

用過核子燃料最終處置計畫
潛在處置母岩特性調查與評估階段一
103年度成果報告
(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國104年5月

(此頁為空白頁)

摘要

本報告為「用過核子燃料最終處置計畫」於103年度工作成果摘要報告。內容涵蓋「地質環境」、「處置技術的研究發展」、「用過核子燃料處置的功能評估」等技術發展成果。

在地質環境方面，主要成果包括：

- (1) 運用過去多年整合地質、地球物理、地下水等調查技術，應用於東部結晶岩體規模、地震、沉陷等特性調查之成果，有助於未來以本土特性調查資料評估地質圈對核種傳輸的影響。
- (2) 進行東部結晶岩鑽井岩心的詳細礦物分析，並完成井下裂隙分析，獲致此區地下地質與導水構造的特性相關資料，顯示不僅井下裂隙特性皆順既有構造發育而具相當一致性，且均有地下水帶來的方解石充填物。持續進行離島結晶岩深井之水文地質長期監測；並根據現地特性調查與參數化資料，建構二維水文地質概念模式。
- (3) 建置長期微震及GPS監測站，獲致此區結晶岩體及鄰近岩層之地震相對安靜帶分布及短期沉陷趨勢之量測紀錄。

在處置設計與工程技術方面，主要成果包括：

- (1) 針對國內用過核子燃料特性，根據瑞典SKB提出之KBS-3型工程障壁之概念，提出國內工程障壁系統設計需求要項，做為處置設計之功能試驗與工程技術發展之基礎。
- (2) 探討與分析處置概念影響因子，包含重新探討用過核子燃料之熱與放射性及關鍵核種，並針對廢棄罐、緩衝材料與母岩等特性，分析對處置設施的重要影響因子。
- (3) 分別進行處置設施、工程障壁、廢棄物罐等熱-水-力-化耦合特性分析，以發展國內本土化之分析能力。

在安全評估方面，主要成果包括：

- (1) 運用裂隙岩體升尺度及等效參數特性，建立離散裂隙統計參數與升尺度等效參數間的關係，發展整體處置系統進行大區域之裂隙水流與核種傳輸之分析技術。
- (2) 分析台灣地區自然現象的可能災害演化，發展定量分析之技術，做為安全評估受自然因素的擾動情節案例分析之基礎，充實處置設施評估情節之可能案例。
- (3) 持續國內用過核子燃料處置之安全評估所需源項、工程障壁、地質圈、生物圈之基本與不確定性技術資料之整合，完成基本情節安全評估所需之基本參數。
- (4) 進行金屬、黏土材料與置放地的天然類比探討，補充實驗室試驗及現地試驗在時間與空間尺度上的不足，並提高深層地質處置概念技術評估之信賴度。

ABSTRACT

This FY2014 progress report is a summary of Taiwan Power Company's work in implementing the Spent Nuclear Fuel Final Disposal Program Plan. Major research and development achievements in this report have been subdivided into three categories, including "The Geological Environment of Taiwan," "Repository Design and Engineering Technology," and "Safety Assessment."

Significant achievements of "The Geological Environment of Taiwan" include:

- (1) Applying integration of geological, geophysical and hydrogeological surveys on investigation of the eastern Taiwan granitic bodies, this report presents the newest information such as magnitude, seismicity, subsidence, etc., about the granitic bodies. These domestic results of characterization for geosphere provide important data for future evaluation on transportation of radionuclides.
- (2) Detailed mineralogical analysis of the drilled cores from the eastern Taiwan granitic body, as well as downhole measurement of fracture characterization, provides first characterization of subsurface water conductive fractures. This reveals that most fractures occurred along pre-existing structures; therefore, water-conductive fractures, where had been filled with calcite veins, present consistency in attitude. This project keeps conducting monitoring long-term monitoring of hydraulic characterization in deep boreholes of the western offshore granitic islands. Using in-situ measurement of subsurface characterization data, construction of the 2-D hydrogeological conceptual model has been carried out.

- (3) Micro-seismicity and GPS have been continuously monitored around the granitic bodies and their host rocks, indicating aseismic area existence and short-term tendency of subsidence of granitic bodies.

Significant achievements of the “Repository Design and Engineering Technology” include:

- (1) Based on the feature of spent fuel and the KBS-3 engineering barrier concept developed by SKB, we proposed a design requirement of engineering barrier system as a basis for the function test and engineering development of the design of disposal facility.
- (2) Impact factors to the disposal concept were discussed and analyzed including the heat and radiation characteristics of spent fuel, key nuclides, canister, buffer material, and the host rock.
- (3) Analysis of the seismic reliability for the long-term stability and the THMC processes in disposal facility, engineering barrier, and canister were applied to develop our own analysis capability.

Significant achievements of the “Safety Assessment” include:

- (1) The statistics of fracture structure and the representative continuum parameters were developed and quantified for a variety of fracture distribution scenarios to provide general insight into the procedures and the associated techniques for analyzing flow in complex large-scale fractured rock systems by using the upscaling techniques for flow and transport parameters in fractured rocks.
- (2) Analysis of natural phenomena and evolution of possible disasters in Taiwan. Quantitative analysis technique was developed as a safety assessment basis for the case study of perturbation scenario affected by natural factors to improve the possible cases in the scenario of assessment.

- (3) Continuously integration of the basic and uncertain technical information of source term, engineering barrier, geosphere, and biosphere which are needed by the safety assessment of spent fuel was made to fulfill the basic parameters for the basic scenario of safety assessment.
- (4) Natural analogue about metal and clay material and the emplacement location was in progress to compensate for the lack of laboratory tests and in-situ experiment in the time and spatial scales and to increase the assessment reliability of the deep geological disposal concept.

目錄

頁次

1. 概述	1-1
2. 計畫目的	2-1
3. 計畫執行成果	3-8
3.1. 地質環境	3-8
3.1.1. 區域環境地質	3-8
3.1.1.1. 地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性	3-9
3.1.1.2. 台灣地質環境特徵	3-10
3.1.2. 深層地質特性	3-17
3.1.2.1. 地質圈特性對多重障壁概念的重要性	3-17
3.1.2.2. 水文地質	3-22
3.1.2.3. 水文地球化學	3-36
3.1.2.4. 核種傳輸路徑	3-49
3.1.2.5. 岩石特性	3-69
3.1.3. 地質處置合適性研究	3-82
3.1.3.1. 台灣用過核子燃料地質處置之地質圈特性	3-82
3.1.3.2. 台灣的大地構造架構	3-84
3.1.3.3. 抬升與沉陷作用	3-94
3.1.3.4. 氣候與海平面變遷	3-113
3.2. 處置設計與工程技術	3-117
3.2.1. 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力	3-117
3.2.2. 工程障壁系統與地質處置母岩的功能	3-118
3.2.3. 整體處置概念	3-120
3.2.3.1. 工程障壁系統	3-121
3.2.3.2. 處置設施	3-121
3.2.4. 設計流程	3-123
3.2.5. 影響處置概念的因子	3-127
3.2.5.1. 熱與放射性	3-127
3.2.5.2. 地質與地形條件	3-127
3.2.5.3. 處置母岩特性	3-128
3.2.6. 工程障壁系統及處置設施的設計需求	3-135
3.2.6.1. 廢棄物罐	3-135
3.2.6.2. 緩衝材料	3-137

3.2.6.3.	工程障壁系規格	3-140
3.2.6.4.	地下設施.....	3-140
3.2.6.5.	回填材料.....	3-140
3.2.6.6.	處置設施設計	3-141
3.2.7.	工程障壁的穩定性	3-150
3.2.7.1.	處置場熱-水-化作用之初步分析.....	3-150
3.2.7.2.	處置場開挖擾動帶之力學特性研究	3-154
3.2.7.3.	工程障壁熱力-力學穩定性研究	3-158
3.2.7.4.	深層地下設施受震穩定性之研究.....	3-163
3.2.7.5.	氣體遷移.....	3-166
3.2.7.6.	膨潤土特性.....	3-169
3.2.8.	建造/運轉/封閉技術.....	3-194
3.2.8.1.	建造階段.....	3-194
3.2.8.2.	運轉階段.....	3-195
3.2.8.3.	封閉階段.....	3-195
3.2.9.	處置場營運管理技術	3-196
3.3.	安全評估	3-197
3.3.1.	潛在處置母岩特性調查與評估階段安全評估的範疇及目標	3-197
3.3.2.	安全評估方法.....	3-198
3.3.3.	處置系統與功能.....	3-200
3.3.3.1.	處置系統特性	3-201
3.3.3.2.	處置系統功能	3-201
3.3.4.	情節發展	3-208
3.3.5.	基本情節	3-208
3.3.6.	變異情節	3-209
3.3.6.1.	地表淹水因素分析及影響作用之研究.....	3-210
3.3.6.2.	颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響之研究	3-217
3.3.6.3.	地質演化作用與地震循環概念模型之研究	3-223
3.3.6.4.	地震對廢棄物罐破壞特性之系統分析.....	3-228
3.3.7.	安全案例分析.....	3-228
3.3.7.1.	所需核種特性相關參數之評估研究	3-228
3.3.7.2.	參數不確定性分析.....	3-246
3.3.8.	安全評估的可信度	3-249
3.3.8.1.	天然類比研究	3-249
3.4.	國際同儕審查規劃	3-257
4.	結論	4-1
4.1.	地質環境	4-1
4.2.	處置設計與工程技術	4-5

4.3. 安全評估	4-9
5. 參考文獻.....	5-1

圖目錄

頁次

圖 3-1：台灣大地構造演化示意圖.....	3-14
圖 3-2：台海地區岩漿活動與大地構造演化圖.....	3-15
圖 3-3：本島東部結晶岩體三維磁感率模型立體圖.....	3-16
圖 3-4：結晶岩體深層特性調查與解析流程.....	3-20
圖 3-5：沿結晶岩體施測之地層電阻影像剖面圖.....	3-21
圖 3-6：4號井孔內4處裂隙段封塞壓力監測成果.....	3-28
圖 3-7：5號井孔內4處裂隙段封塞壓力監測成果.....	3-29
圖 3-8：6號井孔內4處裂隙段封塞壓力監測成果.....	3-30
圖 3-9：二維數值模型主要構造與模型範圍示意圖.....	3-32
圖 3-10：模型初始平衡溫度(°C)及壓力(Pa)分布計算結果.....	3-33
圖 3-11：10年內，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖.....	3-34
圖 3-12：100年時，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖.....	3-34
圖 3-13：1.0E+04年時，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖.....	3-35
圖 3-14：1.0E+05年時，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖.....	3-35
圖 3-15：模擬情境示意圖.....	3-43
圖 3-16：新鮮圍岩之岩性分類QAP圖.....	3-46
圖 3-17：新鮮圍岩及裂隙帶稀土元素分布圖.....	3-47
圖 3-18：鋯石鈾鉛定年結果圖.....	3-48
圖 3-19：DFN_OPT模擬結果.....	3-53
圖 3-20：地層特性地球物理井測井錄圖.....	3-59
圖 3-21：地層特性井測與超音波電視井錄圖.....	3-60
圖 3-22：超音波井測裂隙位態分布圖.....	3-61
圖 3-23：井下60 m至296 m之裂隙位態分布圖.....	3-62
圖 3-24：井下296 m至503 m之裂隙位態分布圖.....	3-62
圖 3-25：核種批次吸附試驗結果範例圖.....	3-66
圖 3-26：花崗岩薄片擴散實驗濃度與時間關係圖.....	3-67
圖 3-27：花崗岩塊樣品擴散實驗濃度與時間關係圖.....	3-68
圖 3-28：膨潤土-花崗岩熱應力量測試驗儀器設計圖.....	3-78
圖 3-29：膨潤土-花崗岩熱應力量測試驗儀器.....	3-78
圖 3-30：膨潤土-花崗岩熱應力量測試驗數值模型與邊界條件設置.....	3-79
圖 3-31：膨潤土-花崗岩系統熱應力量測值與數值模擬結果.....	3-79
圖 3-32：應力取樣位置說明.....	3-80
圖 3-33：不同位置熱應力變化隨時間變化關係.....	3-80
圖 3-34：緩衝材料與花崗岩交界熱應力(最大主應力)變化圖.....	3-81
圖 3-35：緩衝材料與花崗岩交界熱應變(體積應變)變化圖.....	3-81
圖 3-36： $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值分布圖.....	3-88
圖 3-37：大屯火山地區的微地震分布.....	3-88
圖 3-38：震源位置與磁力、波速比異常區對比圖.....	3-92
圖 3-39：三維波速與電阻率併合成像運算結果高程剖面圖.....	3-93

圖 3-40：各站移除平均、趨勢、年週期、地震效應之時間序列資料	3-99
圖 3-41：7年觀測時間經PCA分析後之主成分空間分布及時間序列圖	3-100
圖 3-42：台灣地區絕對海水面變遷史	3-103
圖 3-43：西南平原記錄的絕對海水面變遷史	3-103
圖 3-44：西南部構造抬升與沉陷速率分析	3-104
圖 3-45：宇宙核素 ¹⁰ Be量測得台灣造山帶的剝蝕率	3-109
圖 3-46：台灣山區既有古山崩、土石流時間序列圖	3-110
圖 3-47：東部海岸山脈各海階抬升速率分布	3-111
圖 3-48：花東中北段海岸河流沖積扇及三角洲碳14定年資料	3-112
圖 3-49：2004年數值地形剖面分析圖	3-115
圖 3-50：2008年數值地形剖面分析圖	3-116
圖 3-51：處置設施設計工作架構圖	3-126
圖 3-52：核一廠用過核子燃料組件燃耗分布圖	3-133
圖 3-53：核一廠用過核子燃料組件不同燃耗衰變熱隨時間變化趨勢圖	3-133
圖 3-54：太武山斷層井下資料幾何分析	3-134
圖 3-55：Canister參數示意圖(1)	3-147
圖 3-56：廢棄物罐外觀	3-147
圖 3-57：處置隧道與處置孔剖面	3-148
圖 3-58：地下處置設施配置圖	3-148
圖 3-59：環繞場區斜坡道設計概念圖	3-149
圖 3-60：獨立斜坡道設計概念圖	3-149
圖 3-61：地下水流解析解及數值解驗證結果	3-179
圖 3-62：緩衝材料一維概念模型示意圖	3-179
圖 3-63：熱-水-化耦合概念模型與邊界條件設定	3-179
圖 3-64：緩衝材料溫度模擬結果	3-180
圖 3-65：緩衝材料壓力模擬結果	3-180
圖 3-66：I-129於緩衝材料中傳輸模擬結果	3-181
圖 3-67：Cs-135於緩衝材料中傳輸模擬結果	3-181
圖 3-68：熱-水-力耦合分析概念模式與邊界條件	3-182
圖 3-69：近場緩衝材料的熱-水-力耦合模式	3-183
圖 3-70：近場緩衝材料數值網格變形分布圖	3-184
圖 3-71：FLAC ^{3D} 網格邊界束制示意圖	3-184
圖 3-72：監測點位置圖	3-185
圖 3-73：主隧道掘進之頂拱處監測點C, F之掘進應變曲線	3-185
圖 3-74：主隧道掘進之側壁處監測點7, 8之掘進應變曲線	3-185
圖 3-75：處置孔掘進之仰拱處監測點A, B對處置孔1, 2之掘進應變曲線	3-186
圖 3-76：處置孔掘進之仰拱處監測點D, E對處置孔1, 2之掘進應變曲線	3-186
圖 3-77：FLAC ^{3D} 網格邊界束制示意圖	3-187
圖 3-78：處置孔中各位置簡示	3-187
圖 3-79：不同間距雙處置孔溫度與距離關係(1.5年)	3-188
圖 3-80：不同間距之雙處置隧道溫度與距離關係(1.5年)	3-188
圖 3-81：不同間距雙處置孔與平行y軸之水平力關係圖	3-189
圖 3-82：不同間距雙處置孔與平行y軸之水平力關係圖	3-189
圖 3-83：不同間距雙處置孔與垂直力關係圖	3-189

圖 3-84：不同間距雙處置隧道與垂直力關係圖	3-190
圖 3-85：頂拱區域角度定義示意圖	3-190
圖 3-86：H區與K區之頂拱區域在不同覆蓋深度下對安全係數vs頂拱角 度	3-191
圖 3-87：隧道側壁區域各點位定義示意圖	3-191
圖 3-88：H區與K區之隧道側壁區域在不同覆蓋深度下對安全係數vs側 壁點位	3-192
圖 3-89：臨界安全深度定義示意圖	3-193
圖 3-90：廢棄物罐及緩衝材料間之氫氣累積量	3-193
圖 3-91：水力傳導係數升尺度概念	3-206
圖 3-92：二維量測裂隙強度示意圖	3-206
圖 3-93：初始母岩體模擬範圍	3-207
圖 3-94：母岩岩體外部裂隙圓盤	3-207
圖 3-95：母岩岩體內部裂隙圓盤與離散裂隙網路網格	3-207
圖 3-96：琉球海溝與馬尼拉海溝及研究區地形資料圖	3-214
圖 3-97：各情境最大波高圖	3-215
圖 3-98：各情境觀測點水面高度資料	3-216
圖 3-99：HP溪流域年平均土壤沖蝕深度分布	3-222
圖 3-100：HP溪流域之野溪坑溝計算集水區劃分成果	3-222
圖 3-101：1920年研究區東方近海的琉球海溝模型	3-227
圖 3-102：國內用過核子燃料案例之核種存量活度及衰變熱分布	3-235
圖 3-103：國內用過核子燃料關鍵核種篩選流程	3-235
圖 3-104：分裂產物及活化產物最終處置後放射毒性隨時間變化	3-236
圖 3-105：用過核子燃料放射毒性與天然鈾礦之比較	3-236
圖 3-106：嚥入農產品曝露途徑之通量劑量轉換係數	3-245
圖 3-107：農耕曝露群體之通量劑量轉換係數	3-245
圖 3-108：釜石礦坑內花崗閃長岩基質導水裂隙內的U-238衰變序列剖 面	3-255
圖 3-109：埋於海底黏土的古銅砲	3-255
圖 3-110：古銅砲的腐蝕過程	3-256
圖 3-111：十三行博物館的考古遺址模型	3-256
圖 3-112：十三行遺址出土之鐵製刀形器	3-256

表目錄

	頁次
表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年).....	1-6
表 2-1：SNFD2017報告預定章節.....	2-2
表 3-1：離島結晶岩體6口鑽井已完成試驗項目彙整表.....	3-27
表 3-2：C-C'剖面數值模擬所需主要環境參數列表.....	3-31
表 3-3：C-C'剖面數值模擬所需主要水文地質參數列表.....	3-31
表 3-4：現場與模擬結果之裂隙密度.....	3-52
表 3-5：本島結晶岩體岩心室溫下物理性質、熱特性及力學性質表.....	3-73
表 3-6：室內試驗尺度基本案例模擬熱-力學參數.....	3-77
表 3-7：處置系統尺度模擬熱-力學參數.....	3-77
表 3-8：我國潛在處置母岩長期穩定性比較表.....	3-83
表 3-9：西南平原區鑽井岩心紀錄構造沉陷速率.....	3-101
表 3-10：SNFD2017報告關鍵核種評估之計算假設.....	3-131
表 3-11：K區岩石特性.....	3-132
表 3-12：BWR型與PWR型廢棄物罐各組件重量.....	3-146
表 3-13：熱-水-化耦合數值模式之熱與水參數設定表.....	3-172
表 3-14：熱-水-化耦合數值模式之化學參數設定表.....	3-172
表 3-15：熱-水-力耦合模式參數整理表.....	3-173
表 3-16：三維網格整體模型參數表.....	3-174
表 3-17：數值分析之參數(輸入RMR及 σ_c 再由FLAC ^{3D} 輸出).....	3-174
表 3-18：主隧道掘進完成後之應變位移量監測值.....	3-174
表 3-19：處置孔掘進完成後之應變監測值.....	3-175
表 3-20：處置孔掘進完成後之應變增幅量.....	3-175
表 3-21：主隧道應力變化量.....	3-175
表 3-22：處置孔2之應力變化增幅表.....	3-176
表 3-23：處置孔1之應力變化增幅表.....	3-176
表 3-24：模擬深層岩體之參數性質.....	3-177
表 3-25：雙處置孔不同間距下於不同研究區之臨界安全深度表.....	3-177
表 3-26：不同覆蓋深度與研究區所對應之修正(折減)係數.....	3-177
表 3-27：各研究區岩石材料參數表.....	3-178
表 3-28：緩衝材料之氣體突破壓力試驗結果.....	3-178
表 3-29：相同試體之水力傳導係數試驗結果.....	3-178
表 3-30：初始含水量試體於不同溫度環境下之體積收縮量.....	3-178
表 3-31：離散裂隙網路網格生成測試例重要參數.....	3-205
表 3-32：過去100年之3大地震參數.....	3-213
表 3-33：情境參數資料.....	3-213
表 3-34：今村與飯田海嘯規模分級表.....	3-213
表 3-35：HP溪域重大崩場地統計.....	3-221
表 3-36：本研究34個重要核種之ICRP 119號報告吸入及嚥入劑量係數 DCF與目前國內頒布標準之比較.....	3-234

表 3-37：參考案例Olkiluoto中主要核種之溶解度限值-廢棄物罐、緩衝 材料、回填材料、參考案例.....	3-239
表 3-38：參考案例Olkiluoto重要核種分配係數 K_d 擴散係數 D_e 緩衝材料及 回填材料.....	3-240
表 3-39：參考案例Forsmark中主要核種之溶解度.....	3-241
表 3-40：參考案例Forsmark中主要核種之分配係數(K_d) [m^3/kg].....	3-242

1. 概述

我國自 1978 年(民國 67 年)開始利用核能發電，迄今共有核一、二、三廠的六部核能機組，龍門計畫(龍門電廠)因國內政策轉變，預計將進行封存工作，一號機完工進行封存，二號機停工。其中，核一、二廠四座機組為沸水式，核三廠兩座機組為壓水式，龍門電廠兩部則為進步型沸水式反應器。預估此三座核能電廠的六部機組運轉 40 年將會產生約 5,048 公噸鈾的用過核子燃料。

用過核子燃料是指在核子反應器燃燒到無法再有效地支持核分裂反應且被移出反應器的核子燃料；高放射性廢棄物指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物。高放射性廢棄物具有相當高之放射性，會釋放大量的衰變熱，所含之放射性核種中，如 ^{99}Tc 、 ^{135}Cs 、 ^{129}I 等分裂產物及 ^{237}Np 、 ^{239}Pu 、 ^{243}Am 及 ^{247}Cm 等鈾系核種，其半衰期長達數十萬年，且部分核種為阿伐發射體，對人體具長期潛在的輻射危害，因此審慎尋找共同認可的處置方式，確保高放射性廢棄物可以長期摒除在可能影響人類目前生活環境之外，一直是核能技術發展的重點之一。

用過核子燃料最終處置的基本要求是選擇適當的環境，將用過核子燃料永久安置，使其與人類生活圈隔離，以確保民眾安全及環境品質，促進非核害環境的永續發展。海床處置、深孔處置、冰層處置、井注處置、太空處置及深層地質處置是幾種曾被各國考慮的處置方案。上述這些方案經過國際間多年的研究後，一般咸認「深層地質處置」是較為可行的一種處置方式。而所謂的「深層地質處置」係採用「多重障壁」的概念，利用深部岩層的隔離阻絕特性，將用過核子燃料埋存在深約 300 至 1000 m 的地下岩層中，再配合包封容器、緩衝回填材料等工程設施——藉由人工與天然障壁所形成的多重屏障系統，可以有效使外釋而遷移的核種受到隔離與阻絕的效果，以換取足夠的時間，讓用過核子燃料的輻射強度在影響人類目前生活環境之前已衰減至法令規定所容許的限值。

我國用過核子燃料處置之推動，係依「用過核子燃料最終處置計畫書(2006年核定版)」之擬定時程及規劃，切實執行境內最終處置之技術發展及處置設施的籌建工作。本階段(2005~2017年)為「潛在處置母岩特性調查與評估」階段，預計規劃達成2個重要里程碑：(1)於2009年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告」(簡稱SNFD2009報告)；(2)於2017年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(簡稱SNFD2017報告)」。

目前已完成近程工作主要目標——彙整過去長程計畫研發成果與蒐集國內外相關資料，於2009年提出SNFD2009報告，該報告內容涵蓋「處置環境條件的調查研究」、「處置技術的研究發展」、「用過核子燃料處置的功能評估」等技術發展成果，並於2010年7月獲原能會同意核備。台電公司依核備之SNFD2009報告內容，據以修訂並完成「用過核子燃料最終處置計畫書(2010年修訂版)」。

在過去幾年中，潛在母岩特性調查技術之發展重點，集中於建立結晶岩體測試區特性調查與評估相關之處置技術發展，總計在結晶岩測試區完成約500點地表重/磁力探測、16 km地電阻剖面探測、3000 m(6孔)地質鑽探，及地物/水文/地化/岩力等各式孔內探測作業，並透過整合性的地質、地物、水文、水化學及環境資料解析，建構出結晶岩測試區初步地質概念模式。期能透過各項技術整合性的驗證，供功能/安全評估技術之發展，以完備現地調查至功能評估的整體作業流程。

根據SNFD2009報告(台電公司，2010)的研究結果顯示：台灣地區活動構造、地震、火山活動及地質災害均有其侷限分布的特性；除了離島結晶岩體具備長期地質穩定特性外，過去認為位於板塊邊界之本島結晶岩體，根據最新研究顯示可能近百萬年來，已邁入相對穩定地塊的地質環境條件。且因其地質及構造特性可能與離島結晶岩類似，故在後續的潛在處置母岩調查工作中，將加強本島結晶岩體穩定性的研究。初期進行岩體規模、分布與主要構造帶延伸等資訊的調查研究，以取得後續驗證所必要之基礎數據；同時將已成熟應用於離島結晶岩體之調查研究技術，移轉應用於本島結晶岩體特性調查中，逐

步發展熱、水、力、化特性相關之調查與評估技術，並進行各項特性升尺度效應探討，藉以取得完整地下岩體調查數據，以利後續本島結晶岩體穩定性評估工作之進行。

自1986年推動我國用過核子燃料長程處置計畫，及至2005年依物料管理法推動我國用過核子燃料最終處置計畫，依規劃自2005年至2014年底之計畫成果分別摘述於表 1-1 (2005-2014年)。目前，我國用過核子燃料處置之推動，係依「用過核子燃料最終處置計畫書(2010年修定版)」之擬定時程，切實執行境內最終處置之技術發展及處置設施的籌建工作。依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2010年修定版)」之規劃，2005年至2017年為「潛在處置母岩特性與調查評估」階段。此階段任務的2個重要里程碑為於2009年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告」(簡稱SNFD2009報告)，以及於2017年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(簡稱SNFD2017報告)」。

目前已完成近程工作主要目標——彙整過去長程計畫研發成果與蒐集國內外相關資料，於2009年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(簡稱SNFD2009報告)」，該報告內容涵蓋「處置環境條件的調查研究」、「處置技術的研究發展」、「用過核子燃料處置的功能評估」等技術發展成果，於2010年7月獲原能會同意核備，並上網公告。台電公司依核備之SNFD2009報告內容，據以修訂「用過核子燃料最終處置計畫書2010年修訂版」，於2011年1月獲原能會核定公告。目前根據迄2014年本計畫完成之成果與因應SNFD2017報告架構之方案，修訂「用過核子燃料最終處置計畫書2014年修訂版」，相關審查正進行中。

根據SNFD2009報告的研究結果顯示：台灣地區雖處於地質不穩定帶，但活動構造、地震、火山活動及地質災害均有其侷限分布的特性；除了離島結晶岩體具備長期地質穩定特性外，本島之結晶岩體根據最新研究顯示，為臺灣地區相對穩定之地塊(台電公司，2010)。因此，在後續的潛在處置母岩調查工作中，將加強本島結晶岩體穩定性的研究，並取得其岩體規模、分布與主要構造帶延伸之進一步資訊。

在過去幾年中，台灣電力公司將潛在母岩特性調查技術之發展重點，集中於離島結晶岩體測試區之處置技術發展，期能透過各項技術的整合性驗證，取得關鍵技術的能力與成果，以及測試區的地質特性參數、構造及建構初步地質概念模式，供功能/安全評估技術發展應用，以完備現地調查至功能評估的整體作業流程。在此技術基礎上，進一步展開本島結晶岩體深層地質特性調查，並加強地殼變動(地震、斷層、抬升、沉陷、侵蝕與剝蝕等作用)、火山活動、氣候變遷與海平面升降等調查工作，以期累積本島潛在處置母岩長期穩定性評估之關鍵資訊。

本計畫後續工作規劃，依據原能會要求以日本核燃料循環開發機構(JNC)於平成12年完成之「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ」報告(以下簡稱H12報告；JNC, 2000a)為參考依據，持續進行本島結晶岩處置母岩特性調查，同時進行處置工程技術及變異情節之功能/安全評估技術的初步發展工作，以期達成潛在處置母岩特性調查與評估階段目標，準時於民國106年底提出「SNFD2017報告」，將確認(1)我國是否有合適處置母岩，(2)我國是否已齊備關鍵處置技術。原子能委員會要求SNFD2017報告應達成我國用過核子燃料處置計畫的3項階段性目標(2011年2月22日會議紀錄)包括：

- (1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置；
- (2) 地質處置技術能力是否完備；
- (3) 地質處置設施長期安全性之評估。

為達成此任務，本計畫需逐步完成我國結晶岩(包含花崗岩)潛在母岩特性的調查與評估、建置深層結晶岩體地質概念模式，以及本土化變異情節之功能/安全評估技術的研發，作為撰寫SNFD2017報告的重要參考依據。

日本於2011年3月11日因宮城縣外海發生規模9.0大地震，此一震災與海嘯致使東京電力公司福島第一核能電廠發生核災事故，日本原子力安全保安院(Nuclear and Industrial Safety Agency)於4月12日將

此事故升至國際核事件分級表第七級，此為史上第2個列為第七級的核事故，也是第一個發生在沿海的核事故。殷鑑於日本311核災，許多國家的核能發展政策，與核廢棄物處置策略均重新檢討。日本展開長期救災行動，根據其新聞發布顯示，將擬訂計畫於10年內拆除受災關廠的核電廠設施。此外，於2014年重組專責機構(NUMO)及研發機構(JAEA)，以期針對福島核災之救災工作，落實高放射性廢棄物最終處置計畫時程，於2025年開始建造最終處置場至2035年運轉。

而我國亦於長期核安考量，均需如期推動用過核子燃料最終處置計畫，落實地質處置長程技術發展。根據已核備、公告之期程規劃，現階段尚未涉及選址作業，主管機關要求以日本H12報告為參考依據，在無特定場址條件下，必須於2017年提出提出SNFD2017報告，以確認國內是否具有地質處置相關技術能力。

有鑑於此，故目前在無特定場址條件下，持續進行全國環境地質(大地構造)、地質合適性調查(火山、斷層活動、地殼抬升或沈陷、氣候及海平面變遷等影響因子)並建立相關深層地質調查及安全評估技術，逐年累進成果，如期達成2017年階段目標。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查與評估階段 (2005~2017)- 潛在處置母岩特性調查 (94~96年度計畫)	2005/12~2007/12	能源與環境研究所 核能研究所	(1) 處置母岩分布： 針對P區、S區及H區潛在處置母岩，進行空中磁測飛航作業，以掌握大範圍地下潛在處置母岩分布及主要地質構造特徵。 (2) 深層特性調查方面： 進行結晶岩質潛在母岩測試區岩體邊界之井下地質、構造、地球物理、水文地質、地球化學特性的現地調查與試驗工作，獲得岩體之地下地質特性及邊界資訊，以建立功能/安全評估驗證所需之初步地質概念模式。 (3) 地質穩定性調查方面： 針對主要潛在處置母岩進行地質環境穩定性相關資料的蒐集與彙整工作，以地理/地質資訊系統展現調查結果。 (4) 裂隙特性參數化方面： 透過小規模試驗場裂隙特性的調查與研究工作，包含跨孔追蹤稀釋試驗、孔內裂隙壓力監測、裂隙特性研究等工作，取得試驗場之裂隙分布特性及參數值，並據以發展與驗證核種傳輸所需之裂隙構造模式。 (5) 核種傳輸與緩衝回填材料試驗： (a) 以國內潛在母岩岩樣及緩衝材料，進行核種在回填材料(花崗岩/石英砂/膨潤土)之化學穩定性及傳輸特性。 (b) 於管柱擴散實驗結果則顯示，在好氧及厭氧條件下，銫(Cs)和硒(Se)在花崗岩的傳輸行為。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (97-99年度計畫)	2008/11~2010 /07	綠能與環境研究所	(1) 潛在處置母岩特性調查： 進行結晶岩深層地質特性資料的蒐集與調查，並與泥岩及其他母岩進行比較，顯示現已發展調查技術可應用於結晶岩母岩深層地質特性調查，並發現結晶岩具較佳的長期穩定性。 (2) 地下水現地試驗及概念模式： 進行結晶岩測試區之井下試驗與跨孔追蹤稀釋試驗，建立小規模試驗場裂隙特性的基礎模式。 (3) 區域性地下水量估算技術發展： 於小規模試驗場深井中進行相關參數之試驗，蒐集區域範圍深井長期觀測之裂隙壓力變化資料，以建立本土花崗岩區域地下水量估算技術。 (4) 潛在處置母岩空中磁測解析： 完成結晶岩質、泥岩質及中生代基盤岩質等潛在處置母岩全磁力網格(TMIGrid)的資料處理，包括濾波、歸極換算、向上/下延伸、微分處理、最小二乘法趨勢面移除等，以製作判釋岩體及構造所需之磁力異常圖幅。 (5) 核種傳輸試驗： (a) 進行實驗室核種遷移與緩衝材料試驗，包括厭氧環境下，膨潤土對Cs、Se核種不同溫度條件的吸附特性，以提供功能評估案例說明所需的基礎模式及本土數據。 (b) 建置與維護核種吸附試驗資料庫管理系統。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查與評估階段 (2005~2017)- 發展功能/安全評估 (99-101年度計畫)	2008/11~2010/11	核能研究所	(1) 用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析 (a) 分析各種再處理方法，並其產生高放射性廢棄物的物理化學特性；根據國內用過核子燃料數量推估經再處理後產生高放射性廢棄物的數量、核種存量與衰變熱特性； (b) 分析比較各國處置場型式、人工障壁功能與天然障壁概念的差異。 (c) 彙整我國處置場設計準則及設計需求，擬定我國高放射性廢棄物處置之初步參考概念。 (2) 用過核子燃料最終處置系統整合模式評估與案例分析 (a) 分析與探討國內外安全評估參數之適用性與合理性，完成近場、遠場及生物圈評估模式之基本情節案例(I、II)(包含RT-NV、ART-NV及ART-NH評估模式案例)之核種外釋評估分析。 (b) 進行國際間機率式分析之文獻評析、評估參數之彙整、核種外釋之機率式運算(近、遠場多重運跑)及結果分析(百分位數曲線分析)。 (c) 以累積分布曲線分析釋出率峰值之不確定性，並以迴歸分析探討影響總釋出率峰值之重要敏感參數。 (d) 進行近場二維評估程式之參數取樣及排列功能檢視及確認，對近場二維評估程式新增參數進行參數資訊彙整，並在多重運跑架構中進行機率式運算及敏感度分析。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (99-101年度計畫)	2010/11~2013 /05	綠能與環境研究所 核能研究所	(1) 處置環境條件的調查研究： (a) 鑽探與井下量測 完成本島東部結晶岩第一口500 m深取岩心地質探查井之設置，及完成岩心井錄與地球物理標準井測，獲取本島東部結晶岩之岩性特徵、構造特性、不連續面類型、裂隙型態與角度，以及裂隙充填物等基本資訊。 (b) 區域岩層與構造分布測勘 建立空中磁測三維構造及岩體規模解析能力，並進行現地大地電磁測勘，取得地質實驗室鄰近地區之地下三度空間的地質與含水層構造分布資訊。 (c) 地殼變動監測 完成東部結晶岩體首度建置之地震監測站及GPS連續觀測站，獲取本島東部結晶岩體與其鄰近構造接觸帶的實際位移觀測數據，並完成其地震危害度之初步評估。 (d) 區域深層地下水特性調查 完成離島測試區3口大區域深井(均達500 m深)之裂隙封塞壓力監測系統安裝，持續進行區域性井下裂隙帶壓力的長期監測，計算各深度裂隙之壓力梯度。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (99-101年度計畫)	2010/11~2013 /05	綠能與環境研究所 核能研究所	(e) 岩水反應地化分析 獲取離島結晶岩裂隙水質長期監測資料，取得岩心之完整與破裂帶岩樣的岩象分析、全岩地化組成、礦物組成分析數據。 (f) 處置環境調查成果彙編 完成SNFD2009報告審查、核定及公告作業；完成離島花崗岩地區之階段調查成果(1999-2012)彙編。 (2) 處置技術的研究發展 (a) 岩塊熱效應 完成岩塊熱傳導係數量測及熱效應數值模擬；進而完成緩衝回填材料實驗試驗儀器之組裝，據此完成岩塊熱效應室內試驗及熱應力數值模擬。 (b) 地下水地球化學演化 依據離島結晶岩現地裂隙水質長期監測資料，完成U、Cu和Fe元素在離島測試區深層地下水之水質條件下的Eh(pe)-pH穩定相圖繪製，以及溶解度模擬計算。 (c) 核種特性分析 完成離島結晶岩岩樣之實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗，獲致放射性或非放射性Cs及Se好厭氧條件下之吸附動力學參數；完成離島結晶岩核種吸附特性的研究及模擬分析，與礦物成分核種吸附特性分析；更新傳輸參數資料庫。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014 年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (99-101年度計畫)	2010/11~2013 /05	綠能與環境研究所 核能研究所	(d) 地質實驗室規畫 完成地質實驗室特性調查技術發展規劃，作為後續地質實驗室特性調查工作推動之依據。 (e) 坑道裂隙測勘技術 建立取得坑道裂隙特性參數及裂隙分布之調查技術。 (f) 裂隙參數化與模擬技術 完成小規模試驗場結晶岩深層地質之裂隙連通性與透水係數分布等分析工作；完成離島結晶岩坑道裂隙量測，並發展整合離散裂隙網路之3D裂隙結構模擬及自動驗證模組。 (g) 近場環境緩衝材料特性 進行國際間處置場近場環境緩衝材料特性之探討。 (h) 近場二維程式參數取樣及多重運跑技術建立 完成近場二維評估程式之機率式分析技術，以垂直分率及回填材料孔隙率等新增參數進行參數取樣，探討對核種釋出率造成之不確定性範圍。 (i) 用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析 完成高放射性廢棄物(HLW)活度與衰變熱分析；以參考處置概念為基礎，建立處置場之設施需求與處置隧道配置，研擬我國初步 HLW 地下處置場所需之空間。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (99-101年度計畫)	2010/11~2013 /05	綠能與環境研究所 核能研究所	(3) 用過核子燃料處置的功能評估 (a) 用過核子燃料最終處置系統整合模式評估與案例分析 完成生物圈機率式分析結果之後續參數敏感度分析，以階步迴歸分析來探討生物圈總輻射劑量率峰值之參數敏感度。 (b) 最終處置概念模式與變異情節之研究 洪水與地震活動對處置場或地下設施之影響分析。 (c) 近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之研究 完成近場核種遷移行為模擬所需考量之影響因素與模擬特性概念；近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為之模擬技術建立。 (d) 功能與安全評估發展歷年研究成果彙編 進行功能與安全評估發展歷年研究成果彙編。
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (101-103年度計畫)	2013/02~2015 /02	綠能與環境研究所 核能研究所	(1) 地質環境 (a) 區域環境地質 (i) 更新本島結晶岩體規模與大地構造架構相關地質環境資訊。 (ii) 獲致本島結晶岩體的磁力與地電探勘數據，提供後續計畫進行深層地質與構造解析。 (b) 深層地質特性 (i) 水文地質： 獲致離島結晶岩體裂隙水壓長期變化趨勢；

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年)(續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (101-103年度計畫)	2013/02~2015 /02	綠能與環境研究所	根據現地量測資料完成二維水文地質數值模型與流場；並於沉積岩區井群進行學研合作，完成井下封塞試驗與水文地球化學特性試驗。 (ii) 水文地球化學： 蒐集與彙整國際處置技術之地化反應模擬資訊，與本土案例進行比較，提供後續計畫規劃岩-水反應機制模擬參考；進行本島結晶岩岩礦特性組成分析，提供後續裂隙內岩-水反應基礎資料。 (iii) 核種傳輸路徑： 建構裂隙網路結構解析技術，獲致坑道裂隙參數及特性模擬成果，作為後續裂隙網路地下水流場數值模式之基礎；完成本島結晶岩井下裂隙之井錄資料與孔內攝影綜合解析，獲致裂隙分布與特性等資訊，可作為後續岩體特性分析之參考依據；持續建立本土結晶岩核種傳輸試驗技術，取得吸附與擴散參數。 (iv) 岩石特性： 完成本島結晶岩室溫下物性、熱、力學試驗之參數特性，持續進行不同溫度試驗中；坑道內裂隙變形監測裂隙位移之技術建立；完成實驗室內膨潤土與岩塊熱-力學試驗與模擬。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年)(續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 潛在母岩特性調查 (101-103年度計畫)	2013/02~2015 /02	綠能與環境研究所	(c) 地質處置合適性研究 (i) 台灣的大地構造架構 在火山活動方面，完成台灣大地構造架構及演化資料收集，以及火山活動特性與時空分布文獻回顧；在斷層活動方面，監測本島結晶岩體地震帶與地震相對安靜帶特性，並利用震波成像技術建構地殼結構，探討地震相對安靜帶分布關係。 (ii) 抬升與沉陷作用 在台灣抬升/沉陷特性方面，持續累積結晶岩體上GPS連續監測記錄，完成定期水準網測量，解析區域性地殼變動紀錄；在剝蝕作用方面，進行東部結晶岩代表性岩體低溫年代學資料彙整與剝蝕作用分析，以及河階、海階定年對抬升率、沉陷率及剝蝕率之經典案例分析。 (iii) 氣候與海平面變遷 完成東部結晶岩代表性河域沖積扇之數值地形模式及震測剖面分析，獲得河域受海平面上升與河口堆積之地形演變證據。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 發展功能/安全評估技術 (102-104年度計畫)	2013/11~2015 /11	核能研究所	(2) 工程障壁系統設計與穩定性研究 (a) 影響處置概念的因子 根據現有母岩調查資料，彙整影響處置概念之設計因子，包括地質與地形條件、處置母岩特性、以及熱與放射性等相關因子。 (b) 工程障壁系統設計需求 初步針對我國處置概念，進行廢棄物罐、緩衝材料、回填材料之工程障壁功能需求研究。 (c) 工程障壁的穩定性 (i) 進行處置設施熱-水-化與熱-水-力現象研究，已完成相關文獻資料之蒐集與整理，進行理論架構探討，並進行數值模型的案例驗證。 (ii) 處置設施開挖擾動帶之力學特性研究，已完成處置設施開挖擾動影響之相關文獻探討，並以FLAC^{3D}進行案例分析。 (iii) 工程障壁熱力-力學穩定性研究，已建立處置設施熱-力行為分析模型，及初步分析不同處置孔間距之溫度場與應力場分析。 (iv) 深層地下設施受震穩定性之研究，利用有限元素軟體ABAQUS建立地下空間之二維模擬網格，並使用H區及K區地質材料參數，評估在不同覆蓋深度下，進行建造階段之靜態穩定安全分析。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年) (續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 發展功能/安全評估技術 (102-104年度計畫)	2013/11~2015 /11	核能研究所	(d) 膨潤土特性 探討緩衝材料在處置孔中，乾縮收縮特性、塊體接合特性及膠體滲濾等研究，做為未來處置場工程障壁性能研究試驗規畫之參考。 (e) 氣體遷移特性 探討包封容器內的氣體生成成因、近場環境的氣體擴散及傳輸行為，成果作為緩衝材料氣體傳輸試驗規劃的依據。 (3) 安全評估 (a) 地質處置系統特性 完成裂隙統計模式與離散裂隙生成模式之回顧、評析與比較，離散裂隙網路模式網格生成與案例測試。 (b) 擾動情節 (i) 以6種假設情境進行研究區域海嘯影響探討，發現假設琉球海溝破裂長度超過800 km，寬度100 km，滑移距離20 m，地震矩規模 9.1 M_w的3種假設情境，才會對研究區域可能造成相當的災害影響。 (ii) 以研究區域歷年逕流量特性進行分析，發現僅連續型颱風豪雨事件才會造成極端高逕流，而土石流發生潛勢評估發現研究區下游集水區為低或中潛勢，中上游集水區受高崩塌率及坡度陡峭等影響，具中或高潛勢。

表 1-1：用過核子燃料最終處置計畫成果摘要(2005~2014年)(續)

階段名稱	執行期間	參與單位	工作成果摘要
潛在處置母岩特性調查 與評估階段 (2005~2017)- 發展功能/安全評估技 術 (102-104年度計畫)	2013/11~2015 /11	核能研究所	(c) 隔離失效情節 完成研究區地質環境與附近發震構造分析，探討地震對研究區域影響。 (d) 案例分析 (i) 分析分裂產物(如Cs-137、Sr-90、Cs-135、Tc-99及I-129等)及錒系核種及其衰變子核隨時間其活度變化趨勢。將ICRP(2012)第119號報告中，最新的DCF參數完成建檔。 (ii) 彙整近場與遠場核種重要特性與參數資料，包括分配係數、擴散係數等 (iii) 完成各國使用的不確定性分析技術進展和國內不確定性分析技術應用近況之研究。 (e) 安全評估的可信度 探討國際間相關天然類比資訊，並歸類為地質處置的天然類比、處置容器材料天然類比、膨潤土材料天然類比和國內可能的天然類比等，以提供安全評估可信度說明之參考的依據。

(資料來源：我國用過核子燃料最終處置計畫書2010年修訂版；新增資料摘自本報告書成果摘要)

2. 計畫目的

本計畫目前於「潛在處置母岩特性調查與評估」階段(2005~2017年)中，依照用過核子燃料最終處置計畫書規劃推動研發工作，現階段目標是於2017年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(簡稱SNFD2017報告)；該技術可行性評估報告，將依據調查成果評估處置關鍵技術發展之可行性，作為最終處置計畫下階段工作規劃之基礎。

為順利達成「潛在處置母岩特性調查與評估階段(2005~2017年)」之任務目標—於民國106年底提出「SNFD2017報告」，台電公司自102年度起即依照SNFD2017報告之預定章節(表2-1)中的3大工作主軸：地質環境(第3章)、處置設計與工程技術(第4章)、安全評估(第5章)，進行相關研究/調查工作之規劃，並逐年說明工作之進度與成果。

表 2-1：SNFD2017報告預定章節

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
1. 台灣用過核子燃料管理策略與處置計畫	I. High-Level Radioactive Waste Management in Japan
1.1 緣起	1.1 Utilization of nuclear energy and generation of HLW
	1.1.1 Nuclear energy production and the nuclear fuel cycle
	1.1.2 Characteristics of HLW
1.2 管理	1.2 Management of HLW
	1.2.1 Fundamental principles
	1.2.2 Selection of geological disposal
1.3 執行策略	1.3 Geological disposal program for HLW
	1.3.1 General background to research and development
	1.3.2 The second progress report on research and development for HLW disposal: H12
2. 處置系統與安全概念	II. The Geological Disposal System and the Safety Concept
2.1 各國處置系統概念概述	2.1 Worldwide evolution of the geological disposal concept
2.2 我國處置系統概念概述	2.2 The Japanese geological disposal concept
2.3 安全案例概述	2.3 Components of the safety case
	2.3.1 Definition of safety goals
	2.3.2 Demonstrating the feasibility of disposal
3. 地質環境	III. The Geological Environment of Japan
3.1 區域環境地質	3.1 Introduction
3.1.1 地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性	3.1.1 The role of the geosphere in HLW disposal
3.1.2 台灣地質環境特徵	3.1.2 Geological setting of Japan
3.2 深層地質特性	3.2 Geosynthesis
3.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性	3.2.1 Characteristics of the geosphere of importance to the multibarrier concept
3.2.2 水文地質	3.2.2 Hydrogeology
3.2.3 水文地球化學	3.2.3 Hydrogeochemistry
3.2.4 核種傳輸路徑	3.2.4 Transport pathways
3.2.4.1 流通路徑的定義	3.2.4.1 Definition of flow pathways

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
3.2.4.2 流通路徑參數的定義	3.2.4.2 Definition of flow pathway parameters
3.2.4.3 基質的擴散效應	3.2.4.3 Matrix diffusion
3.2.5 岩石特性	3.2.5 Lithological properties
3.3 地質處置合適性研究	3.3 Feasibility of siting a HLW repository in Japan
3.3.1 台灣用過核子燃料地質處置之地質圈特性	3.3.1 Features of the geosphere of specific relevance to HLW disposal in Japan
3.3.2 台灣的大地構造架構	3.3.2 Tectonic setting of Japan
3.3.2.1 火山活動	3.3.2.1 Volcanism
3.3.2.2 斷層活動	3.3.2.2 Faulting
3.3.3 抬升與沉陷作用	3.3.3 Uplift and subsidence
3.3.3.1 台灣抬升/沉陷特性	3.3.3.1 Features of uplift/subsidence in Japan
3.3.3.2 剝蝕作用	3.3.3.2 Denudation
3.3.4 氣候與海平面變遷	3.3.4 Climatic and sea level changes
3.4 結論	3.4 Conclusions
4. 處置設計與工程技術	IV. Repository Design and Engineering Technology
4.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力	4.1 Objectives of H12 with respect to design and engineering
4.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能	4.2 Role of the EBS and the host rock in geological disposal concepts
4.3 整體處置概念	4.3 Outline disposal concept
4.3.1 工程障壁系統	4.3.1 EBS components
4.3.2 處置設施	4.3.2 Emplacement configuration
	4.3.3 The disposal facility
	4.3.4 Concept for disposal panels and panel layout
4.4 設計流程	4.4 Design methodology
4.5 影響處置概念的因子	4.5 Factors influencing the disposal concept
4.5.1 熱與放射性	4.5.1 Heat production and radioactivity
4.5.2 地質與地形條件	4.5.2 Geological and topographic conditions
4.5.3 處置母岩特性	4.5.3 Properties of the host rock
	4.5.3.1 Mechanical properties

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
	4.5.3.2 Thermal properties
	4.5.3.3 Hydraulic properties
	4.5.3.4 Chemical properties
4.5.4 處置深度	4.5.4 Disposal depth
	4.5.4.1 Long-term safety
	4.5.4.2 Characteristics of the geochemical environment
	4.5.4.3 Current construction and investigation technologies
	4.5.4.4 Mechanical stability of tunnels
	4.5.4.5 Thermal stability of the EBS
4.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求	4.6 Design requirements of the EBS and disposal facility
4.6.1 廢棄物罐	4.6.1 Overpack
	4.6.1.1 Corrosion resistance
	4.6.1.2 Pressure resistance
	4.6.1.3 Radiation shielding
	4.6.1.4 Thickness of the overpack
	4.6.1.5 Manufacture of the overpack
	4.6.1.6 Composite overpacks
4.6.2 緩衝材料	4.6.2 Buffer
	4.6.2.1 Thermal properties
	4.6.2.2 Hydraulic properties
	4.6.2.3 Mechanical properties
	4.6.2.4 Chemical properties
	4.6.2.5 Gas permeability
	4.6.2.6 Buffer specifications
	4.6.2.7 Installation and quality control
4.6.3 工程障壁的規格與配置	4.6.3 Specifications and emplacement of the EBS
4.6.4 地下設施	4.6.4 Disposal drifts and underground facilities
	4.6.4.1 Mechanical stability and dimensions of the disposal drifts
	4.6.4.2 Disposal drift spacing and waste form pitch

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
	4.6.4.3 Excavation disturbed zone
4.6.5 回填與封塞	4.6.5 Backfilling and sealing
4.6.6 處置場設計	4.6.6 Repository layout
4.7 工程障壁的穩定性	4.7 Integrity of the EBS
4.7.1 再飽和特性	4.7.1 Resaturation
4.7.2 力學穩定特性	4.7.2 Mechanical stability
	4.7.2.1 Rock creep
	4.7.2.2 Overpack corrosion product expansion
	4.7.2.3 Overpack sinking
4.7.3 受震穩定性	4.7.3 Seismic stability
4.7.4 氣體遷移	4.7.4 Gas migration
	4.7.4.1 Diffusion of dissolved hydrogen
	4.7.4.2 Gas migration
4.7.5 膨潤土特性	4.7.5 Extrusion of bentonite
4.8 建造/運轉/封閉技術	4.8 Construction, operation and closure
4.8.1 建造階段	4.8.1 Construction phase
	4.8.1.1 Construction technologies
	4.8.1.2 Countermeasures against perturbations
4.8.2 運轉階段	4.8.2 Operational phase
	4.8.2.1 Transportation and emplacement of waste packages
	4.8.2.2 Backfilling of the disposal tunnels and main tunnels
4.8.3 封閉階段	4.8.3 Closure
4.9 處置場營運管理技術	4.9 Technical overview of management of the disposal site
	4.9.1 Basic principle of geological disposal and international consensus on institutional control
	4.9.2 Basic concept of management of the disposal site
	4.9.3 Disposal site management and control components
	4.10 Conclusions

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
5. 安全評估	V. Safety Assessment
5.1 潛在處置母岩特性調查與評估 階段安全評估的範疇及目標	5.1 Objectives and scope of the safety assessment
5.2 安全評估方法	5.2 Safety assessment methodology
5.2.1 相關法規	5.2.1 The AEC Guidelines
5.2.2 安全評估案例的建置方法	5.2.2 Development and treatment of safety assessment cases
5.2.3 模式建構	5.2.3 Modeling strategy
5.2.4 安全評估可信度	5.2.4 Confidence in the safety assessment
5.3 處置系統與功能	5.3 Geological disposal systems and their safety functions
5.3.1 處置系統特性	5.3.1 Features of geological disposal systems
5.3.2 處置系統功能	5.3.2 Safety functions and detrimental factors
5.4 情節發展	5.4 Scenario development
5.4.1 特徵/事件/作用(FEPs)之 建置	5.4.1 Identification and classification of relevant FEPs
5.4.2 特徵/事件/作用(FEPs)之 篩選	5.4.2 Screening of FEPs
5.4.3 情節定義	5.4.3 Definition of scenarios
5.5 參考案例	5.5 The Reference Case
5.5.1 參考案例定義	5.5.1 Definition of the Reference Case
5.5.2 工程障壁系統參考案例	5.5.2 The EBS Reference Case
5.5.3 地質環境參考案例	5.5.3 The geosphere Reference Case
5.5.4 生物圈參考案例	5.5.4 The biosphere Reference Case
5.6 替代案例	5.6 The Alternative Cases
5.6.1 基本情節之替代案例分析	5.6.1 Analysis of alternative cases within the Basic Scenario
5.6.2 擾動情節分析	5.6.2 Analysis of perturbation scenarios
5.6.3 隔離失效情節分析	5.6.3 Analysis of isolation failure scenarios
5.6.4 關鍵不確定性之確認	5.6.4 Identification of key uncertainties
5.7 計算案例之整合分析	5.7 Synthesis of calculation cases illustrating overall system performance

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
5.7.1 案例定義	5.7.1 Definition of cases
5.7.2 案例分析結果說明	5.7.2 Results of cases illustrating overall system performance in different geological environments
5.7.3 比較各國安全標準	5.7.3 Comparison of results with overseas safety standards
5.7.4 補充的安全標準	5.7.4 Supplementary safety indicators
5.8 安全評估的可信度	5.8 Reliability of the safety assessment
5.8.1 情節、模式、模組及資料庫的建置	5.8.1 Development of scenarios, models, codes and datasets
5.8.2 天然類比研究	5.8.2 Natural analogues
5.8.3 評估報告比較	5.8.3 Comparison with other safety reports
5.9 總結	5.9 Summary and conclusions
6. 選址技術與安全標準	VI. Technical Basis for Site Selection and Development of Safety Standards
7. 結論與未來發展	VII. Conclusions and Future R&D Requirements
7.1 台灣地質處置之技術可信度	7.1 The technical reliability of geological disposal in Japan
7.2 未來發展	7.2 Research and development on geological disposal after the year 2000
	7.2.1 General features of research and development
	7.2.2 Strategy for R&D after the year 2000
	7.2.3 Specific goals of the R&D program
	7.3 Afterword for foreign audiences: Japanese waste management in the 21st century

3. 計畫執行成果

3.1. 地質環境

本計畫針對地質環境所規劃之工作，除了進行「地質環境」所需調查評估技術的發展驗證，用以確認SNFD2017報告所需的「處置技術可行性」外，並參考日本H12的發展經驗，針對台灣地質環境取得評估「深層地質處置」條件的地質資訊，並加強相關地質影響因子(如火山、斷層、地震、抬升沉陷等因子)的資訊彙整研析與特性研究工作，作為整備SNFD2017報告所需之必要資訊。因此，「地質環境」相關研究工作規劃，依SNFD2017報告預定章節(表 2-1)共可分為：(1)區域環境地質、(2)深層地質特性，以及(3)地質處置合適性研究等3大類。

3.1.1. 區域環境地質

區域環境地質主要係說明地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性，並以綜觀之角度，探討台灣的大地構造與地質環境特徵。日本H12報告對地質科學研究強調現地調查數據(井下或坑道中取得深層地質環境相關數據)，加上有關自然現象活動歷史的案例分析(JNC, 2000a)。因此，本計畫參考日本H12報告經驗，針對SNFD2017報告架構規劃，亦著重於深層現地調查數據的解析，以及自然現象活動歷史的資訊收集，初步建立地質概念模式，據以建立功能/安全評估技術。

在SNFD2009報告中已分別針對台灣的地質環境、影響地質環境的自然變化因子，及台灣三大潛在處置母岩(花崗岩、泥岩、中生代基盤岩)的地質環境特徵，作一初步的資訊彙整(台電公司，2010)。而後，本計畫於101年度起針對現階段處置環境調查成果，彙整結晶岩體深層地質特性(涵蓋地質圈特性、水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑、岩石特性等)，提供初步概念模式架構。

此外，針對地質處置合適性研究所需地質圈特性、大地構造架構、抬升與沉陷作用、氣候與海平面變遷等內容，展開SNFD2017報告架構所需相關調查與研發工作。以下摘要性說明103年度獲致成果。

3.1.1.1. 地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性

日本H12報告指出，地質圈(處置母岩及其地質環境)的特性，除了會影響工程障壁的功能外，亦決定了地質圈能否發揮天然障壁的效能(JNC, 2000a)。例如：母岩的熱與力學特性，除了與天然障壁的穩定性有關外，也會直接影響工程障壁的功能；若母岩性質不佳，將會縮短工程障壁的使用年限，處置安全也會受到影響。地下水的流動特性與化學條件，除了會影響核種在地層的遷移速率與分布情形外，亦是影響廢棄物罐腐蝕速率的關鍵因素。就地質圈能否提供天然障壁功能而言，其核種傳輸的特性顯得特別重要。

因此，地質環境若以概念模式(conceptual model)方式表現，需要整合幾項真實調查的資訊(JNC, 2000a)，包括：

- (1) 水文地質
- (2) 水文地球化學
- (3) 核種傳輸路徑
- (4) 岩石特性

從日本H3報告(PNC, 1992a)即開始累積地質概念模式所需資料，特別是詳細調查東濃(Tono)及釜石(Kamaishi)實驗設施(這2個實驗設施是為了取得一般性研究資料，而非作為處置場址)，取得的關鍵參數(包括水力梯度、地下水特性及岩層特性等)，因此確認日本於2000年已完備安全地質處置高階核廢料的技術能力(JNC, 2000a)。目前已知各類參數因場址地點而異(site-specific)，透過概念模式的建構及相關數值模擬的資訊，可提供一個日本場址整合描述相關的基礎案例(JNC, 2000a)。

日本H12報告特別歸納出「地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性」有3點(JNC, 2000a)：

- (1) 首先，在一段足夠長的時間裡，在物理上能使用過核子燃料受到隔絕，並讓用過核子燃料與人類生活圈之間維持足夠的距離。為了達到此一目的，處置場必須選擇適當的地點，並具有足夠的深度，以確保自然現象或人類侵入活動(在資源開挖過程中)，不會使處置場或處置母岩的功能有明顯破壞。
- (2) 其次，應該要維持處置環境能夠彰顯工程障壁的功能。地下水化學及母岩化學特性，以及緩慢的地下水流動都會影響工程障壁系統的功能，要讓合適的條件能維持足夠長的時間。
- (3) 地質環境將扮演核種遷移的自然屏障。甚至在核種外釋的情況下，自工程障壁遷移至地質圈裡，在岩層的傳輸路徑裡，受到緩慢的地下水流影響，以及與礦物反應而發生遲滯作用，都會導致遷移作用受到限制。同時，自然障壁的功能也有助於核種在地下水中發生分散與稀釋作用。

3.1.1.2. 台灣地質環境特徵

台灣位於歐亞大陸板塊東緣，坐落於環太平洋構造活動帶上，因此，台灣地區的火山活動和斷層(地震)活動，皆與台灣大地構造的演化息息相關。考量SNFD2017報告所需之大地構造架構特性資訊與評估分析能力，103年度進行了台灣大地構造架構時空演化相關文獻資料(空間上涵蓋台灣及台灣海峽周邊海陸域資料，時間上則涵蓋控制各岩層形成之地質歷史)的蒐集與回顧，其工作成果簡述如下：

(1) 大地構造架構回顧

SNFD2009報告已回顧台灣的大地構造架構的演化模式(台電公司，2010)，根據前人提出的大地構造演化模式(Jahn et al., 1976; 1990; Lapierre et al., 1997; Chen et al., 1999, 2004; Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007)，顯示福建東南沿海的花崗岩與台灣東部花崗岩，均受到古太平洋海板塊隱沒到歐亞大陸板塊的隱沒作用影響，形成大陸邊緣的「安地斯山型」岩漿活動(圖 3-1之圖A至圖C)。同樣地，根據岩漿活動反映的大地構造演化過程，林蔚(2001)提出福建沿海的花崗岩先於140百萬至110百萬年發生侵

入與變質作用，而台灣東部花崗岩後於110百萬至90百萬年發生侵入與小於80百萬年之後的變質作用，此一由內而外的岩漿活動遷移，反映古太平洋海板塊向東退縮(retreat)，向海一側發生拉張作用的過程，此拉張作用持續發生到中新世晚期，形成數千萬年的張裂型被動大陸邊緣張裂活動(圖 3-2)。

(2) 台灣島不同成因比較

台灣屬於世界最年輕的造山帶之一，其山脈隆起的成因，與呂宋島弧與歐亞大陸邊緣在近數百萬年來的「弧陸碰撞」(arc-continent collision)有關，此造山運動稱為蓬萊運動，使得台灣東部結晶岩體(花崗片麻岩、花崗岩、大理岩、片岩、角閃岩等)與離島結晶岩體(花崗片麻岩、花崗岩、片岩、角閃岩等)的地體構造環境，在數百萬年前即有明顯的差異。目前有2種大地構造演化論述：

- (A) 大陸楔(continental wedge)模式下的台灣造山作用(例如何春蓀，1986；Fuller et al., 2006及其引用之相關文獻等)；
- (B) 陸緣塊體組合成的台灣造山運動(Lu and Hsu, 1992；Shyu et al., 2005)。

101至102年度由中央地質調查所針對蘭陽平原所進行的空中磁測調查發現，在蘭陽平原下方深處(介於中央山脈及雪山山脈之間)，存在著大範圍由海洋地殼殘塊所形成的高磁基盤(Tong et al., 2013)。大範圍海洋地殼的形成，使大南澳片岩陸塊先漂離歐亞大陸邊緣(間夾南中國海板塊)，而後再發生弧陸碰撞作用，使呂宋島弧與大南澳片岩陸塊均拼貼回歐亞大陸邊緣，形成台灣島今天的大地構造架構。符合Lu and Hsu (1992)及Shyu et al. (2005)的陸陸拼貼模式。根據過去本計畫大區域執行東部結晶岩體空中磁測調查結果(圖 3-3)，也證實此一海洋板塊殘塊亦分布於台灣東部大南澳片岩帶之結晶岩體下方，深度達10 km至20 km深，可能形成東部結晶岩體下方深部的地震相對安靜帶，值得後續以微震震波資料，透過震波成像技術來了解此高磁基盤的分布

及地震活動的關係。Wu et al. (2014)報導跨海、陸地球物理測勘台灣地殼結構的研究結果，也指出在中央山脈下方此區域20 km至40 km深處地殼，具有高波速特性，為明顯的地震相對安靜帶。

(3) 長期穩定性更新資訊

傳統上從大地構造演化角度，看台灣造山運動之中央山脈形成模式，均主張山脈發生快速抬升與剝蝕作用(如 Huang et al., 2006,)，使中央山脈東翼屬於深層變質岩的岩層剝蝕出露(Lo et al., 1995; Pulver et al., 2002)。近來之文獻資料，反而發現山脈坍塌的張裂性斷層帶，遍佈於中央山脈(Crespi et al., 1996; 李元希, 1997)，顯示近期構造活動若以受菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊斜碰撞的影響來解釋，也必須釐清山脈的抬升速率，已因張裂性構造的發育而下降，甚至發育山間沉陷盆地及沉積型河系(陳文山等, 2004)，剝蝕率透過模擬發現會有逐漸降低的趨勢(Fuller et al., 2006; Derrieux et al., 2014)。

相較之下，國內外研究對陸陸拼貼作用及高磁基盤的存在，過去因資訊不足，僅以Lu and Hsu (1992)、林蔚(2001)及Shyu et al. (2005)有大地構造架構的宏觀演化論述。南中國海洋地殼殘塊，尚存在台灣地殼深處，已靠地球物理探測技術的精進獲得證實。有鑑地體架構模式的差異，對長期穩定性的評估有重大影響，過去因弧陸碰撞作用影響大陸楔模式，所預測的中央山脈快速抬升與剝蝕作用(Suppe, 1981; Willett et al., 2003; Fuller et al., 2006及所引用文獻)，以及地震分布的解釋，均有需要再累積更多調查結果來釐清，並建立新的評估技術，詳見後續第3.1.3節的說明。

(4) 未來大地構造環境演化趨勢

就時空關係的宏觀來看東部結晶岩體，在台灣島形成後的大地構造演化趨勢，自台灣島形成以來(即6百萬年前弧陸碰撞運動發生以來)，約3百萬年前形成高山(鄧屬予, 2007)。區域地質研究顯示本島東北部2百萬年前屬於擠壓環境，過去75萬年以來山腳斷層以正斷層作用一直活動，並伴隨張裂型大屯火山群活動，顯示已進入張裂沉陷的地體環境(陳文山等, 2008)，原本台北盆地與

蘭陽平原所在的地層2百萬年前曾受逆衝斷層作用影響，地層均為覆瓦狀堆疊，在大地構造環境轉為張裂活動後，長期受此張裂作用影響，台北盆地與蘭陽平原下方的基盤岩，均下降至海平面下數百公尺深處(陳文山等，2008；蘇清全，2011)。由菲律賓海板塊隱沒作用促成此區弧後張裂的大地構造環境，已持續至少80萬年迄今，目前東北海域最近期為龜山島火山活動。未來1百萬年之地體構造體系，可能會持續超過1百萬年以上，海岸山脈可能隨菲律賓海板塊隱沒作用而北移。目前地球物理研究顯示海岸山脈北段，受到沖繩海槽張裂南移影響，已經處於沉陷狀態(Wu et al., 2009; 2014)。

至於本島東部結晶岩體，分布於花蓮至中壢以東之中央山脈，預測百萬年以上尺度的大地構造運動下，將持續受到菲律賓海板塊隱沒作用影響，即廣泛出現在台灣東北部的張裂構造作用會更加擴大(Wu et al., 2009)，使歐亞大陸地殼發生正斷層張裂與沉陷作用，甚至沈入海底(鄧屬予，2007)。

在數十萬年尺度下，氣候變遷與海平面升降的變化，依照數個河口沖積扇沉積與下陷歷史來看，海平面影響屬於循環性變化，對區域性水文地質流場影響不大。相較之下，離島結晶岩體距離板塊邊界較遠，過去千萬年來地殼並無顯著變動，地下水流場雖僅受氣候變遷與海平面升降影響，但陸海域變遷影響頗大。

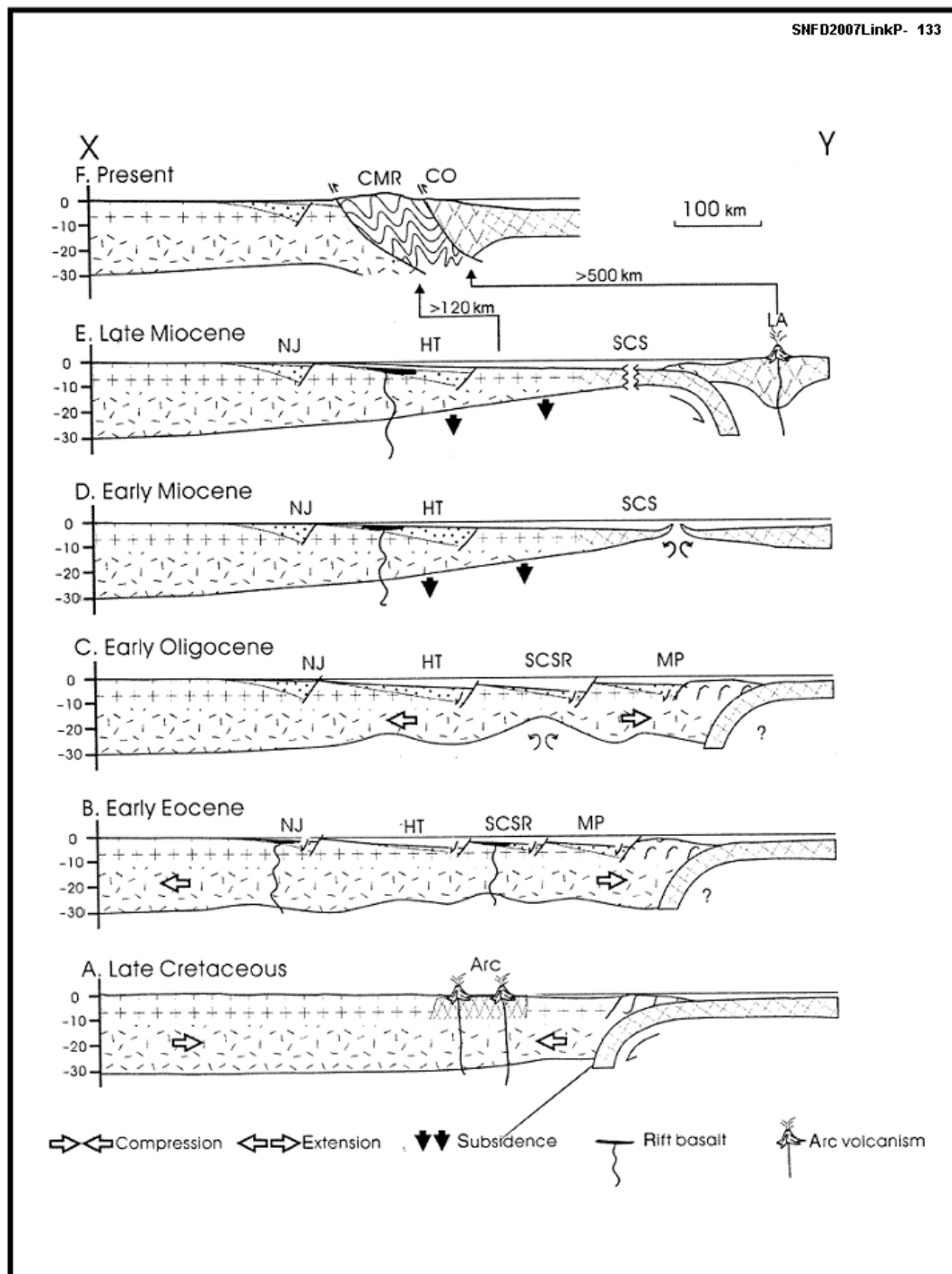


圖 3-1：台灣大地構造演化示意圖

資料來源：Teng and Lin (2004)。

註：CMR: Central mountain range; CO: Coastal Range; HT: Hsuehshan Trough; MP: Mindoro-Palawan block; NJ: Nanjihtao Basin; SCS: South China Sea Basin; SCSR: South China Sea rift。

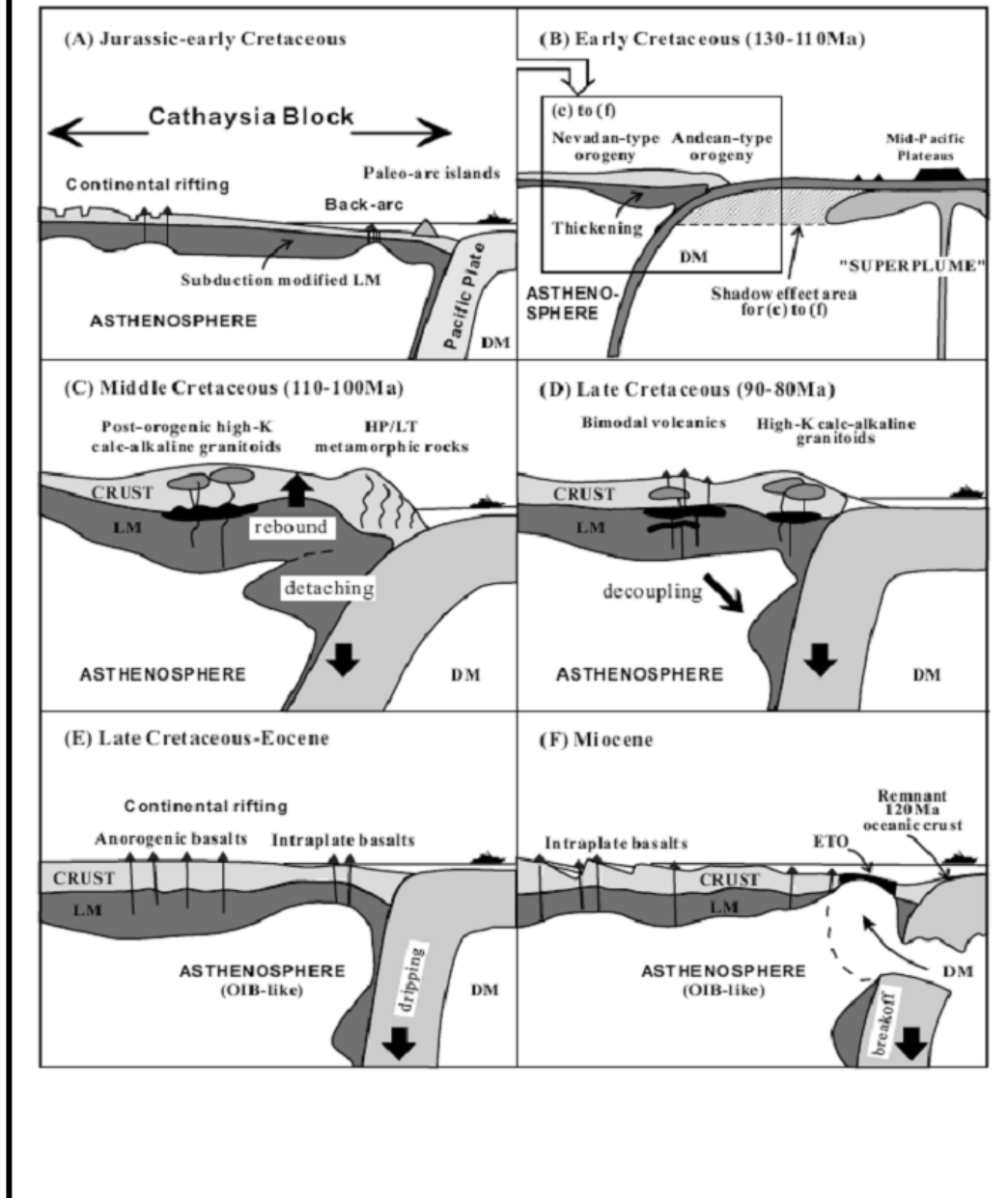


圖 3-2：台海地區岩漿活動與大地構造演化圖

資料來源：林蔚(2001)。

註：(A)侏羅紀至早白堊紀(約140 百萬年以前)古太平洋板塊向西隱沒至歐亞大陸邊緣，大陸內部廣泛發生板內型張裂環境的岩漿活動；(B)早白堊紀(約120百萬年左右)西太平洋發生洪流玄武岩噴發活動，歐亞大陸邊緣亦發生廣泛的燕山運動；(C)燕山運動後期(約110百萬至100百萬年)造山帶內部形成張裂環境的後造山型花崗岩(如福建、金門等)，造山帶邊緣則發生高壓低溫相變質作用(如台灣東部大南澳變質帶)；(D)晚白堊紀(約90百萬至80百萬年)造山帶內部形成張裂型火山活動，造山帶邊緣則形成張裂環境之後造山型花崗岩(如台灣東部花崗岩)；(E)晚白堊紀至始新世隱沒作用停止，大陸邊緣發生板內型張裂環境的玄武岩噴發活動，台灣東部大南澳變質帶無島弧岩漿活動發生；(F)中新世大陸邊緣張裂與南中國海板塊。

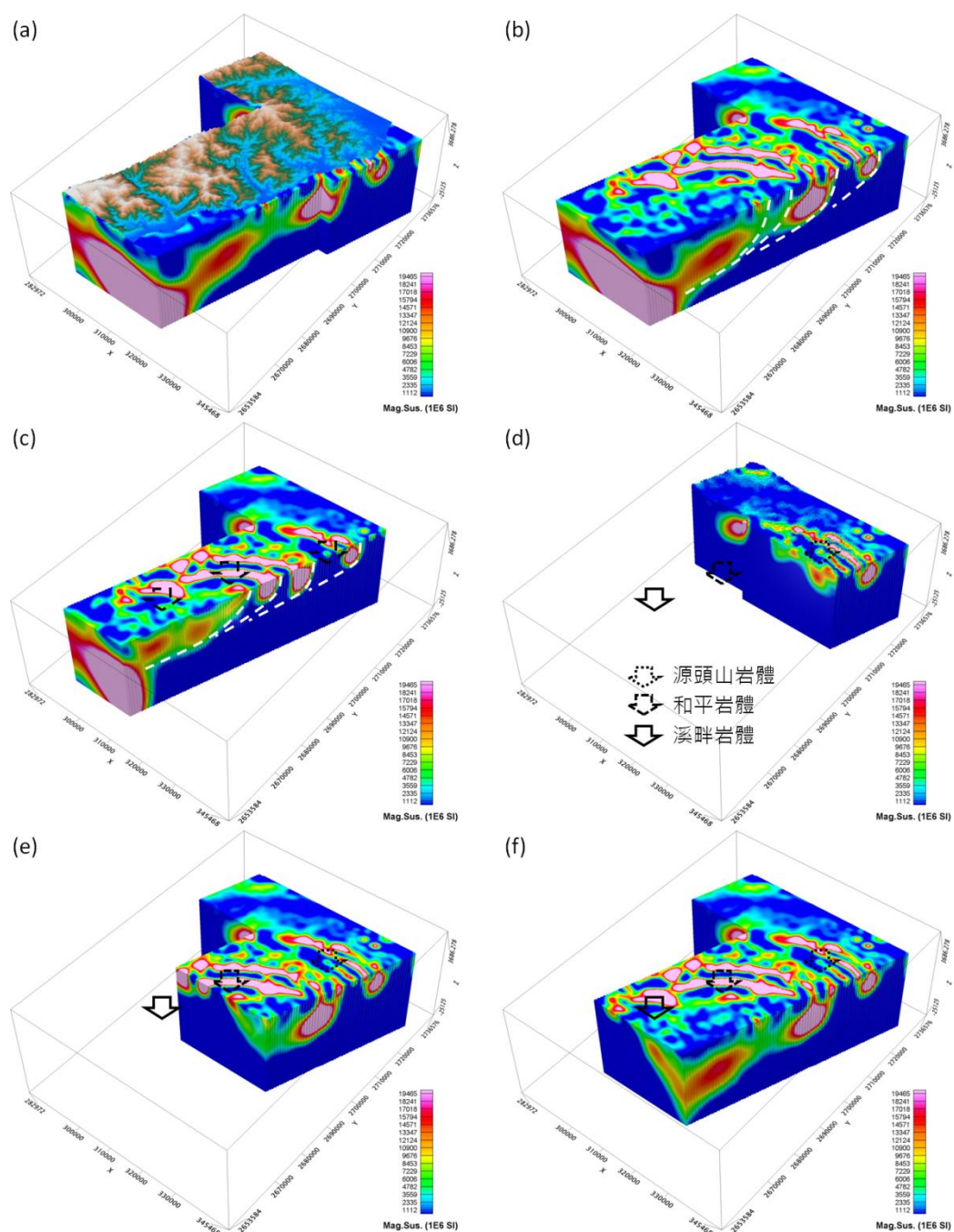


圖 3-3：本島東部結晶岩體三維磁感率模型立體圖

註：圖c~f箭頭標示結晶岩體位置，大規模厚層高磁性基盤，位於大南澳片岩帶下方約10 km至20 km處，傾向東南方，具有覆瓦狀構造型態(圖c,d中白色虛線標示)，與大南澳片岩中大理岩體與花崗片麻岩體的逆衝構造關係密切。相較於低磁性大理岩體，花崗片麻岩體為高磁性岩石組成，可見其深層規模均較地表地質圖出露的規模大得多。

3.1.2. 深層地質特性

在「深層地質處置」概念中，主要的處置設施將建構於遠離人類生活環境的深地層中，因此，如何掌握與建構深地層母岩周圍的岩石特性與構造空間分布的地質概念模式，是處置研究工作的首要任務，亦是探討水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑等特性，與相關地質環境特性的關鍵性基礎工作。

3.1.2.1. 地質圈特性對多重障壁概念的重要性

用過核子燃料深層地質處置的多重障壁概念，是指在遠離人類生活圈的深層地質環境中，構築良好的工程設施，藉由天然的地層環境及人為工程設施遲滯核種遷移的功能特性，形成所謂的天然障壁(natural barrier)與工程障壁(engineered barrier)的多重障壁(multiple barriers)構造，使放射性物質遷移到達生物圈之前已衰變至可接受的活度，排除日後對人類可能造成的影響。

地質圈(處置母岩及其地質環境)的特性，除了決定天然障壁對核種的遲滯功能外，亦會影響工程障壁的性能(JNC, 2000a)。例如：母岩的熱與力學特性，除了與天然障壁的穩定性有關外，也會直接影響工程障壁的功能；若母岩性質不佳，將會縮短工程障壁的使用年限，處置安全也會受到影響。同樣地，地下水的流動特性與化學條件，除了會影響核種在地層的遷移速率與分布情形外，亦是影響廢棄物罐腐蝕速率的關鍵因素。當然，處置母岩所面臨的大地構造活動、抬升與沉陷、氣候與海平面變遷等地質環境特性，均對遲滯核種傳輸的多重障壁功能，具有關鍵的影響性。

人類的技術有限，工程障壁有一定的使用年限，一般而言，數百至千年尺度，已是人類現今的極限。但穩定的深層地質環境所形成的天然障壁，由諸多已知的地質證據，顯示其功能性可能維持到百萬年尺度以上。天然障壁的地質圈特性係為自然環境生成，無法強求，而地質特性資訊，因地而異且不確定性高，因此，地質圈特性的調查與評估，是各國放射性廢棄物深層地質處置的關鍵課題。

地質圈特性的調查與評估結果，必須適度的透過概念模式來展現，用以說明多重障壁遲滯核種遷移能力的影響因子與其影響性，包含處置母岩周圍的岩性與構造空間分布，水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑等特性，與處置母岩所面臨的大地構造活動、抬升與沉陷、氣候與海平面變遷等地質環境特性，提供功能/安全評估所需之地質環境資訊。

在「深層地質處置」概念中，主要的處置設施將建構於遠離人類生活環境的深地層中，因此，如何掌握與建構深地層母岩周圍的岩性與構造空間分布的地質概念模式，是處置研究工作的首要任務，亦是探討水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑等特性，與相關地質環境特性的關鍵性基礎工作。由於國際間處置母岩為結晶岩(含花崗片麻岩、英雲閃長岩、花崗岩、混合岩等)如瑞典、芬蘭等國，已進展至處置場執照申請甚至建造階段，因此已有許多實際數據及設計相關資料可供參考。從國際經驗得知，處置場的配置是需要經過許多基本參數的評估來決定，必須給定母岩特性調查所得的特性參數，還有運轉處置場的營運概念，加上合適的FEPs(特徵、事件、作用)分析，才能進行一般性安全分析。

日本H12報告指出地質圈(處置母岩及其地質環境)的特性，除了會影響工程障壁的功能外，亦決定了地質圈能否發揮天然障壁的效能(JNC, 2000a)。該報告為了將地質環境以概念模式(conceptual model)方式表現，從東濃(Tono)及釜石(Kamaishi)實驗設施整合數項真實調查的資訊(JNC, 2000a)。本計畫亦以十餘年時間建立現地調查深層地質特性的技術，比照日本技術要求，建立了結晶岩質潛在處置母岩深層特性調查與解析流程(圖 3-4)。包括：(1) 水文地質；(2) 水文地球化學；(3) 傳輸路徑；(4) 岩石特性，據以建構出結晶岩體初步地質概念模式。此一經驗將不斷透過吸取國際最新技術經驗，及擴大國內學研合作來尋求技術傳承，提供後續世代地質處置技術精進的機會，有助於未來持續提昇地質處置安全性。

103年度起加強解析東部其他結晶岩體規模資料，利用本計畫已建立的磁力資料解析流程，運用於東部其他岩體(如源頭山、飯包尖

山及溪畔等岩體)，進行磁力三維逆推處理，以提供後續分析區域性地下岩體與構造分布，未來將提供SNFD2017報告評估東部岩體規模與分布的重要資訊。初步完成涵蓋地表出露的源頭山、飯包尖山、和平、溪畔等結晶岩體(高磁性)範圍，以及其間夾大理岩體(低磁性)、片岩體(高磁性)與全區10 km至20 km深處海洋地殼(最高磁性)之三維立體圖(圖 3-3)，經比對地質調查所2000年版50萬分之1地質圖，地表出露較大岩體位置(源頭山、和平、溪畔等岩體)以箭號標示(如圖 3-3c~f)。本研究成果初步顯示全區有數個高磁基盤，以覆瓦狀構造方式(圖 3-3b, c白色虛線)，均向東南傾斜(圖 3-3e, f)，與弧陸碰撞作用擠壓造成的逆衝斷層活動有關。

