# 107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108年6月12日

# 目錄


【議程及場地】 3
【核能安全科技】 11
01-除役中核能電廠之核子保安管制要求與國際實施現況研究 13
02-大規模路網疏散時間估算與疏散路線規劃之研究 16
03-各國核子保安機敏資料資訊公開之規定與實務研究 20
04-核能電廠低中壓電纜老化檢測與評估研究 23
05-大範圍深穿透輻射遷移計算的技術與應用研發 27
06-壓水式反應器一次側系統水化學最適化研究 33
07-利用流固耦合以二相流分析方法探討蒸汽產生器之熱交換管的暫態應力特性 36
08-核三廠SBO下之自然對流模擬分析 45
09-壓水式反應器二次側結構組件腐蝕劣化防制研究 48
10-壓水式核能電廠之TRACE SNAP FRAPTRAN事故模擬與URGFLEX措施分析(II) 59
11-核能電廠避雷器老劣化線上診斷及運轉狀態評估系統研製 64
【放射性物料安全科技】 81
01-研析SKB訂定地震危害之關鍵性裂面尺寸邏輯 83
02-高放射性廢棄物處置場緩衝材料劣化之研究 85
03-放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧 90
04-三維放射性核種衰變鏈遷移快速預測工具發展與劑量風險評估 95
05-組建超國界後端服務保證管理機制之研析-以IAEA核燃料銀行模式為基點之多邊後端管理情境分析 99
06-用過核子燃料最終處置緩衝材料乾濕過程下熱力-水力(TH)特性評估 115
07-氧化還原敏感性核種的物種分析技術研究 122
08-乾式貯存系統監測檢驗技術研究 129
09-碘物種及硒物種於花崗岩與膨潤土之吸附與擴散行為研究 134
10-氧化還原敏感性核種遷移參數實驗之精進及遲滯機制分析 140
【輻射防護與放射醫學科技I】 145
01-輻災受影響地區環境復原及民眾返鄉標準之實務研究之一 147
02-診斷用途之CBCT輻射醫療曝露品質保證作業項目研究 152
03-商品含放射性物質之輻射影響研究 155
04-因應ICRP的眼球水晶體劑量限制下修之職業輻射防護考量 158
05-組織等效比例計數器應用於混合輻射場之劑量特性研究 160
06-能階式放射影像感測器之讀出電路晶片設計與系統整合 166
07-台灣北投石產區背景輻射之研究 170
08-開發具有無線傳輸功能且具備環境修正輸入的劑量面積乘積儀原型機 174
09-核醫全身電腦斷層衰減校正之診斷參考劑量水平調查與建立 176
【輻射防護與放射醫學科技II】 179
01-研發PD-L1結合胜肽於肺癌標靶診療藥物之運用(II) 181
02-氟18 FEONM之合成與評估TAU蛋白新型造影劑之研究 186
03-以肺轉移小鼠模式研究錸-188微脂體合併免疫檢查點療法對腫瘤微環境之調控機制 188
04-發展放射性標記的表皮生長因子受體(EGFR)靶向之融合蛋白 194
05-使用碘-125射源進行攝護腺癌永久插種近接治療之輻防管制與劑量評估 196
06-Tau蛋白標靶造影劑氟-18-FEONM之阿茲海默基因鼠正子造影對tau蛋白病變之選擇性與專一性研究 197
07-I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用 199
08-研發結合含碘藥物IUdR與特定能量之X光照射在癌症治療之新技術 201
【人才培訓與風險溝通I】 205
01-護理類科大學生醫療輻射防護學習教材研發與活動推廣 207
02-應用擴增實境(AR)推廣多元族群輻射教育之研究 209
03-針對不同族群設計開發原子能科普教育學習課程 213
04-民眾緊急應變之虛擬實境體驗 218
05-龍華科技大學原子能學程與原子能人才培訓 220
06-原子能輻射防護影音多媒體內容製作與提升網路溝通行銷計畫 225
【人才培訓與風險溝通II】 229

01-利用虛擬實境增進人類與遠端機器人之互動以輔助輻射作業之應用 ..... 231
02-半導體元件輻射效應與抗輻射製程研究 ..... 238
03-鑑識情資於輻射監測數據之應用 ..... 242
04-應用於核電廠遠端視訊操控機器手臂開發及其推廣的競賽活動舉辦 ..... 252
【人才培訓與風險溝通III】 ..... 255
01-核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行 ..... 257
02-原子能監督規範中裁罰制度之實證研究分析 ..... 268
03-核電廠除役各階段公民參與模式及民意溝通之研究 ..... 275
04-跨國核電廠除役管理個案分析及利害關係人之研究 ..... 280
05-核能電廠緊急應變計畫區核安社區風險治理之研究 ..... 284

# 107 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會議程

時間：108 年 6 月 12 日（星期三）

地點：臺灣大學進修推廣學院 (台北市羅斯福路四段 107 號，捷運公館站 2 號出口左轉直行至基隆路口)

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 | 大門右側 |
| 10:20～12:00 | 分組成果發表(I) | 各領域場地 |
| 12:00～13:00 | 綜合討論(供應午餐) | |
| 13:00～14:20 | 分組成果發表(II) | 各領域場地 |
| 14:20～14:40 | 中場休息 | |
| 14:40～15:30 | 分組成果發表(II) | 各領域場地 |
| 15:30～15:50 | 優良計畫頒獎(各場次主持人) | 各領域場地 |

各領域場地

| 領域 | 場地 地點 | 時間 |
|---|---|---|
| 1.核能安全科技 | 105 教室 | 10:20~16:00 |
| 2.放射性物料安全科技 | 201 教室 | 10:20~16:00 |
| 3.輻射防護與放射醫學科技(I) | 202 教室 | 10:20~16:00 |
| 4.輻射防護與放射醫學科技(II) | 203 教室 | 10:20~16:00 |
| 5.人才培訓與風險溝通(I) | 207 教室 | 10:20~16:00 |
| 6.人才培訓與風險溝通(II) **(上午)** | 206 教室 | 10:20~12:00 |
| 7.人才培訓與風險溝通(III) **(下午)** | 206 教室 | 13:00~16:00 |

# 107 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：105 教室 | | | | | |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計畫主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| 分組發表 I | 10:20~10:40 | 李綺思*、陳建源、吳文方、廖俐毅、郭榮卿 | 宋大崙 | 龍華科技大學化工與材料工程系 | 除役中核能電廠之核子保安管制要求與國際實施現況研究 |
| | 10:40~11:00 | | 許聿廷 | 國立臺灣大學土木工程學系暨研究所 | 大規模路網疏散時間估算與疏散路線規劃之研究 |
| | 11:00~11:20 | | 汪毓瑋 | 中央警察大學國境警察學系 | 各國核子保安機敏資料資訊公開之規定與實務之研究 |
| | 11:20~11:40 | | 陳金順 | 國立清華大學工程與系統科學系 | 核能電廠低中壓電纜老化檢測與評估研究 |
| | 11:40~12:00 | | 許榮鈞 | 國立清華大學核子工程與科學研究所 | 大範圍深穿透輻射遷移計算的技術與應用研發 |
| | 12:00~13:00 | | **綜合討論(午餐供應便當)** | | |
| 分組發表 II | 13:00~13:20 | | 王美雅 | 國立清華大學原子科學技術發展中心 | 壓水式反應器一次側系統水化學最適化研究 |
| | 13:20~13:40 | | 許清閔 | 國立虎尾科技大學機械設計工程系 | 利用流固耦合以二相流分析方法探討蒸汽產生器之熱交換管的暫態應力特性 |
| | 13:40~14:00 | | 林唯耕 | 國立清華大學工程與系統科學系 | 核三廠 SBO 下之自然對流模擬分析 |
| | 14:00~14:20 | | 葉宗洸 | 國立清華大學工程與系統科學系 | 壓水式反應器二次側結構組件腐蝕劣化防制研究 |
| | 14:20~14:40 | | **中場休息** | | |
| | 14:40~15:00 | | 陳紹文 | 國立清華大學核子工程與科學研究所 | 壓水式核能電廠之 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 事故模擬與 URG/FLEX 措施分析(II) |
| | 15:00~15:20 | | 郭政謙 | 國立臺灣科技大學電機工程系 | 核能電廠避雷器老劣化線上診斷及運轉狀態評估系統研製 |
| | 15:20~15:50 | | **綜 合 討 論** | | |

***為該場會議主持人**

# 107 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：201 教室 | | | | | |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計畫主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| 分組發表 I | 10:20~10:40 | 陳文泉*、黃慶村、謝榮春、邱太銘、魏聰揚 | 楊長義 | 淡江大學土木工程學系 | 研析 SKB 訂定地震危害之關鍵性裂面尺寸邏輯 |
| | 10:40~11:00 | | 林文勝 | 國立臺灣大學水工試驗所 | 高放射性廢棄物處置場緩衝材料劣化之研究 |
| | 11:00~11:20 | | 李錫堤 | 國立中央大學應用地質研究所 | 放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧 |
| | 11:20~11:40 | | 陳瑞昇 | 國立中央大學應用地質研究所 | 三維放射性核種衰變鏈遷移快速預測工具發展與劑量風險評估 |
| | 11:40~13:00 | | **綜合討論(午餐供應便當)** | | |
| 分組發表 II | 13:00~13:20 | | 曾雅真 | 南臺學校財團法人南臺科技大學國際企業系暨研究所 | 組建超國界後端服務保證管理機制之研析-以 IAEA 核燃料銀行模式為基點之多邊後端管理情境分析 |
| | 13:20~13:40 | | 楊樹榮 | 國立屏東科技大學土木工程系 | 用過核子燃料最終處置緩衝材料乾濕過程下熱力-水力(TH)特性評估 |
| | 13:40~14:00 | | 鄭文熙 | 輔英科技大學職業安全衛生系 | 氧化還原敏感性核種的物種分析技術研究 |
| | 14:00~14:20 | | 張惠雲 | 國立高雄大學土木與環境工程學系 | 乾式貯存系統監測檢驗技術研究 |
| | 14:20~14:40 | | **中場休息** | | |
| | 14:40~15:00 | | 李傳斌 | 國立成功大學地球科學系（所） | 碘物種及硒物種於花崗岩與膨潤土之吸附與擴散行為研究 |
| | 15:00~15:20 | | 蔡世欽 | 國立清華大學原子科學技術發展中心 | 氧化還原敏感性核種遷移參數實驗之精進及遲滯機制分析 |
| | 15:20~15:50 | | **綜 合 討 論** | | |

***為該場會議主持人**

# 107 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：202 教室 | | | | | |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計 畫 主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| 分組發表 I | 10:20~10:40 | 高熙玫*、邱志宏、林善文、陳健懿、李境和 | 董傳中 | 長庚大學放射醫學研究院 | 輻災受影響地區環境復原及民眾返鄉標準之實務研究之一 |
| | 10:40~11:00 | | 詹美齡 | 長庚大學放射醫學研究院 | 診斷用途之 CBCT（cone-beam CT）輻射醫療曝露品質保證作業項目研究 |
| | 11:00~11:20 | | 吳杰 | 國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系 | 商品含放射性物質之輻射影響研究 |
| | 11:20~11:40 | | 蔡惠予 | 國立清華大學核子工程與科學研究所 | 因應 ICRP 的眼球水晶體劑量限制下修之職業輻射防護考量 |
| | 11:40~12:00 | | 許芳裕 | 國立清華大學原子科學技術發展中心 | 組織等效比例計數器應用於混合輻射場之劑量特性研究 |
| | 12:00~13:00 | | 綜合討論(午餐供應便當) | | |
| 分組發表 II | 13:00~13:20 | | 盧志文 | 國立清華大學工程與系統科學系 | 能階式放射影像感測器之讀出電路晶片設計與系統整合 |
| | 13:20~13:40 | | 林群智 | 南華大學自然生物科技學系 | 台灣北投石產區背景輻射之研究 |
| | 13:40~14:00 | | 謝奇文 | 國立嘉義大學電機工程學系 | 開發具有無線傳輸功能且具備環境修正輸入的劑量面積乘積儀原型機 |
| | 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 | 核醫全身電腦斷層衰減校正之診斷參考劑量水平調查與建立 |
| | 14:20~14:40 | | 中場休息 | | |
| | 14:40~15:10 | | 綜 合 討 論 | | |

***為該場會議主持人**

# 107 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：203 教室 | | | | | ) |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計畫主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| 分組發表 I | 10:20~10:40 | 王世楨*、魏孝萍、林昆儒、忻凌偉、江啟勳 | 吳漢忠 | 中央研究院細胞與個體生物學研究所 | 研發 PD-L1 結合胜肽於肺癌標靶診療藥物之運用(II) |
| | 10:40~11:00 | | 馬國興 | 國防醫學院生物及解剖學研究所 | 氟-18 FEONM 之合成與評估-TAU 蛋白新型造影劑之研究 |
| | 11:00~11:20 | | 陳裕仁 | 台灣基督長老教會馬偕醫療財團法人馬偕紀念醫院放射腫瘤科 | 以肺轉移小鼠模式研究銖-188 微脂體合併免疫檢查點療法對腫瘤微環境之調控機制 |
| | 11:20~11:40 | | 藍耿立 | 國立陽明大學傳統醫藥研究所 | 發展放射性標記的胞嘧啶脫氨酶與表皮生長因子融合蛋白(Fcy-EGF)以治療表皮生長因子受體(EGFR)表達的癌症 |
| | 11:40~13:00 | | **綜合討論(午餐供應便當)** | | |
| 分組發表 II | 13:00~13:20 | | 許世明 | 國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系 | 使用碘-125 射源進行攝護腺癌永久插種近接治療之輻防管制與劑量評估 |
| | 13:20~13:40 | | 劉仁賢 | 國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系 | Tau 蛋白標靶造影劑氟-18-FEONM 之阿茲海默基因鼠正子造影對 tau 蛋白病變之選擇性與專一性研究 |
| | 13:40~14:00 | | 邱百誼 | 秀傳醫療社團法人秀傳紀念醫院神經科 | I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用 |
| | 14:00~14:20 | | 柯建志 | 國立陽明大學生醫影像研究中心 | 研發結合含碘藥物 IUdR 與特定能量之 X 光照射在癌症治療之新技術 |
| | 14:20~14:40 | | **中場休息** | | |
| | 14:40~15:10 | | **綜 合 討 論** | | |

***為該場會議主持人**

# 107 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 I | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 會場地點：207 教室 | | | | | |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計畫主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| 分組發表 I | 10:20~10:40 | 王重德*、尹學禮、楊遵榮、張自立 | 潘愷 | 國立臺北護理健康大學嬰幼兒保育系（所） | 護理類科大學生醫療輻射防護學習教材研發與活動推廣 |
| | 10:40~11:00 | | 古建國 | 臺北市立大學應用物理暨化學系 | 應用擴增實境(AR)推廣多元族群輻射教育之研究 |
| | 11:00~11:20 | | 劉鴻鳴 | 國立清華大學原子科學技術發展中心 | 針對不同族群設計開發原子能科普教育學習課程 |
| | 11:20~11:40 | | 陳彥均 | 龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系 | 民眾緊急應變之虛擬實境體驗 |
| | 11:40~13:00 | | **綜合討論(午餐供應便當)** | | |
| 分組發表 II | 13:00~13:20 | | 宋大崙 | 龍華科技大學化工與材料工程系 | 龍華科技大學原子能學程與原子能人才培訓 |
| | 13:20~13:40 | | 單文婷 | 國立臺灣藝術大學廣播電視學系（所） | 原子能輻射防護影音多媒體內容製作與提升網路溝通行銷計畫 |
| | 13:40~14:00 | | **中場休息** | | |
| | 14:00~14:30 | | **綜 合 討 論** | | |

***為該場會議主持人**

# 107 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

| 場 地 6（上午）：人才培訓與風險溝通 II | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 會場地點：206 教室 | | | | | |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計畫主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| 分組發表 | 10:20~10:40 | 陳志平*、洪明崎、張永華、魏榮宗 | 陳湘鳳 | 國立臺灣大學機械工程學系暨研究所 | 利用虛擬實境增進人類與遠端機器人之互動以輔助輻射作業之應用 |
| | 10:40~11:00 | | 張廖貴術 | 國立清華大學工程與系統科學系 | 半導體元件輻射效應與抗輻射製程研究 |
| | 11:00~11:20 | | 陳用佛 | 中央警察大學鑑識科學系 | 鑑識情資於輻射監測數據之應用 |
| | 11:20~11:40 | | 杜國洋 | 國立高雄第一科技大學電機工程研究所 | 應用於核電廠遠端視訊操控機器手臂開發及其推廣的競賽活動舉辦 |
| | 11:40~12:00 | | 綜 合 討 論 | | |
| | 12:00~13:00 | | 午餐 (供應便當) | | |

*為該場會議主持人

# 107 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

| 場 地 6（下午）：人才培訓與風險溝通 III | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 會場地點：206 教室 | | | | | |
| 場次 | 時間 | 評審委員 | 計 畫 主持人 | 執行機關 | 計畫名稱 |
| | 12:00~13:00 | | 午餐 (供應便當) | | |
| 分組發表 | 13:00~13:20 | 陳志平*、洪明崎、王居卿、鄭武昆 | 黃東益 | 國立政治大學公共行政學系 | 核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行 |
| | 13:20~13:40 | | 程明修 | 東吳大學法律學系（所） | 原子能監督管理規範中裁罰制度之實證分析研究 |
| | 13:40~14:00 | | 梁世武 | 世新大學公共關係暨廣告學系 | 核電廠除役各階段公民參與模式及民意溝通之研究 |
| | 14:00~14:20 | | 張四明 | 國立臺北大學公共行政暨政策學系 | 跨國核電廠除役管理個案分析及利害關係人之研究 |
| | 14:20~14:40 | | 中場休息 | | |
| | 14:40~15:00 | | 楊永年 | 國立成功大學政治學系 | 核能電廠緊急應變計畫區核安社區風險治理之研究 |
| | 15:00~15:30 | | 綜 合 討 論 | | |

***為該場會議主持人**

# 核能安全科技

# 除役中核能電廠之核子保安管制要求與國際實施現況研究
# The regulation requirement and international practice for nuclear plant security during decommissioning

計畫編號：MOST　107-NU-E-262-003-NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：宋大崙
共同主持人：周源卿
e-mail：tlsung@mail.lhu.edu.tw
計畫參與人員：林瑋格 曹瑋倫
執行單位：龍華科技大學化工與材料工程系(所)

## 摘要
除役階段，核能電廠如果永久停止運轉，則關注的對象就是用過核子燃料，因此保護的對象將會是維持燃料安全的冷卻及貯存設備。核一廠已經提出除役計畫給原能會並已公告，並面臨爐心燃料無法移至用過核子燃料池或是乾式貯存箱，針對上述情形，本文將由各國相關的核子保安法規，討論台灣在除役階段可能面臨的核子保安問題及目前各國的做法，分析在除役階段之核子保安計畫、保安武力、崗哨部署、緊要範圍縮減、適職方案、及保安人員訓練的差異。

關鍵詞：核能電廠、除役、核子保安、法規

## Abstract
In the decommissioning phase, if the nuclear power plant is permanently shut down, nuclear spent fuel becomes the main safety issues, so the cooling and storage equipments to maintain spent fuel safety will be the mainly important protection objects. The Taiwan Chinshan Nuclear Power Plant has proposed a decommissioning plan to the Atomic Energy Council but has announced that it is unable to move fuel in core to the used fuel pool or dry storage tank. In view of the above situation, this article will discuss the relevant nuclear security regulations of various countries. The issues include nuclear security plans, security forces, sentry deployments, vital area reductions, fitness-for-duty programs, and security personnel training during the decommissioning phase.

Keywords: Nuclear Power Plant, Decommission, Nuclear Security, Regulation

## I. 前言
核一廠之除役作業規劃[1]，將採取拆除之方式進行，並於取得主管機關核發之除役許可後 25 年內完成除役。拆除或移出之放射性污染設備、結構或物質，將貯存於主管機關核准之放射性廢棄物貯存設施。在除役過程長達 25 年，在廠址內會有各種設施的改變，尤其放射性污染設備、結構或物質拆除或移出及貯存，均涉及人員與環境之安全。除了核能安全的管制外，對於核子保安也是必須的。

除役階段與運轉中的反應器，其不同點是如果將燃料移出反應器，則運轉中反應器的許多核子事故將不會發生，因此依照核子事故所伴隨的核子保安措施將可以縮小。因此各國定義除役階段為核燃料移出反應器或是移至乾式貯存，而在兩者過渡期間則以原有之核子保安規定,但是允許在不影響核子保安效能下,提出豁免。依照美國的規劃[2]，其階段分 4 個 LEVEL；(1)依據 10 CFR 50.82/52.110 之除役立案階段(Docketing of §50.82/ §52.110 Certifications） (2)永久停機階段（Permanent Cessation of Operations+ 10 Months (BWR) or 16 Months (PWR)）需將燃料移出反應器。(3) 所有用過核子燃料皆已進入獨立之用過核子燃料貯存設施（All Fuel in ISFSI，Independent Spent Fuel Storage Installation）(4) 所有用過核子燃料貯存至中期或最終用過核子燃料貯存設施（All Fuel Offsite），而核子保安在 Level 1 時將可以變更核子保安計畫無須先取得許可（Can make certain physical security plan changes without prior approval），而 Level 3 時將法規依據由 73.55 變更 73.51 也就是由反應器的規定變更為用過核子燃料貯存的規定(Can transition from §73.55 to §73.51 requirements)。目前核一廠無法將燃料運送至乾式儲存或用過核子燃料池，因此，狀態與各國不同，所以無法完全比照其他國家。

核能電廠運轉期間到永久停止運轉後，核子保安之關注的物質由爐心燃料轉變為用過核子燃料；因此除役階段保護的對象改變為：用過核子燃料及維持用過核子燃料於安全冷卻狀態的相關設備。針對保安建構的基礎及除役階段核子保安保護對象改變的議題，本文將參考目前國際除役核子保安的相關資訊(核子保安的資料多為保密取得困難，僅以網路可取得之公開資訊為主)，針對除役階段核子保安計畫、保安武力、崗哨部署、緊要範圍縮減、適職方案、及保安人員訓練項目來討論各國除役階段核子保安法規差異比較分析。

## II. 執行方法
國際間對於除役電廠的實施有許多規範，本計畫依據 IAEA、OECD/NEA、NRC、德國、STUK 及台灣的除役核能電廠子保安相關資料，其資料列表如[1-22]。針對除役的核能電廠核子保安法規及實施的現況，對於保安計畫、保安武力及適職方案等，作一討論比較。

## III. 結果與討論
除役過程一般可分為兩部分:首先是將用過核子燃料貯存等待除役(移出反應器)；第二是實際拆除及將用

過核子燃料運送至最終處置場，將場地回復至原先之狀況。

對於除役中之核能電廠，除役第一階段仍有核物料或相關維持冷卻設備在廠內，為防範遭受破壞、盜取及非法搬移、使用，需依照電廠的保安措施進行。進到除役的第二階段，則是成為施工的場地，主要是移除系統及組件、清洗去污等工作。除役的活動開始，將會增加許多切割、鑽孔及分離大型組件的工作，此時獨立的工作空間必須有輻射防護的需求，因此新的空間必須規劃，而且新的保安管制措施也要建立。

依照此原則，除役階段之核子保安計畫、保安武力、崗哨部署、緊要範圍縮減、適職方案、及保安人員訓練詳述如下:

3.1 保安計畫

美國是以目前 10CFR73 法規的規定原則上依據運轉階段的核子保安計畫執行，直到用過核燃料全部移置乾式貯存設施為止。但持照者可依據 10 CFR 73.54(1)和(2)款的規定提出保安計畫部分條文的豁免申請，或可依據 10 CFR 50.90 法規申請執照條件的變更申請。法規具體列舉保安計畫的要件和內容規定。IAEA 則依據其核設施壽命期之保安執行導則草案[8](IAEA 核子保安序列編號 NST051,草案,Dec.2016)內容(第 26 頁)『第 8 階段:除役階段』第 3.30 節(除役階段行動)，管制機構應審查持照者除役階段的保安組織、保安計畫、保安應變計畫等。台灣法規主要在「核子事故緊急應變法施行細則」，第 11 條提到演習內容包括核子保安及防恐。「核子反應器設施除役計畫審查導則」提到第十四項保安措施，範圍包括(i)門禁管制、(ii)人員管制、(iii)物品管制及(iv)記錄保存等。僅要求需涵蓋範圍，並未提及所需之內容要求。核一廠除役計畫，第十四章為核子保安計畫，因保密無相關內容。而運轉中反應器的核子保安計畫，應該包含保安工作的組織管理訓練等、保安區域的規畫、實體阻隔物、入侵偵測及警報監視系統;保安通訊設施及協調軍事、警察機關支援事項;門禁管制與進出人員查核措施；警位部署與應用、保安事件應變及防範內部破壞措施及保安系統整體效能評估等。

3.2 保安武力

美國由 10CFR73.55(k)(ⅱ)款明定武裝反應人員任何時間均應維持至少 10 人。因此以每天維持三值及另一值人員休息，估計最少應有 40 人。芬蘭之法規要求每天維持三值、24 小時的保安武力，且其人力編組應足以同時應付一個以上的保安危害(Hazard)，諸如火災(縱火)和人為破壞，但未具體規定最低人數。另明文規定臨時保安警力不應計入保安武力。IAEA 資料只規定確保實體防護的效力。

3.3 崗哨部署

美國:依據 10CFR73.55(a)保安計畫允許透過整合系統、技術、計畫、設備、支援程序和實施程序來提供縱深防禦，以確保實體防護計畫的有效性。因此允許採用先進自動化和數位化入侵偵測系統及門禁管制系統，以降低所需保安勤務人員數量至最精簡。芬蘭只有原則性規定，例如『保安效能不能因任何的單一保安系統、結構和組件的故障而發生重大降低。保安的執行成效也不能因任何的共因失效或緊急事件而重大降低，諸如喪失電力或火災』。

3.4 緊要區範圍減縮

美國的實體防護計畫適用範圍劃分為控制區、保護區和緊要區。而緊要區係以決定性方式(Deterministic Approach)評估結果劃定，法規允許在除役階段因風險降低而可以個案方式提出向核管會申請緊要區範圍減縮變更。德國面臨的一個挑戰是，『運轉許可所要求的保安措施必須持續維持，直到獲得除役許可與用過核子燃料從現廠內移出為止』。即便是在用過核燃料被移出後可能不需要這些安全措施，仍然要求核電廠業者在這幾年需對除役廠區的保安措施需進行精進計畫。分析與安全有關的系統並設立一個較小的緊要區，會有助於確認哪些改進措施需要繼續維持它被要求的保安等級。例如，當燃料棒從反應器移出並進入用過核子燃料池後，如不再需要主蒸汽隔離閥和主蒸汽安全閥，閥室可能不再是緊要區的一部分。芬蘭之實體防護計畫適用範圍劃分為限制區、廠區、保護區和緊要區。依據法規可利用送核保安計畫時提出緊要區範圍減縮變更申請。

3.5 適職方案

美國 10CFR26 法規要求的人員適職方案(Fitness For Duty, FFD)和 IMP(Insider Mitigation Program, IMP)均適用於除役階段。但法源的關聯性持照者均不太容易理解。但核管會於 2004 年 8 月 18 日對所有核子設施持照者所發布之特別管制命令 EA-03-099『有關門禁授權、適職方案和行為觀察執行特別保安措施』及 2009 年 3 月所頒布法規導則 RG5.77 提供 IMP 執行導則，雖然有部分持照者提出豁免要求但經過審查均自行撤案，改為遵照法規要求辦理。根據核管會於 2017 年 2 月 22 日所公布的除役反應器保安監管視察報告(Audit of Oversight of Security at Decommissioning Reactors,OIG-17-09) 視察摘要結論包括下列兩項：A.核管會的管制法規缺乏明確要求除役反應器持照者必須執行 FDD 的規定。B.核管會的管制法規缺乏明確要求除役反應器持照者必須執行疲勞管理方案的規定。芬蘭之保安人員服勤前應執行酒精測試及其他違禁毒品量測。對設施內人員執行隨機查核，包括攜帶物品。

3.6 保安人員訓練

美國在 10CFR73 法規附錄 B『保安人員通用標準』內對保安人員之訓練和資格有具體明確規定。芬蘭之保安人員訓練和資格應符合核設施核子保安法第 7 條相關規定。IAEA:在其技術導則第 12 號文件『核子保安教育』有具體的規劃內容。

## IV. 結論

依照國際除役階段，當爐心還有用過核子燃料時，適用運轉階段核子保安計畫。但是核子燃料從反應器移出並進入用過核子燃料池(SFP)後，將不再需要主蒸汽隔離閥和主蒸汽安全閥，閥室可能不再是緊要區的一部分，因此緊要區可檢討修改。

除污和拆除(D＆D)期間的核子安全、保安更改：於

可行的情況下，當從反應器中取出燃料和放射性廢棄物時，也從廠區設施取出主要放射源和安全風險，並降低廠區的風險。雖然除污和拆解過程中所殘留較小劑量的放射性物質對工作人員，公眾和環境仍具有相當的風險，必須要重新考量，但廠區風險降低之後可以較低層級的保安措施為之。依照上述，除役可能變更的項目為：(1)緊要區範圍 (2)保安標的物(3)保安武力部署 (4) 實體屏障位置和數量。

從核子保安角度來看，另一個重要的階段是當用過核子燃料從廠區完全移出，到用過核子燃料貯存或最終處置場時。當用過核子燃料完全移至乾式貯存設施，反應器廠房即非屬緊要區，可拆除。其保安管制考量為乾貯設施，應依用過核子燃料貯存設施的保安規定，本論文並未加以探討。

## 參考文獻


[1] 台電公司，核一廠除役計畫修訂版，2017

[2] NRC, Regulatory Improvements for Production and Utilization Facilities Transitioning to Decommissioning, RIN 3150-AJ59, 2018

[3] NRC, Consolidated Decommissioning Guidance (NUREG-1757, Rev2), 2006.

[4] NRC, Standard Review Plan for Evaluating Nuclear Power Reactor License Termination Plans (NUREG-1700, Rev. 1), 2018.

[5] IAEA, Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors, EA Safety Standards Series No. WS-G-2.1, 1999.

[6] IAEA, Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities (INFCIRC/225/Revision 5) (核物料與核設施實體防護建議) IAEA Nuclear Security Series No. 13, 2011.

[7] NRC, 10 CFR Part 73 Physical Protection of Plants and Materials, 2009.

[8] IAEA, Security during the lifetime of a Nuclear Facility, IAEA Nuclear Security Series No. XX, Draft, 2016

[9] NEA/OECD, The Regulatory Challenges of Decommissioning Nuclear Reactors, 2003.

[10] NRC, 10CFR 50.82 Termination of license, 2018.

[11] NRC, (ISG) NSIR/DSP-ISG-03, “Review of Security Exemptions/License Amendment Requests for Decommissioning Nuclear Power Plants,” (ML15106A737) 2015.

[12] NRC, 10CFR 50.34 Contents of applications; technical information 2018.

[13] NRC, 10CFR 50.54 Conditions of licenses, 2018.

[14] NRC, 10CFR 50.90 Application for amendment of license, construction permit, or early site permit, 2018.

[15] NEI, Guidance on Submitting Security Plan Changes, NEI 11-08 [Revision 0] 2012

[16] NRC, Appendix to Power Reactor Transition From Operations to Decommissioning Lessons Learned Report. ML16302A022, 2016.

[17] NRC, 10CFR 26 Fitness for Duty Programs, 2011.

[18] NEI, Template for the Security Plan, Training and Qualification Plan, Safeguards Contingency Plan, NEI, 03-12, 2009.

[19] NEI, Managing Personnel Fatigue at Decommissioning Reactors, NEI 15-08 [Revision 0] 2015.

[20] NRC, Audit of NRC's Oversight of Security at Decommissioning Reactors, OIG-17-A-09, 2017

[21] Renner A, Esch M. Plant Security During Decommissioning; Challenges and Lessons Learned From German Phase Out Decision. From: ASME 2013 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Volume 2: Facility Decontamination and Decommissioning; Environmental Remediation; Environmental Management/Public Involvement/Crosscutting Issues/Global Partnering Brussels, Belgium, September 8–12, 2013.

[22] STUK, Security of Nuclear Facility , GUIDE YVL A.11 / 15 November 2013

# 大規模路網疏散時間估算與疏散路線規劃之研究
# Evacuation Planning and Clearance Time Estimation for a Large-Scale Network

計畫編號：107-NU -E-002 -002 -NU
計畫主持人：許聿廷
e-mail：yutinghsu@ntu.edu.tw
執行單位：國立臺灣大學土木工程系

## 摘要

精簡報告範例路網清空時間定義為疏散作業下將路網相應區域內一般民眾全數撤離所需時間；也可以解釋為最後一位人/車離開路網撤離至安全地區的時間點。當災難發生時，短時間內將有大量的疏散需求於路網中產生。在大規模路網的疏散問題中，由於牽涉較複雜的道路連結、容量配置和其中的車流互動，當前文獻對於路網清空時間多透過模擬方法對特定疏散作業/策略下之情境進行估算。本研究亦將使用中觀車流模式進行模擬，以兼顧運算效率與對車流的精確描述。

為實際分析不同因素對於大規模路網疏散問題的影響，本研究以核能電廠周遭道路路網為標的進行疏散模擬情境分析，透過設定不同路網結構（不同核能電廠）、不同車輛分配情境（不同私有運具與大客車之比例）與不同疏散策略（階段性疏散之有無），透過車流模擬軟體 DynaTAIWAN 使用中觀車流模式進行模擬。由模擬結果進行分析，顯示使用較多比例之大客車進行疏散作業將降低路網清空時間，階段性疏散之成效則隨路網結構而異，而部分瓶頸點可因階段性疏散而獲得紓解。

關鍵詞：路網疏散問題、清空時間、階段性疏散、中觀車流模擬。

## Abstract

Network clearance time is the time required to clear a network under an evacuation operation; it can be interpreted as the time for the last person/vehicle to leave the network and arrive at the place of safety as well. When a disaster occurs, an overwhelming amount of evacuation demand will be generated in the road network in a short time. Due to the complex connectivity structure and traffic flow interaction involved in a large-scale network, in current literature, network clearance time is primarily estimated by using simulation-based approaches. This study will also perform the simulation using the mesoscopic traffic flow model in order to balance the computational efficiency and accurate description of the traffic flow.

In order to analyze the impact of different factors on the large-scale road network evacuation problem, this study uses the road network around the nuclear power plant as the target for evacuation simulation scenario analysis. By setting different road network structures (around different nuclear power plants), different vehicle allocation scenarios (with different ratio of private transport to large passenger car) and different evacuation strategies (with or without phased evacuation), this study implement the simulation using the mesoscopic traffic simulation by the traffic simulation software DynaTAIWAN. The result shows that the use of a large proportion of buses for evacuation can reduce the network clearance time. Moreover, the effect of phased evacuation varies with the structure of the road network, and some bottlenecks can be solved due to phased evacuation.

Keywords: network evacuation problem, clearance time, phased evacuation, mesoscopic traffic simulation.

## I. 前言

在災難應變計畫中，疏散作業是對於民眾防護最主要的措施之一；其目的在於將受到災難影響或威脅 (disaster-affected or -threatened) 的民眾轉移、安置至安全的地點，以避免或降低災難對民眾生命安全的影響。在各類災難管理問題中，核能電廠的安全一直是受到社會高度重視的議題，甚至是為整體國家安全和能源政策的重要一環；對於其營運所涉及的風險和核子事故的因應處理，包含臺灣在內世界各國的核能電廠皆有制定相關的緊急應變規劃，而廠區內外的疏散作業亦是主要的民眾防護措施之一。各國針對核能電廠的緊急應變計畫中，皆劃設有「緊急應變計畫區 (Emergency Planning Zone, EPZ)」，通常為核能電廠周邊一特定範圍，一旦核能電廠發生核子事故，會特別針對該區域採行民眾防護措施，以減緩核子事故對電廠周邊民眾之影響。

路網疏散問題可視為交通指派 (traffic assignment) 問題中的一種特殊狀況，其問題的主要困難點在於短時間之內大量湧現的疏散需求 (demand surge) 可能遠超過既有路網容量的負荷，若不經由有效的交通管理策略以對車流進行管制或疏導，很可能在路網中發生嚴重的壅塞狀況，不但會大幅增加疏散時間，亦可能使疏散的民眾曝露於更大的輻射影響風險。因此，如何針對大規模路網的疏散作業進行系統化的分析、釐清疏散車流之間的複雜互動、檢視路網中容量的瓶頸點並更明確地於問題中納入核子事故的影響風險，將可更行提升緊急應變的效能和強健性 (robustness)，並可作為核能電廠整體安全評估的重要參考依據之一。

## II. 主要內容

本計畫探討影響核能電廠緊急應變計畫區內大規模疏散之因素，並以民眾疏散時所使用之運具分配，與於緊急應變計畫區內實施階段性疏散等兩面向進行探討。研究以核能一、二、三廠周邊路網為模擬對象，收集各核能電廠半徑八公里內範圍涵蓋村里之人口、私有運具分布。為了解不同因素造成之影響，本計畫以路網清空時間為指標評估大規模疏散之效果，設計兩向度之情境：車輛分配情境與階段性疏散情境。為測試使用私有運具為主與使用大客車為主之差異，本計畫設計三個

車輛分配情境，分別為包含機車情境、排除機車情境與純大客車情境。為分析階段性疏散對於不同路網結構之效果，本計畫將緊急應變計畫區依照與核能電廠之距離劃分為半徑三公里內與三至八公里範圍等兩疏散階段，並以疏散起始時間差為不同情境。

## III. 結果與討論

本計畫案整合前述之車輛分配情境與階段性疏散情境，並將各情境組合之計算結果繪製為圖表，分別呈現路網清空時間與每輛汽車、機車於路網中之平均旅行、停等時間。再由結果可以觀察全面使用大客車進行疏散將能顯著降低路網清空時間，而階段性疏散確如相關文獻所載，各路網之間並未有一致之變化趨勢，深入觀察造成差異的原因則與各路網於大規模疏散時出現之瓶頸點有關。

(1) 各核能電廠結果呈現

核能一、二、三廠之大規模疏散模擬結果顯示若兩階段疏散之疏散起始時間差大於僅疏散核能電廠半徑三公里範圍內村里之路網清空時間，則由於第一階段疏散之居民於第二階段疏散之居民出發前已離開緊急應變計畫區，因此路網清空時間由此線性上升。而當疏散起始時間差小於僅疏散半徑三公里內涵蓋村里之路網清空時間，第一階段與第二階段於路網內將交互影響，因此產生平均旅行時間不同 (即每輛車平均於路網內壅塞時間不同) ，但以整體路網觀之的路網清空時間卻沒有明顯變化 (核能一、二廠)，或甚至是下降 (核能三廠)。

(2) 大客車疏散之效益

實行大規模疏散時，對於民眾而言，選擇私有運具(例如日常使用之自有小客車與機車) 除較為方便出發外，更能藉此攜帶部分個人物品。但若是疏散區域內之居民皆優先選擇各自的私有運具，大量進入道路路網之車輛將會造成部分關鍵區域之壅塞，而成為影響大規模疏散效果的瓶頸點。純大客車情境假想居民完全使用大客車進行疏散之極端情境，由於進入路網之車輛數大幅較另外兩車輛分配情境少，因此對應之路網清空時間亦大幅降低。雖然在執行大規模疏散時，完全使用大客車進行疏散並不切實際，但由測試結果可知，適量提高大客車於大規模疏散中運具之比例可降低路網清空時間，使疏散區域內所有居民更快離開緊急應變計畫區。

(3) 階段性疏散於各核能電廠之差異

階段性疏散所帶來的效益最直觀而言便是降低大規模疏散時，道路路網中的壅塞情形。若以本計畫設計之階段性疏散情境為例，第二階段疏散區域之車輛的延後出發可以使第一階段疏散區域之車輛遭遇較少壅塞而較快離開緊急應變計畫區。因此，如同前述之模擬結果，階段性疏散造成的共通效果在不同核能電廠、不同車輛分配情境下，皆為降低平均車輛旅行時間。但是，其結果反應在路網清空時間上時，便因為各核能電廠周邊道路路網性質的不同而呈現不同的變化趨勢。

由於路網清空時間是受到最後一個車輛離開緊急應變計畫區控制，因此大規模疏散時，最後一個車輛受到壅塞之影響將會反映在路網清空時間。因為階段性疏散所減緩的是疏散區域內部與外部的車輛通過同一部份路網，但該區域的道路容量不足所造成的壅塞，若影響路網清空時間之主要因素為部分道路容量不足，階段性疏散則能降低路網清空時間。若影響路網清空時間之因素主要為路網中部分區域因路網結構因素而形成瓶頸點，在疏散期間皆維持壅塞之狀態，即便透過階段性疏散之手段降低通過瓶頸點的車流量，也未能減緩該處的壅塞，是以該瓶頸點所產生之壅塞控制路網清空時間之長短，此時改變疏散起始時間差也未能降低路網清空時間。

## IV. 結論

利用中觀車流模擬軟體 DynaTAIWAN 執行大規模疏散之車流模擬結果並進行分析，於其結果可發現以大客車為主的大規模疏散，由於進入道路路網之車輛數減少，而較優先使用私有運具之車輛分配情境大幅降低路網清空時間。階段性疏散情境之模擬結果則並未於各核能電廠產生一致的路網清空時間變化趨勢。雖然車輛平均旅行時間皆隨疏散起始時間差上升而下降，但路網清空時間的變化趨勢在各核能電廠則有所不同，其影響主要因素可能包含：部分道路容量不足或於路網中出現瓶頸點。階段性疏散之效果於路網清空時間受部分路網容量稍微不足控制的情況下，效果較為明顯。倘若於疏散時出現嚴重瓶頸點，則階段性疏散並無法改善路網清空時間，此時以其他人為介入手段，如調撥車道、號誌控制、導引分流等，或可改善、消除瓶頸點。

## 參考文獻


[1] *核能電廠緊急應變計畫區民眾疏散方案規劃與模擬分析*，臺灣電力股份有限公司，民國 106 年 12 月。

[2] *即時動態交通分析與預測模型* (*DynaTAIWAN*)*之實證分析與推廣*，交通部運輸研究所，民國 96 年 6 月。

[3] Abdelgawad, H., and Abdulhai B. (2010). Managing large-scale multimodal emergency evacuations. *Journal of Transportation Safety and Security*, 2(2), pp. 122–151.

[4] Bana e Costa, C. A., Oliveira, C. S., and Vieira, V. (2008). Prioritization of bridges and tunnels in earthquake risk mitigation using multicriteria decision analysis: application to Lisbon. *Omega*, 36(3):442–450

[5] Bertsekas, D. P. (2010). *Dynamic Programming and Optimal Control*. Second Edition. Belmont, Mass.: Athena Scientific.

[6] Chang, S. E. (2014). Infrastructure resilience to disasters. *The Bridge*, 44(3).

[7] Chen, X., and Zhan, F. B. (2008). Agent-based modelling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. *Journal of the Operational Research Society*, 59, pp. 25–33.

[8] Chien, S. I., and Korikanthimath, V. V. (2007). Analysis and modeling of simultaneous and staged emergency evacuations. *Journal of Transportation Engineering*, 133(3), pp. 190–197.

[9] Chiu, Y., and Mirchandani, P. B. (2008). Online behavior-robust feedback information routing strategy for mass evacuation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(2), pp. 264–274.

[10] Chiu, Y., Zheng, H., Villalobos, J. A., Peacock, W., and Henk, R. (2008). Evaluating regional contra-flow and phased evacuation strategies for texas using a large-scale dynamic traffic simulation and assignment approach. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 5(1).

[11] Chu, C. Y. (2009). A computer model for selecting facility evacuation design using cellular automata. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24 (8), pp. 608–622.

[12] Daganzo C. F. (1994). The cell transmission model: A simple dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B*, 28(4), pp. 269–287.

[13] Faturechi, R., and Miller-Hooks, E. (2014) Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: A comprehensive review. *Journal of infrastructure systems*, 21(1), p.04014025.

[14] Fu, H., and Wilmot, C. G. (2004). Sequential logit dynamic travel demand model for hurricane evacuation. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1882, pp. 19–26.

[15] Fu, H., and Wilmot, C. G. (2006). Survival analysis-based dynamic travel demand models for hurricane evacuation. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1964, pp. 211–218.

[16] Hasan, S., and Ukkusuri, S. V. (2011). A contagion model for understanding the propagation of hurricane warning information. *Transportation Research Part B*, 45(10), pp. 1590–1605.

[17] Hobeika, A. G., and Kim, C. (1998). Comparison of traffic assignments in evacuation modeling. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 45(2), pp. 192–198.

[18] Hsu, Y. T., and Peeta, S. (2013). An aggregate approach to model evacuee behavior for no-notice evacuation operations. *Transportation*, 40(3), 671–696.

[19] Hsu, Y. T., and Peeta, S. (2014a). Behavior-consistent information-based network traffic control for evacuation operations. *Transportation Research Part C*, 48, 339–359.

[20] Hsu, Y. T., and Peeta, S. (2014b). Risk-based spatial zone determination problem for stage-based evacuation operations. *Transportation Research Part C*, 41, 73–89.

[21] Hu, T. Y., Tong, C. C., Liao, T. Y., and Ho, W. M. (2012). Simulation-assignment-based travel time prediction model for traffic corridors. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3), 1277–1286.

[22] Jarvis, J. J., and Ratliff, H. D. (1982). Note — some equivalent objectives for dynamic network flow problems. *Management Science*, 28(1), 106–109.

[23] Kalafatas, G., and Peeta, S. (2009). Planning for evacuation: Insights from an efficient network design model. *Journal of Infrastructure Systems*, 15(1), pp. 21–30.

[24] Liu, C. Z., Fan, Y. Y., and Ordonez, F. (2009). A two-stage stochastic programming model for transportation network retrofit.ej0 *Computers & Operations Research*, 36(5):1582–1590.

[25] Liu, Y., Lai, X., and Chang, G. (2006). Cell-based network optimization model for staged evacuation planning under emergencies. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1964, pp. 127–135.

[26] Mawson, A. R. (2005). Understanding mass panic and other collective responses to threat and disaster. *Psychiatry*, 68(2), pp. 95–113.

[27] Mileti, D. S., and Peek, L. (2000). The social psychology of public response to warnings of a nuclear power plant accident. *Journal of Hazardous Materials*, 75(2–3), pp. 181–194.

[28] Mitchell, S. W., and Radwan, E. (2006). Heuristic priority ranking of emergency evacuation staging to reduce clearance time. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1964, pp. 219–228.

[29] Momoh, J. A. (2008). *Electric Power System Applications of Optimization*, Second Edition. Marcel Dekker, New York

[30] Peeta, S., Salman, F. S., Gunnec, D., and Viswanath, K. (2010). Pre-disaster investment decisions for strengthening a highway network. *Computers & Operations Research*, 37(10), 1708–1719.

[31] Pel, A., Bliemer, M., and Hoogendoorn, S. (2011). Modelling traveller behaviour under emergency evacuation conditions. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 11(2), pp. 166–193.

[32] Robinson, R. M., and Khattak, A. (2010). Route change decision making by hurricane evacuees facing congestion. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2196, pp.168–175.

[33] Sherali, H. D., Carter, T. B., and Hobeika, A. G. (1991). A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions. *Transportation Research Part B*, 25(6), pp. 439–452.

[34] Sohn, J. (2006). Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach. *Transportation Research Part A*, 40(6), 491–4506.

[35] Song, W., Xu, X., Wang, B., and Ni, S. (2006). Simulation of evacuation processes using a multi-grid model for pedestrian dynamics. *Physica A*, 363, pp. 492–500.

[36] Stern, E. (1989). Evacuation intentions of parents in an urban radiological emergency. *Urban Studies*, 26(2), pp. 191–198.

[37] Tuydes, H., and Ziliaskopoulos, A. (2006). Tabu-based heuristic approach for optimization of network evacuation contraflow. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1964, pp. 157–168.

[38] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2014) *UNSCEAR 2013 Report Volume I. Report to the general assembly scientific annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan earthquake and tsunami*. United Nations.

[39] Wilmot, C. G., and Mei, B. (2004). Comparison of alternative trip generation models for hurricane

evacuation. *Natural Hazards Review*, 5(4), pp. 170–178.

[40] Xie, C., Lin, D., and Waller, S. T. (2010). A dynamic evacuation network optimization problem with lane reversal and crossing elimination strategies. *Transportation Research Part E*, 46(3), pp. 295–316.

[41] Ziliaskopoulos, A. K. (2000). A Linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem. *Transportation Science*, 34(1), pp. 37–49.

# 各國核子保安機敏資料資訊公開之規定與實務研究
# Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號：MOST 107-2623-E-015-001 -NU
計畫主持人：汪毓瑋
e-mail：una254@mail.cpu.edu.tw
執行單位：中央警察大學國境警察學系

## 摘要

嚴密核設施及核物料的保安措施已是國際共識，也是國際原子能總署「核物料實體防護」國際公約的要求重點。因為核子保安機敏資料若被惡意份子不當截取，就可能利用而遂行入侵與破壞。不僅會導致國家安全遭受到重大危害，亦可能嚴重的傷害人民的生命與財產。

然而在「透明化」治理的脈絡下，「公開」與「問責」已是檢證政府效能之重要指標，且攸關之標準就是資訊公開。因此，根據開放政府途徑，核子管理機構認為，不再需要保護的資訊，按照既定的資訊安全程序應該被解密，以促進資訊的自由流通。

關鍵詞：資訊安全、敏感的非機密的非保防資訊、透明化、公開、問責。

## Abstract

Strict security measures for nuclear facilities and nuclear materials are an international consensus and are the focus of the International Atomic Energy Agency's International Convention for the Protection of Nuclear Material. Because the nuclear security information if the malicious people were improperly intercepted, it may be used to carry out invasion and destruction. Not only will lead to national security suffered major harm, it may seriously harm the people's lives and property.

However, Under the context of "transparent" governance, "open" and "accountability" are important indicators of government effectiveness, and the standard is information disclosure. Consistent with Approach to Open Government, the Nuclear Regulatory Agency believes that information that no longer requires protection, in accordance with established Information Security procedures should be declassified to promote the free flow of information.

Keywords: Information Security、sensitive unclassified non-safeguards information 、 Transparent 、 Open 、 Accountability.

## I. 前言

根據開放政府途徑，不再需要保護的資訊，按照既定的資訊安全程序應該被解密，以促進資訊的自由流通。但在公共領域仍會考慮某些類型的資訊不宜被定期公布，同時也會尋求新的方法而能夠適當管理。

「透明」原則可有效促進「問責制」的建立；「參與」原則可以使公眾更方便的提供建議和某些專業知識，以利政府廣泛利用這些資訊來制定與改善公共政策。「協作」原則係通過鼓勵中央政府內部、不同層級政府間、以及政府與私人機構間之合作與夥伴關係，來提高政府的有效性。

若檢討美歐等國家之核子管理機構的實踐，雖然仍然不斷努力盡可能公開有關資料與資訊，並且繼續鼓勵公眾參與對放射性物質的民用用途的進入和監督。但是在「九・一一事件」之後，大概均已改變了公開之程序和作法，以確保不會不必要地發布恐怖分子可以用來規劃或執行對境內設施或公民攻擊之可能資訊。因此，以前在公共領域考慮的某些類型的資訊不再被定期發布，而被視為敏感的未定密資訊。

## II. 主要內容

對於資訊之必要公開但又不得不兼顧安全之實踐作為，反映出針對於核子保安機敏資料資訊的是否必然公開？如何更佳的公開？如何進行優先性的決策？如何減低可能的不良後果？如何擴大資訊運用的成效？如何使民眾正確理解資訊公開的意涵，而對於核子管理機構能有更多的支持？如何使私營部門產生合力等？

實踐來自於支撐的「學理」，而核子保安機敏資料資訊公開之要求，是來自於「開放社會理論」的發展，因此，必須對此理論進行重新檢視，才能夠鑑定「開放資料」與「保留資料」之理論基礎，以因應公眾要求且有合理解釋。

核子保安機敏資料資訊涉及國家安全，不論是國家或是非國家行為者均盼能夠不付出代價就能夠輕易取得此等資料，而能遂行其各式不同目的之運用。因此管制下必須型塑兼顧開放要求之彈性的「資訊安全」政策與內容。

資料與資訊若依於其功能、或性質、或是重要性等之不同途徑進行檢視，可以發現必須重新設計一個依據明確且有層級的新分類標準及相對應之使用者，例如「機密資訊」、「保防資訊」、「機敏的非機密非保防資訊」等，才可以「有機性」的隨著威脅情勢變化而自動檢討調整，以因應開放。

資訊安全政策之設計與核子保安機敏資料資訊保留與開放之運用，涉及第一線工作人員之專業、訓練且

須呼應「市民社會」之風險程度高低不同階段的開放與否要求，因此必須有兼具安全學理與法理思考之法規與檢討機制。

核子保安機敏資料資訊之保護，重點在實踐。因此，必須從縱向之法律位階檢視相關法規之更新、擬定或修正；未來也須架構橫向的與行政體系之協作內容，特別是定密與解密方面。

## III. 結果與討論

一般民眾基於知的權利，而要求政府各部門在一定時間後，應該主動的公開有關業務範圍內之非涉密事件，但是有關機構是否可以無所保留的將所有資料均加以公開？若果如此，是否有任何可能危害核電廠之風險？又若進行資料之區隔，而選擇性公開，則判準如何訂定？又如何才可以有效的實施及進行監管，以符合透明化政府潮流之發展趨勢？

國家必須制定與國家利益相關重要資訊安全的法律，以規定違反這種資訊保密法律的制裁，包含該國或其他國家的國民。也要有法律以規範個人獲得政府官方資訊的機會。也要有解決政府與其他單位之間對於可以扣留哪些資訊來保護國家安全分歧之機制。

國家有《資訊自由法》或其他法律，允許公眾要求查閱當局所持有的資訊。當局可能拒絕的唯一資訊，是指定豁免所涵蓋的類型，例如國防相關的資訊或隱私和個人資訊。具有定密標記的項目不能自動免於揭露。

有些法律或法規可能要求揭露包含敏感資訊的某些類型的資訊。但應確保此類法律允許豁免之規定，不會影響國家安全或第三方安全的資訊。

應該制定具體指導綱要，協助組織和機構決定哪些敏感資訊可能被揭露。編寫此類指導綱要時，負責的政府機構通常會諮詢其他政府部門和相關組織。透過確定其認為不適合公開的資訊類型，指導綱要應該意圖防止未經授權的揭露敏感資訊。

應該考慮對以下方面提供具體指導綱要的必要性：

基於揭露的後果，某些類型的敏感資訊的敏感性；

哪些類型的資訊在哪種情況下，以哪種方式揭露給哪些人；

揭露資訊的條件；

在公開介紹之前，例如會議介紹、網頁發布或技術規格，要有檢討資訊的潛在敏感性之過程；

在任何情況下，如果未經授權揭露敏感資訊，或是其他違反資訊安全要求，無論是故意的還是無意的，應該採取哪些行動。

指導綱要需要受制於改變。情況的演變和可能會被認為是敏感的資訊，不適合一次性揭露，可能會依於敏感度顯著降低而適合晚一點揭露（反之亦然）。 因此，應該定期審查和更新指導綱要，並在政策或情況發生重大變化的情況下，進行審查和更新。

一般情況下，適當的降低適用於特定資訊的安全級別通常是可行的。然而，如果已經更廣泛地揭露資訊，將資訊重新定密到更受限制的類別可能是不可能或無效的。在原始定密（original classification）中應該考慮到這一點，另一方面應考慮機密性（confidentiality）和警告（caution）之間的適當平衡，另一方面是可用性（availability）和透明度（transparency）。應該建立定期審查定密的默認時間（A default time）框架，但在需要時也應該進行更改，例如環境發生顯著變化。

組織揭露敏感資訊的所有要求，應該根據相同的指導綱要或標準進行考慮，如有可能，所有請求都應該透過組織的單一中央辦公室進行處理。通常用於獲取對敏感資訊進行不當進入的技術是向同一組織內的不同個人或單位發出多個請求。如果單獨處理這些請求而沒有協調，則可能會給出不同的答覆，並且可能會公開敏感資訊，而若有協調將不會公開。

## IV. 結論

根據開放政府途徑，核子管理機構亦瞭解按照既定的資訊安全程序已不再需要保護的資訊就應該解密，以促進資訊的自由流通。因此，當資訊最初被定密時，原定密機構必須根據資訊的國家安全敏感性之持續時間，而建立具體的解密日期或事件。

為了防止公開發布可能對不法行為者或潛在攻擊的恐怖分子有用或可以合理預期有用的安全相關敏感資訊，敏感資訊之必要扣留已是美國與歐洲國家在管制資訊方面之共識。這些敏感資訊包括了：關於放射性物質的確切位置、某些詳細設計圖紙、附近設施資訊、應急計畫資訊，以及某些脆弱性和安全性分析評估的資訊等，均應繼續受到保護而免於遭受公開的揭露。

因此，如果必須在提交的文件中包含了與安全相關的敏感資訊，則應該明確說明該文件包括與安全相關敏感資訊而應區別對待。且雖然核子管理機構通常不能夠保護已經被公開的資訊，但是在某些情況下，如果對於恐怖分子或其他有惡意行為者進行攻擊或破壞特別有用，則如有可能的話，該機構仍會要求將資訊從公共空間中撤出來。

本研究對於社會而言，可以讓民眾瞭解何種資訊雖然不是機密資訊，但因為仍涉國家安全而不能公開；對於經濟而言，此等不同類型的敏感資訊若是被不當國家或是非國家行為者取得，將會使我經濟競爭力減弱；對於學術而言，是整合國家重大關鍵基礎設施與資訊安全不同領域之研究，而填補此等領域研究不足之空間。

## 參考文獻

[1] IAEA, INFCIRC/225/Revision 5, 2012.
[2] Nuclear Regulatory Commission, Information Security.
[3] Jeffrey Roy, "Open Data and Open Governance in Canada: A Critical Examination of New Opportunities and Old Tensions." Future Internet 6, No. 3, 2014.

[4] Australian Government, Australian Public Service Better Practice Guide for Big Data, January 2015.
[5] EUR-Lex, "DIRECTIVE (EU) 2016/1148 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL," July 2016.
[6] EUR-Lex, Directive 2013/40/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 on attacks against information systems and replacing Council Framework Decision 2005/222/JHA.
[7] The UK Government's Office of Civil Nuclear Security, Finding a Balance: Guidance on the Sensitivity of Nuclear and Related Information and its Disclosure, April 2005.
[8] IAEA, "Security of Nuclear Information, Implementing Guide," IAEA Nuclear Security Series No. 23-G, 2015.
[9] Sara de Freitas and Guy Crivello, Freedom and Information: A History, December 1, 2017.
[10] Mark Fenster, The Transparency Fix: Secrets, Leaks, and Uncontrollable Government Information, July 11, 2017.
[11] Charles H Sides, Freedom of Information in a Post 9-11 World, March 31, 2017.
[12] Michael E. Whitman and Herbert J. Mattord, Principles of Information Security, 5th Edition, March 13, 2017.
[13] Jan Goldman and Susan Maret, Intelligence and Information Policy for National Security: Key Terms and Concepts, July 30, 2016.
[14] Douglas J. Landoll, Information Security Policies, Procedures, and Standards: A Practitioner's Reference, May 5, 2016.
[15] Thomas R. Peltier, Information Security Policies, Procedures, and Standards: Guidelines for Effective Information Security Management, Apr 19, 2016.
[16] American Board for Certification in Homeland Security, Sensitive Security Information, Certified (SSI) Body of Knowledge, February 24, 2016.
[17] Melissa A. Foster, Insider Threats: Department of Defense Protection of Classified Information and Installations (Defense, Security and Strategies) UK ed. Edition, January 15, 2016.
[18] Meredith B. Carro, Classified Information: Protections and Issues (Intelligence and Counterintelligence Studies) UK ed. Edition, January 8, 2013.

# 核能電廠低中壓電纜老化檢測與評估研究
# Aging Measurement and Assessment for Low/medium Voltage Cable in Nuclear Power Plant

計畫編號：MOST 107-NU -E-007-004 -NU
計畫主持人：陳金順
e-mail：gschen@ess.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

## 摘要

核能電廠儀控系統低中壓電纜的老化劣化評估是一項非常重要的研究題目，其中電纜之老化劣化檢測則是基礎而先決的工作。本研究計畫檢測之組件是核能電廠所使用之低中壓電纜等，主要工作內容為，電纜絕緣材料之伸長率、硬度、耐壓強度之關聯分析，電纜絕緣電阻、散逸因素、局部放電之比較分析，電纜絕緣材料老化機制與劣化模型之探討等。研究發現電纜材料硬度適合初期老化測量，伸長率適合中長期之監測，耐壓強度則適合長期監測及對應驗證標準。絕緣電阻、介電損失、局部放電三種檢測方法同時配合使用，將可有效評估老化劣化狀況。本研究計畫所建立之低中壓電纜老化劣化評估方法及設備，可供核能電廠及產業界檢測核能級設備組件所用，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，進而提昇我國之核能科技。

關鍵詞：核電廠、低中壓電纜、老化、劣化、檢測、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 testing of aged cable is a basic and preliminary work. The test components in this project are the low/medium voltage cables generally used in a nuclear power plants. The major tasks in this project are to study the correlations among elongation, hardness, and breakdown field, comparison of electrical resistance, dissipation factor, and partial discharge of cable insulation materials. It is found that the hardness of cable insulation material is suitable for aging test in the early stage; the elongation is a suitable test of aging assessment for medium term; the breakdown field is good for aging test in the long term and can be checked with the standard criterion. The electrical resistance, dissipation factor, and partial discharge tests of cable insulation materials can be used together to effectively evaluate the aging and degradation of cables. The method and facility of aging and degradation assessment can be used by the nuclear power plants and the cable vendors to verify the cables for 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 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, aging, degradation, test, assessment

## I. 前言

核能安全一直是廣大民眾最重視的議題，又運轉中的核能機組若能減少故障或縮短檢修期間，也可以提升經濟效益。不過，由於國外有些核電廠已出現部分設備提前劣化（degradation）現象，美國能源部正積極聯合各國推動核電廠老化（aging）管理研究計畫，以提昇核能發電安全。我國核電廠運轉超過 30 年，也同樣地可能面臨設備劣化問題。應用於核電廠安全相關系統中的重要電力與儀控電纜，係用以保護、控制反應爐或安全相關設備以防止事故發生，因此電纜特性對核電廠運轉安全影響深遠，所以電纜老化劣化對核能電廠使用壽命及整體安全評估是一項非常重要的研究題目。

核電廠廣泛使用的橡膠電纜（EPR cable），其壽命通常可達 50-100 年，甚至更長時間。但由於有些電纜在其使用期間可能經歷較惡劣的環境，包括溫度、濕度及輻射等，造成這些電纜加速老化，而降低電纜絕緣功能，使得實際使用壽命縮短。使用非破壞方式來監測核電廠電纜劣化情形，並評估電纜使用壽命，為維護核電廠安全重要工作之一。目前已有許多電纜劣化監測（condition monitoring）方法，如壓痕模數（indenter modulus）、氧化誘導時間(oxidation-induction time, OIT)、密度等，被用來評估電纜劣化程度。然而這些監測方法的允收準則仍需進行評估，且僅適用於電纜的端點或可碰觸（accessible）部分。另外，對於裝置於管線或溝槽內的無法碰觸（inaccessible）電纜而言，由於無法接觸到電纜遭受局部高溫、濕氣/浸水、輻射等較惡劣的環境位置，所以一般採用電氣方法，如絕緣電阻、介電損失（dissipation factor 或稱 Tan delta）、部分放電等，評估整條電纜功能與電性劣化情形。然而對於電纜的允收準則與壽命評估的相關研究，仍持續進行中。目前核電廠已廣泛使用 EPR 電纜，然而以非破壞方式監測此種電纜的劣化是比較困難的，而其共同特點，就是須等到 EPR 材料接近到嚴重老化時，量測參數才會有較明顯的變化。本研究目的在於探討 EPR 電纜在不同環境條件下的劣化行為，並經由長期監測與趨勢分析，確立其允收準則與剩餘壽命。核二廠自 1981 年 12 月壹號機商業運轉以來，至今已 27 年頭，即將面臨 40 年使用年限與延長使用年限之執照申請。面對核能機組使用年限執照更新，安全性將是最主要的考量因素，而電纜劣化評估也屬設備安全性評估之一。核能電廠大量使用的中壓電纜，由於使用期間可能在惡劣的環境，包括溫度、溼度及輻射等，而造成電纜加速老化，使得實際使用壽命大幅縮短。

利用絕緣電阻量測，來作為確認電纜性能是否正常，乃目前最被廣泛使用且為一種簡單快速的方法。由於濕氣結合溫度或輻射所造成的材料老化產生傳導路徑，所以利用絕緣電阻量測可能是很有用的現況偵測方法。

本研究計畫之主要目的係就核能電廠使用之重要低中壓電纜，比較分析其絕緣材料檢測及電性評估的方法，主要的工作係對電纜進行高溫及濕度老化實驗與檢測。本研究計畫擬檢測之組件是核能電廠所使用之中低壓電纜等，主要工作內容為，電纜絕緣材料之伸長率、硬度、耐壓強度之關聯分析，電纜絕緣電阻、散逸因素、局部放電之比較分析，電纜絕緣材料老化機制與劣化模型之探討等。由於核電廠電纜可能處於高溫、高濕、輻射及蟲害等環境，因此本研究計畫也進行核二廠中壓電纜老劣化絕緣電阻數據蒐集及分析，核二廠中壓電纜部分放電測量，及以部分放電分析生物效應。

## II. 主要內容

1. 研究方法

為了有效了解核電廠電纜老化狀況，除了藉助模擬實驗取得相關資料外，現場資料蒐集也是相當重要的一環；由於現場環境較複雜，多項老化因子綜合效應下，很難使用數學式來表達，因此藉由大修檢測資料進行數據分析追蹤，另輔以在線式局部放電檢測設備，將更能評估電纜老化狀況。

2. 資料蒐集

核電廠中壓系統主要有 4.16/11.4/13.8kV 等 3 種電壓等級，其中 11.4kV 為開關場配電系統之電源，4.16/13.8kV 屬電廠中壓馬達之電源,使用電纜有 5/15kV 等級。目前電廠主要檢測工具以絕緣電阻為主，蒐集資料範圍包括核二廠壹號機及貳號機大修自 EOC14 至 EOC19 中壓電纜檢測資料。

3. 在線式檢測

由於現場不似實驗室環境單純，因此使用在線式檢測設備，背景環境及雜訊干擾將是影響檢測之重要因素。

a.檢測地點-核二廠壹/貳號機汽機廠房開關室及開關場。

b.背景量測-使用 Agilent 公司所生產之頻譜分析儀(E7405A)，進行現場環境測試及頻譜分析。

c.局部放電-使用 LDIC 公司生產之在線式局部放電設備(LDS-6)進行量測，監測參數有局部放電量、局部放電次數及局部放電圖形。

4. 生物效應

雖然生物咬傷電纜機率並不高，但核二廠氣渦輪機控制室電纜曾經發生因老鼠咬破電纜引起火災事件，有鑑於此本研究也同時探討生物對電纜之破壞，實驗方式以人為破壞來模擬生物咬傷電纜，檢測工具為高阻計及局部放電檢測設備。

## III. 結果與討論

本研究計畫依照原規畫除了分析電纜絕緣材料之伸長率、硬度、耐壓強度之關聯，然後進行電纜絕緣電阻、散逸因素、局部放電之比較分析等，承計畫進行期間的查核建議，本計畫也完成核二廠中壓電纜絕緣電阻數據蒐集及分析，並對核二廠中壓電纜進行局部放電測量，及以局部放電分析生物效應(老鼠咬傷電纜外皮及絕緣層)。以下分別敘述主要的結果。

1. **電纜絕緣材料之伸長率、硬度、耐壓強度之關聯分析**

電纜經 175℃/130 小時熱老化，硬度值高達 91，依據 ASTM D 2240 標準，當硬度值高於 90 時測試結果會有較大誤差。又電纜經過 136 ℃/2520 h 熱老化後，絕緣材料的平均伸長率從 383.4 %下降至 254.69 %；而平均耐壓強度從 49.4 kVac/mm 下降至 21.9 kVac/mm。根據美國核能級電纜 IEEE 383 驗證標準，加速老化後之電纜絕緣強度應大於 3.2 kVac/mm (80 Vac/mil)。因此從伸長率、硬度、耐壓強度之關聯分析，電纜材料硬度適合初期老化測量，伸長率適合中長期之監測，因材料已有明顯劣化其絕緣強度仍在規格以上，耐壓強度則適合長期監測及對應驗證標準。

2. **電纜絕緣電阻、散逸因素、局部放電之比較分析**

電纜經輻射及濕熱老化環境模擬，本計畫完成絕緣電阻、介電損失、局部放電三種檢測方法之比較分析，各檢測方式均有其優劣及對不同診斷能力缺點，如表 1 所示，由三種檢測方法同時配合使用，將可有效診斷劣化之原因及狀況。

3. **核二廠中壓電纜測量**

a. 絕緣電阻分析

由核二廠歷次大修中壓電纜絕緣電阻資料分析，如圖 1~4 所示。再循環泵電纜為所有電纜中，絕緣電阻平均值最低，如圖 5 所示，其原因為再循環泵位於核反應器內，除了濕熱老化外，輻射效應也同時對電纜產生影響。而在 4.16kV 馬達系統中，核機冷卻水泵等定期換台運轉之泵電纜絕緣電阻值最高，低壓爐心注水泵等緊急運轉之泵電纜值次高，循環水泵等長天期運轉之泵電纜值最低，探討原因如下：

甲、 定期換台運轉之泵電纜既無長期承受電應力，又由於定期運轉加壓後所產生之加熱效果,減少濕氣產生之影響，故其絕緣電阻值最高。

乙、 緊急運轉之泵電纜其承受電應力較低，但同時也較容易受濕氣影響,故次之。

丙、 長天期運轉之泵電纜則同時承受著電應力與濕熱效應雙重影響，故絕緣電阻值最低。

b. 在線式局部放電試驗

由於現場環境干擾多，因此在線式局部放電檢測設備使用前必須對背景環境進行偵測，在核二廠實際量測中，壹號機汽機廠房開關室並無雜訊干擾，而由貳號機汽機廠房開關室頻譜分析，在 30 ~150 MHz 處出現 M 字型連續訊號,如圖 6。由於此背景雜訊干擾，局部放電圖形也同樣呈現相同訊號，如圖 7 所示。經與附近風扇馬達頻譜比對相似後，確定干擾源即針對雜訊頻段進行濾除工作，濾除後圖形如圖 8 所示。

核二廠中壓馬達電纜量測結果除了受到干擾量測到雜訊放電訊號外，並無電纜本身局部放電訊號，此結果有 2 種可能，其一為電纜本身狀態相當良好，另一原因為局部放

電本身受限於放電訊號之大小，當距離太遠或訊號太小造成量測不到放電訊號，因此無放電訊號並不代表電纜一定沒問題，若能再結合介電損失檢測將使評估更為準確。

c. 生物效應對電纜影響

生物效應對電纜絕緣是一嚴峻考驗，一般未老化的中壓電纜耐壓程度為 40~50kV/mm，已老化電纜耐壓則可能降低至 10 kV/mm，因此若發生物咬破電纜致絕緣部分損壞，已老化電纜可能因此被擊穿；當電纜外層遭受破壞，絕緣介電強度將降低，破壞表面將出現放電現象，因此在短距離電纜使用局部放電設備檢測，將可有效檢測出問題，如圖 9 所示。另外在高阻計量測，因破壞表面污損致洩漏電流增加，絕緣電阻值也有顯著變化，但若將破壞表面清洗乾淨，則絕緣電阻將不能有效被量測。

## IV. 結論

本研究計畫完成了預期的工作項目，由研究發現電纜材料硬度適合初期老化測量，伸長率適合中長期之監測，耐壓強度則適合長期監測及對應驗證標準。絕緣電阻、介電損失、局部放電三種檢測方法同時配合使用，將可有效診斷劣化之原因及狀況。核二廠中壓電纜絕緣電阻資料分析結果顯示，定期換台運轉設備之電纜絕緣電阻值最高，緊急運轉設備之電纜次之，長天期運轉設備之電纜最低。

## 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.


表 1　絕緣電阻、介電損失、局部放電三種檢測方法比較

| | Insulation Resistance | | Tanδ | | Partial Discharge | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | HIPOT* | MEGGA* | PWRF* | VLF* | On-line* | Off-line* |
| Moisture | ▲ | ▲ | ● | ● | ▲ | ▲ |
| Cut | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ● | ● |
| Void | | | ● | ● | ▲ | ▲ |
| Non-Destruct | ▲ | ▲ | ● | ● | ● | ● |
| On-line | | | ● | | ● | |
| Learning | ● | ● | ▲ | ▲ | | |

註：HIPOT 測試電壓使用額定電壓或更高電壓，MEGGA 測試電壓使用低於額定電壓之高阻計，PWRF 測試頻率為額定頻率 60Hz，LVF 測試頻率為極低頻 0.1Hz，On-line 在線式局部放電監測設備，Off-line 離線式局部放電監測設備

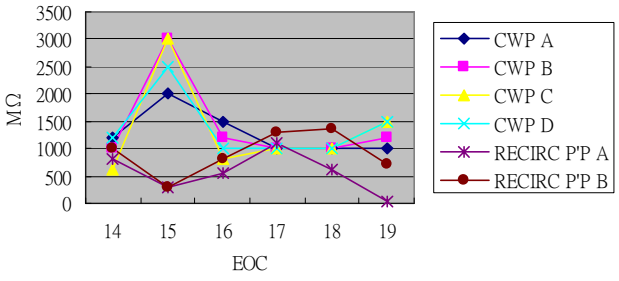



圖 1　核二廠壹號機 15kV 電纜絕緣電阻

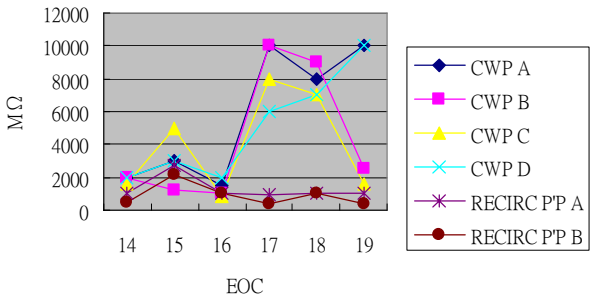



圖 2 核二廠貳號機 15kV 電纜絕緣電阻

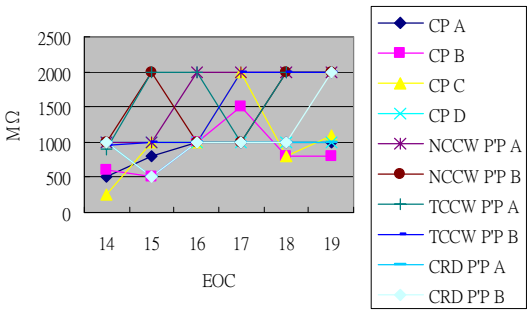



圖 3 核二廠壹號機 5kV 電纜絕緣電阻

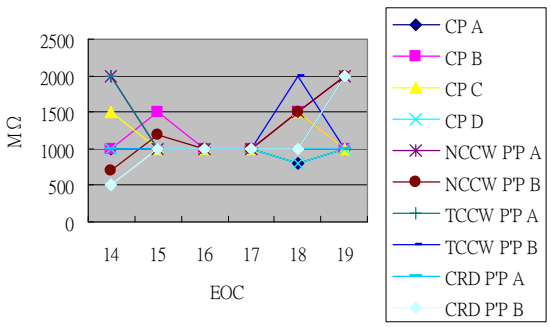



圖 4 核二廠貳號機 5kV 電纜絕緣電阻

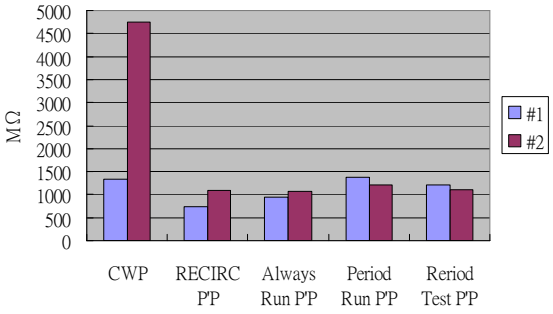



圖 5 核二廠中壓電纜絕緣電阻平均值

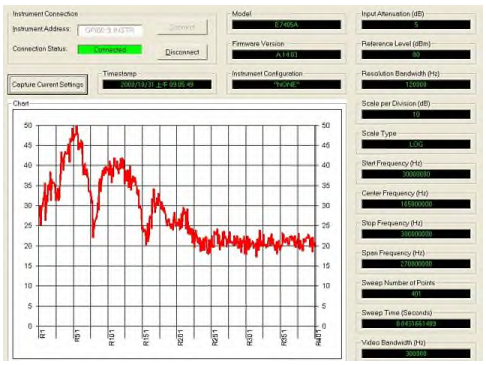


圖 6 核二廠貳號機汽機廠房背景頻譜

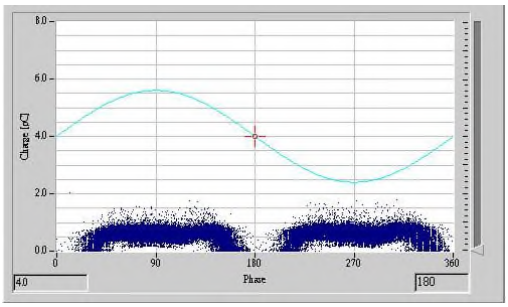



圖 7 核二廠貳號機中壓電纜局部放電

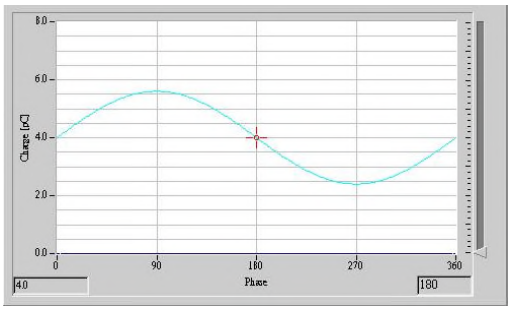



圖 8 背景雜訊濾除之局部放電圖形

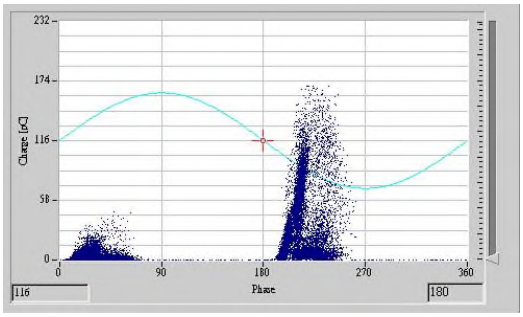



圖 9 電纜生物效應之局部放電圖形

# 大範圍深穿透輻射遷移計算的技術與應用研發

計畫編號：MOST 107-2623-E-007-002-NU
計畫主持人：許榮鈞
e-mail：rjsheu@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

## 摘要

本計畫探討混合決定論法與蒙地卡羅法在大範圍深穿透輻射遷移計算的潛力與應用，測試直接由輻射源開始追縱，透過一次性的追蹤計算求得整個大範圍空間的三維輻射通率分佈。本研究所謂大範圍系指約略數十到數百公尺的距離，可涵蓋反應器爐心直至廠界相關的輻射安全分析應用範圍。基於電腦科技的快速進展與目前最先進的混合式遷移計算方法，這樣直接一次性的計算由傳統上的不可能變成可行，這類方法可大幅減少傳統分段接續計算所需假設造成的誤差，因此建立混合式計算方法相關的能力與處理技術可有多種潛在的重要應用，有利於提升國內核能與輻射安全分析的技術。本計畫以 THOR 為分析對象，建立全設施的三維中子/加馬通率分佈，結果可以應用於輻射安全管制以及評估全廠各區物質活化的種類與程度，預先掌握以利未來 THOR 除役規劃所需。

關鍵詞：輻射遷移計算、決定論法、蒙地卡羅法、混合式方法、活化評估。

## Abstract

This study investigated the technology and possible applications of the so-called hybrid deterministic/Monte Carlo methods in large-scale deep-penetration radiation transport problems. Three-dimensional neutron and gamma-ray flux distributions around a nuclear facility are essential for personnel radiation safety and assessment of material activation, which are important issues directly related to safety analysis or review of a nuclear facility. Traditionally, large-scale deep-penetration Monte Carlo transport calculations are considered to be not practical because of time-consuming and the complexity of modelling all the details in a nuclear facility. Advanced variance reduction techniques are inevitable in challenging problems. Taking the Tsing Hua Open pool Reactor (THOR) as an example, this study established a full-scale model of the whole facility from rector core up to the site boundary and predicted three-dimensional neutron flux distributions around the facility, which can be used to estimate the extents of material activation in various regions and inventories of possible radionuclides. The results and relevant technologies developed in this study will be beneficial for radiation safety program during operation and future preparation of facility decommissioning.

Keywords: radiation transport, deterministic method, Monte Carlo method, hybrid method, activation analysis.

## I. 前言

本計畫擬探討混合決定論法與蒙地卡羅法的遷移計算方法（Hybrid Deterministic/Monte Carlo Methods）在大範圍深穿透輻射屏蔽與劑量分析的應用。首先規劃以清華水池式反應器（THOR）作為分析對象，目標是建立正常運轉時全設施的三維中子通率與劑量率分佈，如圖 1 所示。傳統的輻射遷移計算無法處裡如此龐大規模的實際問題，有鑑於電腦速度提升與廉價可用的大量記憶體，更重要的是配合遷移計算技術的進展，現在已經有能力處理這樣困難的計算，值得國內引進技術深入探討。



圖 1. THOR 設施外觀。

計畫中選用的混合式遷移計算工具是美國橡樹嶺國家實驗室（ORNL）發展的 SCALE/MAVRIC，會先以決定論法遷移計算程式 DENOVO 計算設計問題的伴隨函數。接著利用 CADIS 理論，以伴隨函數建立輻射源項與相空間參數的權重，最後以蒙地卡羅法遷移計算程式 MONACO 依輻射源項與相空間參數權重，進行加權的蒙地卡羅計算。這種透過伴隨函數指引的輻射遷移計算，結合了決定論法與蒙地卡羅法的優點，可大幅改善蒙地卡羅法的計算效率。

## II. 研究目的

混合式遷移計算方法可減少傳統分段接續計算所需假設造成的誤差，建立相關的數據處理與計算能力，明顯對於提升國內核能安全技術有相當助益，並有多種潛在應用。有鑑於此，本研究規劃深入探討混合遷移計算方法的各種理論與應用，首先以 THOR 為分析對象，先建立全設施的三維中子通率分佈，以利未來評估全廠各區物質活化的基礎。倘若研究順利，我們規劃未來申請延續計畫以擴展應用規模，基於已建立的技術延伸應用於核一、二、三廠的分析，相關成果應有利於輻射管制作業與未來除役評估的優化。

## III. 研究方法

本研究採取的研究方法與步驟如下：

1. 探討混合式遷移計算。
2. 建立 THOR 幾何模型。
3. 建立 THOR 輻射源項。
4. 計算 THOR 全區中子通率分佈。

## IV. 建立 THOR 分析模型

參考 THOR 最初的建廠與歷年重要的改建資料，搭配現場勘查，建立整個 THOR 的分析模型。模型的範圍在高約 21.6 公尺、長約 28.5 公尺、寬約 21.3 公尺的爐房內，考慮的區域有 THOR 水池、生物屏蔽、7 個水平照射管與實驗室屏蔽，如圖 2 至圖 4。輻射源項考慮 THOR 達臨界時熱功率在 1.2 MW 的爐心中子射源，射源強度是 $9.1206\times10^{16}$ n/s。

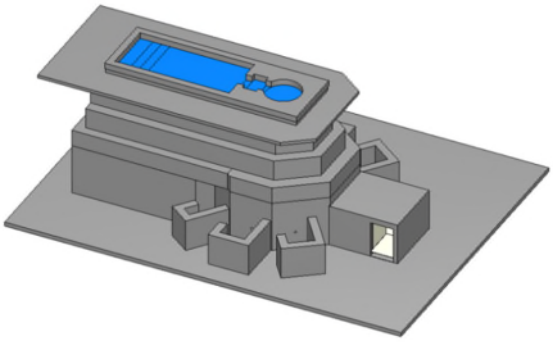


圖 2. THOR 計算幾何模型的示意圖。

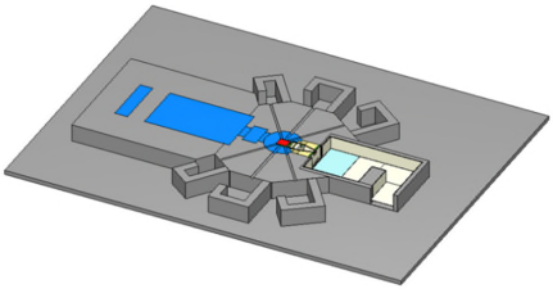


圖 3. THOR 計算幾何模型的水平剖面示意圖，可見爐心與水平射束管位置。

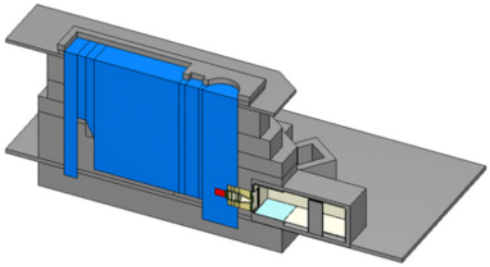


圖 4. THOR 計算幾何模型的垂直剖面示意圖，可見爐心與 BNCT 射束位置。

射源分佈在圖 3 與圖 4 中紅色矩形處。射源在水平方向的相對強度是均勻的，在垂直方向的相對強度如圖 5 所示，射源的能量分佈選用 Watt Spectrum。變異數降低法選用 FW-CADIS，伴隨射源設定在爐房內的所有區域但不包含空氣與水。選用的截面資料庫有兩個，DENOVO 的 Forward 與 Adjoint 計算使用 ENDF/B-VII.0 中子能量有 27 群的 v7-27n19g，MAVRIC 的蒙地卡羅計算選用 ENDF/B-VII.1 有連續能量分佈的 ce_v7.1_endf.xml。DENOVO 的計算在 X、Y、Z 方向分別設定 100、101、99 個網格。MAVRIC 估算的結果選用 Meshtally 搭配與 DENOVO 相同的網格設定紀錄爐房內所有區域的中子通率，另使用 ICRU-57 的轉換因子求得所有區域的個人有效劑量率。

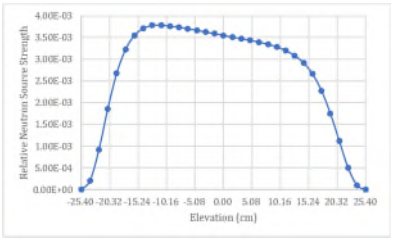



圖 5. THOR 爐心中子射源垂直方向的相對強度。

## V. 驗證 THOR 分析模型

在開始估算 THOR 的中子通量之前，使用已知的 BNCT 中子束出口面射源資訊 THOR-50C 與 THOR-Y09 驗證分析模型，在不同的驗證計算中，以不同的射源估算 BNCT 中子束出口面的中子通率。如表 1 所示，Case 1 與 Case 2 分別以 THOR-50C 與 THOR-Y09 作為計算的射源、Case 3 則考慮上述的爐心中子射源，並設定伴隨射源在 BNCT 的中子束出口，方便求得出口面的中子通率，估算結果的比較如圖 6 所示。比較結果顯示，爐心的中子射源經過 THOR 分析模型後，在 BNCT 出口面的總中子通率與能量分佈和 THOR-50C 與 THOR-Y09 的結果差異不大，表示此分析模型有考慮到影響中子遷移的重要資訊應且與現場實際情況出入不大，有信心作為估算爐房內中子通率分佈的分析模型。

表 1. 不同分析案例的計算條件與計算時間

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Source | THOR50c | THORy09 | Core Fission Neutron | Core Fission Neutron |
| Adjoint Source | -- | -- | BNCT Beam Exit | Everywhere except water/air |
| NPS | $10^4$ | $10^4$ | $10^6$ | $2\times10^5$ |
| | Execution Time (hour) | | | |
| DENOVO forward 100×101×99 | -- | -- | 1.04 | 0.62 |
| DENOVO adjoint 100×101×99 | -- | -- | -- | 0.43 |
| MAVRIC | 0.35 | 0.36 | 5.35 | 196 |
| Total | 0.35 | 0.36 | 6.39 | 197 |

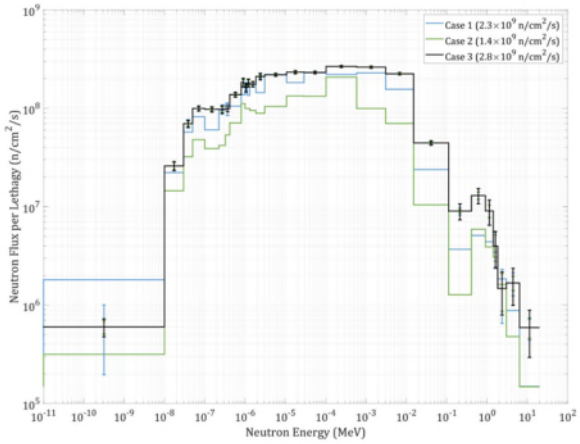



圖 6. 不同的射源估算 BNCT 中子束出口面的中子通率。

各案例的計算時間列於表 1 下方，所有案例皆以同一台桌上型電腦執行，CPU 是 Intel Xeon Gold 5120 2.20 GHz，OS 是 Scientific Linux 7.6 x86_64，RAM 有 64 GB。Case 1 與 Case 2 的射源與計分區域相當接近，故不會花費太多計算時間。Case 3 因伴隨射源的設定，引導中子遷移至 BNCT 中子束出口，故可在合理的時間內得到可接受的答案。Case 4 即本計畫估算 THOR 中子通率的計算條件與計算時間。DENOVO 的計算約須 1 個小時，但蒙地卡羅計算則須 196 個小時（高過 8 天），由此可知大範圍深穿透的輻射遷移計算需要更快速的 CPU 以更快速處理蒙地卡羅追蹤輻射粒子以提升計算效率，當然也需要大量的電腦記憶體以儲存所有相空間的資訊。

## VI. 結果與討論

基於前述經驗證可靠的計算模型，使用 SCALE/MAVRIC 以一次性的計算估算整個 THOR 爐房內三維中子通率，計算結果則依序呈現在圖 7 至圖 30。

圖 7 至圖 30 是在有限的資源與計算時間內得到初步的中子通率，但在水池與其它生物屏蔽附近區域等則沒能得到結果。目前未能以一次性的計算求得整個 THOR 爐房內的中子通率，在水池與大部份的生物屏蔽區域，由於水與水泥材料有相當好的中子減速能力，故目前還沒能得到計數結果。因此欲以一次性的計算求得大範圍深穿透所有區域的結果有一定的難度，不過若增加蒙地卡羅追蹤的中子數仍可在對 THOR 工作人員與使用者具代表性的位置上提供可靠的中子通率。圖 11 與圖 13 是具代表性位置的示意圖：(1)BNCT 中子束出口，(2)BNCT 照射室屏蔽門外，(3)E1 中子束出口，(4)E1 照射室屏蔽水泥後，(5)E2 中子束出口，(6)E2 照射室屏蔽水泥後，(7)E2 中子束出口，(8)E2 照射室屏蔽水泥後，(9)爐心上方池邊。

表 2 分別是具代表性位置的估算結果與相對統計誤差，目前的估算結果仍有過大的統計誤差，不過若增加蒙地卡羅追蹤的粒子數應可求得有信心的結果。

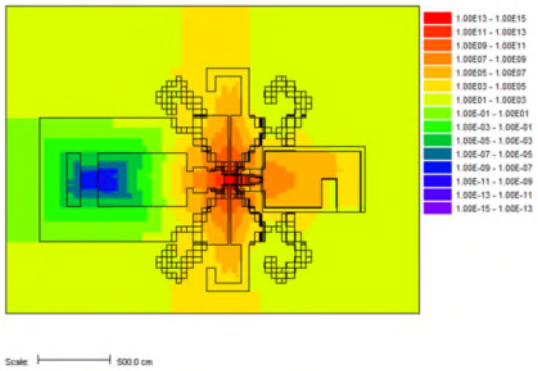


圖 7. DENOVO 估算的中子通率（Forward）通過爐心中央的水平分佈。

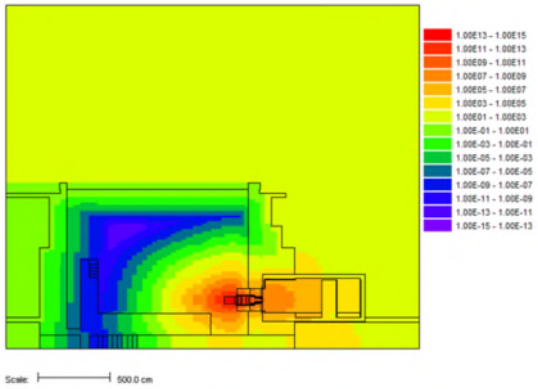


圖 8. DENOVO 估算的中子通率（Forward）通過爐心中央的垂直分佈。

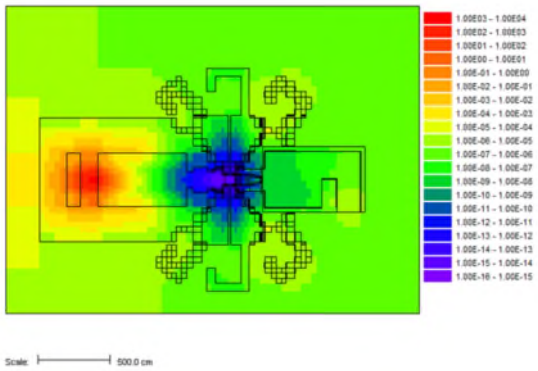


圖 9. DENOVO 估算的伴隨通率（Adjoint）通過爐心中央的水平分佈。

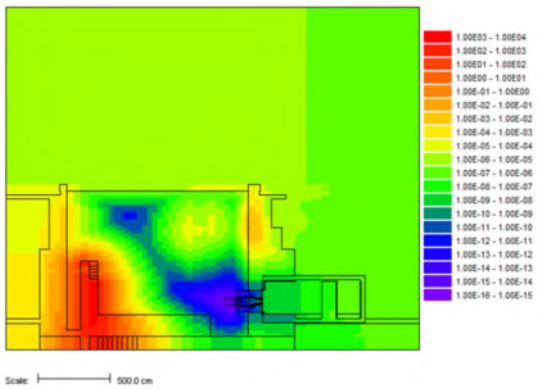


圖 10. DENOVO 估算的伴隨通率（Adjoint）通過爐心中央的垂直分佈。

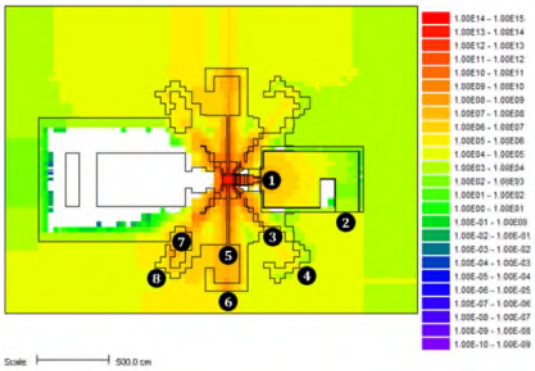


圖 11. MAVRIC 估算的總中子通率通過爐心中央的水平分佈。

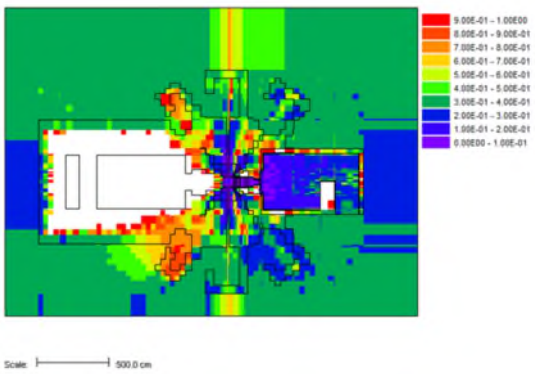


圖 12. MAVRIC 估算總中子通率的相對統計誤差。

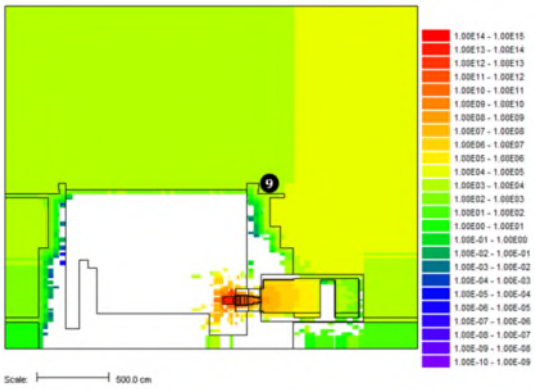


圖 13. MAVRIC 估算的總中子通率通過爐心中央的垂直分佈。

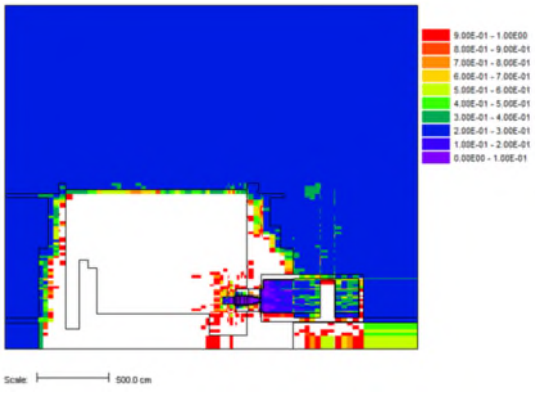


圖 14. MAVRIC 估算總中子通率的相對統計誤差。

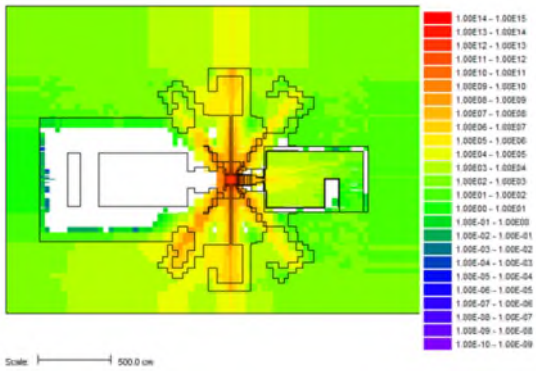


圖 15. MAVRIC 估算的快中子通率通過爐心中央的水平分佈。

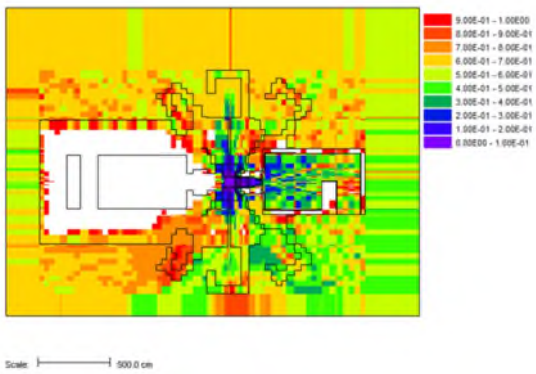


圖 16. MAVRIC 估算快中子通率的相對統計誤差。

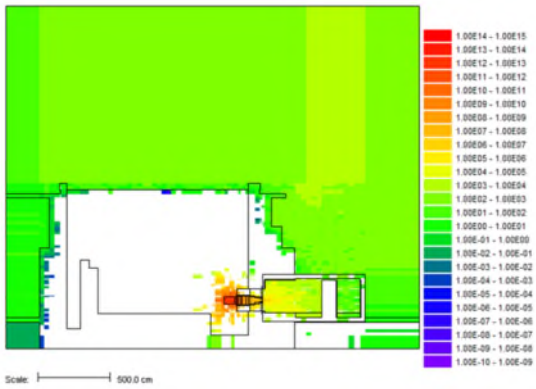


圖 17. MAVRIC 估算的快中子通率通過爐心中央的垂直分佈。

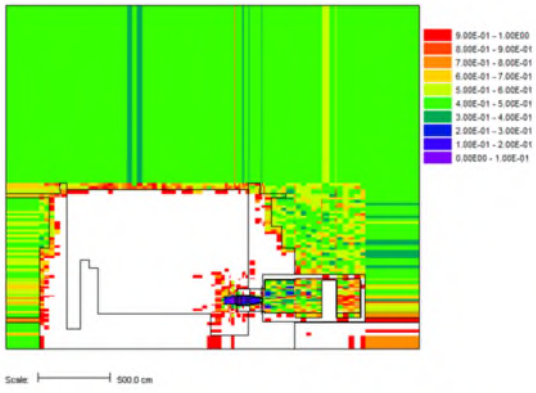


圖 18. MAVRIC 估算快中子通率的相對統計誤差。

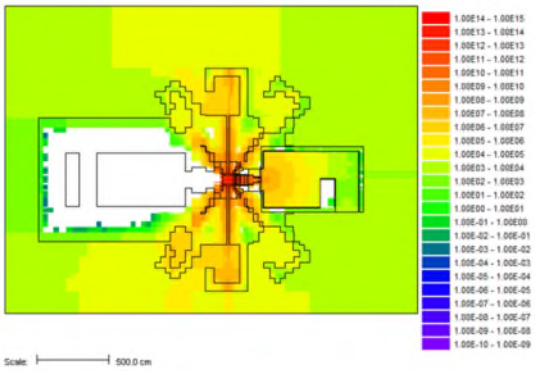


圖 19. MAVRIC 估算的超熱中子通率通過爐心中央的水平分佈。

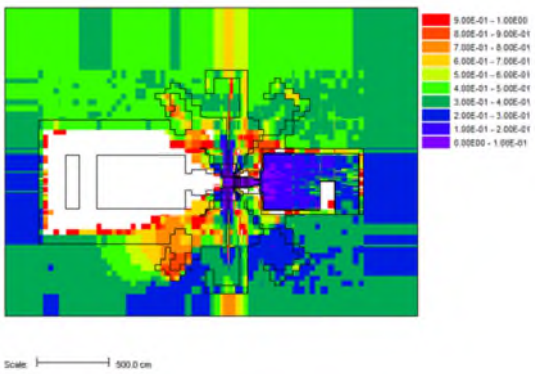


圖 20. MAVRIC 估算超熱中子通率的相對統計誤差。

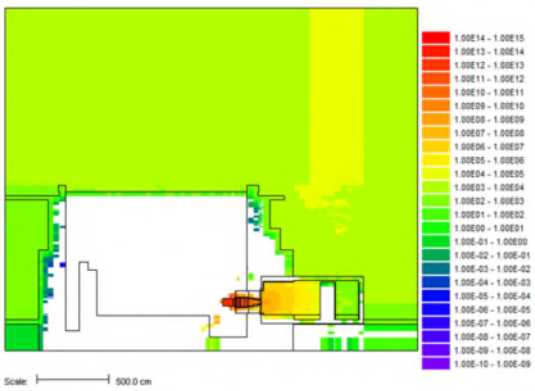


圖 21. MAVRIC 估算的超熱中子通率通過爐心中央的垂直分佈。

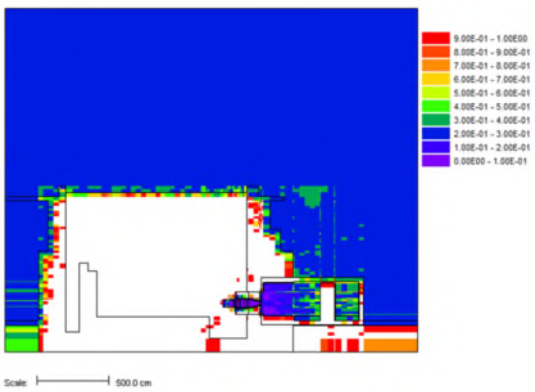


圖 22. MAVRIC 估算超熱中子通率的相對統計誤差。

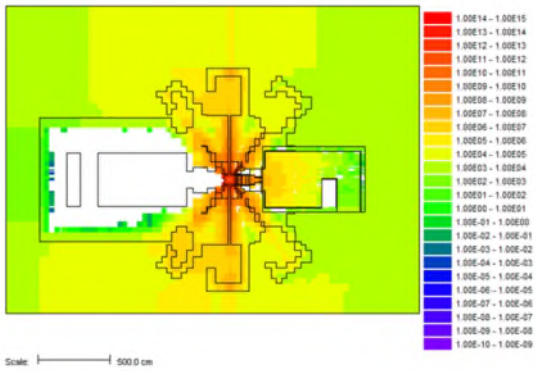


圖 23. MAVRIC 估算的熱中子通率通過爐心中央的水平分佈。

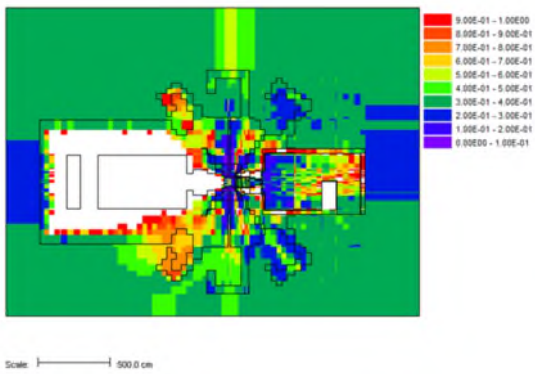


圖 24. MAVRIC 估算熱中子通率的相對統計誤差。

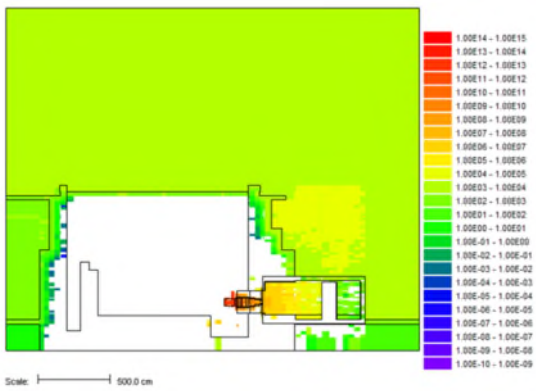


圖 25. MAVRIC 估算的熱中子通率通過爐心中央的垂直分佈。

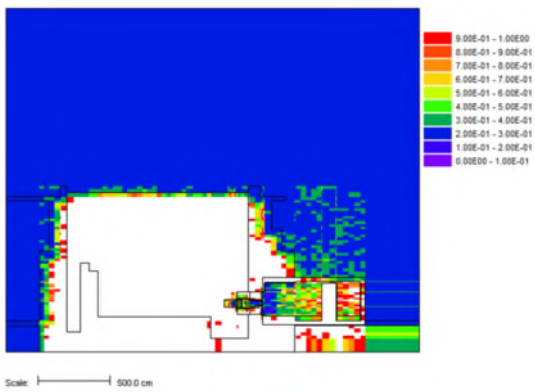


圖 26. MAVRIC 估算熱中子通率的相對統計誤差。

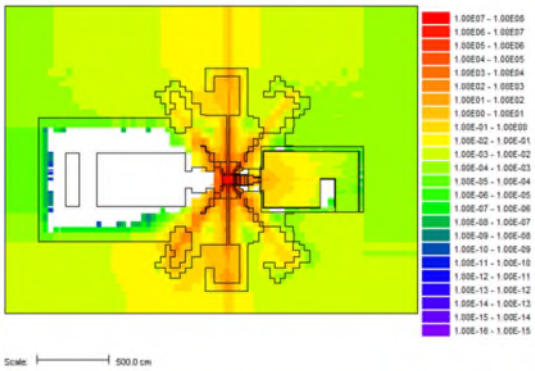


圖 27. MAVRIC 估算的中子劑量率 H*(10)通過爐心中央的水平分佈。

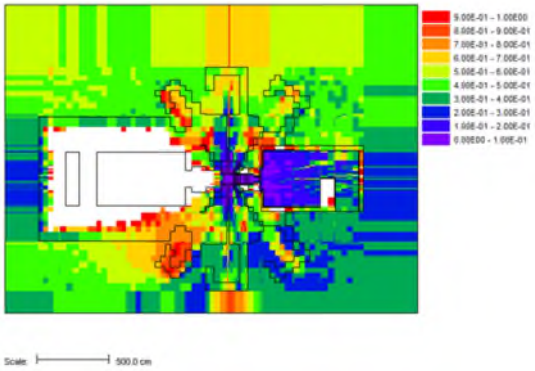


圖 28. MAVRIC 估算中子劑量率 H*(10)的相對統計誤差。

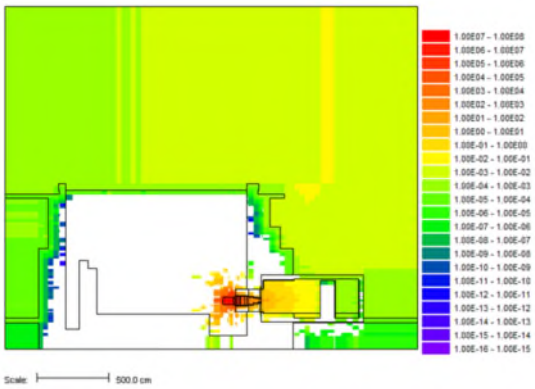


圖 29. MAVRIC 估算的中子劑量率 H*(10)通過爐心中央的垂直分佈。

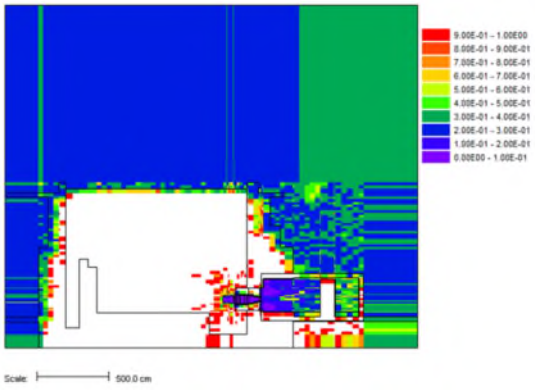


圖 30. MAVRIC 估算中子劑量率 H*(10)的相對統計誤差。

表 2. 具代表性位置的中子通率與中子劑量率

| Position | Neutron Flux (n/cm$^2$/s) | | | | H*(10) |
|---|---|---|---|---|---|
| | Total | Fast | Epi | Thermal | (Sv/h) |
| 1 | $2.99\times10^{9}$ | $6.57\times10^{6}$ | $2.76\times10^{9}$ | $2.23\times10^{8}$ | $1.42\times10^{2}$ |
| 2 | $5.73\times10^{3}$ | $2.69\times10^{1}$ | $2.41\times10^{3}$ | $3.28\times10^{3}$ | $5.48\times10^{-4}$ |
| 3 | $3.92\times10^{6}$ | $1.16\times10^{6}$ | $6.93\times10^{5}$ | $2.05\times10^{6}$ | $1.92\times10^{0}$ |
| 4 | $1.60\times10^{4}$ | $1.93\times10^{3}$ | $4.78\times10^{3}$ | $9.32\times10^{3}$ | $4.43\times10^{-3}$ |
| 5 | $3.72\times10^{8}$ | $5.60\times10^{7}$ | $1.07\times10^{8}$ | $2.08\times10^{8}$ | $1.27\times10^{2}$ |
| 6 | $1.52\times10^{6}$ | $1.33\times10^{6}$ | $1.62\times10^{5}$ | $2.70\times10^{5}$ | $2.02\times10^{0}$ |
| 7 | $1.39\times10^{8}$ | $1.36\times10^{8}$ | $1.36\times10^{6}$ | $1.47\times10^{6}$ | $1.98\times10^{2}$ |
| 8 | $1.42\times10^{5}$ | $1.45\times10^{4}$ | $3.54\times10^{4}$ | $9.28\times10^{4}$ | $3.55\times10^{-2}$ |
| 9 | $4.47\times10^{3}$ | $1.80\times10^{1}$ | $1.15\times10^{3}$ | $3.29\times10^{3}$ | $2.88\times10^{-4}$ |

## VII. 結論與未來方向

本計畫討論混合決定論法與蒙地卡羅法在大範圍深穿透輻射遷移計算的應用，測試直接由 THOR 爐心中子射源開始追蹤，以一次性的計算求得整個 THOR 爐房內的三維中子通率分佈。

本計畫中選用的基礎工具程式為應用 FW-CADIS 理論的 SCALE/MAVRIC，FW-CADIS 是一種進階混合決定論法與蒙地卡羅法的輻射遷移計算理論，也是 CADIS 理論的一種延伸。計算前期，在 MAVRIC 中先執行二次 DENOVO 的決定論 SN 法求得全區中子通率與伴隨通率，緊接利用伴隨通率產生射源粒子取樣參數與相空間的遷移參數，再以不同區域各自的中子通率再加權一次得到最後的射源粒子取樣參數與相空間的遷移參數，最後利用 MONOCA 程式依照最有效的射源與相空間參數的加權執行蒙地卡羅計算。經過這個過程處理的蒙地卡羅計算非常有效率，因為在粒子遷移過程中有二次決定論法的初步結果做為蒙地卡羅粒子取樣與前進的參考。

在本案例中估算 THOR 的中子通率時，我們將伴隨射源設定在爐房內的所有區域但不包含空氣與水，目的是想引導中子遷移至所有區域，使不同區域的結果盡量有差不多的統計誤差。從最後估算結果顯示，針對爐心沿水平照射管到實驗室屏蔽內附近的重要區域，可在有限的電腦資源與計算時間內得到初步具參考價值的中子通率分布，但在水池與其它生物屏蔽附近區域等則尚未得到結果，還需更久的計算時間才能有所計數，但是可想而知這些區域在實務輻射安全考量上不重要。

總結本計畫的成果，混合式輻射遷移計算在解決極端困難的輻射計算問題有極佳的效果，以 THOR 設施為例，我們示範了從爐心中子射源開始追蹤，成功求得 THOR 爐房內絕大部份區域的中子通率分佈。本研究所建立的方法與經驗明顯可以應用在各式各樣的核設施或輻射工作場所，計算所得之全區三維中子通率分佈有多種應用潛力，特別有利於設施規劃輻射安全管制作業或是評估未來除役必須考量的物質活化種類與程度。

# 壓水式反應器一次側系統水化學最適化研究
# Water Chemistry Optimization for Structural Integrity in PWR Primary Coolant System

計畫編號：MOST 107－NU－E－007－003－NU
計畫主持人：王美雅
e-mail：meywang@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學/原子科學技術發展中心

## 摘要

本計畫透過 DEMACE_PWR 程式，修正水化學相關參數，進行國內 PWR 核電廠經小幅度功率提昇後，組件材料分析在不同注氫濃度及 pH 值的調控(硼酸及氫氧化鋰濃度)下之主冷卻水迴路中關鍵氧化還原劑(氫、氧、過氧化氫)濃度的變化情形分析，以及組件防蝕效益的評估。

關鍵詞：壓水式反應器、應力腐蝕龜裂、pH 值、溶氫濃度。

## Abstract

In this project, the well-developed computer code would be modified and used to investigate the impact of dissolved hydrogen and the pH at temperature on the water chemistry variation in the primary coolant system of a PWR. Upon the completion of this project, predicted the water chemistry and corrosion behavior of structural materials in the primary coolant system of a PWR at the higher power level will be presented. This code would assist the primary coolant system cracking problem by exploring the impact of coolant hydrogen concentration on the ECP in relationship to the critical potential for the cracking of the component used in PWR.

Keywords: PWR, Stress Corrosion Cracking, pH Value, Dissolved Hydrogen.

## I. 前言

台灣除了核一、二廠為 BWR 外，核三廠則為 PWR，興建中的核四廠則為進步型沸水式反應器。為了降低核能電廠主冷卻水迴路的組件產生腐蝕行為，水化學是最主要考量的參數之一。壓水式反應器的主要腐蝕問題包含一次側及二次側冷卻水系統結構材料的腐蝕，而美國 PWR 廠運轉經驗顯示，合金 82/182/600 材質會在 PWR 正常運轉環境和一次側冷卻水因殘餘應力之狀態下產生 PWSCC 現象。而為了防止一次側冷卻水系統的組件產生腐蝕產物而對燃料護套造成 CRUD，採用的材料為不銹鋼及鎳基合金，嚴格控制了壓水式反應器水化學，因爐水受到輻射分解效應而產生過氧化氫，並進而分解成氧。雖然加入氫氣作為還原劑，減緩氧化性環境，但為了反應度與 pH 值的控制，加入硼酸及氫氧化鋰，使得 PWR 水化學更為複雜。

## II. 主要內容

PWR 在正常運轉下，一次側水循環迴路中的水經輻射分解效應以及後續的化學反應造成高度複雜性的環境，為了探究水環境對組件材料造成的影響，計算輻射水解成份的分佈是相當重要的課題，因為這些具有氧化還原特性的化學成份會直接地或間接地影響組件材料的腐蝕電位及裂縫成長。為了能夠計算壓水式反應器一次側水迴路組件的 ECP，需要考慮許多的過程及其物理現象，存在於金屬與其所屬的環境。ECP 隨著組件位置而有所差異，因受到所在環境的影響，包含熱流狀態、溫度、pH 值以及電化學成分的濃度等。必須先知道相關參數的數值才能計算 ECP，才可透過 ECP 了解一次側水迴路組件可能受到腐蝕的相關情況。特定位置的 pH 值與所在溫度相關，也須考量到可決定 pH 值的化學成分，像是硼和氫氧化鋰等。透過程式的開發，計算每個重要化學成分的濃度，包含生成及消耗的部分，以及所需的熱流參數、溫度。最後透過混和電位理論( Mixed Potential Model, MPM)獲得冷卻水迴路特定組件的 ECP。本計畫所使用的電腦模式「DEMACE_PWR」計算爐水經過中子、加馬及α射線照射後，主冷卻水迴路各處的分解產物的化學成份濃度。DEMACE_PWR 電腦程式將可預測壓水式反應器在不同的水化學狀態下的一次側冷卻水迴路中之爐水輻射分解產物濃度。

本研究進行 PWR 的水化學模擬時，將整個主冷卻水迴路區分成九個區域，其他未列入的區域均已被簡化並納入九個區域的爐水路徑長度考量中，以減低數值計算的複雜性。如圖 1 所示，整個迴路劃分為九個區域，分別為：1－爐心燃料匣區（Core Channel）、2－爐心旁通區（Core Bypass）、3－爐心上方空間（Upper Plenum）、4－熱噴嘴（Hot Nozzle）、5－蒸汽產生器（Steam Generator）、6－冷噴嘴（Cold Nozzle）、7－降流區（Downcomer）、8－爐心下方空間（Bottom Lower Plenum）、9－爐心下方空間（Top Lower Plenum）。本研究主要為針對功率變化對 PWR 反應器水化學與材料腐蝕趨勢影響的分析計算，內容可區分為四個部分：一為 PWR 水化學模擬程式理論基礎、二為現場實測與模式校正、三為 pH 值的調控(硼酸及氫氧化鋰濃度)對不同加氫濃度防蝕效益之影響預測。

## III. 結果與討論

模擬的結果是針對核三廠主要流徑的位置進行討論。目前 PWR 運轉的條件下，水中要求維持溶氫濃度在 30-35 c.c./kg 範圍，爐水中的溶氧維持在 1 ppb，過氧化氫的濃度則低於儀器可測值 50 ppb 以下。透過校正後的模擬程式，用於分析不同溶氫條件、硼濃度與 pH 值下的氧化還原劑濃度變化。

針對硼濃度固定在 1000 ppm 下，圖 2 顯示不同溶氫濃度下的氧化還原劑濃度變化。隨著溶氫量的增加，可以看出兩種氧化劑，包含溶氧與過氧化氫的濃度是隨著溶氫量的增加而減少。爐水在經過降流區之後，溶氧濃度可以降至較低的值。過氧化氫濃度經過降流區時因劑量的關係而增加。氧化劑的濃度變化顯示溶氫濃度在 10 c.c./kg 範圍下顯現比較高的數值，尤其是溶氧的數值，在這個溶氫濃度下無法有效抑制氧的濃度。

圖 3 為在不同硼濃度下的氧化還原劑濃度變化。在同一溶氫濃度下，隨著燃料周期的變化，硼濃度由高的數值因與中子作用後而逐漸下降，可以發現氧化劑濃度在硼濃度較高時也較高，主要是因為硼與中子產生的粒子對水產生的輻射分解效應。不過因為在 35 c.c./kg 溶氫的作用下，兩者氧化劑濃度都不高。

圖 4 顯示 pH 值對於氧化還原劑濃度的影響，兩者對於溶氫、溶氧與過氧化氫的影響差異顯示較低的 pH 值顯示較高的數值，氧化劑濃度在接近爐心區域的位置明顯因 pH 值的不同而較為不同。

## IV. 結論

分析的結果顯示爐水中的溶氫濃度還是影響氧化劑濃度的最主要因素。未來調整溶氫濃度則需另外評估對於組件 SCC 起始的影響，尤其對於 600 合金及其類似的材料，其氧化膜將是影響 PWSCC 敏感性的關鍵。

## 參考文獻


[1] D. D. Macdonald et al., “Modeling the Radiolysis and Electrochemical Properties of PWR Primary Coolant Circuits,” 5th International Workshop on LWR Coolant Water Radiolysis and Electrochemistry, San Francisco, United States, October 15, 2004.

[2] D. D. Macdonald et al., “Electrochemistry of Water-Cooled Nuclear Reactors,” Nuclear Energy Education Research Final Technical Progress Report, (2006).

[3] Mei-Ya Wang and Tsung-Kuang Yeh, “Study of Boron Concentration Changes on the Water Chemistry in a Pressurized Water Reactor during the Fuel Cycle,” International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, USA, September 9-14, 2018.

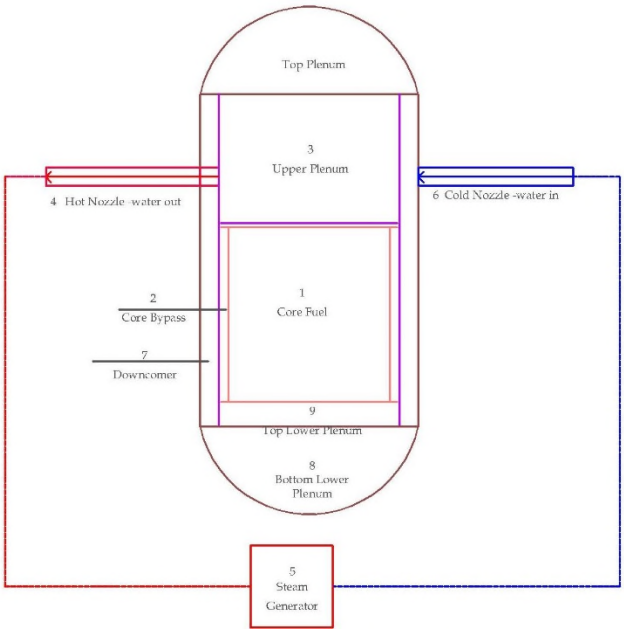
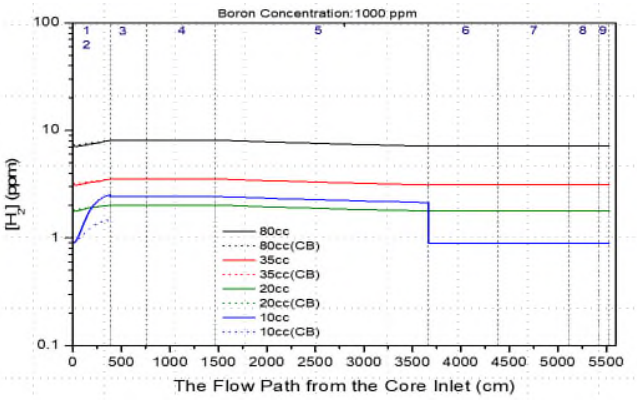
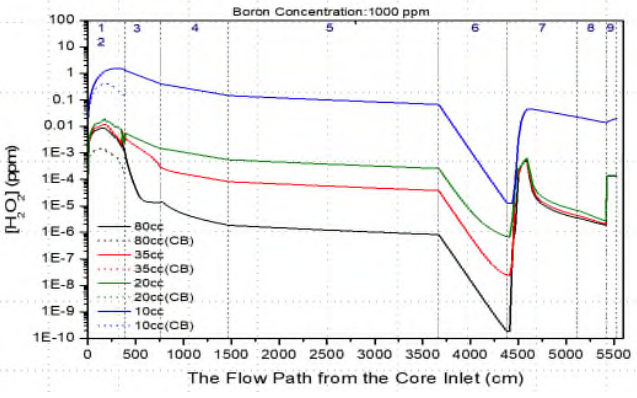




圖 1、核電廠主冷卻水迴路壓力槽內部組件幾何位置示意圖



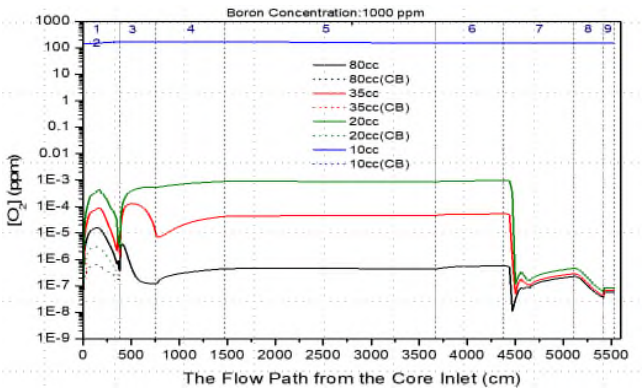
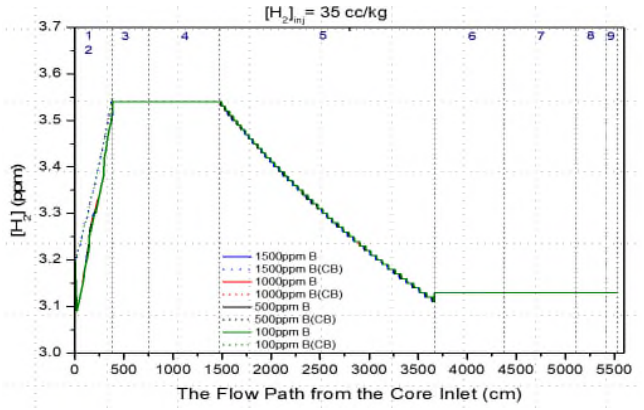
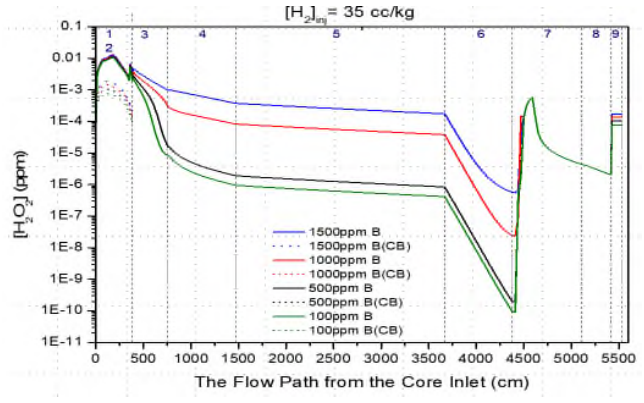



圖 2、固定硼濃度(1000 ppm)下，各模擬區域之氧化還原劑濃度在不同加氫量下的變化情形



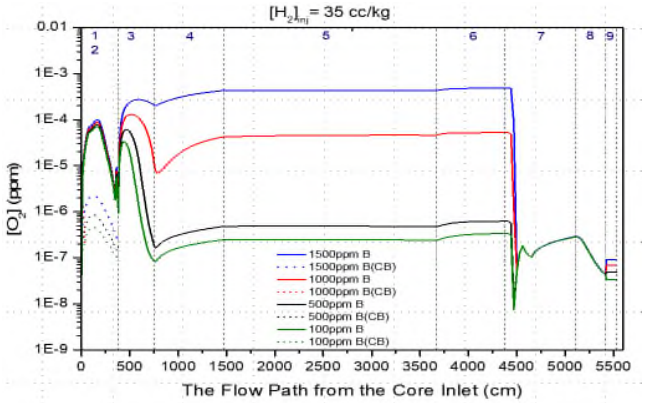
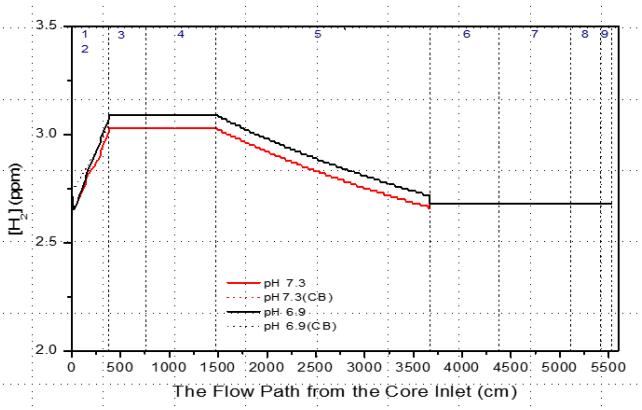
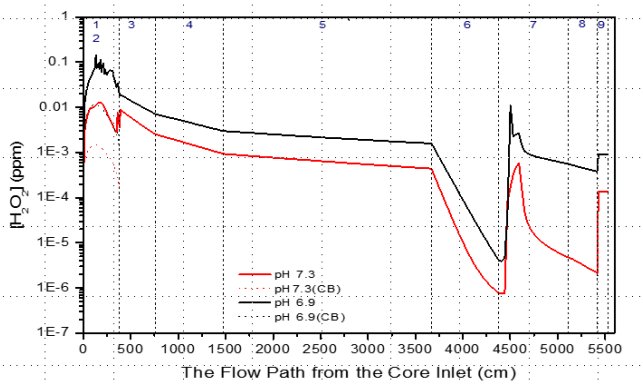




圖 3、加氫量(35 cc/kg) 固定下，各模擬區域之氧化還原劑濃度在不同硼濃度下的變化情形



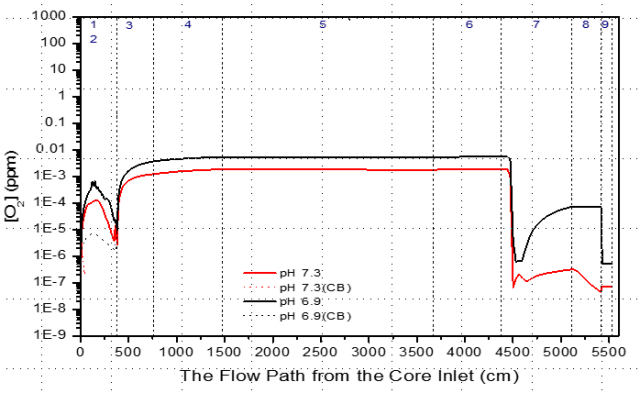




圖 4、加氫量(30 cc/kg) 固定下，各模擬區域之氧化還原劑濃度在不同 pH 下的變化情形

# 利用流固耦合以二相流分析方法探討蒸汽產生器之熱交換管的暫態應力特性

# Stress Analysis of Heat Exchanger Used on Steam Generator Based on Fluid-Structure Interaction of Two-Phase Flow

計畫編號：107-2623-E-011-003 -NU
計畫主持人：許清閔
e-mail：cmhsu@nfu.edu.tw
計畫共同主持人：黃育熙
執行單位：國立虎尾科技大學 機械設計學系
國立臺灣大學 機械工程學系

## 摘要

本計畫探討應用於蒸汽產生器之陣列式熱交換管於高速流體誘發結構的振盪，振動經由分析可能在不同流速下產生的振動與應力有其相關性，推估會使熱交換管受到疲勞破壞進一步造成應力腐蝕，因此分析模型以流固耦合分方式進行熱交換管之暫態應力波傳與振動的特性，並與穩態聲固耦合與非耦合結構進行振動特性的比較。

本研究分析區分為兩種方式，有限元素分析與暫態波傳應力分析，於有限元素給予流體壓力與四種不同流速之分析條件再與結構結合，探討穩定和不穩定流場下溫度於流體內部與結構升溫的情形，以及流體造成結構變形與應力的差異，利用暫態波傳應力與應變將進行短時傅立葉轉換(Short－time Fourier Transform，STFT)獲得時頻-能量響應，了解頻率與強度隨時間衰減之特性。因此經由本研究的執行建立蒸汽產生器之熱交換管於不同流速下的流固耦合暫態應力與振動分析技術，以期未來可經由其他結構、流體與溫度等條件探討振動疲勞對應力破壞的影響。

關鍵詞：流固耦合、暫態應力波傳、流體致振、熱交換器、聲固耦合。

## Abstract

Exploring the oscillation of an array-type heat exchange tube applied to a steam generator in a high-speed fluid-induced structure, it is speculated that such vibration may cause fatigue damage to the heat exchange tube and further cause stress corrosion. Therefore, the fluid-solid coupling of the two-phase flow is used to analyze the transient stress wave propagation and vibration characteristics of the heat exchange tube.

The analysis of this study is divided into two methods, finite element analysis, and transient wave propagation stress analysis. The finite element analysis provided fluid pressure and the different characteristics of four flow velocities, which result in the different properties of the fluid under the stable and unstable flow fields as well as the increase of the temperature. Therefore, fluid properties then applied to the structure model in order to investigate the impact on the structure. In the transient wave propagation strain, the transient strain response is made into a short-time Fourier transform with a time-frequency diagram to understand the characteristics of frequency and intensity decay with time.

Therefore, the implementation of this study will establish a fluid-solid coupling vibration analysis technique for the heat exchanger tubes of steam generators, in order to explore the effect of vibration fatigue on stress damage.

Keywords: Fluid-Structure Interaction, Stress Propagation, Flow Induced Vibration, Heat Exchanger, Acoustical-Solid Coupling.

## I. 前言

對於國內在檢測核電使用的熱交換器之蒸氣產生管束的安全評估多半藉由現有的非破壞檢測技術，鮮少建立考慮具學理之二項流的流固耦合暫態應力分析，核電設備中應用蒸汽產生器之陣列式熱交換管如圖一[1]，會在高速流體通過元件時誘發流體振盪，物理機制包含了液態與氣態流體互相轉換之二相流特性，以及造成熱交換管可能發生振動的流固耦合之力學特性，這種振動可能會使熱交換管發生疲勞破壞造成應力腐蝕的現象，且核三廠蒸汽產生器過去的確曾發生塞管與微漏的事件[2]，因此針對流固耦合所造成的力學特性尤其需詳加研究是否為應力腐蝕破壞的主要因素。本研究建立蒸汽產生器的熱交換管基於理論背景給與實際物理參數條件力用數值計算方法驗證結構安全性，確認管件幾何外型於流體作用下產生的應力特性，以推估其振動疲勞特性對於結構的影響。

## II. 文獻回顧

水以各種形式作用在結構管件上，會產生破壞性的振動，這種現象稱為流體誘導振動(Fluid Induced Vibration，FIV)，此種現象會阻礙工程設備的平穩運行，甚至導致系統故障的嚴重後果，所以在工程行業中單相和多相流的議題備受關注，對於單向流體非的結構振動問題就十分複雜，因此二相流有許多模型提出，早期研究人員多半以均質平衡模型(Homogeneous Equilibrium Model，HEM)定義二相流參數，例如密度空孔率速度等。此模型在氣體與液體之間整體而言是均質的特性，計算評估較為簡單。爾後，一些二項流的分析模型逐漸發展，如：Smith 於 1968 年提出的 Smith Correlation[3]、Zuber and Findlay 於 1965 年提出的 drift-flux model[4]、Schrage 於 1998 年提出的 Schrage Correlation[5]、Feenstra 等人

於 2000 年提出的 Feenstra mode[6]等等。頻譜分析是研究 FIV 現象的重要技術， James Cooley 與 John Tukey 於 1965 年提出快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform，FFT)演算法，通常用於分析力和動量、通量週期性波動信號，隨著時間而演化出短時距傅立葉變換、小波轉換等等，本研究使用短時距傅立葉變換來做訊號解析。

熱交換的流體致振研究雖已有諸多相關研究文獻，過往流體力學的研究可以單向簡化模型討論結構振動的現象，Connors 於 1970 年最早提出模型來評估蒸氣管束內流動引起的振動[7]，在 1995 年 Eisinger 等人創建了一個管束的數值模型，結合有限元求解器來模擬流動引起的振動[8]。Cheng 和 Finnie 於 1996 年推導了受均勻橫流影響的管子運動方程，然後預測了管子和流體動力的振動響應[9]。Longatte 等人於 2003 年提出了一種具有周期性邊界條件的完全耦合方法，以模擬橫流中管的動態行為[10]。Kim 和 No 於 2004 年使用大渦模擬(LES)來研究橫向流動中真實於圓柱體的特性[11]。Kim 和 Mohan 2005 年驗證了 LES 模型，並計算了高雷諾數交叉流量下管道上的力[12]。Oakley 等人 2005 年使用 Detached-Eddy Simulation（DES）模擬高雷諾數橫流中的管使 FSI 更加完整[13]。Ahn 和 Kallinderis 在 2006 年採用任意拉格朗日-歐拉來研究橫流中管的特徵[14]；同年 Kim 和 Choi 進行了一種新的浸入式邊界法（IBM）來模擬受交叉流動的管子的流動模式和動態行為[15]。Borazjani 等人 2008 採用耦合模型來分析橫流中任意大變形的管子的振動[16]，Simoneau 等人於 2010 年使用 LES，結合網格方法研究 FSI 模型，隔年使用完全耦合的方法來進一步改進流體結構相互作用問題的評估，並分析了流動管的振動響應。2013 年 E. Longatte 和 F. Baj 等人對於流-固耦合的數值模擬方法提出一種新的混和建模並擴展對熱交換管束內的二相流的探討[17]。

大多對於熱交換管的文獻都來自國外，在國內的相關研究已有許久未有學者執行，尤其目前有限元素數值計算工具的成熟，可針對此議題建立符合時宜的分析技術，目前電腦模擬已可進行流體與固體的分析，故經由本研究的執行可以確立此研究問題的分析技術。

## III. 研究理論

### 1. 流體模型

就流固系統而言的二相流模型，屬於圖四[18]中平型流體(Parallel Flow)形式，其中，二相流的流體特徵再許多文獻多使用以下分率形式來定義流體平均混合速度$V_p$、密度ρ、介面流體速度等$V_i$等[18]

$$V_p = \frac{\rho_g Q_g + \rho_l Q_l}{\rho A} = \frac{\rho_g J_g + \rho_l J_l}{\rho} \tag{1-1}$$

Q為體積流率、A為有效流體截面積，J為線流速，下標g與l分別表示氣體與液體相位，混合密度ρ定義如下

$$\rho = \alpha_H \rho_g + (1-\alpha_H)\rho_l \tag{1-2}$$

其中$\alpha_H$為氣相分率

$$V_i = 0.73(J_g + J_l) + \sqrt{gD_e(\rho_l - \rho_g)/\rho_l} \tag{1-3}$$

其中，g為重力加速度，$D_e$為有效管徑。

因此，可應用於有限元素分析軟體進行流固耦合的流體條件中，帶入質量守恆、能量守恆、動量守恆的統御方程式進行計算。由非黏性可壓流體統御方程式中得知，Navier-Stokes 方程式可以簡化為

$$\tilde{\rho}\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = -\nabla P \tag{1-4}$$

其中P為壓力，ρ為流體密度，u為流速，t為時間。

可壓縮流的連續方程式為

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \nabla\cdot(\tilde{\rho}\tilde{u}) = 0 \tag{1-5}$$

並假設壓力、密度與流速包括一個初始值與時間空間的函數

$$\begin{aligned} p &= p_0 + p'(x,y,z,t) \\ \tilde{\rho} &= \tilde{\rho}_0 + \tilde{\rho}'(x,y,z,t) \\ \tilde{u} &= \tilde{u}_0 + \tilde{u}'(x,y,z,t) \end{aligned} \tag{1-6}$$

將式(6)代入(4)並作梯度的空間微分可整理出

$$\tilde{\rho}_0 \Delta\cdot\frac{\partial \tilde{u}'}{\partial t} = -\nabla^2 p' \tag{1-7}$$

接著同樣接式(1-6)代入式(1-5)可得

$$\frac{\partial^2 \tilde{\rho}'}{\partial t} + \tilde{\rho}_0 \nabla\cdot\tilde{u} = 0 \tag{1-8}$$

並對式(1-8)作時間微分可以整理出

$$\frac{\partial^2 \tilde{\rho}'}{\partial t^2} + \tilde{\rho}_0 \nabla\cdot\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = 0 \tag{1-9}$$

由式(1-7)和式(1-9)關係得到

$$\frac{\partial^2 \tilde{\rho}'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = 0 \tag{1-10}$$

令 $p' = \left[\frac{\partial p}{\partial \tilde{\rho}}\right]\tilde{\rho}' = c_0\tilde{\rho}'$，可獲得聲場方程式

$$\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 \tilde{\rho}'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = 0 \tag{1-11}$$

使用φ速度勢(Velocity potential)描述一個可壓縮且無黏滯性的連續流場，當速度$\tilde{u} = \nabla\varphi$時，得到的波動方程式

$$\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \nabla^2\varphi = 0 \tag{1-12}$$

其中，$c_0$為流體聲速(Speed of sound)，且由體積模數K(Bulk Modulus)與體積V及壓力p的關係可得

$$K = -V\frac{dp}{dV} = -V\frac{\partial p}{\partial \tilde{\rho}}\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial V} = -V\frac{\partial p}{\partial \tilde{\rho}}\frac{\partial (m/V)}{\partial V} = \tilde{\rho}\frac{\partial p}{\partial \tilde{\rho}} \tag{1-13}$$

且

$$c_0 = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \tilde{\rho}}} = \sqrt{\frac{K}{\tilde{\rho}_0}} \tag{1-14}$$

利用(1-14)式可將體積模數K與流體密度$\tilde{\rho}$換算流體聲速$c_0$。

Yu-His Huang和Hui-Tseng Hsu於2016年對流固耦合進行壓電水聲元件開發，成功的利用實驗量測、理論分析與有限元素數值計算三者均獲得良好的對應性，因此可以確定此分析技術的適用性與準確性[20]。

可將穩態的流體視為一種聲學介質，即一種彈性體，假設流體為可壓縮非黏性的理想聲學介質。

聲學統御方程式

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1-15}$$

其中p為聲壓，c為流體聲速，將(10)式經由離散後可得

$$M_e^p \ddot{P}_e + K_e^p P_e + \rho R_e^T \ddot{U}_e = 0 \tag{1-16}$$

其中$M_e^p$為流體的質量矩陣，$K_e^p$為流體的勁度矩陣，ρ為流體的平均密度、$R_e$為流固耦合的質量矩陣，$P_e$為聲壓向量。

**2. 固體模型**

固體力學中，其統御方程式為Cauchys's equation如下所示

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_{ij} + F_s \tag{2-1}$$

其中ρ為結構密度，U為位移向量，$\sigma_{ij}$為應力，$F_s$為結構負載力。

一般在結構系統中，其結構的動力方程式

$$M_e^p \ddot{U}_e + K_e U_e + C_e \dot{U}_e = F_e + F_e^{pr} \tag{2-2}$$

其中$M_e$為結構的質量矩陣，$K_e$為結構的阻尼矩陣，$C_e$為結構的勁度矩陣，$F_e$為結構的負載力，$F_e^{pr} = R_e P_e$為流固耦合中流體的作用壓力。

**3. 暫態波傳應力分析**

本計畫以流固耦合方法進行結構分析，在數值計算所獲得的暫態訊號將進行時頻轉換藉以確認其振動特性，往後才能詳細考量疲勞與應力現象對結構安全性的破壞分析之影響。因此，管路受到二相流的動態訊號，可經由簡化歐拉-白努利梁模型進行暫態波傳的特性分析，如圖五所示。獲得之時欲訊號，可藉由圖六的解析流程達到。在此先不考慮二相流的影響因素，單純對於一管束若受到流體做用力會產生的波傳現象進行描述，以圖五標量之的統御方程式為

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{1}{q^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \tag{3-1}$$

其中，$q^2 = \frac{EI}{\rho A}$。

考慮梁的初始邊界條件為

$$y(x,0) = 0$$
$$\frac{\partial y(x,0)}{\partial t} = 0 \tag{3-2}$$

以單邊固定的懸臂邊界為例

$$y(0,t) = 0$$
$$\frac{\partial y(0,t)}{\partial x} = 0 \tag{3-3}$$

$$M(L,t) = EI\frac{\partial y^2(L,t)}{\partial x^2} = 0$$
$$V(L,t) = -EI\frac{\partial y^3(0,t)}{\partial x^3} = 0 \tag{3-4}$$

取拉式轉換(Laplace Transform)可得

$$\int_0^\infty \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} e^{-pt} dt + \int_0^\infty \frac{1}{q^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} e^{-pt} dt = 0 \tag{3-5}$$

可將(5-5)式簡化為

$$\frac{d^4 \hat{y}}{dx^4} + \frac{1}{q^2} P^2 \hat{y} = 0 \tag{3-6}$$

並假設$\hat{y} = A(p)e^{\lambda x}$代入方程式(3-6)中，可得

$$\lambda^4 + \frac{P^2}{q^2} = 0 \tag{3-7}$$

其中，$\pm\lambda_j(p) = \left[\pm i\frac{p}{q}\right]^{1/2}$ ，　　$j = 1,2$。故獲得梁的四階微分方程式於拉式轉換後可寫為

$$\hat{y}(x;p) = \upsilon_{1+}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{-\lambda_1 x} + \upsilon_{1-}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{\lambda_1 x} + \upsilon_{2+}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{-\lambda_2 x} + \upsilon_{2-}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{\lambda_2 x} \tag{3-8}$$

$$\hat{\phi}(x;p) = -\lambda_1\upsilon_{1+}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{-\lambda_1 x} + \lambda_1\upsilon_{1-}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{\lambda_1 x} - \lambda_2\upsilon_{2+}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{-\lambda_2 x} + \lambda_2\upsilon_{2-}(\mathrm{p})\mathrm{e}^{\lambda_2 x} \tag{5-9}$$

$$\hat{V}(x;p) = -EI\frac{d^3\hat{y}}{dx^3}$$
$$= -EI\lambda_1^3(\upsilon_{1-}\mathrm{e}^{\lambda_1 x} - \upsilon_{1+}\mathrm{e}^{-\lambda_1 x}) - EI\lambda_2^3(\upsilon_{2-}\mathrm{e}^{\lambda_2 x} - \upsilon_{2+}\mathrm{e}^{-\lambda_2 x}) \tag{5-10}$$

$$\hat{M}(x;p) = EI\frac{d^2\hat{y}}{dx^2}$$
$$= EI\lambda_1^2(\upsilon_{1-}\mathrm{e}^{\lambda_1 x} + \upsilon_{1+}\mathrm{e}^{-\lambda_1 x}) + EI\lambda_2^2(\upsilon_{2-}\mathrm{e}^{\lambda_2 x} + \upsilon_{2+}\mathrm{e}^{-\lambda_2 x}) \tag{3-11}$$

將(3-8)-(3-11)寫為矩陣形式

$$\begin{bmatrix} \hat{y}(x) \\ \hat{\phi}(x) \\ \hat{V}(x) \\ \hat{M}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11}(x) & M_{12}(x) & M_{13}(x) & M_{14}(x) \\ M_{21}(x) & M_{22}(x) & M_{23}(x) & M_{24}(x) \\ M_{31}(x) & M_{32}(x) & M_{33}(x) & M_{34}(x) \\ M_{41}(x) & M_{42}(x) & M_{43}(x) & M_{44}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \upsilon_{1+} \\ \upsilon_{2+} \\ \upsilon_{1-} \\ \upsilon_{2-} \end{bmatrix} \tag{3-12}$$

並代入邊界條件後經由射線法求解

$$\begin{bmatrix} M_{11}(0) & M_{12}(0) & M_{13}(0) & M_{14}(0) \\ M_{21}(0) & M_{22}(0) & M_{23}(0) & M_{24}(0) \\ M_{31}(L) & M_{32}(L) & M_{33}(L) & M_{34}(L) \\ M_{41}(L) & M_{42}(L) & M_{43}(L) & M_{44}(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \upsilon_{1+} \\ \upsilon_{2+} \\ \upsilon_{1-} \\ \upsilon_{2-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3-13}$$

其中，$\mathrm{M} = \mathrm{D} + \mathrm{L} + \mathrm{U} = \begin{bmatrix} D_1 & U_1 \\ L_2 & D_2 \end{bmatrix}$，在此，不再贅述各項細節，主要經由行列式求解再由Durbin提出的拉式逆轉換[14]

$$f(t) = \frac{2e^{\alpha t}}{T}\left\{-\frac{1}{2}\mathrm{Re}[F(\alpha)] + \sum_{k=0}^{\infty}\mathrm{Re}[F(\alpha + i\frac{2k\pi}{T})]\cos(\frac{2k\pi t}{T}) - \mathrm{Im}[F(\alpha + i\frac{2k\pi}{T})]\sin(\frac{2k\pi t}{T})\right\} \tag{3-14}$$

可獲得理論解析之暫態應波傳分析結果，可對時域訊號進行時頻轉換得知其振動頻率與強度隨時間衰減之特性，如圖七(左)示意為時域訊號的理論解析與有限元素

之結果比較，並將訊號進行短時傅立葉轉換可獲得結構之時頻特性。

## IV. 研究方法

### 1. 有限元素分析模擬

本研究採用商業套裝軟體 ANSYS 18.2版，進行有限元素分析，於流體部分使用ANSYS FLUENT 模組進行暫態流場分析，在建立控制方程設定k-epsilon模型，將流體性質指定為水蒸氣，然後給予壓力和四種不同速度，分別為1、3、5、10 (m/s)，且於流體進口端設定873(K)與邊界層熱通量1200(W/m2)等熱相關條件，然後設定時間步長以及步長數量將其求解。在固體分析使用ANSYS Transient Structure，熱交換管的尺寸如表1所示，在材料部份需設定熱傳導係數、比熱、密度、熱膨脹係數、彈性係數、浦松比之機械性質，如表2所列。分析步驟分為兩階段，其一為流體分析，在流體分析可以得到四種速度分別於不穩定流場與穩定流場下的分布情形，並將所得到的流場壓力條件代入第二個分析步驟：暫態結構分析，使結果考慮於不同流場下對於結構應變的影響。

### 2. 暫態波傳應變分析

將有限元素分析於結構的暫態應變響應結果輸出，再帶入短時傅立葉轉換(STFT)，利用將輸入的整個訊號過程分解成數個等長的小過程，每個小過程近似平穩來呈現頻率隨時間耗散的過程。

## V. 結果與討論

### 1. 有限元素分析

圖八(a)、(b)為不穩定流場和穩定流場的比較圖，流體經彎管處時均會產生速度變化的情形。圖八(b)是穩定流場經過 U 型彎管的典型流場特徵，流體在靠近轉彎會形成兩個主要的低速區(或稱為迴流區)，一為靠近轉彎處的外側及經過轉彎處後的內側，如圖八(b)標註所示。並且，隨著流速增加，低速區的面積增加[21]。然而，在圖八(a)中，由於流場內造成不穩定的現象，可能在低速區產生激烈的速度擾動，使得流體在轉彎處下游的低速區內有較大的流體動量與質量的傳遞，進而減小低速區的形成。因此，在圖八(a)中的轉變處內側，低速區的範圍較小。圖九(a)、(b)為流場內於彎管處分布的情形，可以看出溫度和速度是呈現相依的情形，不穩定流場 873K 到最高溫為 949 K；穩定流場最高溫為 960 K，圖十(a)、(b)為應變分布圖，不穩定流場時應變無集中於特定位置，於穩定流場後最大應變均集中於第一彎管處，於速度 10 產生最大應變為 0.0011519 ，於速度 1 應變值為 0.0010915 ，也可以由圖得知速度越快應變越大。

### 2. 暫態波傳應力

圖十一為於不穩定流場下平均應變的頻率與時頻圖，在不穩定的情況下速度越低比較容易激發出低頻的震盪但因擷取的作用時間過短，因此無法完整看出能量的變化，但可以由頻率得知速度 3 和 5 在極短時間內較容易激發低頻的震盪分別為 6,719 Hz 和 5,415 Hz，圖十二為平均應變在穩定的情況下可以看出頻率能量隨時間的變化速度 1 與其他四個速度相比最容易激發出低頻的震盪，但頻率能量均不大，速度 3 的主要頻率為 12,030 Hz 和速度 5 的主要頻率為 11,310 Hz 都是處在比較高頻的地方，但在作用時間都比較短暫的情況，隨時間增長於 0.04 秒之後只剩下一個高頻為主要作用，在速度 10 m/s 的部分也容易激發低頻振盪且頻率能量是四個速度中最大的。圖十三和圖十四為最大單元應變於各別流場的情況下，則是速度越快越容易產生低頻振盪，穩定流場在速度 3 產生比較高頻的情形約 0.02 秒之後就沒有任何作用了，而速度 10 m/s 是較容易激發低頻振盪且作用強度相對較大。

## VI. 結論

本研究藉由 FEM 模擬結果以及暫態波傳應變分析，綜合幾點以下結論為:

1. 速度和溫度分布是相依的，速度較低升溫結果越明顯。
2. 流場穩定時，隨著雷諾數的增加彎管處的速度差異會越大
3. 最大應變集中於彎管處以流速較低造成應變會較大。
4. 穩定和不穩定的流場均是流速越低越容易激發低頻的震盪，且穩定時頻率相對較低。
5. 在單元最大應變處，則是流速越高越容易激發低頻震盪。
6. 由於結構的破壞大都是低頻的震盪引起的，總和以上結果，推測流速在 3m/s 情況下對結構會是比較好的選擇。

## 參考文獻


[1] 核三場一號機第十八次大修蒸汽產生器管束非破壞檢測視察報告，NRD-NPP-98-21，行政院原子能委員會核能管制處，中華民國九十八年八月。

[2] 核三廠一號機第十五次大修管制報告(蒸汽產生器管束檢測)，NRD-NPP-93-32，行政院原子能委員會核能管制處，中華民國九十三年十二月。

[3] Smith, S.,1968.''Void fractions in two-phase flow: a correlation based upon an equal velocity head model.''Proc. Inst. Mech. Eng.

[4] Zuber, N.,Findlay, J., 1965. “Average volumetric concentration in two-phase flow systems.''ASME J. Heat Transfer 87,453-468.

[5] Scharge, D., 1988. ‘’Two-phase pressure drop in vertical cross-flow across horizontal tube hundle.'' AICHE J. 34(1), 107-115.

[6] Feenstra, P., Weaver, D.S., Judd, R.L., 2000.''Modelinng two-phase flow excite fluid-elastic instability in tube arrays.'' In: Proceedings of the Seventh International Conference on Flow-Induced Vibrations, FIV-2000, Lucerne, Switzerland, June 19-22, ISBN 90 5809 1295, pp. 545-554.

[7] Connors, H., 1970. “Fluid elastic vibration of tube arrays excited by cross flow. In:Proceedings of the Symposium on Flow-Induced Vibration in Heat Exchangers,” ASME Winter Annual Meeting, New York., pp. 42–56.

[8] Eisinger, F., Rao, M., Steninginger, D., Haslinger, K., 1995. “Numerical simulation of cross-flow-induced fluid elastic vibration of tube arrays and comparison with experimental results.” J. Press. Vessel Technol 117, pp.31-39.

[9] Cheng, W., Finnie, I., 1996. “Analysis of the flui

d-elastic vibration of a U-bend tube bundle induced by cross-flow in PWR steam generators." Nucl. Eng. Des. 160, pp.111-128

[10] Longatte, E., Bendjeddou, Z., Souil, M., 2003. "Methods for numerical study of tube bundle vibrations in cross-flows." J. Fluids Struct. 18, pp.513-528

[11] Kim, M., No, H., 2004. "Analysis of power spectrum density in the PWR fuel assembly using the 3-D LES turbulent model of FLUENT 6. ICONE12-49297. In: Proceedings of the 12th International Conference on Nuclear Engineering" Arlington, VA, April, 25-29.

[12] Kim, S., Mohan, L., 2005 "Prediction of unsteady loading on a circular cylinder in high Reynolds number flows using large eddy simulation. OMAE 2005-67044.In: Proceedings of OMAE 2005: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering." Halkidiki, Greece, June 12-16.

[13] Oakley, O.H., Constantinides, Y., Navarro, C., Holmes, S., 2005. "Modeling vortex induced motions of spars in uniform and stratified flows. OMAE2005-67238. In: Proceedings of OMAE 2005: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering," Halkidiki, Greece, June 12-16.

[14] Ahn, H., Kallinderis, Y., 2006. "Strongly coupled flow/structure interactions with a geometrically conservative ALE scheme on general hybrid meshes." J. Comput.phys. 219, pp.671-696.

[15] Kim, D., Choi, H., 2006. "Immersed boundary method for flow around an arbitrarily moving body." J. Comput. Phys.212, pp.662-680.

[16] Borazjani, I., Ge, L., Sotiropoulous, F., 2008. "Curvilinear immersed boundary method for simulating fluid structure interaction with complex 3D rigid bodies." J. Comput. Phys. 227, pp,7587-7620.

[17] E.Longatte., F.Baj., Y.Hoarau., M.Braza., D.Ruiz., C.Canteneur. "Advanced numerical methods for uncertainty reduction when predicting heat exchanger dynamic stability limits: Review and perspectives " Nuclear Engineering and Design vol.258, pp.164-175,2013

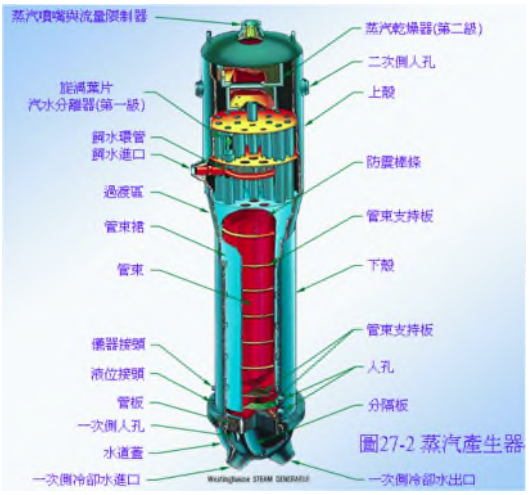
[18] Jiang Nai-bin, Xiong Fu-rui, Zang Feng-gang, Zhang Yi-xiong, and Qi Huna-huan, "Analysis on vibration response of U-tube bundles caused by two-phase cross-flow turbulence," Annals of Nuclear Energy, vol.99, pp.328-334,2017.

