用過核子燃料最終處置計畫

候選場址評選與核定階段

108年度成果報告
(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國109年06月

(此頁為空白頁)

用過核子燃料最終處置計畫
候選場址評選與核定階段
108年度成果報告

摘要

108年度成果報告係配合用過核子燃料最終處置計畫(2018年核定版)第二階段「候選場址評選與核定階段」之里程碑，規劃進行「場址合適性調查技術」、「工程設計技術」、「安全評估技術」之技術發展，並逐步進行技術發展之整合應用。108年度成果報告將分為「區域特性調查技術精進」、「處置設施工程設計技術及安全評估技術精進」之2大章節說明年度整體技術發展成果。

於區域特性調查技術精進方面，主要成果包括：區域地質探測技術與資料解析、水文地質、長期監測、岩石力學描述模型等4項工作。主要藉由持續精進相關調查技術並且進行建模與分析，提高對現地調查數據分析的精度與準度，奠定提出優先詳細調查場址之技術。

於處置設施工程設計技術及安全評估技術精進方面，主要成果包括：用過核子燃料特性研究與分析技術、處置設施工程設計技術及安全評估技術精進、地下設施設計、水文地質演化趨勢分析、工程障壁演化分析、核種傳輸分析技術、情節發展與案例分析技術等7項工作。主要藉由我國用過核子燃料尺寸需求，變更工程障壁尺寸規格並進行相關性能評估，以確保符合設計需求，並且針對各項關鍵技術議題包括：地下設施配置、水文地質、工程障壁參考演化分析等持續精進，最後由封閉後安全評估劑量及風險評估進行整合。

關鍵字：用過核子燃料、最終處置、地質環境、處置設計與工程技術、安全評估

108年度成果報告目錄

頁次

1. 概述 1-1

2. 計畫目的 2-1

2.1. 計畫目標 2-1
2.2. 工作規劃 2-1

3. 區域特性調查技術精進 3-1

3.1. 區域地質探測技術與資料解析 3-1
3.1.1. 潛在母岩空中磁力探測 3-1
3.1.2. 空中磁力測勘與資料解析之無人載具空中調查技術發展 3-13
3.1.3. 地球物理三維成像技術 3-22
3.1.4. 地質單元三維建模及展示技術 3-34
3.1.5. 深層流體影響性評估技術 3-48
3.2. 水文地質 3-61
3.2.1. 坑道開挖損傷帶裂隙分布評估技術研究 3-61
3.2.2. 裂隙參數分布特性統計研究 3-73
3.2.3. 裂隙岩體地下水流分析技術精進 3-88
3.3. 長期監測 3-98
3.3.1. 全球衛星定位聯繫監測與時序分析 3-98
3.3.2. 微震監測及資料解析 3-105
3.4. 岩石力學描述模型 3-111
3.4.1. 岩石力學調查技術演練與發展 3-111
3.4.2. 岩石力學場址特徵化技術與模式發展 3-140

4. 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進 4-1

4.1. 用過核子燃料特性研究與分析技術 4-1
4.1.1. 核種存量與衰變熱分析技術 4-1
4.1.2. 核臨界安全分析技術 4-13
4.2. 工程障壁設計與性能評估 4-24
4.2.1. 廢棄物罐設計 4-24
4.2.2. 緩衝材料設計 4-32
4.2.3. 廢棄物罐抗圍壓性能評估 4-43
4.2.4. 廢棄物罐抗剪力位移之性能分析技術 4-51
4.2.5. 未飽和膨潤土特性分析 4-64
4.2.6. 緩衝材料與回填材料性質特性分析 4-75

4.3. 地下設施設計 4-86
4.3.1. 處置設施熱間距設計 4-86
4.3.2. 地下設施配置設計 4-92
4.4. 水文地質演化趨勢分析 4-108
4.4.1. 地下水流場演化分析 4-108
4.5. 工程障壁參考演化分析 4-124
4.5.1. 緩衝材料與回填材料參考演化 4-124
4.5.2. 廢棄物罐參考演化 4-144
4.6. 核種傳輸分析技術 4-168
4.6.1. 核種釋出途徑分析 4-168
4.6.2. 近場核種傳輸分析技術 4-185
4.6.3. 遠場核種傳輸分析技術 4-199
4.6.4. 生物圈核種傳輸分析技術 4-212
4.7. 情節發展與案例分析技術 4-230
4.7.1. 工程障壁安全功能指標 4-230
4.7.2. 情節分類與發展 4-242
4.7.3. 封閉後安全評估劑量與風險分析技術 4-256

5. 結論 5-1

5.1. 區域特性調查技術精進 5-1
5.2. 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進 5-6

6. 參考文獻 6-1

圖目錄

頁次

圖 1-1：深層地質處置概念圖 1-2
圖 2-1：場址合適性調查技術整體發展路徑圖 2-1
圖 2-2：處置設計與工程技術整體發展路徑圖 2-2
圖 2-3：安全評估整體發展路徑圖 2-3
圖 3-1：研究區內主要高磁帶分布 3-8
圖 3-2：磁力解釋線型構造套疊經歸極換算之全磁力強度圖 3-9
圖 3-3：等高程磁化向量磁感率切面圖套疊磁化向量水平分量 3-10
圖 3-4：代表性解釋剖面位置圖 3-11
圖 3-5：H區第Ⅱ調查區經三維逆推獲得之三維磁感率模型 3-12
圖 3-5：無人飛行載具資訊畫面 3-19
圖 3-6：MagArrow型磁力儀外觀 3-19
圖 3-7：無人飛行載具與12 kg載重物組裝測試 3-20
圖 3-8：高酬載長滯空飛行測試 3-20
圖 3-9：無人機裝載5公斤磁力儀模型飛行狀況 3-20
圖 3-10：無人飛隨地貌飛行測試地形高度(下方紅線)與飛行高度(上方黃線)圖 3-21
圖 3-11：理論測試(Synthetic Test)流程圖 3-29
圖 3-12：三維模型有限差分法，電、磁場網格位置示意圖。 3-30
圖 3-13：理論測試使用的人為電性構造模型 3-30
圖 3-14：逆推計算所使用的空白初始電性構造模型。 3-31
圖 3-15：電性構造模型之迭代計算。 3-31
圖 3-16：既有資料之視電阻率與相位分布曲線 3-32
圖 3-17：既有資料區域之電阻率深度切面(500 m至-600 m) 3-33
圖 3-18：BH01裂隙位態分布圖 3-44
圖 3-19：BH02裂隙位態分布圖 3-44
圖 3-20：BH03裂隙位態分布圖 3-45
圖 3-21：BH05裂隙位態分布圖 3-45
圖 3-22：BH06裂隙位態分布圖 3-45
圖 3-23：線型判識成果與編號(紅色線為判斷之線型) 3-46
圖 3-24：針對區域尺度之模擬範圍劃定結果 3-46
圖 3-25：地下地質三維模型成果圖 3-47
圖 3-26：臺灣熱流分布圖 3-59
圖 3-27：臺灣二氧化矽熱流分布圖 3-60
圖 3-28：溪畔坑道預定測線位置示意圖 3-69
圖 3-29：A-Gc雷達剖面之開挖損傷帶分布判釋圖 3-70
圖 3-30：A-Rc、A-Rr、B-Rc、B-Rr坑道地電阻剖面 3-71
圖 3-31：A-Sr、A-Sc震波速度剖面 3-72
圖 3-32：視窗裂隙軌跡量測成果範例(YTS-01) 3-85
圖 3-33：花崗片麻岩體地質構造演化圖成果範例(源頭山) 3-86

圖 3-34：花崗片麻岩體裂隙統計分析與地質構造成因探討成果範例(源頭山) 3-87
圖 3-35：K區數值模型的空間範圍及其可能的邊界條件 3-97
圖 3-36：RunSea_Base在深度500 m的鹵水質量分率分布圖 3-97
圖 3-37：研究區及鄰近區域之水平向與垂直向速度場 3-104
圖 3-38：板塊邊界指定區域測站分布圖 3-108
圖 3-39：震源叢集分布切面圖 3-109
圖 3-40：地震震源三維空間分布 3-110
圖 3-41：現地孔內試驗調查成果(以臺灣南段山區鑽孔為例) 3-136
圖 3-42：音射式及光學式孔內影像(以臺灣南段山區鑽孔為例) 3-137
圖 3-43：南段山區之岩層鑽孔岩心孔隙率與滲透係數關聯性 3-137
圖 3-44：臺灣南段山區地溫梯度量測成果與地層分布圖 3-138
圖 3-45：臺灣南段山區地溫梯度量測與鄰近溫泉點位分布圖 3-139
圖 3-46：不同階段所需的調查範圍(尺度)以及兩個岩石力學分析模式涵蓋範圍之關係圖 3-155
圖 3-47：岩石力學描述模型建置流程圖 3-155
圖 3-48：岩石力學描述模型之參數特徵化與建置流程 3-156
圖 3-49：不同岩性抗張強度與單壓強度關係圖 3-156
圖 3-50：不同岩性抗張強度與動彈性模數關係圖 3-157
圖 3-51：不同岩性孔隙率與體積模數關係圖 3-158
圖 3-52：岩體評分Q值與波速Vp(km/sec) 3-159
圖 3-53：岩體評分Q值與水力傳導係數K(m/sec) 3-159
圖 3-54：尺寸效應對岩石單壓強度影響之示意圖 3-160
圖 3-55：不同試體尺寸與其採用之Hoek-Brown破壞準則計算公式條件 3-160
圖 4-1：不同鈾濃化的用過核子燃料衰變熱隨冷卻時間的變化 4-10
圖 4-2：不同燃料型式的用過核子燃料衰變熱隨冷卻時間的變化 4-10
圖 4-3：不同燃耗的用過核子燃料衰變熱隨冷卻時間的變化 4-11
圖 4-4：核一廠CSALL衰變熱曲線 4-11
圖 4-5：核一廠CSALL衰變熱方程式 4-12
圖 4-6：核一廠燃料RG 3.54修訂1版與ORIGEN-ARP的衰變熱計算值比較 4-12
圖 4-7：鑄鐵內襯之鐵含量與有效中子增殖因子趨勢圖 4-22
圖 4-8：鑄鐵內襯密度與有效中子增殖因子趨勢圖 4-22
圖 4-9：燃料通道鐵含量與有效中子增殖因子趨勢圖 4-22
圖 4-10：燃料通道密度與有效中子增殖因子趨勢圖 4-23
圖 4-11：燃料組件於燃料通道中水平位移 4-23
圖 4-12：廢棄物罐內溫度與有效中子增殖因子趨勢圖 4-23
圖 4-13：廢棄物罐銅殼尺寸 4-28
圖 4-14：廢棄物罐鑄鐵內襯尺寸 4-28
圖 4-15：廢棄物罐銅殼與鑄鐵內襯尺寸 4-29
圖 4-16：廢棄物罐斷面尺寸 4-29
圖 4-17：廢棄物罐上端細部尺寸 4-30
圖 4-18：廢棄物罐下端細部尺寸 4-30
圖 4-19：鑄鐵內襯頂部封蓋尺寸 4-31
圖 4-20：處置孔設計需求之幾何條件 4-38

圖 4-21：處置孔尺寸與緩衝材料設計 4-39
圖 4-22：緩衝材料元件設計 4-40
圖 4-23：處置孔各部位緩衝材料飽和密度及對應之乾密度 4-41
圖 4-24：MX-80型膨潤土於純水及模擬地下水質條件下不同乾密度之回脹壓力 4-41
圖 4-25：MX-80型膨潤土於純水及模擬地下水質條件下不同乾密度之水力傳導係數 4-42
圖 4-26：廢棄物罐均勻圍壓分析結果圖 4-49
圖 4-27：飽和前不均勻圍壓分析結果圖(廢棄物罐長度4,905 mm) 4-49
圖 4-28：飽和後不均勻圍壓分析結果圖(廢棄物罐長度4,905 mm) 4-50
圖 4-29：式(4-3) 170 MPa與175 MPa曲線擬合結果 4-58
圖 4-30：處置孔剪力位移作用方式 4-58
圖 4-31：廢棄物罐1/4處位置各角度剪力位移分析結果 4-59
圖 4-32：廢棄物罐1/2處各角度之5 cm剪力位移鑄鐵應力分析結果 4-60
圖 4-33：廢棄物罐1/4處各角度之5 cm剪力位移銅殼應變分析結果 4-61
圖 4-34：廢棄物罐1/8處各角度之5 cm剪力位移銅殼應變分析結果 4-62
圖 4-35：廢棄物罐1/2處及1/4處90°之5 cm長期剪力位移鑄鐵應力分析結果 4-63
圖 4-36：廢棄物罐1/2處及1/4處90°之5 cm長期剪力位移銅殼潛變分析結果 4-63
圖 4-37：匯入BBM組成模型之方式 4-69
圖 4-38：文獻案例-單一未飽和土壤元素 4-69
圖 4-39：文獻案例-加載路徑 4-70
圖 4-40：FLAC3D運跑結果與文獻比對-1 4-70
圖 4-41：FLAC3D運跑結果與文獻比對-2 4-71
圖 4-42：FLAC3D運跑結果與文獻比對-3 4-71
圖 4-43：未飽和沉陷量分析結果 4-72
圖 4-44：密度分布(case#3：左；case#4：右) 4-72
圖 4-45：平均應力分布(case#3：左；case#4：右) 4-73
圖 4-46：垂直沉陷量分布(case#3：左；case#4：右) 4-73
圖 4-47：回脹壓力分布(case#1-w8.2%：左；case#2-w11%：右) 4-73
圖 4-48：回脹壓力分布(case#3-w16.5%：左；case#4-w19.3%：右) 4-74
圖 4-49：回脹壓力分布(case#5-w21.6%：左；case#6-w24.6%：右) 4-74
圖 4-50：回脹壓力分布(case#7-w26.6%) 4-74
圖 4-51：回脹壓力實驗-實驗配置圖 4-81
圖 4-52：回脹壓力實驗-回脹壓力vs.初始乾密度 4-81
圖 4-53：FLAC3D數值模型幾何與網格劃分 4-82
圖 4-54：FLAC3D數值模型由底部開始向上飽和示意圖 4-82
圖 4-55：處置孔模型幾何與網格劃分 4-83
圖 4-56：FLAC3D數值模型分析結果與實驗比對 4-83
圖 4-57：回脹壓力分布：左；回脹量分布：右 (密度=1,700 kg/m^3) 4-84
圖 4-58：回脹壓力分布：左；回脹量分布：右 (密度=1,650 kg/m^3) 4-84
圖 4-59：回脹壓力分布：左；回脹量分布：右 (密度=1,600 kg/m^3) 4-84
圖 4-60：不同密度及水質之回脹壓力 4-85

圖 4-61：不同密度及水質之水力傳導係數 4-85
圖 4-62：廢棄物罐與處置孔之相對位置 4-90
圖 4-63：膨潤土最高溫與熱間距之關係 4-91
圖 4-64：不同地溫梯度下之熱間距與膨潤土最高溫之關係 4-91
圖 4-65：地下設施配置設計 4-100
圖 4-66：震源邏輯樹 4-101
圖 4-67：基本模型 4-101
圖 4-68：最大尖峰剪力位移量與最大殘餘剪力位移量 4-102
圖 4-69：各裂隙叢集之地震引致裂隙剪力位移與時間之關係 4-103
圖 4-70：2,000次DFN實現值的單一處置隧道廢孔率次數分布 4-104
圖 4-71：各時間段之水壓分布及入流量觀測點 4-105
圖 4-72：開挖後各時間段之入流量 4-106
圖 4-73：在2,000次實現值結果中，隨機挑選104個計算廢孔率 4-106
圖 4-74：廢孔率累積移動平均值、標準差與DFN實現值次數之關係 4-107
圖 4-75：廢孔率累積移動平均值、標準差與DFN實現值次數之關係 4-107
圖 4-76：處置設施及主隧道與處置隧道底部開挖損傷帶物件圖 4-117
圖 4-77：處置設施及其周圍之等效滲透性轉換結果 4-117
圖 4-78：處置設施及其周圍之等效孔隙率轉換結果 4-118
圖 4-79：區域尺度模型之邊界條件設定 4-118
圖 4-80：場址尺度模型之邊界條件設定 4-119
圖 4-81：案例1之穩態地下水壓力分布 4-119
圖 4-82：案例1之穩態鹽度分布 4-120
圖 4-83：案例2之穩態地下水壓力分布 4-120
圖 4-84：案例2之穩態鹽度分布 4-121
圖 4-85：案例1及案例2於z剖面之穩態壓力分布等值圖 4-121
圖 4-86：案例1及案例2於z剖面之穩態鹽度分布等值圖 4-122
圖 4-87：案例3於z剖面之穩態地下水壓力分布 4-122
圖 4-88：案例4於z剖面之穩態地下水壓力分布 4-123
圖 4-89：案例3及案例4於z剖面之穩態壓力分布等值圖 4-123
圖 4-90：水平管流侵蝕試驗容器照片 4-137
圖 4-91：裝填膨潤土顆粒之水平管流侵蝕試驗容器 4-137
圖 4-92：水平管流侵蝕試驗，瑞典SKB文獻試驗照片 4-137
圖 4-93：水平管流侵蝕試驗，試驗編號4第4 hr，試驗容器照片 4-138
圖 4-94：水平管流侵蝕試驗，瑞典SKB文獻雙對數圖及線性關係之模式 4-138
圖 4-95：水平管流侵蝕試驗，累積出流水量對累積流失量之雙對數圖 4-139
圖 4-96：感測器位置示意圖 4-139
圖 4-97：小型熱水力耦合試驗歷程紀錄 4-140
圖 4-98：小型耦合試體拆解後水份分布觀察 4-140
圖 4-99：試體各層之含水量分布 4-141
圖 4-100：小型耦合試驗濕度分布及膨脹壓力演化過程 4-141
圖 4-101：預先飽和試驗之回脹壓力 4-142
圖 4-102：純膨潤土塊體氣體傳輸試驗程序 4-142
圖 4-103：氣體除水設備吸水材料飽和變色 4-142
圖 4-104：混砂膨潤土第1次注氣試驗 4-143

圖 4-105：處置隧道之處置孔配置圖 4-158
圖 4-106：廢棄物罐剪力失效率分析方法 4-158
圖 4-107：不考慮EFPC廢孔準則之廢棄物罐剪力失效率 4-159
圖 4-108：2,860罐廢棄物罐，不使用EFPC的破壞罐數隨時間分布 4-159
圖 4-109：廢棄物罐剪力失效期望值 4-160
圖 4-110：使用EFPC廢孔準則之廢棄物罐剪力失效率 4-160
圖 4-111：300 m處置隧道，1,560個處置孔，廢棄物罐破壞罐數機率分布 4-161
圖 4-112：250 m處置隧道，1,300個處置孔，廢棄物罐破壞罐數機率分布 4-161
圖 4-113：不同叢集對剪力失效的比例 4-162
圖 4-114：處置隧道長軸方向與裂隙叢集極點之立體投影圖 4-162
圖 4-115：PHREEQC計算表二全球平均海水物種分布圖 4-163
圖 4-116：PHREEQC計算表二全球平均河水物種分布圖 4-163
圖 4-117：當代流場環境地下水鹽度與處置孔配置位置圖 4-164
圖 4-118：當代流場環境地下水陽離子強度與處置孔配置位置圖 4-164
圖 4-119：當代流場環境地下水硫化氫濃度與處置孔分析結果 4-165
圖 4-120：當代流場環境地下水陽離子強度與處置孔分析結果 4-165
圖 4-121：水流速與緩衝材料重量損失之關係圖 4-166
圖 4-122：100萬年緩衝材料侵蝕重量損失變化 4-166
圖 4-123：銅殼腐蝕深度變化 4-167
圖 4-124：案例1之Q1質點傳輸路徑圖 4-177
圖 4-125：案例2之Q1質點傳輸路徑圖 4-178
圖 4-126：案例2之Q2質點傳輸路徑圖 4-178
圖 4-127：案例3之Q1質點傳輸路徑圖 4-179
圖 4-128：案例4之Q1質點傳輸路徑圖 4-179
圖 4-129：案例4之Q2質點傳輸路徑圖 4-180
圖 4-130：案例1之等效初始通量CDF圖 4-180
圖 4-131：案例2之等效初始通量CDF圖 4-181
圖 4-132：案例3之等效初始通量CDF圖 4-181
圖 4-133：案例4之等效初始通量CDF圖 4-182
圖 4-134：案例1與案例2之Q1路徑等效初始通量CDF圖 4-182
圖 4-135：案例1之水流傳輸阻力CDF圖 4-183
圖 4-136：案例2之水流傳輸阻力CDF圖 4-183
圖 4-137：案例4之水流傳輸阻力CDF圖 4-184
圖 4-138：案例1及案例2之Q1路徑水流傳輸阻力CDF圖 4-184
圖 4-139：瑞典SKB的SR-97報告中的近場核種傳輸評估架構 4-192
圖 4-140：瑞典SKB的SR-Site報告中的核種傳輸途徑示意圖 4-192
圖 4-141：利用GoldSim建立SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例核種傳輸區塊模式示意圖 4-193
圖 4-142：利用近場二維評估模式評估瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例之評估結果 4-194
圖 4-143：瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例之評估結果 4-194

圖 4-144：利用近場二維評估模式評估瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例中Pu系列放射性核種的結果，並不考慮Pu系列核種的溶解度限值共享 4-195
圖 4-145：利用近場解析解公式計算各放射性核種的近場年釋出活度 4-195
圖 4-146：雙三角分布的機率密度分布圖，其中，最小值為0，最大值為1.5，最可能值為0.5，且2個三角形的機率總和相同 4-196
圖 4-147：利用GoldSim對1個雙三角分布取樣400、2,000及5,000次後得到的機率密度函數 4-196
圖 4-148：利用GoldSim進行瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例近場評估結果 4-197
圖 4-149：瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例近場評估結果 4-197
圖 4-150：利用隨機取樣及拉丁超立方方法進行參數取樣，不同取樣次數下近場的Ni-59峰值平均年有效劑量 4-198
圖 4-151：利用GoldSim進行瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例遠場評估結果 4-207
圖 4-152：瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例遠場評估結果 4-207
圖 4-153：遠場平均、中位數(50%)、95%百分位及99%百分位的年有效劑量 4-208
圖 4-154：瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例遠場的參數敏感度測試 4-208
圖 4-155：利用隨機取樣及拉丁超立方方法進行參數取樣，不同取樣次數下，遠場的Ni-59峰值平均年有效劑量 4-209
圖 4-156：MARFA SP母岩無限擴散驗證案例 4-209
圖 4-157：MARFA SP母岩有限擴散驗證案例 4-210
圖 4-158：緩衝材料/母岩裂隙交界面幾何示意圖 4-210
圖 4-159：SNFD2017參考案例剪力情節基本案例於早期失效之評估結果 4-211
圖 4-160：SNFD2017參考案例腐蝕情節全球暖化案例之評估結果 4-211
圖 4-161：陸地生態系統之交互作用矩陣 4-226
圖 4-162：陸地生態系統環境介質區塊模組之概念模型 4-226
圖 4-163：水域生態系統的交互作用矩陣 4-227
圖 4-164：水域生態系統環境介質區塊模組之概念模型 4-227
圖 4-165：陸地生態系統食物鏈概念模型 4-228
圖 4-166：關鍵曝露途徑與環境介質之連結 4-228
圖 4-167：0 m海平面核種傳輸模組串接設定 4-229
圖 4-168：-120 m海平面核種傳輸模組串接設定 4-229
圖 4-169：管流形成過程與核種傳輸 4-249
圖 4-170：腐蝕議題情節發展關係圖 4-250
圖 4-171：腐蝕議題評估案例 4-251
圖 4-172：腐蝕議題設計基準演化情節故事版 4-252
圖 4-173：地震議題情節發展關係圖 4-253
圖 4-174：地震議題評估案例 4-254
圖 4-175：地震相關非設計基準演化情節故事版 4-255
圖 4-176：腐蝕議題設計基準演化情節安全評估模式鏈 4-265

圖 4-177：地震議題非設計基準演化情節安全評估模式鏈.....4-265
圖 4-178：設計基準演化情節安全評估案例2的近場年有效劑量 4-266
圖 4-179：設計基準演化情節安全評估案例2的遠場年有效劑量 4-266
圖 4-180：設計基準演化情節安全評估案例2中，不同核種對不同潛在曝露群體的峰值遠場年有效劑量 4-267
圖 4-181：設計基準演化情節安全評估案例5的遠場年有效劑量 4-267
圖 4-182：設計基準演化情節安全評估案例2至案例5的遠場釋出對關鍵群體造成的年有效劑量 4-268
圖 4-183：設計基準演化情節安全評估案例6的遠場年有效劑量 4-268
圖 4-184：設計基準演化情節安全評估案例6至案例9的遠場釋出對關鍵群體造成的年有效劑量 4-269
圖 4-185：非設計基準演化情節安全評估案例1的近場平均年有效劑量 4-269
圖 4-186：非設計基準演化情節安全評估案例1的遠場平均年有效劑量 4-270
圖 4-187：非設計基準演化情節安全評估案例1中，不同核種對不同潛在曝露群體的峰值遠場平均年有效劑量.....4-270
圖 4-188：非設計基準演化情節安全評估案例1至案例4的遠場釋出對關鍵群體造成的平均年有效劑量 4-271
圖 4-189：非設計基準演化情節安全評估案例5的遠場平均年有效劑量 4-271
圖 4-190：非設計基準演化情節安全評估案例5至案例8的遠場釋出對關鍵群體造成的平均年有效劑量 4-272
圖 4-191：案例9的遠場平均、中位數(50%)、95%百分位及99%百分位的年有效劑量 4-272
圖 4-192：利用案例9進行參數敏感度分析的龍捲風圖 4-273

表目錄

頁次

表 1-1：「用過核子燃料最終處置計畫書」各階段名稱、時程及目標一覽表 1-4
表 3-1：無人飛行載具規格表 3-18
表 3-2：MagArrow型磁力儀基本規格 3-18
表 3-3：既有AMT資料之測點位置資訊 3-29
表 3-4：臺灣東部花崗片麻岩體裂隙參數統計分析表(測線採樣法) 3-84
表 3-5：臺灣東部花崗片麻岩體裂隙參數統計分析表(視窗採樣法) 3-84
表 3-6：不同模型之邊界條件設定彙整表 3-96
表 3-7：研究區及鄰近區域之其它單位所屬GPS連續觀測站相關資訊 3-102
表 3-8：研究區及鄰近區域之其它單位所屬GPS連續觀測站相關資訊(續) 3-103
表 3-9：現地孔內試驗參考規範 3-133
表 3-10：演練之孔內調查技術項目、探測儀訊號原理及判釋 3-133
表 3-11：本工作岩石力學試驗參考規範 3-134
表 3-12：臺灣不同岩性與加馬放射強度統計 3-135
表 3-13：不同階段所需之岩石力學參數及其用途 3-151
表 3-14：岩石力學描述模型所需之調查技術 3-152
表 3-15：最終岩石應力模式之建置流程 3-153
表 3-16：臺灣離島結晶岩體參考案例之現地應力數據 3-154
表 4-1：核種存量與衰變熱分析技術之案例編號與說明表 4-5
表 4-2：各核電廠用過核子燃料第一年裝載時廢棄物罐熱負載的平均值 4-5
表 4-3：核一廠一號機各退出批次最大燃耗的用過核子燃料資訊 4-6
表 4-4：核一廠二號機各退出批次最大燃耗的用過核子燃料資訊 4-7
表 4-5：核一廠一號機各退出批次代表性燃料的重要核種計算結果 4-8
表 4-6：核一廠二號機各退出批次代表性燃料的重要核種計算結果 4-9
表 4-7：廢棄物罐與傳送護箱尺寸參數 4-18
表 4-8：核臨界安全分析技術之案例編號與說明 4-18
表 4-9：代表燃料型式挑選 4-19
表 4-10：鑄鐵內襯材料組成敏感度分析 4-19
表 4-11：鑄鐵內襯密度敏感度分析結果 4-19
表 4-12：燃料通道鐵含量敏感度分析結果 4-19
表 4-13：燃料通道密度敏感度分析結果 4-20
表 4-14：燃料組件水平位移敏感度分析結果 4-20
表 4-15：燃料通道間距敏感度分析結果 4-20
表 4-16：燃料通道開口大小敏感度分析結果 4-20
表 4-17：燃料通道厚度敏感度分析結果 4-20
表 4-18：鑄鐵內襯直徑敏感度分析結果 4-21
表 4-19：銅殼厚度敏感度分析結果 4-21
表 4-20：燃料通道長度敏感度分析結果 4-21
表 4-21：廢棄物罐長度敏感度分析結果 4-21

表 4-22：廢棄物罐內溫度敏感度分析結果 4-21
表 4-23：鑄鐵材料參數 4-26
表 4-24：銅殼材料參數 4-26
表 4-25：方管材料參數(型號：S355J2H) 4-27
表 4-26：封蓋材料參數(型號：S355J2G3) 4-27
表 4-27：緩衝材料設計功能、性質及設計需求 4-35
表 4-28：處置孔設計需求 4-36
表 4-29：製造及運轉相關的設計需求 4-37
表 4-30：緩衝材料原料參考設計需求 4-37
表 4-31：緩衝材料元件參考設計規格 4-37
表 4-32：廢棄物罐抗圍壓之案例編號與說明(均勻圍壓) 4-47
表 4-33：廢棄物罐抗圍壓之案例編號與說明(不均勻圍壓) 4-47
表 4-34：廢棄物罐圍壓參數分析 4-47
表 4-35：飽和前廢棄物罐不均勻圍壓分析結果 4-48
表 4-36：飽和後廢棄物罐不均勻圍壓分析結果 4-48
表 4-37：式(4-3)潛變曲線擬合參數 4-55
表 4-38：廢棄物罐抗剪力位移之案例編號與說明 4-55
表 4-39：廢棄物罐短期剪力位移鑄鐵應力分析結果 4-56
表 4-40：廢棄物罐短期剪力位移銅殼應變分析結果 4-57
表 4-41：廢棄物罐長期剪力位移分析結果 4-57
表 4-42：膨潤土參數及初始條件表 4-68
表 4-43：未飽和膨潤土之案例編號說明 4-68
表 4-44：回脹壓力分析-緩衝材料與回填材料界面之分析結果 4-80
表 4-45：回脹壓力實驗-實驗結果 4-80
表 4-46：模擬場址地下水成分 4-80
表 4-47：膨潤土最高溫比較 4-90
表 4-48：地震裂隙剪力位移 4-98
表 4-49：地下水流場演化分析之案例編號與說明 4-116
表 4-50：4個地下水流分析案例資訊 4-116
表 4-51：緩衝材料水平管流侵蝕試驗，各試驗初始條件 4-135
表 4-52：緩衝材料水平管流侵蝕試驗數據分析結果 4-135
表 4-53：純膨潤土試體之試驗條件 4-135
表 4-54：混砂膨潤土試體之試驗條件 4-136
表 4-55：突破壓力統計表 4-136
表 4-56：參數需求表 4-155
表 4-57：離島結晶岩測試區的裂隙領域分類及DFN參數集 4-155
表 4-58：廢棄物罐剪力失效評估之案例編號與說明 4-156
表 4-59：廢棄物罐腐蝕失效評估之案例編號與說明 4-156
表 4-60：廢棄物罐全面腐蝕劑來源說明 4-156
表 4-61：PHREEQC驗算工研院表二水質成果表 4-157
表 4-62：廢棄物罐之銅殼腐蝕速率 4-157
表 4-63：核種釋出途徑分析之案例編號與說明(質點傳輸) 4-177
表 4-64：利用GoldSim建立SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例核種傳輸區塊模式，各區塊的材質、體積及水量 4-191

表 4-65：近場二維核種擴散傳輸模式驗證中，所考慮的放射性核種 4-191
表 4-66：生物圈評估之參數需求表 4-217
表 4-67：陸地生態系統生產者相關參數 4-218
表 4-68：水域生態系統生物相關參數 4-219
表 4-69：C-14計算相關作用參數 4-219
表 4-70：K區陸地生態系個曝露模式之關鍵曝露途徑 4-219
表 4-71：K區陸地生態系統潛在曝露群體曝露途徑設定 4-220
表 4-72：生物圈核種傳輸分析技術之案例編號與說明 4-220
表 4-73：生物圈案例1之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq) 4-221
表 4-74：生物圈案例2之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq) 4-222
表 4-75：生物圈案例3之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq) 4-223
表 4-76：生物圈案例4之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq) 4-224
表 4-77：生物圈案例5之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq) 4-225
表 4-78：各國處置系統元件安全功能彙整 4-235
表 4-79：Posiva的處置場概念中分配給各障壁(EBS組件和母岩)的安全功能 4-238
表 4-80：封閉後處置設施的長期安全功能 4-238
表 4-81：臺灣3種潛在處置母岩之長期穩定性評估結果一覽表 4-239
表 4-82：工程障壁安全功能對在地花崗岩適用性分析評估一覽表 4-240
表 4-83：工程障壁安全功能對在地中生代基盤岩適用性分析評估一覽表 4-240
表 4-84：參數需求說明 4-262
表 4-85：封閉後安全評估劑量與風險評估之案例編號與說明(腐蝕議題) 4-264
表 4-86：封閉後安全評估劑量與風險評估之案例編號與說明(剪力議題) 4-264

1. 概述

我國目前運轉中之反應器機組共4部，其中2部為沸水式反應器(BWR)，2部為壓水式反應器(PWR)；另進入除役階段之反應器機組有2部，皆屬於BWR。針對核一廠既存的溼式貯存與預估核二廠、核三廠運轉40年累計產生的用過核子燃料數量，預估約為BWR 17,890束組件，PWR 4,320束組件，約相當於4,913公噸鈾的用過核子燃料。在108年度工作成果中，先完成了核一廠與核二廠用過核子燃料的特性研究與計算，核三廠用過核子燃料的相關計算則規劃在109年度的工作計畫中。

核能發電原理主要係利用核子燃料進行核分裂連鎖反應所產生的熱進行發電，當核子燃料經核反應一段時間後，因鈾濃化降低，須將核子燃料從核反應器中退出，這些核子燃料即稱為「用過核子燃料」。依據我國用過核子燃料管理策略評估，初期退出之用過核子燃料具有相當多且複雜的放射性核種，且會釋放大量的衰變熱，首先透過廠內用過核子燃料池的溼式貯存方式，可以使多數的短半化期核種先行衰變，待衰變熱降低至一定安全程度，即可陸續採行中期乾式貯存以及尋求最終處置方案。依我國「放射性廢料管理方針」第8條「放射性廢料之最終處置，採境內、境外並重原則，積極推動；不論境外是否可行，仍應在境內覓妥處置場址備用」，故台電公司(以下簡稱本公司)採行之用過核子燃料處置計畫管理策略上，係採乾式貯存並積極推動用過核子燃料境內處置方案，同時亦密切追蹤國際發展趨勢。

經過國際間多年研究，一般咸認「深層地質處置」是用過核子燃料較為可行的最終處置方式(如圖 1-1)。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特性，將用過核子燃料置於工程障壁中，並埋存在深約300 m至1,000 m的地下岩層中，其中人工障壁包括廢棄物罐、緩衝材料及回填材料等，藉由人工與天然障壁所形成的多重障壁系統，可有效圍阻與遲滯可能釋出的放射性核種，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生活環境之前，已衰減至法令規定所容許的風險限值。

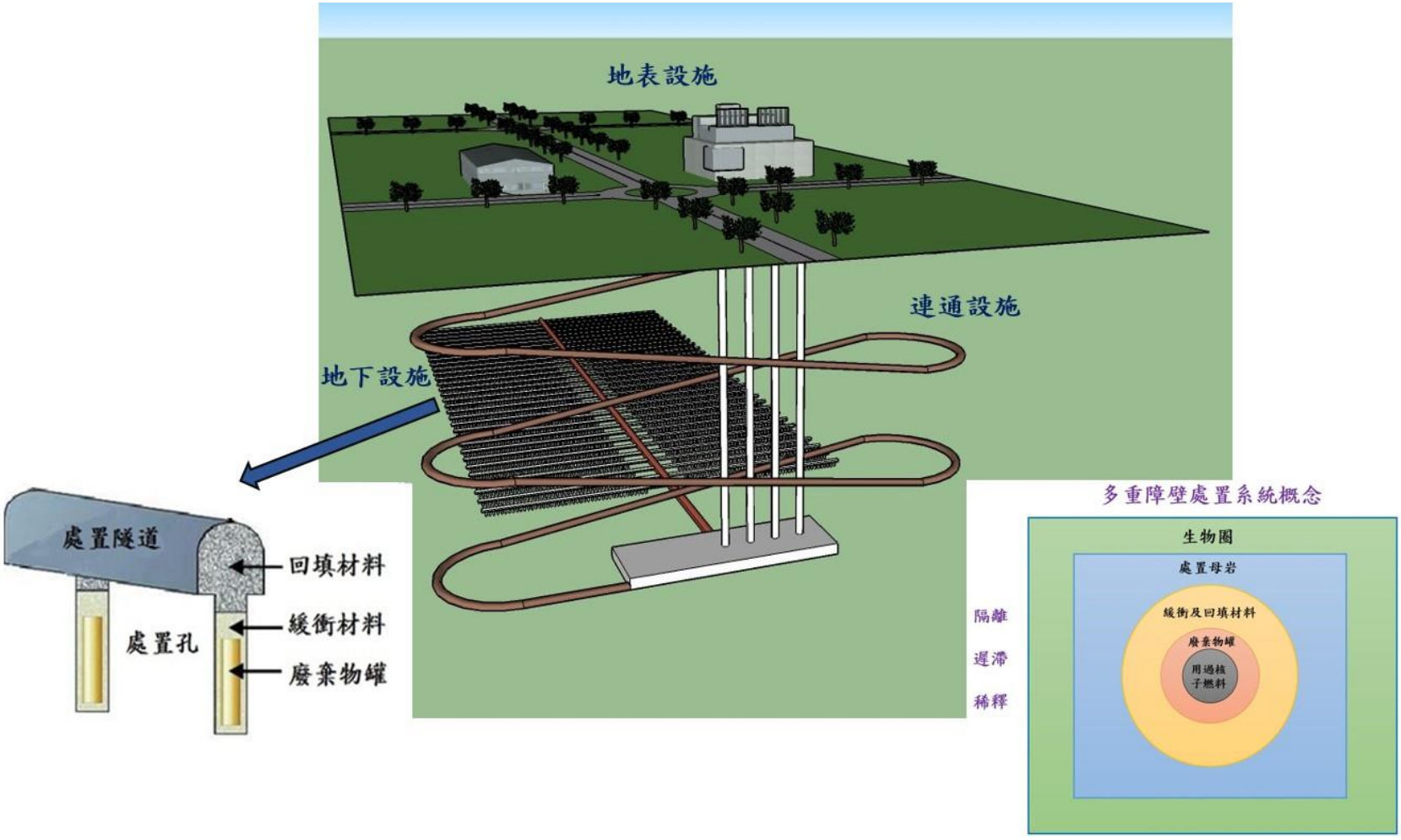


圖 1-1：深層地質處置概念圖

深層地質處置是師法大自然經驗的處置概念；位於加拿大雪茄湖的地底鈾礦床是典型的範例。雪茄湖的地底鈾礦床已存在約12億年，礦床位於地下水位之下，距地表450 m，由一厚約5 m至30 m的黏土層包圍，其上的圍岩為石英帽和厚重的砂岩。長期以來，在地面進行的許多調查工作都無法偵測到放射性的異常，顯示放射性物質是可以藉著黏土、圍岩等天然阻隔物的障壁功能，在安全處置期限內受到妥善的隔絕保護。

配合積極推動用過核子燃料境內處置方案，本公司以深層地質處置方案為技術發展主軸，戮力建立最終處置本土化能力，依照「放射性物料管理法」與「放射性物料管理法施行細則」之相關規定，於2004年提出「用過核子燃料最終處置計畫書」經主管機關核定後，並於每4年檢討修正最終處置計畫，近期已於2018年送出修訂版。本公司切實依計畫時程之目標執行，如表 1-1，在第一階段「潛在處置母岩特性調查與評估」階段(2005年~2017年)，於2009年完成SNFD2009報告，就「處置環境條件的調查研究」、「處置技術的研究發展」及「用過核子燃料處置的功能評估」的初步可行性進行研究；於2017年完成用過核子燃料最終處置技術可行性評估，區分「地質環境」、「處置設計與工程技術」及「安全評估」3大技術領域並進行成果彙整，完成SNFD2017報告主報告1冊及技術支援報告3冊，並經過國際同儕審查，落實滿足主管機關原子能委員會所提出之3項階段性目標要求之技術評估：

(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技術是否建立。

表 1-1：「用過核子燃料最終處置計畫書」各階段名稱、時程及目標一覽表

階段名稱→	潛在處置母岩特性調查與評估	候選場址評選與核定	場址詳細調查與試驗	處置場設計與安全分析評估	處置場建造
預定時程	2005~2017年	2018~2028年	2029~2038年	2039~2044年	2045~2055年
主要目標	(1) 完成我國潛在處置母岩特性調查與評估 (2) 建立潛在處置母岩功能/安全評估技術	(1) 完成候選場址調查區域的調查與評估並建議優先詳細調查之場址 (2) 建立候選場址功能/安全評估技術	(1) 完成場址可行性研究報告(FR) (2) 完成場址環境影響說明書(EIS)	(1) 完成申請建造許可所需的安全分析報告(SAR) (2) 完成建築執照申請程序並取得建照	(1) 完成處置場之建造與運轉試驗 (2) 完成運轉執照之申請與取得
重要里程*	(1) 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 (2) 2016年建立潛在處置母岩功能/安全評估技術 (3) 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 (4) 2017年提出候選場址的建議調查區域	(1) 2025年完成處置場概念設計 (2) 2026年完成候選場址之特性調查與評估 (3) 2027年完成候選場址功能/安全評估技術之建立 (4) 2028年底提出優先詳細調查的場址	(1) 2033年完成場址地表地質調查 (2) 2033年開始進行試驗直井與地下試驗設施規劃與建造 (3) 2036年完成處置場初步設計 (4) 2037年完成場址可行性研究報告(FR) (5) 2038年完成場址環境影響說明書(EIS)	(1) 2043年完成安全分析報告(SAR) (2) 2043年完成地下技術驗證工作 (3) 2043年完成處置場及接收暫存設施細部設計與交通運輸規劃設計 (4) 2044年完成建築執照申請程序並取得建照	(1) 2052年完成接收暫存設施之建造及取得運轉執照 (2) 2054年完成處置場建造與交通運輸設施 (3) 2055年完成處置場運轉執照之申請與取得

*由於時程規劃可能因民意接受度、土地取得等因素影響而導致時程推延，因此當規劃工作與時程無法如預期時，將循放射性物料管理法施行細則所提供每4年修正的機會，另行檢討修正。

第二階段「候選場址評選與核定階段」自 2018 年開始至 2028 年止，為期 11 年，主要工作目標(表 1-1)為：

(1) 完成候選場址的調查與評估並建議優先詳細調查之場址；

(2) 建立候選場址功能/安全評估之技術。

本公司將遵循國內相關法規要求，進行候選場址之評選及調查工作；並依原能會核備之處置計畫書之規劃，進行候選場址建議調查區域之調查與評估工作，建立候選場址之功能及安全評估技術，務實推動用過核子燃料最終處置計畫。

2. 計畫目的

2.1. 計畫目標

依據用過核子燃料最終處置計畫第二階段「候選場址評選與核定階段」之目標，以及符合原能會要求提報更新技術報告(「105年度放射性廢棄物最終處置計畫執行成果報告」審查會議紀錄)，在目前尚未有特定場址之情形下，將善用國外發展經驗及聚焦國內研發資源，台電公司將持續精進「區域特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」等3項核心技術研發工作，同時亦重視技術發展成果之整合應用，以作為推動第二階段工作之主軸。

參照本公司106年底提報之SNFD2017報告指出，臺灣西部離島及東部均存在合適的花崗岩體，且具備足夠的岩體尺寸及地質特性可供處置；中生代基盤岩目前尚未發現可能影響處置設施安全之地質因子，惟仍須進一步調查與評估；另SNFD2017報告亦以離島結晶岩測試區及瑞典KBS-3處置概念作為參考案例，說明已發展具備深層地質特性調查評估之能力與技術，已具備工程障壁與處置設施長期穩定性的性能評估能力，並透過建立的全系統安全評估，可整合處置技術各項成果，展現我國已具備地質處置設施長期安全性的評估技術能力。

有鑑於處置計畫第二階段將進行候選場址的調查與評估技術工作，以及發展建立處置設施概念設計，本階段重要工作，基於SNFD2017報告的研究能量與技術可行性下，強化各項技術連結與國內人才、技術資源的跨領域整合，並將隨計畫進程滾動推進，逐步提升可信度。依據用過核子燃料最終處置計畫(2018年修訂版)，整體計畫發展策略規劃分為2期進行，分別為前4年『調查準備期(2018年－2021年)』與後7年『區域調查期(2022年－2028年)』，技術工作規劃與發展路徑圖則依照『場址合適性』(圖 2-1)、『工程設計』(圖 2-2)與『安全評估』(圖 2-3)技術架構類別持續精進「區域特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」之相關技術能力。

108年度成果報告遂著手整合處置設施工程設計技術及安全評估技術精進，透過設計分析與安全評估的迭代回饋過程，並配合國內地質特性等重要條件，持續深入探討處置設施之設計方案、工程障壁參