102年度起蒐集有關結晶岩體(區域性岩性種類，包含花崗岩、花崗片麻岩、大理岩及片岩等)有關規模、構造延伸等地表地質與地表地物調查資訊(如地質圖、地表磁力、大地電磁等)，於103年度綜合上述結果，針對開南岡結晶岩體及其圍岩的大理岩體，可根據地電阻影像剖面特性，建構初步的岩體分布與構造帶位置之概念模式(圖 3-5)：高電阻區塊呈現出花崗岩質結晶岩體緻密特性，其間存在兩條呈現低電阻特性且向北傾斜的主要導水構造帶，均呈現覆瓦狀構造特徵，岩體厚約2 km，其下為低電阻岩體，應屬於破碎含水的大理岩夾層，厚約1 km。在地表下3 km深以下則為花崗岩質結晶岩基盤，緻密且均質，並無導水裂隙帶可辨認(可能超過深地下水循環深度)。

類似覆瓦狀高磁基盤，曾在蘭陽平原下方，經空中磁力三維逆推技術解析也有發現(Tong et al., 2013)，並據以解釋蘭陽平原曾經屬於年輕的造山帶，為弧陸碰撞伴生的逆衝斷層作用而形成山脈。經山脈崩毀、反轉成正斷層作用(鄧屬予，2007)，並長期沉降下，於5,000年前沒入海下，而後才因快速沉積作用，形成蘭陽平原(陳文山等，2004)。

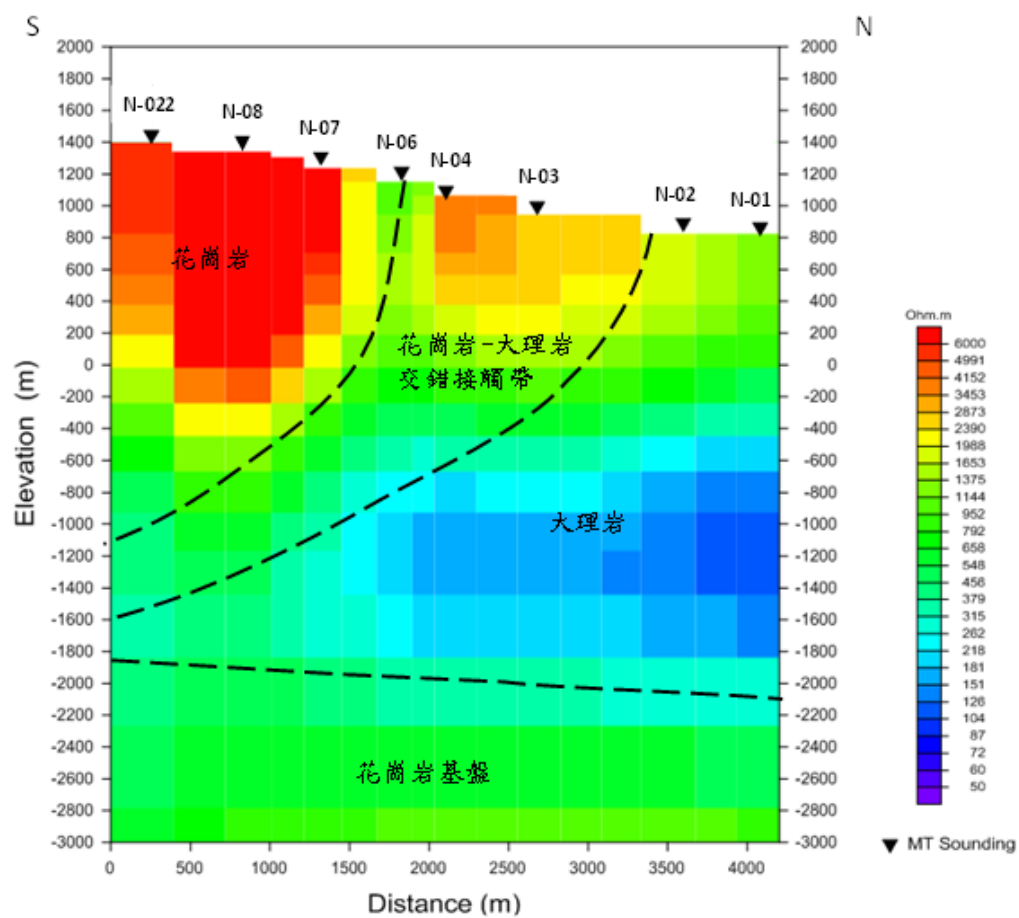


圖 3-5：沿結晶岩體施測之地層電阻影像剖面圖

註：根據結晶岩電阻特性的差異，解析覆瓦狀深層結晶岩層及構造帶分布。

3.1.2.2. 水文地質

在「深層地質處置」概念中，地下水的流動特性，是影響核種在地層遷移速率與分布的主要因子。一個具有緩慢地下水流(通量)的深層地質條件，使核種在地層的遷移速度低，是考量處置場功能優劣與否的關鍵因子(JNC, 2000a)。然而，深層地下水的流動特性，不同地區均有其獨特的特性，且深層水文地質資訊普遍缺乏。因此，在處置場址未定之前，世界各國主要將心力集中於相關深層水文特性調查與資料解析技術的發展，以因應場址調查階段對掌握深層水文地質特性的需求。

有鑑於此，本計畫在1999至2010年間，於離島結晶岩體建置6口深度均超過500 m之鑽井，用以進行深層地質相關調查技術之發展，迄今已完成之試驗項目如表 3-1所示。在水文地質調查技術發展方面，目前本計畫已進行現地深井的雙封塞水力試驗、跨孔追蹤試驗、水力傳導係數升尺度試驗、封塞段裂隙水壓長期監測等，取得水力梯度、水力傳導係數、延散度、裂隙寬度等參數特性。103年度孔內裂隙水壓長期監測工作，持續數年於離島結晶岩體中，進行井下裂隙帶封塞內壓力變化的背景值長期監測，並持續收集簡易型水文氣象站的觀測資料。

測試區北側及南側之水文氣象站在2013年6月至12月所觀測之降水總量分別為643 mm及618 mm，差距不大；但皿蒸發總量分別為707 mm及801 mm，目前兩者有比較明顯的差異(約100 mm)。至於2014年1月至11月北側總降水量為525 mm，南側總降水量482 mm，差距亦不大；北側與南側皿蒸發總量分別為1,155 mm及1,275 mm，兩者亦有100 mm以上的差異。100 cm處土壤含水量北面則介於4%至40%之間，南側介於25%至35%之間，兩者亦有比較明顯的差異。

圖 3-6至圖 3-8分別為4號、5號及6號鑽井孔內各4處裂隙段封塞壓力監測成果圖，各封塞段之壓力讀值，已換算為公尺(m)，以利比較各深度裂隙壓力隨時間之變化(fluctuation)。根據4號鑽井之裂隙水壓長期監測結果(圖 3-6顯示)，至2014年11月監測期間，各封塞區

段壓力值上下震盪的情形，均受降水強度的影響。其中4號井的400 m至500 m封塞區段裂隙壓力值，於2014年4月開始有升高趨勢。6號鑽井各封塞段壓力讀值遠高於3號、4號及5號鑽井各封塞段壓力值；且4個封塞區段壓力值均與降水量的變化有明顯的關係存在，顯現6號鑽井位於壓力的高區，且各封塞區段裂隙帶間連通性良好。

針對水文地質數值模型建構技術之研究工作，102年度進行現地調查/試驗資料的研析與評估，據此決定模型範圍C-C'剖面，通過1號及6號鑽井，並根據試驗參數定義模型邊界條件與初始條件(表 3-2及表 3-3)。離島結晶岩體水文地質特性及地下水流向與梯度，根據現地調查多年累積成果，顯示太武山岩體與斗門岩體分屬兩地下水層，以北太武山為地下水分水嶺，淺層地下水以太武山為中心呈放射狀流向各方，但深層地下水則受高角度導水裂隙帶(如太武山斷層帶)及輝綠岩脈群(伴生高角度冷卻節理)的分布及延伸所影響。

103年度將利用美國 Lawrence Berkeley 國家實驗室發展的 TOUGH2 軟體，參考通過1號與6號鑽井的剖面之現有調查資料，建立通過C-C'剖面之二維水文地質數值模型，相關成果概要說明如下：

(1) 地表觀測及鑽井試驗、監測資料研析與評估

進行數值模擬，須了解模擬範圍內主要影響水流構造以及水文地質特性，並根據調查或試驗所得結果研判數據可用性，再將模擬區域切分數值網格，並賦予每個網格合適的水文與地質參數，根據質量與能量守恆概念進行數學計算。

C-C'剖面經過太武山斷層位態N64°E/70°N。小規模試驗場之1號、2號及4號鑽井均於450 m至470 m以下深度鑽遇太武山斷層，具有發達的破碎帶、斷層角礫及斷層泥，且包括輝綠岩脈均受斷層影響而形成破碎剪裂帶，研判為結晶岩體的主要導水裂隙帶，也是深層地下水賦存區。

另由調查顯示，輝綠岩脈往往順著北東向的張裂性節理侵入，此類節理多為結晶岩體的冷卻節理，輝綠岩脈滲透性甚差，可能形成水流的不透水構造，研判其位態N30°E/80°N，在結晶基盤中分布甚廣，每1 km間隔內可能即會出現岩脈群(dike swarm)。

(2) 依據現地資料建構模型邊界

本研究模型範圍長度延伸14 km，C-C'剖面在陸地上約有12 km，因此，模型範圍包含C-C'剖面在陸地上所有範圍，同時部分延伸入海。根據現地調查資料研判，C-C'剖面上可能遭遇之構造，包括：太武山斷層及輝綠岩脈。圖 3-9為模型主要構造與模型範圍示意圖，太武山斷層以及輝綠岩脈根據其位態加入於模型中，於深度450 m至470 m左右切入太武山斷層(圖中以1號鑽井為代表)。黑色虛線研判為太武山斷層位置，位態 $N64^{\circ}E/70^{\circ}N$ ，鄰近1號、2號及4號鑽井，斷層寬度假設200 m；黑色實線，為模型中考慮之輝綠岩脈位置，位態 $N30^{\circ}E/80^{\circ}N$ ，岩脈群寬度假設100 m，現階段先考慮2條岩脈群，相對位置沿C-C'剖面分別在太武山斷層南、北方各約1.5 km。

二維模型利用卡氏座標系統(XYZ)，X方向延伸14,000 m，Z方向厚度約700 m。二維網格規劃，X方向網格寬度固定20 m，使用700個剖分；Z方向網格間距不等，依高程變化，間距約5 m至50 m。C-C'剖面最大高程約海平面上45 m，因此，最上層網格變化依照地表高程。賦予各網格不同岩石特性(圖 3-9)，土黃色區域為風化層，厚度約50 m；灰色區為花崗岩；黑色區為輝綠岩脈；藍色區為太武山斷層。Z方向使用20個剖分，二維模型總計使用14,000個網格。

(3) 修正概念模型

模型初始平衡溫度及壓力分布計算結果如圖 3-10所示。當系統水流達到穩態，表示若無其他外界干擾，系統的水流將不會有太大的變異性，根據初始模型的計算結果，水流速度最快處在風化層，方向依其與鄰近格點高程差產生變異，速度可達到 $1.0E-4$ m/s，表示每年可達到數千公尺；其次是太武山斷層，亦可達到 $1.0E-5$ m/s至 $1.0E-4$ m/s，水流最緩慢處在完整花崗岩與輝綠岩脈，約 $1.0E-15$ m/s至 $1.0E-16$ m/s，近乎停滯不動。

由於水流速度在不同位置差異極大，達10個數量級，為了呈現出系統的地下水流向與流速，方便讀者閱讀，在原有系統中加入質

量分率 0.1(質量分率為無單位變量，以下以濃度稱之)的氯化鈉(鹵水)，由於EOS3不具備鹵水相關計算功能，因此，將輸入檔以及TOUGH2慣用之初始條件檔案'INCON'轉換為EOS7可讀格式，改採EOS7運算，EOS7功能基本上與EOS3類似，僅為了達到示意流向的目的，故將鹵水性質假設跟地下水一致，不影響原先由EOS3計算的穩態水流以及後續的計算，因此，鹵水功能類似示蹤劑(tracer)，加入2位置中一在風化層，另一在深度約450 m處。

(4) 建立數學模型

地下水達到穩態10年後，加入圖 3-11顯示加入鹵水的濃度分布，紅色箭頭代表地下水流向(但其長度不代表速度大小)；每個箭頭所指方向皆是X與Z方向的速度和向量，明顯地，在靠近風化層深度區域，鹵水濃度隨著水流很快的被稀釋，在太武山斷層區域也有類似狀況，顯示這2個區域水流速度較快；其餘區域流速甚是緩慢，鹵水濃度幾乎沒有明顯變化，屬於花崗岩體深層地下水流場的基本特性。圖 3-12顯示100年時，風化層與太武山斷層的鹵水幾乎全被地下水稀釋，風化層內僅有零星濃度鹵水，主要是代表輝綠岩脈的區域的低滲透性所致，往更深層的地方觀察，代表太武山斷層的格點，其鹵水濃度亦甚低，但花崗岩與岩脈內的鹵水濃度，並沒有發現明顯的擴散現象。圖 3-13顯示在 $1.0E+04$ 年時，低流速區域的花崗岩與岩脈區，鹵水也有明顯的擴散現象，圖中並以黑框標示出岩脈所影響區域，岩脈幾乎不透水，因此在岩脈左右兩側，水流方向可能不同，且由鹵水擴散趨勢來看，速度也有些許差異。圖 3-14顯示在 $1.0E+05$ 年時，深度450 m處的鹵水已緩慢擴散到淺部風化層區域，但風化層流速相對快了許多，鹵水濃度並無法在淺部地區累積。

本研究所建立數值模型為二維(2D)，由於第三個維度受限，計算結果未必完全趨近現地調查結果，但二維模型所用網格相對三維模型少了許多，計算時間縮短，現象相對單純，因此在了解構造行為、參

數變異性探討，以及開發TOUGH2程式後處理工具上，對於後續相關工作進行助益極大。

表 3-1：離島結晶岩體6口鑽井已完成試驗項目彙整表

鑽井	孔徑(mm)	孔長度(m)	試驗及監測項目
1號井	96	500	地球物理井測 跨孔地電阻量測 水力破裂應力量測 孔內微流速量測 地球化學井測及水質採樣 裂隙雙封塞水力試驗 跨孔示蹤試驗 裂隙壓力多封塞長期監測
2號井	96	500	地球物理井測 裂隙雙封塞水力試驗 跨孔示蹤試驗
3號井	96	500	地球物理井測 孔內微流速量測 地球化學井測及水質採樣 裂隙雙封塞水力試驗
4號井	96	560	地球物理井測 跨孔地電阻量測 孔內裂隙壓力及微流速量測 地球化學井測及水質採樣 裂隙雙封塞水力試驗 跨孔示蹤試驗 裂隙壓力多封塞長期監測
5號井	96	500	地球物理井測 孔內裂隙壓力及微流速量測 地球化學井測及水質採樣 裂隙雙封塞水力試驗 裂隙壓力多封塞長期監測 簡易水文氣象站
6號井	96	500	地球物理井測 孔內裂隙壓力及微流速量測 地球化學井測及水質採樣 裂隙雙封塞水力試驗 裂隙壓力多封塞長期監測 簡易水文氣象站

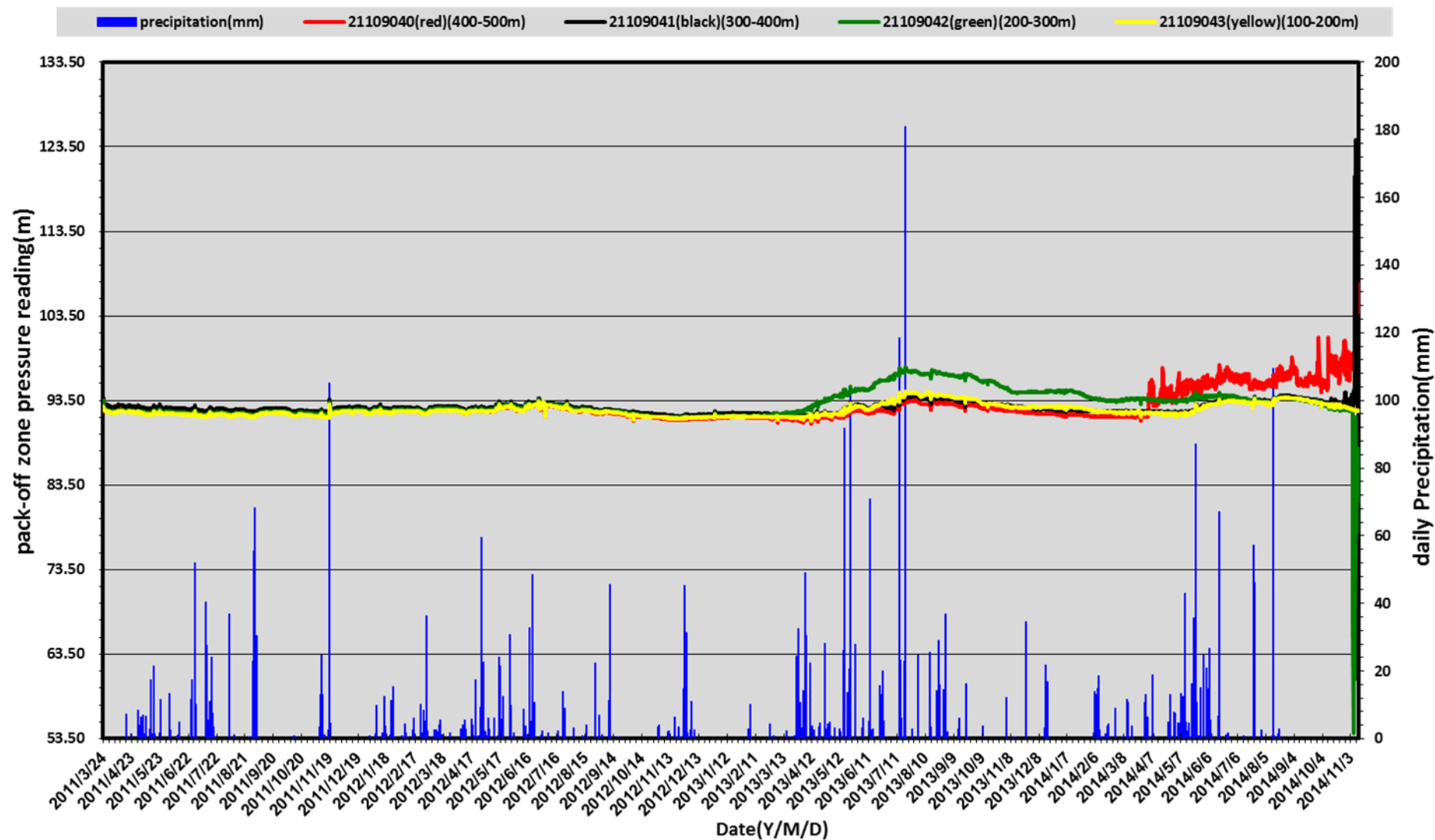


圖 3-6：4號井孔內4處裂隙段封塞壓力監測成果

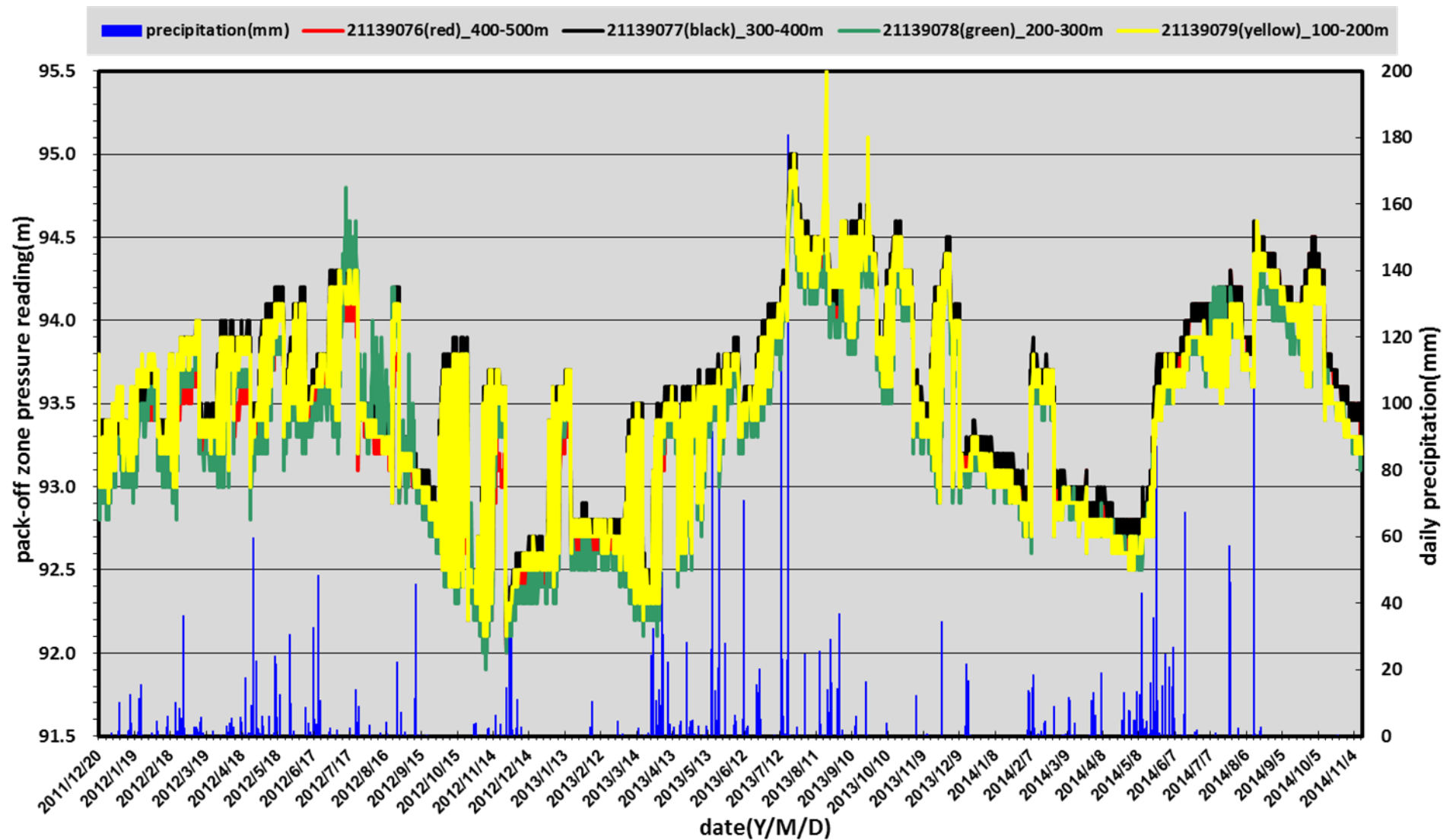


圖 3-7：5號井孔內4處裂隙段封塞壓力監測成果

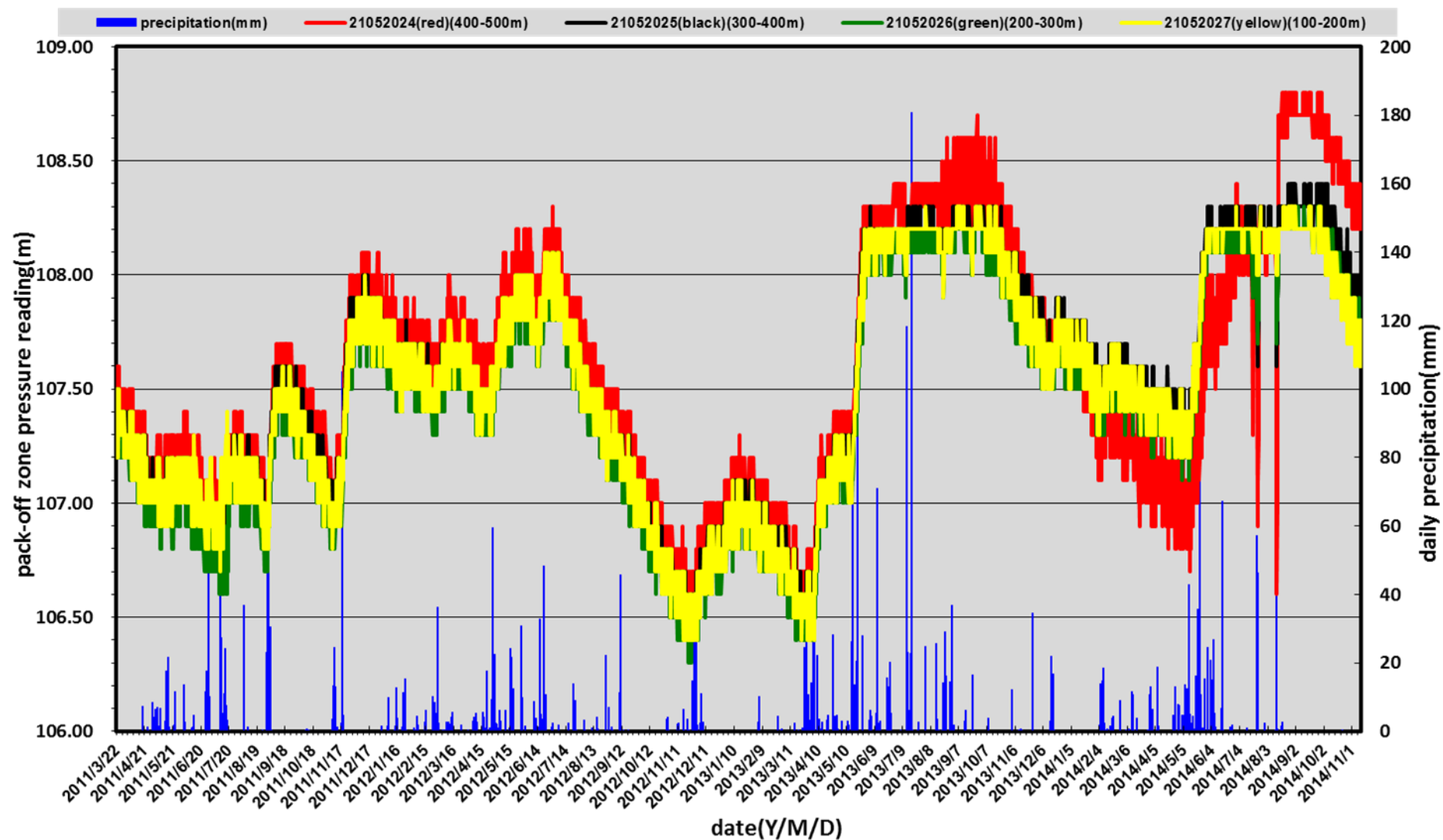


圖 3-8：6號井孔內4處裂隙段封塞壓力監測成果

表 3-2：C-C'剖面數值模擬所需主要環境參數列表

	調查數值範圍	參考數值 ¹	資料來源 ²
地下水位面溫度(°C)	23.4 to 23.9	23.5	SNFD-GEL-90-290, ac2p79, ac2p82
地溫梯度(°C/100 m)	1.5 to 1.8	1.7	SNFD-GEL-90-290, ac2p79, ac2p82
地表壓力(Pa)	NA	1.01E+05	NA
地表風化層厚度(m)	5 to 90	50	SNFD-EEL-90-270, c4p3
平均雨量(mm/yr)	650 to 1650	1080	SNFD-EEL-90-270, c3p11
平均入滲量(mm/yr)	-80 to 190	45	SNFD-EEL-90-270, c3p11

註1：第三欄中“參考數值”，為基本模型中使用參數值。

註2：引用資料，以報告代號代替作者。

表 3-3：C-C'剖面數值模擬所需主要水文地質參數列表

	岩石密度(kg/m ³) 調查數值範圍/參考數值	有效孔隙率 調查數值範圍/參考數值	滲透率(k, m ²)x 10E-15 調查數值範圍/參考數值	熱傳導係數(W/m·°C) 調查數值範圍/參考數值	比熱(J/kg·°C) 調查數值範圍/參考數值
風化層	NA/2000	NA/0.2	100 to 10,000/1,000 (SNFD-EEL-90-270, c4p5)	NA/2.0	NA/800
花崗岩	2620 to 2680/2650 (SNFD-GEL-90-290, c4p37)	0.0038 to 0.0079/0.005 (SNFD-GEL-90-290, c4p37)	0.001 to 0.1/0.01 (SNFD-GEL-90-290, c4p37)	2.3 to 3/2.5 (SNFD-EEL-90-275, c2p13)	730 to 903/800 (SNFD-EEL-90-275, c4p5)
斷層帶	NA/2650	0.0001 to 0.00001/0.0001 (SNFD-GEL-90-290, c3p51)	1.0 to 10,000/100 (SNFD-GEL-90-290, c4p37)	NA/2.0	NA/800
輝綠岩脈	NA/2650	NA/0.005	NA/0.001	NA/2.5	NA/800

註1：欄位中“參考數值”，為基本模型中使用參數值。

註2：引用資料，以報告代號代替作者。

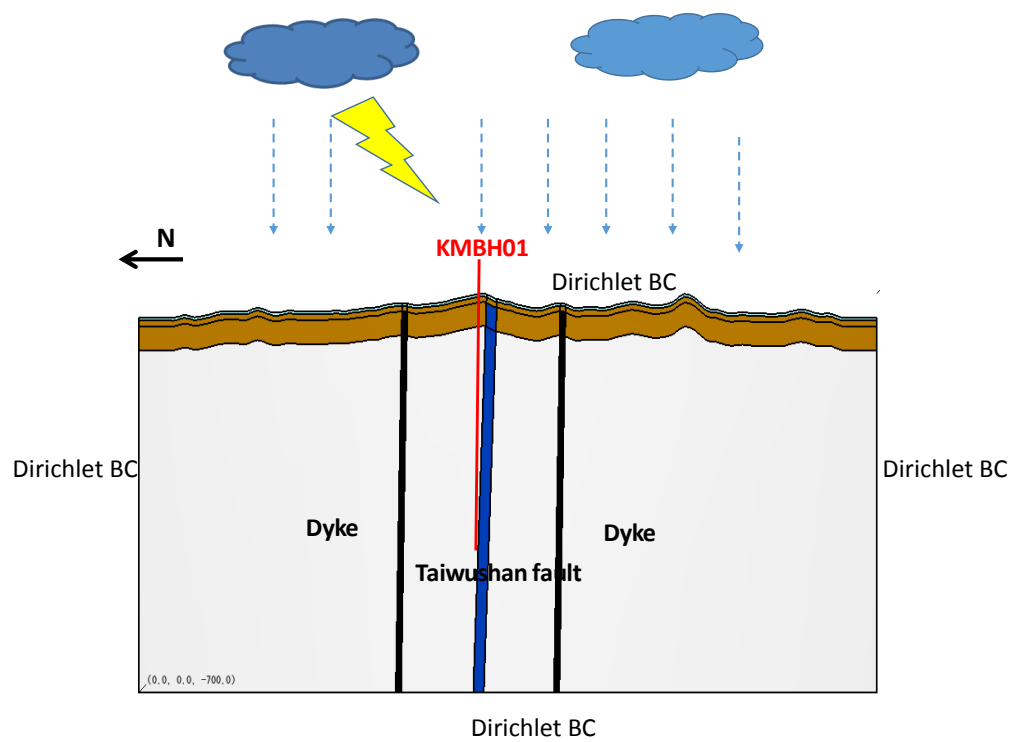


圖 3-9：二維數值模型主要構造與模型範圍示意圖

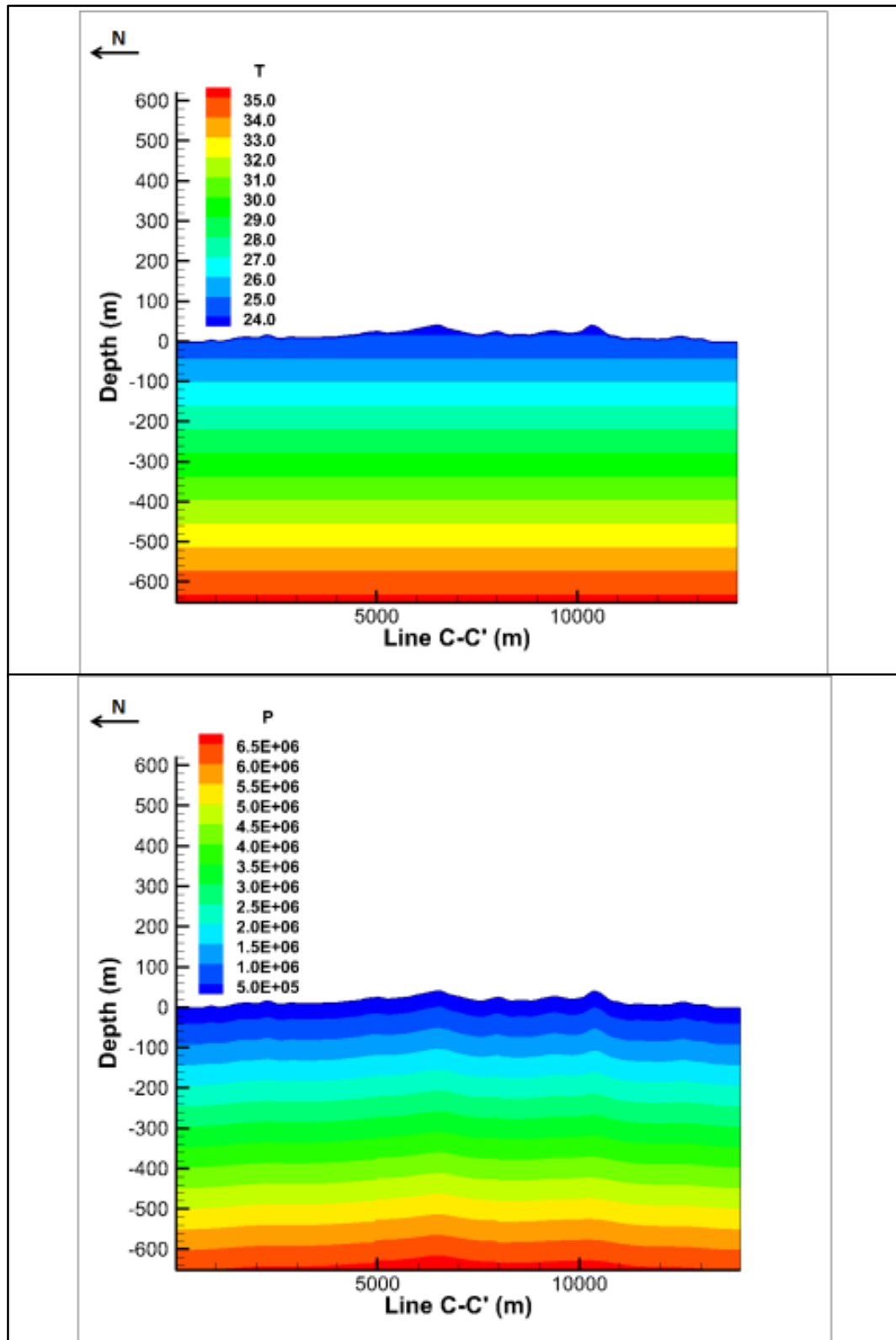


圖 3-10：模型初始平衡溫度(°C)及壓力(Pa)分布計算結果

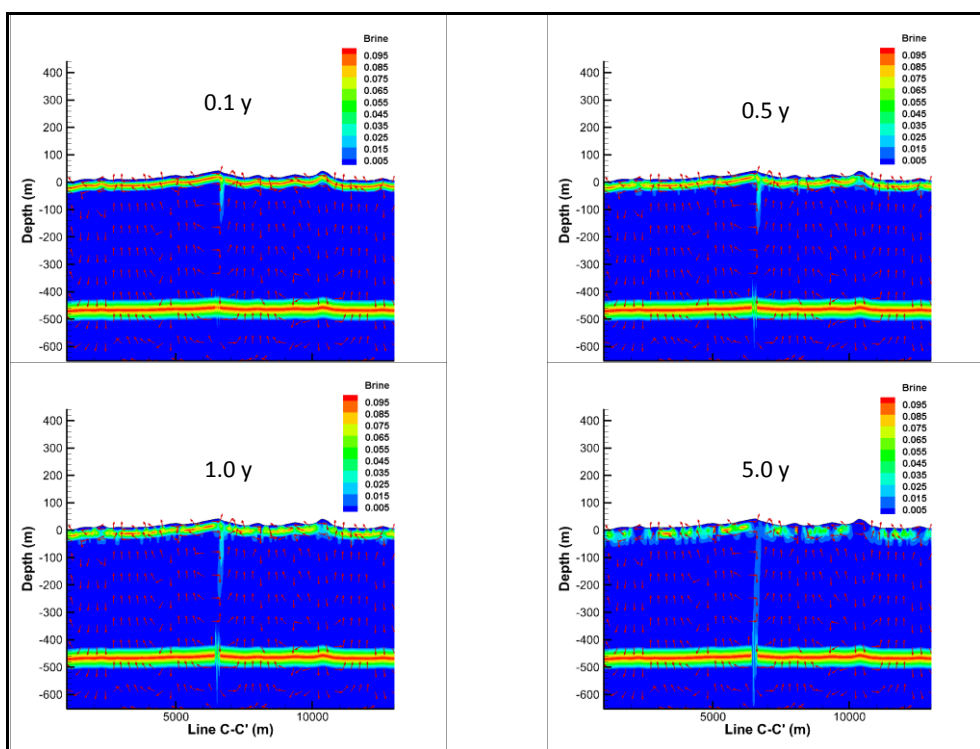


圖 3-11：10年內，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖

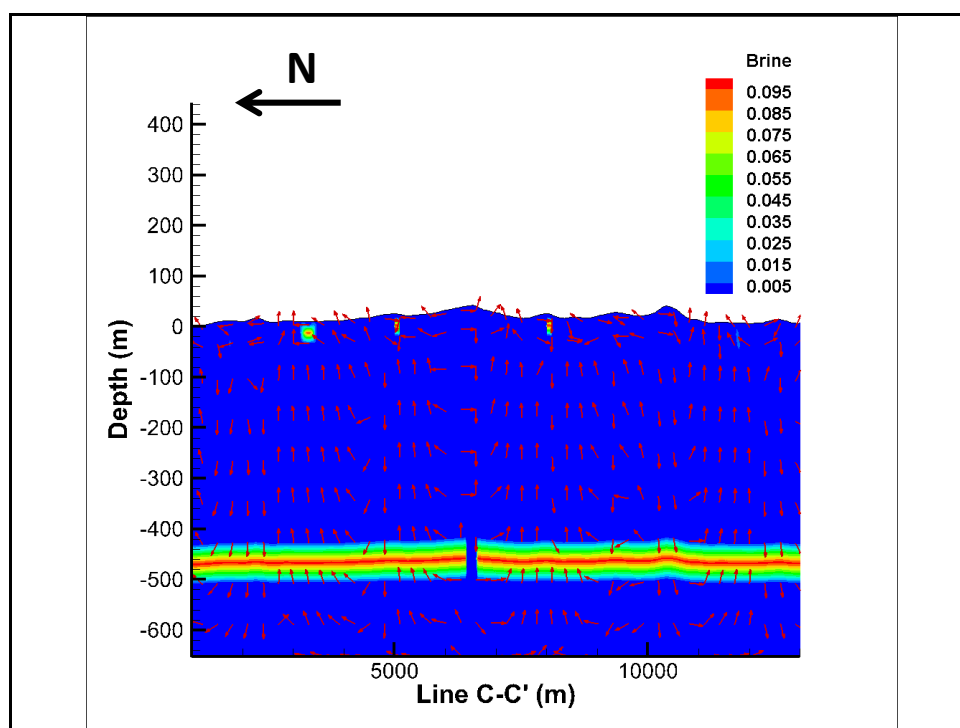


圖 3-12：100年時，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖

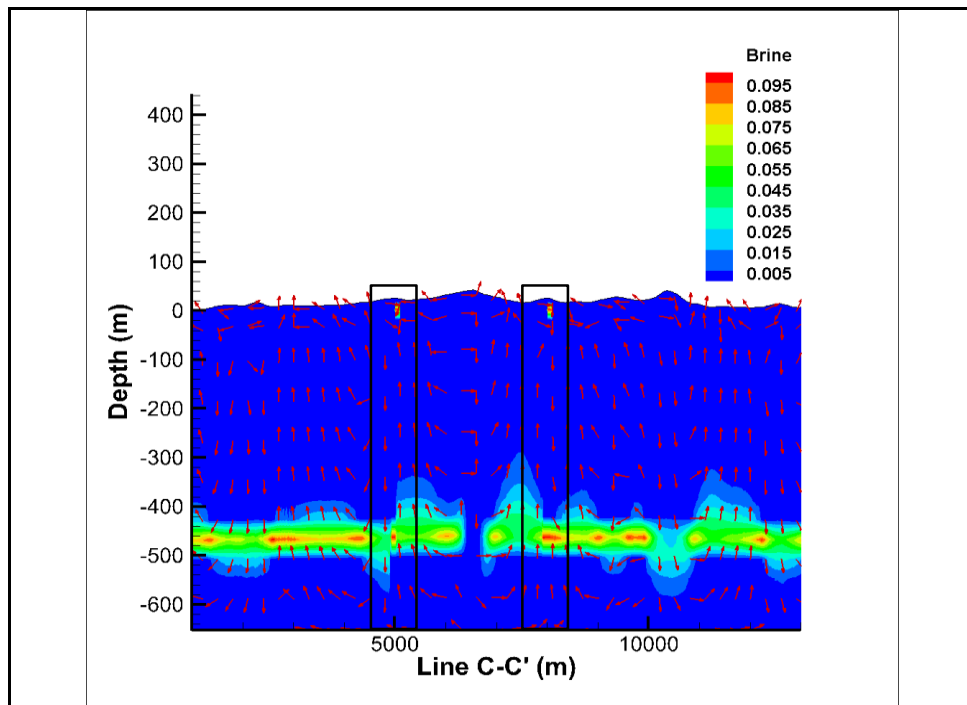


圖 3-13：1.0E+04年時，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖

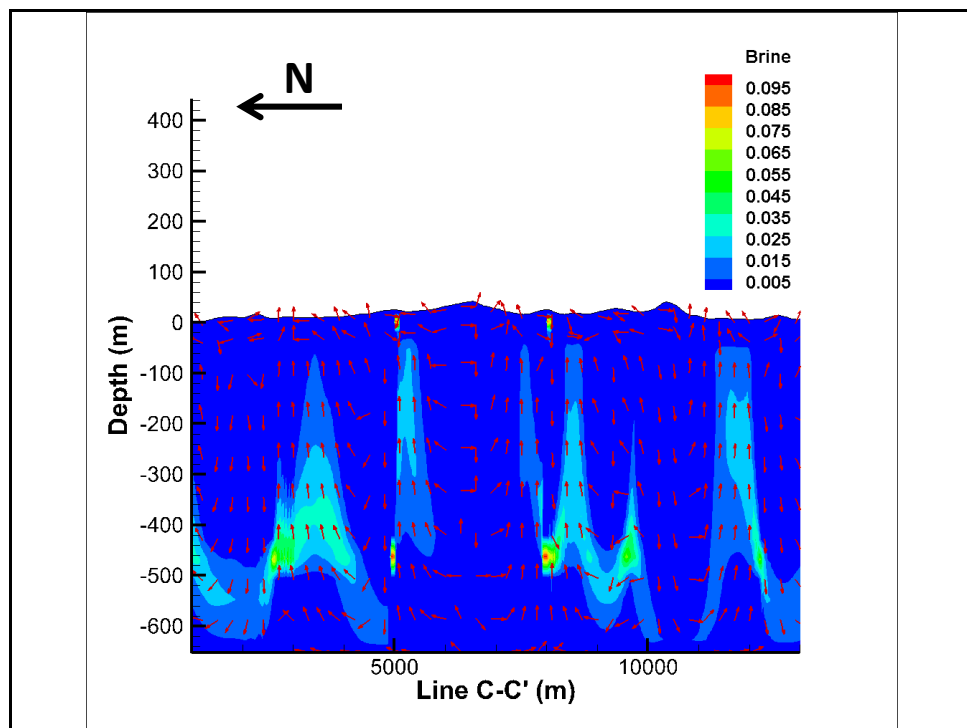


圖 3-14：1.0E+05年時，鹵水隨地下水遷移之濃度分布圖

3.1.2.3. 水文地球化學

在「深層地質處置」概念中，處置母岩的評估，除了需考慮岩層之地質、水文、地震和岩石力學特性等條件外，其水文地球化學特性更是決定是否適合進行深層地質處置的關鍵。而所謂合適的水文地球化學環境，係指其具備高的放射性核種遲滯能力、高的化學緩衝能力，以及低的核種溶解度之地下水化學特性(Metz et al., 2003)。除了直接影響核種的溶解度外，地下水的化學特性，尤其是地下水的酸鹼度及氧化還原條件，對工程障壁(如緩衝回填材料)及天然障壁(母岩)的屏障功能亦具有重要的影響性。因此，研析處置環境地下水的化學特性及其可能的演化機制，是潛在處置母岩安全評估中一項重要且基本的工作(JNC, 2000a)。

代表性的深地層水質資料及詳細的礦物組成，是評估水文地球化學環境合適性的必要基本資訊，而地化模擬技術是探討水文地球化學環境的長期演化(穩定)特性的必要能力。透過歷年的技術發展成果，目前已成功建構深地層裂隙水質的取樣技術及岩樣詳細礦物組成的分析技術，並成功取得離島結晶岩的深地層裂隙水質資料，及其周圍的新鮮與風化岩樣的礦物組成資訊。在裂隙水質資料方面，於離島結晶岩技術發展測試區6口深度達500 m鑽井中，經封塞取樣獲致深層裂隙地下水質分析數據，顯示太武山岩體與斗門岩體分屬兩不同地下水層，特別是後者具有沙漠化富硫及經過蒸發岩入滲的水質特徵。此外，當深度低於400 m以下時，離島結晶岩測試區地下水pH的保守數值均大於8，而氧化還原電位的保守數值均小於0 (mV)，屬於還原的狀態。在礦物組成分析方面，經過岩相觀察與分析、礦物鑑定及全岩地球化學組成分析，顯示結晶岩裂隙含水層經蝕變作用後石英大量溶解，長石呈現纖維長石化、絹雲母化或黏土化蝕變現象，黑雲母因蝕變而減少，形成綠泥石(主要含鐵之綠泥石亞種為主)，在裂隙段中常可見大量方解石晶體充填。裂隙填充物與其新鮮圍岩比較，顯示SiO₂含量皆低，Al₂O₃與CaO明顯富集，石英或矽酸鹽類礦物受到蝕變作用溶解或換質，重新膠結的次生礦物傾向以碳酸鹽類為主，同時易遷移

的 Na_2O 、 K_2O 推測因被流體帶走而呈現含量偏低的現象。在微量元素分析方面，裂隙散狀填充物呈現輕稀土元素富集與鎔(Eu)元素虧損，但在稀土元素總含量上，裂隙帶都明顯富集，可能顯示受到蝕變作用下，易遷移性元素被溶解帶離，但稀土元素仍保留並相對富集，代表此區結晶岩的裂隙含水層因長期岩-水反應結果，含可吸附La、Ce、Sm、Nd等元素的組成，前述裂隙所含的次生礦物與填充物對吸附作用相當重要。雖然現有資訊數量有限，但在技術可行性的發展驗證階段，已可做為建立結晶岩體地球化學反應模擬技術的基礎。

本研究工作主要以離島結晶岩的裂隙地下水水質，以及其周圍的新鮮與風化岩樣的礦物組成等調查分析資料為基礎，利用地化模式軟體(Geochemist's Workbench, GWB)與該軟體所內含之"thermo.com.V8.R6+.dat"熱力學資料庫，來進行反應路徑之模擬，以瞭解該結晶岩體深層地下水的化學演化特性及其相關的岩-水反應機制。此外，也期藉由各種不同假設條件(情境)之反應路徑模擬結果，來探討處置環境(岩石及其周圍水質條件)，在不同的外在時空背景變化下，可能發生的化學變化及其結果，例如裂隙地下水的pH和Eh變動範圍，以及其圍岩裂隙中的次生礦物種類；而這些可能的改變，對深層地質處置之核種穩定性(溶解度及遲滯特性)扮演著關鍵的影響角色。

102年度已針對國際間運用GWB在用過核子燃料處置計畫之現況或經驗，進行相關文獻資料的蒐集及研析，並選取案例進行軟體的測試與驗證，以提升本研究使用該軟體進行地化模擬工作之能力。103年度則規劃利用在離島結晶岩體既有現地水質及礦物資料，發展岩-水反應路徑模擬技術，成果簡述如下：

(1) 建立反應路徑模擬情境

一個化學反應系統，根據其是否與外界有質量的交換特性，可分為封閉(close)及開放(open)兩種反應系統。在岩體內部聯通性很差的裂隙末端，基本上，可以合理假設其為一封閉式的化學反應系統；在岩體內部的地下水主要流動路徑及其週遭的裂隙，則可視為開放式的化學反應系統。

反應路徑模擬(reaction-path modeling)主要在探討化學反應系統的特性，隨反應程度或時間的可能演化情形。反應路徑模擬雖然可考量隨時間變化的動力特性，但由於礦物反應動力學的資訊貧乏，或因不同礦物反應速率差異過大所造成的數值分析困難度，故通常需要做適度的簡化。例如，在本研究中的反應動力模式之反應路徑模擬過程中，僅新鮮的主要原生礦物，其反應速率以動力學模擬(Marini, 2007; Palandri and Kharaka, 2004)，其餘礦物的沉澱或溶解，均假設「瞬間」達熱力學平衡條件。

本研究之反應路徑模擬共包含5種不同的情境(圖 3-15)，用以瞭解不同環境條件下，水文地球化學的可能演化情況。每種情境的反應路徑模擬均包含相對反應速率(CaseZx)及反應動力(CaseKx)等兩種模式；前者可供快速研判反應系統達最終平衡時的化學特性，後者則供研判反應系統隨時間的可能演化情形。透過各種不同假設條件(情境)之反應路徑模擬結果，可供建構功能/安全評估所需之相關水文地球化學特性，例如，地下水pH、Eh的變動範圍，以及其圍岩裂隙中的次生礦物相。其中，pH、Eh之範圍可用以評估核種的穩定特性及估算其可能的溶解度範圍，而次生礦物相則為決定其吸附核種能力的主要因素。

假設在反應起始之初，反應系統內的礦物組成均為深地層新鮮岩樣的礦物組成分析結果。至於在不同情境下，反應系統的起始水質條件、假設條件及其模擬目的，分別說明如下：

(a) 情境1：深層封閉裂隙情境(CaseZ1/CaseK1)

- (i) 針對遠場模擬所需的極端條件—pH的上限值及Eh的下限值，用以研判深地層在無干擾狀態下之水文地球化學的可能特性，或用以研判地下水取樣分析結果與所謂熱力學平衡狀態的差距。

- (ii) 本情境假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸後，馬上與外界隔絕，形成封閉式的反應系統，長期進行化學演化。

(b) 情境2：深層開放裂隙情境(CaseZ2/CaseK2)

- (i) 針對導水裂隙水文地球化學環境可能面臨的pH上限值及Eh下限值，研判在深層地下水流動管道內或其週遭裂隙之水文地球化學的可能特性。另外，由於本情境與深層封閉裂隙(情境1)之反應路徑模擬條件，與深地層風化岩心的環境接近，因此，可藉由與次生礦物相的實驗分析結果之比對，來研判模擬結果的合理性。
 - (ii) 本情境假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸時，因地下水的流動，使整個反應系統的風化驅動力，如CO₂的含量(逸壓)，維持在一個定值；並假設該定值等於深層水質的分析結果。
- (c) 情境3：深層開挖擾動情境(CaseZ3/CaseK3)
- (i) 針對近場模擬所需水文地球化學環境的可能變動範圍。雖然在深地層處置概念的時間尺度(百萬年)中，地層處置開挖及運轉的工程行為僅為相對地短暫(數十年)，但相關工程行為，如內燃機的使用帶入大量CO₂、因通風需求帶入大量O₂，將干擾原本深地層的水文地球化學特性。
 - (ii) 本情境假設「深層地下水」與新鮮岩石接觸時，地下水的風化驅動力，瞬間提高至高CO₂含量(P_{CO₂}=10,000 ppm)及高O₂含量的條件(P_{O₂}=0.2 atm)後，後因處置場封閉未能持續提供CO₂及O₂，使得該封閉式反應系統中的CO₂及O₂含量，隨反應而持續降低。
- (d) 情境4：淺層開放裂隙情境(CaseZ4/CaseK4)
- (i) 針對導水裂隙水文地球化學環境可能面臨的pH下限值及Eh上限值，研判在淺層地下水流動管道內或其週遭裂隙之水文地球化學的可能特性。
 - (ii) 本情境假設「淺層地下水」與新鮮岩石接觸時，因淺層地下水受其上方未飽和層的高CO₂含量的影響，使整個反應系統的CO₂風化驅動力，維持在一個定值(P_{CO₂}=10,000 ppm)。

(e) 情境5：未飽和層情境(CaseZ5/CaseK5)

- (i) 針對遠場模擬所需的另一極端條件—pH的下限值及Eh的上限值，在未飽和層中的地下水，上接富含O₂的天然雨水，向下為淺層地下水的主要來源。由於未飽和層上部的土壤植物根部及維生物的作用，使得未飽和層中的O₂會逐漸消耗，並使得未飽和層中的CO₂含量通常遠大於大氣中CO₂含量。
- (ii) 此情境首先假設純水與大氣(P_{CO₂}=350 ppm, P_{O₂}=0.2 atm)達平衡後，再與海風混合形成含NaCl的未飽和層的入滲水(1 mmol/kgGW)；其次，再假設該含NaCl的入滲水在未飽和層與岩石接觸時，因土壤植物根部及微生物的作用，使其整個反應系統的CO₂風化驅動力，維持在一個高CO₂含量的定值(P_{CO₂}=10,000 ppm)，但因整個反應系統與大氣隔離，故未飽和層的O₂不再補充且隨反應的進行而改變。

(2) 建立模擬所需之水質及礦物資料

(a) 水質資料

本研究之模擬情境案例中所需的初始水質資料，包含深層地下水、淺層地下水與未飽和層之入滲水。其中，深層地下水的水質資料係採用離島結晶岩深度400 m至500 m裂隙地下水採樣分析所得之平均水質。淺層地下水則是採用離島結晶岩深度50 m附近之裂隙地下水採樣分析資料。至於未飽和層之入滲水則是假設純水與大氣(P_{CO₂}=350 ppm, P_{O₂}=0.2 atm, T=25 °C)達平衡後，再與海風(含1 mmol NaCl)混合形成所謂的未飽和層之入滲水。

(b) 礦物資料

(i) 完整新鮮岩樣礦物

在本研究的模擬情境案例中，均假設在反應起始之初，反應系統內的礦物組成均為深地層完整新鮮岩樣的礦物組成；而該新鮮岩樣係取自離島結晶岩深度460 m附

近之岩心，其主要岩性為花崗片麻岩。根據岩心礦物組成分析結果得知，該花崗片麻岩岩樣主要是由石英(35%)、鉀長石(45%)、斜長石類(15%)和黑雲母類(5%)等礦物所組成，另含少量或微量之綠泥石類、絹雲母、褐簾石類及鋇石等礦物。然而，一般地化模式軟體的熱力學資料庫，因礦物的命名方式不同或因資料缺乏無法涵蓋所有的礦物，因此，在進行岩-水反應的可能路徑探討時，必須根據所使用的熱力學資料庫實際內容，將分析/觀察所得的新鮮原生礦物、風化次生礦物及微量的殘餘原生礦物，進行適度的分類或假設：

(*) 石英(Quartz)含量35 vol.%。

(*) 鉀長石(K-feldspar)含量45 vol.%：以微斜長石(Microcline)來代表。

(*) 斜長石類(Plagioclase)含量15 vol.%：

以79 vol.%的鈉長石(Albite_low)及21 vol.%的鈣長石(Anorthite)的混合比例來代表。

(*) 黑雲母類(Biotite)含量5 vol.%：

以75 vol.%鐵雲母(Annite)及25 vol.%金雲母(Phlogopite)的混合比例來代表。

(ii) 破碎裂隙帶岩樣礦物

離島結晶岩之破碎(裂隙)帶風化岩心樣品，經實際分析所得的風化次生礦物或可能之微量殘餘原生礦物，包含綠泥石類(chlorite)、角閃石類(amphibole)、綠簾石類(epidote)、鈦鐵礦(ilmenite)、磁鐵礦(magnetite)、鋇石(zircon)、石榴石類(garnet)、褐簾石類(allanite)、絹雲母(sericite)、白雲母(muscovite)、單斜輝石(clinopyroxene)、黝簾石(zoisite)、方解石(calcite)、磷灰石類(apatite)、黃鐵礦(pyrite)、高嶺石(kaolinite)，及其它微量的黏土礦物(clay)。其成分如下，

- (*) 綠泥石類、簾石類、絹雲母、方解石、黃鐵礦、高嶺石、石英及黏土礦物為主要的次生礦物，但石英可能為次生礦物或殘餘原生礦物；
- (*) 角閃石類、鈦鐵礦、磁鐵礦、鋯石、石榴石類、白雲母、單斜輝石、磷灰石類等，則可能為微量的殘餘原生礦物。

為了與反應系統內之初始(原生)礦物有所區分，上述相關礦物在本研究之模擬結果中，均將視為反應過程所形成之次生礦物。經與熱力學資料庫中之礦物資料進行比對後，本研究將上述之次生礦物進行以下之假設：

- (*) 綠泥石類(chlorite)以同屬綠泥石類的鎂斜綠泥石(Clinochlore-14A)及鐵綠泥石(Daphnite-14A)做為代表；
- (*) 角閃石類(amphibole)以同屬角閃石類的透閃石(Tremolite)及直閃石(Anthophyllite)做為代表；
- (*) 石榴石類(garnet)以同屬石榴石類的鈣鐵榴石(Andradite)及鈣鋁榴石(Grossular)做為代表；
- (*) 褐簾石類(allanite)及黝簾石(zoisite)均以黝簾石(Zoisite)做為代表；
- (*) 絹雲母(sericite)及白雲母(muscovite)均以白雲母(Muscovite)做為代表；
- (*) 磷灰石類(apatite)以氟磷灰石(Fluorapatite)做為代表。

後續將利用上述所建置之基本資料與模擬情境，進行其反應路徑模擬，以及模擬結果之資料解析，以瞭解結晶岩體岩-水反應機制，並探討處置環境(岩石及其周圍水質條件)，在不同的外在時空背景變化下，可能發生的化學變化。

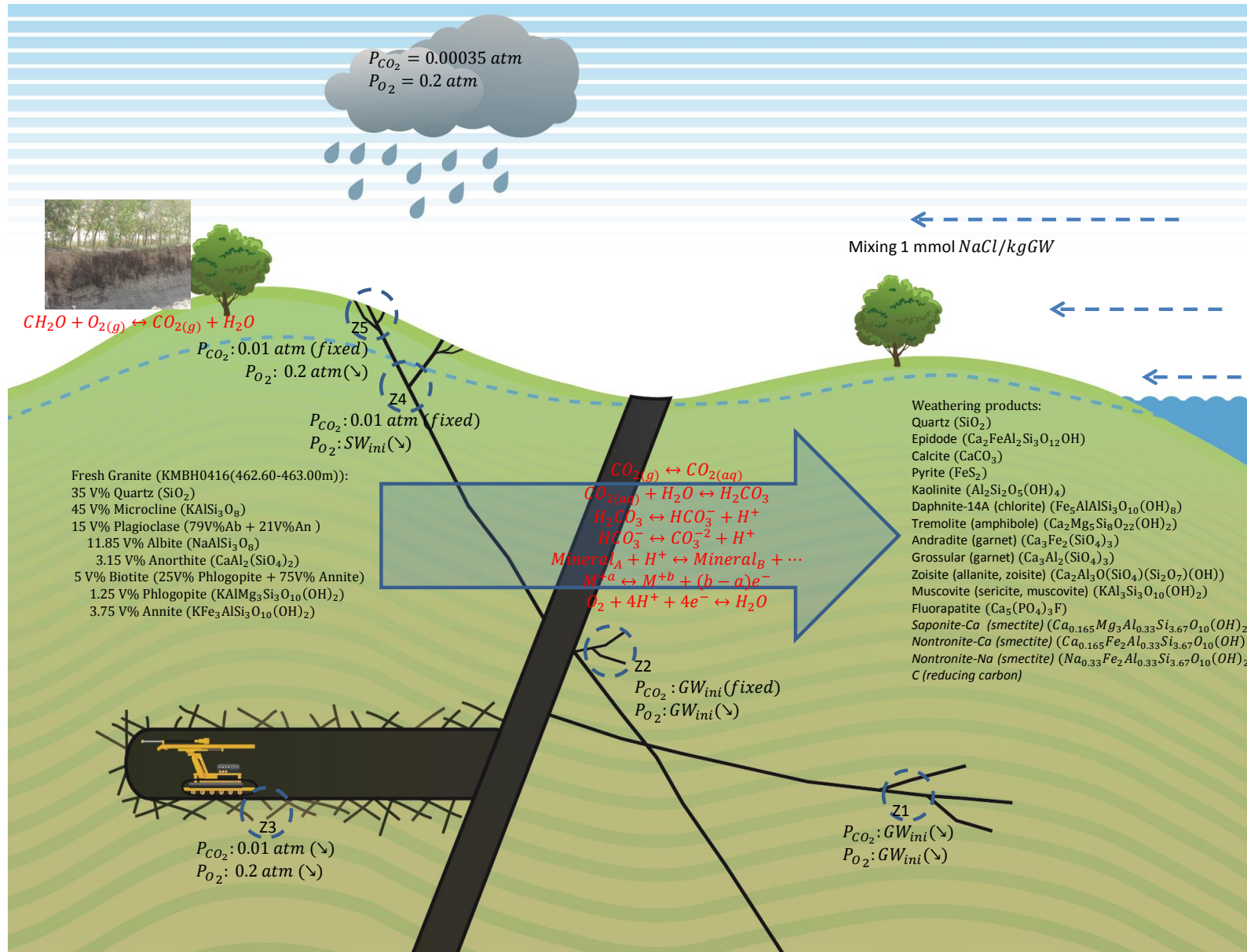


圖 3-15：模擬情境示意圖

3.1.2.3.1. 結晶岩體岩礦特性分析

由於地質環境特性主控了工程障壁系統(EBS)的效用以及天然母岩屏障的功能，例如：岩石力學和熱傳特性影響最終處置場設計與建造、地下水化學性質與流場影響母岩溶蝕與放射性核種遷移等，為了評估潛在處置母岩之適切性，必須有正確可靠的地質資訊，才得以建立具有代表性的地質概念模式，作為最終處置母岩選址依據與相關工程設計關鍵參數，這些地質資訊包括了水文、水文地球化學、核種傳輸路徑與岩石特性等；再者，各潛在處置母岩皆具有其獨特之地質特性，故取得之資訊即為其代表性的數值模擬關鍵數據，可作為各項情節評估所需之輸入參數，利用討論岩-水作用反應，可推衍深層地下水地球化學演化過程(Iwatsuki and Yoshida, 1999)。

在結晶岩體岩礦特性分析方面，102年度取得本島結晶岩的岩樣，已完成岩石樣品之前處理工作(含岩石產狀、岩性與微視構造紀錄)及初步完成的主要元素全岩地化分析，103年度將持續進行岩相、全岩微量元素地化、礦物組成及鋁石鈾-鉛同位素定年等分析工作，透過系統化實驗分析工作，以取得後續地質演化模式與地化反應模擬之必要資訊。

圖 3-16為該岩體所有岩樣薄片經偏光顯微鏡下計數所獲得之礦物含量QAP分類圖(Streckeisen, 1976)。由圖可知，岩體分布在以石英(Q)含量20%至60%之間的廣義花崗岩類(granitoids)範圍內，更明確的是以斜長石(P)含量35%至65%的二長花崗岩(monzogranite)與斜長石(P)含量65%至90%的花崗閃長岩(granodiorite)為主。

微量元素量測項目有：Ni、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Hf、Ta、Pb、Th、U。利用微量元素中的稀土元素(rare earth element-REE)含量，在對球粒隕石標準化的稀土元素分布圖中(chondrite-normalized rare earth element pattern)作圖，可看出不論是花崗片麻岩(圖 3-17(a)-(c))、細粒花崗岩與花崗岩(圖 3-17(d))都表現出

右傾之輕稀土元素富集與鉬元素虧損，比較離島花崗岩岩心組成(灰色區塊)，兩者特性符合，顯示岩漿由地殼重熔、分化而來。

從岩心中擇取3個較為適合之岩樣(編號為H04、H06與H09)，利用雷射感應耦合電漿質譜儀 (laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry—LA-ICP-MS)來進行鋁石鈾-鉛定年，分析結果如圖 3-18所示，顯示花崗岩質結晶岩體岩漿侵入的事件，應發生於85百萬年至95百萬年左右，即反映花崗岩體形成的時代。另一方面，從許多繼承鋁石多期次的古老年齡，可推論此岩體是由不斷重熔產生的地殼岩漿所侵入冷卻形成，表示台灣東部的地殼，與歐亞大陸華南沿海的地殼相當，經歷過早元古代、印支期、早燕山期與晚燕山期之事件，而鋁石礦物的多重鋁石鈾鉛同位素年齡則留下了相關地質紀錄。

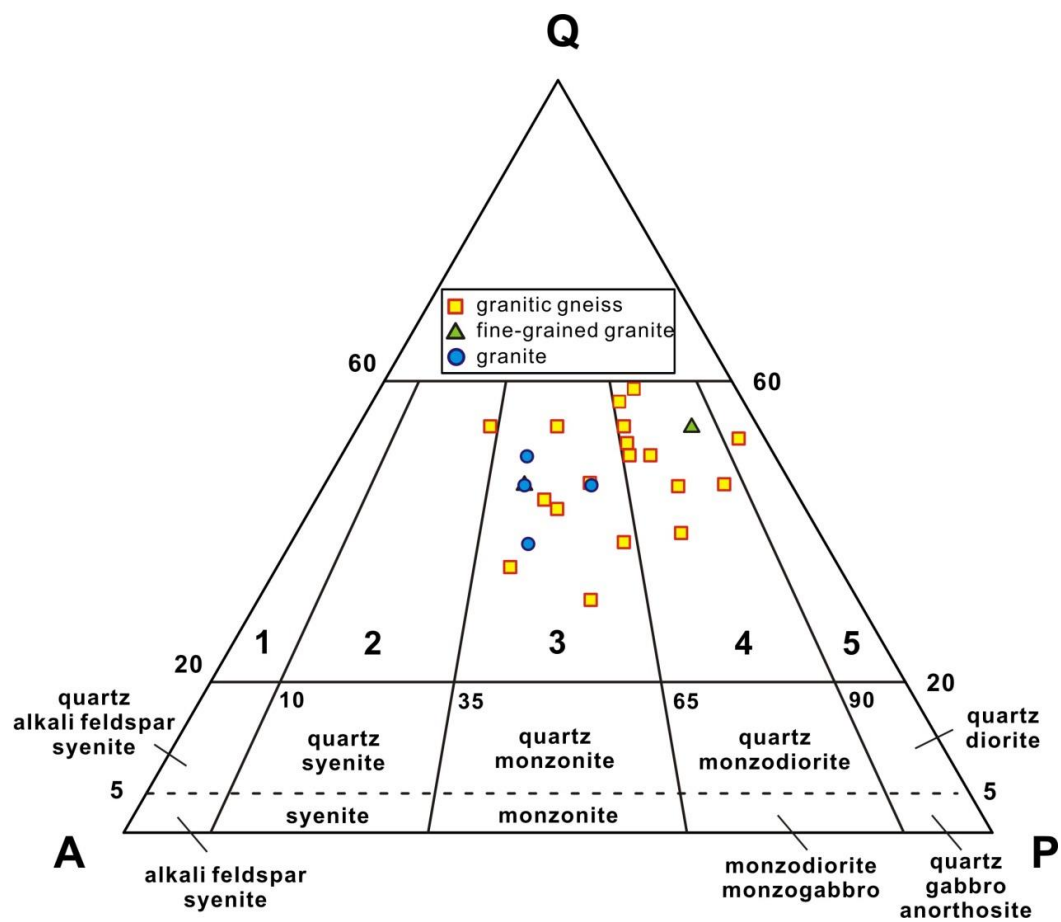


圖 3-16：新鮮圍岩之岩性分類QAP圖

註：1. alkali feldspar granite; 2. syenogranite; 3. monzogranite; 4. granodiorite; 5. Tonalite。

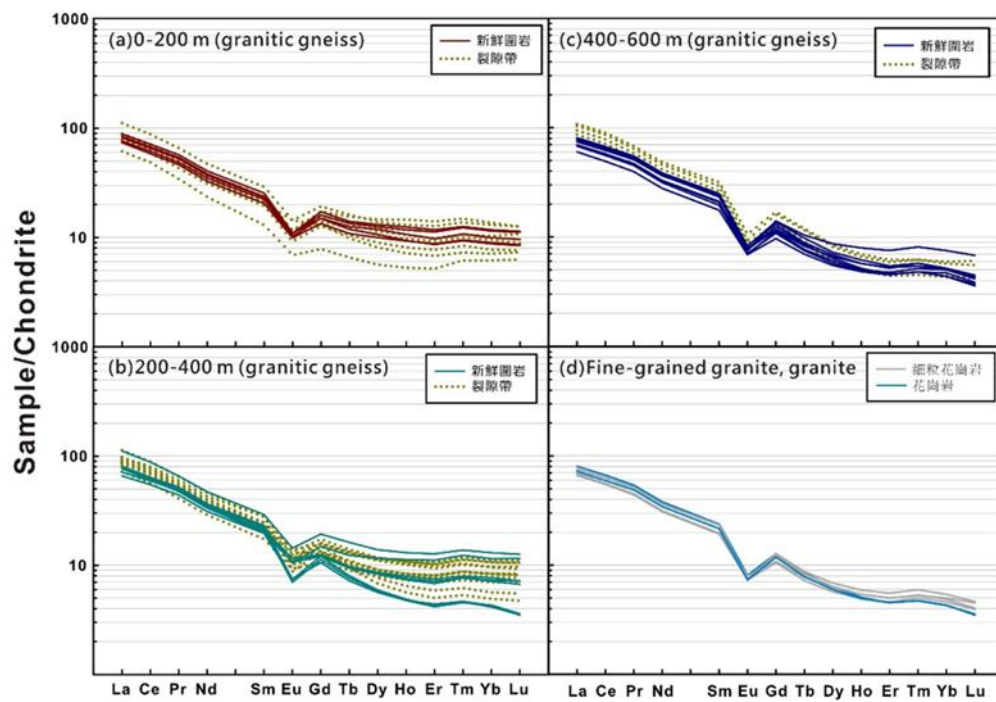


圖 3-17：新鮮圍岩及裂隙帶稀土元素分布圖

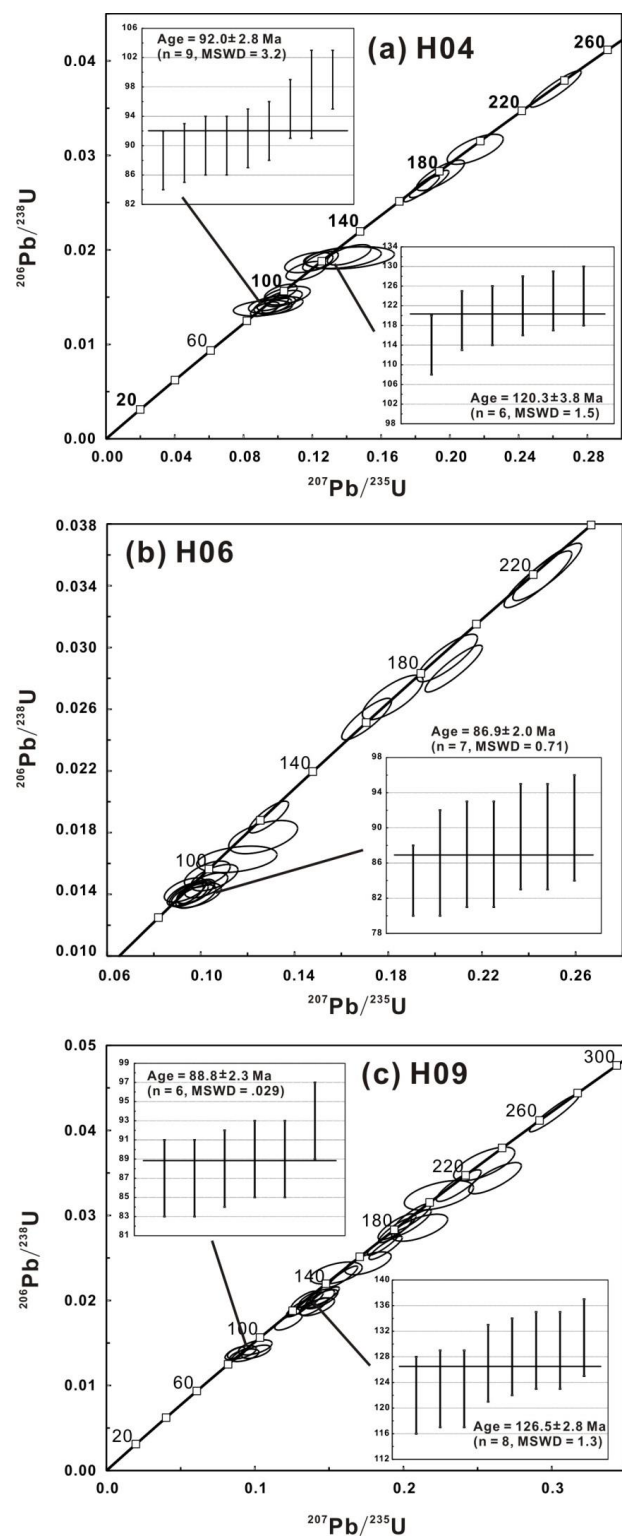


圖 3-18：鋯石鈾鉛定年結果圖

3.1.2.4. 核種傳輸路徑

最終處置系統是否能安全運作，母岩的地質環境必須滿足下列2項功能(JNC, 2000a)：長期的穩定性與遲滯核種遷移的功用。連通的裂隙網路是地下水與核種的主要傳輸路徑，因此，瞭解岩體中裂隙構造分布為處置設施是否安全的重要條件之一(JNC, 2000a)。雖然連通的裂隙網路是核種的主要傳輸路徑，但核種亦可藉由其在裂隙圍岩的擴散機制，稀釋其在地下水中的濃度，且裂隙中的充填物與圍岩的礦物組成對不同的核種會造成不同的吸附效應，使得由處置設施近場外釋的核種，可能因圍岩擴散及吸附等機制而遲滯核種由地質圈遷移至人類生活圈的傳輸速度。

為了建構探討核種在地質圈傳輸路徑的能力，及瞭解地質圈對核種遷移之遲滯能力，並考量SNFD2017報告所需之核種傳輸路徑評估分析能力，本計畫在核種傳輸路徑方面，規劃3項子項工作：

- (1) 在流通路徑的研究方面，規劃進行二維離散裂隙網路地下水流場數值模式之發展。
- (2) 在流通路徑參數的研究方面，規劃進行結晶岩體井下的裂隙特性研究。
- (3) 在基質的擴散效應研究方面，規劃在實驗室內進行核種遷移與傳流試驗，取得本島結晶岩樣品的核種吸附與擴散參數。

3.1.2.4.1. 流通路徑的定義

流通路徑(flow pathway)泛指下列地質構造：裂隙(包含節理與斷層)、岩脈及岩床(dikes and sills)、層面(bedding planes)、不整合(unconformities)、基質孔隙率(matrix porosity)等(JNC, 2000a)。

岩體中會發育深度、程度、大小不同的區域性破碎帶與裂隙，連通的裂隙網路是地下水與核種的主要傳輸路徑。節理與斷層為主要的裂隙構造，可藉由地表或井下裂隙資料以分析裂隙網路特性參數。若考慮岩體中溶質傳輸的範圍，除了考慮上述流通路徑中的地下水流之外，還須考慮溶質藉由擴散效應進入基質，以及利用吸附效應附著在

岩體礦物表面的機制。因此，以功能/安全評估的角度而言，欲瞭解母岩中的溶質傳輸特性，首先須藉由分析裂隙資料以建構離散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)，進而建立此離散裂隙網路之地下水流場，以作為離散裂隙岩體中溶質傳輸的初始條件，並在離散裂隙岩體溶質傳輸模擬中考慮圍岩擴散與溶質吸附效應。

103年度開始根據此DFN結果，進行地下水流場數值模擬的技術發展。透過假設結晶岩體中地下水流主要發生於裂隙網路，將連通裂隙網路簡化為數個互相連接的一維渠道，以數值遞歸演算法(Recursive algorithm)計算出岩體中連通裂隙網路的路徑，展示岩體中導水裂隙可能的空間分布，並根據設定的邊界條件及質量守恆原則，模擬出試驗母岩中的地下水流分布情形，以發展DFN穩態地下水流數值模擬方法。

為評估現地量測的裂隙數據，103年度採行方法流程概述如下：

(1) DFN數值模擬

利用現地數據的量測面上進行數值採樣，計算DFN_NET採樣結果的裂隙強度(Fracture intensity)、裂隙參數(如位態、軌跡長度、間距與裂隙大小)平均值與變異數，及裂隙參數的半變異數(semi-variogram)模式。

(2) DFN最佳化

根據DFN_NET裂隙結果，裂隙最佳化程式(DFN_OPT)對DFN構造進行最佳化。DFN_OPT以模擬淬火法(simulated annealing)理論，擾動DFN_NET模擬所使用的裂隙參數，並比較擾動後在量測面上展現的裂隙軌跡特性與現場裂隙軌跡特性，當達到收斂條件後，則可得出符合現場裂隙軌跡特性的DFN結果，以下以其模擬程式DFN_OPT簡稱之。

(3) FracMan數值模擬之比較

利用商業化DFN模擬軟體FracMan 7.4版，以現場量測資料分析所得的裂隙參數模擬現地數據的DFN，將DFN_OPT裂隙結果與FracMan模擬結果互相比對，評估2種模擬結果與現場觀測所得岩體坑道內裂隙特性的差異。

以圖 3-19 為 DFN_OPT 裂隙結果為例，為了比較 DFN_OPT 與 FracMan 模擬結果，進行 FracMan 模擬時將依現場裂隙資料作條件模擬(conditioning simulation)。因 FracMan 僅容許以鑽井中的裂隙資料做為條件資料，故進行條件模擬時分別在現場裂隙資料兩個施測面(SPSW 及 SPNW 面)上設置 5 個不同高度的虛擬水平鑽井，並擷取現場資料與虛擬鑽井相交的裂隙作為條件資料，且限定每一條現場裂隙軌跡，僅可出現於某一個虛擬鑽井，以避免重複條件化。若比較現場資料、DFN_OPT 與 FracMan 結果的裂隙強度，由表 3-4 可以看出除了 Cluster3 以外，FracMan 的 P_{21} 與 P_{10} 普遍大於其他結果之裂隙強度。發生此現象的原因為 FracMan 做條件模擬時，僅能將非條件資料的裂隙從虛擬鑽井中移除，或搬動其他裂隙道條件資料所在的位置，裂隙大小不會在條件模擬中改變。故僅當裂隙數目較少的叢集(如 Cluster3)方可能得到接近現場及 DFN_OPT 的裂隙強度，但當裂隙數目較多的叢集則容易產生高估裂隙強度的現象。但反觀 DFN_OPT，因擾動的過程中容許改變裂隙大小，且 P_{21} 為擾動目標函數考慮的分量之一，因此 DFN_OPT 計算的 P_{21} 方能接近現場的 P_{21} 。

表 3-4：現場與模擬結果之裂隙密度

SPNW						SPSW				
	參數	現場資料	初始DFN	最佳化DFN	FracMan	參數	現場資料	初始DFN	最佳化DFN	FracMan
Cluster1	位態	(255°,69°)	(252°,68°)	(255°,69°)	(255°,69°)	位態	(255°,69°)	(252°,68°)	(255°,69°)	(255°,69°)
	P ₂₁ (1/m)	1.3072	1.566	1.092	2.2699	P ₂₁ (1/m)	1.0677	1.6925	1.087	2.4593
	P ₁₀ (1/m)	1.75	2.05	1.65	2.35	P ₁₀ (1/m)	1.15	1.65	1.2	2.4
Cluster2	位態	(114°,81°)	(115°,82°)	(115°,82°)	(114°,84°)	位態	(114°,81°)	(115°,82°)	(115°,82°)	(114°,84°)
	P ₂₁ (1/m)	0.3860	0.5803	0.3438	0.9832	P ₂₁ (1/m)	0.5346	0.6078	0.5194	0.9161
	P ₁₀ (1/m)	0.15	0.25	0.15	0.2	P ₁₀ (1/m)	0.6	0.6	0.55	0.95
Cluster3	位態	(93°,30°)	(107°,28°)	(92°,31°)	(91°,29°)	位態	(93°,30°)	(107°,28°)	(92°,31°)	(91°,29°)
	P ₂₁ (1/m)	0.2540	0.5567	0.2318	0.3283	P ₂₁ (1/m)	0.1151	0.5682	0.1369	0.3269
	P ₁₀ (1/m)	0.15	0.25	0.15	0.2	P ₁₀ (1/m)	0.15	0.2	0.1	0.1

註：SPNW 及 SPSW 為現場數據兩個施測面。

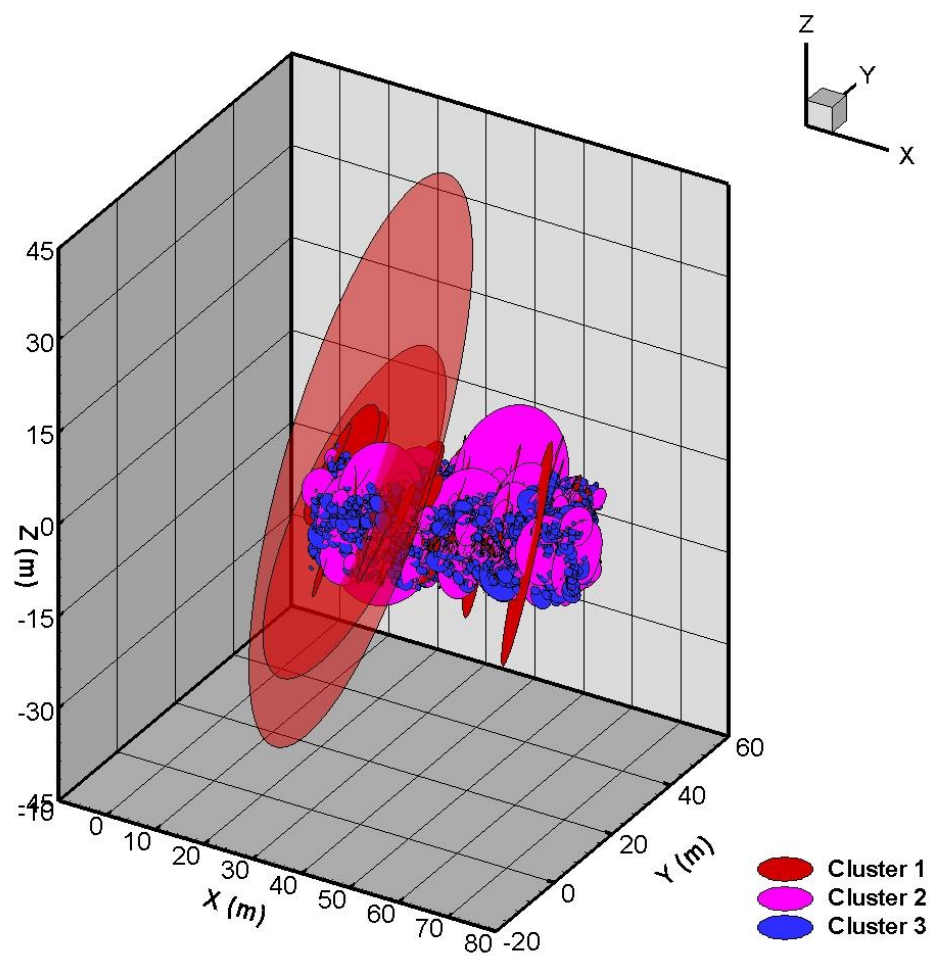


圖 3-19：DFN_OPT模擬結果

3.1.2.4.2. 流通路徑參數的定義

連通的裂隙網路為地下水與核種之主要傳輸路徑，而流通路徑參數主要包括裂隙之水力傳導係數、裂隙寬度與延散度等參數(JNC, 2000a)。在進行裂隙傳輸行為的模擬之前，必須先對於裂隙參數進行研析，進而建立完整的裂隙構造模型，以分析探討岩體裂隙中地下水滲流傳輸的現象。針對結晶岩體內鑽井之岩心井錄、孔內攝影及地球物理井測等資料進行綜合解析，以瞭解其孔內裂隙帶與鄰近地表露頭的地質構造特性、位態及空間分布等相關資訊，提供後續評估岩體特性或規劃調查工作之用。102年度已完成岩心井錄與孔內攝影資料的解析，103年度則是進行地球物理井測資料解析，以及其裂隙位態之綜合分析，相關成果摘述如下：

(1) 地物井測資料解析

本分項地球物理井測主要分成：地層特性地球物理井測及地層位態井測等兩大類，資料解析範圍為井下深度60.4 m至603 m。地層特性地球物理井測之探測項目包括：自然伽瑪、井徑、溫度、16"及64"電阻、單點電阻與全波形超音波等。而地層位態井測之探測項目則為超音波電視井測。資料解析結果說明如下：

(a) 地層特性井測資料分析

圖 3-20與圖 3-21為地球物理井測之結果。本井深度0 m至60 m為套管，數據資料不予採用，自深度60 m以下，則為裸孔狀態下所量測的地層資料。各物理特性井測分析結果，分述如下：

(i) 自然伽瑪(Natural Gamma)

