

# 104 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 105 年 5 月 6 日



# 目錄

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 議程及場地 .....                                                                        | iii |
| 核能安全科技                                                                             |     |
| ※核電廠電子元件輻射傷害之可靠性研究(II) .....                                                       | 1   |
| ※啟動與運轉之控制棒掉棒事故燃料性能評估 .....                                                         | 9   |
| ※核電廠圍阻體排氣效應探討 .....                                                                | 22  |
| ※電磁攪拌對不銹鋼覆銲緩衝層微結構及性質改善 .....                                                       | 31  |
| ※熱交換器管件應力破損防治--實做 .....                                                            | 36  |
| ※新型鎳基合金銲材之 LBW 與 GTAW 銲道特性研究 .....                                                 | 49  |
| 放射性物料安全科技                                                                          |     |
| ※過氧化氫對於實施貴重金屬化學添加之沸水式反應器金屬組件應力腐蝕龜裂行為之影響 .....                                      | 53  |
| ※用過核子燃料處置設施受熱力-水力-力學-化學耦合作用之國際發展現況 .....                                           | 56  |
| ※先進國家地下實驗室熱-水-力學(THM)耦合試驗成果與分析模式之研析 .....                                          | 59  |
| ※海嘯對結構物衝擊分析與審查技術建立之研究 (II) .....                                                   | 63  |
| ※核種遷移參數實驗方法之精進及遷移機制研究 .....                                                        | 87  |
| ※核電廠除役之放射性物質污染擴散之分析研究 .....                                                        | 90  |
| ※台灣地區地下化放射性廢棄物處置設施之地震影響評估 .....                                                    | 99  |
| ※放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料研究--核種擴散參數 .....                                                  | 106 |
| ※放射性廢棄物長期貯存與最終處置之比較研究 .....                                                        | 113 |
| ※乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬 .....                                                       | 116 |
| ※深地層處置熱水力化耦合模式國內外發展現況評析與基準案例模擬研究 .....                                             | 122 |
| 輻射防護與放射醫學科技(I)                                                                     |     |
| ※建立臨床放射治療劑量稽核驗證技術 .....                                                            | 132 |
| ※給低輻射劑量核醫成像應用之多通道讀出系統晶片電路設計 .....                                                  | 133 |
| ※高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立-II .....                                                   | 142 |
| ※評估心導管診療期間醫療曝露與職業曝露劑量並研擬最適化策略 .....                                                | 146 |
| ※醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接研究 (II) .....                                        | 153 |
| ※應用分子影像對比劑資料庫探討 PET/MR 多重影像放射藥物開發與臨床應用 .....                                       | 157 |
| ※運用 4-[ <sup>18</sup> F]-ADAM/animal PET 研究中藥的神經保護作用(II) .....                     | 159 |
| 輻射防護與放射醫學科技(II)                                                                    |     |
| ※多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用-子計畫一：Tc-99m TRODAT-1 SPECT 影像技術提升與臨床應用 .....     | 163 |
| ※探討使用奈米核醫藥物銻-188-微脂體多次劑量治療人類非小細胞肺癌及頭頸癌原位小鼠模式之藥理研 .....                             | 167 |
| ※探討奈米藥物銻-188-微脂體多次劑量於卵巢癌細胞代謝再調控之影響 .....                                           | 170 |
| ※定量 TRODAT-1 SPECT 影像對於帕金斯症治療評估之臨床價值 .....                                         | 172 |
| ※結合銻-188 微脂體及遠隔放射治療應用於腦轉移性黑色素瘤動物模式之治療效果 .....                                      | 174 |
| ※阿茲海默症早期診斷藥物之組蛋白去乙酰化酶抑制劑放射性標誌前驅物合成 .....                                           | 178 |
| ※多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用-總計畫暨子計畫三：比較多巴胺轉運器在巴金森氏患者及抗精神病誘發之類巴金森氏症狀之異同 ..... | 180 |
| ※多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用-子計畫二：建立 99mTc-TRODAT 多巴胺轉運器影像資料庫 .....           | 183 |

## 人才培訓與風險溝通

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| ※加速原子能管制機關新進人員學習與提昇組織向心力之探討 ..... | 186 |
| ※核能議題的政策論證與風險溝通：網路輿情分析的應用 .....   | 188 |
| ※大專生對核能相關議題之態度調查與最適溝通模式之探討 .....  | 193 |
| ※核能重大事故之緊急應變與資訊公開 .....           | 204 |
| ※有關放射性廢棄物處理、貯存與最終處置之國際規範研析 .....  | 209 |
| ※多元族群輻射與核能教育推廣之研究 .....           | 223 |
| ※科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(II) ..... | 228 |
| ※新住民之核能與輻射知識宣導 .....              | 232 |
| ※核能安全與輻射防護科普實務推動及成效探討 .....       | 234 |

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

首頁>施政與法規>施政績效>原子能科技學術合作研究計畫 項下下載

# 104 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

## 議程及場地

時間：105 年 05 月 06 日（星期五）

地點：臺北捷運北投會館訓練大樓

（臺北市北投區大業路 527 巷 88 號）

發表會議程（議程仍以當日現場公告為主）

| 時間          | 議程             | 地點    |
|-------------|----------------|-------|
| 09:40~10:20 | 報到             | 3 樓   |
| 10:20~11:40 | 分組成果發表(I)      | 各領域場地 |
| 11:40~13:00 | 綜合討論(午餐)       | 各領域場地 |
| 13:00~15:00 | 分組成果發表(II)     | 各領域場地 |
| 15:00~15:20 | 中場休息           |       |
| 15:20~15:30 | 優良計畫頒獎(各場次主持人) | 各領域場地 |

各領域場地

| 領域                | 地 點       | 時間          |
|-------------------|-----------|-------------|
| 1.核能安全科技          | 3 樓 309 室 | 10:20~15:30 |
| 2.放射性物料安全科技       | 3 樓 310 室 | 10:20~15:30 |
| 3.輻射防護與放射醫學科技(I)  | 3 樓 311 室 | 10:20~15:30 |
| 4.輻射防護與放射醫學科技(II) | 3 樓 312 室 | 10:20~15:30 |
| 5.人才培訓與風險溝通       | 3 樓 313 室 | 10:20~15:30 |

# 104 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： 3 樓 309 室        |             |                        |                  |                        |                                        |
| 場次                     | 時間          | 評審<br>委員               | 計 畫<br>主持人       | 執行機關                   | 計畫名稱                                   |
| 分<br>組<br>發<br>表<br>I  | 10:20~10:40 | 李綺思（*）、陳建源、廖俐毅、吳文方、高良書 | 張廖貴術             | 國立清華大學<br>工程與系統科學系     | 核電廠電子元件輻射傷害之可靠性研究(II)                  |
|                        | 10:40~11:00 |                        | 陳紹文              | 國立清華大學<br>核子工程與科學研究所   | 啟動與運轉之控制棒掉棒事故燃料性能評估                    |
|                        | 11:00~11:20 |                        | 白寶實              | 國立清華大學<br>核子工程與科學研究所   | 核電廠圍阻體排氣效應探討                           |
|                        | 11:20~11:40 |                        | 喻冀平              | 國立清華大學<br>核子工程與科學研究所   | 電磁攪拌對不鏽鋼覆鋅緩衝層微結構及性質改善                  |
|                        | 11:40~13:00 |                        | 綜 合 討 論 (午餐供應便當) |                        |                                        |
| 分<br>組<br>發<br>表<br>II | 13:00~13:20 |                        | 吳威德              | 國立中興大學<br>材料科學與工程學系(所) | 熱交換器管件應力破損防治實做研究                       |
|                        | 13:20~13:40 |                        | 李驊登              | 國立成功大學<br>機械工程學系(所)    | 新型鎳基合金鋁材之 LBW 與 GTAW 鋁道特性研究            |
|                        | 13:40~14:00 |                        | 葉宗洸              | 國立清華大學<br>工程與系統科學系     | 過氧化氫對於實施貴重金屬化學添加之沸水式反應器金屬組件應力腐蝕龜裂行為之影響 |
|                        | 14:00~14:20 |                        | 綜 合 討 論          |                        |                                        |

\*為該場會議主持人

# 104 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： 3 樓 310 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 | 邱賜聰（*）、陳渙東、黃慶村、陳鴻斌、魏聰揚 | 林文勝              | 國立臺灣大學<br>水工試驗所      | 用過核子燃料處置設施受熱力-水力-力學-化學耦合作用之國際發展現況研究  |
|                 | 10:40~11:00 |                        | 楊長義              | 淡江大學<br>土木工程學系       | 先進國家地下實驗室熱-水-力學 (THM) 耦合試驗成果與分析模式之研析 |
|                 | 11:00~11:20 |                        | 吳祚任              | 國立中央大學<br>水文與海洋科學研究所 | 海嘯對結構物衝擊分析與審查技術建立之研究(II)             |
|                 | 11:20~11:40 |                        | 蔡世欽              | 國立清華大學<br>原子科學技術發展中心 | 核種遷移參數實驗方法之精進及遷移機制研究                 |
|                 | 11:40~12:00 |                        | 馮玉明              | 國立清華大學<br>工程與系統科學系   | 核電廠除役之放射性物質污染擴散之分析研究                 |
|                 | 12:00~13:00 |                        | 綜 合 討 論 (午餐供應便當) |                      |                                      |
| 分組發表 II         | 13:00~13:20 | 邱賜聰（*）、陳渙東、黃慶村、陳鴻斌、魏聰揚 | 石瑞銓              | 國立中正大學<br>地球與環境科學系   | 台灣地區地下化放射性廢棄物處置設施之地震影響評估             |
|                 | 13:20~13:40 |                        | 吳銘志              | 國立成功大學<br>地球科學系（所）   | 放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料研究-核種擴散參數            |
|                 | 13:40~14:00 |                        | 劉大綱              | 國立成功大學<br>海洋科技與事務研究所 | 放射性廢棄物長期貯存與最終處置之比較研究                 |
|                 | 14:00~14:20 |                        | 曾永信              | 國立清華大學<br>原子科學技術發展中心 | 乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬                |
|                 | 14:20~14:40 |                        | 倪春發              | 國立中央大學<br>應用地質研究所    | 深地層處置熱水力化耦合模式國內外發展現況評析與基準案例模擬研究      |
|                 | 14:40~15:00 |                        | 綜 合 討 論          |                      |                                      |

\*為該場會議主持人

# 104 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：3 樓 311 室         |             |                        |                  |                      |                                                |
| 場次                     | 時間          | 評審<br>委員               | 計 畫<br>主持人       | 執行機關                 | 計畫名稱                                           |
| 分<br>組<br>發<br>表<br>I  | 10:20~10:40 | 黃景鐘（*）、邱志宏、莊克士、張似璵、趙自強 | 許世明              | 國立陽明大學<br>生物醫學影像暨放射系 | 建立臨床放射治療劑量稽核驗證技術                               |
|                        | 10:40~11:00 |                        | 盧志文              | 國立清華大學<br>工程與系統科學系   | 給低輻射劑量核醫成像應用之多通道<br>讀出系統晶片電路設計                 |
|                        | 11:00~11:20 |                        | 許榮鈞              | 國立清華大學<br>核子工程與科學研究所 | 高能加速器中子輻射劑量分析與能譜<br>測量技術建立(II)                 |
|                        | 11:20~11:40 |                        | 吳東信              | 國立陽明大學<br>生物醫學影像暨放射系 | 評估心導管診療期間醫療曝露與職業<br>曝露劑量並研擬最適化策略               |
|                        | 11:40~13:00 |                        | 綜 合 討 論 (午餐供應便當) |                      |                                                |
| 分<br>組<br>發<br>表<br>II | 13:00~13:20 |                        | 蘇振隆              | 中原大學<br>生物醫學工程學系     | 醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫<br>療數位影像傳輸協定橋接研究(II)        |
|                        | 13:20~13:40 |                        | 高潘福              | 中山醫學大學<br>醫學系        | 應用分子影像對比劑資料庫探討<br>PET/MR 多重影像放射藥物開發與臨床<br>應用   |
|                        | 13:40~14:00 |                        | 馬國興              | 國防醫學院<br>生物及解剖學研究所   | 運用 4-[18F]-ADAM/animal PET 研究<br>中藥的神經保護作用(II) |
|                        | 14:00~14:20 |                        | 綜 合 討 論          |                      |                                                |

\*為該場會議主持人

# 104 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： 3 樓 312 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 | 陳家杰(＊)、程紹智、王信二、魏孝萍、陳榮治 | 黃文盛              | 彰化基督教醫院<br>核子醫學科     | 多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用－子計畫一：Tc-99m TRODAT-1 SPECT 影像技術提升與臨床應用     |
|                       | 10:40~11:00 |                        | 李易展              | 國立陽明大學<br>生物醫學影像暨放射系 | 探討使用奈米核醫藥物銻-188-微脂體多次劑量治療人類非小細胞肺癌及頭頸癌原位小鼠模式之藥理研究                            |
|                       | 11:00~11:20 |                        | 莊其穆              | 國立陽明大學<br>醫學系婦產學科    | 探討奈米藥物銻-188-微脂體多次劑量於卵巢癌細胞代謝再調控之影響                                           |
|                       | 11:20~11:40 |                        | 魏誠佑              | 彰濱秀傳紀念醫院<br>神經內科     | 定量 TRODAT-1 SPECT 影像對於帕金森症治療評估之臨床價值                                         |
|                       | 11:40~13:00 |                        | 綜 合 討 論 (午餐供應便當) |                      |                                                                             |
| 分組發表 II               | 13:00~13:20 | 陳家杰(＊)、程紹智、王信二、魏孝萍、陳榮治 | 陳裕仁              | 馬偕紀念醫院<br>放射腫瘤科      | 結合銻-188 微脂體及遠隔放射治療應用於腦轉移性黑色素瘤動物模式之治療效果                                      |
|                       | 13:20~13:40 |                        | 忻凌偉              | 國立臺灣大學醫學院<br>藥學系暨研究所 | 阿茲海默症早期診斷藥物之組蛋白去乙酰化酶抑制劑放射性標誌前驅物合成                                           |
|                       | 13:40~14:00 |                        | 周元華              | 臺北榮民總醫院<br>精神病部      | 多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用－總計畫暨子計畫三：比較多巴胺轉運器在巴金森氏患者及抗精神病誘發之類巴金森氏症狀之異同 |
|                       | 14:00~14:20 |                        | 王世楨              | 臺北榮民總醫院<br>核醫部       | 多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用－子計畫二：建立 99mTc-TRODAT 多巴胺轉運器影像資料庫           |
|                       | 14:20~14:40 |                        | 綜 合 討 論          |                      |                                                                             |

\*為該場會議主持人

# 104 年原子能科技學術合作研究計畫成果發表會

| 場 地 5：人才培訓與風險溝通        |             |                        |                 |                       |                                |
|------------------------|-------------|------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------------------|
| 會場地點：3 樓 313 室         |             |                        |                 |                       |                                |
| 場次                     | 時間          | 評審<br>委員               | 計 畫<br>主持人      | 執行機關                  | 計畫名稱                           |
| 分<br>組<br>發<br>表<br>I  | 10:20~10:40 | 王重德（*）、饒大衛、翁曉玲、王毓正、張自立 | 楊遵榮             | 國立臺灣師範大學<br>物理學系（所）   | 加速原子能管制機關新進人員學習與<br>提昇組織向心力之探討 |
|                        | 10:40~11:00 |                        | 蕭乃沂             | 國立政治大學<br>公共行政學系      | 核能議題的政策論證與風險溝通：網路<br>輿情分析的應用   |
|                        | 11:00~11:20 |                        | 王居卿             | 淡江大學<br>企業管理學系        | 大專生對核能相關議題之態度調查與<br>最適溝通模式之探討  |
|                        | 11:20~11:40 |                        | 高仁川             | 國立臺北大學<br>法律學院        | 核能重大事故之緊急應變與資訊公開               |
|                        | 11:40~12:00 |                        | 程明修             | 東吳大學<br>法律學系（所）       | 有關放射性廢棄物處理、貯存與最終處<br>置之國際規範研析  |
|                        | 12:00~13:00 |                        | 綜 合 討 論（午餐供應便當） |                       |                                |
| 分<br>組<br>發<br>表<br>II | 13:00~13:20 |                        | 古建國             | 臺北市立大學<br>應用物理暨化學系    | 多元族群輻射與核能教育推廣之研究               |
|                        | 13:20~13:40 |                        | 李敏              | 國立清華大學<br>工程與系統科學系    | 科普級輻射度量實驗研發與實務推動<br>及其成效探討(II) |
|                        | 13:40~14:00 |                        | 陳彥均             | 龍華科技大學<br>多媒體與遊戲發展科學系 | 新住民之核能與輻射知識宣導                  |
|                        | 14:00~14:20 |                        | 戴明鳳             | 國立清華大學<br>物理學系（所）     | 核能安全與輻射防護科普實務推動及<br>成效探討       |
|                        | 14:20~14:40 |                        | 綜 合 討 論         |                       |                                |

\*為該場會議主持人

# 核電廠電子元件輻射傷害之可靠性研究(II)

## Reliability study of electronic devices with radiation damage in nuclear power plant (II)

計畫編號：MOST 104-NU -E-007-004 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：張廖貴術

e-mail：lkschang@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：呂君章、張瑞軒

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

### 摘要

由於儀電系統電子卡片所引起之急停佔了相當比例，核能電廠儀電系統電子卡片電子元件的輻射效應評估是很重要的研究課題。本計畫對核能電廠使用重要儀電系統之電子卡片電子元件，探討並建立其輻射傷害評估的方法及設備。本研究計畫之主要目的，係就核三廠固態邏輯介面控制系統之 Auxiliary Logic Module(ALM) 電子卡片的關鍵元件 Hex inverting Schmitt Trigger，進行抗輻射實驗和可靠度評估。本計畫完成國內核能電廠電子卡片關鍵電子元件在一固定總劑量且不同劑量率的輻射照射對電特性衰退影響，分析 CMOS 元件的電特性衰退與電荷效應以瞭解輻射傷害，及元件可靠度評估等，期有助於增進核能電廠營運安全。

關鍵詞：核能電廠、電子卡片、元件、輻射。

### Abstract

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

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

### I. 前言

根據美國核能電廠操作研究所之調查(Institute of Nuclear Plant Operation, INPO)，對儀電系統電路卡片引起急停之調查，結果顯示於 2008 年共有 6 次，約佔全部 48 次急停的 13%；於 2007 年共有 8 次，約佔全部 51

次急停的 16%。由於儀電系統電路卡片所引起之急停，於 2005~2007 年共有 32 次，大約佔 15%。因此，核能電廠控制系統電子卡片的零組件老化劣化問題，是很重要的研究課題。核能電廠因為儀控電子卡片的故障或誤動作，可能造成電廠工作人員的困擾以及電廠營運上的損失，甚至發生電廠非預期性的跳機。國內現有的核能電廠皆已運作多年，許多控制系統電子卡片的零組件已有老化現象，因而若引起系統異常及故障事件，對電廠正常營運影響很大。因此，如何找出有效的對策，預防電子卡片故障之產生，降低其故障率，進而增進核電廠控制系統的可靠度為一項重要之研究課題。

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

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

在核電廠電子卡片預知維護技術中，為及早發掘電子卡片失效的潛在肇因，防範電子卡片失效的產生，一

般除了進行加速電子卡片老化實驗外，同時也發展運用變化環境溫度與電子卡片量測相結合的測試方法，並驗證其為電子卡片預知維護的可行性。

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

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

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

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

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

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

本研究主要在於分析核三廠 SSILS-ALM 電子卡片關鍵 CMOS 元件(Hex inverting Schmitt Trigger & Hex Inverter)經輻射照射之後之效應。首先我們先了解金氧半導體(MOS)元件的輻射效應機制，其主要之機制為控制二氧化矽氧化層(SiO<sub>2</sub>)與二氧化矽與矽基板之介面層(SiO<sub>2</sub>-Si)之電荷效應。因此元件在游離輻射照射後，導致 oxide trapped charge 及 interface trapped charge 的量增

加，這種電荷的效應造成了臨界電壓(threshold voltage)的漂移，此影響的效應與所受到整體輻射劑量成一合理之線性測量比例，此即為金氧半導體與輻射效應之重要研究機制。因此基本上可應用上述之功能機制，利用金氧半場效電晶體直接接受輻射照射，以臨界電壓之偏移量，來表示所遭受之輻射劑量。同樣地會對於 CMOS 元件來探討其電性飄移與對應之輻射劑量。

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

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

## II. 主要內容

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

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

### 1. Hex inverting Schmitt Trigger

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

(a) 當輸入為正飽和時，即  $V_O = +V_{sat}$  時

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

(b) 當輸入為負飽和時，即  $V_O = -V_{sat}$  時

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

綜合以上分析比較，可知道上臨界電壓與下臨界電壓為對稱相等(即  $V_U < V_L$ )，其完整電路及輸入-輸出轉移特性曲線，如圖 3 所示。因為反相施密特觸發電路之

轉移特性曲線具有封閉性的磁滯效應(hysteresis effect)，故稱為磁滯曲線，如圖 3 所示，且曲線變化方向為順時針旋轉，其中  $V_H$  定義為磁滯電壓又稱為磁滯寬度，即  $V_H = V_U - V_T = 2V_{sat} \cdot \beta$ 。

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

## 2. Hex Inverter

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

## 3. 主要量測參數-propagation delay

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

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

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

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

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

## 4. 實驗量測步驟

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

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

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

## 5. 游離輻射照射條件

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

接著探討劑量率之效應，以不同的劑量率來照射使得元件累積相同的總劑量，照射條件詳表 1，首先將元

件以三種不同之劑量率 155.5 krad/h、270.3 krad/h 與 320.7 krad/h 來照射，分別以不同照射時間累積相同輻射劑量 1 Mrad，其次將元件以三種較低之劑量率 13.6 krad/h、33.4 krad/h 與 53.3 krad/h 來照射，分別以不同照射時間累積相同輻射劑量 100 krad，照射前後皆量測元件相關參數並紀錄。

從美國核電法規 RG1.029 指出，對 MOS 的積體電路而言，其抗輻射程度範圍需從輻射劑量 1 krad 至 10 Mrad，本研究採用輻射總劑量範圍皆符合此規範。因此能夠瞭解元件抗輻射能力，並可利用元件參數漂移量對應 3 krad~3 Mrad 範圍內之輻射劑量之關係，可將元件應用做為輻射之偵檢器使用，而量測參數之選用與其劑量率效應在本研究有相關背景資料。而從美國軍事情格 MIL-STD-883H 的 METHOD 1019.8 中指出，對於輻射照射測試而言其劑量率須低於 180 krad/h，而在本研究中探討輻射劑量率效應時也符合此標準。

## III. 結果與討論

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

圖 8 為 Hex Inverter 的輸出之高低電壓準位變化量對應 155.5 krad/h、270.3 krad/h 與 320.7 krad/h 輻射劑量率關係圖。由於元件經輻射照射後，對輸出之低準位影響相當小，幾乎可忽略，故觀察其劑量率效應並無明顯趨勢。反之輻射對輸出之高電壓準位就有相當程度變化，故在觀察其劑量率，發現較高劑量率會造成較低之高電壓準位。輸出之高電壓準位變化量最多相差到約 0.05 V。

圖 9 CD4007 元件中的 NMOSFET 起始電壓漂移對應 13.6 krad/h、33.4 krad/h 與 53.3 krad/h 輻射劑量率關係圖。前述探討輻射效應時已知 NMOSFET 元件經輻射照射後，起始電壓漂移隨著輻射劑量的增加而變得更正，故輻射劑量率之影響會使得較高劑量率 53.3 krad/h 時的起始電壓變更正。NMOSFET 起始電壓的變化量最多相差到約 0.14 V。

圖 10 CD4007 元件中的 PMOSFET 起始電壓對應 13.6 krad/h、33.4 krad/h 與 53.3 krad/h 輻射劑量率關係圖。而 PMOSFET 元件經輻射照射後，起始電壓漂移隨著輻射劑量的增加而變得更負，而輻射劑量率之影響會使得較高劑量率 53.3 krad/h 時的起始電壓變更負。PMOSFET 起始電壓的變化量最多相差到約 0.23 V。

圖 11 為 CD4007 元件中的 NMOSFET 之電壓偏移對應輻射總劑量關係圖。由圖可知，起始電壓  $\Delta V_{th}$  的漂移量是來自於氧化層電荷電壓  $\Delta V_{ot}$  和界面缺陷電壓  $\Delta V_{it}$  漂移量貢獻的總和。從這裡也可以知道輻射所造成氧化層電荷及界面缺陷是造成起始電壓漂移的主要原因。從負的氧化層電荷電壓  $\Delta V_{ot}$  漂移量可知輻射所衍生氧化層電荷是帶正電，而從正的界面缺陷電壓  $\Delta V_{it}$  可知 n 型金氧半電晶體之界面缺陷的電性大多是由帶負電的受子態所決定。

圖 12 利用電荷分離的技術分析 CD4007 元件中的 NMOSFET 來自氧化層電荷以及界面缺陷電荷造成電壓偏移對應輻射總劑量關係圖。隨著元件的微縮，所衍生

出的界面陷阱比氧化層電荷要來得多，尤其是在累積總劑量越來越高之情況下。從圖中可發現到界面缺陷電壓  $\Delta V_{it}$  漂移量比氧化層電荷電壓  $\Delta V_{ot}$  漂移量來得大，因此整個  $\Delta V_{th}$  的漂移是由負的界面陷阱電荷所主導。而在低輻射總劑量時，因其照射時間並不長，故其所衍生出的界面陷阱與氧化層電荷差異不大。

由於一般 p 型金氧半電晶體是正常工作在負偏壓，所以實際影響起始電壓漂移的界面陷阱應為帶正電的施子態。故對 p 型金氧半電晶體而言，輻射所衍生出的  $Q_{ot}$  和  $Q_{it}$  均是帶正電。而這會使得  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  對  $\Delta V_{th}$  來說有加成的效果，這也是為何 PMOSFET 的臨界電壓漂移量要比 NMOSFET 來得大，而 PMOSFET 較 NMOSFET 受到輻射效應影響較大之原故。

#### IV. 結論

本計畫對於核三廠固態邏輯介面控制系統之 Auxiliary Logic Module 電子卡片的 CMOS 關鍵元件 Hex inverting Schmitt Trigger、Hex Inverter，進行輻射照射實驗，以探討此電子元件的抗輻射能力及可靠性，研究成果可分成二部分。第一部分為相同輻射總劑量且不同劑量率效應，觀察到較高劑量率對元件電特性衰退影響較大，如 Hex inverting Schmitt Trigger 與 Hex Inverter 的傳導延遲時間、Hex inverting Schmitt Trigger 的上下臨界電壓漂移量、Hex Inverter 的最大電壓增益點之漂移量及 CD4007 元件起始電壓漂移量都較大。另外，第二部分為金氧半元件經輻射照射後產生電荷之分離探討。p 型金氧半電晶體，輻射所衍生出的  $Q_{ot}$  和  $Q_{it}$  均是帶正電，使得  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  對  $\Delta V_{th}$  有加成的效果，因此 p-MOSFET 較 n-MOSFET 受到輻射效應影響較大。

#### 參考文獻

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

表 1 不同的劑量率照射元件以累積相同總劑量之照射條件

| dose rate (krad/h) | Total dose (100 krad)  |
|--------------------|------------------------|
| 13.6 (40cm)        | 7hr+22min (100.2 krad) |
| 33.4 (25cm)        | 3hr (100.2 krad)       |
| 53.3 (20cm)        | 1hr+53min (100.4 krad) |

| dose rate (krad/h) | Total dose (1 Mrad)   |
|--------------------|-----------------------|
| 155.5 (11cm)       | 7hr (1.088 Mrad)      |
| 270.3 (8cm)        | 4hr (1.081 Mrad)      |
| 320.7 (6.75cm)     | 3hr+23min(1.085 Mrad) |

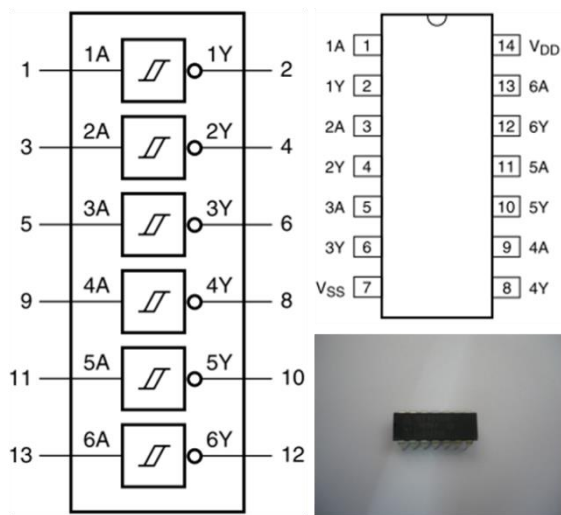


圖 1 Functional diagram & Pin configuration

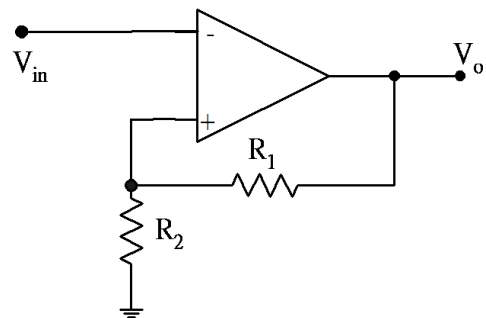


圖 2 Inverting Schmitt Trigger Circuit

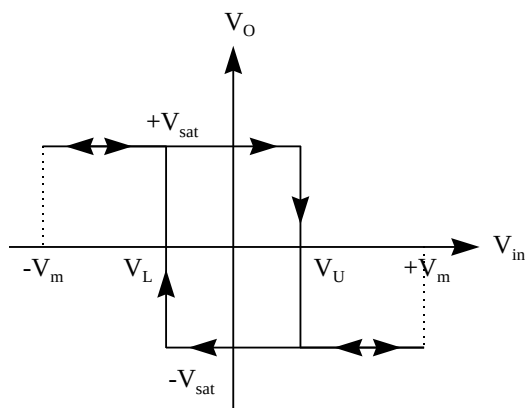


圖 3 反相施密特觸發電路之轉移特性曲線

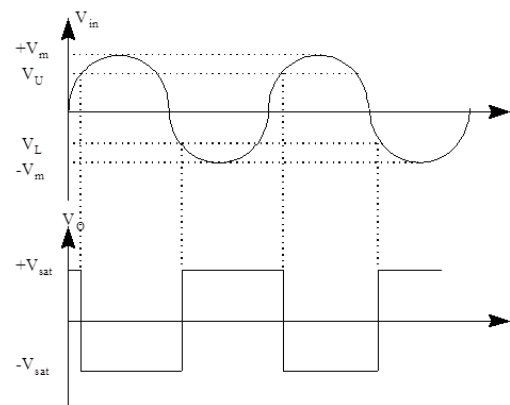


圖 4 Input & output waveforms

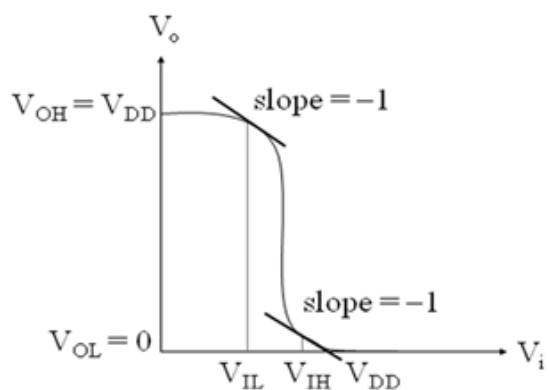


圖 5 電壓轉換曲線

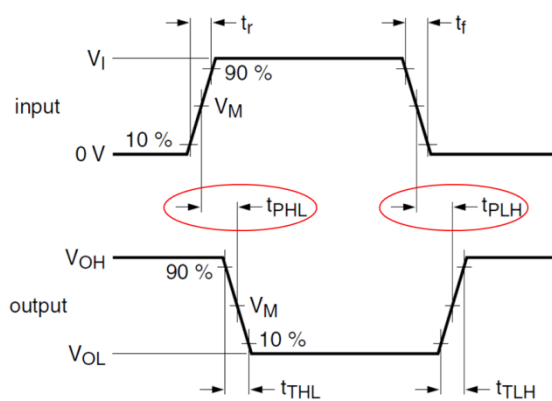


圖 6 傳遞延遲時間示意圖

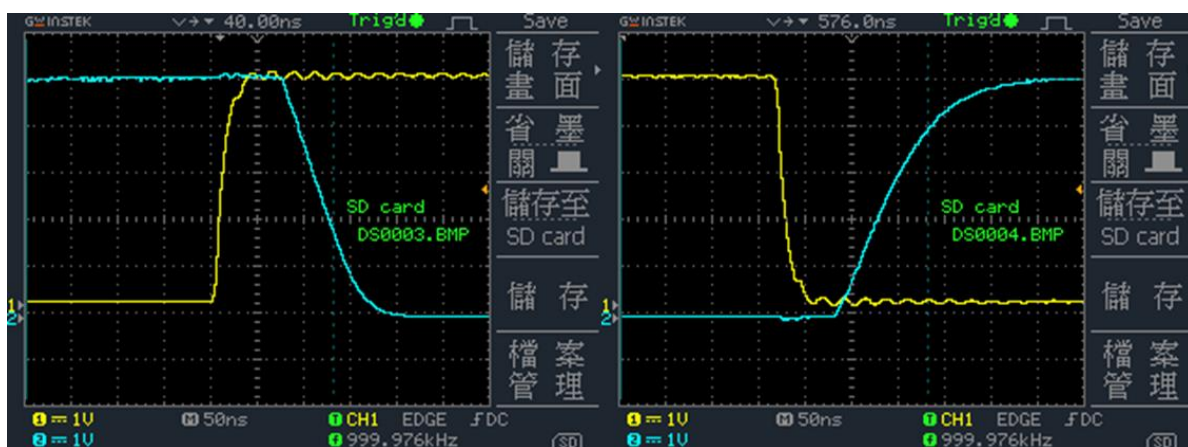


圖 7 Actual Waveforms ( Input waveform :yellow , Output waveform :blue )

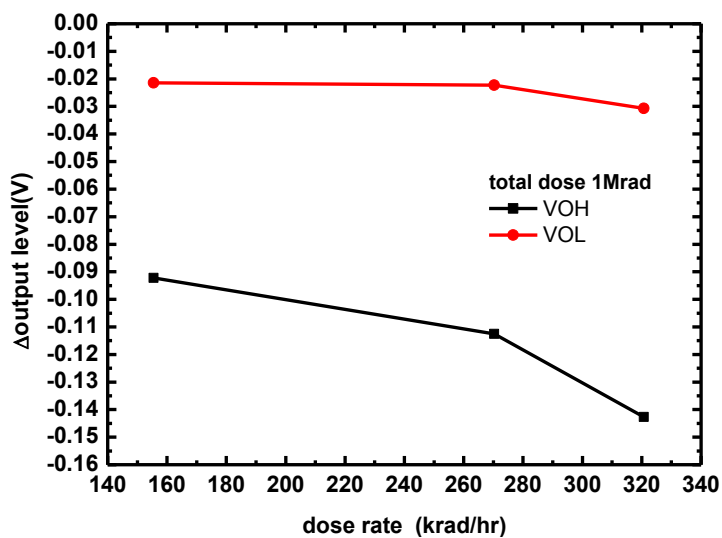


圖 8 Hex Inverter 的輸出之高低電壓準位變化量對應 155.5 krad/h、270.3 krad/h 與 320.7 krad/h 輻射劑量率關係圖

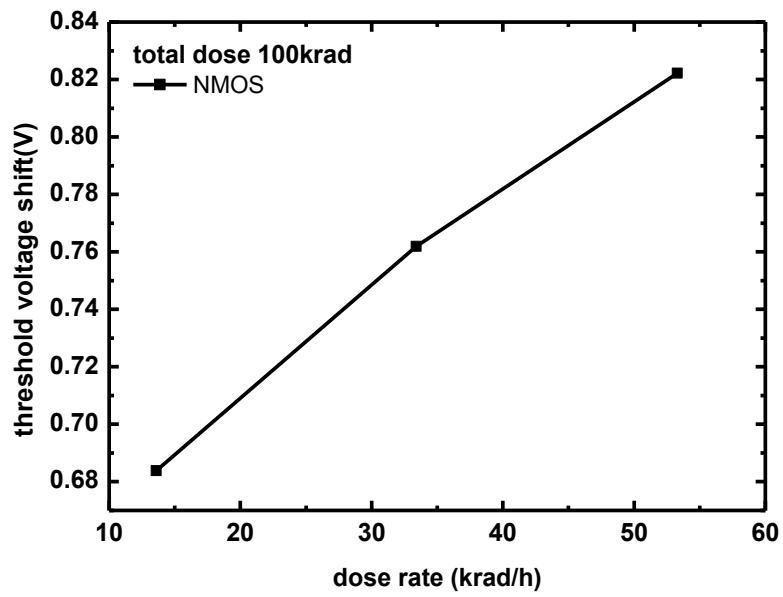


圖 9 CD4007 元件中的 NMOSFET 起始電壓漂移對應 13.6 krad/h、33.4 krad/h 與 53.3 krad/h 輻射劑量率關係圖

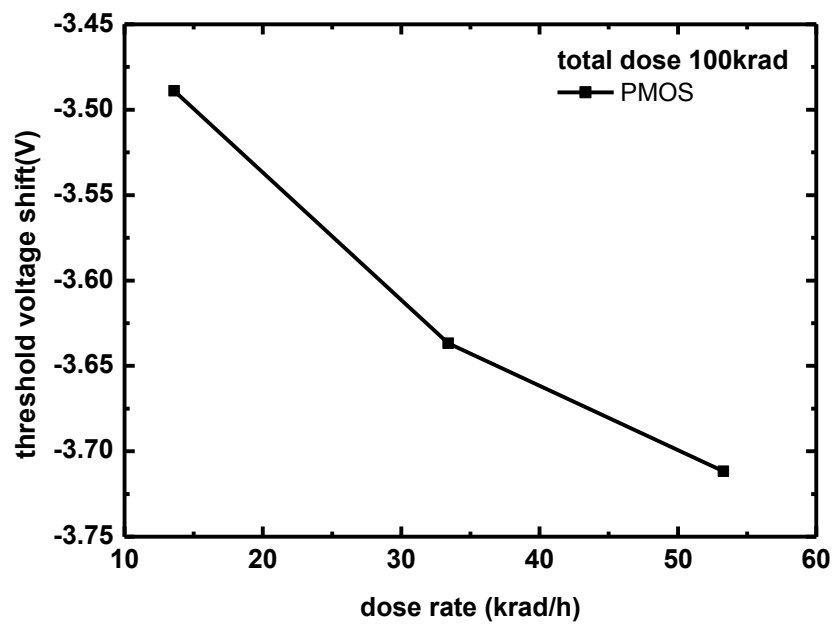


圖 10 CD4007 元件中的 PMOSFET 起始電壓對應 13.6 krad/h、33.4 krad/h 與 53.3 krad/h 輻射劑量率關係圖

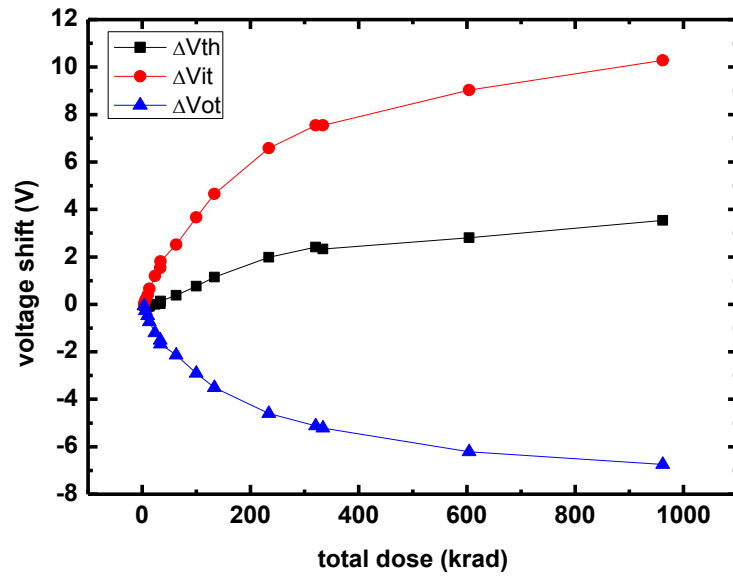


圖 11 CD4007 元件中的 NMOSFET 之電壓偏移對應輻射總劑量關係圖

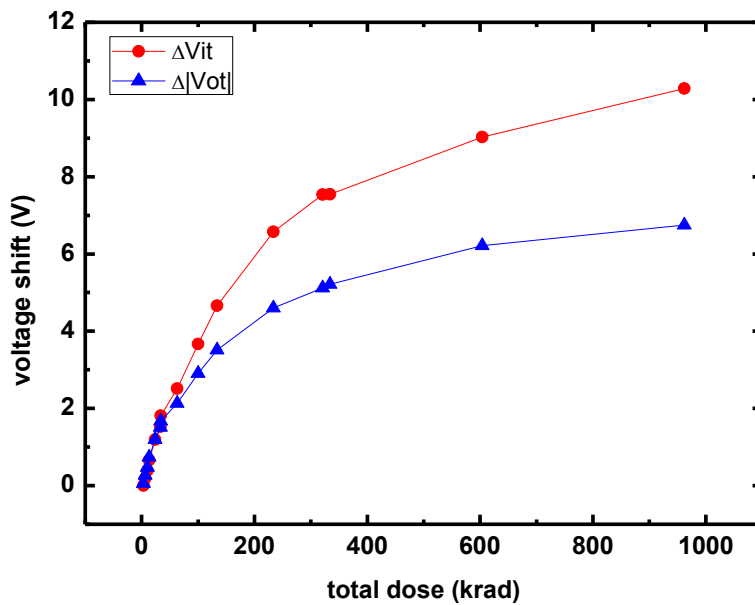


圖 12 利用電荷分離的技術分析 CD4007 元件中的 NMOSFET 來自氧化層電荷以及界面陷阱電荷造成電壓偏移對應輻射總劑量關係圖

# 啟動與運轉之控制棒掉棒事故燃料性能評估

## Performance Evaluation of Nuclear Fuel in Normal and Startup Operations Under CRDA Scenarios

計畫編號：MOST 104-2623-E-007-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳紹文 教授

e-mail：[chensw@mx.nthu.edu.tw](mailto:chensw@mx.nthu.edu.tw)

計畫參與人員：何愛玲、郭封均、蔡明倫、劉芳霖、

王亭懿、張靖、黃俊富、林郁格、傅采詩、林明松

執行單位：國立清華大學 核子工程與科學研究所 / 工程與系統科學系

### 摘要

本計畫之主要目標為研究龍門電廠的燃料棒在控制棒之掉棒暫態事故(CRDA)，當沸水式反應器發生掉棒事故後爐心功率會有急速且局部的上升情形，明顯會影響燃料棒的臨界、功率及可能改變沸騰模式。本研究使用 TRACE 與 PARCS 兩者結合，TRACE 提供電廠核島區的熱水力模擬計算雙相的熱交換現象；PARCS 使用三維的中子擴散模式計算爐心內燃料棒功率分布，在得到上述兩者之結果後，將之結果放入 FRAPTRAN 作為輸入，以得到單根燃料棒可能的損壞情況。

本研究中包含兩種假設情況：一為在燃料週期起始(BOC)的熱爐全功率(hot-full-power, HFP)下發生掉棒事故；其二為在起始燃料週期的熱爐零功率(hot-zero-power, HZP)狀態發生掉棒事故，燃料棒損壞有下列三種情況：(1) 護套膨脹(ballooning)及脹裂(burst)的情形；(2)因為護套氧化層的影響產生脆化及失效；(3)護套或燃料丸融化。結果顯示燃料棒護套在熱爐全功率下沒有燃料失效情形的發生；在熱爐零功率下，掉棒控制棒附近的燃料棒有產生失效的情況，其主要原因在於過高的護套溫度。

關鍵詞：PARCS、TRACE、FRAPTRAN、掉棒事故

### Abstract

The object of this study is to understand the behavior of Lungmen ABWR during a control rod drop accident (CRDA) transient. The power would change extremely fast and locally because of the CRDA transient. The CRDA simulation for Lungmen ABWR was performed by coupling PARCS and TRACE which were the 3D neutron kinetic code and two-phase thermal hydraulic code, respectively. After the calculation of PARCS/TRACE, the results would be putted into FRAPTRAN input. FRAPTRAN is a function of time-dependent fuel rod power shape and cooling boundary condition to calculate the fuel rod damage during accidents.

There were two conditions of CRDA analysis for Lungmen ABWR: case 1 : hot-full-power (HFP) at the beginning of cycle (BOC); case 2 : hot-zero-power (HZP) at BOC. Under these two conditions, the damage mechanisms of fuel rod are (1) cladding ballooning and burst; (2) embrittlement and failure by high-temperature oxidation; (3) melting of cladding and/or fuel pellets. And

the relevant quantities for fuel performance are the maximum fuel enthalpy and the melting temperatures of cladding and fuel pellet. The results show that case 1: no fuel failure occurred during HFP condition at BOC; case 2: the fuel rod failure occurred which was nearby the drop control rod under HZP condition at BOC. The main reason of rod failure is the high cladding temperature.

Keywords: CRDA、PARCS、TRACE、FRAPTRAN

## I. 前言

### 1.1 研究目的

自 2011 年的福島事故，國內外皆對於核能電廠作完整且嚴謹的檢視，對於複合性災害或人為因數影響之事故能有更進一步的防範，故本研究以此為目的，設定為因人為或不可預期之事變造成控制棒掉出事故，藉以模擬發生嚴重掉棒事故時之情形，以研究核燃料棒之機械行為，以檢視核燃料棒的完整性以及瞭解掉棒事故對龍門電廠之嚴重性。

### 1.2 電廠介紹

龍門電廠核能發電廠是臺灣是第四座核能發電廠簡稱核四廠，是 GE 公司所設計發展的進步型沸水式反應器(ABWR)，且由 GE 公司與日立公司合力建造。

ABWR 對照過去的沸水式反應爐，有主要的改進：增加爐內循環泵減少破管事故的可能性、全數位化的保護系統與控制系統以及更多重的備份系統。龍門電廠包含 872 GE14 燃料組件與 205 根控制棒，其蒸汽流率為  $7.64 \times 10^6$  Kg/h，而爐心設計流率為  $52.2 \times 10^6$  Kg/h。

### 1.3 分析工具 – TRACE&PARCS

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

PARCS 使用雙群中子擴散方程式在 3D 垂直座標計算中子通量的變化，可以應用在輕水式反應器的反應度增加事故(RIA)。相較之下 TRACE 使用單點反應動力計算中子的擴散狀況，將整個爐心壓縮成一點計算，因此本研究採用 PARCS 與 TRACE 結合運算 RIA 事故，用 PARCS 得到燃料棒功率分佈再以 TRACE 做熱水力計算。

## 1.4 分析工具 – FRAPTRAN

FRAPTRAN 是一個 Fortran 電腦語言由 Pacific Northwest National Laboratory 發展，其主要功能是計算輕水式反應器單一燃料棒在運轉的暫態或者假設的事故中的暫態的反應。FRAPCON 與 FRAPTRAN 是一組的，前者的功能主要是高燃料的單一燃料棒在穩態的反應，後者則是計算燃料與護套的溫度、護套的應變與應力以及護套內氣體壓力在給定的功率和冷卻條件隨時間的變化。

FRAPTRAN 的 FRACAS-I 模式是計算燃料棒與護套的機械行為，FRAPTRAN 的失效模式應用在因為過度氣壓造成的變形或相對高溫的護套(>700K)。在 FRACAS-I 計算後護套有效的塑性應變會與 MATPRO 給定不穩定的應變作比較，如果護套的有效塑性應變較大則會用膨脹模式，膨脹模式(BALON2)計算護套局部不規則的應變，膨脹模式(BALON2)預測在膨脹節點斷裂有兩樣標準，一是當護套的環向應力超過經驗上的極限，二是預測護套的環向應變超過 FRAPTRAN 應變極限。

## II. 主要內容

### 2.1 CRDA

在掉棒事故是控制系統失控造成控制棒掉落，其掉落只要原因在於重力而形成自由落下，掉棒事故可能發生在運轉的任意操作情況下。控制棒的主要功能在於吸收過多的中子以保持臨界狀態，當控制棒掉離爐心，吸收中子的能力降低，反應出核分裂與爐心功率的上升，如此的功率飄移可能造成燃料棒的損壞以及爐心的完整性，是屬暫態事故中嚴重性高者，甚至可能造成爐心過熱[1]。

燃料棒的機械行為在掉棒事故下受功率跳動的特性、爐心冷卻條件、燃料耗條件以及燃料棒設計的影響，下列四種可能造成燃料棒損壞的模式，其中第一種為低溫情況發生：

- (1) 燃料丸與護套的機械交互作用在加熱早期發生 (PCMI)
- (2) 護套發生護套膨脹現象與脹裂
- (3) 護套在高溫下發生淬冷現象
- (4) 護套或燃料丸發生熔化現象

燃料其中主要發生在 RIA 的損壞情況為 PCMI，此損壞機制的主要因為因熱膨脹與分裂產物的腫脹，發生護套與燃料丸的機械作用，當燃料丸直接膨脹填滿間隙撐破護套稱為脹裂(burst)，發生 burst 的特特徵為燃料丸與護套的間隙寬度在事故發生時逐漸縮小至零。相反地，若是發生護套膨脹(ballooning)的現象則是間隙寬度逐漸在事故中變大。在膜沸騰那面的護套因為高溫下發生淬冷現象，以及最後直接護套或燃料棒熔化，後三者皆為高溫下發生的損壞現象[2]。

掉棒事故的安全規範是基於美國 NRC 的 10CFR50 Appendix A 與 Regulatory Guide(RG) 的 General Design Criterion 28 (GDC-28) 以及 NUREG-0800 Standard Review Plan[3-5]。在起始燃料週期的兩個情況：熱爐全功率與熱爐零功率(以下全文簡稱 HFP 與 HZP)所必須遵守的掉棒事故安全規範如下：

(1)在 HZP 下若燃料棒內壓不超過系統壓力則徑向平均熱焓之最大值不可超過 170 cal/g，若超過系統壓力則徑向平均熱焓最大值不可超過 150 cal/g。若是全功率或中間者，若局部的熱通量超過設計極限則會被假設發生燃料棒損壞情況。

(2)在可冷卻的爐心安全規範要求徑向平均熱焓必須小於 230 cal/g，為保持遠離燃料與護套的熔化起始溫度，燃料中心溫度必須小於 3078.15 K 且護套溫度亦須小於 1473.15 K。

掉棒事故是設計基本中的反應度初始事故(RIA)，在過去研究中單點或一維的反應動力模型都已被用來模擬 RIA 事故發生時的爐心安全性[6]，但上述兩者方法並無法迅速或局部地計算功率突升的情況，因此本篇研究使用 PARCS 與 TRACE 結合以計算掉棒事故，再將兩者結合得到的結果檔當作 FRAPTRAN 的輸入條件計算燃料棒在暫態事故的機械行為。此篇研究分成兩部份討論：(1)起始燃料週期的 HFP 與(2)起始燃料週期的 HZP。

### 2.2 龍門電廠 TRACE 模式

初步的龍門電廠模式建立是基於引用[7][8][9][10]，模型概要圖如圖一所示，包含三個主要的控制系統，其中包含飼水控制系統、壓力控制系統以及 RIP 控制系統。爐心部分建立成 22 的熱水力通道模擬 872 個燃料部件的熱水力行為，為求精準的計算熱水力回饋，在掉棒附近的每一通道皆代表單一燃料部件，而爐心軸向分成 11 個節點，依照實際的反應爐情況，將爐心分割成軸向十一個節點、四個徑向環以及六個方位角的分割，其中方位角的分割有四個 36 度角與兩個 108 度角，切成此種情況的主要原因在於：此四個 36 度角之位置是主蒸氣管的出口處，此處的熱交換過程較為複雜，需要切割成較小部分計算以得到較接近真正情況的計算結果，反之其餘爐心部分相較之下熱交換過程較無如此複雜，因此切割成 108 度角加以計算。每個方位角部分的切割皆有連結飼水管路口（六個飼水管路口）。而在反應爐內每 36 度角有一進步式沸水反應器的爐內泵共 10 個，爐內泵主要分成三群，其中一群不與 M/G 連結 (RIP3)，另外兩群則與 M/G 連結 (RIP1RIP2)。閥的部分分成四種類型在 TRACE 模式中，主蒸氣隔離閥與渦輪機控制閥呈現正常開狀態，渦輪旁通閥、六種設在四個主蒸氣管路安全釋壓閥則呈現正常關閉狀態。此外 Moody choke flow model 被用來計算安全釋壓閥最大流量的限制。

TRACE 龍門電廠模式的重要參數已使用 FSAR 與 RETRAN02 兩者驗證過，結果顯示 TRACE 的龍門電廠模式有相[11-12]當高的準確性。

### 2.3 龍門電廠 PARCS 模式

PARCS 是涵蓋三維反應器物理模式的程式，有高度的真實性，可以解在爐心幾何參數為矩形與六邊形中的穩態、時變、多群中子擴散以及 SP3 遷移方程式。圖二顯示在 PARCS 中龍門電廠的爐心佈局情況，在徑向網格有 1012 節點：872 個節點代表 872 個燃料組件(黃色矩形)；140 個節點代表爐心外圍的反射器(藍色矩形)，在軸向分成 25 個有效區域計算。燃料的截面資料由

PMAXS 檔案提供，而 PMAXS 是由程式 GenPMAXS 巨觀中子截面資料與 CASMO 格點程式的計算結果[13]。

PARCS 的龍門電廠模式是由本實驗室的同儕陳淑娟[14]與張佳穎[15]建立。其中 PARCS 中的  $k_{inf}$  參數已由 SIMULATE 驗證過，結果顯示同樣具有高度的準確性，其誤差小於  $10^{-5}$ 。

龍門 PARCS 將 205 根控制棒分為 19 群，其中第 19 群為用來控制暫態所需掉落之控制棒。圖四及圖五為龍門電廠在 HFP(圖三)及 HZP(圖四)運轉下之控制棒佈局圖。圖中之紅框處，為本研究預掉落之控制棒的位置：(1) HFP 為(18,6)；(2) HZP 為(26,26)。圖五顯示，在圖四及圖五(HFP 與 HZP)之控制棒佈局下，初始爐心軸向功率分佈圖。

## 2.4 龍門電廠 TRACE/PARCS 結合模式

圖六顯示 TRACE 與 PARCS 結合的概要流程圖，在格點程式結果檔輸入後，PARCS 即開始暫態分析，PARCS 由熱水力條件得到爐心功率分布情形，TRACE 將 PARCS 的功率分布情形計算出下一時間的熱水力條件，兩者將結果互相迭代算出掉棒事故的暫態行為，因此透過 TRACE 與 PARCS 的結合可以算出在暫態事故中任一時間點的爐心功率與熱水力條件。

上述 TRACE 與 PARCS 的程式結合在馮等人[16]分析喪失飼水加熱器暫態事故且將結果比較電廠供應商所提供的資料，結果顯示 TRACE 與 PARCS 的結合模式可以成功地模擬計算龍門電廠的暫態事故。

## 2.5 龍門電廠 FRAPTRAN/SNAP 模式

FRAPTRAN 是模擬單根燃料棒受到熱應力行為，專用於輕水式反應器的暫態事故模擬，如：冷卻水流失事故(LOCA)與 RIAs[18]。

圖七表示 FRAPTRAN 中龍門電廠的單根燃料棒幾何模型，燃料棒 3.81 公尺，軸向由下到上分為 12 個節點，徑向則以環形結構分成 17 個節點，其中，由圓心向外 1 至 15 個節點模擬燃料九行為；最後第 16、17 節點分別模擬護套內側與外側之護套機械行為。雖然，在 TRACE、PARCS 與 FRAPCON/FRAPTRAN 各程式間，切割軸向節點的數目不同，以至高度不完全相互匹配，期間之落差，本研究使用線性內插法求得。

圖八為 TRACE/PARCS/FRAPCON/FRAPTRAN 之分析流程是意圖。在做 FRAPTRAN 燃料棒行為模擬時，需要輸入幾項重要參數作為邊界條件：(1) TRACE 輸出檔，作為熱水流參數之邊界值；(2) PARCS 輸出檔，作為燃料棒功率分佈之邊界值；(3) FRAPCON 輸出檔，作為燃料棒燃耗值之初始條件。除上述幾項邊界條件，FRAPTRAN 還需輸入燃料棒的幾何參數(圖七)。此外，在 FRAPTRAN 中冷卻水的邊界條件有兩種可以選擇的輸入方式：COOLANT 模式與 HEAT 模式。在本研究中，由於 TRACE/PARCS 輸出檔中，對熱水流參數與功率分佈之邊界值有明確的定義，因此採用 HEAT 輸入模式。FRAPTRAN 模擬計算燃料與護套的熱焓時所用的參考溫度為 298.15K。

## III. 結果與討論

CRDA 的發生設定主因是控制棒的控制系統失靈，

失去支撐的控制棒直接因重力影響掉出爐心，控制系統失靈的狀況隨時有機率發生在任何運轉情況，本研究選用兩種功率情況分別為案例一：HFP 在起始燃料週期與案例二：HZP 在起始燃料週期，以上兩者案例爐心的初始情況與參數如表一所示，而圖三與圖四分別表示案例一與案例二的控制棒佈局情形。圖九表示反應度對掉棒之軸向位置的關係圖，可看出隨著掉棒位置越遠離爐心，其暫態對系統輸入之正反應度會越多，因此為增加本研究的保守性，選用爐心邊緣的控制棒，施行假設掉棒事故(圖三及圖四之紅框處)。使其發生掉棒事故。另外爐心的設定上在當功率超過原本全功率的 15%時，即 115% 的全功率，系統則會啟動急停措施防止事態更加嚴重。

反應度是核反應器最基本的數值，其表現爐心中子平衡的情況以及描述燃料、緩速劑在暫態時的反應回饋，反應度回饋在爐心中有四項主要的影響因子：控制棒的位置、燃料溫度(都普勒效應)、緩速劑溫度以及緩速劑的空泡分率，下式為反應度變化率與其四項因子之關係式：

$$\dot{\rho} = \rho_{CR} + \frac{\partial \rho}{\partial T_f} \dot{T}_f + \frac{\partial \rho}{\partial T_m} \dot{T}_m + \frac{\partial \rho}{\partial \alpha_m} \dot{\alpha}_m = \rho_{CR} + \rho_{TF} + \rho_{DM}$$

其中  $\rho_{CR}$ 、 $\rho_{TF}$  與  $\rho_{DM}$  分別是反應度變化受控制棒、燃料溫度與緩速劑密度影響，其中  $\dot{T}_f$  與  $\dot{T}_m$  亦分別是燃料與緩速劑的溫度變化率，同時  $\dot{\alpha}_m$  是緩速劑空泡分率的變化率。

### 3.1 案例一：起始燃料週期下 HFP

在假設案例設定上，使選定的控制棒在第 500 秒時發生掉落。圖十顯示掉棒後，各項反應度( $\rho_{CR}$ )、( $\rho_{TF}$ )、( $\rho_{DM}$ )之暫態變化情形。當控制棒掉落時，其輸入系統之正反應度，會使反應器之功率開始向上攀升，如圖十一所示。隨著反應器功率上升，燃料溫度及緩速劑溫度也會隨之上升。燃料溫度上升，回饋系統負反應度，稱之為都普勒效應；同時緩速劑溫度上升，使得緩速劑之空泡分率上升、密度下降，亦回饋系統負反應度。上述兩項參數所輸入系統之負反應度，將抵銷控制棒掉落所產生之正反應度，抑制功率的上升，並使系統回到臨界狀態。此外，在案例一之數據顯示，熱由燃料九傳遞至護套、再至冷卻水的熱傳時間並沒有明顯的延遲。

在整個暫態的變化期間，在 517.2 秒發生爐心的功率峰值達到 4267MWt (約 109%全功率)，約 109%全功率，低於急停條件(115%全功率)，因此，此案例沒有使用急停措施。圖十三與圖十四表示由下到上燃料各節點處的平均護套溫度以及平均燃料熱焓量，燃料中心溫度峰值為 1347.2K、護套內側溫度峰值為 606K、平均燃料熱焓峰值量為  $2.085 \times 10^5$  J/kg(49.83cal/g)，上述最大溫度全數發生在節點 5，約為燃料高度 1.43 公尺。如圖五所示，節點 5 即是燃料棒在 HFP 下軸向功率峰值。此外燃料溫度、護套內外側溫度以及燃料平均熱焓之峰值皆在安全規範的限制值之內，因此結果顯示在案例一燃料沒有發生損壞的情況，因此亦不需討論高溫損壞的情況。

### 3.2 案例二：起始燃料週期時 HZP

在假設案例設定上，使選定的控制棒在第 500 秒時發生掉落。圖十五顯示掉棒後，各項反應度( $\rho_{CR}$ )、( $\rho_{TF}$ )、

( $\rho_{DM}$ ) 之暫態變化情形，其中 b 小圖為放大顯示。當控制棒掉落時反應度只有些微上升，因為在 HZP 下，燃料處於低溫、緩速劑處於次冷態，使得燃料與緩速劑溫度上升所造成的負回饋效應受到延遲，導致功率在發生掉棒事故後約 3.3 秒，才有明顯地上升情況。如圖十六和十七所示，在掉棒附近發生局部的沸騰現象(203.4 秒)，同時緩速劑的密度下降才開始回饋明顯的負反應度。數據顯示，相較於案例一（在 202.5 秒開始），案例二的熱水力回饋(熱由燃料丸傳遞至護套、再至冷卻水的熱傳時間)似乎需要較長的反應時間，才能明顯地看到功率因掉棒而攀升之效應。同案例一，由燃料與緩速劑產生的負反應度壓制住反應度的增加，同時讓反應器回到低於瞬發臨界狀態，結束功率突升(power excursion)的情況，案例二在 203.5 秒發生功率峰值，為 22646MWt (約為 577%的全功率)，高於急停條件(115%全功率)，啟動急停系統，爐心功率因而明顯下降。

圖十八、圖十九和圖二十顯示由上到下個節點的燃料中心溫度、護套平均溫度以及燃料平均熱焓量，燃料中溫度峰值為 3113.2K (發生在節點 10; 燃料高度約 3.02 公尺)、護套平均溫度峰值為 1045.7K (發生在節點 8; 燃料高度約 2.38 公尺)、燃料平均熱焓之峰值為  $1.05 \times 10^6$  J/kg(251.67cal/g; 發生在節點 9; 燃料高度 2.70 公尺)。

燃料溫度、護套溫度與燃料熱焓之峰值皆達到安全規範的極限值，皆已達到安全規範的極限值，顯示在 HZP 情況下，發生掉棒附近的燃料棒有產生損壞的可能。圖二十二和圖二十三顯示燃料丸與護套在暫態發生時都有膨脹的現象，但是燃料丸的膨脹情況明顯較護套快，因此從圖二十四顯示燃料丸與護套間隙寬度明顯下降，圖二十五顯示間隙不穩定的熱傳遞係數，當間隙變窄時，熱傳變得更加容易，最大值發生在燃料丸觸碰到護套內側的表面，最後護套溫度可能高於熔點 1473.15K，另外燃料中心溫度亦可能超過安全規範的 3078.15K，需要額外的冷卻措施。

#### IV. 結論

本研究主要目標即是瞭解龍門電廠在控制棒的掉棒事故下的燃料棒情況。控制棒的下降會給予爐心正的反應度回饋，使得爐心功率上升；相反地，核燃料溫度上升與緩速劑密度下降則會得到負的反應度回饋。如是反應度回饋平衡，得以控制反應度的上升以及避免達到爐心的瞬發臨界狀態(prompt critical)，且終止功率突升(power excursion)之問題。

與 HFP 的情況相比，案例二 HZP 的情況下，其燃料溫度較低且緩速劑在次冷狀態下，熱由燃料丸傳遞至護套、再至冷卻水的熱傳時間有明顯的延遲，導致其燃料溫度與緩速劑的反應度回饋相對較慢，爐心功率在掉棒暫態發生後 3.3 秒才有很明顯地上升現象。

在假設案例一中，起始燃料週期 HFP 下的燃料中心溫度、護套內外側溫度以及燃料平均熱焓之峰值皆在安全規範內，無安全疑慮。但案例二結果顯示：燃料中心溫度峰值為 3113.2K (發生在節點 10; 燃料高度約 3.02 公尺)、護套內層溫度峰值為 1045.7K (發生在節點 8; 燃料高度約 2.38 公尺)、燃料平均熱焓峰值為  $1.05 \times 10^6$

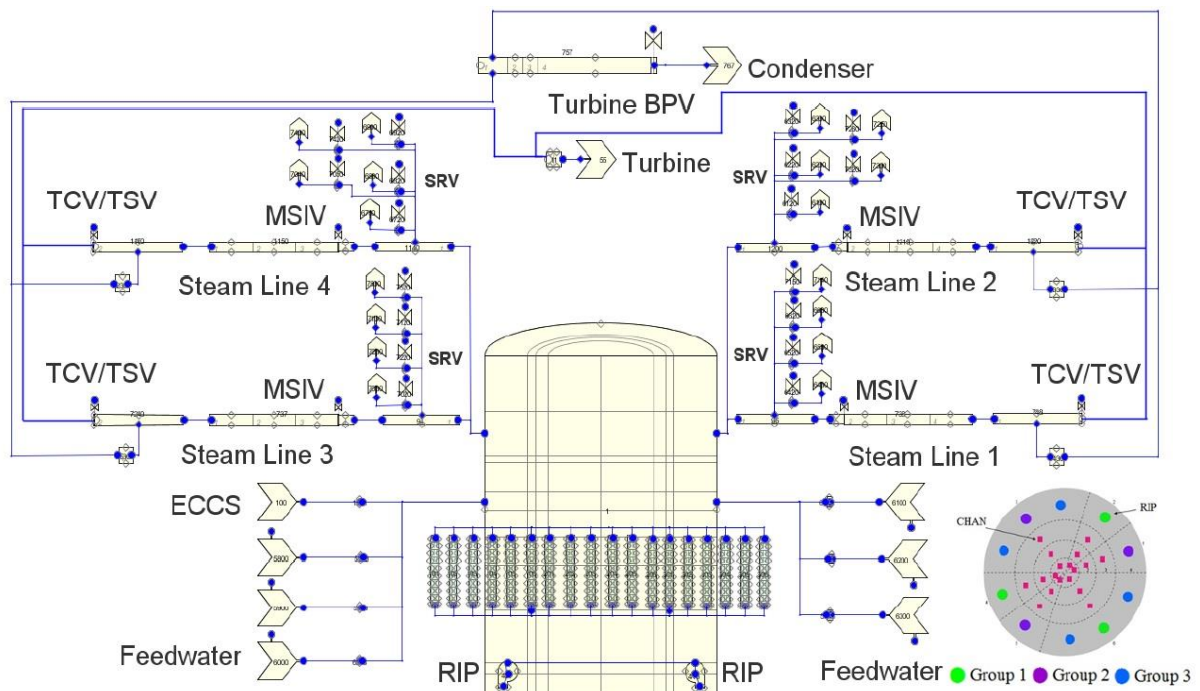
J/kg(251.67cal/g; 發生在節點 9; 燃料高度 2.70 公尺)，皆已達到安全規範的極限值，顯示在 HZP 情況下，控制棒掉棒意外附近的燃料棒有可能損壞之可能。此外，FRAPTRAN 的模擬結果，顯示最後護套溫度可能會高於熔點 1473.15K，另外燃料中心線溫度亦可能超過安全規範的 3078.15K。

#### 參考文獻

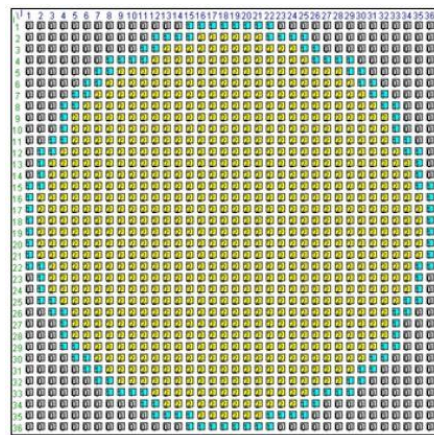
- [1] Nuclear Energy Agency, "Nuclear Fuel Behaviour Under Reactivity-initiated Accident (RIA) Conditions", NEA/CSNI/R(2010)1, 2010
- [2] H. Yamada, T. Nakajima, and I. Komatsu, "Realistic Revaluation of Reactivity Insertion Accidents for a Typical BWR", BE-2000, 2000.
- [3] P. M. Clifford, "Technical and regulatory basis for the Reactivity Initiated Accident interim acceptance criteria and guidance", Memorandum ML070220400, January 2007.
- [4] NUREG-800,"USNRC Standard Review Plan", Office of Nuclear Reactor Regulation, Section 15.4.9, Spectrum of Rod Drop Accidents (BWR), Revision 2 July 1981.
- [5] P. E. MacDonald, S. L. Seiffert, Z. R. Martinson, R. K. McCardell, D. E. Owen, and S. K. Fukuda, "Assessment of Light-Water-Reactor Fuel Damage During a Reactivity-Initiated Accident," Nuclear Safety, Volume 21, 582, 1980
- [6] Nuclear Energy Agency, "Proceedings of the Topical Meeting on RIA", NEA/CSNI/R(2003)8/VOL 1
- [7] Taiwan Power Company, "Lungmen Nuclear Power Station Startup Test Procedure- One RIP Trip Test", STP-28A-HP(2008).
- [8] Taiwan Power Company, "Lungmen Nuclear Power Station Startup Test Procedure- Three RIPs Trip Test", STP-28B-HP(2008).
- [9] Taiwan Power Company, "Lungmen Nuclear Power Station Startup Test Procedure- Reactor Full Isolation", STP-32-HP(2008).
- [10] U. S. Nuclear Regulatory Commission, TRACE v5.0 USER'S MANUAL, 2012.
- [11] J. R. Wang and H. T. Lin, W.C. Wang, S.M. Yang, and C. Shih, "TRACE models and verifications for LINGMEN ABWR", American Nuclear Society Winter Meeting, November 15-19, 2009.
- [12] J. R. Wang and H. T. Lin, "TRACE Analysis of MSIV Closure Direct Scram Event for Lungmen ABWR", in ICAPP 10, San Diego, CA, USA, 2010.
- [13] Y. Xu and T. Downar, "GenPMAXS Code for Generating the PARCS Cross Section Interface File PMAXS", University of Michigan, April, National Tsing-Hua University, 2012.
- [14] S.J. Chen, "Study and Application of Neutronic Model in TRACE code", National Tsing-Hua University, 2010.
- [15] C.Y. Chang, "The Establishment and Applications of Lungmen TRACE/PARCS Models", National Tsing-Hua University, 2012.
- [16] T.S. Feng, J.R. Wang, H.T. Lin, and C. Shih, "Analysis Of Feedwater Heater Transients For LUNG MEN ABWR BY TRACE/PARCS", ICONE 20th, 2012.
- [17] T. Downa, Y. Xu., V. Seke. And N. Hudson, PARCS v3.0 U.S. NRC Core Neutronic Simulator USER

MANUAL, University of Michigan, 2012.

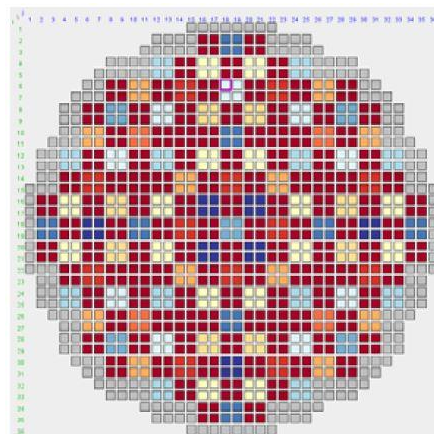
- [18] K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, and J.M. Cuta, FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods, NUREG/CR-7023, Vol. 1, 2011.



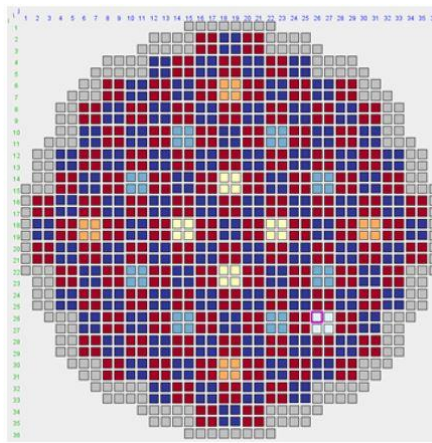
圖一：龍門電廠在 TRACE 下的模型



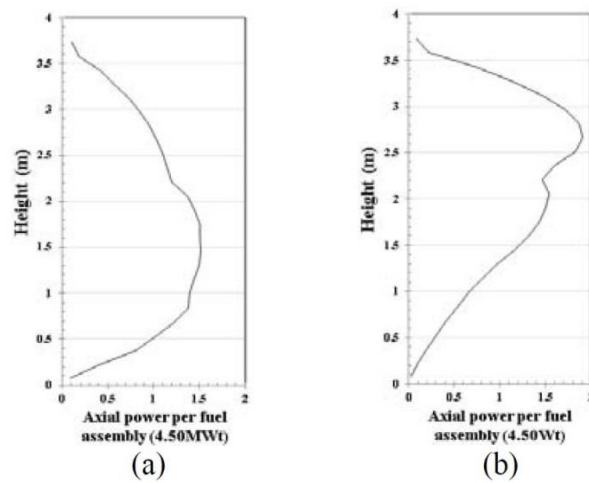
圖二：龍門電廠在 PARCS 中的爐心佈局狀況



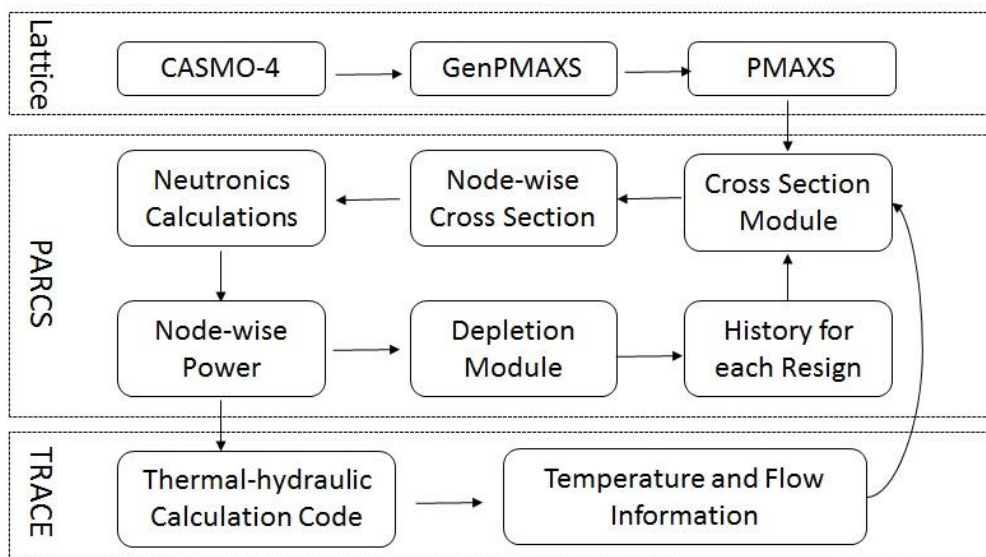
圖三：在案例一中 HFP 情況的控制棒佈局狀況



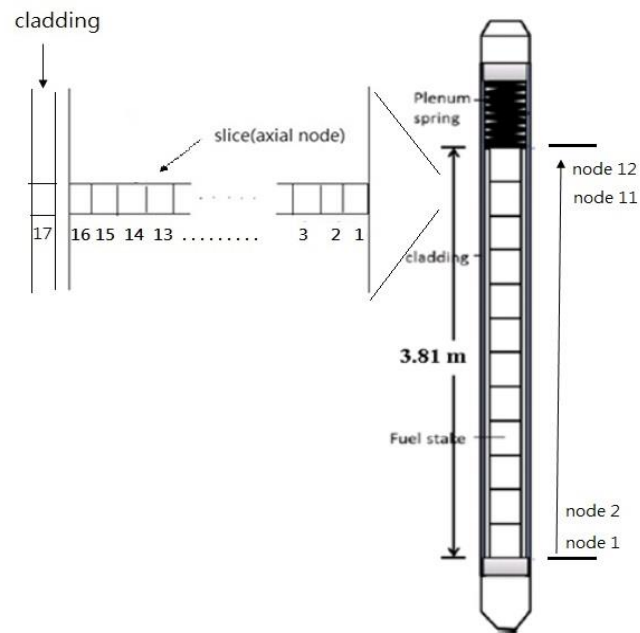
圖四：在案例二中 HZP 情況的控制棒佈局狀況



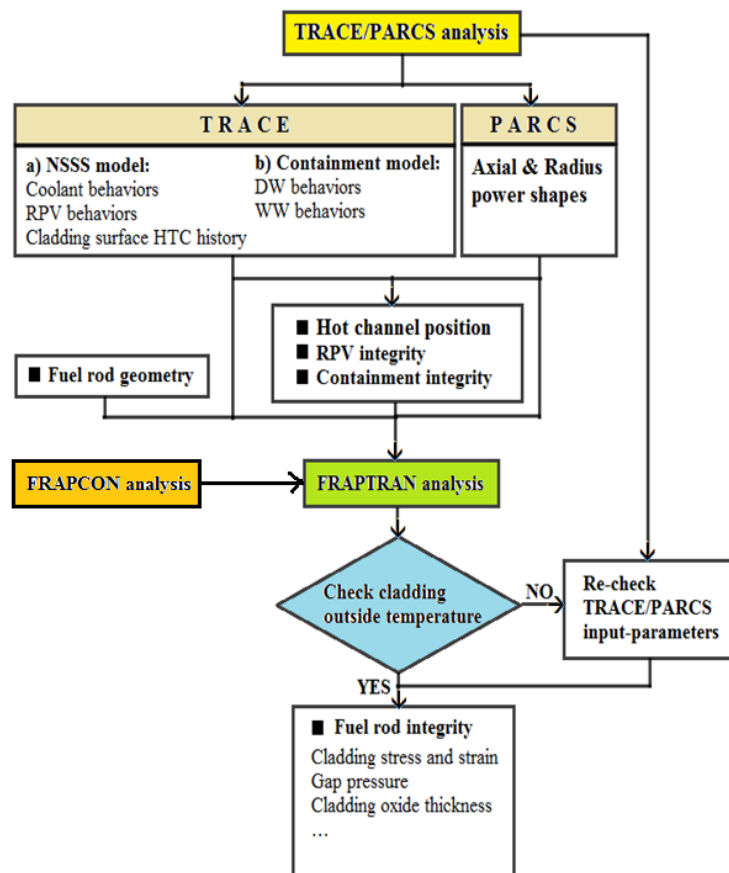
圖五：在(a)HFP 情況 (b)HZP 情況的爐心平均軸向功率分佈



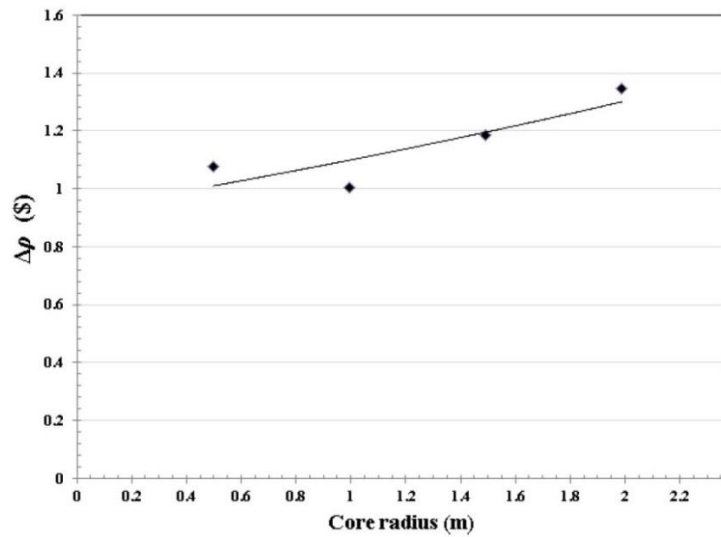
圖六：TRACE 與 PARCS 結合的程序概圖



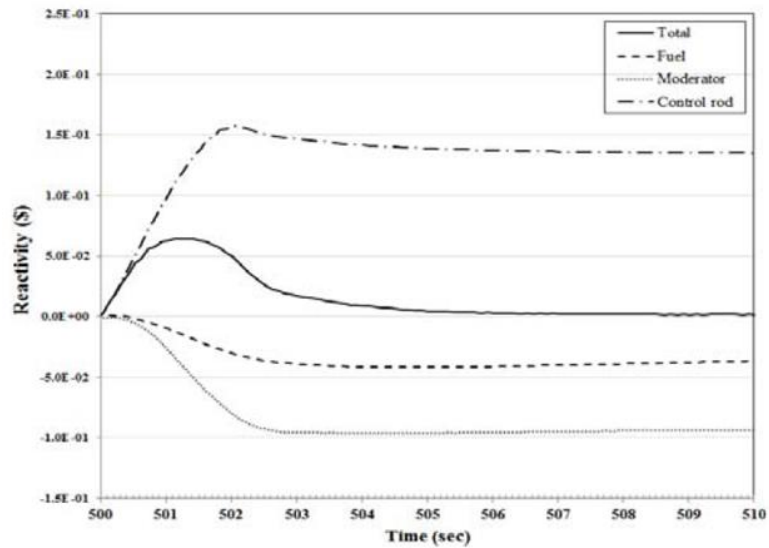
圖七：龍門電廠之單根燃料棒在 FRAPTRAN 中的模型



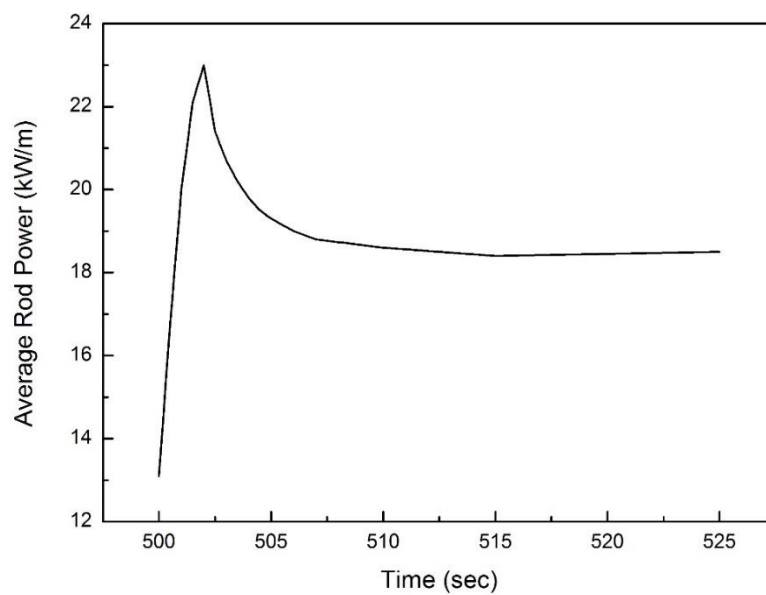
圖八：TRACE 與 PARCS 的結合結果與 FRAPCON/FRAPTRAN 輸入流程圖。本研究中使用全新燃料，初始燃料棒燃耗值為零，因此無需做 FRAPCON 燃耗值之輸入



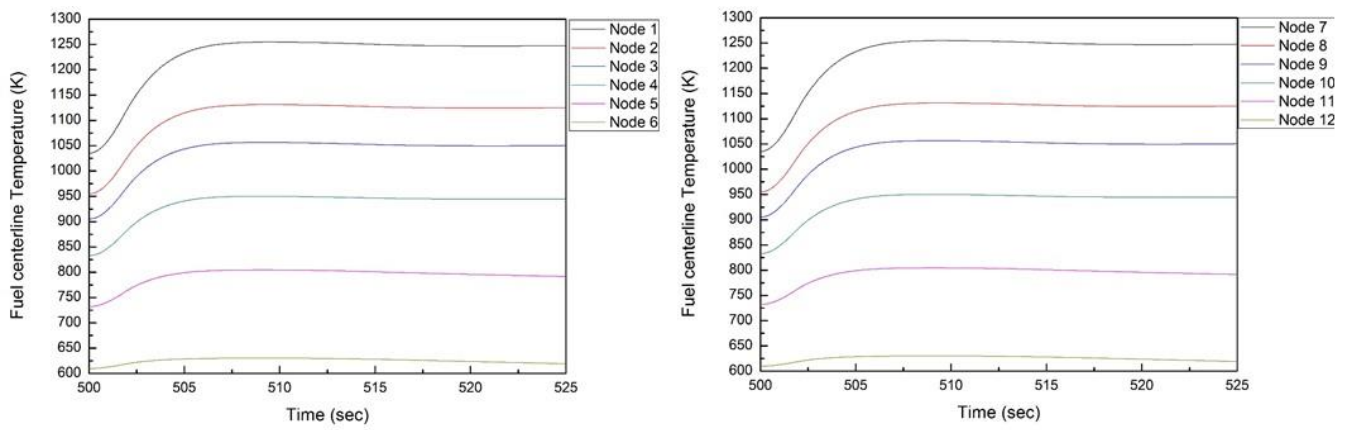
圖九：因掉棒產生的反應度改變與掉棒位置關係圖



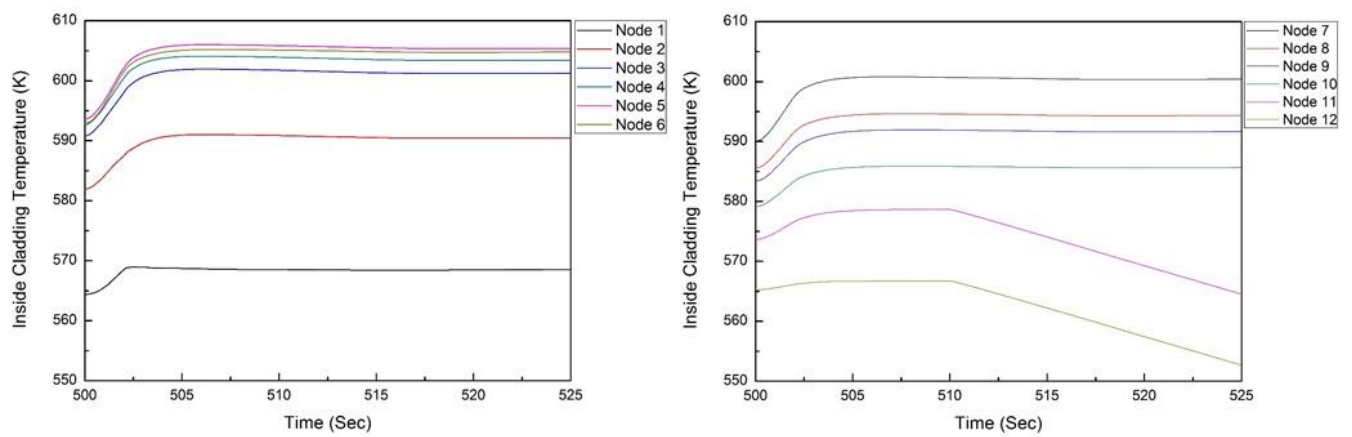
圖十一：掉棒後各項反應度影響



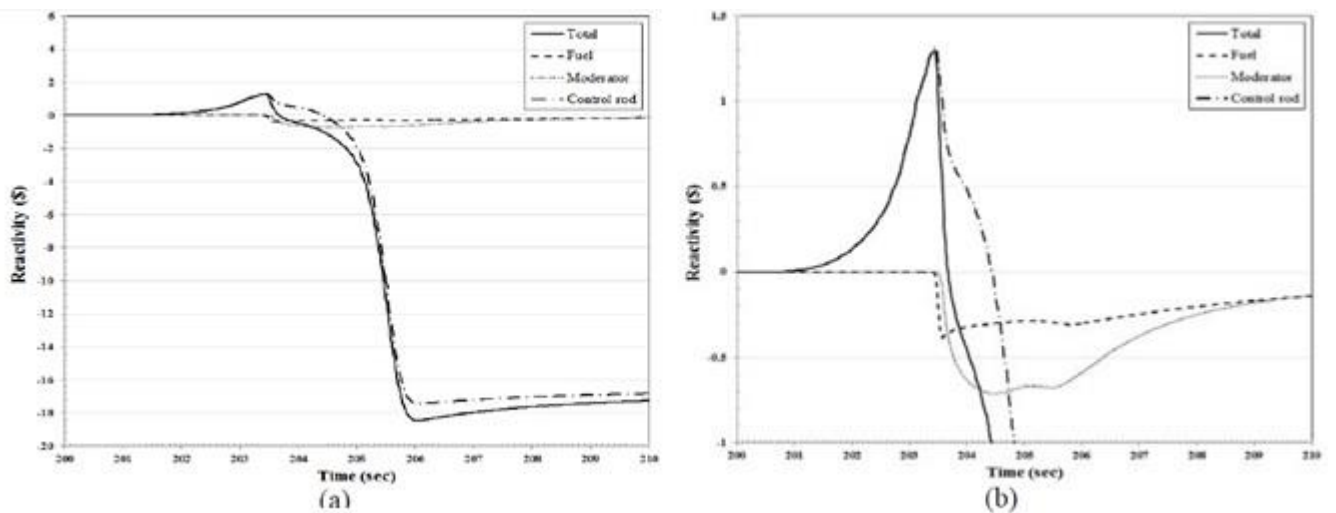
圖十二：案例一 HFP 情況下因掉棒的正反應度造成的功率突升



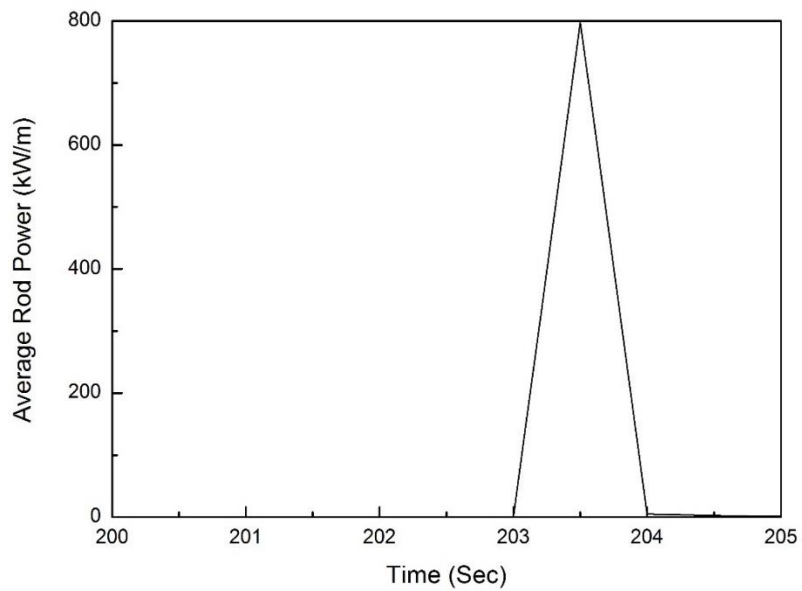
圖十三：節點 1 至節點 12 的燃料中心溫度變化



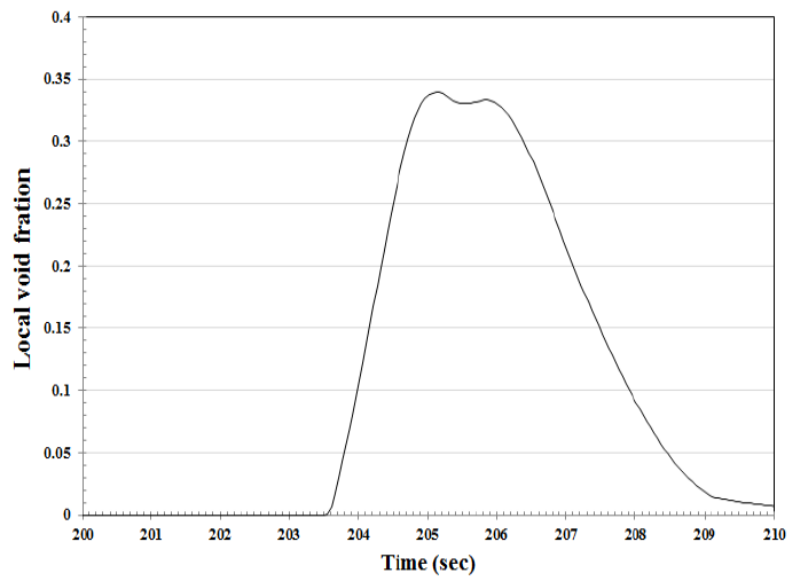
圖十四：節點 1 至節點 12 的護套內側平均溫度



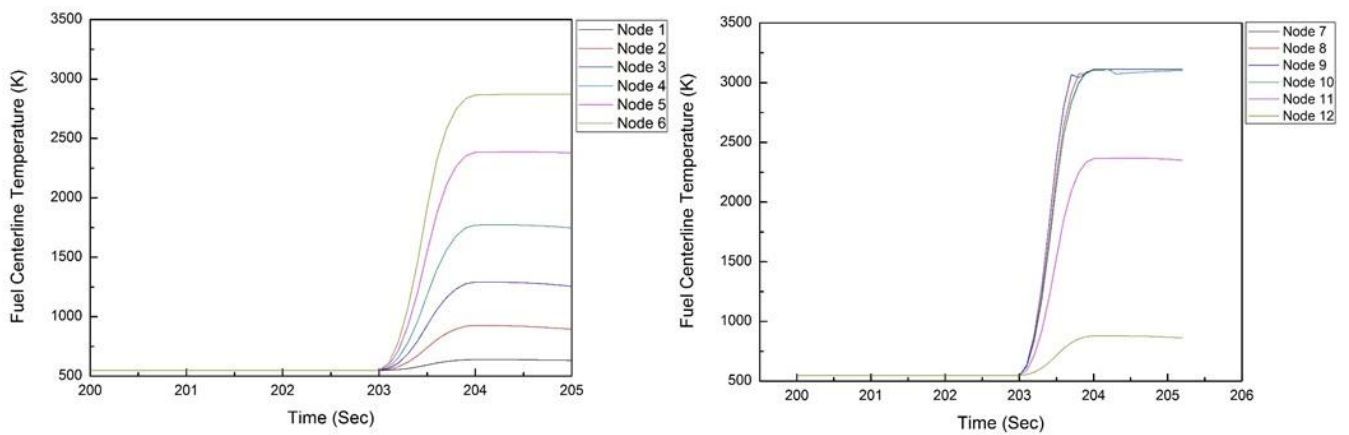
圖十五：案例二 HZP 情況下掉棒事故發生後各項反應度影響



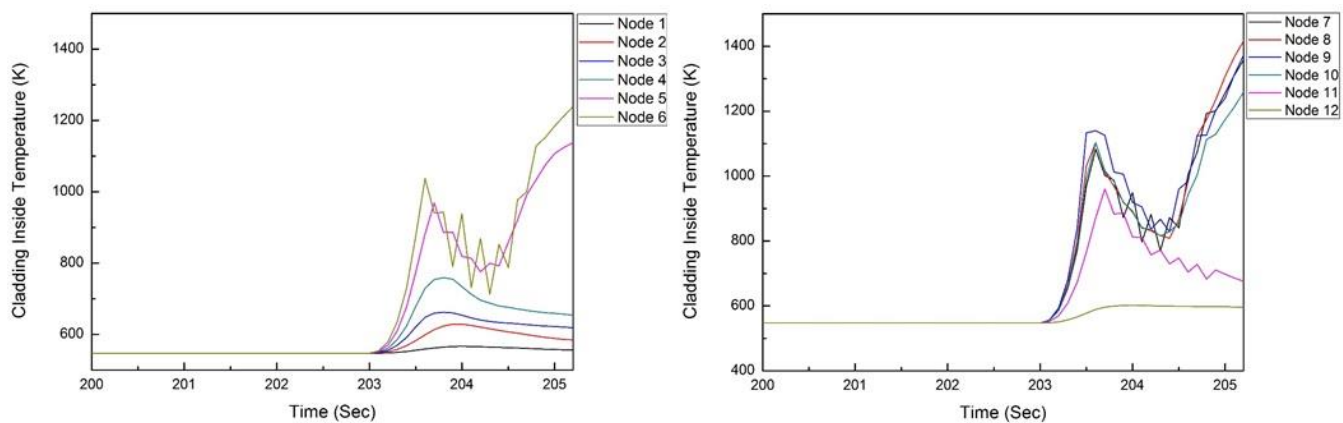
圖十六：案例二 HZP 情況下事故發生後平均燃料棒功率變化



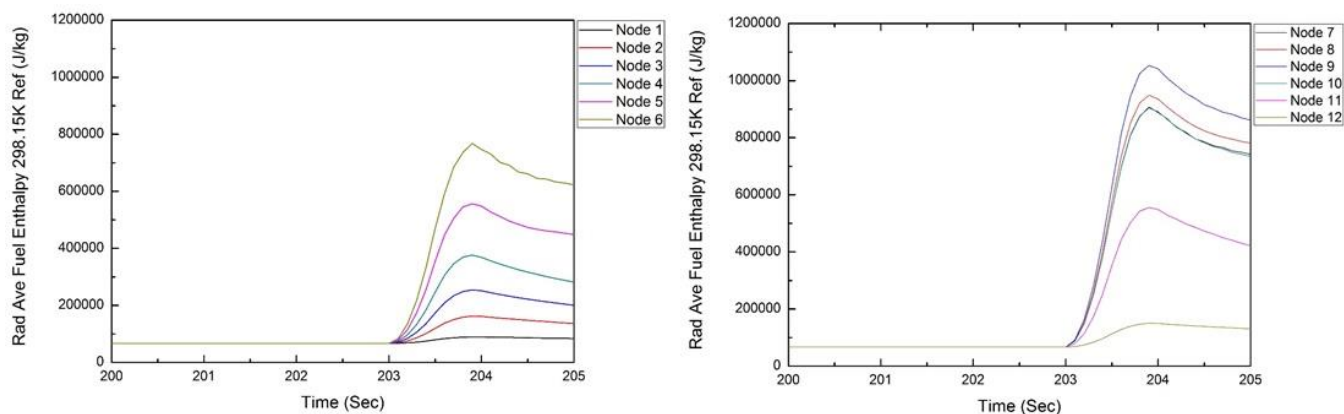
圖十七：案例二 HZP 情況下事故發生後局部的空泡分率變化



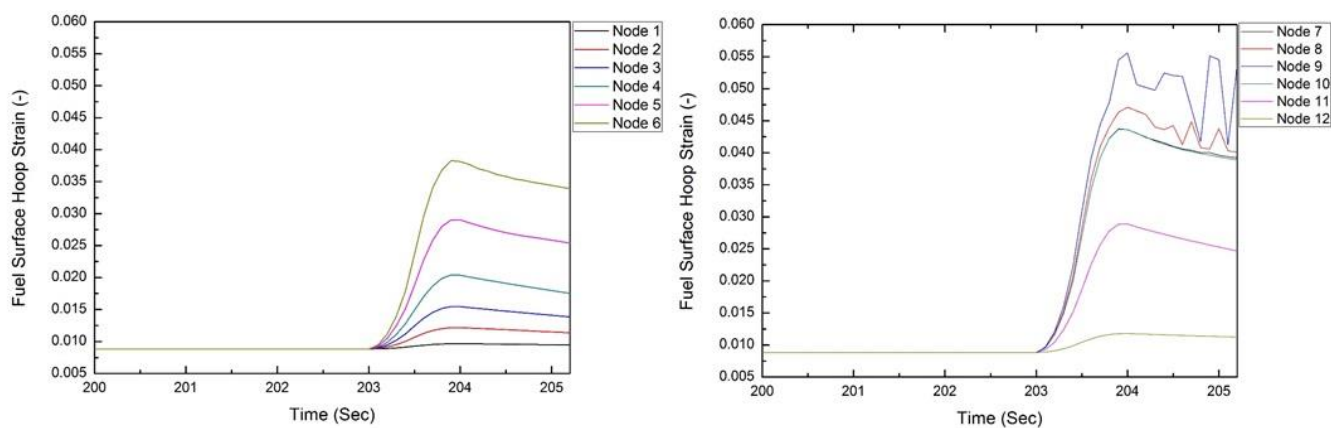
圖十八：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 燃料中心溫度變化



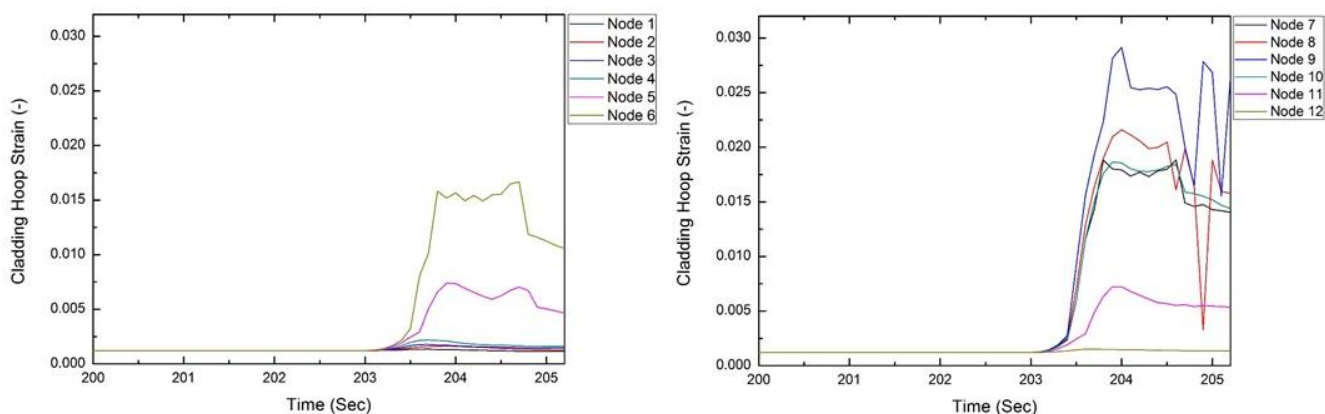
圖十九：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 護套內側平均溫度變化



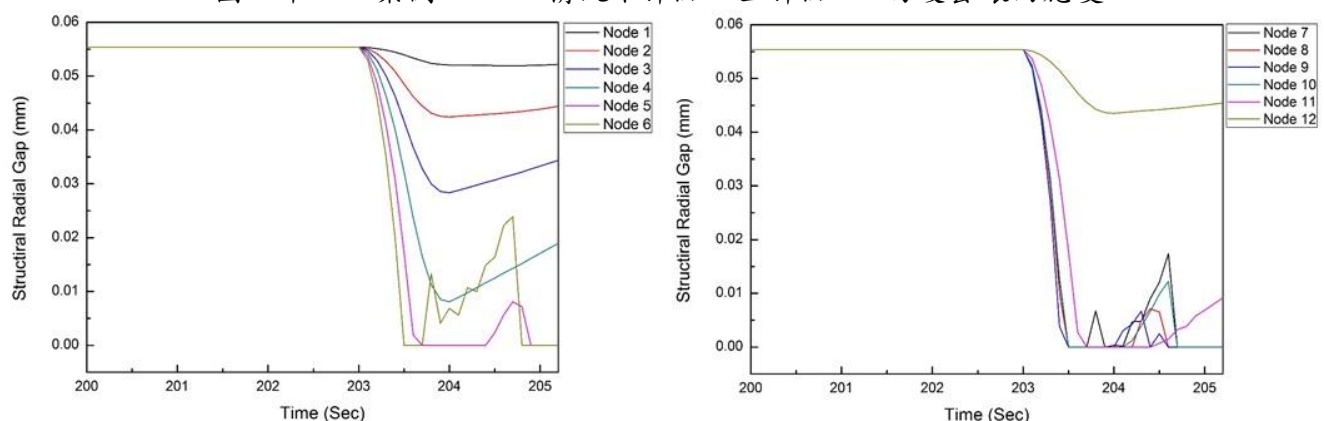
圖二十：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 護套平均熱焓量(298.15K 為基準)



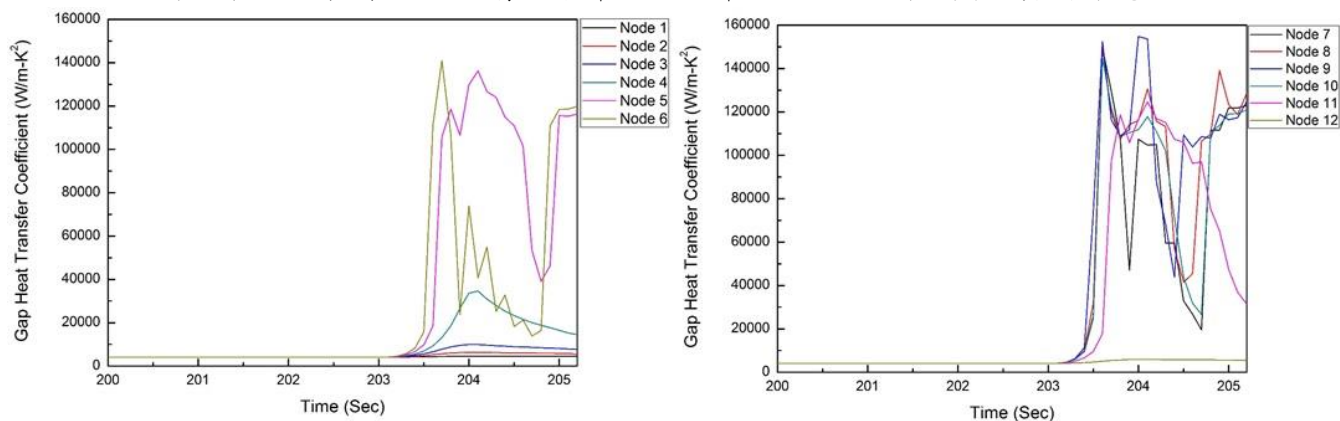
圖二十一：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 的燃料丸環向應變



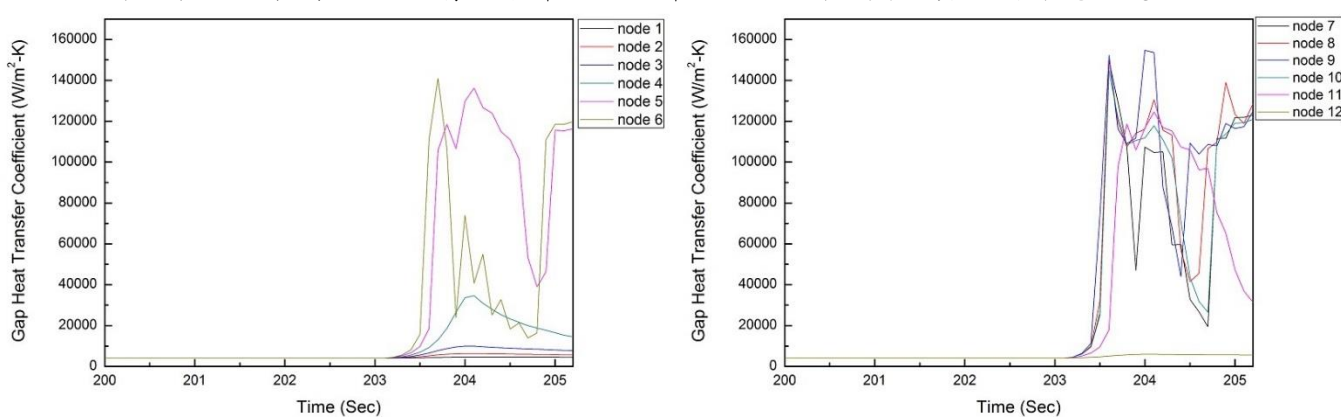
圖二十二：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 的護套環向應變



圖二十三：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 的燃料丸與護套間隙寬度



圖二十四：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 燃料丸與護套的間隙寬度變化



圖二十五：案例二 HZP 情況下節點 1 至節點 12 燃料丸與護套的間隙熱傳係數變化

# 核電廠圍阻體排氣效應探討

## Analysis of Nuclear power plant containment FCVS venting effects

計畫編號：MOST 104-NU-E-007-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：白寶實

e-mail：bspei@hotmail.com

計畫參與人員：洪振育、林正中

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

### 摘要

由於核一廠屬於 BWR 電廠且圍阻體為 Mark-I 型，因此有加裝 FCVS 之計畫，但核一廠目前尚未確定裝設 FCVS 之廠家、型號，因此本研究中介假設核一廠裝設瑞士 KKL 電廠所裝設由 IMI/Sulzer 設計之 FCVS 過濾器。利用 GOTHIC 程式模擬核一廠裝設此 FCVS，且用 MAAP 程式分析提供之核一廠發生加長型電廠全黑事故且爐心裸露時之氫氣產生質量流率做為邊界條件，在保守之假設下，檢驗若核一廠發生類福島事故之加長型電廠全黑事件而導致喪失爐心最終移熱能力，爐心產生高溫水蒸氣而導致鍋水反應產生氫氣時，為了避免產生之氣體使圍阻體過壓損壞，而將氣體透過圍阻體過濾排放系統緊急洩壓時，在排氣過程中 FCVS 之管路、過濾器以及排氣煙囪是否有產生氫氣爆燃的可能性，並對降低氫氣爆燃風險之方法提出建議，為本研究之研究標的。

研究中在三個保守假設下：排氣路徑僅有 FCVS 單一路徑、氫氣直接在抑壓池水面產生，以及水蒸氣皆被抑壓池冷凝，分析結果顯示除了剛開啟 FCVS 時之暫態及煙囪頂層外，FCVS 內空氣體積分率皆低於可能發生爆炸的 20% 而無氫氣爆燃之風險。若在第 3000 秒開啟 FCVS，空氣與氫氣之組合可於開啟暫態之部分時間進入可爆燃區，有氫氣爆燃之風險。因此根據分析結果建議，應避免排氣過程有靜電累積而產生火花之可能，例如以導體為排氣管路時，須對管路接地；對 FCVS 裝設填充氫氣裝置，並保守起見建議裝設預熱裝置，在開啟 FCVS 排氣前先對 FCVS 進行填充氫氣以及預熱，以避免在開啟暫態時因高空氣體積分率或水蒸氣冷凝導致氫氣及空氣體積分率上升之氫氣爆燃風險。

關鍵字：核一廠、氫氣爆燃、圍阻體過濾排氣系統

### Abstract

Because Chin Shan nuclear power plant is BWR NPP with Mark-I Containment, it considers the possibility of being equipped with FCVS. This study assumes Chin Shan NPP equipped with FCVS designed by IMI/Sulzer and uses GOTHIC (Generation of Thermal Hydraulic Information for Containment) code to simulate Chin Shan nuclear power plant equipped with FCVS under prolonged station blackout accident conditions and core uncover like Fuku

shima accident. The target of this study is looked into and investigated the volume fraction of hydrogen and air of pipes, filters and stack when venting through FCVS action is taken, and check whether the volume fraction of hydrogen and air will high enough to cause hydrogen explosion under conservative assumptions.

Under the three conservative assumptions: FCVS is the only path to vent; production of hydrogen is directly under water level in suppression pool and no consideration about steam. The consequence of analysis shows that the combination of air concentration and hydrogen concentration can enter flammable region at the transient starting of FCVS opening and have risk of hydrogen explosion. And then, the volume fraction of air will much lower than 20% during venting process and have no risk of hydrogen explosion; during venting process, the top of stack also has risk of hydrogen explosion due to the enrichment of air at that place. Therefore, we suggest that when using FCVS, it should equip with nitrogen vessel and preheater to make the FCVS inert and avoid steam condensation before containment atmosphere injection, and accumulation of static electric charge should be avoided during venting process at any place of the venting route.

Keyword: Chinshan Nuclear Power Plant, Hydrogen explosion, Filtered Containment Venting System

### I. 前言

福島事故後，美國 NRC(The Nuclear Regulatory Commission)成立了 NTTF(Near-Term Task Force, 近程專責小組)對福島事故深入調查，並且提出十二項強化 21 世紀反應器安全之建議，其中第五項建議為如圍阻體為 Mark-I 型、Mark-II 型之輕水沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)電廠，皆應該配備強化圍阻體排氣系統(Hardened containment venting system, HCVS)，此乃因為 Mark-I 型以及 Mark-II 型圍阻體體積較小，較容易在事故發生時壓力過高而需要透過排氣降低圍阻體內之壓力；同時鼓勵電廠執照者考慮未來加裝過濾器之可能，以避免輻射物質直接進入環境對周遭民眾之身體健康及財產安全造成影響。因此本研究考慮配備有過濾器之圍阻體過濾排氣系統(Filtered containment venting system, FCVS)之裝設後對核電廠氫爆安全性之分析。

台灣金山核能一廠為配備 Mark-I 型圍阻體之 BWR 電廠，且核一廠未來也有加裝 FCVS 之規劃；由於目前核一廠尚未決定加裝 FCVS 之型號，無法利用預定加裝

之 FCVS 實際設計數據進行 GOTHIC 程式模擬分析；因此研究中假設核一廠裝設瑞士 KKL 電廠已裝設之由 IMI/Sulzer 設計之過濾器。由於利用 FCVS 排氣時應避免氫氣爆燃之風險，因此研究中探討若核一廠發生類福島之加長型電廠全黑事故且爐心裸露，當一次圍阻體內壓力上升需透過 FCVS 排氣時，利用 GOTHIC 程式模擬並分析 FCVS 中管路、過濾器以及排氣煙囪內體積中之氫氣體積分率以及空氣體積分率，並利用 Shapiro & Moffette 之空氣、氫氣、水蒸氣燃燒條件區塊分布三元圖來判斷利用 FCVS 進行排氣之過程中是否有氫氣爆燃之風險，並對核一廠透過 FCVS 排氣時降低氫氣爆燃風險之方法提出建議。

II. 主要內容

研究中利用 GOTHIC 程式模擬核一廠一次圍阻體結構，並且在一次圍阻體濕井連接管路至圍阻體過濾排氣系統之過濾器，再由過濾器連接排氣煙囪將氣體排至外界。

- GOTHIC 程式分析模型中採用下面三項保守假設：
- 1. 進行圍阻體排氣時，圍阻體過濾排放系統為唯一排氣路徑；
  - 2. 研究中直接將氫氣產生速率邊界條件連接於抑壓池水面，而非將氫氣產生速率邊界條件設定於乾井再使氫氣由乾井經通洩管系統排入抑壓池；
  - 3. 排入 FCVS 之氣體中水蒸氣體積分率為 0%，即假設排入抑壓池之水蒸氣皆被抑壓池水冷凝。

核一廠圍阻體與過濾排氣系統之 GOTHIC 程式輸入模型如圖 II.1 所示。

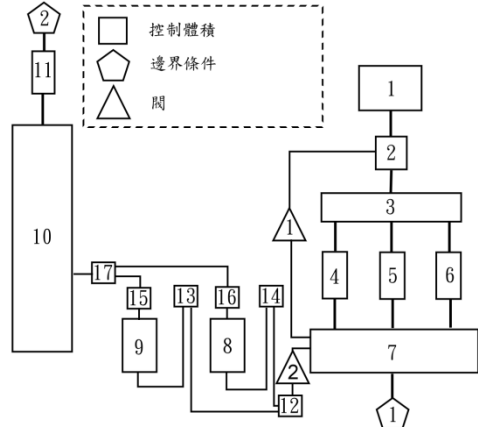


圖 II.1 核一廠圍阻體與過濾排氣系統 GOTHIC 輸入模型圖

圖 II.1 所示，矩形代表的是控制體積(Control volume)；五角形代表的是邊界條件(Boundary condition)；三角形代表的是閥(Valve)。各個系統組件之說明如表 II.1 至表 II.3。

表 II.1 核一廠圍阻體與過濾排氣系統 GOTHIC 分析輸入模型控制體積說明

| 控制體積 |    |
|------|----|
| 編號   | 名稱 |
| 1    | 乾井 |

|    |          |
|----|----------|
| 2  | 通洩管      |
| 3  | 通洩集管     |
| 4  | 下通管(第一組) |
| 5  | 下通管(第二組) |
| 6  | 下通管(第三組) |
| 7  | 抑壓池      |
| 8  | 過濾器(第一個) |
| 9  | 過濾器(第二個) |
| 10 | 排氣煙囪     |
| 11 | 大氣       |
| 12 | 濕井出管     |
| 13 | 過濾器 1 入管 |
| 14 | 過濾器 2 入管 |
| 15 | 過濾器 1 出管 |
| 16 | 過濾器 2 出管 |
| 17 | 排氣煙囪入管   |

表 II.2 核一廠圍阻體與過濾排氣系統 GOTHIC 分析輸入模型邊界條件說明

| 邊界條件 |                                          |
|------|------------------------------------------|
| 編號   | 名稱                                       |
| 1    | MAAP 程式計算出之核一廠發生加長型電廠全黑事故且發生爐心裸露後之氫氣產生速率 |
| 2    | 大氣壓力邊界條件                                 |

MAAP 程式計算出之核一廠發生加長型電廠全黑事故時發生爐心裸露時之氫氣產生速率如圖 II.2 所示，由圖 II.2 可得知大部分氫氣在爐心裸露後第 1500 秒到第 3000 秒之間產生。

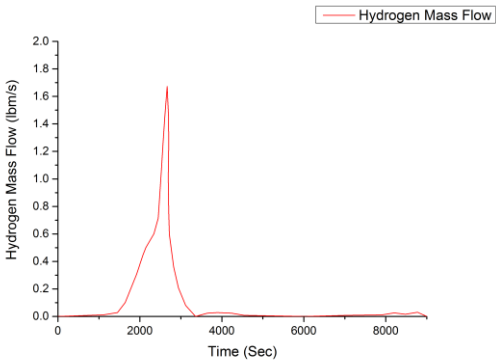


圖 II.2 MAAP 程式計算得之核一廠假設類福島加長型 SBO 事故下爐心裸露後之氫氣產生率

表 II.3 核一廠圍阻體與過濾排氣系統 GOTHIC 分析輸入模型閥之說明

| 閥  |                       |
|----|-----------------------|
| 編號 | 名稱                    |
| 1  | 真空破壞器(vacuum breaker) |
| 2  | 圍阻體過濾排放系統開關閥          |

核一廠之真空破壞器口徑為 18 吋，設定當抑壓池上方氣體空間壓力高過乾井壓力 0.5psi 時，真空破壞器會開啟，使抑壓池上方氣體透過通洩管排入乾井，直到抑壓池與乾井之壓力相等時才會再關閉。

### III. 結果與討論

對於氫氣是否會有發生爆燃之風險，研究中參考如圖 III.1 之 Shapiro & Moffette 之空氣、氫氣、水蒸氣燃燒條件區塊三元圖；當氣體組合在圖中非爆燃(Non-flammable)區內，則不會有氫氣爆燃之風險；若可在可爆燃(Flammable)及可爆轟(Detonable)區內則有氫氣爆燃之風險，若有點燃源或者高溫源之存在則可能導致氫氣燃燒或自燃進而引發氫氣爆炸。由圖中可知當空氣體積分率低於 20% 以下時，即使氫氣體積分率偏高，亦無氫氣爆燃之風險。因此分析中當空氣體積分率高於 20% 時方須考慮氫氣爆燃之風險。

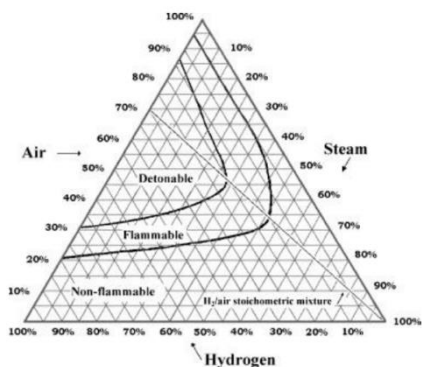


圖 III.1 Shapiro & Moffette 之空氣、氫氣、水蒸氣燃燒條件區塊三元圖

圖 III.2 至圖 III.14 為大量產生氫氣前就開啟 FCVS 進行排氣，即 GOTHIC 程式分析設定於第 0 秒即開啟圍阻體過濾排氣系統連接閥時，圍阻體過濾排氣系統內組件內部體積之空氣、氫氣以及氮氣體積分率之分析計算結果。圖中以 layer1、layer2 表示是在體積內切割之分層，layer1 代表最底層、layer2 則是高於 layer1 一層，以此類推，數字越大則代表層數越高。

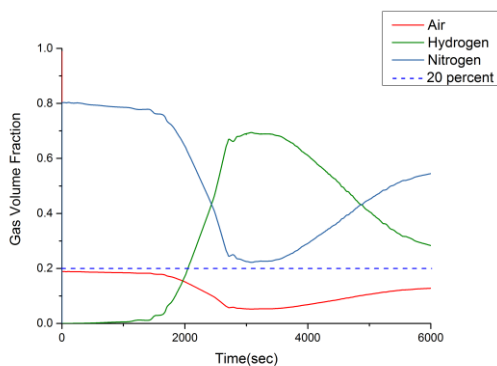


圖 III.2 濕井出管於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

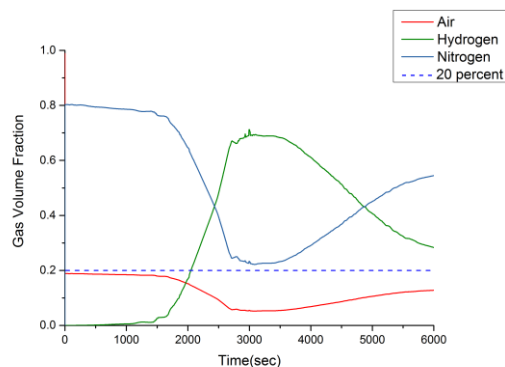


圖 III.3 過濾器一入管於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

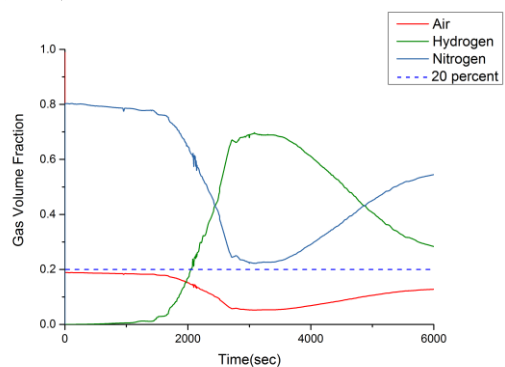


圖 III.4 過濾器二入管於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

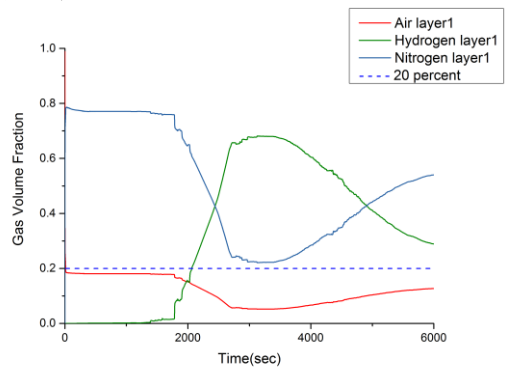


圖 III.5 過濾器一第 1 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

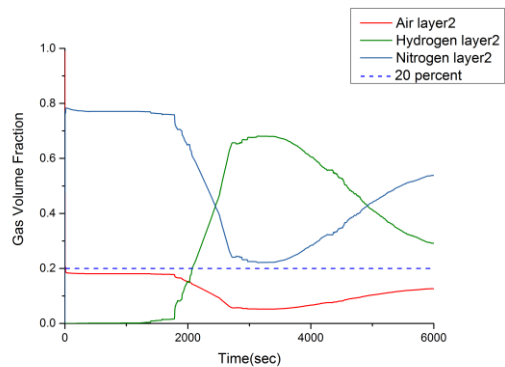


圖 III.6 過濾器一第 2 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

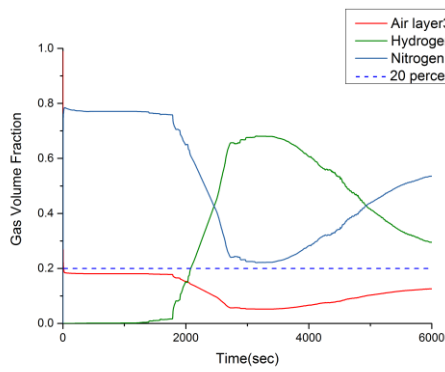


圖 III.7 過濾器一第 3 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

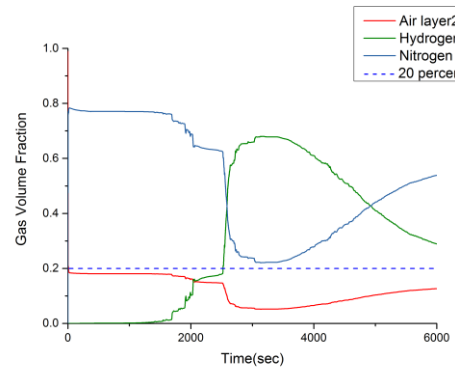


圖 III.11 過濾器二第 2 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

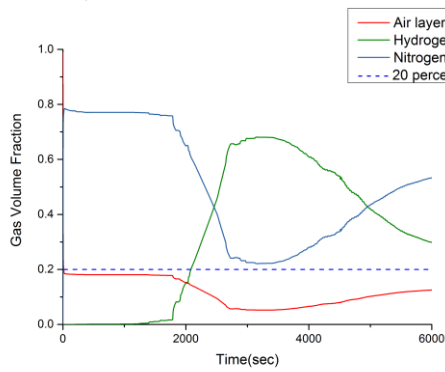


圖 III.8 過濾器一第 4 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

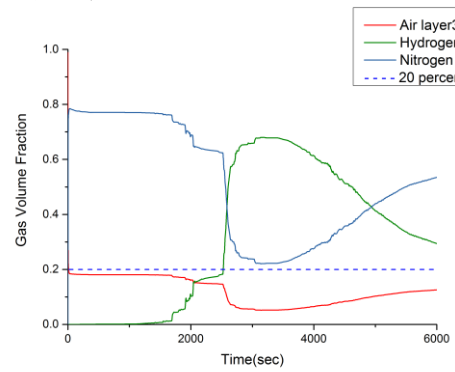


圖 III.12 過濾器二第 3 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

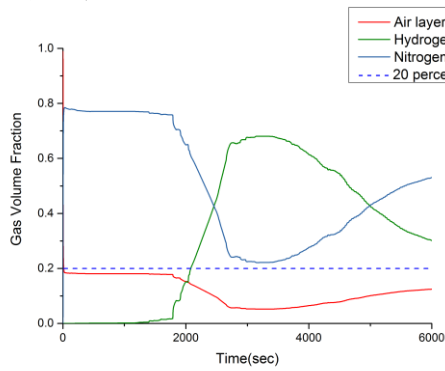


圖 III.9 過濾器一第 5 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

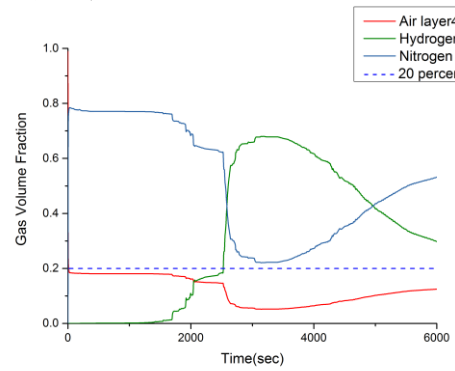


圖 III.13 過濾器二第 4 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

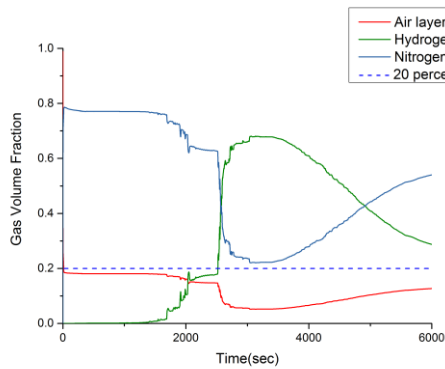


圖 III.10 過濾器二第 1 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

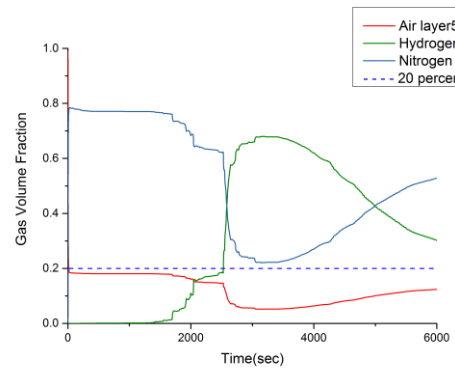


圖 III.14 過濾器二第 5 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

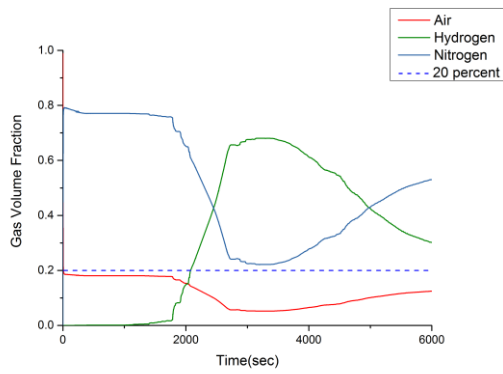


圖 III.15 過濾器一出管於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

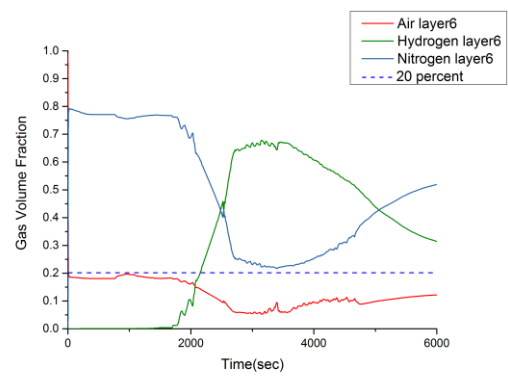


圖 III.19 排氣煙囪第 6 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

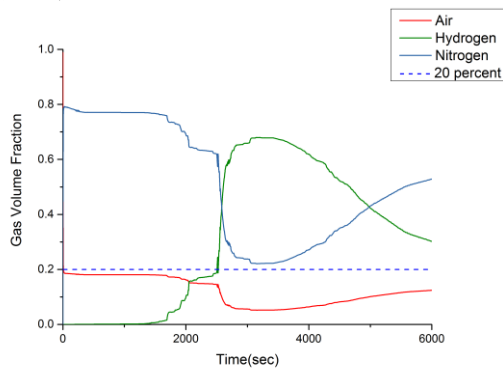


圖 III.16 過濾器二出管於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

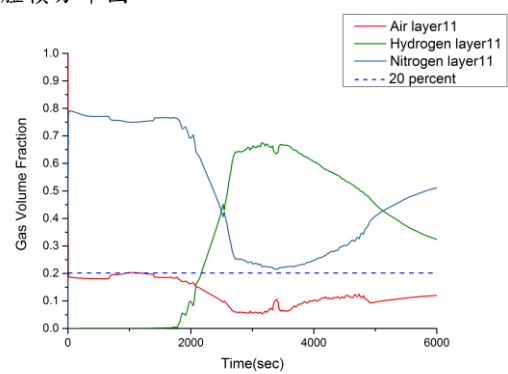


圖 III.20 排氣煙囪第 11 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

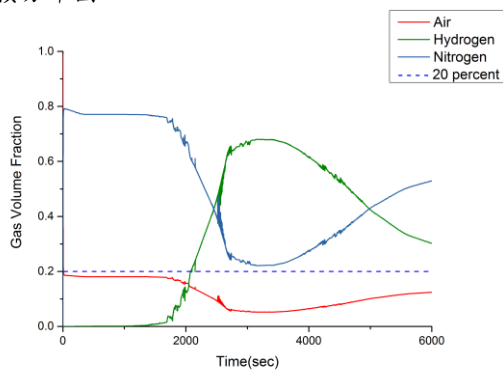


圖 III.17 排氣煙囪入管於第 0 秒開啟之空氣、氫氣、氮氣體積分率圖

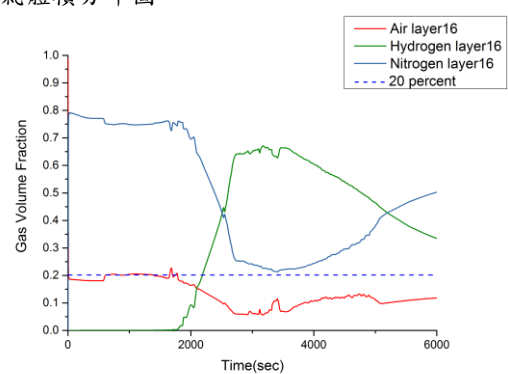


圖 III.21 排氣煙囪第 16 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

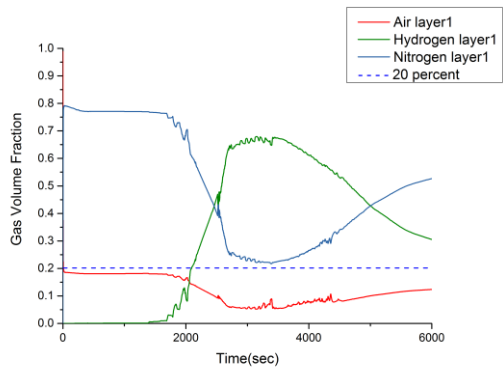


圖 III.18 排氣煙囪第 1 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

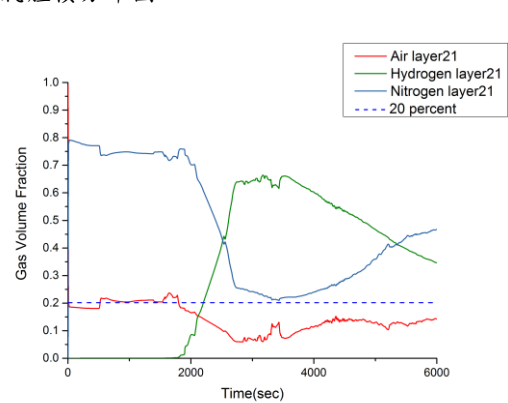


圖 III.22 排氣煙囪第 21 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

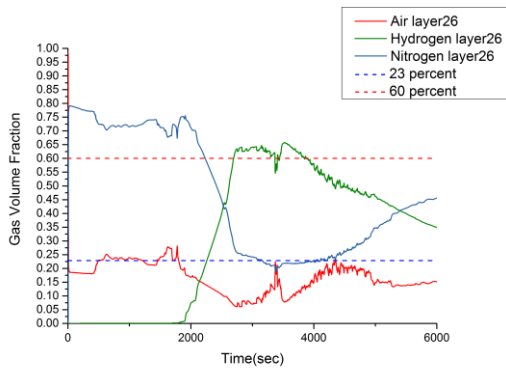


圖 III.23 排氣煙囪第 26 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

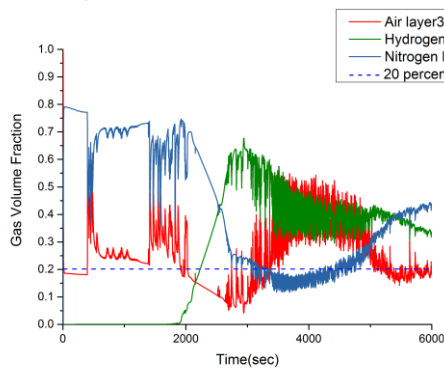


圖 III.24 排氣煙囪第 30 層於第 0 秒開啟之空氣、氫氣以及氮氣體積分率圖

由圖 III.2 至 III.17 可得知，由於圍阻體內已填充氮氣，因此分析結果中，FCVS 管線及過濾器體積內之空氣體積分率皆低於 20%，無發生氫氣爆燃之可能。圖 III.18 至 III.24 顯示排氣煙囪之分析結果，在排氣煙囪之低分層，如第 1 層、第 6 層、第 11 層、第 16 層以及第 21 層，空氣體積分率亦低於 20% 而無發生氫氣爆燃之可能。在排氣煙囪高分層，由於與大氣連接，會有空氣流入導致空氣體積分率上升之情況，如第 26 層之體積分率在排氣過程中可達 23%，在燃燒三元圖上對應進入氫氣可爆燃區的氫氣體積最低分率為 60%，在第 26 層的分析結果圖可以得知，空氣體積分率達 23% 時，氫氣體積分率仍略低於 60% 而無發生氫氣爆燃之可能。在排氣煙囪頂層第 30 層時，由於第 30 層直接與大氣連接，因此顯示已有發生氫氣爆燃之可能，若有點燃源出現，則會發生氫氣爆燃。在 FCVS 系統中，雖無明顯之點燃源存在，但排氣過程可能產生靜電累積，因此煙囪頂層之設計需注意避免靜電累積而產生火花，以避免氫氣爆燃之發生。

為了要了解爐心裸露後產生大量氫氣時，經由 FCVS 排氣時是否會有發生氫氣爆燃之風險，研究中利用 GOTHIC 程式設定 FCVS 在第 3000 秒後才開啟，由圖 II.8 中 MAAP 程式分析提供之氫氣產生速率可以得知在 GOTHIC 程式分析第 3000 秒時圍阻體內部已經產生大量氫氣，因此在第 3000 秒開啟 FCVS 會將圍阻體內高氫氣體積分率之氣體排入 FCVS 內。圖 III.25 至圖 III.47 為第 3000 秒開啟 FCVS 連接閥將混有氫氣之氣體排入 FCVS 後，FCVS 內體積在開啟暫態時空氣與氫氣體積分率之 GOTHIC 程式分析結果。

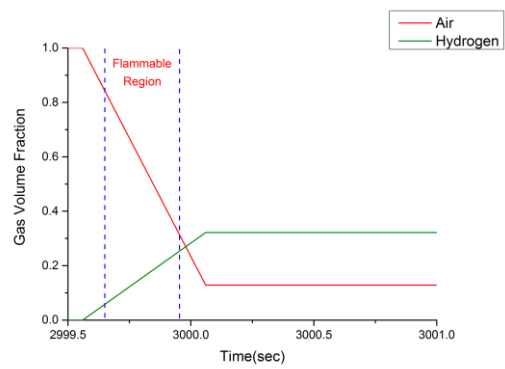


圖 III.25 濕井出管於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

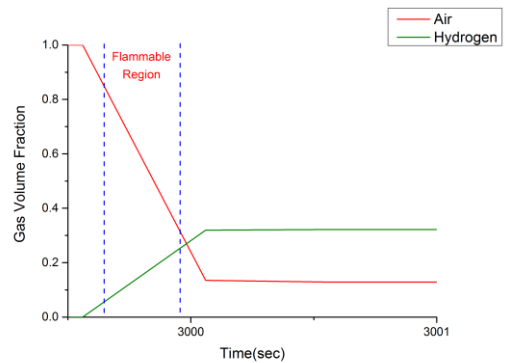


圖 III.26 過濾器一入管於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

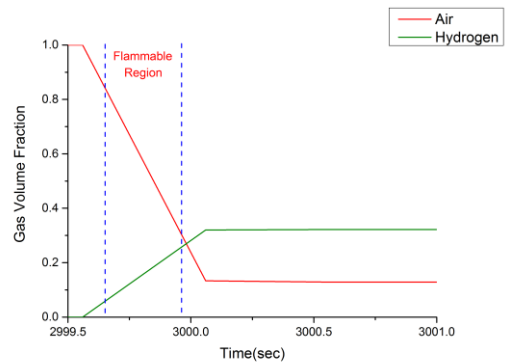


圖 III.27 過濾器二入管於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

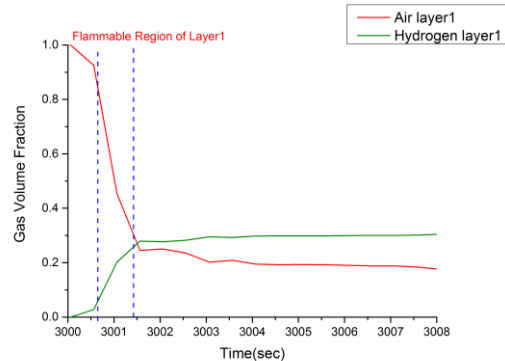


圖 III.28 過濾器一第 1 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

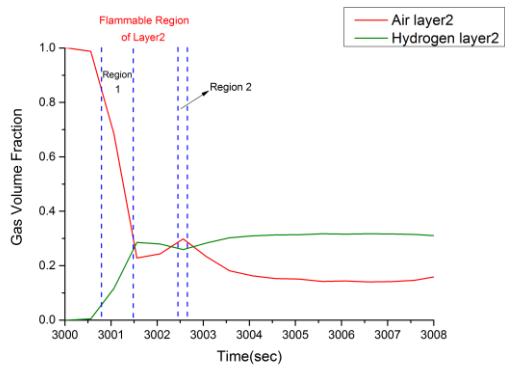


圖 III.29 過濾器一第2層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

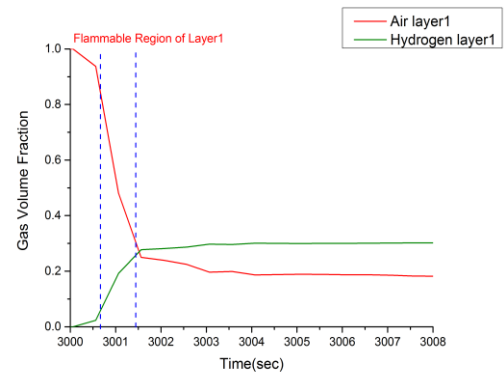


圖 III.33 過濾器二第1層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

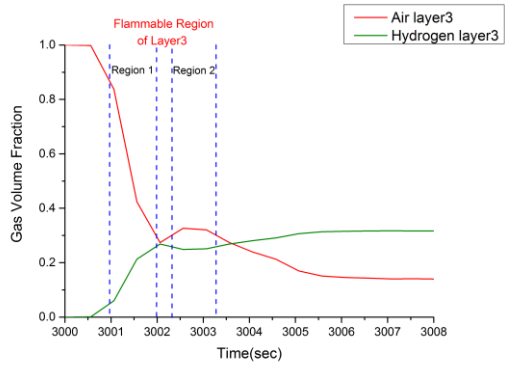


圖 III.30 過濾器一第3層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

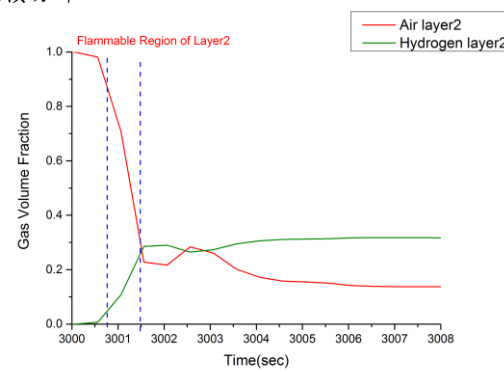


圖 III.34 過濾器二第2層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

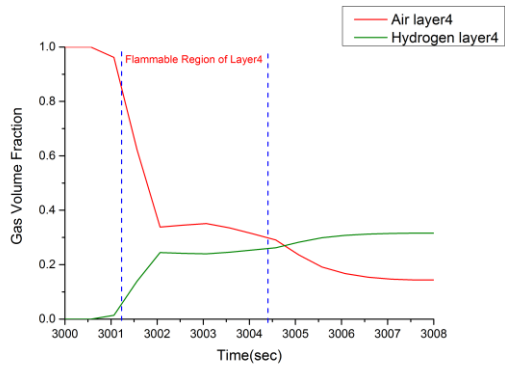


圖 III.31 過濾器一第4層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

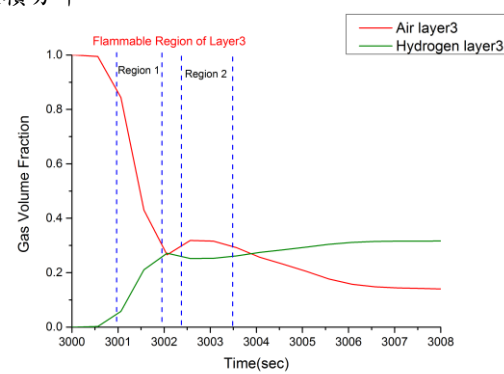


圖 III.35 過濾器二第3層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

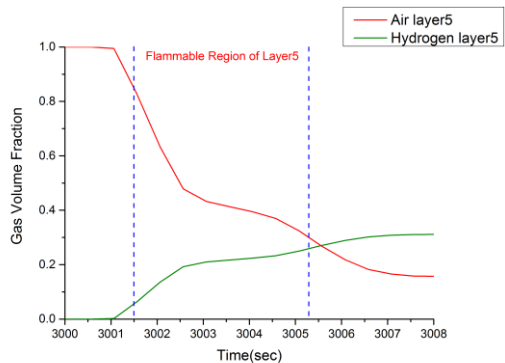


圖 III.32 過濾器一第5層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

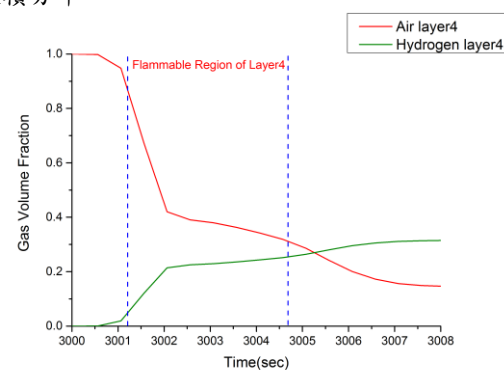


圖 III.36 過濾器二第4層於第3000秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

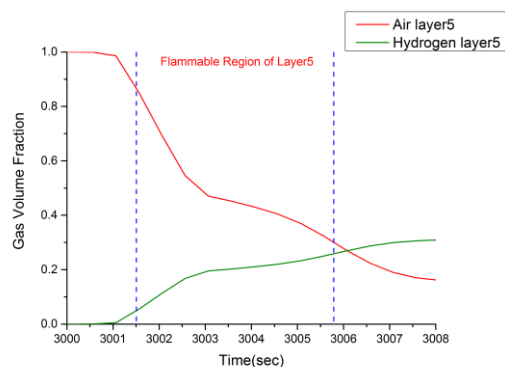


圖 III.37 過濾器二第 5 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

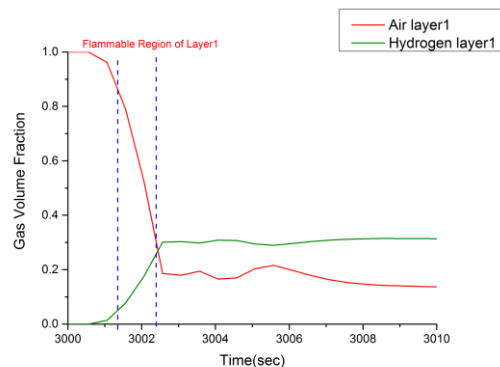


圖 III.41 排氣煙囪第 1 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

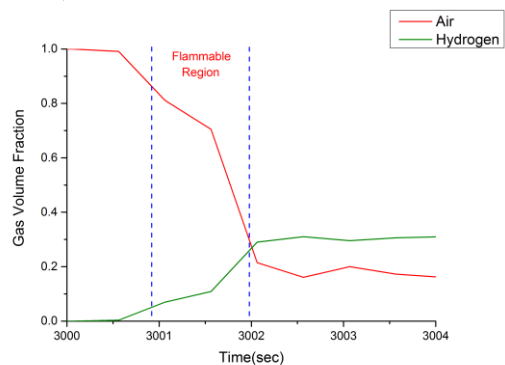


圖 III.38 過濾器一出管於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

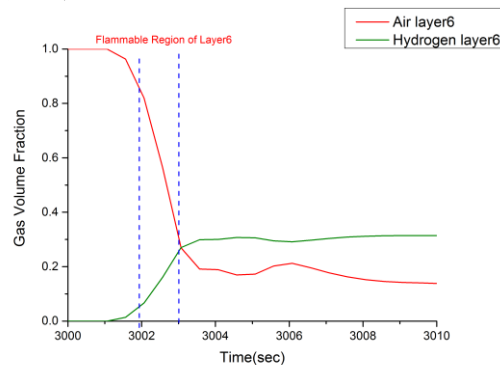


圖 III.42 排氣煙囪第 6 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

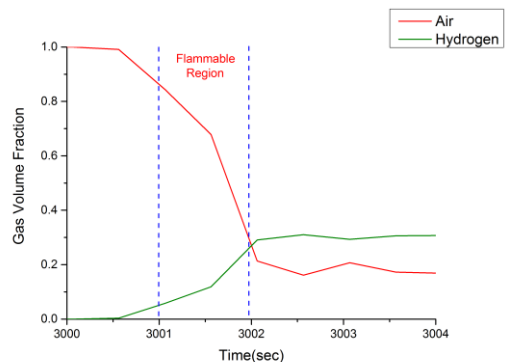


圖 III.39 過濾器二出管於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

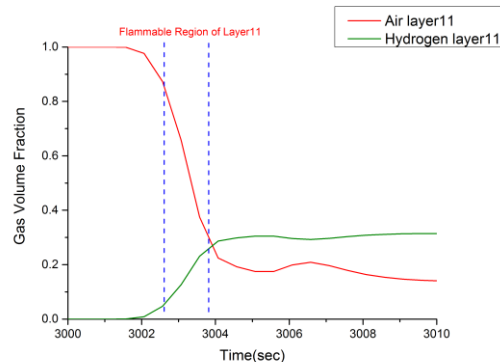


圖 III.43 排氣煙囪第 11 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

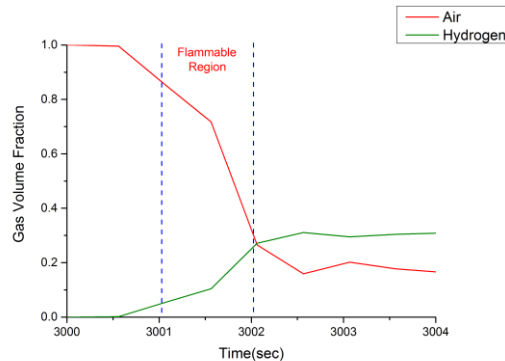


圖 III.40 排氣煙囪入管於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

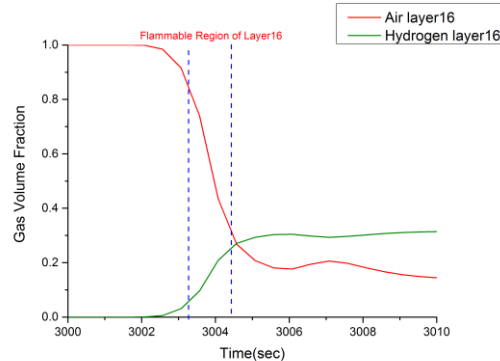


圖 III.44 排氣煙囪第 16 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

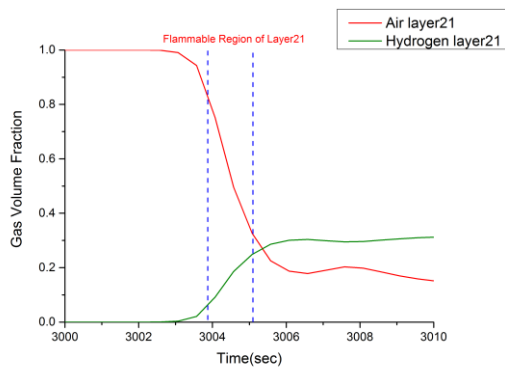


圖 III.45 排氣煙囪第 21 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

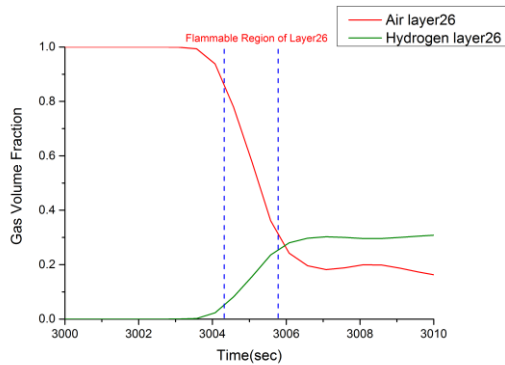


圖 III.46 排氣煙囪第 26 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

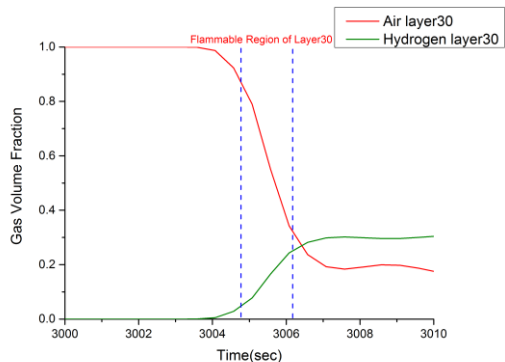


圖 III.47 排氣煙囪第 30 層於第 3000 秒開啟暫態之空氣與氫氣體積分率

圖 III.25 至圖 III.47 可以得知，在第 3000 秒圍阻體內已產生大量氫氣後才開啟 FCVS 排氣，剛開啟 FCVS 之暫態時間內，在圖 III.1 Shapiro & Moffette 之空氣、氫氣、水蒸氣燃燒條件區塊三元圖中有部分時間(如藍虛線所標示)可進入可爆燃區而有氫氣爆燃之風險。

#### IV. 結論

在三個保守假設下：FCVS 為唯一排氣路徑、銹水反應劇烈產生之氫氣直接產生於抑壓池池面以及不考慮水蒸氣存在，第 0 秒開啟 FCVS 之研究結果顯示煙囪頂部可能進入氫氣爆燃區而有氫氣爆燃之風險；第 3000 秒開啟 FCVS 時之研究結果顯示開啟暫態可能進入氫氣爆燃區而有氫氣爆燃之可能；雖然保守假設中不考慮水蒸氣存在，但排入 FCVS 氣體中之水蒸氣在剛開啟 FCVS 時，水蒸氣會被 FCVS 內之冷空氣、管壁冷凝，水蒸氣

冷凝會使得水蒸氣的體積分率下降、空氣與氫氣之體積分率上升而增加氫氣爆燃之風險；圍阻體過濾系統內雖缺乏明顯之點燃源，但排放過程中可能在管壁累積靜電產生火花而成為點燃源。因此對於核一廠降低利用 FCVS 排氣時之氫氣爆燃風險提出以下建議：

1. 加裝氫氣注入裝置，並在開啟 FCVS 前預先對 FCVS 注入氫氣。
2. 加裝預熱裝置，並在開啟 FCVS 前對 FCVS 預熱。
3. 避免排氣煙囪有累積靜電而產生火花之可能，例如以導體作為排氣煙囪管壁時，令排氣煙囪管壁接地。

#### 參考文獻

- [1]Electric Power Research Institute, "GOTHIC: Containment Analysis Package User Manual", version 8.0, NAI 8907-02 Rev. 20, January 2012.
- [2]Electric Power Research Institute, "GOTHIC: Containment Analysis Package Technical Manual", version 8.0, NAI 8907-06 Rev. 19, January 2012.
- [3]Electric Power Research Institute, "GOTHIC: Containment Analysis Package Qualification Report", version 8.0, NAI 8907-09 Rev. 12, January 2012.
- [4]OECD/NEA, "Status report on Filtered Containment Venting", NEA/CSNI/R(2014)7, July 2014.
- [5]OECD/NEA, "Status report on hydrogen management and related computer codes", NEA/CSNI/R(2014)8, July 2014.
- [6]Shapiro, Z. M. and Moffette, T. R., "Hydrogen Flammability Data and Application to PWR Loss-of-Coolant Accident", WAPDSC-545, Bettis Plant, September 1957.
- [7]NRC, "Near-Term Report and Recommendations for Agency's Actions Following the Events in Japan", SECY-11-0093, July 12, 2011.
- [8]NRC, "Prioritization of Recommended Actions to be Taken in Response to Fukushima Lessons Learned", SECY-11-0137, October 3, 2011.
- [9]Sentaro Takahashi Editor, Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, Tokyo, Springer, 2014.
- [10]台灣電力公司第一核能發電廠，「沸水式反應器核能電廠訓練教材」，台灣電力公司，民國 84 年 12 月。
- [11]沈紘毅，「核能一廠 Mark-I 型圍阻體氣體擴散濃度 GOTHIC 程式分析模式建立」，國立清華大學核子工程與科學研究所，碩士論文，民國 101 年。

# 電磁攪拌對不銹鋼覆銲緩衝層微結構及性質改善

## Improvement of stainless welds with magnetic stirring welding process

計畫編號：104-NU -E-007 -003 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：喻冀平

e-mail：[gpyu@mx.nthu.edu.tw](mailto:gpyu@mx.nthu.edu.tw)

計畫參與人員：龔昭元 黃嘉宏 鄭勝隆

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

### 摘要

核電廠壓水反應爐及沸水反應爐壓力邊界的完整性攸關核電安全運轉。多年來，管路異質金屬銲道的應力腐蝕裂紋(Stress Corrosion Cracking, SCC)的修理與防治一直是電廠核能安全的重點工作。覆銲(weld overlay)為其重要的修理及防治方法之一。

電磁攪拌(Magnetic stirring)常配合用於氬銲(Gas Tungsten Arc Welding, GTAW)及電漿銲接(Plasma Arc Welding, PAW)等製程中，不需要改變任何成份或製程條件下，即可促使銲道晶粒細化並改變晶界特性，目前國外初步研究顯示，電磁攪拌製程可改善銲道的銲接性，但國內仍無相關研究資料可供參考。本實驗使用 300 系不銹鋼作為研究用的母材與銲線。309L 常用於覆銲緩衝層的材料，本實驗在銲接製程上加上電磁攪拌，探討其對於不銹鋼銲接金屬 309L 銲材的機械性質、微結構等影響，以改善銲接製程。實驗結果顯示電磁攪拌導致 309L 多道次覆銲層的晶粒變小，銲層成份分佈無影響，且晶向從接近[001]轉變為接近[111]，肥粒鐵的晶向與沃斯田鐵的晶向有相關，伸長率沒改變的情況下增強其降伏強度與抗拉強度。

關鍵詞：銲接製程、不銹鋼銲線 309L、電磁攪拌、機械性質、拉伸

### Abstract

The integrity of pressure boundary of pressurized water reactors (PWRs) and boiling water reactors (BWRs) is a major concern for the operation safety of nuclear powers. For years, to mitigate the occurrence of stress corrosion cracking (SCC) in components, especially at dissimilar metal welds, is always an important work for the maintenance of nuclear power plants. Contributed to their good records, weld overlays are often used for repairing and mitigating SCC.