[19] INCONEL 600 TECHNICAL DATA

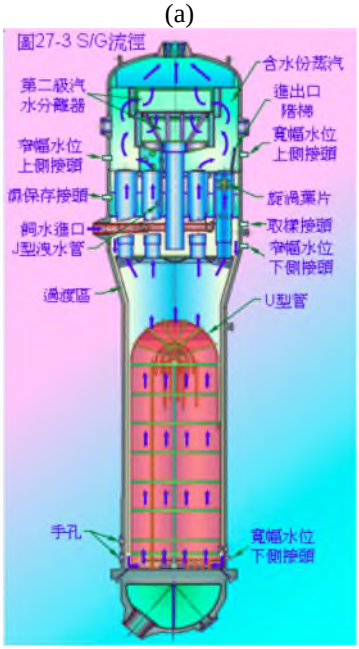
[20] Yu-His Huang, and Hui-Tseng Hsu, "Solid-liquid coupled vibration characteristic of piezoelectric hydroacoustic devices", Sensors and Actuators, vol. 238(A), pp.177-195, Feb 2016

[21] Prasun Dutta, Sumit Kumar Saha, Nityananda Nandi, Nairit Pal. "Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high Reynolds number by k-ε modelling" Journal of Engineering Science and Technology vol. 19 pp. 904-910, Jun 2016

## 圖表資料

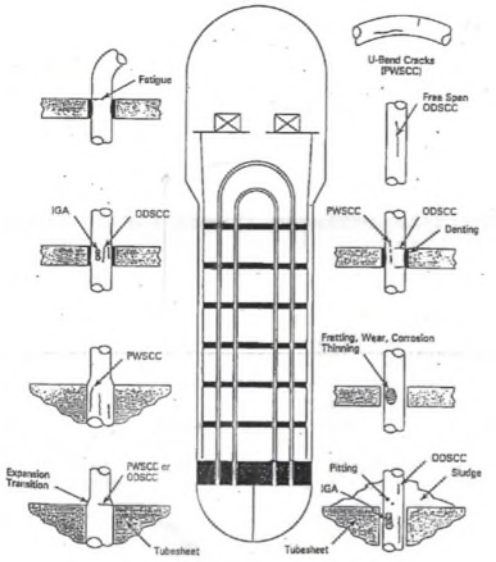



(a)

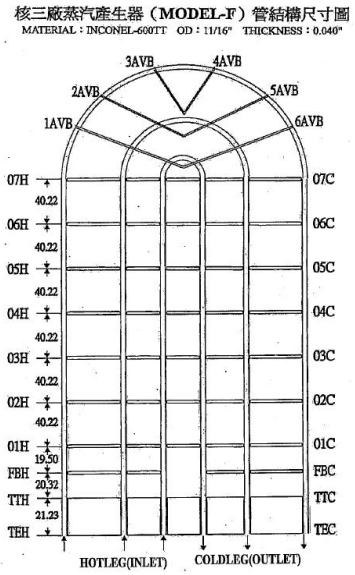



(b)

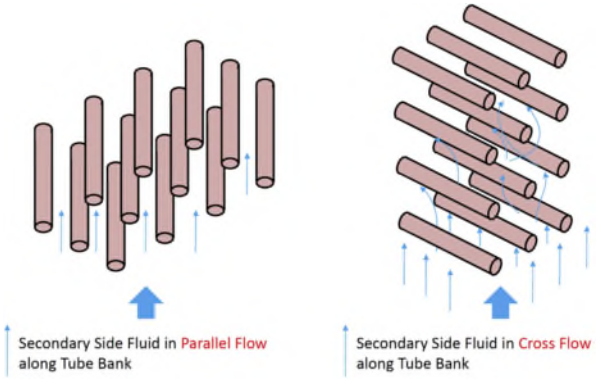
圖一、蒸汽產生器之(a)構造, (b)與流徑[1]



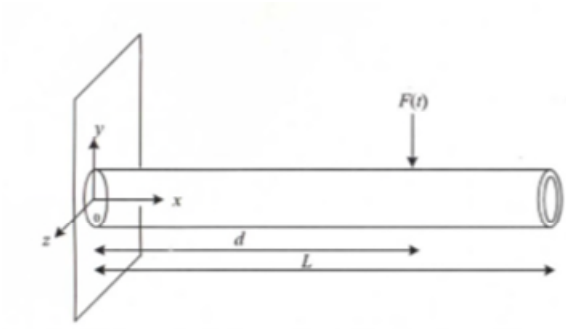

圖二、蒸汽產生器管束常發生的劣化機制[2]



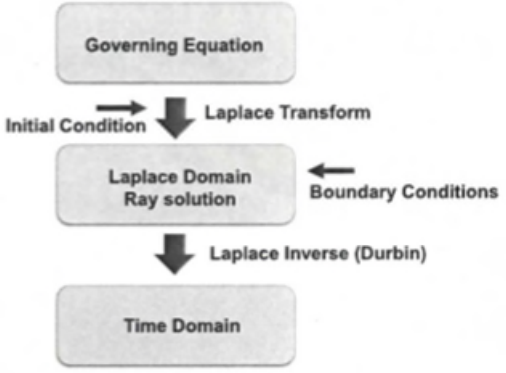

圖三、蒸汽產生器之管束尺寸結構[17]



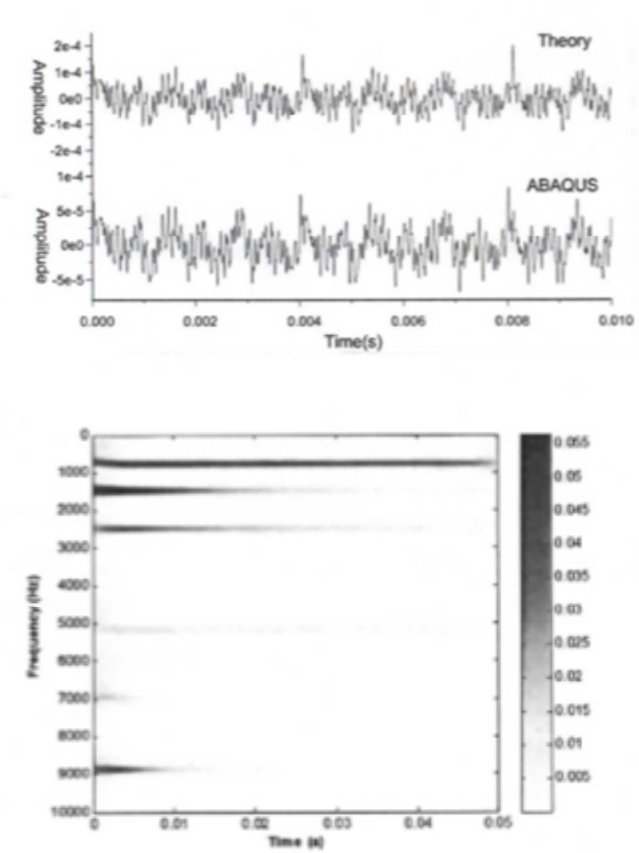

圖四、流體與陣列管束方向示意圖[18]



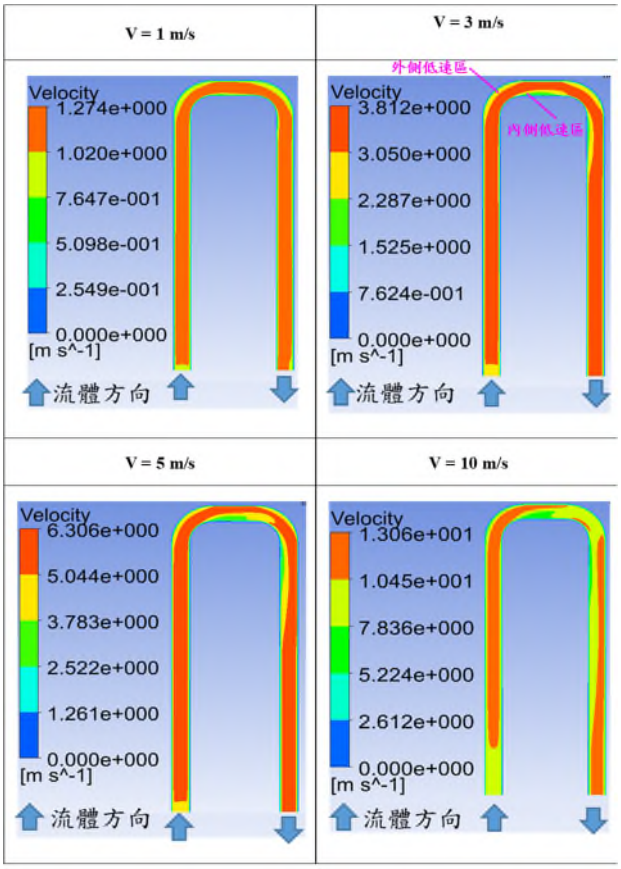

圖五、以管束為基準之樑模型




圖六、解析流程圖

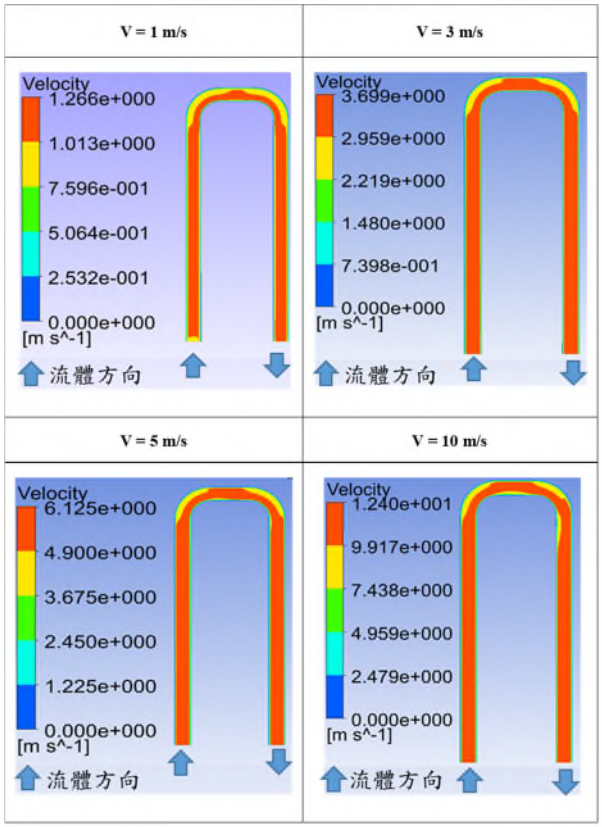



圖七、樑的時域訊號與短時傅立葉轉換得時頻分析示意解析流程圖

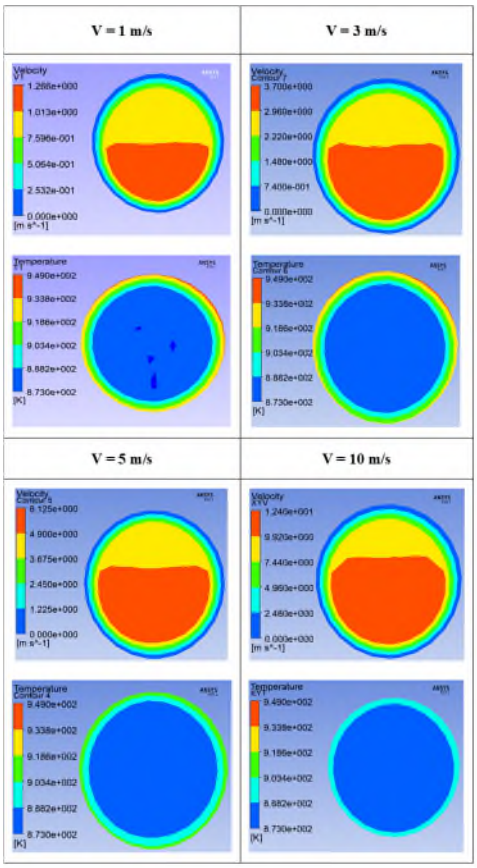



(b) 穩定流場

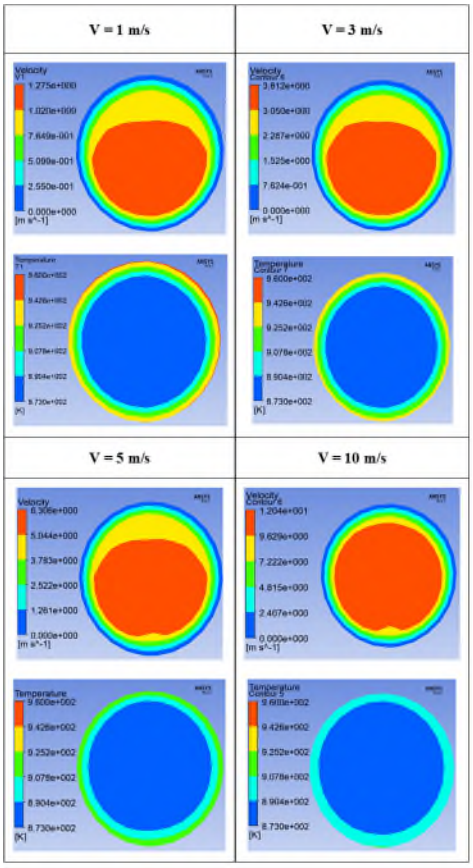
圖八 (a)不穩定流場與(b)穩定流場內流速分布




(a) 不穩定流場

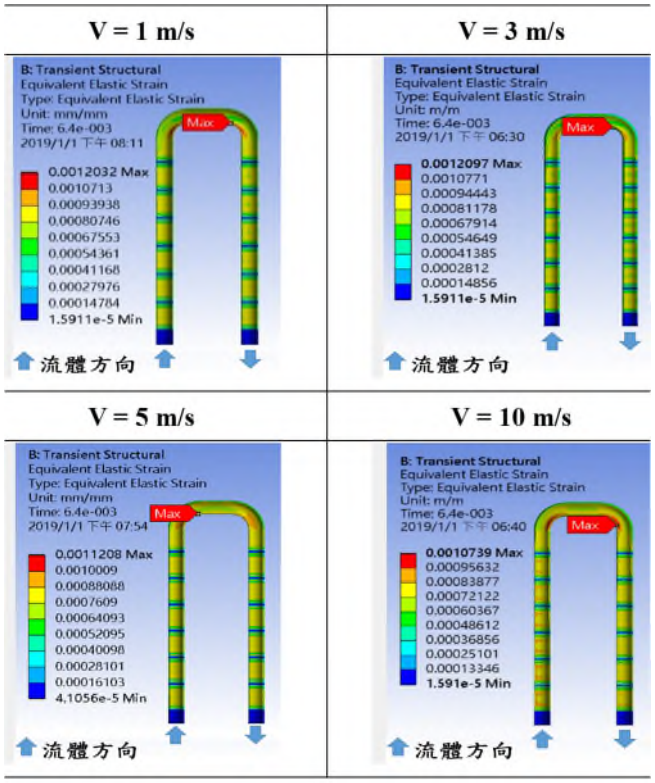



(a) 不穩定流場

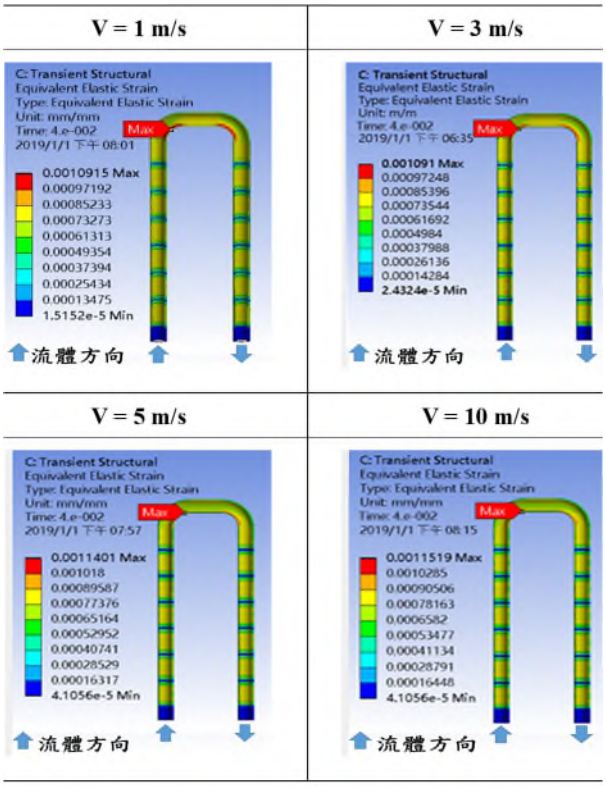



(b) 穩定流場

圖九 (a)不穩定流場與(b)穩定流場截面速度與溫度分布

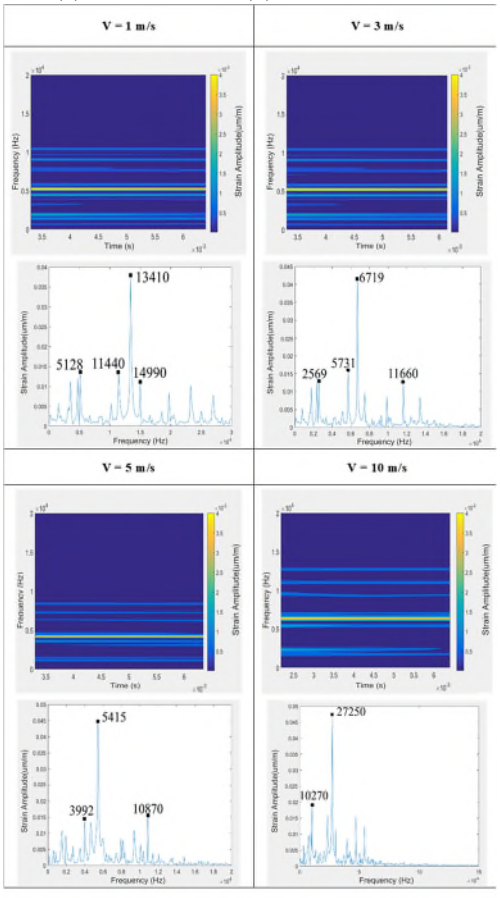



(a) 不穩定流場

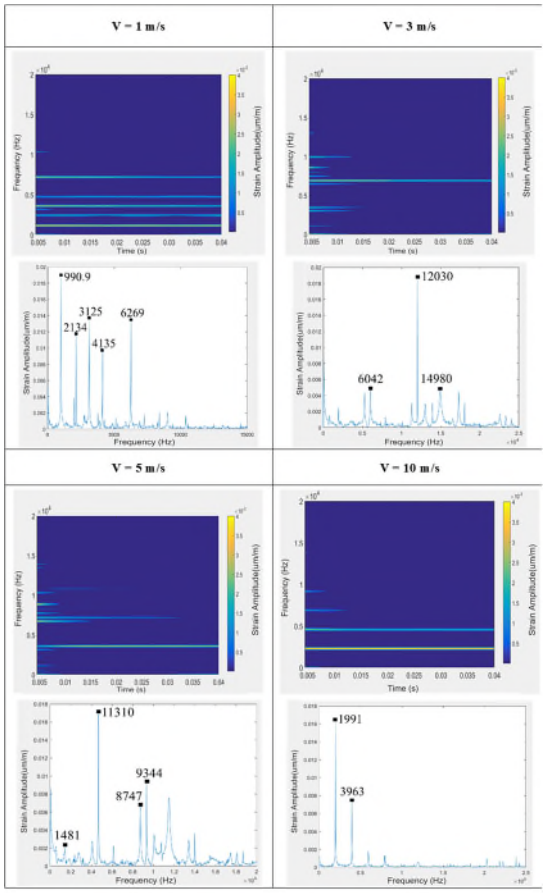



(b) 穩定流場

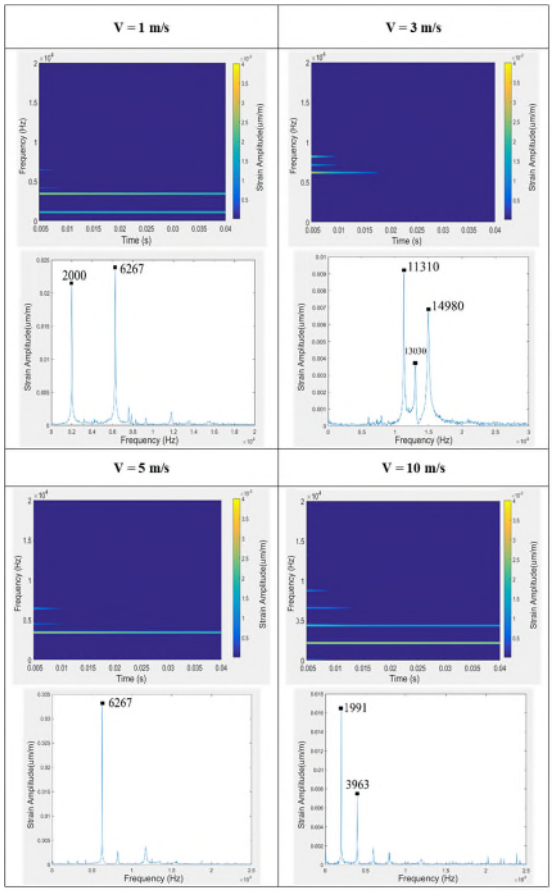
圖十 (a)不穩定流場與(b)穩定流場之應變分布



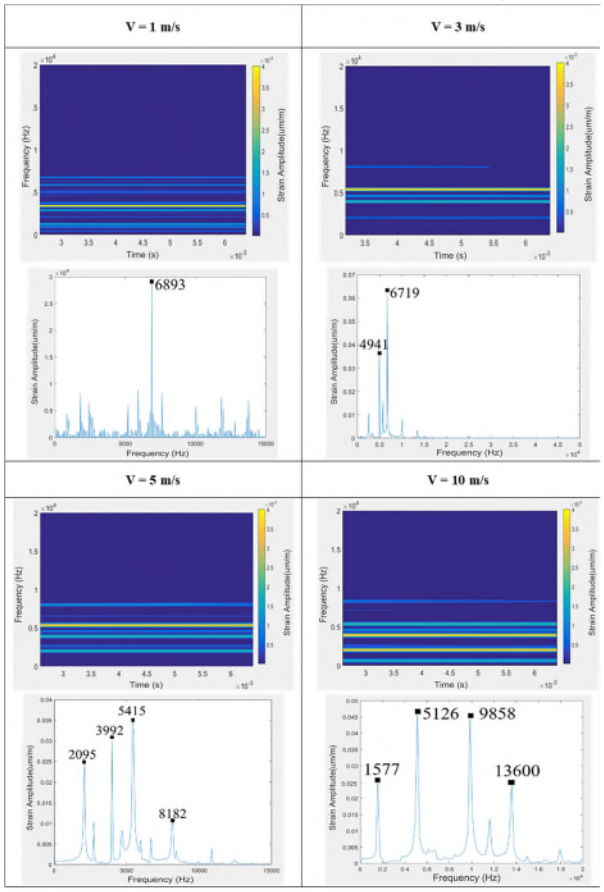

圖十一 不穩定流場平均應變頻域解析




圖十二 穩定流場平均應變頻域解析




圖十四 穩定流場最大應變單元頻域解析




圖十三 不穩定流場最大應變單元頻域解析

# 核三廠 SBO 下之自然對流模擬分析
# Natural Circulation Analyses under Station Blackout for Maanshan Power Plant

計畫編號：MOST 107-NU-E-007-002-NU
計畫主持人：林唯耕
e-mail：wklin@ess.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

## 摘要

日本福島事故是一個長期電廠全黑(Long-term Station Blackout, LTSBO)事件，廠內外交流電都因海嘯而長期喪失，形成嚴重核子事故。在嚴重事故期間可以預期有三種自然循環流動(natural circulation flow)模式，而自然循環在嚴重的事故演進中會影響爐心熔融進展，和爐內裂變產物分佈。本年度主要工作為更新/建立核三廠 MELCOR 2.2 SBO 分析模式。模擬結果顯示，新版(MELCOR 2.2)、舊版(MELCOR 1.8.5)之爐心熱流模擬，爐心水位達 TAF (Top of Active Fuel)的時間差異不大，舊版時間約為 8.6 小時，新版約為 8.8 小時；不過在 BAF (Bottom of Active Fuel)之前，整體而言新版分析結果較為穩定。明顯之差異發生在爐心熔融、崩落後，新版之事故進程(如溫度、壓力)較為緩和，這對後續嚴重事故與二階 PRA 之分析可能有顯著之影響。

關鍵詞：電廠全黑、自然循環、嚴重事故、MELCOR 2.2。

## Abstract

The core damage frequency of a western type reactor is normally dominated by the station blackout (SBO) event; the Fukushima event is actually a long term station blackout leading to core damage and severe accident. Three natural circulation flow patterns can be expected during a severe accident. Natural circulation may change core melt progression, and in-vessel fission product distribution etc. during a severe accident. The major work of this study is improved and/or revised of MELCOR 2.2 SBO model. The simulation results show that no much difference between new model (MELCOR 2.2) and old model (MELCOR 1.8.5), such as time to TAF (top of active fuel) for new model and old model is 8.8 hour and 8.6 hour, respectively. However, before the BAF, the overall analysis results were more stable. The obvious difference occurs after core melt down, and the accident progress (i.e. temperature, pressure) of new version is more moderate, which may have a significant impact on the analysis of severe accidents and level 2 PRA.

Keywords: Station Blackout (SBO), Natural Circulation, Severe Accident, MELCOR 2.2.

## I. 前言

2011 年 3 月 11 日本福島事故基本上是一個長期電廠全黑(Long-term Station Blackout, LTSBO)事件，廠內外交流電都因海嘯而長期喪失，最終導致爐心熔損、發生嚴重核子事故。在嚴重事故期間預期有三種自然循環流動(natural circulation flow)模式，(1)爐內循環，(2) countercurrent hot leg flow，和(3)迴路自然循環，如圖 1 所示。自然循環在嚴重的事故演進中是重要的，因為循環蒸汽從爐心到反應器上部、熱端管路(hot leg)，和蒸汽產生器(Steam Generators, S/Gs)，(1)將熱量從爐心帶走，(2)改變爐心熔融進展，和(3)改變爐內裂變產物分佈。事故演進過程中，一次側(熱端)管路可能發生熱應力失效(即潛變斷裂(creep rupture))。

美國 NRC SORCA (State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses)計畫其中之 Surry 電廠以 MELCOR 1.8.6 進行爐心熱流與嚴重事故分析，其模型涵蓋自然循環流動之模擬。核三廠(舊版)MELCOR 1.8.5 input deck 所建立之爐心節點難以模擬自然循環流動，故可參照 Surry 電廠，並建立 MELCOR 2.2 模型，進行重要事故(如 SBO)之模擬分析。本研究今年度主要工作項目為修訂/更新模型，以 MELCOR 2.2 模擬 SBO 事故(汽機驅動輔助飼水系統成功運轉，但有 RCP 軸封 LOCA)，並與舊版(MELCOR 1.8.5)之模擬結果進行比對。

## II. 主要內容

本研究修訂/建立之核三廠 MELCOR2.2 模型包含反應器壓力槽(Reactor Pressure Vessel, RPV)、一次側系統(Primary Side)以及相關組件、二次側系統(Secondary Side)以及相關組件、圍阻體(Containment)和大氣環境等區塊。一次側的部分包含反應器壓力槽(爐心與壓力槽底部之格點建構，如圖 1 所示)、反應器冷卻水系統迴路、調壓槽以及附帶之調壓管路與釋壓閥；系統管路包含冷端(Cold Leg)及熱端(Hot Leg)管路，以及介於兩者之間的蒸汽產生器管側(Tube Side)管路。二次側系統管路係指蒸汽產生器殼側(Shell Side)，共有三個迴路。二次側部分主要分為 2 個控制體積來模擬一組蒸汽產生器，並用 FL (flow path)模組來模擬主蒸汽隔離閥與釋壓閥。汽輪機進口則以控制函數與 FL 模組共同模擬。一次側與二次側之間以 HS (heat structure)模組進行熱能傳遞之模擬，其中並無任何質量交換。

本研究建立之 MELCOR 2.2 模式以 345 個控制函數(CF)進行電廠的穩態控制、注水控制、閥門開關以及欲模擬之暫態事件如冷卻水流失。在電廠整體架構部分，利用 47 個 CVH 組合成核三廠三迴路模式，包含反應器壓力槽、一次側、二次側和圍阻體，並在流徑(FL)模組中設定各控制體積間的流體交換。

MELCOR 2.2 對於各分析模組(package)之功能均有程度不等的修訂或更新，例如爐心部分在 Lower Vessel、Lower Head 之模型、局部溫度模型等；MELCOR1.8.5 版本，爐心筒設計僅適用於沸水式反應器(BWR)，新版已增加可適用於 PWR 之設計。

完成 MELCOR 2.2 模型建置後，進行穩態分析計算。分析結果的各項數據均收斂至與電廠數值相近，確認已

具有初始化計算的能力。

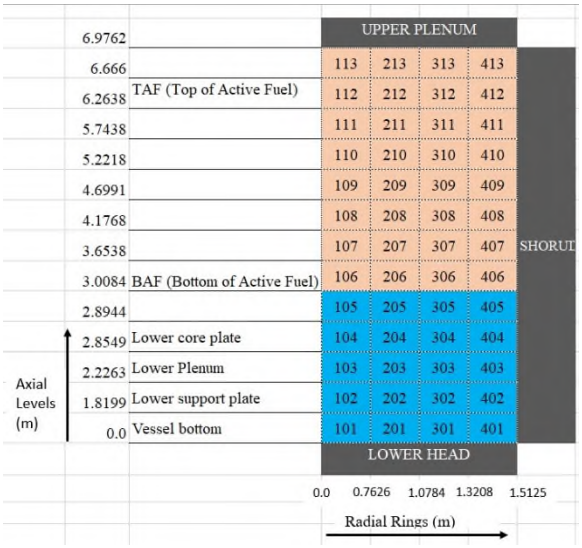



圖 1. 爐心與壓力槽底部之格點建構示意圖

## III. 結果與討論

本研究今年度之主要目標為修訂/更新核三廠 MELCOR 2.2 模型，進行 SBO 下之爐心熱流分析，並與舊版(MELCOR 1.8.5)模擬結果進行比對。

分析案例之模擬情境為：發生喪失外電事件，且緊急柴油發電機亦失效，電廠進入 SBO，10 秒鐘後起動蒸汽驅動輔助飼水(TDAFW)泵、RCP 因喪失軸封注水與冷卻，約 15 分鐘後發生 seal LOCA，洩漏量為 21 gpm/RCP、TDAFW 的水源(即冷凝水儲存槽(CST))8 小時以後水量用盡，TDAFW 泵跳脫。模擬時間約為 22 小時，主要為了解一次側與二次側(即蒸汽產生器)之水位、溫度、與壓力隨時間之變化。模擬結果比對說明如下。

1. 衰變熱：爐心功率設定為 2,822 MW，SCRAM 後爐心功率約剩下 6%，衰變熱隨時間變化新版與舊版之結果一模一樣。
2. 爐心水位：新版之爐心水位降至 TAF (Top of Active Fuel)約為 8.8 小時，舊版則約為 8.6 小時。但舊版水位波動較為劇烈，MELCOR 2.2 則相對較為平穩，如圖 2 所示。
3. 二次側：比較蒸汽產生器壓力、水位、溫度隨時間之變化。大約在 51000 秒之前(燃料護套失效前)，新舊模式之蒸汽產生器壓力差別不大，在燃料護套失效後，才有明顯差異。蒸汽產生器水位分析結果兩者幾乎一樣，水溫則與壓力類似，如圖 3 與圖 4 所示。
4. 一次側：比較 RCS 壓力、水溫、燃料護套溫度隨時間之變化。新舊版之模擬結果整體而言差異不大，以 RCS 壓力為例，直到約 51,000 秒燃料護套失效後，才有明顯差異，如圖 5 所示。
5. Lower Head 溫度：由於新版與舊版 Lower Head 模型之徑向環數不一樣，故僅比較 ring 1 之溫度。前者在 67,135 秒左右達到最高溫約 1,323K，後者於 63,633 秒左右達到最高溫約 1,794K，如圖 6~圖 7 所示。其主要原因應為(1)幾何形狀之模擬參數不同，新版增加 PWR Lower Head、Lower Vessel 之幾何形狀；(2) MELCOR 1.8.5 忽略沿著爐槽的側向熱傳導，而 MELCOR 2.2 則有計算側向熱傳導。

新舊版本之模擬結果，爐心水位在 TAF 以上時，兩者分析結果差異不大。TAF 之後新版之模擬結果較為穩定，溫度、壓力之波動較小。在爐心完全裸露(即水位低於 BAF)後，在爐心完全裸露(即水位低於 BAF 後)，燃料護套溫度快速升高，在燃料護套失效後，新舊版之分析結果有較明顯之差異。

## IV. 結論

本研究完成分析所必需建立之各項邊界條件與模型更新，並以 SBO 狀態下發生 RCP seal LOCA、蒸汽驅動輔助飼水泵成功運轉為案例，進行分析與探討。分析結果顯示，相同分析條件下，相較於舊版 MELCOR 1.8.5，更新後之 MELCOR 2.2 模型，其模擬結果對於爐心有小破口 LOCA (即 RCP seal LOCA，洩漏量 21 gpm/RCP)的爐心熱流模擬，TAF 的時間差異不大，舊版時間約為 8.6 小時，新版約為 8.8 小時；不過在 BAF 之前，整體而言新版分析結果較為穩定。就此案例而言，明顯之差異發生在爐心燃料護套失效後，新版之事故進程(溫度、壓力)較為緩和，這對後續嚴重事故演進過程中之自然循環流動與二階 PRA 之分析可能有顯著之影響，值得未來繼續探討。

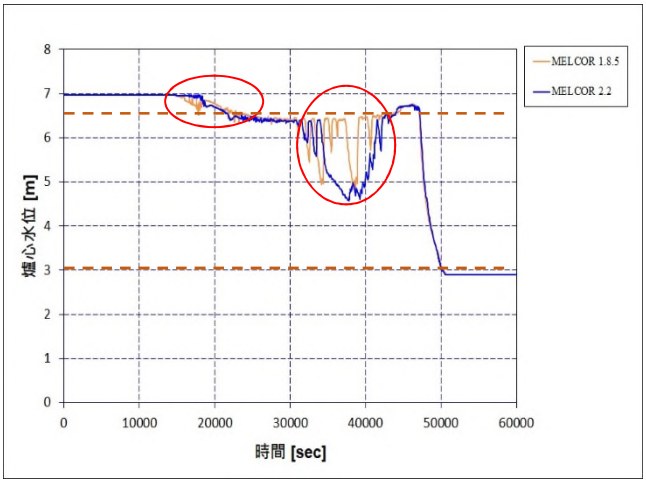



圖 2. 爐心水位隨時間之變化

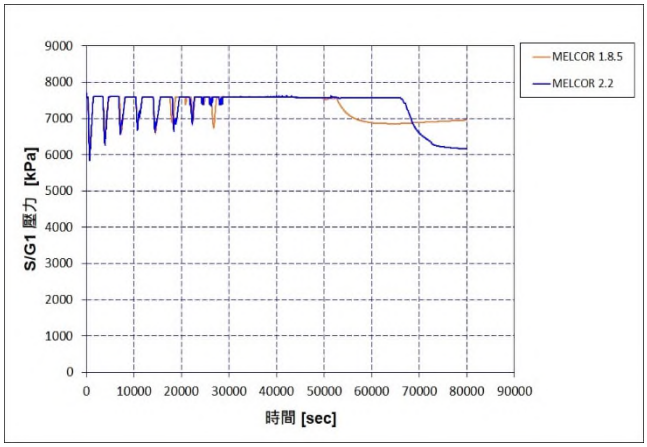



圖 3. 蒸汽產生器 1 壓力隨時間之變化

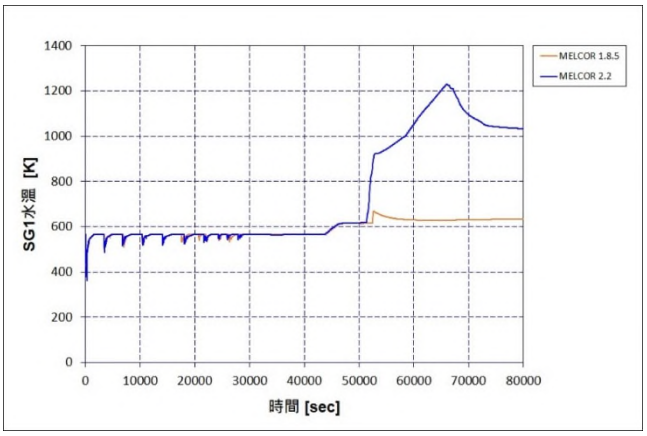



圖 4. 蒸汽產生器 1 水溫隨時間之變化

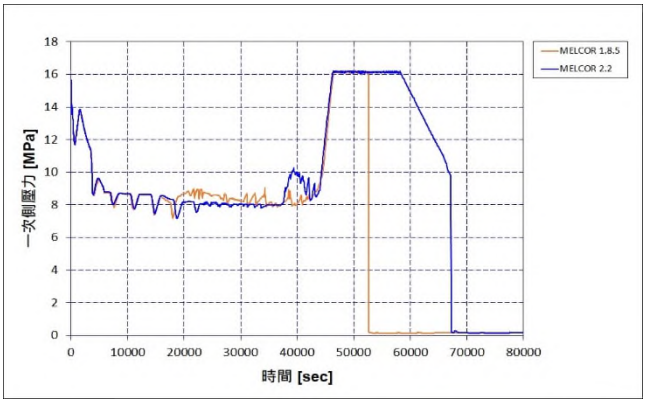



圖 5. 一次側壓力隨時間之變化

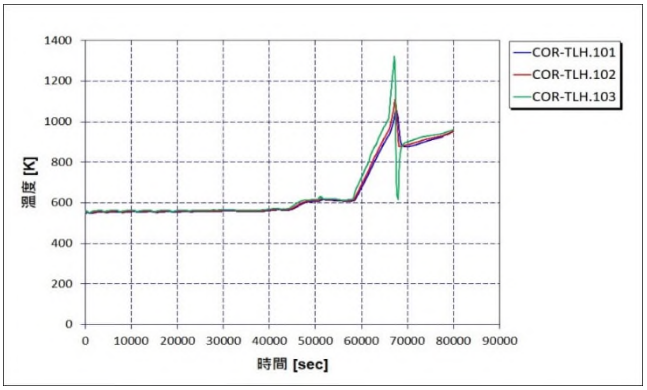



圖 6. MELCOR 2.2 Lower Head ring 1 溫度隨時間之變化

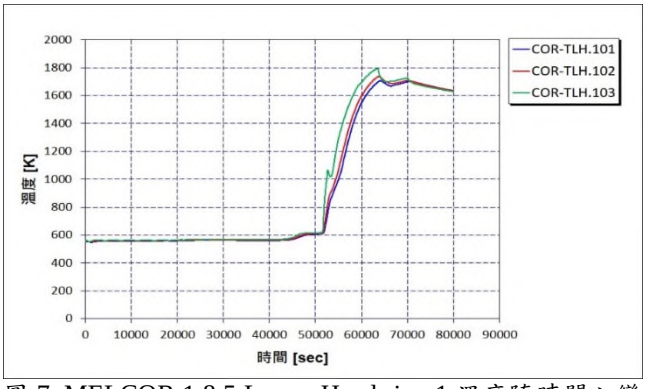



圖 7. MELCOR 1.8.5 Lower Head ring 1 溫度隨時間之變化

## 參考文獻

[1] NUREG/CR-7110 Vol.2, “State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project”, US NRC, August 2013.

[2] L.L. Humphries, “MELCOR COR Package”, 2018 MCAP workshop, June 2018.

[3] L.L. Humphries, B.A. Beeny, F. Gelbard, D.L. Louie, J. Phillips, “MELCOR Computer Code Manuals Vol. 2: Reference Manual”, Sandia National Laboratories, January 2017.

[4] 蔣宇、王仲容、施純寬等人，“2015 CSARP/MCAP 國際合作會議出國報告及成果發表”，清華大學 核子工與科學程研究所，民國 104 年 10 月。

[5] 陳詩奎、陳得誠、林子仁等人，“核三廠電廠全黑事故序列驗證評估”，清華大學，民國 105 年 11 月。

[6] 核三廠 FSAR，November 1994.

[7] 台灣電力公司第三核能發電廠，Phase II PWRT 訓練教材，壓水式反應器系統介紹，第 07 章反應爐冷卻水系統(RCS)，民國 95 年 2 月。

[8] 張益維(台電核三廠機械組)，參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵研討會(Workshop)出國開會報告，民國 101 年 7 月。

# 壓水式反應器二次測結構組件腐蝕劣化的防蝕研究

# Corrosion Mitigation of Structural Materials in PWR Secondary Cooling System

計畫編號：MOST 107-2623-E-007-006-NU
計畫主持人：葉宗洸
e-mail： tkyeh@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學工程與系統科學所

## 摘要

壓水式反應器二次測的腐蝕情況以蒸氣產生器最為嚴重，因為在蒸氣產生器內的管線束會穿過支撐用的管板，在中間縫隙產生間隙腐蝕造成沿晶腐蝕龜裂。淤泥堆積在縫隙硬化後，會造成磨耗、孔蝕，甚至擠壓管線造成管路凹陷，且在管線 U 型彎曲部分會有拉伸應力，容易造成應力腐蝕龜裂。

此外，二次測腐蝕環境的改善取決於溶解在水中的溶氧的濃度。二次側的水環境是採用聯胺作為還原劑，為了降低水中的氧化劑濃度，並減低腐蝕性環境。一般來說，溶氧濃度希望降至 1 ppb 以下~ 數個 ppb，聯胺的濃度約在 20 ppb 以上。針對二次側的組件，包含蒸汽產生器的管件及相關組件，主要採用的材料是鎳基合金、奧斯田鐵不銹鋼、低合金鋼以及銅合金等，而鎳基合金包含 600MA、600SR、600TT、800NG 以及 690TT 等。減低二次側組件產生腐蝕的程度以提高可靠度並使從二次側系統傳輸至蒸汽產生器的腐蝕產物減少，這必須要能透過控制系統的 pH 值、減低或控制系統中的氧化劑濃度，以及減少不純物質的濃度來達到。

實驗方法為,透過PWR二次側水循環模擬迴路中針對 Inconel 690/600 試片進行 U-bend 應力腐蝕和間隙腐蝕試驗，U-bend 作法為將試片

彎曲成一 U 型並固定於一夾具內，試片於夾具內的曲率為固定值;間隙腐蝕作法為參考美國材料協會規範，用挖溝槽的耐高溫絕緣材料夾具夾住試片，利用小縫隙形成間隙腐蝕條件。再透過不同濃度的聯胺注入，使得水環境控制在低溶氧狀態下(~數個 ppb)的水化學條件，進行在 280 oC 運轉溫度下 Inconel 690/600 試片的應力腐蝕龜裂和間隙腐蝕行為分析。測試後的試片則利用掃描式電子顯微鏡（SEM）與能量散佈式 X 光頻譜（EDX）對試片表面產生的裂縫的分布情形及其裂縫深度進行分析，探討在 280 oC、8.3MPa 條件下運轉時，不同的水化學環境對於 Inconel 600/690 試片在應力和間隙腐蝕條件下，裂縫起始與成長之影響。

**關鍵字 ：** 應力腐蝕龜裂、間隙腐蝕、二次側水循環迴路、合金 690/600、聯胺

## Abstract

The condition of the corrosion of PWR secondary side is the most severe with the steam generator because the tube bundles in the steam generator will pass through the support tube sheet, it may cause crevice corrosion in the intermediate gap to cause intergranular corrosion cracking. After the sludge is hardened in the gap, it will cause wastage, pitting corrosion, and even denting. There is tensile stress in the U-bend portion of the pipeline, which will easily cause stress corrosion cracking.

In addition, the improvement in the secondary side corrosion environment depends on the concentration of dissolved oxygen in the water. The water condition in the secondary side uses hydrazine as a reducing agent to reduce the concentration of oxidant in the water to reduce the corrosive environment. In general, the dissolved oxygen concentration is desirably reduced to less than 1 ppb to several ppb, and the concentration of hydrazine is above about 20 ppb. For the secondary side components, the main materials are nickel-based alloy, stainless steel, low alloy steel and copper alloy. We need to reduce the degree of corrosion generated by the secondary side assembly to increase reliability and reduce corrosion products from the secondary side system to the steam generator, so the concentration of oxidant and the concentration of impurities in the system need to be controlled.

The experimental method is to perform U-bend stress corrosion test and crevice corrosion test on the Inconel 600/690 specimen through the PWR secondary side simulation circuit. The U-bend method is to bend the specimen into a U-shape. The curvature of the specimen in the fixture is a fixed value; the crevice corrosion method is according to the American Society of Materials Association, the specimen is clamped by the high temperature resistant and electrical insulating material to form trench to have crevice corrosion condition.

Then, we use different concentrations of hydrazine injection, and the water environment is controlled under low dissolved oxygen conditions (~ several ppb).We test the specimen under the water chemical condition at 280 oC and 8.3 MPa. After the test, we analyze the distribution of the cracks generated on the surface of the specimen and the length of the crack to find out the influence of these condition.

**Keyword:** SCC, crevice corrosion, secondary side, alloy 600/690, hydrazine

## I 前言

隨著輕水式反應器（Light Water Reactor, LWR）運轉時間的增長，不少反應器的壓力槽內部組件產生應力腐蝕龜裂的問題，應力腐蝕龜裂包含了沿晶應力腐蝕龜裂(Intergranular Stress Corrosion Cracking, IGSCC)與輻射促進應力腐蝕龜裂(Irradiation-assisted Stress Corrosion Cracking, IASCC)，組件產生裂化不僅嚴重影響運轉安全，同時修復組件的工作也須耗費鉅資。壓水式反應器的主要腐蝕問題包含一次側及二次側冷卻水系統結構材料的腐蝕，如果組件材料發生應力腐蝕龜裂導致劣化，使得電廠無法運轉而造成嚴重損失，因此使用能抗應力腐蝕的材料及嚴格控制水化學的條件就變得相當重要。

透過控制二次側水質以減低相關設備管線的腐蝕，評估壓水式反應器二次側材料應力腐蝕龜裂傾向，或是腐蝕產物對於組件可能產生的間隙以及孔蝕局部腐蝕狀況進行評估與分析，將有助於運轉中的電廠建立完整的劣化機制與評估模式。

本實驗主要來探討透過 PWR 二次側水循環模擬迴路中針對鎳基合金 Inconel 600/690 試片進行 1. U-bend 應力腐蝕試驗、2. 間隙腐蝕試驗利用兩個 crevice former 夾著試片形成三明治結構來對試片造成間隙腐蝕條件，並透過扭力板手鎖緊物件，施力 8N.M 以控制 crevice 的緊密程度[1]。3. 平板的均勻腐蝕試驗做為對照組。透過構建模擬壓水式反應器水環境的高溫水循環迴路，以 U-Bend 應力腐蝕、間隙腐蝕試驗的測試，用 SEM 觀察材料的顯微特性，在高溫及不同聯胺程度的水化學環境來研究鎳基合金在此環境下而產生的影響。探討在 280 °C 時溫度運轉時，不同的水化學環境對於 Inconel 600/690 試片應力腐蝕龜裂裂縫起始與成長之影響，以及間隙和應力存在對於組件材料的間隙腐蝕程度的影響。

## II 文獻回顧

根據 Tyler Moss, Wenjun Kuang, Gary S Was 幾位先進所發表關於鎳基 600/690 合金在高溫水環境的應力腐蝕龜裂中提到[7]，鎳基合金在沒有應力的情形下，都很難有裂縫的生成。因此許多實驗室會在友應力的條件下去觀察裂縫生成，像是固定應變、固定應力、固定拉伸速率等等方法，本實驗室是採用固定應變方法。由於鎳基 690 合金在鉻含量較鎳基 600 合金高，導致腐蝕機制的不同，合金 600 被觀察到對於應力腐蝕龜裂較合金 690 敏感。其中，應力腐蝕龜裂的起始常被分類為三階段:一、氧化階段，氧化鉻保護薄膜會在基材表面生成。二、潛伏階段，在此階段氧化層會連續的被破壞並且鉻會從基材的晶界中不斷擴散至表面修補氧化層。三、裂縫成核階段，在此階段因為晶界出現鉻缺乏的現象，無法再從晶界提供鉻去修補破裂的氧化層，導致基材直接接觸到水環境，裂縫從晶界與基材表面交接處開始生成。從這種應力腐蝕機制可以看出，在沒有應力的情況下，裂縫是很難生成的。實驗方法也會受某些因素使裂縫成長受到影響，像是固定應變試驗隨著實驗時間拉長容易造成應力鬆弛現象，使得應變量達不到標準; 固定應力試驗則是缺乏對於表面氧化鉻薄膜的連續破壞，使裂縫無法起始生成。

許多實驗室針對鎳基 600/690 合金做的應力腐蝕測試，其結果都有類似的趨勢。[8]像是 A.J. Sedricks 把鎳基 600/690 合金分別用 mill annealed 熱處理(MA)和固容熱處理(TT)後，用 double U-bend 的方法，使試片同時遭受應力腐蝕和間隙腐蝕，並在含氧以及除氧兩個水化學條件下，在 316ºC 和 360ºC 進行長達一萬小時的試驗。其結果發現，甚至連含有間隙腐蝕條件下，鎳基 690 合金仍沒有產生裂縫，而鎳基 600 合金則有觀察到裂縫。類似的結果也發生在模擬 PWR 一次側水化學環境的 U-bend 試驗，[9][10] K. Smith 和 T. Yonezawa 兩位先生都在模擬 PWR 一次側的水化學環境下，做鎳基 600/690 合金的應力腐蝕測試，其實驗結果顯示，鎳基 690 合金在 MA 和 TT 熱處理下，進行了 16,000 小時都沒有觀察到裂縫的生成，而鎳基 600 合金在實驗 800 小時後就觀察到裂縫生成。

從這些結果可以看出鎳基 690 合金在不同熱處理方式中，或是不同的高溫水化學環境中，它的裂縫起始都是很困難的。對比本實驗室在鎳基 600/690 合金的裂縫定量分析，在鎳基 690 合金中有觀察到小於 10 微米的裂縫增加，推測是因為本實驗室試片備製時用的是研磨機研磨到#1200，而參考資料中其他實驗室是用電解拋光法來備製，造成一開始略微不平整的表面有機會使小裂縫生成,但由於鎳基 690 合金有不錯的對抗裂縫生長能力，所以在本實驗中，大於 10 微米的裂縫都沒有觀察到增長的趨勢,相對的，在鎳基 600 的定量分析中，所有長度區間的裂縫都有些微增長的趨勢。

## III 實驗流程

### 3.1 模擬 PWR 二次側高溫水循環系統

本實驗室為模擬 PWR 二次側結構組件的水環境在高溫高壓(280ºC 和 8.3MPa)的壓水式反應器二次側建置了一組水循環系統，如圖 1，循環迴路分成主循環迴路和副循環迴路，主循環迴路的水由儲水槽流出後，經由高壓幫、穩壓器、安全閥、熱交換管，進入高壓釜中流經試片，回流的水經熱交換管、調壓閥，最後回到儲水槽，完成主循環迴路。副迴路由儲水槽連接出一個小型迴路來監控水質，包含導電度儀、溶氧監測儀、溶氫監測儀。實驗的水化學條件為不同聯胺濃度下，利用氣體微調閥來控制氧氣和氫氣的流通量來達到實驗所需的低溶氧值。主迴路用高壓泵浦維持高壓力（8.3MPa）和固定流速。水溫控制方面由控溫儀在預熱端和高溫釜進行加熱和溫度的維持、並配合低溫恆溫水槽與冷熱交換管來進行熱交換與穩定溫度。實驗流程如圖 3。

### 3.2 試片製備

本實驗用的試片尺寸分為三種，分別為 U 型試片、間隙試片、平板試片，皆由該金屬板材直接車削加工而成。U 型試片如圖 2，長 80mm x 寬 20mm x 高 2.5mm，由該金屬板材直接車削加工而成，再以標準治具進行彎折達到符合 ASTMG30-97 之規範的 U 型試片，並用夾具維持其 12.5%的應變程度，如圖 2(b)為 U 型試片。間隙試片與間隙生成夾具如圖 3，長 24mm x 寬 24mm x 高 2.5mm，由該金屬板材直接車削加工而成，並在式片正中央切出直徑 7mm 的圓孔來配合間隙生成夾具的組裝，夾具則是參考 ASTMG78-15 規範製成。平板試片尺寸為 20mm x 寬 20mm x 高 2.5mm。試片則是使用鎳基 600/690 合金，其成分列於表 1 與表 2。之後將試片做熱處理，熱處理後的試片以碳化系(SiC)砂紙研磨去除表面氧化層。研磨到 1200 號。

### 3.3 試片熱處理

試片在加工完成後，進行高溫高壓模擬二次側水循環試驗之前，接受測試的試片會全部經過固溶熱處理，目的是消除加工造成的影響，使溶質重新分部，亦可消除潛在的析出物。固溶熱處理之後視測試條件再選擇是否經歷較低溫的熱處理。其中，固溶處理的條件為升溫兩小時達 1050℃再持溫一小時於 1050℃，之後水淬(solution treatment，ST)，以達成溶質固溶入基材；較低溫熱處理則為升溫一小時達 700℃再持溫 24 小時後爐冷(heat treatment，TT)，使溶質平衡析出散佈[2]。詳細實驗條件如表 3 所示。

### 3.4 U-bend 應力腐蝕試驗

將熱處理完的試片，以標準治具進行彎折達到符合 ASTMG30-97 之規範的 U 型試片，並用夾具固定其曲率，為持其應變量在 12.5%[6]。之後將試片連同夾具置於鎳基高壓釜中，在模擬 PWR 二次測高溫高壓(280 ˚C, 8.3MPa)的主迴路水循環系統中，水由儲水槽流經高壓幫浦、穩壓器、安全閥、熱交換管，然後進入高壓釜中流經試片，回流的水經熱交換管至交換器再至調壓閥，最後回到儲水槽，完成循環。而副迴路主要流經水質監測管路，由送水幫浦把待檢測水帶至監控儀器，包含溶氫測量儀、導電度儀及溶氧儀。實驗的水化學條件為不同聯胺濃度。溶氧控制方法為利用氣體微調閥控制氧氣及氫氣的流通量以達到實驗所要求的溶氫值。之後以 SEM 觀察試片經過 PWR 水環境後，含有應力試片其表面產生裂縫的分布情形及其裂縫深度與長度。

### 3.5 間隙腐蝕試驗

將熱處理完的試片，利用兩個夾具(crevice former)夾著試片形成三明治結構(multiple crevice washers)來對試片造成間隙腐蝕條件，如圖 4，並透過扭力板手鎖住物件，施力 8N.M 來控制間隙的緊密程度，以達到 ASTM G78-15 規範之間隙腐實條件[1]。實驗進行同 U 型試片，置入高壓釜中，以模擬 PWR 二次側水環境來進行試驗。之後以 SEM 觀察試片經過 PWR 二次測水環境後，含有間隙條件試片其表面的顯微結構。

### 3.6 平板試片腐蝕試驗

將熱處理完試片，以碳化系(SiC)砂紙研磨去除表面氧化層，研磨到 1200 號。實驗進行同上述所說，置入高壓釜中，以模擬 PWR 二次側水環境來進行試驗。之後以 SEM 觀察做為對照組的平板試片經過 PWR 二次測水環境後的顯微結構，並用雷射拉曼散光譜 (LRS)來分析表面氧化層結構。

### 3.7 表面分析

實驗室以場發射掃描式電子顯微鏡（Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy, FE-SEM）觀察材料的表面形貌及氧化物的顆粒狀況，並搭配能量散佈 X 光分析儀（Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDX）進行成分分析和搭配雷射拉曼散光譜 (LRS)來分析表面結構。本實驗使用的 SEM 為日本 JEOL 型號 JSM-7610F。

## IV 實驗結果與討論

### 4.1.1 平板試片 SEM 分析

為了確認在添加聯胺前，在此高溫高壓下條件下，鎳基 600/690 合金氧化層生長情況和腐蝕情況，目前先在 280ºC、1200psi(8.3MPa) ，用去離子水、溶氧 300ppb 的條件下試驗。在完成 1500 小時運轉後，觀察其增重，發現無論鎳基 600 合金或是 690 合金都沒有明顯增重，如圖 5，增重只有少量 0.01%左右，表示只長出薄薄一層的氧化層，且根據 sem 觀察，氧化層開始均勻生成時間約在實驗進行 900 小時，如圖 7。圖 6 為在 300 小時觀察到鎳基合金的些微的孔蝕現象發生。

### 4.1.2 U 型試片分析

U 型試片採用定量分析，取試片上特定面積(約 6mm$^2$)來觀察表面的裂縫長度成長趨勢。如圖 8 為目前鎳基 600/690 合金在 900 小時試驗下裂縫成長的趨勢，裂縫長度大部分在範圍 0 到 30 微米，可以看出裂縫有緩慢增長的趨勢[3]。在 600 小時裂縫數目出現微小下降的情況，推測是因為在此時試片長出氧化層，因此擋住些微裂縫長度的判讀(如圖 10)，在用酸洗清洗掉氧化層後，又恢復裂縫長度緩慢增加的趨勢。從大於 10 微米的裂縫觀察裂縫長度變化的趨勢可以發現，鎳基 690 合金的裂縫長度比鎳基 600 合金的長度還短，且 20 微米以上的裂縫少許多。但同樣成分中，不同熱處理的試片並無太大的趨勢。此外，鎳基 690 合金在長裂縫區間中(大於 10 微米) ，沒有觀察到裂縫數目變多的趨勢，表示鎳基 690 合金的裂縫不太容易擴展。

### 4.1.3 間隙試片分析

間隙試片在實驗進行 900 小時後，觀察到在夾具有凹槽處生成較多氧化層，由其是在夾具凹槽出口處出現較明顯的氧化層，打 EDX 分析成分為氧化鉻，如圖 11。凹槽內部氧化層較薄的情形是因為間隙腐蝕條件下，由於水流動幾乎靜滯，反應進行產生的帶電離子聚集，使得腐蝕反應更加容易發生造成。

## 4.2 LRS 分析

平板試驗在模擬 PWR 二次側高溫高壓下(280ºC;8.3MPa)、溶氧 300ppb、去離子純水的條件下在 900 小時長出明顯的均勻氧化層，用雷射拉曼分析出來的結果顯示，如圖 9，鎳基 600/690 合金的表面氧化層為氧化鎳(NiO)為主的結構和少數氧化鉻($Cr_2O_3$)、氧化鎳鉻($NiCr_2O_4$)結構[5][6]。

# V 結論

1. 平板試驗在實驗 900 小時後，鎳基 600/690 合金長出均勻氧化層。
2. 平板試驗在實驗 1500 小時後，鎳基 600/690 合金都只有出現些微孔蝕現象，但並未發生裂縫的擴展。且增重只有些微的 0.1%，表示氧化層非常薄，即鎳基合金在模擬 PWR 二次側水環境下有基材本身不錯的抗蝕能力，不同熱處理條件沒有太大的氧化增重區別，且氧化層以氧化鎳(NiO)為主。
3. 在 U 型試驗加入應力的條件後，開始觀察到裂縫的生成，且裂縫長度有緩慢增加的趨勢，裂縫範圍在 0-30 微米間，其中鎳基 600 合金在大於 10 微米的長裂縫明顯較多，表示鎳基 600 合金在裂縫的起始與擴展方面比較迅速，即鎳基 600 合金在本實驗條件下較對 SCC 較敏感，參考其他論文解釋，可能因為鎳基 600 合金本身鉻(16.45%)含量較鎳基 690 合金(28.43%)少，導致在氧化層受到應力連續破壞之後，鎳基 600 合金的鉻含量無法快速修復形成保護層所致[7]。此外，鎳基 690 合金在大於 10 微米的裂縫沒有觀察到裂縫擴展的現象。
4. 間隙試驗中，試片受到間隙條件影響的夾具凹槽區域也符合間隙腐蝕的原理，較厚的氧化層生長在凹槽出口處，內部的氧化層較薄，可用能量散佈 X 光分析儀（Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, EDX）分析出。可以推測出隨著試驗時間增長，凹槽內部的氧化腐蝕情形會因為間隙腐蝕越來越嚴重。

# VI 參考文獻


[1] Kain, R. M., "Crevice Corrosion Testing in Natural Seawater: Significance and Use of Multiple Crevice Assemblies,"Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 18, No. 5, Sept.1990,pp. 309-318.

[2] Tyler Moss and Gary S. Was, “Factor of Improvement In Resistance Of Stress Corrosion Crack Initiation Of Alloy 690 Over Alloy 600,” The 17th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactor, Ottawa, Canada, Aug. 9-13, 2015.

[3] Tetsuo Shoji, Zhanpeng Lu, Seiya Yamazaki,” The Effect of Strain-Hardening on PWSCC Of Nickel-Base Alloys 600 and 690,” The 14th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactor, Virginia Beach, VA, Aug. 23-27, 2009. pp. 220-238.

[4] Ji Hyun Kim and Il Soon Hwang, “In-situ Raman Spectroscopic Study of Oxide Films on Alloy 600 in Simulated PWR Water” Proceedings of the Korean Nuclear Spring Meeting Gyeong ju, Korea ,Seoul National University 56-1, Shinlim-dong, Gwanak-ku Seoul, Korea 151-742, May 2003.

[5] Ji Hyun Kim∗, Il Soon Hwang, “Development of an in situ Raman spectroscopic system for surface oxide films on metals and alloys in high temperature water”, Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 1029–1040.

[6] Designation: G30 − 97 (Reapproved 2016), “Standard Practice for Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimens.”

[7] Tyler Moss, Wenjun Kuang, Gary S Was, “Stress corrosion crack initiation in Alloy 690 in high temperature water”, University of Michigan, 2355 Bonisteel Blvd, Ann Arbor, MI 48109, United States, Received 25 August 2017.

[8] A.J. Sedricks, J.W. Schultz, M.A. Cordovi, Inconel Alloy 690 - a new corrosion resistant material, Corros. Eng. Sci. Technol. 28 (1979) 82–95.

[9] K. Smith, A. Klein, P. Saint-Paul, J. Blanchet, Inconel 690: a material with improved corrosion resistance for PWR steam generator tubes, in: Proceedings of the Second International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Monterey, California, 1985.

[10] T. Yonezawa, K. Onimura, N. Sasaguri, T. Kusakabe, H. Nagano, K. Yamanaka, T. Minami, M. Inoue, Effect of heat treatment on corrosion resistance of Alloy 690, in: Proceedings of the Second International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Monterey, California, 1985.

表格 1.鎳基 600 合金成分列表

| Element | Ni | Cr | Fe | Mn | Co | Si | S | C | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Percentage(%) | Bal. | 16.45 | 9.300 | 0.270 | 0.030 | 0.190 | 0.015 | 0.070 | 0.009 |

表格 2.鎳基 690 成分列表

| Element | Ni | Cr | Fe | Al | Ti | Si | Mn | Mo | Ta | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Percentage(%) | Bal. | 28.43 | 9.62 | 0.31 | 0.27 | 0.27 | 0.17 | 0.13 | 0.12 | 0.026 |

表格 1.試片前處理之條件

| | 固溶處理(ST) | 較低溫熱處理(TT) |
|---|---|---|
| 目標溫度 | 1050˚C | 700˚C |
| 升溫速度 | 2 小時 | 1 小時 |
| 持溫溫度 | 1050˚C | 700˚C |
| 持溫時間 | 1 小時 | 24 小時 |

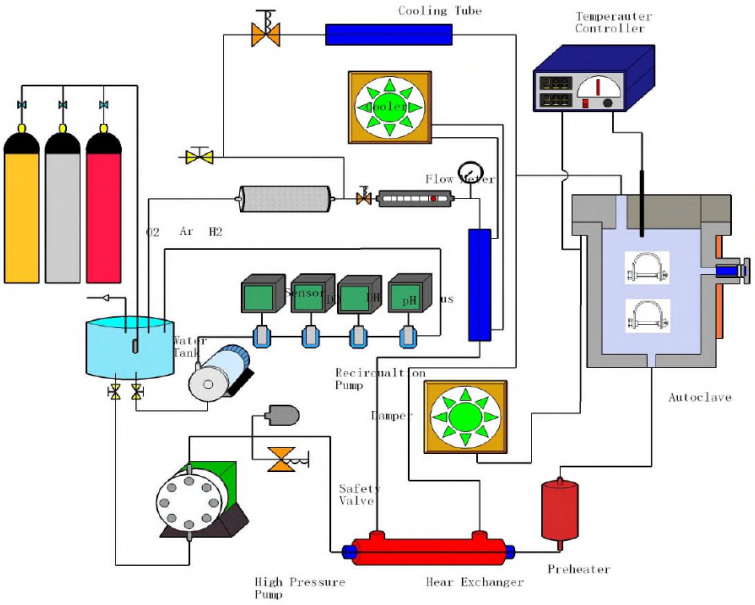



圖 1.實驗水循環迴路示意圖

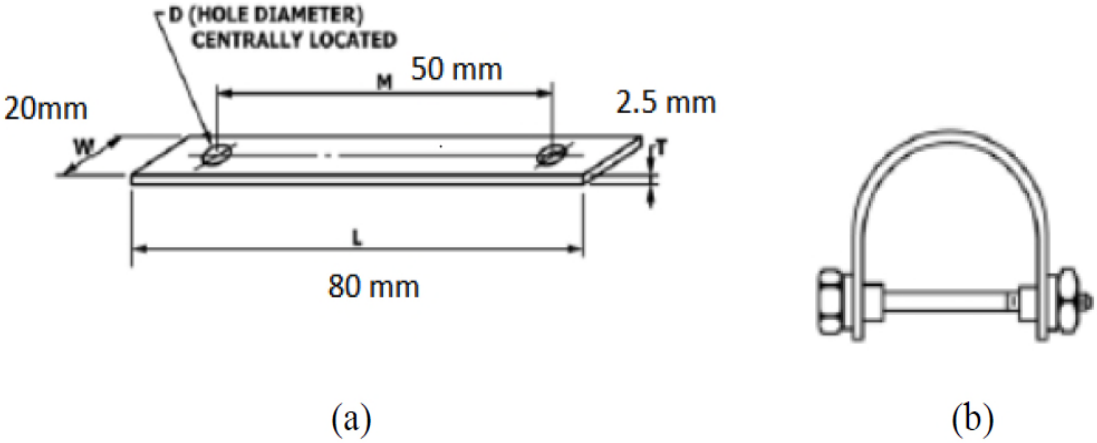



圖 2.(a)U-bend 試片大小。(b)彎曲後示意圖

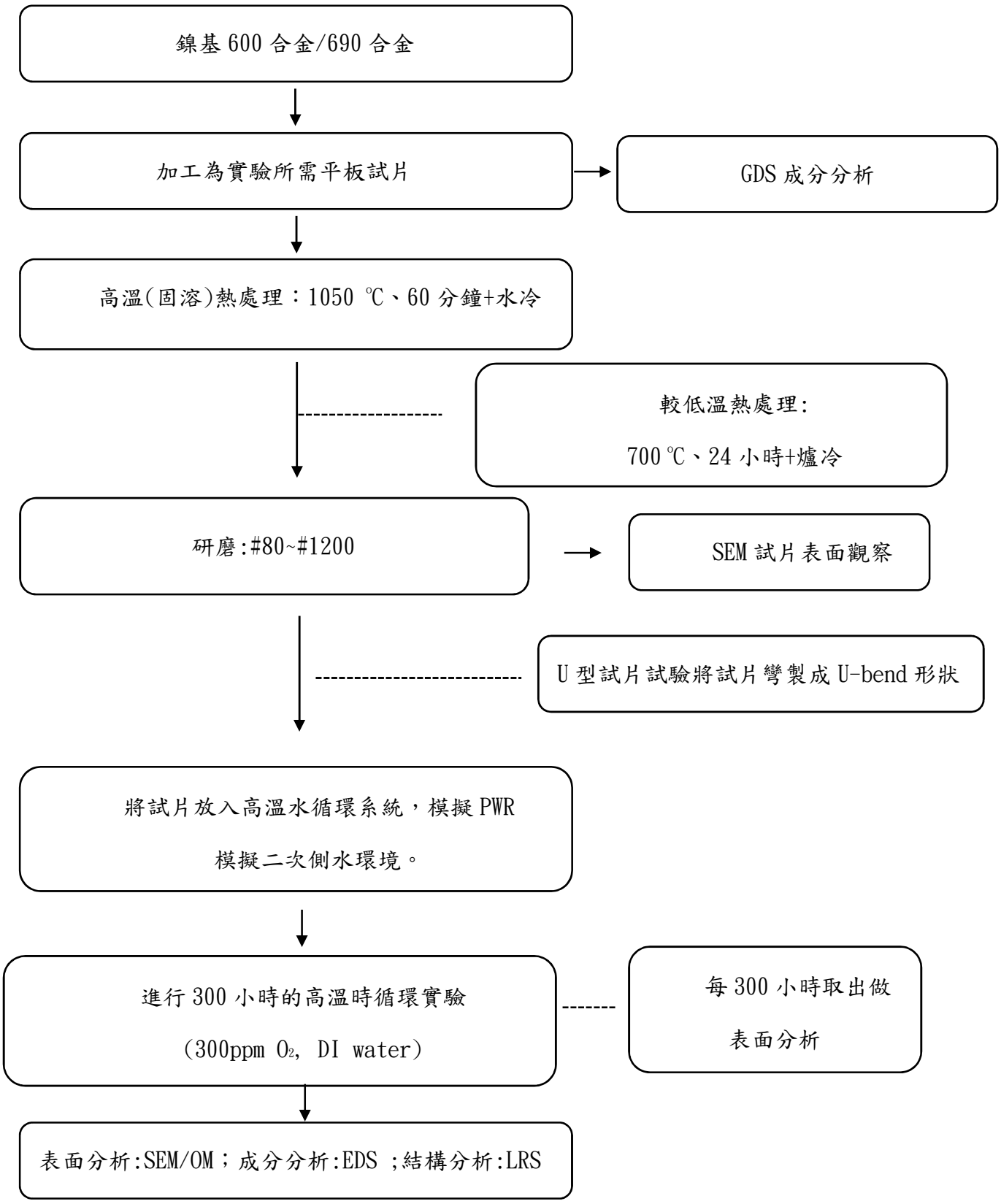
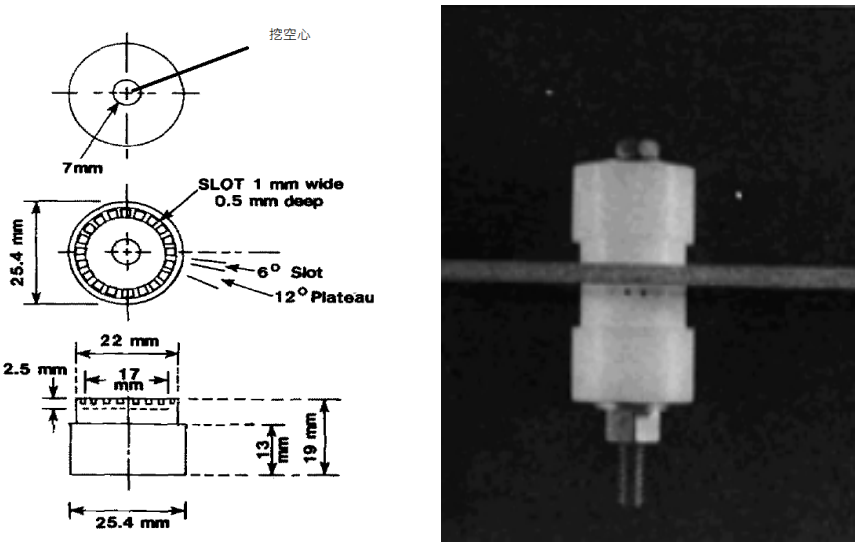

鎳基 600 合金/690 合金
加工為實驗所需平板試片
GDS 成分分析
高溫(固溶)熱處理：1050 ℃、60 分鐘+水冷
較低溫熱處理:
700 ℃、24 小時+爐冷
研磨:#80~#1200
SEM 試片表面觀察
U 型試片試驗將試片彎製成 U-bend 形狀
將試片放入高溫水循環系統，模擬 PWR
模擬二次側水環境。
進行 300 小時的高溫時循環實驗
(300ppm O2, DI water)
每 300 小時取出做
表面分析
表面分析:SEM/OM；成分分析:EDS ;結構分析:LRS

圖 2.實驗步驟流程圖




(a) (b)

圖 4.(a)間隙生成夾具 (b)夾具試片組合示意圖

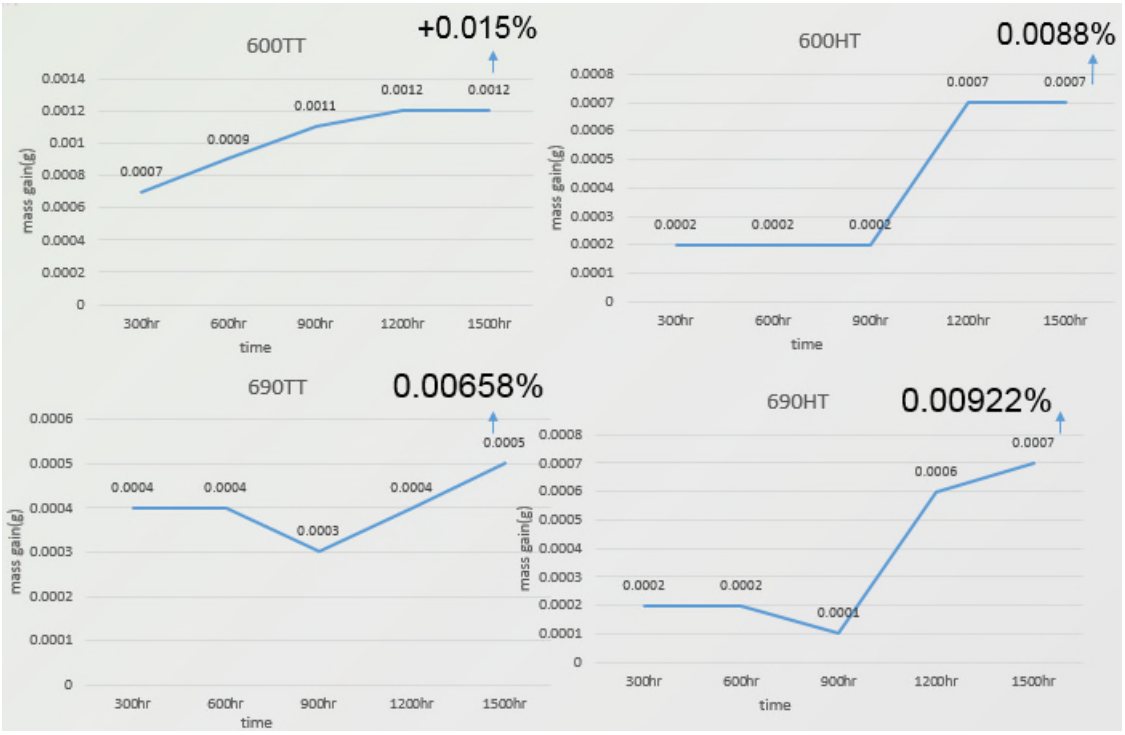



圖 5.鎳基 600/690 合金增重

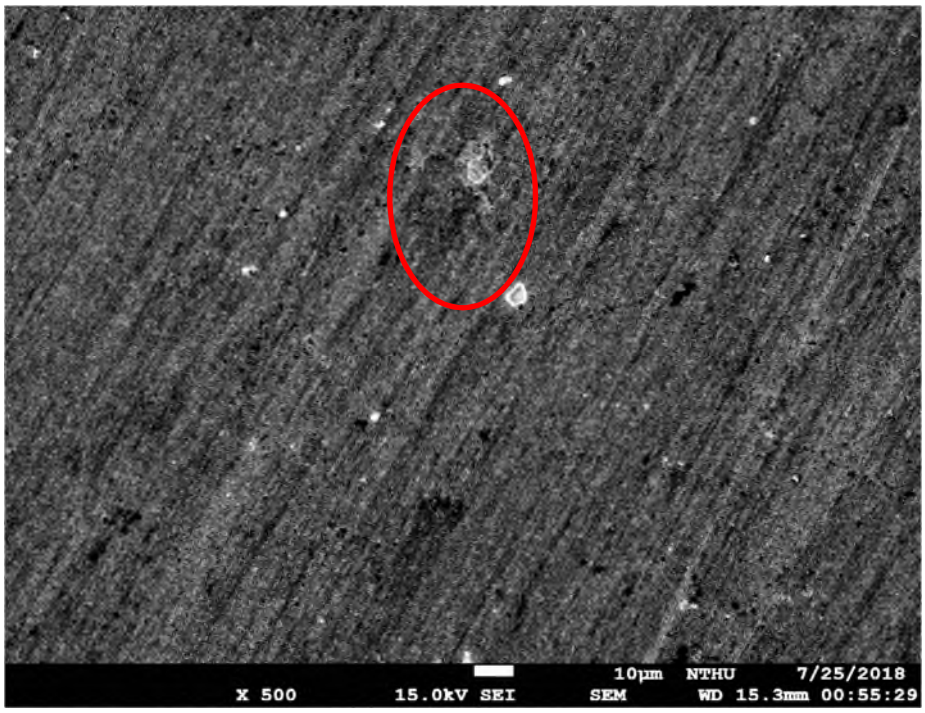



圖 6 .鎳基 600 合金 300 小時後測試表面孔蝕情形

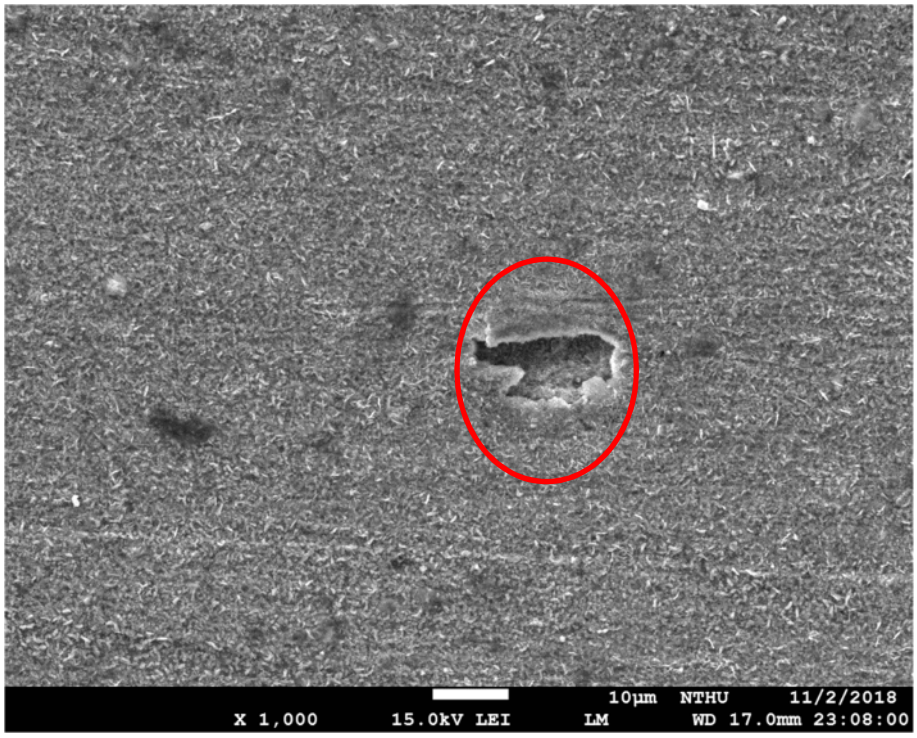



圖 7.鎳基合金 900 小時生開始成氧化層

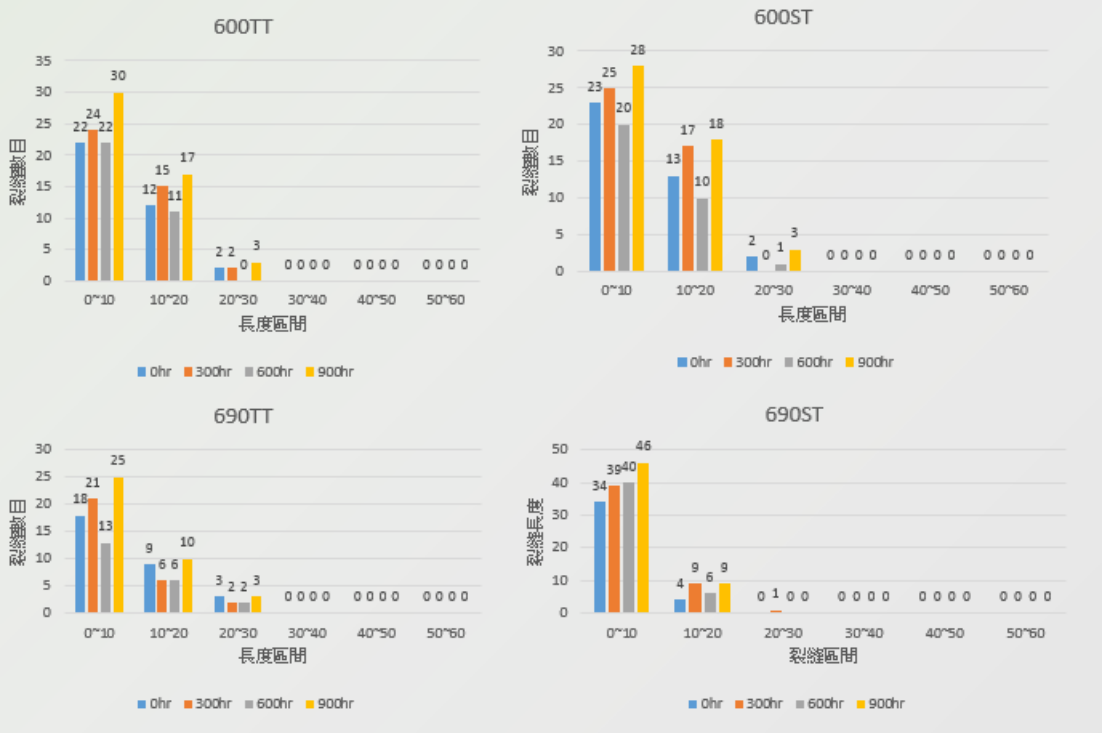



圖 8.鎳基 600/690 合金的 U 型試片定量分析表

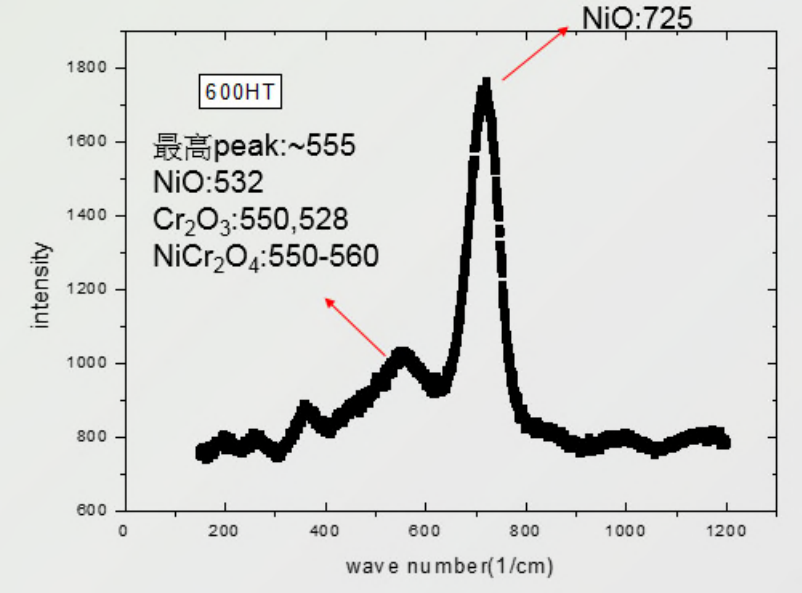



圖 9.鎳基 600 HT 的雷射拉曼分析

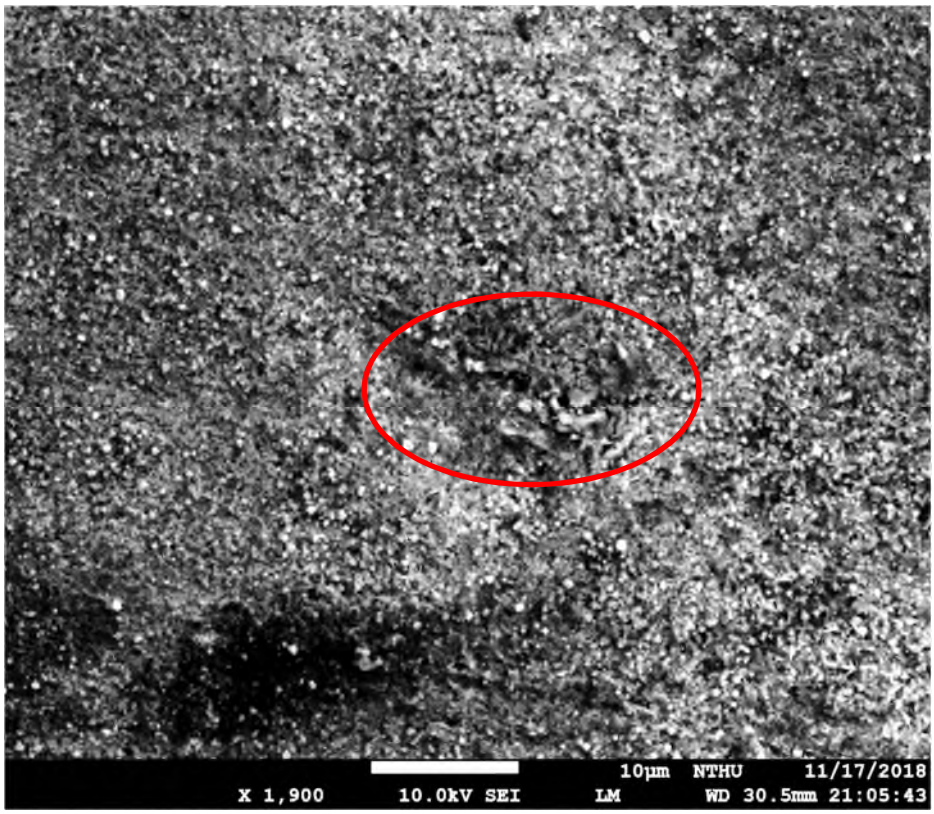



圖 10. 鎳基 600 合金(HT)在 600 小時氧化層生長情形與裂縫。

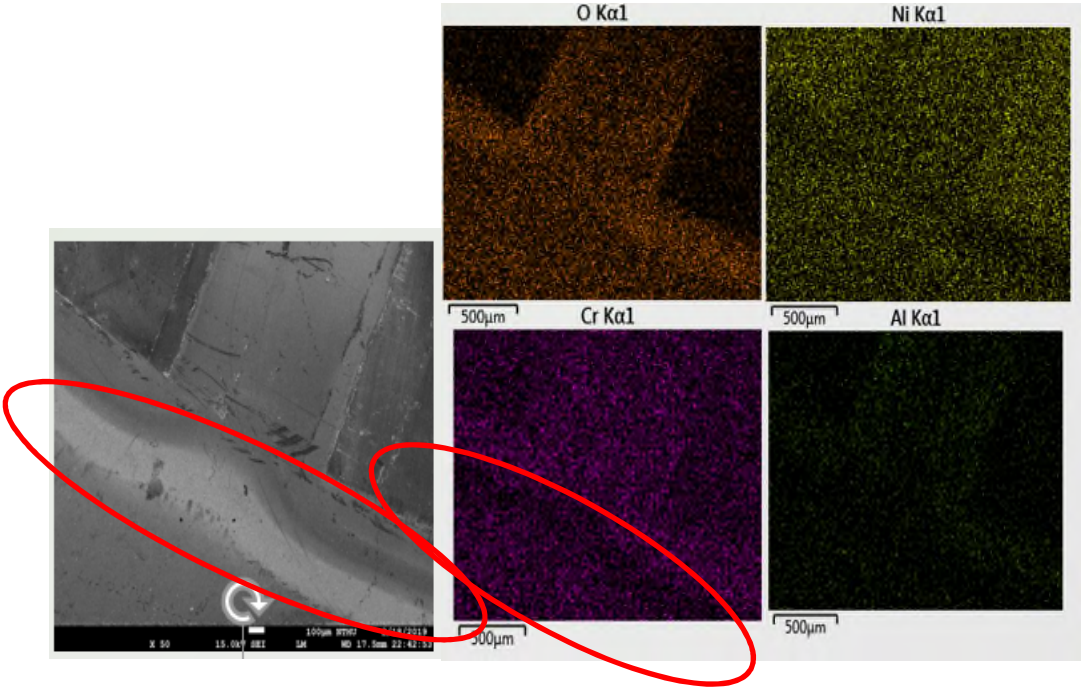



圖 11.間隙條件試片在凹槽開口處容生成厚的氧化鉻。

# 壓水式核能電廠之 TRACE/SNAP/FRAPTRAN 事故模擬與 URG/FLEX 措施分析 (II)

# PWR Accident Simulation and URG/FLEX Strategy Analysis with TRACE/SNAP/FRAPTRAN Codes (II)

計畫編號：MOST 107-2623-E-007-003 -NU

計畫主持人：陳紹文教授
e-mail：chensw@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學 核子工程與科學研究所

## 摘要

2011 年發生日本福島電廠事故，使得核能安全的議題再度受到全球重視。因此台電公司提出了斷然處置措施（URG），國外也提出得以 FLEX 設備因應，期望當電廠遭遇事故狀況時，能將反應爐順利冷卻並防止後續事故。本研究採用美國核管會研發之熱水流分析程式 TRACE，結合圖形化介面程式 SNAP，針對壓水式核電廠假設事故狀況進行模擬計算，並使用 FRAPTRAN 程式分析燃料和護套在假設事故狀態下之完整性，以確保電廠系統與燃料之安全。本年度之研究假設 SBO 同時再加上冷卻水喪失事故 LOCA，並採用 URG 措施與 FLEX 相關設備進行補水，分析在各種極端假設條件之下，電廠之可能狀況並提出建議，期望提升國內對電廠極端假設事故之了解，以作為電廠操作與安全管制之參考。

關鍵詞：馬鞍山電廠、壓水式反應器、TRACE 程式、FRAPTRAN 程式、電廠全黑、冷卻水喪失事故。

## Abstract

In 2011, the Fukushima accident made every countries more focus on the issue of nuclear safety. Thus, the Tai-power company has developed the Ultimate Response Guideline (URG) to handle and mitigate the Fukushima-like accidents, and hopefully it can successfully cool down the reactor core under complex accidents. In this study, the thermal hydraulic analysis program, TRACE and the graphical user interface program, SNAP, are used to analyze PWR under assumed accident scenarios. Furthermore, the FRAPTRAN code is also used to analyze the integrity of fuel rod and cladding as well as their mechanical behaviors. This project have assumed the complex SBO and LOCA conditions. Partial URG and the FLEX strategies are applied to rescue and mitigate the plant conditions, and several assumed situations have been tested as well to analyze the feasibility and capability of the present emergency processes. The present study can provide a useful reference for future NPP operations and safety managements.

Keywords: Maanshan NPP, TRACE, PWR, FRAPTRAN, SBO, LOCA.

## 一、 前言

在 2011 日本福島事故過之後，台電重新檢視了國內電廠之安全措施，並提出了 URG 等措施來因應。由於福島事故的導因是複合式天然災害，因此相對應的救援措施需有較大的安全餘裕，才能確保全面的防護。在去年的計畫中，本研究去年度計畫中[1]已完成 SBO 事故下使用 URG[2.3]進行救援的一些案例，並依此提出對核三廠[4.5]的操作安全建議。今年度本研究計畫繼續做更深入的模擬，假設更極端的 SBO 與 LOCA 的複合式事故狀況，搭配嚴苛的邊界條件，以模擬當 URG 與 FLEX[6-11]救援措施應用時的電廠系統狀況，並檢視假設事故狀況下燃料與護套的完整性。

## 二、模擬程式與模式建立

### 2.1 模擬程式介紹

TRACE 是由美國 NRC 研發之最佳估算熱水流分析程式[12-15]，可用於輕水式反應器，包含沸水式與壓水式反應爐之安全分析模擬，可建立三維之分析計算能力，為 NRC 未來重要的核能安全熱水流分析之主要程式之一。目前本研究使用的 TRACE 是最新版本 Patch 5。

FRAPTRAN 由 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) 發展[16-19]，主要功能是計算核電廠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。FRAPTRAN 可以計算包括燃料與護套的溫度、護套的應變、應力、氧化層厚度、以及護套內氣體壓力等等的暫態計算。本研究目前使用的 FRAPTRAN-2.0 為最新版本，首先代入 TRACE 爐心熱水流分析之結果，再計算爐心護套的溫度、應力、應變與氧化層厚度等機械性質，用以驗證燃料棒與護套之完整性。

本研究利用 SNAP 程式(Symbolic Nuclear Analysis Package)進行模擬模式之編輯[20]，相較於過去使用文字輸入邊界條件的方式，SNAP 提供使用者圖形化的輸入模式，對於初學者理解程式的各個組件與設定十分方便。本研究中 SNAP 可與 TRACE 及 FRAPTRAN 結合一起使用，分別用以控制 TRACE 程式與 FRAPTRAN 程式，並可作為不同程式之間的溝通橋樑與結果輸出介面等。

### 2.2 假設事故案例

本研究模擬條件假設七個案例，探討馬鞍山電廠在假設 SBO 與 LOCA 下的複合式事故，假設 TDAFP 與 MDAFP 運轉一小段時間後即失效之嚴苛情況下，驗證燃料與護套溫度是否能滿足法規準則[21]。在分析電廠於複合式事故下執行不同救援措施之案例比較中，將針對爐心系統之重要參數探討，如爐心壓力或水位及燃料護套溫度等。

為確保安全，暫態模擬期間燃料護套溫度須低於 1088K(保守安全值)，以確保燃料完整且不會氧化或護套破損之風險。在本研究中，模擬初始皆為核電廠處

於正常穩定運轉狀態下。本研究針對馬鞍山電廠進行下列假設案例測試：首先電廠穩定運轉至 60 秒，接著在 60 秒時發生地震，並假設在冷端入水段發生 1”大小的冷卻水流失 LOCA 事故，反應爐急停並執行控制降壓，同時 MDAFP 啟動。而所有案例假設在 1860 秒時(約半小時後)遭遇海嘯襲擊廠區，喪失外電，開始 SBO 狀態，此時假設 MDAFP 失效，而 TDAFP 則因保守考量假設其失效。其後的救援措施則分別簡述如下。Case1、2 於 3660 秒開始注水，除了二次側執行蒸汽產生器的緊急洩壓與注水 600gpm 之外，一次側也分別執行 100gpm 與 40gpm 的注水。Case3 則於 3660 秒執行蒸汽產生器緊急洩壓與二次側注水 800gpm，以及一次側高壓注水 5gpm。Case4、5 則分別於 5460 秒與 3660 秒執行緊急洩壓與二次側注水 800gpm，以及一次側高壓注水 10gpm。最後 Case 6、7 則分別於 3660 秒與 5460 秒對 SG 二次側進行中壓注水 215gpm，並對一次側進行 20、25gpm 的高壓注水。各案例執行救援程序及其內容簡列於下方的表 1 中。

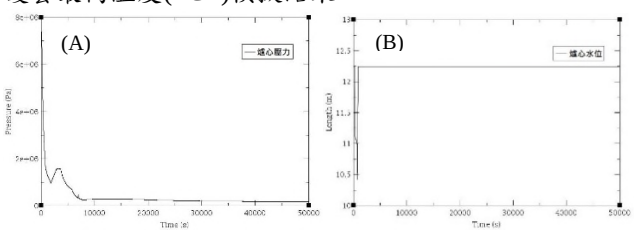
**表 1 模擬案例假設暫態模擬時序表**

| | 案例一 | 案例二 | 案例三 | 案例四 | 案例五 | 案例六 | 案例七 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 控制降壓 | 60s | 60s | 60s | 60s | 60s | 60s | 60s |
| 緊急洩壓 | 3660s | 3660s | 3660s | 5460s | 3660s | n/a | n/a |
| 注水時間 | 3660s | 3660s | 3660s | 5460s | 3660s | 3660s | 5460s |
| 一次側注水量 | 100 gpm | 40 gpm | 5 gpm | 10 gpm | 10 gpm | 20 gpm | 25 gpm |
| 二次側注水量 | 600 gpm | 600 gpm | 800 gpm | 800 gpm | 800 gpm | 215 gpm | 215 gpm |

## 三、模擬結果與討論

案例一分別於 60 秒及 3660 秒依照 EOP 及 URG 策略執行控制降壓與緊急洩壓，大量移除衰變熱。而緊急洩壓後便可利用準備完成之注水系統進行注水，恢復爐心水位。由分析結果圖可知，這樣的分析時序與注水量對於 SBO+LOCA 事故來說十分足夠，爐心安全無虞。

案例二分別於 60 秒及 3660 秒執行 URG 之控制降壓與緊急洩壓，大量移除衰變熱。而緊急洩壓後便可利用準備完成之注水系統進行注水，恢復爐心水位。由於一次側的破口，我們也引入一次側 FLEX 高壓注水來對爐心水位進行救援。由分析結果圖可知，這樣的分析時序與 40gpm 注水量對於 SBO+LOCA 事故來說十分足夠，只要救援設備狀態持續維持，爐心安全無虞。圖 1 為 TRACE/SNAP 分析案例一、二之爐心壓力、水位及燃料護套最高溫度(PCT)模擬結果。



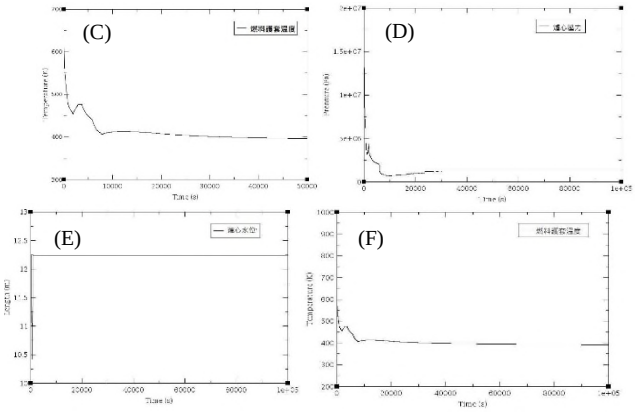




圖 1 TRACE 分析案例一之(A)壓力(B)水位(C)護套溫度與案例二之(D)壓力(E)水位(F)護套溫度結果圖。

利用 TRACE 模擬結果代入 FRAPTRAN/SNAP 程式進行案例一之燃料與護套暫態分析。圖 2 顯示護套環應力與護套環應變，在順利實施一二次側注水的狀況下，護套環應力維持在相當低的數值，而護套環應變顯示遠低於法規限值 0.1。護套溫度變化皆遠低於 1088K，護套無安全疑慮。因此，護套氧化層厚度並無增加，經由上述結果證明案例 1 之燃料完整性與安全無虞。

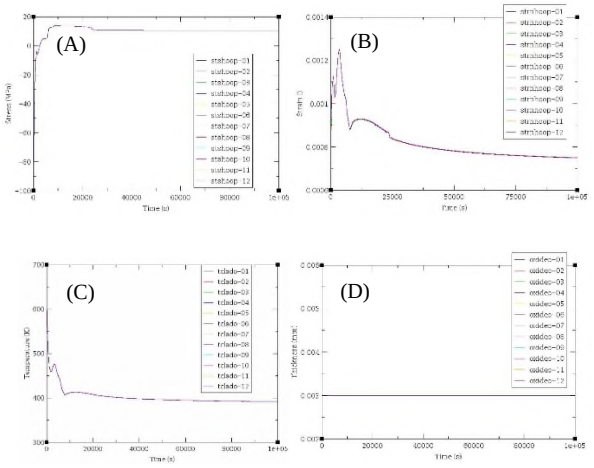



圖 2 FRAPTRAN 分析案例一之(A)護套環應力(B)護套環應變(C)護套溫度(D)護套氧化層厚度結果圖。

案例三同時發生 SBO 與 LOCA 事件，是非常極端之假設案例。本案例在二次側的蒸汽產生器注水雖然十分成功，也讓蒸汽產生器的水位維持在相當高的位子。但由於在一次側由於軸封洩漏外加破口 LOCA 的關係，雖然有 5gpm 的注水量，仍顯得入不敷出，水位將於 45000 秒左右接近 TAF，而 PCT 將於 58000 秒左右時突破 1088K。由 TRACE 分析結果可以看出，自事件發生後約有大約 45000-58000 秒左右(大約 12.5~16 小時)的時間可供反應，需在這段期間內盡快恢復廠內供電或是尋求其他注水途徑。

案例四發生 SBO 事件與 LOCA 事件是非常極端之假設案例。在二次側的蒸汽產生器注水同樣非常成功，使蒸汽產生器的水位維持在相當高的狀態。但因一次側的軸封洩漏外加破口 LOCA 假設，加上假設只有 10gpm 的注水量，因此入不敷出。根據水位與溫度之模擬結果，因為水位大約 68000 秒接近 TAF，而 PCT 大約於 90000

秒接近 1088K，因此大約自事件發生後有 8000~90000 秒，也就是約 19~25 小時的緩衝時間，需盡快恢復廠內的電源是尋求其他注水來源對爐心進行救援。圖 3 分別為案例三、四之爐心壓力、爐心水位及燃料護套 PCT 模擬結果。

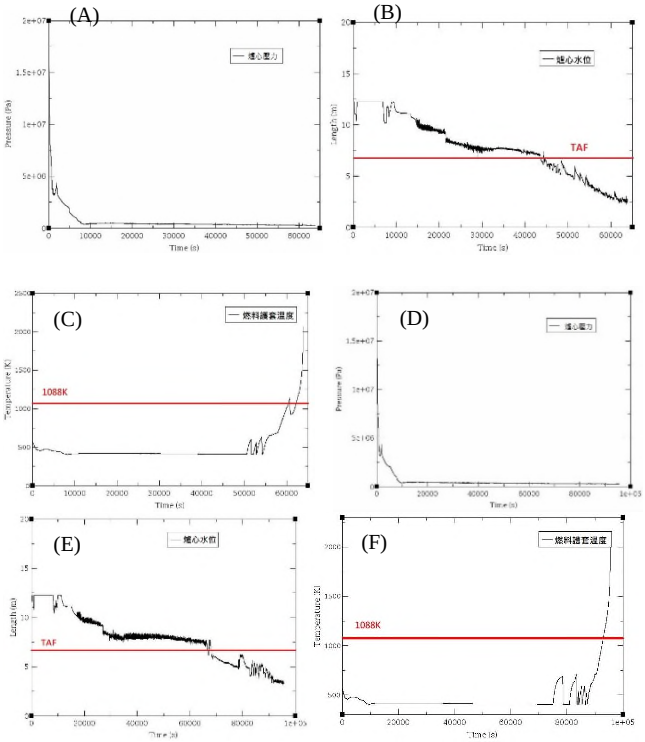



圖 3 TRACE 分析案例三之(A)壓力(B)水位(C)護套溫度與案例四之(D)壓力(E)水位(F)護套溫度結果圖。

案例五將案例四之一次側高壓注水提前至 3660 秒時開始進行。在二次側的蒸汽產生器注水雖然成功使蒸汽產生器的水位維持在高位，但一次側因軸封洩漏加破口 LOCA 的冷卻水流失，高壓注水 10gpm 的量依然入不敷出。最後結果差異並不大，溫度開始上升值也大約差 1800 秒左右。，因水位約於 70000 秒接近 TAF，而 PCT 亦約於 90000 秒接近 1088K，因此自事件發生後也是預估大約有 70000~90000 秒(約 19~25 小時)的緩衝時間，需盡快尋求其他救援。圖 4 分別為案例五爐心壓力、爐心水位及燃料護套 PCT 溫度模擬結果。

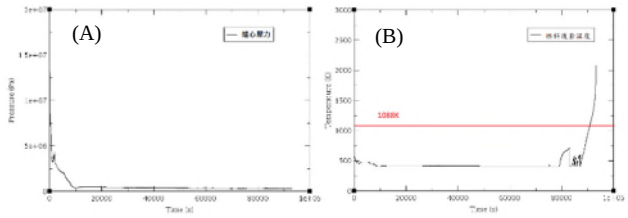



圖 4 TRACE 分析案例五(A)壓力(B)護套溫度結果圖。

利用 TRACE 模擬結果代入 FRAPTRAN 進行燃料與護套暫態分析。圖 5 顯示護套環應力變化，因在爐心水位逐漸降低，移熱功能逐漸喪失，在約 50000 秒後因爐心水位低於 TAF 之 2/3 處以下，因無水覆蓋且蒸氣冷卻效率降低開始快速上升，到約 58000 秒時環應力達到最大值隨後驟降，顯示護套可能在此時失效。護套環應變同樣地於 58000 秒左右突然驟升，超過了 0.1 的法規值，亦顯示護套可能失效。護套溫度在 50000 秒之後開始上升後，引發環應力隨之上升，此處溫度趨勢與 TRACE 結果相當一致。在約 58000 秒時，護套溫度達到 1088K，燃料護套可能開始產生氫氣。護套氧化層厚度在約 59000 秒時快速上升，超過法規限值 17%。由上述結果可知，本案例在此極端假設條件下，水位約於 45000 秒接近 TAF，護套可能在 50000 秒後溫度明顯上升，58000 秒後開始劇烈變化，建議應於 45000 秒之前須介入或啟動替代搶救措施。

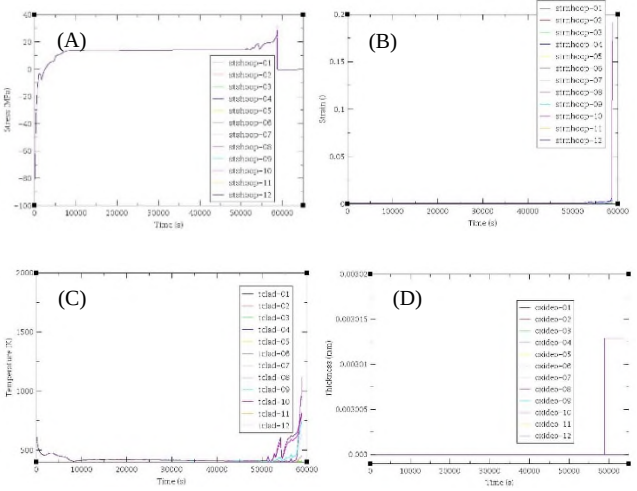



圖 5 FRAPTRAN 分析案例三之(A)護套環應力(B)護套環應變(C)護套溫度(D)護套氧化層厚度結果圖。

利用 TRACE 之案例四模擬結果，代入 FRAPTRAN 進行分析。根據 FRAPTRAN 模擬結果圖 6 顯示，約 75000 秒後環應力、環應變及燃料護套溫度皆開始有明顯的變化出現，也可以看出在護套溫度趨勢與 TRACE 結果相當一致。而在約 90000 秒後，燃料護套溫度快速上升，可能會開始產生氫氣。根據上述結果可知，水位大約於 68000 秒接近 TAF，而燃料護套在 75000 秒後開始會有劇烈性質變化，建議本案例應於 68000 秒之前啟動替代搶救/冷卻措施。

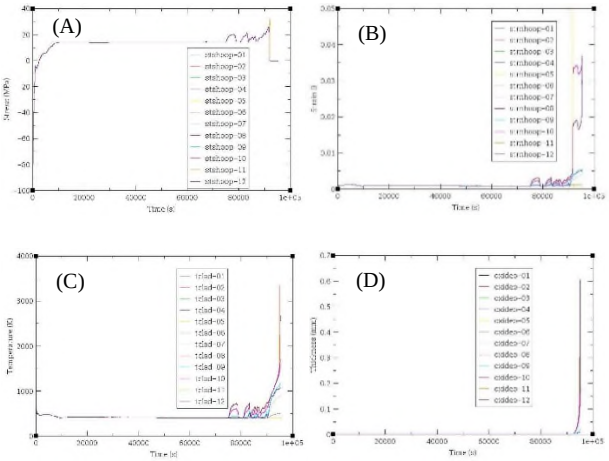



圖 6 FRAPTRAN 分析案例四之(A)護套環應力(B)護套

環應變(C)護套溫度(D)護套氧化層厚度結果圖。

案例六的 TRACE 模擬結果圖 7 包括爐心壓力及燃料護套溫度模擬結果等。當反應爐急停之後，爐心壓力先因破口的關係快速下降，而在 SG 部分並未執行 URG 的緊急降壓，改採用 FLEX 之中壓注水設備提供二次側 215gpm 之注水流量，模擬顯示二次側的中壓注水已足夠維持 SG 之水位，因此 SG 仍可維持熱移除能力。在一次側部分，如同前述案例皆有假設軸封洩漏與 LOCA 冷卻水流失，並設定從 3660 秒開始高壓注水 20gpm 進入爐心，因本案例二次側並沒有執行緊急降壓動作，故二次側的溫度壓力維持在較高的狀態，因此一次側的壓力與溫度亦仍略高於前述案例；加上高壓注水使得此案例爐心的雙相區高度應仍足以覆蓋住大部分燃料束範圍。直到最後護套 PCT 溫度雖然有些微上升與震盪，但是總體來說本案例爐心與燃料仍然維持在安全範圍以內。

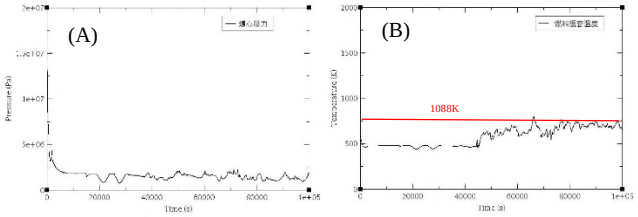



圖 7 TRACE 分析案例六(A)壓力(B)護套溫度結果圖。

利用 TRACE 模擬結果，代入 FRAPTRAN/SNAP 進行案例六燃料與護套暫態分析。圖 8 分別顯示本案例之燃料護套環應力、護套環應變、護套溫度、及氧化層厚度等。結果圖顯示，雖然護套環應力、護套環應變、護套溫度等雖然皆有一些震盪，但溫度最高並沒有超過 800K，且溫度結果與 TRACE 相當一致，環應變亦遠低於 0.1，皆遠低於法規限制值以下，且皆屬於安全範圍之內。因為護套溫度不高沒有明顯的氧化作用，因此護套氧化層厚度並沒有變化。由此可知，本案例處置適當，燃料護套完整性得以確保且安全無虞。

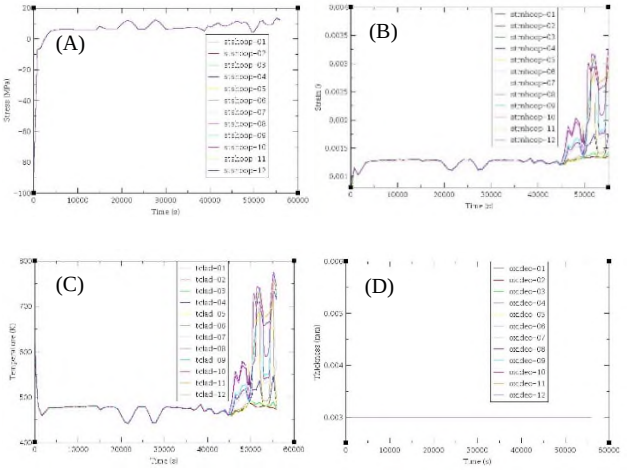



圖 8 FRAPTRAN 分析案例六之(A)護套環應力(B)護套環應變(C)護套溫度(D)護套氧化層厚度結果圖。

案例七的 TRACE 模擬結果顯示於圖 9。本案例相似於案例六，在二次側的部分並未執行 URG 之緊急降壓動作，採用 FLEX 中壓注水設備提供二次側 215gpm 之注水量等，模擬結果在二次側 SG 內顯示維持足夠之水位，因此二次側之移熱功能得以確保。而在一次側，同樣皆假設軸封洩漏與 LOCA 冷卻水流失，而高壓注水部分假設從 5460 秒才開始注水 25gpm 進入爐心。本案例模擬結果亦類似於前段案例 6，因二次側無緊急降壓動作，故溫度與壓力仍維持在較高之狀態，因此一次側之溫度與壓力亦略高於前述案例 1~5，而一次側的爐心內之雙相區高度應仍覆蓋住燃料束，因此燃料護套 PCT 溫度得以被控制在安全限值 1088K 之內。根據模擬，本案例處置得宜，使得電廠與爐心並未受到嚴重影響，爐心安全無虞。

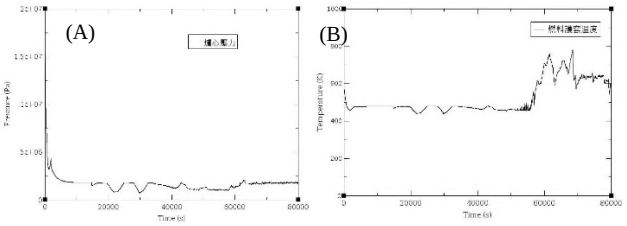



圖 9 TRACE 分析案例七(A)壓力(B)護套溫度結果圖。

利用 TRACE 案例七模擬結果代入 FRAPTRAN 程式進行燃料與護套的暫態分析。圖 10 顯示為燃料護套環應力、環應變、護套溫度、與氧化層厚度。根據模擬，整體的環應力維持在一個相對低的狀態，於當水位降低時環應變稍微大，但遠低於規範值 0.1，而護套溫度最高值約為 850K 左右，溫度趨勢亦與 TRACE 相當一致，整體來說燃料與護套皆在安全範圍之內，也因此本案例之氧化層厚度並沒有變化。燃料護套完整性得以確保，安全無虞。

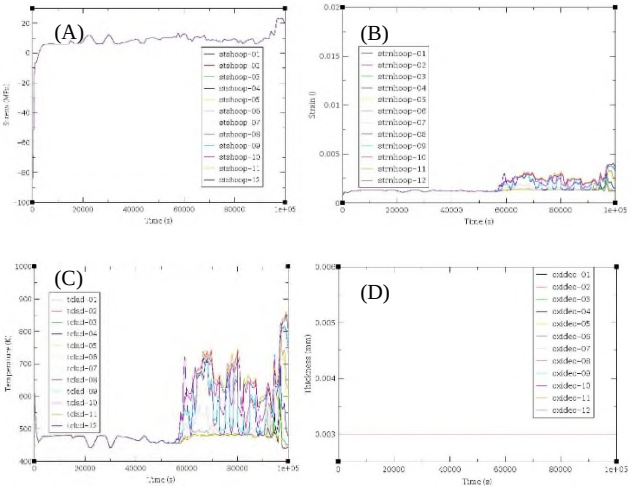



圖 10 FRAPTRAN 分析案例七之(A)護套環應力(B)護套環應變(C)護套溫度(D)護套氧化層厚度結果圖。

## 四、結論

本研究結合 TRACE/FRAPTRAN/SNAP 程式，針對壓水式馬鞍山電廠假設全黑 SBO 狀況並加上極端假設冷卻水流失 LOCA 事故，模擬多種極端的複合式假設事故案例，並採用 URG 措施與 FLEX 設備進行事故緩解，以分別探討電廠整體熱水流行為模式及燃料棒的機械

行為。本研究模擬案例之分析結果簡述如下：

(1) 本研究假設電廠發生 SBO 加 LOCA 事件，屬於現實中不太可能發生之極端假設案例。
(2) 即使電廠發生 SBO 加 LOCA 事件，只須即時執行斷然處置措施，輔以 FLEX 策略之一次側足量注水，即能有效確保電廠安全狀態。
(3) 根據模擬結果指出，若沒有引入其他救援措施，則一次側最低注水量大約為 20-25gpm (保守假設流量值)，只要高壓注水量能高於此流量以上，則電廠爐心與燃料應可安全無虞。反之則需要於一定時間內引入其他的救援或注水行動，以確保電廠爐心安全。
(4) 當一次側的注水量達到 40gpm (FLEX 一次側高壓幫浦之額定流量)，則電廠一次側水位完全不會受到影響，可以成功地被保持在 TAF 之上。同時燃料護套得以順利冷卻，並無任何溫度震盪情形發生。
(5) 在本研究假設案例中，雖然二次側有無緊急洩壓也會影響對蒸汽產生器的注水量，但若在一次側有破口的情況下，應先對一次側進行注水才是比較優先的選擇，以確保二次側能將爐心熱量順利帶走。

## 參考文獻


[1] 106 年科技部研究計畫結案報告, 2017, “壓水式核能電廠之 TRACE/ FRAPTRAN/ SNAP 嚴重事故分析方法建立與應用”,科技部,中華民國。
[2] 台灣電力公司馬鞍山電廠機組斷然處置程序指引
[3] 核三廠程序書 192「備援用設備維護及管理程序書」
[4] 維基百科, 2018, “第三核能發電廠”, https://zh.wikipedia.org/wiki/第三核能發電廠。
[5] 原子能委員會, 2018, “核能三廠基本資料”,
[6] 孫格非, 2016, “核三廠斷然處置措施與業界 FLEX 救援策略整併規劃”, 台電公司報告投影片, http://www.chns.org/attachments/article/194/
[7] 台電公司, 2015, “台電公司核能電廠福島後安全強化現況”, 台電公司報告投影片, http://www.chns.org/attachments/article/154/
[8] 楊融華, 2016, “利用 TRACE 程式分析核三廠 SBO 與 FLEX 評估”, 報告投影片, http://www.chns.org/attachments/article/194/
[9] WCAP 17601-P, Revision 0 “Reactor Coolant System Response to the Extended Loss of AC Power Event for Westinghouse, Combustion Engineering and Babcock & Wilcox NSSS Designs”.
[10] NEI 12-06, Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide, version endorsed by the NRC. https://www.nrc.gov/docs/ML1214/ML12143A232.pdf
[11] NEI 06-12, “B.5.b Phase 2 & 3 Submittal Guideline”. https://www.nrc.gov/docs/ML0700/ML070090060.pdf
[12] U.S.NRC, 2018, “Thermal-Hydraulics Codes, TRACE”, U.S.NRC, USA, https://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/research/safetycodes.html.
[13] Andrej Prošek, 2017, “RELAP5 and TRACE Calculations of LOCA in PWR”, NUREG/IA-0479, U.S.NRC, USA.
[14] K. C. Huang, C. Shih, J. R. Wang, “Analysis of Maanshan Station Blackout Accident and Ultimate Response Guideline using TRACE Code,” MS thesis, National Tsing Hua University, Institute of Nuclear Science and Engineering, 2012.
[15] C. Shih, J.H. Yang, J.R. Wang, S.W. Chen, 2016, “Fuel Rod Behavior and Uncertainty Analysis by FRAPTRAN/TRACE/DAKOTA Code in Maanshan LBLOCA”, NUREG/IA-0471, 2016.
[16] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, J.M. Cuta, I.A. Porter, 2016,, “FRAPTRAN-2.0: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods”, PNNL-19400, Vol.1, Rev 2, https://frapcon.labworks.org/Code-documents/FRAPTRAN-2.0-A_Computer_Code_for_the_Transient_Analysis_of_Oxide_Fuel_Rods.pdf.
[17] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, and J.M. Cuta, 2011, “FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods”, NUREG/CR-7023, Vol. 1, 2011.
[18] 李尚諭, 2017, “利用 TRACE 與 FRAPTRAN 程式分析馬鞍山電廠全黑事故與喪失冷卻水事故之核燃料行為”, 國立清華大學碩士論文.
[19] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, “FRAPTRAN 1.4: Integral Assessment” NUREG/CR-7023, Vol. 2, March 2011.
[20] Applied Programming Technology, 2018, “SNAP”, https://www.snaphome.com/.
[21] U.S.NRC, “§ 50.46 Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors”, 10 CFR 50.46 regulations, USNRC, USA. https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0046.html

# 核能電廠避雷器老劣化線上診斷及運轉狀態評估系統研製

計畫編號：MOST 107-2623-E-011 -002 -NU
計畫主持人：郭政謙 教授
e-mail：cckuo@mail.ntust.edu.tw
執行單位：國立台灣科技大學　電機工程系

## 摘要

隨著自動化技術的發展及自動化水準的提高，電力系統高壓設備的檢修手段也在逐步改進，狀態監測、狀態評估及狀態檢修是未來電力系統之必然方向。避雷器主要作為電力系統重要的過電壓保護設備，此設備不但使用廣泛，且其運行狀況的好壞將直接影響到電力系統的安全，因此對於避雷器進行線上監測就顯得尤其重要。。以往對於避雷器監測設備，大多以全洩漏電流監測儀為主，雖然採用此方式之監測儀設備簡單可靠，對保障電網的安全運行尚能發揮作用，但其資料分辨力低，無法獲取設備最精確的運行狀態，或判別其老化狀態，並且資料只能在現場讀取，不能滿足狀態監測和綜合自動化的需要。因此，自主研製一套能夠快速、準確的發現並診斷避雷器故障類型之設備，對故障的及時、迅速維修復原將具有重要的意義，亦可為電力系統的安全運行提供可靠的保證。

基於上述，本計畫已完成避雷器線上檢測及預警系統。首先第一部分透過長期放置型線上監測單元同時兼具故障警示及老化過程分析之雙重功能，整合電壓、總洩漏電流大小、電阻性洩漏電流大小、三次諧波電流大小與長期量測之訊號進行分析，提供第二部分攜帶型線上量測單元之參考依據，透過有效評估避雷器設備之絕緣老化階段，及其剩餘壽命之估算，或甚至瑕疵及損壞等現象，利於提高系統可靠度，使之真正達到故障的預防與老化預知之診斷，同時藉由實驗結果，驗證本計畫產出之預警系統兼具診斷準確性與使用便利性。

關鍵詞：避雷器、故障診斷、線上監測、嵌入式系統、局部放電。

## Abstract

With the development of automation technology and the improvement of automation level, the maintenance methods of high-voltage equipment in power system are also gradually improved. Condition monitoring, state assessment and state maintenance are the inevitable directions of the future power system. The arrester is mainly used as an important over-voltage protection device for the power system. This device is widely used, and its operation status will directly affect the safety of the power system. Therefore, it is especially important to perform on-line monitoring of the arrester.

In the past, most of the arrester monitoring equipment were based on full leakage current monitors. Although the monitor equipment used in this mode is simple and reliable, it can still play a role in ensuring the safe operation of the power grid, but its data resolution is low, and the equipment status can’t be obtained most accurately. Also it can't determinie equipment aging state. The data can only be read in the field, can't meet the needs of condition monitoring and integrated automation. Therefore, it is of great significance to independently develop a set of equipment that can quickly and accurately detect and diagnose the type of lightning arrester fault and provide timely and reliable repair and recovery of faults. Can also provide reliable guarantee for the safe operation of the power system.

Based on the above, the plan has completed the online monitoring and early warning system for the arrester. First, the first part is through the long-term placement type online monitoring unit, which has both the function of fault warning and aging process analysis. The voltage, total leakage current, resistive leakage current, third harmonic current and long-term measurement signals are analyzed to provide a reference for the second part of the portable online measurement unit.

Through effective evaluation of the insulation aging stage of the arrester equipment, and the estimation of its remaining life, or even the damage and defect, it is beneficial to improve the system reliability, so that it can truly achieve the diagnosis of fault prevention and aging prediction. By the experimental results, verify that the early warning system of the project has both diagnostic accuracy and ease to use.

Keywords: arrester, fault diagnosis, online monitoring, embedded system, partial discharge.

## I. 前言

發變電所內之電力設備，主要包括：電力變壓器、氣體絕緣開關、配電盤、斷路器、電力電容器、避雷器、高壓套管、發電機及高壓馬達等等，此些高壓設備之絕緣材料的絕緣缺陷或劣化，將會是影響上述設備正常運轉的重要因素之一。絕緣缺陷通常可分為集中性缺陷及分佈性缺陷。所謂集中性缺陷是指缺陷集中於絕緣材料的某一局部，具有快速發展造成絕緣嚴重劣化的可能；分佈性缺陷較常由於受潮或長期過熱所引起，它是一種較普遍性的劣化，一般劣化進展過程較為緩慢，有些長達數年。為了確保設備能夠穩定運轉，實施相關絕緣設備之狀態監測是有其必要性。本研究為了防範發生絕緣劣化之改進措施為：針對此案研製一套氧化鋅避雷器之線上狀態監測與即時預警系統，將提供智慧型的避雷器狀態立即顯示及故障預先警示系統，以有效防止避雷器絕緣劣化的發生，確保電力設備可靠的運行，降低維護費用，並提高安全性與穩定供電。避雷器在長期運轉於操作電壓下不免會發生故障，並藉由長期放置型線上監測方式與攜帶型線上監測方式，同時兼具故障警示及老化過程分析之雙重功能，整合電壓、總洩漏電流大小、電阻性洩漏電流大小、三次諧波電流大小與長期量測之

訊號，建立其老化圖譜趨勢判斷，提供未來於單次性量測的重要參考依據。透過有效評估避雷器設備之絕緣老化階段，及其剩餘壽命之估算，或甚至瑕疵及損壞等現象，利於提高系統可靠度，使之真正達到故障的預防與老化預知之診斷，同時藉由此研究達成全自製之檢測設備，降低檢測設備成本。

## II. 研究目的

電力系統在運轉期間常常遭受到過電壓的威脅，過電壓的來源包含有開關切換、接地故障及雷擊等等。當電力設備在遭遇過電壓期間，若欲使電力設備正常運轉而不被破壞，往往需要非常良好的絕緣能力。在成本及技術層面考量下，電力設備的耐壓等級通常無法承受所有的過電壓，尤其雷擊造成的突波最容易直接破壞電力設備，過電壓保護，避雷器的結構較為堅固且使用壽命也較長，但其使用壽命還是有限的。因此若可以在避雷器發生故障前先找出故障特徵或是老化警訊，並透過簡易的人機介面顯示避雷器目前的運行狀態，就能提早進行維修與保養，來減少避雷器故障時所造成的損失，確保電力系統可靠的運行，以降低維護費用，並提高安全性與提供穩定供電。

使用者往往無法得知避雷器的在線運轉狀態，得透過定期的離線測試才能得知避雷器的老化狀態。由國際標準 IEC 60099-5 可知，氧化鋅避雷器在正常使用期間，評估避雷器之唯一可靠指標為測量總洩漏電流中的電阻性成分，並比較在溫度和電壓下的最大允許電阻性洩漏電流加以比較，以判斷避雷器老化程度，當作汰換之參考。

為了減少避雷器因無法預期的故障而衍生出的巨額虧損，期望能透過非侵入式的檢測在避雷器發生故障的初期能有適當的警訊，如此一來便能使維修人員即早發現避雷器已發生老化，進而減少因故障損壞而造成的損失。

## III. 研究方法及內容

本計畫之長期放置型線上監測系統架構，如圖 1 所示，係利用電壓感測器、電流感測器量測避雷器之電氣訊號，並藉由 Arm-Cortex M4 將擷取到的類比訊號傳遞至中央監控診斷單元加以分析計算，讓使用者能透過圖控式人機介面顯示避雷器目前的運行狀態

本計畫之攜帶型線上監測系統架構，如圖 2 所示，係利用隔離探棒、電流感測器量測避雷器之電氣訊號，並藉由資料擷取卡將類比訊號傳遞到電腦端，讓使用者可以從 LabVIEW 即時顯示介面得知當下避雷器運轉情況，並得知避雷器之健康狀況。

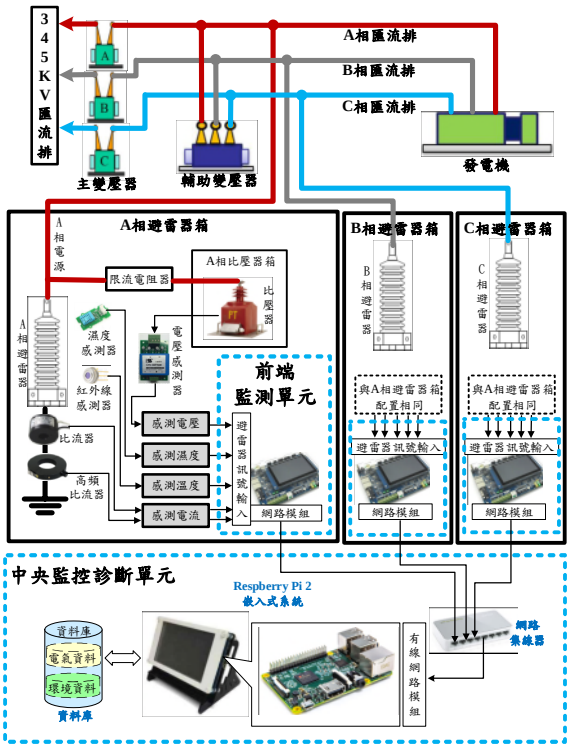



圖 1. 長期放置型線上監測架構

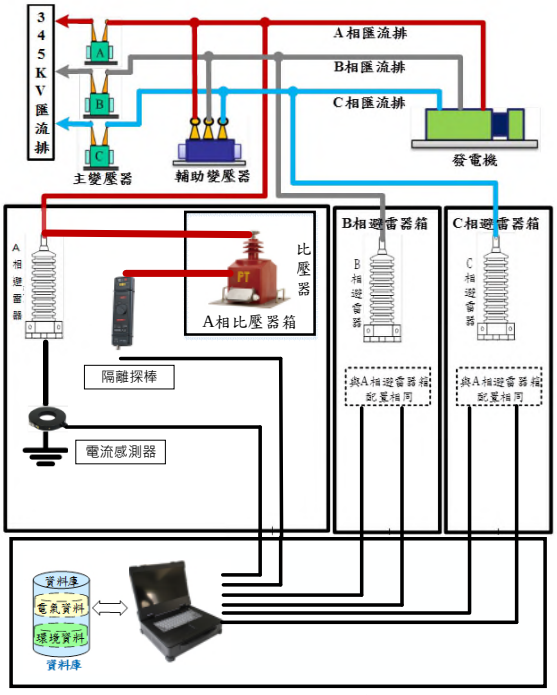



圖 2. 攜帶型線上監測系統架構

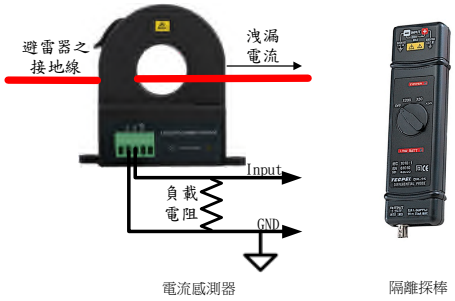



圖 2 感測器介紹

### 3.1 硬體架構

1.感測器介紹

本計畫使用 ETCR 鈦泰公司出產的 ETCR025K 開合式高精度漏電流傳感器，採用開合式設計，線路不必斷開即可測量，另外採用磁性遮罩技術，受到外界磁場的影響極小，確保其感測器之高精度、高穩定性、高可靠性，與 PINTEK 所出產的 DP-25 隔離探棒。圖 2 為使用之感測器介紹。

2.資料擷取盒

如圖 3 所示,把前端感測單元整合於資料擷取盒中,並且把元件連接之所有感測器一律採用標準規格的 BNC 接頭,不需要而外的轉接盒,以減少資料擷取盒的體積與重量。

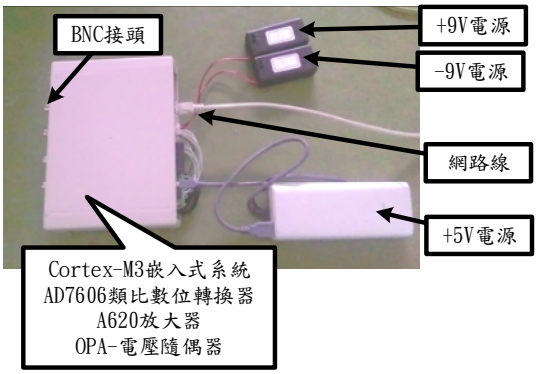



圖 3.資料擷取盒外觀

3.2 軟體架構

1.快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform)

假設電力系統含有諧波，假設避雷器之電壓及電流分別為 和 ，則傅立葉展開式如下：

$$u_{total} = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(\text{kwt} + \alpha_k) \quad (1)$$

$$i_{total} = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{km} \sin(kwt + \beta_k) \quad (2)$$

其中 $U_0$ 電壓的直流成分，$I_0$ 為電流的直流成分，$U_{km}$ 為 k 次諧波電壓，$I_{km}$ 為 k 次諧波電流，$\alpha_k$ 為 k 次諧波電壓之相角，$\beta_k$ 為 k 次諧波電流之相角，k 為正整數。另外，若 $f(t)$ 的週期為 T 且為不間段且連續的函數，則以下列傅立葉展開級數表示：

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\left[a_n \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) + b_n \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right)\right]$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\left[\sqrt{{a_n}^2 + {b_n}^2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt - \phi_n\right)\right] \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{T} + \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} + \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt \quad (3)$$

其中 $\alpha_0$ 為直流成分，$\alpha_n$ 為 n 次諧波的餘弦函數之振幅，$b_n$ 為 n 次諧波的正弦函數之振幅。因微處理器讀取訊號的方式為離散取樣，須使用離散傅立葉轉換（Discrete Fourier Transform , DFT），轉換過程中需將傅立葉級數轉換成複數形式再執行離散運算，即為離散傅立葉轉換。方程式( 3 )改由尤拉公式來表示複數如下：

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\left[a_n \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) + b_n \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right)\right]$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\left[a_n \cdot \left(\frac{e^{i\frac{2\pi}{T}nt} + e^{-i\frac{2\pi}{T}nt}}{2}\right) + b_n \cdot \left(\frac{e^{i\frac{2\pi}{T}nt} - e^{-i\frac{2\pi}{T}nt}}{2i}\right)\right]$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}nt} + \sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{a_n + ib_n}{2}\right) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{T}nt}$$

(7)

將方程式( 5 )和方程式( 6 )帶入方程式( 7 )得到如下：

$$\frac{a_n - ib_n}{2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt - j\frac{2}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) dt\right]$$

$$\frac{a_n - ib_n}{2} = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{T}nt\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{T}nt\right)\right] dt$$

$$\frac{a_n - ib_n}{2} = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{T}nt} dt$$

$$\frac{a_n - ib_n}{2} = C_n \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}nt} = \sum_{n=1}^{\infty}(C_n) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}nt} \quad (9)$$

因方程式( 5 )和方程式( 6 )的關係，

$\frac{2\pi}{T}(-n) = -\frac{2\pi}{T}(n)$ ，$a_{-n} = -a_n$ ，$b_{-n} = -b_n$ ，也同時：

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{T}nt} = \sum_{n=-1}^{-\infty}\left(\frac{a_{-n} - ib_{-n}}{2}\right) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{T}nt}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{T}nt} = \sum_{n=-\infty}^{-1}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}nt}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{T}nt} = \sum_{n=-\infty}^{-1}(C_n) \cdot e^{i\frac{2\pi}{T}nt} \quad (10)$$

而常數項 $\frac{a_0}{2}$ 為：

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot dt = C_0 \quad (11)$$

綜合方程式( 2-4 )至方程式( 2-9 )，可以得到：

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n - ib_n}{2}\right) \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}nt} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{a_n + ib_n}{2}\right) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{T}nt}$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}nt} + \sum_{n=-\infty}^{-1} C_n \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}nt}$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}nt} \quad (4)$$

因此最後得到傅立葉級數的複數表示形式：

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(n) \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}nt} \quad (13)$$

$$F(n) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T f(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{T}nt} dt \quad (14)$$

若接收的連續訊號 以 時間間格取樣，且每周期共取 N 個點，則得到的離散傅立葉級數（Discrete Fourier Transform, DFT）[3]如下：

$$f(k)=\sum_{n=0}^{N-1}F(n)\cdot e^{i\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5)$$

$$F(n)=\frac{1}{N\Delta T}\sum_{n=0}^{N-1}f(k)\cdot e^{-i\frac{2\pi}{N\Delta T}n\cdot k\cdot\Delta T}\cdot\Delta T$$

$$F(n)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}f(k)\cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \quad (6)$$

由方程式(16)可以得知訊號在 k 次頻率的振幅大小與相位角。

若只取單一週期做轉換，則方程式( 15 )和方程式( 16 )可以改寫成：

$$f(k)=\sum_{n=0}^{N-1}F(n)\cdot e^{i\frac{2\pi}{N}kn},\ 0\le k\le N-1 \quad (77)$$

$$F(n)=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}f(k)\cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}kn},\ 0\le k\le N-1 \quad (18)$$

其中 $f(k)$ 為訊號經類比-數位轉換器(ADC)取樣得到的離散數位訊號，而 $F(n)$ 是經離散傅立葉轉換所得的離散頻譜。由方程式(17)和方程式(18)得知，N 點離散傅立葉轉換共需要 $N^2$ 複數乘法與 $N\cdot(N-1)$ 次複數加法運算，取樣為 10 萬點，用離散傅立葉轉換，乘法和加法次數將達到 100 兆次，無法有效率的解決運算問題。

利用複數表示形式中具有對稱性與週期性的循環性質，因此簡化上述的離散傅立葉轉換的高效能演算法就可以發展出來，於 1965 年 Cooley 及 Tukey 提出的快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform , FFT)，本計畫即使用快速傅立葉轉換達到運算需求。運算過程如下[2]：

(1) 設定讀取的取樣時間間格 $\Delta T$ 即總取樣點數 N。

(2) 進行類比-數位轉換及取樣

(3) 將取樣結果帶入快速傅立葉轉換函式，計算出各係數。

(4) 將係數結果乘上轉換因數，則得到訊號各個頻率的振幅與相位角。

2.相位差計算原理

微處理器計算兩個訊號之相位差主要有兩個方法：

(1)由兩個訊號之時間差推估相位差

利用電場感測器接收到電壓訊號，電流感測器接收到電流訊號，由類比-數位傳換器做同步讀取，其波形如圖.4 所示。

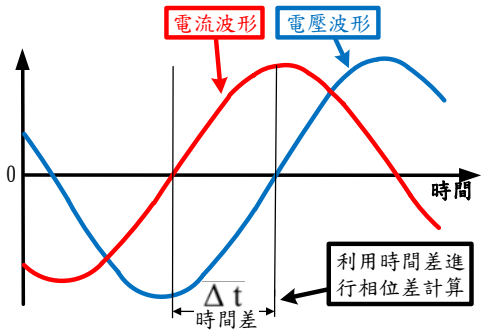



圖 4.相位偵測方法

微處理機計算相位差 的計算步驟如下：

(1)電壓訊號、電流訊號進行類比-數位轉換及同步取樣

(2)利用微處理機判別取樣點是否過零點且此斜率為正

(3)計算第一筆與第二筆過零點且此斜率為正的取樣點之時間差，如圖.4 的 $\Delta T$，再經過轉換為相位差 $\theta$。計算如下：

系統頻率=60Hz、若 =3.60ms

$$\theta=0.00360\times360^{\circ}\times\frac{1}{\frac{1}{60}}=77.76^{\circ}$$

(2)由快速傅立葉轉換推估基本波之相位差

訊號經傅立葉轉換後的複數數學式 ，具備兩者物理意義，一為訊號在 n 頻率下的振幅大小，一為訊號在 n 頻率下的相位角。最後相減兩個訊號的相位角，則得到兩訊號之相位差，微處理機計算相位差 的計算步驟如下：

(1)電壓訊號、電流訊號進行類比-數位轉換及同步取樣

(2)將取樣結果帶入快速傅立葉轉換函式，計算出各個頻率的振幅與相位角。

(3)電流訊號相位角-電壓訊號相位角=相位差 。

3.電阻性洩漏電流計算原理

氧化鋅避雷器之總洩漏電流 $I_t$ 、電阻性洩漏電流 $I_r$ 、電容性洩漏電流 $I_c$ 之向量關係突如圖 5.所示，可藉由電壓信號與總洩漏電流之相位差 $\theta$ 做洩漏電流之計算。

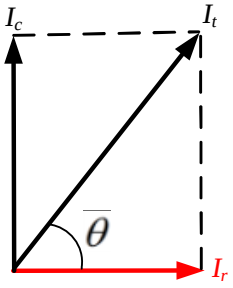



圖 5. 洩漏電流之向量關係

微處理器計算電阻性洩漏電流主要有兩個方法：

(1) 總洩漏電流乘以

避雷器端電壓與洩漏電流之相位差等同於總洩漏電流與電阻性洩漏電流之相位差，則總洩漏電流為：

$$I_r=I_t\times\cos\theta \quad (19)$$

(2) 總洩漏電流減電容性洩漏電流

若洩漏電流只有單純基本波成分的話，方程式(19)成立，若洩漏電流出現諧波成分，方程式(19)的誤差會增加許多，應修正為：

$$I_r=I_t-I_c=I_t-I_t\sin\theta \quad (20)$$

4.總洩漏電流之量測

目前國內外對於氧化鋅避雷器線上之監測技術，已有許多的研究，其中簡易的方法是將毫安培計與避雷器串聯，並監測避雷器的總洩漏電流值。避雷器運

行在正常系統電壓下，流經避雷器的電流非常微小。洩漏電流包含電容性和電阻性兩部分。

氧化鋅避雷器之電壓-電流波形如圖 6.所示。當特性元件劣化時，電阻性成分洩漏電流和電容性成分洩漏電流都會增加，其中電阻性成分洩漏電流增加較顯著。但原來電阻性成分洩漏電流電流非常小，要能夠監測到微安培的電流上頗為困難。實際上避雷器在正常通電下，根據總洩漏電流(It)來推測劣化情形。

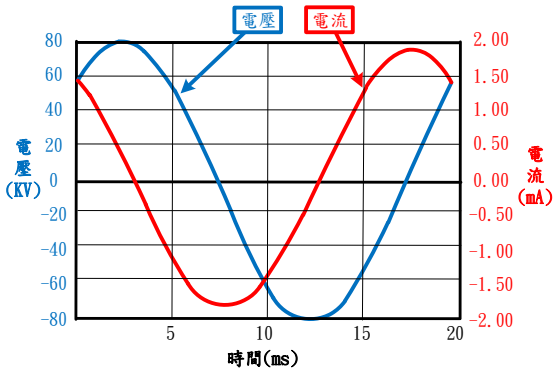



圖 6.　氧化鋅避雷器之電壓-電流成分波形

5.電阻性洩漏電流分析法

避雷器診斷的最關鍵技術，目前為洩漏電流之電阻性分量的量測方式，透過端電壓與洩漏電流間之相角關係，再使用量測到的總洩漏電流求得電阻性洩漏電流。故取得避雷器之電壓信號的變為量測重點。電阻性洩漏電流可作為氧化鋅避雷器線上診斷的重要工具。

在一定的電壓及溫度下，因為氧化鋅元件為非線性電阻，因此氧化鋅元件之電阻性洩漏電流會受系統電壓與周圍溫度影響，導致洩漏電流之電阻性成分非常容易受到影響。圖 7.顯示典型的交流電壓中電阻性及電容性電壓-電流的特性，為了容易比較，典型的直流電壓也能在圖 7.比較。

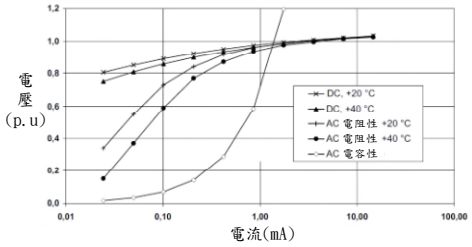



圖 7.　氧化鋅可變電阻體之電壓-電流特性

6.洩漏電流諧波分析法

當避雷器施加正弦電壓加壓時，氧化鋅避雷器之非線性電壓-電流之特性將會使洩漏電流中出現諧波成分。諧波成分將依電阻性洩漏電流的強度及非線性的程度(又依據電壓及溫度的函數)當作依據。例如，電阻性電流之第三諧波成分通常介於 10%至 40%之間，可做為避雷器的電阻性洩漏電流之指標，電壓相依特性如圖 8 所示。

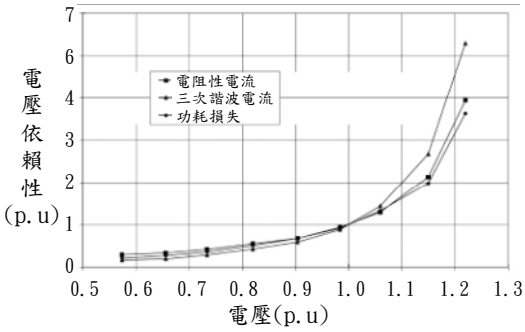



圖 8.　在+20℃下之典型標準電壓相依特性

除了其他可排除之電壓來源，系統電壓裡的諧波成分會對洩漏電流之諧波測量造成重大影響。非線性可變電阻體避雷器所生成的電容性諧波電流與電壓諧波產生的電容性諧波電流是不相上下的。若系統電壓產生的諧波成分會導致洩漏電流諧波成分的出現。

若想藉由洩漏電流之諧波大小來診斷避雷器之特性，須參考電壓高次諧波之影響。雖然電力系統中電壓高次諧波含量一般僅在 1%~1.5%間，若出現在電容性洩漏電流中，量測的洩漏電流干擾會很大，同樣的其相角也會受到影響，如圖 9.為電壓高次諧波對洩漏電流之三次諧波之影響。故計畫使用洩漏電流之高次諧波來監測避雷器之特性，且須對電源諧波予以補償與修正。

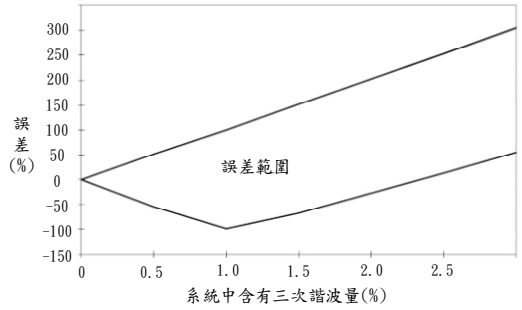



圖 9.電力系統之三次諧波與洩漏電流之三次諧波之關係

3.3 長期放置型系統流程說明

整體系統分為兩大單元，前端量測單元與中央監測單元。前端量測單元其目的為量測氧化鋅避雷器之洩漏電流波形，由 C 語言撰寫而成。每一相氧化鋅避雷器各配置一個前端量測單元，三相避雷器則由三個前端量測單元個別監測其電壓電流，利用網路線彙集給中央監測單元。前端量測單元其目的為收集各相氧化鋅避雷器之資訊，並做運算分析得知避雷器有無老化的情形，程式由 Java 撰寫而成，並透過淺顯易懂的人機介面讓操作人員能夠操作系統，人機介面則由 Java-FX 程式撰寫完成，利用畫面的方式告知操作人員數個避雷器目前的狀況，以監控各避雷器總洩漏電流、電阻性洩漏電流、相位差、洩漏電流之三次諧波，且分析各個避雷器之老化情況。

1.前端量測單元之程式流程

前端量測單元程式開始之後，會先對系統執行初始化，設定取樣頻率、取樣速度、網路卡驅動等初始化步驟，接下來透過網路等待傳來的需求，當收到需求命令後，則透過網路傳送避雷器之電壓、電流擷取資料，程式結束後，則自動重新啟動主程式，如圖 10 所

示。

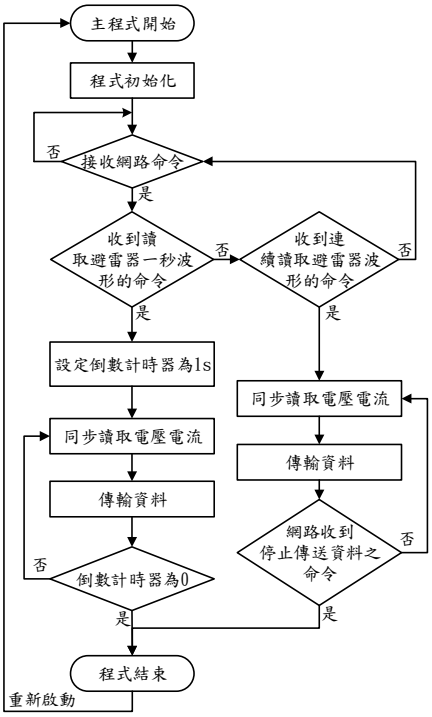



圖 10　前端量測單元之主程式流程圖

2.中央監測單元之程式流程

中央監測單元開始之後，系統會開始設定網路卡驅動、螢幕驅動等初始化步驟，完成初始化後，接下來系統會進入 JAVAFX 圖形化介面中，載入避雷器之選擇畫面，因系統架構是監測多個避雷器，所以一開始須擇一避雷器才能進入下一步，如圖 12 所示。




圖 11　中央監測單元之主程式流程圖

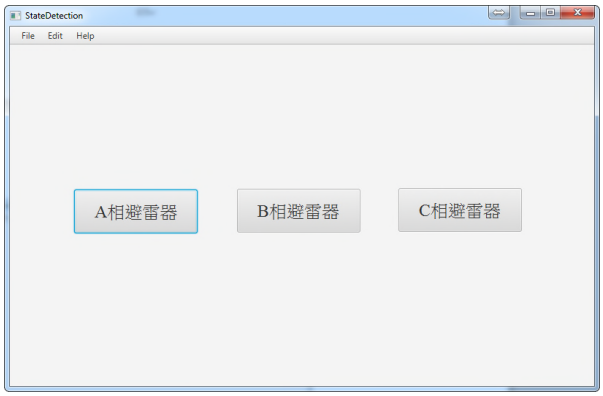



圖 12　中央監測單元-選擇避雷器畫面

中央監測單元選擇該避雷器前，必須先檢測避雷器相關接線，包括電場感測器、電流感測器之接線、網路接線等，確認完畢之後，系統即出現功能選擇主頁面，使用者可以從此頁面選擇 6 個功能，以下將詳細說明其六項功能，如圖 13 所示。




圖 13　中央監測單元-功能選擇主頁面

(1)　避雷器現況功能

此功能是擷取氧化鋅避雷器目前線上電壓、電流狀況，由人機介面中可以清楚看到電壓及電流之波形。




圖 14　中央監測單元-讀取資料之畫面

系統操作順序為:使用者先由中央監測單元操作點選「避雷器現況」，中央監測單元透過網路傳送訊息給前端量測單元，命令其開始讀取避雷器之洩漏電流，並讀取避雷器之電壓相位，讀取幾個週期之後，透過網路傳輸至中央監測單元，當中央監測單元尚未讀取完畢時，螢幕會先顯示「讀取中」，如圖 14 所示。當系統完成接受資料時，電壓及電流波形即立即顯示在人機畫面上，如圖 15 所示。此功能在中央監測單元中與前端量測單元中的流程圖如圖 16 所示。

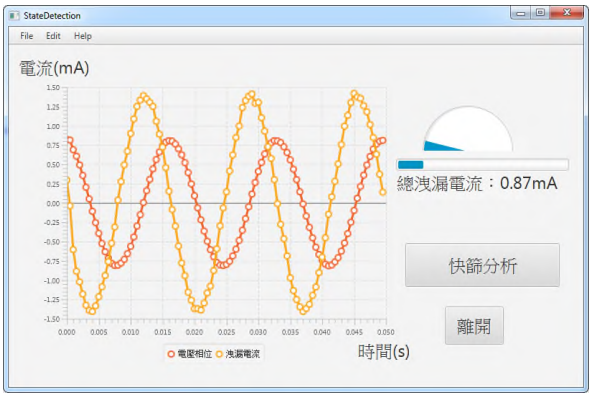



圖 15　中央監測單元-「避雷器現況」功能之畫面

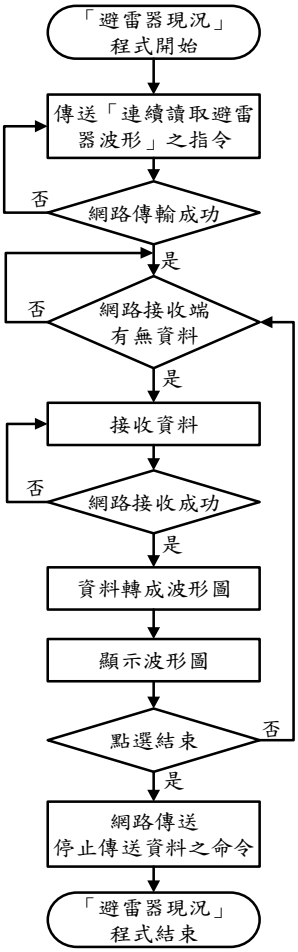



圖 16　中央監測單元之「避雷器現況」功能之流程圖

(2)　資料擷取功能

此功能是完整擷取避雷器之電壓相位、洩漏電流等數據，擷取完資料後將自動儲存於記憶卡當中，並且在內容中加註擷取時間，進而保存原始擷取資料，供後續避雷器之老化狀態監測分析使用。

系統操作順序為:使用者先由中央監測單元操作點選「資料擷取」，中央監測單元透過網路傳送訊息給前端量測單元，命令其開始讀取洩漏電流與電壓相位，完整讀取一秒之後，全部資料透過網路傳輸至中央監測單元，當系統完成接受資料時，系統會儲存目前所接受的資料，並且再次回到剛開始重新傳訊息給中央監測單元的步驟，同樣的步驟再執行兩次，總共接收三次避雷器之讀取資料，其目的為了提高系統的精確性，程式結束後會在儲存裝置中儲存三個資料夾，其為避雷器之電壓相位與洩漏電流資料。並且在螢幕上顯示「資料擷取完成」，如圖 17 所示。其此功能在中央監測單元中的流程圖如圖 18 所示。

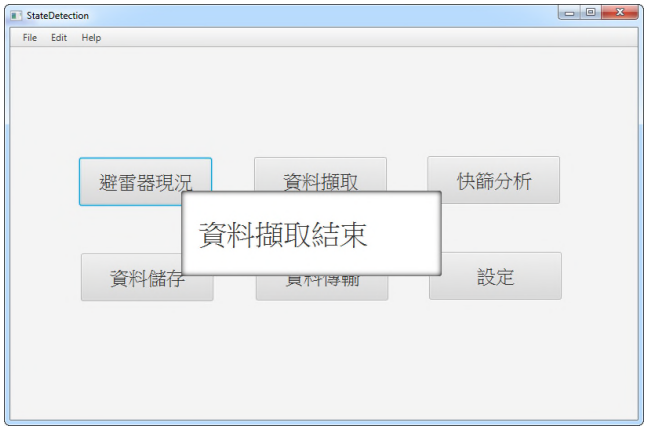



圖 17　中央監測單元-資料擷取完成之畫面

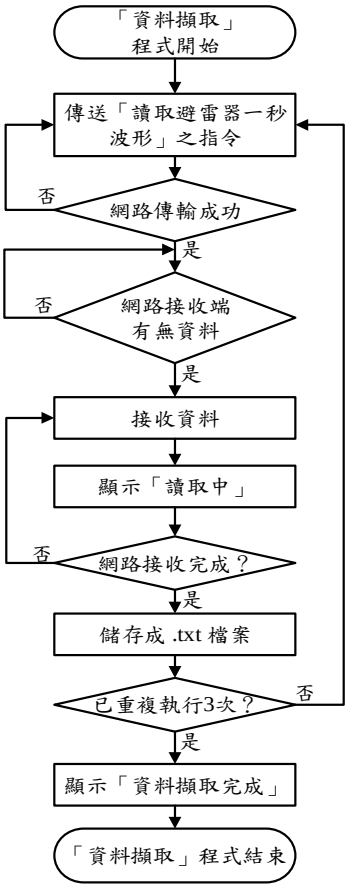



圖 18　中央監測單元之「資料擷取」功能之流程圖

(3)　狀態分析功能

此功能是對氧化鋅避雷器的老化程度作分析，透過剛剛系統讀取的洩漏電流資訊，加上電壓相位，分析出電阻性洩漏電流之成份、大小，再對照法規制定的電阻性洩漏電流標準，推論出目前避雷器之老化程度。若使用者想要進一步查看指標數值可以點選「詳細結果」按鈕，其結果會顯示避雷器之總洩漏電流資訊，電阻性洩漏電流資訊、相位差、功耗、PF 值。

系統操作順序為:使用者先由中央監測單元操作點選「狀態分析」，中央監測單元透過儲存裝置中搜尋最近一筆儲存感測避雷器的資料，讀取完畢後對其電壓、電流資料做快速傅立葉分析，並且求出相位譜，

最後由相位譜中得知電壓資料的相位，也能得知洩漏電流的相位，相減即獲得電壓電流相位差$\theta$。洩漏電流資料經傅立葉轉換後的主頻峰值除以某一常數(2/樣本數)得到總洩漏電流峰值，總洩漏電流峰值再除以$\sqrt{3}$則得到總洩漏電流有效值。總洩漏電流值乘上$\sin\theta$角度則能夠得到電阻性洩漏電流，PF 值由$\cos\theta$角度得出。各個數值得出之後，在對照法規之洩漏電流標準，在圖形化介面中顯示避雷器之目前老化狀態「正常狀態、注意狀態、警戒狀態與危險狀態」，如圖 19 所示。下方有個「詳細結果」按鈕，使用者按下去後，系統則顯示分析之結果，如圖 20 所示。其此功能在中央監測單元中的流程圖如圖 21 所示。面中顯示避雷器之目前老化狀態「正常狀態、注意狀態、警戒狀態與危險狀態」，如圖 19 所示。下方有個「詳細結果」按鈕，使用者按下去後，系統則顯示分析之結果，如圖 20 所示。其此功能在中央監測單元中的流程圖如圖 21 所示。




圖 19　中央監測單元-避雷器老化狀態之畫面

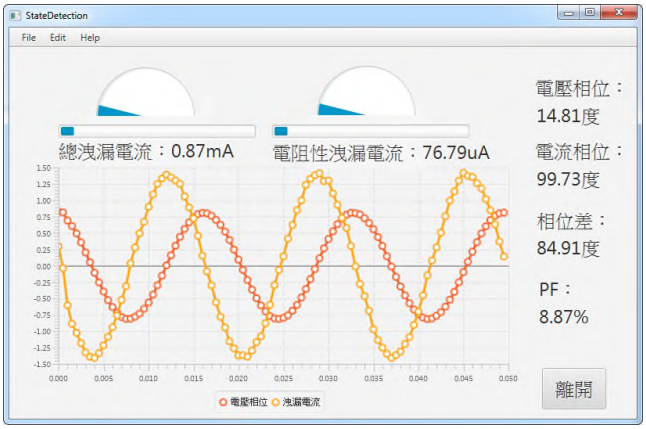



圖 20　中央監測單元-避雷器老化狀態的詳細結果之畫面

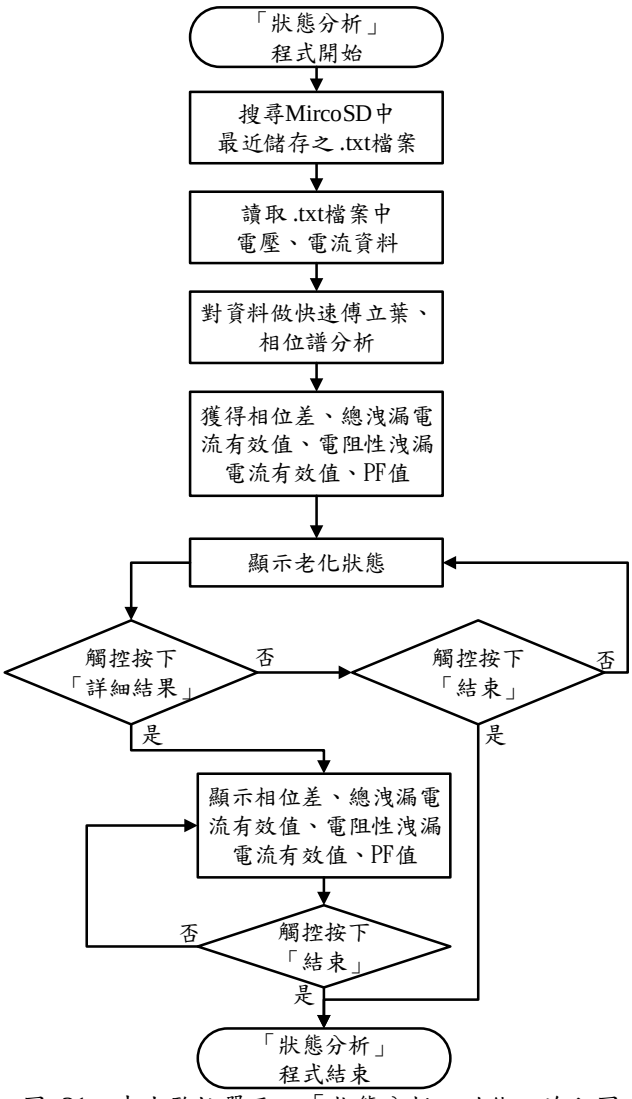



圖 21　中央監控單元之「狀態分析」功能之流程圖

3.4 攜帶型系統流程說明

整體系統架構分為兩大單元，第一部分為前端量測單元，第二部分為監控診斷單元。前端量測單元其目的為布置量測氧化鋅避雷器之感測器，並收集氧化鋅避雷器之資訊，每一相氧化鋅避雷器各配置一組感測器，並且將三相感測器個別的電壓與電流訊號，利用 BNC 接頭連接模組收集彙整給監控診斷單元。監控診斷單元其目的為收集前端量測單元之資訊，經由分析運算得知氧化鋅避雷器有無老化的情形，並透過人機介面讓操作人員能夠簡易的判斷該避雷器目前知狀況，以監控各相避雷器總洩漏電流、電阻性洩漏電流、洩漏電流之三次諧波，並且分析各相避雷器之老化情況。監控與診斷單元開始之後，系統會設定擷取卡的通道、擷取模式、取樣頻率等初始化與設定步驟，完成初始化與設定後，系統會開始同步擷取多個避雷器之數值，並計算避雷器之電壓電流相位、相位差、總洩漏電流有效值、電阻性洩漏電流、PF 值等，也可選擇是否儲存擷取到的數值。如圖 22 攜帶型系統流程圖所示。