考演化分析與核種傳輸分析技術，技術發展上並強化對邊界條件、變數傳遞之一致性，逐步推動對模式與參數不確定性之探討。

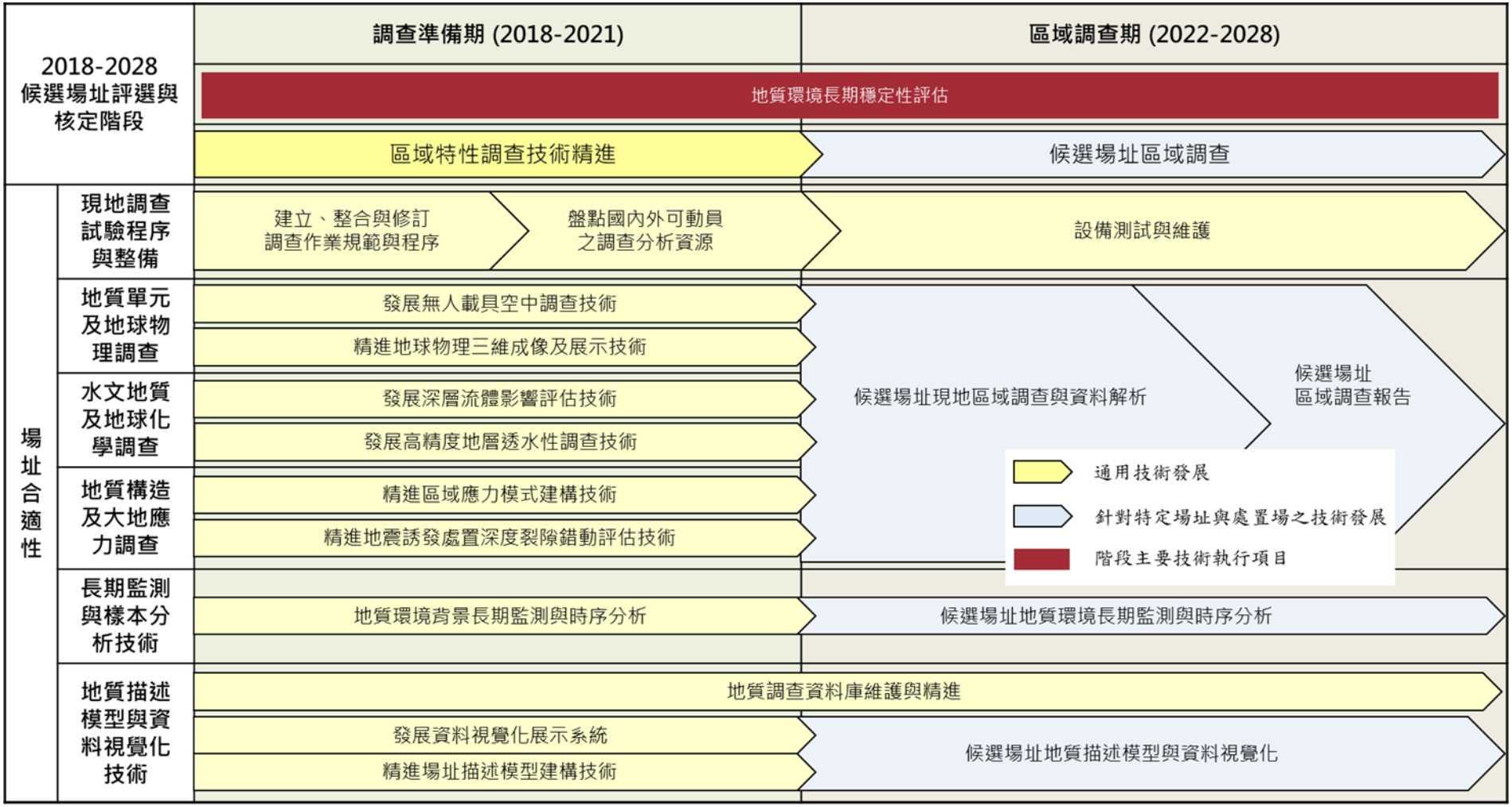


圖 2-1：場址合適性調查技術整體發展路徑圖



圖 2-2：處置設計與工程技術整體發展路徑圖



圖 2-3：安全評估整體發展路徑圖

2.2. 工作規劃

108年度工作計畫以任務導向，運用「潛在處置母岩特性調查與評估」階段所建立之技術及獲致的成果，包括初步取得的岩體可能範圍、大小尺寸、構造的可能位置及基本地質特性等資料，精進對區域特性調查技術發展，提高對現地調查數據分析的精度與準度，以及精進處置設施工程設計技術及安全評估技術之整合運用，以回饋探討對現地調查數據的連結應用與數據需求管理。

在「區域特性調查技術精進」方面，工作規劃說明如下：

(1) 區域地質探測技術與資料解析

為能建立對候選場址區域範圍之地質構造特性的解析，本年度持續精進地球物理探測及解析方法(如：磁力法、大地電磁法等)，進行岩體地下分布範圍調查及資料解析工作，與地下地質構造判釋技術。

(2) 水文地質

候選場址區域範圍之水文地質是影響工程障壁圍阻功能與核種傳輸遲滯的主要條件，工作規劃包括建立坑道開挖擾動帶對裂隙分布評估技術、精進裂隙參數分布特性的統計研究工作，以及持續精進裂隙岩體之地下水流分析術。

(3) 長期監測

持續蒐集並分析本島結晶岩微震監測網之觀測資料，以探討區域地殼活動構造特性，藉由逆推方法獲致本島結晶岩體地區之震源機制與應力反演，以及小型地震的破裂尺度分析結果，作為掌握地下斷層活動的評估因子。

(4) 岩石力學描述模型

持續發展具有本土特性之岩石力學描述模型，著重於岩石力學調查技術演練與發展、岩石力學場址特徵化技術與模式發展。

在「處置設施工程設計技術及安全評估技術精進」方面，工作規劃說明如下：

(1) 用過核子燃料特性研究與分析技術

持續精進對用過核子燃料之核種存量與衰變熱分析技術，以貼近合理真實之用過核子燃料燃料特性，以及建立屬於本土化臨界安全評估方法，執行符合國內用過核子燃料特性的參數敏感度分析，最終成果為建立符合臨界安全之廢棄物罐可接受裝載標準。

(2) 工程障壁設計與性能評估

考量國內BWR用過核子燃料之長度較瑞典用過核子燃料規格長，故針對廢棄物罐、緩衝材料等工程障壁規格進行調整與更新，並且為能符合各項安全功能指標，亦進行廢棄物罐及緩衝材料各項性能評估，包括：廢棄物罐抗圍壓、抗剪力位移之力學分析、緩衝材料未飽和膨潤土特性分析，以及與回填材料介面之性質分析，以確保設計可符合性能安全需求。

(3) 地下設施設計

此項設計仍以離島結晶岩測試區做為參考案例，精進納入岩石應力、地質構造、裂隙剪力位移、地下水流等外在因素影響之考量，以及進行地震剪力位移分析、處置孔水壓及入流量分析、處置孔廢孔率與失效評估分析、陽離子強度分析等相關評估後，調整配置區域。

(4) 水文地質演化趨勢分析

依據地下設施配置設計方案，持續精進針對隨外部條件變化之地下水流場進行分析，包括：等效水力特性參數之數據前處理研究、考量鹽度耦合之地下水流場模擬分析技術、導入主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之結構等，藉以獲得處置設施周圍與遠場之地下水流場演化趨勢。

(5) 工程障壁參考演化分析

藉由各項試驗建置並於試驗過程中獲取相關數據成果，據以分析各類環境下影響過程與演化趨勢，來探討緩衝材料與回填材料之參考演化，以及執行廢棄物罐剪力與腐蝕議題之失效評估，並供後續封閉後安全評估風險與劑量分析使用。

(6) 核種傳輸分析技術

此項議題分為核種釋出途徑分析、近場與遠場核種傳輸分析技術，以及生物圈核種傳輸分析技術。地下水文地質之核種釋出途徑分析，主要導入隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之流場結果，建立傳輸路徑追蹤模擬技術及計算功能測度值；近場及遠場核種傳輸分析技術建立Q2路徑，並與遠場母岩裂隙資訊進行串接，精進核種傳輸分析技術，以評估放射性核種釋出率；生物圈核種傳輸分析技術，建立不同地表地景之環境介質區塊核種傳輸模組，根據陸地生態系統相關之關鍵曝露途徑，找出不同之潛在曝露群體，進行生物圈劑量轉換因子(Biosphere Dose Conversion Factor, BDCF)計算。

(7) 情節發展與案例分析技術

藉由研析國際工程障壁安全功能指標，進行適用於本土性之通用型工程障壁之預期安全功能指標，並且依據ICRP 122報告進行「設計基準演化情節」與「非設計基準演化情節」建構，最後整合前述各項關鍵技術工作成果及情節建構，設定封閉後安全評估劑量與風險各項案例進行評估，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低於法規限值。

108年度成果報告(以下簡稱本報告)將於第3章說明「區域特性調查技術精進」之成果，並於第4章說明「處置設施工程設計技術及安全評估技術精進」之成果。

3. 區域特性調查技術精進

3.1. 區域地質探測技術與資料解析

3.1.1. 潛在母岩空中磁力探測

本項目工作為瞭解本島花崗岩體向海域的延伸範圍，針對該區域鄰近海域之空中磁力探測資料進行處理與解析，研究範圍涵蓋海岸線向東延伸約30 km的區域，期能增進對本島花崗岩體空間分布的瞭解，作為候選場址特性評估及調查規劃之參考。概要內容說明如後。

(1) 磁力資料處理

資料處理的目的在於強化來自岩層的磁力特徵，是磁力資料解釋工作前重要的一環，所進行的主要資料處理項目包括：

(a) 資料前處理

原始磁力量測數據需經一連串資料修正後(Luyendyk, 1997, p31)，才能獲得全磁力網格(total magnetic intensity grid; TMI grid)，並據以進行後續資料處理與解釋等工作。

(i) 突波移除(spike removal)：突波雜訊主要導因於磁力感測器在量測過程中，因陣風或拖鳥姿態劇烈變化，導致磁力感測器劇烈震盪所致。突波移除步驟如下：剔除所有脫鎖(un-locked)的磁力紀錄，包括脫鎖紀錄之前後各一個資料點；搭配第4 階差檢視磁力紀錄，剔除明顯的突波；以非線形濾波(non-linear filtering)法，濾除不規則的小突波。

(ii) 基站修正(base correction)：目的在於去除磁力探測作業期間，地球磁場的日變化效應。基站修正需先經內插對應測點在地磁紀錄中相同時間的地球磁力強度，並自磁力量測紀錄中直接扣除前述內插的地球磁力強度。

(iii) 國際地磁參考場移除(IGRF removal)：地球的主磁場強度隨地點不同而異，故若要凸顯測區內地層的磁性異常，需扣除地球主磁場的磁力強度。故採用IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy)所發布的國際地磁參考場(International

Geomagnetic Reference Field; IGRF)計算公式，先計算每一測點的理論主磁場的磁力強度後，再自量測資料中予以扣除。

(iv) 調平(leveling)：空中磁力探測是在連續變化的環境中進行資料收集，因此兩相鄰測線的磁力紀錄，往往顯現出不一致的基準(level)，而形成與測線平行的雜訊，稱為系統性雜訊(systematic noise)。消除系統性雜訊的過程稱為調平，包括普通調平：透過相互垂直的檢核線，計算測線與檢核線交點處的磁力紀錄差異，據以調整各測線的磁力值，使測線與檢核線交點處的磁力紀錄差異最小化。微調平：透過方向濾波(directional filtering)的概念，濾除沿測線方向的雜訊。

(b) 網格處理

透過二維處理方式，強化磁力異常的影象，包含歸極換算(reduction to the pole; RTP)、濾波(filtering)、向上延伸(upward continuat ion; UC)、與)微分(derivative)說明如下：

(i) 歸極換算：將磁傾角小於90 度區域所獲得的磁力異常圖，轉換成磁傾角等於+90 度或−90 度時的磁力異常圖。為避免當磁傾角較小或雜訊較高情況下，可能引起計算過程之不穩定，故採用MacLeod et al. (1993, p681)所提出的換算公式進行計算。

(ii) 濾波：訊號與雜訊通常具有不同的波長，在空間域(space domain)因各種波長的訊號及雜訊混雜在一起，並不容易在空間域中直接將不同波長的訊號加以分離。故須先將空間域的序列(series)，經快速傅氏變換(Fast Fourier Transformation, FFT)至波數域(wave-number domain)後，於波數域直接對特定波長進行刪除或保留，再經逆快速傅氏變換(Inverse Fast Fourier transformat ion, IFFT)回空間域，藉以達到濾除或保留特定波長訊號之目的。

(iii) 向上延伸：透過解迴旋(convolution)運算，將磁力量測基準面向上提升至某特定高度。如同濾波處理，在波數域與反應函數作用後，再以逆快速傅氏變換轉回空間域。由於基準面高度提高，量測點與地下磁體間的距離加大，故磁力異常較不受淺部局部磁體影響，可反映出大區域的構造形貌。

(iv) 微分處理：透過微分處理可以加強地下磁體邊界的對比(Bruno et al. , 2004, p116)，使之更易於辨認。使用的方法包含垂直微分(Vertical Derivative; VDR)、全水平微分(Total Horizontal Derivative; THDR)、傾角微分(Tilt Derivative; TDR)、解析訊號(Analytic Signal; AS)等。

(2) 磁力三維逆推(3D inversion)

本項目工作以全磁力強度(TMI)網格做為輸入資料，進行三維逆推處理，以獲得地下岩層磁感率的三維分布。

(a) 逆推原理

在地表所量測的磁力值，是地下各不同深度磁體的磁力總合，故在地表量測到的磁力值是地下磁體之深度與磁感率的函數。逆推技術係依據地表量測之磁力值，反推地下磁體的空間分布及其磁感率。進行三維逆推時，慣常先將地下地層劃分為規律的立體網格，藉以固定幾何參數(Denisse et al., 2009, p3; Dutra and Marangoni, 2009, p197)，於求解方程式過程中，解算各立體網格對應的磁感率，並依據磁感率的空間分布進行解釋。

(b) 三維逆推處理

本項目工作採用磁化向量逆推法(Magnetization Vector Inversion, MVI; Ellis et al., 2012, p1; MacLeod and Ellis, 2013, p1)進行處理。基於地下磁體的磁化是一種向量型式，是感應磁化(induced magnetization)與非感應磁化(non-induced magnetization)的向量和，其中非感應磁化的主要來

源為各種殘磁力。MVI將每一個網格都視為具有不同的磁化向量，磁化向量由3組獨立參數組成(大小、磁傾角與磁偏角)，在逆推時直接逆推此3組參數，故較能反應真實情況。

(3) 磁力特徵分析

依據所獲得的各種磁力異常圖及三維磁感率模型，解析磁力強度特徵、磁力線型特徵、及磁化向量特徵，重點說明如下：

(a) 磁力強度特徵

研究區內主要高磁帶分布如圖 3-1。海域磁力強度特徵顯示研究區南側有一顯著的南北向高磁條帶，為一巨大的高磁岩體，推測為古老殘留的南中國海板塊上向西擠壓的海洋地殼塊體，以HP代號表示。另有4條弧形高磁條帶，自南而北分別以HA、HB、HC及HD代號表示。此4條弧形高磁條帶均有向海域延伸的現象。其中HA、HB、HC等3條弧形高磁條帶之磁力高區並非連續的，似由多個高磁塊體接續後形成，故推測並非單一岩體。

(b) 磁力線型特徵

綜合參考磁力異常及等深度磁感率切面上磁體分布的變化，如圖 3-2為例，解釋研究區線型構造特徵如下：

(i) 海域與陸域磁力特徵明顯不同，其界線自花蓮沿中央山脈東緣向北北東延伸，新城以北逐漸轉向海域及東北方向延伸。推測為菲律賓海板塊向西北及向北隱沒的上部邊界，以UBP (Upper Boundary of subducting Plate)代號表示。

(ii) 海域區域之磁力訊號相較於陸域磁力訊號為低頻，磁力趨勢(magnetic trend)呈塊狀分布，可分為5個次塊體(HP1至HP5)，每個次塊體均有高磁條帶分布的現象，次塊體內的高磁條帶方向約略一致，但各次塊體的高磁條帶方向，由南至北有由東北向逐漸轉為東西方向的趨勢。此外，相鄰次塊體間之高磁條帶並不連續，由邊界

處高磁條帶的錯移方向，推測次塊體間受東南方向帶左移的構造切割。

(iii) 陸域區域之磁力特徵主要以弧形高磁條帶(HA、HB、HC及HD)為主，由磁力趨勢的不連續現象，推測存在許多略與UBP方向垂直的斷裂構造，推測與菲律賓海板塊向西北及向北隱沒造成的張裂有關。

(c) 磁化向量特徵

依據三維逆推所獲得之三維磁感率模型，解析不同高程的等高程磁化向量磁感率切面，並套疊磁化向量水平分量(例如圖 3-3)。解析地下磁體之空間分布與磁力向量特徵如下：

(i) 陸域高磁岩體分布可對應HA、HB、HC及HD等弧形高磁條帶，由許多高磁塊體組成，且大致在高程-2 km以下逐漸消失。這些塊狀高磁岩體，其磁化向量的磁偏角部份與現今本區地球磁場的磁偏角(-4.3°)及磁傾角(35.8°)不一致，顯示這些高磁塊體之磁性主要受殘磁力影響，且曾經受不同程度的位移及翻轉。

(2) 隨著高程降低，海域HP高磁岩體在高程-10 km以下，岩體呈現兩條南北方向的高磁條帶分布，西側高磁條帶的磁化向量方向指向西方，而東側高磁條帶的磁化向量方向指向東方，形成兩相鄰岩體磁化向量幾乎相反的特殊構造。

(4) 本島花崗岩體近岸海域之地下岩體分布及構造解析

本島花崗岩體近岸海域之地下岩體分布及構造解析本次調查成果經與地調所蘭陽平原全磁力強度圖縫合(董倫道、林蔚，2014，p92，f4-32)彙編後，再經歸極換算處理，研究區內主要高磁帶分布如圖 3-1。海域磁力強度特徵顯示研究區南側有一顯著的南北向高磁條帶，依其高磁特性推測可能為古老海洋地殼塊體殘塊，陸域有4條顯著的弧形高磁條帶，間夾不同寬度的低磁區，有向東南傾斜並具覆瓦狀結構的特徵，這些弧形高磁條帶均明顯向東延伸至海域。依據三維磁化向量模型，顯示和平岩體及開南

岡岩體在感應分量磁感率剖面上為正值，而其下之基盤岩體為負值，有利於識別和平岩體及開南岡岩體，依此估計開南岡岩體約向海域延伸2 km至3 km。此外，由磁力趨勢的不連續現象，推測地體深處可能存在呈東南、南北及東北等方向的斷裂構造，推測該特徵可能與菲律賓海板塊向西北及向北隱沒造成的地體環境構造有關。

研究區南側海域有一顯著的巨大高磁岩體HP，推測對應海岸山脈向北延伸的火山塊體。HP高磁岩體深部基磐則具有磁化向量方向相反的條帶特徵，推測對應於海洋板塊的磁力特性。分析海域三維磁化向量模型，顯示海域岩體具有平行高磁條帶的特徵，並受東南方向帶左移的構造切割成5個次塊體，各次塊體內的高磁條帶方向，由南至北有由南側的東北向逐漸轉為東西方向的趨勢，推測對應於大南澳片岩包裹高磁性岩體的結晶岩層。由於海域岩體的磁力強度與磁力趨勢等特徵明顯與陸域不同，二者間界線自花蓮沿中央山脈東緣向北北東延伸，新城以北逐漸轉向海域及東北方向延伸，推測為菲律賓海板塊向西北及向北隱沒的上部邊界。

本項目工作選擇6條代表性剖面(於圖 3-4中以H1至H6表示)，並挑選研究區內既有資料中探測深度相當的研究成果進行比對分析，包括震波速度模型、震源分布與聲頻大地電磁地電阻模型等，結果顯示高電阻岩體對應高震波速度及高磁區，絕大多數地震發生在HP高磁岩體的西緣及北側接觸帶上，推測與HP高磁岩體向西推擠及向北隱沒有關。綜合磁力特徵與既有地質資訊，推測研究區結晶岩體可能由三層組成，淺層且厚度相對較薄為片岩及大理岩包裹花崗岩體的白堊紀大南澳片岩帶，中層為巨厚的中新世海洋地殼物質，底層則為厚層的白堊紀大南澳片岩帶。地質構造型態主要受控於覆瓦狀堆疊的海洋基盤，並可與含高壓變質海洋地殼的中新世玉里帶對比，代表可能於中新世因仰衝構造形成前述覆瓦狀堆疊。而後上新世的弧陸碰撞，都是以西北-東南向發生

擠壓作用與碰撞作用；但這些擠壓構造在更新世，因菲律賓海板塊向西北方向發生隱沒作用，而反轉成正斷層活動及沉陷作用。此外，經三維逆推獲得之三維磁感率模型，係採用Geosoft公司開發的VOXI軟體，進行磁化向量逆推，使用TMI網格作為三維逆推的輸入網格，於逆推過程中設定先扣除二階趨勢面後再擷取資料作為逆推的觀測網格。觀測網格間距為87.5 m，共有43,984個量測值。三維網格水平方向的網格間距為100 m，垂直方向的網格間距則為50 m，並以海科中心出版的250 m地形模型作為三維網格的上邊界，包括延伸格點後的網格尺寸為207 × 241 × 108，總計5,387,796個網格。經過880次疊代後獲得的地下磁感率模型如下圖 3-5所示。

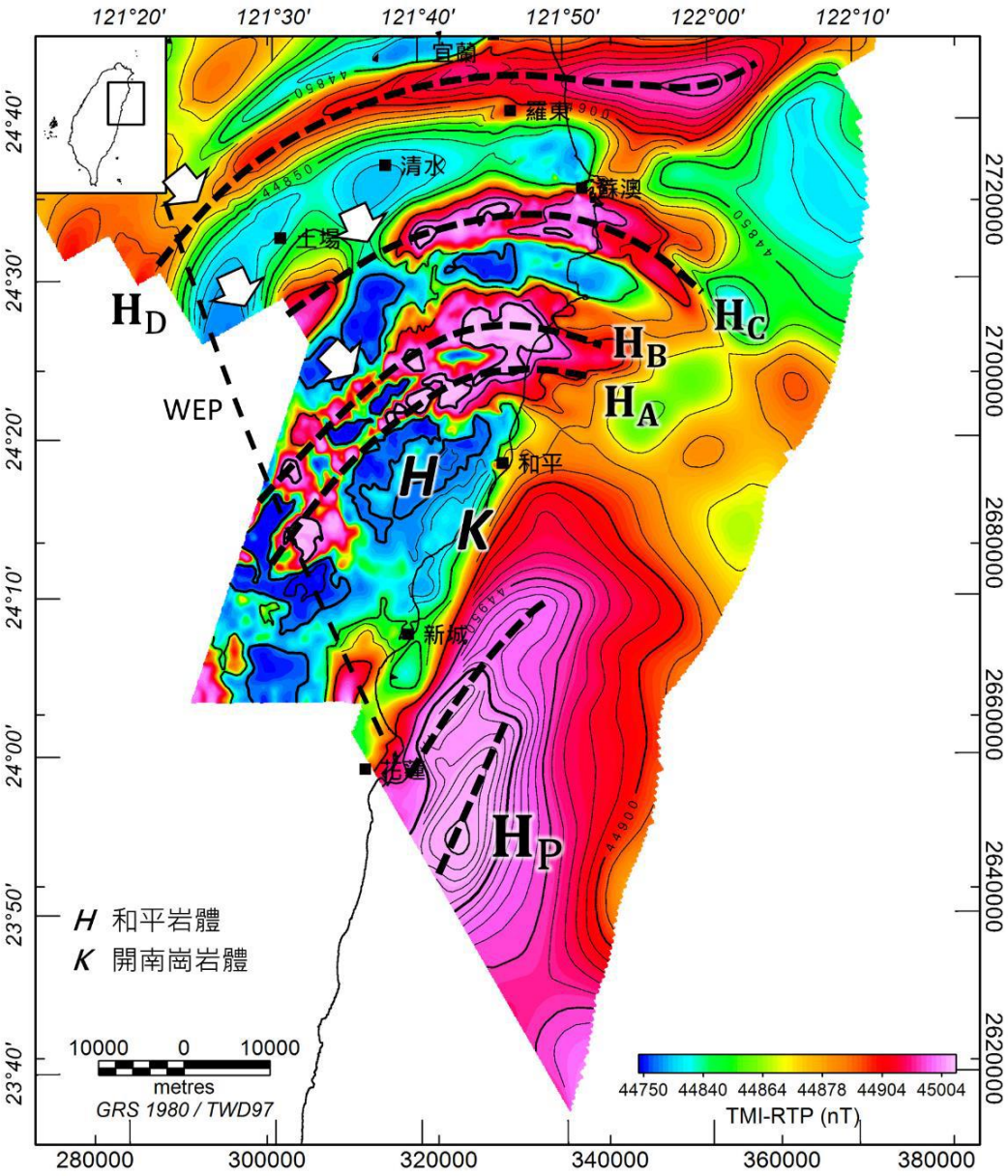


圖 3-1：研究區內主要高磁帶分布

註1： 黑色虛線代表主要高磁帶。

註2： H_A至H_D為陸域的弧形高磁條帶，H_P為海域主要的高磁岩體。

註3： 底圖係將經縫合處理後之全磁力強度圖與地調所蘭陽平原全磁力強度圖(董倫道、林蔚，2014，p92，f4-32)彙編後再經歸極換算處理。

註4： WEP (The Western Edge of the northwestward subducting PSP in northern Taiwa)係菲律賓海板塊向西北隱沒至臺灣北部地區的西部邊緣線的縮寫，大致位於花蓮至中壢連線上(鄧屬予，2007，p7；陳文山等，2016，p5)。

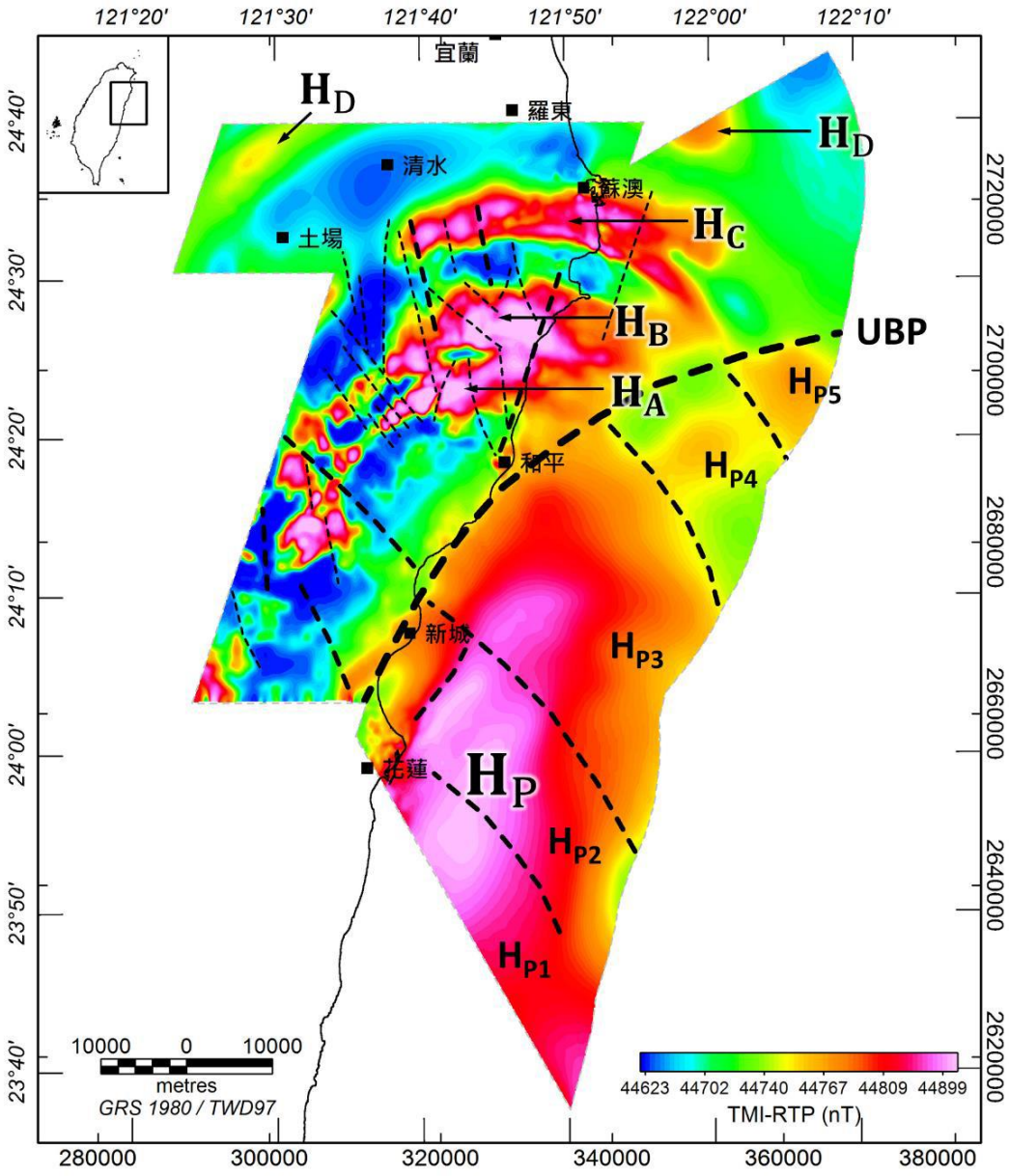


圖 3-2：磁力解釋線型構造套疊經歸極換算之全磁力強度圖

註1： 黑色虛線代表依據磁力趨勢變化解釋之線型構造，線條寬度定性地正比於構造規模。

註2： 底圖為全磁力強度圖經歸極換算處理後之全磁力強度圖。

註3： UBP為Upper Boundar of subducting Plate縮寫，推測為菲律賓海板塊向西北及向北隱沒的上部邊界。

註4： HP1至HP5為推測海域岩體受其下菲律賓海板塊隱沒作用產生的次塊體。

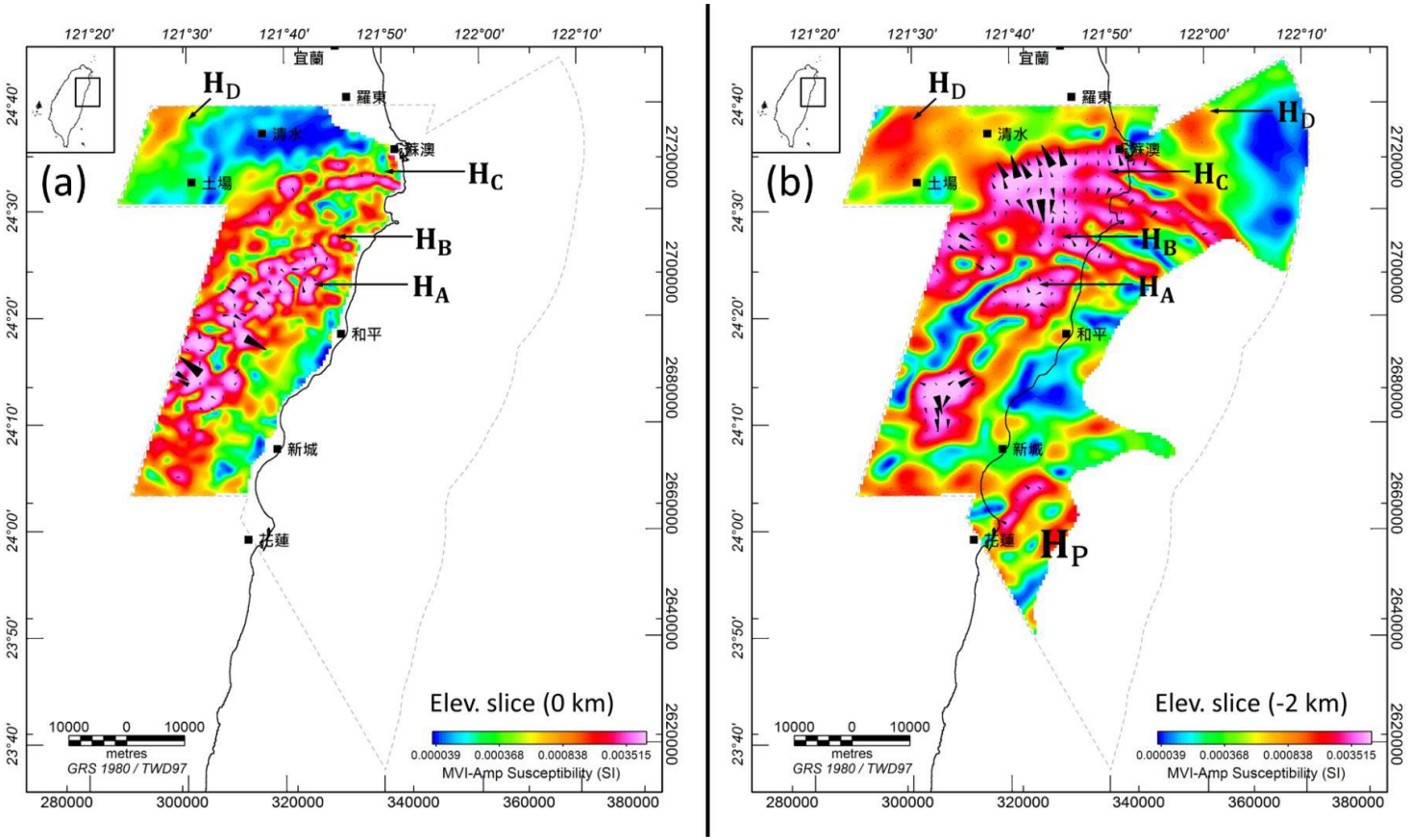


圖 3-3：等高程磁化向量磁感率切面圖套疊磁化向量水平分量

註1： (a)高程等於0 km；(b)高程等於-2 km。

註2： 黑色箭頭為磁化向量在切面圖上的投影，箭頭大小正比於磁化向量大小。

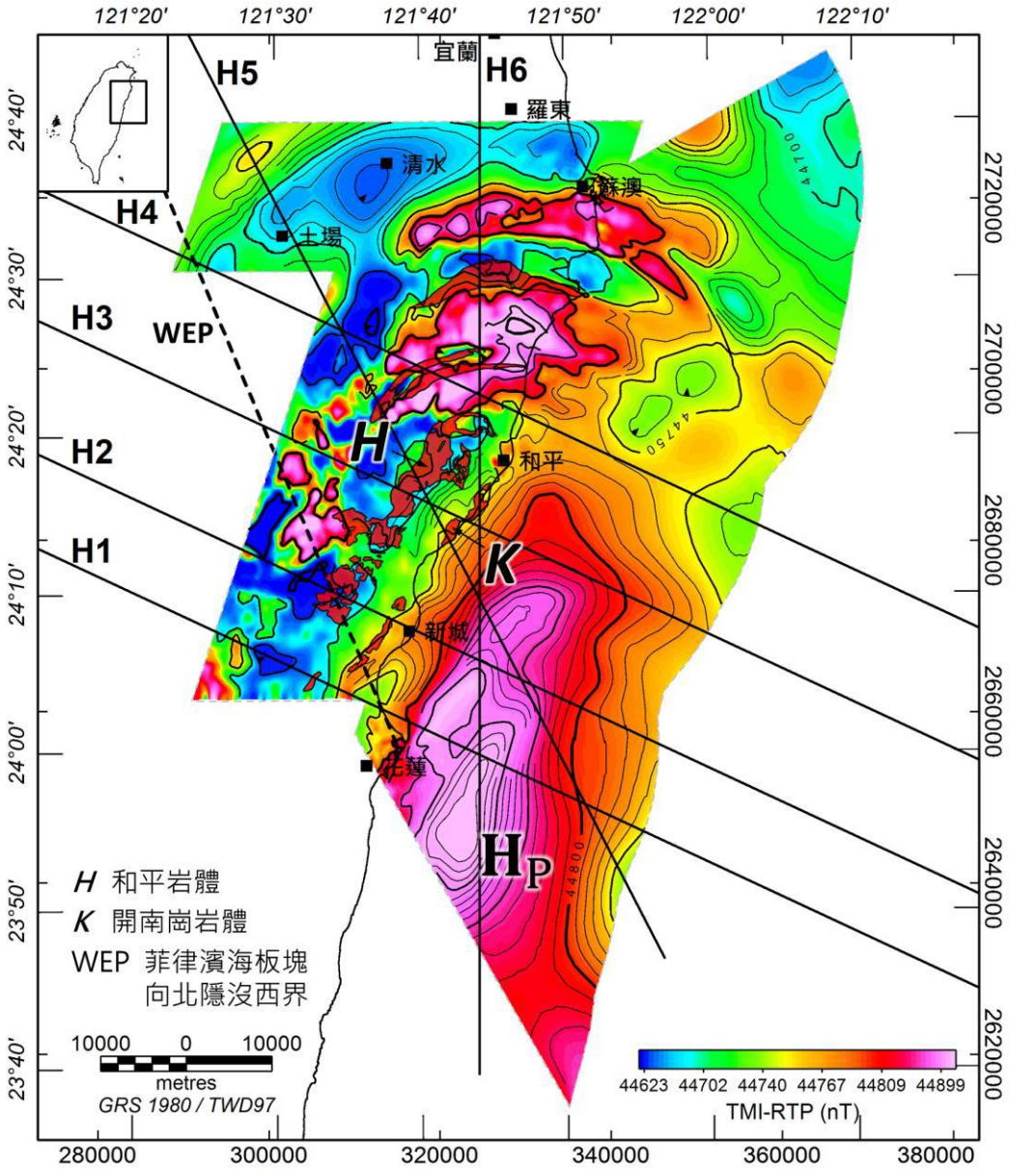


圖 3-4：代表性解釋剖面位置圖

註1： WEP為Western Edge of the Philippine Sea Plate之縮寫。

註2： 底圖為經歸極換算處理後之全磁力強度圖。

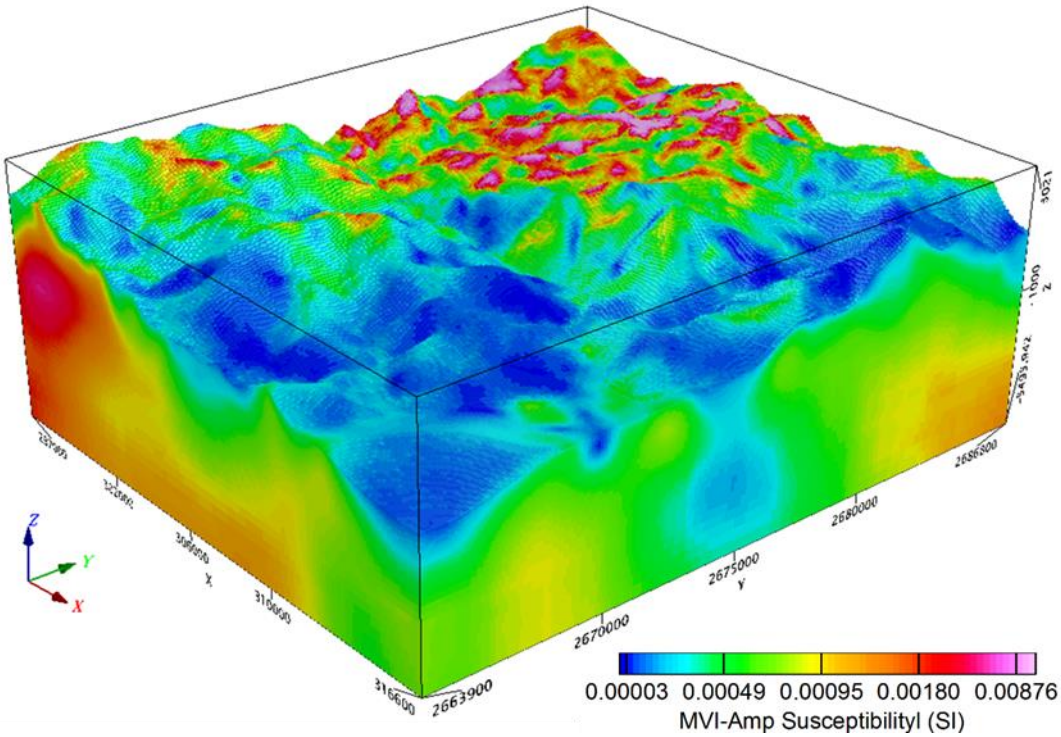


圖 3-5：H區第Ⅱ調查區經三維逆推獲得之三維磁感率模型

3.1.2. 空中磁力測勘與資料解析之無人載具空中調查技術發展

國際發展趨勢係開發高機動性的無人飛行載具空中重力與磁力聯合探測系統(UAV Gravity/Magnetic Integrated Survey System)，可結合協同作業的空中重力與磁力聯合探測系統，以低空之地貌飛行作業，搭配探測紀錄三維逆推與整合解釋技術之建立，獲取高精度的地下三維磁力與密度模型，作為建構地質描述模型的重要基礎資訊以因應接續場址調查之需求。108年度本項目工作主要成果為系統建置與技術開發，說明如下：

(1) 空中磁力探測載具

空中磁力探測飛行載具雖突破了地形限制、降低調查人力與時間成本，但仍受限於電池續航能力，使無人飛行載具飛行時間受限於15~20分鐘，在大範圍野外調查應用上面臨效率不足問題。因此本計畫空中磁力探測飛行載具選擇蒼穹科技有限公司研發之TCT Hexacopter 無人機混合動力推進系統，用先進汽油引擎發電機作為動力驅動電力來源取代純電池發電，使飛行續航時間達2小時，大幅增加野外調查之效率。同時也設計鋰電池系統提供3分鐘內的緊急迫降安全使用，相關規格如表 3-1所示。

空中磁力探測飛行載具採安全保障性較高的六旋翼機身設計，若有1至2具螺旋槳在飛行時故障，剩下的螺旋槳仍能持續運作維持安全返航。內部的CUAV V5 nano飛控系統則控制無人飛行載具的飛行姿態、速度、航線控制等，即使無人飛行載具暫時失去全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)訊號時，仍能依照飛行現況與運動慣性計算出無人飛行載具的位置與狀況，避免失去控制。通訊則結合MAVLink無線通訊協定，與地面站進行單點對單點的WiFi無線通訊，並使用開放可下載的載具操控程式DJI GO地面站，即時觀看航行資訊與畫面，亦可輸入預先規劃的飛行點位、航線、飛行姿態等資訊，以進行自動導航飛行。

無人飛行載具執行任務時，所有飛航資訊經由無人飛行載具通訊鏈，紀錄於天空飛控端與地面站，所紀錄資訊包含經緯度、高度、航向、速度及姿態等訊息，如圖 3-6所示。

(2) 空中磁力探測系統

空中磁力探測系統係採購Geometrics公司開發之MagArrow型磁力儀(圖 3-7)，該磁力儀可以搭配無人飛行載具系統進行施測，突破了傳統地面磁力儀對於地形與交通的限制，更提升了調查效率並降低成本。

MagArrow由空氣動力學、輕巧的碳纖維外殼和內部電子設備組成，包括MFAM™磁力傳感器、慣性測量元件與全球定位系統。MFAM™是MagArrow內部的兩個傳感器模組，能夠以極其輕巧和小巧的包裝進行高精度測量。

以無人飛行載具搭載MagArrow型磁力儀，預編程的全球定位系統航點便會在高度穩定的測量線中執行磁力測量工作，以10 m/s的飛行速度進行調查之下，每1 cm便能採集一次樣本。

MagArrow型磁力儀基本規格如表 3-2，特色和優點如下：

(a) 輕巧：僅重1 kg，比有效載荷2.5 kg的無人飛行載具將可延長20%的飛行時間。

(b) 獨立於無人飛行載具：可搭載到大多數無人飛行載具上

(c) 機體包含：全球定位系統、儲存設備和無線熱點。不需要與無人飛行載具的數據連接。

(d) 高採樣率：飛行速度更快，每1 cm採樣速度高達10 m/s。濾除無人飛行載具電動機噪音。

(e) 現場的品質控管:可以使用任何具有網頁瀏覽器應用程序界面的設備在現場查看和做數據品質控管。

(f) 低功耗：單個1,800 mAh鋰聚合物電池將為系統供電2小時，使多架無人飛行載具飛行更持久，並且電池是可熱插拔的。

(3) 無人飛行載具空中磁力探測系統組裝與測試

實際進行無人飛行載具及空中磁力探測系統結合前，需進行無人飛行載具性能測試，測試包含酬載能力、續航能力、自動飛行與

隨地飛行能力。因此測試內容分為12 kg級高酬載長滯空無人機載具設計製作與5 kg級空中磁力探測載具設計製作成果。

(a) 12 kg級高酬載長滯空無人飛行載具測試

(a) 飛行前準備

12 kg高酬載長滯空無人飛行載具飛行測試的準備項目包含無人飛行載具飛行器、螺旋槳、油料、攝影機與腳架、遙控器箱、工具箱與12 kg載重箱。

(b) 飛行測試地點

飛行測試地點為高雄市大寮區大發工業區內的萬大模型直升機飛行場。根據國內法規，此地點為限飛行機場標高60 m以下之地區，本次飛行之高度維持約3 m至4 m，符合無人飛行載具禁飛區之規定。

(c) 環境條件

根據中央氣象局大寮氣象站觀測資料，施測時風速為2.8 m/s，對應中央氣象局現行的風級標準為2級風，本無人飛行載具最大承受風級約為6級風，因此，為良好的飛行天氣條件。

(d) 飛行測試

載重測試係準備一個12 kg重之箱子，經秤重後確切重量為12.14 kg，並將此箱固定至無人飛行載具腳架上。箱子固定完成後，將6支螺旋槳依序裝上無人飛行載具，裝置完成如圖 3-8。

安裝螺旋槳完成後，將ipad裝置與無人飛行載具遙控器連接，再將無人飛行載具與地面站軟體做連線，並做無人飛行載具的水平儀校正，校正過程為：施測者先將無人飛行載具水平抬起，以施測者為軸心旋轉360度，再將無人飛行載具轉成垂直，以施測者為軸心旋轉360度，即完成無人飛行載具水平儀校正。

