言，使公共參與的過程更加有效率。核廢的處理以及選址的議題除應在充分的公共參與下做決定之外，彼此也互相影響著，不同形式的貯存或處置方式對於所需的廠址應有不同的條件及考量。



在工作坊進行過程中，公民常對核廢處置各階段中政府機關角色定位有所爭執，在實務上，角色定位常常拘泥於法規有無規定，而無著墨於權責內的開創，以及主管單位間與開發業者間權責的相互支持與連結，因此角色劃分地帶過於模糊且有灰色地帶，故探討並界定主管機關與開發業者於民眾參與及溝通所扮演之角色實有繼續深入探索之必要。

多位公民亦針對利害關係人定義與焦點團體定位有許多意見。因此建立完整的利害關係人及焦點團體的選擇機制，使後續的民眾溝通過程中能有效獲致來自各界的意見，藉此提高民眾接受度。參與形式的透明以及法規制度的完整是受訪利害關係人認為一個完善公共參與的條件。政府明確的角色定位或是交由可信任的第三方監督都有助於建立民眾的信任感。

IV. 結論

1. 最終處置的目標為將其從人類的生活圈完全隔離，使之不致影響到人們生活。其中包含兩種路線：直

接處置及經再處理後處置。目前國際間主要研究的處置方法為深地質處置，其中除制度與技術層面的問題外，近年來尚有民眾接受度以及風險溝通等在國內外皆逐漸受到重視的議題，如何提高民眾對於可控制風險的接受度，及我國未來如何處理核廢處置等風險溝通議題之研究非常重要。

2. IAEA 針對長期貯存有特別述明需設立一個結束點，因貯存只是一個暫時的過渡狀態，提供緩衝最終處置做準備，亦即各國對於貯存年限的定義雖各有不同，但不能將長期貯存無限的延長。依本研究所收集的國際對於長期貯存之定義，各國皆有針對貯存的年限訂下目標以配合處置設施的發展。
3. 民眾拒絕某些設施在鄰近地區設置的鄰避現象，是民主制度在本質上難以處理的困境。正因為會有此困境，選址不應該被延遲到暫存貯存設施即將用罄才倉促著手，否則在迫於時間壓力下可能影響到決策的品質，因此如何充分的與民眾溝通能讓民眾對於政策更放心以減少衝突，進而提升整體效率是未來重要的課題。
4. 本研究自 25 份訪談稿中找出 103 個開放編碼(open coding)，並組成 20 項主軸編碼(axial coding)，最後歸納出 6 項選擇編碼(selective coding)。經由紮根理論的推導，歸納出影響利害關係人對核廢料處置之核心因素為公共參與的完善程度，如何在透明以及完整的法規制度下使具有充足相關知識的民眾參與是受訪利害關係人所關心的。其中，政府明確的角色定位或是交由可信任的第三方監督都有助於建立民眾的信任感。
5. 應在納入民眾參與討論核廢處理議題之前，宜先納入民眾參與討論如何建構適當的溝通對話模式與程序。以免因為過度著重在細節性的技術性討論，而忽略了討論適當的溝通與對話模式，不僅阻礙實質議題方面共識的形成，更有可能加深既有的不信任。
6. 由於未直接涉及核廢處理議題，會議較容易形成共識，亦有助於後端核廢處理議題討論對立之緩和。而溝通對話模式與程序，未必僅能以一種方式呈現或僅舉辦一場，亦可考慮聽證與公民共識會議先後舉辦，以利聚焦各方意見。換言之，公民參與方式之多元，不應拘泥於「定義」，宜視發生的情況而定。

參考文獻

- [1] IAEA (2012). IAEA Safety Standards, Storage of Spent Nuclear Fuel, Specific Safety Guide, No. SSG-15
- [2] European Atomic Energy Community (2015). On the implementation of the obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Fifth Review Meeting of Contracting Parties Vienna, May 2015
- [3] IAEA (2014). United States of America Fifth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management

- [4] DECC (2014). The United Kingdom' s fifth national report on compliance with the obligations of the Joint Convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management
- [5] IAEA (2014). FRANCE, Fifth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations
- [6] IAEA, Netherlands, Fifth National Report on Compliance with the Joint Convention
- [7] IAEA (2014). Canadian National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management
- [8] AEA (2012). Report of the Federal Republic of Germany for the Fourth Review Meeting in May 2012 Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management
- [9] IAEA (2014). National Report of JAPAN for the Fifth Review Meeting, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management
- [10] IAEA (2014). Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, national report from Denmark
- [11] Archon Fung(2006). Varieties of Participation in Complex Governance. Public Administration Review. 66-75
- [12] IAEA (2014). Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management 5th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention
- [13] 林國明、黃東益(2004)，公民參與模式及其運用，公民參與：審議民主的實踐與全民健康保險政策
- [14] 林子倫(2008)，審議民主在社區：台灣地區的經驗，海峽兩岸參與式地方治理，國立台灣大學社會科學院，頁 22-23。
- [15] 黃東益、杜文苓、范玫芳、林子倫(2011)，低放射性廢棄物最終處置議題與公民參與之研究，國科會研究計畫
- [16] 杜文苓(2015)，環境風險與公共治理：探索台灣環境民主實踐之道
- [17] 陳向明(2002)，社會科學值的研究
- [18] 胡幼慧(2008)，質性研究：理論方法及本土女性研究實例

乾式貯存設施密封鋼筒不銹鋼材料應力腐蝕發生條件研究

A Study on SCC Initiation of Stainless Steel Used in Dry Storage Canisters

計畫編號：MOST 105-NU-E-390-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：張惠雲

e-mail：hychang@nuk.edu.tw

計畫參與人員：王曆俐、王廷懿

執行單位：國立高雄大學土木與環境工程學系

摘要

國內台電公司於核能電廠內規劃興建用過核子燃料乾式貯存設施(以下簡稱乾貯設施)。與美國同樣，國內乾貯設施是由混凝土護箱與不銹鋼密封鋼桶所構成。考慮國內乾貯設施長期維護與監測之需求，甚至未來設施更新作業，本計畫針對國內乾貯設施密封鋼桶不銹鋼材料大氣環境下 應力腐蝕劣化 (SCC) 發生條件進行研究。研究內容包括：(1) 蒐集分析各國不銹鋼護筒鹽霧應力腐蝕案例與文獻，(2) 研析不同鹽分應力腐蝕發生之臨界條件，(3) 研析不同種類試片應力腐蝕發生之臨界條件。本計畫研究成果除應用於評估國內不銹鋼密封鋼桶 SCC 可能發生位置，也將有助於乾貯設施長期維護與監測技術之本土化研究發展。

關鍵詞：不銹鋼，材料試片，鹽霧試驗，應力腐蝕。

Abstract

Taiwan adopts a dry storage system composed of a concrete cask and a Type 304L stainless steel canister. To meet the need of long-term maintenance and monitoring of dry storage system and the renovation, detailed investigation has been made on the initiation conditions for atmospheric stress corrosion cracking (SCC) to occur in stainless steel. In detail, literature review is first given to the SCC tests of stainless steel. The conditions for SCC initiation are then analyzed and compared along salts and test specimens. The results obtained above will help locate the probable SCC position of stainless steel canister and help Taiwan develop local long-term maintenance and monitoring program for dry storage systems.

Keywords: stainless steel, material specimens, salt fog test, stress corrosion.

I. 前言

如圖 1，國內台電公司已於第一與第二核能發電廠內規劃興建用過核子燃料乾式貯存設施 (以下簡稱乾貯設施)。與美國同樣，如圖 2，國內乾貯設施是由混凝土護箱與不銹鋼密封鋼桶所構成。乾貯設施與一般工程相同，設計使用年限設定為 50 年。若乾貯設施設計使用年限將屆而最終處置場址仍無法決定，則以更新設施來因應。在這樣的考量下，美國核管會 (U.S. NRC) 於 2012 年 11 月公佈的資訊通告 (Information Notice) 中建議，將不銹鋼材料應力腐蝕劣化 (stress corrosion

cracking, SCC) 評估結果，納入乾貯設施延長管理計畫 (最長達 120 年)。

過去工業使用經驗，不銹鋼材料在特定環境與材料條件下，會有應力腐蝕劣化 (SCC) 現象。考慮國內乾貯設施長期維護與監測之需求，甚至未來設施更新作業，本計畫因此針對國內乾貯設施密封鋼桶不銹鋼材料大氣環境下 SCC 發生所需環境條件 (溫度，濕度與時間)，與材料條件 (冷加工程度，殘餘拉應力與外加拉應力、應變等)進行研究。

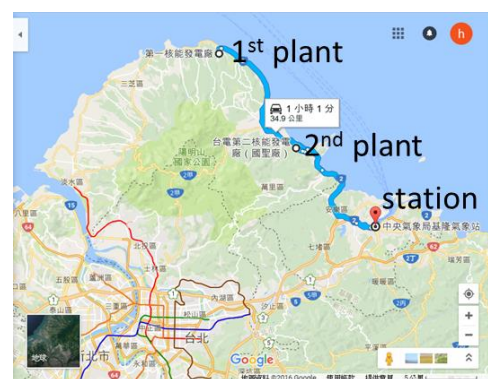


圖 1 國內乾貯設施所在核電廠與氣象觀測站
(<https://www.google.com.tw/maps>)

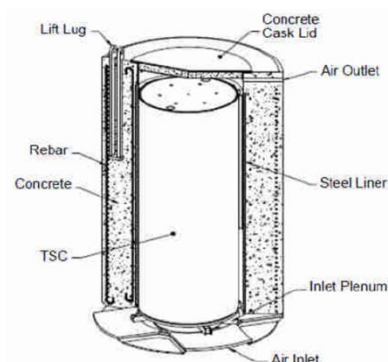


圖 2 乾貯系統 (<http://www.nacintl.com/magnastor>)

II. 不銹鋼材料與 SCC

不銹鋼材料依合金特性與微觀結構，可區分成 3-系列的沃斯田鐵不銹鋼 (austenitic stainless steels)，4-系列的肥力(鐵)不銹鋼 (ferritic stainless steels)，以及雙相不銹鋼 (duplex (austenitic-ferritic) stainless steels)。總體而

言，肥力(鐵)不銹鋼與雙相不銹鋼在一般使用下較不易有氯鹽引致 SCC 之問題 (Parrott et al., 2011)。

孔蝕 (pitting) 可誘發 SCC，但抗孔蝕能力不等同於抗 SCC 能力。根據鉻 (Cr)，鉬 (Mo) 與氮 (N) 含量可定義出抗孔蝕能力指標 (pitting resistance equivalent number, PREN)

$$PREN = Cr + 3.3Mo + 16N \quad (1)$$

根據英國不銹鋼協會 BSSA (British Stainless Steel Association) 統計，例如 430 不銹鋼的 PREN 範圍介於 16.0-18.0，而一般 304 不銹鋼 PREN 範圍介於 17.5-20.8。前者屬於肥力(鐵)不銹鋼故一般使用下沒有氯鹽引致 SCC 問題，而後者則有較好的抗孔蝕能力。

日本中央電力研究所 (CRIEPI) 曾究探討沃斯田鐵不銹鋼 304 與 304L 材料之孔蝕與 SCC 相關性 (Mayuzumi et al., 2002)。試驗結果發現，在拉應力較低而材料維持彈性的狀態下，孔蝕誘發 SCC 情況明顯，也因此 PREN 指標與 SCC 試驗結果有一定的相關性；拉應力增加使材料變成塑性狀態，沿著晶界滑動破裂變成 SCC 情況明顯，也因此 PREN 指標與 SCC 試驗結果已無特定的相關性。另外，316 不銹鋼添加了 2-3% 鉬元素，被認為有較好的抗孔蝕能力，常用於醫療器材。根據統計，加氮強化的 304LN 不銹鋼的 PREN 範圍落在 19.4 與 23.0 之間，而 316/L 不銹鋼的 PREN 範圍落在 23.1 與 28.5 之間，兩種材料的抗孔蝕能力相近。至於抗 SCC 之能力，304 與 316 不銹鋼被業界歸類為同一等級。

III. 密封鋼桶 SCC 評估研究

與美國同樣，國內乾貯設施是由混凝土護箱與 304L 不銹鋼密封鋼桶所構成。由於護箱與密封鋼桶間設有通風孔，因此海鹽 (sea salt) 可能進入乾貯設施內沉積在密封鋼桶表面。海鹽主要是由氯化鈉 (NaCl)，氯化鎂 (MgCl₂)，與氯化鈣 (CaCl₂) 所組成，而海鹽的潮解溼度 (DRH) 略低於其組成的氯化鎂 (MgCl₂)。美國電力研究所 (EPRI) 過去曾採用 304(L) 不銹鋼 U-形彎曲試片進行 SCC 實驗，發現溫度 85°C 與 120°C 所對應之 RH 過低而氯鹽無法潮解反應，故不銹鋼未有 SCC 之跡象 (Caseres and Mintz, 2010)。後來改用 C 形試片在溫度 35°C，45°C，與 52°C 下進行鹽霧試驗，結果發現塑性應變大的試片比較容易有 SCC 現象。另外將 304 不銹鋼 U 形試片放置於鹽霧試驗箱，考慮自然環境條件設定絕對溼度 (AH) 也就是大氣中含水量從 15g/m³ 變化到 30g/m³，溫度從 27°C 變化到 60°C 進行反覆試驗 (cyclic test)，找到 SCC 發生所需氯鹽濃度門檻值為 0.1g/m² (Oberson et al., 2013; He et al., 2014)。

日本 CRIEPI 早期研究發現，用來模擬灰塵 (dust) 的氧化鋁可阻卻不銹鋼材料之腐蝕反應 (Mayuzumi, 1986)。對照業界經驗，鋁質鍍膜確實可增加不銹鋼產品之抗腐蝕能力 (Parrott et al., 2011)。另外，將 304(L) 不銹鋼材料拉應力降至材料降伏強度一半以下仍可能發生 SCC (Mayuzumi et al., 2002)。後來的試驗證實，銲接加工後密封鋼筒殘餘拉應力與不銹鋼材料降伏強度相當，足以致使 SCC 發生 (Shirai et al., 2011)。為了模

擬密封鋼桶實際的製程，最近有研究將兩片不銹鋼板對接後銲接，並用砂輪機修整銲道與磨平表面，再取出包含銲道之材料試片進行 SCC 試驗 (Wataru et al., 2016)。結果，改為乾式研磨後 SCC 發生所需氯離子 (Cl⁻) 濃度臨界值從 0.8 降至 0.2g/m²。考慮安全係數為 2，建議以 0.1g/m² 氯離子濃度當作 SCC 評估的鹽分門檻值。另外，溫度 80°C 下 相對溼度(RH)在 15%與 35%之區間反覆變化，比固定 RH=35%試驗需更多時間才能使 304L 不銹鋼材料發生 SCC。

與 304 不銹鋼相較下，實際乾貯密封鋼桶所用的 304L 不銹鋼之碳含量更低，故抗晶界腐蝕性較好可適用於銲接加工。也因此，美日過去使用 304 不銹鋼進行鹽霧試驗來評估 304L 不銹鋼 SCC 問題，評估結果偏保守。業界普遍認為，溫度超過 50°C 是不銹鋼 SCC 發生的條件之一，而 50°C 以下不銹鋼 SCC 則往往是發生在銲接敏化與氯鹽沉積同時作用之情形。定期水洗讓材料表面溼度有周期性變化也會促進不銹鋼 SCC (Parrott et al., 2011)。

IV. 密封鋼桶檢查案例分析

表 1 密封鋼桶檢查案例 (Bryan and Enos 2013, 2014)

核電廠	乾貯系統	使用時間	取樣位置	Cl ⁻ (mg/m ²)	水源特性
Calvert Cliffs	NUHOMS (水平式)	15.6 年	桶身	3.10-5.64	(含鹽) 河水
Hope Creek	Hi-Storm (垂直式)	6 年	頂蓋 桶身	7.5-60 2.2-7.3	(含鹽) 河水
Diablo Canyon	Hi-Storm (垂直式)	2 年	桶身	2.0-4.8	海水

註：實驗 SCC 發生所需氯離子(Cl⁻)濃度>=0.1g/m²=100 mg/m²

如表所示，美國 EPRI 對使用中的用過核子燃料密封鋼筒進行檢查。第一次取樣是在 2012 年 6 月進行，對象是 Calvert Cliffs 電廠內已使用 15.6 年之 NUHOMS 水平式存放的乾貯密封鋼筒。Calvert Cliffs 核電廠鄰近馬里蘭州南部的卡爾弗特郡 (Calvert County)，所在位置於美國面積最大的河口灣、乞沙比克灣 (Chesapeake Bay) 的西岸，河水帶有鹽味也就是鹹水 (brackish water) (SNL 2013)。Calvert Cliffs 核電廠內的乾貯設施最初核准的使用時間是 20 年，使用執照在 2012 年 11 月到期前，業主即在 2010 年申請延長使用執照。此最早實施的乾貯現地檢查主要重點在於，驗證遠距檢測密封鋼桶表面之能力，也就是對鋼桶表面狀況取得目視檢查之證據，並進行溫度量測與表面取樣 (SNL 2013;

EPRI 2014)。檢查對象是電廠內已使用 15.6 年之 NUHOMS 水平式存放的乾貯密封鋼筒。化學分析結果確認，密封鋼桶表面沉積的氯離子濃度很低，比臨界值 0.1g/m^2 少 1 至 2 位數。Calvert Cliffs 乾貯設施經審核後獲准再延長使用 40 年，且根據 NRC 規定往後須對密封鋼桶與相關組件進行週期性檢查以發現劣化跡象與處置 (NRC 2013)。

第二次取樣是在 2013 年 11 月進行，對象是 Hope Creek 電廠內已使用 6 年之垂直式存放的乾貯密封鋼筒。第三次取樣是在 2014 年 1 月進行，對象是 Diablo Canyon 電廠內已使用 2 年以上之垂直式存放的乾貯密封鋼筒。Hope Creek 核電廠位於紐澤西州，冷卻水源的德拉瓦河 (Delaware river) 是美國大西洋流域的一條河流，河水帶有鹽份也就是鹹水 (brackish water)；Diablo Canyon 核電廠位於加州阿維拉海邊 (Avila Beach)，屬於海洋 (marine) 環境、水源來自於海洋 (ocean) 也就是海水 (SNL 2014, EPRI 2016)。Hope Creek 與 Diablo Canyon 核電廠內乾貯都利用垂直式密封鋼桶之特性，將儀器從靠近上部的通風孔往下放入密封鋼桶與混凝土護箱間的環形間隙 (annular gap) 到想要的位置後，遙控儀器靠近密封鋼桶進行取樣。兩個電廠乾貯檢查結果都是平放的筒蓋比垂直的筒身有更多沉積物。Saltsmart™取樣分析結果顯示，Hope Creek 密封鋼筒頂部的筒蓋氯鹽沉積量少於 60 mg/m^2 ，遠少於臨界值 100 mg/m^2 ；Diablo Canyon 密封鋼筒使用時間仍短故筒的蓋溫度很高，因此僅對筒身取樣且所得氯鹽沉積量少於 5 mg/m^2 。

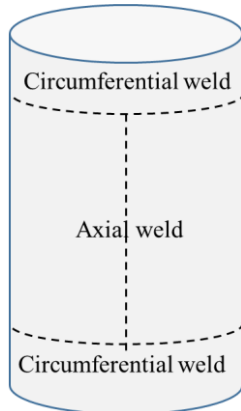


圖 3 密封鋼桶銲接位置

V. 模型 (Mockup) 試驗研究

日本 CRIEPI 曾進行實尺密封鋼桶 SCC 試驗 (Shirai et al. 2011)。密封鋼桶的直徑 1836 mm，高度 1100 mm，304L 不銹鋼板厚 12.7 mm ($=1/2\text{ in}$)，總重量 2.1 噸。如圖 3，密封鋼桶之桶身是由兩片鋼板經彎曲加工後雷射銲接而成 (axial weld 長向銲道)，之後桶蓋與桶身再進行封銲作業 (circumferential weld 圓周方向銲道)。最後與實際製作過程一樣，使用砂輪機對銲道進行形狀修整與研磨不銹鋼板表面至平整。控制試驗溫度 80°C ，相對溼度 $\text{RH}=35\%$ ，使用人工海水提供 4g/m^2 氯離子 (Cl^-) 濃度的條件下，進行 1000 小時(以上)的加速腐蝕試驗。結

果發現，距離銲道 5mm 附近的熱影響區之銲接殘留(拉)應力超過不銹鋼材料降伏應力 ($\sim 270\text{MPa}$)，加上試驗的溫溼度與氯離子 (Cl^-) 濃度等環境因子共同作用下，有很多垂直銲道方向的裂隙，切片取樣進行 SEM 確認 SCC 發生，在圓周方向銲道附近取樣的結果 SCC 裂隙最大有 3mm。上述試驗也證實使用 LSP/ZSP 等珠擊法因對材料表面施與能量改善材料微觀性質並消除殘餘應力，故可降低不銹鋼材料 SCC 可能性。

為了瞭解密封鋼桶中存在的殘餘應力是否足以造成貫穿不銹鋼板的 SCC 裂隙，也考慮到銲接程序與銲道修鑄對殘餘應力之影響，美國相關單位計畫使用 304 不銹鋼材料製作如圖 4 所示之密封鋼桶實尺模型，製作作業預計於 2014 年下旬完成，後續將進行量測與評估 (1) 銲道殘餘應力狀態，(2) 敏化程度，(3) 電化學特性，與 (4) SCC 可能性 (Saltzstein et al. 2015)。

VI. 本土乾貯 SCC 模擬試驗

根據熱流分析，乾貯密封鋼桶表面最低溫會出現系統下部入氣口附近，而配合場址氣象資料可以進一步預測密封鋼桶表面溫度與溼度 (RH) (張惠雲 2016)。以核二乾貯為例，密封鋼桶下部溫溼度洽滿足海鹽潮解條件時，對應的溫度約為 55°C 。颱風大雨時，從乾貯系統下部入氣口進入的水氣量會增加、溫度可能會進一步下降，為瞭解相關影響本計畫先期研究因此爭取業界長期協助，持續進行累計 10,000 小時以上長時間的中性鹽霧試驗。鹽霧試驗箱的工作原理是用人工方法，在箱內加速模擬鹽霧環境，來進行耐腐蝕性能的考核。設置鹽霧試驗箱內溫度，飽和塔溫度，噴霧壓力，試片在鹽霧試驗箱中懸垂放置，利用 5% 氯化鈉溶液進行連續噴霧後，用流動冷水沖洗表面沉積的鹽霧。試驗條件：溫度 ($35 \pm 2^\circ\text{C}$)，降霧量 $1\text{--}2\text{ ml/h}/80\text{ cm}^2$ ，相對溼度 $>95\%$ 。

以核一乾貯為例，密封鋼桶表面最高溫超過 120°C ，隨使用時間增加至 30 年可降至 84°C ，到達設計使用年限 50 年時溫度會進一步降至 72°C 。從業界經驗反饋，無論材料銲接敏化與否，上述的高溫 SCC 與材料冷加工 (塑性應變) 程度有相關性。本計畫研究因此參考美日國際研究，與乾貯密封鋼桶相同使用厚度 12.7 mm 的 304L 不銹鋼板，依照 CNS 規範製作 10 號標準拉伸試驗片 (平行部 60 mm)，再利用萬能試驗機將試片拉伸至設定的長度、預加塑性應變後，最後在溫度 80°C 與相對溼度 (RH) 35% 條件下使用氯化鎂 (MgCl_2) 進行 1,000 小時 (以上) 的加速腐蝕試驗。

之後利用鹽酸去除試片表面的氧化及鏽蝕物，並利用感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP) 分析酸洗後的溶液中金屬含量。藉由不銹鋼腐蝕表面成份的量測，可以定量分析氯鹽沉積於不銹鋼表面之速率，與其他氧化物之生成情況。根據上述 ICP 分析出的鈉 (Na) 或鎂 (Mg) 等金屬量，確認試驗參與腐蝕反應的氯離子 (Cl^-) 量皆已超過 SCC 發生所需臨界值 (0.1g/m^2)，甚至數十倍以上。之後，利用金相顯微鏡，找出試片表面孔蝕嚴重處，觀察是否有 SCC 裂隙。金相顯微鏡主要被用來觀察材料的顯微組織，尤其是觀察材料晶格間的變化。結果，上述試片表面雖然有長度超過 $100\text{ }\mu\text{m}$ (0.1 mm) 的孔蝕，切片進行剖面金相攝影後確認孔蝕深度雖然超過 $50\text{ }\mu\text{m}$ ，但是並沒有從該處延

伸發展出其他的裂隙、也就是無 SCC 現象。

VII. 結論

本計畫針對國內乾貯設施密封鋼桶不銹鋼材料大氣環境下 SCC 發生條件進行研究，所獲主要結果與建議如下：

- (1) 美國 EPRI 最近對 Calvert Cliffs, Hope Creek 與 Diablo Canyon 三個位於海邊或河岸的電廠內使用 2-19 年的用過核子燃料乾式貯存設施不銹鋼密封鋼筒表面進行檢查與取樣分析。分析結果顯示，密封鋼桶表面沉積的氯離子量遠低於不銹鋼材料發生 SCC 所需氯 (Cl⁻) 離子濃度臨界值 (0.1g/m²)，也就是實際的氯鹽沉積量不足以使乾貯密封鋼桶產生 SCC 現象。
- (2) 根據乾貯檢查案例與熱流分析預測，貯存初期密封鋼桶表面最高溫度可能超過美國 EPRI 實驗溫度 85℃，對應的相對濕度(RH)過低而無法使氯鹽潮解、參與腐蝕反應。配合場址氣象資料推測，乾貯下部入氣口附近的密封鋼桶表面溫溼度到達 SCC 作用範圍時的溫度約 55℃。根據業界經驗，除了氯鹽沉積，低溫 SCC 發生條件還需銲接敏化之條件配合。故評估密封鋼桶之銲接敏化程度與受影響區域，應是乾貯監測與 SCC 評估的重點工作。
- (3) 日本 CRIEPI 進行的密封鋼桶實尺模型試驗指出，銲接殘餘拉應力超過不銹鋼材料之降伏強度。如此高的應力作用下不銹鋼材料已達塑性狀態，故無論銲接敏化與否，沿晶界滑動破裂取代孔蝕變成誘發 SCC 的主要機制。本計畫研究對施加有塑性應變之材料試片進行了 1,000 小時加速腐蝕試驗與 10,000 小時中性鹽霧試驗，再將試片表面孔蝕嚴重處切片剖面進行金相攝影並未見從孔蝕處延伸出其他裂隙，確認無 SCC 現象發生。
- (4) 為反映密封鋼桶實際製作過程之影響，日本 CRIEPI 最近重新試驗並建議以 0.1g/m² 氯離子濃度當作 SCC 評估的參考值，這與美國核管會 NRC 之前的建議值一樣。從濕式研磨改成實際的乾式研磨，密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 發生所需的氯離子濃度從 0.8g/m² 降至 0.2g/m²。另外，美國 EPRI 的鹽霧試驗結果也指出，試片的塑性應變越大 SCC 可能性越高。由以上可知，密封鋼桶製作時應避免產生過大的塑性應變，與加強銲接後表面修整作業。
- (5) 借鏡美日經驗，密封鋼桶實尺模型試驗對於掌握銲接殘餘應力，敏化程度，與氯鹽沉積特性，有其必要性。針對本土乾貯設施特性與監測作業實施之需求，建議規劃製作密封鋼桶實尺模型，以供監測技術研發與密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 評估研究之用。

參考文獻

- [1]BSSA (British Stainless Steel Association) website "Calculation of pitting resistance equivalent numbers (PREN)"
<http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=111>
- [2]Bryan, C.R. and Enos, D.G.. (2013). Understanding the Environment on the Surface of Spent Nuclear Fuel Interim Storage Containers, SAND2013-8487C
- [3]Bryan, C.R. and Enos, D.G. (2014). Analysis of Dust Samples Collected from Spent Nuclear Fuel Interim Storage Containers at Hope Creek, Delaware and Diablo Canyon, California", SAND2014-16383
- [4]Caseres, L. and Mintz, T.S. (2010). NUREG/CR-7030, "Atmospheric Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Welded and Unwelded 304, 304L and 316L Austenitic Stainless Steels Commonly Used for Dry Cask Storage Containers Exposed to Marine Environments," ML103120081. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [5]EPRI (2014). Calvert Cliffs Stainless Steel Dry Storage Canister Inspection, EPRI Technical Report (No. 1025209)
- [6]EPRI (2016). Diablo Canyon Stainless Steel Dry Storage Canister Inspection, EPRI Technical Report (No. 3002002822)
- [7]He et al. (2014). NUREG/CR-7170, "Assessment of Stress Corrosion Cracking Susceptibility for Austenitic Stainless Steels Exposed to Atmospheric Chloride and Non-Chloride Salts," ML103120081. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- [8]Mayuzumi, M. (1986). Corrosion of Candidate Canister Materials under Atmospheric Condition, CRIEPI Report (No. 285038) (in Japanese).
- [9]Mayuzumi et al. (2002). Chloride stress corrosion cracking of Type 304 and 304L stainless steels in air, CRIEPI Report (No. T01042) (in Japanese).
- [10] NRC Information Notice 2012-20: Potential Chloride-induced Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel and Maintenance of Dry Cask Storage System Canisters.
- [11] Oberson et al. (2013). "US NRC-Sponsored Research on Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Dry Storage Canister Materials in Marine Environments," WM2013 Conference, 2013. (Available with NRC Accession No. ML13029A490).
- [12] Parrott et al. (2011). Chloride Stress Corrosion Cracking in Austenitic Stainless Steel - Assessing Susceptibility and Structural Integrity, Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive 2011
- [13] Saltzstein et al. (2015). Investigations of Stress Corrosion Cracking of Spent Fuel Dry Storage Used for Long-term Storage, IAEA International Conference on Management of Spent Fuel From Nuclear Power Reactors, Vienna, Austria
- [14] Shirai et al. (2011). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use-Feasibility Study on Prevention of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking for Type 304L Stainless Steel Canister, (No. 10035) (in Japanese).
- [15] Sandia national Laboratories (SNL) (2013). Data Report on Corrosion Testing of Stainless Steel SNF Storage Canisters, Prepared for U.S. Department of Energy Used Fuel Disposition Campaign (FCRD-UFD-2013-000324; SAND2013-8314P)
- [16] SNL (2014). Draft report - Results of Stainless Steel Canister Corrosion Studies and Environmental Sample Investigations, prepared for U.S. Department of Energy Used

- Fuel Disposition Program (FCRD-UFD-2014-000055; SAND2014-20347O)
- [17] Wataru et al. (2016). Study on Commercial Realization of Concrete Cask for Interim Storage of Spent Fuel – Proposal and Verification of Code Case on SCC Countermeasure of Canister, CRIEPI Report (No. N15014) (in Japanese)
- [18] 張惠雲 (2016). 乾式貯存密封鋼筒材料應力腐蝕劣化發展評估之研究, 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫成果報告 (計畫編號: 104FCMA021)

乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬 Simulating the thermal behavior of dry storage system under regular storage Situation

計畫編號：105-NU-E-007-010-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：白寶實

e-mail：bspei@hotmail.com.tw

計畫參與人員：李宛芸、陳虹宇

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

摘要

本研究針對核一廠乾貯系統利用 104 年之氣候資料探討貯存第 1、10 及 20 年時之熱流特性。其研究結果不僅充份呈現核一乾貯設施於貯存期間之熱流穩定性，更顯示目前核一乾貯採行進出口溫差進行設施狀況監測之作業確能符合設施於日常變化之影響。最後，本研究更將所建立之分析技術應用於核一乾貯系統封鋼筒之表面溫度及相對溼度評估。透過此一模式之建立，本研究可為未來進行機率破壞力學或應力分析等作業提供所需之劣化速率與位置。最後，本研究更建議未來可進一步針對現有之研究成果，結合機率及確性破壞評估技術，為我國未來乾貯營運需求安全評估技術先行建立基礎技術。

關鍵詞：核一乾貯、計算流體力學、氣候、評估方法。

Abstract

The goal of this study is to investigate the transient thermal-hydraulic behavior of INER-HPS dry storage system during the long-term storage phase, based on the methodology developed by the mutual fund project in 2015. In this year, the collected weather condition near the site of CSDSS was employed to calculate the thermal behavior of the INER-HPS with different thermal load as the time after the 1st, 10th and 20th year from the storage beginning. The simulated results not only indicate that the components' temperature of INER-HPS can be further stabilized by the thermal capacity of the INER-HPS, but also prove that the existing surveillance method can provide enough capability for INER-HPS operating. The yearly period simulation results based on the site weather information, such as the local temperature and relative humidity of TSC surface, used to improve SCC evaluation method. This result shows that the maximum depth and possibility SCC area will not significantly affect the integrity of INER-HPS during the licensed period (40 years). Finally, we suggest that a surveillance and evaluating method combining probability damage and thermal hydraulic assessment techniques should further develop for future requirement.

Keywords: INER-HPS CFD, weather, evaluating method.

I. 前言

有鑑於以往的安全分析報告在進行乾式貯存系統的熱流分析時，皆以本身熱容量極高之熱流基礎，假設外界環境改變對於乾貯系統之暫態熱流影響可以被穩態分析加以涵蓋，進而求取系統可能之最高溫度。然而當相關系統已經完成申照之設計審查程序並著手進行建構工作以及後續 40 年貯存期間的管理與監測程序，其實際狀況下的熱流特性值得再次利用更趨於現實狀況的暫態分析來進行探討。例如，美國 NAC 公司協助台電公司對我國物管局進行核二乾貯審查工作之意見答覆時，曾提及乾貯系統在日常(日與夜間)的天候變化影響下，系統由於季節交替或是日夜所造成的環境溫變等因素變化影將使得系統出口與環境的之間的溫差提高，進而使監測期間的乾貯系統進出口溫度隨之變化可能出現約略 14°C 之變異。

除此之外，鑑於日益受到關注的應力腐蝕龜裂議題，雖然 EPRI 及 CREPI 等單位皆已投入許多人力進行相關預估模式之開發，但其多半著眼於起裂機制之預估；對於起裂後之裂紋成長則未能進一步思考 TSC 表面不同位置受熱負載、環境溫度變化及溼度改變之影響，而難以精確掌握 TSC 表面各處落於潮解閾值內之時間，故本研究藉著精確 TSC 之溫度來估算其活化能與裂紋成長率。雖然未來我國可能因為政策規劃而出現室內乾貯設施，惟在有切確證據前，仍無法直接將 SCC 之風險加以排除，故預期未來此一預估技術仍可作為其它形式乾貯設施管理及管制評估之依據。

為了能更進一步透過模擬分析的方式瞭解不同時間週期內的氣候變化對系統元件、進出口溫度差及老化管理及再檢測周期及範圍之關聯性。本團隊遂藉由原能會所提供之原子能合作研究計畫之執行，著手針對探討乾式貯存系統於日常熱流特性所需之分析技術進行建立，並於研究中針對不同天候特性進行熱流模擬，以期協助管制單位建立所需之監測技術與合適的監測基準，並能更進一步地掌握未來乾貯系統正式營運時之系統熱流特性，並作為未來老化管理與十年再評估之發展基礎。

II. 研究方法與模式

本研究以係採用與美國 NRC NUREG-2174 相同，並已多次應用於我國乾貯相關熱流分析作業之商用計

算流體力學軟體 FLUENT 為基礎。基於本研究之目的係以探討乾貯系統在混凝土護箱內於正常貯存條件下長期貯存時之熱流特性，故其暫態穩態統御方程式可描述如下。

質量守恒方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

其中，

ρ 為流體密度；

而 $\vec{v}$ 為速度向量。

動量守恒方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

其中， P 為靜壓力， $\rho \vec{g}$ 為體積力項；

$\vec{F}$ 為額外力源， $\vec{\tau}$ 為應力張量，其形式可以寫為：

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \vec{I} \right], \quad (3)$$

其中，

μ 為流體黏滯係數；

$\vec{I}$ 則為單位張量。

能量守恒方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (\kappa_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4)$$

其中，

E 為單位質量之總能量；

h 為焓值；

P 為靜壓力；

$\vec{v}$ 為速度向量；

κ_{eff} 則為等效熱導率：

$$k_{eff} = k + k_t \quad (5)$$

其中，

k 為物質本身之分子熱導率；

k_t 則為流場紊流所致之熱導率。

本研究之二維化模式主要係依據第一年所建立之模式二維化技術來進行，並據以下各項簡化邏輯進行進出口流道、燃料束及提籃等元件之二維化作業：

燃料束水力直徑： $\frac{4A}{P}$ ；其中 A 為燃料束面積，而 P 則為燃料束周長。而進出口流道面積： $H_{2D} = H_{3D} \times W_{3D} / \pi D_i$ ；其中 H_{3D} 與 W_{3D} 為原混凝土護箱之進出口尺寸，而 D_i 則為通道各位置上的直徑，此一結果顯示通道的高度將在二維模式中隨著直徑的增加而減少。

除了上述之結構需進行二維化計算之外，

INER-HPS 系統之凝土護箱、密封鋼筒殼體、密封鋼筒上蓋、內襯等元件因原本即屬單純圓柱或圓筒結構，故無需特意進行參數轉換作業以求得水力直徑與等效流面積等資訊。經二維轉換後的分析模式其幾何形狀與網格分析則如圖 1 與圖 2 所示。

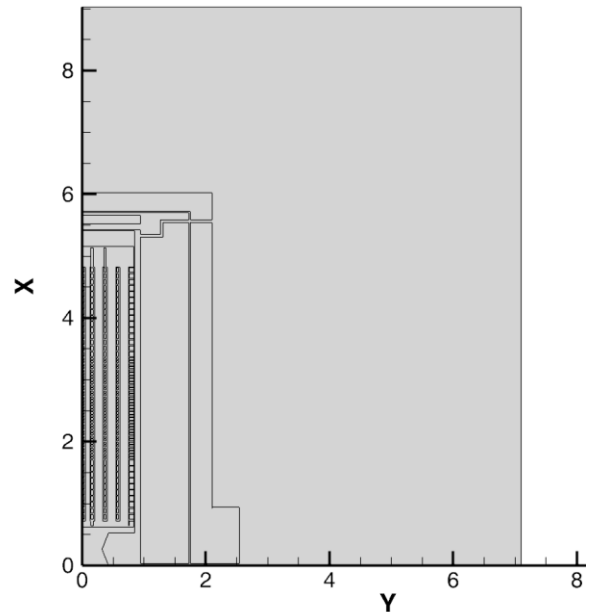


圖 1、核一乾貯系統二維模型示意圖

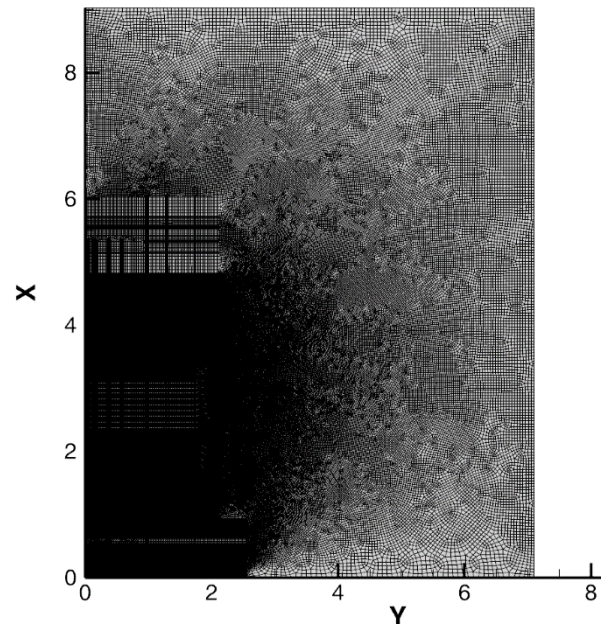


圖 2、核一 INER-HPS 乾貯系統網格分佈示意圖

本研究為求能順利求解 INER-HPS 系統於全年下受外界環境影響之影響，故透過中央氣象局進行 104 年場界附近之氣象資料蒐集(如圖 3)。惟考量即使依暫態求解之時間步階進行資料蒐集，全年度下仍需處理超過 5 萬點之環境溫度，而使計算求解所需之作業更加複雜；此外，透過 104 年之第一期研究結果已證實短期暫態對於整體系統之影響極為有限。故本研究於作業前之資料處理階段，僅留取當日溫度極值之數值(最高溫及最低溫度)與其發生時間，再透過 104 年所建立之分析技術，以

SIN 函數之形式，將其轉換為對應時間下之溫度值：

$$\text{factor} = (T2 - T1) * \sin((\text{CURRENT_TIME} - \text{ime1}) / (\text{time2} - \text{ime1}) * 3.141592 / 2);$$

其中，factor 代表每時間步階之溫度變化量，而 CURRENT_TIME 及 time1、time2 分別物理時間及每日之最高及最低溫發生時間。

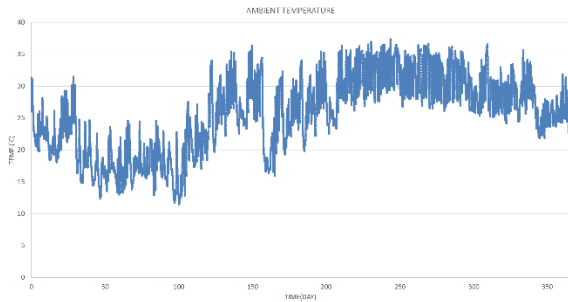


圖 3、INER-HPS 場址 104 年環境溫度資訊

III. 結果與討論

如圖 4 至圖 6 所示，當乾貯系統由午夜開始，將因為環境溫度逐步受日照而升溫之現象所影響，使空氣流動及護箱頂部之迴流區隨日照與環境溫度的增加而呈現升溫之趨勢，但整體而言元件之溫度分佈及熱傳機制並未出現顯著之改變。此結果與第一年利用假設性周期環溫進行模擬之結果相同，皆證實乾貯系統所具有的熱質量將可平衡短暫態之環境變化，而令系統之元件溫度趨於穩定，因此無需對於極短的暫態影響進行深入之探討。

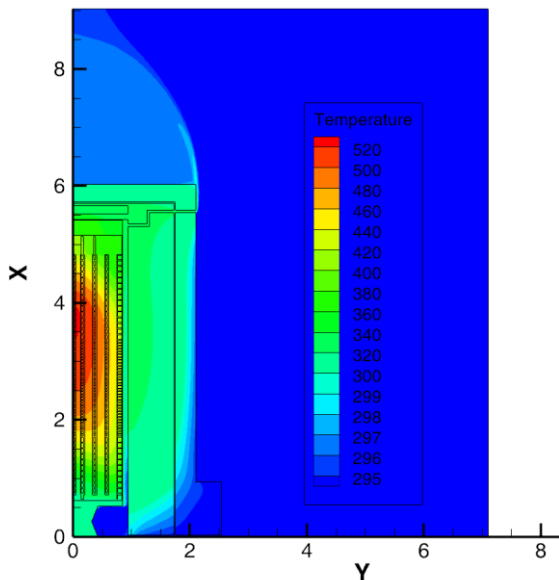


圖 4 乾貯系統於凌晨之整體溫度

由圖上燃料之溫度變化趨勢可以發現，燃料因處於設施最內部，故其元件溫度變化受到短時間之暫態影響(如日夜交替)極為輕微，僅有在第 10 天、30 天、100 天及 105 天等處，因為受到足夠明顯的季節交替效應，才會出現顯著的溫度變化，而其溫度變異值亦僅有 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，遠小於氣溫 $-9\sim+17^{\circ}\text{C}$ 之變化；此一結果亦進一步印證了第一年研究中指出內部元件所受之環境溫度影響將遠小於外界之結果。值得一提的是，上述所討論的溫度變

化趨勢，除了可在燃料上觀察到之外，在與其相鄰的承載圓盤、導熱圓盤等亦可發現相似之趨勢，惟因趨勢線相仿之故，而未於圖 7 上重複標出。

相較於內部元件具有較穩定的溫度值，如 TSC 與 VCC 等外部元件將隨著氣溫的變化而有比燃料束更為顯著的溫度起伏；且若將 VCC 與 TSC 進行更深入的比對後可以發現，VCC 在氣溫較高的第 50 天至 100 天的範圍內，其變化趨勢與氣溫變化幅度相當，明顯大於其它元件。這是因為在此一區段內，正逢寒流與陰雨天氣而使日照輻射效益更形減低，使得大部分的热量在極低的环境溫度下，即直接由 TSC 表面藉由熱對流帶走而未再藉由熱輻射傳送之 VCC。

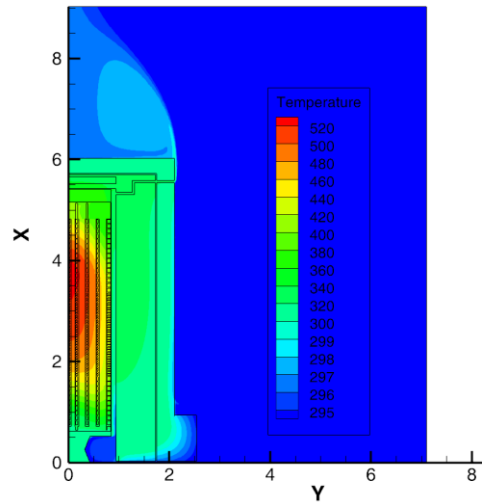


圖 5 乾貯系統於 AM 6:00 之整體溫度

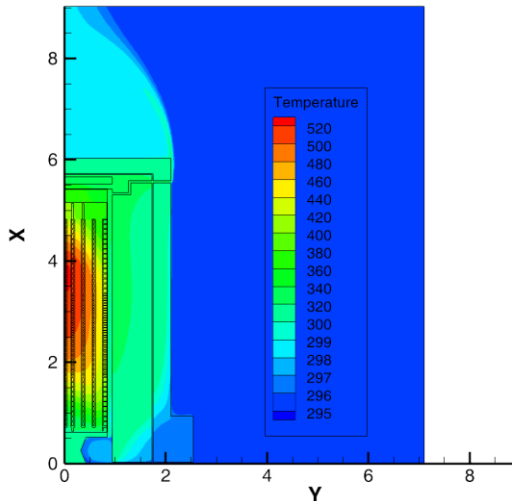


圖 6 乾貯系統於 AM 12:00 之整體溫度

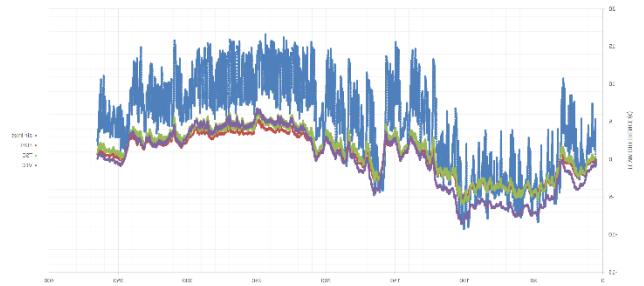


圖 7 貯存初期之乾貯系統元件溫度變化趨勢

不同於新貯存的護箱，當燃料退出爐心並乾貯一段時間後，其衰變熱的減低將會令元件溫度出現如前節所述的下降趨勢，但由圖 7 與圖 8 與所示之結果進行檢視則可發現，隨著貯存年份增加所致的熱衰變率下降狀況並不會影響系統於日常環境溫度下的元件變化量。這是因為相較超過 100 噸之乾貯系統，其每改變 1°C 所需的熱量約為 $1 \times 10^7 \text{W}$ ，係為燃料衰變熱的 2000 倍以上，故可以緩抑整體系統受到環境變化之影響。

透過本研究對於全年度之狀態進行暫態分析後可以發現乾貯系統整體進出口溫差的變化趨勢係與環境溫度的變化(如圖 9 與圖 10 所示)呈現反向趨勢。這是因為如同先前所述及的，乾貯系統所具有的熱質量將使系統的溫度變化率遠低於氣溫之變化，而可將空氣流動廣義定義為一定溫度分佈之加熱通道。於是流入的冷空氣將隨其與空氣流動壁面之溫差，而呈現不同的移熱能力故藉由自然對流所帶走的熱量在日常狀態下將為一明顯變動之值；甚至於夜間氣溫較低的狀況，更將帶走過多的熱量而致使進出口溫度差反而擴大。

若更進一步的檢視氣溫對於進出氣口之溫差影響則可以發現，整體之溫差趨勢不論內部所裝載的燃料具有多少的熱負載(圖 9-圖 10)仍將隨著四季的更迭而出現差異，更可能在冬季時段因為氣溫的變化及日照之影響而出現較大的進出口溫度差，但整體而言其值約略接近 34°C ，並未超出 36.6°C 之監測條件。

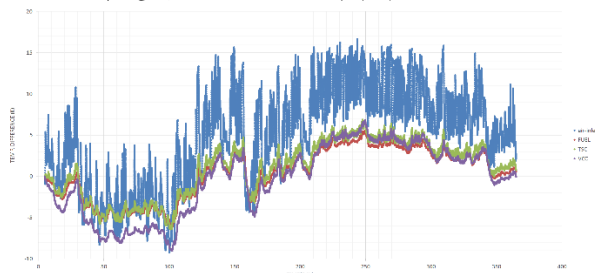


圖 8 貯存 10 年後乾貯系統元件溫度變化趨勢

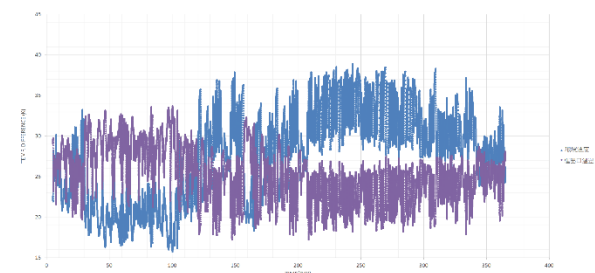


圖 9 貯存初期之進出口溫度差與氣溫變化之關係

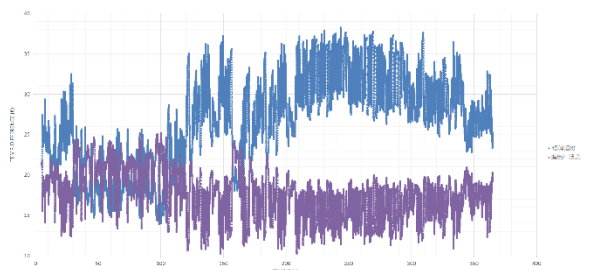


圖 10 貯存 10 年後進出口溫度差與氣溫變化關係

應力腐蝕龜裂係為我國乾貯作業施行之重要管制

議題，其主要係因為具有殘留應力之不銹鋼焊件，在含鹽之特定溫溼度狀態下造成鹽類潮解並引發之材劣化議題。以往雖然已有大量之研究據進行應力腐蝕之分析，但其結果往往係基於實驗環境下所進行的加速實驗，其目的係在於瞭解劣化與溫度之關係進而作為未來預估模式之發展基礎。然而上述的實驗往往係假定設施常時間存在於滿足應力腐蝕龜裂之條件下，而未考量天候與裝載條件對於其發生與成長之影響。

為此，本研究即藉由已建立之預估技術，針對需特別考量應力腐蝕龜裂之 TSC 密封鋼筒各處進行其溫度評估，並透過天氣模擬所得之環境溼度，重新推估 TSC 表面之合理相對溼度，進而作為判斷 TSC 表面是否發生潮解之基準。這是應力腐蝕龜裂需發生在同時符合所有條件之狀況下，因此在現今未能充分排除殘留應力及鹽類附著的可能前提下，透過 TSC 表面是否符合潮解的條件，並提供表面溫度或可作為精進應力腐蝕龜裂模式，並使其符合實際狀況。

在將環境溼度進一步依據密封鋼筒表面之溫度進行計算後可以求得如圖 11-圖 13 所之表面相對溼度變化趨勢。其代號係將整體 TSC 高度分割為 25 等分後之相對位置，每一區間位置約略等於 18cm 左右。而分析結果顯示，在 TSC 底部之 TSC1(0-18cm)，其相對溼度分佈範圍約略為 25-60%RH。此一趨勢將隨著高度增加至 36cm 區間而快速下降到 15-30%左右，甚至到了 54cm 之區間後僅剩 9-12%，而在超過 54cm 的區間皆小於 10%。此一結果顯示 TSC 表面的潮解現象將被受限於較低的位置，並且隨著高度及溫度的增加而不易發生，這也意味著既有的評估模式中同時採用較高的溫度量值及較低環溫下的相對溼度來同時進行潮解閾值及活化能的評估將是過於保守的。

而若將底部之溼度進一步與進行 SCC 分析常引用的氯化鎂跟氯化鈣等鹽類之潮解閾值進行比較後則更可發現，若於 TSC 表面考慮氯化鎂為主要 SCC 之誘發鹽類時，TSC 底部的鹽類將約略有 90%之時間係呈現潮解狀況，而在高於 36cm 之區間，則將不會有任何的潮解機會。反之，若以氯化鈣潮解條件作為 SCC 之誘發閾值時，則在 36cm 的高度位置上將有約 80%的時間呈現潮解狀況，僅當高度高於 54cm 時，才不致發生任何的潮解現象。

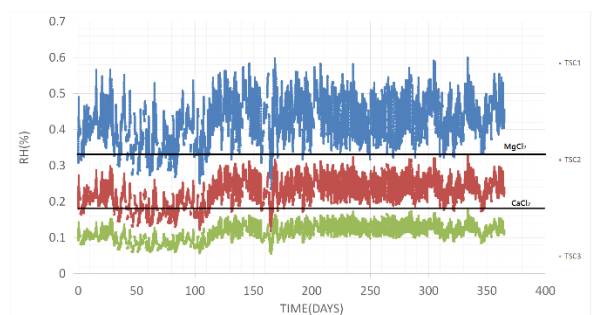


圖 11 不同高度與鹽類潮解閾值之關係圖

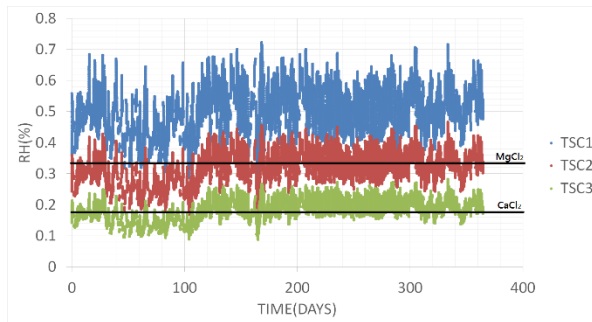


圖 12 貯存 10 年後表面相對溼度與潮解閾值關係

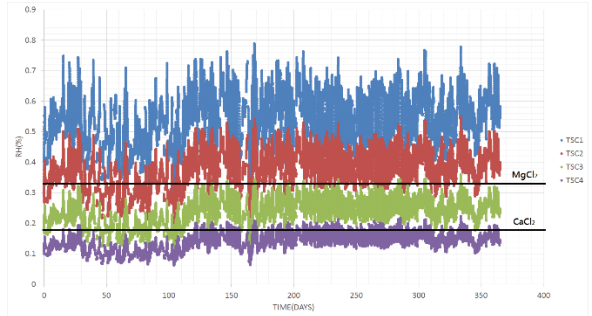


圖 13 貯存 20 年後表面相對溼度與潮解閾值關係

然而，此一可能範圍的擴大並不意味著 SCC 將隨著貯存時間的增加而加劇！這是因為 SCC 之活化能亦同時是溫度的函數，並與一參考溫度值有關。如同 EPRI 之研究成果(NUREG/CR-7170)[7]指出，對於裂紋成長與溫度之關係，可藉下式來進行估算：

$$\frac{da}{dt} \begin{cases} \alpha \exp \left[-\frac{Q_g}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] & \text{for } RH \geq DRH \text{ and } K1 > 0 \\ 0 & \text{for } RH < DRH \text{ or } K1 \leq 0 \end{cases}$$

其中， Q_g 為活化能，可依最保守之量化(40KJ/mol)或合理之 304 不銹鋼活化能(80KJ/mol)來進行評估； R 為理想氣體常數， T_{ref} 為參考溫度，其值為 80°C (353.15K)，而 DRH 則為上述定義之潮解相對溼度；而所得結果如圖 14-圖 16 所示。

在比較後可以發現，在貯存 10 年後的 TSC 雖然因為表面相對溼度較高而持續落於鹽類潮解之區間內，但因為溫度亦隨時間增加而降低之故，使得 TSC2 區間裂紋成長速率降低至初期的 2/3 左右；而位於密封鋼筒底部的 TSC1 則因為溫度變化較小，僅呈現些微下降之狀況。當貯存年限增加至 20 年時則可發現，雖然符合 SCC 誘發成長的區域增加，但底部區間因活化能逐步降低實則呈現劣化趨緩之現象；僅有在 72cm 左右之 TSC4 區間內，才可能因為溫度較高而具有較大的活化能；但同時也因為表面溫度較高之故，使得該處可能當環境溼度時間較低時即出現超出潮解閾值之環境條件。

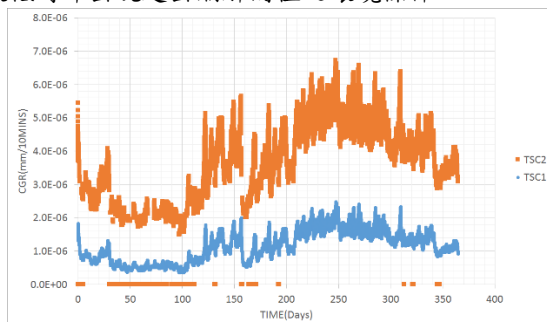


圖 14 貯存初期年不同高度之劣化深度趨勢

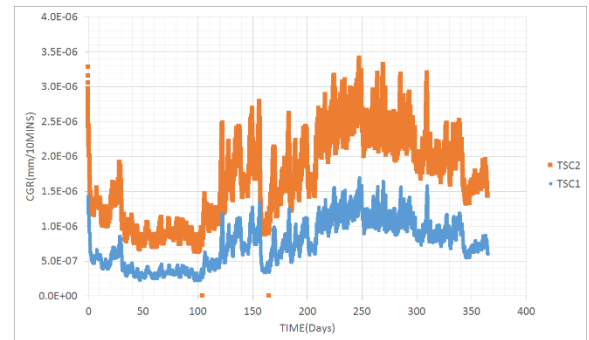


圖 15 貯存 10 年年後不同高度之劣化深度趨勢

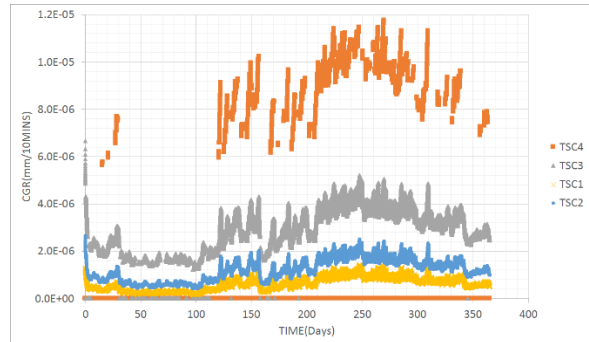


圖 16 貯存 20 年後不同高度之劣化深度趨勢

IV. 結論

本研究擬透過計算流體力學分析技術，針對我國核一廠乾貯系統於日常貯存期間的熱流特性進行探討，並利用 104 年之場址氣候資料探討核一乾貯系統 INNER-HPS 護箱，探討護箱貯存於不同年份時之元件溫度及密封鋼筒表面之溫度及相對溼度分佈趨勢。

研究結果顯示，即使在具有 26°C ($37.4\sim 11.4^\circ\text{C}$) 溫度差之環境溫度作為邊界條件，INNER-HPS 在不同貯存年份下，燃料束卻僅有 11°C 、 12°C 以及 12.5°C 之溫度差；而外部如 VCC 或 AOS 等元件亦僅造成約 $17\sim 18^\circ\text{C}$ 之溫度差。而更進一步的探討目前核一採用進出口溫差作為設施狀況監測之作業後，更證實該設定之 36.6°C 溫度限值確能合理涵蓋設施於日常變化之進出口溫度變異量。此外本研究更將所建立之分析技術應用於核一乾貯系統封鋼筒之表面溫度及相對溼度評估，以期作為精進乾貯應力腐蝕與機率破壞之評估基礎。未來若有機會，本研究除將持續對核二廠乾貯系統在日常環境影響下進行分析之外，更規劃能將本研究所建立之預估能量與起裂時間預估模式及壓力容器之確性及機率破壞預估模式進行結合，以建立一套完整之乾貯設施密封鋼筒 10 年完整性評估技術，為我國乾貯作業管制未來需考量之老化與營運作業貢獻一己之力。

參考文獻

- [1]台灣電力公司，“核一乾貯系統安全分析報告，”民國 97 年 11 月。
- [2]台灣電力公司，“核二廠乾貯系統安全分析報告，”民國 100 年 12 月。
- [3]施純寬、曾永信“乾式貯存設施設計壽命期間熱傳行為分析期末報告，”民國 103 年 12 月。
- [4]NSYS Inc., FLUENT 15.0 User's Manuals, 2015.

- [5]ANSYS Inc., “FLUENT UDF Manual,” 2015.
- [6]NRC, “Impact of Variation in Environmental Conditions on the Thermal Performance of Dry Storage Casks,” U.S. NRC , NUREG-2174, 2015.
- [7]NRC, “Assessment of Stress Corrosion Cracking Susceptibility for Austenitic Stainless Steels Exposed to Atmospheric Chloride and Non-Chloride Salts,” U.S. NRC , NUREG/CR-7170, 2016.

乾式貯存系統裝載破損燃料之熱流分析技術發展與現象研析

Thermal Analysis Methodology Developing and Phenomenon Evaluation as Dry Storage System Loaded with Ruptured Fuel

計畫編號：MOST 105-NU -E-007-011 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：曾永信

e-mail：ytseng@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：辜育庭、朱璟豪

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

本研究透過計算流體力學分析技術，於年度研究期間建立一套可針對現行各式燃料破損狀況進行熱流分析之技術，並在檢核各國法規與學術文獻後，以四種燃料狀態涵蓋各式破損燃料情境，以瞭解各項燃料破損情境下之熱流特性。在逐一針對各式破損燃料之情境與熱流機制進行研析後，本研究完成分析所必需建立之各項邊界條件、程式碼與材料性質，並依據原安全分析報告所載之各項設計基準事故，擇要進行分析與探討。分析結果顯示，即使護箱即使裝載各式具有假設破損之燃料時，仍具有充足之移熱能力，且不影響原系統之安全性與護套之完整性。而針對假想事故之燃料散落事故，分析結果顯示此類事故不會對密封結構造成影響，故不致造成分裂氣體外釋。最後，本研究對破損燃料分析時所規劃之分類更將可作為未來管制單位參考之依據，以作為屏蔽研究、風險評估之基礎，以求進一步精進我國用過核子燃料乾貯作業之安全分析與管制之能量。

關鍵字：核一乾貯、計算流體力學、破損燃料

Abstract

The goal of study is to investigate the thermal hydraulic behavior of INER-HPS dry storage system stored different kinds of damaged fuels through CFD simulation. In this year, the collected status of damaged fuel have been divided into 4 types, which can be used to bundle entail thermal situation as the INER-HPS stored damaged fuel. Based on the defined damaged fuel types, the related thermal properties, boundary conditions and required program coding also have been developed for design basis accident studies. The simulation results indicate that the INER-HPS still provide enough thermal removal capability and ensures the fuel cladding integrity as the type I, II and III damaged fuels have been stored in this system. Furthermore, the result of the beyond design basis accident also proves that the INER-HPS can provide enough structure and sealing function for pressure boundary integrity. It means that the fission product will not be release to the environmental. Finally, we suggest that the results and defined damaged fuel types can be further apply to shielding analysis, risk assessment for future requirement. This might provide more to improve the safety and regulatory for dry storage process

Keywords: INER-HPS, CFD, damaged fuel.

I. 前言

核一廠二座機組運轉至今，爐心既存與已退出至用過燃料池之用過核子燃料總數已近八仟根，其中更有少數燃料於運轉期間或是貯存期間經過運轉之監測或是燃料啜吸、渦電流、超音波等檢測作業而被判為破損燃料，因而被排除於核一廠 1 期乾貯之規劃之外。然而隨著除役計畫的推展，預期未來上述已具有破損疑慮之燃料束將無法排除在乾貯作業之範圍外，而勢必需針對裝載破損燃料之各項可能情境與安全性進行評估。

目前商用輕水式核電廠之燃料護套多為鋁合金製造，其材料融點約為 2200°F 故可抵抗爐心運轉時的高溫，該護套之設計理念除了提供足夠的結構強度以防止燃料丸及其分裂產物外釋至反應爐之外，並避免燃料丸的劣化之外，其所提供的結構維持能力亦是令熱流、臨界及屏蔽等安全分析結果得以成立之重要基礎。因此燃料護套的完整性不論是在運轉或是貯存、運送作業期間都是極為重要的關鍵因子。其完整性除了可能因為製造期間產生瑕疵而破損之外，燃料於爐心中運轉時其溫度、應力以及爐水化學特性、流固耦合所造成的振動、或是碎片卡住而造成的磨蝕等都可能進一步造成燃料護套的劣化並引發破損之狀況。

有鑑於以往的安全分析報告在進行乾式貯存系統的熱流分析時，皆是以一期乾貯所選定之完整並通過啜吸檢測之燃料為裝載目標進行分析；故於分析時無需將燃料破損所致之熱流影響納入評估範圍內，且其分析模式亦將破損燃料之各項分析條件予以納入，而致使得分析情境、邊界條件、模式與材料性質皆無法作為破損燃料評估之基礎。故本研究即以建立相關技術為目標，著手破損燃料乾貯之熱流評估技術建立，以向國人證實 INER-HPS 系統具有充足的熱流餘裕可因應各式假想事故以確保國人安全。

II. 主要內容

根據 EPRI 於 2007 年所發表之研究報告得知，燃料護套因受燃耗而導致之平均氧化層大多為 100μm，約略

僅佔 ATRIUM-10 燃料束厚度(650 μ m)的 1/6 左右，且極少超過 140 μ m。然而若進一步透過 IAEA 2002 年針對水冷式反應器之燃料失效原與改善報告之資訊進研析後可以得知，各項輕水式反應器中之造成燃料護套失效之原因除了製造的缺陷外，BWR 燃料之護套磨損往往是因為燃料丸與護套的交互作用 (Pellet- Cladding Interaction, PCI)，其中尤以爐心內碎片(debris)所造成的機率最大，(>40%)，但仍有約為 40%之破損原因不明。而近年新型式的商用 BWR 燃料(如 ATRIUM-10)亦已增加碎片過濾裝置來減少其發生機率。不同於 BWR 燃料，PWR 的磨損則是以燃料與格架(grid-rod fretting)以及燃料與爐心內碎片之振動(debris-fretting)所致之磨損各佔 40-45%；而製造的缺陷則小於 5%，其餘部分則是不明原因所致之破損。此外，根據 Kim 與 Suh 的研究結果顯示，燃料的振動幅度大約為數個 μ m 左右，且考慮過於嚴重之歷度減損情境下即需要進行裝箱作業以確保其結構幾何不致發生改變。

依據上述對破損燃料之可能形成之機制，本研究擬透過以下案例進行涵蓋規劃，以作為後續材料性質與分析案例之選定據。

類型 I：燃料護套厚度減損 50%之燃料束，用以涵蓋燃料護套受損之情形

類型 II：燃料護套具有髮絲紋或針孔等貫穿孔之燃料束，用以涵蓋燃料護套出現破損時之情形

類型 III：採用集裝箱進行防止燃料幾何形狀改變

類型 IV：假設性燃料散落事故，以涵蓋最嚴重之假想事故。

本研究於類型 I 之案例規劃中，擬探討雖符合 ISG-1 之燃料，但其表面卻存在德國法規中所在意的護套厚度減損狀況，並保守假設其護套厚度已均勻損失至原有厚度的 1/2。而針對類型 II-燃料護套具有髮絲紋或針孔等貫穿孔之燃料束，則僅需針對燃料護套內部氣體性質之變化進行設定即可依循既有安全分析報告中之材料性質進行均質化模式之設計，並求取其等效燃料束特性以作為此類破損燃料分析之依據。

不同於上述兩種燃料束幾何形狀未受改變之狀況，類型 III 之燃料為了確保在乾貯作業期間可以不致產生燃料束元件幾何形狀改變或造成內部元件或破片的遺失，係將用過燃料棒由燃料束中取出，並移除了燃料束之格架、進口噴嘴以及末端提把，並利用一個金屬護箱先行將燃料束加以盛裝後再置入燃料提籃中。而預期在此一包封作業下將導致該容器之燃料束呈密集擺置並於提高熱傳導效果的同時，減低燃料棒之間的對流效果。而基於以上之討論，此一類型之燃料預期可將類型 I 超過 50%護套厚度減損之情境納入考量，以盡可能涵蓋所有可能狀況。

最後，考量燃料束於此狀態下對整體乾貯設施於各式貯存狀況下之熱流特性將是未來管制所需重視之處，上述四種破損燃料束類型除類型 IV 用於探討假設性超越設計基準事故之外；其餘三種類型將依據安全分析報

告中所載之事故案例，進行正常、異常低溫、極高環溫、半阻塞及全阻塞事故之分析。而經上述假設後，本研究即利用 CFD 分析模式，先行針對各式燃料狀況之情形完成如圖 1 與所示之等效熱流特性算：

$$k_{eff} = \frac{K_{pellet}V_{pellet} + K_{cladding}V_{cladding}}{V_{pellet} + V_{cladding}};$$

並整理為表 1 所示之資料以作為模式均質化之依據。

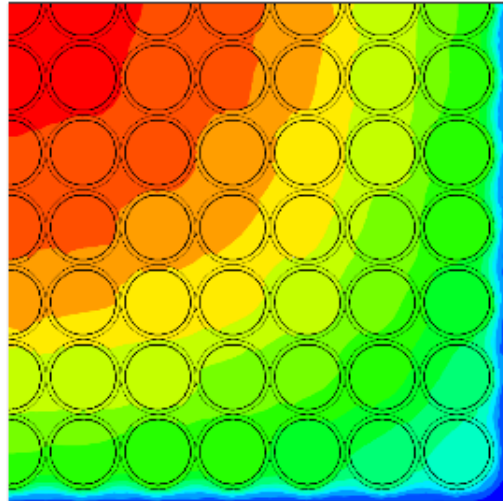


圖 1、利用 CFD 模式進行燃料溫度場計算之結果

表 1 研究中各式燃料之等效熱傳導性質

Temp.(K)	TYPE-I	TYPE-II	TYPE-III	TYPE-IV
300	0.41	0.39	2.73	9.38
400	0.50	0.48	2.79	9.04
500	0.73	0.70	2.91	8.26
600	1.01	0.97	3.12	7.95
700	1.29	1.23	3.46	7.73

本研究以係採用與美國 NRC NUREG-2174 相同，並已多次應用於我國乾貯相關熱流分析作業之商用計算流體力學軟體 FLUENT 為基礎。基於本研究之目的係以探討乾貯系統在混凝土護箱內於正常貯存條件下長期貯存時之熱流特性，故其暫態穩態統御方程式可描述如下。

質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

其中，

ρ 為流體密度；

而 $\vec{v}$ 為速度向量。

動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\frac{\tau}{\tau} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (7)$$

其中， P 為靜壓力， $\rho\bar{g}$ 為體積力項；

$\bar{F}$ 為額外力源， $\bar{\tau}$ 為應力張量，其形式可以寫為：

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{v} \bar{I} \right], \quad (8)$$

其中，

μ 為流體黏滯係數；

$\bar{I}$ 則為單位張量。

能量守恒方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\bar{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (\kappa_{eff} \nabla T) + S_h \quad (9)$$

其中，

E 為單位質量之總能量；

h 為焓值；

P 為靜壓力；

$\bar{v}$ 為速度向量；

κ_{eff} 則為等效熱導率：

$$k_{eff} = k + k_t \quad (10)$$

其中，

k 為物質本身之分子熱導率；

k_t 則為流場紊流所致之熱導率。

而依據上述之簡化與處置後所獲之分析模式其幾何形狀與網格分析則如圖 1 所示。

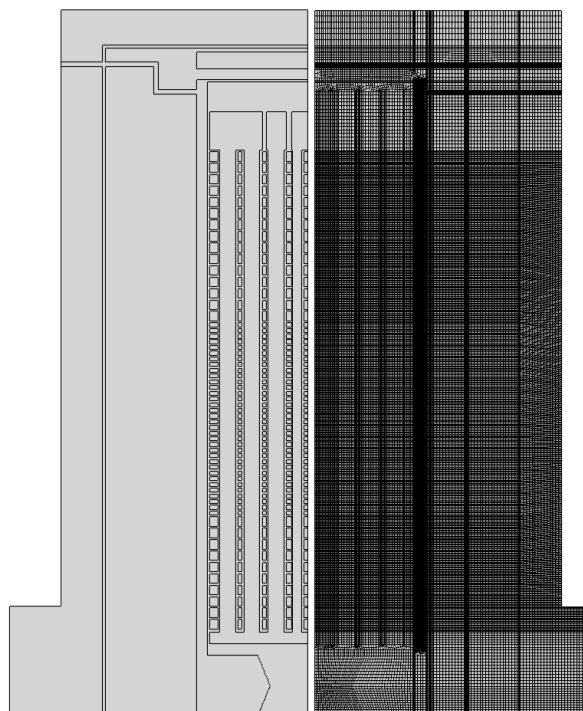


圖 2、核一乾貯系統二維模型示意圖

III. 結果與討論

TYPE-I 燃料之熱傳性質於護套薄化後將略為下降，當燃料護套之熱傳效果減低時將如表 2 所示，令裝載有類型 I 燃料的乾貯護箱，出現元件溫度略為上升趨勢之現象。然而若進一步將裝載類型 I 燃料後所造成的溫升值與該狀況下的元件溫度餘裕進行比較則可明顯發現，此一昇溫的量值由內而外將逐漸由 11°C 降至 1°C 以下，且遠小於元件具有的熱流餘裕。這是因為隨著燃料束移熱能力的減少，而令燃料束提高溫度以克服較大的熱阻，並使得緊鄰燃料的承載圓盤亦具有相當的溫升；此溫度差趨勢隨著能量向外傳遞而逐漸減低，直至外側的 VCC 與 AOS 時，時即無明顯之溫差。此一結果意味著裝載類型 I 的破損燃料將不致造成乾貯系統整體溫度分佈(如圖 3)及對流機制(圖 4)之改變。

表 2 燃料護套厚度大幅減損狀態(類型 I)之燃料於正常貯存之元件溫度。

	TYPE-I	正常燃料	限值
燃料	232.0	221.4	400
承載圓盤	231.5	221.2	371.1
導熱圓盤	225.7	220.5	220.5
密封鋼筒	128.9	128.3	426.6
VCC	88.8	88.6	93.3
AOS	67.2	67.0	93.3

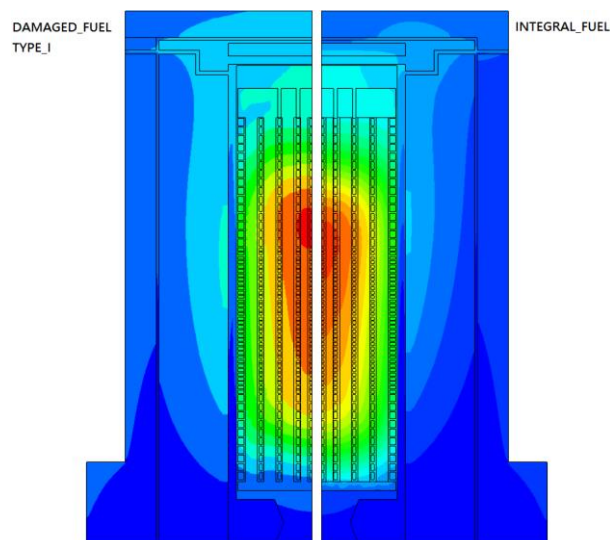


圖 3、類型 I 破損燃料與完整燃料之溫度分佈比較

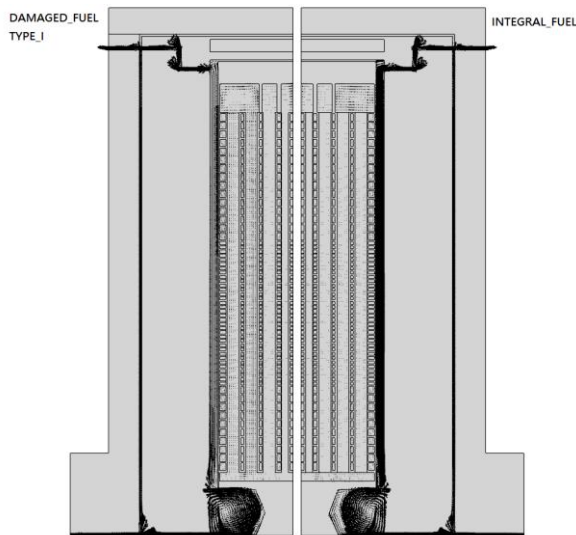


圖 4、類型 I 破損燃料與完整燃料之對流特性比較

除了正常貯存案例之外，乾貯作業的熱流分析更需針對可能之異常與意外事故之案例進行探討，方可確認該設施與內貯燃料之劃是否能符合相關法規。故本節亦針對安全分析報告中之極端溫度如 -40°C 、 41.1°C 、 56.1°C 以及全阻塞等案例進行探討，而忽略半阻塞案例之原因係考慮破損燃料主要影響提籃內之熱傳特性，且既有之分析結果皆顯示半阻塞案例將因為自然對流自動調適驅動力之故，而與貯存正常燃料之狀況無明顯差異。

如表 3 所示，當類型 I 之燃料於乾貯期間面臨設計基準事故中的 -40°C 案例時，其整體溫度差異與先前之正常案例並無明顯不同，皆是於燃料與內部組件處存在較大的溫度差；相同的現象亦可於 41.1°C 與 56.1°C 等案例中觀察到，各案例彼此之間僅因環境溫度的不同而出現量值的差異。

表 3 TYPE-I 燃料於各式貯存狀況下之元件溫度。

	-40°C	41.1°C	56.1°C
燃料	174.4	235.7	243.5
承載圓盤	173.6	235.3	243.0
導熱圓盤	166.5	229.7	237.9
密封鋼筒	67.4	133.1	141.5
VCC	10.8	93.8	104.2
AOS	-0.3	72.1	83.0

不同於前述僅改變環境溫度之案例，混凝土護箱式乾貯系統在面臨全阻塞事故時，往往因為主要熱傳途徑因阻塞而失效，進而導致系統出現時效性之安全議題，故需針對此類案例進行暫態分析並監測其溫升趨勢(如圖 5)。而在依循安全分析報告就事故發生三天後之元件溫度進行檢視後可以發現，裝載有類型 I 之破損燃料之 INER-HPS 系統，在面臨全阻塞事故時仍不致發生元件溫度超出設計限值之問題。此外，本研究亦針對裝載 7KW 類型 I 破損燃料之 INER-HPS 進行相同的熱流分析，其結果更充份顯示在台電原規劃之熱負載下，該系統確實能提供符合用過核子燃料乾貯要求之熱流環境。

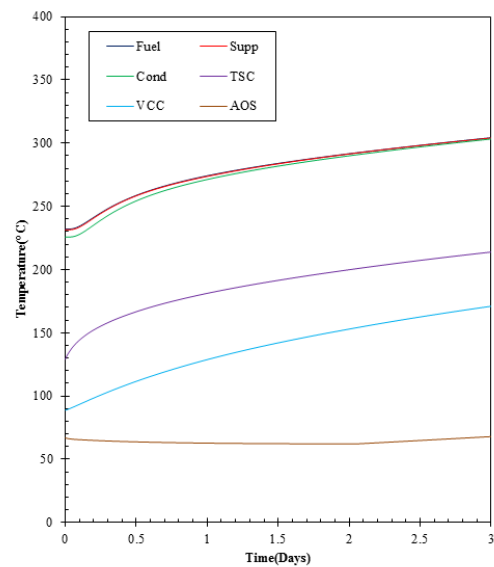


圖 5、類型 I 破損燃料於全阻塞事故下之溫度變化趨勢

類型 II 燃料主要係針對 ISG-1 Rev.2 所述，因護套表面具 1mm 以上之貫穿孔而導致燃料內之回充氣體之洩漏。由於既有的乾貯安全分析係將護套內夾層氣體之壓力保守假設為 1atm，因而使得兩種燃料狀況之熱流特性將無任何差異，亦即既有安全分析之結果已足以，也因此若要能夠更進一步探討此類燃料於乾貯期間之實際熱流差異，則勢必必需放棄原先已採用保守假設進行分析的完整燃料特性，改採趨於實際之燃料性質作為比對之依據。而比對後之結果則如表 4 所示，其結果皆證實因為氬氣層隨壓力所造成的熱傳導效益之提昇將不致對整體燃料束之移熱能力造成顯著影響，故無論該護箱於處於正常、異常甚至是意外事故狀況之狀況下，其熱流特性並無顯著不同。而此一研究結果亦證實 ISG-1 所建議之分類方法式：當燃料護套表面因針孔、髮絲紋甚至是貫穿孔等瑕疵而被歸為破損燃料時，即使直接將此類燃料逕行乾貯亦不致令該種燃料於貯存期間，因為本身所具有的熱流特性而對燃料完整性造成額外影響。

表 4 TYPE-II 燃料於各式貯存狀況下之元件溫度。

	32°C	-40°C	41.1°C	56.1°C	全阻塞
燃料	221.6	160.9	229.5	242.7	278.8
承載圓盤	221.4	160.8	229.3	242.5	278.2
導熱圓盤	220.6	159.0	228.5	241.8	278.2
密封鋼筒	128.3	79.7	149.5	162.8	215.8
VCC	88.6	6.3	86.9	103.3	120.2
AOS	67.0	-0.1	74.0	88.1	60.3

不同於上述二種破損燃料，當燃料需要額外措施以確保其零組件或碎片不致於乾貯期間散落於密封鋼筒中導致無法再取出或出現不符安全分析結果之狀況時，往往需藉由裝箱或包封之方式來達成此一訴求；而本節之類型 III 燃料即是針對此類型燃料進行熱流特性之探討。

當乾貯系統因為裝載了集裝或包封後的燃料束，其

內部的熱對流機制將因為額外容器所造成的阻礙而消失；反之，燃料束亦將因為該一容器與緊密排列的燃料束而產生較大的熱傳導能力。上述兩種相反的熱傳能力變化致使 INER-HPS 之熱流特性出現些許的改變；例如：因為自然對流能力的降低，使得整體之燃料束軸向溫度由原本隨高度增加而逐漸提高的趨勢轉而呈現近似對稱之分佈；此外，整體系統之最高溫度也因為徑向熱傳能力的增加而顯著下降。若更進一步的透過量化結果進行比整即可發，此燃料在進行正常狀態之乾貯時，其溫度將比正常燃料低約 35°C；顯示集裝後之燃料其徑向熱傳導之改善將可以克服軸向對流能力損失所造成的影響。

而其它的分析案例亦顯示，此一類型之燃料在各任設計基準事故與裝載負載下，其溫度皆能符合該護箱之設計限值，並確保燃料護套能保持於 ISG-11 所要求之溫度限值以下。而透過三種類型燃料之研析，本研究發現即使裝載被定義為破損或是具有瑕疵或護套薄化之燃料，INER-HPS 皆能令其護套與其它設施組件溫度符合原安全分析報告之要求，亦即在上述狀況下乾貯系統不致因為貯存了破損燃料而出現熱流方面之安全疑慮。

表 5 TYPE-III 燃料於各式貯存狀況下之元件溫度。

	32°C	-40°C	41.1°C	56.1°C	全阻塞
燃料	221.6	160.9	229.5	242.7	278.8
承載圓盤	221.4	160.8	229.3	242.5	278.2
導熱圓盤	220.6	159.0	228.5	241.8	278.2
密封鋼筒	128.3	79.7	149.5	162.8	215.8
VCC	88.6	6.3	86.9	103.3	120.2
AOS	67.0	-0.1	74.0	88.1	60.3

不同於上述三種類型的破損燃料係用以探討燃料貯存前已依各國可能法規進行破損狀況評估，且適度採行相關措施以令燃料符合乾貯規範之案例；類型 IV 之燃料係以用描述燃料因為假設情節而出現完全破裂的超越設計基準事故，並作為證實在此狀況下 INER-HPS 護箱對護套損事故後的防護效果及密封狀況之案例。

在假設情境中燃料束將出現嚴重的 100%破損狀況，並令破損後之燃料元件堆積於燃料提籃的底端；也因此，在此事故案例中對流效益將隨著堆積所造成的阻塞而無法於密封鋼筒內部建立有效的自然對流機。除此之外，散落的燃料將造成更高的體積熱產生率。如圖 6 所示，在此事故情境下密封鋼筒的下半部將形成顯著的熱區，惟因為燃料散落後所造成的傳導效果增加，使得燃料此時之最高溫度僅比正常案例略為上升。更值得注意的是，在此假設性事件下，承載圓盤與導熱圓盤等結構件的溫度方是關注的要點，而分析結果顯示，在此事件下 d 承載圓盤其最高溫度為 273.6°C 左右，距離其溫度限值仍有 100°C 左右之餘裕，而餘裕最大的密封鋼筒更保有接近 250°C 之溫度餘裕。此一結果證實即使在此類假想事故中，INER-HPS 系統之各元件仍可保有低於設計限值之溫度，以提供原始設計所考慮之結構強度與功能。

最後，若要更進一步檢核密封鋼筒於此狀況下是否能提供充足的密封能力則需要進一步針對此狀況下之內部壓力進行計算。依據安全分析報告第 6.3.5(5) 密封

鋼筒內部壓力計算乙節所考慮之情節，在此超越設計基準事故下之內部壓力將可透過以下之估算方式與裝載基準加以求得，以確保在此 100%燃料破損之假想狀況下，其內部壓力仍符合密封鋼筒之壓力限值。

而分析方法係沿用安全分析報告中所載之理想氣體方程式 $PV = NRT$ 進行密封鋼筒內部壓力計算。其中，燃料棒分裂氣體與放射性物質衰變產生氣體總莫耳數是使用原安全分析報告所採用之假設值(保守以 115%為之) 1034.91 Moles/Canister 來進行考慮。

而計算結果顯示在此事故下之密封鋼筒內部壓力僅為 2.7atm 左右，略小於安分析報告表 6.3.7-6 中因為採用最高燃料溫度而求得的狀況一(3.90atm)與狀況二(4.22atm)；而此一結果更再再顯示即使利用如此嚴峻的假想情境來檢查 INER-HPS 系統，仍可證實 INER-HPS 密封鋼筒確實有能力確保分裂氣體不致於外釋至外界環境之設計餘裕。

IV. 結論

本計畫於研究期間將可能之破損區分為四種可能之涵蓋案例，其中類型 I 之燃料係考慮燃料護套大幅薄化之情形，而類型 II 之燃料係假設其出現穿孔或裂紋之狀況；類型 III 假設為需依照 ISG-1 進行裝箱以滿足燃料及護箱貯存規範之案例。除了上述各式可能於裝載前需考慮之燃料狀況外，本研究更假設乙種超越設計基準情境，利用假想出現燃料束散落之類型 IV 燃料探討 INER-HPS 系統對此類事故下之密封能力進行檢核，以瞭解該種設施對於國人安全之防護能力。

在逐一針對各式破損燃料之情境與熱流機制進行研析後，本研究完成分析所必需建立之各項邊界條件、程式碼與材料性質，並依據原安全分析報告所載之各項設計基準事故，擇要進行分析與探討。而其結果顯示，即使護箱規劃裝載類型 I-III 之燃料，仍僅會對元件溫度造成些許之影響，故不致影響原系統設計之安全性。

最後，本研究已透過熱流分析初步證實了各項事故下的系統熱流特性，其分析結果除可作為系統安全性之初步佐證之外，本研究對破損燃料分析時所規劃之分類更將可作為未來管制單位參考之依據，以作為屏蔽研究、風險評估之基礎，以求進一步精進我國用過核子燃料乾貯作業之安全分析與管制之能量。

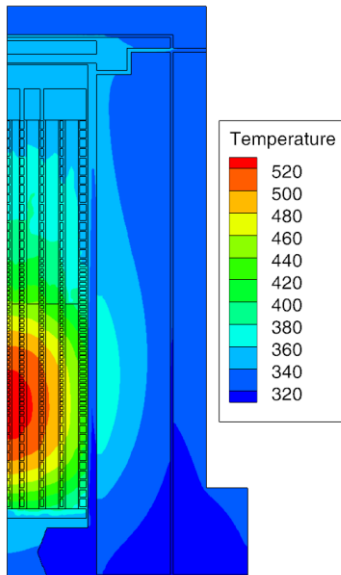


圖 6、假想情境之保守涵蓋案例之破損燃料於全阻塞事故中之護套應力

參考文獻

- [1] 台灣電力公司，“核一乾貯系統安全分析報告，” 民國 97 年 11 月。
- [2] 台灣電力公司，“核二廠乾貯系統安全分析報告，” 民國 100 年 12 月。
- [3] IAEA, “Fuel failure in water reactors: Causes and mitigation,” IAEA-TECDOC-1345, March. 2002.

地化模式應用於高放處置熱力-水力-力學-化學耦合作用之研究 Applying geochemical model on coupled thermo-hydro-Mechanical-chemical processes in High-Level radioactive waste disposal

計畫編號：MOST 105-NU-E-002-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：林文勝

e-mail：wslinlin@ntu.edu.tw

計畫參與人員：林文勝、梁書嚴、劉振宇

執行單位：國立臺灣大學水工所

摘要

本計畫蒐集分析國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊，提出發展高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式之技術方法。成果可作為高放射性廢棄物最終處置之功能安全評估與安全分析有關 THMC 耦合之基本資訊及雛形技術。

關鍵詞：熱力-水力-力學-化學耦合、高放射性廢棄物、功能安全評估、地質處置。

Abstract

This study reviewed current research and the development status of coupled THMC processes in disposal facilities of spent nuclear fuel to investigate the coupled THMC model and propose methods of THMC technical development for HLW disposal in Taiwan. The results from this study furnish THMC-based information and pretechniques for the performance assessment and safety analysis of the final disposal of HLW in Taiwan.

Keywords: coupled thermo-hydro-mechanical-chemical, high-level radioactive waste, performance assessment, geological disposal.