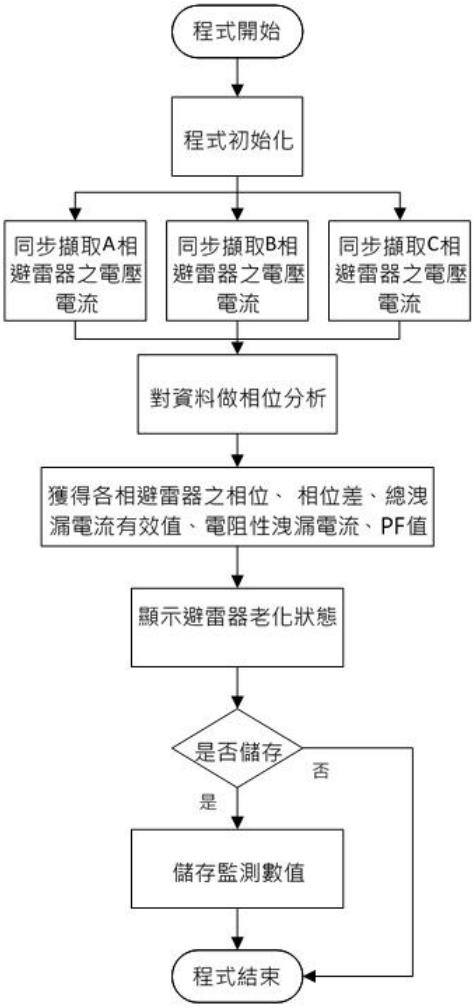



圖 22 攜帶型系統流程圖

## IX. 實測結果與討論

4.1 實測方法

為了測試本系統運作之性能，至台電綜合研究所進行實驗，透過避雷器加壓實驗得知避雷器之特性與系統運行之效能。加壓測試主要探討本系統在不同運轉電壓級距下之量測精度，測試 3 個不同級距電壓： 40kV、57kV、72kV，高壓實驗室現場量測如圖 23 所示。

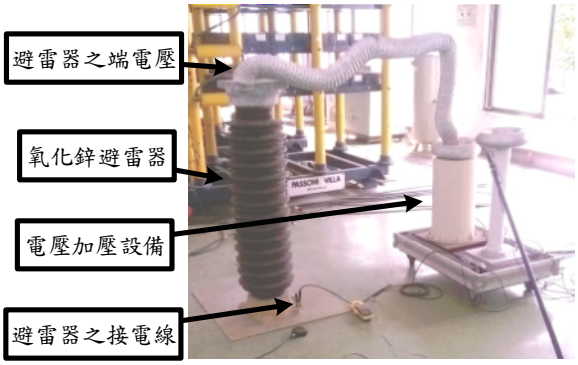



圖 23 避雷器與加壓設備

本實測之驗證方法是以目前使用的商用量測儀器 Hi-VARC 2009 軟體做為標準，此設備使用的電壓、電流感測器直接搭配加壓設備，Hi-VARC 2009 軟體設備如下圖 24 所示，將本系統量測後的分析結果與其互相比對，即可實驗本系統之精準度，針對健康避雷器及老化較嚴重的避雷器進行試驗，驗證其量測誤差。

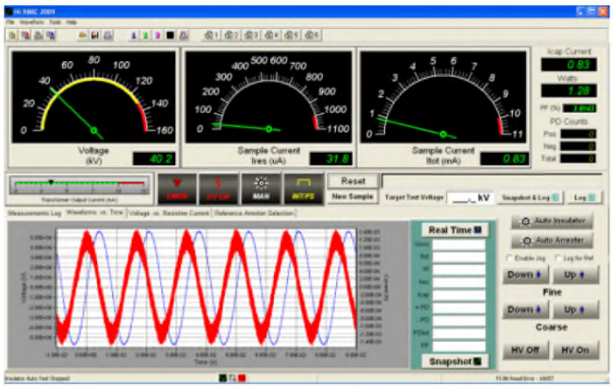


圖 24 Hi-VARC 2009 軟體

為了能夠測試本系統運行，前端量測單元放置在避雷器附近，電流感測器則勾住避雷器之接地線上，前端量測單元則拉一條網路線至診斷分析單元，當開始模擬試驗時，則透過診斷分析單元操作前端量測單元來量測避雷器之訊號。 圖 25 為前端量測單元搭配診斷分析單元之實驗現場圖。

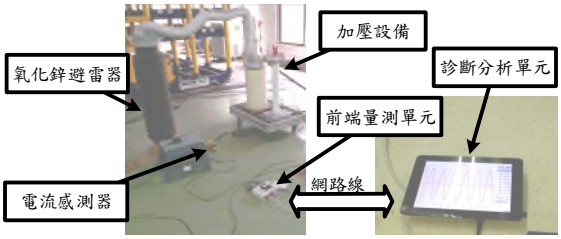



圖 25 前端量測單元與診斷分析單元之實驗現場圖

4.2 長期放置型線上狀態監測實驗結果與分析

4.2.1 正常避雷器

對正常氧化鋅避雷器測試 3 個不同級距的電壓：分別為 40kV、57kV、72kV，圖 26 為此避雷器在 57kV 運轉電壓下的狀態分析結果，系統運分析出的電阻性洩漏電流為 178.96uA，依據 IEC60099-5 法規，其電流落在規範之門檻值之內，狀態分析結果為「正常狀態」。




圖 26 正常氧化鋅避雷器之狀態分析結果

(1) 避雷器加壓至 40kV

圖 27 為商用設備量測之結果，圖 28 為本設備量測之結果。

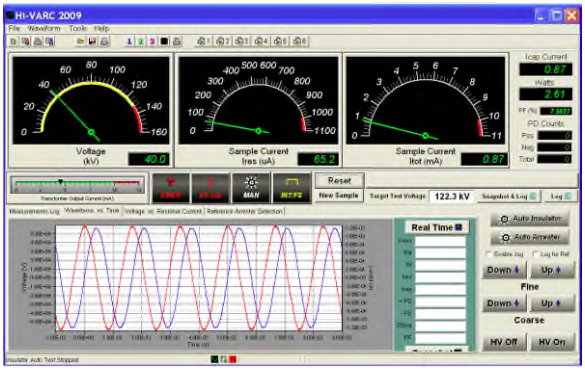



圖 27　商用設備量測之結果畫面

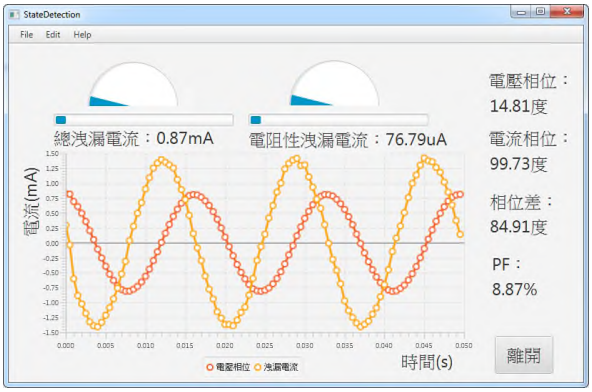



圖 28　本系統量測之詳細結果圖

(2)　避雷器加壓至 57kV

圖 29 為商用設備量測之結果，圖 30 為本設備量測之結果。

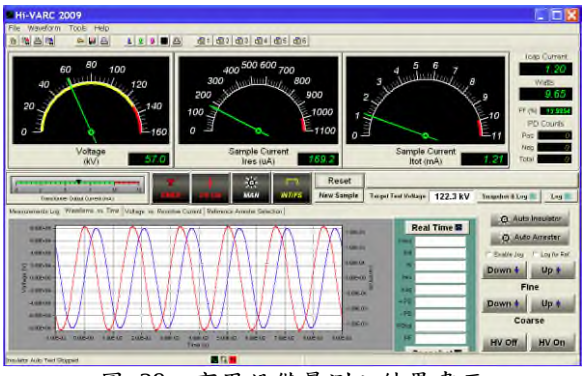



圖 29　商用設備量測之結果畫面

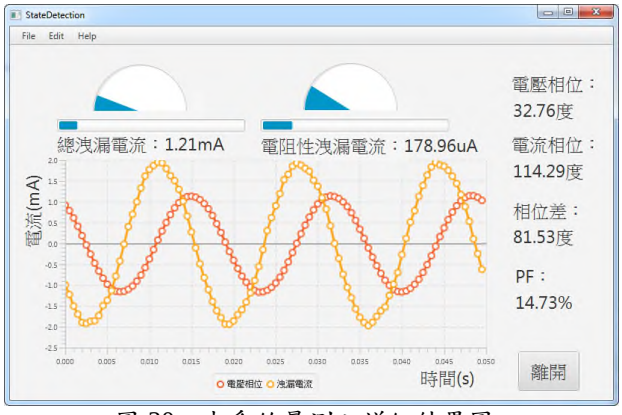



圖 30　本系統量測之詳細結果圖

(3)　避雷器加壓至 72kV

圖 31 為商用設備量測之結果，圖 32 為本設備量測之結果。

| | 30kV | 40kV | 50kV | 57kV | 65kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 總洩漏電流(mA) | 0.66 | 0.87 | 1.07 | 1.21 | 1.44 | 1.79 |
| 電壓相位 | -116.75 | 14.81 | -103.81 | 32.76 | 161.46 | 79.89 |
| 洩漏電流相位 | -31.10 | 99.73 | -20.06 | 114.29 | -121.83 | 147.51 |
| 相位差 | 85.64 | 84.91 | 83.75 | 81.53 | 76.71 | 67.62 |
| 電阻性電流(uA) | 50.25 | 76.79 | 116.65 | 178.96 | 330.98 | 681.59 |

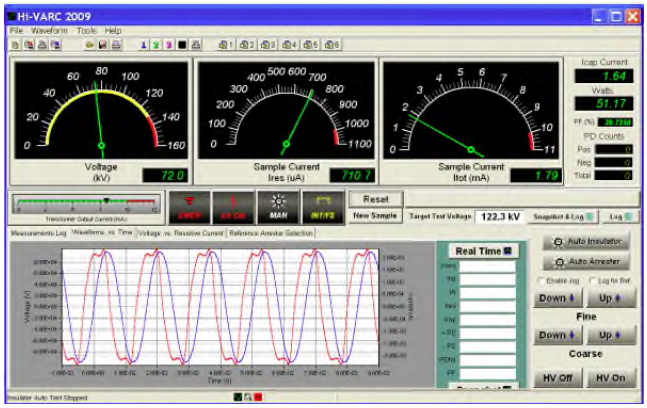



圖 31　商用設備量測之結果畫面

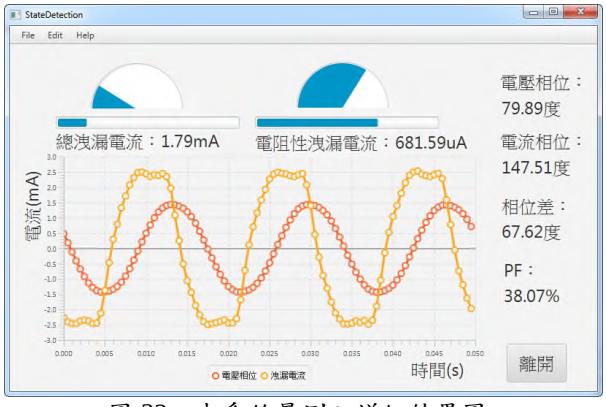



圖 32　本系統量測之詳細結果圖

表 1　本系統量測之結果

表 2　本系統與商用設備量測之比較

| | | 30kV | 40kV | 50kV | 57kV | 65kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 總洩漏電流(mA) | 本系統 | 0.66 | 0.87 | 1.07 | 1.21 | 1.44 | 1.79 |
| | 商用設備 | 0.66 | 0.87 | 1.06 | 1.21 | 1.43 | 1.79 |
| | 量測誤差 | -0.27 | 0.46 | -1.05 | -0.39 | -0.66 | -0.01 |
| PF值 | 本系統 | 7.59 | 8.87 | 10.89 | 14.73 | 22.99 | 38.07 |
| | 商用設備 | 6.35 | 7.50 | 10.03 | 14.00 | 23.65 | 39.74 |
| | 量測誤差 | -19.54 | -18.16 | -8.55 | -5.26 | 2.79 | 4.19 |
| 相位差 | 本系統 | 85.64 | 84.91 | 83.75 | 81.53 | 76.71 | 67.62 |
| | 商用設備 | 86.36 | 85.70 | 84.24 | 81.95 | 76.32 | 66.59 |
| | 量測誤差 | 0.83 | 0.91 | 0.59 | 0.52 | -0.51 | -1.55 |
| 電阻性洩漏電流(uA) | 本系統 | 50.25 | 76.79 | 116.65 | 178.96 | 330.98 | 681.59 |
| | 商用設備 | 41.90 | 65.20 | 106.60 | 169.20 | 337.90 | 710.70 |
| | 量測誤差 | -19.94 | -17.77 | -9.43 | -5.77 | 2.05 | 4.10 |

圖 33 與圖 34 為本系統與商用量測設備之比較，得知總洩漏電流精度誤差大約 1%以下，電阻性洩漏電流精度誤差為 2%-20%。

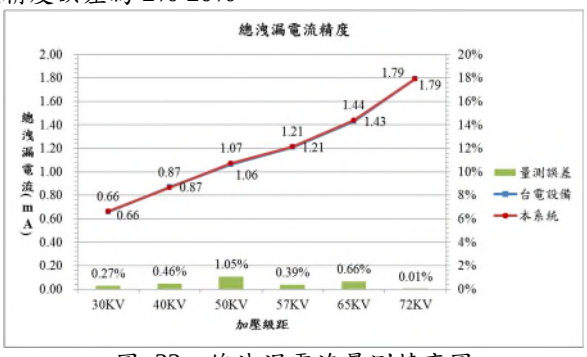



圖 33　總洩漏電流量測精度圖

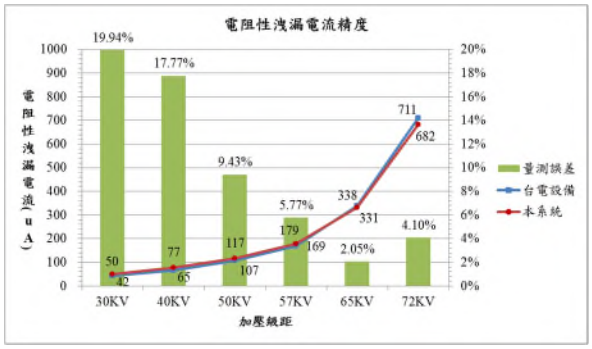



圖 34　電阻性洩漏電流量測精度圖

4.2.2 已老化避雷器

對已老化氧化鋅避雷器測試 3 個不同級距的電壓：分別為 40kV、57kV、72kV，圖 35 為此避雷器在 57kV 運轉電壓下的狀態分析結果，系統運分析出的電阻性洩漏電流為 333.53uA，依據 IEC-60099-5[1]法規，其電流落在規範之門檻值之內，狀態分析結果為「注意狀態」。




圖 35　已老化氧化鋅避雷器之狀態分析結果

(1)　避雷器加壓至 40kV

圖 36 為商用設備量測之結果，圖 37 為本設備量測之結果。

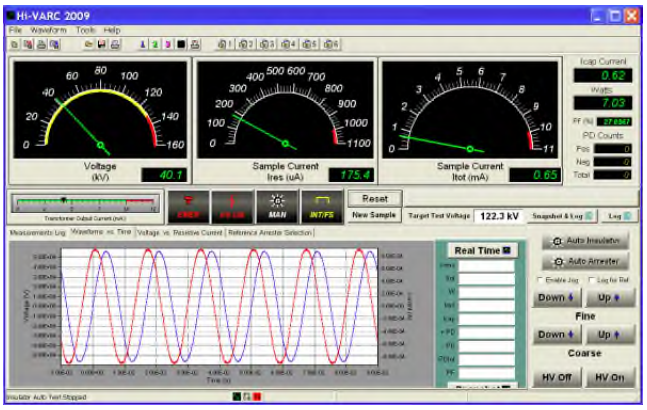



圖 36　商用設備量測之結果畫面

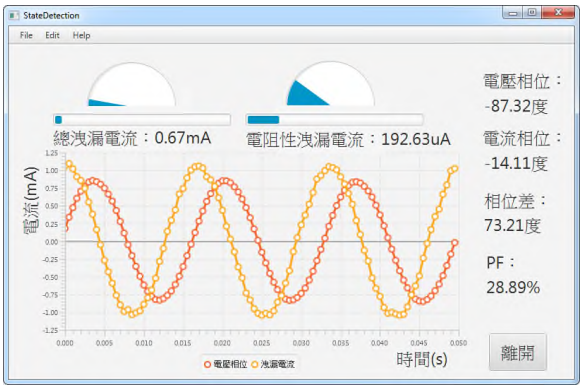



圖 37　本系統量測之詳細結果圖

(2)　避雷器加壓至 57kV

圖 38 為商用設備量測之結果，圖 39 為本設備量測之結果。

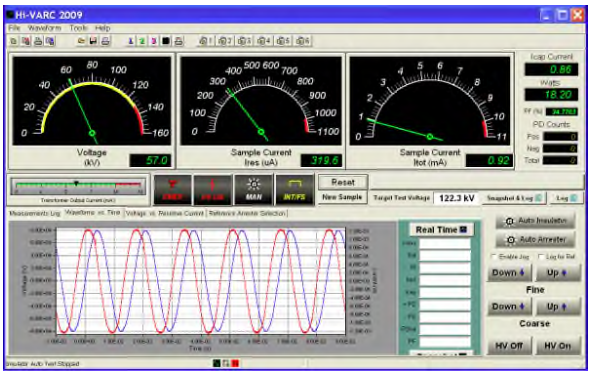



圖 38　商用設備量測之結果畫面

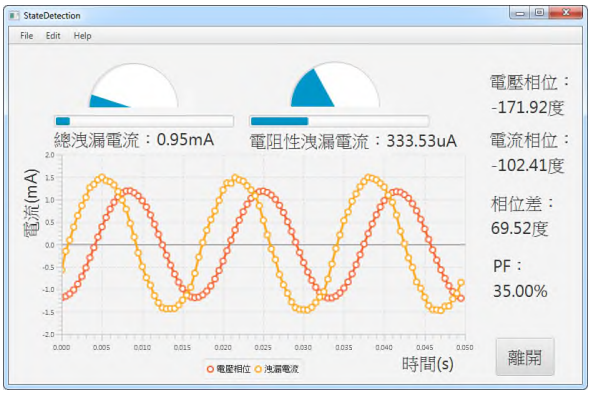



圖 39　本系統量測之詳細結果圖

(3)　避雷器加壓至 72kV

圖 40 為商用設備量測之結果，圖 41 為本設備量測之結果。

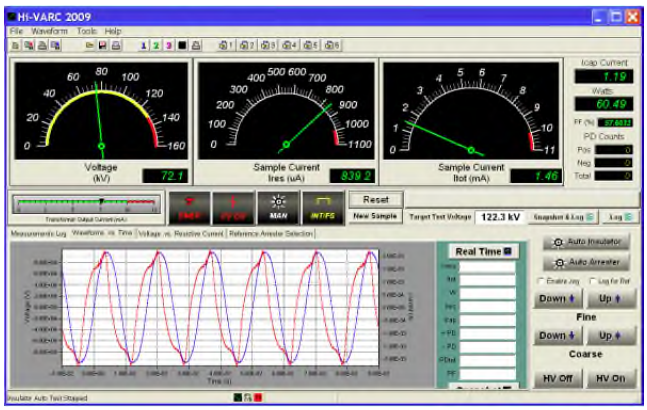



圖 40　商用設備量測之結果畫面

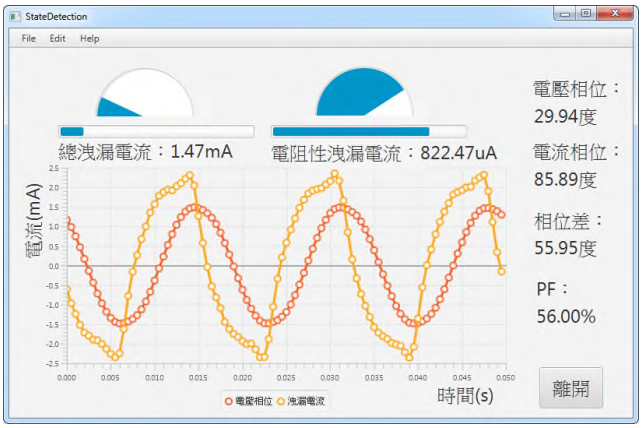



圖 41　本系統量測之詳細結果圖

表 3　本系統量測之結果

| | 30kV | 40kV | 50kV | 57kV | 65kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 總洩漏電流(mA) | 0.51 | 0.67 | 0.83 | 0.95 | 1.15 | 1.47 |
| 電壓相位 | 173.68 | -87.32 | 74.35 | -171.92 | -104.82 | 29.94 |
| 洩漏電流相位 | -112.17 | -14.11 | 146.05 | -102.41 | -40.29 | 85.89 |
| 相位差 | 74.15 | 73.21 | 71.71 | 69.52 | 64.53 | 55.95 |
| 電阻性洩漏電流(uA) | 139.43 | 192.63 | 259.84 | 333.53 | 494.24 | 822.47 |

表 4　本系統與商用設備量測之比較

| | | 30kV | 40kV | 50kV | 57kV | 65kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 總洩漏電流(mA) | 本系統 | 0.51 | 0.67 | 0.83 | 0.95 | 1.15 | 1.47 |
| | 商用 | 0.50 | 0.65 | 0.80 | 0.92 | 1.12 | 1.46 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 設備 | | | | | | |
| | 量測誤差 | -2.10 | -2.57 | -3.49 | -3.59 | -2.61 | -0.60 |
| PF 值 | 本系統 | 27.31 | 28.89 | 31.39 | 35.00 | 43.01 | 56.00 |
| | 商用設備 | 25.07 | 27.06 | 30.54 | 34.77 | 43.85 | 57.60 |
| | 量測誤差 | -8.93 | -6.79 | -2.78 | -0.65 | 1.91 | 2.79 |
| 相位差 | 本系統 | 74.15 | 73.21 | 71.71 | 69.52 | 64.53 | 55.95 |
| | 商用設備 | 75.48 | 74.30 | 72.22 | 69.65 | 63.99 | 54.83 |
| | 量測誤差 | 1.76 | 1.47 | 0.71 | 0.20 | -0.83 | -2.04 |
| 電阻性洩漏電流(uA) | 本系統 | 139.43 | 192.63 | 259.84 | 333.53 | 494.24 | 822.47 |
| | 商用設備 | 124.70 | 175.40 | 244.10 | 319.60 | 489.20 | 839.20 |
| | 量測誤差 | -11.82 | -9.82 | -6.45 | -4.36 | -1.03 | 1.99 |

圖 42 與圖 43 為本系統與商用量測設備之比較，得知總洩漏電流誤差大約 5%以下，電阻性洩漏電流精度誤差大約 15%以下。

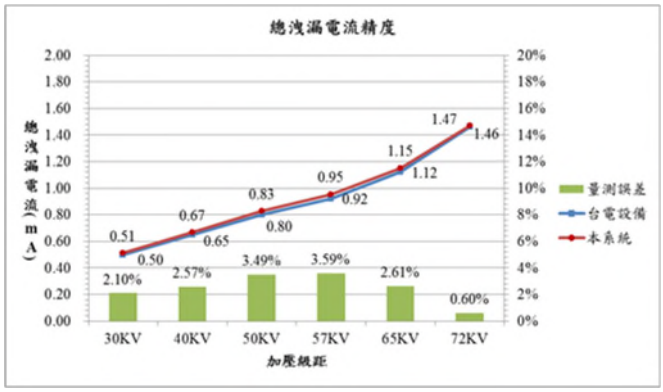



圖 42 總洩漏電流量測精度圖




圖 43 電阻性洩漏電流量測精度圖

4.3 攜帶型線上狀態監測實驗結果與分析

(1) 避雷器加壓至 40 kV

圖 44 為商用設備軟體量測之結果，圖 45 為量測系統之結果

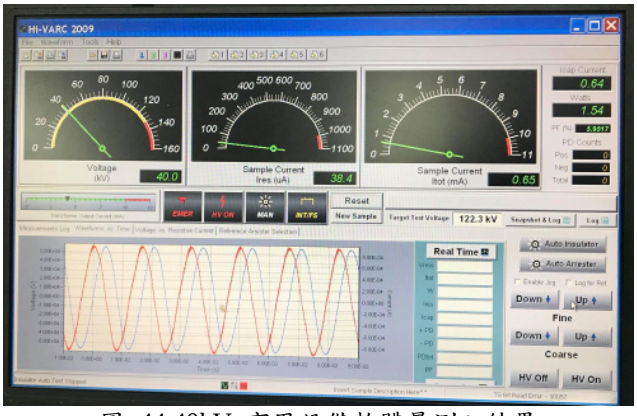



圖 44 40kV 商用設備軟體量測之結果

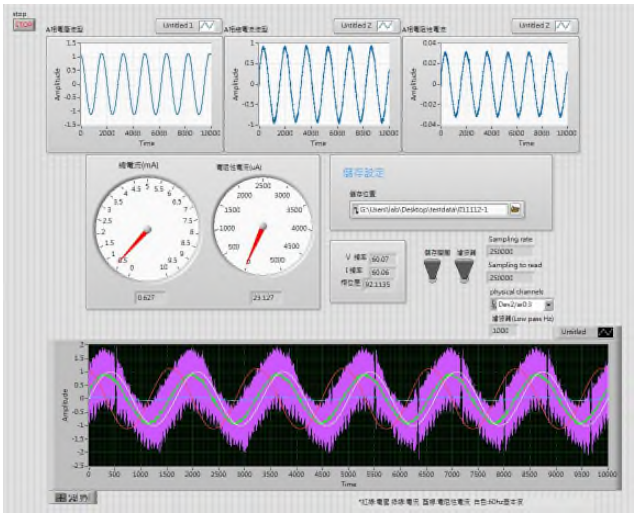


圖 45 40kV 本系統量測系統之結果

(2) 避雷器加壓至 57kV

圖 46 為商用設備軟體量測之結果，圖 47 為量測系統之結果



圖 46 57kV 商用設備軟體量測之結果



圖 47 57kV 本系統量測系統之結果

(3) 避雷器加壓至 72 kV

圖 48 為商用設備軟體量測之結果，圖 49 為量測系統之結果

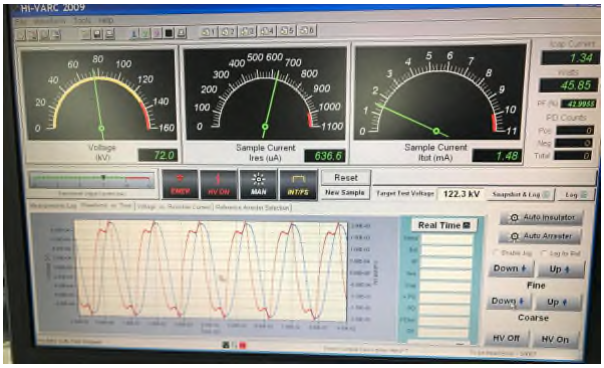


圖 48 72kV 商用設備軟體量測之結果

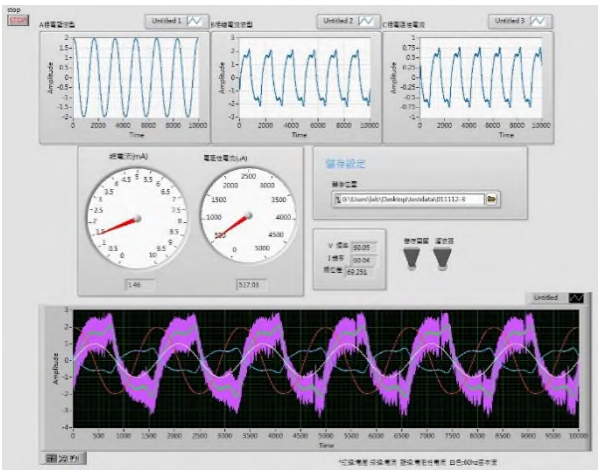


圖 49 72kV 本系統量測系統之結果

表 5 本系統量測之結果

| | 40kV | 57kV | 72kV |
|---|---|---|---|
| 總洩漏電流(mA) | 0.642 | 0.935 | 1.47 |
| 相位差 | 92.49 | 81.42 | 68.23 |
| 電阻性電流(uA) | 24.34 | 147.04 | 555.42 |

表 6 本系統與商用設備量測總洩漏電流之比較

| | | 40kV | 57kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|
| 總洩漏電流(mA) | 本系統 | 0.642 | 0.935 | 1.47 |
| | 商用設備 | 0.65 | 0.94 | 1.48 |
| | 量測誤差(%) | 1.23 | 0.54 | 0.67 |

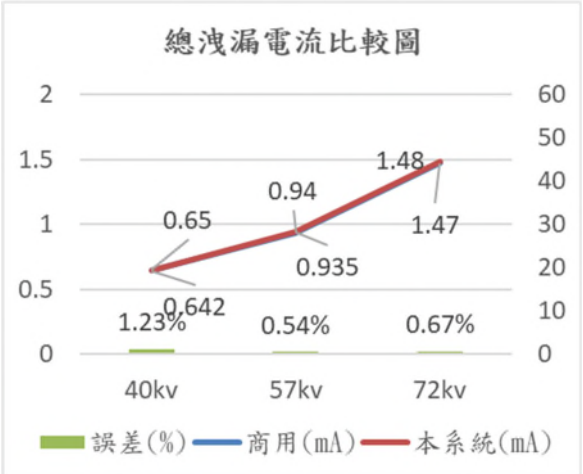



圖 50 總洩漏電流比較圖

表 7 本系統與商用設備量測角度差之比較

| | | 40kV | 57kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|
| | 本系統 | 92.49 | 81.42 | 68.23 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 相位差 | 商用設備 | 86.58 | 83.51 | 64.53 |
| | 量測誤差(%) | 6.826 | 2.394 | 5.733 |

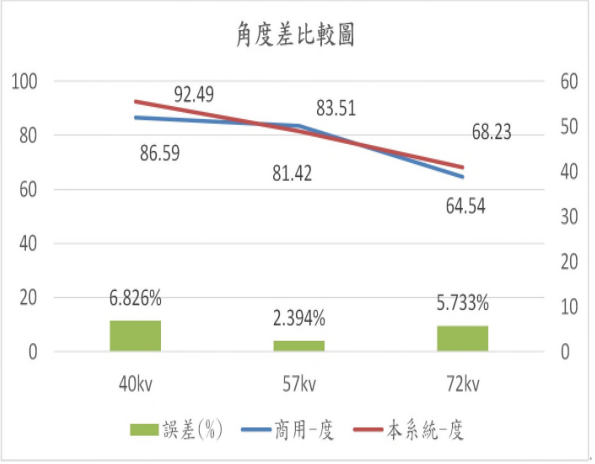



圖 51 角度差比較圖

表 8 本系統與商用設備量測電阻性洩漏電流之比較

| | | 40kV | 57kV | 72kV |
|---|---|---|---|---|
| 電阻性洩漏電流(uA) | 本系統 | 24.33 | 147.04 | 555.41 |
| | 商用設備 | 38.4 | 106 | 636.6 |

## V. 結論

本計畫研製一套長期放置型線上狀態監測系統與攜帶型線上狀態監測，利用電壓感測器、電流感測器做為訊號量測媒介，透過類比數位轉換器，將轉換後的資料傳送至微控制器進行資料運算，運算其避雷器總洩漏電流、電阻性洩漏電流、相位差及漏電流之三次諧波，再參照 IEC 60099-5[1]國際標準評估後，判斷避雷器當前運轉狀態，以監控各個避雷器之老化情況。本系統搭配觸控螢幕以圖形化的方式呈現，整合成一套氧化鋅避雷器線上狀態監測系統，最後，經由實例測試得以證明，本系統與商用 Hi-VARC 2009 軟體交互比對結果，本系統能提供有效之避雷器老化狀態結果。

## 參考文獻

[1] IEC 60099-5, Surge Arresters- Part 5: Selection and Application Recommendations, March 2000.

[2] 吳致緯，高壓避雷器老化監測之研究，國立高雄應用科技大學電機工程系碩士班碩士論文，2009 年 7 月。

[3] 王盟仁，DSP 演算法在電力諧波分析之應用，國立成功大學電機工程學系碩士論文，1993 年 3 月。

[4] IEC 60099- 4, Surge Arresters - Part 4: Metal-oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems , March 2000.

[5] 中國電機工程學會，「中國電機工程師手冊:電力類」，第二卷第四章，民國 82 年，第 12-204~12-205 頁。

[6] Shuji Furukawa, Osamu Usuda, Takashi Isozaki, and Takashi Irie, "Development and Application of Lightning Arresters for Transmission Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, 1989, pp. 2121-2129.

[7] J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei, and B. Hansen, "New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, October 1990, pp. 1811 – 1822.

[8] S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Goto, and M. Sakai, "Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 998 – 1003.

[9] Chen Yazhou；Liu Shanghe；Wu Xiaorong；Zhang Feizhou, "A New Kind of Lightning Channel-Base Current Function," 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2002, May 21-24, pp. 304-307.[10] C E R Bruce, R H Golde. The lightning discharge. J. IEE, London, 1941487-520

[11] F Heidler. Traveling current source model for LEMP calculation. Proc.6th Int. Zurich Symp. Tech. Exhib. Electromagn. Compat, Zurich, pp.157-162, 1985

[12] J.G.A. Lira, E.C.T. Macedo, E.G. Costa, R.C.S. Freire and B.A.Luciano, "ZnO Surge Arresters Diagnosis Using Microcontroller," Proceedings of 2007 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1-3 May 2007, pp.1 – 6.

[13] C.A. L. Almeida, A.P. Braga, S. Nascimento, V. Paiva, H.J.A. Martins, R. Torres and W.M. Caminhas, "Intelligent Thermographic Diagnostic Applied to Surge Arresters: A New Approach," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, Issue 2, April 2009, pp.751 – 757.

[14] T. Taskin, "Introduction of a Measurement System to Monitor the Condition of ZnO Surge Arresters ," Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, 23-27 Jan. 2000, pp.1553 – 1557.

[15] X.L. Yan, Y.F. Wen and X.Y. Yi, "Study on the Resistive Leakage Current Characteristic of MOV Surge Aarresters," Proceedings of 2002 IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 2, 6-10 Oct. 2002, pp.683 – 687.

[16] T. Tada, J. Miyake and S. Shirakawa, "A Diagnosis of Remaining Life Characteristics of ZnO Type Surge Arresters (1st stage) for 275 kV Power Systems," Proceedings of 2002 IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Vol. 3, 6 - 10 Oct. 2002, pp.2233 – 2238.

[17] T. Zhao, Q.M. Li and J.L. Qian, "Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arrester Based on an Accurate Model," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, Issue 2, Part 1, April 2005, pp.751 – 756.

[18] James Taylor, Production Guide, ABB, 2008.

[19] K.P. Mardira and T.K. Saha, " Modern Electrical Diagnostics for Metal Oxide Surge Arresters, " Proceedings of 2002 IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Volume 2, 6-10 Oct. 2002, P.P.672 - 676.

[20] L.T. Coffeen and J.E. McBride, " High Voltage AC

Resistive Current Measurements Using a Computer Based Digital Watts Technique, “ IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 6, Issue 2, April 1991, P.P.550 – 556.
[21] Y.Q. Wang and F.C. Lu, “ Influence of Power System's Harmonic Voltage on Leakage Current of MOA, “ Proceedings of Asia-2003 Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM 2003), 4-7 Nov. 2003, P.P.375 – 378.
[22] O. Nigol, “Methods for Analyzing the Performance of Gapless Metal Oxide Surge Arresters, ” IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7, Issue 3, July 1992, P.P.1256 – 1264.
[23] Cigré Technical Brochure No. 63, Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, 1991.
[24] 陳世榮，中原大學電機工程學系碩士學位論文，氧化鋅避雷器之維護及線上監測技術。吳世軒，近代避雷器的發展與選用藝術，2009。
[25] Huijia Liu, Hanmei Hu,” Development of Tester of the Resistive Leakage Current of MOA”。
[26] Chandana Karawita, Student Member, IEEE, and M. R. Raghuveer, Senior Member, IEEE” Onsite MOSA Condition Assessment—A New Approach”,2006。
[27] IEC 62217 Ed.1, Surge Arresters - Part 9: Tests on shed and housing material.
[28] B. RICHTER*, W. SCHMIDT,”LONG TERM PERFORMANCE OF POLYMER HOUSED MO-SURGE ARRESTERS”.

# 放射性物料安全科技

# 研析 SKB 訂定地震危害之關鍵性裂面尺寸邏輯
# Study on the Critical Fracture Size in Earthquake Event Determined by SKB

計畫編號：MOST 107-NU-E-032-001-NU
計畫主持人：楊長義
e-mail：yang@mail.tku.edu.tw
執行單位：淡江大學土木工程系

## 摘要

瑞典SKB認為廢料罐及緩衝材圍阻系統之完整性，可能因地震導致周圍岩盤裂面發生剪切位移超過 10cm 而失效。因而，規範距主要地震變形帶或斷層在 100~200 內且半徑大於 75m 之大型裂面，或距 200m 外而半徑大於 150m 之大裂面，皆有被地震觸動後發生 10cm 剪位移的潛力，稱之為關鍵性裂面。本計畫主要在研析學習 SKB 選定上述關鍵性裂面尺寸的研究邏輯，並初步檢視於本土地質環境下之裂面滑移量。

關鍵詞：SKB、關鍵性裂面、地震引致位移、3DEC。

## Abstract

A critical rock fracture size greater 75m in radius is recognized by SKB to have the potential to trigger shear displacement reaching the 10cm allowable shear displacement by earthquake. This will damage the integrity and functions of buffer system and canister in deposition hole. This research aims to study the methodology of SKB adopt to estimate the critical fracture size. The related fault behavior and earthquake parameters in Taiwan are collected for comparing to Forsmark. A 3DEC numerical model using the geotechnical and geological parameters in the potential site of Taiwan is established and modelled.

Keywords: SKB, critical fracture size, earthquake-induced slip, 3DEC.

## I. 動機

瑞典 SKB 分析 SR-Can 安全報告得知在廢料罐功能三種失效狀況：其一可能是因地震而使處置孔受周圍岩石發生的剪切(shear) ，導致使緩衝材及廢料罐圍阻系統之完整性失效。經許多研究後，目前 SKB 採認使廢料罐失效之容許剪位移量為 10cm。有鑒於在台灣大地震頻繁，本土的地震特性可能不同於北歐，因此我國未來高放處置設計準則，應先對其設計容許剪位移量(10cm)之研究抉擇邏輯應有所了解。

## II. 主要背景內容

SKB訂定關鍵性裂面尺寸之邏輯，是先透由統計國際上(非只在北歐)，歷史地震之文獻資料與分析，獲得如下結論：

(1)具備足以引起主要損害性地震的變形帶(地震斷層)，其顯露在地表上的跡長必須大於3km以上、或與之斷層面積大小相當的緩和傾斜帶。

(2)若是既有大型的裂面的圓心位置坐落於距該主要地震變形帶100m以內、且其半徑R大於75m；或是圓心落在距此類變形帶200m內而且半徑R大於150m。

此二種狀況之既有大裂面皆有被地震引起10cm剪位移量的潛力(Munier & Hokmark, 2004; Falth & Hokmark, 2006)，均有可能造成處置罐破損。故瑞典SKB稱此等既有大裂面為關鍵性裂面(critical fracture)、在芬蘭Posiva則稱之為目標裂面(target fracture)。

因此，在 SKB(2011)之對 SR-Can 評估報告結論中，獲致以下一個主要設計規定：「若處置孔位在距具有引發主要地震潛能的變形帶一個特定的距離(respect distance)之外、而且廢料罐不被大型的裂面所穿過，則在處置場附近發生的地震將不致影響到廢料罐的完整性」。故在 SR-Can 分析結論建議，處置孔應退避跡長超過 3km 變形帶 100m 之外，俾利避開半徑 R >75m 與半徑 R >150m 這二類大型裂面。

## III. 主要研析結果與討論

經本文研析目前獲致以下主要種重要結論：

1. SKB係根據Well and Coppersmith(1994)收集的244個國際數據，統計可觸發地震模M>5.5的地震及10cm錯動量的斷層長度約為5km；然對照台灣本土地震斷層特性查得長度3 km就具足此能力，故知台灣規定須退避的斷層長度似乎應較保守。

2. 以Shama & Judd(1991)蒐集國際上192個地下隧道震損例，統計得知當地面尖峰加速度(PGA)達於0.18g，即我國氣象局震度5級之強震(80~250gal)，就有可能造成地下的隧道襯砌損傷。故可推估
   (1)低放處置坑道式設置於地下深Z=80 m至120m間(如瑞典SFR處置場)，於運轉期間坑道襯砌仍有輕微受震損傷機率。
   (2)高放處置坑道若在300m至1000m間，則運轉期坑道襯砌受震損機率相對較低。
   (3)被觸動之最大地面加速度PGA值，與該次「地震規模(M)」及隧道之「覆蓋層厚度(H)」兩項因素有密切關係。

3. 由日本早期電廠地下結構受震記錄獲知：
   (1)較深層地下結構所受地震力小於地面淺層的，但震動位移量卻有可能差不多。當地震規模M增加1，其最大位移將增加10倍；當距震央距離增加1倍，則其最大位移量約僅為0.308倍。
   (2)最大加速度PGA與「地震規模」、「距震央距離」兩者有密切關係。本文據之推論若地震規模M足夠大(例如M> 5.0)，則「距震央距離」造成處置場地盤震動的重要性優先於「地震規模」。

4. 由研析日本瑞浪超深層地下實驗室(MIU)之受震PGA記錄，本文初步研析獲知：

(1)地震引致MIU地面上之PGA最大(但PGA值多數僅達14 gal以下)；隨深度之加深PGA漸次衰減，至深度500 m之PGA值已甚低。

(2)由MIU花崗岩地層PGA之深度衰減行為，粗估求其遞減率如下：在Z=100m衰減率為90~40%、在Z=500m處置深度處衰減率在25%以下，然此一倍率應與地層岩性及該次地震特性(地震規模或距震央距離)有關。

5. SKB以破壞力學數值程式Franc3D模擬地震引致裂面位移預測，研究結果發現：

(1)地震引致裂面位移量，與裂面的方位相關性較不高；但裂面位移量與地震之規模(M)、及距離遠近(d)兩者因素有重要關聯性。此點與前述瑞浪實驗室實測數據顯示相符。

(2)地震規模M愈大，可觸動裂面位移量超過10cm之比率越高，且愈靠近地震區(即「距震央距離」)的裂面之所佔比率越高。

(3)地震規模M=5.5者，且該裂面距離地震帶尖端100m，裂面有可能被觸動10cm位移量的機率。故知SKB之設計前提因此規定廢料處置孔需退避主要變形帶於100m之外。(4)在Forsmark之應力場下，對半徑小於100m的裂面其位移量遠低於容許值之10 cm。

6. SKB也以PFC程式模擬在處置場附近斷層發生不同規模地震對場區裂面所觸動之最大錯動值，並以各顆粒間平行鍵結所傳遞的彎矩累積換算地震規模。顯示：(1)越近震央之裂面或地震規模越大時，觸動位移越大。(2)在 Forsmark地區內之裂面，當地震規模大於7.5才可能觸動10cm錯移量。

7. SKB主要以3DEC程式模擬地震力作用的技巧，是先以現地應力作用使之達靜力平衡後，於整個斷層平面上彈性應變能累積，再以釋放能量觀念逐步令斷層面喪失強度，將地震效用以2333m/s 的速度(約為70%彈性剪力波速)由震源向外輻射快速傳遞開，造成周邊關鍵性裂面上增加了地震應力，以致產生錯動剪位移量。

8. 由3DEC模擬獲知在Forsmark場址：(1)大約經歷3~4秒後，關鍵性裂面被觸動達到最大剪位移，(2)位在下盤的關鍵性裂面之地震觸動剪位移常大於上盤關鍵性裂面；(3)越靠近斷層的關鍵性裂面之觸動剪位移越大：例如在距離600m處關鍵性裂面錯移量約僅為200m處之一半，而距1000m以外之關鍵性裂面位移已很小。(4)與地震斷層面傾斜方向相逆之關鍵性裂面，觸動位移量比與斷層順向者為大。(5)地震規模M=6.2時，關鍵性裂的最大位移量達58mm、M=7.3時最大的位移量達82mm。

9. 若以剪動5cm為門檻，針對Forsmark場址，不同長度的斷層(介於3~5km以及大於5km)，依各該關鍵性裂面距離斷層遠近之不同(100m、200m、400m、600m)，SKB訂定該距離處應注意的關鍵性裂面之尺寸(CFS)，距斷層兩側100m內均不允許置放廢料罐，並且：

**A、對高角度斷層**(見圖 1)

斷層長度大於 5km 者的關鍵性裂面為：①位在距 100~200m 間之關鍵性裂面半徑 CFS= 85m，②位在距 200~400m 間之 CFS=170m，③位在距 400~600m 間 CFS=215m，④位在距 600m 以外區域 CFS > 300m。

斷層長度介於 3km~5km 間者的關鍵性裂面為①位在距 100~200m 間之關鍵性裂面半徑 CFS=100m，②位在距 200~400m 間之 CFS=200m，③位在距 400 以外區域 CFS > 300m。

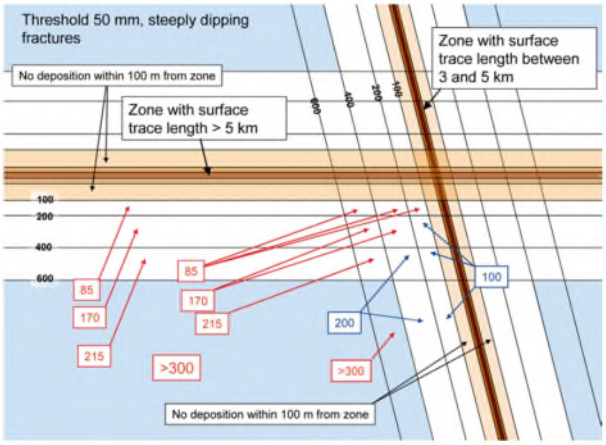



圖1 距高傾角(>55°)斷層帶不同距離之關鍵性裂面半徑規定

## IV. 本土研究結論與建議

本研究同步以 3DEC 程式，初步建構在我國離島潛在場址之應力條件下，針對 SKB 所規範須注意的最小尺寸關鍵性裂面(直徑 150m)，設在受 921 大地震等級地震作用下逆斷層或主變形帶發生 7.84m 錯動後，可引發在斷層線正上方的關鍵性裂面滑移 7.63 cm、距斷層 500m 之下盤關鍵性裂面滑移 7.04 cm、上盤的關鍵性裂面滑移 6.45 cm。

在可預見的近時期內，台灣本土地下實驗室之建立實有困難。但是，我們卻可以盡快規劃在既有地下隧道內裝設地震儀，建立本土坑道受震行為之基礎數據，可釐清本地地面尖峰加速度 PGA 值與「地震規模(M)」及隧道「覆蓋層厚度(H)」兩項因素之關聯性。

## 主要參考文獻

[1]楊長義(2015)，台灣虛擬場址地底實驗室配置之岩力考量，2015 兩岸放射性廢棄物地質處置研討會，北京。

[2]楊長義、李宏輝、萬明憲、吳勁頤(2016)，以 PFC 模擬推估台灣潛在地質處置場母岩之力學參數，2016 岩盤工程研討會，148-157，高雄。

[3]楊長義(2017)，台灣潛在母岩破壞強度特性與處置孔道破裂關係之研析，科技部/原能會合作研究計畫成果報告(MOST 105-NU -E-032-001-NU)。

[4]楊長義、陳昱儒、楊晏瑜(2017*c*)，核廢料罐處置孔位之選定準則，第十七屆大地工程學術研討會，宜蘭。

[5] Fälth B, H. Hökmark and R. Munier (2010), Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, SKB.

# 高放射性廢棄物處置場緩衝材料劣化之研究
# Buffer Material Degradation for High Level Radioactive Waste Disposal Repository

計畫編號：MOST 107-NU -E-002-001 -NU
計畫主持人：林文勝
e-mail：wslinlin@ntu.edu.tw
執行單位：國立臺灣大學水工所

## 摘要

本研究採用膨潤石脫水和膨潤石-伊利石轉化的化學動力學模型，及層間水化狀態之孔隙率修正方程式，計算由於熱衰變的高溫引起膨潤石排出層間水。研究結果顯示，膨潤石黏土排出層間水後，會導致膨潤土緩衝材料體積收縮。未來針對放射性廢棄物最終處置之膨潤土退化演變之研究，可以進一步瞭解放射性廢棄物處置場長期安全分析的功能安全評估。
關鍵詞：膨潤土退化；膨潤石脫水；高放射性廢棄物；功能安全評估。

## Abstract

This study adopted the chemical kinetic model of smectite dehydration and illitization to calculate the amount of water expelled from smectite clay minerals caused by higher temperatures of waste decay heat. We discovered that smectite clay could cause volume shrinkage because of a loss of interlayer water, which can lead to bentonite buffer compression. The results of this study may be used in advanced research on the evolution of bentonite degradation for both performance assessments and safety analyses of final HLW disposal in Taiwan.
Keywords: bentonite degradation, smectite dehydration, high-level radioactive waste, performance assessment

## I. 前言

放射性廢棄物深地層處置場安全概念是利用廢棄物體(waste form)、廢棄物包件(waste package)、緩衝材料(buffer material)與回填材料共同構成之工程障壁(engineered barrier)，與處置母岩構成之天然障壁(natural barrier)所形成之多重屏障系統層層保護，利用隔離、遲滯及稀釋等原理，確保放射性廢棄物衰變到無害的程度，並避免影響生物圈(biosphere)環境，目前工程障壁之設計概念示意如圖 1 所示。膨潤土作為緩衝材料當成高放射性廢棄物深地質處置重要的人工障壁，與放射性廢棄物容器和周圍母岩直接接觸，於場址衰變熱、周圍母岩大地應力和地下水流及化學物種等作用影響下，產生複雜的熱-水-力-化學耦合作用，緩衝材料產生變化及水化膨脹，是否能長期有效地發揮其材料的作用，亦可能影響處置場的安全。對於緩衝材料的分析，過去經常只分析緩衝材料的熱（T）、水力（H）、力學（M）和化學（C）特性，或分析 T-M 耦合或緩衝材料 T-H-M 耦合的長期穩定性。分析高放射性廢棄物處置場中近場熱 - 水 - 化學作用下脫水造成的緩衝材料的劣化較少涉獵。膨潤土黏土礦物的劣化是由外部溫度（T），水壓（H）和化學反應（C）引起的黏土脫水引起的，可以從化學動力學的角度來看，如脫水成伊利石，從化學動力學的角度討論脫水機制。[1-2]

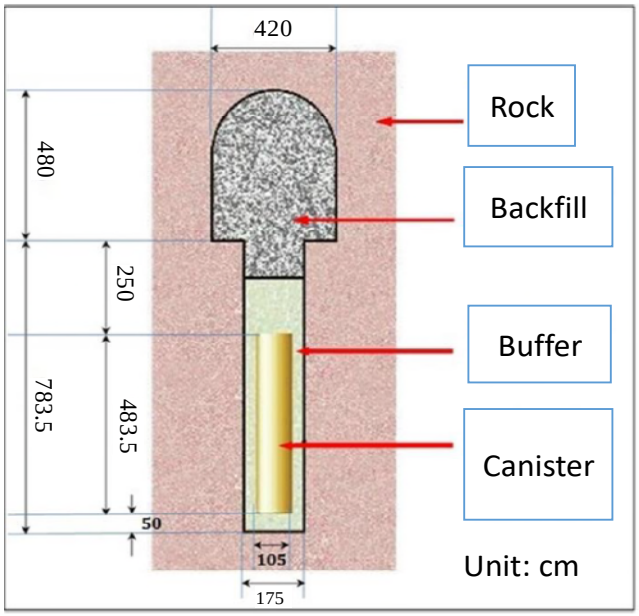



圖 1　工程障壁設計示意圖

## II. 主要內容

緩衝材料之膨潤土屬於膨潤石類黏土，該膨潤石類黏土礦物受到廢料體衰變熱之溫度作用引致脫水反應用導致壓縮產生劣化，所以本研究針對高放廢棄物處置場熱作用對緩衝材料效能之影響，成果可作為高放廢棄物最終處置之功能安全評估與安全分析雛形技術。

### 2.1 緩衝材料溫度分佈

廢料體衰變熱由 SKB 技術報告可以 P(*t*)，其中 *t* 為時間(年)，$a_i$ 為係數，列於表 1 [3]。

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

表 1 時間與係數 $a_i$

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

初始廢料罐熱量 1315W，應用 COMSOL 軟體[4]模擬工程障壁內溫度變化，緩衝材料、回填材料、母岩模擬區域之有限元素網格如圖 2，取部分模擬區域之網格示意如圖 2 中間圖。

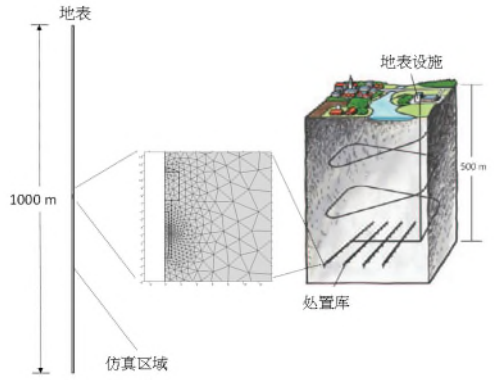



圖 2　工程障壁和母岩之有限元素網格

熱傳模擬參數列於表 2。研究假設類比區域底部位於地表下深度 1,000 m，處置隧道底部位於地表下深度 500 m 處，類比區域頂部為地表。邊界條件部分，類比區域的上部為假設之地表溫度 20.8 ℃，底部(地下 1,000 m)之溫度為 37.8 ℃，區域左右邊設為零熱流通量邊界。初始溫度分佈于區域上方(地表)之溫度為 20.8 ℃，底端(地下 1,000 m)之溫度約 37.8 ℃ (即考慮地溫梯度：20.8 + 1.7×10 = 37.8)。目前均無考慮應力條件與地下水滲透條件，熱傳導係數目前假設為定值。

表 2 熱傳模擬所需之參數

| 參數 | 單位 | 說明 | 緩衝材料 | 回填材料 | 母岩 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\rho$ | $g/cm^3$ | 密度 | 1.95 | 1.535 | 2.75 |
| $C_p$ | $Jkg^{-1}K^{-1}$ | 熱含量 | 830 | 830 | 712 |
| $T_{ini}$ | ℃ | 初始溫度 | 25 | 25 | 29 |
| $k$ | $Wm^{-1}K^{-1}$ | 熱傳導係數 | 1.1 | 1.1 | 2.91 |
| $n$ | - | 孔隙率 | 0.435 | 0.46 | - |
| $\rho_D$ | $g/m^3$ | 乾土密度 | 1.56 | - | - |

**2.2 膨潤土脫水特性**

蒙脫石屬於膨脹性膨潤石類黏土，為膨潤土緩衝材料中主要礦物（65 至 90wt%）。 Na 型膨潤石具有優異的膨脹性和較低的滲透性，因此被認為是緩衝材。膨潤石八面體構造中 $Al^{3+}$和 $Mg^{2+}$的同構置換或膨潤石四面體位置上 $Al^{3+}$的 $Si^{4+}$的同構置換使得在膨潤石結構上產生了過量的負電荷，並導致在膨潤石層間區域吸附陽離子來補償。圖 3 顯示了膨潤石黏土礦物結構，如果膨潤石層間區域吸附水分，那麼這種水就稱為層間水。Colten-Bradley [5]和 Ransom 和 Helgeson[6]指出，膨潤石中間層包括三個不連續的基本間距，在地下水文地質環境大約 10 Å、12.6 Å（一層水分子）和 15.7 Å（兩層水分子）。層間水的化學和熱力學性質不同于孔隙水。層間水可以被認為是與礦物結合形成水合礦物的水。當脫水發生時，層間水從水合的膨潤石中釋放出來形成 $H_2O$ 和無水的 2∶1 層狀矽酸鹽對應物。這種行為類似於固溶體可逆晶格內反應[6,7]。

$$hs = as + nH_2O \quad (2)$$

其中 hs 表示含水膨潤石，表示無水膨潤石，n 是從 1 莫爾含水膨潤石釋放水的莫爾數。 當膨潤石處於較高的廢棄物衰變熱溫度時，反應（2）傾向於向右移動，並且熱條件可能導致膨潤石脫水（即，當層基間距從大約 15.7 到 10 Å 時排出層間水）。另外，溫度低至 70℃可能會發生膨潤石伊利石化[8]。伊利石是一種含鉀、含鋁不膨脹的 2：1 層黏土（見圖 3）。當膨潤石礦物暴露於較高的溫度和壓力時，屬於不穩定礦物並會轉變為更穩定的矽酸鹽相，如伊利石/蒙脫石混合層、伊利石。 轉換過程受動力學和水文條件的強烈影響，如時間、可交換陽離子濃度，膨潤土中的飽和狀態和鄰近地層的滲透率[9]。

**2.3 層間水的動力學脫水**

Ferrage 等人 [6]進行了膨潤石脫水的動力學研究，並說明膨潤石結構表現出各種水合狀態。得到下列膨潤石轉化比率（α）之層間水的動力學脫水方程式。

$$\alpha = 1 - \exp[-(kt)]^m \quad (3)$$

$$k = A\exp(-Ea/RT) \quad (4)$$

其中：k 為速率常數、m 為參數、A 是頻率因數（單位為 $s^{-1}$）、Ea 是活化能（單位為 J / mol），R 表示氣體常數單位為 8.31J/(K·mol)，T 表示絕對溫度。表 3 顯示了膨潤石層間水動力學脫水 2W-1W（兩層到一層水分子）和 1W-0W（一層到零層水分子）轉變的速率常數（k）和參數（m）值[10]。

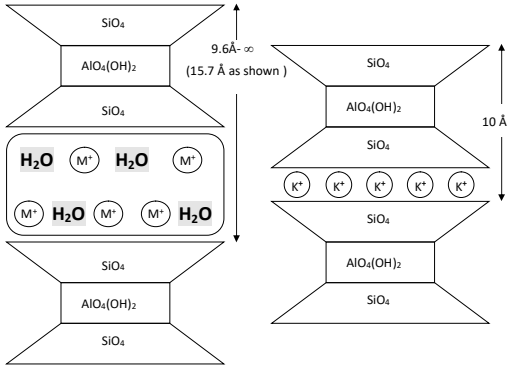



圖 3 黏土礦物結構：（a）膨潤石;（b）伊利石

表 3 2W-1W 和 1W-0W 速率常數（k）和參數（m）值

| 脫水階段 | T(℃) | m | $k$ |
|---|---|---|---|
| 2W-1W | 35 | 0.846 | $6.45\times10^{-3}$ |
| 1W-0W | 90 | 0.733 | $1.55\times10^{-3}$ |

層間水莫爾體積可由下式決定($V_{il}$)

$$V_{il} = \left(\frac{abc\cdot\cos(90-\beta)}{10^{24}Z}\right)N_0 \quad (5)$$

其中 a = 5.17，b = 8.99，和 β= 100°，膨潤石單位晶格的參數; c 是層間厚度; Z = 2 是膨潤石單位晶格中化學式之單位數; $N_0$ 是亞佛加厥數(Avogadro's number) [4]。因此計算含水膨潤石脫水釋放的水莫爾數（$n$）：

$$n = \frac{\rho_{il}V_{il}}{M_w} \quad (6)$$

$\rho_{il}$ 是層間水的密度; $M_w$ 是水的分子量，等於 18.0153。Hawkins 和 Egelstaff [11] 分析層間水平均密度為 1.05 g/cm。 對於大約 12.6 Å（一層水分子）和 15.7 Å（兩層水分子），n 是 2.03 和 4.51。

**2.4 膨潤石- 伊利石轉化動力學**

Huang 等人[12]系統地研究了 Na 飽和膨潤石於 KCl 濃度為 0.1～3mol / L，溫度範圍為 25℃～325℃，壓力 500bar，轉化為混層膨潤石/伊利石的轉化的動力學。研究結果表明，對於富含鈉的流體，轉化率可以下式表示：

$$-\frac{dS_{sm}}{dt}=A\cdot\exp\left(-Ea/RT\right)\cdot C_1\cdot S_{sm}^{\ 2} \quad (7)$$

$$C_1=[K^+]-\frac{[K^+]}{2}\times\frac{[Na^+]}{2.3} \quad (8)$$

其中 $S_{sm}$ 是膨潤石的分率，t 是以秒為單位的時間，A 是頻率因數 8.08×104 $sec^{-1}$，$Ea$ 是 28 千卡/莫爾的活化能，R 表示氣體常數 為 1.987cal / deg-莫爾，T 表示絕對溫度。 $[K^+]$和$[Na^+]$臺灣離島花崗岩孔隙水 $K^+$離子濃度和 $Na^+$離子濃度，分別是 $9.22\times10^{-5}$M 和 $1.53\times10^{-3}$M。

**2.5 膨潤石水合狀態孔隙率修正**

Brown 和 Ransom[13]及 Fitts 和 Brown[14]提出了基於膨潤石水合狀態的孔隙度（$\phi$）修正方程式。土壤的孔隙度定義為

$$\phi\equiv\frac{V_v}{V_T}=\left(\frac{M_p}{\rho_w}\right)\Big/\left(\frac{1}{\rho_b}\right)=\left(\frac{W_cM_s}{\rho_w}\right)\rho_b \quad (9)$$

$\phi$是孔隙度，$V_v$是土體孔隙體積（$cm^3$），$V_T$是土體總體積（$cm^3$），$M_p$是單位品質土壤經加熱釋放水品質（g），$Ms$土壤單位品質中加熱去除水後之乾土壤品質（g），Wc水的品質與乾土壤品質比值(土壤中水的含量)，$\rho_w$孔隙水的密度（g / cm3），$\rho_b$土壤總體密度（g / cm3）。

$$\begin{cases}M_p+M_s=1\\ W_c=\dfrac{M_p}{M_s}\end{cases}\Rightarrow M_s=\frac{1}{1+W_c} \quad (10)$$

Brown和Ransom [13]認為，含膨潤石的沉積物的傳統孔隙度測定可以經由在孔隙和膨潤石層間水含量來校正。由於膨潤石中之層間水會隨加熱而失去，上述方法將會高估孔隙率，所以必須以膨潤石層間的水化狀態決定孔隙率。，使得膨潤石孔隙度的定義之方程式（9）可能高估孔隙率，所以必須以膨潤石層間的水化狀態決定孔隙率，表示為

$$\phi_\alpha=\frac{\rho_b\left(\dfrac{\phi\rho_w}{M_s\rho_b}-\dfrac{A\alpha}{1-\alpha}\right)}{\rho_w\left(1+\dfrac{\phi\rho_w}{M_s\rho_b}\right)} \quad (11)$$

其中：α為單位品質膨潤石中層間水品質，A為膨潤石含量值。對於層間距分別為12.6Å、15.7Å和18.3 Å的含水膨潤石，其近似值分別為0.1、0.2和0.25[5,6]。在α1和α2（其中α1>α2，$\phi>\phi_{\alpha2}>\phi_{\alpha1}$）的含水狀態下，緩衝材孔隙率（$\phi$）和孔隙率改變的物理解釋如下。實驗室求出之孔隙率會因加熱去除層間水，會高估孔隙體積，故$\phi$值最大；而水化狀態越大展示層間水越多，即層間水佔據體積越多，使得孔隙率越小，反之，水化狀態越小展示層間水越少，即層間水佔據孔隙越少，使得孔隙率越大。所以不同的水化狀態α1及α2，其孔隙率之差值($\Delta\phi$)。因此，膨潤石的含水狀態α1和α2之間的孔隙率差異（$\Delta\phi$）是

$$\Delta\phi=\phi_{\alpha2}-\phi_{\alpha1} \quad (12)$$

由於膨潤石脫水，層間水轉化為孔隙水，這可能導致緩衝材料內暫時超壓。 因此，超孔隙壓力的消散可能導致膨潤土的固結壓密並引起緩衝材的壓縮。相比之下，由於較低的緩衝溫度而發生膨潤石再水化。再水化期間的膨脹壓力可能導致膨潤石體積的膨脹恢復。因此，由脫水/再水化引起的緩衝體積（Vbuf）可以定義為孔隙率（$\Delta\phi$）乘以早期體積（Vear）的差值：

$$V_{buf}=\Delta\phi\times V_{ear} \quad (13)$$

最初，緩衝區不飽和。當儲存庫開始運轉時，膨潤土緩衝材與地下水接觸，導致膨潤土緩衝材中的膨潤石黏土完全潤濕。在地下水文地質環境的儲存庫運轉中，假定膨潤石水化狀態的基本間距約為15.7Å（兩層水分子）。然而，Ferrage等人[10]認為，在30°C時，最大層間發生在雙層狀態。 在30°C和50°C之間，發生2W-1W躍遷，隨後1W態占主導地位，達到85°C。1W-0W轉換發生在高於85°C的溫度。這些結果可根據方程式（11）-（13）計算不同層間水化狀態引起的孔隙率變化、膨潤石收縮和膨脹回復。

## III. 結果與討論

2 萬年的罐體熱衰減如圖 4 所示，使用 COMSOL 模型計算在一萬年期間通過 EBS 到母岩的熱傳輸，1000 年的溫度曲線如圖 5 所示。選擇五個點 A、B、C、D 和 E 作為緩衝材料內溫度計算的代表點（圖 6）。圖 7 顯示了 10,000 年期間五個點的溫度分佈。圖 8 顯示了緩衝材料內平均溫度演變，值得注意的是，溫度峰值出現在 10 年前，大約一萬年之後，由於罐體釋放的熱量已經分散，溫度降低到接近地熱背景水平。圖 9 顯示了伊利石化過程中膨潤石所含的比率，在 10,000 年的時間內，低於 0.009%的膨潤石會轉化為伊利石，因為高溫不會長時間保留在緩衝材料中，所以值得注意的是，膨潤石-伊利石轉化對於功能評估可以忽略不計。

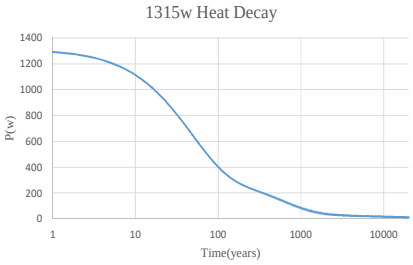



圖 4　廢料罐熱隨時間的變化

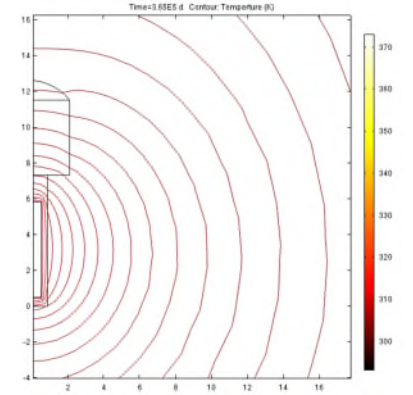


圖 5　模擬區域於 1,000 年之溫度狀態

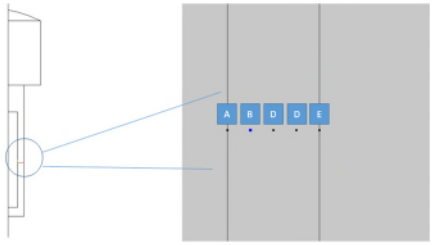


圖 6　緩衝材料計算溫度變化選取點

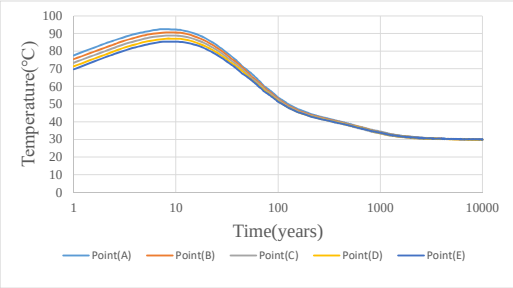



圖 7 緩衝材料 A, B, C, D, 和 E 選取點溫度隨時間變化

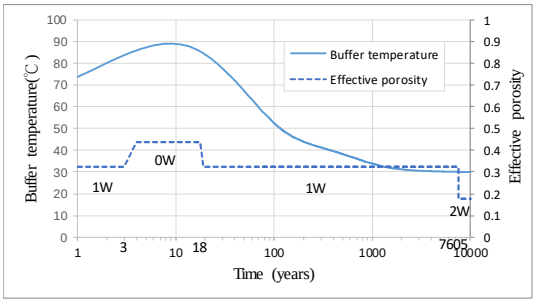



圖 8　緩衝材料內平均溫度與有效孔隙率隨時間變化

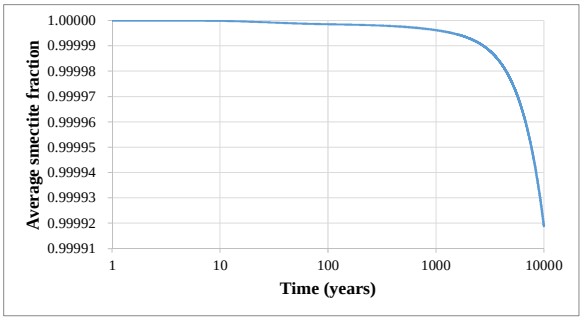



圖 9 膨潤石-伊利石轉化過程中膨潤石含量隨時間變化

表 4 中示出了 2W-1W 和 1W-0W 轉變的膨潤石脫水時間，值得注意的是，在 35℃和 90℃時，脫水時間相對較快，分別為 3,661 秒(2W-1W)和 24,799 秒(1W-0W)。受到溫度演變之水化狀態有效孔隙率分別等於 0.321（1-3 年），0.435（4-18 年），0.321（19-7,605 年）和 0.177（7,606-10,000 年），這是如圖 8 所示。表 5 顯示了由脫水和再水化引起的緩衝材料體積和壓縮量。在 18 年時，徑向壓縮值為 4.458 公分，壓縮可能是因為膨潤石脫水引起緩衝材料內的暫時超額水壓力，該超額孔隙水壓力然後可以消散到回填材料/母岩破裂層中，並導致膨潤土固結壓密和壓縮。但是，由於緩衝材料溫度變低後，可能發生膨潤石再水化，再水化過程中的膨脹壓力可能導致膨潤石的體積膨脹回復，但膨潤石體積是否恢復取決於膨潤石膨脹壓力與 EBS 周圍圍岩施加的圍壓之間的平衡。文獻綜述表明，周圍主岩的水平約束應力約為 11.43-16.55 MPa[15]，膨潤土乾密度 1,533-1,692 kg/m$^3$（含水飽和度為 1,983-2,086 kg/m$^3$）膨脹壓力 4.5-16 MPa[16]。因此，進一步研究膨潤石的膨脹壓力和周圍圍岩的圍壓可以為膨潤土的固結壓密和壓縮以及膨潤石體積膨脹的計算提供進一步的研究。

表 4　2W-1W 和 1W-0W 轉化過程之脫水時間

| 脫水階段 | T(℃) | 脫水時間(sec) |
|---|---|---|
| 2W-1W | 35 | 3661 |
| 1W-0W | 90 | 24799 |

表 5　緩衝材料體積和壓縮量隨時間變化

| 時間(年) | 水化狀態 | $\phi_\alpha$ | $\Delta\phi$ | 緩衝材體積 (cm$^3$) | 壓縮量 (cm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 2W | 0.177 | - | 6151788 | - |
| 1~3 | 1W | 0.321 | 0.144 | 5265931 | 2.427 |
| 4~18 | 0W | 0.435 | 0.258 | 4564627 | 4.458 |
| 19~7605 | 1W | 0.321 | -0.114 | 5265931 | 2.427 |
| 7606~10000 | 2W | 0.177 | -0.258 | 6151788 | 0 |

*負號表示緩衝材料膨脹回復

## IV. 結論

本研究採用層間水的動力學脫水、膨潤石轉化伊利石的動力學模型和層間水化狀態孔隙率修正來計算由於廢熱溫度而引起的膨潤石黏土礦物脫水效應。溫度峰值出現在 10 年前，大約一萬年後，由於廢料罐釋出熱量已經分散，並且溫度已經降低至接近地熱背景水平。根據受到溫度演變之水化狀態有效孔隙率分別等於 0.321（1 - 3 年），0.435（4-18 年），0.321（19-7,605 年）和 0.177(7,606-10,000 年)。在 18 年時，徑向壓縮值為 4.458 公分，壓縮可能是因為膨潤石脫水引起緩衝材料內的暫時超額水壓力，該超額孔隙水壓力然後可以消散到回填材料/母岩破裂層中，並導致膨潤土固結壓密和壓縮。但是，由於緩衝材料溫度變低後，可能發生膨潤石再水化，再水化過程中的膨脹壓力可能導致膨潤石的體積膨脹回復，但膨潤石體積是否恢復取決於膨潤石膨脹壓力與工程障壁周圍母岩施加的圍壓之間的平衡。文獻指出，周圍主岩的水平應力約為 11.43-16.55 MPa，膨潤土乾密度 1,533-1,692 kg/m3(含水飽和度為 1,983-2,086 kg/m3)時膨脹壓力 4.5-16 MPa。所以膨潤石黏土由於膨潤石層間失水而導致體積收縮並導致膨潤土緩衝材壓縮，進一步研究膨潤石的膨脹壓力和周圍母岩的圍壓可以為膨潤土的固結壓密和壓縮，以及膨潤石體積膨脹的計算提供進一步的理論說明。

因為高溫不會長時間保留在緩衝材料中，所以在 10,000 年期間，只有不到 0.009%的膨潤石轉化為伊利石，根據該結果可以提出對於膨潤石-伊利石轉化於功能評估中可以忽略不計。

本研究結果可用於對膨潤土退化演化的進一步研究，以進行高放射性廢棄物最終處置的功能評估和安全分析。

## 參考文獻

[1] 陳文泉，2004，高放廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究，中央大學土木工程研究所博士論文。
[2] 林文勝，2001，膨潤石脫水對地層下陷之影響，臺灣大學農業工程學系博士論文。
[3] SKB, Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB (2009).
[4] COMSOL, Introduction to COMSOl Multiphysics®: Version 5.2, COMSOL (2016).
[5] V. A. Colten-Bradley, "Role of pressure in smectite dehydration - effects on geopressure and smectite-to-

illite transformation”, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 71(11), 1414 (1987).
[6] B. Ransom and H. C. Helgeson, “A chemical and thermodynamic model of aluminous dioctahedral 2:1 layer clay minerals in diagenetic processes: regular solution representation of interlayer dehydration in smectite”, American Journal of Science, 294, 449 (1994).
[7] C. W. Liu, W. S. Lin, A smectite dehydration model in a shallow sedimentary basin: model development. Clays and Clay Minerals, 53(1), 55 (2005).
[8] S. Jennings and G.R. Thompson, Diagenesis of Plio-Pleistocene sediments of the Colorado River Delta, Southern California. Journal of Sedimentary Research 56, 89-98 (1986).
[9] P. Wersin, L.H. Johnson, I.G. McKinley, Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 ℃: A critical review, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 32, 780-788 (2007).
[10] E. Ferrage, C.A. Kirk, G. Cressey, J. Cuadros, “Dehydration of Ca-montmorillonite at the crystal scale. Part II: Mechanisms and kinetics”, American Mineralogist 92, 1007 (2007).
[11] R. K. Hawkins, P. A. Egelstaff, “Interfacial water structure in montmorillonite from neutron diffraction experiments”, Clays and clay minerals, 28(1), 19 (1980).
[12] W. L. Huang, J. M. Longo, D. R. Pevear, An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. Clays and Clay Minerals. Vol.41, No. 2, 162-177(1993).
[13] K. M. Brown and B. Ransom, “Porosity corrections for smectite-rich sediments-impact on studies of compaction, fluid generation”, Geology, 24, 843 (1996).
[14] T. G. Fitts, K. M. Brown, “Stress-induced smectite dehydration: ramifications for patterns of freshening and fluid expulsion in the N. Barbados accretionary wedge”, Earth and planetary science letters, 172, 179 (1999).
[15] 臺灣電力公司，2017 年用過核子燃料最終處置計畫報告，SNFD-AR2016_V3，2017。
[16] SKB, THM modelling of buffer, backfill and other system components- Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB (2010).

# 放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧
# Review of Seismic Hazard Assessment for Radioactive Easte Disposal Facilities

計畫編號：MOST 107-2623-E-008-004 -NU
計畫主持人：李錫堤
e-mail：ct@ncu.edu.tw
執行單位：國立中央大學應用地質研究所

## 摘要

放射性廢棄物處置設施之地震影響可包括強地動之影響、斷層錯動與地變形之影響，及各種次生災害之影響等。強地動之估算一般使用方法上已成熟之定值法及機率式地震危害度分析。因處置窖位於地下深處，地振動及海嘯、山崩、土壤液化等次生災害常不構成控制因素，斷層錯動與地變形成為處置窖最需考量的地震影響。地變形主要出現在主斷層的錯移帶及其兩側一定範圍，因為處置設施在選址時就會避開主要斷層，所以主斷層的變形帶也不是處置窖耐震設計上考量的重點。在主斷層以外，難免遭遇到不易探查得到的次要斷層帶或剪裂變形帶。這一些次要斷層帶或剪裂帶在地震時有可能受震而發生位移，影響結構物之安全。因此，本研究擬廣泛蒐集相關資料，先進行放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧，後續研究再進行次要斷層帶或剪裂帶受震位移量評估方法研析及實際應用。
關鍵詞：放射性廢棄物處置、地震影響評估、地震危害度分析、斷層位移危害度分析。

## Abstract

Seismic impact to radioactive waste disposal facilities may include strong ground-motion impact, fault displacement and ground deformation impact, and impact by secondary hazards. Estimation of strong ground-motion for a site commonly uses deterministic or probabilistic approach via a seismic hazard analysis which has been mature in methodology. Because a disposal site locates commonly in an underground cavern, ground-motions or secondary hazards by tsunami, landslide, liquefaction etc. are not controlling the design of the disposal facilities, and fault displacement and ground deformation become the control. Fault displacement and ground deformation occur generally at primary fault and its surrounding areas and these may have avoided in selecting the disposal site. Therefore, secondary faulting becomes the issue concerned. In the region close to the primary fault, there may exist secondary faults or shear zones. These weak zones may also move during movement of the primary fault affecting the safety of disposal facilities. This study intends to collect relevant information extensively, and to review seismic impact assessment methods for radioactive waste disposal facilities. Details of fault displacement hazard analysis, including development of method and actual applications, will be conducted in the following projects.

Keywords: Radioactive waste disposal, Seismic impact assessment, Seismic hazard analysis, Fault displacement hazard analysis.

## I. 前言

台灣地區位處活動造山帶(Tsai et al., 1977; Teng, 1990)，斷層及地震活動頻繁，因此工程建設須謹慎考慮結構物之耐震設計。地震影響工程設施安全的要項可包括：強地動之影響、斷層錯動與地變形之影響，及次生災害之影響等。

強地動之估算一般使用方法上已成熟之定值法(deterministic method)及機率式地震危害度分析(probabilistic seismic hazard analysis, PSHA)。因處置窖位於地下深處，地振動及海嘯、山崩、土壤液化等次生災害常不構成控制因素，斷層錯動與地變形成為處置窖最需考量的地震影響。

地變形主要出現在主斷層的錯移帶及其兩側一定範圍。因為處置設施在選址時就會避開主要斷層，所以主斷層的變形帶也不是處置窖耐震設計上考量的重點。而在主斷層以外，難免遭遇到不易探查得到的次要斷層帶或剪裂變形帶。這一些次要斷層帶或剪裂帶在地震時有可能受震而發生位移，影響結構物之安全。因此，本研究擬廣泛蒐集相關資料，先進行放射性廢棄物處置設施之地震影響評估方法回顧，後續研究再進行次要斷層帶或剪裂帶受震位移量評估方法研析及實際應用。

## II. 主要內容

Youngs et al. (2003)針對美國核廢料儲存場址 Yucca Mountain 相對於斷層所在位置，提出評估斷層錯動下位移量超越機率之方法，以探討某場址在使用年限下之結構安全性。此一方法稱為機率式斷層位移危害度分析(PFDHA, Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis)，用來描述某位置受某(些)斷層影響下之超越特定位移量之機率。此一分析法主要可分為地震法與位移法。近十年來已有許多研究產出，重要文獻如 Wheeler (1989)的美國西部麓山帶五次正斷層錯動事件，McCalpin (1998)的 11 次正斷層錯動事件、Pezzopane and Dawson (1996)所蒐集正斷層破裂、Wells and Coppersmith (1994)年蒐集各類斷層(正、逆、平移斷層整合)資料、Pezzopane and Dawson (1996)所蒐集正斷層破裂資料與其相對應之地震規模以及 Wesnousky (2008)蒐集之 13 條平移斷層之破裂資料等相關文獻。適用不同斷層類型的相關經驗公式也陸續產出，Moss and Ross (2011)對逆斷層建議之經驗式、Petersen et al. (2011)針對平移斷層議之經驗式與 Youngs et al. (2003)對正斷層建議之經驗式。

### (一)地震法(Earthquake approach)

機率式斷層位移危害度分析之地震法(簡稱地震法)，地震法源自於機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)，參照 PSHA 之理論公

式，PSHA 是分析某一場址一特定的時間內，發生超過某一地動值的機率。假設地震的發生是一種自然隨機過程而符合卜桑模式(Poisson model)，則在 $T$ 時間內，至少有一次地動值 $Z$ 超越 $z$ 的機率如下：

$$P(Z>z|T)=1-e^{-\nu(z)T}$$

上式中，$\nu(z)$為地動值 $Z$ 超越 $z$ 的單位時間(年)平均發生次數。

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

$$v(z)=\sum_n N_n(m_0)\int_{m_0}^{m_u} f_n(m)[\int_0^{\infty} f_n(r|m)\cdot P(Z>z|m,r)dr]dm$$

上式中，$N_n(m_0)$是在第 $n$ 個震源在最小地震規模 $m_0$ 以上的年發生次數；$f_n(m)$是第 $n$ 個震源在最小地震規模 $m_0$ 至最大地震規模 $m_u$ 間的規模機率密度函數；$f_n(r|m)$是第 $n$ 個震源在規模 $m$ 時，斷層破裂面至場址最短距離 $r$ 的距離密度函數；$P(Z>z|m,r)$是在規模 $m$ 以及距離 $r$ 時，地動值 $Z$ 超越 $z$ 的機率，可代入地動衰減函數求得。

地震危害度分析方法特別著重在不確定性因素的掌握，如邏輯樹法等。機率式斷層位移危害度分析是分析某一場址，在一特定的時間內，發生超過某一斷層位移值的機率。假設地震的發生是一種自然隨機過程而符合卜桑模式，則在 $T$ 時間內，至少有一次位移值 D 超越 d 的機率如下：

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

上式中，$\nu$(d)為位移值 $D$ 超越 $d$ 的單位時間(年)平均發生次數。

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

$$v_k(d)=\sum_n N_n(m_0)\int_{m_0}^{m_u} f_n(m)[\int_0^{\infty} f_{kn}(r|m)\cdot P_{kn}^{*}(D>d|m,r)dr]dm$$

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

位移衰減函數$P_{kn}^{*}(D>d|m,r)$與地動衰減函數略有不同:

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

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

(二)位移法(Displacement approach)

位移法機率式斷層位移危害度分析(簡稱位移法)，位移法相關分析資料主要需靠古地震調查，即斷層之槽溝與鑽探資料中定年獲得，如斷層滑移事件之平均發生率($\lambda_{DE}$)，若無相關資料，斷層平均位移量可由相關經驗公式求得，並可利用類似地震法理論求得某震源之超過某特別位移量之年發生平均次數，如下式所示：

$$v(d)=\lambda_{DE}\cdot P(D>d|Slip)$$

其中 v(d)為超過某指定位移量 d 之年發生次數，$\lambda_{DE}$ 為滑移事件平均發生率，$P(D>d|Slip)$為震源發生斷層位移時，場址為移 $D$ 大於 $d$ 之機率。

綜合上述，機率式斷層位移危害度分析可用地震法以及位移法進行壩址可能位移量評估。地震法主要仰賴各不同性質斷層(正斷層、逆斷層或平移斷層)之經驗公式，以評估在某可能地震規模下，發生地表破裂之機率，並找出沿斷層線不同位置對應之位移超越機率，以對於某場址之可能位移量進行評估。位移法主要利用斷層槽溝或是歷史資料定年之方式找出該地點之事件滑移速率以及事件平均位移量，而位移超越機率部分，則與地震法相似，透過經驗公式推求位移量。然而 PFDHA 雖發展僅數十年之久，目前期刊論文數量不多，但仍有數篇重要文獻提供之經驗式可供台灣相關研究參考與選用，本研究依主斷層與次要斷層分別論述:

(1) 研選主斷層地表破裂相關機率模式

相較於 PSHA，PFDHA 需多考慮斷層錯動造成地表發生滑移或破裂之機率，一般認為與地震矩規模有關，Youngs et al. (2003)將 Pezzopane and Dawson (1996)所蒐集正斷層破裂資料與其相對應之地震規模繪圖並進行迴歸，用以評估主斷層發生破裂之機率，其對應之參數依照不同資料庫而有不同之建議值，公式如下：

$$\text{P(principal surface rupture)}=\frac{e^{(a+bm)}}{1+e^{(a+bm)}}$$

此外，在斷層錯動造成地表破裂的條件下，沿主斷層線上某位置之位移量亦需仰賴斷層錯動與位移量之資料庫進行分析，Youngs et al. (2003)利用 Wheeler (1989)紀錄之美國西部麓山帶 5 次正斷層錯動事件，以及 McCalpin (1998)紀錄之 11 次正斷層錯動事件，整理沿主斷層線上不同位置(距離斷層端點 x 處)與主斷層長度(L)下，其對應之位移量(D)，並以該主斷層線最大位移量(MD)或平均位移量(AD)進行正規化，找出沿主斷層線上之正規化位移量分佈情形，並以如 Beta 分佈，Gamma 分佈描述其位移沿斷層線不同位置分佈情形，即可利用地震法進行危害度分析。

上述中關於最大位移量或平均位移量的推估部分，一般以經驗公式推估，例如 Wells and Coppersmith (1994)利用全世界蒐集而得之各類斷層(正、逆、平移斷層整合)資料提出各斷層類型可能造成之地表位移量，該經驗公式至今仍廣為使用，與地震規模、斷層錯動造成地表破裂長度有關。

Moss and Ross (2011)考量各斷層類型造成地表破裂機制不同，蒐集較新之逆斷層地表破裂的資料，其中包括 921 集集大地震的車籠埔斷層錯動事件，評估其錯動造成地表破裂之機率，用以評估逆斷層在給定地震矩規模(m)下錯動，造成地表破裂機率如下式：

$$\text{P(principal surface rupture)}=\frac{1}{1+e^{(7.30+1.03m)}}$$

其研究對平均位移量或最大位移量之推估進行探討，並將台灣集集地震(1999)以及中國汶川地震(2009)等 8 個逆斷層錯動事件列入資料庫內進行分析，提出評估之經驗公式(AD，MD 單位均為公尺，m 為地震矩規模)

如下：

$\log(AD) = 0.3244m\text{-}2.2192,\ \sigma = 0.17,\ R^2 = 0.62$

$\log(MD) = 0.5102m\text{-}3.1971,\ \sigma = 0.31,\ R^2 = 0.53$

Moss and Ross (2011)亦針對主要斷層線上不同位置之位移量的分布情形，將位移量(D)與平均位移量(AD)正規化後，可以 Beta 分佈或 Gamma 分佈描述其分佈情形，若位移量與平均位移量正規化($Z = \frac{D}{AD}$)，則 z 的分佈可以 Beta 分佈描述，如下式所示：

$$f(z) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{z}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{z}{\lambda}\right)^k}$$

$$k = \exp\left[-31.8\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 21.5\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 3.32\left(\frac{x}{L}\right) + 0.431\right]$$

$$\lambda = \exp\left[17.2\left(\frac{x}{L}\right)^3 - 12.8\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 3.99\left(\frac{x}{L}\right) - 0.38\right]$$

此外，位移量與平均位移量正規化($Z = \frac{D}{AD}$)，之分佈亦可以用 Gamma 分佈描述，如下式所示：

$$f(z) = z^{k-1}\frac{e^{-(z/\theta)}}{\theta^k \Gamma(k)}$$

$$k = \exp\left[-30.4\left(\frac{x}{L}\right)^3 + 19.9\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2.29\left(\frac{x}{L}\right) + 0.574\right]$$

$$\theta = \exp\left[50.3\left(\frac{x}{L}\right)^3 - 34.6\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 6.60\left(\frac{x}{L}\right) - 1.05\right]$$

Petersen et al. (2011)對平移斷層之主斷層線以及次要破裂帶(遠離主斷層線)上之位移進行歷史資料之統計及分析，研究中主要蒐集之平移斷層共有 22 條，其中亦包含 Wesnousky (2008)蒐集之 13 條平移斷層。其將平移斷層上沿主斷層不同位置之位移量進行整理，研究中不同位置(l/L)之位移量(D)分別以雙線式(bilinear)、多項式(Quadratic)以及橢圓式(Elliptic function)進行擬合，並以其對應之地震規模為變數之一進行迴歸，研究中建議之經驗公式以及其標準差如下式所示，其中 m 為地震矩規模，D 為主斷層線之位移，單位為公分：

雙線式(bilinear):

$$\frac{x}{L} < 0.31, \ln(D) = 1.797m + 8.52\left(\frac{x}{L}\right) - 10.28$$

標準差為 1.29 (取自然對數後之值)

$$\frac{x}{L} > 0.31, \ln(D) = 1.7658m - 7.8962$$

標準差為 0.96 (取自然對數後之值)

多項式(quadratic):

$$\ln(D) = 1.7895m + 14.47\left(\frac{x}{L}\right) - 20.17\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 10.545$$

標準差為 1.13 (取自然對數後之值)

橢圓式(Elliptical function):

$$\ln(D) = 3.3\sqrt{1 - \frac{1}{0.25}\left[\left(\frac{l}{L}\right) - 0.5\right]^2} + 1.793m - 11.22$$

標準差為 1.13 (取自然對數後之值)

(2) 研選次要斷層地表破裂相關機率模式

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

Youngs et al. (2003)亦利用類似上述主斷層線之位移推估方法進行計算，但由於遠離主斷層線之破裂機率與主斷層不同，發生主斷層破裂不一定產生次要斷層破裂，而隨著距離主斷層的距離改變，位移量也有所變動，Youngs et al. (2003)先將各正斷層對應之地表破裂描繪並數化位移量，再以 500m 為邊長之網格進行套疊，之後計算佔有次要斷層之網格數(同時記錄其距離主斷層線之發生位置)，並以受地震影響的區域之總網格數進行比例之計算。研究中以 Pezzopane and Dawson (1996)蒐集之正斷層資料，針對正斷層在不同地震矩規模下遠離主斷層線之距離與其對應之破裂機率進行迴歸分析，亦分別對各正斷層之上盤以及下盤進行主斷層線錯動造成遠離主斷層線破裂之機率探討，得知地震矩規模愈大，會造成遠離主斷層線破裂之機率愈高，此外，正斷層上盤位置之破裂機率亦較下盤處之破裂機率高，且其發生地表破裂之位置可能延伸至主斷層線外數公里處，其公式如下:

$$P(\text{distributed surface rupture}) = \frac{e^{f(x)}}{1 + e^{f(x)}}$$

$f(x) = 3.27 + (-8.28 + 0.577m + 0.629h)\cdot ln(r + 4.14) + 0.611z_i$

上式中 r 為距主斷層線之距離，單位為公里，m 為地震矩規模，h 為 1 代表正斷層之上盤，h 為 0 代表正斷層之下盤，$z_i$ 為隨機變數，標準差為 1。

由於次要斷層破裂之位移量資料相當少，因為有紀錄該處有地表破裂但不一定有紀錄其位移量，因此對於計算為位移量，Youngs et al. (2003)僅能仰賴少量資料進行迴歸分析，其先計算正規化後位移量與距離(單位為公里)，並針對上盤與下盤分別進行分析，上盤資料相較於下盤資料稍多，下盤僅有一個資料點，公式如下(此研究並未提供標準差):

$$\frac{D_{\text{distributed(hangingwall)}}}{MD_{principal\ fault}} = 0.35e^{-0.091r}$$

$$\frac{D_{\text{distributed(footwall)}}}{MD_{principal\ fault}} = 0.61e^{-0.137r}$$

Petersen et al. (2011)亦進行遠離斷層破裂機率之計算，由於 Youngs et al. (2003)使用 500m 邊長之網格進行破裂比例之計算，其解析度較低，因此 Petersen et al. (2011)針對所蒐集之 22 條平移斷層進行整理，在研究中採用邊長 200m 至 25m 不等之網格進行計算遠離斷層之破裂機率與距離及地震規模之關係，其經驗公式與使用之網格大小、斷層距離有關。其對應之破裂機率模式如下，其中 r 之單位公尺。

$$P(\text{distributed surface rupture}) = e^{-1.0114\ln(r) + 2.5572}$$

Petersen et al. (2011)比照沿主斷層線之位移推估方法進行經驗公式之推導，並建立兩個經驗公式以計算遠離斷層線之位移量，其一為建立地震規模(m)、距主斷層之最短距離(r)與次要斷層之位移量(d)之關係，d、r 之單位分別為公分和公尺，m 為地震矩規模。

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

標準差為 1.12 (取自然對數後之值)

另一方法為利用次要斷層之位移量(d)與主斷層線平均位移量(AD)之關係建立另一計算隨距主斷層之最短距離(r)增加而位移衰減之經驗公式，其中 d、r 之單位

公尺，m 為地震矩規模。

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

標準差為 1.14 (取自然對數後之值)

## III. 結果與討論

結構物之地震影響可包括強地動之影響、斷層錯動與地變形之影響，及各種次生災害之影響等。地震影響評估必須有一定的流程及步驟，方能克盡全功。因處置窖位於地下深處，地振動及海嘯、山崩、土壤液化等次生災害常不構成控制因素，斷層錯動與地變形，尤其是場址內部的次要斷層帶或剪裂變形帶，成為處置窖最需考量的地震影響。

台灣處於歐亞板塊與菲律賓海板塊碰撞作用下的活動造山帶，是世界上最重要的地體構造變動與地形快速演變區域之一。本計畫建立地震影響評估模式暨評估流程與步驟，依照 PSHA 與 PFDHA 之流程，可評估出特定再現期下之危害度。進一步可依據核能法規及地質法，並參考水利構造物安全評估中即有的地震安全評估規定(大型水壩之最大可能地震的對應再現周期為一萬年)，就放射性廢棄物處置設施或其他目標物之需求，選定地震影響評估審查要項與適用的再現期，以數十萬年至數百萬年不等之再現期，依最後結果之危害度曲線訂定某一再現期下之危害度(地動值或斷層位移)。

對於 PFDHA 而言，先確認鄰近控制斷層之斷層類型，計算場址與主要斷層間的最短距離，其斷層之機率密度函數、斷層參數與邏輯樹將與專家之經驗與專業認可後進行分析。危害度分析將針對斷層位移量於斷層帶之分布、斷層位移量以及斷層滑動方向對場址影響程度之不確定性分析，其中機率密度函數、斷層參數以及位移衰減式，針對斷層之位移危害度分析即可利用上述方法進行探討，並依斷層破裂長度，滑移速率以及迴歸年等，定出危害度曲線。各預估方程式，如斷層位移預估式，皆須選用參數完整之文獻，本研究僅列出參數相對完整之研究，如各係數無公開，殘差之標準差沒有列出等，無法有效於分析中計算危害度，故不採納。

以上探討的是主要斷層及次要斷層的永久位移。過去的水庫工程亦有暫態位移之討論，此種暫態位移被稱為共振式移動(sympathetic movement), 對結構物亦會有影響。因共鳴式移動的分析牽涉到大型地值模型與巨量電腦計算，本計畫並未涉入此議題，分析上仍以 PFDHA 為主。

## IV. 結論

地震法主要仰賴各不同性質斷層(正斷層、逆斷層或平移斷層)之經驗公式，以評估在某可能地震規模下，發生地表破裂之機率，並找出沿斷層線不同位置對應之位移超越機率，以對於某場址之可能位移量進行評估。重要相關參數略可分成 5 點:(1)主斷層之幾何資訊、長度、再現期、滑移速率。(2)斷層發生之地震規模之分佈情形(例如:截切指數模式、特徵地震模式或純粹特徵地震模式)。(3)斷層錯動造成地表破裂的機率，主斷層位移與次要斷層不同。(4)主斷層位移預估式，其需藉沿主斷層線破裂位置及其對應位移量之統計資料建立。(5)次要斷層位移預估式，其為評估遠離主斷層線之位移衰減，一般與地震規模及距主斷層線之距離有關。

位移法主要利用斷層槽溝或是歷史資料定年之方式找出該地點之事件滑移速率以及事件平均位移量，而位移超越機率部分，則與地震法相似，透過經驗公式推求位移量。

台灣本島上多為逆斷層，地體構造複雜，無法有效釐清背景地震與主要斷層之關係，建議斷層之規模分布模式可選用特徵地震模式，因中小規模地震生有可能觸發地表破裂，主斷層發生破裂之機率模式與位移量預測公式可選用採 Moss and Ross (2011) 。

若目標物不在主斷層線上，應針對次要斷層地表破裂進行分析，次要斷層地表破裂之機率模式與位移量預測公式現階段可選用採 Petersen et al. (2011)，計算斷層對場址造成次要位移之危害度曲線，推估各再現期之可能位移量。

## 參考文獻


[1] Long, J. C., & Ewing, R. C. (2004). Yucca Mountain: Earth-science issues at a geologic repository for high-level nuclear waste. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 32, 363-401.

[2] McCalpin, J. P. (1998). Statistics of Paleoseismic Data, Final Technical Report, National Earthquake Hazards Reduction Program, U.S. Geological Survey, 54.

[3] Moss, R. E. S., & Ross, Z. E. (2011). Probabilistic fault displacement hazard analysis for reverse faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(4), 1542-1553.

[4] Petersen, M. D., Dawson, T. E., Chen, R., Cao, T., Wills, C. J., Schwartz, D. P., & Frankel, A. D. (2011). Fault displacement hazard for strike-slip faults. Bulletin of the Seismological Society of America, 101(2), 805-825.

[5] Pezzopane, S. K., & Dawson, T. E. (1996). Fault displacement hazard: A summary of issues and information : Seismotectonic Framework and Characterization of Faulting at Yucca Mountain, Nevada, U.S. . Geological Survey Administrative Report prepared for the U.S. Department of Energy., Chapter 9: pp. 160.

[6] Stepp, J. C., Wong, I., Whitney, J., Quittmeyer, R., Abrahamson, N., Toro, G., . . . Sullivan, T. (2001). Probabilistic seismic hazard analyses for ground motions and fault displacement at Yucca Mountain, Nevada. Earthquake Spectra, 17(1), 113-151.

[7] Teng, L. S. (1990). Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. Tectonophysics, 183(1-4), 57-76.

[8] Tsai, Y. B. (1977). Tectonic implications of the seismicity in the Taiwan region. Memoir Geol. Soc. China, 2, 13-41. Retrieved from https://ci.nii.ac.jp/naid/10029008522/en/

[9] Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4), 974-1002.

[10] Wesnousky, S. G. (2008). Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: Issues and implications for seismic-hazard

analysis and the process of earthquake rupture. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(4), 1609-1632.

[11] Wheeler, R. L., Schwartz, D., & Sibson, R. (1989). Persistent segment boundaries on Basin-Range normal faults. US Geol. Surv. Open–File Rept. 87–673, 432-444.

[12] Youngs, R. R., Arabasz, W. J., Anderson, R. E., Ramelli, A. R., Ake, J. P., Slemmons, D. B., . . . Swan, F. H. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). Earthquake Spectra, 19(1), 191-219.

# 三維放射性核種衰變鏈遷移快速預測工具發展與劑量風險評估
# Fast Tool for Plume Migration of Radionuclide Decay Chain and Its Application to Dose and Health Risk Assessment

計畫編號：MOST 107-2623-E-008-003 -NU
計畫主持人：陳瑞昇
e-mail：jschen@geo.ncu.edu.tw
計畫共同主持人：梁菁萍
執行單位：國立中央大學應用地質研究所

## 摘要

本計畫目發展三維放射性核種衰變鏈遷移行快速預測工具，此快速工具的基礎為半無限長度地下水系統的耦合一階衰變反應的三維移流–延散偏微分方程組的解析解，藉由 Laplace 轉換與雙重有限 Fourier cosine 轉換求得衰變鏈中任一核種成員的通用表示式。所得的三維解析解與文獻中二維有限域解析解有非常一致的結果，確認新解析解的正確性。解析解模式應用於$^{238}Pu \rightarrow {}^{234}U \rightarrow {}^{230}Th \rightarrow {}^{226}Ra$放射性核種衰變鏈的三維傳輸計算，計畫中進一步進行不同地下水流距離輻射劑量評估，本計畫所發展的模式可以提供給政府單位做為放射性廢料處置候選場址安全評估之篩選模式。

關鍵詞：放射性核種、衰變鏈、解析解、移流-延散方程式、輻射劑量評估。

## Abstract

A novel tool for rapidly predicting the plume migration of radionuclide decay chain. This fast tool is achieved based on the solutions to a set of three-dimensional transient advection-dispersion equations (ADEs) coupled with sequential first-order decay reactions in a semi-infinite groundwater system. Generalized analytical solutions with a compact expression for arbitrary species of a radionuclide decay chain.are obtained through application of the Laplace transform and double finite Fourier cosine transforms. The accuracy and robustness of the developed analytical model is confirmed by excellent agreement between our derived analytical model and a two-dimensional analytical solutions available in the literature derived for a finite domain. The developed model is then applied to simulate the plume migration of radionuclide decay chain $^{238}Pu \rightarrow {}^{234}U \rightarrow {}^{230}Th \rightarrow {}^{226}Ra$ . The radiological dose assessment is performed along the groundwater flow direction at various distances. The developed tool can serve as a screening model for rapidly assessing the performance of deep geological disposal of radioactive waste.

Keywords: Radionuclide; Decay chain; Analytical solution; Advection-Dispersion Equations; Radiological Dose Assessmet.

## I. 前言

用過核子燃料深層地質處置系統的安全評估，常採用數值模式(numerical model)來模擬放射性核種於地表下水文地質環境中的移動。安全評估關心的時間尺度長達幾千年或百萬年，而空間尺度從處置場至近場、遠場與人類的生活圈可能也是幾十公里的尺度，當數值模式進行大長時間與大空間尺度的模擬時，由於須採用時間與空間的數值離散使得利用數值數模式面臨了模擬結果準確度與模擬與花費大量計算機的儲存空間與計算時間的重大挑戰。

文獻中已存在許多可模擬核種於地下水傳輸的解析解，但這些解析解通常只是考慮單一移流-延散方程式(advection-dispersion equation)推導而得，因此只能探討單一核種的傳輸行為。放射性核種元素會由不穩定的原子核自發性地放出射線(如α射線、β射線、γ射線等)，隨著衰變鏈(decay chain)演化，其放射性會隨之趨向穩定而減低。衰變鏈是指放射性核種序列轉變成不同產物的過程，多數核種須經歷數個不等的衰變，方能到達最終穩定的狀態。因此。放射性核種在地下水流傳輸過程中通常也會伴隨發生序列衰變反應而產生一系列的子核種產物，傳統的單一解析解無法正確探討母核種的衰變對子核種濃度的貢獻。要合理探討放射性核種衰變鏈的傳輸問題時，須同時考慮 $N$ 個移流-延散(advection-dispersion)傳輸偏微分方程式來描述 $N$ 個放射性物種的傳輸行為，這些方程式會因母核種的一階序列衰變反應對子核種濃度來源的貢獻而形成一組耦合的聯立偏微分方程組。

耦合移流-延散傳輸偏微分方程式的解析解目前大都求解一維耦合的移流-延散方程組，真實世界的問題通常需要多維度的解析解，過去雖然有少數的多維度的解析解模式存在，但這些模式的主要限制為每一物種須採用相同的遲滯因子(retardation factor)(例如：Quezada et al., 2004)。目前文獻中可考慮不同遲滯因子的多維度合的移流-延散方程組的解析解模式，只有 Sudicky et al. (2013)與(Chen et al., 2016)。Sudicky et al. (2013)的解因考慮第類邊界條件因此有質量不守恒的問題，(Chen et al., 2016)則因解為級數解因此有須耗費大量計算時間的問題。本研究的目的為發展滿足質量守恒並具快速計算能力的三維解析解模式以做為放射性核種衰變鏈遷移的快速

預測工具，並結合此快速預測工具進行劑量與風險評估應用。

## II. 主要內容

本計畫發展三維核種衰變鏈傳輸解析解模式。解析解發展考慮一組聯立的三維移流-延散方程式，解析解模式發展的示意圖如圖 1 所示，地下水系統為在 $x$ 方向為厚度為 $L$ 、 $y$ 方向厚度為 $W$ 、 $z$ 方向高度為 $H$ ，假設水流為沿 $x$ 軸方向穩態(steady state)的均勻流(uniform flow)，主要傳輸機制與過程包括移流(advection)、縱向延散(longitudinal dispersion)、水平與垂直方向的側向延散(transverse dispersion)、一階衰變反應(first-order decay reaction)與線性平衡吸附(linear adsorption)等機制過程。本計畫考慮如圖 1 的邊界污染源，假設污染源位於入流邊界處，其分布範圍如為一長方形面積，為同時描述 $N$ 個母核種與子核種的傳輸，須利用 $N$ 個移流-延散-反應傳輸偏微分方程式來描述母與子物種的傳輸行為，表示為：

$$D_x\frac{\partial^2 C_1(x,y,z,t)}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 C_1(x,y,z,t)}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 C_1(x,y,z,t)}{\partial z^2}-v\frac{\partial C_1(x,y,z,t)}{\partial x}-\lambda_1 R_1 C_1(x,y,z,t)=R_1\frac{\partial C_1(x,y,z,t)}{\partial t} \tag{1}$$

$$D_x\frac{\partial^2 C_i(x,y,z,t)}{\partial x^2}+D_y\frac{\partial^2 C_i(x,y,z,t)}{\partial y^2}+D_z\frac{\partial^2 C_i(x,y,z,t)}{\partial z^2}-v\frac{\partial C_i(x,y,z,t)}{\partial x}-\lambda_i R_i C_i(x,y,z,t)+\lambda_{i-1}R_{i-1}C_{i-1}(x,y,z,t)=R_i\frac{\partial C_i(x,y,z,t)}{\partial t} \quad i=2,....,N \tag{2}$$

此處 $C_i(x,y,z,t)$ 為第 $i$ 個核種濃度， $x$ 、 $y$ 、 $z$ 為空間座標， $t$ 為時間， $R_i$ 表第 $i$ 個核種的遲滯因子， $D_x$ 為沿水流方向的縱向延散係數(longitudinal dispersion coefficient)， $D_y$ 與 $D_z$ 為沿 $y$ 方向與 $z$ 方向之側向延散係數(transverse dispersion coefficient)， $v$ 為孔隙水流速度(pore water velocity)， $\lambda_i$ 為第 $i$ 個核種之一階衰變反應速率常數(first-order decay reaction rate constant)， $N$ 為衰變鏈的總核種數量。

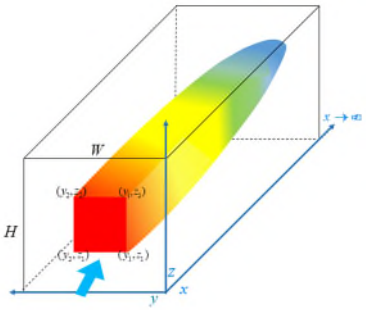



圖1 三維放射性核種衰變鏈傳輸示意圖，假設核種外釋來源位於入流處( $x=0$ ) 的紅色長方形面積。

本計畫將考慮下列的初始與邊界條件：

$$C_i(x,y,z,t=0)=0 \quad i=1,....,N \tag{3}$$

$$\phi v C_i(x=0,y,z,t)-\phi D_x\frac{\partial C_i(x=0,y,z,t)}{\partial x}=\begin{cases}\gamma_i M_i(t) & y_1\le y\le y_2,\ z_1\le z\le z_2\\ 0 & \text{elsewhere}\end{cases} \quad i=1,....,N \tag{4}$$

$$C_i(x\to 0,y,z,t)=0 \quad i=1,....,N \tag{5}$$

$$\frac{\partial C_i(x,y=0,z,t)}{\partial y}=\frac{\partial C_i(x,y=W,z,t)}{\partial y}=0 \quad i=1,....,N \tag{6}$$

$$\frac{\partial C_i(x,y,z=0,t)}{\partial z}=\frac{\partial C_i(x,y,z=H,t)}{\partial z}=0 \quad i=1,....,N \tag{7}$$

此處 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $z_1$ 與 $z_2$ 為描述長方形核種來源區的 4 個座標， $\gamma_i$ 為核種從來源區的外釋率， $M_i(t)$ 為衰變鏈第 $i$ 個核種成員於時間 $t$ 的每單位面積的核種量，可由下列方程式與邊界條件求得：

$$\frac{dM_1(t)}{dt}=-\lambda_1 M_1(t)-\gamma_1 M_1(t) \tag{8}$$

$$\frac{dM_i(t)}{dt}=\lambda_{i-1}M_{i-1}(t)-\lambda_i M_i(t)-\gamma_i M_i(t) \quad i=2,..,N \tag{9}$$

$$M_i(t=0)=M_i^0 \quad i=1,..,N \tag{10}$$

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

上述的聯立方程式與邊界條件可藉由 Lapalce 轉換與雙重有限 Fourier cosine 轉換，可得一通式表為

$$C_i(X,Y,Z,T)=L^{-1}\left[\overline{\overline{C_i}}(X,m=0,n=0,s)\right]+2\sum_{n=1}^{n=\infty}L^{-1}\left[\overline{\overline{C_i}}(X,m=0,n,s)\right]\cos(n\pi Z)+\sum_{m=1}^{m=\infty}\left\{L^{-1}\left[\overline{\overline{C_i}}(X,m,n=0,s)\right]+2\sum_{n=1}^{n=\infty}L^{-1}\left[\overline{\overline{C_i}}(X,m,n,s)\right]\cos(n\pi Z)\right\}\cos(m\pi Y) \quad i=1,..,N \tag{11}$$

此處 $X=\frac{x}{L}$ ， $Y=\frac{y}{W}$ ， $Z=\frac{z}{H}$ ， $T=\frac{vt}{L}$ 且 $\overline{\overline{C_i}}(X,m,n,s)$ 為 $C_i(X,Y,Z,T)$ 的 Lapalce 轉換與雙重有限 Fourier cosine 轉換，定義如下

$$\overline{\overline{C_i}}(X,m,n,s)=L\left\{F_{YZ}\left[\overline{C_i}(X,Y,Z,s)\right]\right\}=\int_0^\infty e^{-sT}\left\{\int_0^1\left[\int_0^1 C_i(X,Y,Z,s)\cos(m\pi Y)dY\right]\cos(n\pi Z)dZ\right\}dT \tag{12}$$

$$\overline{\overline{C_i}}(X,m,n,s)=H_i e^{\alpha_i X}+\sum_{k=1}^{k=i-1}P_{i,i-k}e^{\alpha_{i-k}X} \tag{13}$$

$$\alpha_i = \frac{Pe_x - \sqrt{{Pe_x}^2 - 4Pe_x\,\Theta_i(m,n,s)}}{2} \tag{14}$$

$$P_{i,i-1} = \begin{cases} -\dfrac{\mu_{i-1}H_{i-1}}{\dfrac{{\alpha_{i-1}}^2}{Pe_x} - \alpha_{i-1} - \Theta_i(m,n,s)} & j = i-1 \\ -\dfrac{\mu_{i-1}P_{i-1,j}}{\dfrac{{\alpha_j}^2}{Pe_x} - \alpha_j - \Theta_i(m,n,s)} & j \neq i-1 \end{cases} \tag{15}$$

$$H_i = \frac{\dfrac{\gamma_i}{v\phi}\psi(m)\zeta(n)\overline{M_i}(s) - \sum_{k=1}^{k=i-1} P_{i,i-k}\left(1 - \dfrac{\alpha_{i-k}}{Pe_x}\right)}{1 - \dfrac{\alpha_i}{Pe_x}} \tag{16}$$

$$\psi(m) = \begin{cases} Y_2 - Y_1 & m = 0 \\ \dfrac{\sin(m\pi Y_2)}{m} - \dfrac{\sin(m\pi Y_1)}{m} & m = 1,2,.. \end{cases} \tag{17}$$

$$\zeta(n) = \begin{cases} Z_2 - Z_1 & n = 0 \\ \dfrac{\sin(n\pi Y_2)}{n} - \dfrac{\sin(n\pi Z_1)}{n} & n = 1,2,.. \end{cases} \tag{18}$$

$$\overline{M_i}(s) = \frac{M_i^0}{s + \mu_i + \delta_i} + \sum_{l=1}^{l=i-1} \frac{M_{i-l}^0 \prod_{j=1}^{j=l} \mu_{i-j}}{\prod_{j=0}^{j=l} s + \mu_{i-j} + \delta_{i-j}} \tag{19}$$

$$\Theta_i(m,n,s) = sR_i + \mu_i + \frac{{\eta_y}^2 m^2\pi^2}{Pe_y} + \frac{{\eta_z}^2 n^2\pi^2}{Pe_z} \tag{20}$$

此處 $Pe_y = \dfrac{vL}{D_y}$，$Pe_y = \dfrac{vL}{D_y}$ ， ${\eta_y}^2 = \dfrac{L^2}{W^2}$，${\eta_z}^2 = \dfrac{L^2}{H^2}$

$\mu_i = \dfrac{\lambda_i L}{v}$ 且 $\delta_i = \dfrac{\gamma_i L}{v}$ 。

## III. 結果與討論

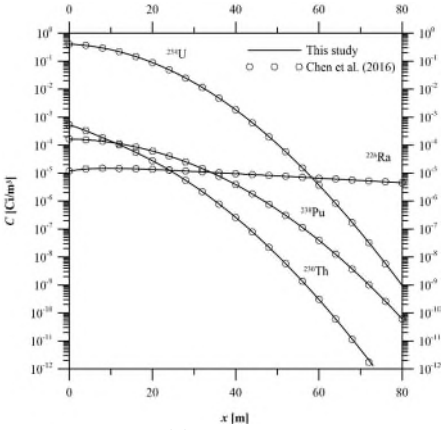
為驗證所發展解析解的正確性，本研究將與文獻中可模擬多維度放射性核種衰變鏈遷移的解析解比較以確認解的正確性。驗證所採用的解析解為 Chen et al. (2016)所發展，應用的範例主要是採用 Higashi and Pigford (1980)的模擬問題，此模擬問題考慮高放射性廢棄物處置場，假設將容納 $5\times10$ Ci/GW(e)$\cdot$yr 的 $^{238}Pu$，考慮的核種衰變鏈為 $^{238}Pu \rightarrow {}^{234}U \rightarrow {}^{230}Th \rightarrow {}^{226}Ra$，在這衰變鏈中 $^{226}Ra$ 由於其具相對較高的生物危害性與在地質介質中有較高的移動性(Higashi and Pigford, 1980)，因此為最重要的核種。van Genuchten (1985)也採用此核種衰變鏈驗證其所發展的一維傳解析解，因此假設只有 $5\times10$ Ci 的 $^{238}Pu$（$M_i^0 = 5\times10^4$ Ci/m$^2$)處置場址場，而處置場內其它 $^{234}U$、$^{230}Th$ 與 $^{226}Ra$ 的來源主要來自 $^{238}Pu$ 的衰變，模擬所採用的參數為 $v = 100$ m/year，$D_x$ =1,000 m$^2$/year，$D_y$ =100 m$^2$/year $^{238}Pu$、$^{234}U$、$^{230}Th$ 與 $^{226}Ra$ 的遲置因子分別為 $R_{238_{Pu}}$ =10,000 、 $R_{234_U}$ =14,000、$R_{230_{Th}}$ =50,000 與 $R_{226_{Ra}}$ =500，衰變常數分別為 $\lambda_{238_{Pu}}$ =0.0079 year$^{-1}$ 、 $\lambda_{234_U}$ =0.0000028year$^{-1}$ 、$\lambda_{230_{Th}}$ =0.0000087 year$^{-1}$ 與 $\lambda_{226_{Ra}}$ =0.00043 year$^{-1}$，核種外釋率為 $\gamma_{238_{Pu}}$ =0.001 year$^{-1}$ 、 $\gamma_{234_U}$ =0.001 year$^{-1}$ 、$\gamma_{230_{Th}}$ =0.001 year$^{-1}$ 與 $\gamma_{226_{Ra}}$ =0.001 year$^{-1}$。假設核種來源區的 4 個座標分別為 $y_1 = 40$ m 、 $y_2 = 60$ m 、 $z_1$=0 m 與 $z_2$=100 m，圖 2 為`$t = 1{,}000$ 年的 $^{238}Pu$、$^{234}U$、$^{230}Th$ 與 $^{226}Ra$ 4 個核種的通過邊界源中沿 $x$ 軸( $y$ =50m)與垂直 $x$ 軸( $x$ =25m )濃度的空間變比較，圖中顯示本研究解析解與 Chen et al. (2016)的解析解兩者有非常好的吻合，證明了本研究所發展的解析解的正確性。

經驗證的模式可以用來模擬三維放射性核種衰變鏈的傳輸，放射性核種的來源區位於 $x = 0\,m$ 處的 $40\,m \le y \le 60\,m$ & $40\,m \le z \le 60\,m$ ，，不同於驗證的地方是此處另外給定 $z$ 方向的側向延散係數值 $D_z$ =100 m$^2$/year，圖 3 為平行 $x-y$ 平面( $z$ =5m)的水平面的 $^{238}Pu$、$^{234}U$、$^{230}Th$ 與 $^{226}Ra$ 的濃度空間分布。從圖中可看出在污染區中心高度( $z = 50\,m$ )的水平面上有最高的濃度，$z = 60\,m$ 則污染區邊界的水平面上，因此其濃度相對較低。在 4 個放射性核種的濃度空間分布，$^{226}Ra$ 有最遠的遷移距離，$^{230}Th$ 則不容易移動，此現象主要 $^{226}Ra$ 有的遲滯因子是 500，反之 $^{230}Th$ 遲滯因子是 50,000。

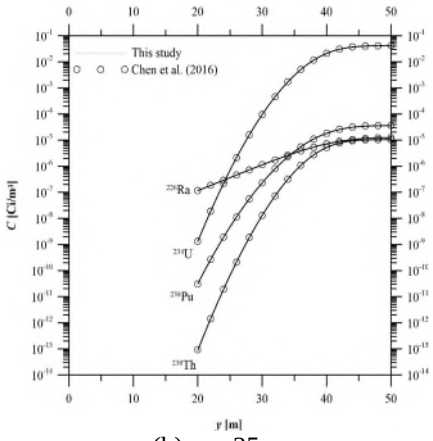
一般放射性核種對人體健康的危害影主要是人體所接受的劑量(dose)值，考慮主要的劑量的來源為飲用地下水，放射性核種的劑量估算可利用下式表示：

$$Dose_i = C_i \cdot R_i \cdot DF_i \tag{21}$$

此處 $Dose_i$ 第 i 個放射性核種劑量[Sv/year]，$C_i \cdot R_i$ 為攝入量，$C_i$ 為濃度[Bq/L]，$R_i$ 為水的攝入率(rate of intake)[L/day]，$DF_i$ 為劑量因子[Sv/ Bq]，不同核種的 $DF_i$ 可參考 ICRP(2012)。考慮水的攝入率為 1.5 liter/day，時間為 100、1,000 與 10,000 年時，於距離核種來源位置 100 m 處計算得的總劑量值分別為 $1.43\times10^{-11}$ Sv、$9.50\times10^{-3}$ Sv 與 $3.48\times10^{-1}$ Sv。

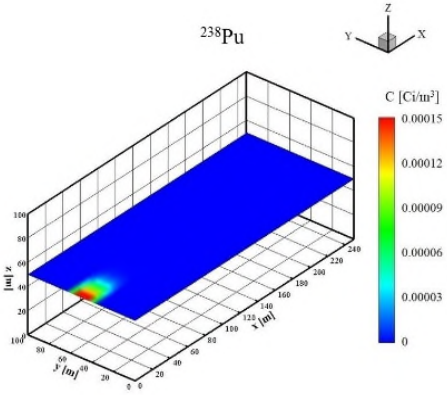


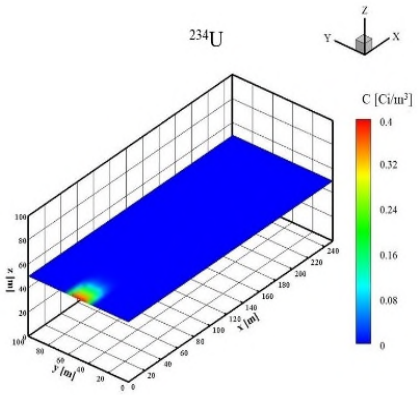

(a) $y$ =50m

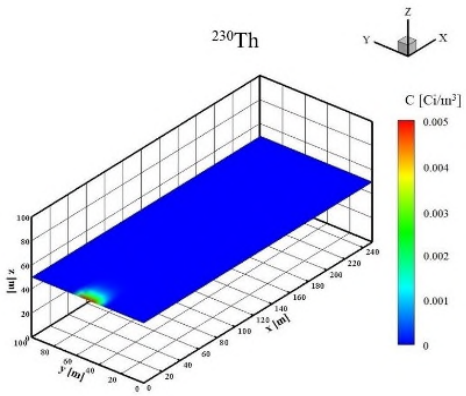



(b) $x$=25m

圖 2 本計畫的解析解與 Chen et al. (2016)有限解析解在 1,000 年的濃度剖面比較，結果顯示兩者有非常好的吻合。



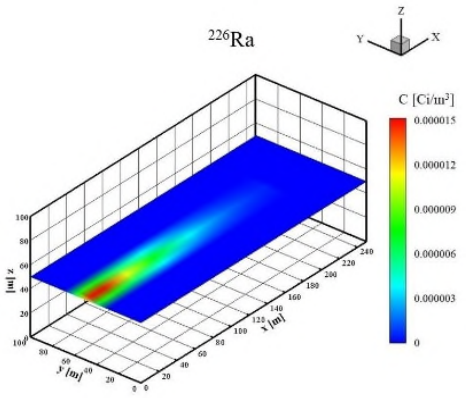




圖 3 模擬了平行 $x-y$ 平面的 $z=50\,m$ 等平面 $^{238}Pu \rightarrow {}^{234}U \rightarrow {}^{230}Th \rightarrow {}^{226}Ra$ 濃度空間分布。

## IV. 結論

本計畫發展發展三維解析解模式做為放射性核種衰變鏈遷移的快速預測工具，所得的三維解析解與文獻中二維有限域解析解比較，兩者呈現非常一致的結果，確認所發展解析解的正確性與計算 FORTRAN 程式的準確性。經驗證的解析解模式應用於 $^{238}Pu \rightarrow {}^{234}U \rightarrow {}^{230}Th \rightarrow {}^{226}Ra$ 的三維放射性核種衰變鏈的傳輸的模擬，根據解析解模擬結果計畫中進一步進行不同地下水流距輻射劑量評估。本計畫所發展的模式可以提供給政府單位做為放射性廢料處置候選場址安全評估之篩選模式。

## 參考文獻

ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.)

Chen, J.S., Liang, C.P., Liu, C.W., Li, L.Y., 2016, An analytical model for simulating two-dimensional multispecies plume migration, Hydrol. Earth Sys. Sci., 20, 733-753.

Sudicky, E.A., Hwang, H.T., Illman, W.A., Wu, Y.S., 2013, A semi-analytical solution for simulating contaminant transport subject to chain-decay reactions, J. Contam. Hydrol., 144, 20-45.

# 組建超國界後端服務保證管理機制的研析-以IAEA低濃縮鈾銀行模式為基點的多邊後端管理情境分析

# Research on the Building of Multilateral Assurance of Service for the Back End Management Mechanism: Scenario Analysis Based on the IAEA Nuclear Fuel Bank Models

計畫編號：MOST 107-NU-E-218-001-NU
計畫主持人：曾雅真
e-mail：paristwo@stust.edu.tw
執行單位：南臺科技大學

## 摘要

組建超國界核燃料循環(nuclear fuel cycle, NFC)多邊協力管理機制(multilateral synergy mechanism, MSM)，在 2017 年已見突破性的發展。國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)於 2017 年九月正式運作的 IAEA 低濃縮鈾銀行(low enriched uranium bank, IAEA LEU Bank)，結合美國現行的「核燃料供應保證」(American Assured Fuel Supply, AFS)計畫，以及俄羅斯國際鈾濃縮中心(The International Uranium Enrichment Center, IUEC)的低濃縮鈾銀行(IUEC Fuel Bank)，構成超國界前端(front-end)低濃縮鈾(low level Uranium, LEU) 供應服務保證多邊協力管理機制(multilateral synergy mechanism, MSM)的具體樣貌，並且成為組建超國界後端(back-end)MSM 供應服務保證的最佳參考範本。

本研究蒐集核燃料循環後端多邊協力機制倡議的內容與主張，並以現有三種低濃縮鈾銀行的運作成果，匯整出核燃料循環前端服務保證多邊協力機制(MSM)的運作模型，並且運用此項模型，推演出後端服務保證多邊協力機制的四種情境，分別是供應方後端服務保證情境 X1，多國組合實體後端服務保證情境 X2.1 與 X2.2，以及由 IAEA(或區域組織)主導的後端服務保證情境 X3。

研究發現，國際強權與 IAEA 仍不懈推動國際/區域後端多邊協力機制的發展。此外，促成 X 1 情境與 X 2.1 情境，應是對我國的最有利情境。相對地，如果任由 IAEA 或區域組織推動 X 2.2 或 X3 情境，則是對我國最為不利的情境。第三，與亞太夥伴國家同步提升我國的核安全、核安保暨核運輸等各種安全規範，乃是為我國鋪陳未來順利參與國際/區域後端多邊協力機制的基石。第四，支持核不擴散機制精神，遵循核保防規範，配合 IAEA 核保防檢查，維持良好的核保防紀錄，乃是爭取夥伴國支持，順利參與國際/區域後端多邊協力機制的前提。最後，為因應國際/區域後端多邊協力機制的可能發展情境，建議我國可以自決策面、法規面、監管機關效能表現與人物力資源等面向，採行各項配套措施。

關鍵詞：核燃料循環，後端，低濃縮鈾銀行，多邊協力管理機制，服務保證，情境分析。

## Abstract

The establishment of nuclear fuel cycle multilateral synergy mechanism (MSM) has been breakthrough in 2017. The IAEA Low Enriched uranium bank (IAEA LEU Bank), which was owned and operated by the International Atomic Energy Agency (IAEA), combines with the United States' Assured Fuel Supply (American Assured Fuel Supply, AFS), and the International Uranium Enrichment Center (IUUC)'s IUEC Fuel Bank, which all constitutes a front-end low-enriched uranium (Low level Uranium, LEU) MSM) and is the best reference model for establishing a back-end MSM of assurance of supply.

This research project firstly collected the content and proposition of the nuclear fuel cycle back-end MSM initiatives. The operational models of the nuclear fuel cycle front-end MSM of assurance of service was produced with the existing profiles of the three LEU banks. With the front-end MSM models, the research project deduced the four scenarios of the back-end MSM of assurance of service, namely the back-end suppliers' additional assurances of service model X1, the back-end International consortium of governments' assurances of service model X 2.1 and X2.2, and the IAEA (or international regional organization) dominated back-end assurances of service model X3.

The study found firstly that Great Powers and the IAEA are still making unremitting efforts to promote the development of international/regional back-end MSM. In addition, the development of the X 1 model and the X 2.1 model would be the most favorable condition for Taiwan's participation to the back-end MSM. In contrast, if the IAEA or regional organization successfully promoted the X 2.2 or X3 model, it would be the most unfavorable situation for Taiwan. Third, the simultaneous improvement of nuclear safety, nuclear security and nuclear transportation safety standards with Asia-Pacific partner countries is the cornerstone for Taiwan's participation in the international/regional back-end MSM. Fourth, supporting the spirit of the nuclear non-proliferation mechanism, following the nuclear safeguard norms, coordinating with the IAEA nuclear safeguard inspection, and maintaining a good nuclear safeguard record will be Taiwan's premise for acquiring partner countries support

for the successful participation in the international/regional back-end MSM. Finally, it is suggested that Taiwan should take various measures in terms of the decision-making, legislative, performance of the regulatory authorities, and personnel resources aspects.

Keywords: Nuclear fuel cycle, back end, LEU Bank, multilateral synergy mechanism, assurance of services, scenario analysis.

## I. 前言

國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)組建超國界核燃料循環(nuclear fuel cycle, NFC)多邊協力管理機制(multilateral synergy mechanism, MSM)，在 2017 年已見突破性的發展。於 2017 年九月正式運作的 IAEA 低濃縮鈾銀行(low enriched uranium bank, IAEA LEU Bank)，結合美國現行的「核燃料供應保證」(American Assured Fuel Supply, AFS)計畫，以及俄羅斯國際鈾濃縮中心(The International Uranium Enrichment Center, IUEC)的低濃縮鈾銀行(IUEC Fuel Bank)，構成超國界前端(front-end)低濃縮鈾(low level Uranium, LEU) MSM 供應服務保證(supply assurance)的具體樣貌，並且成為組建超國界後端(back-end)MSM 供應服務保證的最佳參考範本。

近年來國際社會雨後春筍般湧現各種用過核燃料暨放射性廢物(spent fuel and radioactive waste, SFRW)多邊協力安全管理倡議，各項倡議已從初步的概念討論，推展到制度建構的規範創新階段。其中核威脅倡議(Nuclear Threat Initiative)組織的「用過核燃料發展戰略」(Developing Spent Fuel Strategies, DSFS)倡議，更於 2016 年的夏威夷工作坊會議(workshop)提及，或可藉由俄羅斯 IUEC 低濃縮鈾銀行的運作模式，作為未來建構亞太後端多邊協力管理機制的參考(NTI, 2016)。

依據台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置計畫書」(修訂二版)的規劃，若境外處置各方面條件均已成熟可行，則可作為境內處置的平行替代方案(台灣電力公司，2016: 2)。其次，若境內處置計畫無法按預定期程順利推動，並且境外處置亦未可行時，則規劃的應變方案包括，在核能電廠增建貯存設施，以因應電廠除役所需的貯存空間；或是興建集中貯存設施以為因應(台灣電力公司，2016: 2)。足見境外處置與境內處置兩者，乃為相互平行的替代方案，我國對於跨界合作最終處置用過核燃料暨放射性廢物 SFRW 的相關發展，仍有投以關注的必要性。

核燃料循環前端 MSM 的制度運作成果，已為後端的 MSM 倡議，建構最佳的制度創建(institutional building)參考架構。有鑑於此，本研究旨在前端 MSM 的現有基礎上，以三種低濃縮鈾銀行的運作態樣作為參考樣本，參照現有各種後端的 MSM 倡議，運用情境規劃分析法，前瞻勾勒國際/區域後端 MSM 運作的各種可能態樣。本計畫的研究發現，除可補充超國界後端 MSM 的相關學理論述外，更可以作為我國參與國際或區域後端 MSM，藉以安全管理我國 SFRW 的重要決策參考。

## II. 主要內容

IAEA在二十一世紀初期擘劃多邊管理核燃料循環的概念架構。2003年，IAEA秘書長巴拉迪(Mohamed ElBaradei)提出管制全球核燃料循環的建議(ElBaradei, 2003)，並於2004年6月，成立專家小組，研究多邊管理民用核燃料循環前端(front end)與後端(back end)的各種可能安排。專家小組於2005年提出報告以為，核燃料循環的多邊化管理，可以有三種可能的安排：第一種，是不涉及設施所有權的服務保證(assurance of services)；第二種，是將現有國家設施轉換為多邊設施；第三種，是建造全新的聯合設施(IAEA, 2005: 47-48)。

截至目前，有關核燃料循環前端的多邊協力機制，已見初步成果，分別是由供應方(supplier)，多國組合實體(International consortium of governments) ，或是由IAEA所提供的服務保證 (IAEA, 2005: 47-48)。供應方的額外服務保證，主要是透過長期契約或具備優惠誘因的契約進行。此種安排意謂，額外服務保證的供應國，有必要透過內國修法程序，取得事先同意 (prior consent conditions)供應外國客戶額外服務保證的國家法律與國際承諾(IAEA, 2005: 47)。多國組合實體服務保證，可以透過實質或虛擬設施的型式進行，並得依據國際協議，實際擁有放射性實物的所有權。由IAEA提供的服務保證意謂，(1) IAEA可以實體或是虛擬地擁有放射性實物的所有權並得進行分配，或者(2)IAEA可與服務供應國簽署協議，並在IAEA主導下，由服務供應國提供實物或供應保證服務(IAEA, 2005: 48)。

目前涉及三種核燃料循環前端服務保證的多邊化安排，均已先後成型，而涉及後端各種中期貯存與最終處置服務的各種多邊化倡議，也如雨後春筍般出現，不過皆尚未有具體的成果(請參閱表一)。

表一 核燃料循環的多邊化安排

| 模式 | | 類型 | 前端成果 | 後端成果 |
|---|---|---|---|---|
| I | 不涉及設施所有權的服務保證 | 供應方提供額外的服務保證 | AFS | 尚無 |
| | | 國際政府組合實體的服務保證 | IUEC核燃料銀行 | 尚無 |
| | | IAEA 服務保證 | IAEA LEU銀行 | 尚無 |
| II | 轉換現有國家設施為多國設施 | | 尚無 | 尚無 |
| III | 建造新的多邊聯合設施 | | 尚無 | 尚無 |

資料來源：IAEA, 2005; IUEC, 2010; IAEA, 2017b.；計畫主持人自行研究整理。

國際社會對於核燃料循環後端合作倡議約計有八項途徑。分別是 IAEA「國際核反應器及核燃料循環創新計畫」(The International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, INPRO)架構下，自 2015 年開始籌畫的「核燃料循環後端合作途徑」(Cooperative Approaches to the Back End of the Nuclear Fuel Cycle)協作研究計畫(Collaborative Project)。美國於 2010 年成立的國際核能合作框架(International Framework for Nuclear Energy Cooperation, IFNEC)。EURATOM 執行委員會(Commission)於 2015 年開展「歐洲放射性廢物最終處置聯合計畫」(Joint Programming on Radioactive Waste Disposal, JOPRAD)。部份歐洲國家自 2009 年推

動成立「歐洲處置庫發展組織」(European Repository Development Organization, ERDO)。美國智庫文理學院(American Academy for Arts and Sciences, AAAS)於2008 年提出全球核未來(Global Nuclear Future, GNF)倡議。美國智庫核威脅倡議(Nuclear Threat Initiative, NTI)組織，自 2013 年啟動的「用過核燃料發展戰略」(Developing Spent Fuel Strategies, DSFS)倡議。非商業組織「區域與國際地下貯存協會」(Association for Regional and International Underground Storage, ARIUS)自 2002 年後的宣傳促成。以及澳洲南澳地方政府於2016 年建議在南澳地區，設立容納他國 SFRW 的中期貯存或最終處置設施的努力。(請參閱表二)

表二 現有國際後端多邊協力機制(MSM)的倡議成果

| 倡議名稱 | 倡議內容 | MSM 的建議型態 | 進展成果 |
|---|---|---|---|
| IAEA/INPRO | 探索建立後端管理機制 | 探索中 | 成立「核燃料循環的後端合作途徑」協作研究計畫(Collaborative Project)，定期集會研商。 |
| IFNEC/CFS | 建立國際後端處置設施 | 多國組合實體服務保證 | 定期集會觀念溝通 |
| EURATOM/JOPRAD | 支援歐盟國家處置技術研發 | 無 | 研究計畫執行中 |
| ERDO-WG | 建立歐洲共享處置設施 | 多國組合實體服務保證 | 定期集會觀念溝通 |
| AAAS/GNF | 建立東亞多國中期貯存設施 | 多國組合實體服務保證 | 觀念溝通與討論，出版研究成果 |
| NTI/DSFS | 建立亞太最終處置機制 | 多國組合實體服務保證 | 定期集會觀念溝通 |
| ARIUS | 呼籲建立多國後端合作設施 | 無 | 宣稱後端多邊合作 |
| 南澳政府 | 在南澳地方設立多國使用中期貯存暨最終處置設施 | 多國組合實體服務保證/供應方的額外服務保證 | 被否決 |

參考資料：計畫主持人自行研究整理。

## 一、核燃料循環前端多邊服務保證機制的運作

美國的 AFS 計畫，俄羅斯的 IUEC 低濃縮鈾銀行，以及 IAEA 主導的低濃縮鈾銀行，分別構成前端 MSM 供應方額外服務保證模式、多國組合實體服務保證模式，以及國際組織服務保證模式。(請參閱表三)

表三 現有國際低濃縮鈾銀行運作比較表

| | 美國核燃料儲備庫 | 俄羅斯 IUEC 低濃縮鈾銀行 | IAEA 低濃縮鈾銀行 |
|---|---|---|---|
| 英文名稱 | American Assured Fuel Supply (AFS) | Fuel Bank of the International Uranium Enrichment Centre (IUEC Fuel Bank) | IAEA Low Enriched Uranium Bank (IAEA LEU Bank) |
| 法律地位 | 美國政府機構 | 多國公司公司法人 | 國際組織下的實體法人 |
| 廠址 | 美國南卡羅南納州哥倫比亞鎮的西屋公司貯存庫(Westinghouse's storage site in Columbia, South Carolina) | 俄羅斯 Angarsk | 哈薩克 Ulba Metallurgical Plant |
| 擁有方 | 美國 | 俄羅斯 | IAEA |
| 啟用時間 | 2011 | 2010 | 2017 |
| LEU 所有權 | 美國 | 俄羅斯 | IAEA |
| LEU 儲量 | 230 噸(4.95%濃度)UF6 | 120 噸(2-4.95%濃度)UF6 | 90 噸(4.95%濃度)UF6 |
| 儲放 LEU 的成本承擔方 | 美國 | 俄羅斯 | 哈薩克 |
| 經費資助方 | 美國 | 俄羅斯、哈薩克、烏克蘭與亞美尼亞四國計出資 2600 萬盧布(約當時的 100 萬美元，如今則約當 40 萬美元)。 | NTI、美國、挪威、阿拉伯聯合大公國、歐盟、科威特與哈薩克，計出資 1.5 億美元。 |
| 供應前提 | 滿足 IAEA 保防規範，符合美國核管制機構核發出口執照要件 | 滿足 IAEA 保防規範，不得用於軍事用途，不得再出口與濃化。 | 滿足 IAEA 保防規範，不得用於軍事用途，不得再出口與濃化。 |
| 供應價格 | 市場價格 | 市場價格 | 市場價格 |
| 運作依據 | 美國的內國法規 | IAEA 與俄羅斯的雙邊協議 | IAEA 與哈薩克的雙邊協議 |
| LEU 申請資格 | 美國國內或外國用戶 | IAEA 非核武會員國 | IAEA 會員國 |
| 申請條件 | 因市場扭亂無法取得低濃縮鈾，且窮盡市場取得管道。 | 因技術或商業無關的市場扭亂，故而無法取得低濃縮鈾。 | 因為市場扭亂，故而無法取得低濃縮鈾。 |
| 申請方與 IAEA 簽署 LEU 供應協議 | 無 | 定型化協議 | 定型化協議 |

資料來源：GPO, 2011; GPO, 2013; IAEA, 2010c; IAEA, 2011; IUEC, 2010a; IAEA, 2017b; IAEA, 2017c. Yudin, 2011b.；計畫主持人自行分析整理

這三項已成型的前端 MSM 服務保證模式，是本研究後端 MSM 服務保證運作模式的參考雛型。

## 二、建立核燃料循環多邊服務保證機制的參考模型

自服務保證供應人的觀點出發，美國 AFS 計畫，俄羅斯 IUEC 低濃縮鈾銀行，以及 IAEA 低濃縮鈾銀行，分別代表前端三種不同類型的多邊協力機制。由此建立三種可供後端 MSM 參考的運作模型，分別是：供應方服務保證模式、多國組合實體服務保證模式，以及 IAEA 服務保證模式。各項模式分別包括下列四項情境變數：(1)設施所在國的選定，(2) 設施設立的國際協定，(3)消費方服務保證申請，以及(4)多邊化管理涉及的規範內容。

### （一）供應方服務保證模式

在此模式下，服務保證供應國自願開放其設施，為其它國家或消費區域提供服務。

**A. 設施所在國的選定**

在供應方服務保證模式下，服務設施所在國，係由服務保證供應國自願提供。

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：無或有限。
2. 選定多邊服務設施所在國的法源：依據服務供應國的內國法。
3. 多邊服務設施所在國的選擇條件：依據服務供應國的內國法。
4. 多邊服務設施所在國的遴選程序：依據服務供應國的內國法。
5. 地主國法規的調合與適用：依據服務供應國的內國法，無涉法律調合問題。
6. 地主國公眾意見參與規模、方式、程序與對象：依據服務供應國的內國法規定。
7. 對地主國核管理策略的衝擊：無或十分有限。
8. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：無或十分有限。
9. 對地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：無。

**B. 設施設立的國際協定**

供應國單方向世界各國提供服務保證，故而不涉及服務保證設施的國際協定。

**C. 消費方服務保證申請**

由於申請暨取得服務條件，完全是依據服務供應國單方的內國法所規定，故而：

1. 申請服務資格：由服務供應國的審核機關決定，基本上不限定需是主權國家或是 IAEA 會員國，一般外國法人亦可經由服務供應國的代理人提出申請。
2. 申請服務要件：無法在消費國內國或國際市場取得 SFRW 中期貯存或最終處置的服務，且無違反核保防前例。
3. 申請服務程序：由服務供應國的法人代理消費國，向服務供應國審核機關提出申請，並經其審核。
4. 申請服務之附加要求：不得影響服務供應國本身的後端服務需求。
5. 申請服務的計價：市場價格。

6. 申請服務的數量限制：無或有限。

**D. 多邊化管理涉及的規範內容**

由代理消費國提出申請的服務供應法人，承擔運輸，保險，安全暨賠償責任(liability)。

1. 核安全相關規範：服務供應國的核安全規範。
2. 核保安相關規範；服務供應國的核保安規範。
3. 核保防相關規範；服務供應國的核保防規範。
4. 核賠償相關規範：服務供應國的核民事賠償規範。
5. 核運輸相關規範：服務供應國的核運輸規範，以及跨國運輸核材料規範。

**（二）多國組合實體服務保證模式**

多國組合實體服務保證模式乃是多個夥伴國家，在履行核不擴散承諾的前提下，自願在其領土內放棄敏感核技術的開發暨建立相關設施，並且共同透過已經擁有相關技術、資材暨設施的某個核心國家，向其他參與國與消費國提供服務保證。各夥伴參與國在核心國家境內，簽署多國組合實體協議，共同設立多國出資的企業實體，並依據多國組合企業實體章程進行運作，各自選派執行單位(excutive body)與授權單位(authorirized initiating body)，組成董事會，選派執行長，綜理多國組合企業實體的實際營運。

在多國組合實體服務保證模式下，擬取得 LEU 服務保證的消費國，(1)首先必須通過 IAEA 的資格審查，(2)與 IAEA 簽署定型化契約，(3)再由 IAEA 向多國組合實體的設施所在國提出申請，(4)最後由多國組合實體透過 IAEA 向消費國提供服務。

**A. 多邊設施地主國的選定**

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：服務設施所在國，主動呼應 IAEA 核燃料環多邊化倡議，籌組多國組合實體，並與 IAEA 談判，設立服務機制。
2. 多邊設施地主國的選擇條件：依據多邊設施地主國本身意願為主。
3. 選定多邊設施地主國的程序：依據多國組合實體設立協議，決定設施所在地。
4. 地主國法規的調合與適用：無影響。依據多邊設施地主國的內國法，進行各項監管暨運作管理，但需接受 IAEA 核保防檢查。
5. 地主國公眾意見參與規模、方式、程序與對象：據多邊設施地主國的內國法，進行公眾意見參與。
6. 對地主國核管理策略的衝擊：受到多國組合實體設立條約的額外約束。
7. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：需另外依據多國組合實體設立條約，進行各種核安全、核安保暨核保防監管，以及 IAEA 核保防檢查。
8. 對地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：無影響。多邊設施地主國擁有各種技術與人力資源，但禁止向多國組合實體的一般夥伴國或其他第三方轉移相關技術。

**B. 設施設立的國際協定**

1. 談判方的設定：由多國組合實體的設施所在國邀請夥伴國家加入，加入夥伴國需符合特定條件，例如遵守核不擴散條約規範，自願在其領土內放棄敏感核技術的開發暨建立相關設施等等。
2. 談判項目：多國組合實體設立條約，多國組合實體公司營運章程。
3. 國際協定締約方的權利義務：多國組合實體設立條約要求參與國需遵守核不擴散條約規範，認同核燃料循環多邊化精神，參與國有出資義務，並擁有參與股東大會、董事會與分享多國組合實體營運盈虧的權利。
4. 出資安排：多國組合實體的設施所在國佔有超過 50%以上股份多數，其他參與國各擁有 10%股份。
5. 服務項目的設計：IAEA 要求下，提供核燃料循環服務。
6. 貯存或處置設施的研究、設計、建造與經營策略：由多國組合實體的設施所在國主導。
7. 多邊設施管理機構的設計與運作：設立股東大會與董事會，實際營運由多邊設施地主國國籍的執行長主持。
8. 締約方在多邊設施的決策份額：依據持股份額而定，基本上是由多國組合實體所在地國家所主導。
9. 多邊設施財務盈虧安排：依多國公司註冊國的公司法規定。
10. 貯存或是最終處置設施的貯放規模：多國組合實體決定。
11. 退出合作機制的懲處安排：可以退出，但不影響已執行服務的完成。
12. 後端合作的時間效期安排：十年為期，可無限延展。

**C. 消費方服務保證申請**

1. 申請服務資格：非夥伴國需為 IAEA 會員，且經 IAEA 審核後，由 IAEA 代表非夥伴消費國提出服務申請；IAEA 非夥伴國須與 IAEA 簽署服務契約。
2. 申請服務要件：滿足核不擴散與核保防要求，且經 IAEA 審核批准。
3. 申請服務程序：非夥伴消費國經 IAEA 審核後，由 IAEA 向多國組合實體提出服務申請，由多邊設施地主國核發相關許可執照，執行進出口核材料運輸作業，由多邊設施地主國提供服務。
4. 申請服務之附加要求：IAEA 主導的各種可能附加要求。
5. 申請服務的計價：國際市場價格。
6. 申請服務的數量限制：經 IAEA 審核服務數量。

**D. 多邊管理涉及的規範內容**

1. 核安全相關規範：IAEA 與多邊設施地主國所簽署的核安全協定暨多邊設施地主國的內國法。
2. 核安保相關規範：IAEA 與多邊設施地主國所簽

署的核安保協定暨多邊設施地主國的內國法。
3. 核保防相關規範：IAEA 與多邊設施地主國所簽署的核保防協定暨 IAEA 核保防檢查。
4. 核賠償相關規範： IAEA 與多邊設施地主國雙邊協定中所列舉的第三方民事賠償國際規約。
5. 核運輸相關規範：IAEA 相關規約暨多邊設施地主國的內國法規範。
6. 涉及的第三方責任(third parties liability) 相關規範：IAEA 與多邊設施地主國所簽署的雙邊協定所列舉的相關第三方民事賠償國際規約。

### (三) IAEA 服務保證模式

在 IAEA 主導的服務保證模式下，新建的多邊服務設施雖位於地主國境內，但依據 IAEA 與設施地主國的雙邊協議，有關多邊服務設施與 LEU 的產權，以及多邊設施的營運，以及是否提供消費國服務保證的審批權，皆由 IAEA 掌理。

**A. 多邊設施地主國的選定**

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：IAEA 完全主導。IAEA 會員向 IAEA 提出在其境內設立多邊服務設施的請求與計畫書，經 IAEA 審核後同意後，由 IAEA 與多邊設施地主國簽署雙邊協議，規範 IAEA、該多邊服務設施暨地主國的權利義務。
2. 選定多邊設施地主國的法源：IAEA 理事會決議。
3. 多邊設施地主國的選擇條件：IAEA 理事會設立決議。其考慮項目主要包括地主國為非核武國家，已擁有完善的相關核設施，具備良好的核安全、核保防暨核安保表現，對 IAEA 的人員與設備物料，提供人身保護、治安、金融財務、出入境交通運輸、法律豁免等各種國際組織享有的便利。
4. 選定多邊設施地主國的程序：IAEA 理事會決議公告徵求，經 IAEA 會員國提出申請，經 IAEA 理事會審核後選定，並由 IAEA 與地主國談判設施協議，以及協議生效後多邊設施的啟用與運作。
5. 地主國法規的調合與適用：需完全遵循 IAEA 發佈的核安全、核保防暨核安保等各項規範標準，並依 IAEA 的規範標準，適時修正地主國的內國法，俾能完全契合 IAEA 之各項規範。
6. 地主國公眾意見參與規模、方式、程序與對象：依地主國內國法的規定執行。
7. 對地主國核管理策略的衝擊：需完全遵循 IAEA 核安全、核保防暨核安保等各項規範標準。
8. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：需完全遵循 IAEA 核安全、核保防暨核安保等各項規範標準。
9. 對地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：無。

**B. 設立多邊設施之相關國際協定**

1. 談判方的設定：已通過 IAEA 審核通過的多邊設施地主國。
2. 談判項目：IAEA 與設施地主的雙邊協議。內容包括多邊設施的所有權、多邊設施營運的財務分擔，多國公司暨 IAEA 人員的不可侵犯特權，金融便利暨稅捐豁免，地主國對設施營運基礎設施暨相關服務的後勤支援，通訊暨運輸，人員、文書、行李、貨物的特權與豁免，多邊設施暨其管理單位的保護，核安全、核安保暨核保防遵循，緊急應變措施，核事故責任暨賠償，爭端解決與協議的效期等。
3. 國際協定的締約方的權利義務：依協定內容規範。
4. 出資安排：地主國收取象徵性費用(1 歐元)，多邊設施的營運經費由各國捐資。
5. 服務項目的設計：由 IAEA(或區域組織)決定服務項目。
6. 貯存或處置設施的研究、設計、建造與經營策略：地主國提供已有的核設施供 IAEA(或區域組織)決選，營運完全由 IAEA 主導。
7. 多邊設施管理機構的設計與運作：由 IAEA 完全擁有、規畫、設計暨暨管理。
8. 締約方在多邊設施的決策份額：無。
9. 多邊設施財務盈虧安排：IAEA 承擔。
10. 貯存或是最終處置設施的貯放規模：IAEA 決定。
11. 退出合作機制的懲處安排：無。
12. 後端合作的時間效期安排：設立協議的有效期為十年，十年到期後如締約方無異議，則自動延展十年。

**C. 參與方服務保證申請**

1. 服務契約：接受國必須與 IAEA 簽署定型化消費契約。
2. 申請服務資格：需為 IAEA 會員。
3. 申請服務要件：具備核不擴散與核保防的良好表現，不得再轉化核物料供作軍事用途。
4. 申請服務程序：向 IAEA 提出申請，並簽署服務契約，先付款後再執行服務項目。
5. 申請服務之附加要求：依 IAEA 要求可附加其他要求。
6. 申請服務的計價：國際市場價格。
7. 申請服務的數量限制：由 IAEA 決定。

**D. 多邊管理涉及的規範內容**

1. 核安全相關規範：《國際核安全公約》、《聯合公約》暨 IAEA 核安全規範標準。
2. 核安保相關規範：《核材料實物保護公約》暨 IAEA 核安保規範標準。
3. 核保防相關規範；核不擴散條約、各國與 IAEA 簽署的核保防協議暨 IAEA 核保防規範。
4. 核賠償相關規範：《關於核損害民事責任的維也納公約》暨其修正議定書，或區域組織的其它規定。
5. 核運輸相關規範：IAEA(或區域/國際組織)運輸規範標準。
6. 涉及的第三方責任(third parties liability)相關規

範：《關於核損害民事責任的維也納公約》及其修正議定書，或區域組織的其它規定。

## 三、核燃料循環後端多邊服務保證機制之運作情境

透過本計畫前述建立的服務保證多邊協力機制參考模型，本研究計畫推演出下列三種後端服務保證多邊協力機制的可能運作情境：(1)由供應方提供的 X1 供應方後端額外服務保證情境，(2)由多國政府構成的 X2 多國組合實體後端服務保證情境，以及(3)由 IAEA 主導的 X3 IAEA 或區域組織後端服務保證情境。(請參閱表四)

表四：核燃料循環後端多邊化服務保證情境模擬

| | 前端參考情境 | 後端情境模擬 | |
|---|---|---|---|
| I. 供應方額外服務保證模式 | AFS | X1 供應方後端額外服務保證 | |
| II. 多國組合實體服務保證模式 | IUEC Fuel Bank | X2 多國組合實體後端服務保證 | X2.1 (對夥伴國的後端多國組合實體服務) |
| | | | X2.2 (對非夥伴國之其他IAEA會員所提供的後端多國組合實體服務) |
| III. IAEA服務保證模式 | IAEA LEU Bank | X3 IAEA或區域組織後端服務保證 | |

資料來源：計畫主持人研究整理分析。

### (一) X1 情境(供應方後端額外服務保證)

**A. 後端設施地主國的選定**

在 X1 情境下，服務設施所在國，係由服務保證供應國自願提供本國設施，並向其他國家或公司法人提供後端服務並收取費用。

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：無或十分有限。
2. 多邊服務設施所在國的選擇條件：依據服務供應國的內國法。
3. 多邊服務設施所在國的遴選程序：依據服務供應國的內國法。
4. 地主國法規的調合與適用：後端服務供應國的內國法，無涉法律調合問題。
5. 地主國公眾意見參與規模、方式、程序與對象：依據後端服務供應國的內國法規定。
6. 對地主國核管理策略的衝擊：後端服務供應國為地主國，應開放境外產出的用過核燃料暨放射性廢物進口到本國境內中期貯存或最後處置設施進行儲置。
7. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：無或十分有限。
8. 地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：後端服務供應國為地主國，無涉向消費國提供技術回饋問題。

**B. 後端設施設立的國際協定**

由於供應國單方向世界各國提供服務保證，故而不涉及服務保證設施的國際協定。

**C. 消費方服務保證申請**

可直接由後端服務供應國監管機關暨服務營運機關，公告申請程序與文件格式，由後端服務供應國監管機關暨會同其他必要單位，審核消費國的申請需求，並核發消費國 SFRW 的進口許可執照。由於申請暨取得服務條件，完全是依據後端服務供應國單方的內國法所規定，故而：

1. 申請消費服務資格：由服務供應國的審核機關決定，基本上不限定需是主權國家或是 IAEA(或區域組織)會員國，一般外國法人亦可經後端服務供應國的代理人提出申請。
2. 申請消費服務要件：無違反核保防暨核不擴散案例，或無法在消費國內國或國際市場取得 SFRW 後端中期貯存或最終處置的服務。
3. 申請消費服務程序：由後端服務供應國的法人代理消費國，向後端服務供應國審核機關提出申請，並經其審核。
4. 申請消費服務的附加要求：不得影響後端服務供應國本身的後端服務需求。
5. 申請消費服務的計價：市場價格。
6. 申請消費服務的數量限制：不確定。

**D. 多邊化管理涉及的規範內容**

由代理消費國提出申請的服務供應國法人，承擔運輸，保險，安全暨賠償責任(liability)。

6. 核安全相關規範：後端服務供應國的核安全規範。
7. 核保安相關規範；後端服務供應國的核保安規範。
8. 核保防相關規範；後端服務供應國的核保防規範。
9. 核賠償相關規範：後端服務供應國的核民事賠償規範。
10. 核運輸相關規範：後端服務供應國的核運輸規範，以及跨國運輸核材料規範。

### (二) X2 情境(多國組合實體後端服務保證)

X2 情境下有兩種次情境，分別是多國組合實體對參與夥伴國提供的 X2.1 後端服務保證，以及對非夥伴國，且經 IAEA(或區域組織)認可之其他 IAEA(或區域組織)會員提供的 X2.2 後端服務保證。

**X2. 情境 (多國組合實體對夥伴國的後端服務保證)**

在此情境下，多國組合實體服務保證模式乃是多個國家所組成，多國組合實體的一個夥伴國或多個夥伴國，在其境內設立特定服務品項、內容與規格的後端設施，對全體夥伴國提供後端服務。參與夥伴國在履行核不擴散承諾的前提下，自願放棄(或無法)在其領土內建造或營運後端中期貯存或最終處置設施，故而將其產出的 SFRW 中期貯存或最終處置於已經擁有相關技術、資材或設施的其他多邊設施地主國，由地主國向其他夥伴國提供後端服務保證。各夥伴參與國在核心國家境內，簽署多國組合實體協議，共同設立多國出資的企業實體，並依據多國組合企業實體章程進行運作，各自選派執行單位 (excutive body) 與授權單位 (authorirized initiating body)，組成董事會，選派執行長，綜理多國組合企業實體的實際營運。

**A. 後端設施地主國的選定**

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：後端服務設施所在國，主動呼應 IAEA(或區域組織)核燃料環多邊化倡議，籌組多國組合實體，對夥伴國提供後端服務。
2. 選定多邊設施地主國的法源：依據多邊設施地主國的內國法，選定、監管暨營運相關服務設施，多國公司的註冊暨營運依據多國公司註冊國的內國法。
3. 多邊設施地主國的選擇條件：由多國組合實體的後端設施所在國決定。
4. 選定多邊設施地主國的程序：依據多國組合實體設立協議的規定，決定設施所在國。
5. 地主國法規的調合與適用：無影響。依據多國組合實體後端設施所在國的內國法，進行各項監管暨運作管理，無法規調合與適用的問題，但需接受 IAEA 核保防檢查。
6. 地主國公眾意見參與規模、方式、程序與對象：據多國組合實體後端設施所在國的內國法，進行公眾意見參與。
7. 對地主國核管理策略的衝擊：受到多國組合實體的設立協議的約束，且需開放境外產出的 SFRW，進入本國境內中期貯存或最後處置設施進行最終處置。
8. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：受到多國組合實體設立協議的約束，須進行各種核安全、核安保暨核保防監管，且需接受 IAEA 核保防檢查。
9. 對地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：無影響。多國組合實體後端設施所在國擁有各種技術與人力資源，但禁止向多國組合實體的其他夥伴國或其他第三方轉移相關技術。