由於本無人飛行載具為油電混和引擎，因此，需加入油料。油料使用95無鉛汽油與機油以25：1比例混合。無

人飛行載具準備完成後，準備好錄影器材，利用啟動馬達將無人飛行載具馬達啟動，並開始飛行測試(圖 3-9)。整體測試飛行紀錄，開始飛行時間為14：55，降落時間為15：57，共歷時62 min，符合高酬載長滯空飛行要求。飛行過程並錄影存查。

(b) 5kg級隨地飛行無人飛行載具測試

(i) 飛行前準備

5kg級隨地飛行無人飛行載具測試的準備項目包含無人飛行載具飛行器、螺旋槳、油料、攝影機與腳架、遙控器箱、5公斤磁力儀模型。

MagArrow磁力儀依原廠設計係以4條細鋼索掛載於無人機上執行量測作業，本作業為掛載5公斤磁力儀模型之無人機，為考量未來能加裝對地光學雷達(Lidar)，提升對隨地飛行高度精準度，若以細鋼索吊掛方式可能會遮蔽掉光學雷達的訊號，且為避免本次測試為較高載重負荷，採吊掛方式可能因磁力儀模型受瞬間側風作用，進而影響無人機之飛行穩定，因此本次作業採將磁力儀模型固定於無人機腳架下方之方式執行，安裝設計如圖3-10所示。

(ii) 飛行測試地點

飛行測試地點為高雄市大寮區大發工業區內的萬大模型直升機飛行場旁河畔，飛行距離共118m。根據國內法規，此地點為限飛行機場標高60 m以下之地區，本次飛行之高度維持約21 m至31 m，符合無人飛行載具禁飛區之規定。

(iii) 環境條件

根據中央氣象局大寮氣象站觀測資料，施測時風速為2.2 m/s，對應中央氣象局現行的風級標準為2級風，本無人飛行載具最大承受風級約為6級風，因此，為良好的飛行天氣條件。

(iv) 飛行測試

本次隨地飛行無人飛行載具測試為事先規劃飛行路徑，以先取得飛行路徑之數值地形高度值，再於飛控系統中輸入飛行路徑與預設飛行高度，如此無人機起飛後即可依照預設路徑與高度執行飛行任務，並將測試路徑分成6個段點。

圖 3-11為無人飛隨地貌飛行測試結果，地形高度(下方紅線)與飛行高度(上方黃線)之關係圖，可以看出無人機依照預先設定之飛行路徑與飛行高度，可達到隨地形/地貌飛行之目的。

表 3-1：無人飛行載具規格表

項目名稱	規格
重量	機身13 kg
輸出功率	2.4 kW
機身尺寸	1,600 mm ×1,600 mm×650 mm
輸出電壓	12S (49V)
油耗	5kg載重：1.2 L/hr；12kg載重：2.0 L/ hr
最大飛行速度	40 km/hr

表 3-2：MagArrow型磁力儀基本規格

項目	規格
工作原理	雷射泵浦銫蒸氣(Cs-133非放射性)全場標量磁力計。
工作範圍	20,000至100,000 nT。
磁梯度上限	10,000 nT/m。
操作區域	可配置在世界上任何地方操作。
死區(Dead zone)	無。
噪聲/靈敏度	典型值為0.005 nT/sqrt Hz rms。
採樣率	1,000 Hz。同步至GPS 1PPS帶寬：400 Hz。
航向誤差	在整個360°赤道和極地旋轉中，典型誤差為±5 nT。
輸出	通過2.4 GHz WiFi接入點下載WiFi數據。
GPS	商業級，典型精度為1 m。
USB端口	USB閃存驅動器的端口。用於現場升級。
數據記錄器	內置數據記錄器。
數據存儲	32 GB Micro SD卡，U3速度等級。聯繫銷售人員獲得更高的容量。
數據下載	使用用戶提供的具有瀏覽器功能的設備，通過WiFi 2.4 GHz。10 min的數據需要1 min才能下載。
慣性測量元件(IMU)	Bosch BMI 160 Accel/Gyro-200 Hz採樣率
Insentek指南針	100 Hz採樣率。
總重量	1 kg(不含電池)。
長度	1 m。
電池連接	2個XT60連接器，用於206型電池。
電池建議	非磁性1,800 mAh或2,200 mAh鋰聚合物，3 cell 11.1v。支援熱插拔。
功率	大約6 W。使用12 V電源時，電流消耗約為420 mA。通電時最大電流限制為2 A。
工作溫度	-10 °C至＋40 °C(＋14 °F至＋104 °F)。
海拔	最高3,000 m。通常受無人飛行載具最大高度限制。可以在5,000 m處飛行，但是不能保證在高於3,000 m的高度下的性能。
濕度	不凝結。

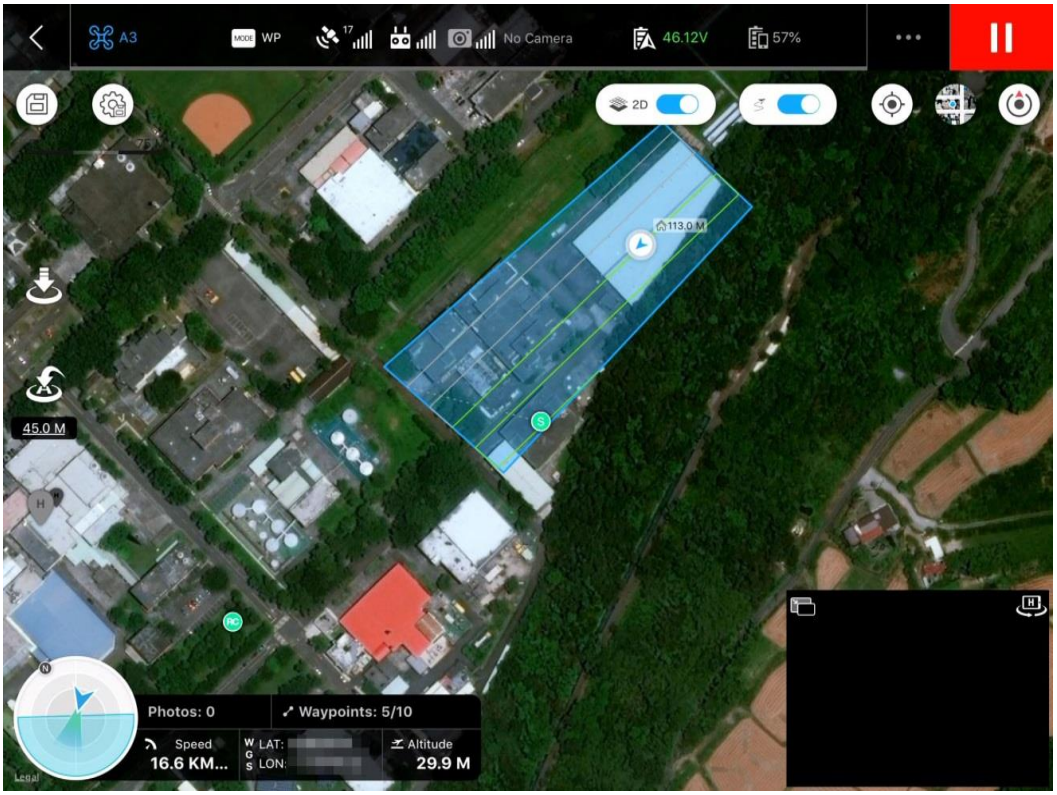


圖 3-6：無人飛行載具資訊畫面



圖 3-7：MagArrow型磁力儀外觀



圖 3-8：無人飛行載具與12 kg載重物組裝測試



圖 3-9：高酬載長滯空飛行測試



圖 3-10：無人機裝載5公斤磁力儀模型飛行狀況

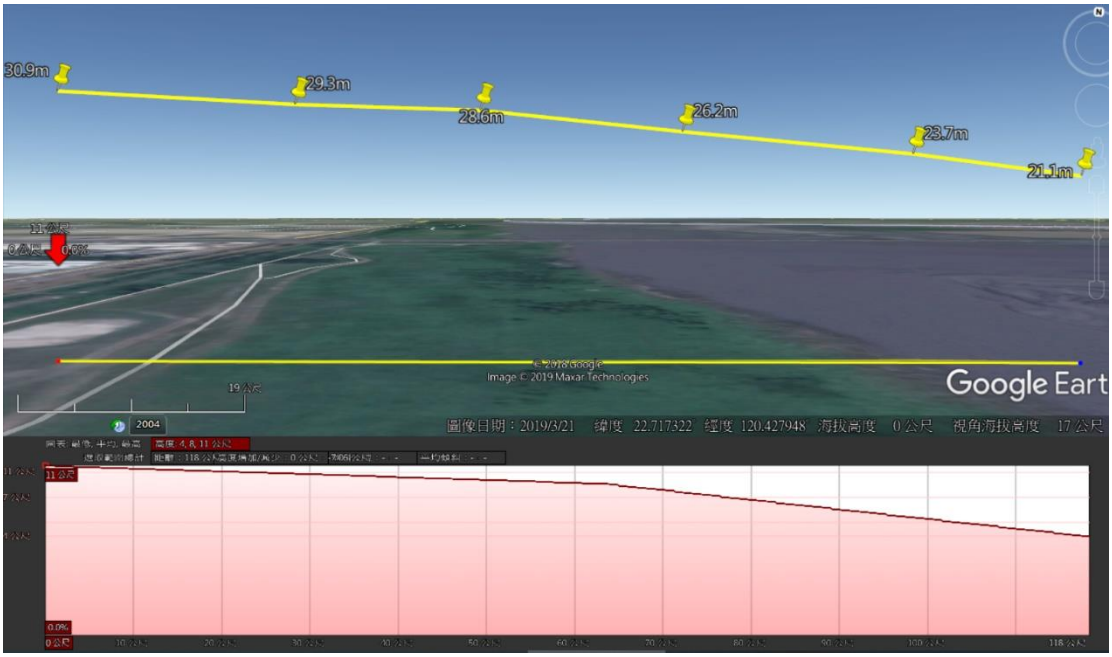


圖 3-11：無人飛隨地貌飛行測試地形高度(下方紅線)與飛行高度(上方黃線)圖

3.1.3. 地球物理三維成像技術

108年度本項目工作以地球物理探勘的聲頻大地電磁測勘法(Audio Magnetotelluric, AMT)為改進目標，並將地形起伏納入三維網格進行逆推處理，期能切實地反映真實地形下的三維地電阻模型。108年度工作成果說明如下：

(1) 起伏地形AMT三維成像技術建置方法

過往進行AMT三維成像運算時，不論是逆推模擬或是成果呈現大多以海平面為基準面進行運算或是展示，然因應現今對於小尺度高解析與待測區本身地形起伏急峻的需求之下，考量若仍忽略測點與海平面之間地層所造成的效應，恐會無法精密反應地下構造的真實性。

本項目工作以Kelbert et al.(2014)所開發的三維電性構造軟體ModEM為基礎，在AMT三維構造模擬中，納入地表地形起伏的幾何形貌，設定邊界條件，測試對於起伏地形的空間解析能力。理論測試(Synthetic Test)流程如圖 3-12。

在地球物理模型求解問題中，包含順推(Forward Modeling)與逆推(Inversion Modeling)。其中，由實際地層或模擬地層以地球物理理論基礎，推估出各種期望觀測物理量的過程，稱為順推過程；利用野外實地測量得到的各種物理紀錄，透過模型假設及數學數值方法求解等方法，求解出最佳模型解或最符合野外實地現況解的過程，則稱為逆推。以下說明採用的順推與逆推方式：

順推：大地電磁探勘法所量測的磁場(H)與電場(E)資料，由一階馬克斯威爾方程式(Maxwell's equation)表示如下：

$$\nabla \times H = \sigma E \qquad (3\text{-}1)$$

$$\nabla \times E = i\omega\mu H \qquad (3\text{-}2)$$

其中，

ω=角頻率

σ=導電率

μ=導磁率

然後應用於三維模型中，多以有限差分法進行數值模擬。圖 3-13表示了三維模型中，有限差分法的網格模型(Kelbert et al., 2014)。其中定義電場E沿著網格方塊邊緣，磁場H則為網格方塊的中心。根據圖 3-13的網格幾何，式(3-1)可以分別表示如下：

$$J_x(i,j,k)=\frac{[H_z(i,j+1,k)-H_z(i,j,k)]}{\Delta y}-\frac{[H_y(i,j,k+1)-H_y(i,j,k)]}{\Delta z} \quad (3\text{-}3)$$

$$J_y(i,j,k)=\frac{[H_x(i,j,k+1)-H_x(i,j,k)]}{\Delta z}-\frac{[H_z(i+1,j,k)-H_z(i,j,k)]}{\Delta x} \quad (3\text{-}4)$$

$$J_z(i,j,k)=\frac{[H_y(i+1,j,k)-H_y(i,j,k)]}{\Delta x}-\frac{[H_x(i,j+1,k)-H_x(i,j,k)]}{\Delta y} \quad (3\text{-}5)$$

一併將電場E以J場表示，則

$$E_x(i,j,k)=\frac{[\rho_{xx}(i,j,k)+\rho_{xx}(i-1,j,k)]}{2}J_x(i,j,k) \quad (3\text{-}6)$$

$$E_y(i,j,k)=\frac{[\rho_{yy}(i,j,k)+\rho_{yy}(i,j-1,k)]}{2}J_y(i,j,k) \quad (3\text{-}7)$$

$$E_z(i,j,k)=\frac{[\rho_{zz}(i,j,k)+\rho_{zz}(i,j,k-1)]}{2}J_z(i,j,k) \quad (3\text{-}8)$$

同樣應用於磁導率的表示式，式(3-2)可表示如下：

$$i\omega\mu_{xx}H_x(i,j,k)=\frac{[E_z(i,j,k)-E_z(i,j-1,k)]}{\Delta y}-\frac{[E_y(i,j,k)-E_y(i,j,k-1)]}{\Delta z} \quad (3\text{-}9)$$

$$i\omega\mu_{yy}H_y(i,j,k)=\frac{[E_x(i,j,k)-E_x(i,j,k-1)]}{\Delta z}-\frac{[E_z(i,j,k)-E_z(i-1,j,k)]}{\Delta x} \quad (3\text{-}10)$$

$$i\omega\mu_{zz}H_z(i,j,k)=\frac{[E_y(i,j,k)-E_y(i-1,j,k)]}{\Delta x}-\frac{[E_x(i,j,k)-E_x(i,j-1,k)]}{\Delta y} \quad (3\text{-}11)$$

平均導磁率可一併表示如下：

$$\mu_{xx} = \frac{\mu_{xx}(i,j-1,k-1) + \mu_{xx}(i,j,k-1) + \mu_{xx}(i,j-1,k) + \mu_{xx}(i,j,k)}{4} \quad (3\text{-}12)$$

$$\mu_{yy} = \frac{\mu_{yy}(i-1,j,k-1) + \mu_{yy}(i,j,k-1) + \mu_{yy}(i-1,j,k) + \mu_{yy}(i,j,k)}{4} \quad (3\text{-}13)$$

$$\mu_{zz} = \frac{\mu_{zz}(i-1,j-1,k) + \mu_{zz}(i,j-1,k) + \mu_{zz}(i,j-1,k) + \mu_{zz}(i,j,k)}{4} \quad (3\text{-}14)$$

地表的電場E和磁場H為連續三維網格延伸到地表的最上層，若以最上層網格中心做為網格對應實際地表的高度。地表觀測的磁場H位置(H_{xs}和H_{ys}，s：surface)就可定義於地表模型網格的中央，可將電場H表示如下：

$$H_{xs}(i,j) = \frac{1}{2}[H_x(i,j,ksurf) + H_x(i,j+1,ksurf)] \quad (3\text{-}15)$$

$$H_{ys}(i,j) = \frac{1}{2}\left[H_y(i,j,ksurf) + H_y(i+1,j,ksurf)\right] \quad (3\text{-}16)$$

其中，

$ksurf$=地表的高程。

電場E亦可定義表示為：

$$\mathrm{Exsi,j} = \rho\mathrm{i,j,k}\rho\mathrm{i,j,k} + \rho\mathrm{i-1,j,k}\mathrm{Exi,j,k} + \rho\mathrm{i,j,k}\rho\mathrm{i,j,k} + \rho\mathrm{i+1,j,k}\mathrm{Exi,j,k} \quad (3\text{-}17)$$

$$\mathrm{Exsi,j} = \rho\mathrm{i,j,k}\rho\mathrm{i,j,k} + \rho\mathrm{i-1,j,k}\mathrm{Exi,j,k} + \rho\mathrm{i,j,k}\rho\mathrm{i,j,k} + \rho\mathrm{i+1,j,k}\mathrm{Exi,j,k} \quad (3\text{-}18)$$

透過式(3-3)至式(3-18)，可順推計算出三維網格從底層到地表的電場E與磁場H。

逆推：大地電磁探勘法三維逆推的目標是要在觀測資料與理論資料之間，在滿足誤差極小化之下，同時獲得平滑的的三維電阻率模型(3D resistivity model)。目標函數(object function)表示如下：

$$\mathrm{U(m,\lambda)} = (\mathrm{m} - m_0)^T \mathrm{C}_m^{-1}(m - m_0) \quad + \lambda^{-1}\{(d - F[m])^T \mathrm{C}_d^{-1}(d - F[m]) - X^2\} \quad (3\text{-}19)$$

其中，

m=電阻率模型。

m_0=初始模型或迭代過程的前組模型(prior model)。

C_m=模型協方差矩陣(covariance matrix)，為定義相對於前組模型的電阻率變化幅度、平滑狀況與邊界條件設定。

d=觀測資料。

$F[m]$=模型響應(response)。

C_d=資料的協方差矩陣。

X=期望的收斂誤差(misfit)。

λ=拉格朗乘數。

在此三維逆推演算過程中，將利用迭代趨近運算來解決非線性逆推問題，F[m]函數定義如下：

$$F[m_{k+1}] = F[m_k + \Delta m] = F[m_k] + J_k(m_{k+1} - m_k) \qquad (3\text{-}20)$$

其中，

k=迭代次數。

$J_k = (\partial F/\partial m)_k$敏感矩陣sensitivity matrix)。

由式(3-19)可獲得趨近求解的運算方程式為：

$$m_{k+1}(\lambda) = [\lambda C_m^{-1} + \Gamma_k^m]^{-1} J_k^T C_d^{-1} X_k + m_0 \qquad (3\text{-}21)$$

其中，

$X_k = \mathrm{d} - \mathrm{F}[m_k] + J_k(m_k - m_0)$，$\Gamma_k^m = J_k^T C_m^{-1} J_k$=代表模型空間的交互乘積矩陣(model-space cross-product matrix)。

適當的λ通常由消長曲線(trade-off cure)上，選取曲率變化最大處的λ值。藉由每次的迭代運算，式(3-21)經由不同的λ值計算出

結果，使模型與觀測誤差值降至期望的誤差(X)以下，尋找出式(3-19)趨於穩定的平衡點。迭代運算可透過式(3-19)中$\|C_d^{-1}(d-F[m]\|$項次計算出均方根(root mean square)誤差，並進行均方根誤差的改進，盡量降低$\|(\mathrm{m}-m_0)^T\mathrm{C}_m^{-1}(m-m_0)\ \|$項次的差異值以及由不同λ值計算中尋找出最平滑的模型。

本次要進行包含地形的三維MT成像技術，將在模型協方差矩陣C_m中，加入地形邊界的設定，提供地形起伏數據與對應的空氣電阻率條件，在逆推過程中利用模型協方差矩陣來調整逆推工作的進行與計算。

(2) 起伏地形三維地電阻模型驗證

基於測試所建置技術是否能完整成像出起伏地形的三維電性構造，將進行理論模型測試(Synthetic Test)的工作流程。首先設定長15 km，寬15 km，高9 km 的理論模型，其中在理論模型深度上，分為海平面以上1.8 km與海平面以下7.2 km之2個層面。整體理論模型設定背景電阻率為100 Ohm-m，海平面以上1.8 km的層面則設定不規則起伏山丘地形，並在山丘地形下方設置一相對高電阻率塊體(500 Ohm-m)，不規則起伏山丘地形以上部分則設定為空氣層。由於本工作項目在於建置包含起伏地形之AMT三維成像技術，因此將強調在起伏地形的電性構造逆推成像，理論模型的設置除了在海平面以上及山丘之下設置了一相對高電阻率塊體之外，在海平面以下的理論模型設置到約7公里深，目的在於測試進行三維電性構造逆推時，是否會因為地球物理非唯一解問題，在為達成起伏地形下的高電阻率塊體的逆推誤差收斂時，而在相對深部產生不應存在的假性構造。若理論模型測試結果能準確的呈現初始人工設定的電性構造，則代表此成像技術可應用於未來所需求的深度與對應構造上。以上設定做為後續理論模型測試的人為電性構造模型(圖 3-14)。

透過順推對上述建置的人為電性構造模型計算出該人為電性構造模型對應的理論視電阻率與相位資料。以此筆資料做為該理論模型的野外觀測值，配合一包含起伏地形的空白初始模型(圖

3-15)進行三維地下電性構造的逆推計算，經過多次迭代計算後，求得符合收斂誤差內的逆推三維電性構造。再與我們所設置的人為電性構造模型進行比對，確認包含起伏地形的三維成像技術是否能確實的還原原有的電性構造幾何形貌。

經過12次的迭代計算(圖 3-16)，完成了包含起伏地形的MT三維逆推理論模型測試。由測試結果來看，從空白初始模型到達第一次迭代結果之間，主要逆推造成的電阻率變化集中在原本理論模型的位置。由集膚深度(Skin Depth)公式來推估，可以理解我們所設置的理論模型塊體接近地表且有切確的電阻率；因此，明確可知順推計算中在地表所接受到的視電阻率大約會落在何種頻率區間，且因為測試模型形貌單純，所以，在逆推計算中，可以在一開始就得到相當明確的模型塊體位置進行逆推。

在後續第2次至第12次迭代過程中，每次逆推迭代的改變皆落在預設塊體的範圍與其周圍變化，且持續收斂誤差到最後停止逆推。比較圖 3-14與圖 3-16第12次迭代之結果，逆推計算得到的包含起伏地形三維電性構造，與理論測試人為建置模型十分相近，顯示已建立可反映起伏地形的MT三維成像技術分析流程。

(3) 既有AMT資料再處理，並與測試區內相關地質及地球物理探測成果進行套繪及綜合解釋。

本項目工作使用ModEM軟體，進行包含起伏地形的既有AMT三維逆推計算。既有AMT資料為經過基礎資料處理之標準EDI格式，共16筆資料，相關測點位置如表 3-3所示，視電阻率測深曲線與相位測深曲線如圖 3-17所示。使用10400 Hz、8800 Hz、7200 Hz、6000 Hz、5200 Hz之5個頻率段資料的Zxx、Zxy、Zyx、Zyy紀錄進行逆推處理。逆推設定的三維網格以測點分布區域之中心點為模型原點(121.623°E, 24.128°N)，水平方向(X與Y)的網格間距設定為0.2 km，外圍網格間距則以1.1倍數逐漸增大；垂直方向地表以上網格設定為100 m共計22層，地表以下網格則為100 m起以1.1倍的級數逐漸加大，網格數在X及Y方向分別為59與57，Z方向則為45，總計約15萬個網格數。

經過32次迭代後所獲得的三維電性構造模型(3D resistivity model)，運用反距離法(Inverse distance)網格化方法進行三維網格模型的展示，反距離法提供簡單的內插格點方法，在原始資料分布均勻狀態下，可完整展示逆推之三維電性模型原始特性。網格大小在X及Y方向為100 m，Z方向為100 m，逆推之電性構造模型展示如圖 3-18。由所展示的電性構造模型中(圖 3-18)，發現主要電性構造出現在地表高程約500 m至海平面以下深度約600 m之間，且集中於研究區域的中心位置，此與所提供之AMT資料頻率段限制有關，受限所獲取資料僅含5個高頻段資料，對於較深地層的電性構造無法提供解析度較佳之電性模型，逆推計算只能推算出相對較淺且規模較小的電性構造。

既有AMT資料之測點位置位於立霧溪與三棧溪之間與附近，靠近出海口。對比地質圖，該區主要岩性/岩體為開南崗片麻岩、現代沉積物、河流沉積物，並包含少量片岩與大理岩，然而受限所獲取資料僅含5個高頻段資料，只能推算出相對較淺且規模較小的電性構造，且該區並無可供建立基準之鑽孔資料，因此難以建立較完整、明確之地下岩體與構造分布狀況。

表 3-3：既有AMT資料之測點位置資訊

測點	TWD97 X(m)	TWD97 Y(m)	高程 (m)	經度	緯度
B02	315098	2671984	115	121.64058	24.15181
B03	312760	2672810	57	121.61761	24.15936
B05	315295	2670973	24	121.64247	24.14267
B06	309677	2665939	64	121.58694	24.09747
B08	314258	2669359	54	121.63219	24.12814
B09	316969	2672715	27	121.65903	24.15831
B11	314140	2668537	32	121.63100	24.12072
B12	312342	2668231	259	121.61331	24.11803
B14	313839	2667613	25	121.62800	24.11239
B15	311572	2666717	34	121.60567	24.10439
B17	316986	2669778	7	121.65906	24.13181
B18	315378	2668737	21	121.64319	24.12247
B19	311876	2667065	79	121.60867	24.10753
B20	313780	2666672	12	121.62736	24.10392
B21	313593	2669906	484	121.62564	24.13300
B23	310829	2666724	29	121.59831	24.10444

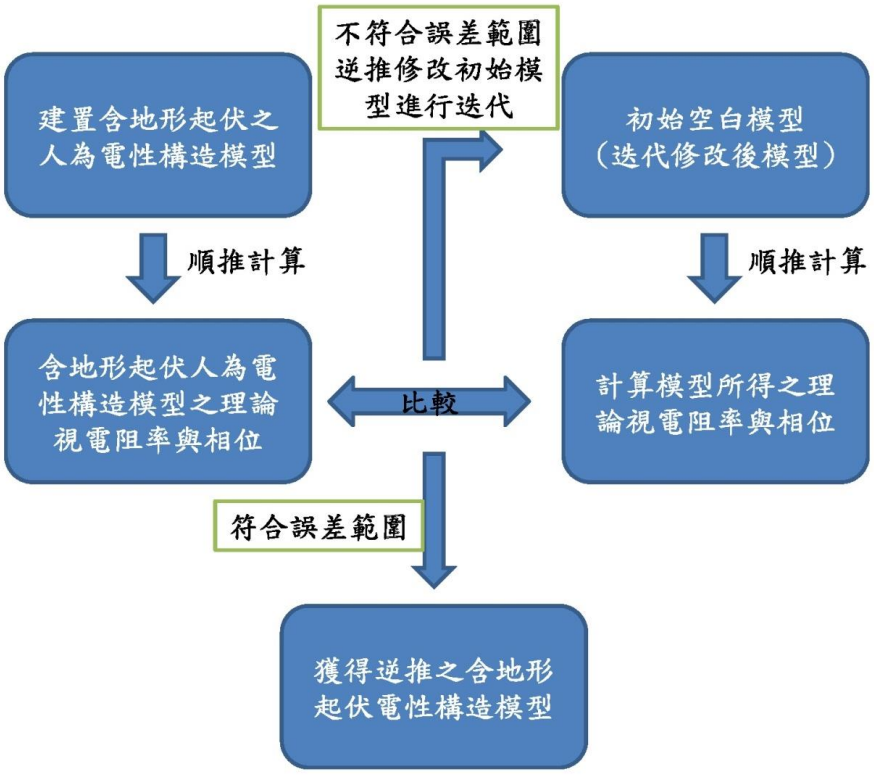


圖 3-12：理論測試(Synthetic Test)流程圖

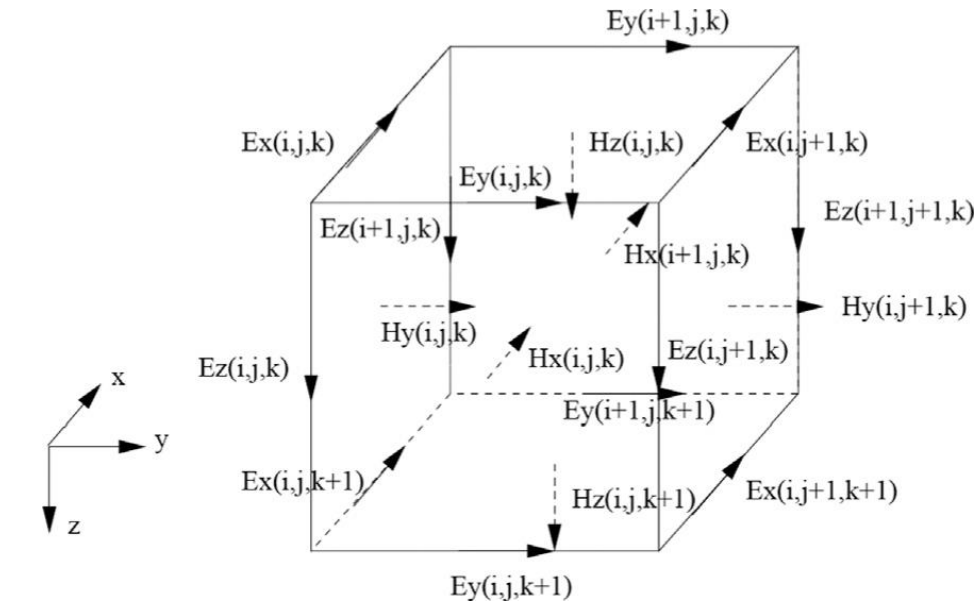


圖 3-13：三維模型有限差分法，電、磁場網格位置示意圖。

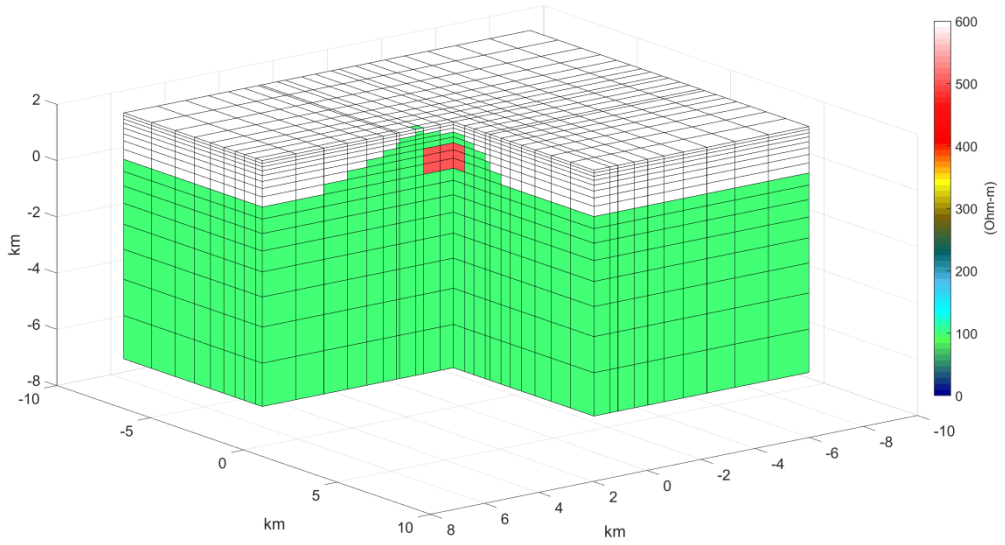


圖 3-14：理論測試使用的人為電性構造模型

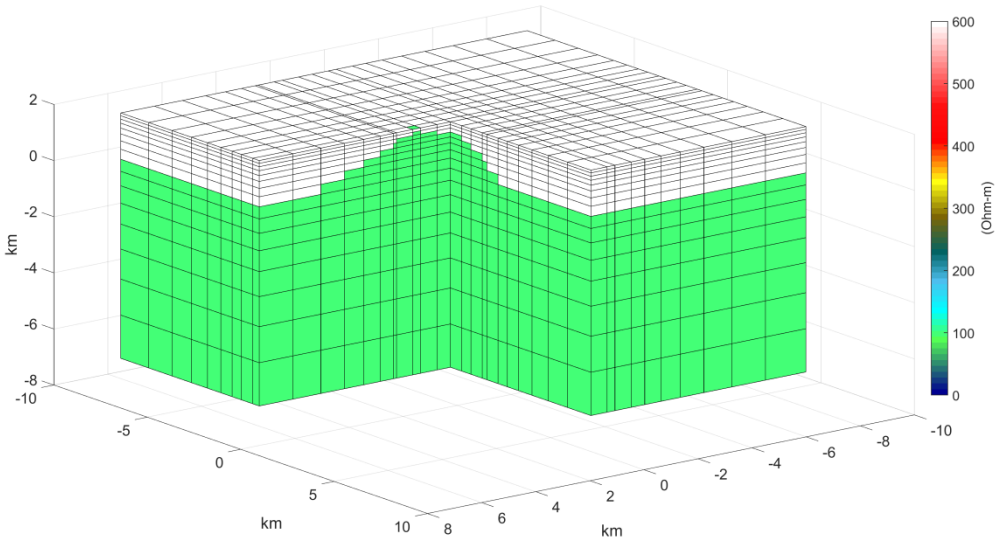


圖 3-15：逆推計算所使用的空白初始電性構造模型。

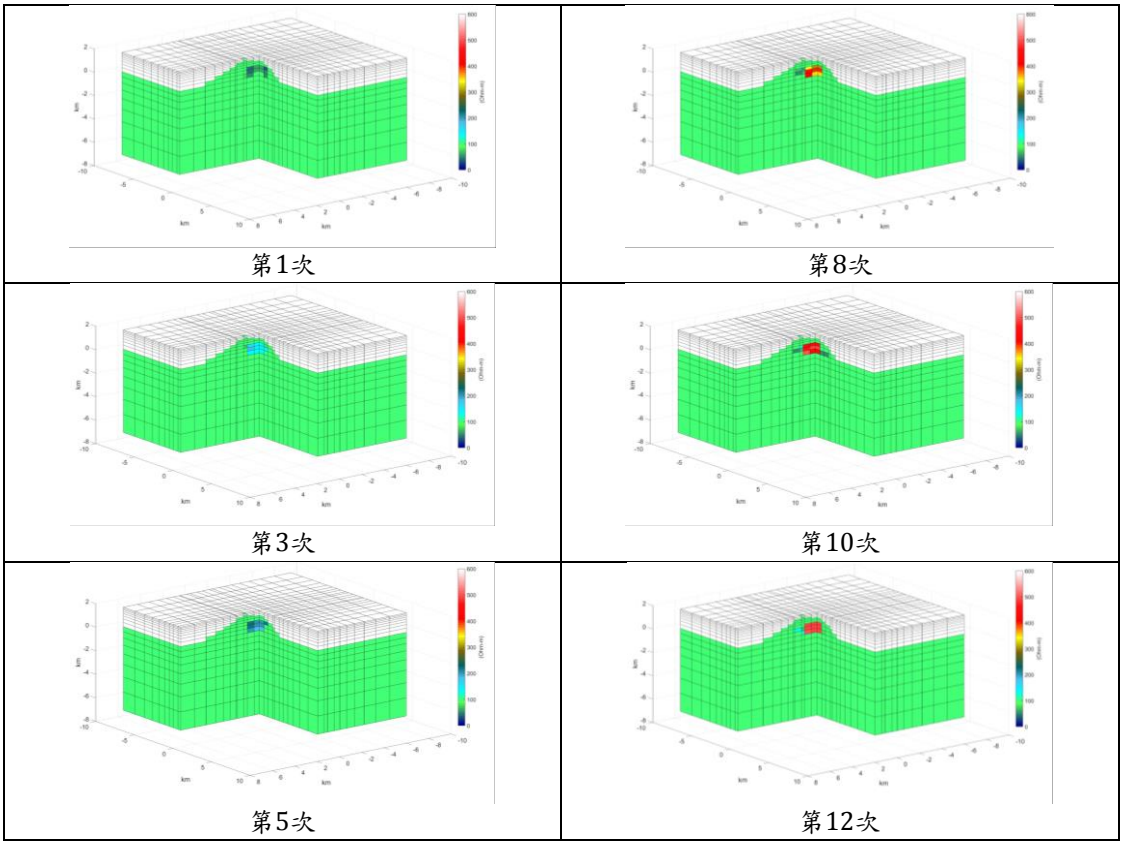
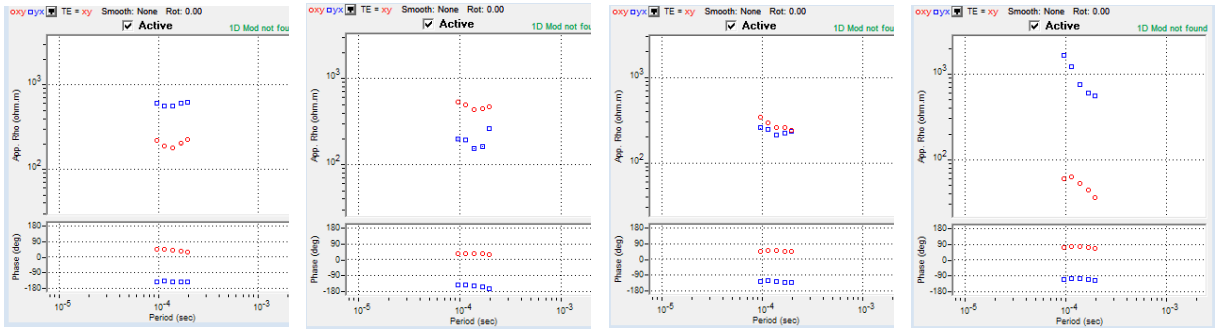
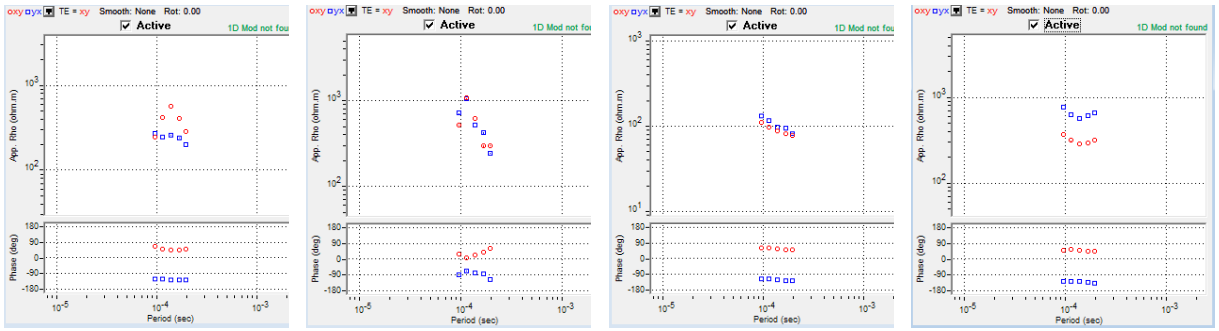


圖 3-16：電性構造模型之迭代計算。

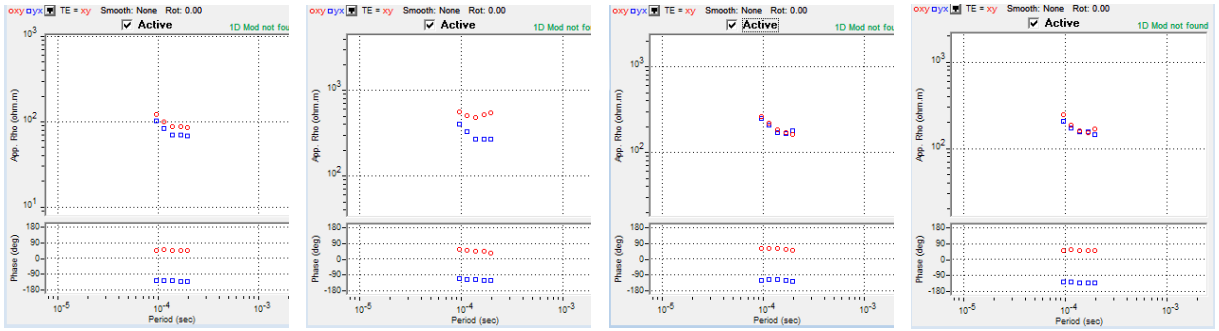
B02 B03 B05 B06



B08 B09 B11 B12



B14 B15 B17 B18



B19 B20 B21 B23

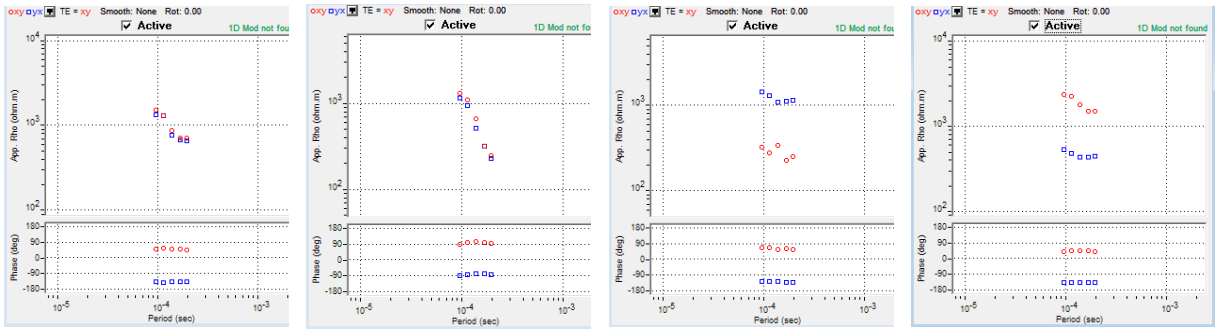


圖 3-17：既有資料之視電阻率與相位分布曲線

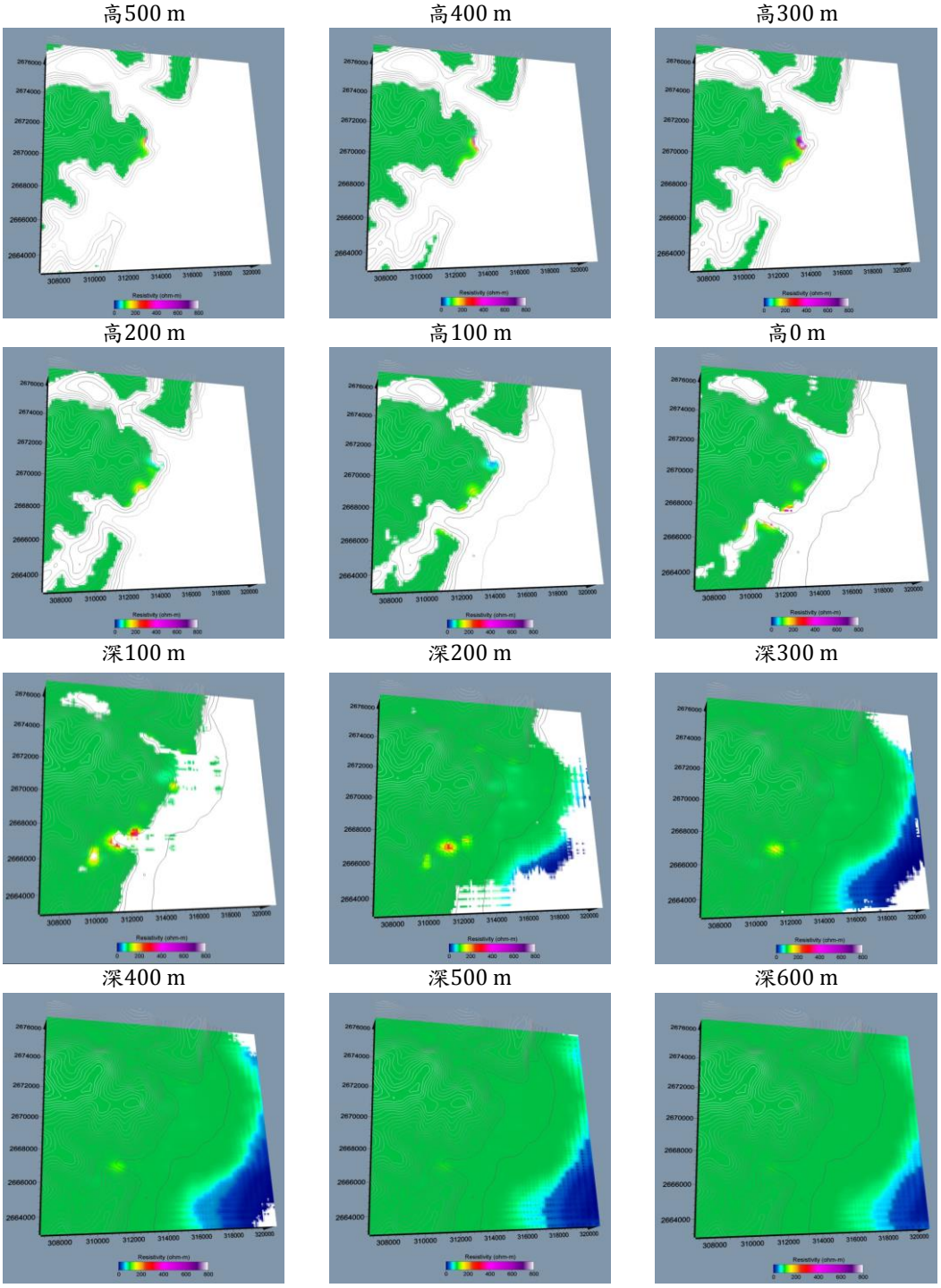


圖 3-18：既有資料區域之電阻率深度切面(500 m至-600 m)

3.1.4. 地質單元三維建模及展示技術

區域地質描述模型可以提供地質構造與地質調查數據的空間分布關係，藉由整合各類地質資料至模型中，可作為候選場址評選及功能/安全評估的整合性關鍵資訊。透過三維視覺化展示技術的協助，將與地質相關的各類資料以立體空間方式展示，以提供更為精確的地質特性評估與參考，作為後續規劃的參考依據。