I. 前言

由於高放射性廢棄物處置涉及時間、空間、各種工程與天然地質材料因素及存在各種化學作用問題。經整理羅嗣海等(2005)及 Tsang et al.(2009a)有關高放射性廢棄物深地層處置主要作用過程和多場耦合與核種遷移的特點，包括：

1. 時間尺度：耦合時間尺度非常長，要求的安全期限至少在 1 萬年，因此，不確定性明顯。

2. 空間尺度：耦合的空間尺度大，包括從廢料固化體、處置場址到生物圈之間人工材料與地質材料，空間不同區域，要考慮的作用過程不同，近場是明顯的 T-M-H-C 四場耦合，遠場主要是溶質傳輸與地下水流動的 H-C 耦合。

3. 工程與天然地質材料因素：耦合的介質複雜，包括人工回填材料和開挖擾動的區域水力傳導係數非等向性、非均質性的裂隙岩體；滲流通道組成複雜，既包括地質歷史過程中形成的初始結構面，又包括開挖擾動區域化碎裂產生，甚至包括熱應力改造的結構

面。

4. 處置場內部因素：內部耦合時放射性核種熱源不斷衰減，導致溫度變化明顯。

5. 處置場封閉後關鍵場作用：化學場具有特別重要的作用，表現在因溫度、水流場、應力場變化導致的近場的化學作用引發的化學成分變化對固化體的溶解與核種的析出具有重要作用，且為核種溶質遷移時場址功能安全評估核心問題。

6. 完全耦合作用：不同於一般的溶質遷移問題，高放射性廢棄物中的核種的遷移需經過從廢料固化體、處置場址到生物圈之間，所以從近場、遠場之地質圈及生物圈遷移是處於複雜的四場耦合環境中和遷移時核種處於不斷衰變中。

基於前述高放射性廢棄物處置問題，從 1992 年開始的大型國際合作計畫 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)。研究了多個兩場耦合及 THC、THM 三場耦合及 THMC 完全耦合作用問題。於 2007 年 DECOVALEX 四期結束後，續執行 DECOVALEX-2011 (2008-2011)、DECOVALEX-2015 (2012-2015)。過去 DECOVALEX IV(2004~2007)處理地化反應所使用模式之一係為 PHREEQC 地化模式 (Parkhurst, 1999; USGS, 2014)。DECOVALEX-2015 第六期，其中 Task B.1：HE-E 熱試驗，研究膨潤土緩衝材料和泥質母岩 THM 過程變化。其中 THM 耦合所使用的模式之一係為 COMSOL 模式 (COMSOL, 2014; Itälä et al, 2010)。由於地化模式 PHREEQC 具有完整的高放射性廢棄物處置地化反應之化學熱力學資料庫。COMSOL 模式能有效進行 THM 模擬。COMSOL 模式在力學模組已建立熱傳導模組、結構力學模組、非線性結構材料模組、地質力學模組、材料疲勞模組，與流體流動、熱傳與溶質傳輸模組，若能耦合 PHREEQC 地化模式，可建立熱力-水力-力學-化學耦合分析模式。所以本計畫研究 PHREEQC 地化模式與 COMSOL 模式之熱力-水力-力學耦合，建立高放處置之 THMC 耦合模式。

II. 主要內容

1. 蒐集高放射性廢棄物處置設施熱-水-力-化耦合資料

針對高放射性廢棄物處置設施之 THMC 耦合國際合作計畫 DECOVALEX 之國家主辦或研究單位之研究成果，如法國 ANDRA、CEA 及 IRSN，德國 BGR、中國 CAS、加拿大 CNSC 及 OPG、美國 NRC 及 DOE、西班牙 ENRESA、日本 JAEA、英國 NIREX、瑞典 SKB 及 SKI、芬蘭 STUK、瑞士 ENSI、南韓 KAERI 等參與國家研究單位之研究報告。已蒐集完成 DECOVALEX 從 1992-2015 共七期計畫之研究報告共 35 本、期刊及研討會論文共 244 篇，包括第一期到第五期的執行摘要與各期研究報告、發表期刊收錄於專書及學術性期刊專刊等，與 GeoProc2008 第三屆國際研討會論文集有關 THMC 在地質材料之耦合及應用論文(Shao and Burlion, 2008)，包括以下：

(1) 第一期 DECOVALEX I(1992~1995)：已蒐集本期 3 個 BMT 和 6 個 TC 報告及 Jing et al.(1995, 1996)、Tsang et al.(2004)和 1995 年第 32 卷第 5 期國際岩石力學與礦冶科學專刊 9 篇期刊論文、「裂隙岩體耦合 T-H-M 過程」專書內 27 篇論文(Stephansson et al. 1996)及 DECOVALEX 網站(DECOVALEX, 2016)成果報告共 4 本。

(2) 第二期 DECOVALEX II(1995~1999)：已蒐集本期研究重點 4 個 Task 執行成果報告，與發表在 2001 年第 38 卷第 1 期國際岩石力學與礦冶科學專刊 12 篇期刊論文及 DECOVALEX 網站(DECOVALEX, 2016)成果報告共 5 本。

(3) 第三期 DECOVALEX III(1999~2003)：已蒐集 3 個 Task 成果報告，與發表在 2005 年國際岩石力學與礦冶科學專刊第 42 卷第 5 期及第 6 期共 18 篇期刊論文及 GeoProc 2003 論文集共 33 篇與 DECOVALEX 網站報告共 9 本。

(4) 第四期 DECOVALEX IV (2004~2007)：已蒐集 5 個 Task 執行成果報告，與研究結果發表在 2009 年環境地質期刊第 57 卷第 6 期共 12 篇期刊論文及 GeoProc2006 論文集共 24 篇期刊論文與 DECOVALEX 網站成果報告共 12 本。

(5) 第五期 DECOVALEX-2011 (2008-2011)：已蒐集本期研究重點 3 個 Task 執行成果報告，與 DECOVALEX 網站成果報告共 4 本及學術性期刊共 31 篇。

(6) 第六期 DECOVALEX-2015 (2012-2015)：已蒐集本期研究重點 5 個 Task 執行成果報告，DECOVALEX 網站有關本期研究重點報告及參考文獻共 15 本，與學術性期刊共 4 篇。

(7) 第七期 DECOVALEX-2019 (2016-2019)：本期研究重點 7 個任務工作。由 12 個國際研究團隊參與在英國、瑞士、日本及法國等地下實驗室進行工程和天然障壁系統有關試驗。

2. 研析高放廢物處置熱-水-力-化學耦合分析模式

Keyes et al.(2013)曾完整討論說明近來已創新發展

多重物理場與多功能目的跨領域使用軟體，該軟體具有使用者自創數學方程式及擴充模式功能彈性。該多重物理場與多功能目的使用軟體具有使用者自創非線性偏微分方程組和多個代數方程式組能於該軟體內進行求解。如 PETSC(Balay et al., 2013)、MUSE(Zwart et al., 2009)、OOFEM(Patzak, 2001)、Chombo(Trebotich et al., 2008)、Fenics(Logg et al., 2012)和 COMSOL Multiphysics® (COMSOL, 2014)。由於 COMSOL Multiphysics® 具有前後處理圖形化介面與使用者自創非線性偏微分方程組和多個代數方程式於該軟體內，且已建立有完整的工程程式模組及演算法於 COMSOL Multiphysics® 內。

美國地質調查局已將 PHREEQC 重新改寫為 C++ 程式語言且已將 PHREEQC 模式模組化(稱為 IPHREEQC) (Charlton and Parkhurst, 2011)。IPHreeqc 已建立如數學演算法程式庫，可由外在數值程式呼叫該 PHREEQC 地化演算器程式庫。PHREEQC 內涵熱力學資料庫，除了 PHREEQC、WATEQ4F 與 MINTEQA 外，目前已有還有美國 Lawrence Livermore 國家實驗室發展化學熱力學資料庫，該資料庫源自 EQ3/6，目前已可於 PHREEQC 模式使用，該完整的化學熱力學資料庫，使得高放廢物處置地化反應化學熱力學資料完整。IPHreeqc 程式庫亦已成功與 COMSOL 模式經由 Matlab Mathworks, 1998 撰寫的程式碼完成耦合，相關研究包括 COMSOL-IPHREEQC 模式(Wissmeier and Barry, 2011)、Coupled Thermal-Hydraulic-Chemical-Geomechanical Model(Seetharam and Jacques, 2013)、THM-GeoC(Nasir et al., 2014)、Interface COMSOL- PHREEQC(iCP)(Nardi et al., 2014)。整理相關模式發展成果如表 6。

高放廢物處置問題，主要核能國家藉由大型國際合作計畫 DECOVALEX 研究 THMC 耦合作用問題，並已發展如表 6 之 THMC 部分耦合或全耦合之模式，如 COMSOL-IPHREEQC、THM-GeoC、Interface COMSOL-PHREEQC(iCP)模式。

COMSOL 模組早期曾幫 MATLAB 開發偏微分工具箱(PDE Toolbox)，並自行研發 FEBLAB(Finite Element Method)軟體，後來完全脫離 MATLAB 並取名為 COMSOL Multiphysics，其可求解各種物理場偏微分方程。COMSOL Multiphysics 地下水模組(Subsurface Flow Module)包含流體流動、熱傳和溶解物質傳輸流動應用模式，模擬乏核子燃料最終處置情形，廢棄物燃料桶發生破裂使核素放射性物質由廢棄物罐外釋並沿著地下水破裂面移動到周遭的地層，模擬環境的廢棄物罐垂直置放處置概念包含了廢棄物罐、緩衝材料、回填材料、母岩、裂隙岩層。為嘗試發展 COMSOL-IPHREEQC 耦合之 THMC 模式，本研究先嘗試使用 COMSOL 求解三維傳輸模式模擬放射性物質釋出與傳輸的過程，設定條件包括地層中地下水流的條件(流速、流向、孔隙率、擴散係數、延散係數)、廢棄物罐的溫度條件變化和核素存量與釋出機制、地層與工程障壁的各種物理性質。

表 6 近年來發展 THMC 部分耦合或全耦合之模式介紹

模式名稱	發展者	模式涵蓋 THMC 物理或化學過程			
		熱	水	力	溶質 化學反應
		傳輸			
		(T)	(H)	(M)	(C)

HP1 HYDRUS1D-PHREEQC	Jacques and Šimunek(2005)	V	V	V
MIN3P	Mayer(2000)	V	V	V
MT3DMS	Zheng and Wang(1998)	V	V	
PHREEQC	Parkhurst and Appelo(1999)	V	V	V
TOUGH-FLAC	Rutqvist and Tsang(2003)	V	V	V
TOUGHREACT	Xu et al. (2006)	V	V	V
3DHYDROGEOCHEM	Cheng and Yeh(1998)	V	V	V
COMSOL-IPHREEQC	Wissmeier and Barry(2011)	V	V	V
FLAC3D-TOUGHREACT	Taron et al.(2009)	V	V	V
THM-GeoC	Nasir et al.(2014)	V	V	V
Coupled THCG Model	Seetharam and Jacques(2013)	V	V	V
Interface	Nardi et	V	V	V
COMSOL-PHREEQC(iCP)al.	(2014)	V	V	V

III. 結果與討論

本研究利用PHREEQC地化模式有完整高放處置有關之核種地化反應(C)及水-礦物化學作用之化學熱力學資料庫。建立COMSOL耦合PHREEQC計算地下水中的水離子分布與U238的反應情形。先設置該場址之地下水水質參數，並建立鈾離子與地下水環境之化學反應模型，物質形成的計算數據包括溫度、pH和離子濃度以及其各離子化合物，鈾離子便可以進行運算。可由PHREEQC模擬後得到各水質參數的變化情形，選取工程障壁系統與地下水之交界處($x=0.85$ $y=0$ $z=0.1$)之鈾與其衍生物在10萬年後之水質濃度如表2。

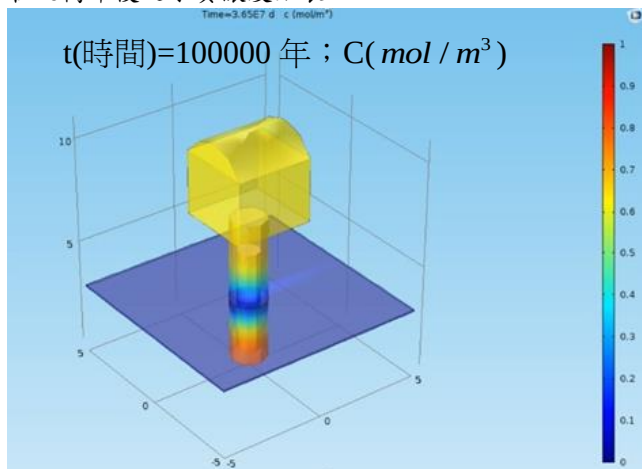
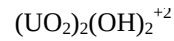


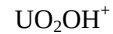
圖1 時間 $t=100000$ 年(表面透視圖)，核種U238洩漏出處置場之濃度。

表 2 U238反應後與其產物濃度分佈

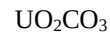
U238	濃度
U(4)	3.59×10^{-24}
U^{+4}	2.53×10^{-24}
$U(OH)_4$	1.05×10^{-24}
$U(OH)_5^-$	5.45×10^{-27}
U(5)	3.17×10^{-10}
UO_2^+	3.17×10^{-10}
U(6)	7.99×10^{-01}
UO_2^{+2}	7.88×10^{-01}



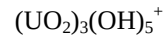
$$5.46 \times 10^{-03}$$



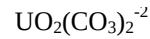
$$1.94 \times 10^{-04}$$



$$3.44 \times 10^{-06}$$



$$3.98 \times 10^{-07}$$



$$3.81 \times 10^{-14}$$

IV. 結論

為期國內研究水準能迎頭趕上 DECOVALEX 在高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合之模式分析技術，本研究針對用過核子燃料處置設施受熱-水-力-化學之國際發展現況進行研究，搜集分析國際組織與各國對高放廢物處置設施之熱-水-力-化學(THMC)耦合效應研究資訊、研析高放廢物處置熱-水-力-化學耦合分析模式。研析 DECOVALEX 六期發展之分析模式，利用 COMSOL 模式與 PHREEQC 地化模式，發展為 THMC 耦合模式，支持國內發展高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式。成果可作為高放廢物最終處置之功能安全評估與安全分析有關 THMC 耦合之基本資訊及離形技術。

參考文獻

- [1] 羅嗣海、錢七虎、李金軒、周文斌，2005，高放廢物物深地質處置中的多場耦合與核素遷移， 岩土力學 第 26 卷增刊 p.264-270。
- [2] Balay, S. et al., 2013. PETSc Users Manual. Technical Report. Argonne National Laboratory.
- [3] Charlton, S.R., Parkhurst, D.L., 2011. Modules based on the geochemical model PHREEQC for use in scripting and programming languages. Comput. Geosci. 37 (10), 1653–1663.
- [4] Cheng, H.-P., Yeh, G.-T., 1998. Development and demonstrative application of a 3-D numerical model of subsurface flow, heat transfer, and reactive chemical transport: 3DHYDROGEOCHEM. J. Contam. Hydrol. 34 (1–2), 47–83.
- [5] COMSOL, 2014. Introduction to Comsol Multiphysics® : Version 4.4, COMSOL.
- [6] DECOVALEX, 2016, <http://www.decovaler.org/index.html>
- [7] Itälä, A., V. Pulkkanen, M. Tanhua-Tyrkkö and M. Olin, Comsol Multiphysics, TOUGHREACT and Numerrin Comparison in Some Modelling Task of Spent Nuclear Fuel Disposal. Comsol Conference 2010, Paris, France, 2010. www.comsol.com/papers/8807/
- [8] Jacques D, Šimušek J., 2005. User manual of the multicomponent variably-saturated flow and transport model HP1: description, verification, and examples. Version 1.0, BLG-998. Waste and Disposal, SCK.CEN.
- [9] Jing L, Stephansson O, Tsang C-F, Kautsky F, 1996, DECOVALEX— mathematical models of coupled T-H-M processes for nuclear waste repositories—executive summary of phase I, II and III. Swedish Nuclear Power Inspectorate SKI technical report 96, Stockholm, p58
- [10] Jing L, Tsang C-F, 1995, Stephansson O, DECOVALEX—an international cooperative research

- project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories. *Int J Rock Mech Min Sci*, 32:389–398
- [11] Keyes, D.E., et al., 2013. Multiphysics simulations challenges and opportunities. *Int. J. High Perform. Comput. Appl.* 27 (1), 4–83.
- [12] Logg, A., Mardal, K.-A., Wells, G., 2012. Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method: The Fenics Book. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [13] Mathworks, 1998. MATLAB User's Guide. Inc., Natick, MA, 5.
- [14] Mayer, K.U., 2000. MIN3P V1.0 User Guide, University of Waterloo, Department of Earth Sciences, 26.06.00.
- [15] Nardi, A., Idiart, A., Trinchero, P., de Vries, L. M., Molinero, J., 2014. Interface COMSOL-PHREEQC(iCP), an efficient numerical frame work for the solution of coupled multiphysics and geochemistry. *Comput. Geosci.* 69(0),10–21.
- [16] Nasir, O., Fall, M., Evgin, E., 2014. A simulator for modeling of porosity and permeability changes in nearfield sedimentary host rocks for nuclear waste under climate change influences. *Tunnel. Undergr. Space Technol.* 42, 122–135.
- [17] Parkhurst D. L. and Appelo C. A. J.,1999, User's guide to PHREEQC (Version 2) — A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations: U.S. Geological Survey Water – Resources Investigations Report 99-4259, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, 310pp.
- [18] Parkhurst D. L. and Appelo C. A. J.,1999, User's guide to PHREEQC (Version 2) — A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations: U.S. Geological Survey Water – Resources Investigations Report 99-4259, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, 310pp.
- [19] Patzak, B., Bittnar, Z., 2001. Design of object oriented finite element code. *Adv. Eng. Softw.* 32 (10), 759–767.
- [20] Rutqvist, J., Tsang, C.-F., 2003. TOUGH-FLAC: a numerical simulator for analysis of coupled thermal-hydrologic-mechanical processes in fractured and porous geological media under multi-phase flow conditions. In: *Proceedings of the TOUGH Symposium 2003*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, May 12–14, 2003.
- [21] Seetharam, S. C, Jacques D., Developments in a Coupled Thermal-Hydraulic-ChemicalGeomechanical Model for Soil and Concrete, 2013, 2013 COMSOL Conference in Rotterdam.
- [22] Shao, J.F., Burlion, N. (Eds.), 2008. Thermo-hydromechanical and chemical coupling in geomaterials and applications. : *Proceedings of the 3rd International Symposium GeoProc'2008*. Wiley, Polytech-Lille, France. ISBN: 9781848210431.
- [23] Stephansson O, Jing L, Tsang C-F, 1996, Coupled thermo-hydromechanical processes of fractured media—mathematical and experimental studies. In: *Development in geotechnical engineering*, vol 79. Elsevier, Amsterdam, 575p
- [24] Taron, J., Elsworth, D., Min, K.-B., 2009. Numerical simulation of thermalhydrologic-mechanical-chemical processes in deformable, fractured porous media. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46 (5), 842–854.
- [25] Trebotich, D., Straalen, B.V., Graves, D., Colella, P., 2008. Performance of embedded boundary methods for CFD with complex geometry. *J. Phys.: Confer. Ser.* 125 (1), 012083 (Available from)<<http://stacks.iop.org/1742-6596/125/i=1/a=012083>>.
- [26] Tsang C-F, Stephansson O, Jing L, Kautsky F, 2009a, DECOVALEX Project: from 1992 to 2007. *Environ Geol*, 57:1221–1237. doi:10.1007/s00254-008-1625-1.
- [27] Tsang C-F, Stephansson O, Kautsky F, Jing L, 2004, Coupled THM processes in geological systems and the DECOVALEX project. In: Stephansson O, Hudson JA, Jing L (eds) *Coupled thermo hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems: fundamentals, modelling, experiments and applications*. Elsevier, Oxford, pp 3–16
- [28] USGS, 2014, PhreeqcI--A Graphical User Interface for the Geochemical Computer Program PHREEQC, http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqcI/, 2014.
- [29] USGS, 2014, PhreeqcI--A Graphical User Interface for the Geochemical Computer Program PHREEQC, http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqcI/, 2014.
- [30] Wissmeier, L., Barry, D.A., 2011. Simulation tool for variably saturated flow with comprehensive geochemical reactions in two- and three-dimensional domains. *Environmental Modelling & Software*, 26(2011), 210-218. doi:10.1016/j.envsoft.2010.07.005
- [31] Xu, T., Sonnenthal, E., Spycher, N., et al., 2006. TOUGHREACT—a simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: applications to geothermal injectivity and CO2 geological sequestration. *Comput. Geosci.* 32, 145–165.
- [32] Zheng, C., Wang, P., 1998. MT3DMS Documentation and User's Guide.
- [33] Zwart, S.P., et al., 2009. A multiphysics and multiscale software environment for modeling astrophysical systems. *New Astron.* 14 (4), 369–378.

台灣潛在母岩破壞強度特性與處置坑道破裂關係之研析

Study on Failure Strength of Kinmen Granite and Modelling the Fracture Mechanism of Deposition Openings

計畫編號：MOST 105-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、李宏輝

e-mail：yang@mail.tku.edu.tw

計畫參與人員：吳勁頤、吳仁瑜

執行單位：淡江大學土木工程系

摘要

本報告先收集離島地區花崗岩單軸試驗資料，尤其是應力-應變曲線及單壓強度 UCS 數據，研析其統計分布特性與變異。再利用 PFC 軟體之可模擬顆粒微觀張裂或剪裂型態與監測破裂音射 AE 事件之能力，以本土花崗岩單壓試驗之應力-應變曲線，回饋於 PFC 之模擬驗證，據以反推建議一組合適的微觀力學參數與其合理變動範圍，並據此微觀力學參數研析在離島預定處置深度處之現地應力場條件下，開挖處置坑道可能發生的岩壁破裂問題。

關鍵詞：地質處置場、花崗岩、單壓強度、剝落、PFC。

Abstract

This research collects the experiment data, such as the failure strength and the stress-strain curves of uni-axial compression tests of Kinmen granite. The statistic macro-parameters for UCS of granite will be calculated. Then, the input micro-parameters in PFC are determined by back-calculating from the modelling results related to the experimental stress-strain curves. The fracture mechanism of deposition tunnel and deposition holes under Kinmen in-situ stresses is studied by PFC modelling.

Keywords: Geological repository, granite, UCS, spalling, PFC.

I.前言

深層地質處置設施的力學穩定安全性是由應力在主控(stress-dominated)，其穩定性或破壞與否之關鍵因子是在：(1)現地應力(in-situ stress)之大小與方位；(2)岩石之破壞強度(failure strength)；見下圖 1 示意於高、低放處置場之差異所在。鑒於早期對金門地區花崗質母岩進行實驗室抗壓試驗時，因國內岩石力學知識之不成熟或尚缺 AE 音射試驗技術、或因未同時量測側向應變，因此目前不易獲知潛在場址金門花崗岩母岩之真實破裂損傷行為。因此，在無法再度規劃於該現地獲取岩心之民意阻礙下，目前可行的方式是利用既有少許試驗資料予以反推力學參數。本文以早期台大岩力室 MTS 高勁度壓力機所得之離島花崗岩之單壓試驗之應力-應變曲線及一些單壓強度、彈性係數統計值為依據，以回饋於 PFC 之數值校正(numerical calculation)之訓練，據以反推合適的微觀力學參數，並據此微觀力學參數以 PFC 探討在離島預定處置深度之現地應力場下，開挖處置坑

道可能發生的岩壁破裂問題。

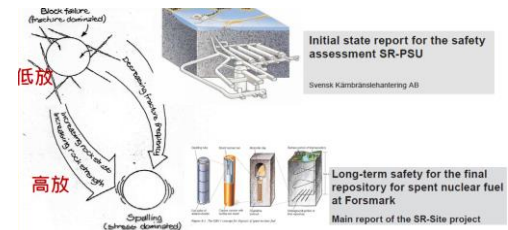


圖 1 高放深層地質處置場(應力主控)與低放處置場(地質構造控制)之差異

II. 主要研究內容

1.離島潛在場址的現地主應力特徵

處置坑道的配置與現地最大主應力有極密切關係，坑道與最大主應力方向之夾角，常是影響坑壁破裂的重要因素。由台電研究報告 SNFD2009，以台電在金門地區深度 157~430m 之間四處、用水力破裂法(hydraulic fracturing)所量測得之四組現地應力值與方向，得知其最大主應力的方向大約位在西北-東南向(楊長義, 2015)。

進一步，圖 2 整理最大水平應力(σ_H)值之深度(Z)分布，得知水平向最大主應力 σ_H 值(MPa)與深度 Z(m)之關係式約為：

$$\sigma_H = 0.035 \times Z$$

可供本案 PFC 模擬分析處置坑道剝落破裂分之用，尤其可用以外插推估最可能處置深度在 500m 處之水平最大主應力 σ_H 。同理，另一方面可得知水平向最小主應力 σ_h 值(MPa)與深度 Z(m)之關係式約為：

$$\sigma_h = 0.021 \times Z$$

該 σ_H 、 σ_h 既有現地應力之資料適可供本案後續 PFC 模擬分析處置坑道剝落破裂分之用。

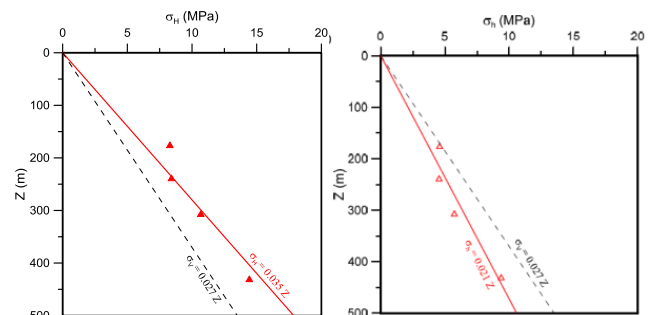


圖 2 金門地區水平最大及最小主應力分佈狀況

2. 離島花崗岩之破壞強度

本研究蒐集金門花崗岩之單壓試驗應力應變曲線、與破壞強度 UCS，並統計 UCS 強度分佈及其變異。例如，圖 3 均同採台大岩力室 MTS 剛性壓力機試驗的 15 組單壓應力-應變曲線，圖中紅色曲線為其平均代表性曲線；另增收 19 個單壓 UCS 試驗值。初步共統計 34 個 UCS 試驗值結果參見圖 4，得知：

- (1) 金門地區花崗岩母岩其平均 UCS=138.13 MPa、標準偏差 Stdev=47.37 MPa、相關變異係數 CoV=34%，其 CoV 值略大於國際花崗岩試驗(CoV=5~15%)。
- (2) 巴西人法試驗間接張力強度，平均 7.37MPa、標準偏差 Stdev=1.16MPa、CoV=18%；張力強度 T_0 約為 UCS/20。
- (3) 金門地區花崗岩母岩之平均彈性係數 $E=51\text{GPa}$ (Stdev=14.94 GPa、CoV=24%)，其 CoV 值也略大於國際試驗經驗(CoV=1~11%)。
- (4) 母岩柏松比值為 $\nu=0.22$ (Stdev=0.03、CoV=0.42%)。

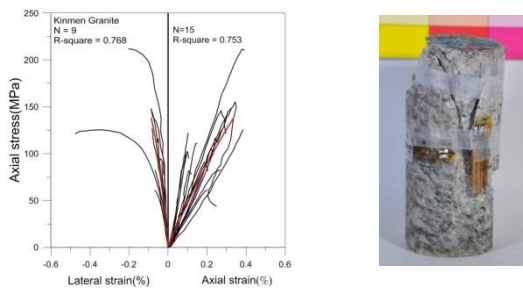


圖 3 單壓應力應變曲線及其破壞狀況

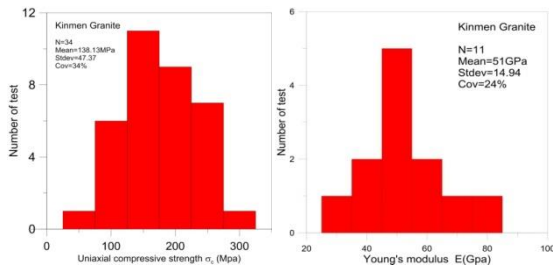


圖 4 彈性模數 E 數據之統計與 UCS 數據之統計

3. PFC 軟體功能

Potyonody 與 Cundall (2004) 利用顆粒流分析軟體 PFC(Particle Flow Code)建構具鍵結特性的顆粒模型(Bonded Particle Model, BPM)已可用於模擬岩石宏觀力學特性，亦可透過顆粒間鍵結斷裂數的追蹤，模擬分析完整岩石在單壓試驗過程中岩石破裂所引致的 AE 訊號行為，並可區分斷鍵係屬正向鍵結或切向鍵結之斷裂(即張裂/或剪裂型態)，藉此得以探討其間的微觀力學機制。

PFC 透過圓形顆粒間的運動與接觸行為，模擬分析顆粒堆積模型相關的靜態與動態問題。程式所選用的粒徑尺寸，可為均勻分佈或高斯分佈，亦能由使用者自行設計所需的級配分佈。模型中每一個顆粒的運動均是各自獨立，顆粒間的相互作用僅發生在接觸點上，相鄰顆粒以勁度(stiffness)彈簧模擬顆粒間的變形行為，並透過顆粒的運動與接觸點之接觸力來描述此堆積模型的力

學特性，此即稱為「接觸勁度模式(contact stiffness model)」，如圖 5(a)。當離散的顆粒受到切向力作用時，則根據庫倫摩擦律所發展的滑移模式(slip model)作為判斷顆粒是否產生切向運動的準則。

除模擬離散顆粒群的運動行為外，亦可透過鍵結模式(bonding model)分析連續體。鍵結模式又分為：(1)接觸鍵結模式(contact bonding model)係指顆粒間的鍵結僅發生在極小的接觸面積，程式中是由正向與切向兩個鍵結力(bonding force)來模擬之。(2)平行鍵結模式(parallel bonding model)假設相鄰顆粒間存在一梁元素以提供鍵結效果，需指定正向與切向之鍵結強度(bonding strength)、正向與切向之鍵結勁度、與鍵結寬度等 5 個參數。

綜合上述，以 PFC 模擬分析完整岩石的力學行為，若採用的數值模式包括接觸勁度模式、滑移模式與平行鍵結模式，所需的輸入參數共計有 8 個，如圖 6(b)，各個模式所需的微觀輸入參數包括：正向勁度 k_n 、切向勁度 k_s 、摩擦係數 μ 、正向鍵結強度 σ_n 、切向鍵結強度 σ_s 、正向鍵結勁度 k_{np} 、切向鍵結勁度 k_{sp} 與鍵結寬度因子 λ 。

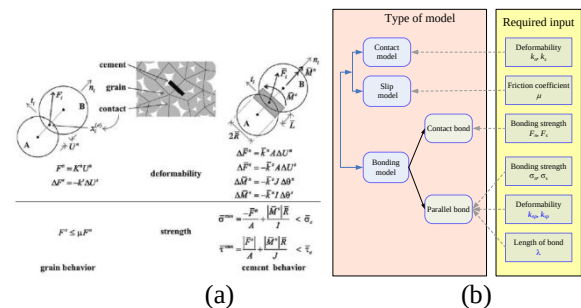


圖 5 PFC 提供的力學與鍵結模式：(a) 由相鄰顆粒的接觸勁度模式模擬顆粒堆積系統的力-位移關係；(b) PFC 提供的數值模式與需要的微觀參數

4. PFC 數值模型與輸入參數之選定

本文根據花崗岩單軸壓縮試驗及 Potyonody 與 Cundall(2004)所建議的建模步驟，建立寬 50 mm、高 120 mm 的花崗岩單軸壓縮數值模型。模型上、下邊界採用不具摩擦特性之剛性牆邊界，試體長軸方向之左、右邊界為自由面。單壓試驗之模擬，係採位移控制條件施加荷重方式，故設定模型頂部與底部之牆邊界在鉛垂方向以固定速率 10^{-2} m/s 往模型中心移動。在顆粒粒徑部分，模型中顆粒粒徑最大者與最小者的比值為 1.6。經穩定性分析後，選定顆粒數 9000 顆建立花崗岩單軸壓縮數值模型，如圖 6(a)所示模型。

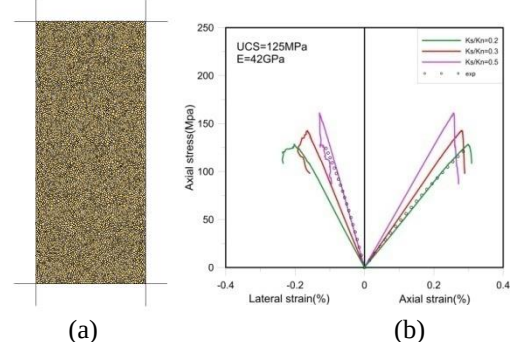


圖 6 離島花崗岩：(a) PFC 數值模型與 (b) PFC 微觀參數訓練

過程，例如以勁度比(k_s/k_n)進行應力應變曲線斜率最適值之數值校正

由於PFC所需輸入之微觀參數數目甚多，且不易直接從基本力學參數建立其間之關係，故(1)一般多採用既有的基本力學試驗結果(例如單軸壓縮試驗)進行輸入參數的訓練與數值校正。部分參數(2)如正向勁度 k_n 與切向勁度 k_s ，則可透過單一顆粒粒徑在一定的排列規則條件下，建立其與楊氏模數 E 與柏松比 ν 之間的關係，據此可獲知 k_n 與 k_s 的參考值。有關(3)平行鍵結強度的設定，一般多以單軸壓縮強度 UCS 設為正向鍵結強度 σ_n 的初始值，再根據模擬的單軸應力應變曲線及破壞形態兩方面，調整正向鍵結強度 σ_n 與其切向鍵結強度 σ_s 。

根據模擬探討砂岩單壓強度(UCS)、變形模數(E)與柏松比(ν)三項參數的PFC主要影響，可歸納出影響岩石單壓強度、楊氏模數與柏松比的關鍵參數分別是：

A、單壓強度(UCS)之關鍵影響因子

正向鍵結強 σ_n 、切向/正向鍵結強度比 σ_s/σ_n 、切向/正向平行鍵結勁度比 k_{sp}/k_{np}

B、楊氏模數(E)之關鍵影響因子

正向勁度 k_n 、正向平行鍵結勁度 k_{np} 、切向/正向平行鍵結勁度比 k_{sp}/k_{np}

C、柏松比(ν)之關鍵影響因子

切向/正向平行鍵結勁度比 k_{sp}/k_{np}

5.力學行為模擬之成效

根據上述參數分析經驗，本文以如圖 7 金門花崗岩單壓試驗應力-應變曲線統計範圍為基準，予以校正 PFC 輸入參數組合，例如圖 6(b)所示為以不同勁度比(k_s/k_n)進行應力應變曲線斜率最適值之數值校正。據以推估得如表 1 所列最合適於金門花崗岩之 PFC 力學微觀參數參考建議值。

圖 8 所示模擬應力應變曲線結果即是取符合表 1 建議參數中之平均值所獲得之結果，可觀察知模擬之單壓強度與變形模數皆符合於灰色區塊試驗範圍，而柏松比(ν)之計算值也在合理範圍內，並由圖 9 破壞型態可看出與試驗行為極相似。

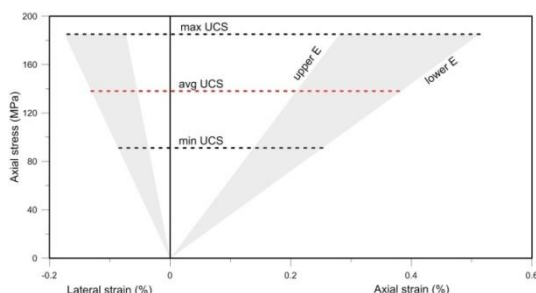


圖7金門花崗岩單壓應力應變曲線試驗值之分布範圍

表1金門花崗岩PFC模擬的微觀力學參數建議值

PFC參數	單位	建議值	備註
顆粒單位重, ρ	kg/m^3	2600.0	
E_c	GPa	74(± 18)	
k_s/k_n		1(± 0.1)	
E_p	GPa	37(± 9)	$E_p = 2 E_c$

k_{sp}/k_{np}		0.45(± 0.05)	
σ_n	MPa	95(± 30)	
σ_s	MPa	95(± 30)	$\sigma_s = \sigma_n$

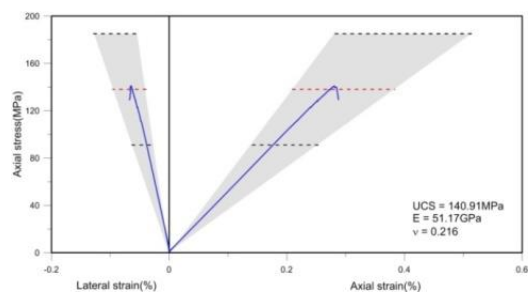


圖8以PFC模擬得之金門花崗岩應力應變曲線

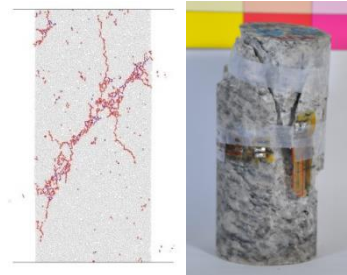


圖9以PFC模擬之破壞型態與試驗結果比較(其中紅色部分為張力破壞，藍色為剪力破壞)

6. 隧道行為模擬之成效

圖 10 處置隧道幾何形狀，係依台電建議之隧道型態，將處置隧道上部設為半圓形直徑為 4m、隧道下半部尺寸寬 4m、高 4m；而設處置孔直徑 2m、深 8m 為模擬依據。開挖時，分二部份開挖岩盤：(1)先開挖處置隧道，開挖後讓模擬岩體進行力平衡穩定後，(2)再開挖下部處置孔，至力平衡。期間，同時觀察與記錄其坑道之變形發展及破裂位置及破裂型態。

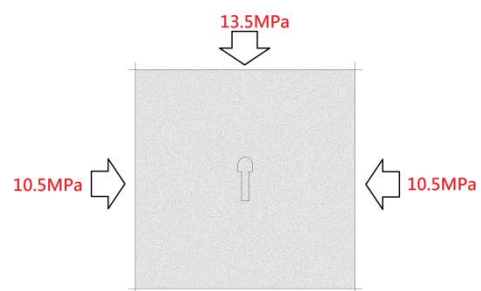


圖 10 PFC 模擬岩體在現地應力下開挖處置坑洞示意(岩體邊界 60*60，含 45000 顆粒)

由前述表 1 歸納之完整花崗岩之 PFC 模擬相關微觀參數，若經一定折減比例後，則可套用於花崗岩岩體(本文考量節理岩體強度之折減，以 0.25 UCS 為鍵結強度，其餘參數皆不改變)。分析在現地實際應力狀態下，如圖 10，探討開挖處置隧道及處置孔，觀察坑道周圍應力之重整、及坑壁可能破壞位置。說明如下：

6.1 開挖處置隧道

(1)由顆粒間力的傳遞線(force chain)可觀察，因開挖處置隧道(deposition tunnel)而造成周圍應力重新調整，如圖 11 所示(黑色線條代表顆粒間之接觸力，線條之粗細表

示其力量之大或小)：開挖後力的傳遞線(a)均佈於岩體各部位、及至(b)應力重新調整完成，而粗的力傳遞線集中於隧道周圍，形成所謂的應力集中現象，而隧道底部(floor)則有一弧形區域之應力明顯減少。

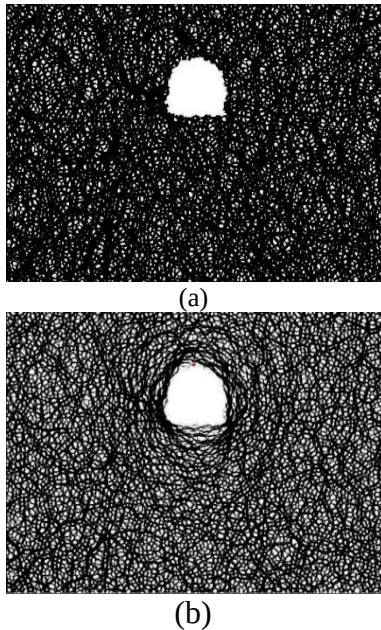
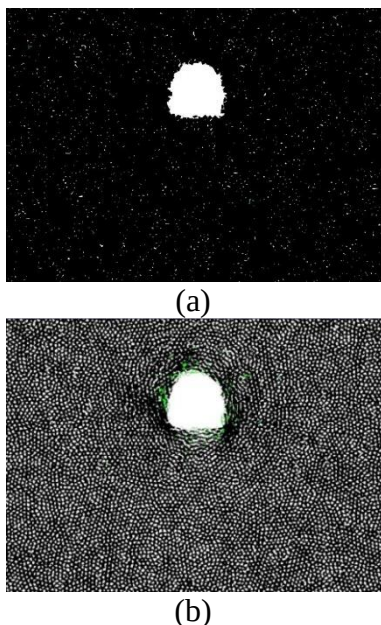


圖 11 開挖處置隧道造成圍岩應力重新調整

(2)若由顆粒間傳遞之鍵結應力(bond stress)，如圖 12 所示，可觀察知：在開挖處置隧道造成應力重新平衡，初期(a)處置隧道周圍岩體皆承受著均勻的壓應力、及至應力重整後(b)隧道周圍顆粒多數承受較大壓應力，但也有部分於頂拱及側壁之顆粒鍵結開始承受到張應力型態，但尚未斷裂。



(黑色為壓應力、綠色為張應力)

圖 12 開挖處置隧道造成顆粒鍵結力之轉變

6.2 開挖處置孔

(1)在處置隧道開挖力量平衡後，再由隧道地面向下

開挖處置孔(deposition hole)，結果如圖 13。由顆粒間接觸力可觀察得知：初期(a)處置孔左右兩側力量均勻分布，但在應力重新調整完成後，發現(b)力量卻多集中去上部隧道之頂拱及下部處置孔之底部；且在處置孔到隧道底面兩側形成一個三角形之不受力區(non-stressed zone)，推測此乃因處置孔直徑僅為處置隧道寬度之一半、且處置孔極深，導致上覆岩壓應力傳遞流經處置隧道後，不能轉入處置孔之兩側，因而形成此一不受力區，所以處置孔壁並不會承受太大的力量。

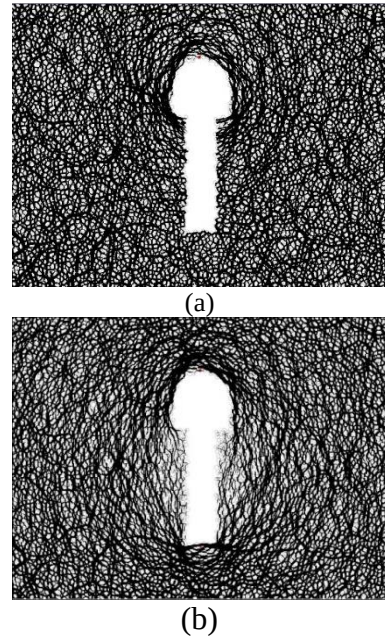
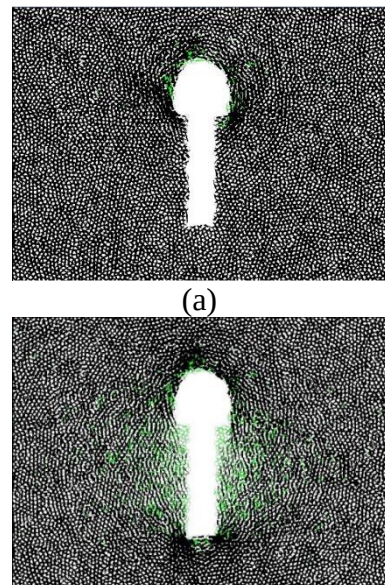


圖 13 開挖處置孔之應力重新分佈情形

(2)由顆粒鍵結應力型態，則可觀察得當進行下部之處置孔開挖時，如圖 14 所示：初期在(a)處置孔左右兩側均承受壓應力、應力調整後(b)在處置孔之底部及兩側三角形之範圍，鍵結應力轉變為張應力狀態，但尚未斷裂。此乃處置隧道與處置孔兩者以上大下小斷面特殊組合之應力分佈特性。



(b)

(黑色為壓應力、綠色為張應力)

圖 14 開挖處置孔造成顆粒鍵結力之轉變

分布特性。

III. 結論

1. 本文經收集統計離島地區花崗岩之室內強度試驗，顯示我國潛在場址離島花崗岩之平均單壓強度 UCS 有隨深度 Z 而增加的趨勢，平均 138.13MPa；間接張力強度平均 7.37MPa、平均彈性係數 E 為 51 GPa、柏松比 ν 為 0.22。
2. 在經以 PFC 模擬岩石之單壓試驗，得知影響 UCS、 E 與 ν 三個主要工程巨觀參數(macro-scale parameters)之微觀參數(micro-scale parameters)如下：
 - A、單壓強度(UCS)之關鍵影響因子
正向鍵結強 σ_n 、切向/正向鍵結強度比 σ_s/σ_n 、切向/正向平行鍵結勁度比 k_{sp}/k_{np}
 - B、楊氏模數(E)之關鍵影響因子
正向勁度 k_n 、正向平行鍵結勁度 k_{np} 、切向/正向平行鍵結勁度比 k_{sp}/k_{np}
 - C、柏松比(ν)之關鍵影響因子
切向/正向平行鍵結勁度比 k_{sp}/k_{np}
3. 本文透過離島潛在處置場址花崗岩之單壓試驗應力應變曲線統計資料，以訓練與數值校正 PFC 輸入的參數敏感性，推估一組最適合之 PFC 微觀參數(micro-scale parameters)組合如下：

PFC 參數	單位	建議值	備註
顆粒單位重, ρ	kg/m ³	2600.0	
E_c	GPa	74(±18)	
k_s/k_n		1(±0.1)	
E_p	GPa	37(±9)	$E_p = 2 E_c$
k_{sp}/k_{np}		0.45(±0.05)	
σ_n	MPa	95(±30)	
σ_s	MPa	95(±30)	$\sigma_s = \sigma_n$

4. 以 PFC 隨機鍵結強度(random bond-strength)方式可適當模擬花崗岩之單壓試驗峰前之線性應力應變行為、及尖峰破壞強度 UCS 值。
5. 以 PFC 模擬坑道開挖顯示：
 - (1) 開挖處置隧道，造成周圍應力重新調整，力傳遞線集中於隧道周圍形成應力集中現象，而隧道底部則有一弧形區域之應力明顯減少。開挖初期隧道周圍岩體皆承受壓應力；應力重整後，於頂拱及側壁之顆粒鍵結開始承受到張應力型態。
 - (2) 開挖處置孔，應力重新調整完成後，力量卻多集中去上部隧道之頂拱、及下部處置孔之底部，且在處置孔兩側到上部隧道底面形成一個三角形不受力區，此區內其鍵結應力轉變為張應力狀態，此乃處置隧道與處置孔兩者以上大下小斷面特殊組合之應力

參考文獻

- [1] Potyondy, D. and P. Cundall (2004), A Bonded-particle Model for Rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, 1329–1364.
- [2] 台灣電力公司(2003)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特性調查計畫(91 年計畫)：K 區(BH1 及 BH2)岩石力學報告，SNFD-ERL-90-199。
- [3] 台灣電力公司(2004)，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(91 年計畫)，期末報告。
- [4] 台灣電力公司(2006)，用過核子燃料最終處置計畫一潛在處置母岩特性調查與評估階段，94 年工作成果報告。
- [5] 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。
- [6] 台灣電力公司(2012)，用過核子燃料最終處置計畫一潛在處置母岩特性調查與評估階段，成果報告。
- [7] 台灣世曦(2011)，金門大橋工程設計暨配合工作-大地工程調查室內試驗紀實報告(第一冊)，國工局。
- [8] 李宏輝(2008)，砂岩力學行為之微觀機制-以個別元素法探討，博士論文，台灣大學。

後福島民眾防護行動規範研擬之一 Protective Action Guide for the Public following Fukushima Accident I

計畫編號：MOST 105-NU-E-182-001-N

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：董傳中

e-mail：cjtung@mail.cgu.edu.tw

計畫參與人員：趙自強、江悅、邢淳惠

執行單位：長庚大學放射醫學研究院

摘要

福島事故發生後，日本政府針對此一事故之緊急應變措施與民眾防護行動，進行了徹底的檢討，然後根據檢討結果修訂其民眾防護行動規範。這些檢討與修訂包括：組織架構、地區劃分、事故分類、干預基準及行動基準等，其中關鍵性的建議包括：(一)事故發生初期之最緊急階段，即使還沒有氣體外釋，也應立即根據電廠損壞的情況，參照緊急行動基準(EAL)，針對預防行動區(PAZ)內的民眾，採取預防性防護行動—包括疏散及服用碘片，以防止民眾發生確定健康效應。(二)應訂定環境監測(包括地表輻射劑量率及污染濃度)之操作干預基準(OIL)，以便根據實地之環境監測數據，而非僅依靠電腦程式預估之可減免劑量，於緊急計畫區(UPZ)內，採取緊急防護行動—包括疏散、掩蔽、暫時移居、食物管制、人員除污、醫務監務等，以降低民眾發生機率健康效應的風險。

由於核子事故緊急應變計畫之民眾防護行動基準，與一國之國情、政策、環境等因素有關，需要經過最優化的分析，才能訂出該國之民眾防護行動規範。本計畫透過蒐集國際最新規範與法規，了解世界各國在福島事故後之最新民眾防護行動的規劃與標準，然後藉由舉辦專家研討會、與主管機關雙向溝通、以及進行最優化分析等步驟，研擬出我國核子事故民眾防護行動規範之修訂方向及建議草案，以提供主管機關作為修法之參考。

Abstract

Based on the experience from Fukushima Dai-ichi nuclear accident, Japanese government has substantially revised its nuclear regulatory organization, emergency response classification, dose criteria, and operational intervention levels (OILs). Key revisions include: (1) precautionary protective actions, based on the emergency action levels (EALs), are applied to the precautionary action zone (PAZ); (2) urgent protective actions, determined by the operational intervention levels (OILs), are applied to the urgent protective zone (UPZ).

Protective actions must be considered by the application of optimization procedures using local conditions. In this project, we tried to collect relevant information on the up-to-date international recommendations and guidance for the emergency response plans from lessons following the Fukushima Dai-ichi NPP accident. Optimization principles will be used to develop

the short- and long-term intervention levels and action levels. These developments will help the governmental officials to select optimized protective actions in a relatively short time period in case of nuclear accident.

Keywords: nuclear accident, emergency response, public protection, EAL, OIL.

I. 前言

福島核子事故發生後，國際組織及日本政府均針對此一事故之緊急應變措施與民眾防護行動，進行了徹底的檢討，然後根據檢討結果修訂了核子事故民眾防護行動指引。檢討與修訂的主要項目，包括：事故分類之緊急行動基準(emergency action level, EAL)、緊急計畫之地區劃分依據、防護行動之劑量基準(dose criteria)、環境監測之操作干預基準(operational intervention level, OIL)等，其中關鍵性的指引包括：(一)核子事故劃分為：緊急戒備事故(alert)、廠區緊急事故(site area emergency)、全面緊急事故(general emergency)；(二)廠區緊急事故時，應即實施廠外環境之輻射劑量率及污染濃度監測；(三)全面緊急事故宣布後，立即於預防行動區(precautionary action zone, PAZ)內，採取預防性防護行動(precautionary protective actions)—包括安全疏散及服用碘片，以防止民眾發生確定健康效應(deterministic health effects)；(四)全面緊急事故宣布後，立即於緊急防護區(urgent protective zone, UPZ)內，採取緊急防護行動(urgent protective actions)—包括室內掩蔽、服用碘片、避免誤食等；並且於存在嚴重空污之可能地區，實施安全疏散；然後在環境監測發現之熱區(hot spots)內，根據 OIL1、OIL2、OIL3、OIL4、OIL7、OIL8 之操作干預基準，採取對應之緊急防護行動—包括安全疏散、服用碘片、室內掩蔽、食物管制、人員除污、醫務監護、暫時移居等，以降低民眾發生機率健康效應(stochastic health effects)的風險。

我國核子事故民眾防護行動規範中，仍然以電腦程式評估個人可減免劑量(averted dose)，作為採用劑量基準、實施防護措施的依據。然而從福島事故的經驗來看，此一方式受限於外釋核種與活度之掌握不易，以及氣象條件隨時間之動態改變影響，評估結果與實測數據之間往往有很大的差異，以致緊急應變的效果大打折扣。基於福島核子事故的檢討，各國政府均著手修訂緊急應變民眾防護行動規範。本計畫參照國際最新指引，研擬緊急應變環境監測之最優化操作干預基準，並且提

供我國核子事故民眾防護行動規範之修訂草案。

II. 主要內容

國際原子能總署(IAEA)建議，全面緊急事故宣布後，立即於預防行動區(PAZ)內，採取預防性防護行動一包括安全疏散及服用碘片，以防止民眾發生確定健康效應。然後於緊急防護行動(UPZ)內，依照環境監測之操作干預基準(OIL)，採取必要之緊急防護行動。表 1 是國際原子能總署採用之通用劑量標準(generic criteria, GC)，以及以預先模擬核子事故之外釋核種、活度、及氣象條件，求得之各項防護行動的通用 OIL 標準。

表 1. IAEA 採用之通用劑量標準(GC)，以及推算求得之通用 OIL

OIL	監測項目	通用 OIL	防護行動	GC	曝露途徑			
					地表照射	吸入	空浮照射	攝食土壤
OIL1		1000 $\mu\text{Sv/h}$	緊急防護	$E(7\text{ 天})=100\text{ mSv}$ $H_{\text{有效}}(7\text{ 天})=100\text{ mSv}$	✓	✓	✓	✓
OIL2		100 $\mu\text{Sv/h}$	早期防護	$E(1\text{ 年})=100\text{ mSv}$ $H_{\text{有效}}(1\text{ 年})=100\text{ mSv}$	✓	✓	✓	✓
OIL3		1 $\mu\text{Sv/h}$	食物管制	$E(1\text{ 年})=10\text{ mSv}$ [總有效劑量]	吸入污染食物、牛乳、 飲水			
OIL4		1 $\mu\text{Sv/h}$	醫務監護	$AD_{50}(4\text{ 天})=1\text{ Gy}$ $E(4\text{ 天})=100\text{ mSv}$ $H_{\text{有效}}(4\text{ 天})=100\text{ mSv}$	皮膚污染之體外照射 及吸入污染食物			
OIL7		1000 Bq/kg 200 Bq/kg	食物覆檢	$E(1\text{ 年})=10\text{ mSv}$ [吸入約定劑量]	吸入污染食物、牛乳、 飲水			
OIL8		$<7\gamma:0.5\mu\text{Sv/h}$ $>7\gamma:2\mu\text{Sv/h}$	甲狀腺醫檢	$H_{\text{甲狀腺}}=100\text{--}200\text{ mSv}$ [約定等價劑量]	吸入及吸入超甲狀腺 之核分裂產物			

另外，亞洲國家包括日本、韓國與中國大陸，均依照國際原子能總署之最新指引，研擬修訂各自的核子事故緊急應變規範，包括採納 EAL 及 OIL 之作業方式，於 PAZ、UPZ、及熱區內實施民眾防護行動。表 2 為各國之 PAZ、UPZ 及 OIL 比較。

表 2. 日本、韓國、中國大陸的 PAZ、UPZ、及 OIL 比較

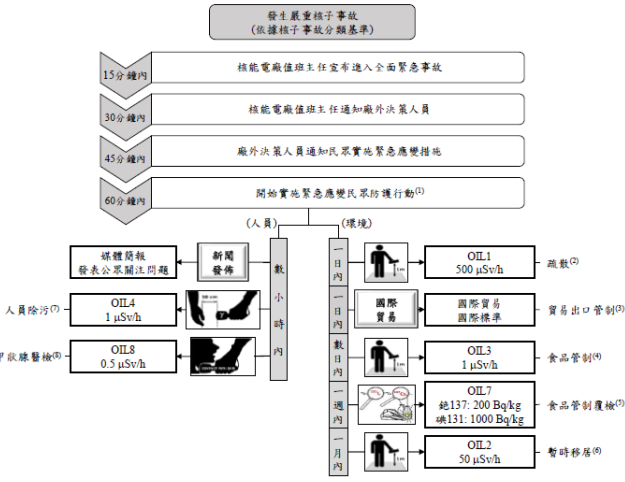
	防護行動	IAEA	日本	韓國	中國大陸
PAZ	預防性疏散	預防性疏散	預防性疏散	預防性疏散	預防性疏散
UPZ	緊急防護	緊急防護	緊急防護	緊急防護	緊急防護
	安全疏散	>OIL1	>500 $\mu\text{Sv/h}$	>50 μSv	指定地區
	暫時移居	>OIL2	>20 $\mu\text{Sv/h}$	>10-30 μSv	>OIL2
	室內掩蔽	疏散前	<20 $\mu\text{Sv/h}$	>10 μSv	指定地區
其他地區	服用碘片	疏散前	疏散前	>100 μGy	指定地區
	環境監測	EPD	PPA		
食物監測	食物監測	ICPD			
	食物管制	1 $\mu\text{Sv/h}$	0.5 $\mu\text{Sv/h}$		1 $\mu\text{Sv/h}$
OIL1	緊急行動	1,000 $\mu\text{Sv/h}$	500 $\mu\text{Sv/h}$		1,000 $\mu\text{Sv/h}$
OIL2	暫時移居	100 $\mu\text{Sv/h}$; 停機 10 天內 25 $\mu\text{Sv/h}$; 停機 10 天後	20 $\mu\text{Sv/h}$		100 $\mu\text{Sv/h}$
	食物管制	1 $\mu\text{Sv/h}$	40,000 cpm* *輻射事故		1 $\mu\text{Sv/h}$
OIL7	食物覆檢	1,000 Bq/kg; 碘 131 200 Bq/kg; 銈 137			1,000: ¹³¹ 碘 200: ¹³⁷ 銈
OIL8	甲狀腺醫檢	0.5 $\mu\text{Sv/h}$; 小於 7 歲			0.5: <7 歲 2: >7 歲

		2 $\mu\text{Sv/h}$; 大於 7 歲			
--	--	--------------------------------	--	--	--

III. 結果與討論

我國核子事故民眾防護行動規範於民國 94 年 07 月 15 日(福島事故前)發布，其中要點與國際原子能總署最新規範之嚴重核子事故緊急應變指引略有出入。建議依照國際原子能總署公布之最新指引，參考亞洲國家所訂之標準及辦法，修訂我國核子事故民眾防護行動規範。表 3 為本計畫初擬之我國核子事故民眾防護行動操作干預基準 OIL 標準，提供主管機關作為修法之參考。

表 3. 本計畫初擬之核子事故民眾防護行動指引



- (1) PAZ 內民眾之防護行動：服用碘片、減少非必要之飲食、實施預防性疏散。UPZ 內熱區民眾之防護行動：室內掩蔽、服用碘片、減少非必要之飲食、實施安全性疏散；UPZ 內其他民眾之防護行動：室內掩蔽、服用碘片、減少非必要之飲食。PAZ 內與 UPZ 內熱區未疏散民眾之防護行動：服用碘片、室內掩蔽(不超過一天)、收聽廣播(電視)並遵照指示、準備安全撤離、海陸空交通人員之防護行動：禁止進入 UPZ 內。EPD 內民眾之防護行動：未經 OIL7 食物覆檢確認前，減少非必要之飲食；牧放動物盡量移入保護(譬如屋頂)場所；保護食物及飲水之來源避免遭受污染；停止流通及食用非必需之當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水、動物飼料；未經安全評估前，停止流通商品。
- (2) 監測離地 1 公尺高度之輻射劑量率，當達到 500 $\mu\text{Sv/h}$ 之 OIL1 時，立即實施該地區民眾之防護行動：服用碘片、安全疏散、減少非必要之飲食；停止流通及食用所有當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水、動物飼料；未經安全評估前，停止流通商品；災民登記、輻射監測、污染監測、除污、醫務篩檢；數日內實施該地區民眾之防護行動：評估民眾的輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- (3) 確保所有商品國際貿易符合國際標準，並提供保證。
- (4) 監測離地 1 公尺高度之輻射劑量率，當達到 1 $\mu\text{Sv/h}$ 之 OIL3 時，立即實施該地區民眾之防護行動：未經 OIL7 食物覆檢確認前，停止流通及食用非必需之當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水、動物飼料；未經安全評估前，停止流通商品。數日內實施該地區民眾之防護行動：更換必需之當地產品、乳品、雨水、動物飼料；若無法更換，則遠離該地區之民眾；對於已經食用當地產品、乳品、雨水之民眾，評估其輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- (5) 取樣分析食品、飲水、乳品中銈 131 及銈 137 之活度濃度，當達到 1000Bq/kg(銈 131)或 200Bq/kg(銈 37)之 OIL7 時，實施該地區民眾之防護行動：停止食用非必需之食品、飲水或乳品；盡速更換必需之食品、飲水或乳品；若無法補給及更換，則遠離該地區之民眾；對於已經食用當地產品、乳品、雨水之民眾，評估其輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- (6) 監測離地 1 公尺高度之輻射劑量率，當達到 50 $\mu\text{Sv/h}$ 之 OIL2 時，立即實施該地區民眾之防護行動：減少非必要之飲食、通知民眾準備暫時移居；停止流通及食用當地產品、野生產品、牧放動物之乳品、雨水。一月內實施該地區民眾之防護行動：登記該地區之民眾；依劑量高低順序，暫時移居該地區之民眾；評估該地區民眾的輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- (7) 由政府發言人統一向媒體簡報，並舉行聯合新聞發布會(核能電廠、地方政府、中央機關相關人員出席)，以淺顯易懂的方式，提供公眾和社團資訊；說明健康危害，並回答問題；處理民眾、社團、媒體間不正確之謠言，並答覆可能衍生之問題。

- (8) 監測離皮膚 10 公分之加馬輻射劑量率，當達到 $1\mu\text{Sv/h}$ 之 OIL4 時，立即實施該民眾之防護行動：服用碘片、減少非必要之飲食、登記輻射劑量率、人員除污、醫療檢查、通知醫院準備污染傷患治療。數日內實施該民眾之防護行動：評估民眾的輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。
- (9) 監測緊貼甲狀腺皮膚之加馬輻射劑量率，當達到 $0.5\mu\text{Sv/h}$ (小於 7 歲)或 $2\mu\text{Sv/h}$ (大於 7 歲)之 OIL8 時，立即實施該民眾之防護行動：服用碘片、減少非必要之飲食、登記甲狀腺輻射劑量率、醫療檢查、通知醫院準備污染傷患治療。數日內實施該民眾之防護行動：評估民眾的輻射劑量，決定是否有必要進行醫療檢查、諮詢、及追蹤。

IV. 結論

本計畫為二年期計畫之第一年，已完成我國核子事故民眾防護之操作干預基準及行動規範草案。後續工作將舉辦專家研討會及與主管機關雙向溝通，以研擬出我國核子事故民眾防護行動規範，提供主管機關作為修法之參考。

參考文獻

- [1] International Atomic Energy Agency. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, EPR-NPP Public Protective Actions, Emergency Preparedness and Response. May 2013.
- [2] Minoru Saito. The Planning of Emergency Detection, Dose Evaluation during Nuclear Accident in Japan. Taiwan-Japan International Experts' Meeting on a Nuclear or Radiological Emergency, 28 July 2015, Tokyo, Japan.
- [3] Report of the Korean Government Response to the Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Policy Issue 0, Korea.
- [4] 核或輻射應急準備與響應通用準則，中華人民共和國國家職業衛生標準 GBZ/T 271-2016。

後福島民眾防護行動規範研擬

Study of Criteria in Preparedness and Response for a Nuclear Emergency after the Fukushima accident

計畫編號：MOST 105-2623-E-010-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳杰

e-mail：jaywu@ym.edu.tw

計畫參與人員：黃哲鴻

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

自從 2011 年日本福島核能電廠的事故發生後，附近國家及日本民眾皆希望日本政府及東京電力公司公告最新發展情形，及迫切希望知道自己是否處於安全環境，同時亦希望政府下達的相關防災措施能提供更公開多元的方式。然在日本處理福島事故的經驗回饋中，面臨在事故當下不明且事態緊急情況下，造成許多的措施執行面呈現紊亂、不一致或是窒礙難行，無法全面發揮應變措施的預期成效。因此需要研究建立一套實務可行的民眾防護行動與應變措施的判斷基準，可提供政府決策者於緊急情況下，能有簡易溝通的應變行動基準，以利相關支援單位或是民眾能快速依循並執行該防護措施。

國際原子能總署在 IAEA-103 號報告中提出可減免劑量防護觀念，於 IAEA-115 報告中提出防護行動操作干預基準，目的皆在於尋求更具安全、周延且通用務實的標準，能於事故應變期間快速達成防護效果而確保民眾生命安全，並能將健康損害降到最低。本計畫目標係參酌國際輻射防護委員會、國際原子能總署等國際組織之建議，與日本在福島事故的經驗回饋，並調查世界各國對民眾防護行動與應變措施的判斷基準，研擬國內適宜的操作干預基準，以提供國內政府災害應變所需之緊急應變作業的參考依據。

關鍵詞：福島事故、操作干預基準、防護行動

Abstract

According to the emergency responses of the Fukushima accident, evacuation and sheltering were performed at the phase one of the disaster. However, during the decision making process, professional discussion, public information, and communication in each phase are absent, causing somewhat hesitant and mistrust to the Japanese government. This study investigated the decision making process during the Fukushima accident.

Through the review of the IAEA-105 and IAEA-115 reports, the operational intervention levels (OILs) has been proposed to achieve more secure and general standards for quick response during nuclear accident and to decrease the detriment of public health. In this study, we considered the related reports and action guidance published by IAEA, ICRP, and IRPA and the experience feedback from the Fukushima accident to investigate the proper operational intervention levels in Taiwan. Suggestions have been

proposed for the government for the reference of emergency response operations.

Keywords: Fukushima accident, operational intervention levels, protective action

I. 前言

緊急應變防護行動基準的發展，目的係在提供一套全面的決策體系，使之兼具安全、周延且通用務實的標準，這套決策體系代表應變階段中各項或是多項防護措施的正當性與最適化，能於事故應變期間快速達成防護效果而確保民眾生命安全，並能將健康損害降到最低。

防護通用基準(Generic Criteria, GC)根據國際輻射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)的建議，GC 可以為預期劑量(projected dose)，用以執行預防性的防護行動，包括疏散、移居、食物管制等；GC 亦可為接受劑量(received dose)，用以進行醫療行為，包括接受診斷與治療行為而引發的潛在健康風險。

世界各國依據其決策需求，而有不同方式訂定緊急應變民眾防護行動基準，包括採行預期劑量(Projected dose)、殘餘劑量(Residual dose)或是可減免劑量(Averted dose)。然而預期劑量無法透過量測得知，不適合用於緊急狀況時的立即決策，國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)建議使用 GC 作為發展防護行動操作干預基準(operational intervention levels, OILs)的基礎，OILs 為一種行動水平(action level)[1]，用以提供立即並直接決定的適當防護措施，或是根據環境量測與實驗室分析而採行相關行動。

目前我國訂定緊急應變民眾防護行動之決策基準係採用可減免劑量，在福島事故的經驗回饋下，本計畫目的係研擬國內適宜的 OILs；研究規劃中，因 OILs 訂定起源是基於應變防護的 GC 所計算求得的指標，此指標可由儀器量測或是實驗室分析數據所提供，其多半以空間劑量率、地表濃度、或是環境、食物、飲水樣品中所測得的放射性核種活度或濃度，一旦指標超過 OILs，則須立刻執行適當的措施，而不存在模糊空間。但在訂定各項民眾防護行動操作干預基準之過程，則必須使用合理與保守的情境與假設條件，如此才可足以涵蓋任何的事故發生，確保民眾之安全。上述的合理與保守的情境與假設條件，包括考量外釋條件存在很大的不確定度，並存在複雜的放射性核種組成、嚴重程度不一的事故發

展時序與歷程、不同年齡群的民眾亦具有不相同的輻射靈敏度等。

本計畫研究 IAEA 用於推導反應爐爐心分裂產物外釋與用過核燃料池外釋情境下的 OILs 預設值的推導方法，以及日本依據福島事故案例所發展的 OILs，進而評估於適合我國可行的 OILs。

II. 主要內容與結果

本研究研析 ICRP 60 與 ICRP 103 輻射防護體系的緊急應變規範的制定精神以及實際應用決策可行性的優缺點並歸納整合。ICRP 60 主要建議以「可減免劑量」觀點作為民眾防護行動措施採行之建議，其係基於實踐與干預的概念，認為應變階段所採行的干預行動是具備正當性的。ICRP 103 概念認為實踐與干預是無法區別的，可以用三種曝露情境來取代，分別為規劃曝露情境、緊急曝露情境與既存曝露情境，其中緊急曝露情境以「剩餘劑量」為基礎作為採取行動的參考基準，這與 ICRP 60 的干預基準採用「可減免劑量」是不同的。若不採取任何防護行動情況下，因緊急曝露情境導致可能的總曝露，稱為預期劑量。在採取防護策略後可能造成的劑量，稱為剩餘劑量，而每個防護措施都可能節省一定程度的劑量。這個劑量稱為可減免劑量，此為建構整體防護策略的第 63 號報告所提出關於個人防護措施最適化的概念。所以就論點而言，ICRP 60 與 ICRP 103 對緊急曝露情境採取干預行動原則的策略雖有不同，但兩者之間是相容的。福島事故前，日本的緊急應變防護體系與我國相似，以 ICRP 60 為基本概念，以可減免劑量作為民眾防護行動的採行基準，以個人防護策略的最適化作為衡量標準，但因依據日本的作業程序與規範，主要機制是基於應變對策支援系統(ERSS, Emergency Response Service System)以及環境緊急劑量預測系統(SPEEDI, System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)等計算機模式評估預測劑量值並與干預水平相比，提出採取緊急防護行動的建議，但在福島事故當時情境下，當日本政府欠缺上述數據資料而難以採用啟動原程序機制作為決策基準時，僅能以當時電廠運轉條件進行主觀式下達掩護與疏散行動。

在福島事故後，日本做了大幅度的緊急應變防護體系的改革，包括採行 ICRP 103 基本概念，評估採行防護行動的剩餘劑量，並直接與參考基準比較，據以評估防護策略的集體效益，此意謂不論高於或低於參考基準，都應該受到最適化原則的約束，且對於高於參考基準的部分個體曝露則應給予特別的關注。以及採行 ICRP 109 建議的緊急曝露情境的防護建議，當緊急時沒有時間執行詳細曝露評估時，可利用適當的「觸發器」作為一致標準採行應變行動。參考 IAEA 在 2012 年出版 GSG-2[1]，訂定核子事故緊急應變標準，係依事故應變分類系統提供緊急行動水平，提供預防性緊急防護行動採取的基準，防止嚴重的確定性健康效應，並衍生其國內可用的應變基準。

研析 ICRP 103 號報告是以前面所提到所有的曝露情境“計畫曝露情境”、“緊急曝露情境”和“既存曝露情境”之輻射防護概念為架構，在“最適化”過程中引入了“參考基準”的概念，以使民眾受曝的可能性、

受曝的群體及其劑量大小均能保持在合理且低的水平範圍，而且隨著事故的發展不同應變階段亦須考慮不同的放射性核種組成與曝露途徑，而採行相對應的防護行動，經由這樣的評估過程可使總體應變防護策略達到最適化。另外透過 GC 計算求得的另一指標 OIL 以觸發緊急應變措施的預設操作標準並立即應變及採取行動。緊急曝露情境的參考基準建議在 20 mSv 至 100 mSv，對於既存曝露情境，建議年曝露的參考基準為 1 mSv 至 20 mSv。參考基準也代表殘餘劑量，用於應變行動後的劑量與現實劑量進行比較，將總體殘餘劑量減少到參考基準以下，以發揮最適化的防護策略[5]。

ICRP 109 報告建議是基於 103 號報告參考基準設定，基於正當性及最適化的原則，採行相關的防護行動與應變措施，以防止緊急曝露情境造成嚴重確定性傷害，緊急曝露情境的參考基準建議單一事件或是每年應為 20 mSv 至 100 mSv，且其建議不允許超過 100 mSv，且所採取的防護行動皆具備正當性，而不論高或低於參考基準，其防護措施都應符合最適化。整體性的防護策略需要考慮所有曝露途徑和所有相關的防護行動特性相互搭配，以求在最佳行動時機中做出決定，提供更完整的整體防護。這樣的整體防護策略必須是正當且符合公共利益的，從而使其利大於弊。當鎖定了主要曝露途徑，以及單位時間所接收到的各種劑量之評估指標，包含潛在有效的個人防護方案，就能得到比較好的防護效果。如果，在一個整體防護策略的應用中，防護措施沒有達到殘存劑量的目標，導致風險超過規劃階段所訂定的參考基準，那就有必要重新評估調整。在緊急曝露情境中用來決定防護行動正當性及最適化的相關劑量定義如下：1. 預期輻射劑量：如果沒有採用防護措施時，預期會發生的緊急曝露，結果會造成個體的有效劑量，常以代表人進行計算；2. 可減免劑量：代表人的個人劑量(通常表示為有效劑量)，預計透過實行個別防護措施或是防護措施組合，所可以避免的劑量；3. 殘餘劑量：執行防護行動策略後的劑量，此亦可視為預期輻射劑量減去採行防護行動的可減免劑量，以評估防護措施執行成效。防護措施最適化的過程是對緊急曝露管理，應當使殘餘劑量低於適當的參考基準，並在學理上和社會面上皆能獲得接受，需考慮所有防護行動，減少殘餘劑量。參考基準定義為劑量水平，高於此水平通常是不能允許此曝露情境發生，低於此水平下仍盡可能合理抑低至可行的程度，故在防護策略規劃中，必須針對特定代表群體及整體需求去優化防護策略。

IAEA 考量當遭遇到反應爐爐心分裂產物外釋與用過核燃料池外釋事故所危害影響的時間與程度，事先劃定相關的應變區域，可快速整備資源並能及時實施有效的防護行動和其他應變行動。因此緊急應變區的大小和邊界需要依各個電廠的設計與廠址環境而訂定，大致上可以分為預警行動區(PAZ)、緊急防護行動計畫區(UPZ)、防護行動計畫延伸區(EPD)、攝入和商品管制計畫區(ICPD)以電廠為中心同心圓的半徑範圍區分向外進行防護措施。PAZ、UPZ 區域的疏散過程中應配合服用 ITB 碘片以增加民眾甲狀腺對放射性碘的防護。由於民眾步行的速度較放射性物質擴散的速度快，所以“疏散”仍會比“掩蔽”更有效，如果來不及疏散，在家或在大型

建築物內遠離門窗就地掩蔽的效果相對會比較好，但不適合超過 2 天以上。應變區域輔以操作干預基準可以增加應變行動的靈活度，增加民眾對輻射的防護。而訂定 OILs 之目的，是藉由儀器直接量測或是實驗室分析數據做為判斷依據，其中以環境劑量率、地表污染與皮膚污染監測為考量，可用儀器簡易、持續測量環境空間劑量率及檢測食物、牛奶與水等樣品，並以主要的 2 種指標性核種 I-131 與 Cs-137 為檢測對象，這 2 個事故期間的主要核種，儀器並可以快速量測或是分析出來，這對於應變防護措施是非常重要的，也是相對方便、快速偵測的通用指標。[2]

其中 OIL1、OIL2 與 OIL3 是量測地面沈積造成的劑量率，量測的位置為離地面 1 米高，並應在低於植被或無植被、遠離道路、樹木和建築物的地方測量，其用於決定是否需採行疏散、移居或是限制當地產品、野生產品(例如菇類)的消費等防護行動的參考標準及現場量測數據。

OIL1 的預設值為 1,000 $\mu\text{Sv/h}$ ，需要立即採取的行動有：1.指示民眾服用 ITB 碘片，2.安全疏散，3.減少不經意攝入的途徑，4.停止所有當地農產品、野生產品(例如菇類和山產)、該地區放牧動物所生產的牛奶、雨水和動物飼料的消費和販售，5.在尚未評估前停止販售商品，6.對該地區的人員提供登錄、監測、淨化和醫療篩查。幾天之內則需執行該地區的劑量評估，確定是否應進行體檢或輔導和隨訪。

OIL2 的預設值為反應爐停機後 10 天內 100 $\mu\text{Sv/h}$ ，超過 10 天之後為 25 $\mu\text{Sv/h}$ ，需要立即採取的行動有：1.指示民眾準備搬遷，同時採取行動減少無意中攝取，2.停止當地農產品、野生產品(例如菇類和山產)的販售和消費、在該地區放牧動物生產的牛奶。一個星期到一個月之內要採行：1.登錄該地區的居民，2.安全地移居該地區的民眾，並從潛在高曝露地區開始，3.進行該地區民眾的劑量評估，以確定是否進行體檢或諮詢和後續行動。

OIL3 的預設值為 1 $\mu\text{Sv/h}$ ，需要立即採取的行動有：1.指停止當地產品、野生產品(如菇類和山產)的販售和消費、在該地區放牧動物生產的牛奶，2.動物飼料應採行 OIL7 標準，3.在尚未評估前停止販售該地區商品。幾天之內要採行：1.盡可能盡快更換該地產品、牛奶，如果沒有辦法替代方法，可能需要重新安置民眾，2.評估與登錄民眾可能因使用當地產品所接受的劑量，以確定是否醫療諮詢和後續管制行動。

OIL4 預設值為 1 $\mu\text{Sv/h}$ ，主要量測離皮膚表面 10 cm 的劑量率，可用於評估皮膚上的放射性物質的水平是否需要醫學檢查或其他應變行為，並在背景劑量率小於 0.5 Sv/h 的區域中測量。需要立即採取的行動有：1.如尚未服用 ITB 碘片，立即指示服用，2.減少不經意的攝入途徑，3.登錄劑量率量測值，4.如果超過 OIL4，對其進行除污並提供醫療篩檢，5.對參與醫療和交通運輸的人員，使用預防污染措施(如手套，面罩等)，防止其受到污染。幾天之內要應對超過 OIL4 劑量率的民眾，確認是否進行體檢或諮詢。

OIL7 為食物、牛奶和水中的兩種指標性放射性核種的濃度(Bq/kg)，預設值分別為 I-131、1,000 Bq/kg，Cs-

137、200 Bq/kg，以確定是否可安全食用。會採用 I-131 和 Cs-137 代表所有放射性核種的殘留量的原因是此 2 核種在樣品分析中很容易被識別出，可輕易用於判斷是否需要防護措施和其他應變行動，而不需進行繁瑣費時的核種分析，很適合在快速篩檢之用。在檢測時只要其中 1 個數值超過就需要執行相應的行動，這些預設值已經考慮到在事故時會外釋的所有其他放射性核種，因此不須另行考量。需要採取的行動有：1.停止非必需食品、牛奶或水的消費，2.盡快更換必要的食物、牛奶和飲用水，如果沒有辦法替代方法，可能需要重新安置民眾，3.評估民眾可能食用濃度大於 OIL7 的食物、牛奶或飲用水所造成的劑量及其影響。

OIL8 值為甲狀腺的劑量率($\mu\text{Sv/h}$)，預設值年齡小於 7 歲的是 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 、大於 7 歲的是 2 $\mu\text{Sv/h}$ ，可用於評估一個人甲狀腺中的放射性碘的濃度，用以判斷是否需要進行體檢和其他應變行動。測量時需要將民眾先進行除污及脫去污染的外衣後，在可能攝入放射性碘後的 1 至 6 天內進行檢測，而偵檢儀的有效面積為 $\leq 15 \text{ cm}^2$ ，在緊貼甲狀腺外的皮膚，並在背景劑量率小於 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 的地方進行。如過超過需要立即採取：1.立即指示服用 ITB 碘片，2.減少不經意的攝入途徑，3.登錄民眾甲狀腺劑量率 3.提供醫療篩檢。幾天之內進行甲狀腺劑量率大於患者之劑量評估，以確定是否進行相關體檢或諮詢。

研析日本在福島核災事故後進行的相關檢討及改進，除了提出新的核能防災體制的構架，也大幅變更核能防災體制，廢除核能安全委員會，同時設置了核能監管委員會，於 2012 年 10 月至 2013 年 2 月間檢討修正核能基本法及核災應變特別措施法及地區防災計畫等運用方針，將 ICRP 及 IAEA 所訂定之應變區域(PAZ 及 UPZ)和實施應變基準等建議納入其中。

日本 OILs 是假設進入全面緊急事故態時，依緊急事故態作區分或基於設施情況的 EAL 判斷，採取疏散等預防性防護措施，但對於放射性物質已經外釋後則迅速執行緊急情況監測，再將量測結果對照應實施的防護措施判斷基準後，以預設的 OILs 作為應實施防護措施之行動基準。而日本核災應變方針中所載明的 OILs 設定值，與 IAEA 一樣將來自煙羽的直接影響視為非適用對象，主要在預防煙羽通過後意外吸入來自地表面的輻射、和再懸浮的放射性物質、及經口攝取所造成的受曝影響。較為不同的是 IAEA 所示之 OIL5 為在測量和分析 OIL6 前，經由測量總(gross) β 、 γ ，先作篩檢降低需要進行 OIL6 分析的數量，因日本的方式較容易直接進行 OIL6 測量、分析及測量各所需核種濃度，因此可直接進行測量 OIL6，而無須透過 OIL5 進行篩檢。此外，日本核災應變方針中所設定的 OIL 預設值為自訂值，也大多不同於 IAEA 的 OIL 值。雖然 IAEA 是從 GC 中訂定 OILs 預設值，但因當時尚未確立 OILs 計算方式，因此日本便以東京電力公司福島第一核能電廠事故時，所實施的防護措施情況和經驗為依據，設定適當可以實施的有效防護措施判斷標準，即為目前所設定的 OILs 標準。

日本 OILs 內容如下：

(1) 需即時疏散的標準：500 $\mu\text{Sv/h}$ (相當於 OIL1)

此標準是基於沈積於地表面的放射性物質所帶來的影響，而排除煙羽所帶來的影響。

在進入全面緊急事故態且放射性物質外釋後即適用此 OIL，但在適用此標準時，應該早已實施 PAZ(約 5km)內的預防性疏散。在東京電力福島第一核能電廠事故時的 5 km 附近測量資料當中，排除因煙羽帶來的影響後，空間劑量率(10 分鐘數值)則以 625 $\mu\text{Sv/h}$ 為最高數值。

此外，除了煙羽造成的影響之外，僅有核電廠區內超過 IAEA 的 1000 $\mu\text{Sv/h}$ 標準。

(2) 需暫時遷移標準：20 $\mu\text{Sv/h}$ (相當於 OIL2)

此標準是基於沈積於地表面的放射性物質所帶來的影響，而排除煙羽所帶來的影響。

以一週為標準執行暫時遷移，其後以指定為計畫性疏散區域為對象，在剛發生事故後的 3 月 13 日起至 3 月 17 日的空間劑量率為 20~170 $\mu\text{Sv/h}$ ，於是將標準設定為 20 $\mu\text{Sv/h}$ ，期能在初期階段盡可能就判定出需要暫時遷移的地區，而得以在更早階段採取適當防護措施。

(3) 需限制攝取飲食標準：0.5 $\mu\text{Sv/h}$ (相當於 OIL3)

IAEA 安全文書中的 OIL3 雖有要求，a.停止消費非必須飲食(OIL3 值量測範圍)、b.測量飲食中放射性核種濃度範圍標準(OIL3 值量測範圍的 10 倍距離範圍)，但通用基準和需限制攝取飲食的空間輻射劑量率之間的關係並不明確，而無法適當判斷採用。因此，日本在核災應變方針中，關於上述 IAEA OIL3 當中的 b.，需測量飲食中放射性核種濃度的範圍的職責標準，若藉由計算，將東京電力公司福島第一核能電廠事故時，在已採取限制出貨當中，以距離最遙遠約 300 km 的靜岡縣而言，其在 5 月 31 日空間輻射劑量率 0.1~0.2 $\mu\text{Sv/h}$ ，取其中間值 0.15 $\mu\text{Sv/h}$ 換算起始值時，則呈現略微超過 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 的值，因而將 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 訂為測量飲食中的放射性核種濃度標準。

(4) 需限制攝取飲食標準(相當於 OIL6)

日本鑑於防災方針指標(規制值)希望能有適當發揮功能，因而採用相當於 OIL6 限制攝取飲食的飲食中核種濃度。再者，IAEA 標準除了核災，也將放射性物質相關恐怖攻擊事件、放射性同位素造成的事故列為對象，因此超重氫和鍍也屬於適用對象。

(5) 需體表篩檢和除污標準：40,000 cpm/一個月後 13,000 cpm(相當於 OIL4)。

由東京電力福島第一核能電廠事故的經驗值可知，相當於 40 Bq/cm^2 的 13,000 cpm、及後來一舉提高到 100,000 cpm，從篩檢後的簡易除污點來說，即便沒有一舉提高，但最終仍可實施應變。另一方面，預估背景劑量率上升的影響(一併量測來自週邊地表面污染的輻射，而未能充分測量適用的人體和物體)後，而設定為 3 倍左右數值的 40,000 cpm。再者，有鑑於放射性碘的影響效果減少，而在一個月後定為 13,000 cpm。

整理日本操作干預基準內容與 IAEA 規定值之比較與整理如表 1。[6]

日本以往以 SPEEDI 進行劑量影響預測分析，以做為採取防護行動的決定，但在事故期間的初期，由於廠內電源喪失，無法提供外釋射源項的估計值作為 SPEEDI 的輸入資料，因而無法量化提供參考資料做為緊急應變判斷之需，只能基於電廠具體狀況的預測而提出各項假想資料，但因相關的掩蔽、疏散和服用碘甲狀

腺阻斷劑等防護措施標準皆是以 SPEEDI 而訂定，而不是根據可測量劑量訂定標準，因此在當下確實沒有任何標準可供決策者下達民眾防護行動之參考。

表 1、核災應變方針中的 OILs 起始設定值設定依據概要

核災應變方針		IAEA
OIL起始設定值	依據東京電力福島第一核能電廠事故經驗值等	OIL起始設定值(主要)
需即時疏散標準 500 $\mu\text{Sv/h}$	除了因放射雲帶來的影響之外，PAZ外 5 km附近空間劑量率(10 分鐘值)的最高值 625 $\mu\text{Sv/h}$	OIL1 1000 $\mu\text{Sv/h}$
需暫時遷移標準 20 $\mu\text{Sv/h}$	除了因放射雲帶來的影響之外，事故後 1 週左右的計畫性疏散區域內的空間劑量率為 20 $\mu\text{Sv/h}$ 以上	OIL2 100 $\mu\text{Sv/h}$
需限制攝取飲食標準(飲食測量範圍)* 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 測量範圍	藉由計算，求出採取限制出貨當中，距離最遠處的輻射量率後，呈現略微超過 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 的數值	OIL3 至 1 $\mu\text{Sv/h}$ 所示地點 10 倍距離的範圍
需體表篩檢和除污標準 β : 40000 cpm β : 13000 cpm (一個月後)	基於相當於剛發生事故後 40 Bq/cm^2 的 13000 cpm，預估背景劑量率上升的影響，而定為 40000 cpm 但在減低碘的影響的一個月後則定為 13000 cpm	OIL4 β : 1000 cps =60000 cpm
不需要	在日本分析體制中，可透過 OIL6 相關測量和分析，較易測量所需各核種濃度	OIL5
需限制攝取飲食的標準(依飲食中的濃度做限制)	採用有適當發揮功能的防災方針指標	OIL6

*請注意，目的同於 OIL3，但範圍定義則不同

從日本國會調查委員會的調查結果顯示，有許多民眾不知道事故已經發生或事故等級已經升高和輻射已經外釋，即使是在政府及一些直轄市地方政府已被告知。[7]

審視福島事故，因為無法得到從 ERSS 提供射源項排放數據，致使 SPEEDI 無法精確量化提供疏散區規劃。雖日本在例行演習中，已有參與人士意識到整套決策系統的局限性，但在事故之前並沒有更新版本，而且也沒有其他監測網絡可以補充或取代相關預測系統，而使決策系統失效。

我國對於核子事故之緊急應變已有相關法規制定，如核子事故緊急應變法(92 年 12 月 24 日公布)及核子事故緊急應變法施行細則(94 年 3 月 3 日公布，101 年 3 月 8 日修正)，並制定有核子事故民眾防護行動規範(94 年 7 月 15 日公布)。

核子事故緊急應變法中，予以規定核子事故期間的機關組織職掌，並明文規定相關的整備措施及應變措施，及要求核子反應爐設施經營者、中央、地方政府皆應有緊急應變計畫，定時執行檢查、測試、演練及相關配套辦法。[8]

我國輻射防護基準，在核子事故民眾防護行動規範所述，干預基準及行動基準之輻射防護目的敘述如下：
(一)防止個人確定效應損害之發生：限制個人在核子事故中組織或器官所接受之等價劑量，低於發生確定效應

之輻射劑量。(二)抑低個人機率效應之發生率：限制個人在核子事故中所接受之有效劑量，以抑低發生機率效應之危險度。(三)抑低民眾機率效應之總危險度：合理抑低核子事故造成之集體有效劑量。在核子事故發生或有發生之虞時，(一)採行掩蔽措施之干預基準，為可減免劑量在 2 天內達 10 毫西弗以上，(二)採行疏散措施之干預基準，為可減免劑量於 7 天內達 50 至 100 毫西弗，(三)採行服用碘片措施之干預基準，為可減免甲狀腺約定等價劑量達 100 毫西弗以上。核子事故發生後，(一)採行暫時移居措施之干預基準，為 30 天之預期輻射劑量達 30 毫西弗以上；移居後應考慮終止暫時移居措施之干預基準，為 30 天之預期輻射劑量在 10 毫西弗以下，(二)採行永久遷離措施之干預基準，終生之預期輻射劑量達 1 西弗以上或暫時移居達 1 年以上，(三)民眾防護行動食物及飲水管制之行動基準，詳如附表 2。[9]

表 2、食物及飲水管制之行動基準

放射性核種	行動基準(千貝克/公斤)	
	一般食品	牛乳、嬰兒食品、飲水
銈-134，銈-137，銈-103，銈-106，銈-89	1 以上	1 以上
銈-131	--	0.1 以上
銈-90	0.1 以上	--
銈-241，銈-238，銈-239	0.01 以上	0.001 以上

說明：參考國際原子能總署安全系列第 109 及第 115 號報告訂定。

依據目前輻射防護與應變策略規劃發展之趨勢，建議可參考納入 IAEA GSG2 之相關概念，以增加緊急應變之效率，能及時反應實施各項緊急應變措施，包含即時疏散、服用碘片、就地掩蔽、暫時移居、永久遷離、限制食物飲水及商品管制等，機關也可以依據實際的數據向大眾媒體具體說明影響程度及相關因應措施，並記取日本福島事故之教訓與經驗，參酌國際輻防趨勢，以使我國民眾輻射防護達到最完善境界。

III. 討論

若就世界各國目前輻射防護基準研究，目前僅只有日本及北歐五國自行制訂操作干預基準，其他國家或以先行採用 IAEA 的建議，或正在研究制訂中，而 OECD 也有調查各會員國實際訂定及執行情形，大多因為各國的電廠及廠址所在環境不同而有不同，但無論採用何種方式，操作干預基準的推導是複雜且需要依照國情、人口組成及射源組成情況而定，並非僅僅依據 IAEA 建議或者以日本經驗推定得到，還需要經過更為嚴謹的研究評估，以得到更符合我國應變所需的操作干預基準，而在未推導出我國的操作干預基準前，建議仍以 IAEA 所訂的操作干預基準值為依循參考，較能與國際接軌並互為評估及印證，日後可依據我國人口群組代表人之特性加以制訂本土化的 OILs。

最後，我國現行制度已經參考 ICRP 及 IAEA 的建議，並有類似日本 SPEEDI 的劑量預測系統，可以依照我國國情調整緊急應變時的各項行動及策略基準，再輔以現場監測數據，依循所制訂符合實際需求的操作干預基準並執行各項防護措施，即可有效提升對民眾的防護，避免發生類似福島事故訊息混亂無法及時應變的情形。

IV. 結論

我國現在已經朝向國際標準研究接軌，若就最新的國際文獻研究，以 IAEA 建議值使用可達到適當的防護作用。未來可優先考慮緊急應變區及周圍人口稠密地區執行緊急應變行動的有效性，確認所有的防護行動都已安排到最適化，並可後續深入研究 IAEA 的 OILs 建議值是否可最佳化應用於我國的核子設施條件及國情。

參考文獻

- [1] IAEA, 2011. Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety Standards Series No. GS-G-2.。
- [2] IAEA, 2013. Actions to protect the public in an emergency due to severe conditions at a light water reactor. IAEA EPR NPP PUBLIC PROTECTIVE ACTIONS.。
- [3] ICRP, 2000a. Pregnancy and medical radiation. ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30.
- [4] ICRP, 2005. Protecting people against radiation exposure in the event of a radiological attack. ICRP Publication 96. Ann. ICRP 35.
- [5] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37.
- [6] IAEA-Review 2013-015, 2013. Basic Concept of the Nuclear Emergency Preparedness and Response in Japan after the Accident of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station – The Plain Explanation for Regional Officials and Emergency Workers.
- [7] The National Diet of Japan The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, 2012. “The official report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission Executive summary”。
- [8] 行政院原子能委員會 2003，核子事故緊急應變法，2003 年 12 月 24 日公布。
- [9] 行政院原子能委員會 2005，核子事故民眾防護行動規範，2005 年 7 月 15 日發布。

給低劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片設計

Multi-Channel Readout Chips for Low-Dose Radiation Image Detectors

計畫編號：MOST 105—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：揚越德、周育諒、陳彥文、周祐安、黃星維、黃俊浩、蔡明翰、賴天珩、張祐綱、郭巨倫、曼尼許、柏麥嘉、段干婉、尼拉吉

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

在本計畫中，吾人擬以兩年時間設計並實現給低輻射劑量放射影像感測器應用之多通道讀出電路晶片。

關鍵詞：最多選擇 6 個詞以內。在第一年，吾人已設計並實現一個 16 通道放射影像感測讀出電路晶片，每一通道的讀出電路包含一個寬頻放大器、一個積分器、一個觸發電路及一個十位元的連續漸進式類比數位轉換器。感測 SiPM array 所產生的電流流到一個感測電阻，此電阻將電流轉換成電壓，寬頻放大器將此電壓信號放大並轉換成差動訊號，積分器將此差動訊號積分成一個電壓，此電壓再由類比數位轉換器轉換成數位資料，此數位資料送到數位資料處理器做影像成像處理。

關鍵字：放射影像感測系統、讀出電路、放大器、積分器、類比數位轉換器、數位資料處理器。

Abstract

In this project, we would like to design and implement multi-channel readout circuits for low-dose radiation image detectors. In the first year, we designed and implemented a 16-channel readout chip for radiation image system. Each output channel of the chip consists of a broadband amplifier, an integrator, a trigger circuit, and a 10-bit SAR ADC. SiPM array generates a signal current, and this current is sensed and converted to a signal voltage by a sensing resistor. This signal voltage is amplified by the broadband amplifier. The integrator integrates the signal voltage for a period and outputs a differential voltage. The SAR ADC converts the integrated differential voltage to digital data. The digital signal processor process the signal data sent by the readout chips for radiation imaging.

Keywords: radiation image system, readout circuit, amplifier, analog-to-digital converter (ADC), SAR ADC, digital signal processor.

I. 前言

全球放射影像設備市場呈現穩定 2 ~ 3% 的成長，數位放射影像設備提供了比傳統放射影像設備更多的優點，如可以較低的輻射劑量提供更好的影像品質，快速成像，減少重製，而且數位放射影像設備亦可提供診斷醫師以電子化方式進行影像的檢視、擷取、傳送、分析，大幅提高醫院醫事效率，所以數位放射影像設備已成為醫學影像市場未來成長的主要動能[1-2]。

數位放射影像設備在醫療檢測方面可用在 X 光照

相、X 光透視檢查、乳腺 X 光攝影檢查、血管造影及斷層攝影；數位放射影像設備也可應用在其他如機場安檢掃描、非破壞性測試、天文應用、核子科學應用及工業儀器設備上。

II. 主要內容

圖（一）為一個 16 x 16 放射影像面板感測系統，包含一個 16x16 SiPM array、16 顆 16 通道放射影像感測讀出電路晶片、一顆數位資料處理晶片及終端顯示器。每一通道的讀出電路晶片包含一個寬頻放大器、一個積分器、一個觸發電路及一個十位元的連續漸進式類比數位轉換器。圖（二）為一個寬頻放大器，為了達到寬頻及高共模拒斥比，吾人設計的放大器為一級差動放大器，電晶體 M1 提供 tail current，M2-M3 為差動對，M4-M5 為差動對的 active load，R1-R2 為 common-mode feedback circuit 以控制輸出的 common-mode voltage，R3-R4 為積分電阻，M6-M7 當作開關由 trigger signal control。圖（三）為一個增益可變積分器，M8-M12 為一個差動放大器，R5-R6 為 common-mode feedback circuit 以控制輸出的 common-mode voltage，電容 C1-C6 為積分電容，M13-M20 為開關，這些開關可改變積分電容的大小，進而改變積分器的增益，可調整積分器增益以配合後面類比數位轉換器的輸入電壓範圍。圖（四）為一個觸發電路，M21-M25 為一個差動放大器，R7-R8 為 common-mode feedback circuit 以控制輸出的 common-mode voltage，M23 的 gate 接到地，M22 的 gate 為輸入端，M24-M25 的 drain 端為差動輸出，M27-M28 為一個動對，其兩個輸入參考電壓可調觸發訊號的準位，M29-M41 為一個具有遲滯效應的比較器。圖（五）為類比前端電路模擬結果，輸入訊號為一個三角波電流代表 SiPM 的輸出電流訊號，此訊號的高度為 0.2 mA；第二列為觸發訊號，當 SiPM 有訊號產生，觸發電路輸出一個觸發訊號，其寬度就是 SiPM 訊號的寬度；第三列為 reset 訊號，每完成一次訊號偵測後電路就產生一個 reset signal，此 reset 訊號用來 reset 積分器到初始值；最後一列為積分器的差動輸出，其差動電壓和輸入訊號的能量成正比。圖（六）積分器差動電壓輸出和輸入三角波高度關係在 5 個 coners 模擬結果，當輸入三角波電流大小高度超過 0.4 mA 時，此類比前端電路就成飽和狀態，改變積分器的增益可改變輸入訊號的範圍。圖（七）為十位元連續漸進式類比數位轉換器之架構圖，吾人擬使

用這連續漸進式類比數位轉換器將積分器的差動輸出電壓轉換成數位資料。本晶片有 16 通道，每一個通道有 10 個位元輸出，如果用並列輸出就須 160 個接角，所以吾人在每一通道設計一個並列轉串列輸出電路如圖（八）。

III. 結果與討論

吾人以 TSMC 0.18 μm CMOS 製程實現此 16 通道放射影像感測讀出電路晶片，圖（九）單通道電路布局圖，面積為 $772\ \mu\text{m} \times 626\ \mu\text{m}$ 。圖（十）16 通道電路布局圖，面積為 $1.284\ \text{mm} \times 10.42\ \text{mm}$ 。圖（十一）為將製作好的晶片焊在電路板上。圖（十二）量測架設環境。圖（十三）為編號第二個通道之輸入與輸出數位波形，其中輸入波形的電壓高度為 40 mV，數位資料之十進位值為 527。圖（十四）為編號第二個通道之輸入與輸出數位波形，其中輸入波形的電壓高度為 500 mV，數位資料之十進位值為 952。從圖（十三）中可明顯看到輸入訊號受到雜訊干擾，吾人將重新量測。表（一）為 16 個通道的輸入訊號與數位輸出量測值，圖（十五）為 16 個通道數位輸出量測值與輸入訊號的關係圖。此圖可看出輸入電壓訊號超過 0.2 V，輸出就成非線性特性，吾人將重新量測，輸入訊號用電流，調整感測電阻使輸入電壓在 SiPM 最大輸出電流之下，其輸入電壓不超過 0.2 V，並調整積分器的增益，使輸入電壓在 0.2 V 時，積分器輸出的電壓為類比數位轉換器的最大輸入電壓範圍。單一通道平均功率消耗為 1.253 mW。

IV. 結論

這一年吾人以 TSMC 0.18 μm CMOS 製程實現一個 16 通道放射影像感測讀出電路晶片，量測結果有以下幾點結論與建議：

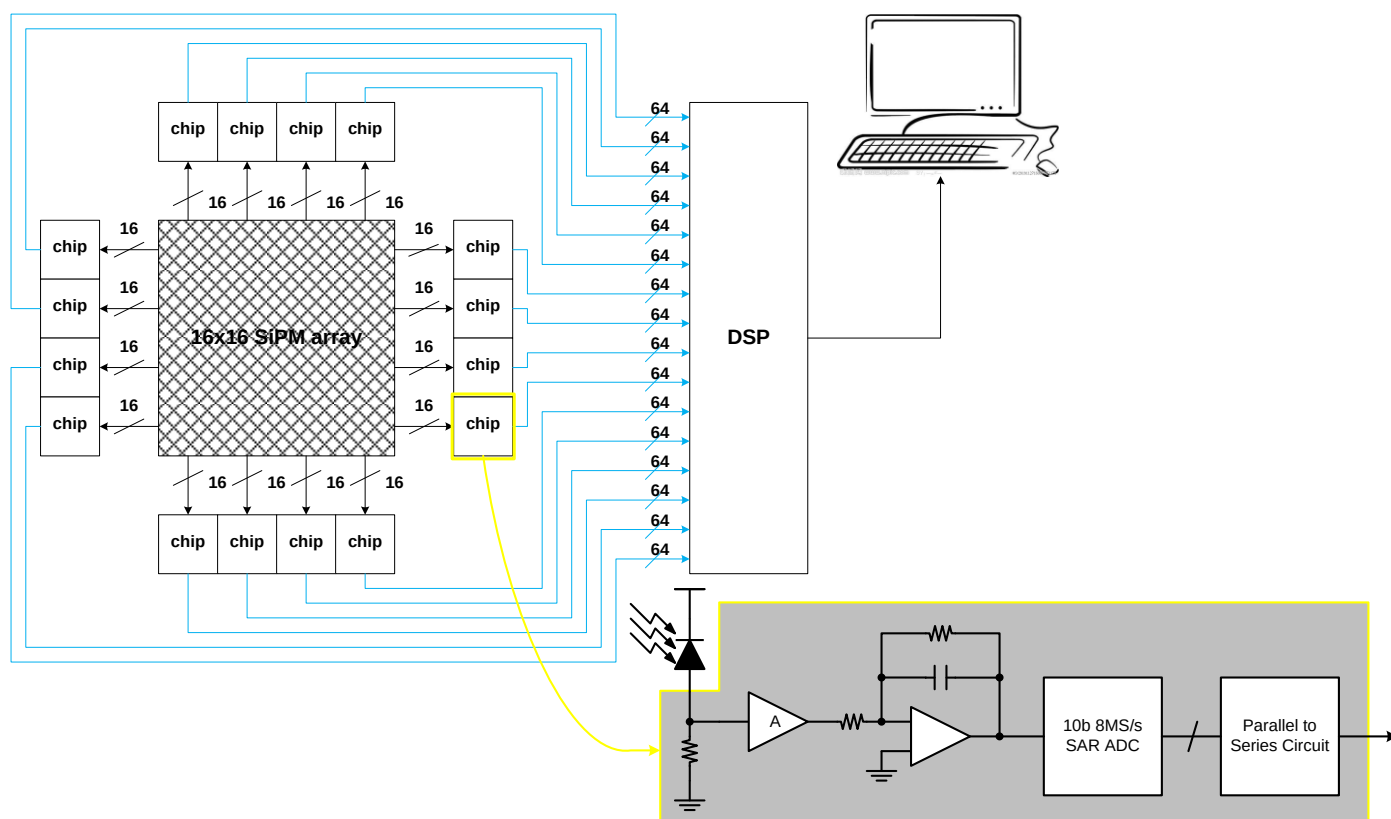
- (1) 每一通通道需要一個觸發器以偵測有無 SiPM signal，一偵測到有 SiPM signal，觸發訊號啟動積分器做積分動作直到 SiPM signal 消失，本晶片的量測已驗證此功能。
- (2) 第一級的放大器須有足夠大的頻寬及輸入電壓範圍，吾人設計一個無須電容補償的差動放大器，有很大的頻寬，本晶片的量測已驗證此功能。
- (3) 由量測結果看出輸入訊號受到雜訊干擾，吾人將重新量測以探討此雜訊干擾是受到環境干擾或是晶片內部雜訊干擾，如果是晶片內部雜訊干擾，在第二年計畫吾人將解決此問題。
- (4) 由量測結果看出當輸入訊號超過 0.2 V，輸出就成非線性特性，吾人將重新量測，輸入訊號用電流，調整感測電阻使輸入電壓在 SiPM 最大輸出電流之下，其輸入電壓不超過 0.2 V，並調整積分器的增益，使輸入電壓在 0.2 V 時，積分器輸出的電壓為類比數位轉換器的最大輸入電壓範圍。在第二年計畫吾人將設計一個有更大輸入範圍的差動放大器。

參考文獻

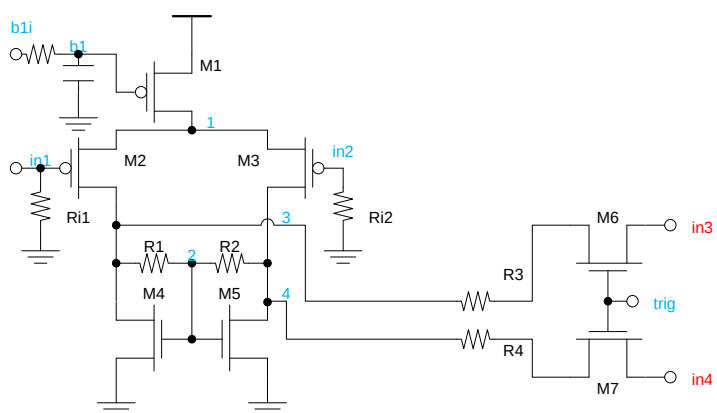
- [1] Available on website:
ww2.itis.org.tw/book/download_sample.aspx?pubid=65226047.
- [2] Available on website:

http://iekweb2.iek.org.tw/IEKConf/Client/confinfo.aspx?mode=confinfo&conf_no=217609829.