Electromagnetic stirring (EMS) is usually equipped with Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Plasma Arc Welding (PAW) to refine the weld microstructure and change grain boundary properties [2-10]. The external electromagnetic field enhances the Lorentz force that causes fluid flow and stirring effect. The formation of fine equiaxed grains in fusion zones helps reducing

solidification cracking and improving the mechanical properties of the weld metal [5, 8, 11].

The base metal and filler metals used in this study all belong to 300 series stainless steel. 309L/308L filler metal is common used for the buffer layers of weld overlays[12]. However, hot cracking and DDC can be found in austenitic stainless steel welds as well[13]. The project planned to use electromagnetic stirring during the welding, for the purpose to evaluate the effect of electromagnetic stirring on the mechanical properties and microstructure of 309L stainless steel welds. Experimental results show that electromagnetic stirring led to smaller crystallites of weld cladding layer 309L multi-pass welding layer, and no effect of the composition distribution in crystallites, and the crystal orientation from near [001] direction turned into proximity [111] direction, texture of crystal ferrite and austenite were relevant, and could enhance its yield strength and tensile strength without reduction of elongation of the weldment.

Keywords: welding process, filler metals 309L, magnetic stirring, mechanical properties, tensile behavior

### I. Introduction

核電廠壓水反應爐及沸水反應爐壓力邊界的完整性攸關核電安全運轉。多年來，管路異質金屬銲道的應力腐蝕裂紋(Stress Corrosion Cracking, SCC)的修理與防治一直是電廠核能安全的重點工作。覆銲(weld overlay)為其重要的修理及防治方法之一，過去的實績顯示，覆銲具有良好維修及防治 SCC 紀錄。

Alloy 52/52M 為管路異質銲道覆銲的材料，高鉻含量使其具有優異的抗 SCC 能力，但卻劣化其銲接性，造成其高失延裂紋(Ductile Dip Cracking, DDC)敏感性，同時容易產生熱裂[1]，不利於現場覆銲維修。近年來，核能工業界已完成數種新合金(Alloy 52MSS 及 Alloy 52I)的研發，以改善 Alloy 52/52M 的失延裂紋敏感性，並獲得 ASME 法規認可，但其機械性及耐蝕性仍需業界長時間評估。再者，合金含高含量 Nb，過量 Nb 增加銲道熱裂敏感性，增加應力腐蝕組件修理與防治的困難度，亟需新製程方式改善銲道品質。

309L 不銹鋼為低碳鋼，有較低的碳含量可以減少碳化物的析出且有良好的抗腐蝕性質，主要用在覆銲

**Table 1. Chemical compositions of filler metals**

| Type | Composition (wt%) |       |       |        |       |       |       |       |        |       |
|------|-------------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|      | C                 | Si    | P     | S      | Cr    | Mn    | Ni    | Cu    | Nb     | Mo    |
| 309L | 0.0277            | 0.705 | 0.041 | 0.0063 | 22.95 | 1.735 | 13.76 | 0.120 | 0.0027 | 0.079 |

緩衝層及包覆層上。電磁攪拌是一個簡單可以在銲接過程中施加的方法，使用電磁攪拌時，靠近銲接電弧的磁極會產生一個垂直的磁場使得電弧依照特定模式去偏折。偏折的電弧會擾動熔池進而造成枝晶斷裂形成較細的枝晶組織[2-10]。銲接是快速冷卻的一個過程，而隨著成份的不同會有不同形貌的凝固組織[14]，以鉻當量與鎳當量的比值去區分大致上可分為四種微結構組織，分別為(1)幾乎無肥粒鐵(ferrite)的沃斯田鐵(austenite)相，(2)骨骼狀肥粒鐵(skeletal ferrite)的組織，(3)層狀肥粒鐵(lathy ferrite)結構以及(4)魏曼式組織(Widmanstatten austenite)，而適當的肥粒鐵含量可以有效提升不鏽鋼銲材的抗腐蝕及熱裂性質[15]。

本實驗使用 300 系不鏽鋼作為研究用的母材與銲線。實驗擬在銲接製程上加上電磁攪拌，探討其對於不鏽鋼銲接金屬 309L 銲材的機械性質、微結構等影響，以改善銲接製程。

## II. Experimental Procedures

實驗銲件母材為 304 不鏽鋼，尺寸為長 400mm 寬 120mm 厚 15mm，以氬銲製程於 304 母材上以多道次(multipass)方式進行銲接，使用 ER309L 不鏽鋼銲線，進行有(無)施加電磁攪拌銲接，銲線成份如表一所示。

銲接執行前以夾具將銲接試片固定於銲接機台上並以酒精清潔後再進行銲接，銲件設計如圖一(a)所示。實驗使用的為自動軌道銲接機附加電磁攪拌裝置，裝置示意如圖二所示。實驗的相關參數為：電流 120A、銲接走速 100 mm/min、電磁攪拌頻率為 3Hz，每道次間皆會以鋼刷除去表面熔渣。

銲接完畢後，銲件後經目視確認無銲接缺陷後，進行金相試片取樣。

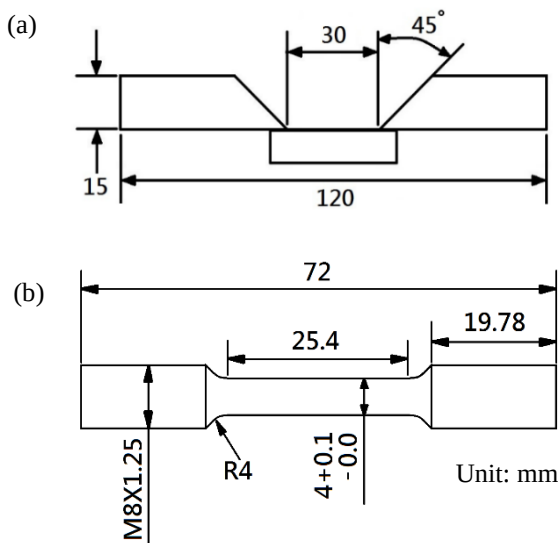


**Fig. 1. Dimensions of (a) Welding configuration and (b) Tensile specimen size**

試件經切割鑲埋、機械研磨與拋光後，以電解方式浸蝕，電解液採用 10g 草酸+100ml H<sub>2</sub>O，試片在 5V 直流電(DC)電解條件下，電解 20~30 秒。以光學顯微鏡(OM)及利用 SEM 及背向散射電子繞射儀(Electron Backscattered Diffraction EBSD)觀察其顯微結構探討銲道材料特性並使用微硬度機(Vickers hardness tester)量測銲道硬度。

銲件後經射線檢測(Radiation Test)確認無銲接缺陷後，進行拉伸片取樣之機械加工。拉伸試片尺寸如圖一(b)所示，拉伸試驗在室溫下進行，應變速率為  $3 \times 10^{-4}$ ，拉伸試驗結束後以 SEM 觀察斷面。

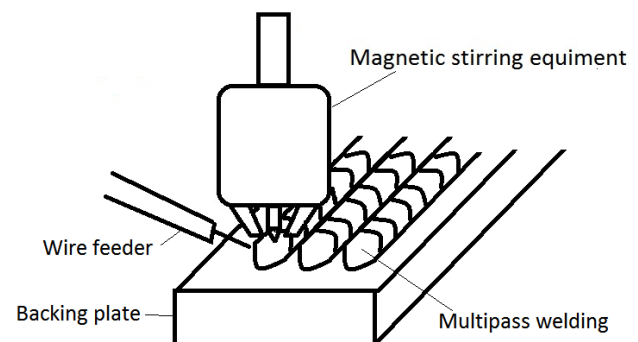


**Fig. 2. Schematic diagram of welding system with electromagnetic stirring.**

## III. Results and discussion

### 3.1 Microstructural characterization

圖三為有無電磁攪拌的縱截面銲道金相組織。金相結果顯示銲道內的枝晶組織在施加電磁攪拌後而有所不同，在未施加電磁攪拌的條件下，部份銲道組織為柱狀枝晶；在施加 3Hz 的電磁攪拌條件下，銲道內較難發現柱狀枝晶，放大後可以看到枝晶組織有細化的現象，從金相的圖亦可觀察到銲接過程中受到電磁攪拌擾動的痕跡。不管有無施加電磁攪拌，其中的肥粒鐵組織皆符合文獻中的骨骼狀肥粒鐵結構[15]。從 X 光能譜散佈分析儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)分析出來的結果如圖四，紅色的線段代表鉻的含量；藍色的線段代表鎳的含量，由 EDS 的結果可以看出不管有無施加電磁攪拌，對於鉻與鎳的成份分佈並無影響，即電磁攪拌不會改變肥粒鐵與沃斯田鐵冷凝固後的成份。肥粒鐵變成沃斯田鐵是一個擴散控制(diffusion controlled)的相變化(phase transformation)，但因為銲接是個快速冷凝的過程，所以溶質並無時間擴散並重新分佈而保留了在高溫時候的成份分佈[16]。

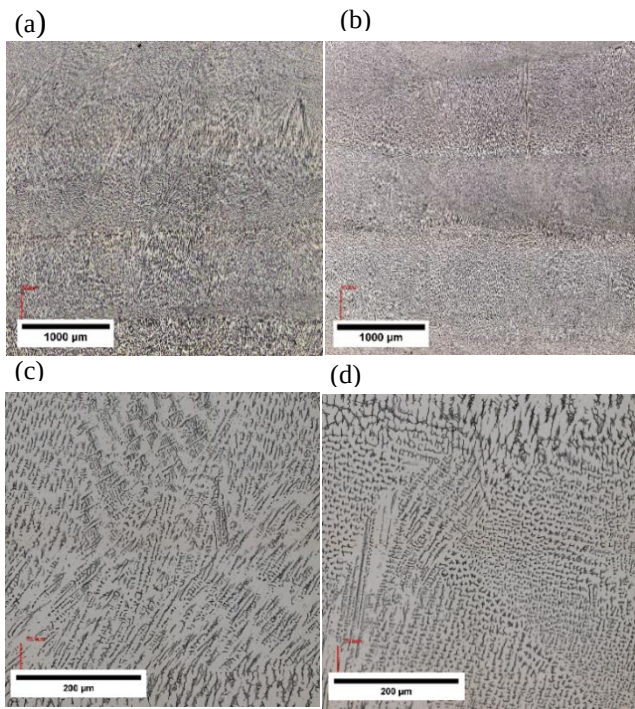


Fig. 3. Optical microscope results from 309L weldments (a)(c) without electromagnetic stirring (b)(d) with electromagnetic stirring.

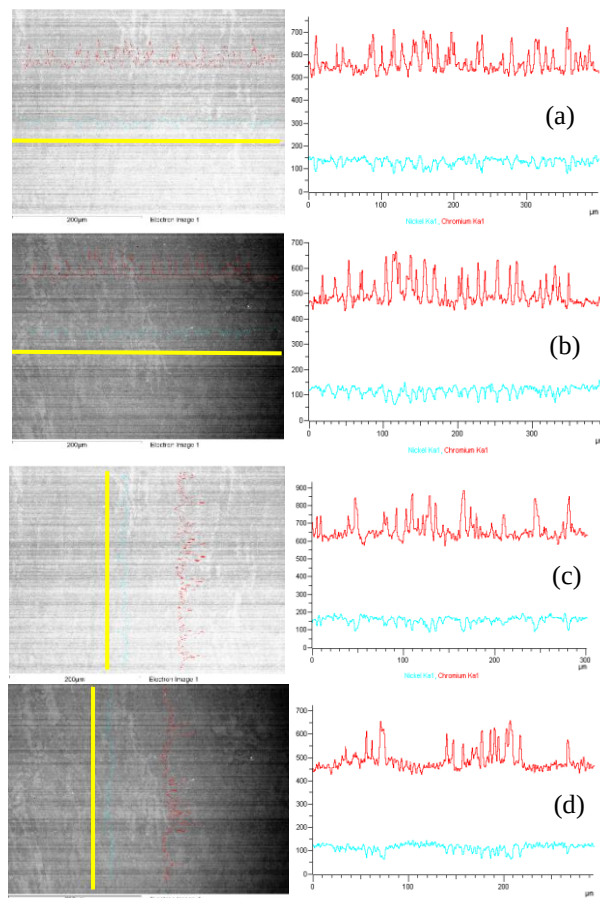


Fig. 4 Energy Dispersive Spectrometer (EDS) results of 309L weldments. (a)(c) Without electromagnetic stirring. (b)(d) With electromagnetic stirring.

### 3.2 Electron Backscattered Diffraction Results

圖五為 309L 不鏽鋼鐸道的 EBSD 結果，取樣的位置在中間層的位置，同 OM 的取樣位置，也是拉伸試棒所涵蓋的範圍，而由上到下也表示鐸道的相關位置。從沃斯田鐵(FCC 結構)的極圖來看，無電磁攪拌的沃斯田鐵相的晶格方向大多都靠近[001]方向；有電磁攪拌的沃斯田鐵相則大多靠近[111]方向，而肥粒鐵(BCC 晶體結構)的晶向分佈與沃斯田鐵的晶向分佈有相關，即無電磁攪拌的肥粒鐵晶向大多靠近[001]方向；有電磁攪拌的肥粒鐵晶向則大多靠近[111]方向。而從 Inverse pole figure(IPF)的晶相圖亦可看出鐸接的結構受到電磁攪拌擾動的痕跡。由 EBSD 結果統計出的晶粒大小比例如圖

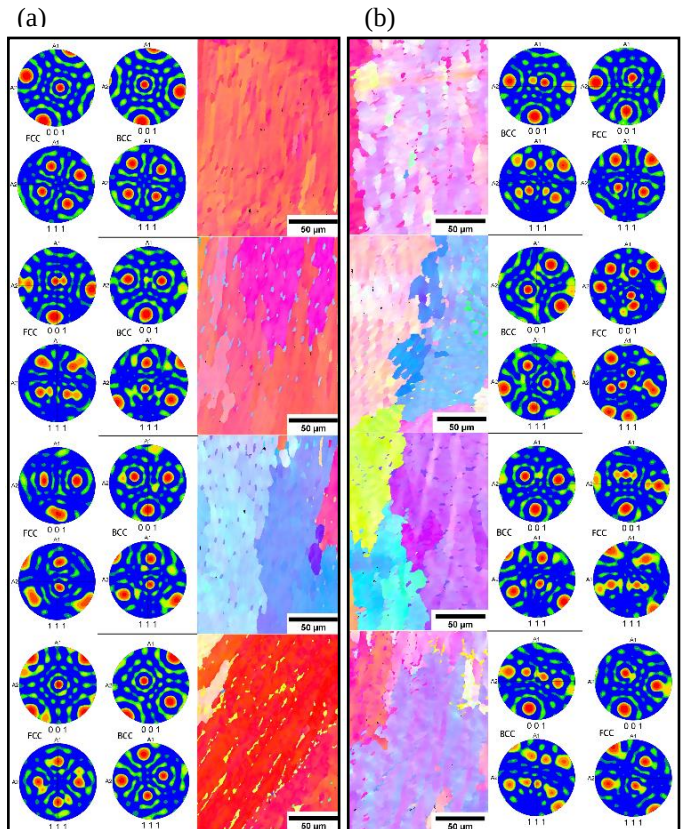


Fig. 5. Inverse pole figure [Normal Direction] and pole figure ([001] and [111]) of 309L weldments (a) without electromagnetic stirring (b) with electromagnetic stirring

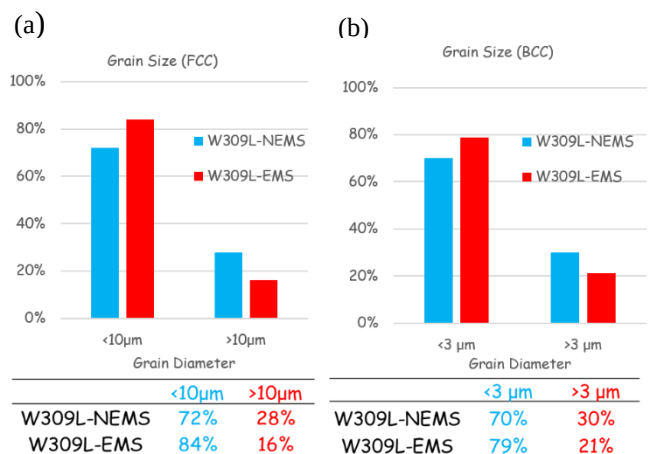


Fig. 6. Grain size fraction from electron backscatter diffraction of 309L weldments (a) Austenite (b) Ferrite

六，沃斯田鐵直徑大於  $10\mu\text{m}$  的晶粒比例從 28% 降到 16%；肥粒鐵直徑大於  $3\mu\text{m}$  的晶粒比例則從 30% 降到 21%，可以得知不管是沃斯田鐵或是肥粒鐵，在施加電磁攪拌後，晶粒的大小皆有變小的趨勢，而從 X-ray Diffraction (XRD) 分析中計算出來的 crystal size 也得到相同的趨勢。

### 3.3 Mechanical properties

圖七為 309L 不鏽鋼鐸道由底部到上方的平均硬度量測值，每個硬度值皆為 6 個硬度量測值平均而得出，1 代表底層而 8 代表最上層，由結果可看出不管有無施加電磁攪拌，硬度皆從底到上有變小的趨勢，而有無施加電磁攪拌對於硬度的影響並不顯著。表二為 309L 不鏽鋼的拉伸相關性質，每個值皆由三個拉伸試棒的拉伸數據平均而得，從結果可知有施加電磁攪拌的鐸道的降伏強度(yield strength)較無攪拌的增強了 5.2%；抗拉強度(tensile strength)增加了 3.3%，這符合 Hall-Petch equation:  $\sigma_{ys} = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$ ，其中  $\sigma_{ys}$  為 yield strength、 $\sigma_i$  為 lattice resistance、 $k_y$  為 locking parameter、而  $d$  為 grain size，從 EBSD 的統計結果可知晶粒大約減小了 13.5%，但降伏強度增強的幅度並無那麼明顯，原因可能是因為 309L 是沃斯田鐵系不銹鋼，主要的晶體結構為 FCC，而因為 FCC 的滑移系統有 12 組，滑移的方向選擇多，locking parameter 也比較小，所以在 FCC 結構中，晶粒變小對於其強度的影響並不顯著[17]。

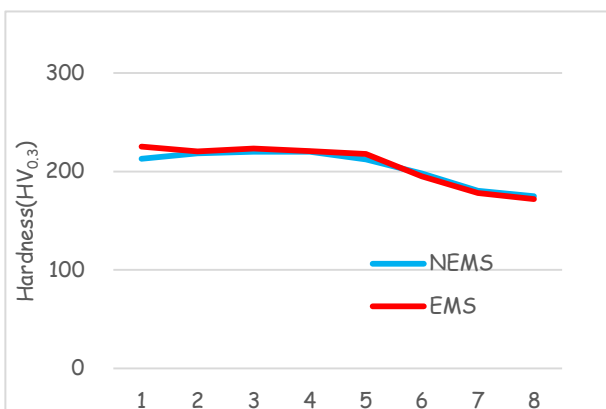


Fig. 7. Average hardness from bottom (1) to top (8) of 309L weldments (\*every point of hardness are the average from 6 measurements.)

Table 2. 309L weldments tensile properties

|                        | NEMS  | EMS   |
|------------------------|-------|-------|
| Yield strength (MPa)   | 513.9 | 540.7 |
| Tensile strength (MPa) | 634.3 | 655.4 |
| Elongation(%)          | 21%   | 21 %  |

Each set of tensile data is an average of measurements on three specimens

圖八為拉伸試棒破斷面的 SEM 圖，從圖中可以看到兩者皆為延性破裂，都有明顯的勒窩組織(dimple)還有微小的空孔(micro-voids)，但有施加電磁攪拌的 dimple 與 void 變得較小，正常來說應該會是因為提前降伏或破裂才會使得 dimple 與 void 較小，即較小的 dimple 與 void 應會有較小的抗拉與降伏強度，但實驗數據顯示在相同的伸長率(elongation)下，有施加電磁攪拌的 309L 不鏽鋼鐸道有著較佳的降伏強度與抗拉強度，顯示晶粒變小對於強度的效應較大。

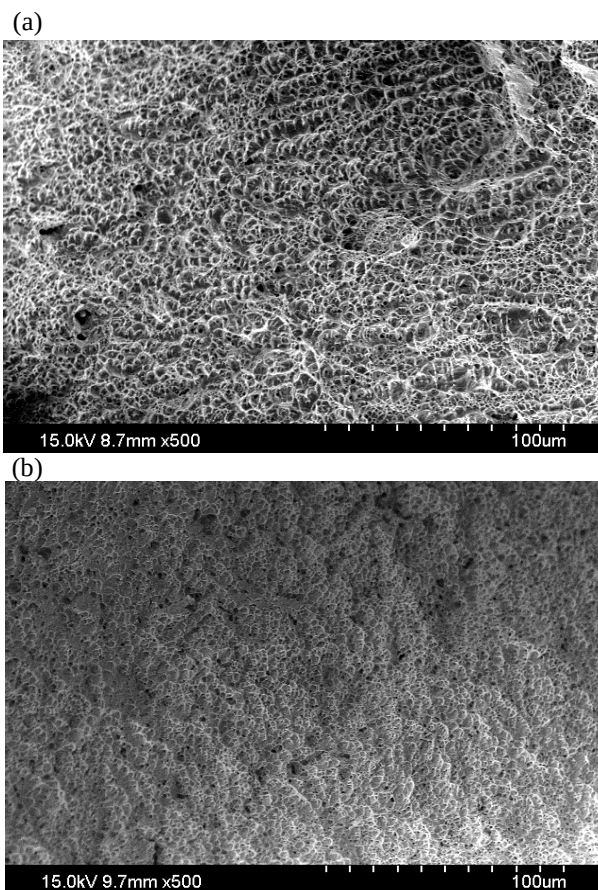


Fig. 8. Scanning electron microscopy fractography of 309L tensile fracture faces. (a) Without electromagnetic stirring. (b) With electromagnetic stirring.

## IV. Conclusions

在鐸接過程中施加 3Hz 的電磁攪拌可以使 309L 多道次覆鐸層的晶粒變小。

施加電磁攪拌對於成份分佈無影響因為鐸接冷凝速度很快沒有足夠的時間可以使成份重新分佈。

施加電磁攪拌使得平行於 309L 多道次覆鐸層拉伸方向的晶向從接近[001]轉變成接近[111]，且肥粒鐵的晶向與沃斯田鐵的晶向有相關。

施加電磁攪拌對於 309L 覆鐸層的硬度影響不大，但可以在伸長率沒改變的情況下增強其降伏強度與抗拉強度。

## Reference

- [1] *Hot Cracking Phenomena in Welds III*. 2011: Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Lim, Y.C., et al., *Effect of magnetic stirring on grain structure refinement: Part 1 – Autogenous nickel alloy welds*. Science and Technology of Welding and Joining, 2010. **15**(7): p. 583-589.
- [3] Lim, Y.C., et al., *Effect of magnetic stirring on grain structure refinement Part 2 – Nickel alloy weld overlays*. Science and Technology of Welding and Joining, 2010. **15**(5): p. 400-406.
- [4] Mousavi, M.G., et al., *Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds*. Science and Technology of Welding and Joining, 2003. **8**(4): p. 309-312.
- [5] Ram, G.D.J., R. Murugesan, and S. Sundaresan, *Fusion zone grain refinement in aluminum alloy welds through magnetic arc oscillation and its effect on tensile behavior*. Journal of Materials Engineering and Performance 1999. **8**(5): p. 513-520.
- [6] Watanabe, T., H. Nakamura, and K. Ei, *Solidification Control of Austenitic Stainless Steel Weld Metal by Electromagnetic Stirring*. Transactions of the Japan Welding Society, 1990. **21**: p. 37-43.
- [7] Malinowski-Brodnicka, M., G.D. Ouden, and W.J.P. Vink, *Effect of Electromagnetic Stirring on GTA Welds in Austenitic Stainless Steel*. Welding Journal, 1990: p. 52-59.
- [8] Kou, S. and Y. Le, *Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy*. Metallurgical Transactions A, 1985. **16**(7): p. 1345-1352.
- [9] Pearce, B.P. and H.W. Kerr, *Grain refinement in magnetically stirred GTA welds of aluminum alloys*. Metallurgical Transactions B 1981. **12**(3): p. 479-486.
- [10] Matsuda, F., K. Nakata, and N. Sano, *Effect of Electromagnetic Stirring on Weld Solidification Structure of Austenitic Stainless Steels*. transactions of JWRI, 1986. **15**(12): p. 327-338.
- [11] S.Kou and Y.L.E, *Nucleation mechanism and grain refining of weld metal*. Welding Journal, 1986: p. 305-313.
- [12] McCracken, S.L. and R.E. Smith, *Behavior and Hot Cracking Susceptibility of Filler Metal 52 M (ERNiCrFe-7A) Overlays on Cast Austenitic Stainless Steel Base Materials*. 2011: p. 333-352.
- [13] Lippold, J.C. and D.J. Kotecki, *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. 2005: John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Suutala, N., T. Takalo, and T. Moisio, *The relationship between solidification and microstructure in austenitic and austenitic-ferritic stainless steel welds*. Metallurgical Transactions A, 1979. **10**(4): p. 512-514.
- [15] Brooks, J.A. and A.W. Thompson, *Microstructural Development and Solidification Cracking Susceptibility of Austenitic Stainless-Steel Welds*. International Materials Reviews, 1991. **36**: p. 16-44.
- [16] Dadfar, M., et al., *Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel*. Materials Letters, 2007. **61**(11-12): p. 2343-2346.
- [17] Hertzberg, R.W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials 4th Edition*. 4 ed. 1995: Wiley.

## 熱交換器管件應力破損防治--實做

### The stress damage prevention of heat exchanger pipes - Practical applications

計畫編號：NSC 104—NU—E—005—001—NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳威德

e-mail：[weite@dragon.nchu.edu.tw](mailto:weite@dragon.nchu.edu.tw)

計畫參與人員：周煒筌、王家祥

執行單位：國立中興大學材料科學與工程學系

#### 摘要

本研究探討 ASTM A285 Gr.C 低碳鋼，模擬核電廠熱交換器之管件實體狀態，將其鋼管經過車床開槽，後續以被覆金屬電弧銲接(Shielded Metal Arc Welding, SMAW)方式進行對接銲，另外再以鋼管無開槽處與鋼板進行填角銲接，後續在振動時效消除殘留應力前後進行 X-ray 之 Cr 靶-cos $\alpha$  法之殘留應力量測，以及金屬磁記憶之殘留應力集中區無損檢測，後續將其殘留應力值、平均半高寬與金屬磁記憶磁場強度值搭配文獻進一步探討數據之間的關係。實驗結果得知，磁記憶之分析可確切得知銲道工件之應力集中位置，爾後再經過 cos $\alpha$  法之殘留應力量測，在管對管銲接的應力分析中，出現罕見的壓縮應力值，並非拉伸應力，其銲道中心區殘留應力值達到最大壓應力，介於-200MPa~-279MPa，此區最大的 Rel 值(應力消除率)可達 43%以上，其原因為此區擁有最大加工硬化率。在管對板的應力分析，為理論的拉伸應力值，但並非銲道中心為最大拉伸應力殘留，而是下銲道區為最大區殘留應力值，介於 211MPa ~ 254MPa，上熱影響區擁有 3 個最佳消除率(Rel 值>48%)的位置點。平均半高寬分析方面，在管對管銲接情形中，下熱影響區擁有較大的 Rel 值並同時擁有明顯變化之平均半高寬變化量(0.05 度~ 0.25 度)，然而上熱影響區雖擁有明顯變化之平均半高寬變化量(0.05 度 ~ 0.18 度)，卻無擁有較大的 Rel 值，原因是下熱影響區擁有殘留應力的大量變化(large difference in residual stress)效應；在下銲道區與上銲道區之部分與 Rel 值之趨勢相同，故下銲道區與上銲道區擁有較小的 Rel 值並同時擁有幾乎不變之平均半高寬變化量；在中心銲道區擁有最大 Rel 值，同時也擁有低變化之平均半高寬(<0.05 度)，平均半高寬超過 0.05 度時，材料將發生破損之潛質性。最後在管對管銲接情形中，VSR 振動時效的作用下，銲道中心區之副作用最低且 Rel 值最高，其 VSR 製程對這區位置效果最佳，然而對下熱影響區與上熱影響區而言，VSR 振動時效製程之副作用影響最大，因其平均半高寬變化量變化過大。在管對板銲接情形中，上熱影響區之平均半高寬變化量最大，主要介於 0.05 度<FWHM<0.15 度之間，有些位置甚至超過 0.15 度，在銲道區中平均半高寬變化量皆不到 0.05 度，雖然上熱影響區擁有較多超過 48%Rel 值的位置並同時擁有明顯變化之平均半高寬變化量(0.09 度 ~ 0.25 度)，但在銲道區擁有較少數量之 48%Rel 值的位置，平均半高寬無明顯變化皆小於 0.05 度，故熱影響區為不安全之狀態。無論是管對管銲接或是管對板銲接，經 VSR 振動消除殘留應力後，熱影響區

皆擁有被破壞之潛質，可判斷熱影響區銲接後為機械性質較脆弱之區域，此三個銲道區經 VSR 振動時效後，Rel 值大且平均半高寬無明顯之變化，因此為安全區域，達到 VSR 振動製程參數最佳化之效果。

關鍵詞：振動應力消除；殘留應力；銲接；半高寬；金屬磁記憶。

#### Abstract

In this study, which investigate about ASTM A285 Gr.C low-carbon steel. It simulate real state about heat exchanger pipes in the nuclear power plant. Through the steel pipes lathe grooving, subsequent to use the manner of Shielded Metal Arc Welding(SMAW) in pipe-pipe butt-weld. In an additional, non-lathe grooving pipe and plate which use the manner of SMAW in pipe-plate fillet welding. Follow-up to using X-ray of the Cr target-cos $\alpha$  law measuring residual stress and metal magnetic memory(MMM) of the stress concentration zone(SCZ) non-destructive testing, which before and after Vibratory Stress Relief(VSR), subsequent to arrange residual stress value, mean-FWHM and magnetic field intensity value to compare with references in those relationship. From the experimental results that Analysis of MMM can exactly know the SCZ of weld fusion zone(WFZ). Then after, using X-ray of the Cr target -cos $\alpha$  law measuring residual stress. In stress of pipe analysis of butt-weld, It appears a rare compression stress value, non-tensile stress, The weld center position reaches the maximum compressive residual stress, between -200MPa and -279MPa, this area is the biggest residual stress relaxation rate(Rel. value) of more than 43% because this area has the largest work-hardening rate. In the analysis of pipe-plate fillet welding, it is tensile residual stress theoretically. It is the maximum residual stress value but the low-WFZ is not center-WFZ., between 211MPa and 254MPa. The up heat-affected zone(HAZ) has three better position of Rel. value (>48%). In the mean-FWHM analysis of the case of pipe to pipe welding, up-HAZ has the amount of Rel. value and also has significant change in the mean-FWHM, between 0.05degrees and 0.25degrees. Although the up-HAZ has significant change in the mean-FWHM, between 0.05degrees and 0.18degrees, it has no greater Rel. value, the reason is low-HAZ with large difference in residual stress effect. The trend of Rel. value and mean-FWHM in low-WFZ and up-WFZ are the same so they have smaller Rel. value and almost the same amount of change of mean-FWHM, simultaneously. Center-WFZ has the biggest Rel. value and a small amount of mean-FWHM

change( $<0.05$ ), simultaneously. When mean-FWHM exceeds 0.05 degrees, material will breakage in potential ability. Finally, in the case of pipe-pipe butt-weld under VSR effect, side effect of center-WFZ is minimum and Rel. value is highest so it has best results in VSR process. However, that is greatest impact under side effects of VSR process in terms of the up-HAZ and the low-HAZ because their amount of change of mean-FWHM are too big. In the case of pipe-plate fillet-weld, up-HAZ has greatest amount of change of FWHM, between 0.05degrees and 0.15degrees, some positions even more than 0.15 degrees. In WFZ, the amount of change of mean-FWHM are less than 0.05 degrees. Although the up-HAZ has a larger number more than 48% Rel. value and also has significant change in the amount of change of mean-FWHM(0.09degrees~0.25degrees), WFZ has a smaller number of values in 48% Rel. value and its amount of change of mean-FWHM are smaller than 0.05degrees. In conclusion, HAZ is insecurity. Whether it is on the pipe to pipe or pipe to plate welding, HAZ all have the potential to be destroyed after VSR process. However, it can be determined that mechanical properties of HAZ is more vulnerable after welding. Rel. value of WFZ are large and have no significant change in mean-FWHM. Therefore, they are security zone and to achieve the best effect of the VSR process parameters.

Keywords: Vibratory stress relief; Residual stress; Weld; FWHM; Metal Magnetic Memory.

## I. 前言

核電廠在構建時或使用後之維修均嚴格監控其施工後所造成的殘留應力，但均只停留於設計時之結構計算或電腦模擬的理論應力分佈，而眾所皆知在銲接施工時並不是一個理想的狀態，只須一個環節出錯則會造成無法彌補的災害。到底目前的核能設施其銲道應力值為何，相信到現在沒有人能說得出來，應力值是否在安全值以下，也沒有人知道。而殘留應力是會受到環境的影響而不斷的改變，這些變化太複雜會受時間、環境、工件相互間的拉扯而互相影響，故很困難準確的利用電腦模擬評估出來，唯有直接測量最方便也最準確，而此量測要準確只能以非破壞的方式針對實體工件直接測量，因為工件一旦破壞則應力馬上改變，反應出來的值也就不是真正的應力值，而此真正的應力值能提供給施工者做為施工程序與參數設定與施工前後處理的參考。

低碳鋼在工業銲接上應用廣泛，因其碳含量低，Mn、Si等元素也少，所以一般情況下不會產生嚴重硬化組織與淬火組織，擁有良好之銲接性，能滿足於各種銲接製程，故低碳鋼為世界上最重要的基礎材料之一，並廣泛地運用於各類結構件中。低碳鋼銲件在人類文明中已用上百年歷史，雖然低碳鋼銲接性良好，但由於銲接過程中材料局部性熔融加熱，產生溫度梯度，在冷卻的過程中材料不均勻地收縮而在銲件內產生殘留應力，殘留應力對機械加工產業、造船業、鋼結構工業、航太工業、國防工業、模具業、銲接相關產業工具、機械產業、精密鑄造等均具有相當大的影響，例如殘留應力將影響工件變形，造成銲接熱龜裂影響，對工件破壞斷裂，降低工件疲勞強度，加工精準度失效，工件容易應力腐蝕等重大危害[1,2]，因此應力消除在精密的工程中不可或缺。

核電廠在構建時或使用後之維修均嚴格監控其施工後所造成的殘留應力，但只停留於設計時之結構計算或電腦模擬的理論應力分佈，而眾所皆知銲接施工時並不是一個理想的狀態，只須一個環節出錯則會造成無法彌補的災害。到底目前的核能設施其銲道應力值為何，相信到現在沒有人能說得出來，應力值是否在安全值以下，也沒有人知道。而殘留應力是會受到環境的影響而不斷的改變，這些變化太複雜會受時間、環境、工件相互間的拉扯而互相影響，故很困難準確的利用電腦模擬評估出來，唯有直接測量最方便也最準確，而此量測要準確只能以非破壞的方式針對實體工件直接測量，因為工件一旦破壞則應力馬上改變，反映出來的值也就不是真正的應力值，傳統非破壞式的定量殘留應力量測是X-ray法[3,4]，所屬的X-ray法也分成兩大主流，即 $\sin^2\psi$ 法與 $\cos\alpha$ 法[5-8]， $\sin^2\psi$ 法需多角度的量測，而造成現場空間上的不便利與需較長的量測時間等缺點，故本研究採用 $\cos\alpha$ 法，可快速累積大量殘留應力的數據。真正的應力值能提供給施工者做為施工程序與參數設定與施工前後處理的參考。目前應力消除的方法主要是以熱處理，使材料處於高溫狀態發生相變化，使原子重新排列、再結晶而消除殘留應力。雖然熱處理的效果優異，幾乎可以完全消除材料內部的殘留應力，但必須耗費龐大的能源，而設備也必須能夠容納待處理物件，因此處理大型工件的設備的容積必須很龐大，才能夠處理。雖然效果優異但費用高昂，造成了不小的門檻，此外熱處理還有許多問題，例如高溫產生氧化皮膜、材料變質、處理時間太長與強度下降等問題，於是也有許多的替代方法用來消除殘留應力，另外必須考慮應力消除後不能影響工件的機械性能，故殘留應力消除的方法以振動方式較熱處理方式為佳，故本研究以振動法消除殘留應力(vibratory stress relief; VSR) [9-11]，以降低材料內部殘留應力。此相關技術已被證明更能有效地降低殘留應力、避免工件變形並提升材料強度，並且具有節約能源、無汙染、成本低、高效率、操作方便等優點。因此目前已有許多工業應用其相關技術。

熱交換管[12-15]是大多數石油裂解工廠或核電廠必備之設備。少數特殊的熱交換器材質(石墨、玻璃、鐵弗龍等)具高抗蝕力，但其工作壓力和溫度是應用上的最大限制。故此大部分的熱交換器，不論何種形式，其材質仍以金屬為主，包括各種鋼材、鋁基、銅基、鎳基、鈦基合金等。金屬和冷卻媒介或反應器中的待冷卻物質接觸，就存在著殘留應力的問題[16-23]。熱交換器的使用環境一般都在高溫高壓下，加上冷卻媒介流動的作用，使金屬材質暴露在極特殊的環境下，不斷承受著應力的累積，其腐蝕發生的機率與型態也異於一般環境。其殘留應力問題也包含了直接性的應力破裂損壞(stress cracking)，與機械設計有關的加工塑性破壞(plastic collapse)、應力磨耗(stress wear)、與環境有關的應力腐蝕破裂(stress corrosion cracking)，與溫度有關的應力疲勞破壞(stress fatigue)，與流體流速有關的應力沖蝕破壞(stress erosion)等，種類幾乎包含了所有因殘留應力關係而造成的破壞型態，實有必要針對不同的材質特性與環境因子建立殘留應力破裂損壞發生及防治的關係。否則一旦發生破裂損壞，不僅減少管件壽命，甚至於造成內部輻射之異常外洩，輕則造成財物上的損失，重則危害

人員的安全。

## II. 主要內容

本研究目的是為了不使熱交換器管件發生殘留應力破裂損壞與爐心襯板龜裂，最終造成放射性物質外洩與爐心熔毀，為確保環境品質與民眾健康，其最根本性的問題就是殘留應力不宜過大，故必須消除殘留應力，由於管件皆需要經過銲接之製程，且銲道殘留應力相對較不穩定也是最脆弱的地方，若殘留應力沒能掌控得當，且更容易造成管件潛在之危機，所以必須經過消除殘留應力來監控管件，因此本研究利用振動消除殘留應力，對銲接之低碳鋼管件進行研究，並找到如何有效地消除殘留應力，且利用 X-ray  $\cos\alpha$  法量測殘留應力以及平均半高寬，並進一步建立評估管件破損之機制。

## III. 結果與討論

### III-I 殘留應力分析

#### III-I-I 振動時效前後銲道及熱影響區殘留應力量測

在本實驗試片製作完成後，同步進行 X-ray 殘留應力量測儀進行殘留應力量測，量測區域為將管件三百六十度劃分成八等分，每一等分皆量測其銲道及熱影響區，如圖 1，其中數字 1~8 代表圓周銲的起始點至結束點，且在對接銲的部分，銲道的地方量測三個點(B、C、D)，熱影響區分別為下熱影響區(A)及上熱影響區(E)，最後填角銲的部分，銲道還是維持著量測三個點(F、G、H)，但在熱影響區只量測上熱影響區(I)，因在下熱影響區的部分，平板上佈滿了銲後的銲渣，若將銲渣清除必然會影響其熱影響區殘留應力，因此在填角銲的部分，本實驗僅選擇上熱影響區的地方做量測，以下將會依各等分之銲道及熱影響區進行殘留應力的量測，如圖 2、3。

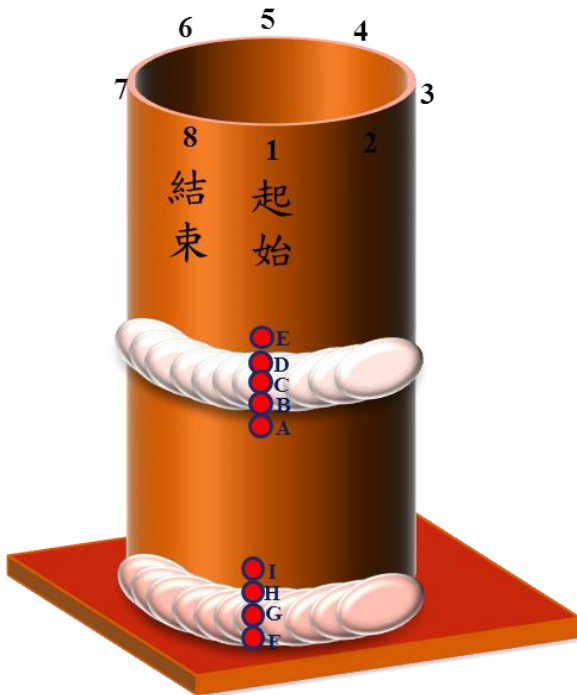
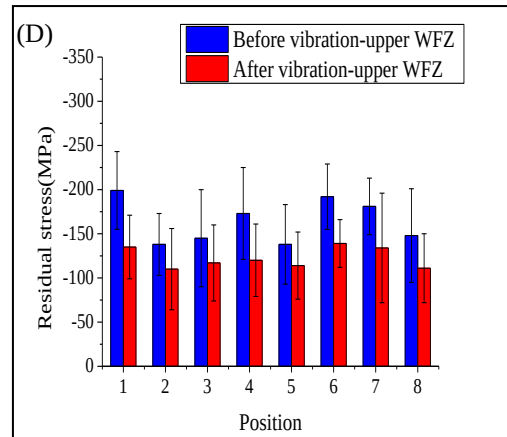
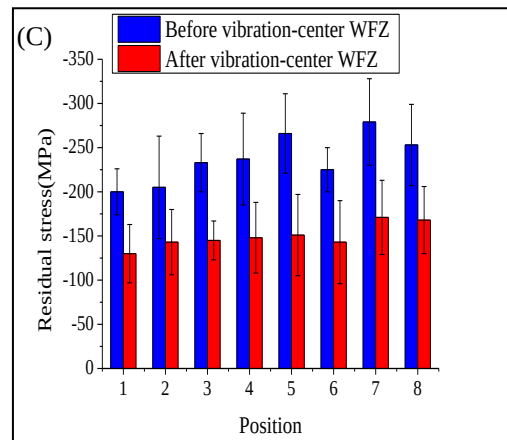
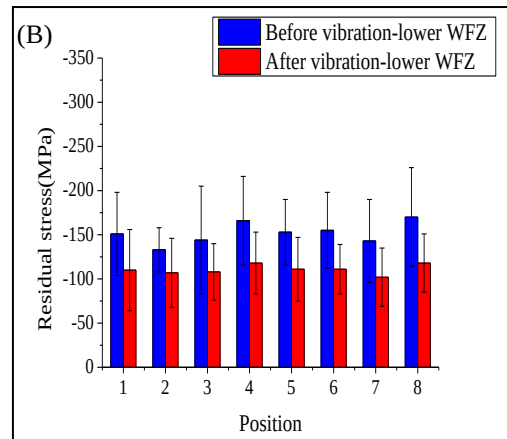
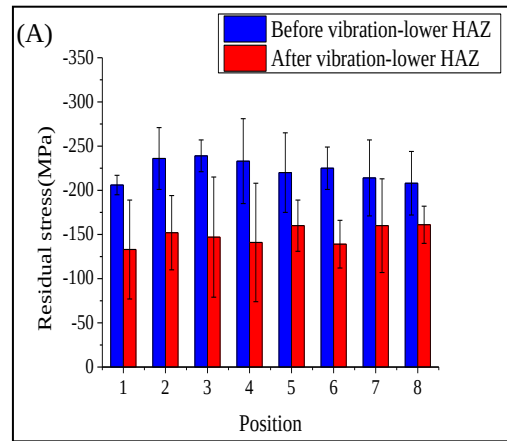


圖 1 應力量測區位示意圖



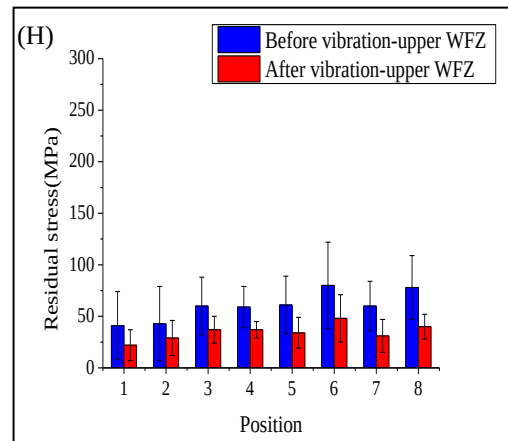
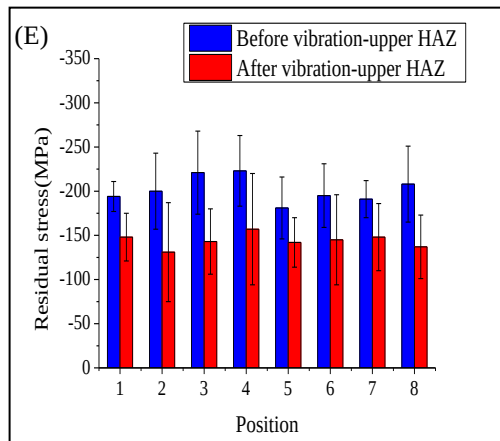


圖 2 管對管銲接之振動時效消除殘留應力長條圖，(A)下熱影響區；(B)下銲道區；(C)中心銲道區；(D)上銲道區；(E)上熱影響區

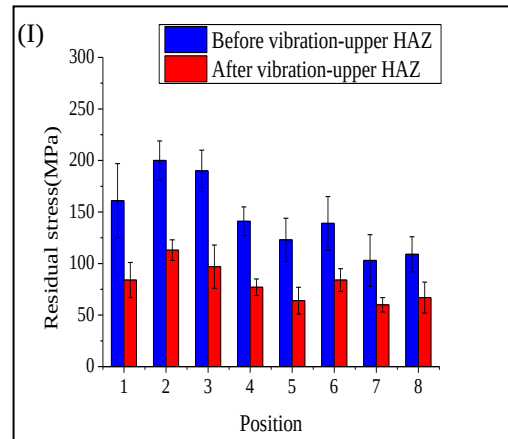
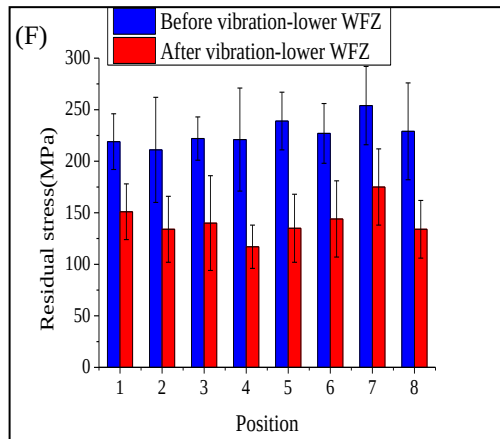


圖 3 管對板銲接之振動時效消除殘留應力長條圖，(F)下銲道區；(G)銲道中心區；(H)上銲道區；(I)上熱影響區

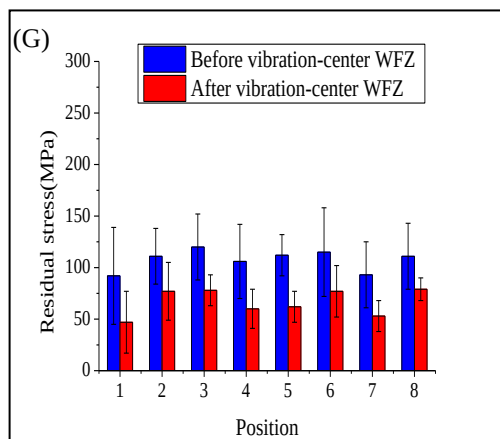


圖 2 為管對管對接銲之管件振動時效消除殘留應力前後長條圖，依序 A-E 分別為下熱影響區、下銲道、銲道中心、上銲道及上熱影響區，首先可以得知的是管對管的部分，其殘留應力皆為壓應力，根據銲接冶金[24]說明，經過銲接後在銲道之殘留應力為拉應力，而本實驗會在下一節提及為何結果是壓應力？接著經由實驗結果也可以明顯看出銲接後的工件經過振動時效消除殘留應力可以有效消除銲道及熱影響區之殘留應力，若當殘留應力一直維持著高應力的狀態，這是對長期運作中的工件所發出的警訊，因此適時地消除殘留應力對業界能夠達到節省成本以及避免不必要的成本損失。後續由銲道，銲道正中心(圖 2(C))比銲道兩側(圖 2(B)與(D))的部分還要高，其主要原因在於開槽後銲道中心和邊緣的銲條填料體積不同，因此在後續銲道正中心的收縮量也會比較多，導致整體的應力值也相對比較高，在熱影響區可以觀察到其殘留應力是大於銲道兩側的殘留應力，這個部分應該是銲道應力釋放，加上兩側銲道體積收縮量也較少，因此導致低於兩側熱影響區的殘留應力可能性非常高。最後，即使同樣是銲道或熱影響區，八個位置所量測的值是有所不同，其主要原因為銲接過程中，因為是圓周銲的狀態，有起始點和結束點，所以熱傳導的關係也會影響應力值的分布。

圖 3 為管對板填角銲之管件振動時效消除殘留應力前後長條圖，依序 F-I 分別為下銲道、銲道中心、上銲道及上熱影響區，從數據來看有很明顯的不同於管對管對接銲的部分，其殘留應力皆是拉殘留應力，另外在銲道的部分殘留應力相對低很多，其主因為管件和板件銲接在一起，在冷卻收縮的過程中，板件發生變形，此種狀態是有助於應力的釋放，相對於管對管的部分，在銲接後冷卻收縮時，管件並不會像板件一樣有明顯的變形，因此導致應力值低很多，不過在下銲道的部分，應力值還是高達 230MPa 左右，這一點猜測可能是因為下銲道屬於接進板件的部位，所以變形劇烈導致應力值較高，但也因為這樣在後續振動時效消除殘留應力時，能夠釋放的殘留應力也較多，而在上銲道及銲道中心其殘留應力值相對較小，主要原因可能是接近管件且變形量較少，使整個能量往下銲道移動，所以殘留應力值也比較小。在熱影響區的部分，其殘留應力值還是維持在一定的值之上，大約落在 150MPa 左右，在銲道，即使應力值相對於管對管銲接的部分還低，但是在振動時效消除殘留應力後，仍然有達到消除的效果，由於拉殘留應力是相對於壓應力還要敏感的狀態，容易因為環境可能導致應力腐蝕，或者是應力集中區也比較容易疲勞甚至開裂，因此若能夠將拉殘留應力消除，勢必能夠確保工件在運作時的安全性以及較不易因環境而受影響。總結以上數據，殘留應力是我們肉眼所看不見的，但是它擁有著很大的影響力能夠使運轉中的工件蘊藏著危機，甚至危及人類生命的安全，我們必須做好把關，嚴謹監控殘留應力，避免更多事故的發生。

### III - I - II 對接銲之壓殘留應力機制

由上一節得知在管對管對接銲中，不管是銲道或熱影響區，殘留應力值都呈現壓殘留應力的狀態，根據銲接冶金[24]得知銲接後之殘留應力值為拉殘留應力，因此本節將會探討此問題。

先前文獻有提及關於管對管對接銲時，外管壁銲道呈現壓殘留應力的狀態，主要原因是在冷卻時，整個圓周的銲道都會收縮，進而在圓周方向上產生一個力，猶如在一個管道上三百六十度的向圓心方向加壓，也就是說在銲道附近，向內管壁局部的變形，產生一個彎曲的力矩，此現象亦稱止血帶效應(tourniquet effect) [25-27]，如圖 4 所示。

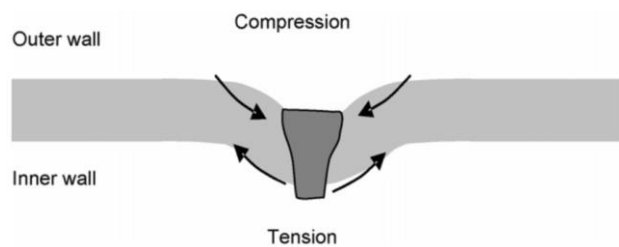


圖 4 管件上銲道周圍 tourniquet 產生之軸向應力[25]

以上為文獻所探討壓應力的機制，而本實驗對此壓殘留應力有不一樣且近一步的看法，在說明以前要回歸到板件銲接時所產生的現象及原因，一般可以得知在銲道會產生拉殘留應力，原因有兩個，一個是在銲道冷卻時體積會收縮，在收縮的當下也會將兩側基材一起向內

拉，由於基材是固定的一端，因此基材會產生一個作用力與反作用力的現象，將銲道拉住，使銲道無法繼續向內收縮，所以在冷卻結束後停止收縮時，銲道將會呈現拉殘留應力狀態，如圖 5，綠色箭頭為銲道收縮時的方向，紅色箭頭則為基材產生作用力與反作用力時的方向。第二個原因則是在銲接後，在凝固的過程中銲道一樣會收縮，至室溫之後發現板件會有翹曲的現象，這時候兩側基材的重量是向下的，因此會拉扯中間的銲道，導致銲道產生拉殘留應力狀態，如圖 6，綠色箭頭為銲道收縮時的方向，紅色箭頭則為基材本身重量向下的力量。

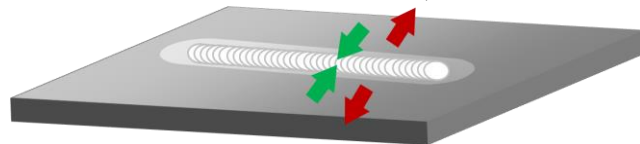


圖 5 板件銲接示意圖

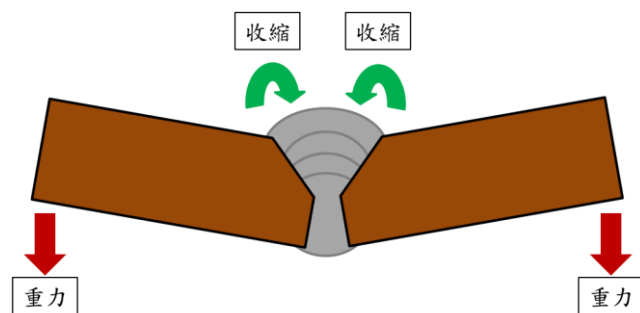


圖 6 板件銲接翹曲示意圖

接下來說明管件銲接狀態為何會呈現壓殘留應力，首先可以得知在板件銲接時，基材會產生翹曲等變形的狀態，原因在於銲道會將基材往內拉，不過在管件來看，因為幾何形狀的不同，管件不會像板件一樣會有翹曲變形的狀態，若產生翹曲，這也代表這個管件是一個失敗的品，所以在成功的例子來講，管件銲接的基材是不會變形的，但是在銲道及附近熱影響區的部分會產生向圓心方向變形如圖 7，因此也導致整個內管徑會縮小，在微觀上，管件銲接後，銲道冷卻的當下，是一直向圓心的方向收縮，導致附近的晶格也會一同被擠壓，所以在量測殘留應力時，偵測到的晶格間距縮短了，因此呈現壓殘留應力的狀態。

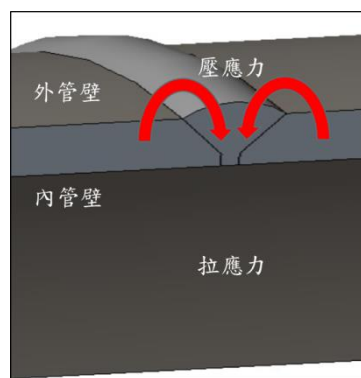


圖 7 管件銲接銲道收縮方向示意圖

在一般業界認為壓殘留應力的比拉殘留應力還要好，因為拉殘留應力的敏感性會導致很多工件較易破損，不過當壓殘留應力過高時還是需要透過消除殘留應力，避免導致應力值超過降伏點而產生變形，另一方面來說明，在外管壁呈現壓殘留應力的狀態下，相對而言在內管壁則會呈現拉殘留應力的狀態，原因是工件必須達到力平衡的現象，因此若發現壓殘留應力過高，經過消除殘留應力後，相對的在內管壁的拉殘留應力也會隨之被消除，畢竟工件在運作通常是在管內進行，如果有太高的拉殘留應力，這對工件是一大的弊端，所以無論是拉或是壓殘留應力都必須控制得當，一但過高則可能會發生危機。

### III - I - III 金屬磁記憶檢測

金屬磁記憶這項檢測方式，可以準確測得殘留應力集中區的位置，因此本實驗利用這項檢測技術可以方便得知殘留應力集中的地方，也可以觀察出在振動時效消除殘留應力前後，其磁場強度的變化，如圖 8。

在一般工業界並非只有銲接的方式會導致殘留應力集中，也有可能是其他的方式，因此這項檢測技術就得以派上用場，其機動性高且準確性也高，可以很快又準確得知哪個部位是殘留應力的集中區，因此也必須開始後續殘留應力的量測甚至檢測該區域是否有裂縫的存在，必須做好一系列的監控流程，避免在不知不覺中工件以達到壽命的終點。

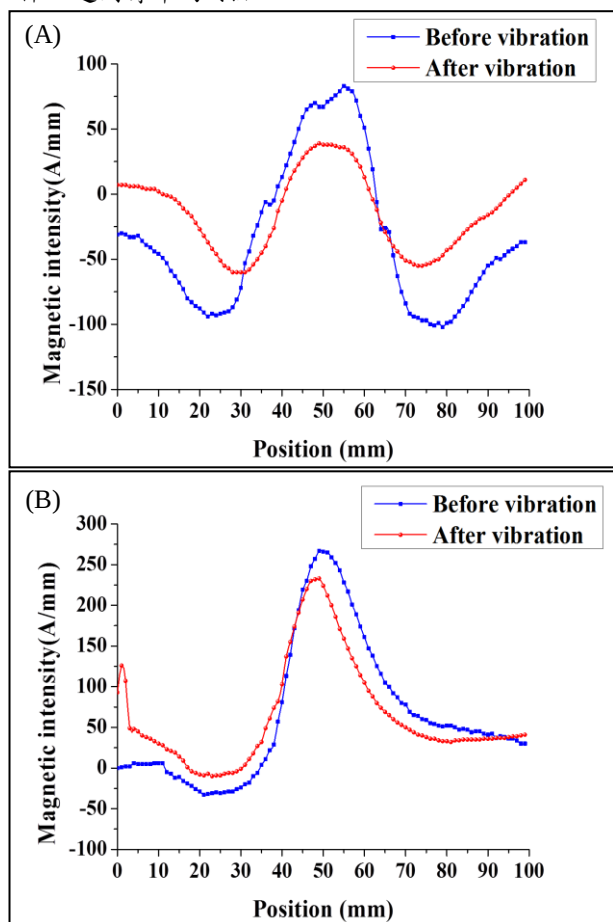


圖 8 金屬磁記憶殘留應力集中區檢測圖，(A)管對管對接銲；(B)管對板填角銲

上圖 8 說明了一些資訊，首先折線圖最高點的地方都是銲到正中心的位置，再來可以看到不管是對接銲或者是填角銲，振動時效消除殘留應力後，在殘留應力集中區磁場強度皆有下降的趨勢，整體而言在振動時效過後，折線圖也呈現相對平緩的狀態，高點的磁場強度下降，低點磁場強度上升，由此狀況可推估在殘留應力集中區缺陷減少，如差排，且搭配圖 2、3 來看，振動時效後殘留應力值也有降低，因此綜合比較後，可以更加確定在殘留應力集中區之應力值降低、磁場強度也降低，這也代表著該處的缺陷也減少了，所以更能夠確保振動時效消除殘留應力後工件的安全性。

### III - I - IV 核電廠實體量測

本研究為了實際比對現場狀態，也進入核電廠做實體運作工件的量測，這一次選擇之量測工件為熱交換器，如圖 9，量測部位為內管壁之銲到及熱影響區，由於外管壁已塗上多層保護漆，若將保護漆卸掉則會有安全上的疑慮，因此選為內管壁的部分進行量測。



圖 9 熱交換器實體圖

在量測之前，以徵求廠內人員的許可，將銲到及熱影響區上的保護漆利用松香水清除掉，隨之開始進行量測，量測區域如圖 10 所示。





圖 10 量測區域圖

接著進一步說明本次實體量測之數據，如圖 11，從數據上得知，不管是鐸道或熱影響區其殘留應力值皆為拉殘留應力，先前提到，本研究在外管壁呈現壓應力狀態，由於力平衡的關係會導致內管壁呈現拉殘留應力的狀態，這也與文獻相吻合[28]，如圖 12 所示，在鐸道的殘留應力值約略落在 200MPa 左右，熱影響區殘留應力值約落在 100MPa 左右，依照這些的殘留應力值來看是有危機可循的，因為本次實體量測的場區是核一廠，其也有幾十年的歷史了，發現所測得的殘留應力值還是很高，況且管件內部一直都有流體在運行，還是呈現如此高的殘留應力值，若此殘留應力值為釋放過的值，想必釋放的方式有問題，所以在釋放殘留應力的方式上依照本實驗的研究結果，是可以達到絕佳的效果。振動時效消除殘留應力技術機動性相當高，不限於任何形狀的工件，大工件或小工件都是可行的，且也非常的環保。

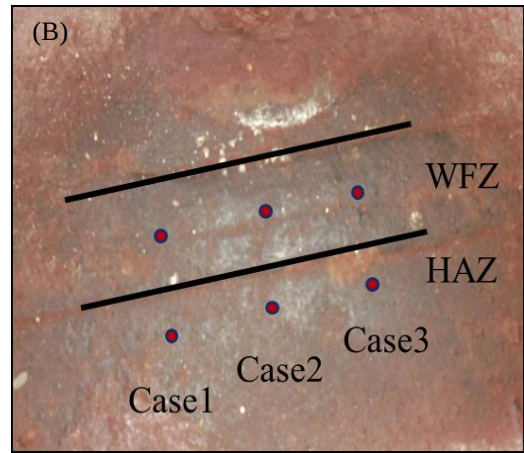
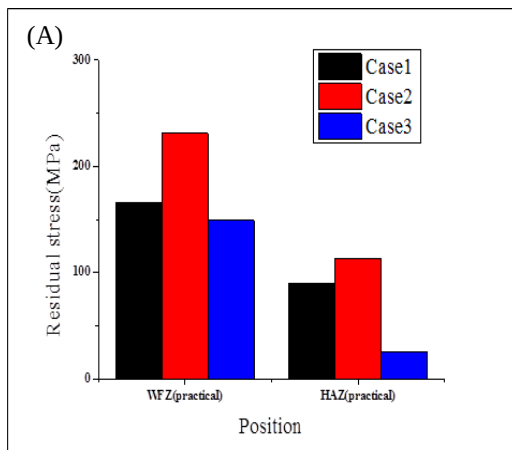


圖 11 實體量測，(A)殘留應力值條圖；(B)位置實體圖

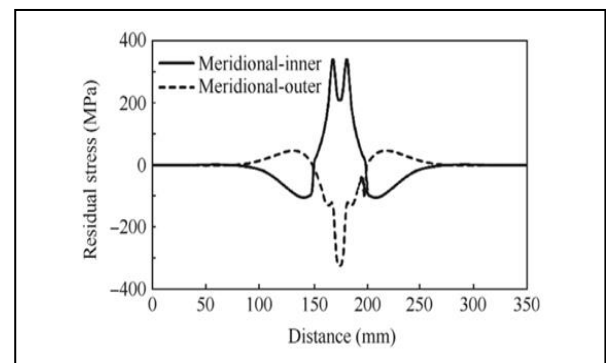


圖 12 壓力容器鐸接後管壁軸向應力[28]

### III-II 殘留應力消除效果

#### III-II-I 鐸道及熱影響區之殘留應力消除效果計算公式

本實驗利用 Cr 靶-cosα 法 XRD 進行殘留應力分析。

試片鐸接後，經過振動時效消除殘留應力，其殘留應力變化結果如圖 13 所示。為了定量化振動時效殘留應力消除效果以鬆弛率(Relaxation rate)表示之，公式如式 1[29]：

$$\text{Rel}(\%) = \frac{|\sigma_0| - |\sigma_{HT}|}{|\sigma_0|} \times 100\% \quad (1)$$

其中 Rel(%)為鬆弛率(Relaxation rate)，相當於殘留應力的消除百分比，Rel 值越大，表示振動時效消除殘留應力效果越好。 $\sigma_0$ 為鐸接後殘留應力 (MPa)； $\sigma_{V.S.R}$ 為振動時效消除後殘留應力 (MPa)。若 Rel (%)為負值，代表殘留應力是負的消除效果，意即振動時效消除後殘留應力反而上升。

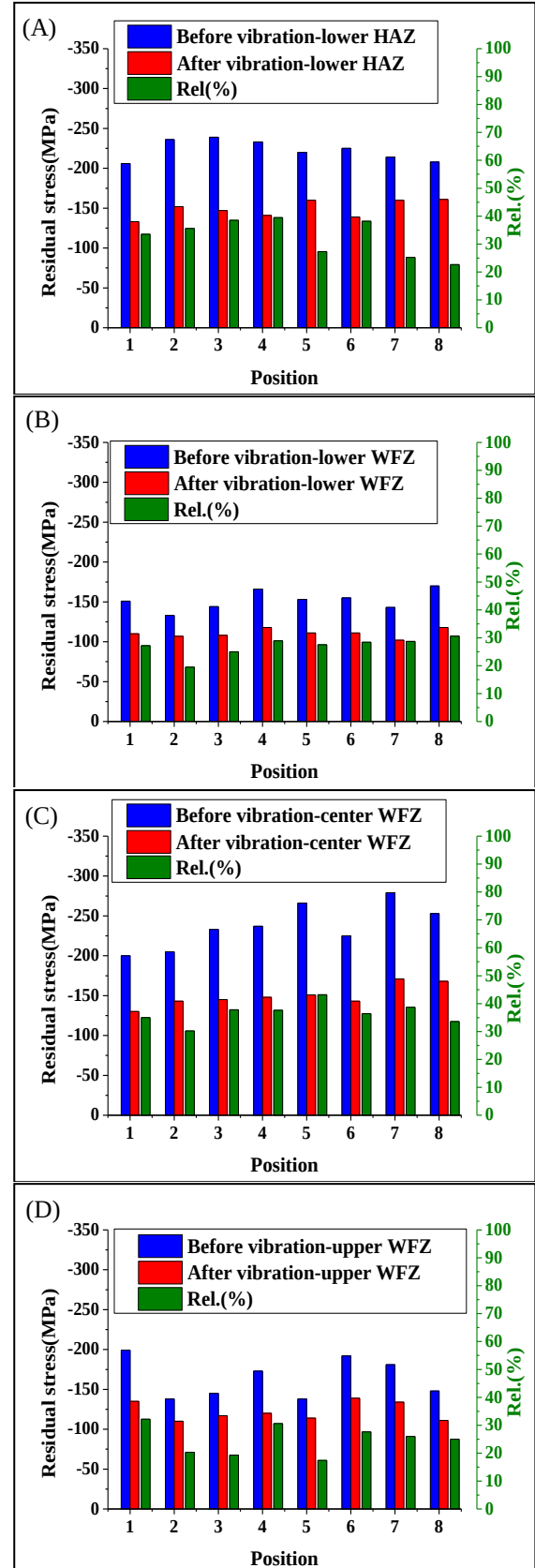
#### III-II-II 鐸道及熱影響區之殘留應力消除效果探討-管對管鐸接

如圖 13 為管對管對接鐸 VSR 製程前後應力消除率 (Rel %)與殘留應力之鐸道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之長條圖分布。整體來說，圖 13(A)與(C)即下熱影響區與中心鐸道區之初始壓殘留應力最大，介於-200~-250MPa

之間，有些位置甚至超過-250MPa，如中心鉸道區之 5、7 與 8 之三點超過-250MPa，而圖 13(B)與(D)即下鉸道區與上鉸道區之初始壓殘留應力不足-200MPa，圖 13(E)即上熱影響區之初始壓殘留應力介於-175~-225MPa 之間，其應力值介於下熱影響區(中心鉸道區)與下鉸道區(上鉸道區)之間。圖 13(A)與(C)即下熱影響區與中心鉸道區之殘留應力消除率(Rel%)最大，介於 22~40%之間，有些位置甚至超過 40%，達至 43%以上，如中心鉸道區之 5 位置，此位置擁有 VSR 製程最大之消除效果，值得後續探討其原因，圖 13(B)與(D)即下鉸道區與上鉸道區之殘留應力消除率(Rel%)最小，介於 17~34%之間，有些位置甚至低於 20%，如上鉸道區之 2、3 與 5 之三點低於 20%，此位置擁有 VSR 製程最差之消除效果，必須探討其背後因素，圖 13(E) 即上熱影響區之 Rel%介於 22~35%之間，其 Rel%介於下熱影響區(中心鉸道區)與下鉸道區(上鉸道區)之間。巧合的是鉸道區兩側即上鉸道與下鉸道之 Rel%最差，熱影響區及中心鉸道區較佳，其原因之一可能為初始殘留應力值較高，故造成的殘留應力 Rel%也較高，由圖得知較高的殘留應力值其消除率也會相對較高，這表示更高的殘留應力值有較大的殘留應力消除效果，此現象由 Kwofie [30]所報導的研究通過式 2 來解釋：

$$\Delta\sigma = (\sigma_r + \sigma_f - \sigma_{ys}) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-8\pi\varepsilon\theta_0 ft}{\sigma_{ys}}\right) \right] \quad (2)$$

$\Delta\sigma$ 為殘留應力消除量 (MPa)， $\sigma_r$ 為初始殘留應力，即尚未經過 VSR 製程之前(MPa)， $\sigma_f$ 為 VSR 振動應力之應力振幅， $\sigma_{ys}$ 材料之降伏應力 (MPa)， $\varepsilon$ 為循環應變振幅， $\theta_0$ 為初始加工硬化率 (%)， $f$ 為振動頻率 (Hz)， $t$ 為時間(s)。由式 2 可知，振動引起的應力消除效應較佳時( $\Delta\sigma$ )，初始殘餘應力值( $\sigma_r$ )是較大。因此，初始壓縮應力值較大的情況下(-200 MPa ~ -250 MPa)，故應力消除效果好。 $t$ 等同於 VSR 振動時效時間，且所有位置即下熱影響區、下鉸道區、中心鉸道區、上鉸道區與上熱影響區皆以一小時 VSR 振動時效時間，故  $t$  相同。圖 13 (C)即中心鉸道區之 Rel%最大，介於 22~43%之間，有些位置甚至超過 40%，達至 43%以上，如中心鉸道區之 5 位置，其中根據式 2 之  $\theta_0$  為主要因素，如圖 14， $\theta_0 = n$  越高(斜率越高)，將影響  $\exp\left(\frac{-8\pi\varepsilon\theta_0 ft}{\sigma_{ys}}\right)$  值  $\theta_0$  當越接近無限大， $\exp\left(\frac{-8\pi\varepsilon\theta_0 ft}{\sigma_{ys}}\right)$  趨近於零，則  $\{1 - \exp\left(\frac{-8\pi\varepsilon\theta_0 ft}{\sigma_{ys}}\right)\}$  達到最大值，越接近理論最大  $\Delta\sigma$  消除率，代表 Rel% 越高，再者加上文獻[31]提及之硬度趨勢，其鉸道中心區之硬度為最高，即加工硬化率高，如圖 15，鉸道中心之  $\theta_0$  為最大，故結論圖 13 (C)之 5 位置 Rel%最高。



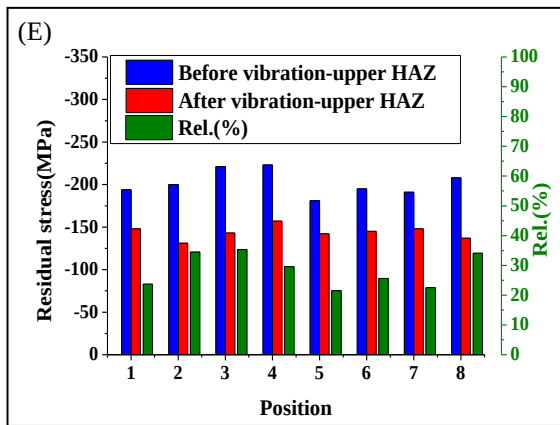
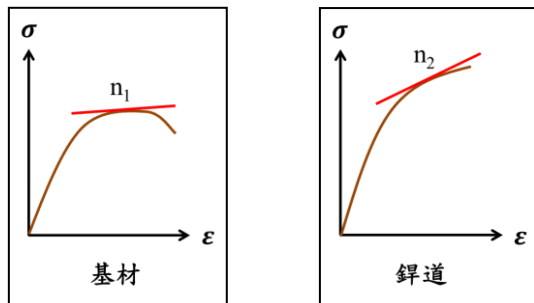


圖 13 管對管對接銲之 VSR 製程前後應力消除率(Rel %)與殘留應力-銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之長條圖分布：(A)下熱影響區；(B) 下銲道區；(C)中心銲道區；(D) 上銲道區；(E)上熱影響區



$$\sigma = \varepsilon(E)^n$$

$$\theta_0 = n$$

$$n = \text{斜率}$$

$$n_2 \text{ 大於 } n_1$$

圖 14 探討加工硬化率示意圖

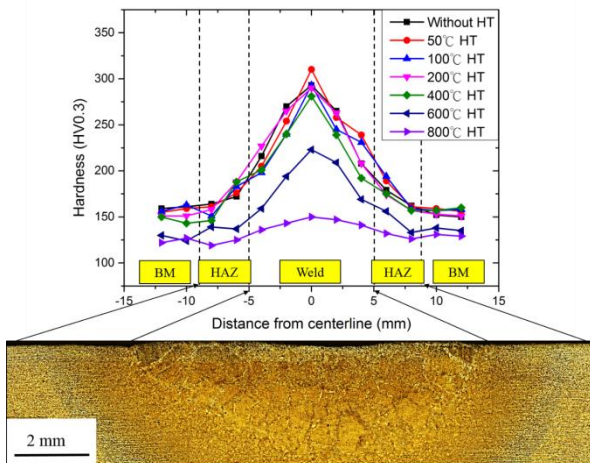
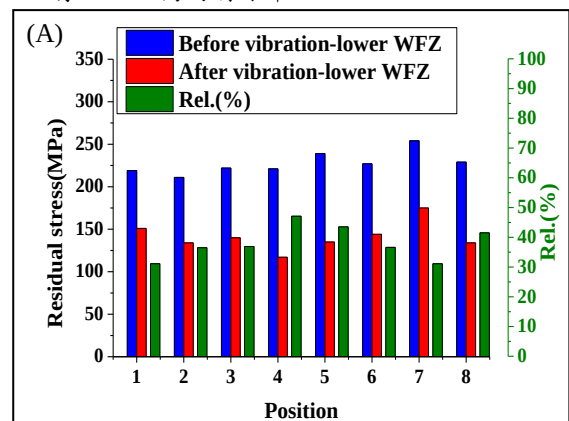


圖 15 銲件表面硬度分布[31]

### III-II-III 銲道及熱影響區之殘留應力消除效果探討-管對板銲接

如圖 16 為管對板填角銲 VSR 製程前後應力消除率(Rel %)與殘留應力之銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之長條圖分布。整體來說，圖 16(A)即下銲道區之初始拉殘留應力最大，介於 200~250MPa 之間，有些位置甚至超過 250MPa，如下銲道區之 7 位置超過 250MPa，而圖 16(B)與(C)即銲道中心區與上銲道區之初始拉殘留應力介於 40~120MPa 之間，其應力值範圍屬於此類管對板銲接之最低群組，圖 16(D) 即上熱影響區之初始拉殘留應力介於 100~200MPa 之間，其應力值介於下銲道區與銲道中心區(上銲道區)之間。另外以 Rel 值而言，其消除應力值範圍介於 31%<Rel<48%，不管是下銲道區、銲道中心區、上銲道區與上熱影響區，Rel 值均可達致 48% 以上，如下銲道區位置 4(圖 16(A))、中心銲道區位置 1(圖 16(B))、上銲道區位置 7 與 8(圖 5-16(C))及上熱影響區位置 1、3 與 5(圖 16(D))。另外銲道區(圖 16(A)-(C))殘留應力值皆低於熱影響區(圖 16(D))，中心銲道區(圖 13(C))高於熱影響區(圖 13(A)與(E))，因此可以得知管對管銲接與管對板銲接之趨勢是相反的，管對板銲接應力分布現象與理論文獻中[24]，最大應力值發生在中心銲道區，如圖 17，相互衝突，其原因如文獻[32]中之解釋因在銲後的冷卻過程中，銲道擁有比熱影響區更高的溫度，所以銲道的收縮程度會大於熱影響區(牛頓冷卻定律[33])，因此熱影響區會施予銲道一拉伸應力，所以理論上應在銲道有最大的拉伸殘留應力，但銲接冶金探討的是理想的銲接情形，並未把銲後試片彎曲變形的因素考慮進去，一般材料塑性變形的條件是內部應力和外部應力疊加後要超過材料的降伏強度，但如果銲接產生的內部應力(殘留應力)已超過降伏強度，那銲接後可能就會產生材料的變形，換句話說，試片的變形可說是殘留應力消耗的結果，而由於理論上銲道會有最大的拉伸應力，代表此處處於非常不安定的狀態，所以變形所需的應力會優先從此處消耗，才會導致銲道的殘留應力低於兩旁的熱影響區。然而管對管銲接屬於壓殘留應力狀態，如同 5-1-2 節之解釋。接著探討 Rel 值隨著不同位置而變化之部分做討論，根據文獻所示[34]在 VSR 振動消除殘留應力製程之下，其不發生疲勞之情況下，Rel 值大約為小於 45%，其 Rel 值為何相當接近?此現象原因有可能已經達到理論最大消除率，同時振動馬達之位置非常靠近應力消除區域，因此判斷循環振動應力相當之大，故有如此之高的消除率。



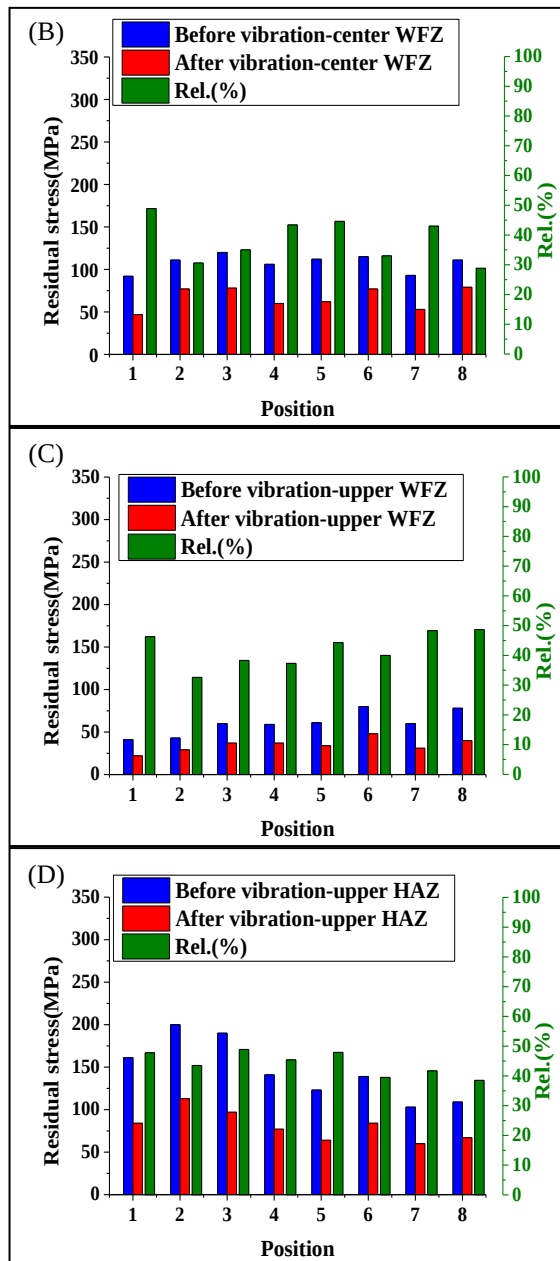


圖 16 管對板銲接之 VSR 製程前後應力消除率(Rel %)與殘留應力-銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之長條圖分布：  
(A)下銲道區；(B)中心銲道區；(C)上銲道區；(D)上熱影響區

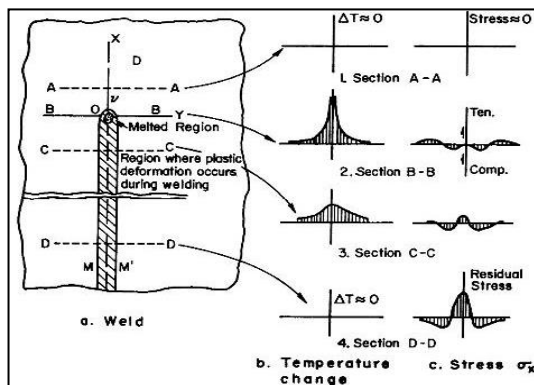


圖 17 銲接溫度與熱應力變化之示意圖[24]

### III-III 平均半高寬分析

本節所討論的是本研究依據 X-ray 德拜-謝樂環原理所衍生的評估破損的技術，利用平均半高寬的變化量來探討材料內部損壞程度。

#### III-III- I 管對管銲接振動時效前後-銲道及熱影響區平均半高寬演化

本研究利用的 X-ray 殘留應力量測儀除了可以量測材料殘留應力之外，還可以同步得知其平均半高寬，平均半高寬取自德拜-謝樂環上的繞射訊號，在本次研究裡面也利用這項技術進行監控管件破損的動作，這項技術主要是以平均半高寬的變化量來評定材料內部缺陷是否產生巨大的改變，如圖 18、19，首先在對接銲的部分，分成 A~E 分別是下熱影響區、下銲道、銲道中心、上銲道及上熱影響區，從這些數據中可以得知在熱影響區的平均半高寬變化量相對較大，銲道的平均半高寬變化量相對較小，這代表著材料內部缺陷變化量的大小。

如圖 18 為管對管對接銲之 VSR 製程前後平均半高寬(FWHM)-銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之曲線演化圖。整體來說，圖 18(A)與(E)即下熱影響區與上熱影響區之平均半高寬變化量最大，主要介於 0.05 度 <FWHM<0.15 度之間，有些位置甚至超過 0.15 度，如下熱影響區之 3、4、6 與 8 及上熱影響區之 2、7 與 8 之平均半高寬變化量超過 0.15 度，其最大值在下熱影響區位置 5 達至 0.25 度；而圖 18(B)、(C)與(D)即下銲道區、銲道中心區與上銲道區之平均半高寬變化量幾乎不到 0.05 度，其中也只有上銲道區 6 與 8 之位置的平均半高寬變化量剛好為 0.05 度。綜合 III-II-II 節之討論，將其殘留應力分布與平均半高寬整合比較，結果顯示，其趨勢與圖 13(A)-(E)不盡相同，討論圖 18(A)與(E)即下熱影響區與上熱影響區之部分與圖 13(A)與(E)，下熱影響區(圖 13(A))擁有較大的 Rel 值並同時擁有明顯變化之平均半高寬變化量(0.05 度至 0.25 度)，然而上熱影響區(圖 18(E))雖擁有明顯變化之平均半高寬變化量(0.05 度至 0.18 度)，卻無擁有較大的 Rel 值，其原因應該為下熱影響區(圖 18(A))擁有更大明顯變化之平均半高寬變化量，如文獻[35]殘留應力消除量越大，其平均半高寬變化量也越大，故可解釋下熱影響區(圖 18(A))平均半高寬變化量大於上熱影響區(圖 18(E))；另外討論圖 18(B)與(D)即下銲道區與上銲道區之部分與圖 13(B)與(D)，其趨勢相同，故圖 13(B)與(D)即下銲道區與上銲道區擁有較小的 Rel 值並同時擁有幾乎不變之平均半高寬變化量。中心銲道區(圖 13(C))擁有最大之 Rel 值，同時也擁有低變化之平均半高寬(<0.05 度)，根據文獻[34]，平均半高寬超過 0.05 度時，材料將發生破損之潛質性，文獻指出擁有 VSR 振動時效的作用下，工件之量測後的平均半高寬應小於 0.05 度以下才算安全，故 VSR 振動時效製程對於中心銲道區之副作用最低且 Rel 值最高，且其 VSR 製程對這區位置效果最佳，然而對下熱影響區(圖 18(A))與上熱影響區(圖 18(E))而言，VSR 振動時效製程之副作用影響最大，因其平均半高寬變化量變化過大。

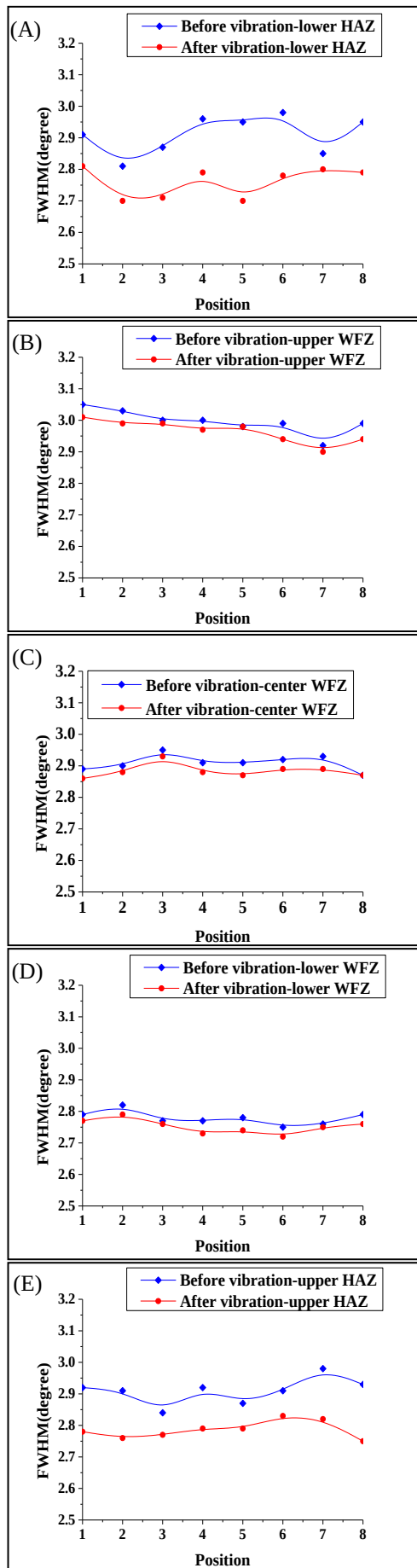
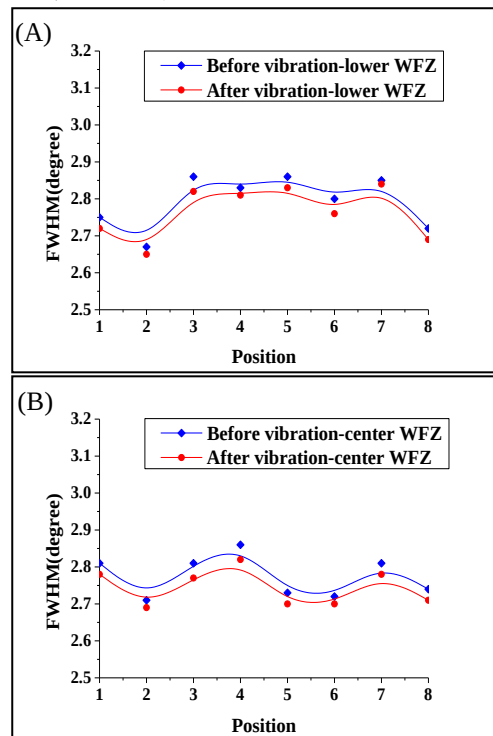


圖 18 管對管對接銲之 VSR 製程前後平均半高寬

(FWHM)-銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之曲線演化圖：  
(A)下熱影響區；(B) 下銲道區；(C)中心銲道區；(D)上  
銲道區；(E)上熱影響區

### III-III-II 管對板振動時效前後-銲道及熱影響區平均半高寬演化

如圖 19 為管對板接銲之 VSR 製程前後平均半高寬 (FWHM)-銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之曲線演化圖。整體來說，圖 19 (D)即上熱影響區之平均半高寬變化量最大，主要介於  $0.05 \text{ 度} < \text{FWHM} < 0.15 \text{ 度}$  之間，有些位置甚至超過  $0.15 \text{ 度}$ ，如上熱影響區之 4 與 5 之平均半高寬變化量超過  $0.15 \text{ 度}$ ，其最大值在上熱影響區位置 5 達至  $0.23 \text{ 度}$ ；而圖 19 (A)、(B)與(C)即下銲道區、銲道中心區與上銲道區之平均半高寬變化量皆不到  $0.05 \text{ 度}$ ，綜合 5-2-3 節之討論，將其殘留應力分布與平均半高寬整合比較，結果顯示，其趨勢與圖 16(A)-(D)不盡相同，雖然上熱影響區(圖 16(D))擁有較多超過 48%之 Rel 值並同時擁有明顯變化之平均半高寬變化量( $0.09 \text{ 度}$ 至  $0.25 \text{ 度}$ )，但在銲道區擁有較少數量之 48%Rel 值，平均半高寬無明顯變化皆小於  $0.05 \text{ 度}$ ，另外由上節 5-3-1 可知，根據文獻[34]，平均半高寬超過  $0.05 \text{ 度}$  時，材料將發生破損之潛質性，文獻指出擁有 VSR 振動時效的作用下，工件之量測後的平均半高寬應小於  $0.05 \text{ 度}$  以下才算安全，故熱影響區為不安全之狀態，此現象同於上節 III-III-I 之圖 18(A)與(E)都是 FWHM 變化量在  $0.05 \text{ 度}$  以上的熱影響區，最後結論顯示，無論是管對管銲接或是管對板銲接，經 VSR 振動消除殘留應力後，熱影響區皆擁有被破壞之潛質，可判斷熱影響區銲接後為機械性質較脆弱之區域。此三個銲道區經 VSR 振動時效後，Rel 值大且平均半高寬無明顯之變化，因此為安全區域，且有達到 VSR 振動製程參數最佳化之效果。



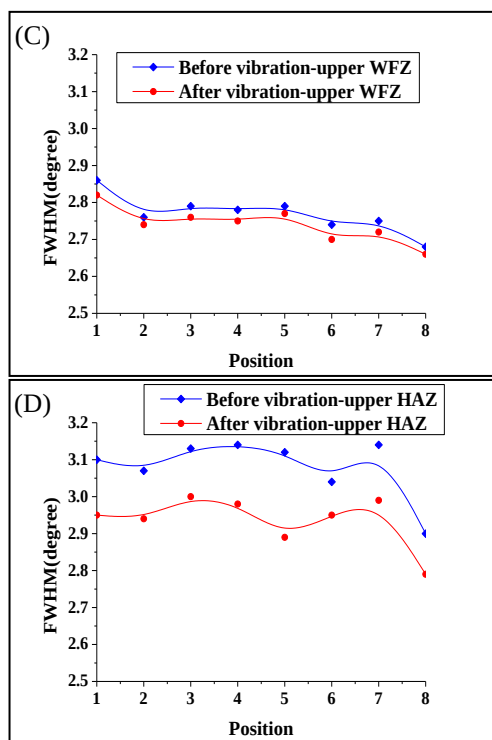


圖 19 管對板填角銲之 VSR 製程前後平均半高寬 (FWHM)-銲道區(WFZ)與熱影響區(HAZ)之曲線演化圖：(A)下銲道區；(B)中心銲道區；(C)上銲道區；(D)上熱影響區

#### IV. 結論

本研究主要探討 ASTM A285 Gr.C 低碳鋼，其由材料殘留應力量觀點切入，分析運轉中核能電廠在熱交換器管件與銲道受殘留應力量影響的情況，材料經由銲接後，經由 VSR 振動消除殘留應力量製程，在製程前後皆進行 Cr 靶 X-ray 之 mean-FWHM 與德拜-謝樂的量測及金屬磁記憶量測儀做檢測，後續將數據搭配文獻做相關分析，其由實驗結果可歸納出下列結論：

1. 經銲接後，管對管銲接之銲道區殘留應力量值為 -133MPa ~ -279MPa，熱影響區殘留應力量值為 -181MPa ~ -239MPa；在管對板之部分，銲道區殘留應力量值為 40MPa ~ 200MPa，熱影響區殘留應力量值為 103MPa ~ 200MPa。
2. 管對管銲接後經振動時效消除殘留應力量，其殘留應力量值消除率為 18%至 43%，在熱影響區消除率為 21% ~ 40%；在管對板之部分，其殘留應力量值消除率為 29% ~ 49%，在熱影響區消除率為 39% ~ 49%。
3. 在熱影響區擁有較大之平均半高寬變化量，而銲道區之平均半高寬變化量卻 <0.05 度，本研究之振動時效之參數所影響平均半高寬 >0.05 度，故材料將發生破損之潛質性，但對於銲道，殘留應力量消除率大且平均半高寬無明顯之變化，因此為安全區域，且有達到 VSR 振動製程參數最佳化之效果。
4. 管對管銲接之銲道殘留應力量值皆為壓殘留應力量，其與一般所認知根據銲接冶金之銲道呈現拉殘留應力量狀態相反，壓殘留應力量狀態對於工業界環境之應力量腐蝕較有抵抗性。

5. 本計畫可驗證當銲道平均半高寬變化量 <0.05 度時，可達到振動時效消除殘留應力量之最佳狀態，且殘留應力量也可以有效地消除。

#### 參考文獻

- [1] P. J. Withers, and H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress: Part 1 – Measurement techniques," Materials Science and Technology, Vol. 17, pp. 355-365, 2001.
- [2] P. J. Withers, and H. K. D. H. Bhadeshia, "Residual stress: Part 2 – Nature and origins," Materials Science and Technology, Vol. 17, pp. 366-375, 2001.
- [3] M. E. Hilley, J. A. Larson, C. F. Jatzak, and R. E. Richlefs, editors. Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction, SAE Information Report J784a, pp. 19-24, 1971.
- [4] P. S. Prevý: Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 10, ed. K. Mills, Am. Soc. For Met., Metals Park, Ohio, pp. 380-392, 1986.
- [5] T. Kondoh, T. Goto, T. Sasaki, and Y. Hirose, "X-ray stress measurement for titanium aluminide intermetallic compound," Advances in X-Ray Analysis, Vol. 43, pp. 107–116, 2000.
- [6] T. Sasaki and Y. Hirose, "Single incidence X-ray stress measurement for all plane stress components using imaging plate of two-dimensional X-ray detector," Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol. 44, pp. 1138–1143, 1995.
- [7] S. Taira, K. Tanaka, and T. Yamazaki, Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol. 27, p 251, 1978.
- [8] T. Sasaki, Y. Hirose, K. Sasaki, and S. Yasukawa, "Influence of image processing conditions of Debye Scherrer ring images in X-ray stress measurement using an imaging plate," Advances in X-Ray Analysis, p 40, 1997.
- [9] M.C. Sun, Y.H. Sun, and R.K. Wang, "Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel," Materials Letters, Vol. 58, pp. 1396-1399, 2004.
- [10] D. Rao, J. Ge, and L. Chen, "Vibratory stress relief in manufacturing the rails of a maglev system," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, pp. 388-191, 2004.
- [11] C.W. Kuo, C.M. Lin, G.H. Lai, Y.C. Chen, Y.T. Chang, and W. Wu, "Characterization and mechanism of 304 stainless steel vibration welding," Materials Transactions, Vol. 48, pp. 2319-2323, 2007.
- [12] E.A.D. Saunders, Heat Exchangers, pp. 475-524, John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [13] J.P. Gupta, Working with Heat Exchanger: Questions and Answers, pp. 501-523, Hemisphere Publishing Corporation, 1990.
- [14] Seppo K. Ruottu, Pertti J. Sarkomaa, Proceedings of the International Conference on Fluidized Bed Combustion, Vol. 1, pp. 419-422, 1995.
- [15] R.E. Smallwood, "Heat Exchanger Tubing Reliability," Mater. Perform., Vol. 16, pp. 27-34,

- 1977.
- [16] D. A. Jones, Principle and Prevention of Corrosion, 2nd ed., Simon & Schuster, 1996.
  - [17] H.H. Uhlig and R.W. Revie, Corrosion and Corrosion Control, 3rd ed., pp. 90-164, Wiley-Interscience, 1985.
  - [18] M.G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd ed., pp. 39-151, McGraw-Hill, New York, 1988.
  - [19] 柯賢文, 腐蝕及其防制, 初版, 全華科技圖書股份有限公司, 1995.
  - [20] M.A. Winters, PSN Stokes, P.O. Zuniga and D.J. Schlottenmier, Corro. Sci., Vol 35, Iss 5-8, pp 1667-1675, 1993.
  - [21] M.D. Tseng and H.C. Shih, "A New Equation for the Resistance of Deep-well groundbed to Earth", Corros. Prevent. Control, Vol. 40, No. 5, pp. 108-111, 1993.
  - [22] M.D. Tseng and H.C. Shih, "The Corrosion Behavior of 90Cu-10Ni in Seawater", Corros. Prevent. Control, Vol. 41, No. 1, pp. 19-21, 1994.
  - [23] M.D. Tseng and H.C. Shih, "The Circuit Resistance and Potential Decay along a Longdistance Pipeline: Cathodic Protection from a Deep-well-grounded System", Corros. Prevent. Control, Vol. 41, No. 1, pp. 45-47, 1994.
  - [24] S. Kou, Welding Metallurgy, 2<sup>nd</sup> Ed., A JOHN WILEY & SONS, INC., New Jersey, pp.122-124, 2003.
  - [25] M. Law, H. Prask, V. Luzin, T. Gnaeupel-Herold, "Residual stress measurements in coil, linepipe and girth welded pipe," Materials Science and Engineering A, Vol. 437, pp. 60-63, 2006.
  - [26] B. Brickstad, B. L. Josefson, "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 11-25, 1998.
  - [27] C. C. Silva, J. P. Farias, "Non-uniformity of residual stress profiles in butt-welded pipes in manual arc welding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 199, pp. 452-455, 2008.
  - [28] M. Jeyakumar, T. Christopher, "Influence of residual stresses on failure pressure of cylindrical pressure vessels," Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 26, No. 6, pp. 1415-1421, 2013.
  - [29] J.T. Maximova, G.V. Dunchevab, and I.N. Mitev, "Modelling of residual stress relaxation around cold expanded holes in carbon steel," Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, pp. 909-917, 2008.
  - [30] S. Kwofie, "Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief," Materials Science and Engineering A, Vol. 516, pp. 154-161, 2009.
  - [31] 周佑融, "熱處理溫度對低碳鋼鉚件應力消除與微觀組織之研究", 國立中興大學材料科學與工程學系專題報告, 民國 103 年。
  - [32] 錢賢峻, "不同鉚後熱處理溫度對 AISI304 不銹鋼殘留應力消除效果與機制之研究", 國立中興大學材料科學與工程學系專題報告, 民國 103 年。
  - [33] P. Juijerm, and I. Altenberger, Effect of temperature on cyclic deformation behavior and residual stress relaxation of deep rolled under-agedaluminium alloy AA6110, Institute of Materials Engineering, University of Kassel, pp. 475-482, 2004.
  - [34] 王家祥, "振動對 FCC、BCC 與 HCP 金屬材料的影響", 國立中興大學材料科學與工程學研究所博士論文, 民國 104 年。
  - [35] B. Pinheiro, J. Lesage, I. Pasqualino, E. Bemporad, and N. Benseddq, "X-ray diffraction study of microstructural changes during fatigue damage initiation in pipe steels: Role of the initial dislocation structure," Materials Science and Engineering A, Vol. 580, pp. 1-12, 2013.

# 新型鎳基合金鐳材之 LBW 與 GTAW 鐳道特性研究

## Characteristics of The New Nickel-Based Alloys Weld with LBW and GTAW

計畫編號：MOST 104-NU -E-006 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李驊登

e-mail：htlee@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：曾秉鈞、吳維軒、陳郁文、洪瑞隆

執行單位：國立成功大學機械工程學系

### 摘要

本研究探討鎳基合金鐳材 Alloy 52 之 GTAW 與 LBW 鐳接特性。首先評估 GTAW 覆鐳填料不同合金元素含量對耐蝕性之影響，並進行改良式惠氏腐蝕測試，再由 OM/SEM 觀察微觀組織。接著利用 GTAW 作單道覆鐳，同時改變溫度與應力以模擬使用環境，由金相評定 DDC 生成與否，並製作失效窗口圖。此外，以熱電偶量測 GTAW 與 LBW 鐳接之冷卻曲線，比較兩者之熱履歷。

結果顯示，隨著 Nb 含量增加，GTAW 覆鐳之惠氏測試腐蝕型態由明顯的沿晶腐蝕轉變為均勻腐蝕，顯示鐳材中 Nb 含量有助於提升覆鐳件之耐蝕性能。針對 GTAW 單道覆鐳件，繪製溫度區間 750-1150°C 之窗口圖，可得知約 900°C 時 DDC 生成敏感性最大。而觀察 GTAW 與 LBW 之熱履歷曲線，發現 LBW 之冷卻速率遠大於 GTAW，可避免  $M_{23}C_6$ 、 $M_7C_3$  碳化物生成。

關鍵字：鎳基合金、Alloy 52、失延裂紋、脈衝鐳接

### Abstract

Ni-based Alloy 52 welding using GTAW and LBW is studied. First, effect of different Nb contents is investigated by the modified Huey test and microstructures observed by OM and SEM. Moreover, the estimate of DDC by microstructures with different simulation environments was used to make the failure map. Besides, the thermocouple measurement is to compare the thermal history of GTAW and LBW.

The results showed that corrosion types turn intergranular corrosion into uniform corrosion with the increase of Nb content which can promote the resistance of corrosion. In addition, the failure map of the GTAW cladding weldment showed that the susceptibility of DDC reached the peak at 900°C. Finally, the thermal history revealed that the cooling rate of LBW is higher than GTAW and results in the avoidance of  $M_{23}C_6$  and  $M_7C_3$  carbides.

Keywords: Pulsed laser welding, Alloy 52, DDC

### I. 前言

鎳基鐳材 Alloy 52 由於具有優良的高溫強度及耐蝕能力，故常施鐳於核電廠各項重要設施如主反應爐、蒸汽產生器等，並搭配不同鐳法如 LBW (Laser Beam

Welding) 與 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) 等。但隨著長時間使用陸續在鐳道處發生裂紋。發生原因主要歸咎於鎳基鐳件長時間在高溫、高壓環境下運轉導致衰化，進而使穿越管產生應力腐蝕 (Stress corrosion cracking, SCC)，又稱一次水應力腐蝕 (Primary water stress corrosion cracking, PWSCC)[1]。

鑑此，近年學者乃針對 Alloy 52 之不同鐳接參數、鐳接方法及其影響作深入探討。A.J. Ramirez[2] 等人認為，增加合金元素 Nb 可以釘扎晶界，增加崎嶇晶界與限制晶界遷移之外，亦可阻止碳與鉻形成富鉻碳化物，其原因為鐳道進行凝固時，TiC/NbC 等碳化物因為成核能低，會於材料溶點溫度以上優先形成[3]。而 Alloy 52 覆鐳所產生的失延裂紋 (Ductility dip cracking, DDC) 議題也有許多討論。其主因目前被認為是晶界遷移 (Grain boundary migration)[4]，在鐳接所受多道次覆鐳熱循環的影響下，Alloy 52 會經過失延區間，並與內應力交互作用產生裂紋。GTAW 覆鐳以外，雷射覆鐳 (Laser Beam Cladding, LBC) 也逐年增加採用趨勢。雷射之最大優勢在於密集的能量輸出以及較低的熱輸入，故組織可以產生細小的鐳道與狹窄的熱影響區，以避免組織因能量過大而產生的不良影響，同時也減少鐳件因熱應力而變形。

故本研究針對 GTAW 多道覆鐳中不同合金元素對耐蝕性的影響作評估，改變 Alloy 52 之 Nb 含量，施鐳後進行改良式惠氏腐蝕測試，以重量損失法評價腐蝕情況，並以 OM/SEM 觀察金相，分別討論其微觀組織呈現。接著利用 GTAW 作單道覆鐳，藉夾具與熱處理爐模擬核電廠使用環境，由金相判定是否有生成 DDC，並改變溫度與應力條件，繪製失效窗口圖。另一方面，實施 GTAW 與 LBW 鐳接，以熱電偶量測其熱履歷與冷卻曲線，比較兩者鐳法之冷卻速率。藉上述各項實驗結果探討 GTAW 與 LBW 之鐳接特性，以期作為核電廠施鐳參考，進一步提升結構安全可靠度。

### II. 實驗方法

本實驗採用鎳基 Alloy 52 鐳線，線徑為 0.9 mm，另一比較用鐳材為 Alloy 52\_08，合金元素成份如表 1 所示。以 GTAW 定速覆鐳於基板。基板材料選用 SUS 316 不銹鋼板，尺寸 50W × 200L × 3H mm 之熱軋薄板。鐳接過程中，以氬氣進行正面單吹以保護鐳道，覆鐳 3 層 15 道，完成後切取需要尺寸。

表 1、Alloy 52 與 Alloy 52\_08 合金元素成份表(wt%)

|             | C    | Si   | Mn   | Cr    | Mo   | Ti   | Al   | Ti+Al | Nb+Ta | Ni   |
|-------------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
| Alloy 52    | 0.03 | 0.17 | 0.7  | 30    | 0.01 | 0.6  | 0.64 | 1.2   | 0.02  | 60   |
| Alloy 52_08 | 0.02 | 0.11 | 0.75 | 29.57 | 0.2  | 0.21 | 0.12 | 1.5   | 0.82  | 56.6 |

銲材之抗腐蝕性測試方法以 ASTM A262a 規範，Modified Huey Test 方法評估，實驗方法為將試件延磨拋光後，置入沸騰 65% $\text{HNO}_3$ +0.5% $\text{HF}$  溶液中進行 120 hrs 腐蝕測試，實驗設置情形如圖 1 所示，實驗結束後取出試件並洗淨酸蝕液，以重量損失法計算腐蝕速率。



圖 1、惠氏腐蝕實驗設置

進行 DDC 敏感性實驗時先利用 GTAW 自動走銲機進行單道覆銲，填料為 Alloy 52，基材為 316L。銲接參數設定值為電壓 10V、熔接電流 80A、銲接走速 200mm/min、單吹氣體(氬氣)10L/min，銲道以 CNC 線切割機切成長條狀試片，如圖 2 所示。試件放置於 Bent Beam 夾具，提供試片應變並加熱至失延溫度，最後由 OM 觀察以確認 DDC 生成與否。



圖 2、GTAW 單道覆銲試件

覆銲實驗使用 YLW-200B Pulsed Nd:YAG 雷射機台，銲接參數如表 2 所示，分別探討 4, 6, 8 mm/s 時的情況。熱履歷量測使用 0.05 mm 之 K-Type 熱電偶 (Thermocouple)。此外亦對熔池溫度變化進行觀測，為了避免雷射熱量將熱電偶熔斷，將熱電偶點銲於孔內並套上耐高溫陶瓷管進行保護。

表 2、脈衝雷射銲接參數

|                     |         |
|---------------------|---------|
| Travel speed (mm/s) | 4, 6, 8 |
| Average power (W)   | 210     |
| Peak power (kW)     | 3.5     |
| Spot size (mm)      | 1.2     |
| Frequency (Hz)      | 20      |
| Pulse duration (ms) | 3       |

對接銲之基材為 3 mm 之 Alloy 690 板材。為了避免殘留應力的不良影響，皆進行 1050 $^{\circ}\text{C}$  持溫 5 min 之退火處理，並加工成 70 × 100 mm 尺寸，利用 SiC 砂紙去

除表面氧化層，最後依序用酒精及丙酮擦拭。熱履歷量測示意圖如圖 3 所示，其中 LBW 採用 Nd:YAG 脈衝方式，無填料對接，輸出功率為 1750 W，頻率為 100 Hz；GTAW 則採有填料對接，銲料為 Alloy 52。

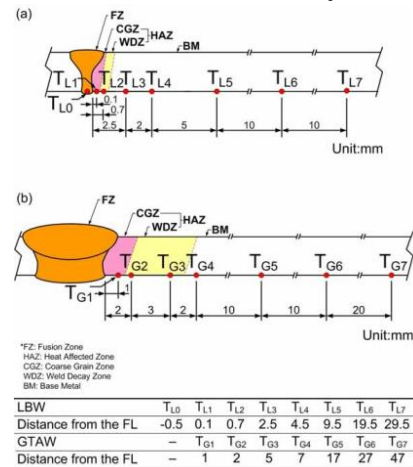


圖 3、熱履歷量測示意圖 (a) LBW (b) GTAW

### III. 結果與討論

#### 3.1. 合金元素對 GTAW 多道覆銲特性之影響

由於核電廠之輻射腐蝕環境近似於硝酸，合金元素對耐蝕性之影響以 Modified Huey Test 作驗證，採用規範為 ASTM A262a test C，即為將試片以 65%  $\text{HNO}_3$  煮沸 240 hrs，此實驗主要針對有缺銲情形材料觀察沿晶腐蝕抵抗能力，但考慮本研究之使用材料銲含量為 30%，是銲材成分使用建議上限，缺銲區情形不明顯，故本實驗採用 Modified 的方式，於 65% $\text{HNO}_3$  中添加 0.5% 之  $\text{HF}$ ，並且為安全起見將反應時間縮短為 120 hrs。結果如圖 4 所示，隨著 Nb 含量增加，Alloy 52\_08 基地組織中有 NbC 析出物析出，NbC 除了細化晶粒的功能以外，也有釘紮晶界的功能，此類析出物化學活性穩定，故不會有粗大情形，細緻的析出物使蝕孔現象較輕微，同時由於 NbC 的釘紮效果，Ti(C,N) 便會均勻散佈而非大多數停留於晶界，減少產生沿晶腐蝕機會，由重量損失也觀察到 Alloy 52\_08 低於 Alloy 52。綜合以上所述，可了解 Alloy 52\_08 比 Alloy 52 具有更佳耐沿晶腐蝕性能，顯示銲材中 Nb 含量有助於提升覆銲件之耐蝕性。

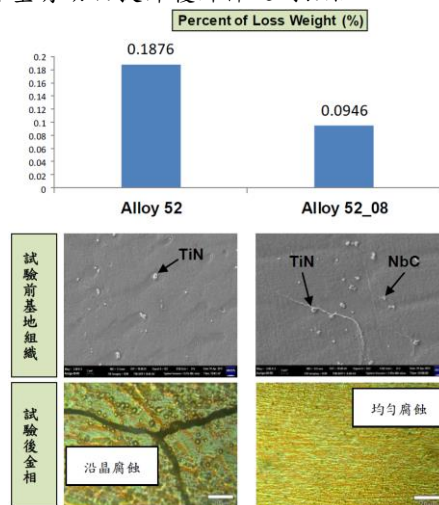


圖 4、Alloy 52 與 Alloy 52\_08 腐蝕試驗後重量損失及金相比較

### 3.2. GTAW 單道覆銲失延裂紋之失效窗口

為了探討失延裂紋之溫度與應力(應變)條件,本研究選取調整參數評估 DDC 是否生成。將試件加熱到不同溫度並持溫 30 秒,再分別以夾具施加應變量,溫度範圍為 750-1100°C、持溫固定為 30 秒、應變量間距為 0.5%,將各項參數之試件鑲埋後以每 0.5 mm 之研磨深度觀察一次金相,確認 DDC 是否存在,若有觀察到 DDC 則在圖上標示 O,若無則標示 X。透過此法界定出 DDC 生成之臨界參數,並繪製失效窗口(Failure Map)如圖 5 所示。由失效門檻曲線趨勢得知,900°C 為應變之最低點,可視為失延最敏感之溫度區間。

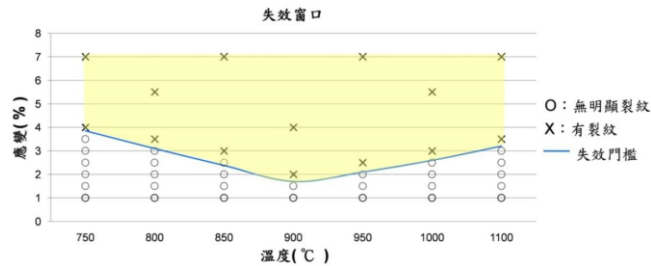


圖 5、Alloy 52 之失效窗口

### 3.3. LBW 覆銲走速對冷卻速率及熱循環之影響

覆銲走速會同時影響銲件冷卻速率與熱循環分佈,進而導致不同的熱裂程度,考慮走速與冷卻速率的關係,利用固定頻率 20 Hz 與送料率 0.75 mm/mm 搭配不同走速,分析熔池位置的冷卻速率。得知冷卻速率隨著覆銲走速而增加,同時取最低走速 4 mm/s 之冷卻速率與 GTAW 互相比較,發現 LBC 之冷速遠大於 GTAW,如圖 6 所示,該特性會提升 LBC 之熱裂敏感性。

現考慮銲接試件各點位置上,不同冷卻速率與熱循環履歷之關係,固定參數為送料率 0.9 mm/mm 與頻率 20 Hz,同時比較不同走速下試件上各點之峰值溫度分佈。發現隨著走速降低,峰值溫度上升、熱量向周圍擴散、總入熱量增加、溫度梯度下降。其中溫度梯度被認為是影響熱裂程度的重要參數之一,而溫度梯度的趨緩有助於減少熱裂。但由進一步熱裂實驗發現,當走速增加,脈衝雷射熱裂情況並未有顯著改善,原因如圖 7 所示,取實驗中溫度梯度最低之走速 4 mm/s 與 GTAW 作比較,發現脈衝雷射之冷卻速度與 GTAW 相比仍明顯偏高,導致熱裂敏感性增加。

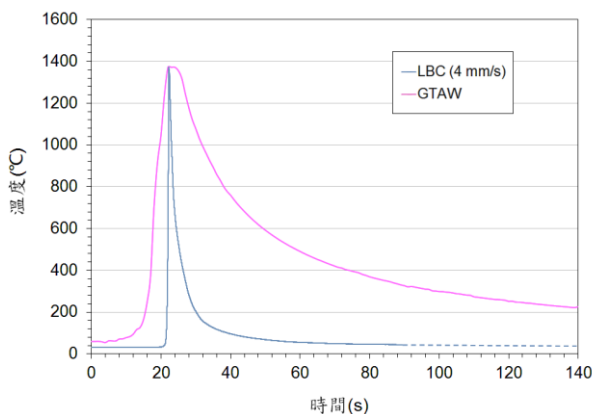


圖 6、LBC 與 GTAW 之冷卻速率比較

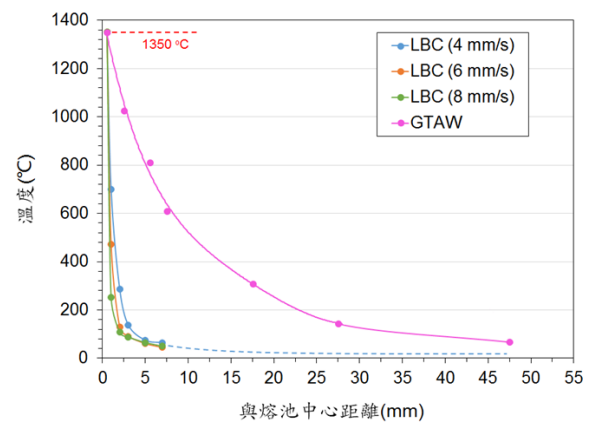


圖 7、LBC 與 GTAW 熱循環比較

### 3.4. GTAW 與 LBW 對接銲之熱履歷曲線特性

Cr 碳化物對鎳基合金的耐蝕性具有不良影響。當基材為 Alloy 600 時,Cr 碳化物容易在 540-980°C 之間析出,同時在 540-760°C 具有高度的 IGC 敏感性,此腐蝕行為容易在沃斯田鐵系不銹鋼中出現。當溫度在 760°C 以上時,主要析出物是  $Cr_7C_3$ ,當溫度在 760°C 以下,則  $Cr_{23}C_6$  也會出現。由此可見在 GTAW 與 LBW 銲接中,熱履歷曲線圖具有重要意義。進一步結合熱履歷曲線與  $Cr_7C_3$ 、 $Cr_{23}C_6$  之溫度時間轉變圖 (Time Temperature Transformation diagram, TTT) 如圖 8 所示,發現 GTAW 之  $T_{G1}$ 、 $T_{G2}$ 、 $T_{G3}$  皆經過  $Cr_{23}C_6$  析出曲線,會在組織中形成  $Cr_{23}C_6$ ,但由於 LBW 冷卻速率快,可有效避開曲線鼻端,降低  $Cr_{23}C_6$  析出機率。

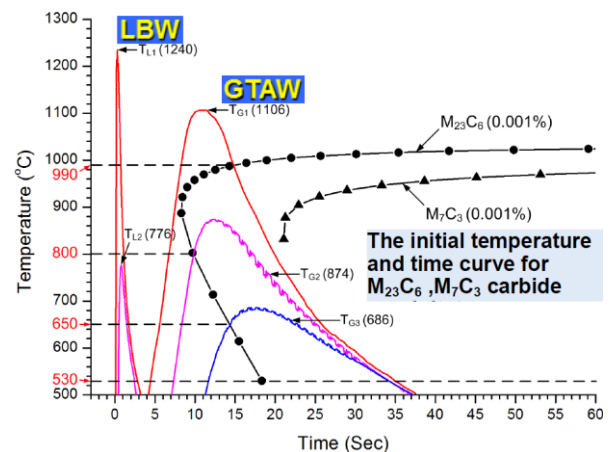


圖 8、LBW 與 GTAW 銲接製程之熱履歷曲線,及析出物  $M_{23}C_6$ 、 $M_7C_3$  之初始析出 TTT 圖

## IV. 結論

1. 本研究探討兩種銲材 Alloy 52 及 Alloy 52\_08 之 Nb 含量分別為 0.02 及 0.82 wt%,藉由惠氏試驗評價銲後耐蝕性可發現,隨著 Nb 含量增加 Alloy 52\_08 基地組織中有 NbC 析出物析出,重量損失較低,而型態則由沿晶腐蝕轉變為均勻腐蝕,顯示銲材中 Nb 含量有助於提升覆銲件之耐蝕性能。
2. 由 Alloy 52 覆銲失效窗口得知,當溫度與應力改變,DDC 裂紋敏感度狀況亦不同。在失延溫度敏感溫度區間 750-1150°C 之中,約 900°C 銲件所能承受之

應力值最低，裂紋生成機率亦最大。

3. 觀察熔池之溫度變化曲線顯示當走速由 8 mm/s 降低為 4 mm/s，冷卻速率也由 5750 °C/s 降低至約 984 °C/s，但一般 GTAW 冷卻速率大多位於 100 °C/s 以內，與之相比 LBW 冷速仍相當大。
4. LBW 與 GTAW 覆銲熱履歷曲線顯示，LBW 具有快速加熱冷卻及低入熱量性質，使得溫度-時間曲線坐落在  $M_{23}C_6$ 、 $M_7C_3$  碳化物生成曲線鼻端之左側，代表藉由 LBW 銲接特性可以在冷卻過程中避開  $M_{23}C_6$ 、 $M_7C_3$  碳化物產生。

### 參考文獻

- [1] J. Gorman, S. Hunt, P. Riccardella and G. A. White, "PWR Reactor Vessel Alloy 600 Issues" Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Vol. 3, 2006, pp. 1-26.
- [2] A. J. Ramirez and J. C. Lippold, "New Insight Into The Mechanism Of Ductility-Dip Cracking In Ni-Base Weld Metals," Phenomena And Mechanisms, pp. 19-41.
- [3] J. Craven, K. He, L. A. J. Garvie, and T. N. Baker, "Complex Heterogeneous Precipitation In Titanium-Niobium Microalloyed Al-killed HSLA Steels - I. (Ti,Nb)(C,N) Particles," Acta Materialia, vol. 48, pp. 3857-3868, 2000.
- [4] A. J. Ramirez and J. C. Lippold, "High Temperature Behavior Of Ni-Base Weld 113 Metal Part Ii – Insight Into The Mechanism For Ductility Dip Cracking," Materials Science And Engineering, vol. A 380, pp. 245-258, 2004.

# 過氧化氫對於實施貴重金屬化學添加之沸水式反應器金屬組件應力腐蝕龜裂行為之影響

## Evaluation of IGSCC Behavior of Hydrogen Peroxide on the Components of Stainless Steels with Noble Metal Chemical Addition in Simulated BWR Environments

計畫編號：MOST 104-NU-E-007-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：葉宗洸

e-mail：tkyeh@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：王美雅、苑主用

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

### 摘要

本實驗模擬反應器啟動及停機過程的溫度及水化學條件，針對 304 不銹鋼試片進行電化學腐蝕電位量測。在啟動的過程中，尚無氫氣添加，因此透過電化學分析，瞭解 304 不銹鋼試片於模擬沸水式反應器啟動環境下，使用白金被覆處理在氧化性水環境的應力腐蝕龜裂特性影響。

關鍵詞：應力腐蝕龜裂、反應器啟動、304 不銹鋼、白金被覆、加氫水化學。

### Abstract

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

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

### I. 前言

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

金，不會使腐蝕被抑制，反而會由於白金催化氧化劑的反應而使腐蝕情形大幅提升。

### II. 主要內容

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

為模擬核電廠組件之真實情形，實驗所使用的試片為 304 不銹鋼，其成分分析如表一，所有試片皆先經過敏化熱處理，然後在溫度 288 °C、溶氧量 300 ppb 之高溫含氧水環境下預長氧化膜約 14 天；預長氧化膜完成後，會將一些試片置入 150 °C、100ppm 白金的水中沉積 24 小時，再來會將被覆白金及沒有被覆白金試片放入高溫高壓水循環系統中(壓力 8.28MPa、溶氧量 300ppb)，使用三極系統對試片做及畫掃描(高溫高壓水循環系統如圖一所示)，試驗之溫度包括 200 °C、250 °C 及 288 °C，水環境分別為 100、300ppb 的過氧化氫。此外，會以 SEM 及 EDX 觀察氧化膜及白金被覆情形。

### III. 結果與討論

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

圖四、圖五分別是白金被覆及氧化膜試片在 100ppb、300ppb 過氧化氫下的極化曲線，其所算出來的腐蝕電位(ECP)、腐蝕電流密度(icorr)列在表一及表二。

不管在什麼溫度下，白金被覆的試片在腐蝕電位及腐蝕電流密度皆高於只有氧化膜的試片，由此可以說明白金可以催化氧化劑的反應，不僅僅是氧氣，催化過氧化氫的效果亦相當顯著。在 300ppb 過氧化氫可以看到腐蝕電位隨著溫度升高而上升，但在電流密度部分，250 到 288 °C 有一個上升的趨勢，可以說明溫度越高反應速率越快。而在 100ppb 的過氧化氫水環境中，250 °C 的腐蝕電位及電流密度都是最高的，此部分還需要再做實驗

來證實是何種機制。

#### IV. 結論

1. 在過氧化氫水環境中，白金被覆試片的腐蝕情形遠比沒有白金被覆的試片來的強烈，由腐蝕電位、腐蝕電流密度及交換電流密度的比較可以證實。
2. 證實白金被覆不只會催化氧化劑及還原劑的再結合，在缺乏還原劑的情況下，會加速氧化劑的反應，大大提升了腐蝕的可能性。

#### 參考文獻

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

表一 304 不鏽鋼成分分析

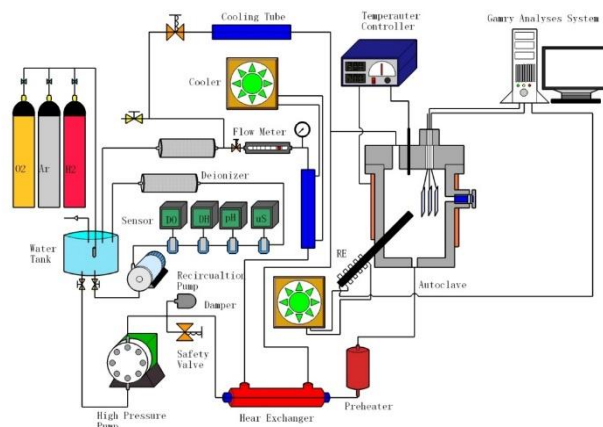
| Fe       | C        | Cr        | Ni       | M <sub>n</sub> | S         | P         | Si       | M <sub>o</sub> | Cu       |
|----------|----------|-----------|----------|----------------|-----------|-----------|----------|----------------|----------|
| Ba<br>l. | 0.<br>04 | 18.<br>34 | 8.<br>10 | 1.<br>59       | 0.0<br>04 | 0.0<br>33 | 0.<br>41 | 0.<br>29       | 0.<br>41 |

表二 100ppb 過氧化氫的腐蝕電位、腐蝕電流密度比較

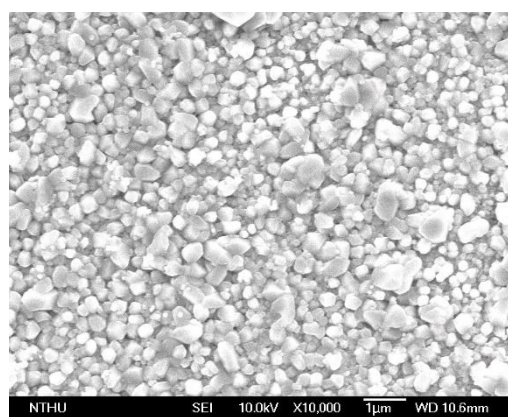
| 試片   | 溫度<br>(°C) | 溶氧<br>(ppb) | ECP<br>(mV <sub>SHE</sub> ) | <i>i</i> <sub>corr</sub><br>(μA/cm <sup>2</sup> ) |
|------|------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 預氧化  | 288        | 100         | 131.85                      | 1.41                                              |
| 白金被覆 | 288        | 100         | 169.25                      | 4.93                                              |
| 預氧化  | 250        | 100         | 152.25                      | 2.83                                              |
| 白金被覆 | 250        | 100         | 180.75                      | 19.55                                             |
| 預氧化  | 200        | 100         | 115.95                      | 1.08                                              |
| 白金被覆 | 200        | 100         | 162.36                      | 4.81                                              |

表三 300ppb 過氧化氫的腐蝕電位、腐蝕電流密度比較

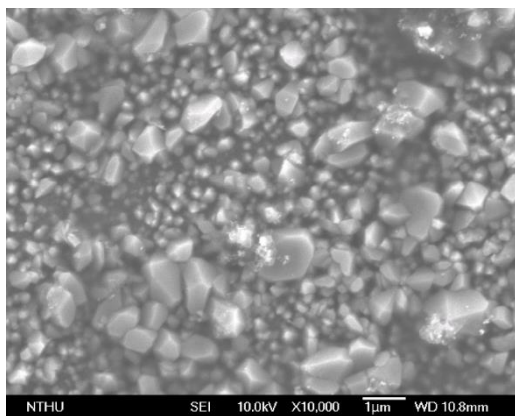
| 試片   | 溫度<br>(°C) | 溶氧<br>(ppb) | ECP<br>(mV <sub>SHE</sub> ) | <i>i</i> <sub>corr</sub><br>(μA/cm <sup>2</sup> ) |
|------|------------|-------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| 預氧化  | 288        | 300         | 168.15                      | 1.37                                              |
| 白金被覆 | 288        | 300         | 202.65                      | 4.63                                              |
| 預氧化  | 250        | 300         | 156.95                      | 1.33                                              |
| 白金被覆 | 250        | 300         | 189.05                      | 2.42                                              |
| 預氧化  | 200        | 300         | 131.45                      | 2.24                                              |
| 白金被覆 | 200        | 300         | 167.85                      | 17.33                                             |



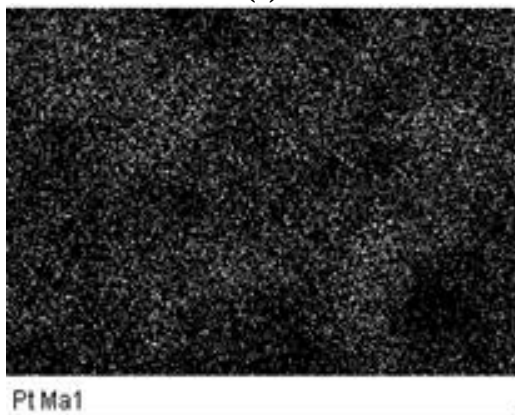
圖一 高溫水循環示意圖



圖二 預長氧化膜 SEM 圖

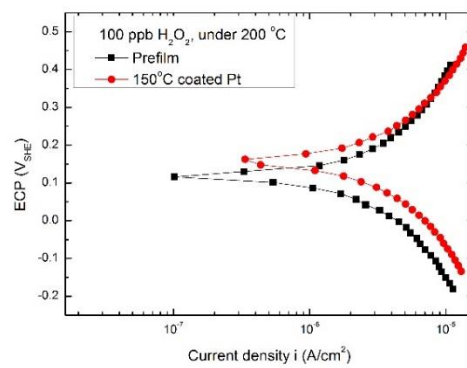


(a)



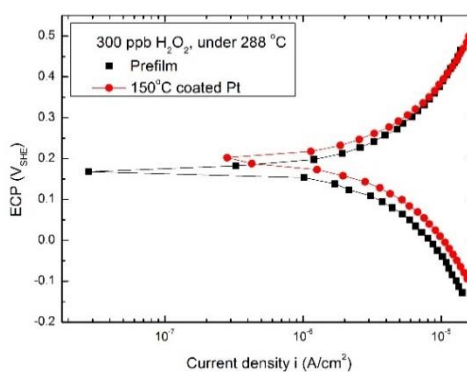
(b)

圖三 白金被覆(a)SEM 圖 (b)EDX 圖

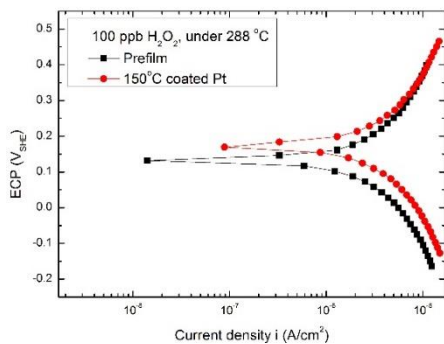


(c)200°C

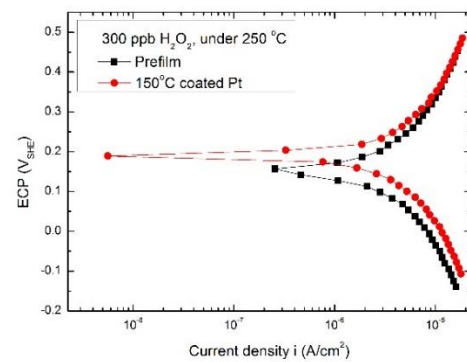
圖四 100 ppb 過氧化氫在不同溫度之極化掃描



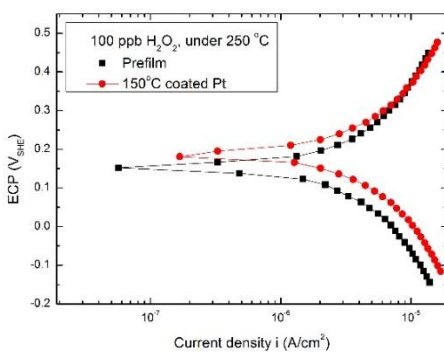
(a) 288°C



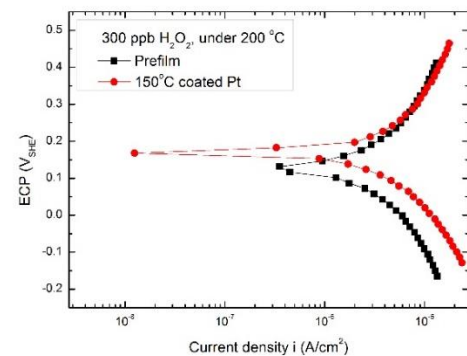
(a) 288°C



(b)250°C



(b)250°C



(c)200°C

圖五 300 ppb 過氧化氫在不同溫度之極化掃描

# 用過核子燃料處置設施受熱力-水力-力學-化學耦合作用之國際發展現況

## Current research and development status of coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in disposal facility of spent nuclear fuel

計畫編號：MOST 104-NU-E-002-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：林文勝

e-mail：wslinlin@ntu.edu.tw

計畫參與人員：林文勝、梁書嚴、劉振宇

執行單位：國立台灣大學水工試驗所

### 摘要

高放射性廢棄物工程障壁系統和地質系統，利用先進的模式模擬熱力-水力-力學-化學(THMC)的耦合作用的過程是必要的。國內對於該 THMC 耦合作用過程的研究較少，僅研究放射性廢棄物處置場熱力(T)、水力(H)、力學(M)、化學(C)之單獨特性，或僅作到 T-M 耦合。從 1992 年開始的大型國際合作計畫 DECOVALEX，已為高放射性廢棄物處置之工程障壁及處置場母岩建立發展 THMC 耦合的數學模型現場實驗。本計畫針對用過核子燃料處置設施受熱力-水力-力學-化學之國際發展現況進行研究，蒐集分析國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊、研析高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式、研提國內高放射性廢棄物處置 THMC 技術發展規劃建議。成果可作為高放射性廢棄物最終處置之功能安全評估與安全分析有關 THMC 耦合之基本資訊及雛形技術。

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

### Abstract

Ensuring the performance that a multi-barrier system will perform its desired functions and isolate the waste from the biosphere is a crucial for the HLW disposal. Advancing the understanding and mathematical modeling of coupled thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes in the engineering barrier system of HLW disposal facility and geological systems should be required. However, study about THMC processes in the host rock affected by the excavation and the heat production caused by the radionuclides decay of the radwaste was seldom addressed in Taiwan. They were only focused on the individual phenomenon of thermal, hydraulic, mechanical, and chemical, or coupled T-M issues relating a radioactive waste repository. To evaluate the coupled THMC processes, the DECOVALEX project which is a unique international research collaboration, initiated in 1992, has been carried out to develop the mathematical models and field experiment of THMC processes in EBS and repository host rock for the HLW disposal. The DECOVALEX project result and current status of coupled THMC for the disposal facility of spent nuclear fuel can get further THMC insights for Taiwan. Therefore, we review the current research and

development status of coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in disposal facility of spent nuclear fuel, investigate the coupled THMC model, and propose the suggestions of THMC technical development in HLW disposal of Taiwan. The results can form the THMC based information and pre-techniques for the performance assessment and safety analysis on the final disposal of HLW in Taiwan..

Key words: coupled thermo-hydro-mechanical-chemical, high-level radioactive waste, spent nuclear fuel, performance assessment, geological disposal

### I. 前言

國際原子能總署建議高放射性廢棄物應由地質處置方式，利用深部岩層的隔離阻絕特性，將用過核子燃料埋在深約 300 至 1000 公尺的地下岩層中，藉由工程與天然障壁所形成的多重屏障系統，可有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移，使用過核子燃料的放射性不致影響人類健康與環境安全。（台灣電力公司，2006；IAEA，2006）。Witherspoon(1996, 2002, 2006)指出所謂多重障壁是指利用廢棄物體(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)，所形成的層層保護，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。

最終處置場址母岩特性需具有條件，包括：非常低滲透性、高熱傳導性、無地殼構造或火山活動、附近無天然資源、具有可能自行封閉的岩性、高強度、塑性/粘性行為、岩石處於等向性靜態穩定狀態、高吸附性、具有高溫狀態時可靠穩定性、低含水量和岩性變異性小的特性（Maßmann, 2009；BGR 2007；IAEA, 2006）。

深層地質處置一般選擇結晶岩為處置母岩的國家，大多採用膨潤土作為多重障壁的緩衝材料/回填材料。緩衝材料應具高熱傳導性，有利於從廢棄物包件產生的衰變熱傳導至母岩而排出，有效降低近場熱負荷可能導致的緩衝材料劣化影響，並避免近場溫度超過 100℃，而使原本飽和狀態因水汽化而改變。在處置場的安全評估期程內，緩衝材料必須保持其物理性、化學性、及礦物性質的長期穩定，不會因為衰變熱與廢棄物包件的荷載而劣化。而處置場由於天然存在的裂隙、開挖造成的擾動帶、或受熱作用而產生的裂隙都會形成核種傳輸的擇

優途徑，因此理想的緩衝材料須具備微量乾縮的特性，不會因乾燥收縮產生裂縫而大幅影響緩衝材料的功能（陳文泉，2004）。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。

## II. 主要內容

高放射性廢棄物深層地質處置場多重障壁結構物及地層所組成複雜系統之環境影響作用，必須有功能/安全評估模式進行整體性的量化分析與模擬，評估處置系統的適當性與安全性。所以本計畫針對用過核子燃料處置設施受熱力-水力-力學-化學之國際發展現況進行研究，蒐集分析國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊、研析高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式、研提國內高放射性廢棄物處置 THMC 技術發展規劃建議。以提出處置設施之長期演變受熱力、水力、力學、化學等外在物理及化學性質影響國際發展現況技術，成果可作為高放射性廢棄物最終處置之功能安全評估與安全分析有關 THMC 耦合之基本資訊及雛形技術。

## III. 結果與討論

(一)蒐集分析國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊，並總結 DECOVALEX 國際合作計畫超過 20 年關於 THMC 之現地試驗、模型建立等研究重要成果：

(1)利用鑽孔示蹤試驗、岩體樣品示蹤試驗及地下實驗研究獲得大量以花崗岩、泥質岩、凝灰岩、鹽岩等母岩為放射性廢棄物處置場天然障壁之放射性核種遷移的水文地質參數（水力傳導係數、延散係數），及 THMC 耦合作用下地質材料參數，為放射性處置場功能安全評估提供科學數據。

(2)透過現地裂隙岩體模型及工程障壁原尺寸模型之試驗研究，瞭解裂隙岩體及工程障壁系統，核種遷移機制和模型，掌握放射性核種在裂隙岩體的移流、延散、擴散、吸附和地化反應作用機制，提供高放處置場工程障壁及天然障壁，核種遷移概念模式和數學模式建立之重要理論與現地驗證基礎。

(3)藉由大規模及長時間地下坑道試驗研究，提供高放射性廢棄物長時間尺度下深地質最終處置場功能安全評估之重要途徑及天然類比研究研究基礎。

(4)發展工程障壁及裂隙岩體 THMC 耦合作用核種遷移試驗技術，包括工程障壁和裂隙岩體核種遷移試驗裝置和溫度、壓力、應力感測設計，反應化學傳輸、地化反應及化學物種濃度分析及量測。

(二)研析高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式，以建立 COMSOL 模式之 THMC 模式，係利用 COMSOL Multiphysics 地下水模組(Subsurface Flow Module)包含流體流動、熱傳和溶解物質傳輸流動應用模式，模擬用過核子燃料最終處置情形，廢棄物燃料桶發

生破裂使核種放射性物質由廢棄物罐外釋並沿著地下水破裂面移動到周遭的地層，模擬環境的廢棄物罐垂直置放處置概念包含了廢棄物罐、緩衝材料、回填材料、母岩、裂隙岩層，本研究使用 COMSOL 求解三維傳輸模式，釋出與傳輸的過程包含地層中，地下水流的條件（流速、流向、孔隙率、擴散係數），廢棄物罐的溫度條件變化和核種存量與釋出機制，地層與工程障壁的各種物理性質。

當放射性廢棄物罐中的物質開始向外滲出時會先往緩衝材料中慢慢釋出，因在緩衝材料內的水力傳導係數、有效擴散係數都非常的低，可見到在滲出時間 100 年後，放射性物質的濃度在緩衝材料還很低，在 1000 年時會慢慢沉積在緩衝材料的周圍，因為基本上定上緩衝材料外圍的母岩是完全的透水的狀態，隨著時間的增加，放射性物質會慢慢的往上開始往回填材料(處置隧道)的方向慢慢擴散，雖回填材料右側的邊界設定為開放的流出邊界，但由下方 10000 年或是 10 萬年的傳輸情形中，可見到放射性物質的濃度也不會快速往流出邊界集中而是慢慢的增加濃度，汙染物在緩衝材料與回填材料中主要是由濃度擴散的方式傳輸。

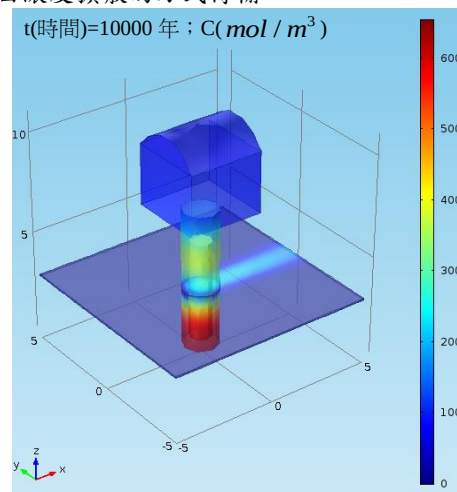


圖 1 時間  $t=10000$  年(表面透視圖)，三維高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式傳輸情形

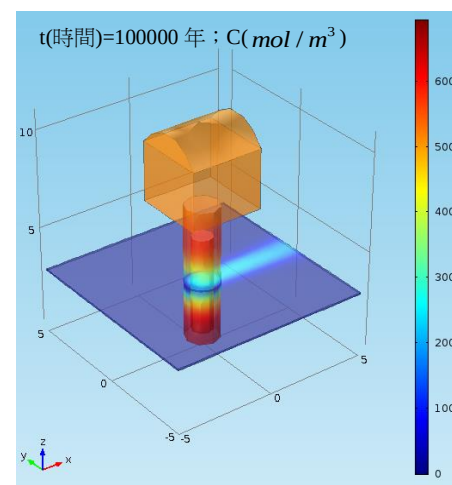


圖 2 時間  $t=100000$  年(表面透視圖)，三維高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式傳輸情形

#### IV. 結論

本計畫針對用過核子燃料處置設施受熱力-水力-力學-化學之國際發展現況進行研究，蒐集分析國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊、研析高放射性廢棄物處置熱力-水力-力學-化學耦合分析模式、研提國內高放射性廢棄物處置 THMC 技術發展規劃建議。成果可作為高放射性廢棄物最終處置之功能安全評估與安全分析有關 THMC 耦合之基本資訊及雛形技術。

#### 參考文獻

- [1] 台灣電力公司, 2006, 用過核子燃料最終處置計畫書, 台灣電力公司。
- [2] 陳文泉, 2004, 高放射性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。
- [3] DECOVALEX, 2014, <http://www.decovallex.org/index.html> Fitts, T. G., Brown, K. M., 1999, Stress-induced smectite dehydration: ramifications for patterns of freshening and fluid expulsion in the N. Barbados accretionary wedge, Earth and planetary science letters, Vol. 172, 179-197.
- [4] IAEA, 2006, Geological disposal of radioactive waste: Safety requirements. Technical Report WS-R-4, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.
- [5] IAEA, 2008, Estimation of global inventories of radioactive waste and other radioactive materials. Technical Report IAEA-TECDOC-1591, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna.
- [6] Maßmann, J., 2009, Modeling of Excavation Induced Coupled Hydraulic-Mechanical Processes in Claystone, PhD thesis, Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover, report no. 77, 2009.
- [7] Witherspoon P., 2002. Geological challenges in radioactive waste isolation- third worldwide review[LBNL-49767] Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- [8] Witherspoon P., 2006. Geological challenges in radioactive waste isolation-fourth worldwide review[LBNL-59808] Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- [9] Witherspoon, P., 1996. Geological problems in radioactive waste isolation- second worldwide review[LBNL-38915] Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.

# 先進國家地下實驗室熱-水-力學(THM)耦合試驗成果與分析模式之研析

## Study on the Experimental Result and Numerical Model for Coupled THM Effect in URLs

計畫編號：MOST 104-NU-E-032-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊長義

共同主持人：李宏輝

e-mail：[yang@mail.tku.edu.tw](mailto:yang@mail.tku.edu.tw)

計畫參與人員：林庭鞍

執行單位：淡江大學土木工程系

### 摘要

本研究在研析先進國家日本 Kamaishi 礦山 THM 耦合試驗研究成果，主要包含其試坑位置選取、監測對象與量測位置、試驗結果。並輔以瑞典 Å SPÖ 地底實驗室在 Tasq 隧道進行抑制 THM 耦合造成圍岩剝落問題之對照試驗比較結論。在數值模式方面，則整理旨在以 PFC 顆粒流數值軟體模擬 THM 作用造成圍岩剝落破裂之模擬關鍵因子與所需輸入岩材參數。文末，本研究以台電在離島潛在場址岩盤之裂隙調查資料，參考 Kamaishi 礦山 THM 試驗規劃精神，提出二個初步模仿在台灣離島潛在場址進行 THM 試驗之概念模型的監測配置。

**關鍵詞：**熱力-水力-力學耦合效應、Kamaishi 礦山、Å SPÖ 地底實驗室、台灣 THM 試驗概念模型。

### Abstract

This research studies the THM experiment program and testing result of Kamaishi mine, Japan. This field experiment is the standard reference case for evaluating the numerical modelling capability used in Decovalex group. The layout planning and experimental results of Kamaishi mine are studied. The experimental methods to prevent rock spalling by THM coupling effect in Å SPÖ hard rock laboratory is also collected. In numerical modelling, the key factors on modelling the THM effect to rock spalling by PFC are also discussed. In the conclusion, two measurement layouts of THM concept model according the distribution of fractures measured in site Taiwan, are preliminary presented.