108年之工作內容包含「整合與更新地質調查成果與解析」以及「製作與精進離島地質描述模型的三維電腦模型物件」，以離島結晶岩測試區(台電公司，2019，p3-41)相關地質資料參數進行深入數據分析，主要依據「SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告-表二：地質概念模式及特性數據」(以下簡稱表二)(林鎮國等人，2015)，完成彙整與更新表二資料，並擴大模型考量空間尺度、增加參數統計特性與構造線型分析資訊。同時利用地理資訊系統(Geographical Information System, GIS)軟體，整合參考案例成果之鑽探報告(林蔚等人，2002；林蔚等人，2003；林蔚等人，2007；林鎮國等人，2015)、K區五萬分之一地質圖與二維地下地質剖面(林蔚等人，2011)，再檢核地質圖與地下剖面，利用鑽探報告之岩心紀錄進行岩心與地層對比。整合上述既有成果與資料，建構出K區之三維立體地下地質構造模型，供資料展示與應用。108年度本項目工作主要成果說明如下：

(1) 整合與更新地質調查成果與解析

(a) 更新參數特性資訊-入滲量

SNFD2017參考案例中，表二入滲量資料，來自SNFD-EEL-90-270報告(蔣立為、余錦昌，2009，p3-2-p3-11)，資料蒐集數據年份自1954年至2002年。本項工作採用鄰近BH06井位之金門縣農業試驗所氣象資料進行更新，含1991年至2007年所收集之降雨量與皿蒸發量；自2008年後僅有降雨量，未提供皿蒸發量，為求計算合理性，故僅收集資料至2007年，以此作為更新入滲量之參數。

區域內之自然補注/入滲量估算採用與SNFD-EEL- 90-270報告(蔣立為、余錦昌，2009，p3-2-p3-11)相同之經驗公式(徐

年盛等人，1991，p90)，以此推估地下水補注量。該方法係引用基地附近氣象水文資料所估計，不考慮湖泊、河川之補注。

計算成果顯示在1991年至2007年期間，年單位面積補注量數值約落在-145 mm至300 mm間，平均值約為64.65 mm，另若考慮K區入滲面積為108 m^2(蔣立為、余錦昌，2009，p3-2-p3-11)，則更新之年入滲總量為6.5×10^6 m^3/yr；與表二相比，年單位面積補注量與年入滲量明顯較35.62 mm與3.6×10^6 m^3/yr為多，亦較1974年至2002年之平均值56.5 mm與5.6×10^6 m^3/yr多。

(b) 更新參數特性資訊-裂隙統計資訊

本項目工作重新解析台電公司過去於K區6孔地質探測井之孔內攝影資料(郭泰融等人，2003；張傳聖等人，2004；李奕亨等人，2007；李奕亨等人，2009)，將相關資料依地層深度與裂隙資訊，進行分層的裂隙位態分析，再以軟體Stereonet 10.0繪製球面投影圖。其中BH01、BH02、BH03、BH05及BH06可取得原始裂隙位態量測數據；BH04(張傳聖等人，2005)僅有裂隙位態分析結果圖，報告中並未檢附原始量測數據。本項工作將各井資料重新整理，裂隙位態以極向量(pole vector)繪製於球面投影圖。成果分述如下：

(i) BH01

BH01孔深度為500 m。根據K區地球物理井測(BH01及BH02孔)報告(郭泰融等人，2003，p6-18)進行孔內裂隙位態的統計分析。由裂隙隨深度分布的情形來判斷，大致可區分出5個裂隙密度分布比較密集的區段，分別為10 m至70 m、180 m至200 m、250 m至310 m、330 m至360 m、430 m至500 m，分別繪製裂隙面大圓投影圖及極點投影圖。圖 3-19(a)為深度10 m至70 m之裂隙位態分布圖，裂隙面傾斜之方位主要集中為2組，分別是方位角約345度(北西)傾角約74度向東傾斜，與方位角約

240度(北東)傾角約77度向西北傾斜，裂隙多為高角度傾斜。圖 3-19(b)為深度180 m至200 m之裂隙位態分布圖，裂隙面傾斜之方位主要集中為1組，方位角約160度(北西)傾角約78度向西傾斜，裂隙多為高角度傾斜。圖3-19(c)為深度250 m至310 m之裂隙位態分布圖，裂隙面走向方位較不集中裂隙密度亦較低，大致約略可判讀出1組方位角約32至74度(北東)傾角約50度向東傾斜。圖 3-19(d)為深度330 m至360 m之裂隙位態分布圖，裂隙面走向方位較不集中裂隙密度亦較低，無明顯主要的裂隙方位。圖 3-19(e)為深度430 m至500 m之裂隙位態分布圖，裂隙面傾斜之方位主要集中為2組，分別是方位角約56度(北東)傾角約66度向東傾斜，與方位角約263度(北東)傾角約67度向北傾斜，裂隙多為高角度傾斜。

(ii) BH02

BH02孔深度為200 m。根據K區地球物理井測(BH1及BH2孔)報告 (郭泰融等人，2003，p6-26)進行孔內裂隙位態的統計分析。

深度10 m至70 m之裂隙位態分布(圖 3-20(a))，裂隙面傾斜之方位主要集中為3組，分別是方位角約270度至290度(東西)傾角約80度向北傾斜，與方位角約8度(北東)傾角約66度向東傾斜，及方位角約165度(北西)傾角約35度向西傾斜，裂隙以高角度傾斜居多。

深度150 m至180 m之裂隙位態分布(圖 3-20(b))，由於裂隙的數量不多可能比較沒有統計上的意義，大致上有3組裂隙，方位角約3度(南北)傾角約68度向東傾斜，與方位角約156度(北西)傾角約72度向西傾斜，及方位角約248度(北東)傾角約68度向西北傾斜。

(iii) BH03

BH03孔深度為500 m。根據地球物理孔內調查94~96年執行成果報告 (李奕亨等人，2007，附錄B-2)進行孔內裂隙位態的統計分析。

深度55 m至135 m之裂隙位態分布(圖 3-21(a))，裂隙面傾斜之方位主要集中為1組，方位角約237度至300度(東西)傾角約2度至32度向北傾斜，裂隙以低角度傾斜居多。

深度260 m至300 m之裂隙位態分布(圖 3-21(b))，裂隙面傾斜之方位主要集中為1組，方位角約293度(東西)傾角約14度向北傾斜，裂隙以低角度傾斜居多。

深度355 m至370 m之裂隙位態分布(圖 3-21(c))，裂隙面傾斜之方位約略集中為1組，方位角約56度(北東)傾角約24至64度向南傾斜。

(iv) BH05

BH05孔深度為500 m。根據地球物理孔內調查94~96年執行成果報告 (李奕亨等人，2007，附錄B-9)進行孔內裂隙位態的統計分析。

深度65 m至120 m之裂隙位態分布(圖 3-22(a))，裂隙面傾斜之方位主要集中為1組另有1組較不明顯，較集中1組方位角約77度(東西)傾角約70度向南傾斜，裂隙以高角度傾斜居多；較不明顯1組方位角約240度至309度(北東至北西)傾角約27度至50度向北傾斜。

深度200 m至270 m之裂隙位態分布(圖 3-22(b))，此段裂隙密度較高但走向方位分布較不集中，裂隙面傾斜之方位較為集中大致有1組，方位角約276度至314度(北東)傾角約29至59度向北傾斜。

深度280 m至350 m之裂隙位態分布(圖 3-22(c))，裂隙面傾斜之方位約略集中為1組，方位角約290度至315度(北東)傾角約36至45度向北傾斜。

深度350 m至500 m之裂隙位態分布(圖 3-22(d))，此段裂隙密度較高但走向方位分布較不集中，裂隙面傾斜之方位約略集中為2組，分別為方位角約75度至125度(北西)傾角約17度至35度向南傾斜，與方位角約274度至318度(北至北東)傾角約44度至64度向北傾斜。

(v) BH06

BH06孔深度為500 m。根據BH06裂隙特性量測與分析-地球物理孔內調查與分析執行成果報告 (李奕亨等人，2009，附錄B-2)進行孔內裂隙位態的統計分析。

深度125 m至190 m之裂隙位態分布(圖 3-23(a))，此段裂隙面傾斜之方位較為集中有5組其他裂隙的分布則比較分散，分別為方位角約272度(東西)傾角約70度向北傾斜，方位角約33度(北東)傾角約25度至30度向東傾斜，方位角約62度至82度(北東)傾角約50度至60度向東南傾斜，方位角約41度至47度(北東)傾角約47度至75度向東南傾斜，方位角約10度至20度(北東)傾角約64度至75度向東傾斜。

深度215 m至285 m之裂隙位態分布(圖 3-23(b))，此段裂隙面傾斜之方位較為集中有2組，分別為方位角約37度至58度(北東)傾角約67度至85度向東南傾斜，與方位角約145度至165度(北西)傾角約14度至30度向西傾斜。

深度335 m至365 m之裂隙位態分布(圖 3-23(c))，此段裂隙面傾斜之方位較為集中有1組，方位角約347度至27度(南北)傾角約45度至67度向東傾斜。

深度390 m至410 m之裂隙位態分布(圖 3-23(d))，此段裂隙面傾斜之方位較為集中有1組，其方位角約19度至40度(北東)傾角約71度至84度向東傾斜。

深度430 m至440 m之裂隙位態分布(圖 3-23(e))，此段裂隙面傾斜之方位較為集中有1組，其方位角約30度至59度(北東)傾角約54度至80度向東南傾斜。

深度480 m至500 m之裂隙位態分布(圖 3-23(f))，此段裂隙面傾斜之方位較為集中有2組，其方位角約5度至38度(北東)傾角約39度至81度向東南傾斜，與方位角約221度至248度(北東)傾角約52度至74度向北西傾斜。

(c) 增加地質描述模型構造線型數量

目前SNFD2017參考案例之地質描述模型中，線型構造僅考慮F1與F2構造，分別為太武山斷層與太武山分支斷層，此2條斷層皆可從鑽井岩心成果中確認其存在。

本項目工作綜合利用內政部2019年7月釋出的最新且高解析度20 m之數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)資料作為底圖，以地表判識的方法進行地表線型構造解析，並由地電阻逆推資料(林蔚等人，2012，附錄p2-1-p2-33)，作為判斷構造是否存在之參考。

以內政部20 mDEM資料為底圖進行線型判識，推論可能的9條線型構造，編號從L1至L9(L：Line)，如圖 3-24所示。其中走向偏向東北-西南者，以奇數表示(L1, L3, L5, L7, L9)，走向偏西北-東南者，以偶數表示(L2, L4, L6, L8)。

參考表二資料與表二說明文件(林鎮國等人，2015)，L1對應已知的太武山斷層(F1)；L2對應的應為已知的太武山分支斷層(F2)。再參考過去於太武山四週運用兼具垂直與側向解析能力的地電阻影像剖面法(Resistivity Image Profiling Method， 簡稱RIP法)，施測的9條測線成果。比對結果推論：L1與L2即為SDNF2017報告中之F1與F2，其走向與傾角皆已從鑽井資料確定，故不做修正；L5與L9可以對應到較明顯的電阻變化帶，應為可能存在之岩性邊界；L3, L4, L6, L7, L9對應在RIP剖面上，雖於RIP剖面上有小範圍之低電阻區域，然深度皆不超過200 m，可能為存於地表之侵蝕溝；L8區域無地電阻資料，但L6與L8位置為過去古九龍江流經區域，可能存在較厚的沉積岩區(林蔚等人，2011，p18)。

(d) 擴大水文地質描述模型空間尺度

本項目工作使用ArcGIS作為研究工具，擴大2種不同模擬尺度，包含區域尺度以及場址尺度。分析過程如下：

(i) 區域尺度：

擴大離島結晶岩測試區，使用中國大陸沿海、臺灣海峽及臺灣本島之數值地形圖，涵蓋空間範圍北側擴展至大陸河流流域、南側擴展至海域後，區域尺度的分析模型範圍變化。不考慮侵蝕率及地質條件等複雜/複合變化下，即單純考慮海平面下降後出露的地表，依據數值地形圖進行集水區地形及河川分布的推估後，再參考集水區劃分理論之方法，選定自然邊界作為模擬區域劃分依據，進一步完成模擬區域劃定。

使用水文法(hydrology approach)進行集水區自動劃分，並輔以人為調整進行模擬區域劃定。水文法主要以水文學為基礎，搭配排水流向(drainage direction)及累積流量(accumulative flow)，藉由累積流向計算之門檻值(threshold)，作為辨識集水區之谷系與稜線之位置(O'Callaghan and Mark, 1984, p324-p344)；當地形高程存在窪地時，以窪地填高方式(Jenson and Domingue, 1988, p1593-p1600)，即可建立無窪地排水流向，以進行集水區自動劃分圖 3-25。

此外，為了同時精進複合邊界條件的設定能力，模擬區域並不全然以高山陵線作為劃定依據，而係部分選擇河流作為邊界的方式，最終完成模擬區域劃分。

鑑於目前僅有離島結晶岩測試區之地質調查資訊(林鎮國等人，2015，p1-1-p4-20)，超出離島結晶岩測試區範圍，需要進行相關水文地質單元及水力特性參數之假設；因此，本項目工作假設離島結晶岩測試區以外之水文地質單元，僅有R0及R#(即F1、F2及D#僅存在於離島結晶岩測試區中)，且厚度及水力傳導係數亦遵照參考案例之設定(即R0厚度為70 m、R0水力傳導係數為

1.0×10^{-5} m/s、R#水力傳導係數為1.0×10^{-10} m/s)(林鎮國等人，2015，p1-1-p4-20)；鑑於模擬範圍擴大，因此，模擬深度亦由2 km加深為4 km。

(ii)場址尺度：

SNFD2017報告中已使用1個大尺度，模擬區域執行剩餘冰河期的地下水分析案例。本期之模擬區域將涵蓋空間範圍，擴大至離島結晶岩測試區鄰近海岸之海域，且同步納入金門島西半部於模擬範圍中；因此，對於模擬區域的劃分將更全面。本期計畫則將直接使用此大尺度模擬區域做為場址尺度的模擬邊界。

模擬參數設定同前述區域尺度，惟鑑於場址尺度的模擬僅些微差異，因此，模擬深度保持與SNFD2017報告中參考案例設定相同，即維持2 km。

(2) 製作與精進離島地質描述模型的三維電腦模型物件

(a) 地下地質三維模型電子檔建立

本項目工作依據不同地質資料建構具空間資訊與地質參數的三維電腦模型物件，利用GIS軟體整合參考案例成果之鑽探報告(林蔚等人，2002；林蔚等人，2003；林蔚等人，2007；林鎮國等人，2015)、K區五萬分之一地質圖與二維地下地質剖面(林蔚等人，2011)，再檢核地質圖與地下剖面，利用鑽探報告之岩心紀錄進行岩心與地層對比。整合上述既有成果與資料，建構出K區之三維立體地下地質構造模型。相較於SNFD2017成果，本次工作主要有兩點修訂：

(i) SNFD2017成果中，岩脈以每條寬100 m，間距1 km呈現，然而有關岩脈之論述，於SNFD2017報告中論述：「輝綠岩脈大都順北東向張性節理侵入(92 MaBP 至76 MaBP期間)，此類節理亦多為基盤岩的冷卻節理。輝綠岩脈群以數十公分至數公尺寬，高角度且走向主要為N30E，成群侵入結晶基盤」(台電公司，2019，p3-40)。故本次工作成果嘗試修改目前概念模式中之岩脈分布，由於岩脈

僅數十公分至數公尺寬，將不考慮置於區域概念模式中。

(ii) SNFD2017成果中，並未於三維模型檔案中進行母岩分區，故本次工作嘗試以金門地區五萬分之一地質圖及其剖面(林蔚等人，2011)、以及以鑽探資料KMBH01、KMBH02、KMBH05與KMBH06進行地下岩性的修正，進行地表與地下地質三維模型建構。然取得之鑽探資料中，KMBH06鑽探位置位於太武山斷層之南側，其餘3個鑽孔皆位於太武山斷層北側，分屬斷層上下盤，且無更多地質資料加以佐證KMBH06與其餘鑽孔岩心之相關聯性。另外KMBH05為驗證斗門花崗岩體之範圍，其岩性以花崗岩、細粒花崗岩脈與偉晶花崗岩脈為主，不同於KMBH01、KMBH02以花崗片麻岩為主之岩性，故能進行岩心比對之鑽孔僅有KMBH01與KMBH02，但KMBH01與KMBH02之2個鑽孔距離為9.31 m，比對之成果對於實際K區地下岩體分布助益不大。故地下地質三維模型以金門地區五萬分之一地質圖及其剖面(林蔚等人，2011)為主，相關成果如圖 3-26所示。

(b) 資料檔案交換格式

考量地質描述模型所需資料的來源與格式眾多且複雜，在轉換與整合資料上具有高困難度，因此，需建立各類二維與三維資料格式轉換流程，提供計畫人員針對相關資料進行前置處理作業。建構具地理資訊系統與地質參數的三維地下地質構造模型之成果檔案，共分為3種檔案格式、2種軟體使用目的與2種軟體類型，以下以2種檔案類型與使用方式說明。

(i) 檔案類型為地理資訊系統：

轉換為GIS通用檔案格式Shapefile(.shp)與.kmz，.shp格式，可供三維展示及應用；所用軟體包含為QGIS 3.10、ArcGIS Pro 2.4與Arcgis 10.6，而.kmz以展示功能為主，

除支援前面所提三種軟體外，並支援Google Earth三維展示。

(ii) 檔案類型為場址細部設計與規劃：

轉換為AutoCAD展示應用之通用檔案格式.dwg，可供未來場址細部設計與規劃。依照使用目的，可以透過Autodesk DWG TrueView作為展示平台，也可以用AutoCAD做展示與應用。

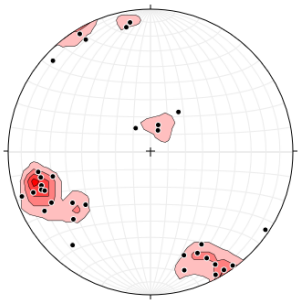
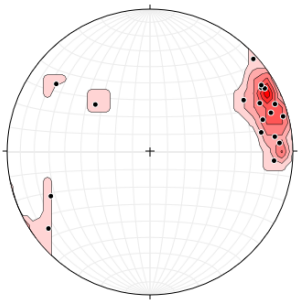
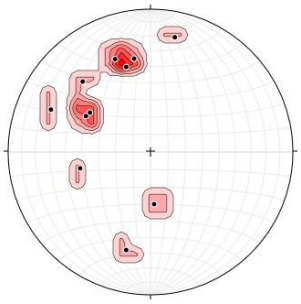
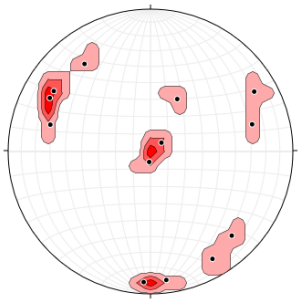
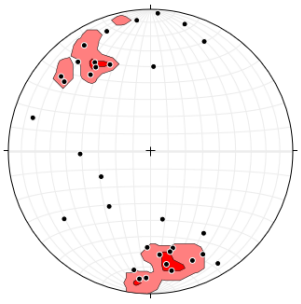
		
(a)深度10 m至70 m	(b)深度180 m至200 m	(c)深度250 m至310 m
		
(d)深度330 m至360 m	(e)深度430 m至500 m	

圖 3-19：BH01裂隙位態分布圖

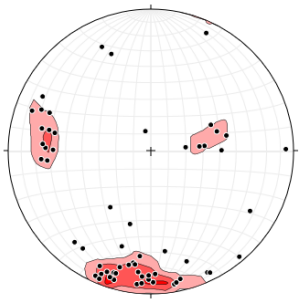
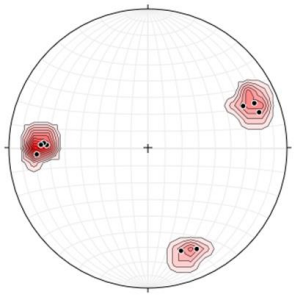
	
(a)深度10 m至70 m	(b)深度150 m至180 m

圖 3-20：BH02裂隙位態分布圖

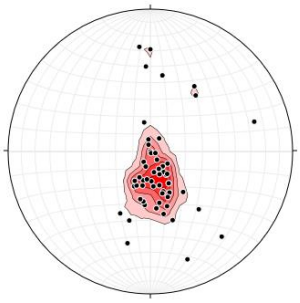
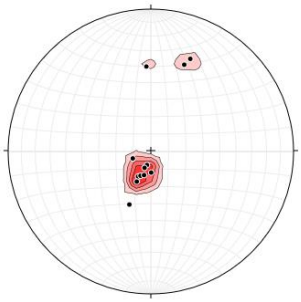
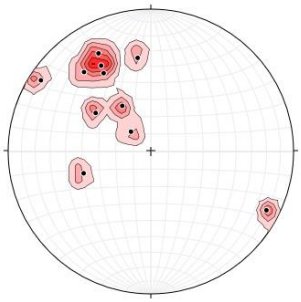
		
(a)深度55 m至135 m	(b)深度260 m至300 m	(c)深度355 m至370 m

圖 3-21：BH03裂隙位態分布圖

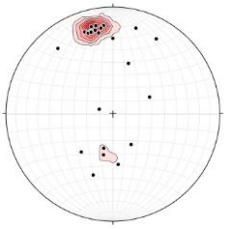
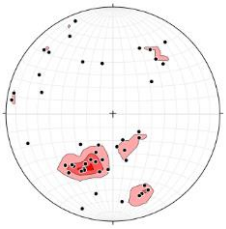
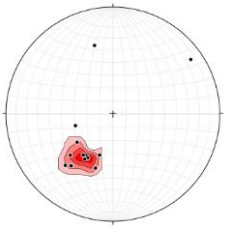
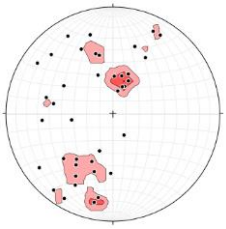
			
(a) 深度 65 m至120 m	(b) 深度 200 m至270 m	(c) 深度 280 m至350 m	(c) 深度 350 m至500 m

圖 3-22：BH05裂隙位態分布圖

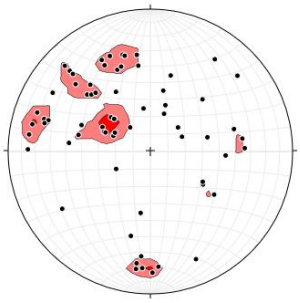
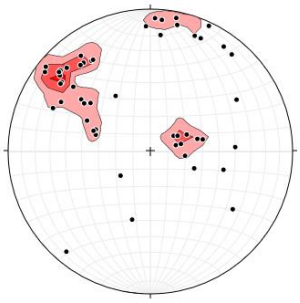
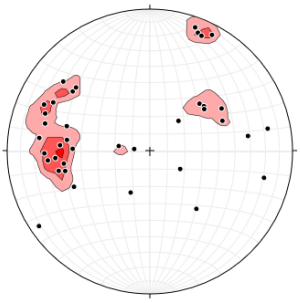
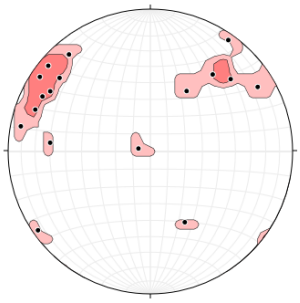
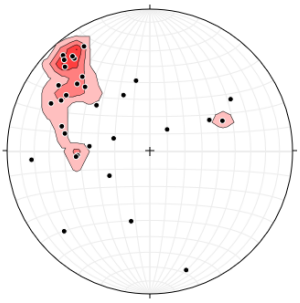
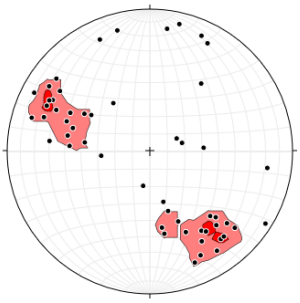
		
(a)深度125 m至190 m	(b)深度215 m至285 m	(c)深度335 m至365 m
		
(d)深度390 m至410 m	(e)深度430 m至440 m	(f)深度480 m至500 m

圖 3-23：BH06裂隙位態分布圖

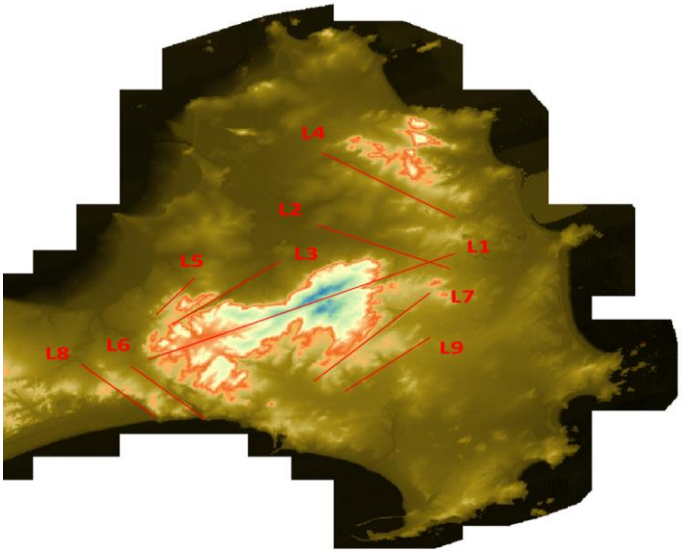


圖 3-24：線型判識成果與編號(紅色線為判斷之線型)

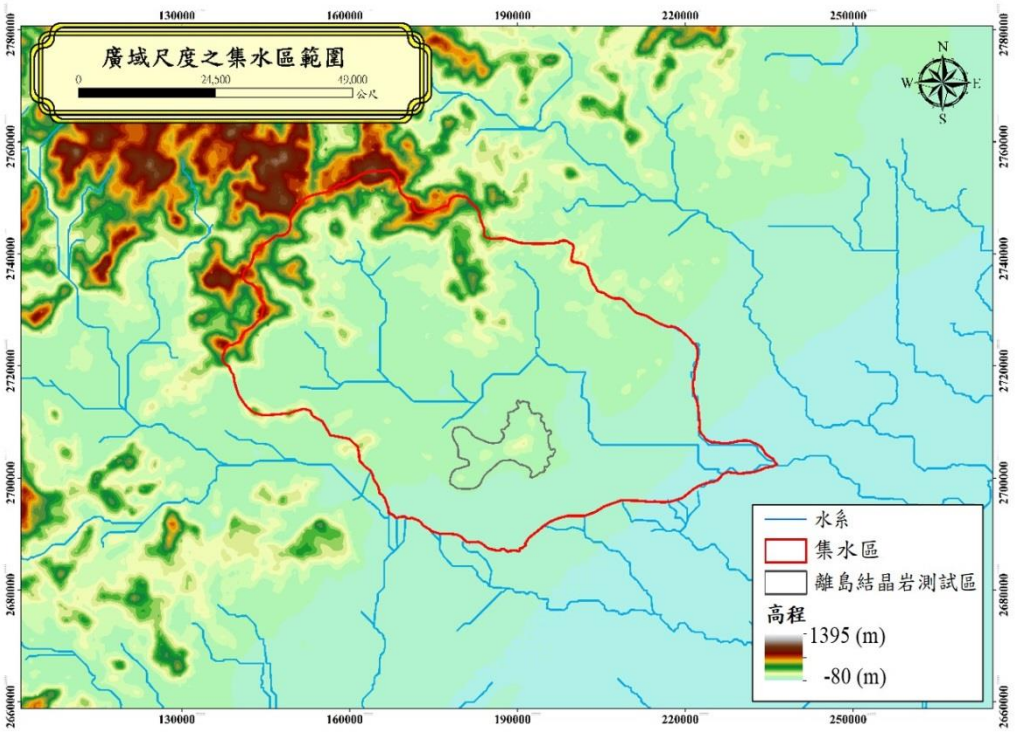


圖 3-25：針對區域尺度之模擬範圍劃定結果

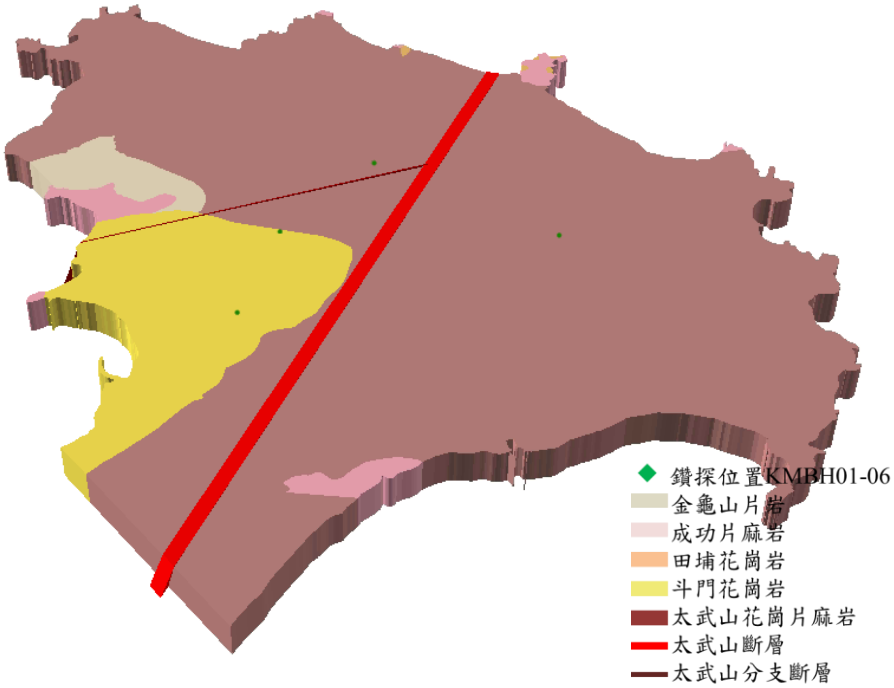


圖 3-26：地下地質三維模型成果圖

3.1.5. 深層流體影響性評估技術

深層流體遷移至近地表後常以土壤氣體、水溶氣、溫泉氣泡和溫泉水、地下水等地表特徵形式存在，本項目工作針對本島地質環境完成上述熱流活動特性現有文獻資料之彙整分析，釐清深層流體之地球化學組成(成分和同位素等)，以作為候選場址評選時地質合適性之參考。108年度工作成果說明如下：

(1) 深層流體影響評估方法與發展現況資料彙整

彙整國際資訊(櫻島火山)相關研究文獻如後：

櫻島的火山地震又分有A型與B型2種，A型地震的發震機制主要是長期收集櫻島周圍各站水平傾斜儀與地震的成果，研究以1975至1977年櫻島的斷層模擬模型為主，認為地底下的應力場在平常時期以南北為主應力擠壓的逆斷層，噴發前期會因岩漿的上升而增加地底下的壓力，而使火山口周邊轉變為張力場型態而導致發生正斷層的地震，並會持續至噴發結束才會恢復成原應力場。因此可以透過A型地震的變化，得知櫻島地下應力狀態來預測火山噴發活動。而B型地震則被認為為在火山口附近淺處發生的的地震，噴發前會發生群發性的地震。B型群震分為兩種類，第1種是指噴發前就會開始有群發地震，地震發生頻率與最大的振幅會一次一次的增大，直到單發性的噴發為止。第2種群震發生頻率與最大振幅並不會隨著爆發而增大的傾向，而是群震會稍為停止後發生多次的爆發。

此外，利用分析火山氣體的成分變化對於火山噴發的預測有幫助。過去學者曾採集櫻島火山氣體分析其中成分含量，發現HCl和SO_2的莫耳比值與火山噴發時間相關。透過各測站的HCl/SO_2平均值可發現和平均每日噴發頻率相符合。若是與火山地震相比，則與櫻島火山地震相呼應，就此案例來看，通常火山沉寂一段時間後，會先由A型地震出現，爾後火山氣體的HCl/SO_2比值增加，與B型地震相近，才開始有火山噴發的跡象，顯示火山氣體成分變化對於火山噴發的預測有一定的關係。

彙整臺灣地區之熱流相關研究文獻如後：

Liu et al. (2015, p392)曾比較臺灣西部關子嶺、台東金崙和清水等地區以傳統井測和水化學法所獲得熱流值，研究成果顯示此兩種方式所估算的熱流值相似，可整合兩種方式地調查成果進行綜合討論。

Lee and Cheng (1986, p8)利用臺灣陸上85筆的鑽井資料，取得地溫梯度與熱傳導率以計算熱流數據，研究指出中央山脈造山區域具有最高熱流值，而西部海岸平原則有最低的熱流值，更發表了後來廣獲引用的臺灣熱流分布圖(圖 3-16(a))。

李清瑞等(2013, p140)整合Lee and Cheng (1986, p8)的熱流資料，以及黃旭燦等(1986, p183)、黃立勝(1990, p130-131)、Chi et al. (2011, p2)等人由井測溫度梯度所推估的熱流數據，加以繪製臺灣熱流分布圖(圖 3-16(b))。

劉佳玫(2002，p64)以二氧化矽地質溫度計法調查臺灣南部二氧化矽熱流分布趨勢(圖 3-17(a))，共分析130筆溫泉水中二氧化矽含量，估算西部麓山帶、中央山脈西翼、中央山脈東翼以及海岸山脈之地熱流值，更新臺灣地熱流分布資訊。由臺灣二氧化矽地熱流等值分布圖(圖 3-17(b))，其南北剖面(圖 3-17(c))顯示2種趨勢：一是在島弧垮塌或是板塊隱沒的北段，最高熱流值出現在宜蘭清水，且朝東北方向的宜蘭平原和西南方向的廬山地區逐漸遞減。另，處於弧陸碰撞的南段，最高熱流值出現在台東知本，熱流值朝北逐漸降低。

歸納整理臺灣北部大屯火山群、東北部宜蘭、東南部台東金崙和西南部等地區之地熱流分布特性及其成因探討，分地區整理如下：

(a) 臺灣北部大屯火山群

經濟部聯合礦業研究所曾於1965年至1971年間執行連續6年大屯火山群地熱資源探勘工作，主要調查區域為大磺嘴及馬槽等區域，其中馬槽地區E208地熱井井底(井深1510 m)溫度高達293 ℃(聯合礦業研究所，1973，p69)；另以2005年的擎天崗地熱鑽井的研究資料為例，其地溫梯度大致可分為

兩個段落，0 m至200 m約為3.4 ℃/100 m，200 m至475 m約為29.1 ℃/100 m，經平均算出下半部的熱傳導係數約為1.43 $W\ m/$℃；因此，計算得到的熱流值約為420 mW/m^2，比一般大陸平均熱流值(約60 mW/m^2)高出甚多(蔡季達，2009，p63)。

大屯火山群圍岩環境主要是安山岩質火山岩，目前仍有明顯的熱液及地表噴氣活動跡象，而區域內溫泉富含硫酸根及氯離子，pH值偏酸性，噴氣成分除了水氣及二氧化碳外，還含有硫化氫，圍岩蝕變及次生礦物生成是此區域地質穩定性必須考慮的特點(李曉芬，2004，p41)。

依據溫泉出露的圍岩及水質條件(酸鹼值、主要元素含量和同位素比值)，將大屯火山群中的溫泉區分為三大類，並分析溫泉水之氫、氧和硫同位素，以推論三類溫泉形成原因(Liu et al., 2011, p475-p485)。

(b) 臺灣東北部宜蘭地區

Shyu and Liu (2001，p311)在沖繩海槽西南端調查海底地熱流，量測結果顯示熱流變化自8.6 mW/m^2至145 mW/m^2。部分地區因為海水滲入，在海床形成強烈對流使得溫度梯度低，導致熱流值偏低；而高熱流地區可能與海底火山或斷層裂隙分布有關。江協堂(2010，p54)在龜山島及附近海域測量地熱，結果顯示龜山島周圍的熱流質非常高，最高可達734 mW/m^2。江協堂等(2008，p112)測量宜蘭平原地區26孔水井的溫度梯度，發現平原南部有較高地熱流，最高值可達7.6 ℃/100 m (龍德井)。宋聖榮等(2015，p74)綜合分析蘭陽溪南岸之所有鑽井量測之地溫梯度和清水地熱區過去量測的地溫資料，指出蘭陽溪南岸高地溫梯度井之平均地溫梯度較周圍一般雪山山脈地層或脊樑山脈板岩區還要高。Kuo et al. (2015, p5)在清水地熱區3處溫泉露頭和5口地熱井共8個點位，連續分析4個月水化學組成以估算二氧化矽熱流，熱流值為268 mW/m^2。宋聖榮(2016，p52)利用鑽井地溫量測和

二氧化矽地質溫度計，調查宜蘭地區的熱流，指出平原和鄰近山區的地溫梯度可高達60 ℃/km以上，高地溫梯度地區主要分布於清水地熱、三星紅柴林和利澤至龍德一帶地區等。宜蘭外海的海底火山活動，可藉由分析溫泉氣泡和熱液柱中的氦同位素比值、水溶氣體成分、溶解無機碳濃度及其碳同位素，探究宜蘭外海龜山島和海底熱液噴泉潛勢區之流體來源與特性。由過剩氦隨海水深度變化剖面圖，指出在南沖繩海槽底部海水中具明顯的地函來源訊號(高莉昕，2014，p73)。根據龜山島的氣體組成分析結果指示氣體來源可分為兩種：以地函來源為主要端源，為張裂板塊構造或是熱點(Yang et al., 2005, p479; Chen et al., 2016, p346)；以空氣或是空氣飽和水為主要端點，根據氦同位素比值推論其中所含的部分氮氣和氬氣是來自於海水(Chen et al., 2016, p346)。平原南部地區圍岩環境主要是第四紀沖積層，區域內地下水監測井pH值介於6至8，多數監測井以碳酸氫根圍特徵，但是東部靠海區域則是氯離子與硫酸根離子濃度皆高，並且於平原中南部區域溶解氣富含甲烷，上述地化特性指出沉積環境的複雜性(鄭又珍，2014，p2)。

宜蘭地區溫泉氣泡氦同位素比值，顯示員山和清水主要受到地殼和空氣端元和少部分的地函端元混和而成的；蘇澳冷泉和武淵未受到明顯的空氣混染，且相較於清水、礁溪、員山、芃芃和仁澤地區顯示較多的地函端成分(Yang et al., 2005, p475)。上述氣體地化特性指出地函流體可能藉由盲斷層入侵宜蘭平原；抑或是岩漿入侵宜蘭南邊而使得位在南邊的溫泉氣泡顯示較高的地函端成分(Yang et al., 2005, p479)。綜合地震層析成像、大地電磁法、溫泉水中的地球化學等研究成果，根據氦同位素、碳同位素和硫同位素值，以及核飛跡定年等，推測宜蘭地區的高地溫梯度現象與該區域底部火成岩的入侵推論相契合，其高地熱來源可能與岩漿的侵入有關(宋聖榮等，2016，p58)。

(c) 臺灣東南部台東金崙地區

Guo et al. (2018, p38-40)統整台東金崙地區各地熱探勘井與地電阻相關資料，展現出金崙地區地下溫度空間分布變化；以及溫度隨深度變化，該地溫梯度可分為兩類：在深度小於500 m的地區以熱傳導為主要的熱傳方式，其地溫梯度高達200 ℃/km；而深度大於500 m的地區，則改以熱對流為主，地溫梯度下修至20 ℃/km。

Yang et al. (2003a, p345)分析台東金崙地熱區氣體的氦同位素值加以探究其來源，分析結果氦同位素值為0.29 RA，推測由地殼與大氣混合，並顯示本區氣體可能是由地殼端成分為主要貢獻來源。Yeh(2004, p51)以雙楔形地體構造模型，說明中央山脈地質區與海岸山脈地質區之間存在一背衝斷層，此一背衝斷層作用將深埋於地下的高溫岩體快速抬升至地表。大地電磁探測結果顯示，金崙地區地下深處存在一向西傾斜的高電阻率電性基盤。綜合上述結果推測，金崙地熱區的熱源可能為深部高溫岩體逆衝至近地表所造成的高溫異常Guo et al. (2018, p43)。

(d) 臺灣西南部

臺灣西南部陸域熱流高區出現在高雄寶來、台南關子嶺和嘉義中崙地區一帶。關子嶺之二氧化矽熱流值為91 mW/m^2(Liu et al., 2015, p392)。Wu et al. (2013, p702) ，利用具有高解析能力之溫度記錄器量測28口井下溫度剖面，並進行分析計算獲得臺灣中部麓山帶地溫梯度和地熱流值，其範圍分別介於12.5 K/km至132.1 K/km和34.2 mW/m^2至442.55 mW/m^2；研究結果顯示高地熱流地區多位於溫泉區或是斷層帶附近，而且全臺地熱流的分布變化趨勢與Lee and Cheng (1986)相似，地熱流值向山區方向遞增。

在臺灣西南部海域之上部高屏斜坡，發現3處高於西南海域平均熱流值(50 mW/m^2至70 mW/m^2)熱流測站，其熱流值分別為86 mW/m^2、99 mW/m^2和106 mW/m^2；高熱流測站分

布於泥貫入體及其周圍，該現象顯示泥貫入體是深部高溫流體遷移至海床的通道。臺灣近年來普遍調查臺灣西南海域可能的甲烷水合物富藏區，此區域的海床熱流研究數據指出增積岩體區之熱流值普遍較高，熱流值介於67.6 mW/m^2至122.8 mW/m^2之間；幾處高熱流區多與泥貫入體構造相關(徐春田等，2004，p2)，泥火山、泥貫入體、褶皺斷層等深部裂隙構造，是臺灣西南部沉積泥岩環境高地熱流的主因。彙整自2005年至2014年餘臺灣西南外海之海底地地溫梯度及熱流量測資料結果，其平均值分別為0.062 ℃/m及70 mW/m^2。高地熱流/高地溫梯度分布的區域恰為斷層帶、泥火山和泥貫入體地區相似，意謂著深部的高溫流體順沿著斷層帶、裂隙或泥貫入體向上遷移(鐘三雄等，2016，p11)。葉高華(2003，p43)的研究指出臺灣西南部熱流異常區，起因於歐亞大陸板塊沒入菲律賓海板塊擠壓變形的增積岩體區，內部深層斷裂地質結構提供了熱流通道，圍岩環境是沉積泥岩，區域內溫泉以碳酸氫根或是氯離子為主，氣體成分中含大量甲烷氣是此區域的特點(葉高華，2003，p50)。而中崙溫泉及濁水潭噴氣之溫泉水與噴氣的地化特性分析結果，顯示與臺灣西南部陸地泥火山類似，深部斷裂構造是提供流體上升的主要通道(謝佩珊，2000，p70)；氦同位素和氣體組成比例分析結果推測中崙地區的氣體具有多種類型的特性，可能包含：岩漿型二氧化碳且具高氦同位素比值、地殼型甲烷且具低氦同位素比值及地殼型二氧化碳且具低氦同位素比值(Yang et al., 2003b, p429)。

(2) 國內既有流體地球化學特性成分組成資料彙整

彙整大屯火山群與蘭陽平原地區相關流體地球化學特性成分組成資料如下：

(a) 大屯火山群地球化學特性

(i) 火山氣體

大屯火山群噴氣的溫度一般都在98℃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二氧化碳為主，其次為含硫化氫和二氧化硫的硫化物氣體及氮氣，此種氣體組成為典型的低溫火山氣體組成(Lee et al., 2005, p843)。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, p284-285)、土壤CO_2逸氣通量(Lan et al., 2007, p36-43)，以及火山噴氣SO_2H_2/S比值與HCl濃度(Lee et al., 2008, p628-633)等火山活動程度指標中，分析數據都指示大屯火山的岩漿活動並未完全停止。氦同位素研究結果顯示，大屯火山群地區噴氣中氦氣來源平均都有大於60%源於地函源氣體成分，其中大油坑更可以高達85%。

楊燦堯等(2003，p143)稀有氣體分析結果顯示大屯火山群噴氣帶有地函訊號，其中以大油坑噴氣口更高達80%地函訊號為最高；同地區噴氣樣本Lee et al. (2008, p628-633)的結果，顯示此地區噴氣來源是隱沒型島弧岩漿系統與空氣的混合；Ohba et al. (2010, p517-519)分析大屯火山群的溫泉及噴氣冷凝水的碳、氫、氧同位素比值，同樣得到地函岩漿來源的訊號。

(ii) 溫泉水

宋聖榮(2011，p131-132)分析大屯火山群溫泉水之硫同位素($\delta^{34}S$)，結果顯示$\delta^{34}S$值介於+24.5‰至+26.1‰；表示溫泉水受到火山氣體或岩漿水影響甚小，推測溫泉水主要來源係天水滲入地下後，受到來自於岩漿的地熱影響，加熱形成高溫的溫泉水，並與地層中的滷水混合，形成高硫同位素值的溫泉水。相較之下，火山岩區的酸性硫酸鹽泉和中性碳酸鹽泉具有較低的硫同位素值，$\delta^{34}S$值介於+0.8‰至+7.8‰之間。

(iii) 土壤氣體

中央地質調查所長期觀測大屯山土壤氣體。從二氧化碳通量來看，整體通量自2016年中為一轉折點，前期大致保持穩定，通量大多有1,000 g m^{-2} d^{-1}以上，尤其是2015年下半年開始偏高，直至2016下半年開始降低，顯示火山活動有較為趨緩的趨勢。然而氡氣數據自2016年後卻有先降後升的勢態，與二氧化碳通量大致相反，兩者關係是否為負相關有待更長遠的資料來觀察(林正洪，2017，p62)。

(b) 蘭陽平原地區地球化學特性

(i) 溫泉氣體

Yang et al. (2005, p469-479)氣體組成分析結果指出龜山島地體構造特性為張裂型板塊或是熱點；而具有高氦同位素比值特性經由氦-3、氦-4和氖-20稀有氣體同位素系統解析，顯示地函端成分為龜山島重要的來源，暗示該地區存有影響周圍熱水活動的岩漿庫。