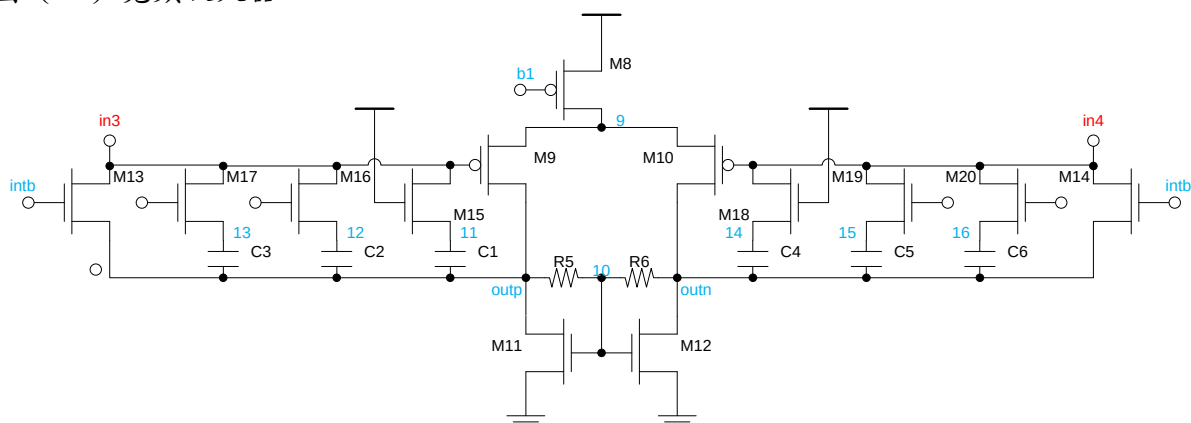
- [3] R. Irsigler, J. Anderson, J. Alverbro, J. Borglind, C. Frojdh, P. Helander, S. Manolopoulos, H. Martijn, V. O'Shea, and K. Smith, "X-ray imaging using a 320 x 240 hybrid GaAs pixel detector," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 507-512, Jun. 1999.
- [4] S. Steadman, F. M. Serrano, G. Vogtmerier, A. Kemna, E. Oezkan, W. Brockherde, and B. J. Hosticka, "A CMOS photodiode array with in-pixel data acquisition system for computed tomography," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 7, pp. 1034-1043, July 2004.
- [5] B. Mikulec, "Development of segmented semiconductor arrays for quantum imaging," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip.*, vol. 510, pp. 1-23, Sep. 2003.
- [6] I. Willekens, B. Dierickx, N. Buls, C. Breucq, A. Schiettecatte, J. D. mey, and C. Bourgain, "Superiority of multi-energy color X-ray for breast spectrum radiography," in *European Society for Radiography Congress*, Mar. 2011.
- [7] X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo, and E. Pernigotti, "Medipix2: A 64-k pixel readout chip with 55- μm square elements working in single photon counting mode," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 49, no. 5, pp. 2279-2283, Oct. 2002.
- [8] R. Ballabriga, M. Campbell, E. H. M. Heijne, X. Llopart, and L. Tlustos, "The Medipix3 prototype, a pixel readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 54, no. 5, pp. 1824-1829, Oct. 2007.
- [9] R. Ballabriga, M. Campbell, E. H. M. Heijne, X. Llopart, and L. Tlustos, "Medipix3: A 64-k pixel detector readout chip working in single photon counting mode with improved spectrometric performance," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip.*, vol. 633, pp. S15-S18, May 2011.
- [10] M. Locker, P. Fischer, S. Krimmel, H. Kruger, M. Lindner, N. Nakazawa, T. Takahashi, and N. Wermes, "Single photon counting x-ray imaging with Si and CdTe single chip pixel detectors and multichip pixel modules," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no. 4, pp. 1717-1723, Aug. 2004.
- [11] M. Perenzoni, D. Stoppa, M. Malfatti, and A. Simoni, "A multispectral analog photon-counting readout circuit for x-ray hybrid pixel detectors," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 7, pp. 1438-1444, July 2008.
- [12] K. Spartiotis, A. Leppanen, T. Pansar, J. Pyyhtia, P. Laukka, K. Muukkonen, O. Mannisto, J. Kinnari, and T. Schulman, "A photon counting CdTe gamma- and x-ray camera," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip.*, vol. 550, pp. 267-277, May 2005.
- [13] J. S. Iwanczyk, E. Nygard, O. Meirav, J. Arenson, W. C. Barber, N. E. Hartsough, N. Malakhov, and J. C. Wessel, "Photon counting energy dispersive detector arrays for x-ray imaging," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 535-542, Jun. 2009.



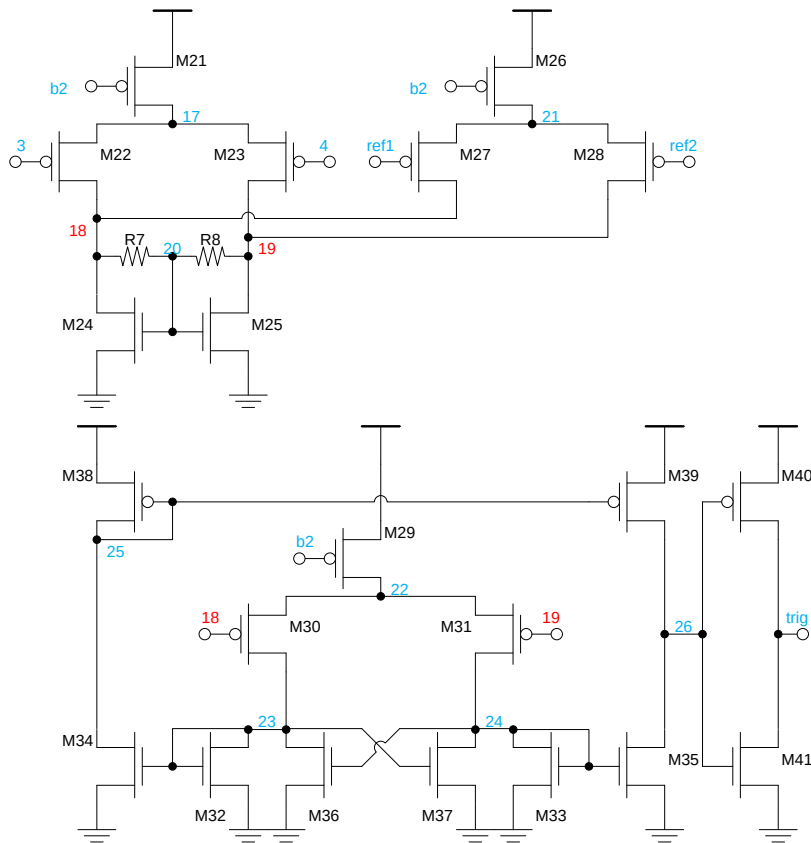
圖（一）64 x 64 放射影像面板感測系統。



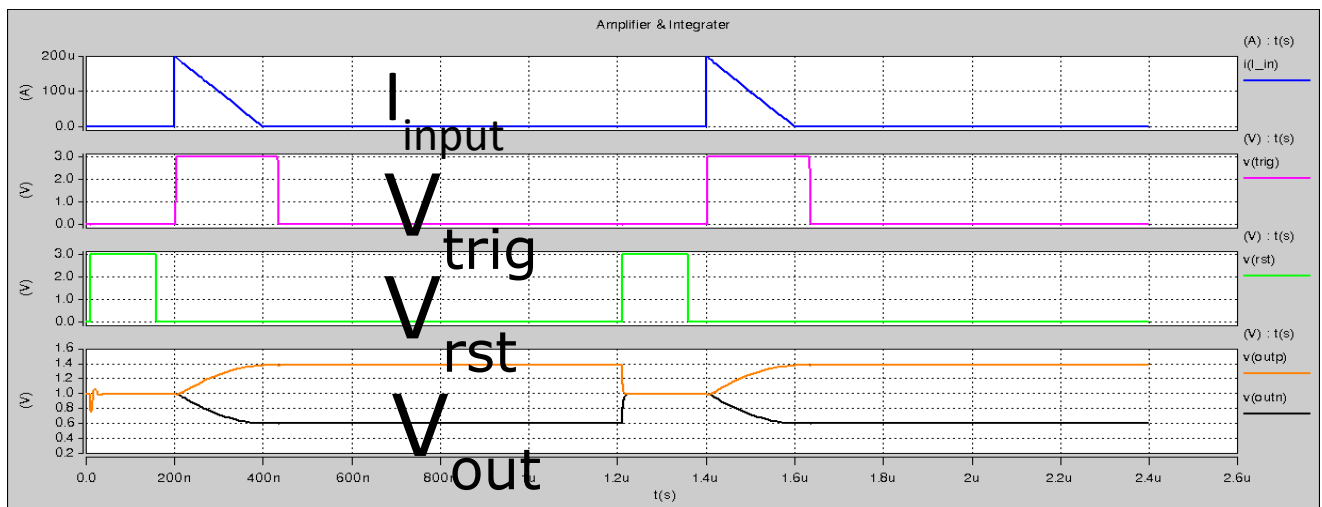
圖（二）寬頻放大器。



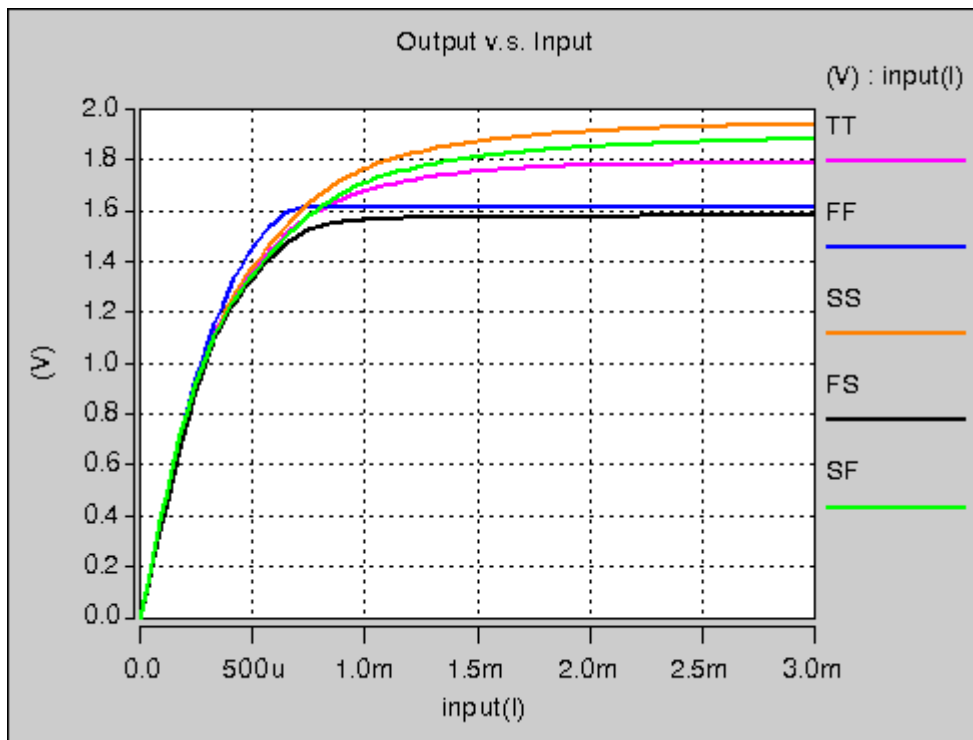
圖（三）增益可變積分器。



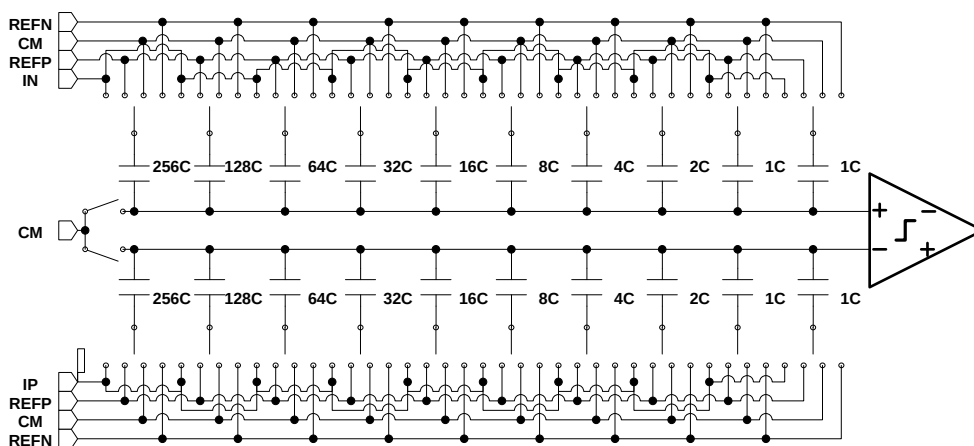
圖（四）觸發電路。



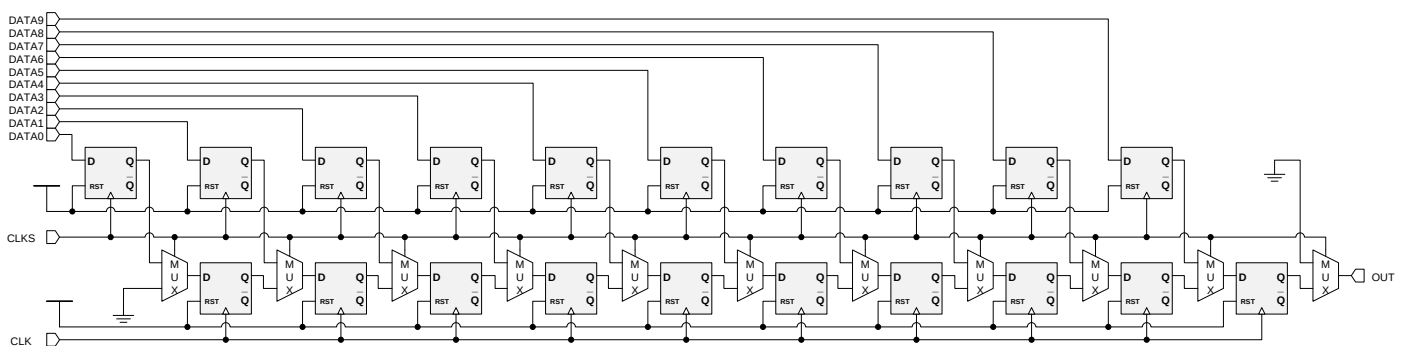
圖（五）類比前端電路模擬結果。



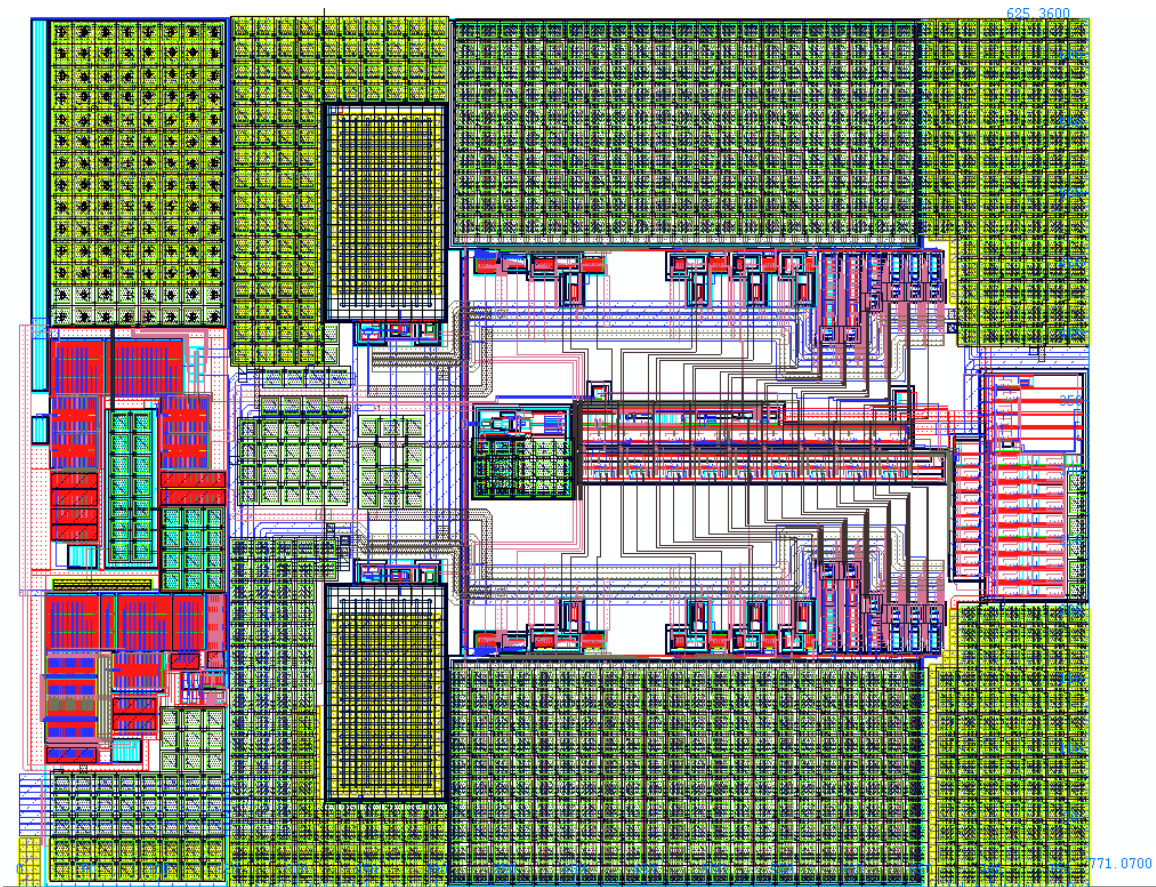
圖（六）積分器差動電壓輸出和輸入三角波高度關係在 5 個 coners 模擬結果。



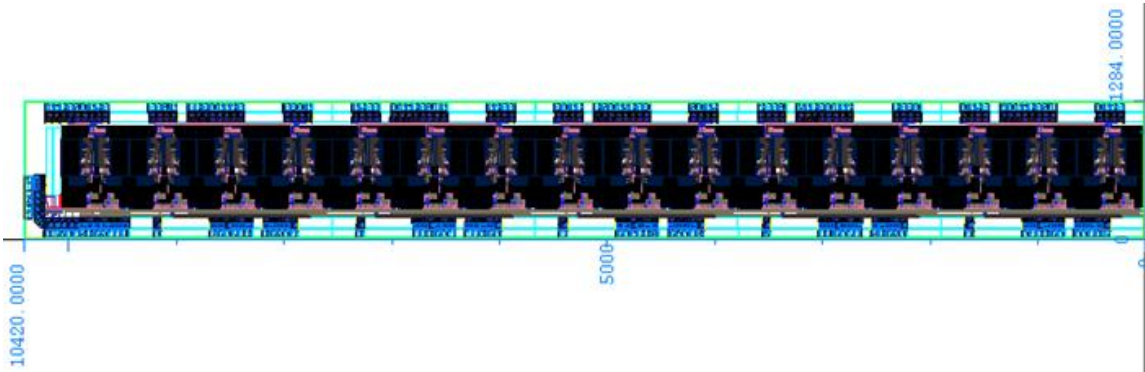
圖（七）十位元連續漸進式類比數位轉換器之架構圖。



圖（八）並列轉串列輸出電路。



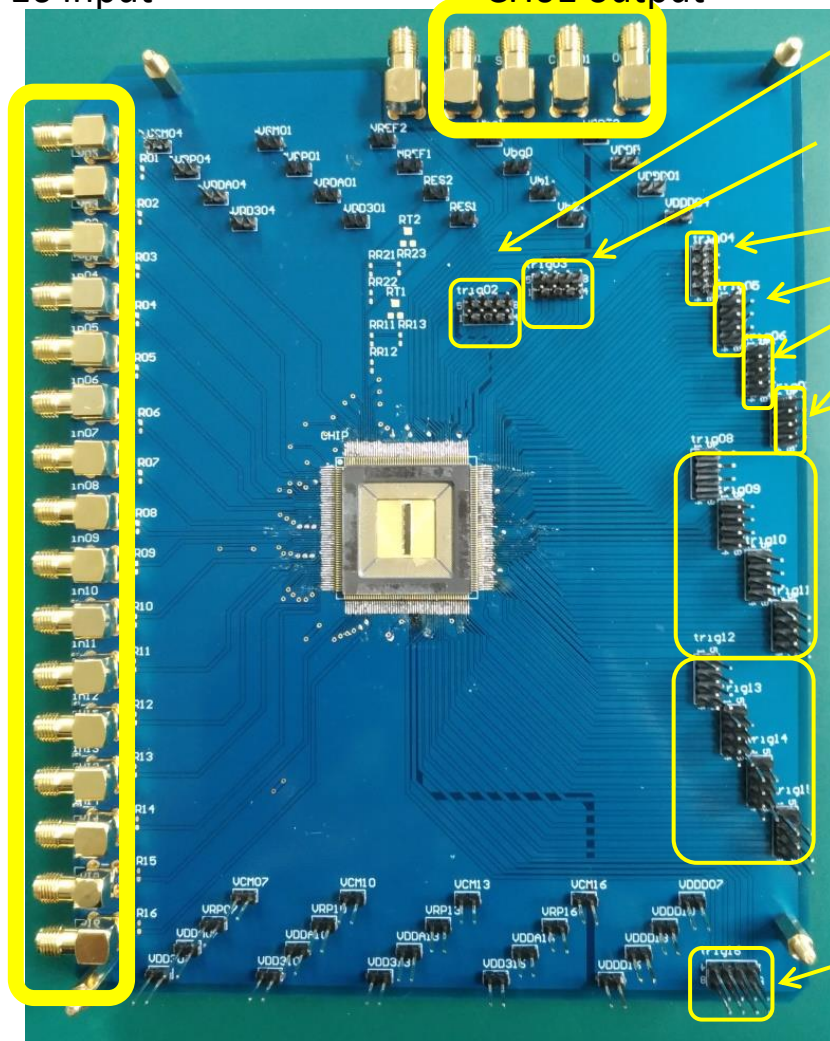
圖（九）單通道電路布局圖。



圖（十）16 通道電路布局圖。

CH01~16 input

CH01 output



CH02 output

CH03 output

CH04 output

CH05 output

CH06 output

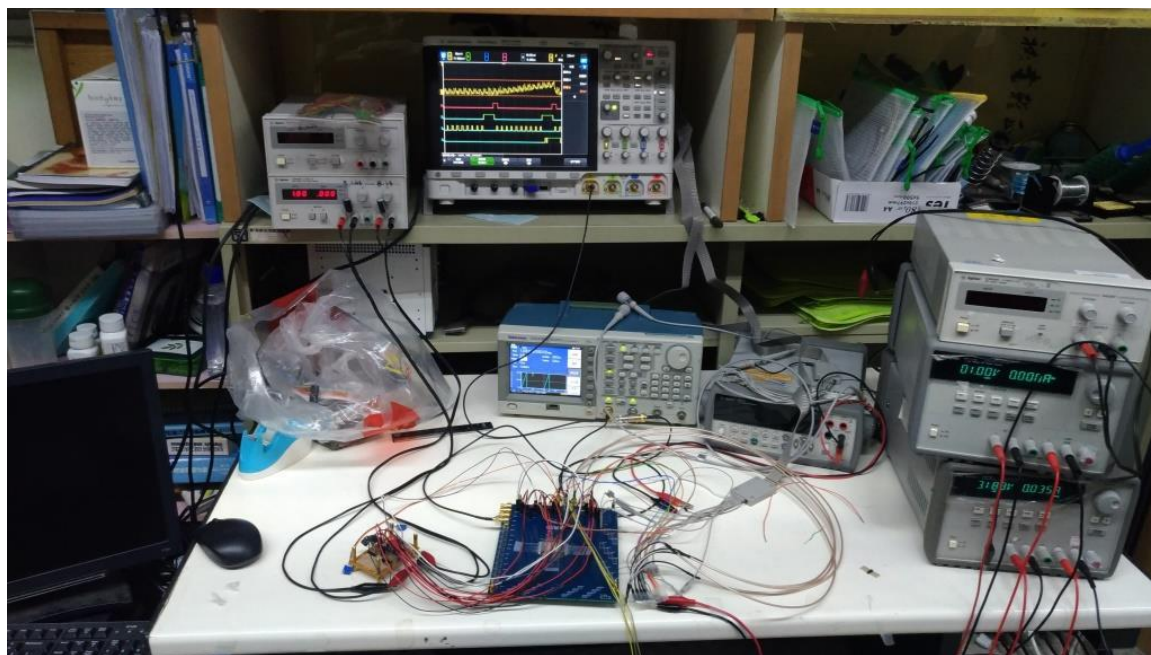
CH07 output

CH08~11
output

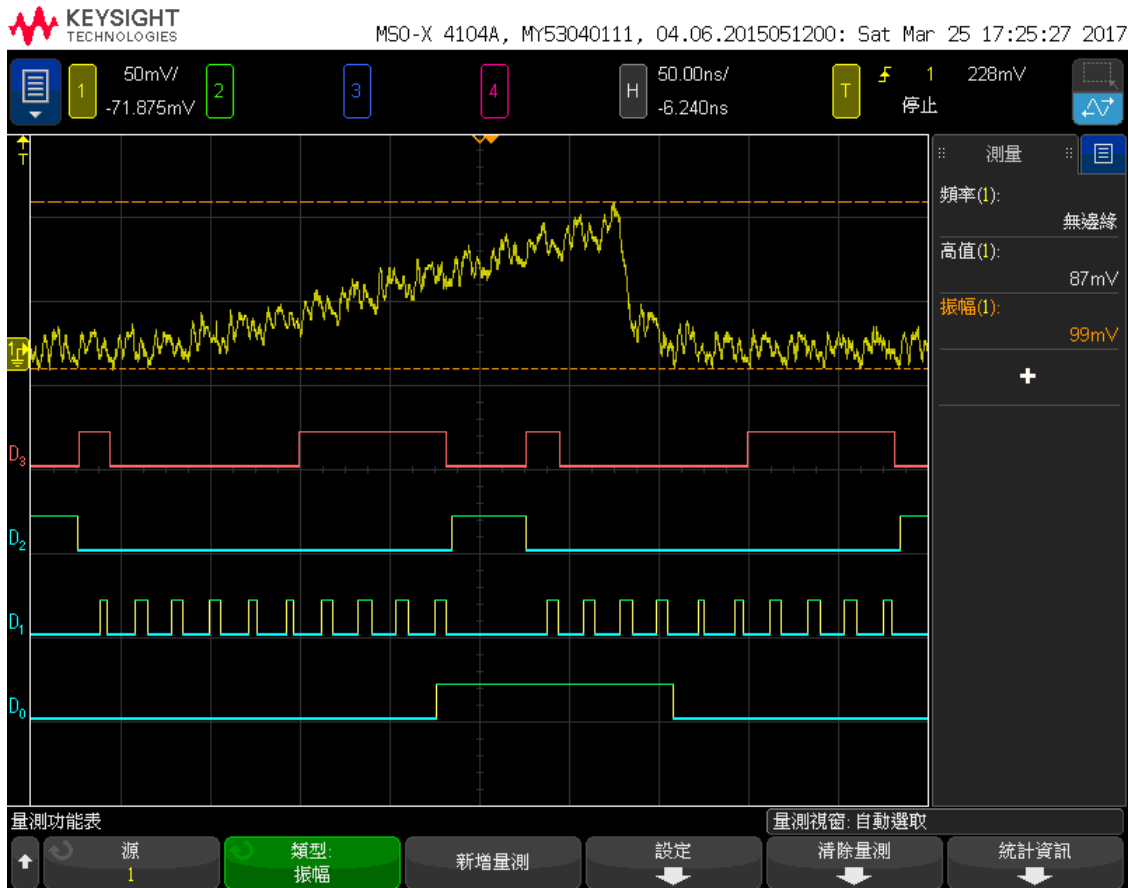
CH12~15
output

CH16 output

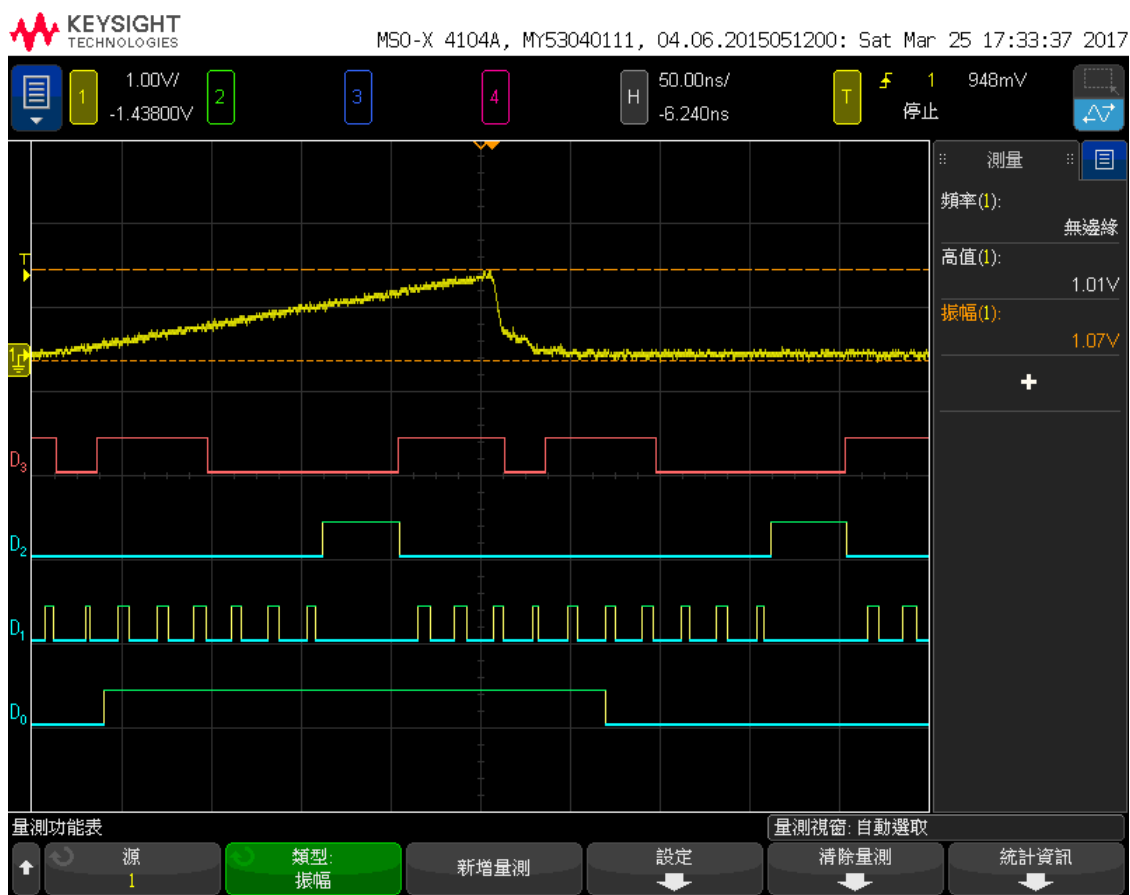
圖（十一）量測電路板。



圖（十二）量測架設環境。



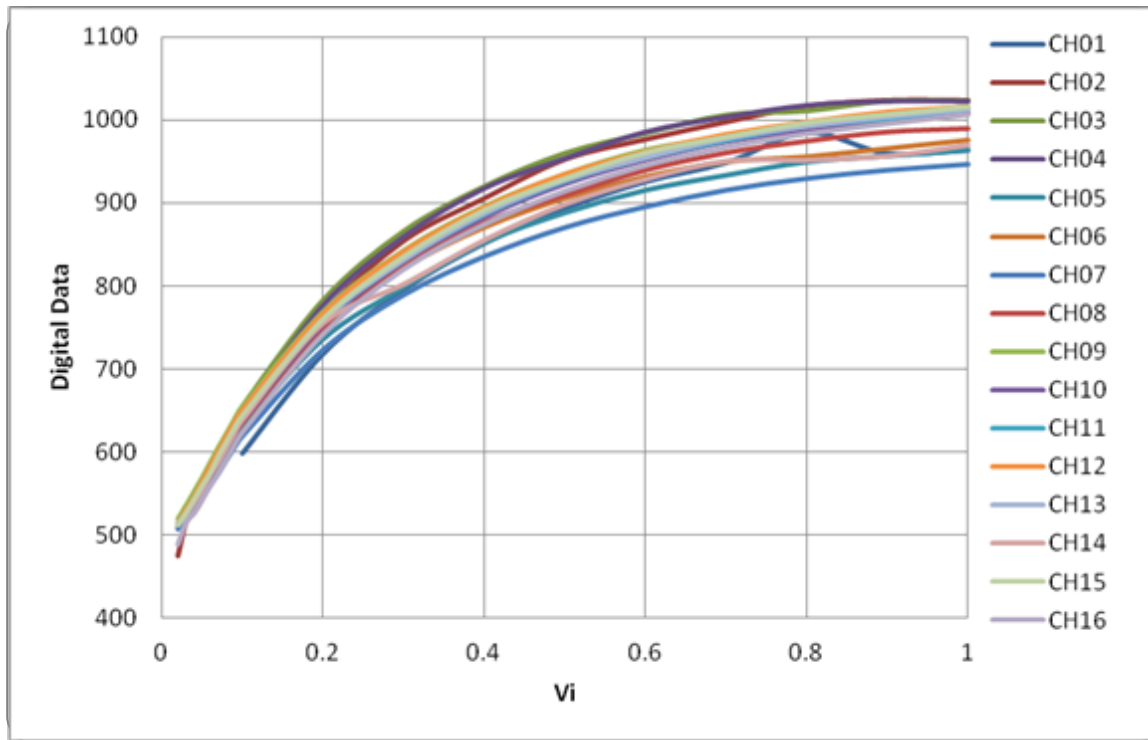
圖（十三） 編號第二個通道之輸入與輸出數位波形，其中輸入波形的電壓高度為 40 m V，數位資料之十進位值為 527。



圖（十四） 編號第二個通道之輸入與輸出數位波形，其中輸入波形的電壓高度為 500 m V，數位資料之十進位值為 952。

表（一） 16 個通道的輸入訊號與數位輸出量測值。

amp	CH01	CH02	CH03	CH04	CH05	CH06	CH07	CH08	CH09	CH10	CH11	CH12	CH13	CH14	CH15	CH16
0.02	511	475	513	512	512	512	508	513	519	512	512	513	513	514	512	489
0.03	521	515	526	524	523	535	519	525	535	524	524	530	526	525	527	515
0.04	534	527	546	539	536	534	532	538	552	539	540	545	541	540	543	527
0.05	551	543	562	556	552	566	546	555	569	554	555	564		555	560	543
0.06		562	583	573	567	585	561	571	587	572	574	582	574	573	575	559
0.07		580	602	594	583	601	575	587	605	589	590	600	591	588	595	575
0.08		597	620	612	598	617	591	604	622	605	608	618	608	605	612	591
0.09		616	638	630	614	631	606	620	639	622	625	635	625	623	629	608
0.1	599	635	655	647	629	647	620	635	654	638	640	650	641	639	644	624
0.2	719	766	783	777	736	752	724	748	769	754	757	766	758	755	760	742
0.3	796	854	866	860	798	822	790	823	843	830	831	841	831	802	835	820
0.4	852	905	920	918	852	871	836	876	896	883	886	894	887	855	891	874
0.5	894	952	960	954	888	906	871	909	935	923	926	934	927	898	929	914
0.6	926	976	984	986	915	932	896	939	964	952	954	961	954	928	960	945
0.7	949	997	1006	1004	933	950	916	960	980	974	975	982	977	950	979	967
0.8	985	1016	1011	1018	949	956	930	974	996	987	992	997	992	951	996	983
0.9	960	1023	1023	1023	956	966	940	985	1008	999	1001	1009	1003	956	1006	995
1	964	1023	1023	1023	963	976	947	989	1016	1008	1012	1015	1012	969	1015	1006



圖（十五） 16 個通道數位輸出量測值與輸入訊號的關係圖。

個人化核子醫學體內劑量評估—釔 90 影像實證研究 Personalization of internal dosimetry in nuclear medicine: evidence-based yttrium-90 microsphere imaging

計畫編號：MOST 105-NU-E-010-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳東信

e-mail：tung@ym.edu.tw

計畫參與人員：官郁翔、林冠亨、蔡沛宜

執行單位：國立陽明大學 生物醫學影像暨放射科學系

臺北榮民總醫院 國家多目標醫用迴旋加速器中心

摘要

釔-90 微球體(^{90}Y microsphere)選擇性體內放射治療(selective internal radiation therapy, SIRT)已廣泛應用在治療原發性或轉移性肝癌。臨床上，為了制定治療計劃，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA 模擬 ^{90}Y microsphere 在體內分布的情形，但是， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA 的粒徑大小、半衰期畢竟和 ^{90}Y microsphere 有所差異，假如能透過此制動輻射造影得知 ^{90}Y microsphere 劑量分布，甚至更進一步得知肝腫瘤和正常細胞接受的輻射劑量，就可更準確評估治療效果及正常組織受到的損傷。

本研究設定兩個目的：(1)使用中能量準值儀(MEGP collimator)對 Jaszczak 假體進行不同造影條件的影像收集，建立符合 SPECT 制動輻射造影之最佳化參數；(2)對 9 位受試者 ^{90}Y microsphere 制動輻射影像(7 位男性和 2 位女性；平均年齡 53 歲)進行每個體素(voxel)與體素劑量核心(kernel)的旋積(convolution)計算，求得 3D 吸收劑量分布、等劑量曲線(isodose curve)、劑量體積直方圖(dose-volume histogram, DVH)，並與 OLINDA 軟體搭配 MIRD (medical internal radiation dosimetry)方法比較之。

研究發現(1)最佳造影參數的能窗(energy window)為 $70\pm 10\%$ 、 $135\pm 10\%$ 、 $167\pm 10\%$ ，每 6 度收集一個投影，每個投影時間為 15 秒，總投影數共 60 個，總造影時間共 15 分鐘，能以最短的掃描時間獲得可接受的影像品質，以提昇臨床應用性；(2)使用影像旋積法所獲得的肝臟吸收劑量為 21.19 ± 3.54 ，使用 OLINDA 法計算的肝臟吸收劑量為 23.50 ± 5.24 ，兩種計算法相關性不高(R^2 僅有 0.05)，原因是 MIRD 理論基礎的 S 值無法精準反應個體解剖的幾何差異。

由於肝癌在台灣是癌症死亡因的第 2 位，且大多數病人無法進行手術切除，進而選擇 ^{90}Y microsphere SIRT 治療，相信此研究結果定能提供更多的臨床價值，為肝癌病人帶來更多的福祉。

關鍵字：釔 90 微球體、制動輻射造影、劑量分布、體內劑量

Selective internal radiation therapy (SIRT) using ^{90}Y (yttrium-90) microsphere has become one of a mainstream treatment for primary and metastatic liver tumors. Currently, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA imaging is used to predict internal distribution of ^{90}Y microspheres for treatment planning. However, the size and half-life of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA are different from ^{90}Y microspheres, leading to potential errors in pharmacokinetics and dose distribution estimation. If the activity or dose distribution of ^{90}Y microspheres for the tumor and normal cells can be predicted by bremsstrahlung imaging, the efficacy of the treatment planning can be enhanced.

There were two aims in this study. (1) Use medium energy general purpose (MEGP) to acquire Jaszczak phantom images with different protocols and establish optimal scanning protocols for ^{90}Y bremsstrahlung images. (2) Convolute every voxel on the 3D ^{90}Y images acquired 9 patients (7 males and 2 females, mean age, 53 years) with a ^{90}Y dose-point kernel to calculate the 3D dose distribution, and then the isodose curve and dose-volume histogram (DVH). Medical internal radiation dosimetry (MIRD) and OLINDA software were also used to calculate absorbed dose for comparing with convolution method.

The results showed that (1) The optimal scanning parameters of this study were as follow: energy window, $70\pm 10\%$, $135\pm 10\%$, $167\pm 10\%$, 15 sec/frame, 60 projections (6° /frame). The total scan time is 15 minutes, meaning this protocol not only could reduce scan time but also maintain image quality. (2) The absorbed dose of liver calculated by convolution method and MIRD method were 21.19 ± 3.54 mGy and 23.50 ± 5.24 mGy, respectively. A bad correlation was observed between convolution and OLINDA method (R^2 is 0.05). The reason was S value neglected individual differences.

Among all cancers, liver tumor is the 2nd leading cause of death in Taiwan. Most patients cannot be treated via surgery and may be suitable for ^{90}Y microsphere SIRT. Our study is critical for successful implementation of SIRT and can ultimately benefit the treatment and prognosis of the patients with liver tumors.

Keywords: ^{90}Y microspheres, bremsstrahlung imaging, dose distribution, internal dose

Abstract

I. 前言

釷-90 微球體(^{90}Y microsphere)選擇性體內放射治療(selective internal radiation therapy, SIRT) 已廣泛應用在治療原發性或轉移性肝癌，其治療方式為將帶有高能量 β 射線的 ^{90}Y microsphere 經導管輸送滯留於肝腫瘤中，可大幅降低對正常肝細胞的傷害。臨床上，為了制定治療計劃，使用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA 模擬 ^{90}Y microsphere 在體內分布的情形，但是， $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA 的粒徑大小、半衰期畢竟和 ^{90}Y microsphere 有所差異，因此， ^{90}Y microsphere 的藥物動力學及劑量分布是無法精準的被模擬，此外，植入 ^{90}Y microsphere 至病人體內後的制動輻射(bremsstrahlung radiation) 造影，僅用於確認 ^{90}Y microsphere 是否正確的置入於肝臟內，假如能透過此制動輻射造影得知 ^{90}Y microsphere 的劑量分布，甚至更進一步得知肝腫瘤和正常細胞各接受多少輻射劑量，就可以更準確的評估治療效果及正常組織受到的損傷。如此一來，影像資訊的正確性就顯得非常重要，然而，針對制動輻射造影將面臨一個重要問題，即造影能窗該如何設定？因為制動輻射能譜上並沒有光峰(photopeak)存在，而是從零到 β 粒子最大動能的連續性分布。因此，能窗的選擇便是進行 ^{90}Y 造影的首要課題，這將會影響影像上的活性分布，造成影像的活性分布與真實狀況的差異，

II. 主要內容

本研究設定兩個目的，(1)使用物理假體建立符合單光子電腦斷層掃描(single-photon emission computed tomography, SPECT)制動輻射造影之最佳化參數。(2)使用旋積法(convolution)對 ^{90}Y 制動輻射影像進行計算求得 3D 吸收劑量分布、等劑量曲線(isodose curve)、劑量體積直方圖(dose-volume histogram, DVH)。

在目的 1 中，使用三顆空心球體和三顆實心球體放入 Jaszczak 假體中進行實驗，三顆空心球的 ^{90}Y 濃度和背景值的濃度比為 5:1、15:1、25:1，使用中能量準值儀(MEGP collimator)。SPECT 造影方面，將根據能窗(energy window)、投影角度(degree per projection)、投影數量(number per projection)和投影時間(times per projection)的變化分為 6 組造影參數。首先，若造影能窗過於寬廣，會接受過多的散射光子而影響影像品質，因此，本研究同時開啟 $70\pm 10\%$ 、 $120\pm 10\%$ 、 $160\pm 10\%$ 三個能窗進行造影；此外，為了避免發生能窗位移(energy window shift)，並不會開啟第四個能窗。另一方面，造影過程中必須收集足夠的投影資訊才可以獲得正確的影像，然而，必定會增加造影時間且執行 ^{90}Y SIRT 治療的病人身體狀況不佳，無法容忍過長的造影時間。故為了減少造影時間(scan time)、減低病人的不舒適感，本

研究測試 SPECT 造影最佳取像時間，將投影角度設定為每 3 度或 6 度收集一個投影，每個角度的投影時間為 15 秒或 30 秒。影像重組部分採用疊代影像重組(OS-EM)，2 iterations，10 subsets，為了進行 SPECT 影像的衰減校正(attenuation correction)，也對假體進行電腦斷層(computed tomography, CT)造影，CT 造影參數為 120 kV，125 mA。影像使用空間解析度(spatial resolution)、均勻度(uniformity)、靈敏度(sensitivity)、對比度(contrast)進行分析。

目的 2 中，使用最佳造影參數收集 9 位病人的影像資料，其中有 7 位男性和 2 位女性，平均年齡為 53 歲(範圍為 25-91 歲)。本研究使用 matlab 程式完成影像旋積法計算輻射劑量的建置，旋積法的基礎為將體內 3D 的活度分佈利用蒙地卡羅導出的 3D 劑量核心來進行旋積。對於均勻介質而言，此劑量計算可導出方程式(1)：

$$D(\vec{r}) = \int \tilde{A}(\vec{r}') K(\vec{r} - \vec{r}') d\vec{r}' \quad (1)$$

其中， $D(\vec{r})$ 為吸收劑量(單位：Gy)； $\vec{r}$ 為中央像素位置； $\tilde{A}(\vec{r}')$ 為在 $\vec{r}'$ 累積的活度(單位： Bq s^{-1})； $K(\vec{r} - \vec{r}')$ 為在 $\vec{r}$ 及 $\vec{r}'$ 之間的空間不變劑量沉積內核(單位： $\text{Gy Bq}^{-1} \text{s}^{-1}$)。

在 $\vec{r}$ 處的體素(voxel)中心的劑量是由其中心及周遭體素利以活度做為權重函數累加所產生的結果；一般而言，此旋積法為病患活度分佈的模糊函數(blurring function)。此外，利用快速傅立葉轉換(fast Fourier transform, FFT)與快速哈特利轉換(fast Hartley transform, FHT)做為劑量計算方式，皆可以減少計算時間，其中 FFT 能將活度分佈和劑量核心利用複數乘積進行運算，FHT 則是利用實數部分進行運算，其旋積皆需要劑量內核為空間不變狀態，即假設為一相對均勻的器官(如：肝臟)；設 T 為旋積轉換因子，則可導出方程式(2)：

$$D(\vec{r}) = T^{-1} [T[A(\vec{r})] T[K(\vec{r})]] \quad (2)$$

之後，將 ^{90}Y SPECT 影像使用 activity cumulation 程式計算影像中每一個體素的活度，接著使用 kernel 透過旋積程式完成輻射劑量的轉換，流程如圖 1，透過 ITK-SNAP segmentation 軟體切割肝臟影像，並與劑量影像(dose image)相乘，即可得知接受的輻射劑量、劑量分佈、等劑量曲線以及 DVH。

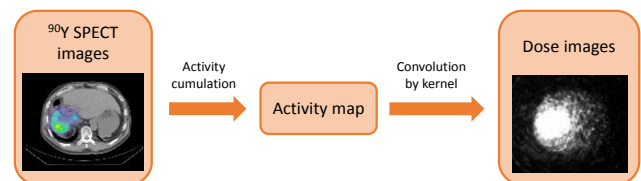


圖 1、劑量影像(dose image)計算流程圖。經由 matlab 軟

體撰寫程式，計算 ^{90}Y SPECT 影像每一個體素的活度，進而獲得 activity map，再使用 kernel 進行旋積(convolution)即可得到劑量影像。

此外，我們也使用醫學體內劑量委員會(medical internal radiation dosimetry, MIRD)劑量計算方法進行這 9 位病人的劑量評估並和影像旋積法進行比較，MIRD 基本假設為藥物平均分佈於器官或組織內，自射源器官(source organ)到標靶器官(target organ)的劑量是均勻，其所得劑量屬於巨觀的、平均的吸收劑量。為了計算身體一標靶區域的吸收劑量，必須精確地測定人體組織中與時間有關放射性強度變化，並代入 MIRD 方程式計算。其簡化之 MIRD 體內劑量方程式如下：

$$\bar{D} = \tilde{A} \cdot S \quad (3)$$

其中， $\bar{D}$ 為平均吸收劑量、 $\tilde{A}$ 為累積放射性強度，而 S 則是每單位累積強度平均吸收劑量。

為了求得體內輻射劑量必須先獲得人體中各器官的時間活性曲線(time-activity curve)，也就是獲得 MIRD 公式裡的 $\tilde{A}$ ，我們使用 GE 公司所發展的 Dosimetry Toolkit 這套軟體獲得時間活性曲線，這套軟體搭載在 GE 專屬的 Xeleris 工作站上。操作流程為將病人於 SPECT/CT 上所獲得的斷層切面影像傳送到 Xeleris 工作站，Dosimetry Toolkit 首先會針對各個時間點的影像位置進行校正，也會將 SPECT/CT 完成衰減校正和一系列的後處理運算，接著，藉由半自動或手動圈選兩種方式圈選器官的 VOI (volume of interesting)，最後，再將注射 ^{90}Y microsphere 的打藥時間、打藥劑量、殘餘劑量、殘餘劑量的量測時間等資訊輸入至軟體，將可獲得時間活性曲線圖。然而，獲得此曲線僅代表獲得方程式(3)的 $\tilde{A}$ ，故需藉由第三方軟體 OLINDA/EXM 進行後續運算。將所獲得的 $\tilde{A}$ 輸入 OLINDA 中，並於軟體介面選擇核種、模型(model)後，將自動提供每單位累積強度平均吸收劑量 S 。最後，透過 $\tilde{A}$ 與 S 即可計算出體內輻射劑量 $\bar{D}$ 。

III. 結果與討論

表 1 為進行物理假體造影的 6 組參數，圖 2 為使用此 6 組不同參數所獲得的 SPECT 影像，圖中可發現濃度比 10:1 和 15:1 的兩顆球狀假體，但無法明顯看到濃度比 5:1 之球狀假體，只有在第 4、5、6 組影像依稀可以發現濃度比 5:1 之球狀假體。另外，可以發現第 1 組的影像品質相較於其他組別較好，這是因為第一組的造影時間為 60 分鐘，並且有 120 個投影數量。第 3 組和第 6 組的影像品質最差，這是因為造影時間只有 15 分

鐘，且投影數量只有 60 個。再者，在第 3 組和第 6 組影像中，發現第 6 組影像所收集的計數值明顯比第 3 組多，原因為第 6 組影像使用較寬廣的能窗，故會獲得較多的計數值，但相對的，會犧牲一些解析度。

表 1、根據能窗(energy window)、投影角度(degree per projection)、投影數量(number per projection)和投影時間(times per projection)的變化分為 6 組 SPECT 造影參數。

	1	2	3	4	5	6
Energy window	70±10%	70±10%	70±10%	70±10%	250±60%	250±60%
	135±10%	135±10%	135±10%	135±10%		
	167±10%	167±10%	167±10%	167±10%		
Degree per projection	3	3	6	6	3	6
Number of projections	120	120	60	60	120	60
Time per projection (sec)	30	15	15	30	15	15
Scan time (min)	60	30	15	30	30	15

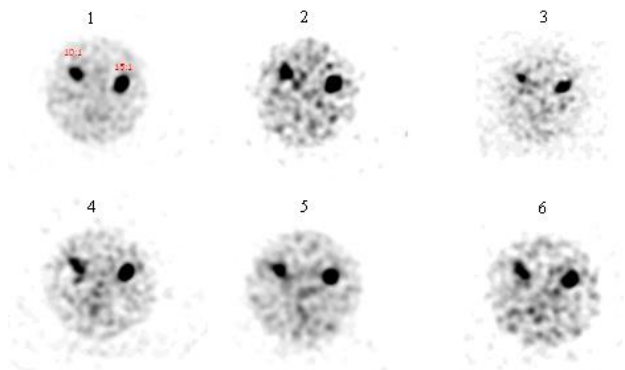


圖 2、6 組不同造影參數的 SPECT 影像。使用三顆空心球體和三顆實心球體放入 Jaszczak 假體中進行造影，三顆空心球的 ^{90}Y 濃度和背景值的濃度比為 5:1、10:1、15:1，圖中僅可清楚發現濃度比 10:1 和 15:1 的球狀假體。

進一步對 6 組 SPECT 影像進行均勻度、靈敏度、對比度及解析度分析。我們使用均方根誤差公式來表示均勻度，根據文獻提及均方根誤差在 7% 內皆可以接受，圖 3(A)顯示 6 組 SPECT 影像均勻度皆小於 1%，其中以第 5 組最佳、第 1 和 2 組其次。經過詳細分析發現，均勻度和收集投影數量的多寡以及投影角度有很大的關聯，當投影數量越多，均勻度越佳；當投影角度越小時，均勻度越佳。在靈敏度方面，數值越大表示靈敏度越佳，由於收集之光子數與靈敏度成正比，就圖 3(B)可發現，因掃描時間或能窗較大，靈敏度第 1 組最佳、第 5 和 6 組其次，值得注意的是第 3 組掃描時間最短，但靈敏度亦高於 2、4 兩組。對比度方面，其值越高代表越容易區分影像中的不同區塊，就圖 3(C)發現，第 3 組的對比度最高，第 4 組對比度最低。在解析度方面，其值越小代表空間解析度越小且影像品質越好，與造影時間成反比，就圖 3(D)可發現，造影時間最長的第 1 組其解析度最佳，而造影時間最短的第 3 組的解析度則表現

較差。

從以上結果發現，造影時間越長可獲得越好的影像品質，但在臨床上，往往因為病患無法維持長時間的姿勢而導致造影失敗，本實驗發現造影時間最短的第3組在各項參數比較中皆能維持在某程度的表現，以最短的造影時間獲得可接受的影像品質，大幅降低應用在臨床上的困難。在能窗方面，寬能窗雖然可增加光子收集數，但是同時也增加雜訊，故在各參數比較中之表現較差。因此，本研究的最佳造影參數為能窗 $70 \pm 10\%$ 、 $135 \pm 10\%$ 、 $167 \pm 10\%$ ，投影角度為每 6 度收集一個投影，總投影數量共 60 個，每個投影時間為 15 秒，造影時間共 15 分鐘。

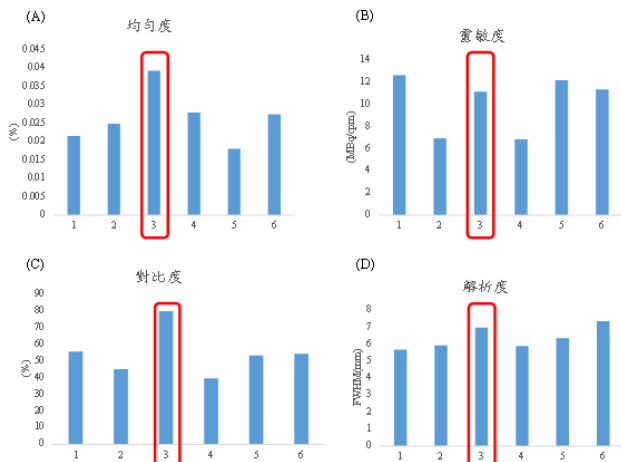


圖 3、對 6 組 SPECT 影像進行均勻度(A)、靈敏度(B)、對比度(C)及解析度(D)的分析。

決定最佳造影參數後，即使用此造影參數收集 9 位病人的影像資料，其中有 7 位男性和 2 位女性，平均年齡為 53 歲(範圍為 25-91 歲)。本研究使用 matlab 程式完成影像旋轉法計算輻射劑量的建置，之後將 ^{90}Y SPECT 影像使用 activity cumulation 程式計算影像中每一個體素的活度，接著使用 kernel 透過旋轉程式完成輻射劑量的轉換，透過 ITK-SNAP segmentation 軟體切割肝臟影像，並與劑量影像相乘，即可得知接受的輻射劑量、劑量分佈、等劑量曲線以及 DVH(圖 4)。透過劑量影像計算各個病人肝臟所接受的輻射劑量，平均吸收劑量為 21.19 ± 3.54 Gy。

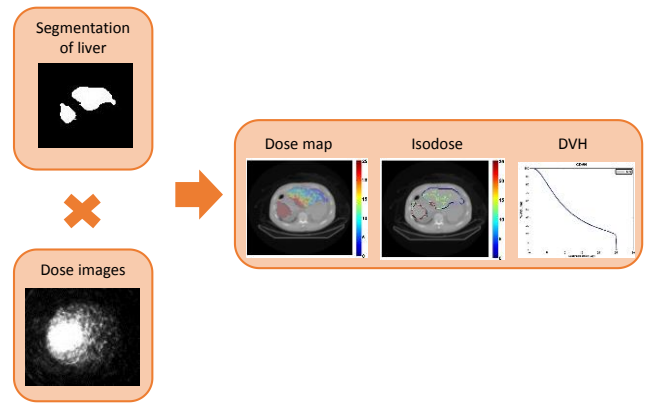


圖 4、透過 ITK-SNAP segmentation 軟體對肝臟進行影像分割，並和劑量影像(dose image)相乘，即可獲得劑量分布圖(dose map)、等劑量分布(isodose)和劑量體積直方圖(DVH)。

使用 OLINDA 方法所計算的肝臟吸收劑量平均為 23.50 ± 5.24 Gy，再進一步進行統計分析，發現此兩種計算方法的相關性並不高， R^2 僅有 0.05(圖 5)，可能原因為 MIRD 理論裡所使用的模擬假體都是同一個，並沒有考慮個體差異，所以 S 值並無法算的很精準，再者，由於接受 ^{90}Y microsphere 治療的病人，肝臟已經因為其他治療或者是病情導致肝臟已經腫脹或是糜爛，核醫用 SPECT/CT 進行 CT 造影時並不會施打顯影劑，因此，使用 Dosimetry Toolkit 進行 VOI 圈選時和使用 ITK-SNAP segmentation 軟體切割肝臟區域時，容易產生誤差。

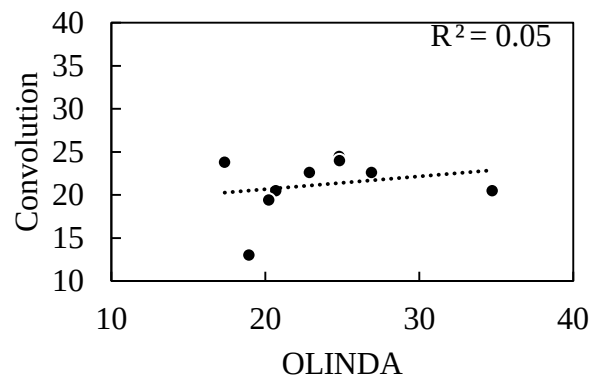


圖 5、影像旋轉法和 OLINDA 方法所獲得的肝臟吸收劑量之相關性分析， R^2 僅有 0.05。

IV. 結論

因國內肝癌病人比例高，使用 ^{90}Y microsphere SIRT 治療可在殺死癌細胞的同時大幅降低對正常肝細胞的傷害，本研究制訂 ^{90}Y 造影的造影參數最佳化，可得到更為精確的影像資訊，以利後續體內輻射劑量之評估。

此外，個人化核子醫學體內劑量評估在核醫治療上的必要性絕對遠高於核醫診斷的意義，對於 ^{90}Y microsphere SIRT 治療進行準確的術前術後體內劑量評估，可提高治療效益及降低正常組織的損傷，進而可以為肝癌病人帶來更大的福祉，改善病患的生活品質。

但是，SPECT/CT 固有的機器限制導致解析度不佳，加上 ^{90}Y 有內部電子對(internal pair production)的特性，因此，未來可於正子射出電腦斷層造影(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)探討 ^{90}Y 的輻射劑量評估。

treating hepatic tumours. Eur J Nucl Med. 1996 Aug;23(8):947-52.

- [9] M. Sarfaraz, A. S. Kennedy, M. A. Lodge, X. A. Li, X. Wu, and C. X. Yu. Radiation absorbed dose distribution in a patient treated with yttrium-90 microspheres for hepatocellular carcinoma. Med. Phys. 2004;31:2449 – 2453.
- [10] Garham LS, Fahey FH, Madsen MT, et.al. AAPM Report No. 52: Quantitation of SPECT Performance. Woodbury, NY: American Institute of Physics; 1995.

參考文獻

- [1] Edward W. Lee, Avnesh S. Thakor, Bashir A. Tafti, David M. Liu. Y90 selective internal radiation therapy. Surg Oncol Clin N Am. 2015;24(1):167-85.
- [2] J.S. Stewart, V. Hird, D. Snook, M. Sullivan, M.J. Myers, A.A. Epenetos, Intraperitoneal ^{131}I - and ^{90}Y -labelled monoclonal antibodies for ovarian cancer: pharmacokinetics and normal tissue dosimetry, International journal of cancer. Supplement = Journal international du cancer. 1988;Supplement, 3:71-76.
- [3] B. Brans, O. Linden, F. Giammarile, J. Tennvall, C. Punt, Clinical applications of newer radionuclide therapies. European journal of cancer. 2006;42:994-1003.
- [4] S.A. Gulec, G. Mesoloras, M. Stabin, Dosimetric techniques in ^{90}Y -microsphere therapy of liver cancer: The MIRD equations for dose calculations, Journal of nuclear medicine. 2006;47:1209-1211.
- [5] Aktolun, Cumali, Goldsmith, Stanley J. Nuclear Medicine Therapy: Principles and Clinical Applications. Springer. 2013
- [6] Bilbao, José Ignacio, Reiser, Maximilian F. Liver Radioembolization with ^{90}Y Microspheres. Springer. 2014
- [7] Dezarn WA, Cessna JT, DeWerd LA, Feng W, Gates VL, Halama J, Kennedy AS, Nag S, Sarfaraz M, Sehgal V, Selwyn R, Stabin MG, Thomadsen BR, Williams LE, Salem R; American Association of Physicists in Medicine. Recommendations of the American Association of Physicists in Medicine on dosimetry, imaging, and quality assurance procedures for ^{90}Y microsphere brachytherapy in the treatment of hepatic malignancies. Med Phys. 2011;38(8):4824-45.
- [8] Ho S, Lau WY, Leung TW, Chan M, Ngar YK, Johnson PJ, Li AK. Partition model for estimating radiation doses from yttrium-90 microspheres in

核醫乳房正子攝影個人劑量系統之研發

Development of Patient-Specific Dosimetric System in Positron Emission Mammography

計畫編號：105-2623-E-007-010-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：莊克士

e-mail：kschuang@nthu.edu.tw

計畫參與人員：董尚倫、林信宏、詹美齡

執行單位：國立清華大學生醫工程與環境科學系

摘要

女性乳房是屬於輻射敏感的器官之一，因此近年來評估女性受檢者在接受放射性檢查中乳房所接受的輻射劑量是一個很重要的議題。隨著核子醫學在腫瘤影像診斷的蓬勃發展，核子醫學檢查對女性乳房造成的輻射劑量也日漸受到重視。為了評估受檢者的體內劑量，美國核醫學會的醫學體內劑量委員會(MIRD)發展一系列的劑量評估文獻以提供參考。然而，該方法在乳房的劑量評估中只能計算固定大小與成份的乳房，同時也僅能評估左側和右側乳房總和的平均劑量，而無法針對個別的左右乳房進行個別的劑量評估。因此本研究針對核醫檢查中乳房劑量進行評估並且改變不同乳房參數，探討不同核醫藥物對個別乳房劑量之影響。本研究建立兩種 ORNL 擬人假體(A: 163cm/58kg, B: 170cm/70kg)，模擬放射性核種 ^{18}F 與 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ，並應用乳房攝影中收集之乳房體積與成份等資訊，建立數學乳房假體，改變乳房形狀、大小、成分及腺體分佈，並且選用本實驗室發展之 SimDose 模擬系統進行蒙地卡羅模擬。射源器官分別選用乳房、心臟、肺臟、肝臟和胸腺進行乳房劑量之評估。

當乳房體積相同且射源器官體積不變時，分別以半橢球和半扁球之乳房假體進行乳房形狀改變之比較，其結果發現乳房 S-value 之比值介於 0.94 到 1.01 之間，數值相當接近。然而，當不同擬人假體之 S-value 比較時，乳房之 S-value 會有明顯的變化。此外依據台灣女性乳房攝影數據為參考，改變半扁球之乳房假體半徑(5-9 公分)，評估不同乳房大小之乳房劑量。兩種模擬核種之結果顯示隨著乳房半徑 5 公分增加到 9 公分時，對 Tc-99m 而言左側乳房之自我吸收 S-value 從 3.573×10^{-4} (mGy/MBqxs) 減少到 0.569×10^{-4} (mGy/MBqxs)，而 F-18 的 S-value 由 2.675×10^{-5} (mGy/MBqxs) 減少到 0.475×10^{-5} (mGy/MBqxs)。其他射源器官對乳房之 S-value 影響也因為器官之位置不同而有不同程度之影響。針對左側及右側乳房之劑量評估，當射源器官為心臟時， ^{18}F 模擬兩種假體之結果，心臟對於左側乳房的劑量沉積為右側乳房的劑量沉積的 1.61 倍和 1.73 倍； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 模擬兩種假體之結果，心臟對於左側乳房的劑量沉積為右側乳房的劑量沉積的 1.64 倍和 1.77 倍。當射源器官為肝臟時， ^{18}F 模擬兩種假體之結果，肝臟對於右側乳房的劑量沉積為左側乳房的劑量沉積的 2.78 倍和 3.19 倍； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 模擬兩種假體之結果，肝臟對於右側乳房的劑量沉積為左側乳房的劑量沉積的 3.13 倍和 3.88 倍。由上述結果可

以發現將兩側乳房劑量分開評估是必要的。此外使用五種不同乳房腺體含量分別模擬乳房之 S-value 和腺體之 S-value 並將兩種結果進行比較。其結果發現當乳房為 10%腺體含量時， ^{18}F 在兩種假體中乳房之 S-value 和腺體之 S-value 之比值為 0.923 到 1.020； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 在兩種假體中乳房之 S-value 和腺體之 S-value 之比值為 0.956 到 1.113。當腺體分佈範圍改變時，由結果可知改變腺體分佈之範圍對於腺體之 S-value 大約有 5%到 8%之影響。

就結論而言，乳房大小的改變會造成 S-value 之顯著變化，而形狀、成分及腺體分佈的變化所造成的影響較小，本研究提供了一套評估核醫檢查中乳房劑量的新方法。

關鍵詞：個人劑量，乳房劑量，核醫影像。

Abstract

The female breast is a radiosensitive organ; therefore, assessing the absorbed dose of female breast is a very important issue when under radiological examination. The diagnosis of Nuclear Medicine in oncology was more and more popular in recent years, and the absorbed dose of female breast was gradually taken seriously. To assess internal dose, MIRD (Medical Internal Radiation Dose Committee) has developed a series of dose assessment literatures for internal dosimetry. Nevertheless, the current programs only assess the dose of the breast which is fixed in size and composition. MIRD only provided the mean dose of the sum of the left breast and the right breast, they didn't assess individual breast dose. Therefore, the purpose of this study is to explore the effects on individual breast dose in Nuclear Medicine by changing the relevant parameters of breasts phantom.

This study constructed two sizes of ORNL phantoms (A: 163cm/58kg, B: 170cm/70kg) and used two radionuclides: ^{18}F and $^{99\text{m}}\text{Tc}$. We use information of the breast volume and composition collected from mammography information to establish mathematical breast phantoms. Breast phantoms with various breast sizes, shapes, compositions, and the glandular distribution were created. SimDose, a Monte Carlo simulation code developed by our laboratory, was used to estimate breast dose in the phantom. The breasts, the heart, the lung, the liver and the thymus are selected as source organs to assess dose to each breast.

With volumes of both breasts remain fixed, we used

semi-ellipsoid breast and semi-oblate spheroid models to compare the S-values of different breast shapes. In addition, referring to mammographic data of Taiwanese women, we changed the radius of the semi-oblate spheroid model (5-9 cm) to assess the breast dose for different breast sizes. Breasts with five glandular contents were simulated to compare the S-values of breasts and glands. Finally, we evaluated gland doses in breast for different glandular distributions.

Results showed the S-value ratios of the breast ranged from 0.94 to 1.01, and the difference caused by breast shapes was insignificant. However, the difference between S-values of breast was significant when different adult phantoms were compared. Therefore, this study considered that distance between organs was important factors in dose estimation. The S-values of left breast self-absorption decreased from 3.573×10^{-4} (mGy/MBq×s) to 0.569×10^{-4} (mGy/MBq×s) for ^{99m}Tc and 2.675×10^{-5} (mGy/MBq×s) to 0.475×10^{-5} (mGy/MBq×s) for ^{18}F with breast radius vary from 5cm to 9cm. The effect of S-value of breast from other source organs caused different effects depending on the locations of source organs. For ^{18}F simulation with heart as source organ, the deposited doses of the left breast are 1.61 and 1.73 times for phantom A and B, respectively, larger than that of the right breast. For ^{99m}Tc simulation, the doses to the left breast are 1.64 and 1.77 times for phantom A and B, respectively, larger than that of the right breast. For ^{18}F with liver as source organ, the deposited doses of the right breast are 2.78 and 3.19 times for phantom A and B, respectively, larger than the doses of the left breast. Using ^{99m}Tc simulation, the doses to the right breast are 3.13 and 3.88 times for phantom A and B, respectively, larger than the doses to the left breast. The results indicated that assess organ dose of left breast and right breast separately is necessary. When the glandular content is 10%, the S-value ratio between the gland and breast for phantoms A and B ranged from 0.923 to 1.020 for ^{18}F and ranged from 0.956 to 1.113 for ^{99m}Tc . Our results indicated that the differences in S-values of the gland self-absorbed dose to be only 5% to 8% for different glandular distributions.

We conclude that the breast size has significant impact on the S-value of the breast while the breast shape, compositions, and the glandular distribution cause less change in the S-value. Therefore, this study provided the new method to assess dose of breast in Nuclear Medicine.

Keywords: patient-specific dose, breast dose, Nuclear medicine imaging.

I. 前言

體內劑量評估是核子醫學研究領域中一項重要的議題，近年來隨著核醫藥物大量的使用在臨床診斷與治療上，其重要性也與日遽增。傳統方法根據不同的核種所發出的輻射能量以建立核種每次衰變發射之游離輻射對靶器官(target organ)造成的平均吸收劑量 S 值，但是由於每個病人個體差異的不同，而造成的體內吸收劑量也會不同。因此如何將劑量計算個人化，是保健物理的最新研究趨勢。我們將以個人化核醫乳房劑量的評估作為本研究的主題，探討影響劑量評估準確性的因素。

II. 主要內容

雖然在 MIRD 在劑量計算上已有看似完善且簡易的計算模式，但對於人種個體差異以及存在腫瘤下的劑量不均勻分布卻不是那麼完善。利用蒙地卡羅模擬的方式對每次衰變時所放出的放射性粒子計算徑跡與其對物質間完整碰撞作用的紀錄，更能貼近核種衰變時於人體產生的真實劑量沉積分佈。而目前常被使用來進行劑量模擬的蒙地卡羅軟體包括了 EGS4 (Electron Gamma Shower Code Version)、MCNP (Monte Carlo N-Particle) 與 Geant4 (GEometry ANd Tracking)。

EGS4 為美國史丹佛直線加速器(Stanford Linear Accelerator Center, SLAC)於 1984 年發展出的蒙地卡羅模擬光子串級電子作用系統，模擬能量範圍為數 keV 至數百 GeV，模擬速度相當有效率。MCNP 在速度上稍處劣勢，但對於散射模擬方面的模擬卻是更加完整，且除了光子與電子外亦可進行中子模擬。因此在劑量模擬上 EGS4 與 MCNP 都是經常被使用的模擬系統。Geant4 則是由全世界多個高能物理研究機構共同研究維護，因其對粒子傳輸經過物質介面時的模擬精確，因此可使用較複雜的幾何形狀與介質，藉由 ROOT 分析軟體可進一步將輸出劑量沉積分佈資料轉為劑量分佈影像，其最大的缺點在於模擬時間過長，雖然精確但卻無法符合時間成本。

上述常用的劑量模擬軟體多為廣泛用途，雖然具有精確的物理模型，但並非特定為核子醫學領域所設計。因此對於應用在臨床上以求快速取得劑量分布與評估則顯得較不實際。為尋求能在合理時間內準確計算劑量，且提供劑量分布影像的蒙地卡羅模擬軟體是必須的。SimSET 是專門為核子醫學領域所設計的蒙地卡羅模擬軟體，而本實驗為達到核子醫學中體內劑量的即時性評估，將利用 SimSET 模擬速度上的優勢，進一步改良 SimSET 蒙地卡羅模擬系統，發展出一套專門計算應用於核子醫學體內劑量沉積分佈及劑量分佈的軟體。

1 假體

本計畫將建立高 170 公分，70 公斤的 ORNL 數學假體，使用 Tc-^{99m} 與 F-^{18} 當作核醫藥物的核種，分別以腎上腺、心臟、肺臟、肝臟、胸腺和本身乳房作為射源器官，觀察對於乳房的劑量影響。並應用乳房攝影中收集之乳房體積與成份等資訊，建立數學乳房假體，改變乳房形狀、大小、成分及腺體分佈，並且選用本實驗室發展之 SimDose 模擬系統進行蒙地卡羅模擬。再進一步討論圓形和橢圓形的形狀改變對乳房的變化，並且使用五種不同的乳房大小觀察劑量變化。

2. SimDOSE

為了評估受檢者的體內劑量，美國核醫學會的醫學體內劑量委員會(MIRD)發展一系列的劑量評估文獻以提供參考。然而，該方法在乳房的劑量評估中只能計算固定大小與成份的乳房，同時也僅能評估左側和右側乳房總和的平均劑量，而無法針對個別的左右乳房進行個別的劑量評估。本計畫利用本實驗室發展的 SimDOSE，來評估核醫造影時的個人化乳房劑量。個人化劑量主要是根據病人的活度分布，利用蒙地卡羅(Monte Carlo)方法逐一追蹤每個光子的行進軌跡，來計算每個器官的累積劑量。因此本研究針對核醫檢查中乳

房劑量進行評估並且改變不同乳房參數，探討不同核醫藥物對個別乳房劑量之影響。射源器官分別選用乳房、心臟、肺臟、肝臟和胸腺進行乳房劑量之評估。表一利用 ^{18}F 與 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 兩種同位素，以乳房為目標器官，由 SimDose 與 OLINDA-EXM 所計算的 S 值比較。可以發現 SimDose 與 OLINDA-EXM 所計算的 S 值相差不多，可以用自行發展的 SimDose 來計算個人化劑量。

III. 結果與討論

當乳房體積相同且射源器官體積不變時，分別以半橢球和半扁球之乳房假體進行乳房形狀改變之比較，其結果發現乳房 S-value 之比值介於 0.94 到 1.01 之間，數值相當接近。然而，當不同擬人假體之 S-value 比較時，乳房之 S-value 會有明顯的變化。此外依據台灣女性乳房攝影數據為參考，改變半扁球之乳房假體半徑(5-9 公分)，評估不同乳房大小之乳房劑量。兩種模擬核種之結果顯示隨著乳房半徑 5 公分增加到 9 公分時[圖一]，對 Tc-99m 而言左側乳房之自我吸收 S-value 從 3.573×10^{-4} (mGy/MBqxs) 減少到 0.569×10^{-4} (mGy/MBqxs)，而 F-18 的 S-value 由 2.675×10^{-5} (mGy/MBqxs) 減少到 0.475×10^{-5} (mGy/MBqxs)。其他射源器官對乳房之 S-value 影響也因為器官之位置不同而有不同程度之影響[圖二]。針對左側及右側乳房之劑量評估，當射源器官為心臟時， ^{18}F 模擬兩種假體之結果，心臟對於左側乳房的劑量沉積為右側乳房的劑量沉積的 1.61 倍和 1.73 倍； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 模擬兩種假體之結果，心臟對於左側乳房的劑量沉積為右側乳房的劑量沉積的 1.64 倍和 1.77 倍。當射源器官為肝臟時， ^{18}F 模擬兩種假體之結果，肝臟對於右側乳房的劑量沉積為左側乳房的劑量沉積的 2.78 倍和 3.19 倍； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 模擬兩種假體之結果，肝臟對於右側乳房的劑量沉積為左側乳房的劑量沉積的 3.13 倍和 3.88 倍。由上述結果可以發現將兩側乳房劑量分開評估是必要的。此外使用五種不同乳房腺體含量分別模擬乳房之 S-value 和腺體之 S-value 並將兩種結果進行比較。其結果[表二]發現當乳房為 10%腺體含量時， ^{18}F 在兩種假體中乳房之 S-value 和腺體之 S-value 之比值為 0.923 到 1.020； $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 在兩種假體中乳房之 S-value 和腺體之 S-value 之比值為 0.956 到 1.113。當腺體分佈範圍改變時，由結果可知改變腺體分佈之範圍對於腺體之 S-value 大約有 5%到 8%之影響。

IV. 結論

就結論而言，乳房大小的改變會造成 S-value 之顯著變化，而形狀、成分及腺體分佈的變化所造成的影響較小，本研究提供了一套評估核醫檢查中乳房劑量的新方法。這個方法可以推廣到放射免疫治療(radioimmunotherapy; RIT)，估算最佳治療所需的藥量，提升治療的效果。

參考文獻

- [1] CC Lu, SL Dong, HH Lin, YC Ni, and ML Jan, KS Chuang (2017) Noninvasive measurement of radiopharmaceutical time - activity data using external thermoluminescent dosimeters (TLDs), *Phys. Med. Biol.*

62(4), N58-N72

表一、利用 ^{18}F 與 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 兩種同位素，以乳房(163cm/58kg 假體)為目標器官，由 SimDose 與 OLINDA-EXM 所計算的 S 值比較

	Target-Breast					
	Source	Breast	Heart	Liver	Lung	Thymus
^{18}F (10^{-4})	SimDose	1.61	0.0282	0.00721	0.0193	0.0259
	OLINDA	1.43	0.0277	0.00728	0.0199	0.0246
	Ratio ($\frac{\text{SimDose}}{\text{OLINDA}}$)	1.13	1.02	0.99	0.97	1.05
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ (10^{-5})	SimDose	1.22	0.0332	0.00785	0.0228	0.0293
	OLINDA	1.11	0.0334	0.00887	0.0250	0.0318
	Ratio ($\frac{\text{SimDose}}{\text{OLINDA}}$)	1.10	0.99	0.89	0.91	0.92

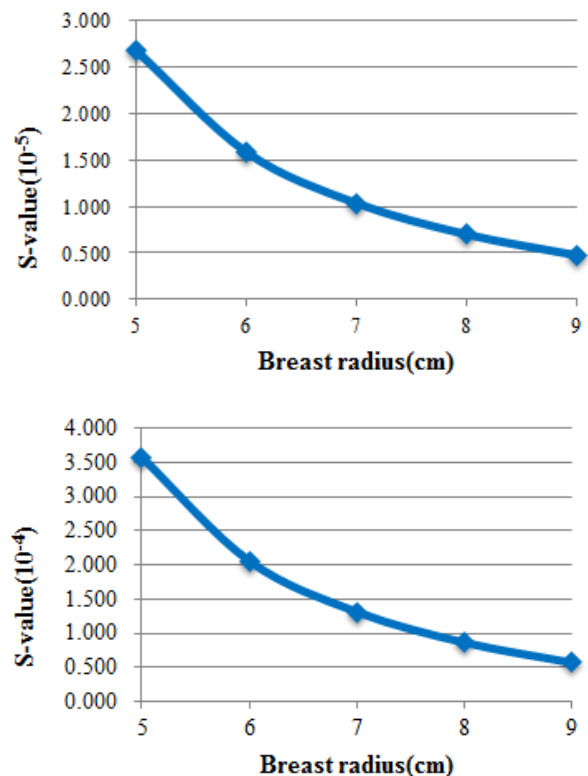


Figure 1. The S-value (mGy/(MBqxs)) of self-absorption in left breast for different breast sizes for (upper) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and (lower) ^{18}F in Phantom B.

表二、不同組成下，乳房的 S 值

			Target-Left Breast					
Source	Target	Radionuclide	Glandular(%)	10	30	50	70	90
Left Breast	Left Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-4})$	S-value(Gland)	2.958	2.959	2.959	2.959	2.960
			S-value(Breast)	3.204	3.145	3.089	3.035	2.983
	Right Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-7})$	S-value(Gland)	8.641	8.455	8.483	8.507	8.466
			S-value(Breast)	8.685	8.688	8.593	8.528	8.503
Heart	Left Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	3.426	3.447	3.439	3.428	3.439
			S-value(Breast)	3.470	3.459	3.450	3.447	3.444
	Right Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	2.126	2.116	2.127	2.137	2.138
			S-value(Breast)	2.147	2.147	2.141	2.137	2.135
Liver	Left Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-7})$	S-value(Gland)	3.823	3.768	3.793	3.794	3.784
			S-value(Breast)	3.813	3.801	3.794	3.779	3.798
	Right Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	1.048	1.050	1.048	1.048	1.045
			S-value(Breast)	1.053	1.052	1.050	1.047	1.047
Lung	Left Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	1.763	1.764	1.769	1.769	1.770
			S-value(Breast)	1.787	1.779	1.779	1.773	1.772
	Right Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	2.022	2.034	2.042	2.043	2.039
			S-value(Breast)	2.053	2.047	2.044	2.046	2.040
Thymus	Left Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	2.578	2.558	2.550	2.549	2.553
			S-value(Breast)	2.584	2.575	2.568	2.556	2.552
	Right Breast	$^{18}\text{F}/(10^{-6})$	S-value(Gland)	2.533	2.500	2.527	2.551	2.545
			S-value(Breast)	2.575	2.567	2.558	2.551	2.545

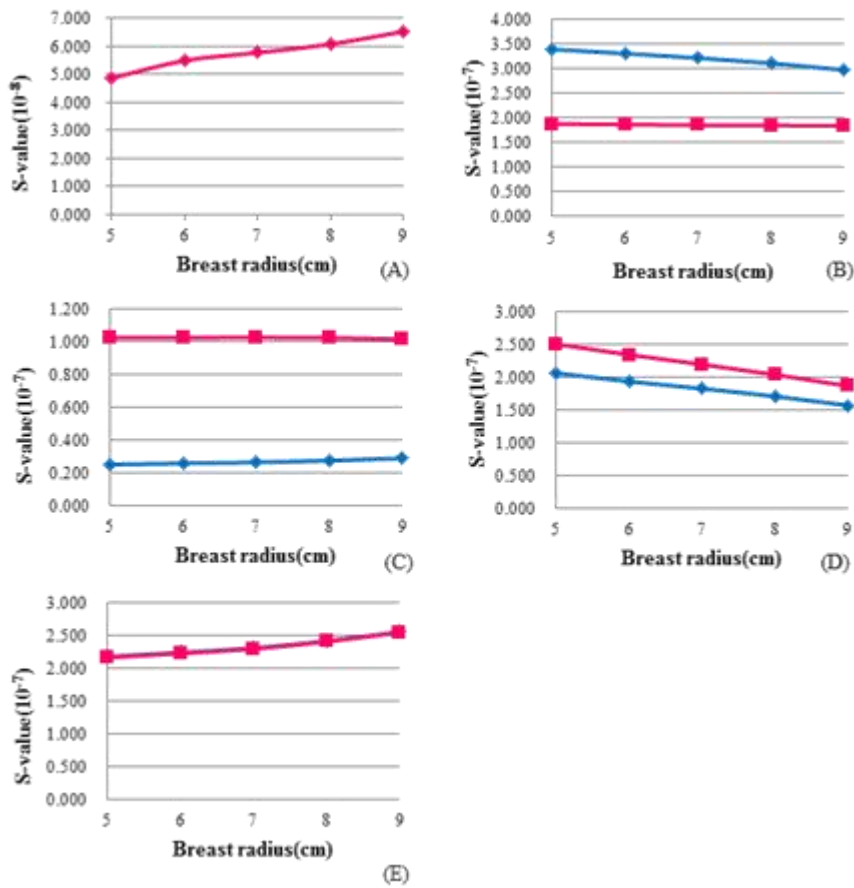


Figure 2. The S-value of the breast for different breast sizes phantoms for ^{99m}Tc for simulation in Phantom B. (A) the source organ is the left breast and the target organ is the right breast. (B), (C), (D), and (E) source organs are heart, liver, lung, and thymus, respectively. The blue line represents that the target organ is the left breast, and the red line represents that the target organ is the right breast.

非醫療用途安檢設備之輻射安全管制建議研析

Research, Analysis and Recommendation of Radiation Safety Control on Non-medical Use of Security Screening Equipment

計畫編號：MOST 105-2623-E-007-012-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許芳裕

e-mail：fyhsu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：蔡宗憲、劉育容、張馥讌

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

游離輻射於安檢的應用包括海關貨櫃物品的檢查及機場人體安檢掃描等，其應用游離輻射的方式又可分为回散射(backscatter)式、穿透(transmission)式與組合式(backscatter plus transmission X-ray systems)等掃描方式。利用 X 光輻射直接照射人體，涉及人體健康安全疑慮，而國內行政院原子能委員會目前並未訂定相關 X 光人體掃描儀之審查導則或規範。非醫療用途之人體安檢掃描在近幾年的應用，衍生相關隱私權爭議，其正當性在國際間有諸多的爭議與討論。國際輻射防護委員會(ICRP)及國際原子能總署(IAEA)等國際組織已於 2014 年提出了最新之非醫療用途安檢的游離輻射源規範、正當性探討及相關輻射安全建議(ICRP publication 125, IAEA GSG-5 等)，本研究針對這些新的文獻與報告進行研析，歸納彙整相關報告並提出具體建議，供主管機關對國內安檢輻射作業管制之參考。

關鍵詞：X 光人體掃描儀、回散射式掃描、機場安檢。

Abstract

Applications of ionizing radiation in security include the container inspection in Customs and body scan in airport security, etc. its manner of use of ionizing radiation can be divided into backscatter and transmission and combined (backscatter plus transmission X-ray systems) scanning types. The issue of X-ray radiation directly exposes human body for security check involves the human health and safety concerns, while the Atomic Energy Council in Taiwan is not currently set to review the relevant guide of the body X-ray scanner or specifications. In recent years, X-ray body scanning for non-medical use of security application derivative the related controversy of privacy. Besides, a lot of controversy and discussion on its justification are also the issue in the international community. In 2014, International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the International Atomic Energy Agency (IAEA) proposed the latest safety guide, justification of practice investigation and related radiation safety recommendations regarding the non-medical use of security. This study is conducted on these new documents (ICRP publication 125 and IAEA GSG-5). The results of research analysis of related reports, summarized and aggregated specific recommendations are proposed, which will be as the reference for the domestic ionization radiation authorities, to manage and control the

safety of screening of humans for security purposes using ionizing radiation scanning systems.

Keywords: Use maximum 6 terms.