**Keywords:** THM coupled, Kamaishi mine, Å SPÖ hard rock laboratory, Taiwan THM concept model.

### I. 前言

放射性廢料的衰變熱由廢料罐外釋，產生溫度梯度使緩衝材受到熱應力與應變，也導致水分從緩衝材內側流動到外側以致到達岩盤，進入岩盤裂隙間擾動岩體，其間熱力-水力-力學(Thermo-Hydro-Mechanical, T-H-M)是一複雜的耦合過程。

日本 Kamaishi 礦坑 THM 試驗案之規畫緣起目的，係為了作為 Decovalex 團隊 (Decovalex II: Task 2) 發展各類型數值模擬技巧與程式訓練之標準案例，故研析學習此案例現地試驗之經驗，實是國內未來 URL 試驗規畫 THM 試驗之最佳學習範例。瑞典 APSE 試驗(2002~2006

年期間)已經證明用極小的圍壓，即可抑制岩柱之受熱剝落。因此，於2008年設計一系列現地加熱對照組，採於加熱內管與岩壁間50mm間隙間，填有鬆散堆置的膨脹性膨潤土粒狀回填料試驗以資印證比較。故兩試驗計畫化實係有相輔相成效益，誠值得我國予以瞭解關注。

在數值模擬方面，PFC(Particle Flow Code)顆粒流商用分析軟體，可建構具鍵結特性顆粒模型除已可用於模擬岩石宏觀力學特性，並探討其顆粒間的微觀力學機制，甚至可透過顆粒間鍵結斷裂數的追蹤，模擬岩石在壓縮過程岩石破裂所引致的AE訊號，並可進一步區分斷鍵係屬正向鍵結的張力破壞或切向鍵結斷裂之剪列破壞，具備探討THM作用造成處置坑圍岩剝落之特殊需求，是值得我國採用之數值模擬利器。

### II. 主要內容

#### 1. 日本 Kamaishi 礦坑 THM 試驗

1994 年日本在東京北方距 600km 外釜石礦坑 (Kamaishi mine) 山谷，見圖 II.1-1，既有礦坑豎井之側壁 Kurihashi 花崗閃長岩岩體中設計 THM 耦合試驗 (JNC, 2000)，試驗期間由 1997 年 12 月 17 日加熱至 100°C 並維持受熱作用 260 天(約受熱 8 個月)、直至 1998 年 9 月 1 日才降溫並持續 180 天。

試坑深度是位在海平面下 550m 深、其上方所承受覆蓋岩層厚 260m。量測已知之現地最大主應力介於 15.5~29.9MPa (在 N-S 方位水平向)；中間主應力介於 7.6~8.7MPa (在水平向)；而最小主應力則為鉛直方向 4.5~6.3 MPa 大約等於覆土應力。

施工法係以鑽炸法(D&B)另挖出一間橫坑長 10m、寬 5m、高 7m 壁龕試驗室，以進行 THM 耦合試驗工作。處置坑(deposition hole)的 THM 模擬試坑，是在試驗室內之地面垂直向下挖出深 5m、直徑 1.7m 的實驗試坑。

試坑座落位置具有許多超過 50 cm 長的裂隙，多數之走向主要在 NE 方位、且具高陡傾角；裂隙平均長度 0.62 m、最長的達於 11.9m。裂隙之間距平均 0.1~0.4 m、最寬的為 1.99 m。其中，有三條具明顯滑動現象的主要剪力裂隙，見圖 II.1-2 內分別編號為 fracture 1 (其內夾泥厚 20.5mm)、fracture2 (夾泥厚 13.5 mm)、fracture3 (夾泥厚 3 mm) (Nguyen et al., 2001)，以利探測岩體內先天裂隙受熱力-水力-力學(THM)作用耦合效應對岩體之影響。

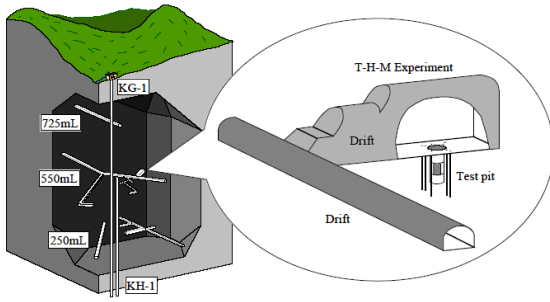


圖 II.1-1 東京北方 Kamaishi mine 花崗岩中 THM 耦合試驗室配置

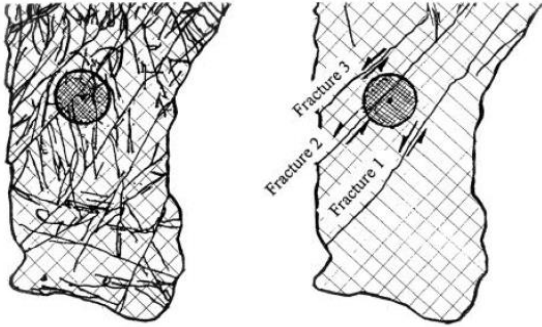
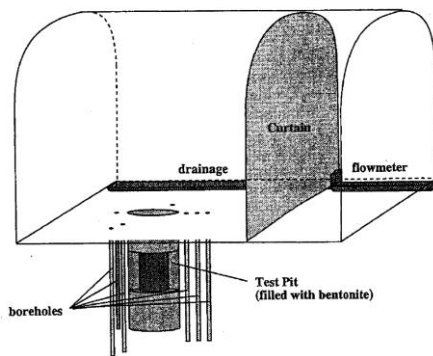


圖 II.1-2 試坑位置與三條主要滑移裂縫之相對關係

在實驗室地面，仿照KBS-3V設計觀念垂直向下挖出深5 m、直徑1.7 m的圓柱試驗坑，以模擬直徑 1.7 m 的處置坑，見圖II.1-3，在之中放置電子加熱棒區直徑約104cm、高2 m用以模擬廢料罐(canister)，並在其底部、周圍、頂部用夯實皂土緩衝材圍繞，計每10cm分層夯實到乾密度達 $1600 \text{ kg/m}^3$ ，夯實皂土初始含水量約 16 % (飽和度66 %)；並在處置坑頂部以防水水泥封蓋(H型鋼提供反力)，防止皂土緩衝材被擠出，並於地上設置60cm高的混凝土牆，以蓄水製造定水頭高40cm之初始水力邊界條件、並加速地下水進入岩盤使趨飽和，蓄水水溫約為 $12.3^\circ\text{C}$ 。



圖II.1-3 實驗倉室與THM處置孔試坑之相對配置

加熱設備是在被夯實皂土緩衝材圍繞的電子加熱破銅筒，直徑約1040 mm、高1950 mm、厚度50 mm，內含電子加熱棒及液壓油循環系統(oil circulation system)見圖II.1-4；6支長1660 mm加熱管可加熱到 $300^\circ\text{C}$ ；液壓油循環系統，是比重0.909的THERMOL No.32油，借內部攪拌棒及兩管注入空氣，以傳遞熱到破銅筒外環，維持加熱筒表面溫度一致。

加熱試驗時，1996/12/17日起加熱筒溫度快速昇至 $100^\circ\text{C}$ ，持續8.5個月(260 天)加熱，見圖II.1-5；再於1997/9/1日冷卻降溫6個月(180天)，期間 440 天內於岩體及皂土緩衝材佈設各類T：溫度、H：(含水量、水壓)、M：(應力、應變、變位)監測器，以探討T-H-M耦合作用變化行為。

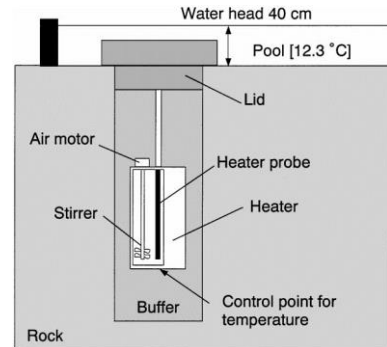


圖 II.1-4 場址 THM 試驗之配置設計

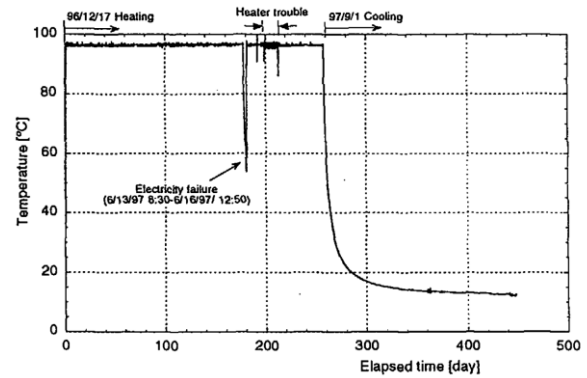


圖 II.1-5 加熱至  $100^\circ\text{C}$  持續 260 天再冷卻 180 天之過程

## 2. 瑞典 Åspö 硬岩實驗室 THM 試驗

瑞典 Åspö 硬岩實驗室 KBS-3 試驗在深 450m 的 Åspö 閃長岩內開挖一直徑 1.75m 處置坑，研究開挖一溫度二者耦合作用所造成之破裂，指出開挖所導致的應力集中可能上部足以產生剝落，但經熱應力額外增加微小的切線應力後，就可使裂隙再延伸發生剝落現象(楊長義，2014)。該 APSE(Åspö Pillar Stability Experiment 岩柱試驗)是於一條與最大主應力(30MPa)垂直之運輸隧道底面，以 TBM 向下先後鑽兩個直徑 1.75m 深度約 6m 左右的豎坑，因兩豎坑相隔 1m 故可以形成一厚度 1m 的岩柱。目的在證明對岩石破裂剝落的預測能力、緩衝材膨脹壓力對岩盤之效應，並已證明用極小的圍壓即可抑制剝落。

SKB(2009)設計一系列現地加熱試驗對照試驗，計含4組(八孔)直徑0.5m、深度4m的鑽孔，見圖II.2-1。一組兩兩加熱孔相距0.7m形成岩柱，目的要驗證是否回填乾的粒狀膨潤土回填材料(Leca pellets)就可以抑制受熱之剝落問題，詳見楊長義(2015；PFC數值模式研析部分亦可參見正式研究報告。

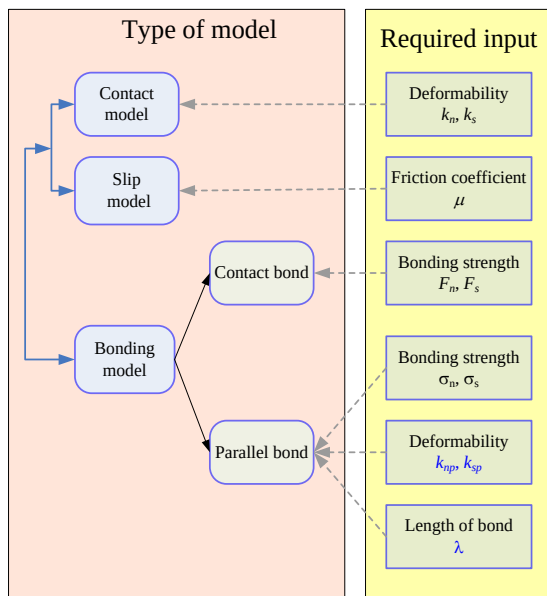


圖 II.2-1 Ä SPÖ 實驗室進行 4 組 THM 對照試驗

### 3. PFC 之分析模式

PFC 屬離散元素法 (DEM) 之一種，透過圓形顆粒間的運動與顆粒接觸行為，模擬分析顆粒堆積模型相關的靜態與動態問題。程式所選用的粒徑尺寸可分別為均勻分佈或高斯分佈，亦能由使用者自行設計所需級配。

PFC 提供的數值模式包含，見圖 III.3-1：(1) 接觸勁度模式 (contact stiffness model)：由相鄰顆粒的接觸勁度模式模擬顆粒堆積系統的力-位移關係；(2) 接觸鍵結模式 (contact bonding model)：顆粒間的鍵結僅發生在極小的接觸面積，可視為接觸點的鍵結方式，以正向與切向鍵結力 (bonding force) 模擬之，不能抵抗彎矩作用力。(3) 平行鍵結模式 (parallel bonding model)：相鄰顆粒間存在一梁元素提供鍵結效果，能抵抗彎矩作用力。需指定正向與切向鍵結強度 (bonding strength)、正向與切向鍵結勁度與鍵結寬度等 5 個參數。



III.3-1 PFC 提供的數值模式與所需微觀參數 (李宏輝，2008)

## III. 結果與討論

### 1. 日本 Kamaishi 礦坑 THM 試驗結果

- (1) 監測 THM 效應：設置直徑範圍到達 4.5m (接近 3 倍的試坑直徑 1.7m)；平均分散於四周；針對既有岩盤裂面，須以斜孔監測其力學行為與水力性質的改變。
- (2) 處置坑內衰變熱達 100°C 的影響範圍約為 6m (此值正是相鄰兩處置坑之間距)。
- (3) 場址岩體之溫度、應力、應變均隨溫度上升而增加，變形量變化不大，須留意因岩盤不均勻變形造成的向上隆起現象。
- (4) 處置坑周圍岩盤含水量，初期雖並未飽和，但長期之後，岩盤內部孔隙水壓力卻可回復到類似靜止水壓力大小。

### 2. 瑞典 Äspö 硬岩實驗室 THM 試驗結果

- (1) 孔加熱確會產生岩壁剝落現象。
- (2) 採用乾的回填料，岩壁仍會產生剝落岩屑，但回填料仍可將剝落岩屑維持於原位，故可保持處置孔正確的幾何形狀。
- (3) 濕潤的回填料則可不發生岩屑的剝落，但岩壁內部仍然會有損傷區，故進一步檢查其損傷區之導水性。

故相較於章 Kamaishi 試驗，Ä SPÖ 實驗隧道之 THM 試驗之不足處，在於沒使用膨潤土圍繞回填，但優點是試驗目的已在探討回填 LECA 回填材料對防治岩壁受熱應力剝落之損傷問題。

### 3. 以 PFC 模擬 THM 耦合作用之剝落結果

根據芬蘭 Olkiluoto 處置場全尺寸坑道實驗結果，以 PFC2D 模擬分析遠域垂直壓應力作用下所引致的圓形坑道損傷，可發現坑道側壁因剝落破壞形成缺口 (notches)。若令 PFC 正向鍵結強度與切向鍵結強度相同 ( $\sigma_n = \sigma_s$ )，由張裂縫與剪裂縫所形成的缺口破壞較符合實際的實驗結果，如圖 III.3-1(a)；若僅允許張裂縫存在 (令  $\sigma_s = \infty$ )，形成的缺口破壞如圖 5.5-10(b)，張力裂縫邊緣串聯成階梯狀的破壞面。

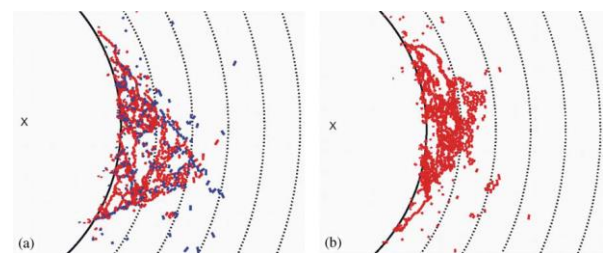


圖 III.3-1 PFC 模擬垂直壓應力作用下所引致的圓形坑道損傷：(a) 微觀張力破壞 (紅) 與剪力破壞 (藍) 並存；(b) 僅微觀張力破壞 (紅) (Potyondy and Autio, 2001)

對溫度上升引致熱應力增加，造成岩石破壞問題，由 PFC2D 模擬分析，透過使隨熱膨脹係數增加或採用較低的鍵結強度等技巧，模擬結果可與實驗結果一致。藉由 PFC2D 模型中的斷鍵發展模擬分析裂隙發生的發生與延伸，亦顯示不同的加熱變化及材料輸入參數，模擬的岩石破裂雷射 AE 事件亦有所改變。

## IV. 結論

### 1. 學習地底實驗室之 THM 實驗經驗

#### (1). THM 試坑位置選取

主要欲模擬衰變熱之徑向向外擴散熱作用，故宜選擇：(1)在具有高角度主要裂面處(至少有3條)；(2)外側兩裂面間距須大於1.7m，以容納加熱處置孔；(3)須使處置孔通過中間之裂面，以利探討地下水入滲水力影響。

#### (2). THM 試驗測對象、監測位置及項目

監測對象為(1)岩體(內部含有短的先天裂隙)、(2)緩衝材料(夯實膨潤土)。量測位置則選在(1)岩石、(2)緩衝材料、(3)岩體-緩衝材料界面。量測項目為(1)岩石與緩衝材之溫度變化；岩石與緩衝材及裂面含水量、孔隙水壓力、總壓力；力學變化：(i)應力、(ii)應變(B、R)及變位，及(iii)裂面之變位(開口量變化)

### 2. 對本土岩石 PFC 模擬經驗

根據李宏輝(2008)以PFC微觀輸入參數對本土砂岩石(sandstone)單壓模擬分析，歸納出影響岩石單壓強度與楊氏模數的關鍵參數為：

- (1)單壓強度影響因子：正向鍵結強度 $\sigma_n$ 、切向/正向鍵結強度比 $\sigma_s/\sigma_n$ 、切向/正向勁度比 $k_s/k_n$ 、切向/正向平行鍵結勁度比 $k_{sp}/k_{np}$ 與鍵結寬度因子等五個。
- (2)彈性模數影響因子：正向勁度 $k_n$ 、切向/正向勁度比 $k_s/k_n$ 、正向平行鍵結勁度 $k_{np}$ 、切向/正向平行鍵結勁度比 $k_{sp}/k_{np}$ 與鍵結寬度因子等五個。

上述關鍵參數會影響 PFC 模擬處置坑道破裂分析結果，可提供後續有關在台灣潛在處置場址所處地質條件力學性之輸入參數選定參考，再透過實際以離島花崗岩單壓試驗之應力應變曲線之訓練與校正(楊長義、李宏輝 2016)。

### 3. 未來我國採 PFC 模擬 THM 耦合分析所需參數

考量裂隙與開挖擾動區 EDZ 在岩盤 THM 耦合長期作用之重要性，對瞭解處置場之長期穩定性問題，未來規劃本土場址母岩試驗所需要求之參數，本案研究心得建議如下：

- (1)岩石材料物理特性：單位重、熱膨脹係數、孔隙率、岩石材料的礦物組成分布。
- (2)完整岩石力學特性：強度參數(單壓強度與間接張力強度)、變形參數(變形模數、彈性模數與泊松比)、岩石力學特性長期依時弱化特性(例如單壓強度隨時間而有強度遞減之趨勢)、或因風化或遇水導致強度弱化之特性。
- (3)節理面力學特性：強度參數(包括剪力強度參數、變形參數如正向勁度與切向勁度)、水力參數(水力傳導係數等)。
- (4)岩體力學特性：弱面位態、間距、組數、岩壁之風化狀況。

## 參考文獻

- [1]JNC (1994), *Plan of coupled Thermos- Hydro- Mechanical Experiment at the Kamaishi mine*, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.
- [2]SKB (2010), *Åspö Hard Rock Laboratory- Annual Report 2009*, TR-10-10.
- [3]田能全(2015), 放射性廢棄物地質處置參考案例研究, 2015兩岸放射性廢棄物地質處置研討會, 北京。
- [4]楊長義、翁孟嘉 (2014), 「模擬裂隙損傷區對母岩受熱與外力作用之耦合效應研究」, 期末報告, 原子能科技學術合作研究計畫成果報告(NSC 102- 2623 -E-032- 002-NU), 國科會。
- [5]楊長義(2015), 「先進國家地底實驗室岩力實驗之規劃與成果研析」, 期末報告, 科技部補助專題研究計畫(NSC103-NU-E-032-001-NU), 科技部。

# 海嘯對結構物衝擊分析與審查技術建立之研究 (II)

## Establishing the Analysis and Review Techniques for Tsunami Impact on Structures (II)

計畫編號：MOST 104-2623-E-008-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳祚任、王仲宇

e-mail：tsoren@ncu.edu.tw

計畫參與人員：吳祚任、王仲宇、鄭喆宇

執行單位：國立中央大學水文與海洋科學研究所

### 摘要

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

關鍵詞：海嘯湧潮、流體體積法、賓漢流模式、流體結構互制、上溯。

### Abstract

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

two viscous parameters. Prior to analysis, this study will first conduct an accuracy verification on the force acting on the structure and the splashing free-surface, and followed by the analysis of the structures arrangement to the tsunami impact force. This study will also focus on seawall erosion by the tsunami, and the effect of muddy water to the impinging force. On the other hand, observed from the 2004 South Asian tsunami and the 2011 East Japan tsunami, the powerful tsunami bores will attack the coastal area not only once, but several times. Among them, the most destructive tsunami bore often appeared in the first three. For this, this study will also analyze the relationship between the impact forces with the first three back-and-force tsunami bores.

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

### I 前言

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

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

水面(如圖 1(d))。由此現象可明顯觀察到,海嘯湧潮之潮頭(bore front)具有相當強之紊流強度、旋度、以及推移力,而潮身(bore body)則持續推移障礙物。這組合為三維之現象,並且具有相當強之紊流強度。對於海嘯湧潮,在早期之研究主要是以理論或實驗進行研究。實驗方面主要觀察與海嘯湧潮有相似性值之潰壩湧潮(dam-break bore)之行為。然而,為要使潰壩湧潮具備類穩態之特性,其所需要之潰壩實驗必須要以長潰壩來進行,困難度相當高。理論方面則將問題簡化為深度積分之線性淺水波方程式予以推導理論公式 Arnason (2005) [錯誤! 找不到參照來源。],其準確性有限。此外,由於流場加速度在垂直方向上之分量強烈,若單以傳統深度積分法之數值模式予以分析(Ting and Kim, 1994 [錯誤! 找不到參照來源。]; Abul-Azm, 1994 [錯誤! 找不到參照來源。]; Zhuang and Lee, 1996 [錯誤! 找不到參照來源。]; Losada et al., 1996 [錯誤! 找不到參照來源。]; Ertekin and Becker, 1996 [錯誤! 找不到參照來源。]; Tang and Chang, 1998 [錯誤! 找不到參照來源。]; Huang and Dong, 1999 [錯誤! 找不到參照來源。]),將無法完整描述海嘯湧潮上溯時之碎波與結構物之交互作用。

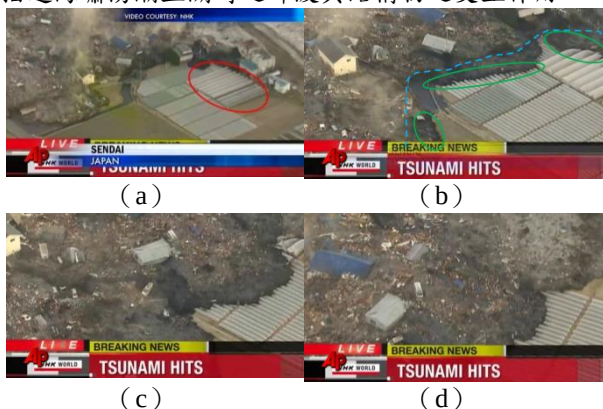


圖 1 (a) 海嘯湧潮即將到達溫室之位置。圖中紅線為溫室之位置。(b) 海嘯湧潮到達溫室之位置。海嘯已越過結構物抵達溫室,圖中綠線代表海嘯湧潮之潮頭位置,藍色虛線後方為海嘯湧潮之潮身。(c) 海嘯湧潮衝擊溫室。(d) 被海嘯湧潮吞沒之溫室。出處

(<http://www.youtube.com/user/AssociatedPress/videos?query=Tsunami+Slams+Northeast+Japan>)

此外,海嘯湧潮具備 5 種特性(表 1),使之與傳統海嘯長波以及河川洪水等研究有所區隔。以下羅列海嘯湧潮之特性,以及與本計畫之關連性。

表 1 海嘯衝擊近岸結構物特性

|                 |
|-----------------|
| 海嘯衝擊侵襲近岸結構物之特性  |
| 初始衝擊力大          |
| 對結構物衝擊持續時間長     |
| 回溯再次衝擊結構物       |
| 對結構物周圍底床具有強烈冲刷力 |
| 多次攻擊之特性         |

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

移。換言之,利用傳統洪水之經驗公式所求得之結構物受力需要修正,然而如何修正,將是本研究之重點。

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

海嘯湧潮具有退水階段(亦稱為回溯階段)之特性,而此階段之破壞力往往不亞於漲水階段。此特性代表當考慮結構物承受海嘯之攻擊,不僅結構物正面需面臨海嘯之破壞,其背面亦需考慮海嘯之破壞力。傳統近岸結構物之設計,多強調迎水面之結構物強度,而忽略背水面之保護。此設計對於一般風浪有效,然而其無法保護結構物所面臨之海嘯破壞力。

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

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

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

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

在海嘯湧潮與結構物之交互作用之模擬中,自由液面之計算會影響整體流場與水位,現有計算自由液面之數值方法有 HF(Hight Function)、MAC(Maker and Cell)、

LSM (Level Set Method)、SPH (smoothed Particle Hydrodynamics)、VOF (volume of fluid) 等五種方法。各方法皆有其擅長之處，限於篇幅，不一一介紹。其中以 VOF 法為發展較成熟，且準確性較高。

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

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

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

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

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

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

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

解三維 Reynolds- Averaged Navier-Stokes (RANS) 方程式與採用  $k-\omega$  紊流方程式模擬水流與不同圓柱之柱高與半徑比與冲刷深度之關係，其模擬結果與實驗有良好一致性。然而上述前人研究多以定床冲刷坑探討流況，且與繁多之經驗公式與模式結合，但真實之冲刷坑變化與流況則會隨時間變化。

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

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

如前所述，為表示非牛頓流體之行為，最重要為定義臨界剪應力，且該黏性流體之剪應力需大於臨界剪應力才發生形變。Bird et al. (1983) [錯誤! 找不到參照來源。] 研究兩平板間賓漢流體之運動行為，並推導求得解析解，此解析解能表示賓漢流體之流場特性。Liu and Mei (1989) [錯誤! 找不到參照來源。] 將賓漢模式應用於模擬不同泥石流 (debris flow) 之流況，其中假設流體為均勻流、慣性力非常微小、水深與波長比率非常小、波振幅至水深為有限，並依此假設建立微擾法 (perturbation method) 之解析解。Ng and Mei (1994) [錯誤! 找不到參照來源。] 將賓漢流應用於探討泥石流之滾地波 (roll waves) 效應。Huang and Garcia (1998) [錯誤! 找不到參照來源。] 以二維賓漢模式研究緩慢變量流且使用 matched-asymptotic 攝動法修正賓漢流之波前 (wave front)。Balmforth and Liu (2004) [錯誤! 找不到參照來源。] 使用 Herschel- Bulkley 之本構關係式研究二

維流體薄膜 (fluid film) 於斜板之滑動情況，並定義起動滾地波之臨界雷諾數。Mei and Yuh (2001) [錯誤! 找不到參照來源。] 研究三維賓漢緩慢流於橢圓渠道之流變情況與於橫斷面中發現賓漢流之靜止區域 (dead zone)。然而上述文獻為將賓漢流研究用於泥石流之模擬，且以實驗方式研究賓漢流體之運動行況，將無法完整呈現真實賓漢流之速度與變化。後續研究則將賓漢之本構關係式建立於數值模式中，以克服實驗尺度之限制。O'Brien and Julien (2000) [錯誤! 找不到參照來源。] 使用 Julien and Lan (1991) [錯誤! 找不到參照來源。] 所發展之模式將高含砂水流視為賓漢流模擬並觀察其流變過程，且將該模式開發商業軟體 FLO-2D，該模式為求解二維動量方程式與控制不同之迴圈系統 (routing scheme)。Shao and Lo (2003) [錯誤! 找不到參照來源。] 採用 SPH 方法求解非牛頓牛體之自由液面變化。然而前人以賓漢模式模擬泥砂運動行為之研究相當鮮少，主要由於模式需同時描述流體與固體，真實之情況更包含空氣、水與泥砂三相之交界面運動，本研究將賓漢流中固體之行為以一極高之黏滯流體代替，並以引式法求解高黏滯項，突破穩定性之限制，以描述賓漢流中之固體運動行為。

綜上所述，茲將本計畫與前人冲刷研究之差異羅列如下：

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

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

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

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

由 2004 年南亞海嘯及 2011 年東日本海嘯之記錄可發現，具有攻擊力之海嘯湧並非僅有一次，而持續數次。其中，破壞力最大之經常出現在前三次中，為此，本研究亦將分析往返三次以上海嘯與衝擊力之關係。

本研究以 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) 海嘯模式設置往返三次之海嘯源。再以三維 Splash3D 模式結合賓漢雙黏性流模式，以分析海嘯往返三次時對結構物之衝擊。本研究藉由改變海嘯湧潮之密度探討結構物於不同湧潮密度下所受壓力及動壓

之改變。並以此了解含砂水流對結構物之影響。

## II 主要內容

### 2.1 研究方法

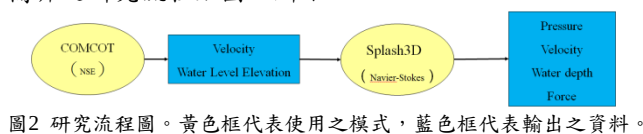
本研究進行海嘯對結構物之衝擊分析，需先設定合理之海嘯源。合理之海嘯源條件，需參考歷史記載最大之海嘯記錄、潛在可能發生之海嘯評估、最大風暴潮影響、潮汐高度。考量上述條件，再加上額外安全考量 6 公尺。因此訂定海嘯源之溯上高度須為 16.28 公尺。

海嘯湧潮侵襲近岸之時間相當於海嘯之半周期。一般而言，大規模海嘯週期大於半小時，因此選定海嘯源之週期需大於半小時，而於海嘯半周期期間結構物將持續受到湧潮侵襲。

海嘯侵襲時間相當長，在此期間大多具有兩波以上之海嘯波侵襲近岸。通常以前三波海嘯波所伴隨之攻擊力較強，而後逐漸變弱。但海嘯反覆攻擊之效應，將使原本可留存之結構物強度逐漸下降，而導致被破壞。此效應為海嘯特有之行為。因此在評估時須將三次以上海嘯波侵襲之情況列入考量。

海嘯湧潮侵襲近岸時，潮頭具有相當強度之紊流強度、旋度、以及推移力，潮身則持續攻擊近岸結構物。此過程為三維之現象，並具有相當強之紊流強度。再者考量設置於近岸之特殊結構物所受之海嘯破壞力。因此於近岸結構物受力之模擬時，應以三維模式進行模擬分析。由於海嘯具強烈之底床冲刷特性，因此在計算時須考量海嘯湧潮夾帶泥沙衝擊結構物之情境。

為符合上述之海嘯特性。海嘯源設定時，考量海嘯之上溯高度須達 16.28 公尺、海嘯傳遞時各海嘯波之間隔時間需大於 30 分鐘、海嘯侵襲過程中至少需考量三次海嘯波。為符合上述之條件，本研究於 COMCOT 海嘯模式設定三次孤立波入射作為海嘯波。每波海嘯波之間隔為 40 分鐘。孤立波條件，波高 11 公尺，水深 2000 公尺，由北緯 25.5 度向南方傳遞，以滿足由遠洋傳入近岸之情況。並擷取於海嘯湧潮之波高及流速，作為 Splash3D 模式之入流資訊。Splash3D 以 COMCOT 之資料作為入流資訊，並改變海嘯湧潮之流體密度。分析海嘯湧潮通過結構物時之流場及結構物所受之壓力變化，以探討海嘯湧潮含砂量之改變，對於結構物受力之影響。簡介之研究流程如圖 2 所示：



### 2.2 審查技術建立

海嘯衝擊結構物之審查技術流程簡介如圖 3。海嘯對結構物衝擊分析之審查，須符合表 1 所列之海嘯侵襲近岸時之特性。海嘯源之強度評估需調查當地之歷史海嘯紀錄海嘯潛勢之上溯高度、當地潮汐資料、最大風暴潮記錄等因素皆須列入考量，方可確保所設定之海嘯源上溯高度為適當之基準。一般而言，大規模海嘯週期大於半小時，因此選定海嘯源之週期需大於半小時。

海嘯源基準確定後，以海嘯模式進行海嘯源之設置，但於近岸時該海嘯模式須具備計算海嘯溢淹之機制，以

反映海嘯對近岸之影響範圍。並由海嘯模式提供海嘯湧潮於岸上之水位及流速。

近岸結構物受力之分析須以三維模式進行方可解析特殊結構物於近岸受到海嘯侵襲時之情況。其次評估海嘯是否會淹沒近岸之土丘，若海嘯淹過近岸之土丘，則模式須具備冲刷及含砂效應之機制，以做為審查基準評估之工具。

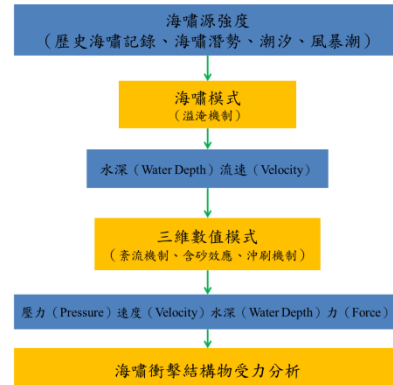


圖3 審查基準流程圖。圖中橙色框代表模式，藍色框代表資料。綠色箭頭為較佳之流程。括號之內容為需要考量之影響因素。

### 2.3 統御方程式與模式介紹

本研究先以國際知名之海嘯模式 COMOT 進行海嘯源之設置。海嘯對近岸結構物之衝擊行為以國立中央大學水文與海洋科學研究所海嘯科學實驗室所發展之 Splash3D 模式為平台進行研究。Splash3D 模式可求解大渦模擬動量方程式 (Large Eddy Simulation, LES)，並以區段線性 (Piecewise Linear Interface Calculation) 流體體積法 (Volume of Fluid, VOF) 進行自由液面與底泥運動之模擬。

#### 2.3.1 COMCOT 模式介紹

COMCOT 模式為康乃爾大學土木與環境工程學系劉立方老師團隊所研發之多重網格耦合海嘯模式且廣為應用於研究諸多知名之海嘯事件中，並有良好之計算與比對成果，如 1992 Flores Islands (Indonesia) tsunami (Liu et al., 1994 [29]; Liu et al., 1995 [30])，the 2003 Algeria Tsunami (Wang and Liu, 2005 [60]) and more recently the 2004 Indian Ocean tsunami (Wang and Liu, 2006 [61])。

COMCOT 可在球座標及卡式座標下同時求解線性與非線性淺水波方程式，可將海嘯於深海區域之傳遞並呈現近岸區域之高非線性強度之行為。並具備巢狀網格 (multi-grid nested system) 可處理多尺度之海嘯傳播過程。此外，該模式移動邊界法 (moving boundary scheme) 模擬海嘯上溯後之溢淹現象，可有利於預測海嘯對內陸之影響範圍。此外模式透過與中研院網格中心合作，已完成平行化之程序，使其效能大幅提升。本節將對 COMCOT 模式之細節及原理做詳細之介紹。

#### 淺水波方程式

海嘯波於深海傳遞時由於波長 ( $l$ ) 遠大於水深 ( $h$ )，因此在計算海嘯波傳遞時可以淺水波方程式來進行計算，其可由頻散係數來定義淺水波

$$\frac{h}{l} = \mu < \frac{1}{20} \quad (1)$$

其中  $\mu$  為頻散係數 (Dean and Dalrymple, [10])。

COMCOT 模式結合線性與非線性淺水波方程式，其中深海地區適用線性淺水波方程式，而近海或上岸後之海嘯波則適用非線性淺水波方程式。本模式結合球座標與卡式座標之計算，可同時求解全球尺度與地方尺度之海嘯。當海嘯波振幅  $a$  遠小於水深  $h$  時，其非線性項  $\varepsilon = a/h$  很小，可用微小振幅波逼近法 (small amplitude approximation) 忽略非線性項，其卡式座標線性淺水波之連續方程式與動量方程式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

其中  $\eta$  為波高， $H = \eta + h$  為總水深其中  $h$  為靜水深， $P = Hu$ ， $Q = Hv$  為水平方向體積通量其中  $u, v$  為兩個方向之流速， $g$  為重力加速度， $t$  為時間。

而在大尺度海嘯模擬中，將使用球座標系統描述淺水波方程式，並因緯度影響而加入柯氏力 (Coriolis force)，所採用之公式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = 0 \quad (7)$$

此處  $\varphi, \psi$  為緯度和經度， $R$  為地球半徑， $f$  為柯氏力係數 (Coriolis force coefficient)， $f = 2\omega \sin \varphi$ ，其中  $\omega$  為地球轉動之角速度 (rotation rate)。

而當海嘯到達近岸時，水深變淺，波高變高，非線性強度增強，必須考慮底床摩擦等非線性項，其卡式座標之非線性方程式如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_x H = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \tau_y H = 0 \quad (10)$$

球座標系統下非線性方程式為：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} = -\frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} + fQ - \tau_x H \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} = -\frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} - fP - \tau_y H \quad (13)$$

$\tau_x, \tau_y$  為底床摩擦項中之剪應力，以曼寧公式假設， $n$  為曼寧相對粗糙係數，為依流體條件決定之經驗常數，如下：

$$\tau_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} P (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (14)$$

$$\tau_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q (P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (15)$$

### 多層套疊巢狀網格系統

海嘯波之傳遞為一複雜過程。在外海範圍屬於大尺度之運動行為，以較粗之網格即可描述。然而一旦海嘯進入近岸地區，其即轉換為小尺度之運動，此時即需以小網格加以分析。因此欲完整計算海嘯之生命歷程，數值模式需要具備能同時處理大小尺度之巢狀網格功能。本研究將於外海處安排較大網格，並於近岸處安排較小網格。而大小網格間為動態連結，可有更精確之計算結果。

兩個不同網格尺度間之計算方法說明如下，圖 4 為一個較小網格系統套疊在一個較大網格系統中之範例，其網格大小比為 1:3，圖中箭頭代表通過各網格之體積通量  $P$  和  $Q$ ，黑色方點和圓點分別代表大網格及小網格之水深及波高資訊。其體積通量之計算，除了位於大網格和小網格邊界上之小網格由相鄰之大網格之體積通量內插而得以外，在大網格及小網格系統中之體積通量皆由動量方程式來計算。小網格系統之下一時間步波高則以連續方程式計算。為求數值上之穩定，小網格系統使用之時間步需滿足 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 條件，即  $C * dt/dx < 1$  (Liu et al., 1998 [31])， $C$  為波浪之相速度 (phase speed)，為一時間步內不可跨越超過一個網格之意思，因此其時間步要比大網格系統使用之時間步來得小。當小網格系統中之下一時間步波高計算完成後，大網格系統中之波高亦會隨之更新。

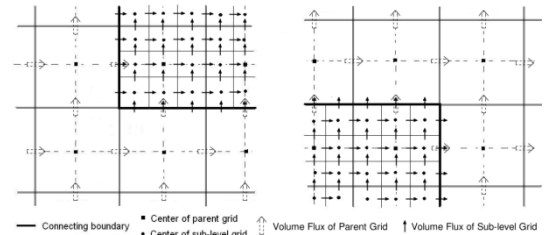


圖4 多層套疊巢狀網格系統 (Wang, 2009 [62])

### 移動邊界法

COMCOT 具有移動邊界之功能，可處理海嘯波上溯時之乾濕邊界問題。一般海嘯模式僅可計算線性淺水波方程式，對於邊界上則僅可處理固定邊界。換言之，一般海嘯波模式無法模擬海嘯溢淹範圍 (inundation)。而本模式具備移動邊界功能，可準確計算海嘯波上溯 (runup) 後，於內陸所造成之溢淹範圍。

COMCOT 模式中以判斷乾濕網格邊界來開始使用

移動邊界法計算。當網格點位於陸地上，為乾網格，其靜水深  $h$  是為平均海面 (mean water level, MWL) 到陸地之高度，以負值表示， $\eta$  為波高，總水深  $H = h + \eta$  亦為負值，反之若在有水溢淹之濕網格中總水深則以正值表示，位於乾網格與濕網格之間之交界則定義為海岸線 (shoreline)。圖以一維階梯代替真實地形來描述移動邊界條件之運算，圖中 MWL 表示平均海面， $H_f$  為洪氾高度 (flooding depth)。波由外海計算到近陸地區，當遇到定義之海岸線 (shoreline)，即  $H_i > 0$  及  $H_{i+1} \leq 0$  之條件成立，則開始使用移動邊界計算。

計算方法說明如下，在圖中，總水深資料被記錄於第  $i-1$ 、 $i$  和  $i+1$  位置中，體積通量則計算於  $i-1/2$ 、 $i+1/2$  和  $i+3/2$  位置上，起始體積通量在各網格皆為零，並利用連續方程式配合移動邊界來計算下個時間步之波高，波高在乾網格中之值為 0。當第  $i$  個網格為濕網格，且第  $(i+1)$  個網格為乾網格同時其通量為 0 時，海岸線位於第  $i$  個網格和第  $(i+1)$  個網格之間，此時位於第  $(i-1/2)$  網格之體積通量則指定為 0，海岸線並不會往陸地方向移動，如圖 5 上半部所示。而當第  $i$  個網格水面升高時， $(i+1)$  個網格之通量不再為 0，原本在第  $i$  個網格點之總水深需更新到第  $(i+1/2)$  個網格點，經由數值計算來決定總水深是否夠高足以溢淹到相鄰之乾網格，並改變定義之海岸線位置，如圖下半部所示，總水深將由連續方程式中被更新。

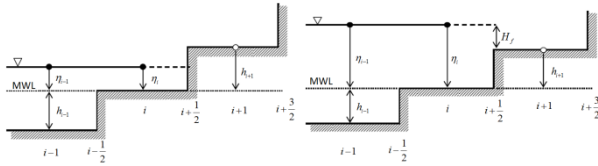


圖5 移動邊界法 (Wang, 2009 [62])

### 2.3.2 Splash3D 模式介紹

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

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (16)$$

不可壓縮流之動量方程式如下：

$$\frac{\partial(\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})) + \mathbf{g} \quad (17)$$

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

大渦模擬動量方程式

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_i} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial X_i} + \bar{g}_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \bar{\mu}_{eff} \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial X_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial X_i} \right] \right] \quad (19)$$

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

$$\bar{\mu}_{eff} = \mu + \mu_{SGS} \quad (20)$$

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

$$\mu_{SGS} = \rho (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (21)$$

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

$$\Delta = (\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3)^{1/3} \quad (22)$$

$\Delta X_i$  ( $i=1,2,3$ ) 為網格於  $X, Y, Z$  三方向之網格長度 (Pope, 2001) [錯誤! 找不到參照來源。]。

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

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

$$\frac{\mu_{SGS}}{\nu} = \rho \kappa y_w^+ (1 - e^{-y_w^+/A})^2 \quad (23)$$

$$y_w^+ = \frac{y \mathbf{u}_*}{\nu} \quad (24)$$

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

流體體積法

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

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \rho_m) = 0 \quad (25)$$

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

$$\rho_m = \frac{M_m}{V} = \left[ \frac{V_m}{V} \right] \times \left[ \frac{M_m}{V_m} \right] = f_m \rho_m^0 \quad (26)$$

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

$$\frac{\partial f_m}{\partial t} + \nabla \cdot (f_m \mathbf{u}) = 0 \quad (27)$$

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

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

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

$$\mathbf{n} = \nabla f_m \quad (28)$$

經標準化改寫為：

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\nabla f_m}{|\nabla f_m|} \quad (29)$$

若自由液面之網格由線性平面單位組合而成，可以下式描述：

$$\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{x}_p - C_p = 0 \quad (30)$$

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

$$F(C_p) = V_{tr}(C_p) - f * V \approx 0 \quad (31)$$

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

#### 賓漢雙黏性流之本構關係式

許多自然界的物質都具有非牛頓流體 (Non-Newtonian fluid) 之特性，諸如河川底泥、雪崩、火山熔岩等，甚至常用的牙膏亦為此種流體。其中部分物質稱為黏塑性物質且具有臨界剪應力，而此臨界剪應力表示該物質之塑性特性。此臨界剪應力又稱為降服應力 (yield stress)，或稱為賓漢降服 (Bingham yield)。如前所述，若剪應力小於該值，則其行為類似固體，且其分子間之固結力相當強大。當剪應力大於該臨界值，則該物質之行為近似牛頓流體。有許多本構模式

(rheological model) 可以用以描述黏塑性行為，然而其中以賓漢塑性模式 (Bingham plastic model) 最為簡單且廣為人知。如同賓漢模式所描述，若剪應力尚未超過降服應力，則該物質無形變發生。藉由賓漢流變模式中之兩個參數：賓漢降服應力、塑性黏滯係數，其流變行為可以完整描述。其中非線性之應力—應變關係式可表示為：

$$\tau = 2\mu \bar{D} \quad (32)$$

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

$$\mu = \mu(\bar{D}) \quad (33)$$

其關係式為：

$$\mu(\bar{D}) = \mu_B + \frac{\tau_0}{2\sqrt{\frac{1}{2}\bar{D}:\bar{D}}}, \text{ if } \frac{1}{2}\tau:\tau > \tau_0^2 \quad (34)$$

$$\mu(\bar{D}) = \mu_\infty \text{ and } \bar{D} = 0, \text{ if } \frac{1}{2}\tau:\tau > \tau_0^2 \quad (35)$$

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

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

#### 高含砂流變理論本構關係式

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

$$\tau = \tau_{co} + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (36)$$

其中

$\tau_{co}$ ：凝聚降伏應力 (cohesive yield stress)

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

$\tau_v$ ：黏滯剪應力 (Viscous shear stress)

$\tau_t$ ：紊流剪應力 (Turbulent shear stress)

$\tau_d$ ：離散剪應力 (Dispersive shear stress)

將式 (36) 之非線性之應力—應變關係式考慮此效應，加入二次剪應變率係數項後表示為：

$$\tau = 2\mu(\bar{D})\bar{D} = \sqrt{2}\tau_0 + \mu_b \cdot 2\bar{D} + \mu_c \cdot (\bar{D})^2 \quad (37)$$

此二次流變模式除了能夠描述顆粒間的凝聚力、沉積顆粒與流體間之黏滯係數外，還可描述顆粒間之碰撞效應及紊流消散作用。其中  $\tau_0$  代表凝聚降伏應力與莫耳庫倫剪應力所合成之賓漢降伏應力， $\mu_b$  為代表黏滯剪應力之黏滯係數，而  $\mu_c$  為消散係數，此係數表現泥砂之顆粒間相互碰撞所造成之能量消散作用以及泥流本身內部所產生紊流消散之影響。

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

Julien 及 Lan (1991) [錯誤! 找不到參照來源。] 提出此消散係數  $\mu_c$  可用

$$\mu_c = \rho_m l_m^2 + a_1 \rho_s \lambda^2 d_s^2 \quad (38)$$

來表示，其中

$\rho_m$ ：含泥砂流體之密度

$l_m$ ：含泥砂流體之 Prandtl 混和長度係數，

趙 (2004) [錯誤! 找不到參照來源。] 提到 Julien et al. (1991) [錯誤! 找不到參照來源。] 假設  $l_m = 0.4$  倍土石流動深度：

$a_1$ ：為一經驗常數，Bagnald 之建議為 0.001

$\rho_s$ ：泥砂顆粒之密度

$d_s$ ：顆粒之粒徑

$\lambda$  由 O'Brien 等人 (1993) [錯誤! 找不到參照來源。] 引用 Bagnald (1954) [錯誤! 找不到參照來源。] 定義如下：

$$\lambda = \left[ \left( \frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \quad (39)$$

$C_*$ ：最大體積濃度 ( $C_* \sim 0.615$ )

$C_v$ ：體積濃度

### III 結果與討論

#### 3.1 海嘯源設置

本研究之海嘯源以三次孤立波入射進行重現。孤立波之時間間隔為 40 分鐘，波高 11 公尺水深 2000 公尺，以建立海嘯波三次往返之情境。圖 6 及圖 7 為 COMCOT 模擬範圍示意圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，單位為度。色階表示高程，單位為公尺。圖中黑線為高程 0 公尺之等高線，藍線為高程 16.28 公尺等高線。圖中黑框為子層之範圍。第一層範圍東經 120 度至 122.5 度，北緯 24.5 度至北緯 26.0 度，解析度為 1000 公尺。第二層範圍東經 121.55 度至 121.75 度，北緯 25.1 度至 25.5 度，解析度為 250 公尺。第三層範圍東經 121.615 度至 121.71 度，北緯 25.165 度至 25.24 度，解析度 62.5 公尺。第四層範圍東經 121.645 至 121.7 度，北緯 25.19 度至 25.227 度，解析度為 15.625 公尺。第五層範圍東經 121.65 度至

121.69 度，北緯 25.195 度 25.22 度，解析度為 3.91 公尺，曼寧摩擦係數 0.045。設置遠洋水位計 G1 及近岸水位計 G2 以記錄海嘯傳遞之過程是否有符合設計海嘯源條件。研究場址設置水位計 G3 以決定帶入 Splash3D 之海嘯湧潮厚度及流速。

圖 8 為遠洋水位計之時序波高圖，縱軸為水位高度，單位公尺。橫軸為時間，單位分鐘。時序資料顯示，黑色實現為時序波高資料。海嘯波時間間距約 40 分鐘，最大波高 11 公尺，符合海嘯源設定之條件。圖 9 為近岸水位計之時序波高圖。縱軸為水位高度，單位公尺。橫軸為時間，單位分鐘。，黑色實現為時序波高資料。觀察時序波高資料。海嘯波傳遞至近岸時第一波海嘯波最大波高約 22 公尺。第二波海嘯波之最大波高降低為 19 公尺。第三波海嘯波之最大波高約為 19 公尺與第二波海嘯波波高相近。每波海嘯波之時間間隔約 40 分鐘。

圖 10 為海嘯侵襲近岸模擬圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，單位為度。圖中黑線為高程 0 之等高線，藍線為高程為 16.28 公尺等高線。圖中色階為高程，單位公尺。模擬結果顯示，海嘯會由東北邊界進入，向西南行進，而後受海底地形影響，逐漸修正為垂直海岸線侵襲近岸。第一波海嘯波約於 60 分時侵襲研究場址，於 70 分時第一波海嘯已逐漸從近岸退去。第二波海嘯波於 100 分時傳遞至研究場址於 110 分時則持續退水，第三波海嘯波於 140 分到達研究場址，150 分時為退水階段。海嘯之溢淹程度方面，可參考 70 分、110 分、150 分之結果，溢淹範圍第一波較第二波及第三波海嘯之溢淹範圍廣。

圖 11 為研究場址水位計資料歷線圖。橫軸為時間，單位為分；左側縱軸為高程，單位公尺；右側縱軸為流速，單位 m/s。藍線為水深；黑線為速度 U；紅線為速度 V。水深歷線顯示，研究場址所在區域受到三次海嘯侵襲。第一次侵襲時，最大水深約為 5.7 公尺。第二次海嘯侵襲期間，最大水深約為 4 公尺。第三次侵襲期間，最大水深約為 3.9 公尺。速度 U 歷線，其值為正時，代表海嘯向東行進；其值為負時，代表海嘯向西邊行進。由速度歷線 U 中可知海嘯第一次侵襲期間向東最大速度為 2 m/s，向西最大速度約為 1 m/s。第二次侵襲期間向東最大速度約 1.5 m/s，向西最大速度約為 0.5 m/s。第三次侵襲時，向東速度最大值約 1.3 m/s，向西速度最大值約為 0.5 m/s。速度歷線 V，其值為正代表海嘯向北行進，代表海嘯回潮；其值為負時，代表海嘯向南行進，代表海嘯上溯。本研究中以速度 V 來判斷上溯和回潮發生之時刻。速度歷線 V 顯示第一次海嘯侵襲時，向南流速最大約為 4 m/s，向北流速最大約為 1.2 m/s。第二次侵襲時，向南流速最大約為 2.5 m/s，向北流速最大約為 0.9 m/s。第三次侵襲時，向南流速最大約 2.2 m/s，向北流速最大約為 0.8 m/s。經由水深、流速之比較，可知第一波之水深、流速為海嘯波往返三次期間水淹的最深、流速最快之情況，海嘯上溯至近岸時受地形影響流向呈西北方向東南方傳遞，因此本次研究於進行海嘯往返三次之受力影響時，針對影響研究場址最大之第一波海嘯波侵襲期間之流速與水深作為邊界條件帶入 Splash3D 模擬。帶入之入流條件為第一波海嘯波上溯流速最快時之海嘯絕對速度 4.52 m/s 及對應之水深 5.15 公尺。

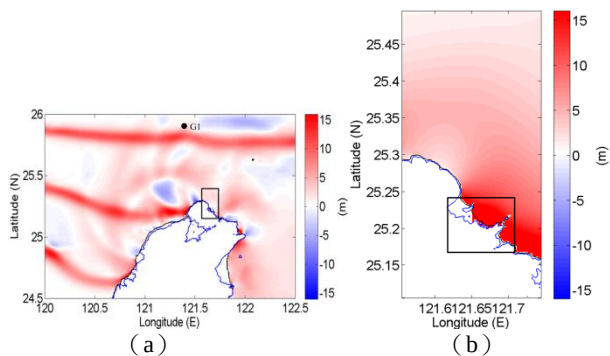


圖6 研究場址遭受三次海嘯波攻擊之 COMCOT 模擬範圍示意圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，單位為度。圖中黑線為高程0之等高線，藍線為高程為16.28公尺等高線。圖中黑框為子層之範圍。色階表示水面高程，單位公尺。第一層模擬範圍示意圖中之黑點為水位計位置 G1 為遠洋水位計。(a) 第一層模擬範圍 (b) 第二層模擬範圍。

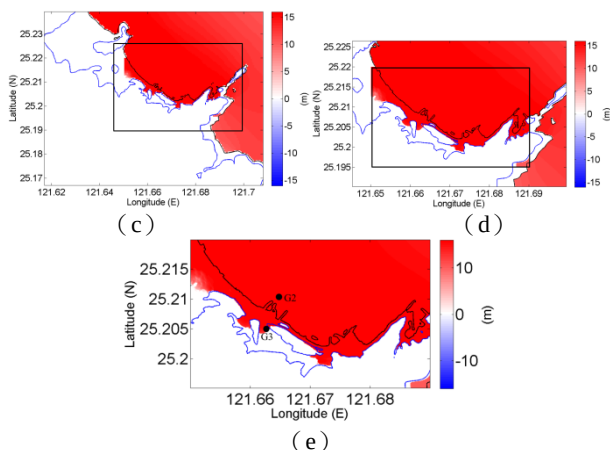


圖7 研究場址遭受三次海嘯波攻擊之 COMCOT 模擬範圍示意圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，單位為度。圖中黑線為高程0之等高線，藍線為高程為16.28公尺等高線。圖中黑框為子層之範圍。色階表示水面高程，單位公尺。第五層模擬範圍示意圖中之黑點為水位計位置 G2 為近岸水位計、G3 為研究場址水位計。(a) 第三層模擬範圍 (b) 第四層模擬範圍 (c) 第五層模擬範圍。

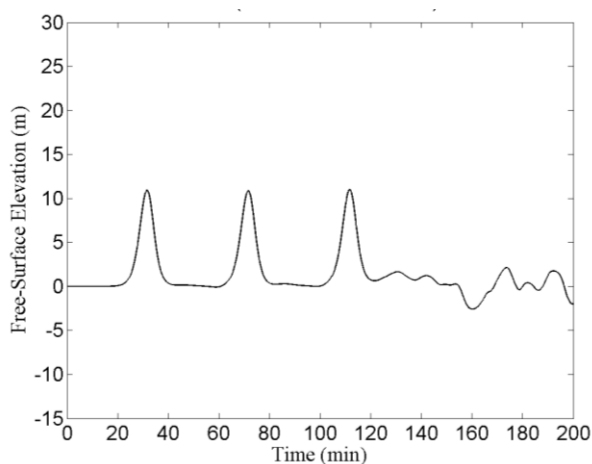


圖8 遠洋水位計時序波高圖。設置於東經120.5，北緯25.8。縱軸為水位高，單位公尺。橫軸為時間，單位分鐘。黑色實線為時序波高資料。

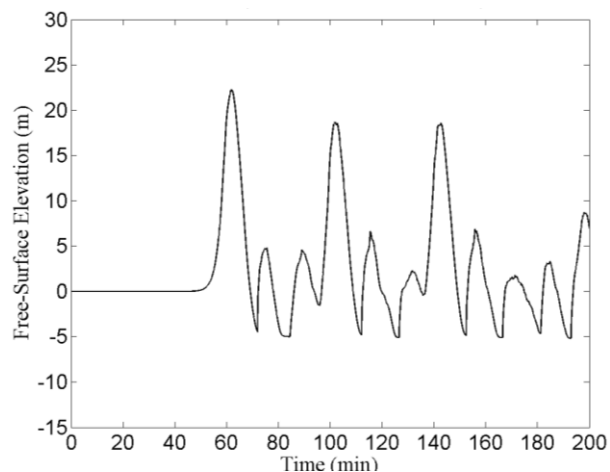


圖9 近海水位計時序波高圖。東經121.665，北緯25.21。縱軸為水位高，單位公尺。橫軸為時間，單位分鐘。黑色實線為時序波高資料。

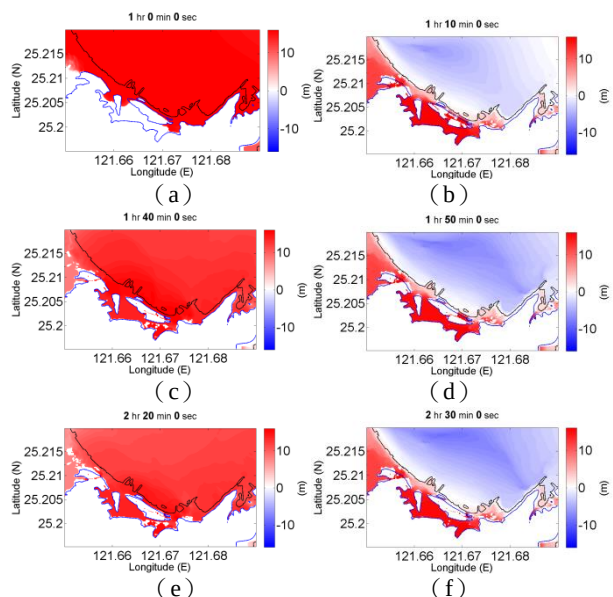


圖10 海嘯侵襲近岸模擬圖。橫軸為經度，縱軸為緯度，單位為度。圖中黑線為高程0之等高線，藍線為高程為16.28公尺等高線。圖中色階為高程，單位公尺。(a) 60分 (b) 70分 (c) 100分 (d) 110分 (e) 140分 (f) 150分。

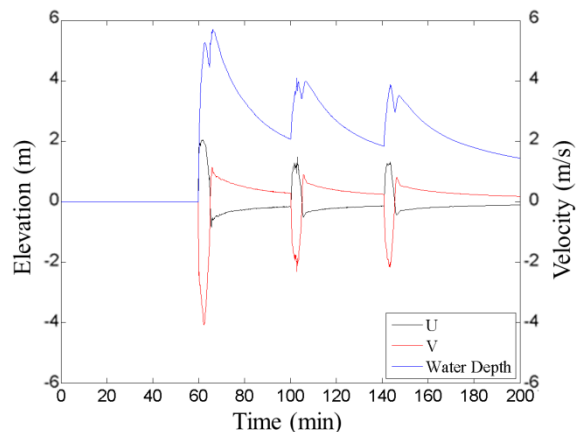


圖11 研究場址水位計資料歷線圖。橫軸為時間，單位分鐘。左側之縱軸為高程，單位公尺。右側之縱軸為速度，單位 m/s。黑線為速度 U 歷線。紅線為速度 V 歷線。藍線為水深歷線。

### 3.2 海嘯往返三次之海嘯衝擊力分析

本研究為探討海嘯多次攻擊特性對於沿岸結構物之影響。首先分析攻擊力最強之前三波海嘯波於近岸時流場分布。經由 4.1 節之探討可知，海嘯波第一波之水深及流速較第二波及第三波海嘯大。因此以第一波海嘯波流速最快時之水深 5.15 公尺，流速 4.52 m/s 作為海嘯往返三次之海嘯衝擊力分析之入流邊界。

模擬域之設定 X 方向 172 公尺長 ( $X=0.0$  至  $X=172.0$ )，Y 方向 50 公尺長 ( $Y=0.0$  至  $Y=50.0$ )，Z 方向 6 公尺 ( $Z=0.0$  至  $Z=8.0$ )。網格解析度為 0.5 公尺，方足以描述圓柱結構物， $X=0.0$  之邊界條件為入流邊界條件。依上一節所得之海嘯源參數帶入湧潮水體厚度 5.15 公尺，湧潮流速 4.52 m/s。 $X=172.0$  之邊界條件為壓力為零的開放邊界。 $Y=0.0$  及 50.0 之邊界條件為無摩擦邊界(Free-Slip)。 $Z=0.0$  之邊界條件為無滑動邊界(No-Slip)， $Z=8.0$  之邊界條件為壓力為零之開放邊界。結構物設置如下，柱徑設置為 4.25 公尺、柱高 5.95 公尺。模擬域之初始流場，參考 COMCOT 模擬之水深及流速歷線。以最大流速前一時刻之水深 5.01 公尺以及流速 4.47 m/s，作為初始流場之設置條件。圖 12 為模擬域上視圖，圖中深灰色圓形代表結構物。圖 13 為模擬域側視圖，圖中灰色矩形為結構物位置。圖 14 為結構物編號圖，圖中之數字為結構物編號，用以區分不同位置之結構物。

藉由三維海嘯模擬，了解當海嘯侵襲近岸結構物時之流場變化及壓力分布。圖 15 為三維水位變化圖，色階表示水位高程變化，白色代表水位為 5.0 公尺高程，海嘯湧潮方向為左上向右下傳遞。模擬時間五秒時，1 號及 2 號結構物前方之水位明顯上升至 6 公尺，於兩結構物之側邊則下降至 4 公尺。25 號及 26 號結構物側邊水位下降至 4.1 公尺。27 號結構物後方水位先下降至 4.7 公尺，於更靠近下游處位置水位上升至 5 公尺。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物之前方水位約 6.2 公尺，兩結構物側邊水位亦升至 5.3 公尺。27 號結構物後方靠近下游處之水位由 5 公尺降至 4.7 公尺。模擬時間 20 秒時，於 1 號及 2 號結構物前之上游水位上升至 6.5 公尺。27 號結構物後方水位則趨近於 4.4 公尺，更靠近下游處之水位為 4.7 公尺。

圖 16 為三維壓力分布圖，圖中色階表示壓力，單位 Pa。水藍色平面為水面。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物所受之壓力分布較其餘結構物大，最大壓力分布於結構物底部，約為 40000 Pa，其餘結構物最大受壓力約為 35000 Pa。模擬時間 10 秒，1 號及 2 號結構物所受最大壓力約為 45000 Pa。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物所受最大壓力分布與 10 秒時之壓力一樣約為 45000 Pa。三維壓力分布圖中可知 1 號及 2 號之結構物所承受壓力較其他結構物大。為清楚觀察兩結構物之受壓力分布，因此繪製圖 17 關注結構物壓力分布圖上游側視角及圖 18 關注結構物壓力分布圖下游側視角。圖中色階為壓力，單位 Pa。兩結構物由上游側觀察之結果，1 號結構物承受最大壓力分布之位置為 Y 座標 23.0 至 24.0 之區域，所承受之壓力為 40000 Pa。垂直海嘯湧潮入流方向之 Y 座標 22.5，所受壓力為 35000 Pa。2 號結構物所受之最大壓力分佈於 Y 座標 26.0 至 27.0 之位置，承受之壓力為 40000 Pa。而垂直海嘯湧潮入流方向之 Y

座標 27.5 位置，所受壓力約為 35000 Pa。下游側視角兩結構物之側邊之最大壓力分布略大於中心位置。所受之最大壓力亦較上游側小，約為 25000 Pa。

為了解當海嘯湧潮撞擊結構物時之衝擊力，觀察動壓於結構物上之分布，可幫助判斷結構物主要受湧潮衝擊之區域。圖 19 為三維動壓分布圖。色階代表動壓，單位 Pa。水藍色平面為水面。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物所受之最大動壓約為 6000 Pa，其餘結構物皆小於 1000 Pa。最大動壓位置為結構物與水面之交界處。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物所受最大動壓約為 7000 Pa。3 號至 20 號結構物所受之最大動壓介於 1000 至 2000 Pa。21 號至 27 號之最大動壓仍低於 1000 Pa。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物所受之最大動壓已到達 8000 Pa。其餘結構物之最大動壓仍低於 3000 Pa。由上述之比較可知，1 號及 2 號結構物所受之動壓較其餘結構物為大。由三維動壓分布圖得知 1 號及 2 號結構物所受動壓較其餘結構物大，因此將視角由全模擬範圍之結構物動壓分布改為關注 1 號及 2 號結構物之動壓分布。

圖 20 為 1 號及 2 號結構物上游側之動壓分布圖。圖中色階表動壓，單位 Pa。1 號結構物於上游側之最大動壓分布範圍為，Y 座標 23.0 至 24.0 間，於模擬時間 20 秒時最大動壓值為 8000 Pa。2 號結構物於上游側方向觀察之最大動壓分布範圍為 Y 座標 26.0 至 27.0 間，於模擬時間 20 秒時之最大動壓亦為 8000 Pa。1 號及 2 號結構物垂直於湧潮入流方向之位置分別為 Y 座標 22.5 與 27.5。兩結構物垂直於湧潮入流方向之位置，動壓分布範圍由結構物頂部至底部。但此位置最大動壓值於模擬時間 20 秒時約為 7000 Pa。

圖 21 為 1 號及 2 號結構物下游側之動壓分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。由圖觀察，1 號及 2 號結構物於下游側時之動壓分布於結構物頂部，模擬時間五秒時動壓值最大約為 2000 Pa。模擬時間 10 秒時亦只有結構物頂部有動壓分布，動壓值約為 2000 Pa。模擬時間 20 秒時，動壓分布由頂部稍微向下延伸，動壓值由 2000 Pa 增至 4000 Pa。由此結果可知 1 號及 2 號結構物動壓分布主要於上游側，下游側所受之動壓較上游側弱。

圖 22 為底床流速分布圖。色階為絕對速度，單位為 m/s。模擬時間五秒時，於 1 號及 2 號結構物之前方出現速度 0.5 m/s 之低流速區，於側邊之流速分布較快約 1.75 m/s。3 至 26 號結構物側邊之流速約為 1.5 m/s。27 號結構物後方亦出現速度約 0.5 m/s 之低流速區。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物前方低流速區之速度介於 0.5 m/s 至 0.25 m/s。3 至 23 號結構物側邊之流速約為 1.5 m/s。23 至 26 號結構物側邊之流速約為 1.75 m/s。25、27 號結構物後方出現小範圍之低流速區，於 27 號結構物後方之低流速區速度約為 0.25 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之低流速區速度仍為 0.25 m/s。3 至 23 號結構物之側邊流速分布約為 1.6 m/s。23 至 26 號結構物之側邊流速約為 1.75 m/s。25、27 號結構物後方之低流速區範圍持續變大，流速降至 0.25 m/s 以下。

為詳細觀察 1、2 號結構物所在之上游區域流速繪製圖 23 上游區底床流速分布圖。圖中色階表示絕對速度，單位 m/s。主要觀測為 1 號及 2 號結構物，因此將其他編號之結構物以半透明之型式繪製。模擬時間 5 秒

時，1 號及 2 號結構物前方之減速區最小速度分布，位於 X 座標 30.0 至 32.0，Y 座標 23 至 27 之間。流速值介於 0.25 m/s 至 0.5 m/s 間。結構物側邊有速度較大之區域，流速介於 1.75 m/s 至 2.0 m/s 間，並且呈現對稱分布。模擬時間 10 秒，1 號及 2 號結構物前方之低流速區域最小流速介於 0.5 m/s 至 0.25 m/s 間。於側邊之高流速分布區之範圍變小，且其範圍逐漸向結構物靠攏，此時流速約為 1.75 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之低流速區域，流速下降至 0.25 m/s。側邊之高速區域則緊鄰結構物，流速約為 1.75 m/s。

欲清楚觀察下游區域 27 號結構物後方之流場分布，因此繪製圖 24 下游區域底床流速分布圖。圖中色階表示絕對速度，單位 m/s。將 27 號以外之結構物皆以半透明表示，以關注 27 號結構物周圍之流場。模擬時間 5 秒時，25 號及 26 號結構物後方有流速 0.5 m/s 之低流速區域並向 27 號結構物後方延伸至 X 座標 110 處。27 號結構物後方之低流速區域最小流速為 0.25 m/s。模擬時間 10 秒時，27 號結構物後方之低流速區延伸至 X 座標 120 處，且流速分布呈現對稱。模擬時間 20 秒時，27 號結構物後方之低流速區延伸出 X 座標 120 處，最低流速約為 0.25 m/s。觀察三維底床流速分布圖、上游區域底床流速分布圖、下游區域底床流速分布圖，除了較為明顯之低速區外。結構物側邊之流速約為 1.75 m/s，側邊之流速分布介於 1.5 m/s 至 1.75 m/s 間。

圖 25 為三維流線圖。線條為流線，線條之色階表示絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。水藍色平面為水面。模擬時間 5 秒時，流線之方向顯示，當湧潮衝擊 1 號及 2 號結構物時，大部分由結構物之側邊流過，少部分流進兩結構物間之狹縫。而後沿結構物側邊持續向下游區域前進，經過 25 號、26 號結構物後，向 27 號結構物併攏再向下游方向前進。由流線之速度顯示，於 1 號、2 號結構物前流速下降。繞向後方之結構物之過程，速度由 2.0 m/s 逐漸提升至 4.5 m/s。至 5 號及 6 號結構物位置時，靠近水面流速減緩為 3.0 m/s，靠近底床之流速則未有明顯減速之趨勢。當湧潮由 25 號、26 號結構物流至 27 號結構物時，靠近水面之流線無較明顯之方向改變及減速便向下游前進。靠近底床之流線部分維持原速度向下游前進，部分則向 27 號結構物方向前進，流速由 4.0 m/s 降至 1.5 m/s 以下，經過一段距離後，流速逐漸提升至 2.0 m/s 向下游前進。由紊流分布觀察可知，於 1 號及 2 號結構物後方有較明顯之紊流分布。於 9 至 27 號結構物之側邊亦有紊流之分布。其中 27 號結構物後方之有較明顯之紊流區向下游延伸至下游區。模擬時間 10 秒時，流線行進之方向與流速分布無明顯變化。但結構物周圍之紊流分布範圍較 5 秒時廣。1 號及 2 號結構物側邊以及 27 號結構物側邊及後方之結構物之範圍皆變更為明顯。於 1 號、2 號結構物前產生新的紊流分布。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物頂部被水面淹過，因此有流線直接翻過頂部向 3 號及 4 號結構物區域流過。其餘流向與 10 秒時相近無太大之變化。紊流於結構物周圍之分布發生部分改變。1 號及 2 號結構物前方之紊流分布範圍變廣，側邊之紊流區消失。其餘之結構物分布與 10 秒時相近，因此不多加描述。

為清楚觀察上游區域之流線及紊流分布之情況，因此繪製圖 26 上游區域流線圖。線條為流線，線條之色

階表示絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。1 號及 2 號結構物以外之結構物以半透明方式呈現。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物前方之流線以 3.0 m/s 之流速向下游移動，並有部分穿越兩結構物間之狹縫。於兩結構物側邊出現約 2 公尺長之紊流分布。經過兩結構物後之流速略微提升至 4.0 m/s。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物前方出現 10 公尺寬之紊流分布。兩結構物側邊之紊流區增長為 5 公尺。穿過兩側紊流區之流線速度約為 2.25 m/s 較初始時之 3.0 m/s 慢。未穿越紊流區之流線流速為 4.0 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之紊流分布增寬至 15 公尺。原位於側邊之紊流區則消失。湧潮流過兩結構物側邊時流速由 3.0 m/s 加速至 5.25 m/s。

圖 27 為下游區域流線圖。圖中線條為流線，線條之色階為絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。除 27 號結構物以外之結構物以半透明方式呈現。模擬時間 5 秒時，於 25 號及 26 號結構物側邊產生紊流區。並往 27 號結構物延伸，概估約 10 公尺長。流線之分布方面可觀察到原本於 23 至 25 號結構物側邊之速度約為 5.0 m/s，經過紊流區後流速降至 4.0 m/s。部分流向 27 號結構物之流，於結構物後方形成漩渦。流速更降至 0.75 m/s 以下，向下游行進約 6 公尺流速方加速至 3.75 m/s。模擬時間 10 秒，由 25 號及 26 號結構物延伸之紊流區增長至 15 公尺。流線行經 23 至 25 號結構物側邊時之流速約為 6 m/s，經過紊流區後減速至 4.5 m/s。流向 27 號結構物之流線受結構物後方之漩渦區域影響，流入降至 0.75 m/s 以下，向前行進約 6 公尺後加速至 2.25 m/s。模擬時間 20 秒時，25 號及 26 號結構物延伸之紊流區增長至 18 公尺。流線行經 23 至 25 號結構物側邊時之流速約為 6 m/s，受紊流區影響之流線減少。只有靠近結構物周圍 3 公尺內之流速受影響減速至 4.0 m/s。27 號結構物後方之漩渦區範圍，由原本之 6 公尺增加至 10 公尺。在此區域內之流速降至 0.75 m/s 以下，向前行進約 10 公尺後加速至 2.25 m/s。

由上述模擬結果顯示，當海嘯湧潮衝擊結構物時，於 1 號及 2 號結構物前方會因兩結構物之阻滯而導致水流流速由 4.52 m/s 減速至 2.5 m/s，以及水位由 5.15 公尺提高至 6 公尺。因水位提高也導致結構物所受最大總壓分布面積變大及最大動壓由 6000 Pa 增加至 8000 Pa。總壓及動壓主要作用於 1 號及 2 號結構物上游側，其中最大動壓發生於結構物與水面之交界處。上游區域之底床流速於 1 號及 2 號結構物前方流速約 0.5 m/s 之低流速區。由流線圖所提供之資訊顯示，底床之低流速區與紊流區重疊，因此結構物前方可能出現堆積之情況。湧潮經過兩結構物側邊時底床流速由 1.5 m/s 提升至 2.0 m/s，於結構物之兩側可能產生沖刷之行為。下游區域於 27 號結構物後方亦有流速約 0.25 m/s 之紊流區，因此在此區域亦可能發生堆積。

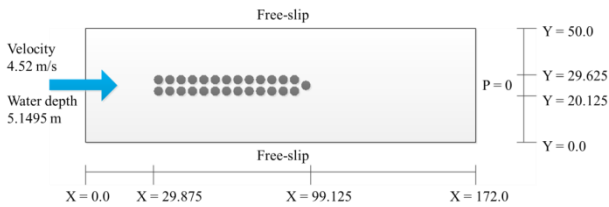


圖12 模擬域上視圖。藍色箭頭代表入流方向。深灰色圓形為結構物。

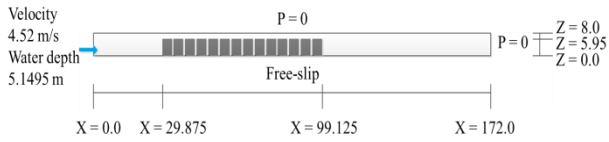


圖13 模擬域側視圖。藍色箭頭代表入流方向。深灰色矩形體為結構物。



圖14 結構物編號圖。圖中數字為結構物之編號。

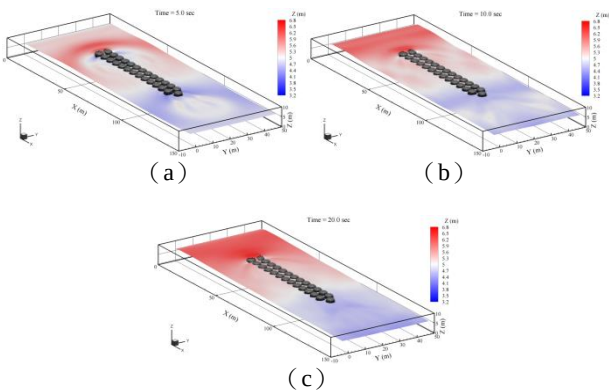


圖15 三維水位變化圖。色階表示高程，單位公尺。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒

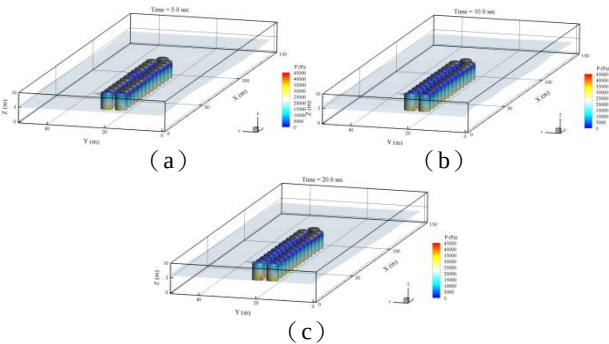


圖16 三維壓力分布圖。色階表示壓力，單位 Pa。水藍色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

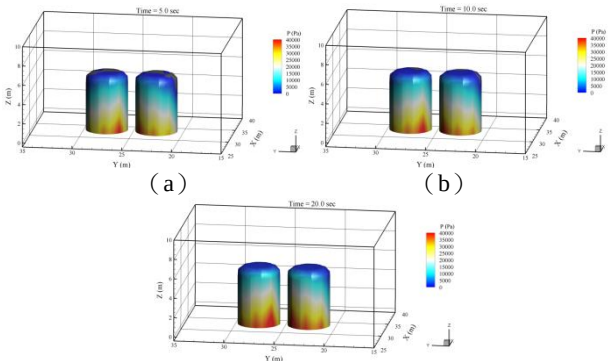


圖17 關注結構物壓力分布圖上游側視角。色階表示壓力，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

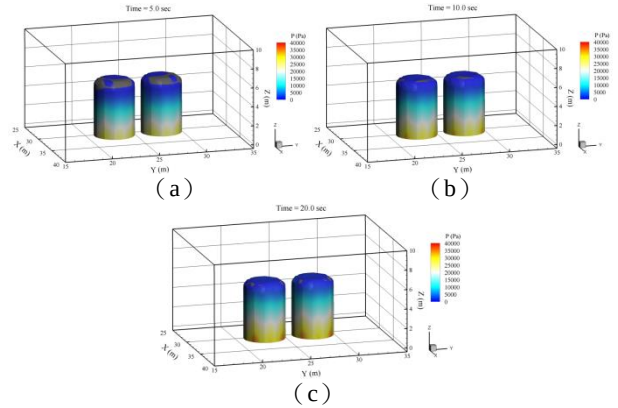


圖18 關注結構物壓力分布圖下游側視角。色階表示壓力，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

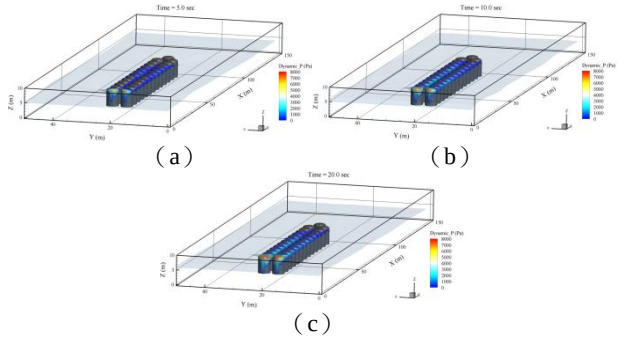


圖19 三維動壓分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。水藍色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

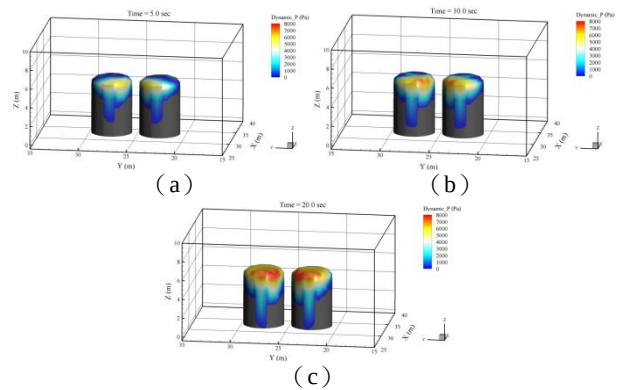


圖20 關注結構物動壓分布圖上游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

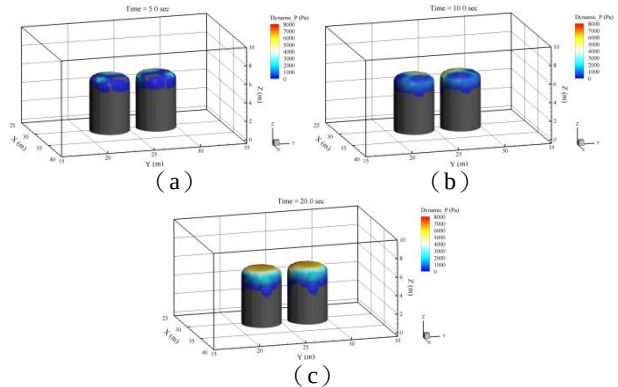


圖21 關注結構物動壓分布圖下游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

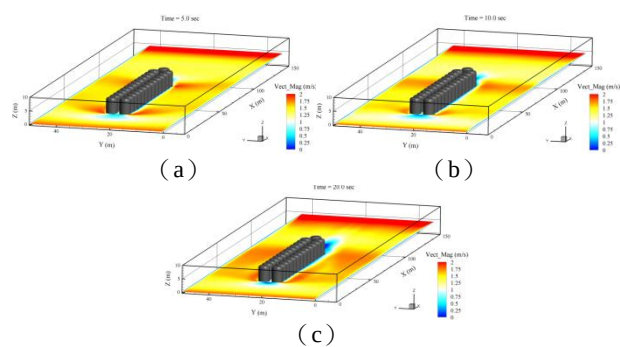


圖22 底床流速分布圖。色階表示絕對速度，單位 m/s。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。



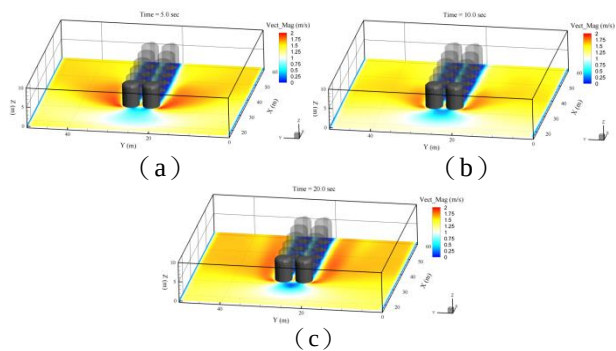


圖23 上游區域底床流速分布圖。色階表示絕對速度，單位 m/s。為觀察1號及2號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

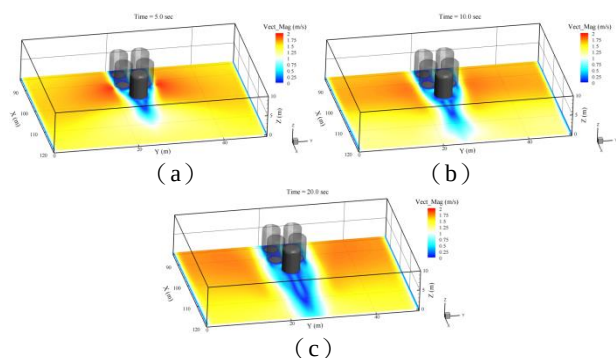


圖24 下游區域之底床流速分布圖。色階表示絕對速度，單位 m/s。為觀察27號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

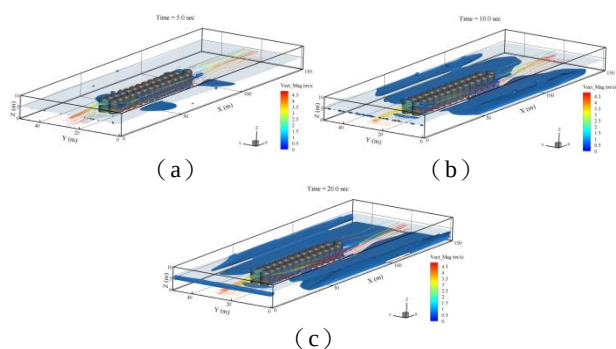


圖25 三維流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。水藍色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

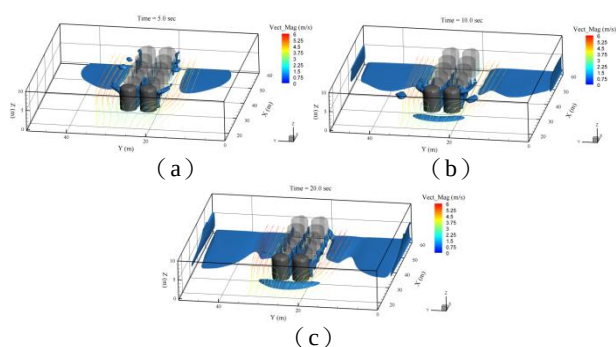


圖26 上游區域流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。為觀察1號及2號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

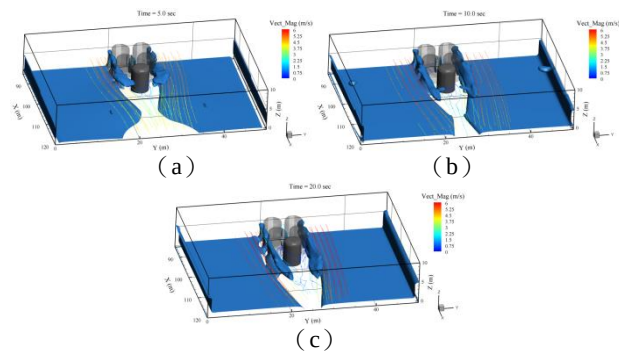


圖27 上游區域流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。為觀察27號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

### 3.3 含砂效應對海嘯衝擊力分析

為了解含砂效應對於海嘯衝擊力之影響。本研究設計兩種情境，分別為水密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 及 1500 kg/m<sup>3</sup> 並與 1000 kg/m<sup>3</sup> 之案例比較。繪製水位、壓力、動壓、底床流速、流線及紊流分布。並比較 1 號及 2 號結構物上固定位置之動壓及壓力與密度之關係。藉由上述之模擬結果了解含砂流體於不同密度下對於結構物之流場及受力之影響。

圖 28 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維水位變化圖，色階表示水位高程變化，白色代表水位為 5.0 公尺高程，海嘯湧潮方向為左上向右上傳遞。模擬時間五秒時，1 號及 2 號結構物前方之水位明顯上升至 6.0 公尺，於兩結構物之側邊則下降至 4.0 公尺。25 號及 26 號結構物側邊水位下降至 4.1 公尺。27 號結構物後方水位先下降至 4.7 公尺，於更靠近下游處位置水位上升至 5 公尺。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物之前方水位約 6.2 公尺，兩結構物側邊水位亦升至 5.3 公尺。27 號結構物後方靠近下游處之水位由 5 公尺降至 4.7 公尺。模擬時間 20 秒時，於 1 號及 2 號結構物前之上游水位上升至 6.5 公尺。27 號結構物後方水位則趨近於 4.4 公尺，更靠近下游處之水位為 4.7 公尺。

圖 29 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維壓力分布圖，圖中色階表示壓力，單位 Pa。淺咖啡色平面為水面。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物所受之壓力分布較其餘結構物大，最大壓力分布於結構物底部，約為 45000 Pa，其餘結構物最大受壓力約為 35000 Pa。模擬時間 10 秒，1 號及 2 號結構物所受最大壓力約為 50000 Pa。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物所受最大壓力分布與 10 秒時之壓力一樣約為 50000 Pa。三維壓力分布圖中可知 1 號及 2 號之結構物所承受壓力較其他結構物大。為清楚觀察兩結構物之受壓力分布，因此繪製圖 30 密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之關注結構物壓力分布圖上游側視角及圖 31 密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之關注結構物壓力分布圖下游側視角。圖中色階為壓力，單位 Pa。兩結構物由上游側觀察之結果，1 號結構物最大壓力分布於 Y 座標 23.0 至 24.0 之區域，所受之壓力約為 40000 Pa。而垂直海嘯湧潮入流方向之 Y 座標 22.5，所受之壓力約為 35000 Pa。2 號結構物所受之最大壓力分佈於 Y 座標 26.0 至 27.0 之位置而非垂直海嘯湧潮入流方向之 Y 座標 27.5，所受壓力約為 40000 Pa。下游側視角兩結構物

之側邊之最大壓力分布略大於中心位置。所受之最大壓力亦較上游側小，約為 35000 Pa。

圖 32 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維動壓分布圖。色階代表動壓，單位 Pa。淺咖啡色平面為水面。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物所受之最大動壓約為 7500 Pa，其餘結構物皆小於 1250 Pa。最大動壓位置為結構物與水面之交界處。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物所受最大動壓約為 7500 Pa。3 號至 20 號結構物所受之最大動壓介於 1250 至 2500 Pa。21 號至 27 號之最大動壓仍低於 1250 Pa。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物所受之最大動壓已到達 8750 Pa。其餘結構物之最大動壓仍低於 2500 Pa。由上述之比較可知，1 號及 2 號結構物所受之動壓較其餘結構物為大。由三維動壓分布圖得知 1 號及 2 號結構物所受動壓較其餘結構物大，因此將視角由全模擬範圍之結構物動壓分布改為關注 1 號及 2 號結構物之動壓分布，並於局部繪製時將水面移除以排除混濁之水面影響判斷動壓值。

圖 33 為上游側視角觀察密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體對 1 號及 2 號結構物造成之動壓分布圖。圖中色階表動壓，單位 Pa。1 號結構物於上游側之最大動壓分布範圍為，Y 座標 23.0 至 24.0 間，於模擬時間 5 秒時最大動壓值為 6000 Pa。2 號結構物於上游側方向觀察之最大動壓分布範圍為 Y 座標 26.0 至 27.0 間，於模擬時間 5 秒時之最大動壓亦為 6000 Pa。1 號及 2 號結構物正對垂直湧潮入流方向之位置分別為 Y 座標 22.5 與 27.5。兩結構物垂直於湧潮入流方向之位置，動壓分布範圍由結構物頂部至底部。此位置最大動壓值於模擬時間 5 秒時約為 6000 Pa。模擬時間 10 秒時，兩結構物所受最大動壓增至 7000 Pa。兩結構物垂直於湧潮入流方向之位置最大動壓為 6000 Pa。模擬時間 20 秒時兩結構物所受最大動壓約為 9000 Pa。垂直於湧潮方向位置之最大動壓約為 7000 Pa。

圖 34 密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 之含砂流體衝擊 1 號及 2 號結構物時，結構物下游側之動壓分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。由圖觀察，1 號及 2 號結構物於下游側時之動壓分布於結構物頂部，模擬時間五秒時動壓值最大約為 2000 Pa。模擬時間 10 秒時亦只有結構物頂部有動壓分布，動壓值約為 2000 Pa。模擬時間 20 秒時，動壓分布由頂部稍微向下延伸，動壓值由 2000 Pa 增至 6000 Pa。由此結果可知 1 號及 2 號結構物動壓分布主要於上游側，下游側所受之動壓較上游側弱。

圖 35 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之底床流速分布圖。色階為絕對速度，單位為 m/s。模擬時間五秒時，於 1 號及 2 號結構物之前方出現速度 0.5 m/s 之低流速區，於側邊之流速分布較快約 1.75 m/s。3 至 26 號結構物側邊之流速約為 1.5 m/s。27 號結構物後方亦出現速度約 0.5 m/s 之低流速區。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物前方低流速區之速度介於 0.5 m/s 至 0.25 m/s。3 至 23 號結構物側邊之流速約為 1.5 m/s。23 至 26 號結構物側邊之流速約為 1.75 m/s。25、27 號結構物後方出現小範圍之低流速區，於 27 號結構物後方之低流速區速度約為 0.25 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之低流速區速度仍為 0.25 m/s。3 至 23 號結構物之側邊流速分布約為 1.6 m/s。23 至 26 號結構物之側邊流速約為 1.75 m/s。25、27 號結構物後方之低流速區範圍持續

變大，流速降至 0.25 m/s 以下。

圖 36 密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之上游區底床流速分布圖。圖中色階表示絕對速度，單位 m/s。主要觀測為 1 號及 2 號結構物，因此將其他編號之結構物以半透明之型式繪製。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物前方之減速區最小速度分布，位於 X 座標 30.0 至 32.0，Y 座標 23 至 27 之間。流速值介於 0.25 m/s 至 0.5 m/s 間。結構物側邊有速度較大之區域，流速介於 1.75 m/s 至 2.0 m/s 間，並且呈現對稱分布。模擬時間 10 秒，1 號及 2 號結構物前方之低流速區域最小流速介於 0.5 m/s 至 0.25 m/s 間。於側邊之高流速分布區之範圍變小，且其範圍逐漸向結構物靠攏，此時流速約為 1.75 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之低流速區域，流速下降至 0.25 m/s。側邊之高速區域則緊鄰結構物，流速約為 1.75 m/s。

圖 37 為含砂流體 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之下游區域底床流速分布圖。圖中色階表示絕對速度，單位 m/s。將 27 號以外之結構物皆以半透明表示，以利於觀察 27 號結構物周圍之流場。模擬時間 5 秒時，25 號及 26 號結構物後方有流速 0.5 m/s 之低流速區域並向 27 號結構物後方延伸至 X 座標 110 處。27 號結構物後方之低流速區域最小流速為 0.25 m/s。模擬時間 10 秒時，27 號結構物後方之低流速區延伸至 X 座標 120 處，且流速分布呈現對稱。模擬時間 20 秒時，27 號結構物後方之低流速區延伸出 X 座標 120 處，最低流速約為 0.25 m/s。觀察三維底床流速分布圖、上游區域底床流速分布圖、下游區域底床流速分布圖，除了較為明顯之低速區外。結構物側邊之流速約為 1.75 m/s，側邊之流速分布介於 1.5 m/s 至 1.75 m/s 間。

圖 38 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維流線圖。線條為流線，線條之色階表示絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。淺咖啡色平面為水面。模擬時間 5 秒時，流線之方向顯示，當湧潮衝擊 1 號及 2 號結構物時，大部分由結構物之側邊流過，少部分流進兩結構物間之狹縫。而後沿結構物側邊持續向下游區域前進，經過 25 號、26 號結構物後，向 27 號結構物併攏再向下游方向前進。由流線之速度顯示，於 1 號、2 號結構物前流速下降。繞向後方之結構物之過程，速度由 2.0 m/s 逐漸提升至 4.5 m/s。至 5 號及 6 號結構物位置時，靠近水面流速減緩為 3.0 m/s，靠近底床之流速則未有明顯減速之趨勢。當湧潮由 25 號、26 號結構物流至 27 號結構物時，靠近水面之流線無較明顯之方向改變及減速便向下游前進；靠近底床之流線部分維持原速度向下游前進，部分則向 27 號結構物方向前進，流速由 4.0 m/s 降至 1.5 m/s 以下，經過一段距離後，流速逐漸提升至 2.0 m/s 向下游前進。由紊流分布觀察可知，於 1 號及 2 號結構物後方有較明顯之紊流分布。於 9 至 27 號結構物之側邊亦有紊流之分布。其中 27 號結構物後方之有較明顯之紊流區向下游延伸至下游區。模擬時間 10 秒時，流線行進之方向與流速分布無明顯變化。但結構物周圍之紊流分布範圍較 5 秒時廣。1 號及 2 號結構物側邊以及 27 號結構物側邊及後方之結構物之範圍皆變得更為明顯。於 1 號、2 號結構物前產生新的紊流分布。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物頂部被水面淹過，因此有流線直接翻過頂部向 3 號及 4 號結構物區域流過。其餘流向

與 10 秒時相近無太大之變化。紊流於結構物周圍之分布發生部分改變。1 號及 2 號結構物前方之紊流分布範圍變廣，側邊之紊流區消失。

圖 39 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之上游區域流線圖。線條為流線，線條之色階表示絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。1 號及 2 號結構物以外之結構物以半透明方式呈現。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物前方之流線以 3.0 m/s 之流速向下游移動，並有部分穿越兩結構物間之狹縫。於兩結構物側邊出現約 2 公尺長之紊流分布。經過兩結構物後之流速略微提升至 4.0 m/s。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物前方出現 10 公尺寬之紊流分布。兩結構物側邊之紊流區增長為 5 公尺。穿過兩側紊流區之流線速度約為 2.25 m/s 較初始時之 3.0 m/s 慢。未穿越紊流區之流線流速為 4.0 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之紊流分布增寬至 15 公尺。原本位於側邊之紊流區則消失。湧潮流過兩結構物側邊時流速由 3.0 m/s 加速至 5.25 m/s。

圖 40 為密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之下游區域流線圖。圖中線條為流線，線條之色階為絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。除 27 號結構物以外之結構物以半透明方式呈現。模擬時間 5 秒時，於 25 號及 26 號結構物側邊產生紊流區。並往 27 號結構物延伸，概估約 10 公尺長。流線之分布方面可觀察到原本於 23 至 25 號結構物側邊之速度約為 5.0 m/s，經過紊流區後流速降至 4.0 m/s。部分流向 27 號結構物之流，於結構物後方形成漩渦。流速更降至 0.75 m/s 以下，向下游行進約 6 公尺流速方加速至 3.75 m/s。模擬時間 10 秒，由 25 號及 26 號結構物延伸之紊流區增長至 15 公尺。流線行經 23 至 25 號結構物側邊時之流速約為 6 m/s，經過紊流區後減速至 4.5 m/s。流向 27 號結構物之流線受結構物後方之漩渦區域影響，流入降至 0.75 m/s 以下，向前行進約 6 公尺後加速至 2.25 m/s。模擬時間 20 秒時，25 號及 26 號結構物延伸之紊流區增長至 18 公尺。流線行經 23 至 25 號結構物側邊時之流速約為 6 m/s，受紊流區影響之流線減少。只有靠近結構物周圍 3 公尺內之流速受影響減速至 4.0 m/s。27 號結構物後方之漩渦區範圍，由原本之 6 公尺增加至 10 公尺。在此區域內之流速降至 0.75 m/s 以下，向前行進約 10 公尺後加速至 2.25 m/s。

由上述之模擬結果，密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 之含砂流體於水位、流場方面與密度 1000 kg/m<sup>3</sup> 之分布情況相同。壓力及動壓方面，密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 之情境下壓力及動壓約為清水情況下之 1.2 倍。

圖 41 為密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維水位變化圖，色階表示水位高程變化，白色代表水位為 5.0 公尺高程，海嘯湧潮方向為左上向右下傳遞。模擬時間五秒時，1 號及 2 號結構物前方之水位明顯上升至 6 公尺，於兩結構物之側邊則下降至 4 公尺。25 號及 26 號結構物側邊水位下降至 4.1 公尺。27 號結構物後方水位先下降至 4.7 公尺，於更靠近下游處位置水位上升至 5 公尺。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物之前方水位約 6.2 公尺，兩結構物側邊水位亦升至 5.3 公尺。27 號結構物後方靠近下游處之水位由 5 公尺降至 4.7 公尺。模擬時間 20 秒時，於 1 號及 2 號結構物前之上游水位上升至 6.5 公尺。27 號結構物後方水位則趨近於 4.4 公尺，更

靠近下游處之水位為 4.7 公尺。

圖 42 為密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維壓力分布圖，圖中色階表示壓力，單位 Pa。深咖啡色平面為水面。由圖中可觀察 1 號及 2 號結構物所受之壓力分布較其餘結構物大，最大壓力分布於結構物底部。由壓力分布圖可確定 1 號及 2 號結構物所受壓力大於其餘結構物，但詳細之壓力礙於水面混濁無法判讀，因此關注於 1 號及 2 號結構物之壓力分布而繪製圖 43 及圖 44 關注結構物 1 號及 2 號結構物於密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之情境下，上游側視角之壓力分布圖與下游側視角壓力分布圖。圖中色階為壓力，單位 Pa。兩結構物由上游側觀察之結果，1 號結構物發生最大壓力分布之位置為 Y 座標 23.0 至 24.0 之區域，所受壓力約為 60000 Pa。而垂直海嘯湧潮入流方向之 Y 座標 22.5，所受壓力為 52500 Pa。2 號結構物所受之最大壓力分佈於 Y 座標 26.0 至 27.0 之位置，所受之壓力為 60000 Pa，而垂直海嘯湧潮入流方向之 Y 座標 27.5 所受壓力約為 52500 Pa。下游側視角兩結構物之側邊之最大壓力分布略大於中心位置。所受之最大壓力亦較上游側小，約為 52500 Pa。

圖 45 為密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維動壓分布圖。色階代表動壓，單位 Pa。深咖啡色平面為水面。由模擬圖可觀察除 1 號及 2 號結構物外，其於結構物所承受之最大動壓小於 2500 Pa。但受動壓最大之 1 號及 2 號結構物之動壓分布因混濁之水面而難以觀測。因此繪製關注於 1 號及 2 號結構物之動壓分布圖並將水面去除以利於進行分析。圖 46 及圖 47 分別為密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之情境下，由上游視角觀察 1 號、2 號結構物動壓分布以及由下游視角觀察兩結構物之動壓分布。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物於上游側所受之最大動壓約為 7000 Pa，下游側所受之最大動壓介於 1000 至 2000 Pa。最大動壓位置為結構物與水面之交界處。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物於上游側之最大動壓約為 8000 Pa，下游側之最大動壓介於 1000 Pa 至 2000 Pa 間。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物於上游側所受之最大動壓為 10000 Pa，下游側所受之最大動壓約為 4000 Pa。由此確定 1 號、2 號結構物上游側所承受之動壓較下游側大。1 號結構物最大動壓分布之位置為 Y 座標 23.0 至 24.0 間。2 號結構物最大動壓分布之位置於 Y 座標 26.0 至 27.0 間。兩結構物垂直湧潮入流方向之位置，動壓約為 9000 Pa。

圖 48 為密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之底床流速分布圖。色階為絕對速度，單位為 m/s。模擬時間五秒時，於 1 號及 2 號結構物之前方出現速度 0.5 m/s 之低流速區，於側邊之流速分布較快約 1.75 m/s。3 至 26 號結構物側邊之流速約為 1.5 m/s。27 號結構物後方亦出現速度約 0.5 m/s 之低流速區。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物前方低流速區之速度介於 0.5 m/s 至 0.25 m/s。3 至 23 號結構物側邊之流速約為 1.5 m/s。23 至 26 號結構物側邊之流速約為 1.75 m/s。25、27 號結構物後方出現小範圍之低流速區，於 27 號結構物後方之低流速區速度約為 0.25 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之低流速區速度仍為 0.25 m/s。3 至 23 號結構物之側邊流速分布約為 1.6 m/s。23 至 26 號結構物之側邊流速約為 1.75 m/s。25、27 號結構物後方之低流速區範圍持續變大，流速降至 0.25 m/s 以下。

為詳細觀察 1、2 號結構物所在之上游區域流速繪製圖 49 上游區底床流速分布圖。圖中色階表示絕對速度，單位 m/s。主要觀測為 1 號及 2 號結構物，因此將其他編號之結構物以半透明之型式繪製。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物前方之減速區最小速度分布，位於 X 座標 30.0 至 32.0，Y 座標 23 至 27 之間。流速值介於 0.25 m/s 至 0.5 m/s 間。結構物側邊有速度較大之區域，流速介於 1.75 m/s 至 2.0 m/s 間，並且呈現對稱分布。模擬時間 10 秒，1 號及 2 號結構物前方之低流速區域最小流速介於 0.5 m/s 至 0.25 m/s 間。於側邊之高流速分布區之範圍變小，且其範圍逐漸向結構物靠攏，此時流速約為 1.75 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之低流速區域，流速下降至 0.25 m/s。側邊之高速區域則緊鄰結構物，流速約為 1.75 m/s。

欲清楚觀察下游區域 27 號結構物後方之流場分布，因此繪製圖 50 下游區域底床流速分布圖。圖中色階表示絕對速度，單位 m/s。將 27 號以外之結構物皆以半透明表示，以關注 27 號結構物周圍之流場。模擬時間 5 秒時，25 號及 26 號結構物後方有流速 0.5 m/s 之低流速區域並向 27 號結構物後方延伸至 X 座標 110 處。27 號結構物後方之低流速區域最小流速為 0.25 m/s。模擬時間 10 秒時，27 號結構物後方之低流速區延伸至 X 座標 120 處，且流速分布呈現對稱。模擬時間 20 秒時，27 號結構物後方之低流速區延伸出 X 座標 120 處，最低流速約為 0.25 m/s。觀察三維底床流速分布圖、上游區域底床流速分布圖、下游區域底床流速分布圖，除了較為明顯之低速區外。結構物側邊之流速約為 1.75 m/s，側邊之流速分布介於 1.5 m/s 至 1.75 m/s 間。

圖 51 為密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維流線圖。線條為流線，線條之色階表示絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。深咖啡色平面為水面。模擬時間 5 秒時，流線之方向顯示，當湧潮衝擊 1 號及 2 號結構物時，大部分由結構物之側邊流過，少部分流進兩結構物間之狹縫。而後沿結構物側邊持續向下游區域前進，經過 25 號、26 號結構物後，向 27 號結構物併攏再向下游方向前進。為清楚觀察上游區域之流線及紊流分布之情況，因此繪製圖 52 密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之上游區域流線圖及圖 53 密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之下游區域流線圖。線條為流線，線條之色階表示絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。上游區域圖中 1 號及 2 號結構物以外之結構物以半透明方式呈現。下游區域圖中則除 27 號結構物以外皆以半透明形式呈現。模擬時間 5 秒時，1 號及 2 號結構物前方之流線以 3.0 m/s 之流速向下游移動，並有部分穿越兩結構物間之狹縫。於兩結構物側邊出現約 2 公尺長之紊流分布。經過兩結構物後之流速略微提升至 4.0 m/s。模擬時間 10 秒時，1 號及 2 號結構物前方出現 10 公尺寬之紊流分布。兩結構物側邊之紊流區增長為 5 公尺。穿過兩側紊流區之流線速度約為 2.25 m/s 較初始時之 3.0 m/s 慢。未穿越紊流區之流線流速為 4.0 m/s。模擬時間 20 秒時，1 號及 2 號結構物前方之紊流分布增寬至 15 公尺。位於側邊之紊流區則消失。湧潮流過兩結構物側邊時流速由 3.0 m/s 加速至 5.25 m/s。

密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之下游區域流線圖顯示，模擬時間 5 秒時，於 25 號及 26 號結構物側邊產生紊流

區。並往 27 號結構物延伸，概估約 10 公尺長。流線之分布方面可觀察到原本於 23 至 25 號結構物側邊之速度約為 5.0 m/s，經過紊流區後流速降至 4.0 m/s。部分流向 27 號結構物之流，於結構物後方形形成漩渦。流速更降至 0.75 m/s 以下，向下游行進約 6 公尺流速方加速至 3.75 m/s。模擬時間 10 秒，由 25 號及 26 號結構物延伸之紊流區增長至 15 公尺。流線行經 23 至 25 號結構物側邊時之流速約為 6 m/s，經過紊流區後減速至 4.5 m/s。流向 27 號結構物之流線受結構物後方之漩渦區域影響，流入降至 0.75 m/s 以下，向前行進約 6 公尺後加速至 2.25 m/s。模擬時間 20 秒時，25 號及 26 號結構物延伸之紊流區增長至 18 公尺。流線行經 23 至 25 號結構物側邊時之流速約為 6 m/s，受紊流區影響之流線減少。只有靠近結構物周圍 3 公尺內之流速受影響減速至 4.0 m/s。27 號結構物後方之漩渦區範圍，由原本之 6 公尺增加至 10 公尺。在此區域內之流速降至 0.75 m/s 以下，向前行進約 10 公尺後加速至 2.25 m/s。

由上述之密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之模擬結果，可觀察出流場之分布與密度 1000 kg/m<sup>3</sup>、1200 kg/m<sup>3</sup> 兩情境時相同。壓力及動壓方面，密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 之情境下壓力及動壓約為清水情況下之 1.5 倍。

為更清楚瞭解結構物所受之壓力及動壓與密度之關係。記錄模擬時間 30 秒時，1 號結構物位於 X 座標 30.75，Y 座標 24.25，Z 座標 4.75 以及 2 號位於結構物 X 座標 30.75，Y 座標 25.75，Z 座標 4.75 兩點之壓力及動壓值並整理至表 2。表中顯示密度 1000 kg/m<sup>3</sup> 案例中 1 號結構物所量測之壓力為 13859 Pa，動壓為 7186 Pa。密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 情境下 1 號結構物量測之壓力為 16619 Pa，動壓為 8992 Pa。密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 情境下 1 號結構物量測之壓力為 20729 Pa，動壓為 11714 Pa。2 號結構物於各密度下量測之壓力及動壓分別為 13865 Pa 與 7214 Pa，16628 Pa 與 9028 Pa，20734 Pa 與 11756 Pa。密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 之壓力及動壓約為清水情況下之 1.5 倍。密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 之壓力及動壓約為清水情況下之 1.2 倍。將表 2 之資料繪製為線條圖（圖 54 及圖 55），可清楚看到密度增大時，結構物所受之壓力及動壓亦以線性增大。

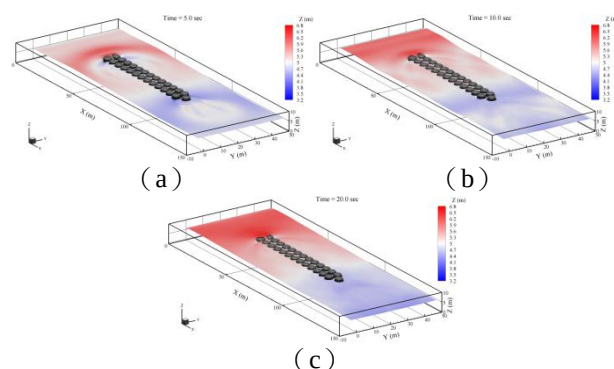


圖 28 密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之三維水位變化圖。色階表示高程，單位公尺。(a) 5.0 秒 (b) 10.0 秒 (c) 20.0 秒

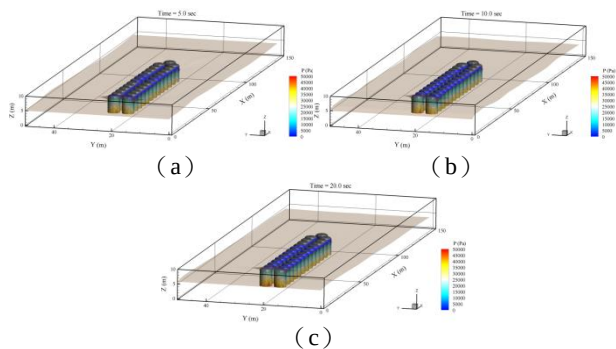


圖29 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三维壓力分布圖。色階表示壓力，單位 Pa。淺咖啡色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

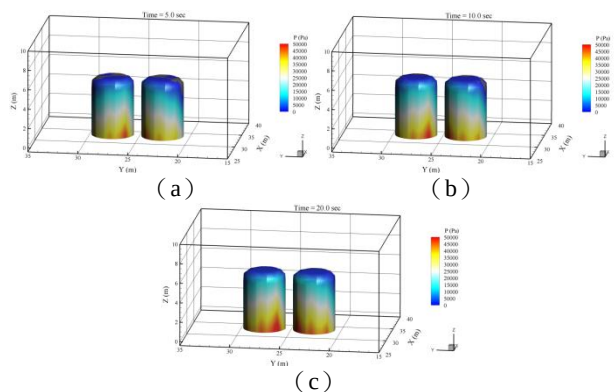


圖30 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物壓力分布圖上游側視角。色階表示壓力，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

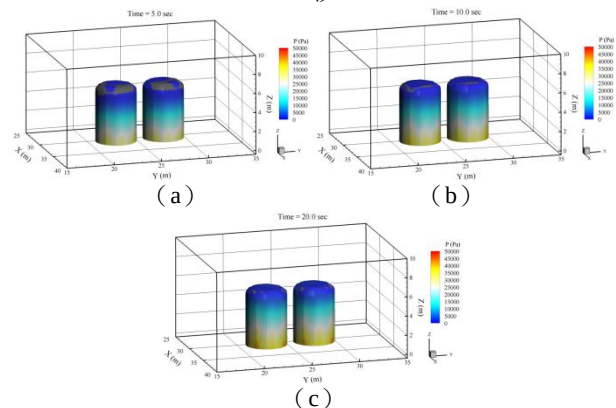


圖31 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體關注結構物壓力分布圖下游側視角。色階表示壓力，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

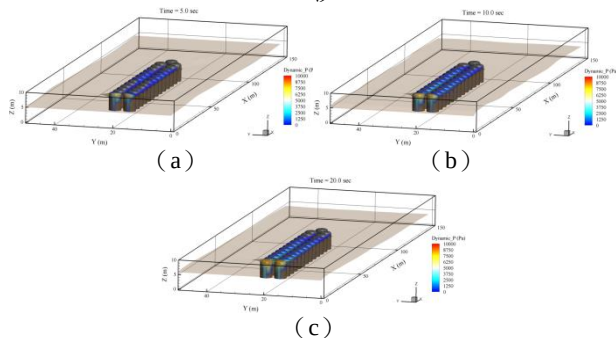


圖32 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三维動壓分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。淺咖啡色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

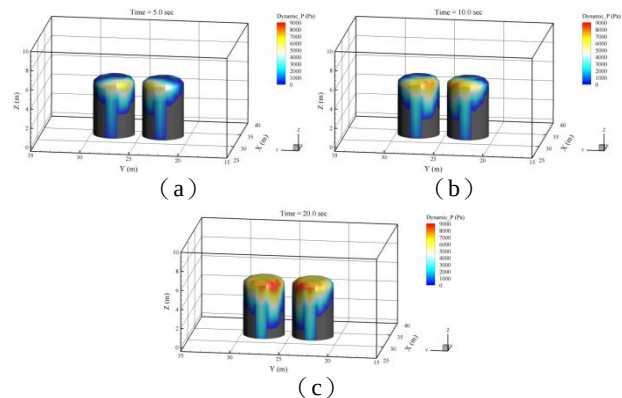


圖33 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物動壓分布圖上游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

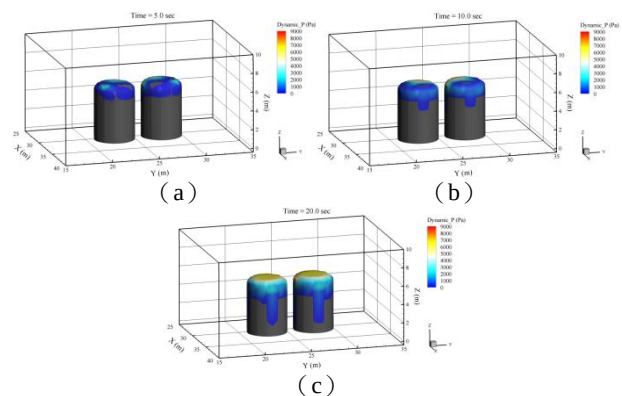


圖34 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物動壓分布圖下游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

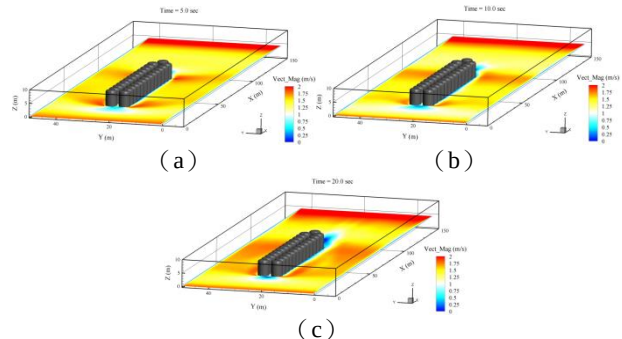


圖35 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之底床流速分布圖。色階表示絕對速度，單位 m/s。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

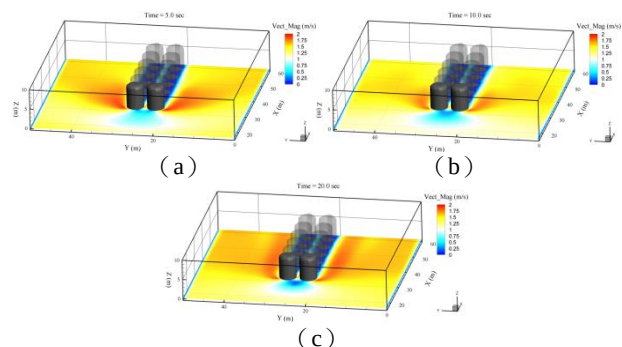


圖36 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之上游區域底床流速分布圖。色階表示絕對速度，單位 m/s。為觀察1號及2號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

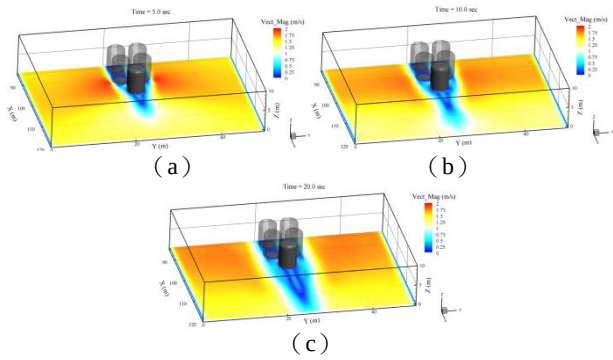


圖37 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之下游區域底床流速分布圖。色階表示絕對速度，單位 m/s。為觀察27號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

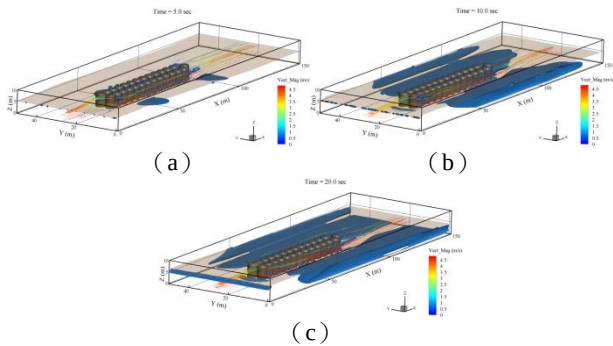


圖38 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。藍色區域為紊流分布。淺咖啡色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

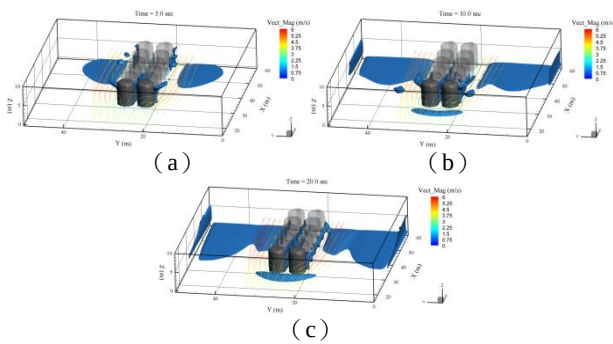


圖39 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之上游區域流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。為觀察1號及2號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

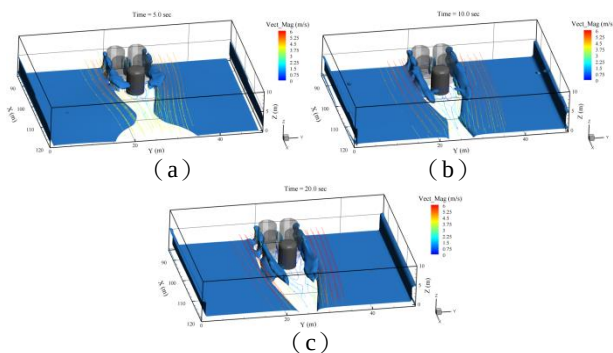


圖40 密度1200 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之下游區域流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。為觀察27號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

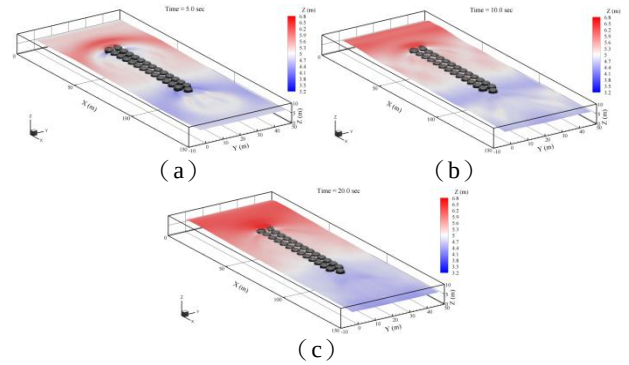


圖41 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維水位變化圖。色階表示高程，單位公尺。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒

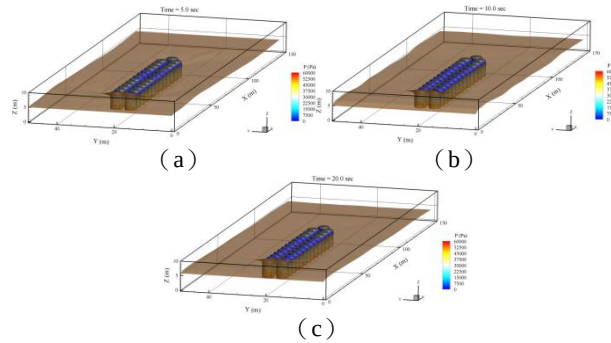


圖42 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維壓力分布圖。色階表示壓力，單位 Pa。深咖啡色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

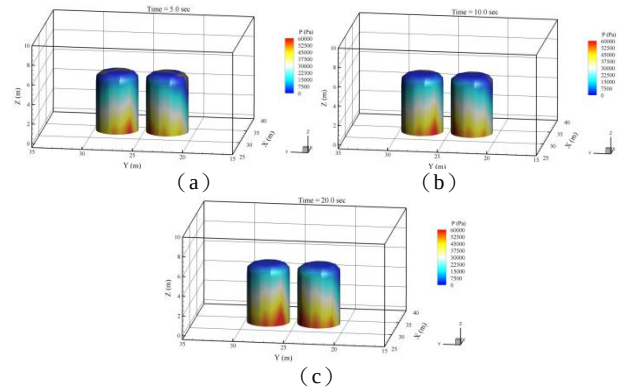


圖43 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物壓力分布圖上游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

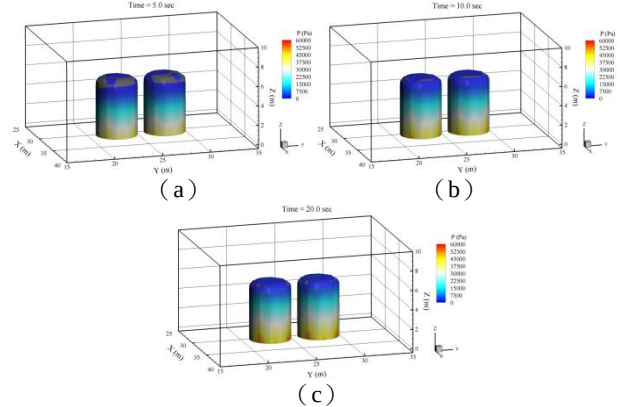


圖44 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物壓力分布圖下游側視角。色階表示壓力，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

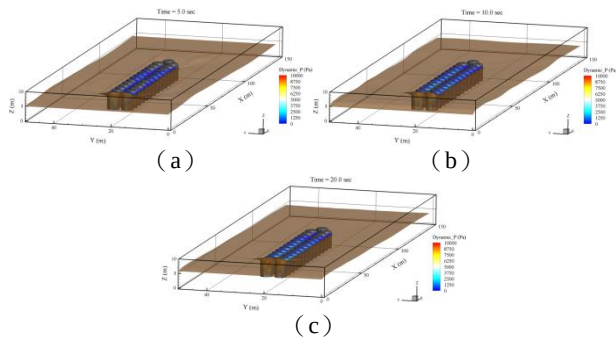


圖45 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維動壓分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。深咖啡色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

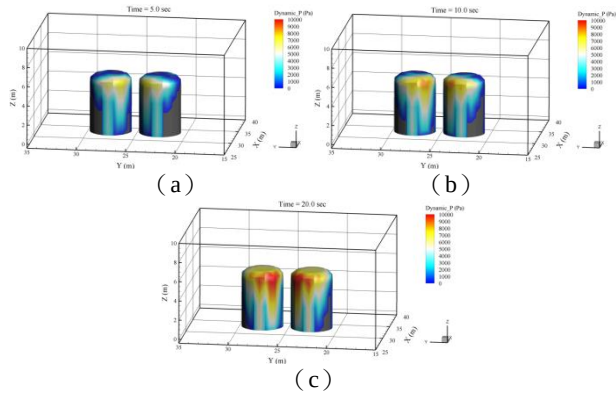


圖46 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物動壓分布圖上游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

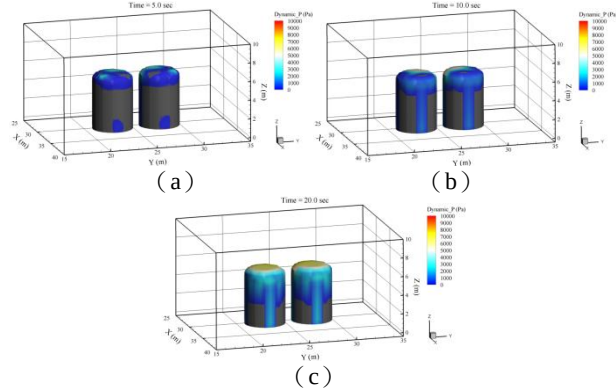


圖47 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之關注結構物動壓分布圖下游側視角。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

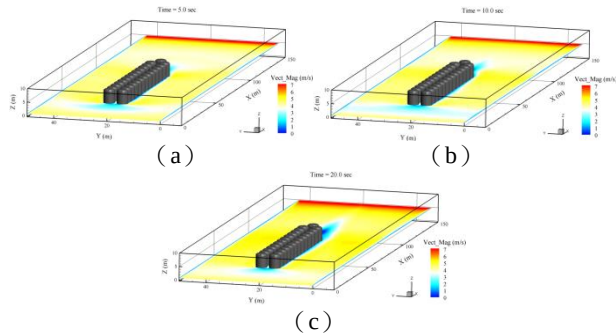


圖48 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之底床流速分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

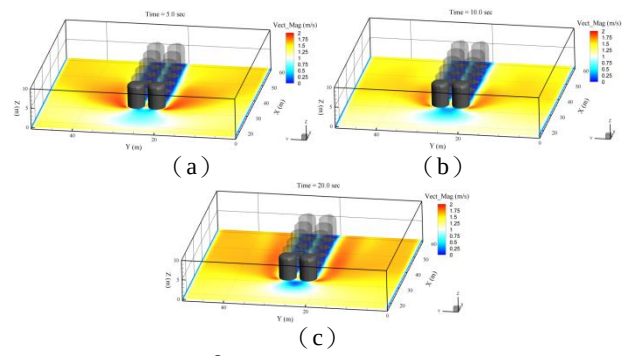


圖49 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之上游區域底床流速分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。為觀察1號及2號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

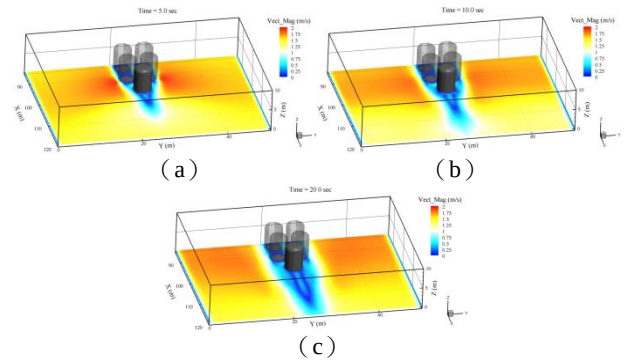


圖50 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之下游區域底床流速分布圖。色階表示動壓，單位 Pa。為觀察27號結構物周圍之流場將其他編號之結構物以半透明顯示。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

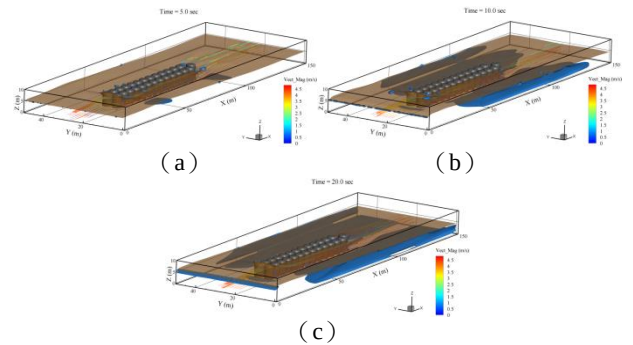


圖51 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。深咖啡色平面為水面。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

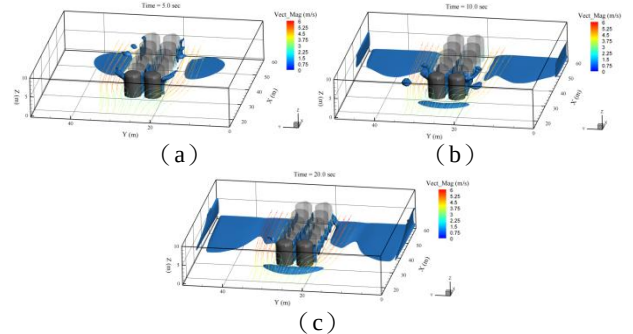


圖52 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。(a) 5.0秒 (b) 10.0秒 (c) 20.0秒。

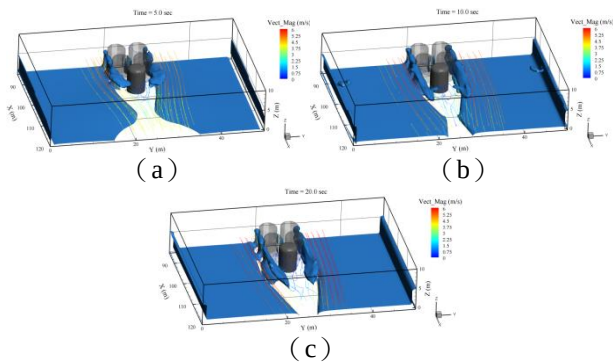


圖53 密度1500 kg/m<sup>3</sup>含砂流體之三維流線圖。線條為流線，線條之色階代表絕對速度，單位 m/s。(a)5.0秒(b)10.0秒(c)20.0秒。

表2 水體密度與結構物受壓力比較表。

| 網格中心位置               | Pressure (Pa) | Dynamic Pressure (Pa) | Flow Density (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------|
| (30.75, 25.75, 4.75) | 13859         | 7186                  | 1000                              |
| (30.75, 24.25, 4.75) | 13865         | 7214                  | 1000                              |
| (30.75, 25.75, 4.75) | 16619         | 8992                  | 1200                              |
| (30.75, 24.25, 4.75) | 16628         | 9028                  | 1200                              |
| (30.75, 25.75, 4.75) | 20729         | 11714                 | 1500                              |
| (30.75, 24.25, 4.75) | 20734         | 11756                 | 1500                              |

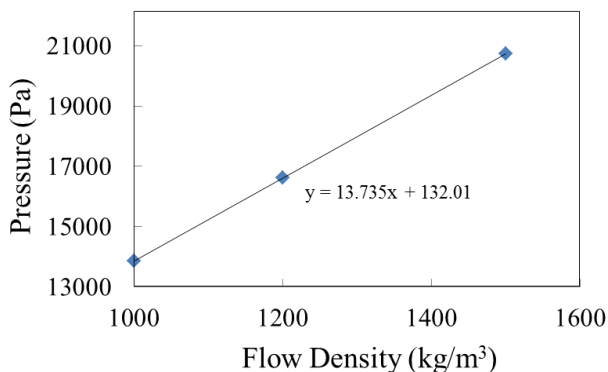


圖54 水體密度與結構物受壓力關係圖。

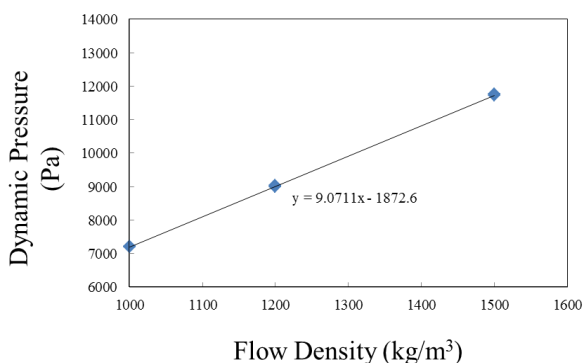


圖55 水體密度與結構物承受動壓關係圖。

### 3.4 小結

藉由模擬分析三次海嘯波中，水深及流速最大之海嘯湧潮攻擊過程。得知海嘯侵襲時，1號及2號結構物前方水位因受阻滯而升高。並對兩結構物造成最大之動

壓及壓力。流場方面兩結構物前方，底床流速偏低並產生紊流區。可能於此位置產生堆積效應。

藉由不同密度之海嘯湧潮衝擊結構物模擬。得知海嘯湧潮之密度線性增加之情況下，所受壓力及動壓亦呈線性增加。於定床之情況下湧潮密度改變對於流場不會造成影響。

## IV 結論

本研究主要目標為建立海嘯對結構物衝擊分析與審查技術，針對海嘯侵襲近岸結構物之特性進行模式開發。並於兩年間達成下列四項目標。建立含夾砂效應之三維海嘯數值模型建立與分析結構物排列對海嘯衝擊力影響之數值模型、建立與評估三維海嘯基礎冲刷數值模型、建立與分析海嘯往返三次以上對海嘯衝擊力之模型。

完成上述四項目標後，於第一年計畫藉由模擬成果瞭解。水平排列之結構物所承受壓力略小於交錯排列之情況、若結構物間距縮小因束縮效應影響海嘯湧潮所受阻力增強，結構物承受壓力變大、結構物間距固定時，結構物總數增加將因阻滯效應影響使結構物承受之壓力增大。

為建立適當海嘯衝擊排列結構物之審查技術。先設立合理之海嘯源強度，因此需蒐集目標區域以下資料：

1. 歷史海嘯記錄
2. 海嘯潛勢評估
3. 潮汐資料
4. 風暴潮記錄

考量上述之條件後，方可設置合理之海嘯源強度。海嘯源強度設置後，海嘯源亦須符合海嘯之特性，一般而言，大規模海嘯之週期大約為1小時，而海嘯湧潮侵襲之週期相當於海嘯半週期。因此設定之海嘯源之海嘯波週期至少要大於30分鐘方可與大規模海嘯侵襲之行為相似。海嘯以具計算海嘯溢淹之海嘯模式進行海嘯源之重現。以此方法可記錄海嘯侵襲目標區域時海嘯湧潮之時變資料。並由此時變資料中選取適當之資料作為三維數值模式之入流條件。

三維數值模式以上述之海嘯湧潮資訊作為入流條件後。可得結構物周圍流速、紊流相關之流場資料及結構物受壓力之壓力場資訊。進一步可分析當改變海嘯湧潮之含砂濃度、結構物排列時流場以及壓力場之改變。並以此訂定設計之基準。

本研究中海嘯源強度為經過蒐集研究區域之歷史海嘯記錄、海嘯潛勢評估、潮汐資料、風暴潮記錄，設定為潮上高度16.28公尺。

以具備溢淹機制之COMCOT海嘯模式進行海嘯源之重現。海嘯源重現方式以三次孤立波進行。模式每隔40分鐘生成一次孤立波，一共造三次孤立波。並於遠洋、近岸、研究場址設置水位計，以判定海嘯波傳遞符合設計情境。參考研究場址之水位計時序資料，並選定三次

海嘯波期間影響最大之波高及流速。將帶入 Splash3D 模式之入流條件設定為湧潮水深 5.15 公尺，湧潮流速 4.52 m/s。

Splash3D 模擬設置前，先參考 COMCOT 模擬之溢淹範圍及水位計資料，可知海嘯波入侵內陸時，波高最高約 22 公尺，無法將研究場址前方之土丘區域淹沒並因地形影響海嘯湧潮流向研究場址之流向與觀測之排列結構物同走向。因此設定之結構物排列方向與入流方向相同。

首先進行三次海嘯波對結構物之侵襲行為分析。由模擬結果顯示，當海嘯湧潮衝擊結構物時，於 1 號及 2 號結構物前方會因兩結構物之阻滯而導致水流流速由 4.52 m/s 減速至 2.5 m/s，以及水位由 5.15 公尺提高至 6 公尺。因水位提高也導致結構物所受最大總壓分布面積變大及最大動壓由 6000 Pa 增加至 8000 Pa。總壓及動壓主要作用於 1 號及 2 號結構物上游側，其中最大動壓發生於結構物與水面之交界處。上游區域之底床流速於 1 號及 2 號結構物前方流速約 0.5 m/s 之低流速區。由流線圖所提供之資訊顯示，底床之低流速區與紊流區重疊，因此結構物前方可能出現堆積之情況。湧潮經過兩結構物側邊時底床流速由 1.5 m/s 提升至 2.0 m/s，於結構物之兩側可能產生冲刷之行為。下游區域於 27 號結構物後方亦有流速約 0.25 m/s 之紊流區，因此在此區域亦可能發生堆積。

為考量海嘯湧潮夾砂之情況，設定湧潮兩種含砂濃度時之湧潮密度，並比較不同含砂濃度情境下結構物周圍之流場、壓力場之改變。模擬結果顯示，密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 之含砂流體於水位、流場方面與密度 1000 kg/m<sup>3</sup> 之分布情況相同。壓力及動壓方面，密度 1200 kg/m<sup>3</sup> 之情境下壓力及動壓約為清水情況下之 1.2 倍。密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 含砂流體之模擬結果，可觀察出流場之分布與密度 1000 kg/m<sup>3</sup>、1200 kg/m<sup>3</sup> 兩情境時相同。壓力及動壓方面，密度 1500 kg/m<sup>3</sup> 之情境下壓力及動壓約為清水情況下之 1.5 倍。由上述結果顯示於不同含砂濃度之情況下，結構物周圍之流場不受影響，但結構物所受之壓力及動壓會隨密度增大而呈現線性提升。

## 參考文獻

- [1] Abul-Azm, A. G. "Diffraction through wide submerged breakwaters under oblique waves." *Oc. Engng.*, 21, 683-706, 1994.
- [2] Arnason, H., "Interactions between an Incident Bore and a Free-Standing Coastal Structure." PhD dissertation, University of Washington, 2005.
- [3] Bagnold, R. A., "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear." *Proc., Royal Society of London, series A*, Vol. 225, pp. 49-63, 1954.
- [4] Balmforth, N. J. and Liu, J. J., "Roll waves in mud," *J. Fluid Mech.*, Vol. 519, pp. 33-54, 2004.
- [5] Bird, R. B., Dai, G. C., and Yarusso, B. J., "The rheology and flow of viscoplastic materials," *Rev of Chemical Engng.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-70, 1983.
- [6] Borrero, J., Yeh H., Peterson, C., Chadha, R. K., Latha, G. and Katada, T., "Learning from earthquakes: The great Sumatra earthquake and Indian Ocean tsunami of December 26, 2004", *EERI Special Earthquake Report*, 2005.
- [7] Brørs, B., "Numerical modeling of flow and scour at pipelines," *J. Hydr. Eng.* Vol. 125, pp. 511-523, 1999.
- [8] Cabot, W., Moin, P., "Approximate wall boundary conditions in the large-eddy simulation of high Reynolds number flow." *Flow Turb. Combust.* 63, 269-291, 2000.
- [9] Dai, J., Chen, W. and Zhou, B., "An experimental study of slurry transport in pipes," *Proc. of International Symposium on River Sedimentation*, pp. 195-204, 1980.
- [10] Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists" World Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ., 1991.
- [11] Dey, S., Bose, S.K. and Sastry, G.L.N. 1, "Clear water scour at circular piers: a model," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 12, pp. 869-876, 1995.
- [12] Deardorff, J. W., "A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers." *J. Fluid Mech.*, 41(2), 452-480, 1970.
- [13] Ertekin, R. C. and Becker, J. M., "Nonlinear diffraction of waves by a submerged shelf in shallow water." In: Chakrabarti, S. et al. (Eds), *Offshore Mech. and Arctic Engng.* 1996, vol. I Pt. B, ASME, New York, 31-39, 1996.
- [14] Ettema, R., Kirkil, G. and Muste, M., "Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* Vol. 132, No. 1, pp. 33-40, 2006.
- [15] Govier, G. W., C. A. Shook, and E. O. Lilge, "The properties of water suspension of finely subdivided magnetite, galena and ferrosilicon," *Trans. Can. Inst. Mining and Met*, vol. 60, pp.147-154, 1957.
- [16] Heinrich, P., "Non linear water waves generated by submarine and aerial landslides." *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 118, 249-266, 1992.
- [17] Hirt, C. W. and Nichols, B. D., "Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free surface boundaries," *J. Comput. Phys.*, pp.201-225, 1981.
- [18] Huang, X. and Garcia, M. H., "A Herschel-Bulkley model for mud flow down a slope," *J. Fluid Mech.*, Vol. 374, pp. 305-333, 1998.
- [19] Huang, C.-J. and Dong, C.-M., "Wave deformation and vortex generation in water waves propagating over a submerged dike." *Coast. Engng.* 37, 123-148, 1999.
- [20] International Tsunami Survey Team (ITST) "The 26 December 2004 Indian Ocean tsunami: Initial findings from Sumatra," *Western Coastal and Marine Geology*, U.S. Geological Survey, 2005, Internet Resource,

<http://walrus.wr.usgs.gov/tsunami/sumatra05/>.

- [21] Jeyapalan J. K. et al., "Investigation of Flow Failures of Tailings Dams", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 2, pp. 172-189, 1983.
- [22] Johnson, A.M. and J.R. Rodine, "Debris flow. In Slope instability." D. Brunsden and D.B. Prior (editors). John Wiley and Sons Ltd., Chap. 8, pp. 257–361, 1984.
- [23] Julien, P. Y. and Lan, Y., "Rheology of hyperconcentrations", *J. Hydraul. Eng. ASCE*, Vol. 117, pp. 346-353, 1991.
- [24] Kothe, D. B., Rider W. J., Mosso, S. J., Brock, J. S., and Hochstein, J. I.,  
Volume tracking of interfaces having surface tension in two and three  
." Technical Report AIAA 96-0859, AIAA 1996. Presented at the  
34rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.
- [25] Lacey, G., "Stable channels in alluvium," Paper 4736, Minutes of the Proc., Institution of civil Engineers, William, 1930.
- [26] L'Hermite, R., and Turnon, G., "Vibration of Fresh concrete," Technical Publication No. 2. Centre d'Etudes et de Recherches de L'Hermite Industrie des Liants Hydraulique, Paris, 1948.
- [27] Li, F., and Cheng, L., "Prediction of lee-wake scouring of pipelines in currents," *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol. 127, No. 2, pp. 106-112, 2001.
- [28] Liu, K.F. and Mei, C.C., "Slow spreading of a sheet of Bingham fluid on an inclined plane," *J. Fluid Mech.* Vol. 207, pp. 505-529, 1989.
- [29] Liu, P. L.-F., Cho, Y.-S., Yoon, S.-B., and Seo, S.-N., "Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii". Recent development in tsunami research, M. I. El-Sabh, ed., Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 99-115, 1994.
- [30] Liu, P. L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J., Kanoglu, U., and Synolakis, C. E., "Runup of solitary waves on a circular island". *J. Fluid Mech.*, 302, 259-285, 1995.
- [31] P. L.-F. Liu, S-B. Woo, and Y-S Cho. Computer programs for tsunami propagation and inundation. Technical report, Cornell University, 1998.
- [32] Lin, P., and Li, C. W., "Wave-current interaction with a vertical square cylinder." *Ocean Engineering*, 30 855-876, 2003.
- [33] Liu, P. L. F., Wu, T. R., Raichlen, Synolakis, C. E. and Borrero, J. C., "Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses," *J. Fluid Mech*, pp. 107-144, 2005.
- [34] Liu, X. and García, M. H., "A three-dimensional numerical model with free water surface and mesh deformation for local sediment scour," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 203-217, 2008.
- [35] Lohner, R., Yang, C., and Onate, E., "On the simulation of flows with violent free surface motion", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 195, pp. 5597-5620, 2006.
- [36] Losada, I. J., Silva, R., and Losada, M. A., "3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters." *Coast. Engng.*, 28, 229-248, 1996.
- [37] Mao, Y., "The interaction between a pipeline and an erodible bed," PhD dissertation, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1986.
- [38] Major J. J., and Pierson T. C., "Debris Flow Rheology: Experimental Analysis of Fine-Grained Slurries," *Water Resources Research*, Vol. 28(3), 841-857, 1992.
- [39] Mei, C. C. and Yui, M., "Slow flow of a Bingham fluid in a shallow channel of finite width," *J. Fluid Mech.*, Vol. 431, pp. 135-159, 2001.
- [40] Melville, B. W., and Raudkivi, A. J., "Flow characteristics in local scour at bridge piers," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 373-380, 1977.
- [41] Ng, C. and Mei, C.C., "Roll waves on a shallow layer of mud modeled as a power-law fluid," *J. Fluid Mech.* Vol. 263, pp. 151-183, 1994.
- [42] O'Brien, J. S., and Julien, P. Y., "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." *Proc. of the Specialty Conference on Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris Flow Hazards in Utah*, Utah Water Research Laboratory, pp. 260-279, 1985.
- [43] O'Brien, J. S. et al., "Two dimensional water flood and mudflow simulation", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No.2, pp.244-261, 1993.
- [44] O'Brien, Jim S. and Pierre Y. Julien, "Laboratory Analysis of Mudflow Properties," *Journal of Hydraulic Engineering* Aug 1988, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887, 1988.
- [45] O'Brien, J.S. and Julien, P.Y., "On the importance of mudflow routing," *Proceedings of the 2nd International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation*, Taipei, Taiwan, Aug. 16-18, pp. 677-686, 2000.
- [46] Olsen, N. R. B., and Melaaen, M. C., "Three-dimensional calculation of scour around cylinder", *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 119, No. 9, pp. 1048-1054, 1993.
- [47] Olsen, N. R. B., and Kjellesvig, H. M., "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth," *J. Hydraul. Res.*, Vol. 36, No. 4, pp. 579-590, 1998.

- [48] Pope, S. B., "Turbulent flows." Cambridge University Press, 2001.
- [49] Richardson, J. E. and Panchang, V.G., "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers," *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 124, No. 5, pp. 530-540, 1998.
- [50] Rider, W. J. and Kothe, D. B., "Reconstructing Volume Tracking," *J. Comp. Phys.*, 141, 112-152, 1998.
- [51] Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J. and Michelsen, J., "3D mathematical modeling of scour around a circular pile in current," *Proc., 7th Int. Symposium on River Sedimentation and 2nd Int. Symposium on Environmental Hydraulics 98*, Hong Kong, 1999.
- [52] Savage, S. B., and S. McKeown, "Shear stress developed during rapid shear of concentrated suspension of large spherical particles between concentric cylinders," *J. Fluid Mech.*, vol. 127, pp. 453-472, 1983.
- [53] Shao, S. and Lo, E. Y. M., "Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface," *Advances in Water Resources*, Vol. 26, pp. 787-800, 2003.
- [54] Sheppard, D.M., Odeh, M. and Glasser, T., "Large scale clear-water local pier scour experiments," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 130, No. 10, pp. 957-963, 2004.
- [55] Smagorinsky, J., "General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic equations. Mon." *Weather Rev.* 91, 99-164, 1963.
- [56] Tang, C. J. and Chang, J. H., "Flow separation during solitary wave passing over submerged obstacle," *J. Hydr. Engng.* 124, 742-749, 1998.
- [57] Ting, F. C. K. and Kim, Y.-K., "Vortex generation in water waves propagation over a submerged obstacle," *Coast. Engng.* 24, 23-49, 1994.
- [58] Titov, V., A. B. Rabinovich, H. O. Mofjeld, R. E. Thomson, and F. I. Gonzalez., "The global reach of the 26 December 2004 Sumatra tsunami", *Science* 309, 2045-2048, 2005.
- [59] Vincent, S., Randrianarivelo, T. N., Pianet, G., and Caltagirone, J. P., "Local penalty methods for flows interacting with moving solids at high Reynolds numbers", *Computers & Fluids*, 36, pp. 902-913, 2007.
- [60] Wang, X., and Liu, P. L.-F., "A numerical investigation of Boumerdes- Zemmouri (Algeria) earthquake and tsunami". *Comput. Model. Eng. Sci.*, 10(2), 171-184, 2005.
- [61] Wang, X., and Liu, P. L.-F., "An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami". *Journal of Hydraulic research*, 44 (2), 147-154, 2006.
- [62] Wang, X., "User manual for COMCOT version 1.7, first draft". Cornell University, 59 pp, 2009.
- [63] Zhao, M., Cheng, L. and Zang, Z., "Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents," *Coastal Engineering*, Vol. 57, pp. 709-721, 2010.
- [64] Zhao, Z. and Fernando, H. J. S., "Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler-Euler coupled two phase model," *Env. Fluid Dyn.*, Vol. 7, No. 2, pp. 121-142, 2007.
- [65] Zhuang, F. and Lee, J. J., "A viscous rotational model for wave overtopping over marine structure." *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, pp. 2178-2191., 1996.
- [66] 杜昀, 「以移動球法量測土石漿體及新拌混凝土之流變性」, 博士論文, 國立雲林科技大學工程科技研究所博士班, 2004。
- [67] 林銘郎, "土石流災害之地質環境探討", 土石流地質調查與防災對策研討會論文集, 第 6-1-6-28 頁, 2003。
- [68] 余昌益, 「高含砂水流流變參數之實驗研究」, 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文, 1997。
- [69] 周憲德, 「石門水庫淤泥之流變特性」, 國立台灣大學土木工程學系碩士論文, 1984。
- [70] 沈長壽, 「幾種毛管黏度計泥漿流體流變試驗的比測」, 泥漿體流體比測組, 山地研究, 第八卷, 第三期, 第 137-146 頁, 1990。
- [71] 詹錢登, 「土石流的發生與運動」, 土木技術第一卷第一期, 第 132-144 頁, 1998。
- [72] 詹錢登、余昌益、吳雲瑞, 「含砂濃度對含砂水體流變參數的影響之初步研究」, 第一屆土石流研討會論文集, 第 179-190 頁, 1997。
- [73] 趙啟宏, "土石流之數值模擬及流變參數特性之探討", 碩士論文, 國立台灣大學土木工程學研究所, 2004。
- [74] 吳政貞, 「土石流流況數值分析-以溪頭為例」, 碩士論文, 國立台灣大學土木工程學研究所, 2003。

# 核種遷移參數實驗方法之精進及遷移機制研究

## On the study of improving the radionuclide migration experiment technique and their transport mechanism

計畫編號：104-NU -E-007 -005 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蔡世欽

e-mail：[sctsai@mx.nthu.edu.tw](mailto:sctsai@mx.nthu.edu.tw)

計畫參與人員：陳建旭, 劉衛蒼

執行單位：國立清華大學原子科學技術發展中心

### 摘要

本研究為兩年的研究計畫，主要是整合過去國內外核種遷移參數室內實驗室之最新精進分析技術，以克服高吸附性核種長時間耗時遷移實驗之困難。此外，本研究利用同步輻射中心提供之 XANES(X 光吸收近邊緣結構)及科技部貴儀中心的 X 光光電子能譜儀(XPS)等材料分析技術，分析吸附於地質材料的核種價態，以進一步了解核中遷移過程中的遲滯特性及反應機制。第一年初步的成果顯示：XANES 及 XPS 的光譜分析可以鑑別吸附於地質材料不同氧化態的鈾核種，進一步瞭解核種與固相材地質材料之間反應的基本特性，對於高放射性廢棄物處置安全評估使用核種遷移參數時提供十分重要的參考依據。

關鍵詞：核種遷移、吸附、遲滯。

### Abstract

The works of this two-year research project are to conform the improved analysis techniques of measuring coefficients of radionuclides migration in laboratory to overcome the difficulties of radionuclide with high absorption which is long-term and time consuming. In addition, we develop XANES (X-ray absorption near edge structure) technique provided from NSRRC and XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) from Instrumentation Center/MOST to study the valance of nuclides adsorbed on the materials to further investigate the reaction mechanism of the nuclide migration process. The results of this study in the first year showed that XANES and XPS techniques could analyze and differentiate the valances of Uranium adsorbed on geological materials. These results showed very important fundamental characters of nuclides/mineral reaction, which would be valuable references for the usage of radionuclide migration parameters to the evaluation of high-level radioactive wastes disposal safety.