自然伽瑪值於火成岩地層中較一般沉積岩層高，其變化主要與岩體中的礦物組成有關，當岩層內 ^{40}K 、 ^{238}U 或 ^{232}Th 等放射性元素富集，則自然伽瑪值明顯偏高。由圖 3-20之自然伽瑪井錄顯示，井下的自然伽瑪值介於150 API unit至300 API unit，顯示結晶岩地區之放射性較沉

積岩區強。由整體趨勢顯示，自深度296.2 m後，曲線向右偏移，明顯區分出上下兩部分。上半部自然伽瑪值介於160 API unit至230 API unit，平均約為194 API unit；下半部自然伽瑪值介於200 API unit至270 API unit，平均約為238 API unit。比對岩心井錄及裂隙分析的成果資料顯示，本井整體岩體之礦物組成差異不大，自然伽瑪高區與地層破碎帶亦無明顯的相關性，研判本井上半部因裂隙發育較多使得岩體較為破碎，而下半部岩體則相對較為完整，礦物結構較完整，因此自然伽瑪值相對較上半部為高。

(ii) 井徑(Caliper)

本井係以HQ尺寸(96 mm)鑽鑿設置之裸孔，井徑的大小主要是受到岩性及裂隙分布的影響。整體而言，本井經過擴孔後井徑變化不大(圖 3-20)，顯示結晶岩區岩石的堅硬特性，井孔不易崩坍。孔徑局部變化較大處，與岩心井錄資料比對後，顯示其與岩層破裂帶有關。

(iii) 電阻(Resistivity)

電阻井錄包括64"及16"正長(短)距電阻、單點電阻、側向電阻與流體電阻等。就本井之岩性屬於高電阻之結晶岩體而言，電阻量測所產生之變異主要為顯示岩層中之含水裂隙帶或斷層活動所造成之破碎帶，形成低電阻異常區。除了流體電阻率(RES (FL))是在測定孔內的泥漿電阻率，於本孔之測值僅供參考外，綜觀所有電阻井錄(圖 3-20)，本井孔地下岩體約以深度296.2 m為界，上部岩體可能受到構造剪切作用較為強烈，造成淺部岩體裂隙發達及礦物變形大，導致電阻及自然伽瑪值較低。相對而言，下部岩體受到剪切作用與變質作用較小，礦物變形及裂隙較不發達，岩體較為緻密，造成電阻率及自然伽瑪值相對較高。

(iv) 溫度(Temperature)

由圖 3-20之溫度曲線可看到井孔內溫度變化情形。深度21.8 m處發生劇烈變化，推測為地下水位面，溫度23.0 °C。深度169.6 m、281.8 m及433.4 m處溫度發生輕微擾動，與破碎帶深度對比後，並無明顯正相關，推測與裂隙水有關。地溫大致上隨著深度加深而增加，並無大的擾動現象，唯地下水面至83.4 m處，為溫度靜止帶幾近無變化，推測發生原因可能是77 m處之破碎帶，夾帶大量地層水湧入，溫度受到影響而靜止。本井最高溫出現在井底，約為34.5 °C，梯度約為20 °C/1 km，遠低於文獻估計的地溫梯度>50 °C/1 km (Lin, 2000)。

(v) 全波形聲波(Full Waveform Sonic)

全波形聲波井測藉由音波在地層傳遞時間的長短，了解不同地層的特性，也表現出岩體力學特性，反映出較弱岩層所形成之低速帶及裂隙帶所造成的弱反射等2種訊息。一般來說岩層越完整或堅硬，震波波速越快，反射能量越強。本井除地表風化層外，皆以堅硬之花崗片麻岩為主，且岩性變化不大，因此由全波形井測(圖 3-21)結果來看，反射訊號弱代表高衰減之破裂帶。

整體而言，本井淺部能量衰減多；深部能量較為完整，顯示淺部岩層裂隙較發達。深部岩體反射能量較淺部強，與自然伽瑪及電阻率趨勢一致，再次說明本井上下2個部分岩體之差異。綜合聲波井測結果，本井孔之地層破碎帶主要分布於深度75.6 m至78.4 m、101 m至105.4 m、124.8 m至130.4 m、178.2 m至184.2 m、212.8 m至216.4 m、250.6 m至252.6 m、269.2 m至272.8 m、275.6 m至278.6 m、335 m至347 m、418 m至422.8 m、434.8 m至437.6 m及541.2 m至542.4 m等處。其位置與岩心井錄之破碎帶及電阻井錄之低電阻異常帶相當一致。本井

之岩體位於板塊接觸之複雜應力區且同時位於構造邊界，導致淺部岩體裂隙發育較為密集。淺部地區破碎帶較深部地層明顯且多，推測是因岩體解壓與地殼應力作用之影響。

(vi) 速度分析

全波形探測除了可以得知岩層弱帶分布外，可藉由井孔內P波的反射時間來逆推P波速度，進而求得岩層速度(圖 3-21中之velocity)。將速度曲線對比破碎帶區域，可明顯看出速度也隨之降低；除此之外，淺部地層(296.2 m以上)速度波動(振幅)較大，推測與裂隙發達有關，造成地層速度變化較大，深部地層速度值變化小，也說明深部地層岩性較為完整。

一般而言，標準花崗岩體速度約為5,600 m/sec，本井之平均速度為4,644 m/sec (淺部4,393 m/sec；深部4,835 m/sec)，與一般花崗岩體速度差異甚大，推估應是受到變質及剪力作用導致岩層速度下降。破碎帶位置吻合，破碎帶平均速度為4,114 m/sec。

(b) 地層位態資料分析

本項地層位態井測的探測項目為超音波電視井測(acoustic televiewer)。有異於孔內攝影需在清澈的水體以可見光波長之影像進行探測分析，超音波電視井測則可不限於水體之清澈與否，利用超音波之影像解析井壁之構造位態，對於孔壁構造材料差異及形貌較為敏感，但對於材料相近之岩脈則較無法解析。由圖 3-21之超音波電視井測結果顯示，本井裂隙發達，欄位中紅色及綠色曲線即為裂隙分布情形。進一步就超音波之井壁影像進行分析，共匹配解析出1,266組裂隙，其中包括342組開口裂隙，可能為地下水通道(圖 3-22)。從裂隙位態統計分析顯示，裂隙傾斜方位角主要介於335°至25°之間(約佔78%)，即裂隙主要約分布在走向方位角75°至

115°區間，呈向北傾沒，傾斜角度介於20°至70°。淺部地區之裂隙除了分布於上述主要位態方位外，亦具有各不同位態方向的裂隙，分布相對較為平均。但隨著深度越深，裂隙位態則主要集中於傾斜方位角接近0°(或360°)之兩側，顯示深部主要以近東西向，往北傾之裂隙為主。

由於本井孔破碎帶之岩層多較劇破碎、黏土化或鑽鑿過程為防止崩孔而施作灌漿，使超音波電視井錄無法詳細解析破碎帶區間之岩層裂隙位態，因此，使本項所分析之裂隙數量較孔內攝影所判釋之裂隙數量為少。

(2) 裂隙位態綜合解析

綜合102年度之岩心紀錄、孔內攝影解析與地球物理井測解析結果，顯示井下的裂隙分布型態，約以深度296 m處為界，分為上下兩個區段，裂隙分布略有差異：

- (a) 上部區段之裂隙分布屬於均勻分布，因位於斷層帶核心，裂隙數量遠多於下部區段。在岩層破碎帶區段裂隙密集，圖3-23為井下深度60 m至296 m之裂隙極點投影圖，顯示本區段主要裂隙群位態介於45°至100°，傾角為30°至70°向北傾，其叢集之傾向與傾角為(347°,35°)。除此主要叢集之外，岩層裂隙亦散佈於其他方位，並具有另一次要裂隙群位態約介於350°至45°，傾角為25°至60°向南傾，其叢集之傾向與傾角為(121°,30°)，約位於主要叢集的共軛方向。若將上部區段再細分為井下深度60 m至100 m及100 m至296 m等兩區段，可明顯看出本上部區段之次要裂隙群，主要分布於井下深度60 m至100 m區段。
- (b) 下部區段之裂隙僅於局部區段呈現富集的現象，顯示岩體大致上屬於比較完整的型態。圖3-24則為井下深度296 m至503 m之裂隙極點投影圖，顯示本區段主要裂隙位態介於45°至90°，傾角為30°至70°向北傾，其叢集之傾向與傾角為(336°,36°)，與上部區段裂隙之主叢集位態相當。

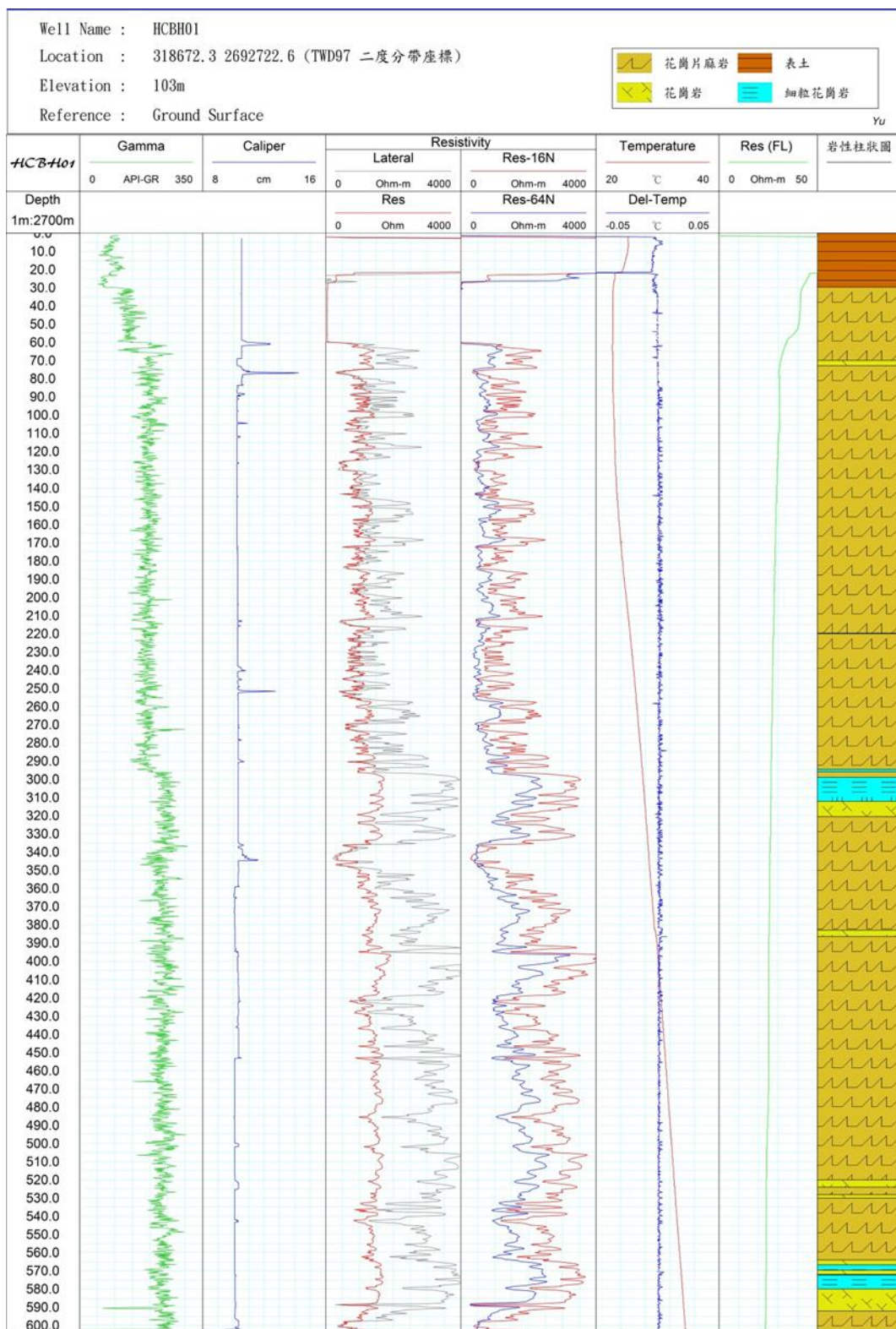


圖 3-20：地層特性地球物理井測井錄圖

註：Gamma：自然伽瑪、Caliper：井徑、Lateral：側向電阻、Res：單點電阻、Res-64N：正長矩電阻、Res-16N：正短矩電阻、Temperature：溫度、Del-Temp：溫度梯度、Res(FL)：流體電阻率。

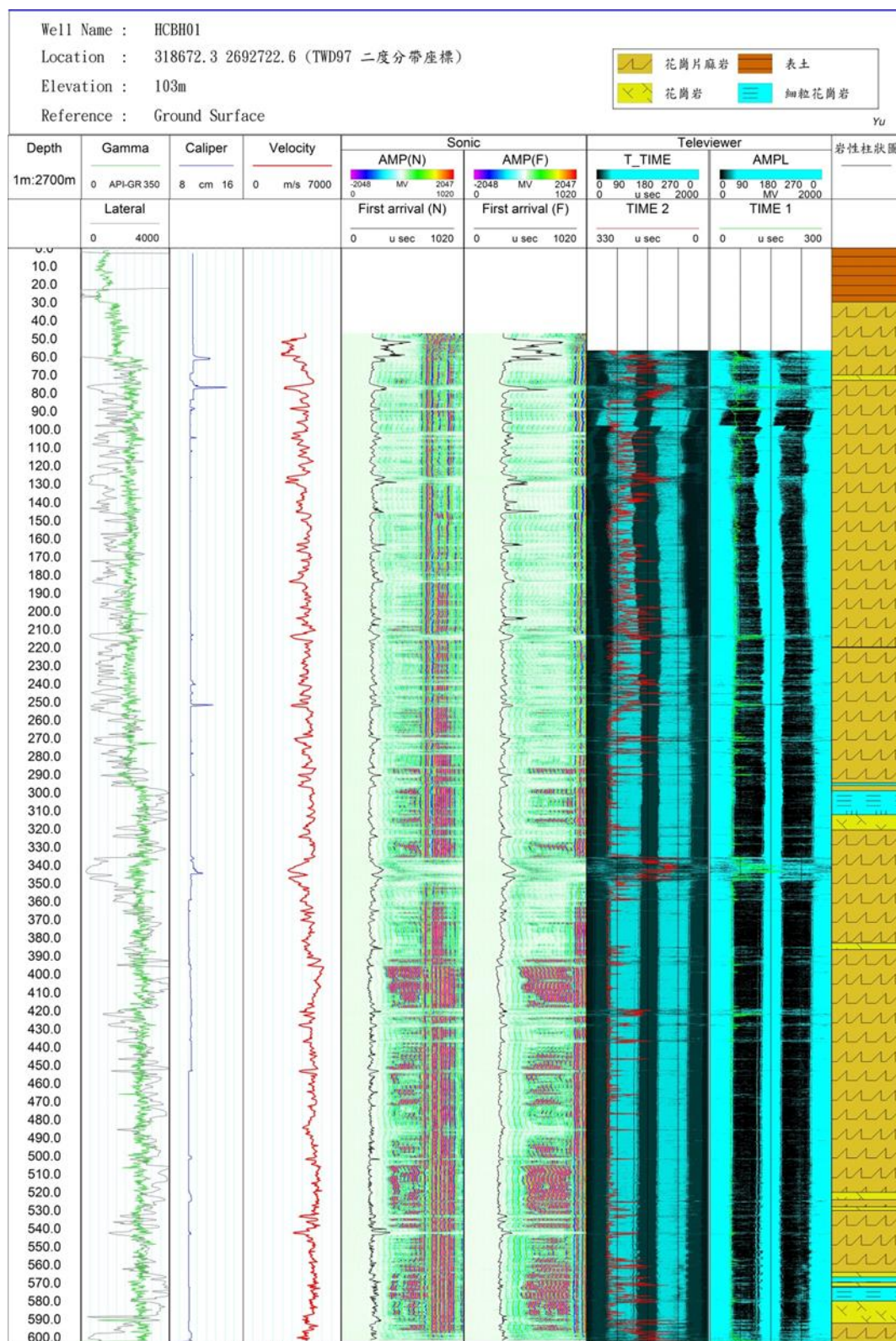
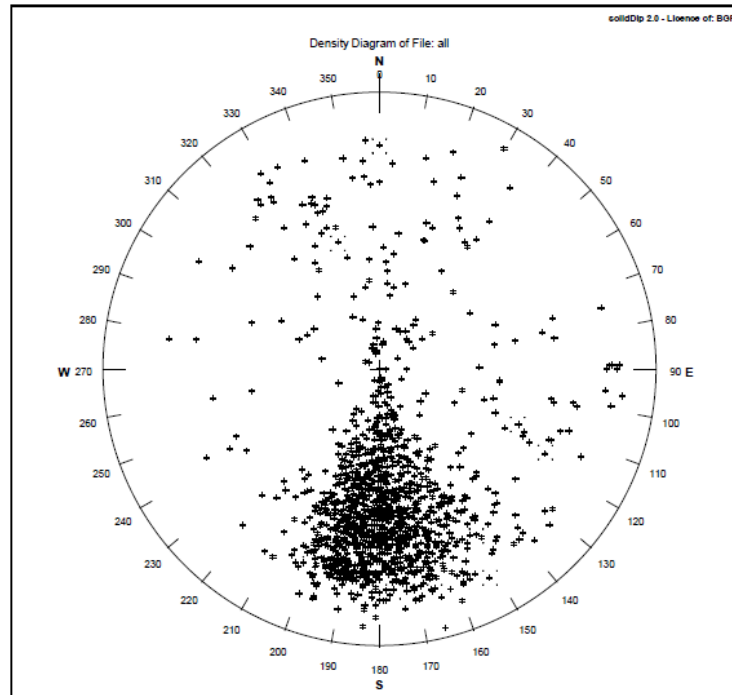


圖 3-21：地層特性井測與超音波電視井錄圖

註：Gamma：自然伽瑪、Lateral：側向電阻、Caliper：井徑、Velocity：地層速度、Sonic：全波形聲波(AMP(N)(F)：短(長)支距波型、First arrival：初達波)、Telviewer：超音波電視井測(T_Time：時間域、AMPL：頻率域)。

(a)



(b)

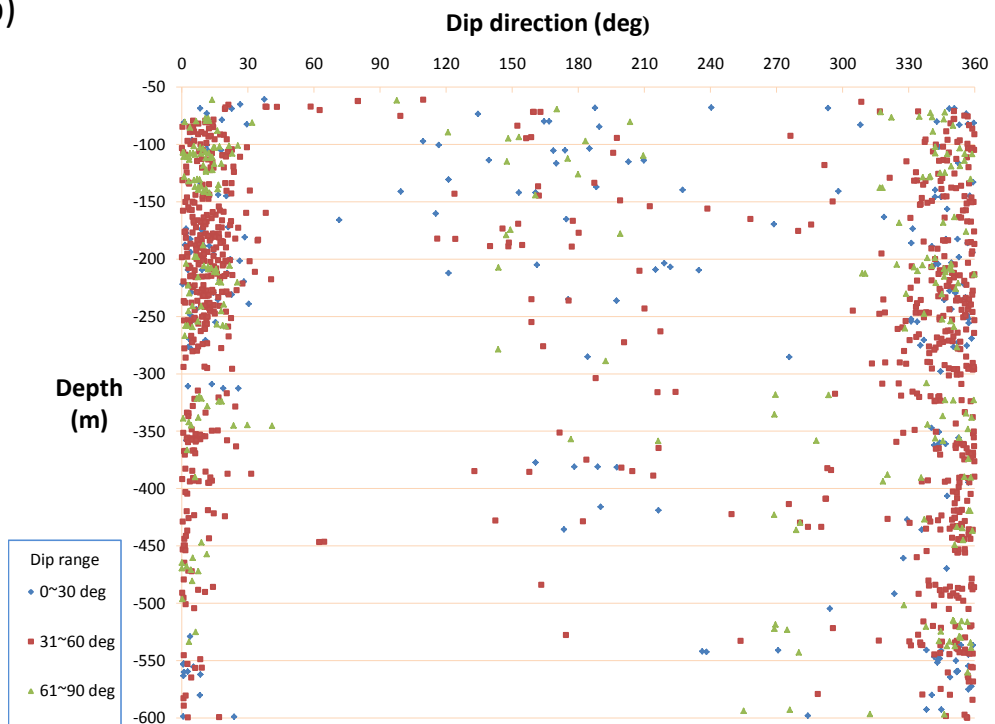


圖 3-22：超音波井測裂隙位態分布圖

註：(a) 極點投影圖；(b) 深度與傾向關係圖。

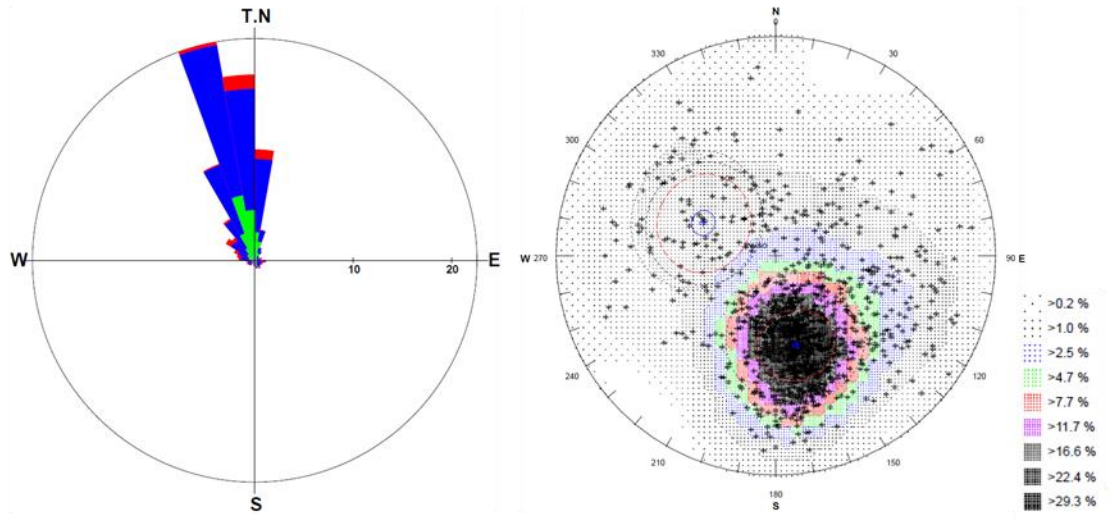


圖 3-23：井下60 m至296 m之裂隙位態分布圖

註：左圖為Rose diagram，色塊代表裂隙傾角：紅色代表0°至30°、藍色代表30°至60°、綠色代表60°至90°；右圖為Pole Diagram，不同顏色區塊代表裂隙位態投影極點的密集程度。

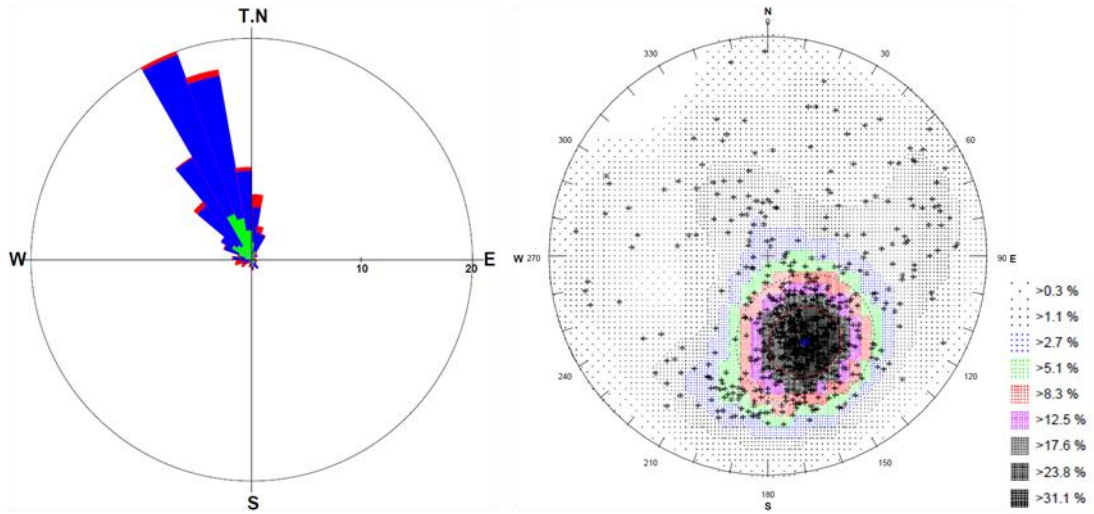


圖 3-24：井下296 m至503 m之裂隙位態分布圖

註：左圖為Rose diagram，色塊代表裂隙傾角：紅色代表0°至30°、藍色代表30°至60°、綠色代表60°至90°；右圖為Pole Diagram，不同顏色區塊代表裂隙位態投影極點的密集程度。

3.1.2.4.3. 基質的擴散效應

在結晶岩質裂隙岩體中，核種在母岩內的擴散效應是遲滯核種遷移的重要機制之一。除了母岩的有效孔隙率外，核種在母岩內的擴散係數與母岩對核種的吸附特性，是影響母岩擴散效應的兩大因素；對於低吸附性的核種，核種在母岩的擴散深度會比高吸附性核種更深(JNC, 2000a)。考量SNFD2017報告所需之核種傳輸路徑評估分析能力，針對基質的擴散效應方面之研究，本計畫規劃進行實驗室核種遷移與傳流試驗，以取得結晶岩樣品的核種吸附與擴散參數。

核種在岩體中的傳輸特性(如吸附、擴散、傳流與延散機制等)，本計畫長期利用離島之結晶岩樣來進行核種傳輸的各項實驗。自102年度除了持續進行離島結晶岩樣之擴散實驗外，亦針對本島結晶岩樣，展開地質材料特性(陽離子交換量與鐵含量)分析、核種吸附實驗，以及基質擴散實驗等相關工作。103年度繼續針對離島結晶岩之完整岩塊與岩石薄片進行實驗工作，藉由更長的觀察時間來提高核種擴散係數的可靠度。本項目執行細節著重在於連結核種吸附參數(K_d)值與本土潛在母岩的化學組成與礦物組成的相關性，現階段以離島花崗岩為例，進行核種吸附實驗，並利用線性迴歸方式評估其相關性。

依據KMBH01及KMBH03鑽井所取得之不同深度岩心樣品，分成54個粉狀樣品，利用粉碎樣品進行核種吸附實驗，粉碎樣品的好處為可以在相對較短的時間內得到吸附實驗結果。實驗方法以批次吸附試驗(batch adsorption test; ASTM (1984): D4319-83; Relyea, 1980)，在達到平衡條件下(圖 3-25)，可求得核種在特定條件下的吸附參數(又稱：分配係數， K_d)。

試驗過程及資料解析方式，簡述如下：

- (1) 取1 g固相材料(單一材料或不同材料混合後之總重量)，放入容量為50 mL的PP離心管。

- (2) 製備含特定核種濃度的合成地下水或合成海水，加入30 mL液相溶液至離心管，再將離心管放置120 rpm恆溫槽震盪器震盪14天，使固液相均勻混合(固液比 = 1 g : 30 mL)。
- (3) 取出離心管，在10,000 rpm轉速下離心5 min。離心後取上澄液，繼之以自動加馬偵檢器，測其活度之變化，計算固相核種吸附量 $((C_0 - C_{eq})V)$ ，及分配係數(K_d)。

$$K_d = \frac{C_0 - C_{eq}}{C_{eq}} \frac{V}{M} \quad (3-1)$$

其中，

K_d = 分配係數(mL/g)。

C_0 = 核種在水中的初始濃度(mole/L; $\cong 10^{-4}$ mole/L)。

C_{eq} = 核種在水中的平衡濃度(mole/L)。

M = 固相的總質量(g)。

V = 液相的總體積(mL)。

以管柱薄片擴散實驗(diffusion test)，透過隨時間變更的突破曲線(BTC, Break Through Curve)，求得核種在特定條件下的有效擴散係數($D_e \equiv \epsilon D_{em}$, effective porous diffusion coefficient)。試驗過程簡述如下：

- (1) 岩心薄片切割安裝，薄片厚度為2 mm、3 mm及5 mm。
- (2) 製備含特定核種濃度的合成地下水或合成海水，放入與管柱入口端連接的容器中。
- (3) 以控制馬達控制流經管柱入口端的濃度，記錄管柱出口端核種濃度隨時間的變化。

在岩塊擴散實驗方面，透過在岩塊鑽孔中填充入吸水劑，在特性時間取出部份的吸水劑，並回填入乾燥後的新吸水劑。取出的吸水劑經過稱重後，置入烘箱以110 °C烘烤24小時，比較不同鑽孔的吸水劑

重量變化與參考孔洞中吸水劑的重量變化，藉以得到不同鑽孔中水的濃度變化，再透過管柱薄片擴散實驗方法的分析分析概念，求取水在完整岩塊的擴散行為(鄧希平等，2012)。工作成果摘要說明如下。

(1) 粉碎樣品批次吸附試驗：

Cs及Se在花崗岩粉碎樣品批次吸附試驗(56組)結果，其分別在氧化及還原環境的 K_d 值彙整如下：

(a) 氧化環境：

(i) Cs 的 $K_d \cong 11$ to 111 ($\text{avg} \cong 36$) mL/g @ pH $\cong 7.7\sim 9.9$ ($\text{avg} \cong 8.3$) & Eh $\cong +103$ to $+687$ ($\text{avg} \cong 277$) mV。

(ii) Se 的 $K_d \cong 0.4$ to 16 ($\text{avg} \cong 4$) mL/g @ pH $\cong 6.1\sim 8.5$ ($\text{avg} \cong 7.2$) & Eh $\cong +105$ to $+487$ ($\text{avg} \cong 272$) mV。

(b) 還原環境：

(i) Cs 的 $K_d \cong 8$ to 67 ($\text{avg} \cong 25$) mL/g @ pH $\cong 7.1\sim 9.9$ ($\text{avg} \cong 8.3$) & Eh $\cong -687$ to -105 ($\text{avg} \cong -279$) mV。

(ii) Se 的 $K_d \cong 2.8$ to 30 ($\text{avg} \cong 12$) mL/g @ pH $\cong 6.1\sim 8.5$ ($\text{avg} \cong 7.2$) & Eh $\cong -687$ to -105 ($\text{avg} \cong -268$) mV。

(2) 管柱薄片擴散及岩塊擴散實驗：

經過接近1,000天的薄片及岩塊擴散實驗後，圖 3-26及圖 3-27分別為K區花崗岩樣品濃度與時間關係圖，說明如下：

(a) 管柱薄片擴散實驗：

碘離子的有效擴散係數大約介於 6×10^{-14} m²/s 至 10×10^{-14} m²/s 之間；而 Cs 與 Se 的有效擴散係數約介於 2×10^{-14} m²/s 至 5×10^{-14} m²/s 之間。

(b) 岩塊擴散實驗：

經過了約1,000天的實驗後，距離水端4 cm觀測孔(圖 3-27；編號為4a至4d)處的擴散係數為 5×10^{-12} m²/s，而距離水端8 cm觀察孔(圖 3-27；編號8a至8d)處的擴散係數為 1×10^{-11} m²/s。而核種的擴散係數約只有水分子的50%左右，故推估核種的岩塊有效擴散係數約為 5×10^{-12} m²/s。

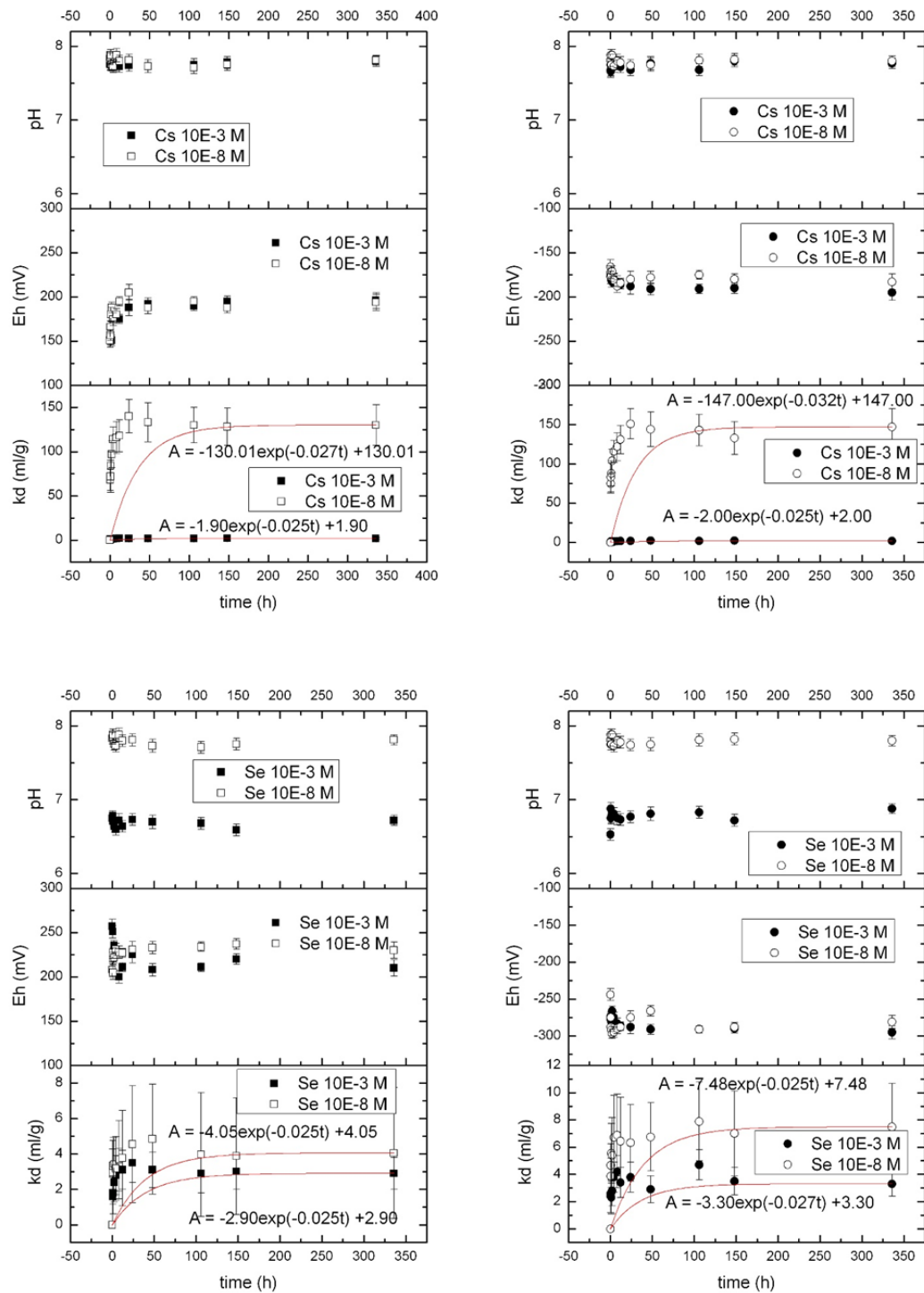


圖 3-25：核種批次吸附試驗結果範例圖

- 註1：資料來源：鄧希平等(2012)。
- 註2：上兩圖為Cs核種的吸附試驗結果圖，下兩圖為Se核種的吸附試驗結果圖。
- 註3：左兩圖為氧化環境的吸附試驗結果圖，右兩圖為還原環境的吸附試驗結果圖。
- 註4：固相資訊取自K區花崗岩；液相資訊取自K區平均地下水水質。

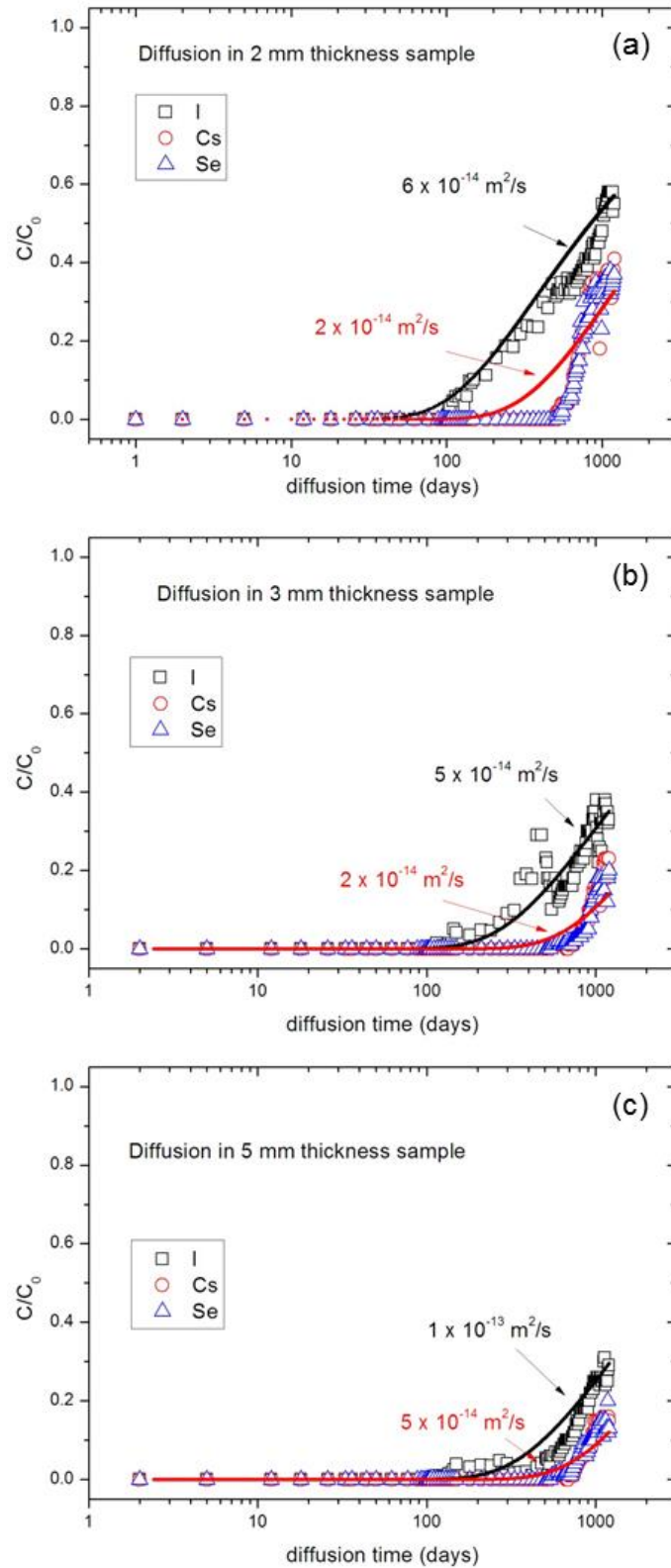


圖 3-26：花崗岩薄片擴散實驗濃度與時間關係圖
註：(a)、(b)及(c)薄片厚度分別為2 mm、3 mm及5 mm。

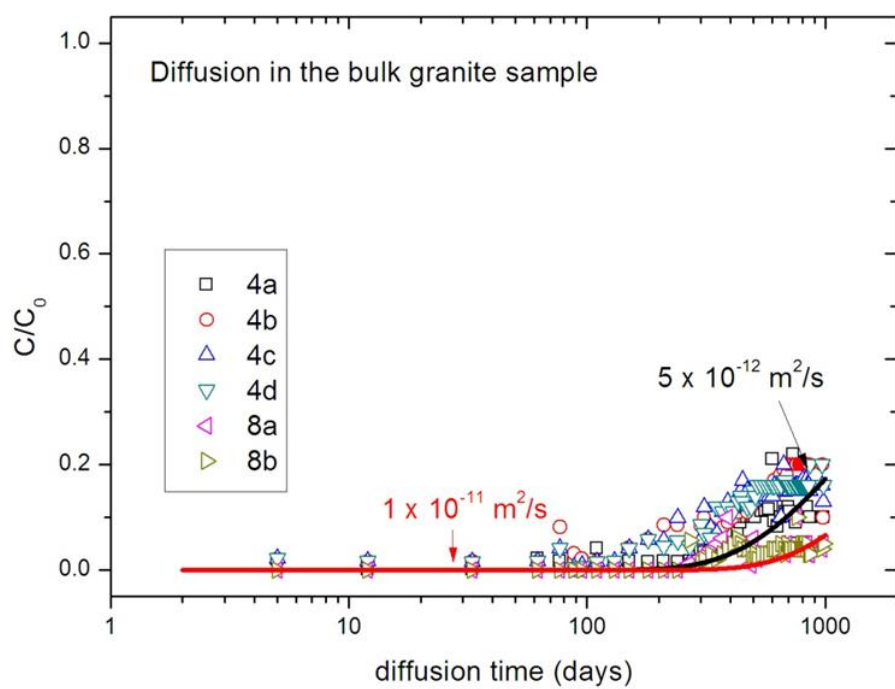


圖 3-27：花崗岩塊樣品擴散實驗濃度與時間關係圖

註：以 H_2O 作為擴散實驗的介質。

註：4a、4b、4c及8a、8b、8c中數字代表距離注入端的距離，單位：cm，a, b, c代表不同鑽孔。

3.1.2.5. 岩石特性

岩體性質(熱與力學性質)與其所處的環境特性(如地溫與應力狀態)是影響處置場設計與建造的重要因素。岩體的熱特性影響處置場的溫度分布、化學反應及地下的工作環境，由岩體的力學性質與其所處的環境特性可評估處置隧道及處置孔在建造期間的穩定性；而在放射性廢棄物貯存期間，因衰變熱的產生，應考量熱-力學耦合(T-M coupled)效應對處置系統的影響，以評估多重障壁系統(含母岩、緩衝材料與廢棄物罐)功能的完整性。由於計畫目前僅處於潛在母岩特性調查階段，尚未涉及場址的選擇或特性調查，故在岩石特性方面，過去已完成離島結晶岩體資料建置，以及持續進行膨潤土在花崗岩塊內之熱-應力室內試驗，並自102年度起展開本島結晶岩體有關實驗室內的物性、熱及力學分析工作，藉以參照日本H12報告內容，呈現國內量測岩石特性之基礎資料。

3.1.2.5.1. 花崗岩物性、熱及力學特性分析

利用本島結晶岩體斷層帶中不同深度的岩心樣本，在實驗室中進行物理性質、熱特性及力學等試驗，102年度已完成各項試驗方法之建立、岩石樣品之加工或前處理，以及各項試驗設備的整備等工作，103年度完成的試驗結果(表 3-5)，簡要說明如下：

(1) 岩石力學性質

(a) 岩石單軸抗壓試驗

利用符合ISRM高勁度要求之100噸MTS伺服控制壓縮機，進行試樣連續加載，直到試樣破壞為止，利用伺服控制不只可以得到尖峰強度，也可以得到尖峰後之應力應變曲線。試驗結果顯示花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性之岩石單軸抗壓強度都高於50 MPa，依ISRM之分類都屬於硬岩。

(b) 岩石點荷重試驗

直接將試體橫置加壓，加壓圓錐與圓柱形試體之接觸為一點，故稱之為點荷重。依經驗公式將其轉換成岩石單軸抗壓強度，以研判岩石是屬軟岩、中等硬度岩石或是硬岩，已完成5組不同深度岩樣，於室溫所進行之岩石點荷重試驗。

(c) 岩心靜彈性模數試驗

本試驗使用美國MTS公司發展之軸向與橫向伸縮儀，依照ISRM之建議方法，量測岩石試體的應力-應變關係，以分析得出彈性模數和柏松比等變形參數。針對5組岩石於室溫下所進行之岩心靜彈性模數試驗結果，顯示花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性，彈性模數(E_s)介於287 MPa至415 MPa之間，柏松比在0.10至0.22之間。

(d) 岩心動彈性模數試驗

本試驗依照ISRM之建議方法進行，藉由量測岩石試體的波速來推估動彈性模數(E_d)。針對5組岩樣於室溫下所進行之岩石動彈性試驗結果顯示，檢測之花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性P波波速皆在2,200 m/s以上，動彈性模數 E_d 皆在13,000 kgf/cm²以上。在硬岩中(視裂隙情況而定)，動彈性模數與靜彈性模數比值(E_d/E_s)可以到達13。

(e) 岩石巴西劈裂試驗

岩石巴西劈裂試驗之目的在檢測岩石的抗拉強度，因直接拉力試驗之圓柱形岩石試體與拉力施加組件間之黏接非常困難，故廣泛作法是以施壓取代施拉作為替代方式。依據ISRM之試驗方法，針對5組岩石於室溫下所進行試驗結果顯示，檢測之花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性之間接抗拉強度介於8.6 MPa至9.0 MPa之間。

(f) 岩石三軸壓縮試驗

岩石三軸壓縮試驗之目的在檢測岩石承受軸差應力時之剪力強度參數(c 、 ϕ)，可用來分析評估岩盤開挖工程之破壞區或開挖擾動帶(EDZ)。三軸壓縮試驗包含第一階段之圍壓施

加，及第二階段的軸向應力施加至試體破壞。藉由試驗進行中的軸向載重與軸向位移，可以繪製載重位移曲線，由此得到尖峰荷重及殘餘強度，結合巴西劈裂試驗(抗拉強度)，可以繪製相關之莫爾圓及破壞包絡線，由此得出剪力強度參數(c 、 ϕ)。依據ISRM之試驗方法，針對5組岩石於室溫下所進行之試驗結果顯示，檢測之花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性之凝聚力(c)，介於13 MPa至20 MPa之間，內摩擦角 ϕ 介於37°至51°之間，視岩性與深度而變，可提供評估岩盤開挖之應力重分配、變形分布與開挖擾動帶分析之用。

(g) 岩石弱面直接剪力試驗

岩石弱面直接剪力試驗之目的在檢測岩石弱面之剪力強度參數(c_j 、 ϕ_j)，可以提供評估開挖施工之弱面滑動與應力變化。依據ISRM之試驗方法，針對5組岩石於室溫下所進行之岩石弱面直接剪力試驗結果顯示，檢測之花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性之凝聚力(c)，介於13 MPa至20 MPa之間，內摩擦角 ϕ 介於21°至34°之間，剪向勁度 K_s 介於1.93 kN/mm²/m至10.10 kN/mm²/m之間。

(2) 岩石物理性質

本試驗依照ISRM物理性質及消散耐久性試驗之建議方法進行。其目的在檢測岩石之單位重及耐風化性質，以供岩盤開挖出露岩體耐風化性質之評估。

(a) 單位重

量測圓柱形試體之直徑(D)與長度(L)，再秤其重(W)，利用 $W/[(\pi D^2)/4]L$ 即可求出單位重，檢測之花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性之單位重皆約為2.7 tf/m³。

(b) 消散耐久性試驗

依據ISRM之試驗方法所得之消散耐久性指數的試驗結果，顯示花崗岩、細粒花崗岩、花崗片麻岩等3種岩性，其消散耐久

性指數皆高達99%以上，顯示此3種岩性都非常耐風化，對於弱化和崩解的抵抗能力都很好。

(3) 岩石熱特性

岩石熱特性包含熱傳導、比熱及熱膨脹等性質，說明如下：

(a) 熱傳導係數量測試驗

本試驗採用暫態平面熱源法 (Transient Plane Source Method, TPS法)，量測不同深度之岩樣在不同溫度下之熱傳導係數，顯示熱傳導係數約介於 $2.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 至 $2.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之間，且較淺層(深度 $\sim 260 \text{ m}$)的熱傳導係數大於較深層的部分。

(b) 比熱量測試驗

本試驗參考 ASTM E1269 建議的熱示差掃描分析法 (Differential Scanning Calorimetry; DSC)，量測不同深度之岩樣，在不同溫度下熱傳導係數的試驗結果顯示，岩樣比熱值約介於 $730 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 至 $870 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 之間，較淺層(深度 $\sim 260 \text{ m}$)的比熱值稍大於較深層的比熱值，且有隨溫度上升而增加的趨勢。

(c) 熱膨脹係數量測試驗

本試驗參考 ASTM E831 建議的固體材料線性熱膨脹試驗法，在3種不同溫差下，量測不同深度之水平向及垂直向岩樣的熱膨脹係數(水平方向2組，垂直方向1組)，試驗結果水平熱膨脹係數之差異在20%之內，具些微的異向性。

表 3-5：本島結晶岩體岩心室溫下物理性質、熱特性及力學性質表

項目			孔號	HCBH01				
			深度(m)	265~	303~	400~	477~	583~
			岩石種類	花崗片麻岩	細粒花崗岩	花崗片麻岩	花崗片麻岩	花崗岩
溫度				室溫(23 °C-25 °C)				
一般物理性質	體密度	ρ_b	ton/m ³	2.73	2.68	2.72	2.71	2.69
	比重	G_s	(*)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	含水量	ω_n	%	0.27	0.33	0.30	0.31	0.36
	吸水率	ω_a	%	0.25	0.32	0.27	0.30	0.34
	孔隙率	n	%	0.74	0.88	0.80	0.84	0.97
	消散耐久性	I_{d2}	%	99.2	99.5	98.8	99.3	99.1
熱特性	熱傳導係數	K	W/(m·K)	2.65	2.34	2.35	2.4	2.25
	比熱	C_p	J/(kg·°C)	790	770	730	740	750
	熱膨脹係數	α_{Ha}	1/K	7.58 × 10 ⁻⁶	7.26 × 10 ⁻⁶	7.40 × 10 ⁻⁶	7.96 × 10 ⁻⁶	8.55 × 10 ⁻⁶
		α_V	1/K	8.75 × 10 ⁻⁶	6.96 × 10 ⁻⁶	7.65 × 10 ⁻⁶	7.66 × 10 ⁻⁶	7.90 × 10 ⁻⁶
力學性質	單壓強度	q_u	MPa	77	107	59	140	129
	P波速度	V_p	m/s	2684	2389	2253	2438	2378
	S波速度	V_s	m/s	1613	1518	1430	1524	1398
	動態柏松比	ν_d	(*)	0.39	0.24	0.24	0.28	0.45
	動態彈性模數	E_d	GPa	19.67	15.30	13.81	16.11	15.21
	動態剪力模數	G_d	GPa	7.10	6.18	5.56	6.29	5.26
	靜態柏松比	ν_s	(*)	0.21	0.22	0.21	0.20	0.21
	靜態彈性模數	E_s	GPa	20.27	32.20	30.00	41.81	44.06
	靜態剪力模數	G_s	GPa	8.38	13.20	12.40	17.42	18.21
	凝聚力(三軸試驗)	c_p	MPa	16	18	13	18	20
	摩擦角(三軸試驗)	φ_p	degree	38	51	44	47	48
	間接張力強度	σ_t	MPa	9	9	9	9	9
	點荷重指數	I_s	MPa	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	凝聚力(弱面直剪)	c_j	MPa	0.03	0.22	0.56	0.83	0
	摩擦角(弱面直剪)	φ_j	degree	28	26	23	21	34
	剪力勁度	K_s	kN/mm ² /m	1.93	6.61	6.24	4.14	10.10

註： α_{Ha} 為平均水平熱膨脹係數， α_v 為垂直熱膨脹係數。

3.1.2.5.2. 膨潤土在花崗岩塊內之熱-應力室內試驗

為瞭解膨潤土與岩塊之熱-力學交互影響關係，在既有岩塊熱場量測與模擬的基礎上，建置含加熱器、壓實鑄型的膨潤土塊及花崗岩塊尺度的近場環境，進行2年期熱-力學岩塊試驗與數值模擬工作。102年度已完成膨潤土塊體製作及量測儀器發展、設計與配置，並利用數值模擬方法，初步評估熱-力學室內試驗預期結果來修正設計配置，103年度主要進行膨潤土與岩塊系統熱-力學交互作用室內試驗，探討以膨潤土為主之工程障壁系統於受熱作用下與岩塊之間的應力變化情形，提供後續現地熱-力學試驗規劃及近場功能/安全評估之參考依據。

(1) 量測儀器發展、設計與配置

以單向熱傳遞概念所設計之熱應力試驗模具如圖 3-28所示，由模具底部鑲嵌具溫度控制系統之變功率熱源，而上依序為膨潤土塊體、第一層荷重計與熱耦(塗滿導熱泥)、花崗岩塊體、第二層荷重計與熱耦(塗滿導熱泥)，最上層為導熱固定壓桿，藉由固定壓桿束制系統之變形與導熱。模具為雙層設計，外圈為不鏽鋼並輔以電木絕熱層內襯，以同時兼顧低變形與熱絕緣之目標。此外，並搭配分裂模之設計將第一層與第二層荷重計與熱耦接線連接至模具外之資料擷取系統，整體量測系統如圖 3-29所示，包括試驗模具、溫度控制系統、資料擷取系統以及記錄用電腦。

(2) 熱-力學試驗與參數率定

分別以單層膨潤土塊體，以及單層花崗岩塊體量測結果進行熱膨脹係數之率定，由於採用本實驗方法塊體並非定溫狀態，因此採用COMSOL模擬實驗條件依據所得的實驗群進行熱膨脹係數的反算，兩組實驗擬合的結果所得膨潤土塊體之熱膨脹係數約 $1\text{E-}4$ (1/K)，花崗岩塊體之熱膨脹係數約 $6\text{E-}6$ (1/K)。

(3) 膨潤土-花崗岩系統熱應力量測結果與數值模擬比對

依據圖 3-28之試驗配置，疊合膨潤土與花崗岩進行實驗，並於膨潤土與花崗岩間以及花崗岩頂部配置量測系統，測定熱傳遞經由膨潤土與花崗岩溫度與應力變化，以瞭解膨潤土與花崗岩系統間作用情形。此外，以COMSOL建置Thermal Stress數值模型進行相關分析，本模型採用模擬參數如表 3-6所示，熱膨脹係數採用前述膨潤土與花崗岩之率定結果，將量測試驗數值模型與邊界條件之設置如圖 3-30所示。數值模擬結果分別截取膨潤土與花崗岩間、花崗岩頂部之熱應力與溫度變化關係，並與實驗量測值比較如圖 3-31所示，可發現具有相當之一致性。因此，由前述率定之膨潤土與花崗岩熱膨脹係數，以及本數值模擬方法具有相當之可靠性。

(5) 升尺度坑道規模數值模擬技術發展

使用COMSOL程式來建構對稱處置孔(無限域處置場)之三維熱-力學模型，模擬對象依據用過核子燃料垂直置放處置概念，廢棄物罐半徑52.5 cm，長度491 cm。廢棄物罐外環繞以35 cm厚之緩衝材料，最外層則為花崗岩。兩廢棄物罐之間距為6 m，兩隧道間距為40 m，處置系統置於地表下500 m處。

由於處置孔屬對稱型態，因此除非需模擬大範圍處置場與地質圈之互動關係(遠場)，一般對於近場處置系統之行為評估，國際上慣用之作法為將對稱面取1/4模型分析，對稱面熱通量=0。此時，所模擬的為一無限域處置場。模型評估邊界為處置場上下各500 m(上邊界為地表，下邊界為流出邊界)，平面為3 m x 20 m(6 m與40.5 m)。模型所考慮之地表溫度為20 °C、地溫梯度0.03 °C/m，於地下500 m深度之地溫為35 °C。據此模擬對象所建立之COMSOL處置系統尺度數值分析模型，各障壁系統元件所採用參數如表 3-7所示。單廢棄物罐功率之初始衰變熱則假設裝載容量為1.5 tU之條件。模擬結果為了解膨潤土與花崗岩系統之熱應力隨時間變化情形。將熱應力分3個區域取樣如圖 3-32所示，包括：

(a) B-R(1)：側面膨潤土緩衝材料與花崗岩之交界處

(b) B-R(2)：底部膨潤土緩衝材料與花崗岩之交界處

(c) Center：兩處置孔中心處

取樣區域之熱應力隨時間變化如圖 3-33所示，可知膨潤土緩衝材料與花崗岩系統於裝載容量為1.5 tU時之溫度場所產生最大熱應力約為31 MPa，最大熱應力伴隨最高溫度發生，時間約落於10年至100年；而兩處置孔中心位置則由於距離熱源發生點較遠，因此熱應力隨之降低，約24 MPa。膨潤土緩衝材料與花崗岩交界之應力分布則如圖 3-34所示，可知熱應力隨時間之增加，並於數十年左右達到最高峰，於空間分布上則為貼近廢棄物容器之區域於熱逸散期間之熱應力較大，而後隨著熱逐漸擴散，而於百年後開始消退。因熱應力所產生之體積應變則如圖 3-35所示，所產生最大的體積應變約為 $3.8E-4$ ；此外，由於熱應力之作用處置隧道所產生之垂直變位約為9 cm。

表 3-6：室內試驗尺度基本案例模擬熱-力學參數

參數	單位	膨潤土塊體	花崗岩塊體
密度(Density)	kg/m ³	1600	2700
熱傳導係數(Thermal Conductivity)	W/(m.K)	0.8	3
比熱(Heat Capacity)	J/(kg.K)	800	800
熱膨脹係數(Thermal Expansion Coefficient)	(1/K)	1E-4	6E-6
彈性模數(Modulus of Elasticity)	Pa	400E6	40E9
柏松比(Poisson Ratio)	-	0.2	0.2

表 3-7：處置系統尺度模擬熱-力學參數

參數	單位	廢棄物罐	緩衝材料	回填材料	花崗岩
密度(Density)	kg/m ³	5880	1600	1600	2700
熱傳導係數 (Thermal Conductivity)	W/(m.K)	40	0.8	1.2	3
比熱(Heat Capacity)	J/(kg.K)	500	800	800	800
熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)	(1/K)	12E-6	1E-4	1E-4	6E-6
彈性模數 (Modulus of Elasticity)	Pa	200E9	400E6	100E7	40E9
柏松比(Poisson Ratio)	-	0.3	0.2	0.2	0.2

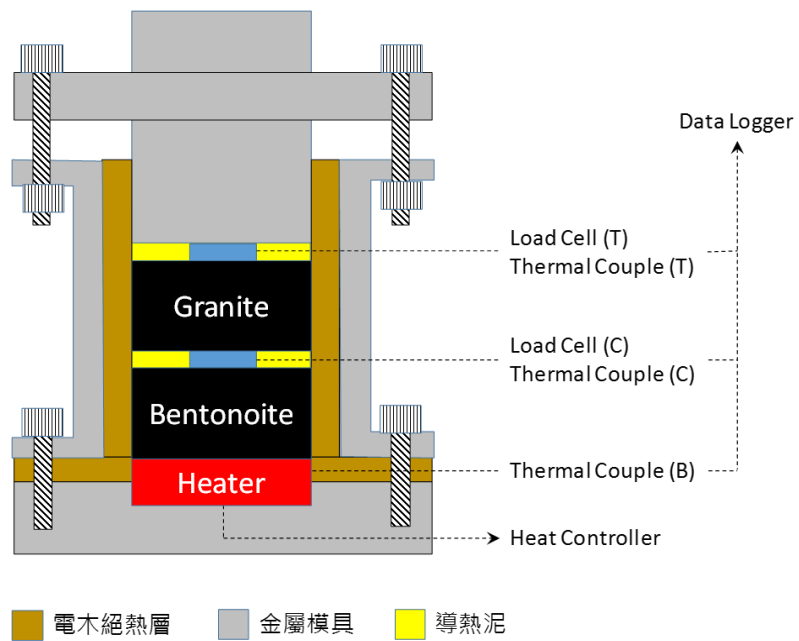


圖 3-28：膨潤土-花崗岩熱應力量測試驗儀器設計圖

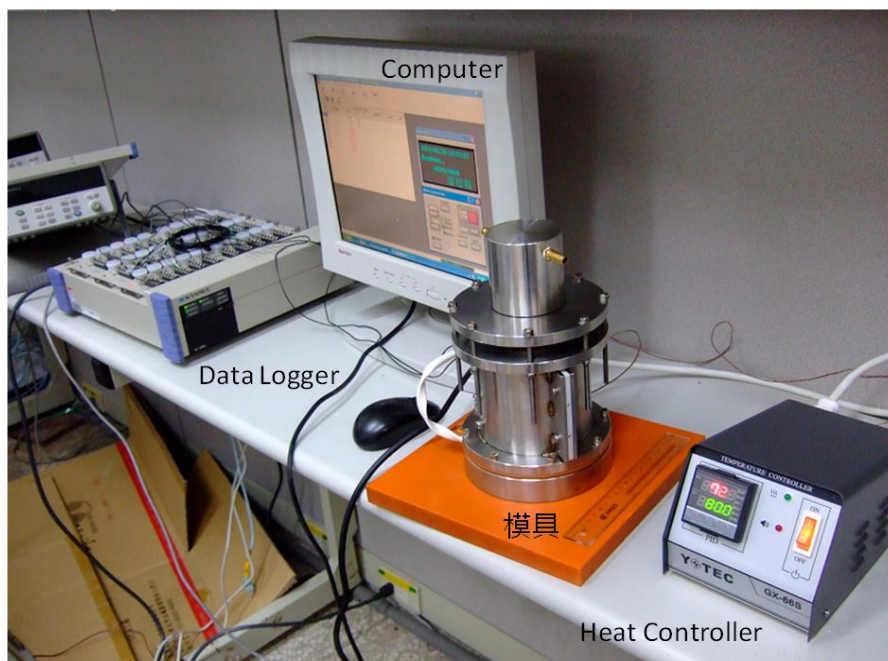


圖 3-29：膨潤土-花崗岩熱應力量測試驗儀器

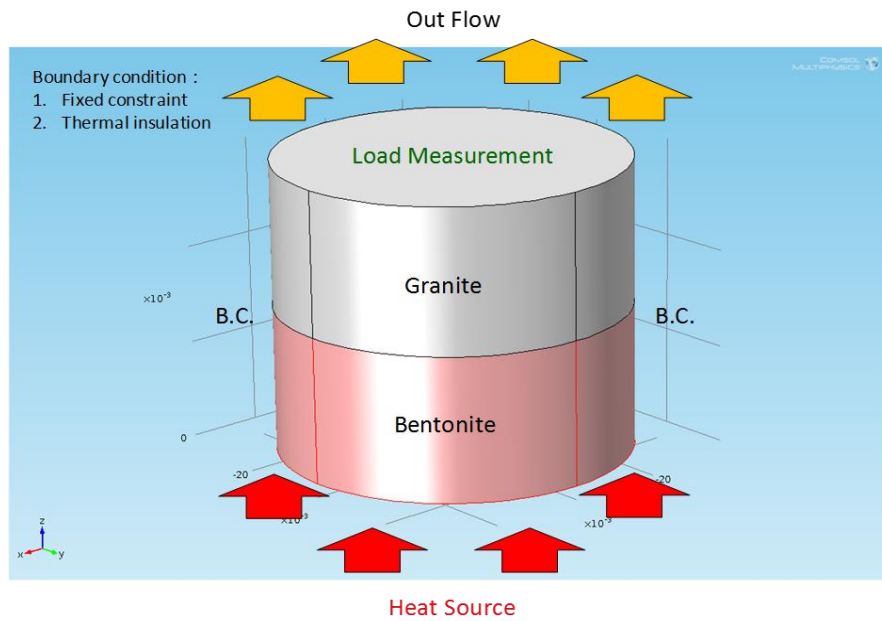


圖 3-30：膨潤土-花崗岩熱應力量測試驗數值模型與邊界條件設置

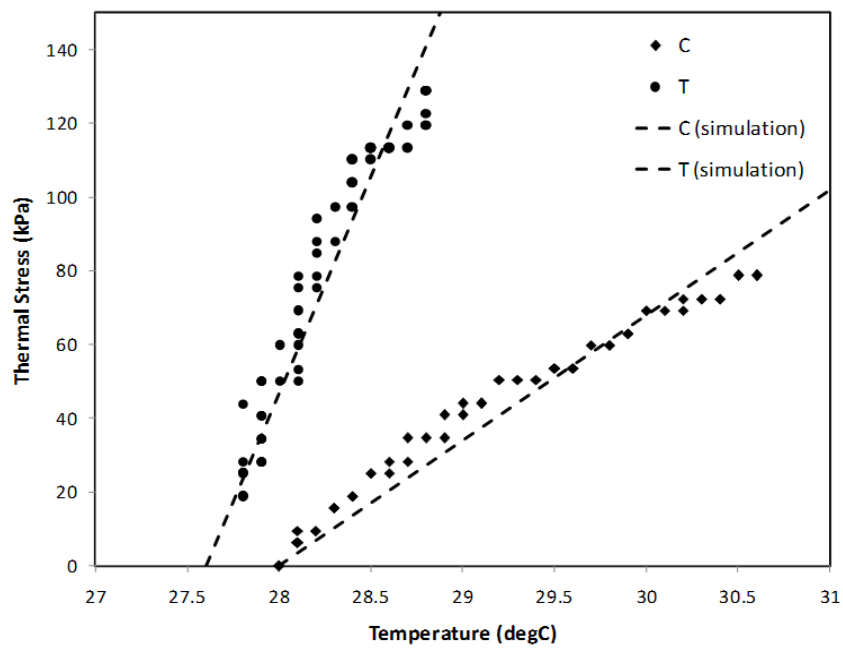


圖 3-31：膨潤土-花崗岩系統熱應力量測值與數值模擬結果

註：C--膨潤土與花崗岩間之量測值，T--花崗岩頂部之量測值

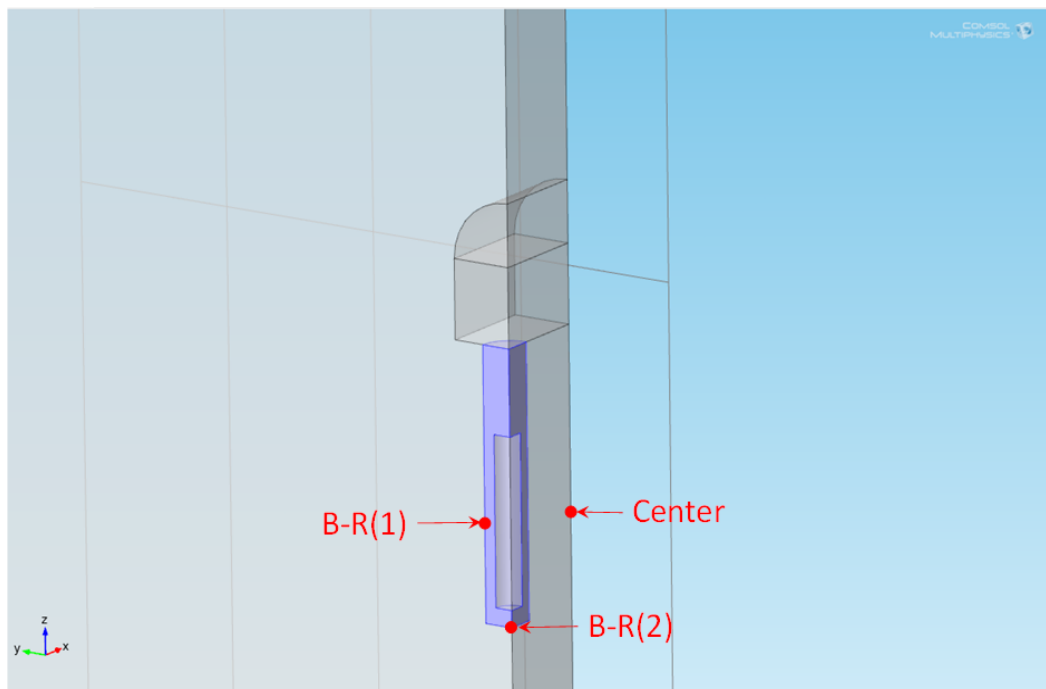


圖 3-32：應力取樣位置說明

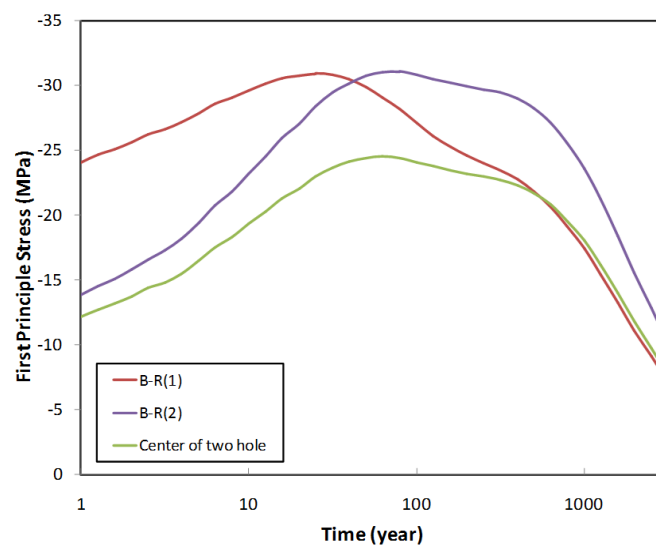


圖 3-33：不同位置熱應力變化隨時間變化關係

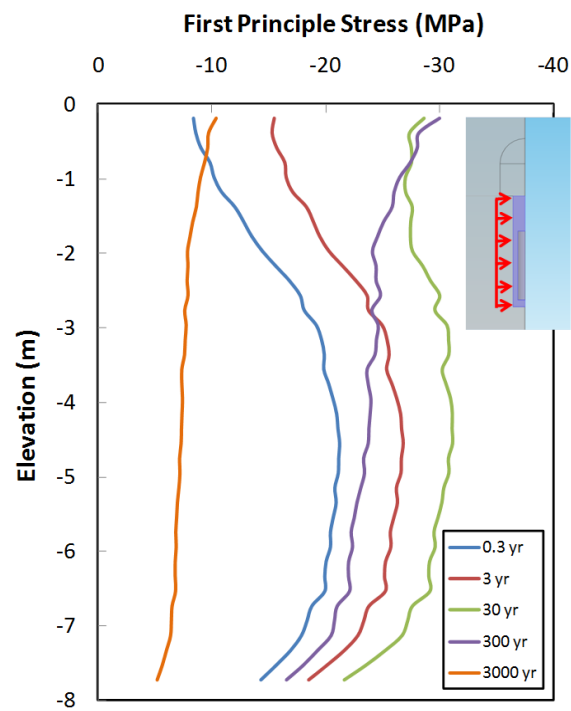


圖 3-34：緩衝材料與花崗岩交界熱應力(最大主應力)變化圖

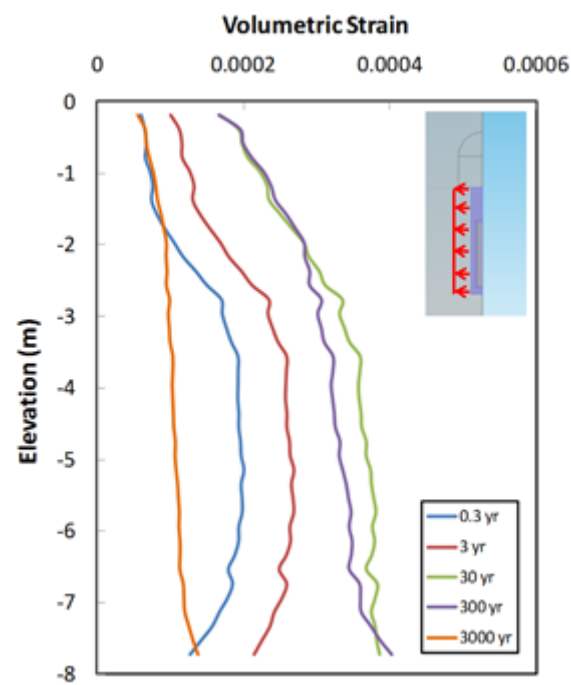


圖 3-35：緩衝材料與花崗岩交界熱應變(體積應變)變化圖

3.1.3. 地質處置合適性研究

3.1.3.1. 台灣用過核子燃料地質處置之地質圈特性

各國因大地構造環境與地質條件特性的不同，進行研發處置場址評選、處置設施功能/安全評估所需技術時，所需特別考量的地質圈特性會有所不同。例如，北歐國家會特別考量下次冰河時期(萬年後)對處置安全性的影響，美國Yucca Mountain計畫則將區域性的火山爆發，列為一相當重要的評估因素(JNC, 2000a)。

台電公司於SNFD2009報告彙整的研究成果(台電公司，2010)，綜合比較我國各潛在處置母岩長期穩定性，以泥岩形成年代最短、地質不穩定條件最多，因此未來調查技術的挑戰也最大；相較之下，西部離島及本島東部結晶岩均有千萬年以上或至少百萬年的長期穩定潛力，較具可調查性和可預測性(表 3-8)。本計畫近年來累積各潛在處置母岩規模、岩性與構造分布、火山活動、地震影響及氣候與海平面變遷相關資料，顯示東部菲律賓海板塊隱沒帶相關的地震帶(>40 km至70 km)之上，有大範圍深層無震區域位於歐亞大陸地殼內(<40 km)；深層岩體的規模大於地表出露所見；海平面變遷下，河階與海階定年記錄了西部快速抬升與沉陷作用，此技術未來也可應用在東部，同樣可檢視地殼的抬升與沉陷速率。

持續針對地質圈長期穩定性，及水文地質概念模式進行評估技術發展，依照國際地質處置技術發展經驗來看(例如JNC, 2000a)，將有助於全國性理解未來地質處置安全技術提昇的條件。

表 3-8：我國潛在處置母岩長期穩定性比較表

潛在處置母岩		結晶岩		泥岩	中生代基盤岩
		西部離島	本島東部	西南部	台灣海峽～西部
岩性		花崗岩/片麻岩	花崗岩/片麻岩	粉砂岩/泥岩	火山岩/變質沉積岩
形成年代		100～140 百萬年	80～90 百萬年	1～2百萬年	60百萬年
地質史	千萬年前	13百萬年 (海岸)	10百萬年 深海	淺海或陸地	10百萬年 (海岸)
	百萬年穩定性	無沉陷(海岸)	6.5～3.5 百萬年 快速隆升造山	6.5～3.5百萬 年快速沉陷	無沉陷(澎湖海岸)；快速沉陷(台灣西部中生代基盤岩深度>2000 m)
			3.5-1.5百萬年 地殼變動有抬升/剝蝕或沉陷/沉積	3.5～0.5百萬 年沉陷	
			1.5百萬年張裂沉陷	0.5百萬年快速隆升	
	萬年穩定性	地殼變動小，氣候與海平面變遷影響大	地殼變動有抬升/剝蝕或沉陷/沉積；氣候與海平面變遷影響小	活動斷層、快速抬升/剝蝕或快速沉陷/沉積、氣候與海平面變遷影響大	地殼變動小，氣候與海平面變遷影響大
大地構造環境		板塊內部	板塊邊緣	板塊內部	板塊內部
		張裂	擠壓轉張裂	擠壓	張裂
		(遠離變形前緣)	(變形帶)	(變形前緣)	(遠離變形前緣)
地震		少震區域	地震帶中有相對地震相對安靜帶	地震帶	少震區域
活動構造		待調查	待調查	密集區	無
海平面升降/環境變遷		海平面上升/島嶼；海平面下降/陸地	山地	海平面上升/海濱；海平面下降/陸地	海平面上升/島嶼；海平面下降/陸地

註：修訂自台電公司(2010)

3.1.3.2. 台灣的大地構造架構

因弧陸碰撞作用形成的造山運動僅數百萬年，具備獨特的大地構造與其演化特性。台灣的地質環境大致上與同為歐亞大陸東緣的日本類似，故在進行處置場址評選、處置設施功能/安全評估相關技術研發時，台灣與日本均需面臨及考量與大地構造架構有關的議題，如大地構造演化、火山活動、斷層(地震)活動，以及抬升與沉陷、氣候與海平面變遷等環境因子對處置場的影響性。

3.1.3.2.1. 火山活動

根據研究結果顯示(JNC, 2000a)，火山活動對放射性廢棄物「深層地質處置」所可能產生的負面影響為：

- (1) 岩漿入侵對處置設施的破壞性，及岩漿噴發活動將放射性物質快速帶到地表人類生活圈的可能性。
- (2) 過高的地溫梯度會加速地下水的流動速率，進而增加核種遷移的速率。
- (3) 地下水化學性質的改變(因過高的地溫或與岩漿、火山氣體的混合)，降低多重障壁遲滯核種遷移的功能。

針對台灣大屯火山群及龜山島的火山活動與特性，本計畫於103年度將持續進行相關文獻資料的蒐集與回顧摘述如下：

(1) 大屯山火山群

大屯火山群位於台北盆地東北方，東南以崁腳斷層與漸新世沉積岩相隔，西南以淡水河與更新世台地分開，北面台灣海峽，涵蓋250 km²面積。可再細分為大屯火山亞群、竹子火山亞群、七星火山亞群、丁火朽火山亞群及磺嘴火山亞群，共約20座第四紀火山。區域2條最主要的構造線為金山斷層與崁腳斷層(圖 3-36)，其中金山斷層以東北-西南方向貫穿大屯山，將大屯火山分為斷層以東及以西兩部份，火山體沿著東北-西南走向的金山斷層兩

側分布，推論大屯火山群的火山活動與金山斷層轉為正斷層(山腳斷層)後的活動有關(Yen et al., 1984)。

運用於同位素分析、原位(In-situ)定年以及微地震的量測，大屯火山群的岩漿活動可能為一活火山(Song et al., 2000)。大屯火山群火山活動定年紀錄不斷更新，Chen and Lin (2002)由台北盆地之鑽井岩心中，發現在松山層中夾有原生火山灰薄層，且推論其最有可能為大屯火山群之噴發產物，以松山層最老的沉積年代為20,000年以前，推論大屯火山群最近的一次噴發紀錄應該少於20,000年前。Belousov et al. (2010)針對大屯火山群最年輕火山的數種火山碎屑堆積層序與熔岩流(lava flow)、火山穹丘(lava dome)型態進行分析，並採取區內崩積層面採集的碳化植物進行定年，定年結果顯示此碳化植物 ^{14}C 年齡為約6,000年，推論當時大屯火山有活動的紀錄。

大屯火山群有11處主要的地熱活動區，噴氣的溫度一般都在98°C以上，噴氣成分主要為水蒸汽，體積百分比約佔95%至98%，其餘為不凝結性氣體。去水後之氣體組成以 CO_2 為主(68%至84%)，其次為硫化物氣體($\text{H}_2\text{S}+\text{SO}_2\sim 0.9\%$ 至17.2%)及氮氣(10.6%至16.5%)，此種氣體組成為典型的低溫火山氣體組成(Lee et al., 2005)。大屯火山群的氣體地球化學研究分析結果，在氦同位素比值(Yang et al., 1999)、土壤 CO_2 逸氣通量(Lan et al., 2007)、以及火山噴氣中 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比值與HCl濃度(Lee et al., 2008)等火山活動程度指標中，分析數據都顯示大屯火山的岩漿活動並未完全停止。已有的氦同位素研究結果顯示，大屯火山群地區噴氣中氮氣來源平均都有60%的地函源氣體成分，其中大油坑更可以高達85%。Sano and Wakita (1985)的研究結果，火山氣體的氦同位素比值可以用來判斷可能岩漿源的位置和活動範圍，距離岩漿源越近其氦同位素值越高，反之則越低。因此大屯火山群如果確認為一活火山，岩漿庫位置最有可能在具有高氦同位素比值的大油坑底下(圖 3-36)(楊燦堯，2000；楊燦堯等，2003)。

大屯山火山群區域設置固定微震網進行長時間的監控，地震紀錄統計顯示七星山及大油坑附近有明顯的微震活動存在，大多數之微震震源深度均集中於2 km至5 km附近；七星山地區之微震震源深度，小於大油坑附近震源深度(圖 3-37)(林正洪，2006)。地震波形類似螺絲釘狀(tornillos)、單頻水滴狀(drop)之震動訊號及超長週期之地震活動訊號，通常發生在火山活躍地區，與岩漿或熱水活動所引發的微震有關。此外，Ma et al. (1996)利用震波層析成像(seismic tomography)方法研究大屯火山地區地層的震波波速結構，發現在地下15 km左右可能有一低速異常帶，上述運用地震震波的調查結果顯示地底下可能有岩漿的存在。

(2) 龜山島

沖繩海槽從日本九州向西南延伸至台灣東北部，全長約為1,200 km。Sibuet et al. (1998)針對沖繩海槽西南段所做的海底剖面調查結果，在南沖繩海槽南側邊緣出露一系列年輕的海底火山，位於班尼奧夫帶(Benioff Zone)上方80 km至100 km處，此一系列火山可能代表第四紀以來琉球島弧向西南之延伸。羅正平(2001)從歷年來所收集的反射震測剖面，輔以磁力資料，在沖繩海槽最南端區域辨識出數以百計的火成岩體，其中噴出火成岩體主要分布於海槽中心軸處，並與東西向的正斷層線性相關。

龜山島坐落於沖繩海槽最南端，是該區域唯一出露於海面的火山島，面積約為2.7 km²，主要由安山岩質之熔岩流與火山碎屑岩互層所構成的一座典型複式火山島(Hsu, 1963)，邱清龍(2007)依據島上鑽探岩心分析資料將龜山島的火山熔岩流分成4個火山噴發期。龜山島剛好位於班尼奧夫帶上方約100 km，符合一般定義島弧火山發生位置處(Kao et al., 1998; Wu et al., 2009)。Chung et al. (2000)的研究也認為其岩石地球化學特徵，與張裂前的中部琉球島弧火山岩相近，而與中部沖繩海槽及弧後張裂後的火山活動岩性不同，不是一般認定的弧後盆地，應歸類為島弧火山。Chen et al. (2001)則利用熱螢光定年技術，分析安山岩中砂岩捕獲岩

的定年結果，將龜山島的火山活動推進到7,000年前，按國際火山學會的定義龜山島仍屬於活火山。

龜山島附近海域仍有強烈的海底熱液活動，Yang et al.(2005)曾採集龜山島附近海底熱液區域氣泡進行氦同位素分析，結果顯示樣本中氦同位素比值($^3\text{He}/^4\text{He}$)高達7.8 R_A 至8.2 R_A ，表示軟流圈地函成分可能已經可以直接逸散至地表。另外，在宜蘭平原採樣的分析結果，同樣地具有偏高的 ^3He 成分，可能的原因是沖繩海槽的擴張西進，地殼減薄及張裂系統提供火山氣上升管道。

董倫道(2012; 2013)利用空中磁力測勘技術，根據磁體邊界分布推估龜山島鄰近之地下火成岩體分布範圍直徑達約9 km，遠較龜山島出露的範圍大。另外龜山島及西南側區域在深度約4 km以下呈無磁性，根據磁力線形、岩漿庫與環狀岩脈的組合，歸納出沿既有的東南東方向裂隙帶，發生裂隙噴發及岩漿侵入活動，形成東南東方向的帶狀磁力高區，後因火山白陷落作用而形成環狀岩脈，環狀內的低磁力區推測為岩漿庫的位置(董倫道，2013)。

中央地質調查所在龜山島龜首附近鑽探1口地溫監測井，江協堂(2010)於民國95年起連續4年進行井下溫度監控，監測結果顯示地溫井溫度變化很小，年溫度變化約0.015 °C至0.215 °C，而且井溫有緩慢下降的趨勢，年均降溫約0.048 °C至0.116 °C，表示龜山島本身的地溫有逐漸冷卻的趨勢。江協堂等(2008)在宜蘭平原淺部地熱水的研究結果也值得注意，其研究結果顯示在宜蘭平原南部龍德井一帶具有很高的地溫梯度(7.6 °C/100 m)，此結果若與董倫道(2012; 2013)在龜山島東南方發現的顯著高磁力異常區、以及Yang(2005)發現武淵井(位於龍德井北邊約2 km)具有高 ^3He 的地下水溶解氣等結果進行連結，可以推論地函熱流體可能已入侵宜蘭平原，沖繩海槽的張裂系統可能已向台灣島前進擴展。

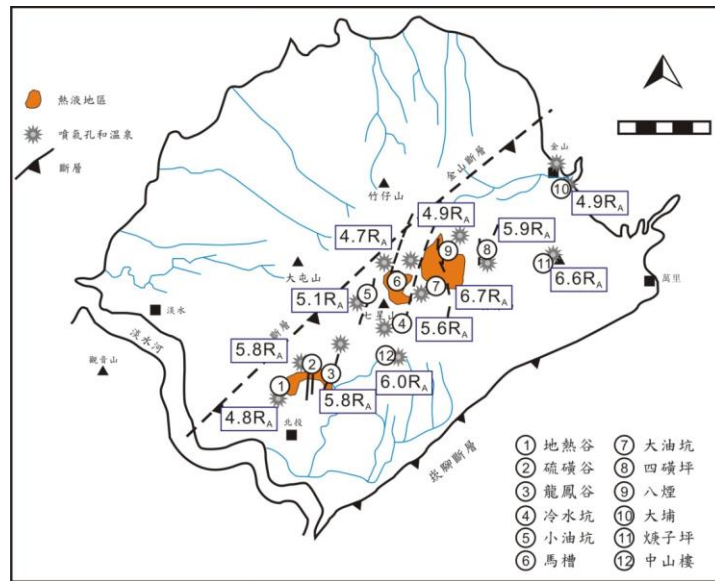


圖 3-36： $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值分布圖

註：He比值從大油坑沿金山斷層兩端逐漸減少，高比值指示He來自上部地函(楊燦堯，2003)。

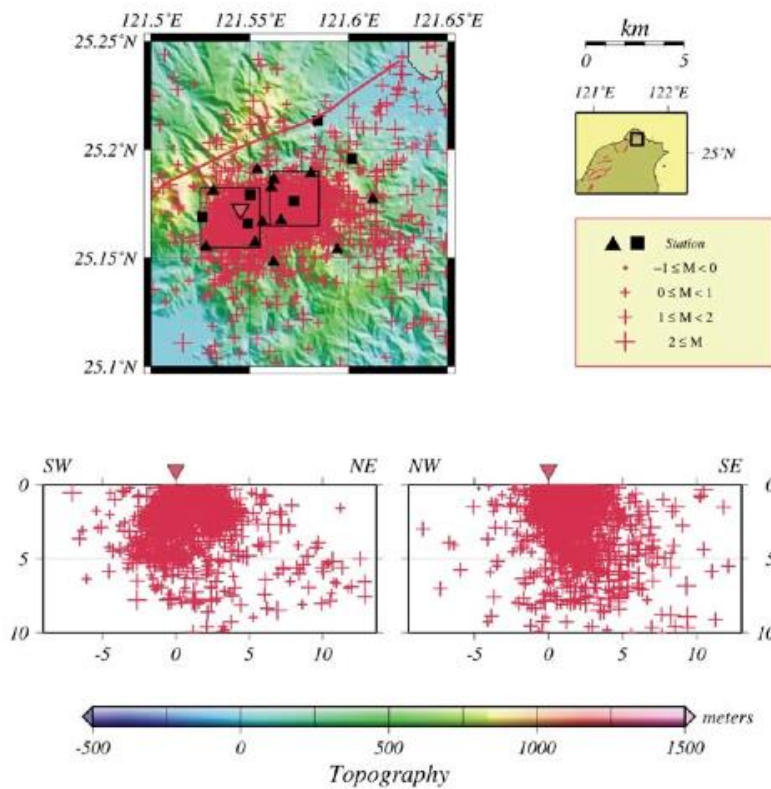


圖 3-37：大屯火山地區的微地震分布

註：此圖引用自林正洪(2006)，十字符號表示震源位置，上圖粉紅色倒三角形標示七星山位置；下圖左邊黑框表示七星山附近地震群，右邊黑框表示大油坑附近地震群，圖中SW-NE及NW-SE方向是指上圖相應黑框區域剖切面方向，而縱軸代表為深度(km)，橫軸代表自倒三角形(七星山與大油坑)位置為中心，向外延伸10 km至15 km處。