鄭又珍(2014，p76)根據地下水離子組成，可將蘭陽平原地下水分成三群：以硫酸根或硫酸根碳酸根為主的西側靠山區；以碳酸根為主要組成的平原地區；以氯離子為主的東側靠海地區。氫氧同位素分析結果除少數樣本受到海水混染導致偏離天水線，大部分樣本落在天水線上，可由氧同位素變化反應出蘭陽平原越向內陸氧同位素越小的空間上變異。

Chen et al (2016, p341-355)指出二氧化碳是龜山島海底熱泉氣泡的主要組成，其次為氮氣、甲烷和硫化氫。藉由氦和碳同位素分析顯示70%以上的氦氣是源自於地函；二氧化碳的可能來源有地函端元、沉積物端元和海洋石灰岩端元，且二氧化碳含量受到流體中二氧化碳於海水的溶解度影響而有所變化；甲烷是經由非生物反應所生成或是熱裂解反應所生成。

Lu et al. (2017, p124)分析清水地區地熱井內的方解石結垢及野外露頭含方解石帶少許石英之礦脈的叢同位素(clumped isotopes) 與碳、氧同位素，依所提供的資訊估算地層溫度並探討熱源與流體來源。氧同位素分析結果出現明顯的差異，地熱井內的結垢反應是天水的氧同位素訊號，而野外露頭的岩脈卻是岩漿來源。

(ii) 熱液活動

龜山島及周圍海域地區之最高熱流值734 mW/m^2位於龜山島東南側約8 km處(江協堂，2010，p54)，顯示海床熱液活動很強烈且集中在龜首周邊海域。監測顯示地溫溫度變化很小，無明顯的週期性變化；而且有緩慢下降的趨勢(江協堂，2010，p84)。

在宜蘭平原調查30口水井之淺部地熱水地溫梯度結果，大部分水井的地溫梯度低甚至為負值，是因為淺部地層受到地下水對流影響；不過在宜蘭平原南部龍德井一帶具有高地溫梯度(7.6 ℃/100 m)(江協堂等，2008，p115-117)，此結果若與董倫道和林蔚(2012，p2)在龜山島東南方發現的顯著高磁力異常區、林正洪(2012，p113-114)的微震監測結果顯示震源集中於龜山島與宜蘭平原南部兩區域，以及Yang et al. (2005, p473-475)發現武淵井(位於龍德井北邊約2 km)具有高He-3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臺灣島前進擴展。

利用地質溫度計估算清水地熱區之溫泉水體於地熱儲集層溫度，二氧化矽地質溫度計估算結果自130 ℃ ±1.3 ℃至226 ℃ ±11.4 ℃；而鈉鉀地質溫度計估算結果介於207 ℃ ±13.5 ℃至243.0 ℃ ±6.1 ℃，略高於石英地質溫度計。整合蘭陽平原地溫梯度資料和二氧化矽地質溫度計所估算地下1.9 km的溫度分布，顯示高溫度地區分布

在平原南側於冬山河地區、清水地熱區至清水溪、蘭陽溪山麓地區、土場和仁澤等地(宋聖榮等，2012，p8)。根據宜蘭紅柴林鑽探岩心中碳酸鈣礦脈所夾液包體之均化溫度和鹽度分析結果，顯示熱液流體是由天水加熱而成，熱液流體溫度大約介於280 ℃至290 ℃ (Liu et al., 2017, p1)。

(iii) 土壤氣體

邱俊銘(2010，p66)土壤氣體濃度調查分析結果顯示，在前人研究所提出的存疑性斷層位置，並未出現異常值；推測除了可能是受到豐富的地下水和厚層的沉積物阻擋氣體遷移路徑，抑或是該存疑性斷層不存在。整體而言，土壤氣體之空間分布顯示在蘭陽平原東側的氣體濃度值較高，且由東向西遞減，而此趨勢越接近雪山山脈則越不顯著；此一現象可能與沖繩海槽由東向西逐漸擴張作用有關；在平原中間和南側出現氣體濃度的異常帶，分別可能表示平原的張裂中心和斷層位置。然而位於平原西南邊的清水地熱區係一明顯的異常區，出現氦氣、氡氣和二氧化碳等氣體濃度高值，顯示本地區的熱液系統富含氣體且具深部流體來源。

(3) 流體特徵補充調查規劃與整備

依國內既有高放場址相關法規已將火山列入排除，故針對火山相關之地球化學調查方法可予以排除。而目前在未有深鑽井之前提下，現階段深層流體來源可透過地表淺層之流體或氣體取樣分析結果，評估其成分主要來源，結合地球物理探勘結果，評估其可能遷移路徑，參考過去前人研究，流體地球化學特徵化調查方法與項目包括：

(a) 主要化學組成

針對氣體樣本與水體樣本，皆需進行主要化學組成之分析。

針對水體樣本，一般調查項目包含如：pH、Eh、主要組成(如：Na、K、Ca、Mg、Cl、SO_4、HCO_3、SiO_2等)、氧化還原控制元素(如：Fe(II)、Fe(III)、Mn、S(-II)等)、溶解無機碳等。針對氣體樣本，調查項目包含H_2O、CH_4、C_2H_6、CO、CO_2、N_2、Ar、O_2、H_2、He。

(b) 同位素比值

同位素比值為判斷氣體、水體、流體主要來源之依據，建議調查項目包含：氫同位素比值、氧同位素比值、氦同位素比值與硫同位素比值。

(c) 土壤氣體

針對有明顯熱流影響地區，調查二氧化碳之通量以及氡氣濃度調查。

綜合目前國內有關地熱與地球化學特性分析研究成果，深層流體主要透過地質構造活動，如：火山、斷層、貫入作用等，將地殼深部物質傳遞至近地表，其影響範圍與區域地質構造特性具高度相關，且目前國內法規已將火山及斷層鄰近區域排除於候選建議調查區域外。考量國內目前已具備地熱流量測與分析及地球化學特性分析相關技術，現地樣本採樣及儀器分析技術亦已完備，故原規劃後續現地調查取樣及分析工作，將俟候選場址選定後進行。

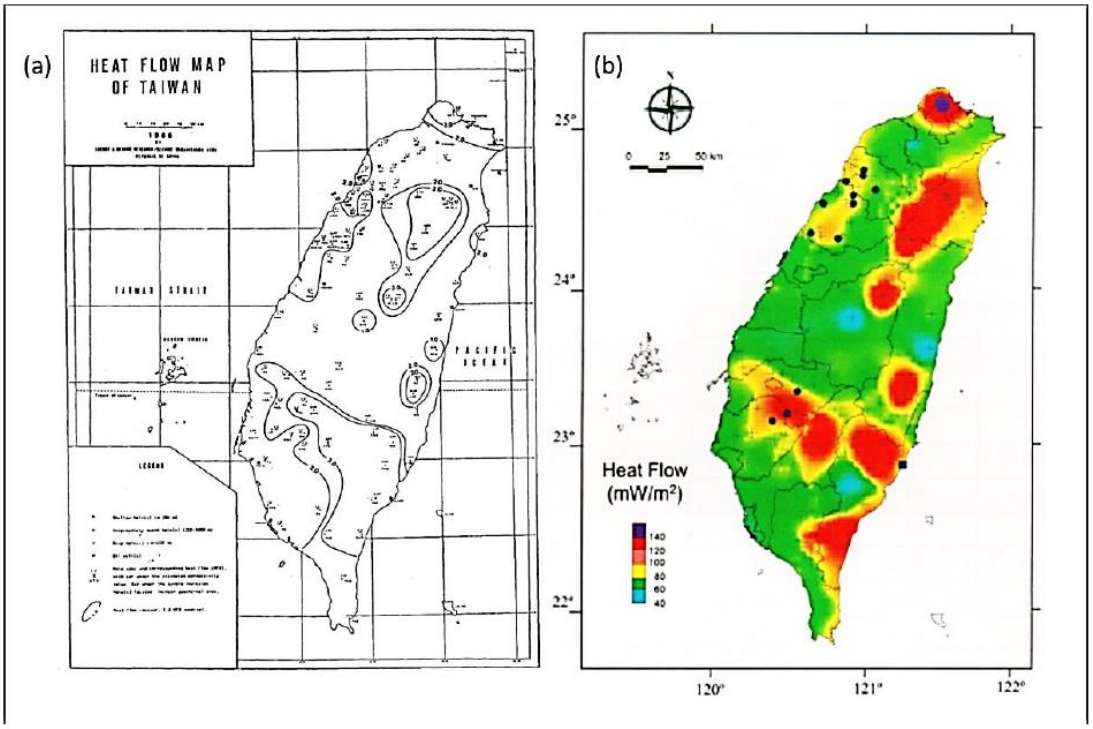


圖 3-27：臺灣熱流分布圖

註：

(a) 陸地鑽井量測之熱流等值圖(Lee and Cheng, 1986, p8)

(b) 陸地鑽井量測之熱流變化趨勢圖及調查點位置(李清瑞等，2013，圖 1)

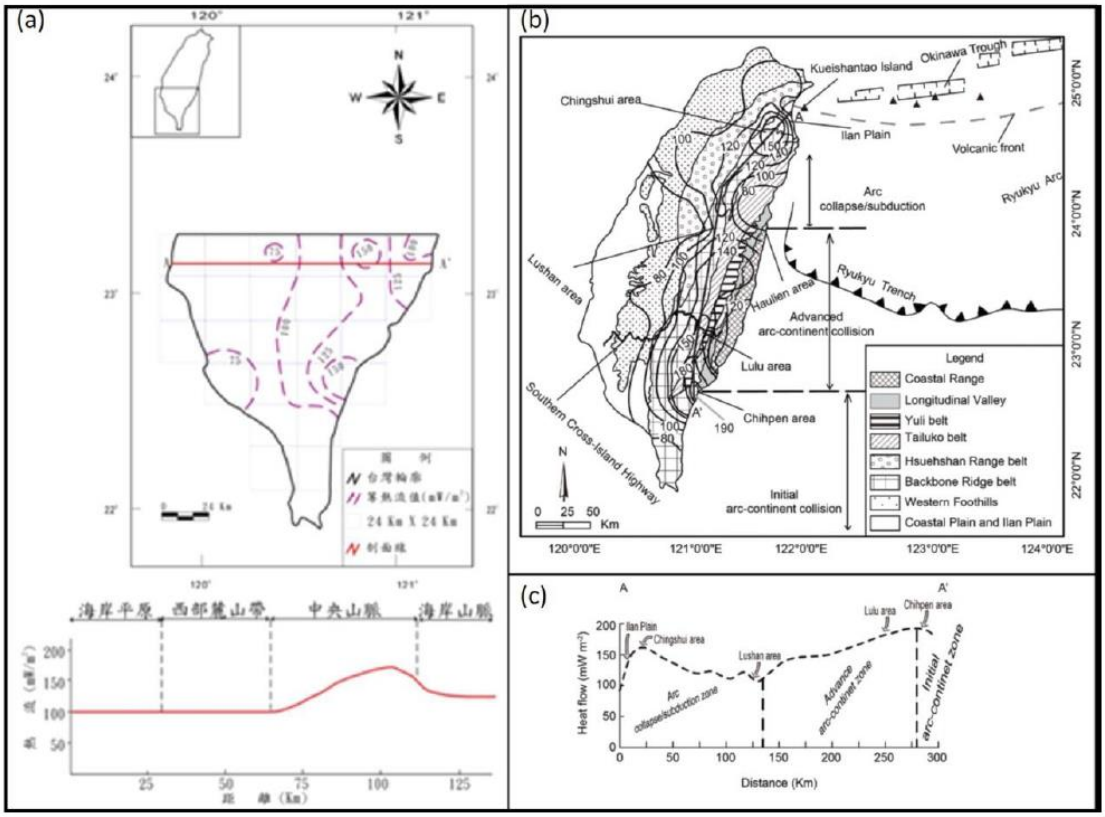


圖 3-28：臺灣二氧化矽熱流分布圖

註：

(a) 熱流等值分布圖未包含大屯火山群之熱流數據。海底火山分布位置以黑色三角形表示(Liu et al., 2015, f4) 。

(b) 南北方向熱流剖面變化圖。北段島弧垮塌或是隱沒區中，最高熱流值出現在宜蘭清水地熱區，朝東北方向宜蘭平原以及西南方向廬山地區遞減。南段弧陸碰撞區中，最高熱流值出現在知本地區，逐漸向北遞減(Liu et al., 2015, f4)。

(c) 南臺灣溫泉二氧化矽溶解量計算熱流值等值圖和東西方向熱流剖面變化圖(劉佳玫，2002，圖14)。

3.2. 水文地質

3.2.1. 坑道開挖損傷帶裂隙分布評估技術研究

坑道開挖擾動之損傷帶岩體物性，會與周圍完整岩石的特性不同，因此，透過觀察或量測坑道壁至周圍岩體的物性變化特徵，可評估開挖損傷帶之分布情形。本項目工作以既有坑道探測技術為發展目標，利用地球物理探測技術進行開挖損傷帶評估與驗證。108年度工作成果說明如下：

(1) 開挖損傷帶技術國際案例研析

蒐集國際間典型的坑道開挖損傷帶研究案例，其採用的研究方法及研究成果說明如下：

(a) 孔內速度量測

瑞士Mont Terri泥岩坑道實驗場中，曾經運用此方法調查泥岩質坑道的開挖擾動之損傷帶(Schuster and Alheid, 2002, p6)特性。依鑽孔內不同深度的超音波速度變化情形，研判損傷帶厚度約介於0.1 m至0.65 m間，此量測結果與岩心取樣資料有相當高的吻合度。此外，比較不同時間的重複量測結果，由損傷帶中岩體的微小超音波速度變化，藉此觀察開挖損傷帶的發育情形。

(b) 跨孔震波探測

瑞士Mont Terri泥岩坑道實驗場中，曾經運用此方法調查泥質坑道的損傷帶分布(Schuster and Alheid, 2002, p6)。結果顯示損傷帶具有較低的超音波速度，由不同深度岩體超音波速度變化所研判的損傷帶厚度，與由岩心所獲得的結果一致。然而此量測法較易受岩體的非均向性及異質性影響，其誤差值相較於孔內超音波量測高出許多，尤其是當傳波方向與岩體內的裂隙平行時，其損傷帶之深度將會被低估。

(c) 震波層析成像法

瑞士Mont Terri泥岩坑道實驗場中，採用不同頻率之壓電換能器做為震源，得到兩井孔間岩體的高解析度P波速度影像，並據以分析損傷帶的分布，其判釋成果也藉由岩心資料獲得

驗證(Schuster and Alheid, 2002, p48; Nicollin et al., 2008, p236)。

Sagong et al. (2012, p86)採用高頻撞擊式震波發射作為震源，於韓國京畿道龍仁市之片麻岩、片岩質岩體測試坑道進行損傷帶分布調查，研究成果與岩心資料對比後，顯示該試驗場之擾動帶深度約1 m。由於撞擊式震源也能夠產生S波，因此，能比較S波速度剖面與P波速度剖面的差異性，結果顯示S波速度剖面具有更好的解析效果。

(d) 折射震測法

Sato et al. (2000, p6)在日本Tono礦區的砂岩質坑道，利用折射震測法比較機械開挖與鑽炸開挖所產生的擾動帶分布。由速度剖面中的低速帶分布顯示，鑽炸開挖法所產生的擾動帶明顯深於機械式開挖法。

Schuster and Alheid (2002, p55)在瑞士Mont Terri泥岩坑道實驗場中，沿著坑道側壁將受波器安裝於岩壁上進行折射震測，並依據低速帶的分布研判其開挖擾動之損傷帶厚度介於0.05 m至0.15 m間，其成果與孔內量測和岩心分析間具有相當好的吻合度。

(e) 透地雷達法

芬蘭研究人員的不同地質環境研究透地雷達的應用。

(i) 在Olkilioto地區花崗岩質坑道中，研究漏水區在含水與不含水期間雷達波特性的變化情形。當裂隙中含水時，會使雷達波的速度及振幅產生明顯變化，故由雷達剖面與頻散剖面上，均能清楚顯示出損傷帶的範圍(Heikkinen et al. (2010, p25)。

(ii) 在芬蘭的Kuru花崗岩礦場，評估鑽炸(drill and blasting)與熱切(burn cutting)開挖法所產生之損傷帶範圍，結果顯示鑽炸法對岩體產生較大的損傷與破壞(Heikkinen et al., 2010, p37)。

(iii) 在瑞典Äspö地下實驗室檢測自然裂隙與人為開挖產生的裂隙。雷達剖面能有效偵測平行於坑道壁發展之裂隙。且透過雷達波頻散剖面有利於偵測開挖損傷帶之微裂隙(Heikkinen et al., 2010, p67)。

(f) 地電阻層析成像

Kruschwitz et al. (2004, p69)在瑞士Mont Terri泥岩坑道實驗場中研究。結果顯示岩體間的孔隙受到拉張作用使空氣或水蒸氣存在於孔隙中，因此，會出現電阻率上升但是相位值下降的現象；而當岩體受到壓縮應力時，孔隙水會被排出，同時岩體內的孔隙也被壓縮，在此狀況下岩體電阻率及相位均會上升。

Walton et al. (2015, p210)在瑞典Äspö硬岩地下實驗室進行探測。採用不同電極排列方法比較經過逆推處理後的地電阻剖面。由電極間距差異之分析結果顯示，當電極間距小於一定程度時，其解析度並無顯著改變。經由三種電極間距排列之地電阻剖面差異分析，作者建議在相似的施測條件下，最大可接受的電極間距大約為預期之損傷帶厚度。

(g) 水力特性試驗

Bossart et al. (2002, p30)於瑞士Mont Terri泥岩坑道實驗場中，採用氣壓試驗及水力試驗調查坑道壁剖面在不同深度孔井中的滲透性及水力特性之變化。結果顯示淺部損傷帶由於岩體破碎程度較高，因此，其水力傳導係數遠高於完整岩石的傳導係數達數個數量級。深部的損傷帶雖然仍有破裂產生，但因其裂隙連通程度較低，故深部損傷帶的水力傳導係數較淺部損傷帶低。

(h) 數值模擬

Saiang (2008, p812)藉由FLAC數值分析軟體模擬開挖損傷帶對坑道壁之影響，研究結果顯示在開挖損傷帶存在的狀況下，因開挖損傷帶之岩體強度及剛性下降，其施加在坑道壁之切應力出現了約50%的顯著下降。

Zhu et al. (2014, p325)採用二維數值模擬觀察開挖損傷帶的動態應力分布情形，結果指出在現地應力較高的環境下，開挖損傷帶的形成主要與現地應力的重新分配有關，而與開挖方法較無關聯。然而開挖行為會造成應力在短時間內被釋放，導致在坑道表面到一定深度內形成很高的剪切應力的轉變，應力的重新組合造成岩體產生破裂，特別是在現地應力特別高的情況下，開挖損傷帶更容易形成，而剪切應力的釋放率造成的應力動態分布行為，對於開挖損傷帶的形成有相當大的影響。

(2) 開挖損傷帶探測技術建立與測試

為建立開挖損傷帶之非破壞性探測與解析能力，本項目工作以各種地球物理探測技術利用既有坑道壁面，進行開挖損傷帶探測技術建立與測試資料解析。

(a) 測試用坑道篩選

本工作項目以H區花崗岩坑道做為技術建立與測試地點。坑道總長度約為150 m，寬及高約為6 m，以花崗片麻岩為主要岩性組成。由於坑道開挖已超過40餘年，除過去採用鑽炸法開挖時造成的岩體破壞以外，長年受到區域應力及地震等構造運動影響，使坑道內之裂隙發育密集、壁面崎嶇並有多處湧水區域。坑道中除了利於大型機具移動而在地面鋪設的厚實混凝土外，其坑道壁兩側與拱頂皆為裸露岩體可供進行試驗。

(b) 探測規劃

本工作規劃2條橫切坑道，以及4條平行坑道佈設測線(圖3-29)，各測線分別以A(鄰近東部洞口)、B(遠離東部洞口)、AN(坑道北壁交錯A測線)、AS(坑道南壁交錯A測線)、BN(坑道北壁交錯B測線)、BS(坑道南壁交錯B測線)編號。由於坑道壁面崎嶇不平，為了評估坑道壁經整平後是否有助於施測及解析，將兩處橫剖面(A及B)預劃為3 m寬，並將其中2 m以噴砂及水泥做整平處理，另保留1 m寬度之原始坑道壁面。

在裸露與整平壁面進行地電阻與震波探測，比較兩種壁面狀況對於探測結果之影響，而透地雷達探測受到儀器本身的體積及施測限制需要相對平整的地形，故透地雷達僅能在水泥整平的區域進行施測。此外，亦以具有高解析能力的超音波探測，評估超音波探測對於開挖損傷帶的解析能力。

探測結果的表示方式以測線名稱為第一碼。第二碼為地球物理探測方法縮寫：R代表地電阻；S為震波；G為透地雷達。第三碼為地面性質，r為裸露壁面；c為水泥壁面。例如A-Rr代表在A測線進行的地電阻裸露壁面探測結果。

本項目工作另進行孔內探測，於A測線南、北壁角落兩側進行單封塞水力試驗，觀察損傷帶的存在對於水力傳導係數的影響，並將提取出的岩心進行分析，以評估開挖損傷帶的真實深度，亦同時比較地物探測之成果與真實開挖損傷帶分布之異同。此外，為了評估超音波探測運用於孔內探測之可行性，亦於孔內布置水下超音波探測器，觀察超音波在孔內岩壁間的傳播特性。3個鑽孔編號A1、A2及A3，深度均約為10 m。

(c) 探測技術測試結果

本項目工作參考國際文獻研析之成果，進行開挖損傷帶之研發規劃，同時亦將花蓮溪畔花崗片麻岩質坑道作為技術建置場域，進行開挖損傷帶之岩體特性分析，以及坑道面地球物理探測技術建置，作為國內坑道開挖損傷帶探測與評估技術之先期研究。成果說明如下：

(i) 岩心試驗

於研究期間鑽取3口約10 m之鑽孔，並於各鑽孔15處不同深度之岩石樣本進行物性試驗，試驗結果顯示溪畔岩體之氣體滲透率介於10^{-10} m/sec至10^{-8} m/sec之間，有效孔隙率介於2.248%至3.097%之間，真比重介於2.787至3.022之間。

(ii) 水力試驗

於3處鑽孔內之40處裂隙段進行封塞微量注氣試驗，結果顯示開挖損傷帶K值介於10^{-6} m/sec至10^{-3} m/sec之間，約有3個數量級差距；非人工裂隙K值介於10^{-4} m/sec至10^{-3} m/sec之間，約有1個數量級差距。

(iii) 透地雷達探測

本項目工作研究選用1,600 MHz與900 MHz透地雷達天線於規劃之A-Gc及B-Gc測線進行透地雷達探測試驗，探測結果顯示1,600 MHz之雷達波解析力較佳，可有效分辨損傷帶與完整岩石的邊界。而900 MHz雷達波因空氣與壁面的反射波遮蔽了淺部的損傷帶區域，而無法解析0.4 m以內之損傷帶構造，故1,600 MHz之雷達波適合作為探測花崗岩質開挖損傷帶分布之工具。此外，由於儀器易受振動干擾資料品質，建議於透地雷達探測作業開始前預先整平壁面，以確保資料之品質穩定度。由於僅A-Gc雷達剖面(圖 3-30)具備足夠的訊噪比進行開挖損傷帶判釋，分析1,600 MHz之雷達剖面結果顯示A測線之開挖損傷帶深度約介於0.1m至0.3 m之間。

(iv) 地電阻探測

本項目工作研究完成4組垂直坑道走向與4組平行坑道走向之地電阻剖面，並將4組垂直坑道走向之地電阻剖面以真實坑道面幾何呈現探測成果。依據成果顯示，開挖損傷帶之電阻率分布介於100 ohm-m至1,000 ohm-m之間，而壁面經水泥整平後可有效降低高程誤差，且水泥層與開挖損傷帶顯著的物性差異，則有利於判釋其邊界。在未經水泥整平的壁面進行探測，雖可直接反應岩體之電阻率，但崎嶇的壁面將造成高程誤差，進而影響地電阻剖面之真實性。因此，建議於裸露岩壁上之地電阻探測需縮短電極間距至0.1 m至0.05 m，據以減少高程誤差帶來的影響、並有利於解析小於0.1 m深之損傷帶分布。A-Rc與A-Rr地電阻剖面顯示(圖 3-31)A測線之開挖

損傷帶深度約介於0.25 m(南壁)，而在A測線南壁拱頂發現有延伸至0.5 m之低電阻帶存在，推測為含水之破碎帶；觀察B-Rc地電阻剖面顯示(圖 3-31)，B測線之開挖損傷帶平均深度約為0.15 m，在坑道南壁與近拱頂處亦有延伸至約0.5 m深之低電阻破碎帶。

(v) 震波探測

完成4組垂直坑道走向之震波速度剖面，並將4組速度剖面以真實坑道幾何形貌展示成果。依據探測成果顯示，完整岩石之P波速度約落在4,000 m/s至6,000 m/s之間，而開挖損傷帶之速度分布則介於3,200 m/s至4,000 m/s之間。觀察A-Sc剖面(圖 3-32)顯示，因水泥層與開挖損傷帶波速相近，將影響震波速度評估開挖損傷帶之深度，故建議震波探測於裸露岩壁進行，以利於辨識開挖損傷帶的低速帶分布。依據A-Sc與A-Sr速度剖面顯示A測線之開挖損傷帶深度介於0.2 m至0.3 m之間，而在南壁近拱頂處之漏水區則有延伸超過0.5 m深之低速帶，推測此處為破碎帶。在B測線上的開挖損傷帶因近支距走時資料受到表面波遮蔽而無法挑選，因此，無法解析淺部0 m至0.2 m之速度變化，故僅能研判B測線南壁拱頂處有深度約0.5 m之低速破碎帶。

(vi) 超音波探測

計畫執行期間新增孔內超音波探測技術建置，透過高頻之超音波於三處鑽孔內探測開挖損傷帶及既有裂隙帶之分布。期間完成A1、A2孔內與跨孔超音波探測之測試，結果顯示其裂隙分布之深度與岩心鑑定吻合，且完整岩石與開挖損傷帶之速度變化，亦可作為震波探測判釋完整岩石與損傷帶岩體之依據。依據A1-A2跨孔速度成像之成果顯示，南壁拐角處之開挖損傷帶約有0.28 m深。

(vii) 綜合解釋

綜合透地雷達、地電阻、震波及超音波判釋開挖損傷帶之成果顯示，A測線之開挖損傷帶深度介於0.1 m至0.3 m之間，A1鑽孔之岩心鑑定深度，亦落在此深度範圍當中(0.2 m)，在A測線之南壁拱頂處有一延伸至0.5 m深之破碎帶存在，而在A測線北壁拐角處在地電阻與震波速度剖面皆顯示損傷帶有延伸的跡象，然而因資料覆蓋率不足，無法進行判釋，故參考A3鑽孔可發現其破碎帶約有0.75 m深；B測線由於無鑽孔岩心資料輔佐探測結果，故開挖損傷帶之判釋僅透過地物探測之綜合判釋成果，決定其平均深度介於0.15 m至0.25 m之間，而在B測線南壁拱頂處，亦發現超過0.5 m深之破碎帶存在。

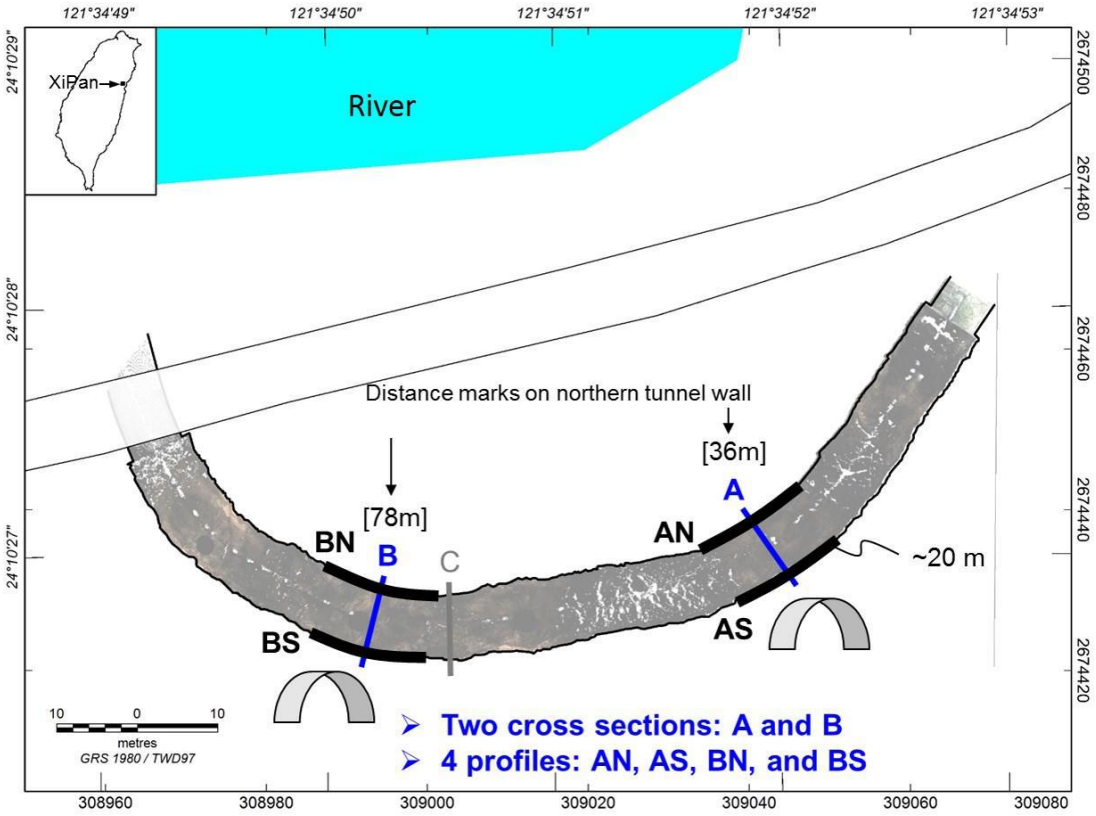


圖 3-29：溪畔坑道預定測線位置示意圖

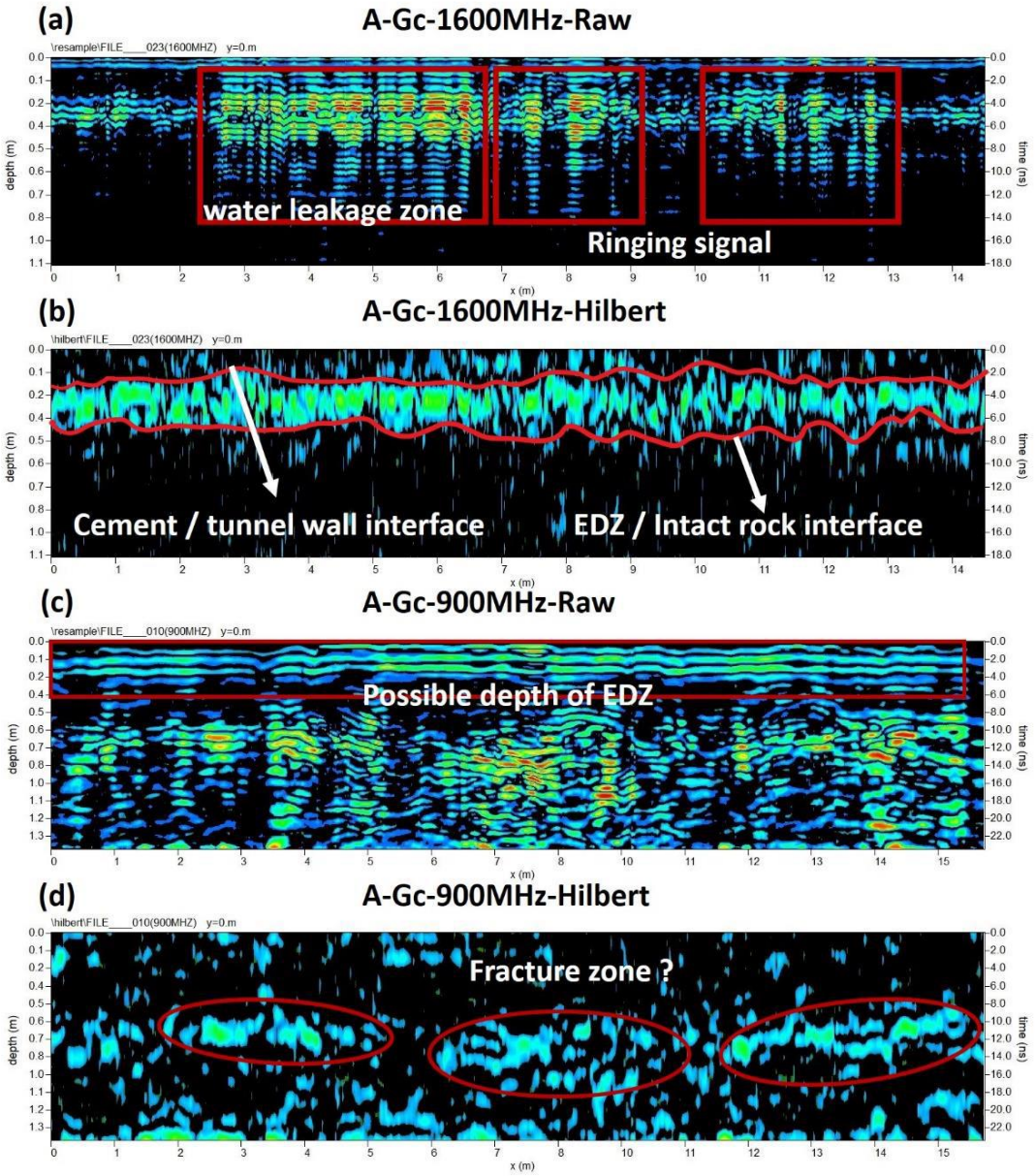


圖 3-30：A-Gc雷達剖面之開挖損傷帶分布判釋圖

註1：(a)1,600 MHz原始雷達剖面；(b)1,600 MHz最終雷達剖面；(c)900 MHz原始雷達剖面；(d)900 MHz最終雷達剖面。

註 2：測線由南向北(圖左至右)前進。

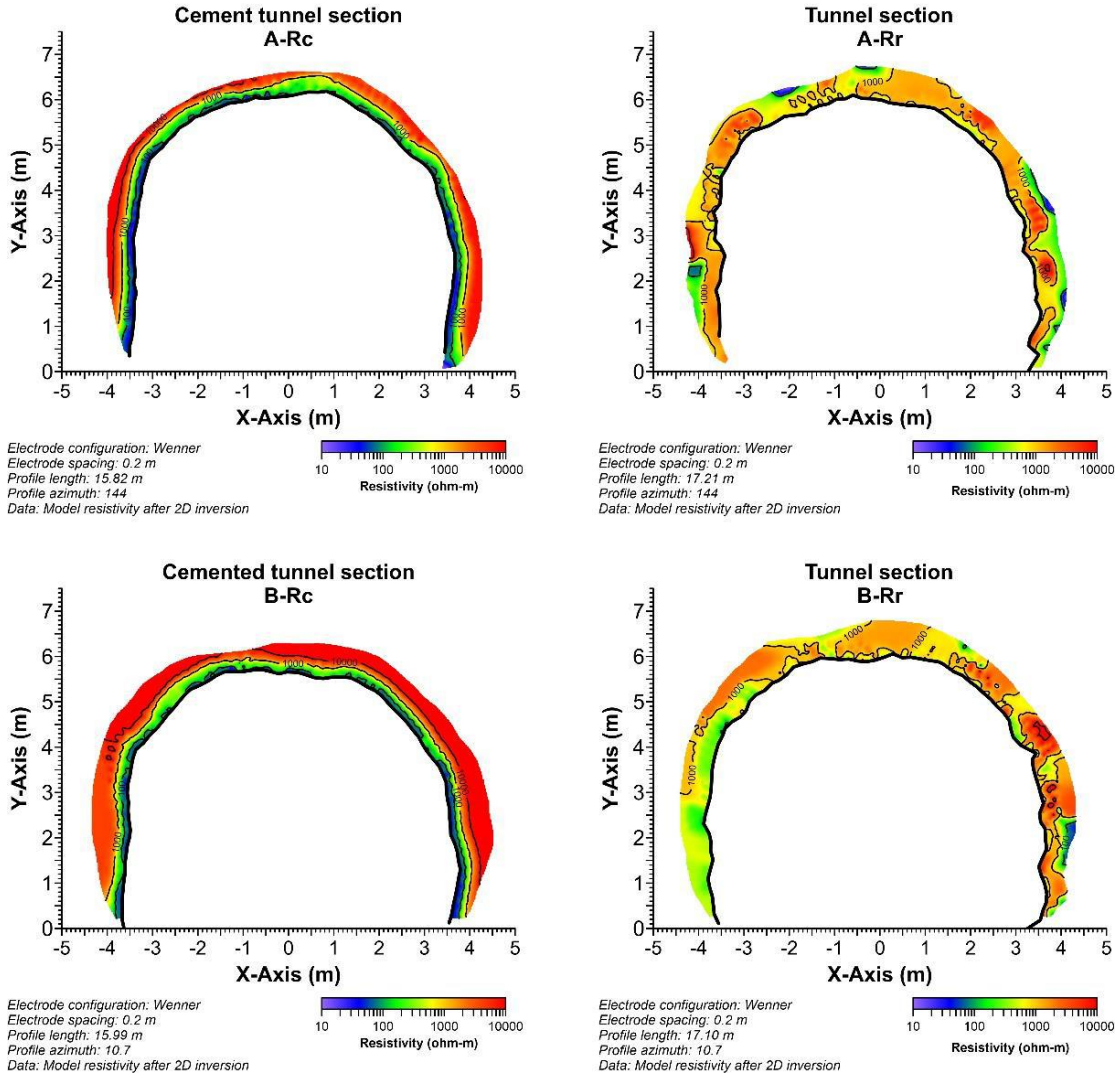


圖 3-31：A-Rc、A-Rr、B-Rc、B-Rr 坑道地電阻剖面

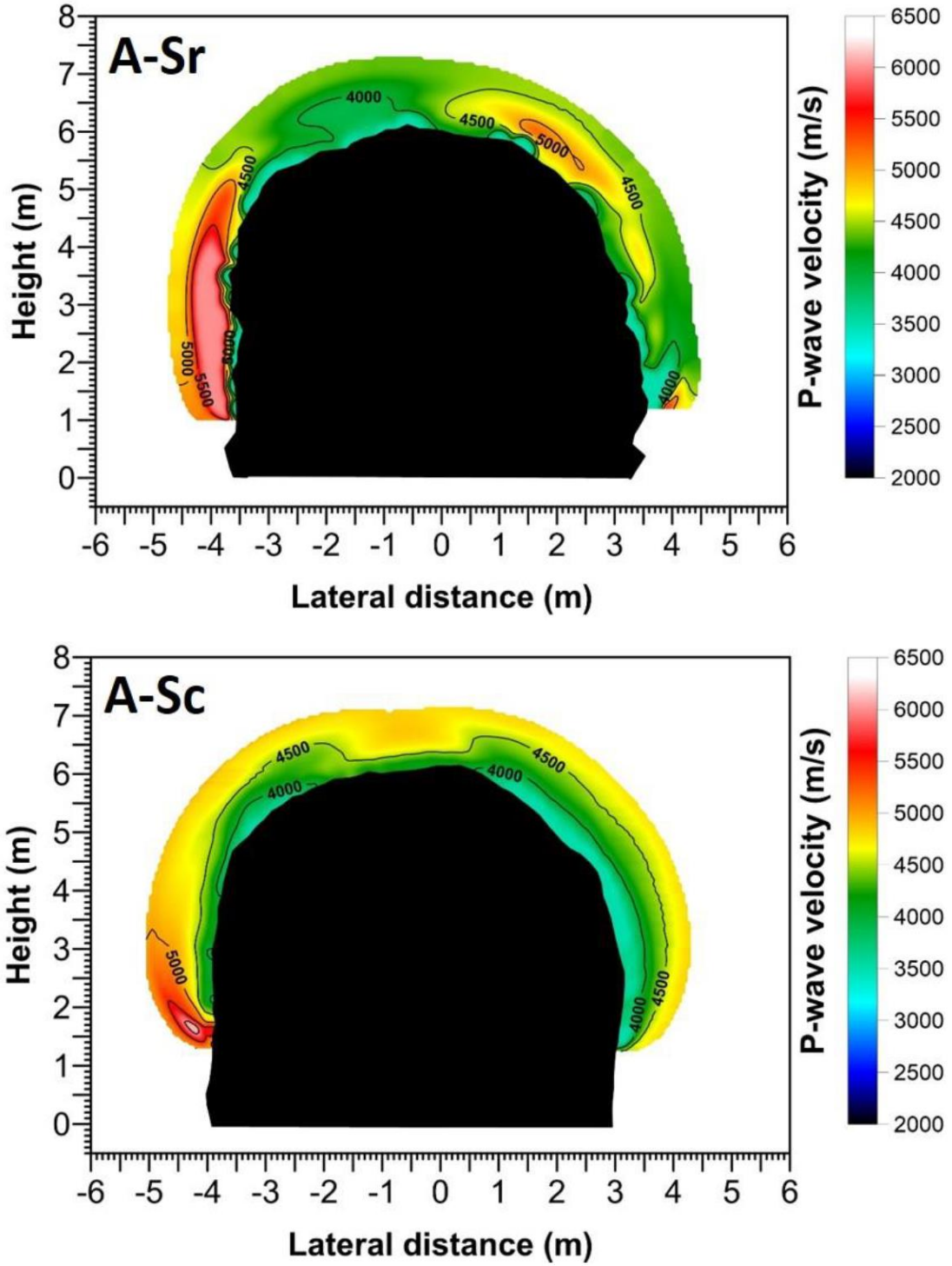


圖 3-32：A-Sr、A-Sc 震波速度剖面

3.2.2. 裂隙參數分布特性統計研究

本項目工作藉由地表裂隙量測方式，取得本島花崗岩裂隙參數分布數據與脆韌性構造特徵，探討裂隙參數分布隨空間變化特性以及區域性應力場分布。108年度工作成果說明如下：

(1) 裂隙量測地點之踏勘及評選

調查地點大多於海岸沿線、廢棄坑道或河流沿岸等岩層出露處。本期共進行2次野外地質勘查以及7次現地測量，量測地點分別位於南澳鄉金洋村(編號FPC-01、FPC-02、FPC-03)、和仁隧道南側出口(編號KNG-01)、舊和平隧道北側(編號KNG-02E、KNG-02W)以及南澳鄉碧侯村(編號YTS-01、YTS-02)，總計共4組測線採樣(scan-line sampling)及4組視窗採樣(window sampling)。

考量裂隙參數統計分布檢定學理及後續模型驗證的可行性，裂隙分析採用美國Golder Associates Inc.公司所發展的商用軟體Fracman®(7.51版)進行模擬分析。Fracman®係為國際上專門用於石油開採及核廢棄物處置方面的離散裂隙網路模擬軟體，不僅能根據現場量測資料分析裂隙參數，如裂隙位態、裂隙強度、軌跡長度等，亦可模擬研究區域之空間三維裂隙網路構造，並分析該區域的裂隙參數之機率分布。

(2) 裂隙參數量測與分析

露頭初步裂隙位態分析結果整理如表 3-4及表 3-5，並依岩性分類敘述如下：

(a) 源頭山花崗片麻岩體

源頭山花崗片麻岩體地理位置分布上呈東西方向延伸，自烏石鼻海岸向西延伸至鹿皮山一帶。然而實際地質勘查後顯示烏石鼻海岸露頭施測不易，僅於南澳北溪剖面岩體出露較為連續，因此，選定2處南澳北溪沿岸露頭進行視窗設置與裂隙參數量測。位態分析結果如下：

(i) YTS-01

YTS-01量測視窗於碧侯部落連絡道北側終點往南澳北溪上游方向溯溪約300 m處的北側露頭，測線起點坐標

以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(328165, 2710093)，高程約為116 m，測線長度為56.0 m，測線走向與傾角為N40°W/0°E，量測面走向與傾角為N40°W/90°。YTS-01量測面上所有與測線相交軌跡繪製分布圖如圖 3-33所示，裂隙平均位態傾向與傾角可分為(10°, 40°)、(318°, 73°)、(270°, 90°)、(177°, 77°)、以及(139°, 28°) 5組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的32%、20%、18%、15%與15%，推測可能受到不同時期剪切帶作用、輝綠岩脈侵入構造及解壓作用影響，裂隙位態集中趨勢相對而言較為零散，約略以近似於東西走向為主。

(ii) YTS-02

YTS-02量測視窗設置於YTS-01量測點往上游方向溯溪約20 m處的北側露頭，測線起點坐標以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(328101, 2710167)，高程約為119 m，測線長度為27.0 m，測線走向與傾角為N40°W/0°E，量測面走向與傾角為N40°W/90°。裂隙平均位態傾向與傾角可分為(348°, 73°)、(298°, 67°)、(149°, 47°)、以及(87°, 63°) 4組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的48%、26%、15%與11%，裂隙位態集中趨勢及葉理面分布較不顯著，裂隙位態約略以北偏東走向為主。

(b) 飯包尖山花崗片麻岩體

考量花崗岩出露面積大小、裂隙軌跡分布及現場施測可行性等條件後，評選3處南澳鄉金洋村內南澳南溪沿岸露頭進行測線設置與裂隙量測。位態分析結果如下：

(i) FPC-01

FPC-01測線設置於金洋後山營地往南澳南溪上游溯溪約200 m處的東側露頭，測線起點坐標以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(325340, 2702321)，高程約為132 m，測線長度為25 m，測線走向與傾角為NS/0°，量

測面走向與傾角為NS/90°。裂隙平均位態傾向與傾角主要集中於(6°, 57°)及(60°, 77°) 2組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的95%與5%，其中走向近似於東西向的裂隙群與該區域葉理發育有密切關聯性。