Keywords: Radionuclide migration, adsorption, retardation

### I. 前言

室內實驗室量測核種擴散係數大都是以穿透擴散實驗(through-diffusion, TD)為主，這個方法可以量測核種在多孔地質材料中的有效擴散係數  $D_e$  及遲滯因數，然而整個穿透擴散過程需要長達一年以上甚至數年，方能得到穩態擴散曲線進行分析，對於 U, Np, Pu, Am, Cm

等鈾系核種，這些核種價數多，對氧化還原環境極為敏感、生成的化合物形態複雜且很難量測，遷移速度又極為緩慢，在維持實驗條件及度量方面都會面臨困難。日本原子力研究開發機構(NUMO)在平成 24 年(2012 年)的研究報告中(參考文獻 1)，彙整核種遷移參數實驗及模式研究實施方法，提出參數實驗方法精進與核種遷移機制分析的整合建議，如表 1 所示，表中所提擴張型 TD 及擴張型 RD 就是修正後的 TD 擴散實驗技術。Zhang(參考文獻 2), Chen(參考文獻 3)等人則進一步提出理論模式及解析解，透過這些方法，可以克服高吸附性，擴散緩慢的核種長時間(長期)耗時遷移實驗之困難及數據分析的不確定性。

此外，核種遷移參數大都是分析核種在液相的濃度變化來推算獲得，然而此變化的原因及反應機制則是需要透過各種地質材料分析技術來進一步了解。過去相關研究利用 X 射線繞射分析儀(XRD)、電子顯微鏡(SEM 及 EDS)等對於固相地質材料的分析已經有初步基礎，本研究擬進一步利用電腦同步輻射中心提供之 X 光吸收近邊緣結構(XANES)及科技部貴儀中心的 X 光光電子能譜儀(XPS)，分析吸附於地質材料核種的價數，進一步了解核種遷移過程中的遲滯特性及反應機制，以期將核種遷移實驗參數模式化。因此本研究擬建立這些最新技術，應用在核種遷移機制分析。

表 1 日本 NUMO 針對吸附性高低不同的核種所建議的擴散實驗方法(參考文獻 1)

| 収着性<br>( $m^3/kg$ )                       | 低～中<br>( $K_d \sim 0.1$ )                                             | 中～高<br>( $K_d \sim 1$ )     | 高<br>( $K_d \sim 10$ )     |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
|                                           | TD法                                                                   |                             | ID法                        |
| 適用範囲                                      | 拡張型TD法<br>3相(RD + BI + profile)                                       |                             | 拡張型RD法<br>2相(RD + profile) |
|                                           | ・試料厚さ/試験期間の調整      ・フロア取得法の高度化                                        |                             |                            |
| 核種<br>環境条件                                | HTO/I/Se<br>【塩濃度】                                                     | Na/Cs/Sr<br>Np(V)<br>【炭酸濃度】 | Ni<br>Am<br>【pH】           |
| ・低～中収着性: 拡張型TD法を適用<br>- 試料厚さ調整により適用範囲を拡大  | 拡張TD/RD法により、多様な核種、環境条件下でのデータ取得・評価が可能                                  |                             |                            |
| ・中～高収着性: 拡張型RD法を適用<br>- 薄層削りだし法により適用範囲を拡大 | □ 高収着性核種、還元条件の手法検証<br>□ TD/RD、3相/2相の手法選択の考え方<br>□ データ不整合を改善する高度化モデル適用 |                             |                            |

### II. 主要內容

本研究為兩年期研究計畫，以鈾核種為分析核種，使用六價  $UO_2(NO_3)_2$  ICP 分析標準溶液，懷俄明膨潤土(MX-80)為材料進行實驗，建立上述核種遷移參數室內實驗最新精進分析技術，以克服高吸附性核種長時間(長

期)耗時遷移實驗之困難，並利用 XANES 及 XPS 等技術，以進一步了解核種遷移過程中的遲滯特性及反應機制。其中第一年的工作主要進行 XANES 及 XPS 分析，以蒙脫石(montmorillonite)純礦物材料進行測試，建立含有不同正六價及正四價鈾氧化物標準樣品的光譜，然後再以本研究各種材料的吸附樣品來進行比對。而 TD 穿透擴散實驗方法的精進及驗證，需要試樣、前處理、實驗溶液備製等前置工作，穿透擴散實驗也需要較長的實驗時間，這部份實驗正在進行中，實驗成果預期在第二年的成果報告中提出。

### III. 結果與討論

#### 3.1 同步輻射 X 光 XANES 分析結果

同步輻射 X 光吸收的原理為：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( $\mu(E)$ )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(如圖 1)，本研究應用的分析區為前段吸收邊緣部分，因此稱之為 X 光吸收邊緣結構(X-ray Absorption Near Edge Structure, XANES)。此區段 X 光能譜範圍由吸收原子之吸收邊緣 0 至 40eV 之間，因 XANES 數據與吸收原子束縛力及其周圍原子排列有關，可得知放射性原子與鄰近吸附材質之原子間鍵結數目及鍵結角度之間的關係，以及原子之價數等。

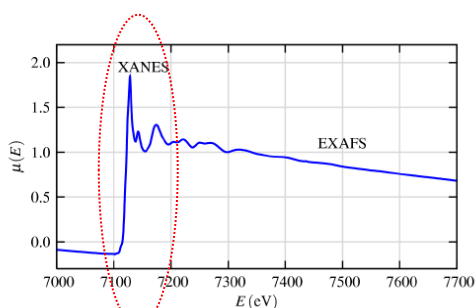


圖 1 X 光吸收光譜圖(參考文獻 4)

##### 3.1.1 鈾核種吸附分析結果

將含鈾離子溶液與膨潤土(MX80)振盪混合 7 天後，利用國家同步輻射研究中心 16A 光束線實施鈾核種 XANES 分析，含鈾 L1、L2、L3 能階之吸收曲線如圖 2(a)所示，將 L3 能階之 XANES 光譜圖一階微分後如圖 2(b)所示。由圖 2(b)得知含吸附於膨潤土之鈾核種，與標定用化合物 CsCl、CsNO<sub>3</sub> 之氧化態價數無差異，均為一價。

##### 3.1.2 鈾核種吸附分析結果

將含鈾離子溶液分別與蒙脫石、膨潤土(MX80)振盪混合 7 天後，利用國家同步輻射研究中心 7A 光束線實施鈾核種 XANES 分析，正規化 XANES 光譜圖如圖 3(a)三所示，取正規化後吸收曲線躍升處其斜率最大位置之

能量點，將吸收曲線一階微分，取頂點處即是吸收邊緣能量位置，如圖 3(b)所示，利用已知氧化鈾 UO<sub>2</sub>(17,166 eV)、UO<sub>3</sub>(17,168 eV)標準品吸收邊緣能量位置，來標定含鈾之蒙脫石及膨潤土吸收邊緣能量位置。由圖 3(b)結果顯示：鈾吸附於膨潤土其價數保持六價氧化態；然鈾吸附於蒙脫石則有還原態發生，因此價數介於四價及六價鈾之間，後續將由吸附前後的 pH-Eh 值變化進一步探討其機制。

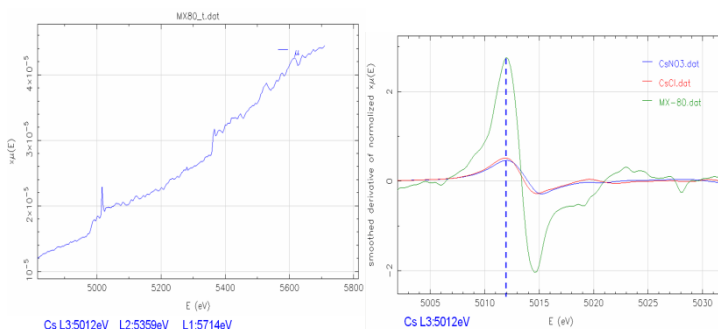


圖 2 MX-80 吸附鈾 XANES 光譜 左:(a)正規化 右:(b)一階微分

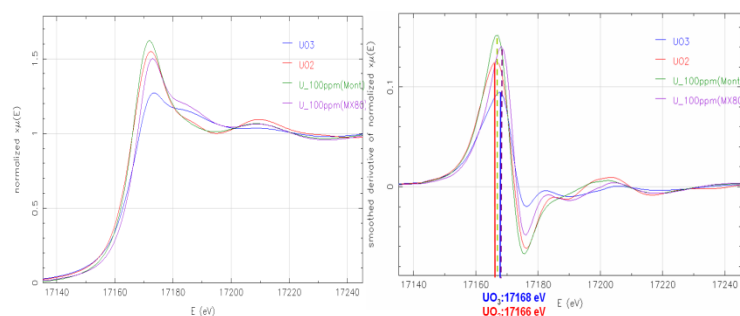


圖 3 材料吸附鈾 XANES 光譜 左:(a)正規化 右:(b)一階微分

#### 3.2 X 光光電子能譜(XPS)分析結果

X 射線光電子能譜 (X-ray photoelectron spectroscopy; XPS) 則是利用 X 光射線照射固態表面，產生游離發射光電子，量測光電子的動能，並回推該電子的束縛能(binding energy)，將橫坐標設為光電子的束縛能，縱坐標設為相對強度 (c/s) 即為光電子能譜圖，詳如圖 4 所示。用於測量材料表面以下 1 奈米到 10 奈米範圍之逃逸出光電子，藉此研判發射光電子之原子元素種類及其化學態(參考文獻 5)。

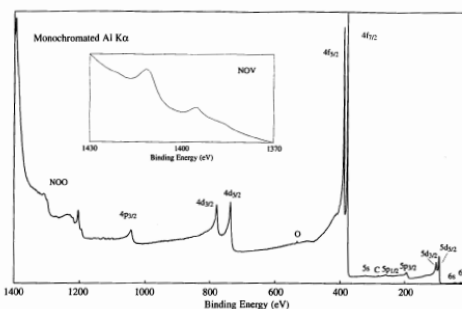


圖 4 鈾之 X 射線光電子能譜圖

為驗證 XANES 的分析結果，將這些分析樣品另以科技部貴儀中心的 XPS 進行光電子能譜分析，鑑定吸附核種的吸附價數，結果如圖 5~圖 7 所示。圖 5 為膨潤土吸附鈉的光電子能譜，以 Cs3d5 的 724.151eV 能譜為分析基準，比對 XPS 資料庫之 CsCl (723.7-724eV)、CsOH(724.8eV) 等一價離子態化合物符合，因此確認吸附於膨潤土的鈉離子為一價。

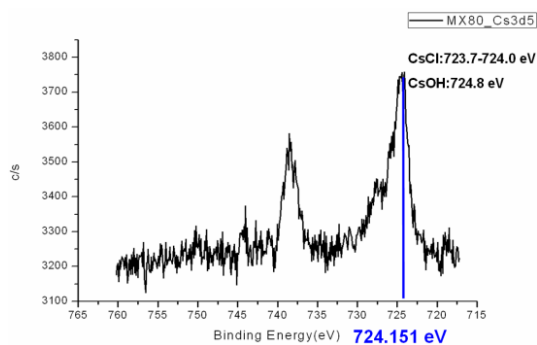


圖 5 含鈉膨潤土 XPS 光譜圖

含鈉之膨潤土及蒙脫石 XPS 分析，其 U4f7 能譜圖分別如圖 6 及圖 7 所示，比對 XPS 資料庫得知四價  $UO_2$  介於(379.2-380.6eV)、六價  $UO_3$  介於(380.9-381.9eV)，可得知由圖 6 顯示含鈉蒙脫石之鈉離子價數介於四價鈉及六價鈉之間，另由圖 7 得知含鈉膨潤土之鈉離子價數接近六價鈉，XPS 檢測結果與同步輻射 XANES 分析結果是一致的。

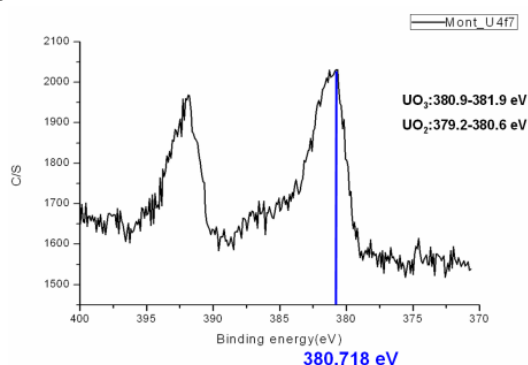


圖 6 含鈉蒙脫石 XPS 光譜圖

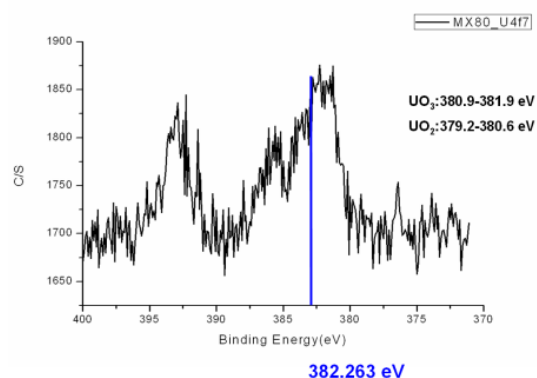


圖 7 含鈉膨潤土 XPS 光譜圖

#### IV. 結論

核種遷移是評估核廢料處置是否安全非常關鍵的課題。本研究為兩年的研究計畫，以精進核種遷移實驗

及分析技術為目標。在第一年研究成果中，探討核種於地質材料的吸附物種及吸附機制。初步結果顯示：對典型一價鈉核種的吸附，XANES 及 XPS 均一致顯示吸附結果為一價物種；對可能形成不同價數化合物的鈉核種，XANES 及 XPS 的光譜也可以進行鑑別，這些分析成果對於進一步探討核種遷移過程中的遲滯特性及吸附反應，提供相當重要的參考資訊。

#### 參考文獻

- [1] 独立行政法人日本原子力研究開発機構，地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム化学影響評価高度化開発報告書，平成 24 年 3 月。
- [2] Zhang M., et al, 2006, "Determining the transport properties of rock specimens using an improved laboratory through-diffusion technique. In: Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 932, 135-142.
- [3] Chen, C.L., et al, 2014, "Intercomparison of diffusion coefficient derived from the through diffusion experiment using different numerical methods," J Radioanal Nucl Chem 300:393-407.
- [4] Fundamentals of XAFS. Matthew Newville. Consortium for Advanced Radiation Sources. University of Chicago, Chicago, IL. Revision 1.7 July 23, 2004。
- [5] 汪建民，材料分析，民國八十七年。

# 核電廠除役之放射性物質污染擴散之分析研究

## Investigation on the diffusion of radionuclide contamination for the decommissioning of nuclear power plant

計畫編號：MOST 104-NU-E-007-007-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：馮玉明

e-mail：ymferng@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：溫世烽、徐仲彥、林志宏

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

### 摘要

數值模擬的計算評估對於如何有效預測放射核種在廠內的擴散遷移扮演著相當重要的角色，其中理論模式、污染源之假設條件、廠區內的幾何模型等，將對於計算結果之準確性有著相當程度的影響。本研究將分析探討核電廠運轉期間所產生的放射核種可能於除役期間因意外或操作不慎而導致滲入地底及土壤，並藉由地下水之流動與擴散而造成大範圍的污染。為了解其放射核種於滲漏後對廠址及地下水文之影響程度，本研究擬藉由數值模擬分析技術，進行放射核種對廠內環境之影響進行嚴重性評估。以期藉由所發展的技術進行污染源之追溯、污染範圍之預測，並作為核電廠除役時之污染評估依據。

關鍵字：核電廠、除役、數值模擬、地下水、核種擴散

### Abstract

The estimate of numerical simulation plays an important role and has quite influence on analyzing the diffusion phenomenon of radionuclides through groundwater in a nuclear power plant, especially for theory, assumptions of pollution sources, geometry of plant, etc. In this study, the numerical simulation would be employed on predicting the effects of the radionuclides diffusion during the decommissioning and establish an analysis model of diffusion transport to derive inversely the range and related locations of pollution sources. Meanwhile, one database based on the results of calculations would be performed. This investigation can not only predict the concentration distribution of the radionuclides and the seriousness of the pollution sources diffusing at nuclear power plant, but also assist the plant staff how to treat the problem during the decommissioning process.

Keywords: Nuclear power plant, Decommissioning, Numerical Simulation, Groundwater, radionuclide diffusion

## I. 前言

### I.1 研究背景

土壤、含水層水流及地下水污染擴散方面等之議題，在環保意識抬頭下持續受到各界的關注。對於核能電廠所需關注之可能引發污染源擴散事件如核廢料貯存處置不當、發生類似日本福島核電廠災害等，進而導致大量之放射性污染物質釋放至土壤及大海中。而核能電廠在

其運轉期間，可能會有部分放射性物質釋放到廠區內土壤，進而有可能藉由地下水流至廠外，影響外界環境。過去二十年中，在美國的核能電廠曾發生多起放射性核種不當外釋事件，這些都是非預期發生且不被允許的。在這當中，最多被發現的放射性核種為氫、銻、鎳等。而核能電廠中放射性核種洩漏之組件為冷凝系統管線，用過燃料池，循環水沖放管等。此外，當核能電廠決定進行除役時，除役過程更加勢必會產生大量放射性廢棄物，雖然大部分放射性廢棄物可以經由除污與可靠的量測分析後進行外釋，或依照其放射性活度高低分別貯存於合法的廢棄物貯存場所，但仍有部分放射性物質可能會經由大氣擴散、地下水流遷移、甚至經由植物體進入食物鏈中，影響環境輻射，對人體也是一種潛在威脅。此外，核能電廠於除役期間放射性物質亦有可能在意外或人為操作不慎時釋出，因此將可預期放射性核種有可能藉由地下水之流動而造成大範圍的廠內污染。因此，對於放射性核種及污染源的特性、地下水流動方向與擴散遷移等之相關資訊，對於核能電廠而言如何汲取國內外於地下水防護與建立相應機制之經驗，有效建立地下水擴散污染防治之分析技術將扮演著相當重要的角色。因此，本研究之主要方法為採用模擬計算方式來進行有效的預測核種外釋，包含其污染範圍與核種種類。同時，本研究之成果可作為核電廠地下水評估之參考基礎。

### I.2 文獻回顧

在地下水系統中，地下水之流動為影響污染物傳輸之主要原因。因此，除役期間之地下水防護問題將與地下水傳輸重要參數如水頭高度，土壤參數，溶質傳輸特性等有關。而不同類型之計算程式針對不同問題會有適用性之問題，本研究亦將整理地下水傳輸相關之模式做為數值模擬軟體選用之參考。

在國外相關之地下水污染研究案例中，美國核能管制委員會(Nuclear Regulation Commission, NRC)於2006年提出一份關於放射性液體不當外釋(Inadvertent release)等污染事件之報告[1]。報告中所提之不當外釋係指非預期、非計畫、未經允許的放射性液體釋出至環境中。該研究報告指出美國核能電廠於1986年至今已發生數起因管路或桶槽洩漏，不當外釋所造成的地下水污染事件中，所偵測得知核種多為氫；而鎳-63、銻-137等其他放射性核種大多污染及滲漏至冷凝系統相關管線、用過燃料池(Spent Fuel Pool, SFP)與循環水沖放管線(Circulating water blowdown line)等。表2-1為美國核能

電廠放射性液體洩漏案例紀錄，包含洩漏發現時間、洩漏來源、地下水污染偵測出之核種。實際上，在美國核能電廠地下水放射污染管制與相關之法規，並無針對地下水防護訂出明確的要求規範。美國聯邦法規(Code of Federal Regulation, CFR)對核能電廠放射性物質排放或監測的管制法規，於 10 CFR 20.1501 中要求核能電廠須在放射污染時做合理的調查，以評估核能電廠放射性污染的風險。在 10 CFR 50.75(g) 中，則要求核能電廠需於滲漏或異常事件而導致放射性物質污染擴散時，須留存相關紀錄，以確保電廠除役後的安全。但在相關之管制法規下，並無要求電廠人員執行廠區內大範圍且例行之地下水監測。僅在可能發生較大機率放射性核種外釋的地區周圍設置固定取樣點，其他外釋機率較小的區域僅設定較少或無之監測點。然而，因發生數起放射性核種不當外釋的地下水污染事件，因此美國電力研究所(Electrical Power Research Institute, EPRI)於 2008 年制定了 EPRI-1016099 號報告「核能電廠地下水防護指引(Groundwater Protection Guidelines for Nuclear Power Plants)」[2]，作為各電廠之地下水防護方案規範、此指引報告亦可作為國內核能電廠於地下水防護之參考。以下簡述列幾項國外核電廠核種洩漏案例[3]。

Vermont Yankee 核電廠(VYNPP)位於美國 Vermont 州的 Vernon County，緊鄰康乃迪克河(Connecticut River)。VYNPP 設有一部 550MW BWR 機組，於 1972 年 2 月 28 日取得運轉執照，目前由 Entergy Nuclear Operations, Inc.(ENO)負責執行其運轉作業。VYNPP 於 2010 年於地下水中發現氚污染後，即通報 USNRC 等相關管制單位，並展開一系列的調查與整治工作，並確定滲漏源位於進步型排氣系統(Advanced Offgas System, AOG)。

VYNPP 基於 NEI-0707 之地下水防護協議，於 2007 年 11 月於廠區內設置三個水井，其編號分別為 GZ1、GZ3 及 GZ5，且持續進行水井監測及水樣分析[4-6]。起初 VYNPP 並未發現水中有任何的異常現象與濃度，直到 2009 年 11 月 17 日的水樣分析結果顯示，初步判定編號 GZ3 水井的含氚濃度異常提升至 26 Bq/L，並於後續階段判定其數據確認為 570 到 640 Bq/L 之間。因此，VYNPP 於 2010 年 1 月 7 日緊急通知 Vermont 公眾服務部、健康部、USNRC、及鄰近的州政府(New Hampshire、Massachusetts)；同時，其 VYNPP 內部亦召集環境監測、水文學、化學、輻射防護、鑽井工程等相關領域的專家們組成調查研究小組，並將環境監測的範圍擴大至可能潛在的水井取樣點及河川流域。VYNPP 對於可能為洩露源頭的系統、組件或結構物、新設水井位置的配置及定位等進行詳細確認及檢視，最終確認 AOG 的地下管線通道為此次滲漏事件之來源點。其主要洩露核種為氚氣，經由地下管線洩露後，在廠區地下水含水層隨地下水流至其他各處。

VYNPP 其研究另特別在 AOG 設施至 Connecticut River 之間，設置水井與並對地質分布進行調查。VYNPP 所在位置之地質分布從表面天然土層向下，有粉土層、灰色粉土層、細粉土層、岩盤，於其下方即為地下水含水層。監測水井深度達至粉土層，而 Construction Office Building well 深度達於含水層內，其目的在監測深層地下水是否受到污染。經研究調查顯示，可看出水井分布大致集中在 AOG 設施且沿著 Connecticut River 上，

總計 VYNPP 廠區內共有 32 口監測井，並持續取樣分析地下水含氚的濃度。整治措施主要是以監測井抽水的方法，將含有氚物種的地下水抽至地表上進行貯存及處理。在 2010 年 1 月分析結果顯示，地下水含氚的濃度已降低，距離廠區北方 150 ft 的監測井也已不受 VYNPP 滲漏之影響。此種地下水抽水作業持續進行至 2011 年 1 月 21 日，抽出的總量約達 314,300 加侖(gallons)至地表貯存庫內，並進行後續的處理作業。被污染的土壤中因偵測出低量鈾、鋇、鈷、鋅等放射性核種，這部分也已被整體挖除處理。此事件 USNRC 曾指出，若 VYNPP 依照 GPI 建立完整的 CSM 並遵守協議，全面監測廠區地下水，將可更早一步發現此次的滲漏。

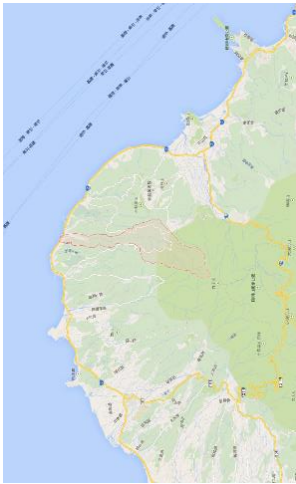
國內核能電廠及其附近之地質、地下水文與幾何形狀等相關之有效資訊因核電廠建廠已久，既有的資訊並不足，若要取得充分的相關實質數據，則必須進行實地勘驗、進行地下水監測、各項紀錄實測與維護等一系列必要的工作。再加上部分半衰期較長之放射性核種，其可能的遷移路徑預測以及地下水流方向判定方面，所獲得之數據需費時冗長，且現實狀況下除了所需之較高成本來設置實驗設備，並無法以實驗模擬長達數十年，甚至於數百年的狀態預測。因此，對於污染源的性質、地下水流動方向與擴散遷移的預測等，應用數值模擬之分析技術將扮演著相當重要的角色[7-12]。同時，對於不同污染源的大小、位置等假想情境，理論模式與邊界條件的選定對於計算結果的準確性亦有相當程度的影響[13,14]。然而，實際地質特性、土壤層結構、地下水水文之物理模式相當複雜，若以數值模式來描繪完整之物理機制，將會消耗過多之電腦計算資源。Fabien 等人[15]則是將土壤層以多孔隙材質為假設條件，並建立一三維模型同時以銕-129 為放射核種，探討放射核種在多孔隙材質中的擴散行為。故對於核能電廠於除役作業時，如何避免放射性核種因故導致污染物滲入土壤或經地下水流外釋至核電廠內及外界環境，數值模擬對於污染源擴散的預測技術與能力將是重要的關鍵之一。如何有效地預期與防治放射性物質之污染擴散，將是核電廠除役工作重要的課題。因此，本研究以地下水流動與污染傳輸理論為基礎，透過適當之假設條件及水文、地質、流況等邊界及初始條件之設定，以數值模擬方法建立核電廠除役時放射性物質於廠內之污染擴散模式與分析技術，以增進未來核電廠除役作業之除污與場址復育規劃工作。

核電廠除役之最終目標即是解除管制，讓廠區土地在除役完成之後能轉做其他用途，而要達成此一目標，除了須先瞭解廠區內建築物及土壤內所殘留的放射性活度外，放射性污染擴散模式可藉以評估核電廠除役後所殘留的放射性物質對環境輻射所造成的影響。因此，放射性物質之擴散傳輸模擬不僅能增進核電廠地下水文與幾何形狀相關資訊不足之處，以提昇核種擴散遷移、地下水流況掌握之分析能力，並可加強核電廠內外之安全分析準確性之應用範圍。因此，國內之核能電廠人員、核能管制單位、國家級實驗室等，更應積極地進行相關實地探勘、放射性物質測量並結合數值模擬模式發展與校驗工作，以彌補實際量測困難與相關地質、地下水文等資訊缺乏之處。以期數值模擬分析之結果能實際應用於既有電廠的運轉情況與安全分析、核電廠進行除役相

關工作與改進等，並能在核能電廠相關放射性物種擴散污染之分析與實際執行除污工作時，扮演重要的角色。

### I.3 核一廠區域地形、水文特性

核能電廠的場址位置、地形與地質特性、水文特性皆對於地下水關係到電廠可能受到的地震危害，也關係到電廠遭受水文相關危害例如暴雨與洪水等的程度，也與颱風的風力危害有關。核一廠位於新北市石門區乾華里內，石門區往東緊鄰金山區、西連三芝區，南面則與臺北市士林區相接。地處台灣的最北端，距離台北約 28 公里，為一背山之海岸地區，如圖 I-1 所示，圖 I-2 與圖 I-3 分別為核一廠廠址區域以及等高線圖。核一廠區地處乾華溪與小坑溪流下游谷地，中間為一山嶺將廠區區隔為東西兩部分，由乾華隧道貫穿東西廠區。根據地理屏障與水文特性，可概分為乾華區與小坑區，前者為發電區所在，後者為行政支援與放射實驗室所在，兩區之間以乾華隧道為主要聯絡通



道。

圖 I-1 乾華里與台灣

圖 I-2 核一廠廠址區域  
相關位置圖

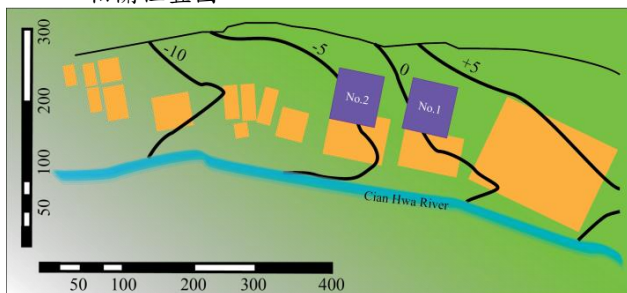


圖 I-3 核一廠之等高線圖

依據核一廠最新修訂之地下水防護案[19]，核一廠址座落於乾華溪狹窄的峽谷底部，砂石和粗礫石沖積層之基岩上。基岩幾乎為平緩，中間間隔為砂質頁岩及砂岩等。土壤層受溪谷侵蝕至基岩。由鑽探和震波探測的結果顯示，砂和礫石厚度往下游增加，其厚度約從 10m 至 18m 不等。本廠廠區有兩層地下水區域存在，一為上部之自由區域，另一為下部之拘限區域。上部區域主要為砂石所組成，這些土壤均為高滲透性的[19]。下層含

水層位於桂竹林層內，由一系列透水之砂岩與不透水之頁岩所組成。依據以往鑽探岩心紀錄及相關文獻顯示，本區大致位於一大型向斜構造之西北翼，地下之岩盤走向大致呈北 60 度東，向東南傾斜約 12 度，以交角不整合與上覆大致呈水平狀態之火山角礫岩相接觸。地質鑽探岩心顯示，核一廠停車場區附近岩層傾角平緩，而南側油槽區附近岩層傾角較陡，約為 40 度左右。

水文特性方面，廠區地下水位約位於地表下 1.5~3.5 公尺，依據距核一廠北方約 2 公里之尖鹿里測站之潮位記錄，此區平均高潮位為 1.59 公尺，平均低潮位為 0.22 公尺，最大潮差為 2.66 公尺，平均潮差為 1.31 公尺。水力傳導係數方面，核一廠覆蓋層之水力傳導係數平均為  $3.81 \times 10^{-5}$  m/s，岩層之水力傳導係數平均為  $2.91 \times 10^{-6}$  m/s，由此顯示覆蓋層及岩層之滲透性均高。

### I.4 研究目的

本研究將分析探討核能電廠運轉期間所產生的放射核種可能於除役期間因意外或操作不慎而導致滲入地底及土壤，並藉由地下水之流動與擴散而造成大範圍的污染。為瞭解其放射核種於滲漏後對廠址土壤以及地下水文之影響程度，本研究擬藉由汙染傳輸分析方法，進行放射性核種對廠內環境之影響進行評估，並將建立相關的材料特性與擴散遷移資料庫，以作為後續模型之參考依據。

由於計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析方法在進行長時間的模擬時需考慮時間間隔(Time step)的大小，較小的 Time step 能得到較高的準確度，然而也相對費時，於計算成本上耗費太高。但若選擇較大的 Time step 則結果會相當不準確。事實上，對於地下水所需要的長時間模擬，CFD 分析方法所採取的計算方式，即便選擇大的時間間隔(Time step)也需耗時相當可觀的時間。故在模擬程式的選擇上，本研究擬採用目前較廣泛應用於擴散分析之計算程式：TOUGH 2 (Transport of Unsaturated Groundwater and Heat)。此計算工具在處理這類問題時，其做法主要即針對擴散來處理，其已優於一般 CFD 軟體，故在使用上較為合理。

本研究將藉由使用蒐集的文獻資料應用於分析軟體適用性評估之驗證，以確定 TOUGH 2 結果與分析技術的精確度與應用性。並進行核能電廠放射核種傳輸的分析模式建立，建立出一套可供評估核種質傳的分析模式，藉以進行核能電廠放射核種於廠址內的污染擴散現象。

## II. 主要內容

本研究探討的流體在岩層中之流動行為，而地下水流之基本原理為達西定律(Darcy's Law)與流體連續方程式結合。且其基本的假設為孔隙度不隨外力增加而改變，且流體密度亦不受壓力之影響。以下將簡述重要的理論與定義。

### II.1 達西定律

達西定律(Darcy's law)如(II-1)式所示：

$$\bar{q} = K \bar{I} \quad (\text{II-1})$$

上式中

$\bar{q}$  = 達西速度(或稱滲流速度，單位體積流量)

K = 水力傳導度

I = 水力梯度

更廣義的達西定律公式則可表示為：

$$\tilde{q} = -\frac{k}{\mu}(\nabla p + \rho g \hat{k}) \quad (II-2)$$

其中，

k 為滲透係數、 $\mu$  為動力黏滯係數、 $p$  為流體壓力、 $\rho$  為流體密度、 $g$  為重力加速度。

## II.2 流體連續方程式

流體運動連續方程式可表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho q) + S = -\rho[\alpha(1-n) + n\beta] \frac{\partial p}{\partial t} \quad (II-3)$$

其中，

S 代表產生源或損失源、 $\alpha$  為含水層壓縮係數、 $n$  為孔隙率、 $\beta$  為流體壓縮係數。

其中，

$$\alpha = \frac{\partial n}{\partial p} \quad (II-4)$$

$$\beta = \frac{n}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \quad (II-5)$$

## II.3 溶質傳輸基本理論

當汙染物由廢棄物貯存設施中被釋出後，該汙染物及往下移動，達地下水面後，則依水力坡降的方向而有橫向的擴散。地下水汙染傳輸程序主要有四個過程，分別為對流(Advection)、分散(Dispersion)、吸附(Adsorption)和衰減(Decay)。

對流是指汙染物因地下水的流動而被帶動的現象。而對流之速度主要與土壤的水力傳導度有關(Hydraulic conductivity)或滲透係數(Permeability coefficient)。值得注意的是，在對於研究區域之現地我們可透過觀察而獲得平均之速度，但地下水流速度變化量很大，即便在相近的幾公尺內，流速也可能有很大的變化。

分散為一種重要的傳輸方式，其中，因汙染物濃度梯度變化而導致的擴散(Diffusion)為分散的一種。分散的另一種方式是，當汙染物通過土壤孔隙顆粒周圍發生發散，稱之為機械延散(mechanic diffusion)。

第三種傳輸方式為吸附。依據不同汙染物的化學性質與土壤顆粒表面情況的不同，會影響汙染物的吸附情況，而這種作用可能為可逆亦可能為不可逆。很多時候，實驗室量測到之吸附性質並不適用於現地之流動系統。

第四種為衰減。常考慮到的有微生物之衰減與放射性核種之衰減，本研究僅考慮放射性核種之衰減，且不考慮任何來自環境變化之影響。

## II.4 流體質能守恆方程式

地下水流動之基本公式為質量守恆方程式。對任一區間，質量守恆方程式可表示為：

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho dV = \iint \tilde{j} n dA + \iint S dV \quad (II-6)$$

上式中，式中第一項表示在單位體積中，質量隨時間變化之變化量；第二項表示質量經由控制表面垂直進出之淨通量；第三項是控制體積中，源匯項所造成的質量增加或減少。

根據流體力學基本理論，假設體積固定時，流體連續方程式亦可表示為微分形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\tilde{j}) = S \quad (II-7)$$

## II.5 對流-擴散方程式

在地下水流中，具溶質之流體傳輸機制可分為兩種：一為機械延散，主要受到流體移動所影響；二為擴散，及溶質本身之擴散機制。

溶質之質點流速相對於水流流速具有一偏差值，可表示為

$$\bar{u}_a = \bar{u} + \bar{u}_f \quad (II-8)$$

將 3-8 式帶入 3-7 式並整理可得：

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_a \bar{u} + \nabla \cdot \tilde{j}) = S \quad (II-9)$$

其中，

$\rho_a \bar{u}$  為質量通量中之對流分量、

$\tilde{j}$  為質量通量中之擴散分量。

假設等溫條件，則由 Fick's law 可得

$$\tilde{j} = -\rho D_m \cdot \nabla \left( \frac{\rho_a}{\rho} \right) \quad (II-10)$$

其中，

$D_m$ ：溶質之擴散係數

將 II-10 式代入 II-9 式且將  $\rho_a$  改寫為  $C$ ，可得對流-擴散方程式為

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \bar{u}) - \nabla \cdot \left[ \rho D_m \nabla \left( \frac{C}{\rho} \right) \right] = S \quad (II-11)$$

## II.6 放射性衰變

若溶質為放射性核種，具隨時間而衰變之特性，則方程式中需增加衰變項。放射性核種之衰變情形可表示為：

$$\frac{dM^k}{dt} = -\lambda^k M^k \quad (II-12)$$

上式中

$M^k$ ：核種種類  $k$  之質量

$\lambda^k$ ：核種  $k$  之衰退係數(decay constant)

將 II-12 式積分可得：

$$M^k = M_0 e^{-\lambda^k t} \quad (II-13)$$

$M_0$ ：初始質量

## II.7 數值模式

TOUGH 2 係為用於計算飽和及未飽和地下水流及熱流傳輸之數值模擬軟體，由 Pruess et al.(1999)使用程式語言 FORTRAN77 開發完成。此軟體可用於研究飽和及未飽和地層中之多孔介質之多相流，多成分之熱流傳輸與溶質傳輸之行為。目前案例多應用於地熱工程與核廢料處置場等。TOUGH 2 使用積分型式之有限差分法(Integral Finite Difference Method)來處理數值問題。在進行計算時，會將每個離散之格點，代入控制方程式，並給定邊界條件及初始條件，計算每個格點與其附近格點之關係。根據質能守恆原理，研究空間之質能守恆方程式可描述如下：

$$\frac{d}{dt} \int M^k dV_n = \int F^k \cdot n d\Gamma_n + \int q^k dV_n \quad (II-14)$$

上式中，

$V_n$ ：所求區域之單位體積

$\Gamma_n$ ：交界面之單位面積

$M^k$ ：單位體積內之質能累積量

$F^k$ ：質能通量

$q^k$ ：單位體積之質量來源或能量來源

$n$ : 交界面之法向量

$k$ : 代表物質之成分

$t$ : 時間

其中 $M^k$ 代表質量累積量時，數學式可表示為

$$M^k = \varphi \sum S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^k \quad (\text{II-15})$$

上式中，

$\varphi$ : 介質之孔隙率

$\beta$ : 代表相之成分

$S_{\beta}$ :  $\beta$ 相之飽和度(Saturation)

$\rho_{\beta}$ :  $\beta$ 相之密度

$X_{\beta}^k$ :  $k$ 在 $\beta$ 相之質量分量(Mass fraction)。

(3-8)式之 $M^k$ 表示熱能累積量，則方程式可表示

為：

$$M^{NK+1} = (1 - \Phi) \rho_Y C_Y T + \sum_{\beta=1}^{NPH} S_{\beta} \rho_{\beta} U_{\beta} \quad (\text{II-16})$$

上式中，

$\rho_Y$ : 岩石密度(kg/M<sup>3</sup>)

$C_Y$ : 岩石比熱(specific heat, J/kg·°C)

$T$ : 岩石溫度(°C)

$U_{\beta}$ : 個別流體相之內能(internal energy, J/kg)

$NK+1$ : 代表總物質質量成分

因流體流動所造成之傳輸，包括了對流通量( $F^k$ )與擴散通量兩項，分別表示如下：

$$F^k = F^k|_{adv} + F^k|_{dis} \quad (\text{II-17})$$

其中各個成分 $k$ 之對流通量可表示為：

$$F^k|_{adv} = \sum_{\beta} X_{\beta}^k F_{\beta} \quad (\text{II-18})$$

$F_{\beta}$ 為每個相之質量通量，可以達西定律描述為：

$$F_{\beta} = \rho_{\beta} u_{\beta} = -k \frac{k_{Y\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} g) \quad (\text{II-19})$$

上式中：

$k$ : 孔隙介質之滲透係數(permeability)

$k_{Y\beta}$ : 每個相之相對滲透係數(relative permeability)

$\rho_{\beta}$ : 流體在每個相的密度

$\mu_{\beta}$ : 流體在每個相的動力黏滯度 (dynamic viscosity, kg/m·s)

$P_{\beta}$ : 流體在每個相的壓力

$g$ : 重力加速度

其中：

$$P_{\beta} = P + P_{c\beta} \quad (\text{II-20})$$

$P$ : 參考壓力，一般指氣相的壓力值

$P_{c\beta}$ 每個相的毛細壓力，其值隨液相飽和度的增加而減少。

若 $F^k$ 為熱通量，則將熱傳導與熱對流之熱傳機制代入後，可表示為：

$$F^{NK+1} = -\lambda \nabla T + \sum_{\beta} h_{\beta} F_{\beta} \quad (\text{II-21})$$

上式中：

$\lambda$ : 熱傳導係數 (thermal conductivity, J/m·s·°C)、

$h_{\beta}$ : 流體在每個相的比焓 (specific enthalpy, J/kg)、

$F_{\beta}$ : 每個相的質通量。

### III. 結果與討論

為進行核一廠現地場址之數值模擬，本研究在進行核一廠模擬前，先與國際研究做模式驗證以確認數值軟體之適用性。

#### III.1 SKB 文獻之熱傳特性驗證

SKB 之文獻[20]為國際上重要之最終處置場衰變熱分析模擬報告，其內容為分析在不同孔隙材料狀況下，衰變熱造成溫度變化之情形，以確定最終處置場之安全性。本研究將進行 SKB 之熱傳特性驗證，利用 SKB 之文獻建立數值分析軟體 TOUGH 2 之熱傳特性適用性。根據 SKB 文獻，其物理模型如圖 III-1 所示。

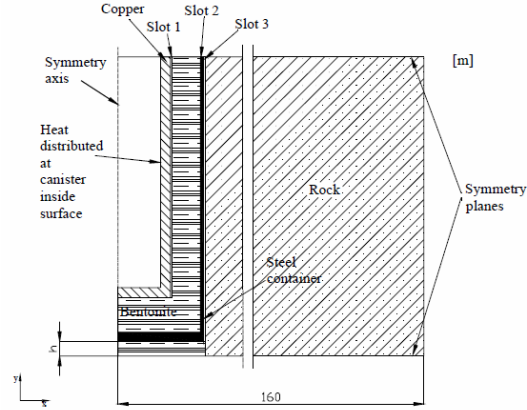


圖 III-1 SKB 文獻之物理模型示意圖[20]

為簡化分析模型，此模型採軸對稱設計，且由於鋼桶為平行擺放之方式，上下邊界亦採取對稱設定。而材質由內依序到外為：銅，孔隙材料 1，膨潤土，孔隙材料 2，鋼板，孔隙材料 3，岩層。而銅所接觸到之內部表面則假設為衰變熱放出之表面。衰變熱假設為

$$P = P_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{III-2})$$

上式中：

$P$ : 衰變熱，案例中訂為 1837W

$\lambda$ : 衰變係數(decay constant)

表 III-1 不同案例下孔隙材料情形[20]

| Case | Slot 1<br>(Between<br>canister and<br>bentonite) | Slot 2 (Between<br>bentonite and<br>steel container) | Slot 3 (Between<br>steel container<br>and rock) | Bentonite<br>conductivity<br>W/(mK) | Comment                    |
|------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| a)   | Air-filled                                       | Air                                                  | Air-filled                                      | 1.0                                 | Worst case                 |
| b)   | Bentonite                                        | Bentonite                                            | Air-filled                                      | 1.0                                 |                            |
| c)   | Bentonite                                        | Bentonite                                            | Water-filled                                    | 1.0                                 |                            |
| d)   | Bentonite                                        | Bentonite                                            | Water-filled                                    | 1.1                                 | Best case                  |
| e)   | Air-filled                                       | Bentonite                                            | Air-filled                                      | 1.0                                 | Conservative/r<br>ealistic |

本研究將採取 case(a)作為熱傳驗證之案例，中間孔隙材料皆假設為空氣。由於空氣之傳熱性質不佳，導致本案例之溫度為 SKB 分析案例中之溫度最高。

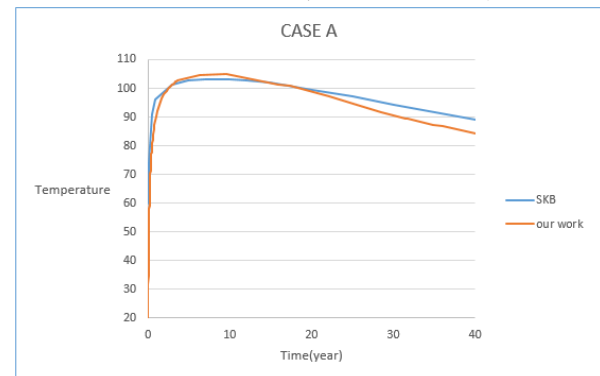


圖 III-3 SKB 之最高溫度與驗證工作之最高溫度之比較

圖 III-2 為計算與 SKB 量測之驗證分析，其結果顯示文獻的數據與本研究之模擬結果間的差異很小，故本研

究所建立之數值模型適用性與 SKB 文獻是可作為互相驗證分析之用。

### III.2 核種傳輸之模式驗證

核種傳輸現象是地下水污染擴散的主要機制，亦為本研究之主要重點，核種傳輸模式及計算結果比對係採用 Lee 等人[21]之研究工作，其研究模型如圖 III-3 所示，圖 III-4 為 KENTEX 實驗設備。

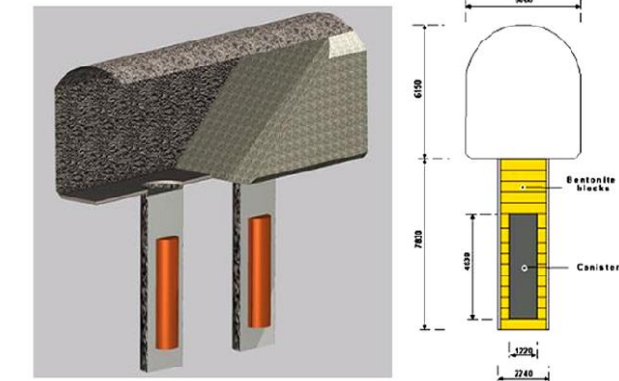


圖 III-3 處置場坑道示意圖

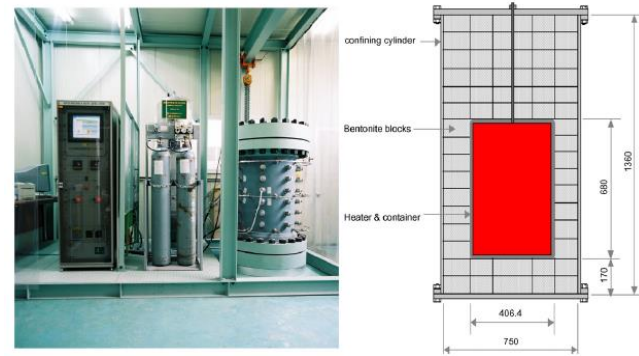


圖 III-4 KENTEX 實驗設施

研究模型為假設一處置場之坑道，初始及邊界條件式設定中間鋼桶(紅色區域)為定溫  $90^{\circ}\text{C}$ ，坑道邊界之壓力條件設定為定壓 5 bar，且 0.01M 鉍離子溶液持續注入，上下的邊界條件為定壓 1 bar，如圖 III-5 所示為模擬之設定。

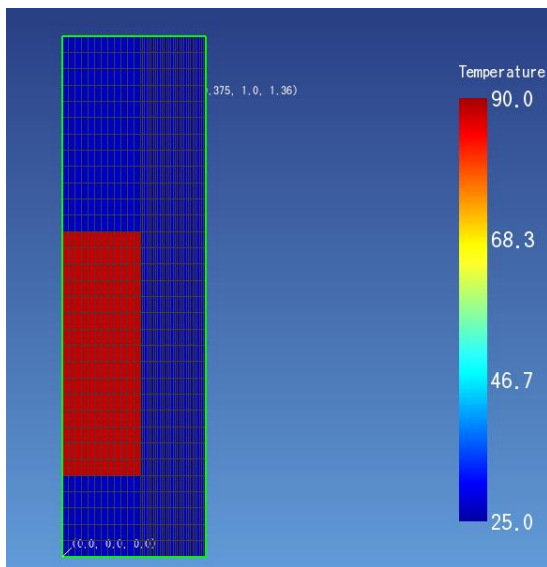


圖 III-5 邊界條件及初始條件



圖 III-6 鉍離子濃度隨距離改變之變化(在 0.61 公尺高處)

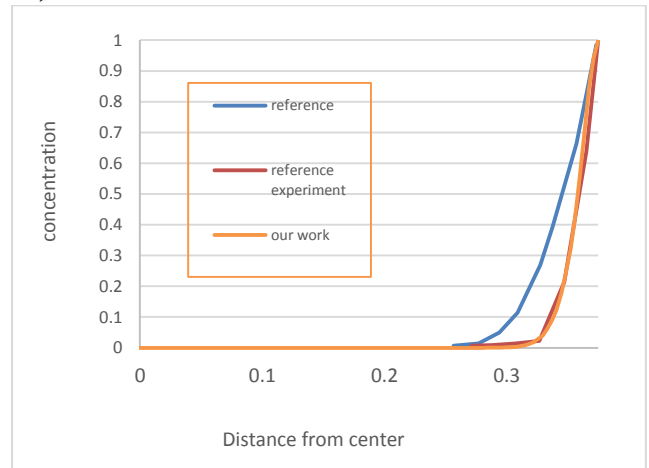


圖 III-7 鉍離子濃度隨距離改變之變化(在 1.03 公尺高處)

圖 III-6 與圖 III-7 分別顯示鉍離子在不同高度下之濃度變化，經計算結果可得知，TOUGH 2 之分析模型建立結果及趨勢分布，是與文獻數據成果相符，因此後續研究在 TOUGH 2 於核種傳輸方面是一適用之分析工具。

### III.3 核一廠模擬分析結果

本研究假設在核一廠除役期間，由於可能有非預期之情況發生，或人為疏失導致放射性核種外洩。因此，建立一資料庫假設任何可能之洩漏位置以便於當核一廠區內發現放射性核種時，能有效協助電廠與管制單位在第一時間作出因應之對策。

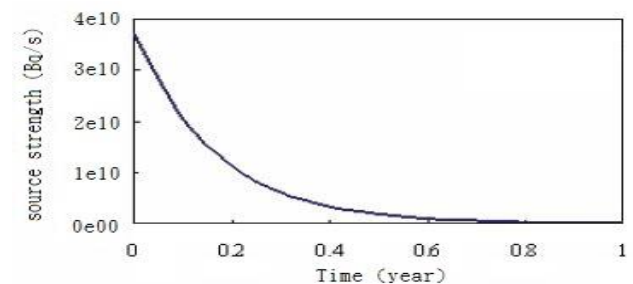
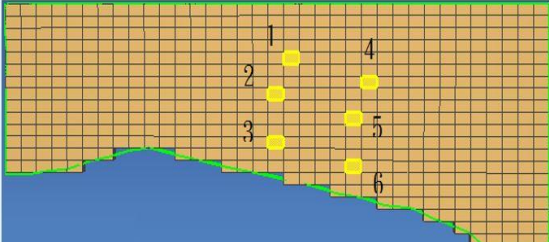


圖 III-8 活度變化

表 III-2 設定污染源之參數變因及金山電廠之研究模型圖

| 位置 | 深度(m)                                        | 核種 |
|----|----------------------------------------------|----|
| 1  | 2                                            | 氚  |
| 2  | 6                                            | 銻  |
| 3  |                                              | 鈷  |
| 4  | 模擬時間長度皆為 25年<br>濃度皆為 $3.7 \times 10^{10}$ Bq |    |
| 5  |                                              |    |
| 6  |                                              |    |



#### III.4 洩漏核種銻之質量變化(位置 1、深度 2m)

如圖 III-9~12 所示，由結果可知污染核種銻由山坡之坡度方向流向較為平緩之廠區，且沿著乾華溪方向流向大海。一號機與二號機之間的地下水流動方向主要流向為向西，即往大海之方向。而垂直主流方向擴散程度則遠低於主流方向。在 s1m1 觀測點中質量最大值發生在第一年。在 s1m2 觀測點最大質量則發生在第六年。而 s1m4 由於經歷較長的時間，核種質量變化不明顯。其餘觀測點與主流方向有相當距離，因此不受到污染影響。

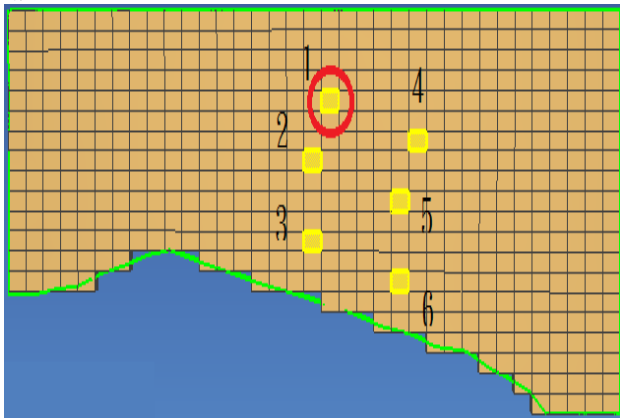


圖 III-9 核種洩漏位置(於位置 1、深度 2m)

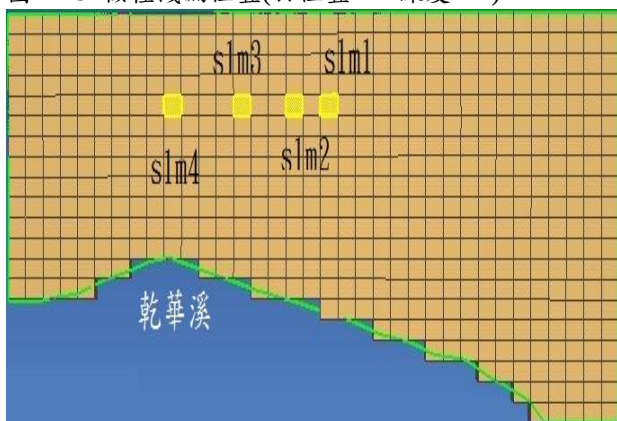


圖 III-10 觀測點位置圖(於位置 1、深度 2m)

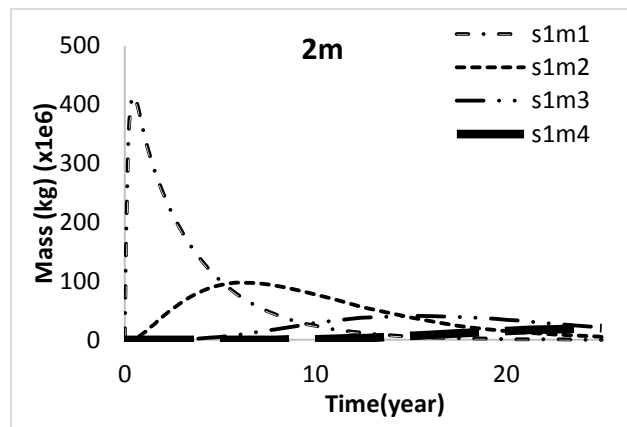


圖 III-11 銻-137 質量變化(於位置 1、深度 2m)

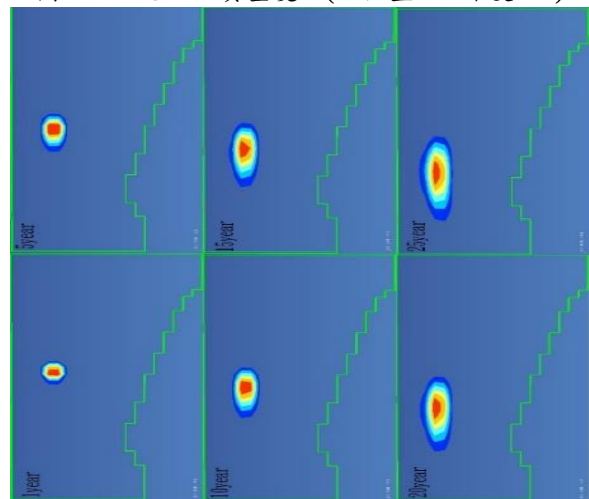


圖 III-12 污染擴散圖(於位置 1、深度 2m)

#### III.5 洩漏核種氚之質量變化(位置 1、深度 2m)

如圖 III-13~15 所示，由結果可知污染核種氚由山坡之坡度方向流向較為平緩之廠區，且沿著乾華溪方向流向大海。一號機與二號機之間的地下水流動方向主要流向為向西，即往大海之方向。而垂直主流方向擴散程度則遠低於主流方向。在 s1m1 觀測點中質量最大值發生在第一年。在 s1m2 觀測點最大質量則發生在第六年。而 s1m4 由於經歷較長的時間，核種質量變化不明顯。其餘觀測點與主流方向有相當距離，因此不受到污染影響。

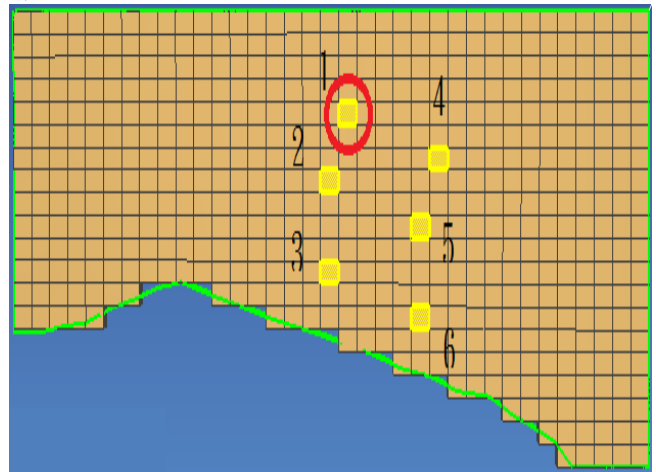


圖 III-13 核種洩漏位置(於位置 1、深度 2m)

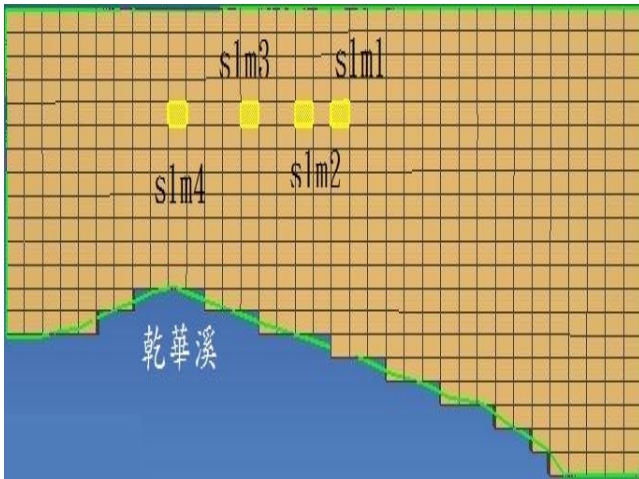


圖 III-14 觀測點位置圖(於位置 1、深度 2m)

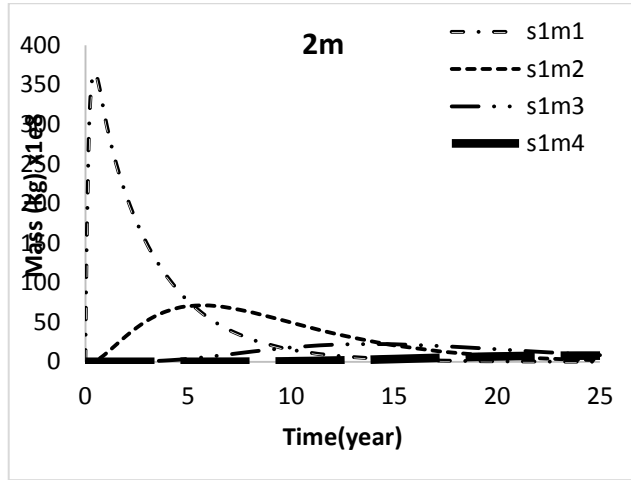


圖 III-15 氡質量變化(洩漏核種氡於位置 1、深度 2m)

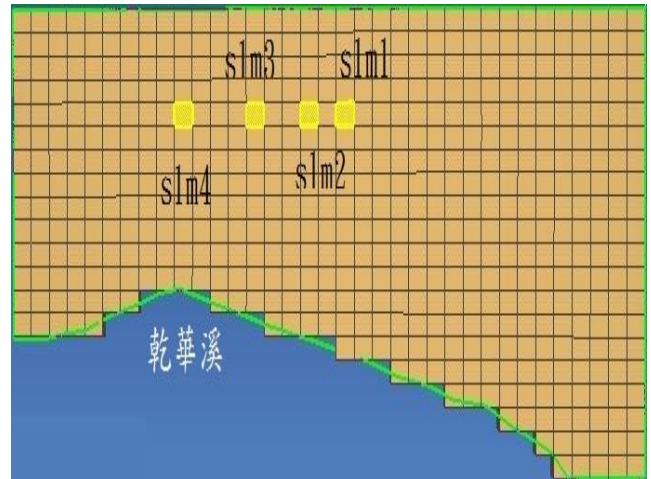


圖 III-17 觀測點位置圖(於位置 1、深度 2m)

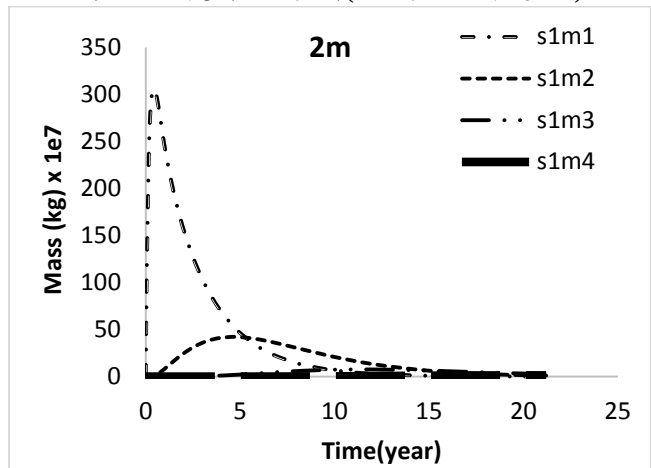


圖 III-18 鈷質量變化(洩漏核種鈷於位置 1、深度 2m)

### III.6 洩漏核種鈷之質量變化(位置 1、深度 2m)

如圖 III-16~18 所示，由結果可知汙染核種鈷由山坡之坡度方向流向較為平緩之廠區，且沿著乾華溪方向流向大海。一號機與二號機之間的地下水流動方向主要流向為向西，即往大海之方向。而垂直主流方向擴散程度則遠低於主流方向。在 s1m1 觀測點中質量最大值發生在第一年。在 s1m2 觀測點最大質量則發生在第四年。而 s1m4 由於經歷較長的時間，核種質量變化不明顯。其餘觀測點與主流方向有相當距離，因此不受到汙染影響。

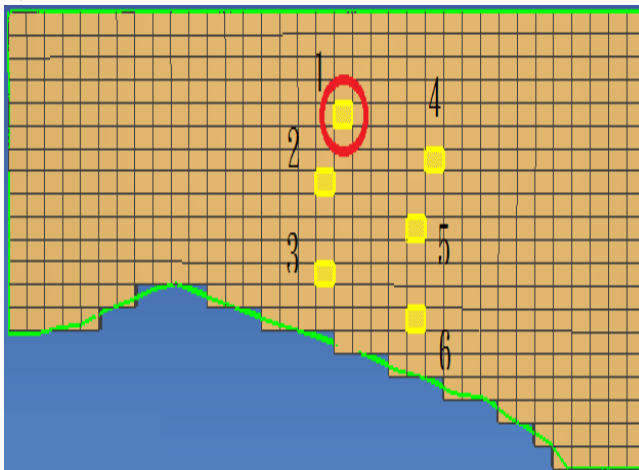


圖 III-16 核種洩漏位置(於位置 1、深度 2m)

### III.7 不同深度核種質量變化率

核種流動趨勢皆為由高水頭處往低水頭處流動，與模型建立之水頭變化一致。隨著時間經過，核種質量會逐漸下降，故離汙染源越遠處，質量越低。且因核種衰退之緣故，越遠處核種質量差異愈十倍。由圖 III-19 可知，核種在垂直方向傳輸量小，每深 4 公尺可差異兩個數量級。

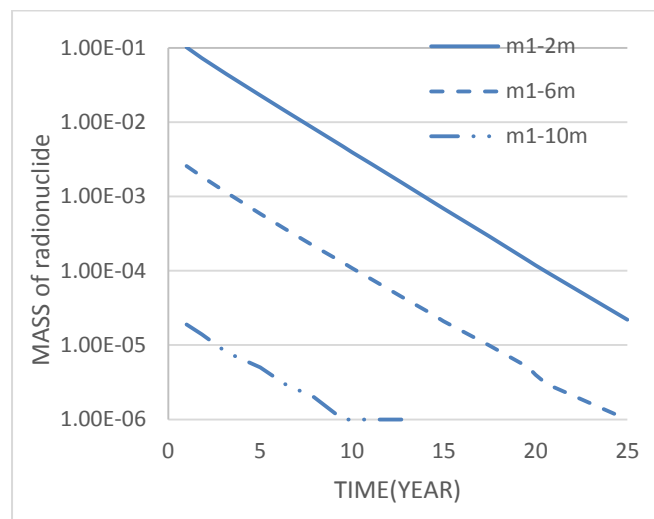


圖 III-19 不同深度下放射性核種隨時間變化圖

#### IV. 結論

地下水污染分析已是現今社會追求環境保護中不可或缺的一部分。因此，對於任何潛在的污染威脅，抑或是污染發生後，第一時間分析並處理的重要性日益提升。根據文獻報告可以得知現階段國外核電廠除役之研究與實際經驗，在核反應器設施之安全性原則考量上，有許多除役作業安全項目須謹慎考量與執行，其最終目的便是解除管制，讓廠區內土地在除役完成之後能夠轉做其他用途。而要達成此一目的就必須先瞭解廠區內建築物及土壤內所殘留之放射性活度，以及污染擴散模式。由於核能電廠於除役期間可能會有部分放射性物質因意外或操作不慎外釋，因此污染源之特性、位置、核種傳輸之方向預測將是重要的工作。本年度研究主要是進行核種擴散相關文獻，以及國內核電廠相關地形水文等重要資料蒐集與彙整，最主要目的係可提供下一年度進行分析之用。本年度在分析上主要係根據計算程式之適用性作一評估，以既有之分析程式，藉由多孔性模式、質傳輸擴散模式與計算效能等方向進行分析驗證，以選擇出適用性及準確度較高之分析程式於本研究作為後續分析之工具。研究所得成果將可提供下一年度進行國內核能電廠放射核種對於廠內環境之影響評估，並假設數種預測可能如可能之放射性核種外洩位置、核種種類、外釋深度等進行分析，並建立核種擴散預測之資料庫。

#### 參考文獻

- [1] T. Nicholson, "Liquid Radioactive release lessons learned task force. Final report," Nuclear Regulation Commission, 2006.
- [2] K. Kim, "Groundwater protection guidelines for nuclear power plants," Public Edition, Electric Power Research Institute, 2008.
- [3] 台電公司, 「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」, 民國 101 年。
- [4] Vermont Department of Health, 2011, Tritium Investigation Archive 2011, [http://healthvermont.gov/enviro/rad/yankee/tritium\\_archive.aspx](http://healthvermont.gov/enviro/rad/yankee/tritium_archive.aspx)
- [5] Vermont Yankee Com, 2010, Vermont Yankee Stakeholders Presentation.
- [6] Vermont Yankee Com., <http://www.vermontyankee.com/>
- [7] M. P. Anderson and W. W. William, "Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport," Academic Press, Inc., San Diego, 1992.
- [8] G. Segol, "Classic Groundwater Simulations: Proving and Improving Numerical Models," PRT Prentice Hall, 1993.
- [9] M. C. Hill and C. R. Tiedeman, "Effective Groundwater Model Calibration, With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty," John Wiley and Sons, 2007.
- [10] C. Zheng and G. D. Bennett, "Applied contaminant transport modeling: Theory and practice," John Wiley and Sons, 1995.
- [11] J. F. Ahearne, "Radioactive waste: The size of the problem," Physics Today, Vol. 50, 24-29, 1997.
- [12] J. R. Dyer and M. T. Peters, Progress in permanent geologic disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste in the United States, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part A – Journal of Power and Energy, 218(A5), pp: 319-334, 2004.
- [13] G. T. Yeh, H. Shan and G. Hu, A model to simulate hydrodynamics and thermal and salinity transport in three dimensional bays and estuaries, Advances in Hydro-Science and Engineering, 6, pp: 1-15, 2006.
- [14] F. Marpeaul and M. Saad, 3D simulation of radionuclide transport in porous media, International Journal of Numerical Methods in Fluids, 70, 2009.
- [15] 黃修哲, 「低放射性廢棄物處置場址溶質傳輸之研究-以蘭嶼處置場為例」, 2011。
- [16] 台電公司, 「核能發電廠海嘯總體檢評估-第一核能發電廠第二階段期末報告書」, 民國 100 年。
- [17] 林家德、趙椿長、夏振原、陳青漢、黃佳慧、邱柏榮、黃清添、徐晨哲、林玉婷、邱鈺婷、林子修、李明樺, 「核能電廠廠外事件安全度評估模式整體標準化與應用 - 核一廠」期末報告, 2015 年 12 月。
- [18] 中興工程顧問社, 「核一廠溫排水改善方案評估報告」, 1989。
- [19] Harald Hökmark, Billy Fälth, Thermal dimensioning of the deep repository, TR-03-09-SKB, 2003.
- [20] J. O. Lee, J. H. Park, W. J. Cho, Engineering-scale test on the thermal-hydro-mechanical behaviors in the clay barrier of a HLW repository, Annals of Nuclear Energy, 35, 1386-1396, 2008.
- [21] 鄭世楠、謝凱旋和邵承芬, 「核能電廠地震危害之研究」期末報告, 2015 年 4 月。
- [22] 低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則, 2012。
- [23] Randall J. Charbeneau, Groundwater Hydraulics and Pollutant Transport, 2000.
- [24] Boore DM., Finite-difference methods for seismic propagation in heterogeneous materials. I, In: Bolt BA, editor. Methods of computational physics vol.11 Academic Press, New York., 1972, pp.1-37.
- [25] Moczo P, Kristek J and Halada L., The finite-difference method for seismologists. An introduction. I, Comenius University, Bratislava., y of America, vol. 58., 2004, pp.367-98.

# 台灣地區地下化放射性廢棄物處置設施之地震影響評估

## Assessment of the seismic effect on deep geological disposal of the spent nuclear fuel in Taiwan

計畫編號：MOST 104-NU-E-194-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：石瑞銓

e-mail：[seirock@eq.ccu.edu.tw](mailto:seirock@eq.ccu.edu.tw)

計畫參與人員：王寅凱、呂宛妤、曹學政、黃明姿、張育郡

執行單位：國立中正大學地球與環境科學系

### 摘要

用過核子燃料的最終處置向來都是各個使用核能的國家所必須面對的重要議題，台灣也一樣。本計畫的目的是想利用其他國家的經驗，於未來台灣要進行深層地質處置計畫時，了解如何依台灣的地震地質特性來評估大地震對於處置設施的影響，做為未來審查台灣用過核子燃料深層地質處置設施之地震影響評估的初步建議。地震時切過處置孔的剪力位移對於處置場則會有較大的影響。從瑞典、芬蘭以及日本的評估報告以及審查意見可知大家都有相同的看法。其中，因生震斷層造成的位移，以及因直接與地震斷層連接之裂面造成的滑移這兩項可以利用場址調查及以避退距離來解決。最大的威脅是因鄰近地區的地震而誘發裂面剪力位移並穿透處置場的處置孔，這個議題在操作上較難有可行的處理方法，需要利用數值或統計的方法去評估，再以多筆實際地震資料來校正斷層活動的數值模擬資料，並須考慮盲斷層的影響。目前幾個進行深層地質處置的國家如此進行地震對於深層地質處置場的影響評估，也是未來台灣評估用過核子燃料最終處置設施可以依循的方向。關鍵詞：用過核子燃料、深部地層處置、地震威脅評估、裂面二次位移、斷層。

### Abstract

Final repository of spent nuclear fuel has always been a major issue for those countries use of nuclear power must encounter; the same as to Taiwan. The purpose of this project is to use the experiences of other countries, at the time when Taiwan needs to initiate the deposition project, realize how to assess the impact of earthquake to the deposition facilities, and recommend a preliminary future review suggestion. Assessment reports from Sweden, Finland and Japan, as well as reviewers' comments show that every country has the same opinion about impact of earthquake to the final repository system. The most important impact will be the deposition hole cut through by shear displacement of fractures. For the slips caused by a seismogenic fault and of fracture directly connect to the seismogenic fault, we may solve the problems by conducting detailed site investigation and applying respect distance in advance. The most important impact is the canister cut through by induced slip of fractures at some distance away from the seismogenic fault. Currently there is no practical approaches available to assess such type of threaten; instead, numerical or statistical methods could be

used for safety assessment, and calibrated by using realistic earthquake data. In addition, concerns of seismic impact from a blind fault should be noticed as well. Currently, several countries are using the above approach to assess the impact of earthquake to the final depository system; it is also a suitable approach for us to follow in the future.

Keywords: Spent nuclear fuel, deep geologic deposition, earthquake impact assessment, secondary displacement of fracture, fault.

### I. 前言

目前全球共有包含我國在內的 11 個國家正在進行或規劃高階核廢料及用過核子燃料深層地質處置，但進程各有不同。進展最快的是芬蘭、瑞典與法國等三個完成選址的國家，芬蘭並已取得用過核子燃料最終處置建照，而瑞典也在申請用過核子燃料最終處置場的建照中，但包括日本、美國與台灣等一些國家仍尚在選址或規劃中。

利用地殼與工程的屏障，讓這些核廢料安全地儲置於深部地層中已成為各個使用核能國家的共識。儲置之前必須以多層密閉的儲存罐密封，而儲置場必須經過安全性、功能性分析等選址作業，選擇適當且穩固的岩盤，再於母岩中 300 至 1000 公尺深處設立寬約 1 至數公里的處置場以進行分隔儲置並以膨潤土填滿空隙，再長期監控其穩定性。處置場除須確保運轉周期間的安全外，還須確保在處置場封閉後數萬年至數十萬年的長期安全性。

適用的岩性有岩鹽、結晶岩、頁岩或黏土、及火山灰等四類。芬蘭的場址是選在片麻岩、瑞典也是選在花崗岩體，而法國則是選在黏土層中，其他國家如美國、日本、英國、加拿大、及中國等國家雖然也有不一樣岩性的處置場址選擇，但也有在進行結晶岩為主的儲存研究。結晶岩能夠提供能提高較穩定的環境以進行礦坑開挖及工程屏障作為，也具有較低岩石破裂密度等的安全性(U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, 2015)。因為各個地區的地質條件不同，岩鹽、頁岩或黏土層、與火山灰也非處處可得，考量台灣的地質條件，利用較構造較為穩定區域的堅硬結晶岩應會是最佳的選擇。

地質條件是深層地質處置最重要的基礎之一，而地震的影響更是地質條件中非常重要的因素。瑞典與芬蘭雖然處於非常穩定的地殼，目前的地震活動度也不高，但在選址過程中(Fälth et al., 2010; Sagar, 2015)，也以地理位置以及氣候變遷的因素，把地質條件評估的時間拉

長至一個冰河期的週期長度，讓該處置場可以長期安全的進行。日本的地質條件比起瑞典、芬蘭或美國內華達等區域均更為複雜，因此他們於選址評估考慮時針對地震對場址的影響評估也相當完整與謹慎(原子力發電環境整備機構，2011 及 2013)。

台灣位處於板塊交接處，地體構造複雜而且活動性高。雖然其他國家已有進行的高放射性核廢料處置經驗，然而受到地殼構造變化的影響，台灣地區的地下化放射性廢棄物與用過核子燃料最終處置設施仍有許多因素需要考慮，包括地震與斷層。地震所可能造成的影響也是需要特別考量之評估因素。

本計畫經由收集幾個對於深層地質處置有經驗國家的深部地層處置地震評估與審查經驗，再針對台灣本身的地震地質構造特性，初步研擬適用於本地的用過核子燃料最終處置設施之地震影響評估要項，做為審查未來台灣用過核子燃料最終處置設施之地震影響評估方面的初步建議。

## II. 地震對深層地質處置場之影響

地震造成的災害除了因地動以及斷層破裂而對地表建築物造成直接的破壞外，也可能因為引發土壤液化、山崩、海嘯、以及火災等而造成二次災害。用過核子燃料最終處置設施的場所位於地下，雖然它也會受到地震影響，但造成的災害不一樣。以結晶岩為主的用過核子燃料處置場為例，土壤液化對於處置場可能造成的災害就很小，其他如地動以及岩石破裂的影響也跟地表結構物不同，反而水力環境的改變以及切過處置孔的剪力位移會有較大的影響。

地震波在地表相對於地底下的表現差異很早便受到重視(Kanai and Tanaka, 1951)。之後，不論是從實驗獲得或經由實際觀測資料皆顯示，地震波在地表的振動強度遠大於地震波於地底下振動的強度。Atkinson and Kraeva (2010) 觀察裝設於加拿大安大略 Sudbury 地區之地表與地下深處結晶岩中的地震儀所記錄之震波振幅差異(圖 1)。表面波的振幅在較低的頻寬範圍會隨著深度顯著地衰減，在高頻部分則無。這可能是較淺部岩石因有較多的破裂，吸收了大部份的高頻表面波能量而成。

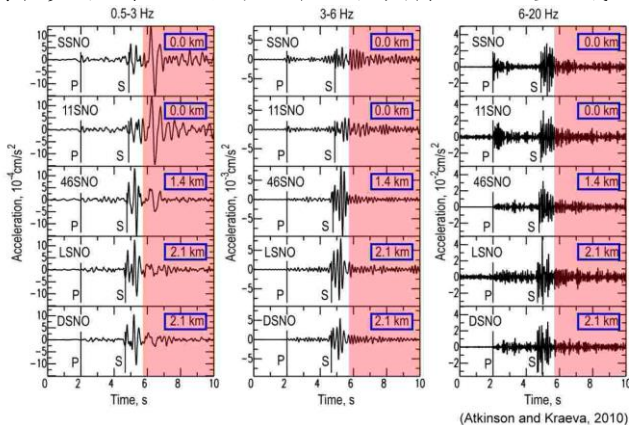


圖 1、加拿大安大略 Sudbury 地區不同深度岩盤中所記錄到之地下與地表之不同頻帶地動加速度比較圖。

2011 年日本東北大地震後，原子力發電環境整備機構(NUMO)從日本的測震網 KiK-net 收集了距離震央 300 公里範圍內，於相同地點紀錄的地表與地下地震儀之地

動加速度資料，並加以比較(NUMO, 2013; Takeuchi, 2013)。比較圖 2 中的觀測結果可發現，地底下地震儀的最大地動加速度都比地面上觀測到的最大地動加速度小許多。

### 東北地方太平洋沖地震(本震)

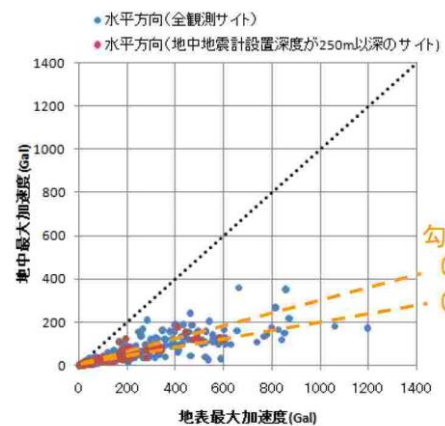


圖 2、2011 年日本東北大地震主震所紀錄，不同深度之地下與地表地動加速度比較圖。(NUMO, 2013)

地震波對於地表結構物的破壞主要是由地震波裡的表面波造成。表面波的振幅會隨著深度的加深而衰減，因此，位於地下岩盤中的用過核子燃料最終處置設施也會受到較小的影響。通常深層地質處置場所使用的緩衝物-廢料罐系統並無任何自由空間或較弱的接點存在，而且它的規模大小也僅幾公尺大，相對於地震波的幾公里長的波長已經可以被省略。因此，可以肯定地震的地動不會影響緩衝物-廢料罐系統的完整性。

地震來臨時引起的土壤液化、地動、處置孔壁的岩石剝落、以及水力環境的改變等現象對於用過核子燃料深層地質處置場的影響較小。然而，切過處置孔的剪力位移則是大地震來臨時處置場會受到地震影響的重要項目。如果裂面的剪力位移夠大、剪切速度不太小、且截切的幾何不幸的能讓力量從岩壁中穿過緩衝物並達廢料罐，這時便有可能在廢料罐的銅質外殼或銅質內襯造成夠大的塑性變形而產生破壞，讓核種有機會外洩。若主要的斷層活動離地下化處置設施太近，也可能在處置設施附近的岩石中造成破裂，甚至切過處置設施而造成不同大小的位移。較大的位移可能破壞儲存槽，也可能連同其他的破裂形成地下水流通的管道(圖 3)。

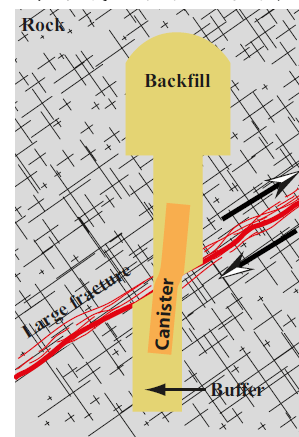


圖 3、剪力位移切過處置孔造成破壞之示意圖。

### III. 其他國家之地震問題對策

#### 1、瑞典

2011 年 3 月，瑞典的放射性廢棄物管理公司(SKB)向該國輻射安全局(SSM)提交用過核子燃料處置場及其包封廠的建照申請，計畫在 Forsmark 興建用過核子燃料處置場。瑞典的 KBS-3 用過核子燃料儲存系統中，廢料罐會存放於花崗岩內約 500m 深處的水平坑道之垂直處置孔內，四周再填以膨潤土作為隔離與防護之用。Forsmark 位於地震活動度相對較低的瑞典東南邊。雖然瑞典也曾經發生過規模 8 的大地震 (Lagerbäck, 1988; Arvidsson, 1996; Böldvarsson, et al., 2006)，跟其他規模較大的地震一般，都發生在瑞典的北部。Lagerbäck and Sundh (2008)認為，規模大於 7 的地震不大可能發生在瑞典的南部，但也不能排除會有中等規模的地震發生。

瑞典是位於高緯度的國家，冰河時期很容易受到冰層覆蓋。當地殼沒有大量冰層穩定覆蓋時，大地構造壓力造成的應變能可能讓岩石中某些方向的裂面緩慢滑動。然而當冰河期厚厚的冰層穩定的覆蓋大地時，冰層的垂直壓力讓裂面無法滑動而增加水平應力。冰層的重量造成地殼彎曲也會造成水平應力的增加。冰消時期，因大地構造活動與地殼彎曲殘餘的水平應力便可能讓某些角度的裂面變成不穩定，而產生地震。殘留於冰層與地殼間的孔隙水壓也會因降低了破裂帶中的有效應力，而讓部分穩定的地殼變不穩定 (Lund et al., 2009)。

地震活動對於處置場的最大威脅是鄰近地區的地震誘發的裂面剪力位移穿透處置場的處置孔。如果剪力位移很大、剪切速度也夠大、且破裂穿越的角度也剛好，剪力作用由岩石傳遞至膨潤土緩衝物便可能讓廢料罐塑性變形並造成破壞。在申請建造處置場之長期安全評估報告(SR-Site)中，因認為膨潤土緩衝物的剪力剛性會跟剪切速度有關，而將處置孔破壞的標準訂在剪力位移 0.05 公尺，及剪切速度每秒 1 公尺。

造成處置孔與廢料罐因剪力位移切過而造成破壞的原因可能有(如圖 4)：發生地震之斷層造成的位移、直接與地震斷層連接之裂面造成的滑移、以及距離主斷層較遠的裂面因地震造成的誘發性二次位移等 3 種(Fälth, et al., 2010)。這三種方式也分別有適當的處置方式讓廢料罐可以避開破壞。1、處置孔被一生震斷層直接截切而造成破壞；這類能產生規模大於 0.05 公尺位移的裂面或破裂帶應可容易地被發現並避開。2、處置孔被一個直接連接至生震斷層的裂面截切而造成破壞；100 公尺的避退距離被認為足以消除這類原因造成的破壞。與地表斷層跡線長度小於 3 公里長變形帶連接的裂面被認為不足以產生超過 0.05 公尺的位移，因此不需要考慮避退距離。3、處置孔被一個位於生震斷層一段距離的裂面截切所造成的破壞；這個裂面可能因為地震時的動態效應及應力重分配而滑移。這種的破壞需要了解目標裂面的滑移與相關地震的參數，如規模、應力降、滑移速度等，以及控制這些再生目標裂面位移的因素，如斷層與裂隙之距離、目標裂隙之方位與大小等。

瑞典經過十幾年的努力以了解地震誘發的裂隙二次剪力位移問題，目前以 Fälth and Hökmark (2006)利用程式 3DEC 所進行的動態分析最新且最詳盡，也是在 Fälth et al.在 2010 年研究中所使用方法的基石。這類的模擬系統性地混合變換不同的參數，如地震規模、應力

降、斷層傾角、斷層滑移速度等，來涵蓋跟安全評估相關的可能許可範圍。利用 3DEC 可以獲得這些目標裂面的同震響應，即被主斷層活動所誘發的目標裂面滑移量。

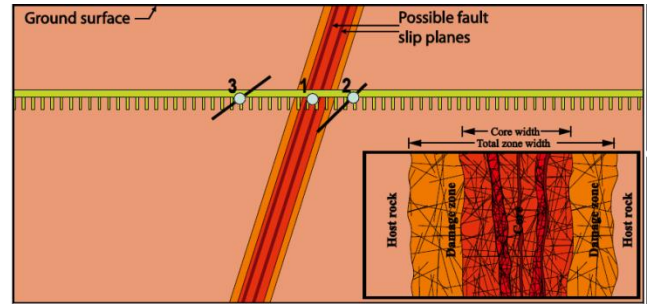


圖 3、因剪力位移切過造成處置孔與廢料罐破壞的 3 種原因之相對位置示意圖。(Fälth, et al., 2010)

目前瑞典 Forsmark 之最終處置場已進入申請建照階段並進行初步審查中，審查項目針對因為大地震而在近場岩體造成的剪力位移部分，分別有 Ofoegbu and Smart (2012)以及 Backers and Stephansson (2012)提供了不同的審查意見。

Ofoegbu and Smart (2012)認為 SKB 針對地震誘發剪力變形的分析是合宜的，然而審查報告中仍認為 SKB 的模擬中有四項不確定性會影響 SKB 所計算的裂面滑移規模，跟地震時鄰近斷層帶的剪力變形之破壞可能性控制。這四項不確定性分別如下：1、SKB 沒有說明模擬地震所造成的地動是否足以代表處置場區的地震特性；2、未考慮裂面在地震時可能癒合或增長；3、未提供合適的應力時空變化來認可計算的滑移型態，及其與地質、力學、以及強加於主斷層的滑移條件；4、未考慮盲斷層所引起的地震。

Backers and Stephansson (2012)認為 SKB 在處置場區域的應力場以及應力的演化模式需要進一步了解，以及也須進一步考慮裂面的成長，並應將應立場進行獨立分析。

McCalpin (2013)關於 Forsmark 地區の後冰河期地震及古地震之審查意見則表示：1、位於處置場內的斷層位移是利用岩石力學模型的數值運算得來，而非利用 IAEA(2010)建議的統計式斷層位移災害分析方法(PFDHA)得到；2、位移發生的頻率是以 650 公里半徑範圍內的長期應變率或地震發生率估計得到，而非是考慮特定之地震地體構造所涵蓋之較小的地震發生範圍獲得。

Bungum and Lindhalm (2013)由則 NORSAR 以地震的觀點認為 SKB 應提出一個較為系統性的方式來達到較為一致性的保守結論。此外，目前 SKB 相關研究工作所需要的地震的最大規模都是以那些地質圖上的斷層帶為主估計。這些斷層都仍待後續的槽溝開挖階段來確認，且斷層活動的動態行為也需要進一步考慮。NORSAR 亦認為 SKB 所使用的地震載大小似乎比能夠認定的長期平均值小，且當評估可能的不穩定斷層帶時，那些對應的冰蓋模型、地殼模型、孔隙壓力模型、以及應力的背景狀態等不確定性便並沒有完整的反應。SKB 基本上僅使用 1999 年台灣集集大地震的資料作為校正參考，但應拿更多的實際地震資料來進行比對。

Yoon, et al. (2014)的審查內容中另行獨立進行地震數值模擬來確認 SKB 的結果以及評估 SR-Site 後須所需要提供的資料，並標記了幾項可能破壞處置場地實體完整性的幾項情境，包括：1、岩石因為用過核燃料廢料罐發熱所形成的熱力載所造成的地震；2、在鄰近變形帶以及與處置場接連的變形帶發生的地震。

## 2、芬蘭

芬蘭與瑞典因為於國土內即有一大片的結晶岩，因此以結晶岩為主的最終處置場便成為這兩個北歐國家的最佳選擇。芬蘭的場址是選在約 15 億年的片麻岩、瑞典則是選在年代約 18 億年的花崗岩體。芬蘭的用過核子燃料最終處置場將設置於芬蘭西南部的 Olkiluoto。預計從 2023 年開始，芬蘭的用過核子燃料在裝入銅製的密封桶後，將陸續儲藏於地下 400-450 公尺深處之隧道中，內襯膨潤土之處置孔內，進行長達 100 年的深層地質處置計畫。

芬蘭 Posiv 跟瑞典 SKB 分別計畫在芬蘭的 Olkiluoto 與瑞典的 Forsmark 之結晶岩內建造 KBS-3 型的用過核子燃料最終處置場。研究結果顯示這兩個場區受到地震效應而可能造成的影響是跟處置孔接觸的裂面因剪力位移而造成的破壞。目前廢料罐若發生 0.05 公尺或更大的剪切便被認為廢料罐已破壞，而不論剪切的速率跟裂面與廢料罐接觸的幾何，而這些剪切量的大小則需要這些裂面的可能延伸量來決定(Fälth et al., 2010; Fälth and Hökmark, 2011; 2012)。對於災害的評估或處置孔的配置規劃，基本上都需要建立這些因鄰近地震而誘發各種不同大小、方位的岩石裂面之剪力位移量可能發生的上限。

到目前為止已有兩個研究(Fälth and Hökmark, 2011; 2012)探討 Olkiluoto 地區因地震而誘發的裂面破裂問題。研究結果認為在 Olkiluoto 區域，地區性中型地震所誘發的目標裂面二次位移很小，且實際情形可能更小。Fälth and Hökmark (2015)的報告中也針對發生一個規模大於 7 的較大地震時來分析不同距離的目標裂面被誘發的二次位移。

在審查建造的過程中 STUK 聘請外部審查委員審查送審資料，Sagar (2015)負責整合安全評估組，包含審查大地震對於處置場母岩裂面之影響(Fälth and Hökmark, 2015)，並依審查意見要求 Posiva 提出補充資料說明。審查報告認為雖然芬蘭目前的地震活動度並不高，然而，根據 Hutri (2007)的研究，在 Olkiluoto 地區的後冰河期地震活動有可被低估。送審資料中，大地震對於處置場母岩裂面之影響(Fälth and Hökmark, 2015)，如地震規模以及地震斷層相關問題等也經詳細檢討。在瑞典有許多的地震事件已經可以經由利用第四紀黏土沉積層的定年而確認(Morner, 1996; Sjöberg, 1994; and Tröften, 1997)。在芬蘭，Posiva 提供的補充資料中許多是從日本得來的經驗，即地震時在地底下不同深度時量測到的地動加速度。然而，真正應該著重的是，處置場的岩石位移是處置場工程障壁最主要的地震相關災害來源。目前認為在 Olkiluoto 可能發生的最大位移是 0.5 公分，但若仔細檢查 Posiva 之報告即可發現已可在 Olkiluoto 附近觀察到 10-20 公分的位移。Posiva 應解釋這些剪力位移如何與已知的構造事件及岩石構造相關。Hutri et al. (2007)與 Kotilainen and Hutri (2007)在外海海床沉積層觀察到的

顯著位移也應被包含在討論議題之內，以說明為何 Olkiluoto 的地震威脅有限的結論是正確的。此外，雖然沒有地質資料可說明在未來的 1 萬年內會發生大地震，但也值得分析若在未來的 1 萬年內發生大地震，對生物圈將可能造成的影響。

## 3、日本

日本位於北美板塊、太平洋板塊、歐亞大陸板塊、以及菲律賓海板塊的交接處，因板塊隱沒、碰撞、橫向移動、以及增積過程，造成地震、高熱流以及火山活動等地質特徵。過去幾十年來，科學家戮力於經由地質、地球物理、以及地球化學等資料，整合這類構造複雜系統的幾何架構與驅動力學。此外，也大量利用最先進的衛星定位測量隨時監測地殼活動，並用以測試或修正日本地區地殼受到構造應變而造成的變形模型。

從過去 1,500 萬年以來，於日本一帶的板塊系統移動型態便處於穩定的狀態，可以從過去 50 萬年來的主要板塊控制與模式，合理的預測日本未來 10 萬年內之地質環境長期穩定性(NUMO, 2004)。然而，在大規模的主體架構下的顯著小區域變化跟事件，例如火山活動、距離斷層的避退距離、以及其他可以界定地殼穩定度的指標等仍然需要特別關注。

日本的活動斷層主要從第四紀的初期開始活動並且活動至今(Awata, 1988; Awata and Kakami, 1985)。一般而言，這些斷層的活動周期都少於 3 萬年。利用活動斷層的分布可以來描述日本的地體構造，並且可以跟目前越來越多的衛星定位資料相比對以了解不同地方的應變量，來知道應力如何因板塊活動而累積、因地震而釋放、地殼抬升或下陷、以及其他如火成岩入侵或慢地震等造成的地殼變形事件。這樣的分析可幫我們估計未來可能發生地震的震源區域以及那些可能地震已經累積的應變能(Wernicke et al., 1998)。

從活動構造樣式跟活動斷層分布顯示持續的詳細調查對於了解未來的斷層活動非常重要。日本的原子力發電環境整備機構(NUMO)也跟國內及國際研究團隊研發如何整合包括：岩石變形、應變率、地震能量釋放、地殼抬升等所有資訊，並界定地殼穩定的指標以幫助評估可能深層地質處置場址的穩定性。

NUMO 認為探討大地震對於深層地質處置場的影響時，最主要的議題還是在母岩內之剪力位移對於處置場的影響。同時也在評估多靠近活動斷層時會影響到深層處置場，並且研究適當的策略來設定對於那些斷層的避退距離，並針對特定場址及特定處置概念來選擇最終的避退距離。這些避退距離會跟區域性及地區性應力變化史、岩石的幾何及力學性質、跟斷層的活動歷史有關。

NUMO 認為活動斷層會在主要剪切帶的兩側形成一個作用帶。在該作用帶中會有較受限制的位移沿著較小的裂面組發生。作用帶在最開始的時候會很寬，但當發展到斷層可以活動時作用帶會變窄。除了將處置場直接避開活動斷層的主要斷層線以及斷層任何可能延伸的方向時，當考慮斷層的避退距離，我們也考慮應該要避免將處置場設置於主要斷層兩側活動的作用帶上，以避免可能破壞。因此，NUMO 認為從日本現有的活動斷層圖資料已可以排除在初步的調查範圍內不能存在有任何活動斷層，現在需要進一步做的就是研究評估處置

場需要遠離任一活動斷層的距離。除了現有的活動斷層圖資料外，也需要隨時仔細的留意在可能的處置場區中是否存在有未出露至地表的盲斷層。

#### IV. 討論與結論

台灣位處於歐亞大陸板塊以及菲律賓海板塊的交接處。菲律賓海板塊約從 2,300 萬年以來即持續向歐亞板塊移動，並在台灣東北方向北隱沒至歐亞板塊底下，而在台灣南方則仰衝於歐亞大陸板塊上面。這兩組不同型態的板塊隱沒行為也分別在台灣東北與西南分別產生了琉球島弧與呂宋島弧兩個系統(圖 4)。台灣即為呂宋島弧衝撞中國大陸邊緣而形成的造山帶(鄧, 2013; 2002)。台灣的地體構造複雜且年輕，在台灣本島與東部外海一帶地震活動度甚高(圖 5)，亦曾有多次發生大地震之紀錄。台灣地質的演化過程複雜多變，然而，台灣西部部分海岸平原及台灣海峽仍未捲入造山過程，尚保有中國大陸邊緣地體構造型態(鄧, 2013)，構造相對單純且地震活動度較低。靠近大陸一帶有些花崗岩岩體為主的離島也許考慮做為用過核子燃料最終處置場使用。在台灣進行用過核子燃料深層地質處置，將須跟日本一樣仔細的評估大地震可能對處置設施可能造成的衝擊。然而，雖然位於如北歐的瑞典與芬蘭的這兩個構造較為單純而且現今地震活動度較低的國家，因為深層地質處置需要考慮處置場封存後一段非常長的時間，因此，大地震可能對於深層地質處置場的衝擊永遠都需要很謹慎地評估。

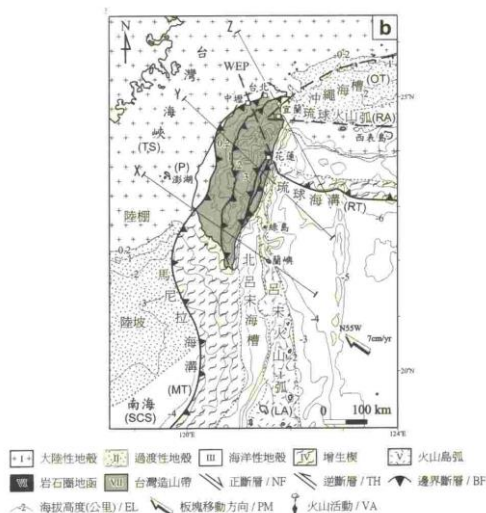


圖 4、台灣大地構造示意圖。(鄧, 2013)

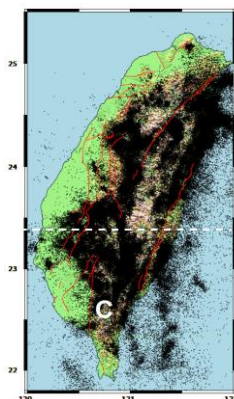


圖 5、台灣地區近 20 年來之地震震央分布圖。

本計畫的目的是希望經由其他已在進行或還在規劃進行深層地質處置的國家，整理並吸收他們的經驗，以便未來台灣若要進行深層地質處置計畫時，知道如何正確看待問題的重點，知道如何避開地震對於處置場的安全衝擊，初步研擬適用於本地的用過核子燃料處置設施地震影響評估模式，以做為未來審查用過核子燃料地震影響評估之初步建議。

芬蘭、瑞典與法國是目前進行放射性核廢料與用過核子燃料深層地質處置進展最快的國家，分別已完成選址，芬蘭並已取得用過核子燃料最終處置建照，而瑞典也在申請建照中。結晶岩能夠提供能提高較穩定的環境以進行礦坑開挖及工程屏障作為，也具有較低岩石破裂密度等的安全特性。瑞典與芬蘭因以結晶岩為主，公開的研究資料也較多。日本、美國、英國、加拿大、及中國等幾個國家有進行結晶岩岩體的處置場研究，但也有不一樣岩體的處置選擇。美國原先規劃於內華達州 Yucca Mountain 的場址是以凝灰岩為主，但目前已陷入未能定案的迴圈之中。日本的地體構造型態與我們較為相近，公開的研究資料也比其他國家多。本計畫探討之資料以瑞典、芬蘭、以及日本等三個國家為主。

地震波中表面波的振幅會隨著深度的加深而衰減，對於地下岩盤中的處置場設施影響也較小，加上廢料罐-緩衝物系統跟緊鄰的處置孔岩石均會同步移動，可以肯定地動不會影響緩衝物-廢料罐系統的完整性。地震時所產生的搖晃以及應力重分配會造成母岩裡裂面變化，並因裂面的開閉或剪力位移是在低或高的正應力下而提高或降低流通性(Hökmark et al., 2010)。土壤液化、地動、岩石破裂以及水力環境的改變對於以結晶岩為主的用過核子燃料處置場會有較小的災害影響，但切過處置孔的剪力位移則對處置場會有較大的影響。

從瑞典、芬蘭以及日本的評估報告以及評審審查一件來看，大家對於大地震對於用過核子燃料最終處置場的可能衝擊都有相同的看法。土壤液化、地動、岩石破裂以及水力環境的改變對於以結晶岩為主的用過核子燃料處置場會有較小的災害影響，但切過處置孔的剪力位移則對處置場會有較大的影響。造成處置孔與廢料罐因剪力位移切過破壞的原因可能有下列 3 種：(1) 發生地震之斷層造成的位移；(2) 直接與地震斷層連接之裂面造成的滑移；(3) 距離主斷層較遠裂面的誘發性二次位移。前兩項因可以利用場址調查以及避退距離來解決，但地震對於處置場最大的威脅是鄰近地區的地震誘發的破裂剪力位移穿透處置場的處置孔，而這個議題在操作上也較難有可行的方法來處理，可以利用數值或統計的方法去評估。利用程式 3DEC 進行動態分析研究斷層活動造成誘發裂面剪力滑移問題，可以了解在何種合理的實際情況下，裂面會滑移並破壞廢料罐。然而所模擬的斷層亦須考慮未出露地表的盲斷層。統計式的斷層位移災害分析法(PFDHA)亦能得到處置場內的斷層位移資料，也應一併使用。利用實際地震資料來校正斷層活動的數值模擬資料極為重要，這些資料包括應力降、滑移速率、跟地動等，但應利用較多筆的實際地震資料進行比對。

芬蘭與瑞典在評估用過核子燃料處置場場址時，先研究未來哪裡可能發生大地震，再評估從主要破碎帶算起的避退距離及決定處置場廢料罐存放位置。日本則是

從現有的活動斷層圖資料先初步排除調查範圍內不能存在有任何活動斷層再評估處置場需要遠離任一活動斷層的距離。除了現有的活動斷層圖資料外，也仔細留意在可能的處置場區中是否有未出露至地表的盲斷層。在堅硬的結晶岩盤中，常已存在自然裂隙或經地震影響而產生之裂隙，這些岩盤中的原生裂隙以及次生裂隙的調查在選址階段中就非常重要，以免核種可能因這些裂隙而移棲或因地震而造成的裂隙直接破壞地下之儲存槽。

將來若要在台灣西部離島進行深層地質處置場選址時，這兩種模式可能都須進行。並需要利用數值以及統計方式評估可能處置場內的斷層位移資料，再利用較多筆的實際地震資料進行比對，以獲得可靠的裂面二次位移資料，作為場區配置的基準。

### 誌謝

本研究感謝科技部與原子能委員會共同推動之 104 年度原子能科技學術合作研究計畫，計畫編號 MOST 104-NU-E-194-001-NU 經費支持。

### 參考文獻

- [1] Arvidsson R. (1996). Fennoscandian earthquakes: whole crustal rupturing related to postglacial rebound. In: Science, vol 274(1): pp 744–746.
- [2] Atkinson, G. M. and N. Kraeva (2010). Ground Motions Underground Compared to Those on Surface: A Case Study from Sudbury, Ontario, Bull. Seism. Soc. Am. 100 1293-1305.
- [3] Awata, Y. and Kakimi, T. (1985): Quaternary Tectonics and Damaging Earthquakes in Northern Honshu, Japan, Earthq. Predict. Res., 3, pp.231-251.
- [4] Awata, Y. (1988): The Crustal Shortening and Movement of Pacific Plate of Inner Part of Central Tohoku Japan, Earth Monthly, 10, pp.586-591 (in Japanese).
- [5] Backers, T., and Stephansson, O. (2012) Shear movement of near-field rock due to large earthquakes, SSM Technical Note 2012:52 Swedish Radiation Safety Authority (SSM)
- [6] Bödvarsson R, Lund B, Roberts R, Slunga R, (2006). Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. SKB R-06-67, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [7] Bungum, H. and Lindholm, C. (2013) Seismology – Frequencies and mechanisms. Initial review phase, Technical Note 2013:33
- [8] Fäth, B. and H. Hökmark (2006). Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [9] Fäth, B. and H. Hökmark (2011). Modelling end-glacial earthquakes at Olkiluoto. Posiva Working Report 2011-13, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- [10] Fäth, B. and H. Hökmark (2012). Modelling end-glacial earthquakes at Olkiluoto. Expansion of the 2010 Study. Posiva Working Report 2012-08, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- [11] Fäth, B. and H. Hökmark (2015). Effects of hypothetical large earthquakes on repository host rock fractures, Working report 2015-18, Posiva Oy, Eurajoki, Finland.
- [12] Fäth, B., H. Hökmark, and R. Munier (2010). Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository, SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [13] Hutri K., A. Heinsalu, A. Kotilainen, and A. Ojala, (2007) Dating early Holocene Paleoseismic events(s) in the Gulf of Bothnia, Baltic Sea. Boreas 36(1), 56–64.
- [14] Hutri, K. L. (2007) An approach to paleoseismicity in the Olkiluoto sea area during the early Holocene. PhD thesis. STUK-A222, Radiation and nuclear safety authority, Helsinki, Finland.
- [15] Hökmark H, Lönqvist M, Fäth B, (2010). THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydromechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [16] Kanai, K., and T. Tanaka (1951). Observations of the earthquake-motion at the different depths of Earth. I, Bull. Earthq. Res. Inst. 29 107-113.
- [17] Kotilainen A. and K. Hutri, (2004) Submarine sedimentary disturbances in the Olkiluoto area of the Gulf of Bothnia, Baltic Sea, a Case of Postglacial Paleoseismicity, Quaternary Science Reviews, 23(9) 1125–1135.
- [18] Lagerbäck R, (1988). Postglacial faulting and paleoseismicity in the Landsjärv area, northern Sweden. SKB TR 88-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- [19] Lagerbäck R, Sundh M, (2008). Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. Research Paper C 836. SGU – Sveriges Geologiska Undersökning.
- [20] McCalpin, J., (2013) Seismology – Post-glacial seismicity and paleoseismology at Forsmark – Initial review phase, SSM Technical Note 2013:34 Swedish Radiation Safety Authority (SSM)
- [21] Morner N, (1996) Liquefaction and Varve deformation as evidence of paleoseismic events and tsunamis. Quaternary Sci. Rev. 15 939-948
- [22] NUMO (2004), Evaluating Site Suitability for a HLW Repository - Scientific Background and Practical Application of NUMO's Siting Factors. NUMO-TR-04-04, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)
- [23] Ofoegbu, G. I., and Smart, K. J. (2012) Shear movement of near-field rock due to large earthquakes, SSM Technical Note 2012:57 Swedish Radiation Safety Authority (SSM)
- [24] Sagar, B. (ed.) (2015). Review of safety assessment in Posiva's construction license application for a repository at Olkiluoto, STUK-TR 19, Southwest Research Institute, Helsinki.
- [25] Sjöberg R. (1994) Bedrock Caves and Fractured Rock Surfaces in Sweden, Doctoral Thesis, Stockholm University.8-1196.

- [26] Takeuchi, M. (2013) NUMO's Basic Safety Concept for Geological Disposal of HLW, Conference presentation material, November 27, 2013. Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)
- [27] Tröften E. (1997) Neotectonics and Paleoseismicity in Southern Sweden, Doctoral Thesis, Stockholm University.
- [28] U.S. Nuclear Waste Technical Review Board, (2015) Designing a Process for Selecting a Site for a Deep-Mined, Geologic Repository for High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel, Overview and Summary, Report to the United States Congress and the Secretary of Energy, USA.
- [29] Wernicke, B., Davis, J. L., Bennett, R. A., Elósegui, P., Abolins, M. J., Brady, R. J., House, M. A., Niemi, N. A. and Kent, S. J. (1998): Anomalous Strain Accumulation in the Yucca Mountain Area, Nevada, *Science*, 279, pp.2096-2100.
- [30] Yoon, J. S., Stephansson, O., Min, K. B. (2014) Relation between earthquake magnitude, fracture length and fracture shear displacement in the KBS-3 repository at Forsmark, main review phase, Technical Note 2014:59
- [31] 原子力發電環境整備機構 (2011), 地層處分設施的耐震性評估, 技術報告 NUMO-TR-10-13, 日本。
- [32] 原子力發電環境整備機構 (2013), 地層處分設施的耐震性評估, NUMO-TR-10-13-延伸報告, 日本。
- [33] 鄧屬予、宋聖榮、葉恩肇、林殿順、劉佳玫、蔡宜玲(2013), 從大地構造看台灣地熱潛勢, 西太平洋地質科學, p. 1-38。
- [34] 鄧屬予(2002), 台灣新生代大地構造, 台灣的大地構造p. 49-93, 中國地質學會與中國地球物理學會聯合出版。

# 放射性廢棄物處置場之緩衝回填材料研究--核種擴散參數

## Study on diffusion parameters of buffer/backfill material in radioactive waste disposal sites

計畫編號：MOST 104-NU-E-006-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳銘志

e-mail：[mcwu@mail.ncku.edu.tw](mailto:mcwu@mail.ncku.edu.tw)

計畫參與人員：李傳斌、涂又琳、康綾珍、潘春花

執行單位：國立成功大學地球科學系

### 摘要

本計畫旨在利用擴散實驗(管柱法)進行核種(銨與銫)在合成地下水環境下,於不同緩衝回填材料(75%膨潤土和 25%母岩之混合物)中遷移行為之研究;並以累積濃度圖之突破曲線(BTC, breakthrough curve)計算擴散係數進行分析。

由非反應性核種實驗結果顯示,氚水(HTO)的有效擴散係數( $D_e$ )皆介於 $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ,可得知不同材料並不會對氚水擴散行為造成太大影響,只有孔隙率是影響氚水擴散的主要因素。

按銨(Sr)與銫(Cs)核種的擴散實驗結果可了解,膨潤土(MX80 或日興土)混合硬頁岩之遲滯因數( $R_f$ )均高於其混合花崗岩的結果;而經壓密後的混合材料的密度愈高( $\rho_b = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ),視擴散係數( $D_a$ )和有效擴散係數( $D_e$ )皆愈低;遲滯因數( $R_f$ )和分配係數( $K_d$ )則愈大。如此結果顯示,管柱內之混合材料的密度愈高,核種擴散時間愈慢,較具有利於核種遲滯於緩衝回填材料中之特性。

以本(104)年計畫比較 103 年計畫成果之分配係數( $K_d$ )的差異可發現,擴散實驗( $\rho_b = 1.6 \text{ g/cm}^3$ )所得的分配係數( $K_d$ )均小於批次吸附實驗;其中更以具較高吸附性之銫核種的差異最為明顯;有一個級數(order)之差。進一步的實驗了解,批次實驗之分配係數( $K_d$ )約與高密度( $\rho_b = 2.0 \text{ g/cm}^3$ )之混合材料的擴散實驗計算所得結果相接近。

關鍵詞：銨、銫、擴散係數、分配係數、膨潤土 MX80、日興土、硬頁岩、花崗岩

### ABSTRACT

The buffer/backfill materials for radioactive waste disposal site were to make of pure bentonite or bentonite and host rock mixtures. This study was subjected to discuss the diffusion coefficients of buffer/backfill materials to the important radionuclides such as Cs, Sr by diffusion test for mixture of the host rock (Taitung argillite and Kingmen granite) with either the U.S. Wyoming MX-80 bentonite or the Taiwan domestic Zhi-Shin bentonite in a fixed proportion (75% bentonite +

25% host rock).

According to the results of nonreactive nuclide (Tritium, HTO) experiment, the effective diffusion coefficients ( $D_e$ ) derived from experiments fall in the range of  $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ . For cesium (Ce), having higher sorption characteristics, the bentonite behaves less influences than the host rock. The retardation factors ( $R_f$ ) and distribution coefficients ( $K_d$ ) of bentonite mixed with argillite are significantly greater than those mixed with granite. For strontium (Sr), having lower sorption characteristic, the effects for bentonite or host rock were not so significant.

In addition, results of the diffusion experiments have shown that the greater the bulk density of in-column buffer/backfill materials were, the smaller the apparent diffusion coefficients ( $D_a$ ) and the effective diffusion coefficients ( $D_e$ ) were; yet, the greater the retardation factors ( $R_f$ ) and the distribution coefficients ( $K_d$ ) would be; such phenomena showed that it took longer time for nuclides to diffuse in respect to higher bulk density for the in-column buffer/backfill materials, so that is better for retardation effect of nuclides.

Comparing with the pervious results of study for year 2014, obvious difference were found for distribution coefficient ( $K_d$ ) between the batch test and the diffusion test. The distribution coefficient ( $K_d$ ) by diffusion test was smaller than that by batch test. In the safety assessment for the disposal site, it would be more conservative to assess the distribution coefficient ( $K_d$ ) by adopting the results performed by the diffusion test.

Keywords: Strontium, Cesium, Diffusion Coefficient, Distribution Coefficient, MX-80 Bentonite, Zhi-Shin Bentonite, Argillite, Granite

### I. 前言

截至目前為止,世界上各國在放射性廢棄物處置場的施工設計中,針對緩衝/回填材質的設計選定,分別有以膨潤土與石英砂的混合物(如:瑞典與日本所採用者)或以膨潤土與粉壓花崗岩的混合物(如:加拿大所採用者)為主。

在 103 年計畫中,以採取已經商業化之產品--美國

懷俄明州產之 MX-80 膨潤土，以及臺灣日興土（台東產膨潤土的一種）為主要研究對象。經與現階段已公告之候選場址之母岩（金門烏坵花崗岩與台東達仁硬頁岩等），依固定配比混合後，利用已知條件或已經長期地下水質分析之地球化學條件，模擬金門與台東地區的合成地下水，分別探討膨潤土及其混合物，對放射性核種銻及鉍的吸附行為及其可能產生之差異性，並探討其化學緩衝性，俾以作為日後可能處置場址施工條件之重要參考。然而，在緩衝材質的施工設計上，除了需維持物理與化學的特性（低透水性、熱傳特性、膨脹潛能、力學強度、吸附性、化學緩衝性等）以外，並需同時考慮在地下水入侵時，可能將有害的放射性核種溶解後釋出，其核種在緩衝回填材料中傳輸行為（平流/延散、擴散）將成為主要關鍵的影響因素。

本計畫主要是延續前一年度(103年)之計畫成果，根據其實驗結果可知在等比例混合物(膨潤土+母岩)，膨潤土大(等)於50%時，對鉍、銻、鈷吸附率平均約90%以上。本計畫目的在探討臺灣目前的兩處低放射性廢棄物候選場址之潛在母岩(台東達仁鄉硬頁岩與金門烏坵鄉花崗岩)在放射性廢棄物地質貯存後，受地下水入侵導致放射性核種外釋情形，並在實驗室中模擬核種在非常低流速(近乎靜止)的地下水中，溶質擴散傳輸作用情形。因此，本計畫選用固定比例(75%膨潤土+25%母岩)之緩衝回填材料，以管柱法(穿透擴散)進行，在實驗中以固定條件(不同材料與密度)和金門與台東的合成地下水，探討銻與鉍在不同混合材料(75%膨潤土+25%母岩-花崗岩或硬頁岩)中擴散行為。此外，計畫中將比較非反應性核種(氘水-HTO)與放射性核種(鉍及銻)實驗所得之擴散係數的差異，並了解緩衝回填材料(膨潤土和母岩之混合物)對銻與鉍核種傳輸行為的影響。

## II. 主要內容

### 一、一維擴散理論

溶質的擴散行為最常以 Fick 定律表示，若將溶質在多孔介質中的擴散行為以 Fick 第二定律加以描述：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中， $C$  為溶質濃度， $t$  為所經過時間， $D$  為擴散係數， $x$  為溶質擴散距離。若多孔介質中溶質得擴散純粹由濃度差所引起，並且不考慮多孔介質的吸附作用，則可改寫上式為：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中  $D_p$  為溶質在孔隙水中的擴散係數。若將多孔介質對溶質的吸附加以考慮，假設溶質吸附於多孔性介質表面的反應是瞬間發生且可逆的，並且擴散只發生在溶質溶於液相時，則孔隙水中溶質的變化量表示如下：

$$\theta \frac{\partial C_l}{\partial t} = \theta D_p \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} - \rho_b \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (3)$$

式中  $\theta$  為試樣孔隙度， $C_l$  為液相中溶質濃度， $C_s$  固相中溶質濃度， $\rho_b$  為試樣體密度。將上式改寫可得：

$$\left(1 + \frac{\rho_b \frac{dC_s}{dC_l}}{\theta}\right) \frac{\partial C_l}{\partial t} - D_p \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

當反應達平衡時，式中

$$\frac{dC_s}{dC_l} = K_d \quad (5)$$

$K_d$  為分配係數，定義為單位質量固相所吸附的溶質總量與單位體積液相所殘存的溶質總量的比值。因此式(4)可重寫為：

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = \frac{D_p}{\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right)} \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} \quad (6)$$

與式(1)相比較，可將本式表示為：

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C_l}{\partial x^2} \quad (7)$$

式中， $D_a$  便是實驗所求得之視擴散係數（apparent coefficient）。因此，

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right) D_a = D_p \quad (8)$$

由此導入一個遲滯因數(retardation factor,  $Rf$ )的概念；

$$Rf = \left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right) \quad (9)$$

所以，式(8)可簡化為

$$D_a = \frac{D_p}{Rf} \quad (10)$$

有效擴散係數（effective coefficient， $D_e$ ）為另一個常用的擴散係數，用以描述在平均通率下，由於溶質的濃度梯度所造成的擴散關係，表示如下：

$$D_e = \theta \cdot D_p \quad (11)$$

將式(10)代入，可得  $D_a$  與  $D_e$  的關係式如下：

$$D_a = \frac{D_e}{\theta + \rho_b K_d} \quad (12)$$

式中分母( $\theta + \rho_b K_d$ )又稱作容量因數(capacity factor,  $\alpha$ )。

## 二、材料

### 1. 商業化膨潤土：

本（104）年度計畫為延續前一年（103 年）之計畫，選用與前一年相同膨潤土材料-美國懷俄明州產之 MX-80 膨潤土（B）以及臺灣日興土（Z），避免造成實驗影響與降低實驗產生之誤差。

### 2. 岩石樣品：

本（104）年度計畫為延續前一年（103 年）之計畫，相關岩石材料-台東硬頁岩（A）與金門花崗岩（G）則選用 103 年所使用經前處理後相同之岩石樣品，避免造成實驗影響與降低實驗產生之誤差。

### 3. 液相材料：

主要為利用不同成分的液相載體，作為本計畫探討核種吸附行為的差異。

(1) **去離子水**：逆滲透去離子水，美國 Millipore 公司出品之 Mill L-SQ 型製水設備製造。

(2) **合成地下水**：以台東（達仁）及金門（烏坵）地區之地下水的地球化學條件，主要以 Na、K、Ca、Mg、Cl、S 等離子，人工合成模擬當地之地下水，相關成份如表（1）所示。

表 1、台東（達仁）和金門（烏坵）地下水組成成分

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

\*99%純度以上德國 Merck 公司出品

### 4. 核種（穩定同位素）：

(1) **銫（Cs）**：氯化銫 CsCl，99%純度以上德國 Merck 公司出品。

(2) **銣（Sr）**：硝酸銣 Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>，99%純度以上德國 Merck 公司出品。

## 三、實驗方法

本計畫以不同核種固定比例均勻混合的固相樣品（75%膨潤土+25%母岩）與不同密度之固定比例混合的固相樣品（75%膨潤土+25%母岩）進行管柱擴散實驗，相關材料資訊與條件如表（2）和表（3）所示。其中 MX-80 膨潤土與臺灣日興土真密度約為 2.65-2.70g/cm<sup>3</sup>；

而台東硬頁岩與金門花崗岩真密度約為 2.70-2.75g/cm<sup>3</sup>。

表 2、固定比例混合管柱之基本參數

| 編號    | 材料                              | 孔隙率 (θ) <sup>*1</sup> | 乾密度 ρ <sub>b</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) | 核種     |
|-------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|--------|
| 1-WG1 | 75%美國膨潤土<br>+25%金門花崗岩<br>(3B+G) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Cs |
| 2-WG2 | 75%臺灣日興土<br>+25%金門花崗岩<br>(3Z+G) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Cs |
| 3-WG3 | 75%美國膨潤土<br>+25%金門花崗岩<br>(3B+G) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Sr |
| 4-WG4 | 75%臺灣日興土<br>+25%金門花崗岩<br>(3B+G) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Sr |
| 5-NG1 | 75%美國膨潤土<br>+25%台東硬頁岩<br>(3B+A) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Cs |
| 6-NG4 | 75%臺灣日興土<br>+25%台東硬頁岩<br>(3Z+A) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Cs |
| 7-NG3 | 75%美國膨潤土<br>+25%台東硬頁岩<br>(3B+A) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Sr |
| 8-NG2 | 75%臺灣日興土<br>+25%台東硬頁岩<br>(3Z+A) | 0.40                  | 1.60                                    | HTO&Sr |

\*<sup>1</sup> 孔隙率(θ) = 1-ρ<sub>b</sub>/ρ<sub>t</sub> : ρ<sub>t</sub> = 真密度

表 3、固定比例混合之不同密度管柱基本參數

| 編號    | 材料                    | 孔隙率 (θ) | 乾密度 ρ <sub>b</sub> (g/cm <sup>3</sup> ) | 核種 |
|-------|-----------------------|---------|-----------------------------------------|----|
| 1-WG5 | 75%美國膨潤土<br>+25%金門花崗岩 | 0.32    | 1.8                                     | Cs |
| 2-WG6 | (3B+G)                | 0.25    | 2.0                                     | Cs |
| 3-WG7 | 75%臺灣日興土<br>+25%金門花崗岩 | 0.32    | 1.8                                     | Cs |
| 4-WG8 | (3Z+G)                | 0.25    | 2.0                                     | Cs |

本計畫實驗工作流程如圖 1，岩石樣品的前處理則與前一年（103 年）之計畫相同（粉碎、過篩、烘乾），擴散實驗步驟如下：

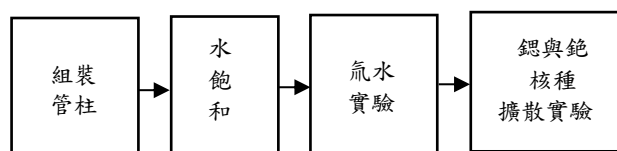


圖 1、擴散實驗實驗流程圖

### 1. 組裝管柱：

在直徑 5 公分的聚丙烯（Polypropylene）管柱中央填入已精秤重量的膨潤土和母岩固定比例混合物，並以鐵氟龍材質所製成的濾片(Teflon filter)固定，使其樣品厚度為 0.3 公分，並在固相和濾片之間加上一張

聚丙烯材質孔徑 30.0 微米 ( $\mu\text{m}$ ) 濾紙，以避免實驗過程中固相粉末滲漏而造成實驗失敗。鐵氟龍濾片外用 2 個 2.0 公分鐵氟龍 O 型環 (Teflon O-ring) 固定住，擴散管柱構造說明如圖 2。

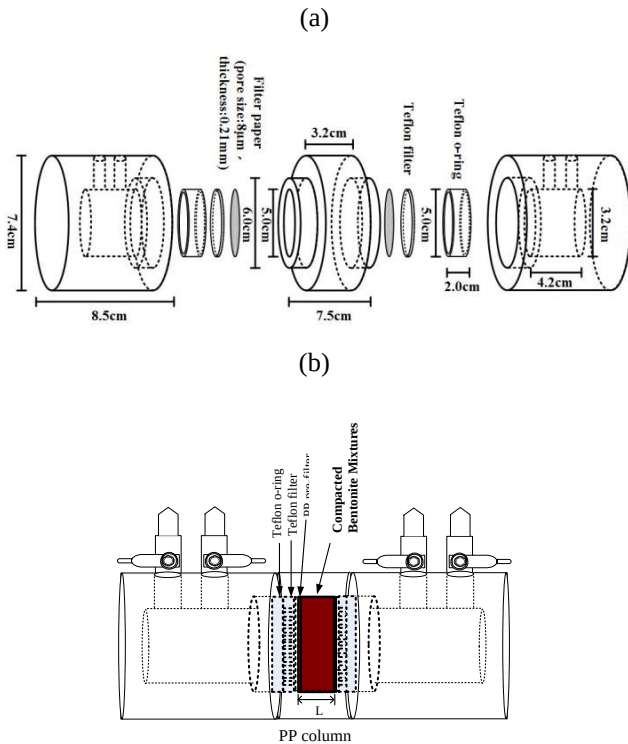


圖 2、核種擴散實驗-管柱構造圖(a)組裝前;(b)組裝後。

## 2. 水飽和實驗：

首先，將管柱左端（循環端）注滿合成地下水（WG1~8 注入金門地下水；NG1~4 注入台東地下水），再利用 150 公分高的水位差進行水飽和，實驗開始後，每日觀察管柱右端（擴散端），並以 50 毫升針筒抽取管柱右端（擴散端），待確認地下水已完全滲透，再將擴散端也注滿地下水，靜置 7 天。此外，每日觀察管柱中水位是否降低，確認無任何滲漏情形後，將完成水飽和後的管柱組裝成擴散管柱（如圖 3），以進行後續核種傳輸實驗。

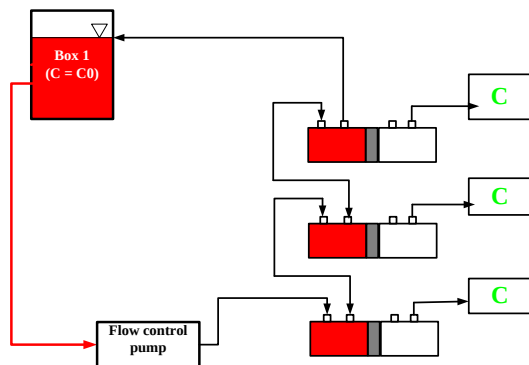


圖 3、擴散實驗示意圖

## 3. 非反應性核種實驗-氚水 (HTO)：

將已配置好 3000 毫升氚水溶液 (30 貝克/毫升) 置於 5 公升容器桶中，為了要讓管柱左端（循環端）保持濃度固定 ( $C_0$ )，擴散實驗中使用泵來作為循環，以減少實驗過程中廢液產生。然而，為了維持一維擴散實驗-濃度梯度邊界條件假設，在每日取樣時，會以 50 毫升針筒將管柱右端（擴散端）的液相全部取出並度量分析其濃（活）度 ( $C$ )，取樣後再重新注入相同體積的金門或台東合成地下水，並關閉管柱右端（擴散端）上方閥門後，開啟管柱左端（循環端）上方閥門後，以 15 毫升/分加以循環，約 30 分鐘後，關閉泵與管柱左端（循環端）上方閥門，維持靜態擴散實驗，並以累積濃度法作圖，確認實驗已達穩態後，求取氚水 (HTO) 在不同材料管柱之擴散係數。

## 4. 反應性核種擴散實驗-鋇與鈾：

完成氚水擴散實驗後，將管柱左端（循環端）中殘留氚水溶液取出，並更換成鋇（或鈾）核種作為循環端 ( $C_0 \approx 200\text{ppm}$ )，並重覆步驟 3 之每日取樣，並取 10 mL 後，再以原子吸收光譜儀 (AA) 及感應耦合電漿發射光譜儀 (ICP-OES) 分析其溶液中之鈾與鋇的每日濃度 ( $C$ )。

## 5. 擴散係數計算-穿透擴散實驗

根據 J. Crank (1975) 的圖形法，以每日累積濃度曲線與時間關係圖（圖 4），在無因次時間 ( $t_d > 0.45$ ) 的條件下的實驗可視已達擴散穩態，其可利用漸近線來求取擴散係數。

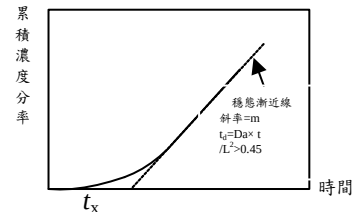


圖 4、擴散實驗的累積突破曲線圖

其中，核種的濃度之累積突破曲線 (cumulative breakthrough curve) 以求取有效擴散係數 ( $D_e$ )、視擴散係數 ( $D_a$ )、遲滯因數 ( $R_f$ ) 及分配係數 ( $K_d$ ) 等。分析方法如下：

$$De = \frac{mV_d L}{s_a} \quad (13)$$

$$Da = \frac{L^2}{6t_x} \quad (14)$$

$$Rf = \frac{D_e}{\theta D_a} = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad (15)$$

式中：

$m$ ：穩態漸近線斜率

$V$ ：擴散端體積 ( $\text{cm}^3$ )

$L$ ：混合固相厚度 ( $\text{cm}$ ) ( $= 0.3$ )

$S_a$ ：管柱截面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $D_e$ ：有效擴散係數 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $D_a$ ：視擴散係數( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $t_x$ ：穩態漸近線與時間軸的截距(s)  
 $\theta$ ：孔隙度(=0.45)  
 $R_f$ ：遲滯因數  
 $K_d$ ：分配係數( $\text{mL/g}$ )

在無因次時間 ( $t_d > 0.45$ ) 的條件下的實驗可視已達擴散穩態，其可利用漸近線來求取擴散係數。

$$t_d = \frac{D_a t_f}{L^2} > 0.45 \quad (16)$$

式中， $t_d$ 為無因次時間； $t_f$ 為擴散實驗進行的時間(s)。

### III. 結果與討論

#### 一、非反應性核種實驗-氚水 (HTO)

將每日度量氚水(HTO)濃度繪成累積濃度曲線圖，並利用 J. Crank (1975)累積突破曲線 (cumulative breakthrough curve)，結果顯示如圖 5。其結果顯示氚水在不同固相樣品 (75%膨潤土+25%母岩) 中的擴散行為，約 5~7 天可達到穩態 (steady-state)，即無因次時間大於 0.45 ( $t_d > 0.45$ )。

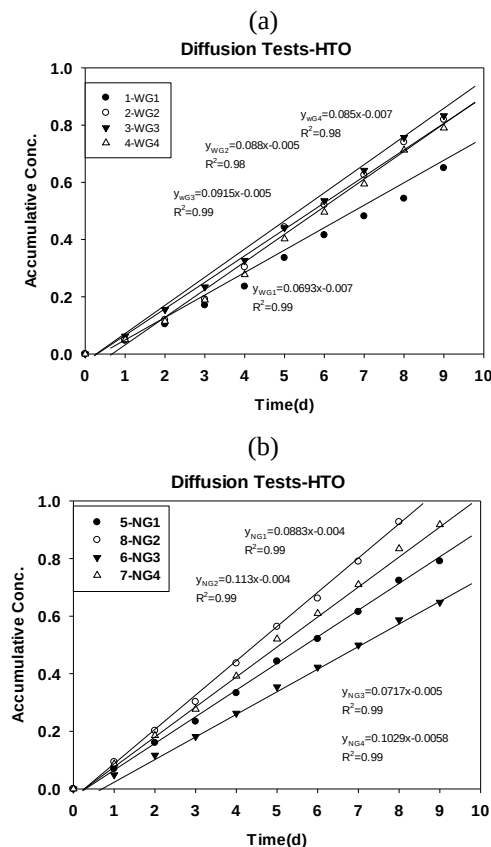


圖 5、非反應性核種擴散實驗-氚水(a) 膨潤土(或日興土)+金門花崗岩;(b) 膨潤土(或日興土)+台東硬頁岩。

此外，表 (4) 列出氚水在管柱 No.1-8 的視擴散係數( $D_a$ )、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( $t_d$ )。No.1-8 不同管柱所得的遲滯因數( $R_f$ )均約等於 1，由此可印證此穿透擴散實驗方法的可靠性，此外，氚水的擴散係數約在  $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ，可觀察得知不同材料並不會對氚水擴散行為造成太大影響，只有孔隙率是影響氚水擴散的因素。

表 4. 氚水擴散實驗參數

| 編號<br>No. | 固相   | 有效擴<br>散係數<br>$D_e (\text{m}^2/\text{s})$ | 視擴散<br>係數<br>$D_a (\text{m}^2/\text{s})$ | 遲滯<br>因數<br>$R_f$ | 分配<br>係數<br>$K_d$ | $t_d$ |
|-----------|------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------|
| 1-WG1     | 3B+G | 1.23E-10                                  | 1.72E-10                                 | 1.78              | 0.20              | 9.6   |
| 2-WG2     | 3Z+G | 1.48E-10                                  | 3.08E-10                                 | 1.20              | 0.05              | 14.8  |
| 3-WG3     | 3B+G | 1.39E-10                                  | 3.18E-10                                 | 1.10              | 0.02              | 18.3  |
| 4-WG4     | 3Z+G | 1.41E-10                                  | 2.11E-10                                 | 1.49              | 0.12              | 10.1  |
| 5-NG1     | 3B+A | 1.53E-10                                  | 3.83E-10                                 | 1.00              | 0.00              | 33.1  |
| 6-NG4     | 3Z+A | 1.68E-10                                  | 3.09E-10                                 | 1.21              | 0.05              | 14.8  |
| 7-NG3     | 3B+A | 1.28E-10                                  | 2.51E-10                                 | 1.27              | 0.07              | 14.4  |
| 8-NG2     | 3Z+A | 1.88E-11                                  | 4.90E-11                                 | 0.96              | 0.00              | 2.4   |

#### 二、核種擴散實驗

##### 1. 反應性核種擴散實驗-銨與銻 (固定密度)

完成氚水實驗後，No.1-8 不同管柱 (WG1~4、NG1~4) 分別進行銨 (Sr) 與銻 (Cs) 核種的擴散實驗，繪製累積突破曲線與時間關係圖 (如圖 6 與 7)，並依漸近線結果可分別得銨 (Sr) 與銻 (Cs) 核種視擴散係數( $D_a$ )、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 (5) 與 (6) 所示。

##### (1) 銨 (Sr)

銨 (Sr) 核種累積突破曲線與時間關係圖，顯示如圖 6。可由其結果發現，銨 (Sr) 在固定密度 ( $\rho_b = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 不同膨潤土混合固相材料中具有少許遲滯現象，實驗約 20 天後可達穩態 ( $t_d > 0.45$ )，可由其結果與氚水實驗比較得知。此外，根據表 (5) 可知膨潤土 (MX80 或日興土) 混合硬頁岩 (NG2&NG3) 之遲滯因數( $R_f$ )均高於其混合花崗岩 (WG3&WG4)，其實驗結果與 103 年計劃中吸附實驗趨勢相似(表 7)，膨潤土 (MX80 或日興土) 混合硬頁岩對銨 (Sr) 核種的吸附性較優於其混合花崗岩。

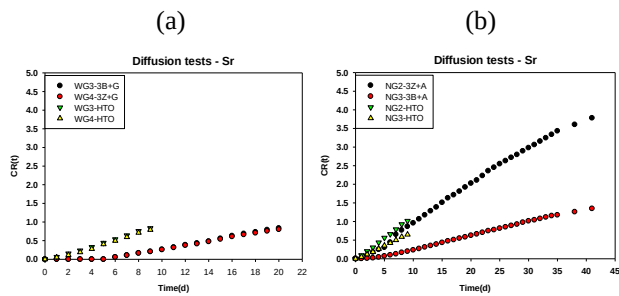


圖 6、反應性核種擴散實驗-鋇 (Sr) (a) 膨潤土(或日興土)+金門花崗岩;(b) 膨潤土(或日興土)+台東硬頁岩。

表 5、鋇 (Sr) 核種擴散實驗參數

| 編號<br>No. | 固相<br>sample | 有效擴散<br>係數<br>$D_e(m^2/s)$ | 視擴散<br>係數<br>$D_a(m^2/s)$ | 遲滯<br>因數<br>$R_f$ | 分配<br>係數<br>$K_d$ | $t_d$ |
|-----------|--------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------|
| WG3       | 3B+G         | 6.91E-11                   | 8.53E-12                  | 20.25             | 4.81              | 2.05  |
| WG4       | 3Z+G         | 7.45E-10                   | 7.24E-12                  | 22.88             | 5.47              | 1.74  |
| NG2       | 3Z+A         | 2.50E-10                   | 1.42E-11                  | 43.89             | 10.72             | 5.61  |
| NG3       | 3B+A         | 7.77E-11                   | 5.64E-12                  | 34.45             | 8.36              | 2.22  |

## (2) 鉈 (Cs)

鉈 (Cs) 核種累積突破曲線與時間關係圖，顯示如圖 7。可由其結果發現，鉈 (Cs) 在固定密度 ( $\rho_b = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 不同膨潤土混合固相材料中具有較明顯遲滯現象，實驗約 20 天後可達穩態 ( $t_d > 0.45$ )，可由其結果與氙水實驗比較得知。此外，根據表 (6) 可知膨潤土 (MX80 或日興土) 混合硬頁岩 (NG1&NG4) 之遲滯因數( $R_f$ )均高於其混合花崗岩 (WG1&WG2)，其實驗結果與 103 年計劃中吸附實驗趨勢相似 (如表 7)，膨潤土 (MX80 或日興土) 混合硬頁岩對鉈 (Cs) 核種的吸附性較優於其混合花崗岩。

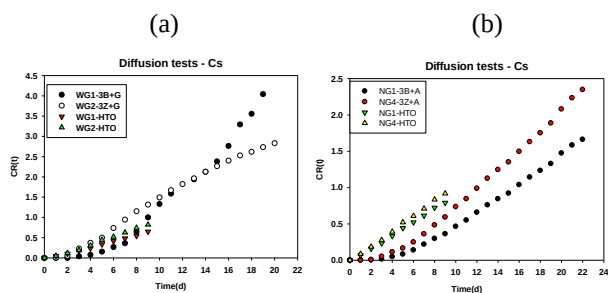


圖 7、反應性核種擴散實驗-鉈 (Cs) (a) 膨潤土(或日興土)+金門花崗岩;(b) 膨潤土(或日興土)+台東硬頁岩

表 6、鉈 (Cs) 核種擴散實驗參數

| 編號<br>No. | 固相<br>sample | 有效擴散<br>係數<br>$D_e(m^2/s)$ | 視擴散<br>係數<br>$D_a(m^2/s)$ | 遲滯<br>因數<br>$R_f$ | 分配<br>係數<br>$K_d$ | $t_d$ |
|-----------|--------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------|
| WG1       | 3B+G         | 2.28E-10                   | 2.28E-11                  | 25.01             | 6.00              | 0.94  |
| WG2       | 3Z+G         | 2.78E-10                   | 1.28E-11                  | 54.20             | 13.30             | 1.60  |
| NG1       | 3B+A         | 1.80E-10                   | 3.04E-12                  | 148.48            | 36.87             | 0.64  |
| NG4       | 3Z+A         | 2.23E-10                   | 3.15E-12                  | 141.05            | 35.01             | 0.74  |

表 7、比較批次實驗和擴散實驗之  $K_d$

| 編號<br>No. | 固相<br>sample | 核種 | 103 年吸附實驗<br>Batch test- $K_d$ | 104 年擴散實驗<br>Diffusion test- $K_d$ |
|-----------|--------------|----|--------------------------------|------------------------------------|
| WG1       | 3B+G         | Cs | 24.86                          | 6.00                               |
| WG2       | 3Z+G         | Cs | 21.28                          | 13.30                              |
| WG3       | 3B+G         | Sr | 5.84                           | 4.81                               |
| WG4       | 3Z+G         | Sr | 17.28                          | 5.47                               |
| NG1       | 3B+A         | Cs | 227.19                         | 36.87                              |
| NG4       | 3Z+A         | Cs | 205.06                         | 35.01                              |
| NG3       | 3B+A         | Sr | 30.19                          | 8.36                               |
| NG2       | 3Z+A         | Sr | 19.37                          | 10.72                              |

本計畫之結果與 103 年比較得知，不同實驗方法(批次吸附實驗和管柱擴散實驗)所得分配係數 ( $K_d$ ) 之差異 (如表 7)，可發現以擴散實驗所得的分配係數 ( $K_d$ ) 均小於批次吸附實驗，其中以較高吸附性的鉈核種差異最為明顯，有一個級數 (order)。其可能因批次實驗為固定固液比例且均勻混合之實驗條件與擴散實驗有所差異，核種吸附行為在傳輸的過程中，可能扮演重要的角色，但可能由於傳輸路徑的不同條件 (不同材料、孔隙率、粒徑大小) 均可能造成核種在膨潤土中吸附行為差異，進而造成分配係數 ( $K_d$ ) 之變異變大。

## 2. 反應性核種擴散實驗-鉈 (不同密度)

為了瞭解不同壓密程度之膨潤土混合固相材料對於核種遷移之影響，本實驗針對鉈核種在不同密度 ( $\rho_b = 1.8$  與  $2.0 \text{ g/cm}^3$ ) 之膨潤土 (75%) 混合花崗岩 (25%) 進行擴散實驗，並與密度 (WG1&WG2;  $\rho_b = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 之結果比較其擴散參數之差異。

實驗結果 (如圖 8) 顯示，高密度 ( $\rho_b = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ) 膨潤土混合花崗岩均較低密度 ( $\rho_b = 1.6$  與  $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) 具有較明顯遲滯現象，實驗約 45 天後方可達穩態 ( $t_d > 0.45$ )。此外，由表 (8) 可知密度愈高，視擴散係數 ( $D_a$ ) 和有效擴散係數 ( $D_e$ ) 皆愈低；遲滯因數 ( $R_f$ ) 和分配係數 ( $K_d$ ) 則會愈大。其結果顯示密度愈高，核種擴散時間愈慢。

此外，再以其實驗結果與 103 年計畫成果比較 (如表 9)，可知批次實驗之分配係數 ( $K_d$ ) 約與高密度 ( $\rho_b = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ) 的擴散實驗計算所得結果相近。

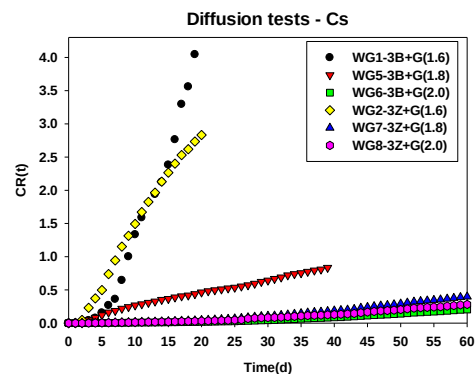


圖 8、不同密度反應性核種擴散實驗-鉈 (Cs)

表 8、銻 (Cs) 核種擴散實驗參數-不同密度

| 編號<br>No. | 固相<br>sample | 乾密度<br>$\rho_b(\text{g/cm}^3)$ | 有效擴散<br>係數<br>$D_e(\text{m}^2/\text{s})$ | 視擴散<br>係數<br>$D_a(\text{m}^2/\text{s})$ | 遲滯<br>因數<br>Rf | 分配<br>係數<br>$K_d$ | $t_d$ |
|-----------|--------------|--------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|-------------------|-------|
| WG1       |              | 1.6                            | 2.28E-10                                 | 2.28E-11                                | 25.0           | 6.00              | 0.94  |
| WG5       | 3B+G         | 1.8                            | 7.45E-10                                 | 7.24E-12                                | 22.9           | 5.47              | 1.74  |
| WG6       |              | 2.0                            | 1.79E-11                                 | 6.59E-13                                | 108.9          | 26.97             | 0.51  |
| WG2       |              | 1.6                            | 2.78E-10                                 | 1.28E-11                                | 54.2           | 13.30             | 1.60  |
| WG7       | 3Z+G         | 1.8                            | 2.81E-11                                 | 9.31E-13                                | 94.3           | 23.33             | 0.72  |
| WG8       |              | 2.0                            | 2.00E-11                                 | 9.30E-13                                | 86.2           | 21.30             | 0.72  |

表 9、比較批次實驗和不同密度擴散實驗之  $K_d$ 

| Sample | 103 年吸附實驗<br>Batch test- $K_d$ | 104 年擴散實驗<br>Diffusion test- $K_d$ |                |                |
|--------|--------------------------------|------------------------------------|----------------|----------------|
|        |                                | $\rho_b = 1.6$                     | $\rho_b = 1.8$ | $\rho_b = 2.0$ |
| 3B+G   | 24.86                          | 6.00                               | 5.47           | 26.97          |
| 3Z+G   | 21.28                          | 13.3                               | 23.33          | 21.30          |

#### IV. 結論

本研究計畫主要在探討緩衝回填材料(75%膨潤土+25%母岩)對放射性核種銻、銻的擴散行為，以及其受不同壓密程度影響之擴散行為差異，藉以提供後續最終處置場施工之依據。

非反應性核種實驗結果顯示，氚水 (HTO) 的擴散係數約為  $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ，可觀察得知不同材料並不會對氚水擴散行為造成太大影響，只有孔隙率是影響氚水擴散的因素。此外，銻 (Sr) 與銻 (Cs) 核種的擴散實驗結果可了解膨潤土 (MX80 或日興土) 混合硬頁岩之遲滯因數 ( $R_f$ ) 均高於其混合花崗岩，而壓密的混合材料密度愈高 ( $\rho_b = 2.0 \text{ g/cm}^3$ )，視擴散係數 ( $D_a$ ) 和有效擴散係數 ( $D_e$ ) 皆愈低；遲滯因數 ( $R_f$ ) 和分配係數 ( $K_d$ ) 則會愈大，其結果顯示管柱密度愈高，核種擴散時間愈慢，較具有利於核種遲滯於緩衝回填材料中之特性。

以本 (104) 年計畫與 103 年計畫成果比較其分配係數 ( $K_d$ ) 之差異，可發現以擴散實驗 ( $\rho_b = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 所得的分配係數 ( $K_d$ ) 均小於批次吸附實驗，其中以較高吸附性的銻核種差異最為明顯，有一個級數 (order)。進一步實驗了解批次實驗之分配係數 ( $K_d$ ) 約與高密度 ( $\rho_b = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ) 的擴散實驗計算所得結果相接近。

在處置場的安全評估中，雖然擴散實驗時間花費較長 (數月)，但其所得的分配係數 ( $K_d$ ) 較批次實驗保守，因此，其實驗結果除了可以預測潛在場址是否具有利地質條件外，也可做為未來處置場施工之依據。

#### 參考文獻

- [1] Pigford, T.H.. The Engineered Barrier System: Performance Issues, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. 249, 657-662 (1993).
- [2] Jan, Y.L., S.C. Tsai, J.C. Jan, C.N. Hsu, *J. of Radio. Nuclear. Chem.* 267 (2006) 1.
- [3] Lee, C.P., M.C. Wu, T.L. Tsai, H.J. Wei, L.C. Men.

Comparative study on sorption additivity of individual and coexisting cesium and selenium on bentonite/quartz sand mixtures, *International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering*, 2, 1, ISSN:2226-3217 (2012).

- [4] Y.L. Tu, Lee, C.P., M.C. Wu, S.C. Tsai, C.Y. Liu, T.L. Tsai. Study the Adsorption Parameters of Buffer/Backfill Materials for Radioactive Waste Disposal Sites. (oral session) The 21st International Conference & Exhibition: " Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future (Global 2015), Sep. 20-24, 2015, Paris, France
- [5] M.C. Wu, Lee, C.P., Y.L. Tu, C.H. Pan, S.C. Tsai, T.L. Tsai, H.J. Wei, C.Y. Liu. Sorption and Diffusion Studies for Cs in Crushed Argillite and Granite via Through-Diffusion Experiments. (oral session) The 21st International Conference & Exhibition: " Nuclear Fuel Cycle for a Low-Carbon Future (Global 2015), Sep. 20-24, 2015, Paris, France
- [6] 許俊男，低放射性廢料處置場址特性參數審查評估之研究—銻、銻、銻在省產黏土礦物中擴散參數之研究，原能會物管局專題研究報告 (1995)。
- [7] 林哲毅，「從緩衝材料觀點研究放射核種在膨潤土中的吸附與擴散行為」，碩士論文，國立清華大學原子科學研究所，新竹 (1997)。
- [8] 工研院，「小坵嶼地下水文調查工作報告」，共 105 頁 (2001c)。
- [9] 陳文泉，「高放射性廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究」，博士論文，國立中央大學土木系，中壢 (2004)。
- [10] 郭明峰，「皂土-碎石混合物之壓實性質」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢 (2004)。
- [11] 吳柏林，「放射性廢料處置場中砂-皂土混合緩衝材料之壓實性質」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢 (2004)。
- [12] 吳冠漢，「緩衝材料於近場環境下之體積穩定性研究」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢 (2004)。
- [13] 曹瑞軒，「模擬低放射性廢棄物處置場於工程障壁地下水化學分析」，碩士論文，國立臺灣大學生環系，台北 (2011)。
- [14] 張皓鈞，「放射性廢棄物最終處置場緩衝材料與混凝土障壁的交互作用」，碩士論文，國立中央大學土木系，中壢 (2011)。

# 放射性廢棄物長期貯存與最終處置之比較研究

## Comparison of Long-term Storage and Final Disposal of Nuclear Wastes

計畫編號：MOST 105-NU -E-006-002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：劉大綱

e-mail：tkliu@mail.ncku.edu.tw

計畫參與人員：王毓正、邱鈺萍、李政霆、翁翊棠、張漢群

執行單位：國立成功大學海洋科技與事務研究所

### 摘要

在核電廠紛紛到達退役年限，核廢料長期貯存或最終處置等問題亟待解決。本研究藉由文獻分析法探討國外放射性廢棄物長期貯存與最終處置之現況，並以深入訪談法分析利害關係人在此議題上之觀點。研究發現國外對長期貯存之定義歐盟為至少為30年，而美國可長達160年。質性訪談分析指出，由於我國核廢料的處置方案與選址問題，往往被反核團體視為與核能利用存廢的議題息息相關，在此背景局限下核廢料處置之政策討論難以開展，停留在核能存廢立場之爭之僵局。選址不應該被延遲到暫存貯存設施即將用罄才倉促著手，否則核廢料的輻射風險無法獲得完善的管理與控制。未來核廢管理政策上，應加強開放性透明度和公眾參與，核廢安全及政策的資訊能夠透明公開，讓一般民眾能夠以簡單的方式獲得相關的資訊，減少錯誤認知所產生之不信任感，並增進政策溝通的效率及品質。

關鍵詞：核能廢棄物、長期貯存、利害關係人、除役、公眾參與

### Abstract

Since most of the nuclear power plants in Taiwan have reached the end of operation, the issues regarding the long term storage or final disposal of the radioactive wastes becomes very critical. In this study, we employed document analysis and in-depth interview with important stakeholders to evaluate problems that may be encountered when disposing the nuclear wastes. It is noted that long term storage of nuclear waste is at least 30 years in EU, and can be as long as 160 years in the US. Results of qualitative interviews reveals that the nuclear waste management policy in Taiwan has long been tied with nuclear energy policy. The siting of the long term storage facilities should not be delayed until the current spaces is exhausted, otherwise the risk of nuclear wastes cannot be properly controlled and managed. The future policy of nuclear waste management should focus on openness, transparency, and public participation. Information on the safety of nuclear waste and related policy should be more transparent so that the general public can obtain relevant information in a simple manner.

Keywords: nuclear waste, long term storage, stakeholder, decommissioning, public participation

### I. 前言

用過核子燃料及放射性廢棄物的處置及貯存是核能發展中重要的環節之一，對此，國際社會一致認為有

必要通過一個以維持用過核子燃料及放射性廢棄物管理方面安全為最高目標的公約：《用過核子燃料及放射性廢棄物管理安全聯合公約》(下稱聯合公約)，作為國際上針對用過核子燃料及放射性廢棄物管理議題之主要溝通平台。台灣在面臨核廢貯存與處置議題時，應如何取得各利害關係人之間支持，將是我國能源政策即將面臨之重要課題。

### II. 主要內容

本研究藉由文獻分析法及質性研究法等，由各國因應聯合公約所繳交之國家報告探討國外關於用過核子燃料及放射性廢棄物長期貯存與最終處置之政策與案例，並進一步針對台灣國內之各個焦點團體進行半結構式深入訪談之模式，將軸心問題標準化後作為訪談過程中的大綱，並循此架構在訪談中以放射性廢棄物長期貯存與最終處置相關議題為主要焦點，引導受訪之利害關係人能夠暢談對於此議題之觀點看法與認知，以利了解現今國際趨勢及彙整國內對於此議題之多元觀點，並使未來核廢議題能夠遵循放射性物料管理法之規定以符合相關國際公約之要求，並且作為未來台電及原能會政策執行之參考依據。

### III. 結果與討論

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

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

|     |      |           |
|-----|------|-----------|
| 法國  | 長期貯存 | 至少 60 年   |
| 荷蘭  | 長期貯存 | 至少 100 年  |
| 德國  | 長期貯存 | 至多 40 年   |
| 加拿大 | 乾式貯存 | 至少 100 年  |
| 日本  | 暫時貯存 | 30 至 50 年 |

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

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

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

受訪者認為關於核廢處置議題相比於一般的能源議題，關心的民眾更多，影響社會的層面也更廣。故不應該由政府關起門來做決定，透過讓過程透明，並且讓民眾得以便利的取得想了解的資訊，開放民眾參與討論等等方式也能夠增進民眾的對於此議題的理解，使得人民不再隨著謠言起舞，未來政府與民眾相關的討論也能夠變的更有效率，更能夠做出更符合大眾利益的決策。公共參與有助於弭平目前台灣社會針對核能議題的衝突。故決策制定的過程必須公開、透明，並且充分的與民眾說明、討論，增加公民參與的管道來協調各方的聲音、彙整出各方的共識，透過完善的法規制度來運作以得到民眾的認同及信任。

德國在核廢處理必要性的共識達成上，普遍承認充分地善用審議民主(deliberative democracy)模式的民眾參與決策(participation in decision-making)有助於相關社會衝擊的掌握以及提高民眾接受度。此即呼應一部份的受訪人所言，公民參與應可作為我國目前核廢處理政策開展不易之解套方法之一。

#### IV. 結論

最終處置的目標為將其從人類的生活圈完全隔離，使之不致影響到人們生活。其中包含兩種路線：直接處置及經再處理後處置。目前國際間主要研究的處置方法為深地質處置，其中除制度與技術層面的問題外，近年來尚有民眾接受度以及風險溝通等在國內外皆逐漸受到重視的議題，如何提高民眾對於可控制風險的接受度，及我國未來如何處理核廢處置等風險溝通議題之研究非常重要。

IAEA 針對長期貯存有特別述明需設立一個結束點，因貯存只是一個暫時的過渡狀態，提供緩衝最終處置做準備，亦即各國對於貯存年限的定義雖各有不同，但不能將長期貯存無限的延長。依本研究所收集的國際對於長期貯存之定義，各國皆有針對貯存的年限訂下目標以配合處置設施的發展。

民眾拒絕嫌惡性設施在鄰近地區設置的鄰避現象，是民主制度在本質上難以處理的困境。正因為會有此困境，選址不應該被延遲到暫存貯存設施即將用罄才倉促著手，否則在迫於時間壓力下可能影響到決策的品質，因此如何充分的與民眾溝通能讓民眾對於政策更放心以減少衝突，進而提升整體效率是未來重要的課題。

本研究目前之深入訪談的結果，已初步了解各利害關係人對於核廢料處置議題之觀點。後續計畫將再利用紮根理論來推導歸納出影響利害關係人對核廢料處置之觀點與接受度的核心因素，並嘗試導入審議式民主之精神尋求公共利益以及各方均可接受方案，以真正落實民主的基本價值。

#### 參考文獻

- [1] IAEA (2012). IAEA Safety Standards, Storage of Spent Nuclear Fuel, Specific Safety Guide, No. SSG-15.
- [2] European Atomic Energy Community (2015). On the implementation of the obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Fifth Review Meeting of Contracting Parties Vienna, May 2015.
- [3] IAEA (2014). United States of America Fifth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.
- [4] DECC (2014). The United Kingdom's fifth national report on compliance with the obligations of the Joint Convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management.
- [5] IAEA (2014). FRANCE, Fifth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations.
- [6] IAEA, Netherlands, Fifth National Report on Compliance with the Joint Convention.
- [7] IAEA (2014). Canadian National Report for the Joint

Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

- [8] AEA (2012). Report of the Federal Republic of Germany for the Fourth Review Meeting in May 2012 Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.
- [9] IAEA (2014). National Report of JAPAN for the Fifth Review Meeting, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management.

# 乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬

## Simulating the thermal behavior of dry storage system under regular storage situation

計畫編號： MOST 104-2623-E-007 -008 -NU

計畫類別： ☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫主持人：曾永信

e-mail： [ytseng@mx.nthu.edu.tw](mailto:ytseng@mx.nthu.edu.tw)

計畫參與人員：朱璟豪、賴科維

執行單位：國立清華大學原科中心

### 摘要

為增進對乾貯系統於長期貯存下熱流特性之瞭解，本研究透過計算流體力學分析技術，發展一套兼具計算效率與精確度之二維分析模式，並藉以探討外界天氣對於乾貯系統監測結果之影響。分析結果顯示，乾貯系統空氣流之進出口溫差將因為出口不受環境溫度明顯影響而出現振盪。此外，分析中所得之系統元件溫度將因熱質量之故，而降低了瞬間溫度衝擊之影響，此結果證實安全分析報告採用 32°C 最高日平均溫度進行分析之合適性。最後，對於環境溫度變化而造成系統監測值波動的現象，可考慮透過滾動式平均來提升監測結果之穩定性。

關鍵詞：乾貯系統、熱流特性、計算流體力學、環境溫度影響、監測方法。

### Abstract

In order to further understand the thermal hydraulic behavior under long-term storage statue, the computational fluid dynamics technology has been employed to develop a high accuracy 2-D model with calculation performance. The environment temperature influence of the surveillance data for the dry storage system was also been investigated in this study. The simulated results indicate that the temperature difference of the air channel of DSS will be affected because the outlet temperature will not be obviously fluctuation with varying environment temperature. Furthermore, the analyses result also indicate that the components temperature of dry storage system does not obviously due to the thermal mass of DSS amortize the by thermal shock induced by instant temperature changing. This finding prove that the 32°C ambient defined in the SAR is appropriated. Finally, the fluctuation behavior of the system measured data might be improved via using the rolling average of ambient temperature within an appropriate time interval.

Keywords: Dry storage system, Thermal hydraulic behavior, Computational Fluid Dynamics, ambient temperature, surveillance method.