3.1.3.2.2. 斷層活動

除非大地構造架構的改變，否則斷層構造通常會沿著過去的活動斷層而活動，並由地下至地表逐漸擴大其活動影響範圍，形成所謂的斷層帶(JNC, 2000a)，處置場址的篩選及建造，必須儘可能遠離已知的活動斷層帶。在處置環境穩定性評估考量的時間尺度達數十萬至百萬年之久，活動斷層再活動的可能性高。因此，活動斷層是放射性廢棄物「深層地質處置」最關切的斷層種類，在SNFD2009年報告中，已根據中央地質調查所所公布的台灣活動斷層分布圖為基礎，彙整台灣已知活動斷層的相關研究資訊(台電公司，2010)。

1999年台灣921地震與2011年日本311大地震，已清楚說明地震與斷層活動的高關連性，因此，地質處置技術非常重視斷層活動位置的空間分布，尤其在地表下錯動位置的可能空間分布，以及記錄震波隨深度衰減的特性，將是處置工程設計所需的關鍵資訊。

3.1.3.2.2.1. 構造活動性微震監測與分析技術建立

(1) 區域地震與構造活動關係研究

在區域地震與構造活動關係方面，利用中央氣象局強震網資料國內外已有相當多文獻，針對深層地震解析板塊運動、地震分布及機制。本計畫針對強震網無法解析的淺部地殼微震分布及機制，參考近年最新地球物理綜合解析結晶岩體規模與構造分布資料，有助於進一步了解淺層地殼的微震特性與構造活動關係。

(a) 地震活動性(Seismicity)

結晶岩體的震源深度分布，從近地表到20 km間，但主要震源發生在8 km至18 km深度。與氣象局的有感地震資料比對，2013年的2月與3月間，此區發生許多有感地震序列。依照空中磁測與大地電磁法獲致的深層磁力與地電阻資料，地震區岩性含大理岩、花崗岩、片岩等岩體，以及深部大範圍高磁性基盤，就岩性與震源空間分布研判，此區地震與高磁性基

盤有關，深度多發生在5 km至15 km深，規模多小於 M_L 2之弱震。此地震群可能肇因於淺部較軟弱岩體，與高磁力基盤接觸帶，其應力集中發生破裂行為有關。

利用雙差分定位法(Double Difference Earthquake Location, HypoDD)將地震重新再定位，呈現出精準的地震叢集分布與密集區。可以發現結晶岩體的地震分布，在3 km至15 km深度確實存在地震相對安靜的區域。另一方面，Wu et al. (2014)亦根據中央氣象局地震資料研究結果，發表中央山脈底下20 km至40 km深處下部地殼經震波成像研究，顯示亦存在地震安靜帶。

(b) 區域構造活動與地震機制

一般構造型的地震震源破裂過程屬於一種雙重耦合(double-couple)的震源型態，各地震站所收到震波的初動訊號，會因地震站與震源間的角度不同而有所差異。從2011年迄今，此區已求解出95個震源機制；為了提高震源機制資料的可靠度，震源分析限制地震事件須定位於地震網內；其次是必需有7個以上的初動觀測量。其中，正斷層、逆斷層和走移斷層分別為33個、34個與28個，但多數地震事件在地震網的外緣或外側。由地震機制解觀察，在地殼應力在淺部及深部不同，在淺部為張力條件，超過10 km深度則以剪切或逆斷層的擠壓應力為主。

(C) 三維地震模型併合成像

將地震震源位置與磁力逆推所得之高磁感率岩體條帶對比，如圖 3-38(a)所示，可發現雖然部分微震發生在高磁感率岩體內，但大多數事件位於高磁岩體的下緣或邊界處。其可能的原因推測為：該高磁性岩體具高剛性，較能抵抗應力不易產生岩體破裂，不易形成孕震帶，因此岩體破裂大多發生於高磁岩體之外。另一方面，將磁感率與震波 V_p/V_s 速度比的逆推結果進行比對，如圖 3-38(b)中所示，藍色區塊標示高

V_p/V_s 速度比所在區域的高磁岩體，其下方及鄰近邊界位於岩性差異處，可能較易破碎，因構造作用而裂隙發生，有大量地震的發生。

(D) 震波與電阻併合成像模型

為深入探討淺層微震的空間分布與岩性的關係，103年度透過震波與電阻併合成像技術(圖 3-39；高程-1 km至-1.5 km)，呈現一明顯特徵為低異常區塊，具低波速和低電阻特性，與結晶岩體中裂隙岩層含較多的地下水有關(即地表大範圍出露，因破碎而富含地下水的大理岩體)。

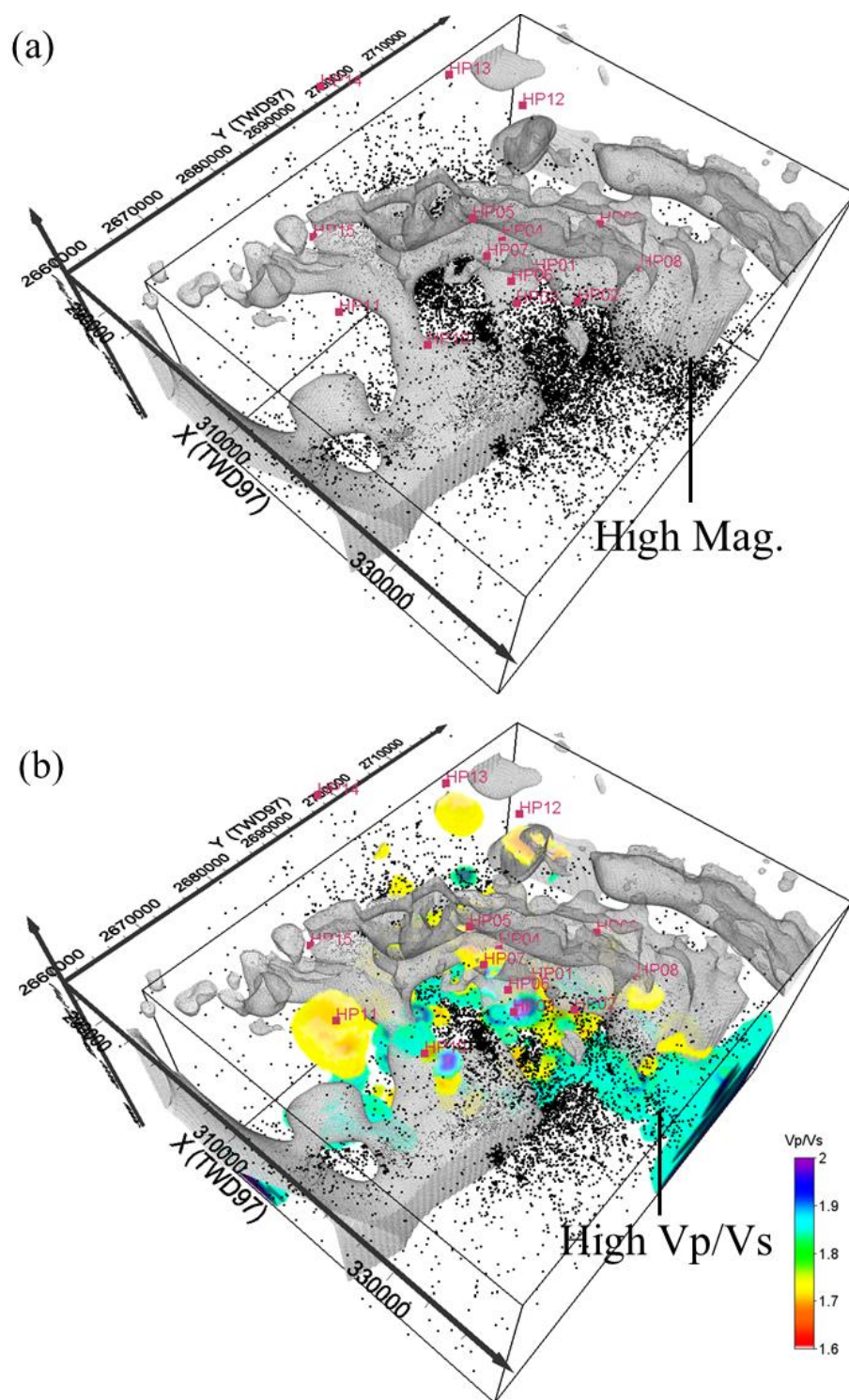


圖 3-38：震源位置與磁力、波速比異常區對比圖

註：(a)灰色區塊為磁力資料顯示的大南澳片岩帶結晶岩體分布範圍。黑色點為震源位置；(b)震波成像(V_p/V_s 比率)解析地殼組成與破碎帶位置。

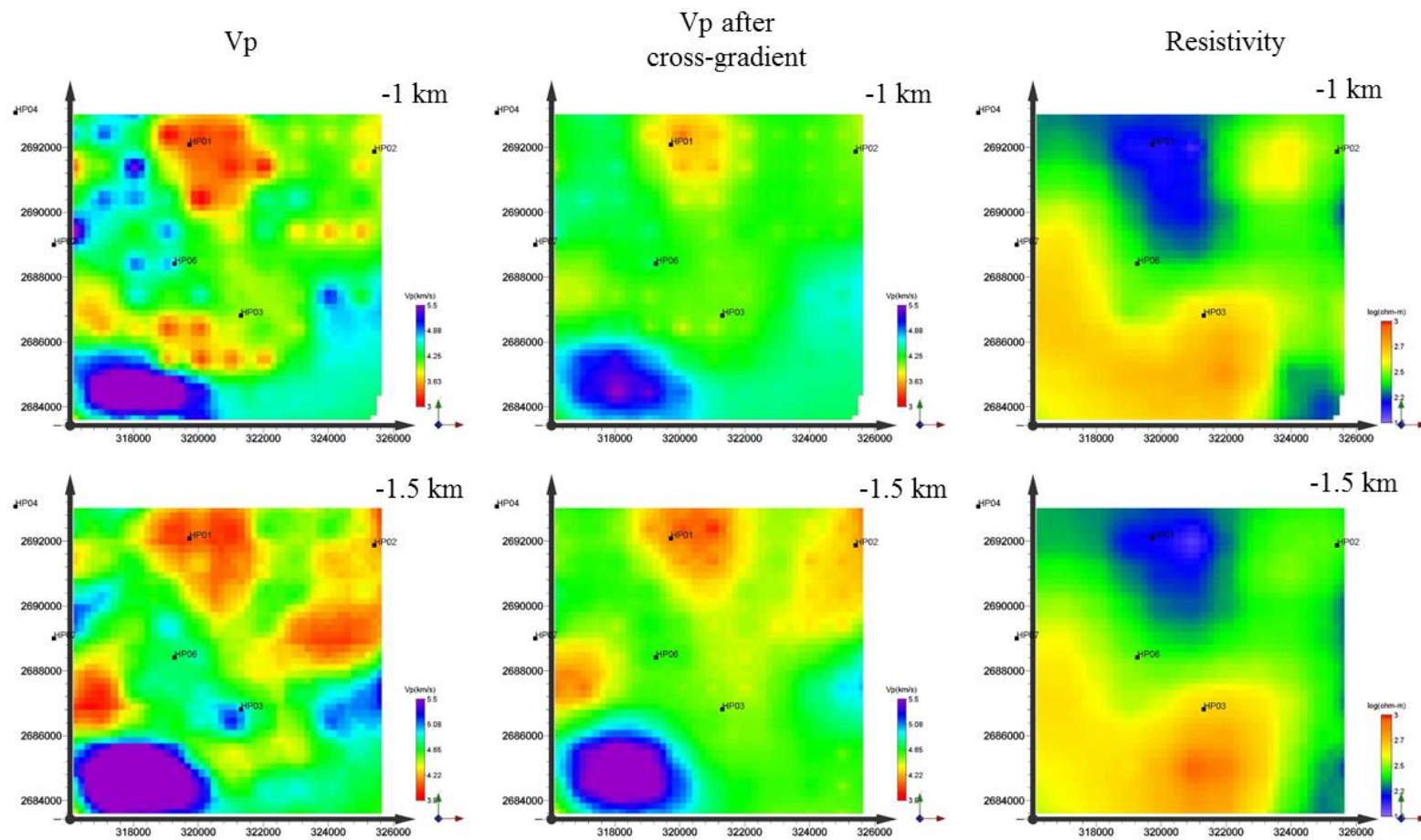


圖 3-39：三維波速與電阻率併合成像運算結果高程剖面圖

3.1.3.3. 抬升與沉陷作用

岩體的抬升/沉陷主要係取決於大地架構及其演化特性。對於放射性廢棄物「深層地質處置」而言，岩體的抬升將縮短處置深度與人類生活圈的安全距離，進而降低岩層對核種遷移的隔離功能，相反地，岩體的沉陷將使放射性廢棄物逐漸遠離人類生活圈。而在評估岩體抬升或沉降的方法中，GPS測量是衛星量距的一種方法，雖然相較其他調查方法，是觀測期距最短(只能觀測近數十年的變化趨勢)，但對於觀測大範圍地殼變動(特別是水平向變動)之大地測量中，較具高準確度及快速的方法，故廣範被用於抬升與沉陷作用的相關研究中。

3.1.3.3.1. 台灣抬升/沉陷特性

利用既有結晶岩體的位移觀測數據，初步進行GPS時間序列資料分析，獲取影響地表形態變化的綜合指標資訊：

(1) 水準測量動態修正

以內部9075為基準點的水準測量施測結果顯示和平地區呈現相對抬升的趨勢，但從GPS連續站的觀測資料來看，此地區的變動模式呈沉陷的趨勢，兩種測量結果的差異，肇因於兩者各有不同的參考基準點。Spampinato等人(Spampinato, et al., 2013,)分析義大利Sicily與Calabria地區的地表變形時，針對此問題採觀測網型內量測基準點變換，來獲取各水準點位隨時間的相對變化速率。本計畫嘗試依此動態變形修正模式的概念，針對水準測量資料進行修正，並與GPS資料相互驗證，以獲得更準確的地表變形資訊。此動態修正模式可以方程式(3-2)表示：

$$C_{(t2,t1)} = (h_i^{t2} - h_i^{t1}) - v_{gps}^{(t2,t1)} \times (t2 - t1) \quad (3-2)$$

式中 C 為修正值， h 為水準測量高程， v_{gps} 為GPS連續觀測站HGC3之變形速率， i 為測量基準點樁號， $t1$ 與 $t2$ 分別代表不同之觀測時間。利用HGC3的GPS連續觀測資料計算兩次水準測量間隔期間的

變形速率 ($v_{gps}^{(t2,t1)}$)，將水準測量獲得之高程變化量扣除GPS資料計算的高程變化量，即可獲得兩種監測方法間的差異量（或稱修正值， $C_{(t2,t1)}$ ）。再將當次水準測量獲得之各水準樁的高程變動量扣除兩種監測方法間的差異量（ $C_{(t2,t1)}$ ），以獲得經修正後相對於HGC3站的高程變化量（ $H_{(t2,t1,j)}$ ），如式(3-3)，式中 j 為水準測量樁號：

$$H_{(t2,t1,j)} = h_{(t2,t1,j)} - C_{(t2,t1)} \quad (3-3)$$

依據各測段期間GPS連續觀測站(HGC3)的變動速率，將原水準測量成果進行動態修正，獲得修正後的水準測量檢測成果，可作為岩體穩定性資料研析的基礎。

(2) 時序分析資料前處理：

時間序列是依觀察或觀測資料發生的先後次序，而排列出來的一群統計數據，亦就是同一元素(變數)於不同時間點或不同期間的資料，包括逐日的資料、週資料、月資料、季資料及年資料等。時間序列分析是以時間為自變數(independent variable)，各時間點所發生事件或觀測的數值為因變數(dependent variable)。本計畫時序分析採用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)來進行，該分析方法的基本意義，是減少變數至少數幾個互相獨立的線性組合變數，並將彼此間具有相關的 p 個變數，經過線性組合後成為 k 個彼此間相關係數為零的新變數。如此可用來簡化變數間的關係，亦可用來縮減多變量分析之變數數目。

由於進行PCA的分析需要較多空間分布的資料，才能有全面客觀的判釋成果。本計畫選擇大區域共17站的時序資料進行PCA分析。為能將有效的GPS連續觀測時序資料進行後續分析，必須將資料進行以下前處理，詳細步驟說明如下：

- (a) 訊號品質分析：建立4項觀測量評估指標，包括(i)L1載波(carrier)之多路徑指標、(ii)L2載波(carrier)之多路徑指標、(iii)週波脫落(cycle slips)之統計數、(iv)接收儀內部時錶平

均偏差量，藉此達到去蕪存菁及精進定位精度之目的。經篩選後，訊號品質不良的觀測數據將予剔除，不納入後續分析。

- (b) 誤差改正：使用去除雜訊分析模式，對於地球固體潮(earth tide)以1996年 IERS(International Earth Rotation and Reference System Service)所公佈的參考標準進行修正。在GPS觀測量計算過程中，也將採用IGS公佈的SP3精密星曆以及地球自轉修正量(來自於IERS所公告之值)、IGS及National Geodetic Survey (NGS)所公佈的GPS天線相位中心偏移及變化量值等參考修正量進行誤差改正處理。對於大氣對流層延遲修正部份，Dry-Saastamoinen大氣模式也將被應用於大氣延遲修正量之初始值，再利用附加參數法進行殘差的吸收。

(3) GPS時間序列資料分析：

本計畫的GPS觀測資料，利用PCA所分析的成果，圖3-40及圖3-41呈現去平均及去趨勢化後的GPS觀測資料，再經過PCA分析後，計算出前三大主成分的空間與時間分析圖。其中第一主成分便佔有50%的比重之多，可視為本計畫GPS時間序列中的共同誤差(common mode error; CME)，普遍存在區域性GPS網型解當中，是GPS時間序列中的主要誤差來源之一。

由於有7年長時期的資料，在資料預處理的程序上，除了去趨勢及去平均外，另外將年週期性的變化以及這7年來發生地震的事件，皆納入預處理的程序中。時間序列的模型從僅有加常數及乘常數的簡單模式，變成如方程式(3-4)：

$$y(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + \sum_{j=1}^n g_j(t_i - T_{g_j}) + v_i \dots \quad (3-4)$$

其中，

$c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i)$ = 年周期性變化

g_j = 地震造成的同震位移

v_i = 殘差

經過資料預處理步驟後，從其最原始的資料經過去趨勢、去平均、去年週期、去地震影響，到最後要導入PCA分析的資料，如圖 3-40呈現各站經過上述預處理步驟後的資料。其中，去除地震效應是根據地震發生的地點及規模來判斷，如果地震發生的地點離該區域大於35 km，以及規模小於5.5的話，則不列入考量計算。有關去除年週期的部分，是根據原始數據，以年為週期先擬合一正弦或餘弦函數，再將原始數據扣除此正弦或餘弦函數值。經預處理後之GPS時間序列資料，以PCA分析之成果如圖 3-41，第一主成分之比重仍高達36%，而且就該成分的空間分布而言，仍然與東部海岸線的距離有不小的相關性；從該主成分的時間序列圖中亦可發現年週期性的特徵存在。如果將來想要獲得較大區域性及較精準週期行為的判斷的成果，往後必須持續累積廣域的觀測資料。

參考日本H12報告的河階研究規劃，102年度開始進行本土河階研究相關資料的蒐集與回顧，獲致西南部泥岩山區活動構造、地體抬升及河階演育的經典案例。103年度擴大蒐集區域性定年資料，提供後續地形演育之研析彙整，作為地殼變動抬升/沉陷作用與河流地形演育等研析所需的估算資訊。

Chen and Liu (1996)利用澎湖珊瑚礁定年資料，建立了過去5千年台灣的海水面變遷曲線(圖 3-42)，其中老於5千年的曲線多靠假設，或參考Sunda Shelf的海水面變化曲線，假設台灣海水面變動具一致性。謝孟龍(2005)提出針對上升或沉降速率(且為定值)的區域，藉由特定地點的定年及其它資料如可獲知該年代海水面的位置；若特定地點有3個定年，理論上可獲得3個年代的海水面位置。比較不同地點依據不同或相同假設下，求得的上升或沉降速率，即有可能得到多個年代的海水面位置，據以檢驗這些由不同地點得到的絕對海水面位置是否彼此吻合，以此間接獲得台灣絕對海水面的變遷歷史。Hsieh et al. (2006)根據西南平原鑽井資料(表 3-9)，分析海水面變遷與濱海古生物化石定年數據，建立了絕對海水面曲線(圖 3-43)，並可據以

估計地殼變動關係，發現台灣的海水面在1萬-1萬1千年前(即更新世轉全新世時)，是一段相對快速上升的階段。冰期結束時，從1萬年前開始，海面上升速率每千年達8 m至9 m，大約在6.5千年至6.6千年前達到今天海水面的高度。這些資料將可作為全台灣估算構造沉陷速率或抬升速率的基準。

地質調查所在西南部平原豐富的岩心資料，除用來建立台灣5千年至1萬1千年前的絕對海水面曲線(圖 3-43)，也反映了區域性受到弧前盆地發育的構造作用影響，快速沉陷的速率也可由這些岩心分析獲得，如表 3-9所示(Hsieh et al., 2006)。謝孟龍(2005)根據岩心紀錄及定年資料研究，說明嘉南、高雄平原區長期受到構造作用影響，形成一系列的向斜(低窪地容易沉積)與背斜(台地)，向斜地區的構造沉降速率每年可達3 mm至4 mm (圖 3-44)。

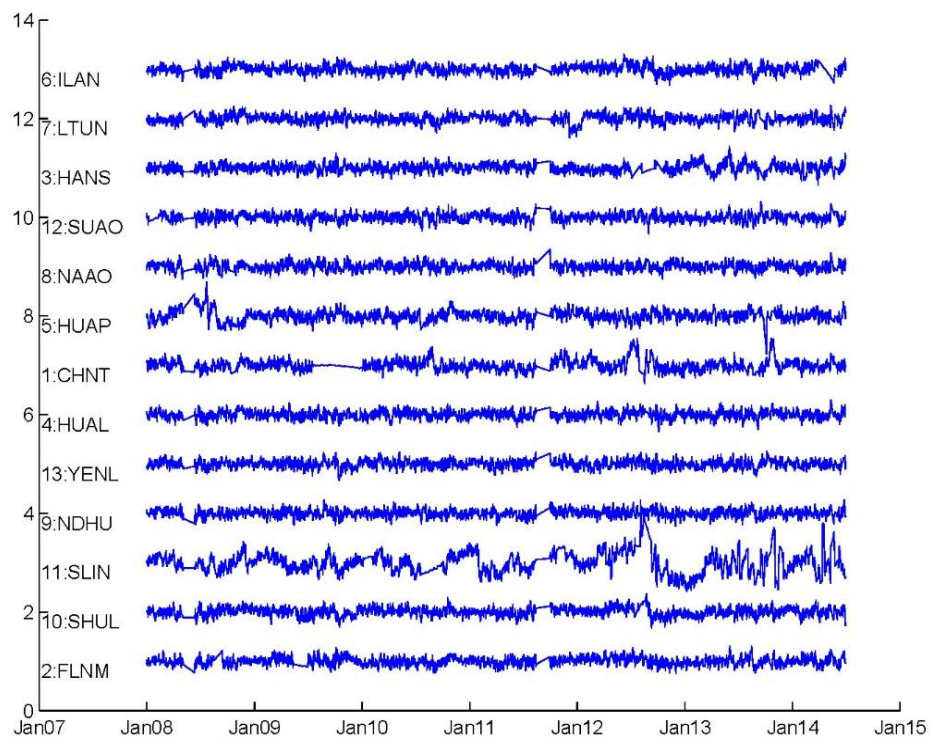


圖 3-40：各站移除平均、趨勢、年週期、地震效應之時間序列資料

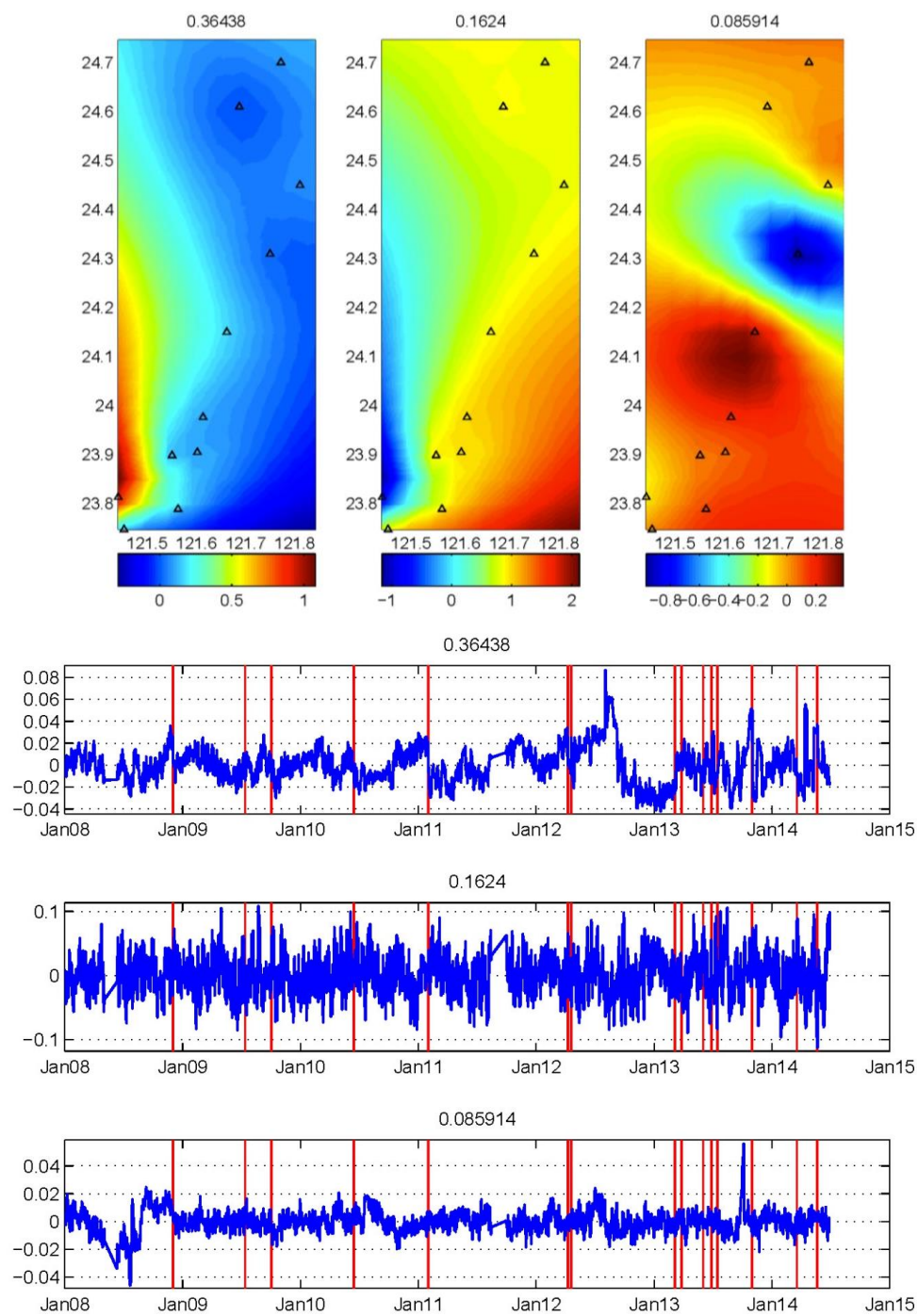


圖 3-41：7年觀測時間經PCA分析後之主成分空間分布及時間序列圖

表 3-9：西南平原區鑽井岩心紀錄構造沉陷速率

Sites ¹ (Fig. 1 for location)			Sample			¹⁴ C age (yr. BP)	Calibrated age ³ (1 σ range) (cal. yr. BP)	Range of rock uplift rate ⁴ (mm/yr)
Name	TWD67 N (m)	TWD67 E (m)	Elevation (m)	Material	Dep. setting ²			
Yuan-lin	2649675	206624	-9.8	wood	L/T	6670 $\pm$ 70	7475-7607	(-0.28, -0.08)
			-11.6	wood	L/T	6700 $\pm$ 60	7493-7654	
Tian-yang	2624986	178688	-5	shell	L/T	5420 $\pm$ 50	5734-5856	(-0.92, -0.91)
			-7.4	shell	L/T	5470 $\pm$ 50	5781-5898	
			-34.3	wood	M	9050 $\pm$ 100	9922-10394	
Lun-zu	2611936	183344	-8.9	wood	L/T	7370 $\pm$ 100	8039-8325	(0.44, 0.46)
			-8.9	shell	L/T	7620 $\pm$ 80	7987-8151	
			-32.6	peat	M	9230 $\pm$ 60	10268-10485	
Sin-pi	2598383	181250	-2.4	wood	M/L/T	6944 $\pm$ 58	7683-7820	(0.55, 0.93)
			-39.3	wood	M	9999 $\pm$ 60	11259-11442	
Dong-shi	2595712	162773	-42.2	shell	L/T	8700 $\pm$ 70	9006-9412	
			-49.2	organic mud	L/T	10200 $\pm$ 80	11642-12275	
			-64.9	organic mud	M	10790 $\pm$ 140	12636-13006	
Zhu-wei	2595599	171471	-31.2	organic mud	M	9240 $\pm$ 50	10283-10302	(-0.03, 0.27)
			-50.6	organic mud	M	9930 $\pm$ 190	11165-11950	
Nan-jing	2590795	185976	13.5	organic mud	L/T	4622 $\pm$ 57	5294-5465	(2.02, 2.73)
			-15.8	wood	M	9517 $\pm$ 67	10643-11067	
Lu-tsao	2590208	178269	-15.1	wood	L/T	8490 $\pm$ 40	9486-9529	(0.99, 1.15)
			-28.8	wood	M	9420 $\pm$ 40	10578-10691	
An-nei	2581219	173556	-40.6	organic mud	L/T	9500 $\pm$ 110	10582-11071	(-0.13, 0.06)
			-63.3	organic mud	M	11030 $\pm$ 120	12926-13152	
Chong-xi	2576361	184263	-4.3	wood	L/T	7277 $\pm$ 66	7982-8164	(1.42, 1.49)
			-21.7	wood	M/L/T	9345 $\pm$ 58	10429-10669	
Liou-ying	2574934	178839	-13	wood	L/T	7201 $\pm$ 66	7883-8146	(-0.24, 0.16)
			-29.6	shell	L/T	9129 $\pm$ 58	9574-9925	
Xia-ying	2570238	173545	-64.2	wood	L/T	9914 $\pm$ 61	11204-11543	(-1.44, -1.09)
			-79.2	peat	L/T	10873 $\pm$ 60	12679-13013	
Zong-ye	2565395	174375	-37.9	wood	L/T	8170 $\pm$ 160	8812-9423	(-1.25, -1.16)
			-51.7	shell	L/T	8627 $\pm$ 59(?)	8962-9376	
			-71.3	organic mud	L/T	10440 $\pm$ 110	12118-12790	
			-89.0	organic mud	M	12210 $\pm$ 160	13847-15077	
Jia-ba	2560020	179955	-4.7	wood	M	8050 $\pm$ 40	8784-9027	
			-31.5	organic mud	M	11510 $\pm$ 50	13206-13792	
Shan-hua	2559721	176200	-9.4	wood	L/T	6204 $\pm$ 63	7010-7208	(-0.80, -0.78)
			-35.5	wood	L/T	8544 $\pm$ 64	9474-9551	
Xi-gang	2558381	167156	-16.4	shell	L/T	6956 $\pm$ 77	7404-7539	(-1.25, -1.07)
			-116.3	organic mud	M	12270 $\pm$ 270	13851-15170	
Nan-ke	2556230	175430	-27.8	shell	L/T	7850 $\pm$ 60	8239-8368	(-1.66, -1.37)
			-35.0	shell	L/T	8330 $\pm$ 50	8773-8916	
			-74.8	wood	L/T	9770 $\pm$ 70(?)	11119-11232	
			-88.6	wood	L/T	11270 $\pm$ 40	13148-13386	
Nan-xing	2553702	169053	-114.5	organic mud	L/T	11560 $\pm$ 110	13405-13808	
			-144.8	organic mud	L/T	14060 $\pm$ 130	16580-17434	

表 3-9：西南平原區鑽井岩心紀錄構造沉陷速率(續)

Xing-shi	2553431	177117	-11.7	wood	M	6400±40	7270-7414	(-1.19, -0.66)
			-31.7	wood	L/T	8090±130	8772-9256	
Fan-zu-liao	2550542	178388	-16.3	wood	L/T	8080±40	8818-9125	(0.30, 0.30)
			-27.9	wood	L/T	8750±50	9603-9889	
			-44.5	wood	M	9710±60	10890-11198	
An-qing	2549095	166368	-130.8	organic mud	L/T	13010±40	15339-15960	
			-163.6	organic mud	L/T	14160±50	16792-17218	
Chang-xing	2543532	173232	-22.9	shell	L/T	7220±60	7615-7727	(-1.46, -1.45)
			-36.7	wood	L/T	8030±60	8776-9025	
			-63.0	shell	L/T	9960±60	10387-11081	
			-81.0	shell	L/T	11680±40	13006-13345	
*Tai-nan terrace	2544675	171056	22.60	wood	L/T	5840±50	6566-6725	(3.52, 3.77)
			20.30	wood	L/T	5930±50	6671-6847	
			17.70	wood	L/T	6950±150	7662-7936	
Ren-de	2539533	173284	-25.1	shell	L/T	8350±60	8786-8935	(-0.73, -0.62)
			-36.8	shell	L/T	9170±60	9600-10270	
			-81.4	shell	L/T	11940±70	13178-13489	
*Da-wan low land	2538044	171184	-10.20	shell	L/T	5300±50	5600-5696	(-2.08, -1.87)
			-45.90	shell	L/T	8850±80	9086-9552	
*Na-yi golf course	2535466	180750	27.5	shell	L/T	5840±50	6199-6289	(4.35, 4.43)
			15.5	wood	L/T	8110±50	9004-9229	
San-min	2504460	176306	-3.1	wood	M	5920±40	6671-6788	(-0.20, -0.16)
			-64.1	shell	L/T	11520±40	12934-13145	
Wu-quan	2502736	179610	-4.5	shell	L/T	5800±60	6166-6276	(-0.58, -0.31)
			-59.1	wood	L/T	10250±60	11753-12307	
Ming-quan	2501310	178355	-12.0	wood	M	5750±40	6491-6623	(-2.32, -1.78)
			-74.8	shell	L/T	10230±160	10825-11604	
Zhong-zhou	2497871	176589	-16.4	wood	L/T	5300±55	5991-6171	(-2.51, -2.27)
			-143.1	shell	L/T	14020±60	16004-16471	
Fo-gong	2497275	179444	-8.3	shell	L/T	6190±110	6487-6739	(-1.30, -0.55)
			-82.9	shell	L/T	12000±40	13199-13796	

摘自 Hsieh et al. (2006)

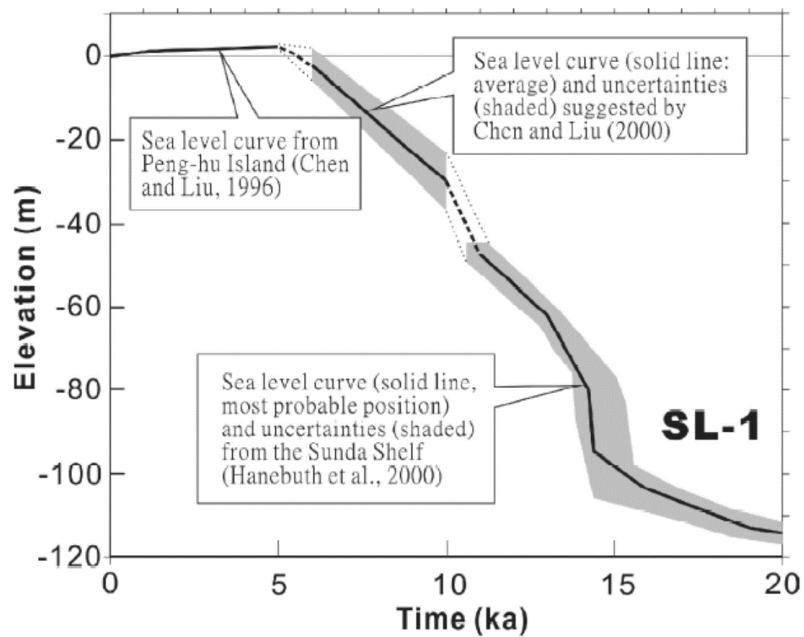


圖 3-42：台灣地區絕對海水面變遷史

註：摘自 Hsieh et al. (2006)，其中5千年至6千年前(虛線標示)及1萬年至1萬1千年前(點線標示)及其不確定範圍為假設。

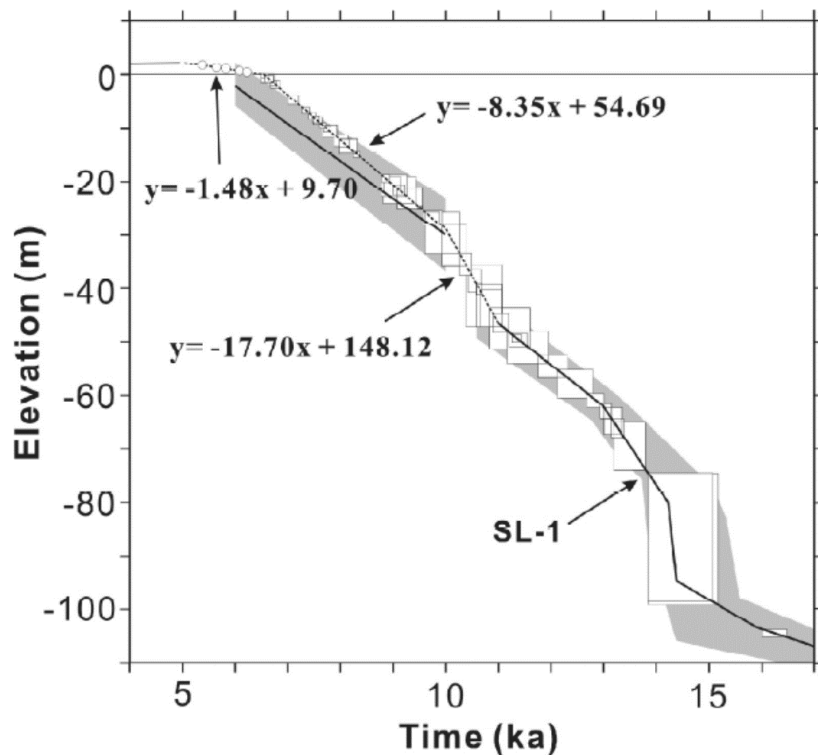


圖 3-43：西南平原記錄的絕對海水面變遷史

註：摘自 Hsieh et al. (2006)，根據西南平原的岩心紀錄、化石定年及環境變遷，進行海水面變遷與岩石沉陷速率的分析後，獲得最佳海水面變遷曲線。

(單位：mm/yr)



圖 3-44：西南部構造抬升與沉陷速率分析

註：摘自謝孟龍(2005)，數值標示抬升速率(正值)及沉陷速率(負值)。

3.1.3.3.2. 剝蝕作用

台灣的剝蝕作用基本上伴隨著山坡的流水，與河流強力進行懸浮及河床搬運與沖刷，加上常有風災或豪雨下的山崩，導致河流快速移運；有鑑於此，Derrieux et al. (2014)回顧過去在台灣發展應用過的各種推估剝蝕率的方法，包括3類：

(1) 量測河流沉積物的方式：

應用數十年主要河流懸浮物載量紀錄，顯示出中央山脈估計範圍為2 mm/y至8 mm/y；而全台為5 mm/y，接近由河流沉積物的宇宙核素測定剝蝕率5 mm/y的估值；但此法偶有局部地區最大值如Dadson et al. (2003)發表會超過30 mm/y。

(2) 以低溫定年估算冷卻率的方式：

應用數百萬年尺度的低溫定年法，主要靠核飛跡法的年代值，加上熱歷史與構造歷史的演化，估計出中央山脈的剝蝕率範圍約3 mm/y至6 mm/y，但近年來重新再以二維熱-力學演化模型加上熱流校正後，顯示整個造山帶呈現較低的剝蝕率，約2 mm/y至4 mm/y (Fuller et al., 2006; Derrieux et al., 2014)。

(3) 應用磁黃鐵礦分布的估算方式：

Horng et al. (2012)提出造山帶剝蝕速率自晚期上新世以來有加速的現象，從原本低於1 mm/y提升到高於2 mm/y，符合台灣弧陸碰撞作用發生的時間。

Derrieux et al. (2014)指出若以整個造山帶來看剝蝕速率，不同的估計方式都涵蓋了3 mm/y至5 mm/y這個範圍，對局部地區或大區域而言似乎都沒辦法更精確了。從河流沉積物來估算，顯然受到颱風和地震導致的土石流與山崩作用影響甚鉅，即無以代表長期地質時間的剝蝕率。另一方面，低溫年代學的模式因台灣碰撞作用可能不屬於一種穩定剝蝕的作用，因此探討長時間的剝蝕率應更為審慎。有鑑於此，Derrieux et al. (2014)利用宇宙核素的方式，分別比較了高山山峰受侵蝕岩層的資料，以及中央山脈東西側河域沉積物的宇宙核素分

析資料，發現台灣中央山脈東西兩側的剝蝕率有明顯差異(圖 3-45)。值得強調的是，Derrieux et al. (2014)利用宇宙核素所獲得的台灣山區流域抬升率範圍，遠低於由水準測量山區高抬升率的範圍(10 mm/y至15 mm/y, Ching et al., 2011)，也遠低於河流懸浮物估算的剝蝕率範圍(最高達20 mm/y, Dadson et al., 2003)。此外，宏觀台灣山脈的西側剝蝕率較低(~1 mm/y至3 mm/y)，符合大陸楔西側的 pro-wedge模式，有較低緩的山形；相較之下，東側較高(~4 mm/y至5 mm/y)符合大陸楔東側的 retro-wedge模式，位於較深部變質岩與較陡峭的山勢，河流下切較深，而反映出剝蝕率較高(Derrieux et al., 2014)。

謝孟龍(2007)指出河階植物化石碳14年代(幾百年前至2萬年前)高品質的定年資料，可重建高解析度的河流演育歷史，得以估算河流堆積、側蝕、下切的速率，進而探討河階的成因及其古環境的意義。

根據謝孟龍(2007)回顧近年來山區河階調查成果，獲得的重要突破可包括：

(1) 階面「聚合」或「發散」的現象：

確認不只一階的階面可沿河流「聚合」成為單一個階面，或單一階面可「發散」成為多重階面；其中階數少的階面一般較寬，生成時間也較長，階數多者則相反。

(2) 「局部」侵蝕基準面升降對河流行為的影響：

因臺灣許多地區侵蝕基準面可獲知變化歷史，據以檢驗河階序列後發現，侵蝕基準面變動影響的範圍及幅度有限，可釐清臺灣上千公尺的山脈，河流行為主要仍受控於「廣大」山脈的水文、水力(流量)與沉積物供應量；

(3) 沉積物供應(或山崩、土石流事件)對河流行為的影響：

臺灣山脈的侵蝕(或沉積物的供應)在百年至萬年的時距下可能是「災變性」的，且其頻率、規模、與時機可隨時間及區域而有所不同。在山脈快速隆升的背景下，大量的岩屑曾因暴雨(或大地震)在短時間內進入河流系統，或造成河流大規模加積，或幫助河谷加寬，形成地形面；重複這地形面的生成，並疊加在河流長期

的下切之上，便形成一系列所見到的階地。「山脈侵蝕的過程」，及其與「地殼運動」和「微氣候變遷」的關連，是目前正在起步的議題，而臺灣系列的河階正是研究這議題最好的材料。

傳統上深受戴維斯(W.M. Davis)的「地形循環」學說影響，劃分了「高山平夷面」、「山麓面」、「赭土緩起伏面」、「高位階地面」、「低位階地面」，及其相對應「地形期」。根據台灣山區河階歷史演育的研究，已能重新詮釋「高山平夷面」可能是山岳冰河侵蝕下的產物，未發現「山麓面」及「赭土緩起伏面」，而部分的「高位階地」未發育紅土，且定年結果比許多「低位階地」年輕。

台灣山區已有近300個坡地或階地獲致碳14年代，累積資料目前共約400筆，年代範圍如圖 3-46所示，在小於200年前至大於4萬年前(絕大多數小於2萬年前)。資料大多位於蘭陽溪、立霧溪、烏溪、濁水溪、八掌溪、楠梓仙溪、荖濃溪，及東部的海岸山脈等地，顯示出古山崩、土石流災害案例較多。

根據這些資料，宏觀台灣古山崩、土石流的特性，概述如下：

- (1) 北部山區山崩、土石流的活動性明顯低於其它山區(雖定年較少，從既有的資料顯示，此區古山崩、土石流的年代較老，規模較小)。
- (2) 中、南部與東部山區不乏超大規模的古山崩、土石流事件。這些事件所帶來極大量的岩屑，曾在支流匯口堆積成大型沖積扇，並將河床堆高100 m以上。
- (3) 山區古山崩、土石流事件經歷的時間(由流域開始不穩定到重回穩定狀態)，因地而異；可短於幾百年(即碳14定年誤差範圍內)，或涵蓋數百年甚至千年之久。
- (4) 即使彼此相鄰、並擁有相似的地質、地形背景，各流域的古山崩、土石流規模、頻率、與發生的時間點並不相同，也因此形成不同大小與序列的階地。
- (5) 考量到古山崩、土石流因地而異的現象，已知的古山崩、土石流從圖 3-46呈現出似有集中於某些時段發生，但這些時段與已知

的古氣候變遷有明顯的關聯—即使是在較冷、較乾的冰期(即年代老於1萬1千5百年前)，大規模古山崩、土石流依然不斷發生。

海階定年與海平面變遷可以得出地體抬升與沉陷速率，海岸山脈東岸有台灣數千年至萬年尺度上最高的抬升率，最高甚至超過10 mm/y (謝孟龍，2005)，如圖 3-47所示呈現南段快速抬升，而北段已經沉陷的趨勢，受到弧陸碰撞作用影響下，海階演變的構造作用與剝蝕作用，實則需要更深入探討。

謝孟龍、劉平妹(2010)利用定年資料老於3千年前的海相、濱海相沉積物(包括原地生長的珊瑚與鑽孔貝)，並採用古海水面曲線(圖 3-43)，來計算花東海岸的地殼隆升速率，發現新社以南大部分的海岸區段，都擁有4 mm/y至5 mm/y的抬升速率，隆升的海岸呈現出兩個北緩南陡、不對稱的大型背斜：

(1)背斜軸部分別位於長濱、鰲曼之間，抬升速率達8 mm/y；

(2)杉原、富山一帶，抬升速率高於10 mm/y。

疊加在這兩個主要背斜之上仍有幾處小幅度的褶皺，但構造形態大致吻合此間海階地形資料。杉原、富山一帶地形與構造關係應更為複雜，如基盤岩性與沿岸沉積物供應等因素，也影響著海岸地形演育。

上述兩個主要背斜大致對應海岸山脈南、北不同的地形區塊。位於北方的主要背斜包含幾個雁行排列的火山岩山脊，南方的背斜則對應泰源盆地及其東緣的弧形火山岩山脊。幾處隆升速率出現局部轉折的地點也發生在不同種類基盤岩石的交界地帶，且泥岩區(包括利吉混同層)的上升速率均大於火山岩區者。這些現象代表花東海岸新期的構造運動相當程度受到原本島弧系統岩性分布的影響(圖 3-48)，較硬的火山岩剝蝕率較低，較軟的泥岩剝蝕率較高(Hsieh and Rau, 2009)。

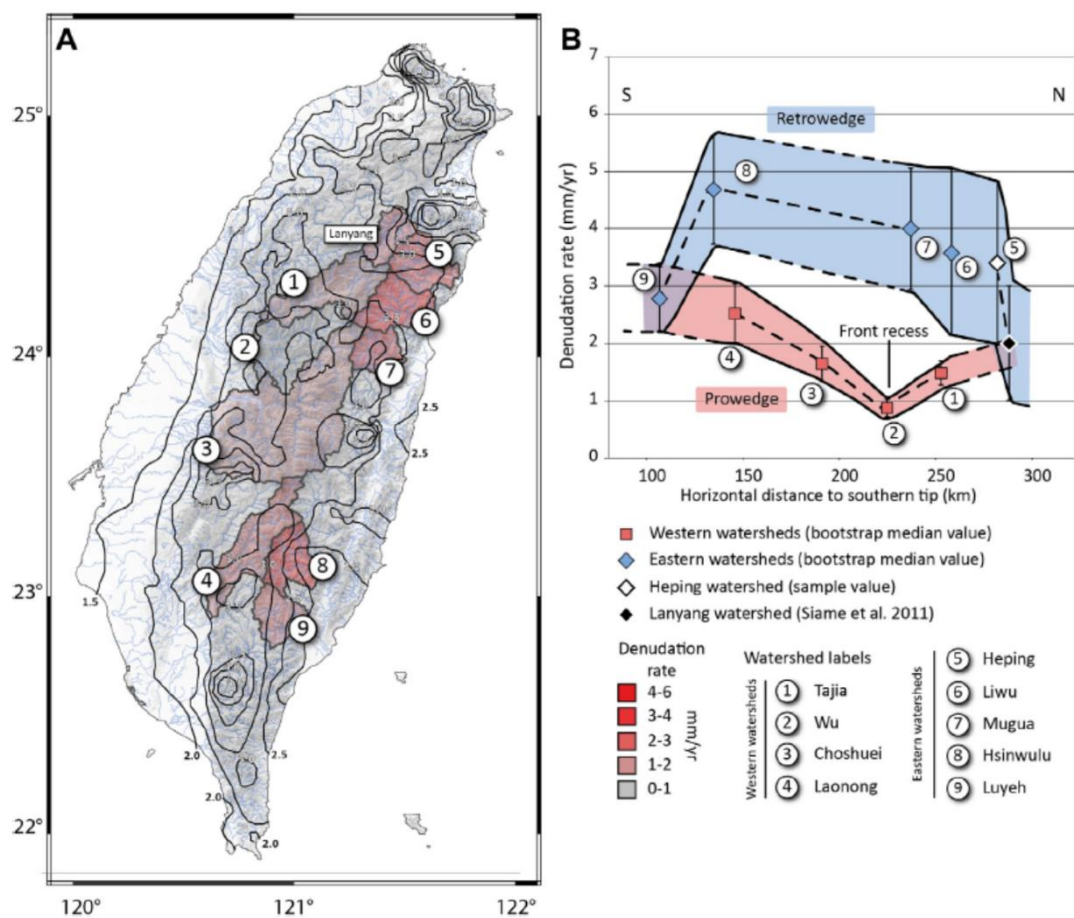


圖 3-45：宇宙核素 ^{10}Be 量測得台灣造山帶的剝蝕率

註：摘自Derrieux et al. (2014)。(左圖)台灣山區各流域的剝蝕率，黑線標示1949年至2009年間平均年降雨量等值線。(右圖)造山帶兩側剝蝕率差異比較，山脈西側剝蝕率低於東側，且東側有往南北兩端剝蝕率降低(和平溪往蘭陽溪方向降低)的趨勢。

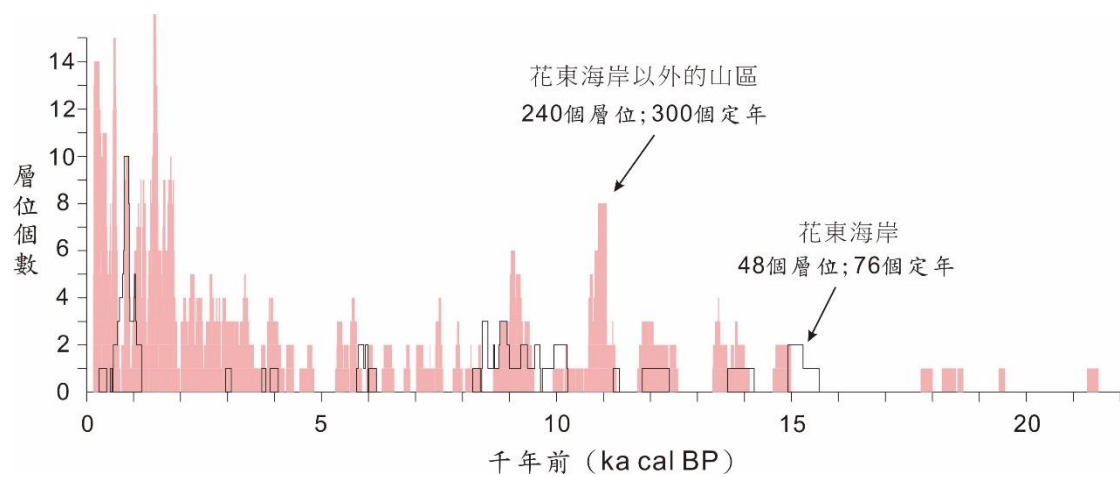


圖 3-46：台灣山區既有古山崩、土石流時間序列圖

註：以「層位」為單位(年代相近、高差 ≤ 10 m、距離 ≤ 200 m者視為同一層位)，各層位由一矩形表示，高(縱軸)為1，寬(橫軸)為該層位所有定年樹輪校正後一個標準差範圍的總和；此圖乃所有矩形疊加的結果。(資料來源：謝孟龍，2007；Hsieh and Rau, 2009；Hsieh and Chyi, 2010；Hsieh et al., 2011, 2012；Hsieh and Capart, 2013，及謝孟龍教授未發表的資料)。

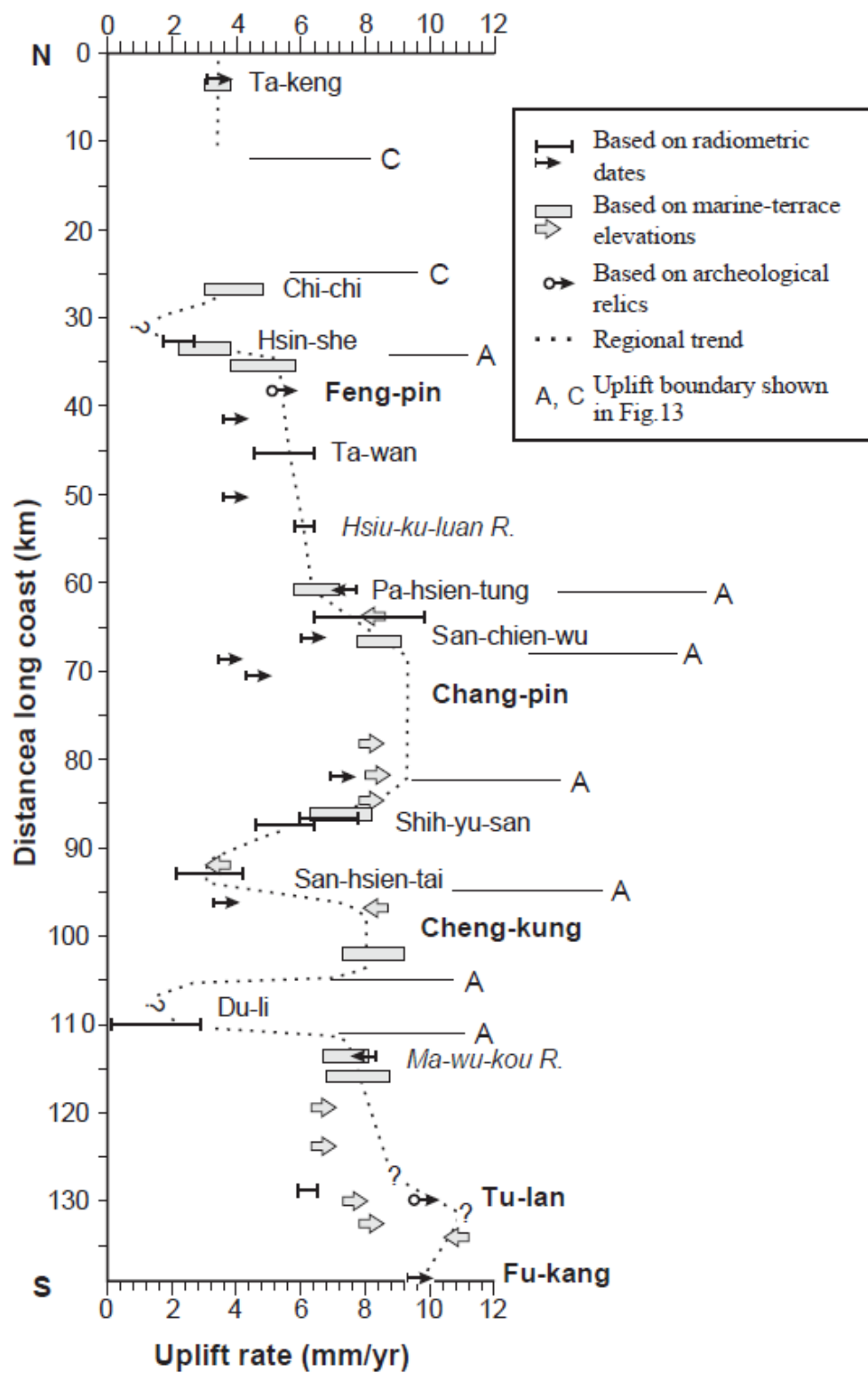


圖 3-47：東部海岸山脈各海階抬升速率分布

資料來源：Hsieh et al. (2006)

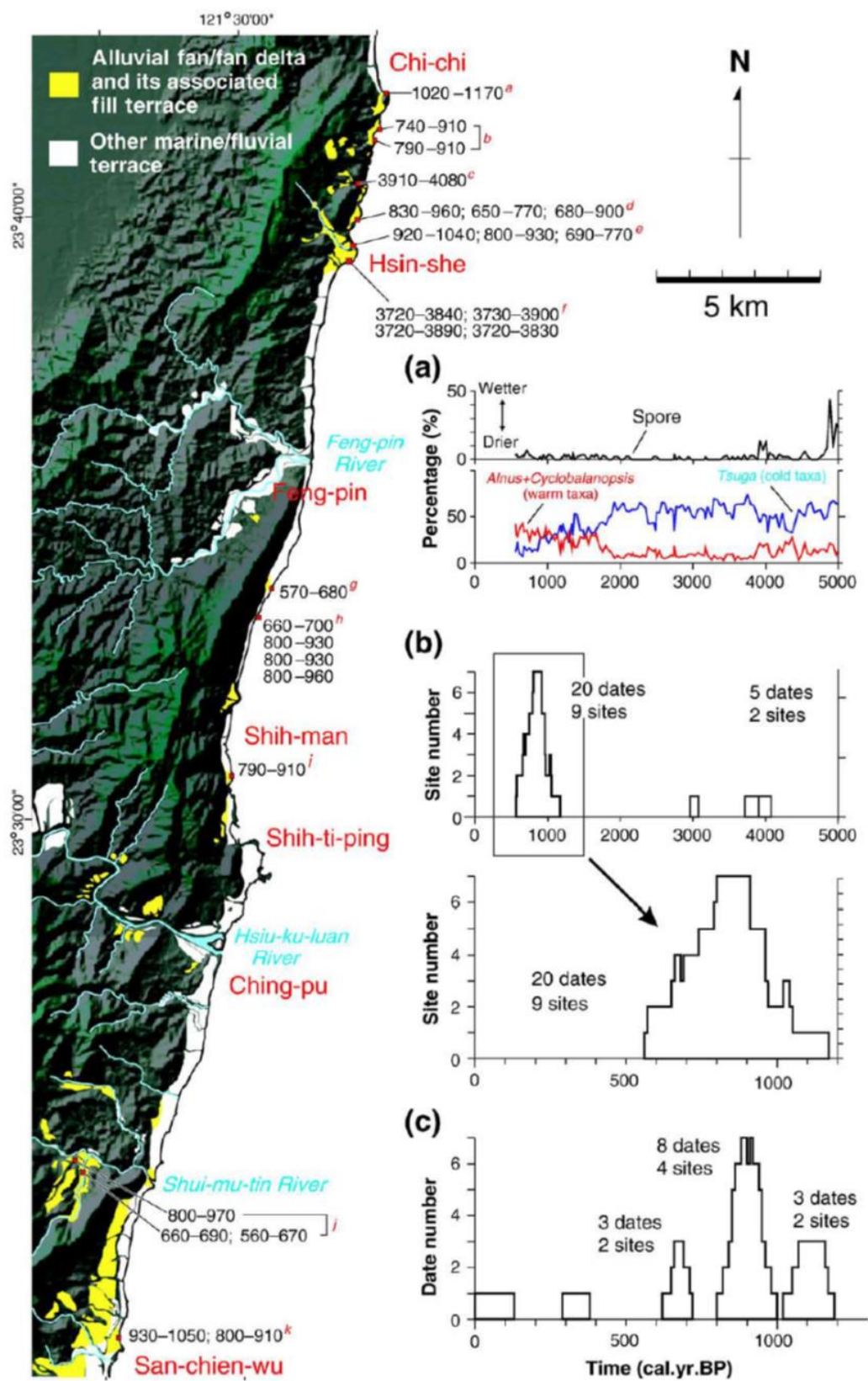


圖 3-48：花東中北段海岸河流沖積扇及三角洲碳14定年資料
資料來源：Hsieh and Rau (2009)

3.1.3.4. 氣候與海平面變遷

根據SNFD2009報告指出，氣候變遷與海平面變化是影響與威脅處置場址地質環境長期穩定性之4項自然活動之一(其他3項為：斷層活動、火山活動、地殼垂直活動和剝蝕)。由於全球氣候變遷為海水面長期演變之驅動力，海水面變遷則對處置系統造成之衝擊包括：改變地下水流和地下水化性、地下水位變動、海/淡水介面遷移、侵蝕/淤積作用等，以致干擾處置系統的穩定地質環境，進而影響處置場之功能。

台灣地區古氣候與古水文環境研究結果，末次冰期自27,000年前至距今約10,000年前，當時全球海水面較現今低約120 m(陳文山等，2005)，此區海岸線約在澎湖以南，亦即當時澎湖以北的台灣海峽是陸地而非現今的海峽。全球氣候於冰期時，雪線南移且往較低的海拔遷移，及至今日台灣海拔超過3,300 m高山上，仍有冰川遺跡被報導(台電公司，2010)。最盛期的乾冷氣候一直持續到約17,000年前(溫度要比今日低超過6 °C以上，年雨量也可能要遠低於今日1,000 mm以上)，而後開始有減緩趨勢。

考量SNFD2017報告所需之氣候與海平面變遷資訊與評估分析能力，自102年度利用2004年2月21日10:44-10:45拍攝之IKONOS-2(1m)同軌立體對影像，製作近海至河道之數值地形模式(DEM)，用以辨識10,000年以來，末次冰期結束至今，海平面上升、河口堆積與海階變化的地形紀錄，以獲取此河域因氣候變遷導致海平面上升與沖積扇堆積的地形演變證據。103年度再次利用歷史衛星影像，以2008年11月7日拍攝0.5 m解析度Worldview1同軌立體對影像，完成相同範圍數值地形模式(DEM)，用以比較地形演育特徵。比照102年度數值地形模型，垂直河道切A-A'、B-B'、C-C'、D-D'等剖面，可以比較2次數值地形呈現出的和平溪口兩岸與沖積扇地形特徵(2004年如圖3-49；2008年如圖3-50)。2次不同時間不同衛星拍攝的歷史影像，所完成的數值地形模式均呈現相同的地表地形特徵。長期地表地形變遷反映在地形剖面上，可能表示數百至數千年尺度的剝蝕作用，而這

些剖面顯示河道地形平坦，地形解析均未呈現出明顯的構造線形。針對海/淡水介面變遷的紀錄，研析各河口沖積扇與近海海域之震測剖面，利用層序分析方法了解河口、海域萬年以來，海進層序及地形演育的地質紀錄，證實陳文山等(2004)指出因為氣候與海水面變遷的影響，全新世以來台灣平原及麓山帶地區的地形演育，必須考慮海水變動速率與沉積速率的關係：假如沉積速率快於沉陷盆地的沉降速率時，沉積物除了向海側堆積，形成海退層序，山麓前緣沖積扇會朝上游的山麓河谷堆積，此一模式可以解釋各河系沉積型河谷、獨立山及河口沖積扇下海退層序的特徵。此外，所有平坦的沖積扇均顯示沖積層序是由海進作用所形成中間略厚之板狀沖積層，沉積於基盤面之上，表示海水曾經淹蓋過陸域區域，此海進造成之地層可向內陸延伸，造成地形有溺谷(dump valley)存在。而後廣泛發生海退層序，可解釋為此沉陷盆地沉降速率低於沖積物沉積速率，在快速沉積下發生海岸往東退縮。但這些海退沉積層東邊邊界，甚至可能往外海延伸，離現今海岸更遠，反映在數公里平緩的基盤岩上，沈積層累積了萬年至數十萬年來氣候變遷與海平面升降下反覆沉積與剝蝕循環。此氣候與海平面變遷的概念，提供未來水文地質模型建立之用，在數十萬年尺度下循環性海水與淡水介面的變遷過程。

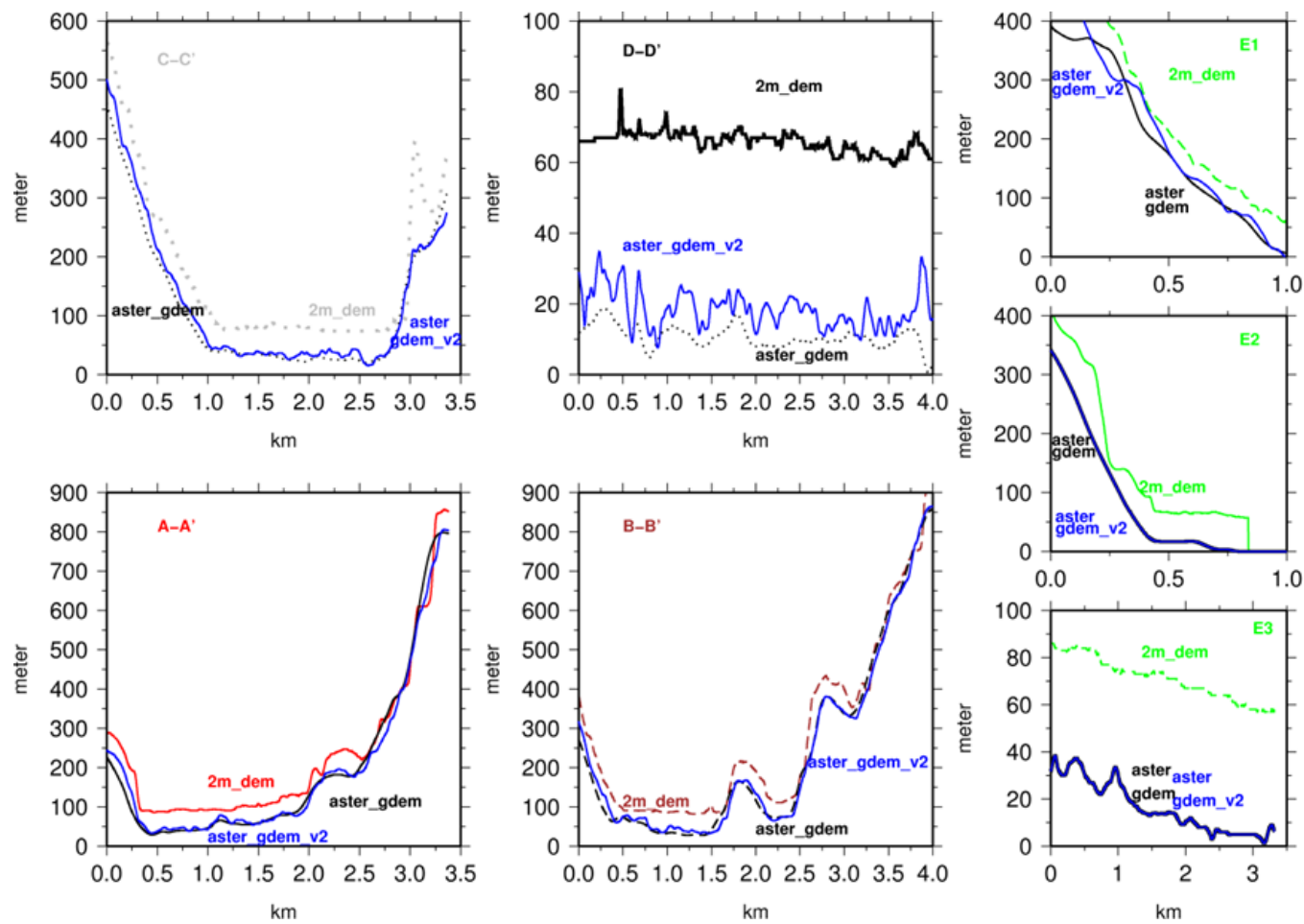


圖 3-49：2004年數值地形剖面分析圖

註：黑色與藍色線為30 m Aster gdem第1版與第2版。摘自102年度成果報告(圖3-115)。

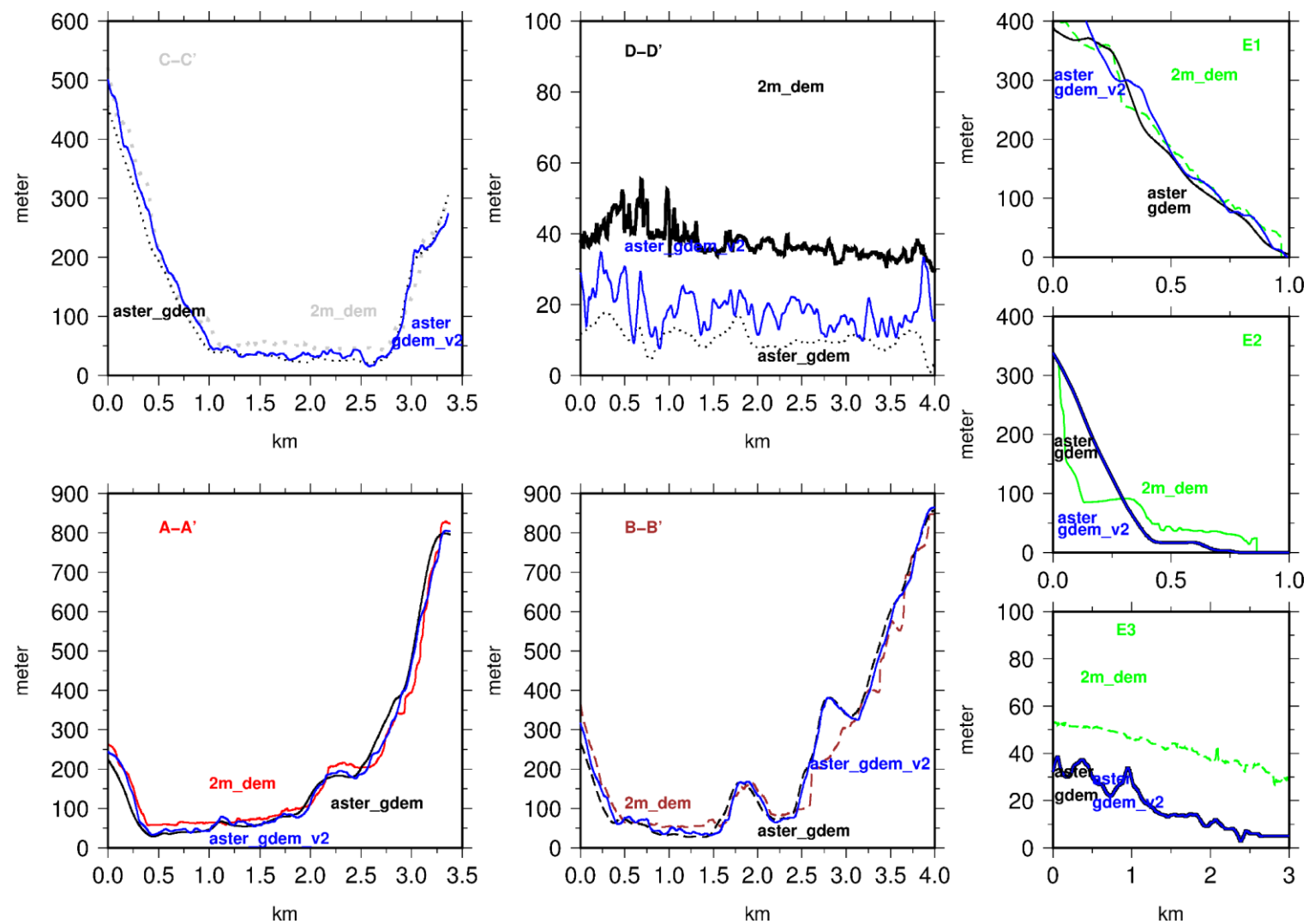


圖 3-50：2008年數值地形剖面分析圖

註：黑色與藍色線為30 m Aster gdem第1版與第2版。

3.2. 處置設計與工程技術

深層地質處置技術主要利用多重障壁概念，以多層的障壁來阻滯用過核子燃料之放射性核種的傳輸，使核種到達生物圈時，放射性已衰減至安全限值以下。多重障壁可分成天然障壁(natural barrier)及工程障壁(engineered barrier)。由於工程障壁設施需與各國地質環境條件配合，且需符合各國法規要求，因而成為各國積極研究的題目。例如美國Yucca Mountain場址位於厚層的未飽和帶，母岩(凝灰岩)中富含高吸附性之沸石礦物；比利時位於Mol地區的處置母岩為透水性極低的厚層黏土(bloom clay)；德國位於Gorleben地區的處置母岩為鹽穹(salt dome)，具有透水性極低、長期大地應力作用下會自身閉合等優點，以上這些國家均以天然障壁為主要障壁。相對地，瑞典、瑞士、芬蘭等以花崗岩為處置母岩的國家，研究結果顯示：天然障壁功能在於提供一個地質及物理化學上穩定的環境，而工程障壁則提供積極的吸附及阻滯核種外釋的作用。以我國區域的情況來看，天然障壁受先天環境的限制，可供選擇的地區非常有限，若以結晶岩或其它合適母岩為優先調查母岩，則應加強工程障壁設施的研究，以確保處置場之安全。

本項工作處置設計與工程技術為SNFD2017報告章節之一，103年度分別按計畫書之規劃，進行「工程障壁系統概念與設計需求」、「處置概念影響因子探討」、「工程障壁的穩定性」等相關研究，工作果將分別於對應章節進行說明。

3.2.1. 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力

國內用過核子燃料最終處置在「潛在處置母岩特性調查與評估階段」的處置概念，係採採多重障壁之深層地質處置方式進行最終處置。深層地質處置為國際公認適於處置高放射性廢棄物之方式，即將高放射性廢棄物埋在深約300 m至1,000 m的穩定地質環境中，再配合前述之工程障壁與天然障壁組成多重障壁，可以有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移，以換取足夠的時間使高放射性廢棄物的輻射強度在到達生物圈之前已衰減至可忽略的程度。

與台灣鄰近的日本在進行高放最終處置的研究過程中，亦採用多重障壁系統作為置設施的設計概念。該國的H12報告中亦有處置設計概念及工程技術能力之章節，內容大意指指出：為安全與合理的工程障壁系統及處置設施的目標下提供設計要求，此目標直接來自主管機關的指引；證實可以運用目前可行的工程技術或可預期之未來發展的技術，來合理地建造工程障壁系統及處置設施，主要為該報告處置設計概念及工程技術能力章節的整體綜合說明(JNC, 2000a)。

本項工作在103年並無規劃實質工作項目，對應於國內SNFD2017報告所需，報告內容亦將針對工程障壁系統及處置設施進行整體說明，此部分成果需待SNFD2017的整體成果大致完成後，再進行彙整說明。

3.2.2. 工程障壁系統與地質處置母岩的功能

國內在「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」(民國94年08月30日發布，民國102年01月18日修正，會物字第1020001007號令)針對國內用過核子燃料有最終處置有明確要求，包括：

- (1) 第3條：高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式。
- (2) 第8條：高放處置設施應採多重障壁之設計。

依據上述法規之要求，國內用過核子燃料最終處置設施將採多重障壁(multiple barriers)之深層地質處置方式進行設計。深層地質處置是將高放射性廢棄物埋在深約300 m至1,000 m的穩定地質環境中，再配合廢棄物罐、緩衝材料與回填材料等工程設施，藉由人工(廢棄物本身、廢棄物罐、緩衝材料、回填材料及包含處置母岩與地質圈障壁所組成的多重障壁，以有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移，並換取足夠的時間使核種在到達生物圈之前，使放射性已衰減至安全限值以下。

結晶岩類(花崗岩)為大部分核能先進國家(如加拿大、英國、芬蘭、日本、西班牙、瑞典、瑞士等國)進行高放射性廢棄物最終處置計畫所選擇的處置母岩。台灣及福建東南地處環太平洋中生代岩漿岩帶

(Mesozoic Circum-Pacific Magmatic Belt)的西緣亦有許多結晶岩出露在中生代基盤岩中，因此，本計畫將結晶岩列為潛在處置母岩的調查對象之一。

最終處置設施之處置母岩之預期的功能如下：

- (1) 具備長期穩定性，如：斷層帶少、低地層抬升率；
- (2) 具備良好的物理環境，如：低地下水流通率、力學穩定性等；
- (3) 提供良好的化學環境，如：還原環境；
- (4) 具備核種遲滯與吸附之天然障壁功能。

工程障壁就組件上可分為4個部分：廢棄物體本身、廢棄物罐、緩衝材料，及回填材料。工程障壁內各組件的預期功能為：

- (1) 廢棄物體本身(用過核子燃料)：
 - (a) 短半衰期核種宜經適當衰變且衰變熱(decay heat)應經適當降溫至便於進行處置操作。
 - (b) 釋出熱能不宜對處置場工程障壁的長期效能造成不利之影響。
 - (c) 用過核子燃料宜耐地下水溶解作用之影響等。
- (2) 廢棄物罐：
 - (a) 避免入滲的地下水直接與用過核子燃料接觸。
 - (b) 具長時間的力學結構完整性。
 - (c) 對處置環境具有化學抵抗力。
 - (d) 對其他工程障壁材料不致產生不良影響。
 - (e) 提供在處置設施運轉階段一定程度的輻射屏蔽功能。
 - (f) 保持處置設施處於次臨界狀態。
 - (g) 在廢棄物罐腐蝕後讓核種處於還原環境。
 - (h) 讓廢棄物罐腐蝕產物對核種有吸附作用。
- (3) 緩衝材料：緩衝材料使用目的在環繞廢棄物罐周圍，以防止地下水流入罐內，維持廢棄物罐在定位，並遲滯核種遷移。緩衝材料的功能需求包括：
 - (a) 能長期完整包圍及保護廢棄物罐抵抗外部岩層之應力作用。

- (b) 避免地下水入滲而直接與廢棄物罐接觸。
- (c) 避免地下水直接在廢棄物罐周圍流動。
- (d) 防止地下水中的腐蝕物質與廢棄物罐直接接觸。
- (e) 作為核種遷移的擴散障壁。
- (f) 具適當導熱性使廢棄物罐表面溫度低於100 °C。
- (g) 具適當密度與強度能承受廢棄物罐之荷重。
- (h) 回脹性不得對岩石及廢棄物罐產生過高之壓力。
- (i) 具適當的柔軟度能容納岩石潛變位移。
- (j) 能允許受腐蝕廢棄物罐可能產生的氣體遷移逸出。
- (k) 對核種有吸附與遲滯效能。
- (l) 對微生物與膠體有過濾功能。
- (m) 具化學緩衝能力。
- (n) 對其他工程障壁材料不致造成不利影響。

此外，基於經濟性考量，緩衝材料須為易於取得與施工。

- (4) 回填材料：回填材料的功能需求為必須維持隧道穩定，並保持緩衝材料於處置孔中。此外，亦須能限制地下水的流動，不能使地下水水質劣化，且須具有長期的化學穩定性等。

日本在其H12報告工程障壁系統與地質處置母岩的功能章節內容中，以列舉方式說明：「母岩的主要功能，以及工程障壁系統中的廢棄物體(waste form)、外包裝(overpack)與緩衝材料的主要性能」(JNC, 2000a)，大致與上述之功能相近。

3.2.3. 整體處置概念

日本H12報告在整體處置概念的章節中主要在說明：「高放射性廢棄物處置系統包括工程障壁系統和整體的處置設施，分別以工程障壁系統、置放方式、處置設施及處置區佈置等4小節描述這些組件的基本概念」(JNC, 2000a)。

SNFD2017報告在整體處置概念章節中，預計將上述日本H12報告4項論述，在包含工程障壁系統及處置設施2小節中進行說明。工程

障壁系統如前所述，包括廢棄物本身、廢棄物罐、緩衝材料及回填材料。處置設施概略分為下列3個部分：即地表設施、地下設施及其間之連通設施，如：豎井(shaft)或斜坡道(ramp)等。詳細內容說明如下。

3.2.3.1. 工程障壁系統

本章節內容應包含日本H12報告的第4.3.1節工程障壁系統與4.3.2節置放方式的內容。在該報告的工程障壁系統小節中，主要在說明：工程障壁設計具有高度地可調整空間，以適用於日本地區的廣泛地質條件，此節內容並於報告中提出水平處置與垂直處置概念圖。在置放方式小節中，主要在說明處置隧道(disposal tunnel)與處置孔(disposal pit)之間可能的配置方式(JNC, 2000a)。

國內在SNFD2009報告中，曾指出工程障壁系統是參考瑞典KBS-3型的設計概念，將用過核子燃料置入廢棄物罐內密封後，置放於開挖的處置孔中，廢棄物罐與處置孔周圍及上下空間以緩衝材料填滿，最後，再以回填材料填滿處置隧道(台電公司，2010)。此設計概念於103年間台電公司舉辦之「用過核子燃料最終處置計畫-國際同儕審查研討會」中，曾與瑞典SKB專家進行討論及審查。

SNFD2017報告關於工程障壁系統設計概念章節內容，將規劃於104年，以國內參考處置概念為基礎，經與瑞典SKB專家研討後，針對工程障壁系統之基本概念進行描述，並彙同「工程障壁系統及處置設施的設計需求」之章節工作內容，完成現階段工程障壁系統之概念與設計需求規劃。

3.2.3.2. 處置設施

本節內容應包含日本H12報告的第4.3.3節處置設施與4.3.4節處置區佈置的內容。該報告的處置設施小節主要在說明處置設施與其功能，處置區佈置小節則說明處置分區的概念與配置方式。

本計畫過去曾對不同處置設施配置的研究成果，並考量目前的建築法規及土木開挖技術與機具(紀立民，2002)，說明如下：

處置設施的基本設施可概略分為下列3個部分：即地表設施、地下設施及其間之連通設施(豎井或斜坡道)。

地表設施若以功能性及使用性作為區分，可以分為六大系統：地上管理與行政系統、放射性廢棄物管理系統、環境監測與輻射管制系統、岩石處理系統、運輸系統及輔助系統。用過核子燃料最終處置設施的地表設施中，放射性廢棄物管理系統是處置設施中最重要的運作系統，包括用過核子燃料接收、包裝、暫貯等功能。處置設施須有對外聯絡的運輸系統，以便於用過核子燃料及緩衝材料的運輸；環境監測與輻射管制系統主要維護處置設施的安全運作，監控輻射外洩之危害，並避免其對環境造成二次污染；輔助系統包含：電力供應及給水系統、消防及警衛系統、緊急避難系統等。

地下設施(含連通設施)系統的功能與需求，說明如下：

- (1) 連通設施：聯絡地表設施與地下設施間之通道可為豎井或斜坑設計，現階段除以豎井為參考設計，未來將視場址特性加入坡道設計概念。廢棄物運送應有專用之豎井，與一般工作人員所使用者應有所區隔。此外，豎井(或坡道)亦作為機具與施工材料運輸、地下設施通風、緊急逃生等之通道。
- (2) 地下控管系統：為地下作業的運轉中心，主要儀控設備均設於本區。本區需與廢棄物管理區保持適當距離，避免輻射或溫度對作業人員或儀器設備產生不良影響。
- (3) 放射性廢棄物管理系統：為處置設施的核心系統之一，攸關輻射作業安全，提供正常與異常情況下，放射性廢棄物管理所需之設備。
- (4) 處置孔道系統：負責處置設施之聯絡隧道、運轉隧道、處置隧道、及處置孔之施工與維護。作業內容包括坑道開挖、岩盤穩定、湧水控制、岩塊清運等。
- (5) 工程障壁系統：進行處置孔之緩衝材料置放、回填、封阻(seal)作業；以及進行處置隧道之回填材料的置放、回填、封阻作業。

- (6) 環境監測與輻射管制系統：進行地下設施輻射與非輻射的環境監測作業，以及正常作業下的污染區管制，與異常情況下的輻射污染除污與管制。
- (7) 功能驗證系統：地下處置設施設置一處先導處置區，以便進行相關之地下試驗與處置技術驗證。
- (8) 設施封閉系統：用過核子燃料處置作業全部完成，經過評估並取得法規主管機關核可後，進行地下設施拆除以及地下空間封填所需之作業程序與設備。
- (9) 輔助系統：處置設施在正常運作下應獨立成自主體系，避免作業意外發生時輻射污染之擴散。

為充實SNFD2017報告之內容，104年度工作將規劃與瑞典SKB專家進行整體處置概念的研討，並考量目前的建築法規與土木開挖技術與機具，以合理更新處置設施之佈置。

3.2.4. 設計流程

深層地質處置場之設計流程必須是有系統的(systematic)、有結構的(structured)、反覆計算(iterated)及循序漸進的(stepwised)，設計的過程是一個逐步定量化及合理化的過程。最終目的，在於依據法規且配合既定時程，建造完成一個安全而經濟有效的深層地質處置場。處置場設計工作架構包括設施設計、功能評估與場址特性調查，此為處置場發展的重要3項領域，彼此間必須緊密配合。設計工作本身由設計目標的建立，到設計功能與設計需求，達更詳盡的設計參數間。亦即欲達成設計目標的理念，必須由廣泛的設計參數資料加以配合。設計工作亦須配合設計準則、設計要求、設計假設的外部條件，在品質保證與品質管制下進行設計驗證，以落實設計成果。