I. 前言

為確保飛航及國土安全，國際上已有許多國家使用不屬醫療行為，但直接照射人體之 X 光掃描儀，如於機場內建置 X 光人體掃描儀，以提供查緝旅客是否藏匿違禁物品或爆裂物之研判依據。在過去，利用游離輻射進行安全檢查僅在少數情況下才會被考慮，其被認為是不適合於一般公眾的安全檢查方式。有兩個因素顯著增加了使用游離輻射對人員進行安全檢查的機會：(1)開發的成像系統具有非常低的輻射劑量，和(2)需要更高的安全性，以應對當前升高的威脅。

非醫療用途之人體安檢掃描在近幾年的應用，衍生相關隱私權爭議，其產生之輻射劑量、誘發健康效應及使用的正當性在國際間有諸多的爭議與討論[1-4]。國際輻射防護委員會(ICRP)及國際原子能總署(IAEA)等國際組織已於 2014 年提出了最新之非醫療用途安檢的游離輻射源規範、正當性探討及相關輻射安全建議[5, 6]，而國內原能會目前並未訂定相關 X 光人體掃描儀之審查導則或規範，本研究計畫即針對這些最新的文獻與報告進行研析，歸納彙整相關報告並提出具體建議，供主管機關對國內安檢輻射作業管制之參考。

II. 主要內容

游離輻射於安檢的應用包括機場人體安檢掃描及海關貨櫃物品的檢查等，其應用游離輻射的方式又可分为回散射(Backscatter)式、穿透(Transmission)式與組合式(Backscatter plus transmission X-ray systems)等掃描方式。組合式指檢掃描同時具回散射式及穿透式掃描方式。在進行人體掃描之安全檢查前，應徵詢與衡量相關法規意見、考慮操作安全及相關的風險評估，並考慮文化/社會問題，以確定進行人體掃描的安檢是有正當性的。在劑量限度的考量上，因國際放射防護委員會(ICRP)建議一般公眾每年的劑量限值為 1 毫西弗 (mSv) [7]，而每個公眾成員可從多個輻射源接受到游離輻射的曝露；因此 NCRP 進一步建議，任何單一安檢機器造成的人員劑量每年不得超過 0.25 毫西弗 (mSv/y)。這個理由是基於下述假設：如果每個輻射源可限制其一般公眾成員接受之最大劑量不超過每年 0.25 毫西弗 (mSv/y)，則

任何單一個人的年劑量限值將不可能超過每年 1 毫西弗 (mSv/y)。

本研究計畫採行之研究方法及步驟如下：

1. 調查與彙整國際間使用 X 光掃描儀進行安檢之現況，包括目前安檢使用之各種設備概況

國際上已有許多國家於機場內建置 X 光人體掃描儀，以提供查緝旅客是否藏匿違禁物品或爆裂物之研判依據。本研究計畫蒐集相關資訊，調查與彙整國際間使用 X 光掃描儀進行安檢之現況，包括目前各國於機場或其他地方進行安檢使用之各種設備概況。

2. 蒐集與研析國際上使用 X 光掃描儀進行人體安檢之法令、規定及其可能造成之健康效應等相關文獻

非醫療用途之人體安檢掃描在近幾年的應用，衍生相關隱私權爭議，其產生之輻射劑量、誘發健康效應及使用的正當性在國際間有諸多的爭議與討論。美國國家標準研究所 (ANSI) 與美國保健物理學會 (HPS) 陸續發表了使用 X 光掃描儀進行人體安檢之輻射安全共識的標準，包括 ANSI/HPS N43.17-2002 報告：“人體 X-射線檢查系統之輻射安全 (Radiation Safety for Personnel Screening Systems Using X-rays)” [8]。此報告提出了 0.1 毫西弗/掃描 ($\mu\text{Sv}/\text{scan}$) 的有效劑量限度，及任何一個安全檢查處所造成個人不超過 0.25 毫西弗 (mSv) 的年有效劑量上限建議。ANSI/HPS N43.17-2009 報告：“人體 X-射線檢查系統之輻射安全 (Radiation Safety for Personnel Security screening Using X-ray or Gamma Radiation)” [9]。2012 年歐盟則提出使用人體 X-射線檢查系統進行安檢之健康效應報告 (Health effects of security scanners for passenger screening based on X-ray technology[2])。本研究計畫廣泛蒐集歐美等國家或組織之相關報告與文獻，研析彙整使用 X 光掃描儀進行人體安檢之法令、規定及其可能造成之健康效應。

3. 蒐集與研析 ICRP 125 報告及 IAEA GSG-5 報告，了解國際組織對使用 X 光掃描儀進行安檢之最新趨勢與建議

其利用 X 光輻射直接照射人體，涉及人體健康安全疑慮，且國內銷售業者亦有意引入銷售，而行政院原子能委員會目前並未訂定相關 X 光人體掃描儀之審查導則或規範。非醫療用途之人體安檢掃描在近幾年的應用，衍生相關隱私權爭議，其正當性在國際間有諸多的爭議與討論。包括美國及歐盟等國家均有利利用 X 光人體掃描儀，使用於機場進行安檢措施，因其涉及人體健康安全及隱私權之疑慮，ICRP 及 IAEA 等國際組織於 2014 年提出了最新之非醫療用途安檢的游離輻射源規範、正當性探討及相關輻射安全建議 (ICRP publication 125 報告：Radiological Protection in Security Screening 及 IAEA GSG-5 報告：Justification of Practices, Including Non-Medical Human Imaging)[13, 14]，本研究即針對這些關於人體 X 光安檢掃描的最新文獻與報告進行研析，歸納彙整相關報告內容，了解國際組織對使用 X 光掃描儀進行安檢之最新趨勢與建議。

4. 提出人體 X 光安檢掃描之正當性探討、輻射安全管制之具體建議

本研究計畫依據相關最新文獻與報告之研析結果進行歸納彙整，提出人體 X 光安檢掃描之正當性探討、輻射安全管制之具體建議，供主管機關對國內安檢輻射作業管制之參考。

III. 結果與討論

1. 國際間使用 X 光掃描儀進行安檢之背景與現況調查彙整

- (1) 美國在 1998 年，即由食品和藥物管理局 (FDA) 的輻射安全專家小組評估 Secure 1000 X 光人體掃描儀器，對其誘發健康風險的上升擔憂。
- (2) 2009 年 12 月 25 日，從阿姆斯特丹到底特律的一架飛機企圖引爆隱藏在衣服下的爆炸性粉末的失敗，引起了對機場安全性的擔憂。許多人的注意力集中在使用身體掃描儀，可以揭示隱藏在乘客的衣服內的非金屬爆裂物品。
- (3) 美國運輸安全管理局在 2010 年秋季對掃描儀安全的關注與旅客的隱私，引發了一場激烈的辯論。
- (4) 2012 年 9 月歐盟委員會裁定使用 X 光全身掃描儀導致罹患癌症的風險“接近零”，但他們在布魯塞爾立法決定將之“不列為建議使用之安檢設備”。
- (5) 2011 年 8 月，近 500 部先進成像技術的全身掃描儀，用於美國各地的 78 個機場。大約有一半使用回散射技術。其他的掃描儀 (241) 是毫米波的機器，使用的電磁波，也提出了一個詳細的身體圖像。美國運輸安全管理局 (TSA) 已開始實施毫米波掃描儀，使用的軟體，只突顯出危險物品，但不會顯示詳細乘客特定的圖像。
- (6) 2012 年，在美國已經有 140 個機場，安裝了 600 多部使用 X 射線技術成像的全身掃描儀。
- (7) 2013 年 1 月美國 TSA 宣布，在 2013 年 6 月全面撤除全美機場可透視人體的 X 光掃描儀，只用呈現身體輪廓的毫米波掃描儀。
- (8) 2016 年中國仍有部分機場使用人體 X 光掃描儀。

2. 國際上使用 X 光掃描儀進行人體安檢之法令、規定及其可能造成之健康效應等相關文獻蒐集與研析

2.1 國際間使用 X 光掃描儀進行安檢之相關法令、規定

- [1969 年] ICRP 15 報告：不建議使用；如果允許，則須在放射科醫生的監督下使用。
- [1971 年] ICRP Statement：因發生多次飛機劫持國際事件，提出建議：搭航空班機乘客的安全檢查是有正當性的。須在放射科醫生的監督下使用。
- [1977 年] ICRP 26 報告：與 ICRP 15 建議類似，考慮安檢之外的非醫學人體掃描的其他情況：職業，醫療法律或保險目的而以輻射進行的人體檢查。
- [1977 年] WHO 技術報告：討論了對非醫療目的使用游離輻射於人體檢測 (包括檢測武器)。結論是只有當沒有令人滿意且具有較低風險的替代方法時才應這樣做，並強調需要管理劑量以達防

護最適化。

- [1991 年] ICRP 60 報告：未就非醫療目的之人體掃描成像做法提出任何建議。
- [2003 年] NCRP 16 報告：提供了關於人體安全檢查的建議。
- [2007 年] ICRP 103 報告：描述除非有特殊情況，非醫療目的的人體掃描成像應視為不正當的。所描述的情況沒有具體包括安全檢查的應用。
- [2008 年] 美國輻射標準機構間指導委員會(ISCORS)：就安檢系統的正當性以及如果安檢是正當的，對應採取的輻射防護措施提供了指導。
- [2011 年] NCRP 21,22 報告：提供了處理主動檢測技術的輻射防護建議。
- [2011 年] IAEA GSR Part 3 報告：使用輻射檢測隱藏物體的人體成像可用於構成國家安全威脅的犯罪行為，由政府決定其正當性。
- [2012 年] 歐洲原子能共同體(EURATOM)：修訂授權使用安全掃描儀(不包括使用游離輻射的掃描儀)作為歐盟機場的主要安全檢查方法，對歐盟(EU)的 27 個成員國具有法律約束力。
- [2014 年] ICRP 125 報告：提出了最新之非醫療用途安檢的游離輻射源規範、正當性探討。
- [2014 年] IAEA IAEA GSG-5 報告：提出了最新之非醫療用途安檢的相關輻射安全建議與要求。

2.2 輻射曝露的性能標準，以及檢測物體的相關安全問題

2002 年美國國家標準協會(ANSI)確定了一次掃描的有效劑量限值為 0.1 μSv (ANSI N43.17, 2002)[8]；此標準還規定，1 年之內任何單一安全檢查設施對個人的有效劑量不得超過 0.25 mSv。2009 年 ANSI 更新其 ANSI N43.17, 2002 標準，以一次安檢(其可能涉及多個掃描)的有效劑量限值為 0.25 μSv ，1 年之有效劑量不得超過 0.25 mSv [9]。2010 年國際電工委員會(IEC)之 IEC-62463 報告[10]，發布了用於個人安全檢查系統 X 射線的國際標準，為安全檢查系統提供放射性能標準。

3. 蒐集與研析 ICRP 125 報告及 IAEA GSG-5 報告，了解國際組織對使用 X 光掃描儀進行安檢之最新趨勢與建議

3.1 ICRP 125 號報告要點

- (1) 為了安全目的使用游離輻射來檢查個人是一種特殊情況，需要仔細的證明其正當性。不應假定使用游離輻射進行安全檢查通常是合理的或可接受的。
- (2) 關於決定使用游離輻射進行安全檢查是否具正當性，應考慮所有相關因素，包括安檢目標(威脅、脆弱性和後果)的定義、輻射技術完成安檢目標的程度，安檢過程的放射性曝露，可用於減少曝露的替代方案，以及一些個體群體每年可能招遭受大量安檢的可能性。
- (3) 採用特定安全檢查技術的正當性決定將包括輻射防護以外的許多因素。
- (4) 為了安全目的而被安檢之個人的曝露被歸屬為是公

眾曝露。無論是否因個人選擇或由於其工作職責而被安檢，這一點都適用。

- (5) 對待安檢個體的防護最適化，應包括考慮完成安檢目標所需的曝露次數、每次曝露的劑量和避免額外(或重複)的曝露。
- (6) 應在安檢系統的設計和操作期間應用防護的最適化，並應考慮被安檢之個體的曝露、未被安檢但可能在安檢作業附近之個體的曝露，以及操作和維持安檢系統的個體。應建立劑量約束，並用於最適化這些群體的每一個體的防護。
- (7) 適當應用防護體系，包括正當化和最適化，將為接受安全檢查系統曝露的任何人(包括敏感族群)提供充分的防護。

3.2 ICRP 125 號報告主要建議

- (1) 在決定採用 X 光安檢技術前，應仔細考慮檢查的正當性。鑑於潛在威脅和可用於安檢的技術的迅速發展，應定期審查安檢的正當性。
- (2) 使用游離輻射的安全檢查應視為計畫曝露情況。為安全目的安檢的個人曝露應被視為公眾曝露。
- (3) 如果確定是正當的，則安檢應遵守適當的法規體系，達到防護最適化，授權和調查，以確保運行中的輻射安全。如果安檢不具正當性，則不應應用來進行檢查作業。
- (4) 用於各種類型的安全檢查設備，應該採用達到共識標準設計規範的系統，諸如國際電工委員會(IEC)，國際標準組織(ISO)和美國國家標準協會(ANSI)。

3.3 IAEA GSG-5 報告主要內容

- (1) 涵蓋了應當考慮的要素以及在確定是否有必要採用特定類型的做法時應當採用的程序。幫助政府和主管機關提出特別具有挑戰性的輻射使用建議，主要是醫療診斷，醫療治療或生物醫學研究以外的其他目的的人體成像，例如機場的安全檢查。
- (2) 正當化的原則是簡單和合乎邏輯的：作業必須對曝露的個人或社會產生積極的淨利益。
- (3) 在討論涉及增加輻射曝露或潛在曝露的活動時，ICRP 指出“要考慮的後果不僅限於與輻射相關的後果 - 它們包括其他風險以及活動的成本和收益。有時，輻射損害是總傷害的一小部分。因此，正當化考量遠遠超出了輻射防護的範圍，也涉及考慮經濟，社會和環境因素。
- (4) 確定正當化的過程和對某一做法達成的決定可能因國而異。
- (5) 政府或主管機關(視情況而定)應明確說明被認為正當的作業類型
- (6) GSR 第 3 部分規定“以下做法被認為是不正當的：
 - (i) 除包含醫療曝露之正當化作業，食品，飼料，飲料，化妝品或任何其他用於食入，吸入或使用於皮膚的商品或產品中，通過添加放射性物質或增加活性，而由某人攝入使用。
 - (ii) 涉及在商品或消費性產品如玩具、個人首飾或裝飾品中使用輻射或放射性物質，導致活性增加。
 - (iii) 使用作為藝術形式或用於宣傳目的而使用輻射的

人體成像。

- (7) 使用輻射用於盜竊檢測目的的人體成像應視為不正當。
- (8) 使用輻射檢測隱藏物品以防止走私目的或構成國家安全威脅的犯罪行為的人體成像通常應被視為不正當。如果在特殊情況下，政府或監管機構決定考慮這種人體成像的正當化，則應適用[GSR Part 3] 的要求。
- (9) 在主管機關負責決定某種類型的做法的正當性的情況下，應正式組建和諮詢諮詢機構。監管機構應確保向諮詢機構提供足夠的信息，以便其成員能夠了解與輻射曝露相關的風險，並能夠將這些風險與其他風險進行透視。
- (10) 如果監管機構決定某種特定類型的做法是正當的，那麼監管機構應該對該類做法行使其正常的監管職能。
- (11) 如果監管機構有責任確保某種類型的作業是正當的，則申請人向監管機構提供的信息應包括以下內容：
 - (i) 申請人姓名及聯繫方式。
 - (ii) 作業類型的描述，附圖和圖表。
 - (iii) 將使用的輻射源的全面特性，以及將採取的措施，以確保安全和減少放射性後果。
 - (iv) 評價作業類型的利益和損害，包括輻射損害。評價應包括經濟、社會、健康和安全、廢物管理、回收、環境影響和除役方面。輻射損害的評估應涵蓋預期曝露的程度和可能性，以及對潛在曝露的評估。
 - (v) 指明預期的作業類型的使用程度。
- (12) 主管機關應首先確定申請人是否提供了所有必要的信息。如有必要，主管機關應請申請人澄清。還應與任何預先確定的標準進行初步比較。在此之後，主管機關應尋求諮詢機構的建議。
- (13) 諮詢機構：
 - (i) 應審查與評估對這類作業要求的利益，如有必要，應與有關各方協商；
 - (ii) 應審查與評估預期由這種類型的做法產生的所述損害，包括輻射損害，並在必要時，應就申請人損害評估的充分性做進一步的資料提供和說明；
 - (iii) 應向主管機關提交報告，其中應提供關於作業類型是否正當的建議。
- (14) 由於引入一種類型的作業，所有曝露的人的集體劑量可能是對某些類型的作業的正當性做出決定的決定因素。集體有效劑量是輻射防護比較的工具。
- (15) 作業的利益可以是許多不同類型，包括可能的保存生命，預防傷害或疾病，技術利益，防止財產損失或安全改進。預期效益應盡可能量化。
- (16) 諮詢機構應審查和評估所有提供的信息，並考慮到已確立的任何標準。評估過程應該全面記錄。報告應列出主要證據、評估的不確定性、諮詢機構建議的基礎和正當化。
- (17) 如果在提出建議時，諮詢機構認為需要與非使用游離輻射的替代方案進行比較，則應適當謹慎地進行。
- 替代方案也可能有損害。
- (18) 主管機關應審查諮詢機構的報告。在與諮詢機構進行任何進一步必要的協商之後，主管機關應當就這種類型的做法的正當化做出決定。一旦作出決定，應將其通知申請人。
- (19) GSR Part 3 針對除醫學診斷、治療或生物醫學研究以外的目的使用輻射的人體成像作業分成二類。
(安檢目的為第二類)
 - (i) 第一類作業，在醫療輻射設施中進行，使用醫療放射設備，由放射醫療人員執行，並由放射科醫生查看圖像。這種做法的目的包括獲得法律證據，就保險，就業和移民，年齡確定，生理學評估和藥物檢測等方面作出決定。
 - (ii) 第二類作業不在醫療設施中發生（它們經常在公共場所發生），涉及使用專門的檢查成像裝置，產生圖像以供不具有醫療資格也不是放射學專家的人員觀看。這種做法的目的包括檢測隱藏的武器或違禁物品(例如在航空公司乘客身上)，以及檢查貨櫃貨物和車輛。
- (20) GSR 第 3 部分要求“使用輻射檢測可用於構成國家安全威脅的犯罪行為的隱藏物體的人體成像應由政府正當化”。
- (21) 在某些情況下，如強大的公共衛生、法律或安全原因，可能導致非醫療用途人體成像的作業（例如在機場的 X 射線安檢）被認為是正當的。
- (22) 特定類型的作業所帶來的利益和損害，可能存在區域或地方差異。
- (23) GSR 第 3 部分將考慮這些特殊情況的正當化的責任提交給政府。各國政府必須考慮：
 - (i) 實施人體成像程序的好處和壞處；
 - (ii) 不實施人體成像程序的好處和壞處；
 - (iii) 與引入人體成像程序類型相關的任何法律或道德問題；
 - (iv) 人體成像程序的有效性和適用性，包括輻射設備是否適用於預期用途；
 - (v) 有足夠的資源在作業期間能安全地進行人體成像程序。
- (24) GSR 第 3 部分規定，如果一種涉及使用輻射於非醫學以外目的之人體成像的作業被確定為正當，那麼該作業需要受到監管控制。應當在特定條件下對這類作業的特定應用進行授權，對進行這種成像的設施進行檢查以及執行監管要求。
- (25) 主管機關與其他相關主管部門及專業機構合作，確定對安檢作業的監管控制要求，包括確定劑量限制，以及定期審查正當化。
- (26) 當有新的資訊或技術可用時，可能需要重新審查正當化決定。
- (27) 正當化決定涉及該作業如何選擇檢查的個體。選擇的標準應當在申請文件中明列，並於正當化決定之過程中被審查。在使用 X 射線於機場旅客檢測，選擇旅客的標準應該指定該作業是否應用於所有乘客，還是只會隨機或其他方式選擇乘客受檢。
- (28) 必要時，標準應包括程序是應該強制執行還是應當徵得個人的同意，特別是如果有非游離輻射的替代

技術可用。

(29)應該設置劑量約束，以便充分防護暴露的個體。

(30)第2類型的人體成項作業的利益可能很大；例如，提高航空公司乘客的安全。一般來說，利益將是對整個社會，而不是暴露的個人。

3.4 IAEA GSG-5 報告主要建議

(1) 檢測人員違禁品

安全檢查涉及使用 X 射線掃描來檢測隱藏在身體上的武器或其他違禁物品，常用在航空公司安檢乘客和監獄或其他建築物的安檢訪客。在這些類型的做法中，好處是減少了使用武器和改善安全威脅，如果是航空公司乘客則可以保全生命。

評估應考慮每次檢查的單次劑量以及可能頻繁暴露的累積劑量，例如。頻繁的航空旅行者或經常訪問監獄。

在安檢航空公司乘客的特定情況下，政府應仔細考慮是否需要廣泛的公眾諮詢。此外，鑑於航空旅行的國際層面，政府還應考慮與其他國家的對應機構聯絡。

(2) 檢測非法販運毒品

使用 X 射線技術來對在人體內的藥物包裝進行成像。包含藥物的包裹物可能被吞下或以其他方式隱藏在身體內部。

只有當高度懷疑個人吞服含有藥物的包裝時，特別是在對個人健康有顧慮的情況下(吞嚥的藥物包裝可能分裂並將內容物釋放到腸中，導致嚴重的傷害或死亡)，才應對個人使用該程序。

應制定查明疑犯毒品運送人的作業標準。應當考量可利用非使用游離輻射的替代技術或措施，包括管理催吐藥或將該人拘留一段時間。

(3) 檢測貨櫃檢查違禁品

在邊界過境/管制點使用 X 射線或放射性物質輻射源暴露貨櫃的主要目的通常是檢測不應存在的物品，這些物品可能包括未申報的香煙或酒精，毒品，炸藥或武器，甚至偷渡客。因此，這種暴露會對預先不知道其存在的物體或個體給予輻射劑量。此外，還應考慮車輛駕駛人的暴露。

這種使用輻射檢查的好處顯然是對整個社會的利益，此外貨櫃中的人亦可能受益，因躲藏於貨櫃中的人可能被發現並從生存困難的情況中釋放(其可能在貨櫃中遭遇窒息的情況)。

(4) 關於使用 X 射線或加馬輻射掃描檢測人們在車輛或貨櫃中非法進入國家的案例研究

(i) 案例介紹

在英國，隱藏在車輛或貨櫃中的偷渡率非常高，已被發現企圖在東肯特州(包括多佛爾港)非法進入的人員，1999 年的人數超過 17,000 人，2000 年超過 19,700 人。使用的檢測措施包括二氧化碳(CO₂)感測器，以及搜索狗。然而，這些措施都有相當大的限制。例如，某些類型的貨物會釋放二氧化碳，從而掩蓋偷渡人員的存在。此外，一些貨櫃的構造阻擋了 CO₂ 的檢查。採用替代措施，如將全部裝載貨物卸載會是一個非常耗時和成本昂貴的過程，並且只能在有

限數量的情況下使用。因此，英國移民局計劃在英國港口和控制區部署 X 射線或 γ 輻射掃描儀，以檢測企圖避開英國移民管制的人。在大多數情況下，掃描儀將用作檢查的第二階段，即作為第一階段措施(如 CO₂ 感測器)提供不確定結果的確認。

掃描器使用 X 射線或加馬輻射，以通過高度敏感的探測器陣列系統產生貨物的影像。掃描器從車輛的一端在其整個長度上移動以獲得完整的圖像，通常需要幾分鐘來完成掃描並通過透射輻射或回散射輻射檢測來產生圖像。

(ii) 使用 X 射線或加馬輻射掃描器之效益

使用 X 射線或 γ 輻射設備被認為是非常顯著的威懾因素，因為：

- (a) 對於旨在企圖避開移民管制的個人，被發現的可能性將大大增加。
- (b) 對於貨運公司來說，預期對他們施加嚴厲的民事罰則會增加，鼓勵他們採取比目前更好的保安措施。
- (c) 對於從事人口販運的人來說，破壞其活動的前景將產生重大影響，特別是在檢查工作成功起訴愈加頻繁的情況。

(iii) 因為許多在車輛中發現的非法入境者身體狀況很差，有些人被發現時甚至已經死亡。X 射線或 γ 輻射掃描設備的部署將顯著增加檢測貨櫃中非法移民的可能性，從而減輕潛在的痛苦並防止可能的人員死亡，特別是在過境早期即受檢測的情況下。

(iv) CO₂ 檢查僅能用於某些類型的貨物，通過 X 射線或 γ 輻射檢測非法移民提供了比 CO₂ 檢查更有效的技術。

(v) 經濟效益包括：

- (a) 隱藏在車輛和/或貨物集裝箱中的人們可以被檢測到，而不需要在搜索過程中卸載貨物，這是勞動密集型和高成本的。
- (b) X 射線或 γ 輻射掃描儀可用於各種車輛，而 CO₂ 感測器的使用僅限於具簾幕車輛。
- (c) 預計通過鼓勵運輸商和渡輪運營商通過執行民事處罰和運輸工具賠償計劃，加強和支持移民的總體成本降低，這是通過鼓勵改進安全預防措施。
- (d) 這種做法提供了搜索更多比例的運往英國或者到達英國的車輛的能力。
- (e) 這種做法代表了更有效地利用移民服務資源搜尋車輛和部署其他控制人員以更好地發揮作用。

(vi) 輻射劑量

- (a) 對操作設備或駕駛員的僱員的年有效劑量被確定為小於 0.5 mSv。
- (b) 禁區外的公眾，由物理障礙和警告標誌指示的掃描器周圍的區域的最大年度有效劑量，信標和聲音警報(根據需要)估計為 100 μ Sv。
- (c) 對車輛或貨物集裝箱內的人的平均有效劑量估計為每次掃描 1 μ Sv，並且在最差條件下期望每次掃描不超過 2 μ Sv。
- (d) 對單個掃描器進行了量化輻射損害的成本效益分

析。基於一年中工人的最大劑量為 0.5 mSv，並假定在掃描儀上部署了多達 36 名工人，所產生的年度集體有效劑量計算為 18 人毫西弗 (man-mSv)。

- (e) 設備需要設計成使車輛駕駛員不在主射束中。
- (f) 掃描器將位於安全港口或環境中的限制區域中，對一般公眾的影響將非常有限。英國移民局估計，在最壞的情況下，10 名公眾每天（每年 365 天）可能曝露於 X 射線束。由於掃描器使用準直光束，公共成員在區域的邊界上將接收的最大輻射劑量將為每次掃描 $1 \mu\text{Sv}$ 。這將導致每年集體有效劑量 3.6 人毫西弗 (man-mSv)。
- (g) 假設每個掃描器在一年中檢測隱藏在車輛或貨櫃內的 1000 個非法移民，並且每個掃描器將造成每個非法移民接收約 $2 \mu\text{Sv}$ 的有效劑量。所產生的年集體有效劑量為 2 人毫西弗 (man-mSv)。
- (vii) 這些集體劑量使用由國家放射防護委員會建立的參考值進行評估，對工作人員每人西弗為 50,000 英鎊，對一般民眾每人西弗為 20,000 英鎊。在此基礎上，運營擬議設備的年度健康相關成本為每台掃描儀 1012 英鎊(考量工作人員、一般公眾及非法移民：
 $50,000 \times 0.018 + 20,000 \times 0.0036 + 20,000 \times 0.002 = 1012$)。如果擬議的做法可能導致拯救幾個人的生命，那麼因此而挽救生命(一個人的生命價值 160 萬英鎊)的做法可以帶來好處。

(viii) 正當性的決定

使用 X 射線或 γ 輻射掃描儀來檢測試圖非法進入英國的非法移民被認為是具正當性的，因為：

- (a) 在長時間的海上和/或公路旅行之前檢測到隱藏在車輛和/或貨櫃中的人時，將會保全其生命。
- (b) 與分配給人類生命的價值為 160 萬英鎊的價值相比，1012 英鎊的輻射損害成本非常小。
- (c) 目前使用的檢測措施（涉及 CO2 感測器，狗搜索隊和車輛和/或貨物的卸載）具有局限性。通過使用 X 射線或 γ 輻射掃描儀將大大增強檢測隱藏在車輛和/或貨櫃中的人的可能性。
- (d) 隱藏在車輛和/或貨櫃中的人接收的任何輻射劑量將極小，並且不會造成顯著的健康風險。
- (5) 在第 2 類檢查程序(安檢)中曝露於輻射的人員應該享有與公眾相同的防護基準，同樣受到針對該類作業的劑量約束。
- (6) GSR 第 3 部分要求所有使用游離輻射檢查成像裝置進行程序的受檢人員，應被告知在可能的情況下請求使用非游離輻射替代檢查技術的可能性。

4. X 射線或 γ 輻射進行安檢掃描之正當性探討、輻射安全管制之具體建議

本研究針對 X 射線或 γ 輻射進行安檢掃描之正當性探討、輻射安全管制提出之具體建議如下：

- (1) 當申請者提出申請時，主管機關有責任評估 X 射線或 γ 輻射安檢掃描之正當性。
- (2) 正當性的評估必須考慮：
- (i) 安檢目標的定義(實施與不實施人體成像程序的好處和壞處)。

- (ii) 輻射技術完成安檢目標的程度。
- (iii) 安檢過程的輻射劑量以及一些個體群體每年可能招遭受大量安檢的可能性。
- (iv) 可用於減少曝露的替代方案。
- (v) 引入人類成像程序類型相關的任何法律或道德問題。
- (3) 回散射式人體 X 光安檢掃描其產生之輻射劑量極低、誘發之健康效應可予忽略。毫米波檢查儀為非游離輻射設備，無輻射劑量問題。
- (4) 如評估結果為具正當性，用於各種類型的安全檢查設備，應該採用諸如國際電工委員會(IEC)和美國國家標準協會(ANSI)的標準設計規範要求。
- (5) 安檢 X 光(人體)掃描儀之輻射安全審查準則(指引)之建議：

表 4.1 本研究建議國內之 X 光安檢(人體)掃描儀之審查項目及標準

建議審查項目	審查標準
一般文件	1. 一般文件審查項目可依放射性物質與可發生游離輻射設備及其輻射作業管理辦法第 18 條規定辦理。 2. 輻射安全測試報告應含檢查室內之劑量分佈結果，明確指出監察室內最大劑量之參考點位置。 3. 申請文件內容除上述規定外，還應包括以下內容： (1) 作業類型的描述，附圖和圖表。 (2) 將使用的輻射源的全面特性以及將採取的措施。 (3) 評估作業的利益和損害，評估應包括對社會、民眾健康和環境、安全、環境影響、設備除役，以及涵蓋預期曝露的程度和可能性、對潛在曝露的輻射損害等方面。 (4) 指明預期作業類型的使用程度，包括使用頻率與次數估計。
濾片	X 光射束出口表面的總濾片厚度應不小於 1 毫米(mm)的鋁當量。
指示器	當掃描正在進行時，須有至少一個指示器顯示“掃描正在進行”。
控制系統	1. 控制系統的電源應由鑰匙開啟。電源開啟後鑰匙無法抽離，且開啟電源並不會直接導致輻射發射。 2. 每種操作模式之管電壓和管電流應當由製造商預先設定，且不得由系統操作員更改。操作模式之電壓和電流應在工程師或維修人員需要時可顯示。 3. 需要工具或鑰匙才能打開或控制面板，此部分至少需要一個安全連鎖裝置。 4. 須確保操作人員可清楚看見檢查區域內的情況，並須確保受檢者不會再誤入掃描檢查區。

	5. 系統機台上應有警語，如：“警告：電源開啟後會產生 X 射線” 6. 預設時間到時，X 射線會自動停止發射。
安全連鎖設定	1. 對於受測人員固定不動的系統中，X-射線的掃描運動應有安全連鎖設計，當 X-射線光束的移動掃描的速率低於預設的最小速度時，照射應被終止。最小速度的條件須確保其劑量在限值範圍內。 2. 在任何系統問題發生的情況下，安全連鎖裝置應終止可能會導致異常或意外的主輻射。包括：意外的停止掃描移動或掃描動作減慢、異常的 X 光輸出、安全系統的電腦故障、無法自動停止照射等。
檢查區內參考點(最大劑量處)之周圍等效劑量 $H^*(10)$	$H^*(10) < 0.4 \mu\text{Sv}$ (回散射系統) $H^*(10) < 5 \mu\text{Sv}$ (穿透式系統及組合式系統) 註:本標準參考 IEC 標準制定
X 光安檢設備外之周圍等效劑量 $H^*(10)$	$H^*(10) < 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 當 $H^*(10) > 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 時，則製造商應提供距 X 光安檢設備任何外部表面超過 30 公分外之該值(2.5 微西弗/小時)的等劑量曲線輪廓範圍。 註:本標準參考 IEC 標準制定

- (6) 車輛及貨櫃 X 光安檢程序中，曝露於輻射的人員應該享有與公眾相同的防護基準，同樣受到針對該類作業的劑量約束。
- (7) 在劑量限度的考量上，因國際放射防護委員會(ICRP)和 NCRP 建議一般公眾每年的劑量限值為 1 毫西弗 (mSv)，而每個公眾成員可從多個輻射源接受到游離輻射的曝露；故任何單一安檢機器造成的人員劑量每年不得超過 0.25 毫西弗 (mSv/y)。
- (8) 主管機關決定某種類型安檢輻射作業的正當性之過程

IAEA GSG-5 報告建議主管機關決定某種類型安檢輻射作業的正當性之流程如圖 4.1。

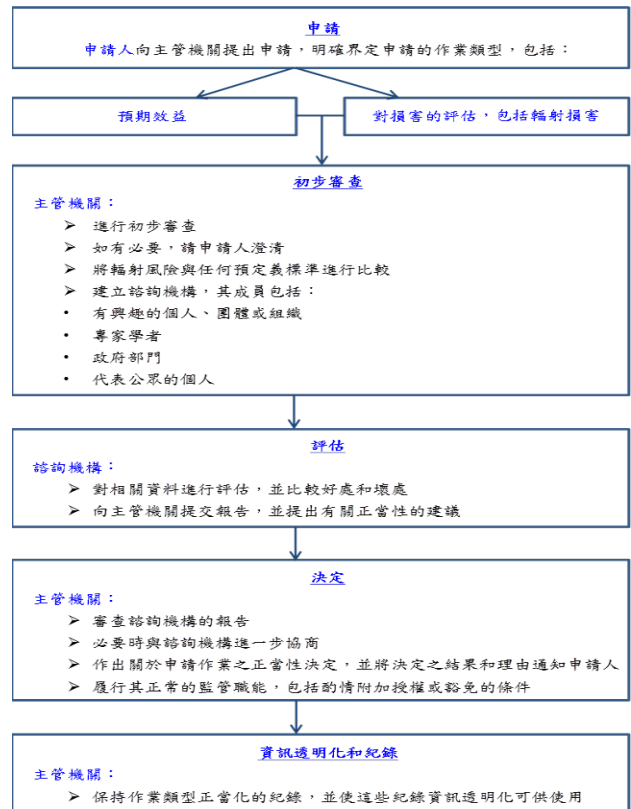


圖 4.1 IAEA GSG-5 建議主管機關對某種類型安檢輻射作業進行正當性決定之流程圖

IV. 結論

非醫療用途人體 X 光安檢設備對受檢者造成之劑量雖然低，健康風險亦小，但目前國際社會仍普遍因隱私權問題等其他政治性因素，暫時不建議使用；然而目前對影像技術已有改善作法，可排除個人隱私受侵犯的問題，如未來國際恐怖攻擊加劇，致使飛安問題有嚴重風險，仍不排除非醫療用途人體 X 光安檢設備有重新使用的可能性。為因應與預先準備後續發展可能，針對非醫療用途人體 X 光安檢設備之現場檢測程序與設備運作之品保要求規範之預先建立，仍有其不可排除之必要性與重要性。

本研究計畫針對非醫療用途之 X 光安檢(人體)掃描儀，蒐集與研析國際上相關之法令及審查規定(包括 ICRP 125 及 IAEA GSG-5 報告)，彙整這些相關標準及指引後，提出國際組織對使用 X 光掃描儀進行安檢之最新趨勢與建議。此外，本計畫亦提出人體 X 光安檢掃描之正當性決定程序探討、以及輻射安全管制之具體建議。計畫結果與所提出之具體建議可供國內主管機關作為對使用游離輻射於非醫療用途安檢設備之輻射作業管制的重要參考。

參考文獻

- [1] New Airport Passenger Screening Technologies, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, 2011.
- [2] Health effects of security scanners for passenger screening (based on X-ray technology), Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health

- Risks, European Commission, April 2012.
- [3] Airport Security Scanners & Ionising Radiation, A Joint Report from The British Institute of Radiology and The Royal College of Radiologists, BJR & RCR, 2011.
 - [4] Facts and figures concerning the use of Full body scanners using X-Rays for security reason, Head of the European Radiological protection Competent Authorities, HERCA, June, 2010.
 - [5] ICRP publication 125, Radiological Protection in Security Screening, ICRP, 2014.
 - [6] IAEA General Safety Guide GSG-5, Justification of Practices, Including Non-Medical Human Imaging, IAEA, 2014.
 - [7] ICRP publication 103, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP, 2007.
 - [8] American National Standard ANSI/HPS N43.17 - 2002 Radiation Safety for Personnel Security screening Using X-ray, American National Standard Institute, 2002.
 - [9] American National Standard ANSI/HPS N43.17 - 2009 Radiation Safety for Personnel Security screening Using X-ray or Gamma Radiation, American National Standard Institute, 2009.
 - [10] IEC 62463 Ed.1: Radiation protection instrumentation - X-ray systems for the screening of persons for security and the carrying of illicit items, International Electrotechnical Commission (IEC), June 2010.

微型輻射劑量計之量測與製程研究

Measurement and Process Development of Micro-sized Semiconductor Radiation Dosimeter

計畫編號：MOST 105-NU-E-007-006-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：阮敦寶、吳宗瑜

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

摘要

微型輻射劑量計之使用，在醫學、科學、工業等應用，日益重要。輻射劑量計之構成，主要含輻射感測元件與抗輻射訊號處理積體電路。感測元件之研製為金氧半電晶體(MOSFET)及太陽能電池之PN junction元件，抗輻射積體電路元件為MOSFET。本研究計畫之主要目標為，應用MOSFET元件汲引電流(Icp)為輻射劑量計之研究、應用Silicon Solar Cell元件之Current Mode為輻射偵檢器之研究、應用開氧化層製程技術以改善MOS元件之抗輻射特性等。研究結果顯示於低、中輻射劑量以nMOSFET元件之Icp較為靈敏，而在高輻射劑量時以pMOSFET元件Icp隨輻射劑量增加。然後以Solar Cell Devices作為Current Mode Detector為輻射偵測應用，研究顯示在 $10 \sim 2 \times 10^5$ rad/hr，電流/輻射劑量率約可達 $5 \sim 8 \times 10^{-11}$ A/(rad/hr)且反應線性良好，在事故級輻射量測可達 $10 \sim 10^6$ rad/hr之監測。在MOSFET元件之製程研究上，所提出的兩階段氮化開氧化層之製程方法，可明顯增進積體電路元件之抗輻射特性。

關鍵詞：輻射劑量計、高輻射、加馬射線、金氧半電晶體、PN元件、抗輻射。

Abstract

Radiation dosimeters of small-sized are gradually important in the applications of medicine, science, and industry. Radiation dosimeter includes radiation sensor device and signal processing integrated circuit (IC) with radiation hardness. The radiation sensors studied in this project are metal-oxide-Si field effect transistor (MOSFET) and PN junction devices in solar cell. The devices in the signal processing IC with radiation hard are MOSFETs. Some targets were achieved in this project, namely, High gamma-ray radiation dosimeter by charge pumping current of MOSFET device, High gamma-ray radiation current-mode dosimeter by silicon solar cell device, and Radiation hardness of MOS device improved by using gate oxide processes. It is found that the charge-pumping current (Icp) of nMOSFET is sensitive to radiation for low/middle dose. For high radiation dose, the Icp of pMOSFET is proportional to dose. A solar cell device is applied for a current mode radiation detector. It is demonstrated that the sensitivity of $5 \sim 8 \times 10^{-11}$ A/(rad/hr) can be achieved in the dose rate range of $10 \sim 2 \times 10^5$ rad/hr

and the linearity is very good. A large dose rate range of $10 \sim 2 \times 10^5$ rad/hr can be obtained for nuclear accident application. Regarding the process development of MOSFET, the radiation hardness of IC devices can be clearly enhanced by gate oxynitrides formed with two-step nitridation approaches.

Keywords: Radiation dosimeter, high radiation dose, gamma ray, MOSFET, PN, Radiation hardening

I. 前言

輻射監測在國內核能電廠發電運轉期，是非常重要的，傳統輻射監測用之偵檢器以蓋革管(Geiger-Mueller Tubes)，離子腔(Ionization Chambers)，閃爍式光電倍增管(Photomultiplier Tubes)等組件為主，近年來因半導體電子元件之製程的快速發展，以半導體元件為輻射之偵檢器亦已陸續應用在輻射監測上，而此類之輻射監測均使用在低強度之輻射偵測 [1]。由於國外曾發生三哩島及車諾堡等核能事故，事故經驗突顯高輻射強度之輻射偵測的重要性。因此；本研究的目的將以半導體元件應用在高輻射強度之輻射偵測為研究主題，以找尋現成之商用半導體元件，利用學校之精密量測儀器研究各種元件電氣特性，開發為輻射偵檢器。由於高輻射強度之輻射偵檢器價格是非常昂貴，且依賴國外進口，若能經研究而開發低廉之輻射偵檢器，則可大量應用在各種高輻射強度之輻射偵測，並建立自主之輻射偵測技術。

由於傳統式之輻射劑量計係以熱發光劑量計(TLD: Thermo-Luminescent Dosimeters)為主，利用無機晶體(Inorganic Crystals)在輻射照射後，在能隙之陷阱中心(Trapping center)內產生陷阱電荷，此量隨所接受之輻射劑量增加，須以加熱方式計讀出其相對輻射劑量，故缺點為在高溫度環境，會自然消失(Fading)，同時使用在高輻射劑量時有不線性現象。因此；本研究以找尋適當之商用金氧半場效電晶體(MOSFET)，研究各種元件之半導體物理特性，再測試電氣及輻射照射效應之相關特性，先以量測輻射效應對 MOSFET 起始電壓變化量為輻射劑量參數實驗，經再研究發現若能再分離出僅量測界面陷阱電荷(interface trapped charge)變化量，將使所推算之輻射劑量之更具代表性，而此變化量以電荷汲引電流(Charge Pumping Current)參數為基準，所以我們利用電荷汲引量測技術，分別以功率金氧半場效電晶體在低強度、中強度、高強度輻射照射效應實驗，取得電荷汲引電流變化量，經分析確實可在高輻射及高溫度環境下使

用，可作為輻射劑量計，如核能電廠之運轉環境，以監測人員或設備所接受之輻射劑量。

以金氧半場效電晶體(MOSFET)作為輻射劑量計已有許多研究報告[2-5]，其優點為體積小，耗電量低及經濟等優點。由於近年來半導體工業之蓬勃發展，電子元件之品質相當穩定且價格很便宜，所以利用 MOSFET 來測量輻射劑量可有準確且經濟的優點。從我們以前的研究得知[6-9]，輻射後 MOSFET 的汲極電流(drain current, I_d)會減小，因為輻射產生氧化層陷阱電荷(Q_{ot})及界面陷阱電荷(Q_{it})所致[8]。又 P 型通道(channel)之 MOSFET 的 I_d 變化常大，這是因為輻射在 PMOS 產生的 Q_{ot} 與 Q_{it} 皆為正[10]。同時， I_d 的減少量隨著劑量的增加而增加。值得一提的是，我們量過很多同一型號之 MOSFET (輻射後)，得到的數據都非常接近，亦即再現性(reproducibility)很好。所以，量得輻射後之 MOSFET 電特性，就可以得知準確的輻射劑量[9]。欲測得 MOSFET 在某固定 V_d 與 V_g 下之 I_d ，只要簡單的電路與數字顯示即可，所以量測的裝置便宜而且是可攜式。PMOS 輻射劑量計已成功地應用在核能(1KRad-10MRad)，太空飛行器(10Rad-0.5MRad)，核醫(1Rad-50kRad)及人員劑量(10^{-3} Rad-1kRad)等[11]。由於退火(annealing)效應，經輻射後之 MOSFET 的電特性就有漸漸恢復的趨勢，而恢復的速度可能與元件所受的總劑量或當時溫度有關[12-13]。我們只要控制可能變因，找到輻射後 MOSFET 之電特性的時變曲線或公式，便可以利用這些數據作基礎，來估算這種輻射線的劑量。

除了輻射感測元件之製作，抗輻射(radiation hard)積體電路(IC)元件之製程也是非常重要。由於感測元件的訊號需要經過處理與判別，所以訊號處理必須不受輻射的影響，此為 radiation hard IC 的緣由。值得強調的是，近來電漿製程已大量使用在超大型 IC，荷電粒子撞擊元件產生的輻射效應也受到重視[14]。因此，也有報告指出應用 IC 中部份 MOS 元件作為測試鍵(test key)，由此元件的電特性變化，可以測知製程中受到多少電漿輻射劑量[15]。應用開氧化層製程技術如 N_2O 成長 SiO_2 ，以改善 MOS 元件之抗輻射與抗熱電子效應，已有大量文獻驗證其有效性[16-20]。由於 N_2O 成長之 SiO_2/Si 界面有 N，可減少界面之 bond strain，同時也減少 H 鍵(electron trap)之形成等，所以頗受到重視。但也有報告指出[21-24]，用一般高溫爐(Furnace)成長之 SiO_2 ，N 分佈較均勻，抗熱電子特性未能明顯改善。若用快速熱處理(Rapid-Thermal-Process, RTP)，可使 N 集中在 SiO_2/Si 界面，抗性可大幅改善。可能機制為 N 集中在介面，可使 Interfacial strain 降低所致。

本研究計畫之目的有幾項，其一為針對 MOSFET 半導體元件之加馬輻射偵檢器在高輻射監測的加馬輻射劑量計之應用研究。本研究以功率金氧半場效電晶體為偵測元件，其開極氧化層(Gate Oxide)之面積厚度較一般大，可使輻射作用效應佳及平均，以量測其經輻射照射後的界面層汲引電流(Charge Pumping Current, I_{cp})變化量[25]，可相對於接受之輻射劑量大小，作為另一種輻射劑量計。其二是針對 Silicon Solar Cell 元件之加馬輻射偵檢器在高輻射監測之應用研究。Silicon Solar Cell

為 Current Mode 操作之輻射偵檢器，由於此其元件之結構是以 Silicon PN Junction Diode 組成，故輻射作用在元件 PN 接面後，可產生微弱之電流輸出[26]，而在高輻射強度之輻射照射後，其產生之電流隨輻射強度增加，達到一般儀器電路可計測之電流，更有利於增強信號雜訊比(S/N Ratio)，故可應用到更高輻射環境之偵測。其三為應用開氧化層製程技術以改善 MOS 元件之抗輻射與抗熱電子特性，方向為 N_2O 之氧化及氮化方法。綜合矽輻射感測元件與抗輻射積體電路元件之研製，同時開發一般 MOSFET 相容製程，完成輻射劑量計微晶片之關鍵元件。

II. 主要內容

本研究首先建立高輻射劑量感測元件之量測方法，然後進行抗輻射 MOS 電容元件製作。

A. 電荷汲取技術 (Charge pumping)

電荷汲取技術是利用電荷汲引曲線直接計算萃取氧化層電荷與界面陷阱分佈的工具，由於不需要複雜的數值計算，並且可以將其損害的空間分佈給萃取出來，所以已經成為研究各種引發氧化層電荷與界面陷阱傷害的最佳方法。電荷汲引技術最主要是根據電子電洞在 SiO_2/Si 界面的結合過程，去對界面陷阱做一直接測量。就一顆製程技術成熟的電晶體而言，由於矽底材內部捕獲中心(trap)的數目相當的低，以致於絕大部分的電荷汲引電流是由界面陷阱所引起。當加入一個連續脈衝電壓於 n 型金氧半場效電晶體的閘極之上，且源極和汲極接地，另外在基底外接一個電流表。假如把連續脈衝的最低準位設定在平帶電壓(Flat-band Voltage)之下，且其高準位設定在電晶體起始電壓(Threshold Voltage)之上，然後從能帶圖可以發現電晶體矽表面能位變化應是從累積的狀態變化到反轉的狀態，而後再回到累積的狀態，如此剛好是一個脈衝週期循環。如果開極脈衝電壓從低準位漸漸上升至高準位的同時，在開極底部矽表面能位會有一個過渡性變化，也就是從電晶體累積狀態漸漸變為反轉狀態。結果造成電洞被推離通道表面並由矽基底流出，而電子則會從源極和汲極流進通道表面形成反轉層。然而，假若有界面陷阱存在則必定會引起一連串表面復合的行為產生。進而會有引導出一定程度的基底電流。其原因如下，當 Si 表面被迫處在反轉狀態的同時，在表面的界面陷阱會被電子所填補一直填補到費米能階所處的準位，而當元件處在反轉狀態過渡到累積狀態的同時，在通道上的自由電子會在矽基底的電洞尚未回流到通道表面之前，很快速的被拉回源極和汲極；然而在這一短暫的過渡週期之內，大部分被界面陷阱所補陷的電子將沒有時間逃脫並回流到源極和汲極，因此最後則被來自於矽基底所複合，而形成複合電流，也就是上述所描述的基底電流。相似的情形，也同樣發生再累積狀態變化到反轉狀態的同時，而在此一過程中主要的淨電流是由界面陷阱所補陷的電洞和從源極和汲極流入的電子進行複合所引發的。

電荷汲引電流 I_{cp} 與界面陷阱的密度 N_{it} ，電荷汲引頻率 f ，和實際貢獻電荷汲引電流元件的實際面

積 A，成正比。[27] $I_{cp} \propto qN_{it}f \cdot A$

B. 抗輻射 MOS 電容元件製作

製程與一般方法相同，惟重點在開氧化層之製作技術研發。如研究背景中所提到，使用 O_2 成長 SiO_2 後，再用 RTP 在 N_2O 中氮化，以驗證其抗輻射特性之改善。氧化層厚度定在 6-8 nm，開面積約在 $10^{-6}-10^{-4} \text{ cm}^2$ 。MOSFET-mask 之設計，使用 4 吋及 6 道 mask。使用 p-type silicon 晶圓，首先以 RCA standard cleaning procedure 清洗，然後浸泡於稀釋 HF 溶液再以前離子水沖洗。以兩種方法成長約 7 nm 厚的氮化氧化層 (oxynitride): (1) 以一般爐管在 N_2O 中氧化 (i.e. N sample); (2) 以一般爐管在 O_2 中氧化形成 5 nm 厚 SiO_2 ，再使用快速熱處理 (Rapid thermal annealing, RTA) 在 N_2O 中以 1000°C 40 s 氮化 (i.e. OR sample)。然後以低壓化學氣相沉積 (low pressure chemical vapor deposition, LPCVD) 在 620°C 成長 200 nm 厚 poly-Si 膜。

III. 結果與討論

本研究計畫之量測結果，在輻射感測 MOSFET 元件方面分別以汲極電流改變率 $\Delta I_d/I_d$ 、電荷汲取電流 I_{cp} ，在 Solar cell current mode detector 以感應輸出電流，作為輻射劑量參數。在抗輻射量測方面，以 MOS 元件經輻射傷害後，其界面陷阱密度之增加量 (ΔD_{it})、平帶電壓的偏移量 (ΔV_{fb}) 為特性比較之參數。以下分別敘述，(1) MOSFET 汲取電流作為劑量參數之輻射劑量計

應用 MOSFET 汲取電流 (Charge pumping current, I_{cp}) 作為一種輻射劑量參數，由於 I_{cp} 之大小直接反應出 SiO_2/Si 之界面陷阱數量，而輻射照射產生之界面陷阱在一般室溫 (<150°C) 下並不會改變，所以 I_{cp} 作為輻射劑量參數頗值得開發。本研究建立不同輻射劑量照射後 MOSFET 之 I_{cp} 資料庫，再以這些數據作基礎來估算輻射劑量。測試實驗之量測儀器設置及量測方法，將個人電腦經 IEEE-488 連線控制，在 Drain 極以 Keithley 236 量測汲極電流，Gate 極以 Philips PM5139 輸入可變偏壓之方波，Source 極以微小負偏壓控制，測試樣品為商用 Power n-channel MOSFET IRFD120 元件，量測之 Charge Pumping I_{cp} 電流變化圖形 [5]，可在 V_{FB} 及 V_T 電壓間，將可測得電荷汲引電流之分佈圖。

有關功率 MOSFET 經射源照射後，Charge Pumping Current I_{cp} 是否會有 Fading 現象之研究如圖 1 所示，顯示確實不會因時間過後產生 Fading 現象。將商用 n-channel Power MOSFET 以 Co-60 射源照射後，在經不同時間之重覆測試 Charge Pumping Current，驗證 Fading Test 反應，證明其 I_{CPmax} 值及特性曲線均未減低及變化。關功率 N-MOSFET 經射源照射後，其照射劑量之 Total Dose 與 Charge Pumping Current I_{cp} 得出之關係曲線，以多項式 Curve Fitting 分析如圖 2，顯示其對應關係相當規律，驗證其作為輻射劑量計之可行性。

Power n-MOSFET 及 p-MOSFET 元件在各種低、中、高強度之照射比較，於低、中輻射劑量以 n-MOSFET 元件之 I_{cp} 較為靈敏，而 p-MOSFET 元件雖

較不靈敏，但在非常高的輻射劑量時， I_{cp} 還是隨輻射劑量增加。

(2) Current Mode 操作元件之加馬輻射偵檢器

Solar Cell Devices 可利用其 Photo-Voltaic 之元件物理特性，即原來以太陽光能產生電流，現利用高強度之加馬輻射即為帶能之光子，穿透鋁質密封裝之偵檢器，將能量轉照射在 Solar Cell 產生電流，其轉換原理相同，故可當作 Current Mode Detector，應用為輻射偵測之用途。Silicon Solar Cell 為 Current Mode 操作之輻射偵檢器，目前文獻上均以其 Photovoltaic 效應產生電壓電流之應用為主，由於元件之結構是以 Silicon PN Junction Diode 組成，故帶能輻射作用在元件後，若其能量高於其電子電洞之 Energy Gap 時，因電子電洞遷移可產生微弱之電流輸出，且不須使用外來電源，而在高輻射強度之輻射照射後，其產生之電流隨輻射強度增加，更有利於增強信號雜訊比 (S/N Ratio)，故可應用到更高輻射環境之偵測，故本研究以太陽能電池板作為研究。經研究已成功找尋到國內廠商生產之合適及便宜之太陽能電池板，元件經測試能在 Current Mode 電路操作及作為輻射偵檢器，經多次之輻射照射實驗結果約可達 $5 \sim 8 \times 10^{-11} \text{ A/(rad/hr)}$ ，且電流/輻射劑量率之對數讀值的反應線性度良好。我們亦研製電流放大器，結合成輻射監測器，經實際照射校驗測試，輻射劑量率與顯示之讀值有良好之線性度，證明能偵測到高輻射環境之範圍，更驗證可應用在核能電廠運轉時之事故級高輻射強度之監測。

將 Solar cell Device 實驗數據與加馬輻射照射實驗數據整合，如圖 3，在各種不同強度下，Solar Cell 1 (Panasonic BP-5313C4) 產生之電流與輻射照射強度之特性反應圖，所可偵測之範圍可達 $1 \sim 10^6 \text{ rad/hr}$ ，更驗證 Solar Cell Device 可作為高強度輻射偵檢器，照射強度範圍可應用在事故級輻射之偵測。由本研究數據顯示在 $10 \sim 2 \times 10^5 \text{ rad/hr}$ ，電流/輻射劑量率約可達 $5 \sim 8 \times 10^{-11} \text{ A/(rad/hr)}$ ，且對數讀值的反應線性度良好，在事故級輻射量測之應用，以 Solar Cell Detector 最能符合預期且可行性高，範圍預估可達 $10 \sim 10^6 \text{ rad/hr}$ 之監測，在高輻射強度之輻射照射後，產生之電流隨輻射強度增加，有利於提高信號雜訊比 (S/N Ratio)，配合研製之電流放大器、及輻射監測器，已驗證可應用到更高輻射環境之偵測。

(3) 抗輻射 MOS 元件製程研究

圖 4 為以 SIMS 分析樣品 N 及 OR 在開介電層中的氮原子分布。 SiO_2/Si 界面通常定義在氧原子濃度從氧化層減少一半至 Si 表面處。可以看出，N sample 在界面處的氮含量較低約 3.1%，而濃度分布也較分散。而 OR sample 在界面處的氮含量較高約 3.5%，而濃度分布也較集中。

由於氮含量集中在界面有助於強化抗輻射特性，本研究接著進行兩階段 RTP 氮化處理以形成氮化氧化層。使用 Furnace 及 O_2 ，為 O sample，然後使用 RTP 在 N_2O 中實施第一次氮化 1050 C/40 sec (OR sample)，及第二次氮化 850C/15sec, 850 C/30sec, 900C/15sec (ORR1、ORR2、ORR3 sample)。圖 5 是 O、OR、ORR1、ORR2、ORR3 五種不同元件經輻射照射後的

ΔD_{itm} 圖。由圖中所示，以含氮氧化層(Oxynitride)元件 OR、ORR1、ORR2、ORR3 的 ΔD_{itm} 較傳統氧化層(O 元件)低，而且兩種電容之間(經氮化與未經氮化處理的元件)差異相當大。接著再以氮化氧層的元件來看，當使用第二階段的氮化處理時，如以 900°C 的溫度予以氮化時會使元件的 ΔD_{itm} 值增加。由於使用較高溫度氮化處理時(900°C)會使氮原子存在於氧化層中的比例增加，也使得界面陷阱能密度變化量也隨之增加，造成元件特性的衰退。而使用 $850^{\circ}\text{C}/30$ 秒第二階段的氮化條件(ORR2 元件)的 ΔD_{itm} 值與單一熱處理氮化過程的元件(OR 元件)之 ΔD_{itm} 值則相差無幾。同時 $850^{\circ}\text{C}/15$ 秒第二階段氮化時間(ORR1 元件)之 ΔD_{itm} 較 OR 元件有更低的 ΔD_{itm} 值。所以由此可知元件使用第二階段氮化時以溫度為 850°C 為較佳的條件，可使氮原子在 Poly-Si/SiO₂ 界面處堆積，但不致於進入 SiO₂ Bulk 中提高 ΔD_{itm} 值。所有元件 ΔD_{itm} 的大小依序為 O、ORR3、ORR2、OR、ORR1。

圖 6 為 O、OR、ORR1、ORR2、ORR3 五種不同元件，經輻射照射後的 ΔV_{fb} 圖。如圖所示，使用 Oxynitride(含氮氧化層 ie: OR、ORR1、ORR2、ORR3)之 MOS 電容的 ΔV_{fb} 值較傳統氧化層(O 元件)之 ΔV_{fb} 值低。接著由含氮氧化層元件(Oxynitride) (ie: OR、ORR1、ORR2、ORR3)中來看，以兩階氮化處理的元件 ORR2 與 ORR3 兩種元件的 ΔV_{fb} 值較 OR 元件的 ΔV_{fb} 值低；而 ORR1 元件的 ΔV_{fb} 值比 OR 元件之 ΔV_{fb} 值高。所以由上述得知，使用第二階段氮化溫度 $850^{\circ}\text{C}/15$ 秒的氮化條件下，會使原先的元件經快速熱處理(RTP)氮化之氧化層氮原子分佈曲線改變。使多晶矽(Poly-Si)/二氧化矽(SiO₂)界面的氮原子含量較少，造成 MOS 元件對於抗輻射性並沒有有效的增加。而使用 $850^{\circ}\text{C}/30$ 秒的氮化條件或 $900^{\circ}\text{C}/15$ 秒的氮化狀況下，使氧化層表面氮原子含量較多更符合理想的氮原子分佈曲線，使元件抗性提高。使氮在多晶矽(Poly-Si)與二氧化矽(SiO₂)界面處產生累積；但是由於使用 900°C 對於氧化層中氮原子含量比例增加，衰減元件的特性。故選擇以 $850^{\circ}\text{C}/30$ 秒的氮化時間為此最佳的選擇。

IV. 結論

本研究計畫首先進行了 MOSFET 元件之輻射效應檢測，應用電荷分離方法可清楚解析產生之氧化層電荷與界面陷阱電荷。然後進行 MOSFET 輻射劑量計之研發，並且驗證其可行性。若以汲極電流改變率 $\Delta I_d/I_d$ 作為劑量參數，適合高劑量範圍且其反應曲線非常線性。若以汲取電流作為劑量參數，適合較低劑量且完全去除 fading 問題。應用 Solar Cell Devices 作為 Current Mode Detector 輻射偵測，顯示在很大的輻射劑量率範圍反應線性良好。關於積體電路元件之抗輻射製程開發上，所提出的開氧化層製程技術，可有效增進 MOS 元件之抗輻射特性。

參考文獻

- [1] Glenn F. Knoll, Radiation Detection and measurement, 3rd ed., John Wiley, p.399, p.751, 1999.
- [2] A. Holmes-Siedle, Nucl. Instr. and Methods, 121, p.169 (1974) .
- [3] L.S. August, IEEE NS-29 (6) ,p.2000 (1982) .
- [4] A. Holmes-Siedle and L. Adam, Radiat. Phys. Chem, 28, p.235 (1986) .
- [5] Kelleher, M.O. Sullivan, J. Ryan, B. Neil, and W. Lane, IEEE NS-39 (6) , p.342 (1992) .
- [6] K.S. Chang-Liao and J.G. Hwu, IEE proceedings-G, 139 (3) , p.319 (1992) .
- [7] K.S. Chang-Liao and J.G. Hwu, J. of Vacu. Sci. & Tech. B, 10 (2) , p.744 (1992) .
- [8] K.S. Chang-Liao and C.J. Huang, J. Vac. Sci. Tech. B, 12 (3) , p.1377 (1994) .
- [9] K.S. Chang-Liao and T.L.Wu, J. Nucl. Sci. Tech., 34 (10) , p.992 (1997) .
- [10] A. Kelleher, et al., IEEE NS-42, p.48 (1995) .
- [11] D.A. Neamen, IEEE NS-31 (6) , p.1439 (1984) .
- [12] A.G. Sabnis, IEEE NS-30 (6) , p.4094 (1983) .
- [13] M.L. Reed and J.D. Plummer, IEEE NS-33 (6) , p.1198 (1986) .
- [14] K.S. Chang-Liao and P.J. Tzeng, Jpn J. Appl. Phys.,36,p.L1580 (1997) .
- [15] M.G. Buehler et al, IEEE NS-40,p.1442 (1993) .
- [16] H. Hwang et al., Appl. Phys. Lett. 57, p.1010 (1990).
- [17] W. Ting et al., Appl. Phys. Lett. 57, p.2808 (1990).
- [18] W. Ting et al., IEEE EDL-12, p.416 (1991).
- [19] Ahn et al., IEEE EDL-13, p.117(1991).
- [20] Z. Liu et al., IEEE EDL-13, p.402 (1992).
- [21] Y. Okada et al., Appl. Phys. Lett. 63, p.194 (1993).
- [22] K.S. Chang-Liao and T.Y. Lan, Jpn. J. Appl. Phys.,35,p.L968 (1996) .
- [23] K.S. Chang-Liao and L.C. Chen, Jpn. J. Appl. Phys.,36,p.L604 (1997) .
- [24] K.S. Chang-Liao and L.C. Chen, J. Vac. Sci. & Tech. B15 (4) ,p.942 (1997) .
- [25] G. Prevost, et al, IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 43, No.3, p.858, 1996.
- [26] S.M. Sze, "Semiconductor devices: physics and technology", John Wiley, pp.218-220, pp.313-325, 2002.
- [27] R. B. Klein, et al, IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 37(6), p.26, 1990.

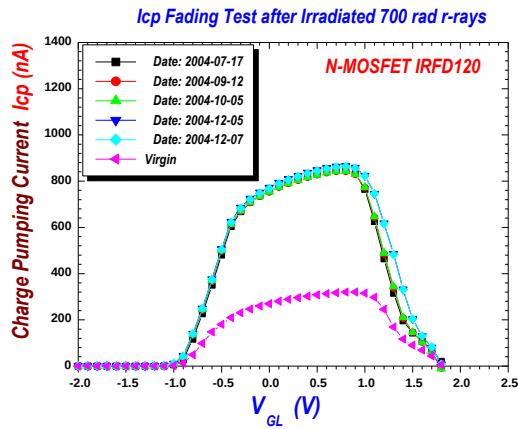


圖1 Power n-MOSFET於輻射照射後之Fading Test驗證反應圖，總照射劑量為700 rad，並經長間重覆測試 I_{CP} ，證明其 I_{CPmax} 值及特性曲線均未減低及變化

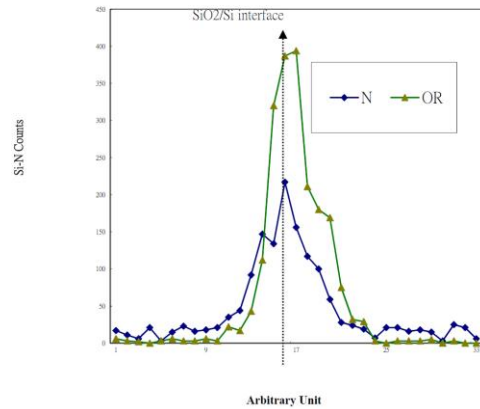


圖4 以 SIMS 分析樣品 N 及 OR 在閘介電層中的氮原子分布

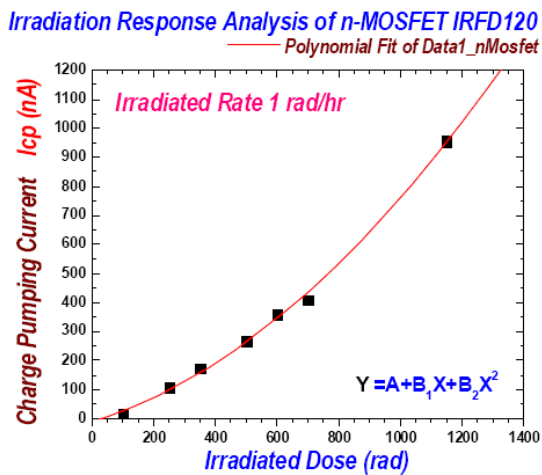


圖2 Charge Pumping Current 與輻射 Total Dose 之關係曲線

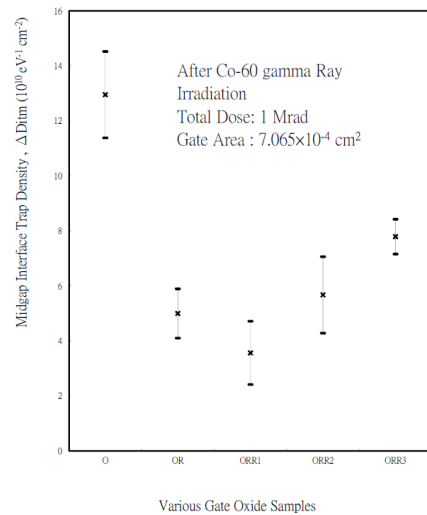


圖5 O、OR、ORR1、ORR2、ORR3 元件經鈷-60 照射後之 ΔD_{itm} 值

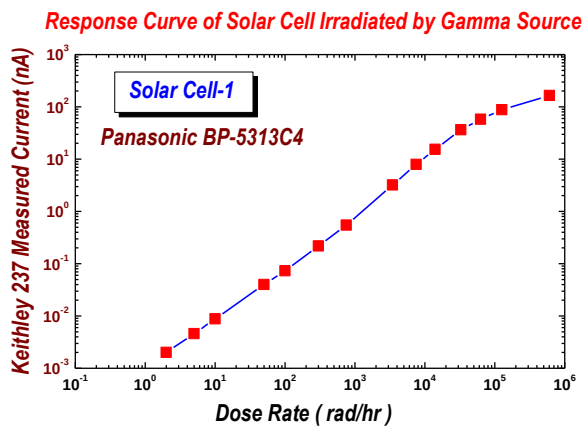


圖3 將 Sloar Cell-1 加馬輻射照射實驗一、二及三之數據整合產生之電流與輻射照射強度之特性反應圖，可偵測範圍達 $1 \sim 10^6$ rad/hr，驗證可作為高強度輻射偵檢器

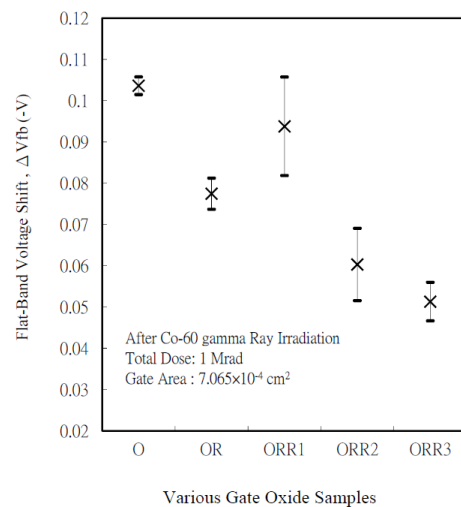


圖6 O、OR、ORR1、ORR2、ORR3 元件經鈷-60 照射後之 ΔV_{fb} 值

三度空間數位乳房斷層攝影檢查與二度空間標準乳房 X 光攝影檢查之劑量比較

Comparison of dose in 3D digital breast tomosynthesis and 2D

計畫編號：105-2623-E-006-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王建國

e-mail：radwangck@gmail.com

計畫參與人員：陳佳惠

執行單位：國立成功大學醫學系放射線學科

摘要

乳腺癌是目前在全世界婦女中最常見的癌症，成功地治療這種癌症，早期發現和診斷可靠是關鍵。乳房 X 光攝影是最常見檢查工具之一，而乳房放射線暴露劑量的估計是攝影品質控制的一個重要議題。在我們的研究中，兩種不同的成像乳房 X 光攝影被納入研究評估：乳房全照野 X 光攝影和數位乳房斷層合成系統。乳房全照野 X 光攝影是利用 X 光照射，輔以乳房壓迫的專業技術，以不同角度照射，並得到高解析度、高對比度的乳房二度空間影像；數位乳房斷層合成系統則是數位 X 光斷層從多個不同的角度拍攝，形成三度空間的影像，再使用電腦綜合與操控這些影像，可從任何角度一層一層地看清這些影像。本研究則比較此二種乳房攝影儀器輻射暴露劑量。預計將研究其診斷效率和輻射劑量評估成為臨床例行檢查時參考。

關鍵詞：全照野數位乳房攝影，數位乳房斷層合成技術，表面劑量

Abstract

Breast cancer is currently the most common cancer in women worldwide. To successfully treat this cancer you first need to find it. Early detection and reliable diagnosis are the keys to survival. The estimation of breast dose is an important part of mammographic quality control for x-ray mammography.

In our study, two different imaging geometries have been considered: a geometry with full-field irradiation of the breast and a breast tomosynthesis system. Comparison of breast doses for full-field mammography and digital tomosynthesis estimated from breast phantoms.

Our practice will have proven its diagnostic efficiency and dose evaluation of digital breast tomosynthesis to become a high potential routine screening setting in the near future.

Keywords: Digital breast tomosynthesis (DBT), full-field digital mammography (FFDM), surface dose

I. 前言

全照野數位乳房攝影廣泛的被運用在乳癌的診斷，近來數位乳房斷層合成技術也引入臨床並且使用在一般人的乳癌篩檢。因此，兩種的成像方式對於病人所產

生的輻射劑量是最受注目的。

II. 主要內容

針對兩種不同的成像技術比較不同深度之乳房輻射劑量以及兩種成像技術下的影像品質。首先，使用自動暴露裝置選擇最佳的管電壓，管電流，過濾器組合作為其劑量測量之暴露參考參數。第二，曝光期間影像擷取時於假體不同深度放置 OSLD 計讀晶片測量其輻射劑量。第三，利用假體視覺評估的辨識分數來計算做影像診斷價值的比較。

III. 結果與討論

數位乳房斷層合成技術 (Digital Breast Tomosynthesis) 所測得之單次輻射劑量比乳房全照野 X 光攝影 (Full-field Digital Mammography) 高 (表一)

表一：乳房假體以自動暴露控制模式照射之吸收劑量與有效劑量

		AGD(μ Gy)	Equivalent dose (μ Sv)	ESD(μ Gy)	Equivalent dose (μ Sv)
Tomo	CC	1950	234	6370	764.4
	MLO	1950	234	6370	764.4
Mammo	CC	990	118.8	3510	421.2
	MLO	960	115.2	3470	416.4

Equivalent dose: $H=DQN$; $Q=1$; $N=0.12$ (ICRP 103)

Tomo: 數位式乳房斷層合成技術; Mammo: 乳房全照野 X 光攝影;

CC: 頭尾向 Craniocaudal view; MLO: 斜位向 Mediolateral Oblique view

數位乳房斷層合成技術 (Digital Breast Tomosynthesis) 及乳房全照野 X 光攝影 (Full-field Digital Mammography)，位同深度下的劑量差異，結果顯示其數位乳房斷層合成技術表面的劑量也較高 (表二)

表二：比較兩種攝影模式同一深度同一晶片位置之 OSLD 計讀劑量

模式	深度	OSLD 位置	測得劑量 (μ Sv)
Tomo	0mm	表面1	2384.957
	0mm	表面1	2137.822
Mammo	0mm	表面1	1363.32
	0mm	表面1	1380.023

Tomo: 數位式乳房斷層合成技術; Mammo: 乳房全照野 X 光攝影;

CC: Craniocaudal view; MLO: Mediolateral Oblique view

IV. 結論

數位乳房斷層合成技術雖單次劑量比乳房全照野 X 光攝影高，但比起篩檢時需要照射頭尾向和斜位向才有可能正確找到病灶的乳房全照野 X 光攝影，數位乳房斷層合成技術只需照射頭尾向或斜位向其中一種便可以

三度空間從緻密的乳腺看見病灶之深度，其更有診斷價值。

參考文獻

- [1] Ciatto S et al 2013 Integration of 3D digital mammography with tomosynthesis for populationbreastcancer screening (STORM): a prospective comparison study Lancet Oncol. 14 583 – 9
- [2] Rose S L, Tidwell A L, Bujnoch L J, Kushwaha A C, Nordmann A S and Sexton R Jr 2013 Implementation of breast tomosynthesis in a routine screening practice: an observational study AJR.Am J.Roentgenol. 200 1401 – 8
- [3] Skaane P et al 2013 Comparison of digital mammography alone and digital mammography plus tomosynthesis in a population-based screening program Radiology 267 47 – 56
- [4] Chevalier M, Morán P, Ten JI, Fernández Soto JM, Cepeda T, Vañó E. Patient dose in digital mammography. Med Phys 2004;31:2471 – 9.
- [5] Morán P, Chevalier M, Ten JI, Fernández Soto JM, Vañó E. A survey of patient dose and clinical factors in a full-field digital mammography system. Radiat Prot Dosimetry 2005;114:375 – 9.

核醫用全身電腦斷層輻射劑量之風險評估 Estimation radiation risk of CT dose in whole body PET/CT scan

計畫編號：MOST 105-2623-E-075 -002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊邦宏

e-mail：bhyang@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：胡聖嬌、吳念芸

執行單位：臺北榮民總醫院國家多目標醫用迴旋加速器中心

摘要

疊代影像重建法(iterative reconstruction, IR)為降低輻射劑量策略中最有效的方法之一，使得電腦斷層(computed tomography, CT)取像時可使用低劑量造影參數，達到更好的影像品質，然而，目前臨床上還沒有研究使用 CT 疊代影像重建法應用於正子射出/電腦斷層掃描儀(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)衰減校正及輻射劑量的使用評估，更沒有搭載疊代影像重建法的劑量最佳化報告。再者，PET/CT 影像大多進行大範圍的全身掃描(範圍從頭部至大腿)，但電腦斷層掃描劑量指標(computer tomography dose index, CTDI)卻無法對一次性CT全身掃描輻射劑量進行評估，此法也並無考慮個體差異性，導致其輻射劑量值的準確性有待商榷。

因此，本研究目的為使用 CT 疊代影像重建技術應用於 PET/CT 全身造影，尋求同時兼顧影像品質及劑量最低化的最佳造影參數，並設計核醫用全身電腦斷層輻射劑量評估方法，進而建立國人低電流全身電腦斷層輻射劑量與輻射風險評估之報告。

低電流電腦斷層應用在核醫全身影像衰減校正的多面向討論，本計畫分三部分執行：1. 寄送 64 份問卷至全台核子醫學部(科)調查核醫用 CT 造影參數，一共回收 22 份，此外，回溯性收集 523 位接受全身掃描的患者進行比較，發現他院核醫部(科)所使用的平均 mA 比本院高 38.7%，有效劑量比本院高 9.7%；2. 使用擬人心臟假體 (Anthropomorphic Cardio Phantom, QRM) 進行 PET/CT 影像擷取，並使用五組低劑量參數的 CT 掃描，並搭配一系列不同比重的濾波反投影重建法(filter back projection, FBP)和 IR 影像重建方法進行影像重組，結果顯示若是需要滿足 PET 之解剖對位功能，管電流最低可使用 40 mA，同時搭配 ASiR70%進行重組，此時所產生的輻射劑量為 0.92 mSv，與標準參數相比，將能降低 66.7%的劑量；3. 建立核醫用 CT 全身造影之劑量評估法，使用擬人化假體進行臨床造影參數掃描，並採用 3 種方法進行輻射劑量評估，分別為(1) 臨床所廣泛使用的 CTDI、(2) 商業化 CT 造影輻射劑量計算軟體 CT-Expo、(3) 熱發光劑量計(Thermoluminescent detectors, TLD)量測，TLD 所測得的輻射劑量值為金標準值(gold standard)，進而探討全身掃描所獲得的 DLP 值與上述輻射劑量之關係，並訂定轉換因子，0.018 即為本研究所制定全身掃描之 K 值。

關鍵字：正子電腦斷層攝影、疊代影像法、輻射劑量。

Abstract

Positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) is an essential diagnostic tool around the world. CT scans increase more radiation dose to patients. Iterative reconstruction (IR) is a most effective method of reducing radiation dose in CT scans. However, so far, there is not any study of using IR on CT images for attenuation correction and estimation of radiation dose in PET/CT scans. In the PET/CT scan, CT images are usually acquired from the head to the thigh, and there is no conversion factor for calculating radiation dose of whole body CT scans. In addition, computed tomography dose index (CTDI) is a standard measurement of radiation dose in CT scans, but it neglects individual differences such as age, patient size, gender and radiosensitivity of organs and tissues exposed to radiation, resulting in the inaccuracy values of radiation dose measured by CTDI method.

Therefore, The purpose of this study is to validate the feasibility of low dose CT protocols with IR technique in PET/CT scans and design the practical method for estimating radiation dose of whole body CT scan, leading to establishment of diagnostic reference level (DRL) for low dose CT scans and radiation risk in Taiwan.

There were three parts in this study. First, we sent questionnaires of CT parameters in PET/CT scan to 64 Department of Nuclear Medicine in Taiwan and received 22 back. Besides, we retrospectively recruited 523 patients underwent whole body PET/CT scan and compared with other department. The results showed average mA and effective dose in other hospitals was increased 38.7% and 9.7% than our hospital. Second, PET/CT images with five low dose protocols were acquired through Anthropomorphic Cardio Phantom (QRM) and CT images reconstructed by different weighted filter back projection (FBP) and IR. The results showed $CT_{ASiR90(40mA)}$ and $CT_{ASiR100(40mA)}$ could be used not only for attenuation correction but also anatomic localization, and dose reduction compared to CT_{120mA} was 66.7 %. Third, Rando phantom was scanned by routine scanning protocols in order to design the method for estimating radiation dose of whole body CT scan. There are three methods of radiation dose measurement used in this study, including CTDI, CT-Expo software and thermoluminescent detectors (TLD). The radiation dose measured by TLD is gold standard, compared with other measurements in order to establish

conversion factors for whole body CT scans. Base on measurements, K factor for whole body CT scan is 0.018.

Keywords: PET/CT scan, iterative reconstruction, radiation dose

I. 前言

正子射出/電腦斷層掃描儀(positron emission tomography/computed tomography, PET/CT)已成為不可或缺或診斷工具，但是電腦斷層卻會導致過多的醫療輻射曝露。近年來，低劑量 CT 造影的意識抬頭，大量的研究論文證實低劑量 CT 造影的可行性，然而，濾波反投影重建法(filter back projection, FBP)對於低劑量 CT 影像進行重組時，會導致較多的雜訊(noise)和容易有假影(artifacts)的產生，這將會導致診斷資訊的不正確。隨著科技進步，電腦運算能力日漸強大，疊代影像重建法(iterative reconstruction, IR)已成功地應用於 CT 影像，每家儀器公司也各自發展與改良不同的程式來進行疊代影像計算，例如：GE 公司所發展的 IR 影像重建法為自適應統計疊代重建技術(Adaptive Statistical Iterative Reconstruction, ASiR)，此方法可混合不同權重比的 FBP 及 IR 兩種重建法同時使用。透過大量的文獻報告得知使用疊代法有較高的影像解析度(spatial resolution)及較少的影像雜訊，因此，取像時可使用更低劑量的參數，達到較好的影像品質，然而，目前國際上，IR 影像重建法只有廣泛地應用在診斷 CT 造影，並沒有任何研究使用 CT 疊代影像重建法應用於 PET/CT 衰減校正及輻射劑量評估，更沒有搭載 IR 影像重建法的劑量最佳化報告，因此，本研究將探討 CT 疊代影像重建法應用於 PET/CT 造影的可行性與劑量最佳化評估。

關於 CT 輻射劑量的測量，電腦斷層掃描劑量指標(computer tomography dose index, CTDI)是用來量化 CT 造成輻射劑量的標準方法之一，體積電腦斷層劑量指標(volume computed tomography dose index, CTDI_{vol})是結合多張掃描寬度(multislice)的平均劑量，雖然 CTDI_{vol}已經可以表示照射體積內的平均劑量，然而 CT 造影是連續掃描一個長度的範圍，因此，將掃描長度納入考量後，便有了劑量長度乘積(dose length product, DLP)。近年來多切面電腦斷層的切面排數不斷增多，使得射束寬度(beam width)不斷遞增，造成主射束(primary beam)範圍增加，散射輻射(scattering radiation)變廣，然而，CTDI_{vol}的原理是架構在使用直徑 16 公分及 32 公分的模擬頭部與軀幹的劑量假體下，因此，使用標準 CTDI 假體和游離腔將無法量測所有的劑量，造成劑量曲線(dose profile)積分的不完整，這樣的量測結果將會使得劑量比實際值低。此外，k factor 是根據標準人體型(standard-sized patient)，也就是 70 公斤體重的體型進行蒙地卡羅計算，模擬人體不同部位將所接受不同的輻射劑量而給予不同的 k factor，並無考慮病人的年紀、體型、性別、以及人體內各個組織器官的衰減程度不同。不僅如此，對於診斷用 CT 而言，大多是特定區段的檢查，只要將機器提供的 DLP 值根據不同的檢查部位乘上不同的有效劑量轉換因子(k)，即可得知該 CT 造影所產生的輻射劑量，但是，常規正子掃描檢查部位為全身輻射掃描，有別於上表所述，因此，核醫用 CT 有別於診斷

用 CT 的頭、胸、腹之劑量報告，且目前國際上也並無一次性 CT 全身掃描輻射劑量評估系統的標準規範，因此，本研究目的為使用 CT 疊代影像重建技術應用於 PET/CT 全身造影，尋求同時兼顧影像品質及劑量最低化的最佳造影參數，並設計核醫用全身電腦斷層輻射劑量評估方法，進而建立國人低電流全身電腦斷層輻射劑量與輻射風險評估之報告。

II. 主要內容

本計畫分三部分執行：

1. 調查台灣核醫用 CT 造影掃描參數；
 2. 建立搭載疊代影像重建法之 PET/CT 最佳造影參數；
 3. 建立核醫用 CT 全身造影之劑量評估方法。
- 1. 調查台灣核醫用 CT 造影掃描參數，建立核醫用電腦斷層劑量參考水平(Diagnostic reference level, DRL)**

國內針對核醫用 CT 造影並無一套標準規範，再加上各醫院機型不同，臨床需求不同而有各自的造影條件，為了解國內核醫用 CT 造影的相關參數條件，設計一份造影參數調查表，分析國內核醫用電腦斷層之劑量範圍。

調查表將分為兩部分：

- (1) 基本資料：醫療院所名稱、調查日期、PET/CT 造影儀廠牌、型號及購置日期。
- (2) 全身 PET/CT 掃描參數：包含放射性核種種類、活度(mCi)、管電流(mA)、管電壓(kVp)、管球旋轉時間(ms)、管電流時間乘積(mAs)、自動管電流調控(Automatic exposure control, AEC ON/OFF)、切面厚度(mm)、掃描範圍、螺距(pitch)、儀器顯示電腦斷層劑量指標(CTDI_{vol})(mGy)、儀器顯示劑量長度乘積(DLP)(mGy*cm)。

2. 建立搭載疊代影像重建法之 PET/CT 最佳造影參數

本實驗使用 GE 公司所生產的 PET/CT (Discovery PET/CT VCT)造影儀及擬人心臟假體(Anthropomorphic Cardio Phantom, QRM)進行 PET/CT 造影與影像品質評估。CT 造影的部分，使用加裝上組織等效擴充環的中體型假體模擬東方人的平均身形，搭配國內外造影參數調查結果，進行五組低劑量參數的 CT 掃描，管電壓為 120 kV，管電流為為：80 mA、60 mA、40 mA、20 mA 及 10 mA，雖然此台 PET/CT 搭載 IR 影像重建法，但仍保有傳統 FBP 重建法的功能，因此，可選擇不同的權重比混合 FBP 和 IR 兩種重建法對 CT 影像進行重組(weighted ASiR/FBP)。因此，設計一系列不同比重的影像重建方法搭配低劑量掃描參數(如表 1)，每組 CT 影像將進行影像評估及對 PET 影像進行衰減校正。

表 1. CT 造影參數及影像重組條件

kVp	120		120		120		120		120	
mA	80		60		40		20		10	
Reconstruction	FBP	ASiR	FBP	ASiR	FBP	ASiR	FBP	ASiR	FBP	ASiR
Weight (%)	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
	90	10	90	10	90	10	90	10	90	10
	70	30	70	30	70	30	70	30	70	30
	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	30	70	30	70	30	70	30	70	30	70
	10	90	10	90	10	90	10	90	10	90
	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100

關於 PET 造影，我們將濃度為 2.15 kBq/ml 的 ^{18}F -FDG(Fludeoxyglucose) 置入水假體做為背景值(background) (圖 1A)，水假體內將放置四支試管，裡面分別為：a. 空氣、b. 鈣化物質(hydroxyapatite, HA; 200mg/cm³) 用來模擬骨頭等效組織、c. ^{18}F -FDG 水溶液(8.6 kBq/ml)，與背景質濃度比 4:1、d. ^{18}F -FDG 水溶液(17.2 kBq/ml)(圖 1B)，與背景質濃度比 8:1，目的在於模擬不同組織的密度及不同濃度的 hot spot。接著進行(1) PET 射出式造影 (emission scan)，約收集一個床段(bed)，收集時間為 3 分鐘；(2)將表 3 多組經過 FBP 及 IR 重組過後的低劑量 CT 影像，分別做為 PET 射出式掃描影像之衰減校正來源，在對於衰減校正後的影像，於 Background 以及 a、b、c、d 試管的位置圈選同樣大小的 ROI (region of interest)，進而進行量化集影像品質分析，比較其中差異。

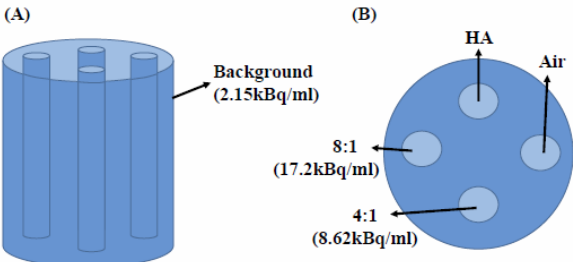


圖 1、QRM 中間的圓柱形水假體。(A)圓柱形水假體透視圖，內置四支試管，分別灌入不同密度及活度之物質。(B)圓柱形水假體俯視圖，試管內物質分別為：a. 空氣，b. 鈣化物質(hydroxyapatite, HA; 200mg/cm³)，c. ^{18}F -FDG 水溶液(2.15kBq/ml)，d. ^{18}F -FDG 水溶液(17.2kBq/ml)。

3. 建立核醫用 CT 全身造影之劑量評估方法
由於常規正子掃描檢查部位為全身射出掃描，其核醫用電腦斷層掃描也必須與正子掃描相同解剖位置以供衰減校正使用，但因核醫用電腦斷層掃描儀為全身劑量報告也有別於診斷用電腦斷層掃描儀之頭、胸、腹部劑量轉換報告，因此本實驗輻射劑量評估的部分使用擬人化假體(Rando Alderson Phantom; Radiology Support Devices, Long Beach, Calif)來模擬真實病患。並採用 3 種方法進行輻射劑量評估，分別為(1) 臨床所廣泛使用的 CTDI、(2) 商業化 CT 造影輻射劑量計算軟體 CT-Expo、(3) 熱發光劑量計 (Thermoluminescent detectors, TLD)，TLD 量測法為最直接、最準確的方法之一，因此，TLD 所測得的輻射劑量值為金標準值(gold standard)，進而探討全身掃描所獲得的 DLP 值與上述輻射劑量之關係，訂定轉換因子，最後亦可與文獻及國際上的輻射劑量進行比較，觀察國內所使用的造影參數是

否適當。

III. 結果與討論

1. 調查台灣核醫用 CT 造影掃描參數

本團隊寄送問卷至全台 64 間核子醫學部(科)，回收 22 份，其中有 11 間核醫部(科)有設置 PET/CT 造影儀，8 台來自 General Electric 公司，3 台來自 Siemens 公司，一共獲得 60 位病患造影資料。各家醫院所使用的造影條件略有不同，管電壓為 120、130、140 kV。其中 52 位(86.7%)的病患使用管電流調控技術(AEC)以降低輻射劑量，範圍為 15-300 mA。我們將有使用管電流調控技術的病患資料代入 CT-Expo 軟體以計算輻射劑量。

同時，我們篩選出台北榮總正子中心 523 位接受全身 PET/CT 掃描之成年病患資料，以 MATLAB 撰寫程式，得出每組 CT 影像每個切面 mA 值之平均值，進一步將這些資料代入 CT-Expo 軟體計算輻射劑量並和其他核醫部(科)結果比較(表 2)。

表 2、問卷與本院資料比較

		身高	體重	BMI	掃描長度(mm)	平均mA	CT-Expo		機器顯示		CT-Expo 計算有效 劑量
							CTDIvol	DLP	CTDIvol	DLP	
本院 病患	平均值	163.81	62.43	23.17	973.60	94.63	4.75	487.91	3.90	398.18	6.6
	標準差	8.56	12.50	3.74	67.63	16.10	0.81	92.75	0.65	75.32	1.32
問卷 調查 結果	平均值	160.14	62.92	24.54	1003.02	154.33	7.78	815.46	4.66	486.23	7.24
	標準差	8.18	13.20	4.05	70.58	60.08	1.74	183.26	1.51	150.48	2.69

2. 建立搭載疊代影像重建法之 PET/CT 最佳造影參數

(1) PET 影像衰減校正評估

第一部分為驗證低劑量 CT 是否能夠與 PET 影像進行衰減校正，將 CTFBP_(120mA)、CTFBP_(80mA)、CTFBP_(60mA)、CTFBP_(40mA)、CTFBP_(20mA)、CTFBP_(10mA) 六組經傳統 FBP 重組之 CT 影像，對 PET 影像進行衰減校正，得到 6 組 PET 影像(圖 2)。由肉眼觀察，假體內無論背景值、cold spot、hot spot，皆無太大差異。

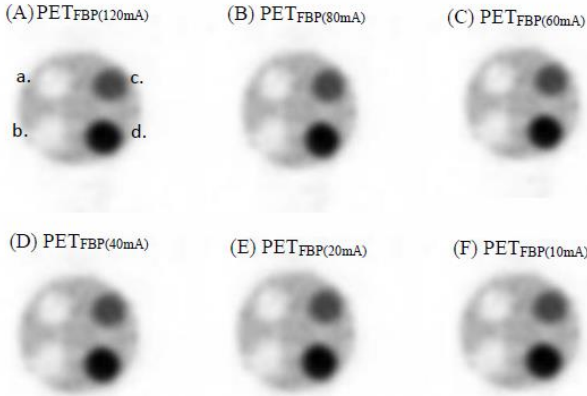


圖 2、六組不同劑量的 CT 影像經傳統 FBP 重建法組過後，對 PET 影像進行衰減校正的結果。其中 a. b. c. d. 管分別為：K₂HPO₄、Air、4:1 ^{18}F -FDG 水溶液、8:1 ^{18}F -FDG 水溶液。

此外，各組影像上，五種不同密度之物質的 ROI 量化分析結果，可發現各組不同劑量之 CT 影像，於同樣傳統 FBP 重建法之條件下，隨著劑量降低其衰減校正後的 PET 影像，無論於何種物質，其 SUV 值皆不會受到影響 (圖 3)，即代表低劑量 CT 並不會影響衰減校正之正確性。

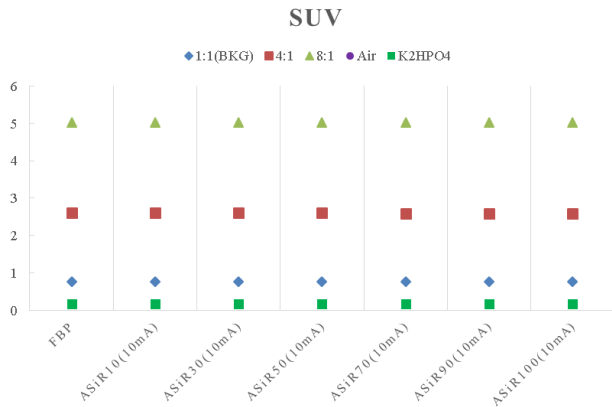


圖 3、上述七組 PET 影像中，圈選 ROI 所得的 SUV 值。結果顯示 CT 疊代重建權重並不會影響 PET 衰減校正結果。

(2)低劑量 CT 影像品質評估

進一步分析不同 IR 重建比重之低劑量 CT。首先，以 10mA 之 CT 影像為例，進行初步分析，結果顯示不同密度之物質，無論 IR 比重如何改變，訊號值皆不受影響；然而於雜訊值方面，隨著 IR 比重增加，各物質之雜訊值皆呈現下降趨勢，證實 IR 重建法能有效降低影像雜訊，提升影像品質。

接著，以臨床 PET/CT 中常使用的 $CT_{FBP(120mA)}$ 作為標準組，與各組不同劑量條件下、搭配不同重建比重之所有 CT 影像，針對雜訊值進行比較。結果顯示於 Lung、Bone 與 Soft-tissue 中，雜訊值表現與標準組相當的最低劑量組別為： $CT_{ASiR90(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR100(40mA)}$ ；另外，於 Water 中，雜訊值表現與標準組相當的最低劑量組別為： $CT_{ASiR70(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR90(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR100(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR100(20mA)}$ 。綜合上述四種不同密度物質分析之結果，得知影像品質與標準組相當的最低劑量組別，為 $CT_{ASiR70(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR90(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR100(40mA)}$ ，此三組參數。但，執行解剖定位時，影像空間解析度優劣，更被視為重要之影響因子，因此將進一步針對上三組最低參數以及標準參數之影像，進行空間解析度分析。此外，同時對 $CT_{FBP(40mA)}$ 與 $CT_{FBP(40mA)+Gaussian}$ 進行空間解析度分析，與前述四組影像之解析度比較，判斷 ASiR 重建法是否能夠確實提升影像品質。

空間解析度分析針對三組邊界，分別為：Lung-Soft tissue、Bone-Soft tissue、Water-Soft tissue，進行 MTF 評估。其結果顯示，於 $CT_{ASiR70(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR90(40mA)}$ 、 $CT_{ASiR100(40mA)}$ 三組不同參數下，於此三邊界中，隨 IR 比重增加，10% MTF 值也隨之上升，但整體而言，MTF 圖中各組曲線皆與標準組相近，即代表該影像於 PET/CT 檢查中仍然保有與標準組相同的解剖定位功能。另外，於 MTF 圖中，顯示 $CT_{FBP(40mA)}$ 加上 Gaussian filter 後，解析度下降，由於此驗證 ASiR 重建法能保有影像品質，而非只將影像經過 filter 處理後輸出(表 3)。最後，從影像上來看(圖 4)，根據前述的影像指標分析結果，雖然指出 40mA 搭配 ASiR 70-100% 之 CT 影像，其品質與標準組相近，但明顯於 ASiR 100% 的影像上可看出，當疊代重建權重增加，邊界增強效應(edge enhancement)明顯，影像同時也有蠟狀紋理(waxy texture)產生，然而， $CT_{ASiR70(40mA)}$ 於肉眼的定位上，幾乎與 $CT_{FBP(120mA)}$ 相似，

因此，推論 $CT_{FBP(40mA)}$ 為可作與標準組相當之解剖定位功能的最低劑量參數。

表 3、10% MTF 值，代表最低的解析能力

10% MTF (lp/mm)	Soft tissue – Lung	Soft tissue – Bone	Soft tissue – Water
$CT_{FBP(120mA)}$	1.41	3.01	0.81
$CT_{FBP(40mA)}$	1.37	3	0.63
$CT_{ASiR70(40mA)}$	1.46	3.01	0.64
$CT_{ASiR90(40mA)}$	1.49	3.01	0.75
$CT_{ASiR100(40mA)}$	1.5	3.01	0.87
$CT_{FBP(40mA)+Gaussian}$	0.86	2.84	0.47

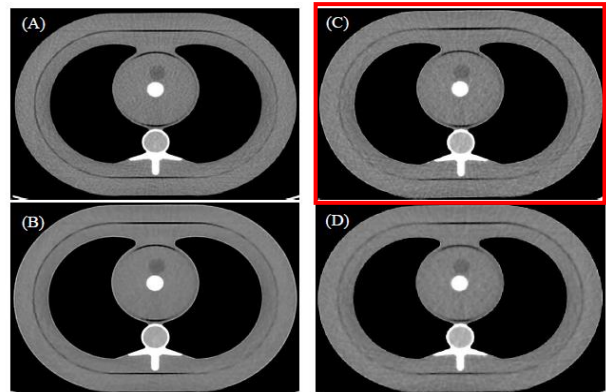


圖 4、比較不同條件下之 CT 影像。分別為(A) $CT_{FBP(120mA)}$ 、(B) $CT_{ASiR100(120mA)}$ 、(C) $CT_{ASiR70(40mA)}$ 、(D) $CT_{ASiR100(400mA)}$ 。影像上顯示 $CT_{ASiR70(40mA)}$ 之影像於肉眼對位上，可與標準組匹配。

3. 建立核醫用 CT 全身造影之劑量評估方法

將 131 顆 TLD 置入於擬人化假體，搭配台北榮民總醫院臨床成人造影條件進行掃描，一般而言，為了符合合理抑低(ALARA)原則，臨床使用 AEC 技術降低病人所接受的輻射劑量，在假體試驗中，我們增加一組未使用 AEC 技術的掃描，探討 AEC 技術的重要性，之後，計讀各部位 TLD 測得之吸收劑量(mGy)，進一步乘以組織加權因數(W_T)，最後加總即為全身有效劑量(mSv)，此結果為 gold standard。此外，以 CT-Expo 軟體代入造影參數，可得到 $CTDI_{vol}$ 、DLP 及吸收劑量，即可比較兩者之結果。

從圖 5 發現，AEC 技術可有效的降低病人所需接受的輻射劑量，但在下腹部和骨盆腔的部位，使用 AEC 與否的差異性並不大，接著，將擬人假體的造影條件代入 CT-Expo 軟體計算，可獲得各器官之吸收劑量，圖 6 為 TLD 和 CT-Expo 在 AEC 技術使用與否情況下各個器官的吸收劑量，比較 TLD 計讀結果及 CT-Expo 所獲得的全身劑量，可發現在使用 AEC 技術情況下，TLD 計讀值為男性 4.78 mSv、女性 4.79 mSv，CT-Expo 的數值為男性 4.0 mSv、女性 5.0 mSv，兩種量測方式的結果非常的相近。

有效劑量為 DLP 和 K 值的乘積，我們已從 TLD 計讀值可得知全身及各器官之有效劑量及 DLP，因此將 scout view 影像切割成頭部、頸部、胸部、腹部、骨盆、大腿，得知各部位之長度，經過計算即可求得各部位的 K 值(表 14)，全身的 K 值是將全身有效劑量直接除以 DLP，而全身*則是將各部位的長度分率乘以該部位組織劑量相加的總和計算。對於核醫臨床而言，幾乎都是全

身掃描並且使用 AEC 技術，因此，本研究使用 0.018 作為全身掃描之 K 值。

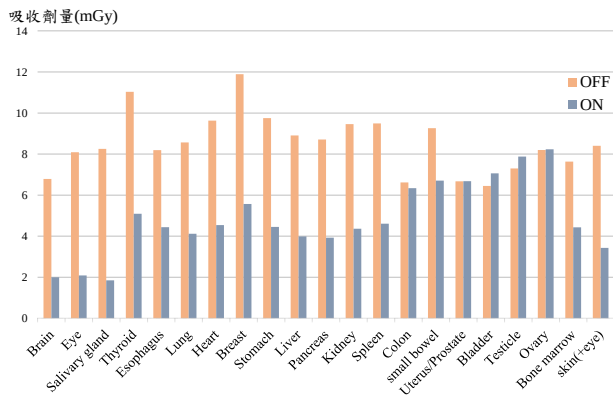


圖 5、TLD 測得之各器官吸收劑量

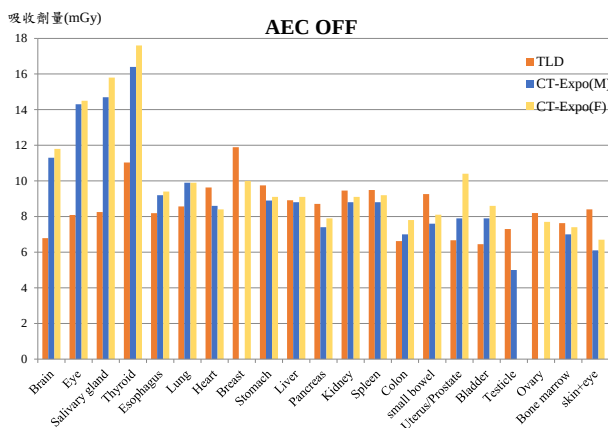


圖 6、TLD 和 CT-Expo 在 AEC 技術使用與否情況下各器官的吸收劑量

表 4、各器官及全身之 K 值

部位	掃描長度(cm)	長度分率	包含器官	K 值	
				AEC OFF	AEC ON
頭部	13	0.14	Brain, Eye	0.0010	0.0006
頸部	12	0.13	Salivary gland, Thyroid, Esophagus	0.0141	0.0124
胸部	26	0.28	Lung, Heart, Breast	0.0194	0.0171
腹部	18	0.19	Stomach, Liver, Pancreas, Kidney, Spleen, Colon(upper), Small bowel	0.0204	0.0177
骨盆	20	0.21	Uterus/Prostate, Bladder, Testicle, Ovary, Colon(lower)	0.0168	0.0320
大腿	5	0.05	-		
全身	94	1		0.0169	0.0188
全身*	94	1		0.0148	0.0166

全身*: $\sum$ [各部位的長度分率 $\times$ (該部位包含器官組織劑量相加)]

IV. 結論

經由擬人化心臟假體進行 PET/CT 影像擷取，比較 FBP 和 IR 重建法進行影像重組，結果顯示需要滿足 PET 之解剖對位功能，其管電流最低可使用 40 mA，同時搭配 ASiR70%進行重組，此時所產生的輻射劑量為 0.92 mSv，與標準參數相比，將能降低 66.7%的劑量。並從至全台核子醫學部(科)調查核醫用 CT 造影參數問卷得知，與本院全身掃描的患者資料比較，他院核醫部(科)所使用的平均 mA 比本院高 38.7%，有效劑量比本院高 9.7%。此外，透過 TLD 所測得的輻射劑量值為金標準

值(gold standard)，訂定 CT 劑量轉換因子 K 為 0.018。本研究所計算出全身掃描之 K 值可以提供其他醫院醫療曝露品保作業之參考，將能夠有效降低國人醫療輻射曝露累積劑量。為避免國人接受不必要之醫療輻射曝露，建議需要建立國人核醫用電腦斷層劑量參考水平，提供參考，透過本研究之成果，除了可以提供國人計算全身電腦斷層之全身劑量，並且告訴各家醫院可以降低管電流劑量來有效降低醫療曝露劑量。

參考文獻

- [1] Kamel E, Hany TF, Burger C, Treyer V, Lonn AH, von Schulthess GK, Buck A. CT vs ^{68}Ge attenuation correction in a combined PET/CT system: evaluation of the effect of lowering the CT tube current. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2002; 29:346–350.
- [2] Wu TH, Huang YH, Lee JJ, Wang SY, Wang SC, Su CT, et al. Radiation exposure during transmission measurements: comparison between CT- and germanium-based techniques with a current PET scanner. Eur J Nucl Med Mol Imaging 2004; 31:38–43.
- [3] <http://www.imagewisely.org/imaging-modalities/nuclear-medicine/articles/ct-protocol-selection>
- [4] Tonkopi E, Ross AA, MacDonald A. CT dose optimization for whole-body PET/CT examinations. AJR. 2013;201:257–263.
- [5] Singh Sarabjeet, Kalra Mannudeep K., Do Synho, Thibault Jean Baptiste, Pien Homer, Connor Owen O. J., Blake Michael A. Comparison of hybrid and pure iterative reconstruction techniques with conventional filtered back projection: dose reduction potential in the abdomen. J Comput Assist Tomogr. 2012;36(3):347-53.
- [6] Manuel Patino, Jorge M. Fuentes, Sarabjeet Singh, Peter F. Hahn and Dushyant V. Sahani. Iterative Reconstruction Techniques in Abdominopelvic CT: Technical Concepts and Clinical Implementation. AJR Am J Roentgenol. 2015;205(1):W19-31.
- [7] Yoshiko Sagara, Amy K. Hara, William Pavliceck, Alvin C. Silva, Robert G. Paden and Qing Wu. Abdominal CT: Comparison of Low-Dose CT With Adaptive Statistical Iterative Reconstruction and Routine-Dose CT With Filtered Back Projection in 53 Patients. AJR Am J Roentgenol. 2010;195(3):713-9.
- [8] Lee M. Mitsumori, William P. Shuman, Janet M. Busey, Orpheus Kolokythas, Kent M. Koprowicz. Adaptive statistical iterative reconstruction versus filtered back projection in the same patient: 64 channel liver CT image quality and patient radiation dose. Eur Radiol. 2012;22(1):138-43.
- [9] Huda W, Ogden KM, Khorasani MR. Converting dose-length product to effective dose at CT. Radiology. 2008;248:995–1003.
- [10] International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Ann ICRP. 2007;37:1– 332.