### I. 前言

我國兩座乾式貯存系統[1-2]，係基於美國 NAC 公司所設計，並先後經美國核管會與我會原子能委員會審核通過之混凝土護箱式乾貯系統。此類乾貯系統之設計

係利用具抗腐蝕能力之金屬密封鋼筒與內部的燃料提籃，將用過核子燃料裝載於其中，並經嚴謹之排水與回充氬氣作業與密封後再運送至具鋼製內襯的混凝土護箱中存放，以達到降低人員與環境劑量並提供充足結構強度，以抵抗設計基準事故或假設性人為破壞。

由於此一厚實結構設計所提供的熱質量，乾貯系統在長期貯存時，採用自然散熱之乾貯系統將因此維持在一相對穩定之溫度下，不易因外界環境之變化而產生波動。也因此，在原有的安全分析報告中，係採用保守之場址氣溫配合穩態分析來進行系統的熱流分析工作，故未對長期貯存時之溫度波動更進一步進行探討。

然而，在我國物管局在進行核二乾貯安全分析報告之審查作業時指出，相較於熱流分析所獲得之系統空氣通道進出口溫度為 39°C，核二廠所採用之 LCO 係為 50°C 之值，並要求 NAC 公司進行答覆說明[3]。為此，NAC 提供美國境內某乾貯場址之護箱實測資料(表 1)來加以說明，此一考量係基於乾貯系統之監測數據可能因為環境因素；例如日夜溫差、日照、降雨及風速等因素而產生變化，故於安全分析報告中將上述因素納入運轉限制條件( limiting condition of operations, LCO)之中，以避免貯存期間因環境因素而造成誤訊號。

表 1、美國境內某乾貯系統之裝載條件與監測結果

| VCC ID | Load (kW) | T <sub>amb</sub> (°F) | T <sub>out</sub> (°F) | ΔT(°F) |
|--------|-----------|-----------------------|-----------------------|--------|
| 006    | 13.7      | 77                    | 114                   | 37     |
| 007    | 16.0      | 37                    | 91                    | 54     |
| 008    | 15.0      | 39                    | 75                    | 36     |
| 010    | 13.5      | 34                    | 86                    | 52     |
| 011    | 14.8      | 51                    | 92                    | 41     |
| 012    | 13.9      | 70                    | 106                   | 36     |
| 020    | 15.4      | 80                    | 141                   | 61     |

為了能更進一步瞭解乾貯設施因環境參數之波動而造成的影響，並釐清現有乾貯設施於長期貯存下之溫度變異狀況，進而評估上述 LCO 定義值之合理性。本研究透過為期三年之原子能科技學術合作研究計畫，針對此一探討此一熱流特性之議題，進行分析技術之發展並依序探討我國二座乾貯系統之熱流特性，並提供評估結果以釐清管制單位與外界對乾貯作業之安全疑慮。

本期之研究目的即是透過合適之計算流體力學分析軟體(Computational Fluid Dynamics, CFD)[4]發展一套精確性與計算效率之分析技術，以克服對乾貯系統進行全年度暫態分析之龐大計算負擔；以下將就本期研究成果中所建立之技術與初步研究成果進行匯整及說明。

## II. 主要內容

本期研究之主要技術發展工作係包括二維分析模式建立、邊界條件模式發展與初步環境參數之影響評估，以下將分別就各項模式發展、校驗與邊界條件等項進行說明。

### 三維分析模式

為確保本研究所建立之二維分析技術的確可以掌握乾貯系統之熱流特性，並不致因為幾何模型維度的簡化而喪失應有的模擬能力，本研究遂選用 EPRI 針對 VSC-17 乾貯系統進行實測之數據進行三維分析模式之發展，以避免直接引用實測數據時，可能因為監測點位置有限，而出現無法全面涵蓋整體熱流特性之狀況。

研究中所建立之三維 VSC-17[5]模型如圖 1 所示，而其燃料束熱負載之配置與軸向分佈因子則分別如圖 2 與圖 3 所示；而本研究為確實模擬其燃料配置與軸向功率因子，更利用分析軟體所具有之使用者定義函數(User Defined Function, UDF)[6]來進行相關邊界條件之建立。

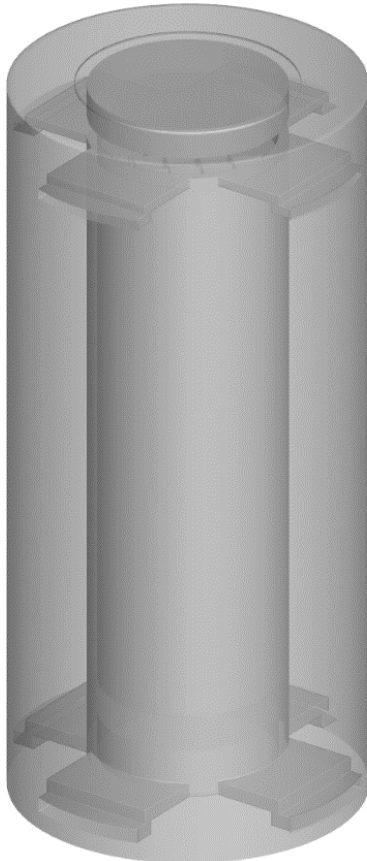


圖 56 VSC-17 之三維幾何模型

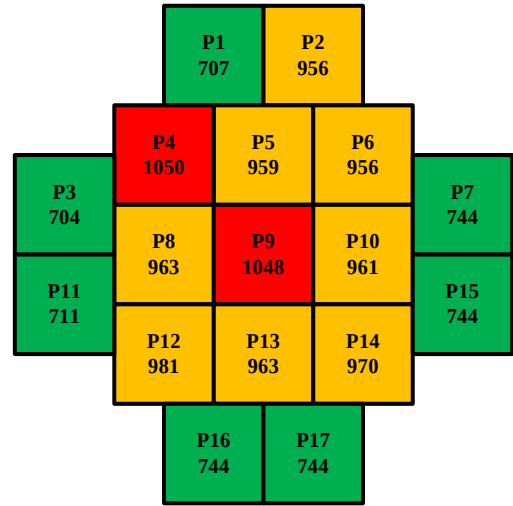


圖 57 VSC-17 之燃料佈局

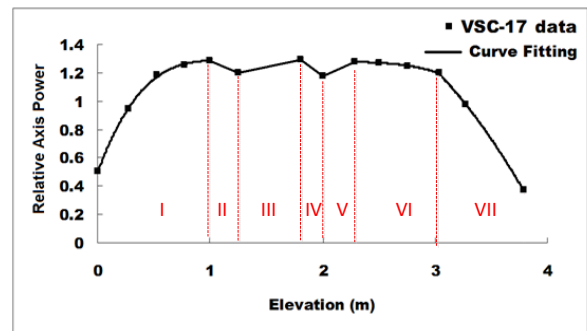


圖 58 VSC-17 之燃料櫃軸向功率分布

此一三維模式所得之燃料束分佈狀況與整體溫度校驗結果如圖 4 與圖 5 所示。其中的燃料束溫度分佈結果顯示，雖然 VSC-17 燃料之熱負載(圖 2)係為非對稱分佈，但在熱對流與輻射熱傳的作用下其截面溫度係近似同心圓分佈且未因為燃料的不對稱佈局而產生明顯的溫度不對稱性。此結果亦充份佐證，即使在此非對稱燃料配置下，仍可透過二維軸對稱模型來掌握內部之對熱流現象。

圖 5 之校驗結果則證實此一三維模型確實可以掌握此乾貯系統各區(如燃料束、護箱與密封鋼筒)之溫度分佈，並可供後續二維模式發展與平行驗證之用。

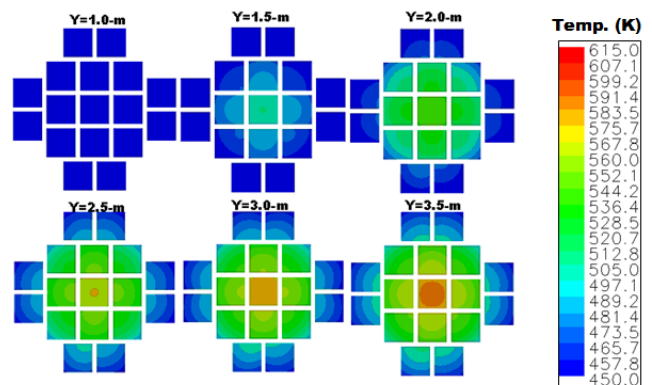


圖 59 VSC-17 之燃料櫃軸向功率分布

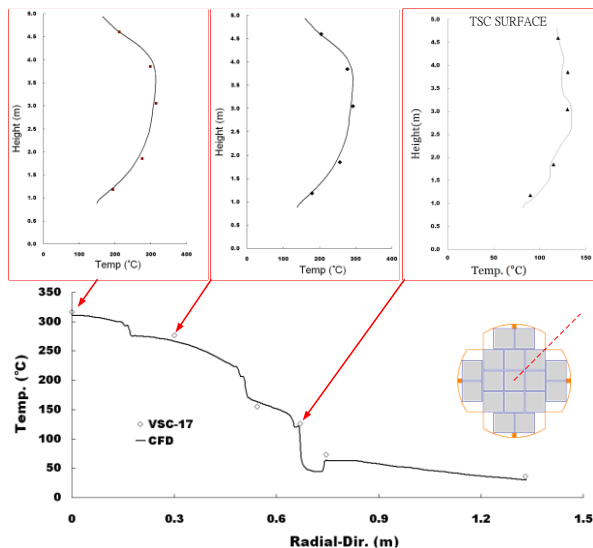


圖 60 VSC-17 之燃料櫃軸向功率分布

### 二維分析模式

基於前述之三維模式，本研究即利用二維軸對稱之概念將三維模型中的各項幾何形狀，依據水力特性進行均質化作業，並使其各項熱水力特徵長度或尺寸；例如燃料及對流通道截面積、提籃側邊表面積等與原始三維模型一致，以期達成兩組分析模型可以採用一致之材料性質。

如圖 6 所示，為證實透過合理簡化與分區之二維模型中，仍可精確掌握乾貯系統內部複雜之熱流現象。本研究建立了四種分析模式以探討不同均質化呈度的二維分析模式對分析結果的影響。其中，最左方之模式係代表最簡化之二維模式，而最右方之模式則詳盡考量各燃料匣、支持件等結構，並依循先前提及之方法，在控制熱水力特徵與流道特性之前提下所完成的分析模型。

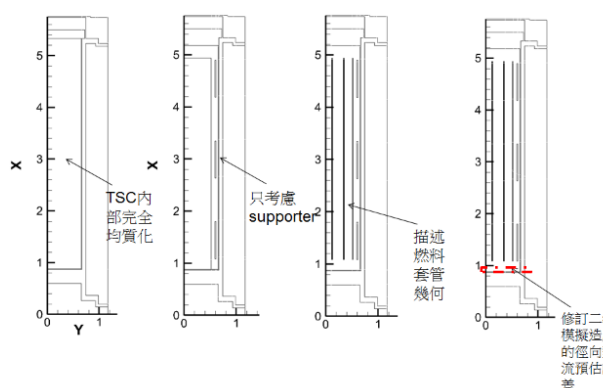


圖 61 VSC-17 之三維分析模型

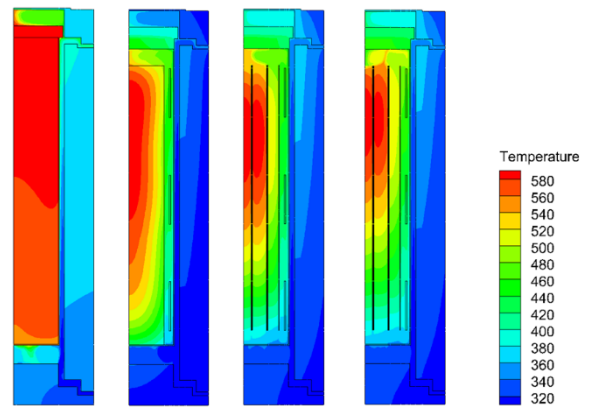


圖 62 不同二維分析模型之溫度分佈

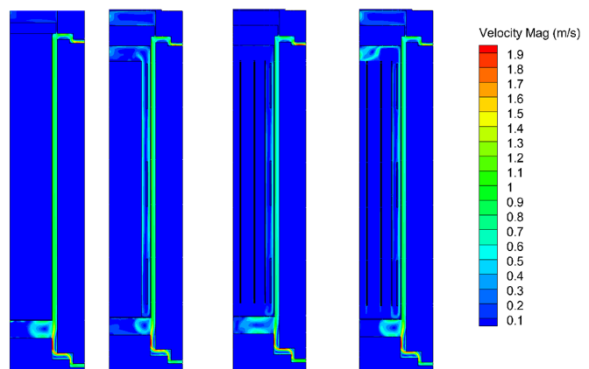


圖 63 不同二維分析模型之速度分佈

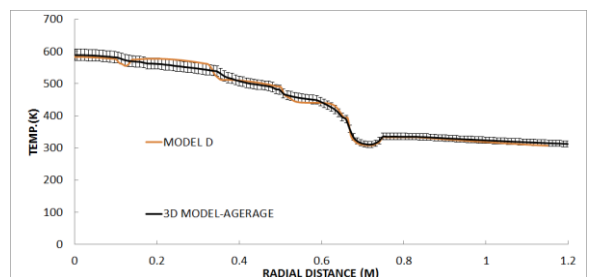


圖 64 三維與二維分析模式之平行驗證

模擬結果顯示，在大幅忽略內部結構所造成的熱流貢獻時(圖 7&8)，將無法正確掌握內部之對流與溫度分佈。並將使預測所得之元件溫度大幅高於三維模型；也因此，本研究選用以最詳盡之二維分析模型進行後續之案例分析；而此模型與三維模型之平行驗證則如圖 9 所示。其結果充份顯示，在考慮各結構物之幾何特徵並轉換為對應之水力特徵尺寸後，可使模擬所得之溫度差異低於 2.5%，且整體貯存之能量(顯熱)差異更低於 0.1%，已足以符合本研究之暫態分析需求，而無需利用網格數高出仟倍的三維模型進行暫態分析。

### 邊界條件建立

由於環境因子對於乾貯系統之熱流特性影響主要係包括作用於護箱表面之日照輻射以及隨日夜與一年四季變化之環境溫度，其中日照輻射係為規律且可被公式計算，故本研究中不再採用原安全分析報告之日照輻射熱假設來作為邊界條件，而以 FLUENT 內建的 solar tracing model 來計算特定時間下的日照角( $\cos\theta$ )並作為模擬期間之邊界條件，其計算式為：

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \\ &+ \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega \\ &+ \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \\ \delta &= 23.45 \sin\left[360 \times \frac{(284 + n)}{365}\right] \end{aligned}$$

$$\omega = 15^\circ \times (m - 12);$$

經此法求得之日照輻射變化趨勢，則如圖 10 所示。

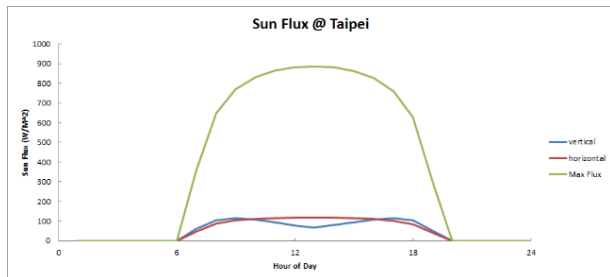


圖 65 混凝土護箱表面日照通量設定

另一方面，由於環境溫度係屬於不規律且無法以模式加以描述之邊界條件，故本研究則選由安全分析報告與場址周圍氣象監測資訊進行涵蓋；經蒐集所其年均溫為 22.2°C 而最高日均溫則為 31.6°C 故於研究中將其年度溫度振幅( $T_{\text{jump}}$ )保守假設為 10°C，並以下式進行描述：

$$\Delta T_{\text{time}} = T_{\text{jump}} * \sin(\Delta t / t_{\text{period}} * 3.141592 * 2).$$

其中，

$\Delta T_{\text{time}}$  為當前時間之溫度變異量；

$T_{\text{jump}}$  所定義之大最溫度振幅；

$\Delta t$  為當前時間；

$t_{\text{period}}$  為溫度振盪之周期大小。

在將環境溫度以上式進行處理並由撰寫為 udf 程式碼後，即可與先前所完成之二維模式、日照輻射等功能整合為完整之分析方法論，以進行後續之案例分析。

### III. 結果與討論

由已蒐集得之環境溫度趨勢圖發現，當處於晴天時，全天的溫度將因為日照輻射的影響而呈現明顯的波動(圖 11)；反之，當天氣為雨天時其溫度將不隨時間的改變而有明顯的變化。在將上述之資訊加以整合後，本研究擬透過三個案來涵蓋可能發生於乾貯場址之環境溫度變化：

1. 假設連日雨天之溫度階降案例；
2. 假設氣候穩定之連續晴天；
3. 一年四季環境溫度變化案例。

以下將對上述之三種案例之分析結果進行探討。

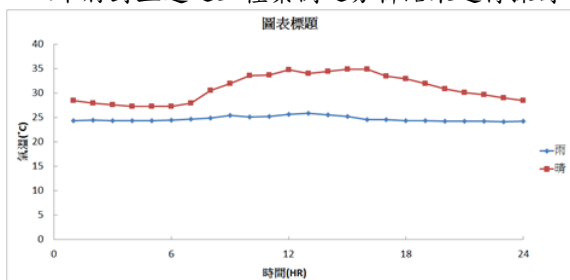


圖 66 晴、雨天對於環境溫度之影響

### 溫度階降案例

當溫度階降狀況發生時，乾貯系統將會因為環境溫度的下降而造成元件溫度與環境溫度差值的增加，並使系統內的自然對流因為溫度差的提高而增強。因此系統之整體溫度分佈(圖 12)雖然前穩態分析(圖 7)之結果相近，但仍有若干不同。例如，進口區混凝土的溫度將會因為較冷空氣的冷卻移熱而明顯低於其它地方，並產生與先前不同的溫度分佈；相似的現象亦可發現於護箱頂部的上升氣流與密封鋼筒頂端之溫度分佈之處。由於上述的變化係為緩慢且不甚明顯的，故為能更進一步的探討此一階降案例之影響，本研究遂將 VSC-17 重要元件之溫度變化趨勢以環境溫度之變異量加以無因次化 ( $\frac{T_{\text{comp},t=0} - T_{\text{comp},t}}{\Delta T_{\text{amb}}}$ )，以便更深入探討各元件在此事件下之變化趨勢。

如圖 13 所示，當環境溫度發生改變時，位於系統較外側的混凝土護箱、鋼質內襯及 TSC 外殼將具最迅速的反應此一邊界條件的改變。這是因為上述的三各元件皆與空氣直接接觸而受到流體溫度改變之直接影響。然而若更進一步的評估則可以發現，在事故發展一段時間後，TSC 殼體之影響將比另外之元件為慢；這是因為 TSC 殼體本身是主要熱由內部向外傳遞之主要途徑，且持續會獲得一定之熱通量之故。

另一方面，由圖面上亦可發現，在此事件發生的 20 小時之內各元件之溫度變化量將只有環境溫度變化值的一半，甚至在 1-2 小時間，外部元件(如混凝土護箱)之變異量將只有 10%，而內部元件之變異量更可忽略不計。此一結果也意味著過短暫態之事件只能有限度的影響外部元件，而無法對內部元件或燃料造成顯著影響。因此對於短暫的陰天、陣雨或是陣風可視為不致對乾貯系統造成影響。例如以安全分析中的持續數分鐘的 800°C 火災事故來看，將只能造成外側元件約略 5% (~40°C) 之溫度變化，且不致對燃料造成任何影響。

### 連日晴天案例

相較於前述持續較短時間的暫態變化，若假設系統處於連日晴天之狀況下，並受日夜溫差變化之影響時可以發現，在以 24 小時為周期的溫度變化案例中，整體元件之溫度變異實則與採用穩態分析的安全分析報告並無明顯不同，其最大變異量僅有 0.73%，而燃料更僅有 0.06%(表 2)；此結一果證實，乾貯系統在氣候穩定時其元件將會因為系統之熱質量龐大之故而維持在相對穩定之溫度。

然而上述結果更意味著，當夜間氣溫變低時，流入乾貯系統空氣通道的空氣將會與乾貯系統具有更大的溫差，使得更多的熱能藉由空氣流道之對流移除至大氣中。更進一步的觀察系統進出口的溫度變化(如圖 14 所示)則可以發現，系統之出口溫度並未受到持續變化之環境溫度影響而維持在一相對穩定之數值。這意味著系統的進出口溫度差將因為夜間環境溫度的下降而增大，並於午間因為環境溫度的提高而縮小(圖 15)。此一結果充份證實 NAC 向物管局呈交之實測數據及推論係為合理且可能於未來貯存期間發生之狀況。

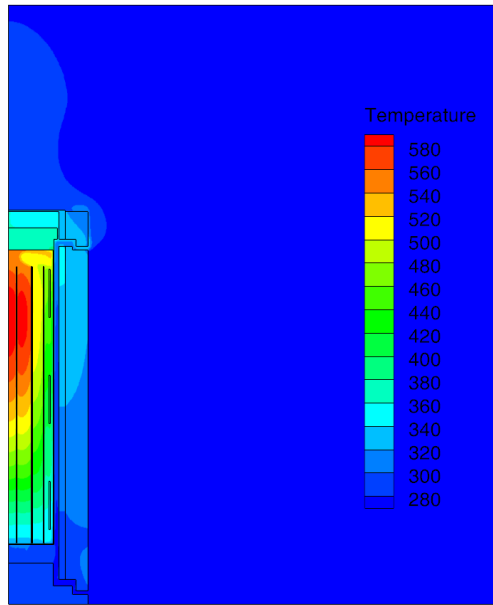


圖 67 溫度階降初始時對整體系統之溫度影響

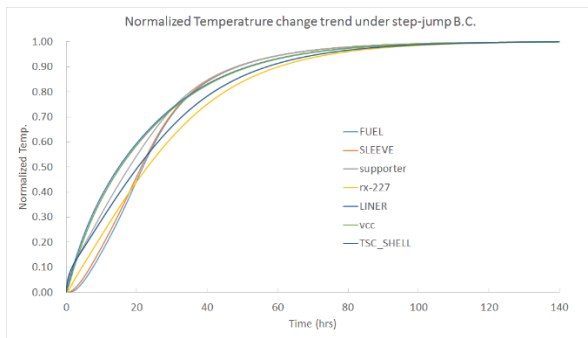


圖 68 溫度階降對系統元件之影響

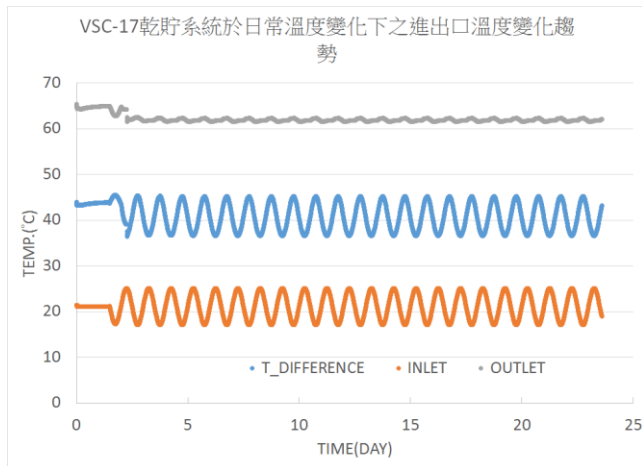


圖 69 連日晴天時系統元件之變化趨勢

表 2、連日晴天案例下元件溫度變異量

| 元件名稱    | 溫度變異量(%) |
|---------|----------|
| 燃料      | 0.06     |
| 提籃      | 0.07     |
| 燃料方管    | 0.16     |
| 密封鋼筒    | 0.32     |
| 混凝土護箱內襯 | 0.73     |

若更進一步探討溫度差變異之原因則可發現，此現象主要係因為環境溫度之變化速度遠比系統溫度響應更快所致，因此實際之監測方式或可由系統熱質量所造成的熱遲滯現象來加以思考並改善，而無需如 NAC 所述，僅採用較寬的 LCO 作業規範來預防誤警報之發生。

圖 15 為進一步將環境溫度依實際溫度變化周期進行滾動式平均後，所求得之系統溫差。此一作法之概念係基於體積龐大的乾貯系統，其最終熱流特性係受到連續之環境特性影響，而非僅受當下環境溫度之左右。經過滾動式平均之處理後，可明顯發現原本因為環境溫度變異而具有震盪趨勢的監測結果將可維持於一穩定之量值而不受環境變異之影響。

基於此一發現，本研究評估 NAC 採用放寬 LCO 限值之方式或可透過以下監測程序來尋求精進：

1. 採用合適之時間區間，並以滾動式平均提供一個合理之進口溫度；
2. 將相對穩定之出口溫度納入鑑別之依據，這是因為系統出口溫度較不受環境溫度影響，且考量實際裝載功率係遠低於安全設計負載之前提，以分析所獲之出口溫度輔助監測將有助於增進運轉人員之參考資訊。

在進一步綜合 NAC 提出之 LCO 規劃及本研究之發現後，本研究發現若將警報之單一條件的判讀程序，調整如圖 16 所示之多重判讀機制或將有助於精進監測作業之可靠性。其判讀邏輯係為：若運轉人員發現滾動式平均所求得之系統溫差大於 LCO 之管制值時，則需進一步檢視出口溫度，此時若出口溫度仍低於安全分析之限值，則代表系統係因為環境溫度所造成的變異所導致之誤警報；反之，若系統溫差與出口溫度同時超出管制值，才需依循原管制程序進行現場確認。

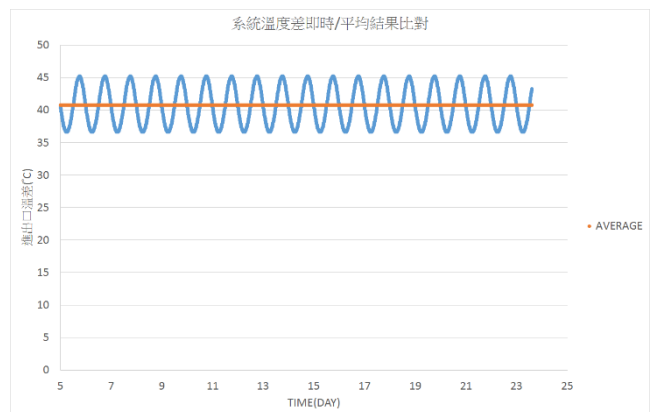


圖 70 採用滾動式環境溫度計算所得之系統溫差

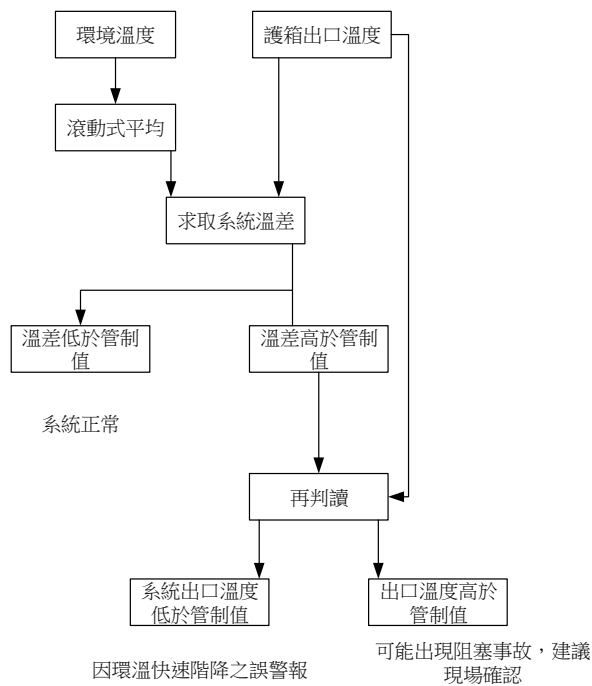


圖 71 可供參考之系統鑑別流程

### 全年溫度影響案例

相較於日夜溫度變異對乾貯系統各元件溫度值之影響甚微，本研究將四季之溫差納入考量後，進一步發現四季的溫度變化因為具有充足的時間作用於乾貯系統上，故其元件之溫度將隨四季環境溫度的變異而出現些微起伏之現象，但在短於1個月內的時間內，系統仍未出現明顯之溫度變化。此一結果除了再次印證乾貯系統之龐大熱質量所提供的緩衝效果可使系統免於短暫的熱衝擊影響之外。更意味著安全分析報告中選用最高日平均溫度(32°C)，作為熱流分析基準係為相對保守之考量，故無需再以更為嚴苛之時均溫來進行評估。

若再次的將進出口之溫差加以處理(圖 18)，其結果再次證實，採用滾動式平均之方式的確有助於縮小系統溫差因日夜溫差而出現之振盪，若更進一步搭配前述之出口溫度進行判讀，應可使現行 NAC 提出單一判讀條件之監測方法更為可靠。未來本研究將依據此分析技術，依序探討核一與核二於不同環境狀況下之熱流特性，為我國之乾貯作業之監測管制程序提出可能之精進方案。

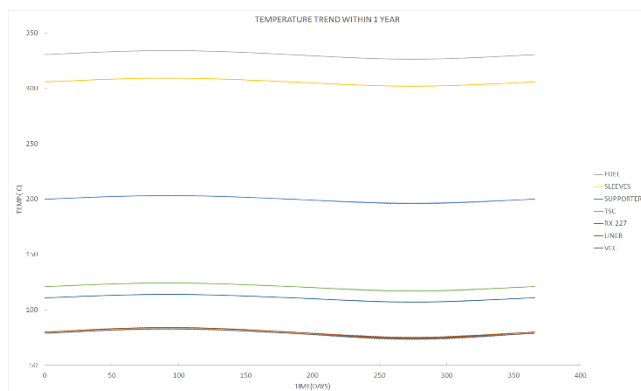


圖 72 系統全年之溫度變異趨勢

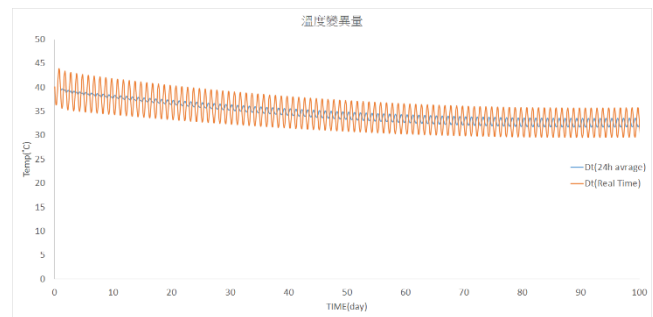


圖 73 系統之全年溫度差變異趨勢(局部)

## IV. 結論

本研究透過一連串的三維與二維分析模式之建立與校驗工作，順利依原訂計畫時程建立乙套用可用以分析乾貯系統受環境溫度影響之熱流分析技術。而透過此一分析技術於 VSC-17 之初步分析，吾等發現，乾貯系統之熱質量確實足以緩衝環境溫度變異所造成的影響；因此短於 2 小時的熱流暫態將無法顯著影響乾貯設施及其內部燃料。另外，本研究充份證實乾貯系統因為出口溫度之變異速度較進口溫度更慢之故，而使系統溫差出現震盪，而出現不必要的誤警報事故。而研究結果亦指出，相較於原始 NAC 廠家提出放寬 LCO 作業限值之方式，本研究透過熱流現象所提出之監測程序精進或許將提供更多的評估資訊，以協助運轉人員判定系統之實際狀況。未來，本研究將透過此一建立之分析技術，逐一就我國核一、二乾貯進行詳細之分析研究，以協助提昇我國乾貯系統之運轉與管制能力。

## 參考文獻

- [1] 台灣電力公司，“核一乾貯系統安全分析報告，”民國 97 年 11 月。
- [2] 台灣電力公司，“核二廠乾貯系統安全分析報告，”民國 100 年 12 月。
- [3] 核二乾貯 SAR CH6.3 審查意見(完整版)\_20130912.
- [4] ANSYS Inc., FLUENT 15.0 User's Manuals, 2015.
- [5] Pacific Northwest Laboratory and Idaho National Engineering Laboratory, "Performance Testing and Analyses of the VSC-17 Ventilated Concrete Cask", EPRI TR-100305, Final Report, May 1992.
- [6] ANSYS Inc., "FLUENT UDF Manual," 2015.

# 深地層處置熱水力化耦合模式國內外發展現況評析與基準案例模擬研究

## Benchmark test and assessments of recent advances in coupled thermo-hydro-mechanical-chemical models for analysis of deep geological disposal of spent nuclear fuel

計畫編號：MOST104-2623-E-008-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：倪春發 副教授

e-mail：nichuenfa@geo.ncu.edu.tw

計畫參與人員：林淇平、李奕賢、李唯祺

吳宛庭、林芷葳、陳鎮傑

執行單位：國立中央大學應用地質研究所

### 摘要

深地層處置為用過核子燃料最終處置場址建議方式，處置系統中，緩衝材、回填材與圍岩特性為處置場中控制滲漏安全的重要子系統，其複雜性涉及熱力、水力、力學及化學(thermal- hydrological- mechanical-chemical, THMC)領域之整合知識與技術。處置場址會因所在地質環境而有不同程度的複雜性，國內在大量投入資源進行熱力、水力、力學及化學耦合分析前，應該先深入瞭解目前相關研究的趨勢與重要成果，再配合國內特有的地質條件與特性，研擬規劃國內可行的 THMC 耦合分析策略。本研究主要目的為(1)評析國內外 THMC 相關研究現況，(2)選用國內常用 THMC 耦合分析模式進行基準案例分析，以及(3)擬定國內 THMC 相關技術發展建議。為評析國內外 THMC 相關研究現況，本研究將廣泛蒐集國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之 THMC 耦合效應研究資料，深入檢核國際上 THMC 分析概念與分析理論評析；基準案例規劃、測試及分析將依據資料蒐集成果，以國內常用模式為基準案例比較的選用模式；擬定國內相關技術發展建議則以國內外 THMC 資料蒐集結果進行綜合評析，考慮基準案例分析結果，提供未來國內 THMC 相關研究的重要參考。

**關鍵詞：**深地層處置、用過核子燃料、緩衝材/回填材、熱-水-力-化學耦合分析、基準案例分析。

### Abstract

Deep geological disposal is the recommended method for final disposal of spent nuclear fuel. The canister, buffer/backfill, and geosphere are key sub-systems that significantly control the safety of a site for storage the spent nuclear fuel. Analyses of these sub-systems require integrated knowledge and techniques on fields of coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical (THMC) problems. The complexity of final disposal site highly depends on geological conditions of the site. Results of relevant THMC studies from other institutes and countries need to be systematically assessed before the available techniques to be conducted in Taiwan. The objectives of the study are: (1) to assess and evaluate the available

studies on coupled THMC problems, (2) to conduct benchmark tests for coupled THMC models that are widely used in Taiwan, and (3) propose strategies that are relevant to our future THMC studies. To assess and evaluate current advances in THMC studies, this study will review papers, reports, and documents proposed by national organizations, institutes, and consultant companies. In this study the concept and the theories for the coupling of THMC will be documented with details. The models and synthetic cases for benchmark tests are selected based on the assessments of previous studies. The results of benchmark tests associated with the assessments of previous studies are expected to provide suggestions and strategies for planning future studies of coupled THMC problems in Taiwan.

**Keywords:** Deep geological disposal, spent nuclear fuel, buffer/backfill, coupled thermal- hydrological-mechanical- chemical analysis, benchmark test.

### I. 前言

深地層處置為國際間對用過核子燃料最終處置場址的建議方式，深地層處置使用多重障壁的設計概念，將用過核子燃料置放於地下約 300 至 1000 公尺內的處置岩體中，建構層層防護，使處置場能與人類生活圈隔離。因處置場址的特殊性與安全考慮，各先進國家如美國、瑞典、加拿大、英國、法國、日本等國，均已投入大量經費進行處置技術的相關研究，預計相關技術將陸續成熟，進行相關研究早已成為國際趨勢。

整個處置系統中，緩衝材及回填材(buffer/backfill)與母岩(rock)為處置場中控制滲漏安全的重要子系統(SKB, 1999)，其複雜性涉及熱力、水力、力學及化學(thermal-hydrological-mechanical- chemical, THMC)領域之整合知識與技術(SKB, 1999)，在處置系統中熱力-水力-力學及化學之耦合研究從 1990 年代起，已成為用過核子燃料最終處置場址相關研究的主要議題。最著名的跨國合作計畫就屬 DEVELOPMENT OF COUPLED MODELS AND THEIR VALIDATION AGAINST EXPERIMENTS (DECOVALEX) THMC 耦合研究(Jing et al., 1993; Chijimatsu et al., 2009)，該計畫從 1992 年起，透過多國經費支助，已執行五個階段，由模式開發配合試驗研究，成果共享，以期對用過核子燃料最終處置場址

的熱水力化學過程，有更準確的掌握，國際間發表的重要處置場分析報告如日本的 H12(JNC, 2000)，歐洲國家瑞典的 SKB(SK B, 1999)或芬蘭的 POSIVA 相關報告(Pastina, 2006)，其 THMC 分析方法及部分結論和 DECOVELEX 成果相似，DECOVELEX 發展歷程如表 1 (Barnichon et al., 2011; Yasuhara et al., 2011; Hudson and Jing, 2012ab; Garitte, 2012; Andersson, 2012; Hokr et al., 2013)。在處置場址安全評估議題中，國內對 THMC 耦合分析的投入相對地少也起步較晚。處置場址會因所在地質環境而有不同程度的複雜性，國內在大量投入資源進行 THMC 耦合分析前，應該先深入瞭解目前相關研究的趨勢與重要成果，再配合國內特有的地質條件與特性，研擬規劃國內可行的 THMC 耦合分析策略。依據以上的目標，本研究將規劃長期的相關研究，主要目的除了進行國內外 THMC 相關研究現況評析外，藉由主持人研究團隊的專長，選用與評估國內外常用的分析模式，針對不同 THMC 組合，進行基準案例分析，最後擬定國內 THMC 技術發展及評估模式使用時的規劃建議。

表 1 DECOVALEX 計畫發展歷史

| 計畫名稱           | 時期        |
|----------------|-----------|
| DECOVALEX I    | 1992-1995 |
| DECOVALEX II   | 1996-1999 |
| DECOVALEX III  | 2000-2003 |
| DECOVALEX THMC | 2004-2007 |
| DECOVALEX 2011 | 2008-2011 |
| DECOVALEX 2015 | 2012-2015 |

## II. 主要內容

本年度研究主要的三大工作項目包括：(1) 資料蒐集與評析：蒐集分析國際組織與各國對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊，同時深入檢核國際上 THMC 分析概念與分析理論評析；(2) 基準案例規劃、測試及分析：依據資料蒐集成果，評估選用基準案例比較模式，進行耦合模式基準案例規劃與設計，根據分析結果綜合評估參與基準案例的模式；以及(3)針對本年度研究成果提出國內相關技術發展建議。以上工作項目將隨時配合國內外其他研究團隊成果，蒐集、分析並更新本研究使用的概念、方法與分析流程，以期和國際間 THMC 模式分析同步。國內未來推動 THMC 耦合分析前，應該先深入瞭解目前相關研究的趨勢與重要成果，再配合國內特有的地質條件與特性，研擬規劃國內可行的 THMC 耦合分析策略。本研究將進行 THMC 研究現況評析，透過廣泛的資料蒐集，選用與評估國內外常用的分析模式，最後擬定國內 THMC 技術發展規劃建議。因應本研究工作項目，初步將工作項目分為三大類，分別為資料蒐集與評析，基準案例測試，以及國內 THMC 技術發展規劃建議。項目的執行架構，依據規畫的研究架構，三大項的工作內容簡述如下：

### (1) 資料蒐集與評析

本研究將廣泛蒐集國際上高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊；其中，聯合國附屬組織國際原子能總署(IAEA)推動的相關研究、交流、審查與公開資源將是蒐集重點。此外，其他跨國合作計畫以及各國運作中的處置場評估

計畫，亦是本研究資料蒐集來源。國內高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊蒐集，則以過去及目前執行的相關研究與論文著述為主。

### (2) 基準案例規劃、測試及分析

資料蒐集與分析結果同時作為本研究中，模式選用與基準案例設計的參考。由於模式開發目的不同，模式的適用性隨之不同，根據初步資料蒐集結果及考慮目前國內常用於放射性燃料地層處置分析模式，本年度研究初步選用 FEMWATER、HYDRUS2D、MODFLOW 等三個模式進行比較(Carsel and Parrish, 1998; Lin et al., 1997; Šimůnek et al., 2013; Alan and Ruslana, 2011; Ficklin and Luedeling, 2010; McDonald and Harbaugh, 1998; Zheng, 1990; Pruess et al., 1999; Itasca Consulting Group, 1994, 2005)，未來將加入 FracMan 商用模式進行分析。基準案例測試先考慮一維的水流(H)、未來再延伸至 HC、HM、TH、THC、THM 與 THMC 等耦合案例。

### (3) 國內 THMC 技術發展規劃建議

資料蒐集與分析結果，將做為檢視及評估國內已建置與待建立有關 THMC 之研發項目的參考。研究最後階段，將由國外相關研究經驗與成果，配合國內已有的技術與場址地質特性，研提國內高放射性廢棄物處置 THMC 技術發展規劃建議。

THMC 的耦合過程，可被應用於處置系統中的各個子系統如廢料罐、緩衝材與圍岩等；同時，也可以考慮子系統與子系統間的交互作用。早在 1980 年代 Noorishad 等人(Noorishad et al., 1984)即利用有限元素法(Finite element method)求解在裂隙岩體中的 THM 耦合行為，ROCMAS(Noorishad and Tsang, 1996)模式的控制方程式是以 Biot 理論(Biot, 1941)為基礎開發而成，模式可以解釋裂隙岩體熱水耦合行為。相似的模式包括 THAMES(Ohnishi et al., 1987; Ohnishi et al., 1996), MOTIF(Guvanasen et al., 1995), FRACON (Nguyen et al., 1995; Nguyen, 1996), FEHM(Bower and Zyvoloski, 1997), FRIP(Pine and Cundall, 1985), FRACTure(Kohl and Hopkirk, 1995)與 GEORACK(Swenson et al., 1997)等，常應用在用過核燃料地質處置場址熱傳問題的研究。隨著電科技進步，近年來多數商業化應用程式也可以模擬 THMC 的部分耦合現象，這些程式包括 ABAQUS(Pawtucket, 1995; Börgesson, 1996)、FLAC(Itasca Consulting Group, 1997; Israelsson, 1996)、FracMan 以及 UDEC(Itasca Consulting Group, 1997)等。研究單位廣泛使用的模式如 FEMWATER/HYDROGEOCHEM、TOUGH2、MODFLOW+MT3DMS 等，功能亦非常強大，但模式使用者須對模式理論深入理解，才可充分應用模式功能。複雜的 THMC 耦合模式須考慮多相系統如氣、液與固相等，在多數模式中，氣相假設為理想氣體的混合，包含乾空氣與水汽；另外，液相包含水與溶解氣，多孔隙介質中可同時考慮氣、液、固相材料反應局部壓力與整體有效應力行為。假設液與固相成份在局部可達溫度平衡，亦即，在局部液與固相是相同溫度。透過以上基本假設，處置場址內的各個子系統，以及子系統與子系統間的 THMC 耦合可以利用圖 1 的關係加以說明。圖中的箭號顯示 THMC 各機制的關係、

影響參數與資訊串流。THMC 中各機制互相影響，以 H 與 M 的關係來說，M 的力學特性會由有效應力的增減進而造成材料孔隙率與滲透率改變，影響水的流動；另一方面孔隙率與滲透率改變卻可以改變水壓力，又影響著有效應力變化；影響水流動的孔隙率與滲透率改變，也可以因化學反應 C 而改變；區域的熱傳導特性 T 也可能改變流體黏滯性與密度，反應在流體的壓力改變與化學反應速率。THMC 之間的互制關係亦非常複雜，模式全耦合的分析概念需將 THMC 彼此間重要的關係建立，求解 THMC 的控制方程式，利用分析程式在時間與空間尺度互相疊代，直到暫態或特定時間的解都符合所有的控制方程式。

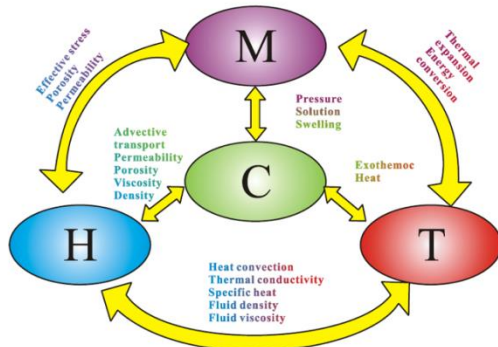


圖 1 處置場址熱力-水力-力學-化學過程與交互作用關係圖

### III. 結果與討論

#### 3.1 THMC 模式簡介

本章節列出國內外較常使用之 THMC 相關數值模式，包括基本介紹、控制方程式以及所使用之數值模式簡介，包括 ADINA-T、FEFLOW、FEHM、FEMWATER、FracMan、FRACOD、FRACSIM 3D、Geocrack 2D、HYDROGEOCHEM、HYDRUS 3D、MODFLOW、MT3DMS、PFLOTRAN、RCB、ROCMAS、TOUGHREACT，綜合整理各模式特性如附錄 A。

#### 3.1 基準案例分析

依據 DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments) III，基準案例 (Benchmark Test, BMT) 2 的模式中，模擬的區域深 1 公里，寬 5 公里，右上方有 50 公尺深的水，中間有一條寬 5 公尺的斷層垂直切過模式，高 10 公尺寬 100 公尺的處置場在模式中間地帶。斷層的存在影響水流及力學行為，尤其在結晶岩體中，斷層往往是水流的主要通道，而對於模擬斷層的方式，則是以連體模式的方法。

對於高放射性用過核子燃料最終處置設置，已有許多研究建議設置於結晶岩體中，然而結晶岩體與處置場之間交互作用，熱水力化 (THMC) 則是扮演著關鍵角色，其中包括熱 (thermal, T)、水 (hydrological, H)、力 (mechanical, M) 與化 (chemical, C) 等四種作用，彼此互相影響 (Gens et al., 2010; Liu et al., 2014; Min et al., 2005)。此耦合過程意指一種關鍵作用會對其他作用造成影響，進而對整體處置場安全形成影響，因此，是無法透過單一作用探討完整結晶岩體與處置場址工程設計或是安全評估。雖然可以透過不同數值模式分別

模擬各種關鍵作用，但是在於存在大量裂隙的大尺度模擬範圍，裂隙岩體水力耦合問題會因為電腦計算能力而受到限制 (Lee and Ni, 2015)。因此近年來對於大尺度裂隙岩體模擬，大多使用連體模式 (continuum approach)，或是連體模式與離散裂隙網路複合域的模型進行研究。連續模式則將裂隙岩層視為連續介質型態，可分為連續裂隙面以及等效孔隙介質模式兩種。連續裂隙面模式將裂隙網路轉化為多組無限長之裂隙面，組成連通行之裂隙網路，大多研究假設此模式為連續正交裂隙面模式。然而，等效孔隙介質模式則是透過代表性體積 REV (representative elementary volume) 作為均勻等效孔隙介質，或是經由多個異質性孔隙介質岩塊所組成裂隙岩體。此類模式常使用於較大尺度模擬範圍，或是裂隙頻率較高之裂隙岩體。當裂隙幾何參數無法有效量測，或是產生極大量且複雜裂隙網路時，則可採用此模式解決相關問題。過去研究發展出多種連續模型，包括雙孔隙率模式 (Barenblatt et al., 1960; Huyakorn et al., 1983; Warren and Root, 1963; Zimmerman et al., 1993)、連續正交裂隙模式 (Long et al., 1985; Oda, 1985; Rouleau and Gale, 1987; Snow, 1965; Weiss, 1972) 與等效孔隙介質模式 (Larocque et al., 1999; Long et al., 1982; Neuman and Depner, 1988)。

本研究所採用的測試案例模型是依據 DECOVALEX III 研究計畫進行修改與設計，此基準案例主要目的在於建立設置用過核子燃料最終處置場假想案例模擬，進而理解升尺度歷程績效考核 (performance assessment) 之影響。在本研究中，將裂隙岩體設定為等效連率體，進行後續模擬。此假想案例是依據 Sellafeld 場址與處置場設計，規劃一個模擬裂隙系統特徵，透過不同數值模型，分析該場址地下水穩態流場比較。參考模型是 1 個寬 5 km，縱深 1 km，核燃料被設定均勻放置於寬 100 m，高 10 m 的處置場內，整體參考模型如圖 2。在此模型中共包含上下 2 層地層，每個地層皆為 500 m 深，而地層第 2 層上部邊界連通大氣，並於距離右側邊界 1000 m 位置為海底，海深度固定為 50 m。潮間帶垂直高度為 200 m，水平長度為 1000 m，坡度比為 1:5，約為 22.62°。並且中間被 1 條垂直斷層區分為 2 部份。模式設定處置場位於地表下 520 m 深，屬於地層第一層 (formation 1)，長 100 m，高 10 m，距離垂直斷層僅 10 m。本研究設置此模式兩側與底部的邊界條件皆為不透水邊界。於上邊界的邊界條件可區分為兩個部份，海面底下的上邊界設定為定水頭，其定水頭依循海的深度而設定；然而，其他海面以上之上邊界部份因為與大氣連通，並且 MODFLOW 此模式僅可計算飽和含水層總水頭分佈，因此本研究在上邊界與大氣連通節點設定為壓力水頭為零，固定地下水水面與地表同高。本研究共設計兩組參考案例比較，其中一組在於透過滲透率異質性的差異，分析不同模式間總水頭差異。另一組則是加密處置場周圍網格，一同探討異質性在不同模式間的模擬總水頭結果差異。對於這兩組模擬案例，本研究皆設定每種模式相同收斂條件為 0.01 m，模式初始猜值為總水頭等於 0 m。



一個剖面則是在  $z = 475$  m 屬於地層 1，位於處置場中央(如圖 5)。無論是那一種數值模式，再這 2 種剖面總水頭分佈皆類似線性分佈結果，其中以 MODFLOW 模擬結果相較其他模式，計算總水頭較高，反之則是 FEMWATER 模擬總水頭結果最低。

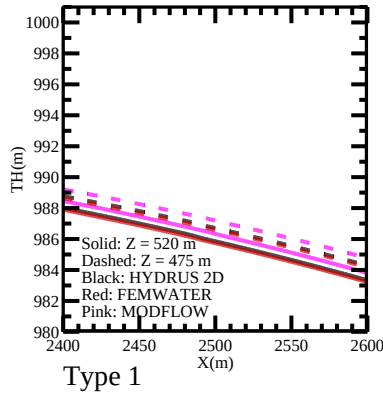


圖 5 Type 1 處置場內外剖面總水頭分佈

### (b) 地層均質與斷層異質(Type 2)

在此案例較大不同在於，本研究設定斷層上部滲透率明顯較高約 5 個級數，因此斷層上部將形成流體快速通道。圖 6 中顯示在斷層上部的總水頭數值明顯較突 7 相同位置較高，其原因正是斷層上部邊界條件為定水頭 1000 m，固能夠從 type 2 整體模擬區域中與處置場局部總水頭分佈發現，總水頭數值顯著提高。

再此案例中，圖 6 與 7 皆顯示 HYDRUS 2D 與 MODFLOW 模式模擬結果較一致，由於再處置場周圍，斷層上下部位置處，FEMWATER 總水頭分佈與其他模式則具有最大差異。

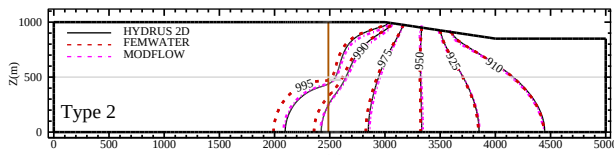


圖 6 Type 2 整體模擬區域總水頭分佈

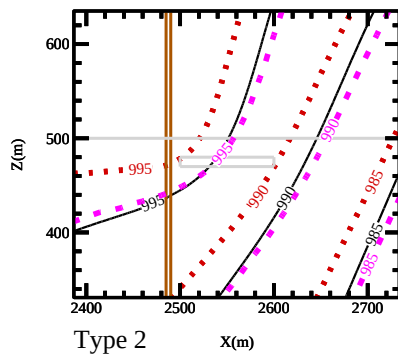


圖 7 Type 2 處置場周圍總水頭分佈

經由圖 8 中可以顯示再於斷層位置處，2 剖面總水頭最高值位置皆在斷層附近，並且以處置場內總水頭值較高。

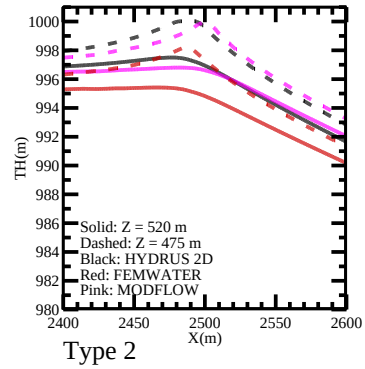


圖 8 Type 2 處置場內外剖面總水頭分佈

### (c) 地層異質與斷層均質(Type 3)

在此案例中，從圖 9 與圖 10 顯示本研究設置地層 2 屬於滲透率較高，其餘部份皆為滲透率較低的部份，因此可以看到在於地層 2 中與斷層上部交界部份，壓力傳遞會沿著滲透率較高的部份傳遞，斷層上部則會形成類似牆的樣子，使的地層 2 左側地下水不易透過斷層流向右側。

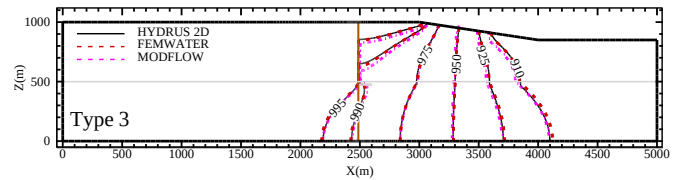


圖 9 Type 3 整體模擬區域總水頭分佈

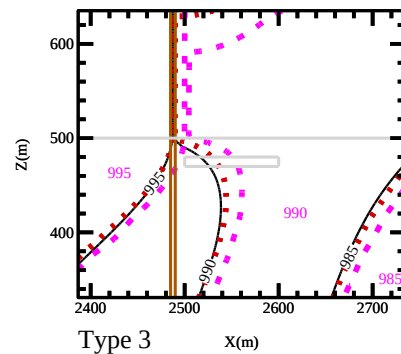


圖 10 Type 3 處置場周圍總水頭分佈

於圖 11 則可以發現在剖面  $z = 475$  m 位置，處置場內的總水頭剖面，3 種數值模式皆有總水頭不連續情形，這是因為在於地層 2 與其他區域滲透率差異較大，而網格不夠細化所導致無法得到總水頭連續模擬結果。

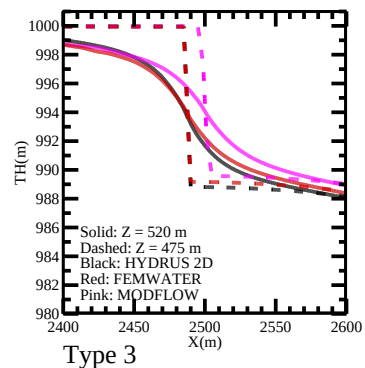


圖 11 Type 3 處置場內外剖面總水頭分佈

#### (d) 地層與斷層皆異質(Type 4)

在此案例中，本研究設定地層與斷層上部皆為滲透率較高的區域，此與 DECOVALEX III BMT 2 原始設定較為相似。並且可以經由圖 12、圖 13 與圖 14 可以得知 HYDRUS 2D 與 FEMWATER 模擬結果較為相似。

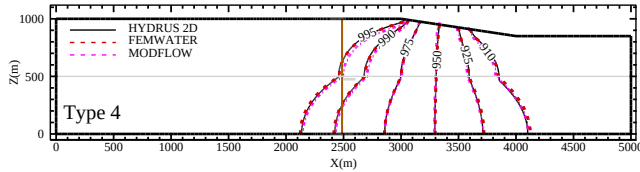


圖 12 Type 4 整體模擬區域總水頭分佈

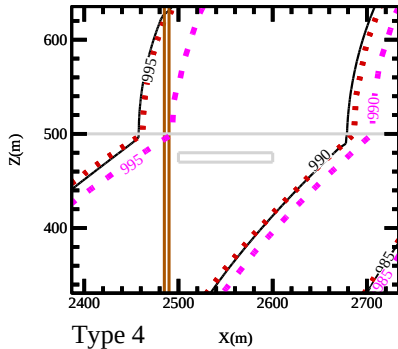


圖 13 Type 4 處置場周圍總水頭分佈

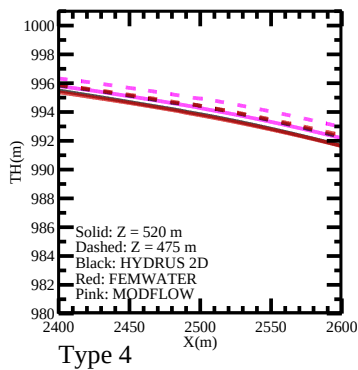


圖 14 Type 4 處置場內外剖面總水頭分佈

#### 3.3-2 網格細化差異比較結果

本節將透過改變不同區域節點間的間距，增加區域內網格個數，進行局部網格細化，比較其各種模式模擬之總水頭分佈差異。其中，圖 15-18 分別為不同網格細化程度所得總水頭模擬結果。並且透過圖 19-21 可以得知，MODFLOW 在不同網格細化結果皆相似，其原因為 MODFLOW 模擬所需網格最少即可使得總水頭分佈達到收斂，反之則是 HYDRUS 2D 則是此 4 種網格數還未能達到模擬結果收斂。

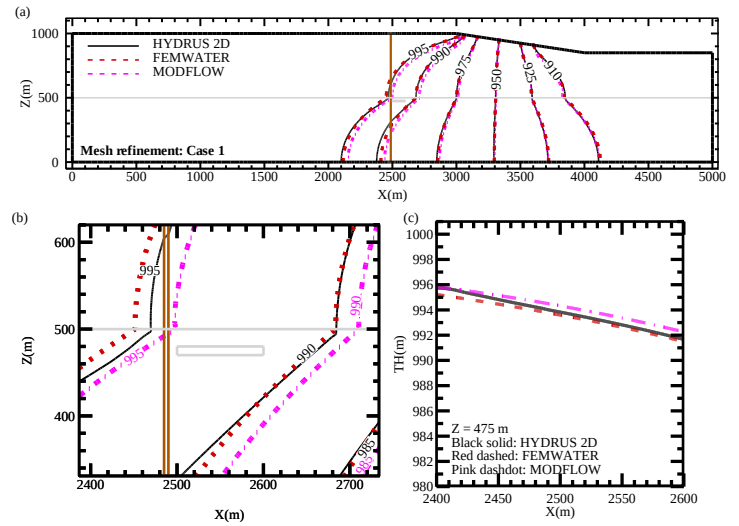


圖 15 Case 1 總水頭分佈

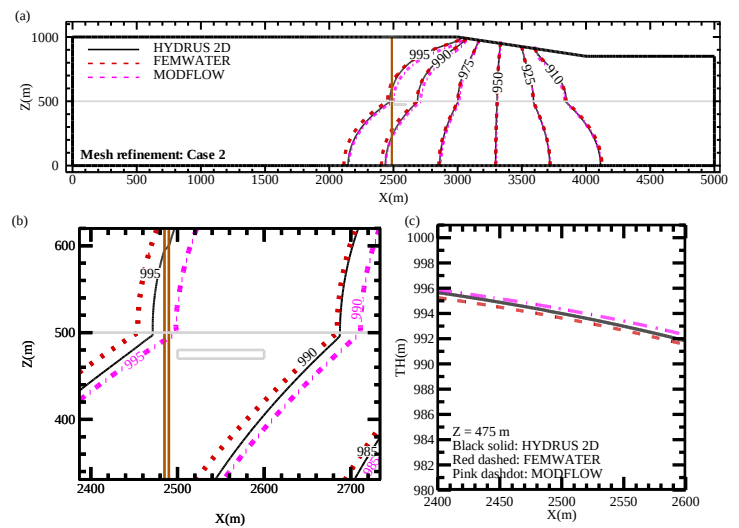


圖 16 Case 2 總水頭分佈

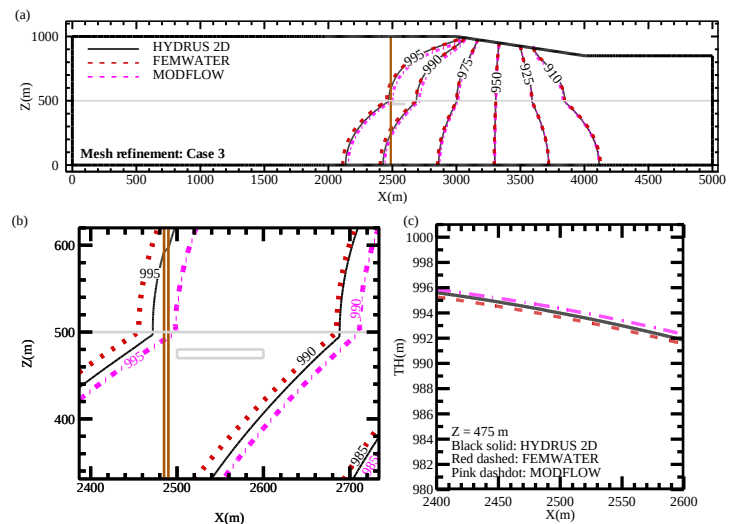


圖 17 Case 3 總水頭分佈

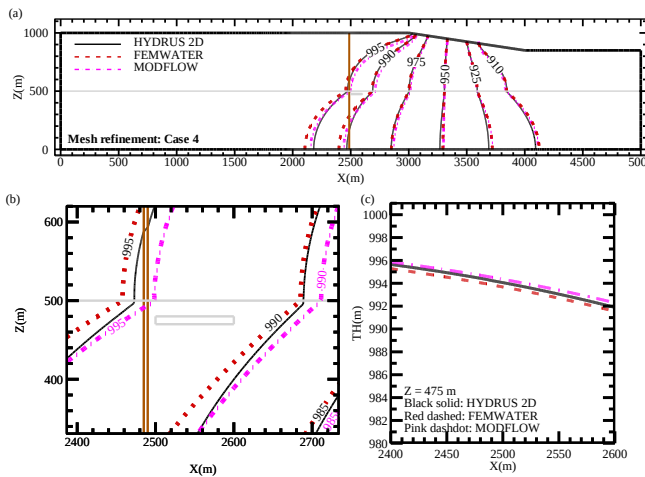


圖 18 Case 4 總水頭分佈

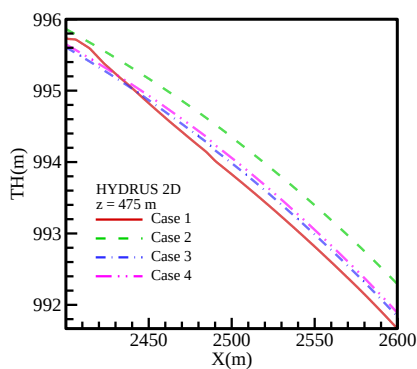


圖 19 HYDRUS 2D 剖面總水頭分佈

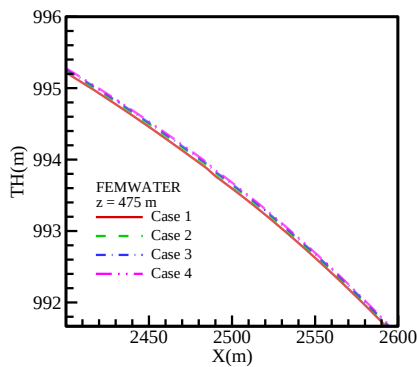


圖 20 FEMWATER 剖面總水頭分佈

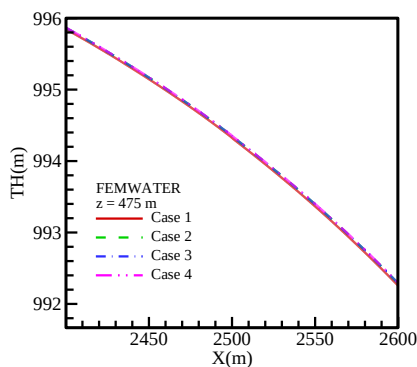


圖 21 MODFLOW 剖面總水頭分佈

### 3.4 THMC 模式篩選平台

隨著電腦運算技術的演進，越來越多能應用於不同狀況的數值模式被開發出來。然而由於各模式開發時間的早晚或是不同的開發目的，每個模式皆有各自的應用範圍及其條件限制，也造成使用者在處理相關模擬問題時，在模式選擇與問題類型的對應上，會遇到很大的困擾。為了能使一般使用者能輕易了解各模式之應用範圍與功能，並能快速地找到與問題所相對應之數值模式，本計畫將發展整合許多數值模式之平台，平台將可提供使用者相關模式資訊(如圖 22)，以讓使用者做為模式選擇之依據。為能讓平台使用人數達到最大化，平台將以跨作業系統、跨瀏覽器與跨行動裝置等三大方向作為規劃目標，因此本平台將使用瀏覽器語言進行撰寫，以讓使用者能僅利用瀏覽器上網就能進入平台以選取所需模式。平台上除可讓使用者藉著點選不同模式類型以進行數值模式之分類外，本平台亦提供利用模式名稱搜尋功能讓使用者能便利地找到數值模式。當使用者查詢到所需之相關數值模式後，平台亦提供資料庫連結能讓使用者查閱更詳細之數值模式屬性(如圖 23、24)。



圖 22 模式選擇平台頁面之各功能分區

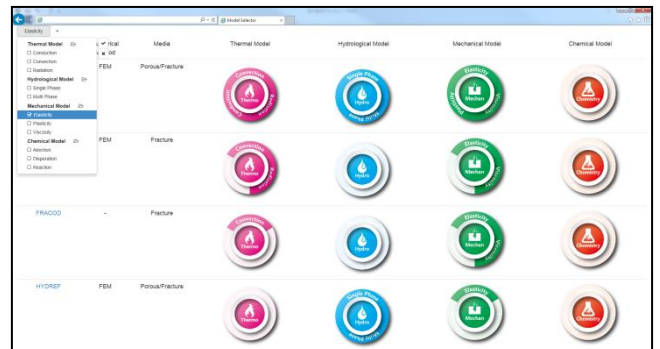


圖 23 當使用者選擇模式類型後，平台便會自動產生相對應之數值模式清單

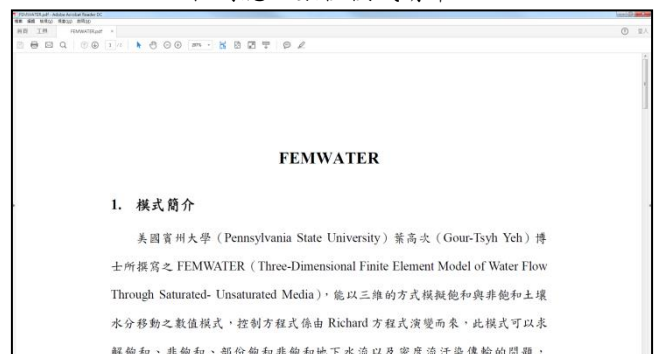


圖 24 當使用者按下模式名稱上之連結後，便可查閱本工作為該數值模式所準備之相關細節內容文件

#### IV. 結論

本研究經由蒐集 THMC 耦合文獻等相關工作，包括國內外 THMC 相關研究進展資料蒐集評析，以及初步階段基準案模擬測試分析，提出議題結論包括現有模式適用範圍與限制、模式開發種類與限制分析列表以及未來 THMC 基準案例實驗與模擬條件設計與規劃建議，分述如下：

- (1) 完成蒐集、分析國內外對高放射性廢棄物處置設施之熱力-水力-力學-化學(THMC)耦合效應研究資訊；完成蒐集、分析國內外熱力-水力-力學-化學耦合分析數學模式；完成蒐集國內工程障壁材料受熱-水壓-力學-化學耦合作用之研究。
- (2) 完成檢視及評估國內外常用 THMC 分析模式，模式選用及基準案例規劃，進行不同模式基準案例比較結果評析與建議。
- (3) 完成模式篩選分析平台，提供各領域於使用相關模式時之選擇標準。

#### 參考文獻

- [1] Alan, S., Ruslana, G., 2011. Modeling of solute transport in the unsaturated zone using HYDRUS- 1D. Effects of hysteresis and temporal variability in meteorological input data. Lund University Water Resources Engineering.
- [2] Andersson, C., 2012. DECOVALEX-2011 project Final report of task B. Stockholm, Sweden. Barnichon, J.D., Dick, P., Bauer, C., 2011. The SEALEX in situ experiments: Performance tests of repository seals. In: Harmonising Rock Engineering and the Environment - Qian & Zhou (eds), pp. 1391-1394.
- [3] Barenblatt, G.I., Zheltov, I.P., Kochina, I.N., 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics 24, 1286-1303.
- [4] Biot, M.A., 1941. General theory of three dimensional consolidation. J. Appl. Phys., 12, 155 - 164.
- [5] Borgesson, L., 1996. ABAQUS. Stephansson, O., Jing, L., Tsang, C.F. (Eds.), Coupled thermohydro-mechanical processes of fractured media, vol. 79 Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier, 565 - 570.
- [6] Bower, K.M., Zyvoloski, G., 1997. A numerical model for thermo-hydro-mechanical coupling in fractured rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 34, 1201 - 1211.
- [7] Carsel, R.F., Parrish, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil-water retention characteristics, Water Resources Research 24(5), 755-769.
- [8] Chijimatsu, M., Borgesson, L., Fujita, T., Jussila, P., Nguyen, S., Rutqvist, J., Jing, L., 2009. Model development and calibration for the coupled thermal, hydraulic and mechanical phenomena of the bentonite. Environ. Geol. 57, 1255 - 1261.
- [9] Ficklin, D.L., Luedeling, E., Zhang, M., 2010. Sensitivity of groundwater recharge under irrigated agriculture to changes in climate, CO<sub>2</sub> concentrations and canopy structure, Agricultural Water Management, 97(7), 1039-1050.
- [10] Garitte, B., 2012. DECOVALEX-2011 project Final report of task A. Stockholm, Sweden.
- [11] Gens, A., Guimarães, L.d.N., Olivella, S., Sánchez, M., 2010. Modelling thermo-hydro-mechano-chemical interactions for nuclear waste disposal. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2, 97-102.
- [12] Guvanasen, V., Chan, T., 1995. A new three-dimensional finite-element analysis of hysteresis thermohydromechanical deformation of fractured rock mass with dilatance in fractures. Proceedings of the Second Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rocks. Vienna, Austria, April 10 - 14, 347 - 442.
- [13] Hibbitt, Karlson & Sorensen Inc., 1995. ABAQUS Manuals-version 5.5. Pawtucket, Rhode Island, USA.
- [14] Hudson, J.A., Jing, L., 2012a. DECOVALEX-2011 project Executive summary. Stockholm, Sweden.
- [15] Hokr, M., Skarydova, I., Frydrych, D., 2013. Modelling of tunnel inflow with combination of discrete fractures and continuum, Comput. Vis. Sci. 15 (1), 21-28.
- [16] Hudson, J.A., Jing, L., 2012b. DECOVALEX-2011 project Final report of task C. Stockholm, Sweden.
- [17] Huyakorn, P.S., Lester, B.H., Faust, C.R., 1983. Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers. Water Resources Research 19, 1019-1035.
- [18] Israelsson, J.I., 1996. Short description of FLAC version 3.2. Stephansson, O., Jing, L., Tsang, C.F. (Eds.), Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media, vol. 79, Developments in Geotechnical Engineering, Elsevier, 513 - 522.
- [19] Itasca Consulting Group, Inc., 1994. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions User' s Manual. Minneapolis, Minnesota, USA.
- [20] Itasca Consulting Group Inc., 1997. FLAC-3D Manual: fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions-version 2.0. Minnesota, USA.
- [21] Itasca Consulting Group Inc., 1997. 3DEC Manual: 3 Dimensional Distinct Element Code-version 2.0. Minnesota, USA.
- [22] Itasca Consulting Group, Inc., 2005. FLAC User' s Manual Version 5, Fluid - Mechanical Interaction , Indianapolis, Minnesota, USA, pp. 2.1-2.53.
- [23] Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), 2000. H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis of HLW Disposal in Japan, Tokyo, Japan.
- [24] Jing, L., Stephansson, O., Rutqvist, J., Tsang, C.F., Kautsky, F., 1993. DECOVALEX— mathematical models of coupled THM processes for nuclear waste repositories, Phase I report SKI Technical Report, pp. 93-31.
- [25] Kohl, T., Hopkirk, R.J., 1995. The finite element program "FRACTure" for the simulation of hot dry rock reservoir behavior. Geothermics, 24, 345 - 359.
- [26] Larocque, M., Banton, O., Ackerer, P., Razack, M., 1999. Determining Karst Transmissivities with Inverse Modeling and an Equivalent Porous Media. Ground

- Water 37, 897-903.
- [27] Lee, I.H., Ni, C.-F., 2015. Fracture-based modeling of complex flow and CO<sub>2</sub> migration in three-dimensional fractured rocks. *Computers & Geosciences* 81, 64-77.
- [28] Lin, H. C. J., Richards, D. R., Yeh, G. T., Cheng, J. R., & Cheng, H. P. (1997). FEMWATER: A Three-Dimensional Finite Element Computer Model for Simulating Density-Dependent Flow and Transport in Variably Saturated Media (No. WES/TR/CHL-97-12). ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS COASTAL HYDRAULICS LAB.
- [29] Liu, Y., Ma, L., Ke, D., Cao, S., Xie, J., Zhao, X., Chen, L., Zhang, P., 2014. Design and validation of the THMC China-Mock-Up test on buffer material for HLW disposal. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6, 119-125.
- [30] Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R., Witherspoon, P.A., 1982. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research* 18, 645-658.
- [31] Long, J.C.S., Gilmour, P., Witherspoon, P.A., 1985. A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures. *Water Resources Research* 21, 1105-1115.
- [32] McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. 1998. A modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, U, S, Geological Survey, Airginia.
- [33] Min, K.-B., Rutqvist, J., Tsang, C.-F., Jing, L., 2005. Thermally induced mechanical and permeability changes around a nuclear waste repository—a far-field study based on equivalent properties determined by a discrete approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42, 765-780.
- [34] Neuman, S.P., Depner, J.S., 1988. Use of variable-scale pressure test data to estimate the log hydraulic conductivity covariance and dispersivity of fractured granites near Oracle, Arizona. *Journal of Hydrology* 102, 475-501.
- [35] Nguyen, T.S., Selvadurai, A.P.S., 1995. Coupled thermal-hydrological-mechanical processes in sparsely fractured rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.*, 32, 465 – 480.
- [36] Nguyen, T.S., 1996. Description of the computer code FRACON. Stephansson, O., Jing, L., Tsang, C.F. (Eds.), *Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media*, vol. 79
- [37] Noorishad, J. Program, 2010. ROCMAS: Introduction and User' s Guide. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL PAPER LBL-12987.
- [38] Oda, M., 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Géotechnique* 35, 483-495.
- [39] Ohnishi, Y., Shibata, H., Kobayashi, A., 1987. Development of finite element code for the analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of a saturated – unsaturated medium. In: Tsang CF, editor. *Coupled processes associated with nuclear waste repositories*, Academic Press, Orlando, 679-696.
- [40] Ohnishi Y., Kobayashi, A., 1996. THAMES. O. Stephansson, O., Jing, L., Tsang, C.F. (Eds.), *Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media*, vol. 79. *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier, 545 – 549.
- [41] Pastina, B., Hellä, P., 2006. Expected evolution of a spent nuclear fuel repository at olkiluoto. POSIVA.
- [42] Pine, R.J., Cundall, P.A., 1985. Application of the fluid rock interaction program (FRIP) to the modeling of hot dry rock geothermal energy systems. Stephansson, O. (Ed.), *Proceedings of the international symposium on fundamentals of rock joints*, Björkliden, Sweden, 293 – 302.
- [43] Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G., 1999. TOUGH2 User' s Guide, Version 2.0. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California.
- [44] Rouleau, A., Gale, J.E., 1987. Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 24, 99-112.
- [45] Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. Th. 2013. The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.16, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 340.
- [46] SKB, 1999. SR 97 - Processes in the repository evolution. Background report to SR 97. TR-reports. Swenson, D.V., DuTeau, R., Sprecker, T. 1997. A coupled model of fluid flow in jointed rock applied to simulation of a hot dry rock reservoir. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 34 , 308.
- [47] Snow, D.T., 1965. A parallel plate model of fractured permeable media. University of California, Berkeley.
- [48] Warren, J.E., Root, P.J., 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers* 3, 245-255.
- [49] Weiss, L.E., 1972. *The Minor Structures of Deformed Rocks: A Photographic Atlas*. Springer Berlin Heidelberg.
- [50] Yasuhara, H., Kinoshita, N., Ohfuji, H., Lee, D.S., Nakashima, S., Kishida, K., 2011. Temporal alteration of fracture permeability in granite under hydrothermal conditions and its interpretation by coupled chemo-mechanical model. *Applied Geochemistry* 26, 2074 – 2088.
- [51] Zheng, C. 1990. MT3D, A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems, Report to the U.S. Environmental Protection Agency Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, Oklahoma.
- [52] Zimmerman, R.W., Chen, G., Hadgu, T., Bodvarsson, G.S., 1993. A numerical dual-porosity model with semianalytical treatment of fracture/matrix flow. *Water Resources Research* 29, 2127-2137.

附錄 A

| Model        | Numerical Scheme <sup>1</sup> | Media <sup>2</sup> |   | T <sup>1</sup> |    |    | H <sup>2</sup> |    | M <sup>3</sup> |    |    | C <sup>4</sup> |     |     |
|--------------|-------------------------------|--------------------|---|----------------|----|----|----------------|----|----------------|----|----|----------------|-----|-----|
|              |                               | P                  | F | Cd             | Cv | Rd | SP             | MP | El             | Pl | Vi | Adv            | Dis | Rec |
| ADINA-T      | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  | ✓  |                |    |                |    |    |                |     |     |
| FEFLOW       | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| FEHM         | FRM                           |                    | ✓ | ✓              | ✓  |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| FEMWATER     | FEM                           | ✓                  |   |                |    |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| FracMan      | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              |    |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| FRACOD       | FEM                           |                    | ✓ | ✓              |    |    |                |    | ✓              | ✓  |    |                |     |     |
| FRACSIM 3D   | FEM                           |                    | ✓ | ✓              |    |    | ✓              |    |                |    |    | ✓              | ✓   |     |
| Geocrack 2D  | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  |    | ✓              | ✓  | ✓              | ✓  |    |                |     |     |
| HYDROGEOCHEM | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| HYDRUS 3D    | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              |    |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   |     |
| MODFLOW      | FDM                           | ✓                  |   |                |    |    | ✓              |    |                |    |    |                |     |     |
| MT3DMS       | FDM                           | ✓                  |   |                |    |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| PFLOTTRAN    | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              |    |    | ✓              | ✓  | ✓              |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| RCB          | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  | ✓  | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |
| ROCMAS       | FEM                           | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  |    | ✓              | ✓  | ✓              | ✓  |    |                |     |     |
| TOUGHREACT   | IFDM                          | ✓                  | ✓ | ✓              | ✓  |    | ✓              | ✓  |                |    |    | ✓              | ✓   | ✓   |

**1. Numerical method-** FEM: Finite element method; FDM: Finite difference method; IFDM: Integral finite difference method.

**2. Media-** P: Porous Media; F: Fracture Media

**3. Thermal-** Cd: Conduction; Cv: Convection; Rd: Radiation.

**4. Hydrological-** SP: Single phase flow; MP: Multi phase flow.

**5. Mechanical-** El: Elastic; Pl: Plastic; Vi: Viscosity.

**6. Chemical-** Adv: Advection; Dis: Dispersion; Rec: Reaction.

# 建立臨床放射治療劑量稽核驗證技術

## Establish the dose audit verification technology for radiotherapy

計畫編號：MOST 104-NU -E-010-002 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許世明

e-mail：[smhsu@ym.edu.tw](mailto:smhsu@ym.edu.tw)

計畫參與人員：李振弘、蕭安成、陳昱誠

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

### 摘要

透過相關部門建立臨床放射治療劑量稽核程序，驗證不同放射治療機構間其設備劑量給予的準確性是非常重要的議題。本研究藉由自製假體進行放射治療劑量的驗證，包括劑量郵校系統和臨床測量。本計畫使用熱發光劑量計做為郵校劑量計，亦製作郵校假體進行放射治療劑量驗證稽核。熱發光劑量計之測讀值透過校正因子轉換為水假體的吸收劑量。藉由固態水假體和自製假體其劑量之差異，進行郵校假體之散射校正；此郵校假體散射因子介於1.084至1.031間。熱發光劑量計在鈷-60與直線加速器間的能量依存性為0.99至1.01。郵校假體的擺放設定因子，可用於修訂不同劑量輸出的校正模式。此放射治療劑量稽核系統經臨床試驗後，整體的劑量差異在5%內。因此，本實驗自製的放射治療劑量稽核系統，將可應用於不同放射治療機構的劑量驗證。

關鍵詞：放射治療，假體，輻射劑量。

### Abstract

The standard protocol of dosimetric measurements by the organization with convincible authority is important to verify the accuracy of dose delivery in an acceptance level among radiation therapy institutions. The object of this study is to evaluate the self-designed simple audit phantom for dose verifications of radiation therapy, including phantom design, dose audit system and clinical test. This study used thermoluminescent dosimeters as postal dosimeters, and produced mailed phantoms for the postal audit. Correction factors are important for converting the TLD readout values from phantoms to absorbed dose in water. The phantom scatter correction factor is used to compare the difference of scattered dose between solid water phantom and homemade phantoms, and their value ranged from 1.084 to 1.031. The energy dependence correction factor is used to compare the TLD reading of unit dose irradiated by audit beam energies with  $^{60}\text{Co}$  in the solid water phantom, and the value is 0.99 to 1.01. The setup condition factor is used to correct the difference of dose-output calibration conditions. After clinical tests of the machine calibrating the dose output, the dose deviation was within 5%. Therefore, our homemade phantoms and dosimetric system can be applied on dose verification for radiation therapy institutions.

Keywords: phantom, radiation dose, radiotherapy.

### I. 前言

目前國際間放射治療劑量之驗證，是藉由郵寄假體及輻射劑量計的方式進行稽核，其解決地幅廣大、人力不足的問題。國內則可透過建立臨床放射治療劑量稽核驗證技術，有效節省品保程序之時間與相關單位之人力資本，做為醫療單位間其放射治療劑量輸出的比較基準，提升國內放射治療之品質。

### II. 主要內容

本計畫研發自製多功能郵校假體，搭配熱發光劑量計、玻璃劑量計及輻射變色膠片...等多種劑量計，進行不同直線加速器品保項目之劑量測量，透過使用游離腔與蒙地卡羅模擬計算，得知自製郵校假體散射修正因子，建立一劑量轉換修正公式。使自製假體所獲得之量測劑量值，可校正轉換為在充分散射供應照射條件下之照射劑量，以正確推估醫院端實際給予之輻射劑量。

### III. 結果與討論

蒙地卡羅模擬計算值與游離腔量測值，得知自製假體，其小尺寸導致之散射供應差異小於1.0%。自製假體在臨床實際校驗結果，其量測劑量與直線加速器輸出劑量的差異小於5%，符合郵校劑量標準，而照野平坦性與對稱性及輻射旋轉中心測定亦符合法規規定標準。故得知本計畫，所建立的臨床放射治療劑量稽核驗證技術之可行性與準確性，期以此做為國內建立品質保證作業程序之基礎資料，以利未來自製假體的多元性發展與應用。

### IV. 結論

國內可透過本計畫，所建立的臨床放射治療劑量稽核驗證技術，驗證不同放射治療機構間其設備劑量給予的準確性，以節省繁複的品質保證驗證程序。

### 參考文獻

- [1] Medical physics 2012;39:40-47.
- [2] Phys Med Biol 2012;57:7599-7614

# 給低輻射劑量核醫成像應用之多通道讀出系統晶片電路設計

## Multi-Channel Readout SOC Circuit Design for Low-Dose Nuclear Medicine Imaging

計畫編號：MOST 104-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：賴李沛毅、傅嘉韋、張祐綱、周育諒、楊越德、黃俊浩、曾韻華、周祐安、黃星維、蔡明翰、柏麥嘉

執行單位：國立清華大學工程與系統科學系

### 摘要

吾人在本計劃中設計並實現一個給正子斷層掃描應用之多通道低輻射劑量讀出電路單晶片。此讀出電路單晶片可以偵測 SiPM array 的輸出電流能量及輸出電流時間，數位資料處理器根據本讀出電路單晶片所偵測的 SiPM array 的輸出電流能量及輸出電流時間資訊可處理並顯示偵測的影像；此架構包括一個電流感測陣列、電流加法器及電流/電壓轉換器、放大器、積分器、類比/數位轉換器及訊號觸發器，訊號觸發器用來觸發積分器及類比/數位轉換器，因為雙斜率類比/數位轉換器具有積分功能，所以使用雙斜率類比/數位轉換器就包含積分器及類比/數位轉換器。

關鍵詞：正子斷層掃描、讀出電路、系統單晶片、放大器、類比數位轉換器及訊號觸發器。

### Abstract

In this project, we designed and implemented a multi-channel low-dose readout SOC circuit for Positron Emission Tomography (PET) applications. This readout SOC chip can detect the current energy of the SiPM array and output the current emission time. From the data of the current energy and the emission time, the digital signal processor (DSP) can process and display the sensing image. The first architecture of the readout SOC circuit consists of a current sensing array, a current summation and I/V converter, an amplifier, an integrator, an analog-to-digital converter (ADC), and a trigger circuit. The trigger circuit is used to active the integrator and the ADC. In this architecture, since the dual-slope ADC has the integration function, it is used for both integrator and ADC.

Keywords: positron emission tomography (PET) system, readout circuit, SOC, amplifiers, analog-to-digital converter (ADC), and trigger circuit.

### I. 前言

正子發射斷層掃描是具有高靈敏度與準確性的影像診斷高科技設備，是核子醫學領域最先進的臨床檢查影像技術。根據分子細胞學的原理，由於癌細胞增生迅速，需不斷吸收體內營養，新陳代謝較旺盛，攝取葡萄糖速率為正常細胞二至十倍，若將帶有正電子的特殊葡萄糖合成藥劑注入於受檢者的體內，這時可利用 PET 掃描儀作全身性的掃描，掃描的圖像上在癌症初期的部位則會出現可辨別的光點。這使得不必等到癌細胞附近的

組織改變，即能於腫瘤發生的早期準確地判定出來，提供給醫師作為癌症診斷及治療的最佳依據，其診斷正確率約達 87-91%。所以綜觀來說，PET 技術具有無創傷性的優點，用解剖形態之方式進行功能、代謝和受體的顯像，是目前臨床上針對腫瘤之診斷和治療的最佳選擇。

### II. 研究方法

本計劃擬實現一個應用在低輻射劑量核醫成像之多通道讀出系統晶片電路，此架構是延續上一年度計畫，實現一個應用在低輻射劑量核醫成像之多通道讀出系統晶片電路，此讀出系統晶片可感測 SiPM 陣列所產生電流訊號的能量大小，為配合核研所現有核醫成像儀器，此架構是應用在 16x16 之 SiPM 陣列電流的讀出電路，此系統需 4 個 8 x 8 current sensing array 晶片去感測一個 16x16 SiPM array 電流。current sensing array 將感測到的電流均分成 x 及 y 方向的電流，x 方向的 16 個電流相加並轉換成 16 個相對應的感測電壓，y 方向的 16 個電流相加並轉換成 16 個相對應的感測電壓（在上一年度吾人已完成這一部分的製作與量測），此 32 個感測電壓分別送到 32 個通道(channels)電路做資料處理與轉換。圖（一）為吾人提出的核醫成像讀出晶片電路系統之單通道架構圖，整個系統需 32 個通道，每一個通道電路對輸入訊號做放大與積分以得到每一通道感測到的能量，每一感測到的能量再轉換成數位資料，然後輸出至後面的數位資料處理器(DSP)做資料處理與成像。

圖（二）為吾人提出的核醫成像讀出晶片電路系統之單通道電路圖及時序圖。由於輸入訊號是隨機的，無法預測訊號何時會來，所以吾人在每一通道設計了一個觸發電路(trigger circuit)，此電路可以偵測輸入電壓一有變動就很快的送出一個觸發訊號(trigger signal)通知積分器開始做積分，此觸發電路包含運算放大器 op-amp1、二極體( $D_1$ )、電容( $C_1$ )及反相器(inv1 and inv2)，當沒有輸入訊號時（只有直流偏壓  $V_{dc}$ ），由於負迴授的連接，電容( $C_1$ )的電壓等於輸入訊號的直流偏壓( $V_{dc}$ )，運算放大器的輸出為  $V_{dc} + V_D$ ，其中  $V_D$  為二極體兩端的跨壓，調整反相器 inv1 的 threshold voltage 使得 trigger signal 為 "high"；當有輸入訊號時（訊號為負的），op-amp1 的輸出電壓下降， $D_1$  off，觸發電路為開迴路狀態，op-amp1 的輸出電壓下降到最低電壓，使得 trigger signal 為 "low"，由於 op-amp1 有很大的 open-loop gain，輸入

訊號只要下降一點點，trigger signal 很快便為"low"，所以此觸發電路可以偵測輸入有無訊號，而且可以很快的通知積分器開始做積分。

輸入訊號先由包含  $R_1$  及  $R_2$  的閉迴路運算放大器 op-amp2 將訊號放大，此級的放大倍率為  $(1 + R_2/R_1)$ ，輸入訊號放大後再送到積分器做積分，積分器電路包含 op-amp3、M1、M2、M3、 $C_2$ 、 $R_3$  及  $(n-1)R_3$ ，其中  $n$  為大於 1 的整數，此積分器和 comparator、control logic、counter 及 latch 組成一個雙斜率式類比數位轉換器，當 trigger signal 為"high"時（也就是沒有輸入訊號時），M1 off，M2 and M3 on，積分器的輸出  $V_{int}$  為 0 V，當有輸入訊號時，trigger signal 變為"low"，M1 on，M2 and M3 off，放大後的輸入訊號連接到積分器的輸入端，積分器開始做積分直到 trigger signal 變為"high"為止（時間等於  $t_1$ ），也就是當輸入訊號回到  $V_{dc}$  時，此時積分器的輸出電壓  $V_{int}(t_1)$  為：

$$V_{int}(t_1) = -\frac{(1 + R_2/R_1)}{R_3 C_2} \int_0^{t_1} V_{sense}(t) dt \quad (1)$$

其中  $-\int_0^{t_1} V_{sense}(t) dt$  為感測到的能量儲存在電容  $C_2$  中，吾人要將此能量轉換成數位資料。

當 trigger signal 在時間  $t_1$  時回到"high"，而控制訊號  $S_1$  保持在"low"，M1 and M3 off，M2 on，參考電壓  $V_{ref}$  接到積分器的輸入，由於參考電壓為正電壓，電容  $C_2$  開始放電，放電路徑的電阻為  $(n-1)R_3 + R_3 = nR_3$ ，積分器的輸出電壓下降，此時積分器的輸出電壓  $V_{int}(t)$  為：

$$V_{int}(t) = -\frac{(1 + R_2/R_1)}{R_3 C_2} \int_0^{t_1} V_{sense}(t) dt - \frac{1}{nR_3 C_2} \int_{t_1}^t V_{ref} dt \quad (2)$$

當積分器的輸出電壓回到 0 V 時，此時的時間為  $t + \Delta t$ ， $\Delta t$  代表電容  $C_2$  上的電荷放電到 0 時的放電時間，令

$$V_{int}(t = t_1 + \Delta t) = -\frac{(1 + R_2/R_1)}{R_3 C_2} \int_0^{t_1} V_{sense}(t) dt - \frac{1}{nR_3 C_2} \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} V_{ref} dt = 0 \quad (3)$$

$$\Rightarrow \Delta t = -\frac{n(1 + R_2/R_1)}{V_{ref}} \int_0^{t_1} V_{sense}(t) dt \quad (4)$$

從(4)中可看出  $\Delta t$  的大小正比於感測能量的大小，而且  $\Delta t$  只和電阻的比值有關，和電阻電容的絕對值無關，所以此電路不會有電阻電容製程偏差的問題。大於 1 的整數  $n$  延長  $C_2$  放電時間，可以提高類比數位轉換的解析度。用後面的比較器及數位電路可將  $\Delta t$  的大小轉換成數位資料，然後輸出至數位資料處理器做資料處理與成像。

由於運算放大器都會有 offset voltage，假如每一通道的 offset voltage 不一樣，會產生齊一性(uniformity)的問題，此問題可用 calibration 方式解決，由於每一通道都有一個 ADC，當系統一開機時，先不要輸入感測訊號，每一通道可用自己的 ADC 偵測自己的 offset voltage，然後將偵測到的 offset voltage 轉換成數位資料，儲存在另一組 latch 中，之後感測到的輸入訊號再扣掉相當於 offset voltage 的數位資料，如此就把 offset voltage 補償掉了。

此系統的運算放大器需很高的開迴路增益及頻寬，吾人擬使用如圖（三）之 folded-csacode operational

amplifier，M1-M3 為 differential pair，M4-M5 為 folded csacode current mirror 當作 differential pair 的 active load，M12-M13 為輸出級。

為了達到更高速，在第二個架構中的 ADC，吾人擬使用管線式類比數位轉換器，圖（四）為管線式類比數位轉換器架構圖，通常在第一級(Stage1)的前端會有一個獨立的取樣保持電路(Sample and Hold circuit, S/H)，在其他每一級的電路裡沒有另外設計取樣保持電路，因為 MDAC 是使用開關電容(Switch-capacitor, SC)電路，本身就可以做為下一級電路的取樣保持電路。當輸入訊號經過前端取樣保持電路的同時，第一級的子類比數位轉換器(Sub-ADC)電路對經過前端取樣保持電路保持住的電壓值做取樣，接下來子類比數位轉換器(Sub-ADC)會轉換保持住的電壓值並將解出的數位碼送出到暫存器，而解析出來的數位碼再進入子數位類比轉換器(Sub-DAC)轉換成電壓值，經由減法器將原本取樣保持電路保持住的電壓值與子數位類比轉換器(Sub-DAC)轉換成電壓值做相減，得到剩餘值(Residue)，透過增益級放大後再送往下一級電路做轉換。在實際的電路中，往往將 sub-DAC、減法器與增益級三個電路合在一起，被稱為 MDAC(Multiplying DAC)。MDAC 可以使用開關電容(Switch-capacitor, SC)電路方式來構成，SC 電路本身就擁有取樣保持電路的功能，可以做為下一級電路的 S/H。而 sub-ADC 則為快閃式(Flash)架構。

在本計劃中我們已先透過 Matlab 中的 Simulink 完成管線式類比數位轉換器的行為模型(Behavioral Model)，包含了取樣及保持電路(S/H)、子類比數位轉換器(Sub-ADC)、DAC/減法器/增益級電路(MDAC)和數位錯誤修正電路，圖（五）為 10-bit 100MHz 管線式類比數位轉換器之行為模型圖，因為數位修正電路行為模型的輸出為 boolean type，必須使用 Data Type Conversion 模塊將之轉換為 double type。利用 To Workspace 模塊來將 DOUT 輸出的資料送進另一 M 檔做 FFT 分析以計算出 SNDR 與 ENOB 等特性。圖（六）為輸入頻率 1.0009765625MHz、取樣頻率 100MHz，取樣點數  $N$  為 4096 點時所得到之頻譜圖。SNDR=61.95dB、ENOB=9.99bit。十位元取樣頻率 100MHz 的 ADC 足夠應用在本計劃的讀出晶片電路。

### III. 結果與討論

我們已完成多通道低輻射劑量核醫成像讀出系統晶片電路設計與製作。圖（七）為多通道電壓積分電路 pcb 板，我們先量測在觸發準位是 14mv 的時後的輸入和輸出差值的圖，如圖（八），輸入為 80mv，輸出差值為 -0.8v，其穩定的時間為 1.14us，然而輸入增大到 340mv 時，其輸出差值為 2.203v，穩定時間為 0.64us 如圖（九），為了看輸入跟輸出差值是不是成一個線性的變化，我們改變輸入從 40mv 到 370mv 把所得到的輸出差值做一個線性圖，如圖（十），我們發現是個線性增加，但到輸入為 350mv 後就穩定不在增加。再來我們改變觸發準位到 28mv 做同樣的量測，如圖（十一）到圖（十三），我們發現不管處發準位為多少，穩定時間都隨輸入增加而減少，然後輸入增大到 340mv 時，輸出差值都成穩定狀態，把兩個不同觸發準位做一個比較表，如表（一）。圖（十四）為多通到電壓積分電路的裸晶圖。

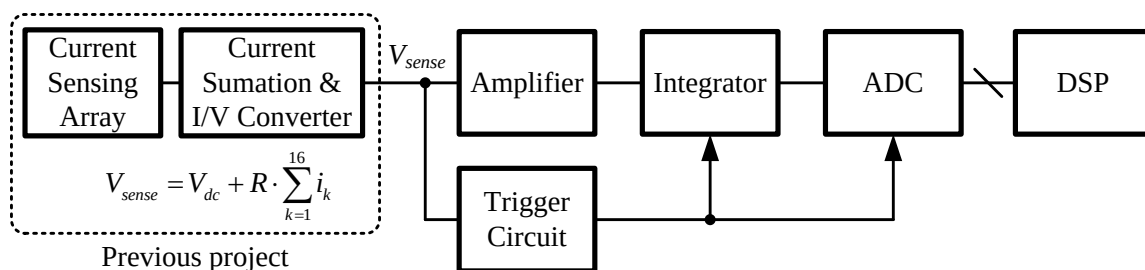
我們也完成一個 10-bit Pipeline ADC 的設計與製作。圖（十五）為 10 位元管線式類比數位轉換器的晶片主體測試板，類比電路的電源與數位電路的電源分開，板子上半面為數位電路的電源端子，板子下半面為類比電路的電源端子；右上方 SMA 端子為 clock 訊號輸入，右下方 SMA 端子為類比訊號輸入，板子左方則為數位輸出 pin 腳。晶片的接腳為 48pin，圖（十六）為晶片實體照片，採用 Side Braze 48 的封裝方式。圖（十七）為取樣率為 20MHz 下取 32768 點的 10 位元管線式類比數位轉換器量測結果頻譜分析。圖（十八）為 10 位元管線式類比數位轉換器的量測結果整理。

#### IV. 結論

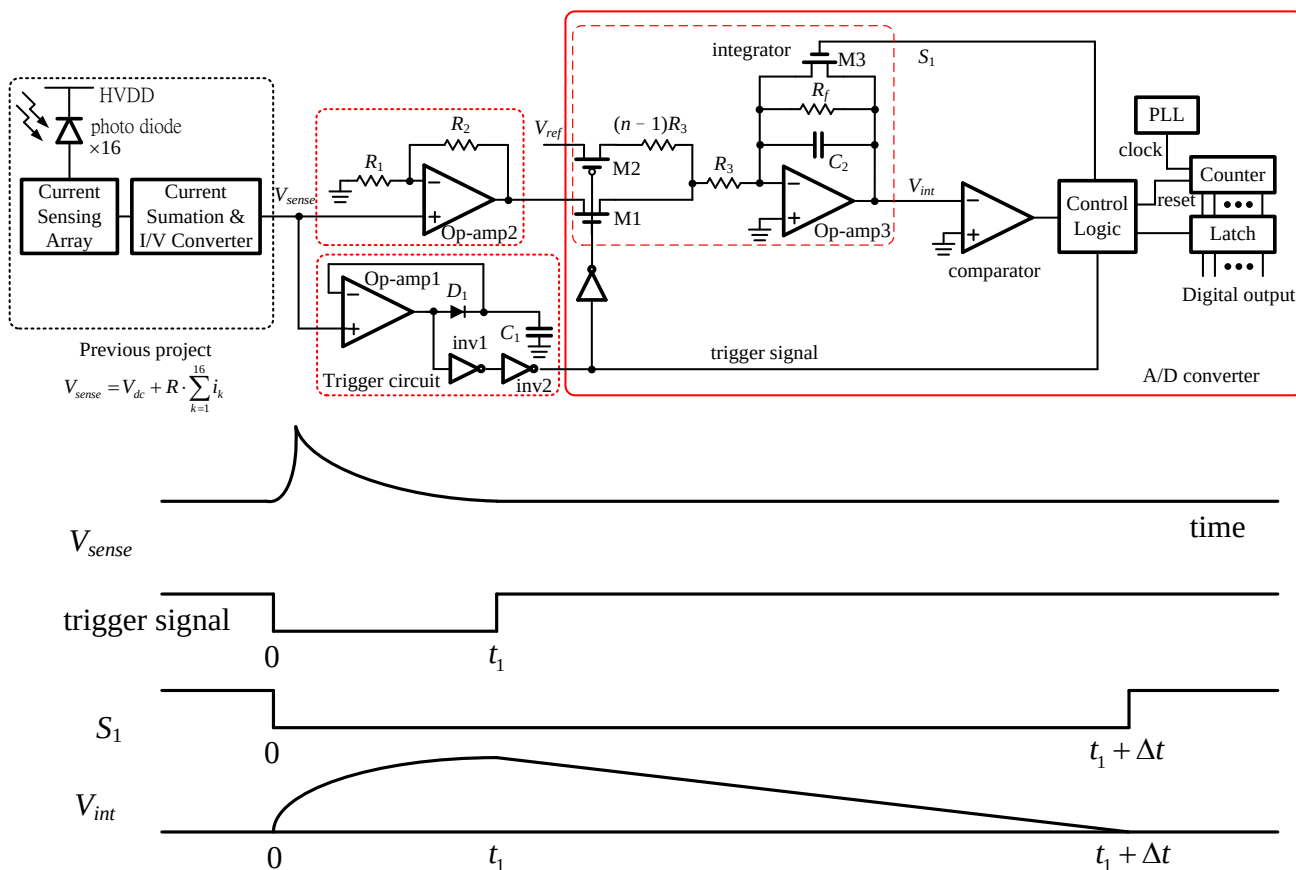
本計畫執行成果為設計並實現一個給正子斷層掃描應用之多通道低輻射劑量讀出電路單晶片。此讀出電路單晶片可以偵測 SiPM array 的輸出電流能量及輸出電流時間，數位資料處理器根據本讀出電路單晶片所偵測的 SiPM array 的輸出電流能量及輸出電流時間資訊可處理並顯示偵測的影像；此架構包括一個電流感測陣列、電流加法器及電流/電壓轉換器、放大器、積分器、類比/數位轉換器及訊號觸發器，訊號觸發器用來觸發積分器及類比/數位轉換器。本計畫中吾人也設計一個高速 10-bit pipelined ADC，量測結果 ENOB 最高為 8.66 bits，很適合應用在低輻射劑量之核醫成像系統晶片。這項計畫的延續還有許多階段的研發工作尚須努力，包括晶片效能的改善和系統的整合並測試，才能使國內此一新型儀器可以順利的推出。

#### 參考文獻

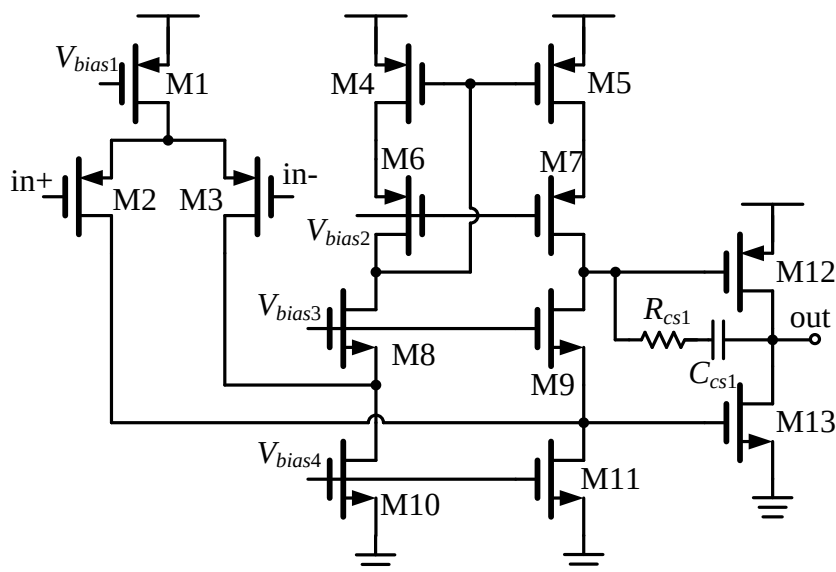
- [1] C.-M. Kao and Q. Xie and Y. Dong and L. Wan and c.-T. Chen, "A High-Sensitivity Small-Animal PET Scanner: Development and Initial Performance Measurements," IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 56, No. 5, pp. 2678-2688, Oct. 2009
- [2] N. Ollivier-Henry, W. Gao, N. A. Mbow, D. Brasse, B. Humbert, C. HuGuo, C. Colledani and Y. Hu, "Design and Characteristics of a Full-Custom Multichannel Front-End Readout ASIC Using Current-Mode CSA for Small Animal PET Imaging," IEEE Transactions On Biomedical Circuits and Systems. Vol. 5, No. 1, pp. 90-99, Feb. 2011.
- [3] X. C. Fang, N. Ollivier-Henry, W. Gao, Ch. Hu-Guo, C. Colledani, D. Brasse, B. Humbert and Y. HU, "IMOTEPAD: 64-Channel Front-End ASIC for Small Animal PET Imaging," Nuclear Instruments and Methods Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 634, No. 1, pp. 106-112, Apr. 2011.
- [4] W. Gao, D. Gao, C. Hu-Guo, and Y. Hu, "Design of a 12-Bit 2.5 MS/s Integrated Multi-Channel Single-Ramp Analog-to-Digital Converter for Imaging Detector Systems," IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement. Vol. 60, NO. 6 pp. 1942-1951, Apr. 2011.
- [5] W. Gao, D. Gao, C. Hu-Guo, T. Wei and Y. Hu, "Design and Characteristics of an Integrated Multichannel Ramp ADC Using Digital DLL Techniques for Small Animal PET Imaging," IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 58, No. 5, pp. 2161-2168, Sept. 2011
- [6] W. Gao, D. Gao, D. Brasse, Ch. Hu-Guo, and Y. Hu, "Precise Multiphase Clock Generation Using Low-litter Delay-Locked Loop Techniques for Positron Emission Tomography Imaging," IEEE Transaction on Nuclear Science. Vol. 57, No. 3, pp. 1063-1070, June 2010.
- [7] M. Mota and J. Christiansen, "A high-resolution time interpolator based on a delay locked loop and an RC delay line," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 34, No. 10, pp. 1360-1366, 1999.
- [8] W. Gao, Member, IEEE, D. Gao, T. Wei, H. Zeng, Y. Duan, S. Lu, L. Shen, W. Xu, Q. Xie and Y. Hu, "Design of a Monolithic Multi-Channel Front-End Readout ASIC for LYSO/SiPM-based Small Animal Flat-Panel PET Imaging," IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp. 2447-2450, 2011.
- [9] Q. Xie, C. M. Kao, Z. Hsiao, and C. T. Chen, "A new approach for pulse processing in positron emission tomography," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 4, pp. 988-995, Aug. 2005.
- [10] R. Fontaine, M. A. Tetrault, F. Belanger, N. Viscogliosi, R. Himmich, J. B. Michaud, S. Robert, J. D. Leroux, H. Semmaoui, P. Berard, J. Cadorette, C. M. Pepin, and R. Lecomte, "Real time digital signal processing implementation for an APD-based pet scanner with phoswich detectors," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 3, pt. 1, pp. 784-788, Jun. 2006.
- [11] A. Fallu-Labruyere, H. Tan, W. Hennig, and W. K. Warburton, "Time resolution studies using digital constant fraction discrimination," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 579, pp. 247-251, Aug. 2007.
- [12] P. D. Olcott, A. Fallu-Labruyere, F. Habte, C. S. Levin, and W. K. Warburton, "A high speed fully digital data acquisition system for positron emission tomography," in Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec., 2006, vol. 3, pp. 1909-1911.
- [13] L. Arnold, R. Baumann, E. Chambit, M. Filliger, C. Fuchs, C. Kieber, D. Klein, P. Medina, C. Parisel, M. Richer, C. Santos, and C. Weber, "TNT digital pulse processor," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 53, no. 3, pt. 1, pp. 723-728, Jun. 2006.
- [14] S. Surti, A. Kuhn, M. E. Werner, A. E. Perkins, J. Kolthammer, and J. S. Karp, "Performance of philips gemini TF PET/CT scanner with special consideration for its time-of-flight imaging capabilities," J. Nucl. Med., vol. 48, pp. 471-480, 2007.
- [15] R. F. Muzic and J. A. Kolthammer, "Pet performance of the Gemini TF: A time-of-flight PET/CT scanner," in Proc. IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec., Oct. 2006, vol. 3, pp. 1940-1944.



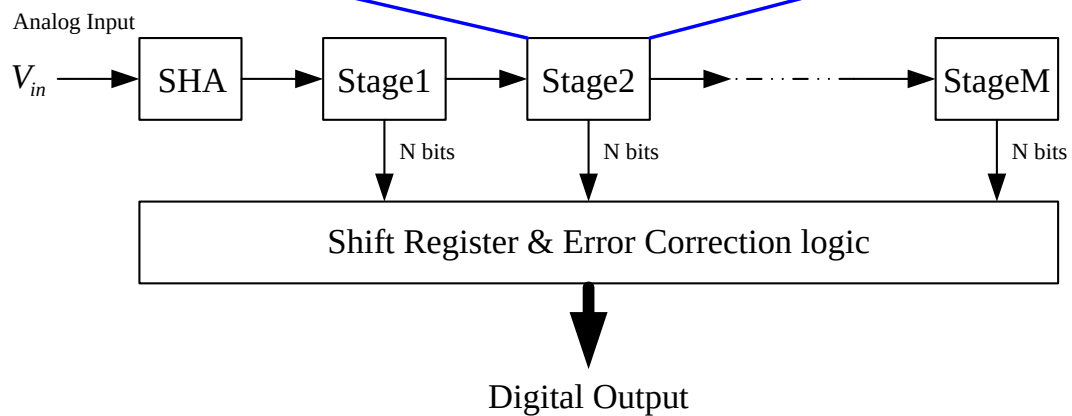
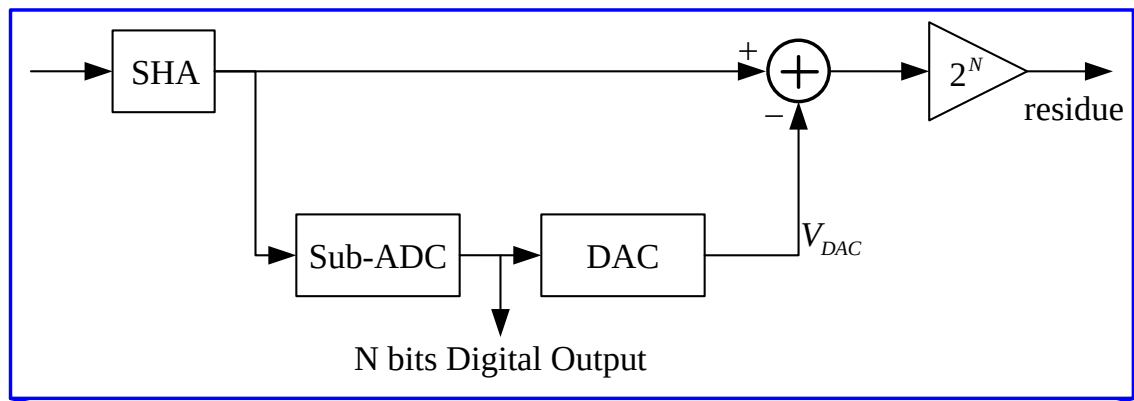
圖（一） 吾人提出的核醫成像讀出晶片電路系統（一）之單通道架構圖。



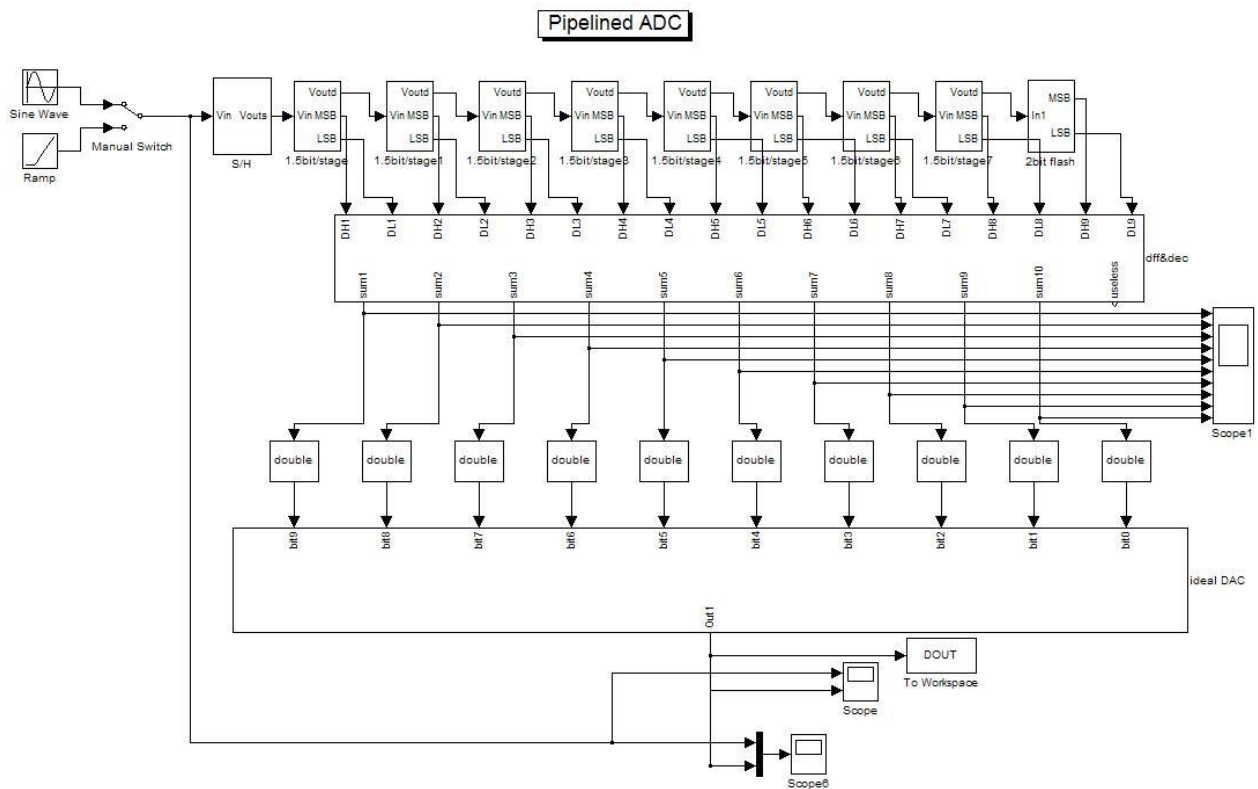
圖（二） 吾人提出的核醫成像讀出晶片電路系統（一）之單通道電路圖及時序圖。



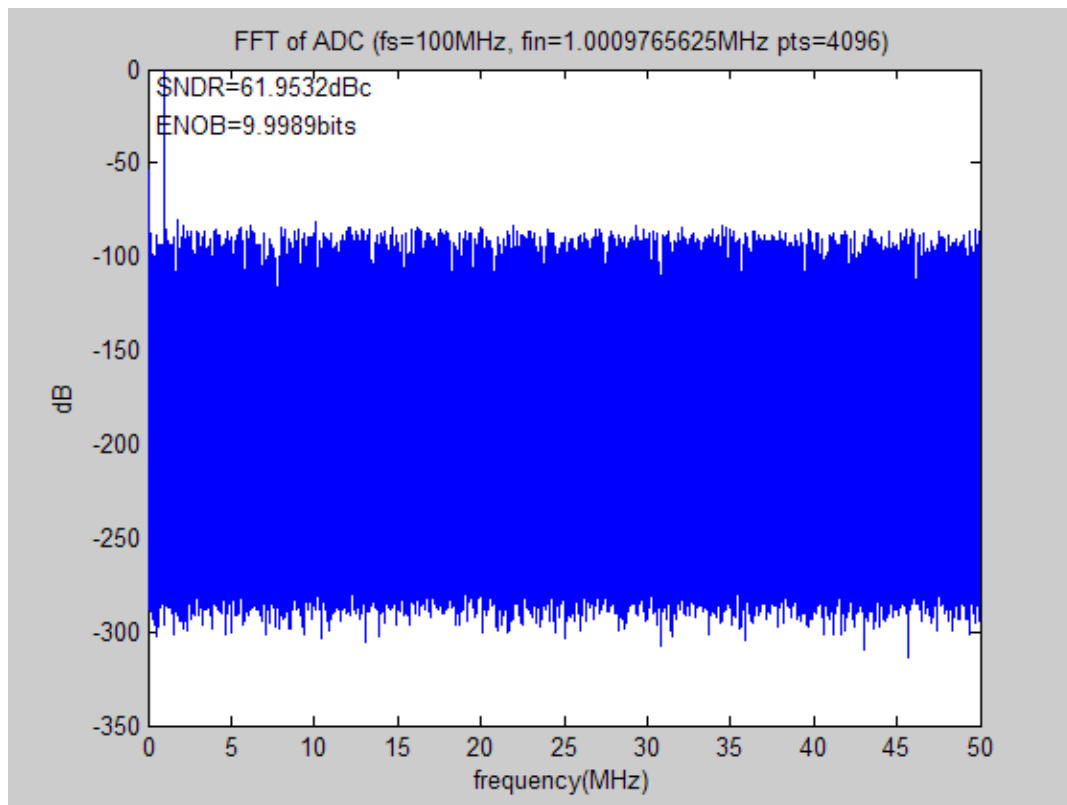
圖（三） Folded-cascode operational amplifier。



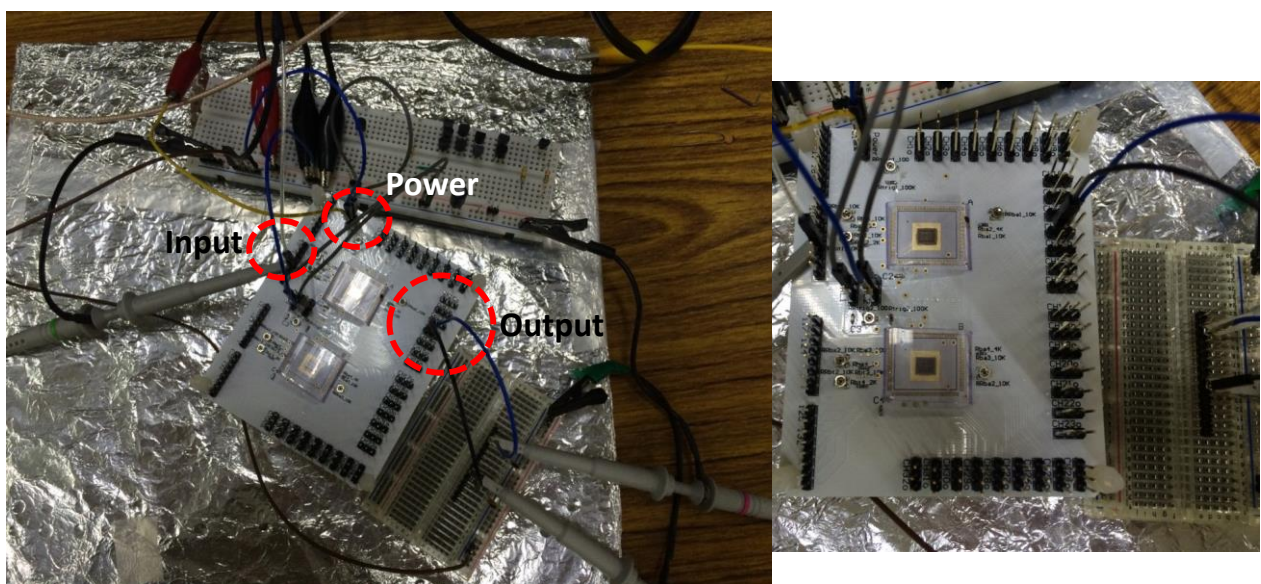
圖（四）為管線式類比數位轉換器架構圖。



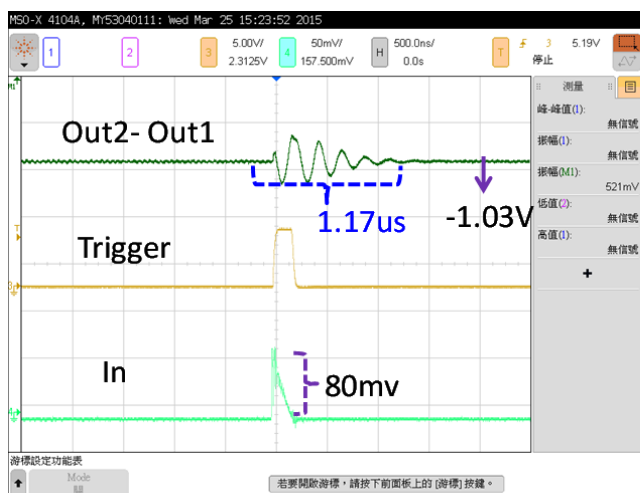
圖（五）10-bit 100MHz 管線式類比數位轉換器之行為模型圖。



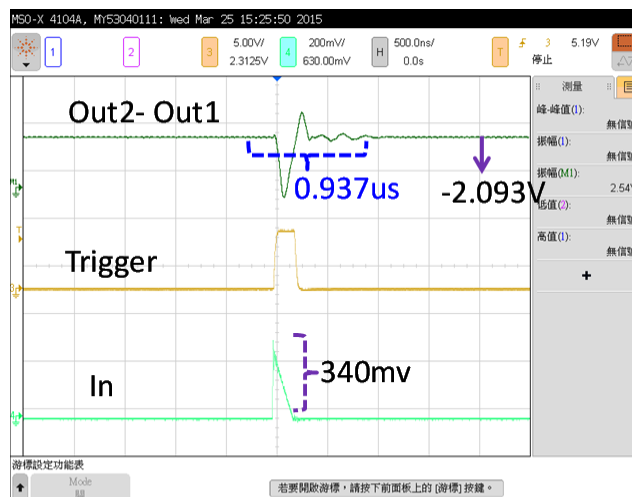
圖(六)輸入頻率 1.0009765625MHz、取樣頻率 100MHz、取樣點數 N 為 4096 點時所得之頻譜圖，SNDR=61.95dB、ENOB=9.99bit。



圖(七)多通道電壓積分電路 pcb 板。



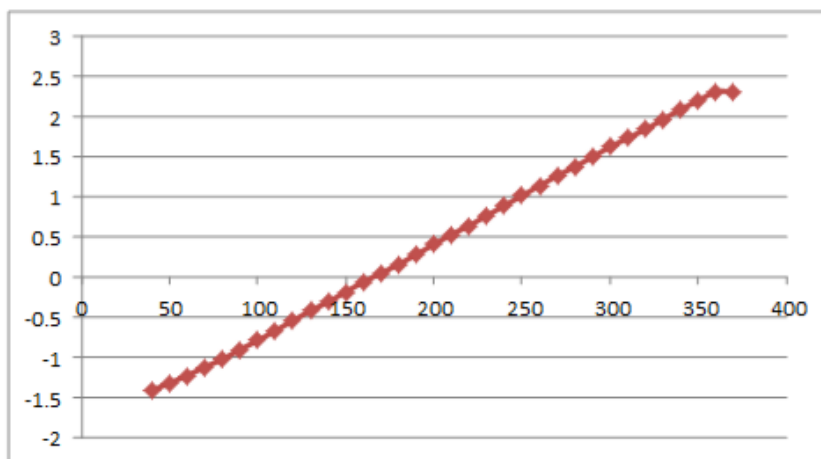
圖(八) 觸發準位為 14mv 的輸入跟輸出差值電壓圖。



圖(九) 觸發準位為 14mv 的輸入跟輸出差值電壓圖。

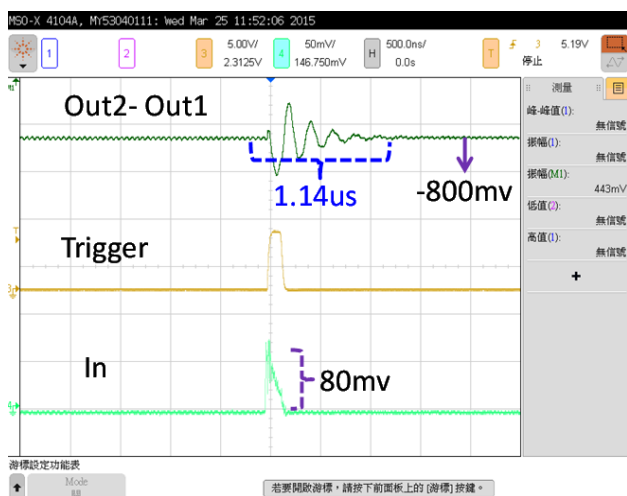
Trigger\_Level=14mV

Output Difference(V)

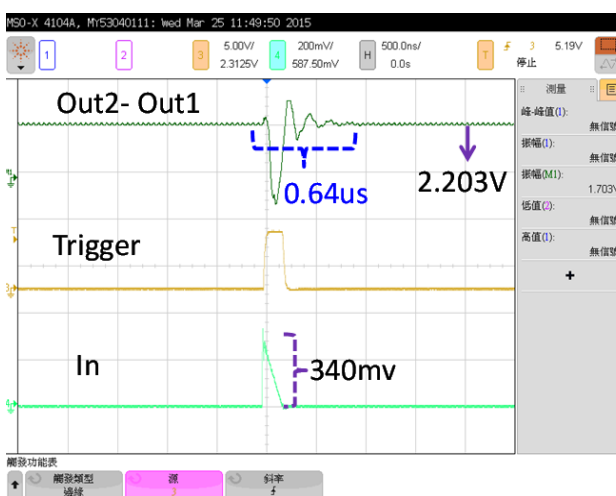


Input Signal(mV)

圖(十) 輸入跟輸出差值的線性圖。



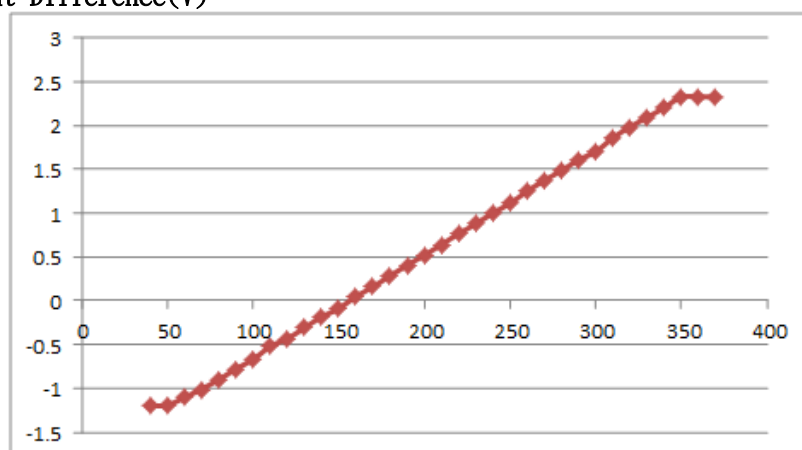
圖(十一) 觸發準位為 28mv 的輸入跟輸出差值電壓圖。



圖(十二) 觸發準位為 28mv 的輸入跟輸出差值電壓圖。

Trigger\_Level=28mV

Output Difference(V)

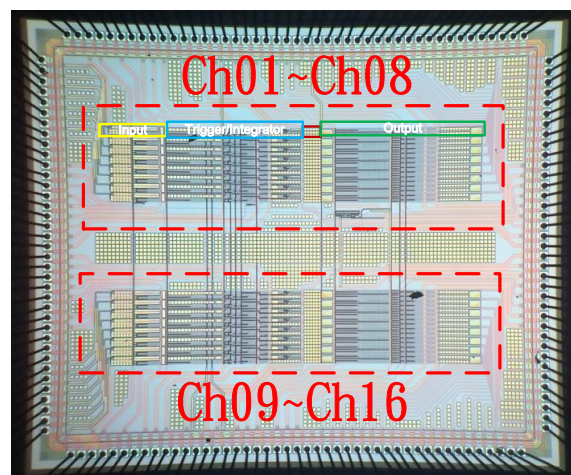


Input Signal(mV)

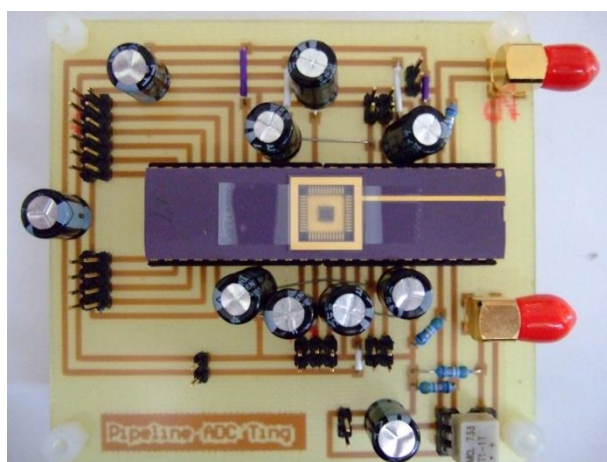
圖（十三） 輸入跟輸出差值的線性圖。

| Trigger_Level   | 14mV         | 28mV         |
|-----------------|--------------|--------------|
| Input Range     | 40mV~370mV   | 40mV~370mV   |
| Out2-Out1 Range | -1.42V~2.31V | -1.19V~2.32V |

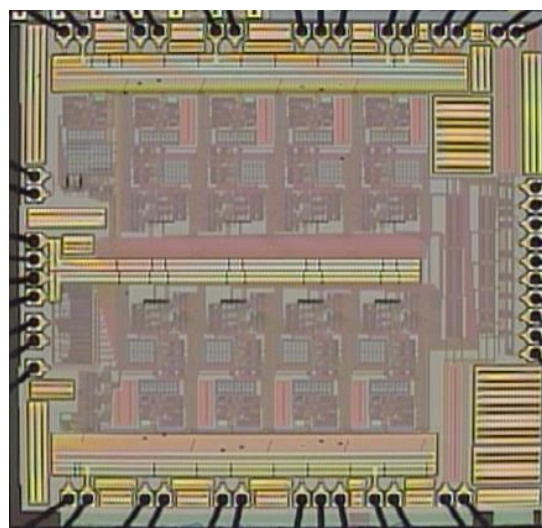
表（一） 不同觸發準位輸入跟輸出差值的比較。



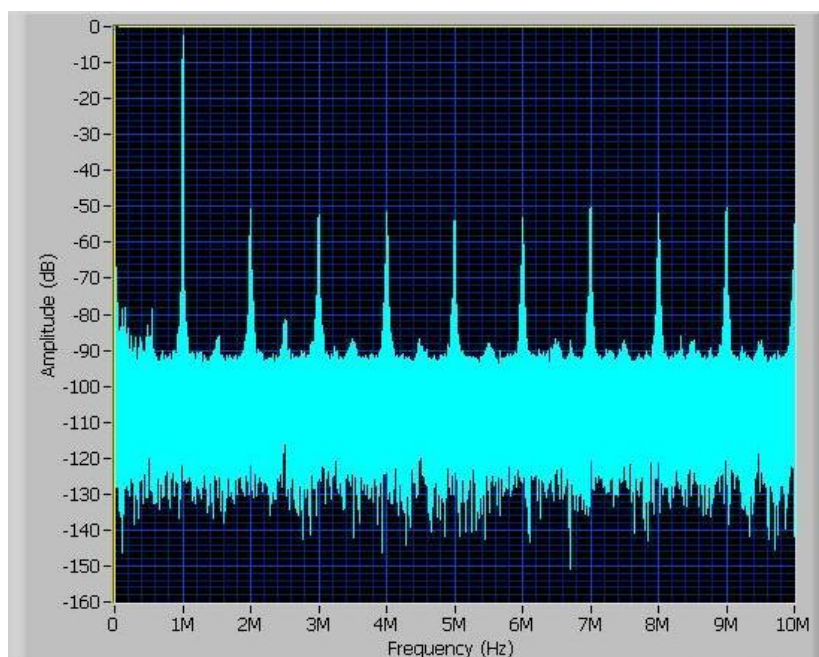
圖（十四） 多通道電壓積分電路裸帶圖。



圖（十五） 10位元管線式類比數位轉換器晶片主體測試板。



圖（十六） 晶片實體照片。

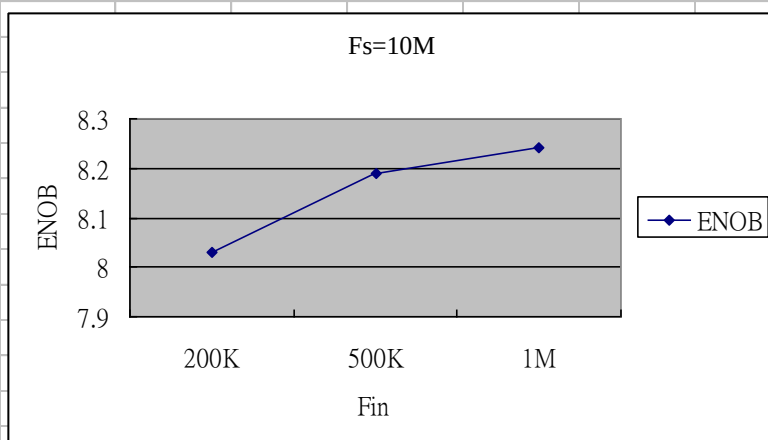
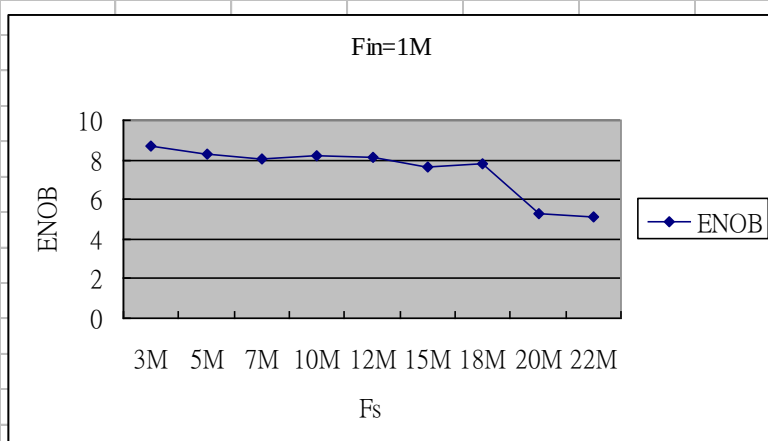


圖（十七）為取樣率為20MHz 下取32768點的10位元管線式類比數位轉換器量測結果頻譜分析。

| $F_{in}$ | $F_s$ | SNDR  | ENOB |
|----------|-------|-------|------|
| 1M       | 3M    | 53.92 | 8.66 |
| 1M       | 5M    | 51.57 | 8.27 |
| 1M       | 7M    | 50.34 | 8.07 |
| 1M       | 10M   | 51.39 | 8.24 |
| 1M       | 12M   | 50.68 | 8.13 |
| 1M       | 15M   | 47.81 | 7.65 |
| 1M       | 18M   | 48.52 | 7.77 |
| 1M       | 20M   | 33.78 | 5.32 |
| 1M       | 22M   | 32.67 | 5.13 |

| $F_{in}$ | $F_s$ | SNDR  | ENOB |
|----------|-------|-------|------|
| 200K     | 10M   | 50.07 | 8.03 |
| 200K     | 20M   | 41.98 | 6.68 |
| 500K     | 10M   | 51.06 | 8.19 |
| 500K     | 20M   | 39.34 | 6.24 |

| $F_{in}$ | $F_s$ | SNDR  | ENOB |
|----------|-------|-------|------|
| 200K     | 10M   | 50.07 | 8.03 |
| 500K     | 10M   | 51.06 | 8.19 |
| 1M       | 10M   | 51.39 | 8.24 |



圖（十八）為10位元管線式類比數位轉換器的量測結果整理。

# 高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立-II

## Neutron Dose Assessment and Spectrum Measurement Technology for Accelerators (II)

計畫編號：NSC 103-2623-E-007-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：許榮鈞

e-mail：rjsheu@mx.nthu.edu.tw

計畫參與人員：林郁琦、許永政

執行單位：國立清華大學核子工程與科學研究所

### 摘要

國內近年增加數座大型的加速器設施，包括台灣光子源計畫的 3 GeV 電子同步輻射加速器、長庚醫院 235 MeV 質子癌症治療機、或是其它醫院規劃引進更先進的質子/重離子加速器、還有一些大學內發展中的加速器中子源或其它用途的加速器設施。加速器的輻射場有一些不同於傳統核設施或射源的特性，例如複雜多樣的混合場、輻射能量高、而且帶有時間結構，因此對於輻射度量的可靠性與劑量評估的準確度造成困難，尤其是中子能譜的問題。配合國內加速器應用的發展，下列四種加速器最受關注，分別是 3 GeV 電子加速器、235 MeV 質子加速器、400 MeV/A 碳離子加速器、30 MeV 質子加速器。本計畫延續 103 年度「高能加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立(I)」計畫，基於第一年的成果與累積經驗，順利完成下列目標：(1)加速器活化物質之分析與劑量評估；(2)高能加速器引發中子能譜模擬與量測技術建立；(3)高能加速器設施輻射防護建議。

關鍵詞：高能加速器、蒙地卡羅計算、中子能譜儀。

### Abstract

The dose assessment and measurement technology for accelerator radiation becomes more and more important in Taiwan. The accelerators of interest in this study include a 3 GeV electron synchrotron, a 235 MeV proton therapy accelerator, a 400 MeV/A carbon ion therapy accelerator planning, and a 30 MeV high-current proton cyclotron. Radiation fields associated with an accelerator operation differ considerably from those around nuclear power plants or radionuclides in many aspects, such as mixed radiation fields, wide-range energy distributions and specific time structures. These problems result in challenging difficulties in radiation measurements, particularly for the neutron spectrum determination. Key items in this project included: (1) residual activities and remnant doses caused by accelerator radiation induced material activation, (2) simulations and measurements of prompt radiation induced by accelerator operation, (3) general guidelines or suggestions for accelerator radiation protection. The second year of the project focused on the analysis of accelerator induced material activation and field measurements to test the performance of commercial and self-assembled neutron spectrometers.

Keywords: High-energy accelerators, Monte Carlo simulations, neutron spectrometers.

### I. 前言

台灣已有數座不同類型的大型加速器設施，而且還會陸續增加，但是相對而言，國內對於各種較高能量加速器輻射場的研究與經驗仍有所不足，本計畫針對高能加速器輻射場特性進行有系統的探討與比較，期望能進一步提升國內中子評估與度量技術的能力，有鑑於未來實際應用的可能性，本研究同時探討四種特別有興趣的加速器類型，目前設定的研究標的與其規格有：

- 3 GeV 電子加速器(最大輸出 30 W)、
- 235 MeV 質子加速器(最大輸出 300 nA)、
- 400 MeV/A 碳離子加速器(最大輸出  $2 \times 10^9$  particle/s)、
- 30 MeV 質子加速器(最大輸出 1 mA)。

括號內的最大射束輸出主要參考相關加速器設計報告或國外類似設施的數據，本研究針對上述加速器條件以中子產率、物質活化以及中子能譜測量為切入角度，深入探討這幾種加速器的輻射場特性。

### II. 材料與方法

在建立射束-靶體組合數據庫的過程中，為了保守估計射束損失最壞情況下的活化情形，本計畫假設四種加速器輸出的最高能量粒子以筆型射束(Pencil beam)的形態平行入射Thick-target條件下的三種材料圓柱體靶中，分別為銅、不銹鋼及軟組織。為了確保最大量的輻射產生，對於質子與碳離子等重荷電粒子，本計畫將靶厚度假設為射程的 1.2 倍，半徑為厚度的 0.5 倍；而對於主要引發電磁串級效應的高能電子，本計畫假設靶的尺寸可涵蓋 95%入射電子引發電磁串級的能量，不同材質所需的厚度與半徑則由文獻建議的公式進行估算[Bock and Vasilescu, 1998]。此外，為了比較運轉狀況下四種加速器設施輻射場的強度差異，本計畫假定的射束強度分別如下：30 MeV 質子束輸出為 1 mA，這是為了滿足 IAEA 建議 AB-BNCT 治療所需超熱中子強度  $1 \times 10^9$  [neutrons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]所需之質子束強度[Tanaka et al., 2009]，3 GeV 電子的射束損耗情形引用自台灣光子源輻射安全評估報告[NSRRC, 2010]，235 MeV 質子與 400 MeV/A 碳離子的射束強度則設定在可對水假體造成癌症治療所需之劑量率 2 [Gy  $\text{min}^{-1}$ ]的程度。本計畫採用 FLUKA 作為活化情形分析的主要工具[A. Fasso` et al., 2005]，此

部分的計算本計畫依據照射時間分為短時間照射情形與長時間照射情形，冷卻時間則由停止照射開始，最高達到 10 年。

為了可靠地評估加速器運轉產生的中子輻射劑量，如何正確地決定中子能譜是一個關鍵的問題，實際工作場所的中子能譜測量本身就是一個很大的困難，此外，評估不能只仰賴計算，因為計算過程與假設條件可能出錯的地方很多，實驗度量的驗證絕對是不可或缺，因此，建立加速器環境中子能譜的測量儀器亦是本研究的重點之一。傳統中子劑量偵檢器的運作建立在「中子能量響應函數」與「中子通率-劑量轉換因子」二者對中子能量曲線的相似性上，當入射中子能量超過 20 MeV 時，中子偵檢效率會隨著能量上升而降低，相反地，中子通率-劑量轉換因子卻是隨能量增加而上升[ICRP, 1997]，因此對於中子劑量需要更謹慎的評估與修正。本計畫利用自行開發的高靈敏度中子能譜儀測量國家同步輻射研究中心 3 GeV 電子加速器運轉的中子能譜，基於 MCNPX 的真檢器響應函數(在核研所標準中子校正實驗室測試無誤)，配合 FLUKA 計算所得的起始猜測能譜，利用 UMG 程式中的 MAEXD 進行能譜解析。

### III. 結果與討論

#### 【加速器活化物質分析與劑量評估】

##### ◎銅靶活度隨時間的變化情形(照射 16 小時)

比較四種射束可以發現有明顯不同的是 30 MeV 質子入射銅靶的案例(圖 1.)，由於質子能量不足以開啟太多核反應通道，活化核種的種類也相對單純，短半衰期與長半衰期的主要貢獻者分別為  $^{62}\text{Cu}$  及  $^{65}\text{Zn}$ ，在停機時  $^{62}\text{Cu}$  占了總活度的 57.70%，在冷卻一個月與一年後則是  $^{65}\text{Zn}$  占了 82.12% 及 97.54%。3 GeV 電子照射銅靶後，冷卻的三個時期活度主要的貢獻者是  $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{57}\text{Co}$ ，所占比例分別是 69.04%、69.59%、31.07%。235 MeV 質子與 400 MeV/A 碳離子引起的活化核種活度在三個時期的主要貢獻者仍是  $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{57}\text{Co}$ ，與 3 GeV 電子照射的結果相同，但 235 MeV 質子與 400 MeV/A 碳離子的活度變化趨勢更一致，核種的組成也更複雜，此外，235 MeV 質子與 400 MeV/A 碳離子除了  $^{62}\text{Cu}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{57}\text{Co}$  外，其他核種的貢獻也佔了相當程度的比例。

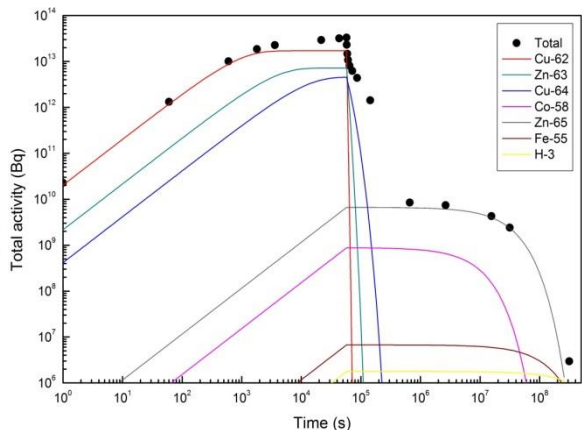


圖 1. 30 MeV 質子照射銅靶 16 小時後活度變化情形

##### ◎不銹鋼靶活度隨時間的變化情形(照射 16 小時)

30 MeV 質子照射不銹鋼靶後(圖 2.)，冷卻的三個時期(停機、冷卻一個月及冷卻一年)，活度主要的貢獻者是  $^{52}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ ，所占比例分別是 33.46%、41.66%、67.17%。3 GeV 電子照射不銹鋼靶後，冷卻的三個時期活度主要的貢獻者是  $^{53}\text{Fe}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ ，所占比例分別是 29.73%、73.34%、69.15%。235 MeV 質子照射不銹鋼靶後，冷卻的三個時期主要的貢獻者是  $^{52}\text{Mn}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ ，所占比例分別是 15.91%、49.51%、32.66%。400 MeV/A 碳離子照射不銹鋼靶後，冷卻的三個時期主要的貢獻者是  $^{11}\text{C}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{55}\text{Fe}$ ，所占比例分別是 10.14%、45.61%、31.68%。與銅靶案例不同的是，經四種射束照射過後的銅在剛停機時主要貢獻核種皆為  $^{62}\text{Cu}$ ；然而經照射過後的不銹鋼在停機初期時，主要貢獻的核種種類則依照入射粒子種類、能量有顯著差異。另一方面，在經過冷卻一個月及一年後的情況下，不銹鋼受到四種射束任一者照射後的活度主要貢獻核種種類一致，皆分別為  $^{51}\text{Cr}$  及  $^{55}\text{Fe}$ 。

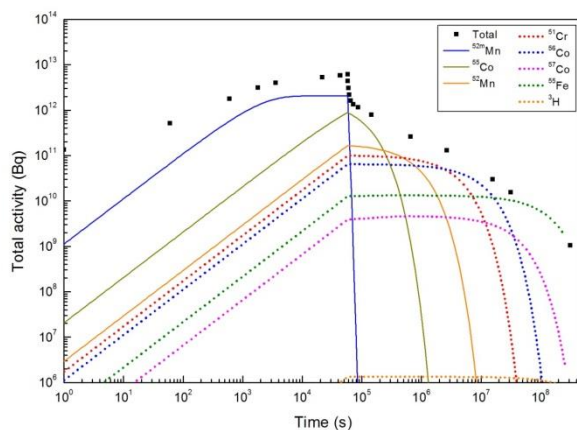


圖 2. 30 MeV 質子照射不銹鋼靶 16 小時後活度變化情形

##### ◎軟組織活度隨時間的變化情形(照射 30 分鐘)

軟組織照射情節是假設以每分鐘 2 Gy 劑量率的點射束持續照射 30 分鐘後，可達到 60 Gy 的治療效果，這樣的假設並無考慮實務分次照射之間的冷卻，是相對更加保守的估計。在剛結束照射時，經過 235 MeV 質子照射的軟組織中(圖 3.)， $^{15}\text{O}$  占總活度的 59.23%， $^{13}\text{N}$  占 3.92%， $^{11}\text{C}$  則占 24.19%；經過 400 MeV/A 碳離子照射的軟組織中， $^{15}\text{O}$  占總活度的 44.12%， $^{13}\text{N}$  占 3.85%， $^{11}\text{C}$  則占 27.08%。造成質子與碳離子間差異的原因來自於入射粒子與組織中原子核發生反應的不同，質子與組織中占比最高的  $^{16}\text{O}$  原子核發生(p,np)反應的結果將踢出一個中子產生  $^{15}\text{O}$ ；然而碳離子與  $^{16}\text{O}$  原子核的 Fragmentation 反應則可能會生成更多產物，例如 Fragmentation 反應會使碳離子失去中子形成  $^{11}\text{C}$ ，因此在碳離子照射過程中， $^{11}\text{C}$  的來源不僅來自組織中的原子核，還可能來自於入射粒子，使得經過碳離子照射的組織中  $^{11}\text{C}$  略多一些。照射結束三十分鐘後，由於  $^{15}\text{O}$  的半衰期僅 122.24 秒，因此經過兩種不同射束照射的組織中活度最高的核種皆為  $^{11}\text{C}$ ；若是以長時間來看，照射結束一天後則活度最高的核種為  $^7\text{Be}$ 。(其他相關加速器活化物質分析與劑量評估結果請參考完整報告”高能

加速器中子輻射劑量分析與能譜測量技術建立-II”。

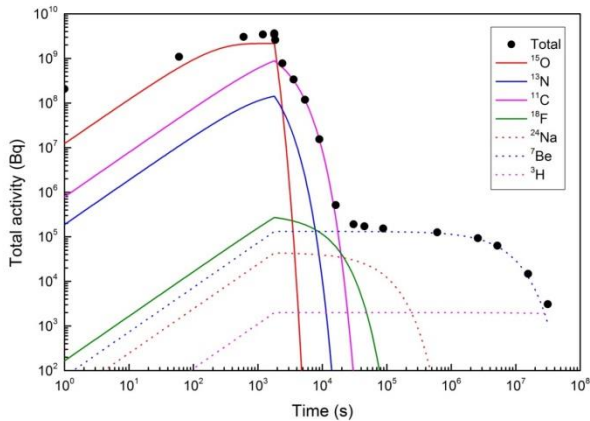


圖 3. 235 MeV 質子照射軟組織 30 分鐘後活度變化情形

#### 【高能加速器引發中子能譜模擬與量測技術建立】

同步輻射研究中心內的同步輻射加速器，由幾個重要的組件所構成(圖 4.)，包含了線型加速器(LINAC)、線型加速器/增能環間的傳輸線(LTB)、增能環(Booster ring)、增能環/儲存環間的傳輸線(BTS)，以及儲存環(Storage ring)；線型加速器的功能是将電子槍產生的電子加速至 150MeV，之後透過 BTS 將 150MeV 的電子傳輸至增能環，增能環再將電子加速至 3GeV，能量達 3GeV 的電子束可再透過 BTS 傳輸至儲存環儲存(僅有 3GeV 的電子能通過 BTS)。在中子度量實驗進行前，為了確保測得的中子計數皆來自於 3GeV 的電子，本計畫將電子束引導至 BTS 尾短進行棄置，波那圓柱能譜量測系統設置於射束損失位置的 90° 方向，並於波那圓柱能譜量測系統旁增設一組 Thermo 偵檢器，作為量測過程中的參考值。

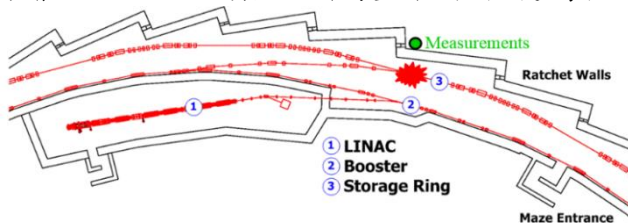


圖 4. 加速器組件配置與量測位置示意圖

#### ◎中子度量實驗

中子度量實驗過程中，本計畫控制注射進入 BTS 的電子束電量在 40pC(約  $2.5 \times 10^8$  個電子的電量)，換算在增能環的電流約為 0.025mA，此時將波那圓柱能譜量測系統逐一設置於量測位置，每組波那圓柱皆量測 3 分鐘以上。實驗過程中雖然盡量保持穩定的 40pC 電量，但電子射束難免有些微動態狀況，包含微量電量的起伏、射束角度的些微變化、加速器元件的微幅不穩定現象等，這些情況都可能造成 Thermo 偵檢器的中子劑量率微幅變化，當然同時也會對波那圓柱能譜量測系統產生影響，因此每組波那圓柱所測得的中子計數，都必須觀察 Thermo 偵檢器的中子劑量率進行微幅修正。本計畫在 6.5cm 這套波那圓柱量測時，把同一時間的 Thermo 偵檢器中子劑量率作為參考值，並將波那圓柱能譜量測系統其他的原始量測資料透過修正因子進行修正。

#### ◎能譜模擬計算與分析

為了驗證並確認量測數據的可靠度，本計畫同時透過 FLUKA 計算機程式，進行測量地點的能譜計算(圖 5.)，第一步先嘗試建立完整的現場模型，除了主體屏蔽與電子軌道外，一些鄰近的加速器組件也盡量考慮進入模型內，包含磁鐵、真空管與相關元件等；接著將模擬後的結果繪製出來，以利射束損失後整個輻射場分布的觀察，由於中子主要產生機制是由高能量加馬射線與加速器組件或屏蔽體經光核反應(Photonuclear reaction)所產生，因此除中子劑量分布外，加馬劑量分布也一併繪出，確保加馬劑量分布無異常現象。初步觀察可發現量測位置的加馬能量大多集中於 0.1~10MeV 之間，中子能量分布則較廣，而且大於 10MeV 以上的中子不可忽視，為瞭解詳細的中子數量，本計畫將中子能譜與中子響應函數進行 Folding 後，將結果數值化程現。

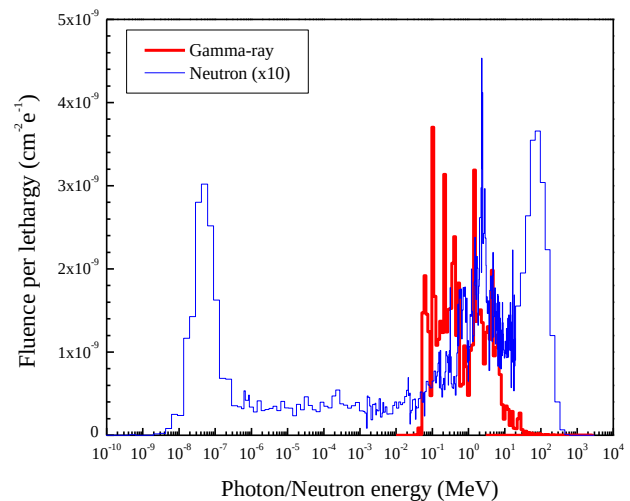


圖 5. 量測位置的中子與加馬能譜

#### ◎實驗的量測結果與模擬結果比較

由數值結果發現，實驗的量測結果與模擬的分析結果有著相同趨勢(圖 6.)，在不含重金屬的區間趨勢相當相似，在含重金屬的區間亦都有較多的中子反應現象，此現象主要來自中子的二次生成作用，同時也代表了高能量的中子具有顯著的影響，在 3GeV 的同步輻射加速器場內不可忽視；細部比較後，可發現實驗的量測結果在不含重金屬的區域僅有小部分差異，兩者間有著極高的相似性，而造成兩者些微不同的可能原因包含了模擬模型與實際現場的不同、加速器材質的簡化、實驗與模擬本身的誤差等，但兩者仍屬同一數量級，表示量測結果具有一定的準確性。在含重金屬的偵檢器中(2C2.5\_6.5、2P2.5\_6.5、2P3\_6.5、3P4\_6.5)，幾乎所有實驗值皆大於模擬的數值，本計畫特別將光中子(Photoneutron)的影響做進一步分析，結果發現並無顯著的光中子產生，因此模擬值確實皆有低於實驗值的現象，此現象可能與中子的入射能量有關，未來值得進一步探討。

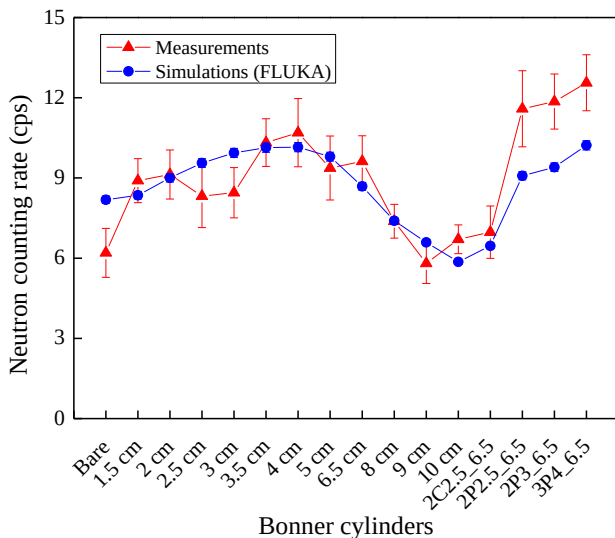


圖 6. 實驗的量測結果與模擬的分析結果比較

#### ◎中子能譜解析結果

本計畫利用 UMG 程式進行能譜解析，利用於國家同步輻射研究中心的實驗結果與在核研所標準中子校正實驗室完成的響應函數作為 UMG 程式輸入檔，配合 FLUKA 計算所得的原始能譜，使用 MAEXD 去旋轉方程式完成能譜解析。比較解析後的能譜與原始能譜後可發現，兩者存在著相同的趨勢(圖 7.)，但能譜解析後的結果在低能部分修正為變少，此現象主要是因為 Bare 偵檢器測得的實驗值明顯低於 FLUKA 的計算值，而造成此現象的原因主要是因為 Bare 偵檢器本身並無任何緩速體，且量測範圍皆落在低能中子，容易造成不穩定與誤差較大的現象；在  $10^{-7}$ ~10MeV 這個能量區間內，能譜解析後的結果與 FLUKA 計算值兩者間略有消長，但趨勢相當一致；在 10MeV 以上的中子能譜則明顯存在差異，能譜解析後的結果明顯大於 FLUKA 計算值，造成此現象主要是因為量測結果在包含重金屬的部分皆大於 FLUKA 的計算結果，因此整個能譜在 10MeV 以上有顯著的修正結果，此結果也更確定了在 3GeV 的电子加速器場內，中子輻射劑量不可忽視，甚至可能是整個輻射場主要的劑量來源。

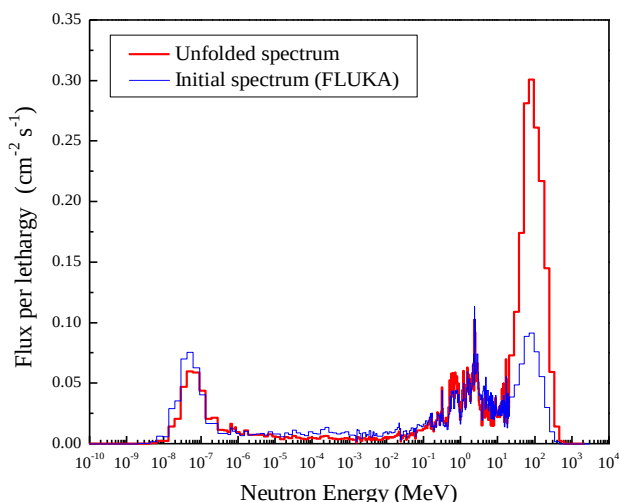


圖 7. Unfolding 後的能譜與 FLUKA 計算所得之能譜比較

#### IV. 結論

本計畫已完成一系列的活化物質分析與劑量評估，內容包含了四種加速器粒子與三種靶材，同時考量了長照射時間與短照射時間的影響，計算出的結果皆表列並圖式於本計畫報告內，除了可瞭解不同加速器與不同靶材的活化關係外，所有圖表資料皆可提供給使用者與主管機關做為設施運轉評估的參考。此外，本計畫也進行了台灣光子源加速器運轉的中子能譜分析，配合量測數據與理論分析結果比對後，兩者絕對值約略類似且有相同趨勢，更增加本計畫實驗數據與模擬分析的信心。能譜解析前後的能譜主要在高能中子部分有所差異，轉換成中子劑量顯示中子劑量率應上修約 2 倍，高能中子(>10MeV)的比重在 3 GeV 的同步加速器輻射場中相當可觀，某些位置甚至是最主要劑量來源，未來在探討這類高能加速器設施時，偵檢器的選擇很重要，除了必要的加馬偵檢器外，可量測高能的中子偵檢器亦須仔細考量，此外，劑量分析評估時也需同時考量加馬劑量與中子劑量。

針對未來研究的方向，建議可繼續深入探討高能加速器混合輻射場的特性，例如加馬中子比例、不同能量中子的比例等。因考量人員進行現場輻射度量時，偵檢器的體積與重量皆相當大，一般僅能使用手提式加馬輻射偵測器，中子偵測器因緩速體與重金屬的關係，不容易進行手提式大範圍環測。若能瞭解加馬劑量與中子劑量的比例與分布特性，或許可藉由實測的加馬數據推估不易直接定量的中子劑量；此外，本研究發現緩速體中含重金屬的中子偵檢器，實驗量測值中子計數率皆略大於理論模擬分析值，此差異是電子電流強度的誤差、能譜儀的角度依存問題、或是與 FLUKA 程式內建物理模型有關，未來值得進一步探討。

#### 參考文獻

- [1] Bock RK., Vasilescu A., (1998). The particle detector briefbook. Springer.
- [2] Tanaka, H., Sakurai, Y., Suzuki, M., Masunaga, S., Kinashi, Y., Kashino, G., Liu, Y., Mitsumoto, T., Yajima, S., Tsutsui, H., Maruhashi, A., Ono, K., (2009). "Characteristics comparison between a cyclotron-based neutron source and KUR-HWNIF for boron neutron capture therapy." Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B-Beam Interact Mater Atoms 267: 1970-1977.
- [3] 許榮鈞, 劉志青, 陳建榮, 張富東, 高小萍, 張夢書, 林郁琦, 王昭平(2010). 台灣光子源 (TPS) 輻射安全分析報告, NSRRC-TR00073.
- [4] A. Fasso`, A. Ferrari, J. Ranft, P.R. Sala, FLUKA: a multi-particle transport code, CERN-2005-10, INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773 (2005).
- [5] ICRP, (1997). "ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", Annals of the ICRP Volume 26/3, International Commission on Radiological Protection.