**B. 後端設施設立的國際協定**

1. 談判方的設定：由後端多邊設施地主國邀請夥伴國家加入，加入夥伴國需符合特定條件，例如遵守核不擴散條約規範，(無法或)自願在其領土內開發暨建立相關設施，並放棄研發並擁有可能造成核擴散風險的敏感性技術。
2. 談判項目：多國組合實體設立協議，多國組合實體公司營運章程。
3. 國際協定的締約方的權利義務：多國組合實體設立條約要求參與國需遵守核不擴散條約規範，認同核燃料循環多邊化精神，參與國有出資義務，並擁有參與股東大會、董事會與分享多國組合實體營運盈虧的權利。
4. 出資安排：多國組合實體的後端設施所在國國佔有超過 50%以上股份多數，其他參與國各擁有 10%股份。
5. 服務項目的設計：提供核燃料循環後端的中期貯存或最後處置服務。
6. 貯存或處置設施的研究、設計、建造與經營策略：由多國組合實體後端設施所在國主導。
7. 多邊設施管理機構的設計與運作：設立股東大會與董事會，實際營運由多國組合實體後端設施所在國國籍的執行長主持。
8. 締約方在多邊設施的決策份額：依據持股份額而定，基本上是由多國組合實體後端設施所在國所主導。
9. 多邊設施財務盈虧安排：依多國公司註冊國之內國法的規定。
10. 貯存或是最終處置設施的貯放規模：由多國組合實體後端設施所在國決定。
11. 退出合作機制的懲處安排：可以退出，但不影響已執行服務的完成。
12. 後端合作的時間效期安排：十年為期，可無限延展。

**C. 消費方的服務保證申請**

1. 申請消費服務資格：需為多國組合實體夥伴國。
2. 申請消費服務要件：滿足核不擴散與核保防要求。
3. 申請消費服務程序：一般夥伴國向多國組合實體提出服務申請需求，多國組合實體後端設施所在國核發相關許可執照，執行進出口核材料運輸作業，由多國組合實體後端設施提供服務。
4. 申請消費服務的附加要求：不確定。
5. 申請消費服務的計價：國際市場價格。
6. 申請消費服務的數量限制：多國組合實體審核服務數量。

**D. 多邊管理涉及的規範內容**

1. 營運與管理：多國組合實體夥伴國設立協定，多國組合實體公司營運章程。
2. 核安全相關規範：多國組合實體夥伴國設立協定所列舉的核安全規範，多國組合實體一般夥伴國的內國法，暨多國組合實體後端設施所在國的內國法。
3. 核安保相關規範：多國組合實體夥伴國設立協定所列舉的核安保規範，多國組合實體夥伴國的內國法，暨多國組合實體後端設施所在國的內國法。
4. 核保防相關規範：IAEA(或區域組織)與多國組合實體夥伴國所簽署的核保防協議，多國組合實體參與夥伴國的內國法，暨多國組合實體後端設施所在國與 IAEA(或區域組織)簽署的核保防協定暨 IAEA 核保防檢查。
5. 核賠償相關規範：多國組合實體夥伴國所簽署的設立協定所列舉的相關第三方民事賠償國際規約，或區域組織的特定核民事賠償規範。
6. 核運輸相關規範：多國組合實體夥伴國暨後端設施所在國的內國法規範。
7. 涉及的第三方責任(third parties liability)相關規範：多國組合實體夥伴國所簽署的設立協定所列舉的相關第三方民事賠償國際規約，

或區域組織的特定核民事賠償規範。

**X2.2 情境(對非夥伴國的其他 IAEA 會員提供後端服務保證)**

在此情境下，多國組合企業實體的一個夥伴國或多個夥伴國，開放其境內特定服務品項、內容與規格的後端設施，供 IAEA(區域組織)運用，向非夥伴國的 IAEA(區域組織)會員提供後端服務。此外，IAEA(區域組織) 得與多國組合實體簽署服務協定，將 IAEA(區域組織) 非夥伴國的 SFRW，送到多國組合實體的後端中期貯存或最終處置設施，進行中期貯存或最後處置，並收取市場價格費用。

**A. IAEA(區域組織)透過多國組合實體向 IAEA(區域組織)非夥伴會員提供服務保證之設施所在國的選定**

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：多邊設施地主國，主動呼應 IAEA(或區域組織)核燃料環多邊化倡議，籌組多國組合實體，並與 IAEA(或區域組織)談判後端服務協議，經 IAEA(區域組織)審核後，對其他非夥伴國的 IAEA(或區域組織)會員，提供後端服務。
2. 選定多邊設施地主國的法源：依據多邊設施地主國的內國法，選定、監管暨營運相關服務設施，多國公司的註冊暨營運依據多國公司註冊國的內國法所規範。
3. 多邊設施地主國的選擇條件：需滿足 IAEA(區域組織)核不擴散、核安全、核安全暨核保防等各項 IAEA(區域組織)標準要求。
4. 選定多邊設施地主國的程序：由多國設施所在的地主國，向 IAEA(或區域組織)提出申請，經 IAEA(區域組織)理事會審查通過後，由 IAEA(或區域組織)與多國設施所在的地主國簽署協議，將其境內的多邊設施，納入 IAEA(或區域組織)後端多邊化協力機制。
5. 地主國法規的調合與適用：主要依據多邊設施地主國的內國法，進行各項監管暨運作管理，但需接受 IAEA(區域組織)核保防檢查，並應配合 IAEA(區域組織)各項規範，俾利服務消費國與 IAEA(或區域組織)人員暨核物料的入出境。
6. 地主國公眾意見參與規模、方式、程序與對象：依據多國設施所在國的內國法，進行公眾意見參與。
7. 對地主國核管理策略的衝擊：需配合 IAEA(區域組織)各項規範，俾利服務消費國與 IAEA(區域組織)人員暨核物料的入出境。
8. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：需配合 IAEA(區域組織)各項規範，俾利服務消費國與 IAEA(區域組織)人員暨核物料的入出境，並接受 IAEA(區域組織)核保防檢查。
9. 對地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：無影響。多國設施所在國擁有各種技術與人力資源，但禁止向多國組合實體的一般夥伴國或其他第三方轉移相關技術。

**B. IAEA(區域組織)透過多國組合實體向 IAEA 非夥伴會員提供服務保證的國際協定**

1. 談判的設定：由多國設施所在的地主國，向 IAEA(區域組織)提出申請，經 IAEA(區域組織)理事會審查通過後，由 IAEA(區域組織)與多國設施所在的地主國簽署協議，將地主國境內的多邊設施開放給 IAEA(或區域組織)，為 IAEA(區域組織)非夥伴會員提供中期儲存或最終處置的後端服務。
2. 談判項目：如何將多邊設施納入 IAEA(區域組織)的後端 MSM 協議；IAEA(區域組織)與設施地主國的雙邊協議。內容包括涉及服務的規模數量、服務標的核物料的產權、相關核物料跨國產權的轉移與相關程序、涉及服務的相關許可執照的核發、保險、計價與事故責任賠償、核安全義務、核安保義務、核保防義務、核運輸安全義務、保密協定、爭端解決與效期等問題。
3. 國際協議締約方的權利義務：締約方的權利義務源自多邊設施地主國與 IAEA(或區域組織)的雙邊協議。此外，多邊設施地主國必需遵守核不擴散條約，其內國法也必須配合 IAEA(區域組織)核安全、核安保、核保防暨核運輸等相關安全規範，並且需採行必要措施俾利服務消費國與 IAEA(區域組織)人員暨核物料的入出境。
4. 出資安排：多國設施所在國佔有超過 50%以上股份多數，其他參與國各擁有 10%股份。IAEA(區域組織)與其他非夥伴國家不出資。
5. 服務與運作程序：非夥伴國的需求經 IAEA(區域組織)審核並同意後，由 IAEA(區域組織)依據雙邊協議，向多國設施所在國要求，向其非夥伴國提供核燃料循環後端服務。
6. 貯存或處置設施的研究、設計、建造與經營策略：由多國組合實體的設施所在國主導。
7. 多邊設施營運機構的設計與運作：設立股東大會與董事會，實際營運由多邊設施地主國國籍的執行長主持。
8. 締約方在多邊設施的決策份額：原則上應由多國設施所在地的地主國主導，其它締約方依據持股份額決定。IAEA(區域組織)暨其他非夥伴國家無決策權。
9. 多邊設施財務盈虧安排：依多國公司註冊國的公司法規定。
10. 貯存或是最終處置設施的貯放規模：依據多國組合實體設立協議之規定。
11. 退出多邊服務國際協議的懲處安排：可以退出，但不影響服務的執行與安排。
12. 後端合作的效期：原則上無效期限制，但 IAEA(區域組織)或多國設施所在國可單方提出終止要求。

**C. 消費方的服務申請**

1. 供應契約：需與 IAEA(區域組織)簽署消費契約。
2. 申請消費服務資格：需為 IAEA(區域組織)會員，且經 IAEA(區域組織)審核後，由 IAEA(區域組織)代表消費國，向多國設施所在的地主國提出申請。
3. 申請消費服務要件：滿足核不擴散與核保防要求，且經 IAEA(區域組織)審核批准。
4. 申請消費服務程序：消費國經 IAEA(區域組織)審核後，由 IAEA(或區域組織) 向多國設施所在的地主國提出申請，由多國設施所在的地主國核發相關許可執照，並執行進出口核材料運輸作業。
5. 申請消費服務的附加要求：IAEA(區域組織)主導的各種可能附加要求。
6. 申請消費服務的計價：國際市場價格。
7. 申請消費服務的數量限制：由 IAEA(或區域組織)審批。

**D. 多邊管理涉及的規範內容**

1. 營運與管理：多國組合實體夥伴國設立協定，多國組合實體公司營運章程。
2. 核安全相關規範：依 IAEA(區域組織)與多邊設施地主國雙邊協議的規定，IAEA(或區域組織)與多國組合實體夥伴國所簽署的各項核安全協定，以及多邊設施地主國的內國法。
3. 核安保相關規範：依 IAEA(區域組織)與多邊設施地主國雙邊協議的規定 IAEA(或區域組織)與多國組合實體夥伴國所簽署的各項核安保協定，以及多邊設施地主國的內國法。
4. 核保防相關規範：依 IAEA(區域組織)與多邊設施地主國雙邊協議的規定，IAEA(或區域組織)與多國組合實體夥伴國所簽署的各項核保防協定，以及多邊設施地主國的內國法。
5. 核賠償相關規範：依 IAEA(區域組織)與多邊設施地主國雙邊協議所列舉的第三方民事賠償國際規約暨相關規範。
6. 核運輸相關規範：依 IAEA(或區域組織)與多邊設施地主國雙邊協議的規定，IAEA(或區域組織)相關規約暨多邊設施地主國的內國法規範。
7. 涉及的第三方責任(third parties liability)：依 IAEA(或區域組織)與多邊設施地主國雙邊協議所列舉的第三方民事賠償國際規約暨相關規範。

**（三）X3 情境(IAEA 或區域組織服務保證)**

在此情境下，多邊服務設施雖在地主國境內，但依據 IAEA(區域組織)與地主國所簽署生效的設立協議，IAEA(區域組織)擁有多邊服務設施與 LEU 的產權，並由 IAEA(區域組織)進行多邊設施的營運與管理，IAEA(或區域組織)更擁有審批消費國後端服務申請的權力。

**A. 後端多邊設施地主國的選定**

1. IAEA 或其他國際組織的參與程度：IAEA(或區域組織)完全主導。IAEA(區域組織)會員國向 IAEA(區域組織)提出在其境內設立後端多邊設施的請求與計畫書，經 AEA(區域組織)審核後同意後，由 IAEA(區域組織)與多邊設施地主國簽署雙邊協議，規範後端多邊設施，IAEA(區域組織)與地主國的權利義務。
2. 選定後端多邊設施地主國的法源：依 IAEA 理事會(區域組織)的決議。
3. 後端多邊設施地主國的選擇條件：依 IAEA 理事會(區域組織)設立決議。其主要考量包括：地主國需為非核武國家，已擁有完善的相關核設施，具備良好的核安全、核保防暨核安保表現，對 IAEA(區域組織)的人員與設備物料，提供人身保護、治安、金融財務、出入境交通運輸、法律豁免等各種國際組織享有的便利。
4. 選定後端多邊設施地主國的程序：依 IAEA 理事會(區域組織)的決議公告徵求，經 IAEA(區域組織)會員國提出申請，經依 IAEA 理事會(區域組織)審核後選定，並由 IAEA(區域組織)與地主國談判後端多邊設施設立協議，協議生效後，啟用多邊設施。
5. 地主國法規的調合與適用：需完全遵循 IAEA(區域組織)核安全、核保防暨核安保等各項規範，並依 IAEA(區域組織)相關規範，適時修正地主國的內國法，俾完全契合 IAEA(或區域組織)的各種規定。
6. 地主國公眾意見暨參與規模、方式、程序與對象：依多邊設施地主國內國法的規定。
7. 對地主國核管理策略的衝擊：必需無縫接軌 IAEA(區域組織)核安全、核保防暨核安保等各項規範。
8. 對地主國核監管機構治理功能的衝擊：必需無縫接軌 IAEA(區域組織)核安全、核保防暨核安保等各項規範。
9. 對地主國人力資源或技術轉移的回饋安排：無。

**B. 後端多邊設施設立的國際協定**

1. 談判方的設定：已通過 IAEA(區域組織)審核通過的後端多邊設施地主國。
2. 談判項目：(1) IAEA(區域組織)與設施所在國的雙邊協議(2) IAEA(區域組織)後端 MSM 設立協議。主要內容包括：後端多邊設施的所有權、後端多邊設施營運的財務分擔，後端多邊設施暨 IAEA(區域組織)人員的不可侵犯特權，金融便利暨稅捐豁免，確保地主國對後端多邊設施營運的基礎設施暨相關服務的後勤支援，通訊暨運輸，人員、文書、行李、貨物的特權與豁免，多邊設施暨其管理單位的保護，核安全、核安保暨核

保防遵循，緊急應變措施，核事故責任暨賠償，爭端解決與效期等。
3. 締約方的權利義務：源自多邊設施地主國與IAEA(區域組織)簽署的國際協議，IAEA(區域組織)後端 MSM 設立協議。
4. 出資安排：地主國收取象徵性費用(1 歐元)，後端多邊設施的營運成本，由各國捐資。
5. 服務項目的設計：由 IAEA(或區域組織)決定服務項目。
6. 貯存或處置設施的研究、設計、建造與經營策略：地主國提供已有的核設施供 IAEA(或區域組織)決選，或提供 IAEA(區域組織)建造全新的聯合設施，營運完全由 IAEA(區域組織)主導。
7. 多邊設施管理機構的設計與運作：多邊設施所有權歸屬 IAEA(區域組織) ，由 IAEA(區域組織)規畫、設計與管理。
8. 多邊設施地主國在後端多邊設施的決策份額：無。
9. 後端多邊設施財務的盈虧安排：IAEA(區域組織)承擔。
10. 貯存或是最終處置設施的貯放規模：IAEA(區域組織)決定。
11. 退出合作機制的懲處安排：無。
12. 後端 MSM 的效期：有鑑於中期貯存與最終處置的時間十分漫長，後端多邊設施設立協議的效期，宜以無限期設定，或者至少超過 20-40 年；此外，設立協議到期後，如締約方無異議，則自動延展 20-40 年。

**C. 消費方的服務申請**

1. 消費契約：需與 IAEA(區域組織)簽署定型化供應協議。
2. 申請消費服務資格：需為 IAEA(區域組織)會員。
3. 申請消費服務要件：需具備核不擴散與核保防的良好表現計紀錄，不得再轉化核物料作為軍事用途。
4. 申請消費服務程序：向 IAEA(區域組織)提出申請，簽署服務定型化契約，並預先結清所有服務款項後始交付服務。
5. 申請消費服務的附加要求：依 IAEA(區域組織)的其他附加要求。
6. 申請消費服務的計價：國際市場價格。
7. 申請消費服務的數量限制：由 IAEA(區域組織)決定。

**D. 多邊管理涉及的規範內容**

1. 核安全相關規範：《核安全公約》、《聯合公約》暨 IAEA(區域組織)核安全之相關規範。
2. 核安保相關規範：《核材料實物保護公約》，IAEA(區域組織)核安保之相關規範。
3. 核保防相關規範；核不擴散條約、各國與IAEA(區域組織)簽署的核保防協議，以及 IAEA 核保防之相關規範。
4. 核賠償相關規範：《關於核損害民事責任的維也納公約》暨其後續修訂議定書，或是區域組織的特定核損害民事賠償協議。
5. 核運輸相關規範：IAEA(區域組織)運輸規範暨國際相關運輸規範。
6. 涉及的第三方責任(third parties liability)：《關於核損害民事責任的維也納公約》暨其後續修訂議定書，區域組織的特定核損害民事賠償協議，以及涉及之其它相關規範。

**III. 結果與討論**

本研究計已蒐集核燃料循環後端多邊協力機制倡議的內容與主張，並以現有三種低濃縮鈾銀行的運作成果，匯整出核燃料循環前端服務保證多邊協力機制(MSM)的運作模型，並且運用此項模型，推演出後端服務保證多邊協力機制的幾種可能情境，分別產出供應方後端服務保證情境 X1，多國組合實體後端服務保證情境 X2.1 與 X2.2，以及由 IAEA(或區域組織)主導的後端服務保證情境 X3。

以下針對全球／區域核燃料循環後端多邊合作前景，三種核燃料循環前端服務保證多邊協力機制模型，以及四種核燃料循環後端服務保證多邊協力情境，分別論述研究結果。

**一、全球或區域核燃料循環後端多邊合作前景**

南澳政府籌組區域後端多邊協力機制的挫敗，未必意謂國際/區域後端多邊協力機制的前景告終。南澳地方政府所推動的區域中期貯存暨最終處置設施，並未得到南澳民眾的支持，但是美國暨歐盟國家仍然努力不懈，或是由智庫暨民間單位進行概念倡導或溝通，或是在區域國際組織(歐盟)架構下進行技術探索。

首先，IAEA 推動核燃料循環多邊化倡議所扮演的促成角色，暨其迄而不捨的態度，值得持續關注。自 2005 年 IAEA 公佈核燃料循環多邊化倡議，直到 2017 年才成功創建低濃縮鈾銀行的過程，以及 IAEA 近年仍然戮力推動核燃料循環後端多邊化的活動，可以發現，IAEA 仍持續不斷地對此議題投注資源。最值得關注的，乃是由 IAEA 主導，在 INPRO 架構下所進行的「核燃料循環後端合作途徑」(Cooperative Approaches to the Back End of the Nuclear Fuel Cycle)協作研究計畫。INPRO 協作研究計畫至今仍然持續運作中，儘管成果有待觀察。

其次，全球各種後端多邊協力的倡議依然方興未艾。國際上的主要核能大國，至今亦未終止對後端多邊協力倡議的支持。無論是美國智庫 NTI，美國支持的 IFNEC，或是 IAEA，均沒有釋出停止推動核燃料循環後端多邊化的訊號，並且各項定期研究與研討論壇仍在持續的運作與推動。

足見核燃料循環後端多邊協力機制的前景，仍然

不容忽視。

## 二、核燃料循環前端多邊協力機制的模型特徵

本研究自低濃縮鈾銀行機制的運作實務，推演出核燃料循環前端服務保證多邊協力機制的三種類型，再分別透過設施所在國選定、多邊設施設立協議、消費方申請流程與資格，以及多邊設施涉及之國際規範等四項變數，演譯出由供應方單獨提供的多邊服務保證模式，由多國組合實體提供的多邊服務保證模式，以及由 IAEA 提供的多邊服務保證模式。(以上前端 MSM 各項模型的內容與特徵，請參閱表五)

觀察 IAEA 在各模型的影響力排序，由高至低依序為 IAEA 服務保證模式 > 多國組合實體服務保證模式 > 供應方服務保證模式。在 IAEA(或區域組織) 模式下，IAEA(或區域組織)不單擁有多邊設施暨相關核物料的產權與營運權，決定消費國的服務申請暨審批內容，更可以更動申請程序與審批內容，並要求多邊設施地主國無條件配合 IAEA(或區域組織)採行的各項措施。在多國組合實體模式下，多邊設施暨相關核物料的產權與營運權乃是多國組合實體所有，IAEA 只負責消費國的服務申請暨審批內容，一旦 IAEA 決定提供服務，則多國公司的核物料須先移轉至 IAEA，再經 IAEA 移轉給消費國。在供應方模式下，只存在消費國與服務供應國的雙邊互動，IAEA 少有置喙餘地，最多只有在核物料移轉至不同國家時，可以要求供應國向 IAEA 申報核物料的項目與數量，並接受 IAEA 核保防檢查。IAEA 對於供應國的服務內容，少有涉入空間。

表五：前端服務保證多邊協力機制的模型特徵

| | 供應方服務保證模式 | 多國組合實體服務保證模式 | IAEA 服務保證模式 |
|---|---|---|---|
| 多邊設施地主國選定 | 供應國自行決定。 | 多國組合實體夥伴國自行選定。 | 有意者向 IAEA 提出申請，由 IAEA 審核決定。 |
| 多邊設施設立之國際協議 | 無，供應國自主。 | 由多國組合實體夥伴國談判並簽署(1)多國組合實體設立協議 (2)多國公司營運章程。 | IAEA 與設施所在國簽署雙邊協議。 |
| 消費方申請資格與程序 | 供應國決定申請資格、程序與審核要件，遵循核不擴散暨良好的核保防檢查紀錄。 | •由 IAEA 分別與多國組合實體暨消費國簽署買賣契約中轉：IAEA 與地主國簽署 LEU 供應協定，再視市場須求與消費國簽署消費契約。<br>•消費資格為 IAEA 夥伴或非夥伴會員國。<br>•由 IAEA 審核消費國申請。<br>•消費國須有良好的核不擴散暨核保防檢查紀錄。 | • IAEA 與接受國簽署定型化供應協議。<br>•消費資格為 IAEA 會員國。<br>•由 IAEA 秘書長依理事會規定進行審核。<br>•消費國須有良好的核不擴散暨核保防檢查紀錄。 |
| 多邊設施(服務)涉及的國際規範 | 供應國的內國法。 | •多邊設施的營運依據多邊設施註冊國的內國法；接受 IAEA 核保防檢查。<br>•遵守核安全、核安保、核保防、核賠償、核運輸、第三方責任等相關規範。 | •多邊設施地主國的內國法；但需與 IAEA 的各項規範無縫接軌。<br>•須依據 IAEA 規範隨時進行內國法規的調整與融合。 |
| 多邊設施的監管機制 | 由服務供應國監管機構單方執行監管。 | •由多邊設施地主國的監管機構自責監管。<br>•須接受 IAEA 核保防檢查。 | •多邊設施地主國的監管機構進行監管。<br>•多邊設施地主國的監管機構，需接受 IAEA 的同儕審查，檢證其規範與 IAEA 標準的融合度。 |

資料來源：計畫主持人研究整理分析。

就消費國服務申請的繁雜程度言之，由高至低依序為 IAEA 服務保證模式 > 多國組合實體服務保證模式 > 供應方服務保證模式。IAEA 對於申請資格與審批內容的要求愈嚴格，消費國所受的拘束愈高；相反的，在單一國家提供多邊服務的供應國模式下，消費國的服務申請享有較高的便利性。

觀察多邊設施地主國的自主性，由高至低依序為供應方服務保證模式 > 多國組合實體服務保證模式 > IAEA 服務保證模式。不過，設施所在國的自主程度，亦導致消費國面臨權益上的不確定風險，該不確定性將隨著地主國的自主性而相對增加。

觀察消費國權益變動風險，由高至低依序為供應方服務保證模式 > 多國組合實體服務保證模式 > IAEA 服務保證模式。在供應方服務保證模式下，設施所在國完全掌握設施的營運，不過該營運同時亦受到內部政經局勢暨社會風潮走向的高度影響，故而消費國在供應方模式下所享有的權利暨義務，可能面臨供應國內部政經社會變遷所導致的不確定風險。在多國組合實體模式下，多國公司註冊國與施設地主國未必會是同一個國家，因此多國組合實體是否具備穩定運作的內部凝聚力，可能取決於多國組合實體主導國的實力。一旦主導國與 IAEA 的互動有所起伏，就可能對消費國的權利與義務，產生不利的影響。在 IAEA 模式下，設施所在國拘束於各項核能規範、國家政策、設施運作規範，並且必須對 IAEA 相關人員、相關文件檔案，給予各種便利暨特權豁免，故而在 IAEA 在選定多邊設施地主國之初，即已對設施所在國的配合度與履行承諾的持續性進行相當的考核與評估。為此，在 IAEA 模式下，消費國一旦經 IAEA 審批核可，則其所面林的權益變動風險，最為有限。

觀察多邊設施地主國承受 IAEA 規範的壓力強度，由高至低依序為 IAEA 服務保證模式> 多國組合實體服務保證模式 > 供應方服務保證模式。在 IAEA 模式下，多邊設施地主國受到其與 IAEA 雙邊協定的約束，拘束於各項核能規範、設施運作規範，並且必須對 IAEA 相關人員、相關文件檔案，給予各種便利暨特權豁免，承擔 IAEA 營運的各項成本，也必須竭盡所能地遵循各項核不擴散、核安全、核安保、核保防暨核運輸等各種 IAEA 規約，並且隨時必須就 IAEA 各項標準的變動，進行內國法的相應調整與融合。相較之下，多國組合實體與供應方模式下的設施所在國，只受到其與 IAEA 簽署的核物料供應協定，以及與 IAEA 簽署之各項安全規範的約束。

就消費國受到 IAEA 拘束的規範強度而言，由高至低依序為 IAEA 服務保證模式 > 多國組合實體服務保證模式 > 供應方服務保證模式。在 IAEA 服務保證模式下，消費國完全受到 IAEA 規範的單方制約。消費國須有核不擴散暨核保防檢查的良好記錄，方能取得服務保證；此外，由於 IAEA 得以更動申請程序與審批內容，為了便利核物料的運送，消費國內國規範須與國際接軌的要求，也可能成為 IAEA 供應服務的履約內容。在多國組合實體模式下，消費國同樣須有核不擴散暨核保防檢查的良好記錄，方能取得服務保證；不過，IAEA 在服務提供的過程中，只扮演中轉的角色，其相關服務受到設施所在國與 IAEA 雙邊供應協議，以及 IAEA 與消費國消費契約的雙重約束，IAEA 自主的程度相對降低，因此拘束的強度相對遞減。最後，在供應方模式下，消費方主要受到消費國與供應國雙邊契約的約束，除了核安全核保安暨核保防之相關規範外，

IAEA 揮灑的空間有限。

最後，觀察 IAEA 對多邊設施監管機制的影響力可以發現，由高至低依序為 IAEA 服務保證模式> 多國組合實體服務保證模式> 供應方服務保證模式。在IAEA 模式下，IAEA 深度影響多邊設施地主國監管機構的監管工作。設施所在國監管機構，雖為 IAEA 所有的多邊設施進行監管工作，但其所據以監管的內國法規，必需無縫接軌 IAEA 核不擴散、核安全、核安保、核保防暨核運輸等各種規範與規約，需隨時依據 IAEA 各項規範的變動而變動 (IAEA, 2017c: article 14.2)。此外，多邊設施地主國的監管機構，也必需接受 IAEA 核安全與核安保審查(review)，檢驗其內國的監管與 IAEA 規範的融合度(IAEA, 2017c: article 14.2)。相較之下，多國組合實體模式與供應方模式下設施所在國的監管機構，則具有相對獨立性，IAEA 的涉入程度相對降低，除非該監管機構主動向 IAEA 提出同儕審查請求。

## 三、核燃料循環後端多邊服務保證情境分析

本研究依據核燃料循環前端，低濃縮鈾銀行運作實務發展出的三種多邊服務保證模型，推演出(1) X1 供應方後端服務保證情境，(2) X2.1 多國組合實體夥伴國後端服務保證情境， (3) X2.2 多國組合實體非夥伴國後端服務保證情境，以及(4) IAEA 主導的 IAEA(區域組織)後端服務保證情境 X3。(請參閱表六) 並以組建亞太區域後端服務保證多邊協力機制為推演情境，針對設施所在國選定、多邊後端服務規範、消費方申請程序與資格、多邊設施的適用規範與多邊設施監管機制等項目，預估 X 1, X 2.1, X 2.2 與 X 3 情境內，可能產生的各種運作概況，供我國評估參與策略之參考。

表六：核燃料循環後端服務保證多邊情境模擬

| 情境 | | 設施所在國選定 | 多邊後端服務規範 | 消費方的申請程序與要件 | 多邊設施適用規範 | 多邊設施監管機制 | 我國取得服務消費機會 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X1(供應方後端服務保證) | | 供應國自行決定；但易受到供應國內部政治經濟暨社會因素影響。 | 依供應方內國法，向他國提供後端服務清程、資格審查、許可證核發等事項。 | •供應國1單方決定供應契約的審查程序與審核要件。<br>•消費國須具備核不擴散暨核保防檢查的良好紀錄。 | 依據供應國的內國法規。 | •供應國監管機構自責。<br>•供應國需接受 IAEA 核保防檢查。 | •可能性極高。<br>•可透過供應國相關廠商代理我國後端機構，提出申請。 |
| X2（多國組合實體後端服務保證） | X2.1（多國組合實體夥伴國後端服務保證） | 多國組合實體的一個夥伴國或多個夥伴國，在其境內設立特定服務品項、內容與規格的後端設施，對全體夥伴國提供後端服務。 | •多國組合實體設立條約；<br>•多國組合實體公司營運章程。 | •需為多國組合實體的夥伴國。<br>•依多國組合實體的公司營運章程，決定審核程序。<br>•消費國須具備核不擴散暨核保防檢查的良好紀錄。 | •多國組合實體後端設施所在之地主國的內國法。<br>•IAEA 核保防核保安暨核安全等相關規範。 | •多邊設施地主國的監管機構自責監管。<br>•須接受IAEA核保防檢查。 | •具挑戰性但並非不可能；需持續關注並及早籌畫加入機遇。<br>•因我國特定後端機構必需成為多國組合實體的夥伴國。 |
| | X2.2 (對IAEA或區域組織非夥伴會員所提供的多國組合實體後端服務保證) | 多國組合實體的一個或多個夥伴國，在其境內設立特定服務品項、內容與規格的後端設施，並開放全部或部份設施，對非夥伴國提供後端服務。 | •多國組合實體設立條約；<br>•多國組合實體公司營運章程；<br>•設施所在國與IAEA的供應協定；<br>•IAEA(區域組織)與非夥伴消費國的供應契約。 | •需為多國組合實體之IAEA(區域組織)非夥伴會員國；<br>•IAEA(區域組織)審核其會員國的消費申請。<br>•消費國須具備核不擴散暨核保防檢查的良好紀錄。 | •多國組合實體後端設施所在之地主國的內國法。<br>•IAEA 核保防核保安暨核安全等相關規範。 | •多邊設施地主國的監管機構自責監管。<br>•須接受IAEA核保防檢查。 | •頗具挑戰性。<br>•因我國特定機構需成為亞太區域特定組織或IAEA 的會員。 |
| X3(IAEA或區域組織提供的後端服務保證) | | 有意者向IAEA(區域組織)提出在其境內設立後端多邊設施的請求與計畫書，經IAEA(區域組織)審核同意後，由IAEA(區域組織)與後端多邊設施地主國簽署雙邊協議。 | •IAEA(區域組織)與設施所在國雙邊條約 | •IAEA(區域組織)審核其會員國的消費申請。<br>•消費國須具備核不擴散暨核保防檢查的良好紀錄。 | •地主國的內國法：但需與IAEA(區域組織)的各項規範無縫接軌。<br>•須依據IAEA(區域組織)規範隨時進行內國法規的調整與融合。 | •由多邊設施地主國的監管機構自責監管。<br>•多邊設施地主國的監管機構，需接受IAEA(區域組織)同儕審查，檢證其與IAEA(區域組織)規範的融合度。 | •頗具挑戰性。<br>•因我國特定機構需成為亞太區域特定組織或IAEA 的會員。 |

資料來源：計畫主持人自行研究整理分析。

在上述四種情境下，就我國可能取得後端服務的機會論之，其可能性依序為X 1情境 > X 2.1情境> X 2.2情境 > X 3情境。X1情境的申請資格最為寬鬆，亦即後端服務供應國的代理商，即可代表我國特定後端機構，向後端服務供應國申請後端相關服務。依目前我國與相關核工業大國取得商業型核能服務的無礙情況觀之，我國在X1情境下取得後端中期貯存或是最終處置服務的可能性最高。其次，我國如能及早成為區域後端多國組合實體的發起國或是夥伴國，則可以無礙地在X 2.1情境下，取得後端中期貯存或是最終處置服務。不過，如若我國未能成為區域後端多國組合實體的夥伴國，則必需以亞太區域特定組織會員身份，向多國組合實體提出申請，如此情境下，我國將面臨諸多挑戰。在X 3型情境下，由於取得後端服務的申請資格限定為IAEA或亞太區域特定組織會員，依目前我國的國際社會處境而言，其挑戰性將十分艱鉅。

觀察上述四種情境，設施所在國對他國開放的態度，可能受到內部因素暨國際因素的雙重影響。特定國家擬成為多邊設施地主國，其所受到國際因素的影響程度，由高至低依序為X3情境 > X 2.2情境 > X 2.1情境 > X 1情境。在X3情境下，設施所在國乃是IAEA(區域組織)向會員國徵募而來，由自願者向IAEA(區域組織)提出在其境內設立後端多邊設施的請求與計畫書，經IAEA(區域組織)審核同意後，由IAEA(區域組織)與後端多邊設施地主國簽署雙邊協議，正式成為IAEA(區域組織)後端服務保證機制的設施所在國。在此情境下，設施所在國的壓力，主要來自IAEA(區域組織)的集體決策。在X 2.2情境下，多國組合實體響應IAEA(區域組織)後端多邊服務機制的號召，將多國公司夥伴國的全部或部份後端設施，開放給IAEA(區域組織)非夥伴會員。在此情境下，設施所在國的壓力，主要來自多國組合實體夥伴國的集體合意。X 2.1情境則是多國組合實體的夥伴國，對全體夥伴國開放其境內的後端設施，在此情境下，設施所在國的壓力，主要來自多國組合實體的其它夥伴國。而在X1情境下，設施所在國就是多邊服務供應國，因此具備高度的自主性，受到其他國際因素影響的可能性較低，但此亦相對突顯供應國內部政治經濟暨社會因素對設施開放的影響力。

觀察後端服務保證多邊機制設立的複雜程度，由高至低依序為情境X3 > 情境X2.2 > 情境X2.1 > X1情境。在IAEA(區域組織)提供後端服務保證的X3情境中，後端多邊設施涉及的規範內容最為複雜。IAEA(區域組織)，首先必需與多邊設施地主國簽署雙邊條約，此協議的內容涉及後端多邊設施的所有權、營運、財務分擔，人員的不可侵犯特權，金融便利暨稅捐豁免，地主國對後端多邊營運基礎設施暨相關服務的後勤支援，通訊暨運輸，人員、文書、行李、貨物的特權與豁免，多邊設施暨其管理單位的保護，核安全、核安保暨核保防遵循，緊急應變措施，核事故責任暨賠償責任，爭端解決與效期等。在X 2.2情境中，向多國組合實體非夥伴國提供後端多邊服務保證的依據，包括多國組合實體設立協議，多國公司營運章程，IAEA(區域組織)與設施所在國的雙邊國際協議，以及IAEA與非夥伴國簽署的消費契約。相關內容包括後端服務的內容、計價、產權移轉、核物料運輸，核安全、核安保、核保防暨核事故事賠償責任，爭端解決與效期等。在X 2.1情境下，有關後端多邊設施服務保證的運作、營運，以及參與國的各項權利義務，明訂於多國組合實體設立條約暨多國組合實體公司營運章程。相較之下，X 1情境的服務供應國，同時也是後端服務設施的地主國，規範相對單純，主要來自供應國的內國法，內容包括向他國提供後端中期貯存或最終處置服務的申請流程、資格審查，以及許可證核發等事項。

就各情境下消費國申請服務的簡捷程度而言，由高至低依序為X1情境 > X 2.1情境 > X 2.2情境 > X 3情境。X1情境乃是由供應方依據內國法自行決定供應契約的審查程序與審核內容，對申請方最為簡便。X 2.1情境的申請則漸趨複雜。因申請方需為多國組合實體的夥伴國，且必須依據多國組合實體設立條約與多國公司營運章程的申請暨審核程序，審批夥伴國的服務申請，但不存在身份資格審核的問題。X 2.2情境下的申請方，乃是多國組合實體的IAEA(區域組織)非夥伴會員國，所以必須先由IAEA(區域組織) 對服務申請國進行身份資格的審核。在X3情境下，由於IAEA(區域組織)是服務提供者，其所涉及的各項規約內容最為複雜，所以各項申請暨資格審核的程序與內容最為繁雜。

就IAEA(區域組織)規範對多邊設施的拘束程度而言，由高至低依序為X3情境 > X 2.2情境 > X 2.1情境 > X1情境。在X3情境下，除了必須接受IAEA核保防檢查外，後端多邊設施主要受到設施所在國之內國法的管轄；不過，該內國法必須遵從IAEA(區域組織)設立協定，無縫接軌IAEA(區域組織)所有規範，並且必需隨時就IAEA(區域組織)規範的變動而變動，確保相互法規融合度的完美。在X 2.1與X2.2情境下的多邊設施，都必須接受IAEA核保防檢查，並且受到多國組合實體後端設施所在之地主國內國法的管轄。在X1情境中，後端服務設施所在國除了必須接受IAEA核保防檢查外，其主要約束法源主要來自供應國的內國法。

觀察後端設施所在國監管機構受到IAEA(區域組織)的影響程度，由高至低依序為X3情境 > X 2.2情境 > X 2.1情境 > X1情境。在X3情境中，後端多邊設施的監管由設施所在國的監管機構負責；不過依據設施所在國與IAEA(區域組織)的雙邊協定，地主國監管機構需接受IAEA(區域組織)的同儕審查，藉以檢證該等監管行動與IAEA(區域組織)規範的融合度，就此觀之，後端服務設施所在的監管機構，顯然受到IAEA(區域組織)的高度監管。在X2.1與X2.2情境中，多國組合實體的後端設施也是設施所在國的監管機構負責監管，但該監管機構必需接受IAEA核保防的檢查。X1型情境下，後端設施由供應方的監管機構自行監管，受到IAEA(區域組織)的干預程度，最為有限。

## IV. 結論

衡量我國面對的國際政治局勢，是否能在後端服務保證多邊協力機制成立後，無礙地取得後端多邊服務的申請資格，緩解我國所面臨的用過核燃料暨放射性廢物的中期貯存或最終處置壓力，應是我國的重大關切議題。為此，促成 X 1 情境與 X 2.1 情境，鼓勵其他國家成立單方擁有並對台灣開放的供應方服務保證機制，或是積極協同友好國家，共同組成可以對我國開放的多國組合實體後端多邊服務保證機制，應是對我國的最有利情境。相對地，如果任由 IAEA 或區域組織推動 X 2.2 或 X3 情境，則是對我國最為不利的情境。

自 2011 年日本福島核災後，IAEA 強化各國核安全、核安保、核運輸等各種規範的力度不斷提升，我國周邊的亞太國家，例如美國、日本、南韓、加拿大、澳洲等國，均順應此道國際趨向，積極修正並嚴謹化各項核安全規範，強化核監管機構效能。如若亞太國家未來產出 X1 情境與 X 2.1 情境，則我國必需滿足服務保證供應國或是多國組合實體設定的核安全標準，方有向其取得用過核燃料暨放射性廢物進口執照的可能性。為此，與亞太夥伴國家同步提升我國的核安全、核安保暨核運輸等各種安全規範，乃是為我國鋪陳未來順利參與國際/區域後端多邊協力機制的基石。

第三，強化核不擴散，提高核保防效能，乃是 IAEA 推動核燃料循環多邊化倡議的核心宗旨。為此，支持核不擴散機制精神，遵循核保防規範，配合 IAEA 核保防檢查，維持良好的核保防紀錄，乃是爭取夥伴國支持，決定我國未來能否順利參與國際/區域後端多邊協力機制的前提。

最後，為因應國際/區域後端多邊協力機制的可能發展情境，建議我國可以自決策面、法規面、監管機關效能表現與人物力資源等面向，採行各項配套措施。

就決策面而言，建議行政院原子能委員會應持續關注國際/區域後端多邊協力機制的發展狀況，及時更新各項資訊，依據情境發展趨向，擘畫我國：

1. 參與國際/區域後端多邊協力機制的類型；
2. 參與國際/區域多邊後端服務協力機制的主動策略；
3. 參與國際/區域多邊後端服務協力機制的被動策略。

就法制面而言，我國應以《核安全公約》(Convention on Nuclear Safey)、《用過核燃料暨放射性廢物管理安全聯合公約》(Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)暨各項 IAEA 規範為藍本，參考美國、日本、南韓、加拿大、澳洲等亞太周邊國家的核安全、核安保、核保防與核物質跨境運輸等各項規範，同步化我國的各項核能法規，提升我國核監管機構的效能，完備我國參與國際/區域後端多邊協力機制的法制基礎。

就監管機關的效能而言，我國核能監管機構未來對「行政法人放射性廢棄物管理中心」各項活動的監管品質，以及對於核電廠除役過程執照核發，核安全、核安保、核保防與核物質跨境運輸的各項監管表現，將是厚植我國監管機關公信力，爭取夥伴國家認同，鋪陳我國順利參與國際/區域後端多邊協力機制的重要基礎。

最後，就人物力資源層面言之，參與國際/區域後端多邊協力機制，需要諸多專業人才的投注。為此，我國有必要未雨綢繆，積極擘畫培育涉及中期貯存與最終處置相關專業的監管與技術人員，培植通曉國際核能事務的法務、商務與國際談判人才，以厚植未來我國參與的各項專業人力需求。

## 參考文獻


[1] 台灣電力公司，2016，「低放射性廢棄物最終處置計畫「替代/應變方案」之具體實施方案 (公開版)」，https://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_07_d-1.pdf

[2] 台灣電力公司，2015，「用過核子燃料最終處置計畫書－2014修訂版」，https://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_06_a16.pdf

[3] 行政院原子能委員會，1997，「放射性廢料管理方針」，（86）台科字第33951號，民國86年9月2日。http://erss.aec.gov.tw/law/LawContentDetails.aspx?id=FL015688&KeyWordHL=

[4] 行政院原子能委員會，2017，「委託研究計畫」，http://www.aec.gov.tw/施政與法規/施政績效/委託研究計畫--2_15_72.html.

[5] 曾雅真，2012，「和平利用核能之國際造法趨勢--IAEA 核燃料循環多邊化倡議的實踐與影響」，*問題與研究*，第 51 卷，第 2 期，頁 69-100。

[6] 曾雅真，2013，「用過核燃料之國際多邊化管控趨勢：兼論我國處理用過核燃料策略的契機」，政治科學論叢，56 期，頁 1-37。

[7] 趙衛武，2016，「參加 2016年台美民用核能合作年會心得」，《原子能委員會》網頁，=http://www.aec.gov.tw/webpage/info/files/index_04_1-46.pdf.

[8] ARIUS, 2017a. “Current Activities,” http://www.arius-world.org/whats_new.html.

[9] ARIUS, 2017b. “US Foundation Projects,” http://www.arius-world.org/whats_new.html

[10] ElBaradei, Mohamed. 2003. “Towards a Safer World,” *Economist*, Vol. 369, Issue 8346, pp. 47-48.

[11] ERDO, 2017. “ERDO members,” http://www.erdo-wg.com

[12] Government of the Republic of Kazakhstan, 2016. “Parliament Ratifies Agreement on IAEA Low Enriched Uranium Bank,” November 9, 2016. http://www.government.kz/en/novosti/1006198-parliament-ratifies-agreement-on-iaea-low-enriched-uranium-bank.html.

[13] GPO, 2011. “Notice of Availability: American Assured Fuel Supply,” *Federal Register,* Vol. 76, No. 160 (August 18, 2011), pp. 51357-51358.

[14] GPO, 2013. “Notice of Availability: Application Requirements for the American Assured Fuel Supply,” *Federal Register,* Vol. 78, No. 231(December 2, 2013), pp. 72071-72072.

[15] GPO, 2017. “Agency Information Collection Extension,” *Federal Register***,** Vol. 82, No. 69(April 12, 2017), pp. 17650-17651.

[16] Grigoriev, Alexey, and Anton Ponmarev, 2016. “INPRO Activities on Nuclear Fuel Cycle,” report for the Technical meeting to Review the Updating of the INPRO Methodology, Vienna, 15-17 November 2016. https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2016/2016-11-15-11-17-INPRO/4.IAEA_Ponomarev.pdf.

[17] IAEA, 2005. “Multilateral Approaches to the Nuclear Fuel Cycle: Expert Group Report submitted to the Director General of the International Atomic Energy Agency,” February 22, 2005. INFCIRC/640. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2005/infcirc640.pdf

[18] IAEA, 2006. “Communication received from the Resident Representative of the Russian Federation to the Agency transmitting the text of the Statement of the President of the Russian Federation on the Peaceful Use of Nuclear Energy,” 8 February 2006. INFCIRC/667. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2006/infcirc667.pdf.

[19] IAEA, 2009. “Communication dated 13 March 2009 received from the Resident Representative of the Russian Federation to the IAEA on the Russian initiative to establish a guaranteed reserve of low enriched uranium,” 1 April 2009. INFCIRC/748. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2009/infcirc748.pdf

[20] IAEA, 2010a. “Communication dated 11 January 2010 received from the Permanent Mission of the Republic of Kazakhstan to the Agency enclosing a position regarding the establishment of IAEA nuclear fuel banks,” 15 January 2010, INFCIRC/782.

[21] IAEA, 2010b. “IAEA Board of Governors Conclude December Meeting,” 3 December 2010. http://www.iaea.org/NewsCenter/News/2010/bog031210.html

[22] IAEA, 2010c. “Assurance of Supply: Establishment of an IAEA Low Enriched Uranium (LEU) Bank for the Supply of LEU to Member States Proposed by Member States of the European Union (Belgium, Czech Republic, Denmark, France, Germany, Italy, the Netherlands, Portugal, the United Kingdom), the Republic of Korea, the Russian Federation, the United

Arab Emirates and the United States of America," GOV/2010/67. 26 November 2010. http://www.armscontrolwonk.com/files/2011/01/Support_document.pdf.

[23] IAEA, 2011. "Assurance of Supply: IAEA Low Enriched Uranium Bank Solicitation for Host Stat," GOV/INF/2011/7. 31 May 2011. http://www.armscontrolwonk.com/files/2011/06/GOV_INF_2011_7.pdf.

[24] IAEA, 2015. "IAEA and Russia Sign Transit Agreement for IAEA Fuel Bank," June 18, 2015. https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-russia-sign-transit-agreement-for-iaea-fuel-bank.

[25] IAEA, 2017a "Kazakhstan Recognizes IAEA's Role in Peace and Development," February 8, 2017. https://www.iaea.org/newscenter/news/kazakhstan-recognizes-iaeas-role-in-peace-and-development.

[26] IAEA, 2017b "The IAEA LEU Bank, Factsheet," March 2017. https://www.iaea.org/sites/default/files/the-iaea-leu-bank.pdf.

[27] IAEA, 2017c. "Agreement between the International Atomic Energy Agency and the Government of the Republic of Kazakhstan regarding the Establishment of the Low Enriched Uranium Bank of the International Atomic Energy Agency in the Republic of Kazakhstan," INFCIRC/916. 22 March 2017. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2017/infcirc916.pdf.

[28] IAEA, 2017d. **"**IAEA and China Sign Transit Agreement for LEU Bank**,"** April 10, 2017. https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-china-sign-transit-agreement-for-leu-bank.

[29] IFNCE, 2016a. "The International Framework for Nuclear Energy Cooperation Joint Statement," IFNEC 7th Executive Committee Meeting, Buenos Aires, Argentina. October 27th, 2016. https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2017-02/joint_statement.pdf.

[30] IFNEC, 2016b. "Practical Considerations to Begin Resolving the Final Spent Fuel Disposal Pathway for Countries with Small Nuclear Programs," IFNEC Reliable Nuclear Fuel Services Working Group. October 2016. https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2016-11/ifnec_rnfswg.pdf.

[31] IFNEC. 2017a. "IFNECE Members," https://www.ifnec.org/ifnec/jcms/g_5196/membership.

[32] IFNEC. 2017b. "2017 IFNEC Steering Group Meeting," Paris, France. June 29, 2017. https://www.ifnec.org/ifnec/jcms/g_8448/2017-ifnec-steering-group-meeting.

[33] IUEC, 2007a. "Agreement between the Government of the Russian Federation and the Government of the Republic of Kazakhstan on foundation of the International Uranium Enrichment Center." http://eng.iuec.ru/docs/agreement/

[34] IUEC, 2007b. "Articles of Association-Joint Stock Company "International Uranium Enrichment Center." http://eng.iuec.ru/docs/ustav/

[35] IUEC, 2010a. "Agreement between the Government of the Russian Federation and the International Atomic Energy Agency Regarding the Establishment on the Territory of the Russian Federation of a Physical Reserve of Low Enriched Uranium and the Supply of Low Enriched Uranium therefrom to the International Atomic Energy Agency for its Member States," 29 March 2010. http://www.iuec.ru/files/IAEA_agreement_eng.tif.

[36] IUEC 2010b, Attachment 2 of the IAEA-Russia IUEC Agreement , "Model Agreement Between the International Atomic Energy Agency and the Government of […] for the Supply of Low Enriched Uranium for the Operation of the […] Nuclear Power Plant in […]," GOV/2009/76 (Vienna: IAEA, 2009)(hereafter IUEC Model Agreement)

[37] IUEC, 2019. "Corporate structure," http://eng.iuec.ru/about/corp_structure/

[38] IUEC, 2019. "Nuclear Fuel Bank," http://eng.iuec.ru/activities/fuel_bank/.

[39] JOPRAD, 2017c. "Programme document DRAFT V0.7" March 13, 2017. http://www.joprad.eu/fileadmin/Documents/JOPRAD_Programme_Workshop/JOPRAD_WP4_D4.2_Programme_Document_Draft_v0.7_Consultation.pdf.

[40] Lim, Eunjung( 林 恩 廷 ). 2016. "Multilateral Approach to the Back End of the Nuclear Fuel Cycle in Asia-Pacific?" *Energy Policy*, 99, pp. 158–164

[41] Newman, Andrew, Thomas Isaacs, and Alina Constantin. 2016. "International Approaches to Spent Fuel Management: Challenges and Opportunities," *Universal Journal of Physics and Application*, 10(5): 170-175.

[42] NTI, 2014. "Key Takeaways: Taipei Workshop on Developing Spent Fuel," June 26, 2014. Taipei , Taiwan. http://www.nti.org/about/projects/developing-spent-fuel-strategies/event/key-takeaways-taipei-workshop-developing-spent-fuel-strategies

[43] NTI, 2015. **"**Key Takeaways: Singapore Workshop on Developing Spent Fuel Strategies**,"** Dec. 4, 2015. Singapore. http://www.nti.org/about/projects/developing-spent-fuel-strategies/event/key-takeaways-singapore-workshop-developing-spent-fuel-strategies**.**

[44] NTI, 2016. "Key Takeaways: Honolulu Workshop on Developing Spent Fuel Strategies," Aug. 16-18, 2016**.** Honolulu, Hawaii. http://www.nti.org/about/projects/developing-spent-fuel-strategies/event/key-takeaways-honolulu-workshop-developing-spent-fuel-strategie.

[45] Nuclear Fuel Cycle Royal Commission, 2016. "Nuclear Fuel Cycle Royal Commission Report," May 2016. https://nuclear.yoursay.sa.gov.au/system/NFCRC_Final_Report_Web.pdf.

[46] Rosner, Robert , Lenka Kollar, and James P. Malone. 2015. *The Back-End of the Nuclear Fuel Cycle: Establishing a Viable Roadmap for a Multilateral Interim Storage Facility.* American Academy of Arts and Sciecnes. Cambridge, Mass.: American Academy of Arts & Sciences.

[47] Sloan, Robert D. 2017. *Multinational Storage of*

*Spent Nuclear Fuel and Other High-Level Nuclear Waste: A Roadmap for Moving Forward*, Cambridge, Mass.: American Academy of Arts & Sciences

[48] Tazaki, Makiko, and Yusuke Kuno. 2013. "Harmonization between a Framework of Multilateral Approaches to Nuclear Fuel Cycle Facilities and Bilateral Nuclear Cooperation Agreements," *Sustainability*, 5, pp. 3802-3818.

[49] Tazaki, Makiko, and Yusuke Kuno. 2014. "Feasibility Analysis of Establishing Multilateral Nuclear Approaches (MNAs) in the Asian Region and the Middle East," *Sustainability*, 6, pp. 9398-9417.

[50] Yudin, Yury. 2009. *Multilateralization of the Nuclear Fuel Cycle: Assessing the Existing Proposals*, Geneva, Switzerland: United Nations Institute for Disarmament Research.

[51] Yudin, Yury. 2011a. *Multilateralization of the Nuclear Fuel Cycle：A Long Road Ahead.* Geneva, Switzerland: United Nations Institute for Disarmament Research.

[52] Yudin, Yury. 2011b. *Multilateralization of the Nuclear Fuel Cycle The First Practical Steps*, Geneva, Switzerland: United Nations Institute for Disarmament Research.

# 用過核子燃料最終處置緩衝材料乾濕過程下熱力-水力(TH)特性評估
# Thermal-hydraulic (TH) properties of buffer material for spent nuclear fuel final disposal under drying and wetting process

計畫編號：MOST 107-2623-E-020-002 -NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：楊樹榮
e-mail：sryang@mail.npust.edu.tw
計畫參與人員：蔡旻峰
執行單位：國立屏東科技大學

## 摘要

核電廠使用過後的燃料棒屬於高階核廢料，國際間針對高階核廢料多採深層地質最終處置法，係將高階核廢料裝入廢料罐中再將之埋入地底，並於其周圍放置緩衝材料，用來阻隔廢棄物罐與回填材料和母岩接觸，可以避免核種經由地下水過於快速地向外遷移。在處置場近場環境溫度升高作用下，由於緩衝材料於不飽和狀態下的熱力-水力(TH)行為影響核種向外遷移的速度。本研究沿用 106 年度計畫所設計一個能夠模擬近場環境，且可量測緩衝材料於不飽和狀態下之水力傳導度的試驗系統，進一步探討溫度和單位重對於緩衝材料熱力-水力(TH)特性的影響。
關鍵詞：緩衝材料、深層地質最終處置、熱力–水力。

## Abstract

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

Keywords: Buffer material, deep geological disposal, thermal-hydraulic

## I. 前言

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

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

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

高放射性核廢料與地下水接觸乃是導致放射性核種釋出或遷移的主要途徑 [2]，本研究沿用 106 年度計畫所設計一個能夠模擬近場環境，且可量測緩衝材料於不飽和狀態下之水力傳導度的試驗系統。研究成果除可做為未來緩衝材料現場厚度與乾單位重設計之依據，並且可充分瞭解核廢料高溫衰變熱對緩衝材料熱力-水力(TH)特性，以利建立我國本土化的用過核子燃料最終處置緩衝材料再飽和過程的審查重點，確保深層地質最終處置場廢棄物處置設施之安全。

## II. 試驗材料與研究方法

2.1 試驗材料

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

表 1 BH 膨潤土物理性質

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

2.2 研究方法

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



圖 1 儀器設備圖

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

2.2.1 水汽平衡法(Vapour Equilibrium Technique)

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

表 2 飽和溶液於不同溫度下之相對濕度與吸力值

| | Temperature | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 40℃ | | 60℃ | |
| Saturated solution | RH (%) | Suction (MPa) | RH (%) | Suction (MPa) |
| NaCl | 74.9 | 41.8 | 74 | 46.3 |
| $K_2SO_4$ | 96.8 | 4.7 | 96 | 6.3 |
| $Mg(NO_3)_2$ | 48 | 106.1 | 40.5 | 138.9 |
| KCl | 82.5 | 27.8 | 80.1 | 34.1 |
| $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ | 32 | 164.7 | 30 | 185.1 |
| $NaNO_3$ | 70.8 | 49.9 | 67 | 61.6 |
| LiCl | 10.8 | 321.7 | 10.2 | 351 |

2.2.2 水平土柱法

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

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

其中,$D(\theta)$為土壤擴散係數;$\theta$ 為土壤體積含水量;$\lambda=\frac{x}{\sqrt{t}}$,$x$= 濕潤鋒的位置,$t$= 入滲時間;

$\Delta\lambda$ 為兩剖面間溼潤鋒前進之距離；$\Delta\theta$ 為兩剖面間之含水量差。

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

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

其中 $C$ 為比水容積，係為土壤含水量與基質吸力之比值，如下式所示：

$$C = \frac{\Delta\theta}{\Delta\varphi} \qquad (3)$$

其中$\Delta\varphi$ =兩剖面間基質吸力差。

## III. 結果與討論

3.1 熱力-水力(TH)下土壤水份特性曲線(SWCC)

本研究利用水汽平衡法及水平土柱法所量測的土壤吸力與含水量之結果，探討溫度及含水量對吸力之影響。圖 2 至圖 15 為 BH 膨潤土分別在單位重 1.6 g/cm$^3$、1.7 g/cm$^3$、1.8 g/cm$^3$ 的條件下，NaCl、KCL、$MgCl_2$・$6H_2O$、$NaNO_3$、$K_2SO_4$、LiCl、$Mg(NO_3)_2$ 等七種鹽溶液，在溫度 40℃與 60℃試驗水汽平衡法之重量變化圖。

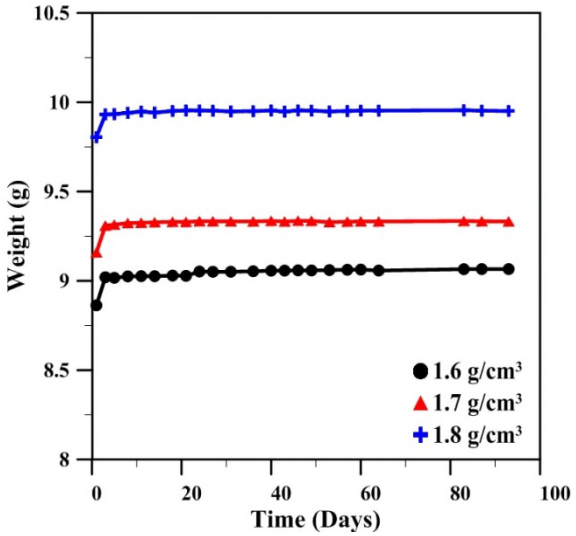



圖 2 40℃ NaCl 重量變化圖

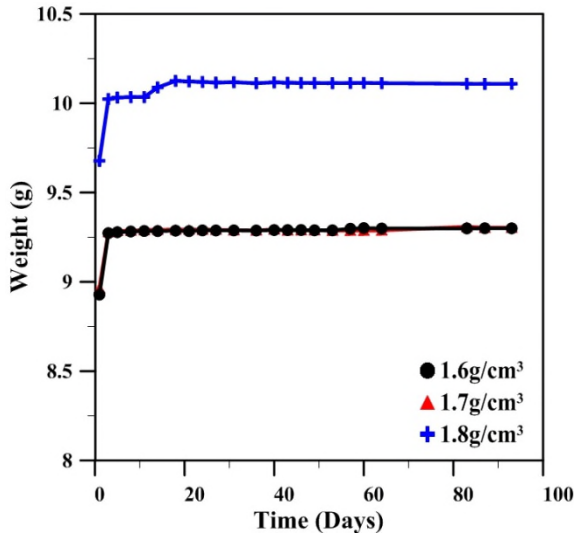



圖 3 40℃ KCL 重量變化圖

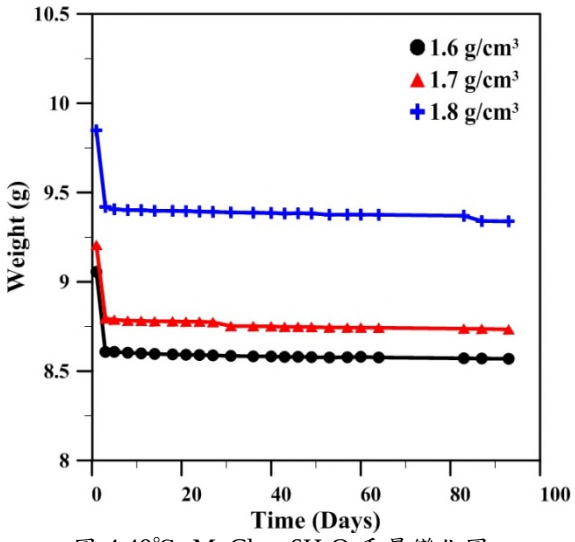



圖 4 40℃ $MgCl_2$・$6H_2O$ 重量變化圖

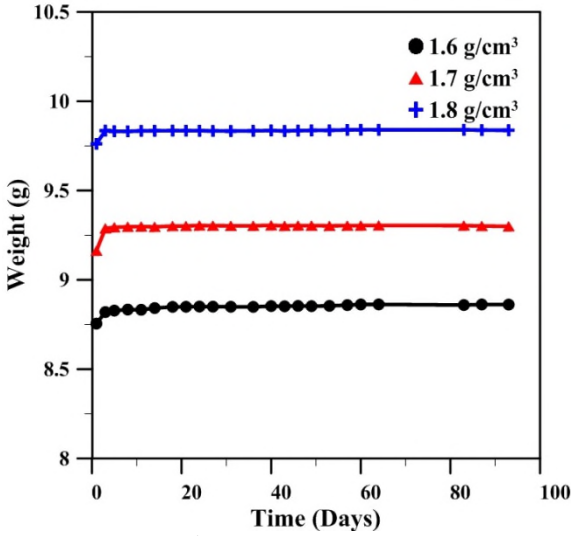



圖 5 40℃ $NaNO_3$ 重量變化圖

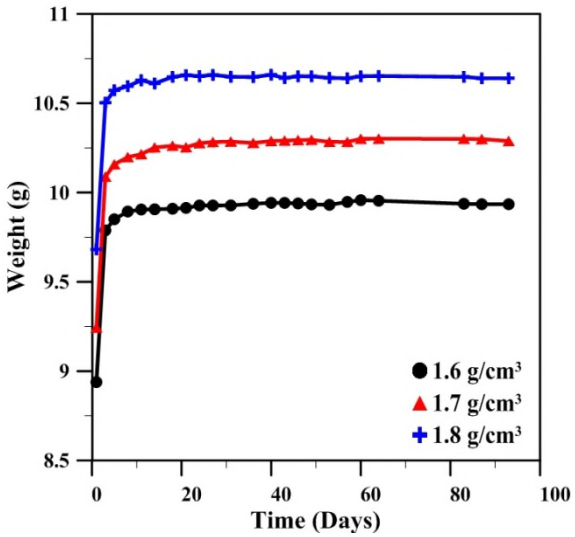



圖 6 40℃ $K_2SO_4$ 重量變化圖

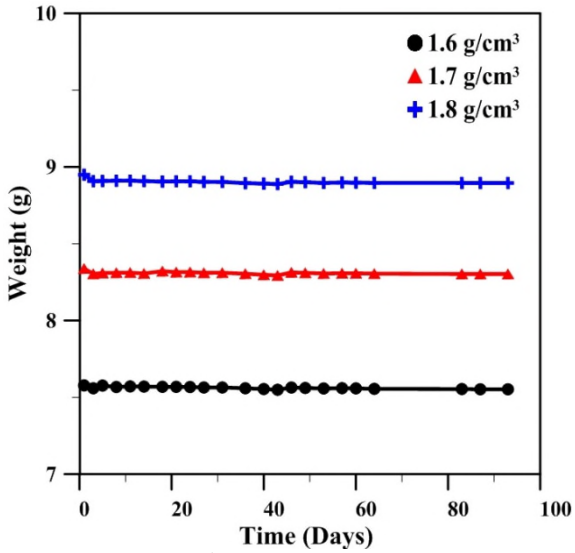



圖 7 40℃ LiCl 重量變化圖

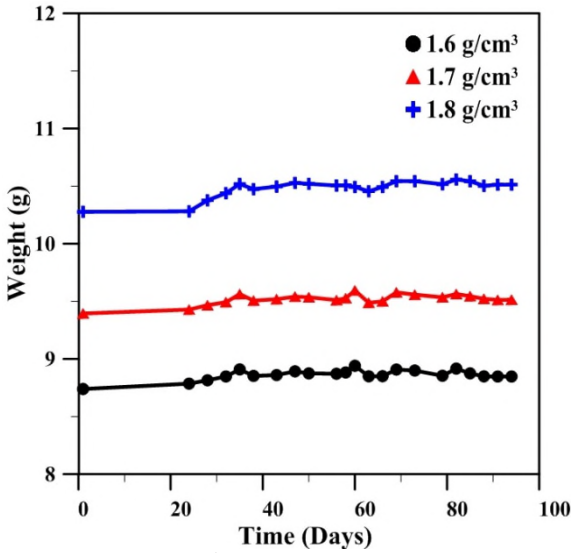



圖 10 60℃ KCL 重量變化圖

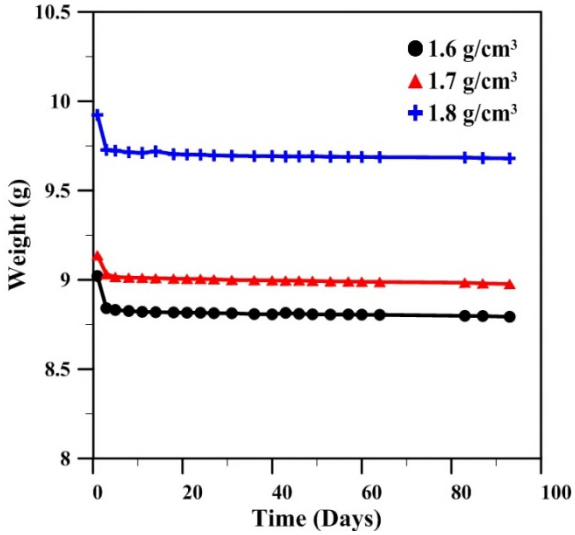



圖 8 40℃ Mg(NO3)2 重量變化圖

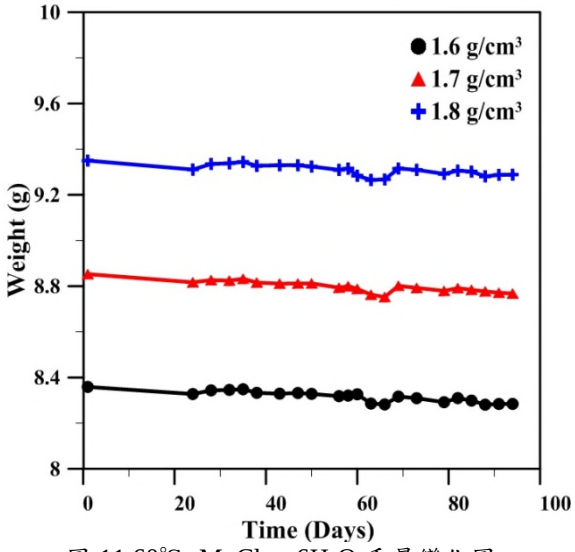



圖 11 60℃ $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 重量變化圖

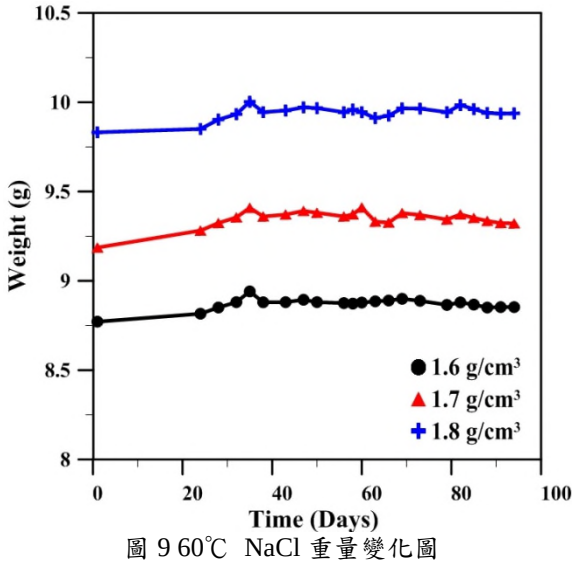



圖 9 60℃ NaCl 重量變化圖

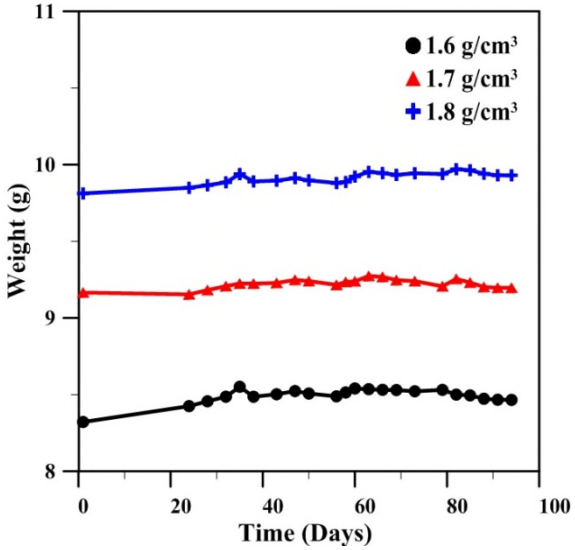



圖 12 60℃ $NaNO_3$ 重量變化圖

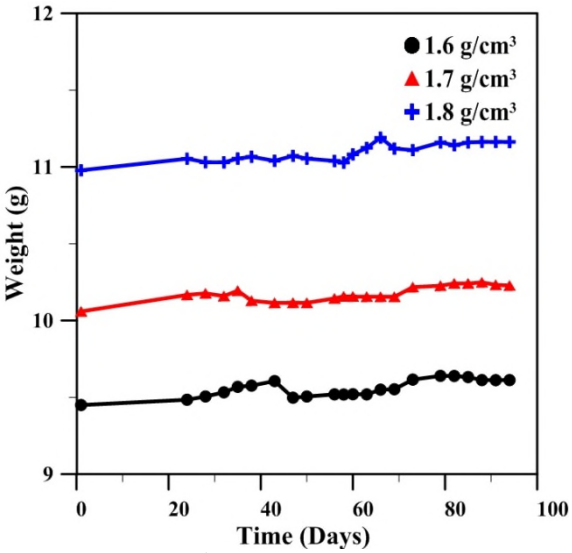



圖 13 60℃ $K_2SO_4$ 重量變化圖

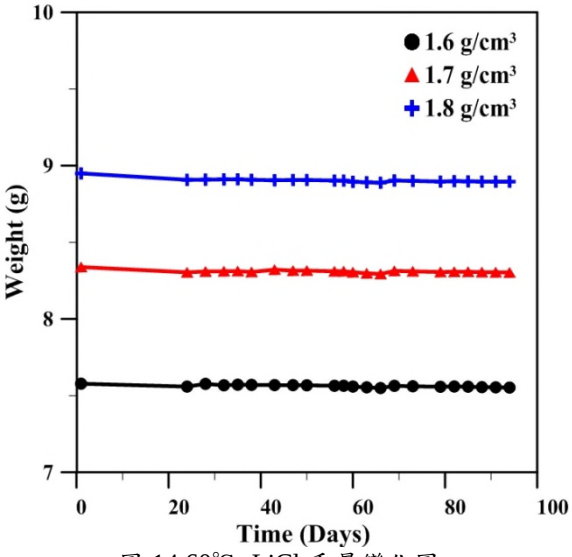



圖 14 60℃ LiCl 重量變化圖

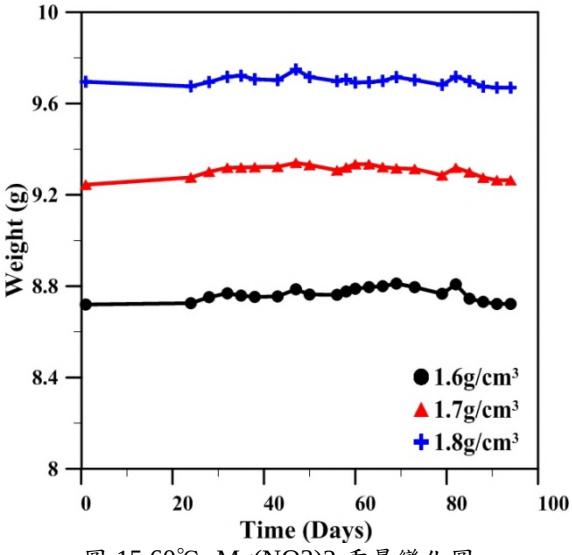



圖 15 60℃ Mg(NO3)2 重量變化圖

當試體剛壓實完的濕度小於玻璃容器內之濕度時，試體放入容器內，在玻璃罐內試體含水量會隨時間而增加，試體的溼度會逐漸與玻璃容器內之濕度達到平衡，如圖 2、圖 3、圖 5、圖 6、圖 9、圖 10、圖 12、圖 13、圖 15 所示，反之，在當試體的濕度大於玻璃容器內之濕度時，試體放入容器中，其試體含水量會受到玻璃罐中鹽溶液所產生之濕度影響而下降，如圖 4、圖 7、圖 8、圖 11、圖 14 所示。

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

圖 16 及圖 17 為 BH 膨潤土分別在溫度 40℃及 60℃之土壤水份特性曲線(SWCC)。由圖中可知，隨著吸力的提高，單位重對 SWCC 的影響越不明顯，只有在較低吸力情況下，單位重對 SWCC 的影響較明顯。

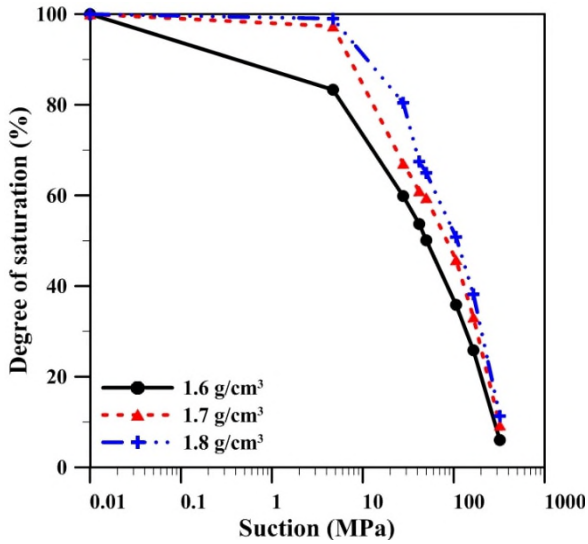



圖 16 40℃各單位重 SWCC

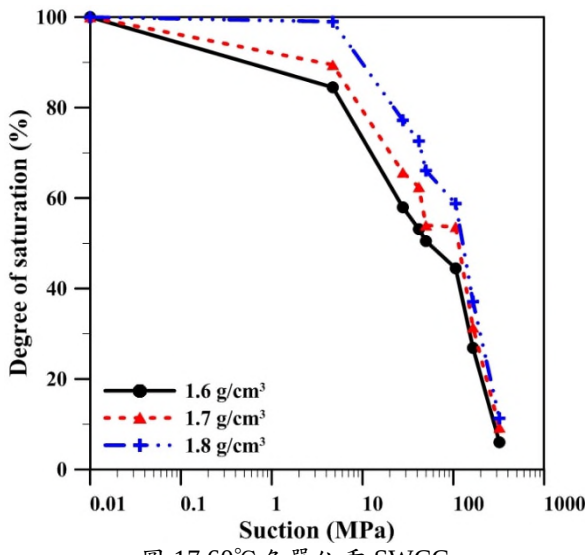



圖 17 60℃各單位重 SWCC

圖 18 至圖 20 為單位重 1.6 g/cm$^3$、1.7 g/cm$^3$、1.8 g/cm$^3$ 於不同溫度下的 SWCC。由驗結果得知，不同溫度下 SWCC 差異性不大。

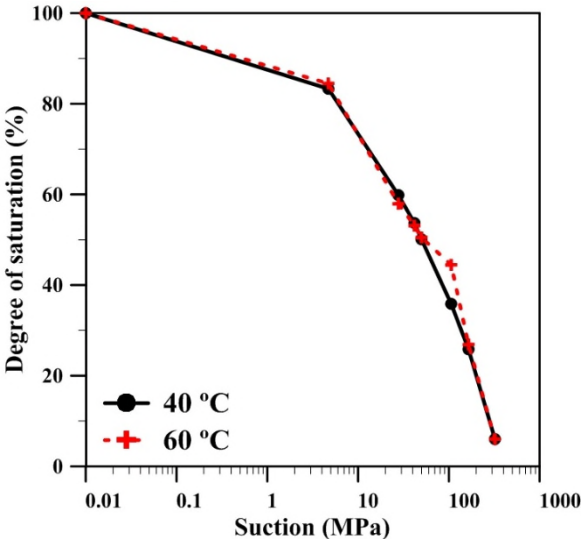



圖 18 不同溫度單位重 1.6 g/cm3 SWCC 比較

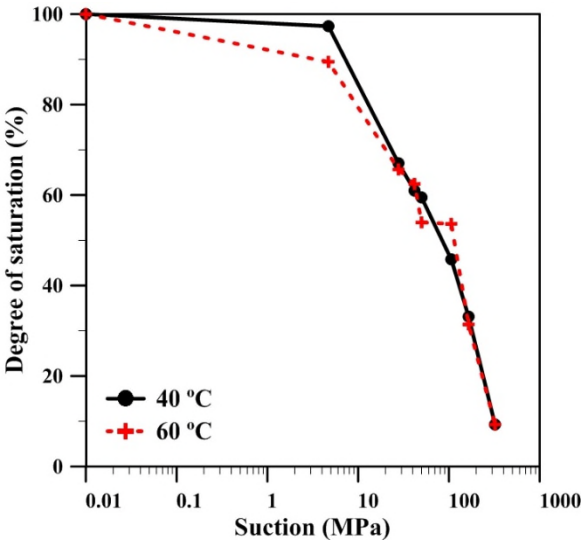



圖 19 不同溫度單位重 1.7 g/cm3 SWCC 比較

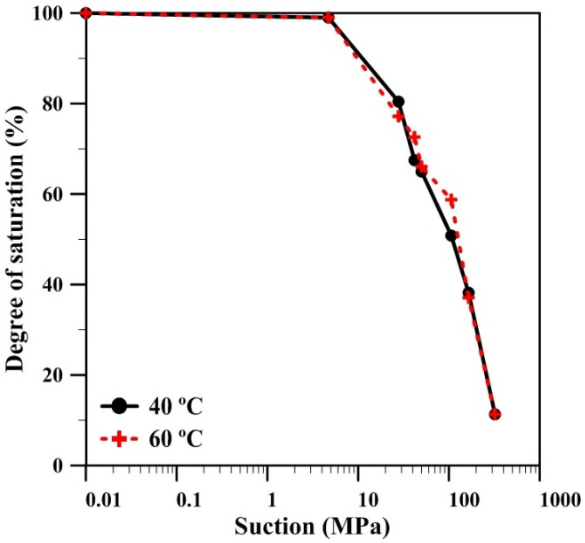



圖 20 不同溫度單位重 1.8 g/cm3 SWCC 比較

3.2 熱力-水力(TH)下不飽和土壤擴散係數

本研究利用水平土柱法試驗並根據 Bohzmann 轉換公式(1)計算土壤擴散係數，進而根據式(2)求取不飽和土壤水力傳導度。40℃各單位重之土壤體積含水量與擴散係數如圖 21 所示。由圖中可知，在相同含水量下，單位重 1.6g/cm$^3$ 時土壤擴散係數較單位重 1.7g/cm$^3$ 及單位重 1.8g/cm$^3$ 之土壤擴散係數來得小，但在溫度 60℃，單位重 1.8g/cm$^3$ 之土壤擴散係數則最小，如圖 22 所示。

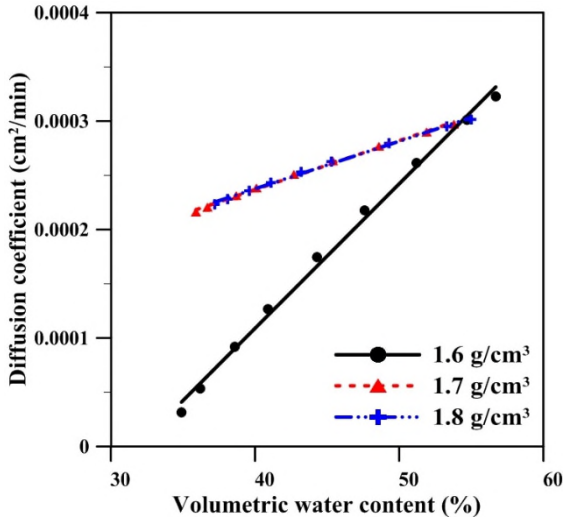



圖 21 40℃不同單位重體積含水量與擴散係數圖

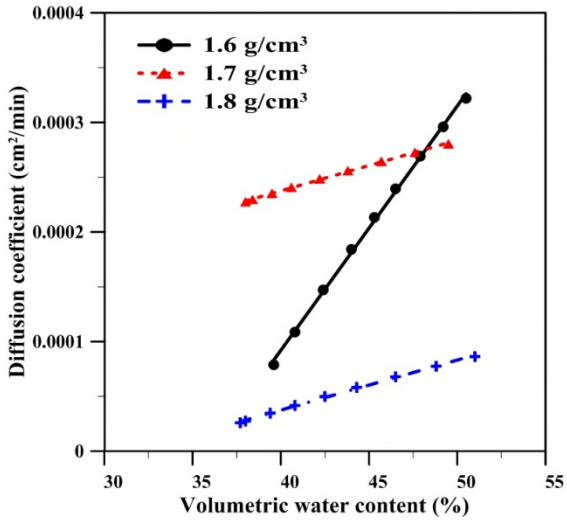



圖 22 60℃不同單位重體積含水量與擴散係數比較圖

3.3 不飽和土壤水力傳導度

本研究根據水汽平衡法所求得之土壤 SWCC 與水平土柱法所求得之土壤擴散係數，利用式(2)土壤擴散係數與水力傳導度關係式，求得不飽和水力傳導度之值。於溫度 40℃及 60℃及於單位重 1.6 g/cm$^3$、1.7 g/cm$^3$、1.8 g/cm$^3$ 飽和與不飽和時之水力傳導度及含水量關係如圖 23 至圖 25 所示，由圖中可知，不同溫度與單位重下，隨著含水量提高，水力傳導度愈大。且含水量越高，單位重 1.6 g/cm$^3$ 之水力傳導度大於單位重 1.7 g/cm$^3$ 及 1.8 g/cm$^3$，然而，溫度對水力傳導度影響較不穩定，其原因為孔隙水的粘滯度會受到溫度變化而有影響，導致土壤

水力傳導度變化極大。

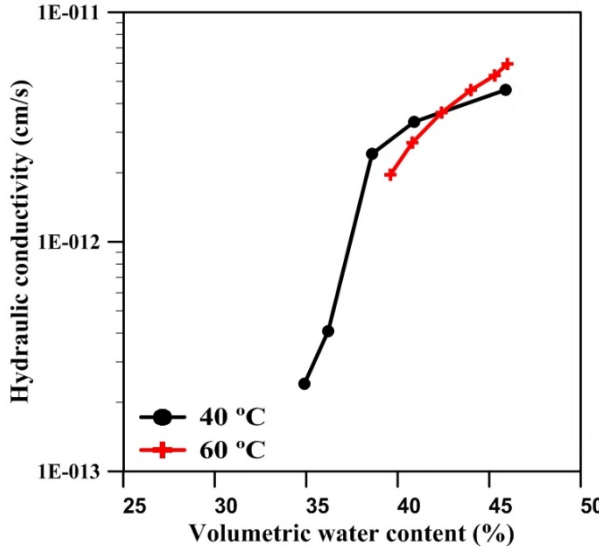



圖23 不同溫度單位重1.6 g/cm$^3$之土壤水力傳

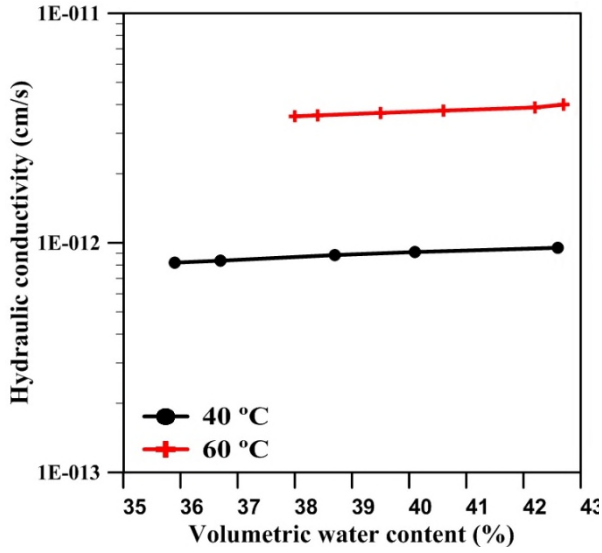



圖 24 不同溫度單位重 1.7 g/cm$^3$ 之土壤水力傳

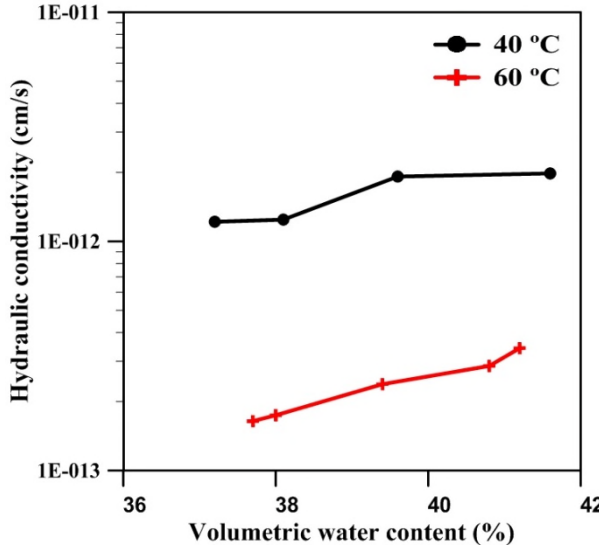



圖 25 不同溫度單位重 1.8 g/cm$^3$ 之土壤水力傳

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

## IV. 結論

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

## 參考文獻

[1] 台灣電力公司，「用過核子燃料最終處置計畫-潛在母岩特性調查與評估階段」，成果報告，2013。

[2] 黃偉慶，「用過核子燃料深層地質處置場近場緩衝材料耦合效應研析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託計畫研究期末報告， 2014。

[3] 張瑞宏、黃偉慶，「深地層處置設施緩衝材料熱-水力-力學耦合模擬研析」，行政院原子能委員會放射性物料管理局，委託計畫研究期末報告，2015。

[4] 郭永海、王駒、金遠新，「世界高放廢物地質處置庫選址研究概況及國內進展」，地學前緣 Earth Science Frontiers，第 8 卷，第 2 期，第 327-332 頁，2001。

[5] Schneider, A. “Neue dagramme zur bestimmung der relativen luftfeuchtigkeit uber gesattigten wasserigen salzslosungen und wasserigen schwefelsaurelosingen beiverschiedenen temperaturen”, Holz als Rohund Werkstoff18, 269–272. , 1960.

[6] van Genuchten, M. “A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” Soil .Sci. SOc. Am.J. 44,pp.892—898. 1980.

# 氧化還原敏感性核種於深地層處置遷移之物種評估與研究(I)－氧化還原敏感性核種的物種分析技術研究

計畫編號：MOST 107-NU-E-242-001-NU

計畫主持人：鄭文熙教授

助理人員：張家瑀、許蕙文、黃婉琪

執行單位：輔英科技大學職業安全衛生系

**摘要**

本計畫之實驗方法與分析成果可分為兩個部分；首先已成功建立一套 IC 與 ICP-OES 之碘與硒物種定量分析方法，並分別完成碘物種濃度 50 至 500 ppm 間有良好的線性範圍，硒濃度 5 至 50 ppm 間有良好的線性範圍。

碘與硒核種在好氧水溶液環境中主要物種（species）為以陰離子：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）的形態存在，導致易於在天然介質中遷移，以 ASTM 批次實驗方法，利用 1g 與 50mL 的固液比條件下，經 7 天震盪後，利用 IC 與 ICP-OES 個別分析其物種濃度與定量濃度，並可從分配係數 $K_d$ 值（mL/g）的結果發現，花崗岩與膨潤土對碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）具有不同的吸附行為，可由其 $K_d$（4 價硒，$SeO_3^{2-}$）大於 $K_d$（碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、6 價硒，$SeO_4^{2-}$）得知，同時發現花崗岩與膨潤土幾乎不吸附碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。

**關鍵字：**高效率離子層析儀、碘離子、碘酸根離子、4 價硒、6 價硒、分配係數

**Abstract**

Among the methods for iodine (I) and selenium (Se) speciation we knew, this study propose a new method by coupling the Ion Chromatography (IC) and the Induced Couple Plasma Optic Emission Spectrometer (ICP-OES), thus to measure simultaneously the concentration of $I^-$, $IO_3^-$, $SeO_3^{2-}$ and $SeO_4^{2-}$ in aquatic solutions; within the detection limit for I (50-500ppm) and Se (5~50 ppm).

The method of using IC and ICP-OES measurements for I and Se species has been successfully developed in this study and also been recognized for the I and Se speciation; as well as been developed to be used as a detector of I and Se. $^{129}I$ and $^{79}Se$, with long half-life of million years, are both fission products in High-Level Radioactive Waste (HLW) as well as a critical radionuclide for the assessment of geological disposal of HLW. According to experimental results for distribution coefficients ($K_d$), $SeO_3^{2-}$ (IV) showed a sorption behavior than $I^-$, $IO_3^-$, $SeO_4^{2-}$(VI) in bentonite and granite by batch sorption tests.

**Keywords:** Ion Chromatography(IC), $I^-$, $IO_3^-$, $SeO_3^{2-}$ , $SeO_4^{2-}$ , distribution coefficients ($K_d$)

## 一、前言

用過核燃料處理與處置工作是目前全世界核能發電國家均面臨的棘手議題，除了含有萬年以上之高毒性且長半化期核種，如：Pu（Plutonium，鈈）、Np（Neptunium，鎿）等以外，最終處置安全性需考量需將其與人類生活圈長久隔離，確保人民健康與福祉。在我國尚未建立深地層地下實驗室之前，如何在實驗室內模擬深地層環境條件（低氧且氧化還原電位小於 0），並能精確地度量與分析不同價態的放射性核種將會是一大挑戰。

碘-129 與硒-79 於用過核燃料中均為重要的分裂產物，且半化期均長達十萬年以上，加上兩者於環境中均以陰離子形式存在，且不同氧化還原條件下，具有不同物種形式存在，導致易於在天然地質環境中遷移。因此，為了研究成果能應用於國內高放射性廢棄物處置，本計畫除了開發與建立一套可以度量與分析不同碘與硒物種(碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）)的標準方法以外，並以國內地質環境的黏土及岩石來進行實驗。考慮的材料包括：金門花崗岩、台灣日興土與懷俄明膨潤土 MX-80。國內台東樟原地區日興礦場生產之膨潤土，是台灣唯一富含蒙脫石為主的膨脹性黏土，而目前較具規模也商業化的產品－美國懷俄明州開採的膨潤土 MX80 為鈉型膨潤土，亦是目前我國高放處置計畫中的候選緩衝回填材料。本研

究實驗岩樣為工研院在金門地區地質調查鑽探調查所取得的岩心試樣，主要的礦物組成為石英、鈉長石、白雲母等。岩心試樣經粗敲、搗碎、篩分後，取 18 至 50 網目(約 1~0.3 mm 岩樣微粒)。

## 二、研究目的

本計畫主要乃針對地質處置的不同實驗環境條件對放射性核種的物種變化影響進行探討與分析研究。因此，本計畫預計完成建立一套標準物種分析方法進行分析不同碘與硒物種，並定量分析不同核種（碘與硒）之穩定同位素的物種濃度，如：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。再者，以 IC 搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀(ICP-OES)或感應耦合電漿原子質譜儀(ICP-MS)，進一步定量分析不同碘與硒物種，如：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）及 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）之穩定同位素的物種最低可偵測濃度（Detection Limit）。

此外，本計畫主要將以探討台灣與美國膨潤土及花崗岩，對不同碘與硒物種的吸附特性與差異；冀期得以提供日後放射性廢棄物處置場選址工作之依據。實驗材料以採取商業化之產品--美國懷俄明州產之 MX-80 膨潤土，以及臺灣日興土（台東產膨潤土的一種）為主要研究對象，透過 ASTM 批次法分析不同碘與硒物種於臺灣本土花崗岩與膨潤土之吸附行為之差異，並探討其化學緩衝性，俾以作為日後可能處置場址施工條件之重要參考。

## 三、研究方法

本研究以高效率離子層析儀(IC)建立一套標準物種分析方法，進行分析不同碘與硒物種，並定量分析不同核種(碘與硒)之穩定同位素的物種濃度，如：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。再者，以 IC 搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀(ICP-OES)或感應耦合電漿原子質譜儀(ICP-MS)，進一步定量分析不同碘與硒物種，如：：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）之穩定同位素的物種最低可偵測濃度（Detection Limit），並透過 ASTM 批次法分析不同硒物種於臺灣本土花崗岩與膨潤土之吸附行為之差異。如下：

### 3.1 實驗材料

(1) **美國膨潤土**：美國懷俄明州 MX-80 膨潤土。

(2) **臺灣日興土**：台東樟原礦區之膨潤土。

(3) **金門花崗岩**：金門烏坵 W 區之粉碎花崗岩樣品(粒徑<1mm)。

### 3.2 物種分離方法

**(1) 離子層析儀配合感應耦合電漿原子發射光譜儀**

以高效率離子層析儀（IC，Ion Chromatography）（**圖 1**）配合感應耦合電漿原子發射光譜儀（ICP-OES，Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy）執行不同碘與硒物種之濃度定量分析，包括：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。離子層析儀所能分析的離子幾乎涵蓋所有的陽離子及陰離子，在某些分析上，它取代了 A.A.、Emission、GC、NMR、Ion Meter 等。目前所能分析的離子有：鹵素，有機酸，有機鹽類，磷酸鹽，胺等。其特點包括：（1）離子間不會互相干擾而影響檢出之正確性；因此，（2）可同時分析多種離子，並進行定性及定量分析。（3）儀器檢測的靈敏度高（10 ppb 以下），適用濃度範圍廣（0.001~103 ppm）。（4）分析速度快，每個離子不超過兩分鐘。（5）所使用之溶媒為一般無機溶劑，費用經濟。

感應耦合電漿原子發射光譜儀（**圖 2**）為微量元素分析常用之檢測儀器，係利用通過高頻電感耦合產生電漿體放電的光源，進行原子發射光譜分析的方法；是為一種火焰溫度範圍 6000～10000K 的火焰技術。其原子發射光譜的發射強度即表示樣品中元素的濃度，為一種新型激發光源，性能優異，應用廣泛。此技術可提供實驗室一相對簡單及具成本效益之元素檢測方法；可以定量濃度低至 ppm，甚至 ppb 等級之元素。

（a）　　（b）

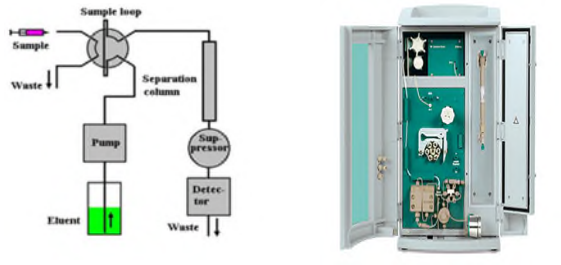



圖 1、離子層析儀（IC）分析原理與照片。

ICP-OES（PerkinElmer 7000DV）該儀器為國立成功大學地球科學系穩定同位素實驗室所有，在本計畫中將搭配 IC 進行不同碘與硒物種之元素濃度的定量分析，包括：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）及 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。ICP-OES 的偵測極限可達到 ppb 等級，且能進行多元素分析，並能達到定性、定量的效果。測試樣品的時候需配製檢量線，而測試樣品的最高濃度不得超過檢量線的上限，其相關係數（$R^2$）達到 0.9999 為佳，而分析時根據不同元素其相關係數最好均大於 0.99 以上，進而達到定量分析。

（a）　　（b）

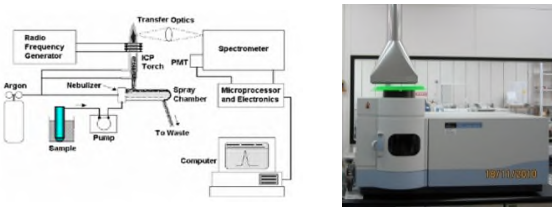



圖 2、ICP-OES 的進樣流程與主機。

### 3.3 批次法

本研究主要乃利用已完成建立之標準物種分析方法，包括：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）和 6 價硒（$SeO_4^{2-}$），加上 ASTM C1733-10（2010）批次法，進行，探討不同核種（碘與硒）於台灣日興土、美國膨潤土與金門花崗岩之吸附行為的差異性。

本工作項目乃利用 ASTM C1733-10（2010）的標準方法，進行模擬台灣日興土、美國膨潤土與金門花崗岩對碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）的吸附實驗，即利用 IC 搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀（ICP-OES）進行碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）濃度變化的分析，了解碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）在膨潤土與花崗岩中的分布情形。於本研究中，所使用的收附模式（sorption model）為：「當核種在液相中的濃度很低，而且吸附於固相所耗費的時間很短時」，針對核種在固、液相上的比例，將可以下列關係式表示：

$$r = \frac{\partial C}{\partial t} = -k_{f1}C + \frac{M_S}{V}k_{b1}S \quad (1)$$

其中，$S$：平衡時核種吸附於吸附相的量（meq $g^{-1}$）

$C$：平衡時核種殘留於溶液中的濃度（meq $mL^{-1}$）

$r$：在液相中污染物濃度的淨反應速率（net reaction rate）（$ML^{-3}t^{-1}$）

$k_{f1}$：吸附反應的一次反應速率係數（$t^{-1}$）

$k_{b1}$：脫附反應的一次反應速率係數（$t^{-1}$）

$M_S$：固相的總質量（total mass of porous media）（g）

$V$：液相的總體積（total volume）（$L^3$）

當反應達平衡後，淨反應速率 r = 0，則

$$k_{f1}C = \frac{M_S}{V}k_{b1}S$$

$$\Rightarrow S = \frac{Vk_{f1}}{M_S k_{b1}}C$$

$$\Rightarrow S = K_d C \quad (2)$$

其中，$K_d$ 為分配係數（mL $g^{-1}$）。式（1）為線性吸附的動力反應式，而式（2）為線性吸附的平衡反應式。

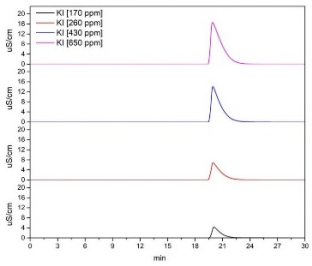
## 四、結果與討論

### 4.1 碘物種分離與鑑定分析

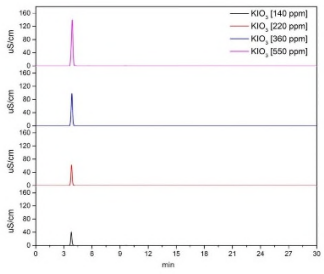
本項工作首先利用 ICP-OES（Perkin Elmer 7000DV）定量分析不同碘物種：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）之濃度（50～500 ppm）。主要乃是利用已知的碘化鉀(KI)與碘酸鉀($KIO_3$)粉末溶於去離

子水中；以四位數天秤精秤，配置數個不同濃度之碘離子($I^-$)與碘酸根離子($IO_3^-$)之濃度(50～500 ppm)。經過反覆測試後，選擇陰離子層析管柱（Metrosep A Supp3, 4.6 x 250 mm），並以 1.0 mM $NaHCO_3$ 與 3.2 mM $Na_2CO_3$ 流洗液，在流速每分鐘 0.7mL 下沖提，可將碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）成功的分離於 3 與 20 分鐘附近，並以其已知濃度（50～500 ppm）與波峰積分面積建立濃度線性檢量線，在碘物種濃度 50 至 500 ppm 間有良好的線性範圍（**圖 3 與表 1**）。實驗結果顯示，碘離子($I^-$)與碘酸根離子($IO_3^-$)線性相關係數均大於 0.95 以上，顯示可利用在此濃度範圍成功地分離碘離子($I^-$)與碘酸根離子($IO_3^-$)。

（a）碘離子（$I^-$）




（b）碘酸根離子（$IO_3^-$）




（c）碘離子（$I^-$）+碘酸根離子（$IO_3^-$）

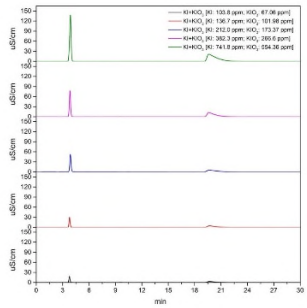



圖 3、碘物種：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）的分離與鑑定分析。

表 1、高效率離子層析儀：
碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）分析數據

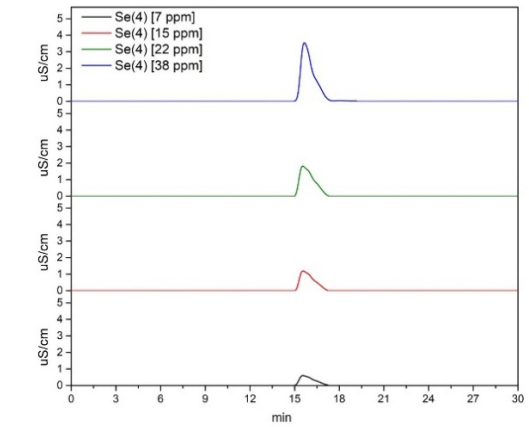
| 碘物種 | C（ppm） | Area (uS/cm*sec) | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| $KIO_3$ | 140 | 372.256 | 0.9977 |
| | 220 | 602.531 | |
| | 360 | 1060.105 | |
| | 550 | 1677.123 | |
| KI | 170 | 261.75 | 0.9836 |
| | 260 | 503.082 | |
| | 430 | 1020.023 | |
| | 650 | 1372.077 | |

4.2 硒物種分離與鑑定分析

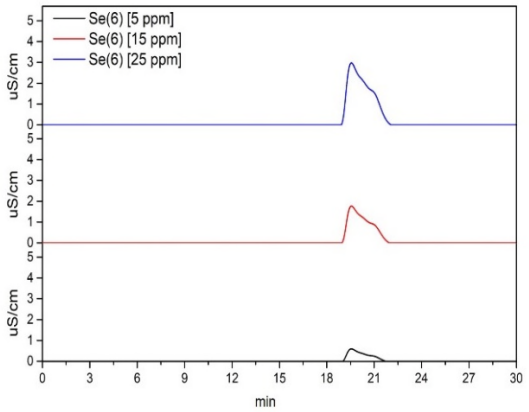
本項工作首先利用 ICP-OES（Perkin Elmer 7000DV）定量分析不同硒物種：4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）之濃度(5 至 50 ppm)。本項工作主要乃是利用已知的二氧化硒（$SeO_2$）與硒酸鈉（$Na_2SeO_4$）粉末溶於去離子水中；以四位數天秤精秤，配置數個不同濃度之 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）之濃度（1～50 ppm）。經過反覆測試後，選擇陰離子層析管柱（Metrosep A Supp3, 4.6 x 250 mm），並以 1.0 mM $NaHCO_3$ 與 3.2 mM $Na_2CO_3$ 流洗液，在流速每分鐘 0.7mL 下沖提，可將 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）成功的分離於 16 與 20 分鐘附近，並以其已知濃度（5～50 ppm）與波峰積分面積建立濃度線性檢量線，在硒濃度 5 至 50 ppm 間有良好的線性範圍（**圖 4 與表 2**）。實驗結果顯示，4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）線性相關係數均大於 0.99 以上，顯示可利用在此濃度範圍

成功地分離 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。

（a）4 價硒（$SeO_3^{2-}$）




（b）6 價硒（$SeO_4^{2-}$）




（c）4 價硒（$SeO_3^{2-}$）＋ 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）

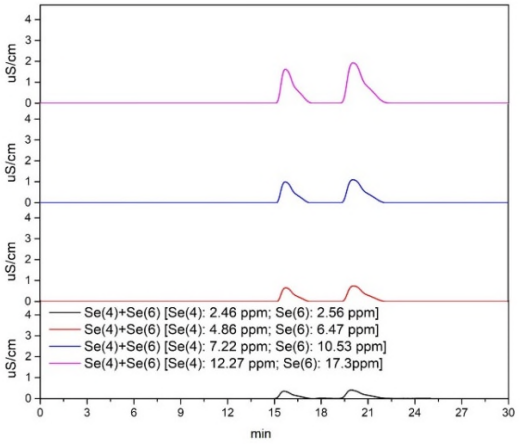



圖 4、硒物種：4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）的分離與鑑定分析。

表 2、高效率離子層析儀：4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）分析數據

| 硒物種 | C（ppm） | Area (uS/cm*sec) | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| Se(4) | 7 | 42.211 | 0.9948 |
| | 15 | 85.622 | |
| | 22 | 131.548 | |
| | 38 | 205.299 | |
| Se(6) | 5 | 61.795 | 0.9999 |
| | 15 | 184.290 | |
| | 25 | 311.690 | |

### 4.3 分配係數（$K_d$）-- 碘與硒物種：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）

為了更真實地反應放射性廢棄物處置場的放射性核種遷移行為，主要探討不同初始濃度($C_0$=5, 10, 20ppm)碘與硒物種：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）在去離子水中，於台灣日興土(ZH)、美國膨潤土(MX)、與金門花崗岩(G)上的吸附實驗。以 ASTM 批次實驗法，利用 0.5g 與 50 mL 的固液比條件下，經 7 天震盪後，利用 IC 與 ICP-OES 個別分析其物種濃度與定量濃度，交叉比對後，其實驗結果整理如**圖 5**，並由分配係數 $K_d$ 值（mL/g）的結果發現，台灣日興土、美國膨潤土、與金門花崗岩對碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）具有不同的吸附行為，可由其 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）的 $K_d$ 大於 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）、碘離子（$I^-$）

與碘酸根離子（$IO_3^-$）的 $K_d$ 得知，並可發現台灣日興土、美國膨潤土、與金門花崗岩幾乎不吸附 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）、碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$），其 $K_d$ 值（mL/g）≒0。

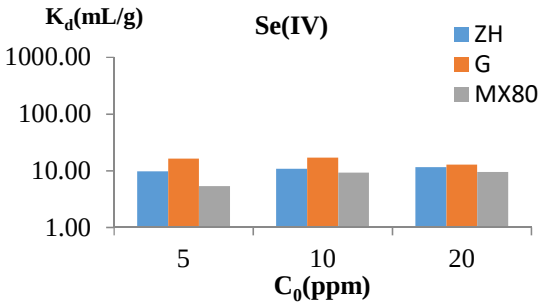



圖 5　分配係數(4 價硒)

## 五、結論與建議

本計畫已成功建立一套 IC 與 ICP-OES 之碘與硒物種定量分析方法，並分別完成碘物種濃度 50 至 500 ppm 間有良好的線性範圍，硒濃度 5 至 50 ppm 間有良好的線性範圍。碘與硒核種在好氧水溶液環境中主要物種（species）為以陰離子：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）的形態存在，導致易於在天然介質中遷移，並可從批次實驗結果發現，4 價硒（$SeO_3^{2-}$）被吸附率大於 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）、碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$），由文獻可知，如：針鐵礦、蒙脫石、農業及森林土壤等，均具有對 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）的吸附行為。

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

## 參考文獻


[1] ASTM （2010） American Society for Testing and Materials. Philadelphia, C1733-10.

[2] Crank J. , 1975 . The Mathematics of Diffusion , 2nd ed. , OxfordUniversity Press London.

[3] Hsu,C. N., Y. Y. Wei, J. T. Chuang, C. L. Tseng, J. Y. Yang, C. H. Ke, H. P. Cheng, and S. P. Teng （2002） Sorption of Several Safety Relevant Radionuclides on Granite and Diorite – A Potential Repository Host Rock in Taiwan Area, *Radiochimica Acta*, 90, pp.659-664

[4] TsaiS.C., Ouyang S., Hsu C. N. Sorption and diffusion behavior of Cs and Sr on Jih-Hsing bentonite. Appl. Rad. Isotopes 54 （2001） 209-215.

[5] T.E Payen et al., Relationship of quantitative X-ray diffraction measurements of geologic materials to Cs sorption. Radiochim. Acta, 90 （2002） 705-711

[6] Xia,X., K. Iijima, G. Kamei and M. Shibata （2006） Comparative study of cesium sorption on crushedand intact sedimentary rock , *Radiochimica Acta*, 94, pp.683–687

[7] Lee, C. P., L. P. Lan, Y. L. Jan, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2006） Sorption of Cesium on Granite Under Aerobic and Anaerobic Conditions, *Radiochimica Acta*, 94, pp.679-683

[8] Lee, C. P., Y. L. Jan, L. P. Lan, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2007） Anaerobic and Aerobic Sorption of Cesium and Selenium on Mudrock, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274, pp.145-151

[9] Lee, C. P., S. C. Tsai, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C.N.Hsu （2008） Comparative Study on Sorption of Individual and Coupling Cesium and Selenium on Mudrock, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 115-119.

[10] Lee, C. P. Y. M. Kuo, S. C. Tsai, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2008） A Numerical Analysis for Characterizing the Sorption/Desorption of Cesium in Crushed Granite, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 343-349.

[11] Lee, C. P., S. C. Tsai, Y. L. Jan, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2008） Sorption and Diffusion of HTO and Cesium in Crushed Granite Compacted to Different Lengths,*Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 371-378

[12] Taiwan Power Company （2009） Preliminary Technical Feasibility Study for Final Disposal of Spent Nuclear Fuel - 2009 Progress Report （Summary） Taiwan.

[13] Tsai, T. L., C. P. Lee, T. Y. Lin, H. J. Wei, and L. C. （2010） Men Evaluation of Sorption and Diffusion Behavior of Selenium in Crushed Granite by Through-Diffusion Column Tests, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 285, pp. 733-739.

[14] 李振誥、吳銘志、陳俊焜，1997，土壤持水曲線碎形維度之研究-案例說明，臺灣水利，Vol.45，No.3，pp. 29-41。

[15] 周定芳、吳銘志、鍾廣吉，1997，儲集層特性分析技術之建立與應用實例，臺灣石油地質，第三十一期，第 203-232 頁。

[16] 劉文忠，銫、鍶及鈷在安山岩及珊瑚礁石灰岩中遷移行為之研究，國立清華大學原子科學系研究所，博士論文，1990 年 7 月。

[17] 許俊男，「在模擬地下水中沸石和高嶺土對鍶銫核種的吸附機制研究，」國立清華大學原子科學系，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告（1996）。

[18] 林哲毅，「從緩衝材料觀點研究放射核種在膨潤土中的吸附與擴散行為，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（1997）。

[19] 張顧齡，「酸鹼度和溫度對鍶銫在膨潤土中吸附與擴散行為之影響，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（1997）。

[20] 李俞鋆，「硒銫在花崗岩上地下水中的吸附與擴散行為，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（2004）。

[21] 李敏、梁天瑞，美麗新世界：核能與文明的永續未來（2005）。

[22] 鄒蕙如（2005）最終處置場黏土障壁材料之傳輸行為研究，國立中央大學土木研究所，碩士論文，2005 年 7 月。

[23] 李傳斌（2009）合成地下水與海水中硒銫在粉碎花崗岩與泥岩的收附與擴散行為，國立清華大學生醫工程與環境科學系，博士論文，2009 年 1 月。

# 乾式貯存系統監測檢驗技術研究
# Feasibility Study of NDE Techniques Applied to Drystorage Systems

計畫編號：107-2623-E-390 -001 -NU
計畫主持人：張惠雲
e-mail：hychang@nuk.edu.tw
執行單位：國立高雄大學土木與環境工程學系

## 摘要

國內台電公司目前已於第一與第二核能發電廠內規畫設計與興建用過核子燃料貯存設施其主要組件包括貯存用過核子燃料之不銹鋼密封鋼筒與提供屏蔽之混凝土護箱 (簡稱第一期露天乾貯)。美日國際研究已建議，將密封鋼桶不銹鋼材料之應力腐蝕劣化 (SCC) 問題納入老化管理計畫 (aging management program, AMP)，進行環境監測以及時採取修正行動 (correction action) 。105 年 9 月 2 日與民眾座談時達成共識，要求經濟部督促台電提出第二期室內乾式貯存場計畫。台電目前也已開始針對室內乾貯安全與營運設施所需，進行評估與分析。為國內未來乾貯設施維護與監測計畫之實施，本計畫研究彙整國際乾貯系統檢測經驗，執照審查與更新之法規要求以及老化管理方案技術，以探討本土乾貯特性非破壞檢測技術應用發展方向，最後對國內相關計畫審查與管制作業提出建議。

關鍵詞：乾貯系統; 執照更新; 不銹鋼密封鋼筒; 應力腐蝕劣化; 老化管理計畫; 非破壞檢測

## Abstract

Taiwan Power Company plans to design and construct spent fuel dry storage systems in the nuclear power generation plants. The dry storage systems are composed of stainless steel canisters and concrete casks. The U.S. and Japan research suggests that stress corrosion cracking (SCC) of stainless steel be taken into consideration of aging management program (APM), have environmental monitoring as to take timely correction actions. To bring the ideas into practice, this study first collects and analyzes data about system inspection, license renewing, and AMP techniques. Then model testing and simulation will be made to reflect the conditions of local drystorage systems. The feasibility will also be studied of nondestructive examination (NDE) techniques applied to drystorage systems. Based on the above work, concluding remarks will be made about AMP practice and license renewal.

Keywords: dry storage system; license renewal; stainless steel canisters; stress corrosion cracking (SCC); aging management program (AMP); nondestructive examination (NDE)

## I. 研究背景與目的

國內台電公司目前已於第一與第二核能發電廠內規畫設計與興建用過核子燃料貯存設施，其主要組件包括貯存用過核子燃料之不銹鋼密封鋼筒與提供屏蔽之混凝土護箱 (以下簡稱第一期露天乾貯)。美日國際研究已建議，將不銹鋼材料應力腐蝕破裂 (stress corrosion cracking，SCC) 問題納入老化管理計畫 (aging management program, AMP)，進行環境監測以及時採取修正行動 (correction action) (e.g NIE 2014; Wataru et al., 2016)。

105 年 9 月 2 日行政院林全院長與民眾座談時達成共識，要求經濟部督促台電提出第二期室內乾式貯存場計畫。台電目前已針對室內乾貯安全與營運設施所需，包括加裝高效過濾、空調系統，輻射與安全監測系統，進行評估與分析。日本中央電力研究所 (CRIEPI) 指出，室內乾貯若採自然通風，將與室外乾貯同樣需要 SCC 對策; 日本機械學會 (JSME) 規範建議，可加裝減鹽裝置，來降低 SCC 發生可能性 (Wataru et al., 2016)。針對國內乾貯設施加裝減鹽裝置之可行性，上年度計畫研究已根據文獻蒐集，模型試驗與熱流分析，持續進行檢討。

為國內未來乾貯設施維護與監測計畫之實施，本計畫本年度研究彙整國際乾貯系統檢測經驗，執照審查與更新之要求以及老化管理方案技術，以探討本土乾貯非破壞檢測技術應用發展方向，最後總結並對國內相關計畫審查與管制作業提出建議。

## II. 研究內容

(1) 國際上乾式貯存系統檢測經驗彙整

美國從 1985 年開始使用乾貯系統，而到 2010 年已累計有 1495 個，其中不鏽鋼密封鋼桶採取銲接的佔 88%，螺栓接合的為 12% (ANL 2012)。過去，日本用過核燃料因為再製策略，所以使用螺栓接合之金屬護箱系統；2011 年福島事件後為加速乾貯設施之建置，除日本機械學會頒定混凝土護箱規範 (Wataru et al., 2016)，電廠新設乾貯設施也有曾將戶外乾貯納入設計評估的 (SBS 2107)。

國內研究過去曾針對美日乾貯設施現場檢測進行案例研究 (張, 2016)。如表 1 所示，美國電力研究所 (EPRI) 曾對 3 個電廠內使用中之乾貯設施進行檢測，包括目視檢查，溫度量測與鋼筒表面取樣分析，並未發現密封鋼筒不銹鋼材料有 SCC 之跡象。另外， 2011 年東日本大地震後，福島第一核能發電廠內乾貯設施之用過核燃料，已全數移到同一廠區內護箱臨時保管設施 (容量 50 個) 。地震後乾貯設施緊急檢測，即根據封蓋間壓力確認金屬護箱系統之密封性，並綜合判斷無 SCC 影響與用過核子燃料之安全貯存。台電第一期露天乾貯係採美國 NAC 公司系統。EPRI 從 2014 年開始發展機器人系統檢查技術，並先後於 Palo Verde (September 2-3, 2015)，McGuire ( May 16-19, 2016 )，與 Maine Yankee (July 12-13, 2016) 進行現地非破壞檢測 (NDE)

技術驗證; 於 Palo Verde 核電廠乾貯設施進行 NDE 技術驗證時，機器人搭載了渦電流矩陣 (Eddy Current Array) 與電磁聲學傳感器探針 (Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) probe) ，對 NAC 系統模型 (NAC System Mockup) 進行現地檢查演練 (Rahimi 2017)。針對台電第二期室內乾貯計畫，本計畫調查與彙整英國，德國與日本之室內乾貯監測項目，如表 2。

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

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

註: 實驗 SCC 發生所需氯離子(Cl-)濃度>=0.1g/$m^2$ =100 mg/$m^2$

表 2 室內乾貯監測案例 (本計畫整理分析)

| | 英國 Sizewell B 電廠乾貯 | 德國 Gorleben 集中乾貯 | 日本 東海第二電廠乾貯 |
|---|---|---|---|
| 啟用時間 | 2016 | 1995 | 2001 |
| 結構系統 | (輕)鋼構 | 鋼筋混凝土 | 鋼筋混凝土 |
| 護箱系統 | 混凝土護箱 | 金屬護箱 | 金屬護箱 |
| 監測項目 | 溫度/輻射 | 壓力/輻射 | 溫度/壓力/輻射 |
| 水源特性 | 海水 | (含鹽)河水 | 海水 |

(2) 乾式貯存系統非破壞性檢測技術發展現況與應用評估

(2-1) 研究現況

各種非破壞性檢測技術 (NDE)技術能否應用於乾貯系統的評估要點有三，即 1) 溫度耐受性，2) 輻射耐受性，與 3) 資料複雜性與設備可靠度。針對密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 問題，美國技術發展重點在 SCC 發生後裂隙深度之偵測。根據日本 CRIEPI 研究，密封鋼桶製作時銲接殘餘拉應力超過不銹鋼材料之降伏強度，如此高應力作用下沿晶界滑動破裂 (Intergranular SCC, IGSCC) 取代孔蝕變成誘發 SCC 的主要機制，而晶間破裂 (IGSCC) 通常為單一明顯之長鏈狀。也就是說，本計畫研究對象之乾貯密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 問題，仍可適用 ECT 與 UT 等 NDE 技術。目視, 陣列式渦電流 (ECT) 與超音波(UT) 檢測技術已經成功地被應用於升溫與輻射環境，證實可用於提供用過核燃料乾貯護箱完整性之細節 (Kunerth et al., 2012)。對於 10-mm (相當於密封鋼筒壁厚 0.5-in 之 80%) 幾乎穿壁之裂隙，UT 方法與技術具 90% 之良好偵測能力，至於 5-mm (相當於密封鋼筒壁厚之 40%) 之裂隙，偵測能力降至 70%; ECT 對 1 mm 以下裂隙之偵測能力約 85%，仍待進一步發展中 (Meyer et al., 2013) 。

日本研究將重點放在 SCC 發生前氯鹽濃度之檢測。日本中央電力研究所 (CRIEPI) 持續研究應用雷射元素光譜分析儀 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) 於密封鋼桶表面氯鹽量量測之技術 (Eto et al., 2012-2014); 新開發的機器可在混凝土護箱與密封鋼桶間狹隘的空間內進行量測，其以雷射為光源和電漿為受光體，在每 50 mm 間距量測一次，且不銹鋼試片表面氯鹽 50mg/$m^2$ 之條件下進行實測，已確認雷射光經 20 m 以上傳送後可將氯鹽反射光傳回、測定鹽量。最近研究確認，LIBS 檢測結果不受密封鋼桶表面溫度所影響，但會因鋼桶表面腐蝕情形而須進行修正 (Eto, 2018)。

美國核管會 (NRC) 規定要求乾貯系統 (DCSSs) 必須具備能力可以持續監測溫度，壓力，結構穩定性，洩漏與劣化，以決定何時必須採取修正行動 (corrective action) 來維持安全貯存狀態。熱影像除了確認密封鋼桶表面溫度，也可藉以找出局部腐蝕發生處 (梁等 2014)，甚至由出入氣口與鋼桶中心三點溫度來偵測桶內氦氣洩漏 (Takeda et al. 2005)。針對混凝土護箱內密封鋼桶，日本 CRIEPI 最近進行了 1/4.5 縮尺模型試驗，考慮用過核燃料在貯存 40 年後密封鋼桶熱負載由 10 kW 減至 5 kW，而內壓由 5 大氣壓 (atm) 依序降至 3 atm 與 1 atm ，結果確認直立式密封鋼桶頂部溫度隨內壓減少而下降、底部溫度反而上升之現象，另外橫放式密封鋼桶同樣是頂部溫度下降、底部溫度上升， 且鋼桶中央同樣上部溫度下降、下部溫度上升；考慮乾貯系統內溫度感應器可能安裝的位置，建議可以密封鋼桶之底部或中央下部的溫度量測結果，作為洩漏監測之依據 (Takeda & Shimaike, 2017 & 2018; Takeda et al., 2018)。

(2-2) 應用評估

SCC 裂隙之偵測，首先以鋼桶表面超過 0.1 mm 裂縫為對象。如圖 1 所示，工業產品之品質管理用的檢查尺上的 0.1 mm 刻度，在一般市售微型攝影下即清晰可辨。微型攝影機大多可由電腦或外置主機獲取影像照片，可以傳輸線連接主機，其長度依使用情況而定。另外，為了在光線昏暗的孔隙內也能獲取曝光正常的相片，部分微型攝影機在鏡頭前段會設置 LED 燈輔助照明。

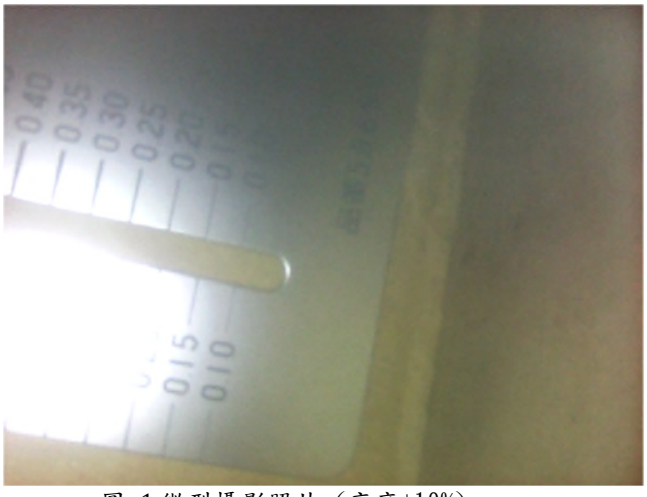


圖 1 微型攝影照片（亮度+10%）

經徵詢國內主要 NDE 廠商如儀器代理之歐測公司與監測專門公司 SGS，發現 ECT 與 UT 應用於不銹鋼材

料之裂隙檢測，需要先有與被檢測設施一樣製作條件的“校正片”。另一方面，實驗室判定 SCC 裂隙目前仍仰賴破裂面分析，但這不能用於實際的核能設施。有鑑於此，日本 CRIEPI 最近有研究針對核能管線用鑄造級不銹鋼，對陣列式 UT 檢測頻率與入射角進行最佳化研究，並嘗試根據銲接條件模擬出奧斯田鐵系不銹鋼銲接後結晶組織，再依據結晶組織成功地預測出 UT 波傳結果 (Nagai & Lin 2017)。

(3) 乾式貯存系統長期儲存執照更新法規要求與老化管理方案技術評估

(3-1) 法規要求

美國核管會 (NRC) 要求各電廠必須針對乾貯設施提出所謂的「老化管理計畫 (aging management program, AMP)」，來管理老化 (aging) 對上述結構，系統與組件所可能造成之影響 (ANL 2013; NEI 2014)。可能影響乾貯護箱結構 (DCS), 系統與構件 (SSCs) 老化機制之營運與研究資料目前相當有限， 因此 NEI 14-03 (2014) 技術報告被提出用於補充說明 10 CFR 72 核照與 NUREG-1927 更新審查合格證明指針 (license and Certificate of Compliance (CoC) renewal review guidance)，Section 3.0 “老化管理審查 (Aging Management Review)” 與 Section 1.4.4, “申請內容 (Application Content)”。

AMP 有兩個核心問題，一為高度燃耗燃料 (high burn-up fuel, HBU)之長期性能。另一為氯鹽所致應力腐蝕劣化 (SCC)。針對乾貯延役期間 HBU 貯存與運輸安全，靜力試驗與疲勞強度，電廠與乾貯設施之 SCC 問題，NRC 於 2017 年提出之 NUREG-2214，說明可信的劣化機制與可用之評估基準與管理措施，以加速乾貯執照更新申請作業之準備與審查 (Weed 2018)。

(3-2) AMP 範例

根據 NUREG-1927，為管理乾貯設施老化影響所定義之 AMP 有 10 個要素 (element) 與敘述 (description)。針對密封鋼筒不銹鋼材料 SCC 問題，美國 NRC 考慮在未來將以下 AMP 納入乾貯執照更新要求 (Dunn et al., 2015)，即

1) 範圍 (Scope)
針對大氣沉積物 (atmospheric deposits)，局部鏽蝕 (localized corrosion) 與應力腐蝕劣化 (SCC) 進行乾貯密封鋼桶檢查。
2) 措施 (Preventative Actions)
針對 (目前設計仍未採取任何預防措施之) 乾貯密封鋼桶進行性能監測。
3) 檢查或監測參數 (Parameters Monitored or Inspected)
包括鋼桶表面之不連續處或不完美處，沉積物之外觀與位置。
4) 老化影響偵測 (Detection of Aging Effects)
依照 BWRVIP-03 規範實施 EVT-1 目視檢查，或美國機械學會 (the American Society of Mechanical Engineers, ASME) 所定 Boiler and Pressure Vessel (B&PV) Code Section XI, Article IWA-2200 進行 VT-1 與 VT-3 檢測。當目視檢查找到局部腐蝕或 SCC 之證據時，追加進行檢測以確定影響範圍和裂隙深度。初次檢查每一場址至少檢查一個密封鋼桶，且最早負載或負載熱量最低、溫度較低之鋼桶優先檢查。初次檢查須於延長使用前 5 年完成，而後續每 5 年實施一次檢查。
5) 監測與趨勢研判 (Monitoring and Trending)
為了提供後續檢查進行比較，應保存密封鋼桶檢查紀錄，沉積物之位置與外觀，以及鏽蝕區域評估等相關檢測結果與影像。
6) 接受標準 (Acceptance Criteria)
檢查之接受標準按照老化影響偵測方法來決定，而追加檢查之接受標準也是按照檢查方法來決定。若遠距目視檢查結果無局部鏽蝕或 SCC 之跡象，則後續不須採取任何行動或追加檢查。如檢查密封鋼桶銲道熱影響區附近並確認直徑 1 mm 以上之鏽蝕，則須依照 ASME 規範進行追加檢查。
7) 改善措施 (Corrective Actions)
檢查確認有局部鏽蝕或 SCC 之密封鋼桶，須依檢查前評估標準判斷是否繼續使用，若否則應進行修復或置換; 此外，同時期開始貯存用過核燃料之密封鋼桶也必須進行檢查。
8) 確認程序 (Confirmation Process)
符合 10 CFR 72 Subpart G 或 10 CFR 50 Appendix B 之申照者品保計畫，可用於程序確認。申照者品保計畫確保完成檢查，評估與修正行動。修正計畫包括條件程度，續用評估，與修復，置換或延緩對策等。
9) 行政控制 (Administrative Controls)
申照者修正行動計畫應符合 10 CFR 72 Subpart G 或 10 CFR 50 Appendix B， 特別是檢查者資格要求，記錄保存要求，與試驗查核程序 (examination review process)。此外，向 NRC 提出檢查報告與更新 AMP 時，應基於業界實務經驗說明所用的檢查方法與頻率。
10) 營運經驗 (Operating Experience)
密封鋼桶檢查將直接增加營運經驗，與用於確認額外的分析與實驗室試驗之結果。相關資訊將有助於評估 AMP 之適當性，進而改善 SCC 問題、避免影響密封性。

(3-3) 案例研析

美國 NRC 到 2017 年中已核准了 5 個電廠乾貯延役 40 年，即 1) Calvert Cliffs NPP – South of Baltimore, MD, 2) Oconee Nuclear Station – WSW of Spartanburg, SC, 3) Prairie Island NGS – Southeast of Minneapolis, MN, 4) Surry NGS – NW of Norfolk, VA, 與 5) HB Robinson NPP – West of Wilmington, NC; 另外，NRC 接受申請審核中的有 4 個，包括 1) North Anna NGS – NW of Richmond, VA, 2) Trojan NPP – Oregon, 3) AREVA License 72-1004 – General license, many users, 與 4) Energy Solutions 72-1007 – General license (Palmisano, 2017)。

以 Trojan 電廠乾貯為例，申請執照更新所需提交給 NRC 之資料包括：一般資訊 (General Information)，範圍評估 (Scoping Evaluation) ，老化管理回顧 (Aging Management Review) ，與老化管理回顧 (Aging Management Review)，以及作為附錄之老化管理計畫

(AMP) ，限時老化分析 (TLAAs) ，關卡 (Tollgates) ，申請之乾貯設施的安全分析報告更新 (Proposed ISFSI SAR Updates) ，申請之執照/技術規格變更 (Proposed License / Tech Spec Changes)，與先導密封鋼桶檢查 (Lead Canister Inspection)。Trojan 電廠與 Holtec 公司簽約，委託其遵照 NUREG-1927 與 NEI 14-03 規範，並以 Calvert Cliffs 換照為參考範本，在乾貯執照到期日前 2 年、也就是 2017 年 3 月 31 日，向 NRC 提出乾貯執照更新之申請、延長使用 40 年。

Trojan 電廠位於奧立岡州 (Oregon)，距波特蘭 (Portland) 約 45 英哩、沿哥倫比亞河 (Columbia River) 設立。Trojan 電廠乾貯設施在 1999 年首次核照，而用過核燃料在 2003 年開始裝載於乾貯護箱系統密封鋼桶中，故以 2003 年為起點規畫與實施每 5 年一次、至 2023 年為期 20 年之自主檢查計畫。計畫之實施強調是基於既存可用的檢測方法，如密封鋼桶之目視檢查，即是將攝影鏡頭由入氣孔與出氣孔放入流道、檢查密封鋼桶與混凝土護箱內襯，且第一次檢查前先製作出氣口流道之全尺模型 (full scale outlet vent mockup)，進行作業演練。2008 年與 2013 年兩次檢查結果無明顯差異，且在密封鋼桶銲道附近並未發現鏽蝕跡象，另外上部通風孔與混凝土護箱內襯之交接處的白色沉積物，經綜合判斷應是製作過程中從護箱外進入乾貯系統之碳酸鈣、不會影響混凝土強度與完整性。上述密封鋼桶之檢查紀錄，即為乾貯核照更新中 AMP 審查之重要參考依據。

## III. 結果與討論

為國內未來乾貯設施維護與監測計畫之實施，本計畫本年度研究彙整國際乾貯系統檢測經驗，執照審查與更新之要求以及老化管理方案技術，以探討本土乾貯非破壞檢測技術應用發展方向，最後總結並對國內相關計畫審查與管制作業提出建議如下:

(1) 美日國際研究已建議，將乾貯密封鋼筒不銹鋼材料應力腐蝕劣化 (SCC) 問題納入老化管理計畫 (AMP)。另外，室內乾貯若採自然通風，將與室外乾貯同樣需要 SCC 對策。

(2) 金屬護箱系統因所用螺栓長期會有鬆弛問題，故會在封蓋間設置壓力計進行內部氣體洩漏監測。以銲接密封鋼桶之混凝土護箱系統原本沒有上述洩漏監測之需求，但考慮乾貯設施延長使用問題，日本 CRIEPI 最近試驗研究證實可以量測直立式密封鋼桶底部之溫度，進行洩漏監測。

(3) 乾貯密封鋼桶不銹鋼材料 SCC 問題，屬於高應力作用下沿晶界滑動破裂 (IGSCC)、常為單一明顯之長鏈狀，故可適用渦電流 (ECT) 與超音波 (UT) 等非破壞檢測 (NDE) 技術，但施測需要與實際製程相同之 “校正片” 與後續模擬分析，如此未來才可能在實際的乾貯密封鋼桶進行SCC偵測與裂隙發展評估。

(4) 針對密封鋼筒不銹鋼材料 SCC 問題，美國 NRC 已就對應的 AMP 之 10 個要素作出明確的建議。當目視檢查找到局部腐蝕或 SCC 之證據時，須追加進行檢測以確定影響範圍和裂隙深度。初次檢查每一場址至少檢查一個密封鋼桶，且最早負載或負載熱量最低、溫度較低之鋼桶優先檢查。初次檢查須於延長使用前 5 年完成，而後續每 5 年實施一次檢查。

(5) 從 Trojan 電廠之申請資料可知，乾貯執照更新應遵照 NUREG-1927 與 NEI 14-03 規範，並可以 Calvert Cliffs 換照為參考範本，另外電廠乾貯自主檢查計畫可以第一次核照後用過核燃料裝載完成時間為起點，規畫期間為 20 年、每 5 年檢查一次，如此所獲之密封鋼桶與混凝土護箱的檢查紀錄，即可作為乾貯核照更新中 AMP 審查之重要佐證資料。

## 參考文獻


[1] ANL, 2012. Dry Cask Storage Inspection and Monitoring, Interim Report, Argonne, Illinois: Argonne National Laboratory.

[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] Dunn et al. (2015). "Aging Management Program for Stainless Steel Dry Storage System Canisters," IHLRWM 2015, Charleston, SC, April 12-16, 2015

[5] Eto et al. (2012). Development of measurement technology of chlorine attached on canister using laser - Application of LIBS using collinear geometry-, CRIEPI Report (No. H11020) (in Japanese attached with English abstract)

[6] Eto et al. (2013). Development of Measurement Technology of Chlorine Attached on Canister Using Laser, CRIEPI Report (No. H12003) (in Japanese attached with English abstract)

[7] Eto et al. (2014). Development of Measurement Technology of Chlorine Attached on Canister Using Laser - Remote Measurement in Narrow Space for The Application during Storage of Spent Fuel-, CRIEPI Report (No. H13004) (in Japanese attached with English abstract)

[8] Eto et al. (2018). Development of Measurement Technology of Chlorine Attached on Canister Using Laser – Effects of Temperature and Corrosion Condition of Canister on the Measurement of Salt, CRIEPI Report (No. H17008) (in Japanese attached with English abstract)

[9] Goto et al. (2013). Study on Interim Storage of Spent Nuclear Fuel by Concrete Cask for Practical Use - Feasibility Study on Prevention of Chloride Induced Stress Corrosion Cracking for Type304L, 316L Stainless Steel Canister-, CRIEPI Report (Rep. No. N12023).

[10] He et al., 2014. Available Methods for Functional Monitoring of Dry Cask Storage Systems, Technical Report Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission Contract NRC－HQ－12－C－02－0089

[11] Kunerth et al. (2012). Inspection of Used Fuel Dry Storage Casks, Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy Under DOE Idaho

Operations Office Contract DE-AC07-05ID1451, September 2012.
[12] Nagai M., & Lin, S. (2017). Basic study on numerical prediction of ultrasonic wave propagation behavior in cast stainless steels, - CRIEPI Report (No. Q16006) (in Japanese attached with an English Abstract)
[13] NRC (2017). NUREG-2214: Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report (ADAMS Accession No.: ML17289A237)
[14] NRC (2018). NUREG-2224: Dry Storage and Transportation of High Burnup Spent Nuclear Fuel (ADAMS Accession No.: ML18214A132)
[15] Meyer et al. (2013). NDE to Manage Atmospheric SCC in Canisters for Dry Storage of Spent Fuel: An Assessment, Report Prepared for the U.S. Nuclear Regulatory Commission under a Related Services Agreement with the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830.
[16] Palmisano, T. (2017). Development & Implementation of Aging Management Programs for San Onofre. https://www.songscommunity.com/internal_redirect/cms.ipressroom.com.s3.amazonaws.com/339/files/20181/Website%20-%20AMP.pdf
[17] Portland General Electric (2016). Trojan ISFSI License Renewal and AMP Inspections (ML16347A485) https://www.nrc.gov/docs/ML1634/ML16347A485.pdf
[18] Rahimi, M. (2017), “An Update on NRC Activities for Aging Management and Storage Renewals,” NMSS Division of Spent Fuel Management
[19] Takeda, H. and Shimaike, K. (2017). Development of Helium Leak Detector for Canister (Part.1)- Leak Evaluation Tests and Analysis by Vertical Small Canister Model – CRIEPI Report (No. N16005) (in Japanese attached with an English Abstract)
[20] Takeda, H. and Shimaike, K. (2018). Development of Helium Leak Detector for Canister (Part.2)- Leak Evaluation by Horizontal Small Canister Model - CRIEPI Report (No. N17007) (in Japanese attached with an English Abstract)
[21] Takeda et al. (2018). Development of Helium Leak Detector for Canister (Part.3)- Leak Evaluation by 1/4.5 Scale Cask Model - CRIEPI Report (No. N17013) (in Japanese attached with an English Abstract)
[22] Wataru et al. (2016). Study on Commercial Realization of Concrete Cask for Interim Storage of Spent Fuel – Proposal and Verification of Code Case on SCC Countermeasure of Canister, CRIEPI Report (No. N15014) (in Japanese attached with English abstract)
[23] 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期末報告 (計畫標號 104FCMA021)
[24] 梁希慈, 賴湘微, 隋開元, 與張惠雲 (2014). 應用紅外線熱攝影技術於不銹鋼應力腐蝕劣化監測之試驗研究, 中華民國力學學會第三十八屆全國力學會議
[25] 静岡新聞 (SBS), 建屋造らず保管検討 浜岡原発の乾式貯蔵、規制委方針受け, 2017/8/17 新聞

# 氧化還原敏感性核種於深地層處置遷移之物種評估與研究
# -碘物種及硒物種於花崗岩與膨潤土之吸附與擴散行為研究
# Study on speciation of important radionuclides under oxi-reducing conditions

計畫編號：MOST 107-NU-E-006-001-NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：李傳斌
e-mail：cplee@mail.ncku.edu.tw
計畫參與人員：汪柏岑、潘春花、吳銘志
執行單位：國立成功大學地球科學系

## 摘要

本研究計畫與合作團隊(清華大學原科中心與輔英科技大學職安系）與核能研究所化學組去年開始共同合作，首先完成建立一套利用 IC（高效率離子層析儀）與 ICP-OES(感應耦合電漿發射光譜儀)之碘與硒物種定量分析方法，碘與硒在好氧水溶液環境中主要物種（species）為以陰離子，包括: 碘離子（I-)、碘酸根離子（IO3-)、4 價硒（SeO32-）與 6 價硒（SeO42-）的形態存在，導致易於在天然介質中遷移，而膨潤土具有較佳的化學緩衝效果，pH 並未隨著不同物種(碘與硒)而有所改變，並可從批次實驗結果發現，4 價硒(SeO32-)被吸附率大於碘離子（I-)、碘酸根離子（IO3-)、6 價硒（SeO42-)。

本計畫主要在探討碘物種及硒物種於花崗岩與膨潤土之吸附與擴散行為之差異，除了以批次吸附實驗探討不同碘與硒物種之分配係數 Kd 值（mL/g）以外，;並完成管柱法-穿透擴散實驗分別進行碘離子（I-)、碘酸根離子（IO3-)、4 價硒（SeO32-）與 6 價硒（SeO42-）核種的擴散實驗，根據實驗結果顯示 4 價硒（SeO32-）於膨潤土之遲滯因數(Rf)較高於 6 價硒（SeO42-)，而碘離子（I-）與碘酸根離子（IO3-）之視擴散係數(Da)與有效擴散係數(De)具有相似的結果，其實驗結果與批次吸附實驗相似。

關鍵詞：高效率離子層析儀、碘離子、碘酸根離子、4 價硒、6 價硒、視擴散係數

## Abstract

Among the methods for iodine (I) and selenium (Se) speciation we knew, this study has set up a new method by coupling the Ion Chromatography (IC) and the Induced Couple Plasma Optic Emission Spectrometer (ICP-OES), thus to measure simultaneously the concentration of $I^-$, $IO_3^-$, $SeO_3^{2-}$ and $SeO_4^{2-}$ in aquatic solutions; within the detection limit for I (50-500 pp,) and Se (5~50 ppm).

The method of using IC and ICP-OES measurements for I and Se species has been successfully developed in this study and also been recognized for the I and Se speciation; as well as been developed to be used as a detector of I and Se. $^{129}I$ and $^{79}Se$, with long half-life of million years, are both fission products in High-Level Radioactive Waste (HLW) as well as a critical radionuclide for the assessment of geological disposal of HLW.

According to the batch sorption and column diffusion results of I and Se species experiment, the effective diffusion coefficients ($D_e$) derived from through-diffusion experiments fall in the range of $10^{-11}$~$10^{-12}$ $m^2/s$. For $SeO_3^{2-}$ (Se-IV), having higher sorption characteristics, the bentonite showed a retardation effect than $SeO_4^{2-}$. For iodine (I), having lower sorption characteristic, the effects for bentonite were not so significant. This method then may be applied to study the sorption and diffusion behaviors and mechanism of $I^-$, $IO_3^-$, $SeO_3^{2-}$ and $SeO_4^{2-}$ in following works.

Keywords: IC, I- , IO3-, SeO32- , SeO42- , distribution coefficient , diffusion coefficient

## I. 前言

近年來全球民眾不分國家均對環境議題高度關切，加上公民意識提升，以再生能源來取代傳統能源成為目前各國經濟發展與能源開發主要的趨勢。然而，化石燃料和核能等傳統能源仍是目前各國能源的主要貢獻者，其中，核能發電在全球各國均受到最大的爭議，事實上核能發電受到質疑主要有兩個原因，核能安全與放射性廢棄物，在 2011 日本福島核電廠嚴重核安事故後，全球反對核能發電的聲浪達到最高，我國政府也於 2014 年宣布封存正在興建中的核四廠。直到去(2018)年 11 月中旬我國首次舉辦公民投票，超過 50%民眾同意在再生能源尚未發展完全時，以核能做為過渡的基礎能源，維持我國的能源穩定。

然而，放射性廢棄物處置場的選址，在過去數十年來一直遭遇強烈的阻力與抗爭，使得核能發電後產生的放射性廢棄物，仍然繼續儲存於各個電廠與早期送至蘭嶼的低放射性廢棄物。因此，放射性廢棄物處置場的安全評估一直是環境影響評估與公眾關注的重要議題。根據我國法規的定義，高放射性廢棄物指最終處置之用過核燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物，由於台灣目前尚無採行再處理方案，因此法規中所提及之高放射性廢棄物，現階段即指用過核燃料。然而，放射性核種自用過核燃料中釋出於地質環境下遷移，最後進入人類生活圈，並對人體造成輻射危害，此一核種遷移過程(圖 1)乃是放射性廢棄物安全評估的重要課題。

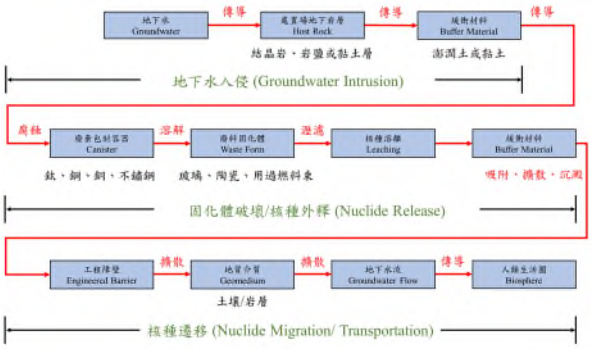



圖 1、核種從廢棄物固化體遷移到人類生活圈的路徑示意圖

1980 年起台灣電力公司即啟動用過核燃料長程處置計畫，以「多重障壁」為主要的處置概念，而「人工障壁」與「天然障壁」所構成主要的重重障壁；其中，人工障壁係包封用過核燃料或高放射性廢棄物的堅固金屬容器，以及金屬容器外所填入能抑制核種傳輸的低透水性緩衝材料（如：膨潤土），以及確保處置單元安全的工程結構體所組成；而天然障壁則為可遠離人類生活環境的完整且體積碩大之處置場的母岩，其應具有地下水稀少、流速緩慢，且地質環境穩定等特性條件，係經審慎調查後評選出的合適岩層。

理想的緩衝材料需兼具物理特性(包括:不透水性、熱傳特性、膨脹潛能及力學強度等)與化學特性(包括:吸附性、化學緩衝性等）等優點，基於物、化雙重特性要求下，各國共同選擇緩衝材料乃以黏土中之膨潤土（Bentointe）為主，主要乃因其高可塑性及膨脹性和不透水性直接影響緩衝材料之施工及物性要求。我國採取目前已經商業化之產品-膨潤土(美國懷俄明州產之 MX-80）為主要的候選材料，然卻發現常因廢棄物罐仍會產生高溫，造成周圍膨潤土劣化而尚失吸附放射性核種能力。此外，依據各國的調查與研究結果顯示，花崗岩對於阻滯核種外釋，其主要優點在於岩體的緻密性與完整性，其所組構而成之地層甚為穩定，且其熱傳導性及機械強度皆較好；膨潤土被視為深層地質處置場的緩衝回填材料，因其水力傳導率低、擴散係數低、膨脹和塑性能力佳、離子交換能力強等特性。

碘-129 與硒-79 於用過核燃料中均為重要的分裂產物，且半化期均長達十萬年以上，加上兩者於環境中均以陰離子形式存在，且不同氧化還原條件下，具有不同物種形式存在，導致易於在天然地質環境中遷移。目前國內外針對核種遷移參數相關實驗方法，包括批次吸附及管柱擴散實驗等。研究顯示放射性核種吸附於緩衝材料與天然母岩將有利於放射性廢棄物最終處置工作，其中填充於固化體四周之緩衝材料(buffer material)，在遲滯放射性核種向外遷移及穩定金屬廢棄物罐上扮演相當重要的角色。

放射性核種於多孔隙介質中的擴散係數可藉由實驗室中不同實驗方法進行估算，如穿透擴散實驗及內擴散試驗等。其中，穿透擴散(Through Diffusion)實驗是目前公認用於估算擴散係數的最佳方法，擴散行為是核種在多孔隙介質中溶質傳輸的主要機制，Crank 於 1975 年所提出之漸近線-圖形法，透過擬合累積濃度曲線擬合計算分析可得不同核種於不同介質中之擴散係數。本計畫則同時以批次與管柱法-穿透擴散實驗進行不同碘與硒物種之吸附與擴散行為研究，探討不同碘與硒物種於膨潤土與花崗岩中之吸附與擴散行為之差異。

## II. 主要內容

本研究計畫主要針對不同氧化還原敏感性核種於深地層處置遷移相關行為之研究，透過不同專業團隊之跨領域整合並進行分工合作，除了針對不同核種(I、Se）建立一套標準物種分析方法以外，進而研究不同碘及硒物種於花崗岩與膨潤土之吸附與擴散行為之差異。

### 2.1 物種分離方法

本項計畫工作係與輔英科技大學職安系鄭文熙教授共同合作以高效率離子層析儀（IC，Ion Chromatography）配合感應耦合電漿原子發射光譜儀（ICP-OES，Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy）執行不同碘與硒物種之濃度定量分析，包括：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。高效率離子層析儀（IC，Ion Chromatography）該儀器為輔英科技大學職安系鄭文熙教授所有，加上 ICP-OES（PerkinElmer 7000DV）該儀器為國立成功大學地球科學系穩定同位素實驗室所有，透過配置不同濃度的碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）標準品，並測試其檢量線，其相關係數（$R^2$）達到 0.9999 為佳，而分析時根據不同元素其相關係數最好均大於 0.99 以上，進而達到定量分析。

### 2.2 批次法

利用批次吸附實驗來探討核種的分配係數（$K_d$）--吸附參數，已經被廣泛的使用在放射性廢棄物處置場的功能安全評估上。根據各國研究顯示，礦物扮演著對核種吸附的主要關鍵角色，對核種具高吸附性的礦物表示遲滯核種的外釋與遷移的能力較佳，富有黏土礦物與雲母類的岩石乃具有較高的吸附效果。在過去之研究文獻成果中，已知富有黏土礦物的膨潤土對陽離子具有高吸附作用。本研究主要乃利用已完成建立之標準物種分析方法，包括：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$），並以 ASTM C1733-10(2010）批次法進行，探討不同核種（碘與硒）於 MX80 膨潤土與臺灣本土潛在母岩（如：花崗岩）之吸附行為的差異性。

本工作項目乃利用 ASTM C1733-10（2010）的標準方法，進行模擬膨潤土與花崗岩對碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）的吸附實驗，即利用 IC 搭配感應耦合電漿原子發射光譜儀（ICP-OES）進行碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）濃度變化的分析，了解碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）在膨潤土與花崗岩中的分布情形。於本研究中，所使用的收附模式（sorption model）為：「當核種在液相

中的濃度很低，而且吸附於固相所耗費的時間很短時」，針對核種在固、液相上的比例，將可以下列關係式表示：

$$r = \frac{\partial C}{\partial t} = -k_{f1}C + \frac{M_S}{V}k_{b1}S \qquad (1)$$

其中，

$S$：平衡時核種吸附於吸附相的量（meq $g^{-1}$）
$C$：平衡時核種殘留於溶液中的濃度（meq $mL^{-1}$）
$r$：在液相中污染物濃度的淨反應速率（net reaction rate）（$ML^{-3}t^{-1}$）
$k_{f1}$：吸附反應的一次反應速率係數（$t^{-1}$）
$k_{b1}$：脫附反應的一次反應速率係數（$t^{-1}$）
$M_S$：固相的總質量（total mass of porous media）（g）
$V$：液相的總體積（total volume）（$L^3$）

當反應達平衡後，淨反應速率 r = 0，則

$$k_{f1}C = \frac{M_S}{V}k_{b1}S \quad \Rightarrow S = \frac{Vk_{f1}}{M_S k_{b1}}C$$

$$\Rightarrow S = K_d C \qquad (2)$$

其中，$K_d$ 為分配係數（mL $g^{-1}$）。式（1）為線性吸附的動力反應式，而式（2）為線性吸附的平衡反應式。

### 2.3 管柱法

本研究除了利用已完成建立之標準物種分析方法外，並利用管柱法（穿透擴散實驗）來了解或模擬放射性核種：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$），在膨潤土中之擴散行為，進而分析放射性廢棄物在深地層處置環境下，放射性核種之不同物種 – 碘物種：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）。硒物種：4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）之遷移行為的差異。

由管柱法-穿透擴散實驗所獲得之累積濃度曲線可區分為兩部分，前半部的曲線部分及後半部的直線部分。Crank 於 1975 年建立漸近線-繪圖法，利用擬合後半部直線部分所得之線性參數進行推估擴散行為等重要參數。漸近線-繪圖法之示意圖如圖 2，圖中 X 軸為實驗時間，Y 軸為累積濃度曲線，紅色虛線區隔前半部及後半部，黑色虛線為繪圖法之擬合線。

視擴散係數及有效擴散係數分別由一維擴散方程式推估求得：

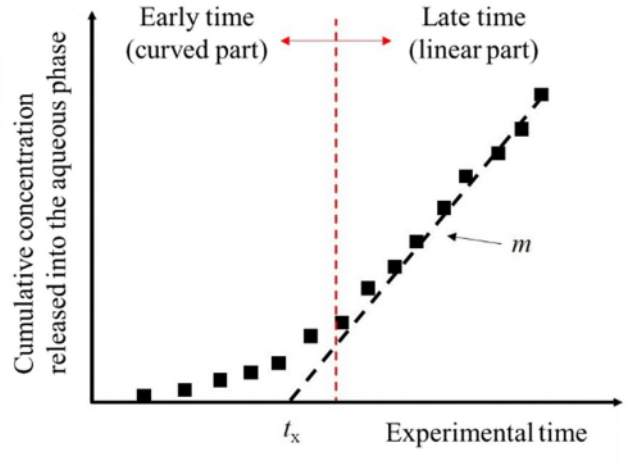



圖 2、繪圖法示意圖

$$D_a^G = \frac{L^2}{6t_x} \qquad (3)$$

$$D_e^G = \frac{mVL}{A} \qquad (4)$$

上式中，$D_a$ 及 $D_e$ 分別為由繪圖法所求得之擴散係數，右上標示 G 用以代表由穿透擴散實驗-繪圖法所求得。$t_x$ 為擬合線與 X 軸之截距、L 為管柱長度(=0.3cm)、m 為擬合線之斜率、V 及 A 分別為溶液體積與壓密膨潤土薄片截面積(=19.625$cm^2$)。

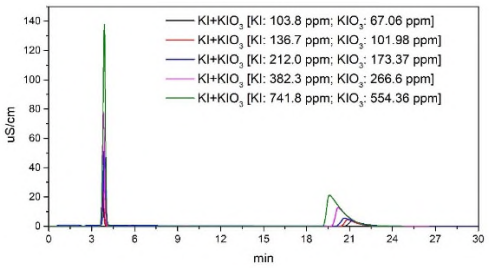
## III. 結果與討論

### 3.1 分配係數（$K_d$）--碘與硒物種：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）

本項計畫工作係與輔英科技大學職安系鄭文熙教授共同合作以高效率離子層析儀（IC，Ion Chromatography）配合感應耦合電漿原子發射光譜儀（ICP-OES，Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy）執行不同碘與硒物種之濃度定量分析，包括：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。實驗結果（如圖 3）顯示，利用 IC 可成功的在不同的 RT (retention time)時間分離碘與硒物種，包括：21 分鐘碘離子（$I^-$）、3 分鐘碘酸根離子（$IO_3^-$）、15 分鐘 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、21 分鐘 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。此外，碘物種濃度 50 至 500 ppm 間有良好的線性範圍，硒濃度 5 至 50 ppm 間有良好的線性範圍，兩者的線性檢量線均達 $R^2$>0.95 以上。

為了更真實地反應放射性廢棄物處置場的放射性核種遷移行為，以 ASTM 批次實驗法，分別以初始濃度約 5, 10, 20ppm 碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$），在 0.5g 與 50 mL 的固液比條件下，經 7 天震盪後，利用 IC 與 ICP-OES 個別分析其物種濃度與定量濃度。

(a)




(b)

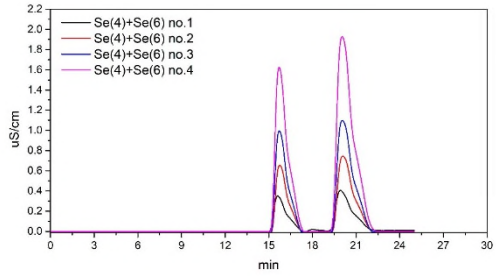



圖 3. 碘與硒物種：(a) 碘離子（$I^-$）+碘酸根離子（$IO_3^-$）; (b) 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）

實驗結果 pH、Eh 及經 Eq.(2)計算分配係數 $K_d$ 值整理如**表 1**。由於膨潤土具有較佳的化學緩衝效果，因此，膨潤土的樣品在最後的實驗結果 pH 變動並未隨著不同物種(碘與硒)而有所改變，碘與硒物種的化學緩衝實驗結果顯示，pH 均在 8~10 之間，而 Eh 值均為正值（> 0 mV）。分配係數 $K_d$ 值（mL/g）的結果發現，花崗岩與膨潤土對碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）具有不同的吸附行為，並可發現 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）吸附於膨潤土與花崗岩，而碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）和 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）幾乎不吸附 $K_d$ =0。

表 1、分配係數（$K_d$）-- 碘與硒物種：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）

| RN | $K_d$（mL/g） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 碘離子（$I^-$） | 碘酸根離子（$IO_3^-$） | 4 價硒（$SeO_3^{2-}$） | 6 價硒（$SeO_4^{2-}$） |
| 金門花崗岩 | ~0 | ~0 | 9.5 | ~0 |
| MX80 膨潤土 | ~0 | ~0 | 11.5 | ~0 |

### 4.2 擴散係數（Da 與 De）-- 碘與硒物種：碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）

由批次實驗結果-分配係數 $K_d$ 值（mL/g）發現，花崗岩與膨潤土對碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）具有不同的吸附行為，並可發現 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）明顯吸附於膨潤土與花崗岩，而碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）和 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）幾乎不吸附 $K_d$ =0。

以管柱法擴散長度 L=0.3cm 與固定密度( ρb =2.0g/cm$^3$)，壓置 4 支相同的穿透擴散實驗 No.1-4 管柱分別進行碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）核種的擴散實驗，並繪製累積突破曲線與時間關係圖（如圖 4），並依漸近線結果可分別得碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）視擴散係數($D_a$)、有效擴散係數($D_e$)、遲滯因數($R_f$)、分配係數($K_d$)和無因次時間($t_d$) 如表 2 所示。

(a) 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$） (b) 碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）

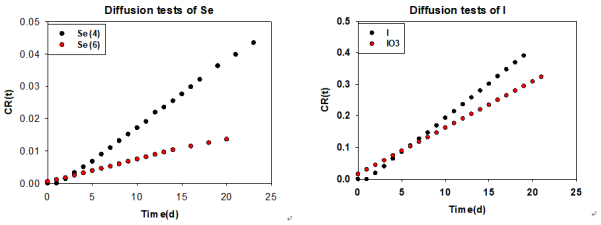



圖 4、管柱法-穿透擴散實驗-碘與硒(a) 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）;(b) 碘離子（$I^-$）與碘酸根離子（$IO_3^-$）

表 2、核種擴散實驗參數--碘與硒物種：碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。

| 編號 No. | 核種 RN | 有效擴散係數 $D_e$(m$^2$/s) | 視擴散係數 $D_a$(m$^2$/s) | 遲滯因數 $R_f$ | 分配係數 $K_d$ | $t_d$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No.1 | 4 價硒（$SeO_3^{2-}$） | 3.20E-12 | 6.75E-12 | 1.82 | 0.21 | 1.56 |
| No.2 | 6 價硒（$SeO_4^{2-}$） | 1.07E-12 | 4.05E-11 | 0.10 | ~0 | 3.11 |
| No.3 | 碘離子（$I^-$） | 2.95E-11 | 2.27E-11 | 5.00 | 1.00 | 4.36 |
| No.4 | 碘酸根離子（$IO_3^-$） | 2.33E-11 | 3.02E-11 | 2.97 | 0.49 | 5.80 |

## IV. 結論

本研究計畫與合作團隊（成功大學地科系、輔英科技大學職安系與清華大學原科中心）與核能研究所化學組去年開始共同合作，首先完成建立一套利用 IC（離子層析儀）與 ICP-OES（感應耦合電漿發射光譜儀）之碘與硒物種定量分析方法，碘與硒在好氧水溶液環境中主要物種（species）為以陰離子，包括: 碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）的形態存在，導致易於在天然介質中遷移，而膨潤土具有較佳的化學緩衝效果，pH 並未隨著不同物種(碘與硒)而有所改變，並可從批次實驗結果發現，4 價硒（$SeO_3^{2-}$）被吸附率大於碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、6 價硒（$SeO_4^{2-}$）。

本計畫主要在探討碘物種及硒物種於花崗岩與膨潤土之吸附與擴散行為之差異，除了以批次吸附實驗探討不同碘與硒物種之分配係數 $K_d$ 值（mL/g）以外，;並完成管柱法-穿透擴散實驗分別進行碘離子（$I^-$）、碘酸根離子（$IO_3^-$）、4 價硒（$SeO_3^{2-}$）與 6 價硒（$SeO_4^{2-}$）核種的擴散實驗，根據實驗結果顯示 4 價硒（$SeO_3^{2-}$）於膨潤

土之遲滯因數($R_f$)較高於 6 價硒($SeO_4^{2-}$)，而碘離子($I^-$)與碘酸根離子($IO_3^-$)之視擴散係數($D_a$)與有效擴散係數($D_e$)具有相似的結果，其實驗結果與批次吸附實驗相似。

除了建立 IC（離子層析儀）搭配 ICP-OES（感應耦合電漿發射光譜儀）分析不同碘與硒物種方法以外，後續將持續進行利用不同的材料分析法，如：電子顯微鏡分析（SEM）、能量分析儀（EDS）、X 光光電子分析法（XPS）、X 光繞射分析（XRD）、X 光螢光分析（XRF）、拉曼顯微光譜分析、X 光斷層掃描分析（Micro-CT）、拉瑟福背向擴散分析（RBS）與同步輻射中心提供之 XANES（X 光吸收近邊緣結構）等分析技術，以金門花崗岩或美國膨潤土（MX-80）為材料進行分析實驗，俾以建立在不同條件下，緩衝回填材料黏土礦物結晶形態與花崗岩薄片的碘（$I^-$ 與 $IO_3^-$）與硒（$SeO_3^{2-}$與 $SeO_4^{2-}$）分析技術，並與傳統批次法（或管柱法）交互驗證（國內及國際文獻比較），以克服不同吸附性核種遷移實驗之困難，更可進一步了解核中遷移過程中的遲滯特性及反應機制。

## 參考文獻


[1] ASTM （2010） American Society for Testing and Materials. Philadelphia, C1733-10

[2] Crank J. , 1975 . The Mathematics of Diffusion , 2nd ed. , OxfordUniversity Press London

[3] Hsu,C. N., Y. Y. Wei, J. T. Chuang, C. L. Tseng, J. Y. Yang, C. H. Ke, H. P. Cheng, and S. P. Teng （2002） Sorption of Several Safety Relevant Radionuclides on Granite and Diorite – A Potential Repository Host Rock in Taiwan Area, *Radiochimica Acta*, 90, pp.659-664

[4] TsaiS.C., Ouyang S., Hsu C. N. Sorption and diffusion behavior of Cs and Sr on Jih-Hsing bentonite. Appl. Rad. Isotopes 54 （2001） 209-215.