日本H12報告在設計流程中主要在說明：「建構工程障壁系統與處置設施的設計方法」，內容略述如下：根據地質處置系統的基本概念，確認基本設計的需求，進行工程障壁系統的設計，以及處置設施

的設計，再選擇建造、營運與封閉的技術，最後，利用安全評估技術確認處置場的功能(JNC, 2000a)。

本章節103年工作計畫書並無規劃工作項目，惟SNFD2017報告內容將於104年配合廢棄物罐、緩衝材料與回填材料的研究成果，繪製工程障壁系統的設計流程。另經彙整計畫過去成果，說明如下：

處置設施設計工作是一項重大的工程案件，有必要採行具有系統性、結構性的方法，循序漸進，逐步精進。本項工作擬採行之方法為系統需求法(system requirement approach)。系統需求法以系統性的方法判別建造及運轉處置設施所有的資料需求，包括處置系統的設計及功能分析，以列出所有的資料需求。其步驟為(許秀真等，2003)：

(1) 定義系統設計目標：

就本研究而言，即為永久安全隔離國內用過核子燃料於單一處置設施。

(2) 定義系統功能：

亦即處置方式之選擇，本研究採行深層地質處置、多重障壁之原則進行設計。處置設施功能需能提供用過核子燃料運轉期間及封閉後之安全性，且限制核種釋出至人類及環境。

(3) 定義系統需求：

系統需求係為達成前述功能，所需提供之主、次要設施及設備，進行用過核子燃料接收、處理、置放等作業，並考慮用過核子燃料可回收性、設施封閉與除役等，以及提供運轉所需之輔助服務等。

(4) 定義資料需求：

資料需求則包括相關於各項設施設計所需之用過核子燃料特性、場址特性、材料特性、施工方法、設備/機具規格、場址變遷行為之預測、功能/安全評估結果之回饋等。

處置設施設計的工作架構包括場址特性調查、設施設計與功能評估，彼此間必須緊密配合。設計工作本身由設計目標的建立，到設計功能與設計需求，達更詳盡的設計參數間，應呈現金字塔狀結構。亦

即欲達成設計目標的理念，必須由廣泛的設計參數資料加以配合。設計工作亦須配合設計準則、設計要求、設計假設的外部條件，在品質保證與品質管制下進行設計驗證，以落實設計成果(如圖 3-51)。

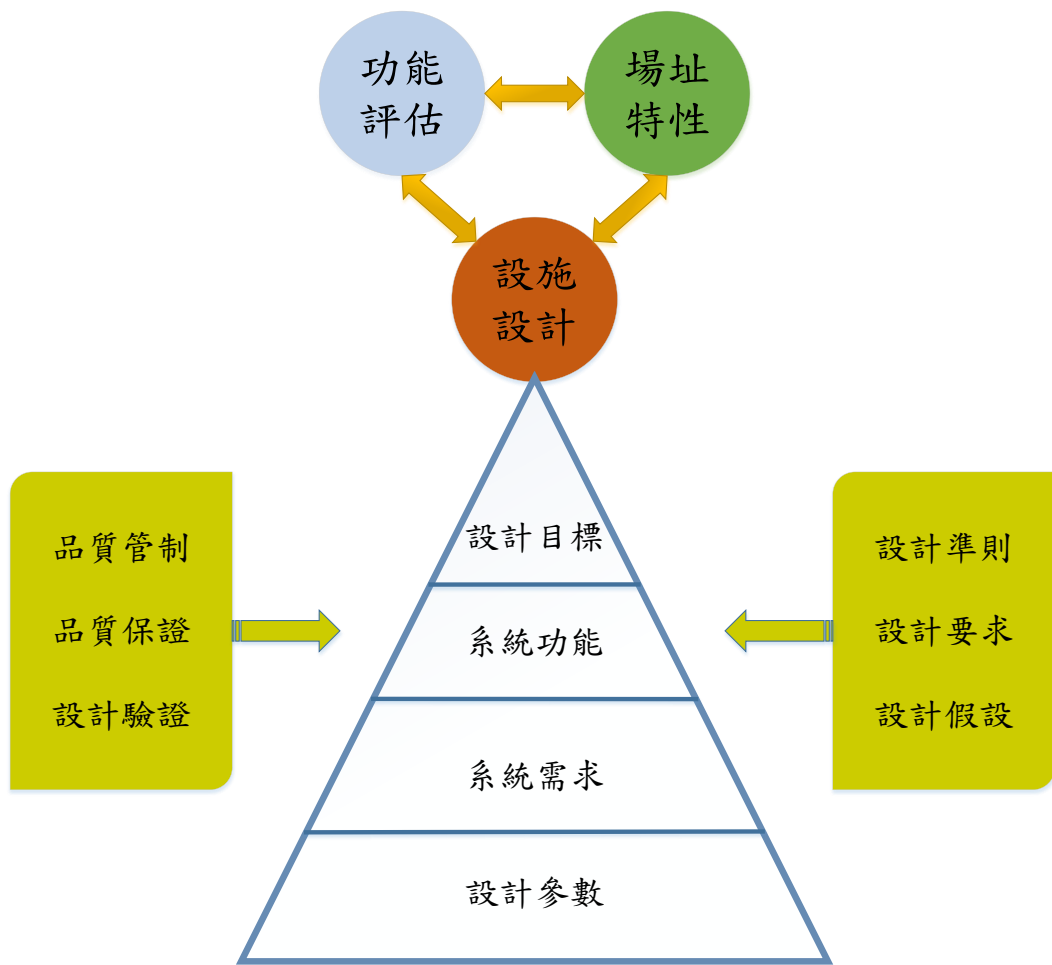


圖 3-51：處置設施設計工作架構圖

資料來源：摘自許秀真等(2003)

3.2.5. 影響處置概念的因子

深層地質處置場之處置概念影響因子，其工作項目包含熱與放射性、地質與地形條件、處置母岩特性、處置深度等，將以下列各節進行說明。

3.2.5.1. 熱與放射性

日本H12報告在熱與放射性章節中說明再處理與玻璃固化條件，以及玻璃固化後高放射性廢棄物之規格，並圖示化表示每個包封容器中重要核種放射毒素與衰變熱隨時間之變化情形，供後續章節參考。

本期工作重新檢診SNFD2009年報告4.5.1節熱與放射性章節資訊，推估早期因資料蒐集尚未完整，假設之用過核子燃料燃耗資訊無法保守涵蓋後期高燃耗的用過核子燃料組件，以核一廠為例，其運轉40年後整體用過核子燃料組件的燃耗分布如圖 3-52所示，平均燃耗約為32 GWd/MtU，最大燃耗將高達54 GWd/MtU；然而用過核子燃料的熱與放射性源項，很大程度上與燃耗有著密切相關性。採用AREVA Atrium10燃料組件為例，進行不同燃耗造成衰變熱隨時間變化的影響如圖 3-53所示，衰變熱幾乎與燃耗成正比。

根據目前已完成蒐集的用過核子燃料組件設計與運轉歷程資料，訂定SNFD2017報告安全評估所需關鍵核種估量計算所採用之參數，設定如表 3-10所示；此表詳列了保守之運轉條件設定，包含燃料組件類型、起始鈾濃縮度及燃耗資訊。此項工作所選用之核心模擬工具為ORIGEN-S，相較於H12所採用工具是早期版本的ORIGEN-2，在資料庫與演算法上已進行更新，使得我們的評估結果能更具代表性。

3.2.5.2. 地質與地形條件

日本H12報告主要在說明：「處置母岩的空間範圍及體積、裂隙與斷層分布，為決定處置設施設計之關鍵，故進行整體處置設施設計前，詳細的地形調查為相當重要工作之一。地形條件同時影響初始岩

體應力及區域地下水流，以及地表設施及聯絡通道或豎井設置之規劃設計位置」(JNC, 2000a)。

本計畫在過去幾年於K區發展詳細的地質調查技術，並獲得許多該地區母岩特性資訊，相關研究成果彙整如下：

K區東部以太武山花崗片麻岩體為主，斗門花崗岩體為第二大岩體。太武山岩體具混合岩狀或片麻狀特徵，為鐵鎂礦物含量少、長英質含量多的花崗岩體，並構成K區東部主要的基盤岩，目前出露面積達22 km²(以太武山出露面積最多)；斗門岩體具流動狀構造、含閃長岩質包體，為鐵鎂礦物含量多的中粒花崗岩體，侵入太武山岩體的北界，周圍出露面積估計約5 km²(中間為平原沉積物所覆蓋)(林蔚等，2005)。

太武山斷層及金龜山斷層是影響K區東部基盤岩分布最主要的兩個斷層。太武山斷層為一正斷層，其位態依照KMBH01、KMBH02及KMBH04鑽遇破碎帶的深度進行3點構成的平面精算，其走向大致為N64E，傾角70°N(圖 3-54)。金龜山斷層為一正斷層，其破裂帶寬數10 m，主要斷層位態為N55E，傾角50°N。此兩個北東向的正斷層系統構成K區東部半地塹地體構造，並影響K區東部岩層的分布(林蔚等，2005)。

由太武山周圍地區佈置的8條測線(RIP-1~8)所獲得的地電阻影響剖面探測結果顯示，太武山及其周圍地區具有多條NE與NW等2個方向的地質構造，分別為E1、E2、E3、E4、E5、W1、W2、W3及W4，這些地質構造帶可能代表地下岩層間的破碎帶、斷層帶及不同岩體的分界等構造(陳文山等，2003；林蔚等，2005；林鎮國等，2012)。

3.2.5.3. 處置母岩特性

日本H12報告主要在說明：「工程障壁系統及處置設施於設計、安裝及建造的過程中，處置母岩的力學及熱學特性扮演重要的角色。因此，H12報告考慮了廣泛的岩石種類及不同的熱學-力學特性，藉以進行設計概念的評估」(JNC, 2000a)。

103年工作主要彙整本計畫曾進行過之K區調查之成果，說明如下。且104年將依據計畫的整合案例研究成果，持續進行地質環境影響處置設施設計的相關特性之分析，以充實SNFD2017報告所需。

針對K區岩石進行一般物理性質試驗，試驗對象分別為KMBH04的太武山花崗片麻岩體及KMBH03的斗門花崗岩體，其中，試驗項目有乾密度、比重、飽和密度、孔隙率及有效孔隙率共5項(表 3-11)(林蔚等，2005；林鎮國等，2012)。

除了必須具備足夠的空間容納地下處置設施外，處置母岩特性考量其力學性質、熱力學性質、水力性質、化學性質等，K區有關母岩特性彙整如下。

3.2.5.3.1. 力學特性

K區的岩石力學試驗結果如表 3-11所示，其中，試驗對象分別為KMBH04的太武山花崗片麻岩體及KMBH03的斗門花崗岩體，而試驗項目包含單軸壓縮強度、三軸壓縮試驗凝聚力、動態彈性模數、間接張力強度、靜彈性模數、柏松比、動態剪力模數、動態彈性模數及動態柏松比共9項(林蔚等，2005；林鎮國等，2012)。

3.2.5.3.2. 熱力學特性

K區的岩石熱力學特性試驗結果如表 3-11所示，試驗對象為KMBH04的太武山花崗片麻岩體，試驗項目包含熱傳導係數及地表溫度。

3.2.5.3.3. 水力特性

在K區KMBH01-02-04小規模試驗場以井下裂隙的雙封塞水力試驗，共獲得60組裂隙段的水力傳導係數(其中有16組重複試驗)，數值範圍為 1.0×10^{-8} m/s至 1.0×10^{-4} m/s，主要集中於 1.0×10^{-7} m/s至 1.0×10^{-6} m/s。針對導水性較差的裂隙段，則進行9段雙封塞水力試驗，試驗結果顯示數值小於 1.0×10^{-9} m/s(林鎮國等，2012)。

K區的岩石水力特性如表 3-11所示。

3.2.5.3.4. 化學特性

由於鑽井數量較少，且無法取得各鑽井間關於不連續面及裂隙含水層分布的關鍵資訊，因此，目前K區化學特性的初步成果如下(林鎮國等，2012)：酸鹼度(pH)在垂直的變化，隨著深度的增加逐漸由中性轉為鹼性；而氧化還原電位(Eh)在垂直變化上，隨著深度的增加逐漸由氧化態轉變為還原態。大體而言，當深度低於400 m以下時，K區東部地下水的pH值，其保守估計均大於8；而氧化還原電位的保守估計為還原態(數值小於0 mV)。

表 3-10：SNFD2017報告關鍵核種評估之計算假設

反應器類型	燃料組件重量	平均起始鈾濃縮度 (wt%)	燃耗(GWd/MtU)
	kgU/束		
BWR (Atrium10)	179.54	4.053	54
PWR (Vantage+)	426.21	4.95	58

表 3-11：K區岩石特性

試驗對象		太武山花崗片麻岩體(KMBH04)	斗門花崗岩體(KMBH03)
物理特性	乾密度[g/cm ³]	2.61至2.66， 平均2.63	2.73至2.77， 平均2.75
	比重	2.63至2.68， 平均2.65	2.75至2.79， 平均2.77
	飽和密度[g/cm ³]	2.62至2.67， 平均2.64	2.74至2.78， 平均2.76
	孔隙率[%]	0.38至0.65， 平均0.54	0.34至0.96， 平均0.56
	有效孔隙率[%]	0.007至0.015	—
力學特性	單軸壓縮強度[MPa]	75.68至168.66 平均125.97	89.16至131.21 平均111.54
	三軸壓縮試驗凝聚力[MPa]	17.99至29.51	26.42至28.49
	三軸壓縮試驗摩擦角[度]	50.71至59.08	47.90至54.20
	間接張力強度[MPa]	6.91至13.33， 平均9.73	6.99至14.60， 平均10.99
	靜彈性模數E50[GPa]	34.15至51.19， 平均41.93	31.70至52.66， 平均44.18
	柏松比	0.11至0.19， 平均0.15	0.13至0.27， 平均0.17
	動態剪力模數[GPa]	12.99至24.50， 平均17.98	16.75至29.24， 平均22.88
	動態彈性模數[GPa]	30.28至58.37， 平均42.28	41.31至73.60， 平均55.17
	動態柏松比	0.10至0.25， 平均0.17	0.12至0.27， 平均0.20
熱力學特性	熱傳導係數[W/(m·K)]	2.85至2.94	—
	地表溫度[°C]	20.8	—
水力特性	水力傳導係數[m/s]	完整岩塊：4.1×10 ⁻¹² 至3.6×10 ⁻¹¹ 裂隙帶：3.0×10 ⁻⁸ 至1.0×10 ⁻⁴	
	水力梯度	KMNH01-02-04建議值為0.1 K區東部建議值為0.01	

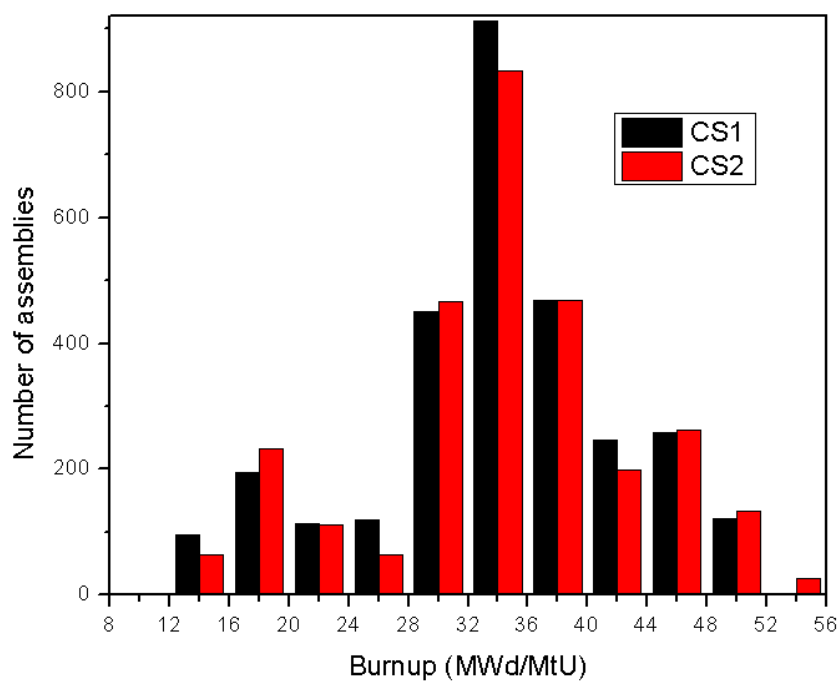


圖 3-52：核一廠用過核子燃料組件燃耗分布圖

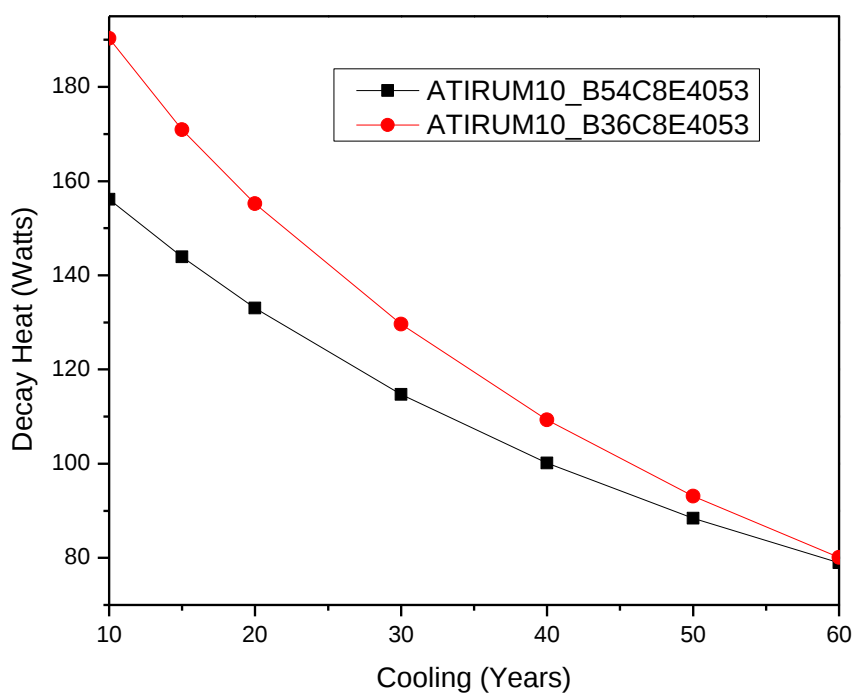


圖 3-53：核一廠用過核子燃料組件不同燃耗衰變熱隨時間變化趨勢圖

井下分析『太武山斷層』之位態：

走向(strike)為N64E

傾斜(dip)為70° N

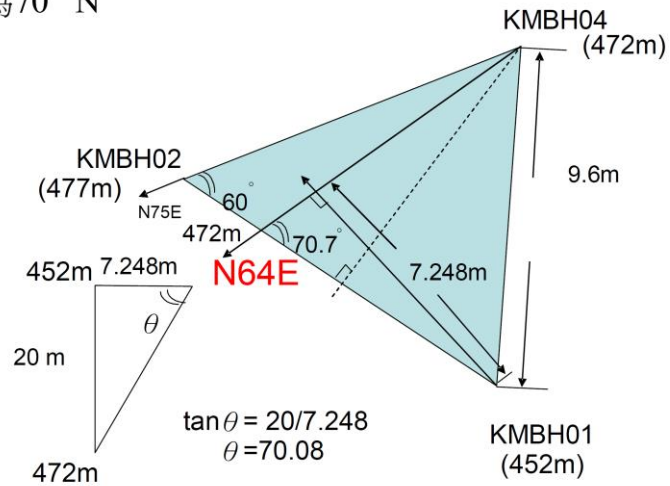


圖 3-54：太武山斷層井下資料幾何分析

資料來源：摘自林蔚等(2005)。

3.2.6. 工程障壁系統及處置設施的設計需求

3.2.6.1. 廢棄物罐

日本H12報告在外包裝章節中主要在說明：「外包裝的設計要求，以及其抗腐蝕特性、抗壓特性、輻射屏蔽特性、外包裝的厚度、外包裝的加工與合成的外包裝(composite overpacks)」，也提到外包裝需提供抗腐蝕、抗壓等力學特性(JNC, 2000a)。

本計畫103年工作除參考日本H12報告，進行以玻璃固化之高放射廢棄物外包裝設計需求外，並針對國內以封裝用過核子燃料的特性，進行廢棄物罐相關特性的設計與研究工作。

3.2.6.1.1. 地震對廢棄物罐破壞特性之系統分析

3.2.6.1.1.1. 廢棄物罐數值分析

SKB(2010a)報告中有廢棄物罐的詳細設計資料，因此，本研究將初步根據此設計資料建置數值模型，模型設計細節包括銅殼長度、銅底座直徑及厚度等。圖 3-55為廢棄物罐參數示意圖，桶身為軸對稱模型。

3.2.6.1.1.2. 縮尺試體製作與數值模型驗證

本研究製作銅與鑄鐵之抗拉與抗壓兩類標準試體，以及PWR與BWR的縮尺試體，其中PWR與BWR的縮尺試體內，包括銅外殼與鑄鐵兩大部分。銅與鑄鐵的抗拉標準試體：直徑20 mm，長300 mm；銅與鑄鐵抗彎標準試體：直徑20 mm，長350 mm。BWR縮尺試體(12孔鑄鐵廢棄物罐)：直徑94.9 mm，長491 mm，每方孔為16 mm × 16 mm；PWR縮尺試體(4孔鑄鐵廢棄物罐)：直徑94.9 mm，長為491 mm，每方孔為23 mm × 23 mm。銅質外殼：外徑104.8 mm，內徑99.2 mm，長491 mm。這些試體將在104年工作年度中，進行試驗及數值模型之驗證。

3.2.6.1.2. 廢棄物罐設計準則

廢棄物罐基本設計準則，其材料之選擇須符合主要功能需求，即在一定設計年限內，將用過核子燃料及其所含之放射性物質包封在罐內，不使其中的核種釋出，並維持運轉過程中的輻射安全。廢棄物罐須滿足的需求如下：

- (1) 輻射防護
- (2) 臨界控制
- (3) 力學強度
- (4) 溫度限值
- (5) 抗腐蝕性
- (6) 與緩衝材料及母岩具相容性
- (7) 可製作性及成本

3.2.6.1.3. 廢棄物罐初步設計

廢棄物罐的設計依不同類型核能電廠產出之用過核子燃料種類而異，主要有BWR與PWR兩種，其中BWR型廢棄物罐可貯存12束燃料束，PWR可貯存4束燃料束，廢棄物罐總重列於表 3-12。

本研究參考瑞典SKB(2010a)的尺寸進行設計，如圖 3-56，由左至右材料組構為銅底座、銅質外殼、內襯鑄鐵、鋼頂蓋與銅頂蓋。廢棄物罐總長為4,835 mm，內裡鑄鐵長為4,573 mm，最外層為50 mm厚的銅質外殼，包括銅底座與銅頂蓋均為50 mm厚，外徑1,050 mm長，內徑949 mm，BWR與PWR貯存用過核子燃料方形通道的斷面，分別為160 mm與230 mm。

3.2.6.1.4. 小結

103年工作成果為：已蒐集國內及瑞典、日本等各國廢棄物罐的設計資料，包括廢棄物罐尺寸、材料組成、物件組構等參數，以做為基礎國內廢棄物罐之設計基礎。根據中國國家標準CNS2112規範完成製作抗拉和抗彎的鑄鐵與銅質標準試體，以及製作原尺寸廢棄物罐之1/10縮尺試體(含適用於PWR與BWR兩種不同燃料型態的廢棄物罐)。

預計104年度之研究工作，將對標準試體與縮尺試體進行一系列的力學試驗：包括軸力、剪力、彎矩等相關破壞試驗；結果可提供後續之「應力-應變分析」、「極限狀態分析」與「廢棄物罐圍壓變化影響分析」的數值模擬驗證，供作國內廢棄物罐的設計依據。

3.2.6.2. 緩衝材料

日本H12報告主要在緩衝材料設計需求的說明為：緩衝材料的熱傳、水力、力學、化學及氣體遷移特性等影響緩衝材料在工程障壁系統中的設計要求，同時緩衝材料於製造與安裝過程之品質控制亦須特別注意(JNC, 2000a)。

緩衝材料的設計需求係參考國內處置概念使用純膨潤土作為主要材料(紀立民，2002)。膨潤土之厚度取決於力學、化學、水力、熱力、氣體傳輸等性質與功能需求，例如膨潤土與廢棄物罐之交互影響、膨潤土之承載力、膨潤土之回脹力、膨潤土之水力傳導係數、膨潤土阻滯核種傳輸之能力、膨潤土之導熱性等因素。因此，在緩衝材料的設計上，主要參考瑞典SKB用過核子燃料深層地質處置設施的「SR97封閉後安全性」報告(SK B, 1999b)提出設計概念。

3.2.6.2.1. 熱傳特性

考量處置設施工程障壁材料之穩定性與工程性能，緩衝材料之設計需具備足夠的熱傳導特性，使廢棄物罐內廢棄物產生之衰變熱可有效傳導，保持緩衝材料周圍環境溫度低於100 °C。

影響緩衝材料之熱傳特性條件，取決於其密度、孔隙率及含水量(PNC, 1992b)。當密度增加、孔隙率減少，緩衝材料緻密性愈高，熱傳導率與比熱即隨密度增加而增加；在相同密度條件下，因水分之導熱性能較好，故熱傳導率及比熱隨含水量增加而增加。

在放射性廢棄物處置初期，緩衝材料呈未飽和狀態，故設計時需考量緩衝材料於未飽和狀態，即不同含水條件時之熱傳性質。MX-80型膨潤土，壓製為孔隙比0.8之膨潤土塊體於不同含水條件下之熱傳

導係數，其未飽和至飽和程度之熱傳導度值範圍在0.6至1.3 W/(m·K)之間。

3.2.6.2.2. 水力特性

緩衝材料之設計，需有效限制影響處置設施功能與安全條件物質之質量傳輸行為，緩衝材料需具備低滲透性，可有效限制放射性核種由廢棄物罐傳輸至處置母岩中，以及有效限制腐蝕或侵蝕物質由處置母岩傳輸至廢棄物罐表面。

處置設施運轉階段，緩衝材料及周圍處置設施環境呈未飽和狀態；處置設施封閉階段時，當地下水入侵，緩衝材料因毛細作用使其漸由未飽和狀態轉為飽和狀態，因此，在進行處置設施設計與功能評估時，需考量未飽和與完全飽和狀態之水力行為，且處置設施環境受廢棄物罐之衰變熱及處置環境地溫的影響，進行緩衝材料設計時，亦需考量水力傳導係數於不同溫度下的行為。

3.2.6.2.3. 力學特性

緩衝材料之力學行為需考慮無圍壓縮強度、彈性模數、抗拉強度、初始孔隙率、壓縮指數、回脹指數、極限狀態參數等，以評估材料之力學行為。緩衝材料之力學特性受其乾密度設計、緩衝材料中黏土含量、圍壓大小等影響，國際間針對緩衝材料之相關研究因試驗材料配比有所不同，故僅針對目前現有研究成果進行探討。

陳志霖(2000)採用MX-80型膨潤土及國內國產之日興土，混合不同比例之花崗岩碎石粒料，探討材料之力學特性。同為乾密度1,900 kg/m³之純膨潤土試體，日興土之破壞強度皆小於MX-80型膨潤土破壞強度；純膨潤土試體之最大破壞強度隨密度增加而增強，且隨圍壓增加而增強；而在固定膨潤土密度且增加碎石體積時，其剪力強度也隨之增強，但其增加之強度不及增加膨潤土密度來得明顯。就增加緩衝材料強度而言，增加膨潤土乾密度比增加碎石粒料體積百分比更有效率。

3.2.6.2.4. 化學特性

緩衝材料之設計，必須有效限制或抑低廢棄物罐受腐蝕之有害物質，如有機物、氧化物、硫化物、氮之化合物及微生物影響，以確保緩衝材料可有效保護廢棄物罐不致被破壞。

膨潤土內的膨潤石，其層間陽離子的離子交換反應，和表面羥族(hydroxyl)的酸/鹼反應(質子化作用/去質子作用)，控制著緩衝材料孔隙水初始的化學性質。

- (1) 吸附
- (2) 膠體過濾
- (3) 蝕變

3.2.6.2.5. 氣體滲透性

緩衝材料間的孔隙需容許氣體通過，以避免因氣體聚積造成處置孔內壓，使緩衝材料因內部壓力造成裂隙。

日本H12報告提到關於緩衝材料氣體滲透性相關研究的幾項結果如下：

- (1) 對於砂含量30%，乾密度 $1,600 \text{ kg/m}^3$ 的混合物，氣體滲透率為 $1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ；100%乾密度 $1,800 \text{ kg/m}^3$ 的膨潤土，氣體滲透率在 $1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 至 $1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 之間。
- (2) 氣體在膨潤土中遷移的突破壓力，將隨乾密度及回脹應力的大小而依比例增加。
- (3) 氣體滲透率隨液體飽和度的增加而降低。

3.2.6.2.6. 緩衝材料規格

- (1) 緩衝材料的厚度

日本H12報告中，使用重量百分比70%的膨潤土與30%的砂混合組成緩衝材料，影響其厚度的因素包括對核種遷移的遲滯能力、應力的緩衝能力、自癒能力、熱傳導性及工作性等。

- (2) 輻射屏蔽功能考量的緩衝材料厚度

當採用坑內處置法(pit disposal method)時，如果處置隧道內的輻射劑量能夠在管制的標準下，則當回填作業進行時，處置隧道可被視為非管制地區。

3.2.6.3. 工程障壁系規格

日本H12報告主要在設計需求的工程障壁系統規格之內容為：圖示說明工程障壁系統的設計尺寸與其決定根據(JNC, 2000a)。

本計畫依據前述對廢棄物罐及緩衝材料之設計需求，進行工程障壁系統之規格設計與設置規劃，圖 3-57為國內目前處置概念下之工程障壁系統設計剖面。目前國內所採用之多重障壁系統，包含(1)廢棄物罐(由銅外殼與鑄鐵內裡所組成)，其尺寸為直徑105 cm、高491 cm；(2)純膨潤土之緩衝材料，依據處置孔尺寸(直徑175 cm、扣除回填材料部分100 cm，高691 cm)，壓製成塊體型式，填充於處置孔中；(3)回填材料則由膨潤土、岩屑混合填充於處置隧道中。

3.2.6.4. 地下設施

日本H12報告在設計需求的地下設施章節內容為：地下處置設施的設計要求，並描述處置隧道配置的可能方式、坑道間距、對應之開挖方法、開挖數量及開挖引致之擾動帶等地下處置設施的規劃與考慮條件(JNC, 2000a)。

本章節內容於103年度未規劃工作項目。SNFD2017報告將參考本計畫正在執行之「工程障壁熱力-力學穩定性研究」之研究計畫成果，對坑道配置的可能方式、坑道間距進行說明；以及參考「處置設施開挖擾動帶之力學特性研究」之研究計畫成果，對開挖引致之擾動帶特性進行說明；並於後續第3.2.8節建造/運轉/封閉技術的研究成果，對應之開挖方法和開挖數量進行說明。

3.2.6.5. 回填材料

日本H12報告主要在說明：導水特性、夯實特性、回脹特性、力學特性測試技術為回填材料之研究內容重點(JNC, 2000a)。過去本計畫

已依據國內參考處置概念設計，以膨潤土與結晶岩岩屑之混合物作為回填材料，並規劃於處置作業結束後，以回填材料將地下開挖之處置隧道、處置孔、聯絡通道及豎井等確實回填，以抑制地下水流與處置設施工程障壁之化學變化。

為確立國內深層地質處置設施回填材料之設計需求及條件，以國內參考處置概念為基礎，參考國際間回填材料設計需求與考量之報告(瑞典SKB報告等)，以探討國內回填材料設計需求、特性要求與設計規格，作為未來國內處置設施工程障壁系統回填材料選擇與設計之參考。因此，將於104年度工作規劃中，著重於彙整國際間有關高放射性廢物處置設施之回填材料設計需求及設計考量之相關資料(如瑞典SKB報告等)。

3.2.6.6. 處置設施設計

對於處置設施設計的需求，須考量處置設施建造、營運與封閉階段，並須考量提供安全運輸廢棄物罐及其他組件的運轉隧道，以及處置隧道間之力學穩定與近場的溫度效應等(JNC, 2000a)。本項工作成果如下各小節所述。

3.2.6.6.1. 處置設施設計準則與需求

3.2.6.6.1.1. 處置設施設計準則

- (1) 基本準則：屬於政策性的工作最高指導原則，通常是較為抽象形式的宣言或承諾。參考國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)於2001年6月生效之「用過核燃料管理安全暨放射性廢棄物管理安全聯合公約」。
- (2) 法規準則：國內相關法規為處置設施設計所應依循的準則之一，必要時得以國際規範或他國法規為設計參考文件。對處置設施設計而言適用之相關法規依其性質大致可以分為5類，包括：
 - (a) 放射性廢棄物與輻射防護法規：為目前概念設計階段最主要之設計準則。

- (b) 環境保護法規：如環境影響評估法、環境影響評估法施行細則、環境影響評估書件定稿或補正事項確認作業要點等。
 - (c) 土木建築法規：如建築法、建築技術規則等。
 - (d) 工業安全法規：中華民國勞工安全衛生管理法、中華民國勞工安全衛生設施規則等。
 - (e) 工業標準：中華民國國家標準。
- (3) 一般準則：規範處置設施整體設計與作業安全有關的準則，經參考國際原子能總署與國內外針對核能設施設計之經驗，建立概念設計階段地下處置設施之一般設計準則
- (4) 工程要求：主要為工業安全、勞工衛生、環境保護等相關事項，所設定之工程要求如下：
- (a) 和安全相關的結構、系統與重要組件，在緊急狀況必須能停止操作，並侷限危害的發生程度與範圍。
 - (b) 設施結構設計必須能承受例行操作，以及可預期意外事件之負荷。
 - (c) 可能發生火警危害之結構、系統與重要組件，應採行必要之防範措施與材料。
 - (d) 可能發生火警危害之結構、系統與重要組件，應考慮採取適當之備分設計。
 - (e) 與安全相關的結構、系統與重要組件設計過程，應遵循相關之品保程序。

3.2.6.6.1.2. 設計需求

最終處置設施在地表設施的概念設計要求上，必須滿足安全可行性、技術可行性與經濟可行性的原則，並應包括以下的要點：

- (1) 山坡地建築物建築原則。
- (2) 建築結構物的安全考量。
- (3) 輻射管制區的安全維護。
- (4) 運輸途中的安全維護。
- (5) 水電供應設備的供給無虞。

- (6) 參考國際經驗以發展國內經驗。
- (7) 保留設計的變通彈性。

地下設施的設計需求，亦必須滿足安全可行性、技術可行性、經濟可行性的原則，並應包括以下要點：

- (1) 深層處置的概念。
- (2) 多重障壁的設計。
- (3) 多角度思考的障壁策略。
- (4) 保留適當的安全餘裕。
- (5) 安全前提下經濟有效。
- (6) 參考國際經驗發展國內技術。
- (7) 保留設計的變通彈性。
- (8) 落實設計品質保證措施。

3.2.6.6.2. 國內最終處置設施設計

處置設施的設計主要依據處置隧道的地點、外形與數量，運轉、處置隧道的型態與數量，以及主要隧道與連絡隧道之間的安排來進行規劃。而這些考慮因素又取決於廢棄物罐的數量、工程障壁與母岩的特性。設計處置設施的過程中，執行開挖廢土的清運、廢棄物罐與緩衝材料的運輸與安置等作業都必須納入考慮。建造、運轉到封閉過程中人員的安全，則是最重要的設計參考要素。處置設施在地底的空間布設方式，也必須針對處置設施所在的現地環境，考量區域地下水流動的方向，以加強母岩的天然障壁效能。

3.2.6.6.2.1. 概念發展過程

劉尚志等(1991)於用過核子燃料長程處置計畫第一階段，以電廠30年壽命為基準估算處置廢棄物罐總量，參考當時芬蘭的處置概念進行初步的處置設施規劃設計，該研究估算地下處置設施所需面積約為0.7 km²。

在用過核子燃料長程處置計畫的第2階段工作，對於處置設施的描述仍主要以定性為主，並對處置設計的概念進行修正(劉尚志等，1991)。

第3階段工作則基於發展初步功能/安全評估技術之需要，進行處置系統概念的研究。研究內容與成果以40年運轉壽命估算用過核子燃料數量，以瑞典KBS-3型處置概念(SKBF/KBS, 1983)為參考基準，估算處置配置與空間需求，估計廢棄物罐總數6,253個，處置孔間距6 m，處置隧道33 m，地下處置面積約1 km²。

接續第3階段進行的我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估計畫，則針對處置概念的描述作進一步修訂(洪錦雄等，2001)。同時亦參用瑞典KBS-3型之概念，估算出廢棄物罐需求量為4,170個，處置深度300 m至1,000 m，操作隧道長120 m，隧道間距25 m，寬7 m，高4.5 m。處置孔間距6 m，直徑1.5 m，深度7.83 m。地下處置面積需求在1 km²以下。

我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD2009)中，則採用紀立民(2002)參考瑞典SR97(SKB, 1999a)之設計概念，假設考慮核一、二、三廠及龍門核電廠運轉40年所產生之3,652個廢棄物罐。參考處置概念之處置隧道與處置孔剖面如所示。主要係依據瑞典SR97(SKB, 1999a)的初步設計，但僅考慮尺寸變動，並未就各組成部分如膨潤土與處置孔大小等之功能性與經濟性進行整合評估，所設定之廢棄物罐高度與處置隧道高度配合國內用過核子燃料組件特性，設定廢棄物罐高度為4.91 m，處置隧道高度為4.10 m，隧道寬3.60 m，處置孔深度7.91 m，直徑1.75 m，處置孔間距6 m。

3.2.6.6.2.2. 概念設計

本計畫延續SNFD2009報告中地下處置設施的概念設計，如圖3-58所示，並參考瑞典SKB同時採用豎井或斜坡道將廢棄物罐運送至地下處置深度的方式，針對連通設施另外增加斜坡道的可行性進行分析，並提出不同設計概念評估差異作為日後處置設施設計的參考。由於過去的設計概念僅採用豎井作為連通設施，本計畫保留紀立民

(2002)採用4條豎井，以分別作為人員進出、物料設備與廢棄物運輸、通風與水電供應及緊急逃生的設計；另討論2種處置設施增設斜坡道的設計方式，以作為設計概念研究之參考。

第一種設計方式以開挖過程能夠取得現地完整地質資料作為首要考量，斜坡道沿著處置設施上方的延伸空間，進行環形開挖而逐漸抵達處置深度，開挖過程中針對處置設施所在的岩體可直接進行相關調查。若根據圖 3-59的隧道繞行方式，坡道部分的隧道總長度約為14 km，可達到處置深度約500 m。若將此斜坡道視為連絡隧道，並參考許秀真等(2003)的斷面設計進行估算，總開挖土方量約為310,000 m³。除斜坡道隧道外，仍保留4座豎井的設計，並考慮將逃生用豎井設於地表主要處置設施範圍外，可提昇人員的作業安全。

第2種設計方式以降低斜坡道隧道開挖總體積作為主要考量，隧道繞行方式如圖 3-60所示，這種斜坡道的規劃方式可因應處置設施上方地表無法直接進行施工的環境，藉由繞行的方式抵達目標處置區域，斜坡道的設計坡度則增加為8%，隧道轉彎處仍因為運輸安全的考量保留坡度水平的設計，由於坡度增加並減少隧道繞行的範圍，隧道總長度可降低至大約9 km，即可到達深度約480 m。若以此方式所估算出的連絡隧道開挖土方量約為201,000 m³，可有效降低連絡隧道的開挖體積，節省經費以增加經濟效益。但節省建造成本的同時，也因為隧道坡度的增加，可能造成載運廢棄物罐車輛的運輸風險升高。

表 3-12：BWR型與PWR型廢棄物罐各組件重量

	Weight (kg)	
	BWR-canister	PWR-canister
Insert with lid	13,700	16,400
Copper shell	7,500	7,500
Canister without fuel	21,200	23,900
Canister with fuel	24,600–24,700	26,500–26,800

資料來源：摘自SKB(2010a)

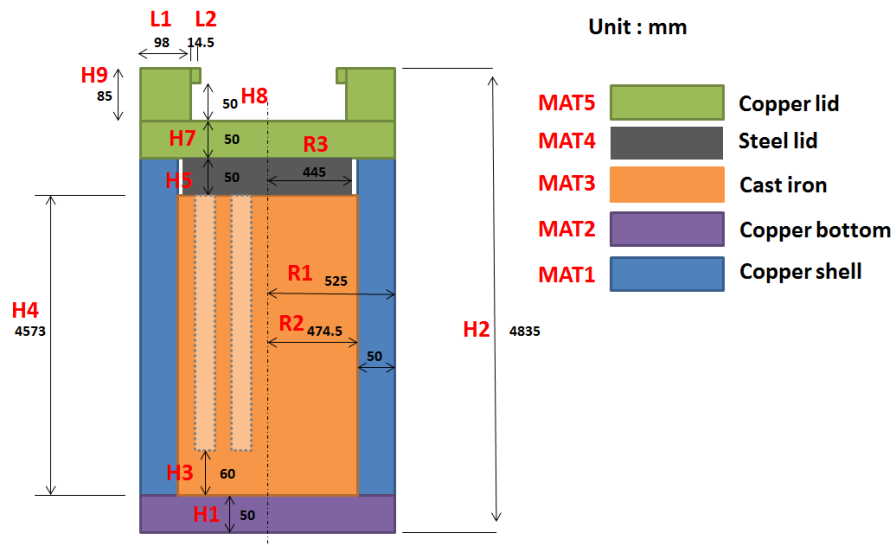


圖 3-55：Canister參數示意圖(1)

資料來源：摘自SKB(2010a)

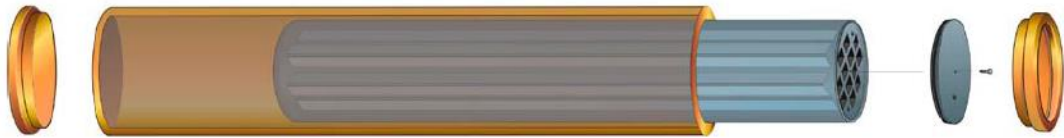


圖 3-56：廢棄物罐外觀

資料來源：摘自SKB(2010a)

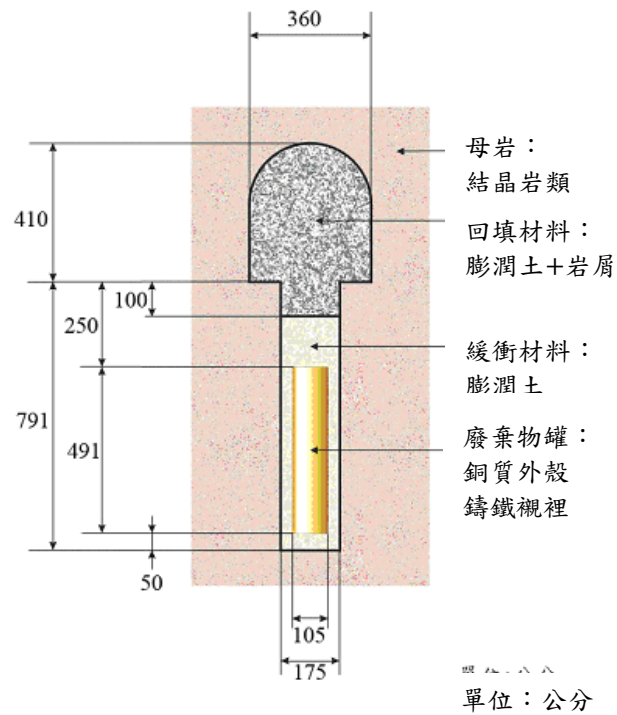


圖 3-57：處置隧道與處置孔剖面

資料來源：摘自台電公司(2010)

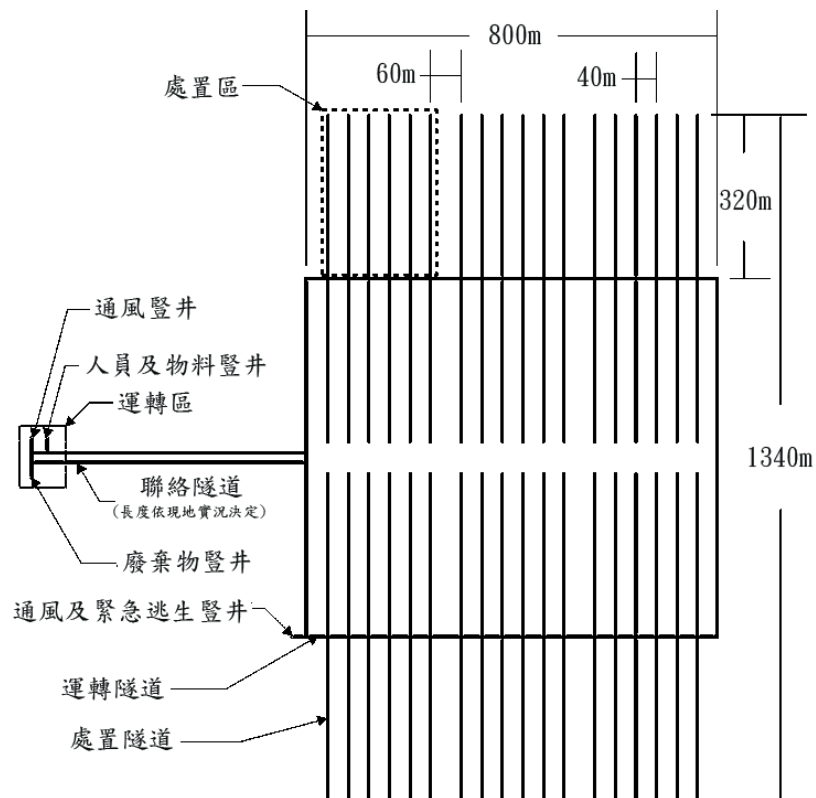


圖 3-58：地下處置設施配置圖

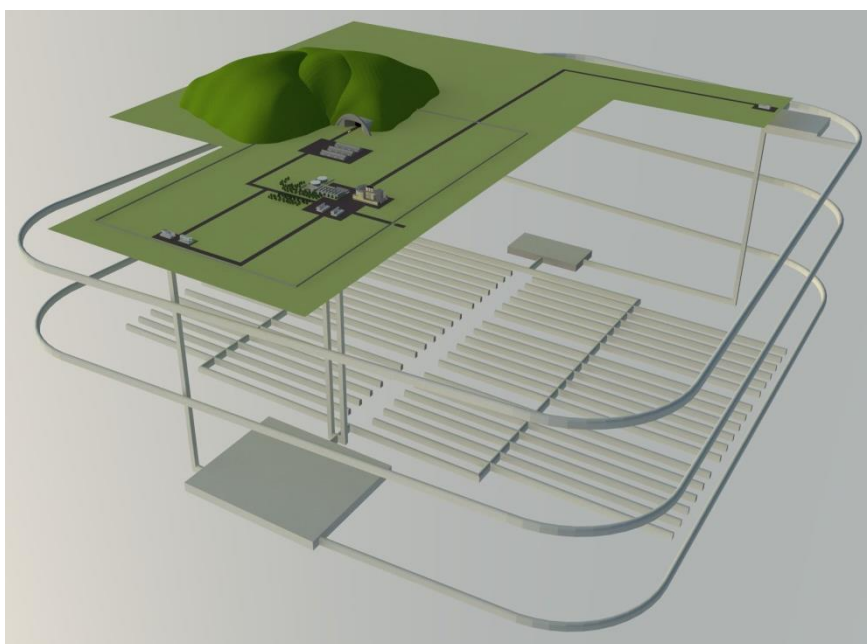


圖 3-59：環繞場區斜坡道設計概念圖

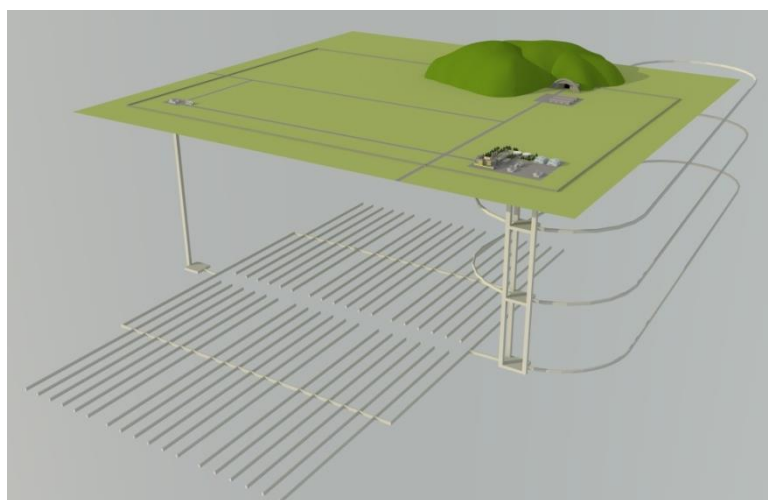


圖 3-60：獨立斜坡道設計概念圖

3.2.7. 工程障壁的穩定性

為檢驗工程障壁設置後之效能，需針對處置設施及工程障壁之規格進行各項分析與評估，如工程障壁於再飽和後之性能、長期力學穩定性、受震穩定性、氣體通過工程障壁之遷移行為，以及緩衝材料因再飽和後膨脹而入侵母岩裂隙等變化(JNC, 2000a)。

本計畫103年分別進行「處置場熱-水-化作用之初步分析」之研究，內容包含熱-水-化耦合現象研究與熱-水-力耦合現象研究2項，探討工程障壁周圍的熱-水-化之地下水流傳輸可能途徑與行為，成果將作為再飽和性性能分析之依據。關於近場環境的力學穩定性相關研究，則進行「處置設施開挖擾動帶之力學特性研究」與「工程障壁熱力-力學穩定性研究」之研究，分別探討開挖擾動帶的力學特性與工程障壁及周圍岩體受溫度與應力的作用影響研究，成果亦將回饋第3.2.6.4節的地下處置設施配置參考。另在「深層地下設施受震穩定性之研究」方面，則進行工程障壁受震之穩定性探討；以及氣體遷移與回填材料特性之分析，探討這些特性對工程障壁穩定性的影響。以下各節分別說明103年的工作成果。

3.2.7.1. 處置場熱-水-化作用之初步分析

日本H12報告針對工程障壁中的緩衝材料再飽和性進行分析，而主要的內容為於膨潤土再飽和過程的熱-水-力耦合現象(JNC, 2000a)。本研究內容於103年工作期間，先行針對處置場廢棄物罐周圍的熱-水-化之地下水流傳輸可能途徑與行為做研究。其成果將可提供SNFD2017報告再飽和特性內容的探討。

3.2.7.1.1. 熱-水-化耦合現象研究

3.2.7.1.1.1. 案例驗證

在熱-水-化耦合模型中，熱傳與水流特性為化學傳輸之重要背景參數，因此，在進行化學特性分析之前，須針對熱與水兩特性進行分

析及驗證，以確保模擬的正確性。熱傳與水流特性驗證主要藉由解析解或數值解來進行計算與驗證，以下列2組驗證案例分析：

(1) 進行地下水流於緩衝材料流動之解析解驗證：

利用地下水流方程式進行求解，將解析解計算結果與模式模擬出之數值解結果進行比較，以驗證本計畫模式正確性。

(2) 進行熱-水耦合之數值解驗證：

以Samper et al. (2008)以FEBEX (Full-scale Engineered Barrier Experiment)對緩衝材料進行熱-水耦合模擬為基礎，以Petrasim數值軟體的TOUGHREACT套件進行模式建置與進行模擬，最後，進行兩數值模擬結果比較，以驗證本計畫模式正確性。

3.2.7.1.1.2. 緩衝材料熱-水-化耦合現象數值模擬分析

圖 3-62為用過核子燃料處置設施緩衝材料一維概念模型示意圖。本研究探討3種熱及核種於緩衝材料內擴散的模擬情境，分別為：

(1) 緩衝材料為初始乾燥狀態；(2) 緩衝材料為未飽和逐漸浸潤狀態；(3) 緩衝材料達到完全飽和。因此在第1與第2情境之邊界設定部分，只考慮緩衝材料內之擴散行為，熱源及核種源皆假設由廢棄物罐向外釋出，故假設概念模型左方為熱源及核種源所在，上下邊界設定為溶質阻絕與零流量邊界，左右兩邊設定為給定水壓邊界且為已知濃度邊界。給定水壓邊界設定部分依3種案例分別給定不同之情況，第1及第3情境設定為無壓力差，第2情境則有壓力差。溶質傳輸邊界於3種情境皆設定左右為已知核種濃度邊界，上下為阻絕邊界。在熱源設定上，本計畫假設熱源中心溫度為75 °C (台電公司，2010)，母岩溫度則假設其位於地下500 m之地溫為40 °C。

3.2.7.1.1.2.1. 數值模型

數值模型長度為0.35 m，切割網格共100格。地質參數設定以「用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段-101年度計畫成果報告」所使用之參數(台電公司，2013)，水力參數設定：初始壓力設定為 5×10^6 Pa，緩衝材料密度為 $2,750 \text{ kg/m}^3$ ，孔隙率為0.43，

滲透率為 $3.0 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ (表 3-13)。熱力參數設定：初始溫度係由於處置孔設計位於地底下500 m，本研究假設地表平均溫度為25 °C，且溫度隨著深度每下降1 m溫度增加0.03 °C，故設定初始溫度為40 °C。化學特性設定：選定不同吸附性(K_d)與衰變性的兩個代表核種：Cs-135(高吸附性與半衰期長)及I-129(低吸附性與半衰期長)，其半衰期、 K_d 值及初始莫耳濃度分別如表 3-14所示。邊界設定部分，左邊界及右邊界分別給予定水壓邊界，水壓設定為 $5.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，上下邊界給予零流量邊界(圖 3-63)，此邊界設定表示緩衝材料內無水力梯度出現。以TOUGHREACT套件中之EOS3模組進行模擬。

3.2.7.1.1.2.2. 案例分析結果

圖 3-64為模擬的溫度分布結果，各個不同顏色之曲線表示離廢棄物罐不同位置的溫度變化。由圖中可發現，離廢棄物罐越近其達到平衡之溫度越高，反之平衡溫度則較低，所有位置之溫度約在模擬時間為0.02年時達到平衡。

圖 3-65為模擬的壓力分布結果，垂直軸為各時間點所對應之壓力值，單位為105 Pa。由圖可知，各位置壓力值約在模擬時間第0.03年後達到穩定壓力。模式設定中，廢棄物罐之溫度為75 °C，而緩衝材料初始溫度為40 °C，水體受到溫度抬升影響而膨脹，導致壓力升高，兩側邊界為固定壓力，因此產生壓力差引致水體流動。在0.03年之前，越靠近廢棄物罐位置其壓力值越大，但經過一段時間溫度場達到穩態後，壓力亦重新平衡而達到穩態。

圖 3-66為I-129遷移模擬結果，由圖中可發現，I-129約在模擬時間5,000年的時候，核種擴散至緩衝材料總長度的一半；而在10,000年時，核種到達緩衝材料邊緣。圖 3-67為Cs-135於緩衝材料遷移模擬之結果，由於Cs-135具有較高之吸附性，因此遷移的速度較I-129慢，由圖中可看出，在模擬時間15,000年時，Cs-135才擴散至緩衝材料的一半距離，而在25,000年時，Cs-135到達緩衝材料之最邊緣處。

3.2.7.1.1.3. 小結

近場緩衝材料之熱-水-化耦合數值模式驗證，以地下水流場及熱-水耦合數值模擬兩方面進行驗證，兩者驗證結果誤差皆小，驗證本計畫所建立之一維數值模型具有可信性。

3.2.7.1.2. 熱-水-力耦合現象研究

3.2.7.1.2.1. 近場環境熱-水-力耦合現象模擬

3.2.7.1.2.1.1. 概念模型

假設用過核子燃料處置設施之放射性核種衰變熱為固定熱源，並由左向右傳遞；圍岩為地下水飽和狀態，且地下水流為緩慢由左至右流動；圍岩受熱作用將產生膨脹，但右側邊界為固定邊界不可變形，因此，主要向左側產生膨脹變形作用。因此，可將熱-水-力模型之研究區進行一維模式之概念化如圖 3-68所示，熱傳邊界左側為放射核種衰變產生之固定熱源，右側為天然地溫；水流邊界左側為固定水壓，右側為大裂隙之零水壓變化(水可自由流入或流出)；力學邊界之左側為自由變型，右側為固定不動邊界。本計畫參考日本H12報告之內容，假設研究區中水力梯度為0，左側固定熱源為75 °C，右側為深度500 m之地溫40 °C。因此，本計畫後續以此概念模式進行熱-水-力耦合之數值模式建立與分析，以瞭解受到左側放射核種衰變產生之固定熱源影響下，圍岩之熱-水-力耦合特性。

3.2.7.1.2.1.2. 模型參數

本計畫針對熱-水-力序率孔彈性理論模式蒐集與整理相關參數資料，以作為後續模式建構之基礎。蒐集與整理H12報告(JNC, 2000a)與Selvadurai and Nguyen (1995)、Selvadurai and Suvorov (2012)之文獻參數如表 3-15所示。

3.2.7.1.2.1.3. 模型模擬結果

在近場環境中，緩衝材料內的熱-水-力耦合模擬結果如圖 3-69 所示。其中位移正值代表網格點向右移動的距離，水壓正值代表相對初始壓力上升(水壓升高)，負值代表水壓力下降。其中圖 3-69 (a)的位移場代表每個網格邊界向右的移動量，每個網格受到壓縮與伸張的情形，可以每個網格的左位移減去網格的右位移來呈現，結果如圖 3-70所示。當某個數值網格的左位移大於右位移，左位移減右位移為正，表示網格變小為受到壓縮；反之，當網格左位移小於右位移，左位移減右位移為負，表示網格變大為受到伸張。因此，圖 3-70中，正值表示壓縮，負值表示伸張，對應至圖 3-69 (a)可知，圖中斜率為正(左半部)時表示網格受到伸張，斜率為負(右半部)時表示網格受到壓縮。

由上述分析結果可知，熱-水-力耦合作用在不同模式尺度與不同材質中呈現不同的行為。近場緩衝材料因為厚度薄，熱傳於短時間達到穩定，但緩衝材料的高壓縮性與低排水性，使得水與力之耦合作用時間較長，呈現對稱行為；遠場環境的尺度較大，可看到熱的變化對水與力耦合交互作用有明顯的影響。

3.2.7.1.2.2. 小結

本計畫自行發展有限差分數值程式進行熱-水-力耦合作用現象分析，以熱傳解析驗證此程式的正確性，並依概念模式進行近場緩衝材料與遠場圍岩之熱-水-力耦合現象模擬。由本計畫分析之近場緩衝材料模式與遠場圍岩模式可瞭解，熱-水-力耦合作用在不同模式尺度與不同材質特性中呈現不同的行為。

3.2.7.2. 處置場開挖擾動帶之力學特性研究

本項工作在進行工程障壁力學穩定性中有關開挖擾動帶的力學特性研究。主要運用FLAC^{3D}分析軟體模擬隧道交叉段開挖力學行為的影響。

3.2.7.2.1. FLAC^{3D}數值分析模式

3.2.7.2.1.1. 數值網格

建構FLAC^{3D}數值模型時，須考量如何建立分析模型的數值網格，本節將說明本研究三維網格的建立依據及其相關考慮的因素：

(1) 模型網格

處置設施三維網格模型尺寸與網格數目表 3-16所示，模型之座標系統Z為垂直方向，Y為隧道挖掘方向，X為垂直於Y的水平方向，座標軸原點於兩處置孔與主隧道中心處。

(2) 網格邊界條件及範圍

本研究為避免邊界效應的影響，參考高世鍊(1998)的研究成果，設定邊界網格寬度為主隧道中心距邊界寬度X向60 m，中心距邊界深度Y向60 m，邊界總高度Z向150 m(範圍包含隧道中心點往上80 m及往下70 m)，整體網格示意圖。

因最終處置設施規劃設置在地底下約500 m處，所以將網格邊界之垂直覆土深度420 m轉為垂直應力邊界，再加上網格垂直邊界高度為80 m。假設整體網格邊界節點不受開挖或外力的影響，因此，本研究在網格的前後左右與底部邊界，皆以輓支承(roller)來限制邊界(如圖 3-71所示)。

(3) 岩石變形行為的假設

岩體假設為均質材料，並假設岩盤開挖過程中力學行為只受到開挖面向前推進的影響，與時間無關，因此，未考慮到岩體本身潛變所造成的影響。

3.2.7.2.1.2. 岩體材料參數

以FLAC^{3D}進程式分析時，所需要的參數會隨著所選用的組合律模式而定。岩體材料部分選用完全彈塑性之Mohr - Coulomb模式進行分析，必須輸入的參數有剪力模數(shear modulus, G)、體積模數(bulk modulus, B)、凝聚力(cohesion, c)、摩擦角(friction, ϕ)、單位重(total unit, γ)及現地初始應力等。

材料參數主要假設岩體評分參數(RMR)為30及側向壓力係數(K)為1。其他由FLAC^{3D}分析的參數示於表 3-17。

3.2.7.2.1.3. 處置設施現地應力之設定

Hoek and Brown(1980)彙整側向壓力與覆土深度的關係，結果顯示整體上K值是隨著深度增加而減少。在深度500 m以內，K值多半大於1；而深度500 m至1,500 m之間時，K值約等於1；當深度超過1,500 m以上時，K值多半小於1。

本研究模擬之覆土深度為500 m，可合理假設 $K=1$ ，作為本研究的初始側向壓力係數。

3.2.7.2.2. 隧道與處置孔掘進模擬分析

3.2.7.2.2.1. 主隧道掘進之應變分析

以RMR為30，K為1的情形，針對完整岩體的馬蹄形隧道掘進進行探討，監測點位置如圖 3-72所示。

(1) 頂拱處應變曲線

掘進應變曲線(如圖 3-73)，完整岩體的馬蹄形隧道Z方向垂直應變在監測點C、F分別在Y/B為-2.5及Y/B為-0.5時，產生明顯變形；監測點C之Y方向水平應變在Y/B為-2.5時，產生明顯變形，而監測點F之Y方向水平應變在Y/B為-1.5時，亦產生明顯變形，通過監測點後監測點C、F隨即回升，直至在Y/B為1時，Y、Z方向之應變曲線趨近一穩定值。由主隧道掘進完成後的應變移量監測值得知馬蹄形隧道在Z方向會有較大變形量(如表 3-18所示)。

(2) 側壁處之掘進應變曲線

掘進應變曲線(如圖 3-74)，監測點7在隧道Z方向垂直應變在Y/B為-1至0時產生微小變形後隨即趨近一穩定值，監測點8在Y/B為0至1時產生些微變形隨即趨近一穩定值；監測點7之Y方向水平應變在Y/B為-2時，監測點8之Y方向水平應變在Y/B為-1時，即產生明顯變形，通過監測點後監測點隨即回升，直至在Y/B為1.5時Y、Z方向之應變曲線趨近一穩定值。

由主隧道掘進完成後的應變監測值得知馬蹄形隧道在Z方向之應變較大(如表 3-18所示)。

3.2.7.2.2.2. 處置孔掘進時之應變分析

本節進行垂直處置孔在隧道掘進時，仰拱處的掘進應變分析探討。

(1) 監測點A、B

掘進應變曲線圖(如圖 3-75所示)，當掘進處置孔2時，監測點A、B由於處置孔2挖除後向處置孔2擠壓，處置孔2之右壁可能產生些許隆起變形；掘進至處置孔1時，監測點A、B應變則會向上隆起。處置孔2掘進完成後的應變監測值如表 3-19所示。

處置孔應變增幅量如表 3-20所示。

(2) 監測點D、E

掘進應變曲線如圖 3-76所示。掘進至處置孔2時，監測點D、E應變會向上隆起；掘進至處置孔1時，監測點D、E應變則會向處置孔1方向產生應變變形。

處置孔掘進完成後的應變監測值

處置孔應變增幅量如表 3-19與表 3-20所示。

3.2.7.2.2.3. 主隧道掘進時之應力分析

綜合分析，在隧道掘進過程，頂拱監測點(C、F)及側壁監測點(7、8)的 σ_1 在開挖後，較初始應力減少約12 MPa，而 σ_3 則增加約6 MPa；仰拱處測點(A、B、D、E)的 σ_1 又比頂拱及側壁監測點減少約13.3 MPa， σ_3 則減少約1.1 MPa。顯示在主隧道掘進後，所有監測點的 σ_1 皆下降，頂拱及側壁監測點之 σ_3 則因覆土應力和側向壓力的影響而增加(見表 3-21)。

3.2.7.2.2.4. 處置孔掘進時之應力分析

主隧道開挖完成後，接著開挖處置孔，順序為先開挖處置孔2後，再開挖處置孔1，由於頂拱監測點(C、F)和側壁監測點(7、8)在開挖時未受到影響，其應力變化量幾乎為0，所以只針對仰拱監測點(A、B、D、E)進行應力變化分析。

3.2.7.2.3. 小結

隧道進行的交叉段開挖的先後順序，會產生不同應力集中之不穩定區域，這些不穩定的應力集中區域在地下處置設施施工上需特別注意。同時，由本研究的模擬分析可知，處置隧道的掘進過程會對處置孔周圍造成不同程度的應力與應變變化。進而瞭解應力與應變隨處置隧道掘進進程的變化，有助於處置設施建造程序布置，及建造工法的選擇。

根據蒐集到有關處置設施開挖擾動帶之研究成果顯示，隧道開挖後周遭岩體會遭受到擾動，其擾動的範圍與程度將是本研究進一步探討的目標。

3.2.7.3. 工程障壁熱力-力學穩定性研究

本研究於103年之工作成果主要為：藉由FLAC^{3D}數值分析軟體，進行在單處置孔、不同間距之雙處置孔及雙處置隧道等3種案例下，工程障壁及周圍岩體受溫度與應力的作用影響研究。

3.2.7.3.1. 數值模型

3.2.7.3.1.1. 橫斷面與尺寸

本研究模擬之模型尺寸，主要參考SNFDF2009報告(台電公司，2010)之垂直處置孔形式，處置隧道之斷面形狀為一拱形斷面，隧道寬度為4 m，頂拱高度為4.1 m，處置孔深度為7.91 m，廢棄物罐尺寸為4.91 m長，其詳細尺寸如圖 3-57所示。廢棄物罐於處置孔中心，廢棄物罐假設為主要熱源，周圍再環置經高壓夯實之膨潤土，最後，以混合回填材料將處置孔上部斷面予以回填。一般而言，混合回填材料

為70%膨潤土及30%砂石混合而成。假設處置隧道與處置孔已完成膨潤土與回填材料之封填，在處置隧道與處置孔中已置妥用過核子燃料，且場址呈穩定狀態。

3.2.7.3.1.2. 初始溫度

假設地表溫度為20 °C，在考慮岩體受地溫梯度(每增加100 m升高3 °C)的影響下，處置深度為500 m處之處置孔溫度約為35 °C。另外，假設地溫為穩定分布，除了處置孔熱源外，忽略其他地溫變動因素的影響。

地下處置熱源參考SKB(1999a)報告，其熱源強度為1,680 W，使用之熱衰減公式如下：

$$P(t) = P_0 [c_1 \exp(0.02t) + c_2 \exp(0.002t) + c_3 \exp(0.0002t)] \quad (3-5)$$

其中，

$P(t)$ = canister power (W)

t = time (years)

P_0 = canister power at deposition = 1680 W

c_1 = 0.769

c_2 = 0.163

c_3 = 0.067

3.2.7.3.1.3. 初始應力與參數

初始應力可參考第3.2.7.2.1.3節的設定方式；剪力模數與體積模數的設定方式，則可參考第3.2.7.2.1.2中對於相關參數的設定方式；另外，本研究中假設處置岩體為花崗岩，其水力性質、熱力性質與力學性質等參數摘自SNFD2009之相關研究成果(見表 3-24)。

3.2.7.3.1.4. 邊界條件

(1) 邊界範圍

柯建仲等(2004)模擬深層處置設施的熱-力耦合現象時發現，距離熱源越遠則岩體之溫度變化會趨近一收斂值本研究對於FLAC^{3D}之網格邊界設定，以處置隧道中心軸為基準，於z方向之上下各取200 m，作為網格邊界的頂部與底部界限，在x方向則取150 m作為網格邊界，而y方向取距離熱源兩側各150 m作為網格邊界。

(2) 邊界束制

假設在網格邊界上不受開挖或外力之影響，因此，以輓支承與鉸支承(hinge)限制邊界處之運動與位移方向。本研究在邊界範圍之前後左右與底部設定輓支承，並於上方施以因上部岩體自重所生之荷重，如圖 3-77所示。

3.2.7.3.2. 案例分析結果

案例分析主要根據不同地溫為變數之單處置孔，與不同間距為變數之雙處置孔及處置隧道，模擬在廢棄物罐熱源所引起之溫度場與大地應力場共同作用下，分別針對處置孔之溫度變化、溫度分布、三維應力、塑性分布及隧道位移之結果進行探討。案例分析中，處置隧道與處置孔之各相關位置如圖 3-78所示。

本研究分析所採取之處置孔形式敘述如下：

(1) 單處置孔

假設模擬場址之地表溫度有10 °C，15 °C及20 °C 3種情形，若以地表深度500 m之隧道底部為基準面且考慮地溫梯度，則該基準面岩體所處之地溫分別為25 °C、30 °C及35 °C。

(2) 雙處置孔

此部分以深度500 m之隧道底部為地溫35 °C之基準面，採取兩處置孔之間距分別為6、8、10與12 m進行探討。

(3) 雙處置隧道

對於雙處置隧道中所進行之模擬分析，仍取不同處置隧道間距作為此部分之變數。以深度500 m之隧道底部為地溫之基準面(35 °C)，採取處置隧道間距分別為20 m、25 m與30 m進行探討。

3.2.7.3.2.1. 溫度分布

溫度所呈現之同溫層分布剖面圖，以處置孔之廢棄物罐中心最高溫處向外擴散漸漸遞減。由於地溫梯度影響，故處置孔溫度之分布呈現向下擴張之橢圓狀，且同溫層之形狀屬下部略寬之橢圓。

圖 3-79為處置孔回填時間達1.5年時，y-z平面上不同間距之各形式雙處置孔，初始地溫 35°C 且 $z = -4.5\text{ m}$ 之斷面上，其y向上各點位置與溫度之關係，得知其兩熱源間距越近則兩溫度場相互作用之效應越明顯，且越接近熱源處則溫度升降之斜率越陡。現階段報告針對熱-力耦合評估研究採用之熱傳參數為SNFD2009報告中的資料，尚未考慮場址調查及衰變熱分析結果，地溫梯度設定為 35°C 、 30°C 、 25°C 三種，當時 35°C 會導致超過 100°C 。但如根據目前調查資料再計算，地下500m處置場溫度為 29.3°C ，則由報告中 30°C 曲線可知，並未超過 100°C 。

同樣條件下之不同間距雙處置隧道，當處置時間經過1.5年時，初始地溫 35°C 且 $z = -4.5\text{ m}$ 之斷面上，於x-z平面上x向上各位置與溫度之變化關係(如圖 3-80所示)，其不同間距之溫度曲線變化趨勢大致相同，但受溫度場影響之間距中點處仍可比較其溫度差異，間距愈近則間距中點受廢棄物罐溫度場之影響愈高。

3.2.7.3.2.2. 水平應力分布

(1) x方向水平應力

本研究中將壓應力定為負應力值，拉應力定為正應力值。圖 3-81表示不同間距雙處置孔與平行y軸之水平力關係，位於雙處置孔間距中間之E點，其水平壓力明顯隨間距增加而隨之提升，但其他點位水平力並未隨間距之變化而有所變動。

(2) y向水平應力

圖 3-82為不同間距雙處置孔與平行y軸之水平力關係，隨著間距增加，其頂拱A點所受之水平力隨之降低，當間距約10.75 m時，水平拉力之狀態改變成為水平壓力；另外，處置孔口B點之受力

變化趨勢，可將間距9 m處視為反曲點，相較之下間距10 m時所受之力較8 m時為大。

3.2.7.3.2.3. 垂直應力分布

圖 3-83為不同間距雙處置孔與垂直力之關係圖，若將間距9 m處視為變化趨勢之參考點，並觀察坑口B點之受力行為，間距10 m處為拉力而間距8 m處所受為壓力；且靠近間距8.75 m處，為坑口受到壓力或拉力之轉換處。頂拱A點之受力變化，亦可由間距8.75 m處做為參考點，間距小於8.75 m其垂直壓力逐漸降低，且經7.5 m處後其垂直力由壓力轉為拉力再逐漸增高，而8.75 m至12 m之垂直力變化趨勢並不顯著。

圖 3-84所表示為不同間距雙處置隧道與垂直力關係，頂拱A點與處置孔中B點之受力關係呈現相對趨勢，且約於處置隧道間距25 m處為反曲點，另外，此兩點位皆有經歷壓力與拉力轉變之現象出現。

3.2.7.3.3. 小結

(1) 溫度

當廢棄物罐進行處置孔處置並完成回填後，較高之初始地溫將提升廢棄物罐表面熱衰減前的最高溫度；反之，若於較低之初始地溫，則廢棄物罐表面熱衰減前之最高溫將略微降低，且廢棄物罐表面溫度產生衰減現象時的發生時間，不受初始地溫影響而提前或延後。

(2) 應力與作用力分布

(a) 當大地應力與放射性廢棄物熱源所生之溫度效應共同作用後，較低之初始地溫在相同熱源影響下，其現地應力將越高，此結果應為不同溫度差異率導致岩體產生不同之應力行為，而溫度差異率愈高則現地應力愈高。

(b) 處置隧道主要之拉力區域，分布於頂拱、隧道底部與處置孔口處，為維持處置設施之安全性與穩定性，需注意拉力發生

區域，於開挖回填之施工過程中加以補強，以降低場址岩體發生破壞的機率。

- (c) 處置孔與處置隧道間距之選擇，除須比較大地應力與溫度場的效應影響外，亦需考慮最小間距來提升處置設施的使用效率，以降低處置成本。本研究以岩體所發生之拉力作為比較依據，認為以間距6 m至8 m為較適宜之處置孔間距，而處置隧道之間距則以25 m為宜。

3.2.7.4. 深層地下設施受震穩定性之研究

日本H12報告在受震穩定性章節內容說明：廢棄物罐置放後，為了維持工程障壁系統的完整性，在地震擾動下，工程障壁系統不能受地震影響而仍須維持穩定(JNC, 2000a)。

本研究於103年度之工作為探討地震對深層地質處置設施安全性之影響，評估深層地質處置設施受地震力影響之安全性。

3.2.7.4.1. 分析工具

本研究分析時採用ABAQUS/CAE數值模擬軟體。ABAQUS為國際上大型的通用有限元素計算分析軟體之一，廣泛應用於工業界、工程界及學術界等。

3.2.7.4.2. 不同覆蓋深度下對安全性之影響與臨界安全深度定義

考慮地下空間在不同覆蓋深度下隧道開挖應力的安全係數。將模型底面之垂直與水平位移設定為零，束制條件設定完成後施予重力，再以頂拱區域與隧道側壁區域進行討論。分別探討H區及K區不同岩性在不同覆蓋深度下，隧道完工後於地震力下安全係數之差異。

(1) 頂拱區域

定義頂拱之角度，頂拱側邊底端為 0° ，頂拱正上方為 90° ，如圖3-85所示。分析結果如圖3-86所示，得知同一研究區，覆蓋深度越深，隧道開挖應力的安全係數越低。不同覆蓋深度下，依據

Mohr-Coulomb破壞準則計算所得之安全係數接近1.0時，表示為臨界狀態。

(2) 隧道側壁區域

定義隧道右側壁由下往上依每隔0.23 m編列一個節點，共編11個節點，如圖 3-87所示。分析結果如圖 3-88所示，亦得知同一研究區，覆蓋深度越深，隧道開挖應力的安全係數越低。其中節點2出現隧道開挖應力的安全係數最低值，隧道開挖應力的安全係數接近於1.0之臨界狀態，亦發生於覆蓋深度較深的情況下。

為便於評估不同因素對研究區所造成之影響差異，將計算所得各觀察點之隧道開挖應力的安全係數進行平滑曲線回歸，選擇最貼合原曲線之平滑曲線方程式，在此定義以隧道開挖應力的安全係數等於1.0時，代入回歸方程式計算所得之覆蓋深度為臨界安全深度，原曲線與回歸之平滑曲線如圖 3-89所示。

3.2.7.4.3. 雙處置孔間距對安全性之影響

探討H區及K區在不同的雙處置孔間距情況，探討頂拱區域與隧道側壁區域之隧道開挖應力的安全係數，根據前章節所提之臨界安全深度推演方法進行計算，觀察H區及K區在不同雙處置孔間距下對其安全性的影響，分析結果如表 3-25，可得處置孔間距越大，臨界安全深度越大，同一覆蓋深度下之安全係數亦將隨之提高，因此建議間距至少應大於25 m。

3.2.7.4.4. 不同覆蓋深度下考慮地震強度對安全性之影響

由於地下處置孔所處位置越深，受地震強度影響越小，因此本節針對不同覆蓋深度對應之地震強度，所得的安全係數差異進行分析。

鑒於地下實際地震加速度歷時資料難以取得，因此本研究將易於取得的地表地震加速度歷時修正成不同覆蓋深度下對應之地震加速度歷時，再將修正後不同覆蓋深度下之地震加速度歷時代入數值模型中計算得其安全係數。

蔣樹屏等(2012)討論覆蓋深度對地震強度的影響，分析不同覆蓋深度的情況下，其PGA(Peak Ground Accerleration)值變化之情形。李忠生(2004)提出PGA與覆蓋深度之衰減式如下：

$$A = e^a Z^{-b} \quad (3-6)$$

其中，A為PGA值[m/s²]；Z為覆蓋深度[m]；a與b均為經驗係數。

陳科翰(2013)將地下各覆蓋深度之加速度峰值，依李忠生(2004)提出之衰減式與蔣樹屏等(2012)使用所得PGA值對比進行擬合，並回歸出關係式如下：

$$A = e^{1.496} Z^{0.156} \quad (3-7)$$

依式(3-7)將地表PGA值修正至不同覆蓋深度所對應之PGA值，而修正係數為不同覆蓋深度與地表之PGA值之比值，即可得不同覆蓋深度與對應之修正係數如表 3-26。再將整段地表地震加速度歷時乘此修正係數，即可獲得修正後之不同覆蓋深度的地震加速度歷時。

修正後H區與K區所對應之不同覆蓋深度的地震加速度歷時，輸入至數值模型底部，並使地震加速度歷時垂直向上傳遞，得知H區及K區之最危險區域應力歷時。H區及K區皆分為頂拱區域與隧道側壁區域進行危險區域之安全係數歷時探討，得知同一研究區覆蓋深度較淺處會有較大的安全係數變化量。

3.2.7.4.5. 小結

(1) 利用有限元素軟體ABAQUS建立地下空間之二維模擬網格，並使用H區及K區地質材料參數，評估在不同覆蓋深度下，進行建造階段之靜態穩定安全分析，分析結果如下：

(a) 考慮500 m的深度，H區與K區隧道開挖應力的靜安全係數相近。

(b)另亦利用靜態穩定安全分析，討論不同雙處置孔間距下對其安全性之影響，得知雙處置孔間距越大，隧道開挖應力的安全係數隨之越高。此一部份仍需配合前3.2.7.3節經由熱力-力學穩定性三維分析雙處置孔間距之結果，進一步進行結合分析。

(2) 利用有限元素軟體ABAQUS建立地下空間之三維模擬網格，並使用H區之地質材料參數，已初步得知分析後於處置孔周圍之應力分布情形。

3.2.7.5. 氣體遷移

深層地質處置設施之包封容器，於地下環境隨時間造成腐蝕作用，進而產生氫氣；氫則假設一開始溶解於緩衝材料之孔隙水中，然後經擴散或遷移通過緩衝材料。若由擴散排出的氫氣量小於其氫氣生量，則氫氣將可能累積在緩衝材料與外包裝之間，隨著越來越多氣體積聚，其壓力可能會影響周圍的緩衝材料及處置母岩之穩定性。日本H12報告中，在氣體遷移對工障壁穩定性章節的內容包含：氣體遷移評估時使用的參數(溶解氫的有效擴散係數、氫氣產生率)，並利用氣體遷移的分析結果，說明所產生氫氣之遷移，對緩衝材料、母岩或核種遷移的影響(JNC, 2000a)。

本計畫在103年的研究內容，包括氣體的生成原因、溶解氣體的遷移機制及緩衝材料中氣體的遷移行為。104年的工作則規劃著重於探討處置設施近場環境中，氣體在緩衝材料內的遷移行為。另外，進行氣體遷移行為實驗研究可行性評估，以及輕水式反應器產生用過核子燃料之氣體分裂產物研究，其目的主要為探討處置設施氣體生成成因，與其對工程障壁長期穩定性之影響，作為未來模擬處置設施之氣體遷移實驗設計與安全評估之參考，這些成果將會編成SNFD2017報告章節內容。以下即為103年之工作成果。

3.2.7.5.1. 氣體的生成原因

氣體的生成對整個處置系統的安全性有很大的影響，其產生的高氣壓可能破壞工程障壁的整體性；壓力梯度的增加會加快水流及核種的移動；過多的輻射氣體、有毒氣體與易燃氣體，會對整個生物圈造成不良影響

目前國內參考處置概念採用瑞典KBS-3型銅質外殼鑄鐵內裡之廢棄罐(SKB, 1999a)設計。廢棄物罐容易被氧與硫所腐蝕，而腐蝕常伴隨著氣體之產生及氫脆化現象。廢棄物罐近場環境中，氣體生成主要源自於下列幾個方面：(1) 在低氧或無氧條件下金屬容器因腐蝕而產生氫氣；(2) 廢棄物中之放射性核種衰減，導致水輻射分解而產生的氫氣；(3) 因微生物作用使有機物質變質，而產生的二氧化碳、甲烷、硫化氫、氮氣等氣體；(4) 其他作用所產生之氣體，例如：由 α 射線作用引起的氫氣、有機物質受到輻射產生的氫氣及母岩中的外釋氣體等。其中金屬物質的腐蝕是氣體生成的主要因素，因為鐵是廢棄物、廢棄物包件及處置設施內結構材料最重要的金屬成分，相關的試驗工作多著墨在鐵以及鐵合金的腐蝕，且涉及到3種不同的生成環境而較為複雜：在滲水之前的大氣條件下、在非飽和狀態下及在飽和狀態下。

3.2.7.5.2. 溶解氣體的遷移機制

瑞典研究報告(SKB, 2005)指出，於低氣體產生率時，氣體溶解於水中經由擴散及對流方式遷移，以及當氣體產生率增加，壓力值超過氣體與土壤試體相互連接之值，氣體將進入土壤內隨孔隙水遷移，其主要分為4種遷移機制包括：

- (1) 氣體溶解之平流與擴散遷移
- (2) 黏毛細管二相流遷移(visco-capillary two-phase flow)
- (3) 擴容現象控制氣體流量(dilatancy-controlled gas flow)
- (4) 氣體流沿宏觀張裂隙遷移

在溶解氫氣的擴散研究上，日本H12報告(JNC, 2000a)，說明溶解在地下水中的氫氣於緩衝材料內的擴散，主要以有效擴散係數

(effective diffusion coefficient)為依據，其定義為溶解氣體與氣體生成率。圖 3-90顯示於廢棄物罐水平置放(horizontal emplacement)及處置深度1,000 m之條件下，累積氫氣與氫氣生成之比率；圖 3-90(a)結果，指出當廢棄物罐腐蝕率為定值 $5 \mu\text{m/yr}$ 時(即釋出氫氣率為定值)，由於緩衝材料擴散係數愈小表示遷移性差，造成氫氣累積量亦愈高。圖 3-90(b)則指出若固定緩衝材料之擴散係數，廢棄物罐腐蝕率高其造成之氫氣累積量亦相對愈高。整體結果顯示當廢棄物罐腐蝕率及擴散係數，分別為 $5 \mu\text{m/yr}$ 及 $2 \times 10^{-11} \text{m}^2/\text{sec}$ 時，因廢棄物罐腐蝕所生成之氫氣在經過10,000年後，約有81%累積於緩衝材料與棄物罐間，相對應之累積壓力約為16 MPa。可以預期的是，當壓力達到某一量值時，氫氣將會由廢棄物罐遷移至緩衝材料中，因此，廢棄物罐與緩衝材料間之累積壓力，並不會持續升高。

3.2.7.5.3. 緩衝材料中的氣體遷移行為

日本H12報告的支援報告(supporting report)中，為了評估氣體遷移行為對緩衝材料的影響(JNC, 2000a)，以100%膨潤土(bentonite)及參考緩衝材料(70%膨潤土及30%砂土)兩種試體，於飽和且完全膨脹之常溫條件下進行試驗研究。緩衝材料試體主要置於試驗容器中(test vessel)，水由試體下方注入，其膨脹壓力(swelling pressure)以上方的測壓元件(load cell)量測；待試體飽和後開始由下方逐步增加壓力直到可注入氫氣為止，此可注入之壓力稱為突破壓力(breakthrough pressure)，氫氣注入過程中持續監測突破壓力、膨脹壓力及氣體流率(gas flow rate)，相關實驗結果包括：

- (1) 氣體滲透率(Gas permeability)
- (2) 突破壓力
- (3) 突破壓力與膨脹壓力之關係
- (4) 氣體路徑回復(recovery of gas pathways)
- (5) 飽和度(degree of saturation)

3.2.7.6. 膨潤土特性

在處置設施的高熱環境下，緩衝材料塊初期會因高熱而產生裂隙，導致緩衝材料各項工程性質劣化。但當周遭水文與熱達到穩定平衡時，緩衝材料將重新飽和而回脹，以其自癒能力填補膨潤土內及處置孔周圍母岩內的微裂隙，因此，常選擇黏土質材料作為緩衝材料(JNC, 2000a)。富含蒙脫石的黏土質材料具有高度之回脹潛能，當緩衝材料重新飽和時，其回脹能力能使緩衝材料微裂隙重新癒合。但過高回脹潛能會產生過大之回脹壓力，致使廢棄物罐遭擠壓破裂，故需控制適當之回脹潛能，使緩衝材料具良好之工程性質。