## 評估心導管診療期間醫療曝露與職業曝露劑量並研擬最適化策略

### Evaluating the radiation dose for medical exposure and occupational exposure dose implement of the promotion of ionizing radiation protection in cardiac catheterization

計畫編號：MOST104-NU-E-010-005-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：吳東信

共同主持人：楊邦宏

e-mail：tung@ym.edu.tw

計畫參與人員：官郁翔、孫靜儀、杜俊元

執行單位：國立陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

#### 摘要

心導管診療過程的時間較長且曝露量大，可能因為診療目的不同而造成平均有效劑量相差 1 倍之多，另外依據美國食品藥物管理局 2010 年報告中，顯示成人因為侵入性透視檢查所接受的輻射劑量，可能視病人檢查的困難度不同而在各種醫學影像檢查中是最高的。本研究選擇 2 間醫院之心導管檢查室配合實際測量病患與工作人員之醫療曝露與職業曝露劑量，使用數位人員劑量即時監控系統紀錄工作人員職業曝露劑量，使用心導管透視 X 光設備所配置之病人輻射劑量自動評估記錄病人醫療曝露。將病人與工作人員結果分為診斷(16 位)、診斷及治療(43 位)、治療(12 位)等三組進行分析，結果顯示心導管診療過程中，造成病人醫療曝露劑量診斷為  $21.47 \pm 9.79$  mSv、診斷及治療為  $42.96 \pm 37.89$  mSv、治療為  $8.97 \pm 22.73$  mSv；工作人員鉛衣外職業曝露劑量診斷為  $39.81 \pm 103.85$   $\mu$ Sv、診斷及治療為  $59.33 \pm 95.03$   $\mu$ Sv、治療為  $21.92 \pm 37.04$   $\mu$ Sv。為保護病人免於接受不必要的輻射曝露，也保障設備操作人員的健康並參考我國醫療現況以研擬最適化策略。

關鍵字：心導管、醫療曝露、職業曝露、劑量評估。

#### Abstract

The process of cardiac catheterization usually takes long time and patients will have more radiation exposures during the operation. The average effective dose might be more than double due to different treatments. On the other side from US Food and Drug Administration (FDA) issued a report in 2010. It said that the radiation dose of invasion examinations is the highest among all kinds of medical image ones at various difficulties of different patient examinations. The study was evaluating the medical radiation dose of patient and operator during the cardiac catheterization in two hospitals. In the operator occupational exposure assessment, the operator doses were assessed using electronic personal dosimeters. In the patient medical exposure assessment, the air kerma, DAP and Fluoroscopy time were retrieved from the dose recording system. The results of our study, patient and operator were divided into three subgroups: diagnostic (n=16); diagnostic with treatment (n=43) and treatment only (n=12). The results of patient medical exposure, diagnostic group was  $21.47 \pm 9.79$  mSv、diagnostic with treatment group was  $42.96 \pm 37.89$  mSv、treatment only

group was  $8.97 \pm 22.73$  mSv. For operator occupational exposure, diagnostic group was  $39.81 \pm 103.85$   $\mu$ Sv、diagnostic with treatment group was  $59.33 \pm 95.03$   $\mu$ Sv、treatment only group was  $21.92 \pm 37.04$   $\mu$ Sv. To prevent patients from unnecessary radiation exposures and protect the health of equipment operating personnel, and compare with develop a study on appropriate strategy by evaluating the radiation dose for medical exposure and occupational exposure dose during the process of cardiac catheterization and refer to the existing circumstances in our medical work.

Key words: Cardiac catheterization, medical exposure, occupational exposure, radiation dosimetry

#### I. 前言

依據衛生福利部 2015 年 6 月公告 2014 年統計國人十大死因資料[1]顯示，因心臟疾病所造成的死亡率高居第 2 位，平均每日會造成 47 人死亡，而每 30 分鐘又 41 秒就有 1 人死亡；除了心臟疾病高死亡率外，也因為近年來心臟電腦斷層掃描檢查技術進步，間接增加心導管診療的病人量，心導管檢查(cardiac catheterization)是使用特製無菌的導管由動脈穿入體內，用以確定診斷心臟及冠狀動脈血管疾病，其檢查時間依病人狀況平均約需一至四小時不等。依據國外專家學者 Fred A. Mettler (2008)等人的研究[2]成人侵入性放射檢查所造成的有效劑量中(Effective dose)，可能因為診療目的不同而造成平均有效劑量相差 1 倍之多(表一)；另外依據美國食品藥物管理局(U.S. Food and Drug Administration) 2010 年報告中[3]，數據顯示成人因疾病所需接受各種醫學影像放射檢查，其中因為侵入性透視檢查所接受的輻射劑量(表二)，可能視病人檢查的困難度不同而在各種醫學影像檢查中是最高的。病人及工作人員輻射安全(radiation safety)是心導管檢查的重要品質指標，因此為保護病人免於接受不必要的輻射曝露，也保障設備操作人員(醫師或醫事放射師)的健康，藉由評估心導管診療期間醫療曝露與職業曝露劑量並研擬最適化策略之研究，進行醫院配合實際測量病患與工作人員劑量調查分析，並參考我國醫療現況以研擬最適化策略，除了落實心導管游離輻射防護品質提升，並可以提供政府推動政策及修訂法規參考之目的。

表一、成人侵入性放射檢查有效劑量

| 檢查項目                 | 平均有效劑量 (mSv) | 相關文獻報告值 (mSv)     |
|----------------------|--------------|-------------------|
| 頭頸部血管攝影              | 5            | 0.8 ~ 19.6        |
| <b>冠狀動脈血管攝影 (診斷)</b> | <b>7</b>     | <b>2.0 ~ 15.8</b> |
| <b>冠狀動脈血管攝影 (治療)</b> | <b>15</b>    | <b>6.9 ~ 57</b>   |
| 肺動脈或主動脈胸部血管攝影        | 5            | 4.1 ~ 9.0         |
| 腹部血管攝影或腹主動脈血管攝影      | 12           | 4.0 ~ 48.0        |
| 經頸靜脈肝內肝門靜脈造流術        | 70           | 20 ~ 180          |
| 骨盆腔靜脈栓塞術             | 60           | 44 ~ 78           |

表二、各種醫學影像的輻射劑量\*

| 種類             | 成人平均有效劑量 (mSv)            | 預估劑量相等值 (胸部 X 光攝影張數) |
|----------------|---------------------------|----------------------|
| 牙科 X 光         | 0.005 ~ 0.01 <sup>a</sup> | 0.25 ~ 0.5           |
| 胸部 X 光         | 0.02                      | 1                    |
| 乳房攝影           | 0.4                       | 20                   |
| 電腦斷層           | 2 ~ 16 <sup>b</sup>       | 100 ~ 800            |
| 核醫檢查           | 0.2 ~ 41 <sup>c</sup>     | 10 ~ 2050            |
| <b>侵入性透視檢查</b> | <b>5 ~ 70<sup>d</sup></b> | <b>250 ~ 3500</b>    |

\*：表中各種檢查之成人平均有效劑量是與胸部前後位 X 光檢查 (0.02 mSv) 之成人平均有效劑量比較。

a：0.005 mSv 是牙科單齒攝影之成人平均有效劑量。0.01 mSv 是全口牙攝影之成人平均有效劑量。

b：2 mSv 是頭部電腦斷層之成人平均有效劑量。16 mSv 是冠狀動脈電腦斷層血管攝影之成人平均有效劑量。

c：0.2 mSv 是 99mTc-DTPA 肺部灌注檢查之成人平均有效劑量。41 mSv 是心肌灌注造影之成人平均有效劑量。

d：5 mSv 是頭和/或頸部血管攝影之成人平均有效劑量。70 mSv 是經頸靜脈肝內肝門靜脈造流術之成人平均有效劑量。

## II. 主要內容

本研究主要可分成二部份：一、評估心導管診療的過程時間長、曝露量大，所造成之醫療曝露與職業曝露劑量，並選擇 2 間醫院之心導管檢查室配合實際測量病患與工作人員劑量。二、藉由文獻查證，依據心導管診療之「醫療曝露與職業曝露劑量調查結果」探討心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量方法，進而提供「病患與工作人員減低輻射劑量最適化策略」以減低輻射劑量。

### 醫療曝露與職業曝露

本研究選擇二間醫院之心導管攝影室，實際評估心導管診療受檢病人與工作人員所接受之醫療曝露與職業曝露劑量。工作人員職業曝露使用數位人員劑量即時監控系統紀錄工作人員之職業曝露劑量；病人醫療曝露為符合實際臨床心導管診療狀況而選擇使用心導管透視 X 光設備所配置之病人輻射劑量自動評估記錄系統即劑量面積乘積運算劑量，將所得之劑量面積乘積乘上轉換因子(0.18 mSv/Gy·cm<sup>2</sup>)轉為有效劑量。

### 文獻查證

蒐集相關文獻[4,5,9-12,14-20]探討「心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量方法」，了解國際上的做法並分析國內外相關資料，提出符合台灣地區之心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量最適化策略，並做為符合台灣地區心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量方法參考依據，以達成可以產生品質可靠的影像，亦可使病人及工作人員得到最小的輻射劑量之目標。

## III. 結果與討論

為了評估心導管診療的過程所造成之醫療曝露與職業曝露劑量，本研究選擇 2 間醫院之心導管檢查室配合實際測量病人與工作人員劑量，在病人之醫療曝露總計納入 101 位受試者，其中 30 位是週邊靜脈血管擴張術治療(Percutaneous transluminal angioplasty, PTA)非心導管診療而排除，剩餘 71 位受試者依據其心導管診療種類，將研究結果分為診斷(16 位)、診斷及治療(43 位)、治療(12 位)等三組進行分析(表三)，分析項目包含病人平均年齡、身體質量指數、醫療曝露、總透視時間、透視管電壓、攝影管電壓、攝影管電流及動態攝影時間。由表三之結果可以發現於心導管診療中，心導管診斷合併治療所造成病人的醫療曝露是三組中最高，總透視時間及動態攝影時間也是三組中最長，相關透視攝影參數條件也較高；心導管診斷造成病人的醫療曝露是三組中次高，除了總透視時間外相關分析參數也是三組中次高；心導管治療所造成病人的醫療曝露是三組中最低，除了總透視時間外相關分析參數也是較低。所以我們知道當心導管診斷合併治療時，造成病人的醫療曝露較大，而心導管診斷的醫療曝露則是因為需要許多心臟血管相關診斷資訊，使得動態攝影時間較長所造成；心導管治療醫療曝露較低，則是因為需接受治療之心臟血管皆為已知，使得動態攝影時間較短。將本研究結果與類似文獻[13]之結果相比較，可以發現在國內心導管診斷的醫療曝露高於該研究而心導管治療的醫療曝露近似於該

研究，其原因是該文獻在進行心導管診斷劑量評估時，規定執行右冠狀動脈診斷時需於 2~3 組影像序列完成，而左冠狀動脈需於 4~6 組影像序列完成；而該研究於心導管治療時，則依照心臟內科醫師的決定，所以會產生這種結果；而國外相關文獻中皆是心導管診斷與心導管治療分開執行，而本研究結果卻觀察到國內醫療環境所產生的特殊現象「心導管診斷合併治療」。

工作人員之職業曝露部分，總計納入 7 位主要操作人員及 7 位協助操作人員為受試者，全部主要操作人員共計執行 101 次診療程序，同樣排除 30 位週邊靜脈血管擴張術治療；全部協助操作人員共計協助執行 54 次診療程序，同樣排除 9 次週邊靜脈血管擴張術治療。同樣依據其心導管診療執行種類，將研究結果分為診斷、診斷及治療、治療等三組進行主要操作人員及協助操作人員的職業曝露分析(表四)。表八結果可以發現於心導管診療中，無論是主要操作人員或是協助操作人員，當心導管診斷合併治療所造成的職業曝露是三組中最高，工作人員職業曝露於診斷、診斷及治療、治療三組的結果大小與病人醫療曝露結果於診斷、診斷及治療、治療三組的結果大小是相關的，而此結果也與國外文獻結果

[9]相似；由結果中也可以觀察到主要操作人員或是協助操作人員的職業曝露主要來自於受檢病人的散射線，而在鉛衣外所測得的輻射劑量相當低( $\mu\text{Sv}$ )，再者每位工作人員穿著二件式鉛衣、鉛護頸、佩戴鉛眼鏡，並於檢查過程中使用懸吊式鉛護板及檢查床邊鉛護板，由此更可確認工作人員實際接受的職業曝露更是低於表四中的結果。在研究過程中發現，心導管診療時為配合血管成像最佳角度或是加快檢查過程，往往過大的攝影角度反而造成協助操作人員直接受到輻射曝露，而協助操作人員通常未配有懸吊式鉛護板；國內醫療環境所造成的特殊現象包含主要操作人員及協助操作人員兩部分，假設當每月病人數固定量時，甲醫院主要操作人員或協助操作人員只有 1~2 位，而乙醫院主要操作人員或協助操作人員有 4~5 位，而甲醫院工作人員的個人職業曝露有可能高於以醫院工作人員的個人職業曝露；相關文獻顯示國外[5-12]於心導管診療過程中相關協助人員約有 1~2 位，反觀國內相關協助人員人力不足，也是造成心導管診療過程時間過長的主因，進而間接造成醫療曝露與職業曝露劑量增加。

表三、病人心導管診療之醫療輻射曝露劑量

|          |              | 診斷(n=16)                    | 診斷及治療(n=43)                   | 治療(n=12)                     |
|----------|--------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 病人, n=71 | 平均年齡 (years) | 69.06±13.34<br>[91-48]      | 61.37±10.98<br>[84-39]        | 53.42±12.80<br>[80-40]       |
|          | 身體質量指數       | 24.40±3.45<br>[30.71-17.20] | 27.03± 4.18<br>[41.78-19.56]  | 24.81± 5.11<br>[33.35-18.51] |
|          | 醫療曝露 (mSv)   | 21.47±9.79<br>[36.81-3.22]  | 42.96± 37.89<br>[163.60-6.75] | 8.97±22.73<br>[80.79-0.48]   |
|          | 總透視時間 (mins) | 6.10±3.49<br>[15.17-2.56]   | 14.67±12.83<br>[63.04-2.03]   | 14.21±12.73<br>[50.13-5.14]  |
|          | 透視管電壓 (kV)   | 87.23±15.06<br>[120-64]     | 98.54±16.55<br>[120-72]       | 93.61±15.31<br>[120-75]      |
|          | 透視管電流 (mA)   | 15.62±4.21<br>[22.4-3.3]    | 12.31±4.93<br>[21.3-5.6]      | 6.12±2.93<br>[15-3.9]        |
|          | 攝影管電壓 (kV)   | 80.84±13.91<br>[125-63]     | 85.60±14.94<br>[125-68]       | 83.40±20.61<br>[125-64]      |
|          | 攝影管電流 (mA)   | 733.46±157.42<br>[927-227]  | 784.75±107.18<br>[928-472]    | 505.70±300.73<br>[966-78]    |
|          | 動態攝影時間 (s)   | 6.61±1.48<br>[10-4]         | 7.25±1.32<br>[10-4]           | 5.3±1.06<br>[7-4]            |

[ ]：括號內數字表示範圍並依由大到小排列。

表四、心導管診療職業曝露劑量(鉛衣外)

|              |                            | 診斷(n=16)                | 診斷及治療(n=43)            | 治療(n=12)               |
|--------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 主要操作人員, n=71 | 鉛衣外職業曝露 ( $\mu\text{Sv}$ ) | 39.81±103.85<br>[424-0] | 59.33±95.03<br>[545-0] | 21.92±37.04<br>[126-0] |
|              | 平均年齡 (years)               | 40.25±5.63<br>[53-32]   | 48±7.38<br>[56-32]     | 42.92±0.10<br>[53-32]  |
|              |                            |                         |                        |                        |
|              |                            | 診斷(n=6)                 | 診斷及治療(n=38)            | 治療(n=1)                |
| 協助操作人員, n=45 | 鉛衣外職業曝露 ( $\mu\text{Sv}$ ) | 14.67±14.88<br>[44-3]   | 30.03±55.67<br>[298-0] | 4<br>[-]               |
|              | 平均年齡 (years)               | 33.83±4.22<br>[40-29]   | 32.6±5.92<br>[56-29]   | 32<br>[-]              |
|              |                            |                         |                        |                        |

[ ]：括號內數字表示範圍並依由大到小排列。

評估心導管診療的過程時間長、曝露量大，實際測量對病人與工作人員劑量所造成之醫療曝露與職業曝露劑量之研究總結，以心導管診斷合併治療之醫療曝露與職業曝露結果為例，並配合行政院原子能委員會之醫療游離輻射比較圖[13]，以圖示說明(圖一)更可以讓一般民眾與相關工作人員容易了解。

藉由文獻查證，依據心導管診療之「醫療曝露與職業曝露劑量調查結果」探討心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量方法，進而提供「病人與工作人員減低輻射劑量最適化策略」以減低輻射劑量。依據本研究之調查結果，並參考國際減低輻射劑量方法並分析目前國內醫療現況，提出心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量最適化策略，蒐集結果如下：

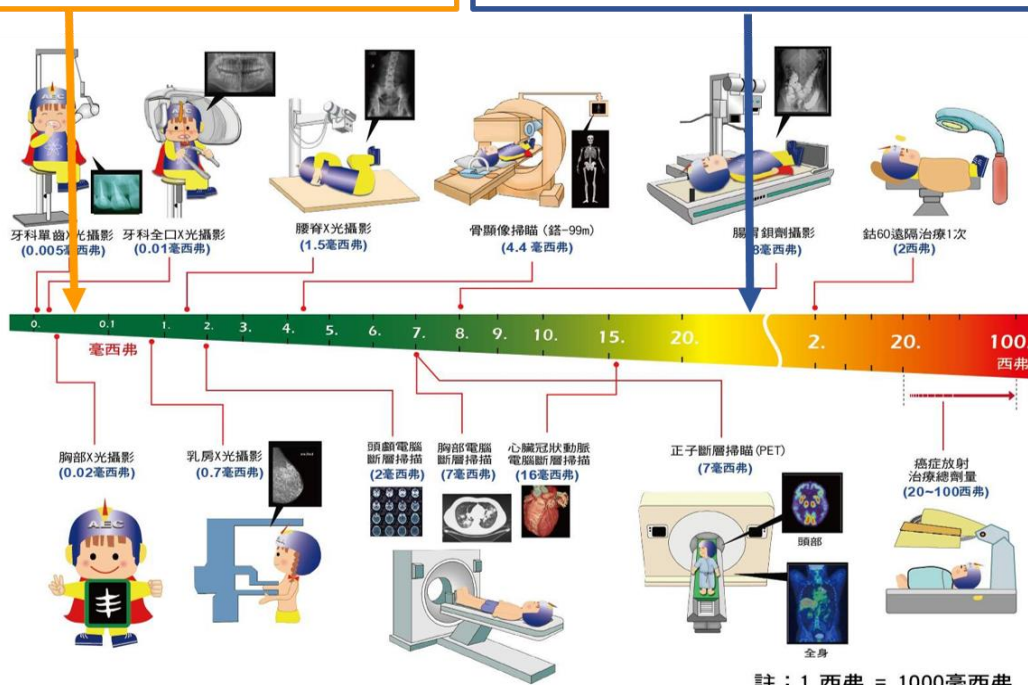
- (1) 國際輻射防護委員會(International Commission on Radiological Protection, ICRP)於 2000 年的報告[10]中說明和檢討透視 X 光設備所造成輻射傷害，其中許多傷害是因為在執行檢查過程中醫師不知道皮膚劑量已經接近或超過劑量參考水平或是未監控設備的品質。
- (2) 國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA) Madan M. Rehani (2006)博士對心導管透視 X 光設備輻射防護建議[11]：
  - a. 病人輻射防護要點-避免於同一部位長時間透視(尤其是病人背部)、身體較厚的部位容易造成輻射傷害、避免對同一病人短時間內進重複檢查(特別是同一病人於不同醫院)、未記錄病人醫療曝露、勿

使用較強的透視模式、勿使用連續或高功率透視條件、降低透視功率、注意調整病患於 X 光球管與影像增感屏之距離、注意病人本身自有疾病。

- b. 工作人員防護要點-主要以距離、時間及屏蔽為主、部份減少病患輻射劑量的方法也會相對減少工作人員所接受的輻射劑量、鉛衣需使用足夠鉛當量(0.35 mm)、注意身體沒有鉛衣防護的部位(例如:眼、手及腿部)、於檢查過程中使用鉛眼鏡及高透光度的鉛屏蔽、使用適當的照野大小、減少站在 C 型臂的 X 光球管旁、使用鉛護頸、手指劑量計及人員劑量計、定期檢測老舊屏蔽設備。
- (3) 加拿大 Anthony W. A. Wassef (2014)等人於「制定新的掃描參數減少心導管檢查劑量」研究中[12]，建議心導管檢查使用減少輻射劑量參數，包括:影像取樣時降低接收器劑量率、設定適當的透視模式、依據病人的檢查和體型設定適當的攝影參數、放射師在影像取樣時依病人厚度調整濾片、將透視每秒顯示幀數(Frame per second, FPS)由 15 FPS 降至 7.5 FPS(表五)。
- (4) 加拿大 Eltigani Abdelaal (2014)等人「低透視取樣率降低操作人員與病人於心血管診療所接受的輻射劑量」於研究中[9]，探討心導管之冠狀動脈血管攝影及冠狀動脈介入性治療使用不同透視功率的輻射劑量差異(表六)。
- (5) 希臘學者 George Simantirakis (2013)等人提出「心導管檢查病人輻射劑量及參考水平」[4]可供國內參考(表七)。

## 工作人員輻射劑量(鉛衣外)

## 病人醫療輻射曝露劑量



行政院原子能委員會 製作

註：1 西弗 = 1000 毫西弗

圖一、以行政院原子能委員會之醫療游離輻射比較圖，說明心導管診斷合併治療於主要操作人員鉛護頸外實測約為 59.33  $\mu$ Sv；心導管診斷合併治療病人之醫療曝露約為 42.96 mSv。

表五、使用低劑量參數所減少空氣克馬

|              | 低劑量參數         |               | 低劑量參數(15FPS)  |               | 低劑量參數(7.5FPS) |               | 心臟血管攝影        |               | 心臟介入性治療       |               |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|              | 前             | 後             | 前             | 後             | 前             | 後             | 前             | 後             | 前             | 後             |
| 空氣克馬<br>(Gy) | 0.98±<br>0.04 | 0.51±<br>0.03 | 1.10±<br>0.03 | 0.62±<br>0.04 | 1.09±<br>0.03 | 0.35±<br>0.04 | 0.61±<br>0.03 | 0.31±<br>0.02 | 1.52±<br>0.07 | 0.76±<br>0.05 |
| 降低比率         | 48%           |               | 44%           |               | 68%           |               | 49%           |               | 50%           |               |

表六、冠狀動脈血管攝影及冠狀動脈介入性治療於不同透視功率差異

|                                  | 冠狀動脈血管攝影 (n=184)         |                          |         | 冠狀動脈介入性診療 (n=179)          |                           |        |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------|----------------------------|---------------------------|--------|
|                                  | 7.5 FPS<br>(n=89)        | 15 FPS<br>(n=95)         | P 值     | 7.5 FPS<br>(n=93)          | 15 FPS<br>(n=86)          | P 值    |
| 工作人員劑量<br>(μSv)                  | 21±17<br>18 (10-25)      | 35±29<br>24 (17-45)      | <0.0001 | 45±34<br>36 (22-66)        | 63±40<br>52 (35-87)       | 0.0011 |
| 病人劑量面積乘積<br>(Gycm <sup>2</sup> ) | 25±15<br>23 (15-31)      | 34±25<br>29 (18-40)      | 0.0018  | 61±31<br>55 (35-83)        | 75±48<br>59 (38-118)      | 0.13   |
| 透視時間<br>(min)                    | 3.4±2.0<br>2.6 (1.8-4.5) | 4.0±4.7<br>2.9 (1.9-4.4) | 0.42    | 11.9±8.4<br>9.2 (5.7-15.0) | 13.3±9.7<br>11 (5.2-19.5) | 0.57   |
| 總檢查時間<br>(min)                   | 18±7<br>17 (13-21)       | 18±7<br>15 (13-20)       | 0.91    | 43±22<br>37 (28-57)        | 48±28<br>43 (28-61)       | 0.33   |
| 對比劑量<br>(ml)                     | 76±29<br>70 (63-88)      | 77±35<br>70 (60-90)      | 0.99    | 142±22<br>130 (100-178)    | 133±57<br>130 (80-175)    | 0.18   |

表七、心導管檢查建議參考水平

| 檢查項目           | 透視時間                       | 空氣克馬面積乘積 |
|----------------|----------------------------|----------|
| 冠狀動脈血管攝影       | 6                          | 53       |
| 冠狀動脈介入性治療      | 18                         | 129      |
| 心律調節器置放術       | 7                          | 36       |
| 心臟電燒灼術         | 40                         | 146      |
| 透視假體表面入射劑量率    | 29 mGy/min (20-25 cm FOV)  |          |
| 影像取樣假體表面入射劑量/幅 | 0.23 mGy/fr (20-25 cm FOV) |          |

#### IV. 結論

綜合上述相關文獻查證之建議，並依據心導管透視 X 光機醫療曝露與職業曝露劑量之調查結果，參考國際減低輻射劑量方法並分析目前國內醫療現況，提出心導管透視 X 光機病患與工作人員減低輻射劑量最適化策略，分成以下兩部分：

##### 醫療曝露最適化策略

1. 依據病人的檢查和體型設定適當的攝影參數設定和透視模式，在影像取樣時依病人體型厚度調整濾片。
2. 使用適當透視模式，儘量減少使用連續或高功率透視條件；降低透視功率，在透視影像品質許可下將透視每秒顯示幀數降低，例如：15 FPS 降到 30 FPS，儘量不要讓透視每秒顯示幀數高於 15。
3. 使用適當攝影參數，降低動態攝影時間及攝影序列組數，在攝影影像品質許可下將透視每秒顯示幀數降低，例如：30 FPS 降到 15 FPS，儘量不要讓透視每秒顯示幀數高於 15。
4. 無論是透視或攝影時，皆需注意調整病人於 X 光球管與影像接收器之距離，以減少散射線及病人皮膚劑量。

5. 病人皮膚效應是介入性診療中最大的風險，例如：紅斑，潰瘍，毛細血管擴張等，據文獻統計早期缺血反應是幾小時內劑量大於 2 Gy，實際的皮膚劑量在 5-10 Gy 內會產生明顯的傷害，大於 15 Gy 則導致組織被破壞較深且真皮層壞死[14]；所以於診療過程中避免使用較高的相關參數條件，注意身體較厚的部位容易造成輻射傷害，並且避免病人同一部位長時間接受透視(例如：背部)，以減少病人皮膚傷害。

6. 藉由儀器設備及診療程序優化，使用劑量降低的技術；實施完整培訓計畫和教育課程，以強化操作人員技能及人力以減短心導管診療時間；同時，避免對同一病人短時間內進行重複檢查程序，特別是同一病人於不同醫院接受相同檢查程序。

7. 建立國內「心導管檢查病人輻射劑量及參考水平」並與歐盟相較，以供心導管診療工作人員執行相關程序之參考依據；目前國內未記錄病人個人之醫療曝露劑量，建議未來可建立個人之醫療曝露劑量相關制度，除了可以減少不必要之醫療曝露外，藉由劑量面積乘積轉換成有效劑量可用來評估輻射機率效應所導致的健康風險。

##### 職業曝露最適化策略

1. 工作人員的職業曝露抑低，主要以距離、時間及屏蔽

- 為主，其中部份減少病患輻射劑量的方法也可以相對比例的減少工作人員所接受的輻射劑量，例如醫療曝露最適化策略中的 1~4 及 6~7 點都是與工作人員的職業曝露有重要的相關性。
2. 依據相關文獻[15,16]統計，若是工作人員於心導管診療過程中未配置輻射防護裝置，其年平均有效劑量約為 42.6 mSv，若是穿著鉛衣則年平均有效劑量可降至 3.5 mSv，同時使用鉛護頸年平均有效劑量可降至 1.7 mSv；因此執行心導管診療程序前應注意相關輻射防護裝備，例如鉛衣(使用足夠鉛當量 0.35 mm)、鉛護頸、佩戴鉛眼鏡，並於檢查過程中使用懸吊式鉛護板及檢查床邊鉛護板，特別需注意身體沒有鉛衣防護的部位(例如:眼、手及腿部)及定期檢測老舊屏蔽設備。
  3. 於執行診療程序時，使用適當的診療參數、輻射照野大小等，並減少站在 C 型臂的 X 光球管旁的時間；於檢查過程中即時注意 C 型臂的投射角度，以減少主射束的直接曝露。
  4. 國內目前心導管工作人員都只配備一枚個人劑量計，且位於鉛衣內的左或右胸前；參考 ICRP 建議工作人員劑量監控應配置 2 枚個人劑量計，一枚位於鉛衣內腰部的部位，另一枚位於鉛衣外肩部或頸部的部位，其餘若是能輔以特殊劑量計，監測皮膚、四肢及眼睛的劑量將會更完善。

5. 心導管診療過程中若能使用本研究的人員劑量即時監控系統紀錄工作人員之職業曝露劑量，不但可即時顯示工作人員目前是在何種狀況下執行診療工作並給予警示，工作人員也可以採取適當輻射防護策略。並將可減低心導管診療醫療曝露與職業曝露劑量的策略彙整於表八。

目前國際間對於心導管診療所造成的輻射劑量已有許多相關研究，病人安全檢查與醫療輻射劑量合理抑低(as low as reasonably achievable, ALARA)更是現今國際上重視的議題，由本研究可以知道心導管診療工作人員(醫師或醫事放射師)的職業曝露劑量，也可以讓一般民眾了解因心導管診療可能接受到的醫療曝露；另外觀察到國內醫療環境與國外所產生不同的特殊現象，如：心導管診斷合併治療、主要操作人員或協助操作人員人力不足，也都是造成心導管診療過程時間過長的主因，進而間接造成醫療曝露與職業曝露劑量增加。病人及工作人員輻射安全是心導管診療的重要品質指標，綜合相關文獻查證之建議，並依據心導管透視 X 光機醫療曝露與職業曝露劑量之調查結果，參考國際減低輻射劑量方法並分析目前國內醫療現況，研擬相關最適化策略減低心導管診療醫療曝露與職業曝露劑量，進而使得國內輻射醫療曝露品質提升並與國際接軌，達成提供政府推動政策及修訂法規參考為本研究之目的。

表八、心導管診療減低醫療曝露與職業曝露劑量的策略

| 策略            | 效益             |
|---------------|----------------|
| 減少透視時間及降低透視功率 | 減少工作人員及病人劑量    |
| 減少攝影影像量       | 減少工作人員及病人劑量    |
| 注意輻射照野        | 減少散射輻射         |
| 工作人員位於低散射區域   | 減少工作人員劑量       |
| 穿著標準輻射防護裝置    | 減少眼球水晶體及其他器官劑量 |
| 儀器設備優化        | 增加劑量減少技術       |
| 專業培訓          | 增加輻射防護及劑量降低概念  |
| 使用個人劑量計       | 了解並監控個人劑量      |
| 建立診斷參考水平      | 監測臨床與參考劑量差異    |

## 參考文獻

- [1] 行政院衛生福利部，民國 103 年死因結果統計分析。  
[http://www.mohw.gov.tw/cht/DOS/Statistic.aspx?f\\_list\\_no=312&fod\\_list\\_no=1717](http://www.mohw.gov.tw/cht/DOS/Statistic.aspx?f_list_no=312&fod_list_no=1717). 2015.
- [2] Fred A. Mettler, Jr, et al. Effective Doses in Radiology and Diagnostic Nuclear Medicine, Radiology 2008; 248:254 – 263.
- [3] Center for Devices and Radiological Health, U.S. Food and Drug Administration. Initiative to Reduce Unnecessary Radiation Exposure from Medical Imaging. 2010.
- [4] George Simantirakis et al. Reference levels and patient doses in interventional cardiology procedures in Greece, European Society of Radiology 2013; 23:2324-2332.
- [5] E. Vano, et al. A set of patient and staff dose data for validation of monte carlo calculations in interventional cardiology, Radiation Protection Dosimetry (2015), pp. 1 – 5.
- [6] J. M. Ordiales, et al. Reduction of occupational radiation dose in staff at the cardiac catheterisation laboratory by protective material placed on the patient, Radiation Protection Dosimetry (2015), pp. 1 – 4.
- [7] H. Baysson, et al. Follow-up of children exposed to ionising radiation from cardiac catheterisation: the coccinelle study, Radiation Protection Dosimetry (2015), pp. 1 – 4.
- [8] Belinda Gray, et al. Radiation exposure during cardiac catheterisation is similar for both femoral and radial approaches, Heart, Lung and Circulation (2015) 24, 264 – 269.
- [9] Eltigani Abdelaal, et al. Can M. Nguyen, Ricardo Allende, Henrique Ribeiro, Olivier Costerousse, Rosaire Mongrain, Olivier F. Bertrand. Effectiveness of low rate fluoroscopy at reducing operator and patient radiation dose during transradial coronary angiography and interventions. JACC: cardiovascular interventions 2014; 7:567-574.
- [10] International Commission on Radiological Protection. Avoidance of Radiation Injuries from Medical

- Interventional Procedures. ICRP Publication 85, Annals of the ICRP, 30 (2). Pergamon Press, Oxford and New York (2000).
- [11] Madan M. Rehani, et al. Radiation effects in fluoroscopically guided cardiac interventions—keeping them under control. *International Journal of Cardiology* 2006; 109:147-151.
  - [12] Anthony W. A. Wassef, et al. Radiation dose reduction in the cardiac catheterization laboratory utilizing a novel protocol. *JACC: cardiovascular interventions* 2014; 7:550-557.
  - [13] 行政院原子能委員會，醫療游離輻射比較圖。  
<http://www.aec.gov.tw/webpage/service/other/images/20100422-2.jpg>
  - [14] Zhonghua Sun, et al. Radiation-induced noncancer risks in interventional cardiology: optimisation of procedures and staff and patient dose reduction, *BioMed Research International*
  - [15] S. Balter, F. A. , et al. Guidelines for personnel radiation monitoring in the cardiac catheterization laboratory, *Catheterization and Cardiovascular Diagnosis*, 1993; 30(4):277 – 279.
  - [16] K.H. Folkerts, et al. Estimation of radiation exposure and radiation risk to staff of cardiac catheterization laboratories, *Zeitschrift fur Kardiologie*, 1997; 86(4):258 – 263.
  - [17] Daisuke Kobayashi, et al. Standardizing radiation dose reporting in the pediatric cardiac catheterization laboratory—A multicenter study by the CCISC (Congenital Cardiovascular Interventional Study Consortium). 2014; 0:0-8.
  - [18] Vlietstra RE, et al. Radiation burns as a severe complication of fluoroscopically guided cardiological interventions. *J Interv Cardiol* 2004;17:1 – 10.
  - [19] Bashore TM. Radiation safety in the cardiac catheterization laboratory. Editorial. *Am Heart J* 2004;147:375 – 8.
  - [20] Wilde P, et al. Radiation hazards for the patient in cardiological procedures. *Heart* 2001 (Feb);85(2):127 – 30.

# 醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接研究 (II)

## The Study on Integrating the Radiation Dose and Digital Imaging and Communications in Medicine for Digital X-ray Photography (II)

計畫編號：MOST 104—NU—E—033—001—NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蘇振隆

e-mail：[jsu@cycu.edu.tw](mailto:jsu@cycu.edu.tw)

計畫參與人員：李憲旻、黃柏凱、郭銘芳、倪于晴

執行單位：中原大學生物醫學工程學系

### 摘要

以放射線造影技術來進行疾病的診斷，在醫學上是很有力的工具。隨著相關醫療設備及診斷技術的進步，醫療輻射防護相關議題也越受到重視，接受的輻射劑量越多，造成之輻射傷害機率也越高，但照射劑量不足，所呈現出來的影像無法提供疾病正確診斷而重照，病患受到的輻射量也將增加。因此，適當劑量在放射診斷上儼然成為重要的議題，尤其資訊數位化比重逐漸增加，加上數位 X 光影像設備提供了傳統 X 光影像設備所不能達到的優點，全球 X 光影像設備市場均呈現平穩成長。國內政府致力推動高階影像器材發展方案，也積極鼓勵醫療器材產業朝高階創新產品發展，目前已有多家廠商投入醫用數位 X 光攝影儀開發，造影系統如何輸出正確成像內容及可靠劑量資訊，且能同時符合醫療器材法規及醫學數位影像及通信標準是國內所欠缺的。

本計畫已完成符合數位 X 光攝影儀輸出影像物件及與系統參數（管電壓(KVp)、管電流(mAs)等）連結之輻射劑量與 DICOM 影像物件輸出資訊的研析，並完成(1) 與促使輻射劑量抑低相關之醫療用數位 X 光攝影儀 DICOM 輸出影像格式及標籤的研析。(2) 透過與醫界之實務使用經驗結合，並針對數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像物件進行測試驗證，完成符合輻射劑量監視與國際影像格式標準之可行方案研究，以作為國產放射類之高階醫療造影儀器設備規格檢視及輻射管制與防護要求之參考，並實際協助相關技術之發展。

關鍵詞：數位 X 光攝影儀、醫學數位影像及通信標準、輻射劑量、管電壓、管電流

### Abstract

The global X-ray imaging system market has shown steady growth. With a gradual increase in global information digitization ratios, coupled with digital X-ray system that features advantages not available in traditional X-ray imaging equipment, such as digital X-ray system that can provide images with higher quality at lower radiation doses, fast imaging, enhanced image storage and reduced reproduction, productivity and efficiency have been greatly enhanced. In addition, digital imaging is used to diagnose physicians' examination, extraction, transmission, and image analysis through electronic means, which has greatly enhanced and simplified the traditional work process and has improved the overall efficiency of medical institutions. Hence, digital X-ray system has become a major growth

momentum for future markets. Reduce radiation risks while maximizing the benefit. To maintain image quality while reducing the radiation dose is very important. The government encourages medical device industry towards high-end innovation and product development. There are manufacturers of the x-ray equipment are now producing digital x-ray systems, how to output the correct image content and reliable radiation dose information in the system, which also comply with the Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) standard and medical devices regulations is currently lacking.

DICOM images objects need to be integrated with the many digital X-ray systems parameters currently available. Such as, tube voltage (KVp), tube current (mAs). The purpose is to integrate the radiation dose and output image objects information. We have completed the following work: (1) Holding meeting to discuss about the low-dose related medical digital X-ray systems and DICOM image format and tag. (2) With the medical community through the combination of practical experience, and for the digital X-ray system of the radiation dose and DICOM image objects for testing and verification, to complete the dose monitoring and compliance with the international standard image format. Finally, we also made recommendations and provided to manufacturers as a reference about high-level medical equipment specification, the radiation dose, and radiation protection requirements.

Keywords: Digital X-Ray, DICOM, Radiation Dose, Tube Voltage (KVp), Tube Current (mAs).

### I. 前言

在醫學診斷影像技術之精進、研究領域擴增及新興國家基礎醫療設施建構等市場需求增加情況下，讓許多醫療院所由傳統洗片式 X 光機逐漸升級為數位 X 光影像系統，也因此帶動 X 光影像設備市場的成長，相關技術包含醫用和非醫用所衍生之產值龐大，經濟效益可觀。根據研究指出，2009 年全球醫用 X 光影像診斷設備之市場約為 35.7 億美元，其中，包含傳統 X 光影像設備 (Analog X-ray) 及數位 X 光影像設備 (Digital X-ray)，且數位 X 光影像設備約佔所有 X 光影像設備之 9 成。預估 2016 年全球醫用 X 光機市場將達到 47.8 億美元以上。

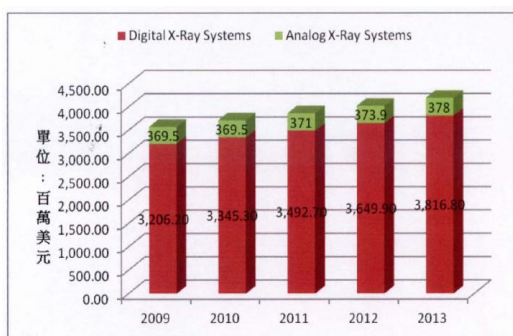


圖 1、2009-2013 年全球醫用 X 光機市場規模預測  
(來源：工研院 IEK(2012))

傳統 X 光攝影以底片接收穿透患者之 X 光，再利用顯影液、定影液將底片上的潛像黑化而形成灰階影像，傳統底片式 X 光影像系統因無法滿足醫學影像儲存及通信系統(PACS)用於儲存、取得、傳送與顯示之需求，故傳統底片式 X 光影像系統已逐漸淘汰。數位 X 光攝影利用直接或間接式之轉換技術將穿透人體組織的 X 光轉為數位訊號，再將其重組為二維影像後，直接顯示於高解析度之顯示器，數位成像系統已成為 X 光影像設備之市場主流。2010 年行政院生技產業策略諮議委員會議決全面推動數位 X 光造影系統等高階醫學造影設備作為台灣高階醫學影像器材產業發展產品；目前有多家廠商已投入醫療用數位 X 光攝影儀系統之開發。

隨著造影設備日新月異，相關醫療輻射防護議題也越受重視。接受的輻射劑量越多，造成輻射傷害之機率也將會越高，但照射劑量不足，所呈現出來的影像無法提供疾病正確診斷而必須重照時，病患所接受的輻射量也會增加。Image Gently 與 Image Wisely 之低劑量 X 光攝影已是國際趨勢，遵守 ALARA 原則，若病患為孩童，使用 Society for Pediatric Radiology 公布之 Image Gently 參考資料，病患為成人時，使用 Radiological Society of North America 之 Image Wisely 指導方針。整個影像鏈，除放射醫師、醫學物理師及放射技師外，儀器製造商、病患及家屬等均應注重劑量紀錄與抑低。AAPM 會議也指出利用每次造影之影像所呈現輻射曝露、劑量、造影程序設定等相關資訊，醫院端可即時監視病人之劑量。因此，適當的劑量在放射診斷影像上是很重要的議題。原子能委員會為保障民眾健康，積極推動醫療曝露品質保證作業，藉以提升國內輻射醫療曝露之品質。可見，在維持放射影像品質同時，降低患者接受之輻射劑量為世界潮流。然而，造影系統如何能輸出造影資訊及可靠之劑量資訊且同時符合醫療數位影像傳輸協定規範是國內所欠缺的，透過此橋接研究的進行，可有效控制在檢查時之非預期輻射劑量曝露，故確有必要進行。

## II. 主要內容

本計畫主要係以完成數位 X 光攝影系統之 DICOM 影像物件解析及輻射劑量曝露與影像品質評估等相關工作，使造影系統能輸出符合 DICOM 標準規範之正確造影內容及可靠劑量資訊，以期能有效控制其進行造影檢查時之非預期的輻射劑量曝露；其完成之工作項目，包括有：(a) 探討解析數位 X 光攝影儀之 DICOM 輸出

影像物件格式與標籤；(b) 數位 X 光攝影儀之輻射劑量評估與影像物件驗證，透過與醫界實務經驗結合，進行符合劑量監視與 DICOM 影像物件格式之可行性研究。以下就上述重點工作項目進行說明之：

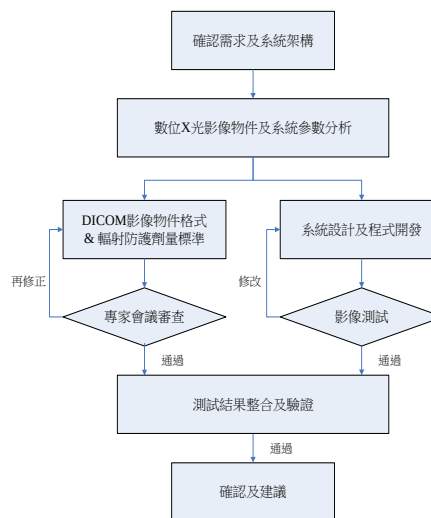


圖 2、主要執行流程及步驟

### (a) 數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤研析：

為使數位 X 光攝影儀輸出影像物件能完整展現，並符合臨床使用之需求及達到劑量監視目標，本年度邀請資通信等領域專家、臨床放射技術師及放射科醫師參與影像物件格式標籤之研討，並參照 DICOM 標準、AAPM TG 116、游離輻射防護法及原能會公告之輻射醫療曝露品質保證作業流程，配合相關數位 X 光攝影儀器開發，並於計畫期間舉辦會議進行討論，以符合輻射劑量暴露防護並實際應用於放射類造影儀器設備上。

DICOM 影像物件檔頭欄位包含有許多重要資訊，DICOM 對檔頭的規定，有一般性及針對不同類影像的特殊性。一般性檔頭包含有病患姓名、基本資料及檢查日期等欄位，特殊檔頭則依據影像特性而有特定欄位。影像資料如同傳統影像一般，紀錄了每幅圖像的值；而影像屬性部分，包含病患姓名、病歷號碼、檢查項目、日期及造影儀器等訊息，其中與劑量有關的資訊為曝露指標(Exposure indicator)，每一家廠商對曝露指標的表示方式與定義，皆不相同。儀器在定期校正情況下，曝露指標可提供臨床放射師作為技術條件調整之參考。DICOM 影像物件會因影像特性而有不同影像檔頭模組定義；以數位 X 光攝影儀影像為例，資訊個體包含 Patient, Study, Series, Frame of Reference, Equipment 及 Image；不同資訊個體，又分別對應不同模組。除上述部份，尚包含參考框資訊個體，主要用以記錄連續影像的參數，如各影像間的時間間隔，或各影像間的厚度，影像碼號等相關資訊。本計畫依據 DICOM 標準第 3 部：資訊物件定義、第 5 部：資料結構及編碼，以及第 6 部：資料辭典規定，透過原始影像解碼所得資訊及參數，以研析 X 光攝影儀之影像物件與輻射劑量間的關係。

在標準 DICOM 影像物件中，檔頭資訊對於影像及

造影相關資訊的呈現非常重要，為使數位 X 光攝影儀能將影像完整的展現，必須選取正確的檔頭，本計畫依據 DICOM 標準第 3 部規定之數位 X 光影像 IOD 模組屬性的定義(M：必要、U：可有可無及 C：依某條件才有的模組)選擇所需對應模組內容，並依據所對應模組(參閱 DX 影像 IOD 模組 Reference 處)規定，選擇對應的欄位。以下針對各資訊模組定義及其內容，列述如下：

表 1、數位 X 光影像 IOD 模組屬性

| IE                 | Module                 | Reference | Usage                                                                                                                 |
|--------------------|------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Patient            | Patient                | C.7.1.1   | M                                                                                                                     |
|                    | Clinical Trial Subject | C.7.1.3   | U                                                                                                                     |
| Study              | General Study          | C.7.2.1   | M                                                                                                                     |
|                    | Patient Study          | C.7.2.2   | U                                                                                                                     |
|                    | Clinical Trial Study   | C.7.2.3   | U                                                                                                                     |
| Series             | General Series         | C.7.3.1   | M                                                                                                                     |
|                    | Clinical Trial Series  | C.7.3.2   | U                                                                                                                     |
|                    | DX Series              | C.8.11.1  | M                                                                                                                     |
| Frame of Reference | Frame of Reference     | C.7.4.1   | U                                                                                                                     |
| Equipment          | General Equipment      | C.7.5.1   | M                                                                                                                     |
| Image              | General Image          | C.7.6.1   | M                                                                                                                     |
|                    | Image Pixel            | C.7.6.3   | M                                                                                                                     |
|                    | Contrast/Bolus         | C.7.6.4   | U                                                                                                                     |
|                    | Display Shutter        | C.7.6.11  | U                                                                                                                     |
|                    | Device                 | C.7.6.12  | U                                                                                                                     |
|                    | Intervention           | C.7.6.13  | U                                                                                                                     |
|                    | Specimen               | C.7.6.22  | U                                                                                                                     |
| IE                 | Module                 | Reference | Usage                                                                                                                 |
| Image              | DX Anatomy Imaged      | C.8.11.2  | M                                                                                                                     |
|                    | DX Image               | C.8.11.3  | M                                                                                                                     |
|                    | DX Detector            | C.8.11.4  | M                                                                                                                     |
|                    | X-Ray Collimator       | C.8.7.3   | U                                                                                                                     |
|                    | DX Positioning         | C.8.11.5  | U                                                                                                                     |
|                    | X-Ray Tomo Acquisition | C.8.7.7   | U                                                                                                                     |
|                    | X-Ray Acquisition Dose | C.8.7.8   | U                                                                                                                     |
|                    | X-Ray Generation       | C.8.7.9   | U                                                                                                                     |
|                    | X-Ray Filtration       | C.8.7.10  | U                                                                                                                     |
|                    | X-Ray Grid             | C.8.7.11  | U                                                                                                                     |
|                    | Overlay Plane          | C.9.2     | C - Required if graphic annotation is present                                                                         |
|                    | VOI LUT                | C.11.2    | C - Required if Presentation Intent Type (0008,0068) is FOR PRESENTATION. Shall not be present otherwise. See Note 8. |
|                    | Image Histogram        | C.11.5    | U                                                                                                                     |
|                    | Acquisition Context    | C.7.6.14  | M – See A.26.5                                                                                                        |
|                    | SOP Common             | C.12.1    | M                                                                                                                     |

### (b)數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像驗證：

為因應國內相關醫療器材製造商及核能研究所於數位 X 光攝影儀之先期開發，本計畫選定國內投入研發之數位 X 光攝影儀作為標的，並以 GE, Siemens 等廠商之數位 X 光攝影儀所產出影像物件進行研析，並已透過自行開發之驗證系統以資料表連結方式來擷取儀器端參數及相關設定。而數位 X 光攝影由照射、原始成像、處理、傳輸到顯示，有多個參數會影響其顯示之結果，在維持放射影像品質的同時，降低患者接受之輻射劑量為世界潮流。然而，造影系統如何輸出造影資訊及可靠之劑量資訊，且同時符合醫療數位影像傳輸協定規範是國內所欠缺的。因此本計畫依據數位 X 光攝影儀之實際產出影像物件資訊（如儀器參數、影像變數、管電壓(KVp)、管電流(mAs)及輸出劑量等資料），且針對數位 X 光攝影儀器的使用者操作軟體，建立實體連結參數；並參考 DICOM 標準第 3 部對應之影像模組規定及依循原子能委員會之輻射管制與防護要求進行驗證，以完成數位 X 光攝影儀器之輻射劑量與影像物件驗證。

## III. 結果與討論

本計畫係以完成「醫用數位 X 光攝影儀之輻射劑量與醫療數位影像傳輸協定橋接的研究」為預期目標，其目的為探討及研析造影系統如何輸出符合臨床診斷所需造影內容及可靠劑量資訊且同時能符合醫學數位影像及通信標準規範，而讓數位 X 光攝影儀等設備之輸出影像物件能符合 DICOM 標準，有效控制檢查時非預期之輻射劑量曝露，並透過整合學研單位研發能量，協助相關技術之開發。年度工作項目包括；(1) 研究探討數位 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤；(2) 數位 X 光攝影儀輻射劑量與 DICOM 影像物件之格式標籤驗證。表 2 所示即為可用來描述有關輻射劑量值(Radiation Dose)之資訊屬性，該屬性讓資訊系統可儲存病人於治療過程所接受之游離輻射照射量。

表 2、輻射劑量模組屬性

| Attribute Name                               | Tag         | Attribute Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anatomic Structure, Space or Region Sequence | (0008,2229) | Anatomic structure, space or region that has been exposed to ionizing radiation.<br>Zero or one item shall be included in this Sequence.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| >Include "Code Sequence Macro" Table 8.8-1   |             | No Baseline Context ID is defined.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Total Time of Fluoroscopy                    | (0040,0300) | Total duration of X-Ray exposure during fluoroscopy in seconds (pedal time) during this Performed Procedure Step.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Total Number of Exposures                    | (0040,0301) | Total number of exposures made during this Performed Procedure Step. The number includes non-digital and digital exposures.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Distance Source to Detector                  | (0018,1110) | Distance in mm from the source to detector center.<br>Note: This value is traditionally referred to as Source Image Receptor Distance (SID).                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Distance Source to Entrance                  | (0040,0306) | Distance in mm from the source to the surface of the patient closest to the source during this Performed Procedure Step.<br>Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.                                                                                                                                                                                                                        |
| Entrance Dose                                | (0040,0302) | Average entrance dose value measured in dGy at the surface of the patient during this Performed Procedure Step.<br>Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.                                                                                                                                                                                                                                 |
| Entrance Dose in mGy                         | (0040,8302) | Average entrance dose value measured in mGy at the surface of the patient during this Performed Procedure Step.<br>Note: This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.                                                                                                                                                                                                                                 |
| Exposed Area                                 | (0040,0303) | Typical dimension of the exposed area at the detector plane. If Rectangular: row dimension followed by column; if Round: diameter. Measured in mm.<br>Notes: 1. This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus.<br>2. This attribute is used in the X-Ray Acquisition Dose Module with units in cm (see Section C.8.7.8 Table C.8-33).                                                                   |
| Attribute Name                               | Tag         | Attribute Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Image and Fluoroscopy Area Dose Product      | (0018,115E) | Total area-dose-product to which the patient was exposed, accumulated over the complete Performed Procedure Step and measured in dGy*cm <sup>2</sup> cm, including fluoroscopy.<br>Notes: 1. The sum of the area dose product of all images of a Series or a Study may not result in the total area dose product to which the patient was exposed.<br>2. This may be an estimated value based on assumptions about the patient's body size and habitus. |
| Comments on Radiation Dose                   | (0040,0310) | User-defined comments on any special conditions related to radiation dose encountered during this Performed Procedure Step.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Exposure Dose Sequence                       | (0040,030E) | Exposure Dose Sequence will contain Total Number of Exposures (0040,0301) items plus an item for each fluoroscopy episode not already counted as an exposure. Zero or more Items shall be included in this sequence.                                                                                                                                                                                                                                    |
| >Radiation Mode                              | (0018,115A) | Specifies X-Ray radiation mode. Enumerated Values:<br>CONTINUOUS<br>PULSED                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| >KVp                                         | (0018,0060) | Peak kilo voltage output of the x-ray generator used. An average in the case of fluoroscopy (continuous radiation mode).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| >X-Ray Tube Current in μA                    | (0018,8151) | X-Ray Tube Current in μA. An average in the case of fluoroscopy (continuous radiation mode).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| >Exposure Time                               | (0018,1150) | Time of x-ray exposure or fluoroscopy in msec.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| >Filter Type                                 | (0018,1160) | Type of filter(s) inserted into the X-Ray beam (e.g. wedges). See C.8.7.10 and C.8.15.3.9 (for enhanced CT) for Defined Terms.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| >Filter Material                             | (0018,7050) | The X-Ray absorbing material used in the filter. May be multi-valued. See C.8.7.10 and C.8.15.3.9 (for enhanced CT) for Defined Terms.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| >Comments on Radiation Dose                  | (0040,0310) | User-defined comments on any special conditions related to radiation dose encountered during the episode described by this Exposure Dose Sequence Item.                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

本計畫執行過程，與核能研究所皆保持良好互動，本計畫已依進度完成低輻射劑量 X 光攝影儀之 DICOM 影像物件格式標籤之研析及驗證。在數位 X 光攝影儀之輻射劑量與 DICOM 影像物件格式標籤驗證上，亦完成 2 家之低輻射造影設備產出影像物件且針對取得之輸出影像物件進行彙整，並透過所開發之 DICOM 影像物件讀取系統進行讀檔及解析。該系統執行時，使用者可以自左側窗格的路徑資料，選取欲檢視之 DICOM 影像的縮圖，即可顯示所選取之影像於 DICOM 影像格式驗證系統之圖像顯示區塊中，右側窗格顯示內容即為該 DICOM 影像檔之檔頭資訊，如圖 3 所示。



圖 3、DICOM Viewer 執行時之介面

輻射醫療檢查主要為提供臨床醫師對於疾病作出準確判斷，以對症下藥達治療之目的。故民眾就診時，臨床醫師會依據其專業判斷，以決定應採取之輻射診療行為，此屬輻射正當化行為，且檢查對病患益處遠大於輻射造成風險，故在國際輻防管制與我國輻射防護法，對醫療輻射劑量並無劑量限制之相關規定。以下為摘錄自美國國家輻射防護學會(NCRP) 1989 年出版第 100 號報告之放射線診斷攝影的皮表劑量。

表 3、放射線診斷攝影之皮表劑量，單位(毫侖琴 mR)

| 檢查部位            | 攝影方向 | 表皮劑量 | 檢查部位                     | 攝影方向 | 表皮劑量 |
|-----------------|------|------|--------------------------|------|------|
| 胸部<br>(Chest)   | 前後位  | 50   | 腰薦椎<br>(L-S spine)       | 前後位  | 910  |
|                 | 後前位  | 20   |                          | 側位   | 3485 |
|                 | 側位   | 80   |                          | 側位   | 559  |
| 頭部<br>(Skull)   | 前後位  | 480  | 腎孟攝影<br>(IVP)            | 前後位  | 440  |
|                 | 後前位  | 445  |                          | 側位   | 2525 |
|                 | 側位   | 280  |                          | 側位   | 760  |
| 頸部<br>(C-spine) | 前後位  | 260  | 大腸鋇劑攝影<br>(Barium enema) | 前後位  | 775  |
|                 | 側位   | 170  |                          | 側位   | 4010 |
| 胸椎<br>(T-spine) | 前後位  | 665  | 胃部攝影<br>(Upper-GI)       | 前後位  | 640  |
|                 | 側位   | 1460 |                          | 後前位  | 550  |
| 腰椎<br>(L-spine) | 前後位  | 885  | 乳房攝影 Mammo.<br>(Mo)      | 前後位  | 730  |
|                 | 側位   | 1345 |                          | 側位   | 545  |
| 腹部<br>(KUB)     | 前後位  | 665  | 脊椎攝影(Full spine)         | 前後位  | 280  |
|                 | 後前位  | 420  |                          | 側位   | 545  |
|                 | 側位   | 2095 |                          | 側位   |      |
| 股盆<br>(Pelvis)  | 前後位  | 545  | 膽囊攝影(OGT)                | 前後位  |      |
|                 | 側位   | 1345 |                          | 側位   |      |

註：前後位指 A-P、後前位指 P-A、側位指 Lat. view。

在數位 X 光攝影設備中，其成像三大要素，如下：

- KVP(電壓值)：指 X 光管或 X 光機之最高輸出。
- mA(電流量)：指 X 光管或 X 光機之最高輸出。
- Sec(時間)：指曝光時間。
- mAs (mA x sec 乘積)：以 mAs 顯示為減化操作流程。mAs 只是曝光劑量值，不代表設備規格。

在數位 X 光攝影設備中，其規格至少應包含：

- Focal spot (聚焦點)
- KVp range (電壓範圍)
- mA range (電流範圍)

國際電工委員會(IEC)公布之 IEC 60601-2-43 標準要求數位 X 光攝影儀器設備必須顯示劑量面積乘積 (Dose area product, DAP) 和皮膚累積劑量 (Cumulative skin dose)。現行輻射防護法規，乃基於「再微量的輻射，仍可能有害，並無所謂劑量低限值」假說為考量基準。這種考量的方式是將高劑量領域的相關數據，直接外插延伸至低劑量範圍，並非在低劑量領域實際驗證結果。低劑量輻射對被曝露者風險及其輻射生物效應，仍然是科學上有待究明的課題。根據研究顯示，生物對低劑量輻射具有巧妙的反應機制，人類對此等機制的產生條件（劑量、劑量率等）更明瞭後，相信將來應會依據科學實驗數據，重新制訂更為符合事實的輻射防護規範。

#### IV. 結論

隨著造影設備的日異更新，相關醫療輻射防護議題也越受到重視，國內醫療器材產業也逐漸朝向高階創新醫療造影設備及週邊產品發展，其對由資通訊產業轉入醫療器材產業之廠商而言，醫療器材安全性與功效性的相關評估技術與法規驗證等問題，實為進入市場的基本門檻。本計畫內容從數位 X 光攝影儀 DICOM 影像物件之研析、輻射劑量曝露及造影系統參數連結驗證，邁向成熟有效的產學整合，以取得診斷市場之先機。尤其，高階醫療影像器材開發為國家經濟推展目標，因其費時費力且需跨領域的合作，透過本計畫相關工作的進行，可開啟研究單位及學術機構之合作契機，有效整合雙方研發力量，並以驗證技術，開發具市場利基之高階醫療影像器材，以彌補關鍵技術缺口，同時尋找可配合台灣優勢項目且易成功之方式，縮短整體開發時程。本計畫也提供了碩士班研究生 2 人參與合作研究之機會，參與計畫之工作人員也學習到與業界合作的技巧、增強撰寫程式能力、資料處理程式之設計及論文撰寫能力，且能增進其實務經驗，有利國內研究人力及素質之提升。

#### 參考文獻

- [1] J. Anthony Seibert, Digital radiography: CR versus DR? Time to reconsider the options, the definitions, and current capabilities, Applied Radiology, 2007.
- [2] 蘇振隆、蔡育秀、劉建財、郭銘芳：引進及推動健康醫療資訊標準，經濟部標準檢驗局成果報告，2007。
- [3] Oosterwijk, DICOM Basics, Third Edition, OTech Inc.
- [4] DICOM 3.0, Digital Imaging and Communications in Medicine, ACR-NEMA, 2016.
- [5] 游離輻射防護法，2002。
- [6] 輻射醫療曝露品質保證標準，2011。
- [7] AAPM TG 116, An Exposure Indicator for Digital Radiography, Report of AAPM Task Group 116, 2009.
- [8] IEC 60601-2-43, Medical electrical equipment - Particular requirements for the safety of x-ray equipment for interventional procedures, 2000.

# 應用分子影像對比劑資料庫探討 PET/MR 多重影像放射藥物開發與臨床應用

## Application of the Molecular Imaging and Contrast Agent Database (MICAD) in Exploration of Potential PET/MR multimodality imaging radiotracers for Clinical Development

計畫編號：MOST 104-2623-E-040-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：高潘福

e-mail：[pfkao@yahoo.com.tw](mailto:pfkao@yahoo.com.tw), [pfkao@csmu.edu.tw](mailto:pfkao@csmu.edu.tw)

計畫參與人員：廖美秀、趙啟民、劉冠妙、吳世彥、趙鴻宇

執行單位：中山醫學大學醫學系

### 摘要

分子影像對比劑資料庫(The Molecular Imaging and Contrast Agent Database, MICAD)建構一個即時且免費的網路自由讀取資料庫，近年分子影像相關研究蓬勃發展，其中造影的製劑發展是重要的關鍵。從 MICAD 的各項資料中，針對 PET 多重影像(multimodality imaging)顯影劑的資料進行有系統的整理與比較，以選取合適國內發展的 PET/MR 放射藥物，集中國內相關研究學術機構，共同集中人力物力創造出新的生技醫藥發展方向。

擬計畫透過定期開會，舉辦教育推廣與研討會，以及並培育國內放射化學人才。

關鍵詞：整合式正子/磁振造影，分子影像對比劑資料庫，多重影像新藥物開發。

### Abstract

Molecular Imaging and Contrast Agent Database (MICAD) provides freely accessible online information regarding molecular imaging and contrast agents. In this project, we try to focus on PET multimodality imaging tracers in MICAD to pick out optimal tracers for the development of radiopharmaceutical for researchers and biotechnology industry.

Through seminar, education conference, and preliminary work on synthesis, we expect to select radiopharmaceuticals which will be suitable for future concentric development bringing together relevant radiopharmaceutical professionals and resources in Taiwan.

Keywords: Integrated positron emission tomography/magnetic resonance imaging, (PET/MR), The Molecular Imaging and Contrast Agent Database, Multimodality imaging drug development.

### I. 前言

國內各大學與醫學中心相關研究環境比起歐美學術機構與藥廠的相對的薄弱許多，雖然國內核能研究所擁有優良的研究人員與充足的設備，但對於全然的創新研究會有一定的資源與人力限制，因此尋求優質有潛力、符合國人健康需要與產業特性的分子影像對比劑來發展，是我們應該認真思考與努力的方向。

從MICAD的各項資料中，針對PET多重影像(multimodality imaging)顯影劑的資料進行有系統的整理

與比較，分析全球PET/MR 放射藥物新藥物開發與潛在臨床應用，針對國人腫瘤與腦神經等各臨床領域醫療保健上的需求，選取若干合適國內發展的放射藥物，集中國內相關研究學術機構，共同集中人力物力創造出新的生技醫藥發展方向。

### II. 主要內容

本計畫透過本計畫主持人與共同主持人不定期開會，以達到放射藥物篩選條件的共識，並擬舉辦一次教育推廣與研討會，提升相關研究參與的品質與人員素質，培育放射藥物發展的相關放射化學人才。同時，將初步試合成本計畫所提氧化鐵製劑，以了解合成的可行性。

本計畫擬針對MICAD 及專業期刊上所記載值得發展的放射化學新藥，進行了解。此外，針對氧化鐵奈米粒子製劑與I-125 模擬合成試驗，計畫未來可以用 I-124 替代，以作為PET/MR 多功能造影藥物。

### III. 結果與討論

透過分析資料庫現況，並回顧國際上核子醫學相關期刊，完成應用分子影像對比劑資料庫分析全球核醫新藥物開發與潛在PET/MR 多重影像臨床應用。擬找尋腫瘤等PET/MR 可能的多重影像臨床應用領域新藥，以提供國內開發PET/MR 多重影像分子影像放射製劑有用的資訊與方向，作為核能研究所及相關產業未來研發核醫藥物與新技術之參考。

此外，進行PET/MR 多重影像分子影像放射製劑的試合成，設計氧化鐵奈米材料，再進一步試標定 I-125/I-124 的可能性。同時也舉辦放射化學與放射藥物學的研討會，集合國內相關領域人才，推展相關領域研究，並培育相關人才，以提振國內放射藥物學的研究風氣，進一步造福國內需要仰賴核醫相關診治的病患。

### IV. 結論

本研究計畫參與之工作人員能從廣泛的文獻資料中，透過討論與實驗設計等工作中，訓練文獻收集與綜合資訊能力，了解放射藥物研發流程與相關技術，並獲得實際參與放射藥物合成的機會與能力，達到培育放射化學人才的成效。

推估未來五至十年全球核醫新藥物開發與潛在臨床應用的研發趨勢，尤其是PET/MR 多重影像分子影像新放射製劑方面，可以作為核能研究所及相關產業未來研發核醫藥物與新技術之參考。研究預期完成文獻回顧

與分析，資料整理後，將在國內核子醫學、醫用迴旋加速器學會等相關學會發表，並在國內外相關學術期刊發表文獻回顧與評論。

### 參考文獻

- [1] Schlemmer HP, Pichler BJ, Schmand M, et al. Simultaneous MR/PET imaging of the human brain: feasibility study. *Radiology*. 2008;248:1028–1035.
- [2] Ratib O, Beyer T. Whole-body hybrid PET/MRI: ready for clinical use? *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2011;38:992–995.
- [3] Weber WA. PET/MR Imaging: A Critical Appraisal. *J Nucl Med*. 2014;55:56S-58S.
- [4] Arvind Chopra, Liang Shan, W. C. Eckelman, Kam Leung and Martin Lattner, et al. Molecular Imaging and Contrast Agent Database (MICAD): Evolution and Progress. *Mol Imaging Biol* 2012;14(1): 4-13
- [5] Lee HY, Li Z, Chen K, Hsu AR, Xu C, Xie J, Sun S, Chen X. PET/MRI Tumor Imaging Using Arginine-Glycine-Aspartic (RGD)–Conjugated Radiolabeled Iron Oxide Nanoparticles. *J Nucl Med*. 2008 Aug;49(8):1371-9.
- [6] Park JA, Kim JY, Lee YJ, et al. Gadolinium Complex of (125)I/(127)I-RGD-DOTA Conjugate as a Tumor-Targeting SPECT/MR Bimodal Imaging Probe. *ACS Med Chem Lett*. 2012;4(2):216-9.
- [7] Durkan K, Jiang Z, Rold TL, et al. A heterodimeric [RGD-Glu-[(64)Cu-NO2A] -6-Ahx-RM2]  $\alpha\beta 3$ /GRPr-targeting antagonist radiotracer for PET imaging of prostate tumors. *Nucl Med Biol*. 2014;41(2):133-9.

# 運用 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal PET 研究中藥的神經保護作用(II)

## Investigating the neuroprotective effect of Chinese herbal medicines using 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal PET (II)

計畫編號：MOST 104-2623-E-016-001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：馬國興

e-mail：kuohsing91@yahoo.com.tw

計畫參與人員：呂紹瑋、林家望

執行單位：國防醫學院生物及解剖學研究所

### 摘要

憂鬱症可能導致國家、社會及經濟蒙受極大的危害與損失，許多研究已證實憂鬱症會造成腦中血清素轉運體密度降低，進一步了解致病機轉以選擇適當的治療藥物有其實際的需要，因此，本計畫目的為利用動物正子斷層攝影 (animal-PET) 搭配 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 建立臨床前篩藥平台，以評估中草藥於憂鬱症大鼠模式之腦中血清素轉運體神經保護作用。先前本實驗室發現三種中草藥—川芎、黃柏與黃芩可降低類憂鬱症小鼠模式的血中 corticosterone 濃度、緩解強迫游泳試驗的絕望程度、與改善類憂鬱症小鼠之大腦海馬迴神經新生的減少。本計畫將運用動物正子斷層攝影搭配 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 評估 Fluoxetine、Dextromethorphan (DM)、川芎、黃柏與黃芩對類憂鬱症大鼠腦中血清素轉運體之神經保護作用。經由此計畫驗證得知 Fluoxetine 與黃芩在類憂鬱大鼠腦部具有神經保護效果，DM 組與 CMS 組在 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 影像研究結果中雖無顯著差異，但 DM 組的專一攝取率呈現上升的趨勢。此慢性壓力造成之類憂鬱症大鼠動物實驗模式運用 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal-PET 造影，可做為評估抗憂鬱或神經保護之潛力藥物篩選平台，建議未來可以藉此動物實驗平台篩選出更多具有神經保護效果潛力藥物。

關鍵詞：慢性壓力、對類憂鬱症大鼠模式、Fluoxetine、Dextromethorphan、中草藥、小動物正子造影

### Abstract

Depression may lead to national, social and economic harm and loss seriously. Many studies have proven that depression may cause the reduction of brain serotonin transporter (SERT) density. Further understanding of the pathogenesis and finding of the treatment are imperative needed. The purpose of this project is to assess the neuroprotective effect of the Chinese herbal medicines (CHMs) in depression-like rat model using the animal positron emission tomography (animal-PET) coupled with 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM. Previously, we found three CHMs, Rhizome Chuanxiong, Radix Phellodendri and Radix Scutellaria, may reduce the blood corticosterone concentration, relieve the despair in force swimming test (FST), and improve the neurogenesis of hippocampus in the depression-like mice model. In this project, the animal-PET coupled with 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM will be used to monitor the status of serotonin transporters in

depression-like rat model with or without the Fluoxetine, Dextromethorphan (DM), Rhizome Chuanxiong, Radix Phellodendri and Radix Scutellaria treatment. The results showed the neuroprotective effects of Fluoxetine and Radix Scutellaria in CMS-induced rats. The 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM uptakes showed no significant difference between DM and CMS groups, but that still revealed the increasing trend of 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM uptakes of DM rats. The CMS-induced depression-like rat model and 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal-PET may be a useful drug screening platform to discover more neuroprotective drugs.

Keywords: chronic mild stress, depression-like rat model, Fluoxetine, Dextromethorphan, Chinese herbal medicine, animal-PET

### I. 前言

憂鬱症會影響腦中血清素系統，包括血清素 (serotonin) 濃度以及血清素轉運體 (serotonin transporter, SERT) 密度降低。血清素轉運體是位於血清素神經元突觸前的一種蛋白質，主要功能為調控突觸血清素濃度，為評估血清素神經元完整性的重要生物指標。此外；血清素轉運體為抗憂鬱劑之主要結合標的，其在憂鬱症所扮演的角色也特別引起關注。以往學者探討憂鬱症所引發之神經退化，僅能藉由憂鬱症病患遺體以傳統方法評估，但這些傳統研究方式 (例如：腦區切片染色法) 往往對於憂鬱症病患在罹病後不同時間點之體內生化轉變無法及時瞭解，所得到的觀察結果無法與活體腦中的變化相吻合，對於憂鬱症病患經治療後各階段的反應也難以評量。因此，運用創新技術建立可靠的評估平台，藉以篩選具抗憂鬱潛力之候選藥物，同時提供憂鬱症病患神經退化之及時資訊，實有其迫切之必要性。

正子斷層攝影 (positron emission tomography, PET) 非侵入性技術配合放射性造影劑，已成功地運用於人類與動物腦組織進行活體血清素轉運體之相關研究。因此，使用適當的放射性結合子 (radioligand) 配合正子斷層攝影，對於人類罹患憂鬱症後產生之影響及相對應於血清素轉運體之變化，應可提供直接且深入之及時性資訊。4-[<sup>18</sup>F]-ADAM，先前在啮齒類與非人類靈長類的數據已顯示 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 對血清素轉運體具有高度的專一性 (specificity) 及親和力 (affinity)。我們也運用 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 配合小動物正子斷層造影研究 fluoxetine 對於 MDMA 在大鼠大腦血清素轉運體毒性

的保護作用，我們發現單一劑量 fluoxetine 對於 MDMA 引發之血清素轉運體喪失，可提供持久性的保護作用。4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 配合小動物正子斷層造影也被運用於聽覺受損大鼠的大腦造影研究，我們發現大鼠以噪音誘發聽覺受損後，大腦的血清轉運體出現減少的現象，如此的血清轉運體減少現象暗示聽覺受損後易罹患憂鬱症。上述關於4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 的研究顯示此核醫藥物在臨床應用深具潛力。

在本計畫中我們將更進一步運用4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 配合小動物正子電腦斷層造影，研究慢性壓力誘導之類憂鬱症老鼠之血清素轉運體變化，並且研究川芎、黃柏與黃芩對於類憂鬱症老鼠之血清素系統是否具有神經保護作用。

## II. 主要內容

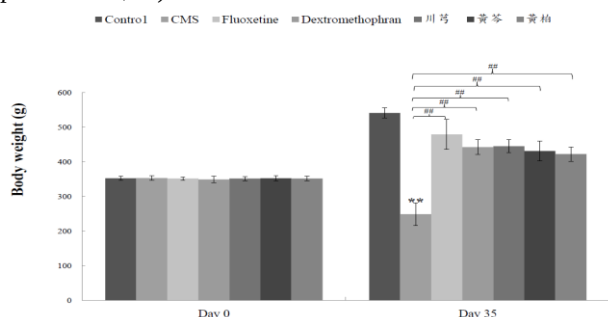
利用強迫游泳試驗，評估 Dextromethorphan 與中草藥能否改善類憂鬱大鼠之絕望感，並利用4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal-PET 造影，研究 Dextromethorphan 與中草藥對大鼠腦中血清素轉運體之神經保護作用。

實驗分為七個組別：(1) 控制組(Control)、(2) 慢性壓力組 (CMS)、(3) Fluoxetine組：慢性壓力並每日皮下注射一次Fluoxetine 10mg/kg、(4) Dextromethorphan組：慢性壓力並每日皮下注射一次Dextromethorphan 10mg/kg、(5) 川芎組：慢性壓力並每日灌食一次川芎 150mg/kg、(6) 黃芩組：慢性壓力並每日灌食一次黃芩 100mg/kg、(7) 黃柏組：慢性壓力並每日灌食一次黃柏 100mg/kg。實驗時間 35 天，Day 34 進行強迫游泳試驗 (forced swimming test, FST)，Day 35 進行4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal-PET 造影，評估各組大鼠腦部的血清素轉運體變化。

## III. 結果與討論

### 體重變化

觀察控制組 (Control)、慢性壓力組 (CMS) 與各藥物給予組別在第 0 天與第 35 天體重變化。控制組經過 35 天後體重增加 53.5%，慢性壓力組體重則明顯減少 29.5%，與控制組有顯著差異 (\*\*,  $p<0.01$ ；圖一)，顯示慢性壓力可能會影響大鼠食慾，造成體重減少。與慢性壓力組組織體重相比較，Fluoxetine 組體重高出 36.2%、Dextromethorphan 組體重高出 26.7%、川芎組體重高出 26.6%、黃芩組體重高出 22.3%、黃柏組體重高出 20.1%。結果顯示，慢性壓力操作時同時給藥，35 天後不同藥物皆能改善由於慢性壓力所造成的體重減輕情形 (###,  $p<0.01$ ；圖一)。



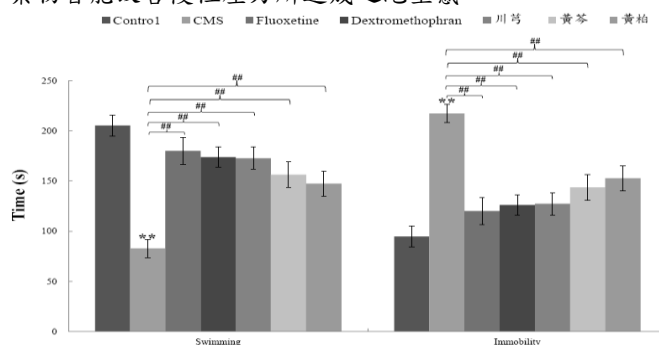
圖一、控制組、慢性壓力組與藥物給予組大鼠於實驗第 0 天

與第 35 天體重變化 (mean  $\pm$  SD,  $n=6$ ; \*\*  $p<0.01$ , ##  $p<0.01$ )。第 35 天慢性壓力組與控制組比較，體重顯著減少；慢性壓力同時藥物給予組與單獨慢性壓力組比較，體重顯著增加。

### 強迫游泳試驗

慢性壓力模式所造成的類憂鬱症大鼠，在強迫游泳的情況下將會呈現顯著的絕望反應 (靜止不動、漂浮的時間延長)。本實驗於實驗開始第 35 天將大鼠放入水中，分析紀錄 5 分鐘內大鼠游泳與靜止情形。

結果顯示，慢性壓力大鼠游泳時間  $82.7 \pm 9.0$  秒與靜止時間  $217.3 \pm 9.0$  秒，與正常大鼠游泳時間  $205.3 \pm 10.2$  秒與靜止時間  $94.7 \pm 10.2$  秒比較，皆有顯著差異，代表慢性壓力大鼠憂鬱症產生的絕望反應明顯高於正常大鼠。此外，Fluoxetine 組游泳時間  $180.0 \pm 13.3$  秒與靜止時間  $120.0 \pm 13.3$  秒、Dextromethorphan 組游泳時間  $173.8 \pm 10.2$  秒與靜止時間  $126.2 \pm 10.2$  秒、川芎組游泳時間  $172.7 \pm 11.2$  秒與靜止時間  $127.3 \pm 11.2$  秒、黃芩組游泳時間  $156.3 \pm 12.6$  秒與靜止時間  $143.7 \pm 12.6$  秒、黃柏組游泳時間  $147.3 \pm 12.7$  秒與靜止時間  $152.7 \pm 12.7$  秒。結果顯示，慢性壓力同時給藥皆能改善慢性壓力所後在強迫游泳試驗中靜止不動之情形 (\*\*,  $p<0.01$ ; ###,  $p<0.01$ ；圖二)。顯示本研究中所使用之 5 種藥物皆能改善慢性壓力所造成之絕望感。

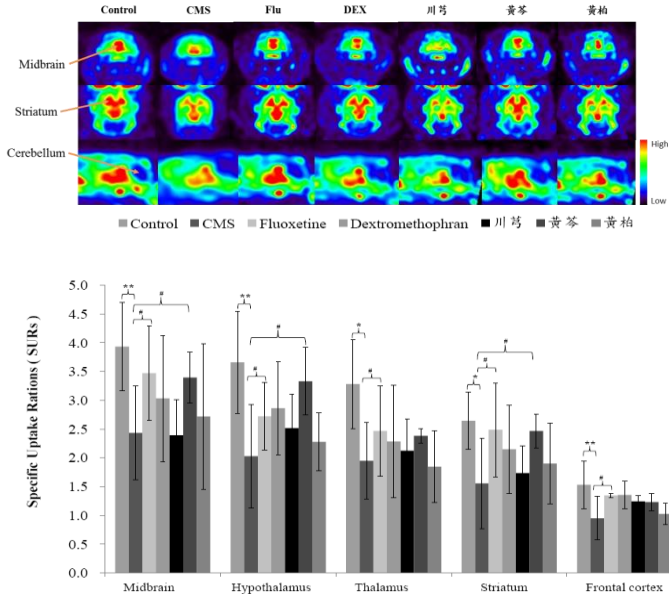


圖二、控制組、慢性壓力組與藥物給予組大鼠強迫游泳測試之比較圖，途中分別記錄兩組大鼠游泳時間與靜止時間。慢性壓力大鼠游泳時間 82.7 秒與靜止時間 217.3 秒，與正常大鼠游泳時間 205.3 秒與靜止時間 94.7 秒，比較皆有顯著差異，代表慢性壓力大鼠憂鬱症產生的絕望反應明顯高於正常大鼠。藥物給予組結果顯示，慢性壓力同時給藥，不同藥物皆能改善慢性壓力大鼠憂鬱症產生的絕望感 (\*\*,  $p<0.01$ ; ###,  $p<0.01$ )。

### 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal-PET 造影結果

使用 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 搭配 animal PET 觀察慢性壓力大鼠 (CMS) 與控制組大鼠 (Control) 腦部血清素轉運體之表現情形。影像量化分析結果顯示慢性壓力大鼠各腦區之專一攝取率 (specific uptake ratios, SURs) 皆低於正常大鼠 (圖三)。4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/animal-PET 造影之結果顯示，本計畫目前已成功建立慢性壓力誘導之憂鬱症大鼠，且造成慢性壓力大鼠腦部血清素轉運體表現量下降。慢性壓力大鼠之專一攝取率 (Midbrain:  $2.4 \pm 0.8$ ; Hypothalamus:  $2.0 \pm 0.9$ ; Thalamus:  $1.9 \pm 0.7$ ; Striatum:  $1.6 \pm 0.8$ ; Frontal cortex:  $0.9 \pm 0.4$ ) 皆明顯低於正常大鼠之專一攝取率 (Midbrain:  $3.9 \pm 0.8$ ; Hypothalamus:  $3.7 \pm 0.9$ ; Thalamus:  $3.3 \pm 0.8$ ; Striatum:  $2.6 \pm 0.5$ ; Frontal cortex:  $1.5 \pm 0.4$ )。代表慢性壓力誘導

類憂鬱症大鼠的血清素轉運體明顯低於正常大鼠 (\*\*,  $p<0.01$ ; \*,  $p<0.05$ ; 圖三)。各藥物給予組 (慢性壓力同時給藥) 的造影結果顯示, Fluoxetine 組大鼠各腦區對 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 攝取率皆明顯高於慢性壓力組 (#  $p<0.05$ ), 顯示 Fluoxetine 保護慢性壓力操作大鼠腦部血清素轉運體的效果最好; 慢性壓力大鼠同時給予黃芩後, 則在中腦、下視丘、紋狀體等腦區對 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 有較高的攝取率 (#,  $p<0.05$ ); 其餘藥物給予慢性壓力大鼠後, 各腦區對 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 攝取亦有較慢性壓力組大鼠高之趨勢。



圖三、正常組 (Normal) 與慢性壓力組 (CMS) 大鼠經 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 之正子影像量化分析結果, 慢性壓力操作組大鼠各腦區之專一攝取率 (specific uptake ratios, SURs) 皆低於正常組大鼠 (\*\*  $p<0.01$ ; \*  $p<0.05$ )。慢性壓力大鼠同時給予藥物, 各腦區對 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 攝取皆有提升, 其中以 Fluoxetine 與黃芩效果尤為顯著 (#  $p<0.05$ )。

#### IV. 結論

本實驗室先前已建立慢性壓力造成之類憂鬱症大鼠模式, 藉由強迫游泳試驗能評估慢性壓力造成之類憂鬱症大鼠之絕望感。此外, 也藉由 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 搭配小動物正子造影技術評估慢性壓力誘導類憂鬱症大鼠腦中血清素轉運體之改變情形。本研究結果顯示, 將慢性壓力操作大鼠同時給予 Fluoxetine、Dextromethorphan、川芎、黃芩、黃柏等藥物, 不僅能改善強迫游泳試驗中的絕望感, 也能改善慢性壓力所造成的 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM 攝取下降情形。顯示本研究中所使用之藥物皆具有抗憂鬱效果之潛力, 不僅能改善類憂鬱之症狀, 也能保護腦部血清素轉運體避免受慢性壓力影響而減少。

#### 參考文獻

[1] Bligh-Glover, W., Kolli, T.N., Shapiro-Kulnane, L., Dilley, G.E., Friedman, L., Balraj, E., Rajkowska, G., Stockmeier, C.A., 2000. The serotonin transporter in the midbrain of suicide victims with major depression. *Biol Psychiatry* 47, 1015-1024.

[2] Brust, P., Hinz, R., Kuwabara, H., Hesse, S., Zessin, J., Pawelke, B., Stephan, H., Bergmann, R., Steinbach, J., Sabri, O., 2003. In vivo measurement of the serotonin transporter with (S)-([<sup>18</sup>F]fluoromethyl)-(+)-McN5652. *Neuropsychopharmacology* 28, 2010-2019.

[3] Catlow, B.J., Badanich, K.A., Sponaugle, A.E., Rowe, A.R., Song, S., Rafalovich, I., Sava, V., Kirstein, C.L., Sanchez-Ramos, J., 2010. Effects of MDMA ("ecstasy") during adolescence on place conditioning and hippocampal neurogenesis. *Eur J Pharmacol* 628, 96-103.

[4] Duman, R.S., Malberg, J., Nakagawa, S., 2001. Regulation of adult neurogenesis by psychotropic drugs and stress. *J Pharmacol Exp Ther* 299, 401-407.

[5] Ginovart, N., Wilson, A.A., Meyer, J.H., Hussey, D., Houle, S., 2003. [<sup>11</sup>C]-DASB, a tool for in vivo measurement of SSRI-induced occupancy of the serotonin transporter: PET characterization and evaluation in cats. *Synapse* 47, 123-133.

[6] Hartvig, P., Bergstrom, M., Antoni, G., Langstrom, B., 2002. Positron emission tomography and brain monoamine neurotransmission -- entries for study of drug interactions. *Curr Pharm Des* 8, 1417-1434.

[7] Jarkas, N., McConathy, J., Votaw, J.R., Voll, R.J., Malveaux, E., Camp, V.M., Williams, L., Goodman, R.R., Kilts, C.D., Goodman, M.M., 2005. Synthesis and characterization of EADAM: a selective radioligand for mapping the brain serotonin transporters by positron emission tomography. *Nucl Med Biol* 32, 75-86.

[8] Kang, H.H., Wang, C.H., Chen, H.C., Li, I.H., Cheng, C.Y., Liu, R.S., Huang, W.S., Shiue, C.Y., Ma, K.H., 2013. Investigating the effects of noise-induced hearing loss on serotonin transporters in rat brain using 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM/small animal PET. *Neuroimage* 75:262-269.

[9] Kugaya, A., Seneca, N.M., Snyder, P.J., Williams, S.A., Malison, R.T., Baldwin, R.M., Seibyl, J.P., Innis, R.B., 2003. Changes in human in vivo serotonin and dopamine transporter availabilities during chronic antidepressant administration. *Neuropsychopharmacology* 28, 413-420.

[10] Li, I.H., Huang, W.S., Shiue, C.Y., Huang, Y.Y., Liu, R.S., Chyueh, S.C., Hu, S.H., Liao, M.H., Shen, L.H., Liu, J.C., Ma, K.H., 2010. Study on the neuroprotective effect of fluoxetine against MDMA-induced neurotoxicity on the serotonin transporter in rat brain using micro-PET. *Neuroimage* 49, 1259-1270.

[11] Loening, A.M., Gambhir, S.S., 2003. "AMIDE: A Free Software Tool for Multimodality Medical Image Analysis", *Molecular Imaging*, 2(3):131-137.

[12] Ma, K.H., Huang, W.S., Kuo, Y.Y., Peng, C.J., Liu, R.S., Hwang, J.J., Liu, J.C., Chen, H.J., Shiue, C.Y., 2009. Validation of 4-[<sup>18</sup>F]-ADAM as a SERT imaging agent using micro-PET and autoradiography. *Neuroimage*.

[13] Meyer, J.H., Wilson, A.A., Ginovart, N., Goulding, V., Hussey, D., Hood, K., Houle, S., 2001. Occupancy of serotonin transporters by paroxetine and citalopram during treatment of depression: a [<sup>11</sup>C]DASB PET imaging study. *Am J Psychiatry* 158, 1843-1849.

- [14] Meyer, J.H., Wilson, A.A., Sagrati, S., Hussey, D., Carella, A., Potter, W.Z., Ginovart, N., Spencer, E.P., Cheok, A., Houle, S., 2004. Serotonin transporter occupancy of five selective serotonin reuptake inhibitors at different doses: an [11C]DASB positron emission tomography study. *Am J Psychiatry* 161, 826-835.
- [15] Nielsen, K., Brask, D., Knudsen, G.M., Aznar, S., 2006. Immunodetection of the serotonin transporter protein is a more valid marker for serotonergic fibers than serotonin. *Synapse* 59, 270-276.
- [16] Pao, L.H., Lu, S.W., Sun, G.G., Chiou, S.H., Ma, K.H., 2012. Three Chinese herbal medicines promote neuroproliferation in vitro, and reverse the effects of chronic mild stress on behavior, the HPA axis, and proliferation of hippocampal precursor cell in vivo. *J Ethnopharmacol.* 144(2):261-269.
- [17] Peng, C.J., Huang, Y.Y., Huang, W.S., Shiue, C.Y., 2008. An automated synthesis of N,N-dimethyl-2-(2-amino-4-[18F]fluorophenylthio)benzylamine (4-[18F]-ADAM) for imaging serotonin transporters. *Appl Radiat Isot* 66, 625-631.
- [18] Porsolt, R.D., Le Pichon, M., Jalfre, M., 1977. Depression: a new animal model sensitive to antidepressant treatments. *Nature* 266, 730-732.
- [19] Semple, D.M., Ebmeier, K.P., Glabus, M.F., O'Carroll, R.E., Johnstone, E.C., 1999. Reduced in vivo binding to the serotonin transporter in the cerebral cortex of MDMA ('ecstasy') users. *Br J Psychiatry* 175, 63-69.
- [20] Shiue, G.G., Choi, S.R., Fang, P., Hou, C., Acton, P.D., Cardi, C., Saffer, J.R., Greenberg, J.H., Karp, J.S., Kung, H.F., Shiue, C.Y., 2003a. N,N-dimethyl-2-(2-amino-4-[18F]-fluorophenylthio)-benzylamine (4-[18F]-ADAM): an improved PET radioligand for serotonin transporters. *J Nucl Med* 44, 1890-1897.
- [21] Shiue, G.G., Fang, P., Shiue, C.Y., 2003b. Synthesis of N,N-dimethyl-2-(2-amino-4-[18F]fluorophenylthio)benzylamine as a serotonin transporter imaging agent. *Appl Radiat Isot* 58, 183-191.
- [22] Wang, S.H., Zhang, Z.J., Guo, Y.J., Sui, Y.X., Sun, Y., 2010. Involvement of serotonin neurotransmission in hippocampal neurogenesis and behavioral responses in a rat model of post-stroke depression. *Pharmacol Biochem Behav* 95,129-137.
- [23] Weng, S.J., Shiue, C.Y., Huang, W.S., Cheng, C.Y., Huang, S.Y., Li, I.H., Tao, C.C., Chou, T.K., Liao, M.H., Chang, Y.P., Ma, K.H., 2013. PET Imaging of Serotonin Transporters With 4-[18F]-ADAM in a Parkinsonian Rat Model. *Cell Transplant.* 22(7):1295-1305.
- [24] Willner, P., 2005. Chronic mild stress (CMS) revisited: consistency and behavioural-neurobiological concordance in the effects of CMS. *Neuropsychobiology* 52, 90-110.
- [25] Zhou, F.C., Tao-Cheng, J.H., Segu, L., Patel, T., Wang, Y., 1998. Serotonin transporters are located on the axons beyond the synaptic junctions: anatomical and functional evidence. *Brain Res* 805, 241-254.

# 多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用-子計畫一：Tc-99m TRODAT-1 SPECT 影像技術提升與臨床應用

## Imaging optima and implications of Tc-99m TRODAT-1 SPECT

計畫編號：MOST 104-2623-E-075-003 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：黃文盛

e-mail：[wshuang01@gmail.com](mailto:wshuang01@gmail.com)

共同主持人：張明哲、巫錫霖 主治醫師

計畫參與人員：郭諭燁

執行單位：台北榮民總醫院 核子醫學部

### 摘要

<sup>99m</sup>Tc-TRODAT-1 乃國內核研所開發，經衛福部查驗通過之健保給付的放射製劑，藉由組套方式標化具專一性結合於多巴胺轉運體以評估其活性。運用單光子電腦斷層掃描，可在活體內反應腦內多巴胺神經系統狀態。目前此製劑已在國內、大陸、部分亞洲及美洲國家臨床使用，但在影像分析與量化評估上仍然沒有一致方式；如能提供一簡易可靠的半量化方法將可使臨床應用更常規化。

其中以目視判讀與半量化分析是目前常用的簡單方法；然其一致性及可信度卻可因影像擷取、處理程序及關心區畫法不同而有差異。本研究乃以特製紋狀體假體為主進行研究。使用 <sup>99m</sup>Tc 放射活性乃依臨床腦造影分佈調整不同濃度溶液注入紋狀體之左右尾核及殼核以及其他大腦腔，以擬人化條件完成假體放射活性製作。標的物：背景值相關調配比例約在 1.5:1 至 4:1 範圍，這相當於標的物特異攝取值在 0.5 至 3 範圍。填充假體以雙頭全功能造影儀配以 LEHR 準直儀為主進行 SPECT 腦造影。收錄資料以 2 組不同影像重建方法來處理：1) 傳統 filtered back projection (FBP)，2) 定量 SPECT 影像重建法 QSRS (quantitative SPECT reconstruction system)，包括衰減修正、散射修正、解析度恢復和影像雜訊消滅，讓 SPECT 影像定量後，更近於 PET 的準確性。原始影像資料經由不同重建方式處理，以準確預測腦部各區活性，最高影像均勻度和臨床便利性為原則以決定最佳造影參數條件，藉此建立 TRODAT-1 SPECT 在儀器間造影方式標準化參考。

結果顯示，採用定量 QSRS 重建方式處理與真實活度比率在兩側紋狀/背景比及右尾/殼核比都比傳統 FBP 重建方法，有較高準確性。在左尾/殼核比方面，準確性相似；以腦紋狀體作對稱性比較亦顯示 QSRS 較 FBP 有較高準確性。

藉特製紋狀體假體的應用，可觀察到目視及處理後最適化影像所需參數並藉結構對位融合後獲得標的物半量化特異攝取值資料與影像，利用目視及加馬計數儀測得實際活性間作比較，以獲一致性分析結果提供臨床參考；然而，對腦活性明顯不足者的影像分析仍需進一步評估。

關鍵詞：<sup>99m</sup>Tc-TRODAT-1、紋狀體腦假體、影像定量分析、造影條件最佳化

### Abstract

<sup>99m</sup>Tc-TRODAT-1 is a unique SPECT tracer to detect functional impairment of dopamine transporter in human brain and measure the activity of dopamine nervous system in vivo. It has been approved as a clinical imaging tracer covered by national healthcare system in Taiwan and further expands clinical usage to many other areas, such as China, certain Asian and American countries. Despite achievement of TRODAT-1 has been made so far, the imaging quantitative analyses for this tracer remain left behind. Visual interpretation and semi-quantitative analysis are two commonly used methods. Nonetheless the consistency and accountability are unstable and sensitive subjecting to how one feels like to draw region of interests (ROI) for image analysis.

To overcome the challenges, this research project utilized a striatal phantom filled with various concentrations of <sup>99m</sup>Tc solution in caudate, putamen as striatum and cortical shell to simulate human condition and to develop relative stable analysis method. The ratio of striatum to cortical shell (SBR) will be varied from 1.5:1 to 4:1 which will give specific binding ratio (SBR) from 0.5 to 4.0 ranges. SPECT data acquisition will be performed mainly by a SPECT/CT camera equipped with LEHR collimator. Image will be reconstructed with traditional filter back-projection (FBP) using the vendor provided processing platform and then reconstruction with a quantitative recon algorithm as Quantitative SPECT Reconstruction System (QRSRS) as a type of reconstruction incorporated with corrections for attenuation, scatter, collimator blur and image noise to produce quantitative brain SPECT images. Image uniformity and other related measurement such as striatum/background ratio (SBR), caudate to putamen ratio (CPR), target to background ratio (TBR) and absolute <sup>99m</sup>Tc activities in regions will be analyzed to determine the performance of both reconstruction approaches and the optimal image acquisition parameters. We found a better quantitative accuracy in bilateral SBR and right CPR using QSRS method compared to FBP method and comparable in left CPR using both methods. Symmetrical measurements of bilateral striatum were also more accurate using QSRS than that of FBP.

The study provided a way to establish the imaging standard for major SPECT and SPECT/CT cameras and created a significant impact to improve consistency of

TRODAT-1 SPECT. Further evaluation for those with apparently low brain uptake however, is still needed.

Keywords:  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1、, Striatum phantom、Image quantitative analysis、Imaging optimization

## I. 前言

[ $^{99m}\text{Tc}$ ]TRODAT-1, [2-[[[3-(4-chlorophenyl)-8-methyl-8-azabicyclo[3,2,1]-oct-2-yl]methyl](2-mercaptoethyl)amino]ethyl]amino]ethanethiolato(3-)-N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>]oxo-[1R-(exo-exo)] 已是核研所開發經衛署核可臨床(健保)使用[衛署藥製字第 R000023 號。適應症：對紋狀體區突觸前神經末梢處之多巴胺轉運體之標示顯影劑]的單光子斷層造影(SPECT)主要放射製劑，儘管  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 有很多優勢，但據悉目前臨床推廣及應用仍有限制如：各核醫單位所呈現的影像一致性即有很大落差。 $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 與  $^{123}\text{I}$ -FP-CIT 臨床適應症類似，常規使用上，前者並不遜於後者。但歐洲核醫學會於 2007 年即針對  $^{123}\text{I}$ -FP-CIT (DaTSCAN) SPECT 進行多中心、系統性歐洲資料庫研究[Eur J Nucl Med Mol Imaging 2010; 37 (Suppl2): S198-311.]，從個人差異到使用儀器軟、硬體條件、製劑劑量、造影時機、分析及判讀標準等均有規範；2010 年更提供會員國校正技術服務等作為影像一致性參考，期能在臨床上有效應用，這可作為我們借鏡。特別是當此一製劑已在國內、外臨床使用的此刻，臨床品管資料常見使用者詢問信函，儘速及儘可能多面向探討及訂定 Tc- $^{99m}$  TRODAT-1 臨床影像標準化乃無可避免的趨勢。我國目前似無法如上述機構大規模進行全面性品管提升，但隨同核醫軟、硬體與醫工物理的進步，是可以利用影像截取與後處理方式，針對重要部分進行影像品質提升。

## II. 主要內容

$^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1: [2-[[[3-(4-chlorophenyl)-8-methyl-8-azabicyclo[3,2,1]-oct-2-yl]methyl](2-mercaptoethyl)amino]ethyl]amino]ethanethiolato(3-)-N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>]oxo-[1R-(exo-exo)]，是一種 cocaine 類似物，可結合於多巴胺轉運體 (dopaminergic transporters) [Kung, 1997]。最早由美國賓州大學孔繁淵教授等研發而成[Kung, 1997; Meegalla, 1997; Kushner, 1999]並於 1996 年獲美國核醫學會傑出影像(Image of the year)殊榮；特別之處是使用  $^{99m}\text{Tc}$  及簡化組套方式(Kits)供臨床使用。目前核研所開發的  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 已是衛生署查核通過有關神經受體分子影像的放射製劑，其適應症為對紋狀體區突觸前神經末梢處之多巴胺轉運體之標示。

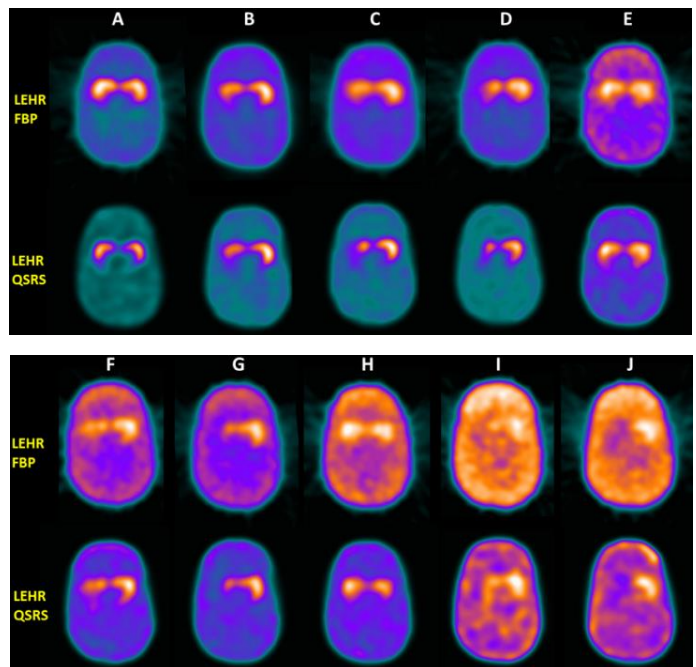
儘管  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 已是臨床(健保)核可適應症：對紋狀體區突觸前神經末梢處之多巴胺轉運體 (dopaminergic transporters) 之標示顯影劑使用的單光子電腦斷層造影的主要放射製劑[Tzen, 2001; Huang, 2001; 2003; 2004; Yen, 2002; 2004]，其優勢也很多，後續臨床推廣及應用則仍有其限制如：各核醫單位所呈現的影像一致性即有很大的落差。

我國目前似無法大規模進行全面性品管提升，但期能針對重要部分逐步進行。本研究旨在(1).利用假體針對

影像處理參數如前處理常用濾波器之 cutoff frequency 或 order、衰減校正方法與程序及輪廓分割判斷值、影像重建方法 FBP 或 OSEM 及其參數 iteration, subset 等調整，進行  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 臨床影像處理參數最適化組合探討，提升與實際活性一致性或作為儀器間影像比較標準化，(2). 將此參數最適化組合應用於臨床，以提高核醫醫師判讀一致性及臨床醫師使用方便性，亦有助國內未來推動院際影像資源分享的達成。

## III. 結果與討論

影像顯示不同濃度及比例組別(A-J)。造影以雙探頭全功能 SPECT/CT 造影儀來進行 (Siemens Symbia T SPECT/CT)。雙探頭為 180 度組態，於 360 度軌道採集 128 張，每 2.8125 度一張。數據採集採用 LEHR (low energy high resolution) 幾何結構的準直器來進行。資料分別使用 2 組不同的影像重建方法來處理：1) 傳統 FBP，2) 定量 SPECT QSRs 影像重建法，此重建方法包括衰減修正，散射修正，解析度恢復和影像雜訊消滅，讓 SPECT 定量後，更接近於 PET 的準確性。



## IV. 結論

由於  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 對腦紋狀體多巴胺轉運體有攝取專一性，所產生的紋狀體影像對比性尚佳，如能藉影像濾波器及其參數調整可使其影像更準確反應出其實質變化，不但可讓不同儀器間作影像比對，有利於醫師間相互判讀，也可在臨床應用上進一步推廣，成為常規化。此研究結果可應用於國內其他醫院，甚至拓展到目前使用此一製劑的國外核醫單位，期以多面向探討  $^{99m}\text{Tc}$ -TRODAT-1 臨床影像的標準制定並達臨床確效性，將藥物銷售、影像品質和診斷率保證計劃三者結合為藥物應用推廣的完整配套(package)，讓此一國內核研所首例成功研發、製造及技轉應用的核醫製劑能提供全方位服務給使用者，而非只作單純藥物銷售。

## 參考文獻

- [1] Acton PD, Kushner SA, Kung MP, et al. Simplified reference region model for the kinetic analysis of [99mTc]TRODAT-1 binding to dopamine transporters in nonhuman primates using single-photon emission tomography. *Eur J Nucl Med* 1999; 26: 518-26.
- [2] Adler CH. Differential diagnosis of Parkinson's disease. *Med Clin North Am*, 1999; 83: 349-67.
- [3] Chen CH, Muzic RF Jr, Nelson AD, Adler LP. A Non-Linear Spatially-Variant Object-Dependent System Model for Prediction of Partial Volume Effects and Scatter in PET. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 1998; 17(2):214-27.
- [4] Eising EG, Müller T, Freudenberg L, et al. SPECT imaging with [123I]-beta-CIT in Parkinsonism: comparison of SPECT images obtained by a single-headed and a three-headed gamma camera. *Nucl Med Commun* 2001; 22: 145-50.
- [5] Gelb DJ, Oliver E, Gilman S. Diagnostic criteria for Parkinson disease. *Arch Neurol* 1999; 56: 33-9.
- [6] Hesse S, Barthel H, Schwarz J, Sabri O and Muller U: Advances in in vivo imaging of serotonergic neurons in neuropsychiatric disorders. *Neurosci Biobehav Rev* 2004; 28:547-63.
- [7] Huang WJ, Yao WL, Wey SP, Ting G. Reproducibility of 99mTc-TRODAT-1 SPECT measurement of dopamine transporters in Parkinson's disease. *J Nucl Med* 2004; 45: 207-13.(b)
- [8] Huang WS, SZ Lin, JC Lin, SP Wey, G Ting, RS Liu. Evaluation of early-stage Parkinson's disease with [Tc-99m] TRODAT-1 imaging. *J Nucl Med* 2001; 42: 1303-8.
- [9] Huang WS, Chiang YH, Lin JC, et al. Cross-over study of Tc-99m TRODAT-1 SPECT and F-18 FDOPA PET in Parkinson's disease patients. *J Nucl Med* 2003; 44: 999-1005.(b).
- [10] Huang WS, Lee MS, Lin JC, et al. Usefulness of Tc-99m TRODAT-1 SPECT for the evaluation of Parkinson's disease. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2004; 31: 155-61.
- [11] Hughes Aj, Daniel SE, Kilford L, et al. Accuracy of clinical diagnosis of idiopathic Parkinson's disease: a clinicopathological study of 100 cases. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1992;55:1142- 6.
- [12] Jellinger K. The pathology of Parkinson's disease. In: Calne D, Calne SM, eds. *Advances in Neurology*, Vol. 86, Parkinson,s disease. New York, Lippincott, 2001; pp. 55-72.
- [13] Koller W, Montgomery E. Issue in the early diagnosis of Parkinson's disease. *Neurology* 1997; 49(suppl 1): S10-25.
- [14] Kushner SA, McElgin WT, Kung MP, et al. Kinetic modeling of Tc-99m TRODAT-1: a dopamine transporter imaging agent. *J Nucl Med* 1999;40:150-8.
- [15] Kung MP, Stevenston DA, Plossl K, et al. Tc-99m TRODAT-1: a novel technetium-99m complex as a dopamine transporter imaging agent. *Eur Nucl Med* 1997; 24: 372-80.
- [16] Li SC, Schoenberg BS, Wang CC, et al. A prevalence survey of Parkinson's disease and other movement disorders in People's Republic of China. *Arch Neurol* 1985; 42: 655-7.
- [17] Løkkegaard A, Werdelin LM, Friberg L. Clinical impact of diagnostic SPET investigations with a dopamine re-uptake ligand. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2002; 29: 1623-9.
- [18] Marshall V, Grosset D. Role of dopamine transporter imaging in routine clinical practice. *Mov Disord* 2003; 18: 1415-23.
- [19] Martin WR. Magnetic resonance imaging and spectroscopy in Parkinson's disease. In: Calne D, Calne SM, eds. *Advances in Neurology*, Vol. 86, Parkinson,s disease. New York, Lippincott, 2001; pp. 197-203.
- [20] Meegalla SK, Plossl K, Kung MP, et al. Synthesis and characterization of technetium-99m-labeled tropanes as dopamine transporter-imaging agents. *J Med Chem* 1997; 40: 9-17.
- [21] Meder JF. Henry-Feugeas MC, Oppenheim C. Dementia: role of imaging. *J Radiol* 2003; 84: 1819-28.
- [22] Mosley PD, Schneider JS, Acton PD, et al. Binding [99mTc] TRODAT-1 dopamine Transporter in patients with Parkinson's disease and in healthy volunteers. *J Nucl Med* 2000; 41: 584-589.
- [23] Parkinson Study Group. A multicenter assessment of dopamine transporter imaging with DOPACAN/ SPECT in Pakinsonism. *Neurology* 2000; 55: 1540-7.
- [24] Sendecor GW, Cochran WG. Specific indeces of interater relaiability. In: Snedecor WG, eds. *Statistical Methods*, 6<sup>th</sup> ed. Ames, IO; Iowa State University Press, 1989; pp. 147-56.
- [25] Stolze H, Kuhtz-Buschbeck JP, Drucke H, et al., Comparative analysis of the gait disorder of normal pressure hydrocephalus and Parkinson's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 2001; 70: 289-97.
- [26] Tikofsky RS, Ichise M, Seiby JD, Verhoeff N. Functional brain SPECT imaging: 1999 and beyond In: Freeman LM, ed. *Nuclear Medicine Annual*, Lippincott, New York, 1999; pp. 209-220.
- [27] Tolosa E, Wenning G, Poewe W. The diagnosis of Parkinson's disease. *Lancet Neurol* 2006; 5: 75-86.
- [28] Tseng LY, Chen CH, Chou KL, Liu RS, Rota Kops E, Herzog H, Chen JC. A newly developed apparent-contrast random-ratio (AC RR) dependent PSF model for MRI based partial volume correction in PET. *J Nucl Med Tech* 2005;2:1-7.
- [29] Tsuchuda T, Ballinger JR, Vines D, et al. Reproducibility of dopamine transporter density measured with 123I-FPCIT SPECT in normal control and Parkinson's disease patients. *Ann Nucl Med* 2004; 18: 609-16.
- [30] Tzen KY, Lu CS, Yen TC, Wey SP, Ting G. Differential diagnosis of Parkinson's disease and vascular parkinsonism by (99m)Tc-TRODAT-1. *J Nucl Med* 2001; 42: 408-13.
- [31] Wang Y, Shi YM, Wu ZY, et al. Parkinson's disease in China. *Chin Med J* 1991; 104: 960-4.
- [32] Wang SJ, Fuh JL, Liu CY, et al. Parkinson's disease in Kin-Hu Kinmen: a community survey by neurologists. *Neuroepidermiology* 1994; 13: 69-74.

- [33] Weng YH, Yen TC, Chen MC, et al. Sensitivity and specificity of <sup>99m</sup>Tc-TRODAT-1 SPECT imaging in differentiating patients with idiopathic Parkinson's disease from healthy subjects. *J Nucl Med* 2004; 45: 393-401.
- [34] Yen TC, Tzen KY, Chen MC, et al. Dopamine transporter concentration is reduced in asymptomatic Machado-Joseph disease gene carriers. *J Nucl Med* 2002; 43: 153-

# 探討使用奈米核醫藥物銻-188-微脂體多次劑量治療人類非小細胞肺癌及頭頸癌原位小鼠模式之藥理研

## The pharmacokinetic study of multidose rhenium-188-liposome administration in human NSCLC and HNSCC tumor-bearing mice model

計畫編號：104-NU-E-010-006-NU

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫主持人：李易展

e-mail：[yjlee2@ym.edu.tw](mailto:yjlee2@ym.edu.tw)

共同主持人：李德偉

計畫參與人員：張志賢、游祥霖、張淳媛

執行單位：陽明大學生物醫學影像暨放射科學系

### 摘要

臨床上對惡性腫瘤最有效之治療方式為手術切除，而複雜的骨骼及神經血管構造增加了治療困難度。輔佐以放射或化學治療已行之有年，近來使用聚乙二醇化 (polyethylene glycol, PEG) 的微脂體包覆藥物，證實可延長藥物體內循環時間，也可藉由滲透及停滯增強效應 (EPR) 穿過腫瘤疏漏血管達成積聚效果。此外，使用可放射貝他粒子及伽馬射線之核種銻-188，可同時具有治療及示蹤能力，使此類藥物於臨床上占有一席之地。且由核能研究所開發之「銻-188-微脂體」已被證實為一種穩定且安全的奈米化核醫藥物，業於食藥署認可下進入第一期臨床試驗。本團隊過去成果中，也呈現銻-188-微脂體於人類肺癌及頭頸癌小鼠之藥物動力學及輻射劑量評估，顯示其非但可有效積聚於腫瘤，所累計輻射劑量也在安全限值下，證實臨床應用之可行性。然而，單劑治療僅能提供短暫抑癌能力，顯示單劑銻-188-微脂體於臨床應用尚待突破，多劑治療是否能延長循環時間或降低肝脾積聚仍待探討。至此，本計劃旨在針對多劑型銻-188-微脂體於荷腫瘤小鼠模式進行療效評估，並且合併臨床使用之化療藥物 5-FU 探討銻-188-微脂體於荷腫瘤小鼠模式之療效評估，期望藉由多劑型銻-188-微脂體與單劑型合併化療藥物 5-FU 之治療下能對於頭頸癌之治療有更佳療效，期能作為前臨床測試的資訊，成為未來此類奈米藥物發展之利基。

關鍵詞：銻-188-微脂體、5FU、分子影像、頭頸癌

### Abstract

According to the Ministry of Health and Welfare annual cancer registration report, head and neck cancer is listed the most lethal cancer among all cancers in Taiwan. Surgical resection is the standard protocol for the cure of both cancers. Regarding the locations of both cancers, the surgical process is greatly restricted by the anatomical barriers, such as skull base bones and vessels. Adjuvant radiotherapy and chemotherapy become critical in cancer treatments to achieve complete response. However, the systemic administration of chemotherapy usually occurs severe side effects. Recently, the PEGylated liposomal drugs have been developed for a better accumulation and resident time in tumor location. The enhanced permeability

and retention (EPR) effect is a special environment caused by the leaky blood vessel networks established by tumor tissue. Liposomal drugs can easily pass through the immature vasculatures, and specifically accumulate inside the lesions. In addition, the liposomal drugs are encapsulated with a potential theranostic radioisotope, rhenium-188 who emits emitted therapeutic beta-particles and detectable gamma-rays, for enhancing therapeutic efficacy through radiotherapy in short distance. In our previous results, we had successfully manufactured the rhenium-188 liposome and demonstrated the clinical value of rhenium-188 liposome in both orthotopic lung and hypopharyngeal carcinoma by an overall evaluation of pharmacokinetic and internal dosimetry. Despite the stability and safety had indicated the clinical applicability, the treatment of rhenium-188 liposome was found only temporarily suppressed the tumor growth for 2 weeks, suggesting single dose may not sufficient for complete tumor control. Therefore, the multiple dose or split dose of rhenium-188 liposome may be an effective way to improve the therapeutic efficacy, but the systemic pharmacokinetic, bio-distribution and the internal radiation dosimetry of multiple rhenium-188 liposome administration are still unclear. In this study, we evaluated therapeutic efficacy with multimodality molecular imaging. To investigate the therapeutic efficacy of Head and Neck cancer animal model after double injections of rhenium-188 liposome or single injection of rhenium-188 liposome in combination with 5-FU. Taken together, the results of this project are believed to provide concrete information for future application of the <sup>188</sup>Re-liposome in clinical cancer therapy.

Keywords: Liposome embedded Re-188 radiopharmaceutical, HNSCC, multimodality molecular and genetic imaging

### I. 前言

在先前研究中，本實驗室成功使用病毒系統建構帶有報導基因之頭頸癌細胞株，包含人類口腔癌細胞 SAS、人類下咽部上皮細胞癌 FaDu 細胞及 OECM-1 細胞等。前述細胞株具穩定表現綠色螢光蛋白 (green fluorescence protein)、螢火蟲螢光酶 (firefly luciferase)、

以及第一型簡單疱疹病毒胸腺嘧啶激酶 (HSV1-tk)等三種分子造影功能。並且證實小鼠接植有原位頭頸癌並注射銻-188-微脂體後可確實利用單光子造影技術發現確實有積聚效果。利用螢光蛋白做細胞分選後取得穩定表現報導基因之細胞株，並使用 IVIS 系統取得細胞數量與冷光強度之正相關性。胸腺嘧啶激酶之活性則使用氚標定之胸腺嘧啶類似物 2'-fluoro-2'-deoxyarabinofuranosyl-5-ethyluracil(FEAU) 或利用 123I -1-(2-deoxy-2-fluoro-1-D-arabinofuranosyl)-5-iodouracil (FIAU)攝取實驗予以定量。動物模式使用裸鼠於原位接植，並使用 IVIS -50 系統以非侵入之方式追蹤其冷光訊號作為腫瘤生長訊號之評估。進一步地我們將植有人類頭頸癌腫瘤之裸鼠，進行奈米型藥物銻-188-微脂體之療效評估，並對照銻-188 於局部細胞之造影效果與細胞本身之核子醫學造影探針，以證明此類微脂體奈米藥物確實可抑制原位頭頸癌的生長。接續先前研究，本計劃擬使用已建立人類頭頸癌之原位小鼠模式，並利用體外光學及核子醫學造影技術追蹤評估雙劑型奈米藥物與單劑型奈米藥物合併臨床第一線化療藥物配合定量評估治療效果，以期獲得整體並有利的人類頭頸癌治療或抑制效果證明，在未來將此類藥物送上臨床，為癌症病患之一大福音。

## II. 主要內容

本實驗室已成功建立人類肺癌與頭頸癌小鼠模式，透過銻-188-微脂體藥物，完成對人類頭頸癌及肺癌的治療效果探討。先前研究證實銻-188-微脂體藥物可透過 (Enhanced Permeability and Retention effect) EPR 效應使其專一地累積在植入人類 FaDu 頭頸癌及 H292 肺癌腫瘤的小鼠原位接植 (orthotopic implantation),並可以與分子影像相輔相成。透過生物體分布評估分析 (Bio-distribution)、療效評估、藥物動力學、輻射劑量評估、以及多模組分子核醫造影分析,具體呈現了銻-188-微脂體藥物抑制人類頭頸癌及肺癌的效果，然單劑型劑量之銻-188-微脂體藥物於研究結果顯示僅可提供短暫之抑癌效果，顯示多劑型之銻-188-微脂體藥物抑或是單劑型搭配化療藥物或許能達到更好之療效。本研究計畫中，利用銻-188-微脂體藥物於人類頭頸，癌模式之小鼠模式為基礎探討其抑癌之分子機制,並進一步探討銻-188-微脂體藥物合併第一線化療藥物 5-FU 與雙劑型銻-188-微脂體藥物是否也可在小動物體內更具抑癌生長之療效,以及是否能有效降低系統毒性。以此為目的,本研究將提供人類頭頸癌於小鼠模式中更佳的治疗方式，並可提供前臨床有用之相關治療資訊。

總結來說，本計畫之實驗目的可歸納如下：

1. 探討銻-188-微脂體藥物於小鼠模式中之抑癌分子機制探討。
2. 研究雙劑型銻-188 微脂體藥物於荷人類頭頸部腫瘤小鼠之療效評估。
3. 評估單劑型銻-188 微脂體合併化療藥物 5-FU 抑制人類頭頸癌原位接植模式小鼠 生長之療效評估。

## III. 結果與討論

### 第一部分-單劑量銻-188 微脂體於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式之分子機制探討

本實驗室於先前研究已完整呈現單劑量給予銻-188 微脂體於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式之藥物動物學與生物分佈等相關實驗數據，並於結果發現銻-188 微脂體可積聚於病灶處;除此之外，利用非侵入式之光子造影方式觀察腫瘤生長情形,更發現此核醫奈米藥物可抑制腫瘤生長，並延長小鼠存活期(圖四-六)，本實驗室進一步將小鼠犧牲並取下腫瘤,將其樣本進行 microarray 分析,探討銻-188 微脂體抑制癌症生長之分子機制，於分析結果中發現其中與腫瘤生長轉移有密切關係之微核糖核酸 microRNA 內其中一 let7 家族中 let7i 之表現有所關連(圖七)，其後本實驗室更進一步利用 let7i 之抑制劑探討在此抑制劑處理下是否可使腫瘤抑制現象消失,於結果中發現當抑制此微核糖核酸 let7i 之表現後，於細胞實驗中之生長曲線、細胞群落形成 等實驗觀察到當抑制 let7i 表現後，癌細胞生長速度皆較控制組明顯增加;於動物實驗中也顯示在抑制劑之處理下給予銻-188 微脂體,抑癌效果明顯消失(圖八)，此研究結果目前已完成科學論文之撰寫，並預計投稿至國際期刊。綜合以上之研究結果，將可提供銻-188 微脂體於臨床治療時更多治療方針之選擇。

### 第二部分-雙劑量銻-188 微脂體於頭頸癌荷腫瘤小鼠模式之療效評估

根據實驗室先前研究結果顯示,銻-188 微脂體於小鼠模式上可明顯抑制人類非小細胞肺癌與頭頸癌之腫瘤生長;然而，於研究成果顯示頭頸癌模式之抑癌效果較為短暫，為使抑癌效果延長並能使研究成果與臨床接軌，本研究利用雙劑型銻-188 微脂體探討其療效評估。於實驗第 0 與第 7 日分別給予 80%MTD 約 640  $\mu$  Ci 之銻-188 微脂體藥物，並於不同時間點以非侵入方式觀察腫瘤生長情形,由結果顯示，雙劑量之銻-188 微脂體藥物給予，雖可達到更佳之抑癌效果(圖十)，但於生長存活曲線上差異並不明顯,推測是雙劑量給予之毒性所造成，此部分仍待未來雙劑量之生物分佈與藥物動力學等測試來了解其中原因。

### 第三部分-單劑量銻-188 微脂體合併化療藥物 5-FU 之療效評估

由前述實驗結果，本實驗室利用銻-188 微脂體藥物合併臨床現行藥物-5-FU,期望能藉由合併藥物治療達到比單劑量更好的抑癌效果,在給予銻-188 微脂體藥物 24 小時後，以尾靜脈注射 100  $\mu$  g/ml 劑量之 5-FU，之腫瘤生長追蹤與療效評估結果。實驗室先前曾進行於銻-188 微脂體藥物注射後 1 小時即給予相同劑量 5-FU 然於結果中發現,單獨處理 5-FU 之組別抑癌效果並不明顯,推測可能是劑量不足或是 5-FU 之藥物機轉應用於此人類頭頸癌細胞株之效果較差，除此之外亦兩種藥物若於太密集時間給予,將造成太大毒性並造成小鼠體重

減輕過快於短時間(約 10 天)內因體重減輕等因素死亡，然而在參考文獻並修正 5-FU 給予時間後可於光子定量圖中發現合併處理組別可達更佳之腫瘤抑制效果，但是由平均存活曲線中發現，合併處理藥物組別之合併處理藥物組別之平均存活天數與單劑型並無差異(圖十一)，此一現象可能是由於之數過少所造成，目前已著手進行大規模數量之療效評估，此研究結果若搭配後續藥物動力學與生物分佈等數據將可作為臨床前研究相關資訊。

#### IV. 結論

本計畫之研究成果，就肺癌研究方面已經刊登於 Journal of Nuclear Medicine (Journal of Nuclear Medicine, 2014; 55:1 – 7)。我們建立了肺癌與頭頸癌的原位腫瘤小動物模式對藥物的前臨床研究，且進一步探討腫瘤生長的微環境是否會影響銻-188-微脂體藥物對療效的影響，於頭頸癌的治療則是可透過各種分子影像模組看到明顯的藥物積聚，早期腫瘤的抑制也顯著，但是後期則不明顯，似乎也影響了動物的存活時間。因此，頭頸癌的生長環境可能不適合單一劑量的銻-188-微脂體發揮最大效果，必須改善治療劑量及時間，因此本年度計畫針對於雙劑量之藥物針與單劑量合併化療藥物之療效評估，發現此兩種治療之療效皆比單次治療效果好因此後續研究將針對有關可能的機制做探討。目前銻-188-微脂體已經進入臨床一期的藥物試驗，也透過核能研究所的合作申請中華民國、美國及歐盟等專利。在社會氛圍對核能有疑慮的情況下，核子醫學的研發應用應該要加強深化，以期許改善國人觀念，或者將核能研究的能量導向對人體健康有幫助的醫學研究，將可提高核能應用的接受度。

#### 參考文獻

- [1] Maeda, H., The enhanced permeability and retention (EPR) effect in tumor vasculature: the key role of tumor-selective macromolecular drug targeting. *Adv Enzyme Regul*, 2001. 41: p. 189-207.
- [2] Greish, K., Enhanced permeability and retention (EPR) effect for anticancer nanomedicine drug targeting. *Methods Mol Biol*, 2010. 624: p. 25-37.
- [3] Emfietzoglou, D., et al., Liposome-mediated radiotherapeutics within avascular tumor spheroids: comparative dosimetry study for various radionuclides, liposome systems, and a targeting antibody. *J Nucl Med*, 2005. 46(1): p. 89-97.
- [4] Ho, E.A., et al., Characterization of cationic liposome formulations designed to exhibit extended plasma residence times and tumor vasculature targeting properties. *J Pharm Sci*, 2010. 99(6): p. 2839-53.
- [5] Ma, Y., et al., Nanoparticles of Poly(Lactide-Co-Glycolide)-d-a-Tocopheryl Polyethylene Glycol 1000 Succinate Random Copolymer for Cancer Treatment. *Nanoscale Res Lett*, 2010. 5(7): p. 1161-9.
- [6] Mohanty, C., et al., Curcumin-encapsulated MePEG/PCL diblock copolymeric micelles: a novel controlled delivery vehicle for cancer therapy. *Nanomedicine (Lond)*, 2010. 5(3): p. 433-49.
- [7] Wan, Y., et al., Anti-tumor activity of biodegradable polymer-paclitaxel conjugate micelles on Lewis lung cancer mice models. *J Biomater Sci Polym Ed*, 2011. 22(9): p. 1131-46.
- [8] Wang, T., V.A. Petrenko, and V.P. Torchilin, Paclitaxel-loaded polymeric micelles modified with MCF-7 cell-specific phage protein: enhanced binding to target cancer cells and increased cytotoxicity. *Mol Pharm*, 2010. 7(4): p. 1007-14.
- [9] Edelman, M.J., et al., Targeted radiopharmaceutical therapy for advanced lung cancer: phase I trial of rhenium Re188 P2045, a somatostatin analog. *J Thorac Oncol*, 2009. 4(12): p. 1550-4.
- [10] Keng, G.H., et al., Preliminary experience in radionuclide therapy of hepatocellular carcinoma using hepatic intra-arterial radio-conjugates. *Ann Acad Med Singapore*, 2002. 31(3): p. 382-6.
- [11] Chang, Y.J., et al., Therapeutic efficacy and microSPECT/CT imaging of 188Re-DXR-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor model. *Nucl Med Biol*, 2010. 37(1): p. 95-104.
- [12] Chen, M.H., et al., MicroSPECT/CT imaging and pharmacokinetics of 188Re-(DXR)-liposome in human colorectal adenocarcinoma-bearing mice. *Anticancer Res*, 2010. 30(1): p. 65-72.
- [13] Chen, L.C., et al., Pharmacokinetics, dosimetry and comparative efficacy of 188Re-liposome and 5-FU in a CT26-luc lung-metastatic mice model. *Nucl Med Biol*, 2012. 39(1): p. 35-43.
- [14] Hong, H., et al., Non-invasive cell tracking in cancer and cancer therapy. *Curr Top Med Chem*, 2010. 10(12): p. 1237-48.
- [15] Cortesi, M., et al., New prospective for non-invasive detection, grading, size evaluation, and tumor location of prostate cancer. *Prostate*, 2010. 70(15): p. 1701-8.
- [16] Miyagawa, M., et al., Non-invasive imaging of cardiac transgene expression with PET: comparison of the human sodium/iodide symporter gene and HSV1-tk as the reporter gene. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2005. 32(9): p. 1108-14.
- [17] Ibrahimi, A., et al., Highly efficient multicistronic lentiviral vectors with peptide 2A sequences. *Hum Gene Ther*, 2009. 20(8): p. 845-60.

# 探討奈米藥物銻-188-微脂體多次劑量於卵巢癌細胞代謝再調控之影響

## Exploration on the metabolic reprogramming of <sup>188</sup>Re-Liposome on ovarian cancer cells by multiple dose effect:

計畫編號：MOST 104-NU-E-010-004-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：莊其穆

e-mail：cmjuang@yahoo.com.tw

執行單位：國立陽明大學醫學系婦產學科

### 摘要

本年度研究目的在探討不同藥物傳遞路徑對於輻射耐受性卵巢癌細胞代謝再調控的影響情形。建立輻射耐受性卵巢癌細胞在免疫缺乏小鼠orthotopic模式下，經由腹腔或靜脈注射<sup>188</sup>Re-Liposome後，採集腫瘤組織進行初代培養，進而分析腫瘤細胞經不同治療後氧氣消耗率及乳酸形成率藉以評估細胞傾向的代謝路徑。另外，檢測細胞內粒線體膜電位、活性氧含量與ATP含量變化則用於驗證多次劑量給予銻-188微脂體腹腔治療可以反轉腫瘤細胞代謝路徑，由原本表現在癌幹細胞以醣解為主的能量產生方式，轉變為以氧化磷酸化產生能量的分化型腫瘤細胞模式。利用Western blot與定量PCR分析p53基因結果顯示，<sup>188</sup>Re-Liposome腹膜腔給藥對於卵巢癌細胞具有顯著增加p53表現的效果。在將p53剔除的抗放射性細胞中證實，<sup>188</sup>Re-Liposome可以促進卵巢癌細胞趨向上皮細胞型態。綜合以上研究結果顯示，利用腹膜腔注射<sup>188</sup>Re-Liposome可以經由促進腫瘤細胞表現p53，改變細胞分化型態等方式，達到抑制腫瘤生長效果並降低腫瘤細胞轉移分化。本研究結果在相關機制探討的部分提供了銻-188-微脂體放射藥物對於腫瘤細胞代謝路徑影響的可能調控機制。在臨床上有助於未來對於輻射耐受性的卵巢癌病患，可以嘗試使用<sup>188</sup>Re-Liposome進行治療。

關鍵詞：卵巢癌、銻 188-微脂體、代謝再調控、輻射耐受性卵巢癌細胞

### Abstract

This study focused on discovering the effect between various drug delivery routes on drug-resistant ovarian cancer cells and the regulation of metabolic reprogramming. First, radio-resistant ovarian cancer cells were inoculated in the immune deficiency mice in an orthotopic model, and <sup>188</sup>Re-Liposome was injected by intraperitoneal (i.p.) or intravenous (i.v.). Treated tumor tissues were collected for primary culture at the time of sacrifice. The rates of oxygen consumption and lactate formation in the tumor cells were analyzed to assess metabolic pathway. In addition, mitochondrial potential change, reactive oxygen species (ROS), and the amount of ATP also supported that <sup>188</sup>Re-Liposome is able to reverse metabolic reprogramming by multiple doses. The metabolism of tumor cells transferred from glycolysis to oxidative phosphorylation as differentiated cells. Western blot and qPCR were used to analyze p53 gene expression, and showed a significant p53 gene increase with the treatment

of <sup>188</sup>Re-Liposome on ovarian cancer cells by intraperitoneal injection. In p53 knockout radio-resistant cell lines, <sup>188</sup>Re-Liposome could induce differentiation of ovarian cancer cells to epithelial cells. In conclusion, i.p. injection of <sup>188</sup>Re-Liposome could induce p53 expression and revise cell differentiation to suppress tumor growth and metastasis. This result establish a possible mechanism of how <sup>188</sup>Re-Liposome regulate metabolic pathway of cancer cells, and provide a potential clinical treatment for those patients with radio-resistant ovarian cancer.

Keywords: Ovarian cancer, <sup>188</sup>Re-Liposome, Metabolic reprogramming, radiation-resistant ovarian cancer cell

### I. 前言

由於癌細胞經常具有將葡萄糖代謝產生乳酸的能量代謝異常模式，所謂的 Warburg effect<sup>1,2</sup>，而癌細胞透過 Warburg effect 可能導致癌細胞對於化、放療的耐受性，藉由逆轉癌細胞的 Warburg effect 可以回復癌細胞對相關藥物的敏感性。過去對於銻-188-微脂體在卵巢癌動物模式下的治療效果評估與癌幹細胞毒殺效應研究中顯示，腹腔注射奈米化銻-188 藥物對於療效與腫瘤幹細胞抑制均有顯著效果。因此，我們想更進一步探討，銻-188-微脂體對於腫瘤細胞代謝調控的影響情形，並研究相關可能的調控機制，進而有利於尋找新的抗癌藥物標的，而調節癌症能量代謝之機制可能發展成為重要的抗癌策略。

### II. 主要內容

本年度試驗利用過去建立的卵巢癌動物模式，並建立輻射耐受性的卵巢癌細胞株進行實驗。在經由不同路徑給予放射線銻-188-微脂體治療後，摘取腫瘤組織進行細胞培養與相關代謝特性分析，主要項目包括：利用海馬生物能量測定儀分析治療後的癌細胞氧氣消耗的情形以及乳酸產生率用以評估趨於醣解代謝或是氧化磷酸化反應產生能量。粒線體膜電位變化、細胞內活性氧含量與粒線體 DNA 含量則有助於確認治療後的癌細胞代謝路徑的轉變是否與粒線體相關。另外，再利用腫瘤抑制基因 p53 剔除細胞中探討輻射耐受性的卵巢癌細胞可透過銻-188-微脂體回復其 p53 網絡系統並改變其細胞轉移特性趨向表皮細胞型態。為了驗證區域性給予銻-188-微脂體對於腹腔卵巢癌細胞的抑制效應，本試驗建立另一個卵巢癌細胞腹腔生長模式-SKOV-I6，利用腹腔注射，多次治療後，再次確立了奈米化藥物局部治療對

於腹腔腫瘤的抑制效應。

### III. 結果與討論

本年度實驗工作是收集治療後卵巢癌細胞進行細胞代謝型態分析。為了探討銻-188-微脂體對於輻射耐受性細胞radiation-resistant cell (RR)的代謝影響，首先利用多次放射線照射建立輻射耐受性卵巢癌細胞株ES-2-luc-RR，經放射線毒殺分析確定其輻射劑量耐受性後，以orthotopic方式埋植於免疫缺陷小鼠卵巢中，以靜脈 (intravenous infusion) 或腹膜腔 (intraperitoneal infusion) 注射<sup>188</sup>Re-BMEDA或<sup>188</sup>Re-Liposome進行多次治療。待治療後收集腫瘤組織進行培養，培養後的細胞依據分組分析細胞代謝特性，從氧氣消耗率 (OCR) 與細胞外酸度 (ECAR) 比例可以發現ES-2-luc-RR細胞較原始ES-2-luc-PT細胞趨向醣解代謝，且免疫螢光染色結果同樣顯示出類似的代謝路徑型態。此外，對放射線抗性較強的卵巢癌細胞較易吸收醣類衍生物，醣類運送蛋白表現量也比較高。流式細胞儀分析細胞內活性氧與超氧陰離子含量也發現了輻射耐受性細胞具有較高的抗氧化能力，可以有效的清除細胞內的活性氧與自由基分子。上述結果顯示腹腔注射<sup>188</sup>Re-Liposome對於放射耐受性卵巢癌細胞具有反轉Warburg effect的代謝再調控作用。進一步分析處理後的癌細胞表現腫瘤抑制基因p53發現，奈米化銻-188局部治療對於卵巢癌細胞p53具有明顯提升的效應，而這樣的促進效應可以經由RNA干擾方式排除，由此可證明銻-188-微脂體可以透過活化p53網絡方式達到腫瘤生長抑制的效果。新建立的SKOV-16腹腔埋植腫瘤模式下，初步評估利用腹腔方式給予<sup>188</sup>Re-Liposome治療相較於控制組，對於癌細胞成長也有明顯抑制的情形。整合以上結果與過去研究顯示，腹腔注射<sup>188</sup>Re-Liposome透過EPR效應，促進腫瘤內銻-188的累計量，經由活化p53、促進細胞代謝翻轉為一般分化後細胞為主的醣解作用進而抑制癌組織內的腫瘤幹細胞生成，並降低癌細胞轉移、抗藥性的分化達到抑制腹腔卵巢癌細胞的效應。

### IV. 結論

近年來，腫瘤細胞代謝路徑議題在腫瘤治療策略與新興藥物開發部分扮演重要的關鍵角色<sup>3-7</sup>。本年度研究深入探討過去銻-188微脂體在卵巢癌小鼠模式上的顯著療效的相關代謝調控機轉。以往的研究證實局部給予放射藥物可有效抑制腫瘤幹細胞比例與抑制轉移及抗藥性生成。目前試驗成果闡明了<sup>188</sup>Re-Liposome腹腔注射對於輻射耐受性卵巢癌細胞的代謝再調控影響，趨向分化細胞為主的醣解作用，同時降低癌幹細胞主要進行的粒線體氧化磷酸化能量獲得路徑。而可能參與作用的機制是透過活化p53腫瘤抑制基因網絡達成。未來研究預計針對銻-188微脂體對於癌(幹)細胞代謝調控相關分子進行探討。例如粒線體型態多型性指標、細胞自噬 (Autophagy) 與粒線體自噬 (Mitophagy) 對於癌細胞自我毒殺的效應以及奈米放射性藥物對於腫瘤細胞自我清除扮演的角色進行分析。期待對於新劑型放射藥物開發提供作用機制的理論基礎。

### 參考文獻

- [1] Deberardinis RJ, Sayed N, Ditsworth D, Thompson CB. Brick by brick: metabolism and tumor cell growth. *Current opinion in genetics & development* 2008;18:54-61.
- [2] Gatenby RA, Gillies RJ. Why do cancers have high aerobic glycolysis? *Nature reviews Cancer* 2004;4:891-9.
- [3] Fantin VR, St-Pierre J, Leder P. Attenuation of LDH-A expression uncovers a link between glycolysis, mitochondrial physiology, and tumor maintenance. *Cancer cell* 2006;9:425-34.
- [4] Le A, Cooper CR, Gouw AM, et al. Inhibition of lactate dehydrogenase A induces oxidative stress and inhibits tumor progression. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2010;107:2037-42.
- [5] Michelakis ED, Sutendra G, Dromparis P, et al. Metabolic modulation of glioblastoma with dichloroacetate. *Science translational medicine* 2010;2:31ra4.
- [6] Samudio I, Harmancey R, Fiegl M, et al. Pharmacologic inhibition of fatty acid oxidation sensitizes human leukemia cells to apoptosis induction. *The Journal of clinical investigation* 2010;120:142-56.
- [7] Vinogradov S, Wei X. Cancer stem cells and drug resistance: the potential of nanomedicine. *Nanomedicine* 2012;7:597-615.

# 定量 TRODAT-1 SPECT 影像對於帕金森症治療評估之臨床價值

## The Clinical Value of Quantitative TRODAT-1 SPECT images in the Therapeutic Evaluation of Patients with Parkinson's Disease.

計畫編號：MOST 104-2623-E-758-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：魏誠佑

e-mail：yuyu@seed.net.tw

計畫參與人員：戴旭志、洪光威

執行單位：秀傳醫療財團法人彰濱秀傳紀念醫院

### 摘要

本研究針對使用低能高解析度準直器的 Trodat-1 SPECT 掃描建立影像定量分析的標準化流程，並針對年紀較高齡層建立巴金森氏症(PD)的鑑別指標，臨床應用可提高對於 PD 的診斷準確性。此研究比照 2014 年研究所建立的正常人資料，正常人及本研究 PD 病人在 60-69 歲分別為 8 及 19 位，70 歲以上分別為 8 位及 30 位，所採集的 SPECT 影像經過完整物理校正(包括：組織衰減、散射、空間且析度與圖像噪聲)，影像處理通過 MRI 與 SPECT 影像的融合，再通過 MRI 影像的標準化套用於 SPECT 影像，取得一致性的 VOI (volume of interest)，之後從 SPECT 影像獲得 caudate 與 putamen 對於 Trodat-1 藥物的絕對攝取量，並計算定量參數包含 SBR (specific binding ratio)、CPR (caudate-to-putamen ratio)及 SBRs (SBR symmetry)的對稱性等，再透過 ROC 分析取得鑑別巴金森/巴金森氏症患者的最佳閾值(cutoff)。研究結果證實 PD/PM 患的 SBR 最佳診斷鑑別 cutoff 範圍為：1) 60-69 歲=0.79，2) 70 歲以上=0.58，CPR 與 SBRs 隨著疾病的嚴重程度而產生變化。未來需更多臨床數據，建立小於 60 歲族群的 SBR cutoff 值，CPR 與 SBRs 的範圍，可對早期 PD/PM 進行診斷與分期。

**關鍵字：**TRODAT-1 單光子造影、低能高解析度準直器、多巴胺轉運體、巴金森/巴金森氏症診斷

### Abstract

The aim of this research is to establish the standardized image processing procedure for Trodat-1 SPECT and the parameter to diagnose Parkinson's disease (PD). The clinical application of this approach can improve the diagnostic accuracy of PD. This research included 65 subjects, including 16 normal healths and 49 PD, divided into 60-69 and >70 aged groups. SPECT images acquired with low-energy-high resolution (LEHR) collimator were reconstructed with full physical corrections, including attenuation, scatter, collimator blur and image noise. For each subject, SPECT and MRI images were automatically fused and registered. MRI images were normalized to the MRI template to obtain image parameters utilized to adjust SPECT images fitted with the template. Absolute Trodat-1 activity uptake in striatum was measured and used to calculate specific binding ratio (SBR), caudate-to-putamen ratio (CPR) and SBR symmetry (SBRs). Cutoff values to differentiate PD/PM and normal groups were created with

the ROC analysis. The result demonstrated that SBR cutoff for the age of 60 was 0.79 and 0.58 for the age of 70. CPR and SBRs were changed with the severity of PD. Future research would need more data from younger ages to establish the criteria for diagnosing early PD populations.

**Keywords:** TRODAT-1 SPECT, dopaminergic transporters Parkinson's disease, low-energy high-resolution collimation

### I. 前言

2014 年開始啟動針對廣用低能準直器進行造影參數最佳化、影像定量重建和正常人數數據庫建立等研究工作透過低能 parallel-hole 準直器 (low energy high resolution, LEHR) 來進行人體數據採集，以建立影像重建和 定量分析的標準流程與正常人數數據庫。

本年度計畫中，以臨床 PD 或 parkinsonism 為標的，並以所建正常資料庫為標準，通過臨床驗證建立起 PD 與 parkinsonism 的分子影像生物指標

### II. 主要內容

比照 2014 年研究所建立的正常人資料，正常人及本研究 PD 病人在 60-69 歲分別為 8 及 19 位，70 歲以上分別為 8 位及 30 位。

受測者皆接受 SPECT TRODAT-1/CT 與 MRI (T1-3D protocol) 影像檢查及 UPDRS 與 modified H-Y stage 之臨床測驗評估。

SPECT 數據採集以 GE Infinia Hawkeye SPECT/CT 進行採集 (LEHR, 128x128, zoom=1.6, 3-degree/step, 30 sec/stop, pixel size=2.76 mm)

所有 Trodat-1 SPECT 數據以定量重建技術進行重建，並使用 Amide 與 SPM 進行文狀體的 SBR、SBR-symmetry 與 CPR 測量，以建立年齡相關的 PD 與 PM 鑑別診斷標準。

### III. 結果與討論

本研究將 SPECT 影像經過定量重建，並通過 MRI 融合的方法將受測者的 MRI 影像與 MRI template 進行調整，將調整參數套用於 SPECT 可將 SPECT 影像中的 striatum 位置及大小標準化，通過固定 VOI 進行定量可去除人為圈選 ROI 的差異性，本方法學的臨床應用可提升 Trodat-1 影像定量的準確性。

#### IV. 結論

本研究證實,PD/PM 的 SBR 明顯低於健康受測者。CPR 定量數值可因疾病的嚴重程度而上升,而 SBR 的左右對稱性(SBRs)會因不同的嚴重程度下降或上升,兩項指標可做為臨床上分期的參考。

本研究結果在不同年齡分組的 cutoff: 1) 60-69 歲: SBR=0.79 CPR=0.77, 2) 70 歲以上: SBR=0.58 CPR=0.6

#### 參考文獻

- [1] Huang WS, Lin SZ, Lin JC, Wey SP, Ting G, Liu RS. Evaluation of early-stage Parkinson's disease with 99mTc-TRODAT-1 imaging. J Nucl Med. 2001 Sep;42(9):1303-8.
- [2] Weng YH, Yen TC, Chen MC, Kao PF, Tzen KY, Chen RS, Wey SP, Ting G, Lu CS. Sensitivity and specificity of 99mTc-TRODAT-1 SPECT imaging in differentiating patients with idiopathic Parkinson's disease from healthy subjects. J Nucl Med. 2004 Mar;45(3):393-401.
- [3] Shyu WC, Lin SZ, Chiang MF, Pang CY, Chen SY, Hsin YL, Thajeb P, Lee YJ, Li H. Early-onset Parkinson's disease in a Chinese population: 99mTc-TRODAT-1 SPECT, Parkin gene analysis and clinical study. Parkinsonism Relat Disord. 2005 May;11(3):173-80.

# 結合銻-188 微脂體及遠隔放射治療應用於腦轉移性黑色素瘤動物模式之治療效果

## Combination of $^{188}\text{Re}$ -liposome and teletherapy for brain metastatic Melanoma animal model

計畫編號：MOST 104-2623-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、林明暄

執行單位：財團法人馬偕紀念醫院放射腫瘤科

### 摘要

黑色素瘤是一種高度惡性以及高轉移性的腫瘤，黑色素瘤一旦發生轉移，病人五年存活率均低於 15%。黑色素瘤好發轉移的器官主要有肝、骨、大腦等處，腦轉移約佔黑色素瘤病人中的 15%，臨床症狀包括嚴重性神經缺陷、神經惡化、甚至死亡。治療策略上，頭部放射治療仍是治療腦轉移黑色素瘤的首要選擇，一般是採用少次高劑量的治療策略完成。可惜的是，分次放射治療經常造成腦部正常組織以及周邊神經組織晚期反應的傷害。儘管許多治療策略正蓬勃發展中，轉移性黑色素瘤病人的平均存活仍低於 12 個月，因此，針對腦轉移黑色素瘤臨床上仍須開發更有效的治療策略。

奈米微脂體是一種能有效運送臨床藥物的載體，透過其在血液中循環期長以及穿透腫瘤微血管的特性，奈米微脂體能將藥物特异性送達腫瘤處，大幅增加藥物的療效同時也降低藥物造成之副作用。除了臨床治療應用外，微脂體可包覆放射性核種(如 rhenium-188,  $^{188}\text{Re}$ )，達到同時擁有治療與影像觀察的功能。我們先前的研究顯示同時合併放射治療(遠隔放射治療 EBRT)與銻-188 微脂體(近距放射治療 IBRT)在人類食道癌中有顯著抑制效果。本研究期望探討在腦轉移黑色素瘤老鼠模式中，利用合併遠隔放射與近距放射治療提高腫瘤毒殺專一性以及涵蓋顯微轉移病灶，達到有效抑制與治療轉移性腫瘤的效果。本研究已建立穩定表現冷光基因之黑色素瘤細胞(B16F10-luciferase cells)並利用心臟注射和頸動脈注射等方式建立腦轉移小鼠模式，追蹤黑色素瘤細胞在腦部生長情況。研究結果顯示，頸動脈注射腫瘤細胞的方式可成功建立腦轉移小鼠模式，其成功率與致死率均優於心臟注射方式。NanoSPECT/CT 影像顯示在黑色素瘤腦轉移小鼠模式中，銻 188-微脂體可特异性聚積於小鼠腦部位置。我們將利用此腦轉移小鼠模式繼續分析銻 188-微脂體在單獨放射治療與合併放射治療後之藥物動力學、生物劑量分布、放射活度活體影像、生物安全毒性、以及治療效果，建立在腦轉移黑色素瘤動物模式中的生物參數資料，以提供未來臨床應用時之參考數據。

關鍵詞：遠隔放射治療、近距放射治療、銻-188 微脂體、腦轉移、黑色素瘤

### Abstract

Melanoma is an aggressive and highly metastatic disease, and the 5-year survival rate is less than 15% in patients with metastatic melanoma. Brain metastasis occurs in 15% of the melanoma patients who suffer from severe neurological deficits, deterioration, and eventually succumb to cancer. Brain radiotherapy (RT) remains the first treatment option for melanoma metastasis of the brain, and hypofractionated RT with large fraction size has been recommended for melanoma RT. Unfortunately, this fractionated scheme of RT usually causes greater damage to the normal brain and surrounding late-responding nerve tissues. Clearly, development of new therapeutic strategies for brain metastasis of melanoma is of clinical importance.