[5] T.E Payen et al., Relationship of quantitative X-ray diffraction measurements of geologic materials to Cs sorption. Radiochim. Acta, 90 （2002） 705-711

[6] Xia,X., K. Iijima, G. Kamei and M. Shibata （2006） Comparative study of cesium sorption on crushedand intact sedimentary rock , *Radiochimica Acta*, 94, pp.683–687

[7] Lee, C. P., L. P. Lan, Y. L. Jan, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2006） Sorption of Cesium on Granite Under Aerobic and Anaerobic Conditions, *Radiochimica Acta*, 94, pp.679-683

[8] Lee, C. P., Y. L. Jan, L. P. Lan, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2007） Anaerobic and Aerobic Sorption of Cesium and Selenium on Mudrock, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 274, pp.145-151

[9] Lee, C. P., S. C. Tsai, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C.N.Hsu （2008） Comparative Study on Sorption of Individual and Coupling Cesium and Selenium on Mudrock, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 115-119.

[10] Lee, C. P. Y. M. Kuo, S. C. Tsai, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2008） A Numerical Analysis for Characterizing the Sorption/Desorption of Cesium in Crushed Granite, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 343-349.

[11] Lee, C. P., S. C. Tsai, Y. L. Jan, Y. Y, Wei, S. P. Teng, and C. N. Hsu （2008） Sorption and Diffusion of HTO and Cesium in Crushed Granite Compacted to Different Lengths,*Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 275, pp. 371-378

[12] Taiwan Power Company （2009） Preliminary Technical Feasibility Study for Final Disposal of Spent Nuclear Fuel - 2009 Progress Report （Summary） Taiwan.

[13] Tsai, T. L., C. P. Lee, T. Y. Lin, H. J. Wei, and L. C. （2010） Men Evaluation of Sorption and Diffusion Behavior of Selenium in Crushed Granite by Through-Diffusion Column Tests, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 285, pp. 733-739.

[14] Wu, M.-C. and Cawlfield, J. D., 1992, Probabilistic Sensitivity and Modeling of Two-Dimensional Transport in Porous Media, No. 6, Stochastic Hydrology and Hydraulics, Springer-Verlag, pp. 103-121.

[15] Wu, M.-C. （1993） Probabilistic Sensitivity Analysis for Contaminant Transport Modeling with a Reliability Algorithm, Ph.D. Dissertation, University of Missouri – Rolla, 314 p.

[16] Cawlfield, J. D. and Wu, M. -C., 1993, Probabilistic Analysis of One-Dimensional Reactive Transport Porous Media, Vol. 29, No. 3, Water Resources

Research, American Geophysical Union, pp. 661-672.

[17] Wu, M.-C. and Shih, K., 1999, Modeling The Inter-Strata Seepage Effect Near the Nanhua Reservoir, Journal of the Geological Society of China, Vol. 42, No. 3, pp. 409-428

[18] P. Christophe, and G. Horst. 2012 Radionuclide behavior in the natural environment. Woodhead, U.K

[19] 李振誥、吳銘志、陳俊焜，1997，土壤持水曲線碎形維度之研究-案例說明，臺灣水利，Vol.45，No.3，pp. 29-41。

[20] 周定芳、吳銘志、鍾廣吉，1997，儲集層特性分析技術之建立與應用實例，臺灣石油地質，第三十一期，第 203-232 頁。

[21] 劉文忠，銫、鍶及鈷在安山岩及珊瑚礁石灰岩中遷移行為之研究，國立清華大學原子科學系研究所，博士論文，1990 年 7 月。

[22] 許俊男，「在模擬地下水中沸石和高嶺土對鍶銫核種的吸附機制研究，」國立清華大學原子科學系，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告(1996)。

[23] 林哲毅，「從緩衝材料觀點研究放射核種在膨潤土中的吸附與擴散行為，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（1997）。

[24] 張顧齡，「酸鹼度和溫度對鍶銫在膨潤土中吸附與擴散行為之影響，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（1997）。

[25] 劉靜蓉，「鍶銫在潛在母岩與水泥工程障壁中吸附與擴散的基礎研究，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（1999）。

[26] 黎華嵊，「銫在粉碎花崗岩與低鹽度人造地下水中傳輸之研究，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（2000）。

[27] 陳子雲，「放射性廢料處置主要核種之遷移，」清華大學原子科學系研究所，碩士論文（2001）。

[28] 郭殷銘，「銫在粉碎花崗岩中宿命與傳輸模式之建立，」國立清華大學原子科學系研究所，碩士論文（2002）。

# 氧化還原敏感性核種於深地層處置遷移之物種評估與研究-氧化還原敏感性核種遷移參數實驗之精進及遲滯機制分析

# On the study of improving the redox-sensitive radionuclide migration experiment technique and their transport mechanism

計畫編號： MOST 107-NU -E-007-005 -NU
計畫主持人：蔡世欽
e-mail：sctsai@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

## 摘要

本研究提出了一種基於迭代和分析方法（PIPIAM）的新穎分析方法，利用濃度數據獲得擴散相關參數，並比較 PIPIAM 和繪圖法的結果。結果顯示：，PIPIAM 在濃度誤差降低和估計參數不確定性降低方面優於圖解法。因此本研究所提出的方法是可用來做為安全評估所需擴散參數分析的良好替代方案。此外本研究利用 EXAFS 光譜技術來探討不同反應時間其 Cs 離子吸附在膨潤土之位置變化，藉此瞭解 Cs 離子吸附膨潤土的特性。研究結果顯示：Cs 離子吸附在膨潤土主有作用機制有兩部分，第一部分 Cs 離子與 H2O 分子之氧原子迅速地形成鍵結，特別是形成 OS 錯合反應；第二部分其反應則是較緩慢的發生，去水合之 Cs 離子由較寬廣的層間水層移動到 FES 位置及狹窄的層間水層位置。此研究結果將有助於了解 Cs 離子吸附於膨潤土核種的基本特性及機制。

關鍵字：膨潤土、銫、擴散、吸附、參數反推、延伸 X 光吸收精細結構

## Abstract

A novel parameter identification process based on an iterative and analytical method (PIPIAM) is proposed in this study to obtain the diffusion related parameters using concentration data. The results of PIPIAM and the graphical method are compared through an error analysis of concentration. The results show that PIPIAM outperforms the graphical method in terms of the error reduction of the concentration and the uncertainty decrease of the estimated parameters. The proposed method is thus a good alternative for acquiring transport parameters for use in safety assessments of nuclear waste repositories. In addition, From the EXAFS study, it was revealed that the adsorption of Cs on bentonite occurred in two steps. The first step includes the rapid uptake of Cs by attachment to the oxygen atoms of the H2O molecules on broad interlayer sites, especially for OS complex. The second step includes the slower process that dehydrated Cs ion move from the broad interlayer sites to the FES and narrow interlayer sites. Those results have benefit to the basic understanding for Cs adsorbed on bentonite.

Keywords: bentonite, Cs, diffusion, adsorption, parameter inversion, EXAFS.

## I. 前言

目前國際間對高放射性廢棄物的處置方式為深層地質處置。此種處置方式是藉由工程與天然的多重障壁設計概念，來阻絕或遲滯放射性核種的外釋及遷移，最終目標希望能將高放射性廢料與人類生活圈長久隔絕，使其對人類影響之輻射劑量減低至無害的範圍。以蒙脫石為主要礦物成分的膨潤土(bentonite)，在滲透性、離子交換、膨脹性等方面有相當良好的功能，因此為許多研究單位所建議作為工程障壁之緩衝回填材料。放射性核種於膨潤土中遷移以擴散為主，藉由實驗室中進行穿透擴散(through-diffusion)實驗，估算擴散係數。擴散係數可使用圖形法，當實驗進行至穩態時，透過擬合累積濃度曲線之漸近線進行計算，但其擬合過程受到人為主觀選擇因素，往往對其擬合結果造成影響，因此需要開發替代方案來降低人為主觀性並提高準確性。

本研究提出一個新穎方法（Parameter Identification Process based on an Iterative and Analytical Method, PIPIAM）透過迭代計算並結合解析解用以進行參數推估過程，利用非反應性示蹤計氚水及放射性示蹤劑銫 137 與 PIPIAM 及繪圖法擬合之結果進行討論。此外，針對吸附遲滯機制分析部分，本研究利用同步輻射中心提供之 EXAFS(延伸 X 光吸收近邊緣細微結構)分析，探討銫核種遷移過程中的遲滯特性。

## II. 主要內容

### 2.1 迭代解析解法 PIPIAM

有別於過去傳統用繪圖法來分析擴散實驗數據，本研究提出一新穎方法用以推估膨潤土實驗孔隙率及擴散係數等重要參數，利用推導所得之解析解與完整累積濃度曲線進行擬合，透過多次迭代過程找出區域誤差最小值，並利用迭代過程至找出全域誤差最小值即停止。迭代過程利用均方根誤差進行誤差值計算，考量到膨潤土壓密至管柱時，可能會因受力不均勻導致孔隙率與理論孔隙率有些微差距，因此 PIPIAM 將孔隙率一併進行推估，並將孔隙率納入誤差值之計算。誤差值($\varepsilon$)為濃度誤差及孔隙率誤差之均方根誤差總和，計算公式如下：

$$\varepsilon = \alpha\sqrt{\frac{\sum_i^N (C_p - C_m)^2}{N}} + \beta\sqrt{\frac{(\theta_E - \theta_T)^2}{N}} \quad (1)$$

式中，C_p 及 C_m 分別為利用 PIPIAM 計算及管柱實驗所量測之濃度，$\theta$_E 為利用 PIPIAM 所計算出之實驗孔隙率，$\alpha$ 及 $\beta$ 分別為權重項，本研究使用 $\alpha=\beta=1$，意即濃度和孔隙率於計算誤差時有相同的權重，最後，將上述所求得之擴散係數與理論孔隙率代回方程式(12)計算累積濃度。PIPIAM 步驟及流程圖如圖 1 所示：

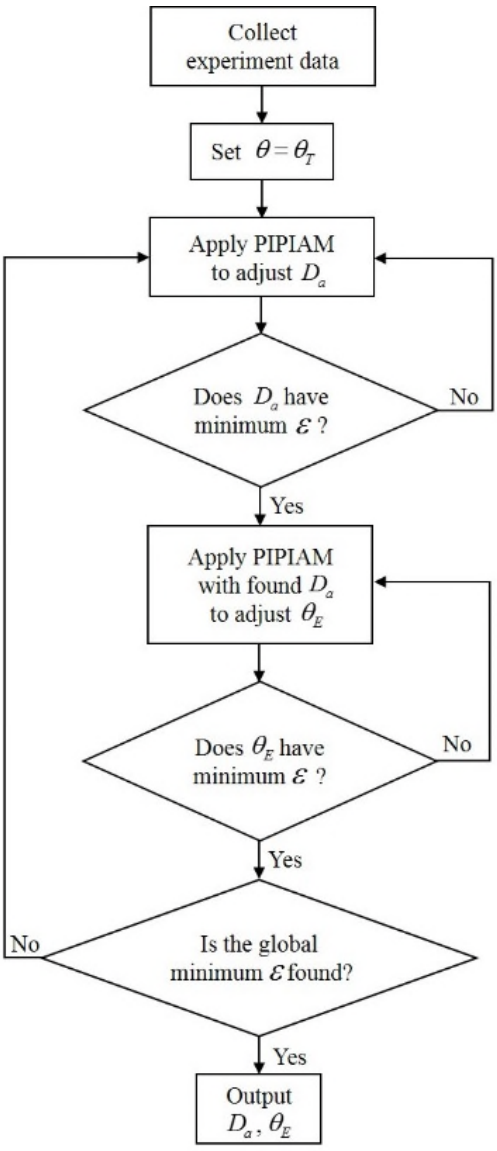



圖 1、PIPIAM 步驟及流程圖

### 2.2 核種遷移吸附遲滯特性

國家同步輻射中心(NSRRC)16A 射束提供之延伸 X 光吸收精細結構(X-ray Extended Absorption Fine Structure, EXAFS)，可分析銫與膨潤土中氧的配位數及鍵結位置。EXAFS 是以同步輻射所產生的高強度 X 光為基礎，當光子通過物質時，部分能量會被物質吸收，光子能量愈高，物質其能量的吸收率愈低(即是高能量 X 光有較大的穿透力)。若將物質的吸收係數( (E))對其入射光能量作圖，則會呈現遞減趨勢。然而當入射能量恰可足夠將某元素原子之內層電子激發時，原子內層電子開始吸收光子能量而躍升至外層空軌域，而使吸收係數遽增，且在遞減的吸收曲線上出現躍升，形成一個吸收邊緣能量。X 光吸收光譜分為兩個區域進行分析，前段吸收邊緣部分稱之為 XANES，後段為 EXAFS。因 EXAFS 數據與吸收原子束縛力及其周圍原子排列有關，可得知銫與固化體結構鄰近之 O、H 等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，可進一步分析銫吸附於膨潤土結構內部的價態及鍵結。

### 2.3 擴散實驗及 PIPIAM 分析結果

圖 2 為 PIPIAM 及繪圖法對實驗數據擬合結果。圖中實線與虛線分別為 PIPIAM 及繪圖法，實心點為實驗所量測之數據。由圖中可發現繪圖法與實驗數據具有相當大的偏差，反之，PIPIAM 有較優異之擬合結果，且用於不同長度之管柱皆能有良好的擬合效果。

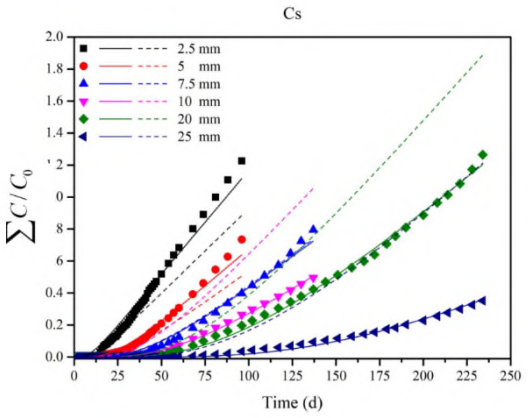



圖 6 PIPIAM 及繪圖法對銫 137 實驗擬合結果

### 2.4 核種遷移吸附遲滯特性分析結果

本研究利用 EXAFS 光譜技術來研究 Cs 吸附在膨潤土從反應開始至吸附達平衡時，Cs 離子隨時間變化的遷移特性(如圖 3)。在達吸附平衡前其 Cs-O 鍵結長度，銫原子和氧原子之原子間距會隨時間產生變化(如圖 4)。研究得知：Cs 離子吸附在膨潤土主有作用機制有 2 部分，第一部分 Cs 離子與 H2O 分子之氧原子迅速地形成鍵結，特別是形成外層(Out-Sphere, OS)錯合反應。第二部分其反應則是緩慢的發生，去水合之 Cs 離子脫去外層水合後，由較寬廣的層間(inter-layer)移動到 FES(Frayed Edger Site)位置及狹窄的層間水層位置。利用 EXAFS 光譜技

術可以分析不同反應時間其 Cs 離子吸附在膨潤土之位置變化，藉此瞭解 Cs 離子吸附膨潤土的特性。

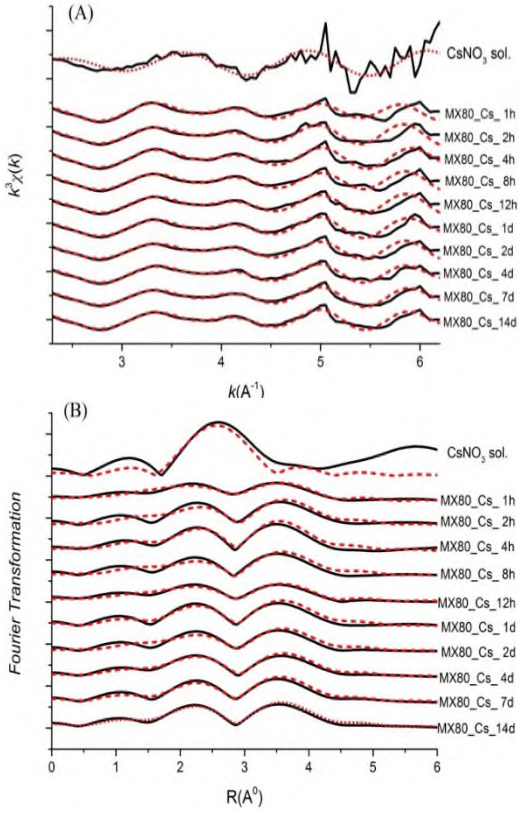



圖 3 鉑吸附在膨潤土不同反應時間 Cs L3-edge 之 EXAFS 光譜(a) k3 加權之 χ(k) 光譜 (b)對應的 RSFs (未修正之相位偏移)，圖上標示實驗數據(實線)及配適數據(破折線) 。

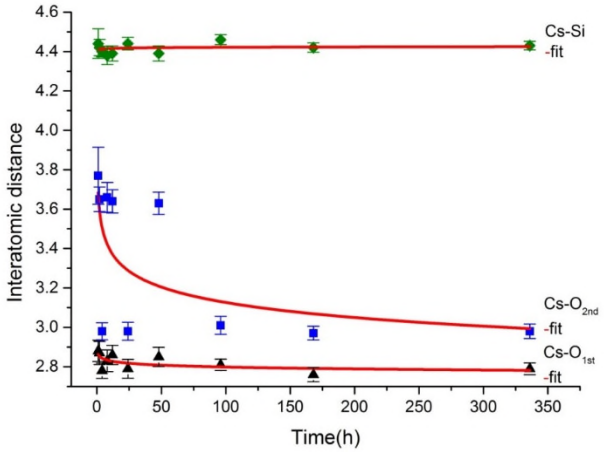



圖 4 每層原子間距隨時間之變化圖

## III. 結果與討論

本研究提出一新穎方法(PIPIAM)及實驗流程用以推估放射性核種於膨潤土之重要參數，利用管柱實驗所獲得之累積濃度曲線與解析解進行擬合，藉由非反應性示蹤劑（氚水）及放射性示蹤劑（銫）推估視擴散係數、實驗孔隙率及遲滯因子。於實驗流程先進行氚水實驗用以了解膨潤土的物理參數，PIPIAM 利用完整累積濃度曲線進行擬合並同時推估實驗孔隙率，可降低 Crank 提出之繪圖法僅使用晚期直線部分及理論孔隙率進行計算所造成之誤差。研究結果顯示，利用 PIPIAM 所求得之參數進行濃度誤差計算，其誤差值及統計不確定性皆優於繪圖法。

此外，本研究利用 EXAFS 光譜技術來研究 Cs 吸附在膨潤土從反應開始至吸附達平衡時，Cs 離子隨時間變化的遷移特性。研究得知 Cs 離子吸附在膨潤土主有作用機制有 2 部分，第一部分 Cs 離子與 H2O 分子之氧原子迅速地形成鍵結，特別是形成 OS 錯合反應。第二部分其反應則是緩慢的發生，去水合之 Cs 離子由較寬廣的層間水層移動到 FES 位置及狹窄的層間水層位置。本研究結果可有助於評估 Cs 離子在土壤環境中核種遷移的特性，提供核燃料最終處置場其緩衝材料的設計參考。

## IV. 結論

本研究提出一新穎方法(PIPIAM)及實驗流程用以推估放射性核種於膨潤土之重要參數，利用管柱實驗所獲得之累積濃度曲線與解析解進行擬合，藉由非反應性示蹤劑（氚水）及放射性示蹤劑（銫）推估視擴散係數、實驗孔隙率及遲滯因子。於實驗流程先進行氚水實驗用以了解膨潤土的物理參數，PIPIAM 利用完整累積濃度曲線進行擬合並同時推估實驗孔隙率，可降低 Crank 提出之繪圖法僅使用晚期直線部分及理論孔隙率進行計算所造成之誤差。研究結果顯示，利用 PIPIAM 所求得之參數進行濃度誤差計算，其誤差值及統計不確定性皆優於繪圖法。

此外，本研究利用 EXAFS 光譜技術來研究 Cs 吸附在膨潤土從反應開始至吸附達平衡時，Cs 離子隨時間變化的遷移特性。研究得知 Cs 離子吸附在膨潤土主有作用機制有 2 部分，第一部分 Cs 離子與 H2O 分子之氧原子迅速地形成鍵結，特別是形成 OS 錯合反應。第二部分其反應則是緩慢的發生，去水合之 Cs 離子由較寬廣的層間水層移動到 FES 位置及狹窄的層間水層位置。本研究結果可有助於評估 Cs 離子在土壤環境中核種遷移的特性，提供核燃料最終處置場其緩衝材料的設計參考。

## 參考文獻

[1] Brook, B.W., Alonso, A., Meneley, D.A., Misak, J., Blees, T., van Erp, J.B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. Sustainable Materials and Technologies, 1-2, 8-16.

[2] Popp, J., Lakner, Z., Harangi-Rakos, M., Fari, M. (2014). The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 559-578.

[3] Wu, M. C., Lee, C. P., Tsai, S. C., Liu, C. Y., Pan, C. H., Tsai, T. L., Wei, H. J., Men, L. C. (2015). Study on sorption and diffusion of Sr in crushed and intact basalt and granite investigated in through-diffusion

experiments. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 304, 435-441.
[4] Japan Nuclear Cycle Development Institute. (2000). H12: Project to establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC, Japan.
[5] Johanna, H. (2011). Backfilling of deposition tunnels: Use of bentonite pellets, SKB technical report, SKB-P-11-44
[6] Lee, C. P., Wu, M. C., Tsai, T. L., Wei, H. J., Men, L. C., Lin, T. Y. (2012). Comparative study on retardation behavior of Cs in crushed and intact rocks: two potential repository host rocks in the Taiwan area. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 293, 579-586.
[7] Radhakrishna, H. S., Chan, H. T., Crawford, A. M., Lau, K. C. (1989). Thermal and physical properties of candidate buffer‐backfill materials for a nuclear fuel waste disposal vault. Canadian Geotechnical Journal, 26(4), 629-639.
[8] Borgesson, L., Chijimatsu, M., Fujita, T., Nguyen, T. S., Rutqvist, J., Jing. L. (2001). Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite-based buffer material by laboratory tests and numerical back analyses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, 95-104.
[9] Eriksen, T. E., Jacobsson, A. (1984). Diffusion in clay. Experimental techniques and theoretical models. KBS TR 84-05, Swedish Nuclear Fuel and Waste management Co., Stockholm, Sweden.
[10] García-Gutiérrez, M., Cormenzana J. L., Missana1, T., Mingarro, M., Molinero, J. (2006). Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite, Journal of Iberian Geology, 32: 37-53.
[11] Villar, M. V., (2005). MX-80 bentonite, thermo-hydro-mechanical characterization performed at CIEMAT in the context of the prototype project. CIEMAT Technical Report: CIEMAT/DIAE/54540/2/04.
[12] Holmboe, M., Wold, S., Jonsson, M. (2012). Porosity investigation of compacted bentonite using XRD profile modeling, Journal of Contaminant Hydrology, 128(1-4):19-32.
[13] Shih, Y. H., T. L. Tsai, L. C. Chen, T. Y. Su, C. P. Lee, and S. C. Tsai. (2017). Determination of sorption and diffusion parameters of 99Tc in crushed granite using through-diffusion experiments. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 311, 1111-1116.
[14] Tsai, T. L., Tsai, S. C., Shih, Y. H., Chen, L. C., Lee, C. P., Su, T. Y. (2017). Diffusion characteristics of HTO and $^{99}TcO_4^-$ in compacted Gaomiaozi (GMZ) bentonite. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 28:67.
[15] Molera, M., Eriksen, T. Jansson, M. (2003). Anion diffusion pathways in bentonite clay compacted to different dry densities, Applied Clay Science, 23, 69-76.
[16] Crank, J. (1975). The mathematic of diffusion, Great Baitain, Oxford university.
[17] American Society for Testing and Materials (2010). Standard Test Method for Distribution Coefficients of Inorganic Species by the Batch Method. C1733-10.
[18] Bostick, B.C., Vairacamurthy, M.A., Karthikeyan, K.G., Chorover, J., (2002). Cesium adsorption on clay minerals: an EXAFS spectroscopic investigation. Environ. Sci. Technol. 36, 2670e2676.
[19] Qin, H., Yokoyama, Y., Fan, Q., Iwatani, H., Tanaka, K., Sakaguchi, A., Kanai, Y., Zhu, J.,Onda, Y., Takahashi, Y., (2012). Investigation of cesium adsorption on soil and sediment samples from Fukushiam Prefecture by sequential extraction and EXAFS technique. Geochem. J. 46, 297e302.
[20] Fan, Q.H., Tanka, M., Tanaka, K., Sakaguchi, A., Takahashi, Y., (2014). An EXAFS study on the effects of natural organic matter and the expansibility of clay mineral on cesium adsorption and mobility. Geochim. Cosmochim. Acta 135, 49e65.

# 輻射防護與放射醫學科技 I

# 輻災受影響地區環境復原及民眾返鄉標準之實務研究之一
# The study on returning-home of evacuees and environment recovery for people affected by a nuclear accident (I)

計畫編號：MOST 107-2623-E-182-001-NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：董傳中、趙自強
e-mail：cjtung@mail.cgu.edu.tw
計畫參與人員： 江悅、賴柏辰
執行單位：長庚大學放射醫學研究院

## 摘要

核子事故應變措施應分兩階段實施：即(1)緊急階段(2)復原階段。在全面緊急事故之緊急階段之應變，本團隊已於 105-106 年度整理完成，並訂定相關規範。而在全面緊急事故之復原階段，則應根據環境監測、劑量評估、除污措施、廢棄物處置、既存曝露標準等，進行最優化之利弊分析，以尋求最有利之中長期復原措施。福島事故發生後，日本政府除了採取復原行動：包括電廠除役、大規模環境監測、廣泛性環境除污、短中長期廢料處置之外，另外也訂定了包括食物、疏散、移居等之解除管制的劑量標準與作業標準，以便緊急曝露順利移轉至既存曝露。我國和日本的民情與制度接近，這些措施與標準具有高度的參考價值。本計畫執行之主軸為：(1)蒐集國際重大核子災害復原階段之實務經驗，包括劑量評估、環境復原、民眾返鄉、農漁牧產品管制等，然後參考國際最新規範，研擬復原措施之相關導則。(2)綜整重大核災之處置經驗及研究資料，包括復原時期之民眾劑量評估、環境清理準則與方法、疏散或移居民眾返鄉之劑量標準、受影響地區農漁牧產品劑量監控與追蹤管制。(3)產出以下導則：核災復原階段之民眾與環境劑量評估、環境清理準則和方法、疏散或移居民眾返鄉標準。本報告係兩年期計畫之第一年研究成果報告，研究內容包括上述(1)及(2)之各項工作，研究方法是以國際放射防護委員會 ICRP 及國際原子能總署 IAEA 之指引為藍本，針對日本福島核子事故之復原階段的各項措施加以檢討，研擬完成各種工作之標準依據與作業準則。
關鍵詞：福島、核災、輻災、復原。

## Abstract

Emergency response to a nuclear accident can be implemented in two phases, i.e. the urgent phase and the recovery phase. In the recovery phase of a general emergency, it requires the remediation of released radioactive substances in the environment and the implementation of long-term recovery plans, in order to return the situation to existing exposure. The long-term plans of nuclear accident recovery must be worked out among the relevant personnel and organizations. Optimization analysis should be performed in accordance with the data on environmental monitoring, dose assessment, health assessment, decontamination measure, and waste disposal. Existing exposure must comply with international standards. The main objectives of this research are: (1) to collect information on the major international nuclear and radioactive accidents (including the Soviet Union Chernobyl, Japan Fukushima and Brazil Goiania accidents) regarding the recovery plans for dose assessment, environmental remediation, returning home from the evacuation, and lifting from the emergency control; (2) to collect data on the major nuclear and radioactive accidents regarding individual and environmental dose assessments, environmental clean-up criteria and methods, dose standards for the lifting of evacuations, and monitoring and tracking of foodstuffs; (3) to develop guidelines for the assessments of public and environmental doses, the criteria and methods of environmental decontaminations, and the dose standards of lifting evacuations and relocations. The Fukushima nuclear accident has been more than seven years. Since then, the Japanese government has implemented several recovery plans - including the intensive monitoring of radioactive contaminations and the radiation dose standards for lifting evacuations. Due to the similar geographic and humanistic conditions between Taiwan and Japan, the recovery plans of Japan provide valuable references. After thorough review of Japanese recovery plans, we will develop guidelines and standards of nuclear emergency recovery measures that will be provided to the competent authorities in Taiwan. This report provides the first-year progress of a two-year project. Works studied in the first year include items of (1) and (2) listed above. Methods of study include the guidelines of International Commission on Radiological Protection and International Atomic Energy Agency for the protective measures in the recovery phase of a nuclear accident. Reviews have been made for the Fukushima Nuclear Power Plant accident in Japan regarding the dose and operational guidelines developed.

Keywords: Fukushima, nuclear accident, radiological accident, recovery

## I. 前言

嚴重核子事故一旦發生，若放射性物質有外釋之虞時，首要工作在於民眾防護。處理短期內近距離之高濃度雲團之放射性物質，民眾防護屬於緊急應變措施；處理長時間大範圍之地表放射性污染，民眾防護則屬長期復原措施。本計畫之研究限於長期復原措施。長期復原階段之民眾輻射曝露稱為既存曝露(existing exposure)，此階段之長期復原措施包括：環境污染監測、人員劑量評估、環境除污與解除管制、除污廢棄物之短中長期處

置等，係根據事先擬訂之劑量參考基準(reference level)與劑量率作業基準(operational level)實施。國際放射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)建議之緊急曝露年劑量參考基準為上限 100 mSv、下限 20 mSv；既存曝露年劑量參考基準為：上限 20 mSv、下限 1 mSv；而 20 mSv 及 1 mSv 之年劑量，正是計畫曝露(planned exposure)中之工作人員及一般人的劑量限度(dose limit)。上述參考基準之個人有效劑量(effective dose, E)，與機率效應(stochastic effect)風險有關，但因無法直接度量，故須另訂可以度量之環境監測的劑量率或污染濃度作業基準使用。

## II. 主要內容

嚴重核子事故發生後，由於放射性雲團的擴散影響，使得周圍民眾受到不同程度的輻射曝露，包括短期之體外曝露以及長期之環境污染引起的體外與曝內曝露。在復原階段，首要工作在於大規模的環境(土壤、飲水、房屋、農作物、畜牧產品、林木等)監測，用以評估污染地區居民之輻射劑量，作為後續之環境除污依據；其次是規劃環境除污之有效方法、除污標準、及工作分配，然後進行除污、解除管制、與居民返鄉；最後就是研擬除污產生之廢棄物的短中長處置方法。

2011 年 3 月 11 日 14:46 日本外海發生地震，引起海嘯造成福島核能電廠一號機失去冷卻水，17:30 燃料棒破損。此時雖然尚無放射性物質外釋，然而日本政府在國際建議下，於 19:03 開始疏散 2 公里內的民眾，隨後 21:23 下令疏散範圍擴大至 3 公里，3 月 12 日 05:44 再次擴大至 10 公里，這些預防性防護行動，有效地避免了鄰近核能電廠最內圈地區民眾的確定效應。3 月 12 日 15:36 福島核能電廠一號機發生爆炸，產生了放射性雲團，於是 18:25 日本政府再次下令擴大疏散範圍至 20 公里，其目的在於抑低民眾發生機率效應的風險。環境監測資料顯示[圖 1]，電廠周圍數十公里範圍內受到不等程度的放射性污染，環境劑量分布高至數百 mSv/y 以上。本計畫依據國際機構之建議以及福島事故之經驗，研擬嚴重核子事故之長期復原措施，以供主管機關參考使用。

ICRP 與 IAEA 均建議，核子事故復原階段之環境除污與復育，應依據之參考基準為上限 20 mSv/y、下限 1 mSv/y。在此劑量區間，可視實際污染面積與程度，分次逐步達成目標值；當污染低於 1 mSv/y 時，即屬長期既存曝露，不再進一步除污。依此建議，可設定高污染區除污之參考基準以及疏散民眾返鄉之參考基準為 20 mSv/y，而低污染區除污之參考基準以及疏散學童返校之參考基準為 1 mSv/y。

基於上述建議，日本政府劃分了中央政府與地方政府的復原行動責任區。中央政府責任區稱為特別除污區(special decontamination area, SDA, 圖 1)，包括整個疏散地區(20 公里範圍內及 20 公里範圍外之熱區)，又細分為 SDA1、SDA2、SDA3 三區，分別針對長期無法返鄉、短期難以返鄉、可以返鄉之原則劃分。地方政府責任區稱為加強污染監測區(intensive contamination survey area, ICSA)，係指疏散地區以外、年劑量大於 1 mSv/y 之地區。為日本政府訂定之 SDA 與 ICSA 的除污及返鄉參考基準。

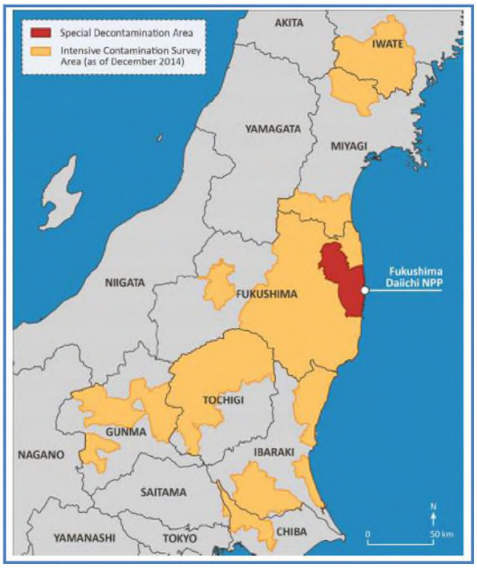



圖 1:日本福島核子事故放射性污染造成之環境影響。

## III. 結果與討論

### 一、核子事故復原措施之(劑量率)作業基準

參考基準之有效劑量無法直接度量，只能依靠劑量評估求得。劑量評估分為體外曝露評估及體內曝露評估，前者可由環境監測所得之空氣劑量率配合時間佔用因子(occupancy factor)推得，後者可由環境監測所得之污染濃度配合攝入(吸入及嚥入)因子(intake factor)推得。利用體外曝露或體內曝露評估模式，求得空氣劑量率或污染濃度之參考基準稱為作業基準。以車諾堡事故為例，體內曝露所佔比重很大，故作業基準多以活度濃度(Bq/kg)表示；而福島事故則以銫 134 與銫 137 之體外曝露比重最大，故作業基準則以離地一公尺高度之空氣劑量率(μSv/h)表示。

福島事故的特性包括：(1)體外曝露個人劑量佔 90% 以上，(2)土壤污染屬多為附著(soft attachment)，容易引起再懸浮(resuspension)，(3)環境除污可以大幅降低體外曝露之個人劑量。基於此一認知，日本政府採用體外曝露之離地一公尺高度的空氣劑量率(μSv/h)，作為環境監測之作業基準。針對一般居民而言，假設每天居留室內時間為 16 小時、室外活動時間為 8 小時，又居屋之輻射屏蔽效率為 0.4，則對應年劑量 20 mSv 參考基準之劑量率作業基準為 3.8 μSv/h，而對應年劑量 1 mSv 參考基準之劑量率作業基準為 0.23 μSv/h (含 0.04 μSv/h 之天然背景輻射年劑量率)。對於學校學生而言，假設每天室內上課時間為 7 小時、室外活動時間為 2 小時，又教室之輻射屏蔽效率為 0.1，則對應 1 mSv。

### 二、核子事故復原措施之環境監測

環境輻射監測之目的，在於瞭解放射性污染之面積與程度，並且監測離地一公尺高度之空氣劑量率，以作為環境除污與解除管制之依據。為了兼顧快速與準確之需求，環境輻射監測分為大範圍之粗篩與小區域之細測。大範圍之粗篩常選擇機載型(特別是無人機)監測，小區域之細測則多選用車載型(汽車或機車)或背帶式監測。

這些監測之儀器必須經過校正、具備 GPS 定位、數據無線傳輸等功能，以便經由軟體直接將監測數據標示於電子地圖上，提供醒目而容易的辨識。

### 三、核子事故復原措施之個人劑量評估

個人劑量評估需包括兩類人員：(1)協助管制作業之軍警消人員、執行任務之公務人員、參與救災與復原之工作人員(含志願者)、協助救災與復原之國際人員等，劑量評估結果係作為劑量限度之管制使用，(2)受災民眾(特別是疏散民眾)。其中工作人員的劑量評估，應包括體外曝露與體內曝露，分別利用人員劑量計如熱發光劑量計，以及人員污染偵測器如全身計測器或生化分析儀等。而受災民眾體外曝露的劑量評估，則利用：(1)環境監測與問卷調查，(2)人員劑量計之模擬環境實測，(3)模擬疏散路線等方法加以評估；民眾體內曝露的輻射劑量，則針對嬰兒、懷孕婦女等特定人口之關鍵器官的等價劑量加以評估[圖 2]。




圖 2:福島事故中針對特定人口的體內曝露劑量評估




圖 3:福島事故 Ookumamachi 示範性除污工程

### 四、核子事故復原措施之環境除污的示範性工程

由於環境除污的項目很廣、方法很多，因此有必要先進行示範性工程，以比較各種方法之效果、人力、費用、時間等，作為大規模除污之依據。以福島事故之 Ookumamachi 示範性工程為例[圖 3]，工程涵蓋之除污面積有 4.5 公頃、含私人住家 30 戶及公共設施(市政廳、社區住宅、與公園)等。環境除污時，除污方法的選擇很多，有些方法的除污效果很好、但產生廢棄物亦多，有些可使用機械協助、但費用昂貴，有些則需要大量人力、但費時較長，因此各種方法取捨的考慮因素很多，可藉由示範性工程的比較，選擇出最優的方法執行。

### 五、福島核子事故復原措施之環境除污結果

目前，許多 SDA 區已經完成除污、且已解除管制、鄉民得以返鄉；某些地區已經完成除污、尚待其他工程完成、經過審查後即可解除管制；也有些高汙染區還未完成除污、仍需管制、鄉民無法返鄉。圖 4 為截至 2018 年 3 月為止，ICSA 區內之除污與復原情形，其中黃色區表示已經完成除污、且已自 ICSA 除名；綠色區表示已經完成除污、等待自 ICSA 除名。比較 2011 年 4 月與 2016 年 10 月之污染地圖，可以發現已經沒有紅區、黃區與綠區也大幅縮小、大部分地區已經轉為藍區了。

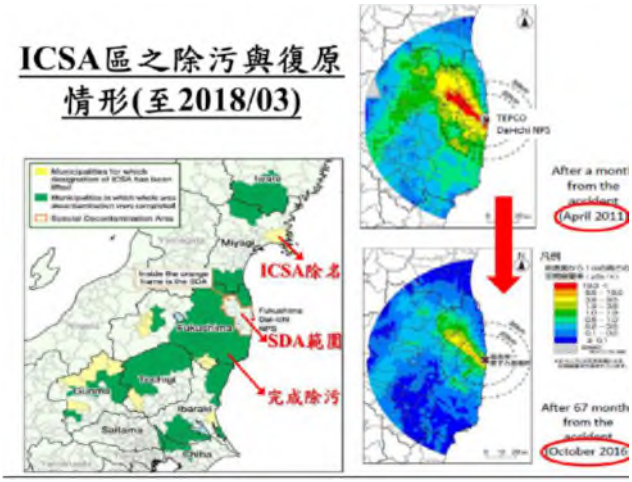



圖 4:截至 2018 年 3 月為止福島事故 ICSA 地區之除污與復原情形

### 六、福島核子事故復原措施之臨時廢棄物處理

福島核子事故復原措施產生了大量的放射性廢棄物，其中大多是污染土壤、少量是固體廢棄物、還有許多生物(動物與植物)可燃性廢棄物等。除了可燃性廢棄物可在特殊焚化爐中減容外，土壤與固體廢棄物必須先裝入特製袋中，暫時堆積於臨時貯存場中，然後集中運輸至中期貯存場，最後再謀求長期之最終處置。

圖 5 為臨時貯存場之包裝與堆放情形，由於臨時貯存場設施之主要考量為輻射屏蔽及滲漏防水，因此包裝容器、防水覆蓋、污水集水池、底層防滲、圍籬、監測井等均為工程重點。

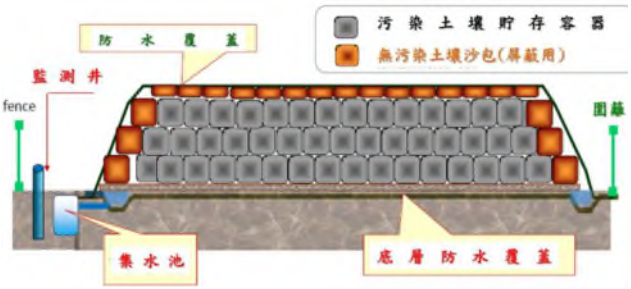



圖 5:福島事故復原措施之臨時廢棄物處理設施

### 七、福島核子事故復原措施之中期廢棄物處理

土壤與固體廢棄物集中運輸至中期貯存場後，預計

貯存 30 年，然後再尋求最終處置。中期貯存場之分類，包括土壤貯存場、可燃性減容設施、固體廢棄物貯存場等。其中土壤貯存場又分為兩級，分別貯存高度污染與低度污染之土壤。

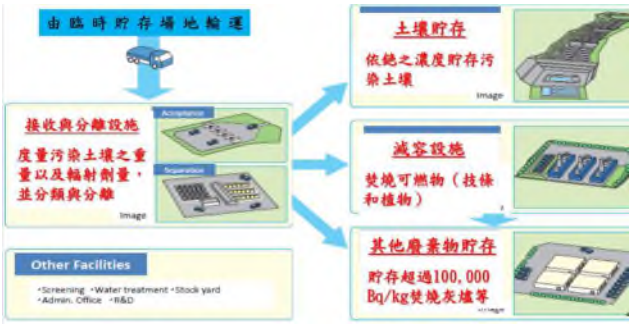



圖 6:福島事故復原措施之中期廢棄物處理場

圖 6 為低度污染土壤之貯存場設施，乃利用低地建構而成，污染土壤貯存於地下，設施重點為防水及排水，以及輻射安全之監測與管理。圖 7 為高度污染土壤之貯存場設施，利用山丘與高原建構而成，污染土壤貯存於地下，設施重點仍為防水及排水，但增加排水穿孔管以及加強污水收集與處理。另外，固體及燃燒後之廢棄物貯存設施[圖 8]，則利用山丘與高原建構，貯存廠房具有足夠的輻射屏蔽效果，而包裝之鐵筒亦具有耐久之屏蔽效果，此外輻射安全之監測與管理更是重點。

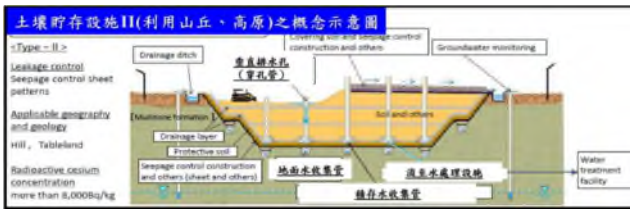



圖 7:福島事故高度污染土壤中期廢棄物處理場之設施

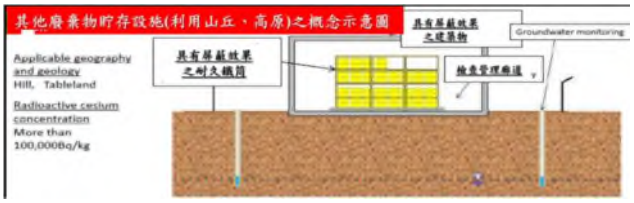



圖 8. 福島事故其他固體廢棄物之中期處理場設施

## 八、福島核子事故污染土壤之減容研究

污染土壤中的放射性銫含量極少，主要成分仍然是土壤，為了最終處置的方便起見，如果能將土壤與銫加以分離，則可大幅減少污染土壤的體積，因此研究土壤與銫分離的減容技術，乃成為最迫切的工作。日本政府委託幾家工程公司研究此一技術，建造了示範工廠，嘗試利用此一技術大量處理污染土壤。分別以昇華氣化法與清洗法，去除土壤中的放射性銫，達到減容效果之比較。土壤時除了考量除污效率之外，還要考量減容率與每小時的工作量。

## 九、福島核子事故污染土壤之回收再利用研究

污染土壤經過銫分離後，可以回收再利用，應用於曝露時間短(人員佔用因子小)、長期不改變的工程需求，譬如路基材料與防波堤的內襯等。

## IV. 結論

國際組織如 ICRP 與 IAEA，均提出嚴重核子事故復原階段的應變建議，針對外釋到環境中之放射性污染，實施中長期之應變措施。有關核能災害中、長期應變措施的基本原則，需由有關單位人員充分協商討論，然後依據實際之環境監測、劑量評估、健康評估、除污措施、廢棄物處置、既存曝露標準等，進行優化分析(optimization analysis)，以尋求最有利的復原措施。福島事故發生至今已超過七年，這段期間日本政府除了實施大規模的復原措施：包括電廠除役、水污染處理、環境監測、環境除污、食物檢測、食物管制、食物解除管制、復原行動輻射防護等之外，另外訂定了解除疏散的劑量標準、程序、方法，以確保核子事故順利地由緊急曝露轉移至既存曝露。由於我國和日本的民情與制度十分接近，因此這些措施與標準可提供寶貴的參考價值。本計畫之目的，在於檢討國際及日本的復原應變措施，研擬我國的規範與標準，以提供主管機關參考使用。

## 參考文獻

[1] 日本原子力災害對策方針_20160301 修正
[2] The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 5, Post-accident Recovery, IAEA TV5, 2015.
[3] Annex I of Technical Volume 5, Evolution of Reference Levels for Remediation and Development of a Framework for Post-accident Recovery, IAEA TV5, Annex I, 2015.
[4] Annex II of Technical Volume 5, International Best Practice Basis for Assessing Recovery Operations, IAEA TV5, Annex II, 2015.
[5] Annex III of Technical Volume 5, Outline of the Guidelines on the Scope of Nuclear Damage, IAEA TV5, Annex III, 2015.
[6] Annex IV of Technical Volume 5, Comparative Analysis of Remediation Strategies and Experience after the Fukushima Daiichi and Chernobyl Nuclear Accidents, IAEA TV5, Annex IV, 2015.
[7] 福島再生: Progress on Decontamination & Interim Storage Facility, 10th September, 2014, Ministry of the Environment, Japan.
[8] 福島再生: Progress on Off-site Cleanup and Interim Storage in Japan, July 2015, Ministry of the Environment, Japan.
[9] 福島再生: Environmental Remediation in Japan, March 2018, Ministry of the Environment, Japan.
[10] Chernobyl, Assessment of radiological and health impacts, 2002 update of Chernobyl: ten years on. Nuclear Energy Agency Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD 2002.
[11] Reassessment of Fukushima nuclear accident and outline of nuclear safety reform plan (interim report). Nuclear Reform Special Task Force, December 14, 2012.
[12] Michiaki Kai, Experience and current issues with recovery management from the Fukushima accident. ICRP Symposium 2013.

[13] The radiological accident in Goiania. International Atomic Energy Agency 1988.
[14] Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: twenty years of experience, Report of the Chernobyl Forum Expert Group, IAEA 2006.
[15] Itsumasa Urabe, Takatoshi Hattori, Takeshi Iimoto & Sumi Yokoyama, Radiation protection lessons learned from the TEPCO Fukushima No.1 NPS accident. Journal of Nuclear Science and Technology 2013.
[16] Act on special measures concerning the handling of environment pollution by radioactive materials discharged by the NPS accident associated with the Tohoku district - off the pacific ocean earthquake that occurred on March 11, 2011.
[17] Guidelines for remediation strategies to reduce the radiological consequences of environmental contamination, IAEA Technical Reports Series No. 475, 2012.
[18] Remediation process for areas affected by past activities and accidents, IAEA Safety Standards Series No. WS-G-3.1, IAEA 2007.
[19] Daisuke Sugiyama, Tomonari Fujita and Takatoshi Hattori, Fundamental consideration on reference levels in radiological protection for implementation of practical off-site remediation, International Experts' Meeting on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, 29 January 2013.
[20] Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency, ICRP Publication 111, 2008.
[21] Daisuke Sugiyama, Takatoshi Hattori, Key issues on radiological protection from radioactive waste management in existing exposure situation, IRPA 13, Glasgow, 17 May 2012.
[22] Donald A. Cool, The approach to existing exposure situations, review of the ICRP system, 2nd International Symposium on the System of Radiological Protection, October 23, 2013.
[23] Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. National Report of Japan, October, 2011.
[24] The Fukushima Daiichi accident post-accident recovery, Technical Volume 5/5, International Atomic Energy Agency 2015.

# 診斷用途之 CBCT (cone-beam CT) 輻射醫療曝露品質保證作業項目研究
# Study of Radiation Medical Exposure Quality Assurance Programs for Diagnostic Cone-Beam CT Applications

計畫編號：107-2623-E-182-002-NU
計畫主持人：詹美齡
e-mail：mljan@mail.cgu.edu.tw
執行單位：長庚大學放射醫學研究院

## 摘要

錐形射束電腦斷層掃描儀(cone-beam computed tomography, CBCT)的成像方式與傳統定義的 CT 非常不同，因此無法沿用目前已有的輻射醫療曝露品質保證標準第二條，針對診斷用電腦斷層掃描儀、核醫用電腦斷層掃描儀及電腦斷層模擬定位掃描儀之相關規定。因此需針對 CBCT 特有的輻射輸出方式與影像呈現方式，設計適合 CBCT 的輻射醫療曝露品質保證作業項目。

針對 CT 會有較高輻射劑量的議題，國際輻射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)已針對電腦斷層掃描儀與多排電腦斷層掃描儀(multi-detector CT) 提出病人劑量管理之建議，分別列於 ICRP 87 號報告與 102 號報告，但仍於 2015 年提出 ICRP 129 號報告針對 CBCT 的輻射防護提出建議，並載明 CBCT 的劑量評估方法與傳統 CT 不同。

本計畫的目的是提出 CBCT 之醫療曝露品質保證規範，包含品保項目、執行頻次與建議容許誤差值，並提出適用 CBCT 的劑量評估方法，以利 CBCT 設備輻射劑量顯示值驗證。

關鍵詞：錐形射束電腦斷層掃描儀、C 型臂 CBCT、CBCT 劑量管理、劑量指標。

## Abstract

The imaging method of cone-beam computed tomography (CBCT) is very different from that of traditional CT. It cannot follow the existing Article 2 of Medical Exposure Quality Assurance Standard. This standard is for the traditional CT units in diagnostic departments, the CT part of PET/CT or SPECT/CT scanners in nuclear medicine departments, and the CT simulators in radiation oncology departments. Therefore, it is necessary to design appropriate quality assurance items to fulfill the CBCT radiation operation property.

The International Commission on Radiological Protection (ICRP) has proposed patient dose management for CT and multi-detector computed tomography (MDCT) in ICRP Report No. 87 and Report No. 102, because of CT's high-dose levels. Later, ICRP also proposed ICRP Report No. 129 for Radiation Protection of the CBCT in 2015, due to that the CBCT dose assessment method is different from the original CT.

The purpose of this project is to propose the CBCT medical exposure quality assurance specification, including the quality assurance program, the frequency of implementation, and the recommended allowable error. A dose assessment method for CBCT is also proposed to verify the radiation dose display on the CBCT equipment.

Keywords: Cone beam CT, C-arm CBCT, Dose management CBCT, dose index

## I. 前言

錐形射束電腦斷層掃描儀(cone-beam computed tomography, CBCT)是由大照野X光環繞病患曝露一圈，有相應的平板式偵檢器(flat panel)偵測穿透病人的輻射，取得數位偵測訊號後由電腦進行影像重組而取得斷層影像。雖然 CBCT 有電腦斷層掃描儀(CT)的意義，但它的成像方式與 CT 非常不同(Scarfe and Farman, 2008)，因此無法沿用目前已有的輻射醫療曝露品質保證標準第二條(Atomic Energy Council in Taiwan, 2011)，針對診斷用電腦斷層掃描儀、核醫用電腦斷層掃描儀及電腦斷層模擬定位掃描儀之相關規定，須另行針對 CBCT 特性另訂相關規範。

針對 CT 具較高輻射劑量的議題，國際輻射防護委員會 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)已針對電腦斷層掃描儀與多排電腦斷層掃描儀(multi-detector CT) 提出病人劑量管理之建議，分別列於 ICRP 87 號報告(ICRP, 2000)與 102 號報告(ICRP, 2007)，但仍於 2015 年提出 ICRP 129 號報告(ICRP, 2015)針對 CBCT 的輻射防護提出建議，並載明 CBCT 的劑量評估方法與傳統 CT 不同。

## II. 主要內容

根據不同臨床應用，目前 CBCT 的設備類型可分為三類：(1) 坐式 C 型臂 CBCT、(2) C 型臂(C-arm based) CBCT (Siewerdsen et al., 2005)、(3) 機架型(gantry-based) CBCT。坐式 C 型臂 CBCT 的臨床應用是執行牙科檢查程序、耳鼻喉科或顱內骨檢查程序，本文簡稱其為牙科 CBCT。C 型臂 CBCT 通常是透視攝影X光機的延伸功能，相關臨床應用是執行介入性血管攝影程序、心導管檢查程序、骨科介入性檢查程序、尿路攝影程序等，本文簡稱其為介入性診療 CBCT。機架型 CBCT 的臨床應用是放射治療的治療計畫或影像對位的目的，本文簡稱其為影像導引 CBCT。因此，需針對 CBCT 特有的影像呈現方式與輻射輸出方式，設計適合 CBCT 的輻射醫療曝露品質保證作業項目。

本計畫目的為提出 CBCT 之醫療曝露品質保證規範，包含品保項目、執行頻次與建議容許誤差值，並且提出適用 CBCT 的劑量評估方法，以利驗證 CBCT 設備上的輻射劑量而奠定病人劑量管理的基礎。我們透過執行下列任務，以達成的計畫目的：

**CBCT 之醫療曝露品質保證規範：**蒐集國際報告以研析各種臨床用途之 CBCT 曝露品保相關規範，因為針對不同檢查目的，如介入性血管攝影程序、心導管檢查程序、骨科介入性檢查程序、尿路攝影程序等、牙科檢查程序、耳鼻喉科或顱內骨檢查程序，或用於放射治療的治療計畫或影像對位的影像，CBCT 的影像成像方法不同，所以需要依據該檢查診療程序影像的需求訂定品保項目、執行頻次與建議容許誤差值。

本計畫針對兩大類別：影像品質評估與輻射劑量評估，提供 CBCT 之醫療曝露品質保證規範建議。目前擬針對下列國際報告，包括美國醫學物理學會所出刊的第 142 號報告、第 179 號報告，美國放射線醫學會，英國健康防護署、歐盟輻射防護 172 號報告等，進行研讀、分析、與比較，將收集相關資料彙整納入 CBCT 規範建議。相關國際報告列於參考文獻。

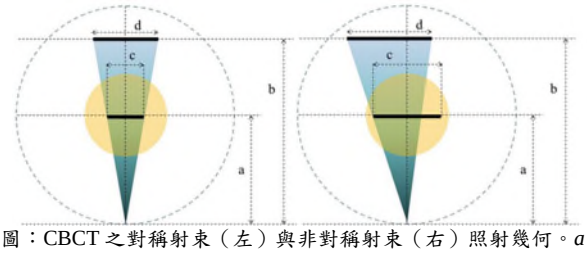
**CBCT 的劑量評估與劑量管理之建議：**由於 CBCT 造影參數相當具彈性，包含 X 光管與偵檢器距離、造影幾何對稱性(如下圖)，都可視實際需求做調整，故其劑量分佈有其特殊性及多樣性。目前國際趨勢 CBCT 的劑量評估方法有以下三種：

(1)沿用 CT 的傳統定義與測量方式

(2)使用 CT 的新型劑量定義與測量方法

(3)用透視攝影 X 光機的劑量評估法。

礙於篇幅，這三種方法的說明詳如本計畫期末報告。本計畫參考國際文獻歸納整理這三種劑量測量方法的操作程序，提出最適用於 CBCT 的劑量評估建議。




圖：CBCT 之對稱射束（左）與非對稱射束（右）照射幾何。*a* 為射源到旋轉中心的距離，*b* 為射源到影像接收裝置的距離，*c* 為旋轉中心的照野尺寸（左）。若有偏移，則 *c* 為旋轉時會覆蓋的最大照野（右），*d* 為偵檢器上的照野尺寸

## III. 結果與討論

**CBCT 之醫療曝露品質保證規範：**CBCT 設備的品質保證規範項目應該包括影像品質相關測試與輻射劑量評估。在影像品質控制方面，建議選擇以下項目進行評估，均勻度(uniformity)、幾何評估(geometrical evaluation)、體素密度值(voxel density values)、雜訊(noise)、低對比解析度(low-contrast resolution)和空間(高對比)解析度(spatial (high-contrast) resolution)。在劑量量評估方面，則建議選擇空氣克馬面積乘積(air kerma-area product)與照野內平均劑量(dose to the field of view, $D_{FOV}$)進行評估。本計畫建議應針對此七項目進行醫療曝露品質保證之評估，下表列出 CBCT 影像品質參數測試與劑量評估，包含測試頻率及限值建議摘要。本計畫亦彙整此七項目所需使用的相關假體與測試方法。礙於篇幅，詳細內容請本計畫期末報告附件。

**CBCT 的劑量評估與劑量管理之建議：**綜合國際劑量評估發展相關文獻及三種 CBCT 的劑量評估方法－(1)沿用 CT 的傳統定義與測量方式、(2)使用 CT 的新型劑量定義與測量方法、(3)用透視攝影 X 光機的劑量評估法，我們建議以透視攝影 X 光機的劑量評估法，作為 CBCT 的劑量評估方式，並建議以此作為納入 CBCT 醫療曝露品保的項目。本計畫報告已將 CBCT 劑量評估的測量方法詳細於期末報告附錄述明。

由於 CBCT 是個統稱，其設備會因用於牙科診療、介入性診療或影像導引定位應用需求而有不同的設計與造影參數設定，因此無法以指定單一品質保證測定方法來統括所有設備。截至本計畫到期日為止，國際協會針對有些項目尚未有完整的定論，目前以最全面的觀點來探討 CBCT 設備的品質保證是歐洲聯合組織，其專業組織包括歐洲醫學物理學會、歐洲放射治療和腫瘤學會、國際原子能總署等三個重要國際團體。即便如此，該聯合組織仍是針對低對比解析度與劑量評估的方式有所保留，僅提供簡易的方法，因為 CBCT 在這兩個項目並未有統一的做法。本計畫報告也僅摘列看法較為一致的作法，若有需要更進階的評估方式，則須依據各 CBCT 設備的特殊設計來設計相關測試。

## IV. 結論

本計畫已完成預定工作項目，第一，提出 CBCT 之醫療曝露品質保證規範，包含品保項目、執行頻次與建議容許誤差值；第二，提出 CBCT 的劑量評估與劑量管理之建議，雖然國際上推定 CBCT 劑量有三種方法，但依據實用性與參考國際趨勢，建議使用透視攝影 X 光機的劑量評估法，包括度量空氣克馬面積乘積與推算照野內平均劑量，作為品質保證標準的規範項目。

## 參考文獻

[1] AAPM-142：Klein, E.E., Hanley, J., Bayouth, J., et al., 2009. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. Med. Phys. 36, 4197–4212.

[2] AAPM-179：AAPM, 2012. Quality Assurance for Image-guided Radiation Therapy Utilizing CT-based Technologies: a Report of the AAPM TG-179. American Association of Physicists in Medicine, New York.

[3] ACR: ACR, 2009. ACR Technical Standard for Medical Physics Performance Monitoring of Image-Guided External Beam Radiation Therapy (IGRT). Reston, VA: American College of Radiology. (last accessed 5 May 2017).ACR, 2014. ACR–AAPM Technical Standard for Medical Physics Performance Monitoring of Image-guided Radiation Therapy (IGRT)ACR–AAPM Technical Standard for Medical Physics Performance Monitoring of Image-guided Radiation Therapy (IGRT) 1–10.

[4] Atomic Energy Council in Taiwan, 2011. 輻射醫療曝露品質保證標準.

[5] Bissonnette, J.-P., Balter, P.A., Dong, L., Langen, K.M., Lovelock, D.M., Miften, M., Moseley, D.J., Pouliot, J., Sonke, J.-J., Yoo, S., 2012. Quality assurance for image-guided radiation therapy utilizing CT-based technologies: A report of the AAPM TG-179. Med Phys 39, 1946–1963. doi:10.1118/1.3690466

[6] EC: EC, 2012a. Radiation Protection No. 172: Cone Beam CT for Dental and Maxillofacial Radiology. Evidence Based Guidelines. Directorate-General for Energy. European Commission, Brussels.

[7] Glenny, A.-M., 2012. Cone Beam CT for Dental and Maxillofacial Radiology Cone Beam CT for Dental and Maxillofacial Radiology (No. Radiation Protection 172).

[8] HPA, 2010. Guidance on the Safe Use of Dental Cone Beam CT (Computed Tomography) Equipment (No. HPA-CRCE-010). Health Protection Agency.

[9] IAC: IAC, 2012. The IAC Dental CT Standards for Dental/Maxillofacial Computed Tomography (CT) Practice Accreditation Using Cone Beam Technology. Ellicott City, MD: Intersocietal Accreditation Commission.

[10] ICRP, 2015. CBCT: Wide Range of Clinical Applications and Wide Range of Doses (No. ICRP Publication 129).

[11] ICRP, 2007. Managing patient dose in multi-detector computed tomography (MDCT) (No. ICRP Publication 102), Annals of the ICRP. doi:10.1088/0952-4746/28/3/b01

[12] ICRP, 2000. Managing patient dose in computed tomography. (No. ICRP Publication 87), Annals of the ICRP.

[13] Klein, E.E., Hanley, J., Bayouth, J., Yin, F.-F., Simon, W., Dresser, S., Serago, C., Aguirre, F., Ma, L., Arjomandy, B., Liu, C., Sandin, C., Holmes, T., Task Group 142, American Association of Physicists in Medicine, 2009. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. Med Phys. doi:10.1118/1.3190392

[14] Scarfe, W.C., Farman, A.G., 2008. What is Cone-Beam CT and How Does it Work? Dental Clinics of North America 52, 707–730. doi:10.1016/j.cden.2008.05.005

[15] Siewerdsen, J.H., Chan, Y., Rafferty, M.A., Moseley, D.J., Jaffray, D.A., Irish, J.C., 2005. Cone-beam CT with a flat-panel detector on a mobile C-arm: preclinical investigation in image-guided surgery of the head and neck, in:. Presented at the Medical Imaging 2005: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display. doi:10.1117/12.595690

三種應用類別的 CBCT 之醫療曝露品質保證規範建議表

| 項目 | 程序 | 頻率 | | | 限值 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 牙科 CBCT | 介入性診療 CBCT | 影像導引 CBCT | 牙科CBCT | 介入性診療CBCT | 影像導引 CBCT |
| **1.均勻度** | XYZ均勻度曲線 | 每年 | | 每月 | 均勻度須小於空氣與水差異的10% 或 依據製造商規範 | | 均勻度與基準值相比 <10 HU |
| | DIN法 | | | | 均勻度參數 U > 5 | | |
| **2.幾何評估** | 幾何準確度 | 每年 | | 每月 | <1 mm | <2mm | 針對傳統放射治療 <2mm; 針對 SRS/SBRT <1mm |
| | 線性度 | 每年 | | 每月 | | | |
| | 空間穩定度 | 無* | | 每月 (每日：旋轉中心處符合) | 無* | 無* | |
| **3. 體素密度值** | 不同材質的體素值 | 每年 | | 每月 | 與基準值相比，< 25 % 的空氣與水灰階值差異或製造商規範 | 與基準值相比<50 HU (國際單位仍在研究中) | |
| **4 .雜訊** | ROI值標準差 | 每年 | | 每月 | 與基準值相比< 20% | | |
| **5. 低對比解析度** | 對比雜訊比 | 每年 | | | 與基準值相比< 40% | | |
| **6. 空間解析度** | $MTF_{10\%}$ | 每年 | | | > 10 lp/cm (高解析模式) | | >5 lp/cm |
| **7. 劑量評估** | 空氣克馬面積乘積 | 每年 | | | 250 mGy $cm^2$ | 無* | 無* |
| | 照野內平均劑量 | 每年 | | | 50 mGy | | |

*無：國際文獻並無相關規範及建議。

# 商品含放射性物質之輻射影響研究
# Study of Radiation Doses from Radionuclide Containing Consumer Products

計畫編號：MOST107-NU-E-010-001-NU
計畫主持人：吳杰
e-mail：iamjaywu@gmail.com.tw
執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

## 摘要

本研究探討國際上對含放射性物質消費商品之管制限值，亦探討安全評估程序，用以評估商品於製造、運送、儲存、使用或最終處置等過程中造成工作人員與民眾之輻射劑量。在案例研究上，將以常用消費商品「煙霧警報器」、「含氚氣光源之鐘錶或指北針」、「燈泡」等進行正當性與安全評估程序研究，以佐證含放射性物質消費商品在民生應用豁免許可的安全性，使消費者在使用相關產品能了解其安全性，放心使用並享受該商品所帶來的便利性。

關鍵詞：含放射性物質消費商品、豁免管制、劑量評估。

## Abstract

The activity and concentration of these consumer products containing radioactive substances should be under the regulatory limit, so that the purchase, use, transport, and disposal of these consumer products are perfectly free. However, considering the globalized economy and free world trade, we need to study the regulatory limit of each country. For deep understanding the derived formula of the regulatory limit from exemption criteria of radiation sources, the dose assessment methods will be developed, including the scenarios of manufacture, transport, storage, using, and disposal phases. Case studies of radiation safety assessment include the ionization chamber smoke detector and the lamp containing radioactive substances to prove the justification. Furthermore, consumers can also use these consumer products containing radioactive substances safely and can enjoy the convenience of goods.

Keywords: consumer products containing radioactive substances, exempt criteria, dose evaluation.

## I. 前言

含放射性物質消費性商品主要是指在通過豁免管制的允許下，於商品製造過程中透過加入放射性物質，用以發揮產品的特定功能。日常生活中常遇到且熟悉的含放射性物質消費性商品包括：煙霧偵檢器、手錶及時鐘等；其中如煙霧偵檢器利用 Am-241 射源，將空氣游離產生導電性以偵測外在空間的煙霧粒子，達到消防偵測之用途；手錶與時鐘的錶面或是指針，可透過塗上放射性物質(如 H-3)作為發光源。我國原子能委員會於游離輻射防護法規範對含放射性物質消費性商品之輻射安全管制；國際 ICRP 第 103 號報告與 IAEA SSG-36 報告也完整提出對輻射源豁免管制的防護概念，以及對含放射性物質消費性商品提出安全要求。透過本計畫完成探討國際上對含放射性物質消費商品之管制限值與安全評估程序，並以「煙霧警報器」、「含氚氣光源之鐘錶或指北針」、「燈泡」等進行案例研究，以佐證含放射性物質消費商品在民生應用豁免許可的安全性。

## II. 主要內容

國際原子能總署於 2014 年發行 IAEA GSR Part 3，針對輻射源提供輻射防護基準與輻射安全標準建議，其中要求 8 即是說明對輻射源的豁免與解除管制，並在附件 I 中提出放射性核種豁免與解除管制之活度或是單位質量之活度濃度，供主管機關作為明確定義輻射源豁免與解除管制水平之參考依據。

依據 IAEA GSR Part 3 附件 I 之 I.1 和 I.2 之準則，所謂「豁免」須滿足以下 2 點：

(1) 輻射源引起的輻射劑量應足夠低而無須進行監管，且符合豁免之活度或是活度濃度水平，在此所指的輻射劑量需足夠低，依據 I.2 之闡述，係指在合理預期下的曝露情境，任何人在一年內所受到的有效劑量在 10 Sv 以內或是更小。但對於一些極低機率的假想曝露情境，則可採用年有效劑量不超過 1 mSv 之基準進行推導。

(2) 若主管機關採行任何監管作為仍是無法獲得預期的效益，意旨無法減低對個人有效劑量的曝露影響。

基於豁免管制是允許含放射性物質的消費性產品可在市場上自由販售的先決條件，我國原子能委員會除於民國 105 年修訂公布「商品輻射限量標準」外，亦於同年修訂公布「輻射源豁免管制標準」，附表一提供放射性物質之豁免管制量，豁免管制量推導之基本公式如下式。

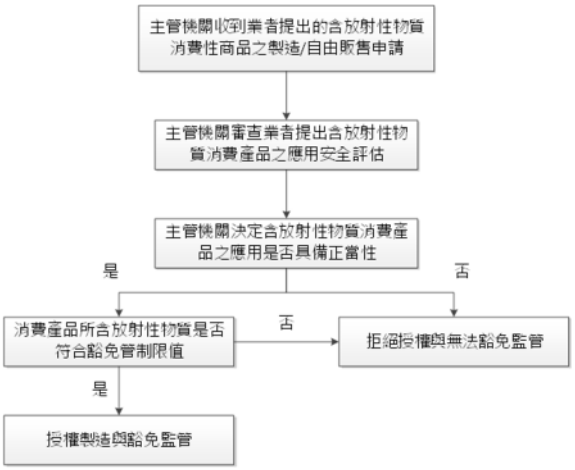
$$\text{豁免管制標準 (Bq或是 Bq/g)} = \frac{\text{個人年有效劑量限值 (Sv/yr)}}{\text{單位活度 (Bq)或活度濃度 (Bq/g)所造成的年劑量 (Sv/yr)}}$$

其中，單位活度(Bq)或活度濃度(Bq/g)所造成的年劑量(Sv/yr)需依據各個放射性核種的特性分析關鍵曝露途徑，如主要釋出α粒子的核種，以在工作場所吸入灰塵或是氣溶膠為主要關鍵曝露途徑，而主要釋出β粒子之核種，將須考量在工作場所中對皮膚的輻射照射，另對於釋出 射線的核種將主要考量體外曝露；透過解析不同情境與關鍵曝露途徑，可推算出單位活度(Bq)或活度濃度(Bq/g)所造成的年劑量(Sv/yr)，並以 10 μSv 作為劑量限值，推導出各個核種之豁免管制標準。

同時 IAEA GSR Part 3 基於違反曝露正當性，禁止

六種商品添加放射性物質，包括：食品、飲料、飼料、玩具、化妝品以及個人飾品。

IAEA SSG-36 報告對含放射性物質消費性商品提出安全要求，提出審查作業程序如圖一，確保添加輻射源符合豁免管制標準，基於正當性和防護最適化，提供對含放射性物質消費性商品授權使用的建議和指導，最終決定策授權製造或是豁免監管(自由販售)。




圖一、含放射性物質消費性商品之審查作業程序
參考文獻：IAEA SSG-36

**正當性**

為確保含放射性物質消費性商品的使用正當性，製造商在商品製造前應通知主管機關，說明商品開發與應用意圖，確認其輻射作業是否符合正當性。而主管機關評估製造商和新型商品的相關輻射作業時，應考慮到商品在其生命週期中的影響，包括製造、組裝、運輸、儲存、使用、回收和處置等階段。在決策過程中，倘若有替代方法可以不用加入放射性物質就可以達到該商品相似或相同的目標，即應考慮替代方法。

為了主管機關評估程序的客觀性，應建立一個諮詢機構以獲得相關機構或專家意見，來實現社會利益，故諮詢機構應包括消費者利益團體，商品製造商或供應商、學者和政府官員，主管機關應提供諮詢機構相關的輻射風險評估作為參考。

**防護最適化**

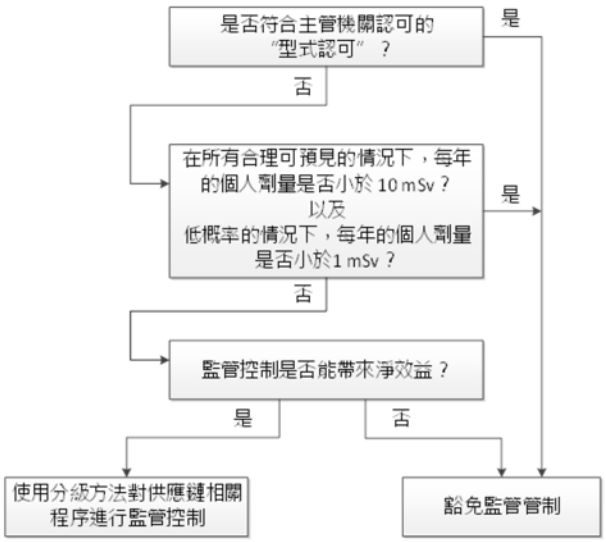
最適化主要經由商品的設計與結構配置來達到，但若是需要控制商品的使用程序來達到，則意謂商品不應通過豁免。

含放射性物質商品的防護最適化應考慮的重要因素如下：

(1) 考量半化期、輻射特性、能量和活度，選擇對於商品有效運作的合適放射性核種。
(2) 考量商品在預期正常使用、不當使用可能造成的意外損壞或處置，選擇具有高度安全性的放射性核種。
(3) 商品的結構配置。
(4) 能防止接觸到放射性核種。
(5) 借鏡於其他評估過的類似商品之使用經驗。
(6) 品質保證。

**安全評估**

安全評估是實現商品正當性和防護最適化的重要過程。評估內容包括商品在正常使用時、不當使用造成意外損壞和處置時可能造成的劑量影響，並與劑量標準進行比較。在安全評估的基礎上，主管機關須決定其他階段的授權是否必要，如果是，則應採用分級方法，或是主管機關可決定商品其他階段豁免的最大數量。圖二為豁免監管安全評估程序。




圖二、含放射性物質消費性商品之豁免監管安全評估程序
參考文獻：IAEA SSG-36

## III. 結果與討論

基於 IAEA SSG-36 報告對含放射性物質消費性商品之安全要求，並以常用消費商品「煙霧警報器」、「含氚氣光源之鐘錶或指北針」、「燈泡」等進行案例研究，探討應用正當性與安全評估。研究結論，對於煙霧警報器之商品，OECD/NEA 早於 1977 年基於使用煙霧警報器造成的年有效劑量影響小於 0.1 μSv，認為使用煙霧警報器，可利於減少財產損失和挽救生命而具備正當性，直到近幾年非游離腔式煙霧警報器技術發展成熟，法國已於 2011 年決策游離腔式煙霧警報器已不再具備正當性，並由法國核安局公布具體行動，預計於 10 年內淘汰游離腔式煙霧警報器。

針對含氚氣光源之應用，多可運用於夜間指示、逃生指示、指北針或鐘錶，此對於公共場所安全或是專業人士(潛水夫、登山客)用途具備合理正當性；同時也基於確保使用上的防護最適化，提出對氚管密封規格之測試條件，防止發生洩漏造成額外風險。

近幾年，高強度放電燈以高效節能的方式產生亮度高的白光，並已大量應用於街道照明；在正常使用條件下，若照射 400 小時之年有效劑量為 3.2 μSv，故基於節能、低成本與安全性之綜合考量，認為高強度放電燈符合正當性而授權豁免監管控制。

## IV. 結論

含放射性物質消費性產品須符合豁免管制標準、正

當性，且須利用安全評估確保產品在生產、使用、運輸、處置等階段皆能達到極低微之符合影響，主管機關也基於正當性和防護最適化，提供對含放射性物質消費性商品授權使用的建議和指導，最終決定策授權製造或是豁免監管(自由販售)。唯明確規定六種食品、飲料、飼料、玩具、化妝品以及個人飾品等商品禁止添加放射性物質。

現今坊間常以放射性核種的科學現象，包裝成為健康、科學創意產品，造成民眾在未知風險下使用，為確保管制含放射性物質消費性產品應用之正當性與安全性，本研究提出以下三項建議供主管機關參考：

(1) 建議成立評估委員會，辦理公聽會，以資訊公開方式，審議新型含放射性物質消費性產品之正當性與安全評估，公布授權決策結果，讓民眾在知情風險下正確使用。
(2) 建議設計專欄式宣導與 Q&A，供民眾查詢。
(3) 結合校園規劃多元化科普教育，重視民生應用之輻射安全議題。

## 參考文獻

[1] 原能會(2002)，游離輻射防護法，中華民國 91 年 1 月 30 日總統(91)華總一義字第 09100019000 號令制定公布。
[2] 原能會(2016)，商品輻射限量標準，中華民國 91 年 12 月 4 日會輻字第 0910023177 號令訂定發布，中華民國 105 年 6 月 20 日會輻字第 10500084021 號令修正發布。
[3] 原能會(2013)，輻射源豁免管制標準，中華民國 92 年 1 月 29 日會輻字第 0920002030 號令訂定發布，中華民國 105 年 6 月 20 日會輻字第 10500084031 號令修正發布。
[4] ICRP (2007), The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37(2-4).
[5] IAEA GSR part 3 (2014), Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.
[6] IAEA SSG-36 (2016), Radiation Safety for Consumer Products, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016.
[7] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Recommendations for Ionization Chamber Smoke Detectors in Implementation of Radiation Protection Standards, OECD Publications, Paris (1977).
[8] FRENCH NUCLEAR SAFETY AUTHORITY, Arrêté du 18 novembre 2011 portant dérogation à l'article R. 1333-2 du code de la santé publique pour les détecteurs de fumée à chambre d'ionisation, ASN, Paris (2011).

# 因應 ICRP 的眼球水晶體劑量限值下修之職業輻射防護考量
# Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye: Impact of the ICPR Proposed Lower Limit

計畫編號：MOST107-NU-E-007-009-NU
計畫主持人：蔡惠予
e-mail：huiyutsai@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

**摘要**

因應國際放射防護委員會提出眼球水晶體劑量限值下修的建議，本計畫目的為回顧劑量限值下修的依據，針對職業輻射防護提出劑量評估方法，提出合理抑低措施建議，並回顧國際上法規標準調整的作法。

關鍵詞：劑量限值，眼球水晶體，國際放射防護委員會

**Abstract**

The aim of this study is to be in the compliance with the new eye lens dose limit proposed by International Commission on Radiological Protection (ICRP) by collecting and analyzing the management of the dose for the lens of the eyes from international reports for radiation workers, recommending measured methods and dose assessments of the lens of the eyes, exploring the critical groups caused by occupational exposure, suggesting that the appropriate dose reduction methods for the lens of the eyes, and feasibility to adjusted with the regulatory standards.

Keywords: dose limit; the lens of the eyes; ICRP

## I. 前言

國際原子能總署(International Atomic Energy Council, IAEA)針對「輻射源的輻射防護和安全：國際基本安全標準(Basic Safety Standards, BSS)」於 2014 年出版編號 GSR Part 3 報告(IAEA, 2014)，該報告針對職業輻射防護提出在計劃曝露(planned exposure)的情況下，工作人員的眼球水晶體等價劑量限值從每年 150 mSv 下修至每年 20 mSv (五年期間的平均值)，然而可容許單年的年劑量限值至 50 mSv。水晶體劑量限值下修乃是遵循國際輻射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)第 118 號報告於 2012 年所提之建議，這是 ICRP 回顧過去數十年文獻，針對眼球水晶體的劑量閾值(dose threshold)建議應不大於 0.5 Gy，考量器官組織對輻射的生物反應與相關風險，另針對職業曝露(occupational exposure)的眼球水晶體提出年劑量限值下修以達到合理安全(ICRP, 2012)。

通過蒐集 ICRP、國際輻射單位與度量委員會(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)、 IAEA 等國際組織的相關報告，了解其針對眼球水晶體劑量的管制做法。其次研讀國際上發表的文獻，以掌握工作人員眼球水晶體等價劑量之量測方法與評估方式的國際趨勢。最後參閱 IAEA 1731 號報告(IAEA, 2013)的立法建議與考量層面，同時蒐集已立法國家於工作人員眼球水晶體劑量管制上的方式和立法內容，以了解目前國際上的立法趨勢和立法方式。本計畫的目標為因應國際放射防護委員會提出眼球水晶體劑量限值下修，針對職業輻射防護提出眼球水晶體劑量評估方法、針對法規管制提出具體的建議。

## II. 主要內容

研究內容包含五個面向，即：(一)探討劑量限值下修的科學依據；(二)蒐集研析國際報告對於輻射工作人員眼球水晶體劑量之管制作法；(三)建議工作人員眼球水晶體等價劑量之量測方法與評估方式；(四)探討職業輻射作業造成關鍵群體的眼球水晶體劑量水平；(五)提出眼球劑量合理抑低措施建議與法規標準調整之可行性評估。

## III. 結果與討論

水晶體劑量閾值下修之科學依據已有初步結論：第一、早期流行病學研究的觀察時間較短，所定訂的閾值劑量存在高估之虞：較短的流行病學觀察時間，無法觀察到從輻射曝露到產生水晶體模糊或視力障礙的潛伏期。隨著觀察時間的增加，所觀察到的潛伏期特性為：急性曝露下，劑量越小，潛伏期越長。劑量越大，潛伏期越短。第二、早期醫療檢驗技術於輻射誘發病變之生物終點(biological endpoint)定義模糊：先前病理診斷的技術不足以檢測由輻射導致的水晶體早期之模糊病變，所以導致在擬定劑量閾值時，各研究報告所針對的生物終點未有相同的設定基礎。第三、低劑量研究樣本的數量限制：由於接受到曝露劑量的高低將會影響潛伏期長短和白內障的嚴重程度，但早期流行病學研究所收集的數據較少有低劑量樣本(主要來源於原子彈爆炸倖存者)，而 ICRP118 號報告中最新的流行病學研究，相較於原子彈爆炸倖存者和車諾比事件清除人員之急性曝露，慢性曝露和分次曝露之輻射工作人員罹患白內障的風險並未顯著降低，其閾值數值分佈較為接近 0.5 Gy。

對於輻射工作人員眼球水晶體劑量之管制作法為：均勻輻射場下，可以佩戴一個人員劑量計，非均勻輻射場下，則需配戴至少兩個人員劑量計，且配戴在合適位置。以醫療透視輻射工作人員為例，在僅有一個劑量計的狀況下，當佩戴於鉛衣內，則劑量讀值僅為全身有效劑量，其無法客觀評估水晶體等價劑量。故 IAEA 建議於鉛衣內外各佩戴一個劑量計以分別量測全身有效劑量和人體淺部劑量（如皮膚等價劑量和水晶體等價劑量）。國際輻射防護委員會最早提出關於眼球水晶體等價劑量的建議，為粗略近似起見於輻射防護領域之水晶體建議有效深度為 3mm。ICRP 於不同輻射場下對於人員劑量的建議管制方式分為輻射場劑量空間分佈均勻（uniform）和輻射場劑量空間分佈不均勻（non-uniform）此兩種情況：相較於輻射場劑量的空間分佈均勻的狀況下只需要考慮器官的平均劑量，即 ICRP 60 號報告、

ICRP 103 號報告所規範的器官等價劑量；然而在輻射場劑量的空間分佈不均勻的情況下，器官的平均吸收劑量（organ averaged dose）無法客觀地反應器官可能受到的輻射損傷，因此 ICRP 建議，器官等價劑量應該為器官之「顯著體積（significant volume）」深度下最大劑量（highest dose）處的平均值。就眼球水晶體而言，其顯著體積被描述為「細胞核所在的體積 (adult nuclear volume)」這將對應於水晶體上皮（lens epithelium）和水晶體物質的淺部皮質層之眼球往內 3 mm 處，該深度下的劑量點即為管制考量下可量測的個人等效劑量（personal dose equivalent, $H_p(d)$( d：「顯著體積」之深度，單位：mm），則該劑量點的劑量可代表 ICRP 26 號報告所規範之防護考量下的器官等效劑量（$H_T$）。

水晶體等價劑量的評估的方法有二種：在佩戴合適的人員劑量計情況下，可在均勻輻射場或不均勻輻射場下，使用現有量測之全身有效劑量或皮膚等價劑量以公式推估；以頭帶方式固定於頭部之眉毛上方或頭部之眼角位置的水晶體專用劑量計以直接量測。

依據國際原子能委員會 1731 號報告中的輻射工作分類，輻射工作人員所涉及的行業大致有：醫療、工業、教育研究和獸醫業，當中醫療行業職業人員為危險族群。在眾多醫療行為中，又以透視影像引導介入性流程之平均作業劑量最高，主要由於醫師站位接近病人，會接受到大量來自病人的散射輻射，且因手術複雜程度而影響作業時間的長短，最終導致工作人員所接受到的水晶體等價劑量之統計數據範圍較大，且存在超過新劑量限值之虞。

針對關鍵群體的輻射防護建議，市面上已有鉛眼鏡、鉛衣和鉛屏風等輻射防護器具，應正確使用方能達到良好的輻射防護效果，故建議工作人員佩戴之鉛眼鏡應符合國際建議之鉛當量規格，且佩戴時盡量貼近雙頰，並在佩戴鉛眼鏡的狀況下習慣性使用鉛玻璃屏風。

國際上法規標準調整的作法包括：一階段式，即直接將水晶體劑量限值下修至每年 20 mSv（五年期間的平均值），然而可容許單年的年劑量限值至 50 mSv；兩階段式，即於第一階段之水晶體劑量下修的五年內將水晶體劑量下降至每年 50 mSv，再依據執行狀況於第二階段繼續下降至 ICRP 建議之每年 20 mSv（五年期間的平均值），然而可容許單年的年劑量限值至 50 mSv，並最終完成修法。

## IV. 結論

眼球水晶體等價劑量限值的下修將使透視影像引導介入性醫療程序之工作人員成為輻射防護的關鍵群體；當配戴適當的人員劑量計時，其水晶體的等價劑量可以通過間接推估和直接量測此兩種方式評估之；為達到良好的輻射防護效果，建議輻射工作人員確實佩戴和正確使用符合國際建議規格之防護器具；在法規限值的調整上有兩種方法包括兩階段式與直接式，無論哪種立法方式，都須考慮對關鍵群體的單位在人力與經費上之衝擊；此外國家應須建立眼球水晶體劑量佩章的標準校正場，以供劑量測量的校正依據。

## 參考文獻

[1] IAEA, 2013. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the eye.

[2] IAEA, 2014. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources : International Basic Safety Standards General Safety Requirements Part 3.

[3] ICRP, 2012. ICRP publication 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Annals of the ICRP.

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

計畫編號：MOST 107-NU-E-007-007-NU
計畫主持人：許芳裕
e-mail：fyhsu@mx.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

## 摘要

針對如光子與中子等多種輻射混合之輻射場的劑量評估，較一般傳統光子輻射的評估更困難與複雜。組織等效比例計數器(TEPC)具有可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻特性，此方法相較於傳統方法更加便利，此法於國際間逐漸受到青睞與使用。本研究擬利用 TEPC 可測得混合輻射場中不同 LET 輻射之微觀能量沉積能譜特性，以全程二年期的時間(本期為第一年期)，精進 TEPC 之技術，進一步建立以 TEPC 同時評估混合輻射場中個別輻射之劑量貢獻之新技術。預估於研究計畫完成後，可將此技術提供做為未來反應器、高能量粒子加速器設施之作業場所針對中子與光子混合輻射場之輻射劑量度量與評估之參考。
關鍵詞：組織等效比例計數器、混合輻射場、中子劑量、線性能量、微劑量計。

## Abstract

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

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

## I. 前言

近年來，國際間有些劑量評估專家已開始使用組織等效比例計數器(tissue equivalent proportional counter, TEPC)來評估光子與中子混合場之個別輻射的劑量貢獻，並有愈來愈多的趨勢使用在如太空或飛航(宇宙射線)劑量評估及前述之高能粒子放射治療的劑量評估[1,2]。TEPC 是最常被用來度量如光子、中子、重離子等不同游離輻射之單一事件能量沉積參數(y、z)分佈的微劑量偵檢器。微劑量學主要是探討在微觀體積下游離輻射能量沉積的情形，對於高直線能量轉移(LET)輻射而言，因其在短距離內會有大量的游離事件發生，因此對生物體的傷害程度較傳統低 LET 輻射(如光子)治療不同。

目前國際間多利用 TEPC 量測混合輻射場之微劑量能譜，經由生物加權因數轉換，可評估得到治療射束之有效相對生物效應值(effective RBE)，作為輻射束品質評估依據。因為 TEPC 可測得混合輻射場中不同 LET 輻射之微劑量(微觀能量沉積)能譜特性，使得 TEPC 具有可於一次同時測得不同 LET 輻射的能量沉積特性，藉由此特性之測量結果即可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻，此原因也使得以 TEPC 評估混合輻射場(特別是有光子與中子同時存在)中個別輻射之劑量貢獻之方法相較於傳統方法似乎較便利，而使得此法於國際間逐漸受到青睞與使用。

## II. 主要內容

### 2.1 以 TEPC 模擬人體細胞

使用組織等效材料製成並充填組織等效氣體的 TEPC，可用於度量人體細胞之微劑量學特性[3-4]，理論上，可利用由單位體積內的細胞分子個數(即其密度)，控制比例計數器內部之氣體密度，藉由降低氣體密度，增加比例計數器的體積，以模擬相同密度的細胞[3-5]。本計畫使用 TEPC 進行劑量測試(TEPC 度量系統設置如圖 1)，規劃之相關實驗參數列於表 1。本研究所使用之 TEPC 內部為 A-150 組織等效固體塑膠球壁，充填組織等效(TE)氣體，A-150 塑膠及 TE 氣體組成成分別列於表 2 及表 3 [3-4]。

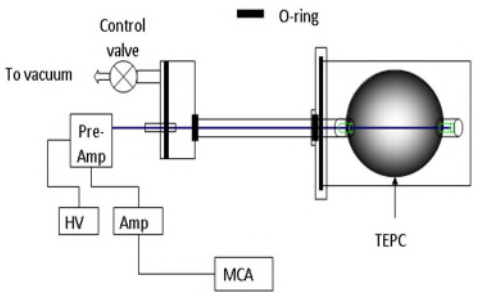



圖 1 TEPC 度量系統設置圖

表 1 以 TEPC 進行劑量測試之相關實驗參數

| Parameter | 自製 TEPC |
|---|---|
| Geometry | Spherical(球形) |
| Dimensions (cm) | 2.54 (直徑) |
| Filled gas | Propane based TE gas |
| Simulated cell diameter | 2 μm |
| Mean chord length | 1.33 μm |
| Gas pressure (torr) | 32 |
| Mass of gas (mg) | 0.660 |

表 2 組織等效固體之組成成分

| 組成成分 (重量百分比) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | H | C | N | O | F | Ca |
| ICRU Tissue | 10.1 | 11.1 | 2.6 | 76.2 | … | … |
| A-150 Plastic | 10.2 | 76.8 | 3.6 | 5.9 | 1.7 | 1.8 |

表 3 組織等效氣體之組成成分

| 組織等效氣體(丙烷，Propane based)組成成分 (密度=1.82628×10$^{-3}$ g/cm$^3$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 組成元素成分 (重量百分比) | | | | 組成氣體成分 (壓力百分比) | | |
| H | C | N | O | $C_3H_8$ | $CO_2$ | $N_2$ |
| 10.3 | 56.9 | 3.5 | 29.3 | 55 | 39.6 | 5.4 |

### 2.2 以TEPC評估輻射劑量

因為TEPC可測得混合輻射場中不同LET輻射之微劑量(微觀能量沉積)能譜特性，使得TEPC具有可於一次同時測得不同LET輻射的能量沉積特性，藉由此特性之測量結果即可同時評估混合輻射場中不同LET輻射(如光子與中子)之劑量貢獻。利用TEPC測得混合輻射場之線性能量y分布能譜後，可利用以下之公式計算出輻射劑量(absorb dose D, dose equivalent H)[8]：

$$D = \sum_i y_i f(y_i) \cdot c \qquad (1)$$

$$\overline{Q} = \frac{\sum_i y_i f(y_i) \cdot Q(y)}{\sum_i y_i f(y_i)} \qquad (2)$$

$$H = D \cdot \overline{Q} \qquad (3)$$

其中$f$(y) 則為機率密度(probability density)，亦稱為線性能量分佈(lineal energy distribution)。$C$則為每單位線能之劑量轉換因子(包括效率修正因子)，單位為 μGy per keV/μm。假設線性能量y相當於是LET，以依據ICRP 60之射質因數Q(LET)函數[9]計算Q及平均射質因數$\overline{Q}$。ICRP 60之射質因數Q(LET)函數或表示為Q(L)如下式：(ICRP 103之射質因數Q(LET)函數沿用ICRP 60，並未改變。

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & L < 10\ \text{keV}/\mu\text{m} \\ 0.32L - 2.2 & 10 \leqslant L \leqslant 100\ \text{keV}/\mu\text{m} \\ 300/\sqrt{L} & L > 100\ \text{keV}/\mu\text{m} \end{cases} \qquad (4)$$

### 2.3 TEPC 系統建置、精進測試與校正

本計畫研究團隊近年已建立微劑量計(TEPC)的設計製作與微劑量特性(射束品質)評估技術，惟在真空度控制及 TEPC 雜訊抑低技術上，仍有精進空間。本研究以現有之自製 TEPC，搭配新建置之低壓(真空)氣體供應系統(low pressure gas flow system)、高壓電源供應器(high voltage, HV)、低雜訊前置放大器(pre-amplifier)、線性放大器(amplifier)、多頻道分析儀(MCA)以及鎢-241 阿伐、銫-137 加馬校正射源等設備，於全程計畫二年期之第一年(107 年)，已加強 TEPC 真空度防護、在 TEPC 上新增氣壓監測裝置(如圖 2)及使用低雜訊信號裝置進行測試等方法，精進相關 TEPC 測量技術。TEPC 新增低壓檢測計，可以隨時提供 TEPC 內之氣體壓力狀況，對進行量測時 TEPC 之穩定度能更加掌握。




圖 2 本研究自製並裝置低壓檢測計之 TEPC

TEPC 可充入不同壓力之組織等效氣體，以模擬度量不同大小之細胞(或 DNA)的能量沉積與微劑量參數；在度量之前，須先進行校正，找出能譜中頻道數與能量間之關係，才能得到正確之結果。本研究於 107 年(第一年期)依規劃進度逐步進行 TEPC 系統之穩定性測試，檢測 TEPC 內之氣體壓力穩定性、線性能量 y 分布隨時間變化之特性分析等；分別以光子源(銫-137 加馬射源、不同能量之 X 光輻射等)及鎢-241 阿伐射源，搭配蒙地卡羅方法計算(以 PHITS 程式模計算)，進行線性能量特性校正、找出其與理論計算所得之能量沉積之關係，PHITS 程式是以在 Windows 作業系統為平台下，以機率統計的方法模擬粒子遷移的蒙地卡羅方法程式。藉由校正程序分別評估出測量之能譜頻道分別對應之線性能量 y 分布，可分別找出使用 TEPC 之最佳量測條件(高壓、放大器增益等)(測量低 LET 輻射及高 LET 輻射之最佳量測條件須使校正射源所測量之能峰出現在全部頻道中間附近)。

### 2.4 以 TEPC 測量混合輻射場之劑量

本研究以 TEPC 實測低 LET 輻射如銫-137、鈷-60 不同能量之 X 光之 y 分布以及含高 LET 輻射之 Cf-252 輻射場(包括中子及光子輻射)之 y 分布，並依據所測得之 y 分布結果，及公式(1)至(4)的方法評估來自不同 LET 輻射之劑量貢獻；TEPC 方法評估之劑量結果並將與傳統劑量計(如中子劑量配章或 TLD-600 及 TLD-700 等)評估之結果做比較分析，建立以 TEPC 實測混合輻射場中不同 LET 輻射之輻射品質與劑量之新技術。

## III. 結果與討論

### 3.1 TEPC 之量測系統建置及穩定性測試

依據范諾定理，在具有相同原子組成的情況下(此為組織等效材質)，可以利用充入不同的氣體壓力進入計數器使其內部的氣體分子數與欲模擬之細胞中的分子數

目相同，來模擬不同大小的細胞。亦即控制 TEPC 內部之氣體密度，藉由降低氣體密度或壓力，可模擬人體細胞。需充入計數器中的氣體壓力說明如下：如圖 3 所示，當入射輻射通過介質時，將沉積部全部或一部分能量於介質中。

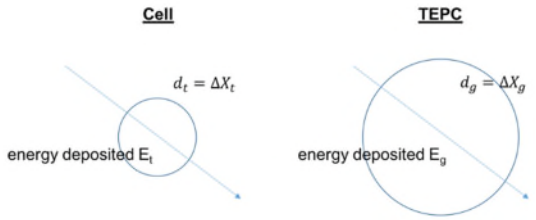



圖 3 入射輻射作用於細胞及 TPEC 示意圖

其中 $\Delta X_t$ 及 $\Delta X_g$ 分別為細胞及組織等效比例計數器氣腔之直徑，而 $E_t$ 及 $E_g$ 之質量阻擋本領(mass stopping power)為 $\left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_t$ 和 $\left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_g$，而 $\rho_t$ 及 $\rho_g$ 為細胞和計數器內組織等效氣體之密度，且假設因模擬的體積很微小(μm 等級)，所以 $\left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_t$ 和 $\left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_g$ 本身沒有很大的變化，輻射在細胞和 TEPC 內沉積的能量 $E_t$ 及 $E_g$ 可以下式表示：

$$E_t = \left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_t \rho_t \Delta X_t = \left(\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}\right)_g \rho_g \Delta X_g = E_g \qquad (5)$$

由於充入計數器中的為組織等效氣體，因此其質量阻擋本領應與細胞相同，則上式可改寫成：

$$\rho_t \Delta X_t = \rho_g \Delta X_g \qquad (6)$$

如以直徑 2.5 公分之 TEPC 來模擬 2 μm 大小的細胞，則所需充入之氣體密度為：

$$\rho_g = \rho_t \frac{\Delta X_t}{\Delta X_g} = 2 \times \frac{0.0001}{2.5} = 0.00008 (g/cm^3) \qquad (7)$$

本研究所使用的丙烷組織等效氣體，其氣體在一大氣壓(760 torr)、20°C 下之密度為 $1.8263\times10^{-3}$ (g /cm$^3$)，則所需充入的氣體壓力為：

$$P_g = \rho_g \times \frac{P_{g0}}{\rho_{g0}} = 0.00008 \times \frac{760}{1.8263\times10^{-3}} \approx 32 \ torr \qquad (8)$$

### 3.2 組織等效氣體充填系統

本研究使用自製之低壓(真空)氣體供應系統(low pressure gas flow system) (如圖 4.2)，將 TEPC 充填特定壓力之組織等效氣體予以模擬微米級之細胞。其充填流程係先將 TEPC 內部氣體抽出達近真空狀態(低於 $10^{-3}$ torr)，再充入適當壓力之組織等效氣體，本研究欲模擬之細胞大小為 2μm，故充填之等效組織氣體壓力為 32 torr，圖 A2(右)為氣體充填系統的示意圖。

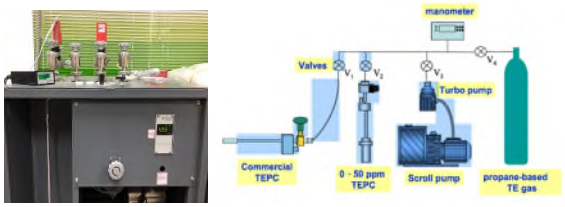



圖 4 低壓(真空)氣體供應系統及氣體充填系統

### 3.3 微劑量計穩定度分析

當 TEPC 於組織等效氣體充填後，會因偵檢器接合處之不完善及塑膠材料分子之間隙產生氣體洩漏，或塑膠吸收氣體等原因造成充填組織等效氣體之壓力發生變化，以致所量測到之微劑量能譜隨量測時間不同說造成能譜偏移之情形。為瞭解充填壓力變化造成 TEPC 能量修正之影響，本研究探討 TEPC 於重覆充填組織等效氣體後之量測結果分析，同時亦評估充填後隨時間 TEPC 能量修正參數之變化，並利用增一低壓檢測計，以隨時提供目前 TEPC 內之氣體壓力狀況，對進行量測時 TEPC 之穩定度能更加掌握。

TEPC 依程序完成丙烷組織等效氣體充填後，將因其漏氣、塑膠吸收及核儀系統穩定性等問題造成充填壓力改變，間接影響後續量測結果。因此，確認定 TEPC 之量測穩定性及再現性。本研究於每次充填丙烷組織等效氣體後，每間隔 1 小時進行內建 Am-241 之能譜量測，並推算其 alpha-edge，其結果顯示如表 4 所示。由圖中可看出隨時間增加，alpha-edge 呈現緩慢下降之趨勢，顯示能量校正值會受 TEPC 因時間增加導致外部氣體進入 TEPC 腔體或核儀系統穩定度等原因所影響，相較於充填氣體後即量測之 alpha-edge，充填氣體 4 小時之能量校正值之相對差異約為 3.0%，該差異對後續混合輻射場劑量評估之影響甚微，但可藉由線性擬合函式校正不同時間點之 TEPC 量測結果，以修正因充填氣體壓力變化之影響。

表 4. TEPC 充填組織等效氣體後隨時間間隔量測之 alpha-edge 頻道位置

| Time interval after filling TE gas [hr] | Alpha-edge 頻道位置 | Normalized to 0 hr [%] |
|---|---|---|
| 0 | 804 ± 23 | 100.0 |
| 1 | 795 ± 20 | 98.8 |
| 2 | 787 ± 13 | 97.8 |
| 3 | 782 ± 18 | 97.2 |
| 4 | 780 ± 16 | 97.0 |

除 TEPC 隨壓力變化影響外，量測再現性對劑量評估亦為重要，本研究於每次 TEPC 充填組織等效氣體後即進行量測內建 Am-241 之能譜，並探討每次量測之 alpha-edge 頻道位置之差異性，其結果如表 5 所示，平均值為 811±13，相對量測數據差異介於 4.0%範圍內，可推論表示本研究使用之 TEPC 量測系統再現性佳，可降低 TEPC 後續量測結果之誤差。

表 5.充填組織等效氣體後量測之 alpha-edge 頻道位置

| Number of measurements [#] | Alpha-edge 頻道位置 | Relative difference [%] |
|---|---|---|
| 1 | 821 | 99.2 |
| 2 | 795 | 96.0 |
| 3 | 822 | 99.3 |
| 4 | 809 | 97.7 |
| 5 | 796 | 96.1 |
| 6 | 828 | 100.0 |
| 7 | 804 | 97.1 |

### 3.4 微劑量計線性能量校正

本研究欲評估之混合輻射場包括 Cf-252、BNCT 及高能粒子加速器等輻射場，就低 LET 及高 LET 輻射之 TEPC 能量校正使用之射源分別為 Cs-137 及 Am-241，以作為高 LET 輻射校正，相關校正程序及結果分述如下：

#### 3.4.1 低 LET 輻射之校正

光子屬於低游離能力之輻射，因此需使用低游離能力之輻射來做校正。本研究之校正方法，直接量測 Cs-137 與不同 X 光射質輻射場之光子微劑量能譜，其中標準 X 光射質輻射場係利用可追溯至美國 NIST 之核能研究所國家標準實驗室之 X 光射質輻射場，其屬原級校正實驗室；而 Cs-137 係利用國立清華大學之輕便型輻射偵檢儀器校正實驗室的 Cs-137 照射場，其標準件直接追溯至國家游離輻射標準，屬二級校正實驗室。並藉由量測 33 keV、65 keV、100 keV、208 keV 及 662 keV 等多種不同 X 光射質與單能光子能量，同時搭配 PHITS 模擬低 LET 輻射照射於 TEPC 之微劑量能譜，進行低 LET 輻射於 TEPC 能量校正。對於低 LET 輻射之 TEPC 能量校正，本研究將 TEPC 置於國立清華大學 Cs-137 校正實驗室進行能譜量測結果，並將量測結果進行微劑量能譜 yf(y)及 yd(y)轉換如圖 5。

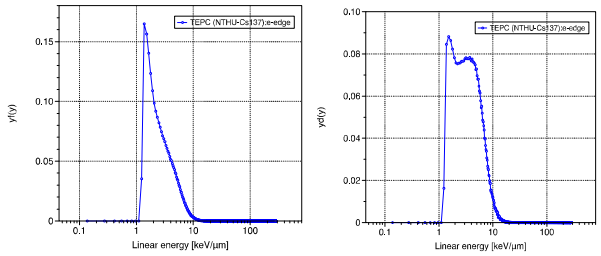



圖 5. TEPC 量測 Cs137 光子之頻道－計數曲線轉換為 yf(y) (左)與 yd(y) (右) 之微劑量能譜

#### 3.4.2 高 LET 輻射之校正

本研究使用之高 LET 輻射校正之射源為 Am-241，該射源以科技黏土固定於自製 TEPC 之組織等效球外壁上，射源放出之阿伐粒子將通過組織等效球壁上之孔洞，並穿過組織等效氣體之氣腔後沉積其部分能量，於 MCA 上產生一清楚的能鋒，藉該能鋒之位置與對應到已知線能 y，可得到 MCA 中頻道數對應線能的相對關係。以 CSDA 理論、蒙地卡羅模擬評估阿伐粒子於 TEPC 組織等效球之最大能量損失，可推算阿伐粒子邊緣(alpha-edge)。根據 CSDA 理論，Am-241 衰變放出阿伐粒子之平均能量 5.405MeV，經查 NIST 資料庫(ASTAR)，其對應之 CSDA 射程為 $3.924\times10^{-3}$ g/cm$^2$，當該阿伐粒子通過直徑 2.5 cm，32 Torr 之丙烷組織等效氣腔後($1.92\times10^{-4}$ g/cm$^2$)，其能量剩餘為 5.230 MeV，可推估阿伐粒子於該組織等效氣腔之最大能量損失為 175 keV，推算之線性能量($y_p$)為為 131 keV/μm，對應於 TEPC 量測能譜峰值頻道($y_p$)為 802，其餘能譜頻道之線能可由 y=0.163h 轉換。另外，以 PHITS 模擬前述阿伐粒子通過 TEPC 組織等效空腔後之結果，其最大能量損失為 172 keV，線性能量($y_p$)為為 129 keV/μm，對應於 TEPC 量測能譜峰值頻道($y_p$)為 802，其餘能譜頻道之線能可由 y=0.161h，兩種 TEPC 能量校正方式之線性能量差異在 2%之內。

### 3.5 以 TEPC 實測低 LET 輻射以及含高 LET 輻射之 y 分布，並分別評估來自不同 LET 輻射之劑量貢獻

對於中子-光子混合輻射場之輻射劑量量測，可藉由 TEPC 同時測量不同 LET 輻射之劑量貢獻。但欲於微劑量能譜中鑑別個別輻射之劑量貢獻則需進一步探討，尤以 1 至 10 keV/μm 之區間甚困難，例如光子於 TEPC 中所沈積之能量，原則不超過 20 keV/μm，又中子於其造成之能量沈積亦會落在 1 至 20 keV/μm 之區間。因此，如利用 TEPC 量測中子通量作為評估含硼藥物之組織所受劑量，對於量測個別輻射之特定用途則為其重要。

本研究先分析不同射質之光子輻射之微劑量能譜，並從中瞭解其相關性與特異性，以建立光子微劑量能譜模型，再依此模型套入鈈 252 混合輻射場之微劑量能譜，以探討光子與中子之個別輻射微劑量能譜特性。

本研究將自製 TEPC 置於核能研究所之 X 光參考輻射場中，並以 33 keV (IN40)、65 keV (IN80)、100 keV (IN120)、208 keV (IN250)等不同 X 光射質輻射照射；另亦將 TEPC 置於國立清華大學銫 137 參考輻射場，將 TEPC 量測所得之個別微劑量能譜歸一化至單位劑量，分析及探討不同光子射質之微劑量能譜特性。其結果如圖 6 所示。

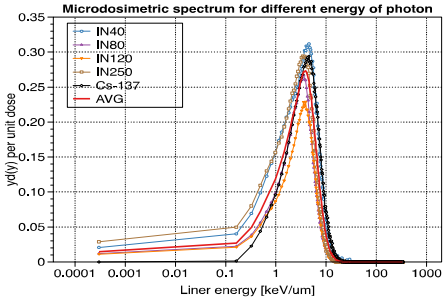



圖 6　TEPC 量測不同光子射質之微劑量能譜

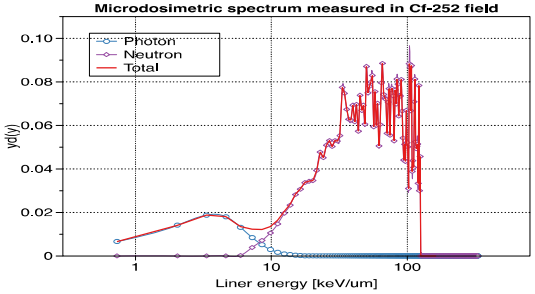



圖 7. 以光子輻射鑑別模式分割 TEPC 量測鈈 252 之光子及中子微劑量能譜

此外，本研究將 TEPC 置於核能研究所之鈈 252 參考輻射場中(未包覆重水球)，並對其照射給定之中子劑量(照射條件為 1.4346 mSv)，以量測該參考輻射場之微劑量能譜。為鑑別該混合輻射場之中子與光子劑量，依據 ANSI/HPS N13.11 建議之鈈 252 輻射場之光子比例，推算該輻射場之光子劑量約為 0.07 mSv。另將本研究建立之光子輻射鑑別模型以等比例關係套入 TEPC 所量測之微劑量能譜，可得到如圖 7 之結果。其顯示 5 至 20

keV/μm 線能之間，呈現光子與中子微劑量能譜之交集，藉由光子輻射鑑別模型可有效區別個別輻射之響應。分析 TEPC 評估輻射劑量之結果，較參考輻射場給定劑量高估約 4.0%；如以單一線能(例如 20keV/μm)作為個別輻射之鑑別，則較該輻射場高估約 5.3%。此結果可看出兩者輻射鑑別之些微差異，但其差異不大之原因可能係由於該混合輻射場之光子劑量遠小於中子劑量，導致利於簡易鑑別模式亦可評估出合理之結果。

### 3.6 比對與分析 TEPC 與其他常用之傳統劑量計量測方式之結果

本研究在進行 TEPC 測量 $^{252}$Cf 輻射源中子/光子輻射場照射之劑量評估測試時，亦使用光刺激發光中子佩章(OSLN)及雙熱發光劑量計 TLD-600/700 晶片)量測劑量結果並進行比較分析。由研究結果得知，TEPC 對不同 LET 輻射包括光子、熱中子、超熱中子與快中子等均能有效測量其造成之輻射劑量；光刺激發光中子佩章(OSLN)使用 Landauer 公司原廠計讀儀及原廠的計量評估演算法/程式進行評估，而 Landauer 公司提出的 OSLN 有效中子能量量測範圍在 40 eV 至 5 MeV。

相關之劑量評估結果如圖 8 所示，對於裸 $^{252}$Cf (未包覆重水球)輻射場，以 OSLN 估計之光子和中子劑量分別被低估約 63%和 69%，主要是因為 OSLN 在裸 252Cf 照射下具有較差的響應(Landauer 公司提出的 OSLN 有效中子能量量測範圍在 40 eV 至 5 MeV，而裸 $^{252}$Cf 輻射場中含有較多能量高於 5 Mev 以上之高能中子)。而 TEPC 評估的劑量結果與照射場給予之已知照射劑量相比，差異分別為 7%(光子)和 4%(中子)，與給予之已知照射劑量有不錯的一致性。

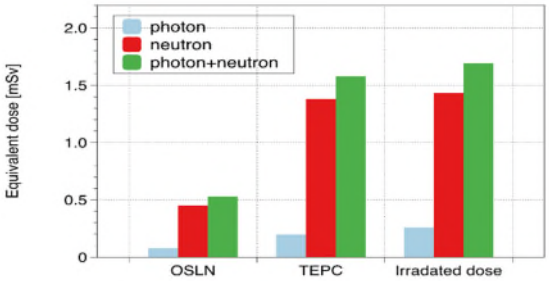



圖 8. 以 TEPC 及 OSLN 量測核研所之裸 $^{252}$Cf (未包覆重水球)輻射源中子/光子輻射場照射之劑量結果比較

### 4.5 研究獲得之發現與建議事項彙整

本研究第 107 年之研究發現與建議事項彙整如下：

1. 充入不同壓力之組織等效氣體至 TEPC 中，可以模擬度量不同大小之細胞的能量沉積與微劑量參數；度量之前，須先進行校正，找出能譜中頻道數與能量間之關係，才能得到正確之結果。
2. 本研究已完成 TEPC 系統之穩定性測試，檢測 TEPC 內之氣體壓力穩定性、線性能量 y 分布隨時間變化之特性分析等；分別以光子源(銫-137 加馬射源)及鎢-241 阿伐射源，搭配蒙地卡羅方法計算，進行線性能量特性校正、找出其與理論計算所得之能量沉積之關係。
3. 本計畫於 TEPC 新增一低壓檢測計，以隨時提供 TEPC 內之氣體壓力狀況，對進行量測時 TEPC 之穩定度能更加掌握。
4. 由氣體充填系統之充填流程實作中發現，於近真空狀態之管路僅限 TEPC 至組織等效氣體鋼瓶閥門之間，氣體瓶閥門至氣體鋼瓶間之管路並不屬於真空範圍。因此，於首次充填組織等效氣體時，TEPC 將存在混雜外界空氣之不純氣體，致影響量測品質。為減少此現象發生，於進行 TEPC 量測前，將連續充填組織等效氣體至少 3 次以上，以避免不純氣體伴隨組織等效氣體進入 TEPC 腔體中。
5. 本研究之校正方法，直接量測 Cs-137 與不同 X 光射質輻射場之光子微劑量能譜，其中標準 X 光射質輻射場係利用可追溯至美國 NIST 之核能研究所國家標準實驗室之 X 光射質輻射場(原級)；而 Cs-137 係利用國立清華大學之輕便型輻射偵檢儀器校正實驗室的 Cs-137 照射場，其標準件直接追溯至國家游離輻射標準，屬二級校正實驗室。此外，本年亦藉由量測 33 keV、65 keV、100 keV、208 keV 及 662 keV 等多種不同 X 光射質，同時搭配 PHITS 模擬低 LET 輻射照射於 TEPC 之微劑量能譜，進行低 LET 輻射於 TEPC 能量校正。
6. 高 LET 輻射校正之射源為 Am-241，該射源固定於自製 TEPC 之組織等效球外壁上，射源放出之阿伐粒子將通過組織等效球壁上之孔洞，並穿過組織等效氣體之氣腔後沉積其部分能量，Am-241 衰變放出阿伐粒子之平均能量 5.405 MeV，經查 NIST 資料庫(ASTAR)，考量其對應之 CSDA 射程、TEPC 直徑、充填氣體壓力等參數，推算之線性能量 y 與對應之能譜峰頻道 h 關係為 y=0.163h 轉換。另外，以蒙地卡羅 PHITS 程式模擬前述阿伐粒子通過 TEPC 組織等效空腔後之結果，推算之線性能量 y 與對應之能譜峰頻道 h 關係為 y=0.161h，兩種 TEPC 能量校正方式之線性能量差異在 2%之內。
7. 本研究於每次充填丙烷組織等效氣體後，每間隔 1 小時進行內建 Am-241 之能譜量測，並推算其 alpha-edge，可看出隨時間增加，alpha-edge 呈現緩慢下降之趨勢，顯示能量校正值會受 TEPC 因時間增加導致外部氣體進入 TEPC 腔體或核儀系統穩定度等原因所影響，相較於充填氣體後即量測之 alpha-edge，充填氣體 4 小時之能量校正值之相對差異約為 3.0%，該差異對後續混合輻射場劑量評估之影響甚微。
8. 除隨壓力變化影響外，TEPC 之量測再現性對劑量評估亦為重要，本研究於每次 TEPC 充填組織等效氣體後即進行量測內建 Am-241 之能譜，探討每次量測之 alpha-edge 頻道位置差異性，其結果表示，TEPC 量測之平均值為 811±13，相對量測數據差異介於 4.0%範圍內，可推論表示本研究使用之 TEPC 量測系統再現性佳。
9. TEPC 對不同 LET 輻射包括光子、熱中子與快中子等均能有效測量其造成之輻射劑量；光刺激發光中子佩章(OSLN)原廠 Landauer 公司提出的有效中子能量量測範圍在 40 eV 至 5 MeV。
10. 預估於研究計畫全程(107 至 108 年)完成後，可將此劑量評估技術提供給主管機關，做為未來反應器、高能量粒子加速器設施等作業場所針對中子與光子混

合輻射場之輻射劑量度量與評估標準技術建置及劑量管制技術選項之參考。

## IV. 結論

TEPC 具有一次同時測得不同 LET 輻射的能量沉積特性，可同時評估混合輻射場中不同 LET 輻射(如光子與中子)之劑量貢獻，此方法相較於傳統方法便利，於國際間逐漸受到重視與使用。本計畫精進現有使用 TEPC 之技術，藉由分析探討不同 LET 輻射在 TEPC 所造成之劑量貢獻，建立以 TEPC 同時評估混合輻射場中個別輻射之劑量貢獻之技術。本計畫總體規劃為二年期計畫，整體而言，第一期(107 年)已依原規劃進度完成相關研究工作。

## 參考文獻


[1] 行政院原子能委員會,人員輻射劑量評定機構認可及管理辦法，行政院原子能委員會，民國 91 年 12 月 11 日發布，96 年 07 月 26 日修正。

[2] 行政院原子能委員會， 游離輻射防護法，行政院原子能委員會，民國 91 年 01 月 30 日發布。

[3] 許彬杰,翁寶山編著,實用固體熱發光劑量計測定數，合記出版社，2000。

[4] Huntley DJ, Godfrey-Smith DI and Thewalt MLW. Optical dating of sediments Nature, 313: 105–7, 1985.

[5] Rhodes.EJ. Methodological considerations in the optical dating of quartz, Quart. Sci. Rev. 7: 359–400, 1988.

[6] Smith BW. Optical dating of sediments: initial results from Oxford, Archaeometry 32: 19–31 , 1990.

[7] Akselrod MS, Kortov VS, Kravetsky DJ, et al. Highly sensitive thermoluminescent anion-defect $\alpha$-$Al_2O_3$:C single crystal detectors Radiat. Prot. Dosim. 33: 119–22, 1990.

[8] Akselrod MS, and McKeever SWS. A radiation dosimetrymethod using pulsed optically stimulated luminescence. Radiat. Prot. Dosim. 81: 167–76 , 1999.

[9] McKeever SWS. Optically stimulated luminescence dosimetry Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 184: 29–54, 2001.

[10] Corporation, CT. New RPL glass dosimeter system for large scale personal monitoring, 2001.

[11] 吳東曄，光刺激發光指環劑量計之劑量演算法研究，國立清華大學碩士論文，2012 年 7 月。

[12] Bøtter-Jensen L, Thomsen KJ, Jain M. Review of optically stimulated luminescence (OSL) instrumental developments for retrospective dosimetry. Radiation Measurements; 45: 253-257, 2010.

[13] Yukihara EG1, McKeever SW. Optically stimulated luminescence (OSL) dosimetry in medicine. Phys Med Biol. 53(20):R351-79, 2008.

[14] McKeever SWS, Akselrod MS, Colyott LE, et al. Characteristics of Al2O3 for use in thermally and optically stimulated dosimetry, Radiat. Prot. Dosim. 84: 163–168, 1999.

[15] Bøtter-Jensen L, McKeever SWS. Optically stimulated luminescence dosimetry using natural and synthetic materials. Radiation Protection Dosimetry, 65: 273-280, 1996

[16] Aguirre J, Alvarez P,Followill D,et al. SU-FF-T-306: Optically Stimulated Light Dosimetry: Commissioning of An Optically Stimulated Luminescence (OSL) System for Remote Dosimetry Audits, the Radiological Physics Center Experience. Medical Physics 36(6): 2591, 2009.

[17] Marcazzo J, Khaidukov NM, Caselli E, Dangelo C, and Santiago M. Optically stimulated luminescence of hydrothermal K2YF5:Pr3+ crystal. Physica Status Solidi(a), 11:2593–2598, 2009.

# 能階式放射影像感測器之讀出電路晶片設計與系統整合
# Readout Circuit Design and System Integration for Multi-Energy Radiation Image Detector

計畫編號：MOST 107－NU－E－007－008 －NU
計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫
計畫主持人：盧志文
e-mail：cwlu@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：郭亘倫、賴李沛毅
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

## 摘要

在本計畫中，吾人設計並實現給低輻射劑量放射影像感測器應用之讀出電路晶片，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十二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。以 TSMC 0.18 μm CMOS 製程實現一個放射影像感測讀出電路晶片，實驗結果顯示此顆感測讀出電路晶片能夠感測輻射源。
關鍵詞：放射影像感測系統、讀出電路、放大器、積分器、類比數位轉換器、數位資料處理器。

## Abstract

In this project, we designed and implemented a readout chip for low-dose radiation image detectors. The chip consists of a broadband amplifier, an integrator, a trigger circuit, and a 12-bit SAR ADC. The 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. By using 0.18-μm 1P6M CMOS technology, this work fabricated a prototype to validate the performance of the readout chip. The experimental results show that the readout chip can detect the radiation source.
Keywords: radiation image system, readout circuit, amplifier, analog-to-digital converter (ADC), SAR ADC, digital signal processor.

## I. 前言

全球放射影像設備市場呈現穩定 2~3%的成長，數位放射影像設備提供了比傳統放射影像設備更多的優點，如可以較低的輻射劑量提供更好的影像品質，快速成像，減少重製，而且數位放射影像設備亦可提供診斷醫師以電子化方式進行影像的檢視、擷取、傳送、分析，大幅提高醫院醫事效率，所以數位放射影像設備已成為醫學影像市場未來成長的主要動能[1-6]。本計畫接續前一年的計畫設計並實現一個給低輻射劑量放射影像感測器應用之讀出電路晶片。

## II. 主要內容

圖（一）為吾人提出的給能階式放射影像感測器之單通道讀出電路架構圖。此讀出電路包含一個 Current Amplifier、觸發及信號控制電路、Current Integrator、Single-to-Differential Converter、12-bit SAR ADC、Parallel-to-Serial Register 及 Interface Circuit。為了提高靈敏度以降低輻射劑量，第一級先用一個 Current Amplifier 放大感測到的電流，而且為了提高 CMRR 值以提高 signal-to-noise ratio (SNR)，吾人擬設計一個 Fully Differential Current Amplifier，並且額外使用 dummy 感測元件，此感測元件不感光，所以只有雜訊，感光的感測元件有感測電流及雜訊，感測電流被放大後送到 Current Integrator，此 Current Integrator 將感測元件的電流轉換成電壓，為了進一步消除雜訊，積分器也是採用 Fully Differential Amplifier；Current Integrator 的輸出電壓就是感測元件感測到的能量，用一個 SAR ADC 把 Current Integrator 的輸出電壓轉換成數位資料，和第一個 64 X 64 能階式放射影像感測器之讀出電路一樣，為了減少晶片輸出接腳並降低晶片面積，每一個通道有 parallel to serial register 和 interface circuit 將數位資料以 serial 方式傳送到晶片外面。

## III. 結果與討論

使用 TSMC 0.18 μm CMOS 製程製作此讀出電路晶片，圖（二）為讀出電路晶片照相圖，圖（三）為將製作好的晶片焊在電路板上作量測用。吾人先量 SAR ADC 特性，輸入一個正弦波信號，量輸出數位資料，圖（四）為輸出數位資料的頻譜圖，表（一）為此循序漸進暫存器類比數位轉換器量測規格表。

量完電性特性後，讀出晶片接上閃爍晶體及 SiPM Array，銫 137 擺放在閃爍晶體旁邊，圖（五）及圖（六）為讀出晶片送出的數位資料，從圖中可看出，讀出晶片可以感測到射源。圖（七）為沒有擺放銫 137 量 50 秒的量測統計圖，此時讀出晶片量到的是宇宙射線，圖（八）為擺放銫 137 量 50 秒的量測統計圖，此圖不僅量到宇宙射線也量到銫 137。重覆量測一次得到類似結果，圖（九）為沒有擺放銫 137 量 50 秒的量測統計圖，此時讀出晶片量到的是宇宙射線，圖（十）為擺放銫 137 量 50 秒的量測統計圖，此圖同時量到宇宙射線也量到銫 137。

## IV. 結論

這一年吾人以 TSMC 0.18 μm CMOS 製程實現一個放射影像感測讀出電路晶片，晶片的前端感測電路及類比數位轉換器皆能正常工作，類比數位轉換器在 1 MS/s sampling rate 下的 SNDR 達 69.5 dB，ENOB 為 11.25 bits。讀出晶片接上閃爍晶體及 SiPM Array，擺放銫 137 在閃爍晶體旁邊，讀出晶片可感測到銫 137 及宇宙射線，讀出電路晶片接上閃爍晶體及 SiPM array 能正常工作，本年度重新設計的晶片已解決去年的雜訊問題，未來將設計製作多通道讀出晶片並整合到放射影像感測系統中。

## 參考文獻


[1] Available on website: www2.itis.org.tw/book/download_sample.aspx?pubid=65226047.

[2] Available on website: http://iekweb2.iek.org.tw/IEKConf/Client/confinfo.aspx?mode=confinfo&conf_no=217609829.

[3] R. Irsigler, J. Anderson, J. Alverbro, J. Borglind, C. Frojdh, P. Helander, S. Manolopoulos, H. Martijn, V. O'Shea, and K. Smith, "X-ray imaging using a 320 x 240 hybrid GaAs pixel detector," *IEEE Trans. Nucl, Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 507-512, Jun. 1999.

[4] S. Steadman, F. M. Serrano, G. Vogtmerier, A. Kemna, E. Oezkan, W. Brockherde, and B. J. Hosticka, "A CMOS photodiode array with in-pixel data acquisition system for computed tomography," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 7, pp. 1034-1043, July 2004.

[5] B. Mikulec, "Development of segmented semicondcutor arrays for quantum imaging," N*ul. Instrum. methods Phys. Res., Sect. A, Accel. Spectrum Detect Assoc. Equip*., vol. 510, pp. 1-23, Sep. 2003.

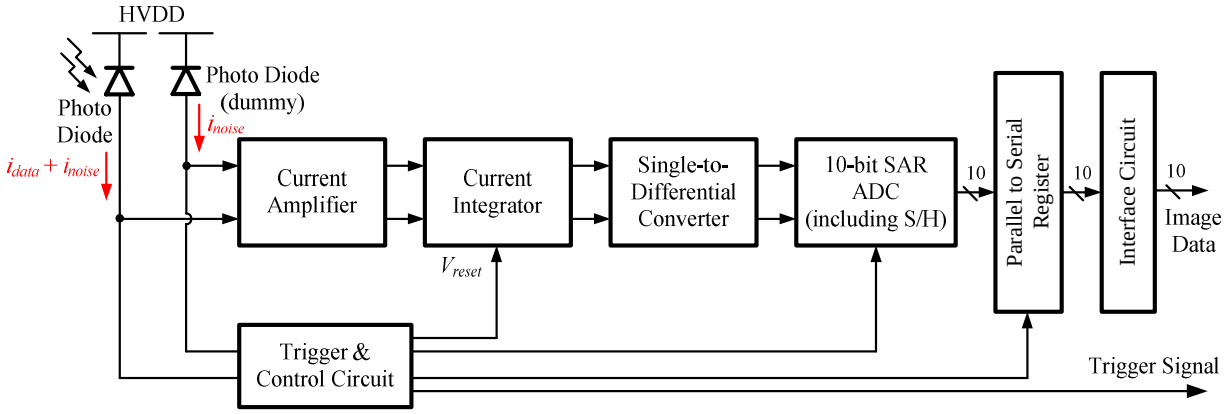
[6] I. Willekens, B. Dierickx, N. Buls, C. Breucq, A. Schiettecatte, J. D. mey, and C. Bourgain, " Superiority of multi-energy color X-ray for breast spectrum radiography," in *European Society for Radiography Congress*, Mar. 2011.

[7] B. P. Ginsburg and A. P. Chandrakasan, "A 500 MS/s 5 b ADC in 65-nm CMOS," *IEEE Symp. VLSI Circuits*, Jun. 2007, pp. 174–175.

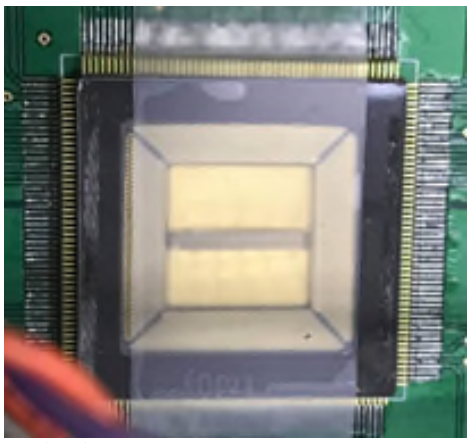
[8] Y. K. Chang, C. S. Wang, and C. K. Wang, "A 8-bit 500 KS/s low power SAR ADC for bio-medical application," *IEEE ASSCC Dig. Tech. Papers*, Nov. 2007, pp. 228–231.

[9] Liu, C.-C., Chang, S.-J., Huang, G.-Y., and Lin, Y.-Z.: 'A 10-bit 50-MS/s SAR ADC with a monotonic capacitor switching procedure', *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2010, 45, (4), pp. 731–740.

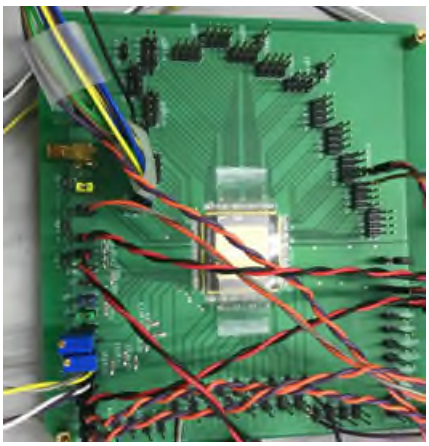
[10] Y. Zhu, C. H. Chan, U. F. Chio, S. W. Sin, S. P. Martins, and F. Maloberti, "A 10-bit 100MS/s reference-free SAR ADC in 90nm CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 45, no. 6, pp. 1111-1121, Jun. 2010.

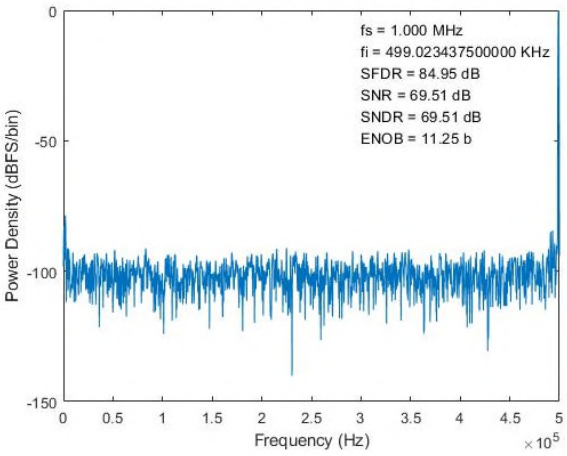

圖（一） 吾人提出的給能階式放射影像感測器之單通道讀出電路架構圖。



圖（二）讀出電路晶片照相圖。



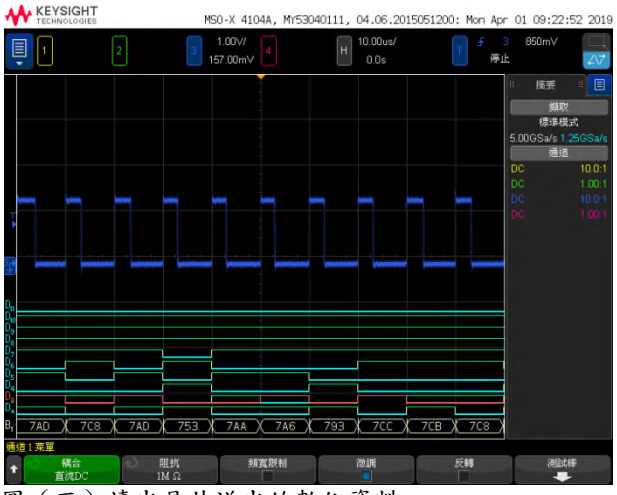
圖（三）量測用電路板。



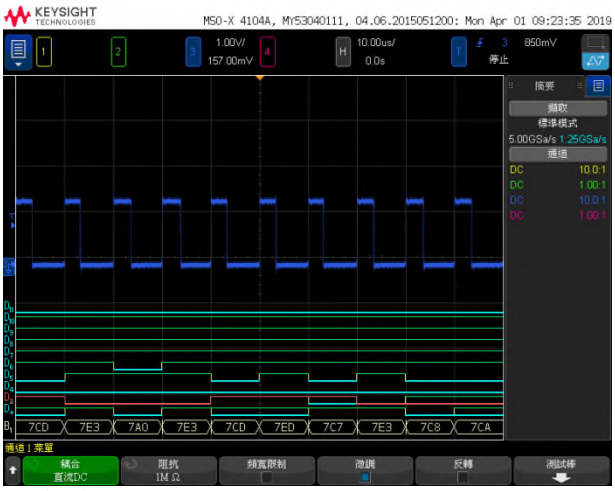

圖（四） SAR ADC 輸出數位資料的頻譜圖。

表（一） 循序漸進暫存器類比數位轉換器規格表

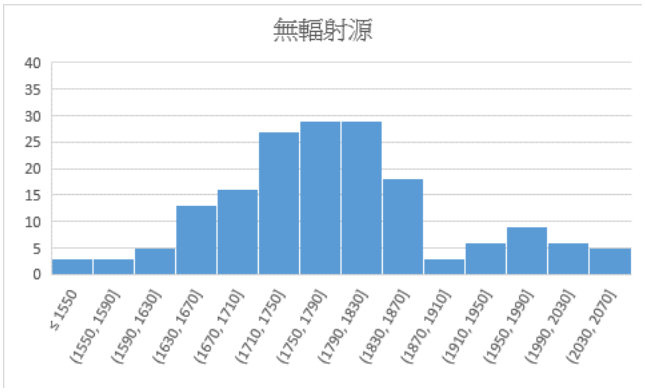
| Specification Summary of SAR ADC | | |
|---|---|---|
| Technology | TSMC 0.18μM 1P6M | |
| Supply Voltage | 1 | V |
| Reference Voltage | 1 | V |
| Power Consumption | 44.78 | μW |
| Sampling Rate | 1 | MS/s |
| Resolution | 12 | bit |
| LSB | 1.172 | mV |
| DNL | 0.59 | LSB |
| INL | 0.97 | LSB |
| ENOB | 11.25 | bit |
| FoM | 18.39 | fJ/step |



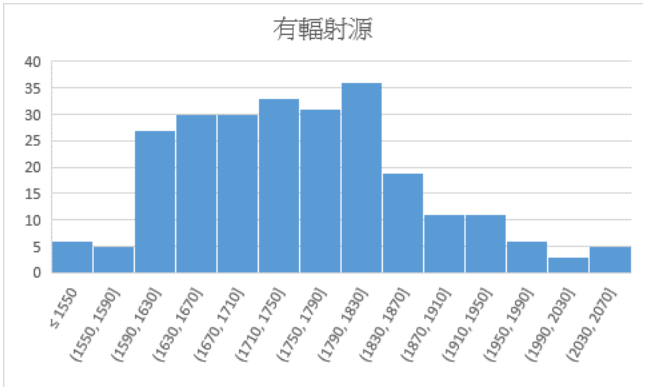

圖（五）讀出晶片送出的數位資料。



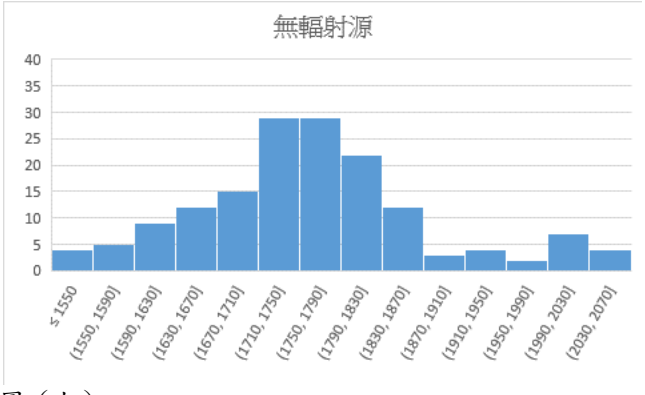

圖（六） 讀出晶片送出的數位資料。



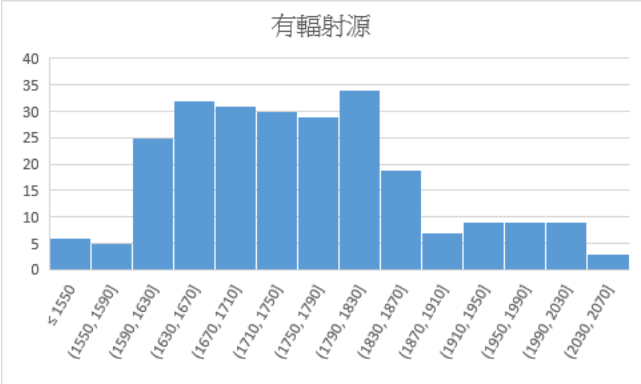

圖（七）




圖（八）




圖（九）


有輻射源
40
35
30
25
20
15
10
5
0
≤ 1550
(1550, 1590]
(1590, 1630]
(1630, 1670]
(1670, 1710]
(1710, 1750]
(1750, 1790]
(1790, 1830]
(1830, 1870]
(1870, 1910]
(1910, 1950]
(1950, 1990]
(1990, 2030]
(2030, 2070]

圖（十）

# 台灣北投石產區背景輻射之研究

# Research on Background Radiation at the Place of Origin of Hokutolite in Taiwan

計畫編號：MOST 107-2623-E-343-001 -NU
計畫主持人：林群智
e-mail：cclin@nhu.edu.tw
執行單位：南華大學自然生物科技學系

## 摘要

為釐清北投石產區居民或旅客可能對該地之輻射水平安全之疑慮，並提升民眾對於天然放射性物質、當地背景輻射及輻射安全之認識，本研究藉由量測北投石產地之環境輻射水平及劑量，說明當地之背景輻射對民眾的安全性。結果顯示，該區土壤之 Be-7 活度均低於 MDA 值；K-40 均在半年報調查值範圍內；U-238、Th-232 僅瀧乃湯、地熱谷稍高於臺灣其他地區 2018 年放射性落塵與食品之調查值。底泥試樣之 Be-7 僅地熱谷泉池南側稍高，其餘均低於 MDA 值；K-40 均與臺灣其他地區 2018 年調查值相近;底泥試樣之 Cs-137 均低於 MDA 值; Th-232 稍高於臺灣其他地區 2018 年河沙放射性含量調查值。植物試樣之 Be-7、K-40 均與臺灣其他地區 2018 年調查值相近，Cs-137、Th-232、U-238 均低於 MDA 值。溫泉水氚活度均低於 MDA 值。該區域之某些天然放射性核種(如: $^{226}$Ra、$^{228}$Ra、$^{222}$Rn 和 $^{220}$Rn)相較於與 2018 年臺灣其他地區之調查值稍高，而輻射劑量率量測顯示當地除了北投石產出地點稍高外，其餘均與台灣平均環境背景值相近，且經推估其所導致一般民眾體內及體外劑量亦與一般區域相近。

關鍵詞：北投石、地熱谷、背景輻射、輻射安全、天然放射性物質、輻射劑量

## Abstract

This research aimed to measure environmental radiation levels and doses at the place of origin of Hokutolite in Taiwan to help the public clarify the doubt of radiation in this area and understand the NORM, background radiation as well as radiation safety. The results showed that the activity in soil was lower than MDA for $^{7}$Be, within the range of previous investigation at other places in 2018 (PI2018) for $^{40}$K. $^{238}$U and $^{232}$Th in soil were slightly higher at Lonniton and Geothermal Valley and within the range of PI2018 at other sampling sites. In glaur, the activity of $^{137}$Cs is lower than MDA, $^{40}$K was similar to while $^{232}$Th was slightly higher than the results in PI2018 at other places, and $^{7}$Be was lower than MDA except that at southern part of Geothermal Valley, which was slightly higher than the results in PI2018. In plant, the activity of $^{137}$Cs, $^{238}$U and $^{232}$Th were lower than MDA, and that of $^{7}$Be as well as $^{40}$K were similar to the results in PI2018. The activity of $^{3}$H in hot spring water was lower than MDA. Some NORM, such as $^{226}$Ra $^{228}$Ra, $^{222}$Rn and $^{220}$Rn, were slightly higher than the results in PI2018. However, the background radiation was similar to average levels at other places in Taiwan except that around hokutolite-producing regions. Besides, the internal and external doses of the public were estimated to be similar to other places in Taiwan and lower than high background radiation area.

Keywords: Hokutolite, Geothermal Valley, background radiation, radiation safety, natural occurring radioactive materials, radiation dose

## I. 前言

北投溫泉自日據時期以來即是著名的溫泉觀光景點，昔日在北投溫泉入流之北投溪下游 150-400 公尺處生成的北投石，是唯一以台灣地名命名之礦物，其成分為重晶石(BaSO4)與硫酸鉛礦 (PbSO4)的共沉澱結晶物，因具有來自鐳同位素之放射性而聞名。近年來，由於國內「核科學教育(nuclear science education)」不普及 (林群智，2006)，民眾對於核能、輻射等知識的認知往往因為不恰當的引喻或刻意扭曲，導致國人反核聲浪高漲，耳聞輻射即慌張驚恐，特別是往往僅認知某些環境中存在輻射但忽略了劑量的高低，對於風險更缺乏評估發生機率與嚴重性的概念，於是造成許多無謂的恐慌。事實上，地球自形成以來便處在來自宇宙、地表放射性核種及氡氣所釋出之輻射所籠罩的背景環境中，有些地區的輻射水平比一般地區高數倍至數百倍，這些高背景輻射地區以中國廣東省陽江縣 (平均年有效劑量約 6.4 mSv; Hayata et al., 2004; Jiang T et al., 2000; Wei et al., 1990; Tao et al., 2000; Zhang et al., 2003; Zhang et al., 2004; Zhou et al., 2005) 、巴西 Espirito santo (Vasconcelos et al., 2013)、印度的 Kerala 地區(平均體外劑量約 4.5 mGy/y，某些地區高達 70 mGy/y，平均體內有效劑量約 2.4 mSv/y; Nair et al., 2009; Thampi et al., 2002)以及伊朗北方的 Ramsar 市最著名，其中，Ramsar 當地有 50 個溫泉源頭，溫泉水中之鐳核種於下游之小溪中形成石灰華沈積，並被當地居民就地取材製成泥磚作為建材使用，因此，其室內 γ 輻射劑量率及氡氣活度明顯偏高，

部份住宅室內輻射劑量率為一般住宅之數百倍，由其背景輻射所推算之年輻射吸收劑量高達 260 mSv/y (Ghiassinejad et al., 2002)，約為輻射作人員年劑量限度(20 mSv/y)之 13 倍。台灣北投石產區屬於火成岩地質，為國內天然背景輻射較高之區域，因此，對於北投石產區之天然放射性物質、背景輻射以及所導致之環境劑量等監測將有助於促進民眾對於天然放射性物質、當地背景輻射及輻射安全之認識，以及提升我國輻安管理之提升與民眾參與度，本研究之目的即在探討北投石產區之天然放射性物質、背景輻射以及所導致之環境劑量並與其他區域比較，以釐清地熱谷區域居民或旅客可能對該地之輻射安全之疑慮。

## II. 研究方法

所有水、土壤、底泥和植物樣本均採自北投溫泉區，包含地熱谷和北投溪 (Fig. 1)。採樣地點並以衛星接受器定位。水樣的溫度、酸鹼值(pH)和氧化還原電位 (Eh) 均在原地量測，另取 5 L 水樣在實驗室加熱蒸發濃縮後以比例式偵測系統(WPC9550, Protean-Instrument Co.)計測總阿伐/貝他活度及加馬能譜核種分析，鐳同位素之分析可在溫泉水中加入氯化鋇與稀硫酸形成硫酸鋇沉澱以濃集鐳同位素(Ra-226/Ra-228)，再進行加馬能譜分析。

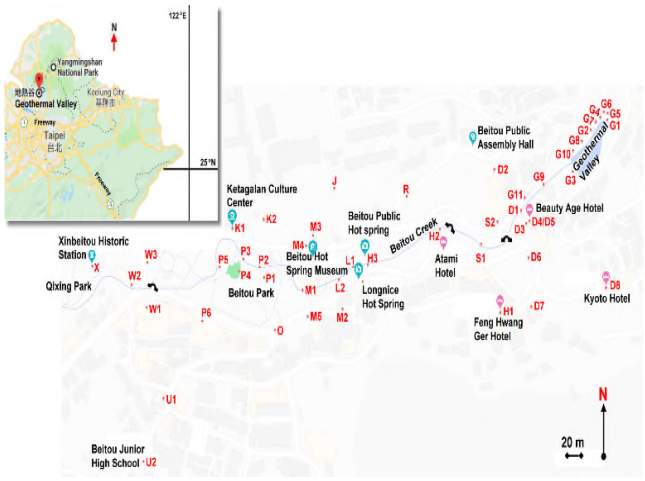



**Fig. 1 Sampling sites at Beito Hot Spring Area**

另外，取 100 mL 水試樣，加入 0.5 g NaOH 和 0.1 g of $KMnO_4$ 蒸餾純化，以液體閃爍偵檢器執行氚分析(Lehto and Hou, 2011)。水樣中主要陽離子的濃度以離子層析儀測定(Dionex AS12, Thermo Fisher Scientific Inc.)。取採樣點河床底泥或地面土壤 10 cm 深度部分的樣品，以 105℃ 烘乾 24 h，研磨後以一個 60 網目的篩網過濾，秤重後密封於 125 mL 的塑膠罐中。植物樣品(0.5-1.0 kg)經乾燥後以 400 ℃ 的高溫爐進行乾式灰化。樣本中的 γ 核種以高純鍺偵檢器(HPGe; GC3520, Canberra Co.)測定，環境的劑量率則以加瑪幅射偵檢器量測。空氣中的 Rn 同位素的活度濃度以氡氣偵檢器(RTM1688-2; SARAD Co.)測定。$^{238}U$ 之濃度由加馬能譜中其子核 $^{214}Pb$ (352 keV)和 $^{214}Bi$ (609 keV)所測定之濃度平均而得，$^{232}Th$ 之濃度則由其子核 $^{208}Tl$ (583 keV)和 $^{228}Ac$ (911 kev)所測定之濃度平均(Hemby and Tynybekov, 2000)。地表天然放射性核種的貢獻可由地表土壤之 $^{40}K$ ($C_K$) $^{232}Th$ ($C_{Th}$)和 $^{238}U$ ($C_U$)依式(1)估算，並可由式(2)求得有效劑量率，地表直接輻射劑量可由土壤中之 $^{137}Cs$ 和 $^{60}Co$ 濃度 (Bq/kg)依式(3)估算，其中，S=0.36；K=80 kg/m$^2$；H=8.28×10$^{-9}$ mSv·m$^2$·Bq$^{-1}$·h$^{-1}$ ($^{60}Co$) 或 2.08×10$^{-9}$ mSv·m$^2$·Bq$^{-1}$·h$^{-1}$ ($^{137}Cs$)。

$$D_a(nGy/h)=0.0417C_K+0.604C_{Th}+0.462C_U \quad (1)$$

$$D_1(\mu Sv/h)=Da \times 0.7 \times 10^3 \quad (2)$$

$$D_2(\mu Sv/h)=S\times K\times H\times A\times 10^{-3} \quad (3)$$

## III. 結果與討論

### 溫泉水之總阿伐活度、加馬活度及氚活度

該區溫泉水之總阿伐活度僅在地熱谷溫泉池、美代溫泉飯店自行引入的青磺泉及露天溫泉處可測得(高於飲用水放射性含量管制標準 0.55 Bq/L)，總貝他活度以地熱谷溫泉池、美代溫泉飯店自行引入的青磺泉較高 (高於飲用水放射性含量管制標準 1.80 Bq/L) (Table 1)，顯示該區水質不適合飲用。水中之加馬活度以地熱谷溫泉池最高，

Table 1 Gross α and gross β activities and activity concentrations of $^{226}Ra$ and $^{228}R$ in water

| Survey site | code | Activity concentration (Bq/L) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Gross α | Gross β | Ra-226 | Ra-228 |
| 地熱谷（北） | G1 | 1.5±0.4 | 8.7±0.7 | 0.34±0.04 | 1.35±0.09 |
| 地熱谷（南） | G3 | 1.7±0.4 | 6.4±0.6 | 0.19±0.03 | 1.20±0.08 |
| 美代飯店側溪水 | D1 | —[a] | 4.6±0.5 | — | 0.69±0.07 |
| 美代飯店（青磺） | D4 | 1.7±0.1 | 7.4±0.2 | — | 1.17±0.04 |
| 銀星橋 | S1 | — | 2.3±0.4 | — | 0.29±0.04 |
| 熱海飯店 | H2 | — | 2.7±0.4 | — | 0.34±0.05 |
| 露天溫泉 | H3 | 1.3±0.4 | 2.3±0.4 | — | 0.31±0.06 |
| 瓏乃湯 | L1 | — | 1.7±0.4 | — | 0.29±0.05 |
| 溫泉博物館 | M1 | — | 3.4±0.4 | — | 0.24±0.04 |
| 圖書館後池水 | P2 | — | 0.86±0.05 | — | — |
| 溜冰場旁池塘 | P4 | — | 0.29±0.04 | — | — |
| 北投公園自來水 | P0 | — | — | — | — |

a: <MDA

主要來自 $^{228}Ra$ (約 0.24-1.35 Bq/kg)，$^{226}Ra$ 僅在地熱谷溫泉池可測得(約 0.19-0.34 Bq/kg)。溫泉水之氚活度均低於 MDA 值。

### 土壤、底泥和植物中之 NORM

該區土壤及底泥中之環境中之 $^{238}U$ 和 $^{232}Th$ 僅在幾處可測得，土壤試樣主要活度貢獻核種為 $^{232}Th$ 和 $^{238}U$，且 $^{232}Th$ 較高，$^{238}U$ 和 $^{232}Th$ 之活度濃度變化相似，在瀧乃湯(L1)附近因北投石產出其土壤中之活度較高(73.5±2.4 Bq/kg)。底泥中主要活度貢獻核種為 $^{232}Th$ 和 $^{238}U$，且 $^{232}Th$ 遠高於 $^{238}U$，在 G3 活度較高(Fig. 2)，植物中之 $^{238}U$ 和 $^{232}Th$ 均低於 MDA。$^{7}Be$ 主要來自銀河與太陽的宇宙射線與大氣中 N 和 O 核反應所產生，可用以追蹤大氣中的質量傳輸、

土壤再分布和沉澱物來源(Yoshimori et al., 2003; Saleh and Abdel-Halim, 2018)，$^{137}$Cs 主要來自 1950 至 1970 年代核試爆落塵(Mabit et al., 2008)，本研究中土壤中之 $^{7}$Be 僅在 M4 可測得，$^{137}$Cs 僅在 G3、R 和 J 點可測得，土壤中之 $^{40}$K 以溫泉博物館之 733±25 Bq/kg 最高 (Fig. 3)。底泥中僅 $^{40}$K 可測得，活度濃度為 193±9~551±27 Bq/kg，植物中僅 $^{7}$Be 和 $^{40}$K 可測得，在 G3、J 和 M4 較高 (Fig. 3)；但均與臺灣其他地區 2018 年放射性落塵與食品之調查值相近。

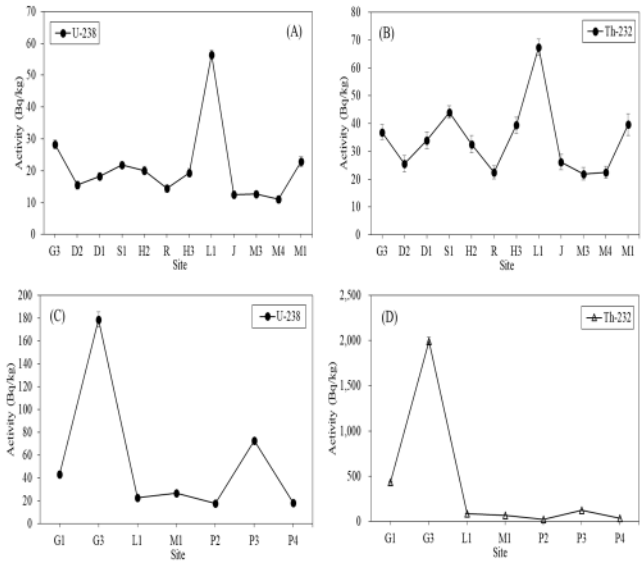



Fig. 2 (A) $^{238}$U and (B) $^{232}$Th concentration in soil and (C) $^{238}$U and (D) $^{232}$Th concentration in sludge

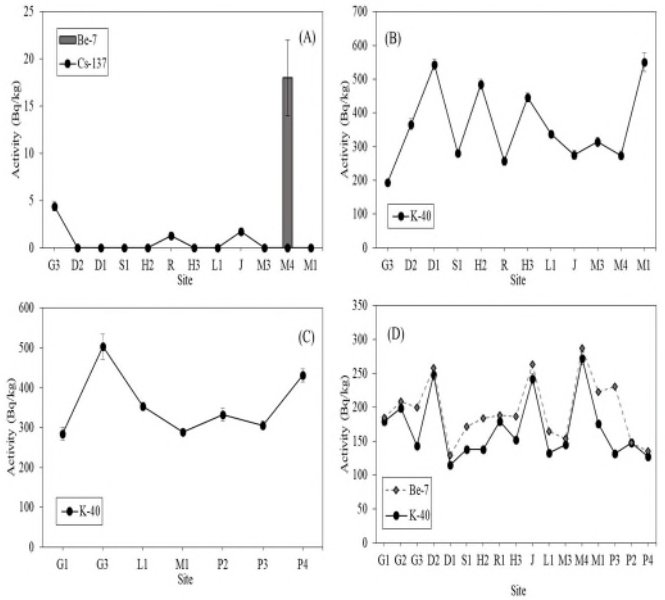



Fig. 3 Activities of (A) $^{7}$Be , $^{137}$Cs and (B) $^{40}$K in soil, (C) $^{40}$K in sludge, and (D) $^{7}$Be as well as $^{40}$K in plants

由 $^{40}$K、$^{238}$U 和 $^{232}$Th 之活度濃度可估算地表天然放射性核種對個人所貢獻之體外吸收劑量率($D_a$)約 30.1~80.9 $\mu$Gy h$^{-1}$)，依土壤活度推導劑量率與實測劑量率的相依性評估(Huang et al., 2019)得知，實測劑量率約為 31.9~85.9 $\mu$Gy h$^{-1}$；有效劑量率($D_1$)約 0.021~0.057 $\mu$Gy h$^{-1}$)。地表人工放射性核種($^{137}$Cs)直接輻射劑量之貢獻($D_2$)約 $7.79\times10^{-11}$~$7.79\times10^{-10}$ $\mu$Gy h$^{-1}$，其值遠低於來自土壤中天然放射性核種所致之有效劑量率。若室內占用因數為 0.8，估計可能貢獻居民個人之年劑量率為 $8.10\times10^{-6}$~$2.08\times10^{-5}$ mSy/y (Table 2)，遠低於個人之年劑量限值，對旅客而言，以室外占用因數 0.2，停留時間不到 1 h 而言，對個人年劑量率之貢獻更是微乎其微。

Table 2 Contribution of external dose estimated from artificial radionuclides in the ground

| Survey site | μSv/h | | | mSv/y |
|---|---|---|---|---|
| | Da | D1 | D2 | Annual effective dose |
| G3 | 43.4±9.5 | 0.030±0.007 | $(2.64\pm0.30)\times10^{-10}$ | $(2.13\pm0.47)\times10^{-5}$ |
| D2 | 37.8±16.3 | 0.026±0.011 | | $(1.85\pm0.80)\times10^{-5}$ |
| D1 | 51.6±15.3 | 0.036±0.011 | | $(2.53\pm0.75)\times10^{-5}$ |
| S1 | 48.4±8.4 | 0.034±0.006 | | $(2.37\pm0.41)\times10^{-5}$ |
| H2 | 49.2±15.4 | 0.034±0.011 | | $(2.41\pm0.75)\times10^{-5}$ |
| R | 30.9±12.3 | 0.022±0.009 | $(7.79\pm1.80)\times10^{-11}$ | $(1.52\pm0.60)\times10^{-5}$ |
| H3 | 51.4±13.4 | 0.036±0.009 | | $(2.52\pm0.66)\times10^{-5}$ |
| L1 | 80.9±10.5 | 0.057±0.007 | | $(3.96\pm0.52)\times10^{-5}$ |
| J | 33.1±13.3 | 0.023±0.009 | $(1.02\pm0.24)\times10^{-10}$ | $(1.62\pm0.65)\times10^{-5}$ |
| M3 | 32.2±14.2 | 0.023±0.010 | | $(1.58\pm0.70)\times10^{-5}$ |
| M4 | 30.1±12.2 | 0.021±0.009 | | $(1.47\pm0.60)\times10^{-5}$ |
| M1 | 57.4±27.6 | 0.040±0.019 | | $(2.81\pm0.14)\times10^{-5}$ |

**環境直接輻射劑量偵測**

對該區域之直接輻射量測劑量結果如 Fig. 4 所示，其造成的輻射劑量率分佈為 0.066 至 0.340 $\mu$Gy h$^{-1}$，可發現僅溫泉博物館附近河床北投石產地(L2 和 M1) 射劑量率較高。其他區域均低於 0.15 $\mu$Gy h$^{-1}$。

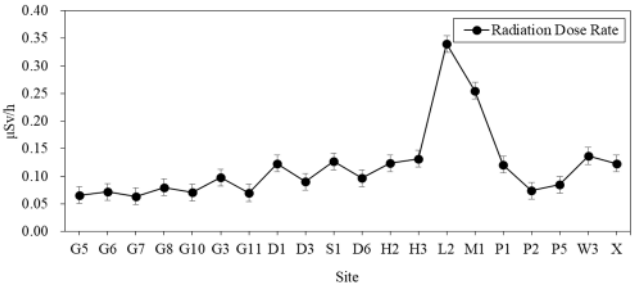



Fig. 4 Direct measurement of radiation dose rate

**氡氣量測**

該區域之 $^{222}$Rn (radon)除了地熱谷溫泉池附近(G1 和 G3)較高(Fig. 5)，與 2004 年溫帶國家室內氡活度水平

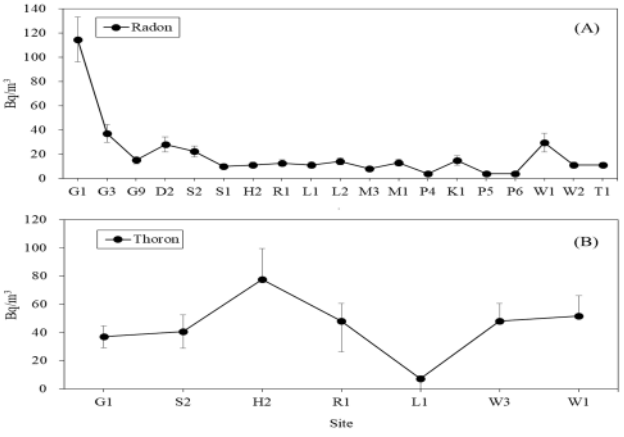



Fig. 5 Variation of radon and thoron concentration at the sampling sites

調查中，芬蘭之室內平均氡氣濃度相當外，其餘均低於 40

Bq/m$^3$，與 2017 年輻射偵測中心針對台灣地區住宅氡氣活度量測之結果相近(輻射偵測中心，2017)。該區因 $^{232}$Th 之活度濃度較高，故某些偵測點可測到 $^{220}$Rn（thoron），濃度為 7.4~77.7 Bq/m$^3$。

## IV. 結論

本研究結果顯示，台灣北投地區地殼中天然放射性核種造成之輻射劑量率、環境直接輻射暴露與地表人工放射性核種直接輻射對北投石產區之居民與遊客體外劑量之貢獻，均與全球的平均值相似。直接輻射量測劑量僅溫泉博物館附近河床北投石產地輻射劑量率稍高，其餘均與台灣其他區域平均值相似。

氡氣濃度

## 參考文獻


Hamaguchi H., Lee Y.T., Cheng H.S., 1962. Study of the Radioactivity of Hokutolite. Journal of the Chemical Society 9(1), 1-13.