日本H12報告在膨潤土特性的章節中的內容主要論述：膨潤土因膨脹壓力而把膨潤土擠入周圍母岩的裂隙中，造成膨潤土密度降低，以及探討此現象對工程障壁系統功能的影響(JNC, 2000a)。

103年本項工作如工作計畫書所述，以分析國際間緩衝/回填材料設計方法與規格，瞭解各材料之基本特性、設計準則與設計完成之材料性能為主。為充實SNFD2017報告之內容，規劃於104年進行緩衝材料設計試驗研究，以及緩衝材料長期穩定特性試驗，著手進行符合國內環境之功能實驗。以下內容為103年的工作成果。

3.2.7.6.1. 緩衝材料乾燥收縮特性

緩衝材料塊體在製作時，為求材料製作之工作性及壓密性，會採用適當的含水量進行壓製，考慮處置孔中廢棄物罐釋出之衰變熱對緩衝材料受乾燥收縮的影響緩衝材料在安裝初期會受廢棄物罐所釋放之衰變熱影響，故緩衝材料受熱之體積變化率不可過大，且必須保有適當的自癒特性，否則因受熱收縮產生裂縫，將形成地下水流通途徑，亦可能帶出核種而影響至人類生活圈。未來緩衝材料設計最佳密度與含水量後，亦需針對緩衝材料初期受熱乾燥收縮之張裂影響及遇水自癒性能，進行功能測試。

3.2.7.6.2. 緩衝材料回脹特性

緩衝材料之回脹性能受材料本身之礦物組成或周圍之環境影響，如環境溫度、水質鹽度、酸鹼度等，故進行緩衝材料設計時，需考量處置設施環境溫度與水質，對膨潤土本身回脹特性之改變，進行相關的性能測試，以確定所設計之材料配比受環境影響後，仍保有原本之功能需求。

3.2.7.6.3. 緩衝材料塊體接合特性

日本JNC檢驗緩衝材料於處置孔中塊體接縫對力學及水力特性之影響，分別進行塊體接合試體之剪力性質及水力傳導性質(Chijimatsu et al., 1998)。緩衝材料在初始狀態因塊體間隙加速水分滲流，但隨著試體飽和過程中因塊體回脹擠壓使得接縫變小，接合面越趨緊密，故在塊體達飽和後，接縫之影響並不顯著。

考慮緩衝材料組合之塊體接縫造成地下水入侵之途徑，雖知緩衝材料本身之回脹特性可癒合塊體間之接縫，但仍可參考日本之試驗計術研究，以做為國內未來緩衝材料設計驗證技術之參考。

3.2.7.6.4. 膠體瀝濾

當深層地質處置設施封閉後，且處於地下水飽和狀態時，此時若廢棄物包件受損，放射性核種將溶解於地下水中，並與廢棄物包件周圍夯實黏土製成的緩衝材料膠體物質結合；因此，緩衝材料之膠體瀝濾性能為減緩核種遷移。緩衝材料之瀝濾功能為重要的防護因子之一，而設計密度與膠體瀝濾性能有關，因不同膨潤土本身質性之差異，建議國內未來進行緩衝材料設計時，亦應建立相關驗證技術，以確保所設計材料之瀝濾性能。

3.2.7.6.5. 高溫高壓對緩衝材料之影響

在深層地質處置設施環境中，因受到地溫梯度及廢棄物包件之衰變熱作用影響，緩衝材料將受到50 °C至100 °C的溫度影響。因此，必須瞭解緩衝材料在此溫度範圍下之性能與行為，以及任何可能由於

高溫影響的劣化行為。不同膨潤土受溫度影響行為趨勢各有不同，其特性與膨潤土本身性質有關，但仍可從中得知高溫及壓力對膨潤土之壓密性質有所影響，建議未來進行膨潤土力學相關參數試驗，應考慮溫度之影響。

表 3-13：熱-水-化耦合數值模式之熱與水參數設定表

參數種類	物性參數	緩衝材料
水力參數	初始壓力[Pa]	5×10^6
	整體密度[kg/m ³]	2,750
	孔隙率	0.43
	滲透率[m ²]	3.0×10^{-21}
熱力參數	初始溫度[°C]	40
	處置窖溫度[°C]	75
	熱傳導係數[W/(m · °C)]	1.3
	比熱[J/(kg · °C)]	2,500

表 3-14：熱-水-化耦合數值模式之化學參數設定表

	Cs-135	I-129
半衰期[sec]	7.26×10^{13}	4.96×10^{14}
Kd值[m ³ /kg]	1.0×10^0	1.0×10^{-3}
初始莫耳濃度[mole/L]	2.60×10^{-1}	1.11×10^{-1}

表 3-15：熱-水-力耦合模式參數整理表

種類	參數	¹ 緩衝材料	² 圍岩	單位	參考文獻
物理特性	密度	2,750	2,670	kg/m ³	¹ 台電公司(2013) ² JNC (2000)
	有效孔隙率	0.43	0.02	—	¹ 台電公司(2013) ² JNC (2000)
	固體壓縮係數	2.3×10^{-4}	2.0×10^{-11}	1/Pa	¹ Bag (2011) ² Selvadurai and Nguyen (1995)
	流體壓縮係數	4.5×10^{-10}	4.5×10^{-10}	1/Pa	Selvadurai and Nguyen (1995)
力學特性	彈性模數	3.0×10^6	3.7×10^{11}	Pa	¹ Cho et al. (2002) ² JNC (2000)
	柏2松比	0.30	0.25	—	¹ 台電公司(2013) ² JNC (2000)
水力特性	水力傳導係數	5.41×10^{-14}	1.0×10^{-9}	m/s	¹ 台電公司(2013) ² JNC (2000)
	水力梯度	0.001 to 0.1, 平均0.01	0.001 to 0.1, 平均0.01	—	JNC (2000)
	黏滯係數	0.00054	0.001	Pa·s	Selvadurai and Suvorov (2012)
熱力特性	熱傳導係數	0.78	2.8	W/(m·°C)	JNC (2000)
	比熱	590	1,000	J/(kg·°C)	JNC (2000)
	固體線性熱膨脹係數	3.0×10^{-4}	8.3×10^{-6}	1/°C	¹ Cho et al. (2002) ² Selvadurai and Suvorov (2012)
	流體線性熱膨脹係數	6.9×10^{-5}	6.9×10^{-5}	1/°C	Selvadurai and Suvorov (2012)

表 3-16：三維網格整體模型參數表

項目		數量/尺寸
覆土深度[m]		500
三維模型尺寸[m]	X軸	60
	Y軸	60
	Z軸	150
隧道斷面尺寸[m]	X軸	5
	Y軸	60
	Z軸	5
處置孔尺寸[m]	直徑	1.75
	深度	8
三維整體網格數(個)		28,260
三維整體節點數(個)		30,634

資料來源：摘自游創博(2013)

表 3-17：數值分析之參數(輸入RMR及 σ_c 再由FLAC^{3D}輸出)

體積模數 B[MPa]	剪力模數 G[MPa]	凝聚力 c[MPa]	摩擦角 φ [degree]	彈性模數 Em[MPa]	抗拉強度 σ_t [MPa]
765	459	7.74	33.4	1,148	0.026

資料來源：摘自吳柏辰(2014)

表 3-18：主隧道掘進完成後之應變位移量監測值

主隧道應變監測值	Y (掘進前) [mm]	Y (掘進後) [mm]	Z (掘進前) [mm]	Z (掘進後) [mm]
監測點				
C	0.0	0.00	0.0	-52.60
F	0.0	-0.10	0.0	-52.60
7	0.0	-0.07	0.0	-7.62
8	0.0	-0.08	0.0	-7.61
A	0.0	-0.20	0.0	-63.82
B	0.0	-0.59	0.0	-64.62
D	0.0	-0.10	0.0	-64.30
E	0.0	-0.20	0.0	-64.60

(z負號向下應變，y負號向右應變)

表 3-19：處置孔掘進完成後之應變監測值

處置孔 應變監 測值	處置孔2				處置孔1			
監測點	Y (掘進 前) [mm]	Y (完) [mm]	Z (掘進 前) [mm]	Z (完) [mm]	Y (掘進 前) [mm]	Y (完) [mm]	Z (掘進 前) [mm]	Z (完) [mm]
A	-0.2	0.60	63.8	63.72	0.6	9.24	63.7	64.82
B	-0.6	0.64	64.6	64.42	0.6	-8.06	64.4	65.62
D	-0.1	9.01	64.3	66.03	9.0	7.50	66.0	65.86
E	-0.2	-9.38	64.6	65.71	-9.4	-9.90	65.7	65.65

(z負號向下應變，y負號向右應變)

表 3-20：處置孔掘進完成後之應變增幅量

處置孔應變增幅量	處置孔2		處置孔1	
監測點	Y [mm]	Z [mm]	Y [mm]	Z [mm]
A	0.80	-0.11	8.64	1.10
B	1.23	-0.23	-8.70	1.23
D	9.13	1.77	-1.51	-0.17
E	-9.14	1.15	-0.52	-0.06

(z負號向下應變，y負號向右應變)

表 3-21：主隧道應力變化量

主隧道監測點		σ_v	σ_1	變化量 % (σ_1/σ_v)	σ_v	σ_3	變化量 % (σ_3/σ_v)
C	無襯砌(MPa)	-13.163	-1.980	-84.96%	-13.164	-19.402	32.15%
F	無襯砌(MPa)	-13.163	-1.224	-90.70%	-13.164	-19.216	31.49%
7	無襯砌(MPa)	-13.238	-2.078	-84.30%	-13.240	-19.242	31.19%
8	無襯砌(MPa)	-13.238	-2.019	-84.75%	-13.240	-19.229	31.14%
A	無襯砌(MPa)	-13.341	-0.211	-98.42%	-13.345	-12.329	-8.24%
B	無襯砌(MPa)	-13.341	-0.003	-99.98%	-13.345	-12.426	-7.40%
D	無襯砌(MPa)	-13.341	-0.222	-98.33%	-13.345	-12.465	-7.06%
E	無襯砌(MPa)	-13.341	-0.054	-99.59%	-13.345	-12.493	-6.82%

(應力負號向下)

表 3-22：處置孔2之應力變化增幅表

處置孔2監測點		σ_v	σ_1	變化量 % (σ_1/σ_v)	σ_v	σ_3	變化量 % (σ_3/σ_v)
C	無襯砌(MPa)	7.392	1.983	-73.17%	21.266	19.456	-9.30%
F	無襯砌(MPa)	7.661	1.229	-83.95%	36.931	19.299	-91.36%
7	無襯砌(MPa)	9.231	2.077	-77.50%	16.858	19.224	12.31%
8	無襯砌(MPa)	7.875	7.875	0.00%	17.946	19.258	6.82%
A	無襯砌(MPa)	2.169	0.211	-90.27%	25.837	12.442	-107.66%
B	無襯砌(MPa)	4.823	0.006	-99.88%	23.956	12.676	-88.98%
D	無襯砌(MPa)	2.215	0.530	-76.08%	26.115	22.341	-16.89%
E	無襯砌(MPa)	1.368	0.390	-71.45%	26.069	22.686	-14.91%

(應力負號向下)

表 3-23：處置孔1之應力變化增幅表

處置孔1監測點		σ_v	σ_1	變化量 % (σ_1/σ_v)	σ_v	σ_3	變化量 % (σ_3/σ_v)
C	無襯砌 (MPa)	7.392	1.989	-73.10%	21.266	19.542	-8.82%
F	無襯砌 (MPa)	7.661	1.233	-83.91%	36.931	19.360	-90.76%
7	無襯砌 (MPa)	9.231	2.078	-77.49%	16.858	19.253	12.44%
8	無襯砌 (MPa)	7.875	2.018	-74.37%	17.946	19.239	6.72%
A	無襯砌 (MPa)	0.211	0.408	93.78%	25.837	22.834	-13.15%
B	無襯砌 (MPa)	4.823	0.361	-92.52%	23.956	22.815	-5.00%
D	無襯砌 (MPa)	2.215	0.561	-74.66%	26.115	22.772	-14.68%
E	無襯砌 (MPa)	1.368	0.416	-69.61%	26.069	22.930	-13.69%

(應力負號向下)

表 3-24：模擬深層岩體之參數性質

參數性質	材料 參數項目	岩盤 (花崗岩)	膨潤土 (MX-80)	回填材料 (30/70)
力學	密度[kg/m ³]	2,650	1,600	1,400
	彈性模數，E[GPa]	60	Bulk Modulus 17 [MPa]	Bulk Modulus 1.45 [Mpa]
	柏松比， ν [-]	0.25	0.3	0.3
	凝聚力， c_i [MPa]	0.15	7.5	7
	摩擦角， ϕ^i [°]	40.67	32.0	35.0
熱力	熱傳導係數， k [W/(m·°C)]	3.0	1.3	1.25
	比熱， C [J/(kg·°C)]	845	800	800
	熱膨脹係數， α_e [1/°C]	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
水力	滲透率， K [m ²]	6.9×10^{-19}	6.5×10^{-21}	0.5×10^{-17}
	孔隙率， f [-]	0.003	0.41	0.63

表 3-25：雙處置孔不同間距下於不同研究區之臨界安全深度表

臨界安全深度(m)		研究區域			
		頂拱區域		隧道側壁區域	
		H區	K區	H區	K區
雙處置孔 間距 (m)	25	2,690	3,032	2,102	2,270
	35	2,690	3,032	2,135	2,291
	40	2,690	3,032	2,141	2,294

表 3-26：不同覆蓋深度與研究區所對應之修正(折減)係數

覆蓋深度(m)	K區	H區
500	0.343	0.343
1,100	0.303	0.303
1,500	0.289	0.289
2,100	0.274	0.274
2,300	0.270	0.270
2,500	0.260	-

表 3-27：各研究區岩石材料參數表

參數	H 區	K 區
彈性模數 E [GPa]	33.5	37.5
柏松比 ν	0.21	0.26
密度 ρ [kg/m ³]	2,495	2,545
凝聚力 c [MPa]	30	27
摩擦角 ϕ [°]	52.5	48.8
滲透係數 k [m/s]	6.0×10^{-6}	8.0×10^{-6}
孔隙率 N [%]	2.25	1.85

資料來源：摘自潘國樑(2007)

表 3-28：緩衝材料之氣體突破壓力試驗結果

No.	突破壓力 第1次試驗 [MPa]	突破壓力 第2次試驗 [MPa]
1	8.88	8.14
2	0.60	0.59
3	0.62	0.65
4	3.59	3.15
5	1.64	1.70

資料來源：摘自Tanai et al.(1999)

表 3-29：相同試體之水力傳導係數試驗結果

	突破壓力 [MPa]	水力傳導係數 [m/s]
第1次試驗	1.20	3.64×10^{-12}
第2次試驗	1.20	3.62×10^{-12}
第3次試驗	1.16	3.03×10^{-12}

資料來源：摘自Volckaert et al.(1995)

表 3-30：初始含水量試體於不同溫度環境下之體積收縮量

環境設定	體積收縮量[%]	
	日興土	MX-80膨潤土
常溫乾燥皿	2.20	5.50
常溫乾燥7日再以60 °C 乾燥	2.80	5.10
常溫乾燥7日再以100 °C 乾燥	2.30	5.80
100 °C 乾燥	2.27	5.70

資料來源：摘自吳冠漢(2004)

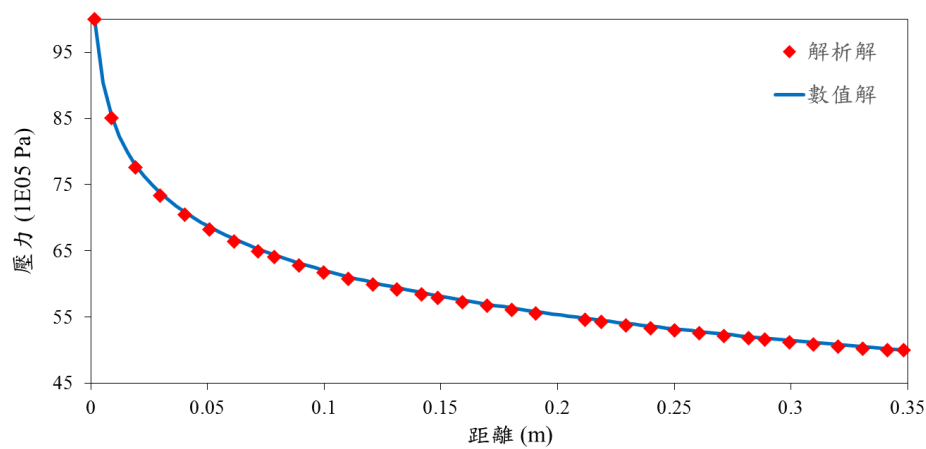


圖 3-61：地下水流解析解及數值解驗證結果

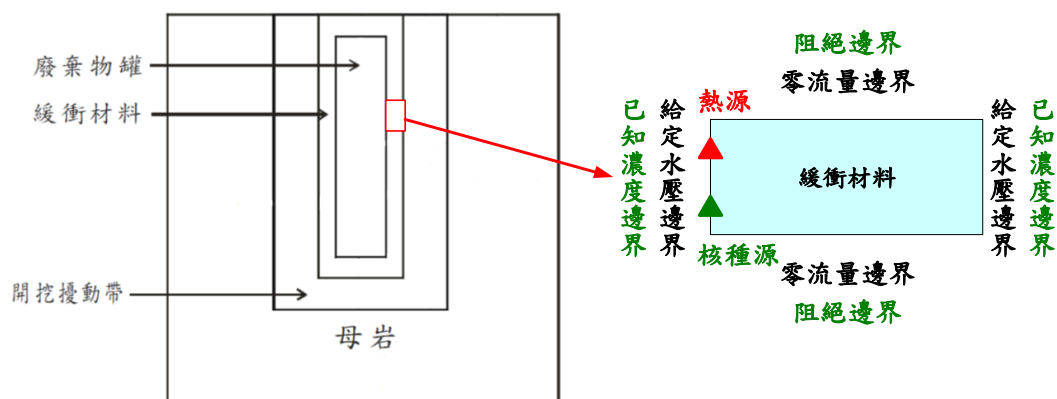


圖 3-62：緩衝材料一維概念模型示意圖

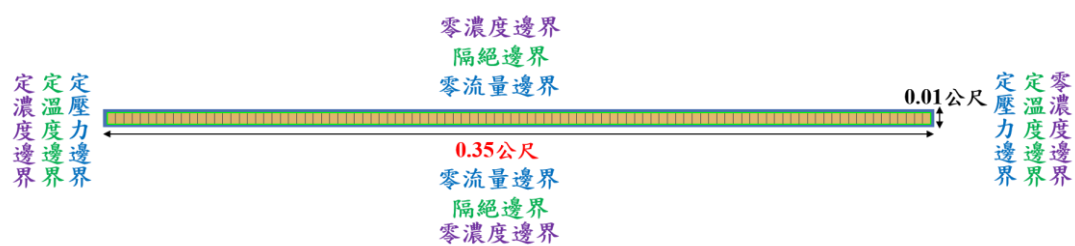


圖 3-63：熱-水-化耦合概念模型與邊界條件設定

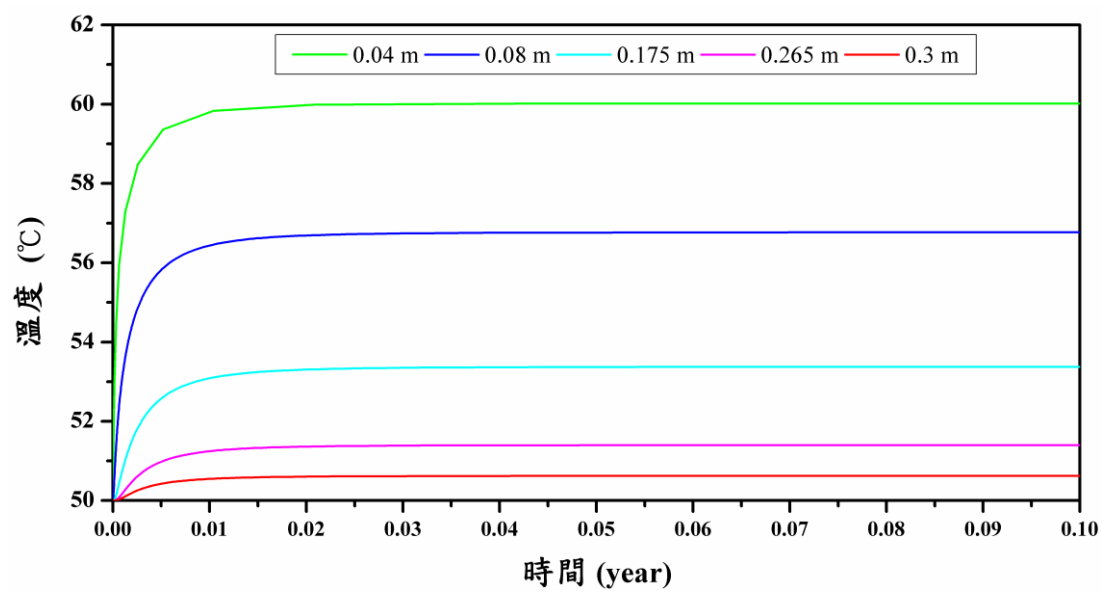


圖 3-64：緩衝材料溫度模擬結果

圖例之數字表距廢棄物罐距離

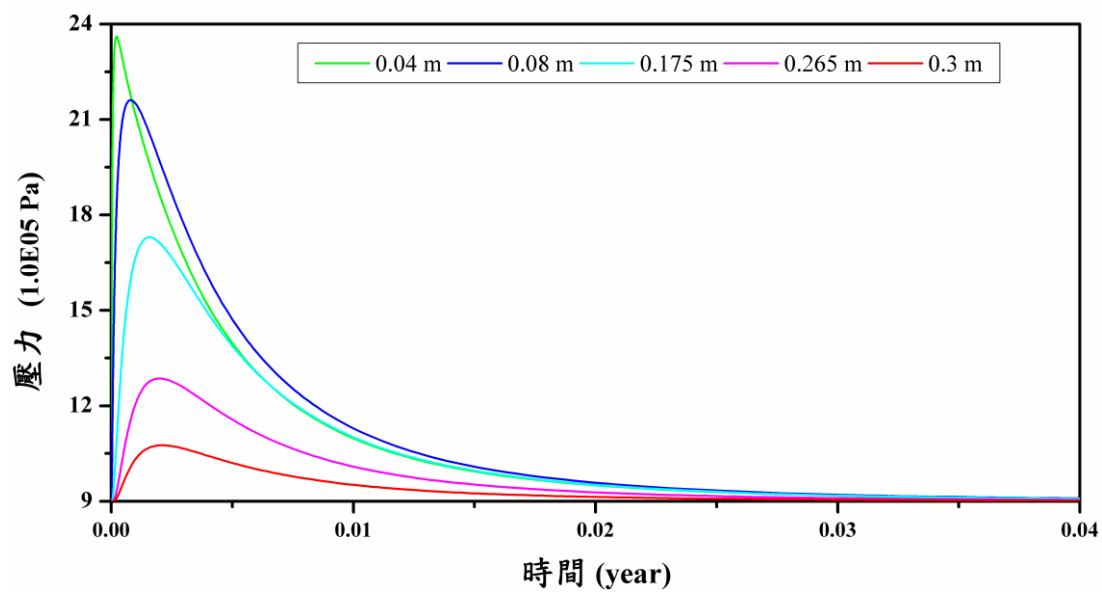


圖 3-65：緩衝材料壓力模擬結果

圖例之數字表距廢棄物罐距離

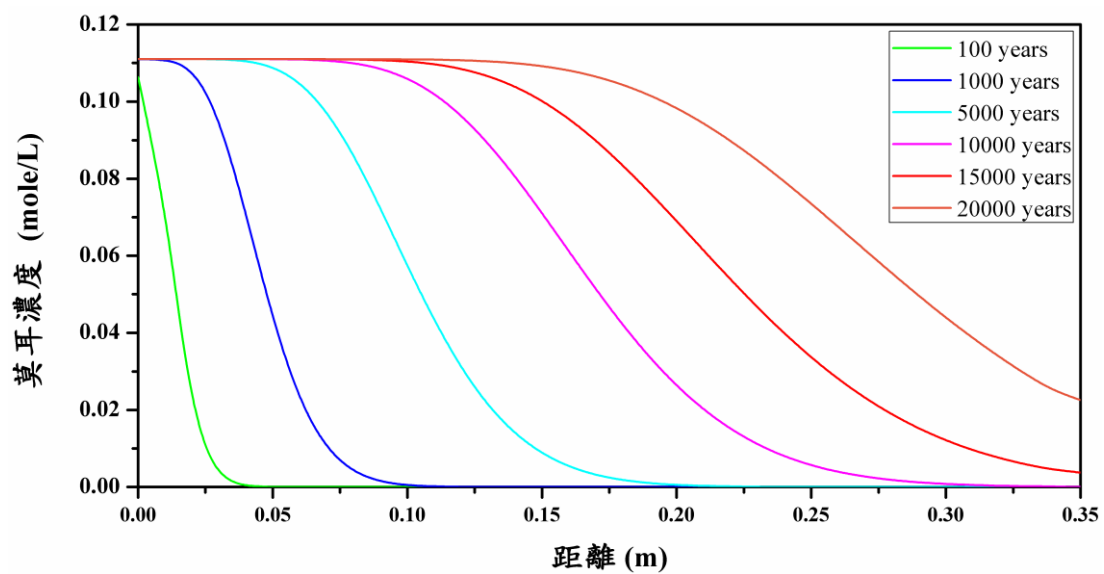


圖 3-66：I-129於緩衝材料中傳輸模擬結果

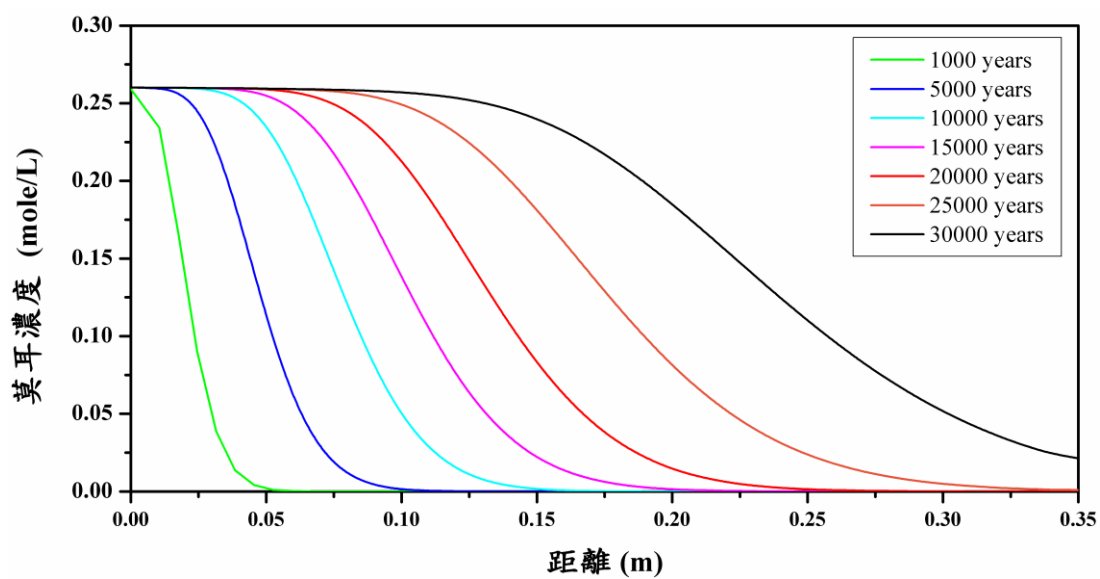


圖 3-67：Cs-135於緩衝材料中傳輸模擬結果

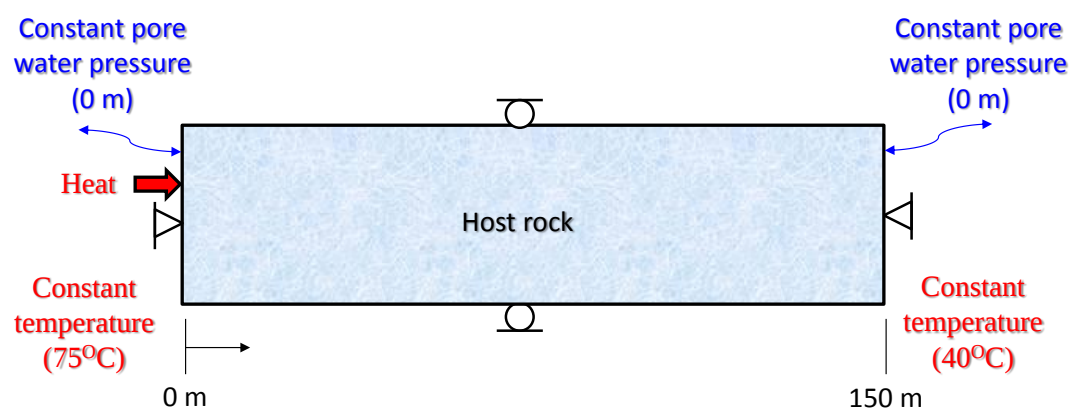


圖 3-68：熱-水-力耦合分析概念模式與邊界條件

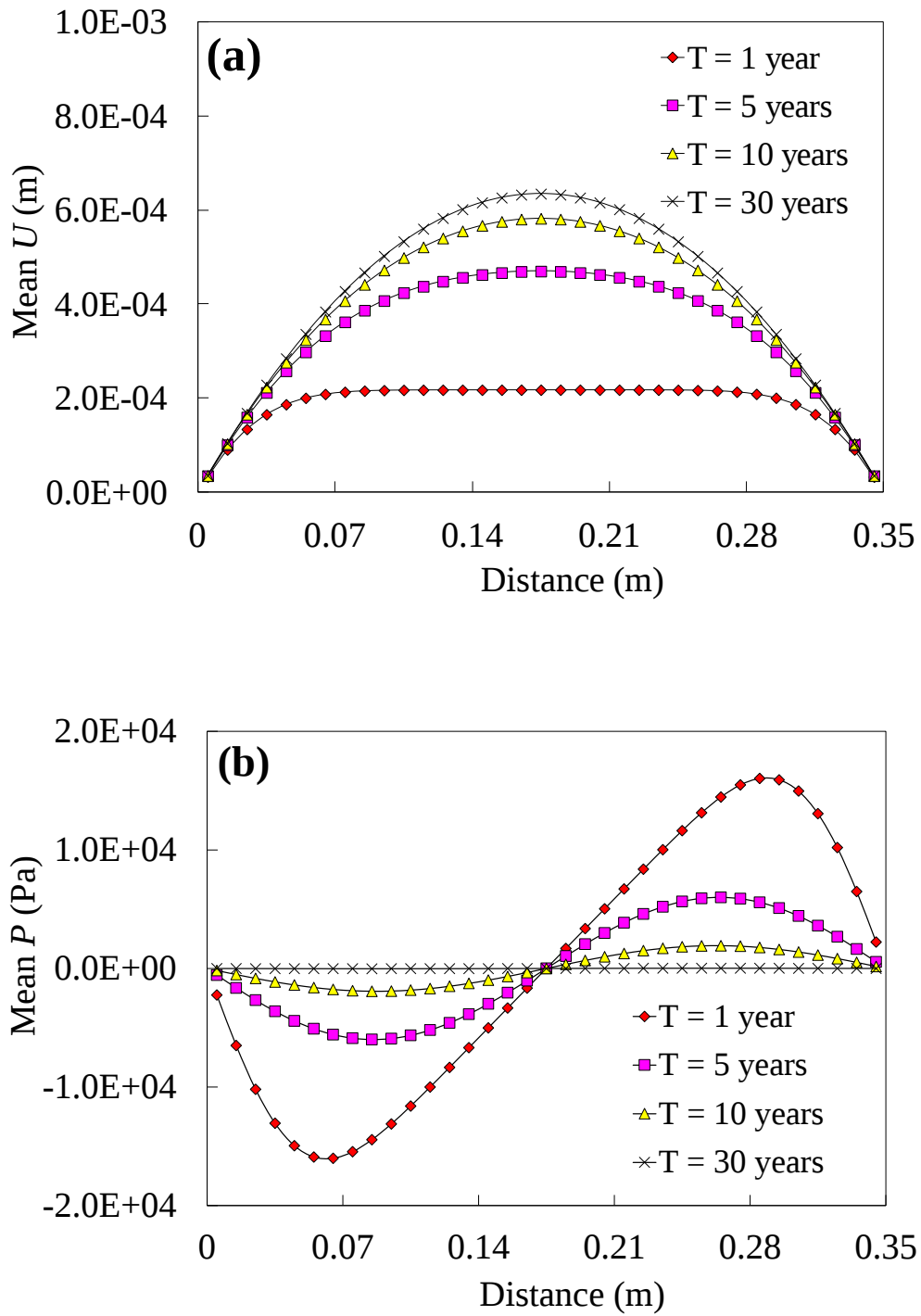


圖 3-69：近場緩衝材料的熱-水-力耦合模式

(a)位移場與(b)水壓場的數值結果

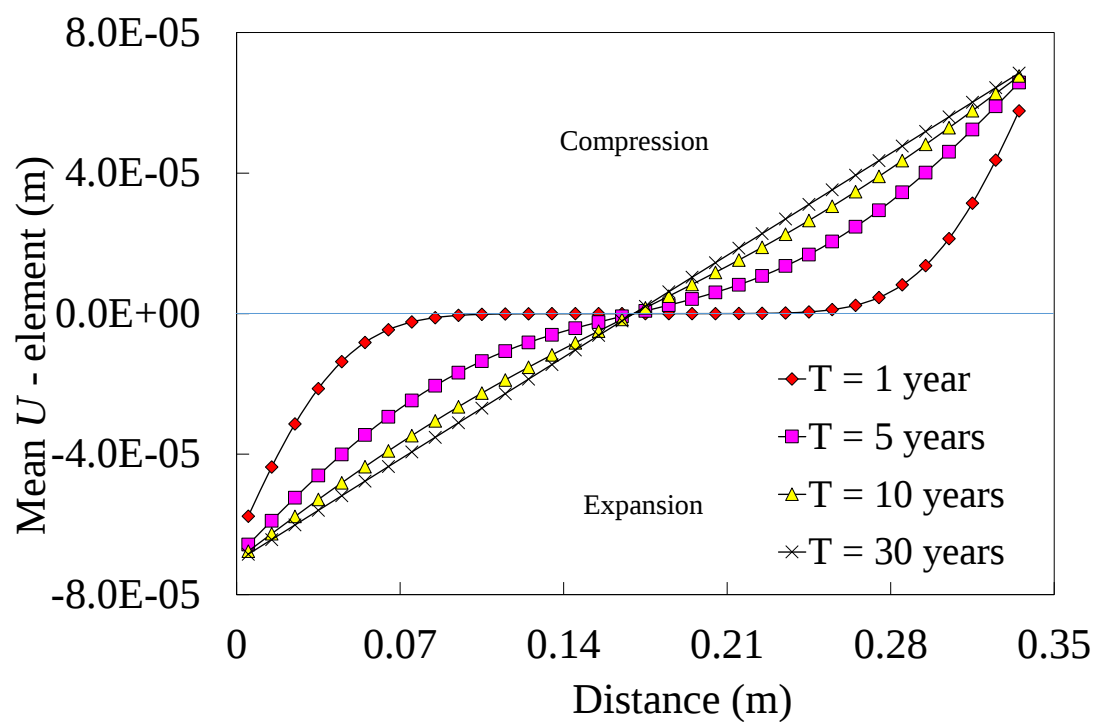


圖 3-70：近場緩衝材料數值網格變形分布圖

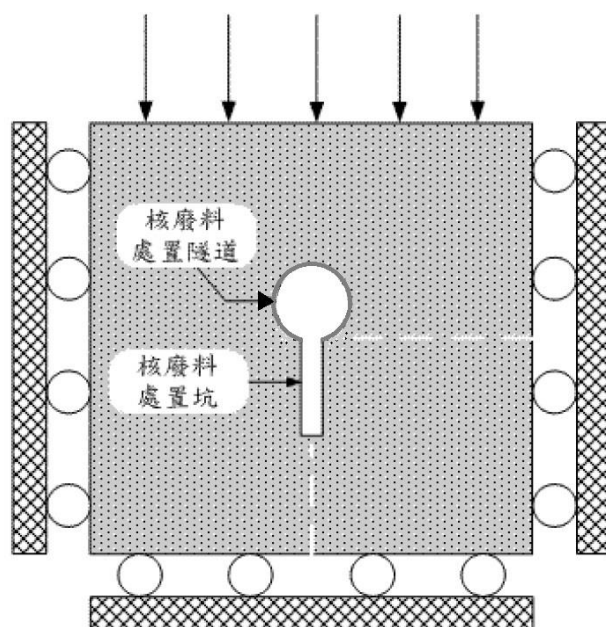


圖 3-71：FLAC^{3D}網格邊界束制示意圖

資料來源：摘自游創博(2013)

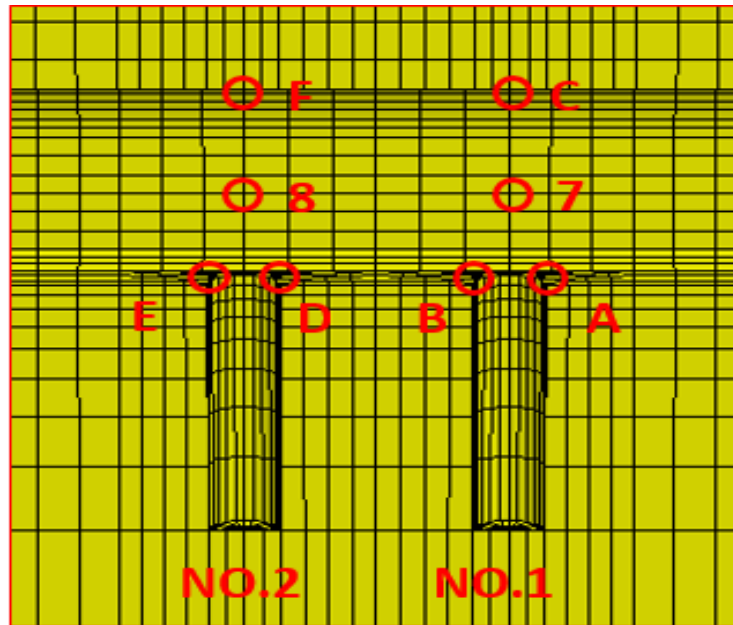


圖 3-72：監測點位置圖

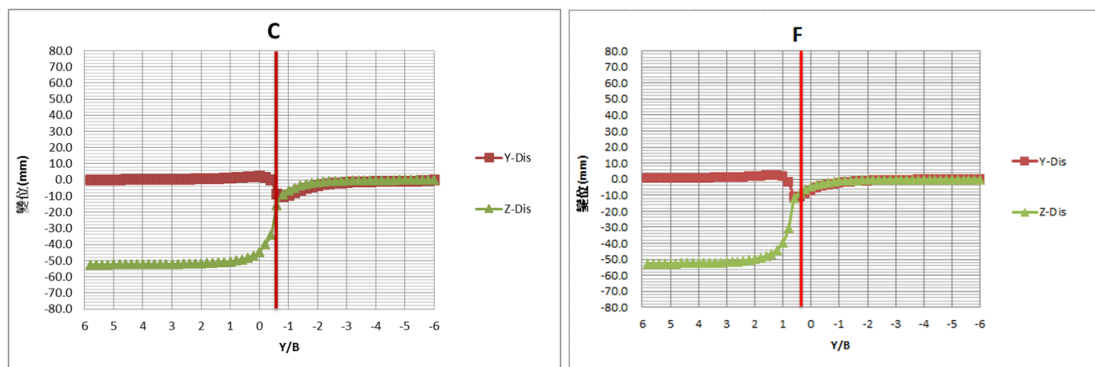


圖 3-73：主隧道掘進之頂拱處監測點C,F之掘進應變曲線

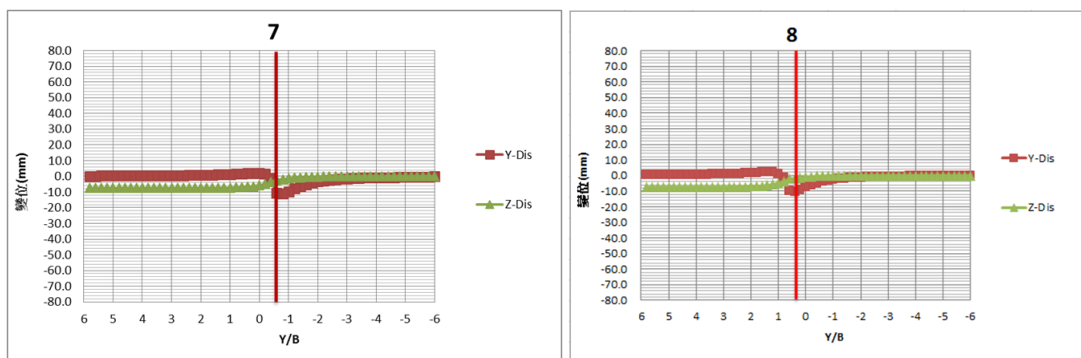


圖 3-74：主隧道掘進之側壁處監測點7,8之掘進應變曲線

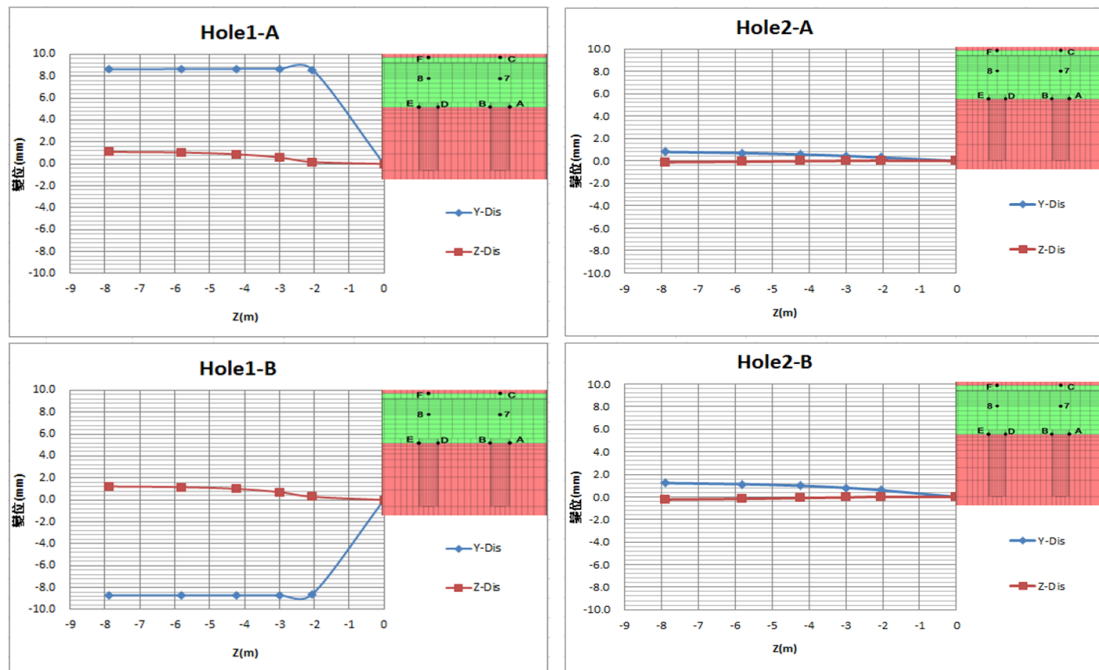


圖 3-75：處置孔掘進之仰拱處監測點A,B對處置孔1,2之掘進應變曲線

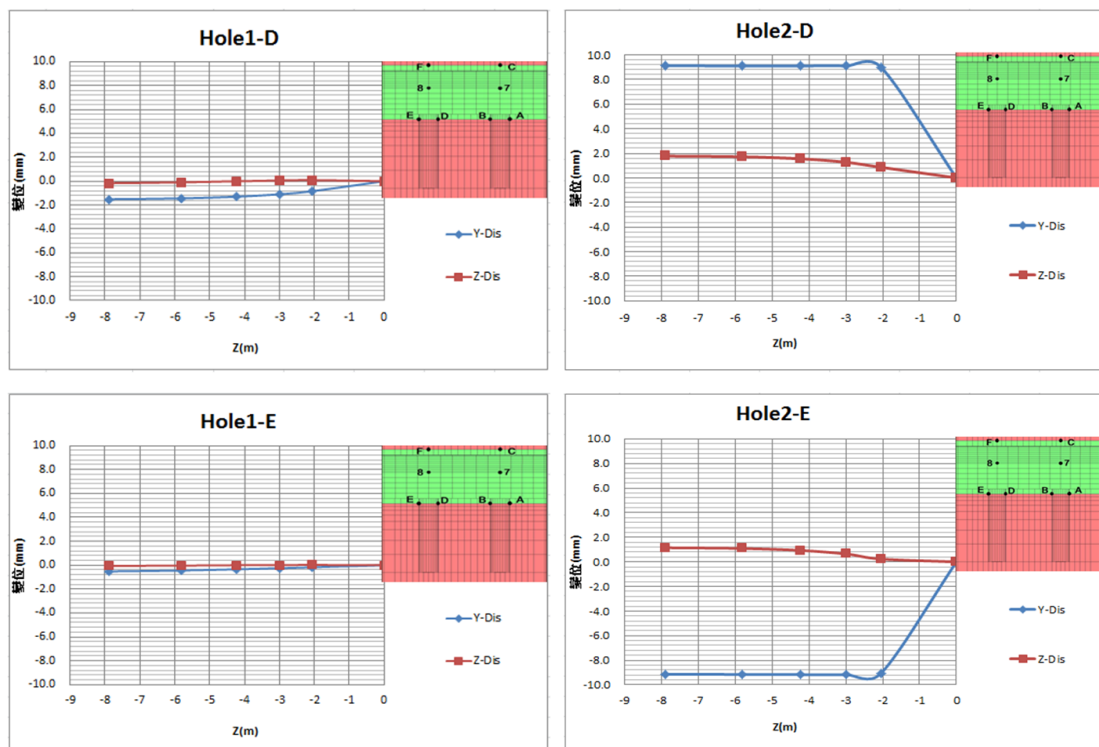


圖 3-76：處置孔掘進之仰拱處監測點D,E對處置孔1,2之掘進應變曲線

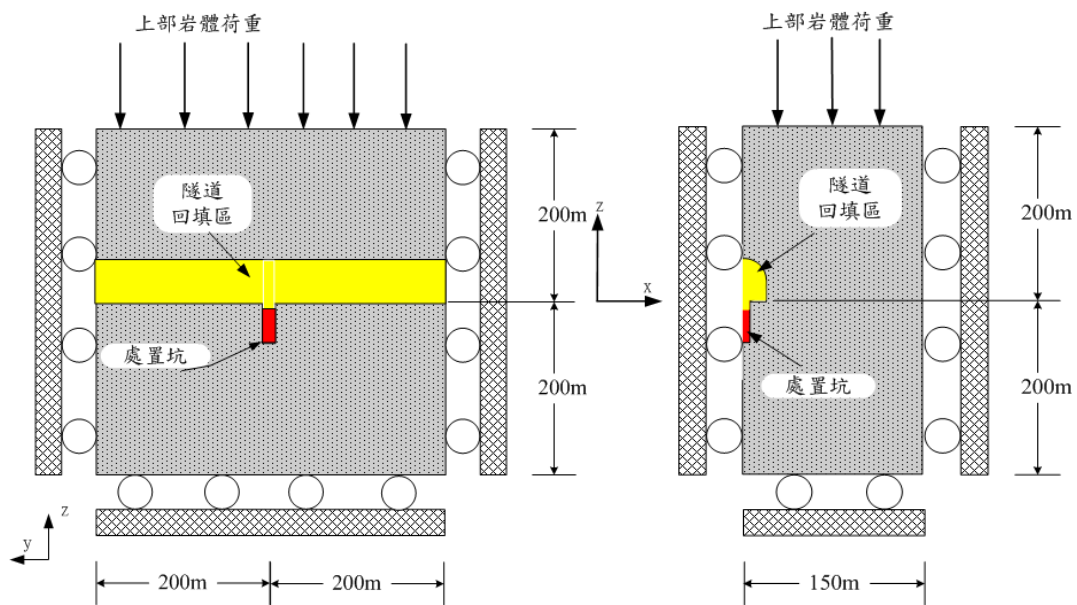


圖 3-77：FLAC^{3D}網格邊界束制示意圖

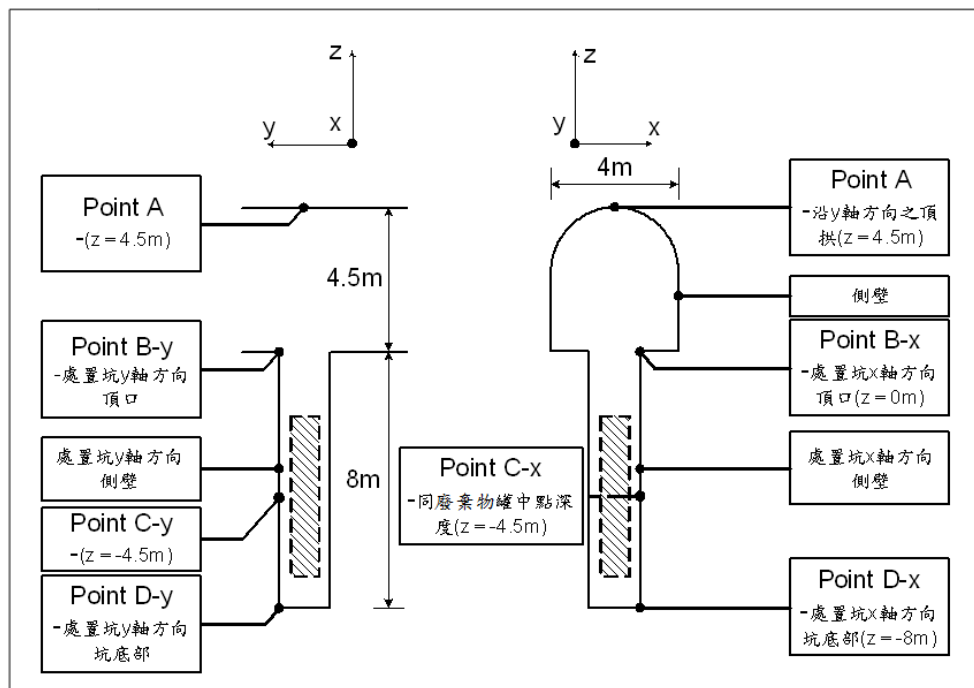


圖 3-78：處置孔中各位置簡示

註1： Point E為雙處置孔及雙處置隧道於高程 $z = -4.5$ m時之間距中點。

註2： Point E-x 表示該點位於x-z平面。

註3： Point E-y 表示該點位於y-z平面。

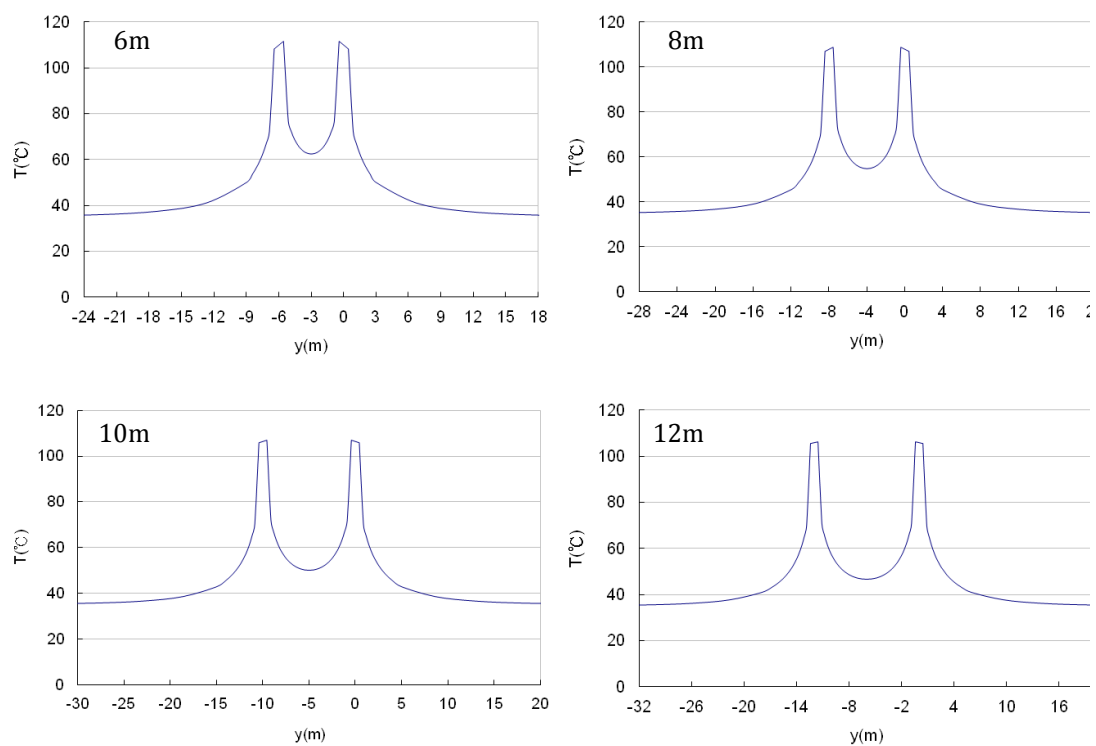


圖 3-79：不同間距雙處置孔溫度與距離關係(1.5年)

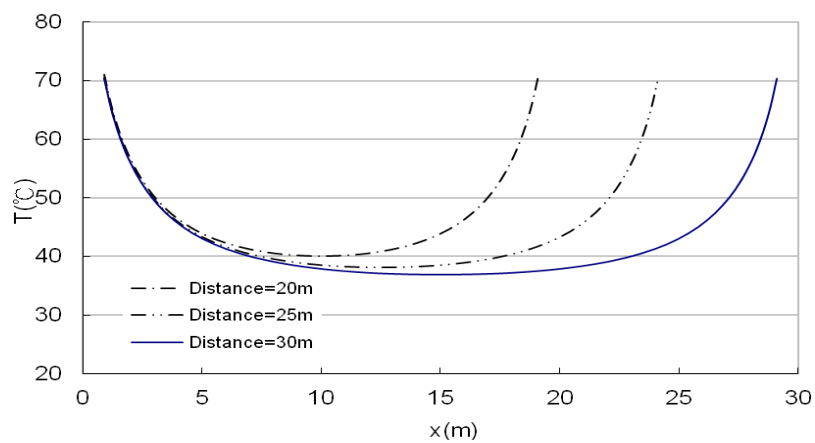


圖 3-80：不同間距之雙處置隧道溫度與距離關係(1.5年)

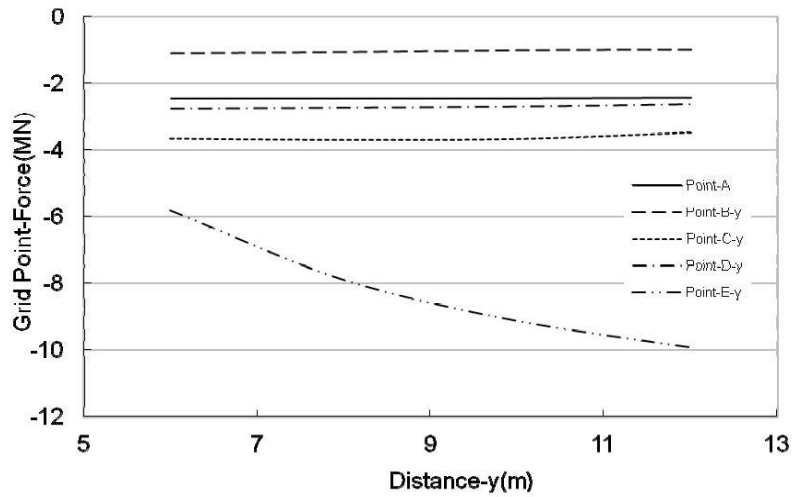


圖 3-81：不同間距雙處置孔與平行y軸之水平力關係圖

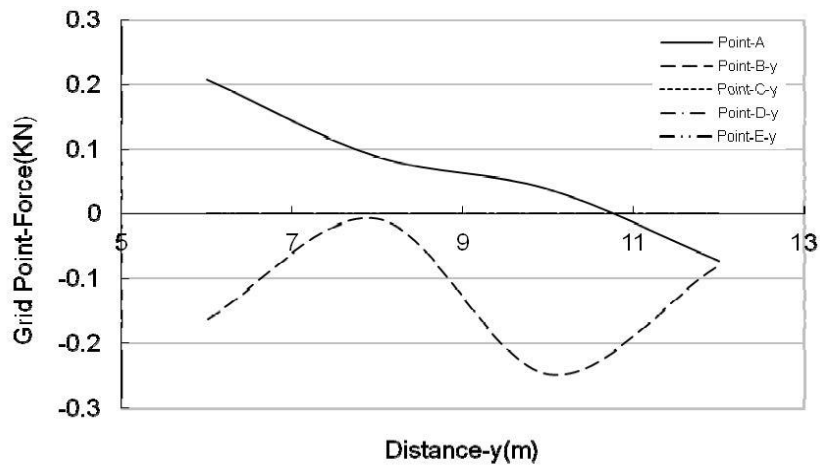


圖 3-82：不同間距雙處置孔與平行y軸之水平力關係圖

註：Point-C-y、Point-D-y、Point-E-y與縱座標原點共線之情況。

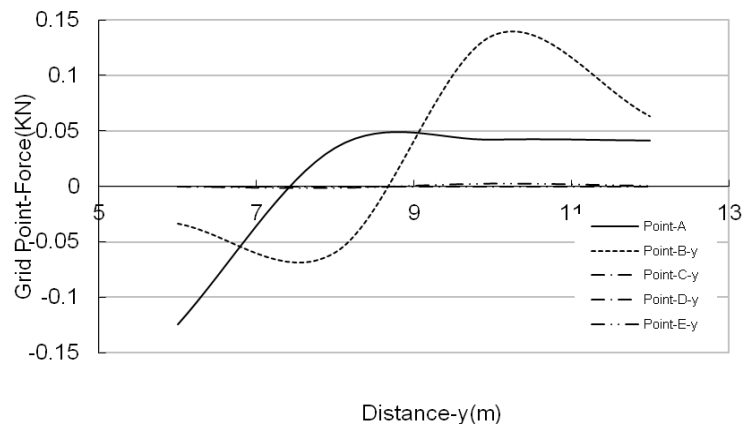


圖 3-83：不同間距雙處置孔與垂直力關係圖

註：Point-C-y、Point-D-y、Point-E-y與縱座標原點共線之情況。

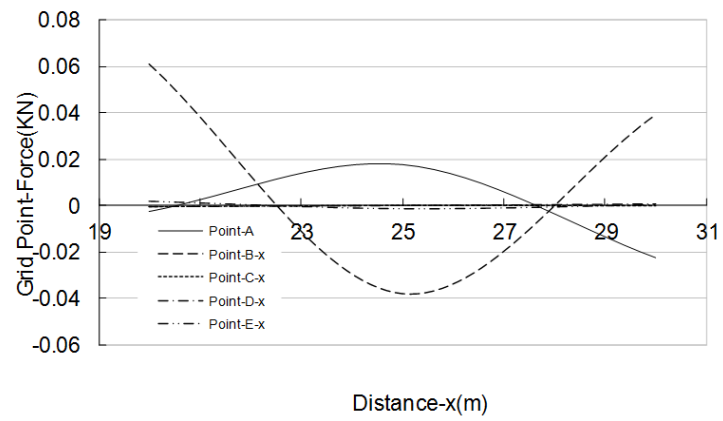


圖 3-84：不同間距雙處置隧道與垂直力關係圖

註： Point-C-y、Point-D-y、Point-E-y與縱坐標原點共線之情況。

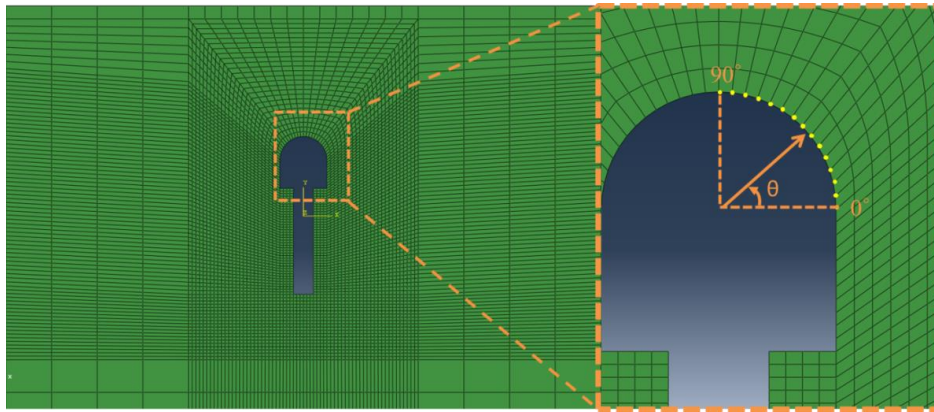


圖 3-85：頂拱區域角度定義示意圖

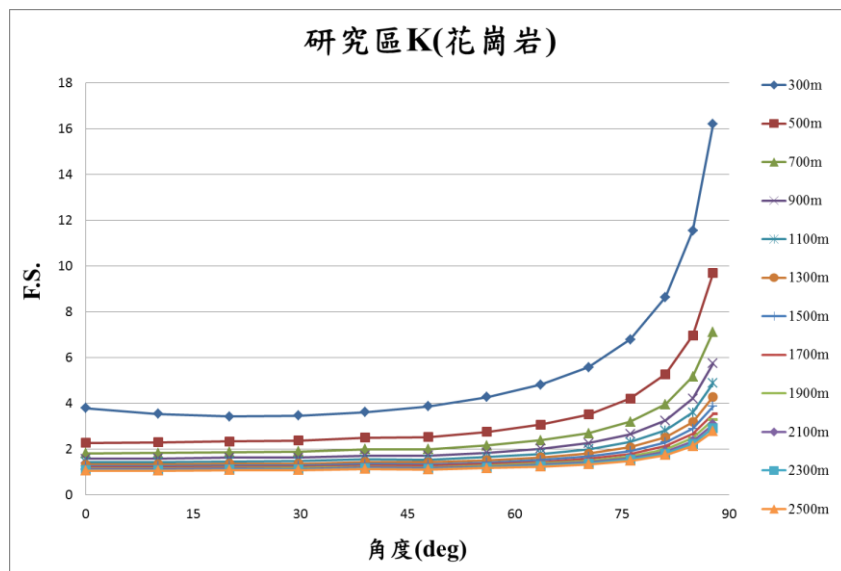
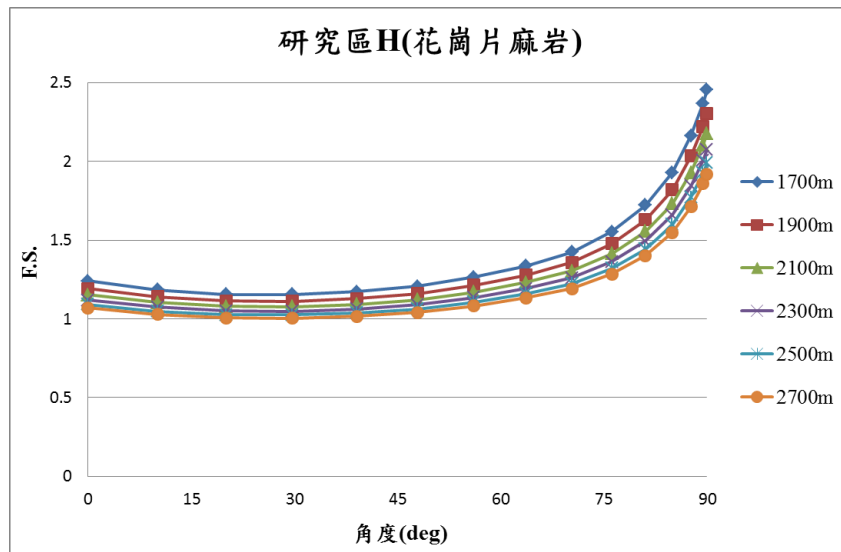


圖 3-86：H區與K區之頂拱區域在不同覆蓋深度下對安全係數vs頂拱角度

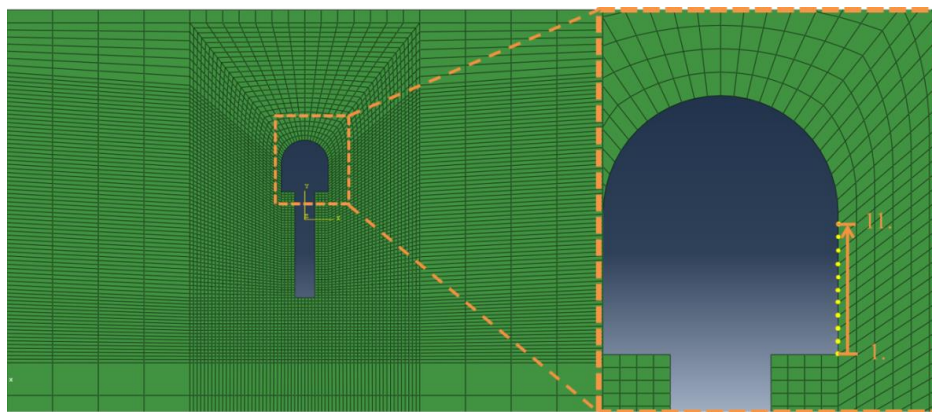


圖 3-87：隧道側壁區域各點位定義示意圖

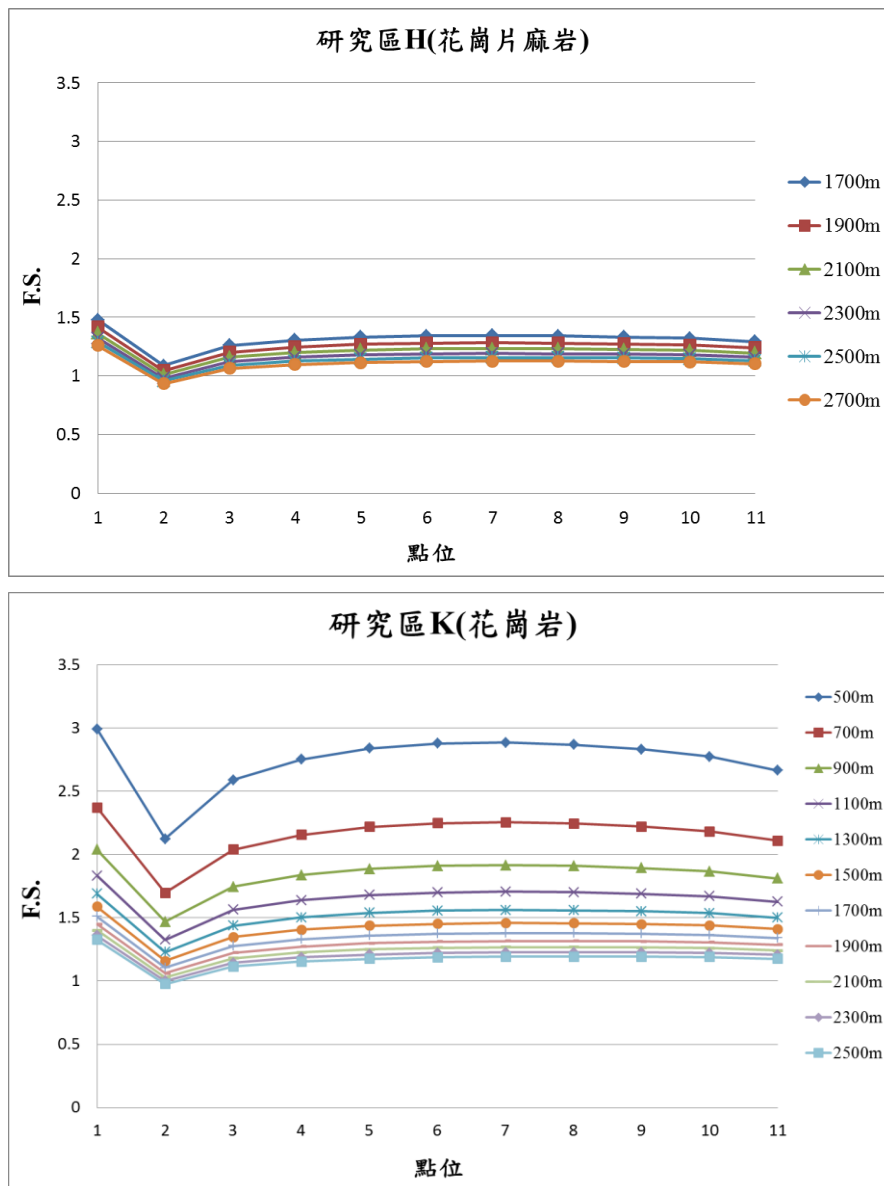


圖 3-88：H區與K區之隧道側壁區域在不同覆蓋深度下對安全係數vs側壁點位

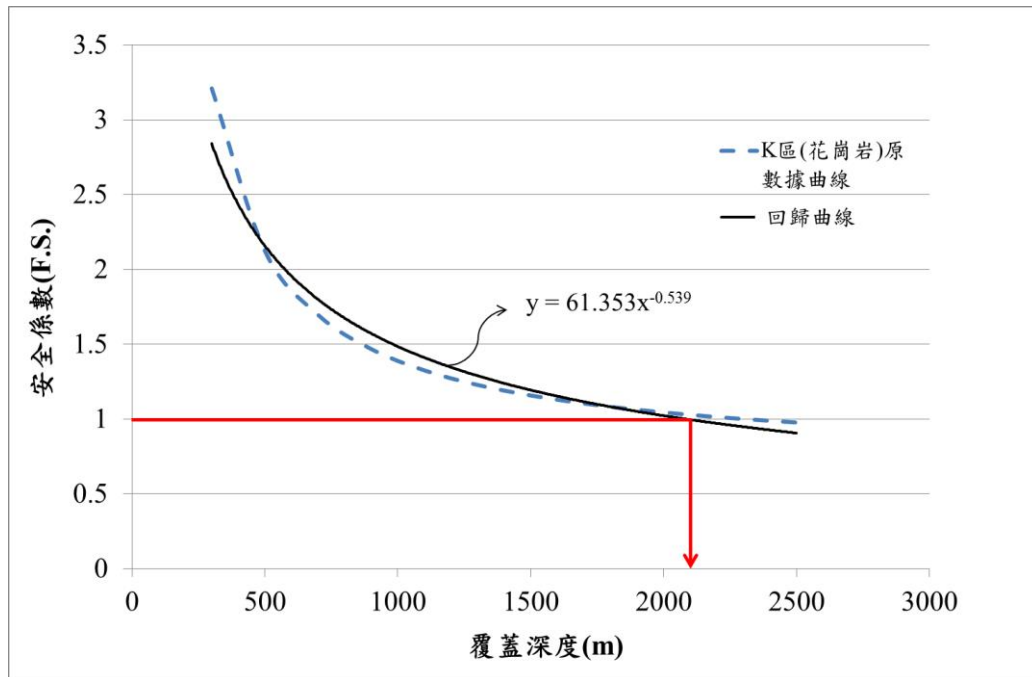
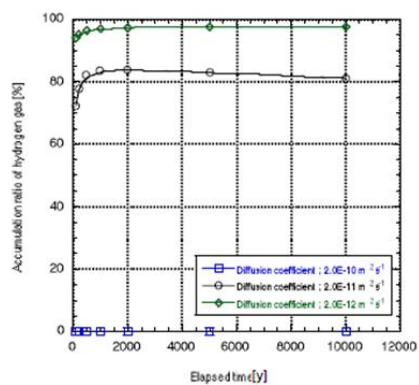
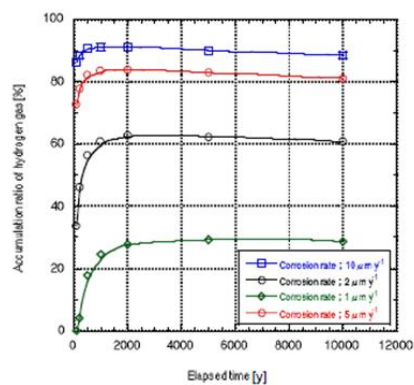


圖 3-89：臨界安全深度定義示意圖



(a) Corrosion rate fixed at $5 \mu\text{m y}^{-1}$



(b) Diffusion coefficient fixed to $2 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

圖 3-90：廢棄物罐及緩衝材料間之氫氣累積量

註：考慮處置深度1,000 m及水平置放條件

資料來源：摘自JNC(2000b)

3.2.8. 建造/運轉/封閉技術

處置設施建造/運轉/封閉技術須於既定時程完成，各階段須環環相扣，為使計畫得以順利進行，故應事先進行進行工作項目之研究，了解國內人員機具施作能量，以利後續擬定完整工程計畫。日本H12報告在此章節主要在說明：處置設施在建造、運轉與封閉各階段的主要作業內容(JNC, 2000a)。

本章節雖在103年工作計畫書無規劃實質工作項目，但在年度執行期間仍有進行部分資訊的分析，以下即為103年度本項目執行成果的整理。

3.2.8.1. 建造階段

日本H12報告此節主要在說明：處置設施各坑道可能採用的施工方法、建造可能遇到且須特別注意的擾動現象，以及對這些現象的預測方法與對策(JNC, 2000a)。

處置設施初期建造時程通常約在5年左右，隨後配合每年處置用過核子燃料之速度，逐年進行地下處置隧道之擴挖工程。國際上，如瑞典(Stripa礦場、Äspö硬岩實驗室)、芬蘭(Olkiluoto)、日本(東濃實驗設施)及瑞士(Mont Terri、Girmsel岩石實驗室)等國家，所採用之施工方法主要為鑽炸工法(drilling and blasting method)與隧道鑽掘機工法(tunnel boring machine method, TBM)。

參考處置概念係以鑽炸法或機械鑽掘作為豎井、運轉隧道與處置隧道之施工方法，處置孔則以機械鑽掘方式較可減少開挖擾動。瑞典經驗顯示處置孔以機械式垂直鑽掘1.75 m的直孔，在岩壁所產生新裂隙不超過10 cm距離，但此距離須加上彈塑性應力重新分布的影響。而鑽炸法所造成的開挖擾動帶，在處置隧道頂部及側面產生約30 cm，在底部則產生約0.8 m至1.5 m之開挖擾動帶。開挖擾動帶將使隧道軸向水力傳導係數增加約100至1,000倍，而其外應力重新分布帶則增加約10倍。建造及運轉期間必須維護隧道的穩定及控制地下水滲流，可

能採行支保、噴凝土與岩釘等支撐措施，並對含水裂隙進行灌漿處理。此外，通風與排水亦為施工與運轉期間必備之重要措施。

3.2.8.2. 運轉階段

日本H12報告此節主要在說明：廢棄物包件從接收到置放前的運輸概念和廢棄物包件的置放概念(JNC, 2000a)。

處置設施估計每年約有處置100個廢棄物罐之效能，依所有需處置之用過核子燃料數量，初步假定運轉時間約40年至50年。地下處置設施在運轉期間之處置作業概念假定如下：

- (1) 廢棄物罐經由豎井電梯運抵500 m深的地下設施，由地下控管中心以遙控作業方式對廢棄物罐進行登錄與檢視。
- (2) 廢棄物罐視情況以軌道方式移轉到暫貯區域；或直接移轉到輪形運輸車輛上，直接送往處置區電腦指定的處置孔進行處置。
- (3) 處置孔預先完成底部與側壁緩衝材料之置放作業。
- (4) 運輸車輛將廢棄物罐運抵處置孔上方，定位後將廢棄物罐安置處置孔中。
- (5) 封填置入廢棄物罐之處置孔，並加蓋板防止膨潤土脹溢。
- (6) 處置隧道暫不回填，保留可回收機制。

3.2.8.3. 封閉階段

處置設施完成全部用過核子燃料處置後，依法規要求進行必要監管與除役措施。取得許可後以進行封閉作業。封閉作業主要為回填地下開挖運轉隧道與作業區，並另對天然或隧道開炸所造成岩石力學與水文性質改變的重要地點加以補強，包括使用混凝土塊體阻隔等。這些措施有助於限制水流傳輸途徑並阻止人類侵入。

處置設施之回填與封閉措施假定如下：

- (1) 逐次拆除運輸軌道與管線設備。
- (2) 各處置隧道以膨潤土及岩屑適當配比所組合成之回填材料，分層夯實回填。
- (3) 回填時破碎帶以灌漿方式封阻或以混凝土封阻。

- (4) 處置隧道口以混凝土封阻。
- (5) 運轉隧道與連通設施(豎井)，以適當設計之回填措施與材料加以回填。

3.2.9. 處置場營運管理技術

由於處置設施開挖、運轉或因潛在的自然現象等造成的地質環境變化，必須保持在基本的設計要求內，以確保處置設施可維持長期的隔離性能及安全性。為保證處置設施的設計需求之安全性，必須透過處置設施管理進行驗證。日本H12報告在此章節的論述為：封閉後確保安全的原則、管理的目的及考量、管理的主要內容，包括處置設施與工程障壁在設計、製造、安裝、建造等方面之品管、工程障壁周圍的地質環境監測、每個階段的監測項目與要求等(JNC, 2000a)。

參考日本H12報告(JNC, 2000a)的內容，針對處置設施營運管理程序的主要項目有：

- (1) 工程障壁及處置設施的設計、製造、裝設及建造之品質控制；
- (2) 工程障壁及處置設施建造前、建造期間及處置設施建造後之地質條件監測。

對工程障壁及處置設施周圍，進行一定程度的監測活動，可確保處置設施在建造階段或廢棄物裝設階段的擾動狀況，是否在可接受的安全範圍內，相關監測設備需設計成不影響工程障壁及地質圈之長期隔離性能。

3.3. 安全評估

有關國內用過核子燃料處置的功能/安全評估，歷年來依據技術發展，已初步具備用過核子燃料深層地質處置之處置設施功能/安全整合性評估所需的相關基礎技術，並於2009年完成「SNFD2009報告」之重要里程碑。本分項安全評估屬於現階段「功能/安全評估技術建立」主軸之範疇，亦為「SNFD2017報告」中章節之一，為達成前述既定目標，將依期程進行安全評估相關工作，2012年(民國101年)度成果為進行地質處置系統特性、生物圈模式、變異情節、案例分析、不確定性分析等相關研究。

3.3.1. 潛在處置母岩特性調查與評估階段安全評估的範疇及目標

日本H12報告主要說明：安全評估的目的有3部分：(1) 建立可信賴的安全評估技術，以運用於日本各種不同的地質環境與處置設施設計；(2) 評估日本進行安全地質處置的可行性；(3) 提供未來選址與發展安全標準(safety criteria)的技術支援(JNC, 2000a)。

原子能委員會針對SNFD2017報告，要求應達成下述3項階段性目標(2011年2月22日會議紀錄)：

- (1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置；
- (2) 地質處置工程技術能力是否完備；
- (3) 地質處置設施長期安全性之評估。

基於上述本階段的計畫目標，本年度報告之安全評估將著重於運用現階段研究區的調查成果、現階段的處置設施設計概念、工程障壁系統的功能要求概念，以及處置設施可能面對的各種情節、不確定性因素等，進行安全評估，以期能達到下述目標：

- (1) 建立可信賴的安全評估技術以運用於國內不同的地質環境和處置設施設計；
- (2) 評估國內進行安全地質處置的可行性；
- (3) 提供國內未來選址與發展安全標準的技術支援。

3.3.2. 安全評估方法

欲對處置場全系統之安全評估進行有系統分析，乃針對近場、遠場及生物圈等3個子系統程式，建立一套全系統評估程式架構，可以有系統的依序連結3個子系統程式，並處理評估程式之輸出、入介面問題。此外，也在全系統評估程式架構中，也建立參數取樣子系統程式及不確定性與參數敏感度分析子系統程式，使得此全系統評估程式可以對處置場進行全系統之機率式安全分析/評估，以瞭解處置場全系統安全分析結果之不確定範圍及各參數對安全分析結果之敏感程度，並將分析結果回饋給處置場設計人員及場址、參數之調查人員，做為調整未來工作方向之參考，國內相關法規亦規定處置場之安全分析，必須進行輻射風險分析。

本章節於103年工作計畫書中，並無規劃實質工作項目，經參考日本H12報告之內容，規劃於104年至105年期間將陸續進行下列4項工作，並作為撰寫SNFD2017報告之內容。

(1) 相關法規

國內在「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」中相關內容如下：

- (a) 第三條規定：「高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式」；
- (b) 第八條規定：「高放處置設施應採多重障壁之設計」；目前國內的用過核子燃料最終處置參考概念依據國際共識，採用多重障壁深層地質處置方式，符合國內相關法規的要求。
- (c) 第九條規定：「高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外一般人所造成之個人年有效劑量不得超過0.25毫西弗」；
- (d) 第十條規定：「高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外關鍵群體中個人所造成之個人年風險，不得超過一百萬分之一」。

(2) 安全評估案例的建置方法

日本H12報告在安全評估案例的建置方法中主要的說明內容為：安全評估案例的發展及處理，描述相關特徵(features)、事件(events)和作用(processes)的發展、定義地下水情節[基本情節(base scenario)與擾動情節(Perturbation scenario)]及隔離失效情節，以及評估計算時採用序率(stochastic)的蒙地卡羅(Monte-Carlo)模擬技術和定率分析技術(JNC, 2000a)。

本項目非103年度之預定工作項目，SNFD2017報告的內容將待104年至105年之情節分析結果，根據分析工具再說明採用的模擬與分析技術，將相關成果呈現於SNFD2017報告中。

(3) 模式建構

模式建構在說明安全評估所使用的工具，日本H12報告在安全評估的方法中有針對模式建構進行說明，主要內容摘述為：「安全評估分析過程，呈現不同分析系統中主要考量的核種外釋機制，並針對這些機制所使用的分析程式，與各程式之間的連結關係」(JNC, 2000a)。

本項工作將安排104年中完成，模式之間的關係與分析流程於SNFD2017報告再進行說明。

(4) 安全評估可信度

本項主要針對如何建立安全評估可信度，進行策略或方的說明。在日本H12報告主要說明：安全評估並非對地質處置系統未來演化的準確描述，也沒有必要去驗證及瞭解每個FEPs的細節。為了日本複雜性地質環境且要建立結果的信心，在H12報告中強調是近場論述，且因地質圈相當大的不確定性，而對地質圈做了相當保守(悲觀)的陳述。另一個重要的策略是藉由對近場環境及物理-化學理論發展的掌握，經由安全評估可信度章節內容中的資料庫建置、天然類比研究，以及其他安全報告的比較，來加強安全評估的信心(JNC, 2000a)。

本項目因僅為對策略或方法的說明，所以，在103年度並無實質的工作成果；但在104年預定進行以綜合說明方式，說明建立安全評估可信度的具體措施，包括情節、模式、模組及資料庫建置，

天然類比研究，評估報告比較等內容，並運用在SNFD2017報告對應的章節內容中。

3.3.3. 處置系統與功能

日本H12報告有關本章節的內容，主要是針對安全評估的目的，定義一個參考處置系統，包括：維持至少10萬年的穩定地質環境、處置場配置(含處置坑道、處置孔、運轉隧道、豎井等)、工程障壁系統及生物圈環境。該報告亦提到地質處置系統，可提供以下安全功能(JNC, 2000a)：

- (1) 穩定地質環境可使工程障壁系統免受物理/化學的擾動；
- (2) 工程障壁系統(含廢棄物體)可對放射性核種提供長期的物理/化學的遏制；
- (3) 放射性核種的遷移會受到地質圈的物理/化學過程而遲緩。

SNFD2017報告將以處置系統特性與處置系統功能二方面，來說明在調查階段的所考量處置系統及其功能。103年針對離散裂隙岩體進行處置系統傳輸功能之探討，並作為探討核種在地質圈遷移安全功能的分析基礎。

此外，為充實SNFD2017報告在處置系統與功能的內容，於104年的執行年度中規劃進行：

(1) 處置系統特性

針對國內地質處置系統特性從安全評估的觀點依序分析地質環境、處置設施、地質與生物圈介面及參考系統之處置系統特性。

(2) 處置系統功能

延續103年之工作，進行：(a)離散裂隙與連體量模式分析比較，量化升尺度水文參數；(b)裂隙網路統計結構參數敏感度分析及岩層等效水力參數推估，作為核種傳輸分析時的重要依據。

3.3.3.1. 處置系統特性

日本H12報告針對該國之處置系統特章節之內容，主要在說明：地質處置系統的概念圖及考量的系統元件(JNC, 2000a)。

國內SNFD2017報告的內容，將進行綜合說明地質處置系統的概念及考量的系統元件，針對國內地質處置系統特性分析，從安全評估的觀點依序來定義有關處置系統之特性。

3.3.3.2. 處置系統功能

本計畫於103年已針對核種在裂隙地質環境的進行研究，發展離散裂隙岩體水流模式參數升尺度技術。以下即說明103年度的工作成果：

岩層中的孔隙與裂隙是岩層中水體流動與污染傳輸計算的最小單元，當分析區域擴大時，以孔隙或裂隙尺度為基礎單元去分析水流與傳輸行為，除了大量的計算資源需求外，技術及經濟上都存在很大的困難性。本項工作之目的在以連續體的概念，運用其升尺度及等效參數特性，來分析大區域裂隙水流與污染傳輸問題，提昇遠場核種遷移功能評估技術。

3.3.3.2.1. 尺度與含水層參數關係

現地試驗資料的蒐集過程通常有其先後順序，低解析度(或大尺度)的資料，可用來定性描述區域概況。高解析度的量測與分析，依據所需由大區域範圍內，針對特定小區域範圍，選用相同或不同量測與分析方法進行量測，並推估高解析度之含水層參數。

3.3.3.2.2. 離散裂隙與連體模式間等效參數分析概念

含水層的水力傳導係數之升尺度問題，已有非常多的相關文獻討論，而最常使用的概念不外乎等效水力傳導係數，圖 3-91為水力傳導係數升尺度概念。小尺度的量測資料對於其較大尺度規模來說，可提供其點的資訊，由多處點的資訊結合後，可以建構大尺度水力傳導係數在空間中的分布(Zhang, 2009)。