Nanoliposomes have been used as effective carriers for drug delivery due to their long circulating character and the enhanced permeability and retention effect at tumor sites. In addition to therapeutic application, liposomes encapsulated with radionuclide (such as rhenium-188,  $^{188}\text{Re}$ ) possess both therapeutic and imaging functions. Our previous study demonstrates that the combination of radiotherapy (external beam radiotherapy, EBRT) and  $^{188}\text{Re}$ -liposome (internal beam radiotherapy, IBRT) is promising in esophageal cancer. To evaluate the therapeutic effect after combination of EBRT and IBRT in vivo, we established melanoma cancer cell line B16F10 cells stably expressing luciferase gene for xenograft model and brain-metastatic melanoma mouse model was generated by cell injection into left-ventricle or carotid artery. Our results showed brain-metastatic melanoma mouse model was successfully established with carotid artery injection method and NanoSPECT/CT images demonstrated the specific uptake of  $^{188}\text{Re}$ -liposome within brain region in brain-metastatic xenograft. Analysis in pharmacokinetics, radiation dose, and therapeutic efficacy of  $^{188}\text{Re}$ -liposome alone or in combination with EBRT in melanoma cancer animal model continued in progress and will be used as a reference for clinical trials in the future.

Keywords: external beam radiotherapy, internal beam radiotherapy,  $^{188}\text{Re}$ -liposome, brain metastasis, melanoma cancer

## I. 前言

Metastatic malignant tumor is one of the common causes of death in the worldwide. The current result is aimed to analyze the molecular imaging, radiation dose, pharmacokinetics and efficacy of  $^{188}\text{Re}$ -liposome alone or in combination with EBRT. Understanding the role of  $^{188}\text{Re}$ -liposome in radiotherapy is a crucial step that will enrich our knowledge regarding the radiotherapy, which provides insight of radiation regimen in malignant cancer. Analysis of the correlation between IBRT and EBRT may provide a new therapeutic approach to treat metastatic melanoma cancers in a better way.

## II. 主要內容

Labeling efficiency of  $^{188}\text{Re}$ -liposome

The labeling efficiency of  $^{188}\text{Re}$  and BMEDA was measured by instant thin-layer chromatography on silica gel-impregnated glass fiber sheets (ITLC-SG) and the result showed the purity of  $^{188}\text{Re}$ -BMEDA was  $96.7 \pm 5.8\%$ , as radioactivity complex ( $^{188}\text{Re}$ -BMEDA) remained at the origin, whereas free  $^{188}\text{Re}$  migrated in the strip. The radiochemical purity of  $^{188}\text{Re}$ -liposome exceeded 95% after purification with PD-10 columns. The average particle size of  $^{188}\text{Re}$ -liposome was similar to that before  $^{188}\text{Re}$ -BMEDA encapsulation.

Generation of melanoma cells stably expressing luciferase  
To monitor the location of growth rate of melanoma cells in vivo, lentivirus infection system was used to establish stable clone of melanoma cells carrying luciferase gene (B16F10-luc). pLT-3R vector (expressing three marker genes: luciferase, RFP, thymidine kinase) was successfully infected into B16F10 cells, and human glioblastoma U87MG cells was used as comparison. Compare to previous established CT26-luc cells, the luciferase intensity can be detected from 2000 cells.

Establishment of brain metastasis melanoma mouse model

In our preliminary study, brain metastasis mouse model was established with intra-cardiac injection method by using mouse colorectal cancer CT26-luc cells. Different cell concentrations ( $2, 5, 10 \times 10^5$ ) were tested and injected into mouse left-ventricle. IVIS image analysis showed there was 50% positive signal of luciferase (15/30 mice) 1 week post-injection. Among mice with luciferase signal, only one mouse may appear brain metastasis, indicating the successful rate was too low. Besides, high death rate of mice was observed after two week of injection due to the non-specific distribution of cancer cells after intra-cardiac injection.

To overcome the low successful rate of brain metastasis and high death rate with intra-cardiac injection, cell injection through carotid artery was tested and examined. One week after injection of CT26-luc cells ( $1 \times 10^6$ ) into carotid artery, IVIS image showed there was 76% positive signal of luciferase (19/25 mice) and around 30% of luciferase-positive mice presented brain metastasis candidates. Precise location of metastatic cancer cells awaits anatomical analysis. Moreover, the death rate of mice after two weeks carotid artery injection was about

20%, indicating brain metastatic mouse model generating by carotid artery injection was feasible than intra-cardiac injection method.

Brain metastasis mouse model was established by carotid artery injection method, we further tested by melanoma B16F10-luc cells. IVIS image revealed that there was 75% positive signal of luciferase (15/20 mice) and about 40% of luciferase-positive mice showed luciferase signal near brain region. Different from brain metastasis colorectal cancer mouse model, the death rate of brain metastasis melanoma xenografts was higher than 90%, suggesting melanoma cells metastasized to brain were more malignant than colorectal cancer cells. This result limited our observation for further therapeutic analysis.

To make sure the precise location of brain-metastatic melanoma cells in vivo, mice were further sacrificed and dissected. Melanoma cells (black) indeed crossed brain blood barrier and grew within mouse brain. Besides, the death of mouse was not proportional to the size the cancer cells growth in brain, as the localization of cancer cells colonized seems to play more decisive role.

Specific uptake of  $^{188}\text{Re}$ -liposome in vivo

Live image of  $^{188}\text{Re}$ -liposome uptake in brain metastasis melanoma mouse was obtained by NanoSPECT/CT analysis. At first, melanoma B16F10-luc cells ( $2 \times 10^5$ ) was injected through carotid artery. After two weeks, luciferase signal was monitored by IVIS system to filter the mice of brain metastasis. Brain metastasis melanoma xenografts were transferred to INER and injected  $^{188}\text{Re}$ -liposome ( $500 \mu\text{Ci}$ ) through tail vein. NanoSPECT/CT analysis was used to access the live image of  $^{188}\text{Re}$ -liposome uptake at 1h and 24h post-injection. To reduce background noise, mice were further sacrificed at 24h post-injection and scanned the mouse brain by NanoSPECT/CT system only. Both live images and brain organ images demonstrated  $^{188}\text{Re}$ -liposome was accumulated within mouse brain.

## III. 結果與討論

Brain metastatic animal model was successfully established by carotid artery injection method. NanoSPECT/CT image demonstrated the specific uptake of  $^{188}\text{Re}$ -liposome in brain not only in vivo but also observed in mouse brain organ. Due to the low successful rate (30%) and high death rate (within two weeks) in brain metastatic melanoma xenografts, it takes us more time and effort to collect enough number of mice for therapeutic experiment and further analyses. We are trying to adjust optimal experimental parameters or use colorectal brain metastasis xenografts as better animal model system.

#### IV. 結論

1. Brain metastasis colorectal and melanoma mouse model was successfully established by carotid artery injection method.
2. Brain metastatic melanoma cells were more malignant than brain metastasis colorectal cells in vivo. Thus, brain metastatic colorectal xenografts were more suitable mouse model for therapeutic strategy test.
3. <sup>188</sup>Re-liposome can be uptake by brain metastatic melanoma cells as demonstrated by live image and brain organ scanning.

#### 參考文獻

- [1] Gray-Schopfer V, Wellbrock C, Marais R: Melanoma biology and new targeted therapy. *Nature* 2007, 445(7130):851-857.
- [2] Jemal A, Bray F, Center MM, Ferlay J, Ward E, Forman D: Global cancer statistics. *CA Cancer J Clin* 2011, 61(2):69-90.
- [3] Sneyd M, Cox B: The control of melanoma in New Zealand. *N Z Med J* 2006, 119(1242):U2169.
- [4] Shoo BA, Kashani-Sabet M: Melanoma arising in African-, Asian-, Latino- and Native-American populations. *Semin Cutan Med Surg* 2009, 28(2):96-102.
- [5] Lee MS, Lin RY, Chang YT, Lai MS: The risk of developing non-melanoma skin cancer, lymphoma and melanoma in patients with psoriasis in Taiwan: a 10-year, population-based cohort study. *Int J Dermatol* 2012, 51(12):1454-1460.
- [6] Chen YC, Guo YL, Su HJ, Hsueh YM, Smith TJ, Ryan LM, Lee MS, Chao SC, Lee JY, Christiani DC: Arsenic methylation and skin cancer risk in southwestern Taiwan. *J Occup Environ Med* 2003, 45(3):241-248.
- [7] Parkin DM, Bray F, Ferlay J, Pisani P: Global cancer statistics, 2002. *CA Cancer J Clin* 2005, 55(2):74-108.
- [8] Damsky WE, Theodosakis N, Bosenberg M: Melanoma metastasis: new concepts and evolving paradigms. *Oncogene* 2014, 33(19):2413-2422.
- [9] Streit M, Detmar M: Angiogenesis, lymphangiogenesis, and melanoma metastasis. *Oncogene* 2003, 22(20):3172-3179.
- [10] Damian DL, Saw RP: Dramatic regression of cutaneous, nodal, and visceral melanoma metastases. *Journal of the American Academy of Dermatology* 2011, 65(3):665-666.
- [11] Becker MR, Gaiser T: Impressive regression of visceral and cerebral melanoma metastases under combination treatment including dacarbazine, radiotherapy and celecoxib. *Int J Dermatol* 2009, 48(2):207-209.
- [12] Fonkem E, Uhlmann EJ, Floyd SR, Mahadevan A, Kasper E, Eton O, Wong ET: Melanoma brain metastasis: overview of current management and emerging targeted therapies. *Expert Rev Neurother* 2012, 12(10):1207-1215.
- [13] Sloan AE, Nock CJ, Einstein DB: Diagnosis and treatment of melanoma brain metastasis: a literature review. *Cancer Control* 2009, 16(3):248-255.
- [14] Fidler IJ, Schackert G, Zhang RD, Radinsky R, Fujimaki T: The biology of melanoma brain metastasis. *Cancer Metastasis Rev* 1999, 18(3):387-400.
- [15] Leung AM, Hari DM, Morton DL: Surgery for distant melanoma metastasis. *Cancer J* 2012, 18(2):176-184.
- [16] Forschner A, Heinrich V, Pflugfelder A, Meier F, Garbe C: The role of radiotherapy in the overall treatment of melanoma. *Clin Dermatol* 2013, 31(3):282-289.
- [17] Mendenhall WM, Amdur RJ, Grobmyer SR, George TJ, Jr., Werning JW, Hochwald SN, Mendenhall NP: Adjuvant radiotherapy for cutaneous melanoma. *Cancer* 2008, 112(6):1189-1196.
- [18] Stevens G, Thompson JF, Firth I, O'Brien CJ, McCarthy WH, Quinn MJ: Locally advanced melanoma: results of postoperative hypofractionated radiation therapy. *Cancer* 2000, 88(1):88-94.
- [19] Eaton BR, Gebhardt B, Prabhu R, Shu HK, Curran WJ, Jr., Crocker I: Hypofractionated radiosurgery for intact or resected brain metastases: defining the optimal dose and fractionation. *Radiat Oncol* 2013, 8:135.
- [20] Satyamoorthy K, Chehab NH, Waterman MJ, Lien MC, El-Deiry WS, Herlyn M, Halazonetis TD: Aberrant regulation and function of wild-type p53 in radioresistant melanoma cells. *Cell Growth Differ* 2000, 11(9):467-474.
- [21] Raaphorst GP, Mao JP, Ng CE: Repair of potentially lethal damage: its inhibition by hyperthermia in two human melanoma cell lines with different radio- and heat sensitivities. *Melanoma Res* 1993, 3(5):351-356.
- [22] Luke JJ, Schwartz GK: Chemotherapy in the management of advanced cutaneous malignant melanoma. *Clin Dermatol* 2013, 31(3):290-297.
- [23] Wu S, Singh RK: Resistance to chemotherapy and molecularly targeted therapies: rationale for combination therapy in malignant melanoma. *Curr Mol Med* 2011, 11(7):553-563.
- [24] McGettigan S: Dabrafenib: A New Therapy for Use in BRAF-Mutated Metastatic Melanoma. *J Adv Pract Oncol* 2014, 5(3):211-215.
- [25] Gogas HJ, Kirkwood JM, Sondak VK: Chemotherapy for metastatic melanoma: time for a change? *Cancer* 2007, 109(3):455-464.
- [26] Menzies AM, Long GV: Systemic treatment for BRAF-mutant melanoma: where do we go next? *Lancet Oncol* 2014, 15(9):e371-e381.
- [27] Sabbatino F, Wang Y, Wang X, Ferrone S, Ferrone CR: Emerging BRAF inhibitors for melanoma. *Expert Opin Emerg Drugs* 2013, 18(4):431-443.
- [28] Ott PA, Bhardwaj N: Impact of MAPK Pathway Activation in BRAF(V600) Melanoma on T Cell and Dendritic Cell Function. *Front Immunol* 2013, 4:346.

- [29] Oude Blenke E, Mastrobattista E, Schiffelers RM: Strategies for triggered drug release from tumor targeted liposomes. *Expert Opin Drug Deliv* 2013.
- [30] Kostarelos K, Emfietzoglou D: Tissue dosimetry of liposome-radionuclide complexes for internal radiotherapy: toward liposome-targeted therapeutic radiopharmaceuticals. *Anticancer research* 2000, 20(5A):3339-3345.
- [31] Hafeli UO, Roberts WK, Meier DS, Ciezki JP, Pauer GJ, Lee EJ, Weinhaus MS: Dosimetry of a W-188/Re-188 beta line source for endovascular brachytherapy. *Med Phys* 2000, 27(4):668-675.
- [32] Argyrou M, Valassi A, Andreou M, Lyra M: Rhenium-188 production in hospitals, by w-188/re-188 generator, for easy use in radionuclide therapy. *Int J Mol Imaging* 2013, 2013:290750.
- [33] Moghimi SM, Hamad I: Liposome-mediated triggering of complement cascade. *J Liposome Res* 2008, 18(3):195-209.
- [34] Fanciullino R, Ciccolini J: Liposome-encapsulated anticancer drugs: still waiting for the magic bullet? *Curr Med Chem* 2009, 16(33):4361-4371.
- [35] Chang YJ, Chang CH, Chang TJ, Yu CY, Chen LC, Jan ML, Luo TY, Lee TW, Ting G: Biodistribution, pharmacokinetics and microSPECT/CT imaging of 188Re-bMEDA-liposome in a C26 murine colon carcinoma solid tumor animal model. *Anticancer Res* 2007, 27(4B):2217-2225.
- [36] Leong SP, Gershenwald JE, Soong SJ, Schadendorf D, Tarhini AA, Agarwala S, Hauschild A, Soon CW, Daud A, Kashani-Sabet M: Cutaneous melanoma: a model to study cancer metastasis. *J Surg Oncol* 2011, 103(6):538-549.
- [37] Amit M, Laidier-Trejo L, Shalom V, Shabtay-Orbach A, Krelin Y, Gil Z: Characterization of the melanoma brain metastatic niche in mice and humans. *Cancer Med* 2013, 2(2):155-163.

# 阿茲海默症早期診斷藥物之組蛋白去乙醯化酶抑制劑放射性標誌前驅物合成

## Design and Synthesis of Precursors for Radiolabeled Histone Deacetylase Inhibitors as Imaging Agents for Early Diagnosis of Alzheimer's Disease

計畫編號：MOST 104-NU-E-002-002-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：忻凌偉

e-mail：lwhsin@ntu.edu.tw

計畫參與人員：楊佳縈、陳穎姮、吉彥婷

執行單位：國立臺灣大學醫學院藥學系暨研究所

### 摘要

組織蛋白去乙醯化酶抑制劑 (histone deacetylase inhibitor, HDACI) 具增強神經退化性疾病 (如 AD) 患者，記憶，學習能力以及認知功能的潛力。因此，可非侵入性、在生體內即時觀察及定量組織蛋白去乙醯化酶 (histone deacetylase, HDAC) 在人類大腦中含量和活性的 HDAC 正電子放射斷層掃描 (positron emission tomography, PET) 示踪劑對於確定 HDAC 在 AD 中所扮演的角色，AD 的早期診斷，治療監測，新藥和新治療方法的開發將非常有價值。在本計畫中，選擇苯甲醯胺 4 做為先導化合物，首先設計與成功合成八個新穎具通透血腦屏障 (blood-brain barrier, BBB) 潛力的 HDACI，接著在初步的體外 HDAC 抑制活性試驗中，這些分子探針對於各種不同亞型 HDAC 的抑制能力展現明顯的差異。多數化合物對於 HDAC1 與 HDAC2 具有良好的抑制活性，但幾乎所有的新化合物對於其他的 HDAC 亞型都不具有明顯的抑制活性。其中，化合物 7b 與 8a 對於 HDAC1 具有良好的抑制活性及選擇性 (HDAC1  $IC_{50}$  = 0.53 及 0.55  $\mu$ M；HDAC2  $IC_{50}$  = 2.59 及 1.36  $\mu$ M)，而化合物 7a 與 5 則是對於 HDAC1 及 HDAC2 具有良好且相近的抑制活性 (HDAC1  $IC_{50}$  = 0.44 及 0.53  $\mu$ M；HDAC2  $IC_{50}$  = 0.51 及 0.77  $\mu$ M)。在體外模擬 BBB 的 PAMPA 試驗中，數個新化合物展現良好的 BBB 穿透潛力，可用於進行這些 HDACI 碳十一和氟十八標記所需之前驅物的合成方法已順利建立。

關鍵詞：阿茲海默症、組織蛋白去乙醯化酶、正電子斷層掃描、放射性標記前驅物。

### Abstract

Histone deacetylase inhibitors (HDACIs) are potential agents to enhance the memory, learning ability, and cognitive function of patients with neurodegenerative diseases, such as AD. Hence, positron emission tomography (PET) imaging agents for noninvasive real-time in vivo visualization and quantification of the contents and activity of HDAC in human brains would be valuable for the determination of the roles HDAC plays in AD, early diagnosis of AD, treatment monitoring, discovery and development of new drug and treatment for AD. In this project, benzamide 4 was chosen as the lead compound, and eight novel HDACIs with potential blood-brain barrier (BBB) permeability were designed and synthesized. In preliminary in vitro HDAC inhibition assay,

most ligands demonstrated potent inhibition against HDAC1 and HDAC2, whereas these compounds had negligible ability to inhibit other subtypes of HDAC. Compounds 7b and 8a exhibited high potency and selectivity for HDAC1 (HDAC1  $IC_{50}$  = 0.53, 0.55  $\mu$ M; HDAC2  $IC_{50}$  = 2.59, 1.36  $\mu$ M, respectively), while ligands 7a and 5 showed similar potency for HDAC1 and HDAC2 (HDAC1  $IC_{50}$  = 0.44, 0.53  $\mu$ M; HDAC2  $IC_{50}$  = 0.51, 0.77  $\mu$ M, respectively). In PAMPA assay, several probes demonstrated high potential to penetrate through BBB. The method for the preparation of the corresponding precursors for  $^{11}C$ - and  $^{18}F$ -labeled HDACIs was established.

Keywords: Alzheimer's disease, histone deacetylase, positron emission tomography, precursor.

### Introduction

Alzheimer's disease (AD), a progressive neurodegenerative disease of the brain, is the most common type of dementia and is one of the most costly diseases in developed countries. AD usually occurs in people over the age of 65, and there were around 26 million AD patients in 2006. Due to the global phenomenon of population aging, the numbers of AD patient will be increased rapidly and is estimated one person suffering from AD in every 85 people in the world in 2050. According to the projections, if AD could be detected earlier and therefore its onset can be delayed for five years, the patient numbers of dementia would be decreased by 50%. As a result, the social burden and the medical care expenses of dementia will significantly reduce.

Discovery and development of novel PET molecular imaging agents for noninvasive real-time in vivo visualization and quantification of the contents and activity of HDAC in human brain would be crucial for the determination of the roles that HDAC plays in AD, early diagnosis of AD, treatment monitoring, discovery and development of new drug and treatment for AD. Furthermore, the potential therapeutic benefits that HDACIs might confer in neurodegenerative diseases stimulate us to design blood-brain barrier (BBB) permeable HDACIs and investigate their brain uptake for the development of in vivo molecular imaging agents to study epigenetic regulation and HDAC engagement in CNS diseases and disorders, and for the discovery of novel candidate molecules as therapeutic drugs for CNS applications.

Recently, [<sup>11</sup>C]**4**, a benzamide HDACI, was found to be the first BBB permeable HDACI.<sup>11</sup> In comparison with the moderately brain-penetrable HDAC substrate, **FAHA**, and other HDACIs, such as **SAHA**, **F-SAHA**, **FE-SAHA**, **CI-994**, and **MS-275**, which are not BBB permeable, compound **4** and **FAHA** have the lowest polar surface area (tPSA, 58.38 and 58.20, respectively). Hence, the PSA must be a critical property for brain uptake.<sup>12</sup> Therefore, compound **4** was chosen to be the lead compound for the discovery of novel highly potent and brain permeable HDACI radiotracers for the development of PET radiopharmaceuticals for early diagnosis of AD and other CNS applications. In this project, eight novel benzamide derivatives with tPSA less than 65 were designed and synthesized as shown in Chart 3 and their HDAC inhibition activity, BBB and GI permeability were also determined.

## Results and Discussion

A concise synthetic route was developed for the preparation of various benzamide derivatives. Protection of *O*-aminonitrobenzenes **11** by using Boc anhydride yielded *N*-protected compounds **12**. Compounds **13** were obtained by reduction of compounds **12** with Pd/C. *N*-alkylation of **13** with compound **14** afforded key intermediate compounds **15** in medium to high yields. Aminobenzamides **16** were prepared from compounds **15** with dimethylamine. De-protection of compounds **16** gave final compounds **4** and **6**. Aminobenzamide intermediate **19** was prepared from compound **15a** with methylamine. *N*-alkylation of **19** with fluoroalkyl bromides and tosylate afforded compounds **20a-c**. Target compounds **7a-c** were obtained after de-protection of compounds **20a-c**. Compounds **21** and **22** were prepared from compound **15a** with *N*-methyl-piperazine and piperazine. *N*-alkylation of **22** with fluoroalkyl bromides afforded compounds **23a-b**. Target compounds **8a-c** were then obtained after de-protection of compounds **21** and **23a-b**.

In preliminary in vitro HDAC inhibition assay, most HDACI ligands demonstrated potent inhibition against both HDAC1 and HDAC2, whereas these target compounds had negligible ability to inhibit other subtypes of HDAC. Both compounds **5** and **7a** demonstrated similar inhibition activity against HDAC1 and HDAC2 (HDAC 1: IC<sub>50</sub> = 0.52 μM and 0.44 μM; HDAC 2: IC<sub>50</sub> = 0.77 μM and 0.51 μM, respectively), whereas compounds **8a** and **7b** possessed better selectivity toward HDAC1 (HDAC 1: IC<sub>50</sub> = 0.55 μM and 0.53 μM; HDAC 2: IC<sub>50</sub> = 1.36 μM and 2.59 μM, respectively). The BBB and GI permeability of six benzamide derivatives is shown in Table 1. Compound **6** showed the highest in vitro BBB and GI permeability, whereas compound **8b** possessed the lowest GI and BBB permeability. In addition, compound **5** has high GI permeability and moderate BBB permeability, in comparison to the lead compound **4** and other piperazine derivatives, which exhibited high GI permeability but low BBB permeability.

## Conclusion

A concise synthetic route was developed for efficient preparation of various benzamide derivatives. The inhibition activity and selectivity of drug candidates for a

panel of HDACs have been evaluated. Both compounds **8a** and **7b** are potent HDAC1 inhibitors (IC<sub>50</sub> = 0.55 and 0.53 μM, respectively), whereas compounds **5** and **7a** are potent HDAC1/HDAC2 dual inhibitors (IC<sub>50</sub> = 0.53/0.77 μM and 0.44/0.51 μM, respectively). The GIT and BBB permeability of benzamide derivatives were quantitatively evaluated by PAMPA assay. Compound **6** has the greatest GIT and BBB permeability (102% and 86%, respectively), whereas compound **8c** has the lowest permeability both to GIT and BBB (30% and 10%, respectively). Furthermore, Compound **5** has great GIT permeability and moderate BBB permeability (93% and 63%, respectively).

## References

- [1] Kilgore, M.; Miller, C. A.; Fass, D. M.; Hennig, K. M.; Haggarty, S. J.; Sweatt, J. D.; Rumbaugh, Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology **2010**, 35, 870.
- [2] Golden, S. A.; Christoffel, D. J.; Heshmati, M.; Hodes, G. E.; Magida, J.; Davis, K.; Cahill, M. E.; Dias, C.; Ribeiro, E.; Ables, J. L.; Kennedy, P. J.; Robison, A. J.; Gonzalez-Maesó, J.; Neve, R. L.; Turecki, G.; Ghose, S.; Tamminga, C. A.; Russo, S. J. *Nature Medicine* **2013**, 19, 337.
- [3] Abel, T.; Zukin, R. S. *Current opinion in pharmacology* **2008**, 8, 57.
- [4] Kazantsev, A. G.; Thompson, L. M. *Nature reviews. Drug discovery* **2008**, 7, 854.
- [5] Yu, C. W.; Chang, P. T.; Hsin, L. W.; Chern, J. W. *Journal of medicinal chemistry* **2013**, 56, 6775.
- [6] Tsai, L.-H. G., Ji-Song; Haggarty, Stephen, J.; Holson, Edward; Wagner, Florence; Graeff, Johannes.; Vol. US 8,563,615 B2.
- [7] Yeh, H. H.; Tian, M.; Hinz, R.; Young, D.; Shavrin, A.; Mukhopadhyay, U.; Flores, L.G.; Balatoni, J.; Soghomonyan, S.; Jeong, H. J.; Pal, A.; Uthamanthil, R.; Jackson, J. N.; Nishii, R.; Mizuma, H.; Onoe, H.; Kagawa, S.; Higashi, T.; Fukumitsu, N.; Alauddin, M.; Tong, W.; Herholz, K.; Gelovani, J. G. *Neuroimage* **2013**, 64, 630.
- [8] Kim, S. W.; Hooker, J. M.; Otto, N.; Win, K.; Muench, L.; Shea, C.; Carter, P.; King, P.; Reid, A. E.; Volkow, N. D.; Fowler, J. S. *Nuclear medicine and biology* **2013**, 40, 912.
- [9] Hendricks, J. A.; Keliher, E. J.; Marinelli, B.; Reiner, T.; Weissleder, R.; Mazitschek, R. *Journal of medicinal chemistry* **2011**, 54, 5576.
- [10] Seo, Y. J.; Muench, L.; Reid, A.; Chen, J.; Kang, Y.; Hooker, J. M.; Volkow, N.D.; Fowler, J. S.; Kim, S. W. *Bioorganic & medicinal chemistry letters* **2013**, 23, 6700.
- [11] Seo, Y. J.; Kang, Y.; Muench, L.; Reid, A.; Caesar, S.; Jean, L.; Wagner, F.; Holson, E.; Haggarty, S. J.; Weiss, P.; King, P.; Carter, P.; Volkow, N.D.; Fowler, J. S.; Hooker, J. M.; Kim, S. W. *ACS chemical neuroscience* **2014**, 5, 588.
- [12] Kelder, J.; Grootenhuys, P. D.; Bayada, D. M.; Delbressine, L. P.; Ploemen, J. P. *Pharmaceutical research* **1999**, 16, 1514.

# 多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用-總計畫暨子計畫三:比較多巴胺轉運器在巴金森氏患者及抗精神病誘發之類巴金森氏症狀之異同

## Compare the difference of dopamine transporter between Parkinson's disease and schizophrenia induce atypical Parkinsonian syndromes

計畫編號: NSC 104-2623-E-075-001-NU

計畫類別: ☐ 個別型計畫 ☒ 整合型計畫

計畫主持人: 周元華

e-mail: c520608@ms64.hinet.net

計畫參與人員: 謝文琦、高子凱

執行單位: 臺北榮民總醫院精神部

### 摘要

多巴胺轉運器造影在許多神經精神疾病研究當中是一項非常重要的工具,在過去的研究顯示多巴胺轉運器在精神分裂症患者病因學中所扮演的角色並不顯著。然而多巴胺轉運器是調節腦中多巴胺一個非常重要之蛋白質,因此可以合理的推論多巴胺轉運器在精神分裂症的研究當中仍然扮演著一定的角色。許多精神分裂症的患者在服用抗精神病藥物後會出現藥物的副作用,例如肌肉僵硬、步伐變慢或是流口水的症狀。這些症狀與巴金森氏症非常的類似,但是目前並不清楚是什麼原因造成這些藥物的副作用。因此本研究的目的在於探討多巴胺轉運器在此副作用的病理機制中所扮演之角色。本研究納入 17 位巴金森氏症患者以及 17 位在服用抗精神病藥物後出現類巴金森氏症狀之藥物副作用的精神分裂症患者。每位受試者接受放射藥物 Tc-99m TRODAT-1 造影多巴胺轉運器,其中精神分裂症患者再以正性及負性症狀量表來評估其臨床症狀之嚴重度以及療效,同時也以藥物引發錐體外徑症候群量表來評估其藥物所產生之副作用。結果顯示出現錐體外徑症候群副作用之精神分裂症患者相較於巴金森氏症患者有較高的多巴胺轉運器可用率,而藥物引發錐體外徑症候群量表分數與左側尾核及右側視丘之多巴胺轉運器可用率呈顯著負相關。結果顯示多巴胺轉運器在服用抗精神病藥物造成錐體外症狀副作用的病因學中,同時也扮演重要的角色。

關鍵詞: 精神分裂症、多巴胺轉運器、錐體外徑症候群

### Abstract

Image dopamine transporter (DAT) has become a major technique in the research of neuropsychiatric disorders. Previous studies have demonstrated that the role of DAT in the pathophysiology of schizophrenia is insignificant. However, DAT is the most important protein, which regulates the concentration of dopamine. It is reasonable to speculate that the role of DAT in schizophrenia must be considerable. Extrapyramidal (EPS) side effect of antipsychotic is popular in schizophrenia when patients are taking antipsychotics included tremor, muscle rigidity and salivation. The symptoms are the resemblance of Parkinson's disease (PD). The exact mechanism is still unclear. The purpose of this study was to study the role of

DAT in the physiology of EPS side effect. This study has recruited 17 patients with Parkinson's disease and 17 schizophrenic patients who develops EPS side effect after the treatment of antipsychotics. Each subject received Tc-99m TRODAT for the image of DAT. In addition to use positive and negative symptoms of scale for the severity of symptoms in schizophrenia, EPS side effect rating scale was apply for the assess the severity of EPS side effects. The result shows that patients with PD have lower DAT availability around ROIs in brain compare to schizophrenic patients. Significant correlations were found between scores of DIEPSS and DAT availability in left caudate and right thalamus. Our findings show that DAT plays an important role in the pathophysiology of physiology of EPS side effect.

Keywords: schizophrenia, dopamine transporter, extrapyramidal side effect

### I. 前言

利用 Tc-99m TRODAT-1 造影人腦中多巴胺轉運器的研究在台灣已有超過十年的歷史。在這過去的十年中造就了無數的研究結果也帶動了台灣對於中樞神經放射藥物的發展。直到今日這個造影劑 Tc-99m TRODAT-1 依然是各個醫院核子醫學科所常用的一個放射藥物,特別是針對巴金森氏症病患的檢查。然而這個放射藥物仍然有一些臨床上使用的限制,包含了準確度的驗證、資料庫的建立、以及對於非巴金森氏症疾病之實用性,均有待進一步的驗證。本研究之目的在於利用整合性資料以提升此放射藥物之準確性。

### II. 主要內容

多巴胺失調 (dopamine dys-regulation) 的理論在精神分裂症 (schizophrenia) 的研究及病因學中一直扮演著重要的角色(1),過去的研究已經探討了許多關於多巴胺系統在精神分裂症病因學中之角色,包括了多巴胺第一型受體 (D1 receptor) (2-4)、第二型受體 (D2 receptor) (5, 6)、多巴胺轉運器 (dopamine transporter, DAT) (7, 8)及精神分裂症急性發作期內生性多巴胺的釋放增加 (endogenous dopamine release) (9, 10)等研究。雖然這些研究的結果並不全然一致,然而卻顯示出多巴胺系統在精神分裂症中複雜及異常的角色。

巴金森氏症 (Parkinson's disease, PD) 是一項以多巴胺神經元退化為主的疾病。臨床上往往會出現肌肉僵硬(muscle rigidity)、手抖(tremor)、流口水(salivation)以及小碎步(motor function impair)的症狀(11, 12)。目前也有許多的研究利用不同的研究方式證實這項病因為多巴胺神經元退化(13, 14)。而最常用的研究方式就是利用核醫放射藥物造影病患腦中多巴胺轉運器並呈現其在活體之狀況(15)。過去本研究團隊也已經利用 Tc-99m TRODAT-1 造影巴金森氏症患者腦中多巴胺轉運器缺損，同時發現這項缺損也與臨床症狀嚴重度有明顯之相關(16)。值得一提的是這項研究成果不但證實了多巴胺神經元在巴金森氏症患者之缺損，也顯示神經元之退化現象。

造影精神分裂症患者腦中多巴胺轉運器是一項非常重要的研究方法，然而過去的研究顯示精神分裂症患者腦中多巴胺轉運器在服用抗精神病藥物之前後並無明顯之改變(17)。最近一項大規模的回顧分析更證實了用 Tc-99m TRODAT-1 的結果在精神分裂症的研究中變化並不顯著(18)。然而在臨床上精神分裂症的病人在服用抗精神病藥物治療後往往容易出現錐體外症候群的症狀，主要也包含了有面無表情 (blunted affect)、肌肉僵硬(muscle rigidity)、手抖(tremor)以及流口水等現象，而這些的現象與巴金森氏症之臨床症狀非常的相似，因此可以推斷這兩種情況應該具有類似之病因學。

關於錐體外徑症候群之病因機轉，過去有許多的研究證實了出現錐體外徑症候群的時候，患者所服用之抗精神病藥物往往有比不具有錐體外症候群之患者較高之多巴胺第二型受體佔有率，在佔有率超過 80% 的時候更容易出現錐體外徑症候群之副作用(19, 20)，但是過去的研究很少有針對當病患出現錐體外徑症候群副作用時多巴胺轉運器之變化。因此本研究最主要的目的在於探討精神分裂症患者服用抗精神病藥物後出現錐體外徑症候群副作用時多巴胺轉運器之變化。這個研究也將是第一個利用 Tc-99m TRODAT-1 研究抗精神病藥物副作用與多巴胺轉運器間之關係。

### III. 結果與討論

本研究共納入 17 位精神分裂症患者及 17 位年齡、性別配對之巴金森氏症患者，如表一所示，兩組平均年齡為 36 歲且無顯著差異。其中精神分裂症患者有 14 名接受正性及負性症狀量表(PANSS)評估，平均分數為 58.9，有 12 名接受藥物引發錐體外徑症候群量表(DIEPSS)評估，平均分數為 2.8。

多巴胺轉運器特異性結合率(specific uptake ratio; SUR)的分析結果如表二所示，精神分裂症患者組之平均為：尾核(caudate)-左側：3.17±1.22、右側：2.97±1.34、兩側：3.08±1.24；被核(putamen)-左側：3.57±1.24、右側：3.60±1.42、兩側：3.59±1.30；視丘(thalamus)-左側：1.29±0.55、右側：0.86±0.53、兩側：1.07±0.48；相較於巴金森氏症患者組皆有較高的可用率，除了右側視丘無顯著差異( $t=-1.243$ ,  $p=0.223$ )。表三為斯皮爾曼相關(spearman's rank correlation)分析，發現在精神分裂症患者組左側尾核及右側視丘之多巴胺可用率與藥物引發錐體外徑症候群量表分數呈現顯著負相關

( $\rho=-0.62$ ,  $p=0.03$ ;  $\rho=-0.70$ ,  $p=0.01$ )，而正性及負性症狀量表分數則與多巴胺轉運器可用率則未達統計上顯著相關。

### IV. 結論

研究結果顯示巴金森氏症患者組相較於精神分裂症患者組多巴胺轉運器可用率較低，指出精神分裂症患者服用抗精神病藥物後產生錐體外徑症候群副作用可能與巴金森氏症患者症狀之病因學不同。藥物引發錐體外徑症候群量表分數與左側尾核之多巴胺轉運器可用率呈現負相關，結果顯示多巴胺轉運器在服用抗精神病藥物造成錐體外症候群副作用的病因學中，同時也扮演重要的角色。因此在未來的研究中需收集較大的樣本數與進一步的分析。

### 參考文獻

- [1] Carlsson A. The current status of the dopamine hypothesis of schizophrenia. *Neuropsychopharmacology*. 1988;1(3):179-86.
- [2] Karlsson P, Farde L, Halldin C, Sedvall G. PET study of D(1) dopamine receptor binding in neuroleptic-naive patients with schizophrenia. *Am J Psychiatry*. 2002;159(5):761-7.
- [3] Okubo Y, Suhara T, Suzuki K, Kobayashi K, Inoue O, Terasaki O, et al. Decreased prefrontal dopamine D1 receptors in schizophrenia revealed by PET. *Nature*. 1997;385(6617):634-6.
- [4] Abi-Dargham A, Mawlawi O, Lombardo I, Gil R, Martinez D, Huang Y, et al. Prefrontal dopamine D1 receptors and working memory in schizophrenia. *J Neurosci*. 2002;22(9):3708-19.
- [5] Farde L, Wiesel FA, Stone-Elander S, Halldin C, Nordstrom AL, Hall H, et al. D2 dopamine receptors in neuroleptic-naive schizophrenic patients. A positron emission tomography study with [<sup>11</sup>C]raclopride. *Arch Gen Psychiatry*. 1990;47(3):213-9.
- [6] Wong DF, Wagner HN, Jr., Tune LE, Dannals RF, Pearlson GD, Links JM, et al. Positron emission tomography reveals elevated D2 dopamine receptors in drug-naive schizophrenics. *Science*. 1986; 234(4783): 1558-63.
- [7] Laakso A, Bergman J, Haaparanta M, Vilkkumäki H, Solin O, Syvalähti E, et al. Decreased striatal dopamine transporter binding in vivo in chronic schizophrenia. *Schizophr Res*. 2001;52(1-2):115-20.
- [8] Laakso A, Vilkkumäki H, Alakare B, Haaparanta M, Bergman J, Solin O, et al. Striatal dopamine transporter binding in neuroleptic-naive patients with schizophrenia studied with positron emission tomography. *Am J Psychiatry*. 2000;157(2):269-71.
- [9] Laruelle M, Abi-Dargham A, Gil R, Kegeles L, Innis R. Increased dopamine transmission in schizophrenia: relationship to illness phases. *Biol Psychiatry*. 1999; 46(1): 56-72.
- [10] Breier A, Su TP, Saunders R, Carson RE, Kolachana BS, de Bartolomeis A, et al. Schizophrenia is associated with elevated amphetamine-induced synaptic dopamine concentrations: evidence from a novel positron emission tomography method. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1997;94(6):2569-74.

- [11] Rothwell JC, Edwards MJ. Parkinson's disease. *Handbook of clinical neurology*. 2013;116:535-42.
- [12] Lindenbach D, Bishop C. Critical involvement of the motor cortex in the pathophysiology and treatment of Parkinson's disease. *Neuroscience and biobehavioral reviews*. 2013;37(10 Pt 2):2737-50.
- [13] Caviness JN. Pathophysiology of Parkinson's disease behavior--a view from the network. *Parkinsonism & related disorders*. 2014;20 Suppl 1:S39-43.
- [14] Pyatigorskaya N, Gallea C, Garcia-Lorenzo D, Vidailhet M, Lehericy S. A review of the use of magnetic resonance imaging in Parkinson's disease. *Therapeutic advances in neurological disorders*. 2014;7(4):206-20.
- [15] Suwijn SR, de Bruin K, de Bie RM, Booij J. The role of SPECT imaging of the dopaminergic system in translational research on Parkinson's disease. *Parkinsonism & related disorders*. 2014;20 Suppl 1:S184-6.
- [16] Huang WS, Lin SZ, Lin JC, Wey SP, Ting G, Liu RS. Evaluation of early-stage Parkinson's disease with 99mTc-TRODAT-1 imaging. *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine*. 2001;42(9):1303-8.
- [17] Booij J, van Loon G, de Bruin K, Voorn P. Acute administration of haloperidol does not influence 123I-FP-CIT binding to the dopamine transporter. *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine*. 2014;55(4):647-9.
- [18] Chen KC, Yang YK, Howes O, Lee IH, Landau S, Yeh TL, et al. Striatal dopamine transporter availability in drug-naïve patients with schizophrenia: a case-control SPECT study with [(99m)Tc]-TRODAT-1 and a meta-analysis. *Schizophrenia bulletin*. 2013;39(2): 378-86.
- [19] Uchida H, Suzuki T, Graff-Guerrero A, Mulsant BH, Pollock BG, Arenovich T, et al. Therapeutic Window for Striatal Dopamine D2/3 Receptor Occupancy in Older Patients With Schizophrenia: A Pilot PET Study. *The American journal of geriatric psychiatry : official journal of the American Association for Geriatric Psychiatry*. 2012.
- [20] Corripio I, Ferreira A, Portella MJ, Perez V, Escarti MJ, Del Valle Camacho M, et al. The role of striatal dopamine D2 receptors in the occurrence of extrapyramidal side effects: iodine-123-iodobenzamide single photon emission computed tomography study. *Psychiatry research*. 2012;201(1):73-7.
- [21] Parker KL, Lamichhane D, Caetano MS, Narayanan NS. Executive dysfunction in Parkinson's disease and timing deficits. *Frontiers in integrative neuroscience*. 2013;7:75.

# 多面向探討 Tc-99m TRODAT-1 臨床影像標準化之應用—子計畫二：建立 99mTc-TRODAT 多巴胺轉運器影像資料庫

## To establish DAT images database of healthy controls for 99mTc-TRODAT

計畫編號：MOST 104-2623-E-075-002-NU

計畫類別：☐個別型計畫 ☒整合型計畫

計畫主持人：王世楨

e-mail：jwshyh@vghtpe.gov.tw

計畫參與人員：吳念芸

執行單位：臺北榮民總醫院核子醫學部

### 摘要

99mTc-TRODAT-1 單光子電腦斷層造影劑，為主要偵測腦部突觸前多巴胺轉運器之檢查。有越來越多研究報導多巴胺神經系統，已經被當成重要的診斷巴金森症候群或神經疾病病患的重要檢查依據。然而，許多醫院對於其影像的定量化分析數據及報告、影像品質品管的技術、影像造影收集條件、影像重組的條件，卻是有很大的差異及爭論，並且臨床醫師們最想知道 99mTc-TRODAT 在正常人之紋狀體結合的比值和病患相差多少。除此之外，許多的研究文獻都指出多巴胺系統功能會隨著年齡逐漸退化，同時也會跟性別有所差異，而大部分運動神經疾病都好發於年長病患。有鑑於此，目前在台灣迫切的需要建立年長正常人的腦部影像資料庫，尤其在 40 歲以上之正常人腦部影像資料。

本計畫納入了 16 位正常人，每位受試者皆接受 99mTc-TRODAT 造影腦部多巴胺轉運器以及磁振造影腦部結構影像，每位受試者的影像資料分別使用傳統手繪的方式以及自動化軟體分析紋狀體的多巴胺轉運器特异性結合率。組內相關係數分析結果顯示中高的信度(0.65~0.83)。顯示自動軟體分析已慢慢成為便利與快速的分析工具。

關鍵字：99mTc-TRODAT-1、單光子斷層掃描、多巴胺轉運器、巴金森症候群、影像資料庫

### Abstract

99mTc-TRODAT-1 SPECT tracer is currently one of the most widely used dopamine transport (DAT) imaging probe in cerebral pre-synaptic site. There are more and more articles of DAT research show that DAT could be a prognosis index for diagnosis of Parkinsonism and psychiatric disease. However, many of hospitals have a big conflict with in quantification of 99mTc-TRODAT-1 images analysis、imaging acquisition protocol、image reconstruction algorithms, and so on. Furthermore, the clinical physicians really want to understand how difference of DAT distribution between normal subjects and patients. Recently, many papers point out function of DAT would be declined by aging, and be varied from gender difference. According to that, to establish DAT images database of elder healthy controls for 99mTc-TRODAT is urgently required, especially is above 40 years old of normal controls.

This study will cost 3 year to collect sixty normal

healthy controls for 99mTc-TRODAT-1 SPECT images, and are classified to three groups according to age. The first group is 40-50 years old, the second group is 50-60 years old, and the third group is 50-60 years old, men and women are in each group per decade. This expert evaluation system used automatic calculation and analysis of three-dimensional space, and was also collocated with 99mTc-TRODAT-1 imaging. To establish DAT images database of elder healthy controls for 99mTc-TRODAT will performed accurately and effectively for clinical using. To our knowledge, we are pioneers in collecting normal 99mTc-TRODAT images database in Taiwan, which are highly valued in the fields of nuclear medicine. We believe our research results will provide useful information in suspected neurodegenerative Parkinsonism diagnosis. The data collected in this study may serve as a imaging reference database for research and for completion of a diagnostic evaluation.

Keywords: 99mTc-TRODAT-1、SPECT、dopamine transport、Parkinsonism、normal、images database

### I. 前言

利用 Tc-99m TRODAT-1 造影人腦中多巴胺轉運器的研究在台灣已有超過十年的歷史。在這過去的十年中造就了無數的研究結果也帶動了台灣對於中樞神經放射藥物的發展。直到今日這個造影劑 Tc-99m TRODAT-1 依然是各個醫院核子醫學科所常用的一個放射藥物，特別是針對巴金森氏症病患的檢查。然而這個放射藥物仍然有一些臨床上使用的限制，包含了準確度的驗證、資料庫的建立、以及對於非巴金森氏症疾病之實用性，均有待進一步的驗證。本研究之目的在於利用整合性資料以提升此放射藥物之準確性。

### II. 主要內容

核醫 99mTc-TRODAT 是一個用來偵測人腦中多巴胺轉運蛋白的有效造影劑，經過超過 10 年的研發，目前已是一個穩定且極具臨床開發使用的單光子斷層造影劑[1]。過去在使用 99mTc-TRODAT 的研究中，多集中於疾病的研究，例如巴金森氏症(Parkinson's Disease, PD)患者其腦中紋狀體有顯著的減少等研究[2-4]。根據統計，台灣大約有 28 萬人罹患巴金森氏症候群(Parkinson's syndrome)，約佔 65 歲以上老年人口的 15%，其中約 4 萬人罹患巴金森氏症，而且其發生率隨著年齡

的增加而提高。在美國巴金森氏症為第二大常見神經退化疾病，僅次於老人失智症(Alzheimer's disease)，然而。目前對這些疾病早期準確的診斷依然是很大的挑戰[5]。

99mTc-TRODAT 造影劑在國內早已開始上市使用，但是許多醫院對於其影像的定量分析數據及報告，卻是有很大的差異及爭論，其主要的原因是：

第一：國內沒有 99mTc-TRODAT 造影標準作業流程準則。

第二：99mTc-TRODAT 影像品質及影像重組條件之不同。

第三：台灣缺少 99mTc-TRODAT 紋狀體定量結合比值的正常人影像資料庫。

第四：無再現性高的影像定量分析工具，可以自動化圈選紋狀體等組織。

回顧國外的文獻發現，123I-labeled dopamine transporter ligands 在歐美國家為最普遍使用來診斷懷疑神經退化疾病引起巴金森氏症候群之病患，也因為上述的原因，故歐洲核醫學會在2002年已經針對123I-labeled dopamine D(2) transporter ligands 訂出相關造影準則[6]，其主要目的是規範123I-labeled 之腦神經造影劑之影像造影程序、影像重組參數、影像定量結果之報告格式等等，大大提高對於運動神經元退化疾病之早期的正確診斷及治療率。除此之外，近期許多的研究文獻都指出多巴胺系統功能會隨著年齡逐漸退化，同時也會跟性別有所差異[7,8]，而且各臨床醫師對於正常人之多巴胺轉運體密度含量之多寡資訊，極渴望有一正常參考值，作為早期診斷及用藥療效之重要參考依據。故在2013年歐洲提出跨國建立正常人[123I] FP-CIT SPECT (ENC-DAT)之影像資料庫之建立計畫[9]，共有13所醫院參與，完成151位正常人影像之收集，年齡從20歲到83歲，男生80位，女生71位。除了重新建立正確影像造影標準流程，也解決影像資料庫會因為不同儀器、不同影像重組條件而不適用等問題，造福歐美國家之國民健康。

但是，目前國內普遍使用99mTc-TRODAT 造影劑，及亞洲人種與西方人種不同等因素，無法適用於上述之影像資料庫，且大部分運動神經疾病都好發於年長病患。有鑑於此，目前在台灣迫切的需要建立年長正常人的腦部影像資料庫提供臨床醫師診斷之依據，尤其在40歲以上之正常人腦部影像資料。

### III. 結果與討論

本研究納入4位男性及12位女性受試者，平均年齡為51.6歲，平均教育程度為12.8年。皮爾森相關係數(pearson correlation coefficient)分析顯示手繪與自動軟體分析兩種方式不論在尾核(caudate)、被核(putamen)或是視丘(thalamus)都有顯著的相關(0.49 ~ 0.72)，如表二所示，組內相關係數也顯示中高的信度(0.65~0.83)。

### IV. 結論

結果顯示自動軟體分析已慢慢成為便利與快速的分析工具，若未來要推廣本軟體之使用及準確性，應持續增加個案數(>30)，並促使跨區或跨院的合作，同時訂

定影像造影標準流程，使手繪與自動軟體之信度提高(>0.9)，俾利提供臨床醫師使用。

### 參考文獻

- [1] Kung MP, Stevenson DA, Plossl K, et al. [99mTc] TRODAT-1: a novel technetium-99m complex as dopamine transporter imaging agent. *Eur J Nucl Med* 1997; 24:372 - 380
- [2] Wen-Sheng Huang, Meei-Shyuan Lee, Jiann-Chyun Lin, et al. Usefulness of brain 99mTc-TRODAT-1 SPET for the evaluation of Parkinson's disease. *EJNM*, 2004; 31:155-161
- [3] Wang J, Jiang YP, Liu XD, Chen ZP, Yang LQ, Liu CJ, et al. 99mTc-TRODAT-1 SPECT study in early Parkinson's disease and essential tremor. *Acta Neurol Scand* 2005; 112: 380 - 5.
- [4] Kai-Yuan Tzen, Chin-Song Lu, Tzu-Chen Yen, et al. Differential Diagnosis of Parkinson's Disease and Vascular Parkinsonism by 99mTc-TRODAT-1. *JNM* 2001; 42:408-413
- [5] Nussbaum RL, Ellis CE. Alzheimer's disease and Parkinson's disease. *N Engl J Med* 2003; 348: 1356 - 64.
- [6] Tatsch K, Asenbaum S, Bartenstein P, Catafau A, Halldin C, Pilowsky LS, et al. European Association of Nuclear Medicine procedure guidelines for brain neurotransmission SPET using (123)I-labelled dopamine D(2) transporter ligands. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* 2002;29(10):BP30 - 5
- [7] van Dyck CH, Seibyl JP, Malison RT, Laruelle M, Wallace E, Zoghbi SS, et al. Age-related decline in striatal dopamine transporter binding with iodine-123-beta-CITSPECT. *J Nucl Med*. 1995; 36: 1175 - 81.
- [8] Lavalaye J, Booij J, Reneman L, Habraken JB, van Royen EA. Effect of age and gender on dopamine transporter imaging with [123I]FP-CIT SPET in healthy volunteers. *Eur J Nucl Med*. 2000;27:867 - 9.
- [9] Andrea Varrone, John C. Dickson, Livia Tossici-Bolt Terez Sera, Susanne Asenbaum, Jan Booij, Ozlem L. Kapucu, Andreas Kluge, Gitte M. Knudsen, et al. European multicentre database of healthy controls for [123I] FP-CIT SPECT (ENC-DAT): age-related effects, gender differences and evaluation of different methods of analysis. *Eur J Nucl Med Mol Imaging* (2013) 40:213 - 227
- [10] [http://www.pmod.com/technologies/products/product\\_s.html](http://www.pmod.com/technologies/products/product_s.html)
- [11] Wen-Sheng Huang, Shinn-Zong Lin, Jiann-Chyun Lin, et al. Evaluation of Early-Stage Parkinson's Disease with 99mTc-TRODAT-1 Imaging. *JNM* 2001; 42:1303-1308
- [12] Wen-Sheng Huang, Meei-Shyuan Lee, Jiann-Chyun Lin, et al. Usefulness of brain 99mTc-TRODAT-1 SPET for the evaluation of Parkinson's disease. *EJNM*, 2004; 31:155-161
- [13] Friston KJ. Statistical parametric mapping. In: Thatcher RW, Hallett M, Zeffiro T, John ER, Huerta M, eds. *Functional Neuroimaging*. San Diego, CA: Academic Press; 1994: 79 - 93.

- [14] Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ, Poline J-P, Frith CD, Frackowiak RSJ. Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Hum Brain Mapp.* 1995;2:189 – 210.
- [15] N. Tzourio-Mazoyer, B. Landeau, D. Papathanassiou, et al. Automated Anatomical Labeling of Activations in SPM Using a Macroscopic Anatomical Parcellation of the MNI MRI Single-Subject Brain. *Neuroimage* 2002; 15(1): 273-289.

# 加速原子能管制機關新進人員學習與提昇組織向心力之探討

## Accelerate atomic energy regulatory agencies new staff to learn and explore the promotion of solidarity organization

計畫編號：MOST 104-2623-E-003-003-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：楊遵榮

e-mail：[yang1@ntnu.edu.tw](mailto:yang1@ntnu.edu.tw)

計畫參與人員：楊易倫

執行單位：國立台灣師範大學物理系

### 摘要

本研究目的：一、原能會教育訓練的探究；二、影響原能會新進人員的學習因素，以原能會教育訓練為範疇。聚焦在原能會的教育訓練課程實施狀況，即課程執行與職能習得的關係、如何加速新進人員教育訓練為本研究欲探討的重點，進而找出影響學習之因素，與提昇組織向心力之探討，提供原能會辦理教育訓練相關之建議。

關鍵詞：教育訓練、原能會、職能。

### Abstract

The purpose of this study was to understand the current Atomic Energy Council's educational training and the learning effects to new staff. The learning effects focus on the influence of educational training for the category and explore the enhance cohesion of the organization.

Keywords: educational training、Atomic Energy Council、competence.

### I. 前言

原能會是我國原子能安全管制的最高機關，然而原能會正面臨各方所帶來的衝擊，包含原能會組織層級改變、日本福島事故後的影響、核電廠除役與延役、原能會人員的屆退退休潮，面臨上述種種因素，加之工作人力資源有限，惟有透過原能會各種教育訓練研究、影響學習因素、加速學習、影響組織士氣的相關因素，找出更積極面的作為，提供原能會相關建議。

### II. 主要內容

分發至原能會各單位之原能會新進人員，其工作業務性質大不相同，在職教育訓練是進入職場後專業技術或相關能力習得的主要管道，加速新進人員對工作環境適應與實際作業操作熟稔，即便是不同背景亦能藉由在職訓練，習得工作所需之能力。本研究內容包含三個部分。一、檔案內容分析，從原能會教育訓練資料整理，建構原能會各單位職能分析表、建構原能會整體教育訓練架構圖與規劃表、建構原能會視察員證書取得流程分析；二、問卷調查，此部分為量化研究，從第一部分的建構中，延伸相關影響學習的研究問題，目的在瞭解原能會新進人員對工作環境適應、整體教育訓練、公務人員教育訓練、視察員證書訓練與規劃、加速學習相關因素的認知與情意；三、質性訪談，為深入瞭解教育訓練

課程對新進人員的學習影響，包含參與教育訓練所面臨的困難、那對基礎課程、自行研讀與見習課程改善相關建議、本身工作業務上所遭遇的困難點、本身工作業務上所需的教育訓練需求。學習因素研究的範疇聚焦在原能會的教育訓練課程實施狀況，即課程執行與職能習得的關係、如何加速新進人員教育訓練為本研究欲探討的重點，進而找出影響學習之因素。

### III. 結果與討論

一、新進人員高度同意「新進人員教育訓練以及104年辦理之集中實務訓練」可加速對環境之適應，對原能會各單位工作職掌有初步概念與瞭解。

二、新進人員對參與教育訓練所遭遇困難點為工作繁忙，在業務繁重同時又要受訓質與量為受到影響，其他因素包含不同單位訓練時間重疊、訓練的時數限制等。

三、新進人員對建立整體教育訓練的架構圖表示高度同意，對各種訓練的方向有整體認識，在面對各單位辦理之教育訓練有初步概念。

四、新進人員對公務人員訓練表示高度認同，公務人員依法行政，在工作現場遵守公務人員應有的規範，藉由相關公務人員教育訓練習得。在職能學習上，對溝通能力與公文寫作助益較大；另外法規相關研習對工作業務有助益。性別議題相關研習持中立的立場，看法較不一致，從訪談過程中得知，

五、新進人員對取得視察員證書表示正向與積極作為，視察員證書取得對自我信心成長與執行工作業務皆有助益。多數同意盡可能完成視察員之訓練與檢定，部分對加速取得證書表示不同意，理由為視察員的養成，需要時間與經驗的磨練，這部分需要不斷充實與工作經驗累積成熟。

六、原能會新進人員對視察員教育訓練加速學習因素的認知與情意狀況：

(一)多數贊同開課時間點對工作業務與學習有幫助，然每個新進人員進入單位的時間點不同，某些訓練1~2年開課1次，時間點的配合是關鍵因素。

(二)適當的獎勵制度能增加參與教育訓練學習意願，然而訪談過程皆表示無論何種獎勵，公平性是執行時考量的重要因素，激勵的實施可能會帶來社會觀感不佳與執行的困難，以參與訓練的數量和所持有的證書作為升遷和年終考量，可能變成工作業務與教育訓練上的失衡，故主管的鼓勵與自主性是優質教育訓練的最佳動

力。

(三)自行研讀採密集或分散式辦理各有其優缺點，建議依該年度各單位人力狀況討論辦理之。

(四)通過考評制度是一種肯定，雖然辛苦但會對學習更投入。

(五)師徒制的帶領對學習的影響。資深視察員的帶領與經驗傳承，為實務作業學習最有效的方式，面臨屆齡退休潮，這些寶貴經驗留存，製作成案例分析的上課教材、工作日誌，成為將來作業上的經驗參考，對實務作業影響有幫助。

(六)輻射防護處因業務較為多元廣泛，故完成兩科的見習對經驗歷練有助益，多數對調動時間點沒有表示意見，部分建議，制度與規定能明確落實，會對視察員證書與制度有助益，在工作業務熟稔與調動時間點找到平衡點。

七、公務人員高等考試三級考試，核子工程暨輻射安全類科錄取，分發制原能會相關業務單位，包含原能會、物管局、核研所等單位，從原能會組織架構表中，發現原能會組織分工專業，教育訓練規畫表中亦發現：一年當中各單位舉辦不少的訓練課程，新進人員對相關教育訓練之整體方向較難以掌握，因此，建構一種學習地圖或訓練地圖的模式，容易清楚各單位所辦理訓練的方向性，對整體原能會教育訓練有初步概念，選擇、時間規劃與參與必會更積極。

八、原能會視察員分級制度落實。資深視察員或資深同仁的師徒制帶領，無論在見習訓練或工作實務，是主要學習的對象來源，故視察員制度落實，對經驗傳承與資深視察員帶領之人力有助益。

九、原能會教育訓練開課時間問題。原能會各單位業務差異甚大，各單位重點工作業務與繁忙時期不同，各處辦理教育訓練之主要參與對象為該處內同仁，勢必以該單位之時間點作考量，開課時間可能發生重疊，此為一般上課研習之問題。然主要課程必定每年辦理，公務人員等訓練有基本時數，故個人時間規劃與對各個教育訓練之方向與概念，為選擇之依據。

十、原能會各單位教育訓練課程名稱不少會重複，有無統一開課或抵免之可能性？同一上課名稱，不同單位的授課對象，其工作需求、上課內容與深入程度皆不同，如同大學普通物理學，深度廣度因授課對象系別不同而有差異。故此課程概念對原能會而言實施實質意義不大。

十一、基礎訓練課程、專業訓練課程開課時間太集中，造成時間無法配合以及學習吸收的困難。基礎課程與專業課程常採用集中式辦理，從教育訓練分析資料得知，上課時數必須達5/6才能參加檢定，以一週式密集課程而言，只要一天請假或工作業務因素而缺課，該年度唯一一次的訓練課程便無法達成，此外，密集式課程有時對非相關領域會產生吸收上的困難。若採取分散式開課，也可能造成課程不連貫、複習與檢定辦理的困難。兩者各有其優缺點。

#### IV. 結論

原能會人員，替全國人民把關原子能相關作業，能通過公務人員高等考試三級考試，專業上具有一定的實

力，從調查得知，原能會相關專業訓練對專業技術職能完備，其中以實務訓練課程，對職能學習助益最大，故師徒制與資深人員的帶領對工作業務學習影響最鉅。此外，潛在職能學習，對原能會人員同等重要，包含溝通服務技巧、判斷與決策、語言表達等職能，於原能會人員執行相關業務如：電廠稽查督導、輻防稽查、核安演習與核能教育時，和業者、民眾或媒體互動往來，故藉由公務人員訓練：性別、法規、行政罰法、人權等研習，逐漸增強潛在職能，與專業職能相輔相成，對工作充滿信心。

新進人員希冀對自己工作專業領域上手，研習時間的規劃，進入原能會1~3年以專業領域為主，之後可以開始接觸性別、行政等相關議題，對工作歷練有某種程度的幫助。

在加速新進人員相關教育訓練相關策略上，研究過程中發現「加速」一詞，除了時間縮短外，藉由教育訓練過程而習得相關能力的品質、深度與廣度亦包含在其中。故加速新進人員學習，本研究提出相關策略之結果、研習安排建議、影響學習等因素，縮短時間完成教育訓練可能性不大，然有順序之教育訓練規畫安排、對教育訓練整體藍圖的認識、性別、法規、行政罰法、人權等研習與專業職能相輔相成，皆能加速學習。

#### 參考文獻

- [1] 黃英忠(2000)，人力資源管理，台北：三民書局。。
- [2] 原能會 100~102 年報。
- [3] 張火燦(1998)。策略性人力資源管理。台北市：楊智出版。洪昭榮(1991)。人力資源發展，台北：師大書苑，頁 10
- [4] 森五郎，1981。勞務管理概念，東京：泉文堂，頁 109
- [5] 徐宗國(1997)。質性研究概論。台北市：巨流圖書。
- [6] 張邵勳(2001)。研究方法。台北市，滄海出版。
- [7] 江紋彬(2001)。製造業與服務業教育訓練人員專業能力內涵及培訓策略之研究。國立彰化師範大學工業教育學系碩士論文李俊穎(2001)。汽車修理業教育訓練需求之研究。國立彰化師範大學工業教育學系碩士論文
- [8] 成之約(2009)。職業訓練師資培訓架構與實施方法探討。行政院勞工委員會職業訓練局委託計畫。
- [9] 林世安(2011)。職能理論與實踐，TTQS 訓練品質系統實施計畫，勞動力發展署。
- [10] 徐昌慧(2008)。澳洲技職教育與訓練之品質保證機制，教育部評鑑雙月刊第 16 期。
- [11] 楊尊恩、林文政(2004)。訓練人員專業職能量表之建立，國立中央大學人力資源管理研究所碩士論文。黃同圳(2003.12)，公務訓練機構訓練業務人員所需職能及在職訓練課程之研究。
- [12] 李右婷、吳偉文等人(2006)，建立職能分析能力課程規劃及運用試作之研究，行政院勞工委員會職業訓練局泰山職業訓練中心。
- [13] 康自立(1982)。工業職業教育能力本位課程發展之理論與實際。

# 核能議題的政策論證與風險溝通：網路輿情分析的應用

## Policy Argument and Risk Communication on Nuclear Energy Policy - An Application of Internet Public Opinion Analysis

計畫編號：NSC 104-NU-E-004-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：蕭乃沂 副教授

協同主持人：黃東益 教授

e-mail：[nhsiao@nccu.edu.tw](mailto:nhsiao@nccu.edu.tw)

計畫參與人員：劉奕宏、林威志

執行單位：國立政治大學公共行政學系

### 摘要

依據 2013 年數位機會調查，我國 12 歲以上民眾有 76% 已經上網，20-60 歲更高達九成以上；其中又有大約三成的上網民眾曾經在政府或其他網站（如特定討論區、社群媒體如 Facebook）上發表對於政府與特定公共政策議題的看法。尤其對於核能（包括核四廠、能源規劃）等具備專業複雜度與價值爭議性的公共政策，傳統民意蒐集管道如大眾傳播媒體、專家學者座談、與針對一般民眾電話調查，以上述民眾逐漸習慣於在網路上表達意見的趨勢來看，不論是資料數量與更新速度都已經超越傳統民意蒐集管道所能妥善代表的程度。更有甚者，具備專業複雜與價值爭議政策的政府主管機關，也逐漸無從瞭解網路輿情的趨向，更遑論妥善因應與溝通。

緣此，利用網路巨量資料（或海量資料、大數據，big data）進行民意調查更成為政府及政策研究機構必須面對的趨勢，尤其對於高衝突爭議的核能議題而言，如果能以先進技術蒐集分析呈現網路民眾的隨特定事件變遷的大量多元意見，並妥善與傳統民意調查途徑予以整合運用，也將成為政策行銷與風險溝通的另一重要的循證基礎。本研究即企圖透過先進的網路輿情分析技術，蒐集分析多元網路媒介上民眾對於核能政策與其相關議題的意見，並且在一段期間內觀察其變化趨勢，同時與當時的政治社會事件對照論述，一方面企圖萃取網路輿情在核能議題上的政策論證，同時對照政府主管機關的政策文件與溝通內容，另一方面也特別探討對於核能議題上風險溝通的意涵。

關鍵字：核能、風險溝通、網路輿情、大數據、政策論證

### Abstract

According to 2013 Survey of Digital Opportunity, 76% citizens in Taiwan have used the Internet, and 30% of the so-called netizens have posted opinions on the websites of governments and other organizations including Facebook and PTT. Particularly for those highly professional and value controversial policy issues like Nuclear Energy, the public opinions on the Internet have gone beyond what traditional survey approaches can handle in terms of hug volume and fast updating of data. Public agencies and officials also lack knowledge and skill to

transform the public opinions on the Internet to effective policy marketing and communication.

Accordingly, the proposed study aims to collect and analyze the public opinions on the Internet regarding Nuclear Energy in Taiwan. As we call the process Internet Public Opinion Analysis (IPOA), the keywords, important and relevant events, and policy issue sentiments will be analyzed and presented in aid of involvement of domain experts and the framework of policy arguments. The results are expected to shed light on policy analysis for the Nuclear Energy issue, with special contribution to the policy authorities in charge of policy marketing and risk communication.

Keywords: Nuclear Energy, Risk Communication, Internet Public Opinion, Big Data, Policy Argument

### I. 前言

在網際網路服務普遍發展的現今，不分地區、年齡、種族、性別，所有的民眾可以簡單地透過終端設備於討論區、社群網站及部落格討論公共議題，與日俱增的社群大數據資料，經由系統及人工分析成為政府施政過程中有效的決策支援。在政治領域運用社群大數據資料作為民意探索的著名案例，為 2012 年美國總統歐巴馬利用社群資料分析贏得美國第 44 屆總統競選。以我國現況而言，依據 102 年數位機會調查結果，12 歲以上民眾有 76% 已經上網，20-60 歲更高達九成以上；其中又有大約三成的上網民眾曾經在政府或其他網站（如特定討論區、社群媒體如 Facebook）上發表對於政治、社會、公共政策的看法，預期此上網表達公共議題看法的比例將逐漸提升（行政院研究發展考核委員會，2013）。

尤其對於核能（包括核四廠、能源規劃）等具備專業複雜度與價值爭議性的公共政策，傳統民意蒐集管道如大眾傳播媒體、專家學者座談、與針對一般民眾電話調查，以上述民眾逐漸習慣於在網路上表達意見的趨勢來看，不論是資料數量與更新速度都已經超越傳統民意蒐集管道所能妥善代表的程度。更有甚者，具備專業複雜與價值爭議政策的政府主管機關，也逐漸無從瞭解網路輿情的趨向，更遑論妥善因應與溝通。

緣此，利用網路巨量資料（或大數據，big data）進行民意研究更成為政府及政策研究機構必須面對的趨勢。以 2012 年 9 月至 2013 年 9 月期間之核能議題為例，核能相關議題大約有 13 萬則，分析議題內容，核

四議題主導了整體核能聲量走勢（意藍資訊，2013）。進一步再將討論內容進行細部歸納、整理，其中又交錯了包括公投議題、電價、核能災害應變、替代能源、核四商轉…等不同面向的議題，同時探究民眾對於核能議題的關切重點，透過社群大數據資料分析，可隨時了解大量、即時、自然的民眾聲音，並評估政策溝通的有效性，提供更具效能的公共政策溝通及決策支援的參考資訊，同時也將有利於審議民主過程的品質（廖洲棚等，2013；Yiu, 2012）。

## II. 主要內容

本研究即企圖以網路上的民眾意見為來源，透過先進的網路輿情分析技術，蒐集分析多元網路媒介（包括大眾新聞媒體的網路版、政府與民間網站、討論區如 PPT、部落格、社群網站如 Facebook 等）上一般民眾對於核能政策與其相關議題的意見，並且在一段期間內觀察其變化趨勢，同時與當時的政治社會事件對照論述，一方面企圖萃取網路輿情在核能議題上的政策論證（policy argument，馬群傑譯，2011），同時對照政府主管機關的政策文件與溝通內容，另一方面也特別探討對於核能議題上風險溝通的意涵。具體而言，本計畫的研究目的如下：

1. 網路輿情分析實作：以網路上的民眾意見為來源，透過先進的網路輿情分析技術，蒐集分析多元網路媒介上一般民眾對於核能政策與其相關議題的意見，在一段期間內觀察其正負面情緒、政策立場、與關注論點。因此，本研究針對 2015 年 3 月 14 日的反核大遊行進行網路輿情的情緒分析。
2. 建立網路輿情立場分析模型：本研究除了針對特定核能議題一反核大遊行進行網路輿情的情緒分析之外，亦希望建構網路輿情的立場分析模型，因為情緒分析僅能分析網友對於政策或議題的態度是屬於正面或負面，但無法判別立場，對於政策分析與運用上有局限性。因此，本研究嘗試建構網路輿情立場分析模型，分析整年度的網路輿情立場分析，因為了解網友的立場論述會比情緒態度更具政策上的實用性。
3. 風險溝通策略研擬：以上述研究成果為基礎，對照政府主管機關的政策文件與溝通內容，研擬政策主管機關在相關議題上的風險溝通與政策行銷策略。

## III. 結果與討論

### A. 網路輿情分析實作

本研究與意藍科技合作，針對 2015.03.14 反核大遊行網路輿情情緒分析，本分析主要針對主文來觀察各自論點與策略（主文較具有明確論述與傳播）篩選出真正在談論 314 反核活動的。三期總主文數為 1903 則，篩選後為 1126 則，依據篩選後主文，做以下分析流程：共分三期分析，分別為準備期、爆發期、結束期（依據聲量走勢判定）。依據來源聲量佔比高的網站：FB、Ptt（含前三名作者）、新聞，觀看前十大關鍵熱門頻道。輿論區分三大類分析方向：活動資訊傳播、綠黨綠盟主打策略、其他（網友疑問或反反核遊行等）。進行分析後，有下列

幾點發現：

針對整體網路輿情聲量走勢：

1. 總聲量走勢在爆發期聲量爆增約為準備期的 18 倍。
2. P/N 比變化後期負評上升，因廢核配套不足，且政策不實際造成。
3. 來源佔比社群網站高達 69%，其中又以 Ptt 與 FB 佔 96%。
4. 來源頻道均發文數，相較於其他來源，社群網站容易大量傳播資訊。
5. 作者均發文數 Ptt 與 FB 相比，FB 卻在爆發期前均達 1.4 篇，表示同相同作者大量宣傳 314 反核活動，又以環保團體居多。

造成 314 反核活動今年人數不如往年之原因（網友輿論）：

1. 廢核配套不足：  
荒野講師黃其君提出，讓網友開始正視此問題，台灣天然資源缺乏，且綠能發展技術有限，因此沒有較實際可行的替代能源…等，若要廢核與廢火力是不太可能。
2. 廢核=空汙：  
網友覺得廢核後，台灣主要發電為火力，火力會嚴重空氣汙染，造成生病或致癌…等。
3. 廢核電價漲：  
大多數網友無法接受，也會嚴重影響荷包，但反核者卻覺得現在電夠用無需求，台電在嚇人與恐嚇。
4. 遊行後能源生活型態依舊不變：  
網友覺得每次上街遊行提出一堆述求，到最後一點改變都沒有，只是浪費力氣而且也覺得麻痺了。
5. 政策不切實際：  
蔡英文提出省下一座核電廠，2025 非核家園，但遊行當天卻是騎腳踏車發電，讓網友覺得人力可以取代核能嗎，很不切實際。
6. 從認購綠電到踩腳踏車發電：  
網路上擁核者對於反核者，至從講師黃其君認購綠電開始，網友要求反核者也要購綠電，到後來蔡英文踩腳踏車，變成要求反核者去騎腳踏車之言論。
7. 遊行淪為政治炒作：  
新聞大量曝光蔡英文下令全黨總動員訊息，以及政黨人物頻繁出現，讓網友覺得是作秀，為了選票，非實質反核，感到煩感。
8. 述求環保卻不環保：  
網友覺得因該是做公益或到海邊撿垃圾才對環境與永續發展有益，而不是上街走走、辦演唱會與擺攤位等吃喝玩樂活動，來吸引人。

### B. 立場模型建立過程與年度核能議題立場分析

過去網路輿情情緒分析僅能判斷網友的情緒屬於正向或是負向，但沒有辦法分析網友的立場，然而公共政策中若僅探討民眾的情緒是無法深入理解民眾的想法，民眾的立場論述才是對政府落實公共政策的重要依據，因此，本研究欲建構網路輿情立場分析，希望藉由探勘網路輿情，進而分析網友在核能政策上的立場。本

研究已經將立場分析模型建構完成，建構流程請詳見下圖 1，分成下列階段：

#### 1. 確定分析政策或主題

- (1) 原能會：提供本研究案政策範圍建議（能源政策—核能政策—核四政策）
- (2) 政大研究團隊：針對核能政策蒐集公聽會或核能研究相關資料
- (3) 意藍科技：針對核能政策蒐集網路輿情資料，為議題相關性高之網友輿論文章共 2 萬筆(2015/1~5月)。

#### 2. 確立立場類型與論述方法

- (1) 政大研究團隊—蒐集核能與政策論述文獻，歸納後將立場類型分為擁核與反核，論述方法有使用統計資料的論述、使用其他政策類比的論述、使用專家或組織的論述、直觀的論述。
- (2) 意藍科技—依據政大研究團隊的立場類型與論述方法定義關鍵詞編碼方式。

#### 3. 建立立場關鍵詞資料庫

- (1) 意藍科技：提供網友針對核能政策新聞的網路留言 2 萬篇，請政大研究團隊依據關鍵詞編碼簿進行立場關鍵詞資料庫建構。

#### 4. 網路輿情立場分析模型建構

- (1) 政大研究團隊：請 2 位對核能政策有專業程度的研究生進行立場關鍵詞資料庫的建立，依據核能政策公聽會紀錄與意藍提供的 2 萬筆網友對核能政策新聞的網路留言，配合意藍建構的關鍵詞編碼簿進行關鍵詞資料庫整理，2 位研究生依據專業進行判斷，從 2 萬筆資料分別找出擁核立場 1 千篇，反核立場 1 千篇，並標註該立場的立場關鍵詞，擁核與反核立場各 1 千篇都要兩位研究生一致共識才能納入。

#### 5. 網路輿情立場分析資料信度檢測

- (1) 意藍公司：針對政大研究團隊所提供的網路輿情立場關鍵詞資料庫進行分析模型的建構，大約需要 2.5 周。



圖 1：本研究立場模型建構流程

建構核能立場分析模型後，針對 2015/1/1~2015/12/31 這段期間的核能議題網路輿情進行立場分析，有下列發現：

1. 2015 核能年度輿論，情緒負評相對高占 38.3%、而立場擁核相對比反核高，推測為核能廢除情勢即將定，帶起擁核者的反對聲量出現。
2. 以 2 月與 10 月反核聲量相對較高，2 月主要是 314 反核遊行準備期，值得一提的是從 3 月開始擁核聲量逐漸高漲，主因是無完整配套政策，以及《非核家園推動法》草案通過等，但於 10 月再度引起大量反核聲量主因是核電廠多起事故引發民眾恐慌，以及蔡總統：邁向非核家園政策等，之後則因空汙問題帶起擁核聲量多等。
3. 網友在哪討論，PTT 占 40%是最主要論戰的地方，其次是新聞占 27.7%、FB 占 22.7%，為三大主要討論源。
4. 三大討論源網友的傾向，皆為無立場且負評占比較高，主文方面可發現 PTT 較偏向於擁核、FB 偏反核、新聞介於兩者之間；回文方面新聞偏擁核、FB 偏反核、PTT 兩者勢均主要是雙方論戰造成。
5. 三大討論源之各月網友傾向，情緒與立場相關係數:0.19(未達顯著)，當扣除 FB:2、10 月後，相關係數:0.36(達顯著)，表示 FB 主要於此兩個月有較高的活動與政策資訊傳遞；12 個月分布，FB 情緒起伏較大、新聞立場起伏較大，主要是因新聞內容，而引發不同立場網友回文、PTT 情緒與立場穩定。
6. 三大討論源之網友集中頻道，PTT 是 Gossiping 占 72%相當高，新聞是 yahoo(非原生新聞為引用媒體)、蘋果、聯合占較大宗，而 FB 除了新聞類粉絲團外、核能流言終結者、媽盟、蔡英文粉絲團占較大宗。

7. 在哪討論-高立場月份前十頻道之活躍程度，三大討論源立場比，最大於12月、最小於2月、10月，2月較活躍頻道是FB-綠盟、媽盟、廢核平台、蔡英文、Ptt-PublicIssue，多數屬於314遊行活動發布頻道；10月是FB-蔡英文(提唱非核家園)，而FB-風傳媒、聯合新聞是報導輻射塵水洗、核一廠除役、事故等；12月主要是新聞媒體報導空汙遊行、漲電價、缺電等引發網友討論，因此可發現媒體、反核頻道影響網友立場明顯。
8. 五大原生新聞年度擴散狀況，前5小時為新聞被轉貼或引用擴散黃金時段，其中中央社前1~5小時被轉貼引用的自身各小時平均占比最高，唯獨聯合非最高，反而是6~24小時較高一些，屬於擴散速度較慢之媒體。
9. 五大原生新聞年度擴散狀況之頻道出現機率，五大原生被轉貼或引用以Ptt的Gossiping皆出現且機率相當高，顯示為主要快速轉貼且高討論量的頻道，其次皆為各自的FB粉絲團；中央社主要是被其他新聞平台如Sina、yahoo、Hinet等引用，其餘四大原生新聞被FB核能流言終結者轉貼機率高、自由時報FB媽盟轉貼機率高、蘋果被查週刊、風傳媒轉貼機率高。
10. Ptt輿論文字雲，反核議題明確聚焦於核廢料、核災、輻射；擁核聚焦嘲笑飯盒，空汙問題被點出。
11. FB輿論文字雲，反核議題明確聚焦於核廢料、核災、輻射；擁核聚焦貼近民生需求討論，缺電、漲價問題。
12. 新聞輿論文字雲，反核議題明確聚焦於核廢料、核災、輻射；擁核聚焦能源議題，兩立場皆政治謾罵。

### C. 風險溝通策略研擬

除了意藍科技進行的網路輿情分析外，本研究亦針對反核輿情進行風險溝通類型的分析，以人工判讀的方式，分析意藍科技運用電腦演算法所判斷的網路輿情，增加分析的準確度，並且分析原能會FB與新聞稿的文章內容，與反核網路輿情分析立場進行比對，瞭解原能會進行風險溝通的狀況，並且研擬風險溝通策略。

首先定義風險溝通的類型

1. 安全風險：是否擔心核能發電本身的安全性（強調核能本身的安全）
2. 功能風險：是否擔心核能發電無法達到預期的發電效率（強調核能發電率差）
3. 財務風險：是否擔心核能發電的效益較真實成本偏低（強調核能效益差）
4. 環境風險：是否擔心核能發電破壞生態環境（強調核能會破壞環境）
5. 社會風險：是否擔心持續使用核能發電會破壞社會和諧（強調核能讓社會衝突）

6. 災害風險：是否擔心核能發電無法避免無預警的重大天然災害（強調核能無法擋天災）。

以上述分類為基礎，接續分析意藍科技經由演算法分析的反核網路輿情言論，主要分析3月份有關反核的網路輿情。主文共計1407篇，經人工判讀後與核能有關的主文共計1040篇（73.29%），其中立場屬於反核共有372篇（35.77%），擁核668篇（64.23%）。回文共計2680篇，經人工判讀與核能有關的回文共計2227篇（83.10%），其中立場屬於反核共有1156篇（51.91%），擁核1071篇（48.09%）。

主文有372篇有關反核輿情的風險溝通內容，主要聚焦於安全風險（265篇，71.24%）、環境風險（166篇，44.62%）與災害風險（40篇，10.75%）上，而功能風險、社會風險與財務風險所佔的篇數比例都低於10%。

回文有1156篇有關反核輿情的風險溝通內容，主要聚焦於安全風險（745篇，64.45%）、環境風險（249篇，21.54%）、財務風險（116篇，10.03%）與災害風險（94篇，8.13%），而社會風險與功能風險篇數所佔的比例都低於5%。因此，反核立場的風險溝通強調安全與環境風險。

分析原能會FB文章資料（2015/10/23~2016/3/31），原能會FB有104篇文章，與核電風險有關的文章有22篇（21.15%），主要聚焦於安全風險（15篇，68.18%）與環境風險（15篇，68.18%）上，另外與災害風險的有3篇，佔13.64%，而所有文章都與社會風險、功能風險與財務風險無關。原能會FB文章針對核能風險相關的文章數約佔1/5，文章進行風險溝通聚焦於安全風險與環境風險溝通資訊的傳遞。

分析原能會新聞稿（2015/1/1~2015/12/31），原能會2015年有28篇新聞稿，與核電風險有關的文章有20篇（71.43%），主要聚焦於安全風險（19篇，95%）上，而與環境風險有關的有8篇，佔40%，與災害風險有關的有6篇，佔30%，另外所有新聞稿皆無提及功能風險、社會風險與財務風險。原能會多用新聞稿進行風險溝通資訊的傳遞並強調核能安全風險的回應。

依據上述分析，研擬下列幾點風險溝通策略：

1. 由於原能會FB文章僅有21.15%的文章針對核能風險議題的說明與溝通，原能會FB可增加有關核能風險溝通資訊的傳遞。
2. 原能會FB可增加針對災害風險溝通的文章：依據網路輿情資料分析，反核網友主要強調安全風險、環境風險與災害風險的議題，而原能會FB的文章與災害風險有關的文章僅有3篇，僅佔13.64%，而核能是否能抵抗天災則是近年國際與我國皆關心的核能風險議題。
3. 增加FB回文的討論：原能會FB文章中有關核能風險的22篇文章的討論度與回應度太低，沒有一篇文章回文數超過10則，欠缺風險溝通過程中的資訊討論溝通過程。
4. 增加FB與新聞稿對於災害風險上的資訊傳遞與溝

通：原能會新聞稿雖有較高比例是針對核能風險議題，但絕大多數都強調安全風險上的資訊傳遞（佔了95%），對於災害風險的資訊傳遞，建議可以增加有關災害風險資訊的提供。

5. 原能會可針對核能運作的成本效益等資訊藉由新聞稿與 FB 文章讓民眾知悉：除了安全風險、環境風險與災害風險的資訊溝通外，財務風險亦為網路輿情中回文所重視的議題（佔回文的 10.03%）。
6. 增加對特定核能議題進行主動的資訊提供與討論：分析新聞稿與 FB 文章發現，原能會較少積極針對社會上與核能有關的社會運動進行主動的回應，像是針對 314 反核大遊行的訴求進行發文。

#### IV. 結論

本計畫成果可以從理論面與實務面來說明：

1. 理論面：現今已經進入網際網路的時代，政府政策的推動與行銷已經不能再從傳統的民意調查或由上而下的政策行銷方法瞭解民眾對政策的態度與需求，本研究以網路輿情探勘的方式來分析民眾對核能政策的立場與論述，對於政府公關、政策行銷、公共政策分析、審議式民主與風險溝通等理論進行學術上的補充。
2. 實務面：本研究建構的網路輿情分析模型為一個運用大數據（big data）的數據分析方法，符合現今資訊爆炸的環境需求，讓政策主管機關可以瞭解核能政策的網路輿情，在設計與民眾進行風險溝通的策略時，可以更確切瞭解民眾訴求，並且提供更有創新性的政策行銷策略。

本研究嘗試將立場分析帶入網路輿情探勘，由於為初探性的研究，過程與結果有下列幾點可提供後續研究發展：

1. 增加立場模型準確度：本研究經由人工判讀意藍科技透過演算法分析的反核網路輿情，發現該演算法的立場判斷準確度偏低。首先主文的部分，意藍科技演算法分析出 3 月共有 1407 篇屬於反核立場的主文，但經由人工判讀發現，1407 篇主文只有 1040 篇（73.29%）與核能有關，而與核能有關的主文，實際屬於反核立場的主文只有 372 篇（35.77%），主文立場分析的準確度僅有 26.22%。另外在回文的部分，意藍科技演算法分析出 3 月共有 2680 篇屬於反核立場的回文，但經由人工判讀發現，2680 篇回文只有 2227 篇（83.10%）與核能有關，而與核能有關的回文，實際屬於反核立場的回文只有 1156 篇（51.91%），主文立場分析的準確度僅有 43.14%，未來可將人工分析的資料提供給意藍科技，讓其修正演算法程式，增加模型立場判斷準確度。
2. 降低無立場數量，增加立場分類：資料探勘的期間為 2015 年，共有 28 萬多筆有關核能的討論，但僅有 77500 筆能被歸類為擁核與反核的立場，若是可以增加立場的強度作為分類種類，可以讓立場分析更為細緻。

本研究建構一個立場模型流程，未來各單位可運用資料探勘的技術，針對不同政策與議題進行立場分析，建立一個產官學合作的模式。本研究嘗試建構資料探勘的立場模型，準確度上還有進步的空間，未來可以在研擬增加準確度的方法。在風險溝通上，原能會 FB 可增加與核能風險有關的溝通資訊，並且增加有關災害風險與財務風險的資訊提供。

#### 參考文獻

- [1] 行政院研究發展考核委員會，2013。102 年數位機會調查報告。
- [2] 意藍資訊，2013，核能議題研究分析報告。
- [3] 馬群傑譯，2011。公共政策分析，William Dunn 原著，台北：巨流
- [4] 廖洲棚、蕭乃沂、陳敦源、廖興中，2013。運用巨量資料實踐良善治理：網路民意導入政府決策分析之可行性研究，台北：研究發展考核委員會與電子治理研究中心委託研究報告。
- [5] Yiu, C. (2012). The Big Data Opportunity: Making Government Faster, Smarter and More Personal. London: Policy Exchange.

# 大專生對核能相關議題之態度調查與最適溝通模式之探討

## The Attitude Survey and Exploration of the Optimized Communication Mode for the Undergraduate Students to the Issues of Nuclear Energy

計畫編號：MOST 104-NU-E-032-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：王居卿

e-mail：[chuching@mail.tku.edu.tw](mailto:chuching@mail.tku.edu.tw)

計畫參與人員：莊秀禎、劉念慈、趙麗玲

執行單位：淡江大學企業管理學系

### 摘要

本研究乃是一個實證性的調查研究，主要目的欲探討我國大專生對核能相關議題的認知與態度、及他們對在核能相關議題上所偏好的溝通方式，進而找出在溝通大師 Eric Berne 所發展 TA 理論（PAC 模式）模式中的最適溝通模式。換言之，本研究聚焦在「我國大專生對核能相關議題的認知與態度」與「我國大專生對核能相關議題所偏好的溝通方式」二大議題。本研究針對全國所有縣市進行分層隨機抽樣去選擇某特定大專院校，然後在針對該院校進行配額集群抽樣調查，結果在 20 縣市共 25 所大專院校的在學大學生中，共回收 1,501 份有效問卷，本研究即針對這些樣本去進行描述性與解釋性的統計分析。

關鍵詞：核能議題、核能溝通、溝通模式、核能態度、核能知識。

### Abstract

This research is an empirical survey study, and the major purposes are to explore the Taiwan's university students' cognition and attitude and their preference of communication mode to nuclear-related issues, and then find out the optimized communication model which is suggested by Eric Berne's TA theory model. This study selected the researched universities by stratified sampling from all counties/cities in Taiwan, and then conducted the survey from those selected universities by cluster quota sampling. Finally, 1,501 copies of questionnaires are available in 20 counties/cities and 25 universities, and these are analyzed through statistical description and testing.

Keywords: Nuclear-related Issues, Nuclear Communication, Communication Model, Nuclear Attitude, Nuclear Knowledge.

### I. 前言

綜觀世界各國對於核電議題，民眾無論支持者或反對者，大體而言均存有或多或少的疑慮與恐懼；我國政府則在經濟發展與民生用電的現實考量下，不敢輕言立即廢核，此乃是在核四安檢通過後，封存三年的主要原因之一。在擁核與反核情結的對立下，如何訂定周延可行的能源政策遂成為考驗政府領導人智慧的重大課題（Han, 2014）。事實上，反核民眾基於恐懼情緒提出廢核要求，政府決策者卻聚焦於理性宣導，結果必然形成

雞同鴨講，也勢難促成共識的產生。其實，「雞同鴨講」乃意味著在溝通的要素（例如信息內容、溝通管道、信息傳播者、閱聽眾或溝通情境等）上存在著一些不適的問題。基此，吾人若能找出目前在國內關於核能發電之重要議題，並在溝通的環節上到底發生了哪些問題？並加以有效地克服，乃是有效溝通的關鍵。由於所有的衝突、對立或抗議，是因缺乏「共識」所致，而共識的形成乃奠基於彼此的思想是否具有共同的「參考架構（framework of reference）」及「同理心（empathy）」；亦即，是否站在同一個觀點（心態）去看一件事情。換言之，要讓國人能理性地來面對核能發電的相關議題，那就要設法讓社會大眾，特別是那些重要的利害關係人（stakeholders）（如環保團體、核電廠社區居民、意見領袖等）能有共同的參考架構及同理心去站在同一個觀點去看待那些重要的議題（如核安、核廢料、政府政策及相關單位的專業能力等）。

觀之各國，在核能發電的相關議題上，沒有一個國家像我國一樣一直紛擾不休，而致使一些重要的公共決策持續被延宕！本人經過長年的觀察與過去三年來對核能溝通的實際深入研究得知，造成此現象的主要原因不外來自於：

1. 非理性的政治對立，使政府決策單位無法立即果斷決策；
2. 擁核與反核人士以不對等的心態在進行溝通對話（即使用了本研究所謂的「交叉式」溝通模式）；
3. 不同利害關係人的自利本位主義，追求彼此不相容的目標；及
4. 一般民眾的盲從與對政府及專家學者的不夠信任。

若以上四個現象未有效地去加以改善，亦即若各利害關係人缺乏「共識」，而想去「共事」解決問題，似乎是緣木求魚。其實，目前世界各國對核能幾乎都仍持肯定與支持的態度，雖然德國政府敢宣佈廢核，主要乃是政府多能源政策（特別是太陽能政策）的奏效、民眾的理性素養、與該國與歐洲電網的互連（特別是法國的核能電網）。反觀我國，處在前述的四大不利因素下，欲迅速解決核能的相關議題，實屬不易；雖然如此，但若取得各利害關係人適當程度的「信任」與「共識」，相信任何問題將可逐步迎刃而解。如前所言，彼此能「共事」需要「共識」，而「共識」有賴於知識的共享，而共享更需奠基在資訊分享的適當「溝通」平台上；換言之，進行有效的「溝通」，乃是化解前述四大不利因素

的基石 (cornerstone)。

若欲進行有效的「溝通」，則須先了解對方的人格心理狀態，才能以適合的溝通模式 (communication mode) 去進行溝通。加拿大的溝通大師 Eric Berne 於 1957 年所發展的人際交流分析 (Transactional Analysis; TA) 技術，又稱為 PAC 模式，極適合作為面對多元利害關係人與議題複雜的核能溝通模式探討，本研究即將以此理論模式去進行分析研究，希望透過對溝通對方 (即本研究的研究對象—大專生) 所處之人格狀態的了解 (意即進行民意調查與分析) 後，能提出一個有效的溝通模式及相應的溝通策略給相關單位參考。

其實在溝通模式內涵中，表明著一個有效的溝通其關鍵在於溝通雙方是否心意相通，彼此是否真正相互了解，而欲達到此境界，首要在於對溝通對象 (Whom) 心理認知的了解，此即所謂的「知己知彼」；接著，需決定由誰 (Who) 透過何種管道 (Where) 如何 (How to) 去傳遞哪些信息 (What)？因本研究的主要目的是對大專生去進行其對核能安全議題的態度調查，亦即應聚焦在 Whom 上。然而，若只進行一般的態度調查，充其量只能達到點式的靜態 (static) 了解，而若要對對方有較永續的動態 (dynamic) 了解，則須從真正了解對方的人格狀態下手 (此乃因人格是人類較持久性的特質)；唯有如此，才能確認如何 (How to) 去有效地與對方溝通。簡言之，本研究的主要任務，除了去蒐集大專生 (Whom) 的核能態度資料外，更希望能透過這些資料的統計分析，去找出該如何 (How to) 去跟他們溝通。

與各利害關係人的充分「溝通」是我國解決正處於僵局的核能議題的重要工作，雖此只是一個前置工作，但往往這是在任何組織變革 (change) 中最困難與最需花時間的工作，此在「好的開始是成功的一半」信念下，對一個重要的決策議題是絕對必要的。在組織變革的理論模型中，Lewin (1951) 所發展的三階段變革模型是最被肯定與廣為使用的過程理論，該模型將變革分為「解凍→改變→再凍結」三個階段，而變革的內容構面 (或方向) 則可分為結構、人員與技術三方面 (2009)。雖然我國已蓋好了四個核電廠 (即在技術面已改變)，而核一、核二與核三廠亦可視為已進入「再凍結」的階段，但在近年來，四個核電廠的議題仍然紛擾不休，此從 Lewin 的理論來看，意味著目前我國的核能議題仍處在「人員」方面的「解凍」階段。面對此「人員」的「解凍」變革，Lewin 的模型正是本研究的另一個理論基礎。

雖然我國目前有關核能相關的議題均裹足不前，而且所牽涉到的利害關係人又相當多元與複雜，因此在一年內要對所有的利害關係人進行客觀且全面的大規模隨機實證調查，是不可能的事情。經過國內社會這幾年來的風風雨雨，可知現在的大學生不但敢言、能言，而且其影響力更不可予以小覷，特別是在媒體溝通的能力上，實可展現出載舟與覆舟的能耐，此可從最近為服貿事件而佔領立法院之事窺其一斑。基此，今年本研究將先針對這族群去進行資料的蒐集、分析與探討，若成效良好，有機會明年再去針對困難度較高的一般民眾去研究。申言之，本研究之所以先鎖定大專院校學生去進行研究調查，主要原因除上述所言外，尚有如下：

1. 該族群在 102 學年度全國共有約 135 萬的學生，不但

是最大族群之一，而且是研究者在研究過程中最容易掌握的；

2. 該族群之母群體明確，最容易接觸，而且調查較容易，配合度也高；
3. 各縣市均有大專院校 (除連江縣外)，而且學校的學生亦來自全省各地，符合本研究所採行的集群抽樣 (cluster sampling) 法；
4. 大專生在信息的傳播上，不論是技術應用、管道操弄與群聚力等均甚強；
5. 大專生的價值觀有別於傳統，自主性強，而且敢做感言；
6. 大專已儼然成為意見領袖之一，一些親朋好友亦會受他們影響；
7. 大專生對社會運動的參與，不但積極，且似已蔚為風潮性；及
8. 在經費預算的有限下，以微薄的 100 元便利商店禮券作為填答問卷的誘因，對學生而言，仍具吸引力。

基於以上的背景論述與問題說明，本研究的主要目的 (工作項目) 如下：

1. 針對全國 21 縣市的大專校院學生族群，以隨機的配額集群抽樣方法去進行實證的問卷調查，以了解該族群對核能相關議題 (特別是核四存廢、核電廠延役、核廢料處置、核能安全與核能政策等)。
2. 根據回收的有效問卷，去進行相關的統計分析。
3. 應用 TA 理論模型去推演調查分析的結果。
4. 根據研究結果，研擬可行的溝通模式與策略，並提供一些政策性論述與建議，以供相關單位的參考。

## II. 主要內容

### 一、文獻探討與假說發展

雖然本計畫的主要工作項目是針對大專生去進行有關核能相關議題之認知與態度、及溝通模式傾向的問卷調查，其可說是一個單純的資料蒐集與分析的實證研究，只要在調查設計上 (如研究對象、問卷內容、抽樣設計與分析方法等) 加以有效地規劃與執行即可。然而，本研究的主要目的不僅是欲得到調查結果的靜態數據資料 (What)，而是希望能透過這些資料去推論受訪者 (即大專生) 未來可能會如何去行為 (How to)？及解釋為何 (Why) 他們會表現出某特定的行為 (如遊行抗議)？因此，本研究需有一些較客觀、邏輯與實用的理論基礎或觀念性模型來支持與引導本計畫的進行；基此，本研究的主要理論模型包括 Kotler (2012) 的溝通過程模型、Berne (1957) 的 TA 模型、及 Lewin (1957) 的變革模型，以下將簡要說明這些模型的內涵及其理論應用。

#### (一) Kotler (2012) 的行銷傳播溝通過程模型

本研究旨在蒐集大專生對核能相關議題的態度資料，以作為未來欲針對他們進行溝通時的參考。從行銷的觀點來看，本研究的研究對象乃是大專生，此可視為是溝通的視聽眾 (Whom)；溝通的訊息內容乃是核能安全相關議題 (What)；溝通者可為政府、專家學者或代言人 (Who)；而溝通的方法乃是如何去溝通 (How to)。Kotler (2012) 的行銷傳播溝通過程模型正可用來解釋本研究的重點範圍，該模型將訊息的傳播溝通，分為六

階段步驟（如下圖 1 所示），而其中的 Whom、What 與 How to 乃是本研究的重點。

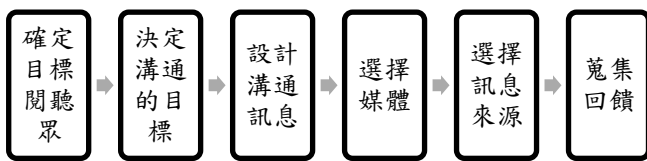


圖 1 Kotler (2012) 的行銷傳播溝通過程模型

## （二）TA 理論模型與應用

### 1. TA 之理論模型

交流分析（Transactional Analysis）的理論又名為人格溝通的 PAC 分析理論，是由加拿大擔任精神科醫生的溝通大師 Eric Berne 於 1957 年所發展的，而在其《人間遊戲（Games People Play）》（1964）一書中，又將 TA 闡釋得淋漓盡致。PAC 模式的溝通心態分為「父母型（Parent）」、「成人型（Adult）」與「兒童型（Child）」三種，而當溝通雙方在溝通時，會因當時彼此所處的 PAC 而產生了不同的對映組合型態，而此彼此的型態（本研究稱之為溝通模式）又可分為「相互型（Mutual）」、「交叉型（Cross）」與「隱含型（Implicit）」三種；其中有效的溝通乃是屬於相互型的，而目前我國存在具爭議性與高風險認知性的核能議題，理論上又以「成人—成人」的理性溝通模式最適合。

所謂「父母型」的心態乃是溝通時，表現出來的態度是較為權威的作風，這種狀態學自父母或其他權威人物。當一個人的人格結構中 P 成份占優勢時，其行為表現為：憑主觀印象辦事、獨斷獨行與濫用權威。這種人講起話來總是「你應該...」、「你不能...」或「你必須...」。「成人型」的心態在溝通時，表現出來的態度是較為客觀和理智的作風，這種人像電子計算機在處理數據一樣，從過去儲存的經驗中去估計各種可能性，然後作出決策。當一個人的人格結構中 A 成份占優勢時，其行為表現為：待人接物冷靜、慎思明斷與尊重別人。這種人講起話來總是「我個人的想法是...」或「根據...」。而「兒童型」的心態像嬰兒的衝動，當是溝通時，所表現出來的態度是較為無知、無主見、遇事退縮與感情用事的作風，一會兒逗人喜愛，一會兒發脾氣，使人討厭。而當一個人的人格結構中 C 成份占優勢時，其行為表現為：無主見、遇事退縮、激動憤怒與感情用事。這種人講起話來總是「我猜想...」或「我不知道...」。易言之，我們可將以上那三種心態分別稱為「法」、「理」與「情」的心態。

當在溝通時，兩造雙方各有各的人格心態，依照雙方的心態組合，可將之分為「相互型」、「交叉型」與「隱含型」三種型態，此可稱為溝通模式。「相互型」的模式乃是一種對稱與互惠的平衡式溝通，亦可說是「話題投機」、「相互了解」、「彼此雙贏」的雙向溝通；「交叉型」的模式乃是一種不對稱與對立的不平衡式溝通，亦可說是「話不投機」、「相互攻擊」、「彼此輸贏」的單向溝通；而「隱含型」的模式乃是一種「話中有話」的不明確溝通，此易造成對方的誤解，盡量少用。現簡要舉例說明三種模式如下：

A. 「相互型」模式：包括「PP-PP」、「AA-AA」、「CC-CC」、「CP-PC」、「AP-PA」、「CA-AC」等方式。這些方式因是雙方都能了解對方，彼此都能想到對方的立場，因此溝通可以順利進行，茲舉二種方式說明如下（見圖 2、圖 3）：整體而言，「AA-AA」方式最為理性，對於重要且爭議大的問題是最為理想的溝通方式。

a. 父母-父母（PP-PP）：見圖 2

甲：「我國必須發展核能。」

乙：「對！政府就應該有 guts。」

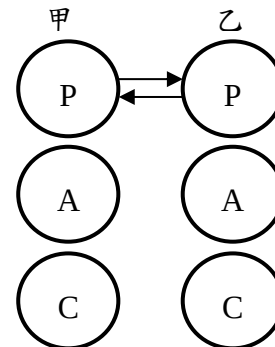


圖 2 PP-PP

b. 成人-成人（AA-AA）：見圖 3

甲：「根據聯合國的資料顯示，核能是絕對安全的。」

乙：「雖然是安全，但還是小心為上。」

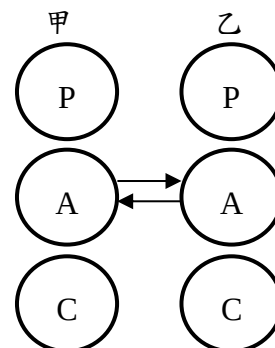


圖 3 AA-AA

B. 「交叉型」模式：包括如「AA-PC」、「AA-CP」、「PC-PC」、「CP-CP」、「AP-PA」等方式。這些方式因雙方都不了解對方，而且彼此都不能想到對方的立場，因此溝通勢必會中斷，茲舉二種方式說明如下（見圖 4、圖 5）：整體而言，本模式的各種方式都是不好的溝通方式，因此當處在這些情境時，若要繼續去溝通，則要設法將情勢扭轉至「相互型」模式中的方式。現舉二例說明如下：

c. AA-PC：見圖 4

甲：「若本村同意作為核廢料的儲存地，是否可以給我們多一倍的回饋金。」

乙：「不可能！」

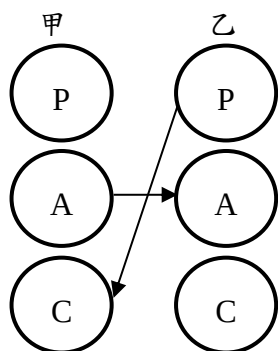


圖 4 AA-PC

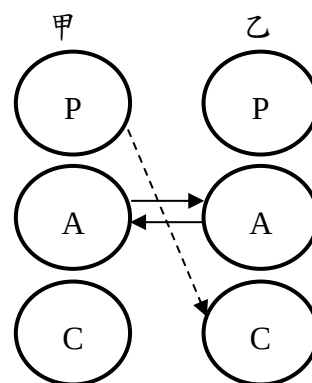


圖 6 「PC-AA」→「AA-AA」

d. AA-CP：見圖 5

甲：「你們現在有什麼困難需要我們協助的？」

乙：「得了，別虛偽、別作秀了。」

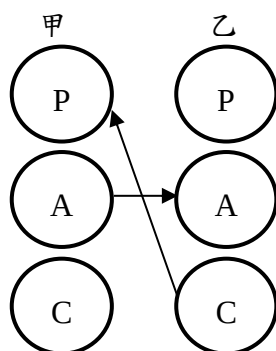


圖 5 AA-CP

- C. 「隱含型」模式：此模式包括的方式有很多，只要是某方表面看起來像是用某心態去溝通，但實際上內心存在的是另一種心態，此有如「言不由衷」一樣；例如某甲以「AA」去跟乙的「AA」進行「AA-AA」式的溝通，但實際上甲的心態是「PC」，因此隱含著內心真正的溝通方式是「PC-AA」（見圖 6）。雖然「隱含型」模式並不一定是不好，有時亦有激勵或妥協的善意價值，此正所謂的「善意的謊言」；然而，此亦是一種變形的「交叉型」模式，除非有必要，否則還是少用為宜。

e. 「PC-AA」→「AA-AA」（隱含）：見圖 6

表面上「AA-AA」：（實線部分）

甲：「根據聯合國的資料顯示，核能是絕對安全的。」

乙：「雖然是安全，但還是小心為上。」

實際上「PC-AA」：（虛線部分）

甲：「你們必須相信核能是絕對安全的。」

乙：「雖然是安全，但還是小心為上。」

2. TA 之應用

雖然 Swensen (1973) 及 Harris (1967) 認為 TA 的基本論點乃包含著心理分析、完形理論、輔導治療與行為論 (Berne, 1963; Berne, 1964; Berne, 1972) 等，並不是一個具突破性的新理論，但它可說是一種溝通分析技術的創新，其展現了人們在每天語言溝通上的基本觀念 (Bowen & Nath, 1978)。長久以來，TA 理論不斷受學術界及實務界的檢視，而且大多證明其具相當的效度與合理性 (Hansen, Barry, Reed, & McGill, 1976)。在實務應用上，該分析技術不但具人類經驗的務實性，至今仍一直被各界所普遍採用，特別是因它能完整地提供溝通雙方可瞭解的語言，因此在有關人際互動上更顯得很有用；例如：Hale (1976) 使用 TA 工具去瞭解藥物濫用的情形，Hansen et al. (1976) 將 TA 應用在廣告上，Oates (1977) 利用 TA 去改善勞資關係，Wehrich and Rigny (1980) 用 TA 去探討領導型態，Park and Harrison (1993) 用 TA 去協助管理者對跨文化的瞭解，而最近 Nazir, Shah, and Zaman (2013) 亦用 TA 來探討教育事業。

反核團體與反核人士反對核電的原因與動機雖各有不同，但其訴求的共同焦點卻均是指向核能的安全考量方面 (Mariotte, 2009; Zehner, 2012)。事實上，許多核能專業人士指出，核能科技的高度複雜性常使社會大眾感到困惑且難以理解，因而給予反核者選擇性利用科學資訊及操弄解釋科學知識的機會，藉誇大核能風險以激發社會大眾的恐懼與猜疑心理 (Rossin, 2003; Surrey & Huggett, 1976)，去進行感性的溝通（即兒童型的模式）。

綜之，目前我國有關核能各議題的爭議均是處於「交叉型 (Cross)」的溝通模式雙方，亦即溝通雙方大多只佔在自己的認知立場去相互攻擊，並只在意輸贏，這種零和遊戲 (Zero Game) 式的溝通，問題勢必僵持而無法解決。近年來，國內的反核人士大多使用恐怖的感性訴求去支持他們的立場，而擁核人士則大多使用理性的訴求去反駁，此一方使用「父母型」或「兒童型」的心態，而另一方則使用「成人型」的心態，這種「交叉型」的溝通模式實無法有交集，爭論與衝突的發生乃是預料之中的事。針對此，在 Han (2014) 的 "Demarking Fear: Bring the Nuclear Issue Back to Rational Discourse" 一文中，說明了要破解我們一直存在的核能僵局，只有擁核與反核雙方回歸理性的對話，才能有效的解決問題。

## 二、研究方法

### (一) 觀念性架構

本研究旨在探討目前我國在學大專生對核能相關議題的態度與他(她)們心中最能接受的溝通模式；基於，本研究主要探討的構面(變項)包括三個：「大專生的特質(包括大專生對核能相關議題的認知、人口統計變項)」、「大專生對核能相關議題之態度」及「大專生對核能相關議題之溝通傾向」，本研究之觀念性架構如下圖 7 所示。

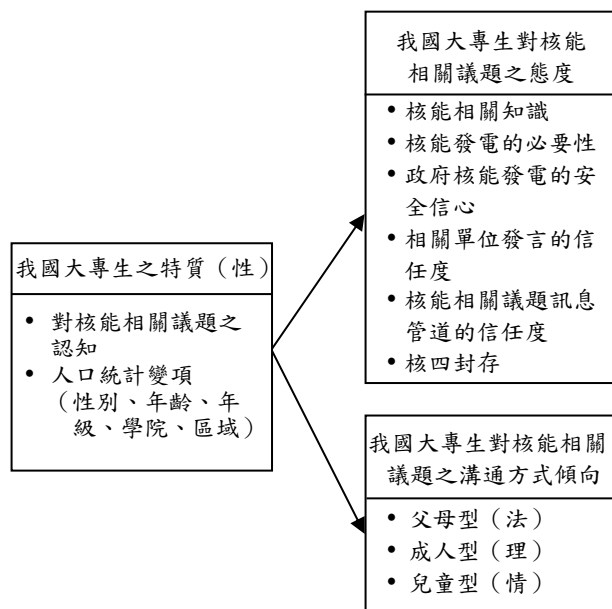


圖 7 本研究之觀念性架構

### (二) 變項定義與衡量

1. 人口統計變項：包括性別(男、女)、年齡(20歲(含)以下、21~25歲及26歲(含)以上)、年級(大一、大二、大三、大四及大五(含研究所))、學院(文學院、理學院等16個學院)、區域(台北市、北基宜、桃竹苗、中彰投、雲嘉南、高屏及花東/外島))；以上均為名目尺度。
2. 核能相關知識：指對核能認知的正確性，以五點李克特式尺度去衡量。  
核能發電的必要性：指對台灣利用核能來發電的同意度，以五點李克特式尺度去衡量。  
政府核能發電的安全信心：指對政府在核能發電相關措施及作法的信心程度，以五點李克特式尺度去衡量。  
相關單位的信任度：指對國內外相關單位在傳遞核能相關訊息時信任度，以五點李克特式尺度去衡量。  
核能相關議題訊息管道的信任度：指對國內外在傳遞核能相關訊息所使用管道(媒體)的信任度，以五點李克特式尺度去衡量。  
核四封存：指對核四廠封存的看法，以四個看法之名目尺度去衡量。
3. 對核能相關議題之溝通傾向：只在核能相關議題之溝通時，偏好何種溝通方式，以三個方式之名目尺度去衡量(包括父母型(法)、成人型(理)及兒童型(情))。

### (三) 研究對象

本研究鎖定全國共有約135萬的大專院校學生母體去進行抽樣調查，結果共回收有效問卷1,501份。其有效問

卷對象分佈如表1所示。

表 1 有效問卷對象分佈表

| 區(縣/市) | 學校       | 問卷  |       |
|--------|----------|-----|-------|
|        |          | 份數  | 合計數   |
| 臺北市：   |          |     | 300   |
| 臺北市    | 國立台北商業大學 | 50  |       |
|        | 台北市立大學   | 30  |       |
|        | 銘傳大學     | 150 |       |
|        | 大同大學     | 70  |       |
| 北基宜：   |          |     | 200   |
| 新北市    | 輔仁大學     | 80  |       |
|        | 淡江大學     | 80  |       |
| 基隆市    | 國立海洋大學   | 20  |       |
| 宜蘭縣    | 宜蘭大學     | 20  |       |
| 中彰投：   |          |     | 281   |
| 臺中市    | 東海大學     | 220 |       |
| 彰化縣    | 國立彰化師範大學 | 41  |       |
| 南投縣    | 暨南大學     | 20  |       |
| 桃竹苗：   |          |     | 250   |
| 桃園縣    | 中原大學     | 120 |       |
| 新竹市    | 國立交通大學   | 60  |       |
|        | 玄奘大學     | 20  |       |
| 新竹縣    | 明新科技大學   | 20  |       |
| 苗栗縣    | 聯合大學     | 30  |       |
| 雲嘉南：   |          |     | 200   |
| 雲林縣    | 國立雲林科技大學 | 30  |       |
| 嘉義縣    | 國立嘉義大學   | 30  |       |
| 臺南市    | 成功大學     | 140 |       |
| 高屏：    |          |     | 220   |
| 高雄市    | 中山大學     | 170 |       |
| 屏東縣    | 國立屏東大學   | 50  |       |
| 花東/外島： |          |     | 50    |
| 花蓮縣    | 國立東華大學   | 20  |       |
| 臺東縣    | 國立台東大學   | 10  |       |
| 澎湖縣    | 國立澎湖科技大學 | 10  |       |
| 金門縣    | 金門大學     | 10  |       |
| 總計     | 共 25 所   |     | 1,501 |

### (四) 資料收集(包括問卷設計)與資料分析方法

#### 1. 資料收集(包括問卷設計)方法

本研究之問卷設計內容如附錄。資料收集方法乃採用實體紙本的問卷，針對所抽樣到的25所大專院校，透過關係請託教師或主持人本人親自在通識課程或共同課程之課堂上發放問卷並當場回收，對填答的學生均給予100元的便利商店禮券，以感謝他們對本研究的協助。

#### 2. 資料分析方法

本研究乃是一個實證性的調查研究，資料包括了名目尺度的項目式資料及與五點李克特式尺度的順序量化資料：前者主要以次數及百分比去進行分析與討論；而後

者則除了以平均數及標準差去衡量其分佈的集中度與離散度外；更進行 T 檢定與變異數分析去進行差異性分析與討論。

### III. 結果與討論

本研究乃是一實證的調查研究，透過實體的自填問卷的方式針對全國 20 縣市共 25 所大專院校的在學大學生，以分層配額的隨機抽樣方法進行第一手資料的蒐集。本調查的內容主要聚焦在大專生對我國核能相關議題及核能溝通相關要素（包括訊息傳送者、溝通管道/媒體方式、訊息內容等）的認知與態度（詳細問卷內容見附錄一）。本節將針對所回收的 1,501 份有效問卷進行相關的描述性與統計性分析（95%信心程度，3%誤差）、及說明重要的發現與結果。

#### （一）樣本人口統計變項之分佈

本研究共回收 1,501 份有效問卷，其相關之人口統計變項資料如表 2 所示。本研究因大部份是在通識或一些共同科目的課程上發放問卷，因此大多集中在 25 歲以下及大三/大四的學生上；為考量多樣化的分佈，因此本調查亦在性別、學院與地區上予以適當的均衡分配之。

表 2 樣本之人口統計變項分佈

| 變項 | 屬性        | 個數  | 百分比  |
|----|-----------|-----|------|
| 性別 | 男         | 774 | 51.6 |
|    | 女         | 727 | 48.4 |
| 年級 | 大一        | 168 | 11.2 |
|    | 大二        | 444 | 29.6 |
|    | 大三        | 641 | 42.7 |
|    | 大四        | 199 | 13.3 |
|    | 大五(含研究所)  | 49  | 3.3  |
| 年齡 | 20 歲(含)以下 | 530 | 35.3 |
|    | 21~25 歲   | 950 | 63.3 |
|    | 26 歲(含)以上 | 21  | 1.4  |
| 學院 | 文學院       | 79  | 5.3  |
|    | 理學院       | 149 | 9.9  |
|    | 工學院       | 315 | 21.0 |
|    | 商(管)學院    | 374 | 24.9 |
|    | 法學院       | 70  | 4.7  |
|    | 醫學院       | 3   | 0.3  |
|    | 社會科學院     | 220 | 14.7 |
|    | 新聞傳播學院    | 0   | 0    |
|    | 農學院       | 31  | 2.1  |
|    | 外語學院      | 0   | 0    |
|    | 教育學院      | 63  | 4.2  |
|    | 國際學院      | 0   | 0    |
|    | 觀光休閒學院    | 62  | 4.1  |
|    | 民生學院      | 49  | 3.3  |
|    | 其他        | 86  | 5.7  |
| 區域 | 台北市       | 300 | 20   |
|    | 北基宜       | 200 | 13   |
|    | 桃竹苗       | 250 | 17   |
|    | 中彰投       | 281 | 19   |
|    | 雲嘉南       | 200 | 13   |
|    | 高屏        | 220 | 15   |
|    | 花東/外島     | 50  | 3    |

#### （二）人口統計變項在各題項上之描述性統計分析

本研究之問卷內容設計，除 4 題是人口統計變項外，共有 19 大題；其中第 1 至第 12 題是在瞭解我國大專生在核能相關議題上的認知與態度；第 13 題是在瞭解大專生對「台灣核能發電」相關議題提出意見或發言（即訊息發送者）的相關單位或個人的信任度；第 14 題是在瞭解大專生對取得「台灣核能發電」相關議題訊息之各管道（即通路或媒體）的信任度；第 15 與第 16 題是在探討大專生對「核能溝通」模式的態度與模式；第 17 題是在瞭解大專生對目前處理封存中的核四廠的態度；第 18 題是在瞭解大專生取得核能發電相關議題之訊息或知識的管道來源；第 19 題是在瞭解大專生希望政府應再加強提供哪些「核能安全」方面的資訊。（詳細之各題項的內容說明，請見附錄）

茲將本研究的如上述之各個項目內容在各人口統計變項上的調查結果加以綜合歸納並簡要予以說明如下：

##### 1. 性別方面

本研究的 1,501 位學生中，男性有 774 位，女性有 727 位，各約佔一半。

(1) 我國大專生不論男女，均高度認同「核能(原子能)」在醫療用途（例如 X 光檢查）、國土安全（例如機場海關之 X 光檢查）、工業安全檢測或考古研究等方面的價值性（第 3 題）；然而，為何他們對使用在發電上卻有相當大的負面態度？此乃值得再去探討、深思與改善之處。

(2) 我國大專生不論男女，亦均高度認同使用「核能來發電」對環境保護有正面的助益（第 4 題）；然而，為何此與他們對核能發電的負面態度有所矛盾？此亦乃值得去探討、深思與改善之處。

(3) 我國大專生不論男女，都認同「在確保核能的安全，台灣應持續發展核能發電（第 11 題）」；此顯示他們對核能發電仍有高度的肯定與期許。

(4) 在對「台灣核能發電」相關議題提出意見或發言（即訊息發送者）的相關單位或個人的信任度方面，具較高信任度的國際性官方核能組織（例如，國際原子能總署）（第 13-9 題）、國外核能研究機構的專家學者（第 13-7 題）、國內專家學者（第 13-1 題）。由第 13 題可知，我國大專生不論男女，對國外官方及專家學者的信任度比國內的任何單位或個人來得還要高。然而，在國內方面，他們最信任的還是專家學者，最不信任的前三名分別依序為：國內其他社會團體（例如，主婦聯盟）、我國經濟部、國內環保團體（例如，綠色公民行動聯盟）；此意味著雖然我國的社會團體的活動很普遍且激烈，但大專生還是不太信任那些團體的訴求。

(5) 在對「台灣核能發電」相關議題的訊息管道來源之信任度方面，我國大專生不論男女，對國外的傳統媒體（包括平面、廣播、電視等）的信任度最高（第 14-3 題），而對國內的新媒體（包括社群網站、電子媒體等）的信任度最低（第 14-2 題）。此與他們高度使用新媒體的情形似有極大的反差，此顯示在「台灣核能發電」相關議題方面所使用的媒體之普及性與其信度間似無明顯的正相關。

(6) 在核能溝通方式上，我國大專生不論男女，還是偏好理性的「成人型」溝通方式，此可由第 15-1 題及第 16-2 題得知。（後面對此將有詳細的說明）

## 2. 年級方面

本研究的 1,501 位學生中，人數最多的是大三生（641 位），其他依序為大二生（444 位）、大四生（199 位）、大一生（168 位）、大五生/研究生（49 位）。

## 3. 年齡方面

在本研究的 1,501 位學生中，人數最多的年齡層是 21-25 歲（950 位），其他依序為 20 歲（含）以下（530 位）、26 歲(含)以上（21 位），此人數與前述之年級有關。

4. 學院方面

本研究的 1,501 位學生所屬的學院主要有 11 個，人數最多的前四個院共佔了總樣本數的 70.5%，分別為商(管)學院(374 位)、工學院(315 位)、社會科學院(220 位)、及理學院(149 位)。

### （三）我國大專生對核四廠營運的看法

由於核四廠的營運問題一直延宕與困擾著各界，雖然現已進入了封存期，但仍需快速地將該問題予以解決，否則會一直引起政治、經濟與社會的不安。由於新世代在現今社會已扮演著重要的角色，其想法與力量實不能加以忽視；基此，本研究乃特別再加以探討之。由表 3 可知，我國大專生對核四廠的營運仍有 45.4%認為只要能確保其安全性下，還是贊成再開封啟動；當然，若再將 12.8%認為「不應該封存核四廠」的列入考慮，則更有 58.2%的大專生對核四廠的營運仍持正面的態度。

表 3 對核四廠的看法

| 核四廠問題                         | 次數  | 百分比  |
|-------------------------------|-----|------|
| 不應該封存核四廠                      | 192 | 12.8 |
| 為因應電力需求，若能在確保核四的安全下，應該儘速開封啟動。 | 682 | 45.4 |
| 應該儘速廢除核四                      | 333 | 22.2 |
| 沒意見                           | 294 | 19.6 |

### （四）我國大專生取得我國核能發電相關議題的資訊管道

為瞭解我國大專生主要透過哪些管道得知台灣核能發電相關議題的資訊，乃請他們勾選前三大主要的資訊來源處，表 4 統計了各個可能的資訊來源管道。表 4 顯示排序 1 的主要前三大管道依序為電子報(416)、電視(406)與社群網站(359)；但若考量前二個排序的總數，則前三大管道依序為社群網站(750)、電子報(701)與電視(653)；而若考量前三個排序的總數，則前三大管道依序為電視(996)、電子報(958)與社群網站(936)。由此可知，現在的大專生最常使用的確實是數位化的新媒體，但傳統的電視仍是不可忽視的訊息傳遞管道，但電視有一主要的缺點是它只具備單向的訊息接收，而無法像社群網站那麼具快速且無遠弗界的渲染效果。

表 4 得知核能發電相關議題的資訊管道排序

|           | 排序 1 | 排序 2 | 排序 3 | 排序 4 | 排序 5 | 總和    |
|-----------|------|------|------|------|------|-------|
| 平面報紙      | 201  | 224  | 308  | 363  | 192  | 1,288 |
| 平面期刊雜誌    | 40   | 82   | 109  | 167  | 233  | 631   |
| 電子報       | 416  | 285  | 257  | 113  | 74   | 1,145 |
| 電子期刊雜誌    | 32   | 199  | 144  | 134  | 131  | 640   |
| 電視        | 406  | 249  | 341  | 233  | 143  | 1,372 |
| 社群網站      | 359  | 391  | 186  | 199  | 138  | 1,273 |
| 個人 E-mail | 0    | 6    | 13   | 15   | 43   | 77    |

|            |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 戶外張貼或架設的廣告 | 0     | 16    | 40    | 95    | 185   | 336   |
| 書面的宣傳單     | 1     | 11    | 29    | 52    | 141   | 234   |
| 學校的相關課程或活動 | 38    | 35    | 65    | 106   | 181   | 425   |
| 其他         | 8     | 1     | 3     | 1     | 4     | 17    |
| 總和         | 1,501 | 1,499 | 1,495 | 1,478 | 1,465 | 7,438 |

### （五）政府應再加強哪些「核能安全」的資訊

除了瞭解了我國大專生取得核能相關資訊所常使用的溝通管道及對哪些核能訊息發言人較信任外，對他們所關心的「核能安全」議題之訊息內容亦應加以重視。表 5 即列示了他們急需哪方面的「核能安全」資訊，其中，他們對所列表的三大安全資訊（包括：核能電廠安全狀態、放射性廢棄物安全狀態、與環境輻射安全狀態）均有極高的需求與期望知道。

表 5 政府應再加強哪些「核能安全」的資訊

|            | 次數   | 比例     |
|------------|------|--------|
| 核能電廠安全狀態   | 1460 | 97.26% |
| 放射性廢棄物安全狀態 | 1467 | 97.73% |
| 環境輻射安全狀態   | 1365 | 90.94% |
| 其他         | 28   | 1.86%  |

### （六）我國大專生對核能相關議題的認知與態度

本調查問卷的第 1 至第 12 題（除第 3 與第 5 題外）共 10 題是在瞭解我國大專生在核能相關議題上的認知與態度，共包括核能的相關知識（1、2、4、8 題）、核能發電的必要性（6、7 題）、核能發電的安全信心（9、11 題）及對政府核能發電的安全信心（10、12 題）等四大類。結果可看出以下的意涵：

1. 目前大專生對「核能」的相關知識甚為不足，此可能亦是影響其他三類認知與態度的主要原因之一，特別是在核能發電的「信心」上。
2. 目前大專生對「核能發電」的必要性還是持相對肯定的態度，若他們有更正確的核能相關知識及對核能發電有更多的安全信心，相信以核能方式來發電仍是可以被接受的選項。
3. 目前大專生對「核能發電的安全信心」相對高於「對政府核能發電的安全信心」，此意味著他們對「政府」在核能發電的安全措施、政策、辦法或實務作為上，有某程度的疑慮或不滿。
4. 第 1 題（「我認為「核能」這種東西目前只用在「核子彈（或原子彈）」及「核能發電」上。」）、第 2 題（我認為只要沒有「核能發電（或核電廠）」，環境中就不會有「核子輻射」的問題存在。）與第 8 題（我認為我具有很豐富的核能（原子能）發電方面的相關知識。）的分數是最低的三項，此可得知目前大專生對核能的相關知識普遍不足。而且，由第 5 題（我認為我國政府對我們已提供了很充足的「核能相關安全」資訊。）的低分數亦可知，政府在核能溝通上仍有很大的改善空間。

### （七）我國大專生對核能發電相關議題訊息傳送者（發言人）的信任度之差異性分析

整體而言，我國大專生對核能發電相關議題訊息傳送者（發言人）的信任度如下表 6。表 6 顯示，我國大專生

相對較信任的前五大訊息傳送者（發言人）依序為：國際性官方核能組織（例如，國際原子能總署）、國外核能研究機構的專家學者、國內專家學者、國際性環保組織、我國原子能委員會。由此可知，具專業性的單位或專家學者來推廣可能較具說服力；然而，環保相關的代言人亦不可予以忽視。

表 6 大專生對核能發電相關議題訊息傳送者（發言人）的信任度

| 核能發電相關議題的訊息傳送者（發言人）    | 平均數  | 標準差   |
|------------------------|------|-------|
| 國內專家學者                 | 3.86 | 0.741 |
| 我國原子能委員會               | 3.63 | 0.867 |
| 我國經濟部                  | 2.77 | 0.752 |
| 台電公司                   | 2.86 | 0.967 |
| 國內環保團體（例如，綠色公民行動聯盟）    | 2.95 | 0.770 |
| 國內其他社會團體（例如，主婦聯盟）      | 2.41 | 0.781 |
| 國外核能研究機構的專家學者          | 4.29 | 0.662 |
| 國外核能發電相關廠商（例如，興建、管理方面） | 3.42 | 0.951 |
| 國際性官方核能組織（例如，國際原子能總署）  | 4.54 | 0.681 |
| 國際性環保組織                | 3.69 | 0.689 |

為了更詳細瞭解對前五大信任度的發言人在各人口統計上有無顯著的統計差異，茲再將其結果加以列示並說明如下：

#### 1. 在性別上之差異分析

只有在對「國內專家學者」與「國際性環保組織」的信任度上，在性別上的態度才具統計上的差異性：亦即，在對「國內專家學者」的信任度上，男性的態度比女性的還高（ $p=0.023$ ）；而在對「國際性環保組織」的信任度上，女性的態度卻比男性的還要高（ $p=0.004$ ）。至於其他三者，在性別上並無顯著的統計差異存在。

#### 2. 在年級上之差異分析

在對所有的前五大發言人信任度上，在年級別上的態度均具統計上的顯著差異性（ $p=0.000$ ）。整體而言，大三學生對各前五大發言人的信任度較高，而大一學生則較低。

#### 3. 在年齡上之差異分析

在對所有的前五大發言人信任度上，在年齡別上的態度亦均具統計上的顯著差異性（ $p=0.000$ ）。整體而言，21-25 歲的學生對各前五大發言人的信任度較高，而 20 歲(含)以下的學生則較低。

#### 4. 在學院上之差異分析

在對所有的前五大發言人信任度上，在學院別上的態度亦均具統計上的顯著差異性（ $p=0.000$ ）；然而，再經過事後檢定比較後，各學院在對各前五大發言人信任度上的差異性如表中的「事後檢定」欄可得知。整體而言，除了在對「國際性環保組織」外，工學院的學生對其他四類的信任度相對較高，此可能是因為工學院的學生在核能方面的知識普遍較豐富的關係。

#### 5. 在地區上之差異分析

在對所有的前五大發言人信任度上，在地區別上的態度亦均具統計上的顯著差異性（ $p=0.000$ ）；然而，再經過事後檢定比較後，各地區在對各前五大發言人信任度上的差異性如表中的「事後檢定」欄可得知。整體而言，北部地區對各前五大發言人的信任度相對較高，特別是北基宜地區，此顯示雖然三個核電廠都在新北市（即北基宜地區）但信任度卻相對較高，此頗為玩味，似可再加以深入地去探討之。

#### （八）我國大專生各人口統計變項在對各訊息管道信任度之差異分析

##### 1. 在性別上之差異分析

我國大專生分別在對國內外各四種不同型態的媒體之信任度上，不會因為性別的不同而有所差異。

##### 2. 在年級上之差異分析

在對四種不同型態的媒體之信任度上，在年級別上的態度除了在「國內傳統媒體」（ $p=0.000$ ）與「國外傳統媒體」（ $p=0.012$ ）上具統計上的顯著差異性外，其他的二種則無差異；然而，再經過對二種顯著的進行事後檢定比較後，發現大三學生對國內外二種傳統媒體有較高的信任度。

##### 3. 在年齡上之差異分析

在對四種不同型態的媒體之信任度上，在年齡別上的態度除了在「國內傳統媒體」（ $p=0.000$ ）與「國外傳統媒體」（ $p=0.000$ ）上具統計上的顯著差異性外，其他的二種則無差異；然而，再經過對二種顯著的進行事後檢定比較後，發現 21-25 歲的年齡層對國內外二種傳統媒體比 20 歲(含)以下年齡層有較高的信任度。

##### 4. 在學院上之差異分析

在對四種不同型態的媒體之信任度上，在學院別上的態度均有統計上的顯著差異性（ $p=0.000$  及  $p=0.004$ ）；然而，再經過事後檢定比較後，各學院在對各對四種不同型態的媒體信任度上的差異性如表中的「事後檢定」欄可得知。整體而言，在對四種不同型態的媒體之信任度上，不同的學院在不同的媒體信任度之差異上，分佈相當分散，並無很明顯的共同性。

##### 5. 在地區別上之差異分析

在對四種不同型態的媒體之信任度上，在地區別上的態度亦均具統計上的顯著差異性（ $p=0.000$ ）；然而，再經過事後檢定比較後，各地區在對四種不同型態的媒體信任度上的差異性如表中的「事後檢定」欄可得知。整體而言，北部地區對各四種不同型態的媒體的信任度相對較高，特別是桃竹苗與台北市二個地區。

#### （九）我國大專生各人口統計變項在核能相關議題認知與態度上之差異性分析

為更深入瞭解我國大專生在四大核能議題上的認知與態度是否會在不同的人口統計變項上而有所差異，乃進行比較性的統計差異分析，以下乃針對所調查的人口統計變項逐一進行統計檢定。

##### 1. 在性別上之差異分析

除了「核能相關知識」在性別上無顯著差異外，其他三項均呈現統計上之差異，而且男性在此三項上之認知與態度顯著地高於女性，其顯著性分別如下：「核能發電的必要性」（ $p=0.000$ ）、「核能發電的安全信心」

（ $p=0.000$ ）、「對政府核能發電的安全信心」（ $p=0.001$ ）。

##### 2. 在年級上之差異分析

在對四大核能議題上的認知與態度上，在年級別上的態度均具統計上的顯著差異性，其顯著性分別如下：「核能相關知識」( $p=0.014$ )、「核能發電的必要性」( $p=0.000$ )、「核能發電的安全信心」( $p=0.000$ )、「對政府核能發電的安全信心」( $p=0.001$ )。然而，再經過對各項顯著的進行事後檢定比較後，發現大四學生在「核能相關知識」反而低於大三與大二的學生；而在其他的三大核能議題上，大三學生均顯著地高於大一與大二的學生。

### 3. 在年齡上之差異分析

在對四大核能議題上的認知與態度上，在年齡層上，除了「核能相關知識」在無顯著差異外，其他三項均呈現統計上之差異，其顯著性分別如下：「核能發電的必要性」( $p=0.000$ )、「核能發電的安全信心」( $p=0.000$ )、「對政府核能發電的安全信心」( $p=0.000$ )。然而，再經過對三項具顯著的進行事後檢定比較後，發現 21-25 歲的年齡層均顯著地高於 20 歲(含)以下 20 歲(含)以下；但在「核能發電的必要性」上，21-25 歲的年齡層只顯著地高於 20 歲(含)以下的年齡層。

### 4. 在學院上之差異分析

在對四大核能議題上的認知與態度上，在學院別上的態度均具統計上的顯著差異性，而且顯著水準均為  $p=0.000$ 。再經過對四項具顯著的進行事後檢定比較後，因各院間的差異性相當多元且複雜。

### 5. 在地區上之差異分析

在對四大核能議題上的認知與態度上，在地區別上的態度均具統計上的顯著差異性，而且顯著水準均為  $p=0.000$ 。再經過對四項具顯著的進行事後檢定比較後，因各地區間的差異性相當多元且複雜。

### (九) 我國大專生核能最適溝通模式之分析

在本研究的所有五個人口統計變項中，父母型的溝通模式均佔有壓倒性的絕對優勢(佔 98.23%)；亦即，目前的大專生看起來雖然自主性很強，但還是偏好「理性」的溝通模式。其實，「理性」的溝通並不代表正確；因此，如何給予並強化大專生對核能相關議題的正確知識，使他(她)們能進行理性的判斷，乃是當務之急。

## IV. 結論

本研究乃是一個實證性的調查研究，旨在探討我國大專生對核能相關議題的認知與態度、及他們對在核能相關議題上所偏好的溝通方式，進而找出在溝通大師 Eric Berne 所發展 TA 理論(PAC 模式)模式中的最適溝通模式。換言之，本研究聚焦在「我國大專生對核能相關議題的認知與態度」與「我國大專生對核能相關議題所偏好的溝通方式」二大議題，以下針對此二大議題的研究發現及其背後的重要管理意涵加以簡要地條列闡述之：

### 一、我國大專生對核能相關議題的認知與態度方面：

1. 我國大專生不論男女，雖均高度認同「核能(原子能)」在醫療用途(例如 X 光檢查)、國土安全(例如機場海關之 X 光檢查)、工業安全檢測或考古研究等方面的價值性；然而，他們對使用在發電上卻有相當大的負面態度。此乃值得再去加以深入探討與改善。

2. 我國大專生不論男女，對國外官方及專家學者的信任度比國內的任何單位或個人來得還要高。在國內方面，他們最信任的還是專家學者，最不信任的前三名分別依

序為：國內其他社會團體(例如，主婦聯盟)、我國經濟部、國內環保團體(例如，綠色公民行動聯盟)；此意味著雖然我國的社會團體的活動很普遍且激烈，但大專生還是不太信任那些團體的訴求。

3. 我國大專生不論男女，都認同「在確保核能的安全，台灣應持續發展核能發電」；此顯示他們對核能發電仍有高度的肯定與期許。

4. 在對「台灣核能發電」相關議題提出意見或發言(即訊息發送者)的相關單位或個人的信任度方面：我國大專生不論男女，對國外官方及專家學者的信任度比國內的任何單位或個人來得還要高。然而，在國內方面，他們最信任的還是專家學者，最不信任的前三名分別依序為：國內其他社會團體(例如，主婦聯盟)、我國經濟部、國內環保團體(例如，綠色公民行動聯盟)；此意味著雖然我國的社會團體的活動很普遍且激烈，但大專生還是不太信任那些團體的訴求。

5. 在對「台灣核能發電」相關議題的訊息管道來源之信任度方面：我國大專生不論男女，對國外的傳統媒體(包括平面、廣播、電視等)的信任度最高，而對國內的新媒體(包括社群網站、電子媒體等)的信任度最低。此與他們高度使用新媒體的情形似有極大的反差，此顯示在「台灣核能發電」相關議題方面所使用的媒體之普及性與其信度間似無明顯的正相關。

6. 我國大專生對核四廠的營運仍有 45.4%認為只要能確保其安全性下，還是贊成再開封啟動；當然，若再將 12.8%認為「不應該封存核四廠」的列入考慮，則更有 58.2%的大專生對核四廠的營運仍持正面的態度。

7. 我國大專生取得我國核能發電相關議題資訊的主要前三大管道依序為電子報、電視與社群網站；但若考量前二個排序的總數，則前三大管道依序為社群網站、電子報與電視；而若考量前三個排序的總數，則前三大管道依序為電視、電子報與社群網站。由此可知，現在的大專生最常使用的確實是數位化的新媒體，但傳統的電視仍是不可忽視的訊息傳遞管道，但電視有一主要的缺點是它只具備單向的訊息接收，而無法像社群網站那麼具快速且不費遠弗界的渲染效果。

8. 我國大專生對三大安全資訊(包括：核能電廠安全狀態、放射性廢棄物安全狀態、與環境輻射安全狀態)均有極高的需求與期望知道。

9. 目前大專生對「核能」的相關知識甚為不足，此可能亦是影響其他議題的認知與態度之主要原因之一，特別是在核能發電的「信心」上。

10. 目前大專生對「核能發電」的必要性還是持相對肯定的態度，若他們有更正確的核能相關知識及對核能發電有更多的安全信心，相信以核能方式來發電仍是可以被接受的選項。

11. 目前大專生對「核能發電的安全信心」相對高於「對政府核能發電的安全信心」，此意味著他們對「政府」在核能發電的安全措施、政策、辦法或實務作為上，有某程度的疑慮或不滿。

12. 目前大專生對核能的相關知識普遍不足。而且，由「我認為我國政府對我們已提供了很充足的核能相關安全資訊」的低分數亦可知，政府在核能溝通上仍有很大的改善空間。

13. 核能相關議題的資訊傳遞(即發言人)，由具專業性的

單位或專家學者來推廣可能較具說服力；然而，環保相關的代言人亦不可予以忽視。

14.在對「國內專家學者」的信任度上，男性的態度比女性的還高；而在對「國際性環保組織」的信任度上，女性的態度卻比男性的還要高。

15.在對所有的前五大發言人信任度上，在年級別上的態度均具統計上的顯著差異性；整體而言，大三學生對各前五大發言人的信任度較高，而大一學生則較低。

16.在對所有的前五大發言人信任度上，在學院別上的態度亦均具統計上的顯著差異性；整體而言，除了在對「國際性環保組織」外，工學院的學生對其他四類的信任度相對較高，此可能是因為工學院的學生在核能方面的知識普遍較豐富的關係。

17.在對所有的前五大發言人信任度上，在地區別上的態度亦均具統計上的顯著差異性；整體而言，北部地區對各前五大發言人的信任度相對較高，特別是北基宜地區，此顯示雖然三個核電廠都在新北市（即北基宜地區）但信任度卻相對較高，此頗為玩味，似可再加以深入地去探討之。

18.我國大專生分別在對國內外各四種不同型態的媒體之信任度上，不會因為性別的不同而有所差異。

19.在對四種不同型態的媒體之信任度上，大三學生對國內外二種傳統媒體有較高的信任度。

20.在對四種不同型態的媒體之信任度上，不同的學院在不同的媒體信任度之差異上，分佈相當分散，並無很明顯的共同性。

21.在對四種不同型態的媒體之信任度上，在地區別上的態度亦均具統計上的顯著差異性；整體而言，北部地區對各四種不同型態的媒體的信任度相對較高，特別是桃竹苗與台北市二個地區。

22.除了「核能相關知識」在性別上無顯著差異外，其他三項均呈現統計上之差異，而且男性在此三項上之認知與態度顯著地高於女性。

23.在對四大核能議題上的認知與態度上，在年級別上的態度均具統計上的顯著差異性；然而大四學生在「核能相關知識」反而低於大三與大二的學生；而在其他的三大核能議題上，大三學生均顯著地高於大一與大二的學生。

24.在對四大核能議題上的認知與態度上，在年齡層上除了「核能相關知識」在年齡層上無顯著差異外，其他三項均呈現統計上之差異；其中，21-25歲的年齡層均顯著地高於20歲(含)以下20歲(含)以下；但在「核能發電的必要性」上，21-25歲的年齡層只顯著地高於20歲(含)以下的年齡層。

25.在對四大核能議題上的認知與態度上，在學院別上的態度均具統計上的顯著差異性，然而各院間的差異性相當多元且複雜。

26.在對四大核能議題上的認知與態度上，在地區別上的態度均具統計上的顯著差異性，但各地區間的差異性亦相當多元且複雜。

二、我國大專生對核能相關議題所偏好的溝通方式及溝通模式：

1. 在本研究的所有五個人口統計變項中，成人型的溝通方式均佔有壓倒性的絕對優勢（佔98.23%）；亦即，目前的大專生看起來雖然自主性很強，但還是偏好「理性」

的溝通方式。其實，「理性」的溝通並不代表正確；因此，如何給予並強化大專生對核能相關議題的正確知識，以使他（她）們能進行理性的判斷，乃是當務之急。

2. 依據Eric Berne所發展的TA理論中的「相互型」、「交叉型」與「隱含型」等三種型態的溝通模式得知，「相互型」的「成人式（理性）」溝通模式乃是達成溝通雙方雙贏的最佳模式；基此，當欲對我國大專生進行核能相關議題的溝通時，最好使用理性的「相互型」的「成人式」溝通模式。

### 參考文獻

- [1] Berne, E. (1963), *The Structure and Dynamics of Organizations and Groups*, Philadelphia: J. B. Lippincott.
- [2] Berne, E. (1964), *Games People Play*, NY: Grove Press.
- [3] Berne, E. (1972), *What Do You Say After You Say Hello?* NY: Grove Press.
- [4] Bowen, D. D., and Nath, R. (1978), "Transactional Analysis in OD: Applications Within The NTL Model," *The Academy of Management Review*, 34(1): 79-89.
- [5] Hale, J. B. (1974), "Use of Transactional Analysis and Other Tools in Understanding Drug Activities," *Journal of Drug Education*, 4(2): 197-204.
- [6] Han, C. C. (2014), "Demarketing Fear: Bring the Nuclear Issue Back to Rational Discourse," *Energy Power*, 64: 183-192.
- [7] Hansen, R. W., Barry, T. E., Reed, H. H., and McGill, M. E. (1976), "Marketing Applications of Transactional Analysis: Some Empirical Support for Advertising," *Journal of Advertising*, 5(3): 16-24.
- [8] Harris, T. (1967), *I'm OK-You're OK: A Practical Guide to Transactional Analysis*, NY: Harper & Row.
- [9] Leana, C. R. and Barry, B. (2000), "Stability and Change as Simultaneous Experiences in Organizational Life," *Academy of Management Review*, October: 753-759.
- [10] Lewin, K. (1951), *Field Theory in Social Science*, NY: Harper & Row.
- [11] Mariotte, M. (2009), "Second Thoughts on Nuclear Power," *The Futurist*, 43(6): 23.
- [12] Nadler, G. and Chandon, W. J. (2004), "Making Changes: The FIST Approach," *Journal of Management Inquiry*, September: 239-246.
- [13] Nazir, T., Shah, S. F. H., and Zaman, K. (2013), "Transactional Analysis: New Ways of Communications," *International Journal of Information, Business and Management*, 5(1): 213-225.
- [14] Oates, D. (1977), "Transactional Analysis Improves Labor Relations," *International Management*, 32(1): 38.
- [15] Oreg, S. (2003), "Resistance to Change: Developing an Individual Difference Measure," *Journal of Applied Psychology*, August: 680-693.
- [16] Park, H., and Harrison, J. K. (1993), "Enhancing Managerial Cross-Cultural Awareness and

Sensitivity: Transactional Analysis Revisited,” *The Journal of Management Development*, 12(3): 20.

- [17] Robbins, S. P. and Coulter, M. (2009), *Management*, NY: Pearson Education, Inc.
- [18] Rossin, A. D. (2003), “Marketing Fear: Nuclear Issues in Public Policy,” *The American Behavioral Scientist*, 46(6): 812-821.
- [19] Surrey, J., & Huggett, C. (1976), “Opposition to Nuclear Power: A Review of International Experience,” *Energy Policy*, 4: 286-307.
- [20] Swensen, C. H. Jr. (1972), *Introduction to Interpersonal Relations*, Ill: Scott-Foresman.
- [21] Welhrich, H. and Rigny, A. J. (1980), “Toward System Four Through Transactional Analysis ,” *International Management*, 31(7): 30.
- [22] Zehner, O. (2012), “Nuclear Power's Unsettled Future,” *The Futurist*, 46(2): 17-21.

# 核能重大事故之緊急應變與資訊公開

## Emergency Response and Information Disclosure of Major Nuclear Accident

計畫編號：MOST 104-NU-E-305-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：高仁川助理教授

e-mail：lawrck@mail.ntpu.edu.tw

計畫參與人員：共同主持人張惠東助理教授

執行單位：國立臺北大學法律學院

### 摘要

從二十世紀中葉以來，歐美先進國家就積極推動資訊公開立法。然而，除了一般性的資訊公開立法之外，亦有著重於特定領域，強化一定區域內之居民，對某些與環境相關之污染物質，賦予民眾擁有知的權利。例如：美國於 1986 年通過「緊急計畫暨社區知的權利法」(Emergency Planning and Community Right-to-Know Act; EPCRA)、又如歐盟於 1982 年通過所謂的塞維索 I 指令 (Seveso I 指令; 82/501/EEC)，以預防並控制對特定工業活動的重大主要事故危害，於 2012 年 7 月 4 日更頒布第三代的塞維索指令 (2012/18/EU)。修正內容包括資訊公開、民眾參與和司法救濟。從以上的發展趨勢來看，針對核能重大事故之緊急應變與資訊公開，國際間是否有跟隨此一演變的可能，實值關注。因此，核能重大事故之緊急應變與資訊公開的相關立法思維，於我國該有如何之相應修正或演進，實不容忽略。本計畫擬比較若干國家的環境或核能重大事故緊急應變機制與資訊公開立法，就其最新的發展進行深入之研究，以作為我國法制之參考。

關鍵詞：核能、重大事故、緊急應變、資訊公開。

### Abstract

Since the mid-20th century, both European countries and the U.S. advanced their information disclosure legislation. Except general Freedom of Information Act, there were some acts focused on specific regulatory areas, enhanced local citizens to access information related environmental pollutant, and empowered citizens the right-to-know, for example, the Emergency Planning and Community Right-to-Know Act of the U.S., and Seveso Directives of the EU. These legislations usually aim at prevention and control over specific industrial activities which could cause severe accident and injuries. It is worthy to note that whether the latest development would influence mechanism of the emergency response and information disclosure of major nuclear accident. This project intends to explore the characteristics of emergency response and information disclosure of major nuclear accident in some regulatory areas, and makes comparison among the U.S., and the EU. This project would propose recommendations for reference to Taiwan.

Keywords: Nuclear Energy, Major Nuclear Accident,

Emergency Response, and Information Disclosure.