採用低劑量 CT 於不同年齡病患接受 PET/CT 與 SPECT/CT 診察之可行性探討 Optimization of low-dose CT in PET/CT and SPECT/CT for patients of different ages

計畫編號：MOST 105-2623-E-277-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊晴晴

e-mail：cyang@tcust.edu.tw

計畫參與人員：詹凱傑、楊弘德、黃冠霖、余泓煊

執行單位：慈濟科技大學醫學影像暨放射科學系

摘要

目的：結合了核醫與電腦斷層(CT)的核醫雙模式造影可對具有先天性心臟疾病之兒童病患提供重要診斷資訊；然而，雙模式影像檢查導致病患劑量增加。本研究目的為評估不同年齡病人接受正子放射斷層/電腦斷層攝影(PET/CT)與單光子放射斷層/電腦斷層攝影(SPECT/CT)心臟疾病檢查的 CT 輻射劑量，並經由掃描參數最佳化設計低劑量 CT 掃描以達到病人輻射劑量合理抑低(ALARA)的目標。

方法：本實驗的第一部分使用花蓮慈濟醫學中心核醫科之 PET/CT 及 SPECT/CT，以探討依體型調整 CT 掃描參數之低劑量掃描；此外，近年來臨床逐步採用自動曝射控制(AEC)以降低病人輻射劑量，故本實驗的第二部分使用台北榮民總醫院核醫部之 PET/CT 及 SPECT/CT，以探討使用 AEC 之低劑量 CT 掃描。為探討掃描參數、病患體型、輻射劑量對影像品質所產生之影響，我們實驗測試掃描參數對四種年齡擬人假體 CT 影像品質，假體模擬有 1 歲、5 歲、10 歲及成人體型；實驗數據以多變異數分析法進行之分析，並依照回歸模型訂定具備臨床診斷影像品質之低劑量 CT 掃描。

結果：本實驗所使用之 4 台核醫雙模式掃描儀中，有 3 台之 CT 照野範圍需與核醫影像之照野範圍一致，導致 CT 掃描時將有部分非感興趣器官接受到輻射照射。在第一部分結果發現，如果採用本研究建議之最佳化低劑量 CT 掃描，PET/CT 影像可具常規成人檢查之品質下，並對 10 歲、5 歲與 1 歲兒童病患分別達到輻射劑量 66.9%、79.0%、83.7% 下降；SPECT/CT 影像可具常規成人檢查之品質，並對 10 歲、5 歲與 1 歲兒童病患分別達到輻射劑量 77.3%、86.9%、90.2% 下降。在第二部分結果發現，如果採用本研究建議搭配 AEC 技術的低劑量 CT 掃描，PET/CT 影像可具備常規成人檢查之品質下，並對 10 歲、5 歲與 1 歲兒童病患分別達到輻射劑量 32.2%、63.7%、79.2% 下降；SPECT/CT 影像可具備常規成人檢查之品質下，並對 10 歲、5 歲與 1 歲兒童病患分別達到輻射劑量 8.4%、51.5%、72.7% 下降。

結論：本實驗探討了不同年齡病患接受 PET/CT 與 SPECT/CT 心臟疾病檢查的 CT 輻射劑量，並依照臨床操作情形分別對不使用與使用 AEC 技術的核醫部門進行低劑量 CT 掃描的探討與最佳化。本研究結果可提供臨床核醫部門對不同年齡病患進行雙模式影像檢查時，在獲得具診斷價值的影像品質前提下，合理抑低病人的輻射劑量。

關鍵詞：低劑量電腦斷層、雙模式影像、自動曝射控制、多變異數分析法

Abstract

Purpose: This study aimed to optimize CT scan protocols to reduce radiation dose as low as reasonable achievable (ALARA) for patients of difference ages undergoing cardiac PET/CT and SPECT/CT.

Methods: In the first part of this study, low-dose CT protocols using constant tube current during scanning were investigated for hybrid systems in Hualien Tzi-Chi Hospital. Recently, there has been increasing interest to optimize CT examinations with the use of automatic exposure control (AEC) technique. In the second part of this study, CT examinations were optimized with the use of AEC technique for hybrid systems in Taipei Veterans General Hospital. Cardiac CT images were acquired using 4 anthropomorphic phantoms representative of adult, 10-, 5-, and 1-year-old children. Multiple linear regression methods were used to analyze image data from anthropomorphic phantom studies to investigate the effects of body size and scan parameters on CT radiation dose and image quality in cardiac PET/CT and SPECT/CT scans.

Results: It was found that the CT units in 3 hybrid systems use fixed scan length to meet the field of view in PET or SPECT unit per bed position. Hence, for pediatric patients, the organs outside the cardiac region would also receive radiation exposure. In the first part of this study, when the proposed low-dose protocols are used in PET/CT, 66.9%, 79.0% and 83.7% dose reduction can be achieved for anthropomorphic phantoms simulating 10-, 5- and 1-year-old children while providing sufficient diagnostic image quality. The corresponding results are 77.3%, 86.9% and 90.2% in SPECT/CT. In the second part of this study, when the proposed low-dose protocols are used in PET/CT, 32.2%, 63.7% and 79.2% dose reduction can be achieved for anthropomorphic phantoms simulating 10-, 5- and 1-year-old children while providing sufficient diagnostic image quality. The corresponding results are 8.4%, 51.5% and 72.7% in SPECT/CT.

Conclusion: This study has investigated CT doses for patients of different ages undergoing cardiac PET/CT and SPECT/CT to optimize CT scan protocols without and with the use of AEC technique. The regression models determined in this study can be used to tailor CT protocols for pediatric patients undergoing cardiac PET/CT or SPECT/CT imaging to reduce radiation exposure while

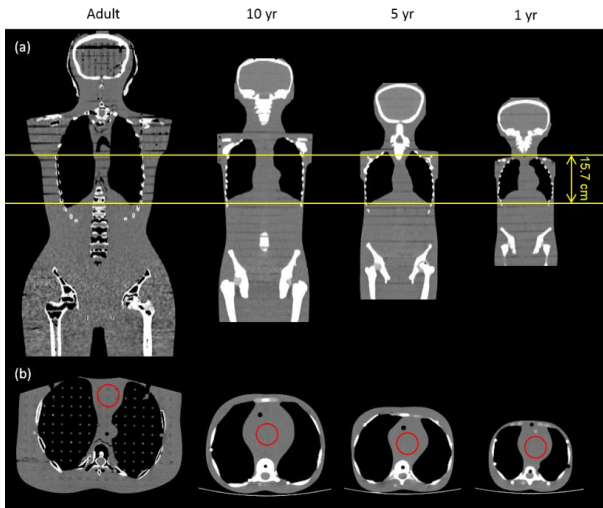


圖 1. Discovery ST 掃描四種擬人假體之重建影像，(a) FOV 掃描涵蓋範圍為 15.7 cm，(b)成人、10 歲、5 歲、1 歲擬人假體(左至右)以臨床條件掃描之橫切面重建影像，紅色圓圈為計算 CT 數值及標準偏差所使用的 ROI。

表 1. Discovery ST 掃描參數

	Tube voltage (kVp)	Tube current (mA)	Tube rotation time (s)	Pitch	Collimation (mm)	CTDI _{vol} (mGy)
1	80	10	0.5	1.75	16*0.625	0.1
2	120	10	0.5	1.75	16*0.625	0.3
3	120	40	0.5	1.75	16*0.625	1.19
4	120	80	0.5	1.75	16*0.625	2.39
5	120	120	0.5	1.75	16*0.625	3.58

providing sufficient diagnostic image quality.

Keywords: low-dose computed tomography; hybrid system; automatic exposure control; multivariate analysis

I. 前言

先天性心臟病在新生兒與孩童有較高的死亡率與發病率，如何及時診斷使病患早期接受適當治療向來受到臨床高度重視[1, 2]。利用單光子放射斷層(SPECT)搭配 ^{201}Tl 或是 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和正子放射斷層(PET)使用 ^{18}F -FDG 放射診斷藥物檢查心肌缺血與生存力已行於多年[3-6]。根據 Gaemperli 等人研究所述[7]，使用 SPECT 以 ^{201}Tl 執行心肌灌注診斷之有效劑量可達 20-30 mSv，而使用 PET 搭配 ^{18}F -FDG 則約 7 mSv 左右。結合電腦斷層(CT)與 PET 或是 SPECT 掃描儀進行雙模式診斷，已在近年成為臨床常規檢查方式，此類雙系統掃描儀因精準的定位增進診斷準確度，且 CT 影像同時可提供受檢者的衰減資訊[8-10]，然而，此種結合功能性與解剖性的檢查方式，將會增加病人的輻射劑量。與成人相比，幼兒有較高輻射敏感度與較長預期壽命，所以具有較高輻射致癌風險；因此，如何有效降低孩童輻射劑量為近年來的重點研究項目[11-16]。核醫檢查的輻射劑量通常會依照受檢者體重增減放射性同位素的使用活度，而 CT 診斷的輻射劑量則因為各醫療院所使用臨床條件之差異，導致病患接受 CT 掃描之輻射劑量範圍分布於 2.3-22.7 mGy。多篇研究指出如果能適當對掃描參數最佳化，將可以降低受檢者輻射劑量同時維持其影像品質[17, 18]。本研究目的為(1)評估不同年齡病人於 PET/CT 以及 SPECT/CT 執行心臟疾病掃描的 CT 劑量與(2)最佳化 CT 掃描臨床條件以降低輻射劑量並達到合理抑低(ALARA)

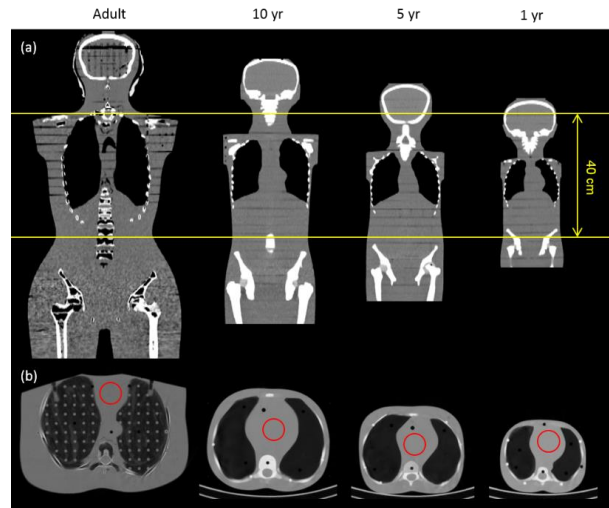


圖 2. Infinia Hawkeye 掃描四種擬人假體之重建影像，(a) FOV 掃描涵蓋範圍為 40 cm，(b)成人、10 歲、5 歲、1 歲擬人假體(左至右)以臨床條件掃描之橫切面重建影像，紅色圓圈為計算 CT 數值及標準偏差所使用的 ROI。

表 2. Infinia Hawkeye 掃描參數

	Tube voltage (kVp)	Tube current (mA)	Tube rotation time (s)	Pitch	Collimation (mm)	CTDI _{vol} (mGy)
1	120	1	23	1.92	4*5.0	0.79
2	140	1	23	1.92	4*5.0	1.19
3	120	2	30	1.92	4*5.0	2.1
4	140	2.5	23	1.92	4*5.0	2.98

之目標。本實驗分為兩大部分進行，第一部分為探討花蓮慈濟醫學中心核醫科不使用自動曝射控制(AEC)技術之雙模式掃描儀的影像品質與輻射劑量，第二部分為探討台北榮民總醫院核醫部使用 AEC 技術之雙模式掃描儀的照影品質與輻射暴露。

II. 主要內容

一、花蓮慈濟醫學中心核醫科雙模式照影

本實驗第一部分使用一台 PET/CT (Discovery ST; GE Healthcare, Waukesha, WI, USA)及一台 SPECT/CT (Infinia Hawkeye; GE Healthcare, Waukesha, WI, USA)，PET 掃描儀使用 24 列 BGO 晶體(6.3×6.3×30 mm³)，可涵蓋 15.7 cm 軸向照野(FOV)(圖 1(a))。CT 掃描儀以 16 排的多排式偵檢器(MDCT)組成，每排含 912 閃爍晶體，表 1 列出五種本研究使用 Discovery ST 於 CT 掃描條件，第五種為臨床 PET/CT 心臟掃描之預設條件，CT 影像重建矩陣為 512×512×47，體素大小為 1.367×1.367×3.75 mm³。圖 1(b)顯示 Discovery ST 使用臨床條件重建的 CT 橫向切面影像。

在 Infinia Hawkeye 部分，此 SPECT 擁有雙頭偵檢器，晶體為 3/8 英吋厚的 NaI，可涵蓋側向 54 cm 與軸向 40 cm 掃描長度，其軸向 FOV 為 40 cm(圖 2(a))。CT 掃描儀以 4 排偵檢器組成，每排含 384 閃爍晶體，表 2 列出五種本研究使用 Infinia Hawkeye 於 CT 掃描條件，第四種為臨床 SPECT/CT 心臟掃描之預設條件，CT 影像重建矩陣為 512×512×90，體素大小為 0.98×0.98×6.1 mm³。圖 1(b)顯示使用臨床條件重建的 CT 橫向切面影像。圖 2(b) 顯示 Infinia Hawkeye 使用臨床條件重建的

表 3. TLD 於 4 具擬人假體的器官分布

Organ	Adult	10 yr	5 yr	1yr
Bone	28	26	22	22
Colon	3	3	3	2
Lung	16	12	12	9
Stomach	6	5	5	3
Breast	2	2	2	2
Remaining tissue	18	18	18	16
Gonads	4	4	4	4
Bladder	3	3	3	2
Oesophagus	3	2	2	2
Liver	8	8	8	4
Thyroid	2	2	2	2
Brain	10	8	8	6
Salivary gland	4	2	2	2
Skin	14	12	12	10

CT 橫向切面影像。

本實驗使用四種擬人假體執行 CT 掃描，分別代表 1 歲、5 歲、10 歲(ATOM; CIRS, Norfolk, VA, USA)及成人(Rando; Alderson Research Laboratories, Stanford, CT, USA)體型，擬人假體包含了多種材質以模擬人體不同組織與器官，包括了腦、肺、軟組織、骨頭、脊髓以及椎間盤，假體以每片厚度為 25 mm 組成，本研究中假體使用頭部至大腿中段進行掃描(成人: 35 片;10 歲: 32 片;5 歲: 26 片;1 歲: 22 片)。表 1 與表 2 詳列 CT 掃描條件。CT 掃描後於擬人假體之心臟影像上圈選感興趣範圍(ROI)並計算平均 CT 數值與標準偏差，同時記錄控制台顯示的體積 CT 劑量指標(CTDI_{vol})與劑量長度乘積(DLP)。

二、台北榮民總醫院核醫部雙模式造影

本實驗第二部分使用一台 PET/CT (Discovery VCT; GE Healthcare, Waukesha, WI, USA)及一台 SPECT/CT (Discovery NM/CT 670; GE Healthcare, Waukesha, WI, USA)，PET 掃描儀使用 24 列 BGO 晶體(6.3×4.7×30 mm³)，可涵蓋 15.7 cm 軸向 FOV。CT 掃描儀為 64 切 MDCT 配有 40 mm (64×0.625 mm)射束寬度。CT 影像使用 0.9844 螺距(pitch)與 0.5 秒旋轉時間擷取，軸向 FOV 固定為 19.16 cm 以配合 PET 每床位截取的 FOV 長度。CT 影像重建矩陣為 512×512，體素大小為 0.98×0.98×3.75 mm³。NM/CT 670 部分，此 SPECT 擁有雙頭偵檢器，晶體為 3/8 英吋厚的 NaI，可涵蓋側向 54 cm 與軸向 40 cm 掃描長度。CT 掃描儀以 16 排 MDCT 配有 20 mm (16×1.25 mm)射束寬度組成，CT 影像使用 0.9844 螺距(pitch)與 0.5 秒旋轉時間截取，軸向 FOV 可根據病人尺寸調整故不需配合 SPECT 的視野範圍。CT 影像重建矩陣為 512×512，體素大小為 0.98×0.98×3.75 mm³。兩台掃描儀的 AEC 系統(AutomA 3D; GE Healthcare, Waukesha, WI, USA)以雜訊指標(NI)定義需要的影像品質，此定義等同量測假體影像上均質中央區域，其豪斯菲爾德單位(HU)的標準偏差。除此之外，操作者可定義 AEC 系統採用管電流的範圍(最小值至最大值)。臨床低劑量 CT 使用 AEC 的成人心臟疾病掃描參數為 120 kVp、NI = 25 及 30-210 mA，但並無定義小兒的掃描參數。

所有的擬人假體會分別於兩台掃描儀進行標準成人低劑量 CT 掃描，在 VCT 部分，小兒擬人假體以 80 kVp，NI = 10、20、30、40 及 10-550 mA 進行掃描，成人擬人假體以 120 kVp，NI = 10、20、30、40 及 10-550 mA 進行掃描。在 NM/CT 670 進行實驗部分，小兒成人擬人假體掃描條件為 80 kVp，NI = 10、20、30、40 及 10-440 mA，成人擬人假體掃描條件為 120 kVp，NI = 10、20、

30、40 及 10-440 mA，掃描結束後同時記錄 CTDI_{vol} 與 DLP。使用 AEC 技術時，CTDI_{vol} 會根據掃描時平均 mA 大小變化，醫療數位影像傳輸協定(DICOM)檔案中的 mA 剖面圖記錄所有切片使用 mA 情形，此數值可評估 AEC 系統調整管電流狀況，掃描長度使用 DLP 除 CTDI_{vol} 定義(DLP/CTDI_{vol})，本研究圈選擬人假體軟組織 ROI 以計算平均 CT 數值及標準偏差。

三、熱發光劑量計劑量量測

本研究使用熱發光劑量計(TLD)置入成人假體並使用預設臨床條件掃描，表 3 詳列 4 具擬人假體內 TLD 的器官分布。TLD (TLD-100 H, Harshaw Thermo Fisher Scientific Inc, Waltham, MA, USA)尺寸為 3.0×3.0×0.9 mm³，成分為氟化鋰(LiF)並添加 Mg、Cu、P 為活化劑，物理密度與有效原子序分別約為 2.6 g/cm³ 與 8.2。TLD 每次照射前以 240 °C 回火 10 分鐘，使用 Harshaw Model 3500 熱發光計系統及 WinREM-S (Harshaw Thermo Fisher Scientific Inc, Waltham, MA, USA)軟體計讀 TLD。購得之 TLD 在首次劑量實驗前需使用 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 照射器(Harshaw TLD Model 2210 Chip irradiator, Harshaw Thermo Fisher Scientific Inc, Waltham, MA, USA)建立校正因子(ECC)使每片 TLD 的敏感度均一化；每次劑量實驗時會取 15 片 TLD 照射 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 獲得計讀儀校正因子(RCF)以維持儀器計讀穩定度。擬人假體內部 TLD 的輻射計讀值以電荷(nC)顯示，本實驗使用 ECC (無單位)以及 RCF (nC/gU)進行校正：

$$\text{Exposure} = \text{ECC} \cdot \text{Charge}/\text{RCF} \quad (1)$$

曝射值(gU)使用第二標準劑量實驗室之 120 kVp X 光及 0.5 mm 銅濾器所得校正曲線轉換為吸收劑量(mGy)。有效劑量公式如下：

$$\text{ED} = \sum w_T \cdot w_R \cdot D_T \quad (2)$$

D_T 為器官平均劑量，w_R 為輻射加權因子，w_T 為組織加權因子，X 光射線包括 CT 的 w_R 為 1，w_T 參考國際放射防護委員會(ICRP)103 號報告[19]。

四、多變量分析

本實驗第一部分，以多項式線性回歸分析心臟 PET/CT 和 SPECT/CT 掃描不使用 AEC 下，身體尺寸與輻射劑量對 CT 影像品質中雜訊的影像：

$$\text{Noise} = B_0 + B_1 \times (\text{chest size}) + B_2 \times (1/\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}) \quad (3)$$

公式 3 之 B₀、B₁ 及 B₂ 為迴歸係數，Noise 定義為心臟影像圈選 ROI 位置量測 CT 數值的標準偏差，chest size 為假體胸腔長短軸平方根，本實驗使用標準迴歸係數(β)評估每項獨立變數關聯的重要性。本實驗使用司圖頓 t 檢驗(student's t test)及變異數影響因子(VIF)作為篩選此模型潛力之標準，且計算判定係數(R²)評估回歸模型功能的強度。

在本實驗第二部分採用 AEC 系統之雙模式掃描儀中，輻射劑量與影像品質會根據影像品質預設指標決定，較高的 NI 指標會使得 CT 使用較低 mA 降低影像品質，

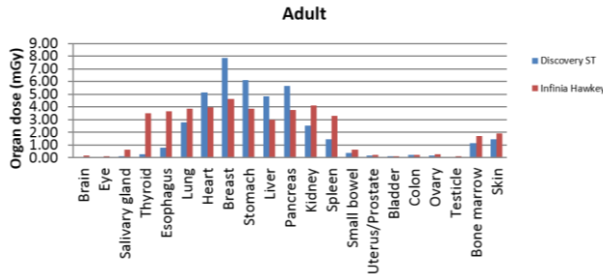


圖 3. Discovery ST 及 Infinia Hawkeye 以預設 CT 條件掃描成人假體的各器官劑量分布圖

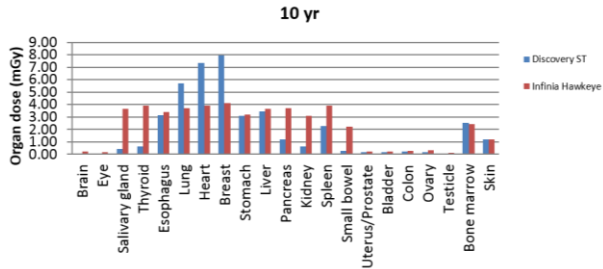


圖 4. Discovery ST 及 Infinia Hawkeye 以預設 CT 條件掃描 10 歲小兒的各器官劑量分布圖

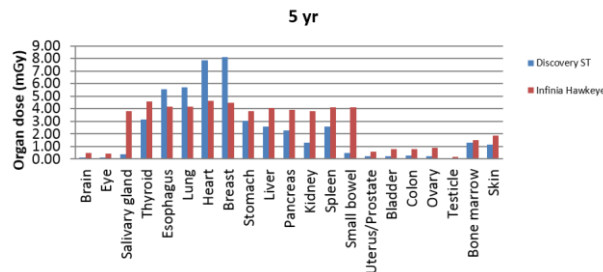


圖 5. Discovery ST 及 Infinia Hawkeye 以預設 CT 條件掃描 5 歲小兒的各器官劑量分布圖

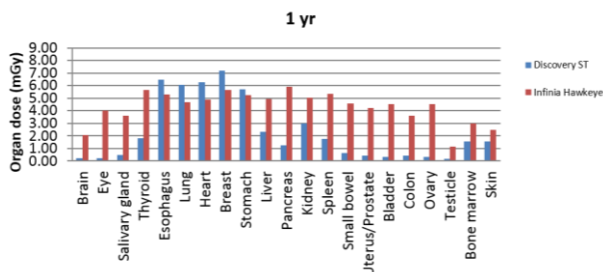


圖 6. Discovery ST 及 Infinia Hawkeye 以預設 CT 條件掃描 1 歲小兒的各器官劑量分布圖

於此同時降低受檢者輻射劑量，但是影像品質的預設指標與受檢者的輻射劑量並無直接關係，因此多項式線性回歸方法使用以分析自擬人假體所獲得之影像資訊，以此研究受檢者進行 PET/CT 與 SPECT/CT 心臟疾病掃描時，身體尺寸與影像品質預設指標對輻射劑量的影響：

$$\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}} = B_0 + B_1 \times (\text{chest size}) + B_2 \times (1/\text{NI}) \quad (4)$$

公式 4 之 B_0 、 B_1 及 B_2 為迴歸係數，chest size 定義為假體胸腔長短軸平方根，NI 為影像品質預測指標。本實驗使用標準迴歸係數(β)評估每項獨立變數關聯的重要性。本實驗使用司圖頓 t 檢驗(student's t test)及變異數影

表 4. Discovery ST 線性回歸模型的統計分析結果($R^2 = 0.84$)

Predictor	B	β	t ^a	VIF ^b
Chest size	2.07	0.25	2.56	1.00
1/ $\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}$	27.06	0.82	9.09	1.00

表 5. Infinia Hawkeye 線性回歸模型的統計分析結果($R^2 = 0.81$)

Predictor	B	β	t ^a	VIF ^b
Chest size	1.48	0.79	7.06	1.00
1/ $\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}$	11.69	0.40	3.54	1.00

^a 如 $|t| > 2$ 則視為此預測因子有統計上顯著差異

^b VIF 最大值超過 10 則視為多重共線性

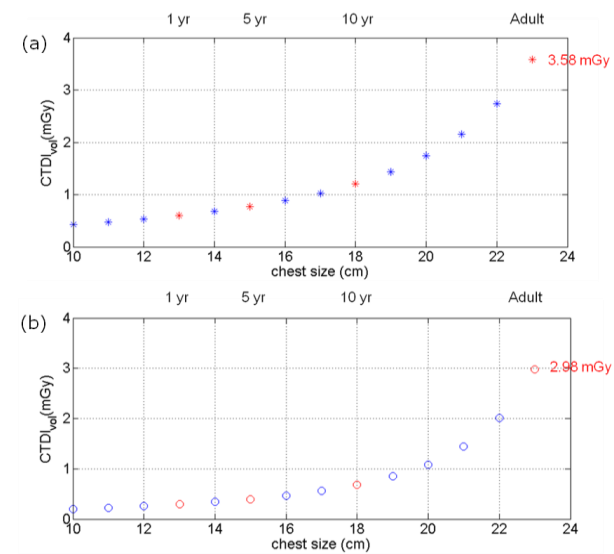


圖 7. 以線性回歸模型估計不同胸腔尺寸在(a) Discovery ST 及 (b) Infinia Hawkeye 達到常規成人掃描參數的影像品質所需之 CTDI_{vol} 。

響因子(VIF)作為篩選此模型潛力之標準，且計算判定係數(R^2)評估回歸模型功能的強度，本研究統計分析演算法皆以 MATLAB-B7.1(The Mathworks, Natick, MA, USA)計算。

III. 結果與討論

圖 3 至圖 6 顯示成人、10 歲、5 歲及 1 歲擬人假體進行常規成人 CT 掃描的器官劑量，上述假體在 Discovery ST 掃描的有效劑量為 2.64、2.81、2.88 及 3.16 mSv；使用 Infinia Hawkeye 掃描後對應結果為 2.37、2.40、2.69 及 4.18 mSv。Discovery ST 使用公式 3 回歸分析結果顯示於表 4，本研究發現兩項獨立變異數對雜訊預測因子有顯著性影響($|t| > 2$)，同時 $1/\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}$ ($\beta = 0.82$)比 chest size ($\beta = 0.25$)更為顯著，下列回歸公式代表 Discovery ST 在雜訊與預測因子之間的關係

$$\text{Noise} = -48.74 + 2.07 \times (\text{chest size}) + 27.06 \times (1/\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}) \quad (5)$$

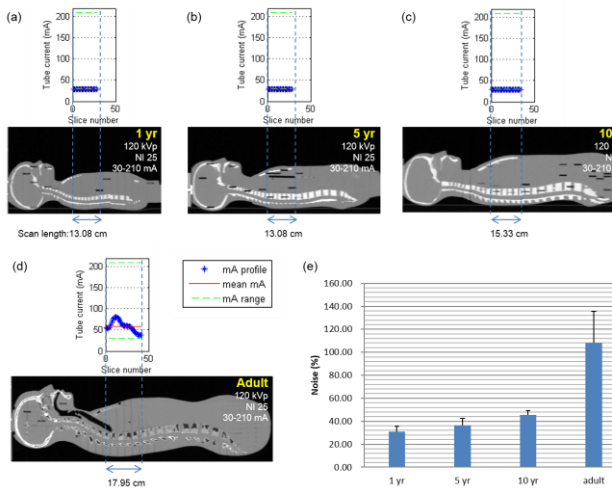


圖 8. NM/CT 670 以 120 kVp、NI = 25、30-210 mA 對(a) 1 歲, (b) 5 歲, (c) 10 歲, (d) 成人假體 CT 掃描 mA 走勢圖及(e) CT 影像雜訊

表 6. VCT 線性回歸模型的統計分析結果($R^2 = 0.95$)

Predictor	B	β	t ^a	VIF ^b
Chest size	0.08	0.40	6.14	1.00
1/NI	22.81	0.87	13.62	1.00

表 7. NM/CT 670 線性回歸模型的統計分析結果($R^2 = 0.92$)

Predictor	B	β	t ^a	VIF ^b
Chest size	0.11	0.43	5.35	1.00
1/NI	26.60	0.86	10.81	1.00

公式 5 中回歸模型產生之 R^2 為 0.84。Infinia Hawkeye 使用公式 3 回歸分析結果顯示於表 5，本研究發現兩項獨立變異數對雜訊預測因子有顯著性影響($|t| > 2$)，同時 chest size ($\beta = 0.79$)比 $1/\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}$ ($\beta = 0.40$)更為顯著，下列回歸公式代表 Infinia Hawkeye 在雜訊與預測因子之間的關係：

$$\text{Noise} = -17.74 + 1.48 \times (\text{chest size}) + 11.69 \times (1/\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}) \quad (6)$$

公式 6 中回歸模型產生之 R^2 為 0.81，回歸模型並無觀察到任何獨立變異數有高度共線性表現($\text{VIF} < 10$)。將成人 CT 掃描參數進行轉換應用於小兒掃描之前，首先需了解影像品質與輻射劑量間的關係，CT 影像雜訊是衡量 CT 影像品質及使用 CT 衰減校正之核醫影像量準確度的關鍵因子，因此本實驗使用多變量分析法檢驗 CT 影像雜訊在不同影像條件的影響。根據本實驗第一部分的結果，Discovery ST 掃描儀中對 CT 影像雜訊相關性貢獻較高者為 $1/\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}}$ ，在 Infinia Hawkeye 掃描儀中則為 chest size。Infinia Hawkeye 掃描儀 CT 部分為低劑量 4 切掃描，具備低管電流與慢轉速的特性，因此與 Discovery ST 的照影特性差距較大，但是兩者回歸相關係數 R^2 皆大於 0.8，此結果代表公式 5 與 6 具有高回歸性。根據回歸模型的結果，本實驗對小兒進行心臟掃描提出低劑量掃描 CT 建議參數(圖 7)，在 Discovery ST 掃描儀可在具有常規 CT 參數(3.58 mGy)掃描成人假體的

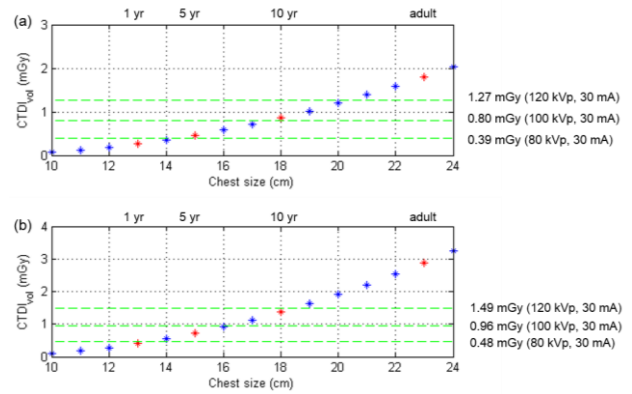


圖 9. 以線性回歸模型估計不同胸腔尺寸在(a) VCT 及(b) NM/CT 670 達到 NI=25 的影像品質所需之 CTDI_{vol} 。

影像品質下，對 10 歲、5 歲及 1 歲假體達到 66.9%、79.0%、83.7% 輻射劑量下降；在 Infinia Hawkeye 方面，則可達 77.3%、86.9%、90.2% 的劑量下降。

圖 8(a)-(d)顯示 4 具擬人假體進行 NM/CT 670 CT 掃描，以條件為 120 kVp，NI = 25 及 30-210 mA 求得之 mA 走勢圖(藍色星狀標記)，模擬 1 歲、5 歲、10 歲及成人假體求得之平均管電流(紅色實線)為 30、30、30 及 59.12 mA，相對應的 CTDI_{vol} 為 1.49、1.49、1.49 及 2.87 mGy，圖 8(e)中可觀察到影像雜訊與受檢者身體尺寸具有正比關係，此結果代表小兒假體掃描時管電流並無適當的調整，因此需進一步對小兒受檢者進行掃描參數最佳化。以公式 4 對 VCT 回歸分析之結果顯示於表 6，本研究發現兩項獨立變異數對雜訊預測因子有顯著影響($|t| > 2$)，同時 1/NI ($\beta = 0.87$)比 chest size ($\beta = 0.40$)更為顯著。下列回歸公式代表 VCT 在 CTDI_{vol} 與預測因子之間的關係：

$$\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}} = -1.48 + 0.08 \times (\text{chest size}) + 22.81 \times (1/\text{NI}) \quad (7)$$

公式 7 中回歸模型產生之 R^2 為 0.95。以公式 4 對 NM/CT 670 回歸分析之結果顯示於表 7，本研究發現兩項獨立變異數對雜訊預測因子有顯著影響($|t| > 2$)，同時 1/NI ($\beta = 0.86$)比 chest size ($\beta = 0.43$)更為顯著，下列回歸公式代表 NM/CT 670 在 CTDI_{vol} 與預測因子之間的關係：

$$\sqrt{\text{CTDI}_{\text{vol}}} = -1.80 + 0.11 \times (\text{chest size}) + 26.60 \times (1/\text{NI}) \quad (8)$$

公式 8 中回歸模型產生之 R^2 為 0.92，回歸模型並無觀察到任何獨立變異數有高度共線性表現($\text{VIF} < 10$)，圖 9 顯示了利用公式 7 及 8 回歸分析所推測 NI = 25 的輻射劑量。根據回歸模型的結果，可知小兒假體在 NI = 25 之 CTDI_{vol} 遠低於以 120 kVp、30 mA 掃描之輻射劑量(VCT: 1.27 mGy; NM/CT 670: 1.49 mGy)。因此，當小兒假體以 120 kVp、NI = 25、30-210 mA 進行掃描時，管電流會調整至最低值 30 mA，並可說明為何以成人低劑量參數掃描小兒假體時，管電流沒有適當的調整(圖 8)。對 VCT 掃描儀來說，當以圖 9(a)的 CTDI_{vol} 進行掃描設定時，影像品質可保持為 NI = 25 前提下，同時在 10 歲、5 歲及 1 歲擬人假體將僅有成人參數輻射劑量(1.27 mGy)的 32.2%、63.7%、及 79.2%；同理，由圖 9(b)可知，NM/CT 670 可達 8.4%、51.5%及 72.7%的劑量下降。由圖 9(a)可知，受檢者胸腔尺寸小於 22 cm 進行 VCT 預設條件

掃描時，管電流會無法適當的調整，而 NM/CT 670 則是發生在受檢者胸腔尺寸小於 20 cm(圖 9(b))，因此當小兒與青少年進行掃描時，管電流與 mA 範圍應當適當的調整降低輻射劑量以求輻射劑量合理抑低。如欲獲得 NI = 25 之影像品質，在青少年病患建議使用 100 kVp 與 30-210 mA 進行掃描，而在幼兒病患建議使用 80 kVp 與 10-210 mA 進行掃描。

IV. 結論

本實驗探討了不同年齡病患接受 PET/CT 與 SPECT/CT 心臟疾病檢查的 CT 輻射劑量，並依照臨床操作情形分別對不使用與使用 AEC 系統的核醫部門進行低劑量 CT 掃描的探討與最佳化。本研究成果可提供臨床核醫部門在對不同年齡病患進行雙模式影像檢查時，在獲得具診斷價值的影像品質前提下，有效的降低病人的輻射劑量。

參考文獻

- [1] J. Jortveit, L. Eskedal, A. Hirth, T. Fomina, G. Dohlen, P. Hagemo, G. S. Tell, S. Birkeland, N. Oyen and H. Holmstrom, *European heart journal* 37 (7), 621-626 (2016).
- [2] A. Frazier, E. A. Hunt and K. Holmes, *Journal of emergencies, trauma, and shock* 4 (1), 89-96 (2011).
- [3] F. M. Bengel, T. Higuchi, M. S. Javadi and R. Lautamaki, *Journal of the American College of Cardiology* 54 (1), 1-15 (2009).
- [4] M. Hernandez-Pampaloni, V. Allada, M. C. Fishbein and H. R. Schelbert, *Journal of the American College of Cardiology* 41 (4), 618-626 (2003).
- [5] P. S. Sundaram and S. Padma, *Annals of pediatric cardiology* 2 (2), 127-139 (2009).
- [6] C. Kondo, *Annals of nuclear medicine* 18 (7), 551-561 (2004).
- [7] O. Gaemperli, F. M. Bengel and P. A. Kaufmann, *European heart journal* 32 (17), 2100-2108 (2011).
- [8] A. Seret, D. Nguyen and C. Bernard, *EJNMMI research* 2 (1), 45 (2012).
- [9] D. W. Townsend, *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine* 49 (6), 938-955 (2008).
- [10] E. Tsukamoto and S. Ochi, *Annals of nuclear medicine* 20 (4), 255-267 (2006).
- [11] F. H. Fahey, M. R. Palmer, K. J. Strauss, R. E. Zimmerman, R. D. Badawi and S. T. Treves, *Radiology* 243 (1), 96-104 (2007).
- [12] F. H. Fahey, S. T. Treves and S. J. Adelstein, *Journal of nuclear medicine technology* 40 (1), 13-24 (2012).
- [13] M. Ferrari, P. De Marco, D. Origgi and G. Pedrolì, *Clinical and Translational Imaging* 2 (6), 557-569 (2014).
- [14] M. J. Gelfand and L. C. Lemen, *Seminars in nuclear medicine* 37 (5), 391-398 (2007).
- [15] S. F. Barrington, J. Begent, T. Lynch, P. Schleyer, L. Biassoni, W. Ramsden, T. Kane, S. Stoneham, M. Brooks and S. F. Hain, *Nuclear medicine communications* 29 (5), 418-424 (2008).
- [16] A. M. Alessio, P. E. Kinahan, V. Manchanda, V. Ghioni, L. Aldape and M. T. Parisi, *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine* 50 (10), 1570-1577 (2009).
- [17] J. M. Boone, E. M. Geraghty, J. A. Seibert and S. L. Wootton-Gorges, *Radiology* 228 (2), 352-360 (2003).
- [18] E. Dougeni, K. Faulkner and G. Panayiotakis, *European journal of radiology* 81 (4), e665-683 (2012).
- [19] ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).

運用 $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ 正子造影技術評估神經異種移植 在巴金森氏症動物模式之治療效果

Evaluating the neural xenograft effects in Parkinsonian animal models using $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ and PET imaging

計畫編號：MOST 105-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：張剛瑋、朱有田、鄭澄意、黃文盛、劉宗達

執行單位：國防醫學院 (生物及解剖學研究所)

摘要

隨著時代的進步及醫療保健的發達，人口結構的平均年齡也逐步增加，因此老化疾病也越來越普遍，而神經退化性疾病即是其中之一。巴金森氏症是目前臨床上常見的神經退化疾病之一，其患病的機率會隨著年紀的增加而提高，60歲以上罹患此病的機率大約為1%-5%。 $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ 是一種可結合於多巴胺轉運體的新穎正子造影藥物，比起目前臨床上常用於診斷巴金森氏症的 $[^{18}\text{F}]\text{DOPA}$ ，其優點有專一性高不易被腦部以外組織的酵素降解，以及進入細胞後不生成代謝產物。因此， $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ 注射至生物體內的藥物劑量自然可以減少，不但降低對細胞的毒性，在影像上可以有更高的解析度。所以本計畫以 $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ 為造影藥物，並配合動物行為學測試，評估巴金森氏症的治療效果。結果顯示 $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ 注射於大鼠腦部的正子造影圖成像清晰且背景雜訊較低(與 $[^{18}\text{F}]\text{DOPA}$ 相比)。動物旋轉行為測試也得到胚胎組織治療成功的數據。更進一步地，運用巴金森氏症病鼠細胞移植治療前後的造影比較，可以觀察到移植組織於大鼠腦中紋狀體內多巴胺神經元細胞的存活。於細胞移植後兩個月犧牲大白鼠，利用免疫組織染色法觀察大鼠腦切片，也可以觀察到紋狀體中有移植細胞的細胞本體。為解決細胞移植排斥的問題，本研究也嘗試使用免疫調節細胞來減低排斥。結果發現免疫調節細胞可減少移植所引發的免疫細胞活化問題。因此，本實驗室成功完成以細胞治療巴金森氏症動物模式，同時也建立 $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ 搭配正子造影技術評估細胞移植治療後多巴胺神經元存活情況。

關鍵詞：正子造影、細胞移植、巴金森氏症。

Abstract

The life expectancy is much longer in this era because of the advanced medicine. Age-associated neurodegenerative disorders such as Parkinson's disease (PD) become more and more common. PD is the second important neurodegenerative disorder in developed societies next to Alzheimer's disease, with a prevalence ranging from 1-5% in people over 60 years of age. $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ is a newly developed radio-ligand of positron emission tomography (PET) for dopamine transporter (DAT). It showed advantages such as early peak equilibrium, fast washout from the brain, and less abundance of radio-metabolites in cell when compare to

$[^{18}\text{F}]\text{DOPA}$. Hence, lower dose of radioactive substances are needed to reach a high target-to-background ratio in $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ PET. In this plan, we have evaluated therapeutic effects of the neural transplantation in parkinsonian rat and investigated the underlying mechanism using $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}/\text{PET}$ and immunohistochemistry (IHC) techniques. First, we were able to successfully synthesize $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}$ of a purity exceeding 95%. We also obtained PET images with much higher target-to-background ratios from the rats using $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}/\text{PET}$. At the same time, the numbers of the drug-induced rotational behavior were decreased in PD rat with transplantation of the E14 ventral mesencephalic (VM) tissue in striatum. The results suggested the neural transplantation therapy was a useful treatment for PD. At the end of experiment, the rats were sacrificed for immunohistochemistry (IHC) staining. The IHC result revealed the transplanted dopaminergic neurons were located in the rat striatum and may exert their neuronal function. Finally, we used a co-graft VM with immuno-regulatory cells to diminish the graft-induced immune responses. The numbers of active microglia were decreased while immuno-regulatory cells (Sertoli cells) were transplanted with the neural cells simultaneously in the rat brain. In this present study, the results suggested the cell therapy was a successful strategy in treatment of PD rat. Using $[^{18}\text{F}]\text{FE-PE2I}/\text{PET}$ imaging was a successful approach to evaluate the cell transplanting strategy for PD. Keywords: Positron emission tomography (PET), 高transplantation, Parkinson's disease.

I. 前言

巴金森氏症是一種神經退化性疾病，與黑質區(substantia nigra, SN)的多巴胺(dopamine, DA)神經元嚴重之喪失有關。巴金森氏症患者的表現症狀包括：(1)靜止時不自主顫動(resting tremor)，(2)肌肉僵直(muscular rigidity)：身體和脖子肌肉僵硬、面部表情呆滯，臉部猶如帶有面具，(3)發啟動作時困難(akinesia)：欲發起動作時行動困難，(4)行動遲緩(bradykinesia)：行動明顯地比正常人遲緩(Clarke and Moore, 2004)。針對帕金森氏症的治療方式有許多種，目前分為(1)藥物治療、(2)手術處理和(3)實驗性療法(細胞療法)。其中藥物治療與手術進行深層腦部刺激可暫時減緩巴金森氏症的症狀，但隨著病程這兩種治療效果會越來越差。越來

越多研究趨向細胞治療來改善巴金森氏症病人的症狀。

[^{18}F]FE-PE2I 為近年發展的新穎多巴胺轉運體 (Dopamine transporter, DAT) 正子造影示蹤劑，在腦內對多巴胺轉運體有很高的親和力，且非專一性攝取率低、清除率相對慢，能夠直接、靈敏地反映出多巴胺轉運體在腦部的變化 (Fazio et. al., 2015; Suzuki et. al., 2014)。有學者對幾種不同會與 DAT 結合的正子示蹤劑作了一系列比較，結果發現 [^{18}F]FE-PE2I 的 PET 成像結果與體外檢測多巴胺神經元損傷結果的相關性最好 (Prunier et al., 2003)。Emond 等人研究又發現不同的動物實驗證明 PE2I 在檢測 DAT 密度的降低方面有著較高的能力 (Emond et al., 2008)。因此，[^{18}F]FE-PE2I 在巴金森氏症的早期診斷和療效評估方面有著相當大的研究價值。

因次，本研究利用 [^{18}F]FE-PE2I 搭配正子造影技術評估以細胞移植治療巴金森氏症大鼠多巴胺系統的成效。

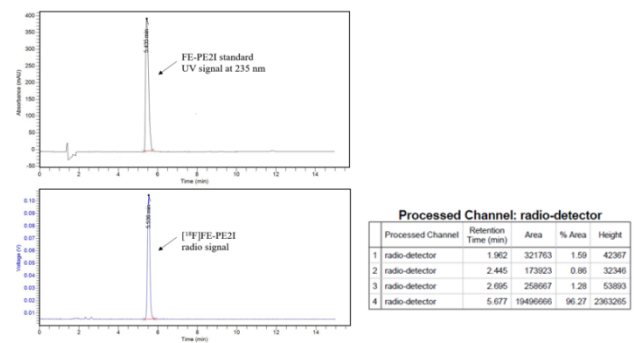
II. 主要內容

本計畫預計完成下列四項目標：

- (1) 動物疾病模式之建立：利用大白鼠建立巴金森氏症的疾病模式，將 6-OHDA 注射於大鼠腦中破壞黑質紋狀體徑路，並配合藥物誘發轉圈行為測試鑑定使否成功建立巴金森氏症大鼠。
- (2) 細胞治療：以 E14 鼠胚中腦組織為移植細胞來源，懷孕母鼠購自樂斯科生物科技股份有限公司 (BioLASCO, Taiwan)，由胚胎分離中腦組織以進行細胞移植。為了解細胞種移植存活狀況與可能造成的免疫反應，本研究也同時免疫調節細胞(史托利細胞)共同移植治療巴金森氏症大鼠。
- (3) 正子造影評估：運用正子造影技術評估移植入腦內的細胞位置及大小，使用 [^{18}F] DOPA 與 [^{18}F]FE-PE2I 為 PET 造影示蹤劑為，由三軍總醫院正子中心合成藥物，再至國防醫學院之分子影像中心進行造影研究。
- (4) 免疫染色研究：為了解細胞種移植存活狀況與可能造成的免疫反應，於實驗終點犧牲大鼠，取腦進行免疫組織化學染色法分析腦中酪胺酸羥化酶、多巴胺轉運體及微小膠細胞 (microglia) 的變化。

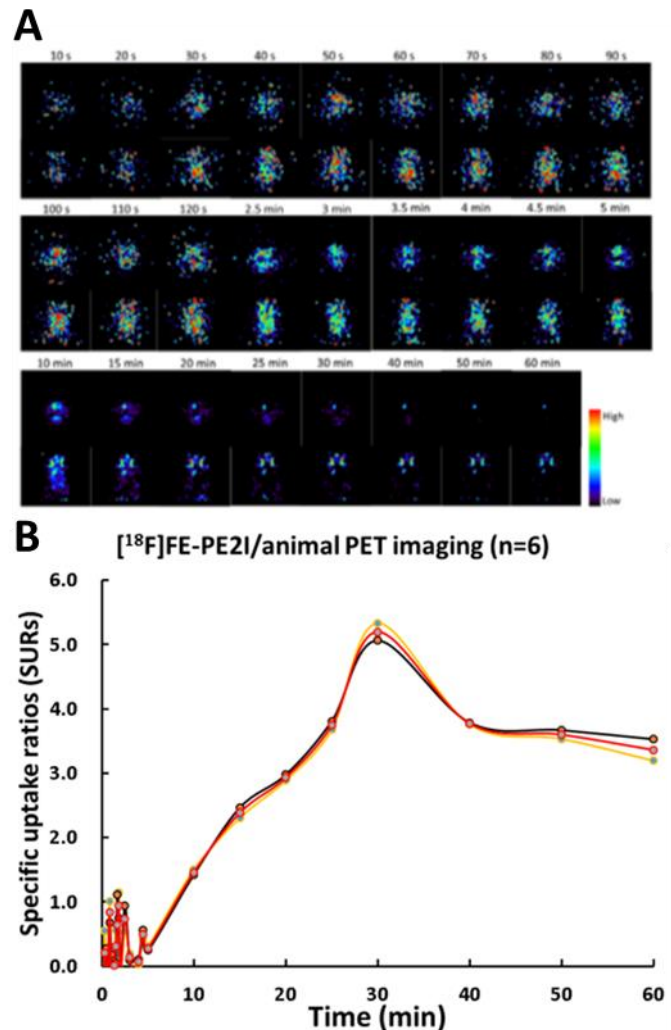
III. 結果與討論

先評估了解新穎的造影藥物 [^{18}F]FE-PE2I 是否可以精確而且穩定的合成出來，於是先與三總正子中心共同討論出製程及步驟，並由技術員周大凱執行產製。由圖一的結果可以得知，合成具高度多巴胺轉運體親和力之核醫正子藥物 [^{18}F]FE-PE2I 後，經過 HPLC 分析其純度可以達到 95% 以上，顯示本實驗室對於之後研究所需的核醫造影藥物有相當優良的生產能力(圖一)。



圖一、使用高效能液相層析儀(HPLC)分析圖譜比對 [^{18}F]FE-PE2I 標準品與 [^{18}F]FE-PE2I 產物。HPLC 分析出 [^{18}F]FE-PE2I 產物與標準品滯留時間相同，且計算其純度高達 96.27%。

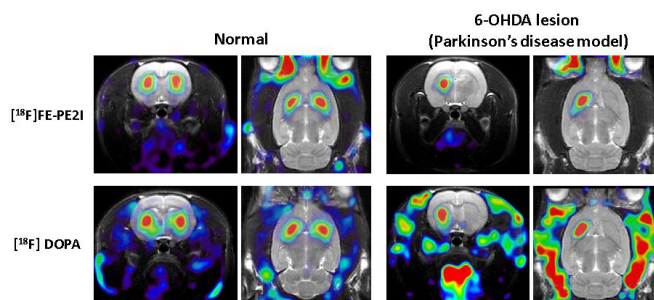
將正常大白鼠以尾靜脈注射核醫藥物 [^{18}F]FE-PE2I，施以動態的小動物正子斷層造影，連續性的觀察此造影藥物於紋狀體之攝取與排除，同時以小腦攝取值作為背景值，計算專一攝取率(specific uptake ratio, SUR)，評估出最佳結合時間 (optimal binding time) 作為理想的靜態造影時間。結果發現，注射 [^{18}F]FE-PE2I 後 30 分鐘達到吸收最高峰，之後攝取量開始下降，是以注射藥物後 20-40 分鐘為最佳造影時間，之後的動物實驗接採行此時間進行靜態小動物正子斷層造影分析(圖二)。



圖二、(A)多巴胺轉運體正子示蹤劑 [^{18}F]FE-PE2I 在大鼠腦中

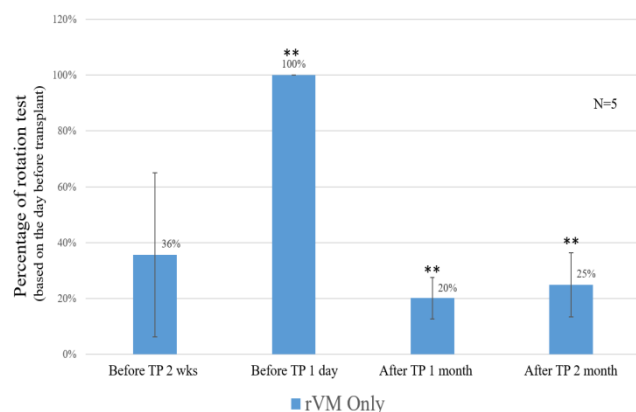
的 0-60 分鐘連續動態正子造影圖。(B)造影時間與專一攝取率 (SUR)關係圖。分析結果顯示腦部攝取於藥物注射後 30 分鐘達到最高吸收高峰。

[¹⁸F]FE-PE2I 為新研發出之多巴胺神經元正子示蹤劑，與現階段臨床上常用之核醫藥物 [¹⁸F]DOPA 比較。發現 [¹⁸F]FE-PE2I 運用於生物體內有造影圖像品質較佳，而且周圍雜訊明顯較 [¹⁸F]DOPA 低的優點(圖三)，且注射 [¹⁸F]DOPA 於正子造影所需之藥物濃度為 0.7~0.8 mCi，而 [¹⁸F]FE-PE2I 則為 0.5~0.6 mCi，對生物而言 [¹⁸F]FE-PE2I 可有效降低注射於體內造成的輻射風險。



圖三、不同的多巴胺系統正子示蹤劑造影比較圖。 [¹⁸F]FE-PE2I 和 [¹⁸F]DOPA 分別於正常(Normal)以及巴金森氏症大鼠 (6-OHDA lesion) 進行造影。影像結果顯示 [¹⁸F]FE-PE2I 的造影圖像雜訊明顯較 [¹⁸F]DOPA 低。

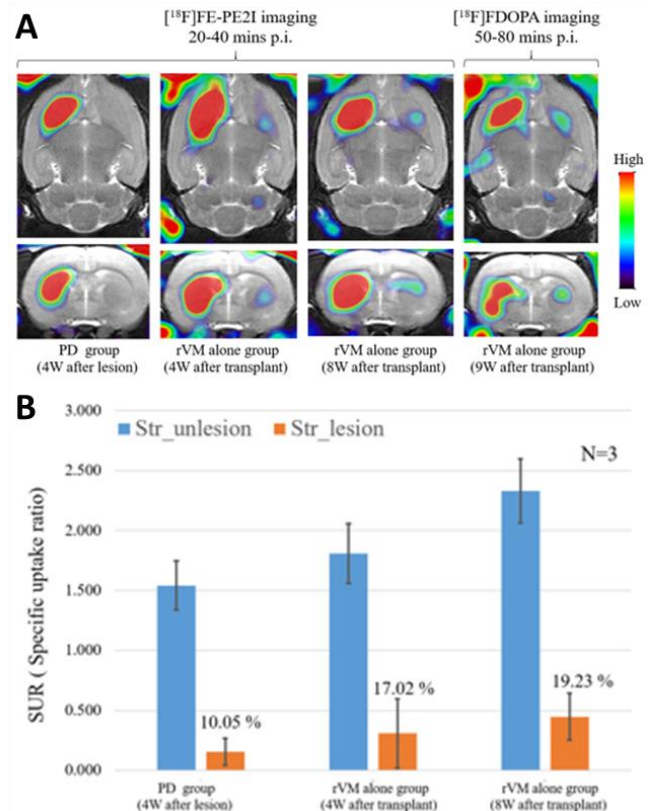
接下來開始評估巴金森氏症大鼠移植前後經行為測試後的結果。旋轉行為測試結果可見，在胚胎組織細胞移植後一和二個月之旋轉測試結果均較移植前明顯轉圈數降低，然隨著移植時間的增長，二個月的旋轉測試結果有稍微回升的趨勢(圖四)。此結果證明移植細胞於大鼠腦中存活並可能行使其正常功能。



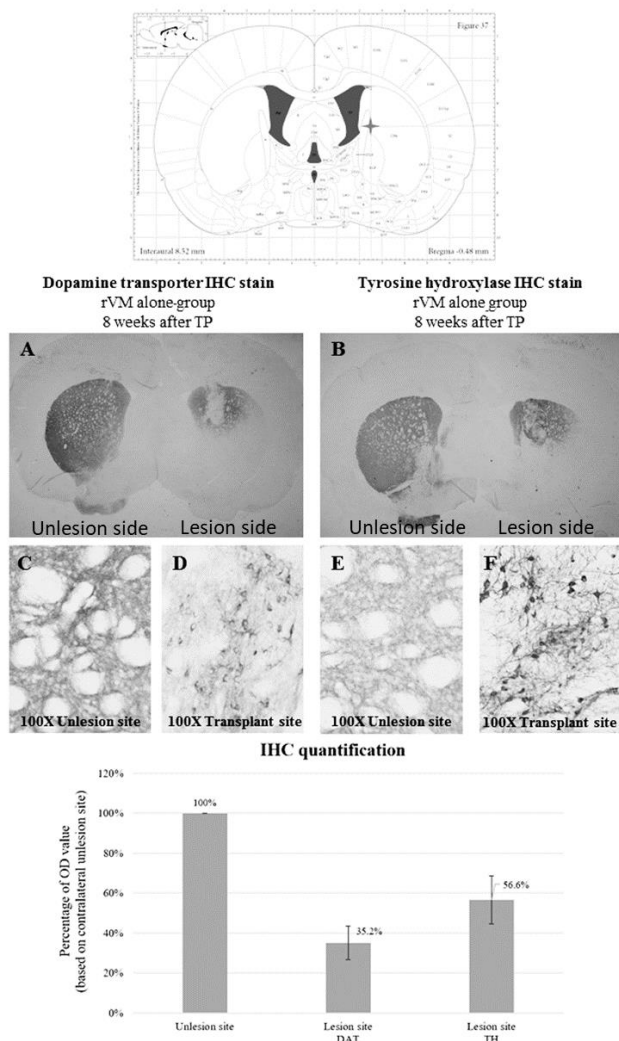
圖四、阿撲嗎啡注射誘導大鼠旋轉行為測試。移植鼠胚胎中腦組織於紋狀體後一至二個月，測試結果發現轉圈數不論是一個月或是二個月，均有較移植前明顯降低(** $p < 0.01$)；然隨著移植後時間增長，旋轉測試轉圈數有輕微上升趨勢，但沒有達到顯著差異 (TP: transplantation; rVM: rat ventral mesencephalic tissue)。

於移植前四週、移植後四週以及八週進行 [¹⁸F]FE-PE2I 正子造影，並於移植後九週進行 [¹⁸F]FDOPA 小動物正子電腦斷層造影進行比較，評估大鼠腦內紋狀體攝取核醫藥物的情況。由正子造影影像結果可見，移植前四週右側破壞側 (lesion side) 已經沒有發現造影藥物 [¹⁸F]FE-PE2I 的攝取，移植後四週與八週

破壞側均有看到 [¹⁸F]FE-PE2I 攝取，亦於九週時有觀察到 [¹⁸F]FDOPA 攝取情況。分析造影圖之影像量化數值(圖五)，巴金森氏症大鼠於移植後四週與八週，破壞側相較於對側 SUR 值有上升之趨勢。此結果說明移植後組織細胞有存活於紋狀體中，並正常吸收造影藥物於多巴胺神經元內。

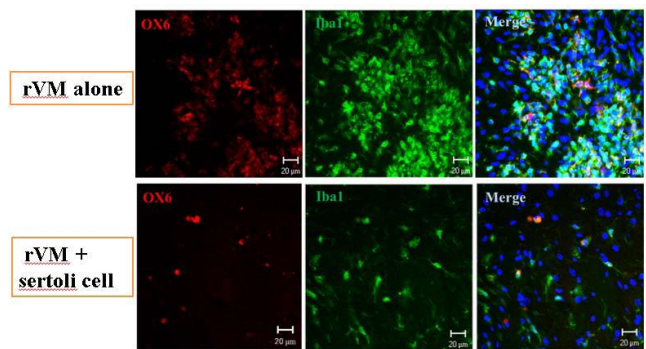


將大鼠於移植後二個月犧牲，將鼠腦取出後進行冷凍切片並以免疫組織化學染色[酪胺酸羥化酶(Tyrosine hydroxylase, TH)和多巴胺轉運體(Dopamine transporter, DAT)]觀察移植中腦組織在紋狀體的分布情形(圖六)。圖中可以看出，實驗注射胚胎細胞之移植位置與免疫組織化學染色結果呈現細胞的位置相吻合(也與小動物正子造影結果相同)，證明移植技術良好且細胞並未流動遺失。經過 6-羥基多巴胺破壞單側鼠腦並移植鼠胚中腦組織八週後，觀察其對側未破壞側之紋狀體多巴胺轉運體及酪胺酸羥化酶表現均屬正常，而破壞側紋狀體中移植區域則可看見多巴胺轉運體及酪胺酸羥化酶之表現量上升，亦可見多巴胺神經元細胞本體與神經纖維，代表移植胚胎組織之多巴胺神經元細胞存活正常(圖六 A)。更進一步地，將免疫組織化學染色圖經過影像分析以及量化處理，可以發現破壞側酪胺酸羥化酶表現數值增加，且比對側未破壞側表現數值高 56.6%，多巴胺轉運體表現量則增加 35.2%(圖六 B)。



圖六、6-羥基多巴胺破壞單側並移植鼠胚中腦組織之免疫組織化學染色以及量化分析結果。紅星標示處為移植位置。多巴胺轉運體之免疫組織化學染色(A)可見移植側表現恢復，未破壞側無多巴胺神經元細胞本體(C)，移植側可見神經元細胞本體與神經纖維(D)，酪胺酸羥化酶染色亦可見類似結果(B)，未破壞側無多巴胺神經元細胞本體(E)，移植側可見神經元細胞本體與神經纖維(F)。量化分析結果以未破壞側 OD 值為 100%，移植測可見多巴胺轉運體恢復達對側之 35.2%，酪胺酸羥化酶則恢復達對側之 56.6%，表示多巴胺神經元之存活與其功能之表現。

細胞移植後常常引發的免疫反應，本研究也利用共同移植免疫調節細胞—史托利細胞(Sertoli cells, S.C.)，來降低免疫細胞攻擊所造成的神經細胞死亡或萎縮。由實驗結果得知，代表免疫活性強度的 Iba1 positive cells (總微小膠細胞, total microglia) 與 OX6 positive cells (活化態微小膠細胞, activated microglia) 數目，於共同移植鼠胚及史托利細胞組別明顯減低(與單獨移植鼠胚中腦組織組相比)，證明了免疫調節細胞可以有效降低免疫排斥反應，達到較好的細胞移植治療效果(圖七)。



圖七、細胞免疫螢光染色結果圖。紅色螢光標定 OX6 positive cells (活化態巨噬細胞)，綠色螢光標定 Iba1 positive cells (總巨噬細胞)，藍色則是染上細胞核。比例尺為 20 μm。

IV. 結論

綜論而述，細胞移植治療在本研究於巴金森氏症已獲得良好之成效，且可利用本計畫所研究之新穎的造影藥物-[¹⁸F]FE-PE2I，非侵入性的觀察移植後的細胞存活情形。未來的醫療使用，也適合以此非侵入性的 [¹⁸F]FE-PE2I 正子電腦斷層影像於人體評估巴金森氏症病患腦部細胞移植治療後多巴胺神經元存活情況。但未來更深入的研究免疫反應及試驗安全性，會是一個重要的課題。

參考文獻

- [1] Clarke C, Moore AP. Parkinson's disease. Clin Evid. 2004 Jun;(11):1736-54.
- [2] Fazio P, Svenningsson P, Forsberg A, Jönsson EG, Amini N, Nakao R, Nag S, Halldin C, Farde L, Varrone A. Quantitative Analysis of [¹⁸F-(E)-N-(3-Iodoprop-2-Enyl)-2 β -Carbofluoroethoxy-3 β -(4'-Methyl-Phenyl) Nortropane Binding to the Dopamine Transporter in Parkinson Disease. J Nucl Med. 2015 ;56:714-20.
- [3] Suzuki M, Ito H, Kodaka F, Takano H, Kimura Y, Fujiwara H, Sasaki T, Takahata K, Nogami T, Nagashima T, Nengaki N, Kawamura K, Zhang MR, Varrone A, Halldin C, Okubo Y, Suhara T. Reproducibility of PET measurement for presynaptic dopaminergic functions using L-[β -¹¹C]DOPA and [¹⁸F]FE-PE2I in humans. Nucl Med Commun. 2014 ;35:231-7.
- [4] Prunier C, Bézard E, Montharu J, et al. Presymptomatic diagnosis of experimental Parkinsonism with [¹²³I]-PE2I SPECT. Neuroimage. 2003;19(3):810-816.
- [5] Emond P, Guilloteau D, Chalon S. PE2I: a radiopharmaceutical for in vivo exploration of the dopamine transporter. CNS Neurosci Ther. 2008;14(1):47-64.

開發 ^{99m}Tc TRODAT-1 在精神疾病造影多巴胺轉運器之影像分析技術 Consensus analysis of ^{99m}Tc -TRODAT on dopamine transporter image in psychiatric disorder

計畫編號：MOST 105-2623-E-075-001-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：c520608@ms64.hinet.net

計畫參與人員：謝文琦、高子凱

執行單位：臺北榮民總醫院精神部

摘要

利用 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器的臨床以及研究工作，在國內已經開展超過十五年了，在這過去的十五年當中有大量的文獻發表，造就了台灣在這方面研究的國際聲譽，然而更進一步的突破是國內的健保已經給付關於使用 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器在巴金森氏症的病患。雖然利用 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器在精神疾病也已經被大量的使用，但是直到今日 Tc-99m TRODAT 仍然未進入精神疾病健保給付系統，以至於 Tc-99m TRODAT 的發展受到阻礙，其中主要的原因之一在於目前精神疾病在利用 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器的時候並沒有一個一致性的分析方式，因此造成研究結果的不一致，也無法應用在臨床的病患身上。本研究的目的是發現一個臨床上方便，並且具有可靠性的分析的方式，以作為臨床精神疾病在利用 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器的時候統一的分析方式，也避免臨床上使用 Tc-99m TRODAT 造影時所產生的差異性，進而能夠改善 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器的時候的品質，以加速此造影劑的臨床使用。本研究納入了 20 位正常人，以及 18 位憂鬱症的患者，而每位患者都將進行兩次的 Tc-99m TRODAT 造影多巴胺轉運器，而每一組影像資料都將進行三種影像分析，其中主要包含了傳統的手繪方式，PMOD 人工對位方式，以及 SPM MarsBaR 的分析方式，藉由這項研究結果將可以了解三種分析方式的方便性及穩定度，以加速此造影劑在臨床上的使用價值及市場占有率。

關鍵詞：精神疾病、多巴胺轉運器

Abstract

A growing body of evidence has demonstrated that Tc-99m TRODAT is a reliable tracer for image the dopamine transporter (DAT) in neuropsychiatric disorders in the past decades from Taiwan. Furthermore, an advance was that Tc-99m TRODAT has been approved for the different diagnosis of Parkinson's and reimbursed by insurance system in Taiwan. However, although Tc-99m TRODAT has popularly been used in psychiatric disorder, Tc-99m TRODAT has not been indicated and reimbursed by insurance system in Taiwan. The caveat was also limited the usage of Tc-99m TRODAT in psychiatric disorder. One of the major reasons deters the advance of Tc-99m TRODA was that the analytic methods were not validated and been consensus. The aim of this study is to compare three currently used methods and the image analysis of Tc-99m

TRODA and test their reliability. Fifteen healthy controls and patient with drug naïve major depressive disorder will be recruited. The test-retest reliability will be used with the interval of one month. Three analytic methods included traditional manual method, PMOD co-registration method with the theory of mutual information and SPM MarsBaR method. The expected result is to find the most reliable and convenient method for the image of Tc-99m TRODA for the clinician and results in the increase of market sharing.

Keywords: dopamine transporter, psychiatric disorder

I. 前言

利用 Tc-99m TRODAT 造影人腦中多巴胺轉運器的研究在台灣已有超過十年的歷史。在這過去的十年中造就了無數的研究結果也帶動了台灣對於中樞神經放射藥物的發展。直到今日這個造影劑 Tc-99m TRODAT 依然是各個醫院核子醫學科所常用的一個放射藥物。然而這個放射藥物仍然有一些臨床上使用的限制，包含了準確度的驗證、資料庫的建立、以及對於精神疾病之實用性，均有待進一步的驗證。

II. 主要內容

文獻探討

多巴胺 (dopamine) 是腦中一種主要的神經傳導物質(17)，其主要之生理功能是調控我們的運動及認知功能。目前許多的神經精神疾病都已經確認腦中因為多巴胺的改變，而造成了臨床的症狀(18)。多巴胺的改變主要是靠多巴胺轉運器 (dopamine transporter, DAT) 的調解，而多巴胺轉運器的變化往往反應腦中多巴胺濃度的變化，在過去的研究當中已經明顯的看到巴金森氏症 (Parkinson's disease) 的病人腦中多巴胺轉運器有明顯的下降(19)，因此多巴胺轉運器也被認為是巴金森氏症的臨床指標。

在精神疾病當中，多巴胺轉運器的理論仍然有很大的爭議，例如精神分裂症 (schizophrenia) 腦中多巴胺異常的理論已經被提出許多年，而最近的一項大規模回顧的分析，也顯示了似乎多巴胺轉運器在精神分裂症患者腦中的變化並不明顯(20)。而在憂鬱症 (major depressive disorder, MDD) 的患者當中，目前的結果就更不一致了，有些報導有增加，而有一些報導則認為是降低，因此多巴胺轉運器在憂鬱症患者腦中所扮演的角色仍然值得進一步的去探討及釐清。

在這些眾多分歧的研究當中，有許多的因素會影響到這些研究的結果，例如機器造影的條件，適當病患的選擇，化學合成藥物的過程，以及影像分析的方式(21)。這些因子往往都會造成不同的研究結果(22)。目前臨床研究用於造影多巴胺轉運器的藥物當中主要是包含了正子造影的 C-11-PE2I，以及單光子造影的 I-123-CIT 及 Tc-99m-TRODAT，而這些藥物在歐洲國家都已經設立了使用方面的準則，因此任何一個醫學中心要做多巴胺轉運器造影的時候都必須要遵照這一些準則，以求得一致的結果。利用 Tc-99m-TRODAT 造影多巴胺轉運器在台灣已經超過十五年以上的歷史，在台灣有非常傑出的文獻發表，然而 Tc-99m-TRODAT 這個造影劑目前仍然沒有一致的準則，而臨床醫生往往由於分析方法的困難，以及不一致的結果(23)，因此臨床使用上並不方便，而這點也可能是造成目前在台灣仍然不普遍使用 Tc-99m-TRODAT 造影精神疾病的原因。然而比較好的進步是目前台灣的健保體系已經將 Tc-99m-TRODAT 這個造影劑造影巴金森氏症患者腦中多巴胺轉運器的收費納入健保，因此在這項藥物的發展上面給予較多的支柱，然而這項藥物在精神疾病當中的使用仍然沒有被認可，而健保也沒有納入給付的方式，這些的現象都顯示 Tc-99m-TRODAT 這個造影劑在臨床的使用仍然有發展的空間(24)。本研究的目的是在於選取精神疾病的患者，進行腦中多巴胺轉運器的研究，並且利用再測信度(test re-test reliability)，以及三種不同影像分析的方式，希望找到一種分析的方式具有良好的再測信度、一致性(consensus)以及便利性。

研究方法

本研究經台北榮民總醫院人體試驗委員會通過後始進行。每位參與者在接受檢查之前均經過詳細的解釋，並且取得書面的同意文件才加入。患者之收集由本院精神科轉介，腦磁振造影由放射科執行，單光子造影多巴胺轉運器則由核子醫學部執行。正常人藉由網路及廣告收集。每位受試者在加入本研究皆接受精神專科醫師以 Mini Neuropsychiatric Interview (MINI) 會談。爾後，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外，也用於影像分析時腦結構之定位。收集到的影像利用 PMOD3.0 進行對位(image registration)，進行解剖構造包括紋狀體、視丘、小腦及座核之定位。造影結果利用比例平衡法 "Equilibrium-ratio analysis" 計算多巴胺轉運器之可用率 (Binding Potential, BP)公式如下：

$$BP = Bmax/KD = CROI/CREF$$

Bmax 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、CROI 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、CREF 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)(27, 28)。兩組受試者之年齡及多巴胺轉運器可用率以 student-t 統計檢定，精神疾病嚴重度量表則以斯皮爾曼相關係數分析與多巴胺轉運

器可用率之相關性，數值將採用 Mean±S.D.呈現。

III. 結果與討論

表一顯示受試者的基本資料，本研究共納入 18 位憂鬱症患者及 20 位正常組受試者，兩組平均年齡分別為 44.71±11.65 歲及 45.27±11.32 歲。總共有 13 位男性及 25 位女性接受單光子造影(single photon emission computer tomography, SPECT)及磁振造影(magnetic resonance image, MRI)。38 名受試者接受靜脈注射 ^{99m}Tc-TRODAT 後，在尾核(caudate)及被核(putamen)觀察到較高的累積輻射值(radioactivity)，小腦皮質則有比較低的累積輻射值；受試者大腦從結構性磁振造影(structure MRI, sMRI)的結果觀察無明顯外傷及萎縮，如圖一所示。

在大腦橫切面(axial view)以手動圈選尾核、被核及視丘(thalamus)分析多巴胺轉運體(dopamine transporter)特異性結合比值(specific uptake ration, SUR)前，先將單光子影像及磁振造影影像進行剛體(rigid body)轉換參數之影像融合(fusion)，再將定義的興趣區域套用在單光子影像上，如圖二所示，得出各部位的輻射值後計算特異性結合比值。研究中開發的自動化分析軟體介面如圖三，所有影像都需要經過正規化(normalised)，再由 automatic anatomic labeling(AAL) template 定義興趣區域的大小，經過型態學(morphology)的侵蝕(erode)及擴張(dilate)處理後，產生受試者的興趣區遮罩(mask)，再套用在單光子影像上，如圖四，得出各部位的輻射值後計算特異性結合比值。

兩種分析方法結果的盒狀圖如圖五，手動圈選比起自動化圈選的方式在各區域皆有較高的平均值(表二)。以組間相關係數(intraclass correlation coefficient)比較不同分析方式之一致性，發現相關係數在尾核部位呈現高度的一致性(Left caudate: ICC(2,1) = 0.83, Right caudate: ICC(2,1) = 0.77)，皮爾森相關係數(pearson's correlation coefficient)分析也證實了兩者間有高强度的相關(Left caudate: r = 0.90, Right caudate: r = 0.82)。

IV. 結論

在單光子造影分析的研究中我們使用 ^{99m}Tc-TRODAT 當作造影劑，造影多巴胺轉運體在大腦中分佈的情形，利用影像分析技術建立自動化的分析流程。本研究成功開發自動化分析模式，分析結果顯示雖然兩者分析方式之一致性高，兩種方式對於每位受試者之信度(reliability for a single individual)則表現不如預期，盒狀圖顯示自動化分析之結果分佈較手動來的低，此差異可能來自於興趣區域大小之選擇所造成。未來將進一步調整軟體內參數，使兩者一致性能達到 0.99，通過臨床驗證方便性及穩定度後再推廣到全國，以加速造影劑在臨床上的使用價值及市場占有率。

參考文獻

- [1] Yang KC, Ku HL, Wu CL, Wang SJ, Yang CC, Deng JF, et al. (2011): Striatal dopamine transporter binding for predicting the development of delayed neuropsychological sequelae in suicide attempters by carbon monoxide poisoning: A SPECT study.

- Psychiatry research*. 194:219-223.
- [2] Yang KC, Wang SJ, Hsieh WC, Lirng JF, Yang CC, Deng JF, et al. (2015): Longitudinal changes in the dopamine transporter and cognition in suicide attempters with charcoal burning. *Psychiatry research*. 231:160-167.
- [3] Chou YH, Yang BH, Chung MY, Chen SP, Su TP, Chen CC, et al. (2009): Imaging the serotonin transporter using (123)I-ADAM in the human brain. *Psychiatry research*. 172:38-43.
- [4] Chou YH, Wang SJ, Lin CL, Mao WC, Lee SM, Liao MH (2010): Decreased brain serotonin transporter binding in the euthymic state of bipolar I but not bipolar II disorder: a SPECT study. *Bipolar disorders*. 12:312-318.
- [5] Hsu JW, Wang SJ, Lin CL, Hsieh WC, Lirng JF, Shen YC, et al. (2011): Short term vs. long term test-retest reproducibility of (1)(2)(3)I-ADAM for the binding of serotonin transporters in the human brain. *Psychiatry research*. 194:224-229.
- [6] Chou YH, Chen CK, Wang SJ, Tsai SJ, Lirng JF, Liou YJ, et al. (2013): Association of brain serotonin transporter availability and brain-derived neurotrophic factor in models of serotonin transporter genotypes in healthy subjects. *Journal of clinical psychopharmacology*. 33:432-435.
- [7] Chou YH, Wang SJ, Lirng JF, Lin CL, Yang KC, Chen CK, et al. (2012): Impaired cognition in bipolar I disorder: the roles of the serotonin transporter and brain-derived neurotrophic factor. *Journal of affective disorders*. 143:131-137.
- [8] Chou YH, Lin CL, Wang SJ, Lirng JF, Yang KC, Chien Chang A, et al. (2012): Aggression in bipolar II disorder and its relation to the serotonin transporter. *Journal of affective disorders*.
- [9] Hsu JW, Lirng JF, Wang SJ, Lin CL, Yang KC, Liao MH, et al. (2014): Association of thalamic serotonin transporter and interleukin-10 in bipolar I disorder: a SPECT study. *Bipolar disorders*. 16:241-248.
- [10] Chou YH, Yang BH, Hsu JW, Wang SJ, Lin CL, Huang KL, et al. (2012): Effects of video game playing on cerebral blood flow in young adults: A SPECT study. *Psychiatry research*.
- [11] Lee SM, Chou YH, Li MH, Wan FJ, Yen MH (2008): Effects of haloperidol and risperidone on cerebrohemodynamics in drug-naive schizophrenic patients. *J Psychiatr Res*. 42:328-335.
- [12] Hsu JW, Su TP, Huang CY, Chen YS, Chou YH (2011): Faster onset of antidepressant effects of citalopram compared with sertraline in drug-naive first-episode major depressive disorder in a Chinese population: a 6-week double-blind, randomized comparative study. *Journal of clinical psychopharmacology*. 31:577-581.
- [13] Lin WC, Chou YH (2008): Aripiprazole effects on psychosis and chorea in a patient with Huntington's disease. *Am J Psychiatry*. 165:1207-1208.
- [14] Wu CL, Yang KC, Wang SJ, Chou YH (2011): Aripiprazole can treat psychotic features but not motor symptoms of Parkinson's disease: evidence from a SPECT study. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*. 35:278-279.
- [15] Lee CY, Chou YH (2011): Aripiprazole in treating a manic episode associated with hydrocephalus: a case report. *Prim Care Companion CNS Disord*. 13.
- [16] Chou YH, Chiu NM, Yang TT, Feng J, Chan CC, Lee HK (2013): An early improvement in depressive symptoms predicts symptomatic remission of schizophrenia treated with quetiapine: a multicenter, 4-week case-control study. *International clinical psychopharmacology*. 28:255-260.
- [17] Chou YH, Huang WS, Su TP, Lu RB, Wan FJ, Fu YK (2007): Dopamine transporters and cognitive function in methamphetamine abuser after a short abstinence: A SPECT study. *Eur Neuropsychopharmacol*. 17:46-52.
- [18] Roberts RC, Barksdale KA, Roche JK, Lahti AC (2015): Decreased synaptic and mitochondrial density in the postmortem anterior cingulate cortex in schizophrenia. *Schizophr Res*.
- [19] Volkow ND, Wang GJ, Smith L, Fowler JS, Telang F, Logan J, et al. (2015): Recovery of dopamine transporters with methamphetamine detoxification is not linked to changes in dopamine release. *Neuroimage*.
- [20] Kane JM, Correll CU (2015): Making the link between science and symptoms in schizophrenia. *J Clin Psychiatry*. 76:e15.
- [21] Wulff S, Pinborg LH, Svarer C, Jensen LT, Nielsen MO, Allerup P, et al. (2015): Striatal D2/3 Binding Potential Values in Drug-Naive First-Episode Schizophrenia Patients Correlate With Treatment Outcome. *Schizophr Bull*.
- [22] Chen KC, Yang YK, Howes O, Lee IH, Landau S, Yeh TL, et al. (2013): 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*. 39:378-386.
- [23] Schmitt GJ, la Fougere C, Dresel S, Frodl T, Hahn K, Moller HJ, et al. (2008): Dual-isotope SPECT imaging of striatal dopamine: first episode, drug naive schizophrenic patients. *Schizophr Res*. 101:133-141.
- [24] Uchida H, Suzuki T (2014): Dose and dosing frequency of long-acting injectable antipsychotics: a systematic review of PET and SPECT data and clinical implications. *J Clin Psychopharmacol*. 34:728-735.
- [25] Ninerola-Baizan A, Rojas S, Roe-Vellve N, Lomena F, Ros D, Pavia J (2015): Dopamine transporter imaging in the aged rat: a [(1)(2)(3)I]FP-CIT SPECT study. *Nucl Med Biol*. 42:395-398.
- [26] Rominger A, Cumming P, Brendel M, Xiong G, Zach C, Karch S, et al. (2015): Altered serotonin and dopamine transporter availabilities in brain of depressed patients upon treatment with escitalopram: A [123 I]beta-CIT SPECT study. *Eur Neuropsychopharmacol*. 25:873-881.
- [27] Jiang CF, Chang CC, Huang SH, Wu CH (2013): Segmentation of the striatum from MR brain images to calculate the 99mTc-TRODAT-1 binding ratio in SPECT images. *Comput Math Methods Med*. 2013:593175.

- [28] Carballedo A, Scheuerecker J, Meisenzahl E, Schoepf V, Bokde A, Moller HJ, et al. (2011): Functional connectivity of emotional processing in depression. *J Affect Disord.* 134:272-279.
- [29] Ward T, Fleming JS, Hoffmann SM, Kemp PM (2005): Simulation of realistic abnormal SPECT brain perfusion images: application in semi-quantitative analysis. *Phys Med Biol.* 50:5323-5338.
- [30] Nieto-Castanon A, Ghosh SS, Tourville JA, Guenther FH (2003): Region of interest based analysis of functional imaging data. *Neuroimage.* 19:1303-1316.
- [31] Hoexter MQ, Fadel G, Felicio AC, Calzavara MB, Batista IR, Reis MA, et al. (2012): Higher striatal dopamine transporter density in PTSD: an in vivo SPECT study with [(99m)Tc]TRODAT-1. *Psychopharmacology (Berl).* 224:337-345.
- [32] 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.
- [33] Pruessner JC, Li LM, Serles W, Pruessner M, Collins DL, Kabani N, et al. (2000): Volumetry of hippocampus and amygdala with high-resolution MRI and three-dimensional analysis software: minimizing the discrepancies between laboratories. *Cereb Cortex.* 10:433-442.
- [34] Maclaren J, Han Z, Vos SB, Fischbein N, Bammer R (2014): Reliability of brain volume measurements: a test-retest dataset. *Sci Data.* 1:140037.

阿茲海默症早期診斷藥物— ^{18}F 標誌組蛋白去乙酰化酶抑制劑之動物模式與造影研究

Animal Model and Imaging Study of ^{18}F -Labeled Histone Deacetylase Inhibitors as Early Diagnostic Agents for Alzheimer's Disease

計畫編號：MOST 105-NU-E-002-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：忻凌偉

e-mail：lwhsin@ntu.edu.tw

計畫參與人員：顏若芳、薛晴彥、陳穎姍、吉彥婷

執行單位：國立臺灣大學醫學院藥學專業學院藥學系

摘要

本研究設計一系列新穎可穿透血腦屏障 (BBB) 的組織蛋白去乙酰化酶抑制劑 (HDACi)，經活性評估及放射化學合成以發展具有早期診斷阿茲海默症 (AD) 和其他中樞神經系統失調的正子斷層掃描 (PET) 藥物。這些化合物展現高度 HDAC1 與 HDAC2 抑制活性並能穿透 BBB。氟十八標記 HDACi 的放射化學合成與分析方法皆已建立。同時，三重變異之 AD 鼠動物模式也成功建置完成，可與 PET 結合用以評估 HDAC 在 AD 中扮演的角色。

關鍵詞：組織蛋白去乙酰化酶抑制劑、阿茲海默症、正子斷層掃描。

探針對於 HDAC 在 AD 中扮演角色的確定，AD 的早期診斷，治療監測，新藥和新治療方法的開發將極有價值。

II. 主要內容

本研究以苯甲酰胺 **4a** 作為先導化合物，設計與合成一系列具穿透 BBB 潛力的新穎 HDACi。在體外以各種 HDAC 亞型進行抑制活性測定，選擇活性較佳的化合物評估其 BBB 穿透能力。將候選化合物進行氟十八的放射標記並開發分析方法。同時建立 HDAC 正子探針的 AD 動物模式，並利用此動物模式進行正子造影研究，以決定新穎氟十八標記 HDACi 的 BBB 通透能力。

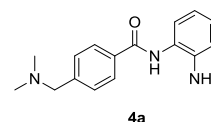
Abstract

A novel series of blood-brain barrier (BBB) permeable histone deacetylase inhibitors (HDACi) was designed, biologically evaluated, and radiosynthesized for the development of potential positron emission tomography (PET) imaging agents for early diagnosis of Alzheimer's disease (AD) and other CNS applications. These ligands exhibited potent activity against HDAC1 and HDAC2 at nM-level and demonstrated high BBB permeability determined by PAMPA assay. The methods of radiosynthesis and analysis of ^{18}F -labeled HDACi have been established. In addition, the 3×Tg-AD (APP_{SWE}, Tau_{P301L}, PS1) mice model was established for the investigation of the role of HDAC in AD using PET.

Keywords: histone deacetylase inhibitor, Alzheimer's disease, potential positron emission tomography.

III. 結果與討論

我們成功合成一系列新穎的 HDACi 化合物中，其中對 HDAC1 的抑制活性可達 28 與 33 nM；對於 HDAC2 的抑制活性則達 150 nM。在評估化合物通透 BBB 能力的 PAMPA 實驗中，穿透力最強的化合物，其穿透速率可分別達到陽性對照標準品的 86% 與 94%。候選化合物成功地進行氟十八的放射標記，相關的品管分析方法亦完成開發。同時利用三重變異之 3×Tg-AD (APP_{SWE}, Tau_{P301L}, PS1) 鼠，建立 AD 動物模式，並正用於評估這些新穎氟十八標記 HDACi 的 BBB 通透能力。



I. 前言

AD 為目前最常見的失智症，並且是在已開發國家中花費最高的疾病之一。若能及早發現因而延緩 AD 的發病，則失智症造成的社會負擔和醫療照護費用將可顯著降低。由於缺乏早期診斷 AD 的工具，病人通常在展現顯著臨床症狀後才被診斷為 AD，此時病人腦中已經積累太多的不可逆損傷。HDACi 具增強神經退化性疾病（如 AD）及其他中樞神經系統（CNS）失調（如思覺失調、癲癇、抑鬱、成癮）患者，記憶，學習能力以及認知功能的潛力。因此，可非侵入性在生體內即時觀察及定量 HDAC 在人類大腦中含量和活性的 HDAC 正子

IV. 結論

本計畫的具體目標是：1) 評估苯甲酰胺衍生物的 BBB 通透能力；2) 相對應之氟十八標記 HDACi 的合成及其安定性研究；3) 建立開發 HDAC 正子探針的 AD 動物模式；4) 利用 AD 動物模式進行正子造影研究，以決定氟十八標記 HDACi 的 BBB 通透能力。所有的工作項目均已完成，同時具體目標亦已全數達成。目前，這些新穎的氟十八標記 HDACi 正子藥物正在持續進行深入的研究，以評估其發展作為可早期診斷 AD 或其他 CNS 失調的正子探針藥物。

發展新穎氟-18 組蛋白去乙酰化酶抑制劑作為中樞神經系統造影劑之研究

Synthesis and biological evaluation of F-18 HDAC inhibitors for central neuron system PET imaging

計畫編號：MOST 105-NU -E-010-001 -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：蔡念家、李庚穎、張文議、李佳哲

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

以表觀基因學酵素作為標靶的對象去處理潛在基因表現之失調、對疾病的發病機制的了解應有所助益。其中組蛋白去乙酰化酶抑制劑具有廣泛且潛在能力運用於癌症治療上，因發展一非侵入性之標靶探針作為組蛋白去乙酰化酶表現在人體身上的分布跟功能顯影會加速在心肌疾病和腦神經退化性疾病上醫學研究和藥物開發的腳步。因此本計畫嘗試開發新穎的 ^{18}F -AFHA 並與 ^{18}F -FAHA 作比較探討其作為氟-18 正子造影劑之潛力，藉由新穎的銅媒介標記技術，於苯環上成功的進行 F-18 標誌合成出 ^{18}F -AFHA，同時也標誌 ^{18}F -FAHA，此些藥物可分別藉由 SPE 及 HPLC 的純化方式分別獲得並有不錯的放射化學產率及純度。在生物活體正子造影實驗，在 ^{18}F -FAHA 注射於正常老鼠的後，分別以不同的 Amide 及 Pmode 完成影像的分析其在正常大鼠腦部之 PET/CT imaging，在有無 SAHA 預處理下，其中攝取 ^{18}F -FAHA 之影像差異，可發現在 SAHA 處理後， ^{18}F -FAHA 明顯攝取量在不同切面下皆降低約可達到兩倍的差別，但 ^{18}F -AFHA 則由於周邊器官清除的速率較快，因此無法達成腦部 HDAC 表現造影之目的，雖然初步並未完成預期之結果，但日後可能可藉由將其乙醯的部分更改為與 FAHA 相同為氟代乙醯或三氟代乙醯，應有助於作為腦部 HDAC 表現之正子造影使用。

關鍵詞：表觀基因學，去乙酰化酶抑制劑，氟-18 正子造影。

development of brain-penetrant, metabolically stable HDAC radiotracers and to understand the role of fluorine substitution on brain penetration.