Hemby, D.M., Tynybekov, A.K., 2002. Uranium, Thorium and Potassium in soils along the shore of the lake Issyk-Kyol in the Kyrghyz Republic. Environmental Monitoring and Assessment 73, 101–108.

Huang, F.J., Hsu, F.Y., Chen, T.Y., Chao, J.H., 2019. Radiation Dose Due to Naturally Occurring Radionuclides in Soils from Varying Geological Environments. Health Physics 116(5), 657-663.

Lehto J., Hou X., 2011. Chemistry and Analysis of Radionuclides: Laboratory Techniques and Methodology. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinhem, Germany, P.203.

Lin C.C., Chu T.C., Huang Y.F., 2003. Disequilibria in the disintegration series of U and Th and chemical parameters in thermal spring waters from the Tatun volcanic area (Taiwan). Radiochimica Acta 91, 403-407.

Lin C.C., Tsai T.L., 2009. Interpretation for the vanishment of hokutolite from aquatic parameters and radiochemical processes in the environment of Peito Hot Spring Area (Taiwan). Applied Radiation and Isotopes 68(2), 345-354.

Lin, C.C., Tsai, TL, 2012. Impact of water environmental change and migration of radionuclides on hokutolite conservation in Peito (Taiwan). Radiochimica Acta 100(5), 329-338.

Momoshima N. , Nita J., Maeda Y. , Sugihara S. , Shinno I. , Matsuoka N., Huang C.W., 1997. Chemical composition and radioactivity in hokutolite (plumbian barite) collected at Peito hot spring, Taiwan. Journal of Environmental Radioactivity 37(1), 85-99.

Saleh I.H., Abdel-Halim A.A., 2018. Cosmogenic beryllium-7 in soil, rainwater and selected plant species to evaluate the vegetal interception of atmospheric fine particulate matter. Isotopes in Environmental and Health Studies 54(4), 392-402.

United Nations Scientific Committee of the Effect of Atomic Radiation, 2000. Sources and Effects of Ionizing Radiations. New York: United Nations.

Yoshimori M., Hirayama H., Mori S., Sasaki K., Sakurai H., 2003. Be-7 nuclei produced by galactic cosmic rays and solar energetic particles in the earth's atmosphere. Advances in Space Research 32(12), 2691-2696.


## 致謝

感謝原子能委員會與科技部的經費(MOST 107-2623-E-343-001 -NU).)對本研究的支持，以及台北市水利工程處溫泉股張本慶專員、義守大學陳清江教授、偵測中心劉祺章博士以及美代溫泉飯店黃光賢總經理對本研究的協助。

# 開發具有無線傳輸功能且具備環境修正輸入的劑量面積乘積儀原型機

計畫編號：107-NU-E-415-001-NU
計畫主持人：謝奇文
e-mail：chiwen@mail.ncyu.edu.tw
執行單位：國立嘉義大學電機系

## 摘要

劑量面積乘積儀(Dose Area Product, DAP)或稱為空氣克馬乘積儀(KAP)是用於量化量測醫療曝露之劑量指標，主要用於醫用 X 光機。可即時監測 X 光檢查、透視攝影或介入手術的輻射劑量，並作為檢查條件最佳化和放射診斷劑量參考水平之用，以評估醫療曝露風險。本研究提出實作之面積劑量乘積計讀儀電子電路與相關硬體與人機操作介面。主要系統架構為高壓元件、自製前端電路、TI TI MSP430F5438A 開發實驗版含後端無線模組、自製機構與人機介面。主要功能有: 參數設定功能、電流與環境因子量測功能、資料傳輸功能含無線傳輸、與按鍵自我測試功能。為提高極高之動量量測範圍，本模組利用兩個負回授電阻，可以從 40nA 到 10 pA 都在 1%的誤差範圍內，符合計畫目標，若配合核能研究所開發的穿透式游離腔，可以達到商用「劑量面積乘積游離腔之計讀儀」的開發目的。

關鍵字: 劑量面積乘積儀, X-射線, 穿透式游離腔, 電流量測, 無線傳輸

## Abstract

Dose area product (DAP) or Kerma-area product (KAP) meter plays a dominant role for quantitatively real-time measure and monitor radiation dose of medical X-ray machine clinically. The objective of this project is to develop a dose area product (DAP) rate meter prototype with wireless communication and environmental calibration functions for transparent ionization chamber to monitor the radiation dose real time. Basically, the electrons flow signal will be converted into a voltage signals via a designed analog circuits consisted of the trans-impedance amplifier (TIA), filters, etc. Then, a Texas Instruments MSP430F5438 Experimenter Board converts the analog voltage signal into digital form via ADC and used a series of calibration factors to obtain the DAP rate. We used Texas Instruments Code Composer Studio (CCS) V6 to develop the kernel current measurement via controlling the MSP430F5438 experimenter board's UART and I/O ports, a color high resolution liquid crystal display LCD, a series of switch and supported parameter setting, current measurement and ambient temperature calibration, data transmission, and button tests. The measurement comparisons with the developed meter and the standard current measuring device can achieve the less than about 1% error date in two selected different measurement ranges including the measurement range is 10 pA ~ 40 nA and the error can be less than 1%. In real test, the electrons collected by the spherical ionization chamber when X-ray is used as the radiation source is measured by developed prototype for various X-ray tube voltages: 80kV, 120kV, 150kV, tube currents: 5mA, 10mA, 15mA, 20mA, 25mA, 30mA, and with the high-voltage module. We compared with the results by using INER's measurement instrument (Keithly6517A) and high voltage power supply (Keithly247) in all the same conditions. The errors between measurement results of our prototype and INER's instruments are mostly less than 1.5%. The developed prototype is also with the wireless commutation functions and can be worked well in Android platform via smartphone displays.

Keywords: Dose area product, x-ray, transparent transmission ionization chamber, electric current measurement.

## I. 前言

克馬/劑量面積乘積儀(KAP/DAP meter)主要是應用在放射臨床醫學上，可以即時提供醫療曝露品質保證的相關資訊。因為 DAP Meter 可以即時的量化量測輻射劑量，所以常用來提供相關劑量指標資訊給放射師、物理師或臨床醫師參考。同時，也可以作為 X-ray 儀器商做為輻射劑量的安全控管或是生產製造的品質監測使用。然而，此類產品過去皆仰賴進口，國內無相關廠商製造生產，除了售價偏貴外，人機介面與相關技術並沒有提升，以至於在實務上，採買使用的單位並不多。我們在 2015 年與核能研究所合作，為國內首度自製 DAP 原型機研發案。在核能研究所的上位計劃中，主要技術涵蓋：配合核研所自製醫療級穿透式游離腔，研發自製計讀儀和核研所自製劑量評估軟體與儀控介面三大部分。而我們執行的分包計劃，即是計讀儀核心技術的研發，可結合前端游離腔和後送相關資訊給後端劑量評估軟體與儀控介面，成為符合 IEC60580 標準之一實作克馬/劑量面積乘積儀原型機。

## II. 主要內容

DAP 的主要運作原理，是藉由量測收集因輻射而游離之電荷，進一步估測游離輻射。因此對於電子電路而言，就是量測微小電量或是微小電流。若是利用量測電量的方式，可以使用一精密的電容器。藉由電容器對於儲存電荷的物理特性，可以透過精密的電壓量測而獲得。簡而言之，利用量測電壓方式取得電量量測。

而本計畫採取直接量測電流，若需要電量資訊，則透過取樣時間對電流積分獲得。微小電流量測的方法有許多種，如電量微分，轉阻放大器(TIA)，儀表放大器(INA)，電流積分 IC 等等。在考慮精度與開發成本與 DAP 的本身特性。本計畫中，採取 TIA、INA 和電流積分 IC 法，其中以 TIA 法為主。基本上 TIA 為一類比元件，所以需要結合後端 ADC 和 MCU(或是 DSP 晶片，或是 FPGA 晶片)，進行訊號處理與運算。惟考慮到原型機具

有高壓模組，以提供適當高壓給 INER 發展的穿透式游離腔，故需得知環境溫度參數。經過訊號量，取樣率與無線化等評估，我們將採用德州儀器公司(TI)生產的 MSP430 的模組。此模組可以提供單機顯示與後端 USB 連線功能，也有相關的 TI 無線晶片的支援，如 TI CC3200 系列，因此符合 INER 開發無線 DAP 的功能需求。本計畫的硬體方塊圖主要包含了八大部分，分別為:電源分配管理模組,外部環境感測模組,類比電路模組，自我電路校正模組，ADC 與 MCU 模組，顯示模組，無線傳輸模組，人機介面模組。

## III. 結果與討論

實作上，我們提供了大面積的顯示幕，搭配 UART 與 I/Oport 控制液晶螢幕和五向開關，開發出四項儀器功能，包括 1.參數設定功能:用以輸入校正因子，將量測到的電流換算成劑量面積乘積率；2.電流與溫度量測功能:同時量測電流與溫度並顯示，並有錯誤提示功能；3.資料傳輸功能:將量測到的 ADC 值經 mini USB 傳輸至 PC，藉以分析量測訊號；4.按鍵測試功能:測試各按鍵是否正常。

計讀儀使用開關切換 20MΩ與 1GΩ兩個負回授電阻以選擇量測範圍，其中使用 20MΩ架構可量測 0.3nA~40nA，誤差大致都在 1%以下；使用 1GΩ架構量測 10pA~700pA，誤差皆在 1%以下。實際量測球型游離腔，並由內建之高壓模組提供電極板高壓，設定 X 光機管電壓為 80kV、120kV、150kV，管電流分別設定為 5mA、10mA、15mA、20mA、25mA、30mA，量測結果與核能所量測儀器與負高壓電源供應器提供電極板高壓比較，除了管電壓為 80kV，管電流為 5mA 誤差為-2.44%之外，其餘皆在 1.5%之下。完全符合計畫所述的原始目標。

## IV. 結論

就國際既有克馬/劑量面積乘積儀商品而言，包括：德國 PTW、IBA、Radcal VacuTec 和 PehaMed 公司產品。以 PTW DIAMENTOR® CX DAP 產品而言，提供了單/雙通道，pA 電流/pQ 電量級的量測，產品規格及量測不確定性亦符合 IEC60580 標準。本計畫如期完成了完成 DAP 的計讀儀原型機，並移轉給核能研究所並洽談千才科技公司完成相關技轉與產業媒合服務。我們使用印刷電路板(PCB)作為感測器元件，利用後端的電流感測元件與 MCU 模組，實作出多通道的 DAP 原型機，並結合無線網路，自我校正，友善 UI 等等功能，進一步開發更完善且功能更多 KAP/DAP Meter，以確實助益於國內高階醫療器材產業之發展。

## 參考文獻


[1] R. L. Morin, T. C. Gerber, and C. H. McCollough,”Radiation Dose in Computed Tomography of the Heart," Circulation, vol. 107, pp. 917-922, 2003.

[2] R. Posada, Ch. Dad and D. Wolf,” New Frameless Patient Positioning Algorithm in Conformal Radiotherapy Using 3D-Data Registration,” Proceedings of the 25’ Annual Intemational Conference of the IEEE EMBS Cancun Mexico, September 17-21,2003

[3] Li Bin, Tian Lianfang, Kang Yuanyuan, Yu Xia,” rallel multimodal medical image fusion in 3D conformal radiotherapy treatment planning[A],” The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, China, Shanghai, 2008

[4] Hausleiter J, Meyer T, Hermann F, et al. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography〔J〕. JAMA, 2009

[5] “International Commission on Radiation Units & Measurements,” http://www.icru.org/

[6] B. Yu, G. J. Mahler, N. A. Schaknowski, and G. C. Smith,” A Position-Sensitive Ionization Chamber for Thermal Neutrons,” IEEE Trans. on Nuclear Science, Vol. 48, No. 3, June, 2001

# 核醫全身電腦斷層衰減校正之診斷參考劑量水平調查與建立
# The survey and establishment of diagnostic reference levels for CT-based attenuation correction in whole body PET/CT examination

計畫編號：107-2623-E-075-001-NU
計畫主持人：楊邦宏
e-mail：bhyang@vghtpe.gov.tw
執行單位：台北榮民總醫院核子醫學部

## 摘要

診斷參考劑量水平(diagnostic reference level, DRL)是目前監控及降低國人之輻射醫療曝露劑量之手段。然而，在核醫影像衰減校正用途之電腦斷層(CT-base attenuation correction)卻沒有被規範及注意。根據文獻指出一次 PET/CT 全身掃描的有效劑量最高可以到達 26 mSv，而正子放射造影劑的全身吸收劑量大約介於 6.6mSv 至 7.2mSv 左右，其他的輻射劑量貢獻來自於衰減校正為主之電腦斷層(CT)掃描劑量，其有效吸收劑量可以高達接近 20 mSv。本計畫預計實地訪查國內不同廠牌、機型之 PET/CT 中心，調查其使用在全身衰減校正造影參數與劑量分布情況。將這些資料代入 CT-Expo 軟體或是 ImPACT 軟體計算衰減校正之電腦斷層體積劑量指標($CTDI_{vol}$)、劑量長度乘積(DLP)等，採四分位數統計分析出不同電腦斷層取樣條件之輻射劑量，並與國際間相比較，從而建立核醫用電腦斷層(CT)全身造影之劑量評估方法，並與核醫學學會合作，透過招開繼續教育課程加強宣導外，並討論電腦斷層衰減校正之診斷參考劑量水平以取得共識，如此才是病人之福。

關鍵詞：診斷參考劑量水平、衰減校正用途之電腦斷層、PET/CT、電腦斷層體積劑量指標、劑量長度乘積。

## Abstract

Diagnostic reference level (DRL) is one of methods to monitor and reduce medical exposure to patients. However, the radiation dose of CT-base attenuation correction in PET/CT scan is usually neglected. According to references, the maximum effective dose of whole body PET/CT scan is approximately 26 mSv. The effective dose derived from the CT component is about 20 mSv and always exceeds the effective dose from PET radiopharmaceuticals injection (6.6-7.2 mSv). The purpose of this study is on-site investigation to record CT-base attenuation correction scanning parameters and radiation dose shown on different models and manufactures in whole body PET/CT examination. CT-Expo and ImPACT software are used to calculate $CTDI_{vol}$ and dose length product (DLP), based on parameters investigation. The radiation dose is defined by quartiles according to different CT scanning parameters and compared with the results of other countries. Besides, we establish the estimation methods of radiation dose derived from CT-base attenuation correction in whole body PET/CT scan. Society of Nuclear Medicine and our team will hold education program to share our experiences and reach the consensus of DRL in PET/CT scan, leading to great blessing and benefit to patients.

Keywords: diagnostic reference level、CT-base attenuation correction、PET/CT、CTDI volume、dose length product

## I. 前言

近年來醫療輻射曝露劑量之觀念越來越被受重視，在 2009 年美國輻射防護與測量委員會( National Council on Radiation Protection, NCRP )所發佈的第 160 號報告，指出美國人民的醫療輻射集體劑量，首位為有超過 49%來自電腦斷層掃描(CT)，核醫檢查 26%佔第二位。而我國剛公布 105 年健保支付檢查的第一名也是電腦斷層掃描，第十九名為正子造影(PET/CT)，兩者都有執行電腦斷層掃描，由於我國原子能委員會在 2011 年 7 月 29 日正式將電腦斷層掃描儀納入應實施醫療曝露品保作業設備範疇，並針對放射診斷用電腦斷層掃描制定出成人頭、胸、腹，及小兒頭、腹之全國輻射曝露診斷劑量水平(diagnostic reference level, DRL)，藉此監控及降低國人之輻射醫療曝露劑量。

然而，用在核醫影像衰減校正用途之電腦斷層(CT)卻沒有被規範及注意。根據 2013 年之健保資料庫顯示正子造影每年大約有 2 萬 3 千左右的檢查人次，而且檢查人次數目隨著越來越普及的 PET/CT 儀器購置而愈趨增加。在核子醫學 PET/CT 造影系統中電腦斷層(CT)扮演三個關鍵性的角色，(1) 診斷(diagnosis)、(2) 解剖定位功能(anatomic localization)、(3) 衰減校正(attenuation correction)。其中，正確的衰減校正結果可顯現正確的放射性藥物分佈於體內狀況(radiotracer distribution)及藥物吸收數值(uptake value)的定量化分析結果，但是號稱使用低電流(low mA)之電腦斷層造影條件在國內核醫界並無統一標準或是參考條件，很可能沿用放射診斷造影條件的觀念與掃描參數，而非正確使用在光子衰減校正的用途上，致使電腦斷層掃描有很大的輻射劑量調降空間，值得我們投注更多的關切於此研究計畫上。

美國自 2010 年到 2014 年期間已經完成全國核醫電腦斷層用於全身衰減校正之診斷參考水平(DRL)，根據 4 年累積追蹤的資料，建議 75$^{th}$ 百分位數之 CTDIvol 9.8 mGy 為其診斷參考水平值，但是發現有很寬的輻射劑量範圍，2010 到 2014 年中位數(median)之 CTDIvol 範圍從 4.9mGy 到 6.2mGy，75$^{th}$ 百分位數範圍從 9.7mGy 到 10.2mGy，造成這個變動最大的 CT 操作參數中，管電流佔最大影響因素。英國也是從 2014 年開始注重核醫用電腦斷層，不僅調查了 PET/CT，也包含了 SPECT/CT 的

部分，結果如下表一所示，其正子電腦斷層掃描範圍為眼睛往下掃到大腿位置，計算出之國家診斷參考劑量水平半身衰減校正與解剖定位掃描條件之 CTDIvol 4.3 mGy，表二列出六種核醫藥物檢查，並計算其電腦斷層衰減校正與解剖定位之有效劑量，故可以知道做一次正子掃描放射藥物提供了 7.6mSv，半身電腦斷層衰減校正與解剖定位之有效劑量為 6.5 mSv，此結果告訴我們電腦斷層掃描應用在核醫做光子衰減校正與解剖定位，病患所接受到的輻射劑量不比注射核醫藥物所吸收的少，等同做一次常規電腦斷層的腹部診斷掃描，所以不得謹慎面對問題。

表一、表內為六項核醫臨床檢查時使用到電腦斷層輻射劑量，並分為國家診斷參考水平和可接受劑量兩欄

Table 3 Suggested national diagnostic reference levels and achievable doses for a limited number of examinations and clinical purpo combinations

| | | Proposed NDRL | | Achievable dose | |
|---|---|---|---|---|---|
| Examinations | Clinical purpose | $CTDI_{vol}$ (mGy) | DLP (mGy cm) | $CTDI_{vol}$ (mGy) | DLP (mGy |
| PET-CT | | | | | |
| PET half body | AC&L | 4.3 | 400 | 3.2 | 310 |
| SPECT-CT | | | | | |
| SPECT bone scan | AC&L | 4.9 | 150 | 3.3 | 115 |
| SPECT parathyroid | AC&L | 5.6 | 170 | 4.7 | 120 |
| SPECT post-thyroid ablation | AC&L | 5.9 | 310 | 4.6 | 130 |
| SPECT mIBG/octreotide | AC&L | 5.5 | 240 | 3.7 | 165 |
| SPECT cardiac | AC | 2.1 | 36 | 1.6 | 34 |

AC, attenuation correction; AC&L, attenuation correction and localization of the nuclear medicine signal; $CTDI_{vol}$, volume computed tomography dose index; DLP, d length product; NDRLs, national diagnostic reference levels; mIBG, meta-iodobenzylguanidine; SPECT-CT, single photon emission computed tomography-compu tomography.

表二、六項核醫檢查時其藥物所造成之體內有效劑量，以及使用電腦斷層之有效劑量

Table 4 Effective doses for radiopharmaceutical and computed tomography exposures for the six examinations with achievable doses presented in Table 3

| Examinations | Radiopharmaceutical | Typical administered activity (MBq) | Radiopharmaceutical effective dose (mSv) | CT effective dose (mS |
|---|---|---|---|---|
| PET-CT | | | | |
| Half body | $^{18}$F-FDG | 400 | 7.6 | 6.5 |
| SPECT-CT | | | | |
| Bone scan | $^{99m}$Tc-phosphates | 800 | 3.9 | – |
| Parathyroid | $^{99m}$Tc-sestamibi | 900 | 8.1 | 1.4 |
| Post-thyroid ablation | $^{131}$I-iodide | NA | NA | 1.5 |
| Octreotide | $^{111}$In-octreotide | 220 | 11.9 | 3.3 |
| mIBG | $^{123}$I-MIBG | 400 | 5.2 | |
| Cardiac | $^{99m}$Tc-sestamibi | 800 | 7.2 (rest)<br>6.3 (stress) | 0.9 |
| | $^{99m}$Tc-tetrofosmin | 800 | 6.4 (rest)<br>5.5 (stress) | |

Effective doses calculated according to [23] and [12].
CT, computed tomography; $^{18}$F-FDG, fluorine-18-fluorodeoxyglucose; mIBG, meta-iodobenzylguanidine; NA, not available; SPECT-CT, single photon emission compute tomography-computed tomography.

目前國內大約有 58 台 PET/CT 造影儀，根據文獻指出一次 PET/CT 全身掃描的有效劑量最高可以到達 26 mSv，而正子放射造影劑的貢獻度若以 70 公斤給予 10mCi 之 $^{18}$FDG 估算，PET(正子)造影劑的全身吸收劑量大約介於 6.6mSv 至 7.2mSv 左右，其他的輻射劑量貢獻來自於衰減校正為主之電腦斷層(CT)掃描劑量，其有效吸收劑量可以高達接近 20 mSv,如表三所示。尤其正子造影(PET/CT)目前已經被臨床視為最重要評估癌症病患治療前後的重要工具，所以病患接受除了診斷電腦斷層 CT 掃描外，也多接受到正子掃描之全身衰減校正 CT 之掃描，如此重複 CT 造影(repeated CT scan)將會造成接受多次的輻射劑量，因此我們應該慎重嚴謹的面對這項問題與挑戰才是病人之福。

表三、PET 在不同收集條件(不用 CT、高劑量品質 CT、低劑量衰減校正 CT)的有效劑量分布

| Study | Injected Activity | Effective Dose Estimate |
|---|---|---|
| PET [19, 20] | [5-15] mCi FDG Injected (185-555 MBq) | 3.5-10.5 mSv |
| Higher dose diagnostic quality CT performed with IV and oral (21) | [110-200] mAs (22)<br>CTDIvol = [8-14] mGy | 11-20 mSv |
| Lower dose CT for anatomic localization and attenuation correction (21) | [30-60] mAs (17)<br>CTDIvol = [2-4] mGy | 3-6 mSv |

For ease of comparison, all CT studies presented are performed with 120 kVp, pitch 1.375, 40 mm collimation, 900 mm scan range, average tube current-time product.

本團隊去年曾經調查國內 11 家核醫部(科)有設置 PET/CT 造影儀，8 台來自 General Electric 公司，3 台來自 Simens 公司，一共獲得 60 位病患造影資料，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，並根據其提供之儀器顯示值 CTDIvol 為 4.66±1.51 mGy，在這麼少台的 PET/CT 調查中就已經發現核醫科號稱衰減校正用電腦斷層掃描，其輻射劑量已經等同一個診斷部位的電腦斷層掃描，此結果不得不提醒我們必須經由調查全國核醫科衰減校正用之全身電腦斷層掃描之輻射劑量分布，從而建立衰減校正之診斷劑量水平值。

## II. 主要內容

本計畫預計調查全國核醫科具有正子電腦斷層掃描儀(PET/CT)設備，目前大約有 58 台，考量國內醫療曝露品保作業的推動，有必要建立常規核醫用全身電腦斷層造影條件之輻射劑量參考水平，其步驟如下:

1. 蒐集國內不同廠牌、機型之 PET/CT 全身衰減校正造影參數與劑量分布:

為了解國內核醫用衰減校正電腦斷層造影的相關參數條件，將設計一份造影參數調查表，分析國內核醫用衰減校正之電腦斷層造影條件，以及每台 PET/CT 全身掃描之十位受檢者其造影條件與輻射劑量數值，以作為建立國人診斷劑量參考水平劑量使用。其中對於問卷內容進行方式，預計將採實地訪視或是電訪正子中心專業放射人員，以確保資料之正確性。

2. 將全國 PET/CT 調查後之結果以及劑量分布數據，用以 MATLAB 軟體撰寫程式，計算出每組 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 或是 ImPACT 軟體計算衰減校正之電腦斷層體積劑量指標(CTDIvol)、劑量長度乘積(DLP)等，作出醫療輻射曝露劑量分佈圖，並將其 CT 部分之造影參數模擬研究與分析其影像品質與劑量高低之關連性，求出並最適化條件，並與國際間相比較統計分析異同點。

3. 將上述找出最適化之衰減校正電腦斷層掃描條件，透過掃描擬人化假體方式，搭配熱發光劑量計(Thermolummescent detectors, TLD)置入於擬人化假體內去量測，此法為最直接、最準確的方法之一，因此，TLD 所測得的輻射劑量值將可以探討全身掃描所獲得的電腦斷層輻射劑量值，進而提供建立全身電腦斷層衰減校正參考劑量水平之依據。

4. 與國際上相關 PET/CT 全身衰減校正輻射劑量進行比較分析，整理分析各國目前之現況，並觀察國內所使用的造影參數是否適當，從而建立核醫用 CT 全身造影之劑量評估方法，並且利用與核醫學會之合作，透過繼續教育課程加強宣導以及取得參考劑量水平共識，並將結果與本計畫收集之資料提供相關主管機關之參考。

本計畫之執行最大困難點在於需要到各醫院去實地調查，非常耗時費力的工作，故首先將與主管機關原能會索取全國 PET/CT 設備分布位置，區分出北、中、南、東的方式進行訪視，再與核醫學會合作進行調查計畫，並協助學會完成低劑量衰減校正電腦斷層之繼續教育，整理出全國目前核醫用電腦斷層設備真正在 PET/CT 的使用情況，建立診斷劑量參考水平。而 SPECT/CT 考量到儀器設備數多，單光子檢查項目多，

以及研究計劃時間太短，將不會在本次計畫內呈現。

## III. 結果與討論

首先，我們使用最直接及正確的 TLD 測量法搭配台北榮民總醫院臨床成人造影條件，將 131 顆 TLD 置入於擬人化假體(Rando phantom) 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(WT)，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 CTDIvol、DLP 及有效劑量(effective dose, ED)，即可比較兩者之結果。

TLD 量測結果顯示，未使用 AEC 技術的 ED 為 6.64 mSv (男性)、8.14 mSv (女性)，使用 AEC 技術則為 4.16 mSv (男性)、4.85 mSv (女性)，CT-EXPO 軟體所計算未使用 AEC 技術的 ED 為 7.25 mSv (男性)、8.58 mSv (女性)，使用 AEC 技術則為 3.83 mSv (男性)、4.61 mSv (女性)。證明使用 AEC 技術可以有效地降低病患所需接受的輻射劑量，另外，比較 TLD 量測法及 CT-EXPO 所獲得的 ED，經過皮爾森相關係數計算得到 r=0.911 (男性)、r=0.915 (女性)，代表兩者測量法的結果高度相關，後續我們將以 CT-EXPO 軟體進行劑量計算。

本團隊寄送問卷至全台 69 間核子醫學部(科)，共有 27 間回覆，獲得 110 位病患造影資料。各家醫院所使用的造影條件略有不同，其中 14 間醫院的 68 位(61.8%)病患因有使用 AEC 技術，我們將其納入本次研究，並代入 CT-Expo 軟體計算 $CTDI_{vol}$、DLP 和 effective dose。68 位病患中有 34 位男性、35 位女性，平均年齡為 59.57 (範圍為 20-83)歲，平均 BMI 為 24.34 (範圍為 16.27-35.43)，造影參數為 123.68 kVp (範圍為 120-140)、109.19 mA (範圍為 36.67-269.86)、0.54 秒(範圍為 0.5-0.8)、pitch 為 1.19 (範圍為 0.8-1.75)。經過軟體計算，$CTDI_{vol}$ 的平均值為 5.15 mGy、中位數為 4.5 mGy、75$^{th}$ 百分位數為 7 mGy，DLP 為 533.9 mGy· cm、中位數為 439 mGy· cm、75$^{th}$ 百分位數為 693.75 mGy· cm，美國和法國的 $CTDI_{vol}$75$^{th}$ 百分位數為 9.8 mGy 和 7.7 mGy，美國由於體型差異，需使用較高劑量的造影條件來獲得合理影響品質的影像，所以導致 $CTDI_{vol}$ 較高，法國的 $CTDI_{vol}$ 跟我們較為相近，除了東方人體型本來就較瘦小之外，多年來推動的 CT 品保以及宣導劑量與影像品質最佳化的造影參數都使得放射師們更努力的執行合理抑低原則。

我們進一步將先前研究所計算出符合台灣核醫全身電腦斷層的 k 值帶入本次研究(k factor=0.016)，即可計算出一次的 PET/CT 檢查中，CT 會造成多少的 ED，計算結果得知平均值為 8.54 mSv、中位數為 7.02 mSv、75$^{th}$ 百分位數為 11.1 mSv，PET(正子)造影劑的全身吸收劑量大約介於 6.6mSv 至 7.2mSv 左右，因可得知一次的 PET/CT 檢查大約會造成 15-20 mSv。

## IV. 結論

透過本研究可知國內核醫用電腦斷層劑量診斷參考水平 $CTDI_{vol}$ 為 7 mGy、DLP 為 693.75 mGy· cm。透過本計畫將可以提升我國學術及醫療輻射安全之國際地位，對於國人更可以直接透過本計畫之施行，有效降低及管理核醫用電腦斷層之輻射劑量。


[1] National Council on Radiation Protection and Measurements. Ionizing radiation exposure of the population of the United States. National Council on Radiation Protection report no. 160. Bethesda, Md: National Council on Radiation Protection and Measurements, 2009.

[2] Mao-Chin Hung, Yu-Yi Huang, Cheng-Yi Cheng, Li-Fan Lin, Cheng-Han Yang Nuclear Medicine Practice with National Health Insurance in Taiwan, 2000 ~ 2013, Annals of Nuclear Medicine and Molecular Imaging.2017; 30(2): p62-71

[3] Etard C, Celier D, Roch P, Aubert B. National survey of patient doses from whole-body FDG PET-CT examinations in France in 2011. Radiat Prot Dosimetry. 2012;152(4):334-8

[4] Murano T, Minamimoto R, Senda M, et al. Radiation exposure and risk-benefit analysis in cancer screening using FDG-PET: results of a Japanese nationwide survey. Ann Nucl Med. 2011;25(9):657-66

[5] Kanal KM, Butler PF, Sengupta D, et al. U.S. Diagnostic Reference Levels and Achievable Doses for 10 Adult CT Examinations. Radiology. 2017:161911

[6] Ngoneh Jallow, Paul Christian, John Sunderland, Michael Graham, John M. Hoffman, and Jonathon A. Nye, Diagnostic Reference Levels of CT Radiation Dose in Whole-Body PET/CT. J Nucl Med 2016; 57:238–241

[7] Gareth R. Iball, Natalie A. Bebbington, Maria Burniston, Sue Edyvean, Louise Fraser, Peter Julyan, Nasreen Parkar and Tim Wood, A national survey of computed tomography doses in hybrid

[8] PET-CT and SPECT-CT examinations in the UK. Nuclear Medicine Communications 2017, 38:459–470

[9] Esma A. Akin, Drew A. Torigian, Patrick M. Colletti, Don C. Yoo, Optimizing Oncologic FDG-PET/CT Scans to Decrease Radiation Exposure. Image Wisely Nuclear Medicine, 2017

[10] Brix G, Lechel U, Glatting G, et al. Radiation exposure of patients undergoing whole-body dual-modality 18F-FDG PET/CT examinations. J Nucl Med. 2005;46(4):608-13

# 輻射防護與放射醫學科技 II

# 研發 PD-L1 結合胜肽於肺癌標靶診療藥物之運用(II)
# Development of PD-L1-binding peptides for molecular imaging and targeted therapy of lung cancer

計畫編號：MOST 107-2623-E-001-001 -NU
計畫主持人：吳漢忠
e-mail：hcw0928@gate.sinica.edu.tw
執行單位：中央研究院細胞與個體生物學研究所

## 摘要

癌細胞能夠藉由免疫抑制分子的表達，活化免疫檢查點相關的路徑來逃避免疫系統的攻擊，研究指出 PD-L1 表現於多種腫瘤的細胞膜表面，其可以與 PD-1 結合而抑制 T 細胞的活化並且限制 T 細胞殺死癌細胞的能力，目前 PD-L1 是極重要的標的且成功地應用在治療上。腫瘤細胞的 PD-L1 的表現程度與病人接受針對 PD1/PD-L1 免疫療法的反應呈高度相關，然而病患的腫瘤組織檢體不易取得，以進行 PD-L1 表現量的分析，因此需要發展抗體、胜肽或是適體等標靶分子來進行專一性偵測腫瘤 PD-L1 的非侵入性醫學影像。噬菌體顯現法是強而有力的生物淘選方法，藉由親和力篩選的過程，快速地鑑定出各式目標分子所相對應的配體，如蛋白質、細胞表面受體、醣分子等。此計畫已獲得三項重要成果：(1)我們已用噬菌體顯現胜肽庫淘選出對抗 PD-L1 細胞外區域重組蛋白的新穎胜肽，且對有 PD-L1 表現的 H441 肺癌細胞株具有結合活性。(2) 為了有更佳的專一性與敏感度，因此我們進一步篩選與使用親和力成熟技術開發對抗 PD-L1 的人類抗體 PL15.1。(3) 我們以此為基礎與核研所共同合作，藉由放射性同位素標定 PL15.1 抗體結合發展成 PD-L1 標靶照影試劑，應用於小鼠腫瘤 nanoSPET/CT 醫學照影，以及在異體移植人類腫瘤的小鼠上進行生物分布的研究。以上結果將有助於臨床上偵測肺癌細胞 PD-L1 表現以及醫學影像，所獲得之成果也可增進了解 PD-L1 標靶診療藥之設計。

關鍵詞：肺癌，噬菌體顯現法，標的胜肽，人類抗體，醫學影像， PD-L1

## Abstract

Cancer cells escape the immune system through expression of immunosuppressive molecule to activate immune checkpoint pathway of immune cells. Programmed death ligand-1 (PD-L1) has been reported to express on the cell surface of multiple tumor types, which interacts with PD-1 to inhibit T cell activity and cancer killing ability. Currently, PD-L1 has been a crucial target and successfully applied in clinical cancer therapy. The expression level of PD-L1 in tumors highly correlates with response to PD1/PD-L1 immune checkpoint therapy. However, the tumor tissue samples from patients might not always be available to analyze PD-L1 expression for guide therapy. Thus development of targeting molecules, such as antibodies, peptides and aptamers, for specific and non-invasive imaging to PD-L1 in tumors is necessary. Phage display technology is a powerful tool that allows rapid identification of ligands for various target molecules such as proteins, cell-surface receptors and carbohydrates through an affinity selection process called biopanning. In this project, we have achieved three important results: (1) we have identified two novel targeting peptides that specific bound to PD-L1-Fc protein and PD-L1-expressing H441 lung cancer cells. (2) To enhance the specificity and sensitivity of targeting moieties to PD-L1, we further identified and affinity-maturated a novel human antibody, PL15.1, against PD-L1. (3) We further investigated the application of radioisotope-labeled PL15.1 hAb for tumor molecular imaging by nanoPET/CT in animal models through collaboration with Institute of Nuclear Energy Research (INER). Furthermore, we evaluated biodistribution of the radiolabeling PL15.1 hAb in mice bearing xenografted human tumors. Our results demonstrated that the specific radiolabeling PD-L1-targeting antibody have a strong clinical potential for cancer molecular imaging and detection of PD-L1-expressing tumor. These data will give insights into the design of PD-L1-targeting drug for lung cancer theranostics.

Keywords: lung cancer, phage display, targeting peptides, human antibodies, molecular imaging, PD-L1

## I. 前言

The immunoregulatory receptor programmed cell death 1 (PD-1) and the corresponding B7 family of ligands is a pivotal mechanism of tumor immune tolerance and escape in cancer. PD-1 is a member of the B7-CD28 family that co-regulates T-cell receptors and contributes inhibitory signals to mediate physiological immune escape and tolerance. PD-1 is expressed in various immune cell types and its activation attenuates T-cell function, survival, and expansion. Programmed death-ligand 1 (PD-L1) is a transmembrane protein that has been shown to be expressed in different tumor cells, and play an important role in suppressing the immune function in diseases like cancer. Expression of PD-L1 by tumor cells is believed to mediate the inhibition of local immune responses, thus shielding the tumor from T-cell mediated killing.

PD-L1 is a transmembrane protein that has been reported to be expressed in different tumor cells. PD-L1-expressing tumor cells provide the inhibitory signals through interaction of PD1/PD-L1 enable these tumor cells to evade immune detection and destruction by NK cells or T cells. PD-L1 is a central role to mediate the inhibition of local immune responses in tumor environment, thus be an important target for exploiting anti-cancer drugs (Sharma and Allison, 2015).

Upregulated expression level of PD-L1 has been found in many different cancer types, including melanoma, NSCLC, and multiple myeloma. High levels of PD-L1 expression have been associated to poor prognosis of cancer patients (Ma et al., 2016). Until now, immunohistochemistry of tumor specimens with anti-PD-L1 antibodies is the most commonly used as a biomarker to guide therapy for patients (Kerr et al., 2015). The anti-PD-L1 rabbit monoclonal antibody 22C3 (Dako) used in IHC is the only US FDA-approved companion diagnostic for selecting NSCLC patients for pembrolizumab. However, the surgical tumor specimen from patients might not always easily be obtained for IHC staining. Thus development of non-invasive imaging for PD-L1-expressing tumor in vivo by PD-L1-specific targeting molecules, such as antibodies, peptides and aptamers, will be potential to improve the PD-L1 diagnosis.

For diagnostic imaging, appropriate signal intensity from an area of interest is required to clearly discriminate between certain structures and surrounding tissues. A wide variety of imaging modalities have been employed. One well-known modality is magnetic resonance imaging (MRI), a technique based on the transition between different energy levels of atomic nuclei in a strong magnetic field by a radio frequency pulse. Many researches seeking to improve MRI signaling have focused on contrast reagents such as Gadolinium (Gd)-based agents. A second modality is nuclear imaging, such as positron emission tomography (PET), which makes use of positron-emitting radioisotope materials like $^{18}$F, $^{11}$C, and $^{64}$Cu. A third mode is single photon emission computed tomography (SPECT), another type of nuclear imaging which uses $\gamma$ ray-emitting radiation like $^{111}$In, $^{123}$I, and $^{99}$mTc combining the operation of computers to obtain cross-images of the body and three-dimensional images of interesting areas. The main advantages of PET and SPECT are their high sensitivity and resolution (McCarthy et al., 2010; Torchilin, 2005).

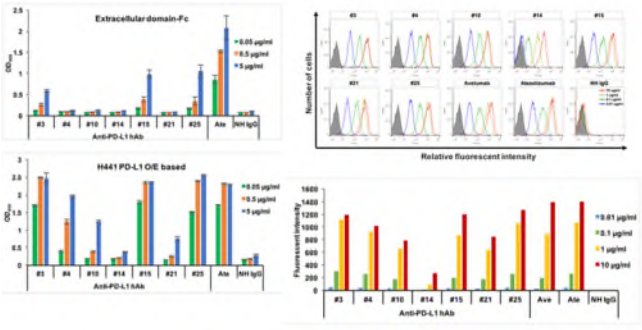
Atezolizumab is a humanized monoclonal IgG1 antibody with high affinity for both human and mouse PD-L1, with dissociation constants (Kd) of 0.43 nM and 0.13 nM, respectively, which was approved by US FDA to treat NSCLC in 2016 (Ma et al., 2016). The imaging agents using radioisotope [$^{111}$In] and near-infrared (NIR) dye-conjugated atezolizumab was reported to employ in SPECT and optical imaging for human breast cancer in the mice models (Chatterjee et al., 2016). Radiolabeling [$^{111}$In] of anti-PD-L1 murine antibodies was studied for SPECT/CT imaging and biodistribution in the mouse models of breast cancer (Heskamp et al., 2015; Josefsson et al., 2016). Additionally, high-affinity PD-1 was engineered and radiolabeled with 64Cu－DOTA－HAC and applied as a Micro-PET imaging tracer to efficiently distinguish between PD-L1-positive and PD-L1-negative tumors in living mice (Maute et al., 2015). AUNP-12 (AUR-12/Aurigene-012), a 29-mer peptide derived from human and murine PD-1 sequences, targets the PD-1/PD-L1 immune checkpoint pathway for cancer immunotherapy and is currently in a preclinical study (Zhan et al., 2016). However, to date, no study has explored the use of PD-L1-specific peptides for tumor imaging in animal models.

Phage display technology is a powerful tool that allows rapid identification of ligands for various target molecules such as proteins, cell-surface receptors and small compounds through a selection process called biopanning. We have successfully developed this method and used it to identify peptide ligands specifically targeting tumor cells (Lee et al., 2004; Wu et al., US patent 2007; Lee et al., 2007; Lo et al., 2008; Chang et al., 2009b; Lu et al., 2013; Wu et al., 2015; Yeh et al., 2016; Chi et al., 2017) or tumor vessels (Lee et al., 2007; Chang et al., 2009a; Wu et al., US patent 2012). Strategies for biopanning cells in vitro (Lo et al., 2008; Lu et al., 2011) or tissues in vivo (Lee et al., 2007; Wu et al., US patent 2012) with phage libraries have been reported to yield phages with organ- or tumor-binding specificity. Therefore, screening phage display libraries against specific binding PD-L1 would be a direct and efficient method of identifying novel peptides and antibodies for the development of targeting drug delivery and targeting imaging.

## II. 研究成果

To identify PD-L1-bound scFvs, we used a phage-displayed human naïve scFv library to isolate phages that bind to the recombinant protein of human PD-L1 extracellular domain. We identified twenty distinct phage clones that bind highly to PD-L1-Fc, but not to control Fc protein. We then used flow cytometry assay of PD-L1-expressing 293 cells to confirm that cellular binding ability of phage-scFvs. Of these PD-L1-cell-binding phages, we molecularly engineered the coding sequences of seven scFv clones into a human IgG1 backbone and generate anti-PD-L1 fully human antibody (hAb). Interestingly, we found that PL15 and PL25 binding to PD-L1-expressing H441 are comparative to both US FDA-approval anti-PD-L1 antibodies atezolizumab and avelumab **(Figure 1)**.

**Figure 1. Detection of the binding ability of anti-PD-L1 hAbs to PD-L1.** (A) ELISA was represented with PD-L1 extracellular domain-Fc protein based or H441 PD-L1 O/E cell based 96-well plates, and incubated with different concentration of anti-PD-L1 antibodies. (B) H441 PD-L1 O/E cells were incubated with various concentration NHIgG and anti-PD-L1 antibodies, followed by detecting with PE-conjugated anti-human IgG antibody. Ave, avelumab. Ate, atezolizumab.




To further determine whether the anti-PD-L1 hAbs can block PD-1 binding to PD-L1, we performed a plate-based competition binding assay in which increasing concentrations of hAbs competed with PD-1 for binding to the immobilized PD-L1 **(Figure 2)**. Both human antibodies, PL15 and PL25, stronger suppressed the interaction of PD-1 with PD-L1, compared to atezolizumab and avelumab. Due to PL15 exhibited the strongest inhibition activity, we chose PL15 to further mature affinity **(Figure 3)**. We used

homologous modeling methodology to assist the antibody design engineering. The five scFvs were created by mutagenesis in VH-CDR residues of PL15, which were designated 15.1 to 15.5. Comparison binding assay using ELISA was shown that engineer PL15.1 bound PD-L1 better than wildtype PL15 and other clones.

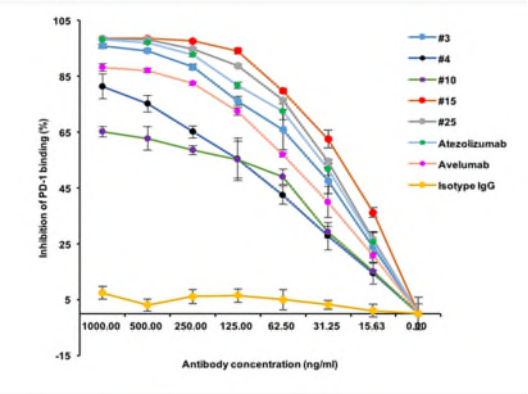



**Figure 2. Anti-PD-L1 hAb clone 15 (PL15) shows the best competitiveness with binding of PD-1 to PD-L1.** 96-well plates coated with PD-L1 extracellular domain-Fc (1 μg/ml) were incubated with varying concentration of anti-PD-L1 hAbs and isotype IgG which were mixed with PD-1-Fc (125 ng/ml), followed by incubated with anti-PD-1 (0.2 μg/ml) the result was detected by ELISA.

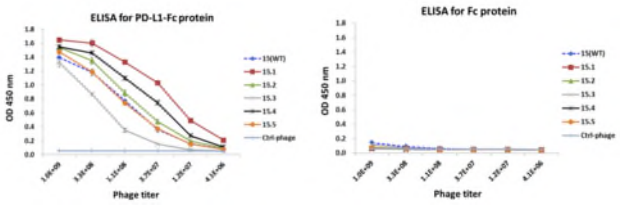
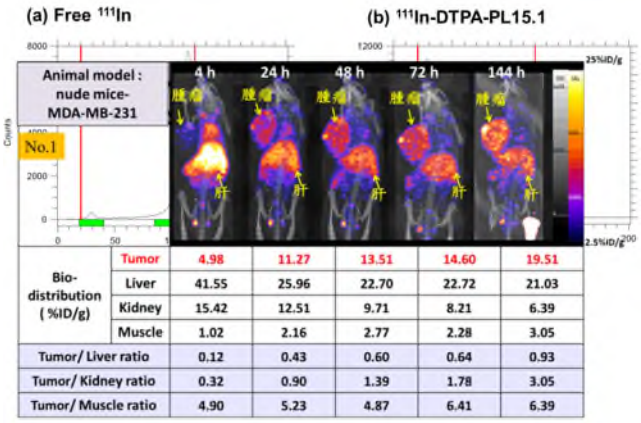



**Figure 3. Affinity maturation for anti-PD-L1 hAb PL15.** To improve the binding activity of PD-L1-15 human antibody, we used homologous modeling to assist the antibody design. The five scFvs were created by mutagenesis in VH-CDR residues of PD-L1-15, which were designated 15.1 to 15.5. (A and B) Comparison of binding activity of engineered the new five scFv phage clones with PD-L1-15 (wild type) scFv phage clone using ELISA. PD-L1-Fc proteins (1 μg/ml) or control Fc protein were coated to MaxiSorp 96 well plates. Control phages (Ctrl-phage) were used as a negative control.

As PL15.1 was demonstrated to exhibit the greatest binding and antagonizing activity of the examined antibodies, we used PL15.1 as anti-PD-L1 hAb imaging reagent by radiolabeling of $^{111}$In-DTPA. 55 g of DTPA-conjugated PL15.1 was mixed with $^{111}$InCl3 and 0.1 M NaOAc Buffer at 37 °C for 30 min. The radiolabeling efficiency was analyzed by using radio-TLC system **(Figure 4)**. Final product was generated: $^{111}$In-DTPA-PL15.1 (1.17 mCi/55 g/ 200 L). The NanoSPECT/CT imaging was performed using MDA-MB-231 subcutaneous tumor mouse models **(Figure 5)**. Biodistribution of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 was also analyzed at 4, 24, 48, 72 and 144 hours after administration.

**Figure 4. Radiolabeling of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 (anti-PD-L1 hAb).** DTPA-PDL1 55 μg was mixed with $^{111}InCl_3$ and 0.1 M NaOAc Buffer at 37°C for 30 min. The radiolabeling efficiency was analyzed by using radio-TLC system. Final product generation: $^{111}$In-DTPA-PL15 PDL1 1.17 mCi/55 μg/ 200 μL.




| | | 4 h | 24 h | 48 h | 72 h | 144 h |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bio-distribution (%ID/g) | Tumor | 4.98 | 11.27 | 13.51 | 14.60 | 19.51 |
| | Liver | 41.55 | 25.96 | 22.70 | 22.72 | 21.03 |
| | Kidney | 15.42 | 12.51 | 9.71 | 8.21 | 6.39 |
| | Muscle | 1.02 | 2.16 | 2.77 | 2.28 | 3.05 |
| Tumor/ Liver ratio | | 0.12 | 0.43 | 0.60 | 0.64 | 0.93 |
| Tumor/ Kidney ratio | | 0.32 | 0.90 | 1.39 | 1.78 | 3.05 |
| Tumor/ Muscle ratio | | 4.90 | 5.23 | 4.87 | 6.41 | 6.39 |

**Figure 5. NanoSPECT/CT imaging of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 in MDA-MB-231 solid tumor.** DTPA-PL15.1 was marked $^{111}$In radioisotope and then the NanoSPECT/CT imaging was performed using MDA-MB-231 subcutaneous tumor mouse model. Biodistribution of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 was analyzed at 4, 24, 48, 72 and 144 hours after administration. At 4 hours after administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1, the tumor imaging was begun to be observed, and the drug accumulation increased with time after 24 hours. However, the tumor may be necrotic due to the larger tumor. Except for tumors, the drug also distributed to the kidney and liver. The accumulation of drugs in the liver decreases with time.

At 4 hours after administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1, the tumor imaging was begun to be observed, and the drug accumulation increased with time after 24 hours. However, the tumor may be necrotic due to the larger tumor. Except for tumors, the drug also distributed to the spleen and liver. The accumulation of drugs in the liver decreases with time. Furthermore, biodistribution and Tumor/Non-Tumor ratio of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 were analyzed **(Figure 6)**. The amount of accumulation in the tumor area at 4 hours post-administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 is 4.90% ID/g. Drug accumulation then increased over time, reaching a maximum of 19.51% ID/g at 144 hours. The accumulation of drugs in the liver and kidneys decreases with time.

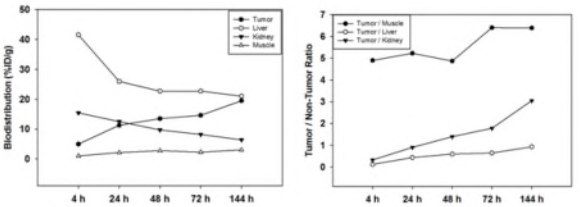
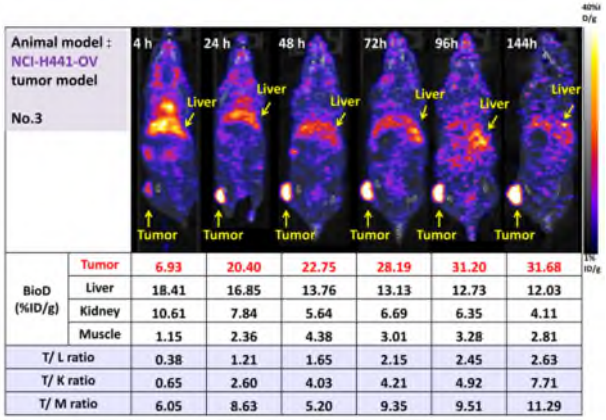



**Figure 6. Biodistribution and Tumor / Non-Tumor ratio of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 NanoSPECT/CT imaging.** The amount of accumulation in the tumor area at 4 hours post-administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 is 4.90% ID/g. Drug accumulation then increased over time, reaching a maximum of 19.51% ID/g at 144 hours. The accumulation of drugs in the liver and kidneys decreases with time.

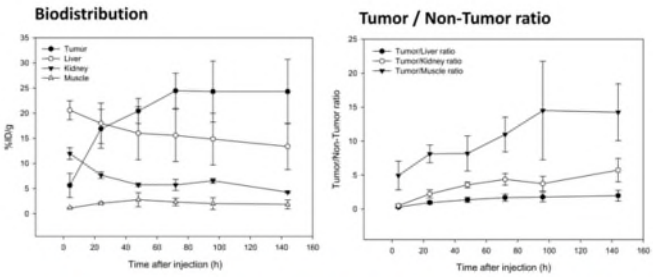
Furthermore, we analyze the NanoSPECT/CT imaging of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 in human lung cancer H441 xenografted tumor models **(Figure 7)**. At 4 hours after administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1, the tumor imaging was begun to be observed, and the drug accumulation increased in tumor with time after 24 hours. Drug accumulation then increased over time, reaching a maximum of 24.5% ID/g at 72-144 hours. Quantification of $^{111}$In-

DTPA-PL15.1 biodistribution and Tumor/Non-tumor ratio was shown in **Figure 8**.




| BioD (%ID/g) | 4 h | 24 h | 48 h | 72h | 96h | 144h |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tumor | 6.93 | 20.40 | 22.75 | 28.19 | 31.20 | 31.68 |
| Liver | 18.41 | 16.85 | 13.76 | 13.13 | 12.73 | 12.03 |
| Kidney | 10.61 | 7.84 | 5.64 | 6.69 | 6.35 | 4.11 |
| Muscle | 1.15 | 2.36 | 4.38 | 3.01 | 3.28 | 2.81 |
| T/ L ratio | 0.38 | 1.21 | 1.65 | 2.15 | 2.45 | 2.63 |
| T/ K ratio | 0.65 | 2.60 | 4.03 | 4.21 | 4.92 | 7.71 |
| T/ M ratio | 6.05 | 8.63 | 5.20 | 9.35 | 9.51 | 11.29 |

**Figure 7. NanoSPECT/CT imaging of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 in human lung cancer NCI-H441 xenografted models.** Biodistribution of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 was analyzed at 4, 24, 48, 72, 96 and 144 hours after administration (n=3). At 4 hours after administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1, the tumor imaging was begun to be observed, and the drug accumulation in tumor increased with time after 24 hours. The accumulation of drugs in the liver and kidney decreases with time.




| Time (h) | 4 | 24 | 48 | 72 | 96 | 144 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T/ L ratio | 0.3 | 1.0 | 1.4 | 1.7 | 1.8 | 2.0 |
| T/ K ratio | 0.5 | 2.2 | 3.6 | 4.4 | 3.7 | 5.7 |
| T/ M ratio | 4.9 | 8.1 | 8.2 | 11.0 | 14.5 | 14.3 |

**Figure 8. Biodistribution and Tumor/Non-Tumor ratio of $^{111}$In-DTPA-PL15.1.** The amount of accumulation in the tumor area at 4 hours post-administration of $^{111}$In-DTPA-PL15.1 is 5.64% ID/g. Drug accumulation then increased over time, reaching a maximum of 24.5% ID/g at 144 hours. The accumulation of drugs in the liver and kidneys decreases with time.

## IV. 結論

Taken together, the above results demonstrate that the PL15.1 human antibody has the best binding activity to PD-L1 and exhibits an excellent antagonistic effect of PD-L1 binding to PD-1. Based on this, we cooperated with Institute of Nuclear Energy Research (INER) to further conjugate PL15.1 human antibodies by radioisotopes, and developed a targeting imaging reagent for the NanoSPET/CT in mice and biodistribution analysis of drugs. We will plan to develop PD-L1-targeting nuclear medicines in the future, which can assist improve the unmet medical needs of current immune checkpoints therapy.

## 參考文獻

[1] Allen, T. M., and Cullis, P. R. (2004) Drug delivery systems: entering the mainstream. Science 303, 1818-1822.

[2] Butte, M.J., Keir, M.E., Phamduy, T.B., Sharpe, A.H., and Freeman, G.J. (2007). Programmed death-1 ligand 1 interacts specifically with the B7-1 costimulatory molecule to inhibit T cell responses. Immunity 27, 111-122.

[3] Chang, D. K., Lin, C. T., Wu, C. H. and Wu, H. C. (2009a) A novel peptide enhances therapeutic efficacy of liposomal cancer drugs in xenograft models of lung cancer. PLoS ONE 4, e4171.

[4] Chang, D. K., Chiu, C. Y., Kuo, S. Y., Lin, W. C., Lo, A., Wang, Y. P., Li, P. C. and Wu, H. C. (2009b) Peptide-mediated anti-angiogenic drug delivery systems increase therapeutic efficacy of solid tumors. Journal of Biological Chemistry 284, 12905-12916.

[5] Chang, D. K., Li, P. C., Lu, R. M., Jane, W. N., and Wu, H. C. (2013) Peptide-mediated liposomal doxorubicin enhances drug delivery efficiency and therapeutic efficacy in animal models. PLOS ONE 8, e83239.

[6] Chatterjee, S., Lesniak, W.G., Gabrielson, M., Lisok, A., Wharram, B., Sysa-Shah, P., Azad, B.B., Pomper, M.G., and Nimmagadda, S. (2016). A humanized antibody for imaging immune checkpoint ligand PD-L1 expression in tumors. Oncotarget 7, 10215-10227.

[7] Chi, Y. H., Hsiao, J. K., Lin, M. H., Chang, C., Lan, C. H., Wu, H. C. (2017) Lung Cancer-Targeting Peptides with Multi-subtype Indication for Combinational Drug Delivery and Molecular Imaging. Theranostics. 7, 1612-1632

[8] Harrington, K.J., Mohammadtaghi, S., Uster, P.S., Glass, D., Peters, A.M., Vile, R.G., and Stewart, J.S.W. (2001). Effective Targeting of Solid Tumors in Patients with Locally Advanced Cancers by Radiolabeled Pegylated Liposomes. Clinical Cancer Research 7, 243-254.

[9] Heskamp, S., Hobo, W., Molkenboer-Kuenen, J.D.M., Olive, D., Oyen, W.J.G., Dolstra, H., and Boerman, O.C. (2015). Noninvasive Imaging of Tumor PD-L1 Expression Using Radiolabeled Anti‐PD-L1 Antibodies. Cancer Research 75, 2928-2936.

[10] Hu, W., and Kavanagh, J. J. (2003) Anticancer therapy targeting the apoptotic pathway. Lancet Oncol 4, 721-729.

[11] Iwai, Y., Ishida, M., Tanaka, Y., Okazaki, T., Honjo, T., and Minato, N. (2002). Involvement of PD-L1 on tumor cells in the escape from host immune system and tumor immunotherapy by PD-L1 blockade. Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 12293-12297.

[12] Josefsson, A., Nedrow, J.R., Park, S., Banerjee, S.R., Rittenbach, A., Jammes, F., Tsui, B., and Sgouros, G. (2016). Imaging, Biodistribution, and Dosimetry of Radionuclide-Labeled PD-L1 Antibody in an Immunocompetent Mouse Model of Breast Cancer. Cancer Research 76, 472-479.

[13] Keir, M.E., Butte, M.J., Freeman, G.J., and Sharpe, A.H. (2008). PD-1 and its ligands in tolerance and immunity. Annu Rev Immunol 26, 677-704.

[14] Kerr, K.M., Tsao, M.-S., Nicholson, A.G., Yatabe, Y., Wistuba, I.I., Hirsch, F.R., and Committee, I.P. (2015). Programmed death-ligand 1 immunohistochemistry in

lung cancer: in what state is this art? Journal of Thoracic Oncology 10, 985-989.

[15] Ma, W., Gilligan, B.M., Yuan, J., and Li, T. (2016). Current status and perspectives in translational biomarker research for PD-1/PD-L1 immune checkpoint blockade therapy. Journal of Hematology & Oncology 9, 1-21.

[16] Maute, R.L., Gordon, S.R., Mayer, A.T., McCracken, M.N., Natarajan, A., Ring, N.G., Kimura, R., Tsai, J.M., Manglik, A., Kruse, A.C., et al. (2015). Engineering high-affinity PD-1 variants for optimized immunotherapy and immuno-PET imaging. Proceedings of the National Academy of Sciences 112, E6506-E6514.

[17] Laginha, K. M., Verwoert, S., Charrois, G. J., and Allen, T. M. (2005) Determination of doxorubicin levels in whole tumor and tumor nuclei in murine breast cancer tumors. Clin Cancer Res 11, 6944-6949.

[18] Lee, T. Y., Wu, H. C., Tseng, Y. L., and Lin, C. T. (2004) A novel peptide specifically binding to nasopharyngeal carcinoma for targeted drug delivery. Cancer Research 64, 8002-8008. (SCI)

[19] Lee, T. Y., Lin, C. T., Kuo, S. Y., Chang D. K. and Wu, H. C. (2007) Peptide-mediated targeting to tumor blood vessels of lung cancer for drug delivery. Cancer Research 67, 10958-10965.

[20] Lo, A., Lin, C. T., and Wu, H. C. (2008) Hepatocellular carcinoma cell-specific peptide ligand for targeted drug delivery. Molecular Cancer Therapeutics 7, 579-589.

[21] Lu, T. Y., Lu, R. M., Liao, M. Y., Yu, J., Chung, C. H., Kao, C. F. and Wu, H. C. (2010) Epithelial cell adhesion molecule regulation is associated with the maintenance of undifferentiation of human embryonic stem cells. Journal of Biological Chemistry 285, 8719-8732.

[22] Lu, R. M., Chang, Y. L., Chen, M. S. and Wu, H. C. (2011) Single chain anti-c-Met antibody conjugated nanoparticles for in vivo tumor targeted imaging and drug delivery. Biomaterials 32, 3265-3274.

[23] Lu, R. M., Chen M. C., Chang, D. K., Chiu, C. Y., Lin, W. C., Yan, S. L., Wang, Y. P., Kuo, Y. S., Yeh. C. Y., Lo, A., and Wu, H. C. (2013) Targeted drug delivery systems mediated by a novel peptide in breast cancer therapy and imaging. PLoS ONE 8, e66128.

[24] McCarthy, J.R., Bhaumik, J., Karver, M.R., Sibel Erdem, S., and Weissleder, R. (2010). Targeted nanoagents for the detection of cancers. Mol Oncol 4, 511-528

[25] Phillips, W.T., Bao, A., and Goins, B. (2009). Nanoliposomes for Cancer Imaging and Therapy: Labeling Methods and Potential Applications. In, pp. 239-246.

[26] Sharma, P., and Allison, J.P. (2015). Immune checkpoint targeting in cancer therapy: toward combination strategies with curative potential. Cell 161, 205-214

[27] Torchilin, V.P. (2005). Recent advances with liposomes as pharmaceutical carriers. Nat Rev Drug Discov 4, 145-160

[28] Wu, C. H., Kuo, Y. H., Hong, R. L., Wu, H. C. (2015). $\alpha$-Enolase-Binding Peptide Enhances Drug Delivery Efficiency and Therapeutic Efficacy Against Colorectal Cancer. Science Translational Medicine. 7, 1-14.

[29] Wu, H. C., Lin, C. T. and Lee, T. Y. (2007) A peptide marker targeting to nasopharyngeal carcinoma cell and application thereof. US 7,238,665 (USA), Jul 03, 2007 ~ Mar 08, 2024.

[30] Wu, H. C. and Chang, D. K. (2010). Peptide-mediated liposomal drug delivery system targeting tumor blood vessels in anticancer therapy. Journal of Oncology 2010:723798.

[31] Wu, H. C. Chi, Y. H. and Wu C. H (2011). Targeting Liposomes for Drug Delivery in Cancer Therapy. Book title "Lipid Nanocarriers in Cancer Diagnosis and Therapy", in Chapter 5, published by iSmithers, UK.

[32] Wu, H. C., Lin, C. T., Lee, T. Y., and Kuo, S. Y. (2012) Peptide-conjugates that bind to VEGF-stimulated or tumor vasculature and methods of treatment. US Patent # 8,088,887 (USA), Jan 03, 2012 ~ April 13, 2027.

[33] Yeh, C. Y., Hsiao, J. K., Wang, Y. P., Lan, C. H., Wu, H. C. (2016). Peptide-conjugated nanoparticles for targeted imaging and therapy of prostate cancer. Biomaterials, 99, 1-15.

[34] Zhan, M.-M., Hu, X.-Q., Liu, X.-X., Ruan, B.-F., Xu, J., and Liao, C. (2016). From monoclonal antibodies to small molecules: the development of inhibitors targeting the PD-1/PD-L1 pathway. Drug Discovery Today 21, 1027-1036

# 氟-18 FEONM 之合成與評估-TAU 蛋白新型造影劑之研究

計畫編號：MOST 107-2623-E-016 -002 -NU
計畫主持人：馬國興
e-mail：kuohsing91@yahoo.com.tw
執行單位：國防醫學院 (生物及解剖學研究所)

## 摘要

微管相關蛋白質-Tau 蛋白質異常與過度磷酸化後，會產生如成對螺旋形細絲與神經纖維化糾結，此結構常見於阿茲海默症，因病症初期症狀不明顯故難以及早診斷，[18F]FEONM 為[18F]FDDNP 經結構改良後衍生之新型正子藥物，輔以正子造影技術，能偵測腦中 Tau 蛋白之變化，本研究利用基因轉殖阿茲海默症小鼠 (P301S) 進行小動物正子造影，發現 P301S 小鼠其大腦中 [18F]FEONM 於海馬迴之攝取量明顯高於正常小鼠，於免疫組織化學染色中亦顯示相同結果，顯示 [18F]FEONM 於偵測過度磷酸化 Tau 蛋白之潛力，未來或可將其應用於臨床，提升阿茲海默症早期偵測之可能性。

關鍵詞：Tau 蛋白質，阿茲海默症，正子造影。

## Abstract

Hyperphosphorylation and abnormal aggregation of tau protein is a major contributing factor in Alzheimer's disease, labelled as tauopathies. Aggregation of hyperphosphorylated tau into paired helical filaments (PHFs), subsequently, into neurofibrillary tangles (NFTs) is a progressively process, no obvious clinical symptom in the early onset of neurodegenerative diseases and is difficult to diagnosis. [18F]FEONM, an analogue of [18F]FDDNP with structural modification, expected to improve lipophilicity and specificity using PET to detect abnormal tau aggregation in brain. In this study, we validate [18F]FEONM applicability as tau protein imaging agent in a transgene mice (P301S) model using animal micro positron tomography (PET). Higher uptake of tracer in hippocampus was shown in P301S mice compared with wildtype mice. Immunohistochemistry stain also demonstrates similar result in hippocampus. [18F]FEONM maybe a potent PET tracer for detecting abnormal phosphorylated tau protein in brain, further comparisons with different tau protein tracers are needed to evaluate its potency.

Keywords: Tau protein, Alzheimer's disease, PET, [18F]FEONM.

## I. 前言

阿茲海默症病患腦部神經病理特徵主要為 neurofibrillary tangles (NFTs) 與乙型類澱粉斑塊(beta-amyloid plaque) 之沉積，其中 tau 蛋白在腦部沉積分布的位置及沉積量之多寡已被證實與某些疾病之臨床症狀的發生及嚴重程度具有相關聯性，近年來許多研究致力於開發針對異常 tau 蛋白質具良好選擇性與高度親和力之正子造影藥物，搭配正子斷層造影，期許能於活體偵測腦部異常 tau 蛋白質沉積與分佈位置之資訊，藉以提供臨床早期診斷神經退化疾病有力的輔助診斷依據，本研究以[18F]FDDNP 為主結構，參照文獻開發其類似結構之衍生物[18F]FEONM，期許能改善原正子造影劑親和力不佳之缺點，並以模擬家族性阿茲海默症(familial AD)之基因轉殖鼠動物模式，驗證[18F]FEONM 於生物體內之藥物特性。

## II. 主要內容

本年度實驗以基因轉殖小鼠 P301S 作為評估之平台，將以微正子電腦斷層造影搭配[18F]FEONM 與免疫組織化學染色等方式，觀察基因轉殖小鼠與正常對照小鼠於不同年齡時，其腦部攝取[18F]FEONM 之差異，經由分析影像結果與免疫染色分析結果，評估[18F]FEONM 於家族性遺傳阿茲海默症動物模式偵測異常 tau 蛋白質之靈敏度。

## III. 結果與討論

基因轉殖小鼠與對照組小鼠於不同年齡以尾靜脈注射核醫藥物 [18F]FEONM 並進行 60 分鐘的連續動態小動物正子斷層造影後，於出生後五個月之兩組小鼠中，其大腦之[18F]FEONM 並無顯著差異；九個月大之 P301S 基因轉殖小鼠，其專一性攝取率 (specific uptake ratios: SURs)於注射 [18F]FEONM 八分鐘後達到最高，而後以嗅球作為參考區域 (reference region)計算不同腦區之 SURs，發現 P301S 基因轉殖鼠之海馬迴、大腦皮質與腦幹之[18F]FEONM 攝取量於高於對照組小鼠；出生後 12 個月之小鼠與 9 個月之小鼠有相同結果，於造影圖亦可見與分析結果相符之造影影像；而後利用免疫組織化學染色觀察在大鼠腦中 ser396 過度磷酸化之 Tau 蛋白質是否異常堆積於[18F]FEONM 攝取量較高之區域，由免疫組織化學染色結果可見基因轉殖小鼠大腦海馬迴、皮質與腦幹中 ser396 過度磷酸化之 Tau 蛋白質明顯高於對照組小鼠，此結果與造影結果相互呼應。

## IV. 結論

本實驗室研究團隊所合成 Tau 蛋白質正子示蹤劑[18F]FEONM，可於基因轉殖小鼠腦中成功偵測是否有 Tau 蛋白質過度堆積之情形，且免疫染色結果亦能與造影結果相互呼應，此一平台可於未來進行臨床前藥物與治療方式篩選，利用[18F]FEONM 結合小動物正子造影，於不同種類之阿茲海默症動物模式中以非侵入性方式

進一步研究治療效果與結果追蹤，並期能更進一步逐漸發展至臨床運用，於早期成功偵測是否罹患阿茲海默症與後續用藥效益。

# 以肺轉移小鼠模式研究銪-188 微脂體合併免疫檢查點療法對腫瘤微環境之調控機制

計畫編號：107-2623-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

腫瘤細胞為了躲避免疫系統攻擊，發展出抑制性免疫的腫瘤微環境。近年來免疫檢查哨抑制劑的發展，開啟了反轉抑制性腫瘤微環境的可能。本研究期望探討在免疫檢查哨抑制劑的幫助下，能否增加奈米微脂體核醫藥物對轉移性腫瘤的療效。奈米微脂體是一種能有效運送臨床藥物的載體，可增加藥物在血液中以及腫瘤處停滯期，同時降低藥物產生成之副作用。奈米微脂體包覆放射性核種(如 rhenium-188, Re188)，利用 Re188 同時發射出 beta 粒子與 gamma 射線特性，可提供臨床治療與影像觀察的雙重功能。本研究利用穩定表現冷光基因之大腸直腸癌細胞，以尾靜脈注射方式建立肺轉移小鼠模式，定期追蹤冷光表現表示肺轉移腫瘤生長速度，並紀錄小鼠存活率、生物安全性、腫瘤微環境以評估合併療法的可行性。

研究結果顯示，Re188 微脂體單一治療造成小鼠體內白血球數低下至少一週，但同時增加了巨噬細胞和嗜中性細胞的比例。利用 liposomal-clodronate 抑制巨噬細胞後，Re188 微脂體針對肺轉移小鼠呈現更好的腫瘤控制效果，不管是單次或雙次治療方式均有效。生物分佈分析也證明抑制巨噬細胞後，Re188 微脂體在小鼠肺部堆積量增加兩倍。此外，Re188 微脂體單一治療可增加免疫細胞上 PD-L1 的表現，合併 Re188 微脂體與 PD-L1 抗體後，Re188 微脂體針對肺轉移小鼠也呈現更佳腫瘤抑制效果。上述結果顯示，腫瘤相關的巨噬細胞增加以及高表現 PD-L1，提供腫瘤細胞發展出抑制性腫瘤微環境，再次活化免疫微環境可達到更好的腫瘤治療效果，提供未來發展免疫治療合併其他現有療法之治療策略。

關鍵詞：銪-188 微脂體、肺轉移、腫瘤微環境、免疫檢查哨抑制劑

## Abstract

Cancer cells have evolved various means of evading or subverting host defense by creating an immune suppressive tumor microenvironment. Recently, the accelerated development of immune checkpoint inhibitors (ICI) brings a hope for clinical therapies, for their potential of reversing T cell exhaustion and restoring anti-tumor immunity. Our study aims to evaluate the therapeutic efficacy of nanomedicine after the combination of ICI therapy in lung metastasis mouse model. 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 (rhenium-188, Re188) possess both therapeutic (beta particle) and imaging (gamma ray) functions. We established lung metastatic mouse model by intravenous injection of colon cancer cells stably expressing luciferase gene. To evaluate the application value of combination therapy, cumulative survival, biological safeties, and tumor microenvironment were further analyzed.

Our data showed Re188-liposome treatment resulted in the inhibition of white blood cells at least for one week; however, macrophages and neutrophils were increased by Re188-liposome exposure. After macrophage depletion by liposomal clodronate, Re188-liposome presented better tumor control, either one time or two times

administration. Bio-distribution analysis also showed two-fold accumulation of Re188-liposome at tumor site in lung metastatic mouse model. Besides, Re188-liposome increased the expression of PD-L1 on immune cells. After combination of Re188-liposome and PD-L1 inhibitors, prolonged overall survival was observed. These data indicated tumor-associated macrophages and higher level of PD-L1 provided immune suppressive tumor microenvironment. Recovering immune defense function achieves better therapeutic efficacy in lung metastatic mouse model. Our study provides valuable pre-clinical evidences for the development of combinatorial strategy with immune therapy.

Keywords: Re188-liposome, lung metastasis, tumor microenvironment, immune checkpoint inhibitors

## I. 前言

Metastatic malignant tumor is one of the common causes of death in the worldwide. The current result is aimed to analyze tumor microenvironment, bio-distribution and therapeutic efficacy of Re188-liposome alone or in combination with immune therapy. Understanding the role of Re188-liposome in the regulation of immune system is crucial for enriching our knowledge in the therapeutic strategy design, which provides insight of immune therapy-based regimen in malignant cancer. Analysis of the correlation between Re188-liposome and immune checkpoint blockage may provide a new therapeutic approach to treat metastatic colon cancers in a better way.

## II. 主要內容

### Depletion of Re188-liposome-induced macrophages in lung metastatic mice

Lung metastatic mouse model was established by intravenous injection of colon cancer CT26 cells expressing luciferase (CT26-Luc). After 10 days, tumor growth of CT26-Luc cells metastasized in the lung was examined by IVIS imaging system to start treatments. Compare to conventional therapeutic methods, Re188-liposome exposure led to significant and steady leukopenia within 7 days (Fig. 1A). Within the period of leukopenia mediated by Re188-liposome, neutrophils and macrophages were increased in tumor microenvironment on day 6 post-treatment (Fig. 1B). The induction of neutrophils was also observed after irradiation, implying neutrophils are responsible for the elimination of reactive oxygen species generated from external or internal radiation therapy. As macrophages play an important role in connecting innate and adaptive immunity, we designed to deplete macrophages using liposomal clodronate and observed the anti-tumor effect of Re188-liposome in lung metastatic colon cancer-bearing mice. To achieve maximal suppression of macrophages, liposomal clodronate was intravenously injected two days prior to Re188-liposome administration (Fig. 1C). On day 4 post-treatment, leukocytes in the spleen were prominently decreased after liposomal clodronate and Re188-liposome exposures. Combination of liposomal clodronate and Re188-liposome reduced more splenic cells than single treatment (Fig. 1D). Flow cytometric analysis showed Re188-liposome induced higher level of macrophages in the spleen than in the lung, and liposomal clodronate significantly reduced circulating macrophages either in single or combined groups (Fig. 1E). Tumor-associated macrophages showed confined suppression by liposomal clodronate, indicating treatment of liposomal clodronate mainly blocks the recruitment of circulating monocytes /macrophages to tumor microenvironment (Fig. 1F). Besides, Re188-liposome-induced neutrophils in the spleen were slightly increased after combination of liposomal clodronate and Re188-liposome in lung metastatic mice.

### Therapeutic efficacy of Re188-liposome treatment after macrophage depletion

After confirming the inhibition efficiency of liposome clodronate on macrophages, therapeutic efficacy after combination of liposome clodronate and Re188-liposome was evaluated by IVIS system and survival analysis. IVIS data showed tumor growth was delayed in combinatory group within 12 day than single treatment groups, however; later time point (Day 16) revealed an invalid trend of anti-tumor effect with combined treatment (Fig. 2A). Thus, repeated administration of liposomal clodronate and Re188-liposome was performed on day 0 and on day 7 in lung metastatic mice. IVIS analysis showed all treated groups impeded tumor growth within two weeks, and luciferase signal started to decrease in week 3

(Fig. 2B). Although the most effective inhibition of tumor growth was found in Re188-liposome group in week 3, the survival was suddenly drop since 3 weeks after Re188-liposome treatment, implying the adverse effect induced by repeated treatment of Re188-liposome. Similar to Re188-liposome exposure, lung metastatic mice treated with liposomal clodronate initiated a lethal response since 3 weeks post-treatment. Both monotherapy of liposomal clodronate and Re188-lipsome extended survival from 20 days to 35 days in lung metastatic mice. Moreover, combination of liposome clodronate and Re188-liposome showed significant difference in overall survival compared to tumor control in lung metastatic mouse model (Fig. 2C).

Biological toxicities of Re188-liposome after macrophage depletion were examined by mice weight, white blood cells counts, liver and kidney functions. Combination of liposome clodronate and Re188-liposome led to a sustained decrease in mice weight compared to other groups, indicating mice treated with repeated exposure of combinatory strategy were in weak status (Fig. 3A). White blood cells counts revealed Re188-liposome treatment led to long term inhibition of leukocytes in the absence or the presence of liposome clodronate (Fig. 3B). Liver function as evident with ALT indicator found lung metastasis resulted in abnormal liver function per se, and treatment of liposomal clodronate or Re188-liposome did not generate liver abnormality within 20 days post-treatment (Fig. 3C). Kidney function was in normal range in each group (Fig. 3D).

**Bio-distribution of Re188-liposome after macrophage depletion**

Next, we examined the distribution of Re188-liposome in vivo with or without liposomal clodroante treatment (Table 1). After 1 hour post-treatment, Re188-liposome mainly stayed in the blood (23.29% ± 2.72%), and macrophages depletion led to the increase of Re188-liposome in the blood (38.37% ± 13.22%) and 4-fold increase in the spleen. After 24 hours post-treatment, Re188-liposome concentrated in the blood, liver, and spleen, and macrophage suppression resulted in 2-fold increase in the spleen but 3-fold decrease of Re188-liposome in the liver. After 48 hours post-treatment, Re188-liposome was detected in the spleen and liver, and macrophage depletion contributed to consistent increase in the spleen and steady decrease in the liver. It is worth to note the level of Re188-liposome in the lung was increased (2.36% ± 0.46% to 5.11% ± 1.03%) with the aid of macrophage depletion in lung metastatic colon cancer-bearing mice. These data indicated elimination of macrophages prior to Re188-liposome treatment prolonged residence time of Re188-liposome in the blood and at tumor site. Moreover, the accumulation of Re188-liposome in the liver was consistently reduced after liposome clodronate treatment.

**Alternation of circulating and local immune cells after Re188-liposome combined with macrophage depletion**

To explore the comprehensive profile of immune cells after Re188-liposome treatment after macrophage depletion, single cells collected from spleen and lung were examined by flow cytometric analysis. Regarding to specific defense mediated by adaptive immunity, CD4+ T cells was significantly increased in the spleen and lung, whereas CD8+ T cells was elevated in the lung only after single treatment of Re188-liposome (Fig. 4A, 4C, and 4E). Another key effector link the innate and adaptive immune systems is natural killer T (NKT) cells, which possess ability to quickly respond to lipid antigens and produce an array of cytokines modulating other immune cells. Our data showed combination of Re188-liposome and liposomal clodronate increased NKT cells in the lung than single treatment group (Fig. 4E). With respect to innate immune system, all treated groups generated higher neutrophils in the lung compared to lung metastatic tumor group (Fig. 4D). Moreover, tumor-associated macrophages were decreased after combination of Re188-liposome and liposomal clodronate, while circulating macrophages were not significantly altered in combinatory group (Fig. 4D and 4B). Induction of inflammatory monocytes (Ly6G-/CD11b+/Ly6C++) were observed in Re188-liposome treated groups, implying the specific regulation of Re188-liposome on local immune cells.

**Reverse tumor-associated regulation on PD-1/PD-L1 signaling after combination of Re188-liposome and liposomal clodronate**

Our flow cytometric data revealed lung metastatic CT26-Luc cells led to the increase of neutrophils,

macrophages, CD8+ T cells and the decrease of CD4+ T cells and NKT cells in tumor microenvironment on day 10 post-treatment (Fig. 4B-E). Moreover, PD-1 expression was significantly induced on CD4+ and CD8+ T cells, while PD-L1 expression was elevated on neutrophils, macrophages, and NKT cells compared tumor and non-tumor group (Fig. 5A-C). Combination of Re188-liposome and macrophage depletion reduced PD-1 level on CD8+ T cells, indicating the blockage of tumor-associated macrophages may lead to the relief of T cell exhaustion by tumor cells. The level of PD-L1 on neutrophils and macrophages showed a declined trend but not reached significance (Fig. 5B). NKT cells are PD-L1 highly expressing cells (purple region in the lower panel of Fig. 5A), and the expression degree of PD-L1 on NKT cells was increased in combinatory treatment (Fig. 5C).

## III. 結論

1. Combination treatment of Re188-liposome and macrophage depletion enhances tumor control and prolongs survival with the increase of drug retention rate and NKT cells in lung metastatic mice.
2. Combination treatment of Re188-liposome and PD-L1 inhibitor enhances tumor control with the increase of total T cells in lung metastatic mice, and multiple administration should be considered.

## 五、具體績效及貢獻

Our study reveals tumor microenvironment regulation by Re188-liposome. Depletion of tumor-associated macrophages impedes tumor growth and increases anti-tumor effect of Re188-liposome, and inhibition of PD-L1 signaling mediated by tumor cells also elevated tumor control of Re188-liposome in lung metastatic mouse model. Our study provides a combination strategy utilizing reverse concept of suppressive tumor microenvironment combined with Re188-liposome therapy.

## 參考文獻


[1] Shinto A. Rhenium 188: The Poor Man's Yttrium. World J Nucl Med. 2017;16:1-2.

[2] Dash A, Knapp FF, Pillai MR. Targeted radionuclide therapy--an overview. Curr Radiopharm. 2013;6:152-180.

[3] Zhu X, Palmer MR, Makrigiorgos GM, Kassis AI. Solid-tumor radionuclide therapy dosimetry: new paradigms in view of tumor microenvironment and angiogenesis. Med Phys. 2010;37:2974-2984.

[4] Chang CM, Lan KL, Huang WS, et al. (188)Re-Liposome Can Induce Mitochondrial Autophagy and Reverse Drug Resistance for Ovarian Cancer: From Bench Evidence to Preliminary Clinical Proof-of-Concept. Int J Mol Sci. 2017;18.

[5] Lin LT, Chang CH, Yu HL, et al. Evaluation of the therapeutic and diagnostic effects of PEGylated liposome-embedded 188Re on human non-small cell lung cancer using an orthotopic small-animal model. J Nucl Med. 2014;55:1864-1870.

[6] Hsu WH, Liu SY, Chang YJ, Chang CH, Ting G, Lee TW. The PEGylated liposomal doxorubicin improves the delivery and therapeutic efficiency of 188Re-Liposome by modulating phagocytosis in C26 murine colon carcinoma tumor model. Nucl Med Biol. 2014;41:765-771.

[7] Chang YJ, Hsu CW, Chang CH, Lan KL, Ting G, Lee TW. Therapeutic efficacy of 188Re-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor model. Invest New Drugs. 2013;31:801-811.

[8] Chang YJ, Yu CY, Hsu CW, et al. Molecular imaging and therapeutic efficacy of 188Re-(DXR)-liposome-BBN in AR42J pancreatic tumor-bearing mice. Oncol Rep. 2012;28:1736-1742.

[9] Chang YJ, Chang CH, Yu CY, et al. Therapeutic efficacy and microSPECT/CT imaging of 188Re-DXR-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor model. Nucl Med Biol. 2010;37:95-104.

[10] Krajewska JB, Bartoszek A, Fichna J. New Trends in Liposome-based Drug Delivery in Colorectal Cancer. Mini Rev Med Chem. 2019;19:3-11.

[11] Sercombe L, Veerati T, Moheimani F, Wu SY, Sood AK, Hua S. Advances and Challenges of Liposome Assisted Drug Delivery. Front Pharmacol. 2015;6:286.

[12] Chang HI, Yeh MK. Clinical development of liposome-based drugs: formulation, characterization, and therapeutic efficacy. Int J Nanomedicine. 2012;7:49-60.

[13] Gabizon AA, Shmeeda H, Zalipsky S. Pros and cons of the liposome platform in cancer drug targeting. J Liposome Res. 2006;16:175-183.
[14] Azzi S, Hebda JK, Gavard J. Vascular permeability and drug delivery in cancers. Front Oncol. 2013;3:211.
[15] Maeda H. Vascular permeability in cancer and infection as related to macromolecular drug delivery, with emphasis on the EPR effect for tumor-selective drug targeting. Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci. 2012;88:53-71.
[16] Nel A, Ruoslahti E, Meng H. New Insights into "Permeability" as in the Enhanced Permeability and Retention Effect of Cancer Nanotherapeutics. ACS Nano. 2017;11:9567-9569.
[17] Nehoff H, Parayath NN, Domanovitch L, Taurin S, Greish K. Nanomedicine for drug targeting: strategies beyond the enhanced permeability and retention effect. Int J Nanomedicine. 2014;9:2539-2555.
[18] Greish K. Enhanced permeability and retention of macromolecular drugs in solid tumors: a royal gate for targeted anticancer nanomedicines. J Drug Target. 2007;15:457-464.
[19] Chen LC, Wu YH, Liu IH, et al. Pharmacokinetics, dosimetry and comparative efficacy of 188Re-liposome and 5-FU in a CT26-luc lung-metastatic mice model. Nucl Med Biol. 2012;39:35-43.
[20] Topalian SL, Taube JM, Anders RA, Pardoll DM. Mechanism-driven biomarkers to guide immune checkpoint blockade in cancer therapy. Nat Rev Cancer. 2016;16:275-287.
[21] Wood SL, Pernemalm M, Crosbie PA, Whetton AD. The role of the tumor-microenvironment in lung cancer-metastasis and its relationship to potential therapeutic targets. Cancer Treat Rev. 2014;40:558-566.
[22] Noy R, Pollard JW. Tumor-associated macrophages: from mechanisms to therapy. Immunity. 2014;41:49-61.
[23] Almatroodi SA, McDonald CF, Darby IA, Pouniotis DS. Characterization of M1/M2 Tumour-Associated Macrophages (TAMs) and Th1/Th2 Cytokine Profiles in Patients with NSCLC. Cancer Microenviron. 2016;9:1-11.
[24] Harrington KJ, Rowlinson-Busza G, Syrigos KN, et al. The effect of irradiation on the biodistribution of radiolabeled pegylated liposomes. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2001;50:809-820.
[25] Chen LC, Chang CH, Yu CY, et al. Biodistribution, pharmacokinetics and imaging of (188)Re-BMEDA-labeled pegylated liposomes after intraperitoneal injection in a C26 colon carcinoma ascites mouse model. Nucl Med Biol. 2007;34:415-423.
[26] Yu YR, O'Koren EG, Hotten DF, et al. A Protocol for the Comprehensive Flow Cytometric Analysis of Immune Cells in Normal and Inflamed Murine Non-Lymphoid Tissues. PLoS One. 2016;11:e0150606.
[27] Abu Lila AS, Kiwada H, Ishida T. The accelerated blood clearance (ABC) phenomenon: clinical challenge and approaches to manage. J Control Release. 2013;172:38-47.
[28] 28. Ishida T, Harashima H, Kiwada H. Liposome clearance. Biosci Rep. 2002;22:197-224.
[29] Yuba E. Liposome-based immunity-inducing systems for cancer immunotherapy. Mol Immunol. 2018;98:8-12.
[30] Bertrand N, Grenier P, Mahmoudi M, et al. Mechanistic understanding of in vivo protein corona formation on polymeric nanoparticles and impact on pharmacokinetics. Nat Commun. 2017;8:777.
[31] Kim DH, Moon C, Oh SS, et al. Liposome-encapsulated CpG enhances antitumor activity accompanying the changing of lymphocyte populations in tumor via intratumoral administration. Nucleic Acid Ther. 2015;25:95-102.
[32] Kuylenstierna C, Bjorkstrom NK, Andersson SK, et al. NKG2D performs two functions in invariant NKT cells: direct TCR-independent activation of NK-like cytolysis and co-stimulation of activation by CD1d. Eur J Immunol. 2011;41:1913-1923.
[33] Domaica CI, Fuertes MB, Rossi LE, et al. Tumour-experienced T cells promote NK cell activity through trogocytosis of NKG2D and NKp46 ligands. EMBO Rep. 2009;10:908-915.

[34] Brutkiewicz RR, Yunes-Medina L, Liu J. Immune evasion of the CD1d/NKT cell axis. Curr Opin Immunol. 2018;52:87-92.
[35] Durgan K, Ali M, Warner P, Latchman YE. Targeting NKT cells and PD-L1 pathway results in augmented anti-tumor responses in a melanoma model. Cancer Immunol Immunother. 2011;60:547-558.
[36] Bae EA, Seo H, Kim IK, Jeon I, Kang CY. Roles of NKT cells in cancer immunotherapy. Arch Pharm Res. 2019.
[37] Bader JE, Enos RT, Velazquez KT, et al. Macrophage depletion using clodronate liposomes decreases tumorigenesis and alters gut microbiota in the AOM/DSS mouse model of colon cancer. Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol. 2018;314:G22-G31.
[38] Piaggio F, Kondylis V, Pastorino F, et al. A novel liposomal Clodronate depletes tumor-associated macrophages in primary and metastatic melanoma: Anti-angiogenic and anti-tumor effects. J Control Release. 2016;223:165-177.
[39] Reusser NM, Dalton HJ, Pradeep S, et al. Clodronate inhibits tumor angiogenesis in mouse models of ovarian cancer. Cancer Biol Ther. 2014;15:1061-1067.
[40] Gordon SR, Maute RL, Dulken BW, et al. PD-1 expression by tumour-associated macrophages inhibits phagocytosis and tumour immunity. Nature. 2017;545:495-499.

# 發展放射性標記的表皮生長因子受體(EGFR)靶向之融合蛋白

計畫編號：107-NU-E-010-006-NU
計畫主持人：藍耿立
e-mail：kllan@vghtpe.gov.tw
執行單位：台北榮民總醫院

## 摘要

上皮癌的特點是表皮生長因子受體（EGFR）的過度激活和表達。這途徑是腫瘤細胞增殖，存活，轉移和血管生成的關鍵。針對 EGF 蛋白質訊息傳遞路徑的靶向性(Target Therapy)療法，包含了抗體(如 Erbitux, Vectibix 等)及小分子 drug(如 Iressa, Tarceva 等) ，其對於頭、頸、肺及大腸直腸癌等的治療都有顯著的效果。然而，上述癌症經治療後不免發生對 EGFR 靶向性治療藥物具有抗藥性，因此，發展新的針對 EGFR 治療藥物極為重要。為了研發新型對抗 EGFR 之標靶藥物，我們將放射性物質標幟在人類表皮生長因子與白蛋白結合區域之融合蛋白上(human EGF and albumin-binding-domain fusion protein, hEGF-ABD)。。本研究評估人類表皮生長因子受體表現的人腸癌治療，探討放射性碘標誌 hEGF-ABD 蛋白於進入細胞內後影響腫瘤之機制效果，在細胞測試結果顯示，其進入細胞內後，有相當高的比例進入細胞核，並能造成腫瘤抑制表現。本研究期可提供國內癌症治療藥物發展創新資訊。

關鍵詞: epidermal growth factor (EGF) 表皮生長因子; epithelial growth factor receptor (EGFR) 表皮生長因子受體; Albumin-Binding-Domain (ABD) 白蛋白結合區域; fusion protein 融合蛋白; pharmacokinetics 藥物動力學

## Abstract

Epithelial cancers are characterized by excessive activation and expression of the epidermal growth factor receptor (EGFR). This type of cancer The EGFR pathway is critical for cancer cell proliferation, survival, metastasis and angiogenesis. New target therapies against EGFR signaling pathway, including antibody and small molecules, have achieved significant benefits treatment of head and neck, lung, colorectal cancers, etc.. However, due to inevitable development of resistance to the current EGFR inhibitors, the prognosis of EGFR-expressing cancers remain dismal and new therapeutics targeting EGFR pathway are still required. We are developing a novel anti-EGFR therapeutics using radiolabeled hEGF-ABD (human EGF and albumin-binding-domain fusion protein). This study evaluated the inhibitory effect of iodine-labeled hEGF-ABD protein on human EGFR expressing cancer cells, and explored its mechanism of the effect. The results of in vitro study showed that after entering the cell, there was significant proportion of radioactivity within the nucleus, which might account for tumor suppression. This study may provide information on the development of cancer treatment drugs in Taiwan.

**Keywords:** epidermal growth factor (EGF); epithelial growth factor receptor (EGFR); Albumin-Binding-Domain (ABD); fusion protein; pharmacokinetics

## I. 前言

本研究探討人類表皮生長因子受體(EGFR)表現的人類癌症治療，使用之 hEGF-ABD 為大腸桿菌生產之蛋白，此蛋白含人類表皮生長因子(human epidermal growth factor, hEGF) 及白蛋白結合區域(Albumin-Binding-Domain; ABD)。人類表皮生長因子受體為類似接收器的受體(receptor)，位於細胞表面，主要由蛋白質所組成，會接收細胞外之訊息(例如: epidermal growth factor, EGF 及 transforming growth factor α, TGFα)，將訊息傳至細胞內部，促使細胞活化不同的細胞生理功能。許多癌症中都能看到 EGFR 的過量表現，包括胰腺癌(30%-50%)、結腸癌(25%-77%)、頭頸癌(80%-100%)、非小細胞肺癌(40%-80%)、腎臟癌(50%-90%)、乳腺癌(14%-91%)、前列腺癌(40%-80%) 、卵巢癌(35%-70%) 、膀胱癌(31%-48%)和神經膠質瘤(40%-63%)等。

## II. 主要內容

本研究指出，hEGF-ABD 蛋白經放射性同位素碘標誌後，放射化學純度分析結果均>90%；在標誌反應及純化後，於體外(in vitro)加入血清中，測試藥物穩定度於 360 小時內的放射化學純度，可維持>80%，顯示藥物相當穩定。本研究使用人類腸癌(HCT116)細胞，觀察 hEGF-ABD 蛋白與臨床使用之 EGFR 藥物 Erbitux，比較它們於細胞攝取、細胞內核質分布及毒殺效果；放射性 $^{131}$I-EGF-ABD 及 $^{131}$I-Erbitux 放射化學純度均>90%，於加入 HCT116 細胞 10,20,30,40,50,60 分鐘後，顯示細胞攝取逐漸上升，於 60 分鐘達到最高，60 分鐘/10 分鐘結果可達 1.52 及 2.17 倍。觀察細胞內核質分布，將 $^{131}$I-EGF-ABD 及 131I-Erbitux 加入 HCT116 細胞 24 小時後，可看到細胞質/細胞核之比例分別為 8.14%/91.86%及 53.01%/46.99%，可觀察到 $^{131}$I-EGF-ABD 於 HCT116 細胞核內有較高的積聚，高於 $^{131}$I-Erbitux 之積聚效果。在進行毒殺抑制時，將 free I-131、$^{131}$I-EGF-ABD 及 $^{131}$I-Erbitux 不同的活度(0.0025, 0.01, 0.04 及 0.16 mCi)加入 HCT116 細胞，其抑制結果可看到較高活度有較高的抑制效果，加入 $^{131}$I-EGF-ABD 的則顯示有較好的抑制效果。本研究使用 WinNonlin 分析 $^{131}$I-EGF-ABD 於小鼠之血液動力學試驗，也可看到藥物於 0 小時進入小鼠體內，於 0.5, 1, 2, 4, 8, 24, 48, 72, 96, 168 小時觀察其血液濃度逐漸降低，體內半衰期分別為 3.6 小時(分布相)及 27.3 小時(清除相)，迅速於體內分布後並排出體外。

## IV. 結論

本研究評估人類表皮生長因子受體表現的人腸癌治療，探討放射性碘標誌 hEGF-ABD 蛋白於進入體內後影響腫瘤之機制效果，在細胞測試結果顯示，其進入體內後，有相當高的比例進入細胞核，並能造成腫瘤抑制表現。本研究期可提供國內癌症治療藥物發展創新資訊。

## 參考文獻

[1] Lan, K.H., et al., *5-Fluorocytosine combined with Fcy-hEGF fusion protein targets EGFR-expressing cancer cells.* Biochem Biophys Res Commun, 2012.

# 使用碘-125 射源進行攝護腺癌永久插種近接治療之輻防管制與劑量評估
# Radiation protection control and dose evaluation of the prostate cancer using iodine-125 source permanent seed implant brachytherapy.

計畫編號：MOST107-NU-E-010-004-NU
計畫主持人：許世明
e-mail：smhsu@ym.edu.tw
執行單位：國立陽明大學 醫放系

## 摘要

藉由本計畫建立國內攝護腺癌碘-125 射源，永久插種近接治療病人外釋管理標準作業，協助國內設定永久插種放射治療在輻射劑量輸出的品質保證機制，同時協助提昇國內放射治療劑量輸出的準確性，並確認輻射品質保證作業的成果，以確保病人於治療後之生活品質。

關鍵詞：劑量輸出、碘-125、攝護腺癌、放射治療。

## Abstract

The program will be able to build domestic's patient release management standard operation for iodine-125 source permanent implant brachytherapy. The clinical outcomes according to dose levels can thus be truly compared. Therefore, it is necessary to carry out the related research to evaluate the calibration procedure for radiation therapy dose output in order to achieve the above goals.

Keywords: dose output, iodine-125, prostate cancer, radiation therapy.

## I.前言

本研究針對國內攝護腺癌碘-125 插種近接治療患者，其居家環境輻射安全之議題進行相關研究：評估蒐集分析國際間，執行行碘-125 攝護腺永久插種之曝露品保模式；臨床測量病人於治療時之輻射劑量，並建立蒙地卡羅模擬運算模型；病人居家環境之輻射劑量評估；及病人外釋管理標準作業。本研究結果將有效合理抑低患者家屬、醫療從業人員、以及一般民眾之非預期輻射劑量，為民眾之輻射安全把關。

## II. 主要內容

蒐集分析國際間執行攝護腺癌永久插種治療所使用的密封射源規範及文獻，包括射源驗收、紀錄、儲存、使用安全管理之規範基準模式。透過碘-125 射源資料，及病人植入射源之體厚資料，進行病人蒙地卡羅模擬運算模型；將可使用蒙地卡羅模擬運算模型，預測病人體內及體外劑量，及病人與家屬的輻射防護措施，以快速推估輻射劑量。

## III. 結果與討論

透過碘-125 射源資料及病人植入射源之體厚資料，進行病人蒙地卡羅模擬運算模型；本研究量測病人骨盆四個方向及其距離分別為表面，30 公分、100 公分處輻射值並且取得病人體厚資料進行病人蒙地卡羅(MCNP)模擬運算

在病人表面的數值中量測值會低估於蒙地卡羅模擬運算，而在 30 公分處量測值，與蒙地卡羅模擬運算沒有統計上的差異性，但在 100 公分處量測值會與蒙地卡羅模擬運算高估於蒙地卡羅模擬運算。在病人前、後位置差異較大相對的在病人左、右位置差異性較小。依據 Takashi Hanada 所發表的文獻中，病人站立量測與躺在床上的量測是有不同的輻射量，躺在床上量測體表及 30 公分處輻射值為病人站立量測的 1.93 倍與 1.6 倍。

## IV. 結論

對碘-125 射源永久插種近接治療患者進行下列處置措施，包含輻防管制，病人體內外劑量評估、碘-125 射源管理與儲存紀錄、人員管理、與環境輻射監測、輻射防護衛教預防措施、病人外釋管理標準作業皆已完成其基準規範，以符合合理抑低的精神。

## 參考文獻

[1] ICRP Publication 98: Radiation Aspects of Brachytherapy for Prostate Cancer ; 2006
[2] Dauer LT, Kollmeier MA, Williamson MJ, et al. Less-restrictive patient-specific radiation safety precautions can be safely prescribed after permanent seed implantation. Brachytherapy 2010; 9:101-111.
[3] Dauer LT, Zelefsky MJ, Horan C, et al. Assessment of radiation safety instructions to patients based on measured dose rates following prostate brachytherapy. Brachytherapy 2004; 3:1-6.
[4] IAEA. Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy. IAEA; 2002.
[5] DeWerd LA, Ibbott GS, Meigooni AS, et al. A dosimetric uncertainty analysis for photon-emitting brachytherapy sources: report of AAPM Task Group No.138 and GEC-ESTRO. Med Phys 2011;38:782-801.
[6] IAEA, TECDOC-1355, Security of Radioactive Sources – Interim Guidance for Comment, 2003
[7] Hanada T, Yorozu A, Kikumura R, et al. Assessing protection against radiation exposure after prostate 125I brachytherapy. Brachytherapy 2014;13: e 311-318.

# Tau蛋白標靶造影劑氟-18-FEONM之阿茲海默基因鼠正子造影對tau蛋白病變之選擇性與專一性研究

# Characterization of [18F]FEONM as an imaging agent for Tauopathy in triple transgenic AD mice

計畫編號：107-NU-E-010-002-NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：劉仁賢
e-mail：rsliu@vghtpe.gov.tw
計畫參與人員：陳怡安、柯建志
執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射醫學系

## 摘要

阿茲海默症(Alzheimer’s disease, AD)是老年失智症(dementia)最常見的原因，約佔 50~70%之多，AD 的病理特徵之一是腦部神經細胞內有雙股的螺旋狀纖維或直形纖維纏繞形成之神經纖維糾結(neurofibrillary tangles)，以及在細胞外所堆積的β-類澱粉酶(β-amyloid, Aβ)形成之瘢塊(plaque)，其中 tau 病理學傳播的時間過程與個體患者的臨床和認知的變化極具相關性，因此針對 tau 蛋白開發的 PET 造影劑，要能判斷疾病進程和有效區分不同的神經退化性疾病。本研究將評估核研所開發的藥物[18F]FEONM，有助於以抑制 tau 蛋白為主的治療藥物的研發。本研究中建立了體外細胞平台和小鼠腦部影像平台以便後續藥物評估，且分別確認[18F]FEONM 於阿茲海默症基因轉殖鼠和同年齡之正常鼠的腦部影像和各腦區之攝取量。此一資訊就臨床前研究而言，可獲得相當具有價值的相關性分析，以便輔助進行更精確的 AD 診斷和治療。

關鍵詞：阿茲海默症，神經纖維糾結，tau 蛋白病變，正子發射斷層掃描

## Abstract

Alzheimer’s disease (AD) is a progressive neurodegenerative disorder, accounting for 50~70% of cases of dementia. In the brains of AD patients, hyperphosphorylated tau protein or neurofibrillary tangles and Aβ plaques are major pathological markers. The time course of tauopathy is especially related to the clinical and cognitive changes of individual patients. Thus, optimal tau PET tracers may allow discriminating neurodegenerative diseases and monitoring disease progression effectively. [18F]FEONM developed by Institute of Nuclear Energy Research (INER) was used to assess the feasibility in AD diagnosis. Currently, there are many efforts on novel anti-tau therapies, so the development of tau-PET tracer becomes much more important to evaluate the therapeutic effects. In this study, Both *in vivo* and *in vitro* platforms we established respectively were applied for evaluating [18F]FEONM. Our results demonstrated the potential of [18F]FEONM PET imaging to differentiate AD and age-matched WT control. Further, it suggests that a useful PET imaging tracer of tau protein will provide considerable relevance for preclinical studies.

Keywords: Alzheimer’s disease, neurofibrillary tangles, tauopathy, PET

## I. 前言

正子斷層掃描是能提供早期診斷 AD 及 AD 疾病病情追蹤的分子影像工具。發表於 2011 年的有關 AD 生物標記由臨床前發展至臨床的動態變化之假設模型。當中最早出現的生物標記是由腦脊髓液偵測到 Aβ42和以 PET 類澱粉造影偵測到的 Aβ 聚積，其次是[18F]FDG-PET 或功能性 MRI 檢測出神經突觸功能異常，最後是腦萎縮。近年被認証許可臨床使用的[18F]florbetapir 及[18F]flutemetamol PET 同位素造影劑，可以偵測腦皮質內的 β-amyloid，當 amyloid 造影呈陰性，可減少病患被誤診為 AD 的可能;疑似 AD 的高危險群病患，如 amyloid 造影呈陽性的結果，發生失智症的將可能是其他人的 3 倍，但仍不足以確診 AD。除 Aβ 外，tau 蛋白過度磷酸化(hyperphosphorylation)後，與其他的 Tau 蛋白纖維糾結成雙股螺旋纖維(PHFs)或神經纖維糾結(neurofibrillary tangles)，形成無法分解的團塊，阻礙神經細胞內的營養傳輸，最後致使細胞死亡。於過去的研究中發現，tau 病理學傳播的時間過程，特別是與個體患者的臨床和認知的變化有關。因此，tau-PET 造影與上述的各種生物標誌(biomarker)檢測對於 AD 的診斷有相輔相成的效果。

目前在發展中的 Tau 蛋白造影劑有 7 種，分別是[11C]PBB3，[18F]THK-523，[18F]THK-5105，[18F]THK-5117，[18F]T808，[18F]FDDNP 以及[18F]T807，然而在結合 tau 蛋白的專一性和親合力以及同位素的半衰期等各有優缺點;最早研發成功的[[18F]FDDNP 除 tau 外會同時與 Aβ 及 α-synuclein(突觸核蛋白)結合;較晚發表的[18F]T807 [18F]AV-1451 雖具有較好的選擇性結合 PHFs 及不與 β-amyloid 結合的特性，但仍有會與含 melanin(絲氨酸)的結構結合的現象，造成診斷上的困擾。即使[11C]PBB3 與 tau 結合的專一性高，但由於 C-11 半衰期短，限制了臨床上的應用。本研究首先建立了體外細胞平台和小鼠腦部影像平台以便各種藥物之評估。核研所開發的[18F]FEONM，其針對上述 tau 蛋白造影劑的優缺點，進行了修飾與改良，確認[18F]FEONM 正子影像於阿茲海默症基因轉殖鼠的腦部影像和分析各腦區之攝取量，可獲得相當具有價值的相關性分析，以

便輔助進行更精確的 AD 診斷，並有助於未來以抑制 tau 蛋白為主的治療藥物的研發。

## II. 主要內容

本計畫之目的在驗証[$^{18}$F]FEONM與tau結合的情形及偵測AD動物模型腦部tau病變(tauopathy)的效用。利用表現磷酸化tau的三維擬AD病變之細胞培養模型作為藥物測試平台，並以帶有3突變基因AD轉殖鼠模型收集長期追蹤腦部正子造影之資訊，包含偵測腦部神經代謝造影劑[$^{18}$F]FDG、Aβ-PET造影劑[$^{11}$C]PiB及tau-PET造影劑[$^{11}$C]PBB3，評估[$^{18}$F]FEONM於偵測AD鼠腦tau病變的效用。

子目標一：建立3D神經細胞培養平台作為藥物體外測試平台(in vitro platform)。

子目標二：建立阿茲海默症基因轉殖鼠腦部影像平台(in vivo platform)。

子目標三：評估 [$^{18}$F]FEONM 於 AD 基因轉殖鼠腦部之影像和各腦區攝取量腦區攝取量分析。

## III. 結果與討論

三維擬 AD 病變之細胞培養模型可觀察到 Aβ 累積和 tau 病變，化學組織切片染色的結果發現神經分化至 6 週時，阿茲海默症相關特定位點(ser396 和 ser404)過度磷酸化的 tau 蛋白表現明顯上升，免疫螢光染色更可以清楚看到沿著神經細胞突觸表現的情形。三重標誌法(triple labeling)，以單株抗體個別在[$^{18}$F]FEONM 結合的自體放射顯像上偵測 tau 蛋白和 β-amyloid，最後進行多重染色的分析比較，更能得知[$^{18}$F]FEONM 對 tau 病變蛋白的專一性和結合力是否為佳，且依分化時間越長則 tau 病變越明顯，[$^{18}$F]FEONM 探針的結合力及敏感度皆能獲得驗證。

我們已將[$^{18}$F] FEONM 於阿茲海默症之疾病進展後期進行測試，分析腦部的攝取情形。使用之實驗小鼠為 3xTg-AD，具有 P301S 的 Tau 蛋白相關的基因突變，文獻指出 12-15 個月時能於海馬回處偵測到神經纖維纏結。此次實驗使用的小鼠年齡為 16 個月，[$^{18}$F] FEONM 尾注射後進行 1.5 小時的連續正子放射斷層攝影(dynamic imaging)。觀察到[$^{18}$F] FEONM 有高度腦部通透，且於 3xTg-AD 的攝取量明顯較同齡的 WT 鼠高。

利用影像處理軟體 Pmod (PMOD Technologies)進行分析的結果，能夠觀察到 3xTg-AD 全腦的攝取量較 WT 高出約 2.5 倍。若是分區圈選腦部 Tau 病變相關區域，如腦皮質、左右海馬迴、小腦處，經由定量分析且繪出一時間曲線，可觀察 3xTg-AD 組別於這些腦區的攝取量明顯高出 WT，證實[$^{18}$F]FEONM 具有良好區分出阿茲海默症的能力。文獻已指出腦部病理切片觀察 tau 病變的區域包括 hippocampus，anterior temporal cortex，inferior temporal，mid temporal，broca area，motor cortex 及 occipital area，未來可藉由組織染色的結果，與影像分析軟體擷取出現在各腦區的影像進行分析比較，評估[$^{18}$F]FEONM 是否能獲得更佳的 Tau-PET 影像。

早期於驗屍研究中已知 Tau 病理學的區域分佈及其進展的順序分期(stage)，初期和相對較長的 tau 聚集表現於前臨床期（pre-clinical stage），即無認知或臨床神經功能異常的時期，然而以 tau 病理學傳播的時間過程中發現與個體患者的臨床和認知的變化高度有關。因此，一長期縱向研究對於[$^{18}$F]FEONM 在 Tau 病變的敏感性是必要的，搭配我們已完成的[$^{18}$F]FDG 和[$^{11}$C]PiB 之小鼠腦部 PET 影像，以及定期評估其認知與記憶功能之狀態，[$^{18}$F]FEONM 影像將與[$^{18}$F]FDG、[$^{11}$C]PiB 和[$^{11}$C]PBB3 造影結果相互比較，以期更完整此疾病腦部影像變化之資訊，也符合最近以阿茲海默阿茲海默症生物標記所提出的一 A/T/N 系統之評估標準。

## IV. 結論

體外細胞平台和小鼠腦部影像平台的建立，可提供研究AD早期診斷及抗tau蛋白之AD治療藥物的平台，而[$^{18}$F]FEONM作為Tau追蹤劑，與各種生物標誌於AD的診斷具有相輔相成的效果，能提供相當具有價值的相關性分析資訊。

## 參考文獻

[1] D'Avanzo C, Aronson J, Kim YH, Choi SH, Tanzi RE, Kim DY. Alzheimer's in 3D culture: challenges and perspectives. BioEssays : news and reviews in molecular, cellular and developmental biology. 2015;37(10):1139-48.

[2] Alzheimer's A. 2013 Alzheimer's disease facts and figures. Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association. 2013;9(2):208-45.

[3] McKhann GM, Knopman DS, Chertkow H, Hyman BT, Jack CR, Jr., Kawas CH, et al. The diagnosis of dementia due to Alzheimer's disease: recommendations from the National Institute on Aging-Alzheimer's Association workgroups on diagnostic guidelines for Alzheimer's disease. Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association. 2011;7(3):263-9.

[4] Sperling RA, Aisen PS, Beckett LA, Bennett DA, Craft S, Fagan AM, et al. Toward defining the preclinical stages of Alzheimer's disease: recommendations from the National Institute on Aging-Alzheimer's Association workgroups on diagnostic guidelines for Alzheimer's disease. Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association. 2011;7(3):280-92.

[5] James OG, Doraiswamy PM, Borges-Neto S. PET Imaging of Tau Pathology in Alzheimer's Disease and Tauopathies. Frontiers in neurology. 2015;6:38.

[6] Nelson PT, Alafuzoff I, Bigio EH, Bouras C, Braak H, Cairns NJ, et al. Correlation of Alzheimer disease neuropathologic changes with cognitive status: a review of the literature. Journal of neuropathology and experimental neurology. 2012;71(5):362-81.

[7] Saint-Aubert L, Lemoine L, Chiotis K, Leuzy A, Rodriguez-Vieitez E, Nordberg A. Tau PET imaging: present and future directions. Molecular neurodegeneration. 2017;12(1):19.

[8] Jack CR, Jr., Bennett DA, Blennow K, Carrillo MC, Feldman HH, Frisoni GB, et al. A/T/N: An unbiased descriptive classification scheme for Alzheimer disease biomarkers. Neurology. 2016;87(5):539-47.

# I-123 MIBG 在極早期路易氏體失智症之診斷價值與運用
# Diagnostic value and clinical application of the I-123 MIBG for very early dementia with Lewy bodies

計畫編號：MOST　107－2623－E－442－001－NU
計畫主持人：邱百誼
e-mail：paiyibox@gmail.com
執行單位：秀傳醫療社團法人秀傳紀念醫院神經科

## 摘要

失智症是最常見的神經退化疾病，也是神經科學領域中最常被研究的主題之一。根據國際阿茲海默協會(Alzheimer’s Disease International, ADI)於 2015 年所發表的世界阿茲海默報告指出，失智症已造成巨大的社會經濟負擔。失智病患的早期與明確的診斷是這類疾病研究與防治的第一步。

路易氏體失智症(dementia with Lewy bodies, DLB)是僅次於阿茲海默症(Alzheimer’s disease, AD)之第二常見的退化性失智症。由於 DLB 不僅在認知功能上產生嚴重障礙，更會在許多情緒行為方面產生諸多異常，同時造成病患與家屬極大的困擾，因此 DLB 的早期診斷(尤其是失智前期)與防治是相當重要也逐漸受到重視的議題。

在剛出爐之最新版的國際 DLB 診斷準則中，I-123 MIBG 已經名列 DLB 主要的診斷生物指標(biomarker)之一。然而針對可能因為 DLB 引起之失智前期，即輕度智能障礙(mild cognitive impairment, MCI)，還甚少研究討論其臨床表現與生物指標之相關性或是轉變為失智的預測性。目前的假說認為 I-123 MIBG 的吸收缺損可能在極早期的 DLB 即表現出來，然而針對還未失智之 DLB，也就是可能是 DLB 引起之 MCI (DLB-MCI) 病患，I-123 MIBG 之研究甚少，也僅只於少數病例報告，例如 Fujishiro 等人 2012 年的兩個 amnestic MCI 病患。因此對於 DLB-MCI 病患的 I-123 MIBG 與臨床表現或其他生物指標之相關性是非常值得探討的議題，甚至可能成為推測 MCI 轉變失智的重要預後指標。

本研究將用二年的時間，蒐集 MCI 病患共 40 位(包括 DLB-MCI 與 non-DLB-MCI 各 20 位)，以及正常對照組 20 位、進行完整的生物指標評估並進行至少一年的追蹤，以評估 I-123 MIBG 在 DLB-MCI 的診斷價值、了解 I-123 MIBG 與其它生物指標的相關性以及 I-123 MIBG 是否具有預測病人進一步轉化為 DLB 失智症的預後角色。

關鍵詞：失智症、路易氏體失智症、輕度智能障礙、生物指標

## Abstract

Dementia is the most common neurodegenerative disorder and the most frequently studied subject in the field of neuroscience. According to the report of Alzheimer’s Disease International (ADI) on 2015, fighting for dementia has caused tremendous financial burden all over the world. Early and accurate diagnosis of dementia disorders is the first step of prevention, management, and research of dementia.

Dementia with Lewy bodies (DLB) is the second most common degenerative dementia. The combination of severe cognitive and behavioral symptoms of patients with DLB has great impact on themselves as well as their caregiver. Therefore, early and accurate diagnosis of DLB has gradually become an important issue for the prevention and management of dementia disorders.

The newest consensus for the diagnosis of DLB on 2017 has indicated that the I-123 MIBG being one the most valued diagnostic biomarkers. The impairment of I-123 MIBG was believed to be observed in the early stage of DLB based on the finding by Fujishiro et al. on 2012. However, few studies have investigated the presentation of I-123 MIBG in very early or predementia stage of DLB (mild cognitive impairment due to DLB, DLB-MCI). Besides, rare studies have speculated the predictive value of I-123 MIBG for conversion of DLB-MCI to DLB.

In this study, we will use two years to enroll 40 MCI patients (20 DLB-MCI and 20 non-DLB-MCI) and 20 normal controls, perform detailed biomarker assessments for them and follow-up at least for one year. We aim to study the diagnostic value of I-123 MIBG in DLB-MCI, the relationship of I-123 MIBG and other biomarkers and the predictive value of I-123 MIBG for the conversion of DLB-MCI to DLB.

Keywords: dementia; dementia with Lewy bodies; mild cognitive impairment; biomarker

## I. 前言

失智症是最常見的神經退化疾病，也是神經科學領域中最常被研究的主題之一。根據國際阿茲海默協會(Alzheimer’s Disease International, ADI)於 2015 年所發表的世界阿茲海默報告指出，全球罹患失智症的人口在 2015 年會增加九百九十萬人而來到四千六百八十萬人，其中約有一半的病人在亞洲；而其總醫療花費將高達八千一百八十億美元，造成巨大的社會經濟負擔。如何早期而正確地診斷，給予合適的治療、預後評估與安養成了各國重要的醫藥衛生的難題。

## II. 主要內容

(1) 病患選擇方面，由於 I-123 MIBG 尚在食藥署審查當中，因此尚未有病患執行此項檢查。因此自 107 年 3 月計畫通過開始，已經從本院失智症中心篩選出合適病患 41 位。為了避免受到巴金森病(PD)干擾(因為 PD

病患之 I-123 MIBG 吸收也是大部分異常)，因此在 non-DLB-MCI 中排除 PD-MCI 個案。

(2) 診斷 DLB-MCI 的方法需要主要臨床特徵(認知起伏、視幻覺、快速動眼期睡眠異常行為、與巴金森症)與生物特徵(Tc-99m Trodat-1 brain SPECT，Tc-99m ECD brain SPECT，與 MRI)，才足以區別 DLB 與 non-DLB。診斷 MCI 則需要詳細的神經心理檢查。

(3) 研究步驟首先是將重要的生物指標如 Tc-99m Trodat-1 brain SPECT、Tc-99m ECD brain SPECT、 MRI、詳細的神經心理、與血液指標如 $\alpha$-Synuclein 等在 DLB 與 non-DLB 兩組病患做比較。

## III. 結果與討論

由於 I-123 MIBG 尚在食藥署審查當中，因此尚未有病患執行此項檢查。因此自 107 年 3 月計畫通過開始，已經從本院失智症中心篩選出合適病患 41 位。這些受試者均已完成除了 I-123 MIBG 之外所有的生物指標(如 MRI、詳細的神經心理、與血液指標包括 A$\beta$40、A$\beta$42、Tau 與 $\alpha$-synuclein)。

比較 DLB 與 non-DLB 之背景資料，結果顯示兩組在年齡、性別、教育程度、CDR-SB 等基本資料均有顯著不同。

比較 DLB 與 Non-DLB 之臨床表徵與血液指標包括 A$\beta$40、A$\beta$42、Tau 與 $\alpha$-synuclein 顯示只有在臨床特徵之 visual hallucinations, parkinsonism, RBD 等在兩者有顯著差異，血液指標包括 A$\beta$40、A$\beta$42、Tau 與 $\alpha$-synuclein 都沒有顯著差異。

## IV. 結論

總結目前之結果，首先是基於 MIBG 藥物尚在衛服部審查當中，因此第一年之病患尚無法做這項查。其次是目前分析結果在血液生物指標上面並 DLB 與 non-DLB 未達到顯著差異，這樣的結果一方面可能是試驗人數不足，另外一方面可能是這樣的生物指標無法有效地分辨兩組，本研究將在 108 年度繼續收案並且做 MIBG 之檢查，以讓最後之結果有更準確之比較分析。

## 參考文獻


[1] McKeith, IG, Boeve BF, Dickson DW, Halliday G, Taylor JP, Weintraub D, ... & Bayston A. Diagnosis and management of dementia with Lewy bodies Fourth consensus report of the DLB Consortium. Neurology 2017; 10: 1212.

[2] Nagayama H, Hamamoto M, Ueda M, Nagashima J, Katayama K. Reliability of MIBG myocardial scintigraphy in the diagnosis of Parkinson's disease. J Neurol Neurosurg Psychiatry 2005;76:249–251.

[3] Yoshita M, Arai H, Arai H, et al. Diagnostic accuracy of I-123-meta-iodobenzylguanidine myocardial scintigraphy in dementia with Lewy bodies: a multicenter study. PLoS One 2015;10:e0120540.

[4] Tiraboschi P, Corso A, Guerra UP, et al. (123) I-2betacarbomethoxy-3beta-(4-iodophenyl)-N-(3-fluoropropyl) nortropane single photon emission computed tomography and (123) I-metaiodobenzylguanidine myocardial scintigraphy in differentiating dementia with Lewy bodies from other dementias: a comparative study. Ann Neurol 2016;80:368–378.

[5] Fujishiro H, Nakamura S, Kitazawa M, Sato K, & Iseki E. Early detection of dementia with Lewy bodies in patients with amnestic mild cognitive impairment using 123 I-MIBG cardiac scintigraphy. Journal of the neurological sciences 2012; 315: 115-119.

[6] Chiu MJ, Yang SY, Chen TF, Chieh JJ, Huang TZ, Yip PK, ... & Horng HE. New assay for old markers-plasma beta amyloid of mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. Current Alzheimer Research 2012; 9: 1142-1148.

[7] Chiu MJ, Yang SY, Horng HE, Yang CC, Chen TF, Chieh JJ, ... & Liu HC. Combined plasma biomarkers for diagnosing mild cognition impairment and Alzheimer's disease. ACS chemical neuroscience 2013; 4: 1530-1536.

[8] Yang SY, Chiu MJ, Lin CH, Horng HE, Yang CC, Chieh JJ, ... & Liu BH. Development of an ultra-high sensitive immunoassay with plasma biomarker for differentiating Parkinson disease dementia from Parkinson disease using antibody functionalized magnetic nanoparticles. Journal of nanobiotechnology 2016; 14: 41.

# 研發結合含碘藥物 IUdR 與特定能量之 X 光照射在癌症治療之新技術
# Development of combined IUdR and X ray with specific energy for cancer therapy

計畫編號： 107-2623-E-037 -001 -NU
計畫主持人：柯建志
e-mail：ccke@kmu.edu.tw
執行單位：高雄醫學大學

## 摘要

過去用作輻射增敏劑及化療藥物之五碘去氧尿嘧啶(IUdR)是類似 DNA 合成所需之嘧啶，能在細胞合成 DNA 時併入 DNA 中，降低 DNA 結構強度，在高能量輻射照射時容易斷裂，達到輻射增敏效果。近年來許多團隊利用略高於碘原子 K 層電子束縛能的低能 X 光照射 IUdR，引發光電效應及擊出厄惹電子 (Auger electron) 來進行腫瘤治療。厄惹電子能量僅數百電子伏特，射程約為幾十奈米，其線性能量轉移 (LET) 卻高達 100 keV/μm，能夠嚴重破壞 DNA。欲使 IUdR 產生厄惹電子，X 光能量需略高於其 K 層電子束縛能 33.4 keV，以提高撞擊出 K 層電子機率，本研究將使用 X 光管搭配不同厚度之鋁及鑭金屬濾片合併使用，提高 34~50 keV 能量 X 光的比例，來進行合併 IUdR 的細胞及動物腫瘤之厄惹電子治療，評估治療後其 DNA 破壞，細胞死亡以及腫瘤生長抑制程度，此模式能降低 IUdR 的使用劑量減低副作用，並因 X 光只局部照射腫瘤位置，厄惹電子的產生因此只侷限於腫瘤內達成專一性的治療，此研究旨在評估厄惹電子應用在腫瘤治療之可行性，實驗上與與臨床使用鈷六十進行比較治療效果，將對未來腫瘤厄惹電子治療發展提供重要參考。
關鍵詞：腫瘤厄惹電子治療，五碘去氧尿嘧啶。

## Abstract

Renewable 5-iododeoxyuridine (IUdR) was used as a radiosensitizer and chemodrug. It resembles thymidine and is essential for DNA synthesis. IUdR is capable of incorporating into nascent DNA during DNA synthesis. The DNA with incorporated IUdR would decrease its architectural strength compared to normal DNA and consequently is more easily to break upon irradiation, which is the basis of radiosensitization of IUdR. Recently, many investigators attempt to treat cancer with IUdR combined irradiation with X-ray of energy slightly above the K-edge of iodine to generate Auger electrons for cancer therapy. Auger electrons have energy ranging merely tens to hundreds of eV and mean free path ranging tens of merely several nm. However, the linear energy transfer (LET) of an Auger electron can be as high as 100 keV/micrometer which is capable of inducing an enormous DNA damage leading to cell death. To induce Auger effect from IUdR incorporated in the tumor DNA, we used X ray tube (Microfocus X-Ray Source L10951) with an optimal combination of filters made of aluminum and lanthanum. As the output of X ray is monitored by a X ray spectrometry, the combination of tube voltage, thickness of aluminum and lanthanum filters which produce the highest percentage of X ray photons with energy of 34~50 KeV will be determined. After dose calibration performed by standard ion chamber and thermos-luminescence dosimetry, Auger electron therapy will be performed on cancer cells and tumor xenografts. DNA damage and cell survival in vitro and in vivo were evaluated after Auger therapy. In this proposal, we aim to evaluate the feasibility of Auger electron therapy for cancer treatment, and compare the therapeutic result with that by Co-60 used in clinical practice. The results with be of great value as reference for future development of Auger electron therapy for cancer.
Keywords: Tumor Auger electron therapy, IUdR.

## I. 前言

本研究計畫旨在提出利用含碘原子之類 DNA 分子藥物 IUdR，合併照射特定能譜之 X 光產生激發產生光電效應合併厄惹效應進行腫瘤治療的技術，並以癌細胞株及動物腫瘤模式評估此療法之可行性。此研究構想具高度應用潛力原因在於利用癌細胞快速分裂複製 DNA 之特性，攝入 IUdR 進新合成之 DNA 中，再以略高於碘原子 K 層電子束縛能(32.4 KeV)之 X 光，局部照射腫瘤處，擊出 IUdR 中的碘原子的 K 層電子，引發光電效應乃至厄惹效應之連鎖反應，以厄惹電子高線性能量轉移(Linear EnergyTransfer, LET)的特性，破壞 DNA 結構，殺死腫瘤細胞。此雙元腫瘤治療方式，由於 IUdR 相對於正常組織在腫瘤內的高積聚，加上輻射針對腫瘤部位照射，可雙雙降低 IUdR 以及輻射照射劑量，降低治療對正常組織的傷害，保留腫瘤最佳的治療效果。

## II. 主要內容

目標 1、驗證活體外 IUdR-厄惹電子治療之對癌細胞之毒殺效果

本研究將採用人類頭頸部癌細胞株 SAS 做為癌症之治療測試。細胞將分別以群落生長實驗來建立 IUdR 藥物及輻射之劑量-反應關係，並選擇一最佳合併治療劑量，同時並以鈷六十做為對照組。在治療劑量上預計將建立 IUdR 0~500μg/ml 的劑量反應關係，以及 0~10Gy 的 X 光及鈷六十的劑量反應關係，合併治療方面將取約造成 30%細胞死亡之劑量進行。人類頭頸部癌細胞株以群落生長實驗來建立藥物及輻射之劑量-反應關係。細胞經給予不同劑量之 IUdR 或放射線照射(X 光或鈷 60)過後計算存活的群落數，以得知細胞分別對順鉑以及放射線的劑量反應關係。

目標 2、驗證活體外 IUdR 合併 X 光治療所造成細胞之 DNA 損傷

此目標將測試治療後細胞凋亡效果以及 DNA 雙股

斷裂程度，來驗證此厄惹電子腫瘤療法的有效性。DNA 損傷則針對組蛋白 γH2AX 的磷酸化進行螢光染色。細胞在輻射照射後形成的雙股斷裂可誘導 ATM 機制進行 DNA 修復，其中一步驟即是 DNA 的磷酸激酶將組蛋白 γH2AX 進行磷酸化，於是偵測 γH2AX 的磷酸化成為一觀察 DNA 雙股斷裂的指標。另外彗星試驗為另一種方式來偵測 DNA 斷裂程度，將細胞進行電泳後進行核酸染色，若 DNA 有斷裂則會形成如彗星形狀，斷裂越多則會星形狀越明顯。

目標 3、X 光能譜量測與修飾

本研究欲產出 35-40KeV 之 X 光，方法為量測所使用 X 光源之能譜，再以不同厚度不同材質之濾片進行測試，以產出所要之 X 光能譜

## III. 結果與討論

本研究已完成測試頭頸癌細胞株 SAS 之細胞生長速度，對 IUdR 毒性耐受度，以及在有無 IUdR 處理下對鈷 60 照射的劑量反應關係。在 IUdR 濃度為 2.5μg/ml 時細胞致死率約落於 75~80%，在濃度為 5μg/ml 時細胞致死率約落於 50%。在 IUdR 濃度與 Thymidine 置換率實驗結果顯示，1.075μg/ ml IUdR 對 thymidine 置換率約 26%；2.05μg/ ml IUdR 置換率約 34%；4μg/ ml IUdR 置換率約 41%；7.9μg/ ml IUdR 置換率約 41%；15.7μg/ ml IUdR 置換率約 55%。此外，在攝取 12 小時後約有 70% 細胞可偵測到 IudR 在細胞內，而在 24 小時時，已有 80% 細胞有涉入 IUdR。此實驗結果乃決定未來合併 X 光治療時 IUdR 處理時間及 X 光照射時機。由於本研究進行原位腫瘤模式治療，故將 SAS 細胞株轉染螢光及冷光報導基因，並初步以行光顯微鏡以及活體光學造影檢測細胞報導基因之表現，並將細胞種植於原位口腔內側肌肉長成腫瘤再進行活體冷光造影。

為檢測 DNA 損傷，本研究採取彗星試驗技術做為量測工具，先行以鈷六十照射作為測試，細胞只有給予 IUdR 之組別其彗星尾巴並不明顯，然而在給予 5 Gy 鈷六十照射時彗星尾巴明顯出現，而在合併給予 IUdR 與 5 Gy 鈷六十照射後彗星尾巴比單獨鈷六十照射組別更加明顯，在 5 Gy 的鈷六十照射組中，合併 IUdR 處理的組別其彗星 Tail moment 為無 IUdR 之組別的 1.5 倍，顯示合併處理可益發更多的 DNA 損傷。而另一種量測 DNA 雙骨斷裂方式為偵測 γ-H2AX 磷酸化，本實驗先行以細胞處理 IUdR 搭配鈷六十照射作為測試。在輻射線照射後產生 DNA 雙股斷裂時，斷裂點的組蛋白 H2AX 的 C 端 serin138 位置隨即被磷酸化形成 γ-H2AX，並進行隨後的 DNA 修復步驟。本實驗在細胞分別在給予或不給予 IUdR 狀態下進行 0, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4 Gy 的鈷六十照射，照射後細胞固定後進行 γ-H2AX 的免疫螢光染色，在進行顯微鏡觀察極光定量。結果顯示在對照組與只有給予 IUdR 處理組別其細胞之平均細胞核光強度 (nuclear average intensity, NAI)無太大差異，隨著輻射劑量增高每組的 NAI 明顯增高，顯示輻射照射所引發的 DNA 雙股斷裂可以此法靈敏測得。然而分析比較有無合併 IUdR 處理的組別，並無每個劑量皆呈現合併 IUdR 處的的組別有較高的 NAI，僅在 1，4Gy 呈現此趨勢。

X 光修飾方面，本研究欲產出 35-40KeV 之 X 光，方法為量測所使用 X 光源之能譜，再以不同厚度不同材質之濾片進行測試，以產出所要之 X 光能譜。採用 X 光管：Hamamatsu L10951 Microfocus X-ray Sourc，並以能譜儀(X-123 CdTe spectrometer)，距離 1 公尺(空氣)進行能譜量測。量測結果能譜分布正常，可繼續以濾片進行修飾，目前備有不同厚度之鋁質及銅質濾片，然而若欲將能譜修飾在 35-40KeV，較為適合的濾片材質為鑭值金屬，故目前正找尋可協助製作之廠商。為使 X 光管在未來進行細胞及動物照射用，必先量身訂做一合適載架以及照射台。

## IV. 結論

本計畫已階段性完成以 SAS 頭頸癌各種基本量測，對 IUdR 細胞毒性，合併鈷 60 治療，量測 DNA 損傷，建立腫瘤原位模式，初步以 IUdR 進行腫瘤治療，以及 X 光機光譜量測，測試鉛鋁濾片的能譜修飾。本計畫為厄惹電子腫瘤治療之基礎及臨床前評估測試，其成果將可提供學術及臨床有關厄惹治療進一步發展之重要參考，對於未來相關醫療技術開發及臨床應用深具影響。

## 參考文獻


[1] Sadeghi, M., Enferadi, M. & Shirazi, A. External and internal radiation therapy: past and future directions. *Journal of cancer research and therapeutics* **6**, 239-248, doi:10.4103/0973-1482.73324 (2010).

[2] Adelstein, S. J., Kassis, A. I., Bodei, L. & Mariani, G. Radiotoxicity of iodine-125 and other auger-electron-emitting radionuclides: background to therapy. *Cancer biotherapy & radiopharmaceuticals* **18**, 301-316, doi:10.1089/108497803322285062 (2003).

[3] Boswell, C. A. & Brechbiel, M. W. Auger electrons: lethal, low energy, and coming soon to a tumor cell nucleus near you. *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine* **46**, 1946-1947 (2005).

[4] Prusoff, W. H. Synthesis and biological activities of iododeoxyuridine, an analog of thymidine. *Biochimica et biophysica acta* **32**, 295-296 (1959).

[5] Hampton, E. G. & Eidinoff, M. L. Administration of 5-iododeoxyuridine-I-131 in the mouse and rat. *Cancer research* **21**, 345-352 (1961).

[6] Eidinoff, M. L., Cheong, L., Gurpide, E. G., Benua, R. S. & Ellison, R. R. Incorporation of 5-iodouracil labelled with iodine-131 into the deoxyribonucleic acid of human leukaemic leucocytes following in vivo administration of 5-iododeoxyuridine labelled with iodine-131. *Nature* **183**, 1686-1687 (1959).

[7] Eidinoff, M. L., Cheong, L. & Rich, M. A. Incorporation of unnatural pyrimidine bases into deoxyribonucleic acid of mammalian cells. *Science* **129**, 1550-1551 (1959).

[8] Her, K. G. & Hughes, W. L. Incorporation of iododeoxyuridine-125-I into the DNA of L1210 leukemia cells during tumor development. *Cancer research* **30**, 236-243 (1970).

[9] Rotenberg, A. D., Bruce, W. R. & Baker, R. G. Incorporation of 5-iododeoxyuridine 1311 in spontaneous C3H mouse mammary tumours. *The British journal of radiology* **35**, 337-342 (1962).

[10] Djordjevic, B. & Szybalski, W. Genetics of human cell lines. III. Incorporation of 5-bromo- and 5-

iododeoxyuridine into the deoxyribonucleic acid of human cells and its effect on radiation sensitivity. *The Journal of experimental medicine* **112**, 509-531 (1960).

# 人才培訓與風險溝通 I

# 護理類科大學生醫療輻射防護學習教材研發與活動推廣

# Medical Radiation Protection Knowledge Enhancement Program for Nursing College Students

計畫編號：MOST-107-NU-E-227-001-NU
計畫主持人：潘 愷
e-mail：kaipan@ntunhs.edu.tw
執行單位：國立臺北護理健康大學 嬰幼兒保育系

## 摘要

醫療院所中除具放射性功能醫療設備外，尚有放射性同位素藥劑在使用。然，除具輻射學理背景之輻射技術人員對輻射防護有正確知能外，在醫院工作人員中比例最高，相對接觸醫療輻射機會較多的護理人員，其養成教育中，輻射科學的學理並未被重視。護理人員身處在輻射風險相對較高的工作環境中，若無正確的輻射知識，恐會有錯誤認知而造成過度疑慮；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。

目前醫療職場中之護理工作人員，均來自於各大學（專）護理系；本計畫擬針對大學護理科系學生族群，彙編護理類科大學生所適用的醫療輻射防護教材，同時辦理「護理類科系大學生醫療輻射防護實務訓練」，以醫療院所為主軸，從具輻射性儀器設備及物料用品開始，引導學生認識相關輻射知能，再進一步將護理專業知能與輻射常識做一連結，來強化醫療輻射防護的素養。教材編輯擬採用 ADDIE 的教學模式，結合前述研習活動，引導非輻射科學背景之護理類大學生，進行醫療輻射防護知識的學習，以達自我保護，遠離醫療輻射職災目標。

**關鍵字：**醫療輻射防護、護理類大學生、科普知識

## Abstract

The potential radiation risk exists during operating radioactive medical apparatus and using radiopharmaceuticals in the medical institution. However, most health care employees such as registered nurse, were not strengthened in the knowledge concerning radiation during their education courses except for the medical personnel who majored in related radiology. Without correct knowledge about radiation risk in working environment, registered nurse for medical services would be overly suspicious because of misperception on radiation. If the registered nurse couldn't protect themselves correctly, then of course how could they instruct patients about correct radiation protection knowledge?

This program is dedicated to execute and extend the enhancement of medical radiation protection knowledge by energizing activities for nursing college students. It is expected to improve students' attainment of radiation concept by suitable instruction regarding popular radiation science. The ADDIE teaching model will combine with the activities 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.

**Keyword**：medical radiation protection、nursing college students、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曝露的危害；但醫療院所是相對輻射高風險的工作場域：正確的診斷是治療病症的首要關鍵，醫療院所最常使用的 X 光機，例如移動式 X 光機、固定式 X 光機、乳房攝影儀、電腦斷層掃描儀以及巡迴 X 光車，或將放射性同位素直接攝入病患體內，利用攝入放射性同位素所釋出的輻射進行診斷與治療，都是利用游離輻射的穿透性來作為疾病診斷。而利用高劑量游離輻射殺傷癌細胞施行癌症的治療，亦是目前常使用的放射治療模式。醫療院所中各式輻射醫療設備的使用，讓輻射劑量的輸出遠高於一般的職業場所，故常在醫院出入的醫事從業人員及病患，相對會有較多機會接受到不必要的輻射曝露。

但除了具備輻射性學理背景之輻射相關醫事技術人員之外，絕大部分在醫療院所中工作的護理人員，在其養成教育的過程中，輻射科學相關學理知能的充實並未被重視。醫療產業相關從業人員，身處在相對具輻射高風險的工作環境中，若沒有具備正確的輻射防護知識，恐怕會使個人受到輻射傷害，或是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。護理人員一旦進入醫療職場之後，其專業分工的場域若非輻射專門單位，往往少有相關輻射防護之教育訓練。國內目前有超過 30 大專校院具有護理科系，每年均培育大量準護理人員投入醫療職場工作，故對此類將進入醫療院所工作之護理人員，施與輻射防護教育訓練的最佳時機，將會是在其進入職場之前的最後專業學習階段。

## II. 主要內容

為使護理類科大學生能具有「醫療輻射防護」的概念，本計畫擬針對大學護理科系學生族群，彙編護理類科大學生所適用的醫療輻射防護教材，同時辦理「護理類科系大學生醫療輻射防護實務訓練」，以醫療院所為主軸，從具輻射性儀器設備及物料用品開始，引導學生認識相關輻射知能，再進一步將護理專業知能與輻射常識做一連結，來強化醫療輻射防護的素養。教材編輯擬採用 ADDIE 的教學模式，結合前述研習活動，引導非輻射科學背景之護理類大學生，進行醫療輻射防護知識的學習，以達自我保護，遠離醫療輻射職災目標。本計畫目標有二：一、開發適合護理類科系大學生「醫療輻射防護」教材；二、辦理醫療輻射防護推廣活動提昇護理科系大學生輻射防護知能。

## III. 結果與討論

本計畫係以護理類科大學生為對象，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 2 小時（包括講習課程及環境輻射檢測實務操作），總共舉辦了 25 場次，累計辦理時數約計 50 小時。共有來自全省各大學（專）護理系科師生 1,434 人（其中男生：176 人，女生：1258 人）一起參與。

本研究在醫療院所輻射的實際經驗與感受調查部分，主要評估研究對象對醫療院所輻射防護態度認知上的改變，於課程進行前後進行調查及統計分析，用於評估其學習成效。經實施課堂教學後，研究對象對醫療院輻射防護態度認知程度整體是有所提升，並具體顯示醫療輻射防護認知概念學習是明確需要且具有成效的。

另針對輻射防護的認識調查部分，在評估研究對象對輻射防護的認識，於課程進行前後進行調查及統計分析，用於評估其學習成效。經實施課堂教學後，研究對象對輻射防護的認識答對題數由 6.63 提升至 9.92 題，達統計上差異。若每題分數以 6 分計算，最高分為 102 分，經實施課堂教學後，平均分數由 39.80 分上升至 59.52 分，達統計上差異，具體顯示醫療輻射防護認知概念學習是明確具有成效的，但在整體學習的部分，課程實施後研究對象對輻射防護的認識分數僅達 59.52 分，表示此部分仍有很大的進步空間，需持續的輻射相關課程融入護理養成的教育中。

另對「環境輻射檢測實務體驗滿意度調查表」並做分析統計（Likert 五點量表計分標準），平均最高分為「環境輻射檢測操作後，可以幫助我認識輻射」，其同意程度平均分數為 4.27 分，而整體成效評值的平均數亦達 4.04。而學生在開放式問題的回答結果得知學生在輻射防護方面，印象最深刻的是防護三原則（時間、距離和屏障），其次是對於輻射屏障的材質特性有很高的注意；在認識輻射方面，實際測量輻射讓學生感受最深刻且在實際參訪後改變自己舊有的輻射概念。顯見課程實施後進行環境輻射檢測實務體驗的成效是正向的。

## IV. 結論

經實施課堂教學後，研究對象對醫療院輻射防護態度認知程度整體是有所提升，而在醫療輻射防護知識層面的分析結果上，研究對象對輻射防護的認識答對題數由 6.63 提升至 9.92 題，平均分數由 39.80 分上升至 59.52 分，達統計上差異（$p$=.000），在環境輻射檢測操作後，學生對「環境輻射檢測操作後，可以幫助我認識輻射」、「接受到游離輻射的強度，與距離放射源的遠、近有關」、「游離輻射無色、無味、無形，所以必須靠儀器才能偵測得到」等三項選項得分最高，整體成效評值平均數達 4.04，顯見實施環境輻射的檢測，讓學生更進一步清楚輻射的特性及防護的原則，且讓學生在醫療輻射防護概念之態度表現上是呈現正向態度。綜上，證實本計畫之實施有達到預期之目標。

本計畫在探討「護理類大學生醫療輻射防護認知概念」，了解目前護理類科大學生對於醫療輻射防護的態度與知能，並在防護教育研習活動後，評估對防護認知的成效，以作為日後護理人員醫療輻射防護教育推動之參考。從此次「護理類大學生醫療輻射防護認知概念」的課程教學，研究對象在知能學習成效的評量上顯示，參加人員都有顯著與正向的提升，同時也強化了護理類大學生醫療輻射防護的態度與知能，對未來將進入醫療體系工作的護理類大學生是相當有所助益。在整體學習的部分，課程實施後研究對象在輻射防護的認識分數雖提高約 20 分，但只有 59.52 分，表示一次性的研習課程，雖有知識學習的果效，但仍需持續將輻射相關知能融入護理養成教育中，始能將醫療輻射防護的知能，更深化於護理專業學理中。

在醫療院所進出頻繁的護理工作人員，相對是輻射高曝露風險的族群，尤其是第一線救難與醫護人員，更需要有醫療輻射防護認知正確的態度與認知；除應廣泛辦理此類研習活動外，更需要將相關的醫療輻射防護的認知概念，融入在護理人員的養成教育中，讓每一位的護理人員擁有醫療輻射防護的認知概念，能適時預防高暴露風險所帶來得潛藏危機。

### 參考文獻


[1] 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。

[2] 伍春、高紅、王曉冬（2016）。核應急救援中護理人員的角色適應。新西部，30，73-75。

[3] 巫俊明、王愛義、張榮華（1998）。在職醫護人員「輻射安全與防護」推廣課程及相關認知與迷思概念研究。元培學報，2，153-176。

[4] 李敏杰、徐爾善、朱慧、廖力（2016）。本科護生核輻射認知與培訓需求調查。護理研究，30(3)，1135-1137。

[5] 周霞、張嵐、吳傑（2011）。醫務人員醫療輻射防護研究進展。中華現代護理雜誌，17(26), 3101-3104。

[6] 徐明德（2008）。核能、輻射與生活通識教材。

[7] 翁寶山（2003）。台灣輻射防護史話。臺北市：行政院原子能委員會

[8] 張寶樹（2011）。醫用游離輻射防護。臺北市：合記圖書。

[9] 張紘綸、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。

[10] 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。

[11] 陳芳、揚石麟（2012）。大專護生對輻射認知水平的調查研究。國際護理學雜誌，31(3)，547-548。

[12] 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。

[13] 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。

[14] 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

# 應用擴增實境(AR)推廣多元族群輻射教育之研究
# Nuclear Safety Perceptions and the Deveopment of Nuclear Energy Policy

計畫編號：MOST 107-NU-E-845-001-NU
計畫主持人：古建國
e-mail：kuo@utaipei.edu.tw
執行單位：臺北市立大學應用物理暨化學系

## 摘要

結合親子活動，使用興新科技例如擴增實境教材，透過手機或平板的整合，除增進輻射與核能防護教育的學習成效，可以提升學習者使用興趣。本研究目的包括製作多元族群為對象的擴增實境學習教材、辦理多元族群輻射教育親子活動與輻射檢測提升輻射認知與防護知識。研究對象家庭中老人、父母親(特別是外籍配偶)與小孩。輻射教材內容包括核災緊急應變機制、常見醫療輻射知識等。研究步驟包括文獻探討作為編輯教材參考，進行擴增實境環境建構，整合圖片與動畫製作教材, 並進行學習成效評估。研究工具為學習者學習調查。

關鍵詞：擴增實境、多元族群、輻射教育。

## Abstract

For the purposes of this study includes the production of diverse ethnic groups spread in augmented reality learning materials, handle multi-ethnic radiation education and the promotion of radiation detection radiation protection knowledge and cognitive. The units of teaching materials will have nuclear power plant safety, knowledge of common medical radiation.

Research steps include literature reviews. This research aims for a continuation, to undergo digital teaching material for nuclear safety and radiation protection and prevention, and also update the existed website since 2012, and also add on the films and interaction games to attract more viewers to learn about the website. Besides, the related achievements will be developed into application for smart phones, to provide the public rich knowledge about nuclear safety and emergency measures.

Keywords: Augmented reality、Multiple ethnic groups、Radiation education

## I. 前言

### 1.動機

所謂擴增實境(AR)是一種結合影像、文字、聲音或照片透過手機或平板的整合的一種工具，藉由虛擬畫面增加資料內容，將真實的環境和虛擬的物件同時重疊在同一個畫面中，方便學習者學習。

張皓淵(2011)研究發現透過以擴增實境式輔助教學的學生相較於傳統式教學，有較佳學習能力，學生們認為擴增實境是一種有趣且好玩的學習方式，研究亦發現，學生在操作過程中利用擴增實境做觀察同時還同時與同學進行討論，提升學生們或學生和老師間的互動。唐聖傑(2011）)研究發現透過以擴增實境式輔助教學，可以提升學生的學習興趣。張樹安(2011）)研究發現透過以擴增實境進行「新科技敘事模式」教學，在「故事」、「影音效果」、與「互動機制」之間讓使用者體驗到故事、感官刺激合而為一的導覽經驗。

研究者若能利用擴增實境將這些多媒體資源整合，透過教學應有助於提高新住民或親子學習輻射教育興趣，故編輯擴增實境教材進行多元族群輻射教育與推廣有其重要性。

### 2. 研究目的

配合 2025 非核家園政策目標，強化核災緊急應變機制宣導，整合多元族群教材(含中文、英文、本土母語(閩南語)、越語、印尼語與泰語之動畫與繪本)發展擴增實境學習教材，提供輻射與核能防護教育用，內容涵蓋民眾關切民生與醫療的應用及核能電廠意外事故之民眾防護等。本研究目的如下：

(1) 製作多元族群為對象的擴增實境學習教材。
(2) 辦理多元族群輻射教育體驗活動提升輻射認知與防護知識。
(3) 辦理參訪相關核設施之親子活動並進行輻射檢測。

## II. 研究方法

### 1. 研究步驟

本研究根據研究動機、研究目的與文獻探討的結果，分為準備階段、實施階段與撰寫階段：

(1) 準備階段:根據現有動畫與繪本為基礎，著手建立擴增實境教材。擴增實境教材製作流程，參考ADDIE教學模式進行開發。在準備階段，包括三個步驟：分析、設計與發展教材。
   a. 分析教材內涵：配合2025 非核家園政策目標，並配合中小學現行課程有關內容，進行規劃、確立主題與架構。
   b. 設計教材: 根據分析教材規畫方向，設計圖卡、動畫放置位置等，訂定教材架構。
   c. 發展教材：進行擴增實境環境建構，整合圖片與動畫製作教材
(2) 實施階段：本研究之場域為學校或社區，利用夜間或假日時間實施本研究之課程。
(3) 撰寫階段：整理資料及撰寫論文。

### 2. 研究對象

本計畫對象包括教師、學生、親子與在中小學終身教育之新住民為主要對象。因此教材與學習深淺以國小至國中為範圍，包括家庭中老人、父母親(特別是外籍配偶)與小孩，對象使用語言涵蓋多元族群（對象包括閩南語、越語、印尼或泰語)，上課地點以參訪設施適合場地或學校為主。

### 3. 建置系統與使用

本研究系統建置分為設計及技術兩方面：設計方面包括教學內容規劃、圖片或照片繪製，以及動畫素材編輯；技術方面規劃擴增實境整合圖片與動畫製作教材，希望藉由 AR 特性將相關輻射知識與動畫結合，讓學生能透過手機或平板更容易獲得學習，提供學習者另一種全新的學習方式。

### 4. 活動規劃

(1) 輻射教育推廣

以中小學終身教育之新住民或成人為主要對象，規劃輻射教育內容涵蓋核災緊急應變機制、常見醫療輻射知識等，於學校課外時間進行教學，透過擴增實境輔助，以擴展學生學習觸角。

a. 授課時數：課程規劃每次二小時為原則。

b. 授課對象：新住民或成人為主。

(2) 假日親子參訪活動

以中小學終身教育之新住民或成人為主要對象，規劃假日親子活動，除了介紹輻射相關知識之外，還進行實地偵測輻射量，以擴展學習觸角。

a. 授課時數：課程規劃 4 小時為原則。

b. 授課對象：新住民或成人為主。

c. 授課時間：課外時間。

d. 授課地點：北投溫泉博物館或電力展示館。

e. 課程內容：配合參訪活動，課程內容說明包括自然界輻射量檢測、核災緊急應變機制、常見醫療輻射知識與生活中輻射應用。

### 5. 研究工具

為了解學生在進行教學活動學習情況，依據研究目的、參考文獻資料和教學內容編撰學習意見調查，信度之 Cronbach's Alpha 值為.900。我們抽樣含大人與小孩合計 54 人進行意見調查。

測驗卷需經專家效度審查後，再次修改形成問卷。教學者進行教學活動之際，會針對學生學習的情形進行觀察與討論式互動，了解多元族群得學員學習反應，是否有學習困難?如何排除困難?以及教材的使用狀況進行詳細記錄，於課堂結束後，完成省思札記。

### 6. 資料處理

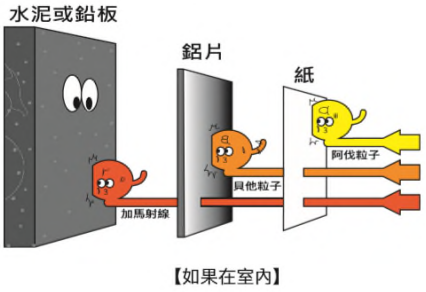
本研究資料處理是指對於研究過程中所蒐集到的資料，予以編碼及建檔，以 SPSS V20.0 中文版進行資料的統計及分析，其中意見調查分為 4, 3, 2, 1, 課程滿意度為 5, 4, 3, 2, 1 進行描述性統計及成對樣本 t 檢定。

## III. 結果與討論

### 1. 製作多元族群為對象的擴增實境學習教材

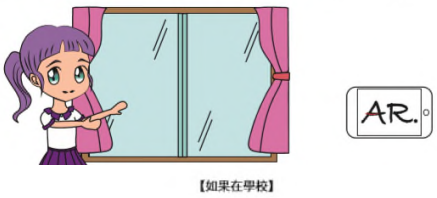



核反應過程，產生游離輻射可分為 α、β、γ，它們的特性不一樣，穿透能力也不同。




【如果在室內】

1.如果正在室內，請勿外出，關閉門窗並關閉空調，減少室外空氣留到室內。




【如果在學校】

聽從學校老師指示，進行避難或疏散。






圖 1 教材封面與內容摘錄

**2. 辦理多元族群輻射教育體驗活動**

本研習活動涵蓋台北市、新北市與屏東縣就讀國小與新住民學員，時間與場次等說明見表 1。

表 1 研習課程

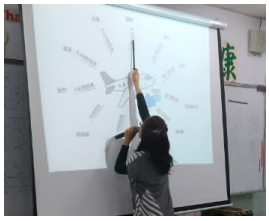
| 時間 | 地點 |
|---|---|
| 2018/11/09 | 北市大與周邊戶外景點輻射實測 |
| 2018/11/25 | 屏東信義國小 |
| 2018/12/08 | 屏東東海國小 |
| 2018/12/12 | 八里國小 |
| 2018/12/15 | 屏東大同國小 |
| 2018/12/16 | 屏東唐榮國小(I) |
| 2018/12/16 | 屏東唐榮國小(II) |







圖 2 多元族群輻射教育體驗活動





**3. 辦理參訪相關核設施之親子活動並進行輻射檢測**

本研習活動涵蓋台北市、新北市與屏東縣就讀國小與新住民學員，時間與場次等說明見表 2。

表 2 參訪與實測

| 時間 | 地點 |
|---|---|
| 2018/11/18 | 台電北展館與周邊戶外景點輻射實測 |
| 2018/12/08 | 台電南展館與周邊戶外景點輻射實測 |
| 2018/12/08 | 台電南展館與周邊戶外景點輻射實測 |
| 2018/12/09 | 台電北展館與周邊戶外景點輻射實測 |
| 2018/12/15 | 台電南展館與周邊戶外景點輻射實測 |
| 2018/12/23 | 台電北展館與周邊戶外景點輻射實測 |






圖 3 參訪相關核設施之親子活動並進行輻射檢測

**4.輻射學習意見調查**

抽樣 54 位學員進行意見調查，見表 3。

表 3 學習意見調查

| | 平均數 | 標準差 |
|---|---|---|
| 1.我們生活中的環境就有天然輻射存在 | 3.61 | .492 |
| 2.人體接受過X光或電腦斷層等的設備照射後，不會有輻射殘留或污染發生 | 3.26 | .782 |
| 3.看見病房內在使用移動式X光機時，大家要盡可能離很遠，以免對身體造成不良影響 | 3.35 | .677 |
| 4.我們應該要了解哪些是非游離輻射(紅外線、微波或無線電波) | 3.63 | .487 |
| 5.基礎輻射防護知識應加入學校課程中 | 3.74 | .442 |
| 6.當有核能意外災害射，應以搶救病患生命優先搶救，輻射計量可後續進行偵測 | 3.44 | .769 |
| 7.我們應該要了解那些是游離輻射(X光和α射線) | 3.63 | .487 |
| 8.核子意外發生之緊急狀況下，知道何時才可以吃碘片以保護甲狀腺的知識。 | 3.57 | .536 |
| 9.核子意外發生狀況在室外或學校緊急應變知識 | 3.67 | .476 |
| 10.認識核能發電原理 | 3.67 | .514 |

大人與小孩對學習意見與變異數分析，結果見表 4 與表 5 。

表 4 大人與小孩對學習意見分析

| | 個數 | 平均數 | 標準差 |
|---|---|---|---|
| 小孩 | 15 | 38.2667 | 2.81493 |
| 大人 | 39 | 34.5385 | 4.21055 |
| 總和 | 54 | 35.5741 | 4.20064 |

研究發現小孩滿意度高於大人。

表 5 大人與小孩對學習意見的變異數分析

| | 平方和 | 平均平方和 | F | 顯著性 |
|---|---|---|---|---|
| 組間 | 150.578 | 150.578 | 9.979 | .003 |
| 組內 | 784.626 | 15.089 | | |
| 總和 | 935.204 | | | |

研究發現小孩與大人意見差異達顯著差異。

另外我們分析學員學習後對輻射了解程度，發現 54 位中 75%以上自認比學習前更了解輻射課程。

表 6 學員學習後對輻射了解程度

| | 個數 | 平均數 | 標準差 |
|---|---|---|---|
| 沒差 | 2 | 35.5000 | 6.36396 |
| 略懂 | 4 | 33.7500 | 3.40343 |
| 懂多一些 | 8 | 32.5000 | 3.81725 |
| 懂更多 | 40 | 36.3750 | 4.06162 |
| 總和 | 54 | 35.5741 | 4.20064 |

研究發現三成左右大人有學過輻射相關概念，但七成大人沒有學過輻射相關課程，可見辦理本類似活動有其必要性。

學生學過輻射，地點在學校為主，廣播新聞次之。

表 7 學員學習輻射來源

| | 個數 | 平均數 | 標準差 |
|---|---|---|---|
| 無 | 24 | 35.7083 | 3.90628 |
| 學校課程 | 20 | 36.1000 | 4.10263 |
| 醫院課程 | 1 | 33.0000 | . |
| 廣電媒體 | 4 | 36.0000 | 5.47723 |
| 社區課程 | 1 | 40.0000 | . |
| 其他 | 4 | 31.2500 | 4.71699 |
| 總和 | 54 | 35.5741 | 4.20064 |

## IV. 結論

（一）結論

1. 本計畫是針對多元族群設計輻射概念與核子防護教材並辦理學習活動推廣，尤其透過與新住民關懷協會或學校(特別是開設新住民夜間課程或新住民學生較多學校)合作進行輻射教育推廣，提升多元族群瞭解輻射相關知識與應用，議題包括醫療輻射、生活中輻射知識與核子防護等。
2. 本計畫辦理六場戶外親子認識輻射與實測體驗活動，透過參訪北區與南區電力展示館，除了了解生活中輻射與應用之外，本活動特別加入環境背景之游離輻射檢測，期能釐清與提升民眾對於環境輻射的認知。
3. 透過與學校新住民族群或新住民關懷協會合作辦理新住民為主的認識輻射與防護研習，並透過動手實測或參訪，對提高學員的學習興趣。

(二)建議

1. 編輯多元族群 AR 輔助教材。
2. 透過親子共學與參與活動認識輻射與核子防護概念。

## 參考文獻

[1] 科技大觀園~瘋狂的 AR－擴增實境應用 https://scitechvista.nat.gov.tw/c/gLji.htm。

[2] 唐聖傑(2011)。**擴增實境結合行動裝置之應用程式研究與創作-以兒童多媒體學習為例**（未出版之碩士論文）。國立臺北科技大學互動媒體設計研究所，臺北市。

[3] 張皓淵(2011)。**擴增實境應用於輔助教學之研究-以國小四年級自然生態學習為例**（未出版之碩士論文）。玄奘大學大學資訊管理學系碩士班。

[4] 張樹安(2011)。**3D 擴增實境應用於行動導覽之研究**(未出版之碩士論文)。國立政治大學數位內容碩士學位學程。

# 針對不同族群設計開發原子能科普教育學習課程
# Designing and Developing Atomic Energy Science Education Curriculum for Different Ethnic Groups

計畫編號：MOST 107-NU-E-007-006-NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：劉鴻鳴
e-mail：hmliu@mx.nthu.edu.tw
計畫參與人員：劉鴻鳴、吳勇慶
執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

## 摘要

本計畫主要是藉由改良、精進已開發完成之簡易輻射度量儀器及設計簡易輻射偵測模組，並透過活動規劃與內容增加，進一步設計出相對應的實驗課程與教材，以輻射度量實際體驗活動為開端，再延伸介紹輻射應用、輻射防護、甚至放射性廢棄物處置…等相關課題，讓民眾與學子們可以認識生活環境中的輻射及輻射量測，並瞭解輻射防護措施等基本常識。
關鍵詞：輻射度量、輻射防護、輻射劑量、輻射應用。

## Abstract

This project is mainly to improve the radiation measurement instruments that have been developed and to further plan and design corresponding experimental courses and teaching materials. The promotion process starts with radiation measurement and actual experience activities, and extends the related topics such as radiation application, radiation protection, and even the disposal of radioactive waste. It is hoped that the activities will enable the people and students to understand the radiation and radiation measurements in the living environment and understand the basic knowledge of radiation protection.
Keywords：Radiation measurement, Radiation protection, Radiation dose, Radiation application.