(ii) FPC-02

FPC-02測線設置於南澳古道入口處沿既有產業道路往東約2.5 km處橋下南澳南溪西側，因地勢高差僅能經由下方農舍往上溯溪約250 m到達該露頭點，測線起點坐標以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(323475,2701936)，高程約為198 m，測線長度為34 m，測線走向與傾角為N70°W/0°，量測面走向與傾角為N70°W/90°。裂隙平均位態傾向與傾角主要集中於(353°, 82°)、(267°, 74°)、(107°, 74°)、(82°, 31°)及(229°, 44°) 5組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的38%、21%、13%、13%與15%，其中走向接近於東西向的裂隙群與該區域葉理發育有密切關聯性。

(iii) FPC-03

FPC-03測線設置於FPC-02測線往上游約20 m處，測線起點坐標以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(323424, 2701945)，高程約為192 m，測線長度為26.75 m，測線走向與傾角為N80°E/10°E，量測面走向與傾角為N80°E/70°N。裂隙平均位態傾向與傾角主要集中於(97°, 77°)及(184°, 75°) 2組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的85%與15%，其中走向近似南北向的裂隙群受到量測面(東西走向)影響反而較易於被量測，甚至有部份裂隙可被觀察穿過葉理面，代表此叢集可能是晚於葉理面構造發育的裂隙群。

(c) 開南岡花崗片麻岩體

開南岡花崗片麻岩體評選2處合適的露頭進行裂隙量測，分別位於和仁隧道南側出口之舊公路彎曲處壁面處進行測線

採樣(編號為KNG-01)，以及舊和平隧道內東西側壁面(編號為KNG-02E、KNG-02W)進行視窗採樣。位態分析結果如下：

(i) KNG-01

KNG-01測線起點坐標以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(323294, 2682280)，高程約為35 m，測線長度為45 m，測線走向與傾角為N60°E/0°，量測面走向與傾角為N60°E/90°。裂隙平均位態傾向與傾角主要集中於(263°, 51°)、(20°, 18°)及(80°, 84°) 3組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的74%、13%與13%。裂隙位態分析顯示岩體破裂面主要為南北走向且為中高角度傾角，明顯與葉理面走向相異，而傾角近乎水平的裂隙群，可推測為岩體抬升至地表因上覆層風化剝離而形成之解壓節理。

(ii) KNG-02

KNG-02量測點位於舊蘇花公路開鑿之第11號隧道內，分為東側及西側隧道面進行量測，量測視窗起點坐標以TWD97二度分帶投影坐標系統描述為(325460, 2684449)，高程約為48 m，視窗大小長度為1 m× 2 m，測線走向與傾角為N25°W/0°，量測面走向與傾角為N25°W/90° 。東側量測面(KNG-02E)裂隙平均位態傾向與傾角主要集中於(149°, 52°)及(317°, 60°) 2組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的52%與48%；西側量測面(KNG-02W)裂隙平均位態傾向與傾角主要集中於(157°, 64°)、(254°, 53°)、(337°, 77°)及(253°, 3°)4組叢集，分別佔所有可量測裂隙總數的52%、15%、19%與14%。

(3) 區域古應力場量測分析

古應力反演主要係建立在斷層擦痕分析的基礎上，即所謂脆性滑動構造分析，判定地震發生時地層滑動的應力場模式，藉以輔佐瞭解古斷層的運動機制。

已完成源頭山岩體、飯包尖山岩體、和平岩體、開南岡岩體及溪畔岩體的現地應力特徵調查工作，配合其他地質構造截切關係，分析各岩體中所記錄之構造證據，並將後期斷層擦痕構造進行古應力反演，最後，再整合上述構造分期結果，得到相對應的演化關係。古應力斷層擦痕反演成果說明如下：

(a) 源頭山花崗片麻岩體

源頭山岩體的斷層擦痕測量結果共計有3期事件，發育依序分別為東北-西南走向之左移斷層、東北-西南走向之左移斷層帶逆斷層分量及西北-東南走向之正斷層，經由古應力反演分析後描述如下(岩體構造演化相對序列如圖 3-34)：

(i) 左移斷層：水平最大應力方向為40°，水平最小應力方向為277°。

(ii) 左移斷層帶逆斷層分量：水平最大應力方向為27°，水平最小應力方向為162°。

(iii) 正斷層：水平最大應力方向為063°，水平最小應力方向為329°，其中水平最大應變方向指示著冲繩海槽拉張的證據，與現今GPS之結果非常一致。

(b) 飯包尖山花崗片麻岩體

飯包尖山岩體為本期計畫中，唯一無法於野外露頭量測到斷層擦痕的花崗岩體，但是利用構造截切關係，仍可於瞭解該岩體其它構造的相對發育序列。

(c) 和平花崗片麻岩體

和平花崗片麻岩體野外地質調查結果顯示，花崗岩體靠近中心地帶並無斷層擦痕之證據，唯一擦痕出露的位置係為大理岩與花崗變質岩接觸帶。經由截切關係可分為2期應力場，由西北-東南走向之走向滑移斷層轉為近東-西走向之正斷層(林朝彥，2015，p85)。經由古應力反演分析結果可得知：

(i) 早期的走向滑移斷層，水平最大應力方向為113°，水平最小應力方向為204°。

(ii) 晚期的正斷層，水平最大應力方向為181°，水平最小應力方向為276°。

(d) 開南岡花崗片麻岩體

開南岡岩體野外測量結果共計有2期斷層擦痕事件，分別由和仁隧道南側出口外露頭之正斷層擦痕證據，與舊和平隧道南出口西側平移斷層證據，構造時間先後順序目前無法判別，僅可確定皆為後期的斷層構造，古應力反演結果顯示：

(i) 正斷層位態為西北-東南走向，水平最大應力方向為256°，水平最小應力方向為166°。

(ii) 平移斷層位態為東北-西南走向，但無法量得擦痕線理構造，導致應力反演條件不足，未能進行古應力方向分析。

(e) 溪畔花崗片麻岩體

溪畔岩體於溪畔隧道內或岩心描述中，皆可觀察到正斷層構造的證據，斷層面的位態約為西北-東南走向，經由古應力反演分析得知，正斷層水平最大應力方向為236°，水平最小應力方向為331°。

(4) 裂隙參數與古應力場綜合性分析

經由和平花崗片麻岩體野外露頭調查與H區岩心井錄的判釋結果，顯示多數脆性破裂的節理係為早期的葉理或急折帶的構造弱面，經後期應力場影響產生的脆性破裂，此現象亦即代表和平花崗岩體後期裂隙發育的成因與早期的地質構造特性有所關聯。探討臺灣東部花崗岩體裂隙發育成因與地質構造的關聯性如下：

(a) 源頭山花崗片麻岩體

將源頭山所有量測到的地表裂隙叢集簡化為YTS-A、YTS-B與YTS-C、YTS-D，如圖 3-35所示，並討論裂隙發育與地質構造關聯性如下：

(i) YTS-A叢集

根據地質構造的位態極點投影圖(圖 3-35d至f)，顯示早期的韌性剪切帶與較為晚期的走向滑移斷層，位態皆約

為北偏東57°向東傾，與裂隙叢集YTS-A的裂隙位態相當一致。因此，推測裂隙叢集YTS-A可能為韌性剪切帶的構造弱面，經後期應力場改變重新開裂，或是直接受到走向滑移斷層活動時的大地應力場影響，導致岩體直接產生的脆性破裂。

(ii) YTS-B叢集與YTS-C叢集

經由地質調查可發現研究區域的急折帶構造，有共軛發育的特性，若將構造繪製為位態極點投影圖(圖3-35d)，亦與YTS-B及YTS-C裂隙叢集幾近疊合。考量急折帶構造於野外量測確實亦會呈現脆性破裂的現象，因此，推論YTS-B與YTS-C兩組裂隙叢集發育應與急折帶構造有所關聯。

(iii) YTS-D叢集

YTS-D裂隙叢集係為測線YTS-02最主要的裂隙叢集分布，經野外構造量測結果與應力特性分析，裂隙位態與目前所量測構造的關聯性不大，推測可能為後期抬升至地表的解壓作用影響或其他的因素所造成，仍有待後續更進一步的研究以釐清成因。

(b) 飯包尖山花崗片麻岩體

將飯包尖山岩體所有量測到的地表裂隙叢集簡化為FPC-A、FPC-B及FPC-C，並討論裂隙發育與地質構造關聯性如下：

(i) FPC-A叢集

經由野外構造量測可發現FPC-A叢集裂隙主要沿著葉理弱面發育，變質岩區之葉理或片理構造係為區域中岩體的構造弱面，故後期脆性環境的應力擠壓或地質事件，易於致使岩體沿葉理面方向產生脆性破裂。

(ii) FPC-B叢集與FPC-C叢集

裂隙叢集FPC-B及FPC-C截切區域葉理，係為調查區域次要裂隙統計叢集，並且可於花崗岩的韌性剪切變質帶量測高角度的急折帶構造，其位態特性與FPC-B與FPC-C叢

集相近。此外，南澳南溪上游與花崗岩體接觸之大理岩也普遍發育同一期的脆性裂隙，所分析裂隙位態亦與急折帶構造相當一致，且大理岩體中裂隙剪切的方向亦與急折帶構造相符，故推論FPC-B與FPC-C兩組裂隙叢集發育應與急折帶構造有所關聯。

(c) 和平花崗片麻岩體

陳文山等人(2015)於和平溪HCBH01井孔下方採砂場周圍以及八達崗隧道下方佈置共8組測線，位態分析結果顯示，裂隙分布以中高角度破裂面為主，約可將此區域性裂隙位態歸納為三組，傾向與傾角依序為(232°, 83°)、(131°, 75°)及(8°, 42°)。為了利於後續與地質構造綜合討論，將和平岩體所有量測到的地表裂隙及井下裂隙叢集，簡化為HP-A、HP-B及HP-C，並討論裂隙發育與地質構造關聯性如下：

(i) HP-A叢集

裂隙叢集主要沿著早期的葉理弱面產生破裂，林朝彥(2015，p75)分析HCBH01井下岩心結果，也得到相同的論證。變質岩區之葉理或片理構造係為區域中岩體的構造弱面，故後期脆性環境的應力擠壓或地質事件，易於致使岩體沿葉理面方向產生脆性破裂。

(ii) HP-B叢集

急折帶主要發育於脆-韌性環境，地表露頭調查與岩心分析，亦顯示此構造有時會呈現脆性破裂的產狀，位態分析結果可發現急折帶構造，幾乎完全疊合和平溪沿岸地表裂隙統計HP-B裂隙叢集，可推論HP-B叢集為急折帶脆性破裂或後期再開裂的結果。此外，根據HCB01井下裂隙統計結果，HP-B叢集並不顯著，該現象係因統計筆數差異懸殊所致，井下破碎帶與裂隙群大多皆沿著葉理面破裂，因而導致極點投影圖上HP-B叢集較不明顯。

(iii) HP-C叢集

HP-C裂隙叢集位態與目前所量測地質構造關聯性不大，並且於HCBH01裂隙判釋亦不顯著，推測可能為後期的河谷效應或地表解壓所造成。

(d) 開南岡花崗片麻岩體

將開南岡岩體所有量測到的地表裂隙及坑道裂隙叢集，簡化為KNG-A及KNG-B，並討論裂隙發育與地質構造關聯性如下：

(i) KNG-A叢集

KNG-A裂隙叢集特性與和仁隧道南端出口處所量測之正斷層位態的投影結果非常一致，測線KNG-01量測裂隙的統計分析，亦顯示KNG-A叢集為該區域最主要之裂隙位態分布；因此，推論KNG-A裂隙叢集可能為正斷層應力場時期，受到大地應力影響導致岩體產生脆性破裂的結果。

(ii) KNG-B叢集

地質調查結果顯示該區域範圍內有強烈的褶皺構造發育，並且擾亂區域葉理分布，導致葉理傾向有向南或向北的情形，且位態走向接近似於東-西向。根據構造位態極點投影分布圖顯示，葉理構造與KNG-B叢集特性非常吻合，因此，認為KNG-B裂隙叢集係為早期韌性環境下受到應力影響產生褶皺構造，並且在後期脆性環境中受到應力擠壓或地質事件影響下，導致岩體沿葉理面方向產生脆性破裂。

(e) 溪畔花崗片麻岩體

採用劉台生(2006，c4p5)及劉明坤(2014，p31)於溪畔坑道岩壁以視窗量測法之量測的裂隙參數進行分析，分析結果顯示平均位態傾向與傾角，主要集中於(266°, 64°)、(116°, 82°)、(231°, 77°)及(83°, 13°)4組叢集。為了利於後續與地質構造綜合討論，將溪畔岩體所有量測到的坑道裂隙叢集，簡化為SP-A、SP-B及SP-C，並討論裂隙發育與地質構造關聯性如下：

(i) SP-A叢集及SP-B叢集

分析結果顯示SP-A及SP-B兩組裂隙叢集位態與早期的地質構造截然不同，推測兩者的關聯性不大，另受到溪畔隧道嚴重滲水的影響，大量碳酸鈣礦物沉澱亦造成量測上的困難。此外，經分析後可發現量測視窗(東西走向)幾乎平行於葉理面位態，亦可能導致葉理方向的裂隙群，未能在此2組視窗採樣中被量測。

(ii) SP-C叢集

根據地質構造的位態極點投影圖，顯示急折帶構造與正斷層構造，構造位態皆為西北-東南走向，與裂隙叢集SP-C的裂隙位態較為一致，然而裂隙的傾角及傾向，距離以上兩者構造平均位態尚有些許偏差；因此，僅能推測SP-C裂隙叢集發育可能與急折帶構造或正斷層構造相關。

(5) 研究結論

(a) 臺灣東部花崗岩體地表露頭(包含坑道壁面)所量測的叢集位態，可用Kolomogrov-Smirnov假設檢定進行統計分析，並以費雪機率分布進行套配；二維裂隙強度P_{21}僅考慮視窗採樣結果，數值約介於0.89 m^{-1}至2.0 m^{-1}之間；裂隙軌跡長度則可用冪函數進行描述，冪函數指數值kr約為2.98，以提供後續建立空間三維裂隙模型。

(b) 源頭山花崗片麻岩體經截切關係判釋，地質構造發育依序為基性岩脈與韌性剪切帶、急折帶、走向滑移斷層與正斷層。整合所有量測的裂隙位態進行分析，大致上可分為4組主要的位態叢集，分別對應韌性剪切帶及走向滑移斷層、急折帶構造及後期的地形解壓作用。

(c) 飯包尖山花崗片麻岩體經截切關係判釋，地質構造發育依序為基性岩脈、區域葉理、急折帶之地質構造。裂隙位態分析顯示主要可分為葉理面方向破裂，以及與葉理面共軛方向破裂2組，並可推論葉理面共軛的裂隙叢集成因與急折帶有所關聯。

(d) 和平花崗片麻岩體經截切關係判釋，地質構造發育依序為區域葉理、假玄武玻璃、急折帶、走向滑移斷層與正斷層之地質構造。裂裂隙位態分析顯示可分為3組主要的位態叢集，分別對應早期的葉理面、急折帶構造及後期的河谷效應或解壓作用。

(e) 開南岡花崗片麻岩體經截切關係判釋，構造發育依序為區域葉理與褶皺、急折帶、走向滑移斷層與正斷層之地質構造。裂隙位態分析結果顯示可分為葉理面方向破裂及正斷層面方向破裂2組。早期韌性環境下葉理受到應力影響產生褶皺構造，導致後期沿葉理面構造弱面發育裂隙叢集之傾角與傾向並非完全一致，但是位態走向皆以東-西方向為主；另一組裂隙叢集則是反映後期的正斷層應力場，致使岩體產生脆性破裂。

(f) 溪畔花崗片麻岩體經截切關係判釋，構造發育依序為區域葉理、急折帶與正斷層之地質構造。裂隙位態分析結果共可分為東北-西南走向、南-北走向、西北-東南走向3組高傾角裂隙叢集，並且僅只有西北-東南走向的裂隙叢集可對應於急折帶構造及正斷層構造。

(g) 臺灣東部花崗岩體後期所發育的裂隙構造，大多沿著岩體中葉理弱面產生，亦即代表花崗岩體早期所發育的構造弱面，容易受後期大地應力的影響產生破裂的現象。

(h) 經由岩心描述與現地踏勘結果，顯示急折帶構造為臺灣東部花崗岩體中，皆可觀察到的地質構造之一，且皆為高傾角之位態；其中，以和平岩體及源頭山岩體具有脆性破裂的特徵。裂隙叢集的位態分析結果亦顯示，源頭山岩體、飯包尖山岩體及和平岩體的裂隙發育皆與急折帶構造有關。

表 3-4：臺灣東部花崗片麻岩體裂隙參數統計分析表(測線採樣法)

Scan-line	Fracture clusters	Orientation distribution	Sample number	Relative
FPC-01	Set 1 (6, 57)	Fisher (K=73.73)	37	95
	Set 2 (60, 77)	Fisher (K=64.88)	2	5
FPC-02	Set 1 (353, 82)	Fisher (K=64.54)	15	38
	Set 2 (267, 74)	Fisher (K=29.72)	8	21
	Set 3 (107, 74)	Fisher (K=76.73)	5	13
	Set 4 (82, 31)	Fisher (K=63.85)	5	13
	Set 5 (229, 44)	Fisher (K=11.96)	6	15
FPC-03	Set 1 (97,77)	Fisher (K=19.75)	29	85
	Set 2 (184, 75)	Fisher (K=11.31)	5	15
KNG-01	Set 1 (263, 51)	Fisher (K=32.89)	63	74
	Set 2 (20, 18)	Fisher (K=8.89)	11	13
	Set 3 (80, 84)	Fisher (K=10.60)	11	13

註1：裂隙位態以傾向與傾角(dip direction, dip)表示。

註2：位態分布假設傾向及傾角無相關性，因此採用費雪分布近似。

註3：相對強度(Relative Intensity)代表該裂隙叢集佔所有量測數目比例。

表 3-5：臺灣東部花崗片麻岩體裂隙參數統計分析表(視窗採樣法)

Scan-window	Fracture clusters	Orientation distribution	Sample number	Relative
KNG-02E	Set 1 (149, 52)	Fisher (K=7.25)	99	52
	Set 2 (317, 60)	Fisher (K=7.35)	91	48
KNG-02W	Set 1 (157, 64)	Fisher (K=14.67)	62	52
	Set 2 (254, 53)	Fisher (K=12.59)	18	15
	Set 3 (337, 77)	Fisher (K=17.89)	22	19
	Set 4 (253, 3)	Fisher (K=11.28)	17	14
YTS-01	Set 1 (10, 50)	Fisher (K=10.79)	69	32
	Set 2 (318, 73)	Fisher (K=21.65)	42	20
	Set 3 (270, 90)	Fisher (K=12.20)	39	18
	Set 4 (177, 77)	Fisher (K=14.18)	33	15
	Set 5 (139, 28)	Fisher (K=11.72)	33	15
YTS-02	Set 1 (348, 73)	Fisher (K=13.58)	109	48
	Set 2 (298, 67)	Fisher (K=10.10)	58	26
	Set 3 (149, 47)	Fisher (K=13.35)	35	15
	Set 4 (87, 63)	Fisher (K=9.60)	24	11

註1：裂隙位態以傾向與傾角(dip direction, dip)表示。

註2：位態分布假設傾向及傾角無相關性，因此，採用費雪分布近似。

註3：相對強度(Relative Intensity)代表該裂隙叢集佔所有量測數目比例。

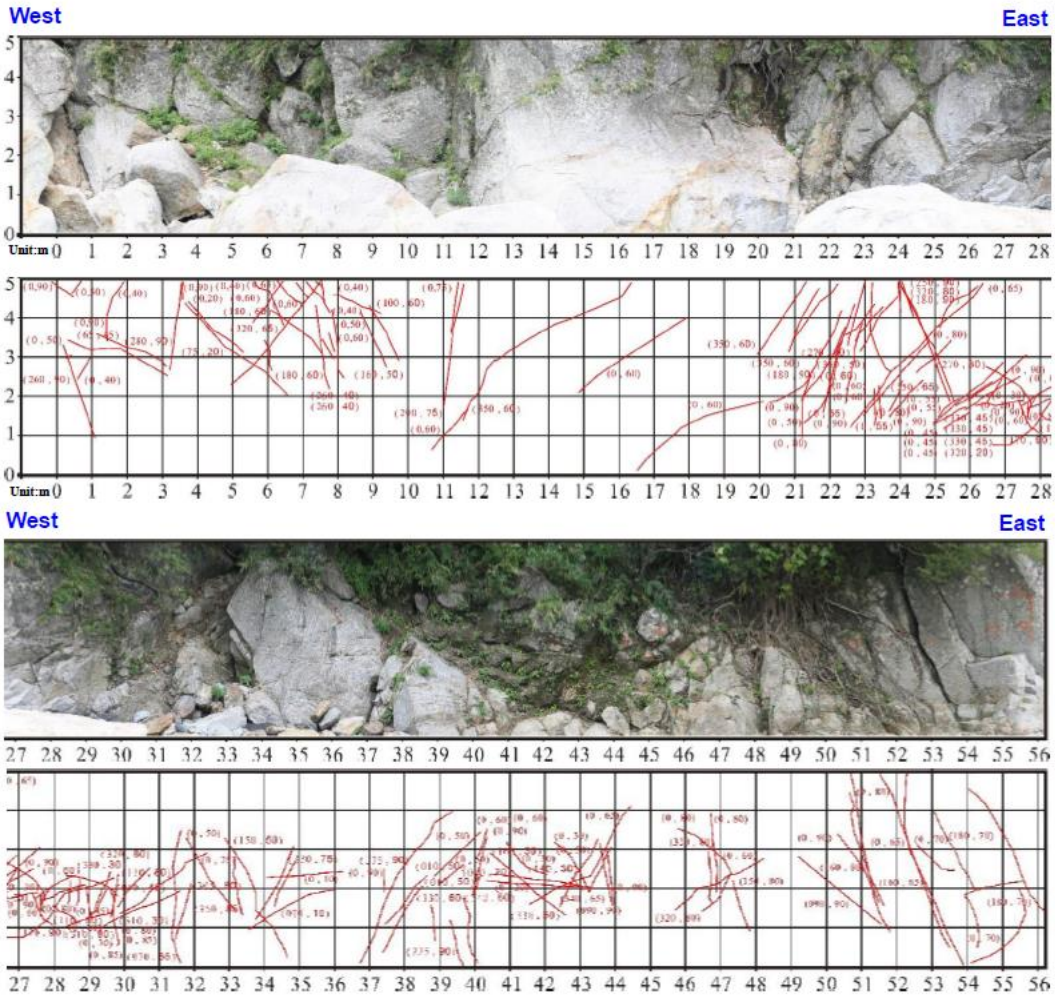


圖 3-33：視窗裂隙軌跡量測成果範例(YTS-01)

註：裂隙軌跡圖所標示之裂隙位態以傾向與傾角(dip direction, dip)表示

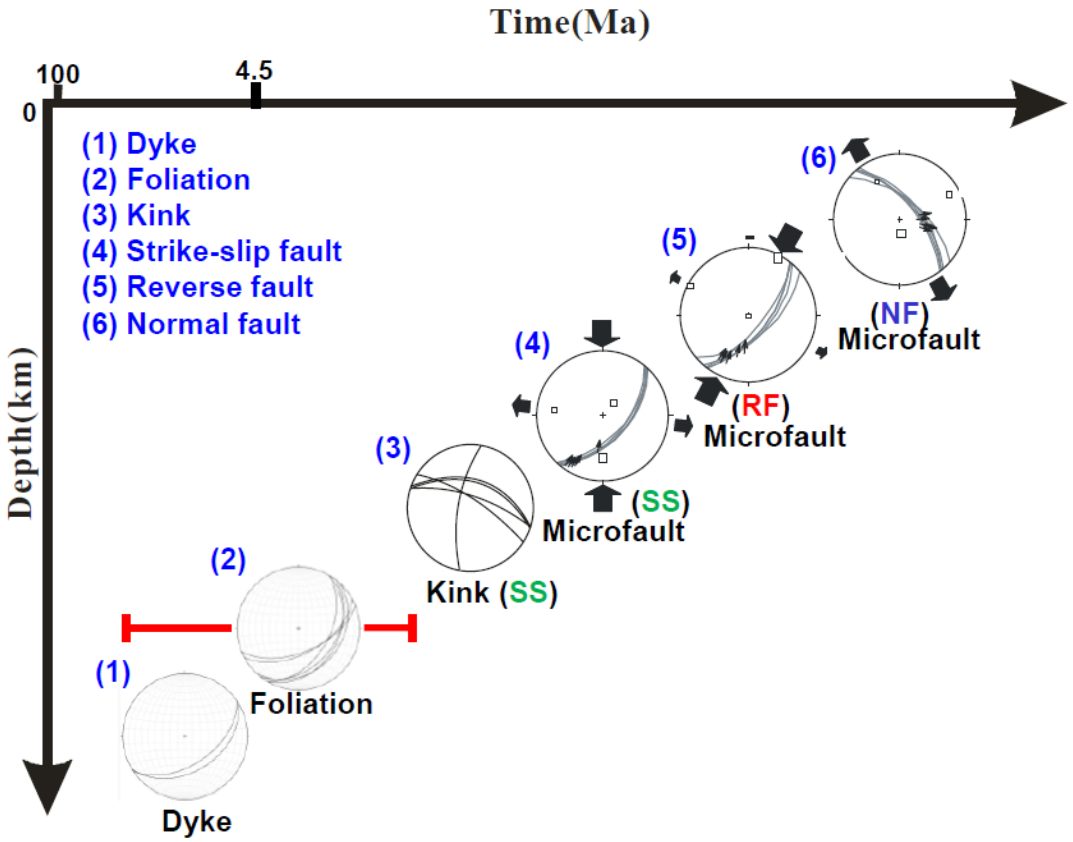


圖 3-34：花崗片麻岩體地質構造演化圖成果範例(源頭山)

註1：經野外構造截切關係，源頭山花崗片麻岩體所能觀察之構造演化序列為：基性岩脈、葉理構造、急折帶、走向滑移斷層、逆斷層(帶滑移分量)與正斷層構造。

註2：Microfault係指野外露頭或岩心中所能量測之擦痕證據(斷層擦痕、刮痕)，但此斷層的規模與尺度，並未達到中視或巨視尺度構造條件，故將此小尺度斷層構造定義為Microfault。

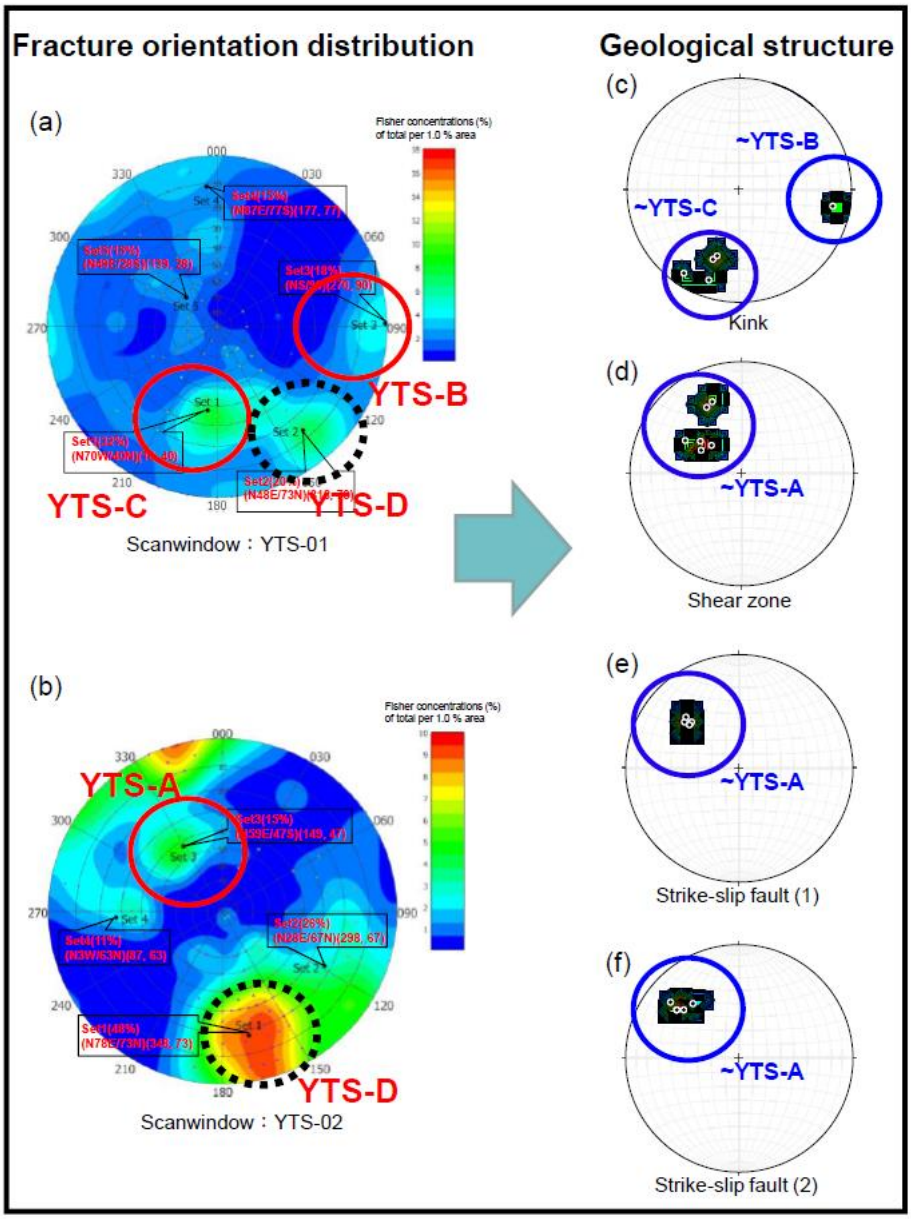


圖 3-35：花崗片麻岩體裂隙統計分析與地質構造成因探討成果範例(源頭山)

註1：YTS-A之裂隙叢集可能與剪切帶弱面脆性破裂或與後期斷層發育產生脆性破裂有所關聯。

註2：YTS-B與YTS-C叢集發育，經野外判釋與急折帶有所關聯。

註3：YTS-D叢集之成因與早期地質構造弱面破裂均無關聯性，應屬於後期直接發育之脆性節理或解壓作用所造成。

3.2.3. 裂隙岩體地下水流分析技術精進

針對地下水流場模擬探討參數不確定性與敏感度分析對其功能測度值的影響，用以加強模擬結果的論證基礎。主要以SNFD2017報告之參考案例的地下水流場模擬經驗為基礎，進行模擬區域的變化(如包含海域及不同的模擬深度)、邊界條件的改變(如定水頭或無水流邊界條件)，以及水文地質參數的變化(如多孔介質或裂隙岩體單元的水力傳導係數)。108年度工作成果說明如下：

(1) 模型之範圍邊界及條件

(a) 地表地形及輪廓數值檔

區域模擬僅需地表地形的大致輪廓，因此，採用NASA-ASTER計畫 (Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)所公開之K區的GDEM (Global Digital Elevation Map)地表地形資料，進行相關模式的建置；其解析度為100 m × 100 m的網格。

(b) 模型邊界及其可能的邊界條件

圖 3-36顯示K區數值模型的空間範圍，及其可能的邊界條件。在相關模式案例探討中，將改變相關邊界條件，進行其影響性的討論。

(i) 頂部邊界：頂部邊界設定為K區地表環境，平均地表溫度為23.5 ℃、壓力為1.013×10^5 Pa、平均年降雨入滲量為35 mm/yr。

(ii) 底部邊界：深度1,000 m，假設其邊界條件為無流邊界。

(iii) 西側邊界：西側邊界為陸地，對於此邊界條件有2個不同的假設及其對應的模擬計算：

- 假設西側邊界為無流邊界條件；考量K區東、西兩側地形差異不大，概略可視為東西對稱；基於數值模擬所需，將K區西側邊界條件簡化假設為無流邊界。
- 假設西側邊界為定水頭邊界。

(iv) 其他臨海側邊界：其他側邊界皆臨海，假設為定水頭邊界；對於臨海側邊界之海水深度有2個不同的假設及其對應的模擬計算：

- 假設海水深度1,000 m，其鹵水質量分率設為1。
- 假設海水深度僅70 m，沿海邊界僅地表表層的風化帶與海水接觸，其鹵水質量分率設為1；深度70 m以下到1,000 m間則為淡水，鹵水質量分率設為0。

(2) 模型之設計目的

根據對K區地質特性的基本認知，建立模型代碼RunSea_Base，並以此準依探討的不同議題分別修正其對應的模型設定，共建構6個不同模型。各模型之設計目的，說明如下：

(a) RumSea_Base模型之建構基礎，係根據對K區地質特性的現有基本認知，其模擬結果將做為其他模型的共同比較對象。

(b) RunSea_Mesh模型之設計目的，主要供了解不同數值網格系統的設計，其對模擬計算結果的影響性。

(c) RunSea_WBound模型之設計目的，主要供了解西側邊界條件之不同設定，其對模擬計算結果的影響性。

(d) RunSea_High模型之設計目的，主要供了解臨海側邊界條件之不同設定，其對模擬計算結果的影響性。

(e) RunSea_Partial模型之設計目的，主要供了解臨海側邊界條件之不同設定，其對模擬計算結果的影響性。

(f) RunSea_Partial_Tracer模型之設計目的，主要供了解在處置深度(約500m)之示蹤劑的可能遷移特性。

各模型的不同設計條件，彙整如表 3-6所示。上述不同模型之設計目的，除了供討論網格系統的影響性外，RunSea_WBound、RunSea_High及RunSea_Partial等模型，主要供討論邊界條件不確定性對模擬計算結果的影響性。

(3) 數值模式之建立及工具

本項目工作採用的地下水流場模擬工具為TOUGH2-MP(Zhang, et al., 2008)。輔以商業版的套裝軟體PetraSim(Thunderhead,

2017)，作為TOUGH2-MP的前處理(如網格產製及參數設定)，以及後處理(如計算結果的視覺化展示)的輔助工具。另外，採用TOUGH2-MP之EOS7模組(Prauss et al., 1999, p40)，進行地下水流場之數值模型建置與模擬計算，以EOS7特有之鹵水質量分率的計算結果，探討地下水流場、海水入侵現象及其模擬結果的合理性及不確定性。

(4) 模擬計算結果及討論

(a) 模型代碼RunSea_Base

海水的入侵現象，明顯與地表地形呈關聯性；地表高程越高的地方，其在500 m深度的水質越具有維持為淡水水質的趨勢。海水的入侵方向，分別與F1及F2的構造方向相似。

海水的入侵現象，明顯與主要導水構造(F1及F2)的位置呈關聯性；F1及F2構造因其水力傳導係數很高，且至少有一側與海岸線接觸，故在接觸側的海水入侵現象很明顯，連帶影響其周圍地層的水質(圖 3-37)。

SNFD2017參考案例之表二(地質概念模式及特性數據)的輔助說明報告中，指出：「位於太武山北側(即F1構造)的KMBH03及KMBH05的水質條件，明顯與位於南側的KMBH01, 04及06的水質有明顯不同，前者離子強度較高」(林鎮國等，2015，c3p56)。本模型案例計算結果可以發現具有類似的水質分布趨勢，亦即F1構造以北具有較高的鹵水濃度(即離子強度較高)，顯見主要導水構造(如F1及F2)確實可能會影響地下水質的分布特性。本模型案例計算結果雖然具有類似的水質分布趨勢，但根據K區的現地水質調查結果顯示，即便深度500 m的地下水，在KMBH05的地下水離子濃度雖然相對較高，但仍比海水的離子濃度低很多。

(b) 模型代碼RunSea_Mesh

模型代碼RunSea_Mesh與RunSea_Base兩者的差異，主要在網格系統的設計有所不同。RunSea_Mesh在X及Y方向，均採等間距方式產製網格系統，總計產出285,552個網格。

RunSea_Base在X方向均等間距，但在Y方向靠近F1及F2構造周圍地區，加密網格密度4倍，用以強化該地區的計算解析度，總計產出486,252個網格。

由鹵水質量分率分布情形比較發現：在網格密度差異區的某些地方，計算結果有很明顯的差異；而在網格密度沒有差異的地方，局部計算結果雖會有差異，但差異非常小。尤其是位於F1與F2構造之接觸帶處，因具有較複雜的地下水流場，故為造成計算結果明顯差異的原因。

大致而言，在網格密度沒有差異的地方，計算結果均大致相同，或難以明確的感受其差異性，僅局部有些微的差異性，此局部差異可能係因位於F1構造南側並鄰近西側邊界。

由計算結果可知，不同網格系統的設定，對模擬計算結果會產生一定程度的影響，此影響性稱之為數值擴散效應(Numerical Dispersion)(Fanchi, 2006, p167)。理論上，可透過網格的加密，降低數值擴散效應，但其代價是增加電腦記憶體及計算的負荷量；在有限的電腦計算能量下，迄今仍無最佳的網格系統建置方案。因此，後續幾個模型均採用與RunSea_Base相同的網格系統(486,252個網格)進行計算。

(c) 模型代碼RunSea_WBound

RunSea_WBound模型將RunSea_Base模型的西側邊界條件改為定水頭(淡水)。比較二者在深度500 m的鹵水質量分率分布，兩者的差異主要在西側邊界之鹵水質量分率的分布有所不同。在RunSea_WBound模型中，由於西側邊界改為定水頭的淡水，造成西側邊界之最左側的海水無法入侵，故導致西側海水入侵的的現象會較小且往右側稍微偏移。其他區域的鹵水質量分率分布，RunSea_WBound與RunSea_Base模型近乎一致，應是西側邊界與整個區域邊界比較起來，相對仍小，因此，西側邊界條件的改變對整體海水分布產生的影響不大，主要僅集中在西側局部區域。計算結果顯示，

RunSea_WBound與RunSea_Base之不同西側邊界條件的設定，對整體模擬計算結果，並不會產生重大的影響。

(d) 模型代碼RunSea_High

RunSea_High模型將RunSea_Base模型的海水邊界壓力條件加大20%，以探討側邊海水邊界條件設定對計算結果的影響性。比較二者於深度500 m的鹵水質量分率分布，可發現模式的計算結果符合預期：因為RunSea_High之海水壓力比正常值約高20%，RunSea_Base的海水壓力為正常值，故針對海水入滲現象，RunSea_High的海水滲入內陸的狀況比RunSea_Base深入許多。且RunSea_High中，因為受到較大的海水邊界壓力擠壓，明顯地，其淡、海水交界面碗狀形狀較為狹窄。

(e) 模型代碼RunSea_Partial

RunSea_Partial模型將RunSea_Base模型的臨海側邊界，修改為深度0 m到70 m為海水，70 m到1,000 m為淡水(原為0 m到1,000m均為海水的邊界條件)。在長期氣候變遷過程中，預期每10萬年會有一循環週期，K區現今的海島環境可能轉成內陸地區，因此，現今海島側面邊界的地下水，過去或未來有可能轉為淡水，而不是像現今被海水淹沒的狀態。透過對海水邊界條件的不同設定，上述2個模型之計算結果的差異，可供初步探討長時間氣候變遷，其對地下水流場的可能影響性。

比較二者在深度35 m之鹵水質量分率分布，顯示均在海岸附近的海水滲入狀況，仍甚是明顯，但相對而言，RunSea_Base海水入滲有較明顯入滲到內陸的現象。

比較二者在深度70 m之鹵水質量分率分布，在RunSea_Base模型的計算結果中，海水入滲較明顯，而在RunSea_Partial模型的計算結果中，沿海的鹵水質量分率分布反而變低，推測原因為：RunSea_Partial模型假設海水深度僅70 m，因此，

在深度70 m海、淡水交界處，海水可以往下流動，而沒有在海岸區域累積，因此，鹵水質量分率降低。

(f) 模型代碼RunSea_Partial_Tracer

RunSea_Partial_Tracer與RunSea_Partial的設定內容，除了以下條件外，其餘均相同：

(i) 起始條件不同；原RunSea_Partial模型的地下水流場計算至穩態之各網格的數值，作為RunSea_Partial_Tracer模型各網格的起始數值。

(ii) 在500 m深度的某些特定網格，設定起始的鹵水濃度為1，做為後續計算模擬過程的示蹤劑，其係以各鑽井BH-01-02-04、BH-03、BH-05以及BH-06為中心點，做十字型的鹵水布置。原RunSea_Partial模型的條件設定，使得其在模擬達穩態後，在500 m深度的水質仍然保持約為淡水，因此，若在此穩態之後，瞬間改變在500 m深度之某些特定網格的起始鹵水濃度為1，則隨後的計算結果，應可顯示出示蹤劑流動或被稀釋消散的過程。

模擬計算結果，係以BH-01-02-04、BH-03、BH-05及BH-06鑽井位置為中心，分別探討示蹤劑(鹵水)濃度在4個南北向剖面，以及4個東西向剖面中，示蹤劑濃度隨著時間(10,000年及20,000年)的變化情形，以及在深度500 m，示蹤劑濃度隨時間(500年、1,000年、10,000年及50,000年)的變化情形。結果如下：

(i) 示蹤劑(鹵水)在垂直方向之濃度隨時間的變化，顯示靠近邊界處，示蹤劑有向上傳輸之趨勢，表示靠近邊界處的水流具有向上的趨勢。但在其他位置，示蹤劑會朝上或朝下傳輸，表示內陸區位置的水流方向可能向上或向下。

(ii) 示蹤劑(鹵水)在水平方之濃度隨時間的變化，顯示示蹤劑的傳輸受到F1與F2的影響最大，示蹤劑在靠近F1與F2的位置，因為水流流速較高，易順著水流傳輸而很快

地被稀釋。但其他位置的示蹤劑，則因水流速度相對較低，傳輸速度較為緩慢，故隨著時間被消散的速度也較慢。

一旦核種因故自深地層的處置容器外洩後，核種會隨地下水在地層中遷移流動。RunSea_Partial-Tracer的模擬結果顯示，即便在相同深度，示蹤劑在不同的地點，會受到不同地下水流場的影響，其遷移流動的趨勢會有所不同，有的地點向上流動、有的地點向下流動。亦即，針對處置計畫所關切的核種傳輸趨勢，處置深度並非唯一的考量；在鄰近海淡水交界面，地下水會有向上流動遷移至生物圈的趨勢，因此，若要考量臨海的深層地質處置環境，則應該盡量避開海淡水交界面的影響區域。

(5) 研究結論

(a) RunSea_Base之海淡水界面的3D分布圖呈現碗型鏡面體的鹵水分布特性，海淡水介面的流場呈現往上流動的趨勢，顯示所使用之模擬工具(TOUGH2-MP)的計算結果，符合基本的物理原理，可作為地下水流場相關研究的模擬計算工具。

(b) 根據RunSea_Partial_Tracer的計算結果顯示，針對處置計畫所關切的核種傳輸趨勢，處置深度並非唯一的考量；在鄰近海淡水交界面，地下水會有向上流動遷移至生物圈的趨勢，因此，若要考量臨海的深層地質處置環境，則應該盡量避開海淡水交界面的影響區域。

(c) 根據RunSea_Base、RunSea_High及RunSea_Partial模型的計算結果顯示，不同臨海側邊界條件的設定，對地下水流場的模擬結果影響很大。

(d) 根據RunSea_Base的計算結果顯示，地表地形、主要導水構造(如F1及F2構造)及岩脈(如D1至D10)的特性與分布位置，對地下水流場具有重要的影響性。一旦核種因故自處置環境外洩後，主要導水構造有可能成為核種在地層傳輸的主要快速通道。

(e) 根據RunSea_Mesh模型的計算結果顯示，不同網格系統的設定，對模擬計算結果會有一定程度的影響。因此，建議未來的相關研究工作，在使用相同的地下水流場模擬器時，應該採用共同的網格系統，降低計算結果之互相比對或驗證的不確定性。

(f) 採用TOUGH2-MP做為地下水流場的模擬器，並輔以商業版的套裝軟體PetraSim作為TOUGH2-MP的前處理(如網格產製及參數設定)，以及後處理(如計算結果的視覺化展示)的輔助工具，可以大幅降低網格製作的負擔，加速相關研究的進行。

表 3-6：不同模型之邊界條件設定彙整表

模型代碼	邊界條件			
	頂部	底部	西側	其他臨海側邊
RunSea_Base	平均地表溫度為23.5 ℃、壓力為1.013 × 10^5 Pa、平均年降雨入滲量為35 mm/yr	無流	無流	定水頭，海水深度1,000 m
RunSea_Mesh			無流	定水頭，海水深度1,000 m
RunSea_WBound			定水頭	定水頭，海水深度1,000 m
RunSea_High			無流	定水頭，海水深度1,000 m，但增加約20%壓力
RunSea_Partial			無流	定水頭，海水深度70 m，深度70 m至1,000 m 為
RunSea_Partial_Tracer			無流	同上，但在深度500 m 的部分地點，施放示蹤劑