Keywords: Epigenetic, HDACs

I. 前言

表觀基因學酵素作為標靶的對象去處理潛在基因表現之失調、對疾病的機制了解是一種重要課題。其中組蛋白去乙酰化酶抑制劑具有廣泛且具潛在能力運用於癌症治療上，因發展一非侵入性之標靶正子造影探針作為組蛋白去乙酰化酶表現在人體身上的分布跟功能顯影，將可加速在心肌疾病和腦神經退化性疾病上醫學研究和藥物開發。因此本計畫嘗試開發新穎的 ^{18}F -AFHA 並與 ^{18}F -FAHA 作比較探討其作為氟-18 正子造影劑之潛力，

II. 主要內容

藉由新穎的銅媒介標記技術，於苯環上成功的進行 F-18 標誌合成出 ^{18}F -AFHA，同時也標誌 ^{18}F -FAHA，此些藥物可分別藉由 SPE 及 HPLC 的純化方式分別獲得並有不錯的放射化學產率及純度，進一步以大鼠進行正子斷層造影和電腦斷層造影並與 SAHA 進行 blocking：以驗證此些放射藥物作為組蛋白去乙酰化酶表現之正子造影劑之能力。

III. 結果與討論

以苯胺，4-氟化苯胺及 4-碘化苯胺經由與 6-胺基己酸進行醯胺化的反應，再進行乙醯基化後即可獲得此些結構的類似骨架，其中 ^{18}F -FAHA 之標誌前驅物，標準品與合成及 ^{18}F -AFHA 與 ^{18}F -FAHA 標準品，即可經由此一類似的反應獲得，而 ^{18}F -FAHA 的標誌前趨物則再進行保護與將碘取代置換成硼酯取代後即可獲得，此些標誌前驅物及標準品的總產率皆大於 20%。 ^{18}F -AFHA 的放射化學標誌是藉由新穎的銅媒介標記技術，於苯環上成功的進行 F-18 標誌出 ^{18}F -AFHA，在進一步水解純化後，其放射化學產率約 20%，而放射化學純度 $\geq 95\%$ 。 ^{18}F -FAHA 則藉由直接的 $\text{S}_{\text{N}}2$ 取代反應獲得，經製備級 HPLC 分離後得到，放射化學產率大於 30%，而放射化學純度 $\geq 95\%$ 。以正常之 SD 大鼠經尾靜脈分別注射 ^{18}F -FAHA 或 ^{18}F -AFHA 藥物後，進行正子造影之實驗。在注射 ^{18}F -FAHA 後進行正子造影可分別在橫切面 (Transverse) 及冠狀面 (Coronal) 觀察到藥物累積，另外利

Abstract

Epigenetic enzymes are suitable targets to treat the essential gene expression regulation that contribute to disease pathogenesis. Histone deacetylases (HDACs) have shown possible in treatments against cancer and revealing evidences supports their targeting in the context of cardiovascular disease and central nervous system dysfunction. To develop the proper molecular agent for non-invasive imaging to explain the distribution and functional roles of HDACs in humans will accelerate medical research and drug discovery in this field. Here, we report the radiosynthesis of ^{18}F -FAHA and novel ^{18}F -AFHA as candidate radiotracers (substrate-based radioligand) for HDAC and their evaluation in SD rat brain. PET studies showed very low brain uptake and rapid metabolism of ^{18}F -AFHA. Maybe the structure could be modified with the fluoroacetyl group that be the same with ^{18}F -FAHA. Further structural refinement is needed for the

用 SAHA (25mg) 事先注射於 SD 大鼠後進行 blocking，再注射 [^{18}F]FAHA 可發現，SAHA 可明顯將 HDAC blocking，以致 [^{18}F]FAHA 於腦中積聚降低，其比值約在 2 倍左右，可觀察到 [^{18}F]FAHA 的確具有專一性。另外在注射 ^{18}F -AFHA 藥物後， ^{18}F -AFHA 則無法有效累積在腦中，其中 [^{18}F]FAHA 累積量皆高於 ^{18}F -AFHA，由以上初步結果發現我們新設計的藥物並無較好的積聚效果。

IV. 結論

目前我們已經成功完成 ^{18}F -AFHA 與 ^{18}F -FAHA 的合成及分析，此些藥物可分別藉由 SPE 及 HPLC 的純化方式分別獲得並有不錯的放射化學產率及純度，其中此類一步 F-18 標誌在苯環上的技術將有助於未來造影藥物的開發。在後續的正常老鼠的腦部正子造影實驗，以 ^{18}F -FAHA 注射後，其在正常大鼠腦部之 PET/CT imaging，並分別以 Amide 及 Pmode 完成影像的分析，同時建立在有無 SAHA 預處理下，攝取 ^{18}F -FAHA 之影像差異，可發現在 SAHA 處理後， ^{18}F -FAHA 明顯攝取量在不同切面下皆降低約可達到兩倍的差別，而 ^{18}F -AFHA 則由於周邊器官清除的速率較快，因此無法達成腦部 HDAC 表現造影之目的，日後可能可以藉由將其乙醯的部分更改為與 FAHA 相同為氟代乙醯，如此因有助於作為腦部 HDAC 表現之正子造影使用。

參考文獻

- [1] Schmitt, M. and Matthies H. Biochemical studies on histones of the central nervous system. II. Acetylation of histones from neurons and glia of the rat brain in vitro. *Acta Biol Med Ger*, 1979. **38**(4): p. 677-82.
- [2] Levenson, J.M., et al., Regulation of histone acetylation during memory formation in the hippocampus. *J Biol Chem*, 2004. **279**(39): p. 40545-59.
- [3] Alarcon, J.M., et al., Chromatin acetylation, memory, and LTP are impaired in CBP $\pm$ mice: a model for the cognitive deficit in Rubinstein-Taybi syndrome and its amelioration. *Neuron*, 2004. **42**(6): p. 947-59.
- [4] Lattal, K.M. and M.A. Wood, Epigenetics and persistent memory: implications for reconsolidation and silent extinction beyond the zero. *Nat Neurosci*, 2013. **16**(2): p. 124-9.
- [5] Fischer, A., et al., Opposing roles of transient and prolonged expression of p25 in synaptic plasticity and hippocampus-dependent memory. *Neuron*, 2005. **48**(5): p. 825-38.
- [6] Cruz, J.C., et al., Aberrant Cdk5 activation by p25 triggers pathological events leading to neurodegeneration and neurofibrillary tangles. *Neuron*, 2003. **40**(3): p. 471-83.
- [7] Cruz, J.C., et al., p25/cyclin-dependent kinase 5 induces production and intraneuronal accumulation of amyloid beta in vivo. *J. Neurosci*, 2006. **26**(41): p. 10536-41.
- [8] Broide, R.S., et al., Distribution of histone deacetylases 1-11 in the rat brain. *J Mol Neurosci*, 2007. **31**(1): p. 47-58.
- [9] Fischer, A., et al., Targeting the correct HDAC(s) to treat cognitive disorders. *Trends Pharmacol Sci*, 2010. **31**(12): p. 605-17.
- [10] Francis, Y.I., et al., Dysregulation of histone acetylation in the APP/PS1 mouse model of Alzheimer's disease. *J Alzheimers Dis*, 2009. **18**(1): p. 131-9.
- [11] Ricobaraza, A., et al., Phenylbutyrate ameliorates cognitive deficit and reduces tau pathology in an Alzheimer's disease mouse model. *Neuropsychopharmacology*, 2009. **34**(7): p. 1721-32.
- [12] Guan, J.S., et al., HDAC2 negatively regulates memory formation and synaptic plasticity. *Nature*, 2009. **459**(7243): p. 55-60.
- [13] Graff, J., et al., An epigenetic blockade of cognitive functions in the neurodegenerating brain. *Nature*, 2012. **483**(7388): p. 222-6.
- [14] Kilgore, M., et al., Inhibitors of class 1 histone deacetylases reverse contextual memory deficits in a mouse model of Alzheimer's disease. *Neuropsychopharmacology*, 2010. **35**(4): p. 870-80.
- [15] McQuown, S.C., et al., HDAC3 is a critical negative regulator of long-term memory formation. *J Neurosci*, 2011. **31**(2): p. 764-74.
- [16] Govindarajan, N., et al., Sodium butyrate improves memory function in an Alzheimer's disease mouse model when administered at an advanced stage of disease progression. *J Alzheimers Dis*, 2011. **26**(1): p. 187-97.. *Appl Radiat Isot* 2008; 66:513-22

以[F-18]FEONM/microPET 及多重分子影像模式評估薑黃素結合游離輻射於原位多型性神經膠母細胞瘤大鼠模式之療效探討

Therapeutic evaluation of curcumin combined with ionizing radiation in orthotopic GBM rat model using [F-18]FEONM/microPET and multimodality imaging

計畫編號：MOST 105-2623-E-010-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃正仲

e-mail：jjhwang@ym.edu.tw

計畫參與人員：陳傳霖、陳振宗、莊惠燕、李佳哲、羅逸軒

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

濤蛋白已被報導具預測腫瘤對臨床化療藥物太平洋紫杉醇 (paclitaxel, 汰癌勝注射液) 預後的潛力。本研究於兩種荷人類神經膠質瘤動物模式，評估 ^{18}F -FEONM 用於作為偵測腫瘤濤蛋白表現量之正子造影。經由建立 ^{18}F -FEONM 之放射性標幟及純化，將藥物應用於 GBM4801 及 U87MG 這兩株人類神經膠質瘤細胞進行細胞實驗及建立荷腫瘤免疫缺乏鼠模式。生化分析結果發現 GBM4801 細胞株的濤蛋白表現量約為 U87MG 細胞株的 3.5 倍。將兩細胞株與 Paclitaxel 共培養後，低表現之 U87MG 細胞的存活率大幅降低 ($\text{IC}_{50} = 99.1 \pm 1.2 \text{ nM}$)，而 GBM4801 細胞存活率則較高 ($\text{IC}_{50} = 1950 \pm 1.8 \text{ nM}$)，顯示 GBM4801 細胞對 paclitaxel 有較強的抗藥性。放射藥物細胞攝取實驗顯示，GBM4801 細胞對 ^{18}F -FEONM 攝取量高於 U87MG。再以 ^{18}F -FEONM 進行小動物正子動態造影，結果顯示 ^{18}F -FEONM 於 GBM4801 腫瘤的積聚量亦顯著較高於 U87MG 腫瘤。由此可發現 ^{18}F -FEONM 在細胞攝取實驗與正子造影結果皆顯示， ^{18}F -FEONM 於腫瘤的積聚量與濤蛋白表現量具有高度相關性，對於 paclitaxel 具較強抗藥性 GBM4801 腫瘤具有較高的攝取能力。本研究結果發現， ^{18}F -FEONM 可做為預測及評估 paclitaxel 或其他臨床藥物治療腫瘤效果之正子造影潛力。

關鍵詞： ^{18}F -FEONM，太平洋紫杉醇，濤蛋白，正子造影。

Abstract

Tau protein was also regarded as a promising predictive marker of paclitaxel sensitivity in cancer chemotherapy. This study evaluated the feasibility of ^{18}F -FEONM for detecting tau protein expression in two human glioma tumor-bearing mouse models. The level of tau protein expression in GBM4801 glioma cells was determined 3.5-fold higher than that in U87MG glioma cells. After treatment with paclitaxel, the viability of U87MG cells was dramatically reduced ($\text{IC}_{50} = 99.1 \pm 1.2 \text{ nM}$) compared with that of GBM4801 cells ($\text{IC}_{50} = 1950 \pm 1.8 \text{ nM}$). The uptake of ^{18}F -FEONM in GBM4801

cells was higher than that in U87MG cells after 120 min of incubation. Animal PET imaging of the SCID mice that bearing GBM4801 xenograft exhibited more remarkable tumor accumulation after administration of ^{18}F -FEONM than those bearing U87MG xenograft during the period of experiment. The results observed in cellular uptake and PET imaging studies correlated well with the tau protein expression of cell lines. Our study demonstrates that ^{18}F -FEONM may be a promising PET probe for imaging the expression of tau protein in human gliomas to evaluate the therapeutic efficacy of paclitaxel or other therapeutic drugs in clinic.

Keywords: ^{18}F -FEONM, paclitaxel, Tau protein, PET

I. 前言

濤蛋白 (tau protein) 為一種微管相關蛋白 (microtubule-associated proteins, MAPs)。與非神經元細胞比較，濤蛋白於神經元細胞表現量較高，主要功能為維持神經元細胞軸突微管的穩定性及其靈活性。近期研究發現^[1]，濤蛋白於腫瘤之表現量影響其腫瘤的轉移能力。細胞形狀的維持是經由細胞膜內側的肌動蛋白皮質 (actin cortex) 來維持，當肌動蛋白皮質變為較鬆散時，其細胞膜的可變性就可增加，因此，腫瘤細胞的濤蛋白表現量多寡將影響其轉移能力，太平洋紫杉醇 (汰癌勝，Paclitaxel) 已證實在多種不同之惡性腫瘤具有抗癌作用，尤其是卵巢癌與轉移性乳癌。其殺腫瘤之作用機轉為影響腫瘤細胞內的微管系統，造成細胞於有絲分裂時死亡。因此，研究認為，濤蛋白表現量會影響腫瘤細胞對於紫杉醇治療之靈敏度進而對其治療預後造成影響。因此開發可專一性與濤蛋白結合的正子造影對比劑 ^{18}F -FEONM 評估對濤蛋白專一結合之特性，將有潛力作為腫瘤濤蛋白表現量之正子造影探針使用。

II. 主要內容

核研所先前研究顯示 ^{18}F -FEONM 可作為針對濤蛋白進行阿茲海默症之正子造影，其他研究發現濤蛋白於腫瘤扮演的角色與轉移能力有關，在濤蛋白表現量高的腫瘤其轉移能力高，反之則轉移能力低。本計畫將選用

GBM4801 及 U87MG 這兩株人類神經膠質瘤細胞進行細胞實驗及建立荷腫瘤免疫缺乏鼠模式。分析兩種細胞之濤蛋白表現量、Paclitaxel 之細胞毒性及 ^{18}F -FEONM 細胞攝取，並於兩種荷人類神經膠質瘤動物模式，評估 ^{18}F -FEONM 用於偵測腫瘤濤蛋白表現量之潛力，冀未來可藉由 ^{18}F -FEONM 造影結果提供臨床醫師評估病患是否適合進行 Paclitaxel 治療之參考指標。

III. 結果與討論

由生化分析結果發現兩株人類神經膠質瘤細胞，GBM4801 細胞株的濤蛋白表現量約為 U87MG 細胞株的 3.5 倍。進一步將兩細胞株分別與 Paclitaxel 共培養後，低表現之 U87MG 細胞的存活率大幅降低 ($\text{IC}_{50} = 99.1 \pm 1.2 \text{ nM}$)，而 GBM4801 細胞存活率則較高 ($\text{IC}_{50} = 1950 \pm 1.8 \text{ nM}$)，顯示 GBM4801 細胞對 paclitaxel 有較強的抗藥性。放射藥物 ^{18}F -FEONM 於兩細胞株中的細胞攝取實驗顯示，GBM4801 細胞對 ^{18}F -FEONM 有較高的攝取量相較於 U87MG。 ^{18}F -FEONM 的小動物正子動態造影，結果顯示放射藥物於 GBM4801 腫瘤的積聚量亦顯著較高於 U87MG 腫瘤。由此可發現 ^{18}F -FEONM 在細胞攝取實驗與正子造影結果皆顯示， ^{18}F -FEONM 於腫瘤的積聚量與濤蛋白表現量具有高度相關性，對於 paclitaxel 具較強抗藥性 GBM4801 腫瘤具有較高的攝取能力。

IV. 結論

兩株人類神經膠質瘤細胞 GBM4801 與 U87MG 細胞其濤蛋白表現量明顯不同，因此 ^{18}F -FEONM 在兩株腦細胞中之積聚也明顯不同，在活體正子造影亦顯示荷 GBM-8401 腫瘤之小鼠動物中也驗證攝取較多 ^{18}F -FEONM。由結果可知，腫瘤細胞濤蛋白表現之多寡將影響太平洋紫杉醇之毒性效果，因此， ^{18}F -FEONM 正子造影劑應有潛力作為判斷腫瘤細胞濤蛋白表現之指標並有機會提供臨床評估病患是否適合進行 Paclitaxel 治療之參考。

參考文獻

- [1] MA Matrone, RA Whipple, K Thompson, et al., *Oncogene* (2010) 29, 3217–3227
- [2] Songbo Xie, Angela Ogden, Ritu Aneja and Jun Zhou, *Medicinal Research Reviews*, 36, No. 2, 300–312, 2016.
- [3] Santwana Kar, Juan Fan, Michael J. Smith, Michel Goedert, and Linda A. Amos, *The EMBO Journal* Vol.22 No.1 pp.70-77, 2003.
- [4] Smoter et al. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research* 2013, 32:25.
- [5] Chang Gung *Journal of Pharmacy* 9.15.2012.
- [6] Images courtesy of PNAS and David Geffen School of Medicine at UCLA.
- [7] Eric D. Agdeppa, Vladimir Kepe, Jie LiuThe, et al., *Journal of Neuroscience*, 2001, Vol. 21 RC189.

- [8] J.-P. Hsu et al., *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 68 (2016) 119–129.

結合銻-188-微脂體、化學治療藥物應用於轉移性大腸直腸癌及黑色素瘤治療

計畫編號：MOST 105-2623-E-195-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳裕仁

e-mail：chenmdphd@gmail.com

計畫參與人員：劉欣怡

執行單位：財團法人馬偕紀念醫院放射腫瘤科

摘要

黑色素瘤是一種高度惡性以及高轉移性的腫瘤，儘管許多治療策略正蓬勃發展中，轉移性黑色素瘤病人的平均存活仍低於 12 個月，因此，針對轉移黑色素瘤臨床上仍須開發更有效的治療策略。奈米微脂體是一種能有效運送臨床藥物的載體，除了臨床治療應用外，微脂體可包覆放射性核種（如 rhenium-188, ^{188}Re ），達到同時擁有治療與影像觀察的功能。本研究期望探討在腦轉移黑色素瘤及大腸直腸癌老鼠模式中，利用合併化學治療與近距放射治療提高腦轉移性腫瘤毒殺效果。研究結果顯示，內頸動脈注射方式可成功建立腦轉移小鼠，其成功率與致死率均優於心臟注射方式。

利用黑色素瘤腦轉移小鼠模式，我們觀察到銻 188-微脂體可特异性聚積在腦中。可惜的是，單次給與銻 188-微脂體或合併化學治療均無法減少腦轉移性黑色素瘤在小鼠中的高度惡性。在大腸直腸癌小鼠模式中我們觀察到，單次合併銻 188-微脂體與化療藥物 5FU，可短暫抑制腦轉移性大腸直腸癌生長情形，顯示給與多次合併策略可能達到更加治療效果。分析腫瘤微環境顯示，銻 188-微脂體治療顯著增加腫瘤相關巨噬細胞的比例，而 M2 macrophages 增加比例尤其明顯。利用 liposomal clodronate 將巨噬細胞清除後，銻 188-微脂體在小鼠肝中含量降低，在小腸及血液中含量則變高。未來我們將針對銻 188-微脂體對巨噬細胞的影響、腫瘤微環境的平衡做更進一步探討。

關鍵詞：銻-188 微脂體、腦轉移、黑色素瘤、大腸直腸癌、腫瘤微環境

Abstract

Melanoma is an aggressive and highly metastatic disease, and the mean survival of patients with brain metastatic melanoma is still less than 12 months. Clearly, development of new therapeutic strategies for brain metastatic melanoma is of clinical importance. Nanoliposomes have been used as effective carriers for drug delivery due to their long circulating character and the enhanced permeability and retention effect at tumor sites. In addition to therapeutic application, liposomes encapsulated with radionuclide (such as rhenium-188, ^{188}Re) possess both therapeutic and imaging functions. Our results showed brain metastatic mouse model was successfully established with internal carotid artery injection. The

successful and death rate of carotid artery injection method are better than that of intra-cardiac method.

In brain metastatic melanoma mice model, NanoSPECT/CT analysis demonstrated the specific uptake of ^{188}Re -liposome within brain region. However, therapeutic analysis revealed that combination treatment could not relieve the malignancy of brain metastatic melanoma xenografts. In brain metastatic colorectal cancer mice model, combination of chemotherapy and ^{188}Re -liposome transiently suppressed tumor growth. Tumor microenvironment study revealed that ^{188}Re -liposome significantly increased the level of tumor-associated macrophages, especially M2 macrophages. After depletion of macrophage, the level of ^{188}Re -liposome decreased in liver, but increased in small intestine and blood. Next, we will investigate the role of ^{188}Re -liposome on the induction of macrophages and the balance of tumor microenvironment.

Keywords: ^{188}Re -liposome, brain metastasis, melanoma cancer, colorectal cancer, tumor microenvironment

I. 前言

Metastatic malignant tumor is one of the common causes of death in the worldwide. The current result is aimed to analyze the molecular imaging, radiation dose, pharmacokinetics and efficacy of ^{188}Re -liposome alone or in combination with chemotherapy. Understanding the role of ^{188}Re -liposome in radiotherapy is a crucial step that will enrich our knowledge regarding the radiotherapy, which provides insight of radiation regimen in malignant cancer. Analysis of the correlation between ^{188}Re -liposome and chemotherapy may provide a new therapeutic approach to treat metastatic melanoma cancers in a better way.

II. 主要內容

Generation of melanoma cells stably expressing luciferase

To monitor the location of growth rate of melanoma cells in vivo, lentivirus infection system was used to establish stable clone of melanoma cells carrying luciferase gene (B16F10-luc). The pLT-3R vector (expressing three marker genes: luciferase, RFP, thymidine kinase) was successfully infected into B16F10 cells. Compare to previous established CT26-luciferase cells, the luciferase intensity can be detected from 2000 cells.

Establishment of brain metastasis melanoma mouse model

In our preliminary study, brain metastasis mouse model was established with intra-cardiac injection method by using mouse colorectal cancer CT26-luc cells. Different cell concentrations ($2, 5, 10 \times 10^5$) were tested and injected into mouse left-ventricle. IVIS image analysis showed there was only 6% positive signal near brain region 1 week post-injection, indicating the specificity of brain metastasis was too low. Besides, high death rate (over 90%) was observed after two week of injection due to the non-specific distribution of cancer cells after intra-cardiac injection.

To overcome the low successful rate of brain metastasis and high death rate problems by intra-cardiac injection, cell injection through common carotid artery was tested and examined. One week after injection of CT26-luc cells into carotid artery, IVIS image showed there was around 30% of luciferase-positive mice presented brain metastasis candidates. Moreover, the death rate of mice after two weeks carotid artery injection was about 20%, indicating brain metastatic mouse model generating by carotid artery injection was feasible than intra-cardiac injection method. For melanoma B16F10-luc cells, there were about 40% of luciferase-positive mice showed luciferase signal near brain region, similar result observed in CT26-luc cells. One difference between brain metastasis colorectal cancer and melanoma mouse model was the death rate, and only 20% of mice died from brain metastatic colorectal mode whereas over 90% of mice died from brain metastatic melanoma mode at 3 weeks post-injection. These results revealed that melanoma cells metastasized to brain were more malignant than colorectal cancer cells.

To increase the cell deliver specificity into mice brain, we further ligated external carotid artery (ECA) and injected tumor cells through internal carotid artery (ICA), the main artery supplied to brain region. Methylene blue staining showed only brain region was successfully stained in blue via ICA injection method. The specificity of brain metastasis was successfully increased to 50~65% using ICA injection method both in brain metastatic colorectal and melanoma xenografts.

To make sure the precise location of brain-metastatic melanoma cells in vivo, mice were further sacrificed and dissected. The melanoma cells (black) indeed crossed brain blood barrier and grew within mouse brain. Besides, the death of mouse was not proportional to the size the cancer cells growth in brain, as the localization of cancer cells colonized seems to play more decisive role.

Specific uptake of Re188-liposome in vivo

Live image of Re188-liposome uptake in brain metastasis melanoma mouse was obtained by NanoSPECT/CT analysis. At first, melanoma B16F10-luc cells was injected through carotid artery. After two weeks, luciferase signal was monitored by IVIS system to filter the

mice of brain metastasis. Brain metastasis melanoma xenografts were transferred to INER and injected Re188-liposome ($500 \mu\text{Ci}$) through tail vein. NanoSPECT/CT analysis was used to access the live image of Re188-liposome uptake at 1h and 24h post-injection. To reduce background noise, mice were further sacrificed at 24h post-injection and scanned the mouse brain by NanoSPECT/CT system only. Both live images and brain organ images demonstrated Re188-liposome was accumulated within mouse brain.

Therapeutic efficacy after combination of Re188-liposome and chemotherapy in brain metastatic mice model.

To evaluate the therapeutic efficacy for Re188-liposome and for the combination of Re188-liposome and chemotherapy, brain metastatic mice were divided into four groups: control, dacarbazine (DTIC), Re188-liposome, and DTIC+Re188-liposome. IVIS analysis showed all mice in control group were died at 12 days post-treatment, while mice in single treatment (DTIC or Re188-liposome) and combined treatment groups still survived. At 14 days post-treatment, only mice in DTIC group were alive, indicating combination treatment had no obvious better therapeutic effect in brain metastatic melanoma mice model.

To monitor the side effect after the combination of chemotherapy and Re188-liposome, mice weight, white blood cell (WBC) count, liver function (alanine aminotransferase, ALT) and kidney function indicator (creatinine, CRE) were measured in each group. The mice weight in control group was dropped since 7 days post-treatment, while only DTIC group slightly delayed this effect. Within 7 days after treatment, the level of WBC, ALT and CRE kept in normal range, suggesting combination treatment did not cause severe side effect. After 7 days of treatment, all mice became weaker and weaker due to brain metastatic malignancy, so we did not collect the blood sample at later time points.

Due to the high death rate in brain metastatic melanoma xenografts, we also examined the therapeutic effect after combination of chemotherapy and Re188-liposome in colorectal brain metastasis mice model. The single treatment or combined treatment could not relieved the lethality of brain metastatic colorectal xenografts. However, tumor growth in murine lung was transit reduced at 7 days post-treatment in combination group, suggesting multiple exposure of combination treatment (5FU and Re188-liposome) is worth to access in brain metastatic colorectal xenografts.

In regard of biological toxicities, four parameters were examined including mice weight, white blood cells, live and kidney functions. In control group, mice weight gradually decreased with time, while mice weight in single or combined treatments all delayed reduction compared to control. This result indicated both single and combined treatments transiently relieved the lethality of brain metastatic colorectal xenografts. White blood cells count and liver and kidney function indicators showed single

treatment and combined treatment did not result in biological toxicities at late time point.

Effect of Re188-liposome on tumor microenvironment

To understand the effect of Re188-liposome on tumor microenvironment, we analyzed tumor-associated macrophages in our previous established mice model. After 3 days treatment of different dosage of Re188-liposome, mice spleen was collected and analyzed the cell surface markers specific for M1 (F4/80+, CD38+), M2 (F4/80+, CD206+), Treg (FOXP3+, CD25+), and myeloid-derived suppressor, MDSC (GR1+, CD11b+) by flow cytometry. Re188-liposome significantly increased the level of macrophages, especially M2 macrophages in brain metastatic xenografts. The level of Treg was slightly increased after high dosage exposure of Re188-liposome, while the level of MDSC was not enhanced after Re188-liposome treatment.

To examine the role of Re188-liposome in macrophage activation, we depleted murine macrophages using liposomal clodronate. Our result demonstrated the level of M1 and M2 macrophages were successfully suppressed by liposomal clodronate. Treatment of liposomal clodronate followed by Re188-liposome also successfully reduced macrophage activation by Re188-liposome. Next, we will investigate the therapeutic efficacy of Re188-liposome after depletion of murine macrophages.

Furthermore, biodistribution of Re188-liposome after macrophage depletion was examined. The data revealed that macrophage depletion by liposomal clodronate significantly increased the level of Re188-liposome in small intestine, pancreas, and blood, but decreased the level of Re188-liposome in liver ($p < 0.05$). Besides, Re188-liposome in tumor site was decreased after depletion of macrophages, implying macrophages were likely to be the cargo for Re188-liposome transportation.

III. 結論

1. Brain metastasis colorectal and melanoma mouse model was successfully established by internal carotid artery injection method.
2. Brain metastatic melanoma cells were more malignant than brain metastasis colorectal cells in vivo. Thus, brain metastatic colorectal xenografts were more suitable mouse model for therapeutic strategy test.
3. Re188-liposome can be uptake by brain metastatic melanoma cells as demonstrated by live image and brain organ scanning.
4. Re188-liposome significantly increases the level of tumor-associated macrophages, especially for M2 macrophage in lung metastatic mice model.
5. Depletion of macrophages increased Re188-liposome in blood but decreased Re188-liposome in tumor site.

參考文獻

[1] Gray-Schopfer V, Wellbrock C, Marais R: Melanoma biology and new targeted therapy. *Nature* 2007, 445(7130):851-857.

[2] Jemal A, Bray F, Center MM, Ferlay J, Ward E, Forman D: Global cancer statistics. *CA Cancer J Clin* 2011, 61(2):69-90.

[3] Sneyd M, Cox B: The control of melanoma in New Zealand. *N Z Med J* 2006, 119(1242):U2169.

[4] Shoo BA, Kashani-Sabet M: Melanoma arising in African-, Asian-, Latino- and Native-American populations. *Semin Cutan Med Surg* 2009, 28(2):96-102.

[5] Lee MS, Lin RY, Chang YT, Lai MS: The risk of developing non-melanoma skin cancer, lymphoma and melanoma in patients with psoriasis in Taiwan: a 10-year, population-based cohort study. *Int J Dermatol* 2012, 51(12):1454-1460.

[6] Chen YC, Guo YL, Su HJ, Hsueh YM, Smith TJ, Ryan LM, Lee MS, Chao SC, Lee JY, Christiani DC: Arsenic methylation and skin cancer risk in southwestern Taiwan. *J Occup Environ Med* 2003, 45(3):241-248.

[7] Parkin DM, Bray F, Ferlay J, Pisani P: Global cancer statistics, 2002. *CA Cancer J Clin* 2005, 55(2):74-108.

[8] Damsky WE, Theodosakis N, Bosenberg M: Melanoma metastasis: new concepts and evolving paradigms. *Oncogene* 2014, 33(19):2413-2422.

[9] Streit M, Detmar M: Angiogenesis, lymphangiogenesis, and melanoma metastasis. *Oncogene* 2003, 22(20):3172-3179.

[10] Damian DL, Saw RP: Dramatic regression of cutaneous, nodal, and visceral melanoma metastases. *Journal of the American Academy of Dermatology* 2011, 65(3):665-666.

[11] Becker MR, Gaiser T: Impressive regression of visceral and cerebral melanoma metastases under combination treatment including dacarbazine, radiotherapy and celecoxib. *Int J Dermatol* 2009, 48(2):207-209.

[12] Fonkem E, Uhlmann EJ, Floyd SR, Mahadevan A, Kasper E, Eton O, Wong ET: Melanoma brain metastasis: overview of current management and emerging targeted therapies. *Expert Rev Neurother* 2012, 12(10):1207-1215.

[13] Sloan AE, Nock CJ, Einstein DB: Diagnosis and treatment of melanoma brain metastasis: a literature review. *Cancer Control* 2009, 16(3):248-255.

[14] Fidler IJ, Schackert G, Zhang RD, Radinsky R, Fujimaki T: The biology of melanoma brain metastasis. *Cancer Metastasis Rev* 1999, 18(3):387-400.

[15] Leung AM, Hari DM, Morton DL: Surgery for distant melanoma metastasis. *Cancer J* 2012, 18(2):176-184.

[16] Forschner A, Heinrich V, Pflugfelder A, Meier F, Garbe C: The role of radiotherapy in the overall treatment of melanoma. *Clin Dermatol* 2013, 31(3):282-289.

[17] Mendenhall WM, Amdur RJ, Grobmyer SR, George TJ, Jr., Werning JW, Hochwald SN, Mendenhall NP: Adjuvant radiotherapy for cutaneous melanoma. *Cancer* 2008, 112(6):1189-1196.

[18] Stevens G, Thompson JF, Firth I, O'Brien CJ, McCarthy WH, Quinn MJ: Locally advanced melanoma: results of postoperative hypofractionated radiation therapy. *Cancer* 2000, 88(1):88-94.

- [19] Eaton BR, Gebhardt B, Prabhu R, Shu HK, Curran WJ, Jr., Crocker I: Hypofractionated radiosurgery for intact or resected brain metastases: defining the optimal dose and fractionation. *Radiat Oncol* 2013, 8:135.
- [20] Satyamoorthy K, Chehab NH, Waterman MJ, Lien MC, El-Deiry WS, Herlyn M, Halazonetis TD: Aberrant regulation and function of wild-type p53 in radioresistant melanoma cells. *Cell Growth Differ* 2000, 11(9):467-474.
- [21] Raaphorst GP, Mao JP, Ng CE: Repair of potentially lethal damage: its inhibition by hyperthermia in two human melanoma cell lines with different radio- and heat sensitivities. *Melanoma Res* 1993, 3(5):351-356.
- [22] Luke JJ, Schwartz GK: Chemotherapy in the management of advanced cutaneous malignant melanoma. *Clin Dermatol* 2013, 31(3):290-297.
- [23] Wu S, Singh RK: Resistance to chemotherapy and molecularly targeted therapies: rationale for combination therapy in malignant melanoma. *Curr Mol Med* 2011, 11(7):553-563.
- [24] McGettigan S: Dabrafenib: A New Therapy for Use in BRAF-Mutated Metastatic Melanoma. *J Adv Pract Oncol* 2014, 5(3):211-215.
- [25] Gogas HJ, Kirkwood JM, Sondak VK: Chemotherapy for metastatic melanoma: time for a change? *Cancer* 2007, 109(3):455-464.
- [26] Menzies AM, Long GV: Systemic treatment for BRAF-mutant melanoma: where do we go next? *Lancet Oncol* 2014, 15(9):e371-e381.
- [27] Sabbatino F, Wang Y, Wang X, Ferrone S, Ferrone CR: Emerging BRAF inhibitors for melanoma. *Expert Opin Emerg Drugs* 2013, 18(4):431-443.
- [28] Ott PA, Bhardwaj N: Impact of MAPK Pathway Activation in BRAF(V600) Melanoma on T Cell and Dendritic Cell Function. *Front Immunol* 2013, 4:346.
- [29] Oude Blenke E, Mastrobattista E, Schiffelers RM: Strategies for triggered drug release from tumor targeted liposomes. *Expert Opin Drug Deliv* 2013.
- [30] 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.

以正子斷層攝影搭配新式氟化分子早期診斷腦部發炎之可行性研究 The Feasibility of ^{18}F -labeled TSPO Ligands in Detection of Neuroinflammation

計畫編號：MOST 105-2653-E-039-001-NU

計畫類別：□個別型計畫 ■整合型計畫

計畫主持人：吳駿一

e-mail：cywu@mail.cmu.edu.tw

計畫參與人員：陳楊翊、林嘉嘉

執行單位：中國醫藥大學 生物醫學影像暨放射科學學系

摘要

腦部發炎(neuroinflammation)是一把雙刃劍，其有助於免疫細胞抵抗外來的入侵者亦有助於後續修復，但也可能會造成腦部的二次傷害。已有多篇期刊論文証實若能將腦部發炎的時間控制在一定範圍，即有助於預後又不致造成損傷。因此，準確地以非侵入式的方式即時監測腦發炎的進程實對臨床醫師制訂治療策略有所助益。微膠細胞在被活化時，會同時大量表現 18-kDa translocator protein (TSPO)，其在正常情況下於腦部的表現量甚低，但在不正常的腦部，膠體細胞或巨噬細胞便會高度表現 TSPO，應是一個相當不錯的腦發炎偵測標的。過去研究發現牡丹酚(paeonol)具抗發炎作用，且其結構與現今已知的 TSPO ligands 類似。本研究已成功製備放射性氟標記之牡丹酚類似物，並建立創傷性腦發炎之動物模式以執行後續動物實驗。造影結果顯示，此自行合成之放射性氟標記牡丹酚類似物(^{18}F -2-(2-(3-(4-fluorophenyl)ureido)thiazol-4-yl)-5-methoxyphenyl 4-methoxybenzenesulfonate, ^{18}F -MMBS)可選擇性地積聚於發炎部位。有鑒於台灣已邁入高齡化社會，老年人因車禍或意外跌落而導致的腦損傷將會可預期地增多，此研究所建立之影像平台期能協助臨床醫師於日後選擇適當的療程。

關鍵詞：腦部發炎、非侵入性偵測、TSPO、牡丹酚、放射性氟標記之牡丹酚類似物

Abstract

The inflammation reaction in brain is a double-edged sword. It can stimulate the damage repair, but also possibly causes the secondary brain injury. The beneficial effects of controlled neuroinflammation in a time-regulated manner has been clearly demonstrated. Hence, accurate and real-time monitoring of neuroinflammation would be very helpful to design effective therapeutic protocols to avoid secondary injury. Activated microglia are involved in inflammatory reaction and would overexpress 18-kDa translocator protein (TSPO). Under normal condition, TSPO expression is low in neurons. However, in pathological processes, TSPO expression is upregulated in glial cells and infiltrating macrophages, thus has been considered as a marker for detecting neuroinflammation. In this study, we have successfully synthesized radiofluorinated paeonol derivative (^{18}F -2-(2-(3-(4-fluorophenyl)ureido)thiazol-4-yl)-5-methoxyphenyl 4-methoxybenzenesulfonate, ^{18}F -MMBS) with acceptable radiochemical yield and demonstrate the

potential of ^{18}F -MMBS to noninvasively reflect the process of neuroinflammation. With Taiwan considered an aging society, the population of elderly people with traumatic neuroinflammation would be inevitably increasing. Hopefully, this imaging platform can help physician choose optimal treatment strategy.

Keywords: neuroinflammation, noninvasive detection, TSPO, paeonol, radiofluorinated paeonol derivative

I. 前言

腦部若發生像腫瘤(Brain tumors)、阿茲海默症(Alzheimer's disease)、帕金森氏症(Parkinson's disease)、單純皰疹性腦炎(Herpes simplex encephalitis)、中風(stroke)或是外傷性腦損傷(traumatic brain injury; TBI)等腦部病症，腦中的先天免疫細胞-微膠細胞(microglia)就會因此活化而造成腦部發炎 neuroinflammation¹⁻⁴。發炎反應是一把雙面刃，有助於免疫細胞抵抗外來的入侵者或進行修復，但也可能會造成後續腦部的二次傷害。已有多篇期刊論文証實若能將腦部發炎的時間控制在一定範圍，即有助於預後又不致造成二次傷害。因此，準確地以非侵入式的方式即時監測腦發炎的進程實對臨床醫師制訂治療策略有所助益。

微膠細胞在被活化時，會同時大量表現 18-kDa translocator protein (TSPO)，TSPO 過往備視為週邊苯二氮卓受體(peripheral benzodiazepine receptor, PBR)，通常位於粒腺體外膜，是一種穿膜蛋白質(transmembrane protein)。其表現與甚多生化反應相關，如：膽固醇傳輸(Cholesterol transport)、細胞凋亡(apoptosis)與增生(proliferation)等，但 TSPO 在正常情況下於腦部的表現量甚低，但在不正常的腦部，其膠體細胞或巨噬細胞便會高度表現 TSPO，應是一個相當不錯的腦發炎偵測標的⁵⁻⁷。

II. 主要內容

本次研究主要由國立清華大學原子科學技術發展中心、中國醫藥大學生物醫學影像暨放射科學學系再加上國家衛生研究院陳仁焜博士的協助，共同攜手合作，以外傷性腦損傷(TBI)導致的腦發炎為主題，共同規劃研究方針及合作方向。各單位均有基礎研究實驗室及相關實驗技術，可以從事小分子設計及合成的工作並延伸到相關細胞及動物實驗分析。透過各單位不同之研究特長，互相截長補短，彼此互相協助支援，以建構出互補合作之有利研究模式。本研究成功開發新穎之 TSPO ligands 用

以偵測外傷性腦損傷，望能即時監測外傷性腦損傷(TBI)導致的腦發炎之效益，以提供未來臨床治療之建議參考。

[7] Papadopoulos V, Lecanu L. Translocator protein (18 kDa) TSPO: an emerging therapeutic target in neurotrauma. *Experimental neurology*. 2009;219:53-57.

III. 結果與討論

由 microPET 結果觀之，正常大鼠腦中活性隨著時間而下降，顯示 ^{18}F -MMBS 並未選擇性地積聚於腦中，而由 NYU 系統所造成的腦損傷大鼠，則可見發炎區域於注射後 10-20 分鐘時有明顯積聚，其位置與切片染色確認之發炎區域相符，有趣的是，lipopolysaccharide (LPS) 是公認可造成系統性發炎的化學結構，亦有許多文獻使用腦中注射 LPS 製造腦發炎模式，可是在本研究中， ^{18}F -MMBS 並未在 LPS 誘發之腦發炎區域積聚，其腦中活性分布及排除模式與正常老鼠相同，其機制擬於後續實驗探討。若以影像處理方式扣減背景值(因此結構雖較先前發展之造影示蹤劑易通過腦中血腦障壁，但通過比例仍有有限，故背景活性會影響判讀)，則可明顯判斷發炎最嚴重之區域，自體放射顯影影像亦驗證此發現。先前許多文獻提及 ^{18}F -fluoroacetate (^{18}F -FAc)有潛力成為發炎造影劑，然而在本研究中卻發現其不適合用於外傷性腦損傷所造成之發炎。圖九的影像指出， ^{18}F -FAc 通過 BBB 進入腦中比例相當有限，更遑論於發炎區域有明顯積聚。

IV. 結論

執行本群體計劃之研究成果包括：開發具臨床造影潛力之放射性氟標誌 ^{18}F -MMBS 及觀測外傷性腦損傷之腦發炎之核子醫學影像平台，或有助於提高外傷性腦損傷之腦發炎之診斷敏感度及特異性。本團隊亦將以此計畫研究成果為基礎，評估是否可以藉由 TSPO 造影劑探討因放射線腫瘤治療或是其他腦退化疾病所造成的腦發炎成因及時程，應有助於日後新型藥物或治療方式的開發。

參考文獻

- [1] Block ML, Zecca L, Hong JS. Microglia-mediated neurotoxicity: uncovering the molecular mechanisms. *Nature Reviews Neuroscience*. 2007;8:57-69.
- [2] Ceulemans AG, Zgavc T, Kooijman R, Hachimi-Idrissi S, Sarre S, Michotte Y. The dual role of the neuroinflammatory response after ischemic stroke: modulatory effects of hypothermia. *Journal of neuroinflammation*. 2010;7:74.
- [3] Davalos D, Grutzendler J, Yang G, et al. ATP mediates rapid microglial response to local brain injury in vivo. *Nature neuroscience*. 2005;8:752-758.
- [4] Kumar A, Loane DJ. Neuroinflammation after traumatic brain injury: opportunities for therapeutic intervention. *Brain, behavior, and immunity*. 2012;26:1191-1201.
- [5] Batarseh A, Papadopoulos V. Regulation of translocator protein 18 kDa (TSPO) expression in health and disease states. *Molecular and cellular endocrinology*. 2010;327:1-12.
- [6] Chen MK, Guilarte TR. Translocator protein 18 kDa (TSPO): molecular sensor of brain injury and repair. *Pharmacology & therapeutics*. 2008;118:1-17.

探討奈米藥物銻-188-微脂體多次劑量於卵巢癌細胞代謝再調控-以及對於細胞和粒線體自噬，粒線體型態變化之研究

Exploration on the metabolic reprogramming of ^{188}Re -Liposome on ovarian cancer cells by multiple dose effect:

計畫編號：MOST 105-2623-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

本研究計畫在探討卵巢癌小鼠動物模式中，多次劑量的微脂體銻-188治療具有抑制卵巢癌幹細胞的比例、增生分化以及代謝轉變效果的分子機制。主要針對奈米包覆放射藥物對於卵巢癌細胞抑制作用的細胞自噬、粒線體自噬等調控機制。利用過去建立的orthotopic model收集被治療過 (treated tumor cells) 的腫瘤細胞進行分析，評估 ^{188}Re -liposome 靜脈注射或是腹腔注射的氧消耗率 (oxygen consumption rate)，乳酸產生率 (lactate production rate)，活性氧化物質細胞內含量 (intracellular levels of reactive oxygen species)，粒線體超氧負離子含量 (mitochondrial superoxide anion level)，以及銻188微脂體在卵巢癌腫瘤蓄積影像分析。此外，利用細胞自噬與粒線體染色分析，評估細胞進行自噬與粒線體自噬的分期。分析結果顯示，多次給予腹腔微脂體銻-188可有效累積於小鼠腹腔卵巢癌細胞內。相較於其他治療方式，治療後的腫瘤細胞，代謝模式轉變為一般已分化細胞所採用的代謝機制-氧化磷酸化反應，並有效提升細胞間活性氧與超氧陰離子的免疫活化作用。細胞自噬與粒線體分型分析結果也揭示了腹腔給予 ^{188}Re -liposome可有效促進腫瘤細胞發生細胞或粒線體自噬。綜合以上結果顯示區域性給予緩釋型的放射線銻-188對於卵巢癌腫瘤細胞具有促進細胞粒線體自噬的作用。這樣的發現為將來銻188微脂體在臨床上的應用，提供了除了腫瘤毒殺外，尚可以誘導腫瘤細胞發生自我吞噬與抑制分化的支持性效應。

關鍵詞：卵巢癌、銻 188-微脂體、細胞自噬、粒線體自噬、粒線體分型

Abstract

This research project focuses on, in mouse models of ovarian cancer, multiple doses of ^{188}Re -liposome is able to inhibit the proliferation of ovarian cancer stem cells (CSCs) and reprogram metabolic mechanism through autophagy and mitophagy. We collected the treated tumor cells from previously conducted orthotopic model, and evaluated oxygen consumption rate, lactate production rate, intracellular levels of reactive oxygen species, mitochondrial superoxide anion level, and accumulated tumor size images by either intravenous or intraperitoneal injection of ^{188}Re -liposome. In addition, subtypes and stages of autophagy/mitophagy could be analyzed by local staining. The result showed that multiple doses of ^{188}Re -liposome effectively accumulates in the ovarian cancer sites of mice, and post-treatment cells were altered toward OXPHOS respiration compared to other treatment

groups. Analysis of subtype also displayed that

intraperitoneal injection of ^{188}Re -liposome significantly induced autophagy/mitophagy in cancer cells. In conclusion, gradual and localized release of ^{188}Re -liposome in mice is able to promote mitophagy in ovarian cancer cells. This discovery provides a novel application in guiding cancer cell toward autophagy and inhibit differentiation besides direct tumor killing function.

Keywords: ovarian cancer, ^{188}Re -liposome, autophagy, mitophagy, mitochondrial subtype

I. 前言

細胞自噬是一種細胞自身組成降解和循環再利用的過程。其功能是扮演品質管制的角色，清除受損或摺疊錯誤的蛋白質。癌細胞經化學治療或放射治療後可以透過細胞自噬的方式產生抗藥性，進而造成腫瘤復發重新生成^{1,2}，細胞自噬可能導致癌細胞對於化、放療的耐受性增加進而提高腫瘤存活率。臨床上透過抑制癌細胞的細胞自噬可以加成腫瘤細胞對相關藥物的敏感性³。過去對於銻-188-微脂體在卵巢癌動物模式中證實，經腹腔注射奈米化銻-188 可有效抑制癌幹細胞與反轉細胞代謝的作用。由於化、放療治療誘導腫瘤細胞自噬或粒線體自噬的課題，近年來已廣泛被探討。因此，我們想更進一步瞭解，銻-188-微脂體對於腫瘤細胞自噬、粒線體自噬的影響情形，並研究相關可能的調控機制，進而有利於發展新的抗腫瘤標的，透過調節癌細胞自噬等相關機制可能發展新穎的抗癌策略。

II. 主要內容

本年度實驗利用卵巢癌原位動物模式進行研究。經由不同路徑給予放射線銻-188-微脂體治療後，培養治療後的腫瘤細胞進行相關細胞自噬、粒線體自噬與粒線體分型分析，主要項目包括：利用活體影像分析系統檢測放射線在卵巢癌細胞累積的情形，藉以確認微脂體銻-188可有效蓄積於腹腔腫瘤內。而運用生物能量測定儀分析治療後腫瘤細胞氧氣消耗的情形以及乳酸產生率。檢測細胞內活性氧含量與粒線體超氧陰離子含量則有助於瞭解治療後的癌細胞粒線體功能性。此外，利用免疫螢光染色分析卵巢癌細胞內細胞自噬標誌 LC3B 的表現情形，藉此評估銻-188-微脂體誘導細胞自噬的作用。粒線體型態分析則利用 MitoTracker Red (MTR) 染色治療後的腫瘤細胞，經影像分析軟體 Micro-P 分析鑑定。利用 Meta-analysis 大量分析細胞內粒線體型別，獲得經治療

後卵巢癌細胞自噬及粒線體自噬相關指標。為將來腫瘤放射治療後誘發細胞死亡或自噬等反應，提供有效評估判斷的依據。

III. 結果與討論

本年度實驗以小鼠模式收集銻-188-微脂體治療後的卵巢癌細胞進行代謝類別分析，粒線體形態，功能性評估以及細胞自噬相關分子標誌染色，粒線體型態學鑑定等研究。為了探討銻-188-微脂體在腹腔腫瘤內蓄積的情形，首先活體影像分析系統，以orthotopic方式埋植於免疫缺陷小鼠卵巢中，以靜脈（intravenous infusion）或腹腔腔（intraperitoneal infusion）注射¹⁸⁸Re-BMEDA或¹⁸⁸Re-Liposome進行多次治療，待治療後24小時進行分析，結果顯示，¹⁸⁸Re-Liposome無論經靜脈或腹腔注射均能明顯蓄積在腹腔腫瘤區域，因此也可以提供治療效果的相對佐證。收集治療後腫瘤組織進行培養，培養後的細胞依分組分析細胞代謝特性，以氧氣消耗率（OCR）與細胞外酸度（ECAR）比例驗證有效治療後的卵巢癌細胞趨向氧化磷酸的代謝。且粒線體功能分析也證實經相對free form的銻-188，有效治療後所存活的卵巢癌細胞，有較為正常功能的粒線體。可以產生較多與超氧離子毒殺腫瘤。上述結果顯示腹腔注射¹⁸⁸Re-Liposome對於卵巢癌細胞具有抑制腫瘤幹細胞數量與反轉代謝的調控作用。由於細胞自噬、粒線體自噬與粒線體型態有關，進一步分析處理後的卵巢癌細胞中粒線體自噬標誌與型態鑑定差異發現，奈米化銻-188局部治療對於卵巢癌細胞的細胞自噬標誌有顯著提升的效應，而粒線體型態分析結果也驗證了，第二型粒線體在腹腔治療銻-188-微脂體後的比例明顯提升。整合以上結果與過去研究顯示，腹腔注射¹⁸⁸Re-Liposome透過EPR效應，促進腹腔腫瘤內銻-188活度的累計，經提升細胞自噬、粒線體自噬等機制清除受損及修正粒線體功能，同時將腫瘤細胞代謝翻轉為一般分化後細胞，進而抑制癌組織內的腫瘤幹細胞生成，並降低癌細胞轉移、抗藥性的分化達到抑制腹腔卵巢癌細胞的效應。

IV. 結論

近年來，藥物誘導腫瘤細胞自噬與粒線體自噬的治療策略已廣泛應用在新興腫瘤治療策略與新藥開發方面⁴。本年度研究針對過去銻-188微脂體在卵巢癌小鼠模式上的顯著療效與相關代謝調控機制上，更進一步探討除了癌幹細胞毒殺抑制與代謝反轉的效益外，誘導細胞自噬與粒線體自噬的影響也提供了未來在臨床應用上的另一種思維。過去研究證實局部給予銻-188-微脂體可有效抑制腫瘤幹細胞比例與抑制轉移及抗藥性生成。目前試驗成果揭示了銻-188微脂體腹腔注射對於輻射誘導卵巢癌細胞的自噬作用具有決定性的影響，可以促進失能的粒線體排除，並恢復粒線體產生活性氧與超氧離子等自我保護功能。透過分析細胞自噬標誌與粒線體型態分類分析結果也同步驗證相同的結果，未來研究預計針對銻-188微脂體對於癌（幹）細胞其它毒殺或自我修復亦或其他休眠機制進行探討。例如粒線體型態與腫瘤細胞老化（Senescence）對於癌細胞自我抑制的效應，以及奈米放射性藥物對於腫瘤細胞誘導休眠所扮演的角色進行分析。期待提供銻-188微脂體在卵巢癌臨床應用

的理論基礎。

參考文獻

- [1] Ogier-Denis E, Codogno P. Autophagy: a barrier or an adaptive response to cancer. *Biochimica et biophysica acta* 2003;1603:113-28.
- [2] Van Limbergen J, Stevens C, Nimmo ER, Wilson DC, Satsangi J. Autophagy: from basic science to clinical application. *Mucosal immunology* 2009;2:315-30.
- [3] Deloch L, Derer A, Hartmann J, Frey B, Fietkau R, Gaipl US. Modern Radiotherapy Concepts and the Impact of Radiation on Immune Activation. *Frontiers in oncology* 2016;6:141.
- [4] Baskar R, Itahana K. Radiation therapy and cancer control in developing countries: Can we save more lives? *International journal of medical sciences* 2017;14:13-7.

開發具腦部發炎偵測力之新式小分子 Developing Novel Small Molecules for Detecting Neuroinflammation

計畫編號：105-2623-E-007-009-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許銘華

e-mail：mhhsu@mx.nthu.edu.tw 計畫參與人員：黃映霈

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

摘要

腦中的免疫細胞—微膠細胞 (microglia) 可能因腦部發生腫瘤 (Brain tumors)、阿茲海默症 (Alzheimer's disease)、中風(stroke)或是外傷性腦損傷(traumatic brain injury; TBI) 等腦部病症而活化，進而造成腦部發炎(neuroinflammation)。發炎反應雖然可幫助免疫細胞抵抗外來入侵者或進行修復，但也可能會造成後續腦部的二次傷害，不利預後。因此，準確地以非侵入式的方式即時監測腦發炎的進程實對臨床醫師制訂治療策略有所助益。

微膠細胞在被活化時，會同時大量表現 18-kDa translocator protein (TSPO)，但 TSPO 在正常情況下於腦部的表現量甚低，應是一個相當不錯的腦發炎偵測標的。

丹皮酚為傳統中藥牡丹根皮中主要成分，為類黃酮素衍生物且在相當多研究中優異的生物活性，如抗發炎和鎮痛等等，而其衍生物亦展現諸多生物活性，本實驗室基於過往對此天然物之研究經驗，製備出 13 種含有噻唑(thiazole) 雜環和酰胺官能基之新式丹皮酚衍生物，並在抗 B 肝病毒實驗中取得良好成果。另一方面，中國醫藥大學生物影像暨放射科學學系吳駿一助理教授將會利用前述丹皮酚衍生物企圖開發新式核醫藥物，搭配合適之造影儀器偵測外傷性腦損傷(TBI)導致的發炎反應，期能協助臨床醫師於日後選擇適當的療程。

關鍵詞：腦部發炎、轉位因子蛋白、正子造影、丹皮酚。

Abstract

The immune cells inside brain-microglia can be activated when brain tumors, Alzheimer's disease, Parkinson's disease, stroke, or traumatic brain injury (TBI) occurs, which leads to neuroinflammation. Although inflammation reaction can assist immune cells to defend pathogens or recover, it may cause undesired consequences and not beneficial future prognosis. Thus, monitoring neuroinflammation progression immediately with non-invasive method definitely will benefit clinical application.

When microglia cells are activated, 18-kDa translocator protein (TSPO) will be highly expressed at the same time. Because in normal condition, the amount of TSPO in brain stays low, it is an ideal target for neuroinflammation. Recently, many researches utilize F-18 labeled TSPO ligands to detect neuroinflammation resulting from different methods.

Paeonol, the main component in traditional Chinese medicine --Moutan Cortex, has shown remarkable bioactivity such as anti-inflammation and analgesic in many researches.

Moreover, its derivatives also demonstrate various bioactivity. Based on our experience in the synthesis and activity screening of Paeonol derivatives, we prepared 13 thiazole scaffold and amide functional group embodying novel molecules and acquired prominent results in anti hepatitis B virus (HBV) experiment. With the cooperation with Prof. Chun-Yi Wu, we are able to develop novel nuclear medicine that can detect neuroinflammation caused by TBI while employing proper imaging instrument, which may further assists doctors to determine the appropriate clinical therapy.

Keywords: Neuroinflammation、18-kDa translocator protein (TSPO)、Positron Emission Tomography (PET)、Paeonol

前言

腦部若發生像腫瘤 (Brain tumors)、阿茲海默症 (Alzheimer's disease)、帕金森氏症(Parkinson's disease)、單純皰疹性腦炎(Herpes simplex encephalitis)、中風(stroke)或是外傷性腦損傷(traumatic brain injury; TBI) 等腦部病症，腦中的先天免疫細胞—微膠細胞(microglia) 就會因此而活化造成腦部發炎(neuro-inflammation)。已有多篇期刊論文証實若能將腦部發炎的時間控制在一定範圍，即有助於預後又不致造成二次傷害。因此，準確地以非侵入式的方式即時監測腦發炎的進程實對臨床醫師制訂治療策略有所助益。

微膠細胞在被活化時，會同時大量表現 18-kDa translocator protein (TSPO)，其表現與甚多生化反應相關，如：膽固醇傳輸(Cholesterol transport)、細胞凋亡(apoptosis)與增生(proliferation)等，但 TSPO 在正常情況下於腦部的表現量甚低，應是一個相當不錯的腦發炎偵測標的。

丹皮酚 (paeonol; 2-hydroxy-4-methoxy acetophenone, Fig.1)，為傳統中藥牡丹根皮中主要成分，其被歸類為類黃酮素衍生物且在相當多研究中優異的生物活性，例如：抗發炎、^{1,2} 鎮痛、³ 抗糖尿病、⁴ 抗癌、⁵ 抗動脈粥狀硬化⁶ 等。本研究有鑒於台灣已邁入高齡化社會，老年人因車禍或意外跌落而導致的腦損傷將會可預期地增多，因此本研究擬專注於開發具發炎診斷力之新式小分子，以協助中國醫藥大學生物影像暨放射科學學系吳駿一助理教授所負責之子計畫二開發核醫藥物，搭配合適之造影儀器偵測外傷性腦損傷(TBI)導致的發炎反應，期能協助臨床醫師於日後選擇適當的療程。

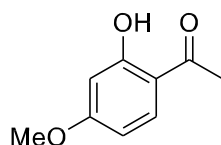
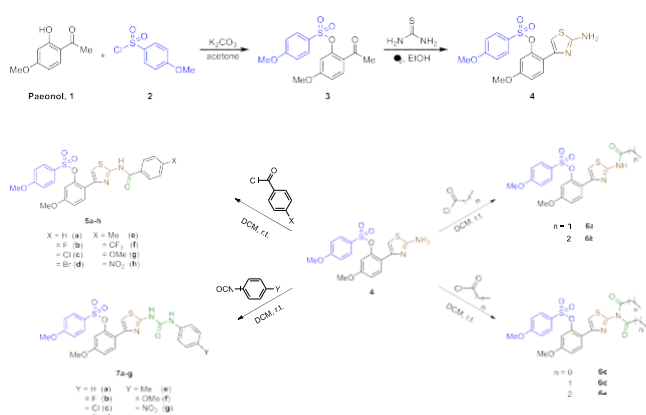


Figure 1 丹皮酚結構

主要內容

本計畫負責開發新式TSPO ligands, 丹皮酚衍生物 5-7 系列的任務, 包括其合成及優化, 並配合吳駿一老師負責之子計畫二以 ELISA 的方式篩選最適合偵測腦中 TSPO 表現的結構, 並以放射性氟標製成放射性示蹤劑, 隨後進行非侵襲性分子造影像於病程中監測 TSPO 的表現量的可行性研究。



Scheme 1 丹皮酚衍生物5-7 系列合成圖

結果與討論

本實驗室除了在 2015 年曾發表一系列丹皮酚衍生物在低劑量下仍具有降血脂的能力⁷外, 同年於 European Journal of Medicinal Chemistry 報導⁸ 苯磺醯基丹皮酚衍生物可抑 HBsAg 和 HBeAg 表現和病毒 DNA 複製, 其中又以化合物 3 (Scheme 1) 展現最佳的抑制效果 ($IC_{50} = 0.36$), 且其選擇性 (selectivity index; $SI = IC_{50}/TC_{50} = 47.75$) 優於抗 HBV 臨床用藥 Lamivudine (3TC, Fig. 2; $SI = 46.13$), 亦會抑制 HBV 兩種主要信使 RNA—pregenomic RNA (3.5kb) 及 surface antigen RNA (2.4/2.1kb) 的轉錄。基於此研究結果, 本實驗室再以化合物 3 (Scheme 1) 為基礎, 發展出含異五元環—2-氨基噻唑 (2-aminothiazole), 最後以苯甲醯氯及醯氯試劑形成擁有醯胺鍵的一系列新式分子 (Scheme 1)⁹。

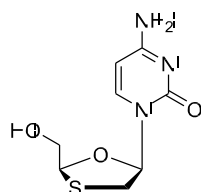


Figure 2 3TC 結構

Table 1 丹皮酚衍生物 (化合物8a-h 對應到Scheme 1 之 5a-h; 化合物9a-9e 對應到Scheme 1 之6a-e) 對HepG2 2.2.15 hepatoma cell 之細胞毒性、對病毒蛋白HBsAg 和 HBeAg 和病毒DNA 複製之半抑制濃度、和對病毒DNA 複製抑制之SI 值列表

Compound	TC ₅₀ (μM)	HBsAg IC ₅₀ (μM)	HBeAg IC ₅₀ (μM)	Inhibition of HBV DNA replication IC ₅₀ (μM)	HBV DNA replication SI value (TC ₅₀ /IC ₅₀)
8a	373.99 ± 5.52	3.30 ± 0.32	4.27 ± 0.32	6.32 ± 0.31	59.14 ± 3.51
8b	145.97 ± 3.65	3.90 ± 0.12	8.34 ± 1.34	12.67 ± 1.21	11.48 ± 1.32
8c	144.80 ± 4.21	5.52 ± 0.6	5.48 ± 0.45	7.25 ± 1.41	19.97 ± 4.72
8d	204.80 ± 3.36	8.13 ± 0.24	19.88 ± 2.12	17.78 ± 2.87	11.52 ± 2.22
8e	508.32 ± 3.54	107.09 ± 2.25	173.41 ± 3.42	133.26 ± 3.65	3.32 ± 0.1
8f	416.93 ± 4.32	86.21 ± 1.64	116.87 ± 4.5	99.81 ± 1.78	4.18 ± 0.1
8g	479.78 ± 4.65	85.99 ± 2.57	173.76 ± 3.74	161.65 ± 4.43	2.97 ± 0.1
8h	581.53 ± 4.45	83.76 ± 3.68	96.52 ± 3.21	84.24 ± 3.12	6.90 ± 0.3
9a	54.29 ± 2.33	6.22 ± 0.12	7.63 ± 1.36	5.89 ± 0.21	9.22 ± 0.39
9b	12.89 ± 2.24	2.85 ± 0.25	4.02 ± 0.64	4.09 ± 0.87	3.22 ± 1.1
9c	47.20 ± 2.67	3.67 ± 0.64	4.13 ± 1.41	3.44 ± 0.11	13.71 ± 1.03
9d	13.02 ± 1.21	N/A	N/A	N/A	N/A
9e	64.98 ± 3.47	5.73 ± 0.22	11.36 ± 2.21	13.99 ± 0.84	4.65 ± 0.43
3-FU*	216.79 ± 5.74	—	—	—	—
Lamivudine (3TC)*	352.83 ± 4.38	—	—	7.63 ± 0.41	46.13 ± 2.93

TC₅₀: the concentration of the compound at which cell viability was reduced to 50% IC₅₀: the concentration of the compound at which anti-HBV effect was reached to 50%

*3-FU: Fluorouracil, the positive control for cytotoxic analysis

由丹皮酚衍生物5-7 系列對HepG2 2.2.15 hepatoma cell 之細胞毒性、對病毒蛋白 HBsAg 和 HBeAg 和病毒 DNA 複製之半抑制濃度、和對病毒 DNA 複製抑制之 SI 值列表 Table1 來看, 我們合出分子中, SI 最高的明顯是側鏈是較平面且沒有取代的化合物 5a, 它的 SI 值甚至比前一代化合物沒有異圓環架構的分子3 還要好, 且優於臨床用藥3TC。

結論

本實驗室已順利合成本計畫提及之丹皮酚衍生物 5a-5h、6a-e, 部分結構甚至展現優異抗 B 型肝炎病毒活性。⁹ 由已發表之成果可知本計畫列舉之丹皮酚衍生物具抗發炎之潛力, 故此系列分子不僅可能作為偵測腦部發炎之工具, 亦可能有治療用途。雖然本計畫執行期限有限且不長, 但其中之發現可提供未來發展不同主結構之具備偵測力、甚至是治療腦部發炎的丹皮酚衍生物一些基礎研究背景和大略方向, 具有一定之學術, 甚至是商業價值。

參考文獻

- [1] P.K. Fu, C.L. Wu, T.H. Tsai, C.L. Hsieh, *Evid Based Complement Alternat Med* **2012**, 2012, 837513.
- [2] T.C. Chou, *Br J Pharmacol* **2003**, 139, 1146-1152.
- [3] B. Chen, M. Ning, G. Yang, *Molecules* **2012**, 17, 4672-4683.
- [4] C.H. Lau, C.M. Chan, Y.W. Chan, K.M. Lau, T.W. Lau, F.C. Lam, W.T. Law, C.T. Che, P.C. Leung, K.P. Fung, et al., *Phytomedicine* **2007**, 14, 778-784.
- [5] J. Yin, N. Wu, F. Zeng, C. Cheng, K. Kang, H. Yang, *Acta Histochem* **2013**, 115, 835-839.
- [6] J.F. Zhao, S.J. Jim Leu, S.K. Shyue, K.H. Su, J. Wei, T.S. Lee, *Am J Chin Med* **2013**, 41, 1079-1096.
- [7] K.C. Pao, J.F. Zhao, T.S. Lee, Y.P. Huang, C.C. Han, L.C.S. Huang, K.H. Wu, M.H. Hsu, *Rsc Advances* **2015**, 5, 5652-5656.
- [8] T.J. Huang, H. Chuang, Y.C. Liang, H.H. Lin, J.C. Horng, Y.C. Kuo, C.W. Chen, F.Y. Tsai, S.C. Yen, S.C. Chou, M. H. Hsu, *Eur J Med Chem* **2015**, 90, 428-435.
- [9] Y. P. Huang, H. P. Shih, Y. C. Liang, H. H. Lin, M. C. Lin, C.W. Chen, T. J. Huang, Y. C. Kuo, C. C. Han, M. H. Hsu, *RSC Adv.* **2016**, 6, 43556.

超順磁氧化鐵奈米粒子與奈米藥物銻-188-微脂體之診療開發及應用

Development of a novel theranosis liposome combined ^{188}Re and superparamagnetic iron oxide nanoparticle

計畫編號：MOST 105-NU-E-009-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王雲銘

e-mail：ymwang@mail.nctu.edu.tw

計畫參與人員：許光美、陳俞任、劉冠杰

執行單位：國立交通大學生物科技學系

摘要

本研究團隊成功的合成出將具有親水性以及高度生物相容性的高分子聚合物超順磁性的超順磁氧化鐵，具有非常高的細胞攝入可能性以及高度對比之對比劑；並將表面修飾聚合物裸露出的 NH_2 與抗體(Erbtux)鍵結，使放射性元素 ^{188}Re 成功的標的在抗體(Erbtux)上，以供後續細胞實驗以及動物實驗使用。 ^{188}Re 及 SPIO 之微脂體藥物於臨床癌症醫療上能較過去單一使用 ^{188}Re 進行診斷暨治療具有更佳的治療效果、顯影效果、更高的生物相容性、長時的體內循環時間、亦能針對特定腫瘤之受體進行抗體修飾，提高腫瘤攝入 SPIO 的攝入量，達到診斷及治療的專一性。就結果而言，能夠有效降低患者的不適性、提升醫療精度與縮短治療時程，為身體狀況本就不佳的病患更進一步的提升醫療品質。

關鍵詞：銻-188、超順磁氧化鐵。

Abstract

novel superparamagnetic nanocarrier and liposome drug carrier which combined both functions of therapeutic effect of $\text{Re}188$ radiology drug and molecular imaging of superparamagnetic iron oxide nanoparticle (SPIO) have been developed by our group. The combination of MRI and radiotherapy can achieve efficiency theranosis, avoid the damage of normal tissue, track the position of $\text{Re}188$ drug and increase the quality of therapy. We propose to cooperate with Institute of Nuclear Energy Research to develop two kinds of nanocarrier in this research, the first one is $\text{Re}188/\text{Erbtux-SPIO}$, produced by the modification of $\text{Re}188$ and Erbitux on the surface on our homemade SPIO. By EDC-NHS conjugation with the functional group ($-\text{SH}$, $-\text{NH}_2$) of our homemade SPIO, both $\text{Re}188$ and Erbitux can be delivered with SPIO, which can increase the retention time and the biocompatibility; the second one is encapsulating of $^{188}\text{Re}/\text{Erbtux-SPIO}$ by Nano-X liposome. Nano-X is the lipid membrane material of the commercial drug Lipo-dox, the safety and efficiency has been already certificated. $\text{Re}188/\text{Erbtux-SPIO}$ carried by Nano-X was supposed to achieved higher cellular uptake efficiency and biocompatibility. By mixing and sonicating the Nano-X, SPIO and ^{188}Re in the temperature over the phase transition temperature of Nano-X ($\sim 60^\circ\text{C}$), both ^{188}Re and SPIO can be encapsulated into Nano-X, the size and

the zeta potential will be measure by dynamic laser scattering. The morphology of both particles will be observed by transmission electron microscopy. MTT assay will be tested to find the appropriate dose of both drug. The cellular uptake efficiency will be observed by confocal microscopy with the CyTE777 modified $^{188}\text{Re}/\text{Erbtux-SPIO}$ and $\text{Re}188/\text{Erbtux-SPIO}$ Nano-X. After the in vitro studies, the biodistribution will be observed by IVIS. The MR imaging and tumor therapy efficiency will be measure by treating the drug with CED in xenograft glioblastoma rats model to prove the potential of this novel theranosis drug.

Keywords: Re^{188} 、SPIO.

I. 前言

近年來，病症的追蹤廣泛的使用磁振造影(MRI)技術來做為工具，其中，磁振造影對比劑在該技術中扮演十分重要的角色。超順磁性氧化鐵奈米粒子(SPIO)為市面上常見的磁振造影對比劑的主要材料之一。

II. 主要內容

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

III. 結果與討論

目前已成功的合成出氧化鐵奈米粒子，並於表面修飾上可專一性標靶 EGFR 之抗體，但尚未有效的將 ^{188}Re 大量標幟於抗體上。因此，我們將持續嘗試不同的條件，以期有效的將 ^{188}Re 大量標幟於抗體上，並進行腦瘤的診斷與治療。

IV. 結論

本研究團隊成功利用熱裂解法製備氧化鐵奈米粒子，其水合粒徑為 $24.3 \pm 5.8 \text{ nm}$ ；經 mPEG 及抗體修飾

後之氧化鐵奈米粒子，水合粒徑為 50.82 ± 17.04 nm。並利用 SDS-Page 證實抗體確實修飾於氧化鐵奈米粒子的表面上。接著將 ^{188}Re 標誌於抗體上，標誌效率為 84.18%。

未來將持續嘗試不同的條件，以期有效的將 ^{188}Re 大量標幟於抗體上。

參考文獻

- [1] P. Sathyadevi, Y.-J. Chen, S.-C. Wu, Y.-H. Chen, and Y.-M. Wang*, Reaction-based epoxide fluorescent probe for *in vivo* visualization of hydrogen sulfide. *Biosens. Bioelectron.* 68, 681-687, **2015**.
- [2] G. Singh, K.-M. Hsu, Y.-J. Chen, S.-C. Wu, C.-Y. Chen and Y.-M. Wang*, A switch-on MRI contrast agent for noninvasive visualization of methylmercury. *Chem. Comm.* **2015**.
- [3] Y.-J. Chen, S.-C. Wu, C.-Y. Chen, S.-C. Tzou, T.-L. Cheng, Y.-F. Huang, S.-S. Yuan*, and Y.-M. Wang*. Peptide-based MRI contrast agent and near-infrared fluorescent probe for intratumoral legumain detection. *Biomaterials.* 35, 304-315, **2014**.
- [4] Y.-H. Chen, J.-C. Tsai, T.-H. Cheng, S.-S. Yuan, and Y.-M. Wang*. Sensitivity evaluation of NBD-SCN towards cysteine/homocysteine and its bioimaging applications. *Biosens. Bioelectron.* 56, 117-123, **2014**.
- [5] Y.-C. Chuang, C.-J. Lin, S.-F. Lo, J.-L. Wang, S.-C. Tzou, S.-S. Yuan*, and Y.-M. Wang*, Dual functional AuNRs@MnMEIOs nanoclusters for magnetic resonance imaging and photothermal therapy. *Biomaterials.* 35, 4678-4687, **2014**.

多劑量銻-188-微脂體奈米核醫藥物合併化療藥物對人類頭頸癌及攝護腺癌小鼠模式之療效評估

Evaluation of chemoradiotherapeutic efficacy using multidose rhenium-188-liposome on human HNSCC and prostate cancers

計畫編號：NSC 105-2623-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

e-mail：yjlee2@ym.edu.tw

計畫參與人員：張淳媛杜元亨李易展陳亮丞張志賢

執行單位：國立陽明大學陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

摘要

臨床上對惡性腫瘤最有效之治療方式為手術切除，而複雜的骨骼及神經血管構造增加了治療困難度。輔佐以放射或化學治療已行之有年，近來使用聚乙二醇化 (polyethylene glycol, PEG) 的微脂體包覆藥物，證實可延長藥物體內循環時間，也可藉由滲透及停滯增強效應 (EPR) 穿過腫瘤疏漏血管達成積聚效果。此外，使用可放射高能量貝他粒子及伽馬射線之核種銻-188，可同時具有治療及示蹤能力，提供臨床治療的另一途徑。由核能研究所開發之「銻-188-微脂體」已被證實為一穩定且安全的奈米化核醫藥物，業於食藥署認可下進入第一期臨床試驗。本團隊過去成果中呈現銻-188-微脂體於人類肺癌及頭頸癌小鼠之藥物動力學及輻射劑量評估，顯示其非但可有效積聚於腫瘤，所累計輻射劑量也在安全限值下，證實臨床應用之可行性。然而，單劑治療僅能提供短暫抑癌能力，顯示單劑銻-188-微脂體於臨床應用尚待突破，多劑治療是否能延長循環時間或降低肝脾積聚仍待探討。至此，本計劃旨在針對多劑型銻-188-微脂體於荷腫瘤小鼠模式進行療效評估。於研究結果發現，在第 0 天與第 6 天分別給予銻-188 微脂體藥物之 FaDu 頭頸癌細胞荷腫瘤小鼠抑癌效果較單劑量明顯，另一方面，於雙劑量之藥物動力學結果中發現雙劑量與單劑量相比較下，雙劑量之 Area Under Curve (AUC) 明顯大於單劑量，顯示雙劑量藥物給予能在小鼠體內滯留更長時間並進一步增強腫瘤殺傷之效果，除此之外於免疫組織染色結果發現，細胞增生指標 Ki-67 在給予雙劑量四週後的小鼠訊號明顯降低，且於給予治療後，促進腫瘤轉移的上皮間質轉化(EMT)相關因子有明顯改變，可觀察到在給予銻-188-微脂體藥物後 E-cadherin 表現量明顯增加，且 Twist1, ZEB-1, vimentin 三者則在給予藥物治療後表現量有下降之趨勢，顯示雙劑量銻-188-微脂體於腫瘤生長及轉移的抑制效果更佳。綜合上述結果顯示，期本研究能作為前臨床測試的資訊，未來可進一步探討銻-188-微脂體之相關抑癌分子機制成為未來此類奈米藥物發展之利基。然其安全性仍須進一步探討之。

關鍵詞：銻-188-微脂體，頭頸癌，雙劑量奈米核醫藥物

the report of Ministry of Health and Welfare. The PEGylated liposome based chemotherapy has been used for tumor targeting because of increased retention rate and biocompatibility. We have used PEGylated liposome embedded rhenium-188 (liposome-¹⁸⁸Re), which emits therapeutic β -particles and detectable γ -rays, to treat HNSCC using single dose. Although apparent tumor accumulation and therapeutic efficacy of this compound could be detected, it suppressed the tumor growth temporarily. Therefore, it is essential to investigate whether alternative regime of liposome-¹⁸⁸Re could provide more stable therapeutic effects on HNSCC. In this study, we compared the therapeutic effects of single and double injections of ¹⁸⁸Re-liposomal drug in HNSCC using the FaDu cells based orthotopic tumor model. These cells have harbored luciferase gene and herpes virus type 1-thymidine kinase (HSV1-tk) genes for optical imaging and radionuclide-based imaging, respectively. The pharmacokinetic and internal dosimetry have also been evaluated. The results showed that a more stable inhibitory effect of tumor growth was found using the regime of double dose compared to that of single dose. These observations were confirmed by measuring the tumor growth rate and Ki-67 proliferating marker staining. The expression levels of epithelial-mesenchymal transition (EMT) related markers were also examined using the immunoblot analysis. Interestingly, increased E-cadherin representing less EMT was found in tumor-bearing mice treated with the double dose of liposome-¹⁸⁸Re rather than single dose. In addition, the expressions of Twist-1, ZEB-1 and vimentin showed a decrease in the double dose group. Taken together, current data indicated that double dose of liposome-¹⁸⁸Re treatment exhibited better tumor control on HNSCC tumor model. The pharmacokinetic also indicated that the retention and circulation period of liposome-¹⁸⁸Re were longer in double dose treated mice than in single dose treated ones because of the increasing AUC. These findings suggest that the double dose of liposome-¹⁸⁸Re treatment may be considered in clinical cancer treatment in the future. However, the potent systemic toxicity remains to be addressed.

Keywords: PEGylated liposomal drugs, head and neck cancer, Rhenium-188

Abstract

Head and neck squamous cell carcinoma (HNSCC) has ranked the fourth leading cancer in Taiwan according to

I. 前言

在先前研究中，本實驗室成功使用病毒系統建構帶有報導基因之頭頸癌細胞株，包含人類口腔癌細胞 SAS、人類下咽部上皮細胞癌 FaDu 細胞及 OECM-1 細胞等。前述細胞株具穩定表現綠色螢光蛋白 (green fluorescence protein)、螢火蟲螢光酶 (firefly luciferase)、以及第一型簡單皰疹病毒胸腺嘧啶激酶 (HSV1-tk) 等三種分子造影功能。並且證實小鼠接植有原位頭頸癌並注射銻-188-微脂體後可確實利用單光子造影技術發現確實有積聚效果。利用螢光蛋白做細胞分選後取得穩定表現報導基因之細胞株，並使用 IVIS 系統取得細胞數量與冷光強度之正相關性。胸腺嘧啶激酶之活性則使用氚標定之胸腺嘧啶類似物 2'-fluoro-2'-deoxyarabinofuranosyl-5-ethyluracil (FEAU) 或利用 I^{123} -1-(2-deoxy-2-fluoro-1-D-arabinofuranosyl)-5-iodouracil (FIAU) 攝取實驗予以定量。動物模式使用裸鼠於原位接植，並使用 IVIS-50 系統以非侵入之方式追蹤其冷光訊號作為腫瘤生長訊號之評估。進一步地我們將植有人類頭頸癌腫瘤之裸鼠，進行奈米型藥物銻-188-微脂體之療效評估，並對照銻-188 於局部細胞之造影效果與細胞本身之核子醫學造影探針，以證明此類微脂體奈米藥物確實可抑制原位頭頸癌的生長。接續先前研究，本計畫使用已建立人類頭頸癌之原位小鼠模式，並利用體外光學及核子醫學造影技術追蹤評估雙劑型奈米藥物與單劑型奈米藥物配合定量評估治療效果，以期獲得整體並有利的人類頭頸癌治療或抑制效果證明，在未來將此類藥物送上臨床，為癌症病患之一大福音。

II. 主要內容

本實驗室已成功建立人類肺癌與頭頸癌小鼠模式，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 (Enhanced Permeability and Retention effect) 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植 (orthotopic 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，並且發現銻-188-微脂體然單劑型劑量之銻-188-微脂體藥物於研究結果顯示僅可提供短暫之抑癌效果，顯示多劑型之銻-188-微脂體藥物抑或是單劑型搭配化療藥物或許能達到更好之療效。本研究計畫中，利用銻-188-微脂體藥物於人類頭頸癌模式之小鼠模式為基礎探討其抑癌之分子機制。以此為目的，本研究將提供人類頭頸癌於小鼠模式中更佳的治療方式，並可提供前臨床有用之相關治療資訊。本研究計畫將以先前的肺癌模式為基礎，比較人類頭頸癌及攝護腺癌之小鼠荷腫瘤模式，並且將銻-188-微脂體藥物注射分作多次劑量給予，再評估腫瘤反應。在本研究團隊先前研究中，我們使用銻-188-微脂體藥物針對人類非小細胞肺癌以及人類頭頸部鱗狀細胞癌原位小鼠模式給予藥物之後，研究其藥物動力學、生物體分布、單光子斷層掃描追蹤以及體內劑量評估等整體性研究。先前成果顯示銻-188-微脂體藥物非但展現了絕佳的穩定性，在動物體內也能因微脂體包覆而有效地維持

一定藥物濃度並積聚於病灶處，並且各器官累積之游離輻射劑量皆在風險等級之下，證實銻-188-微脂體於臨床應用之可行性相當高。然而，於療效評估方面的研究，我們先前的結果顯示腫瘤在單一劑量給予後的 1-2 週時間內，確實有效地抑制了腫瘤生長，但是在兩週後，腫瘤生長的情形又再度恢復至原有速度，顯示銻-188-微脂體於治療腫瘤療效部分，單一次劑量之給藥無法給予腫瘤組織足夠的劑量並造成明顯的殺傷效果。接續先前研究，本計畫擬建立人類頭頸癌及人類攝護腺癌之原位小鼠模式，並利用體外光學及核子醫學造影技術追蹤並使用多次劑量給予方式，進行銻-188-微脂體藥物的診療，並且對此動物模式之藥物動力學，以期獲得整體並有利的人類頭頸癌治療或抑制效果證明，在未來將此類藥物送上臨床，實為癌症病患之一大福音。

本計畫之實驗目的可歸納如下：

1. 了解人類頭頸癌細胞在接受銻-188-微脂體藥物給予單劑量與雙劑量治療之後的生物分布、藥物動力學、劑量評估及療效評估等
2. 評估雙劑量之銻-188-微脂體藥物於頭頸癌小鼠模式是否具更佳療效
3. 探討於頭頸癌小鼠模式中雙劑量治療後之分子機制變化
4. 建立攝護腺癌小動物模式

對抗癌症的化療藥物時常引發嚴重的副作用，由於一般細胞與癌細胞的基本組成相當類似，因此毒殺癌細胞的藥物也同樣會造成正常細胞的死亡或病變。為避免且降低藥物的非專一性效應，透過微脂體包埋方式製備的奈米藥物，已在荷腫瘤動物模式中被證明具有良好的專一性。腫瘤在成長的過程中，為了輸送快速生長所需的氧氣與養分，癌細胞便會開啟血管新生 (angiogenesis) 的機制，腫瘤的周圍也因此快速地生成血管；然而，在缺乏平滑肌支持且血管內皮細胞之間的連結也缺乏緊密連結蛋白 (tight junction) 與周細胞 (pericytes) 的連結的情形下，導致了這類型新生血管 (neo-vasculature) 的疏漏特性，使得部分小分子物質可透過這類新生血管進入腫瘤組織。此現象被稱為藥物滲透與遲滯增強效應 (The enhanced permeability and retention effect, EPR) [1, 2]。直徑小於 400nm 微小分子可藉此自血管漏出；因此，該類藥物可透過被動運輸 (passive transport) 的機制滲入並積聚在腫瘤組織，同時不影響藥物輸送過程中通過的正常組織。近年來，利用脂肪酸所組成的微脂體 (liposome) 已被證實為有效的奈米級藥物載具 (nanocarrier) [3]。根據製備方法的差異可製作出 50-150nm 不等的奈米級分子，可用於包埋各式化療藥物。初期的微脂體奈米藥物雖可抑制腫瘤生長，但也容易被體內肝臟或脾臟的網狀內皮系統 (reticulo-endothelial system) 的免疫作用清除。如今，利用 polyethylene glycol (PEG) 修飾的微脂體奈米粒子，可避過免疫系統的清除，增加在體內的循環時間，並更有效地延長腫瘤抑制的效果 [4, 5]。目前已上

市的 PEG 修飾微脂體小紅莓(liposomal doxorubicin (Doxil))已被廣泛應用於卡波西氏肉瘤、卵巢癌及乳癌等治療。然而,PEG 修飾後的微脂體奈米藥物其顆粒大小略增,雖不易被免疫系統清除,但也不易滲入並積聚於腫瘤細胞。為提高這類奈米級藥物的療效,現今也透過在奈米載具的表面接合單株抗體,或是特定的腫瘤表面受器接受子,讓這類的奈米級化療藥物透過主動標靶行為以更有效的治療腫瘤。除利用微脂體當作奈米化的藥物載具以外,現今也有利用 PEG、聚合物(polymer rods)或是微膠粒(micelles)等做為奈米載具來引導不同的藥物進行治療[6-8]。對於惡性腫瘤的積極治療,通常以第一線的手術切除做為最直接的手段,術後合併化學治療或是體外放射治療以避免殘存癌細胞造成的復發或轉移。以我國衛生福利部中央健康保健署的抗癌藥物給付標準,當前對於惡性腫瘤的化學治療藥物仍以傳統化療藥物為主,如 5-FU、順鉑(cisplatin)、佳鉑帝(卡鉑、carboplatin)以及紫杉醇(Taxol)類為主。除少數標靶藥物如 Iressa 於肺腺癌之治療外,多數高階抗癌藥物都以第二或第三線治療為主。因此,開發價格相對低廉又具專一性的藥物之需求,可見一斑。在放射治療的方面,利用直線加速器於患部直接照射,搭配強度調控治療(Intensity Modulation Radiation Therapy)、立體順形治療(3D Conformation Radiation Therapy)或是影像引導治療(Image-guided Radiation Therapy)等,應用於集中放射治療之劑量分布,避開危急器官以減少副作用。不過,這類型的治療仰賴治療計畫的評估,且療程長達兩週,多葉型準直儀的控制與機體旋轉也耗費許多時間,使得每日治療計畫的容量有限。面對逐漸增加的病例與更佳的癌症治療效果,更高效率的治療方式,也是未來研究的主軸。此外,對於已發生全身性轉移情況的癌症而言,手術切除或放射治療僅能就危急器官做即時處置,對於散佈全身的病灶,仍然以化學治療為主。臨床上目前第一線化療藥物以含鉑化合物以及太平洋紫杉醇類為主。這些抗癌藥物的特性,多是阻止細胞的遺傳物質 DNA 複製,進而造成細胞分裂失敗並且停滯在特定細胞週,最後導致細胞凋亡。然而對於全身性轉移癌症,傳統化療未能提供足夠的專一性,嚴重的副作用也讓病患生活品質低落。而標靶治療化療藥物的所費不貲,在在都成為壓倒癌症病患及其家屬的最後一根稻草。因此,融合化學與放射治療,並且經濟的新型態癌症治療方式,也逐漸為人所嚮往。近來,許多的研究已證實,將奈米微脂體藥物與放射性核種銻-188 結合,可在實驗動物體內有效抑制腫瘤的生長。銻-188 的物理半衰期為 16.9 小時,可憑藉衰變過程中放出的 2.12MeV 高能貝他粒子殺死腫瘤細胞,同時放出的 155keV 伽瑪射線,可經單光子散射斷層掃描(SPECT)來追蹤藥物在體內的位置,而銻-188 可由鎢-188/銻-188 孳生器產生,核種之洗出相對容易,因此非常適合在臨床上應用[9, 10]。銻-188-DXR-Liposome 即是透過 N,N-bis(2-Mercaptoethyl)-74 N',N'-diethylethylenediamine (BMEDA)這類化合物的合成獲得,結合了奈米藥物的腫瘤專一性的優點,以及銻-188 治療及示蹤兼備的特性,在小動物的大腸直腸癌模式已獲得極佳的診療效果(theragnostic)[11, 12],並且在衛生署 TFDA 支持下,業已進入臨床測試階段。因此,透過此類放射性奈米藥物

載具,應積極於轉移性人類腫瘤模式進一步進行試驗,以提供更多的證據使其廣泛地進入各種癌症的臨床試驗,以及通過新藥的審查,造福人類。根據衛生福利部國民健康署之統計,頭頸癌於國人男性十大癌症死亡率已攀升至第四位,更甚者肺癌長年位居國人各項疾病死亡率之首,且長年以來惡性腫瘤亦為十大死因之列(下圖一)。透過近年核醫藥物的開發,頭頸癌的診療朝同步進行的方向研發。先前,核能研究所的團隊已經刊載大腸直腸癌全身性轉移小動物模式的研究於國際期刊[13]。然而核醫奈米藥物對頭頸癌全身性轉移的治療效果、體內分布情況乃至於吸收代謝仍無任何報導,也是非常值得研究的一環。因此非常值得建立人類頭頸癌全身性轉移的小動物模式來進一步探討奈米核醫藥物的療效,並探討此類藥物對腫瘤轉移抑制的效果。

由於癌症已蟬聯十大死因之首二十餘年,當病患被診斷罹患癌症後,臨床醫師根據不同病患情況給予最恰當的治療方式,然而癌症的轉移與復發仍是目前臨床努力克服的問題,因此,銻-188-微脂體如何能達成抑癌效果,其中之分子機制也是相當重要的課題。2011 年時癌症被歸類出 10 種特徵,自給自足生長信號、對於抗生長信號的不敏感、抵抗細胞死亡、潛力無限的修復能力、持續的血管生成、組織浸潤和轉移、避免免疫系統的摧毀、促進腫瘤的癌症、細胞能量的異常、和基因不穩定和突變。這 10 種癌症特徵,目前也是許多科學家著手研究的主題,透過更多研究當中的機制時,或許在未來的癌症治療上會有莫大的幫助。

腫瘤的轉移最關鍵的步驟就是腫瘤細胞的遷移和侵襲,這一系列的過程和細胞內的細胞骨架蛋白的重新排列都有所相關。細胞骨架的重新排列也是上皮間質細胞轉型(epithelial-mesenchymal transition, EMT)的很重要的部分,上皮間質轉型會和細胞的成長、細胞的延長有所相關。近幾年來 EMT 也被提出同樣參與了癌症的發生和進展。EMT 最大的特徵即為 E-cadherin 的表現喪失。在癌症發生的過程當中可以經由一些機制造成 E-cadherin 表現喪失,例如透過一些轉錄因子的表現(ex: SNAIL, SLUG, TWIST)抑制 E-cadherin RNA 的轉錄,藉此影響癌症的發生。本研究計畫中,為瞭解銻-188-微脂體抑癌之分子機制,因此於治療四週後,犧牲小鼠並摘取腫瘤同時萃取蛋白質並將部分組織留作石蠟切片以利免疫組織染色,期望了解銻-188-微脂體是否透過 EMT 相關分子之調控,達到抑癌之療效。

研究方法

1. 小動物原位頭頸癌腫瘤(orthotopic model)接植

本研究擬使用裸鼠(nu/nu)作為動物模型研究對象,動物飼養與處理依循國立陽明大學實驗動物中心之實驗動物組織管理委員會。腫瘤細胞培養後使用胰蛋白酶(trypsin)收集後,使細胞均勻懸浮於 OPTI-MEM 其中,置於冰上備用。將小鼠麻醉後,使用 29G 針筒吸取 0.05ml 懸浮液,約 1×10^6 細胞。將小鼠嘴部撐開並撥開舌頭,將針頭自小鼠右臉側下針使針頭沒入約 2mm 後,

將懸浮液注射入，後照護至小鼠甦醒。

2. 分析雙劑型銻-188-微脂體核醫藥物對性頭頸癌之療效

本療效評估取裸鼠以前述方法接植 FaDu-3R 腫瘤原位接植模式，十天後秤其體重，並隨機分組。待腫瘤訊號超過 1×10^7 (p/s) 後，開始進藥物的注射處理，施打方式為雙次劑量給予，於治療第 0 與第 6 日分別給予 640 Ci 之銻-188-微脂體藥物。對腫瘤的療效以 IVIS 系統定量追蹤腫瘤訊號強度並記錄繪製生長曲線如前述。每一點的觀測值為每組動物的量測結果取平均值 $\pm$ 標準偏差 (S.D.)。動物的存活率則每天觀察並以前述的統計方法繪出存活曲線並比較不同實驗組與對照組之間的差異

3. 多劑型(multidose)銻-188-微脂體藥物積聚效果及藥物動力學測試

在 FaDu 頭頸癌小動物模式中，當全鼠總光子通率 (photon flux) 達到 1×10^{10} (p/s) 時，將 1.85 MBq/100 μ l 的銻-188-微脂體藥物，於治療第 0 天與第 6 天以靜脈注射方式打入動物體內並於 0.083 (5 min), 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56 小時自尾巴取 1 μ l 的血液進行藥物動力學分析，血液中的放射性物質濃度經伽馬計數器計量，以每毫升注入的劑量百分比表示之(%ID/ml)。參數參考使用 Pharsight WinNonlin 5.2 軟體，套用非隔室分析模組(Noncompartmental analysis model 201) 計算其組織時間濃度曲線(AUC)、最高濃度(Cmax)、清除率(CI, mL/h)、平均滯留時間(MRT)等。分析的目標包括血液以及腫瘤的各項藥物動力學參數。

4. 腫瘤生長之觀察與動物毒性與存活評估

腫瘤生長情形主要使用 IVIS 系統定期觀察並定量 (photons per second) 之。冷光造影部分於造影前 15 分鐘使用腹腔注射冷光酶原(D-luciferin, Perkin Elmer Inc., Madison, WI)劑量為 150 mg/kg。訊號收集五分鐘，並圈選 ROI 做定量分析。細胞數與光子數的相關標準曲線，於另一 96 孔盤，加入不同細胞數量之待側細胞，進行造影，獲得的數值與相對種植的細胞數可獲得一相關曲線。小動物的毒性測試以每日觀察老鼠的活力及以電子磅秤記錄體重、每日秤量食物與水的消耗量、以及於動物死亡後做肝臟、腎臟等的病理切片觀察是否有壞死現象(necropsy)。藥物實驗組與對照組的小動物存活率將以 Kaplan-Meier 方法評估，並以 log-rank 統計測試法比較不同組別之間存活曲線差異。

5. 免疫組織染色(immunohistochemistry staining)

在給予小鼠治療後四週犧牲小鼠並取下腫瘤以 4% paraformaldehyde 進行固定其後經過脫水、石蠟包埋、切片等步驟以利後續執行免疫組織染色，組織切片先置於 60°C 烘箱約 1 小時使蠟融化之後進行脫蠟程序。將切片依序放入 xylene 5 分鐘兩次、95%酒精 5 分鐘 2 次、75%酒精 5 分鐘 2 次與 ddH₂O 5 分鐘 1 次(在此過程中組

織皆須保持濕潤)，脫臘後利用 Citric acid 所配製之 antigen retrieval buffer 進行抗原修復，將切片浸潤於抗原修復液中並以 121°C 3 分鐘於壓力鍋中，自壓力鍋中取出後置於室溫約 20 分鐘後以磷酸鹽緩衝溶液 (Phosphate Buffer Saline with 0.05% Tween 20, PBST) 作用 5 分鐘，將切片周圍的水擦拭後並以 Dakopen 圈選組織以利後續試劑加入。首先利用 H₂O₂ 覆蓋於切片上 10 分鐘以去除內生性過氧化酶，PBST 浸潤 5 分鐘後，滴上 goat serum 並避光 30 分鐘進行 blocking，移除多餘水分後加入稀釋之一級抗體，加至組織切片反應隔夜於 4°C，經過 PBST 浸潤兩次後(每次 5 分鐘)，加入二級抗體反應再以 PBST 清洗兩次後(每次三分鐘)。加入 DAB 呈色劑呈色約數十秒，以清水清洗三次(每次 5 分鐘)後使切片烘乾，依序以 70%、90%、100% 酒精脫水，最後滴入封片膠封片，以顯微鏡觀察組織染色情形，並以顯微鏡觀察組織型態並擷取影像。