本研究以數值模式作為分析工具，透過設定統計條件下的離散列分布，獲得對應之連體模式等效滲透率參數。滲透率是代表岩體材料特性，不會受到流體影響；反之，水力傳導係數則利用水作為流體所代表材料傳輸特性。

3.3.3.2.3. 離散裂隙網路網格生成模式

本研究開發離散裂隙網路網格生成模式，假設裂隙於岩體中生成時為橢圓平面，透過TOUGH2計算離散裂隙網路與連體模式滲透率關係。在模式建立過程需要使用的參數如下：

(1) 裂隙強度(fracture intensity)

本研究所採用的量測方式是二維裂隙強度，此方法是於岩體上先劃定量測範圍，量測在此範圍內裂隙長度，其計算公式，如圖3-92。故在野外量測岩石露頭時，需要先將岩體劃分為數個視窗，並且分別量測視窗內每條裂隙長度，以利於計算岩體裂隙強度。

(2) 裂隙方位與傾角量測

經由上述方法已經可以建立裂隙於岩體中合理個數，但是裂隙生成是因為岩體受力產生破裂，則各裂隙在破裂方位與傾角是必須符合統計結構，因此，在野外量測裂隙方位與傾角則更為重要。

(3) 決定岩體裂隙個數

本研究假定裂隙分布符合homogeneous Poisson model，此統計結構關係式可表示如下(Xu and Dowd, 2010)：

$$P(N_i = n) = e^{-\mu_i} \frac{\mu_i^n}{n!} \quad (3-8)$$

$$\mu_i = \lambda \cdot v_i \quad (3-9)$$

其中：

P 代表Poisson機率

N_i N_i 代表第*i*個區域的裂隙數目

λ 代表整體區域的Poisson分布平均值

V_i 代表第*i*個區域的體積

(4) 產生符合統計結構的裂隙中心

依據野外量測裂隙強度，計算符合Poisson分布統計結構的裂隙中心個數。

(5) 產生各裂隙圓盤長短軸、方位角與傾角

在此則需要透過裂隙強度量測出露裂隙長度，並於裂隙平面所量測的方位角與傾角，如此產生各裂隙符合統計結構之長短軸、方位角與傾角。

3.3.3.2.4. 離散裂隙網路網格生成測試案例

本研究透過以下測試案例，來展示本模式所生成複雜裂隙網路，內容包括模式重要參數設定、網格生成歷程與測試結果。

(1) 重要參數

進行離散裂隙網路網格生成前，須取得野外露頭裂隙分布資訊，或鑽井岩心分析中的裂隙強度、方位角、傾角與裂隙空間分布等資訊，本測試案例參數如表 3-31所列。

(2) 網格生成歷程與結果

假定母岩範圍為邊長2 m的正立方體(圖 3-93)。現今技術無法直接於野外測量裂隙 P_{32} ，本研究假設 P_{32} 為 2.0 m^{-1} ，計算此母岩範圍中共可生成56片裂隙。將超出母岩岩體外的裂隙圓盤去除，如圖 3-94。由於在生成網格時無法生成曲線，因此，必須透過多邊形近似橢圓的方式進行修訂，故本研究透過將橢圓上劃分多個節點的方式以構成近似橢圓的多邊形，並判斷內部裂隙是否相連通，再將無連通之裂隙刪除，僅保留連通之裂隙進行網格生成。在此案例中，去除13片未連接之裂隙，並對剩餘的43片裂隙進行網格生成，如圖 3-95所示。計算所有網格面積並求得模擬之裂隙強度 P_{32} 為 2.28 m^{-1} ，接近假設之 P_{32} 為 2.0 m^{-1} ，證實此方法是可行的。

3.3.3.2.5. 小結

- (1) 本研究可自動生成符合Poisson統計結構裂隙圓盤個數與空間分布。先建立XY平面裂隙橢圓圓盤，在經由每個橢圓方位角與傾角旋轉生成三維空間裂隙圓盤。
- (2) 本模式可經由空間裂隙，自動搜尋每片裂隙與模擬母岩邊界的交線，作為建立各個裂隙圓盤網格生成邊界，自動生成邊界內部初始網格。
- (3) 本模式可搜尋兩兩裂隙共線位置，並設定各裂隙共用共線上的節點並且建立關係，所生成之網格於計算裂隙水流與傳輸則透過此共線作為傳遞訊息交界。
- (4) 本項離散裂隙岩體水流模式參數升尺度技術開發研究，目的在以連續體的概念，運用其升尺度及等效參數特性，來分析大區域裂隙水流與污染傳輸問題，提昇遠場核種遷移功能評估技術。本項工作成果亦將提供SNFD2017報告中參考案例章節之應用。

表 3-31：離散裂隙網路網格生成測試例重要參數

Fracture parameter	value
Xmin/XMAX	0.0/2.0 m
Ymin/YMAX	0.0/2.0 m
Zmin/ZMAX	0.0/2.0 m
Fracture intensity	2.0 m ⁻¹
Dip direction(min/MAX)	96 ° /140 °
Dip(min/MAX)	16 ° /160 °
Avg. radius of ellipse	0.4 m
Aperture	1.0×10 ⁻³

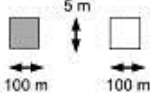
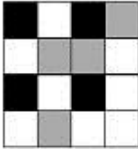
Scale		Conductivity	Simulation
Pixel scale (~100 sand grains)		not defined	none
Local scale (scaled-up pixel; local REV)		K (each K represents a local-scale, homogenous and isotropic porous medium)	Fully Heterogeneous Model
Global scale (a stratigraphic unit comprising of many local REV)		$K^* = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xz} \\ K_{zx} & K_{zz} \end{bmatrix}$ (global K^* is an equivalent conductivity for a stratigraphic unit; global K^* arises due to heterogeneity of local K)	Hydrogeologic Framework Models

圖 3-91：水力傳導係數升尺度概念

資料來源：摘自 Zhang et al.(2006)

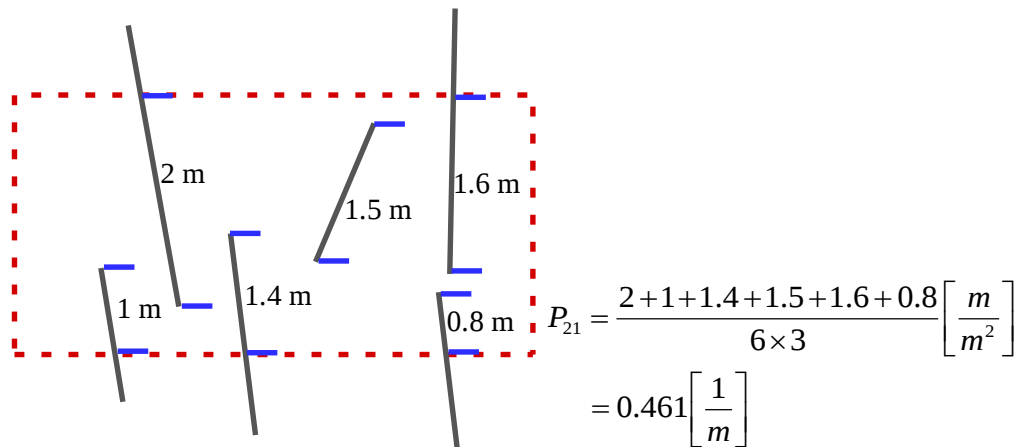


圖 3-92：二維量測裂隙強度示意圖

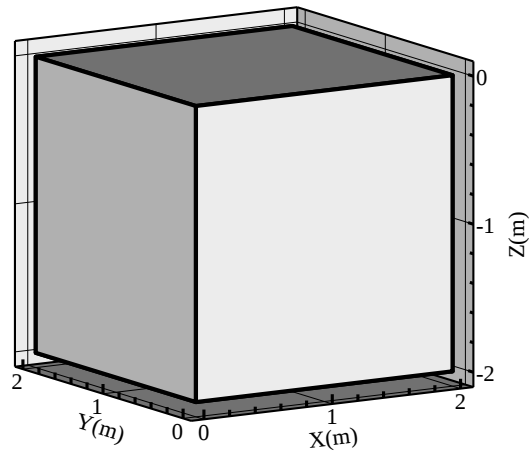


圖 3-93：初始母岩體模擬範圍

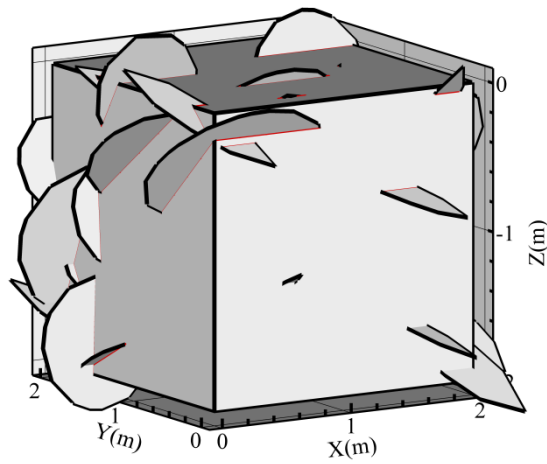


圖 3-94：母岩岩體外部裂隙圓盤

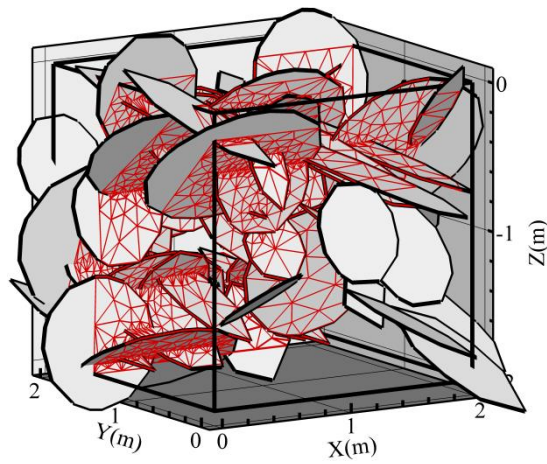


圖 3-95：母岩岩體內部裂隙圓盤與離散裂隙網路網格

3.3.4. 情節發展

日本H12報告的情節發展中，首先說明該報告發展情節的程序，即參考國際上的研究及科學知識與專家判斷來建置特徵、事件及作用報表，簡稱FEPs報表；進而進行FEPs報表的判定與分類、篩選，最後，根據所篩選出的FEPs，定義出一個地下水情節做為基本情節。

國內以往已彙整各國FEPs報表，成為FEPs原始報表(FEPs source lists)，並重新整合成適合我國處置計畫的特徵、事件及作用初始報表，及建構SNFD2009報告的基本情節(台電公司，2010)。

為達成SNFD2017報告內容所需，本計畫自104年起除將彙整國內情節發展過程以建構相關流程外，亦將規劃進行以下3項工作：

- (1) FEPs之建置：著重於審視FEPs原始報表，並進行各項資訊欄位及建置範例報表及數位化資料庫，以完成FEPs初始報表。
- (2) FEPs之篩選：依據現階段之需求精進篩選準則，以篩選建立符合現階段安全評估分析所需之FEPs因素。
- (3) 情節定義：依據現階段之需求，考量處置系統各種未來的可能情況，確認各種分析情節與情節建構技術，並定義基本情節及其他分析之情節(如擾動情節與隔離失效情節等)，以供後續的模式發展與分析計算使用。

3.3.5. 基本情節

日本H12報告在情節定義分別針對安全評估分析的基本情節、擾動情節與隔離失效情節，分別進行定義與說明。其中在基本情節的內容，是根據3個基本假設進行定義，即(JNC, 2000a)：

- (1) 地質環境維持穩定和現在條件一樣，沒有太大的改變；
- (2) 工程障壁系統之功能均能達到在設計時所賦與之功能；
- (3) 地表環境維持與現在條件一樣。

本節在103年工作計畫書並無規劃實質工作內容，規劃在SNFD2017報告，將調整本節內容至節情節發展中的情節定義小節，將

於104年依據現階段之需求，確認各種分析情節與情節建構技術，並定義基本情節及其他分析之情節，以供後續的模式發展與分析計算使用。

3.3.6. 變異情節

在情節發展的步驟中，FEPs的分析工作必須確認那些因素如果發生，會對處置系統產生何種不同程度的重要影響，這些因素可稱之為機率性FEPs；其影響所造成處置系統的演變過程，就是變異情節(Variant Scenarios)需要討論的範疇，變異情節依其發生原因，可分成自然及人為因素造成的現象二大類(吳禮浩，2005)。

(1) 自然因素造成的現象

- (a) 全球變遷：地球軌道參數的改變、冰帽擴張的變化、海水面的變化、溫度與雨量的改變、植物的改變、冰河、水文環境的改變、生物圈的改變及隕石撞擊與溫室效應；
- (b) 地質演化：地殼運動、陸地抬升/沉陷、地震活動(斷層再次活動或產生新斷層)及岩漿活動；
- (c) 地質的不確定性：絕大多數的地質不確定性均與自然因素有關，包括未察覺的地質特徵等；

(2) 人為因素造成的現象：放棄未封閉的處置設施、橫坑或豎井封塞失效、處置容器失效、非意圖性的人類侵入、蓄意的人類侵入及戰爭等。

日本H12報告中並未使用變異情節這一名詞，而是以擾動情節(Perturbation Scenarios)，並在擾動情節分析中的內容中，說明擾動情節對整體處置系統造成影響，考量的範圍包括自然現象：抬升/侵蝕、氣候/海水面改變；初始缺陷：外包裝密封不完全、坑道回填不充分等自然現象；以及包括未來人類行為：鑽井與飲水之人為因素(JNC, 2000a)。

目前世界上進行地質處置技術研究的國家，亦將具體地質環境條件或自然現象相關資訊的影響評估，定為重要課題，並嘗試具體的探

討與分析。舉例而言，日本H12報告已於自然現象影響評估中，就一般地質環境為對象，探討地表抬升與剝蝕現象，影響處置場址深度變化之保守性的簡略方案，並提出影響評估的例證。

在自然因素的地質演化考量上，因台灣本島位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊聚合交界處，最終處置設施可能受地體抬升與地表剝蝕作用，使得地下處置設施上方的覆蓋厚度逐漸減小，再加上海水面可能因氣候變遷而上升，使得處置設施上方地面極接近或稍高於海水面，甚至可能被海水淹沒。

以下各節分別針對台灣的特性因素，進行變異情節分析成果進行說明。

3.3.6.1. 地表淹水因素分析及影響作用之研究

假設用過核子燃料最終處置場在受到地體抬升率與地表侵蝕率作用下，處置區上方覆蓋厚度逐漸減小，可能受到地表降水入侵及海面上升等環境因素影響，使得用過核子燃料最終處置場直接遭受海水的淹沒入侵。

日本H12報告內容包含探討氣候變遷對降雨及海平面上升的影響，並評估降雨及海平面變異情形對地下水流況可能的影響。本研究與日本H12報告主要差異，在於進一步模擬當海嘯發生時，海嘯波對研究區的影響。主要工作內容為預測台灣近岸可能發生較大地震之隱沒帶，進而模擬這些預測海溝所引起的海嘯。104年度將運用海嘯模擬結果建立之地文性淹排水模式，模擬研究區域內地表淹水現象、淹水面積與淹水深度等資訊，提供擾動情節之參考依據。

3.3.6.1.1. 海嘯模擬

本研究在海嘯模擬方面採用兩層網格套疊來進行模擬，主網格部分使用NOAA所提供的ETOPO1地形資料，以線性的淺水波方程進行模擬。琉球海溝部分使用範圍為北緯11°至36°、東經115°至140°的地形圖(圖 3-96圖a)進行模擬，馬尼拉海溝部分使用範圍為北緯8°至33°、東經105°至130°的地形圖(圖 3-96圖b)進行模擬；子網格部分使用向

海科中心所購買的精度為200 m的地形圖(圖 3-96圖c)，以非線性的淺水波方程進行模擬，地形資料圖範圍為北緯24°至25°、東經121.05°至122°。

本研究主要模擬琉球海溝及馬尼拉海溝發生錯動時，所產生海嘯波對研究區沿岸之影響情形，並將模擬結果作為淹水模擬時的水體輸入源，以討論海嘯來時沿岸水深情形。

進行海嘯模擬的地震源有2個，分別為琉球海溝及馬尼拉海溝；琉球海溝部分，將琉球海溝依照曲率不同個別分段，分為5個情境進行模擬，分別為情境1到情境5；馬尼拉海溝部分，由於馬尼拉海溝距離研究區域較遠，海嘯波不容易傳達，因此，僅模擬整段馬尼拉海溝，為情境6；過去100年內3大地震參數，如表 3-32所示(黃惠絹，2008)。本研究根據3大地震的地震矩規模，來設定各情境的地震矩規模，使各情境地震矩規模皆介於8.3至9.3間，各情境參數如表 3-33所示。

3.3.6.1.2. 海嘯模擬成果

本研究使用情境1到情境6的地震參數進行海嘯模擬，模擬時間皆為24 hr。依表 3-34的海嘯規模分級表(徐明同，1989)作為海嘯災害影響的依據，在表中以波高2 m作為造成災害的依據，故本研究的模擬成果將以2 m為標準來評估海嘯帶來的災害影響。

情境1模擬所使用的破裂面全長為400 km，其地震矩規模為8.3；模擬2 hr內海嘯波傳遞情形；最大波高如圖 3-97圖a所示，觀測點所得最大水面高度為觀測點49的0.44 m，圖 3-98圖a為觀測點49的模擬水面高度結果，根據模擬結果，海嘯波對研究區域沿岸造成水面高度皆小於1 m，對研究區域造成影響甚小。

情境2模擬所使用的破裂面全長為400 km，其地震矩規模為8.3；模擬所得2 hr內海嘯波傳遞情形；最大波高如圖 3-97圖b所示，觀測點所得最大水面高度為觀測點49的0.14 m，圖 3-98圖b為觀測點49的的模擬水面高度結果，根據模擬結果，海嘯波對研究區域沿岸造成水面高度皆小於1 m，對研究區域造成影響甚小。

情境3模擬所使用的破裂面全長為800 km，其地震矩規模為9.1；模擬所得5 hr內海嘯波傳遞情形；最大波高如圖 3-97圖c所示，觀測點所得最大水面高度為觀測點49的4.32 m，圖 3-98圖c為觀測點49的模擬水面高度結果，根據模擬結果，情境3發生後7 hr內水面高度震盪較為激烈，之後海嘯波慢慢消散，水面高度震盪逐漸小於2 m，情境3發生將可能對研究區域將造成相當的災害影響。

情境4模擬所使用的破裂面全長為1,100 km，其地震矩規模為9.2；模擬所得5 hr內海嘯波傳遞情形；最大波高如圖 3-97圖d所示，觀測點所得最大水面高度為觀測點49的4.31 m，圖 3-98圖d為觀測點49的模擬水面高度結果，根據模擬結果，情境4發生後7 hr內水面高度震盪較為激烈，之後海嘯波慢慢消散，水面高度震盪逐漸小於2 m，情境4發生將可能對研究區域將造成相當的災害影響。

情境5模擬所使用的破裂面全長為1,300 km，其地震矩規模為9.3；模擬所得5 hr內海嘯波傳遞情形；最大波高如圖 3-97圖e所示，觀測點所得最大水面高度為觀測點49的4.30 m，圖 3-98圖e為觀測點49的模擬水面高度結果，根據模擬結果，情境5發生後8 hr內水面高度震盪較為激烈，之後海嘯波慢慢消散，水面高度震盪逐漸小於2 m，情境5發生將可能對研究區域將造成相當的災害影響。

馬尼拉海溝所使用的破裂面全長為1,100 km，其地震矩規模為9.0；模擬所得5 hr內海嘯波傳遞情形；最大波高如圖 3-97圖f所示，觀測點所得最大水面高度為觀測點38的1.51 m，圖 3-98圖f為觀測點38的模擬水面高度結果，根據模擬結果，情境6發生後5 hr內的水面高度震盪較劇烈，但因水面深度皆小於2 m故造成災害影響有限。

表 3-32：過去100年之3大地震參數

發生時間	地點	經緯度	地震矩規模 [Mw]	長度 [km]	寬度 [km]	滑移量 [m]	深度 [km]
1960/5/22	Chile	74.5° W, 39.5° S	9.5	1,000	300	-	60
1964/3/28	Alaska	147.5° W, 61.1° N	9.2	540至740	300	18至22	23
2004/12/26	Sumatra	95.98° E, 3.3° N	9	1,300	200	20	28.6

表 3-33：情境參數資料

情境	所含破裂面	破裂面個數	長度 [km]	寬度 [km]	滑移距離 [m]	地震矩規模 [Mw]
1	rnsza : 1-4 rnszb : 1-4	8	400	100	2	8.3
2	rnsza : 5-8 rnszb : 5-8	8	400	100	2	8.3
3	rnsza : 1-8 rnszb : 1-8	16	800	100	20	9.1
4	rnsza : 1-11 rnszb : 1-11	22	1,100	100	20	9.2
5	rnsza : 1-13 rnszb : 1-13	26	1,300	100	20	9.3
6	馬尼拉海溝	33	1,100	-	5至20	9.0

表 3-34：今村與飯田海嘯規模分級表

規模	說明
4	波高超過30 m，被害區域達到沿岸500 km以上者。
3	波高超過10 m至20 m，被害區域達到沿岸400 km以上者。
2	波高4 m至6 m程度， 可使部分房屋流失，人畜溺死者。
1	波高2 m左右，損壞海濱的房屋，帶走船舶的程度。
0	波高1 m左右，可能造成小災害者。
-1	波高50 cm以下，通常無災害者。

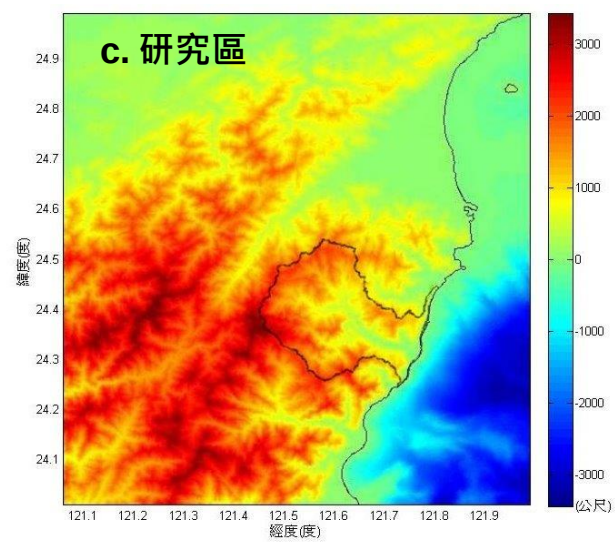
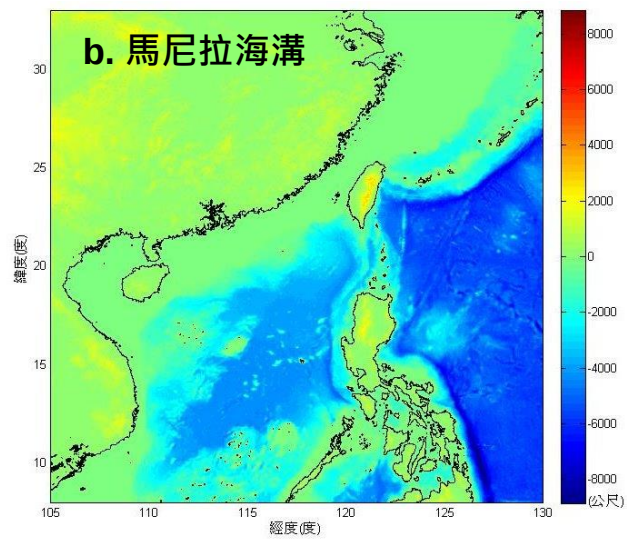
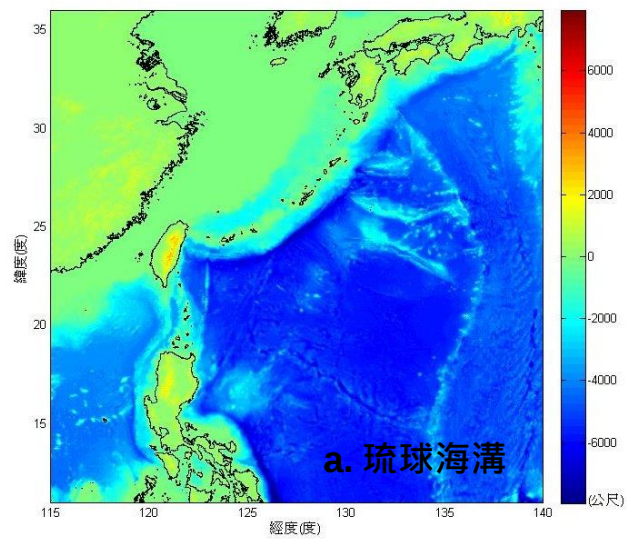


圖 3-96：琉球海溝與馬尼拉海溝及研究區地形資料圖

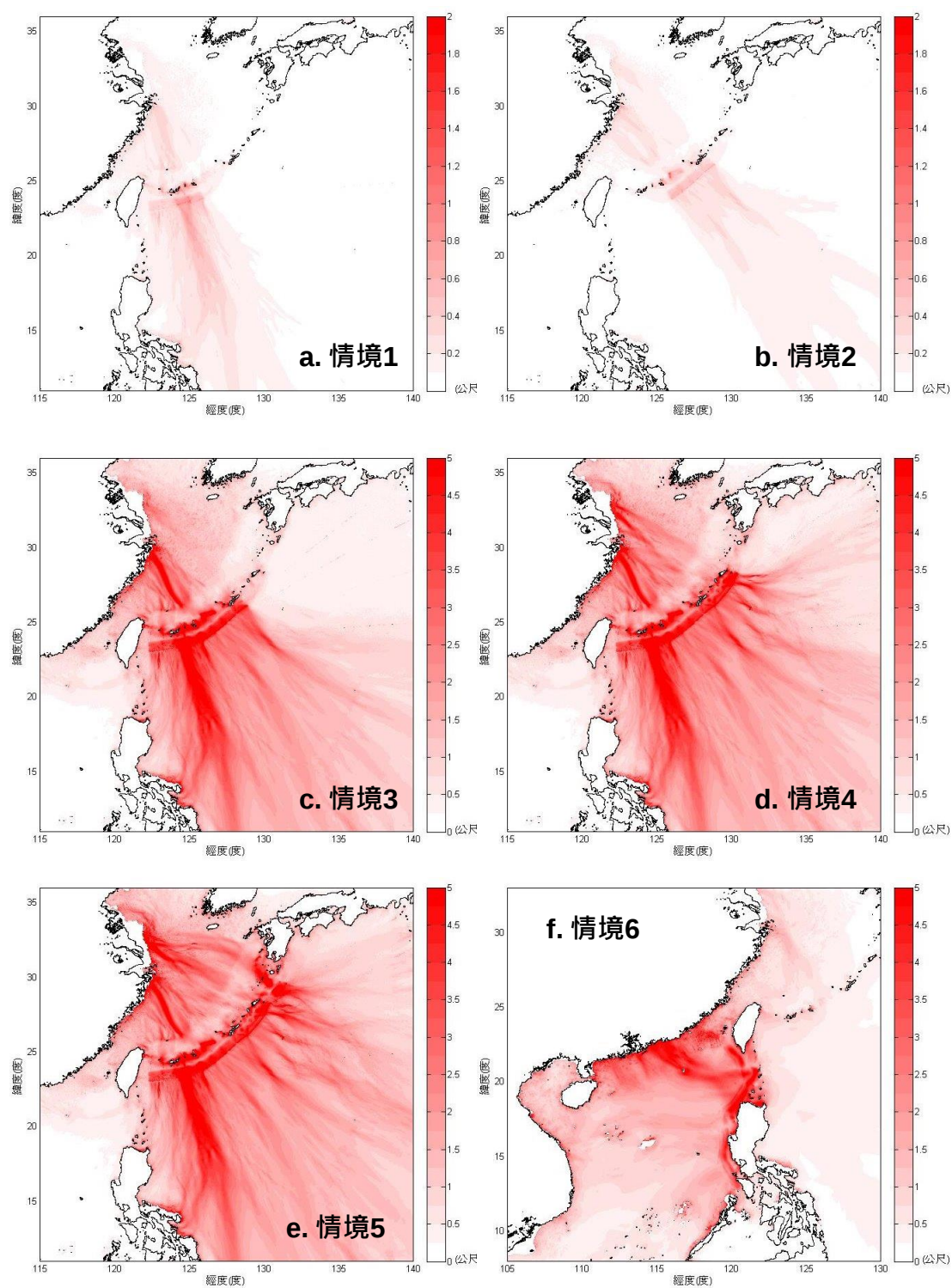


圖 3-97：各情境最大波高圖

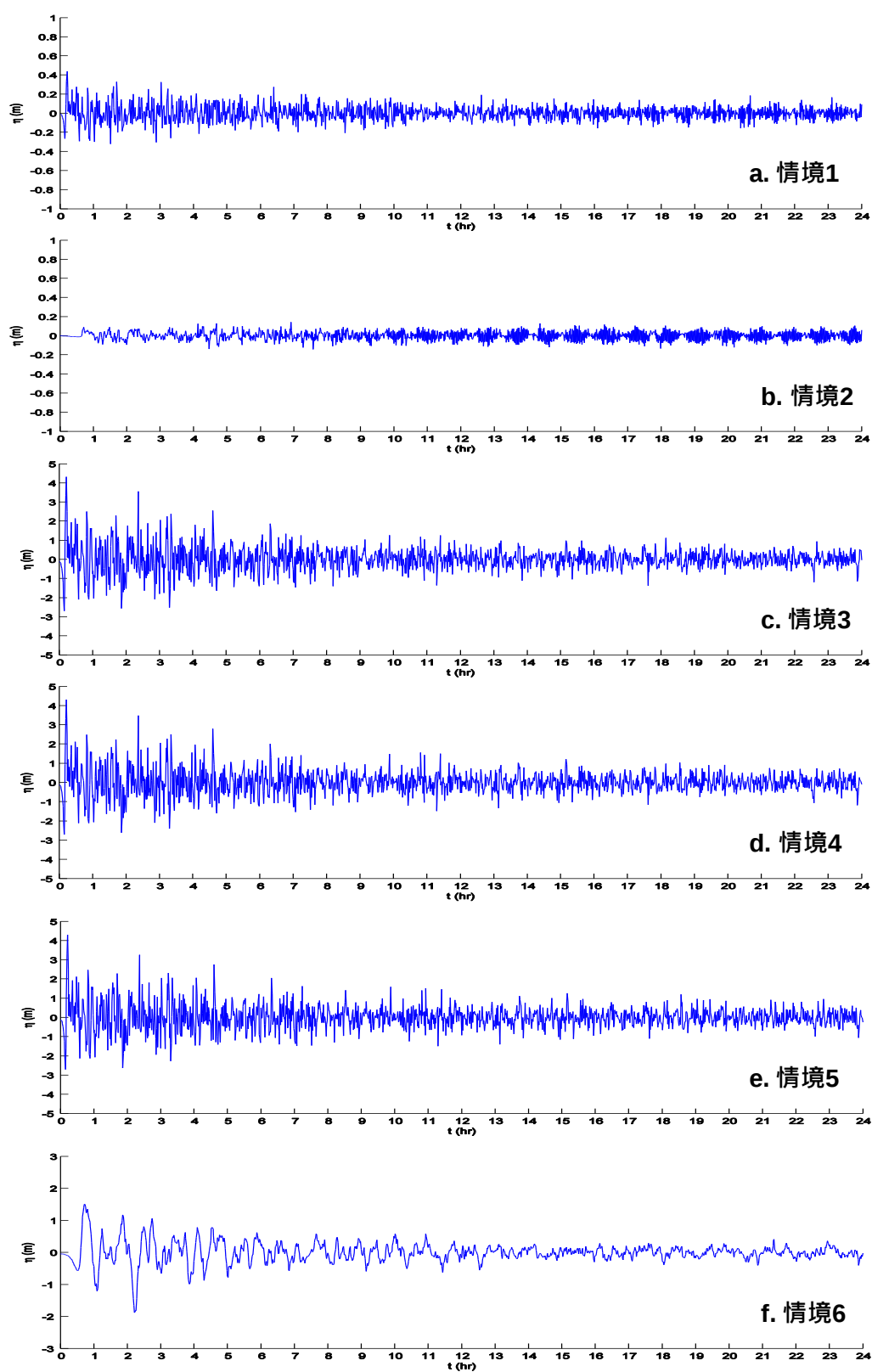


圖 3-98：各情境觀測點水面高度資料

註：橫座標為時間(hr)；縱座標為高度變化(m)

3.3.6.2. 颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響之研究

日本H12報告僅對地表抬升及土壤沖蝕之影響進行分析。本研究為瞭解颱風豪雨可能引發土石災害對於研究區域地表設施環境的可能衝擊，根據其環境變異特性或趨勢，研擬可能之環境變異境況。

本章節內容主要彙整颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響之研究成果。

3.3.6.2.1. 研究區域坡面土壤沖蝕量評估

Wischmeier and Smith於1978年所發展之通用土壤流失公式，已廣泛運用於農地與坡面之沖蝕土砂量評估。本研究運用此公式進行研究區流域之土壤沖蝕量的評估與分析，評估需要的參數則參考行政院農委會水土保持局之土壤流失量估算手冊(吳嘉俊等，1996)。

本研究為瞭解H區附近溪流(以下簡稱HP溪)流域之土壤沖蝕分布情形，以5 m × 5 m精度之數值地形DEM及流域水系之匯流關係，將HP溪流域劃分成56個計算集水區。根據HP溪流域地文特性分析成果，輔以數值地形DEM擷取通用土壤流失公式所需之各計算因子及參數，進行計算集水區沖蝕深度之估算，其結果如圖 3-99所示。

HP溪流域整體之坡面年平均沖蝕深度估算結果約0.72 cm，略高於Dadson et al.(2003)研究之台灣年平均沖蝕量的0.52 cm。流域內沖蝕較高之區域位於HP溪之北溪流域(平均沖蝕深度約0.82 cm)，造成HP北溪內土壤沖蝕量較高的原因為多處大規模崩塌裸露地，由於崩塌裸露地之岩盤破碎，易受風化及降雨等侵蝕作用衝擊影響，導致弱面持續的崩塌及刷深。

相較於HP溪之北溪，南溪流域內的崩塌裸露地較少，雖然南溪流域內之崩塌裸露地較少，但其流域之坡面坡度較陡且土壤抗沖蝕的能力較低(土壤沖蝕指數較高)，因此，年平均沖蝕深度僅略低於北溪流域約0.79 cm。

HP溪流域上游兩大支流北溪及南溪匯流前之下游流域，由於坡面之坡度漸緩，林相良好；且無大規模崩塌裸露地，該區域內各集水區

之年平均沖蝕深度均小於0.6 cm，為HP溪流域內沖蝕程度較輕之區域，平均年沖蝕深度約0.33 cm。

3.3.6.2.2. 研究區域崩塌潛勢的評估

本研究依據經濟部中央地質調查所2012年「易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置」之研究成果(經濟部中央地質調查所，2012)及衛星影像圖資(經濟部中央地質調查所，2008)，進行研究區域HP溪流域崩塌發生潛勢的評估。

根據歷年HP溪之流域崩塌判釋成果，依過去較為嚴重之崩塌地、高潛勢山崩發生區及現地調查等資料，圈繪研究區流域內14處重大崩塌區範圍。而本研究根據所蒐集之地調所與水保局歷年崩塌判釋成果及2013年衛星影像等圖資與地文特性分析之成果(經濟部中央地質調查所，2013)，新增1處重大崩塌區，該區位於太平山東南側莫很溪上游，目前崩塌所產出之土方有嚴重堵塞河道的情形發生。15處HP溪流域內重大崩塌區統計及位置分布，如表 3-35中所示。由結果得知，其中14處位於HP北溪集水區內，1處位於HP南溪集水區內；而HP溪子集水區(HP溪下游)內，並未有重大崩塌區存在。由於重大崩塌地之地勢高峻，坡度陡峭，且裸露之岩盤受到風化作用的影響，受到颱風豪雨因素之影響，持續沖刷及崩落難以自然復育。

此外，若能瞭解降雨與崩塌發生間之關係，將有助於評估流域內崩塌之潛勢。本研究參考地調所針對HP溪流域所評估之崩塌發生臨界降雨量，進行降雨量與崩塌間之關係如式(3-10)所示。

$$Y = \frac{C_a}{A} = 7.2 \times 10^{-6} (R - 246)^{1.15} \quad (3-10)$$

其中，

Y = 新增崩塌率

C_a = 新增崩塌面積[m²]

A = 集水區面積[m²]

R = 累積降雨量[mm]

依HP溪流域重大崩塌地及高潛勢岩體崩滑區之分布情形可知，HP北溪集水區內有多個重大崩塌地及高潛勢岩體崩滑區，HP南溪雖然較少重大崩塌情形，但於HP南溪右岸仍有多個高潛勢岩體崩滑區存在。而HP溪子集水區(HP溪下游)內並未存在重大崩塌地及高潛勢岩體崩滑區，根據HP溪流域崩塌資料的蒐集與分析結果可知，雖然該區域仍有少數小規模崩塌發生，但相較於HP北溪及南溪，HP溪子集水區之坡面較為穩定，發生大規模崩塌之潛勢較低。此外，根據式(3-10)之推估成果，HP溪流域誘發崩塌發生之臨界降雨量為246 mm。

3.3.6.2.3. HP流域土石流發生潛勢評估

本計畫根據所蒐集之HP溪流域地文基本資料，運用ArcGIS軟體進行計算集水區的劃分，以及土石流發生潛勢評估所需4項代表性地文因子參數值的分析及評估，判釋可能發生土石流之野溪坑溝集水區，如圖 3-100所示。再依地文潛勢指標GI之計算方式，計算各集水區之GI值，並根據台灣土石流發生機率臨界曲線圖，可對應出各計算集水區之RTI；在降雨強度 $I=10\text{ mm/hr}$ 的條件下，評估土石流發生之有效累積降雨量。

依研究區域水文基本資料蒐集及分析成果，以HP溪流域25年頻率年及100年頻率年之降雨量為界，當土石流發生有效累積降雨量小於25年頻率年之降雨量時，表示為土石流發生高潛勢溪流，當有效累積降雨量大於100年頻率年時，表示為土石流發生低潛勢溪流，而有效累積降雨量介於兩者間之集水區為土石流發生中潛勢溪流。

HP溪流域土石流發生潛勢評估結果顯示，在HP北溪及南溪交匯前之HP溪下游區域，其土石流發生潛勢多為低潛勢或中潛勢。HP溪流域中上游之HP北溪流域內，於下游左岸有一條高潛勢野溪外，其他多為低潛勢及中潛勢野溪，中游區域鄰近馬望峰大崩壁附近有多條中潛勢及高潛勢野溪，而上游區域多為中潛勢及高潛勢。而HP南溪流域除中游及下游區域有較多中潛勢或高潛勢野溪外，上游鄰近闊闊庫溪之野溪多為低潛勢溪流。

HP溪流域整體土石流潛勢評估成果顯示，下游子集水區土石流發生潛勢多為低潛勢或中潛勢，而中上游之北溪及南溪集水區，分別受到高崩塌率及坡度陡峭等影響，具有較多中潛勢及高潛勢野溪存在。

3.3.6.2.4. 小結

- (1) 依HP溪歷年逕流量特性分析結果可知，颱風豪雨事件為影響流域逕流量變化的主要原因，其中連續型颱風豪雨事件易造成極端高逕流量的發生。
- (2) HP溪流域坡面年平均土壤沖蝕深度約0.72 cm，其中沖蝕較為嚴重之區域為HP北溪集水區約0.82 cm，HP南溪次之；約0.79 cm，而HP溪下游子集水區之年平均沖蝕深度約0.33 cm，為HP溪流域整體土壤沖蝕程度較輕之區域。
- (3) HP溪流域環境現地調查成果顯示，流域野溪之平均坡度陡峭，河床質多由土砂及較大粒徑之礫石及卵石所組成，河道局部河段有泥砂堆積、河床沖刷及岩盤裸露等情形，但河道沖淤情形不明顯。整體而言，流域下游環境及植生現況良好，野溪及其兩岸坡面之環境尚屬穩定，但局部河段有泥砂堆積，仍需持續觀測河道及周遭環境之變化，以掌握該區土砂變異情形。
- (4) 崩塌發生潛勢評估結果顯示，HP北溪集水區內具多個重大崩塌區及高潛勢岩體滑動區；HP南溪集水區雖較少重大崩塌區，但仍有多個高潛勢岩體崩滑區存在；相對於HP北溪及南溪，HP溪下游子集水區內未存在重大崩塌區及高潛勢岩體滑動區，其坡面相對穩定，崩塌發生潛勢較低。
- (5) 土石流發生潛勢評估結果顯示，HP溪下游子集水區土石流發生潛勢多為低或中潛勢，而中上游之北溪及南溪集水區，分別受到高崩塌率及坡度陡峭等影響，皆有較多中潛勢及高潛勢野溪存在。

表 3-35：HP溪域重大崩塌地統計

編號	名稱	TM67座標		圈繪 範圍	崩塌 面積
		x	y		
1	馬望峰大崩壁	310516	2698216	200.4	166.7
2	芳山希南側莫很溪上游支流	308627	2708411	27.0	8.2
3	三星山南側莫很溪上游	306737	2708509	24.4	12.3
4	蘇耶里溪上游	304902	2702712	34.1	20.3
5	比亞毫社	303698	2702842	62.6	34.1
6	拉巴丸溪上游支流源頭處1	301090	2704306	27.6	15.7
7	拉巴丸溪上游支流源頭處2	300629	2703960	18.7	11.1
8	敷島山西北側HP北溪上游支流	301222	2699772	91.6	59.0
9	比野巴宅山基點峰西側HP北溪上游河岸	300853	2701799	105.8	43.1
10	東穗山北坡HP北溪上游支流源頭處	299610	2697956	212.2	132.2
11	西霧覽山東側山坡	296253	2702504	83.9	46.6
12	東穗山西北側HP北溪上游	297814	2698212	90.4	49.0
13	五岩峰斷崖	294418	2698202	326.4	221.7
14	馬比杉山南坡	297783	2693550	50.2	14.2
15	太平山東南側莫很溪上游	306047	2708136	34.0	25.7

資料來源：本計畫及中央地質調查所(2013)，單位：Ha

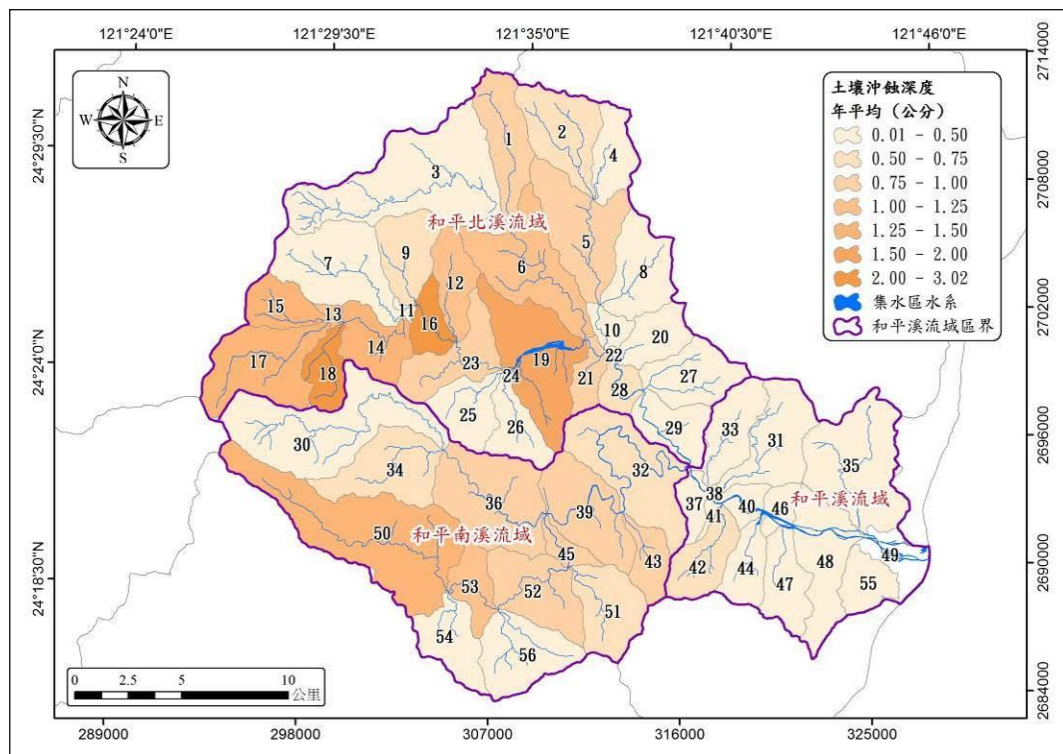


圖 3-99：HP溪流域年平均土壤沖蝕深度分布

資料來源：摘自中央地質調查所(2013)

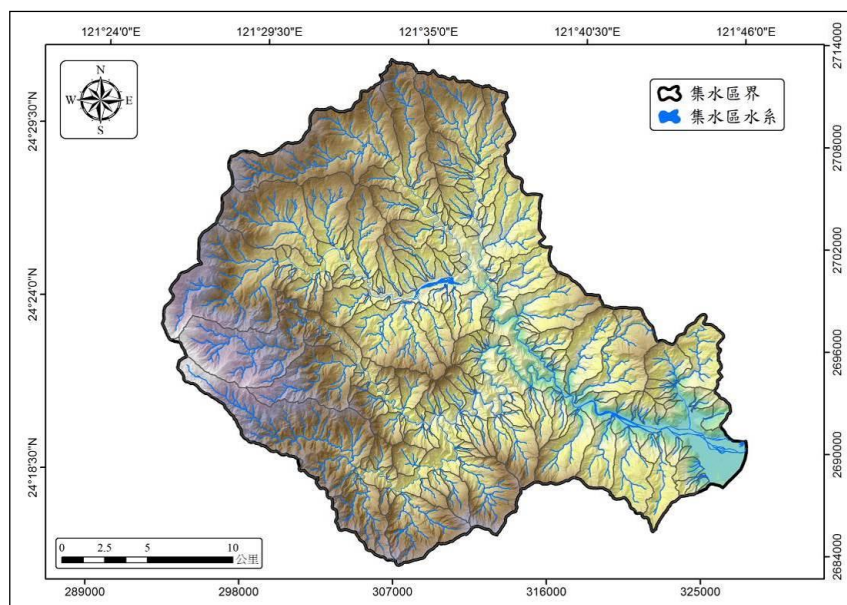


圖 3-100：HP溪流域之野溪坑溝計算集水區劃分成果

3.3.6.3. 地質演化作用與地震循環概念模型之研究

日本H12報告在隔離失效情節分析中的內容說明：隔離失效情節未如基本情節或擾動情節詳細，因其發生機率甚低，或經由適當的選址和設計方式予以避免。在隔離失效情節中，僅簡略以風險方式探討人類故意侵入、抬升與侵蝕，導致處置設施曝露在地表、處置設施附近的地震/斷層活動及火山活動的情形(JNC, 2000a)。

由於地震的發育和山脈的抬升，皆與板塊運動所造成之構造有關。為對應SNFD2017報告隔離失效情節內容所需，本研究運用大地震對地質模型地殼變形影響之斷層模型方法，分析大地震對各目標分區地質模型短、中、長期的地殼變形影響。

3.3.6.3.1. 研究區域鄰近發震構造探討

台灣的造山過程中，包含了2個主要的主動變形帶，即台灣西半部的褶皺逆衝斷層帶及台灣東半部的碰撞帶。本期計畫重點著重於位於台灣東半部碰撞帶的研究區上。

台灣東半部主要有3大發震構造：隱沒構造之琉球海溝；海槽系統之沖繩海槽；中央山脈與海岸山脈之間的縱谷斷層。

3.3.6.3.2. 發震構造對處置設施的影響

3.3.6.3.2.1. 分析模型理論

(1) 同震錯位模型

此為運動學模型(kinematic model)的一種，利用地表的觀察資料進行反演計算斷層面上的滑移分布，此模型方法可得到斷層面上的滑移量在時間和空間的分布關係，但此模型在計算過程中並未考慮何種物理行為控制滑移的分布。

根據地質調查、淺層反射震測和地震斷層面，給定初始的斷層幾何進行逆推，逆推中採用Okada(1985)的彈性半無限空間模型，設定合理的斷層參數範圍進行求解。地表GPS觀測(d)和斷層面上的滑移(s)滿足下列關係式：

$$d = G_s + \varepsilon \quad (3-11)$$

G 為格林函數，與斷層的走向、傾角、長度、寬度、深度和位置有關， ε 為觀測誤差。

(2) 震後變形模型

先以同震正演模型計算同震應力改變量，藉由同震應力改變量推算震後變形，震後變形主要有震後滑移及黏彈性鬆弛效應兩種，探討兩種震後變形機制對地表造成之影響。由於黏彈性鬆弛效應對地表變形的影響時間及恢復週期較震後滑移長(Bürgmann and Dresen, 2008)，為了解此地區更長遠的地表變形，本計畫運用黏彈性模型模擬震後之位移。

黏彈性變形行為如同一個彈簧再加一個阻尼的串聯結果，即 Maxwell solid。因串聯的緣故兩個物體受到的力相同。假設作用力為 σ ，在彈性物體中應力和應變關係為 $\sigma = \mu \varepsilon$ ，其中 μ 為彈性係數， ε 為應變。在黏彈性物體中為 $\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$ ， η 為黏滯係數，應變率為二者之總和。可以寫為下列關係式：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\sigma} / \mu + \sigma / \eta \quad (3-12)$$

黏彈性變形中常用的參數為 Maxwell time (τ)，定義為 $\tau = \eta / \mu$ ，代表應變衰減至總量的 $1/e$ 所需的時間。

將彈性解的剪切係數和滑移歷史取代拉氏轉換 (laplace transform) 之值，最後再經由拉氏逆轉換 (inverse laplace transform)，回到原來定義的時間和空間。根據前段介紹過的 Maxwell solid 公式，Maxwell solid 的應力和應變關係可表示如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon = \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\eta} \right) \sigma \quad (3-13)$$

對Maxwell solid的應力和應變關係兩邊取拉式轉換：

$$\bar{\sigma} = \bar{\mu} \cdot \bar{\varepsilon} \quad (3-14)$$

$\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\varepsilon}$ 分別為 σ 和 ε 之拉式轉換，而 $\bar{\mu}(s) = \frac{s}{\mu^{-1}s + \eta^{-1}}$ 經拉式轉換後的Maxwell solid之應力與應變關係式，其表示與虎克定律相同，驗證了黏彈性問題的解可由彈性的解經由適當的轉換求得。

(3) 參數設定

1920年8月5號台灣東方近海曾發生規模7.7(M_w 7.7)的地震。本研究運用適用於規模4.6-8.9大地震的地震規模與斷層破裂面積相關之經驗公式如下：

$$\log(RA) = -14.77 + 0.92 \times \log(M_0) \quad (3-15)$$

琉球海溝模型(圖 3-101)乃參考Hsu et al. (2009)的研究成果，黑色虛線為模擬琉球海溝的斷層破裂面，斷層長度為110 km，深度13 km，傾角10°向北傾，290°方位角，黃色星號為1920年花蓮東方近海規模7.7(M_w 7.7)的地震。

3.3.6.3.2.2. 分析結果

(1) 同震錯位模型分析結果

整個同震水平分量位移方向大致呈西南向，位移量從19.1 m方位角195°變成36.7 m方位角220°，斷層下部則有2.5 m以上的下降趨勢，震後100年之地表水平變形，H區南部呈現向震央方向約有7.3 m以下的向北位移，北部則是反震央方向約有4.6 m以下的位移。

(2) 震後滑移模型分析結果

震後100年之地表垂直變形，斷層接近地表部分為10.3 m以上的下降趨勢，斷層下部則約有3.1 m的抬升趨勢。震後1,000年之地表水平變形，研究區域南部呈現向震央方向平均約4.5 m的向北位移，北部則是呈現反震央方向約有3.2 m的位移。震後1,000年之地表垂直變形，斷層接近地表部分為12.1 m以上的下降趨勢，

斷層下部則為約3.1 m抬升，整體約為7.5 m以上的下降趨勢。震後10萬年之地表水平變形，研究區域南部呈現向震央方向平均6.3 m的向北位移，北部則是以反震央方向平均約為4.3 m的位移。震後10萬年之地表垂直變形，斷層接近地表部分為10.4 m的下降趨勢，斷層下部呈現約3.8 m的抬升現象，整體垂直變形約為6.5 m的下降趨勢。

「同震變形量」與「黏彈性鬆弛效應」的加總結果，在研究區域南部呈現向震央方向5.3 m向北位移，北部則是以反震央方向3.2 m的位移。震後10萬年之整體垂直變形約為0.6 m以上的下降趨勢。

3.3.6.3.3. 小結

H區鄰近發震構造分別為琉球海溝、沖繩海槽以及縱谷斷層，根據前人之研究顯示H區可能受到之地震活動型態相當複雜，其附近之活動構造，陸域範圍以向東傾之正斷層為主，而海域範圍則以東北—西南走向之左移斷層為主，但這些斷層分布並無明確的證據證明其存在。經由大尺度模型演算結果，顯示該區為下降的趨勢，這些變化趨勢仍需藉對地涵之黏滯係數進行小尺度的合理精進，以提升其精確性。

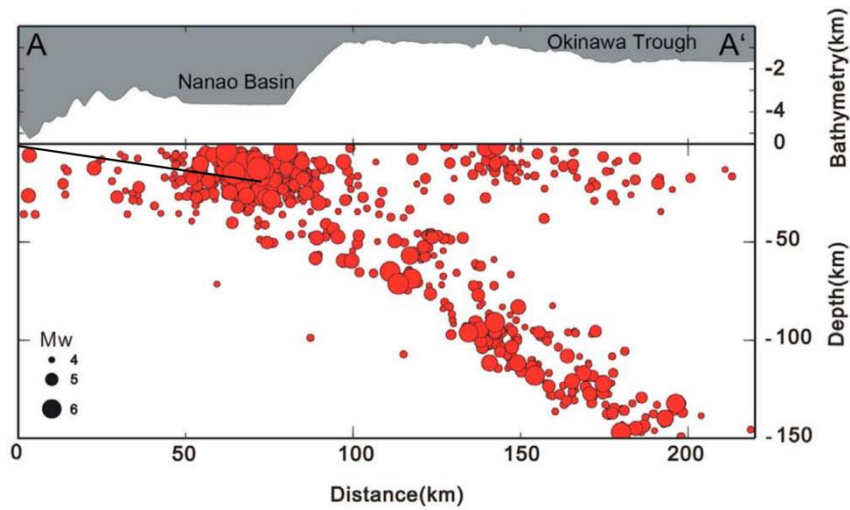
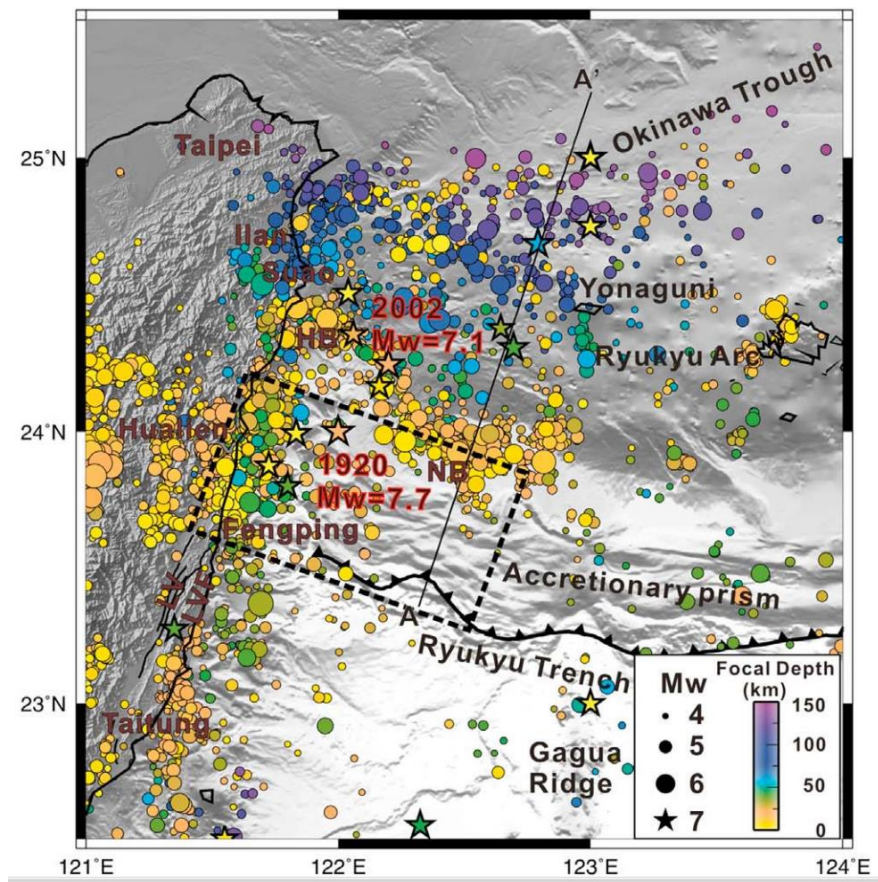


圖 3-101：1920年研究區東方近海的琉球海溝模型

註1：(上圖)黑色虛線為模擬琉球海溝的斷層破裂面，斷層長度為110 km，深度13 km，傾角10°向北傾，290°方位角，黃色星號為1920年研究區東方近海規模7.7(Mw 7.7)的地震。

註2：(下圖)為上圖AA'剖面圖，黑色實線為模擬之斷層位置。

資料來源：摘自 Hsu et. al. (2009)。

3.3.6.4. 地震對廢棄物罐破壞特性之系統分析

本計畫在變異情節分析中規劃本項研究，相對於日本H12報告為隔離失效情節分析之一環。如同第3.3.6.3節所述，日本H12報告在隔離失效情節分析中的內容說明：隔離失效情節未如基本情節或擾動情節詳細，因其發生機率甚低，或經由適當的選址和設計方式予以避免。在隔離失效情節中，僅簡略以風險方式探討人類無意侵入、抬升與侵蝕，導致處置設施曝露在地表、處置設施附近的地震/斷層活動及火山活動的情形(JNC, 2000a)。

本項研究主要建立廢棄物罐長期受震之邊界能力分析技術，包括廢棄物罐受震反應分析、與動態強度評估兩個方向。廢棄物罐的破壞可能性推演，可能在一次強烈地震時破損、亦可能經過無數中小地震後破損，而其外力來源均是邊界條件的變化。針對這些特性，本研究於103年工作期間，以廢棄物罐對受震功能為主要工作內容，成果已在第3.2.6.1.1節「地震對廢棄物罐破壞特性之系統分析」中呈現，這些成果除將提供SNFD2017報告的隔離失效情節分析引用外，亦將作為撰寫廢棄物罐設計需求章節之依據。

3.3.7. 安全案例分析

本計畫為更新安全評估案例分析所需之核種相關參數，於103年進行「所需核種特性相關參數之評估研究」，且為評估長時間尺度可能面臨資料不確定性之題，進行「參數不確定性分析」。以下2節即為103年工作之成果。

3.3.7.1. 所需核種特性相關參數之評估研究

3.3.7.1.1. 源項核種特性參數評估

日本H12報告以舊版ORIGEN2.1程式計算玻璃固化體經處置1,000年後的核種與穩定同位素存量。本研究擬以新版ORIGEN-ARP程式執行「我國用過核子燃料最終處置功能/安全評估所需核種特性相

關參數之評估研究(源項及生物圈)」，以計算國內核電廠爐心輻射物質盤存量。

3.3.7.1.1.1.核種存量案例分析

根據ORIGEN-ARP程式的輸入需求，本研究以核一廠的用過核子燃料進行案例分析，案例所使用的參數如下：

- (1) Fuel type: GE 8×8-2 (plant); GE 8×8-4 (ARP)
- (2) Uranium (g): 10^6
- (3) Enrichment (wt% U-235): 2.66
- (4) Burnup (GWd/MTU): 26.21
- (5) Average power: 23.77 MW/MTU
- (6) Cycles: 3
- (7) Libraries: 1 per cycle
- (8) Cooling time: 5 years

核種存量及衰變熱隨時間變化的結果，如圖 3-102所示。

3.3.7.1.1.2.核種放射毒性(radiotoxicity index, RI)

用過核子燃料中產生的放射性核種包括分裂產物(fission product, FP)、活化產物(activation product, AP)、錒系核種及其子核(actinides and daughters, AC及子核)等，數量超過數百個，在核種遷移實驗及安全評估時，不適合將所有的核種皆納入考量。因此，本研究提出以放射毒性作為關鍵性核種篩選的依據。

蔡世欽(2001)提出以民國80年國內頒布游離輻射防護安全標準中的年攝入限度(annual limit on intake, ALI)[Bq]，依攝入體內的途徑分為嚥入(ingestion)及吸入(inhalation)兩種，考慮核種外釋至生物圈進入人體的曝露途徑以嚥入為主，因而建議以嚥入之ALI值做為放射毒性(RI)計算之依據，如式(3-16)所示：

$$RI=A_0/ALI \quad (3-16)$$

式(3-16)中的RI為無因次單位，在使用上沒有物理意義可以參考。近年來的研究(Daniel, 2007; SKB, 2010b; POSIVA, 2013)則大都參考國際放射防護委員會ICRP所建議的劑量轉換因子(dose conversion factor, DCF)[Sv/Bq]來建立RI，如式(3-17)。

$$RI=A_0 \times DCF \quad (3-17)$$

式(3-17)中的RI為劑量單位Sv，以ICRP所公布的DCF轉換成RI，可以直接用輻射劑量所對應的風險(risk)來表示放射毒性，瑞典SKB及芬蘭POSIVA在最新出版的安全評估報告中(SK B, 2010b; POSIVA, 2003)的核種放射毒性也都採用這個定義，因此，本研究也遵循採用，將2012年ICRP119號報告中最新的DCF值納入在本研究中建立各核種的RI值。

3.3.7.1.1.3. 關鍵核種篩選

國內用過核子燃料長程處置計畫在SNFD2009報告篩選出37個關鍵核種作為最後安全分析評估之用。由於核種的活度分析是由ORNL的資料庫內插獲得。本研究以ORIGEN程式的分析結果為基礎，根據最新的核種放射毒性，並參考瑞典SKB及芬蘭POSIVA最新出版的安全評估報告(SK B, 2010b; POSIVA, 2013)，進一步提出現階段國內用過核子燃料關鍵核種篩選的流程及結果。

圖 3-103為本研究提出之國內用過核子燃料關鍵核種篩選流程。首先根據ORIGEN程式的參考案例核種活度分析結果，再依核種類別區分成分裂產物(FP)、活化產物(AP)、鈾系核種及其子核(AC及子核)等3種。其中FP及AP沒有衰變系列子核，因此，可以用相同篩選流程；AC及子核則以另一流程考量。

(1) 分裂產物及活化產物篩選

將分裂產物及活化產物分別計算其RI後，再對個別核種的半衰期作圖。由於用過核子燃料最終處置採多重障壁的方式，因此，在工程障壁及天然障壁維持基本功能的合理假設下，在1,000年內

核種無法外釋至生物圈；因此，半衰期在10年以下者，1,000年後核種活度約為原來的 1×10^{-30} ，可視為已不存在。因此，以半衰期10年為界，10年以下者不予考慮。另外，以 1.57×10^7 年長半衰期RI值超過100 Sv的核種I-129為標準，其他RI值在0.1 Sv以下者，貢獻不超過I-129的1/1,000，因此，也不予考慮經繪圖刪除後，總計23個核種方列入初步考慮。

接著將這23個核種依照最終處置後不同時間期RI值變化作圖，如圖 3-104。其中在處置初期1,000年內的重要危害是由Sr-90及Cs-137所貢獻，這兩個核種也是主要的衰變熱貢獻核種，因此，首先挑選出這兩個核種；其他在1,000年之內毒性貢獻遠低於這兩者，且 10^5 年後因衰變而沒有危害貢獻的核種，在這階段也予以排除。在此原則下，剩下13個核種列入主要核種考量，分別為Sr-90、Cs-137、Tc-99、Zr-93、Pd-107、I-129、Cs-135、Sn-126、Se-79、C-14、Cl-36、Ni-59、Nb-94。由圖 3-104中亦可發現，這13個主要核種的危害(total major FP+AP黑色實線)與整體的危害(total FP+AP藍色實線)幾乎是一致的。

(2) 鈾系核種及子核篩選

鈾系核種是指原子序超過鈾(Ac)以上的核種，這些核種無法因一次衰變就進入穩定態，大部分都要進行多次的阿伐及貝他衰變直到衰變成鉛(Pb)後才停止。因為一次的阿伐衰變核種質量數會減少4，貝他衰變質量數不變，所以，衰變系列可以用4的倍數區分為 $4N$ 、 $4N+1$ 、 $4N+2$ 、 $4N+3$ 等4個系列。由於核子燃料主要的U-238在爐心運轉中吸收熱中子，當退出爐心之後會形成鐳(Np)、鈾(Pu)、鋂(Am)、錒(Cm)，甚至鈾(Cf)等非常重的超鈾核種(transuranic, TRU)，這些核種會各自成為鈾系母核，並構成不同的衰變系列直到穩定的鉛核種為止。本研究首先依照ORIGEN程式計算的超鈾核種中，找出衰變系列最原始的母核(即原子序及質量數最高者)開始，繪製完整的衰變系列。然後排除半衰期10年以下者，以及沒有貢獻主要活度者。

當衰變系列的子核半衰期遠小於母核的半衰期時，經過一段時間之後兩者之間的活度會達到平衡；如果母核的半衰期非常長，則子核的活度會隨時間增加而於平衡時達到定值。將4個系列選出的鈾系核種及子核，計算其放射毒性隨時間的變化後，整個鈾系核種及子核最終選出21個核種，連同分裂及活化產物，總計篩選出34個重要核種。在數量方面，SNFD2009報告有37個，其中多了Ni-63、Rb-87、Mo-93、Sm-147及Pu-241，少了Pb-210及Ac-227。Ni-63及Mo-93為活化產物，長期放射毒性貢獻相較其他活化產物為低；Rb-87及Sm-147雖為長半衰期分裂產物，然其RI值小於0.01，貢獻遠低於其他重要分裂產物；Pu-241半衰期14年雖略大於10年，然考量其在衰變系列中半衰期短於母核Cm-246及子核Am-241，因此，予以排除。此研究內容與(SKB, 2010b)報告的結果相同。上述結果可作為實驗及安全評估之參考。

3.3.7.1.1.4. 用過核子燃料最終處置放射毒性與天然鈾礦之比較

核子燃料從天然鈾礦中提煉U-238的體積變化，大約8 t的天然鈾可以濃縮產生1 t的濃縮鈾燃料。將上述結果，與天然鈾礦的放射毒性作一比較，如圖 3-105。該圖中，深藍色的曲線為34個重要核種總放射毒性隨處置時間之變化，粉紅色為鈾系核種及子核放射毒性，紅色為分裂及活化產物。整體放射毒性要到 3.0×10^5 年左右才能降到8 t天然鈾(相當於1 t之3.5%濃縮鈾燃料)的放射毒性水準；如果要降至1 t天然鈾的放射毒性則甚至要到百萬年以後。

3.3.7.1.1.5. 劑量評估參數蒐集結果

目前ICRP尚未根據103號報告(ICRP, 2007)的精神將DCF重新制定，然而於2012年公布第119號報告，將最新的DCF參數納入在該報告中。ICRP119號報告中修訂DCF的範圍如下：

- (1) 原先公布的DCF資料中，Pa-233及U-231的資料有誤。
- (2) 使用最新的生理動力學模式來計算一般民眾體內劑量。

- (3) 工作人員DCF納入部分核種(H-3、C-14、Ru-106、Te-121、I-131等)氣態的物種。
- (4) 部分核種介穩態(metastable)能階重新修訂，因而影響DCF數值。

根據上述說明，本研究蒐集ICRP第119號報告的DCF，並與國內頒布的「游離輻射防護安全標準」內容作比較，表 3-36呈現本研究中篩選出34個用過核子燃料關鍵核種的比較結果，顯示ICRP第119號報告的DCF與目前國內頒布的DCF標準兩者數值完全相同。

3.3.7.1.1.6. 小結

本研究總共篩選出34個關鍵核種，其中分裂及活化產物13個核種，分別為Sr-90、Cs-137、Tc-99、Zr-93、Pd-107、I-129、Cs-135、Sn-126、Se-79、C-14、Cl-36、Ni-59、Nb-94；鈾系核種及子核21個，分別為Th-232、U-236、Pu-240、Th-229、U-233、Np-237、Am-241、Cm-245、Pb-210、Ra-226、Th-230、U-234、U-238、Pu-238、Pu-242、Cm-246、Ac-227、Pa-231、U-235、Pu-239、Am-243。處置初期，總放射毒性主要由分裂及活化產物貢獻，尤其是Sr-90及Cs-137；當300年後，分裂及活化產物放射毒性大幅降低，剩下Tc-99及I-129等長半衰期核種。總放射毒性在約60年後主要由鈾系核種及子核貢獻，因為Np-237(半衰期 2.14×10^6 年)、Pu-239(半衰期 2.4×10^4 年)等鈾系核種，以及Ac-227、Ra-226、Pb-210等子核的毒性隨時間增加累積。整體放射毒性要到 3.0×10^5 年左右才能降到8 t天然鈾(相當於1 t 3.5%濃縮鈾燃料)的毒性水準；如果要降至1 t天然鈾燃的毒性則約需百萬年以後。

在劑量轉換因數DCF方面，本研究已經將2012年第119號報告中，最新的DCF參數完成建檔，並與國內頒布的「游離輻射防護安全標準」內容作比較。以本研究34個用過核子燃料重要核種的DCF來看，119號報告與目前國內頒布的標準比較後發現兩者數值完全相同。

表 3-36：本研究34個重要核種之ICRP 119號報告吸入及嚥入劑量係數DCF與目前國內頒布標準之比較

	嚥入 (職業)	吸入 (公眾)	嚥入(公眾)
C-14	5.8×10^{-10}	5.8×10^{-9}	5.8×10^{-10}
Cl-36	9.3×10^{-10}	7.3×10^{-9}	9.3×10^{-10}
Ni-59	6.3×10^{-11}	4.4×10^{-10}	6.3×10^{-11}
Se-79	2.9×10^{-9}	6.8×10^{-9}	2.9×10^{-9}
Sr-90	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}	2.8×10^{-8}
Zr-93	2.8×10^{-10}	2.5×10^{-8}	1.1×10^{-9}
Nb-94	1.7×10^{-9}	4.9×10^{-8}	1.7×10^{-9}
Tc-99	7.8×10^{-10}	1.3×10^{-8}	6.4×10^{-10}
Pd-107	3.7×10^{-11}	5.9×10^{-10}	3.7×10^{-11}
Sb-126	2.4×10^{-9}	3.2×10^{-9}	2.4×10^{-9}
I-129	1.1×10^{-7}	3.6×10^{-8}	1.1×10^{-7}
Cs-135	2.0×10^{-9}	8.6×10^{-9}	2.0×10^{-9}
Cs-137	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}	1.3×10^{-8}
Pb-210	6.8×10^{-7}	5.6×10^{-6}	6.9×10^{-7}
Ra-226	2.8×10^{-7}	9.5×10^{-6}	2.8×10^{-7}
Ac-227	1.1×10^{-6}	5.5×10^{-4}	1.1×10^{-6}
Th-229	4.8×10^{-7}	2.4×10^{-4}	4.9×10^{-7}
Th-230	2.1×10^{-7}	1.0×10^{-4}	2.1×10^{-7}
Th-232	2.2×10^{-7}	1.1×10^{-4}	2.3×10^{-7}
Pa-231	7.1×10^{-7}	1.4×10^{-4}	7.1×10^{-7}
U-233	5.0×10^{-8}	9.6×10^{-6}	5.1×10^{-8}
U-234	4.9×10^{-8}	9.4×10^{-6}	4.9×10^{-8}
U-235	4.6×10^{-8}	8.5×10^{-6}	4.7×10^{-8}
U-236	4.6×10^{-8}	8.7×10^{-6}	4.7×10^{-8}
U-238	4.4×10^{-8}	8.0×10^{-6}	4.5×10^{-8}
Np-237	1.1×10^{-7}	5.0×10^{-5}	1.1×10^{-7}
Pu-238	2.3×10^{-7}	1.1×10^{-4}	2.3×10^{-7}
Pu-239	2.5×10^{-7}	1.2×10^{-4}	2.5×10^{-7}
Pu-240	2.5×10^{-7}	1.2×10^{-4}	2.5×10^{-7}
Pu-242	2.4×10^{-7}	1.1×10^{-4}	2.4×10^{-7}
Am-241	2.0×10^{-7}	9.6×10^{-5}	2.0×10^{-7}
Am-243	2.0×10^{-7}	9.6×10^{-5}	2.0×10^{-7}
Cm-245	2.1×10^{-7}	9.9×10^{-5}	2.1×10^{-7}
Cm-246	2.1×10^{-7}	9.8×10^{-5}	2.1×10^{-7}

(上方為ICRP 119號報告數值，下方為國內現行標準值，單位為西弗/貝克)

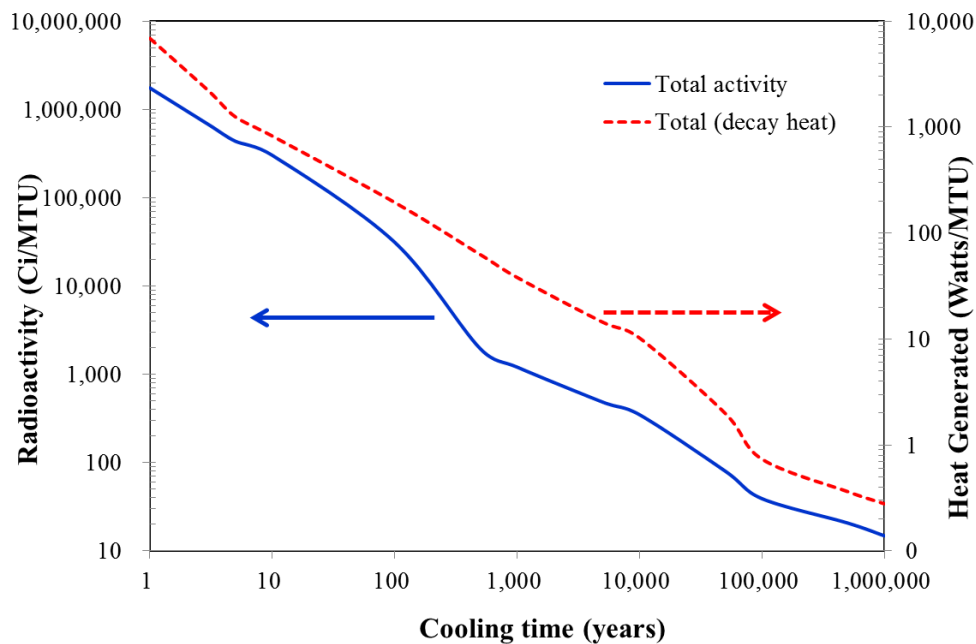


圖 3-102：國內用過核子燃料案例之核種存量活度及衰變熱分布

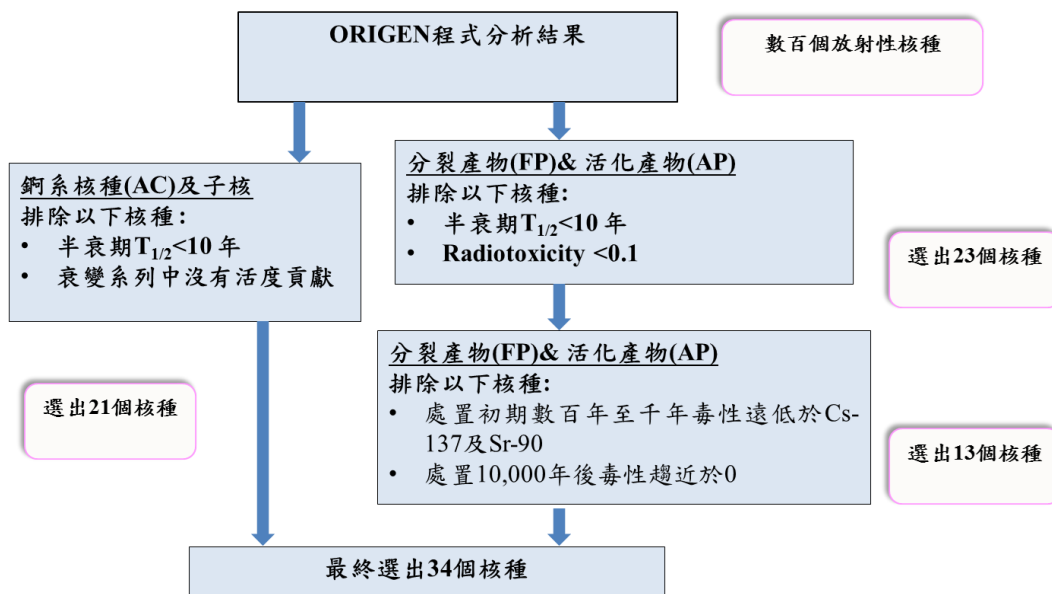


圖 3-103：國內用過核子燃料關鍵核種篩選流程

Fission & Activation

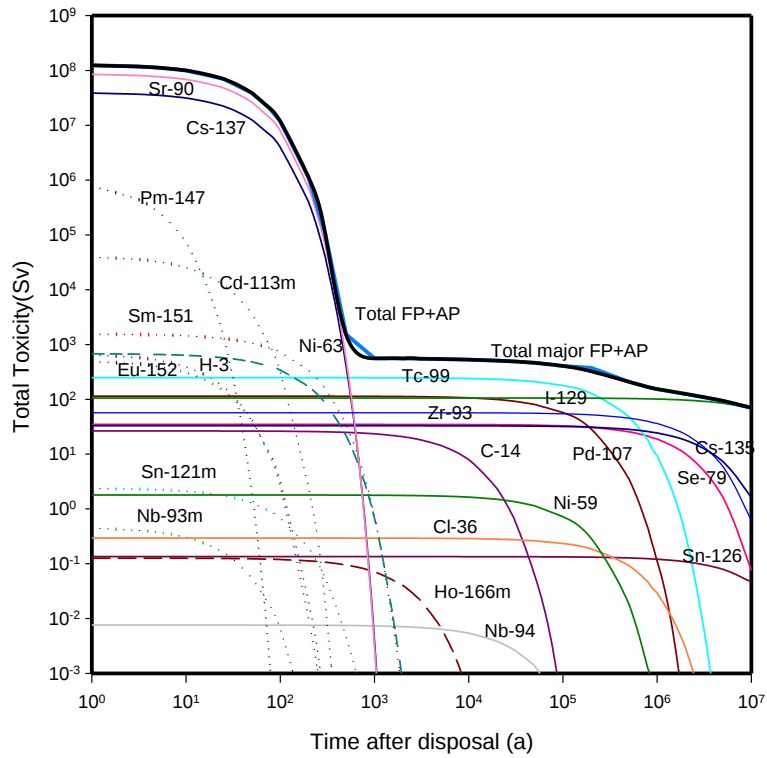


圖 3-104：分裂產物及活化產物最終處置後放射毒性隨時間變化

Spent nuclear fuel vs Natural Uranium

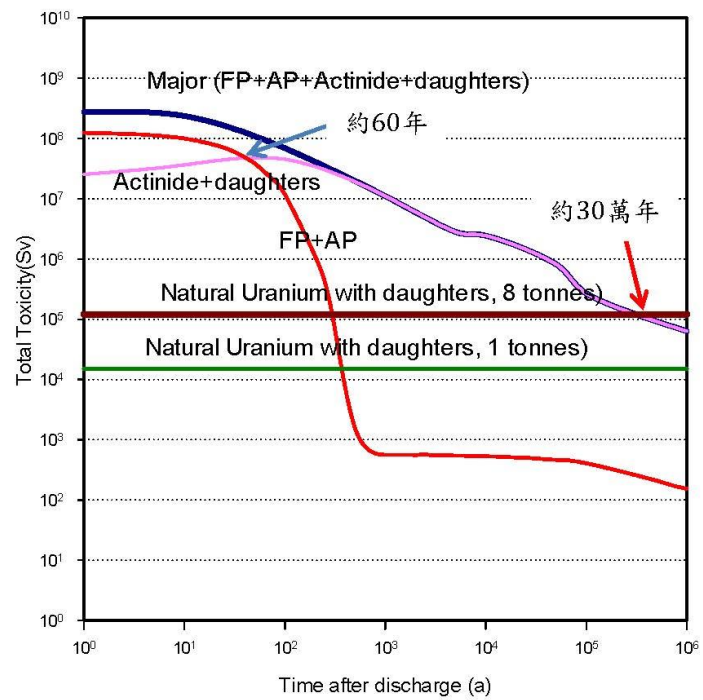


圖 3-105：用過核子燃料放射毒性與天然鈾礦之比較

3.3.7.1.2. 近場及遠場核種特性參數之評估研究

日本H12報告遠場核種相關參數來自日本國內研究單位室內實驗，例如：東海研究所的ENTRY(ENgineering-scale Test & Research facilitY)及QUALITY(QUAntitative Assessment radionuclide migration experiment FaciLITY)等，以及在東濃鈾礦床，釜石礦坑道等進行現地實驗的資料為主，也包含來自國際合作(例如瑞士Grimsel計畫)等所獲得的資料；本研究除蒐集日本H12報告的參數資料外，也同時蒐集分析國際相關研究單位的遠場核種參數，配合國內現場調查之水文地質地球化學等資料進行數據的蒐集與研析，提供地質圈評估分析之用。

本項工作於103年工作成果如下所述。

3.3.7.1.2.1. 近場核種遷移相關參數

3.3.7.1.2.1.1. 芬蘭

在芬蘭POSIVA公司於2013年針對Olkiluoto之用過核子燃料安全最終處置案例的研究調查成果報告(POSIVA, 2013)列舉近場核種參數，其有關近場核種重要特性與參數資料(如：溶解度、分配係數、擴散係數等)均已完整呈現於該報告第七章「Models for the Analysis of Radionuclide Release Scenarios」內，本章節僅相關整理核種特性參數部分(溶解度限值、分配係數Kd與擴散係數De)如表 3-37及表 3-38。

3.3.7.1.2.1.2. 瑞典

瑞典SKB公司在2011年針對參考案例Forsmark之用過核子燃料安全最終處置案例提出研究調查成果報告TR-11-01(SK B, 2011)，該報告中提及的近場核種重要特性與參數資料(如：溶解度、分配係數、擴散係數等)均列於TR-06-32「Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can」(SKB, 2006)與TR-10-52

「Data report for the safety assessment SR-Site」(SKB, 2010c)，整理核種特性相關參數(溶解度、分配係數 K_d)如表 3-39及表 3-40。

3.3.7.1.2.2. 遠場核種遷移相關參數

3.3.7.1.2.2.1. 瑞典

瑞典SKB公司針對Forsmark之用過核子燃料安全最終處置案例的研究調查成果報告有關遠場核種重要特性與參數資料(如：溶解度、分配係數、擴散係數等)均列於TR-06-32(SK B, 2006)與TR-10-52(SK B, 2010c)中，整理核種相關特性參數部分(分配係數 K_d)如表 3-40所示。

3.3.7.1.3. 小結

在近場與遠場重要核種參數文獻蒐集與資料整理工作中，預計以芬蘭、日本、瑞典、瑞士、美國及中國等6國相關最終處置計畫文獻資料為主。彙整結果可作為國內核種遷移參數實驗結果的比較參考，亦可作為安全評估參考案例的參數不確定分析之依據。

表 3-37：參考案例Olkiluoto中主要核種之溶解度限值-廢棄物罐、緩衝材料、回填材料、參考案例

Element	Solubility limits [mol/L]			
	Canister internal void space	Buffer	Backfill	Reference Case (Brackish water)
Ag(I)	5.10×10^{-6}	1.40×10^{-5}	1.02×10^{-5}	5.10×10^{-6}
Am(III)	6.00×10^{-6}	6.30×10^{-6}	1.12×10^{-5}	1.12×10^{-5}
Be(II)	4.39×10^{-6}	5.99×10^{-6}	5.71×10^{-6}	4.39×10^{-6}
Corg				Unlimited
Cl(-1)				Unlimited
Cm(III)	6.00×10^{-6}	6.30×10^{-6}	1.12×10^{-5}	6.00×10^{-6}
Cs(I)				Unlimited
I(-1)				Unlimited
Mo(VI)	2.04×10^{-6}	3.70×10^{-8}	4.68×10^{-8}	2.40×10^{-6}
Nb(V)	1.90×10^{-7}	1.50×10^{-7}	1.47×10^{-7}	1.90×10^{-7}
Ni(II)	8.30×10^{-4}	1.50×10^{-3}	1.73×10^{-3}	8.30×10^{-4}
Np(IV)	1.00×10^{-9}	1.00×10^{-9}	1.01×10^{-9}	1.01×10^{-9}
Pa(V)	1.00×10^{-8}	1.00×10^{-8}	1.00×10^{-8}	1.00×10^{-8}
Pd(II)	3.90×10^{-6}	3.90×10^{-6}	3.83×10^{-6}	3.90×10^{-6}
Pu(III,IV)	4.30×10^{-10}	5.70×10^{-9}	6.32×10^{-9}	6.32×10^{-9}
Ra(II)	6.70×10^{-11}	4.80×10^{-11}	3.24×10^{-11}	6.70×10^{-11}
Se(-II)	5.90×10^{-11}	4.30×10^{-10}	2.79×10^{-10}	5.91×10^{-11}
Sm(III)	3.60×10^{-7}	5.30×10^{-7}	7.16×10^{-7}	3.60×10^{-7}
Sn(IV)	6.30×10^{-8}	5.90×10^{-8}	5.84×10^{-8}	6.30×10^{-8}
Sr(II)	7.40×10^{-4}	6.70×10^{-4}	3.55×10^{-4}	7.40×10^{-4}
Tc(IV)	3.90×10^{-9}	3.80×10^{-9}	3.78×10^{-9}	3.90×10^{-9}
Th(IV)	4.20×10^{-9}	3.60×10^{-9}	3.49×10^{-9}	4.20×10^{-9}
U(IV,VI)	2.40×10^{-8}	3.70×10^{-9}	3.81×10^{-9}	2.40×10^{-8}
Zr(IV)	1.80×10^{-8}	1.40×10^{-8}	1.72×10^{-8}	1.80×10^{-8}