## I. 前言

計畫構想源起於過去幾年在原子能科普教育上的努力與經驗，並加以擴充。在過去幾年觀察到，參與我們舉辦之原子科學科普活動之中，在介紹環境中的輻射及能源知識演講的時候，經常發現 K12（小學與中等教育）師生、一般民眾對於清大反應器館內外環境的輻射能量高低感到好奇，尤其在日本福島事件之後，參訪的一些團體，對於輻射及能源等相關議題更為熱切關注，因此我們就利用現有及自行開發出的游離輻射偵測儀器，在帶領參訪團體時，即偵測週遭環境游離輻射數值並進行相關知識講解，有不少參觀師生對於偵測儀器感到興趣，故在此經驗下，我們認為可結合中心既有教學資源，並融入自行開發及改良的儀器，使得學校團體、社會大眾等在沒有相關知識背景下，能有更多機會接觸原子能科普知識。

此外，近年來國內民眾對於核災食品進口等相關議題也甚為關注，但對於食品中是否含有放射性物質的認知、及可能造成的危害卻不甚了解，在以訛傳訛的情況下，造成了一般民眾對於輻射的過度擔憂。

因此，本計畫結合清華大學原科中心既有的參觀活動與課程資源，同時邀請本校師長、校外廠商、核能研究所、以及輻射偵測中心具備輻射度量專長的學者專家一起合作，進行基本輻射度量儀器之精進與改良（以降低製作成本並提高儀器性能為目標，也可提供中小學的師生進行 DIY 活動）並設計新款簡易輻射偵測器，同時針對已有之實驗課程及上課講義進行相對應的修正與內容擴充，達到寓教於樂、親身體驗的科普教育目的。

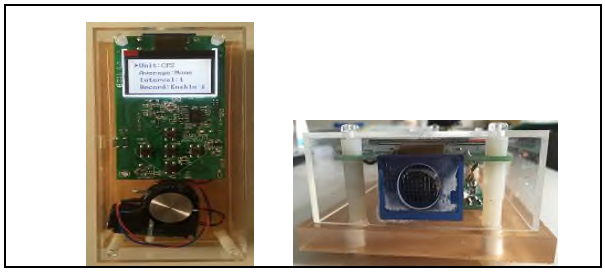
## II. 主要內容

本計畫的內容主要包含三部分：(1)輻射度量儀器的改良；(2)與新竹及臺南科普教育團隊合作開發新教材；(3)課程設計與原子能科普教育的推動。分別說明如下：

(1) 在輻射度量儀器的改良與精進方面：清大原科中心科普團隊(本團隊)與核康科技股份有限公司在 2015 年曾合作進行輻射計數器研製的研究，並於 2016 完成以尾端窗型蓋格計數管並自製具數據顯示功能的手持式游離輻射偵測器的裝置(如下表 1)，但受限於儀器之穩定度不佳、內部蓋格管故障率偏高(50%)，導致教學使用受到極大的限制。因此本計畫在今年度與核康公司持續針對該款儀器進行改善與精進(進行蓋格管更換及內部電路模組調整)，降低故障率(30%)並提高儀器測量的穩定度，做為後續輻射度量實驗之運用。

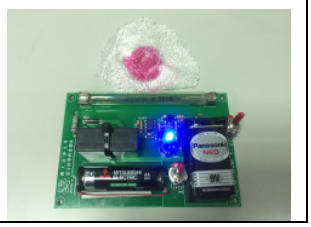
表 1：核康科技公司所研發的手持式輻射偵測儀

| G150　(美製蓋格管 LND712 ) |
| --- |
|  |
| G50　(透明式，美製蓋格管 LND712) |



(2) 與新竹及臺南地區科普教育輔導團隊合作，設計新版的簡易型蓋格管輻射偵測器及模擬蓋格管偵測-電學 DIY 教學模組，讓更多學校師生能藉由動手操作的方式來體驗學習原子能科普知識的樂趣。

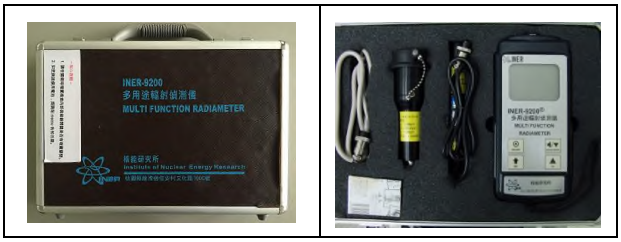
表 2：與科普教育輔導團隊老師開發之教材

| 與新竹科普教育輔導團隊老師合作開發之模擬蓋格管偵測-電學 DIY | 與臺南科普教育團隊老師合作開發之簡易蓋格管輻射偵測器 |
|---|---|
|  |  |

(3) 在課程設計與原子能科普教育的推動方面：本計畫利用上述改良及新開發之儀器，針對高中以上之學生（含大專院校）設計輻射度量課程。除此之外，本計畫亦向核能研究所商借快速輻射偵測儀器（如下表 2），做為中小學師生、以及一般社會大眾在進行認識輻射過程，做為實際體驗動手量輻射的儀器。

表 3：核研所開發之快速輻射偵測儀器

| 核能研究所-FS99 快速輻射偵查儀 | |
|---|---|
|  |  |
| 核能研究所-EDU2015 放射線教學套組 | |
|  |  |
| 核能研究所-INER9200 多用途輻射偵測器 | |



本計畫以 K12 教育推廣為主軸，針對不同年齡層推動不同的方式，以進行原子能科普教育推廣課程：高中以上學生，本計畫以邀請參觀清華大學原科中心為主，除了參觀相關核子設施及輻射應用場所之外，並規畫基礎輻射度量實驗體驗課程；針對國中國小學生或教職員工，本計畫則採取主動出擊，免費前往該校演講，並提供輻射儀器操作與度量體驗；針對一般社會大眾，本計畫則採取與相關產官學、社教單位等合作，以配合及支援活動規劃、內容的方式，利用發展完成之儀器、課程、教材等，因應不同單位的需求，提供人力及器材上的協助。

利用上述之儀器及相對應發展完成的課程，本計畫在今年度執行之成果說明如下：

## III. 結果與討論

(1) 為了將上述之實驗設計推廣至高中師生，本計畫結合原科中心現有之參訪資源，持續推廣適合高中師生（含大專學生）實作的輻射度量實驗教材及內容：在 2018 年規劃了一套包含演講、設施導覽及動手做實驗的活動，安排對象為高中師生，名為「2018 原子科學探奇之旅」。活動的課程表(附於具體成果)，包含認識輻射、認識核能及設施、認識核廢料三個演講主題，以及設施參觀(反應器館及同位素館)和動手操作實驗課程。此系列活動總計舉辦 20 場次，參與人數共 956 人。但受限於場地、同時為顧及教學品質、以及讓參與師生可以深入學習到學校課程中較少提及的輻射知識，我們不得不限制每場次師生人數在 45 人以內。




圖 1：2018 原子科學探奇之旅活動

(2) 本計畫針對國中、國小學生、以及教職員工的輻射教育推廣，主要採取主動出擊的方式，推出「2018 知輻習輻，核家平安 Q&A」免費講座，內容包括：認識輻射與核能（以 Q/A 方式進行）、及動手找輻射（簡

易輻射偵測儀器的示範與體驗)，並將此訊息轉告知各級學校單位，結果報名超乎想像的踴躍，惟受限於本計畫之經費及人力資源有限，最後本計畫接受 17 場次的邀約，對象分佈於全台各地中小學，其中以中南部偏遠地區中小學較多，參與人數共達 1438 人。(圖 2 則是「2018 知輻習輻，核家平安 Q&A」的活動留影)

透過認識核能與輻射 Q/A 的活動進行方式，國中小學生及教職員工所提出的問題可謂千奇百怪、五花八門，如：手機電磁波對人體的影響是什麼？有什麼東西可以阻檔家用微波爐的輻射？若發生核災事件，放射性物質會如何影響環境？受核災影響的食品是否會導致食品基因突變，若吃下去對人體會有影響嗎？微波食品是否會讓食品殘留輻射，要怎麼選擇使用微波容器？…等，這樣的活動也讓我們更進一步瞭解一般民眾對於輻射的恐懼大多源自於生活經驗，也讓我們在活動過程中逐步調整方向，除了傳遞正確的輻射基本知識之外，更重要的是解除民眾生活上的疑慮。




圖 2：2018 知輻習輻核家平安 Q&A 演講活動

另外，除了免費提供輻射演講外，本團隊亦在臺東及新竹偏遠地區學校辦理中小學科學社團活動，與臺東大學、核能與新能源教育研究協進會、至善基金會、清大原住民文化社團及臺南兒童科學館合作，在臺東寶桑國中、新竹尖石國中、玉峰國小及兒童科學館辦理適合中小學生的原子能科普教育活動，以教學與遊戲結合的方式，讓國中小生能有更多機會接觸到輻射知識。而此項社團活動共辦理 21 場次，接觸的學生達 343 人。




圖 3：中小學科學社團活動

透過知輻習輻演講、辦理中小學社團活動的方式，將原子能科普知識推廣至偏鄉地區外，本團隊也採取參與會議(本年度參與物理教育聯會及科博館科普論壇)，與更多中小學教師建立連結與交流，建立與更多 K12 教師合作的管道，共同推廣原子能科普教育。

(3) 在一般民眾的輻射教育推廣方面，本計畫主要是配合其它主辦單位，利用既有之儀器及已開發完成之課程，因應不同主辦單位的需求，提供人力或器材的協助。其中配合原能會與科教館合作之 107 年縣市科學巡迴教育活動中，本計畫參與闖關設站活動(動手量輻射)。2018 年共支援 5 個場次，參加對象以一般民眾及學生團體為主，達數萬人次。且我們也主動與清華大學學習科學與科技研究所科普團隊、車籠埔斷層保存園區合作，辦理與上同等規模的闖關活動 2 個場次，讓更多參與活動的學生及親子團體都能享受到學習原子科學的樂趣。




圖 4：107 年縣市科學巡迴教育活動

除此之外，本計畫所開發的儀器及設計的教材也應公家單位及民間企業的邀請，提供人力或器材的支援，如：(a)新竹市消防局的防災教育訓練，本計畫則應邀演講並進行儀器示範實驗，同時說明清華水池式反應器(THOR)的緊急應變機制，建立雙方未來持續互相支援的管道；(b)屏東空軍後勤指揮部所舉辦之輻射再教育訓練，本計畫也提供演講課程。(c)主動與車籠埔斷層園區洽談合作，應邀講解及進行儀器示範實驗之外，雙方建立起未來持續合作管道；(d)民間企業(四方報、科普一傳十)的邀請，本計畫也應邀進行認識輻射演講、體驗輻射儀器簡易操作及參觀設施等方式。

在對於一般民眾的原子能科普教育推廣方面，我們也特別注重社區樂齡族群、親子族群等方面的需求，因此與臺北天文館、臺中科博館、臺中社區大學、竹苗數位機會中心、中和農會等單位合作，結合各方資源，共同將原子能科普教育推廣至在地的樂齡族及親子族群。以演講、體驗實驗、玩遊戲、玩 APP、戶外教學、辦營隊…等多種方式，讓學員們在學習原子能科普知識的同時，還能接觸到更多有趣的科學知識，以提升學員自主學習、勇於發問，並且進行深度思考的機會，免除受報章媒體影響觀念的可能性。




圖 5：一般民眾-樂齡族群推廣活動，

共 16 場次，參與人數達 613 人




圖 6：一般民眾-親子族群推廣活動及營隊，

共 37 場次，參與人數約 9 千多人次

(4) 本計畫針對所主辦的活動，經由設計問卷的方式，收集以上不同對象的回饋資料，了解學員對於輻射的認知，並選擇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，在課程或活動完畢後，收回近 900 份的回饋單據，此資料將可協助我們進行原子能科普推廣活動的調整、探討及歸納，做為日後課程及活動教案修改依據。

當然本計畫也特別注重性別平等教育，依據目前統計的結果，男女比例約略相當，針對中小學教職員工的活動中，女性的比例明顯高於男性。此外，本計畫也希望平衡城鄉差距，若有偏鄉學校或弱勢團體提出申請，在時間與人力允許的情況下，盡量優先錄取前往進行講演活動(圖 7 表示本計畫推廣輻射教育的足跡地圖)。




圖 7：2018 年本計畫推廣輻射教育的足跡地圖

## IV. 結論

本計畫依據目前已完成簡易型手持式游離輻射偵測器的改良，並持續進行功能及品質的精進，及設計新版簡易蓋格管輻射偵測器及模擬蓋格管偵測-電學 DIY 教學模組，並將此教材擴大應用於高中學生的參訪課程之中，讓更多高中以上的學生有機會體驗輻射度量課程。

本計畫主辦的活動包括：(1)辦理 20 場次適合高中生之「2018 原子科學探奇之旅」活動，讓更多高中師生有機會藉此獲得原子科學基礎知識與應用；(2)辦理 17 場次適合中小學師生之「2018 知輻習輻，核家平安 Q&A」演講，及 21 場次中小學生科學社團活動，藉由結合演講、示範實驗及遊戲的方式，解答師生們對於原子科學常見之疑惑；(3)本計畫也應其他科教單位、產官學主辦單位的邀請，配合辦理了共 66 場次適合學生團體、一般民眾(政府職員、民間企業、樂齡族、親子族)之原子能科普教育推廣活動、講座及營隊，讓更多民眾能藉此了解輻射基礎知識，解除過往對於輻射的錯誤認知及偏見，免於過度擔心及恐懼，

本計畫未來的規劃與期望，目標將著重在以下幾點：(1)希望能將已完成之簡易型手持式游離輻射偵測器結合更多實驗器材及教案，發展出一套適合不同族群的

攜帶式教學套組；(2)持續辦理適合高中生之「原子科學探奇之旅」活動，並透過參與會議及活動的方式，取得更多合作單位及管道共同辦理，讓偏遠地區、南部東部學校能有更多參與的機會；(3)持續辦理適合中小學之「知輻習輻，核家平安」演講及「中小學生科普社團」，並藉此與中小學教師合作，開發出適合不同年級的中小學「認識輻射與核能」基本教材，讓更多學生能透過參與講座及社團的方式來學習及接觸多方面的科普知識；(4)持續推動適合一般民眾、社會不同族群的原子能科普教育推廣活動與講座，取得與更多社教單位、產官學術單位的合作，讓原子能科普知識能推廣到全台各地區。

然而，目前本計畫仍以點的方式往外擴散，盡一己之力努力推廣輻射教育，但影響層面仍屬有限。雖然本計畫以清華大學原科中心為基礎已建立講師群，但仍希望未來能配合不同對象的教案設計，將教案留給當地的老師沿用，本計畫僅在每年計畫期間辦理演講、活動及營隊的方式，讓更多 K12 教師能有機會接觸及參與，成為全面式的輻射推廣教育。

輻射教育推廣是一種長期且持續性的計畫，除了向下扎根之外，如何透過活動與意見的回饋，逐步調整溝通內容與方式，才能讓正確的輻射知識繼續傳遞下去。

# 民眾緊急應變之虛擬實境體驗
# Virtual Reality of Emergency Response during Nuclear Accident

計畫編號：MOST 107-NU -E-262-002 -NU
計畫主持人：陳彥均
e-mail：chen.mg.lhu@live.com
執行單位：龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系

## 摘要

本計畫利用最新的虛擬實境技術，來製作民眾緊急應變的虛擬實境體驗。透過這個虛擬實境體驗，民眾可以實際操作執行緊急應變中的各項重要工作。透過這種方式，不但可以吸引更多民眾來接觸緊急應變知識，也能夠讓參與的民眾，留下更深刻的印象，獲得更好的宣傳效果。本計畫所開發的虛擬實境體驗，免費授權給原子能委員會使用。讓原子能委員會可以在科學展覽或是科學博物館的活動之中，向民眾展示，並且讓民眾參與體驗
。

關鍵詞：核能事故，緊急應變，虛擬實境。

## Abstract

Interactive contents are usually more impressive. Therefore, virtual reality technology is adopted to create Experiential program of emergency response. Users can execute the important works of emergency response in this virtual reality program. It will attract more people and impressive them. Better propaganda effect of emergency response can be obtained.

Keywords: Nuclear accident, emergency response, virtual reality.

## I. 前言

我國現有核電廠的現況，以及使用執照的到期日期，如表一所列。除了尚未商轉的核四廠之外，另外有核一廠的兩部機組，處於停機狀態。考量到核一廠二號機的使用期限，重啟運轉的機率應該不大。至於使用期限較長的核二廠和核三廠，受限於目前的電力供應情況，應該也不會提早除役。因此，在 2025 年之前，核能仍然會是台灣的重要電力來源之一。核電廠的安全及配套措施，包含民眾緊急應變等等，仍然是政府需要重視的工作項目。

表一：我國核電廠之現況與執照到期日

| 核電廠 | 機組 | 現況 | 執照到期日 |
|---|---|---|---|
| 核一廠 | 一號機 | 永久停機 | 2018.12.05 |
| | 二號機 | 停機 | 2019.07.15 |
| 核二廠 | 一號機 | 運轉 | 2021.12.27 |
| | 二號機 | 運轉 | 2023.03.14 |
| 核三廠 | 一號機 | 運轉 | 2024.07.26 |
| | 二號機 | 運轉 | 2025.05.17 |

核能事故發生時的應變措施，分成政府演習和民眾宣導兩大部分。在政府演習方面，原子能委員會每年都會舉辦核安演習，讓三座核電廠輪流演練各項措施。包含了吊運救援物資，引海水降溫，民眾疏散，傷患救治等等。除了核安演習之外，也需要對一般民眾進行宣導。讓民眾知道發生核能事故時，民眾自身的正確應變措施。在民眾緊急應變的宣導上，原子能委員會印製了許多紙本文宣手冊（圖 01），發放給核電廠附近的住戶。在這些紙本文宣之中，有簡要的重點注意事項，教導民眾在發生核能事故之時，避免輻射傷害的幾個重要方法。




圖 01：核子事故民眾防護手冊

## II. 主要內容

受限於工作，一般民眾難以參加核安演習，只能從宣傳品之中，獲得緊急應變的知識。為了讓民眾能夠留下深刻的印象，緊急應變的宣傳品，最好能夠具有互動參與性。因此，本計畫利用最新的虛擬實境技術，來製作民眾緊急應變的虛擬實境體驗。在民眾緊急應變的虛擬實境體驗之中，模擬政府發佈核能事故警報，讓在家的民眾，進行互動操作。互動操作之內容，是根據原子能委員會之核子事故民眾防護手冊所設計。內容包含：

1. 居家掩蔽
   - A. 打開電視，接收最新資訊。
   - B. 關閉窗戶，避免輻射落塵。
   - C. 空調設定為室內循環模式，避免落塵進入室內。
   - D. 將食物密閉，避免沾附輻射落塵。
   - E. 清洗身體，除去輻射落塵。
   - F. 張貼月曆，讓外界知道你已得知消息。
   - G. 未獲政府通知，不擅自服用碘片。
2. 疏散
   - A. 關閉瓦斯，避免火災。
   - B. 拔除電源總開關，避免火災。
   - C. 攜帶證件、藥物、簡便衣物。
   - D. 如有嬰兒，可以攜帶嬰兒用品。
   - E. 如有寵物，可以攜帶寵物隨行。

F. 張貼月曆，讓外界知道你已得知消息。

G. 前往指定集合點，搭乘專車。

在開發軟體方面，本團隊採用 Unreal Development Kit( 簡稱為 UDK )，來開發本計畫的虛擬實境體驗。UDK 是 Unreal Engine 的精簡版，該程式引擎是最知名的商用電玩程式開發引擎。具有最先進的 3D 電腦圖學技術，並且支援所有主流的虛擬實境硬體設備，足以用來製作本計畫所需要的虛擬實境體驗內容。在虛擬實境硬體設備方面，本計畫使用了被 Facebook 收購的 Oculus Rift。

## III. 結果與討論

本計畫所完成的緊急應變虛擬實境體驗程式，其畫面截圖，如圖 02 至 04 所示。




圖 02：觀看政府發佈之消息




圖 03：張貼已接獲消息之月曆

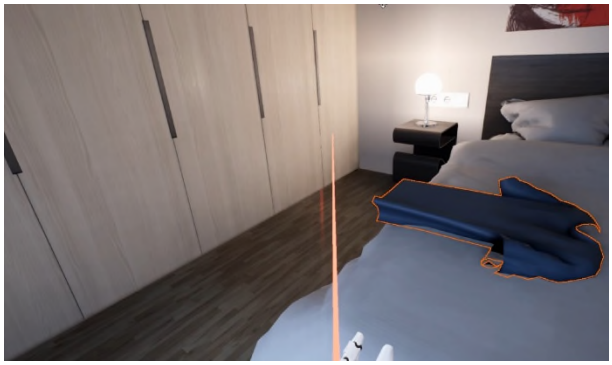


圖 04：拿取個人物品進行疏散

本計畫的成果，提供給原子能委員會免費使用。2019 年 02 月 15-17 日，在台北市華山 1914 文化創意產業園區，所舉辦的原子能科技「酷科學」展覽，進行實際進行展出，並且開放給民眾體驗使用，如圖 05 所示。吸引了許多參觀民眾，排隊進行體驗。並在「2019 亞太智慧防救災高峰論壇暨新科技設備展」進行展出，如圖 06 所示。



圖 05：於科展中開放民眾使用




圖 06：於亞太智慧防救災展之中展示

## IV. 結論

本計畫利用最新的虛擬實境技術，來製作民眾緊急應變的虛擬實境體驗。利用新穎的虛擬實境科技，來提升民眾了解緊急應變知識的興趣。同時，也利用虛擬實境科技的互動性，增加民眾對於緊急應變知識的印象。本計畫的成果，已經實際在科學展覽和其他活動之中，向參觀展示，初步已獲得良好的反應。

# 龍華科技大學原子能學程與原子能人才培訓
# The Atomic Energy Course and Cultivation Program in The Lunghwa University of Science and Technology

計畫編號：MOST 107-NU -E-262-001 -NU
計畫主持人：周源卿、宋大崙
e-mail：tlsung@gm.lhu.edu.tw
執行單位：龍華科技大學 化工與材料工程系

## 摘要

核一廠已經開始除役規畫，並審查通過除役計畫書。台灣將以核能電廠除役與核廢料管理為工作重點，除除役相關人才外，需要持續培育原子能科技人才，在原子能醫療應用與工業應用方面持續穩定發展，維持品質與安全。龍華科技大學過去 8 年培育原子能科技人才的經驗，本計畫持續培養目前原子能科技的發展人才。

本計畫完成的工作包括: 與企業合作設計課程內容、著重核能電廠除役與核廢料管理知識的傳授、加強原子能科技於醫工應用知識的傳授、與嘗試製作虛擬實境教材等，期望能精進原子能科技推廣教育之執行方式，為國內原子能科技應用業界注入新血。

關鍵詞： 原子能科技、技推廣教育

## Abstract

The 1st nuclear power plant (NPP) in this island have started decommission procedure in the year of 2018. Therefore, NPP decommission and radioactive waste management will be two important areas in the future nuclear power sector of Taiwan. On the other hand, the applications of atomic energy in the areas of medical care and industries have developed steadily in Taiwan for decades. To maintain the quality and safety of these areas and applications associated with atomic energy, we need to keep on cultivating experts with knowledge of atomic energy technologies. In this project, we expect to foster domestic capability of atomic energy technologies by utilizing the 8 year experience of teaching students in this area in the Lunghwa University of Science and Technology. And in order to closely follow current trend of domestic development in atomic energy technologies, the emphases of this project will include: to design the course contents by corporation with industrial experts; to highlight the knowledge associated with NPP decommission and radioactive waste management; to enhance the knowledge transfer associated with the application of atomic energy in medical care and industries; and try to make VR material for atomic energy education. It is expected that, through the performance of this project, the way of experts' cultivation could be improved and new blood could be injected in the area of atomic energy application.

Keywords: atomic energy application，education.

## I.前言

台灣於 108 年 1 月修正通過電業法，規定所有核能發電設備必預於 114 年停止運轉，雖然 2018 年公投以廢除電業法這一條。但核一廠已經開始進行除役，核一廠開始除役，台灣不只是需要核能運轉發電人員，除役產業也成為我國可以思考進入的產業。根據我國放射性物料管理法的規定，每座核能機組的除役工作必預在 25 年內完成，而核廢料管理則需延續數百年。另一方面，我國在原子能醫療應用與工業應用方面持續穩定成長，目前相關企業家數已分別超過 8000 與 4000 家，相關的從業人員也超過 50,000 人，對我國醫療水準與農工業發展有重要貢獻。因此必預持續培育原子能科技相關人才，方能維持上述工作與應用的品質與安全。

原子能應用常會伴隨著輻射，因此非原子能應用科系的學生及民眾，常會有敬而遠之或擷取網路上錯誤的知識，其實原子能應用除核能發電之應用外，醫療輻射及工業應用也十分廣泛，而放射性廢棄物及輻射安全更是在使用原子能在產業之應用後，不可或缺的重要考量，正確的知識更顯得重要，除了政府政策的執行外，民眾的安全更是獲得保障。

## II. 研究目的與方法

原子能委員會網站上[1]提供原子能、輻射及核能電廠及除役相關的資訊，但多數同學或民眾並未多加利用，常有錯誤的認知，本計畫希望給予學生認識原子能委員會網站及其 FACEBOOK 輻務小站，正確知識或給予指導進行討論辯論，利用教學理論如翻轉及專案導向等[2]，讓同學對於原子能應用多所了解。本校原子能應用跨領域學程 [3,4]，就是依此目的而建立。

龍華科大跨領域學程[5]為提供學生多元學習機會，鼓勵學生有系統的學習特殊領域課程而設立，目前國內技專院校曾開設核工學程或在學程中開設核工相關課程者之技專院校如高雄應用科技大學核工概論課程學程[7] 台北科技大學核能科技學程，其目的及課程規劃亦然。

本校學程核心課程內容規劃如下：

(1) 核工導論：原子核構造、核裂變及核聚變、核能最新趨勢發展、核能電廠技術、核能電廠除役及核能廢料處理。

(2) 輻射防護與應用: 輻射防護的基本概念例如游離輻射的定義、輻射的量測、輻射安全標準的訂定。

(3) 核能電廠實務：核能電廠技術、核能電廠除役、核能安全法規介紹、核能廢料處理、緊急事故應變處理等概念課程。

自從本校開始參與原子能科技人才的培育工作以來，全球核能工業歷經了日本福島事故前後的復興期與調整期，我國核電發展也從核四廠的興建、封存乃至於

非核家園。本校在國內不同的核能政策階段，均積極配合擬訂相關的人才培育方式，期能使學生掌握最新的國家政策，增加相關職場的參與機會。

（1）與企業合作設計課程內容

在核能電廠除役與核廢料管理方面，國內原子能委員會是管制單位，台電公司是經營者，而核能研究所是研究單位。因此確認本計畫獲得補助後，即請上述三個單位的相關專家協助擬訂原子能科技學程的授課計畫與教材內容。另一方面在原子能於醫農工應用的領域，原子能委員會仍是管制單位，核能研究所也是研究單位，而經營者變成醫療機構、工廠與農業發展單位，因此也需請相關專家協助擬訂相關的授課計畫與教材內容。期望學生在學程中能獲得貼近業界實務的知識，增進爾後求職的能力。

（2）著重核能電廠除役與核廢料管理知識的傳授

本校過去 8 年在核工學程中偏重核電廠設計、營運與安全相關知識的傳授，本計畫不但將名稱改為原子能學程，授課內容除了繼續包含核電廠營運與安全外，也會特別注重核能電廠除役與核廢料管理相關的實務經驗與知識。核能電廠除役與核廢料管理工作除了對核電系統的了解外，還包括機械、電子、電機、化學、化工及材料等許多專業需求。此外，技職教育期望學生能學得實際操作的技巧並取得證照，過去本學程以非破壞性檢測證照之取得為主，未來在焊接、輻射安全及其他相關技術方面也會鼓勵學生更努力考取證照以符合產業的需求。

## III. 結果與討論

本計畫完成了工作項目如表 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 | 說明 |
|---|---|
| 兩門原子能學程核心必修課程 | 核能電廠實務及輻射防護與應用 |
| 原子能課程說明會 | 核能電廠實務及輻射防護與應用開課說明 |
| 輔導學生與學生晤談 | 57 人次 |
| 輔導學生完成原子能學程 | 30 人 (完成兩門必修課程及選修學分) |
| 專家學者演講 | 演講 7 次與 15 次虛擬實境課程 |
| 參訪原子能相關設施 | 4 次 |
| 定期維護原子能學程網站 | 定期 |

5.1 核心必修課程

對於核心必修課程方面開設 2 門，106 第二學期開設「核能電廠實務」 及 106 第二學期開設「輻射防護與應用」。其授課老師為周源卿博士(MIT 核工博士)。上課情形如圖 1。其上課人數: 核能電廠實務 (106-2) 學生 54 (2/22 女/男)；輻射防護與應用(106-2) 學生 57 (5/52 女/男)。

5.1.1 輻射防護與應用課程:

此課程以初階的輻射防護為主，課程講授內容: 基礎物理，原子結構、核種、同位素，放射物理核電介紹，核電安全與事故，輻射特性，輻射與物質作用，輻射劑量與單位，輻射偵測，輻射安全與管制。

5.1.2 核能電廠實務:

課程內容以核能的基礎知識及核能電廠除役為主，課程講授內容: 射性核種之衰變，核子反應，輻射偵測，保健物理與輻射防護，中子與物質之作用，核子反應器，核能電廠，核能電廠除役。

5.2 原子能課程宣傳

學校針對本校所有的學程，由本校校務發展委員會實施學程改善，將所有學程凍結，包含原子能學程。因此改為舉辦原子能課程說明會，邀請學生參與。舉辦輻射防護應用課程說明會，修課人數達 57 人；舉辦核能電廠實務課常說明會，修課人數達 24 人

5.3 輔導學生與學生晤談人次

針對學生的疑問，提供學程修課與獲證資格查詢與幫助；同學主要問題為差多少學分方可獲得證書及指導學生如何選取課程以獲得證書，共晤談學生 57 人次。

5.4 輔導學生取得完成原子能應用學程兩門必修課程及選修學分

輔導學生完成原子能學程兩門必修課程及選修學分，共有 29 位學生(4 女/25 男)。

5.5 舉辦專家學者演講

5.5.1 邀請了 7 位專家學者(表 2)，針對相關議題演講並回答學生的疑問，上課情形如圖 2。深入淺出的說明也獲得學生的熱烈討論。

表 2 演講議題(107)

| 題目 | 專家學者 | 專家背景 |
|---|---|---|
| 輻射安全 | 林善文 | 輻射防護施、核協會顧問 |
| 放化試驗室的一天 | 吳樹實 | 台電放化試驗室組長 |
| 輻射災害-緊急應變 | 林耿民 | 法國國家核能科技研究所 INSTN 博士級研究 |
| 輻射檢測真好玩 | 吳樹實 | 台電放化試驗室組長 |
| 清華原子爐 | 李進得 | 清華大學 核能師 |
| 原子能簡介 | 李進得 | 清華大學 核能師 |
| 核能發電與電廠運作漫談 | 劉興漢 | 核一廠 課長 |

5.5.2 運用 3D 數位技術重建核能電廠模擬器- 16 次課程 (周明韻教授) 如表 3

表 3. 3D 數位技術重建核能電廠模擬器

| 課程 | 課程大綱 | 課程 | 課程大綱 |
|---|---|---|---|
| 1 | 核能電廠說明與計畫介紹 | 9 | 擴增實境實作(I) |
| 2 | 參觀北部核能展示館 | 10 | 擴增實境實作(II) |
| 3 | 3D 數位技術概要(I) | 11 | AR/VR 技術運用於模擬器(I) |
| 4 | 3D 數位技術概要(II) | 12 | AR/VR 技術運用於模擬器(II) |
| 5 | 參觀核能一廠模擬器 | 13 | 小組製作指導(I) |
| 6 | 核能一廠模擬器製作討論 | 14 | 小組製作指導(II) |
| 7 | 核能一廠模擬器建模 | 15 | 小組製作指導(III) |
| 8 | 虛擬 VS 擴增實境 | 16 | 期末報告 |

運用 3D 數位技術重建核能電廠模擬器上課情形如圖 3，有去核一廠模擬器參觀。

5.6 參訪原子能應用及能源相關設施

參觀原子能相關設施(4 次)，如表 4，其參觀花絮如圖 4。核能展示館，清華大學 BNCT 的參觀相關設施等。

表 4 參觀原子能相關設施

| 項次 | 日期 | 參觀地點 | 備註 |
|---|---|---|---|
| 1 | 5/22 | 第一核能發電廠(放射實驗室、風力發電、及北展館) | 綠能及核能發電及相關 |
| 2 | 4/24 | 核能研究所 (Co 60 照射場，輻射檢測) | 原子能應用 |
| 3 | 11/06 | 清華大學 I | 原子爐及中子照射治療 |
| 4 | 11/12 | 清華大學 II | 原子爐及中子照射治療 |

5.7 定期維護核工學程網站-FACEBOOK 網頁更新

本學程在 FACEBOOK 有成立學程網站 https://www.facebook.com/groups/nano.nucler/ ，與原能會之輻務小站相連。

5.8 3D 數位技術重建核能電廠模擬器

本次計畫結合 3D 數位技術，請學生製作重建核能電廠模擬器。完整的製作出核能一廠發電模擬器外貌(圖 4)。

除此之外，採用 VR 的技術，寫入程式，可使使用者輕易的操控模擬器，目前完成的有控制棒抽插的練習程序如圖 5。

## IV. 結論

本計畫完成原子能課程兩門，及專家演講、參觀原子能設施，學生並做核能一廠模擬器的 3D 數位重建，學生在新型技術的加入，更能對於原子能的奇妙之處，感到興趣，未來能有更多的原子能應用人才的產生，主要是更能獲取正確的原子能及輻射的知識及認知。

## 參考文獻


[1] https://www.aec.gov.tw/category/%E6%A0%B8%E7%89%A9%E6%96%99%E7%AE%A1%E5%88%B6/%E6%A0%B8%E9%9B%BB%E5%BB%A0%E9%99%A4%E5%BD%B9%E7%AE%A1%E5%88%B6/6_2550.html，2017/01/23

[2] 吳清山（2014）。翻轉課堂。教育研究月刊，238，135-136。

[3] 宋大崙，「龍華科技大學核工學程之實施與核工人才培訓」，100 年度行政院國科會與原能會科技學術合作研究計畫成果發表會，龍潭，Dec 16, (2011)

[4] 宋大崙，「龍華科技大學核工學程之推廣」，105 年度行政院國科會與原能會科技學術合作研究計畫成果發表會，台北，June 29, (2017)

[5] 龍華科技大學跨領域學分學程設置辦法，龍華科技大學, 105.12.08 第 10502 次教務會議修正通過 (2016)

[6] 工程學院「原子能應用學程」規劃書，龍華科技大學, 105.12.08 第 10502 次教務會議修正通過 (2016)

[7] 國立高雄應用科技大學核工概論課程推廣網站，https://sites.google.com/site/hegaituiguang/




圖1 周源卿博士 上課情形



(a) 放化試驗室的一天-吳樹實



(b) 輻射災害-緊急應變-林耿民




(c) 原子爐 -李進得老師

圖 3 專家學者演講情形



3D 數位技術重建核能電廠模擬器(I)



3D 數位技術重建核能電廠模擬器(II)

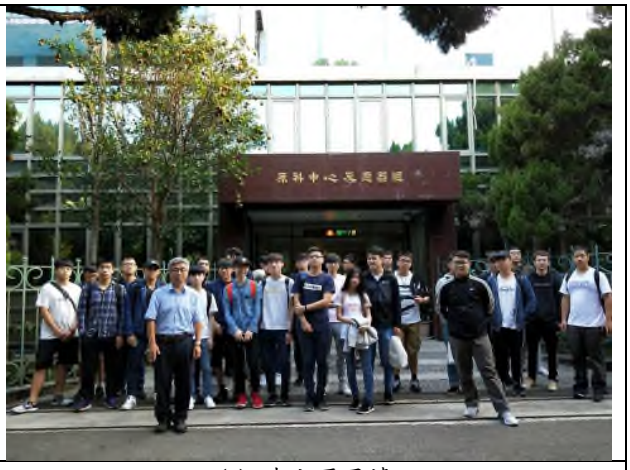
圖 3. 3D 數位技術重建核能電廠模擬器上課情形



(a)台電第一核能發電廠 (放射實驗室、風力發電、及北展館)I




(b) 核能研究所 (Co 60 照射場，輻射檢測)I



(c) 清大原子爐

圖 4 參觀花絮



(a) 核能電廠模擬器實體

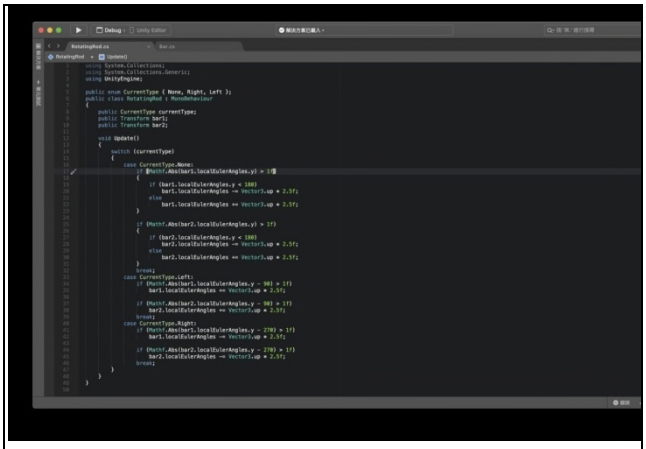


(b) 3D 數位技術重建 I



(c) 3D 數位技術重建

圖 4 3D 數位技術重建核能電廠模擬器



(a)程式 1



(b)VR 操作 1

圖 5 VR 製作與操作

# 原子能輻射防護影音多媒體內容製作與提升網路溝通行銷計畫

**Atomic energy radiation protection content production and internet marketing plans**

計畫編號：MOST 107-NU -E-144-001 -NU
計畫類別：■個別型計畫　□整合型計畫
計畫主持人：單文婷
e-mail：wenting@ntua.edu.tw
執行單位：國立臺灣藝術大學廣播電視學系

## 摘要

本計畫參考歐美研究社群媒體與科學傳播的發展趨勢，提出製作原子能輻射防護民生應用的影音內容，並且以提高網路傳播效果為原則，運用創意方式協助政府傳遞科學知識與政策資訊。本計畫共完成三種型態的影音內容供原能會放置臉書粉絲專頁與官網傳遞，包括 13 部「快問快答」短影片，本計畫並且真實走上街頭隨機邀請民眾進行訪問，也增加民眾對原子能機構、科學知識的親近感。另外也完成 2 部原子能科學家動畫故事片，用新穎的手繪風格動畫向民眾介紹耳熟能詳的愛迪生與居禮夫人，讓一般民眾或在學學生都可瀏覽並對科學家有進一步認識。同時則以網路傳播特性為考量，重新製作 4 部短版的機關簡介，讓民眾更清楚知道原能會及所屬單位的沿革發展。

關鍵字：
科學傳播、原子能輻射防護、社群媒體、網路溝通

## Abstract

This project refers to the development trend of science communication in Europe and America, proposes the audio and video content of atomic energy radiation protection, and uses the idea to create scientific knowledge and policy information. The project has completed three types of audio and video works so that the original can be placed on the Facebook fan page or the official website, including 13 fast short films and actually randomly visit the people on the street, increasing the public's closeness to the atomic energy. In addition, I also completed two animated feature films of scientists, introducing Edison and Julie in an emerging hand-drawn style animation, so that everyone can further understand scientists. In addition, based on the characteristics of the network, the four departments were re-created to make the public more aware of the development of the original.

Keywords: Science communication, atomic radiation protection, social media, internet communication

## I. 前言

近年來歐美科學傳播研究大力倡議讓科學家走入人群，並且鼓勵科學家使用社群媒體傳播，增加與公眾互動。同時學界也認為科學機構與科學家應該主動產製更多完整、正確的科學內容，讓公眾親近科學，甚至讓公民得到足夠的資訊，便於參與各種科學政策討論。2014 年初，全球知名的科學研究機構美國科學促進會年會（AAAA）舉辦一場「如何使用社群媒體進行科學研究」（How to use social media for science）的討論會，吸引許多科學家、媒體記者、政府官員以及科學傳播研究生共同參加。會議主持者是美國威斯康辛大學生命科學院的布羅薩德博士（Dr. Dominique Brossard），他在會議子題之一「參與社群媒體」（Engaging with Social Media）的討論中指出，對現代科學家來說，已經不能只是待在實驗室進行研究，必須要思考如何將研究推廣應用的問題。另一個也很重要的問題是思考「科學家與記者可以合作將科學研究更廣泛地傳達給公眾」（Scientists and journalists can work together to bring science to a broader audience）【1】。

對科學家來說，要把科學研究向公眾說清楚已不容易，若傳播平台是社群媒體，科學家要在社群媒體上把科學研究說明白，並且要顧及媒體記者或一般民眾能夠理解，內容還要吸引大家注意，更不是容易的事。美國喬治亞理工學院氣候科學家（climate scientist at the Georgia Institute of Technology）Kim Cobb 博士談到她自己如何使用社群媒體推廣導航科學研究，儘管她也認為某些時候對科學家來說，使用社群媒體占用太多時間，也可能因為太自我推銷影響科學家形象，但她終究還是接受使用社群媒體來宣傳科學研究。Cobb 博士指出她鼓勵科學家使用社群媒體的主要考量有以下幾點，比如她認為「氣候變化的研究應該對公共領域產生更大的影響」（climate change should have more impact in the public sphere.）、「希望（科學研究）可以更親民」（I want to be accessible）、「希望可以對公眾講很棒的故事、展示很棒的照片」（tell some great stories, and I have some great photos.）、「想改變公眾參與氣候科學研究以及婦女在科學研究的角色變化」（help change the culture of science regarding public engagement with climate change, and women in science）。Cobb 博士在會議中也下了一個結語「如果根本沒人知道你的研究，研究再正確也無關緊要了」（It doesn't matter how right you are if nobody is listening to you），此一語道中為什麼近年來科學界鼓勵科學家或研究機構使用社群媒體與公眾傳播交流，科學家掌握科學內容傳播的主導權，讓民眾得到正確科學發展資訊【2】。

科學傳播研究的兩位學者 Dudo & Besley 【3】調查發現，科學家開始使用社群媒體自我傳播的另一原因是他們非常在意媒體的錯誤報導，若可能的話，科學家會試著用各種媒體管道糾正錯誤報導。兩位學者歸納五個常見的科學家願意使用社群媒體與公眾交流的目的

有以下：(1) 以教育為目的向其他人傳達科學知識、(2) 激起他人關心科學知識、(3) 確保公眾將科學家視為值得信賴的人、(4) 構思或塑造科學信息，讓人們對科學觀點產生共鳴、(5) 防止錯誤的科學資訊傳播或糾正錯誤訊息。

核電安全、輻射防護一直是全球公民關心的議題，隨著政府非核家園政策確定以及核一廠正式進入除役期，核電、輻射、能源也成為國內民眾討論話題。原子能委員會的重要業務均包含上述，包含對核能電廠、核子設施以及輻射作業場所的安全監督，而有關輻射防護及環境偵測等也是原能會的職責且與民眾生活息息相關。本計畫即是在上述背景中規劃執行，順應歐美科學傳播研究，鼓勵與協助科學機構與科學家自製生動有趣的傳播內容，尤其以網路媒體為傳播載體的前提下，設計多元化的科學傳播內容讓民眾參與科學、親近科學知識。

## II. 主要內容

90 年後歐洲開始推動「公眾參與科學」（public engagement of science, PEC）運動，主張公眾的科學知識素養雖然不如專家，但是透過科學教育或公共傳播的方式，也可以使公眾理解科學發展，甚至被說服支持政府的科學政策，而且這比使用法治權威更為有效。另外學者 Halford【4】也指出拜網路科技之賜，「公眾參與科學」也從傳統媒體轉向網路媒體發展，民眾輕易就能上網獲取各類資訊，不僅內容比傳統媒體豐富，透過網路彼此還能互動交流，這也使得網路媒體對於促進「公眾參與科學」的重要性快速超越了傳統媒體。因此本計畫今年執行製作的三種輻射防護影音多媒體內容，均以社群媒體傳播特性為考量，以期達到提升輻射防護政策的網路溝通行銷效果。

研究者自民國 105 年協助執行科技部補助「原子能安全與輻射防護新媒體教材製作與行銷」計畫，主要製作了 1 部 60 秒的 3D 動畫影片，主題為「防輻好簡單，生活金安全」， 重新包裝屬於科學專業領域的原子能輻射防護知識與政策，再透過原能會的臉書粉絲專頁進行傳播。此外也邀請大學生參與觀察研究原能會連輸，提供優化建議。民國 106 年執行科技部補助的「原子能安全與輻射防護之新媒體動畫政策教材製作與行銷」，也是依照原能會政策重點製作 5 部符合網路傳播特質的動畫政策影片，包括 1 部 60 秒 3D 全動畫，主題為「核電廠除役，生活樂無慮！」；以及 1 部 40 秒 3D 全動畫，主題為「認識核廢料，生活咖放心！」。另外也協助製作「科學家說科學知識」單元，製作了 1 部 2 分 40 秒主題為「所不在的輻射-天地人氣篇」的短影片，以及配合世大運製作 2 分鐘原能會在世大院期間的防治恐怖攻擊的籌備新聞影片。

本計畫執行兩年發現，使用一般民眾較容易親近的影片、動畫進行原子能政策傳播，確實更容易吸引民眾瀏覽，也較能達到科學政策行銷效果。除此之外，藉由社群媒體的影音內容，對於增加沒有科學專業背景的民眾接觸有關原子能知識、資訊也有幫助，甚至了解政府推動的政策內容。此也呼應 Thaler 等科學傳播學者【5】的研究發現，多數科學家開始有意識借助社群媒體探訪別的科學專家在做什麼研究，更重要的是讓大眾知道自己的研究，並且把社群媒體視為自我宣傳的重要管道。

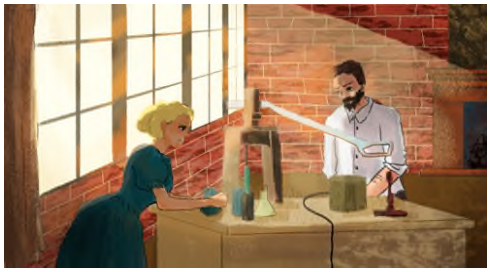
## III. 結果與討論

本計畫參考歐美科學傳播研究進行內容製作設計，德國學者 Weißkopf & Witt【6】討論科學家使用社群媒體進行科學傳播的機會與風險，發現有 45%的德國公民會從網路上瀏覽科學資訊，而且 30 歲以下的德國公民更有高達 68%依賴網路、社群媒體作為科學訊息的主要來源。兩位學者觀察發現社群媒體興起對德國科學界的變化有以下幾點，包括加速科學家的資訊交流行動，有趣的科學影片吸引更多公眾，尤其是年輕族群的信任。另外科學家也可以直接公布研究成果，不用再長篇大論說服記者他們的研究有多重要，也可避免科學新聞報導錯誤或扭曲真實【7】。站在實踐科學傳播主導權的原則，本計畫共執行三種不同型態的影音內容製作，說明如下：

(1) 製作 1 分鐘內的快問快答短影片「原來這麼厲害」：本計畫首先從原能會重點工作計畫挑選 23 個主題，其後配合年度重點再選出 13 個議題進行快問快答腳本撰寫。為增加原能會議題與民眾的親近感，本次計畫特別規劃於台北火車站、忠孝東路街頭以及台灣大學校園、台灣藝術大學校園等多處「隨機」訪問路邊民眾，讓民眾參與問題，一方面增添內容的趣味感，再者也讓民眾藉由訪談知道原能會的重點政策議題。短影片製作採取節奏明快的科學政策知識問答，適合置放網路或臉書轉播，有民眾實際參與訪談也較能吸引非科學背景的觀眾瀏覽。




(2)從原能會既有的「原子能科學家列傳故事」讀本中選擇了民眾較熟知的「愛迪生」、「居禮夫人」兩部進行科學家故事進行改編，製作完成兩部手繪風格的 2 分鐘動畫科學家故事便於網路傳播。





(3)過去原能會機關簡介較制式化，不適合放置網路傳播，缺少傳播效果。本計畫依原能會挑選出的四個主要機關進行組織簡介重製，從老照片影像處理、主播錄影、內容製作，推出每部長度約 3 分鐘左右的短版機關簡介，便於置放網路或臉書推播使用。此次製作的四個機關包括有(1)原子能委員會、 (2)放射性物料管理局、(3)核能研究所以及 (4)輻射偵測中心。




## IV. 結論

本計畫已連續三年製作與原子能輻射防護安全相關的影音內容，而圍繞核能安全、輻射防護的議題十分多元且部分屬於科學專業領域，社會大眾不易感知，例如環境游離輻射、輻射量偵測、環境輻射監測、放射性廢料等，今年計畫為了讓一般民眾感受上述這些議題其實也與民眾生活密切相關，增加製作 13 部「快問快答」短影片，內容也涵蓋上述，且拍攝團隊確實走上街頭隨機訪問民眾，詢問與上述議題有關的問題，同時也獲得最真實的民眾反應，日後也可提供原能會作為政策宣傳效果調整之參考。本計畫執行發現影音內容不僅已是歐美科學傳播內容製作的趨勢方向，國內也有許多科學研究機關、學校等嘗試使用製作科學影音內容，尤其邀請科學專家用輕鬆簡單的方式解釋科學現象或知識、傳遞科學資訊都是吸引民眾，能達到較佳的科學傳播效果。此也是未來研究者執行原能會計畫可以努力的方向，站在科學傳播的效果面向，產製與原子能輻射防護安全議題相關且生動有趣的影音內容，提高民眾對原子能知識的親近感，感知原子能民生應用的重要以及讓科學訊息傳遞更快速也更有效果。

## 參考文獻

[1] 更多資訊內容可參考 How to use social media for science — 3 views Tips from science and journalism pros at the American Association for the Advancement of Science (AAAS) annual meeting，參考網址：https://www.elsevier.com/connect/how-to-use-social-media-for-science

[2] 註 2 可參考 cobb 博士部落格。Dr. Kim Cobb (@coralsncaves), a climate scientist at the Georgia Institute of Technology, talked about Navigating the Science-Social Media Space: Pitfalls and Opportunities.

[3] Dudo, A.& Besley, J.C. (2016). Scientists' Prioritization of Communication Objectives for Public Engagement. PLoS ONE. 11(2), doi:10.1371/journal.pone.0148867

[4] Halford B.(2016). Teaching social media to scientists.A handful of courses help researchers navigate the landscape of internet communication.C&EN, 94 (43),21–22.

[5] Thaler, A.D., Zelnio, K.A., Freitag, A. MacPherson, R., Shiffman, D., Bik. H.(2012). Digital environmentalism: tools and strategies for the evolving online ecosystem. SAGE Reference–Environmental Leadership: A Reference Handbook. London: SAGE Publications, https://doi.org/10.4135/9781452218601.n39

[6] Weißkopf M.,Witt T.(2015).The Opportunities and Risks of Social Media in Science Communication. JUnQ. 5( 2), XVI–XVIII.

[7] Liang, X., Su, L.Y-F., Yeo, S.K., Scheufele, D.A., Brossard, D., Xenos,(2014) Building buzz: (scientists) communicating science in new media environments. Journalism & Mass Communication Quarterly. 91(4), 772-791. doi:10.1177/1077699014550092.

# 人才培訓與風險溝通 II

# 利用虛擬實境增進人類與遠端機器人之互動以輔助輻射作業之應用
# Use virtual reality to enhance the interactions between humans and remote robots to assist radiation operations

計畫編號：MOST 107-2623-E-002-011-NU
計畫主持人：陳湘鳳
e-mail：ssmith@ntu.edu.tw
執行單位：國立臺灣大學機械工程學系

## 摘要

遠端機器人可以充當人類智能的延伸，增強人類的感知和操作能力。然而，遠端機器人通常造價昂貴，不正確的操作方式可能導致這些昂貴設備的損壞。隨著電腦和資訊技術的進步，人類開始使用虛擬實境來模擬複雜或危險的操作。藉由虛擬實境，使用者可在擬真的環境中進行訓練，避免造成不必要的傷害與損失，並有效地降低工作訓練成本。本研究利用虛擬實境的可規劃性與可控性，建立一個虛擬環境，使用者可在其中藉由操控虛擬機器人，來實現遠端機器人的操控。本研究利用逆運動學，計算機器人手臂關節的轉動角度，使遠端機器人之操控更為精準與快速。另外，在虛擬環境中，使用者可隨處走動並改變視角，使操控作業更為流暢。本研究成果預計可用來培育輻射技術應用相關產業人才。工作人員可在擬真的環境中，習得操作機器人處理輻射相關工作之技能。並可藉由操控虛擬機器人，精準的控制遠端實體機器人在具有輻射的環境中工作。

關鍵詞：虛擬實境、遠端機器人、輻射作業。

## Abstract

Remote robots can act as the extension of human intelligence to enhance humans' perception and operation abilities. However, remote robots are usually expensive. Incorrect operations may cause damages to the devices. With the advances of computer and information technologies, humans begin to use virtual reality to simulate complex or dangerous tasks. Using virtual reality, operators can be trained in an immersive and realistic environment, without unnecessary harms or damages. Thus, the training expenses can be reduced. This research takes the advantage of the programmability and controllability of virtual reality to build an immersive environment, where operators can control a remote robot through manipulating a virtual robot. This research uses inverse kinematics to calculate the rotation angles of each robot joint to make the operation more precise and faster. In addition, users can walk around and change the view point at any time, making the operation more smoothly. This research is expected to train more radiation technology related professionals. Operators can learn how to manipulate a remote robot to perform radiation related tasks. They can also precisely control the remote robot by manipulating a virtual robot to complete the radiation related tasks.

Keywords: Virtual reality, remote robot, radiation operation

## I. 介紹

近年來有許多利用虛擬實境(VR)和擴增實境(AR)在職業訓練上的應用。結果顯示，使用 VR/AR 進行訓練，能夠有效地提升操作員達成任務的準確率，降低在真實環境操作時所發生的錯誤機率。而 VR/AR 結合遠端機器人系統，不僅可增強機器人的工作能力，更可拓展遠端操作的應用領域。例如，Zhong et al. [1]建立一個三輪移動平台，並在平台上方安裝一個 6 自由度機械手臂。使用移動平台的運動學和機械手臂的逆運動學，來呈現機器人的運動模型。並使用 VR 建立使用者界面。機械手臂的所有控制都在 3D 虛擬環境中顯示。實驗證明所建立的機器人在遠端操作是可靠和有效的。

Kruusamäe and Pryor [2] 使用 ROS 開發遠端操作軟體。設計一個以使用者為中心的操控界面，允許操作員透過手勢和語言來修改使用者視角、命令。並將人體輸入之動作，調整到機器人合適運作的範圍。操控界面包括用於手部追踪的 Leap Motion 控制器、用於語音檢測的麥克風，以及用於調整人體輸入動作和機器人運動之間的縮放因子之簡單旋鈕。此研究透過執行穿線針的高精度任務，證明所提出的系統的可行性與精準度。

Yew et al. [3]結合相機與 Oculus Rift DK2 HMD，創造一個擴增實境(AR)環境。將預先建立好之機械手臂及操作環境，加入攝影機拍攝到的場景，做虛實結合。在 AR 環境中顯示遠端的視角，將需要操作的部分用虛擬物體取代，並提示操作路徑。

Brizzi et al. [4]使用深度攝影機，捕捉遠端真實場景並在本地使用者端重現。由於真實環境與 AR 系統呈現的環境有所差異，作者加入了三種視覺輔助提示。分別是加入虛擬機械手臂模型、移動操作導引、及目標位置導引。Brizzi et al. 探討視覺輔助提示對操作者的影響。結果顯示，該系統對於不熟悉遊戲或 VR/AR 環境的人有很大的幫助，但對於熟悉遊戲或 VR/AR 環境的人而言幾乎沒有幫助。

Lipton et al. [5]提出了一個遠端機器人的何蒙庫魯茲模型(Homunculus model)。該模型建立一虛擬控制室。使用者可以在虛擬控制室中看見真實機器人所拍攝到的影像，並通過手持控制器來操控真實機器人。利用 Lightweight Communications and Marshalling (LCM)傳輸資訊至 Robot Operating System (ROS)，控制真實機器人移動。通過使用者測試對系統進行評估。結果顯示 VR 遠端機器人模型操作速度，遠快於直接操作遠端真實機

器人。

因傳輸資料的速度延遲，可能造成一些控制的誤差與操控的不連續性。有些學者亦討論遠端機器人之操控流暢性。例如，Cheng-jun et al. [6]在本地端創建一個虛擬環境，在遠端採用多緩沖器和多執行緒技術，加速數據傳輸速度，使畫面清晰流暢，增加操作員的沉浸感，從而增強人機互動能力。Mostefa et al. [7]為了解決傳輸指令延遲造成的控制誤差，設計一套控制系統，該控制系統可即時計算傳輸指令延遲。通過這套控制系統，可以有效減少控制的誤差。

由以上文獻可知，VR/AR 可增進人機互動的效應與準確性。利用 VR/AR 更可事先規劃機器人的路徑與關節轉動角度，使遠端機器人的操控更為準確與快速。本研究將通過操控在 VR 環境中的虛擬機器人，來實現遠端真實機器人的操控。通過改變虛擬環境中的視角，讓使用者能夠舒適及流暢的操控機器人，並順利在危險的工作環境中達成任務。

## II. 研究方法

### 2.1. 實體機器人

本研究所使用的實體機器人，結合一個移動平台和一個六軸機器手臂。移動平台由兩個後驅動輪和一個前輪支撐平台。藉由馬達驅動後輪來控制平台的移動方向及速度。六軸機器手臂，由六個伺服馬達控制手臂關節的位置及方向，以及一個伺服馬達控制末端的夾取操作。

#### 2.1.1. 移動平台動力學

本研究所使用的移動平台，包括兩個前驅動輪和一個萬向後輪。藉由馬達驅動前輪來控制平台的移動方向及速度。而移動平台的運動學模型如圖 1 所示。

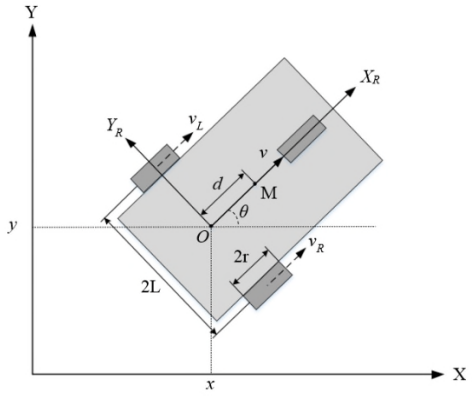



圖 1. 移動平台運動學模型

X、Y 分別為全域坐標系下的橫軸坐標和縱軸坐標，$X_R$、$Y_R$ 分別為機器人參考系的橫軸坐標和縱軸坐標，$X_R$ 總是和移動平台的運動方向一致。兩驅動後輪分別由兩個直流減速馬達獨立驅動。設定移動平台的坐標為 $q=[x, y, \theta]^T$；$x$ 和 $y$ 分別表示移動平台上兩個驅動輪連線中點 $O$ 的 X 坐標和 Y 坐標，$\theta$ 是移動機器人運動方向和全域坐標系 X 軸的夾角。輪子的半徑為 r，兩個驅動輪之間的距離為 2L，M 為移動平台的質心，在全域坐標系中的坐標為$(x_M, y_M)$，M 和 $O$ 的間距為 $d$。假設質心 M 的速度為 $v_M$，因此：

$$\begin{cases} \dot{x}_M = v_M \cos\theta \\ \dot{y}_M = v_M \sin\theta \end{cases}$$

可整理成為：

$$\dot{x}_M \sin\theta - \dot{y}_M \cos\theta = 0$$

而 M 跟 O 兩點的幾何關係為：

$$\begin{cases} x = x_M - d\cos\theta \\ y = y_M - d\sin\theta \end{cases}$$

將幾何關係微分可得：

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{x}_M + d\dot{\theta}\sin\theta \\ \dot{y} = \dot{y}_M - d\dot{\theta}\cos\theta \end{cases}$$

整理上述關係式得到：

$$\dot{x}\sin\theta - \dot{y}\cos\theta - d\dot{\theta} = 0$$

假設 $v_L$ 和 $v_R$ 為平台左輪直線速度及右輪直線速度，聯立上述式子可得到：

$$\begin{cases} \dot{x} = \left(\frac{1}{2}\cos\theta - \frac{1}{2L}d\sin\theta\right)v_L + \left(\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{1}{2L}d\sin\theta\right)v_R \\ \dot{y} = \left(\frac{1}{2}\sin\theta + \frac{1}{2L}d\cos\theta\right)v_L + \left(\frac{1}{2}\sin\theta - \frac{1}{2L}d\cos\theta\right)v_R \\ \dot{\theta} = \frac{1}{2L}(-v_L + v_R) \end{cases}$$

在不考慮車輪滑動的情況下，由上述式子可得本研究移動平台的運動學模型：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\cos\theta - \frac{1}{2L}d\sin\theta & \frac{1}{2}\cos\theta + \frac{1}{2L}d\sin\theta \\ \frac{1}{2}\sin\theta + \frac{1}{2L}d\cos\theta & \frac{1}{2}\sin\theta - \frac{1}{2L}d\cos\theta \\ -\frac{1}{2L} & \frac{1}{2L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix}$$

因此由移動平台的運動學模型可知，移動平台可以透過控制兩個驅動前輪的速度來控制移動平台的位置與方向。而本研究所使用的移動平台其參數如下：

$$L = 120\ mm$$
$$d = 80\ mm$$

#### 2.1.2. 機械手臂逆運動學

六軸機械手臂模型如圖 2 所示。它由六個旋轉軸及連桿所構成。前三軸用來支撐及控制機械手臂，它主要決定了手及腕在空間的位置。後三軸不含手構成了腕，它主要決定了手的擺置姿態。

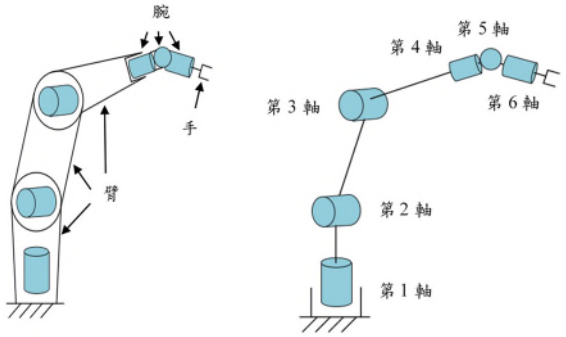



圖 2. 六軸機械手臂示意圖

在不考慮速度與扭力控制的情況下，機械臂必須先求出正逆向運動學方程式，其目的在於讓機械臂可以在卡氏坐標系與軸坐標系間自由轉換。所謂正向運動學所指的是利用機械手臂各軸所轉動的角度，去推出其末端工作點在空間上的位置及工具姿態向量。逆運動學則是利用末端工作點坐標及工具姿態，反推算機械手臂各軸轉動量。而 Denavit 和 Hartenberg 提出了一種各軸之間座標系轉換的方法，即為 D-H 模型。

D-H 模型定義 Z 軸為關節旋轉軸向，為了將軸與軸之間作連結，D-H 模型定義 $\alpha$、$a$、$d$、$\theta$ 四個參數。此四參數分別表示 $\alpha$ 為兩 Z 軸夾角、$a$ 為兩 X 軸水平距離、$d$ 為兩 Z 軸水平距離、$\theta$ 為兩 X 軸夾角，如圖 3 所示。首先將 $O_0$ 沿著 $Z_0$ 軸方向移動 $d$ 距離，接著對著 $Z_0$ 軸旋轉 $\theta$ 角度。再來沿著 $X_0$ 軸方向移動 $a$ 距離，對著 $X_0$ 軸旋轉 $\alpha$ 角度後，便能將兩個關節的座標系統重合。

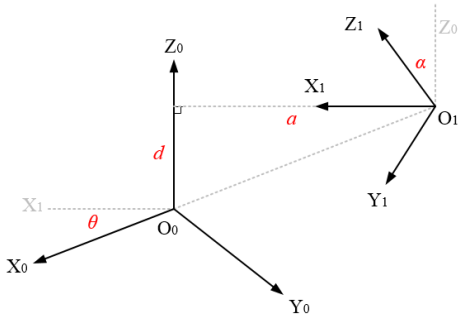



圖 3. 軸與軸間之四個參數

依照上述重合兩座標系統的方式，可以由下列方程式表示：

$$T_i = Trans_Z(d_i) \cdot Rot_Z(\theta_i) \cdot Trans_X(a_i) \cdot Rot_X(\alpha_i)$$

展開方程式可以推導出 D-H 模型矩陣如下：

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

D-H 模型矩陣明確定義出軸與軸彼此之間的距離與座標上的角度差異，常以一表格表示每一軸之 $\alpha$、$a$、$d$、$\theta$ 四個參數，並將表格轉變為矩陣形式以作矩陣乘法運算。矩陣乘法的目的在求正向運動學，六個矩陣乘法便能夠將機械手臂基座的原點座標移動到工作點，並符合新的座標系。以圖 4 之機械手臂模型為例，其 D-H 參數由表一所示。

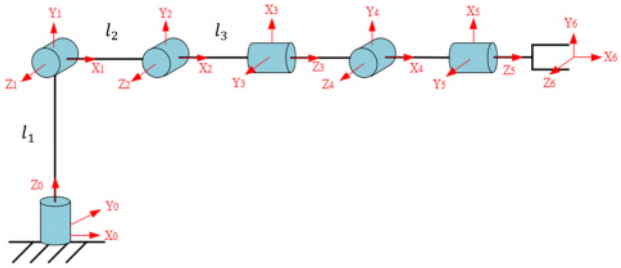



圖 4. 機械手臂模型範例

表 1. D-H 參數表

| Joint $i$ | $\alpha_i$ | $a_i$ | $d_i$ | $\theta_i$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 90 | 0 | $l_1$ | $\theta_1$ |
| 2 | 0 | $l_2$ | 0 | $\theta_2$ |
| 3 | 90 | $l_3$ | 0 | $\theta_3$ |
| 4 | -90 | 0 | 0 | $\theta_4$ |
| 5 | 90 | 0 | 0 | $\theta_5$ |
| 6 | 0 | 0 | 0 | $\theta_6$ |

而將表格內容所轉成之矩陣表示如下

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & l_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & l_3\sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & \sin\theta_5 & 0 \\ \sin\theta_5 & 0 & -\cos\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^1 = T_1T_2T_3T_4T_5T_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

相乘後可以推出手臂末端之矩陣，其中 n、o、a 為手臂末端的方向向量，p 為手臂末端的空間座標，見圖 5。利用手臂末端的方向向量及空間座標，便能推算出手臂每一軸需要旋轉的角度。

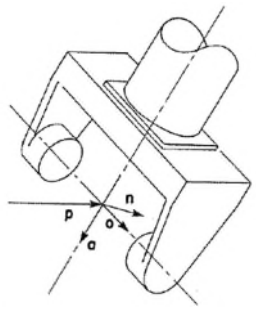



圖 5. 手臂末端空間座標及方向向量

然而本研究中，機械手臂是安裝在移動平台之上，機械手臂基座的原點座標會隨著移動平台的移動而改變。因此在計算相乘後手臂末端之矩陣時，必須考慮機械手臂基座的坐標，其方程式如下所示：

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6$$

本研究將使用逆運動學，並基於 D-H 模型，控制手臂末端的位置及方向，來計算出每一軸所需要轉動的角度。本研究所使用的六機械手臂其臂長參數如下：

$$l_1 = 102.3mm$$
$$l_2 = 108.5mm$$
$$l_3 = 103.2mm$$

利用手臂末端空間位置 $p_x$、$p_y$，計算出機械手臂第一軸旋轉角度 $\theta_1$ 如下：

$$\theta_1 = \tan^{-1}(\frac{p_x}{p_y})$$

利用手臂末端空間位置 $p_x$、$p_y$、$p_z$，以及前三軸臂長 $l_1$、$l_2$、$l_3$ 計算出機械手臂第三軸旋轉角度 $\theta_3$ 餘弦值，再推算出 $\theta_3$ 如下：

$$\cos\theta_3 = \frac{{p_x}^2 + {p_y}^2 + (p_z - l_1)^2 - {l_2}^2 - {l_3}^2}{2l_2l_3}$$
$$\theta_3 = \tan^{-1}(\frac{\sqrt{1 - \cos{\theta_3}^2}}{\cos\theta_3})$$

利用手臂末端空間位置 $p_x$、$p_y$、$p_z$，前三軸臂長 $l_1$、$l_2$、$l_3$，以及 $\theta_3$ 計算出機械手臂第二軸旋轉角度 $\theta_2$ 如下：

$$\theta_2 = \tan^{-1}(\frac{(l_2 + l_3\cos\theta_3)\sqrt{{p_x}^2 + {p_y}^2} - (l_3\sin\theta_3)(p_z - l_1)}{(l_3\sin\theta_3)\sqrt{{p_x}^2 + {p_y}^2} + (l_2 + l_3\cos\theta_3)(p_z - l_1)})$$

利用手臂末端方向向量 $n_x$、$n_y$、$n_z$，前三軸旋轉角度 $\theta_1$、$\theta_2$、$\theta_3$，計算出機械手臂第四軸及第五軸旋轉角度 $\theta_4$、$\theta_5$ 如下：

$$A = n_x\cos\theta_1 + n_y\sin\theta_1$$
$$B = -n_x\sin\theta_1 + n_y\cos\theta_1$$
$$\theta_4 = \tan^{-1}(\frac{B}{A\cos(\theta_2 + \theta_3) - n_z\sin(\theta_2 + \theta_3)})$$
$$\theta_5 = \tan^{-1}(\frac{\cos\theta_3\,[A\cos(\theta_2 + \theta_3) - n_z\sin(\theta_2 + \theta_3)] + B\sin\theta_3}{A\sin(\theta_2 + \theta_3) + n_z\cos(\theta_2 + \theta_3)})$$

接著利用手臂末端方向向量 $o_x$、$o_y$、$o_z$，前三軸旋轉角度 $\theta_1$、$\theta_2$、$\theta_3$，計算出機械手臂第六軸旋轉角度 $\theta_6$ 如下：

$$C = -o_x\sin\theta_1 + o_y\cos\theta_1$$
$$D = o_x\cos\theta_1 + o_y\sin\theta_1$$
$$\theta_6 = \tan^{-1}(\frac{C\cos\theta_3 - [D\cos(\theta_2 + \theta_3) - o_z\sin(\theta_2 + \theta_3)]\sin\theta_3}{-[D\sin(\theta_2 + \theta_3) + o_z\cos(\theta_2 + \theta_3)]}\sin\theta_5)$$

透過機械手臂末端的空間位置與方向向量，計算出第一軸到第六軸的旋轉角度，便能控制真實機械手臂之動作。

### 2.1.3. 遠端機器人硬體設備

本研究使用 3D 印表機，列印六軸機器手臂機身，並以伺服馬達作為動力來源。伺服馬達包含了 4 顆型號 MG996R 伺服馬達、3 顆型號 MG90S 伺服馬達及 1 顆型號 SG90 伺服馬達來控制機器手臂之動作。MG996R 伺服馬達，其旋轉角度為 0 到 180 度，最大力矩為 11 kgf·cm。MG90S 伺服馬達，其旋轉角度為 0 到 180 度，最大力矩為 2.2 kgf·cm。SG90 伺服馬達，其旋轉角度為 0 到 180 度，最大力矩為 1.8 kgf·cm。控制馬達所使用的是 Arduino Mega 控制器。Arduino 是一個開放原始碼的單晶片微控制器，採用了開放原始碼的軟硬體平台，建構於簡易輸出/輸入介面板，並且具有使用類似 Java、C 語言的 Processing/Wiring 開發環境。

使用 PWM (Pulse Width Modulation)訊號控制伺服馬達。而 Arduino Mega 中可輸出 PWM 腳位有 2~13 腳位。控制機械手臂的 8 顆伺服馬達之訊號線，分別連接至 Arduino 腳位 4、7~13。在同時控制多顆伺服馬達的情況下，Arduino 提供的電壓會不足，使得機器手臂在運作時極度不穩定，因此就必須連接額外的電源。

本研究使用之移動平台以兩顆直流減速馬達來作為動力來源。控制左右兩邊後輪轉動，來控制移動平台之移動方向。馬達的驅動 IC 為 L298N 馬達模組，將兩組橋式電路封裝成晶片，並加上穩壓 IC，能同時驅動兩顆直流馬達，並控制轉速。L298N 馬達驅動板具備 I/O 腳、地線與電源輸入與輸出。控制移動平台的 L298N 馬達模組連接至 Arduino 腳位 5、6、22、24、26、28。將移動平台與機械手臂組合即是本研究的遠端機器人，如圖 6 所示。完成所有連結後，便能透過 Arduino Mega 來操控遠端真實機器人之動作。

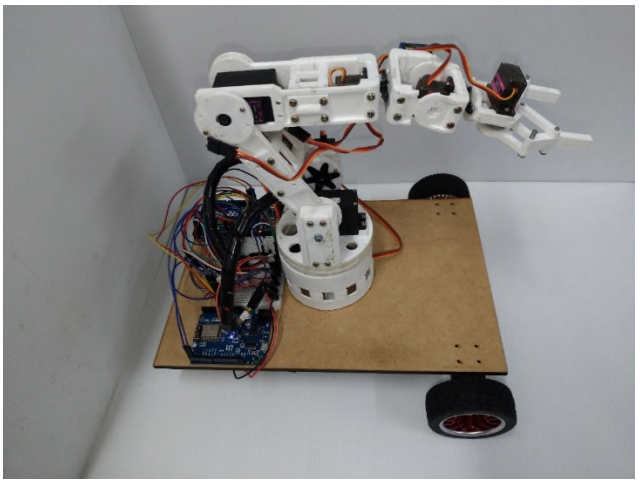


圖 6. 遠端實體機器人

### 2.1.4. 遠端機器人控制

本研究以 Wemos D1 R2 做為無線通訊橋梁。Arduino Mega 通過 Serial1 與 Wemos D1 R2 交換資訊。Arduino Mega 需回饋編碼器的數值，並接收使用者端的指令。本研究使用 Arduino Mega TX1 傳輸資訊及 RX1 接收資訊。Arduino Mega TX1 連接至 Wemos D1 R2 RX0。Arduino Mega RX1 連接至 Wemos D1 R2 TX0。使用 Arduino IDE 建立腳本，並上傳至 Arduino Mega 及 Wemos D1 R2。

以下為 Arduino Mega 所用到的程式碼：

# include <Servo.h>：調用控制伺服馬達的類別

Servo myservo[];：宣告伺服馬達陣列

Serial1.begin()：設定鮑率

myservo.attach()：設定腳位

Serial1.available()：判斷是否有透過 RX1 接收到值

Serial1.readStringUntil()：讀取字串直到設定的字元

Serial1.print()：透過 TX1 傳值

String.toInt()：將字串轉成整數形式

myservo.write()：控制伺服馬達角度

attachInterrupt()：設定中斷函式用於計算馬達轉動角度

以下為 Wemos D1 R2 所用到的程式碼：

#include <ESP8266WiFi.h>：調用 ESP8266 的核心類別

#include <WiFiClient.h>：調用 WiFi 連接類別

WiFi.begin()：連接 WiFi

WiFi.status()：WiFi 連線狀態

WiFi.localIP()：取得 IP 給使用者端輸入連接

server.available()：監聽是否有用戶端端連線

client.connected()：判斷用戶端是否仍然存在

client. available ()：判斷用戶端是否有傳值

client.print：傳值給用戶端

Serial.available()：判斷是否有透過 RX0 接收到值

Serial.print()：通過 TX0 傳值

### 2.2. 虛擬機器人

本研究使用 Unity3D 進行虛擬環境開發。Unity3D 是一套跨平台的遊戲引擎，可用於開發 Windows、MacOS、Linux 遊戲，或是 iOS、Android 行動裝置的遊戲。Unity3D 包括一個基於 PhyX 的物理引擎，一個繪圖顯示引擎，一個遊戲物件(GameObject)層次結構系統。使用者可直觀地利用 drag-and-drop 建立各個類別(class)之間的關係。Unity3D 主要的程式設計語言是 C#，並且支援 C# DLL 外掛程式。雖然有其他的軟體，例如 Robot Operating System (ROS) 或 Microsoft Robotics Developers Studio (MRDS)，可用來建立機器人，但為結合本實驗室之資源，本計劃採用 Unity3D 來建立虛擬機器人與虛擬環境。

虛擬機器人模型由 SolidWorks 畫出。因為 Unity3D 無法直接讀取 SolidWorks 模型檔案，因此必需將模型轉換成 fbx 檔案格式，才能輸入 Unity3D 程式。然而，SolidWorks 不支援 fbx，所以將模型檔案在 SolidWorks 中匯出為 stl 檔案格式，再將 stl 檔案匯入至 3ds Max 建模軟體中，並於 3ds Max 中匯出為 fbx 檔案格式。圖 7 為在 Unity3D 中建立之虛擬機器人。

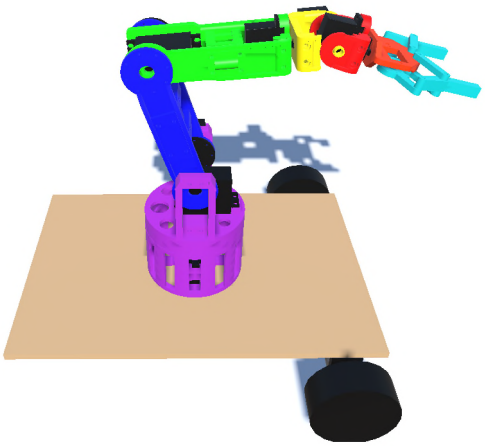


圖 7. 本地端虛擬機器人

### 2.2.1 虛擬機器人控制

本研究使用 HTC Vive 作為頭戴式顯示器。使用 HTC Vive Controller 作為操控器(如圖 8 所示)。操作模式分為兩種：機械手臂模式及移動平台模式。Grip Button 作為模式切換按鍵。在機械手臂模式下，Trackpad 控制夾爪開合。Trigger 用來拖曳夾爪末端之追蹤器，以控制夾爪末端的位置及角度(如圖 9 所示)。並利用逆運動學，計算每一手臂關節轉動之角度。在移動平台模式下，Trackpad 則控制移動平台前後左右，Trigger 則作為連線遠端機器人的按鈕。




圖 8. HTC VIVE 控制器

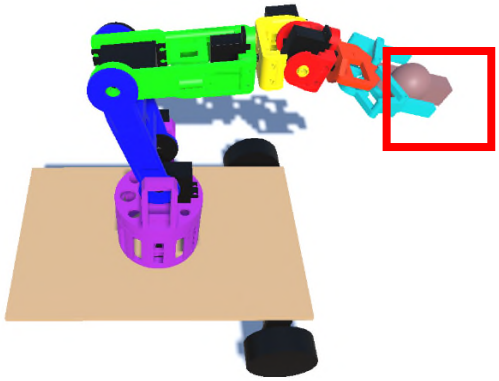


圖 9. 末端追蹤器

### 2.2.2 遠端連線

本研究使用 TCP/IP 網路通訊協定進行遠端控制。TCP/IP 的架構主要分為兩個部分，Client 端與 Server 端。以下為網路連線所用到的程式碼：

using System.Net.Sockets：調用 Sockets 類別

TcpClient client：宣告 TcpClient 物件

NetworkStream stream = client.GetStream()：取得用來傳送和接收資料的 NetworkStream

StreamWriter sw= new StreamWriter(stream)：以特定的編碼方式將字元寫入位元組資料流

StreamReader sr= new StreamReader(stream)：以特定的編碼方式自位元組資料流讀取字元

client = new TcpClient("IP", "port")：建立 TcpClient 連線至輸入的 IP 及 Port

sw.WriteLine()：寫入訊息

sw.Flush()：傳出訊息

sr.ReadLine()：讀取訊息

## III. 測試

在 Unity3D 中建立一個虛擬測試環境(如圖 10 所示)，並在真實環境中建立一真實測試場景(如圖 11 所示)。實際操作圖如圖 12.所示，使用者帶著頭戴式顯示器操控虛擬機器人，以控制遠端機器人。執行任務包括起點夾取物體(圖 13(a))，移動通過障礙(圖 13(b))，在終點放置物體(圖 13(c))。通過遠端回傳的編碼器數值，計算遠端機器人移動距離及旋轉角度，並回饋給虛擬機器人。實際操作影片連結在 https://youtu.be/vw0x-u4flSg。

在測試中，通過遠端機器人之編碼器數值，發現虛擬機器人雙輪旋轉角度，與實際機器人存在誤差，判斷是輪子轉向旋轉速度過快造成打滑。經過調整馬達轉速，可以有效降低誤差。未來將對輪子轉向作進一步的改進，使誤差更為減少。

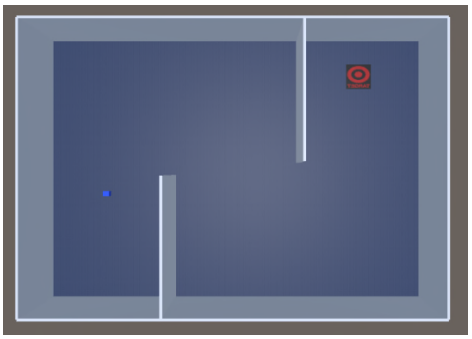


圖 10. 虛擬測試環境

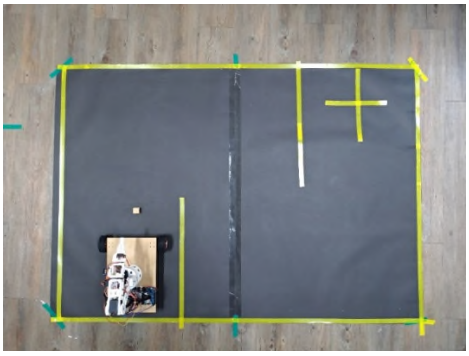


圖 11. 真實測試環境

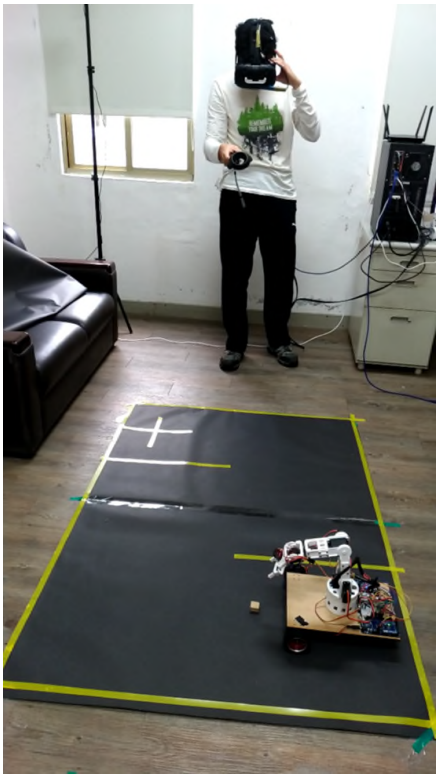


圖 12. 真實測試景

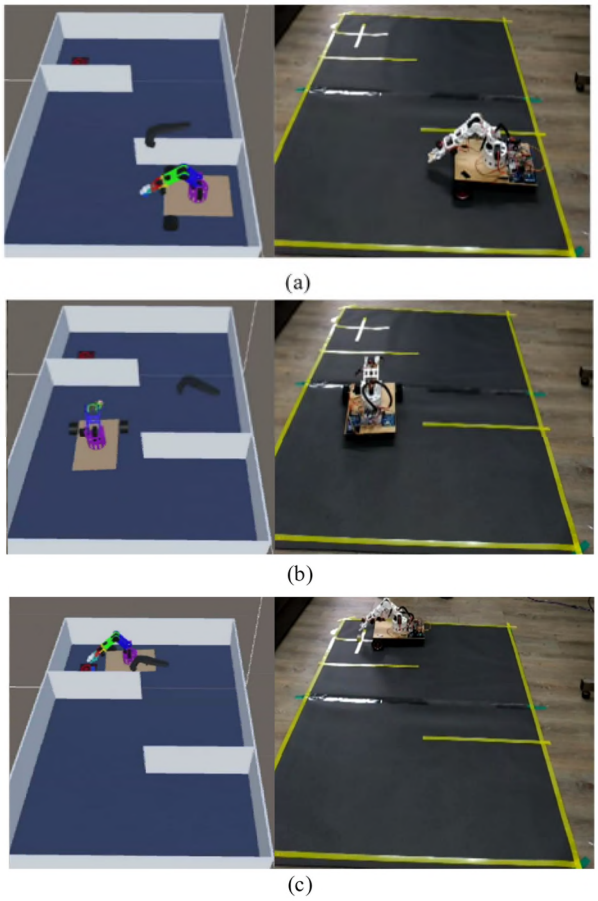


圖 13. 虛擬機器人與真實機器人同步動作 (a)抓取目標物 (b)移動至目的地 (c)放置目標物

## IV. 結果與討論

本研究建立一個利用虛擬實境技術，操控遠端機器人之系統。本系統預先對真實操作環境建模。使用者可在虛擬環境中操控虛擬機器人，並能在虛擬環境中，隨意走動，通過不同視角得到較清楚的空間資訊，使操控更為精準與流暢。測試結果顯示，本系統能有效的操作遠端機器人執行任務。

本研究使用虛實模型，在已知的環境且回傳資訊正確的時候，能有效的操作遠端機器人執行特定的任務。但是在場景發生變化或突發狀況產生時，無法做出對應的回饋。未來將在遠端機器人上裝載攝影機，即時回傳遠端影像。將根據遠端影像重建三維物件，並更新虛擬場景，並對回傳來的影像進行分析，使使用者了解遠端環境發生的變化，以提供使用者操作導引。

## V. 結論

本研究希望藉由虛擬實境，使用者可在擬真的環境中進行訓練，避免造成不必要的傷害與損失，並有效地降低工作訓練成本。研究結果可用來培育輻射技術應用相關產業人才。工作人員可在擬真的環境中，習得操作機器人處理輻射相關工作之技能。並可藉由操控虛擬機器人，精準的控制遠端實體機器人在具有輻射汙染的環境中處理高危險性之工作。本研究對於台灣核電廠之除役亦有所貢獻。目前核一廠正進行除役規劃，本研究可協助操控遠端機器人，在核電廠除役中，進行核設施拆除與包裝。

## 參考文獻


[1] G. Zhong, Y. Kobayashi, Y. Hoshino, T. Emaru, "Intuitive teleoperation of nonholonomic mobile robot with a manipulator based on virtual reality and WiFi," *IET International Conference on Information Science and Control Engineering 2012 (ICISCE 2012)*, 7-9 Dec. 2012, (2012), pp. 1-5.

[2] K. Kruusamäe, M. Pryor, "High-precision telerobot with human-centered variable perspective and scalable gestural interface," *2016 9th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, 6-8 July 2016, (2016), pp. 190-196.

[3] A. W. W. Yew, S. K. Ong, A. Y. C. Nee, "Immersive Augmented Reality Environment for the Teleoperation of Maintenance Robots," *Procedia CIRP*, 61 (2017) 305-310.

[4] F. Brizzi, L. Peppoloni, A. Graziano, E. D. Stefano, C. A. Avizzano, E. Ruffaldi, "Effects of Augmented Reality on the Performance of Teleoperated Industrial Assembly Tasks in a Robotic Embodiment," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 48 (2) (2018) 197-206.

[5] J. I. Lipton, A. J. Fay, D. Rus, "Baxter-Homunculus: Virtual Reality Spaces for Teleoperation in Manufacturing," *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3 (1) (2018) 179-186.

[6] D. Cheng-jun, D. Ping, Z. Ming-lu, Z. Yan-fang, "Design of mobile robot teleoperation system based on virtual reality," *2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 5-7 Aug. 2009, (2009), pp. 2024-2029.

[7] M. Mostefa, L. K. E. Boudadi, A. Loukil, K. Mohamed, D. Amine, "Design of mobile robot teleoperation system based on virtual reality," *2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*, 25-27 May 2015, (2015), pp. 1-6.

# 半導體元件輻射效應與抗輻射製程研究
# Radiation Effects and Hardening Processes for Semiconductor Devices

計畫編號：MOST 107-2623-E-007-005 -NU
計畫主持人：張廖貴術
e-mail：lkschang@ess.nthu.edu.tw
執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

## 摘要

抗輻射積體電路(IC)元件在科技研究與工業製造上，都有很重要的應用。閘介電層製程是發展積體電路金氧半元件很重要的研究課題之一，而高介電係數材料(high-K)閘極已為先進積體電路所使用。為了改善 high-K 材料與半導體基材之界面特性，本研究提出由 high-K 的堆疊與適當退火處理作為閘介電層，以得到很好的金氧半(MOS)元件特性，及很薄的等效氧化層厚度。另外，本計畫探討金屬閘極與 high-K 閘介電層之界面製程，以增進其抗輻射特性。High-K 氧化層與金屬閘之間以原子層沉積(ALD)成長 HfN 做為緩衝層，可以獲得較佳元件及抗輻射特性。本研究計畫之成果，可作為抗輻射積體電路製程整合之範例，並瞭解輻射傷害之物理機制及提出減少傷害的可能方法。

關鍵詞：抗輻射，高介電係數，閘介電層，金氧半元件，金屬閘。

## Abstract

The radiation hardening integrated circuit (IC) devices are important for the applications in researches of science and technology and industry production. The research topic of gate dielectric process is crucial for MOS device in IC. High-K gate dielectrics have been implemented in modern IC. To improve the property of high-K material/semiconductor interface, gate dielectric stack and anneal of high-K are studied in this project. Then, MOS devices with excellent characteristics and low EOT can be achieved. Besides, the process integration of metal gate/high-k gate dielectric for improving radiation hardness is investigated. The electrical characteristics and radiation hardness of Ge MOSFET can be clearly improved by using a ALD-formed HfN buffer layer between High-K gate dielectric and metal gate. The results of this project would provide a good example of the integration of radiation hardening IC process. The physical mechanism of radiation-induced damage on MOS device and the reduction of radiation damage are better understood as well.

Keywords: Radiation hard, high dielectric constant, gate dielectric, MOS device, metal gate.

## I. 前言

半導體晶片大量使用在日常生活及各種裝置，已經是不可或缺的電子零組件。半導體製造在台灣更是一大產業，其中積體電路技術水準已領先國際。近年來隨著太空科技與核能技術的進步，半導體元件技術在該領域的應用越來越受到人們的重視。隨著積體電路(IC)元件之奈米化與製程複雜化，介電層的品質要求將更嚴格，因此絕緣層或閘高介電層之界面、漏電流等特性是當前研發的重點。由於系統整合晶片(system on chip, SOC)的發展趨勢，元件之間隔離的困難將增加，所以各種製程方法正積極進行中，如高速離子植入等。再者，近來電漿製程已大量使用在超大型 IC 製造、人造衛星使用之太空元件等，因而輻射或荷電粒子對元件產生的傷害與防治是非常重要的研究課題。

而半導體元件的發展比較上世紀的傳統元件已經出現較大的不同，更多的元件結構(如:薄膜電晶體 Thin Film Transistor, 多閘極電晶體 Multi-Gate Transistor，穿隧電晶體 Tunnel FET，等等)，及越來越多基板種類（Ge，SiGe，GaAs，三五族半導體等等）已經有大量的研究報告。而關於新元件新材料，對於他們未來應用在太空領域及核能相關領域的研究仍然是有待探討，其中一個關鍵是缺乏相關元件對於高輻射環境的可靠度測試。為了避免半導體元件在高輻射環境下失效造成核子安全事故或太空系統失效等問題，造成無法挽回的損失，確定元件在輻射能量傷害下造成的劣化程度及抗輻射能力非常重要。另外一個關鍵是如何利用相關製程技術提升元件的抗輻射能力，以期望可以達到高輻射環境的使用標準。因此，本研究將以金氧半場效電晶體(MOSFET)及薄膜電晶體(TFT)受輻射傷害之元件可靠度為研究重點。

隨著極大型積體電路(ULSI)技術之發展，MOS 元件的閘極氧化層厚度要求漸薄，為了改善其電特性及可靠性，近年來有含氮氧化層(oxynitride)之研發，不但效果不錯同時也減少 p+-poly gate 硼穿透問題[1]。然而 0.1 μm 以下元件，閘氧化層厚度之要求必須在 15 以下，在此情形下，傳統氧化層或其類似之改良材料已不能使用[2, 3]。因為介電層太薄，大量的漏電流將產生，製作的積體電路(IC)含有嚴重的靜態功率消耗及熱消散問題。因此增加介電層厚度是必然的路，為了同時保持相當的單位面積閘極電容，介電材料勢必要使用係數較高的材料。近年來 Si3N4 已被幾位國際知名的學者製成特性很好的閘介電層，如使用 JVD [2-4]，RTCVD[5]等。又 Si3N4 介電係數雖較 SiO2 高，厚度也可厚些，但是厚度在 1.5 nm 以下也有明顯的漏電流，如同 SiO2 一樣。為了發展閘介電層之等效氧化層厚度(EOT)小於 1 nm 以下，更高介電係數的材料已有不少學者在嚐試，如 Ta2O5，Al2O3，ZrO2[6]，HfO2 等。雖然有不錯的效果，但是由於材料含氧及金屬，經後續製程之熱循環(Thermal cycle)，製成 MOSFET 後仍保有優越電特性就很不容易。因此，本研究係以含氮氣體進行矽表面之氮化，然後再成長高介電係數之金屬氧化物使其 EOT 在 1.5 nm 以下。再由適當之 high-K 成份元素比例及成長後之退火處理，可以得到特性相當不錯的介電層。因此，應用極薄且高品質的

SixNyO，再成長 high-K metal-oxide，是本研究要探討的目標之一。目前我們正進行 high-K 材料，如 HfO2，ZrO2，Al2O3 等，並探討各種材料間混合比例之效應。

本研究計畫之主要目的係開發金氧半場效電晶體(MOSFET)元件抗輻射製程，將探討元件中絕緣層與高介電層之輻射效應，進行測量分析並以製程方法減少元件之輻射傷害。本研究計畫之最大宗旨在培育輻射應用技術與半導體產業之人才，其目標有三項，一為成長 high-K 閘介電層 MOS 元件製程探討，二為研究半導體表面及界面層製程對 MOS 元件抗輻射特性之影響，三為 metal gate/high-K 閘介電層製程整合以提升元件抗輻射特性。這些研究目標是積體電路元件很重要的製程研發課題，也將提出抗輻射製程與可靠度分析。

## II. 主要內容

本研究之流程及結構示意圖，如圖 1 所示。實驗樣品使用二吋 N 型單晶鍺晶片，晶格方向為（100），電阻值為 1~10 Ω-cm。表 1 為本研究實驗所有樣品影響參數表。製作元件前先以去離子水（DI Water）清洗晶面，接著在 1%的稀釋氫氟酸（dilute hydrofluoric acid，DHF）中浸泡 600s 以去除晶片表面的原生氧化層（native oxide）。清洗後，晶片轉移到原子層沉積系統，進行界面層氧化物之成長及高介電材料之堆疊，其腔體溫度為 250°C，基礎壓力為 4.2*10-4 Torr。在原子層沉積系統中，通入水汽後以 300W 的功率點燃電漿 20s 以氧化鍺晶片，成長氧化鍺界面層，隨後通入氫氣還原低價氧化鍺，如此循環 50 週期，可成長高品質氧化鍺界面層。通入十分鐘氮氣清腔後，通入三甲基鋁（trimethylaluminum，TMA）前驅物，隨後通入水汽，以氧化前驅物形成氧化鋁緩衝層。完成緩衝層沉積後，繼續在樣品上沉積 Zr-rich 6 cycle 和 ZrO2 35 Å 作為高介電材料層。此時完成介電層之成長與沉積，所有製程均為原位（in-situ）製程。

隨後在需要的樣品上分別沉積 ALD TiN、ALD HfN 和 ALD ZrN。在腔體中通入十分鐘氮氣清腔後，通入 Ti 或 Hf 或 Zr 之前驅物後等待 12s 以使前驅物均勻分佈整個腔體。隨後通入氨氣和大量氬氣，並以 300W 的功率點燃電漿一定時間完成一個週期氮化。如此循環若干週期，則可沉積一定厚度的閘電極。

此後所有樣品，依序進行真空濺鍍（sputtering，SPT）TiN 閘極金屬沉積、閘極圖形定義與蝕刻、離子佈值、快速熱處理退火、源極及汲極電極沉積、隔離氧化層覆蓋、接觸窗口定義及蝕刻、連接金屬沉積以及金屬燒結。在評估元件輻射特性方面利用 Co-60 照射，總計量分別為 10 Krad、100 Krad、1000 Krad，在照射後量測元件的電性，評估元件照射輻射後的電特性。

本實驗所有參數之量測皆使用 HP4156B 半導體參數分析儀搭配 ICS、EasyExpert 軟體進行，其量測包括照射輻射前與照射輻射後之臨界電壓(threshold voltage，Vth)、轉移電導(transconductance，Gm)、轉移特性曲線(ID-VG)、直流特性曲線(ID-VD)、閘極漏電流(IG-VG)、次臨界斜率(subthreshold swing, S.S.)和可靠度量測。

## III. 結果與討論

本研究計畫依照原規畫工作完成了高介電係數材料成長製程參數及 MOS 元件製作、抗輻射金氧半電容元件製作與量測、MOS 元件輻射傷害之電特性量測及材料分析、物理機制探討等。另外，遵照計畫需求單位之建議，也進行了近地軌道輻射環境資訊文獻之蒐集，及研讀晶片輻射防護設計候選方法等。以下分別簡要敘述主要的結果。

**1. 近地軌道輻射環境，及晶片輻射防護設計**

依據國家太空中心所提供資料，福衛五號在近地軌道的輻射環境，在不同鋁(Al)厚度下的總游離劑量(Total Ionizing Dose, TID)，如圖 2 所示。因此，若經鋁(Al) 3 mm 厚度後，電子元件每年吸收的 TID 值大約是 10 Krads (Si)。

有關晶片輻射防護設計的資料，有些研究應用電路佈局技巧以期減低輻射傷害，例如以金屬遮蔽、棋盤式遮蔽及 NPS 且金屬層縮減，都無法達到防護的效果。另外歐洲太空總署(European Space Agency, ESA)有些報告指出，將 CMOS 元件的 source and drain 兩端點隔離，並加上保護環(guard ring)，可有效提升元件抗輻射能力。因此，以元件結構佈局的改變，是有機會達到防護的效果。

**2. 輻射對 Ge MOSFET 電晶體 ID-VD 及轉換特性之影響**

圖 3(a)沒沉積 ALD 的 SPT TiN 於金屬閘極上方與圖(b)為沉積 ALD HfN+SPT TiN 鍺電晶體，分別給予不同的輻射總劑量所得到的 ID-VD 對輻射劑量率實驗數據圖。由實驗數據可以發現，在照射輻射前，在金屬閘極(Metal Gate)上方沉積 ALD HfN 的鍺電晶體有較高的驅動電流(Driving Current)，在照射不同總劑量輻射後可以發現有沉積 ALD HfN 的電晶體對於輻射的影響相對來的不敏感。圖 3 和圖 4 可以明顯地得到一個結論，那就是可以看出 MOSFET 元件在累積了更多的輻射劑量之後，其所受到的輻射傷害亦愈大，也就是說它的電特性衰減(Degrade)的更嚴重。MOSFET 元件的輻射效應，最重要的反應在位於閘極(Gate)與基板(Bulk)之間的氧化層介面上，亦指此氧化層極易受到輻射傷害之意。當氧化層接受了一定劑量的輻射線之後，由於吸收了能量，便產生了大量的電子電洞對，在產生的同時，除了少數的電子電洞會自行複合之外，其餘電子電洞便會向閘極(Gate)或基板(Bulk)的方向移動。而此時平常不帶電的陷阱便會捕捉電洞而成了正電性，一般稱此電洞陷阱(Hole trap)為氧化層陷阱電荷(Oxide trap charge, Qot)。故對於 P 通道或 N 通道的 MOSFET 而言，其 Qot 之電性均為正的。此外，當氧化層接受了一定劑量的輻射量後，也會在其間產生所謂的介面陷阱(Interface trap)或稱介面能態(interface state)。有關探討介面能態的成因的文獻亦很多，一般均認為那是由於輻射所產生的電洞與介面不完全. 的鍵結相互作用，進而降低 MOSFET 的驅動電流(Driving Current)。

**3. 輻射對 Ge MOSFET 電晶體 ID-VG 及轉換特性之影響**

圖 4 為 ALD HfN+SPT TiN 與 SPT TiN 閘極電晶體的汲極(Drain)電流(a)取對數和(b)線性對閘極電壓特性圖。在照射輻射前，ALD HfN+SPT TiN 閘極的電晶體相比 SPT TiN 閘極電晶體有更小的臨界

電壓，在截止電流的部分，ALD HfN+SPT TiN 閘極的電晶體有較小的截止電流。ALD HfN +SPT Ti 閘極電晶體相較於 SPT TiN 閘電極的電晶體有較大的驅動電流(Driving Current)，差異可能是 ALD 沉積之閘電極氮化不完全導致 EOT 有所增生。兩個樣品的關閉電流($I_{off}$, off current)在照射輻射前，ALD HfN +SPT Ti 閘極電晶體相較於 SPT TiN 閘極電晶體有較小的漏電流，在開關比例(On-Off ratio)上 SPT Ti 閘極電晶體的值約為 3.8 個數量級(Order)而 ALD HfN +SPT Ti 閘極電晶體的值約為 4.4 個數量級(Order)。在次臨界斜率部分，ALD HfN +SPT Ti 閘極電晶體相較於 SPT Ti 閘電極的電晶體有較小的 S.S.值，其值分為 156mV/dec 與 250mV/dec。

圖 5 (a) SPT Ti 閘極電晶體及(b) HfN +SPT Ti 閘極電晶體，經不同的輻射總劑量的元件汲極(Drain)電流對電壓特性圖。從圖 5(a)結果可以發現，在元件照射輻射劑量大於 1000Krad 時，截止電流(Off current)會快速上升，再由圖 5(b)結果可以發現 HfN +SPT Ti 閘極的電晶體在輻射劑量大於 100Krad 時，會使截止電流(Off current)逐漸上升。可能是因為反應在位於閘極(Gate)與基板(Bulk)之間的氧化層介面上，當氧化層接受了一定劑量的輻射線之後，由於吸收了能量，便產生了大量的電子電洞對，在產生的同時，除了少數的電子電洞會自行複合之外，其餘電子電洞便會向閘極(Gate)或基板(Bulk)的方向移動，使得元件量到的截止電流(Off current)逐漸上升。當照射的更大劑量的輻射(1000Krad)時，HfN +SPT Ti 閘極電晶體的截止電流(Off current)還是有稍微上升的趨勢，但上升量相較於照射輻射量為 100Krad 時來的小，表示 HfN +SPT Ti 閘極的電晶體的氧化層在接受輻射劑量大於 10Krad 時會產生大量的介面陷阱(Interface trap)。

## IV. 結論

本研究計畫完成了預期的工作項目，由蒐集資料得知福衛五號的電子元件在近地軌道每年吸收總游離輻射劑量約 10 Krads (Si)。將 CMOS 元件的 source and drain 兩端點隔離並加上 guard ring，可有效提升元件抗輻射能力。MOS 元件的高介電係數氧化層與金屬閘的界面成長製程明顯影響元件的驅動電流、關閉電流、及抗輻射等特性等。高介電係數氧化層與金屬閘之間以 ALD 成長 HfN 做為緩衝層，可以獲得較佳元件及抗輻射特性。

## 參考文獻


[1] K.S. Chang-Liao and L.C. Chen., J. Vac. Sci. & Tech. B15(4), p.942 (1997).
[2] T.P. Ma, IEEE ED-45, p.680 (1998).
[3] X. Guo et al, IEEE EDL-19, p.207 (1998).
[4] X. Guo et al, IEEE 1999 IEDM, p.137.
[5] H.F. Luan et al, IEEE 1999 IEDM, p.141.
[6] W.J. Qi et al, IEEE 1999 IEDM, p.145.

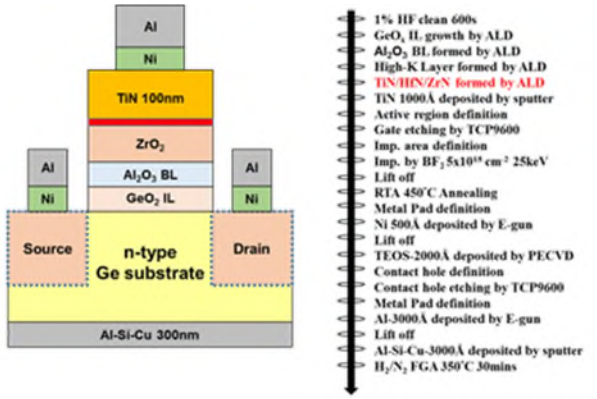




圖 1　本計畫 Ge MOSFET 之製作流程及結構示意圖

表 1　實驗樣品參數表

| No. | IL | BL | HK | Metal gate | | Imp | Annealing | Contact | Sinter |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | $H_2O$ remote plasma $GeO_2$ | $Al_2O_3$ 5Å | Zr-rich+$ZrO_2$ 35Å | X | PVD TiN | $BF_2$ 5E15 25keV | RTA 450°C | Ni 500Å | FGA 350°C/ 30mins |
| 2 | | | Zr-rich+$ZrO_2$ 35Å | ALD deposited HfN 9 nm | PVD TiN | | | | |

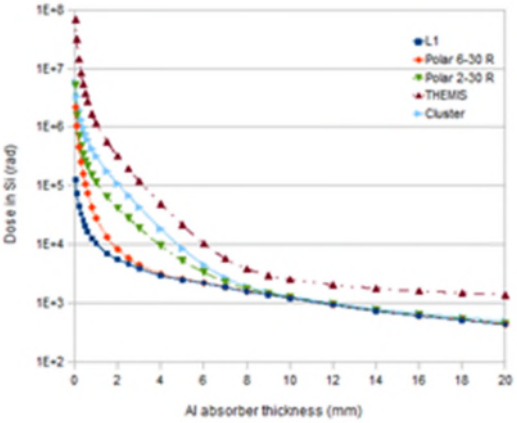
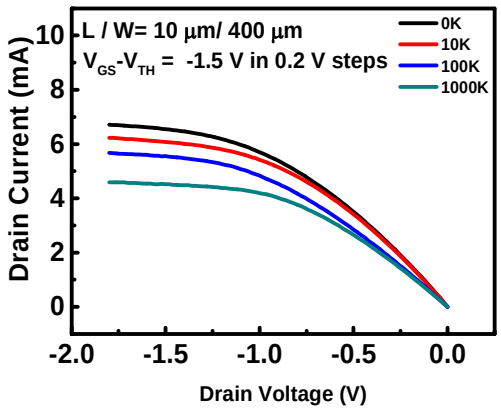
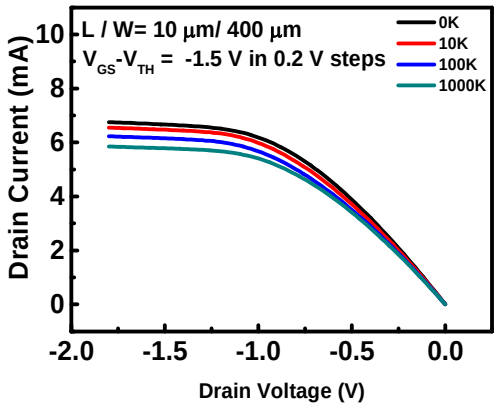



圖 2 近地軌道的輻射環境在不同鋁(Al)厚度下的總游離劑量(TID)

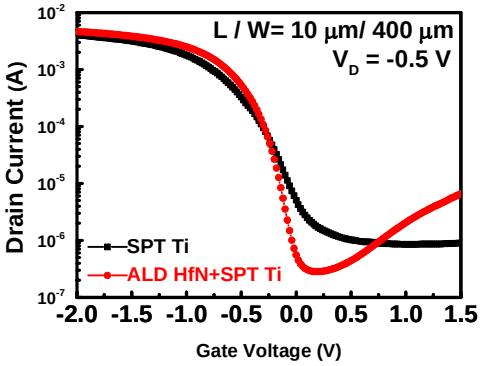



(a)

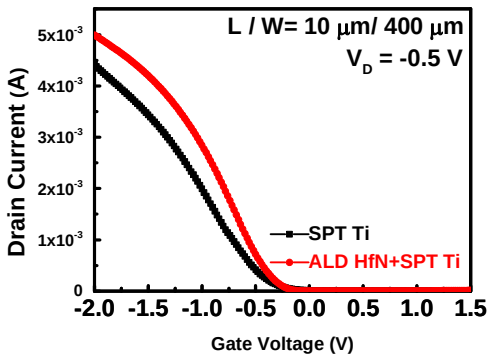



(b)

圖 3(a)沒沉積 ALD 的 SPT TiN 於金屬閘極上方與圖(b)為沉積 ALD HfN+SPT TiN 鍺電晶體，分別給予不同的輻射總劑量所得到的 ID-VD 對輻射劑量率實驗數據圖

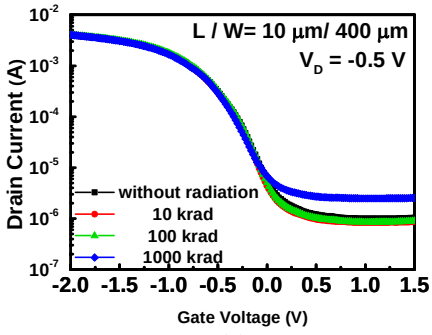



(a)

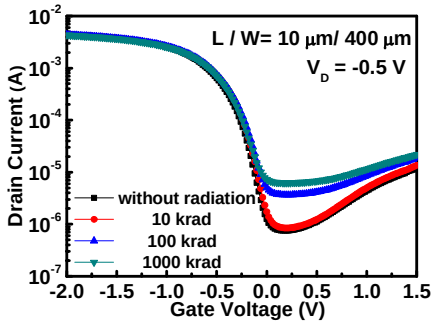



(b)

圖 4 為 ALD HfN+SPT TiN 與 SPT TiN 閘極電晶體的汲極(Drain)電流(a)取對數和(b)線性對閘極電壓特性圖




(a)




(b)

圖 5 (a) SPT Ti 閘極電晶體及(b) HfN +SPT Ti 閘極電晶體，經不同的輻射總劑量的元件汲極(Drain)電流對電壓特性圖

# 鑑識情資於輻射監測數據之應用

# Forensic Intelligence in Radiation Monitoring Data Analysis

計畫編號：MOST 107-2623-E-015 -002 -NU
計畫主持人：陳用佛副教授
共同主持人：鄒慶士教授
e-mail：nanoforensics@mail.cpu.edu.tw
執行單位：中央警察大學鑑識科學學系與國立臺北商業大學
資訊與決策科學研究所共同執行

## 摘要

「輻射監測數據」的目標是製定環境輻射/放射性分佈的系統數據，作為評估公共衛生的標準。以及當在發生輻射安全緊急情況的情況下，分析該數據對於維護國家安全和環境非常重要。輻射監測可以讓我們了解所在地區有多少和什麼樣的放射性物質存在，並測試用於估計人類輻射劑量的數學模型。此外預防更大的不受監控的釋放或放射性的擴散釋放，並評估對生物群可能的影響。本計畫採用之分析方法除了對於原子能委員會可下載之環境輻射監測歷史數據（http://www.aec.gov.tw/monitoring/history.html）進行敘述統計之分析外，可能的話也將採用趨勢變化分析與時間序列分析。本計畫透過研究 4 年之行政院原子能委員會輻射偵測中心執行臺灣地區核設施周圍環境輻射監測結果進行特徵分析。從時間的視覺化分析來看，台灣環境輻射值皆以右偏為主，表示僅有少數較高的離群值，多數的資料仍集中在資料的中心或左邊。從地理空間角度來看，無論是分年或分季繪圖，阿里山和金門兩觀測站的環境輻射值都名列前茅，甚至阿里山的平均值都高於我們建立的離群值門檻，此外，從觀測站是否鄰近核設施來看，位於核設施 20 公里內外的測站其環境輻射值並未有明顯差異，也就是說，鄰近核設施觀測到的環境輻射值並沒有比較高，不需要過度擔憂。最後我們加入空氣品質觀測資料，無論是整體資料或是分季，也比較離群值較多的測站，但是從基本的變數相關性來看，都並未發現環境輻射值與我們所蒐集到的空氣品質變數有明顯的相關。

關鍵詞：輻射監測數據、大數據分析、鑑識情資、趨勢變化分析、時間序列分析

## Abstract

The study of Radiation Monitoring Data can help to develop systematicdata on environmental radiation / radioactivity distribution as acriterion for assessing public health. And in the event of a radiationsafety emergency, the analysis of the data is important for maintainingnational security and the environment. Radiation monitoring allows us tounderstand how much and what kind of radioactive material is present inthe area and to test the mathematical model used to estimate the dose ofhuman radiation. In addition to prevent uncontrolled or radioactive diffusion release and assessing possible effects onbiota, the analysis of thestatistics for theenvironmental radiation monitoringhistoricaldata(http://www.aec.gov.tw/monitoring/history.html) that can be downloadedby the Atomic Energy Commission. The project carried out theanalysis of the results of the environmental radiation monitoring in thenuclear facilities in Taiwan. From the visual analysis, Taiwan's environmental radiation values are mainly skewed to the right, indicating that there are only a few high outliers, and most of the data are still concentrated in the center or left of the data. From a geospatial point of view, both Mt. Ali and Kinmen observation stations have the highest environmental radiation values, whether they are divided into years or quarters. Even the average value of Mt. Ali is higher than the threshold of outliers we established. Whether the observatory is close to the nuclear facilities, the environmental radiation values of the stations located within 20 km of the nuclear facilities are not significantly different. That is to say, the environmental radiation values observed by the adjacent nuclear facilities are not relatively high.Finally, we analyzed air quality observation data, from the basic variable corrlation, we did not find the environmental radiation values we collected.

Keywords: Radiation Monitoring Data, Big Data Analytics, Forensic Intelligence, Trend Analysis, Time Series Analysis

## I. 前言

環境輻射可能的來源包括天然核種與人為核種，前者造成一般所謂的天然輻射，是環境輻射最大的來源。天然核種來自大氣，以及生活環境中存在於土壤、岩石、建材、煤灰、人體和食物中的天然放射性物質(Naturally Occurring Radioactive Materials，簡稱 NORM)及其子核(https://www.aec.gov.tw/便民專區/原子能知識/認識輻射/基本輻射知識/天然輻射--220_271_1085_1086_1171.html)，舉凡太空的宇宙射線(cosmic ray)與地球高層大氣中的伽瑪射線、地殼中的氡氣(Radon)、地底煤礦、及再次加工產生之煤灰所製造的水泥和混凝土等建築材料，都可能是天然輻射的來源。

環境輻射可透過不同的放射劑量測定器(dosimeters)測得其值，瞭解環境輻射監測值(以下簡稱環境輻射值)在不同時間與地理位置上的水準和變異，是非常重要的一項數據分析任務。所得結果除了可以估算各個天然核種的影響程度，更可作為核能設施去污作業與除役決策的參考，並判定環境輻射背景值是否達到總等效劑量(Total Effective Dose Equivalent, TEDE)的防護標準，消除大眾對於輻射游離的疑慮 [19]。

前述的環境輻射值必定存在著變異，其時劑量或日劑量的變化，可能受到陽光、降雨、降雪、大氣、土壤與季節等因素的影響。透過環境輻射數據的空間分析，以及長短期不同時間的變異理解，並探討其可能的原因，如此對於天然核種的瞭解，甚或人為核種的控制等，都具有相當程度的貢獻。

## II. 主要內容

一、 研究方法

本計畫運用資料視覺化的方式探討四年環境輻射值的時間與空間變異，並且針對歷史資料進行各項敘述統計值的計算，得出相對應的離群值並且進一步結合空氣品質資料，探討環境輻射值與各項空氣品質因子(以下簡稱空品因子)之間是否有關係。

二、 資料說明

本計畫抓取行政院原子能委員會輻射偵測中心 2014 年至 2017 年的環境輻射監測歷史數據公開資料[6]，下表 1 為環境輻射監測資料欄位，而原始欄位分別有：時間、環境輻射監測站、經緯度以及環境輻射值，而其資料型態及定義見表 2。

四年的資料中環境輻射值(hourlyDoseRate)每一小時紀錄一筆，總共 35,064 筆，而單位為微西弗(μSv) 。為了利於後續進行計算及分析，我們將環境輻射值統一乘於一千，將環境輻射值的單位轉換成奈米西弗(nSv)。環境輻射監測站(rad_site)總共有四十六個測站，其所監測的核設施包含核一廠、核二廠、核三廠、龍門核能電廠、核能研究所、清華大學及蘭嶼貯存場等 7 個設施。此外，為了後續從進行全台地圖的繪製，我們將原始資料中的各個環境輻射監測站所對應的經緯度一同匯入。

在匯入資料的過程中，因發現到 2014 年至 2016 年九月均沒有「紅頭」測站，故在 2014 年至 2016 年九月這段期間，新增「紅頭」測站，並以 NA 欄位表示這段時間並無任何監測數據，此外日期(date)欄位在匯入資料時的型態為因子(Factor)，因此在匯入完畢後，將日期欄位轉換成日期(POSIxct)格式。

經過 2011 年 3 月 11 日日本福島核災後，國際原子能總署將核災應變區建議訂在二十至三十公里[4]。在本計畫中，我們設定二十公里為我們的範圍標準值。為了標記出四十六個測站，對應各個核設施是位於 20 公里的範圍內還是外，我們擷取該測站的地址及經度(longitude)和緯度(latitude)並結合 Google Earth 進行分類，並且根據此分類增加了是否在核設施 20 公里內外(insideOrNot)衍生欄位以利分析，此欄位在表 1 中以不同的顏色進行標註。

| date | rad_site | hourlyDoseRate | longitude | latitude | insideOrNot |
|---|---|---|---|---|---|
| 2014-01-01 00:00:00 | 大光 | 50 | 120.7405 | 21.95140 | 20km 以內 |
| 2014-01-01 00:00:00 | 阿里山 | 104 | 120.8133 | 23.50820 | 20km 以外 |
| 2014-01-01 00:00:00 | 恆春 | 70 | 120.7467 | 22.00379 | 20km 以內 |
| 2014-01-01 00:00:00 | 石門 | 58 | 121.5630 | 25.29114 | 20km 以內 |
| 2014-01-01 00:00:00 | 宜蘭 | 63 | 121.7563 | 24.76399 | 20km 以外 |

表 1：部分環境輻射監測資料

表 2：環境輻射監測資料詮釋資料

| 欄位名稱 | 資料型態 | 定義 |
|---|---|---|
| date | 因子(Factor) | 日期，每小時一筆。 |
| rad_site | 字串(character) | 環境輻射監測站，共 46 個測站。 |
| hourlyDoseRate | 數字(numeric) | 環境輻射監測值，其單位為微西弗(μSv)。 |
| longitude | 數字(numeric) | 經度。 |
| latitude | 數字(numeric) | 緯度。 |
| insideOrNot | 字串(character) | 是否在各核設施 20 公里以內。 |

## III. 結果與討論

一、 時間與空間視覺化分析

為了能夠快速理解資料的意義，我們將資料以圖表的方式呈現，並從時間與空間的角度切入來查看數據並分析，時間依照資料的年份，依序是 2014 至 2017 年，以及春(3、4、5 月)、夏(6、7、8 月)、秋(9、10、11 月)、冬(12、1、2 月)四個季節；空間則是依照 46 個測站與他們所在的經緯度位置來做觀察。圖表方面，我們會使用折線圖、頻率圖及盒鬚圖。下面簡單介紹各種圖表：

表 3：圖表簡介

| 折線圖 | 頻率圖 | 盒鬚圖 |
|---|---|---|
| 折線圖是用直線段將各數據點連接起來而組成的圖形，以折線方式顯示數據的變化趨勢。<br>折線圖可以顯示隨時間（根據常用比例設置）而變化的連續數據，因此非常適用於顯示在相等時間間隔下數據的趨勢。[1] | 頻率直方圖（frequency histogram）亦稱頻率分佈直方圖。<br>在直角坐標系中，用 X 軸表示隨機變量的取值，X 軸上的每個小區間對應一個組的組距，作為小矩形的底邊；Y 軸表示頻率與組距的比值，並用它作小矩形的高，以這種小矩形構成的一組圖稱為頻率直方圖。[3] | 它的組成有最大值、最小值、中位數、第一四分位數(Q1)以及第三四分位數(Q3)，而第一四分位數與第三四分位數之差值稱四分位距(Interquartile range, IQR)。<br>盒鬚圖會根據第一及第三四分位數繪製出盒子，再沿著盒子的左右畫出鬍鬚，若有觀測值落在盒鬚圖的鬍鬚外，則會將之視為離群值。[2] |

(一) 時間分析

首先從時間角度做切入，下圖 1 為 2014 年至 2017 年各年的全台環境輻射監測值之年平均值與年中位數所繪製而成的折線圖，利用此圖來對環境輻射監測值四年數據分布的位置做個初步的了解，縱軸為環境輻射值(奈米西弗)，橫軸為 2014 至 2017 年四年，而兩條折線分別為年平均值(實線)與年中位數(虛線)，由圖中折線的趨勢可發現環境輻射值除了 2017 年輻射值突然降低，其他三年的輻射值還算是平穩；最高的環境輻射值落在 2015 年，最低的環境輻射值落在 2017 年；再觀察平均值與中位數之間的差距，發現相較於 2017 年，2014、2015、2016 年三年的平均值與中位數的差距都偏大，很有可能的原因是這三年中極端值的影響較大，合理的懷疑是這三年中可能都有一些特別高的輻射監測值在影響著數據的分佈，且從圖中可看出 4 年的平均數皆大於中位數，平均數易受到極端值的影響，因此當分佈中有一些極高的異常值時，平均數會大於中位數，則可推測出資料是呈現右偏的型態，而當平均數越接近於中位數則表示資料分佈越平均。表 4 分別列出了 2014 年至 2017 年四年的各個統計值，能明顯看出四年的平均值皆大於中位數，且 2014 年至 2016 年的平均值與中位數間的差距(最後一欄)明顯大於 2017 年的差距。

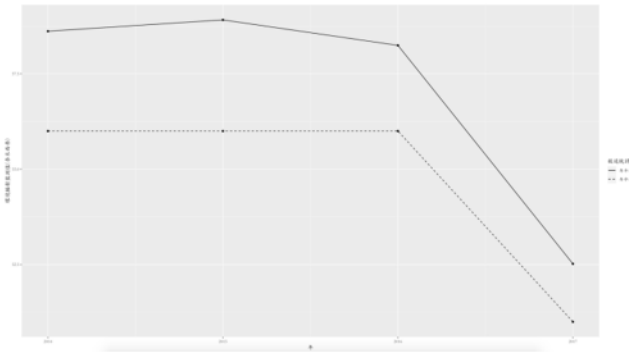


圖 1：全台環境輻射監測年平均值及年中位數折線圖

表 4：全台分年環境輻射監測敘述統計

| | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 | 2017 年 |
|---|---|---|---|---|
| 平均值 | 58.61624 | 58.91327 | 58.24534 | 52.51953 |
| 最小值 | 39 | 39 | 25 | 24 |
| 第一四分位數 | 52 | 52 | 49 | 44 |
| 中位數 | 56 | 56 | 56 | 51 |
| 第三四分位數 | 63 | 64 | 65 | 59 |
| 最大值 | 216 | 190 | 210 | 143 |
| 全距 | 187 | 151 | 185 | 119 |
| 標準差 | 10.77719 | 10.83881 | 15.06277 | 14.29357 |
| 四分位距 | 11 | 12 | 16 | 15 |
| 平均值-中位數 | 2.61624 | 2.91327 | 2.24534 | 1.51953 |

接著利用四年的環境輻射值全距、最大值、四分位距及標準差繪製折線圖，如圖 2 與圖 3 所示，縱軸為環境輻射值(奈米西弗)，橫軸為 2014 至 2017 年四年，可以看到最大值(虛線)與全距(實線)形狀相似且在 2014 與 2016 年皆是峰值；全距只看最大與最小值易受極端值的影響，因此全距不適合用來決定資料的離散程度；再看四分位距(虛線)與標準差(實線)，可發現 2016 與 2017 年有明顯的上升。

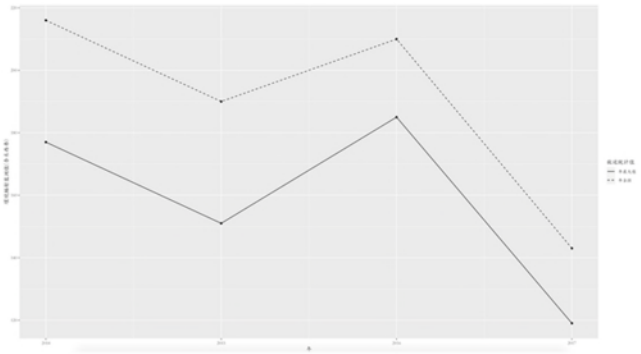


圖 2：全台環境輻射監測年全距、年最大值折線圖

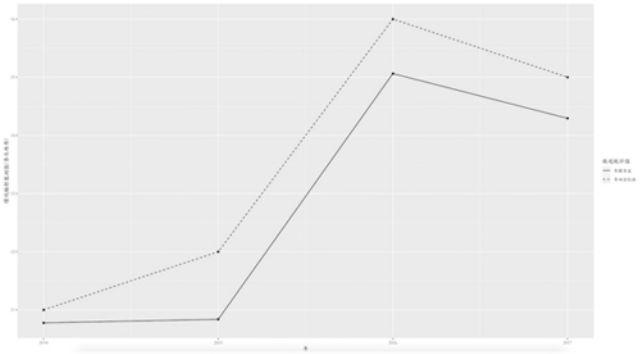


圖 3：全台環境輻射監測年標準差、年四分位距折線圖

為了應證上述對資料偏斜描述，我們繪製了全台分年環境輻射值頻率圖(圖 4)，縱軸為頻率，橫軸為環境輻射值(奈米西弗)，由圖中可明顯的看出四年的資料皆是屬於右偏型態，在集中趨勢方面，2014 與 2015 年明顯比 2016 與 2017 密集。

接著我們也繪製了全台分年輻射值盒鬚圖(圖 5)，縱軸為環境輻射值(奈米西弗)，橫軸為 2014 至 2017 年四年，紅點為該年份的離群值(超過 1.5 倍 IQR)，可發現 2014 至 2016 年的紅點較 2017 年多，對應於前述所說這三年有明顯的離群值在影響著分佈，此圖也可看出 2016 與 2017 的盒子部分大於 2014 與 2015，對應於圖 4，2014 與 2015 年的分佈較集中所以盒子較窄。

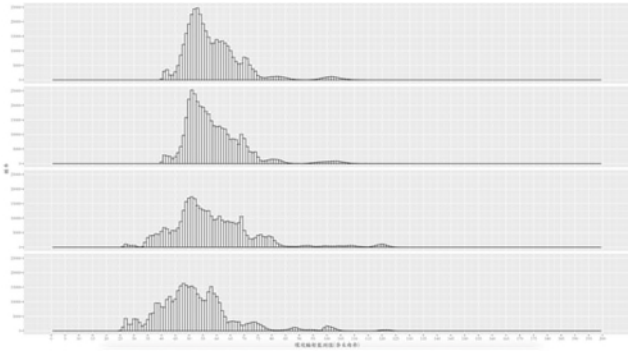


圖 4：全台不分站分年輻射值頻率圖

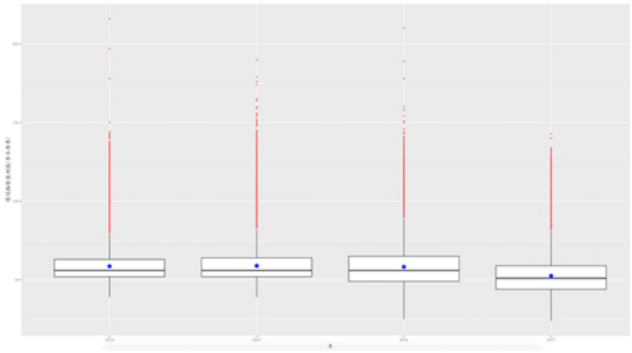


圖 5：全台不分站分年輻射值盒鬚圖

依年份分析完後，我們再來看看依季節的圖表會長怎樣。首先看到圖 6，這是依照季節繪製的台灣環境輻射平均值及年中位數折線圖，橫軸為季節縱軸為環境輻射值，從平均值(實線)可以看出夏季的輻射值最高而秋季的輻射值最低，但是從中位數(虛線)可以知道其實四季輻射值的中心是一致的；與圖 1 相同，四季平均值皆高於中位數，代表資料是向右偏斜。

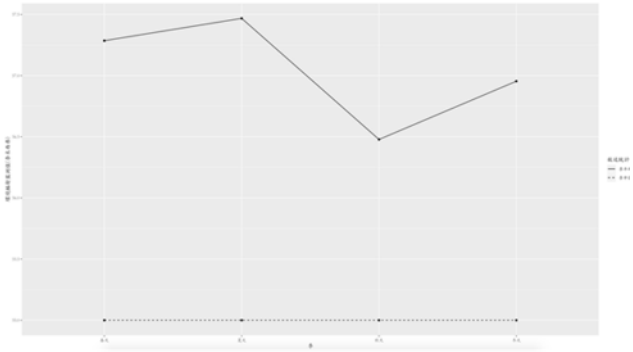


圖 6：全台環境輻射監測季平均值及年中位數折線圖

表 5：全台分季環境輻射監測敘述統計表

| | 春天 | 夏天 | 秋天 | 冬天 |
|---|---|---|---|---|
| 平均值 | 57.2857 | 57.46811 | 56.47817 | 56.95455 |
| 最小值 | 25 | 25 | 25 | 24 |
| 第一四分位數 | 50 | 49 | 49 | 50 |
| 中位數 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| 第三四分位數 | 63 | 64 | 62 | 62 |
| 最大值 | 190 | 154 | 155 | 216 |
| 全距 | 165 | 129 | 130 | 192 |
| 標準差 | 12.03245 | 13.99186 | 13.46728 | 13.10845 |
| 四分位距 | 13 | 15 | 13 | 12 |
| 平均值-中位數 | 2.2857 | 2.46811 | 1.47817 | 1.95455 |

接著一樣將環境輻射值標準差、全距、最大值及四分位距分成四季繪製折線圖，如圖 7 所示，橫軸為輻射值縱軸為季節。按照[19]的論述，雪的覆蓋會導致土壤中的輻射不會發散至空中，因此我們推論雨水可能也有相同效果。這次可以發現春季的最大值(實線)與全距(虛線)呈現 U 字型，春冬兩季大於夏秋兩季，而台灣的夏季為濕季而秋季為乾季，在乾季因為雨水較少，所以環境輻射值會較高；而濕季雨水較多，環境輻射值會較低。另外可以特別看到圖 8，夏季的標準差是四季中最高的，這個可以聯想到夏季天氣多變，時而烈日時而暴雨，導致輻射值差異會較大。

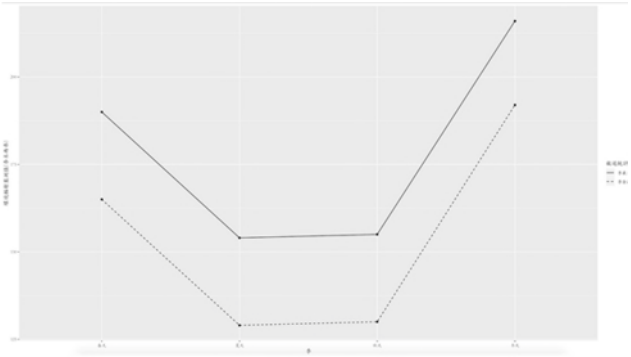


圖 7：全台環境輻射監測季最大值及季全距折線圖

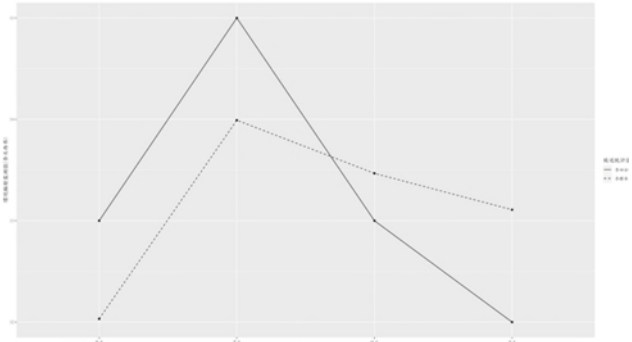


圖 8：全台環境輻射監測季標準差及季四分位距折線圖

一樣為了印證上述對資料偏斜描述，我們繪製了台灣不分站分季環境輻射值頻率圖(圖 9)，橫軸為輻射值縱軸為頻率。可以看出資料是屬於右偏，但是四季的分佈形狀並無明顯差異。

然後我們也繪製了台灣不分站分季輻射值盒鬚圖(圖 10)，橫軸為年份縱軸為輻射值，紅點為該季節的離群值，與圖 5 不同，在於此次盒鬚圖離群值的位置有出現在盒子下方，顯示各季輻射值的偏斜程度，較各年輻射值偏斜程度為低。

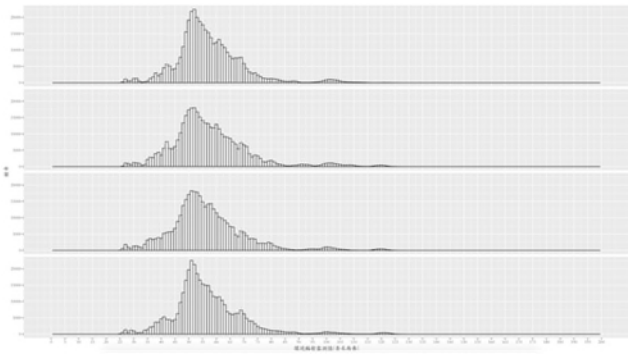


圖 9：全台不分站分季輻射值頻率圖

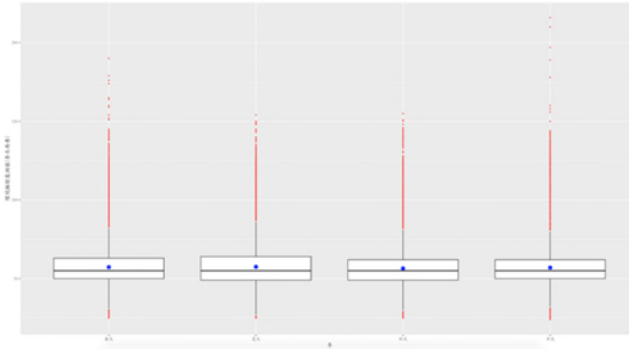


圖 10:全台不分站分季輻射值盒鬚圖

(二) 空間分析

接著進入到空間分析，為了更直覺地觀看各地區的環境輻射值，我們將各測站所監測到的環境輻射值投影至台灣地圖(鄉、鎮、市)上，考慮的變因有兩個，分別是年份(2014~2017)與季節(春夏秋冬)。

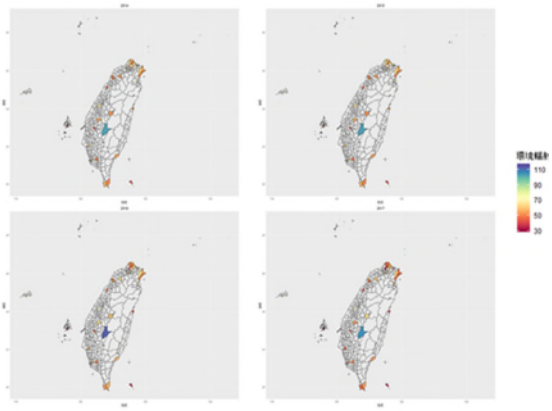


圖 11：台灣各地區分年環境輻射值分佈地圖

圖 11 為依照年份繪製的台灣各區環境輻射值地圖，從左上至右下分別是 2014 至 2017 年，環境輻射值代表的顏色由低至高分別為紅黃藍，沒有顏色代標當地並無設立監測站。

此地圖可以看出 4 年內阿里山的環境輻射值是明顯比其他地區高的，而其他地區在 4 年內的顏色波動並不明顯。因此，我們抓出 4 年台灣各地區環境輻射值的前 10 名來做比較，表 6 可以發現如果不考慮阿里山與金門之輻射值，台中似乎是這 4 年內環境輻射值較高的地區；2014 與 2015 年板橋與石崩山有進到前 10，但 2016 與 2017 兩地區又掉出前 10；而彰化則是相反 2014 沒有進前 10，2015 是第十名，2016 與 2017 卻來到前 4 高。因本次所分析資料，並不能找出造成此環境輻射值排名變化的原因，因此提供相關單位參考，或許能一同找出排名變化之原因。

表 6：台灣各地區分年環境輻射值排名(前 10 筆)

| 2014 | | 2015 | | 2016 | | 2017 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阿里山 | 102.50 | 阿里山 | 102.99 | 阿里山 | 112.47 | 阿里山 | 105.18 |
| 金門 | 81.35 | 金門 | 80.66 | 金門 | 87.07 | 金門 | 87.27 |
| 台中 | 72.25 | 萬里 | 73.34 | 雙溪 | 74.72 | 彰化 | 73.03 |
| 板橋 | 71.12 | 台中 | 70.78 | 彰化 | 73.64 | 萬里 | 70.74 |
| 石崩山 | 70.53 | 板橋 | 70.29 | 台中 | 73.41 | 台中 | 65.15 |
| 恆春 | 69.95 | 石崩山 | 69.86 | 萬里 | 69.37 | 南投 | 64.79 |
| 大坪 | 66.65 | 恆春 | 69.43 | 宜蘭 | 68.52 | 雙溪 | 62.51 |
| 大鵬 | 66.58 | 大坪 | 67.26 | 台北 | 68.03 | 台北 | 62.46 |
| 萬里 | 65.30 | 大鵬 | 66.52 | 恆春 | 67.75 | 龍潭 | 60.88 |
| 宜蘭 | 65.13 | 彰化 | 63.79 | 大坪 | 65.94 | 三港 | 60.19 |

為了檢查是否是因為靠近核設施導致該地區環境輻射值變高，可以看到圖 12，我們鎖定核一廠 20 公里以內的測站，以及其他不在核設施 20 公里以內的測站來做比較，可以發現撇去阿里山與金門不看，整體算是趨近水平，也就是說核設施的遠近其實是對環境輻射影響不大的。

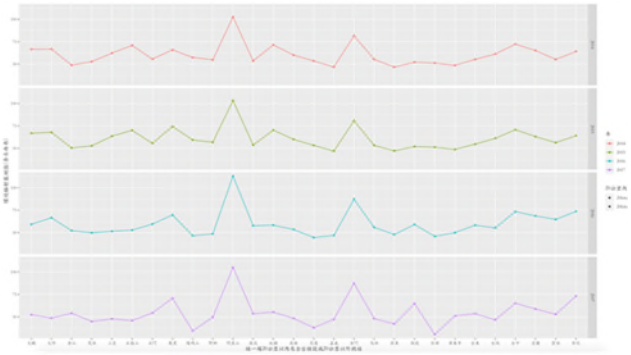


圖 12：環境輻射監測年平均值折線圖

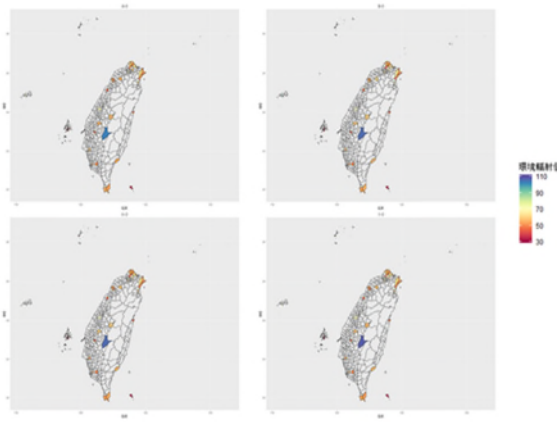


圖 13：台灣各地區分季環境輻射值分佈地圖

看完分年的地圖後來看看分季節的地圖，圖 13 為依照四季繪製的台灣各區環境輻射值分佈地圖，由此圖依舊可以發現，阿里山地區的環境輻射值還是高出其他地區很多，而其他地區的波動相較於分年的地圖更不明顯了。一樣整理出四季台灣各地區環境輻射值的前 10 名來做比較，表 7，可以發現四季環境輻射值的前 10 高的地區

大體上是一樣的地區，而阿里山與金門地區的輻射值同表 6 都是在前 2 名。

表 7：台灣各地區分季環境輻射值排名(前 10 筆)

| 春天 | | 夏天 | | 秋天 | | 冬天 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阿里山 | 103.16 | 阿里山 | 106.03 | 阿里山 | 106.09 | 阿里山 | 107.94 |
| 金門 | 81.92 | 金門 | 88.75 | 金門 | 83.97 | 金門 | 81.75 |
| 台中 | 72.04 | 宜蘭 | 69.68 | 萬里 | 71.39 | 台中 | 70.27 |
| 萬里 | 69.66 | 雙溪 | 69.61 | 彰化 | 70.38 | 萬里 | 69.89 |
| 恆春 | 67.77 | 彰化 | 69.51 | 台中 | 70.10 | 彰化 | 67.68 |
| 彰化 | 67.04 | 台中 | 6/9.18 | 雙溪 | 65.78 | 恆春 | 66.00 |
| 板橋 | 66.08 | 萬里 | 67.85 | 恆春 | 64.93 | 板橋 | 64.69 |
| 石崩山 | 64.01 | 恆春 | 67.77 | 台北 | 63.22 | 雙溪 | 64.60 |
| 宜蘭 | 63.07 | 台北 | 64.10 | 板橋 | 61.97 | 大坪 | 62.85 |
| 大鵬 | 62.88 | 板橋 | 62.17 | 宜蘭 | 61.39 | 大鵬 | 62.39 |

一樣檢查是否是因為靠近核設施導致該地區環境輻射值變高，看到圖 14，撇去阿里山與金門不看，整體依舊趨近水平，從季節的角度，核設施的遠近也是對環境輻射值影響不大的。

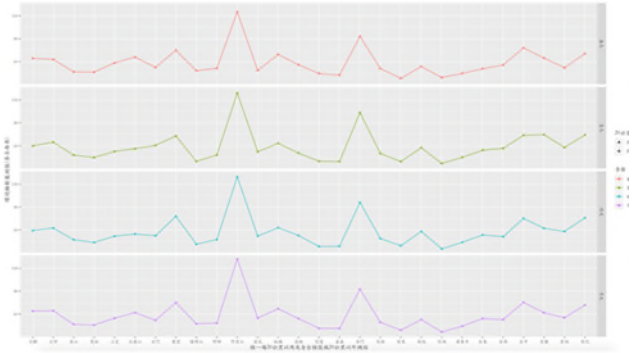


圖 14：環境輻射監測季平均值折線圖

二、 離群值分析

極端值又稱為離群值，一般是指某一個觀察值與其他觀察值的數值呈現很大的差異，因此該觀察值的可信度有待驗證。極端值的存在，將會嚴重影響到很多統計量的估計值。

根據前面時間與空間視覺化分析兩個章節來看，環境輻射值大多資料較為集中，僅有少數較高的離群值。但只探討環境輻射值的樣貌其實是不夠的，因此將結合空氣品質監測資料，試圖進一步的探討環境輻射值與空品因子之間的關係，但在此之前需要先探討四十六個測站中有哪些測站是擁有較高離群值，這樣才可以重點挑出需要關注的測站，並且搭配空品因子進行探討。

在本章節中，運用盒鬚圖可以縱觀整體資料狀態，以圖呈現進一步探討離群值的所在位置。根據圖 15 所示，在盒鬚圖上方及下方的黑色線頂端外擁有許多紅點，而這些紅點則為整體環境輻射值的離群值。因為環境輻射值均屬正常背景範圍，本研究聚焦環境輻射值偏高部分，故在此處我們探討位於 1.5 倍四分位距以上的離群值分佈即可。

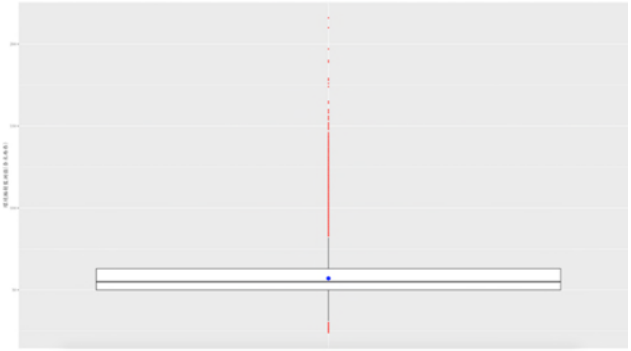


圖 15：跨年跨站環境輻射監測值盒鬚圖

依據表 8 所示，1.5 倍四分位距的「82nSv/hr」作為整體環境輻射值的門檻值，為了確保我們透過盒鬚圖所得出門檻值合理性，因此參考我國行政院原子能委員會[5]所提供的輻射劑量比較圖中所表示的「台灣地區每人每年接受的天然背景輻射劑量約為 1.62 毫西弗(mSv)」，以及在維基百科中西弗的定義[9]所記載的「地球上普通人受到的累計輻射平均值為每年 2.4 毫西弗（mSv，即 2.4mSv/Y÷365÷24＝0.274μSv/h）」。天然背景輻射包含體外曝露及體內攝入(表 9)，以臺灣為例，體外曝露(56%)：為地表(建材)0.64 及宇宙射線 0.26，體內攝入(44%)：為氡氣 0.44 及飲食 0.28，合計為 1.62，因此，就本研究而言，若參考原能會每小時體外曝露估算值應為 184.9nSv * 56%=103.544nSv，引用自聯合國原子輻射效應科學委員會所記載應為體外 0.87/2.42=36%，體內 1.55/2.42=64%，故每小時體外曝露為 274nSv * 36% = 98.64 nSv。藉由估算值及分析，故整理出表 10 的劑量估算對照表。

表 8：跨年跨站環境輻射監測值盒鬚圖統計值

| 最小值 | 下四分位數 | 中位數 | 上四分位數 | 1.5 倍四分位距 |
|---|---|---|---|---|
| 31 | 50 | 55 | 63 | 82 |

表 9：各國評估國民輻射劑量項目與結果[26]

| 項目 | 台灣 | 日本 | 美國 | 英國 | 愛爾蘭 | 聯合國 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 氡氣 | **0.44** | **0.48** | **2.28** | **1.30** | **2.05** | **1.26** |
| 飲食 | 0.28 | **0.99** | 0.29 | 0.27 | 0.235 | 0.29 |
| 地表(含建材) | **0.64** | 0.33 | 0.21 ** | **0.35** | 0.300 | **0.48** |
| 宇宙輻射 | 0.26 | 0.36 | **0.33** | 0.33 | **0.345** | 0.39 |
| 醫療 | **0.81** | **3.87** | **3.00** | **0.44** | **0.540** | **0.60** |
| 核爆、事故落塵 | 0.006 | 0.005 | --* | 0.005 | 0.015 | 0.007 |
| 雜項 | 0.001 | 0.004 | 0.13 ** | 0.0008 | -- | -- |
| 職業 | 0.003 | 0.0015 | 0.05 | 0.0004 | 0.185 | 0.005 |
| 核設施 | 8.5E-7 | 0.0001 | -- | -- | 5E-9 | 0.0002 |
| 合計 | 2.44 | 5.98 | 6.2 | 2.70 | 3.39 | 3.0 |

表 10：劑量估算對照表

| | 每年 | 每日 | 每小時 |
|---|---|---|---|
| 行政院原子能委員會 | 1.62 mSv | 4.438μSv | 184.9nSv |
| 維基百科 | 2.4mSv | 6.574μSv | 274 nSv |
| 每小時體外曝露 | | | |
| 行政院原子能委員會 | 103.544nSv | | |
| 聯合國原子輻射效應科學委員會 | 98.64 nSv | | |

經過單位換算後，根據表 8 定義的參考資料來看，可以得知我們設定的「82 nSv/hr」，每小時所監測到的環境輻射值不得超過 82 奈米西弗的這個門檻值是低於行政院原子能委員會和維基百科評估值，這樣可再進一步根據此門檻值抓出各個具有離群值的環境輻射監測站。至於離群值的時間序列與趨勢分析，由於這些離群值低於規定評估值，以及就目前獲得資料無法確定其為單變量或多變量離群值，因此本研究不對於離群值之時間序列與趨勢進行討論。

表 11 是套用我們所設定的門檻值後超過門檻值之環境輻射監測站，而其數字為該環境輻射監測站中有多少個超過門檻值的數值。在此處首先能發現全部四十六個測站擁有離群值的總個數佔整體數據約 3.97%，而為了探討這 3.97%為何而產生，故將會在下一章節與空品因子進一步的探討。

表 11：高於離群門檻值之環境輻射監測站

| 環境輻射監測站 | 離群值個數 | 環境輻射監測站 | 離群值個數 |
|---|---|---|---|
| 大光 | 1 | 三芝 | 63 |
| 頭城 | 1 | 陽明山 | 64 |
| 竹北 | 1 | 馬祖 | 74 |
| 後壁湖 | 2 | 大鵬 | 83 |
| 基隆 | 3 | 茂林 | 131 |
| 墾丁 | 3 | 龍門 | 133 |
| 嘉義 | 4 | 三港 | 185 |
| 椰油 | 4 | 台中 | 229 |
| 龍泉 | 5 | 恆春 | 240 |
| 貢寮 | 8 | 澳底 | 257 |
| 澎湖 | 8 | 台北 | 301 |
| 台東 | 12 | 彰化 | 314 |
| 花蓮 | 13 | 板橋 | 428 |
| 金山 | 14 | 萬里 | 502 |
| 雲林 | 15 | 大坪 | 860 |
| 台南 | 19 | 石崩山 | 919 |
| 南投 | 22 | 宜蘭 | 1550 |
| 石門 | 28 | 雙溪 | 2263 |
| 野柳 | 31 | 金門 | 20202 |
| 高雄 | 43 | 阿里山 | 34986 |
| 龍潭 | 44 | | |
| 總和 | 64065 | | |

三、 環境輻射與空氣品質分析

根據前一節發現四十六個觀測站有約 3.97%的測站有離群值，為進一步探討那些因素可能影響環境輻射值，本章節參考行政院環境保護署的空氣品質公開資料[7]，試圖進一步挖掘輻射與其他環境中各個變數間的關係。

(一) 觀測站選擇

環保署在網路上公開七十六個測站，開放民眾下載歷年的空氣品質觀測結果。由於空氣品質測站與輻射測站分屬不同地點，又根據原能會民國 100 年修改前的核能電廠緊急應變計畫區範圍為五公里(https://reurl.cc/eQV67)，因此我們僅篩選兩站相距五公里以內的站點作為觀測比較，經過比對後留下二十個測站進一步分析。表 12 為篩選後的二十個測站，紅色標注 1 表示兩測站相距五公里以內，其中再根據上一節建立的離群值標準，標註該測站有多少個離群值，同時以 1 表示位於核設施 20 公里以內，0 表示位於核設施 20 公里以外。從該表格中可以看到大部分對應到的測站都具有離群值，其中金門離群值最多，而恆春離群值數量超過兩百個同時位在核設施 20 公里內，因此以下分析我們主要採取金門與恆春兩站。

表 12: 環境輻射測站與空氣品質測站對應表(超過時劑量門檻值)



(二) 空氣品質資料說明

我們截取環保署網路上 2014 年至 2017 年的空氣品質資料，經過長寬表轉換、欄位命名、資料類別轉換.....等資料前處理後，最後完成如表 13 的樣子。其資料每一小時紀錄一筆，總共 35,064 筆，扣除時間及觀測地點兩變數標籤，共有 21 項空品因子變數。

表 13：部分空氣品質監測資料



(三) 相關性分析

由於空氣品質資料包含相當多變數，透過計算變數間的相關性指數，我們可以推測環境輻射值是否跟某些空氣中的其他因素有關係。

在 R 語言中，計算相關係數的 cor()函數有三種不同的計算方式 :complete.obs 、 everything 和 pairwise.complete.obs ， 我們採用第三種 pairwise.complete.obs 會以成對完整的觀測值計算相關係數，當資料中有遺缺值，計算的結果不會像 everything 的計算方法產生 NA，讓本計畫的空品資料雖然有不少 NA 遺缺值，仍然能計算出變數相關性。

由圖 16、圖 17 可以發現，環境輻射值(hourlyDoseRate)的那一欄位與其他空氣品質監測因子都沒有顯著相關，無論是正相關或負相關，顏色都相當淡。根據我們所能蒐集到的資料和相關係數分析方式，由這三個地點 2014 年到 2017 年的資料來看，並沒有找到空氣中與環境輻射監測值有關的因素。但是從這幾張圖中同時可以觀察，二氧化氮(NO2)和氮氧化物(NOx)就有相當高的正相關，同時甲烷(CH4)、一氧化碳(CO)、非甲烷碳氫化合物(NMHC)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO2)、氮氧化物(NOx)、懸浮微粒(PM10)、細懸浮微粒(PM2.5)及總碳氫合物(THC)經常屬於相關性較明顯的一群。

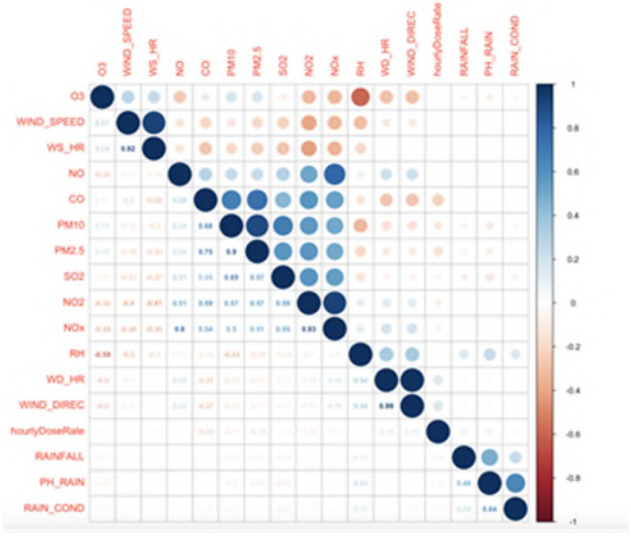



圖 16:金門輻射觀測值與空品因子相關係數圖

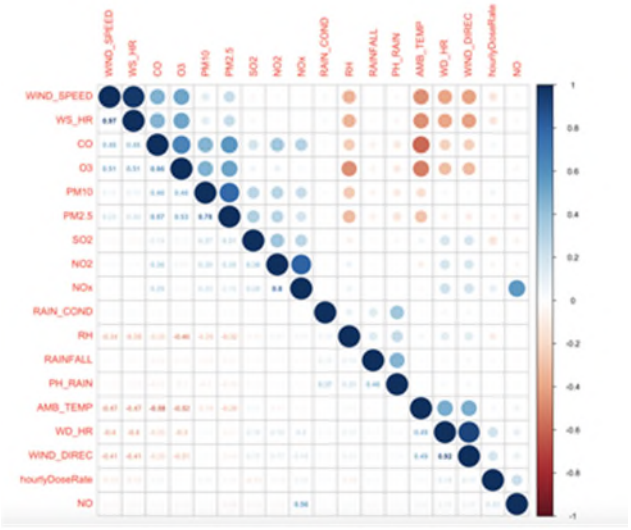



圖 17:恆春輻射觀測值與空品因子相關係數圖

從四年的整體資料來看，無法直接看出環境輻射值與其他變數的相關性，但是環境輻射值很可能受到陽光、降雨、季節.....等因素的影響，台灣氣候冬夏季風吹拂方向、溫度高低、雨量累積仍有差異，因此我們再將這兩測站以四季分別繪製相關係數圖(圖 18 和圖 19)。

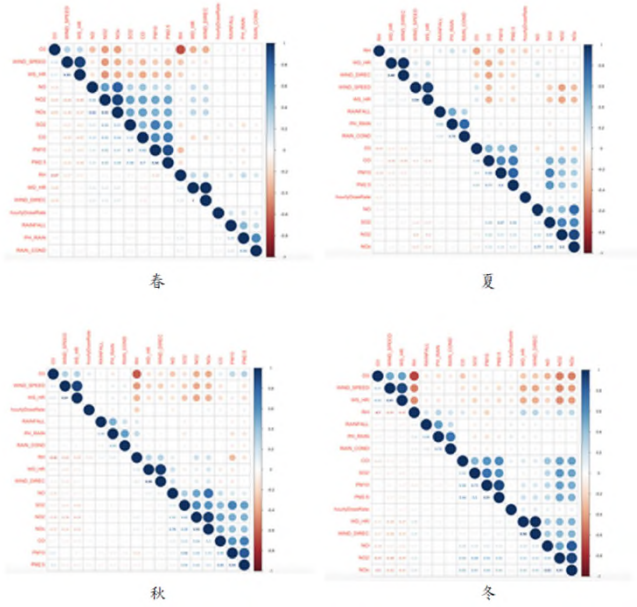



圖 18:金門四季相關係數圖

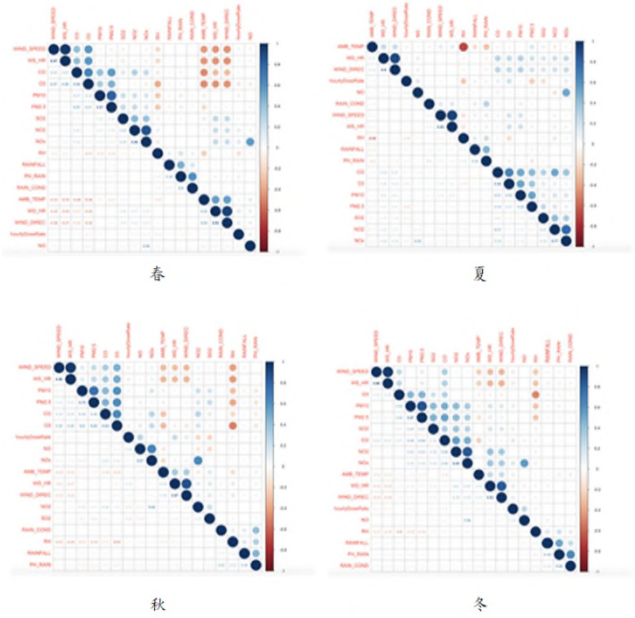



圖 19:恆春四季相關係數圖

從金門和恆春兩站的四季相關係數圖來看，仔細觀察環境輻射值變數那一列(欄)，無論是哪一個季節，都沒有其他變數與它產生較高的相關係數。

## IV. 結論

本計畫主要以視覺化的方式剖悉四年環境輻射值的時間與地理空間變異，並且以過去累積的資料以及統計意義建立新的離群值，作為最後尋找環境輻射值與空氣中其他因子相關性的參考，也提供未來相關研究的參照。

從時間的視覺化分析來看，台灣環境輻射值皆以右偏為主，表示僅有少數較高的離群值，多數的資料仍集中在資料的中心或左邊。除此之外，若分季來看，台灣降雨變異較大的夏季，環境輻射值的標準差也最大；較為乾燥的冬季，地底、土壤中的放射性物質較容易游離出來，造成部分較高的離群值，導致冬季的全距較高，儘管四季的環境輻射值有些差異，但由於我們繪圖的環境輻射監測值單位為奈米西弗，實際差距非常微小，幾乎沒有差別。

藉由本次跨年跨季的視覺化分析，未來若要觀察環境輻射的集中趨勢，建議採用平均值，可以較清楚呈現資料的整體走勢；若要觀察環境輻射值的分散程度，本研究雖然採用了全距、標準差、最大值以及四分位距，但從分析結果來看，標準差最能忠實呈現跨年跨季對資料的影響。

從地理空間角度來看，無論是分年或分季繪圖，阿里山和金門兩觀測站的環境輻射值都名列前茅，甚至阿里山的平均值都高於我們建立的離群值門檻，除了這兩觀測站，其他前十名的觀測站也都幾乎固定那幾個，只是在不同季節或年份排序不同。此外，從觀測站是否鄰近核設施來看，位於核設施 20 公里內外的測站其環境輻射值並未有明顯差異，也就是說，鄰近核設施觀測到的環境輻射值並沒有比較高，不需要過度擔憂。

最後我們加入空氣品質觀測資料，無論是整體資料或是分季，也比較離群值較多的測站，但是從基本的變數相關性來看，都並未發現環境輻射值與我們所蒐集到的空氣品質變數有明顯的相關。

本次研究僅蒐集四年的環境輻射值，過去的研究[19]擷取資料時間更長，未來若以更長時間的資料作分析，或許能夠更詳細看到環境輻射值完整的趨勢或是挖掘到更多資訊。

## V. 參考文獻

[1] MBA 百科，*折線圖定義*，取自 https://wiki.mbalib.com/zh-tw/%E6%8A%98%E7%BA%BF%E5%9B%BE

[2] MBA 百科，*盒鬚圖定義*，取自 https://wiki.mbalib.com/zh-tw/%E7%AE%B1%E7%BA%BF%E5%9B%BE

[3] 百度百科，*頻率直方圖*，取自 https://baike.baidu.com/item/%E9%A2%91%E7%8E%87%E7%9B%B4%E6%96%B9%E5%9B%BE

[4] 行政院原子能委員會(2013), *102 年 4 月核子事故緊急應變計畫區範圍檢討報告*, 未出版。

[5] 行政院原子能委員會輻射偵測中心, *輻射劑量比較圖*，取自 https://www.aec.gov.tw/index--5_40_873.html

[6] 行政院原子能委員會輻射偵測中心, *環境輻射監測歷史數據公開資料*，取自 https://www.aec.gov.tw/trmc/monitoring/history.html

[7] 行政院環境保護署, *歷年空氣品質監測公開資料*，取自 https://taqm.epa.gov.tw/taqm/tw/YearlyDataDownload.aspx

[8] 周林*,王晓峰,卞玉芳,杨安义(2017), “核与辐射安全监管大数据平台建设策略研究”, 中國環境管理, 2017 年第 2 期, pp. 25-30, 2017.