註：定水頭邊界條件，代表水壓僅隨深度(Z)而變，且其與不同深度流體之密度(ϱ)及重力加速度(g)均不隨時間而變動；$P=P0+\varrho gZ$。

註：無流邊界條件，代表水力傳導係數等於無限小，流體無法流過該邊界。

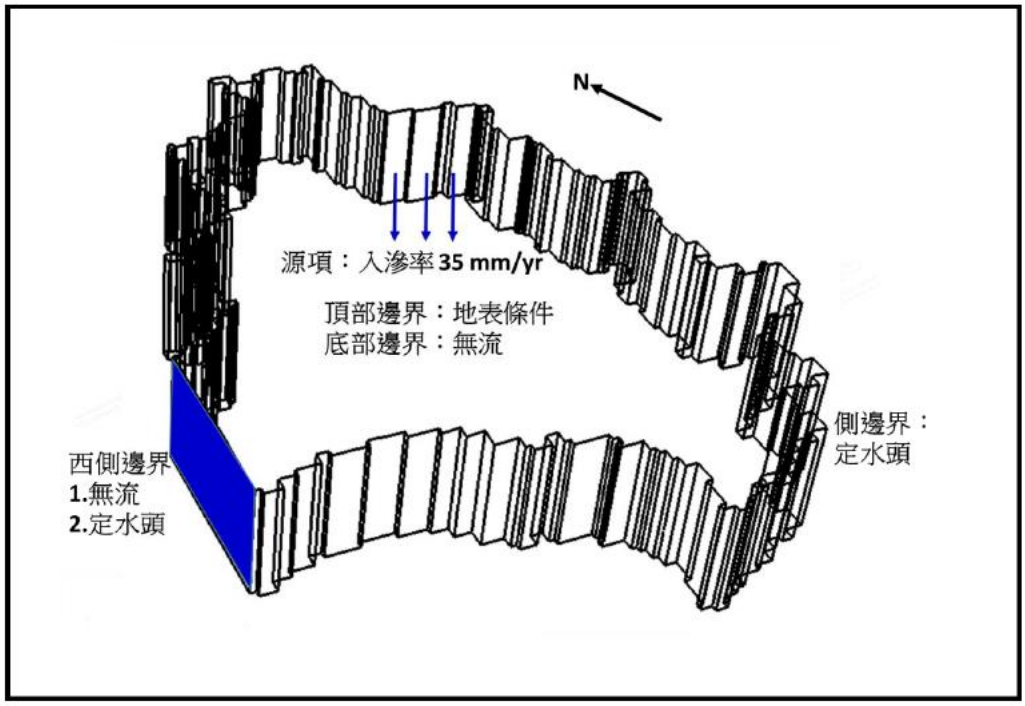


圖 3-36：K區數值模型的空間範圍及其可能的邊界條件

註：頂部邊界設為地表條件：地表溫度為23.5 ℃、壓力為1.013×10^5 Pa

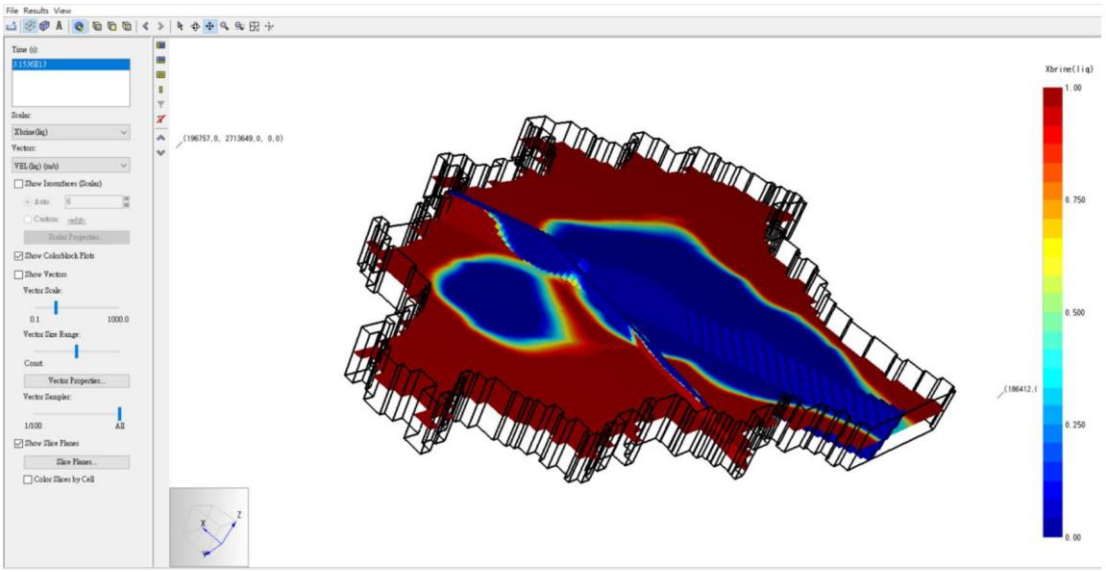


圖 3-37：RunSea_Base在深度500 m的鹵水質量分率分布圖

3.3. 長期監測

透過長時間累積足量之連續觀測結果，建立區域地表變形及地震相關資料，分析區域地表變形變化量及地震分布特性，進而瞭解區域應力與應變特性及相關背景資訊。

3.3.1. 全球衛星定位聯繫監測與時序分析

持續蒐集本計畫在臺灣本島花崗岩體地區之GPS連續觀測站資料，持續累積並進行觀測站長期性資料解析，提升資料解析之可信度。並利用GPS連續觀測站之三維坐標解算成果，分析觀測期間內之三維位移量及速度場變化，獲致臺灣本島花崗岩體區域之長期速度場變化趨勢。108年度工作成果說明如下：

(1) 地表變形連續觀測資料蒐集

(a) 挑選GPS連續觀測站須持續運轉累積期距至少3年以上的測站，資料持續無反覆中斷接收的情形，且近5年內仍有持續接收觀測資料之測站，以呈現研究區域較長期的三維速度場為主。

(b) 其他單位所屬GPS連續觀測站資料三維速度成果，資料來源為中研院地球所GPSLab與TGM(Taiwan Geodetic Model)資料平台。GPSLab與TGM資料平台所公布之測站三維坐標成果，除中研院地球所所屬測站外，亦包含部分其他單位所屬測站(如中央氣象局、中央地質調查所、內政部地政司等)。研究區域鄰近各連續觀測站相關資訊如坐標、所屬單位、天線型號、接收儀型號與天線柱基座形式(如表 3-7所示)。

(c) 臺灣本島東部花崗岩區域鄰近有氣象局於南澳地區設有NAAO站，至和平沖積扇區域設有HUAP站，往南立霧溪沖積扇區域設有CHNT站與中研院設置的SCHN站；再往中央山脈的方向，亦有氣象局陸續設置之BLOW站與SPAO站(如表3-7所示)。

(d) 由用過核子燃料最終處置計畫所建置之HGC系列GPS連續觀測站，觀測數據蒐集自100年8月迄108年3月底止，HGC1、

HGC2與HGC3等站已持續累積7年多的觀測資料；HGC4站於103年1月加入監測網，也已累積5年左右的觀測資料；至於後續建置的GPS連續觀測站，陸續於106年加入地表變形監測網，累積觀測資料僅2年左右。

(2) 地表變形連續觀測分析與成果

GPSLab與TGM資料平台的測站三維坐標時間序列，皆由精密單點定位方式所解算每日觀測資料之成果組成，為全球參考框架(IGS08)下的絕對坐標。本項目工作所取用其他單位GPS連續觀測測站速度數據，皆為經由網頁時序分析功能修正週期性及同震變形後的三維速度值。

挑選板塊邊界研究區域鄰近測站位置分布如**錯誤! 找不到參照來源。**藍色圓點所示測站相關資訊，如坐標、所屬單位、使用資料期距、三維方向速度值(V_N、V_E、V_h)，以及水平速度場角度等。分析研究區鄰近之GPS連續觀測站之水平方向與高程方向速度場，結果分別如圖 3-38 (a)與(b)所示，說明如下：

(a) 水平方向速度場成果說明

由水平方向速度場結果顯示宜蘭平原地區、南澳至花蓮地區、花東縱谷北端與中央山脈區域，分別呈現不同的速度值與位移方向(如圖 3-38(a)所示)。

(i) 宜蘭地區有較大的水平速度值，約介於37.7 mm/yr至63.6 mm/yr之間，大致往東南方向移動，宜蘭平原南部區域水平速度普遍大於宜蘭平原北部。

(ii) 南澳至花蓮新城沿海岸地區水平速度值漸小，由南澳站(NAAO)約49.6 mm/yr，往南至新城國小站(SCHN)約21.2 mm/yr，位移方向由東南方向至東南東方向再轉至東南方向。

(iii) 花蓮北埔至花東縱谷北端的沿岸地區，與第(ii)項區域相較水平速度值較小，但由北埔站(PEPU)約13.1 mm/yr，往南進入海岸山脈至水璉國中站(SHUL)約18.1 mm/yr，水平速度值漸大，大致呈東北方向移動；靠中央山

脈側的水平速度值較靠海岸山脈側小，往南同樣呈現水平速度值越大，由銅門站(TUNM)約7.8 mm/yr至鳳林站(FLNM)約10.5 mm/yr。

(iv) 往西至中央山脈北段區域，布洛灣站(BLOW)和西寶國小站(SPAO)水平速度值與位移方向差異不大，分別約為24.8 mm/yr與23.6 mm/yr，皆往東南東方向位移；往左接近脊梁山脈和雪山山脈交接地帶，由較北的牛鬥站(NIUT)約37.8 mm/yr，往南至合歡山站(HUAN)約13.4 mm/yr速度值漸小，且位移方向由東南東方向逐漸至東北方向。

(b) 高程方向速度場成果說明

研究區及其鄰近區域於沿岸均呈現沉陷趨勢，往內陸山區則呈現抬升趨勢(如圖 3-38(b)所示)。

(i) 宜蘭平原最大沉陷速率為宜蘭站(ILAN)約−8.2 mm/yr，往南至NAAO站約−4.5 mm/yr，沉陷速率漸小；和平國小站(HUAP)(約−2.5 mm/yr)、崇德站(CHNT)(約−2.4 mm/yr)與SCHN站(約−3.0 mm/yr)，花蓮和平至新城一帶呈現差異不大的速率值；至PEPU站約−0.8 mm/yr有最小沉陷速率，往南沉陷趨勢又逐漸增加，由花蓮站(HUAL)約−3.62 mm/yr至SHUL站至約−13.2 mm/yr。

(ii) 往西進入山區方向抬升速率漸增，由BLOW站約7.5 mm/yr、SPAO站約11.7 mm/yr，往西至南山站(NSAN)約11.7 mm/yr、武陵站(WULI)約7.7 mm/yr、環山站(HNSN)約8.8 mm/yr，呈現較大的抬升速率。

(iii) 以臺灣本島東部花崗岩區範圍而言，研究區北側(鄰近宜蘭平原)沉陷趨勢較南側(新城一帶)大，東側沿岸地區呈現沉陷趨勢，往西至中央山脈區域則為抬升趨勢。以臺灣本島東部花崗岩區域附近的垂直向速度場長期變化趨勢顯示，推測應受地體構造影響，與陳文山等(2018，p146)所指出關於菲律賓海板塊隱沒在脊梁山脈

下的西側邊界位置可能相似。另一方面，因地表的垂直變形相較於水平變形複雜，除了如同水平變形會受到一般構造活動的影響外，人為的因素如地下水抽取或其他因素導致的地下水位改變，甚至大規模地表坡面崩塌的發生，均會對地表垂直向變形產生顯著的變化，使得高程方向的影響因素較多亦較複雜(陳國華，2017，p50)。

表 3-7：研究區及鄰近區域之其它單位所屬GPS連續觀測站相關資訊

項次	測站代碼	站名	所屬單位	緯度(°)	經度(°)	測站高程(m)	初始接收時間	GPS天線型號	GPS接收儀型號	GPS天線柱基座形式
1	HANS	寒溪	CWB	24.60951	121.68714	194	2003.10.22	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
2	SUAO	蘇澳	CWB	24.59239	121.86707	24	1997.03.31	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
3	NAAO	南澳	CWB	24.44934	121.81021	25	2004.04.06	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
4	HUAP	和平國小	CWB	24.309	121.74944	43	2004.05.24	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
5	CHNT	崇德	CWB	24.14921	121.66189	38	2002.12.25	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
6	SCHN	新城國小	IES	24.12779	121.65159	52	2008.10.19	LEIAR25	TRIMBLE NETRS	屋頂型
7	PEPU	北埔	CWB	24.01788	121.61034	36	2001.10.31	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
8	HUAL	花蓮	CWB	23.97538	121.61351	46	1993.04.03	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	屋頂型
9	YENL	東管處	CWB	23.9035	121.60184	88	2003.01.01	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
10	SHUL	水璉國中	CWB	23.78761	121.56273	58	2005.07.01	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
11	SLIN	西林	CWB	23.81185	121.4414	202	2001.11.01	TRM115000.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
12	NDHU	東華大學	CWB	23.89724	121.55081	57	2005.03.30	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
13	FLNM	鳳林	MOI	23.7463	121.45335	138	1994.01.01	TPSCR3_GGD	TRIMBLE NETRS	水泥柱式
14	TUNM	銅門	CWB	23.96521	121.49358	195	2001.11.01	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
15	MFEN	梅峰	CWB	24.08216	121.17247	2236	2005.10.19	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
16	HUAN	合歡山	CWB	24.14347	121.27262	3421	2001.11.22	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
17	SPAO	西寶	CWB	24.20501	121.48486	984	2004.04.07	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
18	BLOW	布洛灣	CWB	24.17175	121.57124	375	2005.11.07	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
19	JYAN	佳陽	CWB	24.24247	121.22634	1967	2004.05.21	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
20	HNSN	環山	CWB	24.3377	121.30806	2002	2001.11.22	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
21	WULI	武陵	MOI	24.35228	121.30846	1790	2005.01.11	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	屋頂型
22	NIUT	牛鬥	CWB	24.63478	121.56158	386	2004.07.09	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
23	CLAN	棲蘭	CWB	24.60225	121.512	453	2005.01.05	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
24	NSAN	南山	CWB	24.4282	121.3828	1132	2006.12.05	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
25	SOFN	壽豐	MOI	23.87026	121.59816	58	2005.12.10	TRM57971.00	TRIMBLE NETR9	屋頂型
26	LTUN	羅東	CWB	24.70003	121.77162	28	2004.02.18	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
27	GS72	利澤國中	CGS	24.6647	121.8292	26	2011.09.22	TRM55971.00	TRIMBLE NETRS	地上型單柱式

表 3-8：研究區及鄰近區域之其它單位所屬GPS連續觀測站相關資訊 (續)

項次	測站代碼	站名	所屬單位	緯度(°)	經度(°)	測站高程(m)	初始接收時間	GPS天線型號	GPS接收儀型號	GPS天線柱基座形式
28	GS71	大隱國小	CGS	24.6675	121.7131	63	2011.09.22	TRM55971.00	TRIMBLE NETRS	地上型單柱式
29	SLNP	雙連埤	CWB	24.75311	121.63563	491	2004.02.26	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
30	YILN	宜蘭	MOI	24.74607	121.74565	64	2005.02.01	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	屋頂型
31	ILAN	宜蘭	CWB	24.76404	121.75662	28	1994.04.25	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
32	GS70	玉田國小	CGS	24.7967	121.7900	24	2011.09.23	TRM55971.00	TRIMBLE NETRS	地上型單柱式
33	I10R	太平山苗圃	IES	24.5278	121.5190	1428	2015.01.15	LEIAT504	TRIMBLE NETRS	屋頂型
34	BALN	上巴陵	CWB	24.69948	121.42612	1715	2006.12.25	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
35	THAI	泰崗	CWB	24.60712	121.29559	1520	2002.01.30	TRM115000.00	TRIMBLE NETRS	地上型深錨鋼架式
36	YLSS	三星國中	CWB	24.6679	121.653	123	2015.10.16	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	屋頂型
37	YNTS	圓通寺	CWB	24.8617	121.7789	487	2004.03.10	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
38	LSAN	廬山	IES	24.0293	121.1822	1497	2006.08.01	TRM57971.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式
39	TUCN	土場	CWB	24.5748	121.4961	395	2004.03.09	TRM41249.00	TRIMBLE NETRS	地上型鋼架式

註：單位名稱縮寫：中央氣象局(CWB)、內政部地政司(MOI)、中央地質調查所(CGS)、中央研究院地球所(IES)。

資料來源：TGM平台(http://gdbweb.earth.sinica.edu.tw/TGM/)、中央氣象局地震測報中心(http://earthquake.cwb.gov.tw/zh-tw/station)、內政部國土測繪中心(2007，第14頁)、李宥葭 (2018，第7-20頁)。

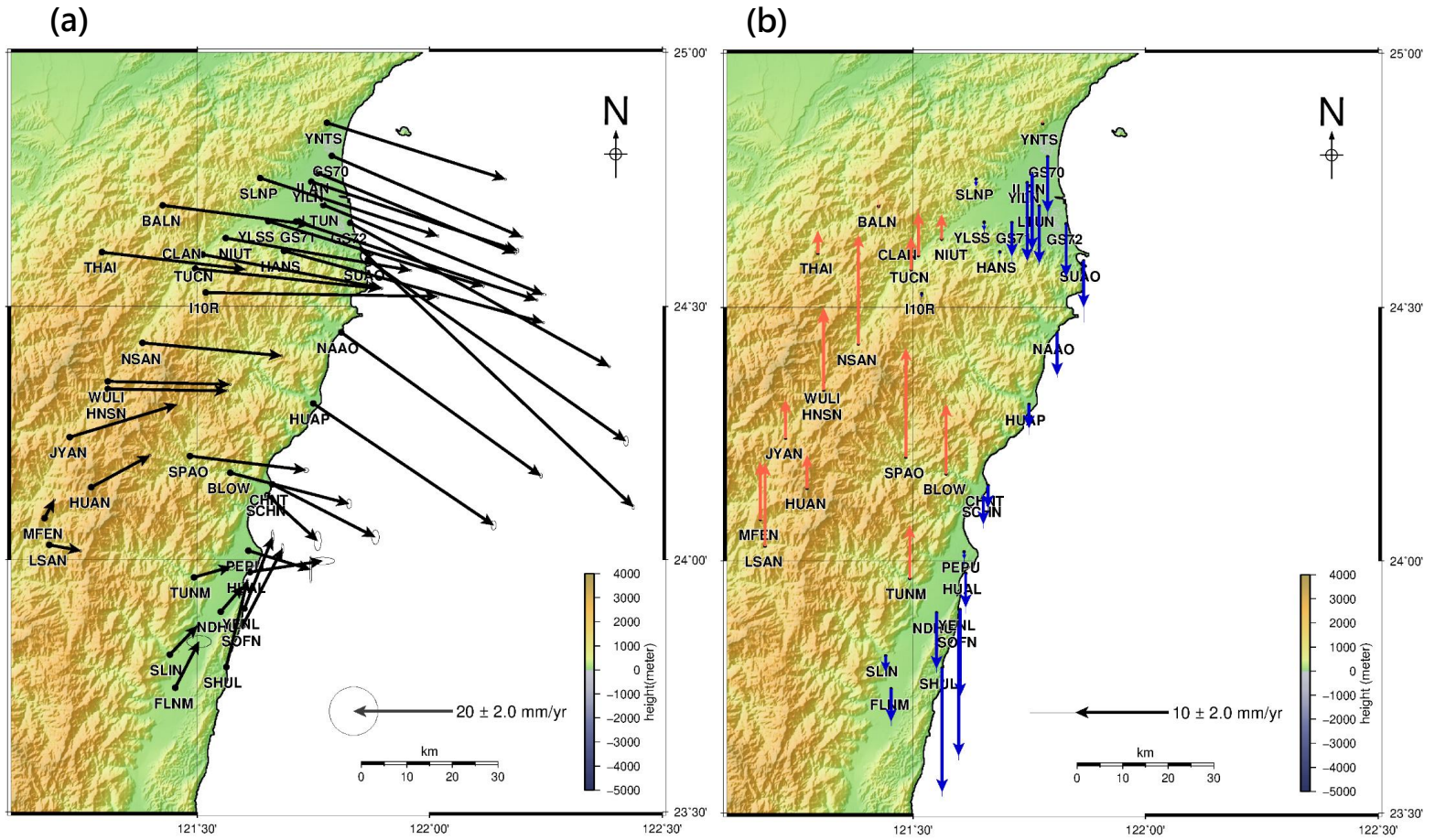


圖 3-38：研究區及鄰近區域之水平向與垂直向速度場

註：(a)水平向速度場；(b) 垂直向速度場(藍色箭頭表示沉陷，橘色箭頭表示抬升)。

3.3.2. 微震監測及資料解析

持續微震監測網的穩定作業與累積微震監測資料，並將地震資料進行前處理及演算，包含波相撿拾(waveform picking)、地震定位(earthquake location)、波形反演(waveform inversion)等資料處理。增加震源機制解的解算筆數，並針對地震叢集進行系統化統計分析。108年度工作成果說明如下：

(1) 微震連續觀測資料蒐集

完成蒐集板塊邊界研究區域中微震觀測網近5年之觀測數據，蒐集的資料當中，最早的測站建置時間可追溯自100年，並逐年增加測站數量，持續累積連續觀測資料，此觀測網具備近場且觀測密度及包覆度高之優勢，可詳實記錄目標岩體及其板塊邊界區域發生之微弱地震，無論在觀測能力與定位精度上，均達到H區岩體穩定性觀測之目的。所蒐集之觀測資料包含工業技術研究院(16站)、中央研究院(4站)、國立中正大學(3站)等國內研究單位的23個寬頻微震觀測站(圖 3-39)，且為了提高所收集地震波訊號品質，測站當中更包含兩座海拔2,800 m以上的高山站，分別位於南湖北山及畢祿山，連續記錄揀選區域微小地震活動，期能提供後續地質穩定性分析。而後於地震定位時加入鄰近地震測站共10站資料以提高精確度，期藉由所蒐集的連續觀測資料建立完整地震叢集資訊，並探討板塊邊界的孕震機制與地殼活動構造特性。

(2) 微震連續觀測資料分析與成果

(a) 地震震源叢集分布(平面分布與深度分布)

依據前述蒐集之連續觀測資料，收錄自2015年7月至2019年6月近5年資料期間，從連續波形資料中選取出微震事件的P波、S波初動時間，逆推地震發震時間與震源位置，並計算地震規模，以進行地震目錄資料庫建構。所彙整收錄之地震活動分布如圖 3-40所示，觀察震源分布情形，震源深度主要分布淺於30 km，投影至地表後可見地震多分布於南澳至和平沿海地區，推測為板塊交界處，主要發震機制由板塊構造活動如碰撞、隱沒所引起。觀測區西側，另有一群地震事件

叢集，該叢集震源深度相較於沿海地區較淺，大約集中分布於深度2 km至8 km間，此地震群可能肇因於高磁力基盤(海洋板塊)與較軟弱岩體(如蛇綠岩系或板片岩類)接觸應力集中之破裂行為有關。此兩地震業集間，呈現地震相對安靜帶(relatively aseismic zone)之特徵，此區域地震發生頻率明顯偏低，據本島東部花崗岩體地震活動研究指出(台灣電力公司，2019)，可能與本島花崗岩體存在有關。

(b) 地震資料系統化統計分析

彙整之地震連續資料進行挑選判釋後，初步分析針對地震發生個數進行時序統計分析，由於所蒐集之資料依據分析完整度，可分為兩類區間，其一，地震事件記錄時間起自2015年07月至2018年3月，此時間區段已完成人工篩選資料品質，每個月平均為一千餘起地震發生，直至2018年2月發生花蓮地震後，造成觀測區域內數量異常增加至一萬餘起地震；其二，地震事件自2018年04月記錄至2019年6月，因本案執行期程因素(得標日60天內需提交本期初成果報告)，故僅針對到時振幅明確之波型資料進行初步挑選及判釋，因地震目錄尚未完整僅供參考。觀察地震數量時序統計結果，可見2018年11月與2019年4月地震數量異常增加，前者與2018年11月宜蘭海域連續三起地震事件有關(中央氣象局2018年第128至130號有感地震)；而後者則與2019年4月18日第031號花蓮秀林地震有關，其地震規模為6.3，震源深度為19 km，待地震目錄得以完整分析後，便可深入探討主、餘震序列與斷層機制及潛在構造關係。

(c) 潛在構造分布評估

微震與斷層裂隙之關係，往往起因於板塊邊界鄰近岩體受應力破壞之表現，而岩體內裂隙發育與區域應力集中直接關係。本工作項目為進一步了解震源與潛在構造分布之關係，將透過不同視角觀測地震事件的三維空間分布特性(圖

3-41)，並以顏色色階標示不同深度之震源位置，進行潛在構造初步評估。

觀察東側地震叢集帶，有明顯的北北東-南南西之線形特徵，位於海岸山脈與中央脊梁山脈之縫合帶向北延伸之地帶，地震多發生於和平溪口，南北向沿海岸線分布。此區域地震成因及叢集分布型態，與隱沒板塊邊界(圖 3-41(a)及(c)，隱沒位態)、覆瓦狀構造模式圖 3-41(b)及(d)，灰色線段)，或不同岩性如花崗岩與其圍岩(包括片岩、大理岩等)的接觸帶，及其圍岩內部有關；其中，觀察隱沒板塊邊界特性，可見地震叢集明顯與琉球隱沒構造相符，呈現向西北傾沒之特徵(圖 3-41 (a)及(c))，對比所蒐集的文獻中，Huang et al. (2014, p177-p191)所提出的板塊邊邊界構造理論模型，同樣指出菲律賓海板塊自板塊前緣基盤上方，向北隱沒至歐亞大陸板塊下方，並以向西傾的方式在北臺灣下方產生碰撞，因此，產生沿板塊邊界排列的地震事件。

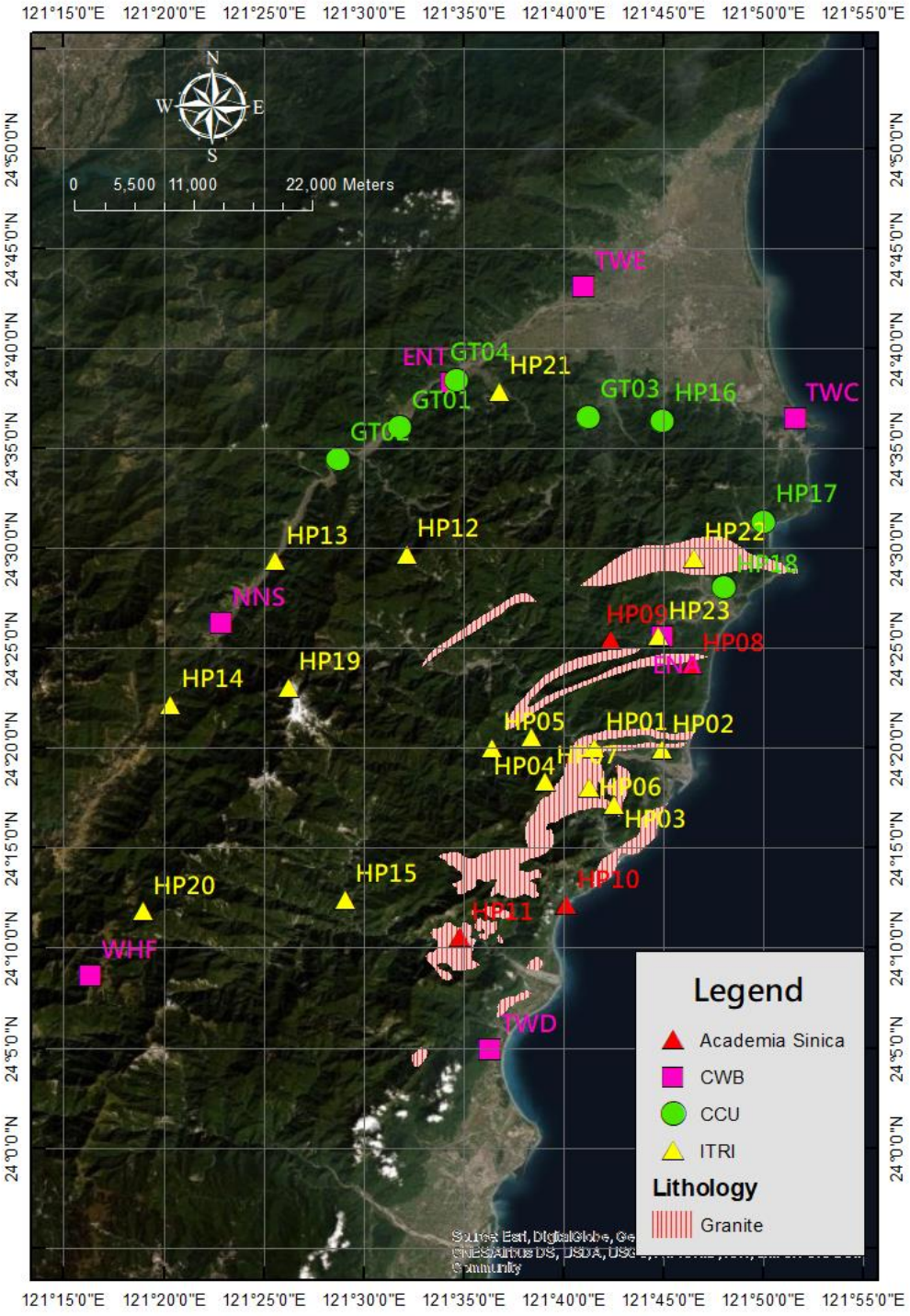


圖 3-39：板塊邊界指定區域測站分布圖

註：紅色三角形為中央研究院觀測站；桃紅色方形為中央氣象局觀測站；綠色圓圈為國立中正大學觀測站；黃色三角形為工業技術研究院觀測站。白底紅線條區塊為臺灣東部花崗岩體，，由北至南分別為源頭山、奇瑤谷、飯包尖山、和平、開南岡、溪畔等岩體。

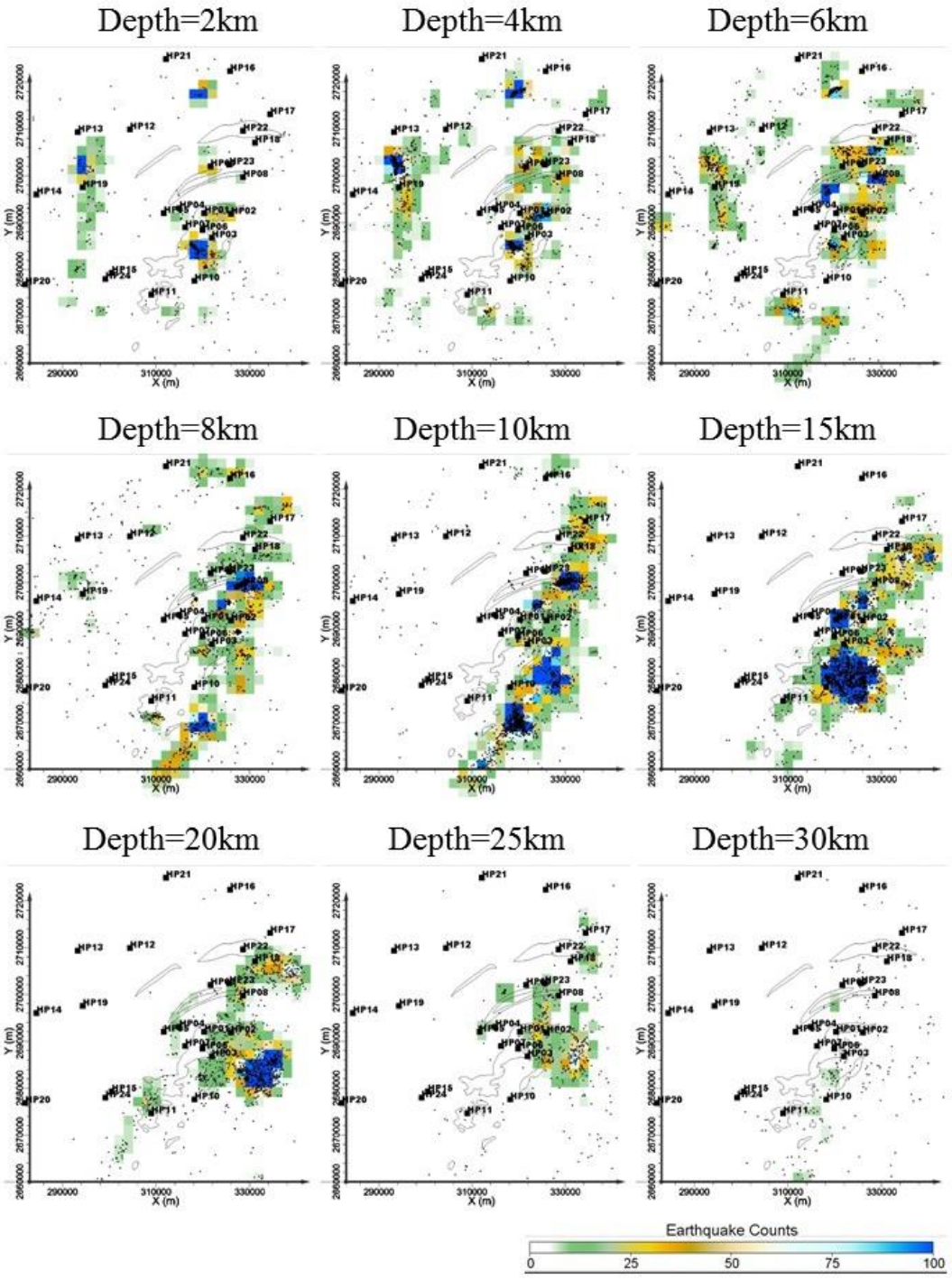


圖 3-40：震源叢集分布切面圖

註：不同深度切面上，以顏色標示水平與垂直方向鄰近2 km網格內地震個數。黑線線段圈選區塊為地表出露之花崗岩體。黑色方塊為測站分布點位。

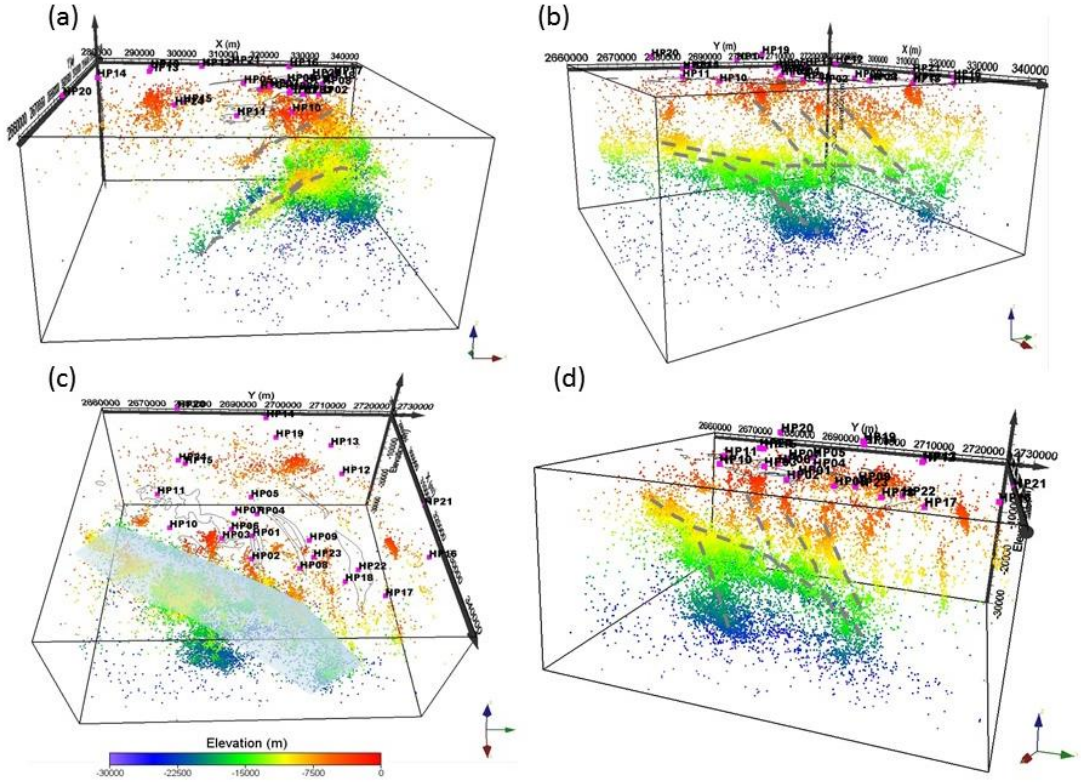


圖 3-41：地震震源三維空間分布

註：色階標示深度為0 km至30 km之震源，(a)-(d)分別為三維空間逆時針不同視角。(a)為由南向北；(b)為由東南向西北；(c)為由東往西高角度俯視；(d)為由東北往西南視角。灰色虛線代表地震密集帶，可能為潛在構造。

3.4. 岩石力學描述模型

本項目工作之目標在於系統性地蒐集並補充岩石力學相關本土數據，以持續發展具本土特性之岩石力學描述模型。

3.4.1. 岩石力學調查技術演練與發展

本項岩石力學調查技術為四年之研究發展規劃，可細分為下列主要目標：(1)建立各項試驗調查技術之標準作業程序；(2)蒐集目前不同岩層環境之各項試驗及調查技術成果；(3)進行岩樣實驗室試驗，量測其物理與力學特性；(4)選擇特定井場執行現地調查技術演練，並探討各項調查技術之不確定性。本年度成果著重於建立標準作業程序及以蒐集過去調查數據資料為基礎，探討參數特性對空間分布之影響，而針對岩樣實驗室試驗部分，論述內容以執行方法內容(包含限制條件、影響因子及衍生誤差等)為主，而109年度將進行岩樣實驗室試驗，增加實際試驗成果。

本工作茲將各項成果及過去已完成之現地試驗項目，例如：地溫梯度量測、自然加馬射線量測等結果彙整如後。

(1) 建立現地試驗之標準程序與輸出資料之文件規範

本工作已蒐集國際岩石力學試驗協會(ISRM)規範，針對場址調查需執行之孔內探測技術，包括孔內攝影、井徑、自然加馬及孔內溫度量測等，研擬其在使用設備、試驗程序、儀器校正、吊放速度及鑽孔條件之規定，以建立本工作現地孔內試驗之標準程序與輸出資料的文件規範，並提升調查成果的正確性及代表性，各試驗項目及參考規範彙整如表 3-9所示。

規範內載明之鑽孔條件諸如鑽進的轉速、孔徑、孔內地下水質、使用添加物(如皂土)等對於調查成果品質影響甚鉅，因此在鑽探過程需控制得宜，倘若遭遇孔壁坍塌造成孔內地球物理試驗側錄不完全或因水質不佳導致結果失真等情況，均有提供因應之道。此外，規範針對施測程序、吊放速度，探測儀校正與紀錄要項等亦有明確之規定。本工作已初步制定試驗程序，同時將上述重要環節納入，冀以建立符合高放處置場址現地試驗之作業程序及數

據紀錄規範，提升試驗品質及成果之代表性，各試驗結果分述如下：

(a) 孔內攝影技術

以連續掃描鑽孔影像剖面來獲取鑽孔岩層狀況、特殊地質構造、節理以及裂隙分布情形，以評估岩層破碎程度與地質構造描述，並分析場址主要不連續面位態及叢集，另可進一步搭配地表露頭調查資料，統計歸納獲得具代表性之離散裂隙網路參數集。試驗設備包含孔內攝影探測儀、鎧裝鋼纜線(armoured cable)、鋼纜絞盤(winch)、三腳架、測深轉盤(mast)、供電系統及資料紀錄器。其中，探測儀依探測原理不同可分為音射式(acoustic televiewer)及光學式(optical televiewer)2種形式，適用的孔徑範圍為42 mm至180 mm，其中孔徑<110 mm的影像品質較佳；而測深轉盤內建滑輪(sheave)，可記錄探測深度。調查程序如下：

(i) 鑽井

鑽進時保持穩定，轉速應低於600 rpm以使鑽孔表面平順，如上方為土層或風化岩屑層可採用套管保護(lining)。

(ii) 鑽孔處理

鑽井完成後應以清水將岩屑及沉積物洗出，尤其添加皂土時應特別將該區段清洗，如鑽孔嚴重崩塌導致探測儀無法順利下放，則需再下放鑽桿處理之。

(iii) 分析岩心紀錄及地質柱狀圖，瞭解地層及地下水狀況，岩心是否因鑽探造成缺陷，記錄不連續面的深度、位態及開口寬度(aperture)。

(iv) 於鑽孔上方組裝測深轉盤及三腳架，並調整使其對準鑽孔中心，其後將探測儀吊放在鑽孔適當位置。

(v) 連接所有電源線、影像及深度訊號傳輸線，並透過電腦介面確認已成功連結。啟動探測儀及資料紀錄器電源，將初始深度歸零後開始進行影像掃描。

(vi) 掃描過程探測儀應緩慢下放，吊放速度保持穩定，一般建議低於1.5 m/min以獲得較佳之解析度。

(vii) 建議於側錄時記錄地下水、岩體完整度或裂隙狀況。

(viii) 待全孔側錄完成後將掃描影像存檔，關閉探測儀及紀錄器的電源，妥善的將探測儀自孔中取出。

(ix) 其他紀錄資料

孔位、孔號、深度、直徑、傾斜度、鑽孔漿液、套管及灌漿深度、地質特性。

(b) 自然加馬井測技術

量測鑽孔內地層釋放的自然加馬射線強度，透過訊號隨深度的剖面變化來界定場址的岩性分布，作為場址描述模型分層、訊號與岩性關聯性分析、鑽探岩心判釋補遺之依據。試驗設備包含電測儀(electrical probe)、裝甲鋼纜線、鋼纜絞盤、三腳架、測深轉盤、地表供電系統，資料紀錄器。其中，電測儀包含前置之放大器(preamplifer)，通常使用蓋革-米勒計數器(Geiger-Müller counter)量測地層的加馬射線。試驗程序如下：

(i) 決定時間常數

選擇合適的時間常數(Time Constant, T.C.)來減少計數率(rate of counting)的波動，通常介於2 s至4 s。

(ii) 於鑽孔上方組裝測深轉盤及三腳架，並調整使其對準鑽孔中心，其後將探測儀吊放在鑽孔適當位置。

(iii) 連接所有電源線及訊號傳輸線，並透過電腦介面確認已成功連結。啟動探測儀及資料紀錄器電源，將初始深度歸零後開始進行側錄。

(iv) 掃描過程探測儀應緩慢下放，吊放速度通常為0.3 m/T.C. (當時間常數為2 s時，吊放速度約9 m/min)。

(v) 記錄加馬射線隨深度變化，建議於某特定區段測試2次以檢視是否有資料變異(fluctuations)情形。

(vi) 可在試驗前後利用已知強度的放射源，調整探測儀與其保持固定距離來校正訊號。

(vii) 其他紀錄資料

孔位、孔號、深度、直徑、傾斜度、鑽孔漿液、套管及灌漿深度、地質特性。

(c) 井徑井測技術

利用高解析度井徑探測儀來量測鑽孔的井徑剖面，同時交互比對孔內攝影結果，做為探討現地應力方向、不連續面數量及出現頻率關聯性分析之依據。試驗設備包含井徑探測儀(caliper probe)、鋼纜絞盤、三腳架、測深轉盤、地表供電系統，資料紀錄器。其中，井徑探測儀應具3軸至6軸彈簧臂以量測井徑。試驗程序如下：

(i) 探測儀校正

採用已知內徑的大小金屬環來校正探測儀的井徑量測值(至少2次)，其中大環的內徑需大於鑽孔孔徑最大值，小環的內徑則須小於鑽孔孔徑最小值。

(ii) 如探測儀有方向指示器(如陀螺儀)，須於探測前校正。

(iii) 於鑽孔上方組裝測深轉盤及三腳架，並調整使其對準鑽孔中心，收縮彈簧臂後將探測儀下放至鑽孔底端初始位置。

(iv) 連接所有電源線及訊號傳輸線，並透過電腦介面確認已成功連結。啟動探測儀及資料紀錄器電源，將初始深度歸零。

(v) 打開彈簧臂，將探測儀以4 m/min至20 m/min的速度拉升，記錄井徑隨深度變化。

(vi) 其他紀錄資料

孔位、孔號、深度、傾斜度及方向、鑽頭尺寸、套管深度及內徑、吊放速度。

(d) 地下水溫度井測技術

利用高解析度探測儀來量測鑽孔地下水的溫度剖面。試驗設備包含溫度探測儀(temperature probe)、鋼纜絞盤、三腳架、測深轉盤、地表供電系統，資料紀錄器。其中，溫度探測儀內建1個(或多個)溫度計或熱感應器(thermistor)量測溫度。試驗程序如下：

(i) 於鑽孔上方組裝測深轉盤及三腳架，並調整使其對準鑽孔中心。

(ii) 連接所有電源線及訊號傳輸線，並透過電腦介面確認已成功連結。啟動探測儀及資料紀錄器電源，將初始深度歸零。

(iii) 依實際狀況或在熱感應器時間常數允許的情況下，盡可能以最慢的速度吊放探測儀，過快的速度會造成熱狀態(thermal regime)的擾動。

(iv) 記錄溫度及溫度梯度隨深度變化。

(v) 其他紀錄資料

孔位、孔號、深度、孔徑、傾斜度及方向、鑽孔漿液、鑽孔水質、套管深度及內徑、鑽孔水質及水位至穩定所需時間、吊放速度。

(2) 現地試驗數據分析

本工作考量台灣尚無特定最終處置場址，現地調查資料已逾15年未更新，而上述井測調查技術近年來均曾於臺灣本島裂隙岩體執行，因此本工作將蒐集近期調查數據資料，藉以探討試驗技術限制，調查的鑽孔深度為100 m，場址地層岩性以片麻岩為主，使用的探測設備為英國Robertson Geologging生產，包括音射式孔內攝影儀、光學式孔內攝影儀、電測儀、四軸井徑探測儀、溫度探測儀，其訊號原理及調查成果在水文地質特性之判釋彙整如表3-10所示。

透過後處理程式WellCAD可將眾多調查成果整合，以利進行資料判釋工作，如圖 3-42所示。調查結果自左至右依序為加馬射線、井徑、溫度、音射式及光學式孔內影像隨深度剖面，首先由加馬