資料來源：摘自 POSIVA (2013)

表 3-38：參考案例Olkiluoto重要核種分配係數 K_d 擴散係數 D_e 緩衝材料及回填材料

	$K_d[m^3/kg]$		$D_e[m^2/s]$	
	Buffer	Backfill	Buffer	Backfill
Ag(I)	0	0	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Am(III)	3.2×10^1	1.8×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Be(II)	3.2×10^1	5.5×10^1	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Corg	0	0	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Cl(-1)	0	0	7.8×10^{-12}	7.4×10^{-12}
Cm(III)	3.2×10^1	1.8×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Cs(I)	4.8×10^{-2}	6.1×10^{-1}	1.0×10^{-9}	9.5×10^{-10}
I(-1)	0	0	7.8×10^{-12}	7.4×10^{-12}
Mo(VI)	2.1×10^{-2}	1.9×10^{-2}	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Nb(V)	5.4	3	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Ni(II)	2.4×10^{-1}	1.5	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Np(IV)	6.3×10^1	1.1×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Pa(V)	8.1×10^1	5.7×10^1	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Pd(II)	2.7×10^{-1}	2.0	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Pu(III,IV)	9.9×10^1	1.9×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Ra(II)	1.4×10^{-3}	9.8×10^{-4}	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Se(-II)	0	0	7.8×10^{-12}	7.4×10^{-12}
Sm(III)	1.0×10^1	4.9×10^1	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Sn(IV)	5.0×10^1	1.0×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Sr(II)	1.4×10^{-3}	9.8×10^{-4}	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Tc(IV)	6.3×10^1	1.1×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Th(IV)	6.3×10^1	1.1×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
U(IV,VI)	5.2×10^1	1.1×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}
Zr(IV)	6.3×10^1	1.1×10^2	1.3×10^{-10}	9.0×10^{-11}

資料來源：摘自POSIVA (2013)

表 3-39：參考案例Forsmark中主要核種之溶解度

Element	Solubility limits [mol/L]
	Reference Case (Forsmark groundwater)
Ag	4.4×10^{-6}
Am	8.7×10^{-6}
C	7.1×10^{-3}
Cm	8.7×10^{-6}
Cs	n.s.l.(No solubility limit)
Ho	1.2×10^{-6}
Nb	2.4×10^{-5}
Ni	5.5×10^{-5}
Np	1.0×10^{-9}
Pa	3.0×10^{-7}
Pd	2.9×10^{-6}
Pu	1.3×10^{-7}
Ra	9.8×10^{-8}
Se	1.4×10^{-10}
Sm	4.4×10^{-7}
Sn	8.6×10^{-8}
Sr	6.7×10^{-4}
Tc	4.4×10^{-9}
Th	7.9×10^{-7}
U	9.5×10^{-9}
Zr	9.7×10^{-9}

資料來源：摘自SKB(2006)

表 3-40：參考案例Forsmark中主要核種之分配係數(K_d) [m^3/kg]

Element	近場	遠場
Ac	5	1.48×10^{-2}
Am	24	3.49×10^{-4}
C	0	1.48×10^{-2}
Cd	0.07	0
Ce	5	1.10×10^{-3}
Cl	0	0
Cm	24	1.48×10^{-2}
Cs	5	3.49×10^{-4}
Eu	5	1.48×10^{-2}
Ho	5	0
I	0	1.48×10^{-2}
Mo	0	0
Nb	3	0
Ni	0.07	1.98×10^{-2}
Np	40	1.10×10^{-3}
Pa	3	5.29×10^{-2}
Pb	46	5.92×10^{-2}
Pd	5	2.52×10^{-2}
Pu	43	5.20×10^{-2}
Rn	0	1.48×10^{-2}
S	0	2.42×10^{-4}
Se	0	0
Sm	5	2.95×10^{-4}
Sn	40	1.48×10^{-2}
Tc	40	1.59×10^{-1}
Th	40	3.42×10^{-6}
U	40	5.29×10^{-2}
Zr	5	5.29×10^{-2}
		5.29×10^{-2}
		2.13×10^{-2}
		1.48×10^{-2}

資料來源：摘自SKB(2010c)

3.3.7.1.4. 生物圈核種劑量轉換因素之發展

本計畫於103年工作中，除已依工作計畫書進行ICRP60及103號報告核種劑量轉換因數蒐集與分析外(詳第3.3.7.1.1.5節之劑量評估參數蒐集結果)，亦為建立國內在地性之評估需技術，進行生物圈核種劑量轉換因素之發展，其工作成果說明如下。

日本H12報告中生物圈參考案例之GBI為平原河流，其選擇依據係基於日本國民中有80%比例居住於平原區，並且70%飲用水及85%灌溉水係取自於河流或水庫，因此，選擇平原河流做為參考案例之GBI。其中假設放射性核種自處置場，沿著處置母岩的主導水裂隙(major water-conducting fault, MWCF)進入近地表含水層，接著以河流為地質圈-生物圈界面(geosphere-biosphere interface, GBI)進入生物圈中，使人類受到輻射曝露。

我國人口分布由於與日本相近，皆集中居住於平原區域，因此，以日本H12報告之生物圈模型為範例，利用國際生物圈通用劑量評估AMBER程式，進行34個關鍵核種設定、概念模型建置與區塊間核種遷移運算，以建立我國生物圈劑量評估之技術。此概念模型中共區分為六個區塊，分別為表土、可變動之飽和含水層、河流、河流沉積物、近海與近海沉積物，其放射性核種假設以1 Bq·y⁻¹之速率由地下水直接進入淡水河流，並忽略此過程中核種之衰變與遲滯作用所造成濃度損失，接著在不同區塊間進行核種傳輸。

H12報告中共有3類關鍵曝露群體，分別為農耕(farming)、淡水漁撈(freshwater fishing)與海洋漁撈(marine fishing)曝露群體。以農耕曝露群體為例，共有7個輻射曝露途徑，包括4個嚥入曝露途徑、1個吸入曝露途徑及2個體外曝露途徑。其中嚥入農產品又可分為稻米、穀類、根類蔬菜、葉菜類蔬菜與水果等5種，各類農產品中放射性核種活度，係以H12報告中所提供公式進行計算：

$$C_{crop} = \frac{(CF_{crop} + (1 - F_{crop})S_{crop})C_{ss}}{(1 - \theta_{ss})\rho_{ss}} + \mu_{crop}(d_{icrop}C_{rw}) \left[\frac{(1 - F_{crop}) + F_{trans}}{Y_{crop} * W_{crop}} \right] \quad (3-18)$$

其中，

C_{crop} ：農產品中放射性核種活度， $[\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}]$

CF_{crop} ：農產品之核種遷移係數， $[-]$

F_{crop} ：經由食物處理造成放射性核種活度損失率， $[-]$

Sc_{crop} ：土壤至農產品之核種遷移係數， $[-]$

C_{ss} ：表土區塊中放射性核種活度， $[\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}]$

θ_{ss} ：表土區塊中土壤總孔隙率， $[-]$

ρ_{gss} ：表土區塊中土壤總孔隙率， $[-]$

μ_{crop} ：灌溉水於農產品之截獲率， $[-]$

d_{icrop} ：農產品中灌溉水深度， $[\text{m} \cdot \text{y}^{-1}]$

C_{rw} ：淡水河流中放射性核種活度， $[\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}]$

F_{trans} ：放射性核種由植物外部表面轉移至內部之比例， $[-]$

Y_{crop} ：農產品產量， $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$

W_{crop} ：風化速率， $[\text{y}^{-1}]$

接著將農產品中放射性核種活度，乘上關鍵群體之農產品攝食率與嚥入之劑量轉換係數，即可求得農耕曝露群體中嚥入農產品之通量劑量轉換係數(flux to dose conversion factor)，如圖 3-106所示。隨後再分別求得其他6個曝露途徑之通量劑量轉換係數，加總後則為農耕曝露群體34個關鍵核種隨時間之通量劑量轉換係數，如圖 3-107所示。此運算結果與日本H12報告結果一致，顯示本團隊已完成複雜生物圈劑量計算技術之建立。

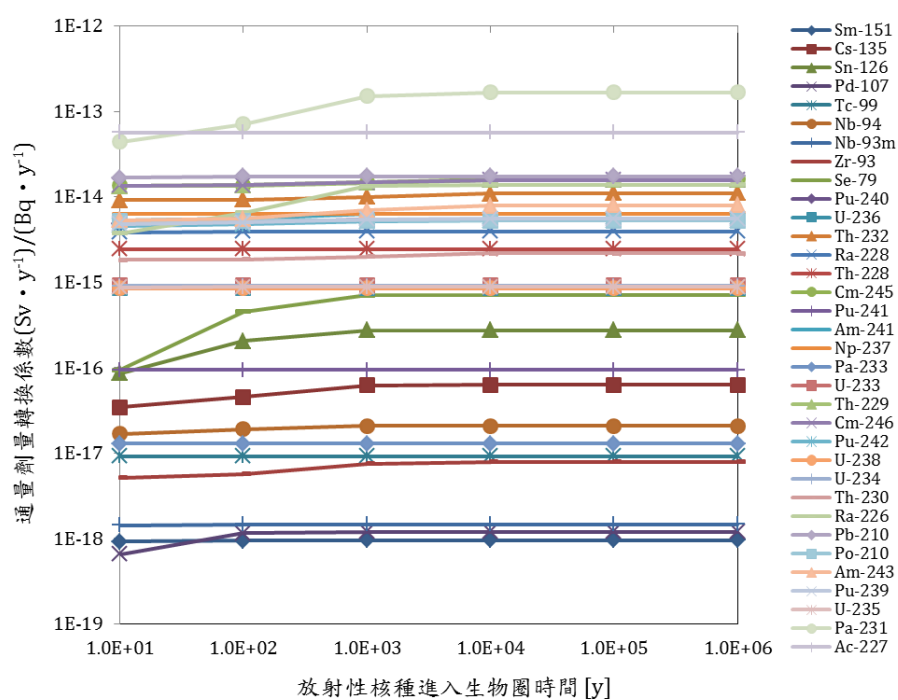


圖 3-106：吸入農產品曝露途徑之通量劑量轉換係數

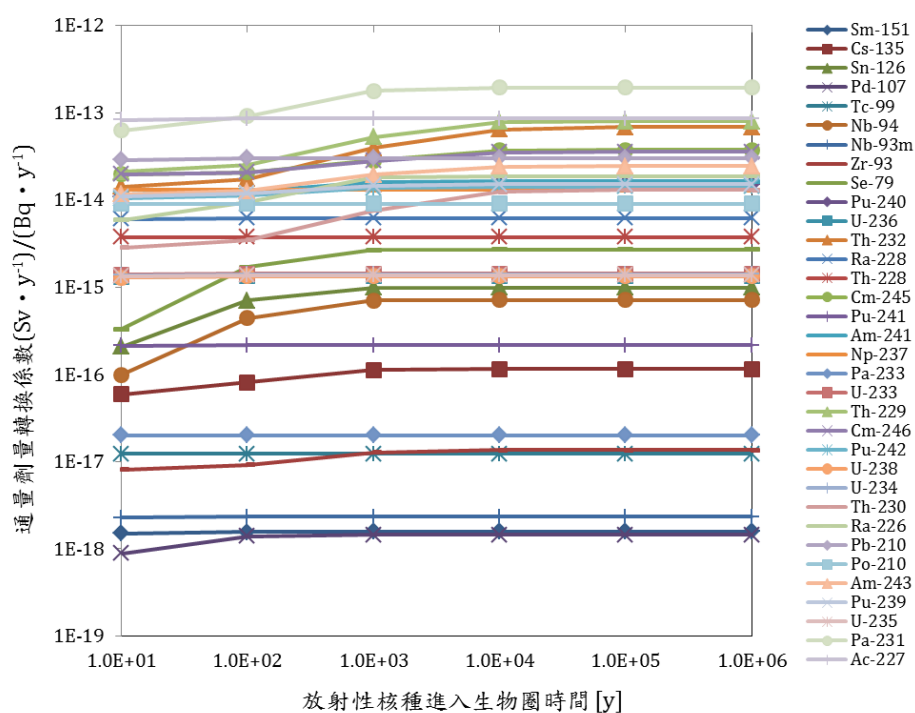


圖 3-107：農耕曝露群體之通量劑量轉換係數

3.3.7.2. 參數不確定性分析

日本H12報告主要在此章節內容說明：根據參考案例與替代案例的分析比較，定義資料不確定性、模式不確定性和情節不確定性中，對處置設施評估重要或可能重要的關鍵因素(JNC, 2000a)。

SNFD2017報告將根據前述參考案例與替代案例的分析比較結果，提出對處置設施評估重要或可能重要的關鍵因素，作為後續研究的參考依據。

針對資料不確定性、模式不確定性和情節不確定性的分類，103年工作成果在不確定性與參數敏感性相關文獻的蒐整，由於文獻內容繁雜，故僅呈現其本期分析成果。

3.3.7.2.1. 不確定性分析技術

由國內、國外有關不確定性分析技術的報告書和論文回顧，可以瞭解目前各國使用的不確定性分析技術進展及國內不確定性分析技術的應用近況。國外有關不確定性分析技術的報告書中，日本考慮計算案例的數量後，選擇定義可能案例進行定率式分析，瑞典與芬蘭都只在FEPs中討論其不確定性，這3個國家報告均是進行定率式分析。

國外有關不確定性分析技術的論文可粗略分成4類，包括(1)不確定性分析來源的研究(Helton et al., 2004)；(2)不確定性分析方法論的改良與開發(Franceschini et al., 2012)；(3)國際安全評估會議結果的討論(Helton et al., 2012)；(4)不確定性分析技術於各領域的應用案例，如水文不確定性分析(周平與朱仁義，2010)。論文中不確定性結果的呈現方法有：平均值、標準差、機率密度函數、累積分布函數(cumulative distribution function, CDF)、互補累計分布函數(complementary cumulative distribution function, CCDF)、方盒圖以及Helton et al. (1995)提出一種將CCDF轉換成平均值的表示法，其中平均值、標準差於大量的不確定性資訊中較沒有代表性，此時使用CDF、CCDF、方盒圖會有較好的表現。

回顧的文獻中不確定性分析方法包括：蒙地卡羅法(MCS)、微分分析(differential analysis, DA)、反應曲面法(Response Surface Method, RSM)、傅立葉幅度敏感度檢驗(Fourier amplitude sensitivity test, FAST)、多變量分析法、點估計法(Harr method, Li' s method and Rosenblueth method)、貝葉斯理論，值得注意的是用過核子燃料最終處置設施安全評估中，常使用的方法為Monte Carlo法、微分分析、反應曲面法、傅立葉幅度敏感度檢驗、常用的ET/FT和3類動態PSA法。然而沒有一種不確定性分析技術適合所有案例，任何一種不確定性分析技術都有其優缺點及適合的案例。

3.3.7.2.2. 參數敏感度分析技術

在不確定性分析與敏感度分析的研究中，必須了解模式輸出中有多少不確定性(不確定性分析)，更應該瞭解不確定性是來自那裡(敏感度分析)；因此，不確定性分析與敏感度分析技術是一體兩面的，大部分探討不確定性分析的研究，都會探討敏感度分析。回顧國外有關敏感度分析技術的論文中，指出許多敏感度分析技術被應用於各領域，如傅立葉幅度敏感度檢驗(FAST)、經驗設計法(the design of experiments method)、Sobol的方法、McKay' s one-way ANOVA method moment independent approaches、散布圖檢驗、相關性分析、回歸分析(RA)、部分相關分析(part correlation analysis, PCA)、階級轉換、網格化型態的統計檢定、網格化型態的熵檢定、非參數型回歸分析、平方階級不同(SRD)和階級相關係數檢定(RCC)、二維度的Kolmogorov – Smirnov檢定(KS-Test)、距離量測型態的檢定和上下調和係數(TDCC)。其次取樣方法也對不確定性、敏感度分析技術結果影響相當大，文獻回顧中取樣的方法有：蒙地卡羅隨機取樣、重點取樣、成層取樣及拉丁超立體取樣，其中又以拉丁超立體取樣(Latin Hypercube Sampling, LHS)最廣泛應用。目前各國使用的功能/安全評估參數敏感度分析都是取上下兩組級距，進行定率式的參數敏感度分析，而近年來已經開始發展全域敏感度分析。

3.3.7.2.3. 小結

國內用過核子燃料處置計畫歷經了5個計畫階段，從1986年至今進行了許多系統整合評估等相關報告，其中包含不確定性分析技術。針對歷年的研究結果，本計畫已開發完成一套全系統功能評估軟體(INER-TSPA)，其參數取樣方法有拉丁超立體法(LHS)與隨機法2種；而取樣數據排列方式有隨機、無相關及特定相關等3種。此外，INER-TSPA之參數敏感度分析，則提供階步回歸、EASI-FAST及KS-Test等3種技術，可供進行SNFD2017報告運用。

INER-TSPA為核能研究所應用微軟之 Visual Basic 6.0 程式語言開發完成一套在Windows環境下操作之軟體，其軟體程式架構設計，係由眾多之獨立子系統所組合而成。在INER-TSPA中，分別納入近場外釋評估程式、遠場傳輸評估程式、生物圈人體輻射劑量率評估程式，以進行核種釋出率與輻射劑量率的定率式分析；而針對參數之分布型態，INER-TSPA提供最常見之10種數學函數，即均一(uniform)與對數均一(log-uniform)、常態(normal)與對數常態(log-normal)、三角型(triangle)與對數三角形(log-triangle)、Gamma、Beta、Weibull、及負指數(exponential decay)等，供設定分佈型參數時選用；並可應用參數取樣程式(如拉丁超立體與蒙地卡羅等兩種取樣方法)及數據組排列程式(如隨機、無相關與特定相關等三種取排列方式)取得參數數據組，並進行近場外釋、遠場傳輸、生物圈人體輻射劑量率之多重運算；在不確定性分析上，INER-TSPA可進行百分位數(5-percentile、50-percentile、95-percentile)與平均值等結果分析；在參數敏感度分析上，INER-TSPA 可進行階步回歸與搭配 EASI 法之傅立葉振幅敏感測驗(Fourier amplitude sensitivity test equipped with EASI method, EASI-FAST)等兩種方法；在機率式分析上，INER-TSPA 提供各種 CCDF 分佈結果，以及用於判斷機率式分析結果之收斂與否的 KS-test (Kolmogorov-Smirnov statistic test)技術。

3.3.8. 安全評估的可信度

日本H12報告以地質環境資料、工程技術方法，及安全評估案例分析，來論述報告的可行性外，並以「情節、模式、模組及資料庫建置」、「天然類比研究」，以及「評估報告的比較」等，輔助說明該報告的可信度。國內亦將以此作為SNFD2017報告的基本論述。

國內用過核子燃料最終處置歷經多年來的發展，102年度計畫已完成階段性功能/安全評估成果彙編，具有溫故知新與鑒往知來的意涵，整合既有的技術成果與創造新的應用價值之效益，以作為後續研發規劃之參考應用。報告成果可為SNFD2017報告中論述，利用104年至106年兩年期工作期間，規劃參考H12報告說明本計畫情節發展、評估程式與分析模組及相關評估數據等建置的具體措施，建立用過核子燃料特性資料庫，作為增進公眾對於安全評估技術的信心。

3.3.8.1. 天然類比研究

日本H12報告在說明：天然類比用以瞭解與處置設施相關現象的發展，並將天然類比區分為地質環境穩定與其保留核種的能力、工程障壁的演化，和地質圈遲滯核種遷移等3大主題(JNC, 2000a)。

本章節內容為本期研究內容之一，相關成果呈現如下。SNFD2017報告參考日本H12報告架構進行彙整說明。

天然類比研究在深層地質處置設施安全評估中，為重要的驗證方法，可補充實驗室試驗及現地試驗在時間與空間尺度上的不足，並提高深層地質處置概念技術評估之信賴度。

3.3.8.1.1. 地質處置的天然類比

放射性廢棄物地質處置的天然類比，其主要的目的為(1)藉由研究可以類比地質處置系統的自然現象，來增進我們對在地質時間尺度下是否符合預期結果的了解(包括放射性核種的遷移與遲滯)；(2)增進利用短期實驗室驗證數據評估處置系統的可靠度。

(1) 天然鈾系核種的遷移與遲滯

(a) 東濃鈾礦床

東濃鈾礦床形成於大概1千萬年前，為日本目前最大的鈾礦床(Ochiai et al., 1989)。該礦區的基岩主要由7千萬年前的花崗岩所組成(1969; Suzuki and Adachi, 1998)，距今2千萬年到1.5千萬年時，這個區域被淺海或是內陸湖所淹沒(Itoigawa, 1974)，沉積了砂質與凝灰質的瑞浪群(mizunami group)沉積層覆蓋於基岩之上。

在過去5 Ma到15 Ma間，東濃一帶的區域因為月吉(tsukiyoshi)斷層的錯動抬升而造成瑞浪群地層的出露(Itoigawa, 1980)，一般認為這條斷層是在礦化作用之後所形成，而瑞浪群最少垂直位移了30 m。雖然鈾礦被這條斷層截切，但並沒有因此造成鈾元素的遷移。即使在斷層錯動、地殼抬升、地表沉陷、剝蝕作用、沉積作用及氣候與海水面的變化之下，東濃鈾礦床在1千萬年前形成之後仍得以被保留。這表示在該區域深處的地質環境下，這些過程並沒有明顯的影響像是酸鹼度pH與氧化還原電位Eh等控制鈾元素遷移的地球化學參數。

由地球化學的分析結果，顯示岩石和地下水的交互作用，是造岩礦物達到飽和，且形成強還原環境的主要原因(Iwatsuki et al., 1995)。在該礦床不同區域的岩石樣本中所收集到的鈾系核種，被發現時幾乎都已達到放射性平衡(Yusa and Yoshida, 1993)，根據母核種的半衰期達到放射性平衡所需要的時間來看，這些核種已經在封閉的系統當中保存了相當長的時間(Yoshida et al., 1994)。

(b) 奧克羅(Oklo)鈾礦床

非洲加彭共和國的奧克羅鈾礦床在過去的2 Ma間，以其天然的條件進行了核分裂的連鎖反應。周圍的岩石溫度因為此連鎖反應放熱估計可達到350°C，分裂後的產物估計至少可達到數噸(Gauthier-Lafeye and Weber, 1989)。其中有幾個核種

在奧克羅天然反應爐地質環境下的行為被發現，而值得參考 (Hidaka and Holliger, 1998)：

- (i) 鈾和鈾大多殘留在核分裂發生的地方。
- (ii) 向外遷移的成分當中，鈾會和鋇與銫一起殘留在周圍的黏土層中。
- (iii) 稀土元素並不會自核分裂的地方向外遷移。
- (iv) 即使在近地表的氧化環境下，也只有少數元素像是鋇與銫，會從核分裂的地方遷移出來而被發現。

根據以上的結果顯示，放射性核種可以在深層地質的環境中長期保持穩定，而黏土層中的遲滯行為，就如同地質處置系統當中以黏土礦物作為工程障壁所扮演的角色。

(c) 昆嘎拉(Koongarra)鈾礦床

澳洲的昆嘎拉鈾礦床大約在17萬年年前形成，該礦床由原始沉積的主區域及鈾礦可能被含氧地下水溶解流動而再濃縮的次要區域所組成，當主區域內的鈾元素與鈾礦物在穩定狀態下共存時，次要區域則開始接觸含氧地下水而開始溶解。地球化學與電子顯微鏡的分析結果顯示，地下水中鈾的濃縮過程，含鐵礦物扮演相當重要的角色(Ohnuki et al., 1995)，這樣的發現可以用來支持目前工程障壁系統，採用碳鋼作為處置容器的佐證，即使放射性核種溶解在含氧的地下水當中，也能夠被有效的吸附。

(2) 岩體基質擴散

在以裂隙作為主要傳輸途徑的岩體中，基質擴散在遲滯核種傳輸的過程中是相當重要的。為了評估這個效應在深地質環境當中的影響，日本在釜石礦坑內進行了相關研究，天然鈾系核種的分布與放射性平衡都做了調查，核種豐度的變動取決於採自坑道壁的鑽孔岩石樣本的裂隙破裂面輪廓。

由於在基質當中地球化學的變化似乎很小，僅有在裂隙充填物當中的天然鈾系列核種，可以藉由足夠的時間達到放射性平衡而擴散到基質(Ota et al., 1999)，如圖 3-108。

在岩石裂隙周圍的蝕變區域有許多綠泥石、絹雲母(含有蝕變斜長石)與其它具有較高鈾吸附能力的礦物(Ticknor, 1994)，而天然鈾的擴散被認為會受到這些造岩礦物間的化學交互作用所影響。研究結果指出，分布在釜石礦坑內的天然鈾系核種於白堊紀花崗閃長岩中基質擴散的範圍在10 mm至100 mm之間。基質擴散的深度則受到孔隙網絡構造(分布、連通性與孔隙形狀)，以及傳輸途徑周圍礦物的吸附潛能所決定。其他國家的相關研究也有相似的結果，結晶岩當中透水裂隙的基質擴散深度範圍在數公分的數量級。基質擴散的天然類比，並不需要像是鈾礦床這類特定條件，也可以類比在一般的地質環境。

3.3.8.1.2. 金屬的天然類比

目前最常見的鋼與鐵器的天然類比腐蝕研究，主要仍是由歷史考古器物為主。Johnson and Francis (1980)為鐵或鐵合金器物迄今最為完整的研究，分析結果顯示鐵的腐蝕率趨於一致，範圍介於 $0.1 \mu\text{m/yr}$ 至 $10 \mu\text{m/yr}$ 之間，此結論也獲得Yusa et al.(1991)的印證，該研究探討供水和供氣管線的腐蝕率，這些鋼質管線埋藏於不同環境的黏土中，研究結果顯示最高腐蝕率為 $10 \mu\text{m/yr}$ ，腐蝕產物則以 FeCO_3 和鐵的氫氧化合物為主。

銅器時代以來，人類就廣為應用銅和青銅(銅和錫的合金)，因此，有關考古銅器的資訊亦相當豐富。據工研院(2003)研究獲悉，Tylecote et al.(1977)曾研究多種古銅器及銅合金(鉛、錫和錫-青銅)器物的持久性，並依不同種類的銅礦源和冶煉方法，探討這些因素對銅器持久性的差異；研究結果顯示銅和銅合金具極佳抗腐蝕性，為製作金屬廢棄物罐的合適材質。Tylecote et al.(1977)亦曾分析不同地點出土的古銅器，並針對環境與腐蝕率的關聯性進行探討，其中環境因子包括場址pH值、有機成分、二氧化碳、硫氧化物、磷氧化物等，並詳細分析銅器的成分及評估腐蝕狀況。結果顯示其中尤以錫青銅合金具抗腐蝕性，並且在典型微鹼性土壤中，各種不同的銅器平均腐蝕速率約為 $0.225 \mu\text{m/yr}$ 。Johnson and Francis (1980)亦進行廣泛性的古銅器腐

蝕研究，其採用保存較為良好且可定年之的銅器進行分析，並嘗試由銅器的年代估算腐蝕速率，結果顯示銅的長期腐蝕率介於 $0.025 \mu\text{m/yr}$ 至 $1.27 \mu\text{m/yr}$ 之間，平均腐蝕率約 $0.3 \mu\text{m/yr}$ ，其研究和Tylecote et al.(1977)具有類似的結果。

3.3.8.1.3. 膨潤土的天然類比

工程障壁系統中常以膨潤土MX-80做為緩衝材料，以其作為緩衝材料的原因，在於膨潤土可以吸收水或是有機溶液於結構層中。蒙脫石組成一般為 $(\text{Na,Ca})_{0.33}(\text{Al,Mg})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ，中間為鋁氧八面體上下為矽氧四面體所組成的三層片狀結構的黏土礦物，在晶體構造層間含水及一些交換陽離子，當膨潤土中具有75%的蒙脫石其陽離子交換容量(cation-exchange capacity, CEC)約為 1 Eq / kg ，因此具有緩衝效果(Aku Itälä, 2009)。在過去研究中得知，夯實之鈉型膨潤土濕潤後具有乾燥體積10倍以上之回脹能力(Fukue et al., 1995)。處置設施之設計可利用此回脹特性，使其填充緩衝材料塊間及處置孔周圍處置母岩之間隙。

廢棄物罐所帶來的高溫，將使得膨潤土與處置設施中的其它物質，產生化學變化，例如膨潤土變成水飽和的狀態，會與廢棄物罐的高溫金屬產生離子交換，進而讓容器發生腐蝕現象。此現象在Pusch(1982)研究中被觀察到，該實驗使用膨潤土包覆KBS-2型銅罐進行3個月至6個月的實驗，發現膨潤土中的鈉離子與被包覆的銅會進行離子交換而讓銅受到腐蝕，不過其腐蝕速率依賴於離子強度和pH，實際反應的速率仍須進一步探討。

Yusa et al.(1991)以流紋岩侵入均勻的膨潤土進行接觸交換試驗，研究發現即使在蒙脫石-伊利石組成比率不同的地區，進行伊利石化反應的活化能約為 27 kcal/mol ，這樣參數與Roberson and Lahann(1981)實驗室中所求得的 30 kcal/mol 相近；另外Pusch and Karnland(1988)研究指出蒙脫石的熱誘導溶解發生在 150°C 至 200°C 之間，並且在冷卻時產生矽質物質，這些矽質膠結會影響膨潤土的

流變性質，該研究推論150 °C為蒙脫石轉化為貝得石的關鍵溫度，而此反應可能會對放射性廢棄物的屏蔽性帶來影響。

克羅南古砲為黏土效用之類比中著名的案例，其砲身使用的是銅含量極高的材質，與瑞典用過核子燃料的廢棄物罐材料類似，研究指出其砲身被包覆在飽和的海洋黏土中(圖 3-109)，海底飽和且實密的黏土也含有與膨潤土類似的蒙脫石成分(Hallberg, 1988)；圖 3-110顯示克羅南古砲腐蝕過程中，Cu在氧化環境中轉變為Cu₂O，而砲身上殘餘熔渣中，CuO則轉變為銅碳酸鹽水合物(hydrated copper carbonat, CuCO₃(OH)₂)由於海水侵入導致不同深度氧化還原潛能的變化，並未明顯造成腐蝕產物的差異，因而認為氧不是主要的氧化媒介(Hallberg et al., 1987)。自船沉沒後，銅腐蝕速率即維持在0.15 μm/yr(Hallberg, 1988)，在如此極端環境下被包覆的銅材亦能有如此保存性，顯示膨潤土材料對處置設施的重要性。

3.3.8.1.4. 國內可能的天然類比

台灣距今約2,000年到400年前為金屬器時代，其中十三行遺址在台灣史前文化中佔有非常重要的地位(圖 3-111)，其時間大約從2,300年前開始，由出土文物判斷當時已進入鐵器時代(圖 3-112)，台灣北部地區擁有赤褐色或淺褐色拍印幾何紋硬陶的史前遺址，都屬於廣義十三行文化的範疇。就此而言，十三行文化的分布地區，在西海岸地區由淡水河沿著海岸向南一直分布到大安溪，向東則沿著北海岸、蘭陽平原一直分布到奇萊平原北側的三棧溪(臧振華與劉益昌，2001)。根據考古學者劉益昌等(2001)的看法，由時間、分布區域及文化內涵，十三行文化可再區分為早、晚兩期及7個不同的類型。其中早期為年代距今2,000年至1,000年之間，包括十三行類型、後龍底類型、番社後類型；晚期年代距今1,000年內，包括埤島橋類型、新港類型、舊社類型與普洛灣類型(劉益昌，1995)。

由上述十三行遺址蒐整資料可知，該文明已進入鐵器時代，但鐵器等金屬的天然類比，尚未有進一步的研究成果。

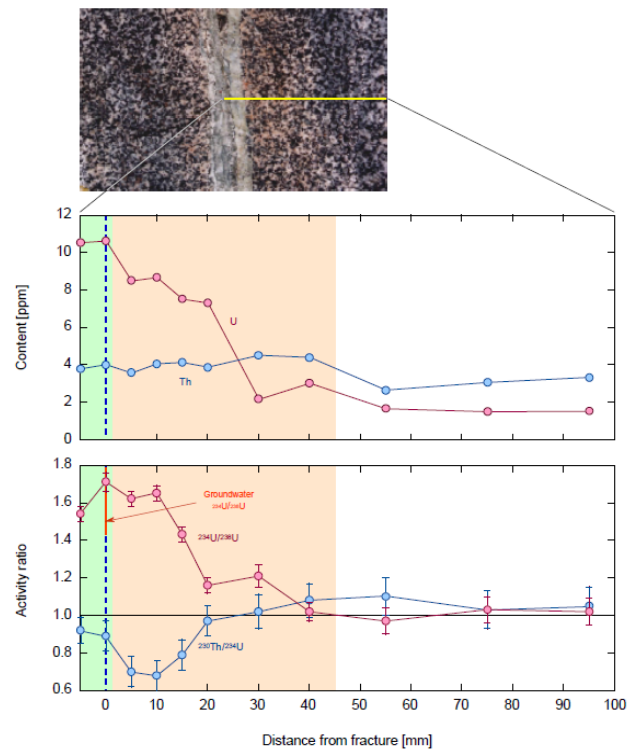


圖 3-108：釜石礦坑內花崗閃長岩基質導水裂隙內的U-238衰變序列剖面
資料來源：摘自 Ota et al.(1999)

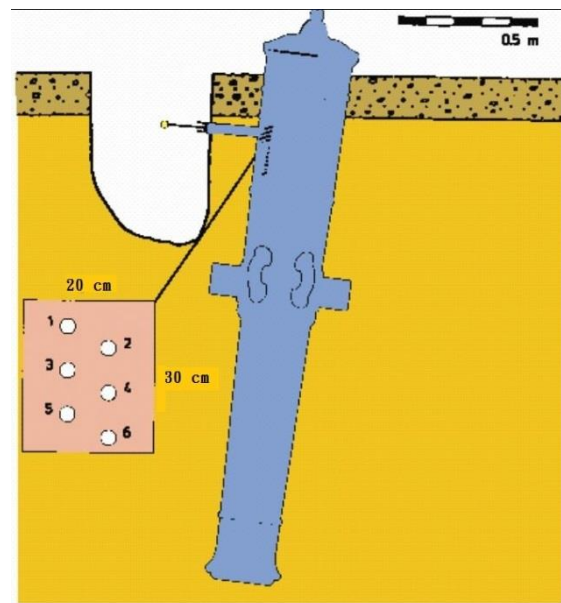


圖 3-109：埋於海底黏土的古銅砲
資料來源：摘自 Tylecote et al.(1977)

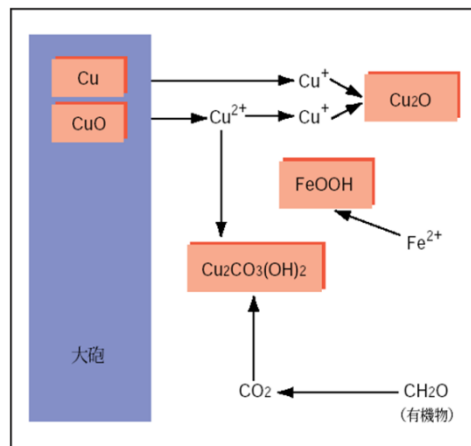


圖 3-110：古銅砲的腐蝕過程

資料來源：摘自 Hallberg et al.(1987)



圖 3-111：十三行博物館的考古遺址模型

資料來源：摘自 臧振華與劉益昌(2001)



圖 3-112：十三行遺址出土之鐵製刀形器

資料來源：摘自 臧振華與劉益昌(2001)

3.4. 國際同儕審查規劃

用過核子燃料最終處置計畫研究時程長遠，且相關研究所涵蓋之專業廣泛，大部分核能先進國家皆以國際合作及同儕審查方式，確保研究技術及成果與國際同步。

台電公司自2006年行政院原子能委員會核定用過核子燃料最終處置計畫書後，皆依處置計畫書執行相關研究工作，現階段首要目的即於2017年提出SNFD2017報告，前述報告章節架構係依據主管機關要求，參考日本H12報告章節架構編擬，因此，針對SNFD2017報告，台電公司將規劃先請國內學者專家審閱后，洽請國外放射性廢棄物處置執行機構或國際學者專家進行同儕審查。

2014年6月本計畫已聯合國內研究單位與瑞典專責機構(SKB)及芬蘭專責機構(POSIVA)，成功舉辦國際同儕審查研討會，建立深層地質處置技術合作管道，預計後續將與國際機構專家展開一系列技術交流活動，以提昇國內深層地質處置技術，並將合作成果逐年累進至SNFD2017報告中，有助於後續國際專家之同儕審查作業推動。

4. 結論

為達成2017年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(簡稱SNFD2017報告)之目標，本計畫依據日本H12報告規劃SNFD2017報告之預定章節架構，分成三大工作主軸「地質環境」、「處置設計與工程技術」、「安全評估」等技術發展，逐年規劃並完成相關的研究/調查工作。有鑑於此，故目前在無特定場址條件下，持續進行全國環境地質(大地構造)、地質合適性調查(火山、斷層活動、地殼抬升或沈陷、氣候及海平面變遷等影響因子)並建立相關深層地質調查及安全評估技術，逐年累進成果，如期達成2017年階段目標。就103年度執行成果摘要說明如下：

4.1. 地質環境

在「地質環境」方面，主要成果為：

(1) 針對區域環境地質之研究：

透過大範圍空中磁力資料三維逆推結果，顯示帶狀高磁基盤，向東南傾斜且具覆瓦狀結構，間夾不同寬度的低磁區，此地層分布與構造特性，與數百萬年前弧陸/陸陸碰撞的板塊推擠活動有關。此高磁基盤可能為古老南中國海板塊之殘塊，介於中央山脈和雪山山脈之間，受到菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊的影響，200萬年前原隆升為山脈廣泛發育正斷層作用，自80萬年前台灣東北部已處於弧後拉張的大地構造環境，最近期的火山活動為龜山島。

(2) 針對深層地質特性之成果：

(a) 103年度持續累積離島結晶岩深井裂隙水壓長期監測資料。

K區多封塞裂隙壓力多年期監測成果顯示，6號井位於相較壓力高區，各封塞段壓力讀值遠高於其他各井，且各封塞段壓力值均與降水量變化有明顯關係，均與高角度裂隙有連通性。而5號井各封塞區段壓力值上下震盪情形，除受降水強

度影響外，可能有其他因素(如過去觀測的遠震造成短期震盪)有關。

- (b) 根據K區東部C-C'剖面以及KMBH01-02-04與KMBH-06鑽井相關文獻資料，建立二維模型，範圍延伸14 km，包含C-C'剖面陸域(約12 km)範圍以及部分海域，總共使用14,000個網格，模型內建立主要影響水流之太武山斷層以及輝綠岩脈，其中太武山斷層假設為高流速區，輝綠岩脈則假設滲透性甚低，功能近似阻水構造，可看出岩脈左右兩側水流所受之影響；另將鹵水視為示蹤劑，搭配速度向量圖，描述C-C'剖面之水流速度分布。
- (c) 沉積岩水文地質特性調查方面，於南投和社井群進行地球化學井測及導水裂隙特性量測工作，完成5口試驗井的主要導水裂隙位置判識。孔內照相發現各試驗井內存有不明羽狀物及白色懸浮物，部分井孔有井偏或孔徑縮小現象。
- (d) 針對鑽井岩心採樣，涵蓋代表性花崗片麻岩、花崗岩與細粒花崗岩岩性，分析新鮮與破碎帶樣本的礦物組成。受岩體後期熱液影響，部分黑雲母、斜長石分別呈現綠泥石化與絹雲母化蝕變；裂隙中有方解石、綠泥石或石英脈狀充填，屬於地下水沉澱物。
- (e) 根據坑道量測的裂隙資料，模擬量測面三維DFN分布，並重新採樣出裂隙軌跡分布。發現FracMan模擬之裂隙位態、裂隙軌跡長度及裂隙間距等參數均接近現場資料，由此可知DFN_OPT及FracMan均可成功模擬目標區域中的DFN分布。為了流場模擬，已發展較FracMan更為符合現地坑道裂隙資料、裂隙分析，及三維DFN數值模擬的整合型工具。
- (f) 井下之裂隙分布約以深度296 m處為界，上部區段裂隙均勻分布於各深度，數量多而密集，主要裂隙走向為N45°E至N100°E，傾角為30°至70°北傾，其叢集之傾向與傾角為(347°, 35°)。下部區段裂隙數量較少，局部區段密集，多發生在破碎帶，主要裂隙走向為N45°E至N90°E，傾角為30°至70°。

北傾，其叢集之傾向與傾角為 $(336^{\circ}, 36^{\circ})$ 。研判於深度296 m內，屬於剪切帶範圍，自296 m以下則逐漸遠離剪切帶，擁有較完整型態。

- (g) 岩石特性研究方面，針對鑽井之花崗岩、細粒花崗岩與花崗片麻岩岩心，製作符合ISRM之試體，完成室溫下岩石一般物理性質消散耐久性、岩石單軸抗壓強度、岩心靜彈性模數、岩心動彈性模數、岩心弱面直剪、岩心三軸與岩心巴西劈裂等試驗之儀器組裝確立、系統連線、自動試驗數據擷取、試驗檢測及分析。
- (h) 岩石熱特性相關試驗結果顯示，熱傳導係數約介於 $2.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 至 $2.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，比熱值約介於 $730 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 至 $870 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，熱膨脹係數約介於 7.02×10^{-6} 至 9.78×10^{-6} 之間，大致上淺層有較高的熱傳導係數、比熱及熱膨脹係數。比熱隨溫度上升而增加；水平熱膨脹係數之差異約在20%之內，呈現些微的異向性，水平向與垂直向的熱膨脹係數沒有顯著差異。
- (i) 花崗岩粉碎樣品對Cs有比Se較大的吸附能力，約大一個數量級；對Cs的吸附能力(K_d)約介於 $K_d \cong 8 \text{ to } 111 \text{ mL/g}$ ，對Se的吸附能力(K_d)約介於 $K_d \cong 0.4 \text{ to } 30 \text{ mL/g}$ 。花崗岩薄片經過約1000天的擴散實驗後，初步的實驗發現碘離子的有效擴散係數大約在 $6 \text{ to } 10 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ ；而Cs與Se的有效擴散係數約界 $2 \text{ to } 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。另外，透過岩塊擴散試驗果，粗估有效擴散係數約為 $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。
- (j) 膨潤土塊體製作累積足夠經驗，且藉由數值模擬修正試驗設計以及膨潤土塊體尺寸。此外，試驗擬採用平板試體、平面式熱源，並於不同位置佈設荷重計以量測熱應力，依據此概念建立初步之試驗系統規劃與設計。並收集國際主要核能國家代表性耦合模擬與試驗相關資訊，藉以瞭解國際趨勢。

(3) 針對地質處置合適性研究：

- (a) 完成和平微震網新增4站建置。H區西側山區淺震群之發生具時間相關性，非常態機率分布。2013年上半年群震頻率有增加現象，但多屬 M_L 2以下規模之淺層地震，與該區之高磁力異常基盤帶岩體邊界之應力集中-釋放相關。地震密集帶多分布於和平溪口兩側海岸沿線，地震高密度帶集中於10至18 km之間；地殼的應力表現在10 km深度以上淺地層多發生正斷層，以下則為逆斷層；地震震源與 V_p/V_s 速度成像表現與裂隙含水地層相關，而地震密集帶以外地區地震發生頻率及規模偏低。
- (b) 藉由2011年奇美地震(M_w 5.0)前安通溫泉吉祥站地下水氦氣、甲烷及乙烷濃度同時異常下降之前兆，可驗證地下水溶解氣體地揮發機制，在合適的地質條件下，地震前的地下水氦氣異常下降為可再現性。在池上斷層南段發生之地震的規模越大，地下水氦氣異常下降之最低值越低，故地下水氦氣是最適合監測地殼應力變化靈敏之地下水溶解氣體。
- (c) GPS連續觀測站數據資料庫累積原始觀測資料已達62,938筆，自2011年8月至2013年10月觀測成果顯示，HGC1水平位移方向為東南方，而HGC2與HGC3兩站水平位移往西南方向，縱、橫方向之年變化速率介於0.2 cm/year至0.7 cm/year間；垂直方向變化，以回歸線推估其年沉陷量HGC1為0.7 cm/year，HGC2為1.4 cm/year，HGC3則為0.9 cm/year。
- (d) 由地震資料顯示和平地區恰位於菲律賓海板塊向北隱沒至歐亞大陸板塊的邊界東側，地體構造環境已由碰撞轉為隱沒區域，反映在水準資料顯示現今為沉陷區，GPS資料亦顯示水平位移方向轉為東南，地形上顯示在結束碰撞區域的地形較為低緩。是否由於地體構造環境的改變為近期，以致長期平均速率仍顯示快速抬升或短期的下沉只是震間的行為，仍待進一步分析。
- (e) 利用Worldview1同軌與IKONOS衛星影像立體對影像，共製作2次和平溪口數值地形模型，高解析度足以解析全區地形

變化，呈現一致特徵。和平地表水及地下水可能受大範圍大理岩影響，水質pH值穩定在8附近。長期地表地形變遷反映在地形剖面上顯示和平溪口超過2 km寬的河段地形平坦，代表長期處於抬升速率與侵蝕速率達到平衡之狀態。

- (f) 大屯火山群和龜山島地區，雖然在人類的歷史記載範圍內未曾有噴發紀錄，但是此區域噴氣與溫泉等後火山作用仍劇烈，且台灣北部的大地應力目前正處於張裂狀態，地質環境又有隱沒與碰撞交互作用，大地構造相當複雜。目前的研究結果也顯示，此區域地底下是有岩漿庫存在的可能性，未來火山活動長期監控應以台灣北部、東北部陸地及其周圍海域為研究重點。

本計畫長期利用於離島結晶岩測試區，建立完整深層地質調查技術能力，取得水文地質概念模式所需參數，進一步應用在本島東部結晶岩地質處置合適性研究上，並持續進行現地調查與研究，累積大地構造環境張裂作用與沉陷作用相關監測數據，據以評估這些因子對處置環境的影響。

4.2. 處置設計與工程技術

2014年在「處置設計與工程技術」工作主要成果為：

(1) 整體處置概念之成果：

處置設施的基本設施分為：地表設施、地下設施及其間之連通設施(豎井或斜坡道)3個部分，分別說如下：

- (a) 地表設施：整體可區分為6大系統，即地上管理與行政系統、放射性廢棄物管理系統、環境監測與輻射管制系統、岩石處理系統、運輸系統及輔助系統；
- (b) 地下設施：可區分為8大系統，即地下控管系統、放射性廢棄物管理系統、處置孔道系統、工程障壁系統(進行處置孔之緩衝材料置放、回填、封阻作業)、環境監測與輻射管制系統、功能驗證系統(地下處置設施設置一處先導處置區，以便進

行相關之地下試驗與處置技術驗證)、設施封閉系統、輔助系統(避免作業意外發生時輻射污染之擴散)。

(c) 連通設施：聯絡地表設施與地下設施間之通道，包含豎井與斜坡為參考設計。

(2) 設計流程研究：為不同階段目標所需，以系統需求法針對有系統性、結構性的方法，循序漸進，逐步精進。其流程為：

(a) 定義系統設計目標：即為永久安全隔離國內用過核子燃料於單一處置設施。

(b) 定義系統功能：亦即處置方式之選擇，本研究採行深層地質處置、多重障壁之原則進行設計。處置設施功能需能提供用過核子燃料運轉期間及封閉後之安全性，且限制核種釋出至人類及環境。

(c) 定義系統需求：系統需求係為達成前述功能，所需提供之主、次要設施及設備，進行用過核子燃料接收、處理、置放等作業，並考慮用過核子燃料可回收性、設施封閉與除役等，以及提供運轉所需之輔助服務等。

(d) 定義資料需求：資料需求則包括相關於各項設施設計所需之用過核子燃料特性、場址特性、材料特性、施工方法、設備/機具規格、場址變遷行為之預測、功能/安全評估結果之回饋等。

(3) 影響處置概念因子之成果：

(a) 熱與輻射：重新檢診國內3座電廠之不同燃耗造成衰變熱隨時間變化的影響，以及重新篩選出安全評估所需34個關鍵核種，以及對應之不同燃耗造成衰變熱隨時間變化的影響。

(b) 處置母岩特性：針對進行過之K區調查之成果，分別以母岩之力學特性、熱力學特性、水力特性與化學特性等四項，探討對處置設施與工程設計之影響，以做為處置場地表設施及地下設施設計之參考。

(4) 工程障壁系統及處置設施的設計需求之工作成果：

- (a) 廢棄物罐：根據假設之起始鈾濃縮度為4.053 wt% U-235的用過核子燃料組件，在高燃耗運轉條件下，完成安全評估用沸水式反應器用過核子燃料組件停機後40年之射源項評估，將做為後續進行廢棄物罐表面劑量率評估之依據。
- (b) 廢棄物罐設計需求：進行銅與鑄鐵的抗拉標準試體與銅與鑄鐵抗彎標準試體(均為1/10之縮尺比例)，做為104年進行廢棄物對受震影響試驗及數值模型之驗證。並分析廢棄物罐需以輻射防護(表面劑量率在1 Gy/h以下)、臨界控制(中子有效增殖因子需小於0.95)、力學強度(如銅質廢棄物罐的總潛變量需小於4%)、溫度限值(允許的衰變熱限值為2 kW)、抗腐蝕性(厚度5 cm，焊接區域的最小連續焊接面需保持在1.5 cm以上)、與緩衝材料及母岩具相容性、及可製作性及成本等方面為設計需求的因素。
- (c) 緩衝材料：其設計需求分別為：熱傳特性方面，熱傳導度值範圍在0.6 W/(m·K)至1.3 W/(m·K)之間，保持緩衝材料周圍環境溫度低於100 °C。水力特性方面，緩衝材料需具備低滲透性，可有效限制放射性核種由廢棄物罐傳輸至處置母岩中。力學特性方面，應力－應變形態應以避免產生脆性破壞為其設計目標，以充分達到保護廢棄物罐的目的，力學強度之上限應低於廢棄物罐之設計強度，以避免出現緩衝材料將廢棄物罐壓壞的意外。化學特性方面，須有效限制或抑低廢棄物罐受腐蝕之有害物質，如有機物、氧化物、硫化物、氮之化合物及微生物影響，以確保緩衝材料可有效保護廢棄物罐不致被破壞。
- (5) 工程障壁的穩定性之成果：
- (a) 處置場熱-水-化作用之初步分析：以地下水流場及熱-水-化耦合數值模擬兩方面進行驗證，兩者驗證結果誤差皆小，驗證所建立之數值模型具高度可信性。而熱-水-力耦合作用在不同模式尺度與不同材質特性中呈現不同的行為，近場緩衝

材料中因為厚度薄，熱傳於短時間達到穩定，但因高壓縮性與低排水性，使得水與力之耦合作用時間較長。

- (b) 處置場開挖擾動帶之力學特性：完成以FLAC^{3D}程式探討應力與應變隨處置隧道掘進進程的變化有助於處置設施建造程序佈置，得到隧道進行的交叉段開挖的先後順序，會產生不同應力集中之不穩定區域，這些不穩定的應力集中區域在地下處置設施施工上需特別注意。
 - (c) 工程障壁熱力-力學穩定性：已建立處置設施熱-力行為分析模型，及初步分析不同處置孔間距之溫度場與應力場分析，溫度方面，當廢棄物罐進行處置孔處置並完成回填後，處置隧道主要之拉力區域，分布於頂拱、隧道底部與處置孔口處，且得到間距6 m至8 m為較適宜之處置孔間距，而處置隧道之間距則以25 m為宜。
 - (d) 深層地下設施受震穩定性：利用有限元素軟體ABAQUS建立地下空間之二維模擬網格。另亦利用靜態穩定安全分析，得知雙處置孔間距越大，隧道開挖應力的安全係數隨之越高。
 - (e) 氣體遷移：探討氣體生成原因、溶解氣體的遷移機制及緩衝材料中的氣體遷移行為。
 - (f) 緩衝材料特性：探討緩衝材料設計所需考量之材料特性。
- (6) 建造/運轉/封閉技術：
- (a) 建造階段：分別以開挖速率、超挖量、支撐數量、勞力需求、機具設備與耗材、臨時性構造、隧道斷面、地質環境等8項因素探討鑽掘工法，得到以鑽炸法作為豎井、運轉隧道與處置隧道之施工方法，處置孔則以機械鑽掘方式以減少開挖擾動。
 - (b) 運轉階段：初步假定運轉時間約40年至50年，研擬廢棄物罐運送途徑，緩衝材料封填方式，以及提出處置隧道暫不回填，保留可回收機制。
 - (c) 封閉階段：初步完成拆除與封填步驟之探討。

4.3. 安全評估

- (1) 地質處置系統與功能成果：發展含離散裂隙岩體水流模式參數升尺度技術之開發，完成裂隙統計模式與離散裂隙生成模式之回顧、評析與比較，離散裂隙網路模式網格生成與案例測試。成果將提供SNFD2017報告中地質環境參考案例章節之應用。
- (2) 情節發展方面，除完成基本情節之假設，提供參考案例評估之應用。主要進行變異情節(相當於日本H12報告之擾動情節)自然因素的分析，如以下之(a)、(b)兩項，及隔離失效情節發展，如下列之(c)項，成果如下：
 - (a) 地表淹水因素分析及影響作用：探討琉球海溝與馬尼拉海溝因地震產生海嘯對H區研究區之影響，得到琉球海溝若發生地震矩規模為9.3；模擬所得5 hr內海嘯波傳遞情形，將對H區沿岸有4.3 m的波高，而地震相對強度，馬尼拉海溝產生的海嘯對H區並無影響。
 - (b) 颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響：根據崩塌發生潛勢評估結果顯示，H區附近溪流上流內具多個重大崩塌區及高潛勢岩體滑動區；而下游子集水區內未存在重大崩塌區及高潛勢岩體滑動區，其坡面相對穩定，崩塌發生潛勢較低。
 - (c) 地質演化作用與地震循環概念模型之研究：經由大尺度模型演算結果，顯示H區為下降的趨勢，此變化趨勢仍需藉對地涵之黏滯係數進行小尺度的合理精進，以提升其精確性。
- (3) 安全案例(參考案例)之核種參數分析：在源項分面，以國內核電廠用過核子燃料之型態、燃耗度；使用周期與冷卻時間等因素，完成核種存量、衰變熱隨時間變化及放射毒性的分析，並據此選出評估所需之34個關鍵核種。
- (4) 安全案例(參考案例)之劑量轉換因數DCF分析：將2012年ICRP第119號報告中最新的DCF參數完成建檔，並與國內頒布的「游離輻射防護安全標準」內容作比較。以本研究34個用過核子燃料關鍵

核種的DCF來看，119號報告與目前國內頒布的標準比較後發現兩者數值完全相同。

- (5) 不確定性與參數敏感度分析技術之研究：完成各國使用的不確定性分析技術進展和國內不確定性分析技術應用近況之研究。國內本計畫研究團隊已開發完成一套全系統功能評估軟體(INERTSPA)，其參數取樣方法有拉丁超立體法(LHS)與隨機法2種；而取樣數據排列方式有隨機、無相關及特定相關等3種。此外，INERTSPA之參數敏感度分析，則提供階步回歸、EASI-FAST及KS-Test等3種技術，可供進行SNFD2017報告運用。
- (6) 安全評估的可信度：以東濃鈾礦床、奧克羅鈾礦床、昆嘎拉鈾礦床等，完成地質處置的天然類比。以中克羅南古砲做為膨潤土的天然類比，研究指出其砲身被包覆在飽和的海洋黏土中，而銅腐蝕速率即維持在 $0.15 \mu\text{m/yr}$ ，在如此極端環境下被包覆的銅材，顯示膨潤土材料對處置設施的重要性。國內可供天然類比的可能區為十三行遺址，由遺址蒐整資料可知，該文明已進入鐵器時代，但鐵器等金屬的天然類比，仍需有待進一步的研究。

5. 參考文獻

- 工研院(2003)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查計畫(91年計畫)，國際天然類比研究案例專刊(II)。
- 中央地質調查所(2013)，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置—圖冊，共53頁。
- 台電公司(2010)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD2009報告)，台灣電力公司，共758頁。
- 田能全、劉智超(2010)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查計畫(97~99年度計畫)—岩塊試驗97~99年執行成果報告，台灣電力公司委辦計畫，SNFD-EEL-90-275，工業技術研究院。
- 江協堂(2010)，台灣東北部宜蘭平原及龜山島之地熱研究，國立台灣大學海洋研究所博士論文，共106頁。
- 江協堂、徐春田、張宏毅(2008)，台灣東北部宜蘭淺部地熱水研究，礦冶，第52卷，第2期，第112-121頁。
- 何春蓀(1986)，台灣地質概論-台灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所。。
- 吳柏辰(2014)，利用有限差分法模擬具斷層岩盤內之隧道開挖，國立高雄第一科技大學營建工程系碩士論文。
- 吳禮浩(2005)，情節發展分析技術建立，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—發展初步功能/安全評估技術(93年計畫)，核能研究所，SNFD-INER-90-530。
- 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲(1996)，土壤流失量估算手冊，國立屏東技術學院，屏東，共192頁。
- 李元希(1997)，台灣中央山脈中段在蓬萊運動中的構造演化，國立台灣大學，地質學研究所，博士論文。
- 李忠生(2004)，黃土斜坡地震動時程分析，西北地震學報，第26卷第2期，第126-130頁。

- 周平、朱仁義(2010)，貝葉斯理論在水文不確定性分析中的應用，巢湖學院學報，第12卷，第3期，23-27頁。
- 林正洪(2006)，大屯火山群潛在岩漿庫及微震觀測網長期監測計畫，陽明山國家公園管理處委託研究報告，共106頁。
- 林蔚(2001)，華南沿海地區晚燕山期侵入岩漿活動及大地構造意義，國立台灣大學，地質科學研究所，博士論文。
- 林蔚、陳文山、楊明宗(2005)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段－潛在母岩特性調查(93年計畫)－潛在母岩特性調查報告，工業技術研究院能源與資源研究所，SNFD-ERL-90-219。
- 林蔚、林鎮國、錢正明、謝佩珊、蔣立為、張育德、陳文山、李奕亨、郭泰融、劉智超、張濟權、黃淞洋(2012)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段－潛在母岩特性調查計畫(99~101年度計畫)－K區調查成果(1999~2010)彙編本文與附錄，台灣電力公司委辦計畫，SNFD-GEL-90-290，工業技術研究院。
- 林鎮國、林蔚、董倫道、田能全、謝佩珊、蔣立為、錢正明、陳文山、李奕亨、洪偉嘉、張育德、劉智超、張濟權、蘇毓秀、王清海、劉台生、黃淞洋、劉致育(2012)，用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段－潛在母岩特性調查(99-101年度計畫)－執行成果報告，財團法人工業技術研究院，SNFD-GEL-90-297。
- 邱清龍(2007)，龜山島火山岩之岩漿演化及其構造上的隱示，國立台灣大學地質研究所碩士論文，共63頁。
- 柯建仲、陳昭旭、鍾柏仁(2004)，核廢料深層處置近場岩石熱力學行為研究，鑛冶，第48卷，第2期。
- 洪錦雄、莊文壽、劉凌振、董家寶(2001)，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段-前二年計畫，功能/安全評估研究-建立深層處置場初期功能評估技術(I)，核能研究所。

- 紀立民(2002)，我國用過核燃料深層地質處置概念之初期研究，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—發展初步功能/安全評估模式(第一年計畫)，核能研究所SNFD-INER-90-526。
- 徐明同(1989)，海嘯所引起之災害，中央氣象局學報，第27卷，第1期，第1-15頁。
- 高世鍊(1998)，開挖中隧道變形行為之初步研究，國立成功大學碩士論文。
- 張志瑋(2012)，以MQ無網格數值法分析孔彈性理論之研究，國立成功大學資源工程學系碩士論文。
- 許秀真、楊尊忠、紀立民、繆延武、王中虛、洪錦雄(2003)，處置場設施配置規劃與設計，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—發展初步功能/安全評估模式(91年計畫)，SNFD-INER-90-528。
- 陳文山、宋時驊、吳樂群、徐濤德、楊小青(2005)，末次冰期以來台灣海岸平原區的海岸線變遷，考古人類學刊，第26期，第40-55頁。
- 陳文山、林朝宗、楊志成、費立沅、謝凱旋、鞏慧敏、林佩儀、楊小青(2008)，晚期更新世以來臺北盆地沉積層序架構與構造的時空演變，經濟部中央地質調查所彙刊，第21號，第61-106頁。
- 陳文山、陳榮輝、黃炎聰(2003)，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查(91年計畫)—K區地電阻影像剖面探測報告，工業技術研究院能源與資源研究所，SNFD-ERL-90-196。
- 陳文山、楊志成、吳樂群、楊小青、陳勇全、顏一勤、劉立豪、黃能偉、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄(2004)，沉降環境的山麓河谷地形特性——探討台北盆地、蘭陽平原與屏東平原鄰近山麓地形與構造的關係。經濟部中央地質調查所，第17號，第79-106頁。

陳科翰(2013)，地下深開挖岩體在十萬年再現週期之地震歷時下安全性評估模式之研究，國立成功大學資源工程研究所碩士論文。

游創博(2013)，應用有限差分法模擬三維地下具襯砌之處置隧道之力學行為，國立高雄第一科技大學營建工程系碩士論文。

黃惠絹(2008)，馬尼拉海溝地震引發海嘯的潛勢分析，國立中央大學水文科學研究所碩士論文。

楊燦堯(2000)，陽明山國家公園大屯火山群噴氣之氦同位素比值研究，國家公園學報，第10卷，第1期，第73-94頁。

楊燦堯、何孝恆、謝佩珊、劉念宗、陳于高、陳正宏(2003)，大屯火山群火山氣體成分與來源之探討，國家公園學報，第13卷，第1期，第127-156頁。

溫心怡(2010)，大屯火山群地熱區中土壤氣體之二氧化碳通量，國立台灣大學地質研究所碩士論文，共65頁。

經濟部中央地質調查所(2008)，地質環境與資源動態監測計畫-中華衛星二號影像應用：中華(福爾摩沙)衛星二號影像對地質環境與災害之動態監測即期資料庫建置。

經濟部中央地質調查所(2012)，易淹水地區上游集水區地質調查及資料庫建置。

董倫道(2012)，台灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測，經濟部中央地質調查所委託研究報告(1/2)，共226頁。

董倫道(2013)，台灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測(2/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共170頁。

詹錢登(2003)，以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定(第一年)成果報告書，行政院農委會水土保持局。

臧振華、張光仁(1996)，曾文溪上游流域史前文化遺址遺物整理及嘉義縣阿里山鄉Yingiana遺址試掘簡報。臺灣西部環境變遷及資源管理之研究(第2年度)：曾文溪流域史前聚落型態及生態適應。中研院史語所。

臧振華、劉益昌(2001)，十三行遺址：搶救與初步研究，台北縣政府文化局。

- 劉尚志、張璞、焦自強(1991)，高放射性廢料深層地質處置，原子能委員會核能彙刊，第24卷，第5期，第2-33頁。
- 劉益昌(1995)，台灣北部沿海地區史前時代晚期文化之探討：中央研究院台灣史研究所籌備處，平埔研究論文集，第1-20頁。
- 劉益昌、陳惠君、王巨中、陳隆智(2001)，十三行博物館展示單元細部內容文字、圖像資料庫建立專案報告，台北縣十三行博物館籌備處委託中央研究院歷史語言研究所之研究報告。
- 潘國樑(2007)，工程地質通論，五南圖書出版股份有限公司。
- 蔡世欽(2001)，用過核燃料深層地質處置核種含量及其關鍵性分析報告，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段88-89年計畫，SNFD-ERL-90-128。
- 蔣立為、余錦昌(2009)，用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段一潛在母岩特性調查計畫(97~99年度計畫)一區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，台灣電力公司委辦計畫，SNFD-EEL-90-270，工業技術研究院。
- 蔣樹屏、方林、林志(2012)，不同埋置深度的山嶺隧道地震響應分析，岩土力學，第35卷，第1期，第211-217頁。
- 鄧希平、王竹方、王本誠、衛元耀、王清海、柯正雄、楊正焰、吳定疆、歐律延(2012)，用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段(99~101年度計畫)一實驗室岩體核種遷移與傳流試驗(一)成果報告，清華大學執行/工研院能資所及台電公司委託，SNFD-NTHU-90-294。
- 鄧屬予(2007)，臺灣第四紀大地構造，經濟部中央地質調查所特刊，第18號，第1-24頁。
- 謝孟龍(2005)，一些簡單數字的背後：回顧台灣千、萬年時距地塊上升、沉降速率的研究，2005年台灣活動斷層與地震災害研討會，47-57頁。
- 謝孟龍(2007)，台灣河階地形研究的回顧、檢討與展望，經濟部中央地質調查所特刊，第18號，第209-242頁。

- 謝孟龍、劉平妹(2010)，花東海岸全新世地殼上升速率的再檢討。經濟部中央地質調查所彙刊，第23號，165-199頁。
- 羅正平(2001)，南沖繩海槽構造與火成岩體分布之研究，國立台灣大學海洋研究所碩士論文，共67頁。
- 蘇清全(2011)，蘭陽平原末次冰期以來沉積環境變遷與構造作用特性。台灣大學地質學研究所碩士論文，共129頁。
- Bag, R. (2011), Coupled Thermo-Hydro-Mechanical- Chemical Behaviour of MX80 Bentonite in Geotechnical Applications, Ph.D. Dissertation, Geoenvironmental Research Centre, Cardiff School of Engineering, Cardiff University.
- Belousov, A., Belousova, M., Chen, C.-H., and Zellmer, G.F. (2010), Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan: Hazard-related issues, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 191, pp. 205-221.
- Benedict, M. (1981), *Nuclear Chemical Engineering*, McGraw-Hill Co., New York, USA.
- Bürgmann, R. and Dresen G. (2008), Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, Vol. 36, pp. 531-567, doi:10.1146/annurev.earth.36.031207.124326.
- Chen, C.H., and Lin, S.B. (2002), Eruptions younger than 20Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sungshan Formation in Taipei Basin, *Journal of Western Pacific Earth Sciences*, Vol. 2, pp. 191-204.
- Chen, C.H., Chen, C.H., Mertzman, S.A., and Shen, J.J.S. (1999), An unusual late Cenozoic volcanic zone in northern Taiwan behind the southern Okinawa Trough, *J. Geol. Soc. China*, Vol. 42, pp. 593-612.
- Chen, C-H., Lin, W., Lan, C.Y. and Lee, C.Y. (2004), Geochemical, Sr and Nd isotopic characteristics and tectonic implications for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Cretaceous)

- orogeny, SE China. Transaction Royal Society of Edinburgh: Earth Science 95, 237-248.
- Chen, Y.G., and Liu, T.K. (1996), Sea level changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait, Quaternary Research, Vol. 45, pp. 254–262.
- Chen, Y.G., Wu, W.S., Chen, C.H. and Liu, T.K. (2001), A date for volcanic eruption inferred from a siltstone xenolith. Quat. Sci. Rev., Vol. 20, pp.869-873.
- Chijimatsu, M., Sugita, Y., Matsumoto, K., Kikuchi, H., Murata, S. and Saito, T. (1998), Mechanical and Hydraulic Properties of Block Joints of Buffer, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, PNC TN8410 98-058.
- Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M. (2011), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, Journal of Geophysical Research, Vol. 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242.
- Cho, W.J., Lee, J.O. and Choi, H.J. (2002), Radionuclide migration through an unsaturated clay buffer under thermal and hydraulic gradients for a nuclear waste repository, Annals of Nuclear Energy, Vol. 50, pp. 71-81.
- Chuang, Y. F., Shih, C. F., and Chuang W. S. (2010) Review of Properties of Potential Buffer Material for Geological Repository in Taiwan, 2010, East Asia Forum on Radwaste Management Conference, Gyeongju, Korea.
- Crespi, J.M., Chan, Y.C., and Swaim, M.S. (1996), Synorogenic Extension and Exhumation of the Taiwan Hinterland, Geology, Vol. 24, pp. 247-250.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C.P., Lague, D. and Lin, J.C. (2003), Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. Nature, Vol. 426, p.648 – 651.

- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C. and Stark C. P. (2003), Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen, *Nature*, Vol. 426, pp. 648-651.
- Daniel, W. (2007), Reducing radiotoxicity in the long run, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 49, pp. 597-605.
- Derrieux, F., Siame, L.L., Bourlès, D.L., Chen, R.F., Braucher, R., Léanni, L., Lee, J.C., Chu, H.T. and Byrne, T.B. (2014), How fast is the denudation of the Taiwan mountain belt? Perspectives from in situ cosmogenic ^{10}Be . *Journal of Asian Earth Sciences* Vol. 88, pp. 230 – 245.
- Franceschini, S., Tsai, C. and Marani, M. (2012), Point estimate methods based on Taylor series expansion - the perturbation moments method - a more coherent derivation of the second order statistical moment, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, pp. 5445-5454.
- Fukue, M., Kato, Y., and Komatsuda, S. (1995), *Principle of Contaminant Transport in Soils*, Tokai University Publishing Group.
- Fuller, C.W., Willett, S.D. Fisher, D., and Lu, C.Y. (2006), A Thermomechanical Wedge Model of Taiwan Constrained by Fission-track Thermochronometry, *Tectonophysics*, Vol. 425, pp. 1-24.
- Gauthier-Lafaye, F. and Weber, F. (1989), The Francevillian (Lower Proterozoic) Uranium Ore Deposit of Gabon, *Ecol. Geol.*, Vol. 84, pp. 2267-2285
- Hallberg, R.O. (1988), Inferences from a Corrosion Study of a Bronze Cannon, Applied to High Level Nuclear Waste Disposal, *Applied Geochemistry*. Vol.3.
- Hallberg, R.O., Ostlund, P. and Wadsten, T. (1987), A 17th Century Cannon as Analogue for Radioactive Waste Disposal, in: Come B. and Chapman NA (editors) *Natural Analogues in Radioactive*

- Waste Disposal, CEC Radioactive Waste Management Series, EUR 11037, pp. 135-139.
- Helton, J.C., Hansen, C.W. and Sallaberry, C.J. (2012), Uncertainty and sensitivity analysis in performance assessment for the proposed high-level radioactive waste repository at Yucca Mountain, Nevada, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 107, pp. 44-63.
- Helton, J.C., Johnson, J.D. and Oberkampf, W.L. (2004), An exploration of alternative approaches to the representation of uncertainty in model predictions, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 85, pp. 39-71.
- Helton, J.C., Johnson, J.D., McKay, M.D., Shiver, A.W. and Sprung, J.L. (1995), Robustness of an uncertainty and sensitivity analysis of early exposure results with the MACCS reactor accident consequence model, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 48, pp. 129-148.
- Hidaka, H. and Holliger, P. (1998), Geochemical and Neutronic Characteristics of the Natural Fossil Fission Reactors at Oklo and Bangombe, Gabon, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 62, pp. 89-108.
- Hoek, E. and Brown, E.T. (1980), Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *J. of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 106, No. 9, pp. 1013-1035.
- Horng, C.S., Huh, C.A., Chen, K.H., Lin, C.H., (2012), Pyrrhotite as a tracer for denudation of the Taiwan orogeny. *Geochem. Geophys. Geosyst.* Vol. 13 (8), Q08Z47.
- Hsieh, M.L., Liew, P.M., and Hsu, M.Y. (2006), Holocene tectonic uplift on the Hua-tung coast, eastern Taiwan, *Quaternary International*, Vol. 115-116, pp. 47-70.
- Hsieh, M. L. and Chyi, S. J. (2010), Late Quaternary mass-wasting records and formation of fan terraces in the Chen-yeo-lan and Lao-nung catchments, central-southern Taiwan. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 29(11-12), pp. 1399-1418.

- Hsieh, M.L. and Capart, H. (2013), Late Holocene episodic river aggradation along the Lao-nong River (southwestern Taiwan): an application to the Tseng-wen Reservoir Transbasin Diversion Project. *Eng. Geol.* Vol. 159, p.83 – 97.
- Hsieh, M.L. and Rau, R.J. (2009), Late Holocene coseismic uplift on the Hua-tung Coast, eastern Taiwan: evidence from mass mortality of intertidal organisms. *Tectonophysics*, Vol. 474, p.595 – 609.
- Hsieh, M.L., Lai, L.S.H., Lin, C.D.J., Shyu, J.B.H. (2012), Late Quaternary landscape evolution and genesis of the 2009 catastrophic landslide in the Hsiao-lin area, southwestern Taiwan. *Geomorphology*, Vol. 179, p.225 – 239.
- Hsieh, M.L., Liew, P.M. and Chen, H.W. (2011), Early Holocene catastrophic mass-wasting event and fan-delta development on the Hua-tung coast, eastern Taiwan. *Geomorphology*, Vol. 134, p.378 – 393.
- Hsu, L.C. (1963), Petrology of the Pleistocene andesite from Kueishantao, Northern Taiwan. *Acta Geol. Taiwanica*, Vol. 10, pp.29-40.
- Hsu, Y.J., Yu, S.B., Simons, M., Kuo, L. C. and Chen, H. Y. (2009), Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, Vol. 479, pp. 4-18, doi:10.1016/j.tecto.2008.11.016.
- Huang, C.Y. , Yuan, P.B., and Tsao, S.J. (2006), Temporal and Spatial Records of Active Arc-Continent Collision in Taiwan: A Synthesis, *Geological Society of American Bulletin*, Vol. 118, No. 3/4, pp. 274-288.
- ICRP (2007), The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, No. 103.
- ICRP (2012), Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, No. 119.

- Itoigawa, J. (1974), Geology of Mizunami Group, Monograph of the Mizunami Fossil Museum, No. 1, pp. 9-42 (in Japanese).
- Itoigawa, J. (1980), Geology of the Mizunami district, central Japan, Monograph of the Mizunami Fossil Museum, No. 1, pp. 1-50 (in Japanese).
- Iwatsuki, T. Sato, K. Hama, K. and Seo, T. (1995), Hydrogeochemical Investigation of Groundwater In the Tono Area, Japan, Proc. Mat. Res. Sci., Vol. 353, pp. 1251-1257 (in Japanese).
- Iwatsuki, T., and Yoshida, H. (1999), Characterizing the chemical containment properties of the deep geosphere: water-rock interactions in relation to fracture systems within deep crystalline rock in the Tono area, Japan. In: Metcalfe and Rochelles (Eds.), Chemical Containment of Waste in the Geosphere, Geological Socitey, London, Special Publications, Vol. 157, pp.71-84.
- Jahn, B.M., Chen, P.Y., Yen, T.P. (1976), Rb-Sr ages of granitic rocks in southeastern China and their tectonic significance. Bull. Geol. Soc. America, Vol. 86, pp. 763-776.
- Jahn, B.M., Zhou, X.H., and Li, J.L. (1990), Formation and tectonic evolution of Southeastern China and Taiwan: isotopic and geochemical constraints, Tectonophysics, Vol. 183, pp. 145-160.
- JNC (2000a), H12:Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan, Project overview report, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC-T21410-2000-001.
- JNC (2000b), H12: Project to establish the scientific and technical Basis for HLW Disposal in Japan, JNC TN1410 2000-003.
- Johnson, A.B. and Francis, B. (1980), Durability of Metals from Archaeological Objects, Metal Meteorites, and Native Metals, Battelle Pacific Northwest Laboratory, PNL-3198.
- Kao, H., Shen, S.J. and Ma, K.F. (1998), Transition from oblique subduction to collision: Earthquakes in the southernmost Ryukyu arc-Taiwan region. J. Geophys. Res., Vol. 103, B4, pp.7211-7229.

- Lan, T.F., Yang, T.F., Lee, H.F., Chen, Y.G., Chen, C.H., Song, S.R. and Tsao, S. (2007), Compositions and flux of soil gas in Liu- Huang- Ku hydrothermal area, northern Taiwan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 165, No. 1, pp. 32-45.
- Lapierre, H., Jahn, B.M., Charvet, J., Yu, Y.W. (1997), Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with tectonic activity in SE China. *Tectonophysics* 274, 321-338.
- Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Chen, C.H., Song, S.R. and Tsao, S. (2008), Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 178, pp. 624-635.
- Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Song, S.R. and Tsao, S. (2005), Fumarolic gas composition of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 16, No. 4, pp.843-864.
- Li, Z.X. and Li, X.H. (2007), Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model., *Geology*, Vol. 35, pp. 179-182.
- Lin, C. H. (2000), Thermal modeling of continental subduction and exhumation constrained by heat flow and seismicity in Taiwan. *Tectonophysics*, Vol. 324, pp. 189–201.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Liang, W.T., Pu, H.C., Lin, Y.M., You, S.H., and Huang, Y.P. (2005), Preliminary analysis of volcano- seismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan: *Geophys. Research Letters*, Vol. 32, pp. L10313.
- Lo, C.H. , and Onstott, T.C. (1995), Rejuvenation of K-Ar Systems for Minerals in the Taiwan Mountain Belt, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol . 131, pp. 71-98.
- Lu, C.Y., and Hsu, K.J. (1992), Tectonic Evolution of the Taiwan Mountain Belt, *Petroleum Geology of Taiwan*, No. 27, pp. 21-46.

- Ma, K.F., Wang, J.H. and Zhao, D. (1996), Three-dimensional seismic velocity structure of the crust and uppermost mantle beneath Taiwan. *J. Physics Earth*, Vol. 44, pp.85-105.
- Marini L. (2007) Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Thermodynamics, Kinetics, and Reaction Path Modeling. *Developments in Geochemistry* 11. Elsevier, Amsterdam.
- Metz, V., Kienzler, B., and Sch ü ß ler, W. (2003), Geochemical evaluation of different groundwater-host rock systems for radioactive waste disposal. *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 61, pp.265-279.
- Ochiai, Y., Yamakawa, M., Takeda, S. and Harashima, F. (1989), A Natural Analogue Study on the Tono Uranium Deposit in Japan, CEC Natural Analogue Working Group 3rd Meeting, CEC Nuclear Science and Technology Series, EUR11725, CEC, pp. 126-138.
- Ohnuki, T., Murakami, T., Isobe, H., Sato, T. and Yanase, N. (1995), Modelling Study on Uranium Migration in the Rock under Weathering Condition, *Sci. Bas. Nucl. Was. Manag.*, XVIII, pp. 1227-1234.
- Okada, Y. (1985), Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Halfspace, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 5, pp. 1135-1154.
- Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1999), Brief overview of in situ containment retardation in fractured crystalline rock at the Kamaishi In Situ Test Site, In: *Proceedings of an International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments*, Kamaishi, Japan, 24-25 August 1998, JNC Tech. Rep., JNC TN7400 99-007.
- Palandri, J.L., and Kharaka, Y.K. (2004), A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling: U.S. Geological Survey Open File Report 2004-1068.
- PNC (1992a), Research and development on geological disposal of high-level radioactive waste, First Progress Report (H3), PNC TN 1410 93-059.

- PNC (1992b), Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, PNC TN1410 93-059, Japan.
- POSIVA (2013), Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear fuel at Olkiluoto, POSIVA.
- Pulver, M.H., Crespi, J.M., and Byrne, T.B. (2002), Lateral Extrusion in a Transpressional Collision Zone: An Example from the Pre-Tertiary Metamorphic Basement of Taiwan, in Byrne, T.B., and Liu, C.S. (eds.), *Geology and Geophysics of an Arc-Continent Collision, Taiwan*: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, Vol. 358, pp. 107 – 120.
- Pusch R. and Karnland O. (1988), Geological evidence of smectite longevity - The Sardinian and Gotland cases, SKB, TR 88-26.
- Relyea, J.F., Serne, R.J., and Rai, D. (1980), *Methods for Determining Radionuclide Retardation Factors: Status Report*, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- Roberson, H.E. and Lahann R.W. (1981), Smectite to illite conversion rates: effects of solution chemistry. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 29, pp. 129-135.
- Sano, Y. and Wakita, H. (1985), Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio in Japan, implications for arc tectonics and incipient magmatism. *Jour. Geophys. Res.* Vol. 90, pp.8729-8741.
- Selvadurai, A.P.S. and Suvorov, A.P. (2012), Boundary heating of poro-elastic and poro-elasto-plastic spheres, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, pp. 1-28, doi:10.1098/rspa.2012.0035.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., and Chen, Y.G. (2005), Tandem Suturing and Disarticulation of the Taiwan Orogen Revealed by its Neotectonic Elements, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 233, pp. 167-177.
- Sibuet, J. C., Deffontaines, B., Hsu, S.K., Thareau, N., Le Formal, J.P., and Liu, C.S. (1998), The Okinawa Trough backarc basin: Early tectonic and magmatic evolution, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, pp. 30245-30267.

- SKB (1999a), Deep Repository for Spent Nuclear Fuel: SR 97 Post-Closure Safety, TR-99-06.
- SKB (1999b), Waste, Repository Design and Sites, Background Report to SR 97, TR-99-08.
- SKB (2005), Summary of a GAMBIT club workshop on gas migration in bentonite, Madrid 29-30 October, 2003. A report produced for the GAMBIT club, TR-05-13.
- SKB (2006), Determination and assessment of the concentration limits to be used in SR-Can, TR-06-32.
- SKB (2010a), Design, production and initial state of the canister, TR-10-14.
- SKB (2010b), Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, TR-10-50.
- SKB (2010c), Data report for the safety assessment SR-Site, TR-10-52.
- SKB (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, TR-11-01.
- SKBF/KBS (1983), Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3, Vol. I : General.
- Song, S.R., Yang, T.F., Yeh, Y.H., Tsao, S. and Lo, H.J. (2000), The Tatun Volcano Group is active or extinct? Jour. Geol. Soc. China, Vol. 43(3), pp. 521-534.
- Streckeisen, A.L. (1976), To each plutonic rock its proper name. Earth Science Review, Vol. 12, pp.1-33.
- Suppe, J. (1981), Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan, Mem. Geol. Soc. China, Vol. 4, pp. 67-89.
- Suzuki, K. and Adachi, M. (1998), Denudation History of the High T/P Ryoke Metamorphic Belt, Southwest Japan: Constraints from CHIME Monazite Ages of Gneisses and Granitoids, Jour. Metamorphic Geol., Vol. 16, pp. 23-37.
- Teng, L.S., and Lin, A.T. (2004), Cenozoic Tectonics of the China Continental Margin: Insights from Taiwan, in Malpas, J., C.J.N.

- Fletcher, J.R. Ali, and J.C. Aitchison, eds., Aspects of the Tectonic Evolution of China, Geological Society, London, Special
- Ticknor, K.V. (1994), Uranium sorption on geological materials, *Radiochim. Acta*, Vol. 64, pp. 229-236.
- Tong, L. T., Lin, W., Lee, P. T., Lee, J. F., Lin, C. W., Liu, C. Y., Chien, J. M., and Huang, Y. T. (2013), Airborne Magnetic Survey in the Kueishantao Volcano area, Taiwan. Abstract in Western Pacific Sedimentology Meeting 2013 WPSM-U6-P-06.
- Tylecote, R.F., Ghaznavi, H.A. and Boydell, P.J. (1977), Partitioning of trace elements between the ores, fluxes, slags and metal during the smelting of copper, *Journal of Archaeological Science*, Vol. 4, pp. 305-333.
- Willet, S.D., Fisher, D., Fuller, C., Yeh, E.C., and Lu, C.Y. (2003), Erosion rates and orogenic-wedge kinematics in Taiwan inferred from fission-track thermochronometry, *Geology*, Vol. 31, No. 11, pp. 945-948.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, (1978), Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation department of agricultural, " U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook, No. 537.
- Wu, F.T., Kuo-Chen, H., McIntosh, K.D. (2014), Subsurface imaging, TAIGER experiments and tectonic models of Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 90, pp. 173 – 208.
- Wu, F.T., Liang, W.T., Lee, J.C., Benz H., Villasenor, A. (2009), A model for the termination of the Ryukyu subduction zone against Taiwan: A junction of collision, subduction/separation, and subduction boundaries. *J. Geophys. Res.*, 114, B07404, doi:10.1029/2008JB005950.
- Xu, C.S., and Dowd, P. (2010), A new computer code for discrete fracture network modelling, *Computers & Geosciences*, Vol. 36, pp. 292-301.
- Yang, T.F., Lan, T.F., Lee, H.F., Fu, C.C., Chuang, P.C., Lo, C.H., Chen, C.H., Chen, C.T., and Lee, C.S. (2005), Gas compositions and

- helium isotopic ratios of fluid samples around Kueishantao, NE offshore Taiwan and its tectonic implications, *Geochemical Journal*, Vol. 39, pp. 469-480.
- Yang, T.F., Sano, Y. and Song, S.R. (1999), $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios of fumaroles and bubbling gases of hot springs in Tatun Volcano Group, North Taiwan, *Nuovo Cimento Della Societa Italiana Di Fisica C*, Vol. 22(3-4), pp. 281-286.
- Yen, T.P., Tzou, Y.H. and Lin, W.H., (1984), Subsurface geology of the region of the Tatun Volcano Group. *Petrol. Geol. Taiwan*. Vol. 20, pp.143-154.
- Yoshida, H., Kodama, K. and Ota, K. (1994), Role of Microscopic Flow-paths on Nuclide Migration in Sedimentary rocks, A Case Study from the Tono Uranium Deposit, Central Japan, *Radiochim. Acta*, Vol. 66/67, pp. 505-511.
- Yusa Y., Kamei G., and Arai T. (1991), Some aspects of natural analogue studies for assessment of long-term durability of engineered barrier materials recent activities at PNC Tokai japan. In: Come B and Chapman NA (editors) Natural analogue working group fourth meeting and Pocos de caldas project final meeting, Pitlochry, june 1990. CEC Nuclear Science and Technology Report, EUR 13014, 215-232.
- Yusa, Y. and Yoshida, H. (1993), Migration behaviour of natural radionuclides in geological formation, - A case study of the Tono uranium deposits, Japan, *Radioisotope*, Vol. 20, pp. 29-39 (in Japanese).
- Zhang, Y. (2009), Hierarchical Geostatistical analysis of an experimental stratigraphy, *Mathematical Geosciences*, Vol. 41, pp. 145-162.
- Zhang, Y., Gable, C.W. and Person, M. (2006), Equivalent hydraulic conductivity of an experimental stratigraphy: Implications for basin-scale flow simulations, *Water Resources Research*, Vol. 42, W05404.

Zhou, X.M., Li, W.X., (2000), Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics* 326, 269-287.