[9] 維基百科，*西弗的定義*，取自 https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%A5%BF%E5%BC%97

[10] A.S. Mollah, M.M. Rahman, M.A. Koddus, S.R. Husain, M.A. Malek(1987), Measurement of High Natural Background Radiation Levels by TLD at Cox's Bazar Coastal Areas in Bangladesh, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 18, pp. 39–41, 1987.

[11] Akbar Eslami , Mohammad HossienSaghi , AyobRastegar(2016), “Assessment of background gamma radiation and determination of excess lifetime cancer risk in Sabzevar City, Iran in 2014”, Tehran University Medical Journal, Vol. 73, pp. 751-755, 2016.

[12] Ching-Jiang Chen, Chi-Chang Liu, Yu-Ming Lin. (1998), “Measurement of Equilibrium Factor and Unattached Fraction of Radon Progeny in Kaohsiung, Taiwan”, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 49, pp. 1613-1618, 1998.

[13] Gerard B. M. Heuvelink , Daniel A. Griffith. (2010), “Space–Time Geostatistics for Geography: A Case Study of Radiation Monitoring Across Parts of Germany”, Special Issue:Geostatistical Methods in Geography Part II: Applications in Physical

Geography, Vol. 42, pp. 161-179, 2010.
[14] J. Sannappa, M.S. Chandrashekara, L.A. Sathish, L. Paramesh, P. Venkataramaiah(2003), "Study of background radiation dose in Mysore city, Karnataka State, India", Radiation Measurements, Vol. 37, pp. 55-65, 2003.
[15] K.S.V. Nambi, V.N. Bapat, M. David, V.K. Sundaram, C.M., Sunta, S.D. Soman(1987), "Country-wide Environmental Radiation Monitoring Using ThermoluminescenceDosemeters", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 18, pp. 31–38, 1987.
[16] Pimei Nancy Yen, I-Feng Lin, Wushou Peter Chang, Jung-Der Wang, Tien-Chun Chang, Kuan-Liang Kuo, Jing-Shiang Hwang, I-Chao Liu, Yi-Ting Chen, Chen-Chang Yang(2014), "Risk factors of depression after prolonged low-dose rate environmental radiation exposure", International Journal of Radiation Biology, Vol.90, pp. 859–866, 2014.
[17] Rostampour N, Almasi T, Rostampour M, Mohammadi M, Ghazikhanlou Sani K, Khosravi HR, Pooya SM, Golzar B, Jabari Vesal N. (2012), "An investigation of gamma background radiation in Hamadan province, Iran", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 152, pp. 438–443, 2012.
[18] Ruizhong Lin, Zhi Wang, Youxian Sun(2004), "Wireless sensor networks solutions for real time monitoring of nuclear power plant", Paper presented at the Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou. P.R. China.
[19] Shebell, Peter and Miller, Kevin M. (1996), "Analysis of eighteen years of environmental radiation monitoring data", Environmental International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. S75-S83, 1996.
[20] Tsuey-Lin Tsai, Chun-Chih Lin, Tzu-Wen Wang, Tieh-Chi Chu. (2008), "Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around nuclear power plant IV in Taiwan", Journal of Radiological Protection, Vol. 28, pp. 347–360, 2008.
[21] Yu-Ming Lin, Ching-Jiang Chen, Pei-Hou Lin. (1995), "Natural background radiation dose assessment in Taiwan", Environment International, Vol. 22, Suppl. 1, pp. 45-58, 1996.
[22] Petra Wallberg and` Leif Moberg. (2002), 'Evaluation of 20 years of environmental monitoring data around Swedish nuclear installations", Journal of Environmental Radioactivity, 63(2), 117-133.
[23] Dong Han Yoo and HeeReyoung Kim (2013), "The Environmental Radiation Analysis on the Residential Area Around Nuclear Power Plants", In International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE-21; Vol. 1, pp 1–5.
[24] Olivier Ribaux, AmélieBaylon, Claude Roux, Olivier Delémont, Eric Lock, Christian Zingg, Pierre Margot (2010), "Intelligence-led crime scene processing. Part I: Forensic intelligence", Foresic Science International, 195 (1–3), 10–16.
[25] Kurt Varmuza and Peter Filzmoser (2009), Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics; CRC press.
[26] 行政院原子能委員會(2019), *108 年 1 月* 107 年國民輻射劑量評估先期作業研究年度執行報告,取自 https://www.aec.gov.tw/trmc/monitoring/project.html

# 應用於核電廠遠端視訊操控機器手臂開發及其推廣的競賽活動舉辦
# Tele-Operating Robot Arm Applied to Nuclear Power Plant and its promotion activity organized by Competition

計畫編號：MOST 107-2623-E-327-001-NU
計畫主持人：杜國洋
e-mail：tuky@nkust.edu.tw
執行單位：國立高雄科技大學電機系智慧自動化系統碩士班

## 摘要

本計畫共分兩部分，一是設計實現一個遠端視訊機器手臂操作的競賽項目，在教育部舉辦的國際機器人競賽中，推廣並培育人才，在輻射環境中，所需的遠端操作人員，本計畫剛執行不久，即在 107 年的 5 月 12 日與 13 日舉行，就能號招 15 個參賽隊，很有效率的達到推廣培育的效果。另一個是設計實現機器手臂，期望未來此機器手臂可以應用在輻射污染的場域。

關鍵詞：遠端視訊操作、機器手臂、國際機器人競賽。

## Abstract

In this project, there are two parts: design and implementation of a tele-operating robot arm competition and design and development of a robot arm. The tele-operating robot arm competition is run in an international robot competition for promotion and talent education. The competition was held on 12 – 13 May 2018 when the project just started, but there are 15 teams to register this competition. It's very high efficiency for the project execution. Moreover, hopefully the robot arm developed in this project can be applied in radiation pollution environment in the future.

Keywords: Tele-Operating, Robot Arm and International Robot Competition.

## I. 前言

危險區域的機具操作，若要人員親臨操作，必冒很大的風險。就一個核輻射重度污染的區域，例如：核能發電廠的核心區域，根本無法派人進入處理。這也是為什麼福島核災，在 2011 年發生後，至今已第八個年頭，尚無法將核子反應爐裡的燃料棒取出。雖然今年正式開始取出燃料棒的作業，但作業速度緩慢，需要多年才能完成。

現今通訊技術日新月異，遠端操作也不斷的擴展到不同的應用領域，例如：外太控。送人至外太空探險，成本很高，而且要冒很大的風險。現在的通訊技術，訊號要在外太空星球上與地球間來回的傳送，已無問題，因此，只要探測的機具設備送到該星球，透過遠端操作技術，在地球上操作星球上的機具設備，進行遠端探測，大大提升效益。

有鑑於此，本計畫規劃遠端視訊機器手臂操作的競賽項目，競賽規則詳見一[1]。參賽者只能透現場攝影機傳回的視訊訊號，掌握現場的情況，操作機器手臂。本計畫期待這樣的競賽項目，模擬在核電廠中核廢料的處理，藉由參賽者的練習與比賽，體驗遠端視訊操作核廢料的處理，藉以培育訓練核廢料的處理人才，並擴大大眾了解核廢料的處理過程。

本計畫另一個目的是設計研發機器手臂的雛形，未來期待作完整性的研發後，可擴展使此機器手臂可以應用於核電廠高輻射汙染區的操作。

透過電腦輔助設計機械手臂的各個機械零件，在圖面中可精確的分析各個部位的尺寸，並用其數值計算馬達的扭力與關節的負載。再利用軟體進行應力模擬，機械手臂在工作時各個零件的受力狀態，了解各個零件的弱點，並進行優化，也將受力較小的機構零件，合理的除料優化，以期減輕其重量也降低機械手臂工作時的負載。利用安全係數的規劃，定義機械手臂各個零件的強度，讓即使是受力較大的零件，在工作時一樣有足夠的強度與安全性。研究中也對手臂各個馬達與減速機的選用，提出合理的說明。完成機械手臂設計後，透過在軟體內模擬與計算，掌握機機械手臂的理論性能。透過模擬與計算，設計出具有高自由度、高扭力重量比與高定位精度的機械手臂。

## II. 主要內容

本計畫的執行共分兩部分：一是設計實現一個遠端視訊機器手臂操作的競賽項目；另一個是設計實現機器手臂。有關遠端視訊機器手臂操作競賽，是假設機器手臂的操作現場是高輻射的汙染區，並假設電池為染料棒，參賽者必須經過遠端視訊操作的方式操作機器手臂，以便將燃料棒由 A 區移至 B 區，遠端視訊的操作方式是，操作者由於遠離現場，只有靠現場的攝影機觀看現場，了解如何操作機器手臂進行燃料棒的吊掛，詳細的比賽規則，請參閱[1]。

此競賽項目是安排在 2018 國際人形機器人競賽活動中，此競賽活動是由教育部主辦，國立高雄科技大學承辦，5 月 12 日至 13 日在國立高雄科技大學第一校區體育館舉辦，活動的競賽網頁請參閱[2]。配合本計畫的執行，競賽活動的規劃與執行相當倉促，但總共十五隊參賽，實屬不易，參賽隊伍請參閱[3]。

競賽活動的進行，如圖一所是，參賽熱烈，圖中所示是兩個模擬高輻射污染的場域，兩個場域提供參賽者更多練習機會，參賽者直誇很好玩，有些人甚至於形容好像在玩娃娃機。圖二是競賽現場的實際情況，圖中的

右邊是參賽者專注的神情，圖左是被操作機器手臂夾持燃料棒的情形。



圖一、遠端視訊機器手臂操作競賽參賽熱烈。

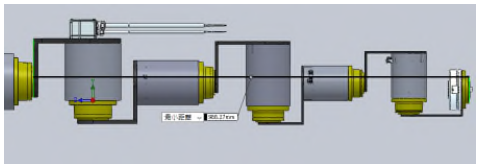


圖二、遠端視訊機器手臂操作競賽過程，右邊是參賽者以遙控器操控機器手臂；左邊是機器手臂受控將電池從黑盤子移到白盤子。



圖三、原子能委員會與核能研究所的貴賓親臨現場參觀比賽的情況。

比賽當天原子能委員會與核能研究所的相關人到場宣導和能使用的相關措施，並參觀競賽活動，圖三是到場人員與競賽貴賓的合影。



圖四、研發機器手臂的設計圖。

對於本計畫欲設計機械手臂的尺寸、長度與額定總負載等，先設定一組數據當作設計的基準，之後的設計將會以這些數據做為設計標準。但是設計過程中一定會因為結構、馬達與減速機尺寸等等的問題，進而調整機械手臂的性能參數。本計畫要設計的機械手臂設計方向的設定規格表如表一。

表一、本研究設計的機械手臂設定規格表。

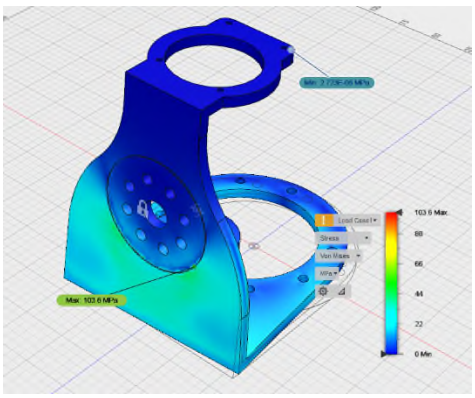
| | 伺服結構 | | 連結結構 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 鋁板厚度 | 重量 | 鋁板厚度 | 重量 | 累積長度 |
| Axis2 | 10 mm | 1434 g | 10 mm | 842 g | N+135mm |
| Axis3 | 8 mm | 734 g | 8 mm | 321 g | 412mm |
| Axis4 | | | | | 532mm |
| Axis5 | 6 mm | 331.4 g | 6 mm | 146 g | 752mm |
| Axis6 | | | | | 851mm |
| Axis7 | N/A | | 4 mm | 109 g | 988mm |

本計畫的機器手臂是模組化機構的設計，在完成機械手臂各軸的機構設計後，透過電腦輔助設計軟體，進行單支機械手臂完整的組合模擬。如圖四黃色為諧波減速機，因為諧波減速機有足夠的剛性，因此在本計畫設計規劃也直接使用其作為機械手臂結構的一部分。而灰色部分為上一段介紹過的伺服結構，由圖四可以看出各軸因扭力設計不同，結構大小也不同。白色部分為馬達，僅有第二軸及第七軸馬達外露，第二軸是因選用高瓦數馬達，使馬達本體過長所以將其設計外露，而第七軸則是為了緊湊的末端軸手腕設計，且第七軸為最末端，無須再連接下一軸，因此將馬達與減速機設計直接外露，而非設計伺服外殼將其包覆，這樣的設計同時也是為了盡量減輕末端重量，降低手臂馬達扭矩負載。

黑色部分則是連接件，連接件使用非常簡單的設計方式，且為單方向組合，減少矛盾或干涉發生的可能性。簡單的設計，也降低後續進行結構最佳化的製圖難度。

將機械手臂的初步設計的規格整理如表一，其中說明了各軸零件的重量與厚度。單機械手臂的第一軸底座尚未設計，第二軸開始才是機械手臂的水平距離(有效作業距離)，因此先假設第一軸底座的長度為 N，從第一軸法蘭面開始計算機械手臂長度。

本計畫期望對設計出的機械手臂機構的應力進行分析，透過應力模擬的結果，設計機構最佳化。決定使用 7075-T6 瑞士板的材料來製作機械手臂的零件，也對應力分析時會使用到參數如降伏強度、比重進行說明。



圖五、機構受力時的應力模擬受力圖

確定了本論文機械手臂的設計後，便開始設計馬達的外殼。馬達的外殼的設計，需要減速機、直流馬達、

驅動器及齒輪等明確的規格，所以先參考各個廠商提供的尺寸圖，將其重新繪成 3D 圖面，以便進行組合模擬。

開始設計減速機外殼時，首先要思考的問題是其形狀，應該是圓形還是方形。因此先簡單設計圓形與方形的兩個長度、厚度、截面積皆相同，不同的截面造型外殼，進行應力模擬。模擬的模組化外殼壁厚為 10㎜，長度為 100㎜，兩個零件的設計重量皆為 971 公克。

本計畫期望做出具有負載輕量但高自由度的雙機械手臂機器人，透過參考國際上成功的七自由度機械手臂，來擬定機械手臂的規格與性能。再透過電腦輔助設計軟體來繪製機械手臂的各個零件，並透過應力模擬來分析機械手臂在工作時的受力，將機構設計中強度較為不足部分進行優化加強，將強度過高的零件結構進行減重。並在軟體中模擬組合機械手臂來研究其機械性能，如連桿長度、運動自由度等。

機械手臂的設計完後，透過軟體模擬其手臂各個關節可以工作的角度，並在電腦輔助設計軟體中，將雙手臂組合，模擬雙手臂可以工作的範圍。透過組合模擬分析機械手臂的各軸機構自由度如表二所示。

表二、機械手臂各軸的自由度

| | 自由度 | 連桿長度 |
|---|---|---|
| 第一軸 | ±180° | |
| 第二軸 | ±130° | 135mm |
| 第三軸 | ±180° | 412mm |
| 第四軸 | ±150° | 532mm |
| 第五軸 | ±180° | 752mm |
| 第六軸 | ±160° | 851mm |
| 第七軸 | ±180° | |

雖然本計畫已完成機械手臂的機構設計與模擬分析，但金屬合金經過加工後的邊角較為銳利，工作時還是有傷害周遭人員的可能性，且本設計的機械手臂馬達還有剩餘負載，若能在機械手臂的金屬結構上在設計塑膠外殼包覆，對機身的美觀、馬達與連結線路的保護與手臂工作時周遭人員的安全必定有提升的效果。

透過本計畫計算出的參數，機械結構設計與應力模擬，期望未來將機械手臂實現時，能夠以最低的成本與時間，完成機械手臂結構的加工，並且在實物組合時，能沒有結構干涉與矛盾。

## III. 結果與討論

本計畫設計與規劃模擬高輻射核電廠操作的競賽項目：遠端視訊機器手臂操作競賽，生動活潑的活動，使得危險場域作業，變成有趣吸引人，適合核能發電安全使用的很好宣傳，更重要的是參賽的選手，也是核電廠高福社區人員，安全無慮操作的人才培育。

本計畫的機器手臂設計與研發，已成功研發模組化、高安全係數的機器手臂，但此類機器手臂，光是馬達、齒輪箱、驅動器與控制器等必須購置的模組就耗費達 50 萬台幣，如此造價昂貴的機器手臂，其應用場域業大大受限。未來將考量在核電廠高輻射場域操作所需的精密度，研發較便宜的機器手臂，以便有更廣的應用。

## IV. 結論

本計畫成功的設計規劃一競賽項目：遠端視訊機器手臂操作競賽，模擬高輻射核電廠內的安全作業方式，不只宣傳核能的安全使用，也藉機培育安全作業的人才。

本計畫研製具有負載輕量但高自由度的機械手臂機器人，透過參考國際上成功的七自由度機械手臂，來擬定機械手臂的規格與性能。再透過電腦輔助設計軟體來繪製機械手臂的各個零件，並透過應力模擬來分析機械手臂在工作時的受力，將機構設計中強度較為不足部分進行優化加強，將強度過高的零件結構進行減重。並在軟體中模擬組合機械手臂來研究其機械性能，如連桿長度、運動自由度等。

透過這些模擬與計算，可以在製作機械手臂之前，就預先將製作完成可能會遇到的一些機構干涉、矛盾先行排除，降低因設計錯誤產生的生產成本與耗費時間，並且在機構完成前就計算出機械手臂理論性能。

## 參考文獻

[1] 遠端視訊機器手臂操作競賽規則：http://humanoid.nkfust.edu.tw/Humanoid2018/robotarm.php

[2] 2018 International Intelligent Humanoid Robotics Competition 競賽網頁：http://humanoid.nkfust.edu.tw/Humanoid2018/

[3] http://humanoid.nkfust.edu.tw/Humanoid2018/member_robotarm.php

# 人才培訓與風險溝通 III

# 核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行
# Design and Implementation of Stakeholders' Inquiry and Communication Mechanism for Nuclear Power Plant Decommission Policy

計畫編號：107-NU -E-004 -001 -NU
計畫主持人：黃東益 教授
e-mail：tyhuang0510@nccu.edu.tw
執行單位：國立政治大學公共行政學系

## 摘要

台灣核電廠自 2018 年核一廠屆臨停止運轉後，正式進入除役的程序，台灣核能發電也邁入新的階段。由於除役計畫的主要目標是在於移除核能設施及放射性和非放射性危險物質，在移除過程當中需要同時顧及執行工作人員、周遭居民、以及其他利害關係人的生活及權益。政府不僅應具備專業的技術，更應在除役過程中規劃民眾參與，充分做好政策溝通以爭取民眾支持與信任。然而，儘管目前有關除役技術或經濟方面的研究很多，但是在探討政府與各利益相關方之間的溝通方面卻較少受到關注，特別是在台灣社會中對核電政策普遍存在較為兩極的看法，各利害關係人所關切的議題也有所不同，往往導致議題無法聚焦、無法進行有效溝通、最終無法達成共識。因此，本研究旨在盤點主要利害關係人的角色及其在核電廠除役中所關切的政策議題，並盤點政府在執行層面中所採取的溝通策略，找出溝通上長期無法達成共識的問題，針對不同的利害關係人所著重的議題，採取最適當的溝通策略以提升整體溝通成效。

關鍵詞；核電廠除役，政策溝通，利益相關人

## Abstract

In 2018, the decommission of Chinshan Nuclear Power Plant leads the development of nuclear power policy in Taiwan to the next stage. The issues correlated with the decommission of nuclear power plants include the "radioactive waste management", "site selection", and "assessment of disposal concept". As the government agency in control of the nuclear safety, the Atomic Energy Council （ AEC ） provides various kinds of public participation channels in order to ease the tension and concern between the government and the people. To deal with the above issues, this study focuses on the communication strategies and the communication modes used by government agencies. For the purpose of recognizing the problems and blind spots of the government's policy communication, and providing the advices to refine the strategies and the modes, this study identifies stakeholders who are involved in the decommissioning of nuclear power plants, and conducts the consultation of these stakeholders.

This study uses qualitative analysis to analyze the results of 28 interviewed stakeholders, and to put the emphasis on the communication channels used by the government agencies. At the same time, the study tries to clarify the interaction network among various stakeholders and government agencies andto identify the main causes forthe ineffective communication. The results show that the causes for the ineffective communication can be divided into two parts: the internal and external problems. Regarding the internal problem, conflicts and misunderstandings occurred since there are too many government agencies involved. As far as the external problem, government agencies are having trouble letting people understand the technical terms for nuclear power, which turns the communication into merely a formality. In the meantime, the unintegrated communication activities also affect the stakeholders' perceptions on government's communication effectiveness. Since the interests of various stakeholders regarding the issue of nuclear power decommissioning are not identical, the government, therefore, cannot integrate them immediately and effectively when collecting opinions from the public and forming policy consensus.

As discussed above, three things need to be considered when the government attempts to communicate with various stakeholders. First, the government need to sort out the internal and relevant government agencies' responsibilities and clearly divide the work. Second, the government need to converge all administrative resources and to avoide duplicate work among different agencies. Last but not least, the government need to consolidate the external communication channels, to divide the issues according to the regions, and to adopt more appropriate communication strategies to improve overall communication effectiveness for various stakeholders and the key issues.

Key words: Nuclear decommissioning, Radioactive waste management, Stakeholders, Policy communication

## I. 前言

核能發電自 1978 年開始運轉，一直是台灣重要的供電來源之一，面臨機組營運 40 年後進入除役階段，核一廠成為台灣首次屆臨停止運轉並進入除役的核電廠，除了專業技術層面需要考量除役的安全性之外，亦需考慮到除役所衍生出的相關議題，例如核廢料管理、核電是否繼續使用、核電廠在地住民權益和核廢料貯放選址等。由於核能除役之後連動的議題複雜交織，也涉及多元的利害關係群體，承擔核電廠除役與核廢料管理之責的政府特別是執行單位，更應在除役前規劃民眾參與，充分做好政策溝通以爭取民眾的支持與信任。因為除役計畫的目標主要是移除核能設施或系統操作相關的放射性和非放射性危險物質，在移除過程當中需要保護工作者、一般大眾和生活環境，因此，核電廠的除役計畫必須採取技術與民主行政兼具的行動，特別是在除役過

程中做好政策溝通，提升民眾參與程度。

國際相關研究及實務經驗已指出，由於核能、放射性廢棄物等物質會讓民眾產生恐慌（Slovic, 2001; Rosa & Freudenberg, 1993），且出現長期持續的心理憂慮與壓力，當政府針對這項政策進行溝通時，若是提供的溝通管道不夠暢通、資訊相對匱乏、訊息無法取得、或者是接收到令人混淆的資訊時，則會讓恐懼與不確定性持續讓民眾認定其置身在風險當中，進而轉化為對政策的抗拒，使得政府在管理與協調的工作難以推展。尤其是在日本福島核事故之後，公眾對於核設施的支持度急劇下降（Ramana, 2011），基於「鄰避效應」（Not In My Back Yard，NIMBY）的公眾抗議逐漸增多，日本、德國、瑞士和比利時等國家在公眾壓力下確立了核電廠除役政策（Devine-Wright, 2011）。台灣社會隨之出現對「非核家園」政策的倡議，並於 2016 年新政府執政後「核電廠除役」正式進入政策議程。然而，擁核團體、反核團體、民意代表，以及在地住民等多個利害關係人圍繞核電廠除役及其衍生出的問題，尚無明確的共識。因此，在我國政府首次處理核電廠除役的過程上，必須更有效地提供充分的政策資訊及參與式的溝通管道，不僅需要重視民主價值及程序上的正義，更應該在政策管理過程中獲得民眾的支持，建立起民眾與政府間的互信和合作。

然而，當前針對核電廠除役議題的研究多聚焦於核能風險態度（陳憶寧，2014）、核電廠除役方式與核廢料管理（胡毓青，2008；陳彥誠，2014；朱璟豪，2017）、或核安治理的溝通與公民參與（蕭金益，2007；林昱廷，2014；陳穎峰，2018）等議題，但是在探討政府與各利益相關方之間的溝通較少受到關注，特別是在台灣的核電政策存在兩極分化的立場，也由於除役過程涉及高度專業知識，因此容易有專家宰制資訊或權力不對等的情況，一般公眾可能沒有對等的機會與管道了解（蕭金益，2007）。因此，為了成功進行核電廠除役，政府需要和利益相關者溝通並採取有效的參與策略，以滿足當地社區和公眾的需求（黃東益、董祥開、傅凱若，2017）。

本研究旨在盤點主要利害關係人及其在核電廠除役中所關切的政策議題，並盤點政府在執行層面中所採取的溝通策略，找出溝通上長期無法達成共識的問題，做為政府單位與利害關係人溝通的焦點，並進一步了解哪些策略或方法進行有效溝通的公共參與，辯論或對話的形式。

## II. 主要內容

本研究訪談採用半結構式進行，給予受訪者對核電廠除役議題有暢所欲言的表達空間，不嚴格受限於訪談問題，適時追問有關利害關係人所提及有利於本研究團隊分析之內容，以利豐富和詳盡取得訪談資料，兼具研究資料的深度與廣度，爲後續的質化研究奠定基礎。

根據文獻檢閱，主要訪談以下列五大構面設計訪綱，針對政府機關、單位對利害關係人溝通策略與管道和互動方式，與其利害關係人在該議題下所偏好的議題、訴求與其他利害關係人資訊分享與互動關係，以利本研究全面盤點利害關係人並給予政府機關、單位溝通政策建議。

由於核電廠除役牽涉議題廣泛，就台灣目前而言，除役的程序與方式仍有爭議亟待商榷，為了讓核電廠除役順利推動，核電廠除役過程中所牽涉到的議題與其利害關係人需進行盤點並界定，因此，本研究先盤點利害關係人與所涉及之議題，再盤整政府機關、單位對利害關係人溝通之策略模式，將利害關係人所關注之核電廠除役議題的梳理，最後建議政策溝通策略、模式的配適性調整，以提升整體溝通成效。

### 一、利害關係人在核能除役議題所關注之議題

根據訪談的結果，在核電廠除役之利害關係人在其相關議題上所站的立場與角色不盡相同，利害關係群體主要分為中央政府、地方政府和專家學者、民眾（在地居民、一般民眾）與公民團體（反核、擁核）等五大類。在核電廠除役議題中，台電公司在溝通過程中扮演關鍵的利害關係角色，而政府機關、單位與利害關係人之溝通策略，成為在該議題下的溝通渠道。以下即針對各利害關係群體所關注之議題進行分述：

#### 1、中央政府

中央政府作為核能政策規劃之要角，在於法規面向之詮釋與執行，也因其需處理之議題層級廣擴全國，因此對於政策規劃與執行方向、監管單位機關主要負責之部會則計有：行政院永續會－非核家園推動專案小組、經濟部－低放選址小組、原能會。負責內容包含核安監督、宣導、以及蘭嶼低放射性核廢料遷移與核廢料集中貯存設施興建和最終處置場選址。其中最棘手的問題在於最終處置場的選址問題，根據《低放射性最終處置設施場址設置條例條例》規定[1]，最終處置設施須以地方性公民投票之機制完成選址程序，意即候選場址的出線，仍須仰賴公投結果與地方政府之配合。上述涵納之議題皆須在既有的政策架構上，接受各方意見進行政策溝通，以解決分歧達到共識，而其層級節制的關係，上到行政院，下至原能會、經濟部，如何順利推展「非核家園」政策，乃是中央政府機關溝通的主要目標。

#### 2、地方政府—新北市政府

地方政府的角色在核電廠除役議題上具有期盼如期除役的一致目標，但在面臨到核廢料管理議題時，核

[1] 《低放射性最終處置設施場址設置條例條例》第 11 條：本法第九條、第十條核定建議候選場址之公告，應於期間屆滿後三十日內該場址所在地縣（市）辦理地方性公民投票，不受公民投票法第二條之限制。經公民投票同意者，得為候選場址。前項之候選場址有二個以上者，由主辦機關決定之。

能第一發電廠所在地之新北市政府，因中央政府遲未完成最終處置場之選址，擔憂在核定集中貯存設施興建運轉後，核廢料即根留地方，為第二個蘭嶼負面經驗，持續造成對地方上的影響，故在核廢料最終處置場址未完成確定地點選址之前，府際之間各有堅持，因此未能達成一致的共識。而在其他地方政府方面，則因核廢料之影響甚為深遠，地方公投的執行在民意與行政程序上相互拉扯，經列為潛在場址之地方政府婉拒辦理公投，造成選址作業的延宕，進而影響除役計畫的進行，也導致府際之間的衝突。

**3、專家與學者**

專家、學者認為台灣在核能技術發展上領先全球，核電廠除役後勢必會為台灣核能產業帶來衝擊，並影響人才投入相關領域的意願，造成專業斷層與技術人才流失。而專家學者在核廢料議題上，主張國際上已有針對核廢料處理再使用的技術研發，未來更能增加其發電之效率。強調核能專業技術上的傳遞不能斷，更需要增加一般民眾對科普教育知識。

**4、民眾**

在地住民與核電廠比鄰而居，而政府為顧及核電廠運轉之安全，便進行周邊土地利用的規範，長期下來即影響到在地的經濟發展與土地利用，造成青壯年移往外地尋求工作機會，導致人口外移等問題，且在 2017 年台電公司以核電廠未運轉為由，降低回饋金，遂引起在地住民的反彈，引發核電廠與核廢料皆遷移離開的陳情與抗議。而除了在回饋金、促協金上進行爭取、溝通外，在地民眾亦提出核電廠用人需在地化的訴求，藉以彌補在地發展與經濟停滯不前狀態之困境。然而在核電廠除役議題上，在地住民在核電廠除役與繼用核電的意見上略有相向，支持核電廠除役者認為核電廠之安全無法百分之百保證，應要進行除役並還地於民，將核廢料遷出，重振地方榮景；支持續用核電者則認為，多年下來核電廠並無重大事故，若政府單位及台電公司願意就在地住民權益受損的部分進行有深度對話，包含補償機制的設計、安全建設（疏散道路－芝投公路）的興建，則願意讓核電廠繼續運轉。惟有在核廢料管理的議題上，在地住民皆認為政府應將實情、規劃進程公布，包含集中貯存場、最終處置的規劃與其未來發展可能，不應以「暫貯」之名行「永貯」之實。而民意代表作為民眾發聲與溝通的要角，同時也是在制度設計上最貼近民眾、了解民意，但因為政黨、個人立場鮮明，因此大部分議員、區長、里長大多關注於回饋金發放金額與促協金規劃議題上，而非專注於核電廠除役之議題。

**5、反核－公民團體**

反核團體對於核電廠除役的政策發展，抱持樂觀與正面的態度，然而在核電廠除役之後，其原廠址與核廢料選址之土地正義、關乎安全的核廢料貯放方式以及後續牽涉到的能源轉型議題，因衍生議題過於龐雜，反核團體內並無完整的共識，大多與本研究案所歸納之其他議題相關性較高。在此角色界定上，仍須再分為有參加非核家園推動專案小組作為諮詢委員之反核公民團體，與其他沒有參加其中之反核公民團體。

**6、擁核－公民團體**

擁核公民團體主張之立場為，核能電廠之發電效能遠比其他發電方式更具優勢，除了便宜外相較之下產生較少的廢棄物，有助於減少溫室氣體之排放，且為可控之發電技術與科技，而在核廢料之部分則主張其輻射含量及其帶來之威脅能隨時間而遞減，在穩定發電的基礎上，發電方式不可偏廢。強調現階段無法直接以綠能替代核能發電，須待技術成熟時得以取代，就現階段而言「以核養綠」才是首選。

**7、營運業者—台電公司**

做為我國唯一一個核能電廠營運之業者，台電公司肩負起的責任不僅只是核電廠除役之執行，更在核廢料管理議題上須擬定完整的具體規劃，包含各設施的興建期程與除役後的土地利用等。面對原能會對除役安全性的要求、經濟部在核廢料管理與選址議題上的監管，公民團體對核廢料貯放方式的質疑，乃至民意在的地方回饋與補償的直接壓力下，因其未有在政策執行上的決策權，故造成了台電公司在配合政府政策的難處與窘境。作為除役計劃的規劃者與執行者，若政府方面的行政流程未有進展，勢必將影響到台電公司在執行相關工程的進度，進而影響到整體除役進程，而在除役之後在地住民因回饋金問題產生的對核電廠的反彈聲浪，也造成未來興建集中貯存設施的社會觀感不佳，故最終處置場選址的府際協商與和在地住民於補償回饋機制內容的溝通，是台電公司迫切需關注的議題，另在核電廠除役之後電力供給的缺口如何補足，也正考驗著台電公司的智慧與應變。

## 二、利害關係人所關切的議題分類

自非核家園政策進入執行階段後，社會輿論在討論核電廠運轉年限到期至除役的議題上，已存在基本共識，並無太大的分歧，但在核電廠除役過程中的核廢料管理與處置上，需要更多的討論，也因其議題牽涉到的範圍，擴及到全國層級。除役過程中所延伸之議題同時也是在執行非核家園政策面臨到最大的難處，民意、專業、政府與台電公司仍在周旋與協調，故綜合訪談內容和焦點座談的分析結果，以下主要藉由議題的釐清與分析，從議題構面中釐清核電廠除役議題中的利害關係人所關注之議題。

### （一）在核電廠除役中，主要分為除役計畫、除役安全以及除役補償

**1、除役計畫**

在除役計畫的討論中，可以得知當地民眾認為核電廠除役的時程規劃長達 40 年，在這 40 年當中土地仍無法進行利用與進行新的規劃，因此在這段時間內當地的

利益該如何兼顧是重要議題，且公民團體亦質疑除役時間過長，是否政府在建廠時的考慮未盡周延。另除役之後，該廠區的利用方式在公民團體、一般民眾以及台電公司都有不同的看法和想像，公民團體主張台電的除役計劃當中若要考慮到未來場址規劃的話，不應包含其他電力事業用途之開發計畫，除了因應除役需要的設施，不應有其他開發，若有的話應該當地居民進行諮詢，並尊重當地居民之意見，而當地民眾則認為廠區的未來規劃應以還地於民為首要考量。

**2、除役安全**

在除役安全的分析中，輻射對人體的影響是重要的議題，除民眾因實際發生過的問題而無法對政府處理輻射安全的能力產生信任感外，公民團體也對台灣的核電廠安全有很多的質疑，但是專家學者則認為事事都有風險，如何改進才是重點。另外，當地居民也非常重視疏散道路的建置，因為有疏散道路才能在危機發生時讓民眾有迅速逃脫的機會，且興建疏散道路在災難未發生時也有活絡當地經濟的效果，有民眾認為與其家家戶戶發回饋金還不如統籌管理，以做對地方有利的建設。而健康檢查則是最能直接確定居民身體安全的方法，因而當地居民及公民團體都主張在除役前應補助民眾進行健康檢查，而在除役進行時持續進行身體狀況追蹤。

**3、除役補償**

核電廠在所在地建置運轉的數十年中，對於地方建設及人口的限制都使當地工商、旅遊業無法發展，因此在核電廠除役後如何對民眾進行補償以及鬆綁限制當地發展的法規是亟需解決的問題。而在當地經濟復甦的期間，該如何保障當地居民的工作權、是否可以聘用當地人力為核電廠工作以提供就業機會，也都有待討論。而除當地權益外，也有專家學者憂心核電廠陸續進行除役將會對台灣的核工相關產業造成衝擊，因為台灣的核電管理技術在國際間是相當優良的，倘若因為除役造成年輕人之後不願投入核工產業，將會造成我國核工的技術斷層，且國際上反應爐已有進階的發展，未來可能可以將核廢料循環再利用，若在現階段造成人才的斷層，以後我國想要再發展的成本就會提高且耗時也會更久。

**（二） 核廢料管理中，本研究又將議題分為核廢料貯放、核廢料貯放安全、核廢料處理進行分析**

**1、核廢料貯放**

在核廢料貯放的討論中，當前高放核廢料的貯放方式以乾式貯存為主要的處置方式，但因最終處置場選址的地點遲未有最後的定奪，故台電公司提出中期處置場之應變方案，在核電廠原廠址地區興建乾式貯存設施，以作為核電廠除役之後高放射性核廢料的暫貯方式。但居民認為最終處置場難以找到，因而中期處置場會不會因此在未來成為最終處置場，是當地居民關心的問題。而最終處置場的選址，政府部門以集中式貯存方式為規劃，亦即將低放與高放核廢料至於同一廠區內，然因低放選址辦法中明定縣市政府舉辦公投之流程，礙於地方政府面對之民意壓力，各縣市政府遲未舉辦公投，遂無法完整除役計劃，而高放核廢料的選址，是否還須納入公投程序，也仍在修法當中。另外目前選址辦法明訂選址範圍人口少、排除六都等條件，因此符合條件的僅剩自然保護區或原住民保留地，然而核廢料該放在這些地方嗎?這也衍生出更加複雜的價值取捨及問題。

**2、核廢料貯放安全**

而核廢料仍然貯放在核電廠區，對於當地民眾來說，該如何回饋給當地居民也多有討論，有民眾主張核電廠停止運轉不應影響到回饋內容，因為核廢料仍在廠區內。而對於回饋的方式，意見也有所分歧，一部分居民民認為應直接發予，另一部分的意見則認為應將回饋金統籌做為公共設施建設的資源。除此之外，因為回饋金金額的差異導致北海岸居民以及蘭嶼居民之間的比較及對抗心態，也是政府在對不同核廢料貯放區進行回饋時應考慮進去的。

另在核廢料貯放安全上，乾式貯存目前設計於核電廠區內，原以室外乾貯為重點規劃，然因規劃地位處順向坡，並曾在雨災後有邊坡滑落的災害，造成民眾對室外乾貯的安全疑慮。且因為貯存地點鄰近海邊，居民也擔心長期的海風吹拂會對貯存桶造成侵蝕，所以在當地居民以及公民團體的倡議下，時任行政院院長林全至當地巡察時承諾將室外乾貯轉為室內乾貯，台電公司遂又進行相關計畫的修改。而除了核廢料該貯放在室外或室內的討論外，貯存的桶子也有其爭議點，因貯存桶為防止核廢料輻射外洩的第一層防護，所以貯存桶的材質也是環團倡議的主要內容之一。

對於核廢料貯放的安全，當地居民相當擔心會造成當地環境的輻射汙染，雖未有直接的證據顯示核廢料有造成附近土質、空氣、水資源的污染，但在核電廠附近發現「變種魚」，以及耕作植物生長的情形都讓民眾對輻射汙染有所聯想，儘管經證實後皆非核電廠輻射外洩所導致，但民眾對其仍有所憂慮，政府在未來或許能對相關的謠言及民眾疑慮的問題給予實際證據並進行解釋。

**3、核廢料處理**

而核廢料的處理方式裡，有專家學者指出目前高放射性核廢料的使用僅有 5%，使用效率極差，而國際上核能技術也已朝向核廢料循環再利用的方向發展，將 95%未使用的燃料物質提煉再運用，藉以減少核廢料的產生。另外，學者也認為核能技術是不斷在進步的，因而未來有可能可以發展出不會產生核廢料的反應爐，核廢料的問題也就得以解決。除處理技術外，在將核廢料送往國外處理或國內自行處理兩種方法中，因國內並無處理的技術，故有一派的公民團體主張將核廢料送往國外進行處理，但因牽涉到國際法的規範、境外處理難度較高且國際情勢錯綜複雜等關係，故而另一派公民團體以及

專家學者較傾向國內自行處理的方式。

**（三）與核能除役後續衍伸，仍為利害關係人所顧慮或關切的相關問題，這些議題又分為能源轉型、公平正義、鄰避效應以及法律規範等四類。**

**1、能源轉型**

台灣的核能發電截至 2018 年止，發電比例在目前台電的發電結構中佔 10.1%，雖然政府決定要發展再生能源進行替代，但在未來核能電廠除役而再生能源尚未穩定供給的情況下，如何確保電力供給，是迫切需要討論的問題。另外，也有民眾指出再生能源的器具使用（太陽能面板、風機），未來也要面臨除役的問題，然而這些器具的處理方式相較核廢料而言其實更為複雜且會也造成環境的汙染，而在天然災害來臨時，若是再生能源發電機組受到嚴重損害，台灣極可能面臨到電力不足的情況，這些也都是台灣全國民眾關心的難題。

**2、公平正義**

在公平正義的部分，因過去政府興建蘭嶼低放核廢料處置場時，並未讓當地住民知道明確的資訊，故產生爭議，也引發當地住民捍衛土地正義的訴求；在環境正義的部分，反核公民團體認為，因核廢料至今仍無法有效處置，且其輻射物質殘留到衰變所需時間最長可至好幾世紀，其對環境造成的危害不可低估，而核災的前車之鑑，如車諾比以及福島核災等案例，皆造成環境的巨大衝擊，故不應再使用核能電廠發電。然擁核團體則認為核廢料未來是可以解決的，且核能發電得以減少溫室氣體的產生，有抑制全球暖化的功效，故應繼續發展；而當今處置核廢料的方式為尋找地點，並將廢料集中貯存，待日後找到最終處置場再進行處置，不過反核團體認為不應將問題消極對待，因為這些問題無法在短短一世紀內解決，勢必會影響到後代的子孫，故應給予後代合理的解釋，諸如使用核電廠的理由以及核廢料放置於任何地方的方式及原因，以達世代正義。而為達公平正義，如何對當地居民進行心理補償，其長久以來與危險設施共處的心理壓力及負擔，該如何撫平與解決?而當地過往的歷史人文產業又該如何恢復? 都是公民團體認為需要注重的重點。

**3、鄰避效應**

核電廠曾為十大建設之一，為台灣工商發展提供很大的助力，在石油危機火力發電供電有隱憂的時代背景下，政府不得不開始發展核能用電，以供台灣電力的穩定供給，因而核電廠未來的發展乃至核廢料貯放的議題，不僅只是核電廠當地居民應要面對的問題，更是全台灣民眾要共同擔承擔的共業。目前依照經濟部《低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例》規定，最終處置場的選址須經縣市公投決定，而對於以縣市為單位進行公投的規劃，部分環團認為應以鄉鎮公投來決定，因以縣市為單位舉辦公投，牽涉因素過多，有執行之困難，為了減少鄰避效應造成的阻礙，若能降低層級以鄉鎮進行公投，公投的推展也許能夠更為順利。

**4、法律規範**

另在法律規範上，目前影響核廢料的法規主要為核廢三法以及水保法。核廢三法主要目的為完整建構核廢料處理的法規與環境，分別為以原能會為主的獨立嚴密管制法（放射性物料安全管制法）、以經濟及能源部為核心之厚植管理基礎的政策法（行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例）、實踐政府職責的組織法（放射性廢棄物管理中心設置條例），其中在是否以行政法人的方式設計核廢料管理專責機構上，在環保團體之間並未有明確的共識，有意見認為因台電公司無法處理好，故應設置，另一派則認為因台電公司的角色與國外完全民營的核電廠營運商不同，因此無需再另設。而目前台電的除役計畫是停擺的，因新北市政府以乾式貯存會造成土地汙染為由，以水保法不發予台電公司集中式乾式貯存設施的運轉執照，但亦有意見指出此舉為新北政府因擔心蘭嶼經驗重蹈覆轍，故用行政程序的方式阻擋。台電公司以及原能會則認為，此舉除了將導致除役程序停擺，無益於核電廠除役之計畫外，更因此衍生政府機關間的衝突和行政訴願、訴訟的往來。

從以上內容分析中可以發現因為技術層面涉及到專業知識與技術，從利害關係人所關注之議題面向來看，可以得出在地住民對於太過專業與技術相關之議題較不注重，像是專業技術子議題－技術、經費成本、核工專業、貯存桶、MOX、處理方式等，但礙於專業技術為核能是否安全之關鍵，因此，在議題溝通處理上，須先與學者專家對於核能在專業技術層面達到共識，不論核能安全或不安全，需要對外做到資訊透明、回應、涵融、參與等四項原則。若是將專業技術相關議題拉出，則可進一步用範圍區分全國型和地方型議題。以在地居民所關注之議題與不關注之議題進行區隔，可以看出除了上述專業技術之外，除了鄰避效應中的選址公投，其他議題皆可歸類為全國議題。全國議題與地方議題溝通的方式與策略在設計上可做出差異性，對關注之利害關係人亦可區別化溝通，以提升溝通效益。在全國議題討論中亦有與法律規範相關之議題，在此部分亦涉及到職業與專業上的顧慮，因此也需要考慮到立法院，在立法與修法上仍受到此部分的限制，因此在溝通上無法立即見效。

總之，政府、公民團體、當地民眾間意見仍相當歧異，各自有其利害關係和欲達成的成果，所以其中的關係跟目的十分複雜難解，但是眾人卻持有共同的目標--除役，因此，除役過程中價值的取捨、溝通如何進行、溝通內容為何，是需要利害關係人以完成除役為最重要中心思想來進行，才能釐清溝通中的角色定位以及分工執行以提升溝通成效，解決核能除役後續相關問題。

**三、政府機關、單位與利害關係人溝通互動策略**

由於不同的利害關係人關注的面向不盡相同，從議題下之利害關係人溝通策略中，可以瞭解到不同利害關

係人在該議題下欲達到之目的，以及在議題下彼此的互動關係，因此，政府機關、各單位在議題溝通上所扮演之角色與策略模式儼然成為議題溝通與發展的關鍵，以下透過深度訪談及焦點座談的內容統整分析出主要利害關係人之訴求、影響政府政策之策略，以及政府在回應機制上的設計與執行（如表 1 所示）。

**1、國家永續發展委員會**

國家永續發展委員會其下轄行政院國家永續發展委員會中的「非核家園專案推動小組」，作為中央政府對外溝通之主要平台。溝通方式主要是每兩個月定期召開會議，尋求「非核」議題共識，並有拍攝宣傳廣告，主要的溝通對象包括公民團體、專家、教育部，以及台電公司。

非核家園專案推動小組隸屬於行政院國家永續發展委員會，但因秘書處為經濟部國營會所負責，因此會議內容與資訊公開都藉由國營會網站公告。小組委員大多為反核-公民團體、專家與學者，政府機關、台電公司會依其議題所需列席會議解釋與溝通（包含技術層面），委員負責諮詢除役、核廢料處置、管理議題，在執行、制定與推動議題上提出建議，並督促政府機關、單位。該小組溝通策略模式簡單，以小組會議作為議題討論與推動，從會議中取得共識後，進行討論下一個議題。其須溝通協商知議題依序分次討論，將議題聚焦，尋找出爭議點所在釐清並取得共識。

**2、原子核能委員會**

原子核能委員會溝通主要由綜合計劃處和核能管制處所負責。採用的溝通方式主要是舉辦說明會、防災演練，以及在地住民舉辦活動、節日與專家演講外，也會在台灣的重要公共場域刊登廣告傳遞知識，溝通方式偏向於知識與安全宣導。溝通的對象包括在地住民、公民團體、專家學者，以及一般民眾。

原能會在核電廠除役溝通機制中，以核能安全監督者、把關者的角度，一方面對政府機關、關注該議題之公民團體以及民眾舉辦公聽會、說明會之外，也透過「公眾參與平台」將資訊揭露、公開，讓一般民眾能夠了解原能會在該議題下負責的角色。藉由核一廠除役計畫審查，舉辦地方說明會、里長乾式貯存參訪、里長拜訪，並與台電相互分工進行地方溝通。

整體分析原能會在核電廠除役溝通策略與扮演的角色，主要為搜集民意，以監督台電公司在執行中對於在地住民的安全、生活環境上的規定有沒有落實遵守，又或者是沒有注意到的面向，加以監督。在溝通議題上主要以核電廠發電上的安全作為宣導與溝通，對於台電的提案監督、審查，並舉辦說明會、聽證會，作為台電公司與在地住民溝通的媒介之一。除了協助當地住民了解計畫走向，也會個別拜會區、里長，以了解當地居民各區、里民情，加以在溝通策略中予以加強。原能會因非執行單位，在技術層面與核安知識層面，則會藉由與其他有使用核能的國家交流，交換資訊與知識、技術，以同步台電在核能上的專業知識，加強監督的正當性。其次，在網絡平台中也充分將民眾對於核能安全困惑之處給予解答，作為一互動式平台，以提供關心核能安全但無法參與說明會、聽證會之民眾。

**3、新北市政府**

新北市政府主要由新北市政府核安監督委員會，負責核能安全的議題，而主張除役之後的核廢料不應放在新北市地區。因此，其策略模式是藉由環境評估與成立核安監督委員會，以法律影響中央政策。而在溝通管道多運用台電核安知識宣導、核廢料選址，以及辦理核安演習，並建立網站資訊平台、透過法律訴訟及新聞媒體發揮影響力。在溝通對象面向上則包括在地住民、新北市民眾、反核公民團體，以及中央政府。

**4、專家、學者**

專家、學者的核心訴求是強調核能安全知識，因此採取的策略模式是舉辦、參加國際專家研討會、會議，國內則藉由科普教育宣傳。大多數的專家學者可運用的溝通管道是參加國內政府機關、單位委員會、小組會議、擔任委員給予專業知識建議，並與外國學者、專家交換核能知識與技術資訊，透過網路評論傳遞資訊。希望以長期教育科普，讓核能知識普及化。

不論是擁核、反核專家與學者在溝通策略模式上，並沒有明顯差異，大多參加國際會議、研討會，交流外國經驗、技術。對政府機關單位溝通的角色，同為政府協商、諮詢對象。但在核能知識宣傳上，因為對核能安全上的意見對立，因此在科普教育上擁核的專家、學者偏向科學實驗方式宣傳，在反核方面的專家、學者則是以案例帶入探討，傳遞知識、訊息。從教育這一塊切入，將知識傳承則是專家、學者在溝通層面上共鳴之處。

**5、反核公民團體**

反核公民團體的主要核心訴求，集中在核廢料貯存與核廢料選址議題上。因此主要是運用結盟、倡議與抗議、遊說甚至於訴訟方式等策略模式，亦會邀請、聯繫國內與國際專家，以請求意見背書。部分團體透過非核家園專案推動小組會議進行倡議。然而，該專案小組討論的政策議程繁雜，進度緩慢，仍與政府持續協商中。

**6、擁核公民團體**

擁核公民團體的核心訴求是「以核養綠」，讓核一、核二廠延役。因此，所採用的策略模式是藉由網絡平台直播與遊說方式與一般民眾溝通，並公開與政府單位、反核民間團體溝通方式。溝通的管道主要是建立網站、社群網絡平台、現場訪查、抗議、倡議、公投提案，並和國際、國內專家學者合作。在 2018 年的公投結果，讓政府放寬 2025 年除役時程之限制。

**7、在地住民**

在地住民的核心訴求是著重在安全、在地發展、工作機會、足夠用電以及回饋金的考量，因此，採用的策略模式是運用抗議、與在地區、里長結盟，參與現場訪查和說明會。多數居民的溝通管道是透過議員與區、里長。不過在溝通方式與問題解決仍有疑慮，焦點座談結果發現民眾間仍有許多尚未釐清之問題以及希望向政府反映之事項，顯示與民眾之間的溝通有待提升也應持續進行。

**8、台電公司**

台電公司中溝通的主責單位，主要由「核能後端營運處－除役及選址溝通中心」負責，同時有規劃協調組、除役溝通組、低放選址督導組協助，在地公關課公關人員（核一、核二廠），以及台東及金門溝通小組協助執行；核發處、後端處協助、支援。其採取的溝通方式，主要是針對「除役」與「核廢料」議題擬定計畫，由特定溝通人員，利用說明會場合宣講業務內容以及技術層面知識。從 106 年整體計劃中共計製作宣導廣告 14 支、捐助與補助 18 名緊急救難、照護、救濟，舉辦活動營 2 場、座談會與說明會 230 場、宗教文化節慶與公益活動 18 場，溝通方式偏向於互動式與單向式混合型溝通。而其溝通對象包括反核團體、專家學者、地方單位，和在地住民。

台電公司作為核電廠除役中主要執行且負責主要溝通的位置，以一個營利公司的角度，將執行層面所遇到的問題包含環境永續、在地住民擔憂、地方領袖、政府的支持意向與中央政策方展，從窄道廣的層面皆需要顧及到。從溝通策略來分析，可以看出台電公司從底層溝通到中央級，都有一定的模式與規劃，除了與利害關係人溝通之外，也以計劃案推動方式加以宣傳核能知識與台電公司在執行上如何處理等，從知識到技術加以推廣。除了中央政策方向不明導致兩邊民意高漲，台電公司「全民」作為台電溝通的對象，透過計畫將利害關係群體以不同規劃來進行溝通。

表 1： 利害關係人溝通機制整理表

| 利害關係群體 | | 反核公民團體 | 擁核公民團體 | 在地住民 | 學者專家 |
|---|---|---|---|---|---|
| 核心訴求 | | 1、廢核料選址<br>2、核廢料貯存方式 | 1、核能是安全乾淨的發電方式<br>2、以核養綠 | 1、安全<br>2、回饋金<br>3、在地發展<br>4、工作機會<br>5、足夠用電 | 1、核安知識傳承 |
| 利害關係人策略 | 共有 | 倡議 | 倡議 | X | 倡議 |
| | | 抗議 | 抗議 | 抗議 | X |
| | | 結盟 | 結盟 | 結盟 | 結盟 |
| | | 向立委、議員陳情 | 向立委、議員陳情 | 向立委、議員陳情 | X |
| | | 國際、國內專家背書 | 國際、國內專家背書 | X | 國際、國內專家討論、背書 |
| | | 現場訪查 | 現場訪查 | 現場訪查 | X |
| | | 建立網站資訊平台 | 建立網站資訊平台 | X | X |
| | 獨有 | 遊說 | 遊說 | 在地區、里長動員 | 舉辦國際研討會 |
| | | 與立委、議員協作 | 與立委、議員協作 | 參與說明會 | 與在地連結 |
| | | | | | 國際核安技術、知識交流 |
| | | 直播參與政府會議 | 社群網絡平台直播 | | 科普教育 |

資料來源：本研究整理所製。

註解：上表中「X」表示該利害關係人在受訪過程中未提及該項策略。

## III.討論與結果

本研究藉由議題的釐清與分析，從議題構面中核電廠除役議題中的利害關係人所關注之議題，主議題－除役計畫（技術、時間、經費成本）、主議題－除役安全（輻射安全、疏散道路、健康檢查）、主議題－除役補償（補償機制、在地發展、在地權益、核工專業）等。

### 一、 利害關係人共同關注之子議題

當利害關係人對某個子議題皆抱持關注時，像是在最深層的其他議題中主要議題－鄰避效應（選址公投），在地住民以及反核、擁核公民團體、專家學者皆關注於此子議題上；因此政府機關、單位亦可將其作為與利害關係人溝通之突破口，不僅核廢料貯放議題鏈結。由除役至核廢料管理以及其他議題，可以藉由利害關係人所關注之子議題作為核能除役溝通的鏈結，延伸至核廢料貯放安全議題與低放射性廢棄物管理法，同時推動核廢三法修正，加強核能除役下法條規範，亦可由選址公投回推議題，將仍須溝通之子議題與利害關係人協商。

### 二、 相關之子議題

從子議題－健康檢查與輻射安全中可以將核廢料議題下之主要議題－核廢料貯放安全鏈結；再延伸至主要議題—核廢料貯放至子議題－選址公投之溝通，而溝

通策略可以從中區分為三個層次：

**1、技術與區域－專業技術、全國、地區**

因技術層面涉及到專業知識與技術，因此從利害關係人所關注之議題面向來看，可以得出在地住民對於太過專業與技術相關之議題較不注重，像是專業技術子議題－技術、經費成本、核工專業、貯存桶、MOX、處理方式等，但礙於專業技術為核能是否安全之關鍵，因此在議題溝通處理上（如圖 1），須先與學者專家對於核能在專業技術層面達到共識，不論安全、不安全皆對外達到資訊透明、回應、涵融、參與。




圖 1 以地區議題區分溝通策略圖

資料來源：本研究團隊繪製。

若將專業技術相關議題拉出，則可再將議題以範圍區分－全國、地方。以在地住民所關注之議題與不關注之議題區分，可以看出除了上述專業技術之外，於其他議題（除了鄰避效應中的選址公投），皆可歸類為全國議題。全國議題與地方議題溝通的方式與策略在設計上可做出差異性，對關注之利害關係人亦可區別化溝通，以提升溝通效益。在全國議題討論中亦有與法律規範相關之議題，在此部分亦涉及到職業與專業上的顧慮，因此也需要考慮到立法院，在立法與修法上仍受到此部分的限制，因此在溝通上無法立即見效。

**2、議題連結－子議題的共通性**

當相關議題具有一定共通性時，可以將議題整併討論，成為較有系統性的溝通策略，從主議題－核電廠除役到核廢料管理之間相關之子議題中，可以得出在子議題－除役安全與核廢料貯放安全上利害關係人最大的共同關注議題在輻射污染與貯存桶上，而與輻射污染相關之議題有輻射安全與健康檢查；另外從主議題－核廢料管理與其他議題之子議題中，可以看利害關係人所共同關注之議題在集中貯存場與最終處置場與選址公投上。可以看出在相關議題溝通上可以作為溝通之突破口，在議題注重之利害關係人之間尋找共識。

**3、議題聚焦－較多利害關係人關注**

除了上述溝通策略之外，亦可以選擇最多共同利害關係人關注之議題進行議題上的聚焦，不論是透過會議或是審議式溝通、論壇、會議將其利害關係人對於該議題的想法與建議蒐集，在與中央政府負責之機關和具有專業知識、技術之單位、學者、專家進行商討政策可行性。以單一議題溝通作為突破口，與利害關係人進行聚焦，對利害關係人所需與所建議之處整理、回應，或透過其利害關係人溝通模式協商溝通，亦可將現行下較難處理之議題以此方式作為溝通策略推動。

若所涉及之利害關係群體過多、人數過於複雜，則可藉由審議式民主聚焦。若單就公民團體所關注之議題而言，在電力供給、土地正義、環境正義議題上同時可以看到擁核、反核兩方對於議題上的建議與立論點。利害關係人在議題下所注重之立論點，亦可為議題聚焦，可以辯論、遊行等方式影響全國人民對議題觀感上的影響（如圖 2）。




圖 2 利害關係人關注議題圖

資料來源：整理自本研究團隊。

備註：選址公投為核電廠除役下利害關係群體共同關注之議題。

## IV. 結論

核能除役的政策溝通不僅是對外與民眾的溝通，在溝通之前首要之務應是由相關的政府部會和行政機關，先行整隊確定政策目標和方向，分別針對核能政策、核能安全、放射性廢棄物以及核電廠除役執行進行分責，而其各自任務以及之間的合作、協力與衝突關係，界定內部角色與定位，才能掌握有效的政策溝通。

如前述整理當前政府機關單位在核電廠除役溝通下所遇之問題，不論在政府機關、單位分工上仍須加強、精進、努力；在溝通模式上仍須進化、多元、創新以協助議題推動、執行。而就執行層面上，本研究整理現代與傳統體制溝通上的溝通途徑、工具上的差異與多元化發展；另外在利害關係群體溝通策略中整理出政府機關單位可參考之溝通模式，提供在整體溝通上舊有的限制，突破溝通上的阻礙，以協助政策溝通效能提升，以下分述「內部」、「外部」兩面向之政策建議：

**一、「內部」溝通策略建議**

**1、建立政府機關、單位之間溝通平台**

核電廠除役及核廢料處理議題，因其涉及跨部會之間的協調以及府際之間的溝通，橫跨層面以及業務範圍相當廣泛，但政府單位內卻缺少一個正式的內部溝通場域，忽略了內部溝通的重要性，導致各部會之間的衝突與立場差異，因此本研究建議，集結有關政府單位建立

政府內部的交流與互動機制，調整內部歧異之意見，藉此促進政府內部的整合。

**2、減少各部會之間行政資源的浪費**

各部會與相關單位針對核電廠除役及核廢料處理議題進行多方的協調與意見探詢，然而在權利與義務之間，仍產生單位間的衝突，如訴訟與訴願，無形之中也產生了時間、費用、人力等機會成本，不但未能解決問題，反而惡化單位之間的關係，故本研究建議，將裁罰的模式轉為建立政府單位間各式溝通的安排，避免使用爭訟的方式解決歧異，耗費行政資源。

**3、增強核廢三法的推進與執行**

政府在核電廠除役溝通下，首先，將「對內」之角色重新定位，並彰顯其角色通能，疏通政府機關、單位上的分工，而當前政府內部溝通未能暢通的原因，乃因法律規範未盡完善，使得原能會、經濟部、台電公司之間職權與分工界線模糊，原能會核廢三法之推動已有數年，其內涵包括將經濟部選址角色清楚定位、成立「核廢料管理」的專責機構以及強化原能會「安全管制」之角色，若能加速立法之進程，其政府內部之分工與溝通將更加完整與清晰，即有助於對外溝通之進行。而根據「核廢三法」的規定（組織、管理、監督）之角色分工上獨缺管理單位，若非經濟部則需有專屬單位進行管理，方能將議題梳理達到有效溝通以解決目前政策阻礙與困難點，而其他部會與專案小組則可定位為協助政策推動一角（如圖 3）。先釐清現有政府機關、單位在執行政策上應扮演之角色，梳理政策「內部」溝通，再解決政策「外部」溝通。

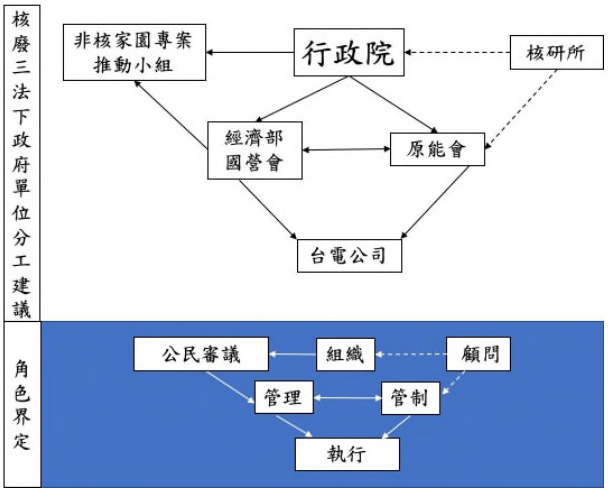



圖 3 政府機關、單位角色定位互動圖
資料來源：本研究團隊整理。

**4、強化中央政府與地方政府對政策的共識**

核電廠除役及核廢料處理議題，為中央之政策，地方政府配合執行選址公投，然地方政府之首長因有來自民意之壓力，不敢貿然執行公投，而新北市政府也不願將核廢料留在地方，使得除役政策進程卡關，然在透過政府單位間的互動分析中得以發現，中央政府與地方政府之間的往來並不頻繁，如此即可能造成府際之間在政策上的誤解，故本研究建議透過首長之間意見協商與共識建立，壤中央與地方共同推進並順利執行政策。

**5、減少台電公司於溝通中的影響力**

台電公司在核電廠除役及核廢料處理議題的溝通上，相較政府單位，與民眾接觸較為深刻，但這也導致民眾在辨識原能會與台電公司職責時，有所混淆，再者因台電公司以營運業者之立場與民眾溝通，如此即可能造成使民眾不清楚、不了解政府的施政核心理念，進而影響政策的推行，故本研究建議減少單一機關或單位對民眾溝通的模式，強化政府機關多方的協作與合作，藉此順利退進政策。

## 二、「外部」溝通面向建議

**1、突破溝通上的策略與模式**

核電廠除役所涉及專業議題溝通上的利害關係人，主要有台電公司和專家、學者。以專家、學者為例，過去大多以文章、演講、教授方式偏向單向式對外溝通，不易取得溝通上的回饋，易與一般大眾思維脫節。長期下來民眾對於太過專業知識、資訊不願理解，甚至導致對專業知識、技術上的誤會；然而隨著現代化發展，專家、學者改變溝通策略管道革新，以雙向溝通模式發展，舉辦、參加研討會、說明會，甚至擔任智庫、協會理事，在核電廠除役下，專家、學者更因害怕知識、技術的人才斷層，透過科普教育將技術融入基礎教育中，成效為佳，藉由從基礎知識上的傳遞模式革新，提升民眾對能源認知的興趣（詳如表 2）。若台電公司在溝通模式策略上與專家、學者協作，設計對專業知識上的科普教程，以活動方式宣傳、溝通，以雙向溝通模式，如 IAEA（2014）整理之模型，將「傾聽」、「溝通」提升至「參與」，別去以往溝通模式，達到有效之溝通策略。

表 2 專家、學者溝通策略多元化整理表

| 核心理念 | 溝通策略 | | | 效果評估 |
|---|---|---|---|---|
| 維持核安文化 | 單向 | 培養種子教師 | 國小、國中、高中、大學、公司、研究所、醫院 | 效果有限 |
| | | 演講 | | |
| | | 出書、雜誌、報紙 | | |
| | | 寫文章 | | |
| | 雙向 | 擔任智庫、協會理事 | | |
| | | 說明會 | 參與台電公司溝通活動 | 目前最有效 |
| | | 舉辦研討會 | 資訊、技術交流 | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 面對面溝通（科普教育） | 國小、國中、高中、大學 | |

資料來源：本研究團隊整理自利害關係群體官方網站、粉絲專頁與逐字稿。

**2、增加民眾對議題的了解程度**

由於核電廠除役之議題涉及專業技術，在溝通上易使得民眾不易理解，且不願多加涉入。因此在宣導與溝通上，應將專業知識宣導藉由不同的宣傳手法，融合文宣品代替沈重宣傳手冊以增加民眾對該議題之有感程度（例如：反核公民團體製作紙膠帶、貼紙、聯名活動），透過生活化的方式增加議題廣泛度與曝光度，進而提升政策推廣。

**3、重新彙整議題，整合溝通平台並朝向分享決策的溝通模式精進**

核電廠除役及核廢料處理議題結構複雜，難以對個別議題進行單獨作業與溝通，便造成政府單位成立數個對外溝通平台與與民眾搭起連結，然而透過公投方式解決核能問題，若民眾對議題之熟悉度不足，恐不太合適，故本研究建議，得以先將政府單位所有對外溝通平台整合，並從涉及較多利害關係群體所關注之議題上著手，透過成立代表決策委員會等方式，匯聚民意建立夥伴關係，府民攜手「共商」與「共決」政策方向，除了緩和府民之間信任感不足之問題，亦能為政策執行上提供新想法，且更能貼近民意。

**4、增加與在地住民接觸的機會**

如在地住民所提及，政府機關在政策溝通上與民眾互動頻率過低，導致民眾對於政策的了解程度不高。但隨著科技進步，民眾生活對電子產品、網路的依賴已密不可分，因此政府機關、單位在溝通策略上，可以較多元的方式增加與民眾溝通互動頻率，以民意代表、反核公民團體－宣傳方式多元，多以文創商品（圖示、紙膠帶、貼紙）與親民口號融合文宣品代替沈重宣傳手冊；擁核公民團體－粉絲專頁直播，日日更新每日進程，皆可作為政府機關、單位與民眾互動之參考。與民眾溝通、達成共識實屬不易，建議政府機關、單位在政策宣導上，應增加與民眾互動之頻率，以利推動政策發展。

**5、透過第三方協助與民眾溝通**

因應當前民眾對政府機關之信任感，以及行政機關無適合與專業之溝通能量，故本研究建議，可藉由學校教育或研究機關單位，以第三方之角色協助進行與民眾的溝通，如此得以減少民眾對政府的誤解，修復關係外，亦能緩和相關單位的溝通壓力，解決問題。

## 參考文獻

### 一、中文文獻


[1] 朱璟豪（2017）。利用 CFD 評估核一廠既有幹式貯存設施應用于電廠除役之可行性。新竹：清華大學工程與系統科學系學位論文，未出版。

[2] 周桂田（2004）。獨大的科學理性與隱沒（默）的社會理性之「對話」－在地公眾、科學專家與國家的風險文化探討。台灣社會研究季刊，(56)，1-63。

[3] 林昱廷（2014）。台灣核能的科技溝通：以《台電核能月刊 (1983-2013)》爲案例。台南：成功大學歷史學系學位論文，未出版。

[4] 胡毓青(2008)。國內核能電廠除役方式評選之研究。桃園：中原大學企業管理研究所學位論文，未出版。

[5] 張瑋珊(2010)。溝通沒做好，風險免不了--從毒奶粉，砷油事件看政府的風險溝通。國立台灣大學新聞研究所學位論文，未出版，台北。

[6] 張寧、黃昆峰（2015）。嫌惡性設施的風險知覺。中國行政評論，21（3），21-47。

[7] 陳彥誠（2014）。核能電廠除役用智慧型核廢料處理系統。新竹：清華大學資訊系統與應用研究所學位論文，未出版。

[8] 陳穎峰（2018）。公民參與和核安治理—核四安全監督委員會與新北市核能安全監督委員會之比較。東吳政治科學，36（1），1-63。

[9] 陳憶寧（2014）。福島危機中台灣民眾對核能的風險感知與態度： 政黨傾向、核能知識、信任與科學傳播的角色。中華傳播學刊，(26)，223-265。

[10] 黃東益、傅凱若、董祥開（2017）。核電廠除役及核廢料處理議題公眾溝通機制之研究，科技部專題研究（106-2623-E-004-001-NU），未出版。

[11] 蕭金益（2007）。強化低放最終處置場溝通策略之研究。國立政治大學行政管理碩士學程學位論文。


### 二、 英文文獻


[12] Alexander, E. R. （2000）. Rationality revisited: Planning paradigms in a post-postmodernist perspective. Journal of planning education and research, 19（3）:242-256.

[13] Bryson, J.（1995） Strategic Planning for Public and Nonprofit Organizations（rev. edn）. San Francisco, CA: Jossey-Bass.

[14] Devine-Wright, P. （2011）. Place attachment and public acceptance of renewable energy: A tidal energy case study. Journal of Environmental Psychology, 31(4), 336-343.

[15] Eden & Ackermann.（1998）. Making Strategy: The Journey of Strategic Management. London: Sage Publications.

[16] Freeman, R. E. （1984）. Strategic Management: A Stakeholder Perspective. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

[17] Gomes, R. C. （2006）. Stakeholder management in the local government decision-making area: evidences

from a triangulation study with the English local government. Revista de Administração Contemporânea, 10（SPE）:77-98.
[18] IAEA （1994）. A Handbook for Guiding Good Communication Practices at Nuclear Fuel Cycle Facilities. Vienna: Free Press.
[19] IAEA （2014）. Communication and Stakeholder Involvement in Environmental Remediation Projects. Retrieved April 6, 2019, from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1629_web.pdf
[20] IAEA （2018a）. Public Communication on Nuclear and Radiological Emergencies to be in Focus at IAEA Symposium. April 6, 2019, from https://www.iaea.org/newscenter/news/public-communication-on-nuclear-and-radiological-emergencies-to-be-in-focus-at-iaea-symposium.
[21] IAEA （2018b）. Country Nuclear Power Profiles—FRANCE. April 6, 2019, from https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/France/France.htm.
[22] Merrifield, J. S. （2003）. Report of the Public Communications Task. Retrieved April 7, 2019, from https://www.nrc.gov/public-involve/stakeholder-involvement/final-report.pdf.
[23] NDA （2009）. NDA Guidance for Site Stakeholder Groups. April 7, 2019, from https://community.magnoxsocioeconomic.com/wp-content/uploads/2015/07/NDA-Guidance-for-SSGs.pdf.
[24] NEA 2007）. Transparency of Nuclear Regulatory Activities . Retrieved April 1, 2019, from https://www.oecd-nea.org/nsd/pubs/2007/6256-transparency-nra.pdf
[25] NEA （2015）. Nuclear Regulatory Organisations and Communication Strategies. Retrieved April 1, 2019, from https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2015/cnra-r2015-2.pdf
[26] NEA （2019）. Working Party on Decommissioning and Dismantling （WPDD）. Retrieved April 6, 2019, from https://www.oecd-nea.org/rwm/wpdd/.
[27] NRC （2015）. Communication Strategy for the Enhancement of Public Awareness Regarding Power Reactors Transitioning to Decommissioning. April 7, 2019, from https://www.nrc.gov/docs/ML1501/ML15013A068.pdf.
[28] Osborne, D., & Gaebler, T. （1993）. Reinventing government: The five strategies for reinventing government.
[29] Ramana, M. V.（2011）. Nuclear power and the public, Bulletin of the Atomic Scientists, 67（4）, 43-51.
[30] Rainey.（1997）. Understanding and Managing Public Organizations.2nd ed. San Francisco. CA: Jossey-Bass.
[31] Rosa, E. A. & Freudenberg, W. R. （1993）. The Historical Development of Public Reactions to Nuclear Power: Implications for Nuclear Waste Policy. In: Dunlap, R.E., Kraft, M.E., Rosa, E.A. eds. Public Reactions to Nuclear Waste: Citizens' Views of Repository Siting. Durham: Duke University Press: 32－63.
[32] Slovic, P. （1999）. Trust, emotion, sex, politics, and science: Surveying the risk-assessment battlefield. Risk analysis, 19（4）:689-701.
[33] Slovic, P. （2001）. Perception of risk from radiation. In: Slovic, P. eds. The Perception of Risk. London: Earthscan Publications Ltd: 264－274.

# 原子能監督管理規範中裁罰制度之實證分析研究
# Empirical Legal Studies On Administrative Penalty of Nuclear Supervision and Control Laws

計畫編號：MOST 107-2623-E-031-001-NU
計畫主持人：程明修
e-mail：cmshiou@scu.edu.tw
執行單位：東吳大學

## 摘要

現行原子能監管法規範所採取之管制方式，其手段十分多元，限期改善制度亦包含在內。但限期改善制度之法律性質與功能為何，並不明確，有必要以德國法為借鏡並分析現行法規範，以回顧現行原子能監管法規範。

關鍵詞：原子能、限期改善、連續處罰、行政罰法、督促改善。

## Abstract

The means of control adopted by the current Atomic Energy Regulatory Law are very diverse, and the deadline-based improvement system is also included. However, it is not clear whether the legal nature and function of the deadline improvement system are necessary. It is necessary to use the German law as a mirror and analyze the current law to review the current Atomic Energy Regulatory Law.

Keywords: atomic energy、Limited time improvement、Continuous punishment、Administrative Penalty Act

## I. 前言

現行原子能監管法規範所採取之管制方式，包括罰鍰、限期命改善（改正）與連續處罰等，且不乏同時採取罰鍰和連續處罰，甚或各種類型交互運用者。以核子反應器設施管制法」第 33 條、第 34 條、第 36 條及第 38 條即為明證。其中，第 36 條並未如另外三條規定明文訂定應限期令改善，始有罰鍰與按次連續處罰之規定適用。

如果檢視前述重要的原子能管制規範，約略可以發現以「限期改善」作為單純的行為態樣或結合其他行政措施的管制結構類型極其多樣。原本若干典型的行政罰議題，例如「按次連續處罰」目的在處罰違規行為或督促改善？本已極具爭議性。例如涉及如刑法上接續犯之爭議。與此一議題結合，則更會產生單純裁罰或連續處罰，是否以法有明文規定限期改善為宜？法若無明文，是否仍得先要求「限期改善」等，在實務上已生爭議。其所涉及者包括法律保留，行政行為容許性的爭議，亦即限期令改善期限規定之法明確性，連續處罰之目的與性質，亦即係屬「秩序罰」或屬「執行罰」之爭議；前者著重於對過去違規行為的處罰，後者則不以處罰為目的，強調的是行為人就持續性之行為或狀態的改善義務。在原子能監管法制，此類限期令改善，若不改善則連續處罰之規定，其規範目的為何？是否與各該制度目的相合？應予探究。其次，在此亦涉及（按次）連續處罰之行為數認定方式之爭議。在大法官釋字第 604 號解釋認為，針對持續存在的違規行為或狀態，得以主管機關舉發之次數作為行為人違規次數之認定。則原子能管制法規中所規範之按次連續處罰，其次數之認定方式是否有異，亦屬爭議。

關於裁罰規定，應探究目前原子能法體系之裁罰規定之法律依據，以及其是否符合法律保留原則之要求。依釋字第 604 號解釋許宗力大法官協同意見書，法律「明確性」的要求應有密度高低之分；例如刑事處罰，因為涉及人民生命、身體、財產之限制，其授權明確性之密度要求亦應較高。依此理，原子能管制法規之罰鍰或連續處罰規定之金額甚高，對於人民財產權之侵害較大，更應確保其授權規範之範圍、目的、內容是否明確，以較高密度的授權明確性要求檢視之。

本計畫對於解決目前原子能管制實務爭議具有重要性，若能透過實證分析，釐清現行法中，立法者以「限期改善」連結的管制或裁罰體系意義，對於管制行為法合法性與管制目的之實現，預期均會產生實質正面的影響。

## II. 主要內容

在第二章中，本文係對相關爭議問題討論做現狀分析。首先是裁罰性不利處分與非裁罰性不利處分之區分，此部分乃因我國行政罰法對於裁罰的類型，包括了裁罰性不利處分，以致針對相對人產生不利益之行政處分，尚且需要進一步判斷該不利益處分是否具有「裁罰性」，以區別其他不具有裁罰性之管制性不利益行政處分（或所謂之「預防性不利益處分」）。然而如何區分，造成學理與實務相當大之爭執。在此，本文如果以學說主要之論點，或參酌釋字第 604 號解釋，「立法者固得以法律規定行政機關執法人員得以連續舉發及隨同多次處罰之遏阻作用以達成行政管制之目的」，顯然最核心的判斷標準仍須以立法者預想之「行政管制之目的」，在個案中斟酌立法目的為斷。

其次則以「連續處罰」之法律爭議為探討，限期改善經常作為連續處罰之前行為，尤其運用在違法狀態持續的繼續犯之情形。然而限期改善措施作為處罰之前行為意義何在是否將之視為切割行為數之行政行為？或其係相當於行政上強制執行前之告誡程序？

在第二章最後一節中，則探討「限期改善」之法律性質。在本節中，本文發現限期改善制度從訴願救濟角

度觀之，已是一種對於行政法總論日益增強的挑戰。挑戰總論所建構的體系是否足以回應各論的需求。然而，不論學說或實務可能忽略了具體個案所適用法規範之差異結構，而過度單純地以既有的行政法釋義學概念進行詮釋？因為即使系爭救濟之程序標的之行為屬性確屬行政處分，然而進入特定的法規範體系中（例如行政程序法第 174 條或行政罰法第 9 條），其與是否得單獨進行行政爭訟，仍有距離。

因此本文將在第三章與第四章中，嘗試透過現行法規範設想之法律關係類型分析，並藉由比較法（德國法上相關之制度）的觀察，釐清我國法制中「限期改善」等類似概念之法律性質與功能

## III. 結果與討論

在第三章中，本文透過德國法的觀察，得到若干啟發，首先對於警告、要求改正或改善之類措施之行為定性的判斷，不應該與法律授權之問題混淆。即便法有明文也未必直接可以定性其法律性質，特別是未必可以直接定性為行政處分。

第二，相對於其他更不利益之處分，先予以當事人限期警告或改善之要求，透過比例原則之衡量，不僅在行政程序法之適用，同時也在其他包括對於違反行政法上義務行為進行裁罰時，扮演重要之角色。

第三，警告、要求改正或改善之類措施，並非德國秩序違反法（OWiG）第 56 條第 1 項所規定的「警告」或「無警告罰鍰之警告」，不具有裁罰性。

第四，在特定法規範結構之解釋下，警告、要求改正或改善之類措施有可能具備行政處分之特徵。基於行政處分權限之要求，理應要有具體法律之授權。在此也凸顯在個別法律關係之結構下，單獨判斷警告、要求改正或改善之類措施定位的必要性。特別是比較臺灣法制之複雜性（裁罰性不利處分，連續處罰等特殊機制等）可能更甚於德國，因此在上述一般性理解之外，個別法律結構的分析觀察仍屬必要。

而在第四章中，本文整理現有法規。發現整理之各種規範類型中，行政機關所為命於一定期限（行政程序法第 48 條規定之期日、期間）內為特定事項、行為之內容，至多僅具有課予相對人負擔之不利益行政處分性質，並無裁罰性質，因此非行政罰法第 2 條所稱之裁罰性不利處分。

限期改善措施本身是否為行政處分之判斷，並無法單就法規是否有規定為判斷根據。行政處分之屬性與法律是否有授權尚屬二事。若干法無明文的前提下，行政機關之限期改善通知本身即是一種比例原則思考下的減弱規制措施，但是也可能是合法化後續按次連續處罰之必要條件，然其法律性質均可能是行政處分。

限期改善措施在法律制度中之功能，依本文就各種立法規範類型之分析，尚難一概而論。毋寧應該在不同的規範結構中個別進行判斷。尚不宜望文生義，只要看到法規使用「限期改善」之類之用語，即逕自賦予其固定之單一意義。立法者在每一個規範結構中就算是使用限期改善之用語，也未必只有唯一或單義的功能。

限期改善措施，特別是在罰鍰外，與法規聯繫之後續行政措施性質之解讀，息息相關。特別是所謂「按次處罰」或「按次連續處罰」之類措施前的限期改善，乃是作為後續「處罰」之前提條件。它並沒有因此造成自然一行為切割成法律上數行為評價的問題。也因此影響「按次處罰」或「按次連續處罰」之類措施之法律性質判斷。就此，本文則採行政罰說

## IV. 結論

目前原子能相關法律中，最具有爭議的條文結構應該是類似核子反應器設施管制法第 36 條的規範模式條款。本法規定，規避、妨礙或拒絕主管機關依第十四條第一項規定實施之檢查或要求檢送資料者，處新臺幣二十萬元以上一百萬元以下罰鍰，並得按次連續處罰及強制檢查。問題的爭議核心在於按次連續處罰亦為裁罰，而法條規定按次處罰，立法之意旨應已經包含要求行政機關於第一次裁罰後，有告知義務違反者，若未於期限內改善即得再予後續裁罰之義務。因此在進行所謂的連續處罰之前提，應該先確認前次之裁罰後，應履行之義務仍持續存在，而有再次裁罰之必要。故而在前次裁罰後，即應該一併命令相對人再次履行義務的期限，故限期改善之義務甚至明文規定乃屬必要。故此類之規範在立法論上，為求明確以及符合法理，建議應該修改條文為「規避、妨礙或拒絕主管機關依第十四條第一項規定實施之檢查或要求檢送資料者，處新臺幣二十萬元以上一百萬元以下罰鍰，並得『於限期改善後』按次連續處罰及強制檢查。」之規範模式。

## 參考文獻

《中文文獻》

書籍

李惠宗，行政罰法之理論與案例，元照，2007 年。

吳庚，行政法之理論與實用，增訂 13 版，三民，2015 年。

林錫堯，行政罰法，元照，2 版，2012 年。

洪家殷，行政罰法論，增訂 2 版，五南，2006 年。

陳文貴，行政罰競合理論與實務─雙重處罰禁止論，自版，2012 年。

廖義男，行政罰法，元照，2 版，2017 年。

蔡志方，行政罰法釋義與運用解說，三民，2006 年。

蔡震榮、鄭善印，行政罰法逐條釋疑，新學林，2008 年。

專書論文

王美琴，水污染防治法有關按日連續處罰法律性質之研究，訴願案例研究彙編，第 5 輯，1993 年 6 月。

林明鏘，兩岸都（城）市計（規）劃法制之比較研究，新世紀經濟法制之建構與挑戰－廖義男教授六秩誕辰祝壽論文集，2002 年，頁 517-532。

洪家殷，水污染防治法上按日連續處罰之法律問題，訴願專論專輯─訴願新制專論系列之三，台北市訴願會編，2002 年 11 月。

黃啟禎，行政管制與行政制裁之區分及運用─以水土保持法為例，刑與思─林山田教授紀念論文集，2008 年。

劉惠文，行政法上連續處罰規定性質之研究－行政罰與行政執行之區別，臺中高等行政法院編，行政法實務研究（第五冊），2010 年 6 月。

期刊論文

王服清、戴鈞宏，論我國行政法規連續處罰之性質，科技法學論叢，第 5 期，2010 年 4 月。

李介民，水土保持的行政管制與限期改善─兼論最高行政法院 100 年度裁字第 2035 號裁定，法令月刊，第 63 卷第 6 期，2012 年 6 月。

李建良，水汙染防治法有關按日連續處罰規定之適用問題─以台北畜產公司排放廢水之處罰事件為例，台灣本土法學雜誌，第 7 期，2000 年 2 月。

李建良，二論水汙染防治法有關按日連續處罰規定之適用問題─最高行政法院 89 年判字第 2573 號判決及 89 年判字第 3415 號判決評釋，台灣本土法學雜誌，第 23 期，2001 年 6 月。

李建良，三論水汙染防治法有關按日連續處罰規定之適用問題─評析最高行政法院 90 年判字第 125 號及 186 號判決，台灣本土法學雜誌，第 44 期，2003 年 3 月。

李建良，行政罰法中「裁罰性不利處分」的概念意涵及法適用上之若干基本問題─「裁罰性不利處分」概念之提出，月旦法學雜誌，第 181 期，2010 年 6 月。

林明昕，裁罰性不利處分 vs.非裁罰性不利處分─兼評台北高等行政法院九十九年度訴字第一五二九號判決，興大法學，第 17 期，2015 年 5 月。

呂秉翰，大法官果能廓清「一行為不二罰」的真貌？－以釋字第六○四號解釋為中心，中央警察大學法學論集，第 16 期，頁 191-230。

洪家殷，我國現行法上連續處罰規定性質之檢討，月旦法學雜誌，第 33 期，1998 年 2 月，頁 74-80。

洪家殷，行政院版「行政罰法草案」有關處罰種類之探討，月旦法學雜誌，第 111 期，2004 年 8 月。

洪家殷，違規停車連續處罰相關問題之探討－以釋字第六○四號解釋為中心，月旦法學雜誌，第 129 期，2006 年 1 月，頁 179-196。

洪家殷，行政罰一行為與數行為問題之探討─以行政罰施行後之實務見解為中心，月旦法學雜誌，第 155 期，2008 年 4 月。

翁曉玲，論坡地管理之共同違法處罰與數行政罰競合之處理，台灣科技法律與政策論叢，第 3 卷第 4 期，2006 年 12 月。

翁曉玲，限期改正與法律保留—評最高行政法院 92 年度判字第 811 號判決與台北高等行政法院 90 年度訴字第 179 號判決，月旦法學雜誌，第 108 期，2004 年 5 月，頁 196-205。

宮文祥，環境汙染裁罰制度之實然與應然─試以美國水汙染法制度之設計提供我國就裁罰規範再思考之比較，法學

叢刊，第 224 期，2011 年 10 月，頁 25-61。

陳淑芳，限期改正之法律性質，台灣法學雜誌，第 165 期，2010 年 12 月，頁 131-135。

陳文貴，公法上「按日連續處罰」問題初探，法令月刊，第 55 卷第 2 期，2004 年 2 月。

許宏達、陳重光，水土保持法中「連續處罰」及「限期改正」制度之法律研究，中華水土保持學報，第 35 卷第 4 期，2004 年 12 月，頁 323-330。

黃茂榮，行政處罰的概念及其建置原則，植根雜誌，第 24 卷第 2 期，2008 年 2 月。

黃錦堂，以業者持續違規而直接駁回換照申請與比例原則－最高行政法院九八年度判字第二八一號判決評論，台灣法學雜誌，第 132 期，2009 年 07 月，頁 227-231。

黃啟禎，從行政作用之類型探討限期改正與行政罰法之關係-行政管制與行政制裁之區分及運用，「水土保持義務人相關法律疑義與對策分析學術研討會」論文集，行政院農業委員會水土保持局主辦，2007 年 11 月。

黃啟禎，行政法上按日連續處罰問題評議，公務人力發展中心發行，遊於藝電子報，第 101 期，2009 年 12 月。

葉俊榮，公害糾紛的處理與行政管制，環保與經濟，第 30 期，1992 年 1 月。

葉俊榮，環境問題的制度因應：刑罰與其他因應措施的比較與選擇，國立臺灣大學法學論叢，第 20 卷第 2 期，1991 年 6 月，87-114 頁。

葉俊榮，論環境政策上的經濟誘因：理論依據，國立臺灣大學法學論叢，第 20 卷第 1 期，1990 年 12 月，頁 87-111 頁。

葉俊榮，環境法上的「期限」：行政法院林園判決的微觀與巨視，法學叢刊，第 34 卷第 4 期，1989 年 10 月，頁 126-137。

程明修，若世界實有者，即是一合相－大法官釋字第 604 號解釋簡析，台灣本土法學雜誌，第 76 期，2005 年 11 月，頁 215-221。

彭鳳至，一事不二罰原則與「一行為不二罰原則」之辯證－為司法院釋字第 604 號解釋請命（上），司法周刊，第 1728 期，2014 年 12 月，頁 2-3。

彭鳳至，一事不二罰原則與「一行為不二罰原則」之辯證－為司法院釋字第 604 號解釋請命（中），司法周刊，第 1729 期，2014 年 12 月，2-3 頁。

彭鳳至，一事不二罰原則與「一行為不二罰原則」之辯證－為司法院釋字第 604 號解釋請命（下），司法周刊，第 1730 期，2015 年 1 月，頁 2-3。

蔡震榮，論按日連續處罰與怠金，法學講座，第 28 期，2004 年 7 月。

蔡震榮，由釋字六一二號解釋論不利益處分或裁罰性不利處分，台灣本土法學雜誌，第 88 期，2006 年 11 月。

蔡震榮，限期改善與一行為不二罰，法令月刊，第 62 卷第 4 期，2011 年 4 月，頁 73-82。

劉建宏，行政罰法上「單一行為」概念之探討─一行為違反數個行政法上義務規定而受處罰者，月旦法學雜誌，第 152 期，2008 年 1 月。

劉建宏，大法官釋字第 604 號解釋之研究－行政罰法上「單一行為」概念之探討，臺北大學法學論叢，第 64 期，2007 年 12 月，頁 1-23。

蕭文生，裁量濫用，月旦法學教室，第 51 期，2007 年 12 月，頁 22-23。

研究報告

郭介恆，水污染防治法罰則修法研議計畫，行政院環保署委託研究計劃（計畫編號：EPA-100-G106-02-238），2011 年 12 月。

學位論文

王紹銘，環境行政管制手段之研究─以「按日連續處罰」制度之合憲性為中心，臺北大學法律學研究所碩士論文，2008 年。

余珊蓉，行政罰法基本問題之研究，臺灣大學國家發展研究所碩士論文，2004 年。

李宗祐，環境法上限期改善制度─以土壤及地下水污染整治法為例，東海大學法律學系碩士論文，2016 年。

李羿霖，限期改正措施的運作及其法律問題之研究，靜宜大學法律學系碩士，2015 年。

杜怡蓁，行政制裁手段之研究－以「連續處罰」制度為中心，高雄大學法律學系碩士論文，2015 年。

杜麗芬，環境法上按日連續處罰問題之探討，東海大學法律研究所碩士論文，2006 年。

林俊霖，環境法中限期改善制度之研究，國立成功大學法律學系碩士論文，2013 年。

洪韻婷，論行政法上一行為不二罰原則之適用，成功大學法律學系碩士論文，2009 年。

胡家瑋，一行為不二罰原則與違規停車連續處罰--以大法官釋字第 604 號為中心，中正大學財法所碩士論文，2008 年。

邱鼎翔，水土保持法上限期改正及按次分別處罰之研究，中正大學法學院碩士論文，2010 年。

許惠雯，環境法上按日連續處罰之定位及其執行之探討，東海大學法律學系碩士論文，2015 年。

許逸明，行政法上連續處罰之研究，中央警察大學法律學研究所碩士論文，2007 年。

許哲維，論一行為不二罰原則於我國行政罰之適用，暨南國際大學公共行政與政策學系，2008 年。

陳建江，環境法上按日連續處罰裁處程序相關問題之研究，中正大學法律學研究所碩士論文，2010 年。

陳文貴，違反行政義務行為之處罰競合關係研究，臺北大學法律學系博士論文，2012 年。

陳毓民，土壤及地下水污染整治法上關於土地所有人整治責任之研究，東海大學法律學研究所碩士論文，2010 年。

許逸明，行政法上連續處罰之研究，中央警察大學法律學研究所碩士論文，2007 年。

張梅蘭，消防法上行政裁罰之研究─以裁罰對象、限期改善、連續處罰為中心，中正大學法律學研究所碩士論文，2014 年。

黃于庭，環境法上連續處罰之研究，中國文化大學法律學系碩士論文，2017 年。

黃義偉，行政法上一行為不二罰原則理論與實務之研究，台北大學法律學系碩士論文，2009 年。

蔡維哲，論秩序罰罰鍰與執行罰之區別─兼論行政強制執行體系之再架構，中央警察大學警政研究所碩士論文，1997 年。

鄭國榮，行政罰法「重複處罰禁止」之研究，臺灣大學國家發展研究所碩士論文，2004 年。

賴怡雯，行政法上狀態責任之研究─以建築法為例，政治大學法律學研究所碩士

論文，2010 年。

賴建豪，一行為不二罰原則在行政罰上之適用，淡江大學公共行政學系碩士論文，2008 年。

戴鈞宏，我國環境保護法規中連續處罰之研究，雲林科技大學科技法律研究所碩士論文，2010 年。

《德文文獻》


- Blum, Heribert/ Gassner, Kathi/ Seith, Sebastian. Ordnungswidrigkeitengesetz. Archiv für kriminologie; 2016, 238(3/4):151-152.
- Bockelmann, Paul. Straßenverkehrsrecht : Straßenverkehrsordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen und Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung in der ab 1. März 1971 geltenden Fassung, Straßenverkehrsgesetz, Pflichtversicherungsgesetz, Ordnungswidrigkeitengesetz ; Textausgabe mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung. München: Dt. Taschenbuch-Verl., Sonderausg., 5. Aufl., 1971.
- Bockelmann, Paul. Straßenverkehrsrecht : Straßenverkehrs-Ordnung mit farbiger Wiedergabe der Verkehrszeichen und Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung, Straßenverkehrsgesetz, Pflichtversicherungsgesetz, Ordnungswidrigkeitengesetz, Verwarnungsgeldkatalog und Bußgeldkataloge ; Textausg. mit ausführlichem Sachregister und einer Einführung. München: Dt. Taschenbuch-Verl., 1981. 20., neubearb. Aufl., Stand: 1. September 1981.
- Bohnert, Joachim. OWiG : Kommentar zum Ordnungswidrigkeitengesetz Ordnungswidrigkeitengesetz. München: Beck, 3. Aufl., 2010.
- Bohnert, Joachim/ Krenberger, Benjamin/ Krumm, Carsten. Ordnungswidrigkeitengesetz: Kommentar (Gelbe Erläuterungsbücher). München: Beck, 4. Aufl., 2016.
- Drathjer, Johann. Die Abschöpfung rechtswidrig erlangter Vorteile im Ordnungswidrigkeitengesetz. Köln [u.a.]: Heymann. 1997.
- Göhler, Erich. Gesetz über Ordnungswidrigkeitengesetz. München: Beck, 10., neubearb. Aufl., 1992.
- Göhler, Erich. Das Ordnungswidrigkeitengesetz : Vorträge, gehalten am 3. Nov. 1967 zu Berlin. Berlin: Bund gegen Alkohol im Straßenverkehr, Landessektion Berlin, 1967.
- Jescheck, Hans-Heinrich. Strafgesetzbuch: mit Einführungsgesetz, Wehrstrafgesetz, Wirtschaftsstrafgesetz, Betäubungsmittelgesetz, Versammlungsgesetz, Auszügen aus dem Jugendgerichtsgesetz und dem Ordnungswidrigkeitengesetz sowie anderen Vorschriften des Nebenstrafrechts. München Dt. Taschenbuch-Verl., München: Beck. Sonderausg. 38. Aufl., Stand 1, 2002.
- Kaiser, Volker. Verbandssanktionen des Ordnungswidrigkeitengesetzes: ein Beitrag zu einem Teilproblem der Wirtschaftskriminalität. Münster (Westfalen), Univ., Diss., 1974.
- Kleinewefers, Herbert. Ordnungswidrigkeitengesetz: Kommentar. München: Vahlen, 5., völlig neubearb. Aufl., 1975.
- Kleinknecht, Theodor/ Müller, Hermann. Kommentar zur Strafprozeßordnung und zum Gerichtsverfassungs- u. Ordnungswidrigkeitengesetz : KMR ; Kostenanhang. 2. Gerichtsverfassungsgesetz, Ordnungswidrigkeitengesetz, verschiedene Nebengesetze und Kostenanhang. Darmstadt : Stoytscheff, neubearb. und erw. Aufl., 1966.
- Lemke, Michael/ Mosbacher, Andreas. Ordnungswidrigkeitengesetz: Kommentar. Heidelberg Müller, 2. neu bearb. Aufl., 2005.
- Lemke, Michael. Heidelberger Kommentar zum Ordnungswidrigkeitengesetz. Heidelberg: Müller. 1999.
- Malies, Jürgen. Das Verfahren der Verwaltungsbehörde nach dem

Ordnungswidrigkeitengesetz : Mustersammlung mit Erläuterungen. Berlin: Verwaltungsakad., 1979.

- Maschke, Günter. Aufsichtspflichtverletzungen in Betrieben und Unternehmen: die Sanktionierung von Verstößen gegen die Aufsichtspflicht in Betrieben und Unternehmen nach § 130 des Ordnungswidrigkeitengesetzes unter besonderer Berücksichtigung des Zusammenhanges zwischen Tathandlung und Zuwiderhandlung. Berlin: Berlin-Verl. Spitz [u.a.], 1997.
- Rasehorn, Theo. Das Ordnungswidrigkeitengesetz und seine Kritiker. JuristenZeitung. 24(5/6):179-180; J. C. B. Mohr (Paul Siebeck), 1969.
- Schefold, Christian. Compliance-Prävention belohnen: einfache Ergänzungen des Ordnungswidrigkeitengesetzes genügen; ein neues 'Verbandssanktionenrecht' ist kontraproduktiv. ZRFC: risk, fraud & compliance; Prävention und Aufdeckung in der Compliance-Organisation. Vol 9 Issue 6, p276-281, 12/2014.
- Schröder, Horst. Strafgesetzbuch : mit Einführungsgesetz, Wirtschaftsstrafgesetz, Ordnungswidrigkeitengesetz im Auszuge, Straffreiheitsgesetz 1970 und anderen Vorschriften des Nebenstrafrechts ; im Anhang: Zweites Strafrechtsreformgesetz mit der ab 1.1.1975 geltenden neuen Fassung des Allgemeinen Teils des StGB) ; Textausgabe. München: Dt. Taschenbuch-Verl., 1974. 14. Aufl., Sonderausg., Stand 1., 1974.
- Schuff, Karl. Bayerische Ausführungsbestimmungen zum Ordnungswidrigkeitengesetz: Vorschriftensammlung Praxis der Kommunalverwaltung. Wiesbaden : Kommunal- und Schulverlag, 2012.
- Soiné, Michael. OWiG. Ordnungswidrigkeitengesetz. Archiv für Kriminologie., Vol. 239 Issue 5, p215-215. 1/2p, Mai/Jun2017.
- Strahlendorf, Hans-Rainer. Eingriffsrechte der Polizei : [Eingriffsrechte dargestellt nach dem Polizeirecht, der Strafprozessordnung und dem Ordnungswidrigkeitengesetz ; mit dienstkundlichen Hinweisen für die Praxis und über 100 Beispielen aus der Praxis der Polizei ; Lehr- und Arbeitsbuch]. Berlin: LTS, 15. Aufl., 1999.
- Volker, Kaiser. Verbandssanktionen des Ordnungswidrigkeitengesetzes: ein Beitrag zu einem Teilproblem der Wirtschaftskriminalität. Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 1975.
- Waβmer, Martin Paul. Ordnungswidrigkeitengesetz. Archiv für Kriminologie. Vol. 238 Issue 3/4, p151-152, sep/okt2016.
- Weigend, Thomas. Strafgesetzbuch: mit Einführungsgesetz, Völkerstrafgesetzbuch, Wehrstrafgesetz, Wirtschaftsstrafgesetz, Betäubungsmittelgesetz, Versammlungsgesetz, Auszügen aus dem Jugendgerichtsgesetz und dem Ordnungswidrigkeitengesetz sowie anderen Vorschriften des Nebenstrafrechts; Textausgabe mit ausführlichem Sachregister. Dtv Deutscher Taschenbuch; Auflage: 51. Aufl., 2013.
- Wiegand, Günter. Leitfaden zum Ordnungswidrigkeitengesetz: Mit Verfahrensdarstellung d. Verwaltungsbehörde, Formblättern m. Mustereintragungen, Ordnungswidrigkeitengesetz u. ergänzenden Rechtsvorschriften. Köln: Deutscher Gemeindeverl., 1968.

Wiegand, Günter. Leitfaden zum Ordnungswidrigkeitengesetz : systematische Darstellung des Verfahrens bei den Verwaltungsbehörden mit Ordnungswidrigkeitengesetz und ergänzenden Rechtsvorschriften. Köln: Dt. Gemeindeverl. [u.a.], neubearb. Aufl., 1975.

# 核電廠除役各階段公民參與模式及民意溝通之研究
# Research on Citizen Participation Model and Public Opinion Communication in Different Stages of Decommissioning of Nuclear Power Plants

計畫編號：107-NU-E-128-001-NU
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

核能發電在台灣啟用已近 40 年，新政府上台後已提出各項政策規劃。在既定的政策目標下，我國核能一廠、二廠、三廠的運轉執照分別將於 107 年 12 月、110 年 10 月、113 年 7 月屆滿並陸續展開除役。

在落實除役政策面前，如何落實核電廠的安全監都以及積極面對核電廠除役及核廢料處理等問題，將是主管機關未來面臨的重要任務。核電廠除役(Decommission)以及核廢料處理(Radioactive Waste Management)既是科技層面議題，也是社會大眾高度關注的議題。在核電廠除役過程中，如何加強公眾參與以及社會溝通，爭取民眾的支持與認同，以順利推展核電廠除役等作業，進而達成非核家園的目的，既是主管機關的重要目標，也是本研究嘗試瞭解以及建議主管機關的重點方向。

為落實核電廠除役資訊管制，原能會已於官網建置「核電廠除役管制」專區，將核電廠除役安全管制相關資訊做充分揭露；另為強化公眾參與，原能會也函請地方政府提供意見，並分別於 105 年 9 月舉辦「核一廠除役計畫暨乾式貯存設施訪查活動」、105 年 10 月舉辦「核一廠除役計畫審查地方說明會」及「原能會公眾參與平台會議」，以求擴大公眾參與、加強社會溝通並聽取相關建言。

本研究在主管機關目前已持續推動的各項核電廠除役公民參與措施基礎上進行不同方式調查，分別於 2018 年 10 月及 12 月針對民眾進行電話訪問調查。除此之外，在調查過程中同時進行網路民意蒐集，以及不同類型學者專家深度訪談。其目的在於比較核電廠除役過程中，主管機關面對全國民眾或在地民眾時，採取的不同溝通方式以及公眾參與角色。

根據調查發現以下幾點結論：

1. 民眾風險認知偏向風險趨避特性比例較高，溝通時較偏好得知政府如何處置核廢料以及環境輻射偵測資訊。
2. 核電廠除役過程，民眾最信任核能專家、原能會的說法，其次則是環保團體，第三才是台電公司。
3. 民眾對原能會在核能安全管制能力信任度高，且對其核能安全管制表現滿意度較不滿意度高，但整體而言，仍自評相關除役資訊不足。
4. 多數民眾偏向認為無論是高低階核廢料，皆以最終貯置場為最佳選擇。
5. 短片、演習的宣導認知效果較佳，核能國際官方或研究機構信任程度較高。

關鍵字：核能、核電廠除役、社會溝通、公民參與

## Abstract

Nuclear power generation has been in operation in Taiwan for nearly 40 years. After the new government took office, various policy plans have been proposed. Under the established policy objectives, the operating licenses of nuclear energy plant No. 1, No. 2, and No. 3 will expire in December 2018, October 2021 and July 2024, respectively, and will be decommissioned.

In the face of implementing the decommissioning policy, how to implement the safety supervision of nuclear power plants and actively face the problems of nuclear power plant decommissioning and nuclear waste disposal will be an important task for the competent authorities in the future. Decommission and Radioactive Waste Management are both issues of science and technology and a topic of great concern to the public. In the process of decommissioning of nuclear power plants, how to strengthen public participation and social communication, to win the support and recognition of the people, to smoothly promote the decommissioning of nuclear power plants, and to achieve the purpose of non-nuclear homes is not only an important goal of the competent authorities, but also this research. Try to understand and suggest the focus of the competent authority.

In order to implement the decommissioning information control of nuclear power plants, the former will have established a “Nuclear Power Plant Deregulation Control Zone” on the official website to fully disclose the information on nuclear power plant decommissioning safety control. In addition, to strengthen public participation, the original can also The local government is invited to provide advice. In September, 2016, the "Nuclear Plant Decommissioning Plan and Dry Storage Facilities Visiting Activities" was held. In October, 2016, the "Nuclear Plant Decommissioning Plan Review Local Meeting" was held. "The original public participation in the platform meeting" is to expand public participation, strengthen social communication and listen to relevant suggestions.

This study conducted different types of investigations on the basis of the decommissioning citizen participation measures of various nuclear power plants that the competent authorities have continuously promoted. The telephone interviews were conducted in October and December 2018 respectively. In addition, in the course of the investigation, online public opinion collection and in-depth interviews with different types of scholars were conducted. The purpose is to compare the different communication methods and public participation roles that the competent authorities take when facing the national people or local people in the

process of decommissioning of nuclear power plants.

According to the investigation, the following conclusions were found：

1. The public risk perception bias has a higher proportion of risk avoidance characteristics. When communicating, it prefers to know how the government handles nuclear waste and environmental radiation detection information.
2. In the decommissioning process of nuclear power plants, the people trust the nuclear energy experts and the original energy society, followed by the environmental protection groups, and the third is the Taipower Company.
3. The public has a high degree of trust in the nuclear safety control capability and is more dissatisfied with its nuclear safety safety performance. However, overall, the relevant self-reviewed decommissioning information is insufficient.
4. Most people prefer to use the final storage yard as the best choice for both high and low nuclear waste.
5. The cognition of short films and exercises is better, and the official or research institutions of nuclear energy have a higher degree of trust.

Key Words：Nuclear Power、Nuclear Power Plant Decommission、Social Communication、Public Participation

## I. 前言

核能發電在台灣啟用已近 40 年，新政府上台後已提出各項政策規劃。在既定的政策目標下，我國核能一廠、二廠、三廠的運轉執照分別將於 107 年 12 月、110 年 10 月、113 年 7 月屆滿並陸續展開除役。

Lawrence(2006)指出，所謂的核電廠除役，係指將與核設施或系統相關的放射性或非放射性有害物質移除，以便允許核電廠設施可以解決管制並將廠址釋出做為其他用途。在除役過程中，必須做到對一般工作人員、民眾以及環境加以保護等作為。從國際的核電廠營運經驗來看，核電廠除役的可能原因包括以下列六大類別，至於我國即將面臨除役的核一廠則是屬於第二種：營運屆期：

1. 安全疑慮(Safety Issues，例如：德國的 Greifwald 1-4 等)
2. 營運屆期(Program Completed，例如：我國核一廠等)
3. 技術障礙(Obsolete Technology，例如：法國 Phenix 等)
4. 意外事故(Accident or Unexpected Events，例如：日本福島核一廠等)
5. 運轉不經濟(Uneconomic Operation，例如：日本 Hamaoka 1-2 等)
6. 政府政策改變(Government Policy Change，例如：瑞典 Barseback 1-2 等)

在落實除役政策面前，如何落實核電廠的安全監都以及積極面對核電廠除役及核廢料處理等問題，將是主管機關未來面臨的重要任務。核電廠除役(Decommission)以及核廢料處理(Radioactive Waste Management)既是科技層面議題，也是社會大眾高度關注的議題。在核電廠除役過程中，如何加強公眾參與以及社會溝通，爭取民眾的支持與認同，以順利推展核電廠除役等作業，進而達成非核家園的目的，既是主管機關的重要目標，也是本研究嘗試瞭解以及建議主管機關的重點方向。

依據時程規劃，我國第一座核能電廠：核一廠，即將展開正式的電廠除役作業，其相關準備工作可概分為二大工作項目，包括：

1. 除役前置準備階段(101-107 年)

由台電公司進行廠址歷史及特性調查、除役策略及作業研究，進行除役規劃及提報除役計畫書。

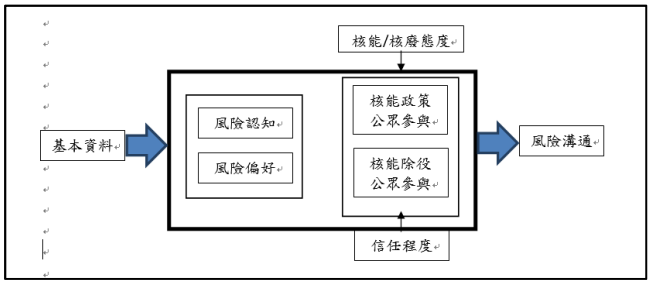
2. 執行除役工作階段(108-132 年)

除役工作包括將核子反應器內的用過核子燃料移出至用過核子燃料池、全系統除污與個別系統除污、將用過核子燃料自用過核子燃料池移除(移至暫貯中心或乾式貯存設施)、反應器壓力槽及大型組件拆除、切割與移除、廠區混凝土表面的除污與廠房的拆除、有害及放射性廢棄物之貯存與清運、執行廠址環境輻射偵測並完成廠址復原。原能會在除役工作期間將執行各項作業的檢查，以確保除役工作之安全。

為落實核電廠除役資訊管制，原能會已於官網建置「核電廠除役管制」專區，將核電廠除役安全管制相關資訊做充分揭露；另為強化公眾參與，原能會也函請地方政府提供意見，並分別於 105 年 9 月舉辦「核一廠除役計畫暨乾式貯存設施訪查活動」、105 年 10 月舉辦「核一廠除役計畫審查地方說明會」及「原能會公眾參與平台會議」，以求擴大公眾參與、加強社會溝通並聽取相關建言。

## II. 主要內容

本研究擬進行 2 次電話訪問調查，問卷架構以國科會補助 100 年度調查計畫「核能安全民意調查研究報告」為藍本，並參照國內外關於溝通之概念進行修正，經研究團隊組織問卷討論會後，本年度問卷架構初步規劃如下圖：




問卷架構圖

資料來源：本研究繪製

其中，核能政策公眾參與構面，參考原能會目前所推動相關公眾參與計畫、平台、資訊公開等內容進行設計；核能除役公眾參與構面，參考國外除役經驗、核一廠除役公開資訊進行設計；風險認知及風險偏好構面，參考文獻回顧中有關風險認知的定義進行設計；風險溝通題組則參考本計畫過去長期追蹤題組進行設計，關心民眾信任的溝通管道以及溝通對象之排序。

除此之外，本研究除了長期關心台灣民眾的核能態度，今年也納入民眾對核廢料處置態度題組；本研究也

關心民眾對於核能資訊的信任程度以及對原能會在核安管制能力上的信任程度。

## III. 結果與討論

民眾風險認知偏向風險趨避特性比例較高，溝通時較偏好得知政府如何處置核廢料以及環境輻射偵測資訊。

調查結果顯示，多數民眾在面臨風險議題抉擇時，即便存在較高的期望收益選項，民眾仍更偏好選擇風險較低的結果。面對這類風險認知特性的民眾，政府在溝通過程中應多向民眾展示對於核能安全管制作為的能力，以便提升民眾對政府的信任感。

另一方面，民眾也更偏好在政府推動核一廠除役的過程中，優先得到核廢料最終處置選項以及除役過程中環境輻射偵測結果。從深度訪談以及網路意見蒐集結果來看，無論我國最終能源政策往哪個方向走，核廢料的處置以及環境輻射的偵測都是無可迴避的問題。政府越提早做好準備並備妥相關的論述，民眾對政府管制核能安全能力的信心便會越高。

核電廠除役過程，民眾最信任核能專家、原能會的說法，其次則是環保團體，第三才是台電公司。

調查結果顯示，關於核電廠除役過程或是核能相關資訊，均有超過半數民眾最信任核能專家的說法，其次依序為原能會、環保團體、台電公司。此一調查結果反應在核能相關議題中，一方面對專家仍然抱持最高的信任，另一方面也希望能有更廣泛的資訊來源，避免偏聽。

調查結果顯示，民眾認為在核電廠除役過程中，最容易被忽略的就是全國民眾的意見。透過深度訪談可以發現，目前台電公司以及原能會在溝通核能相關議題時的交流對象仍以在地民眾或是積極的社團或組織為主，對於核安議題較不感興趣的一般全國民眾，一方面相對不易獲得核安相關資訊，另一方面全國民眾的意見也比較不容易反應。

民眾對原能會在核能安全管制能力信任度高，且對其核能安全管制表現滿意度較不滿意度高，但整體而言，仍自評相關除役資訊不足。

調查結果顯示，超過五成受訪者表示信任原能會在核能安全管制上的能力，滿意原能會究核能安全獨立管制表現的比例也超過四成，且較不滿意度高。但整體而言，仍有接近八成民眾認為就核一廠除役的相關資訊來看仍然不足。

透過學者專家以及地方民眾的深度訪談顯示，其實相當多民眾容易將許多不同的核能資訊混淆在一起，例如：核電廠年限、除役年限、核廢料暫時貯存、核廢料永久處置、環境輻射與核能電廠輻射等。民眾一旦資訊混淆，就很容易受到錯誤資訊的引導，從而產生對政府機關不利或不好的印象。

多數民眾偏向認為無論是高低階核廢料，皆以最終貯置場為最佳選擇

調查結果顯示，多數民眾偏向認為無論是高低階核廢料，皆以最終貯置場為最佳選擇，其次則是在核電廠所在地室內貯存。

另一方面，透過原能會核一廠除役公民參與會議紀錄資訊顯示，部分環保團體認為將核廢料運至境外處置(無論是運到北韓或是運回美國)，也是一種可能的選項。

然而，專家深度訪談結果也反映一個情形，無論中央政府決定以哪一種方式來解決，均應向民眾坦誠說明相關成本效益，並爭取認同與支持。在對民眾做社會溝通或是邀請民眾進行公民參與時，政府機關不應迴避擬定方案的責任，避免遭遇批評時顯得措手不及，進而損傷自身的信任感。

短片、演習的宣導認知效果較佳，核能國際官方或研究機構信任程度較高

調查結果顯示，可能受限於核能本身的議題特性，超過六成民眾仍對原能會的各項溝通宣導感到陌生。在已知的項目當中，拍攝宣導短片、進行核安演習的認知程度較高。

從內容及資訊管道來看，民眾對核能的國際官方或研究機構信任程度較高。另一方面，也許是因為今年遭遇地方選舉競爭激烈，民眾對於媒體報導的信任度呈現下滑。

而根據深度訪談結果來看，核一廠除役的溝通與公民參與形式，可分為針對全國民眾的媒體宣導、網站資訊公開、網路影片或直播；以及針對地方民眾的說明會、座談會、園遊會，也可參考過去反核公民團體使用過的影展、公民咖啡館等。

在溝通的對象，除了針對在地感興趣的民眾以外，也應思考在假日辦理相關活動，增加年輕世代參與的機會，兼顧世代正義。

## IV. 結論

而根據以上研究結論，研究嘗試提出以下建議：

責成台電公司持續加強核電廠除役社會溝通與公民參與

調查結果顯示，在核一廠正式除役之後，對參與核電廠除役過程有興趣的民眾比例上升到接近三成。原能會身為管制機關，應當責成台電公司持續加強核電廠除役社會溝通與公民參與方式，增加社會認同與信任。

**核電廠除役社會溝通與公民參與時間應兼顧平假日**

過去的社會溝通與公民參與時間多以平日時段為主，許多民眾(特別是年輕族群)受限於上班族的身分，較不易直接參與相關過程。然而核電廠除役時間長達 25 年，無論是核廢料處置、核電廠設備拆除、場地復原與產業規劃等，年輕世代預期受到的影響時間最長，相關活動的辦理應思考兼顧平假日，以便讓不同世代民眾皆有參與機會。

**善用網路媒體推動核電廠除役社會溝通與公民參與**

目前較常使用來座核電廠除役社會溝通與公民參與的形式，除了傳統面對面的說明會、座談會以外，電子與平面媒體比例甚高。然而，網路的發展速度很快，政府機關除了在官方網站定期公告正確可靠的資訊內容以外，也應善用網路特性，將部分溝通內容、影片上網，甚至培訓相關講師、代言人，以網路直播方式跟民眾做更快速直接的對話，以提高效果。

核電廠除役社會溝通與公民參與提供環境輻射偵測與核廢料資訊

在進行核電廠除役社會溝通與公民參與活動時，政府機關應是先針對民眾感興趣主題做好相關準備，例如：

核廢料最終處置方案、環境輻射偵測計畫、核電廠設備拆除計畫、核電廠所在地除汙情形等等。事先備妥相關資訊，才能在溝通時有笑回答並取信於民眾。

除此之外,在地民眾針對核電廠除役時間長達 25 年一事，勢必也會對過去曾經有過的回饋金方案有所期待，若政府對此毫無回應，可能會讓部分有預期心態的民眾覺得反感。

**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**

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


**中文資料**

謝明瑞，2006。展望理論之探討。

謝明瑞，2007。行為經濟學理論的探討。

梁世武，2014。風險認知與核電支持度關聯性之研究： 以福島核能事故後台灣民眾對核電的認知與態度為例。

劉淑華，2015。公民參與低碳城市建構可行性之研究。

林美秀，2016。台灣公民參與政策規劃之現況分析，國立台灣大學社會科學院政治學系政府與公共事務碩士在職專班。

張瓊之，2017。荷蘭能源轉型與參與式能源治理作法-荷蘭政府在擬定國家能源發展目標與政策過程中，將公眾參與決策機制納入程序，目的為開放公民參與討論，藉由多元觀點檢視可行作法，回饋至能源政策規劃之修訂。

徐昕煒，2017。德國 2050 氣候行動計畫及其公民參與機制-透過創新的廣泛溝通過程，擬定減碳計畫，工業技術研究院綠能與環境研究所。

**英文資料**

Sherry R Arnstein,1969.A Ladder of Citizen Participatio

Margot Hurlbert & Joyeeta Gupta,2015.The split ladder of participation：A diagnostic, strategic,and evaluation tool to assess when participation is necessary.

Ann S;Peterson, J Scott 2004. Congressional Actions on Nuclear Energy： Do They Follow Public Opinion?

Sarah Elise Wiliarty2013. Nuclear Power in Germany and France.

**網路資料**

財團法人台灣環境資訊協會

http://e-info.org.tw/column/cssconf/2004/cs04060401.htm

黎家維，2013。美國核電廠除役規範與實務之借鏡。

https://www.npf.org.tw/1/12177

鄭淑芳，2015。國外風險感知研究理論回顧與述評 https://read01.com/oOkx30.html#.WuqFFC5uYdU

趙衛武，2015。淺談美國核能管制委員會資訊公開。

https://www.aec.gov.tw/webpage/info/files/index_04_1-39.pdf

賴慧玲，2016。烏特勒支能源政策之城市對話-三階段的市民對話過程。https://www.oranjeexpress.com/2016/08/17/%E7%83%8F%E7%89%B9%E5%8B%92%E6%94%AF%E8%83%BD%E6%BA%90%E6%94%BF%E7%AD%96%E4%B9%8B%E5%9F%8E%E5%B8%82%E5%B0%8D%E8%A9%B12/

柯妤萱，2016。公民入股發電廠 丹麥風電合作社

http://e-info.org.tw/node/113206

北極星電力網，2016。一分鐘看懂各國如何依法治「核」。

https://read01.com/yjQEeO.html#.WvK1V6SFMdU

最江蘇，2016。丹麥：全球「綠色發展」領跑者是如何「煉」成的？

https://read01.com/4xREMJ.html#.Wvjh6KSFMdV

劉允華，2017。法國邀人民辯論、提案，把公民白皮書送進議會 https://g0v.news/%E6%B3%95%E5%9C%8B%E9%82%80%E4%BA%BA%E6%B0%91%E8%BE%AF%E8%AB%96-%E6%8F%90%E6%A1%88-%E6%8A%8A%E5%85%AC%E6%B0%91%E7%99%BD%E7%9A%AE%E6%9B%B8%E9%80%81%E9%80%B2%E8%AD%B0%E6%9C%83-a9c925af0e79

劉致昕，2017。【法國現場】一個 600 億開發案的公民參與之旅，及台灣被遺忘的「民主工程」。https://g0v.news/%E6%B3%95%E5%9C%8B%E7%8F%BE%E5%A0%B4-%E4%B8%80%E5%80%8B-600-%E5%84%84%E9%96%8B%E7%99%BC%E6%A1%88%E7%9A%84%E5%85%AC%E6%B0%91%E5%8F%83%E8%88%87%E4%B9%8B%E6%97%85-%E5%8F%8A%E5%8F%B0%E7%81%A3%E8%A2%AB%E9%81%BA%E5%BF%98%E7%9A%84-%E6%B0%91%E4%B8%BB%E5%B7%A5%E7%A8%8B-ac60dcd7c49d

周于萱，2017。德國能源轉型中的公民身影(上)-歷史文化如何促成能源轉型

https://www.huf.org.tw/essay/content/4239

公視：我們的島，2017。德國的能源轉型怎麼走

http://ourisland.pts.org.tw/content/ortwin-renn-%E5%B0%88%E8%A8%AA-%E5%BE%B7%E5%9C%8B%E7%9A%84%E8%83%BD%E6%BA%90%E8%BD%89%E5%9E%8B%E6%80%8E%E9%BA%BC%E8%B5%B0%E4%B8%8A#overlay-context=search/google/%25E6%258B%25BF%25E5%259B%259E%25E4%25B8%2580%25E5%25BA%25A6%25E9%259B%25BB

黃郁棻，2017。美國能源及氣候變遷政策進程之啟示。

https://portal.stpi.narl.org.tw/index/article/10320

林美惠，2017。借鏡丹麥德國北海道風力發電經驗 以民間力量創新社區再生。

https://www.csronereporting.com/topics/show/4341

# 跨國核電廠除役管理個案分析及利害關係人之研究
# Transnational Decommissioning Management and Stakeholder Analysis of the First Nuclear Power Plant in Taiwan

計畫編號：MOST-107-NU-E-305-001-NU
計畫主持人：張四明
e-mail：ssuming@gmail.com
執行單位：國立臺北大學公共行政暨政策學系

## 摘要

2016 年台灣發生第三度政黨輪替，新政府上台後提出 2025 非核家園之政策規劃，我國核能一廠、二廠、三廠的運轉執照將陸續展開除役。核電廠除役(Decommission)以及核廢料處理(Radioactive Waste Management)不僅是科技層面的議題，也經常是社會大眾高度關注的公共政策議題。由於核電廠除役過程充斥著多種不確定因素，目前顯露的信任危機更加凸顯容納利害關係人參與的重要性。

本研究選擇台灣核能一廠除役過程為實證個案，透過利害關係人分析與網絡觀點之理論視角，探討核電廠除役過程中主要利害關係人之間的互動關係與政策立場。預期研究成果可協助主管機關決策者了解及管理核能一廠除役過程利害關係人的認知與立場。

關鍵詞：核電廠除役、核廢料處理、利害關係人參與

## Abstract

The third party-turnovers in Taiwan happened once again in 2016, and the new government had announced 2025 non-nuclear home policy plan. According to the plan, the operating licenses for current three nuclear power plants will be terminated and go into the decommissioning process one after the other. Both decommission and radioactive waste management are not only scientific and technical issues but they are highly politicized policy issues.

Stakeholder participation has become very important and proven to be useful since the decommissioning process would encounter lots of uncertainties and public trusts in nuclear energy also diminish tremendously in Taiwan. This study utilizes stakeholder analysis and network theory approach to explore those key stakeholders, their policy standings and interactions during the decommissioning process of nuclear power plant I. The findings would provide policy makers with a better understanding of the policy awareness and standings for those key stakeholders.

Keywords: Decommissioning, Radioactive Waste Management, Stakeholder Participation

## I. 前言

2016 年台灣發生第三度政黨輪替，新政府上台後提出 2025 非核家園之政策規劃，依據政府的政策核能一廠、二廠、三廠的運轉執照屆滿將陸續展開除役。核電廠除役(Decommission)以及核廢料處理(Radioactive Waste Management)不僅是科技層面的議題，也經常是社會大眾關注且具有高度政治的爭議。由於核電廠除役過程充斥著多種不確定因素，目前台灣社會顯露的信任危機，更加凸顯容納利害關係人參與的重要性。

從落實公共政策執行之公民參與(citizen participation)而言，在未來核電廠除役過程中，如何加強民眾參與以及社會溝通，爭取民眾的支持與認同，以順利推動核電廠除役等作業，進而達成 2025 非核家園的目標，將是主管機關未來面臨的重要任務，也是本計畫嘗試瞭解以及建議主管機關的研究重點。本研究選擇台灣核能一廠為實證個案，透過利害關係人分析與網絡觀點之理論視角，探討核電廠除役過程中主要利害關係人之間的互動關係與政策立場。預期研究成果可協助主管機關決策者了解及管理核能一廠除役過程利害關係人的認知與立場。

II. 主要內容

2016 年台灣發生第三度政黨輪替，新政府上台後提出 2025 非核家園之政策規劃。在政府既定的政策目標下，我國核能一廠、二廠、三廠的運轉執照分別將於 2018 年 12 月、2021 年 10 月、2024 年 7 月屆滿並陸續展開除役。從國際的核電廠營運經驗來看，核電廠除役可能的原因包括：(1)安全疑慮、(2)營運屆期、(3)技術障礙、(4)意外事故、(5)運轉不經濟、以及(6)政府政策改變等六大類（Boing，2006）；我國即將面臨除役的三座核能電廠，大致屬於第二種情況- 營運屆期。

依據時程規劃，我國第一座核能電廠- 核一廠 2018 年 12 月運轉執照屆滿，展開正式的電廠除役作業，其相關準備可概分為二大工作項目：(1)除役前準備階段，及(2)執行除役工作階段（2019~2043 年）。未來一系列的除役工作包括：將核子反應器內的用過核子燃料移出至用過核子燃料池、全系統除污與個別系統除污、將用過核子燃料自用過核子燃料池移除(移至暫貯中心或乾式貯存設施)、反應器壓力槽及大型組件拆除、切割與移除、廠區混凝土表面的除污與廠房的拆除、有害及放射性廢棄物之貯存與清運、執行廠址環境輻射偵測並完成廠址復原。行政院原子能委員會（以下簡稱為原能會）在除役工作期間將執行各項作業的檢查，以確保除役工作之安全。

策略管理學者 Edward Freeman 最早提出利害關係人途徑(stakeholder approach)，利害關係人係指：「所有受到企業影響的，或是能夠影響企業達成組織目標的團體與個人」(Freeman，1984：25)。公共政策分析學者 William Dunn（1994：85）指出：能夠影響政府決策或者受到政府決策影響的個人或團體，其與該項政策的利益或損害攸關，因此都統稱為政策利害關係人(policy stakeholders)。

其後，Brinkerhoff 和 Crosby（2002：141）定義利

害關係人為：那些能夠影響組織目標達成，或者受到組織目標達成影響的個人或團體。在核能及核廢料管理政策的領域，利害關係人通常界定為那些與核電廠除役決定利益攸關或受到影響的個人或組織（IAEA，2002）。顯見利害關係人涵蓋的範圍至為廣泛，包括直接或間接受到影響、有形或無形、可能有利益或損害攸關的團體與個人都算在內。

應用利害關係人分析途徑，除了指認誰是主要利害關係人與利害關係人的需求外，也必須釐清他們如何滿足需求？此將涉及利害關係人的影響策略議題，亦即利害關係人根據自身的利益來擴張對於組織的影響力（劉宜君等人，2005）。關於利害關係人的影響策略主要根據Savage et. al.（1991）等人的觀點，分從兩個指標區分其回應策略：(1)利害關係人對政策制定機關的潛在威脅性；(2)利害關係人之間潛在合作的可能性。一般來說，決策者面對傾向支持態度的利害關係人，最好的策略是讓他們參與決策過程，共同擬出可行的解決方案; 面對反對態度的利害關係人則宜採取防衛策略; 面對沒有一致態度的利害關係人，宜採取吸納策略，試圖將部分利害關係人轉變為支持立場; 面對邊際型的利害關係人則需要持續追蹤觀察，鼓勵利害關係人之間產生合作意識，以共同參與政策方案的研擬（Donaldson and Preston，1995：70；Kickert and Koppenjan，1997）。 再者，從利害關係人管理的觀點，實有必要瞭解利害關係人的聯盟或是潛在合作的可能性（Vos，2003：105）。

因此，本研究強調利害關係人的網絡觀點，兼從網絡觀點來觀察利害關係人的互動關係，主要聚焦於「網絡位置」的概念；亦即，利害關係人彼此之間即為不同行動者所構成之網絡，每個行動者在網絡當中所據有的資源、權力之不同，以致於形成並佔據不同的網絡位置。不同位置代表不同程度的互動或接觸的便利性，不同網絡位置的利害關係人，所採取的策略也有所不同；因此，利害關係人會根據其在網絡中的結構位置，來改變對於組織或其他利害關係人的影響策略（劉宜君等人，2005：102）。

譬如，對於在中心位置的利害關係人，因為與其他利害關係人形成聯盟的機會，或是直接接觸更為容易，因而容易利用與其他團體或人員的接觸機會增加對於組織的影響力。相對於在邊緣位置的利害關係人，要積極尋求擴張接觸機會的問題，因而通常會利用與中介者接觸的機會。換言之，在邊緣行動者也可以策略地利用網絡的特色；例如，利用掮客或中介者與較核心的利害關係人互動，或是試圖動員支持。然而，網絡邊緣的利害關係人也會面對潛在的反對聯盟，甚至並非在網絡中，所有關係都是正面的，也可能相互競爭資源。因此，網絡位置不但影響利害關係人能夠使用的策略，也促使其試圖克服該網絡位置的限制，例如透過結盟的方式增加自身的影響力或重要性（Frooman，1999：203；劉宜君等人，2005：102-103）。

## III. 結果與討論

誰是核電廠除役過程的主要利害關係人？利害關係人應該如何分類？這是利害關係人作為研究途徑後，必須回答的兩項基本問題。本研究運用下列兩個模型：(1)影響範圍(Zones of influence)、及(2)透過影響和衝擊來描繪利害關係人(Mapping stakeholders by influence and impact)；前者將利害關係人區分為：決策者、主要利害關係人、利害關係人代表以及社會大眾；後者指出不同類型的利害關係人，如何參與除役的決策過程（IAEA，2009：68-69）。

核電廠除役過程的利害關係人具有相當多元且複雜的特性，目前仍缺乏所有人都能接受的界定方式，其涵蓋範圍也較少有官方性質的權威定義，但根據「核能法手冊」(Handbook on Nuclear Law) 核電廠除役的利害關係人一般包含以下幾類：管制單位、科學家、政府權責部門、媒體、一般大眾，乃至於其他國家等。英國環境委員會(Environment Council)提出下列幾項自我評估問題，來協助指認一項公共議題可能涵蓋的利害關係人（IAEA，2009：7）：(1)那些人直接向該議題所做成的決定負責？(2)那些人在該領域中有影響力？(3)那些人直接受到決定影響？(4)誰在利害關係人的組織中佔有關鍵角色？(5)誰有權力推動決策？(6)誰若不被納入會阻礙決策？(7)誰在過去曾經受到議題影響？以及(8)誰在過去沒有機會發言，但他應該要有機會發言？

Bonser（2004）從核子反應器設施除役的過程觀察，將利害關係人歸納成：(1)經濟型、(2)環境型、(3)社會型、以及(4)科技型等類型。由此延伸，本研究將核能一廠除役過程的利害關係人區分為：(1)除役計畫執行者、(2)管制者、(3)合作或共同興趣者、以及(4)受影響者等四大類，參見圖 1。

### A. 除役計畫執行者

除役執行者主要包括核電廠擁有人，如經濟部和台灣電力公司，在核能安全的前提下，傾向於關注經濟利益的議題；再者，核能發電後端營運基金管理會、納稅人及核電廠股東等是資助實體，提供除役的資金來源；除役經理人包括核能一廠廠長、除役專案小組及負責執行的作業人員。

### B. 管制者

行政院原子能委員會和行政院環保署是中央兩大的管制機構，職司除役計畫審查與除役執行的監督，核一廠其下設有除役審查委員會(Station Decommission Review Committee, SDRC)；此外，新北市政府和石門區公所是地方政府代表，另新北市政府設有核一廠除役社區監督委員會，部分立法委員和市議員也積極關注核一廠除役工作，以上均屬於守門人角色的管制者。

### C. 合作或共同興趣者

與核一廠除役有合作或共同興趣者，譬如台灣電力工會、地方或社區企業、除役承包商及協力機構、行政院原能會核能研究所、非核能工業等；行政院原能會核能技術處和放射性物料管理局、台電核能後端營運處、核一廠廢料處理組等單位職司核廢料管理，核一廠保安保防負責安全維護，台大醫院金山分院和新北市消防局第六大隊是緊急救護單位；最後，雖然台灣不是會員組織，國際原子能總署(IAEA)仍然是除役技術支援的國際夥伴。

### D. 受影響者

新北市石門區是受到最大衝擊的蛋黃區，鄰近的金山區和三芝區的影響次之，全台灣人民再次之；中國大陸和日本是鄰近台灣的國家，但由於邊界沒有接壤，受

核廢料影響的可能性偏低；行政院原能會核能研究所和台灣清華大學核子工程與科學研究所，可能在研究與人才培養上受到影響；北海岸反核行動聯盟和石萬金愛鄉協會，是社區民眾組成的地方性壓力團體，地球公民基金會、媽媽監督核電廠聯盟、綠色公民行動聯盟、台灣環境保護聯盟、綠色消費者基金會、以核養綠缺電公民自救會等，則屬於全國性公民團體，長期以來關注核電廠除役及核廢料處理的議題；媒體提供除役利害關係人一個非常有用的溝通管道，但媒體本身也是利害關係人，特別是在公民參與計畫中進行對話的部分(IAEA，2009：33)；此外，IAEA 核廢料管理準則強調，對未來世代加諸的負擔與保護也須列入考量。

根據英國環境委員會，前述的利害關係人參與核電廠除役共分四個步驟(IAEA，2009：39)：(1)資訊提供，告知利害關係人除役的決定及可能的參與機會；(2)資訊搜集，使用調查方法搜集資訊、通知及回饋到決策制定過程；(3)諮商，提供利害關係人參與機會，來回應政府考慮中的選項與方案；(4)對話，在政府做成決策以前，容納利害關係人參與除役的審議及討論。理想上，利害關係人的早期參與非常重要，政府應該確保所有利害關係人被列入考量，儘早納入利害關係人管理計畫的發展。由於核電廠除役過程需要大量的經費，且核電廠存在已久，許多家庭生計長期賴以為生，因此核電廠除役對於地方與社會經濟層面必然會造成衝擊，及早讓社區民眾參與規劃，相信對除役計畫之順利推動必有所助益（劉東山，2011：29）。

關於利害關係人的溝通，首先要發展一項強力的溝通計畫，且有效管理所有利害關係人的期望，保持清楚、公平、開放及透明的規則，來推動利害關係人的參與及溝通工作（IAEA，2009：45）。這些原則聽起來合理，且對於利害關係人參與除役非常重要；然而，以除役計畫的審查為例，利害關係人參與的時間太遲了，行政院原能會直到 2016 年 10 月才到新北市石門區召開除役地方說明會。再者，有關除役策略的選擇，經濟部、台電公司和行政院原能會等，與新北市地方政府、社區民眾及反核團體之間存在重大差異及不同的期望。

中央政府除役計畫的執行者與管制者，大致遵循國際除役個案的前例，採取現址中介貯存核廢料的途徑，經過 30-40 年再移置集中貯存或最終貯存場。然而，社區民眾及反核團體對此一除役策略的選擇非常不放心，傾向於反對的態度；一方面既不信賴高放射性核子燃料棒採乾式戶外貯存的方式，也擔心暫時、中介可能變成永久貯存的夢魘，同時反對在核一廠規劃保留區(大約 98,000m2, 4%)暫存核廢料。部分社區居民及反核團體的代表主張，除役應該是拆除所有的核能設施、除汙及完整的環境輻射監測，並將乾淨的土地返還人民。[1]

此外，高放射性核子燃料棒第一期乾式貯存場早於 2013 年已經完工，但主要因當地民眾和反核團體的不信賴，新北市政府拒絕發給第一期乾式貯存場水土保持設施完工證明書，行政院原能會也沒有介入，直接進行熱測試的作業，以致於第一期乾式貯存場迄今遲遲無法啟用，嚴重影響除役工作的推動。新北市政府強調，「沒有核安，就沒有核電」，時任新北市副市長、核安監督委員會主委侯友宜強調，專家學者對於露天乾式貯存場設計有疑慮，市府沒有故意用水保去「卡」乾式貯存場啟用，攸關核安的水保，必須比一般山坡地案件更嚴謹，今年(2017) 6 月滯留鋒面雨勢才讓核一廠邊坡土石崩塌，地點距乾式貯存場僅 100 公尺，「才一場大雨就禁不起考驗，市府怎能輕易放行？」；[2] 再者，「核一廠不是最終貯存場，核廢料必須找到其他的去處」。[3]

## IV. 結論

誠如 IAEA（2009）指出，在過去的幾十年發展中，那些負責除役或放射性廢棄物管理的機關單位發現，該領域的科技專家或對該科技的社會信任面臨相當不足的危機，而針對此項問題提出的解決方案，便是讓更多的利害關係人能參與其中。從落實公共政策執行之公民參與(citizen participation)而言，在未來核電廠除役過程中，如何加強民眾參與以及社會溝通，爭取民眾的支持與認同，以順利推動核電廠除役等作業，進而達成 2025 非核家園的目標，將是主管機關未來面臨的重要任務。

在核電廠除役及放射性核廢料管理的領域，對於公民參與決策過程的要求與日俱增，因此必須探求容納利害關係人參與的新途徑。OECD-NEA（2012）強調核能管制機關在核廢料管理決策制定過程的角色非常重要，尤其是容納利害關係人的早期參與，包括告知社會大眾、建立民眾與利害關係人的信心；理想上，核安管制機關應該對核能安全議題提供獨立、中立、平衡和事實關連的資訊。

有鑒於經濟部、台電公司與地方民眾及反核團體之間存在不同期望，參照前述 OECD-NEA 的建議，行政院原能會身為中央核安管制機關應該保持其對核電廠除役開放、透明的承諾；從隱身在後臺移動到前臺，使用簡潔、白話的語言來解釋核安及程序議題，並對相關的決策準備在公共論壇接受公眾的詢問與質疑，以期能早日化解核一廠除役工作卡關的相關爭議。

## 參考文獻

[1] 張四明、羅清俊、陳耀祥、宮文祥、賴宇松、黃之棟、歐崇亞 (2013)。《核發環保許可過程中公民參與機制之研究》，行政院環保署委託研究成果報告。台北市：行政院環保署。

[2] 劉宜君、陳敦源、蕭乃沂、林昭吟 (2005)。〈網絡分析在利害關係人概念之應用- 以我國全民健保政策改革為例〉，《台灣社會福利學刊》，4(1)：95-130。

[3] 劉東山 (2010)。〈核電廠除役〉，《台電核能月刊》，341：29。

[4] American Society of Mechanical Engineers (2004). *The*

[1] The Meeting Report of AEC Public Participation Platform on October, 2016. Refer to: https://www.aec.gov.tw/webpage/public/files/index_01_42_1-07.pdf

[2] 核一廠除役「卡在貯存場水保證明」？ 新北市府、台電互槓，自由時報，2017/08/10，網址：https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/2159367

[3] "MEA irritates New Taipei City's blockage, Mayor Zhu reiterates two conditions," *United News*, December 6, 2018, page A6.

*Decommissioning Handbook*, ASME.
[5] Boing, Lawrence E. (2006). *Decommissioning of Nuclear Facilities and Decommissioning Planning*. IAEA Regional Workshop, Manila, Philippines, September, 15-19.
[6] Brinkerhoff, D. W. and B. L. Crosby (2002). *Managing Policy Reform: Concepts and Tools for Decision-makers in Developing and Transitioning Countries.* Kumarian Press Inc.
[7] Donaldson, T. and L. E. Preston (1995). "The Stakeholder Theory of the Corporation: Concepts, Evidence and Implications." *Academy of Management Review*, 20: 65-91.
[8] Freeman, R. Edward (1984). *Strategy Management: A Stakeholder Approach*. Boston, MA: Pitman.
[9] Frooman, J. (1999). "Stakeholder Influence Strategies." *Academy of Management Review*,24(2): 191-205.
[10] IAEA (2002). *Non-Technical Factors Impacting on the Decision-Making Processes in Environmental Remediation*, IAEA-TECDOC-1279, IAEA, Vienna, Austria.
[11] IAEA (2004). *Planning, Managing and Organizing the Decommissioning of Nuclear Facilities: Lessons Learned*, IAEA-TECDOC-1394, Vienna, Austria.
[12] IAEA (2009). *An Overview of Stakeholder Involvement in Decommissioning*. Technical Reports, IAEA Nuclear Energy Series, No NW-T-2.5, Vienna, Austria.
[13] Kickert, W. J., E. Klijn and J. Koppenjan (1997). *Managing Complex Networks*. London: Sage.
[14] Laraia, M. (2018). *Nuclear Decommissioning: Its History, Development and Current Status*, Lecture Notes in Energy 66. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
[15] OECD (2012). *The Evolving Role and Image of the Regulator in Radioactive Waste Management: Trends over Two Decades*, NEA No. 7083.
[16] Perret, Anthony (2006). "BNFL National Stakeholder Dialogue: a case study in public affairs." *Journal of Public Affairs*, 6(3): https://doi.org/10.1002/pa.165.
[17] Savage, Grant T., T. W. Nix, C. J. Whitehead and John D. Blair (1991). "Strategies for Assessing and Managing Organizational Stakeholders." *Academy of Management Executive*, 5(2): 61-75.
[18] Vos, Janita F. J. (2003). *Corporate Social Responsibility and the Identification of Stakeholders*. Cornell University Press.

# 核能電廠緊急應變計畫區核安社區風險治理之研究
# Research on Risk Management of Nuclear Safety Community in Emergency Planning Zone

計畫編號：MOST 107-NU-E-006-002-NU
計畫主持人：楊永年
e-mail：yungnane@mail.ncku.edu.tw
執行單位：國立成功大學政治學系

## 摘要

我國能源政策主要是依據「能源發展綱領」為政策遵循方針，建構安全穩定、效率運用、潔淨環境的能源供需系統。由於能源政策可能調整，核能電廠是否延役係為國家重要考量，若能源政策將核能電廠延役納入選項，核能安全仍是需持續關注議題。因民眾意識覺醒，以及公共安全問題日益被重視，尤其是核能電廠周遭社區的安全問題更是需關注主軸。本研究主要目的為有效提昇核能電廠鄰近社區民眾的核能安全認知，並建立正確與普及核安防護知識，強化社區緊急應變能力。為達前揭目的，本研究將以民眾參與與風險治理為操作面向，探討如何賦予民眾更多參與及溝通的權利與機制，使民眾亦能參與政府政策，進而達到社區風險治理效能。期待藉由與社區民眾互動討論的執行方式，將建議與意見納為決策參酌，以此強化社區民眾風險治理能力以及災害緊急應變效能。

關鍵詞：核能安全、風險治理、民眾參與。

## Abstract

Our country energy policy is mainly based on "Energy Development Guideline" as a follow policy guideline, to build a safe, stable, effective use and clean environment energy supply and demand system. Since the energy policy may be adjusted, whether the nuclear power plant is extend-ed is an important consideration for our country. If the energy policy in-corporates the nuclear power plant into the option, nuclear energy safety is still a topic of constant concern. As public awareness awakens, issues re-lated to public safety are increasingly being valued, especially in the sur-rounding communities of nuclear power plants. The main purpose of this study is that, it's effective for increasing knowledge of nuclear safety about neighboring communities around nuclear power plants. and to es-tablish correct and universal knowledge of nuclear safety protection and strengthen the community's emergency response capabilities. In order to achieve the purpose, this study will focus on people's participation and disaster prevention, and explore how to empower people to participate and communicate more, so that people can participate in government policies and achieve community risk governance effectiveness. The consensus will be reached, and the suggestions and opinions will be directly included in the decision-making, so as to strengthen the community's risk governance ability and disaster emergency response ef-fectiveness.

Keywords: nuclear safety 、 Risk governance 、 public participation.

## I. 前言

我國能源政策主要是遵循國家能源發展上位綱要原則「能源發展綱領」所制定，是國家能源相關政策計畫、準則及行動方案訂定政策方針。而我國也於 2015 年立法通過「溫室氣體減量及管理法」溫室氣體減量規範，並同時以巴黎協議之規範為圭臬。惟該如何在屏除核能使用下，滿足用電需求且又能兼顧此政策目標以及達成國際規範，是目前台灣用電發展、調整能源使用結構的重要挑戰。在 2018 年九合一大選中，核能問題與火力發電等議題也成了許多民眾關切的重點，也間接讓核能安全、空污、用電量等問題浮上檯面。我國仍然面臨有剩餘電廠商轉、核廢料處理議題、用過核燃料儲存問題以及核子反應爐封爐等相關營運問題，這些都是與核能安全無法脫勾的。

過去政府在公共議題處理上通常是以宣導或文宣說明政策內容，單向式的資訊傳遞方式，缺乏民眾意見以及實際需求的反饋，常淪於政策無法彰顯，或政策內容無法落實之窘境；而在核能安全的政策推廣上，由於核能科技官僚長期關注於技術面向，核能安全溝通所獲取的整體社會信任以及回應亦不佳，而核能電廠周遭社區民眾亦認為，政府相關單位仍是欠缺與當地民眾溝通的誠意，常被民眾指摘是進行宣導而非溝通，通常溝通的方式，讓利害關係人認為並無法影響政策執行或可針對相關議題回饋的可能性，現況通常呈現政府相關單位不理解或實施策略與民眾需求不同的態樣。

## II. 主要內容

本研究主要工作項目是透過自助與共助的災害防救法則概念，於核三廠周遭社區進行參與式工作坊，藉由民眾參與使資訊有效傳遞且透明。主要以屏東縣恆春鎮仁壽里、四溝里、頭溝里及網紗里民眾為主要對象，透過田野調查以及訪談意見領袖方式，瞭解範圍內的社區核能安全知識傳遞態樣；以及社區民眾對於相關議題、核能安全知識以及民眾防護行動等的理解程度。工作坊的辦理不僅可拓展社區參與，亦能在與民眾溝通過程，瞭解社區實際需求，以及對於核能安全緊急應變民眾知能的困境與需求。而本研究主要產出為各里的核能安全緊急應變地圖，於執行過程中與民眾的交流與溝通，並配合相關研究方法的運用，是完成成果的重要基礎。透過該模式運作以及產出的成果，將具體普及社區民眾對於核子事故的防護知識，最終則是希冀強化民眾對於核子事故發生的緊急應變能力。




仁壽里核子事故疏散避難路線圖




四溝里核子事故疏散避難路線圖




頭溝里核子事故疏散避難路線圖




網紗里核子事故疏散避難路線圖

## III. 結果與討論

本研究主要是透過自助與共助的災害防救法則概念，進行參與式工作坊，藉由民眾參與使資訊有效傳遞且透明。主要以核能電廠緊急應變計畫區範圍內的社區民眾為主要對象，瞭解目前範圍內的社區核能安全知識傳遞態樣；以及社區民眾對於相關議題、核能安全知識以及民眾防護行動等的理解程度。工作坊的辦理不僅可拓展社區參與，亦能在與民眾溝通過程，瞭解社區實際需求，以及對於核能安全緊急應變民眾知能的困境與需求。而本研究主要產出為核能安全緊急應變地圖，於執行過程中與民眾的交流與溝通，並配合相關研究方法的運用，是完成成果的重要基礎。透過該模式運作以及產出的成果，將具體普及社區民眾對於核子事故的防護知識，最終則是希冀強化民眾對於核子事故發生的緊急應變能力。

多數與救災或環境的議題多數係透過科學技術解決，減少環境變遷甚或避免災害發生，較少以社會或政治角度分析社區安全議題研究，其也更彰顯本研究的獨特性。本研究所指的防災治理主要是以社區民眾為主體參與及規劃相關議題，以長期生活在同一區域的利害關係人，針對既有政策提出調整建議或相關對策，以達成社區風險治理成效。目前因社會趨勢使然，民眾參與公共事務的機會增多；再加上社會結構的複雜化，公務體系等相關單位囿於人力與資源，公共事務的推動更需納入民眾參與，使得政策內容以及資訊傳遞方式更貼近民眾需求，實有助於公共政策的推行。

## IV. 結論

本研究主要產出成果為符合各里需求的緊急應變防災地圖，透過不同的文宣產出品，包括餐墊、束口袋以及看板等呈現各里防災地圖資訊，產出的文宣及含括內容與過往文宣的差異在於，主要為強化防災資訊內容的友善性以及文宣品的實用性，以更簡易的方式與管道傳遞相關資訊予民眾。藉由不同的媒體型態或溝通管道，將核能安全緊急應變資訊或印象傳遞給文宣對象；文宣品的製作需以使用者的角度考量，而文宣製作者更需選用恰當的文宣內容與管道，將正確資訊有效地傳遞給文宣對象，此均是本次成果產出的重要參酌。而納入恆春鄰近社區的參與，與民眾相互溝通瞭解其需求，其可達成民眾核能安全知識提昇之成效外，亦具備有教育宣導意義，是為本年度計畫主要重點與成效。

## 參考文獻

[1] Burt, R. S. (1992). Structural holes: The social structural of competition. Canbridge, MA: Harvard University Press.

[2] Garson, G. D. and J. D. Williams.(1982). Public Administration Concept: Reading, Skill, (Boston: Aliny and Sacon).

[3] Hall, L. M. and S. S. Kennedy.(2008). “Public and Nonprofit Management and the “New Governance”, American Review of Public Administration, Vol. 38(3), pp. 307-321.

[4] 杜文苓、黃郁芩，2014，〈核安議題之民眾風險溝通困境初探〉,「創造適當科技，啟動社會轉型」2014 年

台灣科技與社會研究學會第六屆年會學術研討會，國立交通大學客家文化學院，2014 年 3 月 22-23 日。
[5] 楊永年，2003，〈社區防救災組織之研究〉，《重建區社區營造點案例實例選錄》，財團法人台灣省文化基金會印行，頁 8。
[6] 楊永年，2010，〈核能安全體系之研究—以核三廠變
[7] +壓器失火為例〉，「府際關係的新興議題與治理策略」學術研討會，台灣大學集思會議中心洛克廳，2010 年 11 月 12-13 日。
[8] 劉學仁，2003，《我國核能電廠緊急應變機制之研究》，國立政治大學社會科學院行政管理碩士學程碩士論文。