### I. 前言

由於當前民間環保團體等組織與政府的共識不足，致使我國核能政策相當程度上仍處在不確定的狀態。其中值得矚目者，主要涉及公投與相關訴訟及釋憲的進展。例如：以呂秀蓮前副總統為領銜人的新北市地方性公民投票提案，經行政院公投審議委員會於 102 年 5 月 16 日第 18 次委員會議決議，該案公投事項所詢「是否同意核能電廠裝填核燃料棒試運轉」一節，涉及能源政策，其影響包括我國整體電力供應、能源儲備、產業關連、環境生態等多重政策，依司法院釋字第 520 號解釋意旨，自屬國家重要政策，故本案不屬地方性公民投票事項。行政院於 102 年 5 月 28 日以院臺經字第 1020031611 號函復新北市政府。新北市政府以 102 年 6 月 4 日北府民自字第 2021950046 號函轉公民投票案認定結果「本案不屬地方性公民投票事項」予呂前副總統。呂前副總統再針對此認定事件提行政訴訟，該行政訴訟案經多次答辯後，於 2014 年 8 月 5 日台北高等行政法院認定核四裝填核燃料棒屬全國性事務，需交全國性公民投票，因此宣判呂前副總統敗訴。又如，司法院大法官於民國 103 年 6 月 6 日第 1418 次會議，議決不受理立法委員柯建銘等四十人「為行使預算案議決權，認行政院就龍門核能發電廠編列預算續建、運轉，與憲法第十條、第十五條及憲法增修條文第十條第二項規定保障生存權、工作權、財產權、居住與遷徙自由、環境權及免於恐懼的自由等精神抵觸」的釋憲聲請案。

另一方面，從行政部門的角度，馬總統於 2014 年 8 月 13 日的「2014 能源願景高峰論壇」曾表示：「核能仍在全球發電結構中扮演重要角色，台灣不能放棄任何一種能源選項，要找出最適當組合，要自主化和多元化。」總統並且引述國際組織數據指出：「目前正在興建和規劃興建的核能機組，全球大約有 242 座，包括部分產油國家。芬蘭、英國、美國、俄羅斯與日本，仍繼續使用核能，為了達到能源多元化和自主化、兼顧成本和減碳的目標。」此外，政府始終堅持「沒有核安就沒有核電」的立場，進行嚴格的核安總體檢，確認核電廠可有效防護複合式天災。總統更表示，政府已做出核四安檢後暫時封存、後續能否商轉交由公投決定的決策，期盼降低社會爭議，保留因應國內外能源發展情勢的彈性選擇權。

由上可見，在核四爭議落幕乃至我國核電走向最終

獲得確認之前，有關核能重大事故之緊急應變與資訊公開的課題，仍屬難以迴避之課題。

## II. 主要內容

從二十世紀中葉以來，歐美先進國家就積極推動資訊公開立法。然而，除了一般性的資訊公開立法之外，亦有著重於特定領域，強化一定區域內之居民，對某些與環境相關之污染物質，民眾擁有知的權利。例如：美國於 1986 年通過「緊急計畫暨社區知的權利法」(Emergency Planning and Community Right-to-Know Act; EPCRA)規範化學物質的申報程序、社區知的權利，以及政府及社區的緊急因應措施，用以事前預防及事後因應化學災害。該法的特色在於鼓勵並支持在全國、各州和地方各級政府建置的緊急應變計畫，並提供在地社區居民和地方政府有關該地潛在性危險化學品的資訊。又如歐盟於 1982 年通過所謂的塞維索 I 指令 (Seveso I 指令; 82/501/EEC)，以預防並控制對特定工業活動的重大主要事故危害。該指令於 1996 年進行大幅修訂，通過塞維索 II 指令 (96/82/EC)：《控制危險物質重大事故指令》，以取代舊指令。2012 年 7 月 4 日更頒布第三代的塞維索指令 (2012/18/EU)。修正內容尤其包括資訊公開、民眾參與和司法救濟。從以上的發展趨勢來看，針對核能重大事故之緊急應變與資訊公開，國際間是否有跟隨此一演變的可能，實值關注！

申言之，美國 1986 年通過之「緊急計畫暨社區知的權利法」(EPCRA)，其內容包括「緊急計畫」的擬定，其目的在於確保州和當地社區為潛在化學品事故做好準備。具體步驟是每州須建立州緊急應變委員會 (SERC)。SERC 必須劃定當地緊急計畫區域，並為每一區，建立、監督及協調地方緊急計畫委員會 (LEPC) 的活動。此外，SERC 並任命 LEPC 成員。LEPC 至少應包括下列團體或組織代表：1. 州及地方之民選公務員；2. 執法、民防、消防、急救、健康、當地環境、醫院、及運輸人員；3. 廣播及出版媒體；4. 社區團體；5. 本條規範之廠房的所有人和經營者。LEPC 的任務則包括：制定委員會運作規則、討論緊急計畫的公開會議、緊急計畫的散布；應制定程序，以接受並處理民眾資訊公開之申請，包括指定一官員作為資訊協調員；為該區域提出緊急應變計畫，每年更新。並報請 SERC 審查。

而歐盟的「控制危險物質重大事故指令」，其內容亦包括：重大事故預防政策、緊急應變計畫（廠區自提的內部計畫、主管機關提出的外部計畫）、資訊公開（會員國應確保將附件五規定的資訊永久提供給民眾，包括電子化。資訊應持續更新）、會員國也應確保所有可能受重大事故影響之人，定期並且以最適當方式，毋須提出要求，即收到關於安全措施以及在重大事故發生時所需行為之清楚和易於理解的訊息。尤其該指令第 15 條，特別就民眾協商和參與決策的設計，強調：成員國應確保有關民眾對於特定個別計畫案，有及早表示意見的機會；第 22 條有關資訊取得與機密的規範，清楚指出：為了透明性，會員國應確保主管機關因申請，將依據本指令所持有之任何資訊，提供任何依據 2003/4/EC 提出

申請之自然人或法人。因此，就有關核能重大事故之緊急應變與資訊公開，前述與環境相關之污染物質的特別立法規範，有無值得我國借鏡參考之處，本計畫藉環境法中不同領域的規範進行對照研究。

另一方面，在西方先進國家中，倚重核能為主要供電來源的國家，無疑是以法國最具代表性。因此，核能重大事故之緊急應變與資訊公開的相關立法思維，於法國有何演進，實不容忽略！法國學者明確指出「儘管和安全、保安的目的有關，核能緊急狀況的介入與準備，和用來預防嚴重意外的核能活動的監控與管理活動是不同的。為了更有效率，危機管理的國家機制應該經常性的檢視。在法國，這屬於政府的職權，受首相和其附屬的機構（國家安全與國防秘書處 le secrétariat général de la défense et de la sécurité nationale (SGDSN)）的指揮。這個程序也適用於地方議會和自治團體、醫療專業人員、科學與經濟領域活動者。SGDSN 近年曾進行了『主要放射性或核能意外反應之國家計畫 Plan national de réponse accident nucléaire ou radiologique majeur』。這個計畫確立危機處理組織、使用的策略及政府層級的主要採用措施，在核能緊急狀況下。核能緊急狀況的特殊性在於它的影響幅度及規模。因此，必須實施一個國家的整體回應及危機處理組織應該也是中央、跨部會的。而由於核能重大事故影響範圍更能廣及其他國家，故也需重視歐盟與國際層級的合作。例如：通知和資訊交換的義務，以及協助的義務。在法國，核能保安局 ASN 是國家級主管機關，負責確保第三國的警示和資訊，並接收他們的訊息。

至於核能資訊公開部分，因核能領域是是個敏感的領域，其中有許多機密，工業的或國防的，必須要保護這些機密，可分別出三大項目的機密和核能有關：國防、醫療和工業機密，而核設施建造確定會產生許多關於調閱文件的問題，這些問題過去並未被現行法律所規範。因此，法國特別於 2006 年制定「核能安全與透明性法（該法簡稱為 TSN）」，並採用行政和法律工具來確保這類資訊公開。根據該法第一條，「所有的機制用來確保民眾有獲得正確且可得到的核能安全相關資訊」。法律也制定許多用來確保透明性的措施。其中三項值得被提出討論。首先，核能安全及輻射保護資訊公開權利，這項措施產生三項權利或義務：國家要提醒人民有知的義務，其中核安局負責核能活動領域，核能資訊和環境資訊知的義務應該一致；建構一個可以直接向設施經營者索取核能資訊的權利；基礎核設施經營者有義務作出一份關於設施安全狀態的年度報告，將報告交給資訊公開地方委員會及讓民眾索取。第二項措施是設置資訊公開地方委員會（commissions locales d'information (CLI)）。第三個措施是為了核能安全透明性與資訊公開創設高等委員會（Haut Comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN)）。TSN 法的第一章處理了核能安全和輻射保護的資訊權。法律第十九條特別清楚說明要產生的資訊是關於「（核能活動）可能導致的游離輻射暴露的風險，及為了預防或減少此風險或此暴露所採取的安全與防護措施。第二章則

是關於資訊公開地方委員會。第三章在說明核能安全透明性與資訊公開創設高等委員會。

### III. 結果與討論

美國 EPCRA 有四個主要條款:1.緊急應變計畫 2.緊急排放通知 3.危險化學品儲存彙報規定 4.有毒化學排放清單。該法案中的緊急應變計畫部分是為了幫助社區準備和因應涉及危險物質的緊急事件。基本上,美國的每一個社區都是某一個綜合計畫的一部分。

1.緊急應變計畫 (EPCRA301 至 303 條):美國各州應創立州級緊急應變委員會(SERC),並要求當地社區成立當地緊急應變計畫委員會(LEPC),為化學事故準備當地的緊急應變計畫。2.緊急排放通知 (EPCRA304 條):EPCRA 要求設施向緊急應變計畫委員會(LEPC) 提供緊急應變計畫所必需的資訊,並向 SERC、LEPC 和當地的消防部門提交有關設施裏的危險化學品的年度清單報告和信息。3.危險化學品儲存彙報規定 (EPCRA311 至 312 條):設施製造、加工,儲存指定的危險化學物質必須製作物質安全資料清單 (Material Safety Data Sheets ,MSDSs) 並提供給 SERC、LEPC 和消防單位。MSDSs 記錄了此化學物質的特性及對人體健康之影響。同時,這些資訊也應該向大眾公告。4.有毒化學排放清單(Toxics Release Inventory ,TRI) (EPCRA 之 313 條):特定設施按規定每年都要向環保署報告有毒化學品的排放數量。EPCRA 的資料對公眾公開,環保署存有一個全國性的資料庫,其中包括有毒物質排放清單(TRI)的有毒化學排放報告。

至於歐盟的「控制危險物質重大事故指令」(賽維索指令)的訂立,源自 1976 年時,義大利倫巴底一個名為「賽維索」的小鎮所發生的戴奧辛外洩污染事故。在當時,人們還不太了解如何防治及處理戴奧辛污染,甚至對其可能產生的健康危害亦不清楚。於是,歐盟官方於 1982 年通過更嚴格的「工業安全法規」,後來被稱為賽維索 I 指令 (Directive 82/501/EEC)。1996 年,在世界各地發生的多起化學污染事故,促使歐盟大幅修正賽維索 I 指令,而有了賽維索 II 指令(Directive 96/82/EC)。到了 2012 年,為了因應歐盟化學物質分類法規的變化,並促進公眾對資訊近用及司法救濟的權利,將原來的指令做了修正,是為賽維索 III 指令 (Directive 2012/18/EU)。

考量歐盟境內高度工業化的比率,「賽維索指令 III」旨在減低大型化學物質災害的發生頻率。指令廣泛地規範了歐盟境內所有包括化學、石化、物流及金屬冶煉產業中,多達 10000 處危險化學物質使用及貯存的工業設施。而該指令被認為是工業災害管制政策的標準,大多數國家亦將之視為工業災害管制立法的經典範本。

賽維索指令 III 的主要修正方向:1.更新指令內所有關於化學物質的分類與危險程度,以符合歐盟法規的同一性。2.強化公眾的資訊近用、司法救濟及參與決策過程之權利。3.改善資訊蒐集、處理及公開共享的方法。4.簡化行政流程及闡明規範內容,以利規範實施並且減

少行政負擔。關於賽維索指令 III 的主要目的及宗旨,主要是以大型化學災害的預防及事故後的緊急應變作為規範目的,為了盡可能降低化學災害發生的頻率及限制化學災害事故的後果,該指令適用於所有貯存及使用大量危險化學物質的工業設施。但不包含另有相類似安全規範的化學物質運輸或核子設施,且各個工業設施皆依其所使用或存放的化學物質多寡,分別設有不同程度的規範標準,而所使用或儲存的數量越多,其規範標準將會更加嚴格。

值得注意者,乃該指令有關運營單位與主管機關就因應危險物質重大事故在義務上的詳細規範。

#### (一) 運營單位的主要義務

##### 1. 通知義務 (Article 7)

(1) 運營單位須通知各成員國化學災害管制主管機關下列事項:運營廠商商號或負責人姓名、運營設施的確切地址、能夠充分辨識危險化學物質及其分類的資訊、危險化學物質的數量及態樣、運營設施或貯存場所正在進行或即將進行的運營活動、周邊特定設施或環境因素,易造成事故後果加劇,產生連鎖效應或增加事故風險等危險因子。

##### (2) 提前告知事項

在使用化學物質的過程中,化學物質有顯著改變之情形。修改或安裝新的設施,足以對災害後果產生重大影響之事務、設施定期的關閉或除役。

##### 2. 重大事故預防部署方針 (Article 8)

(1) 各成員國應要求設施運營單位制定「重大事故預防方針」(MAPP),並確保其確實執行。「重大事故預防方針」的設計標準應確保人類健康和環境的保護。內容應包括運營商的總體目標和行動準則,角色定位和管理責任,以及控制不斷提高的重大事故風險,確保安全標準維持在最高層級。

(2) 設施運營單位至少須每 5 年重新檢視並更新一次「重大事故預防方針」(MAPP),且依循各成員國法規按時送交監管單位審查。

(3) 「重大事故預防方針」(MAPP)應以適當的方式、結構於安全管理系統中實踐,並應考量運營組織的複雜性及設施的作用。

##### 3. 營運者須應主管機關要求製作安全報告 (Article 10)

##### (1) 安全報告應揭露事項

須證明「重大事故預防方針」(MAPP)能準確的辨認重大事故發生,並採取可有效減低損害的應對方式。須證明「重大事故預防方針」(MAPP)已考慮運營設施內所有應對內部重大事故風險有關聯的設備、倉儲設施及基礎設施的設計、建設、運行和維護的可靠性。安全報告內須訂有內部的緊急應變計畫,並提供資訊以利外部應變計畫的擬定。向主管機關提供足夠的信息,以利主管機關作出關於新的活動或與現有設施發展的選址決策。

(2) 安全報告須定期重新檢視且至少每 5 年須更新一次。

- (3) 運營商還應審查並在必要時更新「重大事故安全報告」，如：在有關安全相關的新事證、災害分析所得之風險評估或新技術提出後，主動或應主管機關要求，更新「重大事故的安全報告」。
4. 製作內部緊急應變計畫 (Article 12)
- (1) 須訂有內部的緊急應變計畫
  - (2) 須提供主管機關必要資訊，以利主管機關制定外部應變計畫
  - (3) 內部緊急應變計畫需的目的  
控制危害的擴大並盡可能降低對人身安全、環境及財產的損害。採取適當且必要的措施，以保護人員生命、財產及環境。將必要訊息揭露於公眾，且與主管機關或緊急應變機關（消防、警察...）保持充分溝通。在事故後提供重建及環境清理措施。
5. 運營單位在災害發生中的通知及作為義務 (Article 16)
- (1) 在事故發生時立即通知主管機關，當不能通知時，一待能通知時即應通知。
  - (2) 必要資訊包括：  
事故災害的目前情況。事故是由何種危險化學物質引起或廠區內是否含有其他化學物質。損害的即時評估，包括生命、財產或環境。已採取何種緊急應變措施
  - (3) 提供主管機關未來階段性展望措施  
減輕事故中、長期的影響。防止類似事故再次發生
  - (4) 若事故後的調查報告揭露新事證或新的事故原因，運營商須通知主管機關

#### (二) 主管機關的主要義務

1. 監督營運商內部緊急應變計畫的落實並制定外部緊急應變計畫 (Article 12)
- (1) 依據營運商的內部緊急應變計畫制定外部緊急應變計畫
  - (2) 主管機關應確保內部緊急應變計畫，規範對象包括設施內工作人員及外包廠商人員
  - (3) 應確保公眾意見在外部緊急應變計畫制定或修改時，能得到採納
  - (4) 應確保內部和外部的緊急應變計畫進行審查、測試，並在必要時以不超過三年之適當期間由運營商或指定的主管部門分別更新。審查應考慮到在有關設施、新的技術知識或有關重大事故緊急應變部門發生的顯著變化。
  - (5) 在外部應變計畫中，為了應對重大事故，應加強與民間救援單位的合作。
  - (6) 當發生重大事故時或可預見重大事故發生時，主管機關應確保應變計畫即刻付諸施行。
2. 揭露相關資訊義務 (Article 14)
- (1) 主管機關於重大化學事故發生時，應主動提供民眾安全防範措施和必要行為須知。
  - (2) 應提供一個非技術性、總結形式的安全報告，其中至少應包括重大事故風險評估和對人類健康、環境，可能產生的影響。
  - (3) 編列危險化學物質清單。
  - (4) 對於跨國界化學事故，應與其他受潛在影響成員國的主管機關進行資訊交換與流通。

#### 3. 應變義務 (Article 17)

- (1) 確保所有緊急、中期、長期措施都已付諸實行。
- (2) 為了全面分析事故原因，應以審查、調查或其他正當方法，搜集所有技術、組織及管理層面的相關資訊。
- (3) 確保營運商採取必要的修正措施。
- (4) 對未來的預防性措施提出建議。
- (5) 通知可能受影響的地區人民，並告知已採取何種措施以減輕影響。

#### 4. 通知歐盟執委會 (Article 18)

- (1) 通知內容：事故發生地點、專責機關、災情彙報、已採取的應變措施、事故原因的分析、檢討建議。

#### 5. 審查義務 (Article 20)

- (1) 主管機關應建立一套審查制度。
- (2) 審查標準：營運商須證明證明已採取適當的措施並建立防止重特大事故的各種機制。證明已採取措施盡可能地減低事故危害的影響，無論是現場或非現場的。所提交的安全報告，包括數據與相關訊息皆是符合設施現狀的。資訊是否已公開給大眾知悉。
- (3) 主管機關應在相應層級建立相應的審查計畫（從地區層級到國家層級），並經常性地檢視、更新審查計畫。
- (4) 應確保轄下所有化學工業單位接受到審查。設施的危險性體系化評價應符合以下標準：對健康及環境的潛在影響、符合本指令要求的紀錄、非例行性的審查的必要性、審查報告須於一定期限內提出應加強與其他成員國主管機關有關審查經驗、工具與知識的交流。

有關公民權利的部份，就資訊公開亦有詳細規範。

#### (一) 公眾參與決策權 (Article 15)

1. 應在決策前及早讓公眾參與之事項：如特定、個別計畫案、重大加建、改善設施、設施的擴張或增建。
2. 訊息應以電子媒體公告或其他方式，告知公眾最新的資訊。
3. 確保公眾享有在決策前對主管機關表達意見的權利，而且聽證會上所蒐集到的公眾意見必須納入決策考量。
4. 任何有關的決定做成後，主關機關皆須告知公眾應提供合理的時間框架，預留足夠的時間通知公眾並為公眾有效地參與環境決策預留緩衝時間。

#### (二) 資訊揭露內容 (Article 14)

1. 主管機關於重大化學事故發生時，應主動提供民眾安全防範措施和必要行為須知。
2. 應提供一個非技術性、總結形式的安全報告，其中至少應包括重大事故風險評估和對人類健康、環境，可能產生的影響。
3. 編列危險化學物質清單。對於跨國界化學事故，應與其他受潛在影響成員國的主管機關進行資訊交換與流通。

#### (三) 資訊近用及機密事項規範 (Article 22)

1. 主管機關應充分揭露資訊，以符合透明性的要求。任何人皆得依 Directive 2003/4/EC，請求獲取相關資訊。

2. 對於機密事項，主管機關得拒絕揭露  
(四) 司法救濟 (Article 23)：對於申請資訊揭露遭拒絕的民眾得提起司法救濟。

#### IV. 結論

參照美國 EPCRA 法案對於危險化學物質之緊急應變，能提供我國核能安全緊急應變之法規改進之方向。以下幾點分別探討：

##### 1. 從民眾在緊急應變之參與度：

(1) 美國 EPCRA 第 11001 條規範州委員會和地方委員會之建立，其中(c)項更規範地方之委員會至少應包括下列團體或組織代表：1. 州及地方之民選公務員；2. 執法、民防、消防、急救、健康、當地環境、醫院、及運輸人員；3. 廣播及出版媒體；4. 社區團體；5. 本條規範之廠房的所有人和經營者。

(2) 我國之核子事故緊急應變法第 3 條本法所稱主管機關：在中央為行政院原子能委員會；在地方為緊急應變計畫區所在之直轄市政府及縣(市)政府。可得知：我國並未針對地方專設一機關處理相關問題也未提供民眾有參與之機會，僅交由當地政府指派，讓民眾能積極參與核能安全之機會減少。

##### 2. 從危險化學物質之數據公開程度：

(1) 美國 EPCRA 第 11021 條以下，從日常監控危險化學物質之製造、儲存對於人體健康影響的數據量。且全部數據依(c)項需提供給緊急應變計畫委員會(LEPC)和民眾，且依第 11044 條，任何人都能要求緊急應變計畫委員會(LEPC)將 MSDS 公告。

(2) 我國毒性化學物質管理法第 8 條也規範危險化學物質之數據公開：毒性化學物質之運作及其釋放量，運作人應製作紀錄定期申報，其紀錄應妥善保存備查。前項紀錄之製作、格式、申報內容、頻率、方式、保存及其他應遵行事項之辦法，由中央主管機關定之。主管機關應將第一項毒性化學物質之釋放量紀錄分期上網公開供民眾查閱。此一規範應推廣至核能領域，讓民眾能從日常監督核能輻射量之數據。

##### 3. 從緊急應變之敏捷度：

(1) 美國各州創立州級緊急應變委員會(SERC)，當地社區更成立當地緊急應變計畫委員會(LEPC)，為化學事故準備當地的緊急應變計畫。美國之緊急應變機關從州政府至社區，且從日常即實行預防於監控措施，機關間之緊密度較高。

另一方面，賽維索指令目的是在規範化學物質之環境污染，惟化學物質之污染與放射性物質污染雖不盡相同，卻仍有相仿之處值得借鑑。

1. 首先從核能設施運營單位之義務來看，考量核子事故對生命、財產及環境所造成的危害較化學污染嚴重許多，亦具有不可回復性與長期的不良影響，又「重大事故預防部署方針」對於核子事故的風險評估及事故預防有極重要的作用，故應要求其針對重大事故發生

提出「預防部署方針」，以利主管機關監管並實施相關的預防措施。

2. 另外，內部緊急應變計畫及外部緊急應變計畫亦值得我國參考，應用於核能相關規範上。核能事故並非單一營運商能完全負責的，其災害之大，須傾國家之力予以應對，故民間單位、核能運營商及政府間的資訊交流與緊密合作是非常必要的。應構思成立專責單位並做好縱向及橫向的聯繫，才能確保事故發生時不至於手足無措，導致災害擴大。

3. 至於主管機關監理方面，應仿效歐盟，建立嚴格且有體系的審查制度，並確實落實。主管機關不僅有監管之權利，更負有革新、精進監管程序、標準之義務，隨著極端氣候的經常性發生，核能設施的風險評估愈發地重要，而風險評估的謹慎、全面與否通常與主管機關審查嚴密性與全面性有極大的關聯，故審查制度的落實對於核能安全管制是非常有幫助的。

4. 此外，有關資訊公開方面，是最值得我國行政部門借鏡之處，賽維索指令不僅強調公眾參與的權利，更進一步將參與時點提前至計畫案構思之初，在計畫開始形成之初，舉辦公聽會，廣納民眾意見，平衡各方利益，而不僅僅是走過場的表面功夫。如此將公眾參與及早納入決策過程的方式將大大降低政策的實踐難度，也因較早凝聚共識，而較不易發生工程或政策進行到一半卻因反對聲浪過大而被迫擱置的窘境，更增加了民眾對政府的信賴，提高了決策過程的透明度，對行政機關而言可說是利大於弊。

#### 參考文獻

- [1] 劉如慧，危險物質重大事故之預防、緊急應變、資訊公開-兼論高雄氣爆事件，台灣環境與土地法學雜誌，第 14 期，頁 17-42。2015 年 2 月。
- [2] <https://www.epa.gov/epcra/what-epcra>
- [3] <http://ec.europa.eu/environment/seveso/index.htm>
- [4] <http://ec.europa.eu/environment/seveso/legislation.htm>

# 有關放射性廢棄物處理、貯存與最終處置之國際規範研析

## The Analysis On International Regulations Concerning I Radioactive Waste, Treatment, Storage and Final Disposal

計畫編號：MOST 104-2623-E-031-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：程明修

e-mail：cherngms@hotmail.com

計畫參與人員：林昱梅

執行單位：東吳大學法律學系（所）

### 摘要

目前我國對放射性廢棄物之管理方針，係採「近程燃料池貯存、中程乾式貯存、長程最終處置」之策略，與世界上多數使用核能發電之國家係屬相同，若能汲取其他各國在推動時所累積之經驗，必可提升計畫之週延性並增進其效益。是本研究之問題意識將置於：如何針對「放射性廢棄物處理、貯存與最終處置之管制」，隨相關技術發展，建構完整之規範體系，以保持整體國力在穩定中持續成長？而於前開立法論之探索過程中，不可避免地，需研究參酌相關國際組織所形成之標準，期許我國機制能積極隨全球脈動前進。其中，本研究將從「用過核子燃料與放射性廢棄物管理安全聯合公約（下稱聯合公約）」及「用過核子燃料與放射性廢棄物管理之歐盟指令（下稱歐盟指令）」切入，企求我國能成功與國際水準接軌。

關鍵詞：放射性廢棄物,最終處置,用過核子燃料與放射性廢棄物管理安全聯合公約,放射性物料管理法,用過核子燃料與放射性廢棄物管理之歐盟指令

### Abstract

At present, our management policy to radioactive waste adopts "short-range: fuel pool storage, medium range: dry storage, long-range: final disposal" strategy which is the same as most other countries. If we can absorb these experiences that brought by those countries, definitely we can promote the completeness of management and increase the benefit of it. Therefore, this paper will concentrate on how to build the complete system of standard to the treatment, storage, and final disposal of radioactive waste under the development of technique to maintain our national strength in a stable growth. In order to achieve that goal, this paper will also refer to "Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management", and "Spent Fuel and Radioactive Waste Management Directive" for being geared to the international standard.

Keywords: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Treatment, Storage, Final Dispos.

### I. 前言

儘管核能發電之方式在世界各國皆存有爭議，惟隨天然氣與石油供應不確定性升高之同時，核能發電仍受

到相當程度之青睞。2011年3月11日，日本發生芮氏規模9.0級之超大地震，並引發海嘯，造成福島第一核電廠大規模之設備毀損、爐心熔毀及輻射外洩等重大災害，成為1986年蘇聯車諾比爾核電廠事件以來最嚴重之核安事故。台灣天然資源難謂豐富，且身處海島及多地震帶上，自需面對前述大自然所帶來之嚴峻挑戰而全力以赴；尤其前開事變後，反核聲音更係塵囂日上，是為落實前開目標，如何持續強化對放射性廢棄物處理、貯存與最終處置之管制，即屬基本而不可迴避的議題。

目前我國對用過核燃料之管理方針，係採「近程燃料池貯存、中程乾式貯存、長程最終處置」之管理策略，與世界上多數使用核能發電之國家係屬相同；我國核能發電事業較諸歐美各國起步尚晚，有關放射性廢棄物處理之後端營運工作，其進展與規模雖不若該等國度，若能汲取其他各國在推動後端營運計畫所累積之經驗，必可提升計畫規劃之週延性並增進其效益。而回顧我國關於放射性廢棄物處理、貯存與最終處置之法制建構，法律部分目前主要可見「放射性物料管理法」及「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」二部規定，其餘則由為數眾多，但是法律保留不足之法規命令或行政規則所補充，諸如「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」及「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，就「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置」皆多有著墨。固然，法制設計主體如此分流係考量專業分工，惟在「他律」規範密度上顯然較為空泛，對於「實施主體、資金、安全基準、最終處置場址選定程序、最終處置場址閉鎖終了前後之管理方式、處分場地地下空間利用之限制、損害賠償制度之確立」等面向，亦未能具體明確並使民眾廣泛參與，使實際執行之機關未能確實受到計畫性之指示，充分思考社會上各種衝突之利益，進而確保國民生命之健康及經濟發展之安定。本研究並比較各國有關用過核子燃料與放射性廢棄物管制與管理模式，分析我國有關放射性物料管理法之法制發展。

### II. 主要內容

#### I. 透過「用過核子燃料與放射性廢棄物管理安全聯合公約」檢視我國放射性物料管理法之規制密度

為確保民眾生命安全並維護環境生態品質，針對放

射性廢棄物之管制，行政院原子能委員會（下稱原能會）現已建構許多法令，法律位階者如放射性物料管理法、低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例，而命令層次亦如：放射性物料管理法施行細則、放射性廢棄物處理設施運轉人員資格管理辦法、放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則、低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則、放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法、低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則等，形成相當繁複的管制法令體系。惟如前述，前開管制法令體系多偏向由行政機關自行設計，在「他律」之規範密度上顯較為缺乏，亦未能使利害關係人廣泛參與，讓執行機關確實受到計畫性之指示，充分衡量各式衝突利益；申言之，如學者所言：「審議式民主（deliberative democracy）被不少學者視為改善民主政治的良方，它強調：被賦權的公民在取得充分知識（well-informed）後，盱衡情勢提出解決社會利益衝突的方案，並強化政府決策正當性，改善過去公民被動接受資訊或被隔絕在「專業決策」的過程之外。」。尤其，核能發電具有對當代有利（享受發電），對未來世代不利（放射性廢棄物）之特色，如何將不分時空之全體人民利益皆全盤考量，更值深思。對此，本文即嘗試於下述進行簡要分析。

而在比較法之對照上，衡諸篇幅有限，將先從「聯合公約」出發。我國雖非聯合公約之締約方，惟依放射性物料管理法第 17 條規定，吾人仍須遵循該聯合公約之設定要求，是我國立法、行政等權即有義務透過各種必要措施來履行本聯合公約所賦予之不同義務；期間是否有所落差，即有觀察之價值。

### 第一節 管制機關之組成

聯合公約第 20 條規定：「每一締約方應建立或指定一個管制機關，委託其執行第 19 條提到的立法和管制架構，並授予履行其規定責任所需的足夠的權力、能力和財力與人力（第一項）。每一締約方應依照其立法和管制架構採取適當步驟，以確保在幾個組織同時參與用過核燃料或放射性廢料管理和控制的情況下管制權責有效獨立於其他權責（第二項）。」

為確保放射性廢棄物之管理安全，依放射性物料管理法第 2 條規定，作為主管機關之原能會，得依同法第 17 條規定，負責就「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置設施之興建」之申請，進行審核，決定是否發給建造執照。另依同法第 18 條規定，其亦可針對「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置設施興建完成後」，決定是否核准，並發給運轉執照；若有違反義務者，亦得要求持照人立即採行改正、補救措施或給予處罰，以確保設施之安全，且將追蹤改善進度，防止此違規情事之再犯。惟除經營者（如台電公司）與原能會外，尚有數個政府機關參與此等事務之管控。例如當台電公司負責用過核子燃料與放射性廢棄物管理設施之建造、運轉之際，其仍受其主管機關經濟部之監控。行政院環境保護署亦負責確保用過核子燃料與放射性廢棄物之管理，避免對環境之不利影響；行政院勞工委員會會確保勞工安全與健康；而內政部負責防火及建築之設計、建造。由上可知，若未來面臨事故或爭端，勢必將政出多元，難以確認責任歸屬；如是，則何以確保原能會之權責已有效獨立於

其他組織之權責，而符合聯合公約之要求？

## 第二節 處理、貯存及最終處置之管制

### A. 管制架構之目標

放射性物料管理法第 17 條規定：「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置設施之興建，應向主管機關提出申請，經審核合於下列規定，發給建造執照後，始得為之：一、符合相關國際公約之規定。二、設備及設施足以保障公眾之健康及安全。三、對環境生態之影響合於相關法令規定。四、申請人之技術與管理能力及財務基礎等足以勝任其設施之經營。」

至比較法上，聯合公約第 19 條即屬管制架構健全與否之核心判準，其規定：「每一締約方應建立並維持一套管轄用過核子燃料和放射性廢棄物管理安全的立法和管制架構（第一項）。這套立法和管制架構應包括：(i)制定可適用的本國安全要求和輻射安全法規；(ii)用過核子燃料和放射性廢棄物管理活動的執照審核制度；(iii)禁止無照運轉用過核子燃料或放射性廢棄物管理設施的制度；(iv)合適的制度化的控制、管制檢查及形成文件和提交報告的制度；(v)強制執行可適用的法規和執照條款；(vi)明確劃分參與用過核子燃料和放射性廢棄物不同階段管理的各機構的責任（第二項）。締約方在考慮是否把放射性物質作為放射性廢棄物管制時應充分考慮本公約的目標（第三項）。」以下即以此判準為觀察重心，檢視後續相關法規。

### B. 處理管制

聯合公約第 11 條規定：「締約國在放射性廢棄物管理之各種階段，為確保個人、社會及環境能免於放射性等其他危險，應採取適當措施（第一項）。為滿足前開要求，締約國應採取如下適當措施：(i) 應確保能適切除去臨界與放射性廢棄物管理間所發生之殘熱；(ii) 應確保放射性廢棄物係盡可能地於最小限度內產生；(iii) 應顧慮放射性廢棄物管理各階段間具相互依存之狀態；(iv) 應於依國際認可基準妥當考量之國內法體系中，將管制機關所承認之適當防護方法適用於該國，以給予個人、社會及環境有效保護；(v) 應考量與放射性廢棄物相關聯之生物學、化學等其他危險；(v) 應努力不採取使未來世代受有較當代容許影響更為巨大且得預見之行動；(vii) 應避免課予將來世代不當負擔（第二項）。」

又放射性物料管理法第 29 條規定：「放射性廢棄物之產生者應負責減少放射性廢棄物之產生量及其體積」。按為防止放射性廢棄物對環境之污染，即需對其適當包裝，使其所含放射性，鎖住於包裝內，待其轉為較穩定之形態；如此，方得將放射性廢棄物暫存於核能電廠之廢棄物貯存庫內，再視適當時機，送往最終處置場處置，與人類生活環境永久隔離。

以低放射性廢棄物為例，依經濟部能源局之資料所示：「至 2008 年底止，總計產生 192,108 桶，其中蘭嶼貯存場存放 97,960 桶，另貯存於核一、二、三廠，則分別有 40,400 桶、47,091 桶及 7,447 桶（共計 94,938 桶）。各電廠已陸續興建足夠容量的現代化貯存庫供低放射性廢棄物貯存之用；而核一、二、三廠之貯存容量，分別為 73,090 桶、95,421 桶及 12,600 桶，目前各核電廠的貯存空間僅使用一半左右。」而核一、

二、三廠在設計興建時，亦有同步設置低放射性廢棄物處理系統。

承上，為確保放射性廢棄物對環境之影響能逐漸降低，實仍有持續不斷監督之必要，以促其改善現有處理系統之功能與安全性，加強廢棄物減容與安定化處理，務使相關技術能日新又新。為此，放射性物料管理法第21條規定：「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置及其設施之運轉、設計與安全要求及其他應遵行事項之安全管理規則，由主管機關定之。」是1989年起，原能會即頒布「低放射性廢棄物減容策略」，規定各核能電廠放射性廢棄物之目標產值；2003年，原能會更依據前開條文授權訂定「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」希冀提出各式具體衡量標準。又具體執行上，亦透過定期或不定期之派員檢查，針對各核能電廠放射性廢棄物處理設施實施管制評鑑。惟美中不足的是，貯存空間雖尚屬足夠，處理系統之管制評鑑亦持續進行，此等措施（如減容策略、管制評鑑）成效之良善與否仍多取決於原能會之「自主規律與管理」，在法制層面上，仍欠缺外部規範機制；是即有必要對照聯合公約之需求，給予適度調整。

### C. 貯存管制

聯合公約第13條規定：「締約國有關計畫中之放射性廢棄物管理設施，為確保如所述，應採取適當措置：(i) 應將該設施使用期間中及最終處置設施關閉後對安全有影響之虞之全部可能因素，列入評價；(ii) 應將該設施對個人、社會及環境有安全影響之虞者，列入評價。此際，亦應考量最終處置設施關閉後可能發生之情形；(iii) 有關該設施之安全資訊應使大眾得為利用…（第一項）。締約國於實施第一項，並決定依第十一條所定之安全一般要件且同項所定場所時，為確保該設施不生其他締約國難以容認之影響，應採取適當措施（第二項）。」

再根據原能會之說明：「核一、二廠運轉所產生的低放射性廢棄物中，乾性廢棄物經分類後，先暫存各廠倉庫內，再依其可燃、可壓等特性分批送往減容中心處理，以再降低其體積。核三廠亦則於其廠內焚化爐處理可燃放射性廢棄物。濕性廢棄物則採水泥固化於耐蝕性較佳之鍍鋅鋼桶，再送往各核能電廠廢棄物貯存庫內貯存。由於目前我國尚無低放射性廢棄物之最終處置設施，為確保貯存安全，台電公司各核能電廠均建有現代化貯存庫，容量足以存放核電廠運轉年限產生的所有放射性廢棄物。」此種貯存方式即所謂「乾式貯存」—將其置於金屬容器內後予已密封，外部另有混凝土護箱來保護前開容器並降低輻射劑量。乾式貯存因具有運轉維護容易，操作成本較低，不易發生輻射洩漏等優點，目前正廣為世界各國核能電廠所採用。

而我國低放射性廢棄物貯存設施設置之管制究係如何為之？首先，依放射性物料管理法第17條及第18條規定：「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置設施之興建，應向主管機關提出申請，經審核合於下列規定，發給建造執照後，始得為之。」「放射性廢棄物處理、貯存或最終處置設施興建完成後，非經主管機關核准，並發給運轉執照，不得正式運轉。」是貯存設施之興建需依法檢送相關文件，經審核後方能為之；又完工啟用前並經勘驗合格後，貯存設施亦須另提出運轉申請，經

審查核准後始得正式運轉。

其次，為有效提昇貯存安全，依據原能會資料1：「其於97年間已完成法規修正，要求各核能設施限期提報『低放射性廢棄物安定化處理計畫』，由各設施重新審視各類廢棄物之型態，詳細說明處理的方式與期程。各設施均已依法於98年10月提出，經管制機關審查核備後實施。」而另有關核一、二、三廠低放射性廢棄物貯存設施對環境之輻射影響，目前台電公司放射試驗室及原能會所屬輻射偵測中心，皆在電廠周圍設置監測站定期取樣分析。原能會亦已對各核能設施附近之環境輻射，建置即時監測系統，公開於原能會網站；民眾可隨時透過網路，瞭解各地區之監測結果。

觀諸前述，有關貯存管制之實體檢驗標準，尚待繼續結合技術研發與實務需求，逐次提升標準嚴謹度。而在行政程序之透明度上，相關環境輻射之資訊公開，對人民「知的權利及政府監督」實有所助益。最後，亦係關心最少的一環—民眾參與；如何促進民眾得於工安事件決定前，作為利害關係人之身分，表示相關意見，體現人民「國民主權」之理念並促進正確決定，實屬重要。

### D. 最終處置管制

聯合公約第14條規定：「締約國為確保後述，應採取適當措施：(i) 於設計及建設放射性廢棄物管理設施之際，為限制對個人、社會及環境所生之安全影響，應採取適當措施；(ii) 於設計之際，應考慮關於放射性廢棄物管理設施（最終處置設施除外）廢止措施之預定順序及相關必要技術規定；(iii) 於設計階段，應制定為最終處置封閉所用之技術規定；(iv) 應以經驗、實驗或解析證明，設計或建築放射性廢棄物設施所用技術，係屬適當。」

至所謂最終處置，係指興建具有一定防蔽功能之場所，將放射性廢棄物埋藏於地下，藉由多重防護措施，使該等廢棄物永久隔離於人類生活環境外之處置方式。此種處置方式已普遍獲得國際認可，顯見應持續推廣。而低放射性廢棄物最終處置場之設立，立法之際，為求降低不必要之抗爭，依法須經場址選擇、環境影響評估、安全分析、興建與運轉管制及封閉與監管等程序，是將面臨下述階段之管制，詳言之：

#### (A) 場址遴選階段

聯合公約第16條規定：「締約國為確保後述，應採取適當措施：(i) 放射性廢棄物管理設施之使用許可應基於前條規定之適當評價，且該設施之興建亦應以經合於設計、安全要件之實驗為條件，方得准許。；(ii) 基於實驗、使用經驗及前條評價所訂定之使用限制及條件，應循必要而修正之；(iii) 放射性廢棄物管理設施之使用、維護、監督及檢查，應依規定程序為之。至最終處分設施，為更新有關前提條件妥當性檢證及前條所定封閉後期間之評價，亦得利用之；(iv) 放射性廢棄物管以設施之使用期間中，得利用安全有關之全體工學及技術支援；(v) 針對放射性廢棄物之決定與區辨，應進行相關程序；(vi) 受有許可者應即時向管制機關報告安全上之重大事項…(ix) 最終處置設施之廢止計畫，應利用該設施使用期間所得之資訊，或因應必要而更新之，或依管制機關之需要而檢討之。」

而依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條

例」，場址遴選作業包含潛在場址調查、篩選與公告、地方自願場址申請、優選二個以上建議候選場址與公告、地方公民投票選出候選場址與公告等程序。有關場址遴選作業，尚須符合民法所授權訂定發布之「低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準」。相關場址調查作業期間，主管機關亦得要求選址作業者檢送調查計畫等相關資料，並派員檢查，以確保調查作業品質。

又考量此等設施具「眾人規避性及搭便車」之特性，設置條例之立法嘗試作成以下措施：

a. 明定權責：授權經濟部邀請相關機關及 3/5 以上之學者專家，組成選址小組，執行選址工作；並指定台電公司為選址作業者，協助選址小組進行場址調查、安全分析及公眾溝通等工作。

b. 公開透明：選址過程採公開透明原則，主辦機關須公開相關選址作業進度；選址計畫及建議候選場址應公告徵詢各界意見，並明定各階段選址作業的程序及期限。

c. 民主自決：由選址小組遴選或地方自願提出申請之二個以上建議候選場址，須經所在縣(市)同日辦理地方性公民投票同意後，經濟部才能核定作為候選場址。

d. 尊嚴回饋：經行政院核定之場址，所在地與鄰近鄉鎮及縣(市)，可獲總額新台幣 50 億元之回饋金。

#### (B) 環境影響評估階段

聯合公約第 15 條規定：「締約國為確保後述，應採取適當措施：(i) 於設置放射性廢棄物管理設施前，應就該設施所生之危險是否適當及其使用期間，進行體系性之安全評價及環境影響評估；(ii) 於設置放射性廢棄物管理設施前，管制機關應依所定基準，針對封閉期間之體系性安全評價及環境影響評估所得結果，進行評價；(iii) 於開始使用放射性廢棄物管理設施前，若認有必要對(i)所定之安全評價及環境影響評估進行補充，即應更新該等評價並進行更相續措施。」

是為預防及減低處置設施開發對環境造成不良影響，依低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例第 13 條，選址作業者應於候選場址擇定後，若認處置設施之設置，對環境有重大影響之虞，即應辦理二階段環境影響評估，經環保署審查通過後，再依同法第 14 條提報經濟部核轉行政院核定為處置設施場址。而於環評作業期間，選址作業者應同時進行場址特性調查，深入瞭解有關地質、水文等，與處置設施安全評估所需之參數。

#### (C) 建造階段

依「放射性物料管理法」及「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」，處置場興建之前，設施經營者應就場址特性、設計、建造、運轉、封閉與監管等詳加規劃，提出處置場之安全分析報告，向原能會申請核發建造執照。經原能會辦理公告展示、舉行聽證及安全審查通過，核發建造執照後，才可動工興建。建造期間，物管局將派員檢查，以確保施工品質。

#### (D) 使用階段

依放射性物料管理法施行細則第 26 條，處置設施興建完成後，設施經營者應先檢附試運轉計畫，報經原

能會核准進行試運轉。完成試運轉後，設施經營者應檢附最新版之安全分析報告、設施運轉技術規範、試運轉報告、意外事件應變計畫等文件，向原能會申請核發運轉執照。運轉期間，物管局將派員執行安全檢查，以確保廢棄物處置之安全。

#### (E) 封閉監管階段

聯合公約第 17 條規定：「締約國為確保最終處置設施封閉後能之後述事務，應採取適當措施：(i) 應將有關該設施所在地、設計、庫存目錄等紀錄及管制機關要求之事物，確實保存；(ii) 必要時，應進行監視、禁止進入等主、被動措施；(iii) 於主動採取制度管理之際，若發現計畫外之放射性物質發散，必要時得實施介入措施。」

而依我國放射性物料管理法及其施行細則、放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法、低放射性廢料陸地最終處置場安全分析報告導則，處置設施貯滿後，設施經營者應向原能會提出設施封閉及監管計畫，經原能會核准後，依計畫執行封閉及監管作業。待放射性衰減至無害程度時，設施經營者應檢附環境保護主管機關核准之環境影響評估資料及輻射安全評估報告，報經原能會核准後進行設施土地再利用或免於監管。

回顧前述，首先，應針對選址小組及選址作業者之選址公信力予以強化，按此等成員之遴選，外人無法窺知，難免賦予黑箱作業之形象；再者，選址作業者係以臺電公司為主，而選址小組亦係由臺電公司之主管機關經濟部所挑選，由利害關係如此相進之團體自行挑選場地，要能真正衡平附近居民利益、自然生態及經濟發展，恐有疑問；將來針對選址成員該如何做到人事獨立性及透明性，即屬重要。其次，較為可惜在於，由於我國現時尚未擁有最低放射性物料之最終處置場所，是有關最終處置管制之實體檢驗標準，尚待結合實務需求與技術研發，而得近距離觀察其標準嚴謹度。而在行政程序之透明度上，由於有意識地資訊公開及放寬民眾參與，對人民「知的權利及政府監督」實有所助益，惟若能加強經民眾參予所作決定之法效力，更得增添整個過程之實益。此外，法規成效之良善與否仍多取決於原能會之「自主規律與管理」，在法制層面上，實欠缺外部規範機制；是即有必要對照聯合公約之需求，給予適度之調整。

## II. 「用過核子燃料與放射性廢棄物管理之歐盟指令」之規範體系

### 第一節 歐盟指令概述

用過核子燃料與放射性廢棄物管理之歐盟指令 (COUNCIL DIRECTIVE 2011/70/EURATOM of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste.) 於制定當時，歐盟境內共有 143 座核能發電機組，每年產生使用後燃料約為 3600 公噸。可以產出約 85000 立方公尺之放射性廢棄物。使用後燃料經過再處理後之高階放射性廢棄物約 280 平方公尺。對此除各加盟會員國外，歐盟委員會於 2002 年先有有關

放射性廢棄物處理與處置之指令，並於 2007 年設置歐盟核能安全總署（ENSREG）開始檢討歐盟內最終處置場之設置問題。歷經約十年之討論折衝，終於於 2011 年制定本指令。因為本指令之拘束力，各加盟會員國必須至遲在 2013 年 8 月將本指令內國法化。本指令之體系如下：

#### 第一章 適用範圍、定義與一般原則

##### 第一條 主旨

##### 第二條 適用範圍

##### 第三條 定義

##### 第四條 一般原則

#### 第二章 義務

##### 第五條 國家框架

##### 第六條 規制管轄機關

##### 第七條 許可持有者

##### 第八條 專門知識與技術能力

##### 第九條 財源

##### 第十條 透明性

##### 第十一條 國家計畫

##### 第十二條 國家計畫之內容

##### 第十三條 通知

##### 第十四條 報告

#### 第三章 補充規定

##### 第十五條 透過國內法實施

##### 第十六條 施行

##### 第十七條 相對人

#### 第二節 指令上之基本原則

根據指令第 4 條規定，本指令建構之一般原則包括：

1. 各加盟會員國必須制定與維持有關使用後燃料管理與放射性廢棄物管理之國家方針。

2. 各加盟會員國必須對於在國內所發生之使用後燃料管理與放射性廢棄物管理負最終責任。

3. 為處理或再處理使用後燃料與放射性廢棄物，將之發送特定之加盟會員國或第三國時，針對因此衍生包括任何廢棄物在內之物質安全或責任之處置，必須由該發送放射性物質所至之特定加盟會員國或第三國負最終責任。

4. 國家方針必須包括以下之原則：

(a) 放射性廢棄物之生成，透過適當之設計與物資之再生利用及包含再利用在內之操作與廢止處置之實施，必須盡可能合理地將放射能量與體積最小化。

(b) 使用後燃料與放射性廢棄物之生成與管理，必須考量所有的工程相互間的關連性。

(c) 使用後燃料管理與放射性廢棄物管理所需經費，必須由產生該物質者負擔之。

(d) 使用後燃料與放射性廢棄物，必須透過長期性非依外力作用或機器的安全功能，進行安全管理。

(e) 有關使用後燃料管理與放射性廢棄物管理之所有工程，必須有其根據，意思決定程序應書面化。

#### 第三節 加盟國之框架義務

根據本指令第 5 條規定，有關放射性廢棄物處理欲處置，各加盟會員國必須針對使用後燃料管理與放射性

廢棄物管理，制定與維持規定有相關管轄機關相互間之責任分配與調整之法定、管制性與組織性的國家義務框架。此一國家義務框架包括：

(a) 為實施使用後燃料管理與放射性廢棄物管理方針之國家計畫。

(b) 為確保使用後燃料管理與放射性廢棄物安全性之國家安排。採取該安排之方法以及如何適用之法律根據規定，各該加盟當會員國保留其權限。

(c) 使用後燃料管理或放射性廢棄物管理之事業或設施，或兩者兼有者，使用後燃料管理與放射性廢棄物管理之事業，或者使用後燃料管理與放射性廢棄物管理設施之操作，若無雙方之許可證即禁止為之；必要時，可以規定此一事業或設施，或者兩者之管理之繼續性條件的許可制度。

(d) 處理設施封閉後的期間中包含適當措施之放射性廢棄物管理與使用後燃料管理之事業或設施，或者兩者兼具者之適當控制制度、管理制度、定期檢查、記錄及報告義務。

(e) 事業之禁制及許可證之變更、中止或撤銷等強制執行，必要時基於安全性之考量附加替代性解決方法的條件。

(f) 涉及使用後燃料管理與放射性廢棄物管理之多樣性工程的團體間進行責任分配。特別是國家之框架中，必須讓對於產生使用後燃料及放射性廢棄物負擔主要責任，或者在特定之情況下由管轄機關課予許可證保有者負責。

(g) 有關資訊公開與公眾參與之國家所設定之要件。

(h) 對使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之資金融資計畫。

#### 第四節 擬定有關國家放射性廢棄管理之國家計畫

根據指令第 11 條規定，各加盟會員國必須確保實施，針對疆域內所有種類之使用後燃料及放射性廢棄物自生成到處置之所有工程作為對象，以使用後燃料管理及放射性廢棄物管理作為目的之國家計畫。同時，各加盟會員國藉助其他機關之檢測所獲得之建議、教訓與優良案例，若認為也同樣適當時，應將技術性及科學性進展於定期檢討國家計畫時更新之。

各加盟會員國為達成本指令目標，而負責地實施安全管理使用後燃料及放射性廢棄物之國家方針，應於國家計畫中規定必要之事項。有關國家計畫之內容，根據指令第 12 條規定，則包括：

(a) 各加盟會員國有關使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之國家方針之全面目標。

(b) 參照各該國家計畫中整體之目標，所擬定之重要的中間目標，以及為達成該目標之明確預定表。

(c) 於包含自廢止措施時所產生之所有使用後燃料及放射性廢棄物數量，以及預期將來產生之數量一覽表中，依照適當之放射性廢棄物分類，明確地記載使用後燃料及放射性廢棄物之所在地及其數量。

(d) 針對自使用後燃料及放射性廢棄物生成至處置之管理，思考或規劃及技術解決方案。

(e) 在處置設施壽命內維持適當之管理，或者長期保存有關設施資訊之方法，包括要採取之週期在內

之封閉後期間等有關之思考與計畫。

(f) 為解決使用後燃料管理及放射性廢棄物管理等問題，進行研究、開發及檢測之事業。

(g) 為國家計畫實施之責任及實施而監控其進度之基礎與業績指標。

(h) 包括國家計畫之必要費用估算，及進行該估算時之根據與假設條件，沿著整體的時間軸線記載其輪廓。

(i) 有效之資金融資調度計畫。

(j) 確保透明性之方針及程序。

(k) 可能的情況下，包含處理設置之利用在內，與各加盟會員國或第三國締結有關使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之協定。

#### 第五節 設置獨立之管理機關

根據國際趨勢，各國之核能安全管理機關與廢棄物管理機關多採分離原則，而本指令第6條亦採取相同之框架。要求各加盟會員國必須在使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之安全性領域，設置管轄管制機關。同時進一步要求，各加盟會員國，為確保管轄管制機關之監督功能不受不當影響之獨立性，必須確保該管轄管制機關與其他涉及發電與放射性同位素利用等原子力或放射性物質之普及利用，以及涉及使用後燃料管理與放射性廢棄物管理之機關或組織體，在功能上分離。

加盟會員國必須確保管轄管制機關，具有關國家框架下履行義務之必要權限，以及人力與財政之資源。

#### 第六節 透明性之義務

根據指令第10條之規定，各加盟會員國應確保提供給工作人員及公眾有關使用後燃料管理和放射性廢棄物管理之必要資訊。此項義務，包括確保對於管轄管制機關所轄區域內之資訊公開。

資訊於無損國內法上之義務及國際性義務，以及被承認之提他利益，特別是安全保障之條件下，必須根據國內法上之義務與國際性義務提供作為公用。

各加盟會員國，根據國內法上之義務和國際性義務，對於有關使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之意思決定過程，必須確保公眾有效參與之必要機會。

法國之核能資訊公開法之制定即是具體化指令要求中最顯著之案例。

#### 第七節 締結共同利用最終處置場之契約可能性

根據指令第4條第4項之規定，以及可能已經確定之國家計畫，針對放射性廢棄物，各加盟會員國考慮到歐盟委員會制定之標準，而與其他加盟會員國或第三國間，締結目地在於使用任何一國家之處置設施之協定，除非該協定在該當廢棄物發送時點不發生效力，否則必須在產生該廢棄物之該當加盟會員國內處理。

對第三國輸出之加盟會員國，在發送前必須對於歐盟委員會通知協議之內容，並採取目的在於確保下列各款所揭示要件之適當措施。

(a) 目的地國必須是以使用後燃料及放射性廢棄物管理作為對象而與歐洲原子力共同體締結協定，或者是有關使用後燃料管理與放射性廢棄物管理安全公約

(以下稱「安全公約」)之加盟會員國。

(b) 目的地國應有揭示本指令所規定之目標或者同等級高標準之安全性目標，所作之放射性廢棄物管理與處置之計畫。

(c) 目的地國中之處理設施，自得到放射性廢棄物輸入許可而自廢棄物發送前進行之操作，並且根據為目的地國之放射性廢棄物管理和處置計劃所定的要件進行管理。

#### G.向歐盟報告國家計畫等之義務

對於各加盟會員國有關國家計畫與其他義務之執行，根據指令第13條規定，有向歐盟提出各種通知與報告之義務。其具體內如包括：

1. 各加盟會員國必須將其國家計畫或其後之變更通知歐盟委員會。

2. 歐盟委員會於前項通知起六個月內，應就該當國家計畫之內容是否遵守規定，請求各該當會員國說明或者表示意見，或者同時進行之。

3. 各該當會員國在接受前項歐洲委員會要求後6個月內，應針對歐洲委員會要求提出說明，或通知其變更國家計畫，或者同時進行之。

4. 於決定對使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之設施或事業，提供歐洲原子力共同體之財政或技術支援時，歐洲委員會必須考量各加盟會員國之說明及有關國家計畫之進度。

而根據指令第14條規定，各加盟會員國首先至2015年8月23日，其後則每三年，必須利用根據共同條約規定所進行之檢測與報告，向歐盟委員會提出有關本指令實施之報告書。

歐盟委員會必須根據各加盟會員國之報告，向歐洲議會與歐盟理事會提出(a)有關實施本指令之進度報告。(b)歐洲原子力共同體領域內現在與將來預期之使用後燃料及放射性廢棄物一覽表。

而各加盟會員國必須定期或至少每10年，對於國家計畫之實施進行自我評鑑，同時為確保達成安全性使用後燃料管理及放射性廢棄物管理之高安全標準，必須將其國家框架、管轄管制機關或國家計畫，或者將之全部，交給國際性專家進行檢視。該檢視之結果，必須向歐盟委員會及其他加盟會員國提出報告；同時於不妨害安全保障或機密資訊的前提下，必須將該結果提供公用。此一指令要求，有圖現核能安全領域中同儕（行）審查之重要意義。

### III.各國有關用過核子燃料與放射性廢棄物管制與管理模式之比較

世界各國高階核廢棄物處理機制極其多樣化，有全然由私部門主導管理者，亦有由公部門成立之私法組織進行管理者，亦有以公部門作為管理主體。

#### A.瑞典核廢棄物處理體制

瑞典有關核能安全及放射線防護之主管機關為環境部。而根據原子力活動法及放射線防護法之規定，實際具有管制權限者為環境部所設置之「中央行政執行機關」（獨立機關）「放射性安全機關（Swedish Radiation Safety Authority, SSM）」。另外在環境部下另設有「核能廢棄物評議會」作為管制機關之建議機關。核能電廠

出資而於 1984 年成立之「瑞典核燃料暨廢棄物管理公司 (Swedish Nuclear Fuel & Waste Management Company, SBG)」則為實際之管理核廢棄物機關。負責 SFR 中低放射性廢棄物最終處置設施及 CLAB 用過核燃料中期貯存設施之營運。其於 2009 年 6 月選出 Östhammar 之 Forsmark 作為高階放射性廢棄物處置場址，並於 2011 年 3 月於環境影響評估及安全分析報告後，提出建設許可申請。有關管理經費之來源主要為核電廠按發電量提撥之後端基金 (Karnavfallsfondens, Swedish Nuclear Waste Fund) 支應。

#### B. 芬蘭核廢棄物處理體制

芬蘭之核能安全管理機關為獨立機關「放射與核能安全中心 (Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)」，勞雇暨經濟部則負責監督廢料營運符合國家政策，並確保國家放射性廢棄物管理基金 (State Nuclear Waste Management Fund) 之基金充足。2015 年 12 月 12 日核發 Olkiluoto 高放處置場建造執照。1996 年由二家電力公司合組成立之 Posiva Oy 公司，為實際上負責使用過核燃料之最終處置計畫之主體。該國於 2001 年 5 月 18 日國會通過深層地層之處置計畫，集中於 Olkiluoto 地區進行場址細部研究。2004 年開始 Onkalo 地下實驗室之建造。於 2012 年 12 月 28 日取得高階放射性廢棄物處置場建造執照，2020 年營運。

#### C. 法國核廢棄物處理體制

法國核能安全管理機關為獨立機關核安署 (Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN,)。2006 年 6 月 13 日法國國會通過「核物質安全及透明法 (Loi à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire)」，使核能安全主管機關之獨立性更獲得確保。相對地，法國政府並成立「法國國家放射性廢料管理法 (Agence National pour la gestion des Déchets Radioactifs, ANDRA)」，是一種在行政法上「具有工商業性質之公法人 (EPIC)」，其作為放射性廢棄物處置管理之機關，目前負責營運 Centre de l'Aube (CSA) 中低放射性廢棄物處置場及 Morvilliers (Cires) 極低微廢棄物處置場。並預定 2025 年啟用深層地質處置場。放射防護與核能安全研究所 (INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET SURETE NUCLEAIRE, IRSN) 乃根據 2001 年 5 月法令，將原本核安全防護研究所 (IPSN) 及游離輻射防護局 (OPRI) 合併，所組成之諮詢支援機關。ANDRA 也可以透過契約方式委託其他民間公司共同進行放射性廢棄物之處置管理 (例如法國核燃料公司 (AREVA) 負責營運 La Hague 使用過核燃料再處理工廠；SOCODEI 公司負責收集、處理中低放射性廢棄物)。

#### D. 德國核廢棄物處理體制

德國根據 2014 年 1 月 1 日生效之聯邦放射性廢棄物處置署設置法之規定，於 2014 年 9 月 1 日在環境部之下成立設置「聯邦放射性廢棄物處置署 (BfE)」負責場址選定程序之整體許可與監督機關。而實際之核廢棄物處理實施主體，則為同為環境部下之「聯邦放射線防護署 (BfS)」，BfS 之任務包括執行輻射防護、核能安全工作，負責盛裝容器、運輸作業及中期貯存設施之審查發照。

同時根據 2013 年「發熱性放射性廢棄物最終處置設施地點選定之法律 (Gesetz zur Suche und Auswahl

eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S.2553)」第 9 條規定，BfS 並為負責放射性廢料最終處置場之設立及營運以及未來高階放射性廢棄物選址之執行單位。

BfS 並透過契約委託德國廢棄物處分設施建設、營運公司 (DBE 公司) 實際從事放射性廢棄物處置設施之建設與操作。DBE 公司則是在由聯邦物理技術研究所 (PTB) 進行最終處置場開發調查計畫之 1979 年代，包括政府出資成立之公司。環境部下另外設有廢棄物管理委員會 (Nuclear Waste Management Commission, ESK)、核子反應器安全委員會 (Reactor Safety Commission, RSK)、放射線防護委員會 (Commission on Radiological Protection, SSK) 分別提供核廢棄物管理諮詢、反應器及核廢棄物安全諮詢與輻射防護諮詢。

#### E. 瑞士核廢棄物處理體制

瑞士核能安全管理機關為「聯邦核能安全檢查局 (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)」，乃是 2007 年 10 月 17 日通過聯邦核能安全檢查法 (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate) 後法，2009 年 1 月 1 日將原負責核安監督之機關「核能設施安全總部 (HSK)」，從聯邦能源署 (BFE) 脫離而轉型成之獨立機構，負責安全管理。至於實際從事放射性廢棄物處置與管理之機構則是由內政部與電力公司共同出資而成立於 1972 年之放射廢棄物管理集團 (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, NAGRA)，負責研發工作以確保放射性廢棄物處置的安全。2001 年則開始設立放射性廢棄物管理基金作為後端處置基金。

#### F. 英國核廢棄物處理體制

依據 1974 年健康安全法 (Health and Safety at Work etc. Act)，1965 年核設施法 (Nuclear Installations Act, NIA) 及 1985 年電離輻射條例 (Ionising Radiations Regulations, IRR85)，原本核安管制機關為「健康安全署 (Health and Safety Executive, HSE)」，負責核安全、管制放射性廢料處理、貯存及除役。但依據 2013 年能源法 (Energy Act)，則取而代之由新成立之核能管制署 (Office for Nuclear Regulation, ONR)，作為獨立行政機關，隸屬勞動退休部 (Department for Work and Pensions (DWP))，負責核設施核安。英國制度上對於放射性廢棄物管理以及選址程序之計畫實施負責機關為能源氣候變遷部 (DECC)，環境糧食農村區域部 (Defra)，威爾斯政府，北愛爾蘭環境部 (DoENI)。

相對地，有關放射性廢棄物之處理與處置之府則機關則是於 2005 年成立之核能廢止處置機關 (Nuclear Decommissioning Agency, NDA)。其係一種特殊的「政府外公共機關 (NDPB)」的組織，負責監督管理核電廠之除役活動及執行放射性廢棄物之管理任務。並由 NDA 之子公司 RWM (Radioactive Waste Management Limited) 負責放射性廢棄物之深層地層處置。

#### G. 加拿大核廢棄物處理體制

加拿大之核能管制機關為根據 1997 年 3 月公佈之「核子安全及管制法」，而於 2000 年 5 月 31 日將「加拿大核能管制局 (Atomic Energy Control Board, AECB)」改制成立之「加拿大核安全委員會 (Canadian Nuclear

Safety Commission, CNSC)」。而根據 2002 年制定之核燃料廢棄物法之規定，應由對於使用後燃料有管理責任之核能企業設置核燃料廢棄物管理組織。2002 年即由四家核能企業設置「核燃料廢棄物管理機關(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)」。至於相關資金之確保則是根據核燃料廢棄物法之規定，由對於使用後燃料有管理責任之事業者創設信託基金的方式為之。

#### H. 美國核廢棄物處理體制

根據 1992 年能源政策法之規定，作為高階放射性廢棄物管制機關，透過處分基準，而對民間核能利用之管制以及相關設施之許可者，為核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)。相關處分基準中之環境放射性防護基準之設定，則由環境保護署(EPA)為之。國會並於 1987 年成立之放射廢棄物技術審查委員會(Nuclear Waste Technical Review Board, NWTRB)，對能源部的商用使用過核燃料最終處置計畫，特別是針對 Yucca Mountain，提出獨立與專業之技術審查。

而根據 1982 年放射性廢棄物政策法第 111 條之規定，有關高階放射性廢棄物及使用後燃料之處置責任則應由聯邦政府為之。具體而言，應由能源部(Department of Energy, DOE)作為處置之實施主體。至於高階放射性費義務之處理與處置費用，根據同法規定，應由廢棄物發生者或所有者負擔之。而根據同法第 302 條規定，應於財政部下設置「放射性廢棄物基金(NWF)」。

#### I. 西班牙核廢棄物處理體制

西班牙 有關高階放射線廢棄物處置之管制機關為產業觀光商務部(MITYC)。但是就安全性而言，有關原子力安全與放射線防護之唯一機關則是原子力安全審議會(Consejo de Seguridad Nuclear, CSN)。如同其他國家，西班牙亦規定由放射性廢棄物之發生者負擔管理責任，但是針對放射性廢棄物管理之實施，則是放射性廢棄物管理公社(Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, ENRESA)，其乃由國家金融機構全數掌握股份之公司。負責放射性廢棄物之處理、貯存、運輸及最終處置。包括負責營運 El Cabril 中低放射性廢棄物最終處置設施、長期集中貯存設施 ATC。同時也負責目的用作放射性廢棄物管理之基金的管理。2005 年前，此項基金一部分透過電費徵收，一部分由電力事業負擔。2005 年後，則全數向電力公司徵收。

#### J. 比利時核廢棄物處理體制

比利時 有關放射性廢棄物管理之管制行政機關為聯邦核能管理署(Agence Federale de Controle Nucleaire, FANC)。FANC 於 2001 年 9 月 1 日成立，負責核設施輻射防護及最終處置之核照任務。而有關放射性廢棄物之管理機關則為 1980 年設置之「放射廢棄物、濃縮核分裂物質管理機關(ONDRAF/NIRAS)」，同時也負責後端基金之管理。

#### K. 日本核廢棄物處理體制

日本核能安全管制機關為「原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)」，乃 2012 年 9 月 19 日 311 福島核災之後，取代原 NISA 而設置，負責原子力規制、防災及福島事故對策。而有關高階放射性廢棄物之處理與處置則是由根據 2010 年「特定放射性廢棄物最終處置法」，於經濟產業省下所設置之許認可法人「原子力發電環境整備機構(Nuclear Waste

Management Organization of Japan, NUMO)」負責。2002 年開始推動區域調查自願場址計畫。對於後端基金之管理，則由經濟產業省於 2000 年 11 月成為「指定法人」之「核能環境整備促進暨資金管理中心(Radioactive Waste Management Funding and Research Center, RWMC)」，管理高階放射性廢棄物處置的資金。

#### L. 韓國核廢棄物處理體制

韓國核能管制機關「核能安全委員會(Nuclear Safety and Security Commission, NSSC)乃 2011 年 10 月改組新設直屬總統之管制委員會。2013 年 3 月後改隸直屬國務總理。其組織下設「韓國原子子安全院(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS)協助 NSSC 審查、稽查及提供核能安全建議，以及「韓國原子力控制技術院(Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control, KINAC)」，負責防止核擴散及核子保防、保安業務。

原「教育科學技術部(MEST)」則於 2013 年 3 月 23 日改制為「未來創造科學部(Ministry of Science, ICT and Future Planning, MSIP)作為核能研發之負責機關。其下轄「韓國核能醫學院(KIRAMS)」與「韓國核能研究院(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)」，其任務為執行高階放射性廢料核轉換的研究。

至於有關核能工業發展機關則為「產業通商資源部(Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE)。其負責核能開發、放射性廢棄物之管理、處置等長期計畫等政策擬定，並負責放射性廢棄物儲置場址之選址作業。而實際負責全國所有放射性廢棄物之管理者，則是根據 2009 年放射性廢棄物管理法成立之「韓國放射性廢棄物管理法人(Korea Radioactive Waste Agency, KORAD)」。

從國際公約與各國管制與管理模型觀察，有關於放射性物料含廢棄物之法體系，採取管制與管理分離模式已屬共識。但是是具體法規之設計上，是否以單一法規或多部法規來完成規範任務，則應視各國之組織與作用法特性而定並不可以一概而論。相對地，在我國因為主管機關與主辦法規機關往往必須緊密結合，因此在組織法上若有明確功能分工，相關之作用規範之分立會是比較常見的思考模式。例如，將來若在組織調整後，行政院原子能安全委員會不論層級調整為何，但功能全面朝管制機關明確化，則有關相關廢棄物處置與管理法規，即有另外其他管理主管機關立法之空間。目前主管機關針對「放射性物料管理法」朝向「放射性物料管制法」方向提出修正草案，基本上符合上述之思維模式。本修正草案說明並指出：「本法改制為管制法後，檢視並修訂最終處置等具管理性質之條文，鑒於推動最終處置業務為規劃營運與管理之屬性，應由經濟及能源部或其指定單位執行，乃進行條文之修訂。」其涉及將來最為棘手之最終處置業務為規劃營運與管理之屬性，「應由經濟及能源部或其指定單位執行」，包括最終處置計畫改由經濟及能源部自行為之，或者由其指定或選定放射性廢棄物產生者或專責機構執行等等，另外涉及管理機制（特別是在選址程序之實施主體）之立法設計。從上文分析可知，其選項極為多元，直接以行政機關模式甚至另外設立公法人之模式有之，以公私協力之組織形式者有之，以民間組織之形式設計者亦有之。

#### IV.有關放射性物料管理法之法制發展

除前章中有將現行「放射性物料管理法」修正成純粹管制法規而更名為「放射性物料管制法」之修法草案外，立法院第8屆第7會期第6次會議中，亦有委員擬具「放射性廢棄物管理法」草案提出。草案說明指出，近年社會大眾環保意識高漲，對放射性廢棄物相關問題日益瞭解與關切。然而台灣電力公司身為核能發電經營者，執行放射性廢棄物處置業務時，難以獲得民眾信賴，以致執行最終處置選址工作遭遇阻礙，幾乎陷入停滯狀態。露天存放在蘭嶼貯存場的低放射性廢棄物無處進行最終處置，勢將面臨廢料桶逐漸腐蝕的威脅；而高放射性廢棄物無處進行最終處置，導致民眾反對長期乾式貯存，進而影響核能發電。目前全世界大多數核能國家都已完成建置中低放射性廢棄物最終處置設施，芬蘭、瑞典及法國也都獲得民意支持，選出高放射性廢棄物最終處置場址。國際上成功的經驗指出，我國必須建立完備的放射性廢棄物管理法，配合完整的財務規劃、公正獨立之管制機關及專責之最終處置機構，且須建立公民參與決策之管道，以贏得社會大眾的信賴，才能解決跨世代共同面臨的放射性廢棄物處置問題。從而可以，一部透明而有全民參與之「放射性廢棄物管理法」已勢在必行。

依本草案之規劃，「放射性廢棄物管理法」草案，計有六章四十二條，其要點如下：

一、本法之立法目的、用詞定義。(草案第一條至第二條)

二、明定放射性廢棄物管理之中央與地方主管機關及其權責。(草案第三條至第五條)

三、明定放射性廢棄物之輻射安全及環境保護管制機關。(草案第六條)

四、為建立公民參與及資訊公開機制，成立放射性廢棄物資訊交流委員會，並明定相關業務與組織規程。(草案第七條)

五、為評估放射性廢棄物管理業務，成立放射性廢棄物科技諮詢委員會，並明定相關業務與組織規程。(草案第八條)

六、營運者應對放射性廢棄物進行處理、分類貯存、建立記錄檔案，並呈報相關資訊。(草案第九條至第十一條)

七、營運者對放射性廢棄物處理與貯存設施應負輻射安全與環境保護的責任。(草案第十二條至第十三條)

八、放射性廢棄物運輸安全相關規定。(草案第十四條至第十五條)

九、明定低放射性廢棄物最終處置設施及高放射性廢棄物長期貯存設施完成設置的時間、放射性廢棄物長期貯存與最終處置方式。(草案第十六條至第十八條)

十、放射性廢棄物長期貯存及最終處置設施之潛在場址、建議候選場址及候選場址產生過程與辦法。(草案第十九條至第二十一條)

十一、放射性廢棄物長期貯存及最終處置設施應配合提升場址所在地鄉（鎮、市）之社會經濟發展，並回饋設施所在地及其鄰近地區。(草案第二十二條至第二十三條)

十二、放射性廢棄物長期貯存及最終處置設施應符

合長期安全規範，並定期派員稽查、進行研究與教育、執行災害防救業務(草案第二十四條至第二十七條)

十三、核能發電經營者應負擔之放射性廢棄物相關費用。(草案第二十八條)

十四、成立放射性廢棄物永續管理基金，明定基金之用途與來源。(草案第二十九條至第三十條)

十五、成立基金管理會作為放射性廢棄物管理專責機構，明定相關業務與組織規程。(草案第三十一條)

十六、罰則：明定違反本法規定之處罰。(草案第三十二條至第三十八條)

十七、附則：依本法之行政訴訟相關規定、本法施行細則之訂定及施行日期之規定。(草案第三十九條至第四十二條)

在組織上，將於經濟部下將設置「放射性廢棄物資訊交流委員會」及「放射性廢棄物永續管理基金」。

草案中有關「放射性廢棄物資訊交流委員會(資交會)」之執掌包括，對低放射性廢棄物最終處置設施、高放射性廢棄物長期貯存設施及高放射性廢棄物最終處置設施的建議候選場址評選作業，行使同意權。但是行政院 104.4.16 院臺經字第 1040129782 號函請立法院審議「行政法人放射性廢棄物管理中心設置條例草案」，則以設置行政法人之形式進行管理。而根據行政院草案第 3 條規定，「本中心之業務範圍如下：一、放射性廢棄物最終處置設施之選址作業、設計、建造、運轉、維護及其封閉、監管。二、本中心放射性廢棄物貯存設施之選址作業、設計、建造、運轉、維護及其除役。三、放射性廢棄物之境外最終處置。四、用過核子燃料之境外再處理。五、前四款業務相關之研究發展及境外合作。六、其他與本中心設立目的相關事項。」兩版本最大的區別在於選址主體。立法委員版本主體為經濟部，部分由資交會協力；行政院版本則是透過行政法人全程執行。其主要之目的無非試圖改善，目前依低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例第 6 條，由經濟部指定台灣電力公司為選址作業，無法克服民眾在公正性上的疑慮。

有關後端基金之管理，立法委員版草案中則設置「放射性廢棄物永續管理基金」為之，由於中央主管機關應對核能發電經營者預收適當費用，故成立放射性廢棄物永續管理基金。

因為行政院版本草案僅屬組織法，故以下以最終處置場址之選定程序，乃以立法委員版本草案為例說明中各參與機關之權責。

若以此草案之規範對照本文研究。在日本關於選址程序中之資訊公開與民眾參與，為特定放射性廢棄物最終處置法之重要規範。亦即，於各階段進行時，NUMO 皆須提出調查結果報告書，供所在地管轄之都道府縣知事以及市町村長、當地民眾閱覽，並於一定期間內召開說明會，聽取居民之意見，並應給予其就調查結果報告書提出意見之機會(第 6 條至第 14 條)。於各階段進行時，經濟產業大臣應聽取並尊重所在地管轄之都道府縣知事及市町村長之意見(第 4 條第 5 項)。依內閣會議之決定，關於概要調查或精密調查地區之選定，若與都道府縣知事或市町村首長之意見相違，即不能進入下一階段。不過雖說各階段之選定皆須經由經濟產業大臣承認，然而各階段之選定結果僅為行政計畫(大型計畫

確定程序)之一部分。根據日本實務見解,對於程序行為之救濟空間有限,因此人民若對個別階段之程序結果有所不服,亦不得以之單獨作為爭訟客體提起行政救濟。反觀德國,在場址設置地點選定程序之各階段中,相關機關與人民均得參加程序。為使人民順利參加程序,特別在高階放射性廢棄終置處置場址選定程序中,有以多元領域專家委員所組織之「國民監督委員會(gesellschaftliches Begleitgremium)」,以及於當地所成立之「市民會議(Bürgerversammlung)」。前者係透過聯邦環境部而於聯邦眾議院與參議院同意後所設立。其委員並得閱覽聯邦放射性廢棄物處置署與聯邦放射線防護署之相關文書。至於市民會議則是在選址各階段程序中均可參與。以此標準比照台灣之立法草案,參酌司法院釋字第709號解釋理由,「憲法上正當法律程序原則之內涵,應視所涉基本權之種類、限制之強度及範圍、所欲追求之公共利益、決定機關之功能合適性、有無替代程序或各項可能程序之成本等因素綜合考量,由立法者制定相應之法定程序(本院釋字第6八九號解釋參照)。都市更新之實施,不僅攸關重要公益之達成,且嚴重影響眾多更新單元及其週邊土地、建築物所有權人之財產權及居住自由,並因其利害關係複雜,容易產生紛爭。為使主管機關於核准都市更新事業概要、核定都市更新事業計畫時,能確實符合重要公益、比例原則及相關法律規定之要求,並促使人民積極參與,建立共識,以提高其接受度,本條例除應規定主管機關應設置公平、專業及多元之適當組織以行審議外,並應按主管機關之審查事項、處分之內容與效力、權利限制程度等之不同,規定應踐行之正當行政程序,包括應規定確保利害關係人知悉相關資訊之可能性,及許其適時向主管機關以言詞或書面陳述意見,以主張或維護其權利。而於都市更新事業計畫之核定,限制人民財產權及居住自由尤其直接、嚴重,本條例並應規定由主管機關以公開方式舉辦聽證,使利害關係人得到場以言詞為意見之陳述及論辯後,斟酌全部聽證紀錄,說明採納及不採納之理由作成核定,始無違於憲法保障人民財產權及居住自由之意旨。」目前草案之規範密度顯然有所不足。

若比較「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」之程序保障密度亦可發現,目前有關最終場址選定程序之規定,僅有「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」。在低放射性廢棄物最終處置方面,經濟部依據本條例之規定,於2006年7月即開始指定台電公司為選址作業者,並於8月組成選址小組,研訂選址計畫,執行選址相關作業。選址小組並於2008年8月,評選出台東縣達仁鄉、屏東縣牡丹鄉及澎湖縣望安鄉三處潛在場址,經濟部並於2008年8月29日進行公告。其後擇定場址之流程並不順利。

依本條例之規定,相關選址程序流程依序為:

1.初步選址:依本條例第7條第1項規定,選址小組應於組成之日起6個月內,擬訂處置設施選址計畫並提報主辦機關核定。

2.選定建議候選場址:建議候選場址之選定採兩併行進行之選址程序。第一種程序乃根據本條第8條規定,選址小組於選址計畫核定起6個月內提報主辦機關公告潛在場址;根據本條第9條第1項規定,潛在場址公告之日起6個月內,選址小組應向主辦機關建議二個以上

建議候選場址。第二種程序乃根據本條第10條規定,地方縣市政府自願設置者,於經地方民意代表機關議決通過,並經公告設置計畫及舉行聽證後,於潛在場址公告之日起4個月內得向主辦機關提出申請。經主辦機關經濟部交由選址小組審查符合規定者,得優先核定為建議候選場址。

3.選定候選場址:本條例第11條規定,依本條例第9條、第10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。經公民投票同意者,得為候選場址。

4.環評及核定程序:依本條例第13條規定,縱使經過地方性公投同意成為候選場址之地點,若最終處置設施之設置對當地環境有重大影響之虞者,仍應依環境影響評估法第8條規定進行第二階段環境影響評估。環境影響評估通過後,依本條例第14條規定,選址作業者尚須檢附相關資料,提報主辦機關經濟部核轉行政院核定。行政院實際為最後決定權限機關。

檢視立法院版本之管理法草案內容,與現行低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例比較,顯然可以發現兩者之間程序保障之密度差異。姑且不論公投程序與環評程序間之難解關係,低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例中有關公民投票之機制,在草案中並未納入。依本條例第10條規定,「縣(市)政府自願於轄區內設置處置設施者,應經該縣(市)議會及鄉(鎮、市)民代表會議決通過,並經公告設置計畫及舉行『聽證』後,於潛在場址公告之日起四個月內,以書面檢具相關資料,向主辦機關提出申請。」反觀立法委員版草案之內容,卻弱化到僅有「表達意見」程度。在草案第20條中規定,「資訊交流委員會應在低放射性廢棄物最終處置設施、高放射性廢棄物長期貯存設施及高放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址所在地直轄市、縣(市),公告設置計畫及其對環境之影響,並在全國性無線電視頻道提供時段,供正反意見支持代表發表意見或進行辯論,受指定之電視臺不得拒絕。其實施辦法,由資訊交流委員會定之。前項設施建議候選場址經場址所在地鄉(鎮、市)民代表會及直轄市、縣(市)議會議決通過,得為候選場址。前項候選場址如有二個以上者,由中央主管機關決定之。」而在環評程序之後,草案第21條第2項規定,「候選場址通過環境影響評估審查,並經立法院議決通過後,由行政院核定為場址,並於場址所在地之直轄市、縣(市)政府及鄉(鎮、市)公所公告之。」顯然將「民眾」參與之精神,轉換成為「民意機關」參與,此種程序保障之落差,兩相對照,恐難令人折服。

### III. 結論

本研究除比較現行我國管制規範與國際規範間之規範密度之外,不論是從公約或歐盟指令,或者從各國實踐之法制經驗,均可獲得一個最重要之結論:透明性要求之重要。歐盟指令要求國家應確保提供公眾有關使用後燃料管理和放射性廢棄物管理之必要資訊。此項義務,包括確保對於管制機關之資訊公開。資訊於無損公益(特別是安全保障)之條件下,國家有義務提供作為

公用。在履行國家義務作成決定之過程中，必須確保公眾有效參與之必要機會。在我國面對放射性廢棄物處理或處置時絕對不可欠缺之條件。

至於在放射性廢棄物處理或處置等主體與執行選址主體之規劃上，行政機關、公法人或民間團體在各國法制中，均有可能是選項之一。在制度選擇時必須考量我國核能電廠之經營處境。以國營企業經營之模式，在各國似乎並非常態。以純然之民間公司營運模式去比較其他國家之運作方式，也未必全然恰當。以我國之特殊性，公法組織之選項可能比較叫貼近國情。至於要以機關或法人則必須進一步思考我國法制上公法人之類型有無更大的開放性。

在現行「放射性廢棄物管理法」之修正草案與管制與管理區分後，重新起草「放射性廢棄物管理法」之草案版本中，除了相關之組織與程序設計外，更需要重視的核心問題乃是程序之透明性要求。同時應該要更重視的我國憲法要求下，「正當行政程序」的要求，以及國家之程序保障義務。一味規避該有的程序保障（例如聽證），在程序保障密度上恐有不足。

### 參考文獻

- [1] 小林傳司，科技民主與民眾參與——一九九〇年以後日本的經驗，當代，第 217 期，2005 年 9 月，頁 14-23。
- [2] 王竹方，核能安全與風險控制，臺灣法學雜誌，第 193 期，2012 年 2 月，頁 88-90。
- [3] 王伯輝，安全文化——推行 ISO 後的省思，臺電核能月刊，第 169 期，1997 年 1 月，頁 88-92。
- [4] 王毓正，淺析核能風險評估與評價——對於迷失於數字而忘卻權衡法益輕重的核能風險論述之批判，第 193 期，2012 年 2 月，頁 96-99。
- [5] 行政院原子能委員會，放射性廢棄物管理安全國家報告書——依據「用過核子燃料管理安全放射性廢棄物管理安全」聯合公約，2014 年 12 月。
- [6] 何展旭，日本放射性廢棄物處置場設置規範之探討，<http://www.npf.org.tw/1/12144>，最後瀏覽日期：2016/3/2。
- [7] 吳明儒，社會「不」安全制度——風險原則的再省思，國立政治大學社會學報，第 36 期，2004 年 6 月，頁 33-61。
- [8] 李貽康，法國核子廢料管理政策，原子能委員會彙報，第 19：6 期，1983 年 12 月，頁 99-105。
- [9] 周桂田，高科技風險：科學與社會之多元與共識問題，思與言，第 38：3 期，2001 年 9 月，頁 75-103。
- [10] 周鼎主持，國際放射性廢棄物管制機關與管制策略資訊彙整分析，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，2012 年 12 月。
- [11] 周源卿，日本福島核災後之核能安全與相關法制探討，臺灣法學雜誌，第 192 期，2012 年 1 月，頁 62-65。
- [12] 周源卿，日本福島核災後之核能安全與相關法制探討，臺灣法學雜誌，第 192 期，2012 年 1 月，頁 62-65。
- [13] 林枝旺、何玉麗，日本核能溝通之作法與啟示，臺灣經濟研究月刊，第 189 期，1993 年 9 月，頁 101-106。
- [14] 林俊隆，行政程序法與核能安全管制實務之探討之一，臺電核能月刊，第 263 期，2004 年 11 月，頁 16-23。
- [15] 林俊隆，行政程序法與核能安全管制實務之探討之一，臺電核能月刊，第 263 期，2004 年 11 月，頁 16-23。
- [16] 林昱梅，核電廠之風險管理法制——福島核電廠事故之省思，臺灣法學雜誌，第 193 期，2012 年 2 月，頁 100-110。
- [17] 林英，核能安全之趨向與作法，臺電核能月刊，第 3 期，1983 年 3 月，頁 41。
- [18] 林家德、羅崇功、徐碧璘、何上慈、吳瑞洋、徐銳成、高梓木、洪子傑、許懷石、張啟濱、王輔勳，風險告知法規之研究與應用，台電工程月刊第 721 期，2008 年 9 月，頁 37-52。
- [19] 洪立齊，論多階段行政程序——以放射性廢棄物最終處置程序為中心，國立臺北大學法律學系碩士論文，2015 年 7 月。
- [20] 洪鴻智，科技鄰避設施風險知覺之形成與投影：核二廠，人文及社會科學集刊，第 17：1 期，2005 年 3 月，頁 33-70。
- [21] 侯明亮，核能安全的理論與實際中篇第捌章(五之二)，台電核能月刊，第 354 期，2012 年 6 月。
- [22] 侯明亮，核能安全的理論與實際中篇第捌章(五之二)，台電核能月刊，第 354 期，2012 年 6 月。
- [23] 侯明亮，核能安全的理論與實際前篇(一)，<http://info.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/24/SC-234.pdf>，最後瀏覽日期：2016/3/4。
- [24] 侯明亮，核能安全的理論與實際前篇(二)，<http://info.taipower.com.tw/TaipowerWeb/upload/files/24/SC-235.pdf>，最後瀏覽日期：2016/3/4。
- [25] 原動處核管課，核能法規之類別、效力和採用，臺電核能月刊，第 7 期，1983 年 7 月，頁 29-34。
- [26] 核燃料營運課譯，簡介美國 1982 年核子廢料政策法，臺電核能月刊，第 8 期，1983 年 8 月，頁 2-7。
- [27] 翁炯立譯，法國對核能安全的趨勢，臺電核能月刊，第 20 期，1984 年 8 月，頁 34-37。
- [28] 高漢卿譯，核能法規的挑戰：亞洲各國的未來、美國的經驗，臺電核能月刊，第 176 期，1997 年 8 月，頁 64-69。
- [29] 張文貞，當科技遇上憲法：憲政主義的危機與轉機，月旦法學，第 116 期，2005 年 1 月，頁 176-190。
- [30] 許辰舟，行政決策中的人民參與——參與模型的建構，國立臺灣大學法律學研究所碩士論文，1999 年。
- [31] 陳宗憶，國家的風險決策與風險決策監督——以建立「風險原則」為中心，國立台灣大學法律學研究所碩士論文，2007 年。
- [32] 陳明仁，獨立機關制度之推動與檢討，研考雙月刊，第 29：6 期，2005 年 12 月，頁 43-56。
- [33] 陳俊宏，永續發展與民主：審議式民主理論初探，東吳政治學報，第 9 期，1998 年 9 月，頁 85-122。
- [34] 陳春生，行政法學的未來發展與行政程序法——月旦法學雜誌發行百期誌慶，月旦法學，第 100 期，2003 年 9 月，頁 184-196。
- [35] 陳愛娥，代議民主體制是民主原則的不完美形式？

- 加強、補充代議民主體制的可能途徑，思與言，第4期，1999年3月，頁17-47。
- [36] 陳愛娥，民眾參與的理念與實際--以民眾參與「水庫集水區」的管理為例，中央警察大學法學論集，第3期，1998年3月，頁41-64。
- [37] 陳憶寧，公共議題之遊戲框架初探--以核四議題為例，新聞學研究，第72期，2002年7月，頁85-117。
- [38] 曾東澤摘譯，法國核子物料的運輸及相關的安全措施，核能彙刊，第25:6期，1989年12月，頁22-37。
- [39] 曾雅真，歐洲原子能共同體及其會員國權力的競合：以國際用過核燃料暨放射性廢物管理建制為例，政治科學論叢，第62期，2014年12月，頁115-154。
- [40] 程明修，核能剩餘風險之管制瓶頸，第193期，2012年2月，頁91-95。
- [41] 黃昆樹，法國與英國核能管制及法規簡介，臺電核能月刊，第135期，1994年3月，頁2-21。
- [42] 黃國泰，「能源氣候年代」之國際能源管理發展趨勢與熱潮之成效，永續產業發展，第58期，第2012年3月，頁23-31。
- [43] 趙國勝，原子能法、原子能法施行細則及核子損害賠償法簡介，原子能委員會彙報，第22:5期，1986年10月，頁25-30。
- [44] 湯京平等主持，低放射性廢棄物最終處置設施候選場址地方公投之研究，原子能委員會委託研究計畫，2009年。
- [45] 楊鈞池，1990年代日本科技政策決策機制之改革--兼論日本行政改革之意義，中山人文社會科學期刊，第31期，2006年12月，頁35-64。
- [46] 張惠東、高仁川主持，建置我國核子損害賠償作業機制之研究，原子能委員會委託研究計畫，2014年。
- [47] 劉彥青，放射性廢棄物處置場選址程序之研究，國立中興大學科技法律研究所碩士論文，2008年。
- [48] 蔡秀卿，從行政之公共性檢討行政組織及行政活動之變遷，月旦法學，第120期，2005年5月，頁19-36。
- [49] 蔡瑄庭，低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例適用疑義之簡析，臺北大學法學論叢，第80期，2011年12月，頁79-115。
- [50] 鄭維申、周冬寶，各國用過核燃料法規研究，核能彙刊，第23:4期，1987年8月，頁9-20。
- [51] 謝牧謙，日本核能行政體制及相關(社、財)團法人機構，核研季刊，第16期，1995年7月，頁27-33。
- [52] 下山 憲治，原子力事故とリスク・危機管理(特集 東日本大震災--法と対策)，ジュリスト，1427号，頁100-106，2011年8月。
- [53] 小沢隆一，高レベル放射性廃棄物の処分をめぐる法と民主主義，日本社會と市民法学—清水誠先生追悼論文集，頁211-228，2013年。
- [54] 大越実ほか，放射性廃棄物管理施設の立地にあけるリスクコミュニケーション，日本原子力学会和文論文誌，Vol.6，No.4，頁426-427，2007年12月。
- [55] 六車 明，環境と経済(7)原子力法制と心の平和，20号，頁123-144，2011年8月。
- [56] 山本 行雄，幌延問題ガイドブック許すな、北の大地の核汚染：現実・政策・法制，1991年5月
- [57] 日本エネルギー法研究所，国際原子力安全・環境保護規制と国内法制の接点：平成6・7年度比較環境法制班報告書，1997年6月
- [58] 日本エネルギー法研究所，国際原子力法制の重要課題：1995年国際原子力法学会の関連報告，1996年11月。
- [59] 日本エネルギー法研究所，原子力安全確保のための法のあり方に関する総合的検討：平成12年度原子力等の安全確保法制班報告書，2000年7月。
- [60] 日本エネルギー法研究所，原子力行政に係る法的問題に関する総合的検討：平成20・21年度原子力行政に係る法的問題研究班研究報告書，2011年3月。
- [61] 日本エネルギー法研究所，原子力施設・原子燃料の国際取引と安全保障：国際取引法班報告書，1999年1月。
- [62] 日本エネルギー法研究所，原子力施設の立地と規制に係る法制度の在り方に関する総合的検討：平成18・19年度原子力施設の立地・規制に係る法的問題研究班報告書，2009年6月
- [63] 日本原子力学会，トレンチ処分対象廃棄物の埋設に向けた取扱い及び検査の方法：日本原子力学会標準，2012年3月
- [64] 日置 雅晴，拡大する放射能汚染と法規制：穴だらけの制度の現状，2011年12月。
- [65] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金促進センター，放射性廃棄物海外総合情報調査報告書ラフト，2015年1月。
- [66] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金促進センター，諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について，2015年2月。
- [67] 白井 京，韓国における原子力安全規制法制(特集 原子力の利用と安全性)，外国の立法，第244期，2010年6月，頁104-114。
- [68] 広瀬 研吉，わかりやすい原子力規制関係の法令の手引き，2011年4月。
- [69] 卯辰 昇，現代原子力法の展開と法理論，2012年3月，第2版。
- [70] 吉岡 齊，原子力基本法と原子力規制委員会の課題，原子力資料情報室通信，第463期，2013年1月，頁4-6。
- [71] 安田 利枝，原子力政策：政策決定の法制度にかかわる「公共空間」(1)，嘉悦大学研究論集，第54巻第2期，2012年3月，頁33-50。
- [72] 池村 正道，原子力法制とその整理(特集 東日本大震災をめぐる動向と復興へ向けた対応)，法律のひろば，64巻9号，頁36-42，2011年9月。
- [73] 西脇 由弘，我が国の原子力の法規制と組織に関する考察：福島第一事故の教訓を踏まえて，日本原子力学会誌，53巻11号，頁765-762，2011年12月。
- [74] 西郷貴洋等，高知県東洋町にあける高レベル放射性廃棄物処分地決定に係る紛争の対立要因と解決策，社会技術研究論文集 Vol.7，頁87-98，2010年
- [75] 幸田 雅治、野口 貴公美，安全・安心の行政法学：「いざ」というとき「何が」できるか？，2009年3

- 月
- [76] 高橋滋「福島原発事故と法政策—震災・原発事故から復興に向けて」, 2016年2月。
- [77] 蛭沢重信「高レベル放射性廃棄物処分の世代意思決定とはどのようなことか」, 季報エネルギー総合工学, Vol.31, No.3, 頁35-44, 2008年10月
- [78] 長谷川 尚子「原子力施設における安全文化への取組みと今後の方向性(高信頼性組織)」, 日本信頼性学会誌: 信頼性, 34巻5号, 頁318-324, 2012年7月。
- [79] 長谷部 俊治「原子力技術の法的制御: 不確実性のコントロールに向けた法政策の課題 (佐藤金吾教授追悼号)」, 日経ものづくり, 社会志林, 2011年12月, 頁23-71。
- [80] 首藤 重幸、大塚 直、棚澤 能生、牛山 積、須網 隆夫「環境と法」, 2004年3月。
- [81] 原子力安全基盤機構「被ばく評価手法の整備」, 2008年4月。
- [82] 原子力安全基盤機構「国際原子力機関、政府、法律及び規制の安全に対する枠組み: 日本語翻訳版 (全般的な安全要件 第1編 no.GSR part41, IAEA 安全基準: 人と環境を防護するために 第1編 no.GSR part 1)」, 2011年3月。
- [83] 原子力安全基盤機構「国際原子力機関、原子力、放射線、放射性廃棄物及び輸送の安全のための法令上及び行政上の基盤: 日本語翻訳版」, 2008年12月。
- [84] 渡辺 智之、高橋 滋「リスク・マネジメントと公共政策: 経済学・政治学・法学による学際的研究」, 2011年3月。
- [85] 菊池勇次 [訳]「原子力安全委員会の設置及び運営に関する法律 (特集 原子力と再生可能エネルギーをめぐる動き)」, 外国の立法: 立法情報・翻訳・解説, 第252期, 2012年6月, 頁19-25。
- [86] 諸葛 宗男、菅原 慎悦「原子力法制システムの国際化の潮流: シンポジウム「原子力法制システムの改革に向けて」概要」, 日本原子力学会誌, 53巻2号, 頁117, 2011年2月。
- [87] 諸葛 宗男、西脇 由弘「原子力規制委員会設置法の概要: 新しい原子力安全規制法制度とは」, Atomoσ: journal of the Atomic Energy Society of Japan, 第54巻第12期, 2012年12月, 頁774-779。
- [88] 愛敬 浩二「原子力行政の課題: 「フクシマ」の経験を踏まえて (特集 3.11 大震災の公法学 (Part.2) 国家がなすべきこと、民間がなすべきこと)」, 法学セミナー, 第56巻第12期, 2011-12, 頁30-33。
- [89] 桜井 淳「原子力規制の隙 軽視されていた専門性と独立性 (特集 事故は語る 福島第一原発事故の教訓: 「設計」と「規制」に潜む2つの隙)」, 日経ものづくり, 第690期, 2012年3月, 頁66-71。
- [90] 櫻井 敬子「行政法講座(61)原子力施設の安全規制」, 自治実務セミナー, 52巻8号, 頁4-7, 2012年8月。
- [91] ロー・フォーラム「立法の話題 委員長・委員の任命をめぐる議論: 原子力規制委員会設置法の成立」, 法学セミナー, 第57巻第11期, 2012年11月, 頁141。
- [92] American Society of Mechanical Engineers, “Standard for Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications,” ASME RA-S-2002, April 5, 2002, and “Addenda to ASME RA-S-2002,” ASME RA-Sa-2003, December 5, 2003
- [93] Ascher W. and Healy R, Natural Resource Policy-Making in Developing Countries: Environment, Economic Growth, and Income Distribution, Durham: Duke University Press. 1990
- [94] Birnie, Patricia W. and Alan E. Boyle. International Law and the Environment. Oxford: Clarendon University Press, 1992.
- [95] ————. Basic Documents on International Law and the Environment. Oxford: Clarendon University Press, 1995
- [96] Chess, C. et al., Division of Science & Research, Improving Dialogue with Communities: A Short Guide for Government Risk Communication, NJ: Department of Environmental Protection, 1988
- [97] Christian Streffer, Carl Friedrich Gethmann, Georg Kamp, Wolfgang Kröger, Eckard Rehbindler, & Ortwin Renn, Radioactive Waste: Technical and Normative Aspects of its Disposal, Springer; 2012 edition, November, 2011
- [98] Corner, Adam, Dan Venables, Alexa Spence, Wouter Poortinga, Christina Demski, and Nick Pidgeon. “Nuclear power, climate change and energy security: Exploring British public attitudes” Energy Policy, 39:4823-4833. 2011
- [99] COUNCIL DIRECTIVE 2006/117/EURATOM of 20 November 2006 on the supervision and control of shipment of radioactive waste and spent fuel, Official Journal of The European Union, L337, 5.12.2006, pp.69-71.
- [100] COMMISSION RECOMMENDATION 2008/956/EURATOM of 4 December 2008 on criteria for the export of radioactive waste and spent fuel to third countries, Official Journal of The European Union, L338, 17.12.2006, pp.21-32.
- [101] Daniel A. Farber, Jim Chen, Robert R.M. Verchick & Lisa Grow Sun, Disaster Law and Policy (2nd ed. 2010)
- [102] Demski, and Nick Pidgeon. “Nuclear power, climate change and energy security: Exploring British public attitudes” Energy Policy, 39:4823-4833. 2011
- [103] Dellinger, Walter, The Constitutional Separation of Powers between the President and Congress, 63 LAW AND CONTEMPORARY PROBLEMS 514-572, 2000
- [104] Dupont, Alan. The Environment and Security in Pacific Asia. London: Oxford University Press, 1998.
- [105] Elster, Jon ed., DELIBERATIVE DEMOCRACY, Cambridge, U.K.; NEW YORK: Cambridge University Press, 1998
- [106] International Atomic Energy Agency. Experience and Trends in Nuclear Law, Legal Series No.8. Vienna: IAEA, 1972.
- [107] ————. Summary Report on the Post Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident. Vienna: IAEA, 1986.
- [108] ————. Convention on Early Notification of a Nuclear Accident and Convention on Assistance in the

- Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency, Legal Series No.14. Vienna: IAEA, 1987.
- [109] ————. The Law and Practices of the International Atomic Energy Agency, 1970-1980, Legal Series No. 7-S1. Vienna: IAEA, 1993.
- [110] ————. Convention on Nuclear Safety, Legal Series, No.16. Vienna: IAEA, 1994.
- [111] ————. The Principles of Radioactive Waste Management, No.111-F. Vienna: IAEA, 1995.
- [112] Kuokkanen, T., International Law and the Environment: Variations on a Theme, Boston: Brill Academic Publishers, 2002
- [113] Malgosia Fitzmaurice, David M. Ong & Panos Merkouris, Research Handbook on International Environmental Law, Edward Elgar Pub, December, 2010
- [114] Pierce, R.J. JR., Shaprio, S.A., Verduil, P., Administrative Law and Process, 4th ed., NY: Foundation Press, 2004
- [115] Richard Burleson Stewart & Jane Bloom Stewart, Fuel Cycle to Nowhere: U.S. Law and Policy on Nuclear Waste, Vanderbilt University Press, August, 2011
- [116] Sands, P. Environmental Protection in the Twenty-First Century: Sustainable Development and International Law', The Global Environment Institutions, Law and Policy, Eds. N.J. Vig & R.S. Axelrod, Oxford: Congressional Quarterly Inc, 1999
- [117] ————. Principles of International Environmental Law I: Frameworks, Standards and Implementation. Manchester: Manchester University Press, 1995.
- [118] ————, Richard Tarasofsky and Mary Weiss ed. Principles of International Environmental Law IIB: Documents in International Environmental Law. Manchester: Manchester University Press, 1994.
- [119] ———— and Laurence Boisson de Chazournes. International Law, the International Court of Justice and Nuclear Weapons. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [120] Stephen Tromans, Nuclear Law: The Law Applying to Nuclear Installations and Radioactive Substances in Its Historic Context, Hart Publishing; 2nd Revised edition edition, March, 2010
- [121] Richard Burleson Stewart & Jane Bloom Stewart, Fuel Cycle to Nowhere: U.S. Law and Policy on Nuclear Waste, Vanderbilt University Press, August, 2011
- [122] Walther Enkerlin, Guidance for packing, shipping, holding and release of sterile flies in area-wide fruit fly control programmes : Joint FAO/IAEA Programme of Nuclear Techniques in Food and Agriculture- Rome : FAO, 2007
- [123] White Paper - U.S. Government and Nuclear Energy Industry Response to the Fukushima Accident, <http://www.nei.org/Master-Documents-Folder/Backgrounders/White-Papers/US-Government-and-Nuclear-Energy-Industry-Response> (last visited: 2015.3.23).
- [124] Alfred G. Debus, Die behördlichen Beauftragten für Datenschutz und Informationsfreiheit, DÖV 2012, 917 ff.
- [125] Anforderungskatalog für anlagenbezogene Überprüfungen deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan). <[http://www.rskonline.de/downloads/rskanforderungskatalog\\_hp.pdf](http://www.rskonline.de/downloads/rskanforderungskatalog_hp.pdf)>
- [126] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Auswahlverfahren fuer Endlagerstandorte, Köln 2002.
- [127] Axel Pottschmidt, Zehntes Deutsches Atomrechtssymposium, DÖV 2000, 199 ff.
- [128] Bundesministerium fuer Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung waermeentwickelnder radioactiver Abfaelle: Stand 30. September 2010.
- [129] Brodowski Kühne, Das neue Atomrecht, NJW 2002, 1458 ff.
- [130] Christine Langenfeld, Göttingen, Die rechtlichen Rahmenbedingungen für einen Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie, DÖV 2000, 929 ff.
- [131] Christoph Degenhart, Standortnahe Zwischenlager, staatliche Entsorgungsverantwortung und grundrechtliche Schutzpflichten im Atomrecht, DVBl 2006, 1125 ff.
- [132] Detlev Möller, Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Bundesrepublik Deutschland , Frankfurt am Main: Peter Lang, 2009, S.41ff
- [133] Deutscher Bundestag, Drucksache, 17/3051, 17/3052, 17/3053, 17/3054, 17/3405, 17/3453.
- [134] Eberhard Ziegler, Atomgesetz mit Verordnungen, 23. a. Aufl., 2002.
- [135] Erhard Denninger, Verfassungsrechtliche Fragen des Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung, 2000.
- [136] Frank Schorkopf, Die „vereinbarte“ Novellierung des Atomgesetzes, NVwZ 2000, 1111 ff.
- [137] Fritz Ossenbühl (Hrsg.), Deutscher Atomrechtstag, 2000.
- [138] Hans-Joachim Koch, Der Atomausstieg und der verfassungsrechtliche Schutz des Eigentums, NJW 2000, 1529 ff.
- [139] Hellmut Wagner, Atomkompromiss und Ausstiegsgesetz, NVwZ 2001, 1089 ff.
- [140] Herbert Posser/ Malte Schmans/ Christian Müller-Dehn, Atomgesetz. Kommentar zur Novelle 2002, 1. Aufl., 2002.
- [141] Matthias Schmidt-Preuß, Atomausstieg und Eigentum, NJW 2000, 1524 ff.
- [142] Länder billigen Atomgesetze, Süddeutsche Zeitung, 27./28. November 2010, S.7.
- [143] Michael Rodi, Grundlagen und Entwicklungslinien des Atomrechts, NJW 2000, 7 ff.
- [144] Udo Di Fabio, Der Ausstieg aus der wirtschaftlichen Nutzung der Kernenergie, 1999.
- [145] Werner Bischof, Bundesamt für Strahlenschutz-Gesetz, 1. Auflage, 2012.
- [146] Wolf-Georg Schärf, Europäisches Nuklearrecht, 1. Aufl., 2008.

# 多元族群輻射與核能教育推廣之研究

## Study on The Radiation Education of Diverse Ethnic Groups

計畫編號：MOST-104-2623-E-845-001-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：古建國

e-mail：[2014ckku@gmail.tw](mailto:2014ckku@gmail.tw)

計畫參與人員：孫嘉珍、顧元傑

執行單位：臺北市立大學應用物理暨化學系

### 摘要

臺灣是一個具有多元文化的島嶼，尤其這幾年來，不斷有新移民加入，隨著時間累積，這些新住民與下一代人數愈來愈多，然對於這些多元族群提供輻射防護的教材並不多，進行相關輻射教育的研習、參訪與課程等機會亦少。本計畫目的是藉由製作多元族群母語輻射教育教材與培育核安與輻射防護之志工老師，辦理研習活動與戶外教學之實驗課程，以推廣新住民的輻射防護與醫療輻射教育。

研究步驟包括文獻探討新住民教材之開發與研習方式作為編輯二種母語雙語教材參考，同時透過晚間的課程或假日教學，以推廣輻射教育，並進行學習成效評估。研究對象有培育種子教師與夜間參加終身學習學員兩類。師資培育部分：我們招募新住民通譯人員進行培訓，針對教材草案實施進行諮詢與修正，共四次，每次三節課，合計十二節，另外針對教學後進行課程難易度與教學方式釐清婦女醫療輻射與學校輻射防護的基本輻射概念，共五次，每次三節課，合計十五節。試教方面，六位培訓老師經兩次，每次二小時試教，進行教材修正，並確定教材，修正後教材，每位教師再進行二次教學，透過培訓、教案開發、試教與預試、諮詢與修正、正式教學檢核五步驟確立教材與師資培訓。學員部分，透過課程實施教學與學習問卷進行成效分析，並輔以晤談，以了解學習情況。研究發現，後測答對率部分幾乎都高達八成以上，學習中文超過一年的人比較容易了解教材內容，加上就醫經驗，對輻射概念了解較多。初學中文學員，需要圖片輔助教學，概念測驗時亦須要圖片輔助，對輻射應用感到好奇，尤其醫療輻射相關概念感到興趣，所以師生互動以輻射醫療相關問題為主。關鍵詞：輻射教育、核能安全、輻射防護。

### Abstract

This research team has engaged in the environmental radiation related projects since 2012, successfully completed each objective of the project. The concrete achievement included outlining indicators of radiation related teaching material for elementary schools and high schools, and applied all the related data into developing four-column comics and other comics for elementary schools and also adults' teaching materials. This research aims for a continuation, to undergo digital teaching material for nuclear safety and radiation protection and prevention, and also update the existed website since 2012, and also add on the films and interaction games to attract more viewers to learn about the website. Besides, the

related achievements will be developed into application for smart phones, to provide the public rich knowledge about nuclear safety and emergency measures.

Keywords: radiation education、nuclear safety、radiation protection.

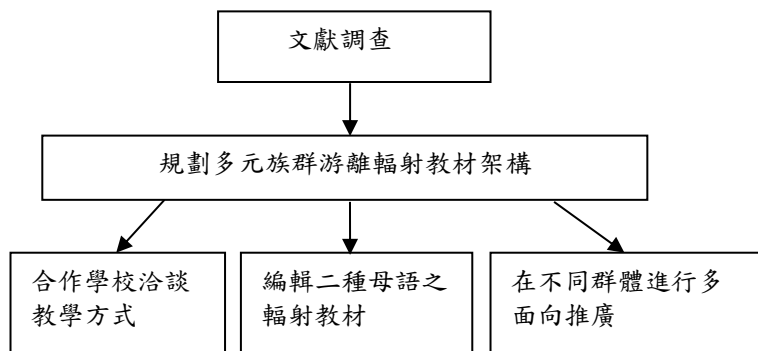
### I. 前言

台灣這幾年來，不斷有新移民，例如東南亞外籍配偶等透過婚姻或工作來到台灣，融入我們生活中，因為語言與文化差異，對於多元族群相關教材不多，根據教育部發展新移民文化計畫與內政部新移民配偶照顧輔導措施，主要學習都是圍繞在識字教育、文化、教養與技藝為主，令人懷疑她(他)們對輻射議題瞭解有多少？核子防護的概念如何？另一方面，在雷淑娟(2006)研究發現除大陸籍配偶之外，其他新移民學習障礙在於語言、文字與文化差異，所以很難想像此族群部分國籍人士對於醫療輻射或一般輻射概念與防護有多少概念？從文獻分析發現輻射相關教育中甚少針對此族群進行相關研習或解說，基於先前輻射推廣計畫經驗，若能透過蒐集環境游離輻射與核能相關文獻，進行分析與瞭解，並且據此編纂輻射相關議題的教材，適時的為民眾進行環境游離輻射教育，所以對多元族群進行教材編輯、課程教學與先關成效分析，可以增加新住民族群對於輻射防護的正確概念，瞭解環境游離輻射的應用，進而建立對於使用核能的取捨之判斷能力。因此本研究的主要目的為：製作多元族群母語文宣教材與培育核安與輻射防護之種子教師並辦理研習活動與戶外教學實驗課程。

### II. 主要內容

#### 1. 執行架構

本計畫旨整體概念以下圖一呈現：



圖一 執行架構

## 2. 研究步驟

培訓、教案開發、試教與預試、諮詢與修正、正式教學檢核五步驟，其相關說明如下：

### (1) 培訓階段

利用文獻資料分析成人教育班任課教師授課方式、新住民通譯教師教學內容，探討新住民輻射教材方面與內容，並招募新住民通譯教師進行培訓，並探討他們對輻射的概念及需求以做為日後教材開發的參考。

### (2) 教案開發階段

依文獻資料分析，架構新住民輻射教育的教材，並配合課程實施，設計以輻射為主題的識字學習教材（含輻射概念上課的 PPT 教學檔案）提供學習使用。另外根據原子能委員會編輯核子防護宣導 DM 與核子醫療宣導 DM 為架構，編輯印尼文和泰文 DM。

### (3) 試教與預試階段

將輻射概念知識及輔助教材製成上課用的 PPT 教材，並搭配輻射識字學習教材上課，每所學校課程進行時間約兩小時，課後進行預試。

### (4) 諮詢與修正階段

邀請輻射教育專家、性平專家與培訓教師就教學情況進行諮詢與內容修正。

### (5) 正式教學與評量階段

將輻射概念知識編製試題進行成效評估，並佐以訪談學員及原任課教師對於以資深新住民種子教師推廣輻射教育的相關意見。

## 3. 研究對象

(1) 種子老師：以六位資深新住民具有通譯背景為研究對象，其中越南語師資二位、印尼語師資兩位與泰語師資兩位。選取六所新北市成人教育班進行教學，每所學校各由一位資深新住民種子教師進行 2 小時輻射教育課程。

(2) 新住民學員：以參加夜間成人教育班為對象，六所中隨機抽選兩所共 53 位學員進行研究。

## 4. 研究工具

本研究的研究工具包括質性研究與量的研究。質性研究包括收集種子教師對輻射教育課程認知與教學相關資訊訪談、新住民學員對輻射教育課程認知與相關資訊訪談，以結合量研究進行分析。

量的研究為輻射概念認知測驗評量：輻射推廣教育上課內容，依不同主題可分成三大類，即「核子防護」、「核子醫療」及「生活中的輻射與應用」，再根據這三大類主題內容分別編擬相對應的重點測驗題目，經專家審核修正後，建立雙向細目表，成預試評量內容。

選取新北市某國小補校一年級 30 位學員進行預試，發現題目以純文字性敘述，對剛學中文僅三個月時間的一年級學員而言過於困難，故經諮詢原補校老師及專家學者的意見後，修正成圖像、試題減少成 10 題與降低試卷難易度，成為正式評量問卷。

## 5. 資料蒐集與分析

邀請研究者就主題相關的重點進行晤談，人員經同意下紀錄並進行編碼，以利於質性分析。觀察推廣輻射教育的課堂教學情形並以文字方式記錄下來，以

了解新住民學員在輻射推廣教育進行時的學習情形，以及教學者與學習者之間的互動狀況，並依此進行比較分析。

量的研究為輻射概念認知測驗評量，答對一分，答錯 0 分，計算總分與比較每一題的答對率，並參考質性資料進行結果分析。

## 6. 結果與討論

### (1) 製作多元族群母語文宣教材。

#### i 核子防護

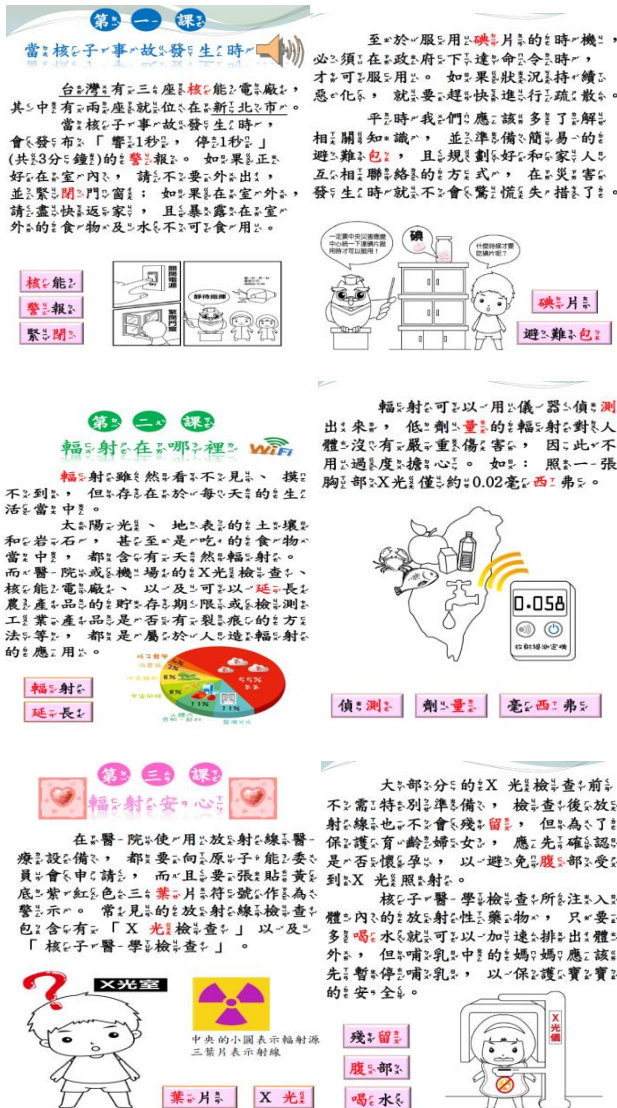
根據原子能委員會出版核子輻射防護中文之文宣品(DM)，邀請通曉印尼文與泰文通譯老師翻成印尼文與泰文之文宣品。

#### ii. 醫療輻射

根據原子能委員會出版婦女醫療輻射中文之文宣品(DM)，邀請通曉印尼文與泰文通譯老師翻成印尼文與泰文之文宣品。

#### iii 開發以輻射為主題之中文識字教材

為使進行輻射防護與醫療輻射概念教學的時候，亦能協助新住民了解輻射相關中文，另外由孫嘉珍編輯以輻射為主題之中文識字教材，供教學時使用，見下圖。



(2) 培育核安與輻射防護之種子教師

培訓種子教師分培訓、教材開發、試教與預試、修正與諮詢、正式實施五步驟進行。

表一 培訓時間與地點

| 日期/時間             | 地點       |
|-------------------|----------|
| 1040511/1830~2030 | 科學館 S103 |
| 1040518/1830~2030 | 科學館 S103 |
| 1040525/1830~2030 | 科學館 S103 |
| 1040601/1830~2030 | 科學館 S103 |



表三 課程修正檢討時間與地點

| 日期/時間             | 地點       |
|-------------------|----------|
| 1040919/1830~2030 | 科學館 S201 |
| 1040921/1830~2030 | 科學館 S201 |
| 1041026/1830~2030 | 科學館 S201 |
| 1041102/1830~2030 | 科學館 S201 |
| 1041214/1830~2030 | 科學館 S201 |
| 1041230/1830~2030 | 科學館 S201 |



表二 試教時間與地點

| 時間      | 地點   | 類型 | 人數 |
|---------|------|----|----|
| 1040607 | 裕民國小 | 試教 | 80 |
| 1040611 | 文聖國小 | 試教 | 40 |
| 1040611 | 碧華國小 | 試教 | 38 |
| 1040612 | 淡水國小 | 試教 | 23 |
| 1040615 | 大豐國小 | 試教 | 34 |
| 1040615 | 雙城國小 | 試教 | 25 |
| 1040615 | 安坑國小 | 試教 | 29 |
| 1040621 | 莊敬高職 | 試教 | 21 |



表四 課程教學時間與地點

| 時間      | 地點   | 類型   | 人數 |
|---------|------|------|----|
| 1041105 | 碧華國小 | 課程教學 | 30 |
| 1041109 | 金龍國小 | 課程教學 | 23 |
| 1041111 | 淡水國小 | 課程教學 | 30 |
| 1041112 | 正義國小 | 課程教學 | 41 |
| 1041112 | 大豐國小 | 課程教學 | 24 |
| 1041116 | 重陽國小 | 課程教學 | 26 |
| 1041117 | 碧湖國小 | 課程教學 | 17 |
| 1041117 | 成功國小 | 課程教學 | 35 |
| 1041118 | 雙城國小 | 課程教學 | 15 |
| 1041126 | 康寧國小 | 課程教學 | 17 |
| 1041202 | 積穗國小 | 課程教學 | 37 |
| 1041203 | 裕民國小 | 課程教學 | 54 |



表五 參訪以及輻射防護之實驗課程

| 時間      | 地點    | 類型            | 人數 |
|---------|-------|---------------|----|
| 1041122 | 北投-金山 | 游離輻射與實地踏查研習活動 | 33 |
| 1041129 | 北投-金山 | 游離輻射與實地踏查研習活動 | 36 |



### III. 結果與討論

為了解進行輻射防護與醫療輻射概念教學成效，我們根據教學內容進行測驗，結果顯示學員第十題回答北投石具有輻射概念時，答對率較低，這與在地議題有關係，相對於其他題目，這一題較難建立概念，若教學時，可以帶領學員實際到北投溫泉博物館進行量測，概念才會深刻，並檢測生活中或醫院輻射值，都是較佳教學方式。

第一題答對率顯示，對於事故警報答對率 81%，但延後測時可以到 100%，表示經過消化後，了解輻射防護重要性之後，會強化對警報敏銳度。其他題目皆有很高答對率，尤其醫療輻射相關題目，可以推論這些跟生活安全有關的教材與教學深度可以被他們接受與注意到。相關資料見表五所示。

表五 以輻射為概念的認知測驗結果

| 題目                                     | 課後<br>答對<br>率<br>(%) | 延後測<br>答對率<br>(%) |
|----------------------------------------|----------------------|-------------------|
| 1. 核子事故發生時，發布的事故警報是「響一秒，停一秒」，共會持續多久時間？ | 81                   | 100               |
| 2. 核子事故發生時，如果你正在 <u>室內</u> ，應該怎麼做？     | 100                  | 88                |
| 3. 核子事故發生時，如果你正在 <u>室內</u> ，應該怎麼做？     | 94                   | 88                |
| 4. 如果在上課日發生核子事故，學生該怎麼疏散？               | 100                  | 100               |
| 5. 哪一個是輻射的警示符號？                        | 100                  | 84                |

|                                      |     |     |
|--------------------------------------|-----|-----|
| 6. 下列哪一種人不適合接受腹部的 X 光檢查？             | 100 | 100 |
| 7. 大部分的 X 光檢查前需要準備什麼嗎？               | 100 | 100 |
| 8. 核子醫學檢查時所注入體內的放射性藥物，如何可以加速排出體外？    | 100 | 100 |
| 9. 下列哪一個是對的？                         | 91  | 94  |
| 10. <u>台灣</u> 的 <u>北投石</u> 是以什麼特色聞名？ | 75  | 69  |

### IV. 結論

核子輻射防護文宣教材加入印尼文與泰文後，加上原有越文文宣教材，在進行教學時，有助於他們對於輻射防護的了解。晤談時，告訴學員這些相關概念會出現在學校複合式防災演練，特別是因為核子事故進行預防式疏散，所以它們知道學生在學校，戶外與室內要如何防護，與這些防護措施的重要，比較不會恐慌。

婦女懷孕編輯醫療防護文宣教材加入印尼文與泰文後，加上原有越文文宣教材，在進行教學時，有助於他們對於醫療輻射的了解。經與學員晤談，普遍認為這些輻射知識，在之前生活中即使遇到也不清楚全貌，只覺得很危險，要避而遠之，有機會學習這種與生活切身相關議題，覺得很有必要性，所以在延後測也有很好答對率。

編輯中文識字教材並進行教學，可以提高學習興趣，經過晤談了解他們對於輻射相關文字有較深印象，對輻射概念學習興趣也較高。

培育核安與輻射防護之種子教師並辦理研習活動或參訪核設施以及輻射防護之課程，對於輻射教育推廣助力甚多。

### 參考文獻

- [1] 王文進(2013)。成人教育之環境游離輻射漫畫輔助教材與學習成效之研究。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版)：臺北。
- [2] 王敏妃(2013)。國小高年級學生開發「認識輻射」四格漫畫輔助教材與學習成效之研究。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版)：臺北。
- [3] 丘愛鈴、何青蓉(2008)。新移民教育機構推動新移民教育現況、特色與困境之調查研究。東大教育學報。19(2), 61-94。
- [4] 吳承達(2014)。中小學環境游離輻課程指標建構之研究。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版)：臺北。
- [5] 何青蓉(2003)。跨國婚姻移民教育初探-從一些思考陷阱談起。成人及終身教育雙月刊。75, 2-10。
- [6] 廖雪伶(2014)。環境游離輻射概念在中小學教科書內容分析之研究——以社會及自然與生活科技領域為例。臺北市立教育大學應用物理暨化學系自然科學教學碩士班碩士論文(未出版)：臺北。
- [7] 教育部(2006)。發展新移民文化計畫。臺北

- [8] 雷淑娟(2006)。臺北市新移民照顧輔導措施之成效評估研究－第四代政策評估觀點。臺北市：銘傳大學公共事務學系碩士在職專班碩士論文(未出版)
- [9] 劉美芳(2001)。跨國婚姻中菲籍女性的生命訴說。高雄市：高雄醫學大學護理學研究所碩士論文(未出版)。
- [10] Chien-kuo Ku\* and Cheng Da Wu , The Study of Radiation Education Indicators in K-9 Sustainable Environmental Education, 2012, 3-5, Sept. CANADA.
- [11] Bowser, A. G. & Nejazinia-Bowser, S. (1990) A GERNRAL STUDY OF INTERMARRIAGE IN United States. (ERIC Document Reproduction Serice No.ED340957)

# 科普級輻射度量實驗研發與實務推動及其成效探討(II)

## Developing, Practically Promoting and Impact Studying of Radiological Experiments in General Science grade (II)

計畫編號：MOST 104-NU-E-007-010-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：李敏

e-mail：mlee@ess.nthu.edu.tw

計畫參與人員：李承龍、張似璵、吳勇慶、顏麗娜

執行單位：清華大學工程與系統科學系

### 摘要

輻射度量實驗計畫主要為使一般大眾能更清楚認識輻射並謹慎面對輻射，藉由研發適合高中生與大學生的輻射度量課程，可更有效的推廣輻射安全教育。我們研發合適價位與效能的手持式輻射偵測器，將有助於一般民眾更清楚認識輻射。

關鍵詞：科普教育、輻射度量。

### Abstract

Studying of radiological Experiment is for the crowd rather than for specialists. We decided to find out more about the knowledge and to spread the education of the environmental radiation safety. In the classes, students(high school and college) will use the detectors which was developed by Hokang Technology Co. Our purpose is that crowd becomes more aware in this radiant Knowledge.

Keywords：the education of Popularization of Science、Radiological Experiments

### I. 計畫背景

本構想源起於擔任各級學校科展評審時或受邀科普演講時，常發現 K12 (小學與中等教育) 師生、民眾或非專業學術社群購買了一部名為游離輻射偵測用的偵測器後，即用以隨處偵測週遭環境游離輻射值，更至核電廠或各電廠週圍偵測環境的輻射量。然非專業的偵測員，通常未考量實驗前後應注意的事項和實驗條件，如儀器的適用性、度量校正、偵測位置的考量、所得數值的測後轉換分析等等必需注意的事宜。經常可見將儀器錶頭上所顯示的數值直接作為偵測的結果，隨即在未經具公信認證單位的確認下，隨即將結果投訴給到一般報章雜誌上報導，記者礙於知識和經驗有限，並常疏於考證數據，而直接報導所得的結果，並常聳動地報導超過法規規範的標準值許多。以致常常誤導一般民眾，因而常造成台灣社會諸多不必要的恐慌。

此一結果，源自正規的教育體系內一直未有一套適合 K12 師生和一般大學生學習的基本輻射度量教材和適性的實驗課程，更無供社會大眾體驗學習的實驗，特別是游離輻射的標準和如何獲取準確度量的基本概念。

故規劃邀請本校、核能研究所和輻射偵測中心具輻

射度量專長的學者專家合作，將以本校普物實驗課程中之鈷-60 的輻射計數實驗為基礎，大幅改進本實驗教材的內涵，增加幾項與基本輻射度量有關的實驗項目，以使讓學生們有機會對輻射度量的基本常識、輻射物理量的定義、各種偵測器的測量原理和數據分析…等等知識有所認識。

### II. 執行內容

清華大學原子科學院和生命科學院，及一般醫學院校相關系所內雖設有與輻射度量有關的課程和教學實驗，但通常僅給專業領域的學生選修，一般學生和社會無法參與。雖有少數人因工作或業務需求，可透過參加游離輻射研習課程獲取基本知識。但此研習課程多以專題演講的簡報方式授課，也幾乎沒有實驗操作的課程。故亦缺乏實驗實作和深入探究的機會。

因此，本計畫主要為使大眾能清楚了解輻射，藉由規劃適合的輻射度量課程，以更有效的方式進行輻射相關知識的推廣，以提升國人對輻射的認識。本年度具體的工作項目如下：

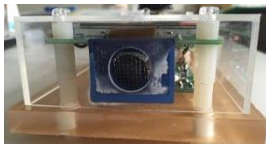
- 1.推廣適合一般大學生學習的基本輻射度量教材和適性的實驗課程：本年度計畫除與清大普物實驗室繼續合作外，更將此套教材用於清大工科系及核工所，並與中國醫藥大學放射系合作，於實驗課程中的基本度量實驗內融入背景輻射知識，以讓更多學生有機會接觸到輻射度量的基本知識。
- 2.研發適合高中師生實作學習的實驗內容和教材：本計畫於 2015 年規劃了一套包含演講、導覽及動手做實驗的活動，安排對象為高中學生，名為“2015 原子科學探奇之旅”，此系列活動目前已舉辦 13 場次，為顧及教學品質及讓參與學生能均有機會深度學習到學校課程中較少提及的輻射知識，我們於每場次會人數限制在 45 人以內，參與師生共 420 人。
- 3.推廣適合一般民眾學習的基本輻射度量教材及相關能源議題：本年度計畫為落實避免一般民眾因未經證實的輻射議題報導而產生的不必要恐慌，特與核能學會合作，於內湖社區大學開設認識輻射的課程，幫助學員正確認識輻射及其價值，祛除無謂恐懼，從而有效提升生活品質，促進身心健康。
- 4.收集各項回饋資料，加強學員對於輻射的認識，並改

**善課程及實驗：**本計畫所研發的輻射課程及教材，在課程完畢後，收回近 520 份的回饋單據，此資料將可協助我們進行輻射課程的重點探討與歸納，做為日後修改內容之依據。

### III. 研發結果

2015 年度清華原子科學科普團隊與核康科技股份有限公司合作進行輻射計數器研製的開發研究，已完成以尾端窗型蓋格計數管，成功地自製具數據顯示功能的手持式游離輻射偵測儀的裝置。運用模組化方式設計輻射偵測儀的硬體電路，每一模組均可獨立進行設計與驗證，故可達到平行分工的效益，並縮短產品開發時程。而此模組化的設計方式亦便於硬體之維修與將來的功能升級。請見表 1。

表 1 核康科技公司所研發的手持式輻射偵測儀

| G150 (美製蓋格管 LND712)                                                                 |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| G50 (透明式，美製蓋格管 LND712)                                                              |                                                                                     |
|  |  |

本團隊並在清華大學原科中心校正實驗室進行 G150 輻射偵測儀的校正實驗，在  $800 \mu\text{Sv/hr}$  劑量率之下，其反應均呈線性關係，圖 1 為 G150 的線性測試結果。偵測儀偵測數據的再現性與儀器的穩定性也藉由背景輻射的量測而獲得確定。

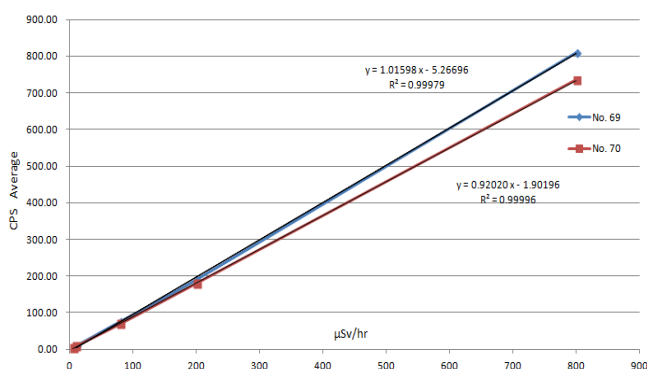


圖 1 G150 線性反應測試結果

利用完成測試後之輻射偵測儀，並根據本校普物實驗課程中之鈷-60 的輻射計數實驗為基礎，本團隊設計了一份適合一般大學生學習的基本輻射度量實驗教材。由於鈷-60 射源半衰期僅 5.26 年，為增加射源的使用年限，實驗改採半衰期為 30 年的銻-137 射源。此實驗的目的為認識偵檢器的偵測原理、瞭解偵檢器的使用方式、學習解讀偵測結果、利用偵檢器進行計數統計量測。

實驗內容包括：

1. 使用 G50 偵測儀示範蓋革計數器高原區特性與工作電壓的選定(圖 2)。

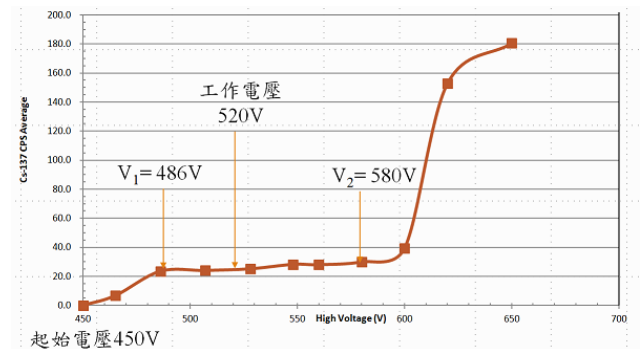


圖 2 G50 蓋革計數器高原區與工作電壓的選定

2. 使用 G150 偵測儀，並利用銻-137 貝他射源測量核蛻變的帕桑分佈圖(圖 3)(圖 4)，並與常態分佈圖(圖 5)作對應的比較。

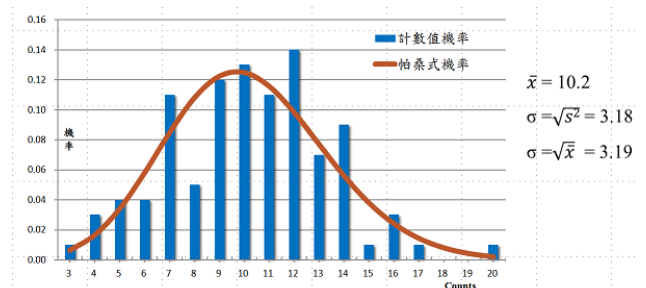


圖 3 G150 機率直方圖與帕桑分佈圖比較(前 100 次)

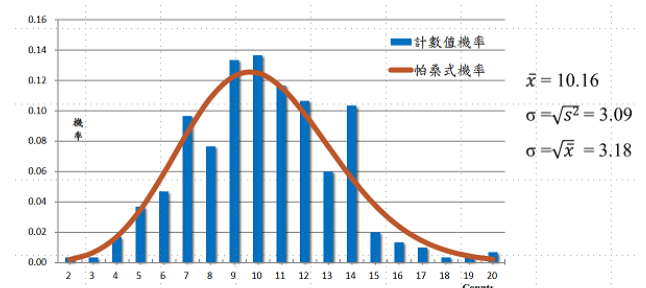


圖 4 G150 機率直方圖與帕桑分佈圖比較(全 300 次)

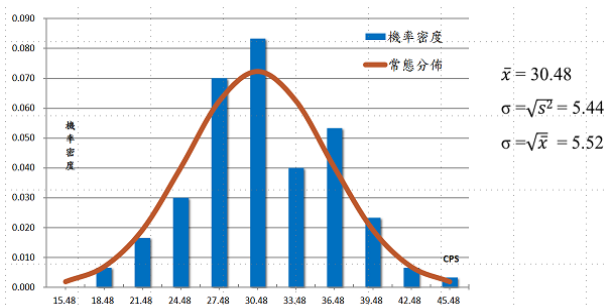


圖 5 G150 機率密度直方圖與常態分佈圖比較

3. 使用 G150 偵測儀測量鈾-137 射源與背景輻射(圖 6), 學習正確計數率的計測及量測數據的表達方式與誤差傳播計算。

## 背景值測定

地點：普物實驗室 3 樓辦公室

測量時間：5 秒/次 × 128 次/組 × 11 組 = 7040 秒 ÷ 2 時

Total counts：G100 及 G150 皆 > 2000

| 背景值         | G100  | G150  |
|-------------|-------|-------|
| total count | 2051  | 2017  |
| CPS average | 0.29  | 0.29  |
| CPM average | 17.48 | 17.19 |

圖 6 G100 和 G150 背景值試做比較

藉由實驗操作, 讓學生們有機會對輻射度量的基本常識、偵檢器的測量原理和數據分析進行學習及吸收。此實驗課程在 104 學年利用清華大一普物實驗課、清大工科系「核工導論」、清大核工所「輻射劑量學」及中國醫藥大學放射系「輻射度量」等課程進行試教, 參與學生人數達 100 人。本年度還將此探討游離輻射特性的實驗, 發展至高中端也可適用之輻射偵測與度量教材, 並開始進行培育種子教師的前置工作, 及在內湖社區大學教導一般民眾認識輻射與輻射的量測, 其成果發表活動如圖 7。



圖 7 台北內湖社大成果發表會闖關活動海報

另外, 清華原子科學科普團隊與核能研究所合作, 利用核研所開發製作的放射線教學套組與 FS99 快速輻射偵查儀及 INER9200 多用途輻射偵測儀, 研發一套適合 K12 師生實作學習的實驗內容和教材, 並用於「2015 原子科學探奇之旅」活動之中, 其活動課程表如圖 8。

### 「原子科學巡禮」課程規劃

| 課程-A         | 破解超人的罩門 - 『人在『輻』中要知『輻』』                                                                                                                                                                 |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 演講<br>(2 小時) | 輻射因為看不到、摸不到、聞不到的特性, 導致一般人對輻射心生恐懼。但其實我們的生活中本來就充斥著各種天然輻射, 甚至為了特定目的而使用人造輻射。但到底輻射在哪裡, 你知道嗎?<br>1. 介紹生活中的輻射來源。<br>2. 介紹輻射的各種應用。<br>3. 瞭解輻射的風險。<br>4. 瞭解輻射的基本防護。<br>                          |
| 課程-B         | 以雷神之名 - 『THOR 的前世今生-認識核子反應器及其應用』                                                                                                                                                        |
| 演講<br>(1 小時) | 清華水池式反應器 (THOR) 是目前台灣唯一的研究用核子反應器, 其運轉原理與一般核能發電廠相同: 透過 THOR 的參訪活動, 可以了解核能發電的基本原理, 也會對於核能安全有更進一步的認識。此外, 核能除了發電之外還可做為其他用途, 您知道多少呢?<br>1. 核能知多少?<br>2. 核能安全設計。<br>3. 核能的醫學用途 (BNCT 介紹)。<br> |
| 課程-C         | 別人到不了的打卡點 - 『參觀清華原科中心設施』                                                                                                                                                                |
| 參觀<br>(2 小時) | 了解輻射基本知識與應用後, 我們將實地參觀清華原科中心設施, 藉由親身接觸, 讓我們更能從中得到寶貴的經驗。<br>1. THOR 參觀(30min)。<br>2. BNCT 參觀(30min)。<br>3. 照射場 參觀(30min)。<br>4. 保健物理(全身計測、HPGe 核種分析) 參觀(30min)。<br>                       |
| 課程-D         | 小心變成蜘蛛人 - 『動手做輻射度量實驗』                                                                                                                                                                   |
| 體驗<br>(1 小時) | 透過自己動手做實驗的樂趣, 讓我們在知『輻』後更懂得『習』輻。<br>                                                                                                                                                     |

課程可視需求安排：☐ 原子科學巡禮(6 小時, A+B+C+D)

☐ 人在輻中要知輻(3 小時, A+D)

☐ THOR 的前世今生(3 小時, B+C)

圖 8 「2015 原子科學探奇之旅」活動課程表

實驗目的為認識生活中的輻射與學習如何偵測輻射外，藉由實際測量並了解不同的輻射有不同的穿透能力、輻射強度與屏蔽的關係、輻射強度與距離的關係等輻射特性。由於一般大眾對輻射容易產生疑慮，因此這部分的教案皆使用天然輻射源。我們除了將研發的實驗教案推薦給高中物理科與其他相關學科中心的教師外，並將與種子教師合作適當修改本計畫所規畫開發的教材，以適合不同對象與不同場合使用，致力於讓全國高中高職的物理教師皆可使用。

#### IV. 結論

104 年度已研發出適合一般大學生及民眾學習的基本輻射度量實驗教材並完成適合高中師生實作學習的教案活動，於 105 年度會將此課程持續推廣及增修，並開發適於國小的課程，同時也將繼續開發實驗數據記錄與分析 APP、及改良探討游離輻射特性的實驗。此外，未來將規劃發展出使用偵檢器正當量測後若發現確有輻射源時，如何指示測量者判斷劑量大小，針對不同劑量如何進行緊急安全防護與危機處理，以避免危害的作業方式。並透過各種發表會及研討會的機會將研發的教材及成果進行推廣與合作。

# 新住民之核能與輻射知識宣導

## Propagation of Nuclear and Radiation Knowledge for Immigrants

計畫編號：NSC 104-2623-E-262 -001 -NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

計畫主持人：陳彥均

e-mail：chen.mg.lhu@live.com

計畫參與人員：黃莉琄

執行單位：龍華科技大學多媒體與遊戲發展科學系

### 摘要

目前有將近 50 萬新住民，長期居留於我國。在不久之後，他們都將會成為我國的正式公民。這些新住民在他們的母國，並未獲得充足的核能與輻射知識。所以，有必要對他們進行這些領域的教育宣導。在本計畫之中，針對本團隊過去所製作的一個影片，進行修訂。增加近年來，民眾所關切的主題。並且利用新住民的母語，來製作旁白配音和字幕，以方便新住民的觀賞。此外，本團隊還會參與新住民的活動，以推廣這個影片。讓更多的新住民知道並觀看此影片，以獲得最大的成果。

關鍵詞：新住民、核能、輻射、多媒體、影片

### Abstract

There are approximately half million immigrants in our country. They will our formal citizen in following years. Most of the immigrants don't get sufficient education about nuclear and radiation in their motherlands. Therefore, it is necessary to provide them knowledge in these fields. In this project, a video created in 2008 is modified. Topics deeply concerned by the public is added. The voice-over and the subtitles are created using mother languages of the immigrants. The team members will attend immigrant activities to promote this video. It will attract more immigrants to watch this video and obtain knowledge in nuclear and radiation.

Keywords: immigrants, nuclear, radiation, multimedia, video.

### I. 前言

根據內政部入出國及移民署（以下簡稱為移民署）的統計資料，大約有 50 萬人，因為婚姻、依親居留、歸化國籍等原因，而長期定居在我國。此統計資料，並不包含外籍勞工、看護與幫傭等短期居留者。對於這些移民至我國的外籍人士，政府統稱為「新住民」。其中，是以大陸地區和東南亞的外籍配偶為主。

根據現行的法令，外籍配偶在經過 4~8 年之後，就可以放棄原有的國籍，歸化成我國的公民，並且取得我國的身分證。也就是說這 50 萬新住民，在可預見的未來，大多都將會成為我國的正式公民。和土生土長的台灣人一樣，擁有相同的權力、福利和法律地位。所以，政府不可能再忽視新住民的權益，把他們當做次等公民，或是將他們視為傳宗接代的工具。基於此一原因，新住民輔導是內政部的重要施政重點之一。政府協助新住民瞭解台灣的風俗習慣，輔導他們就業。讓新住民可以融入台灣的社會，在台灣落地生根。同時，也讓台灣人瞭

解這些新住民母國的風俗習慣，例如泰國的潑水節。讓成長背景全然不同的雙方，可以和平地相處，並且平等地看待對方。避免因為信仰、觀念和認知上的不同，造成誤解和衝突。

原子能委員會長期投入核能與輻射知識的宣導。在過去的計畫之中，絕大多數都是針對一般的台灣人民。經過多年的努力，主要族群（包含在校學生和社會人士）都已經接受過充足的核能與輻射教育。然而在某些特殊族群，例如原住民和本計畫的新住民，則沒有在過去的計畫之中，受到重視。在原住民方面，除了極少數的耆老之外，絕大多數原住民都懂漢語，針對一般民眾設計的文宣，也適用於這些原住民。此外，原住民族並無統一的語言，更沒有文字。所以只能透過口耳相傳，大幅度地增加了知識傳遞的困難度。

我國的新住民，絕大多數來自於大陸地區和東南亞。由於這些地區過去並沒有核能電廠和放射性醫療，高等教育也比較不發達。因此，大多數的新住民，並沒有在母國接受過良好的核能與輻射教育。再加上新住民和傳統的台灣人接觸較少，不常參與一般台灣民眾的社會運動與社交活動。所以，也難以從一般的管道，來取得正確的核能與輻射知識。由於我國具有 50 萬新住民，人數已經具有足夠的規模。所以，本計畫選定了新住民，做為宣導對象。透過這個計畫，讓這些過去並未接受良好核能與輻射教育的新住民，也能夠和一般的台灣人一樣，具有正確的核能與輻射知識。

### II. 主要內容

#### 1. 多媒體教育影片

相較於文字和靜態圖片，一般民眾對於動態的影片比較有興趣。因此，透過影片和電腦動畫來宣傳科學知識，應該可以獲得比較好的效果。在 2008 年的計畫中，本團隊製作了一個「核能天地」影片，透過大量的電腦動畫，介紹核能與輻射的民生應用。此影片的截圖如圖 01。這個影片獲得原子能委員會的肯定，將此影片大量壓制成 DVD 光碟，分送至全國學校與政府機關。此外，原子能委員會也在許多展覽中展示此影片，包含 2013 年於台北世貿舉辦的「台北電信暨智慧生活展」。因此，本團隊把這個影片，用於新住民的核能與輻射教育宣導。



圖 01：多媒體教育影片「核能天地」之畫面

## 2. 影片內容增訂

「核能天地」影片是在 2008 年製作，至今已經過了 7 年。在這 7 年之間，發生了日本福島核災這個重大事件。民眾關心的議題主軸，也有了明顯的改變。因此，有必要將這部影片進行修改，增加民眾想要知道的訊息，以增加民眾的觀賞意願。本計畫在這個影片之中，增加了核電廠總體檢的相關資訊。介紹了核電廠的安全設施，以及在日本福島核災之後，我國核電廠所新增的各項安全設備，以確保核電廠的安全，如圖 02 所示。同時，也介紹了年度的核安演習，展示政府在核能事故上的演練成果，如圖 03 所示。製作完成的影片，放置於 Youtube 影音網站上，供全國民眾觀賞，詳見 <https://www.youtube.com/watch?v=2i3eyjKwkIU>。



圖 02：介紹核電廠安全設施及改善



圖 03：介紹年度核安演習之成果

## 3. 採用新住民之母語

在核能與輻射知識之中，會有許多日常生活不容易接觸到的專有名詞，例如「鈾」。許多新住民接觸中文的時間並不長，恐怕只懂得日常生活用語，不見得能夠瞭解這些罕見的中文專有名詞。因此，本計畫利用新住民的母語，來替影片配音，並且加上字幕。以利於新住民觀賞此影片，並且獲得最好的學習效果。在新住民的母語方面，本團隊比照移民署的標準。除了我國的繁體中文之外，加上簡體中文、泰文、印尼文、緬甸文、越南文。讓絕大多數的新住民，都能夠選用自己的母國語言，來觀看此一影片，學習核能與輻射的知識。在翻譯與配音人員方面，本計畫採用了移民署所推薦的通譯人員。這些通譯人員來自於東南亞，來到台灣已經十年以上，精通我國和母國的兩種語言。他們也在移民署，擔任協助新住民的工作。因此，足以擔任本計畫的翻譯和配音工作。製作出的各種新住民語言版本，如圖 05 所示。

## III. 結果與討論

### 1. 新住民文字檢查

新住民母語版的影片製作完成之後，本團隊將影片交給負責配音的新住民檢視，以確保旁白聲音、字幕、影片畫面的搭配正確無誤。

### 2. 試用

確認新住民版本影片的正確性之後，本團隊邀請學校中的外籍學生，來觀看此一影片，並且填寫問卷，以測試影片的成果。參與測試的外籍學生，包含了 10 位大陸籍大學部學生、8 位越南籍碩士班學生、2 位印尼籍大學部學生。

### 3. 推廣

完成外籍學生的測試，確認影片的知識難易度適中，新住民能夠看得懂之後，本計畫就將這些影片，提供給新住民觀賞。除了放置在 Youtube 網站之外，本計畫也和移民署合作，將影片放置在移民署的新住民資訊 e 網（<https://nit.immigration.gov.tw/Pages/welcome.aspx>）內的影音專區，供全國的新住民瀏覽，如圖 04 所示。



圖 04：放置於移民署新住民網站的核能影片

## IV. 結論與建議

本計畫利用新住民所熟悉的母語，製作出核能與輻射知識影片。讓初到台灣的新住民，能夠補強在核能與輻射的知識，並且了解台灣在這些領域的相關發展。建議未來可以配合移民署的新住民資訊教育活動，利用網路影片與電子書等方式，宣傳核能與輻射等知識。或是製作新住民更有興趣，或是切身相關的主題，例如乳癌的放射線檢測與治療等。

## 核能安全與輻射防護科普實務推動及成效探討

# Practical Promotion on General Science Education for Nuclear Power Safety and Radiological Protection-Phase I

計畫編號：104-NU-E-007-009-NU

計畫類別：■個別型計畫 □整合型計畫

執行期限：104 年 1 月 1 日至 105 年 3 月 31 日

計畫主持人：戴明鳳

e-mail：mftai@phys.nthu.edu.tw

計畫參與人員：黃朝曦、周芳妃、蔡汶鴻、李筱晴、王國至

執行單位：國立清華大學物理系(所)

### 摘要

本計畫針對K12和大專院校各級師生致力於「核能安全」與「輻射防護」知識之科學教育推廣，並協助解決大眾心中對相關議題的不解與疑惑。主要分兩大項主軸進行：(一)「核能安全與輻射防護」知識推動：總計辦理55場次不同型式的科學活動、累計活動時數達362.5小時、4,123人次參與；其中東台灣3縣市共有9所學校9場次，約980人次參與。(二)手機版電子遊戲研發：與宜蘭大學資工系黃朝曦教授合作，透過電子遊戲推動並提高國中小學生學習相關科學教育。

關鍵詞：科普、核能安全、輻射防護。

### Abstract

The program committed to promote public science education on the "nuclear power safety" and "radiological protection" for teachers and students at all levels of K12 and universities. The program also assisted in resolving issues related to what confused and puzzled general public the most. Two major progresses were: (a) the promotion of science education of nuclear power safety and radiological protection: We conducted 55 sessions of various scientific activities, the cumulative activities amounting to 362.5 hours and 4,123 people participated. In the eastern Taiwan, we held 9 activities in 9 different schools in 3 different counties and about 980 people participated. (b) the development of the mobile version video and the APP games: We collaborated with Professor Chao-Xi Huang in the Department of Information Engineering, I-Lan University to develop these programs. These scientific games stimulated the learning interest and enhanced the learning effect to the relevant science topics on nuclear power safety and radiological protection for the schoolchildren

Keywords: general science education, nuclear power safety and radiological protection.

### I. 前言

由於國人對於核能及輻射的基本知識有限，進而對其正確的安全與防護知識所知更是缺乏，導致國人心中對此兩項議題常因不了解而害怕。故本計畫規劃藉由辦理科學研習活動和各種不同的教育傳播方式，以推廣核能安全及輻射防護的基本知識，期使國人能夠具備相關知識；民眾面對疑問時，能夠擁有正確的判斷能力，及當不幸必須面臨對災變時，能以臨危不亂的冷靜態度處

理應對危機。

### II. 主要內容

1. 培育核安與輻防種子深耕校園相關活動：將藉由下列機會推動種子師生的培訓工作。

- (1) 辦理國高中、小學教師研習營，培育核安與輻防種子教師，經由研習與討論，以將相關知識融入常規教學的教材與學生的學習單中。
- (2) 因計畫主持人為高中物理學科中心的科學諮詢顧問，每年得為其種子教師開授教師研習營，積極推動提高高中課綱內輻射與核能應用及其安全等議題授課比例和在學習中被關注的程度，期使高中師生能嚴肅正視並用心探討此兩議題。

2. 辦理學生認識核能安全及輻射防護之實驗課程：

- (1) 接受國內各級學校及民間團體邀約，委託或主動為各單位及社群規劃辦理0.5-4天不等天數的能源科學研習活動，經由研習講授、示範、演示、DIY等教學方式，比較各種能源發電的優缺點與相關安全與防護。並安排參訪各種發電方式的電廠、原子爐核子設施、核醫設施等的體驗研習，以使學員能獲取深刻紮實的知識，更透過學員之間及與資深的從業工作者間的交流討論，解開疑惑與誤解。我們的科學教育團隊每年度有近120-200場次的科學活動邀請，其中至少會有1/3左右的場次規劃為能源研習營，並將核能與輻射相關議題高比例地納入研習課程中。
  - (2) 另主持人近年持續於清華大學校內開設「物理在能源與環境的應用」(2學分)提供具理工背景的大學生選修，有時並受通識中心邀請開設「體驗科學之美與妙」(2學分)給非理工背景學生選修和國中教師師培班必修的「生活科技概論」課(3學分)。核能與輻射議題、相關簡易實驗及核能設施參訪的校外教學均已納為此三門課程中必授內容。
  - (3) 本校每學年度上、下學期有近1,000位大學生必修普物實驗課程，此外，每年另有逾8,000位K12師生到本校普物實驗室暨跨領域科教中心辦理參訪暨研習活動。故於普物實驗課程中的基本度量實驗內融入背景輻射和日常生活用品之輻射強度的度量實驗，以讓更多學生有機會接觸到輻射計量的基本知識，並瞭解輻射度量的定義和使用。該實驗亦適度地安排於K12的科學活動中，使更多人有機會學習正確的輻射知識。
3. 舉辦優秀青年參訪核能機構交流活動：  
遴選各地優質學校或優秀青年，並鼓勵各校自行招攬

優秀學員組團，由我們團隊輔導辦理「核能與輻射科技」研習和參訪核能設施。使學員能經由參訪與座談，體驗核電廠與輻射防護等之安全管制及緊急應變現況。如4場次2-3天期的「能源科技之旅」系列，12場次的「科學神燈之旅」系列輻射產生暨應用研習活動(計有22所高中學校，約820人次高中師生參加，累計活動辦理時數達66小時)；「我們關心的能源議題」與「我國能源科技的發展現況與困境」系列能源講座(共服務4縣市、8場次 8天次、累計22小時、725人次)。

#### 4. 舉辦科普系列活動：不定期舉辦2-3小時的專題演講系列活動，約有23場次(圖1)。



圖1 活動剪影

#### 5. 錄製磨課師教學影片、實驗小短片、簡易電子遊戲與小教具：以推廣核能安全、輻射防護及核子事故之緊急應變知識。已錄製完成分別由葉宗洸教授和洪國鈞先生主講「我們關心的能源議題」和「能源科技的發展現況與困境」的磨課師影片兩部(圖2&圖3)[1][2]。透過自製實驗演示小短片和翻譯國外核能與能源相關議題之討論影片(圖4)。這些影片除上載於本校跨領

域科教中心的網站內，並上傳至科技部的科技大觀園網站供大眾分享。



圖2 洪國鈞先生主講的「我們關心的能源議題」磨課師課程影片。並上載科技大觀園、國網中心，供教師或民眾研習認證。同步上傳清大跨領域科教中心供民眾分享。影片網址：<https://youtu.be/IpdMihVerZQ>



圖3 清大葉宗洸教授「能源科技發展的現況與困境」磨課師課程影片的錄製。影片網址：  
<https://youtu.be/o5IAxweNyk8>



影片網址：<https://youtu.be/yxrbimWCKgs>



圖4 透過自製實驗演示小短片和翻譯國外核能與能源相關議題之討論影片，以供學生及民眾參閱。

6. 與其他教育推廣團隊聯盟及尋找新的資料傳播管道：積極尋找並結合核心聯盟團隊，規劃具創意和成效的推動方式，目前與宜蘭大學之國科會科教處「FUN科學到東部計畫」合作，為東台灣師生服務。

- (1) 黃朝曦教授於104年度特別於東台灣三個縣市8所學校辦理了8場次以「看電影談能源物理」系列講座，共計約8,900人次參與聽講。演講中搭配已開發的能源相關遊戲APP，將核能安全與輻射防護的正確知識帶入國中學生。並將講座活動中5~10分鐘之小主題剪輯成教學短片，放置在黃教授所建置的「核能安全與輻射防護東部科普實務推動網站」上，提供一般民眾能夠透過網際網路學習獲得正確的知識，同時也將我們自製的行動裝置互動式遊戲APP放置網站上，以吸引年輕族群下載體驗核能知識遊戲，從中獲得正確的知識。目前網站所需內容已收集到一定的數量，能夠將本網站帶入宣傳，讓更多的人有機會來進行瀏覽學習核能安全與輻射防護相關知識。
- (2) 製作手機電子遊戲：藉由一般民眾對電子遊戲的喜愛，讓民眾認識核能發電的工作原理，瞭解中子撞擊鈾原子產生連鎖反應，並且知曉核能發電的反應可以受到石墨棒控制中子數量，不會產生中子過多的情況。目前與能源有關的遊戲有「中子大進擊」、「我的核能電廠」、「核能爐發電」、「連鎖世界Chain of World」、「能源建築工」(圖5)。



圖 5

依照上述方法針對不同對象和議題討論，並引導一般大眾學習，促進其主動學習的意願，並透過開放的演示空間及輻射展示、培訓種子師資將核能安全及輻射防護推動給一般民眾及偏鄉地區，藉由工作成果的分享及問卷調查，來評估本計畫辦理的成效。

#### IV. 結論

清華跨領域科教中心科普團隊於 2015 年度總計辦理了 55 場次相關的科學研習活動，累計 70 天次，總時數達約 362.5 小時，參與觸及人次達約 4,123 人。各場次的參與學員多由各單位自行招攬，但由本計畫團隊規劃課程主題和研習內容。使學員能經由參訪與座談，深刻體驗核能安全與輻射防護等之安全管制及緊急應變現況。活動內容如下：

- (1) 舉辦優秀青年參訪核能與輻射相關機構科學之旅活動：如4場次2-3天期的「能源科技之旅」系列，12場次的「科學神燈之旅」系列輻射產生暨應用研習活

動(總計有22所高中學校，約820人次高中師生參加，累計活動辦理時數達66小時)；「我們關心的能源議題」與「我國能源科技的發展現況與困境」系列能源講座(共服務4縣市、8場次、8天次、累計22小時、725人次)。

- (2) 不定期舉辦2-3小時相關專題演講系列活動，約有23場次，「我們關心的能源議題」、「能源科技的發展現況與困境」。
- (3) 錄製分別由葉宗沆教授和洪國鈞先生主講「我們關心的能源議題」和「能源科技的發展現況與困境」的磨課師影片兩部。影片上載於本校跨領域科教中心的網站和科技部的科技大觀園網站供社會大眾閱覽。
- (4) 錄製原能相關的科學知識和DIY短片(如以不同酒精濃度的燃燒紙張的趣味示範結果深入淺出地解說核能發電中所使用的燃料束不會產生核爆的演示實驗影片)。透過影片給與民眾正確的核能與輻射知識及防護觀念。

從推廣活動的回饋資料和多數單位會定期回來再邀請我們的科普團隊持續辦理相關的研習活動，可知經由專題講座、科普影片、實驗活動和深度能源之旅等多元的不同探究方式，可以很有效地幫助民眾逐漸深入地理解正確的核能與輻射知識，強化了 K12 師生與大眾對相關知識正確資訊傳遞與吸收的管道，消除對此兩議題莫名的恐懼和排斥，並提升進一步探討原子科學之基本知識和其應用的興趣和教育推廣的成效。

#### 參考文獻

- [1] <http://youtu.be/IpdMihVerZQ>
- [2] <http://youtu.be/o5IAxweNyk8>