6. 西方墨點法偵測小鼠小鼠腫瘤內特定蛋白質表現量

摘取下之腫瘤先以磷酸鹽溶液沖洗後，以手術剪刀剪碎，再將含有 2% protease inhibitor cocktail 之細胞裂解液 (lysis buffer)，之後將樣品放入 4°C 冰箱內的震盪器反應 15 分鐘，再其樣品置於 4°C 離心機內以 1500rpm 轉速離心 30 分鐘，取其上清液即為蛋白質萃取溶液。利用 Bio-Rad Protein Assay Reagent 及測量其 595 波長的吸光值測量上述萃取的蛋白質濃度後，進行電泳分析。定量後的蛋白質溶液取出 20~50 μ g 所需的體積，加入 1/5 倍的 SDS Loading Sample Buffer，置於 100°C 的乾浴槽當中煮沸 8 分鐘後置於冰上冷卻，再注入 SDS-PAGE 中進行電泳分離蛋白質。完成電泳後進行轉漬。將轉漬後的 NC 膜置於 blocking solution 當中作用一個小時，再以初級抗體分別以適當的比例溶於 blocking buffer 當中，和已經過 blocking 作用後的膜置於 4°C 冰箱振盪器中 16 小時，再用其對應的二級抗體作用 2 個小時。初級抗體將包含 Anti-GAPDH, Anti-ZEB-1, Anti-TWIST-1, Anti-E-cadherin, Anti-gammaH2AX。而蛋白質表現量將利用 Western Lighting Plus-ECL 和二級抗體結合產生冷光，以冷光螢光影像擷取系統 (Luminescence/Fluorescence Imaging System, FUJIFILM, Japan) 即可分析所需蛋白質的表現量

III. 結果與討論

第一部分-單劑量與雙劑量銻-188 微脂體於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式之療效評估與藥物動力學探討

本實驗室於先前研究已完整呈現單劑量給予單劑量銻-188-微脂體於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式之藥物動物學與生物分佈等相關實驗數據，並於結果發現銻-188 微脂體可積聚於病灶處；除此之外，利用非侵入式之光子造影方式觀察腫瘤生長情形，更發現此核醫奈米藥物可抑制腫瘤生長，並延長小鼠存活期(圖一、二)，本實驗室進一步將小鼠犧牲並取下腫瘤進行 microarray 分析，探討銻-188-微脂體抑制癌症生長之分子機制，於分析結果中發現其中與腫瘤生長轉移有密切關係之微核糖核酸

microRNA 內其中一 let7 家族中 let7i 之表現有所關連並更進一步利用 let7i 之抑制劑探討在此抑制劑處理下是否可使腫瘤抑制現象消失，於結果中發現當抑制此微核糖核酸 let7i 之表現後，於細胞實驗中之生長曲線、細胞群落形成等實驗觀察到當抑制 let7i 表現後，癌細胞生長速度皆較控制組明顯增加；於動物實驗中也顯示在抑制劑之處理下給予銻-188-微脂體，抑癌效果明顯消失，此部分研究結果已於去前投稿至國際期刊 *oncotarget* 並獲發表。然而於單劑量研究中發現，抑癌效果較短暫(約兩週)，約於治療後第三週腫瘤就有持續生長情況產生，為使抑癌效果延長並能使研究成果與臨床接軌，本研究利用雙劑型銻-188-微脂體探討其療效評估。於實驗第 0 與第 6 日分別給予 80%MTD 約 640 μ Ci 之銻-188-微脂體藥物，並於不同時間點以非侵入方式觀察腫瘤生長情形，由結果顯示，雙劑量之銻-188-微脂體藥物給予，雖可達到更佳之抑癌效果(圖三)，但於生長存活曲線上差異並不明顯，推測是雙劑量給予之毒性所造成，因此我們更進一步執行藥物動力學試驗(圖四)，藥物動力學實驗中共分三個個組別，於第 0 天時分別給予單獨微脂體/銻-188-BMEDA(未包覆微脂體之藥物)/銻-188-微脂體，於第 6 天時在給予第二劑銻-188 微脂體藥物/銻-188-BMEDA(未包覆微脂體之藥物)/銻-188-微脂體藥物，由結果中可觀察到給予雙劑銻-188-BMEDA(未包覆微脂體之藥物)組別在實驗結果中濃度曲線下面積 AUC 最低，表示銻-188 在微脂體包覆下明顯提高至滯留於體內之時間，並且能藉此更進一步在病灶造成腫瘤殺傷效果；另一方面，給予雙劑量銻-188-微脂體藥物其曲線下濃度面積也明顯高於單劑量組別(由 364%ID/ml 提高至 603%ID/ml)，顯示雙劑量銻-188 微脂體藥物未來臨床上可做為更具潛力之治療方針。

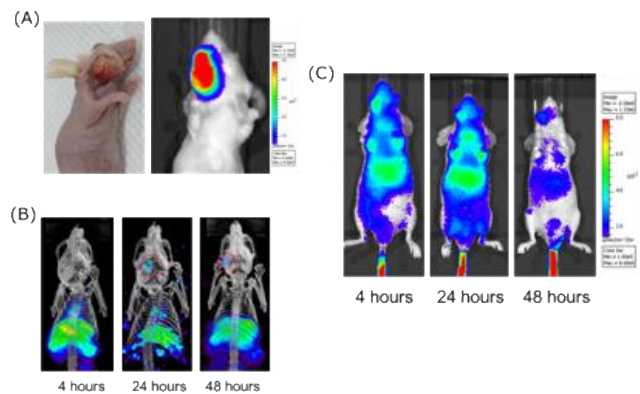
第二部分-雙劑量銻-188-微脂體藥物於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式抑癌效應之相關分子機制探討

根據前述實驗結果顯示銻-188-微脂體可於小鼠模式上達到抑制腫瘤生長的效果，然其分子機制尚不清楚，而癌細胞腫瘤生長與進展中，上皮間質細胞轉型(epithelial-mesenchymal transition, EMT)被視為是一重要指標，為了解銻-188-微脂體之抑癌效應是否與 EMT 有所關聯，本研究於雙劑量藥物給予後四周，犧牲小鼠摘取腫瘤後萃取蛋白質，以西方墨點法偵測與 EMT 相關之分子，於結果中發現被視為抑癌角色之 E-cadherin，在單劑量與雙劑量銻-188-微脂體處理之小鼠腫瘤中表現量都明顯高於控制組及銻-188-BMEDA(未包覆微脂體之藥物)之組別，顯示銻-188-微脂體藥物可能藉由誘導 E-cadherin 表現而抑制 EMT 現象，因此我們進一步分析與 EMT 相關轉錄分子(圖六)，觀察到被視為 EMT 標的分子 vimentin, ZEB-1, Twist-1 在雙劑量銻-188-微脂體處理組別中可觀察到有明顯被抑制的現象產生，有趣的是其中 Twist-1 只在銻-188-微脂體單劑/雙劑量處理中有下降趨勢，而於銻-188-BMEDA(未包覆微脂體之藥物)之組別則與控制組無明顯差異，推測銻-188-微脂體抑癌效果較未包覆銻-188-BMEDA 更佳之

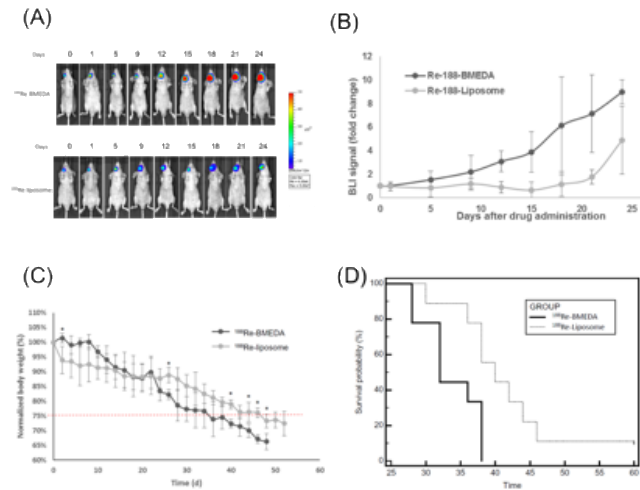
原因可能就是在分子機制上藉由調控 Twist-1 來達成。除此之外，雙劑量藥物給予後四周，犧牲小鼠摘取腫瘤後，我們也同時將部分組織進行時石蠟包埋切片，利用免疫組織染色檢驗被視為細胞增生標的 ki-67 之表現量(圖五)，結果顯示控制組與單劑量組別 ki-67 表現並無明顯區別，推測是由於腫瘤是於治療後四週取下，而已知單劑量抑癌效果只可持續約兩週，因此於治療後四週取下之腫瘤組織切片其增生指標與控制組並無明顯區別，但於雙劑量銻-188-微脂體組別，則可看到顯著性之差異，幾乎於相同染色條件下無法偵測到 ki-67 之訊號，顯示癌細胞增生能力已較控制組與單劑量處理組別低。

第三部分-攝護腺癌小鼠模式之建立

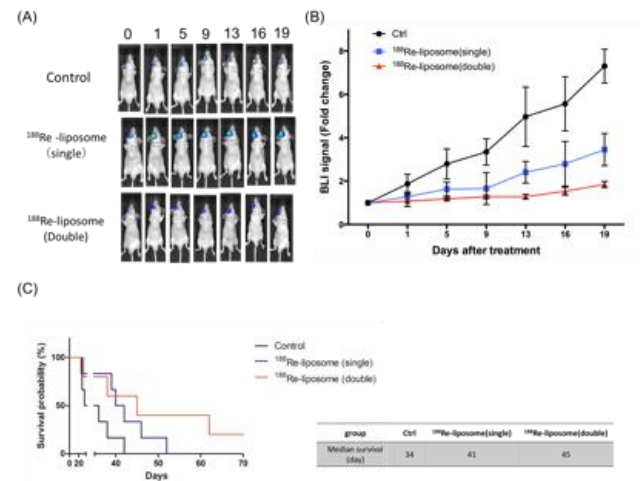
為建立攝護腺癌之小鼠模式，本實驗室利用已成功帶有穩定表現綠色螢光蛋白(green fluorescence protein)、螢火蟲螢光酶(firefly luciferase)、以及第一型簡單皰疹病毒胸腺嘧啶激酶(HSV1-tk)等三種分子造影功能之 PC-3 細胞株。並以原位方式接植至 NOD-SCID 小鼠，並於接植後第六週與第七週以冷光偵測訊號(圖七)，然於後續持續追蹤時已無冷光訊號，於接植後十二週犧牲小鼠也無觀察到腫瘤小鼠也無觀察到腫瘤形成，若於下一年度計畫欲繼續建立此動物模式可考慮更換細胞株另行做測試。



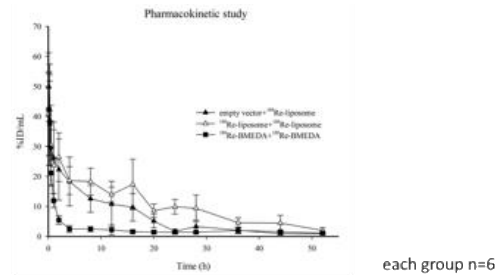
圖一，以非侵入式之方式觀察銻-188-微脂體藥物積聚於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式。(A)以原位接植人類頭頸癌細胞於小鼠右臉頰，並以 IVIS 進行冷光訊號偵測。(B)給予銻-188-微脂體藥物後於不同時間點以 nanoSPECT 觀察藥物於病灶處積聚情形。(C)在給予銻-188-微脂體藥物後於不同時間點利用藥物特性以 IVIS 進行 cerenkov 造影確立藥物積聚情形。



圖二，單劑量銻-188-微脂體藥物於頭頸癌小鼠模型之療效評估。(A)採單一劑量給予，劑量為 80%最高耐受劑量(MTD)，共 640 μ Ci。於治療前開始記錄，每週二至三次收取其光子訊號為期 24 日(B)量化數據由 IVIS 50 內建軟體 Living Image 3.2 自動圈選興趣區間(Region of interest, ROI; 80% peak threshold in contour)。(C)為開始給予藥物後記錄其體重變化圖表。(D) 生存曲線 Kaplan-Meier 圖表顯示，經銻-188-微脂體藥物治療過後之組別，生存較控制組明顯延長 $p=0.0068$ 。(n=9)

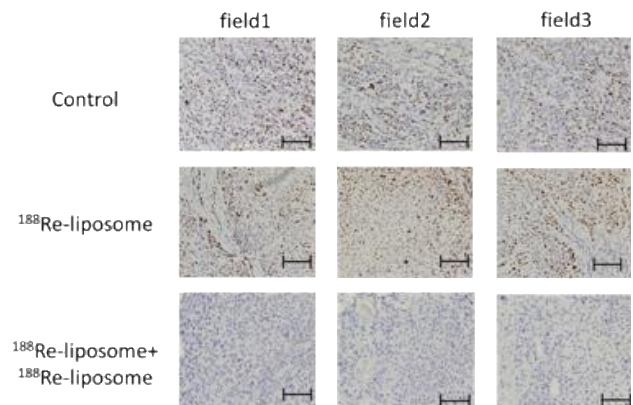


圖三，銻-188-微脂體藥物於頭頸癌小鼠模型之療效評估。(A)為雙劑量處理後於不同時間點以冷光訊號觀察腫瘤生長變化，每週二至三次收取其光子訊號(B) 量化數據由 IVIS 50 內建軟體 Living Image 3.2 自動圈選興趣區間(Region of interest, ROI; 80% peak threshold in contour)。(C)為生存曲線之結果，顯示雙劑型銻-188 微脂體可延長平均生存時間

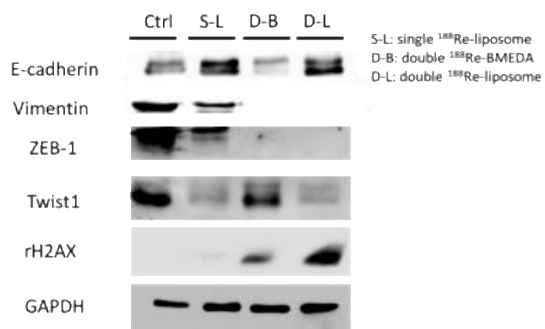


parameter	Unit	Empty vector(liposome) + ¹⁸⁸ Re-liposome	¹⁸⁸ Re-BMEDA + ¹⁸⁸ Re-liposome	¹⁸⁸ Re-liposome
AUC	%ID/ml	364.69147	123.5137	603.36888

圖四，雙劑型銻-188-微脂體藥物之藥物動力結果。實驗共分三個組別，於治療第 0 天與第 6 天以靜脈注射方式將藥物打入動物體內並於 0.083 (5 min), 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56 小時自尾巴取 1 μ l 的血液進行藥物動力學分析，血液中的放射性物質濃度經伽馬計數器計量，以每毫升注入的劑量百分比表示之(%ID/ml)。



圖五，以免疫組織染色驗證銻-188-微脂體藥物之抑癌效應。在給予小鼠治療後四週犧牲小鼠並取下腫瘤以利進行石蠟包埋切片，於不同組別中檢測細胞增生指標 ki-67 之表現量，並隨機擷取不同視野，比例尺為 100 μ m。



圖六，以西方墨點法檢測 EMT 相關標的分子於銻-188-微脂體藥物處理後之表現量變化。

IV. 結論

2012. 39(1): p. 35-43.

由目前實驗結果發現，雙劑量給予之小鼠能有較好之療效與藥物動力學結果，而其抑癌效果，可能是透過調控上皮間質轉型(epithelial-mesenchymal transition, EMT)相關分子來達成，此奈米核醫藥物目前已進入臨床試驗，倘若能針對此藥物之調控分子機制做一詳細探討，必能對未來臨床使用時提供有用資訊與治療策略。

參考文獻

- [1]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.
- [2]Greish, K., Enhanced permeability and retention (EPR) effect for anticancer nanomedicine drug targeting. *Methods Mol Biol*, 2010. **624**: p. 25-37.
- [3]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.
- [4]Ho, E.A., et al., Characterization of cationic liposome formulations designed to exhibit extended plasma residence times and tumor vasculature targeting properties. *J Pharm Sci*, 2010. **99**(6): p. 2839-53.
- [5]Ma, Y., et al., Nanoparticles of Poly (Lactide-Co-Glycolide)-d- α -Tocopheryl Polyethylene Glycol 1000 Succinate Random Copolymer for Cancer Treatment. *Nanoscale Res Lett*, 2010. **5**(7): p. 1161-9.
- [6]Mohanty, C., et al., Curcumin-encapsulated MePEG/PCL diblock copolymeric micelles: a novel controlled delivery vehicle for cancer therapy. *Nanomedicine (Lond)*, 2010. **5**(3): p. 433-49.
- [7]Wan, Y., et al., Anti-tumor activity of biodegradable polymer-paclitaxel conjugate micelles on Lewis lung cancer mice models. *J Biomater Sci Polym Ed*, 2011. **22**(9): p. 1131-46.
- [8]Wang, T., V.A. Petrenko, and V.P. Torchilin, Paclitaxel-loaded polymeric micelles modified with MCF-7 cell-specific phage protein: enhanced binding to target cancer cells and increased cytotoxicity. *Mol Pharm*, 2010. **7**(4): p. 1007-14.
- [9]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.
- [10] 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.
- [11] Chang, Y.J., et al., Therapeutic efficacy and microSPECT/CT imaging of ^{188}Re -DXR-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor model. *Nucl Med Biol*, 2010. **37**(1): p. 95-104.
- [12] Chen, M.H., et al., MicroSPECT/CT imaging and pharmacokinetics of ^{188}Re -(DXR)-liposome in human colorectal adenocarcinoma-bearing mice. *Anticancer Res*, 2010. **30**(1): p. 65-72.
- [13] Chen, L.C., et al., Pharmacokinetics, dosimetry and comparative efficacy of ^{188}Re -liposome and 5-FU in a CT26-luc lung-metastatic mice model. *Nucl Med Biol*,

從核能資訊公開到開放政府資料—制度的區隔與匯流

From Freedom of Nuclear Regulatory Information to Open Government Data —Focused on Distinction and Convergence of Related Institutions

計畫編號：MOST 105-2623-E-305-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：高仁川助理教授

e-mail：lawrck@mail.ntpu.edu.tw

共同主持人：張惠東助理教授

執行單位：國立臺北大學法律學院

摘要

本計畫主要目的在探討政府資訊公開、開放政府這兩個制度的區隔與匯流，尤其設定在核能資訊領域為中心。其次，在確立制度的區隔與彼此之間的關係後，從組織面針對未來核安管制委員會應如何運作，並由政府實際治理層面檢視核能行政領域的資訊特徵，加以歸納分類，進而如何落實核安管制相關資訊公開及開放政府的政策。第三、期於各項核能安全監管之決策作業過程中，強化民眾有充分的資訊取得管道、構思核能資訊再利用的可能情形。第四、促成民眾有機會透過其所委託的專家代表提供意見參與決策，建立公開各項會議的制度及其具體作法，以提升多面向溝通、監督與核能資訊開放利用的可操作性。第五、進一步評估在個別行政領域有無另外制定「核能資訊再利用法」專法的必要。

關鍵詞：核能資訊公開、開放政府資料、政府資訊再利用、核能資訊再利用、公眾參與。

Abstract

This project aims at exploring the distinction and convergence between two concepts, freedom of information and open government data, including their related institutions. Second, this project will focus on nuclear regulatory information and nuclear regulatory commission. After introducing the latest development of FOIA and Open Government Movement happened in other advanced countries, this project argues that specific reform in legislation and the structure of Taiwan's NRC. Third, this project will probe into whether it is necessary to establish a "Nuclear Information Reuse Act". The main purpose of this project is to promote public participation in the nuclear regulatory process, strengthen the access possibility of nuclear information of the public. With the communication and dialogue, this project will also forward active strategies of NRC's staff to realize the ideals of open government data.

Keywords: freedom of nuclear regulatory information, open government data, reuse of government information, Nuclear Information Reuse Act, public participation

I. 前言

伴隨網路科技的興起，大量資訊的產出、傳遞與運

用，不僅改變了個人的行為、也影響各種社會制度與運作模式，並且促成高度複雜化資訊交流網絡的形成。資訊對於個人與政府的意義，產生與過去更為不同的理解及運用可能性。根據我國國家發展委員會於「政府資料開放平台」的說明，「政府施政透明、提升民眾參與公共政策議題是世界各國政府推動的趨勢，經由政府資料的開放，可促使跨機關資料流通，提升施政效能，滿足民眾需求，以強化民眾監督政府的力量。配合雲端運算及行動服務時代來臨，在政府資源有限下，善用民間無限之創意，整合運用政府開放資料，推動政府資料開放增值應用，發展各項跨機關便民服務，更是行政院推動第四階段電子化政府發展的重要主軸。依據 101 年行政院第 3322 次院會決議指示，政府開放資料(Open Data)可增進政府施政透明度、提升民眾生活品質，滿足產業界需求，對於各級政府間或各部會間之決策品質均有助益，可見其重要性，各部會應自民眾的應用面發想，思考使用端之需求，在規劃時也要考慮到機器讀取介面的必要性。行政院所屬各機關今後將藉由『資料開放民眾與企業運用』、『以免費為原則、收費為例外』、『資料大量、自動化而有系統的釋放與交換』3 步驟，並配合『主動開放，民生優先』、『制定開放資料規範』、『推動共用平臺(Data.gov.tw)』、『示範宣導及服務推廣』等 4 大焦點策略推動政府資料開放工作。資料開放的類型以便利及提升民眾生活品質為優先，例如食、醫、住、行、育、樂、就業、文化、經濟發展和生活品質等，期透過政府資料開放，促成跨機關與民間協同合作與服務創新，創造民眾、政府、業界三贏局面。」由此可見，在電子化政府的發展主軸之下，我國政府已意識到「政府開放資料」已成為當前施政的主流目標之一！確立其理念價值，對其推展步驟、焦點領域亦具備基本的體認與原則性的擘劃。

對照其他先進國家的法制與政策經驗，我們也清楚發現：隨著資訊科技發達，從資訊由全民共享的角度來看，資訊的開放與利用，也已逐漸成為各國政府所重視的施政與立法趨勢。例如：自 2009 年起，美國總統歐巴馬簽署「透明與開放政府備忘錄(Transparency and Open Memorandum)」，以「政務透明」、「公民參與」及「協同合作」作為「開放政府」之原則。除了透過政府資訊釋出，使得公眾得以閱覽及利用之外，總統要求行政機關研擬技術使資訊公開於網路上，並應讓公眾回饋

使資訊得到最佳利用；同時為促進政府效率及提升政府決策品質，強調應提供公眾參與政治決策過程之機會；更要求政府透過創新工具、方法及系統，在政府機關間、非營利組織、事業、或個人尋求合作。藉此陸續形塑及實踐「政府開放資料(Open Government Data)」的政策。又如：英國則根據「促進政府及其服務之透明及可信度政策」來推動「開放資料」，並於2012年提出「開放資料白皮書：釋出潛力(Open Data White Paper: Unleashing the Potential)」，具體闡明「開放資料」的範圍定義、目標與作法。可見，從資訊公開、電子化政府理念的提出，到開放政府的趨勢演進，若干國家早已積極邁向開放政府資料的政策實踐與制度建構層次。

在我國政府資料開放平台上，雖然已將著作權法、個人資料保護法、政府資訊公開法、行政程序法列為重要法規，並將前述法律以及電子資料流通實施要點、行動化服務發展作業原則、政府資料開放作業原則列為法源依據；儘管如此，事實上政府資訊公開與開放政府仍有其理念出發點與制度設計上的根本差異，不宜混淆。參考我國其他學者之研究，亦有認為：政府資訊公開法規範的只是資訊公開相關事項，而再利用則將權利授權。所以，再利用之主要內容應係針對「授權」此一部份。因此，政府資訊再利用與政府資訊公開法係屬二事，不適合在同一部法律中予以規範，而應另行思考就政府資訊再利用制定專法。然而，迄今我國政府仍未制定有關開放政府或政府資訊再利用的專法，而僅有「行政院及所屬各級機關政府資料開放作業原則」、「政府資料開放資料集管理要項」、「政府資料開放平臺使用規範」、「政府資料開放諮詢小組設置要點」等行政命令性質的法規範作為施政基礎。

究竟有關政府資訊再利用有無另行制定專法的必要性？本身即屬一個有待再探討的課題。換言之，在一般、通案性的各個行政領域，除了「政府資訊公開法」之外，可能需要思考「政府資訊再利用法」的制定必要。甚至理論上，也存在著於一般、通案性的「政府資訊公開法」之外，在個別行政領域另行制定專法的可能性，例如：核安管制領域另制定「核安管制資訊公開法」、以及「核能資訊再利用法」。亦即，因應相關課題的立法建制，可再細別為：性質上共通適用於各行政領域的「政府資訊公開法」和「政府資訊再利用法」；性質上適用於核能領域的「核安管制資訊公開法」及「核能資訊再利用法」。當然，立法的複雜化勢必有其不同的優缺點，個別法律之間的關係、公務人員操作上的困難度、核能行政領域的資訊管制、公開、再利用的問題特殊性有多大，都是相關考量因素。在透過立法將制度進一步明確化、規範化之前，本計畫認為應先行評估在個別行政領域有無另外制定專法的必要。

II. 主要內容

本計畫首先就政府資訊公開、開放政府這兩個制度的區隔與匯流，深予研究。其次，在確立制度的區隔與彼此之間的關係後，從組織面針對未來核安管制委員會應如何運作，並由政府實際治理層面檢視核能行政領域

的資訊特徵，加以歸納分類，以探討如何落實核安管制相關資訊公開及開放政府的政策。第三、期於各項核能安全監管之決策作業過程中，強化民眾有充分的資訊取得管道、構思核能資訊再利用的可能情形。第四、促成民眾有機會透過其所委託的專家代表提供意見參與決策，建立公開各項會議的制度及其具體作法，以提升多面向溝通、監督與核能資訊開放利用的可操作性。第五、進一步評估在個別行政領域有無另外制定「核能資訊再利用法」專法的必要。最後，在具體作法上，本計畫初步認為：日後核安管制機關內部主管資訊公開事務行政官員不妨藉由舉辦座談會的方式，深化核安管制主管機關其他單位成員對政府資訊公開、開放政府制度理念的認知。另一方面，為提升行政院各部會之資訊主管單位，就有關如何落實開放政府政策的規劃與執行能力，應可考量多與民間或半官方性質的智庫合作，邀請部分可能與各類資訊（包括核能資訊）應用相關的業者，闡釋介紹開放政府、大數據等新興資訊運用的潮流與概念，務實地經過由下而上的產官學交流，達成資訊產出者、資訊管理者、資訊需求者等利害關係人之間的良性溝通，盡可能消弭管制者、被管制者、社會一般資訊需求者在資訊公開與開放政府制度運作過程中的資訊落差。

依本計畫的研究，政府資訊公開的立法理念包括：促使國家邁向民主化及現代化、推進施政公開化與透明化、提高人民參與公共政策與監督政府施政的可能性、便利投資商業行為及個人消費等，此等理念均有賴大量且正確之資訊。而政府正是資訊的最大擁有者，為便利人民共享及公平合理利用政府資訊、增進人民對公共事務之瞭解、信賴及監督，更有必要將資訊公開制度予以法制化。所謂資訊公開制度的定義，即指：(1)「誰」對「誰」得以「何種方法」、(2)請求公開「何種資訊」、(3)於「何種情形」之下，受請求者得拒絕公開、(4)而請求者對於行政機關「拒絕公開的行為」，或者第三人對於公開的行為、(5)應「如何予以爭執」、(6)以「何種程序」尋求救濟。至於「開放政府資料」與「資訊公開法制」的區別問題，有主張：「資訊公開的目的是為了保障人民對資訊有接近、利用的權利。而民眾依政府資訊公開法取得公部門資訊後，若欲再就資訊進行提升其內部價值之加值利用行為，才會落入資訊再利用的討論範圍。」換言之，資訊近用(access)是資訊再利用(re-use)的前階段行為。因此，在探討政府資料公開前，宜究明政府資訊公開法與其他資訊法制的關聯性。其中牽涉政府資訊公開法與個人資料保護法之關係、國會調查權之制度目的與資訊公開的區別。特別是在我國，有時國會議員未能體認國會調查權行使另有其制度依據，反而試圖以政府資訊公開法來申請若干核安管制資訊，此時所衍生的問題，甚至也包括國會議員運用這兩種資訊取得的管道，其所得請求的資訊客體範圍有何差異？核安資訊主管機關能否拒絕提供？拒絕的理由是否有不同的根據及考量因素？申言之，大法官釋字第325號既已經肯認立法院的文件調閱權、第五八五號解釋更確立國會調查權，在現行法律上的根據：立法院職權行使法第四十五條、第四十七條、第四十八條也已有相關明文規範，則核安管制機關面對的資訊公開請求，未必只是一般人民依政

府資訊公開法所提出，也包括類如國會調查權行使的其他方式。因此，為使核安管制機關通盤明瞭整個資訊公開相關法制的競合關係，本計畫才會首先從確立制度的區隔與彼此之間的關係著手。而這樣的實際運作困擾，也是獲悉自計畫主持人先前與核安管制機關的委託計畫合作經驗。

而有關核能行政領域的資訊特徵為何，應如何加以歸納分類，亦關係到資訊公開與開放政府資料的實際執行成效。蓋資訊量體的龐大、專業技術複雜度越高，對於資訊需求者而言，越難具體行使資訊公開請求權或實踐開放政府資料的理念。目前行政院原子能委員會已在官方網站首頁，設有資訊公開專區，其欄位更區別為主動公開資訊項目、開放資料 Open Data。前者項目大致是依據政府資訊公開法第七條應主動公開的資訊類別而區分；後者則包含核能電廠運轉資訊、全國環境輻射偵測、國內輻射偵檢合格鋼鐵業名冊、輻射偵測業者名單、核能電廠異常事件次數等 69 個項目。就此而言，原能會已相當程度意識到踐行資訊公開法制與開放政府資料的重要性。不過，似乎仍無法從此窺知核能行政領域的資訊特徵為何、歸納分類的背後依據或標準為何。易言之，無論是經過一定程度處理而得的「資訊」，或者尚屬有待加工的原始「資料」，都反映著資訊（與資料）之所有者或處理者看待資訊（與資料）的觀點與價值。但由此一面向出發所作的分類，和從資訊需求者面向所期待認定的歸納分類方式，可能有所不同。換言之，資訊的供需如何達成均衡，誠應加強供需雙方的經常性對話與理解。網路平台雖是可能的溝通機制，但是探知民間資訊需求者的看法，藉以定期性反覆檢視並調整資訊或資料的分類與呈現方法，亦有其重要性。實際上，這種文件分類的說明，不僅牽涉資訊公開訴訟中行政機關的舉證與說明理由義務，對於非關訴訟的資訊公開請求，亦有指引民眾的效果。

有關資訊公開與開放政府資料的法制發展上，美國的經驗顯示：建立政府機關與民眾之間的橋接組織機制，有其正面的功能。舉例來說，2007 年的開放政府法（OPEN Government Act）修正資訊自由法的規定，在國家檔案與紀錄管理局（National Archives and Records Administration）之下，創設了「政府資訊服務處」（Office of Government Information Services），國會授權該服務處肩負起「聯邦資訊自由法監察官」（the Federal FOIA ombudsman）的角色，特別是在欠缺清楚而直接的溝通情形時，應擔任資訊請求權人與政府機關之間的橋樑。該服務處的主要任務包括：(1)檢視行政機關是否確實遵守資訊自由法的要求與政策；(2)調解資訊請求權人與行政機關之間的紛爭，但調解制度與資訊公開訴訟並非排斥關係；(3)作為資訊監察官，徵集聯邦政府機關與一般公眾提供改進資訊公開制度的建議或處理相關提問。(4)協助訓練聯邦政府各機關承辦資訊公開業務的人員，該如何處理資訊公開的紛爭。又如「聯邦資訊自由法諮詢顧問委員會」（FOIA Federal Advisory Committee）的建制。根據 2013 年 12 月 5 日公布的第二次「開放政府國家行動計畫」（Open Government National Action Plan，

NAP），為了使資訊自由法更符合現代化的需求，聯邦資訊自由法諮詢顧問委員會的須由政府官員與非政府成員共同組成，其職權在推動行政部門與公眾之間的對話，徵集公眾的評論意見、促進共識與建議的形成進而改善有關資訊公開的行政作業方式與資訊的主動揭露。該委員會作為一個審議性質的組織，須研究橫跨各種行政部門有關資訊公開執法與政策的背景、演變，並研擬立法提案及提供政策建議。

對照美國資訊自由法的發展現況，我國目前的政府資訊公開法並無主管機關，其執行態度任由掌握資訊的機關自行其是，也缺乏監督執行的組織，實際成效缺乏全面或定期統計分析、亦無客觀評估機制。因此，本計畫初步認為：如果能就政府資訊公開法進行全盤檢討，研擬修正故不失為一個可行方向。但藉由對各機關（如原子能委員會）現有資訊公開作業流程與作法，務實地觀察可資改進的空間，俟統合彙整各機關的經驗與問題之後，再審酌立法的應然設計，應更為具體可行。在這一方面，原能會已累積不少可供肯定的作法，例如：清楚描繪出「核能資訊公開作業機制與分工圖」；但相對於美國國家檔案與紀錄管理局所屬的「政府資訊服務處」、「聯邦資訊自由法諮詢顧問委員會」的創置，是否有也意味著從組織面的強化、引入民間顧問委員的參與來推進資訊公開法的落實，應有其進一步參考的價值。

III. 結果與討論

我國政府資訊再利用之法制化問題，研究指出：我國目前並針對政府資訊再利用的部分進行規範，或有認為於政府資訊公開法中設立專章統一規範較好，但亦有認為另定專法係較好之選擇，因現行政府資訊公開法，僅有規範政府資訊公開的部分，但政府資訊再利用則係將相關權益向外授權，二者著重點不同，不適合於同一部法律中訂定。在缺乏母法作為授權基礎的情形之下，以施行細則加以規範亦有合法性上的疑慮。申言之，就政府資訊再利用的法制化而言，其實施步驟至少應包括：釐清可釋出的資訊、可能須有鑑價與授權程序、應否創造政府資訊有價釋出回收成本機制、降低政府資訊交易成本等，其考量面向與傳統政府資訊公開法制應有所不同。除非概念上可將「政府資訊再利用」與「開放政府」完全切割分離，且認為「開放政府」的政策推動完全無須法律作為基礎，否則目前行政院以「行政院及所屬各級機關政府資料開放作業原則」、「政府資料開放資料集管理要項」、「政府資料開放平臺使用規範」、「政府資料開放諮詢小組設置要點」作為推動開放政府的法制依據，恐有所不足。

無論是資訊公開或開放政府理念的實踐，都須要以完善的法制與政策基礎為前提，建立「政府資料開放平台」雖已凸顯出一定程度的施政前瞻性，但法律及制度的交錯關係，尚待澄清。尤其，單一平台的設計，仍需要多重的行政內部組織介面分別發揮其功能，方能「實化」平台的內容，而非徒有網站的架構軀殼。在管制外部環境上，公民社會蓬勃的民間組織、靈活的產業創新思維，都是關鍵的影響因素。當代政府治理理念的重點

關鍵之一，就是強調透明公開是緩解政府與民間社會發生對立衝突的重要施政元素！對行政內部組織而言，為確保民眾知的權利，核安管制機關應透過核能資訊公開、鼓勵民眾參與共同監督核能安全，進而使得民眾認同政府之角色，建立互信並向政府提出建言。管制機關更可以透過核安管制決策過程的透明化，以之抵抗外在政治力與經濟利益的不當干涉。同時，資訊公開也有利於風險溝通，消除民眾疑慮，有助於民眾理解，轉而支持與信任核能安全管制機關之專業判斷。就組織內部的成員來說，核能資訊公開或開放政府資料都可能因為顧及個人資料保護、隱私權、著作權，或擔心洩漏行政機密或國家機密，而導致對資訊公開與開放政府資料的執行層面產生疑慮。甚至，開放政府資料需要以資訊需求者的角度來預想哪些資料有增值利用的可能性，進而將資料歸類、建檔，建立查詢系統，以便利民眾搜尋，有別於行政機關作為決策者的思維模式，凡此均亟需組織內部不同單位成員共同腦力激盪與經驗交流，並以彈性的制度設計與民眾溝通對話。因此，本計畫在執行過程中發現，我國政府向來似乎較缺乏經過由下而上的產官學交流，達成資訊產出者、資訊管理者、資訊需求者等利害關係人之間的良性溝通。換言之，除了法制概念的釐清、法規範的修正或制定之外，政府應更重視「人」的要素。重視內塑行政組織各成員深化政府資訊公開與開放政府的理念，外造核能資訊再利用及開放政府資料的法制基礎，透過內外雙向規劃與執行，期使核安管制機關成為行政部門中落實資訊公開與開放政府資料理念的標竿。

歷經 1974 年、1986 年、1996 年和 2007 年，四次較大幅度修正之後，美國資訊自由法（Freedom of Information Act, FOIA）在 2016 年再次通過修正法案。2016 年 3 月，資訊政策辦公室（Office of Information Policy, OIP）終於公開提供予各專門機關就有關資訊公開法，其所研擬之建議遵循指導方針，此套指導方針係落實第二次美國資訊自由法之全國行動計畫。政府當局承諾積極給一套程序以確定此制度之可行性，和資訊自由法如何修正其規範之核心內容，以適用於全部機關並保持政府專門機關之彈性。在 2014 至 2015 年，資訊政策辦公室召開許多工作論壇，也與公民社會多次溝通，終於完成本次指導方針之探討。在議會通過政府資訊自由法之修正案後，歐巴馬總統簽署通過 2016 年政府資訊自由法增修法案，本改善法案已於 2016 年 6 月 30 日總統公布後起實行。此次資訊自由法增修法案修法之內容，涉及：處理部分程序上爭議，包括要求機關對於提起行政上訴之上訴人需建立至少九十天之上訴時間；以及在政府資訊公開之過程中隨時得提供爭議解決服務。本法案也修正聯邦行政程序法第五篇第五章，創建「資訊自由法主要審查官委員會」，其後又於 2016 年 9 月，更新其指導方針，其內容包含：1.提供申請人公眾聯絡處與政府資訊部門連繫之服務通知（Notifications to requesters of assistance from FOIA Public Liaisons and the Office of Government Information Services）；2.行政上訴之起訴期限最少為 90 天（Ninety-day minimum time

period to file an administrative appeal）；3.爭議解決程序（Procedures for dispute resolution）。透過此等指導方針之更新，進而逐漸修正資訊自由法之相關法律規範和政策。

創立「資訊自由法主要審查官委員會」（Creation of "Chief FOIA Officer Council", CFO）係 2016 年美國資訊自由法修正中，相當值得重視的一部份。此一改善法案創建了一個隸屬於行政部門的委員會，作為機關與請求者社群的合作平台，以探索創新方法來改善資訊自由法之管理。該組織之義務包括：為資訊自由法的遵循性和效率提出建議；傳播相關資訊自由法的經驗、想法、最佳實踐和創新方法；以識別、開發和協調增加資訊自由法的透明度和遵循度；促進資訊自由法之發展以及機關遵循度普通績效考察評估之適用（“common performance measures for agency compliance”）。委員會應對請求者的審查有一通常依據。組織應定期會晤並將會議公開，且每年至少必須有一開放的會議，允許公眾出席和發表意見。

至今，CFO 委員會已經召開兩次會議，分別在 2016 年 7 月 23 日召開一成立會議及同年 9 月 15 日舉行二次會議。CFO 委員會被賦予的第一個任務即為探討「公開至一平台即向全國公開」（“release to one is release to all”）的構想。「公開至一平台即向全國公開」構想之起源，係為透過此一想法促進資料、記錄被公開的範圍。2017 年美國司法部（Department of Justice, DOJ）實行一個為期六個月的實驗計畫，計畫與七個自願參與的聯邦機關主動公佈其資訊，並評估這項政策之可行性。這樣的概念能確保所有公民，非僅限那些主動提出請求公開的公民，都能享有使用這些政府公開資訊的權利。因此，政府希望能將實驗計畫擴展適用至整部資訊自由法，使所有聯邦機關都能採用「公開至一平台即向全國公開」的構想標準。簡言之，美國政府欲設立一數位平台，以儲存並足以容納所有機關之公開資訊，便於民眾查詢利用。而 CFO 委員會需要調查政策在執行上所面臨的主要議題，包含評估對新聞業的影響，以及尋求最佳方法面對技術和資源上的挑戰。在第二次的 CFO 委員會會議，OIP 簡介各機關對於委員會「公開至一平台即向全國公開」構想所給予之回饋，且提供記者對此發表意見與看法。另外，委員會聯合主席 Melanie Ann Pustay 即預告「全國通用的資訊自由法資訊網站」（Universal FOIA portal）將在 2017 年年底開始執行第一階段。

歐盟執委會先前自 2015 年 10 月 30 日到 2016 年 1 月 22 日，針對其 2016-2020 年 e 政府行動計畫（eGovernment Action Plan）進行了公眾諮詢程序。執委會依據其公眾意見諮詢之初步分析，於 2016 年 2 月 23 日說明其 2016-2020 年的 e 政府行動計畫政策，將藉由公共行政管理措施（包含司法部分）的 e 化，實現歐盟數位單一市場的目標，提高跨境的互通性以及促進歐盟公民間的便捷交流。e 化政府服務為所有民眾和企業提

供更好服務之低成本、高效率，以及可參與、透明化的政府。儘管各會員國皆已推出電子化政府服務，但彼此間存在許多差異，且使用率並不高。然而，為推廣跨國整合的政府服務，建立以使用者為中心、個人化、集多樣政府服務的平台，其未來發展仍值得注意。簡之，該計畫主要目標包括：1.數位化：創造高效及有效率的現代化政府；2.聯繫面向：跨境的公共服務；3.參與面向：藉由數位化互動，擴大公眾參與。

歐盟於開放政府資訊再利用之相關政策仍屬萌芽階段，除了 2013 年的指令及 2014 年的指南外，多數相關資訊及概念仍處於諮詢公眾意見之階段，尚未有非常明確的定論。歐盟官方目前雖已意識到在資訊爆炸的時代中，官方所例行性或任務性搜集的不同領域，所有資訊皆富含著重大的經濟價值，並嘗試以大數據探勘等方式，試圖結合民間及官方力量，將原本繁雜的數據轉化成具有高度經濟價值的資訊，但由於整體概念之建構及實踐仍處於初步階段，目前主要是以歐盟官方倡議，各會員國將指令精神及內容內國法化，試圖從規範面建構一個友善「資訊再利用」的環境，並輔以通訊網路基礎設施建置、資料電子化、資訊形式格式化、標準化的落實，使「公部門資訊再利用」具備大規模開展的前提要件。

關於「核能資訊公開」及「核能資料再利用」之部分，除有關核能安全之對於民眾生命財產有重大影響之相關核安資訊外，於歐盟及國際原子能總署（IAEA）之官方文件中皆無「核能資料再利用」之政策或倡議，本研究認為或許係因核能資訊涉及國家安全及國家能源戰略考量，各國皆採較為保守之態度，而國際組織或超國家組織亦考量此類資訊之高度敏感性，並未倡議開放「核能資訊」予民間單位或私人組織有再利用之可能。故我國原子能委員會若有考慮關於「核能資訊」開放甚至供私人部門再利用之可能，參酌國際規範，似應侷限於與核能安全相關之資訊，而非全部的核能資訊，且亦須徵詢國家安全機關或情治單位之意見，方無疑慮。

IV. 結論

從早期政府資訊公開重要性的在法制面的落實，隨資訊本身可能具有的經濟效益，促進了資訊再利用法制的建構與探討，資訊公開由作為監督政府施政透明的一種手段，逐漸轉向資訊在財產權面向的擴張。但在立法建制必要性，從本研究的成果來看，顯然各國法制發展未必一致；但在政策層面，如何實踐「開放政府」的價值，衍生其創新與提供公眾更多服務功能的觀點來看，則似為各國的發展潮流。然而，資訊公開與開放政府這兩個制度的區隔，應不容否認。並且，即使資訊加值再利用法制有其值得肯認之處，但從我國「政府資訊公開法」、「著作權法」、「檔案法」、「國有財產法」、「規費法」、「個人資料保護法」的相關規範來看，缺乏完整、體系性、包裹修正的立法思維，各法規之主管機關疏於協調、流於各自分散的法規修正案提出方式，可能也是造成資

訊加值再利用法制難以在我國實現的原因之一。

本研究根據對外國法制與政策的分析成果，經過評估之後，初步認為在個別行政領域有無另外制定「資訊加值再利用法」的問題，就核能資訊的敏感性與再利用潛在可能較低，初步認為並無單獨制定「核能資訊再利用法」專法的必要。換言之，其他行政領域，例如：土地利用、食品、交通…，應更具先行制定個別資訊加值再利用法的實益，或作為適用對象範圍，而將核能資訊予以排除。整體而言，歐盟公部門資訊再利用指令應足以提供相當參考。

但另一方面，核安管制委員會應如何運作，並由政府實際治理層面檢視核能行政領域的資訊特徵，加以歸納分類，進而落實核安管制相關資訊公開及開放政府的政策強化民眾有充分的資訊取得管道，特別是在：建立公開各項會議的制度及其具體作法，以提升多面向溝通、監督與核能資訊開放的可操作性，美國資訊自由法的新修正與相關命令的實際作法，應可作為未來我國核能資訊公開專法的借鏡。

參考文獻

- [1] 孟令涵，政府資訊加值再利用之法制建立初探——以資訊釋出模式為核心，清華大學科技法律研究所碩士論文，頁 20、21，民國 99 年 6 月。
- [2] 劉得正，我國政府資訊再利用法制建構之研究，世新大學法學院碩士論文，頁 108-134，民國 99 年 7 月。
- [3] 彭惟欣，我國核能電廠風險管制規範之研究——以組織與程序保障功能出發，中正大學法律學研究所碩士論文，2015 年 6 月。
- [4] 湯德宗，政府資訊公開法修正芻議，收於「政治思潮與國家法學」，吳庚教授七秩華誕祝壽論文集，元照出版，2010 年 1 月。
- [5] The United States Department of Justice, NEW GUIDANCE AND TEMPLATE FOR AGENCY FOIA REGULATIONS NOW AVAILABLE, March 22, 2016, <https://www.justice.gov/oip/blog/new-guidance-and-template-agency-foia-regulations-now-available>, (最後瀏覽日：2016/10/2)
- [6] The United States Department of Justice, OIP SUMMARY OF THE FOIA IMPROVEMENT ACT OF 2016, Updated August 17, 2016, <https://www.justice.gov/oip/oip-summary-foia-improvement-act-2016>, (最後瀏覽日：2017/1/18)
- [7] FOIA IMPROVEMENT ACT OF 2016, <https://www.congress.gov/114/plaws/publ185/PLAW-114publ185.htm>, (最後瀏覽日：2017/1/18)
- [8] 主要國家「政府開放資料」(Open Government Data)機制與作法追蹤觀察 報告(一)——美國，財團法人資訊工業策進會，103 年 01 月
- [9] Data Coalition, The OPEN Government Data Act: A Sweeping Open Data Mandate for All Federal Information, <http://www.datacoalition.org/the-open-government-data-act-a-sweeping-open-data-mandate-for-all-federal-information/> (最後瀏覽日：2017/3/21)
- [10] DIRECTIVE 2013/37/EU OF THE EUROPEAN

PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 26 June 2013 : amending Directive 2003/98/EC on the re-use of public sector information

- [11] 潘競恒、李長晏、許耀明，我國政府資訊再利用之法制化研究，行政院研考會委託研究，頁 185，民國 98 年 1 月。
- [12] 高仁川，政府資訊公開制度的理論與實際，政治大學法律研究所公法組碩士論文，民國 89 年 7 月。

深耕中學生核能知識

Implant nuclear power knowledge into secondary school students

計畫編號：MOST 105 - 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：changijy@ntnu.edu.tw

計畫參與人員：蕭家昇、蔡昀達、楊大慶

執行單位：國立台灣師範大學化學系

摘要

本計畫結合高中化學學科中心，舉辦四次高中教師核能相關知識研討會，除將核能防護詳細說明外，亦加入核能在醫學上之應用。向高中生推廣核能相關知識方面，則走訪 6 所大型高中，將核能防護知識導入，並推廣核能漫畫書，讓學生能在課餘主動了解核能知識。

關鍵詞：高中教師研習、高中生、核能知識漫畫。

Abstract

We have held four symposia for high school teachers to establish the general knowledge of nuclear safety, radiation protection and nuclear emergency response as well as new medical application of radiation. Similar lecture is delivered to high school students in six schools. Comic books created for nuclear safety, radiation protection and nuclear emergency response are introduced to high school students.

Keywords: high school teacher symposia, high school students, Comic books about radiation.

I. 前言

核能發電因其較深的原理，很少在高中推廣教導，也因而無法將核能安全、輻射防護及核子事故緊急應變知識在學校傳授。本計畫針對於此，並結合本校-國立台灣師範大學-校友在高中教學之教師，以到校進行專題演講之方式，推廣正確之核能知識。計畫主持人曾於 101、103 年編製有關輻射防護之漫畫，更有利於吸引學生參與。對學生之演講將以推廣核能安全、輻射防護及核子事故緊急應變知識為主，並討論有關環境游離輻射及低階放射性廢棄物貯置的相關知識。

對教師之演講除基本輻射知識外，更增加放射性物質在醫學上的應用。

II. 主要內容

到校進行專題演講主題有二：輻射安全與防護、核能與能源。輻射安全先從說明非游離輻射與游離輻射，光源都可稱為輻射，只有能量超過 10 keV 之光源才可將物質之電子游離，即為游離輻射，對人影響較大。此類游離輻射自然界中就存在，台灣游離輻射量平均值為 1.62 毫西弗/年，遠低於世界平均值 2.4 毫西弗/年(每人)。鼓勵學生多閱讀、思辨，不須聞輻射色變。

對人為輻射之疑慮最大來自核能電廠，演講內容包含萬一真有核能電廠事故時，最需要的輻射防護知識針

對放射性碘 I-131，尤其福島事件後，大多數人只知碘很重要，但不知人體對碘的吸收及使用機制，服用碘片 (KI-127) 雖可以幫助我們不吸收放射性 I-131，但對人體也會造成負荷，所以一定要等到相關機構通知服用時才可使用，不能擅自食用。又因 I-131 的半衰期只有 8 天，很快就可以不再食用碘片。至於銫 (Cs-137) 則會和鈉、鉀等離子一樣被人體吸收。雖然 Cs-137 的半衰期為 30 年，但在身體內銫亦會和鈉、鉀離子一樣代謝、排出，生理半衰期只有 110 天，放射性物質在此時間內只會衰退 0.7 %。具備正確核能知識，才能確保在極不可能發生的核能意外時，保護自己。也不至於以訛傳訛，自我製造恐慌。

放射性廢棄物的處置亦是國人謬誤較多的地方，對高中生會先解釋何謂高階、低階放射性廢棄物，再說明低階放射性廢棄物貯置的方法。最後和同學一起討論，高階放射性廢棄物的最終貯置的方式，引發學生深入思考。

核能與能源之主題著重在核能發電之原理。各種能量轉換，核分裂及核融合基本上的差異，以及核分裂會生成高階、低階放射性廢棄物，但核融合因生成氦，而無放射性廢棄物。此部分亦討論目前三起核能電廠事故，美國三哩島、烏克蘭車諾比(前蘇聯)、日本福島，事件起源以及正確防護可做到最少損害。

在教師之研習活動中，除上述演講外，亦邀請臺大醫院核子醫學部薛晴彥教授，講解可釋放正子(PET)放射性藥物的發展及其在醫學上的應用。一般人只知害怕放射性物質，卻不知放射性物質在日常生活中已扮演的重要角色。在葡萄糖 2 號位置上，用 F-18 取代氫氧基，就可進入腦部，利用 F-18 釋放之正子，即可掃描，進行腦部造影，由此可知道腦血管、腦神經的細節，容易發現任何異變。

III. 結果與討論

本計畫結合高中化學學科中心，共舉辦四次高中教師核能相關知識研討會，除將核能防護詳細說明外，亦加入核能在醫學上之應用。在高中學生的推廣方面，則走訪 6 所大型高中，推廣核能相關知識方面，除將核能防護知識導入，並推廣核能漫畫書，讓學生能在課餘主動了解核能知識。

此計畫中，高中教師參加研討會之男女比例大約為 2：3，和教師結構比例有關。6 所大型高中，除中山女中為女校、成功高中為男校外，其餘各校均為男、女兼

收。在演講的過程中，並沒有發現對核能的認知有性別上的差異，反而中山女中的學生反應熱烈，可能和老師的鼓勵有關。

高中學生較無核能知識，原已在預期中，但實際走訪各高中，才知此情形非常嚴重。藉由本計畫達到推廣正確核能知識，至少在輻射安全與防護上有基本認知。高中學生的情形當然也可反推到高中教師，由教師研習中的反應可知，成年人對核能的認知亦是貧乏。高中教師為科學知識傳遞的主力，若能將正確的核能、核安、防護知識深植到教師群中，對推廣正確的核能知識將有極大的幫助。

IV. 結論

我國目前既定政策為達到 2025 非核家園，但在此之前，對一般民眾最關心的核災緊急應變，以及放射性廢棄物的處置問題，仍需持續推廣。經由執行本計畫得知到高中演講，推廣正確的輻射安全與防護成效非常好。雖然需要一班一班的推動，進度較慢，但聽講之學生真正了解，效果較佳。高中教師對學生的引導非常重要，應持續提供高中教師正確核能知識、有公信力之機構網址，期待高中教師可以科學方法帶領學生獲得正確概念。至於放射性物質在醫學上的應用，對中學生較遙遠，難引起共鳴。反而教師們比較有興趣，值得持續推廣。

在高中生對核能知識普遍不足之現況下，男、女學生並無太大差異，對於核能知識的學習興趣亦大致相同。日後的推廣也應不限男、女分校或合校，而應走訪各類高中。正確的核能防護知識是人人均應具備的。

參考文獻

- [1] 阿凱哥與碘的真實面，張育寧、張一知，2012。
- [2] 阿凱哥之”此鉅非彼色”，余鎮奎、張一知，2014。
- [3] 阿凱哥遊蘭嶼，張育寧、張一知，2014。
- [4] 103 年度原子能科技學術研討暨成果報告，2015。

輻射防護科普實務推動及成效探討-II

Practical Promotion on General Science Education for Nuclear Power Safety and Radiological Protection-Phase II

計畫編號：105-NU-E-007-009-NU

計畫類別：☒個別型計畫 ☐整合型計畫

計畫主持人：戴明鳳 教授

e-mail：mftai@phys.nthu.edu.tw

計畫參與人員：李進得 博士

執行單位：國立清華大學物理系(所)及跨領科學教育中心

摘 要

本計畫致力於輻射科學與技術科普知識的推廣，及輻射安全與防護知識之深耕教育推動，與相關議題的解惑。主要以下列兩方式進行：(1)辦理科普活動：以國高中學生、大學生及師培生為主要推廣對象；活動方式有輻射議題的專題演講，及實地參訪輻射設施，如清華大學水池式原子反應器、國家同步輻射研究中心及核二廠核廢料暫時儲存場等相關輻射單位。總計辦理了33場次活動，累計時數達115小時，參與學員達3,505人(女性學員約占30%)。此外，(2)錄製講座影片：完成九部內含與輻射議題相關的開放式專題講座影片(具HDTV品質)的錄製；影片經標記後上載至科技部科技大觀園「知識大講堂」網頁，亦同步上傳到清華大學跨領域科教中心網站內；供國內外師生與民眾分享學習，並提供公教人員之研習認證用。

關鍵詞：輻射科學、輻射安全、輻射防護、科普教育推廣。

Abstract

The program committed to promote public science education on the "radiation science, safety and "radiological protection". The program also assisted in resolving issues related to what confused and puzzled general public the most. The major progresses were: (a) the promotion of science education of radiation safety and radiological protection: Therefore, this project is dedicated to provide the knowledge of "radiation protection" for students from junior high schools to senior high schools and someone who will be teachers in future. The activities were speeches of radiation issues and visiting to radiation facilities, such as Tsing Hua Open-pool Reactor (THOR) and the National Synchrotron Radiation Research Center. In this project, we held 39 popular science activities related to radiation issues. The total activities were 154 hours long and the participants were 3,757 in total (~30% female participants). (b) In addition, a series of lectures related to the radiation issue were recorded in videos with HDTV quality. The videos were uploaded to the knowledge lecture hall for teachers and civics, and also uploaded to the Cross-disciplinary Science and Technology Center website of National Tsing Hua University. It is expected that students would be enlightened at the event and learn the correct knowledge of radiation. On top of this, students will put more attention to science in general. Someday, they will make a good use of it.

Keywords: radiation science, radiation safety, radiation protection, general science education.

I. 前言

一般人在常規的教育體制內能獲取的輻射知識、應用與其安全等基本知識的機會較為有限，因此進而對輻射正確的安全與防護所知更為缺乏，導致國人心中對此議題常因不了解而產生疑惑，甚至害怕。有感於大眾宜具備輻射基本且正確知識的迫切需求，故根據本團隊以往推動各科學領域的科普經驗，以及近年來對輻射科技與防護安全計畫之推廣工作的成效和經驗[1,2]，本計畫進一步優化，並設計輻射防護的深耕教育。以期能導正民眾對相關知識能有正確的理解及適當的解惑。期使國人得具備足夠的相關知識後，便能在面對疑問時，能夠擁有正確的判斷力，或當不幸遭逢相關災變時，能以臨危不亂的冷靜態度面對危機，並做最適當的危機處理，以避免心理上不當的恐慌。

計畫執行方式主要為辦理科學研習活動，和錄製相關議題之講座影片，再輔以媒體傳播方式進行推廣，提供各級學校師生參考及補充知識，讓參與活動的學生可以於課後複習；也讓未能有機會參加活動的民眾能透過影片自行下載閱讀研習，由此引導學生了解輻射的應用，不再害怕輻射。

II. 主要工作與內容

分析探討過往辦理輻射科普推廣工作的優缺點與成效 [1,2]，並根據本計畫之徵求項目「N4組人才培訓與風險溝通領域」的重點，以下列兩項主軸工作執行本計畫：

一、輻射科普活動實務推動及成效探討：

本計畫以國高中學生、大學生及師培生為主要推廣對象，辦理一系列輻射相關議題的科普活動。活動方式有專題講座及輻射設施實地參訪，如清華大學水池式原子反應器、國家同步輻射研究中心及核二廠核廢料暫時儲存場等相關輻射單位。

本計畫執行期間總計為國內國、高中學生、本校大學生、及自然科學領域的師培生辦理了33場次與輻射議題相關的各式科普活動，累計活動時數達115小時，參與學員達3,505人次(女性學員約占30%)。其中以輻射專題演講為主之時數約75小時，其他為演講搭配輻射設施之實地參觀、或展/演示輻射計、或輻射測量實驗、或輻射模擬之DIY科普實驗等活動。請參見圖1和圖2活動辦理

場次統計。

階段性研究成果



圖1 活動辦理場次統計與照片



圖2 活動推廣所及地區及主要參訪單位統計。

為能有效優化及強化輻射知識深耕教育的推廣，我們經由下列多元的推廣方式執行輻射推動和成效的探究：

1. 培育核安與輻防種子深耕校園科普教育活動：藉由下列機會推動種子師生的培訓工作。

- (1) 受本校師培中心邀請，於104學年度下學期(105年2月中-6月中)開設中學自然領域科目之師培生必修的「生活科概論」課程(3學分)。於課程中納入了輻射科技、輻射應用及核電廠中的輻安與防護議題(約兩週次6小時)，並特別為選修本課程的師培生安排輻射設施的實地參訪活動(兩次，每次各1小時)。期使這些師培生們未來到了教學職場得以其具備的輻射知識，教導未來學子。
- (2) 在即將展開的108課綱內，實作與探究課程已被列為國高中課程中老師必開、學生必修的自主學習課程。因計畫主持人為高中物理學科中心的科學諮詢顧問，每年得為其種子教師開授教師研習營，或透過協助國高中教師研發「實作與探究」課程主題和內容，故我們亦曾規劃將輻射科技議題導入該實作與探究課程中的可能性，使之得以有機會正式納入常規的教學課程內。

2. 辦理K12學生認識輻射安全及防護實驗和參訪課程：

- (1) 接受國內各級學校及民間團體邀約，委託或主動為各單位或社群規劃辦理0.5-4天不等天數的科學教育活動，辦理輻射議題專題演講與實地參觀輻射設施。經由專題講授、實驗示範、演示、DIY等各種教學方式，並安排參訪相關設施，如原子爐核子設施、清華大學水池式反應器、台電核二廠的低輻射核廢料暫時儲存場及國家同步輻射研究中心、核醫設施(清大BNCT)等等的實地參訪和體驗，以使學員能獲取深刻紮實的知識，更透過學員之間及與資深相關職場從業人者間的交流討論，解開疑惑與誤解。近年我們的科學教育團隊每年約有200場次以上的科學活動邀請，其中至少會有1/5-1/4左右的場次規劃為與本計畫推廣主題相關的研習，並將因核能發電所衍伸的輻射安全與防護相關議題高比例地納入研習課程中。請參見圖3活動剪影。



圖3 輻射議題專題演講活動照片

- (2) 將基本輻射測量融入大學普通物理實驗課程中：本校每學年度有一千位以上的大一生必修普物實驗課程，此外，每年另有逾8,000位之多的K12師生到本校普物實驗室暨跨領域科教中心辦理科學研習活動。故於普物實驗課程中的第一個實驗「基本度量實驗」內融入背景輻射和日常生活用品之輻射強度的度量實驗，以讓更多國內各級學生有機會接觸到輻射計量的基本知識，並瞭解輻射度量的定義和使用。該實驗亦適度地安排於K12的科學活動中，使更多人有機會學習正確的輻射知識。
 - (3) 計畫主持人104和105學年度下學期持續於清華大學校內開設「物理在能源與環境的應用」(2學分)提供具理工背景的大學生選修，因有論及核能發電，故課程內必會論及核災衍伸的輻射安全與防護，及其相關輻射測量器材的探討和輻射施設參訪的教學也納入此門課程必授內容。
- ### 3. 舉辦優秀青年參訪核能機構交流活動：
- 遴選各地優質學校或優秀青年，並鼓勵各校自行招攬優秀學員組團，由我們團隊輔導辦理「輻射科技與應用」研習和參訪核能設施。使學員能經由參訪與座談，體驗核電廠與輻射防護等之安全管制及緊急應變現況。如105年度有5場次2-3天期的「能源科技之旅」

系列，其中一天會安排含輻防基本知識與遇核災時，民眾應具備有之應變知識的教育推廣。另有6場次參訪國家同步輻射中心的「輻射應用之旅」系列，以探究輻射產生暨應用研習活動。請參見圖4和圖5活動剪影。



圖4 輻射議題專題演講與清華大學水池式反應器活動實地參觀活動剪影



圖5 國家同步輻射研究中心實地參訪活動剪影

4. 舉辦科普系列專題講座活動：

不定期舉辦2-3小時的專題演講系列活動，約有13場次。圖6為南投地區國中學子第一次接觸到輻射知識及親眼看到輻射研究設備的活動心得與感想彙整表。學生多表示很高興有此難得的學習機會，並深受啟發、收穫滿滿。

二、「輻射」議題系列專題講座影片錄製與實務推廣：

近年來我們科普團隊特別著力於科普教育影片的錄製工作，故特與本校(清大)原科院巫勇賢教授所主持的「週末學術科普列車全國巡迴走透透-大眾科學教育個別型計畫(105-2515-S-007-005-MY3)」合作輻射議題之科普講座影片的錄製(但有關輻射議題的錄製，該計畫僅負責錄影和後製工作；本計畫負責講座活動規劃、演講者邀請、聽眾程度評估和安排，以及影片完成後的使用、推廣與維護。期使無法參加我們活動的師生或民眾，能夠有機會透過線上學習的機會獲取新知。

參與心得和建議彙整表

演講日期	106 年 1 月 20 日	活動參與人數/問卷回收份數	35/31			
單位	南投縣立南崗國中	連絡教師	黃俊豪			
講者	國立清華大學物理系戴明鳳教授 國立清華大學物理系林志明教授 國立清華大學原科中心李進得博士	演講題目	輻射防護之旅			
性別	男性 27 位，女性 8 位，共 35 位					
一、學員對活動之建議或感想						
	學員的意見	非常同意	同意	沒意見	不同意	非常不同意
1.	活動結束後您對演講的主題有了初步的認識	28	3	0	0	0
2.	本活動辦理內容有達到您預期參加的目的和期望	2	29	0	0	0
3.	本次講座演講者的講解清楚易懂	0	3	23	5	0
4.	此活動有助於您對核科學領域產生興趣	28	3	0	0	0
5.	未來願意再參加類似的演講活動	30	1	0	0	0
二、請提供我們，您對參與本活動後的寶貴心得和建議。						
1. 參觀完這座一百億的國家同步輻射研究中心，雖然還有很多學問是我未知的，但收穫很多，也對輻射有了更多的了解。在今天的活動中，不管是科學小遊戲、液態氬、還有清華校園，一大堆的新奇以及過往都在今天從心底湧出，希望還能再來。						
2. 今天特別來到新竹參觀清華大學和國家同步輻射研究中心，還參加了很多有趣的課程學到了很多，我對壯觀的 TPS 印象深刻，還有液態氬的課程，也感謝清大的教授們，希望下次可以再來。						
3. 今天非常感謝清華大學的教授教我們許多科學知識，像是液態氬的體驗和參觀巨型超時的廠房，讓我大開眼界也玩得很盡興，希望下次還有機會能再來訪。						
4. 這趟清華大學之旅讓我獲益良多，今天的學習課程十分豐富，內容教到了光和輻射，雖然有些聽不懂，但是透過教授介紹讓我更加了解，有了很多的收穫。						
5. 來到清華大學上課，還參觀國家同步輻射研究中心，雖然有點聽不懂有關 X 光的東西，但很開心學到不少有關物理、化學的知識，十分開心、十分感謝。						
6. 今天的新竹之旅非常好玩，讓我認識了跟輻射有關的知識與研究中心，如果有機會我一定還要再來，真的非常值得！						
7. 這趟來清華大學的校外參訪中，我雖然不太聽得懂內容，但是能參觀這裡的國家資源，實在非常榮幸。在參觀同步輻射中心時，看到超級深奧的大型研究設備，讓我獲益良多。						

圖6 南投南崗國中學子第一次接觸到輻射知識及親眼看到輻射研究設施的活動心得與感想彙整表。學生多表示很高興有此難得的學習機會，並深得啟發、收穫滿滿。

本計畫執行期間已完成分別由不同專業講師主講輻射議題的九部影片，影片均具備HDTV高畫質規格，影片名稱和講員一覽表請參見表一。影片除上載於本校跨領域科教中心 <http://isec.web.nthu.edu.tw/files/11-1917-10841.php?Lang=zh-tw> 網站外，並上傳至科技部「科技大觀園」網站→單元→週末學術科普列車網頁 <https://scitechvista.nat.gov.tw/list/r41/reset.htm> 中，以供更多大眾分享探究，並供公教人員或民眾研習認證用。部分影片雖以能源和發電為主題，但其中都有涉及核能發電時，應該注意的核安與輻防議題的探討，以及當面臨核災事故發生時，電廠與民眾應該具備的應變能力與態度。

表一 與輻射議題相關的線上影片清單

#	影片名稱 (點選各影片名稱，即可超連結到影片的 youtube 網址)	講者
1	同步輻射光源介紹與應用	林志明教授(清大)
2	核能系統與核能安全	陳紹文教授(清大)
3	觀察質子中的夸克	傅利曼教授(Jerome Friedman)
4	輻射應用	洪國鈞先生(經濟部)
5	能源科技發展的現況與困境	葉宗洸教授(清大)
6	我們關心的能源議題	洪國鈞先生(經濟部)
7	核，不核；核不，核	葉宗洸、陳新泰教授
8	輻射應用與核食安全	洪國鈞先生(經濟部)
9	輻射科技與應用	葉宗洸教授(清大)



圖7 清大物理系林志明教授「同步輻射光源介紹與應用」線上課程影片，影片網址：<https://is.gd/HfyrHR>。



圖10 洪國鈞先生主講「輻射應用」線上影片，影片網址：<http://www.youtube.com/watch?v=hwG48yiiMfs>。

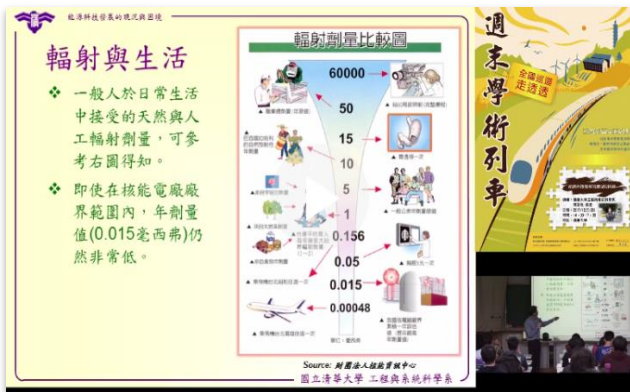


圖8 清大工程與系統科學系葉宗洸教授「能源科技發展的現況與困境」線上課程影片，影片網址：<https://youtu.be/o5IAxweNyk8><https://is.gd/1Ga6cx>。雖以能源和發電為主的影片，但其中都有涉及核能發電時，應該注意的核安與輻防議題的探討，以及當面臨核災事故發生時，電廠與民眾應該具備的應變能力與態度。



圖9 清大工程與系統科學系陳紹文教授「核能系統與核能安全」線上課程影片，影片網址：<http://www.youtube.com/watch?v=Qk5Kpn7u5Y8&t=27s>

III. 結果與討論

本計畫於執行期間總計辦理了 33 場次與輻射議題相關的科學研習活動，累計總時數達約 115 小時，參

與學員達 3,505 人次；並完成 9 部含有輻射議題相關的線上講座課程影片的錄製(影片點閱次數粗估應至少有上千次以上的點閱率)。各場次活動參與學員多由各單位主動自行招攬，但由本計畫團隊規劃課程主題和研習內容，得見本計畫推動探究的議題甚或 K12 各級師生樂於接受及學習。

學員於活動中經由專題講座、實地參訪、與講員間的問與答、交流座談，以及觀看原子能相關科學知識的開放式課程影片。使學員得以深入淺出地了解、或體驗輻射的知識、輻安與防護等安全管制及緊急應變，具備正確的輻射知識及防護觀念；消除心中對輻射原有的不解、疑惑和不安。

從推廣活動的回饋資料和多數單位會定期回來再要求我們的科普團隊持續辦理相關的研習活動，可知經前述多元活動方式、從不同觀點切入探究，可以很有效地幫助學員逐漸深入地理解正確的知識，強化了大眾對輻射議題之正確資訊傳遞與吸收的管道，並提升進一步探討原子科學之基本知識和其應用的興趣，以及提昇教育推廣的成效。

過去幾年我們活動對象主要針對高中師生，但自本計畫起也開始將活動延伸至國中生，雖然國中生基本的相關科學知識較為有限，但透過各式不同的活動方式讓他們對輻射有初步的認識，且意外地在課後問卷中反應熱烈，認為這趟輻射課程非常有趣、甚為值得(參見如圖 6 學員心得)。最近也已和幾所新竹縣市國中、小教師及家長討論醫療與輻射教育的宣導可能，也獲得認同，期許將輻射知識從小學開始深根，使 K12 師生與民眾對輻射提早擁有正確知識與正確的資料來源，提升探討原子科學之基本知識和其應用的興趣，及教育推廣成效。

IV. 結論

本計畫著重在透過辦理科普專題講座及安排學員到相關單位參訪，讓學員了解輻射科技與其應用，推廣輻射安全與防護。讓學員理解輻射是自然存在於大自然界之中的一種能量，透過活動讓學員了解如何可以避免過多的輻射照射，做好自身防護。

從學生在活動中對輻射議題的發問及實地參觀輻射設施時的驚訝與喜悅之情，顯現出一般學校教育很少

提及輻射的應用與發展，使輻射課程對學生來說是未知且渴望探究的。透過活動參與心得回饋單也能得知，學生很珍惜參訪輻射研究相關單位的機會，透過輻射系列專題的演講也達到了輻射知識的推廣目的。

不少學校或單位獲知我們團隊有辦理參訪清華大學水池式反應器及國家同步輻射研究中心，也提供相關教學演示實驗或 DIY 實驗課程，故紛紛來電要求未來能有機會再度協助辦理專題講座、參訪輻射相關設施、輻射偵測的展/演示活動，顯現所辦理的活動成效獲普遍的肯定。未來期望持續致力於輻射教育的推廣，讓輻射議題對一般學生及社會大眾來說不再晦澀難懂，懂得做好輻射防護及學會運用，讓生活更美好安全無慮。

參考文獻：

- [1]104 年度「原子能安全與輻射防護科普實務推動及成效探討」計畫(編號：MOST 104-NU -E-007-009 -NU) 成果報告；
- [2]104 年度「原子能安全與輻射防護科普實務推動及成效探討」計畫(編號: MOST 104-NU -E-007-009 -NU) 於 104 年「原子科技學術合作研究計畫」成果發表會(105 年 5 月 6 日台北北投捷運會館舉辦)的精簡論文。

大學醫護保健類科學生輻射防護知識增能計畫

Radiation Protection Knowledge Enhancement Program for Health Care College Students

計畫編號：MOST-105-NU-E-227-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：潘 愷

e-mail：kaipan@ntunhs.edu.tw

共同主持人：陳明毅、林健盛

計畫參與人員：關荏元、陳佩瑩、簡嘉誼、黃煒筑、陳橋涵

執行單位：國立臺北護理健康大學嬰幼兒保育系

振興醫療財團法人振興醫院

摘要

本計畫將以執行與推廣大學醫護保健類科學生輻射防護知識增能活動，包括護理、復健、營養、幼保、醫管等科系；教導適合醫護保健類科學生的輻射科普知識，提昇其輻射科學之涵養；以『環境情境介入』的活動模式，以未來工作職場為標的，引導非輻射專業背景之參與對象，提供輻射防護知識增能活動，以達自我保護，遠離輻射職災之目標。本計畫有以下三個目標：一、開發醫護保健類科大學生之「醫療輻射防護」科普教材；二、探討實施教學後學生對「醫療輻射防護」概念了解情況；三、實施醫療院所實地參訪及輻射防護操作模式之滿意度調查。

關鍵字：醫療輻射防護、醫護保健、科普知識

Abstract

This program is dedicated to execute and extend the enhancement of radiation protection knowledge by energizing activities for health care college students including Department of Nursing, Department of Physical Therapy, Department of Dietetics, Department of Infant and Child Care and Department of Health Care Administration. It is expected to improve students' attainment of radiation concept by suitable instruction regarding popular radiation science. We plan to set up a model of activity named 'Situational Involvement in Working Environment' and lead the participator who doesn't have profound knowledge in medical radiation protection to achieve the goal of self-protection and keeping away from occupational accident in future. The following three objectives of this program is: 1. To extend the teaching materials of medical radiation protection for health care college students; 2. To evaluate the learning effect of students after the teaching program; 3. To evaluate the satisfaction about medical radiation protection practical program.

Keyword: medical radiation protection、health care、popular science knowledge

I. 前言

輻射防護的目的是在保護人類不會受到輻射暴露的危害；但在醫療場域中為執行醫療行為而必需使用到放射性元素，就必然需考量到醫療暴露（medical exposure）的輻射防護原則為正當化與最適化。涉及醫

療暴露作業的正當性時，應對每一個別的放射診斷、放射治療或核醫造影程序逐一評估；而醫療暴露的最適化亦應具有適當的彈性，允許在完整的臨床判斷下採用更高的劑量。然，除具輻射性學理背景之放射相關醫事技術人員之外，大部分在醫療院所中工作的醫師、護理師、復健師、藥師、營養師…等醫療保健從業人員，在其養成教育的過程中，輻射化學的相關學理知能並未被重視。醫療產業相關從業人員，身處在可能具輻射風險的工作環境中，若不具正確的輻射防護知識，恐怕會有錯誤的認知而造成過度的疑慮，若不知如何正確保護自己，更遑論如何教導病人有正確的輻射防護概念。

II. 主要內容

為使醫護保健類科大學生能具有「醫療輻射防護」的概念，本計畫透過半結構式晤談，收集專家學者與教師意見，新編醫護保健類科大學生醫療輻射防護科普教材，包括學習環境、教學資源、教學活動方式等，其中教學活動又分為課室教學及實務演練兩部分，最後將再利用學生進行學與量性的研究方式，來探討本教材教學之成效，以評鑑本教材之內容。本研究包括：(1)教材開發及(2)醫療院所體驗參訪兩部分；在教材開發部分，將採用 ADDIE 系統化教學設計模式，編寫 2~4 小時的課室教材。以探討教材教學成效，並進行教材內容的修正。在醫療院所體驗參訪部分，將透過醫院臨床技能中心，藉由醫院客觀結構式臨床測驗（Objective Structured Clinical Examination）的模式，帶領學生至實地測試、觀察醫療院所的輻射現況，實施後將進行滿意度調查，藉以了解參訪實測活動之成效。

III. 結果與討論

本計畫係以醫護保健類科大學生為對象，針對其未來進入醫院工作後，可能接觸到的醫療輻射相關設施與措施，施以『醫療輻射防護』主題之研習課程，並安排學生實際至醫療院所參訪運用輻射醫療設備與藥物的相關部門，包括放射診斷、放射治療，核子醫學及急診單位，實際了解醫院運作的實務，總共舉辦了 10 場次，累計辦理時數約計 40 小時之研習工作坊。共有來自護理系、健康事業管理系、運動保健系、資訊管理系、嬰幼兒保育系、聽力與語言治療科學系等共計 632 人次(女 494 人，約占 78%；男 138 人，約占 22%) 一起參與。

醫護保健類科大學生在實施輻射防護主題課程教學後，對輻射防護認知態度都有明顯的改變，對輻射防護知識中的四個次構面，包括輻射防護、認識輻射、醫療輻射、輻射傷害都有顯著的學習成效。實驗組學生的輻射防護認知態度與知識學習成效皆高於未實施課堂教學的對照組，證明針對此類大學生所設計的輻射防護課程教學有其成效。

不同背景變項對醫護保健類科大學生的輻射防護在實施課程教學後之認知態度與知識的學習成效，顯現有所差異。在認知態度上，性別上沒有形成差異。但是，不同年級、不同系別的大學生則有所差異，在認知態度測量中有三題，運動保健系學生相較於其他系別學生顯現出差異。在知識的學習成效上，不同性別及年級，皆有所差異。而不同系別的學生在四個次構面中亦皆有顯著差異。課程實施後進行醫院實務參訪的成效調查，顯現大學生在各構面均有正向態度

IV. 結論

經實施課堂教學的十個班級（實驗組）在醫療輻射防護態度認知的八題測驗中，整體的後測平均數高於前測的平均數，且達顯著性差異；在醫療輻射防護知識學習的四個次構面與總分上，後測平均數均高於前測平均數，差距介於 0.4 至 1.38 且均達顯著性差異；另實驗組學生在認知態度與學習成效上，其整體平均數均高於未實施課堂教學的對照組，且達顯著差異。綜上，證實本計畫之實施有達到預期之目標。

本計畫係針對未來將進入醫療院所工作的醫護保健類科大學生，藉由輻射防護主題的授課及醫院實務參訪，藉以強化其對醫療輻射防護的態度與知能；整體而言，從認知態度與學習成效的評量上顯示，學生都有顯著與正向的提昇；但對部份醫療院所內輻射設施操作及防護作業規範，尚有些許疑慮。未來將從課程教材內容中再作調整，強化學生相關的醫院實務知能，並結合醫院輻射防護的作業現況，來深化其正確的態度與知識。

V. 參考文獻

- [1] 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。
- [2] 教育部環境保護小組（2012）。輻射與核能教育。取自 <http://www.edu.tw/environmental/>。
- [3] 徐明德（2008）。核能、輻射與生活通識教材。
- [4] 吳建忠（2001）。環境放射性的認識之調查分析。化學，59（2），189-198。
- [5] 張寶樹（2011）。醫用游離輻射防護。臺北市：合記圖書。
- [6] 張絃綸、何容君、張武修（2012）。游離輻射、健康效應與防護測量。環境職業醫學會訊，10111，2-7。
- [7] 王建楠、李璧伊（2012）。游離輻射暴露與非癌症疾病。中華職業醫學雜誌，19(4)，227-238。
- [8] 劉瓊珠、蔡金完、楊斐適、黃武達、林鼎裕（2012）。放射科懷孕婦女 X 光診斷輻射防護安全作業流程改善。台灣應用輻射與同位素雜誌，8(3)，347-354。
- [9] 吳政誠、林瑜雯、陳禹、唐進勝、陳富莉（2012）。醫院醫師職場危害暴露現況之調查研究。中華職業

- 醫學雜誌，19(3)，125-134。
- [10] 蘇秀琴、蔡芸芳、于乃玲、翁芝爾（2006）。提升病室 X 光輻射防護安全性。長庚護理，17(3)，332-240。
- [11] 黃瑞珍、吳讚美、陳姬杏、陳淑華（2010）。提昇手術室護理人員對 X 光輻射防護執行正確性之專案。護理雜誌，57(2)，79-86。
- [12] 申斯靜、田惠蘭、王昱豐（2010）。加護病房內工作人員與輻射暴露劑量相關性之研究。中華職業醫學雜誌，17(4)，295-300。
- [13] 蘇柏華、莊芝林、何昭霆、林政勳（2011）。病房護理人員對醫用游離輻射及防護之相關因素探討。中華職業醫學雜誌，18(4)，279-292。
- [14] 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。
- [15] 莊昭華、鄭靜瑜（2002）。某技術學院護理學生對職業災害認知之探討。志為護理-慈濟護理雜誌，1(2)，47-55。
- [16] Alexander, Susan. (1984). Why Nuclear Education? A Sourcebook for Educators and Parents. (ERIC No. ED 256 683)
- [17] Radhika R Pai, Ravikiran Ongole (2015). Nurses' Knowledge and Education about Oral Care of Cancer Patients Undergoing Chemotherapy and Radiation Therapy. Indian Journal of Palliative Care, 21(2), 225-230.
- [18] Eatmon, Stephanie. (2012). Error Prevention in Radiation Therapy. Radiation Therapist, 21(1), 59-77.
- [19] Clayton R & Trotter T. (2013). The impact of undergraduate education in radiation oncology. Journal of Cancer Education, 28 (1), 192-196.
- [20] Alotaibi, Muhammad, Al-Abdulsalam, Amal, Bakir, Yousif Y. & Mohammed, Ahmed M. (2015). Radiation awareness among nurses in nuclear medicine departments. Australian Journal of Advanced Nursing, 32(3), 25-33.
- [21] Chaffins JA. (2008). Radiation protection and procedures in the OR. Radiologic Technology, 79 (5): 415-428.
- [22] Hart S. (2006). Ionising radiation: promoting safety for patients, visitors and staff. Nursing Standard, 20(47), 47-57.
- [23] Johnson, Marlene M. (2015). Directed Reading. Radiation Protection Education in Fluoroscopy. Radiologic Technology, 86 (5), 511-528.

龍華科技大學核工學程推廣

The promotion of Nuclear Engineering Program of Lunghwa University

計畫編號：MOST105 -2623-E-262-001 - NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：宋大崙

e-mail：tlsung@gm.lhu.edu.tw

計畫參與人員：李九龍

執行單位：龍華科技大學

摘要

藉由原子能課程教學、參訪原子能設施、專業演講等活動，培養學生正確的原子能知識，進而培養學生成為具有關懷社會環境具世界觀之核工人才，增加其就業機會。此計畫共開設兩門核心課程：輻射防護與應用及核電廠管路設計；架設 Facebook 網頁，讓同學隨時有互動；參觀清華大學原子爐及相關原子能設施，這學期完成並取得學程證書的人數有 43 位。未來將朝向核電廠除役方向，並採取同學有興趣的 APP 或 3D 列印為導向。

關鍵詞：龍華科技大學、學程、核工

Abstract

By taking Nuclear Engineering Program courses, visiting nuclear facilities and having professional lecturing, the students could obtain the correct knowledge of nuclear power and radiation, become nuclear power engineers, and develop a caring for the environment and global perspective. This project have two courses: "radiation applications and protection" and "pipe design". Except the visiting nuclear facilities, the Facebook replied the students' questions and thoughts to have them studying this nuclear program. There were 43 students who completed the program's requirement and got the certificates. In the future, APP and 3D will be the tools for attracting the students. The important topic to be concerned is the nuclear power plant decommission.

Keywords: Lunghwa University, Nuclear Program

I. 前言

龍華科技大學之跨領域學程[1]，為結合工學院「機械工程系」、「化工與材料工程系」、「電機工程系」、「電子工程系」及「資訊網路工程系」等系所之資源與人力，投入原子能相關技術人才的培育工作。

藉由原子能課程教學、參訪原子能設施、專業演講等活動，培養學生正確原子能知識，進而培養學生成為具有關懷社會環境具世界觀之核工人才，增加其就業機會。

II. 主要內容

本計畫為推動「原子能應用學程」，並針對學生就業及原子能應用領域人才的培育，以培養正確知識、原子能人才培育及關懷環境三方面進行：

1. 培養正確知識（原子能應用及輻射安全）

傳授對於原子能應用及對於周遭人員的影響，政府在管制上如何保證人民的安全之正確觀念，原子能應用及輻射安全之相關知識。並在國內面臨核電廠除役、核廢料安全管制以及醫療輻射、輻射安全管理等領域之問題，提供正確的知識。

2. 原子能人才培育

原子能應用產業並非僅有核能發電，還包括機械、電子、電機、化學、化工及材料等許多專業需求。例如 GMMA 射線殺菌，X 光照射及輻射量測等許多知識，在課程中導入，讓學生有充分的瞭解。

3. 關懷環境

藉由演講、研討會、及參觀，使同學瞭解實際的運作情形，並關心環境參與相關議題，例如核電廠除役、核廢料安全管制、環境變遷及全球暖化等重要的相關議題，如此可以建立民主之素養，積極參與台灣建設或環境保護。民主政治需要以正確知識及積極參與才能有效並建立和諧的社會。本計畫執行，希望達成下列目標：

- (1) 每學期至少一門核子工程學程核心必修課程（兩門核心必修課程）[2]
- (2) 每學期進班宣傳兩次（進班宣傳 4 次）
- (3) 輔導學生與學生晤談 50 人次
- (4) 輔導學生取得核子工程學程證書 20 張
- (5) 舉辦專家學者演講 12 次
- (6) 參訪原子能相關設施 2 次
- (7) 每週定期維護核工學程網站

III. 結果與討論

本計畫完成了預定目標如表 1。以下對於各項成果分別說明：

表 1 計畫完成工作項目

工作項目	預定值	完成值及說明
1 學程核心必修課程	2 門	2 門 <u>輻射防護與應用及核電廠管路設計</u>
2 每學期進班宣傳	2 次	4 次
3 輔導學生與學生晤談人次	50 人次	100 人次
4 輔導學生取得核子工程學程證書	20 張	104-2 有 43 位學生獲得證書

5 舉辦專家學者演講	12 次	11 次 (1 次以參觀取代)
6 參訪原子能相關設施	2 次	6 次
7 定期維護核工學程網站-FACEBOOK 網頁更新	1 次/周	<1 次/週
8 其他相關之活動，並未使用此計畫經費		

1. 開設課程、進班宣導及證書取得

對於核心必修課程方面開設 2 門，104 第二學期開設「輻射防護及應用」，選修學生 66 人（女 11 人/男 55 人）及 105 第一學期開設「核電廠管路設計」，選修學生 51 人（女 5 人/男 46 人）。其授課老師為林善文博士(圖 1)及涂光權博士。

讓學生們了解獲得證書的含意及功用；講解獲得證書的條件及解決學生們對核工學程的疑惑，每學期進班宣導，104 第二學期共進班宣傳兩次及 105 第一學期共進班宣傳兩次。經過兩次的宣導，充分地讓同學了解到核工學程對於未來升學與就業的好處，並且告訴同學如何選修及選擇核心課程，並在老師及助教的細心講解及說明，同學也相當踴躍的參與。因此總計新加入人數共 69 人。104 學年證書取得人數為 43 位同學。

2. 專家學者會議 及 FACEBOOK

舉辦 11 場次之專家學者會議。由於核電廠的除役，對於廢料的關切，則請陳勝朗先生解說，此外輻射藥物也是很重要的應用，邀請曾任台灣醫用迴旋加速器協會兩任理事長的高志浩博士解說，深入淺出的說明也獲得學生的熱烈討論。學程 Facebook(圖 2)與輻務小站相連，且隨時提供目前原子能的訊息，如除役的資訊或是全世界原子能的發展等。除此之外提供參觀原子能的應用設施資訊及發布對於原子能相關議題，讓學生在網站上發表意見。

3. 其他原子能推廣的活動

其他原子能推廣的活動，由學校其他經費支出，並未使用本計畫，但與本計畫相關，且由主持人辦理之活動，也在此報告整理。本校跨領域學程，每年需開一次諮商會議，邀請專家學者及畢業學生與在學生討論，提出對於學程之建言。接待日本工相關專業學生進行交流，日本東京都市大學平田孝道教授帶領 13 名學生(醫用工程系 7 名、原子能安全系 6 名)來台灣訪問交流。由日本原子能安全報告中得知日本學生在福島事件後，對於環境的影響，做了許多研究。

課程的創新一直是學程努力的方向，除了辯論之外，亦將創意思考納入課程，讓同學盡情的想像。雖然同學的想像，並不一定可以完成，但是發想的過程，尋找資料，團隊合作，也是有收穫。2016 年參加台北國際及高雄發明展(圖 3)，就是以用過核燃料乾式儲存罐的改善設計發想參加，台北場雖未獲得名次，但高雄場榮獲金牌，讓老師與同學皆十分驚喜。

IV. 結論

本計畫在工作目標部分，皆達成或超前。對於計畫進行過程中，學生對於原子能學程的認識，及專業能力的培養，雖是最重要的，但關懷環境更是一個工程師必須要達到的目標。此計畫的進行，除培育學生具有原子能正確的知識能力外，同時具有關懷環境的精神。

參考文獻

- [1] 龍華科技大學跨領域學分學程設置辦法，龍華科技大學，105.12.08 第 10502 次教務會議修正通過 (2016)
- [2] 工程學院「原子能應用學程」規劃書，龍華科技大學，105.12.08 第 10502 次教務會議修正通過 (2016)。



圖 1 輻射防護與應用上課情形



圖 2 Facebook 網頁



圖 3 發明展得獎-核燃料乾儲設計

科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(III) Developing, Practically Promoting and Impact Studying of Radiological Experiments in General Science grade (III)

計畫編號：MOST 105-NU-E-007-008-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：周文采、李承龍、張似琛、吳勇慶、顏麗娜

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

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，借此有效地推廣輻射安全教育至國中小學生及社會人士。我們研發合適價位與效能的手持式輻射偵測器及DIY蓋格管計數器，將有助於一般民眾更清楚認識輻射相關知識。

關鍵詞：輻射、輻射度量、輻射實驗、原子科學、科普教育。

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、Atomic Science、Radiation.

I. 計畫背景

本構想源起於參與各級學校科展或受邀科普演講時，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鈷-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

在清華大學原子科學院和生命科學院，及一般醫學院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，一般學生和社會大眾無法參與。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。本年度具體的工作項目如下：

1. **研發簡易型手持式游離輻射偵測器**：本計畫團隊與核康科技股份有限公司合作研發具偵測器功能及外型設計的簡易型手持式游離輻射偵測器，並在清大原科中心校正實驗室完成儀器校正，而後再與清大原科中心曾永信博士合作設計出一套適合實驗進行之底座，期許借由與廠商合作研發適合價位與效能的輻射偵測器，能更有效地推廣輻射知識，使一般大眾更能清楚認識輻射度量及輻射防護。
2. **研發 DIY 簡易型蓋格管計數器**：今年輻射度量實驗在教學模組概念的思考下，設計出一套 DIY 組裝簡易蓋格計數器，用於進行輻射度量實驗之前，讓參與學員能有機會藉由動手組裝的方式體會蓋格管計數器運作的原理，並從中對蓋格管偵檢器於偵測輻射源時所得計數值能有更清楚的了解。
3. **推廣適合大學生學習的基本輻射度量實驗教材及課程**：本年度計畫與清大原科中心合作，將此套教材用於清大工科系及核工所，並與中國醫藥大學放射系及臺東大學應用科學系合作，將本計畫設計的基本輻射度量實驗課程融入大學實驗課程中，讓更多大學生有

機會接觸到輻射度量的基本知識。

4. 推廣適合高中師生實作的輻射度量實驗教材及內容：

本計畫於 2016 年規劃了一套包含演講、導覽及動手做實驗的活動，安排對象為高中師生，名為「2016 原子科學探奇之旅」，此系列活動已舉辦 17 場次，為顧及教學品質及讓參與師生均能有機會深度學習到學校課程中較少提及的輻射知識，我們於每場次會將師生人數限制在 40 人以內，參與人數共 734 人（男 396 人/女 338 人）。

5. 研發適合中小學師生認識的原子科學與輻射教材及內容：

本計畫以「2016 原子科學探奇之旅」活動課程為基礎，向下研發適合中小學師生認識的輻射課程，此系列活動已舉辦 5 場次，參與對象為臺南市政府教育局科技輔導教師團、新竹新湖國小及陽光國小，參與人數共 110 人（男 60 人/50 人）。

6. 推廣適合一般民眾學習的輻射度量實驗教材及相關能源議題：

本年度計畫為落實避免一般民眾因未經證實的輻射議題報導而產生不必要的恐慌，特與核能學會合作，於內湖社區大學舉辦成果發表會活動，幫助參與活動學員正確認識輻射及其價值，祛除無謂恐懼，從而有效提升生活品質，促進身心健康。

7. 收集以上不同對象的回饋資料，了解學員對於輻射的認知，並安排適合不同對象的課程及實驗方式：

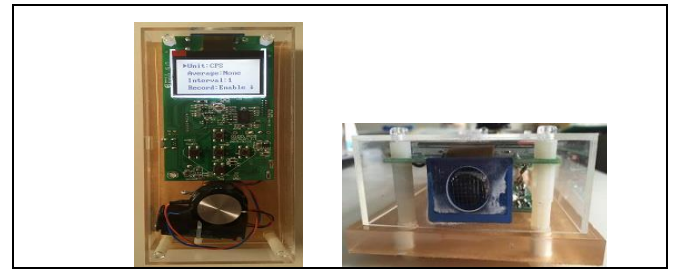
本計畫所研發的輻射課程及教材，在課程完畢後，收回近 820 份的回饋數據，此資料將可協助我們進行輻射課程的重點探討及歸納，做為日後課程及實驗內容修改之依據。

III. 研發結果

2016 年度清華原子科學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開發研究，已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

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 G150 輻射偵測儀的校正實驗，在 $800 \mu\text{Sv/hr}$ 劑量率之下，其反應均呈線性關係，圖 1 為 G150 的線性測試結果。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。

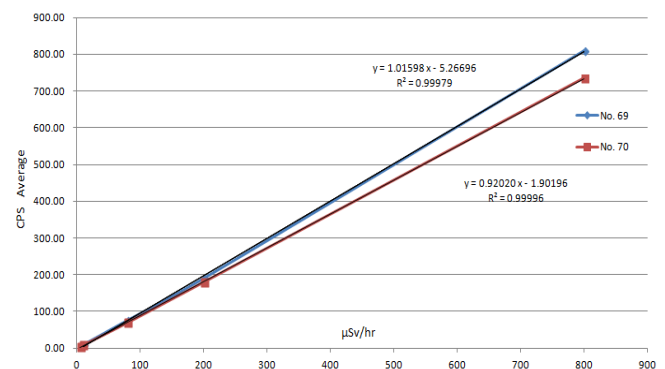


圖 1 G150 線性反應測試結果

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。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(圖 2)。

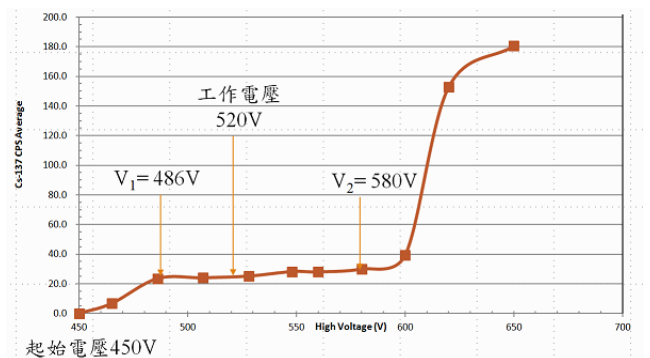


圖 2 G50 蓋革計數器高原區與工作電壓的選定

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(圖 3)(圖 4)，並與常態分佈圖(圖 5)作對應的比較。

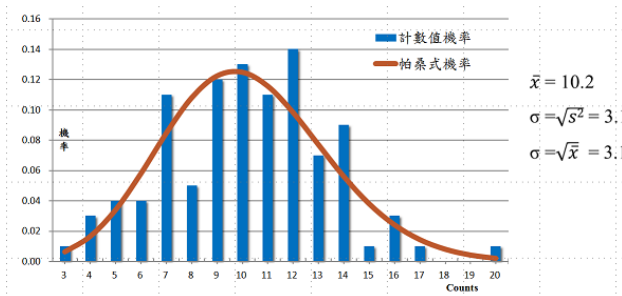


圖 3 G150 機率直方圖與帕桑分佈圖比較(前 100 次)

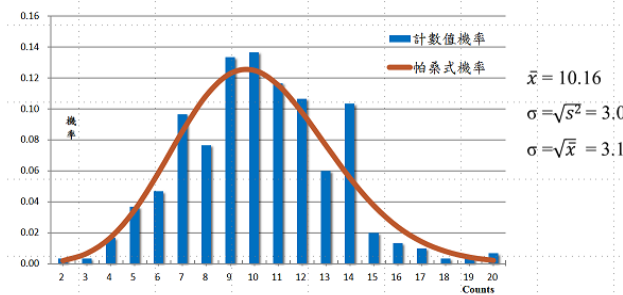


圖 4 G150 機率直方圖與帕桑分佈圖比較(全 300 次)

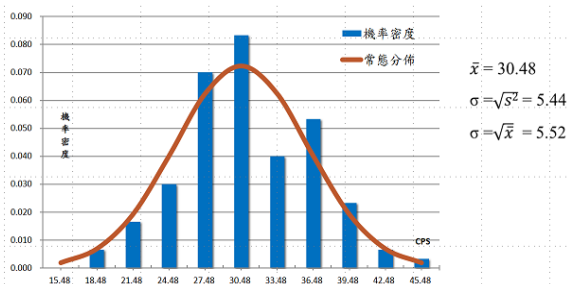


圖 5 G150 機率密度直方圖與常態分佈圖比較

3. 使用 G150 偵測儀測量鉍-137 射源與背景輻射(圖 6)，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。

背景值測定

地點：普物實驗室 3 樓辦公室

測量時間：5 秒/次 × 128 次/組 × 11 組 = 7040 秒 ≈ 2 時

Total counts：G100 及 G150 皆 > 2000

背景值	G100	G150
total count	2051	2017
CPS average	0.29	0.29
CPM average	17.48	17.19

圖 6 G100 和 G150 背景值試做比較

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。此實驗課程在 105 學年利用清華大一普物實驗課、清大工科系「核工導論」、清大核工所「輻射劑量學」及中

國醫藥大學放射系「輻射度量」等課程進行試教，再於 2016 年新增與臺東大學應用科學系合作，將本實驗安排於該系的普通物理實驗課程中，前後參與學生人數共達 350 人。另外，今年輻射度量實驗在教學模組組念的思考下，設計出一套 DIY 組裝簡易蓋格計數器，用於進行輻射度量實驗之前，讓參與學員能有機會藉由動手組裝的方式體會蓋格管計數器運作的原理，並從中對蓋格管偵檢器於偵測輻射源時所得計數值能有更清楚的了解。(於附件中附上 DIY 組裝簡易蓋格計數器收教案設計及學習單)

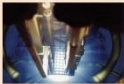
本年度還將此探討游離輻射特性的實驗，發展至高中端也可適用之輻射偵測與度量教材，並開始進行培育種子教師的前置工作，及在內湖社區大學教導一般民眾認識輻射與輻射的量測，其成果發表活動如圖 7。



圖 7 台北內湖社大成果發表會闖關活動海報

清華原子科學科普團隊也與核能研究所合作，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，研發一套適合 K12 師生實作學習的實驗內容和教材，並用於“2016 原子科學探奇之旅”活動之中，其活動課程表如圖 8。

附件一：「原子科學巡禮」課程

破解超人的軍門－演講	
講題一：人在「輻」中要知「輻」(2 小時) 看不見，摸不著，聞不到的輻射，讓一般人常常心生恐懼，但事實上我們生活周遭到處都是輻射。輻射到底在哪裡，你知道嗎？ (1) 生活中的輻射。 (2) 輻射的應用。 (3) 輻射的風險及基本防護。 講題二：THOR 的前世今生 (2 小時) 清華水池式反應器 (THOR) 是目前台灣唯一的研究用核子反應器，其運轉原理與核能發電廠相同。核子反應器除了發電之外還有很多其他的用途，你知道多少呢？ (1) 核能知多少？ (2) 核能安全設計。 (3) THOR 的醫學用途 (BNCT)。	 
小心變成蜘蛛人- DIY & 實驗 -	
藉由動手做實驗的樂趣，讓我們知「輻」「醫」輻。(3 小時) (1) 輻射的發現。 (2) 蓋格計數器的誕生及其原理。 (3) DIY—組裝簡易蓋格計數器。 (4) 輻射量測實驗。	
別人到不了的打卡點－參觀『清華大學原科中心設施』	
了解輻射基本知識與應用後，我們將實地參觀清華原科中心設施，藉由親身接觸，讓我們從中得到寶貴的經驗。 1. THOR 參觀(30min)。 2. BNCT 參觀(30min)。 3. 鈾 60 照射場 參觀(30min)。 4. 全身計測室 參觀及體驗(30min)。	

註：課程可視學校需求安排，待錄取後再與學校老師討論。

圖 8 「2016 原子科學探奇之旅」活動課程表

實驗目的為認識生活中的輻射與學習如何偵測輻射外，藉由實際測量並了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。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教師外，並將與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，致力於讓全國高中高職的物理教師皆可使用。

IV. 結論

105 年度已研發出適合一般大學生及民眾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 DIY 組裝簡易蓋格計數器教案活動，於 106 年度會將實驗課程及教案持續推廣及增修，並推廣適用於國小的課程，同時也將繼續開發實驗數據記錄與分析 APP 及改良探討游離輻射特性的實驗。此外，未來將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，以避免危害的作業方式。並透過各種發表會及研討會的機會將研發的教材及成果進行推廣與合作。

民意調查與議題溝通之執行與研析

The Execution and Analysis of Public Opinion Survey and Issue Communication in Nuclear Power Safety Issues

計畫編號：105-NU-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

執行單位：世新大學公共關係暨廣告學系

摘要

關鍵詞：核能安全，民意調查，風險認知，溝通。

核能發電因為全球暖化的議題再次成為各國政府的能源選項，但 2011 年 3 月日本發生福島核災事故，使得核能安全問題再度引起民眾的關切，民眾意見仍是各國政府考量核能選項時所必須處理的爭議課題。我國目前在核能發電的使用上也面臨極大的挑戰，因此在處理核能議題時不應僅將其視為專業議題，而更應考量社會大眾的感受，然而核能議題較為專業，要促使民眾接觸到核能相關資訊實有其困難存在，因此瞭解核能安全相關資訊的需求與接收行為便是基礎。

本研究開始於 98 年度進行「核能安全民意調查模式之建立」，建立起核能安全民意調查的基本調查機制。99 年度接續 98 年度研究成果，進行「民眾核能安全認知與態度民意調查」，實際執行民意調查。100 年度接續 99 年度之研究成果，欲了解民眾核能安全相關資訊的需求與接收行為，希望透過瞭解一般民眾與核電廠周遭居民的資訊需求及接收行為，提出核能安全資訊傳播的策略。

以問卷調查的方式來瞭解一般民眾與核電廠周遭居民的資訊需求及接收行為，提出核能安全風險溝通策略，分別於 2016 年 5 月及 11 月針對一般民眾及當地居民進行電話訪問調查，一般民眾部分完成 1,074 份及 1,068 份有效樣本，當地居民則完成 383 份及 300 份有效樣本。

根據調查發現以下幾點結論：

1. 福島核災事故後至今，民眾對核電支持度及安全性認知漸漸回升到事故前(2012 年)的水準。
2. 一般及當地民眾對核能安全議題、資訊的不瞭解程度呈現高比例，且對核能相關機關(原能會、台電公司、核能專家)的信任程度降低，可能與核安食品的問題有關。
3. 一般及民眾對於原能會若請電影明星代言宣導相關核能安全的工作使民眾提升核能知識是有幫助的。
4. 一般及當地民眾對核能發電支持的原因皆是以供電穩定的比例最高；反對的原因皆是以處置核廢料問題為最高。

民眾在政策價值觀上的變化，顯示核災事故遠離後，民眾希望政府應該以拼經濟為最先。

Abstract

Because of the global warming, nuclear power generation issue become to the government's energy options, but Fukushima nuclear disaster in Japan, March 2011, many people worried about nuclear safety issues, the public opinion is addressed by Government of nuclear energy options. Taiwan's nuclear power generation is also facing great controversy, so dealing with nuclear energy issues should not only be regarded as a professional issue, but should take into account the feelings of the community, nuclear issue is more professional, promoting the public exposure to Nuclear-related information has its difficulties, so understanding the need for and receiving information on nuclear safety is fundamental.

This study began in 2009 with the establishment of the "Nuclear Safety Public Opinion Survey Model" and basic investigation mechanism for nuclear safety polls. 2010 of continuous 2009 years of research results, the "public awareness of nuclear safety awareness and attitude polls," the actual implementation of public opinion polls. 2011 years of research results for 2010 years, want to understand the public safety of nuclear energy-related information needs and reception behavior, hoping to understand the general public and the residents around the nuclear power plant information needs and receive behavior, proposed nuclear energy security information dissemination strategy.

A questionnaire survey to understand the general population and the residents around the nuclear power plant information needs and receive behavior, the proposed nuclear safety risk communication strategy, respectively, in May and November, 2016 for the general public and local residents telephone survey, the general public 1,074 and 1,068 valid samples were completed, and 383 and 300 valid samples were completed by local residents.

Keywords: Nuclear Power Safety, Public Opinion Survey, Risk Perception, Communication.

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「核能安全管制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。藉由歷年的研究成果與文獻回顧，研究團隊提出一套分析民眾核能態度的架構，綜合描述如下圖 1：

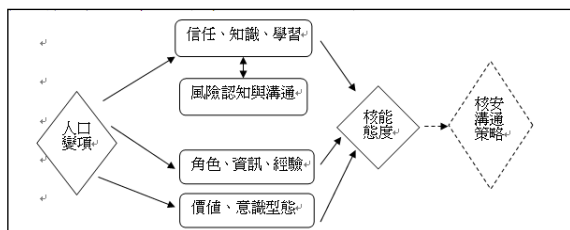


圖 1、核能態度分析架構

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。

因此，研究團隊預期透過研究設計，持續追蹤了解以下問題：

1. 民眾對核能發電的支持度變化？不同性別、地區存在什麼樣差異？
2. 民眾對重要核安議題的瞭解程度？不同性別、地區存在什麼樣差異？
3. 民眾對核能安全、風險認知的變化程度如何？
4. 民眾希望獲得哪些訊息？哪些管道較能有效傳遞資訊？

II. 主要內容

本研究將規劃透過跨國核能民意文獻分析、電話調查法（於 105 年擬於不同時段進行 2 次全國民眾電話訪問以及 2 次針對居住於核電廠週圍的居民電話訪問）、國內外核能議題分析、專家座談會以及跨年度資料(或大數據資料)比較分析方式等進行研究。第 1 次全國民眾電話訪問前，擬邀請核能安全主管機關(行政院原子能委員會)、核能或溝通學者專家舉行問卷討論會。以下就研究流程、抽樣方法與資料分析方法進行說明。

III. 結果與討論

壹、一般民眾(第一次調查時，共計完成 1074 筆有效樣本，其中男性佔 49.3%，女性佔 50.7%；第二次調查共計完成 1068 筆有效樣本，其中男性佔 49.4%，女性佔 50.6%)

一、一般民眾對核能發電態度較偏向不支持核能發電，但支持態度有上升現象

1. 約 3 成 8 的一般民眾支持核能發電，約 4 成 4 表示反對。
2. 一般民眾反對核能發電的主要原因以「核廢料處置問題」為最高。
3. 一般民眾支持核能發電的主要原因以「供電穩定」為最高。

二、一般民眾對核能發電及核廢料處置偏向不安全，但認為核電廠發生事故的機率偏低

1. 約 3 成 8 的一般民眾認為核能發電安全，5 成 7 認為不安全。

2. 約 7 成的一般民眾擔心吃到核災地區周圍生產的農產品，2 成 6 不擔心。

3. 約 8 成 3 的一般民眾擔心核電廠發生事故造成輻射外洩，1 成 4 不擔心。

4. 一般民眾擔心使用核能發電會造成「使後代子孫居住不利的環境」佔 7 成。

三、一般民眾自我評估對核能的瞭解程度偏向「不瞭解」，若資訊透明化對核能安全相關議題的安

心程度會增加

1. 約1成7的一般民眾表示瞭解核能相關議題，8成表示不瞭解。

2. 4成8的一般民眾認為同意使用核能發電可以減緩全球暖化，認為不同意的比例近4成。

3. 約8成的一般民眾同意核廢棄物就算是處理過還是會影響人體健康，1成4表示不同意。

4. 2成6的一般民眾認為吃碘片能避免放射性碘在體內累積，5成3表示不不同意。

四、多數民眾對核能相關單位保持著不信的態度，可能由於近期核安食品的問題有關

1. 約6成的一般民眾對於負責監督核電廠及核子設施的行政院原子能委員會不信任。

2. 5成的一般民眾對於負責營運核能發電營運及安全等事項的台灣電力公司表示不信任。

3. 一般民眾對核能專家對核能發電的說法，表示信任者占4成5。

4. 一般民眾對於核能發電對未來的發展有幫助並能提升人類整體的生活保持著一半的保留態度。

五、一般民眾核能管制工作較偏向不滿意，認為應加強核能安全資訊提供；並在智慧型通訊APP上著手

1. 約3成一般民眾知道長期對核電廠進行核子反應器進行緊急應變計畫的審查。

2. 2成1的一般民眾對於原能會各項工作表現表示滿意，但有7成表示不滿意。

3. 一般民眾對於政府(原能會)對核電廠的安全管制工作，表示良好者近4成。

六、核能相關單位應該要加強宣導民眾對核能相關資訊議題來源

1. 一般民眾表示希望參加原能會所舉辦的宣導活動，核子事故應變措施拍攝宣導短片占2成，其次為村里宣導活動及核能安全演習。

2. 近5成的一般民眾對社區大學開辦有關核能安全及環保議題的課程，表示有興趣。

3. 不到1成的民眾知道原能會有使用智慧型手機通訊軟體(例如:App)的方式來傳遞核能安全資訊。

七、民眾對於核能風險的資訊管道信任程度由第三方機構最多；核能機關應該加強對一般民眾的溝通宣導

1. 一般民眾表示核能安全的資訊來源管道，表示最相信為新聞占2成、其次為政府機關占1成。

2. 近3成的一般民眾對於原能會應該優先加強溝通的對象為一般民眾。

貳、當地居民

一、當地居民對核能發電態度偏向不支持，但與支持態度差異不大

1. 4成3當地居民支持核能發電，4成4表示反對。

2. 當地居民支持核能發電的主要原因以「供電穩定」為最高。

3. 當地居民反對核能發電的主要原因以「核廢料處置問題」為最高。

二、當地居民對核能發電及核廢料風險認知偏向負面

1. 約4成4的當地民眾認為核能發電安全與不安全。

2. 約6成5的當地民眾擔心吃到核災地區周圍生產的農產品，3成不擔心。

3. 約8成的當地民眾擔心核電廠發生事故造成輻射外洩，1成9不擔心。

4. 當地民眾擔心使用核能發電會造成「使後代子孫居住不利的環境」佔7成。

三、當地居民自我評估對核能的瞭解程度偏向不瞭解，若資訊透明化對核能安全相關議題安心程度會增加

1. 約3成的當地民眾表示瞭解核能相關議題，7成表示不瞭解。

2. 4成4的當地民眾認為同意使用核能發電可以減緩全球暖化，認為不同意的比例3成5。

3. 8成的當地民眾同意核廢棄物就算是處理過還是會影響人體健康，1成4表示不同意。

4. 3成2的當地民眾認為吃碘片能避免放射性碘在體內累積，5成表示不同意。

四、當地居民認為政府需要主動針對核能安全相關議題與民眾進行研究探討，並透過電視、地方政府等管道，以專欄節目、新聞及舉辦政策座談會方式宣導核能相關資訊

1. 6成的當地民眾對於負責監督核電廠及核子設施的行政院原子能委員會不信任。

2. 5成的當地民眾對於負責營運核能發電營運及安全等事項的台灣電力公司表示不信任。

3. 當地民眾對核能專家對核能發電的說法，表示信任者占 4 成 4。

4. 當地民眾對於核能發電對未來的發展有幫助並能提升人類整體的生活，表示信任占 5 成。

五、當地居民對核能管制工作較偏向不滿意

1. 3 成 2 當地民眾知道長期對核電廠進行核子反應器進行緊急應變計畫的審查。

1. 2 成 4 的當地民眾對於原能會各項工作表現表示滿意，但有 7 成表示不滿意。

2. 當地民眾對於政府(原能會)對核電廠的安全管制工作，表示良好者占 4 成。

六、核能相關單位應該要加強宣導民眾對核能相關資訊議題來源

4. 當地民眾表示希望參加原能會所舉辦的核宣導活動，核子能事故應變措施拍攝宣導短片占 2 成，其次為核能安全演習及特定機關舉辦講習會。

5. 5 成 1 的當地民眾對社區大學開辦有關核能安全及環保議題的課程，表示有興趣。

6. 不到 1 成的當地民眾知道原能會有使用智慧型手機通訊軟體(例如:App)的方式來傳遞核能安全資訊。

IV. 結論

一、福島核災事故後，民眾對核電支持度及安全性認知皆下降，對核能支持度與歐盟及英國相近，對核能電廠未來發展方向與日本相近

99 年調查中，一般民眾的對核電態度偏向較偏向支持約佔 4 成 5，2 成 9 表示反對，但在 100 年調查中，可能受到日本福島核災事故之影響，偏向反對的比例上升為 4 成 7，較 99 年增加近 2 成。對核能發電的安全性認知，99 年約 5 成 2 認為安全，3 成 1 認為不安全，100 年調查中，過半數民眾認為核能發電不安全。就核能電廠未來發展方向上，一般及當地民眾都認為應朝向「使用年限期滿後就停止使用」且比例較 99 年增加。

我國對核能發電支持度在福島核災後下降約 4 成 7 低於美國的 6 成 2，與歐盟及英國較接近；對核能電廠未來發展方向，我國約 2 成 2 認為應維持現狀與日本較相近，認為應完全停止核電廠運作佔 5 成 1 低於日本的 6 成 6。

二、當地居民認為核能安全溝通管道的充足度較一般民眾高，但資訊透明化對核能相關議題的安心度增加幅度較小

1 成 4 當地居民認為政府提供可詢問或表達核能安全疑慮的管道足夠，一般民眾認為足夠者不到 1 成，另外，在資訊透明化對核能相關議題上，約 6 成的當地居民表示若資訊透明化對核能發電、核廢料處置及新建核廢料場的安心程度會增加，較一

般民眾約 7 成表示會安心程度增加略低。

推測可能當地居民較接近核電廠，核能相關資訊來源相較於一般民眾充足，且在自我評估對核能議題的瞭解度上也較一般民眾高，但也因瞭解度高核能議題以有較高的判斷能力，因此若資訊透明化安心程度增加的幅度較小。

三、多數民眾認為政府需要主動針對核能相關議題與民眾進行研究探討，在溝通管道上除電視、報紙及網路等，舉辦公聽會或研討會也是選擇之一，顯示民眾逐漸希望有雙向溝通的模式政府需要主動針對核能相關議題與民眾進行研究探討

8 成以上的一般及當地民眾，皆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 1 成以上的一般及當地民眾希望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、在安全性認知上，一般民眾及當地民眾認為核廢料的不安全性仍較核能發電高

一般民眾認為核廢料的不安全的比例由 99 年的 5 成 5 上升為 100 年的 6 成 6，當地居民認為不安全的比例由 99 年 5 成 3 上升到 6 成 4，且兩年調查結果認為核廢料不安全的比例皆較核能發電不安全高。

可發現，雖然在日本福島核災後，民眾對核能發電的不安全性有明顯增加，但相較之下，民眾更擔心核廢料的安全性，顯示核廢料議題成為民眾更擔心的問題，政府應更重視核廢料處置與並加強溝通。

五、民眾在能源政策價值觀上的變化，顯示民意及環保意識的抬頭

民眾在能源政策的價值觀上，100 年民眾認為環保比經濟重要的比例佔 5 成 7 且較 99 年的 3 成 9 增加近 2 成，可能因近年來地球暖化議題逐漸受到重視，加上 100 年 3 月發生日本福島核災事故，使得民眾的價值觀產生變化。在專家與民眾意見上，100 年認為民眾意見重要者佔 2 成 2 較 99 年 1 成 5 增加約 7%，顯示民眾意識逐漸提高，認為政策除專家意見外仍需民眾意見，因此未來政策制定時應多考量民意。

而根據以上研究結論，研究嘗試提出以下建議：

一、強化核能安全知識教育宣導

調查結果顯示 7 成 4 的民眾對核能議題表示不瞭解，顯示核能知識有加強空間，因此建議擴大宣導對象，諸如學校、社區及教師等。宣導內容部份，約 2 成 2 的民眾較信任「國際性」組織或研究機構的資訊，因此宣導內容或部分加入國際資訊，增加民眾對資訊的吸收與信任。另外，有 6 成 2 的民眾希望透過「電視新聞」瞭解核能資訊，應透過新聞、專題節目、短片等方式進行宣導。在制定能源

政策上，民眾意見較專家重要的比例有增加的情形，顯示除專家外，政策制定需多加考量民眾意見，因此建議未來持續進行民意瞭解，追蹤民眾對核能相關議題的知識與態度，以作為政策參考。

二、規劃核電廠除役後之準備作業

本次調查發現，有過半數民眾認為制定能源政策上的價值觀考量—環保較經濟重要，4 成以上民眾對核能發電發展傾向「使用年限期滿後即停止使用」。且日前行政院院長表示核一廠到目前為止沒有延役的問題，加上國際核電發展趨勢，顯示未來核電廠有除役之可能。

因此，考量到核電廠除役後，可能面臨附近居民之就業機會、生活補助及核廢料處理等問題，在核一廠除役或核四廠運轉等走向尚未確定前，應提前規劃核電廠除役後之短、中、長期方案及配套措施，如對當地民眾民生就業、經濟及環境影響評估，瞭解除役後對當地影響，並將除役後之因應方案其資訊透明化，增加民眾對政府的信任與支持。

三、主動資訊公開，提供審議式參與，增加風險溝通及民眾參與核能議題的機會

民眾對於公共議題，甚至專業的公共議題，往往是有相當的隔閡的。除了可能沒有能力瞭解外，也缺乏機會去瞭解該議題，調查亦顯示出民眾認為政府在核能資訊的提供及溝通管道不足的問題。

因此，政府應該主動進行資訊公開，增加民眾瞭解議題的機會，讓民眾確實瞭解使用核能或其他能源的風險與利益。另外，為加強議題討論與溝通的深度，可透過審議式的公民會議，創造民眾參與的機會，藉由會議的進行，讓更多民眾在政策決定的初期參與議題的討論，創造風險溝通的機會，讓民眾一開始即能夠瞭解自己所負擔的風險及可能享受的利益，以避免決策後所產生的更多紛爭，並可將相關資料及影音公開，或上傳到網路，做為核能相關資料參考。未來調查除溝通管道外，須加強瞭解哪些議題是民眾希望瞭解的溝通問題。

除一般民眾外，政府也需要加強對媒體記者、網路部落客等的溝通，媒體是影響民眾對核能議題觀感的主要因素之一，因此媒體傳播者是如何思考及框架核能資訊，所傳播出的訊息就會影響民眾。

四、未來延續性長時間之追蹤調查，並建立核能相關研究資料庫

目前為第三年度之調查，由於短期民意容易受到特殊事件影響（如福島事件及德國關閉核能電廠），造成民意較劇烈之變化，以美國三哩島事件為例，針對當地居民進行 10 年以上的追蹤調查，因此建議未來調查可針對相同的受訪者進行的觀察，朝向固定樣本的長期追蹤調查，做長期的追蹤，俾利提供相關單位瞭解長期民意趨勢的變化，避免民意因重大事件產生波動，造成資料解讀的局限性。

政府及研究單位都有針對核能相關議題進行研究，但目前研究資料分散，不利於相關資訊的搜尋，因此應整合目前相關研究，建立資料庫，作為政府在風險溝通上的資訊基礎。

參考文獻

- 內政部(2011)。現住人口按五歲年齡組分，內政部人口統計月報。<http://sowf.moi.gov.tw/stat/month/list.htm>
- 王秀卿(2001)。網路使用與資訊尋求行為之文獻探討。大學圖書館，5(1)，144-162。
- 全國能源會議(2009)。98 年全國能源會議總結報告。<http://www.moeaboe.gov.tw/Policy/98EnergyMeeting/MeetingMain.aspx?pageid=convention>
- 行政院主計處(2005)。社會發展趨勢調查-時間運用。台北市：行政院主計處。
- 行政院非核家園委員會(2005)。「核能四廠相關資訊」彙整。<http://web2.moeaboe.gov.tw/ECW/PublicService/NuclearPowerStat4/1.htm>
- 行政院非核家園委員會(2005)。「核能四廠相關資訊」彙整。<http://web2.moeaboe.gov.tw/ECW/PublicService/NuclearPowerStat4/1.htm>
- 呂以榮(譯)(2002)。A. N. Oppenheim 著。問卷設計、訪談及態度測量。台北：六合。
- 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。
- 李敏(2009)。世界核能現況，核能環保人月刊，第 172 期。
- 林忠毅，(2006)。風險溝通與環境民主—新竹科學園區宜蘭基地為例。世新大學行政管理學系碩士論文。
- 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。
- 胡述兆(1995)。圖書館學與資訊科學大辭典。臺北市：漢美。
- 徐美伶(1995)。男女有別乎？情感與新聞解讀。新聞學研究，51，57-85。
- 馬作鏞、郭憲文、林正介、劉秋松(2001)。不同媒介及指導方法運用老人衛教之成本效益分析及老人特質與衛教之配合研究—以高血壓症為例。行政院衛生署委託研究，計畫編號：DOH90-NH-014
- 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>
- 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所碩士論文。
- 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。
- 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。
- 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。
- 陳定海(2004)。專家意見在我國核能政策風險認知之角色研究。國立台北大學資源管理研究所碩士論文。
- 黃俊儒(2000)。不一樣的風貌-科學普及工作的管道

- 與突破。科學月刊，361，23-26。
- 黃俊儒、簡妙如(2006)。科學新聞文本的論述層次及結構分佈：構思另個科學傳播的起點。新聞學研究，86，135-170。
- 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。
- 黃慶東(2005)。赴捷克參加核能資訊網十五週年慶研討會。
http://open.nat.gov.tw/OpenAdmin/robta/show_file.jsp?sysId=C09403211&fileNo=001
- 黃慕萱(2001)。成人讀者之資訊尋求行為。臺北市立圖書館館訊，19，(2)，49-70。
- 溫仁助(1998)。從資訊與資訊需求的定義探討資訊需求和使用研究方向。大學圖書館，2(3)，58-71。
- 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。
- 蔡鶯鶯、湯允一(1999)。健保資訊的接觸管道對全民健保預防保健服務利用之影響。新聞學研究，61，73-98。
- 謝瀛春(1988)。談科學知識的普及。科學月刊，223，489-491。線上查詢：
<http://203.68.20.65/science/content/1988/00070223/0005.htm>
- Accenture (2008). Attitudes Towards Nuclear Power in the United Kingdom-Survey Analysis. Retrieved from <http://www.accenture.com/Countries/UK/Services/NuclearSurvey.htm>
- Belkin, N. J. (1978). Information concepts for information science. *Journal of Documentation*, 34, 81.
- Blumler, J. C., & Katz, E. (eds) (1974). *The uses of mass communications*. Beverly Hills, CA: Sage.
- Bouazza, A. (1989). Information user studies, in encyclopedia of library and information studies. New York: Marcel Dekker.
- Bouazza, Abdelmajid (1986). Use of Information Sources by Physical Scientists, Social Scientists, and Humanities Scholars at Carnegie-Mellon University.
- 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.
- 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.
- Dervin, B. (1992) From the mind's eye of the user: The sense-making qualitative-quantitative methodology.
- Dervin, Brenda, (1992). From the mind's eye of the user: The sense-making qualitative methodology. in *Qualitative research in information management*, 61-84.
- Devadason, F. J. & Lingam, P.P. (1997). A Methodology for the identification of information needs of users, *IFLA Journal* 23(1): 41-51.
- Eurobarometer (2008). Attitudes towards radioactive waste.
- Eurobarometer (2010). Europeans and Nuclear Safety. 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.
- GlobeScan (2005). Global Public Opinion on Nuclear Issues and the IAEA. Retrieved from http://www.iaea.org/Publications/Reports/gponi_report_2005.pdf
- Holmberg (2008). Swedish Opinion on Nuclear Power 2007. Retrieved from http://www.som.gu.se/rapporter/nuclear/NuclearPower_2007.pdf
- Johnson, A. C. (1980). Related information needs to learner characteristics in higher education. *Journal of Documentation*, 16 (6), 100.
- 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>
- Klapper, J. (1960). *The effects of mass communication*. New York: Free Press.
- Krikelas, J. (1977). Information-seeking behavior: patterns and concepts. *Drexel Library Quarterly*, 13:7.
- Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (1997). Retrieved from <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>
- Meadow, C. T., & Yuan, W. (1997). Measuring the impact of information: Defining the concepts. *Information Processing & Management*, 33(6), 697-714.
- National Research Council (1989). *Everybody counts: A report to the nation on the future of mathematics education*. Washington, DC: National Academy Press.
- Nuclear Energy Institution (2008). Perspective on Public Opinion. Retrieved from <http://www.nei.org/resourcesandstats/publicationsandmedia/newslettersandreports/perspectivesonpublicopinion>
- Nuclear Energy Institution (2009). Perspective on Public Opinion. Retrieved from <http://www.nei.org/resourcesandstats/publicationsandmedia/newslettersandreports/perspectivesonpublicopinion>
- 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.
- Sjoerg, L. (2003). Attitudes and Risk Perceptions of Stakeholders in a Nuclear Waste Siting Issue. *Risk Analysis*, 23(4), 739-749.

- 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.
- 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.
- Taylor, R. S. (1968). Question-negotiation and information seeking in libraries. *College and Research Libraries*, 29, 180-183.
- Univeristy of Wollongong (nd.). Nuclear Power & Australia. Retrieved from <http://www.uow.edu.au/eng/phys/nukeweb/survey.html>
- Viklund, M. J. (2003). Trust and risk perception in Western Europe: A cross-national study. *Risk Analysis*, 23(4), 727-738.
- Webster's new universal unabridged dictionary (2nd ed). (1979). New York: Simon & Schuster.
- Wellish, H. (1972). From information science to information: A terminological investigation. *Journal of Librarianship*, 4(4), 157-187.
- Whitfield, S. C., Rosa, E. A., Dan, A., & Dietz, T. (2009). The Future of Nuclear Power: Value Orientations and Risk Perception. *Risk Analysis*, 29(3), 425-437.
- Wilson T. D. (1997). Information behaviour: An interdisciplinary perspective. *Information Processing & Management*, 33(4), 551-572.
- World Nuclear Association (2009). Nuclear Power in Japan. Retrieved from <http://www.world-nuclear.org/info/inf79.html>
- World Nuclear Association (2009). Nuclear Power in the USA. Retrieved from <http://www.world-nuclear.org/info/inf41.html>
- Yhdyskuntatutkimus Oy (2008). Finnish Energy Attitudes 2007, Retrieved from http://www.sci.fi/~yhdys/eas_07/english/eng_sisallys
- 日本原子力産業協会(2009)。エネルギーに関する意識調査。
http://www.jaif.or.jp/ja/seisaku/ishiki-chosa_report09.pdf

原子能安全與輻射防護新媒體教材 製作與行銷

Produce New Media Teaching Materials and Image Marketing of Atomic Energy and Radiation Protection

計畫編號：MOST 105-NU-E-130-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：單文婷

e-mail：win65913@yahoo.com.tw

執行單位：國立台灣藝術大學廣播電視學系

摘要

自日本福島事件後，全球民眾對核電廠、核能安全等議題展現高度關注，原子能、輻射防護或新能源等議題也成為全球公民關心的公共政策。原子能屬科學專業領域，民眾原本就缺乏主動接觸此類知識的動機，往往因此容易受到新聞媒體報導影響，產生負面解讀與不必要恐慌。網路新媒體興起也成為科學知識傳播新興管道，除了各種移動式載具便利科學知識的傳送接受，內容呈現也影響傳播效果。本研究即是從新媒體行銷政策角度出發，一方面以原子能安全與輻射防護之政策製作 3D 動畫影片，完成一部 60 秒的動畫教材，可供官網與臉書上播送，協助網路政策行銷。另方面也帶領學生參與原能會臉書內容編寫與討論，結果發現以較輕鬆有趣的影音內容確實提高民眾觀看與瀏覽興趣與再分享意願，也降低原子能、核能安全、輻射防護等議題對民眾的距離感，對政策行銷產生正面效果。

關鍵詞：新媒體、視覺化、原子能安全與輻射防護、網路政策行銷、再傳播意願。

Abstract

In recent years, nuclear power plant construction and safety are hot topics and always be talk over because of Fukushima Daiichi nuclear disaster. Without related information of nuclear energy, peoples might be affected by media report and causes unnecessary panic. With the rapid growth of network media and portable device, we selected new media marketing as an entry point. Produce visual products such as: Digital picture book, Short Film, Digital Poster, as digital tutorial of Nuclear Safety and Radiation Protection. With those interesting content and great internet marketing strategies we can draw the attention of public to Atomic Energy Council, make them browsing AEC's website and they will know more about AEC's duties. Digital tutorials by this project will be much easy acceptable by public, and we able to deliver message of Nuclear Safety in anytime, anywhere. The interaction ability of social network increased chances of re-transmission message from internet users, and that will be the bonus benefit of AEC's internet marketing project. Keywords: Media, Visualization, Nuclear Safety and Radiation Protection, On-line Policy Marketing, Re-transmission Intention.

I. 前言

2011 年日本發生福島事件，核能安全問題成為全球話題，台灣受到影響，包括的核電使用，運轉中的核一、核二及核三廠通報事件，新聞媒體多以放大角度檢視，使得與核能安全有關的議題不再被大眾漠視，如能源政策、輻射防護措施、核電廠延役甚至是核輻射食品進口、檢驗與醫療輻射劑量等也都成為民眾關心討論的公共政策。不過原子能研究屬於高度專業領域，一般民眾較缺乏對原子能、核能、輻射或能源等專業知識的主動接觸動機，往往很容易因為媒體的報導，引起對原子能、核能安全等訊息的負面恐慌。另方面國內監理核能安全的原子能委員會（以下簡稱原能會）雖也因應電子化政府改版網站內容，增加了許多豐富有趣的核能相關知識與資訊，也建置臉書社群媒體增加與民眾互動，但始終還是因為內容過於專業、文字用語艱深而影響一般民眾觀看意願。對多數公民來說，缺乏了主動探詢原能會網站或臉書的動機，也較難吸收過於科學專業的內容，這使得原能會網站或臉書即使提供了相當多元充足的資訊也較難達到傳播效果。

依筆者在準備課堂教材時接觸與瀏覽原能會網站或臉書經驗，該網站內容包括與原子能、核能安全、輻射安全等周全資料，甚至其他國家與原子能相關的訊息動態、新聞報導或是重要議題討論等都可以在原能會網站上查詢，不過其網站的瀏覽人數或臉書粉絲瀏覽人數並不多，每篇臉書 po 文的分享或按讚幾乎都在一百位以內，因起筆者好奇探詢原因，因此在開授的「簡報與提案」課堂作業中，實驗性地要求學生發揮創意，針對現有原能會網站與臉書設計提供一系列的媒體曝光與政策行銷計畫，也因為執行這課堂作業，讓近百位的大學生有機會接觸與熟悉原能會網站與臉書。

課堂報告結束後的課程反思也讓筆者深有感觸。有學生問「為什麼大部分的人（或學生）都不知道有原能會這個單位？也不知道原能會有網站、臉書？」，也有學生說「原能會網站上其實有非常多關於核電廠的訊息，但我們通常都是從新聞媒體得到核電廠的訊息，而且多是「負面的」」。此次的課堂作業讓大專生接觸到原能會網站，並因此得到豐富完整的資訊，不只對這單位有較深入認識，對於社會關切的核電廠、核能安全等資訊也有較完整理解，有助於提升原能會形象，對於公共政策行銷也有幫助。而這也成為本研究的重要動機，使用更親民與便於傳播的影像動畫進行政策行銷會否更有助

於政策傳播？因此本研究以新媒體「視覺化行動」〈Visualized Acts〉傳播應用為主，選擇與原子能安全、輻射防護專業領域相關等議題進行視覺化教材製作，除了希望增加民眾對原能會網站的認識、對內容的理解與傳播、或進一步願意加入成為原能會的臉書好友並且願意分享政策資訊。

II. 主要內容

本計畫主要內容與分為三方向進行：其一為主題蒐集；其二為數位媒體教材製作；其三為帶領學生參與原能會幅務小站內容編排與優化作業。在主題蒐集部分，由於與原子能安全與輻射防護議題眾多，應用範圍也廣，為符合原能會政策重點，本計畫以參與觀察法與訪談方式進行主題挑選。首先本計畫於 2016 年 4 月起進行原能會網站與臉書內容之記錄與觀察，以分享或按讚數整理較受民眾歡迎的內容進行討論，再與原能會執掌臉書 po 文的經營同仁進行數次訪談，釐清其 po 文內容的製作與選擇邏輯，並討論選出一適切主題進行數位教材的動畫製作。另一方面本研究計畫自 2016 年 5 月開始參與原能會臉書網站內容的編排討論與優化，並邀請 3-4 位傳播領域大專學生一同參與。以固定每月協助製作 6-8 則貼文內容、或提供臉書編排、撰寫方式建議等方式，協助臉書內容以較適合公眾接收的方式呈現，增加民眾流覽意願與點閱率。這樣的參與方式讓學生實際從「做中學」，不只讓學生理解數位媒體教材製作、公共政策網路行銷的操作，另外藉由作業也增加學生對原能會業務、原子能知識的了解，對於提升原能會形象、增加對原子能科學知識的理解、甚至是提高臉書的瀏覽、分享資訊意願都產生正面效益。

III. 結果與討論

視覺化〈Visualized〉是網路傳播特點，國內外已有相當多實證研究指出網路上的視覺化行動是誘發認同的最佳策略〈沈錦惠，2014：64-65〉[1]。「視覺主義」雖然早在 70 年代即被提出討論，但網路時代更加深視覺主義的影響力道，在個人得以隨時參與、任意上傳下載的網路時代，瞬間連結產生的直覺式感染力，無疑是最有效的傳播方式〈Elkins,2010;Griffin,2008;〉[2] [3]。對於網路上視覺化的圖片或影像傳播效果為什麼勝過語言文字？心理學家 Arnheim 就提出的「視覺思考」〈Visual Thinking〉論述值得參考。Arnheim〈1997〉認為人們透過視覺產出的理解並不是靜態的，而是動態的、有機的、積極的、主動的，人們在處理視覺化帶來的意義時，往往涉及到記憶與思考，甚至要學習如何解決疑難，因此透過視覺化處理過的資訊意義較能產生傳播效果[4]。

依照上述視覺思考的邏輯——「視覺不離思考、思考不離視覺」，即不難理解為何圖片或影像傳播確實比文字更能發揮訊息影響力。另外探討使用者對於網路訊息「再傳播」〈re-transmission〉意願的相關文獻也指出，當網路訊息以活潑有趣的圖片或影片方式呈現，更具影響力，也更容易引起使用者再傳播意願〈Mazzarol,2007〉[5]。企業在進行網路消費者測試時也發現，「一張照片

勝過一千個字」，特別是在評論商品或服務時，若附上照片的訊息，通常較能說服民眾並且提高消費意願〈Lurie and Mason,2007〉[6]。基於更有效進行原子能與輻射防護的公共政策或科學訊息傳遞，本研究一方面選擇以「視覺化行動」策略進行新媒體影片教材製作，另一方面也引導大專生參與原能會臉書內容編輯討論，提供建議讓臉書內容以較親民、活潑、有趣方式呈現，增加公眾對專業領域例如原子能、輻射防護等議題開始感覺有趣，接者能提高其主動接觸網站、認知與分享原子能等相關知識資訊動機，同時透過視覺化影像內容，提高公眾對公共政策再傳播行為與意願，增加政策傳播效益。

IV. 結論

本次研究一方面使用動畫影片結合故事行銷，包裝屬於高度科學專業的輻射防護相關資訊與知識，透過網路進行傳播，以期達到政策行銷效果。另一方面也帶領傳播學院學生實際參與臉書「幅務小站」內容編排與呈現的優化建議工作，提出包括置入有關輻射防護與科技安全的政策動畫影片，以及站在公眾觀點將長篇大論的科學貼文進行縮減改編，以短篇、有趣、簡易閱讀的形式重新呈現，增加瀏覽率。而研究也發現以臉書進行科學知識傳播或政策溝通行銷，確實能觸擊較多民眾，而增加影像類內容也明顯提高瀏覽率或民眾再轉貼分享的意願，不過對於文獻指出是否因此能促進公民參與科技政策討論，或是對於促使參與式溝通模式發展則仍有待觀察。另一方面透過本次研究計畫資料蒐集與整理，發現與原子能輻射防護與安全的議題十分廣泛，包括環境游離輻射、輻射量偵測、環境輻射監測、核能發電原理、緊急應變民眾防護、放射性廢料以及原子能安全管理等，而本研究限於經費與時間此次僅選擇一主題「防輻好簡單，生活金安全」進行數位教材的動畫製作，雖然已是視覺化政策行銷的初始嘗試，卻數量仍不足，日後或可增加數位教材影片數量，以便研究觀察與達成提高政策行銷效果之目的。

參考文獻

- [1] 沈錦惠〈2014〉，〈隱喻即視覺化的語藝行動：網路時代談視覺語藝的古典根源〉，中華傳播學刊，26：63-106。。
- [2] Escalas, J.E. (2004). Narrative processing: Building consumer connections to brands. *Journal of Consumer Psychology*, 14, 168-180.
- [3] Griffin, M. (2008). Visual competence and media literacy: Can one exist without the other? *Visual Studies*, 23, 113-129.
- [4] Arnheim, R. (1997). *Visual thinking*. Berkeley, CA: University of California Press
- [5] Mazzarol, T., Sweeney, J. C., & Soutar, G. N. (2007). Conceptualizing word-of-mouth activity, triggers and conditions. *European Journal of Marketing*, 41(11/12), 1475-1494
- [6] Lurie, N. H., & Mason, C. H. (2007). Visual representation: Implications for decision making. *Journal of Marketing*, 71(1), 160-177.

雲端學習 幸「輻」生活 東部核能知識推廣

LOHAS learning "nuclear" family relieved east of nuclear knowledge to market

計畫編號：MOST 105-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：朱達勇、谷天心、

陳建穎、張旻皓、唐偉庭、廖偉翔、何東陽

執行單位：國立宜蘭大學資訊工程研究所

摘要

透過遊戲式學習(Game-Based Learning)互動 APP，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。並結合磨課師線上課程的數位學習的機制，將有限的學習時間用於練習、問題解決或討論等教學互動，以提升學習的成效。其教學邏輯就是讓老師能在與學生面對面的課堂時間，可以真正進行雙向溝通的教學活動；而磨課師強調的是大規模的「線上」課程，更多的師生互動以及同儕互動學習，將學習自主權以及學習的節奏交還給學生，最後達到工作經驗傳承及永續經營的目的。

關鍵詞：數位學習、遊戲式學習、核能安全。

Abstract

Through games (Game-Based Learning) about APP interactive learning, by the rich multimedia learning environment and video education, it can increase students' awareness and improve people, teachers and students interested in basic knowledge of nuclear safety and radiation and its applications. And also up to educational outreach purposes. E-learning mechanisms which combined the online courses and classrooms, let the limited time for learning exercises, problem resolve or discuss other. The interactive teaching can enhance learning effectiveness. Its logic is to let teachers and students can really be teaching two-way communication; the class division emphasized that the massive "online" curriculum, more teacher-student interaction to peer interaction and learning, you will learn the rhythm of autonomy and returned to student learning, and finally to experience heritage and sustainable development Purposes.

Keywords: E learning, Game-based learning, nuclear safety.

I. 前言

自日本福島核能電廠發生事故後，網路上不斷有各式各樣的流言，而近日福島核電廠的污水外洩事件，讓國內核能發電的議題再度受到民眾的關切，大部分的民眾對於什麼是游離輻射是不太清楚的，因此本計畫希望把宜蘭大學當作東部核能知識推廣的一個基地，目標是能夠提升民眾對原子能事故之輻射影響與防護措施認知，提升全民知識素養，使網路流言不攻自破，同時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. 主要內容

1. 收集學習成效後，修正APP之內容及提供開發方向：

希望藉由主持人東區 FUN 科學到東部的科普推廣活動，讓參與的學員透過遊戲的過程和實作的方式，真正了解有關核能知識。並透過學員或民眾使用過後的回饋，修正 APP 知識內容以及呈現方式，甚至讓國小生都能有初步的了解，從小就建立正確的觀念，使得大眾不再畏懼輻射。

2. 結合「遊戲式學習」的概念製作APP，達到寓教於樂的目的：

近年來將數位遊戲結合學習，所推出的一種新型教學方式，我們稱之為「遊戲式學習」，而數位學習強調學習不分時間和地點都可以進行，而其目標是讓學習充滿樂趣，部分大專院校也成立了數位遊戲學習實驗室專門研究其成效，經各方努力的結果證實，經過適當設計與教學計劃相結合的電腦輔助軟體對學習者在科學、資訊、數學、文學上的學習有明顯的助益。而各公家單位政府機構在推廣及知識普及時也有成功結合遊戲式學習的概念，完成一些教學遊戲。因此我們希望透過製作遊戲軟體，將教學的內容通過遊戲的方式引導民眾或學生學習，避免傳統推廣模式的死板和枯燥，希望達到寓教於樂的目的。

計畫主持人在行動裝置上之 APP 經驗，在 2016 年帶領學生參加全國校園雲端創新應用大賽季軍及人氣獎，至今已為原能會開發了十款行動裝置的能源知識相關之 APP，在本計畫執行期間亦開發出 2 款的互動式遊戲 APP。

3. 導入「磨課師線上課程」的概念，達到工作經驗傳承及永續經營的目的：

磨課師線上課程 (MOOCs, Massive Open Online Courses, 又名大規模開放式線上課程) 是新一代數位學習的機制，是以課堂知識講授和學生回家自行練習作業順序對調的「翻轉教室」為概念，是將課堂講授的部份錄製為影片，當作作業，讓學生在課外先觀看，而將有限的課堂時間用於練習、問題解決或討論等教學互動，

以提升學習的成效。其教學邏輯就是讓老師能在與學生面對面的課堂時間，可以真正進行雙向溝通的教學活動；而磨課師強調的是大規模的「線上」課程，更多的師生互動以及同儕互動學習，將學習自主權以及學習的節奏交還給學生，最後將此經驗導入學習平台，協助建立原能會內部訓練用之 MOOCS 學習平台，可作為工作經驗交流、傳承之用。

III. 結果與討論

105 年辦理 11 場次的核能知識推廣科普講座，對象從國中、高中到大學，並在講座中導入原子能相關 APP 主題達到寓教於樂的目的。

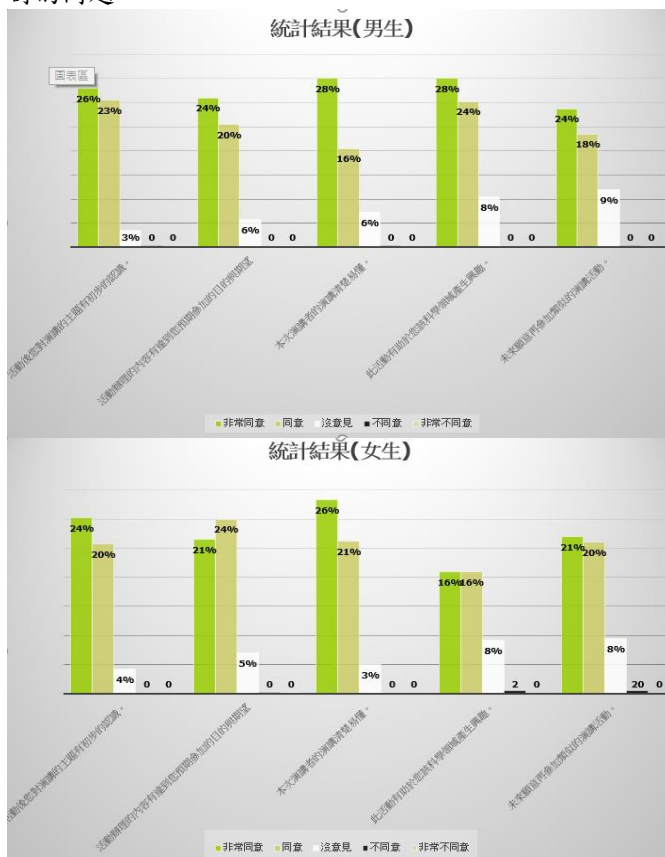
日期	項目
2016.12.20	僑樂國小-看電影談物理 科普新體驗 能源知識 APP
2016.11.17	宜蘭大學樂齡大學-看電影談物理！
2016.10.07	台中科博館-豐原高中學生-看電影談物理
2016.09.26	國立宜蘭大學-電子電路 DIY 科普講座
2016.09.12	宜蘭蘭陽女中-日本高校科學交流團-科普實作講座
2016.09.07	台東成功商業水產學校-看電影談物理
2016.07.25	宜蘭慧登中學-看電影談物理
2016.07.14	宜蘭高中-看電影談物理
2016.06.02	宜蘭五結國中演講-看電影談物理
2016.05.25	宜蘭羅東國中演講-看電影談物理
2016.03.16	宜蘭慧燈中學演講-物理很酷

	活動後您對演講的主題有初步的認識	活動辦理的內容有達到您預期參加的目的與期望	本次演講者的演講清楚易懂	此活動有助於您該科學領域產生興趣	未來願意再參加類似的演講活動
--	------------------	-----------------------	--------------	------------------	----------------

非常同意	2	2	2	2	2
同意	53	30	73	24	23
沒意見	3	5	4	7	8
不同意	1	6	9	9	6
非常不同意	1	1	1	2	3
平均	0	1	0	0	0
分數	4	4	4	4	4
	.43	.33	.44	.28	.26

本計畫執行期間共累計約 770 人（男：391 人，約占 51%；女：379 人，約占 49%）參與，統計資料總計回收 520 份有效問卷(表為整體問卷結果統計表)，問卷採用李克特五點量表(「非常同意」為 5 分，「同意」為 4 分，以此類推)，藉此了解活動的成效和滿意度分析。

從分析中可以看出前三項分數較高，學生對於活動的認識有充分的了解，但要如何讓學生產生對於該領域產生想要了解更多相關知識的動力，是我們必須繼續探討的問題。



對本次演講者的演講清楚易懂，同學普遍較熱烈而兩性在認同程度上，「認同」與「非常認同」有很明顯的差異，也看的出來男生對科學類的議題有較高興趣願意參與討論。

IV. 結論

藉由科普活動為啟發，透過看電影談物理等有趣的方式吸引學生的注意力，提高學習者的學

習意願，再搭配簡單又新奇的物理實驗達到寓教於樂的目的，並實際達成科學普及的最終目標。最後將學生引導進入線上學習的平台，開啟數位學習的大門，除達到科普的目的之外，也使學生在各學科上都有進修的方向，並同時追蹤學生的學習狀況與成效，同時縮短偏鄉地區城鄉差距的問題。並將磨課師的工作經驗導入 MOODLE 學習平台，協助建立原能會內部訓練用之 MOOCS 學習平台，可作為工作經驗交流、傳承之用。



參考文獻

- [1] IX 市調解析 - 智慧型手機篇，
<http://yahoo-emarketing.tumblr.com/post/120303044121/ix-%E5%B8%82%E8%AA%BF%E8%A7%A3%E6%9E%90-%E6%99%BA%E6%85%A7%E5%9E%8B%E6%89%8B%E6%A9%9F%E7%AF%87>。
- [2] 2016 Yahoo 奇摩遊戲白皮書，
<http://yahoo-emarketing.tumblr.com/post/148732014111/2016gamewp>
- [3] 賴翠媛，“資優教育數位學習資源之探討”，資優教育季刊，第 125 期，第 1-8 頁，101，12。
- [4] Cistic, D., Tijan, E., & Kurek, A., “Mobile Game Based Learning - Taxonomy and Student Experience. Proceedings of the ITI”, Int. Conf. on Information Technology Interfaces, 29th, pp.299-305, 2007, June.
- [5] 江明涓、劉晃溢，“Mobile e-Learning—延伸數位學習之無線行動力”，經濟部工業局，2004，10。
- [6] 蘇照雅，“行動學習五項特性”，生活科技教育月刊，38 卷第 7 期，1-2，2005，1。
- [7] 沈佳萍，“行動學習應用於數學步道之研究”，國立台灣師範大學工業科技教育學系碩士論文，2006。
- [8] E Klopfer, K Squire, “Environmental detectives: PDAs as a window into a virtual simulated world”, IEEE, 95-98, 203-228, 2002。
- [9] 陳萌智、何嘉原、吳東誼、王佩馨、嚴士翔，“結合數位學習與數位遊戲之研究—以國小自然科學課程為例”，吳鳳學報，18 期，1993，5。
- [10] 陳似瑋、徐新逸，“行動遊戲學習之現況與發展”，資訊科技國際研討會論文集，2009

開發新住民核子防護與輻射應用之學習教材與活動推廣之研究

The Studies of Developing teaching materials of animation and picture book on radiation Education in Taiwan immigrant residents

計畫編號：NU-105-NU -E-845-001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：古建國

e-mail：2014ckku@gmail.com

計畫參與人員：佟冠誼、顧元傑、許慶雄、王世綸、范哲偉

執行單位：臺北市立大學應用物理暨化學系

摘要

台灣這幾十年來不斷有外籍配偶透過婚姻或工作來到台灣工作或就業，受限於語言與文化差異，加上針對新住民編輯輻射防護與核子事故緊急應變的教材不多。本研究目的在於針對新住民多元族群為對象，編輯輻射與核子防護之繪本與動畫，透過所培育種子教師辦理新住民認識輻射與核子防護概念研習活動與實地參訪，讓參與者了解輻射知識與防護概念。教材編輯乃依據ADDIE 教學模式，先分析教材內容，並透過教師問卷收集教師意見，再進行繪本與動畫教材開發與教學，最後再透過量為研究工具，分析教學後學習成效。

研究發現提供配有英語、泰語、越語與印尼語動畫，搭配所編輯書籍，有助於新住民了解輻射防護與輻射基本概念。辦理戶外參訪與輻射檢測活動，有助於學員對輻射不再陌生。培訓現職老師與師培生有助於活動推廣，與國中與國小進行教學，發現學員後測成績皆優於前測成績，且我們於教學前先觀賞動畫(因為動畫配音採印尼語或泰語或越語)，學員普遍了解動畫內容之後，再上課，有助於他們對於輻射防護與醫療輻射的了解。

關鍵詞：輻射教育、核能安全、新住民

Abstract

This research aims at developing radiation learning for immigrant residents, which is consisted of animation and picture book.

We used ADDIE teaching mode to develop the teaching material of animation and picture book. To analyze teaching requests and opinions, students and teacher are interviewed. Then the integration and analysis of related literature, in order to design the teaching material structure of animation and picture book. Education and radiation experts are invited to review the accuracy. The teaching material is designed for two-hour classes for immigrant resident. We had seeding-teachers and designed outside activity for immigrant residents.

Keywords: Radiation education、Nuclear safety、Immigrant residents.

I. 前言

1. 背景

2011年3月11日日本發生大地震，並於福島附近引發大海嘯，造成福島核電廠的核災事故，包括爐心熔毀、氣氣爆炸與輻射外洩等災害發生，並於同年4月12日正

式宣佈福島第一核電廠事故之國際核能事件等級(INES)由5級提昇為7級，各國開始檢查或停用核能發電。隨著輻射外洩，引發我們對來自日本福島、茨城、樺木、群馬、千葉等5縣生產之食品輸入台灣關切與禁止；食藥署「日本輸入食品輻射檢測專區」專頁更新各類食品監測最新數據，以消除民眾對日輸台的農產品是否受到輻射影響所產生的疑慮。

2. 動機

目前部分中、小學現行課程中對於輻射基本概念、核子事故緊急應變、原子能法規及環境輻射監測等內容介紹不多，民眾對於此類議題恐慌是可想而知的事，所以加強教育宣導，提供各級學校師生以及民眾對於環境游離輻射相關指標與課程，為一件刻不容緩的工作(Ku, 2012)。此外，台灣不斷有新移民透過婚姻或工作來到台灣，融入我們生活中，根據Bowser (1990)研究可以歸納幾項問題，包括溝通問題與價值差異以及家庭問題等。劉美芳(2001)指出跨國婚姻婦女不僅對臺灣社會而言是一個新移民，在新組成家庭也是一個新移民，需要來自遷移地的挑戰與社會文化適應。由於語言與文化差異，目前針對多元族群輻射議題相關教材，例如涉及輻射防護與核子事故緊急應變的課程內容不多，若中文閱讀能力不高，對輻射知識學習難度將提高不少。此外對政府推廣核子防護的概念又理解多少？若能提供不同類型教材，例如繪本、動畫等將增添教學活動互動性，且透過種子教師培訓與活動辦理，將有益於輻射與核子防護推廣進行。

II. 主要內容

1. 研究目的：

- (1) 製作新住民母語動畫與繪本教材。
- (2) 培育核安與輻射防護多元族群語言教學種子教師。
- (3) 辦理研習、參訪與實測活動等多元推廣課程。

2. 研究架構

本研究依據ADDIE 教學模式，分析階段先分析教材內容，並透過教師問卷填寫方式調查針對新移民課程若進行輻射相關課程所需教材內容與範圍，比較任教地區是否鄰近核能電廠、是否參加過輻射相關教育的研習或課程及其他一般背景變項做為自變項，一般背景變項包含有性別、任教年級、任教年資與是否參與輻射教與相關研習課程等項目；分析教師的看法後編製繪本與動畫輔助教材，並進行教學與分析學習成效。

3. 教材開發架構與步驟

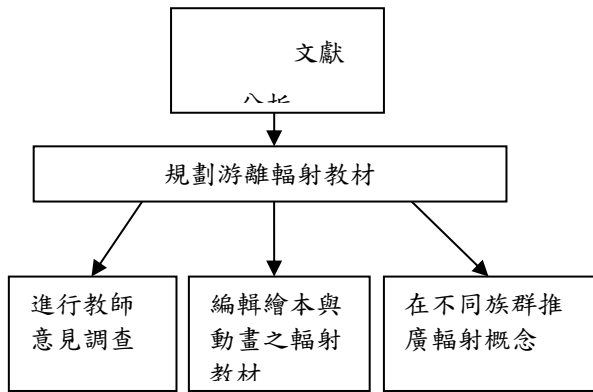


圖1 教材開發架構與步驟

4. 教材開發步驟

系統教學設計可以提昇學習者學習成果，本計畫以ADDIE教學模式的流程進行研究，主要分為五個階段：分析階段、設計階段、發展階段、實施階段和評量階段：

(1) 分析階段：

引用Ku, C. K. & Wu, C. T. (2012, 09)與廖雪伶輻射概念在現行自然與社會教科書內容分析與分析教師教學意見來編輯繪本與動畫。

(2) 設計階段：

再經過修改與參考學習者程度進行教材設計，以求內容正確性與適當性。動畫製作部分，其過程主要分為三大流程：分別為前置作業、內容製作、後製階段（陳怡菁，2009）。

- 前置作業：確定動畫的故事大綱及文字劇本。音效的部分，越南語採取事前錄音，印尼語語泰語採電腦合成發音，動畫製作部分，於前製時期要先寫分鏡腳本以節省日後製作的時間。
- 內容製作：參考前製期所設計的人物，完成場景規劃及分鏡腳本來工作。
- 後製階段：可分為影像處理及音訊處理，進行剪接和配樂音效。

(3) 發展階段：

本階段乃根據需求分析進行教材開發。另外本階段進行教學者與教材編輯者的培訓，並邀請教師進行教案與教學檔案修正，並透過本培訓工作坊，提升種子教師對輻射教學流程的確認。

(4) 實施階段：

本階段進行乃根據課程設計、教材開發與試教之後，正式於新住民課程中進行教學。課程教學前，先進行前測，以瞭解學習者程度，再進行教學。

(5) 評鑑階段

藉由問卷設計、專家效度後，修改問卷並編製成為正式問卷，於教學前後進行施測，以評鑑後將進行資料分析。

5. 研究工具

研究工具以量研究為主，設計「教師對新住民輻射教學意見之調查」，並探討教材內容，以設計與編製輔助教材，接著實施教學，在教學前進行「新住民學員對

輻射認知問卷」為前測，教學後再做後測，藉以評量學生學習成效之影響採專家效度，修正題意不清及不佳之題目，並考慮題目的保留與刪除，成為正式問卷。

6. 資料處理與分析

本研究將蒐集之問卷資料經過整理編號，輸入電腦並利用SPSS for Windows 套裝軟體進行統計分析，對問卷的各變項進行次數分配之分析，以平均值、次數分配、百分比為統計量之主要參考依據，以t 檢定與單因子變異數分析。

III. 結果與討論

1. 製作新住民母語動畫與繪本教材。

- (1) 編輯英語、泰語、越南語、印尼語之輻射防護與醫療輻射之動畫。

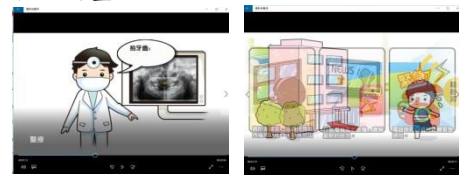


圖2 動畫(摘錄)

- (2) 編輯英語、泰語、越南語、印尼語之繪本



圖3 繪本(摘錄)

2. 培育核安與輻射防護以多元族群語言教學種子教師
為了確認輻射教材與教學正確性並分析學員學習成效，本計畫除培訓新住民教師六位之外並增加五位種子教師。

表1 培育核安與輻射防護種子教師

時間	地點/培訓老師
0220/0830~1200 0521/0830~1200 0709/0830~1200	萬里國小/許慶雄、曾佳慧
0926/1830~2030	科學館S103b/顧元傑、王世綸、范哲偉
1024/1830~2030	科學館S103b/顧元傑、王世綸、范哲偉

3. 辦理研習與參訪活動多元推廣課程

(1) 研習課程

本研習活動（352 人/男 48 人；女 304 人）涵蓋台北市與新北市，對象包括就讀國小與國中新生住民學員，邀請培訓種子教師進行教學，時間與場次等說明見表 2。

低年級和高年級的老師在對於輻射教學意見之描述性統計分析見表 4。

表 2 研習課程

編號	日期	地點	主講教師	人數
1	20161025(二)	碧湖國小	顧元傑	9
2	20161026(三)	淡水國小	徐德秀 顧元傑	40
3	20161107(一)	蘆洲國中	張慧芳 徐德秀	55
4	20161109(三)	大豐國小	李拉雀薇	25
5	20161110(四)	碧華國小	施鷺音 張慧芳	55
6	20161114(一)	安坑國小	李拉雀薇	30
7	20161116(三)	正義國小	陳秋柳	23
8	20161116(三)	三峽國中	薛素素 顧元傑 施鷺音	50
9	20161117(四)	積穗國小	陳秋柳 薛素素	65

(2) 參訪活動

本計畫邀請種子教師進行戶外教學(97人/男17人;女80人),其中一場以越南語教學為主,一場以泰語教學為主,一場為中文教學。

表 3 戶外參訪活動

時間	地點	講師	人數
0716(六)	北投溫泉博物館 核二廠電力展示館	萬里國小~ 許慶雄老師 泰語為主教學	25
1104(日)	北投溫泉博物館 核二廠電力展示館	徐德秀老師 李拉雀薇老師	43
1211(日)	北投溫泉博物館 核二廠電力展示館	越語為主教學 薛素素老師	29



圖 4 活動照片(摘錄)

4. 教師對新住民輻射教學意見分析

主要是調查小學老師對於輻射和核子單元教學意見,內容分為4大類:輻射基礎知識、輻射醫療知識、核能電廠、輻射防護知識,共21題。再依照所蒐集的量化資料進行統計,以釐清輻射問卷的重要性再不同背景教師是否有達到統計之顯著差異。

(1) 中低年級和高年級的老師在對於輻射教學意見

表 4 中低年級和高年級的老師在對於輻射教學意見

組別	人數	平均數	標準差
中低年級	18	4.534	0.302
高年級	22	4.493	0.399

以兩組結果進行變異數同質性考驗,經 Levene 檢定法 $p=.196>.05$ 未達顯著差異,表示兩組樣本變異數可視為同質,之後進行獨立樣本 t 檢定來考驗中低年級的老師和高年級的老師的看法,其統計結果如表 5:

表 5 中低年級和高年級的老師在對於輻射問卷的重要性的獨立樣本 t 檢定

組別	平均數	標準差	t 值	顯著性(p)
中低年級	4.534	0.302	.359	.196
高年級	4.493	0.399		

未達顯著水準,表示教導不同年級的老師其對於問卷沒有顯著差異。

(2) 教學年資 15 年以下和 16 年以上的老師對於輻射教學意見之分析

表 6 教學年資 15 年以下和 16 年以上的老師對於輻射教學意見之描述性統計分析

組別	人數	平均數	標準差
15 年以下	24	4.5	0.347
16 年以上	16	4.53	0.377

由表 6 對於輻射輻射教學意見中,教學年資 15 年以下的老師平均數 4.5 分和教學年資 16 年以上老師的 4.53 分,經 Levene 檢定法 $p=.962>.05$ 未達顯著差異,表示 15 年以下和 16 年以上的老師在「對於輻射問卷的重要性」看法未達顯著差異。

(3) 畢業於教育大學和一般大學部文法商理工醫農學院的老師在對於輻射輻射教學意見分析

表 7 教育大學和一般大學部文法商理工醫農學院的老師對於輻射問卷的重要性之分析

組別	人數	平均數	標準差
教育大學	26	4.53	0.372
一般大學部文法 商理工醫農學院	14	4.48	0.331

由表 7 可得知,畢業於教育大學的老師平均數 4.53 分和畢業於一般大學部文法商理工醫農學院老師的 4.48 分,經 Levene 檢定法 $p=.642>.05$ 未達顯著差異,表示畢業於教育大學和一般大學部文法商理工醫農學院的老師在「對於輻射問卷的重要性」的表現,看法未達顯著差異。

(4) 學習成效

探討經過教學,分析教材對受教者的學習影響,並進行前測與後測,分析教材教學前後的差異性。前測與

後測為相同的題目，共 15 題輻射知識相關問題。以學習中文的國小和國中兩組新住民成人為對象，對於相同的輻射教材介入後的學習成效。

a. 分析兩組(國小組和國中組)新住民對輻射知識前後測驗的答題情況

藉由輻射知識教材介入後進行前測、後測的結果，分析輻射教材介入後，對新住民在不同中文程度學習輻射知識的影響，國中組(總人數 16 人)的新住民中文程度較國小組(總人數 29 人)好。

依據國小組與國中組所做的前測、後測答題情況：

表 8 國小組前後測各題答對結果

類別 名稱	前測			後測	
	題 號	答對 人數 (人)	答對 率(%)	答對 人數 (人)	答對 率(%)
輻射 基礎 知識	1	23	79.3	28	96.6
	11	11	37.9	20	69.0
	12	9	31.0	19	65.5
	13	15	51.7	13	44.8
	14	12	41.4	20	69.0
輻射 醫療 知識	15	21	72.4	25	86.2
	2	13	44.8	16	55.2
	3	27	93.1	23	79.3
	4	23	79.3	26	89.7
	10	18	62.1	26	89.7
核能 電廠	5	17	58.6	21	72.4
	6	10	34.5	24	82.8
	7	16	55.2	23	79.3
	8	8	27.6	25	86.2
	9	21	72.4	26	89.7

由表 8 國小組前後測各題答對結果分析發現，新住民前測得分較高的類別為「輻射醫療知識」，第 3 題答對率有 93.1%及第 4 題答對率有 79.3%，而後測得分較高的類別為「輻射防護知識」，由此可見新住民在接受教學後，「輻射防護知識」明顯的提升許多。從前測此類別各題的答對率為 58.6%、34.5%、55.2%、27.6%和 72.4%，提升到後測此類別各題答對率為 72.4%、82.8%、79.3%、86.2%和 89.7%。

表 9 國中組前後測各題答對結果

類別 名稱	前測			後測	
	題 號	答對 人數 (人)	答對 率(%)	答對 人數 (人)	答對 率(%)
輻射 基礎 知識	1	13	81.3	15	93.8
	11	13	81.3	10	62.5
	12	13	81.3	13	81.3
	13	10	62.5	16	100
	14	12	75	16	100
輻射 醫療 知識	15	12	75	16	100
	2	16	100	15	93.8
	3	16	100	16	100
核能 電廠	4	11	68.8	16	100

類別 名稱	前測			後測	
	題 號	答對 人數 (人)	答對 率(%)	答對 人數 (人)	答對 率(%)
核能 電廠	10	15	93.8	16	100
	5	11	68.8	16	100
輻射 防護 知識	6	13	81.3	16	100
	7	11	68.8	16	100
	8	3	18.8	14	87.5
	9	16	100	16	100

由表 9 國中組前後測各題答對結果分析發現，新住民前測得分每個類別都相當的高，由此可見國中組的新住民其中文教育程度較好，以至於在教學前的前測成績表現較佳。但僅有「輻射防護知識」的第 8 題答對率偏低，有只有 18.8%，不過後測成績大幅明顯的進步。

b. 分析兩組新住民在輻射知識前後測驗的整體表現

國小與國中輻射知識測驗，共 15 題，每答對 1 題則給予 1 分，共 15 分；將國小與國中前、後測描述性統計分析之結果（包含平均數及標準差），整理為表 10 所示：

表 10 國小組和國中組前後測之描述性統計分析

組別	人數	前測		後測	
		平均 數	標準 差	平均 數	標準 差
國小	29	8.41	2.922	11.52	2.923
國中	16	10.81	2.509	14.19	.834

由 10 表可得知，國小組與國中組在輻射知識測驗的前測平均數分別為 8.41 分、10.81 分，後測平均數則為 11.52 分、14.19 分，兩組的後測之平均數皆高於前測之平均數。

為了釐清實驗教學前，國小組與國中組在輻射教學上是否有顯著差異，因此先以兩組前測結果進行變異數同質性考驗，經 Levene 檢定法 p 值為 .703，未達 $p < .05$ 的顯著水準，表示兩組樣本變異數可視為同質。進行單因子共變數分析後，發現在排除兩組新住民輻射知識測驗前測分數的影響後，後測成績在經過共變數分析檢定結果之 F 值為 6.169，而 p 值為 .017，達 $p < .05$ 的顯著水準，顯示兩組新住民輻射知識測驗之後測分數會因教學方式不同而有所差異，國中組新住民輻射知識測驗上後測分數顯著優於國小組。

為了進一步瞭解國小組新住民在輻射知識測驗前測與後測的表現差異，以及國中組新住民在輻射知識測驗前測與後測的表現差異，分別對國小組新住民之輻射知識測驗前測、後測成績，以及國中組新住民之輻射知識測驗前測、後測成績，進行相依樣本的平均數差之 t 檢定，發現，國小組前測與後測相依樣本檢定之 t 值為 -4.805， $p = .000$ 值達 $p < .001$ 的顯著水準，表示國小組輻射知識測驗分數上有顯著差異，可見得國小組的新住民在接受學習後，對於輻射知識幫助上能有顯著性的成長。國中組前測與後測相依樣本檢定之 t 值為 -3.516， $p = .003$ 值達 $p < .01$ 的顯著水準，表示輻射知識測驗分數有顯著差異，可見國中組的新住民在接受學習後，對

於輻射知識幫助上能有顯著性的成長。

IV. 結論

(一) 結論

1. 提供配有英語、泰語、越語與印尼語動畫，搭配所編輯書籍，有助於了解輻射防護與醫療輻射概念。
2. 辦理以泰語以及越語為主族群之戶外參訪與輻射檢測活動，有助於學員對教學內容了解。
3. 培訓現職老師與師培生了解輻射教學內容，有助於日後活動推廣。
4. 輻射教材加入動畫之後，我們於教學前先觀賞動畫，因為動畫配音採印尼語或泰語或越語(先詢問主要對象)，學員普遍了解動畫內容之後，再上課，而授課內容所用繪本與教材與動畫內容呼應，有助於他們對於輻射防護與醫療輻射的了解。
5. 戶外參訪，我們嘗試各辦一場以泰語與越語為主之新住民學員訪查活動，以他們母語為主要授課語言，讓他們了解自然輻射語如何進行輻射偵測。只覺得輻射聽起來好像很危險，經過母語教師教學，更容易了解輻射與如何進行輻射防護。

(二) 建議

1. 編輯閩南語之繪本與動畫輔助教材。
2. 透過親子共學與參與活動來認識輻射相關概念。

參考文獻

- [1] 王路易 (2002)。動畫卡通的魅力。文建會台灣電影筆記。線上檢索日期：2010 年12 月5 日。網址：
<http://movie.cca.gov.tw/files/13-1000-371.php?Lang=zh-tw>
- [2] 文建會 (無日期)。電影小辭典。文建會台灣電影筆記。線上檢索日期：2010 年12 月5 日。網址：
<http://movie.cca.gov.tw/files/15-1000-814,c143-1.php>
- [3] 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，台北市立教育大學，台北市。
- [4] 吳雪菁 (2002) 資訊科技融入教學對學生在電化電池概念改變之研究。未出版碩士論文，國立高雄師範大學，高雄市。
- [5] 林宜正 (2009) 電腦動畫融入國小五年級數學圖形與空間領域補救教學之研究。未出版碩士論文，嶺東科技大學，台中市。
- [6] 許清姿 (2004)。網頁輔助教學對國二學生在「光的傳播與光速的測量」課程學習成效之研究。已出版碩士論文，國立高雄師範大學，高雄市。
- [7] 陳昌宏 (2002) 應用模擬動畫對高中學生物理學習之成效研究。未出版碩士論文，國立高雄師範大學，高雄市。
- [8] 陳伶伶 (2005) 多媒體動畫融入國小六年級教學之學習成效研究--以分數之加、減、乘法為例。未出版碩士論文，國立台南大學，台南市。
- [9] 何青蓉 (2003)。跨國婚姻移民教育初探--從一些思考陷阱談起。成人教育，75, 2-10。
- [10] 劉美芳 (2001)。跨國婚姻中菲籍女性的生命訴說。

高雄市：高雄醫學大學護理學研究所碩士論文(未出版)。

- [11] Chien-kuo Ku* and Cheng Da Wu , The Study of Radiation Education Indicators in K-9 Sustainable Environmental Education, 2012, 3-5, Sept. Canada.
- [12] Bowser, A. G. & Nejazinia-Bowser, S. (1990) A General Study of Intermarriage In United States. (ERIC Document Reproduction Service No.ED340957)

核能議題溝通策略之性別分析

The Gender Analysis of Communication Strategies of Nuclear Issues

計畫編號：105-NU-E-845-002-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：羅潔伶

執行單位：台北市立大學教育學系

摘要

本計畫分析目前民眾對於核能公共事務議題的溝通思維與障礙，並進一步檢視目前溝通訊息、溝通模式（正式與非正式）、溝通媒介等相關溝通策略，對於核能公共事務議題作修正分析，建構民眾所需的核能議題訊息與溝通策略，並透過性別意識的分析比較，分別探究性別主流化的差異，提供相關主管機關未來進行核能公共事務議題推廣相關決策時之重要參考依據。

關鍵詞：核能、溝通、性別

Abstract

The project analyzes the public communication thoughts and barriers of the public nuclear affair issues, and current communication messages further as well as communication model (formal and informal), communication media and relevant strategies, so as to make correction and analysis on the public nuclear affair issues, to construct the information related to nuclear issues and communication strategies needed by the public, and to investigate the mainstreaming differences of between genders through the analysis and comparison of gender awareness in order to provide them to the related authorities to serve as important references for promoting relevant decisions of public nuclear affair issues.

Keywords: Nuclear; Communication; Gender.

I. 前言

在現代民主社會裡，由於價值多元，對於利益與代價的定位與取捨，也是多元的。而在核能公共事物議題：如「要不要核能」、「核四要不要續建或停建」等，所涉及不只是科技與成本效益的理性分析，它更涉及價值與生活方式的選擇。但過去在核能公共事務議題上，往往是各說各話。主要原因是核能議題包含了科技、經濟、清理、環保，甚至於國家安全的問題，因此民眾對於核能公共事務議題還是一知半解。為此，本計畫將針對核能公共事物的議題的溝通障礙深入分析為主要研究動機之一。

Poole, Seibold and McPhee (1996) 認為，溝通是組織控制及協調的基礎，主要的功能是提供重要的資訊以完成組織的任務，有效的溝通在應用中可獲得的資訊來幫助政策演進。在任何的組織當中，溝通是組織運作過程中的必要活動，而在溝通的過程中，溝通的最大問題是傳送者常無法如期將資訊傳達給接收者。除了管理者對於訊息選擇的影響之外，當中還包含了成員本身對於

訊息來源的處理方式與重視程度。目前傳播媒體在核能溝通策略上，大都採用恐懼效應進行溝通傳播。為此，在一般民眾對於核能議不瞭解的狀況下，無法做出正確的決策。為此，本計畫將針對目前民眾對於核能公共事務議題的溝通訊息完整性進行深入探討為主要研究動機之二。

過去在性別與語言研究的領域，不管從心理學或人類學去研究語言的焦點，我們在解讀時都必需同時考量其學科背景。對於性別在語言運用上的分析，我們如何不限於一執之偏，而能從語言上了解兩性溝通存在的差異性（柯建志和莊淳惠，2001）。Tannen (1990) 提出兩性在使用語言上的策略及背後呈現的意義是有所不同，而 Lakoff (1990) 認為溝通風格 (Communicative Style) 是指不同種族或不同文化的人在面對面溝通所產生的誤解，誤解的情況都會雙雙發生在跨文化和跨性別上，原因在於溝通形態上有著不同系統性的差異。因此在溝通言語上，男性屬於報告式談話，他將人際間的談話就像一場談判，並且必須保護自己以免他人將自己推擠下去。而女性使屬於情感式談話，她相信對話可以維持彼此關係的存在，因此在對話中會去尋求和給予肯定及支持的態度，並達成彼此的一致性（柯建志與莊淳惠，2001）。為此，本計畫將對性別在溝通風格的差異進行分析探討為為主要研究動機之三。

目前性別在溝通議題的相關研究上，主要可分為三大方向：一是從管理學的論點出發，探討性別在溝通與領導特質上的相關研究，尤其是女性如何應用溝通策略來管理衝突，強化領導效果（秦琍琍，2010；Steele & Plenty, 2015；Terek, Nikolić, Gligorović, Glušac and Tasić, 2015）；另一為從社會學或是心理學的理論出發，探討性別角色和性別刻板印象對於溝通的影響（Zivotofsky and Koslowsky, 2005；Shin, Roter, Roh, Hahm, Cho and Park, 2015）；第三則是從傳播學的角度，探討性別在溝通媒介與資訊傳送的差異，例如性別對於訊息數量多寡、訊息之不對稱性之觀點之差異（李威龍、留淑芳、劉明宗，2005）；性別在網路溝通障礙與衝突（劉仲矩與黃金榜，2008；Oka, Whiting and Reifman, 2015）；性別對於溝通媒介偏好的差異，對於不同性別主管，採用何種溝通媒介，才能達到組織公民行為（Ritzhaupt, Feng, Dawson and Barron, 2013；羅新興、羅景文、王彥蓁，2015），但對於將性別議題用於公共事務溝通策略上之相關研究甚少，尤其是核能議題。為此，本計畫將針對

核能公共事務議題之溝通策略進行性別的差異分析為主要研究動機之四。

針對上述研究動機，本計畫首先探究民眾對於核能公共事務議題的溝通思維與障礙，並進一步檢視目前溝通訊息、溝通模式（正式與非正式）、溝通媒介等相關溝通策略，對於核能公共事務議題作一修正分析，建構民眾所需的核能議題訊息與溝通策略，並透過性別意識的分析比較，分別探究性別主流化的差異，提供相關主管機關未來進行核能公共事務議題推廣相關決策時之重要參考依據。

II. 主要內容

本計畫根據溝通理論的學術與實務運用層面，針對核能公共事務議題的定位與發展，研擬溝通策略模式，並就其性別意識進行差異分析。其研究方法採三階段的方式來進行：蒐集目前核能議題溝通困境、規劃出溝通模式與驗證溝通模式。

III. 結果與討論

本計畫分為三部分：首先針對目前傳播現況進行調查，主要分為專家訪談與民眾問卷調查，其次彙整兩方面結果制訂出專家模糊德菲法問卷，制訂出傳播應考量相關因素，最後，將第二階段問卷進行民眾認知調查，以便瞭解民眾之接受度。此外，針對性別與其他背景資料進行分析比較。

一、傳播現況分析

（一）專家訪談

本計畫在專家訪談研究對象的選擇，主要是本研究選擇三大領域：公共政策 7 位、行銷傳播 6 位及社會弱勢 3 位共 16 名產官學的專家。其中公共政策領域專家了解政府與政策面的制定與困難；行銷傳播領域專家具備傳播的理論及實務經驗；社會弱勢領域專家則是洞察目前臺灣社會的人口組成身分與特性，並能以貼近民眾的角度提供建議。在專家訪談後，謄寫出訪談逐字稿，彙整並歸納有二至三名以上專家所提出的觀點並建立指標，如下：

1. 核能公共政策傳播的困難點：核能知識專業性太高、政府長遠規劃不足、施政力度不佳、政治議題凌駕於專業知識、民眾的核能科普知識不足、民眾普遍對於核能的刻板印象、許多錯誤資訊充斥、社會普遍低度信任。
2. 核能公共政策爭議性議題的傳播環境：各方意見多元並呈，促進交流、民眾的法治觀念/公民素養成熟度、民眾的理性對話程度、公共討論平臺的建立與運作、政府對於能源政策的態度與規劃、政府對於傳播工具的運用與整合能力、傳播媒體的資訊來源(成熟度)、核能資訊的充分流通與透明公開、電價政策與用電成本(包含不同發電方式)、網路社群的傳播特質(年輕化)、閱聽人類型增加、
3. 核能公共政策傳播所應達到的成效：短期目標：能

提供接收者正確、無誤、沒有扭曲的核能公共政策相關訊息、接收者與核能知識擁有者(官方)建立良好關係、接收者能相信並了解核能公共政策的正確訊息、接收者能正確傳播核能公共政策相關訊息、能引發理性的公民討論、能有效降低網路上的錯誤資訊；長期目標：知名度：能有效提升民眾對於原能會工作內容的了解、功能性：能幫助民眾瞭解核能知識及政府的政策走向、中立性：能讓民眾建立信心、相信原能會的中立立場、專業度：能建立原能會專業形象、塑造其守門員的角色、溝通性：能擔任民眾及政府間的溝通橋樑。

（二）民眾感受問卷調查

本研究面訪問卷之有效問卷共有 432 位

1. 核能公共政策傳播的困難點：民眾認為目前傳播的困難點在於公共政策規劃不足與施政力度不佳、政治議題凌駕於專業知識、錯誤資訊充斥與低度信任。
2. 核能公共政策爭議性議題的傳播環境：民眾認為一個好的傳播環境應考量各方意見，促進交流、民眾的法治觀念/公民素養成熟度、民眾的理性對話程度、有效運用公共討論平臺、能源政策的態度與規劃、傳播工具的運用與整合能力、媒體的資訊來源、資訊的充分與透明公開、資訊的充分與透明公開、電價政策與用電成本、網路社群的傳播特質、閱聽人類型增加。
3. 溝通傳播滿意：民眾對於原能會在溝通的滿意度調查，在信任、主動性、友善、內容、方法、多元性等，都未達到滿意的程度 ($\mu > 3.5$)。
4. 溝通傳播成效：民眾對於原能會在溝通的成效調查，對於原能會的任務、角色、中立、守門員、溝通橋樑，都未達到認同的程度 ($\mu > 3.5$)。

二、傳播溝通關鍵因素

（一）專家德菲法調查

在專家訪談與民眾調查結束後，本研究導入了溝通模式，建構出一共有 5 個構面，包括了『議題內容』、『傳播業者條件』、『代言人條件』、『溝通工具』以及『溝通成效條件』建構模糊德菲法問卷。本研究在專家德菲法調查研究對象的選擇，主要是本研究選擇三大領域：公共政策 15 位、行銷傳播 11 位及社會弱勢 4 位共 30 名產官學的專家。

而本研究設定門檻值為 7 做為本研究評估準則之篩選標準。其篩選結果刪除了 15 個評估準則，保留 40 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 72.73%。

1. 傳播議題內容：專家認為傳播議題包括：核能安全(核電廠基本資料、體檢報告)、輻射安全(知識、類型、污染、管制等)、危機處理應變機制(核災的緊急應變措施)、核物料管理(核廢料管制、核電廠除役管制)、環境與生態保護(熱汙染、珊瑚白化等)、使用核能的原因與優缺點、各種(替代)

能源的用電方式與比例(核能與不同發電方式的比較)與電價議題(核能與不同發電方式對於電價的影響)；對於其他國家核能議題，專家認為其他國家發電相關經驗不用作為傳播的議題。

2. 傳播代理業者條件：專家認為傳播代理業者條件必須考量：策略規劃能力、商譽(具口碑)、立場中立、信用承諾(企業倫理)、有效針對不同目標民眾的溝通能力、對核能安全知識的熟悉與瞭解程度、國際觀(能結合不同國家、專家的觀點作傳播)、營造公共討論空間的能力。
3. 政策代言人條件：專家認為政策代言人條件必須考量：持續溝通(能擔任政府與民眾的溝通橋樑)、具公信力、具專業知識、具溫暖形象與親和力、具良好口條；對於性別(代言人的性別對於接收者是否會有不同影響)與具相關經驗是不重要之因素。
4. 溝通媒體工具：專家認為溝通媒體工具媒介：入口網站(Yahoo、Google等)、電視(無線電視、有線電視、網路電視等)、書面報紙(蘋果日報、自由時報等)、電子報(中時電子報、蘋果電子報等)、社群軟體(例：FB粉絲專頁、部落格、PTT、LINE)、影音平台(例：Youtube)；對於官方網站(原能會、經濟部等)、廣播(收音機、網路收音機等)與雜誌或電子書是不重要之工具。
5. 溝通成效的指標：專家認為傳播活動後成效包括：能提供接收者正確、無誤、沒有扭曲的核能公共政策相關訊息、民眾與政府能建立良好關係(民眾能信任政府政策及執行能力等)、民眾能相信並了解核能公共政策的正確訊息與能有效降低網路上的錯誤資訊；對於民眾能正確傳遞核能公共政策相關訊息給他人與能引發理性的公民討論是不重要成效考量。

(二) 民眾感受問卷調查

本研究面訪問卷之有效問卷共有 554 位，問卷為 Likert 量表 1-5 分。：

1. 傳播議題內容：民眾對於專家問卷中有關傳播議題的重要性皆抱持支持性的結果 ($\mu > 3.5$ 分)。
2. 傳播代理業者條件：民眾對於專家問卷中有關傳播代理業者條件的重要性皆抱持支持性的結果 ($\mu > 3.5$ 分)。
3. 政策代言人條件：民眾對於專家問卷中有關政策代言人的重要性皆抱持支持性的結果 ($\mu > 3.5$ 分)。
4. 傳播媒體工具：民眾對於專家問卷中有關傳播媒體工具的重要性，民眾認為網路平台才是最重要部分 ($\mu > 3.5$ 分)，而平面媒體並非為主要傳播工具。
5. 傳播活動成效評估：民眾對於專家問卷中有關傳播活動成效重要性皆抱持支持性的結果 ($\mu > 3.5$ 分)。

(三) 溝通模式在人口差異分佈的檢定

個人變項在各變項上之差異分析 本研究探討不同的個人基本變項對傳播議題、傳播代理業者、傳播代言人、傳播工具、傳播成效是否會造成差異。其結果發現，在傳播議題上，對於核能發電態度會有顯著性差異；其次在傳播代理業者選擇上，學歷不同，認同程度也有所不同；第三，在傳播代言人上，年齡、學歷、職業與職務都會有所不同的認知條件；第四，在傳播工具選擇上，性別與年齡是具有不同的差異選項；最後傳播成效會依照人口分布而條件有所差異。

表 1：性別溝通模式在不同族群的差異性分析表

	傳播 議題	傳播代 理業者	傳播代 言人	傳播工 具	傳播 成效
性別				成立	
年齡			成立	成立	
學歷		成立	成立		
城鄉					成立
職業			成立		
職務			成立		
核電態 度	成立				
性別 *					成立
薪資					
性別 *					成立
地區					

IV. 結論

當政府進行爭議性的公共政策傳播(如核能相關議題)時，往往為了政策能夠順利推動，因此僅以單向溝通策略模式以及僅呈現有利資訊，此時當反對團體努力地將政府不為人知的訊息傳播給一般民眾時，民眾就會認為公部門不夠公開，隱瞞重要事實。而一個好的政策溝通，並非是與反對勢力團體打筆戰，讓一般民眾對於爭議性公共政策有所未知。為此，在一般民眾對於核能議題不瞭解的狀況下，無法做出正確的決策。面對這樣的溝通成果，並非是哪一方贏或輸的問題，而是民眾還是對於核能公共事務議題還是一知半解。

溝通是組織控制及協調的基礎，因此在任何的組織當中，溝通是組織運作過程中的必要活動。而溝通所使用的言語運用卻因為性別而有所差異，男性屬於報告式談話，他將人際間的談話就像一場談判，並且必須保護自己以免他人將自己推擠下去。而女性使屬於情感式談話，她相信對話可以維持彼此關係的存在，因此在對話中會去尋求和給予肯定及支持的態度，並達成彼此的一致性。

本計畫針對目前民眾對於核能公共事務議題的溝通思維與障礙，並進一步檢視目前溝通訊息、溝通模式(正式與非正式)、溝通媒介等相關溝通策略，對於核能公共事務議題作一修正分析，建構民眾所需的核能議題訊息與溝通策略，並透過性別意識的分析比較，分別探究性別主流化的差異，提供相關主管機關未來進行核能公共事務議題推廣相關決策時之重要參考依據。

根據專家與民眾調查結果顯示，男性與女性的溝通模式有所不同，但針對核能公共政策議題，僅在傳播工具選擇上的著重點有所差異，但對於傳播議題、傳播代理業者、傳播代言人、與傳播成效的需求條件上並沒有顯著性差異。本研究進一步檢測其他相關變項，學歷程度差異對於傳播代理業者選擇上也所差異，而代言人的挑選上，民眾會隨著年齡、學歷、職業與職務都會有所不同的認知條件；而傳播議題上，主要還是在先入為主的核能電廠運作接收度有所差異。由此結果得知，不僅是性別是核能公共政策議題在傳播工具上有所差異外，對於議題內容，傳播業者的專業與中立形象、代言人的條件，都會隨著年齡、學歷、職業與職務都會有所不同。因此，當進行核能相關議題傳播時，必須做詳細的規劃與市場區隔，如此才能夠做到溝通成效。

- [1] 中央廣播電台 (2013) 臺灣核電爭議，核能工程專家賀立維博士央廣 16 分鐘專訪。
[http://sidefilers.pixnet.net/blog/post/66751420-%5B轉載 5D%-臺灣核電爭議，核能工程專家賀立維博士。](http://sidefilers.pixnet.net/blog/post/66751420-%5B轉載%205D%-臺灣核電爭議，核能工程專家賀立維博士。)
- [2] 李威龍，留淑芳，劉明宗 (2005)。網路口耳相傳訊息數量、訊息方向暨性別對訊息說服效果之影響。行銷科學學報，1 (2)：165-201 頁。
- [3] 柯建志，莊淳惠 (2001)。線上兩性溝通風格研究-由黛伯拉·泰南的觀點談起。資訊社會研究，1：121-146 頁。
- [4] 秦琍琍 (2010)。女性領導與溝通：從性別傳播看組織文化的建構。應用心理研究，45：173-202 頁。
- [5] 劉仲矩，黃金榜 (2008)。網路人際衝突成因與性別差異之研究。電子商務學報，10 (1)：113-137 頁。
- [6] 羅新興，羅景文，王彥蓁 (2015)。職場員工是否為主管 FB 好友對知覺主管支持與公民行為的影響—探討員工性別之調節效果。健行學報，35 (1)：31-43 頁。
- [7] Lakoff, R. (1990). Talking power: The politics of language in our lives. New York: Basic Books.
- [8] Oka, M., Whiting, J. B. & Reifman, A. (2015). Observational research of negative communication and self-reported relationship satisfaction. American Journal of Family Therapy, 43(4): 378-391.
- [9] Poole, M., Seibold, D. & McPhee, R. (1996). The

- [10] Ritzhaupt, A. D., Feng L., Dawson, K. & Barron, A. E. (2013). Differences in student information and communication technology literacy based on socio-economic status, ethnicity, and gender: evidence of a digital divide in florida schools. *Journal of Research on Technology in Education*, 45(4): 291-307.
- [11] Shin, D. W., Roter, D. L., Roh, Y. K., Hahm, S. K., Cho, B. & Park, H.-K. (2015). Physician gender and patient centered communication: the moderating effect of psychosocial and biomedical case characteristics. *Patient Education & Counseling*, 98(1): 55-60.
- [12] Steele, G.y A. & Plenty, D. (2015). Supervisor – subordinate communication competence and job and communication satisfaction. *Journal of Business Communication*, 52(3): 294-318.
- [13] Tannen D. (1990). You just don’ t understand: women and men in conversation. William Morrow , New York.
- [14] Terek, E., Nikoli, M., Gligorov, B., Glušac, D. & Tasi, I. (2015). The impact of leadership on the communication satisfaction of primary school yeachers in Serbia. *Educational Sciences: Theory & Practice*, 15(1): 73-84.
- [15] Zivotofsky, A. Z. & Koslowsky, M. (2005). Short communication: Gender differences in coping with the major external stress of the Washington, D.C. sniper. *Journal of the International Society for the Investigation of Stres*,. 21(1): 27-31.