射線的側錄結果可知整孔訊號的變化不大，說明場址的岩性一致，皆以片麻岩為主。而透過井徑訊號可知在5 m、9 m、64.5 m、83.5 m、90 m及91 m陡增，說明這些區段因岩層破碎或具有開口裂隙造成井徑彈簧臂的變動，相較之下其他區段的井徑變化不大，說明岩盤甚為完整緻密，此現象亦可透過孔內攝影調查檢視，亦即上述的破碎區段之裂隙(或破碎帶)皆顯現在掃描的影像中。如將孔內影像的尺度放大檢視，可清楚窺探裂隙的各種特徵，以本孔89 m至91 m為例(圖 3-43)，音射影像藉其色階之差異可迅速標定裂隙位置、寬度及位態，而光學影像更可進而研判一些特殊的地質構造，如破碎帶泥質填充或夾薄層石英等情形。最後由溫度的調查可知地下水溫度及溫度梯度均無明顯的變化，研判本孔在岩盤裂隙網路不發達的情況下未具有良好的水力連通性，不易迫使地下水在孔內流動而造成流體溫度的擾動。

此外，由音射式孔內影像可發現自35 m以下呈現明顯的暗色軌跡，其對稱方向為東北-西南向，而交互比對井徑調查結果可知鑽孔在兩正交方向的井徑具4 mm之差異，其中短軸(x軸)方向為東南-西北向(介於120°至150°)，因此與其正交的長軸方向(y軸)可判定為東北-西南向(介於30°至60°)，此現象與孔內影像的特徵一致，說明鑽孔有可能因東南-西北向的現地應力作用使鑽孔產生破裂(breakout)，惟此結果仍需仰賴更多的探測及判釋經驗而定，同時統計不連續面位態分布結果做驗證。

基於現有之經驗，本工作針對以上調查技術分別提出調查技術限制、影響因子及衍生之誤差，茲整理如下：

(a) 音射式孔內攝影技術

(i) 鑒於聲波需要水做為訊號傳遞的媒介，因此僅適合在有地下水的裸孔施測。

(ii) 質地過度軟弱、膠結不佳或剪裂泥充斥的沉積岩(如砂質泥岩或細砂岩)，其聲波反射訊號往往會因為偏低而導致影像中的裂隙難以分辨。

(iii) 鑽探使用之皂土常黏著於孔壁不易清洗，過度使用會大面積的遮蓋孔壁表面，以致無法取得真實的影像。

(iv) 探測儀於鑽孔應置中，以避免聲波振幅因偏心造成強弱不均的情形。

(v) 陀螺儀應校正以避免產生量測位態之偏差。

(vi) 量測時避免周遭環境金屬物質對陀螺儀造成影響。

(b) 光學式孔內攝影技術

(i) 僅適合在裸孔中施測。

(ii) 於地下水位面以下探測時，如水質過度混濁將導致影像失真。

(iii) 吊放速度過快會影響影像的解析度。

(iv) 光源的亮度與曝光度控制不當會造成特殊地質材料的誤判。

(v) 探測儀於鑽孔應置中，以避免影像解析度及曝光不均的情形。

(vi) 陀螺儀應校正以避免產生位態之偏差。

(vii) 量測時避免周遭環境金屬物質對陀螺儀造成影響。

(c) 自然加馬井測技術

(i) 套管內的探測結果會使實際訊號產生小幅度的偏移。

(ii) 鑽孔皂土或超泥漿過度使用有可能影響訊號結果。

(iii) 檢測放射源強度以避免訊號之偏差。

(d) 井徑井測技術

(i) 僅適合在裸孔施作。

(ii) 兩正交方向的井徑量測結果需校正，以確認其誤差係來自於鑽孔。

(iii) 使用之鑽頭(drilling bit)應確保孔徑完全一致，否則會造成結果之誤判。

(iv) 陀螺儀應校正以避免產生量測位態之偏差。

(v) 量測時避免周遭環境金屬物質對陀螺儀造成影響。

(e) 地下水溫度井測技術

(i) 僅適合在有地下水的裸孔施測。

(ii) 如在鑽井過程施加皂土或超泥漿會影響水質及溫度的反應。

(iii) 吊放速度過快會擾動水體產生溫度的偏差。

(iv) 鑽探如有灌漿會改變自然流場的地下水流路徑而影響調查結果。

(3) 建立試驗室岩心樣本性質分析與量測標準程序

試驗室岩心樣本物理及力學性質分析與量測方面，本工作已蒐集美國材料和試驗學會(ASTM)、國際岩石力學試驗協會(ISRM)、ISO國際標準機構訂定之規範以及芬蘭放射性廢棄物管理公司POSIVA之研究報告，針對一般物理性試驗、消散耐久性試驗、單軸壓縮試驗、三軸壓縮試驗、巴西試驗、岩石直接剪力試驗、靜彈性模數試驗、動彈性模數試驗、熱傳導及熱擴散試驗，研擬其在使用設備、量測元件、試驗程序、參數紀錄等規定，以建立岩石力學試驗之標準程序與輸出資料的文件規範，提升本工作試驗成果的正確性及代表性，各試驗項目及參考規範彙整如表 3-11所示。

本工作已研擬上述規範，首先將設備規格、感應元件的量測範圍及精度、試體重量及尺寸、加(解)壓速率、試驗時間及記錄頻率等規定具體量化，隨後再依照規範制定試驗程序，以做為本工作試驗室軟硬體設備及施作要點遵循之依據，同時建立符合高放處置品質岩石力學試驗之作業程序及數據紀錄規範，提升試驗品質及成果之代表性，各試驗結果分述如下：

(a) 岩石一般物理性質試驗

包含岩心之單位重、含水量、比重、吸水率、孔隙率等岩石一般物理性質參數。試驗設備包含烘箱(溫度維持105 ℃，24 h內誤差<3 ℃)、電子秤(精度達0.01%)、游標卡尺(精度達0.1 mm)、乾燥器(dessicator)、真空飽和設備(提供至少600 Pa之真空壓)及試驗皿。試驗程序如下：

(i) 含水量量測：

- 清洗試驗皿並氣乾，求取其重量。
- 取具代表性之試體至於試驗皿中，求取試體與皿的重量。
- 將試體與皿置於105 ℃烘箱，取出後至於乾燥器30 min求取重量。

(ii) 孔隙率及單位重量測：

- 取代表性的試體，以卡尺量測尺寸求取試體體積。
- 將試體浸置在低於600 Pa真空壓之水中至少1 h。
- 將試體自水中取出，擦拭試體表面水，量測飽和試體重。
- 將試體及皿置入105 ℃烘箱內，其後在乾燥器中冷卻試體30 min，求取乾試體重。

(iii) 孔隙指數量測：

- 取代表性的試體，置於裝滿乾燥劑的皿中氣乾24 h。
- 將試體取出，用毛刷去除試體表面岩屑及乾燥劑後求得乾試體重。
- 將試體放回皿中，於皿中加水使試體完全浸於水中1 h。
- 將試體自水中取出並擦拭表面水，求取浸水後之飽和試體重。

(b) 岩石消散耐久試驗

測定岩石材料之消散耐久性指數，藉以了解岩石於標準循環下，所能提供對軟化與解體之抗力及岩石的膠結狀況。試驗設備包含消散耐久儀(軸承馬達轉速20 rpm，10 min內誤差<5%，旋轉軸承須高於槽內水位20 mm)、篩筒(篩網間距2 mm，即No.10)、長度100 mm、直徑140 mm、耐溫110±5 ℃，下緣須高於水槽底端40 mm)、烘箱(溫度維持維持110±5 ℃)、電子秤(靈敏度達1 g，最大量測重量2000 g)。試驗程序如下：

(i) 取10個試體，每塊重量40 g至60 g，總重450 g至550 g，磨除銳角使試體近似圓球狀。

(ii) 將試體置於篩筒，置入烘箱2 h至6 h，求取試驗前乾試體重。

(iii) 將篩筒安裝於消散耐久儀，倒入蒸餾水(水位低於軸承20 mm)進行試驗，旋轉速度應於10 min內旋轉200圈。

(iv) 取下篩筒置入烘箱，求取乾試體重。

(v) 重複(iii)至(iv)，記錄第二次循環乾試體重。

(vi) 將試體自篩筒清空，記錄篩筒重。

(c) 岩石單軸壓縮試驗

本試驗係為求取岩石材料之單軸抗壓強度。試驗設備包含壓力機(應力速率介於0.5 MPa/s至1.0 MPa/s)、位移感應計(當應變讀值大於250×10^{-6}時，解析度至少25×10^{-6}，精度<2%；當應變讀值小於250×10^{-6}時，解析度及精度<5×10^{-6})。試驗程序如下：

(i) 取長徑比為2:1或2.5:1之試體(不得低於2:1)，試體側向垂直偏差不得大於0.5 mm，試體底端與軸向的垂直偏差不得超過0.25°。

(ii) 將試體置於壓力機，依固定應力速率(0.5 MPa/s至1.0 MPa/s)或應變速率施壓，其不論是應力或應變於試驗過程之偏差不得超過10%，試體須在2 min至15 min內達到破壞。

(iii) 荷重記讀頻率係以在整段加壓過程平均劃分時距，至少記錄10次，如採用自動紀錄系統，其精度及正確性應符合要求，以確實記錄試體之最大荷重。

(d) 岩石潛變試驗

將岩心施加固定之靜載重，並由變形與時間之關係，求得一近似之變形模式，以預估岩石在長期荷重下之潛變行為及潛變破壞之可能。試驗設備包含懸臂式潛變加壓(載重誤差<2%)、位移感應計(當應變讀值大於250×10^{-6}時，解析度至

少25×10^{-6}，精度<2%；當應變讀值小於250×10^{-6}時，解析度及精度<5×10^{-6})。試驗程序如下：

(i) 取長徑比為2:1至2.5:1之試體(不得低於2:1)，試體側向垂直度偏差不得大於0.5 mm，試體底端與軸向的垂直偏差不得超過0.25°。

(ii) 將試體置於潛變設備，於試體表面施加約100 N的接觸荷重。

(iii) 於試體施加荷重，原則上加壓速度越快越好，硬岩應在20 s、軟岩應在60 s內完成加壓，加壓荷重誤差不得超過2%。

(iv) 加載完成後立即記錄試體的軸向變位及側向變位，應至少採用2種應變計量測(如電阻式應變計或LVDT)，再採2者之平均。

(v) 取適當的間距持續記錄，直到應變速率降低或變位趨於恆定。

(e) 岩石三軸壓縮試驗

本試驗為求取岩石材料之抗壓強度參數，包括凝聚力及摩擦角。試驗設備包含三軸室、壓力機(應力速率介於0.5 MPa/s至1.0 MPa/s，在無圍壓情況下能使試體在2 min至15 min內破壞)、圍壓加壓系統(採用液壓泵或增壓器(pressure intensifier)提供恆定之圍壓，壓力偏差在1%以內)、壓力計(精度至少±1%，解析度至少0.5%)。試驗程序如下：

(i) 取長徑比為2:1至2.5:1之試體(不得低於2:1)，試體側向垂直度偏差不得大於0.5 mm，試體底端與軸向的垂直偏差不得超過0.25°。

(ii) 將試體包覆橡皮模後置於三軸室中，確認底端密封後接上圍壓管。

(iii) 將三軸室置於壓力機上施加接觸荷重約100 N，以讓加壓設備確實與試體接觸。

(iv) 於三軸室注入液壓油，並在5 min內均勻施加圍壓至預定大小。

(v) 於試體持續施加軸向應力，可依固定應力速率或應變速率施壓，不論採用何者，其偏差均不得超過10%，試體應在2 min至15 min達到破壞。

(vi) 記錄試體最大荷重。

(f) 巴西試驗

為求取岩石抗張強度σ_t，提供岩石強度估計之基本參數。試驗設備包含壓力機(應力速率介於0.05 MPa/s至0.35 MPa/s)及試體夾具(bearing block)。試驗程序如下：

(i) 取厚度與直徑比介於0.2至0.75之間的試體。

(ii) 在試體預定施壓垂直方向的兩端標記一直線，標記線可用以確認試體在壓力機置中，或是做為厚度及直徑量測的參考依據。

(iii) 調整試體標記線與夾具接觸面中點一致，兩者偏差不得大於1.25 mm，其後將夾具置於壓力機。

(iv) 於試體施壓產生恆定的應力或變位速率，試體依岩性不同於1 min至10 min內產生破壞，所對應之加載速率約0.05 MPa/s至0.35 MPa/s。

(g) 岩石直接剪力試驗

本試驗為求取岩心試體之剪力強度、凝聚力及摩擦角等力學參數。試驗設備包含壓力機(提供正向應力加壓或解壓速率≤0.01 MPa/s、剪動速率0.1 mm/min至0.2 mm/min)、荷重元件(精度高於±2%)、位移感應計(量測範圍：達到試體變位±13 mm、剪位移靈敏度：0.025 mm，正向位移靈敏度：0.0025 mm)、資料紀錄系統(採集頻率>1 Hz)、輪廓測定儀(contour gauge)。試驗程序如下：

(i) 使用卡尺、測微錶或球積儀量測試體面積，誤差應<0.025 mm。

(ii) 採用輪廓測定儀沿著預定剪位移方向量測節理面之粗糙度，再依對照表推求節理面粗糙度(JRC)。

(iii) 利用石膏或水泥將試體固定於澆灌模中，澆灌模表面務須保持平整，待澆灌材料固化後置放於直剪機的剪力盒中。

(iv) 安裝4個正向位移計(分布在剪力盒上方4個角落)來評估試體是否有俯仰或翻轉的情形，安裝一個位移計來量測試體的側向變位。

(v) 於試體施加接觸荷重，依尺寸不同通常介於450 N至900 N，接著以穩定的速率施加正向應力，加載速率(加壓或解壓)應控制在≤ 0.01 MPa/s，直到達到預定壓力後記錄所對應之正向變位。

(vi) 當正向變位達到穩定後(10 min變位小於0.05 mm)以固定的速率施加剪力(建議在剪力達到尖峰強度前至少記錄10筆數據)，施加過程正向應力須維持恆定。

(vii) 可採用資料紀錄器以利連續紀錄資料的儲存，剪位移量測間距建議設定在每0.025 mm或0.05 mm，試體達到尖峰強度後仍須持續記錄，直到產生殘餘應力為止。

(viii) 卸除正向力及剪力，將剪位移退回原點，於試體施加第二階荷重。

(ix) 重複上述程序進行第二、三階加載，記錄試體的尖峰及殘餘強度。

(h) 岩石靜彈性模數試驗

求取岩石抗張強度σ_t，提供岩石強度估計之基本參數，藉由試體壓縮過程的應力-應變行為求取岩心靜彈性模數及靜態柏松比。試驗設備包含壓力機(應力速率介於0.5至1.0 MPa/s)、位移感應計(當應變讀值大於250×10^{-6}時，解析度至少25×10^{-6}，精度<2%；當應變讀值小於250×10^{-6}時，解析度及精度$<5\times10^{-6}$)。試驗程序如下：

(i) 取長徑比為2:1或2.5:1之試體(不得低於2:1)，試體側向垂直偏差不得大於0.5 mm，試體底端與軸向的垂直偏差不得超過0.25°。

(ii) 於試體中段取適當等距位置黏貼軸向及側向應變計，如為軸向應變至少要量測2組數據再求取平均值。

(iii) 將試體置於壓力機，依固定應力速率(0.5 MPa/s至1.0 MPa/s)或應變速率施壓，其不論是應力或應變於試驗過程之偏差不得超過10%，試體須在2 min至15 min內達到破壞。

(iv) 記錄試體的應力及變位，記讀頻率係以在整段加壓過程平均劃分間距，至少記錄10次，如採用自動紀錄系統，其精度及正確性應符合要求，以確實記錄試體之最大荷重。

(i) 岩石動彈性模數試驗

測定岩石材料之壓縮波速(P波)及剪力波速(S波)，作為岩石材料特性評估之依據，並可用以推估岩石力學參數，包括動彈性係數、動剪力模數及動態柏松比。試驗設備為超音波試驗系統(ultrasonic test system)，包含一對發射器及接收器，感應器之標稱頻率(nominal frequency)介於20 KHz至2 MHz，實際應用則建議介於50 kHz至500 kHz。試驗程序如下：

(i) 研磨試體使其表面平整度最大偏差不得超過0.025 mm，一般建議試體波傳距離與側向尺寸比例不超過5，否則波速的可靠度較低。

(ii) 於試體兩端標示感應計放置位置，使感應器與試體接觸面之軸線保持垂直(傾斜不超過2°)，接觸面積誤差則不得超過0.1%。

(iii) 於試體兩端塗覆薄層的耦合介質(coupling medium，如甘油、凡士林、一般潤滑油酯)，以確保能量有效且均勻的在感應器間傳遞。

(iv) 至少量測3次走時，盡可能讓接收的波形產生10個脈衝間距，如波速走時因系統延遲須予以修正。

(v) 記錄波傳路徑長度(發射器與接受起的最短距離)、壓縮波走時及剪力波走時，藉以計算波速。

(j) 裂隙正向勁度試驗

量測岩體節理(不連續面)受到正向載重加壓-解壓的位移變化，藉其評估岩體不連續面之勁度K_N。試驗設備包含壓力機(量測範圍介 0.5 MPa至10 MPa，加壓及解壓速率應達10 MPa/min)、裂縫位移計(Crack Opening Displacement gauge, COD)，量測範圍達4 mm，誤差小於1%)。試驗程序如下：

(i) 裁切試體使其高度約略為60 mm(裂隙上下端各30 mm)，最大試體長度為50 mm或100 mm。

(ii) 將試體置入上下模具澆灌快乾水泥(fast-setting cement)使其固定於模具中(須留意試驗面應超過水泥澆灌面約25 mm，亦即上下模具之間隙約50 mm)，待水泥完全硬化(約24 h)，用清水清洗試體以將試驗面上之碎屑移除。

(iii) 在試體破裂面上下緣之對稱位置各黏貼一金屬片，並在金屬片間各安裝1個裂縫位移計。

(iv) 將試體置於壓力機上施加壓力，首先在壓力達0.5 MPa前先將正向位移歸零，其後施加第一階正向力至10 MPa，加壓速率為10 MPa/min。

(v) 將正向力解壓至0.5 MPa(解壓速率亦為10 MPa/min)，施加第二階正向力至10 MPa，其後再解壓至0.5 MPa。

(vi) 全程記錄加(解)壓之正向應力及2個COD之變位，並將資料儲存。

(k) 節理面抗壓強度試驗

利用施密特錘，透過錘擊的回彈數值、撞擊方向及試體的乾密度來推算岩體節理(不連續面)抗壓強度(JCS)。試驗設備為

施密特錘(Schmidt hammer)，其可分為L型及N型2種形式，撞擊能量分別為0.735 N及2.207 N。試驗程序如下：

(i) 如採用L型施密特錘，岩心至少為NX尺寸(≥54.7 mm)，如採用N型施密特錘，岩心至少為T2尺寸(≥84 mm)。

(ii) 當敲擊間距為2 cm，岩心(NX)長度須為43.5 cm，如為塊狀試體面積須達268 cm2，厚度至少10 cm(尺寸在此條件下，可提供20點讀值)。

(iii) 採用細粒砂紙將岩心或塊狀試體的表面磨平(尤其在錘頭尖端之撞擊點)，不得有灰塵或細粒殘留。

(iv) 為使試體敲擊點在每1個方向均具備相同的圍束規模，岩心試體的敲擊點應距試體底端超過1個半徑的距離，岩塊試體的敲擊點應距邊界超過半個厚度的距離。

(v) 將試體固定在1個堅固且平坦的鋼製塊體(L型錘頭最小重量20 kg、N型錘頭最小重量40 kg)，錘頭的敲擊方向須與試驗表面垂直，可採用導引桿(guide tube)以維持正確的角度。

(vi) 建議讀取20筆單次敲擊的回彈能量，如任何10筆連續紀錄的讀值中僅有4筆不同，試驗得以終止。

(l) 岩石熱傳導及熱擴散試驗

測定岩石的熱學參數，包括熱傳導係數(λ)及熱擴散係數(α)，推算岩石的比熱(C)，藉以評估地層的熱力學特性，做為模式建立與驗證之依據。試驗設備包含熱傳導分析儀、測試室(chamber)、恆溫器(thermostat)、真空幫浦、電橋、電壓感應計(voltmeter)、電壓源(voltage source)。其中，熱傳導分析儀之內部包含熱感應器(hot-disc probe)，其為刻蝕處理形成雙螺旋(bifilar spiral)薄片結構之金屬箔(metal foil)，厚度10±2 μm，直徑4 mm至100 mm，兩端塗覆厚度7 μm至100 μm絕緣薄膜(insulating film)。試驗程序如下：

(i) 試體形狀沒有特別規定，筒狀、正方體或長方體皆可，但厚度至少為內部組成材料長度的20倍(如試體為不均

質)，且試體接觸感應器表面應保持平整。如為板型(slab)試體(表面為平面、厚度介於1 mm至10 mm)，上下試體厚度須為已知且一致，厚度的量測精確度達0.01 mm。

(ii) 將熱感應器放置於待測試體中，組裝設備將其置入恆溫室(constant-temperature chamber)，以在量測時能保持恆定之溫度。

(iii) 將熱感應器內之電橋平衡，當初始電阻介於1 Ω至50 Ω時，其平衡電橋的電壓須妥善選擇使電流不致超過1 mA。

(iv) 釋放熱源並在預定的時間記錄溫度變化，電源輸出大小及量測時間，均依試體種類選擇，並參照規範之規定。

(v) 在全程量測時間取適當的時距(interval)記錄電流的不平衡反應，建議資料擷取頻率至少100點。

(vi) 自電壓讀值計算溫度增量ΔU。

(vii) 增加試驗溫度，確保溫度在提升後能達到平衡，每次增溫至少量測3次，且每次量測須待溫度達到平衡後得以進行。

(viii) 記錄每次的量測條件，包括量測的溫度及壓力。當試體為非均質(或異向)時，材料的組成變化及其在試體內部造成方向及位態上的差異亦須記錄。

(m) 岩石比熱試驗

測定岩石的比熱(C)，藉以評估地層的熱力學特性，做為模式建立與驗證之依據。試驗設備為示差掃描量熱儀(Differential Scanning Calorimeter, DSC)，其內部包含加熱爐(furnace，溫度範圍為-100℃至600 ℃)、溫度感應計(最小可顯示至±10 mK，約0.01 ℃)、示差感應計(differential sensor，可量測參考當量至1 μW間之熱流變化)、測試室(test chamber，能承受內部惰性氣體流量介於10 mL/min至50 mL/min ±5 mL/min)、溫度控制器(當溫度產生10

℃/min至20 ℃/min改變或達到恆定時可自動運作，降溫速率可控制在至少10 ℃/min)、電子秤(精度應在±0.01 mg)、資料紀錄器。試驗程序如下：

(i) 試體尺寸與儀器靈敏度需調整至最佳化，如試體為固體狀，建議有機試體的重量為5 mg至15 mg，非有機試體重量則在20 mg至50 mg。可使用刀片或剃刀裁切，但要確保試體為均質，如試體在分析前採用熱處理或機械處理，必須把處理方式記錄下來。

(ii) 進行儀器的溫度校正及熱流(heat flow)校正，在熱流校正時建議採用合成藍寶石片(synthetic sapphire disc)做為標準件量測其在加熱及冷卻的比熱，並與本規範結果相對照。

(iii) 採用惰性氣體(如氮氣)以10 mL/min至50±5 mL/min的速度灌注在DSC設備。

(iv) 使用電子秤量測試驗盤(含上蓋)淨重。

(v) 將標準樣本(合成藍寶石)的試驗盤及空盤(均含上蓋)同時置入DSC設備中，放置前需先確認兩個盤及上蓋的淨重相當。

(vi) 以20 ℃/m的加溫(或降溫)速率使DSC的測試室達到試驗的初始溫度，其後使溫度保持平衡狀態至少4 min，記錄此時的熱曲線(thermal curve)。

(vii) 以20 ℃/m的速度於試體加熱，並在加熱的過程中記錄熱曲線變化。

(viii) 在溫度上限記錄試體的穩態等溫基線(steady-state isothermal baseline)，其後終止加溫，將測試室冷卻回復至環境溫度。

(ix) 取出標準樣本，將其放置於試驗空盤並量測重量(含上蓋)。

(x) 置換待測試體，將其放置於試驗空盤並量測重量(含上蓋)。

(xi) 重複vi至viii之加溫程序，記錄完試體的熱曲線變化後，將其自設備取出量測重量，如果重量損失≥0.3%初始重量時，本次量測視為無效。

(xii) 紀錄資料應涵蓋熱流、溫度及時間之變化。

在完成所有物理及力學性質試驗後，本工作將綜整試驗數據探討不同參數間之關聯性，藉由蒐集過去台灣裂隙岩體110個鑽孔的實驗室內岩石樣本試驗資料，探討岩石力學參數間的關聯性，例如：藉由孔隙率及滲透係數量測結果，依據不同地層岩性區分為砂岩、泥岩、板岩及變質砂岩等，分別探討孔隙率及滲透係數之關聯性，並根據結果發現到不論何種岩性其2者間均具有正相關之趨勢，如圖 3-44所示。

(4) 不同岩層與地域之地溫梯度分布範圍與特性

地溫梯度(geothermal gradient)為地球內部溫度不均勻分布程度的參數，又稱地熱梯度或地熱增溫率。臺灣山區岩層構造迴異且變化大，岩層中不同性質的斷層、節理、片理、層理、劈理等建構出不同的水循環通路、應力狀態、地球化學性質與地溫梯度，而不同結構岩層基本上也展現不同的熱力學特徵，地溫梯度不盡相同，目前掌握岩層地溫梯度之變化特性，為水文地質環境研究工作重要的課題之一。

本工作首先彙整臺灣南段山區過去已完成的2 inch水文地質鑽孔之地下岩層地溫梯度變化，其使用臺灣大學徐春田教授實驗室自行研發的小型高解析度自計式熱探針(Chang and Shyu, 2011)，調查各水文地質鑽孔地溫梯度之分布特性，量測時需以水為傳導介質，設定水位面下整數深度為初始值，每2 m停置約60 s左右，達成探針與井內溫度的熱平衡後繼續測量下一個深度。本工作蒐集20口水文地質鑽孔之量測結果，各口的量測範圍為地下水位面以下至井底(約96 m至100 m)，進一步繪製臺灣南段山區地溫梯度量測成果與地層分布圖及與鄰近溫泉點位分布圖，分別如圖3-45及圖 3-46所示。

比較20口水文地質鑽孔量測結果，地溫梯度變化範圍為22 ℃/km至107 ℃/km，地溫梯度於中央山脈東側較高，特別是位於大南澳片岩與畢祿山層沿線，地溫梯度最高的2站為羅試站與雙流站，地溫梯度分別為107 ℃/km與105 ℃/km，而在中央山脈的西側地溫梯度明顯較低，地溫梯度分布範圍為24 ℃/km至81 ℃/km。若進一步比對台灣南段溫泉分布資料(圖 3-46)，顯示地溫梯度量測結果與溫泉分布大致吻合，鄰近溫泉區之地溫梯度較高，而地溫梯度較低的區域周圍較少溫泉資源。

由於在用過核子燃料內仍具有一定活度的放射性核種，這些核種在處置過程中將持續釋放出衰變熱，使得廢棄物罐周圍的膨潤土與圍岩升溫，為確保膨潤土不因過熱發生質變，或是因過熱造成內部孔隙水汽化影響膨潤土之性能安全，因此地溫梯度的高低將影響著處置設施之溫度變化與熱演化特性，地溫梯度的分布主要受裂隙帶與構造帶之影響，常具備區域性分布的特性，因此透過蒐集台灣地溫梯度量測成果，有助於後續選址程序之進行。

(5) 不同岩層之自然加馬分布特性

(a) 調查背景與目的

自然加馬射線是原子核在衰變裂解(radioactive decay)時所釋放出的電磁輻射之一，其具有波長短(<0.01 nm)、頻率高(>10^{20} Hz)、高能量(>100 keV)、穿透力強的特性，學界又稱之為γ射線。在自然地層環境中許多礦石原本就含有多種放射性元素，例如鈾鐳系(uranium-radium series, half-life time of 4.4×10^{9} years)、釷系(thorium series, half-life time of 1.4×10^{9} years)、鉀(potassium ^{40}K, half-life time of 1.3×10^{9} years)，或其他天然放射性物質（Naturally Occurring Radioactive Materials, NORM），過去許多研究已指出天然放射性核種含量隨地理環境而有所不同，因此，自然加馬射線能量的偵測是研究地質狀況的重要指標(Schön, 2015)。

以沉積岩為例，顆粒較細的頁岩或泥岩層中具有黏土礦物，其表面通常帶有負電，其陽離子交換能力(Cation Exchange

Capacity, CEC)較強，岩石表面對周圍水溶液中陽離子吸附能力也較高，因此可吸附較多放射性元素，故加馬射線強度較高；反之，在砂岩、石灰岩或礫石層吸附之放射性元素較少，加馬射線的強度則相對較低。此外，泥的風化程度會影響加馬強度，灰色新鮮泥之加馬強度會較黃棕色風化泥為高，而砂或礫石的成分亦會影響加馬強度值，板岩質砂或礫石往往會比石英質砂或礫石還要高。就水文地質觀點而言，井測之加馬值高表示地層含黏土量高，可判定為低透水性之頁岩或泥岩層；相反的，加馬值低表示地層含黏土量少，可能為透水性較佳之砂岩層。利用這樣的規律，依據鑽孔內地層或岩石所釋放的自然加馬射線強度結果就可進行井下岩石特性或沉積特徵的判別，劃分出鑽孔的地質特性剖面、確定砂岩泥質含量，甚至定性地判斷岩層的滲透性，因此過去廣泛用於石油探勘、深部地質調查及淺層地質鑽探等工作中。

自然加馬井測儀約在1930年代開始啟用，早期用於油頁岩層定位和量化粘土礦物組成，可記錄能量大於100 keV的所有加馬光子造成的次數。主要探測方式係將自然加馬探測儀置入鑽井中，於下放或拉升的過程量測鑽孔內地層釋放的自然加馬射線強度，岩體放射強度越高，加馬射線計讀次數即越多。

(b) 工作內容與方法

參考國際發展經驗，本項工作盤點臺灣山區不同岩層之自然加馬分布範圍與特性，本報告首先彙整臺灣南段山區29口鑽井基本地質特性與自然加馬井測結果，比較上述29口鑽井自然加馬值分布，可初步觀察到變質岩層區段之加馬強度值平均較高，沉積岩層區除了砂岩段與部分泥岩段之外，加馬放射強度值落於整體分布之中間範圍，而岩屑崩積層的加馬放射強度值整體而言較低，顯示其組成粒徑較粗，黏土含量較少，所吸附的放射性微量元素的強度較低使然。進一步歸納南段山區不同試驗區段之岩性分類與加馬放射強度之統計

結果(如表 3-12)，變質岩層不同岩性區段所側錄之加馬強度值分布之差異性並不明顯，沉積岩層不同岩性區段之加馬放射強度統計結果差異較大，最明顯的是泥岩和頁岩段的出現可測得較強的加馬射線強度，係由於其富含自然放射源如鉀40 (^{40}K)放射性元素所致，其次為粉砂岩與砂頁岩互層，加馬放射強度值則相對較低。

表 3-9：現地孔內試驗參考規範

試驗項目	參考規範
孔內攝影技術	ISRM: SM for rock fractures observations using borehole digital optical televiewer
孔內地球物理探測	ISRM: SM for geophysical logging of boreholes

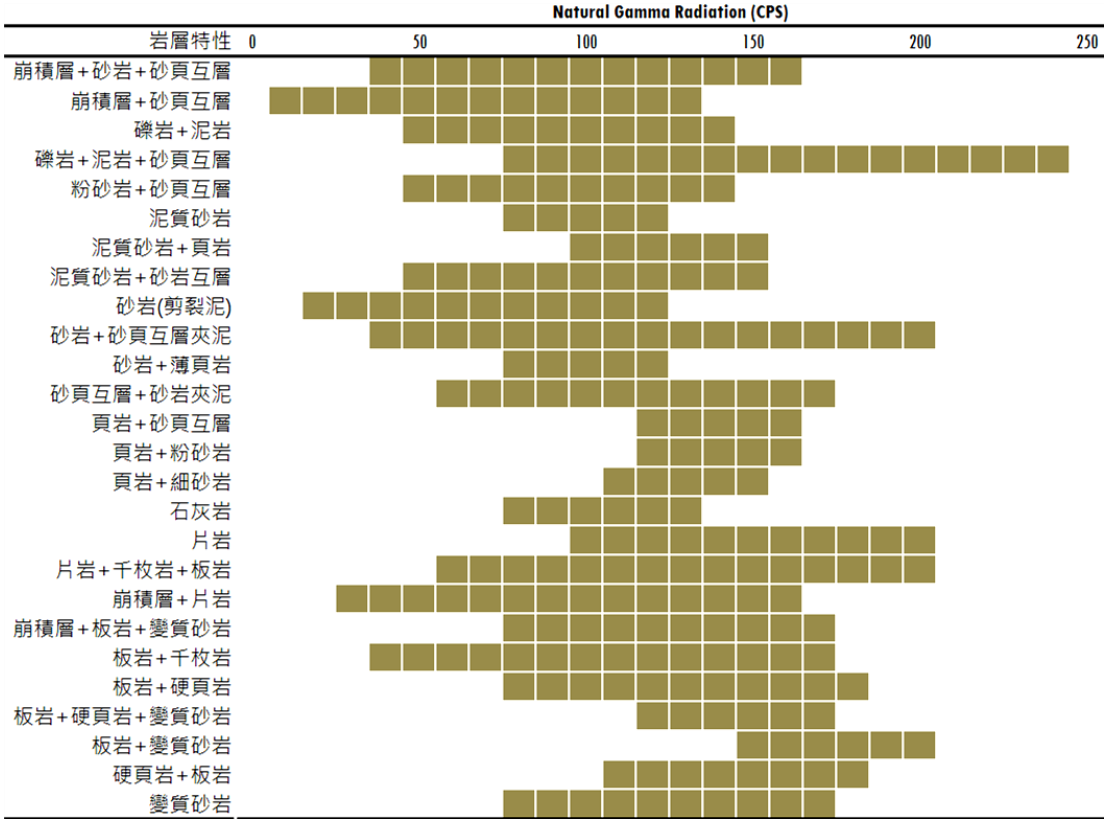
表 3-10：演練之孔內調查技術項目、探測儀訊號原理及判釋

探測儀	訊號原理及水文地質特性判釋
音射式孔內攝影儀	係以利用內建之發射器於鑽孔內向地層發射超音波，接收器在同一時間擷取反射訊號，並將反射訊號的振幅及走時以色階的型態轉換地層全景影像(panoramic image)。一般而言，質地堅硬的岩盤會具有較強走時及震幅的回彈能量，在聲波影像會以較亮的色階呈現；反之如在裂隙、空穴或弱帶則會反映較暗的色階。透過內建數位羅盤儀及加速度計可計算裂隙位態及井偏等資訊，探測的影像剖面可做為岩盤裂隙分布及破碎程度評估之依據。此外，如在有破裂現象(breakout)的鑽孔中施測，會因聲波回彈能量不同而使影像在對稱方向呈現暗色軌跡，故此特徵可用以判釋現地應力方向。
光學式孔內攝影儀	由LED光源及CCD攝影機所構成，直接掃描孔壁的全景影像，其拍攝結果如同一般肉眼所見，精度則取決於攝影機之解析度，透過內建數位羅盤儀及加速度計可計算裂隙位態及井偏等資訊，探測的影像剖面可做為岩盤裂隙分布及破碎程度評估之依據，而光學影像亦可用以檢視特殊地質構造、裂隙填充或鏽染情形。
電測儀	透過內部蓋革-米勒計數器偵測鑽孔內地層釋放來自鉀(^{40}K)、釷(^{232}Th)或鈾(^{238}U) 等放射性元素，由於頁岩或泥岩層間之黏土吸附較多放射性元素，所以加馬射線強度會明顯高於放射性元素較少之砂或礫石層。就水文地質觀點而言，井測之加馬值高可判定為低透水性之頁岩或泥岩層；相反的，加馬值低表示地層屬透水性較佳之砂岩層，因此根據自然加馬射線的偵測結果，可用以界定砂岩及頁岩層之分布並進而判定地層之透水性。
四軸井徑探測儀	係利用探測儀上之彈簧臂在孔內拉升的過程連續記錄井孔的直徑。一般而言，在膠結良好之完整岩盤，井徑通常呈現一致的結果；反之，在軟弱或破碎岩盤側錄時，井徑就會有震盪或陡增之情形，因此井徑資料可作為岩層破碎程度判釋之依據。另可藉由內建之陀螺儀判斷鑽孔X向及Y向的井徑變化，透過兩者關係來研判鑽孔是否有鑽孔破裂的情況，進而推求現地應力方向。
溫度探測儀	係以利用探測儀直接記錄鑽孔中流體溫度隨深度的變化情形，常用在地熱或地下水資源探勘，探測結果多以梯度的方式表現，如有異常變化通常代表孔內流體於該區段產生擾動，有可能是受到地下水沿孔隙或裂隙流入(出)孔內所導致，此現象可用以判釋地層的透水性及連通裂隙位置，亦可藉由溫度剖面分布情形，協助判釋地下水補注區與排水區。

表 3-11：本工作岩石力學試驗參考規範

試驗項目	參考規範
一般物理性試驗	ISRM: SM for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties - 1977
消散耐久試驗	ISRM: SM for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties - 1977
	ASTM D4644-08: Standard test method for slake durability of shales and similar weak rocks
單軸壓縮試驗	ISRM: SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials - 1979
	ASTM D7012-14: Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperature
岩石潛變試驗	ISRM: SM for Determining the Creep Characteristics of Rock
	ASTM D7070-16: Standard test method for Creep of Rock Core Under Constant Stress and Temperature
三軸壓縮試驗	ISRM: SM for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression - 1978
	ASTM D2664-04: Standard test method for triaxial compressive strength of undrained rock core specimens without pore pressure measurements
巴西試驗	ISRM: SM for Determining Tensile Strength of Rock Materials - 1978
	ASTM D3967-16: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens
直接剪力試驗	ISRM: SM for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version
	ASTM D5607-16: Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force
靜彈性模數試驗	ISRM: SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials - 1979
	ASTM D7012-14: Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures
動彈性模數試驗	ISRM: Upgraded ISRM SM for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique
	ASTM D2845-08: Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock
裂隙正向勁度試驗	POSIVA working report 2016-30: Normal loading and shear tests on rock joints from Olkiluoto
節理面抗壓強度試驗	ISRM: SM for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness
熱傳導及熱擴散試驗	ISO international standard 22007-2: Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity
比熱試驗	ASTM E-1269: Standard Test Method for determine specific heat capacity by differential scanning calorimetry

表 3-12：臺灣不同岩性與加馬放射強度統計



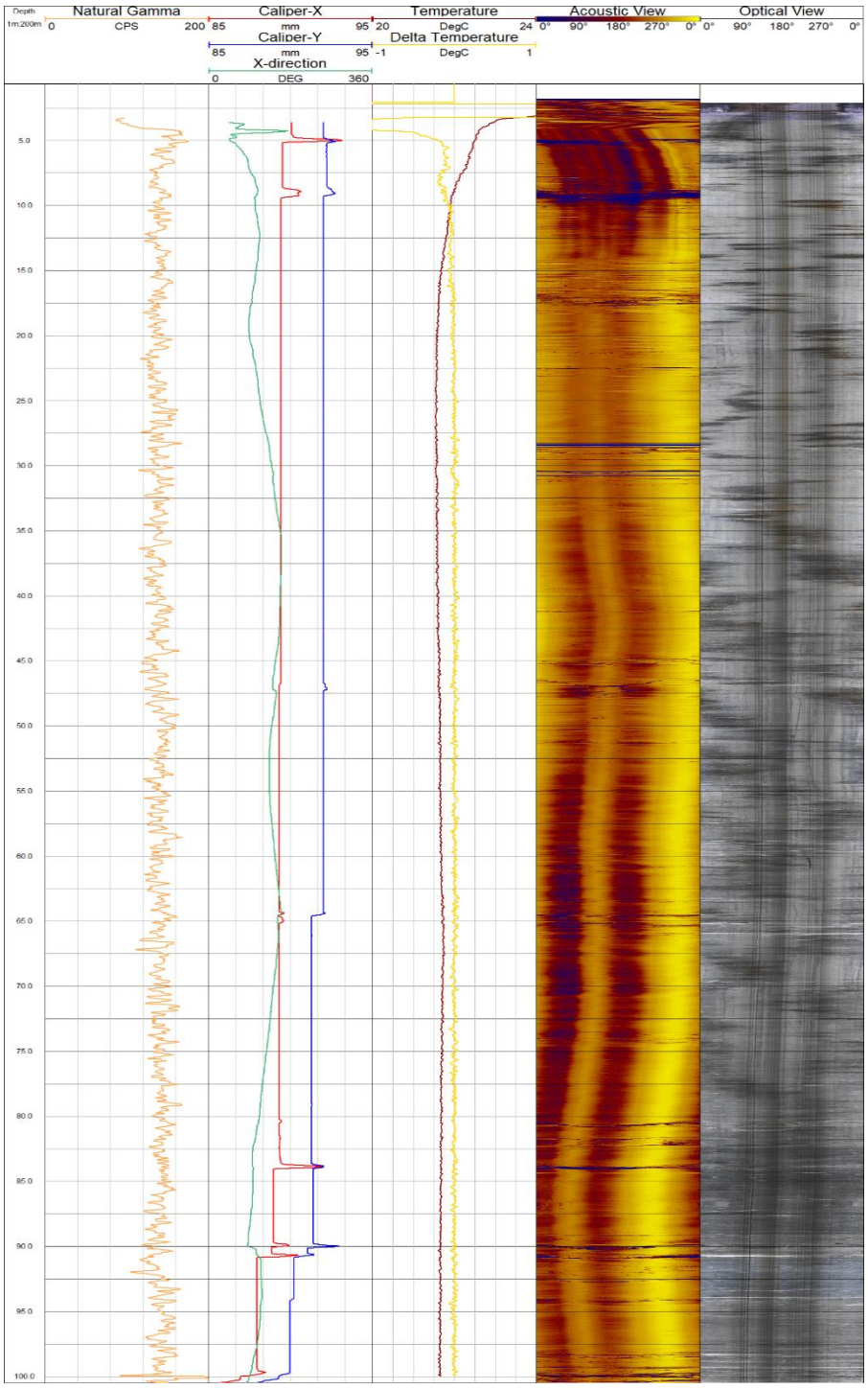


圖 3-42：現地孔內試驗調查成果(以臺灣南段山區鑽孔為例)

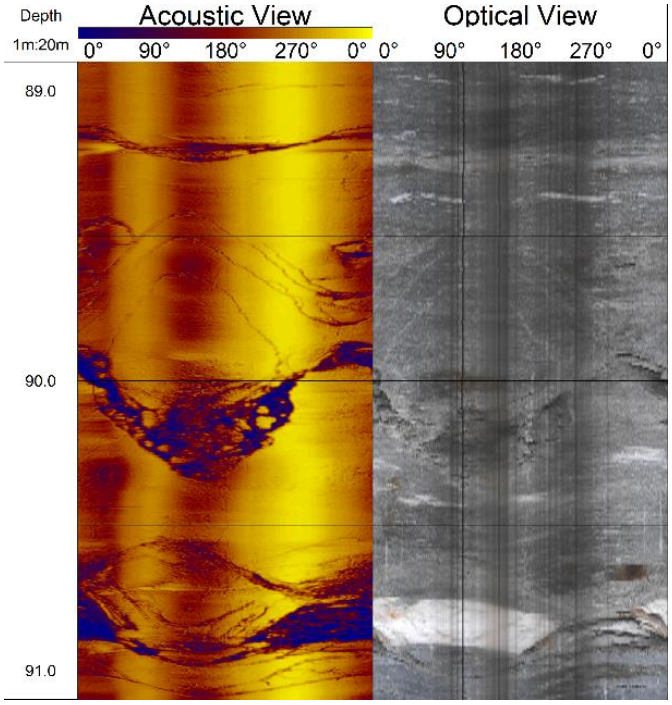


圖 3-43：音射式及光學式孔內影像(以臺灣南段山區鑽孔為例)

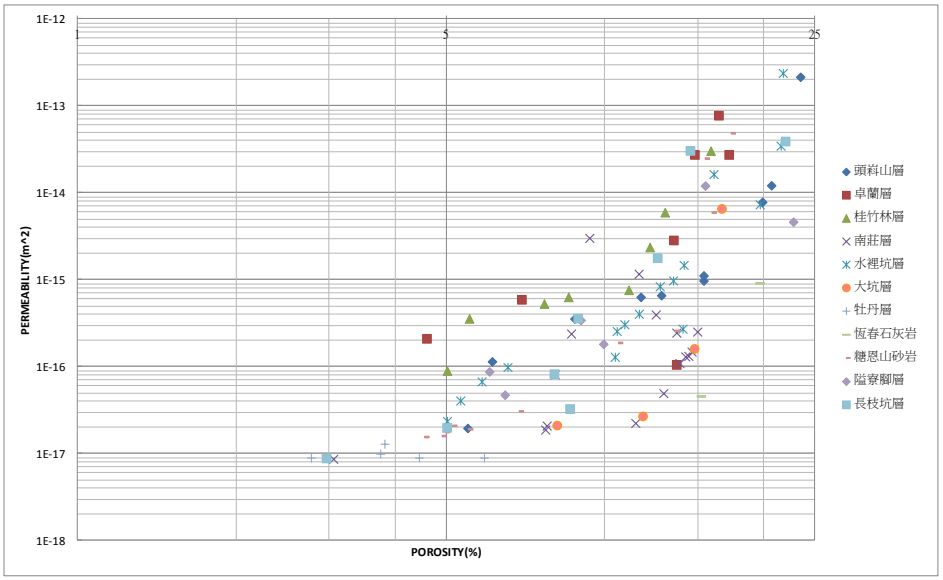


圖 3-44：南段山區之岩層鑽孔岩心孔隙率與滲透係數關聯性

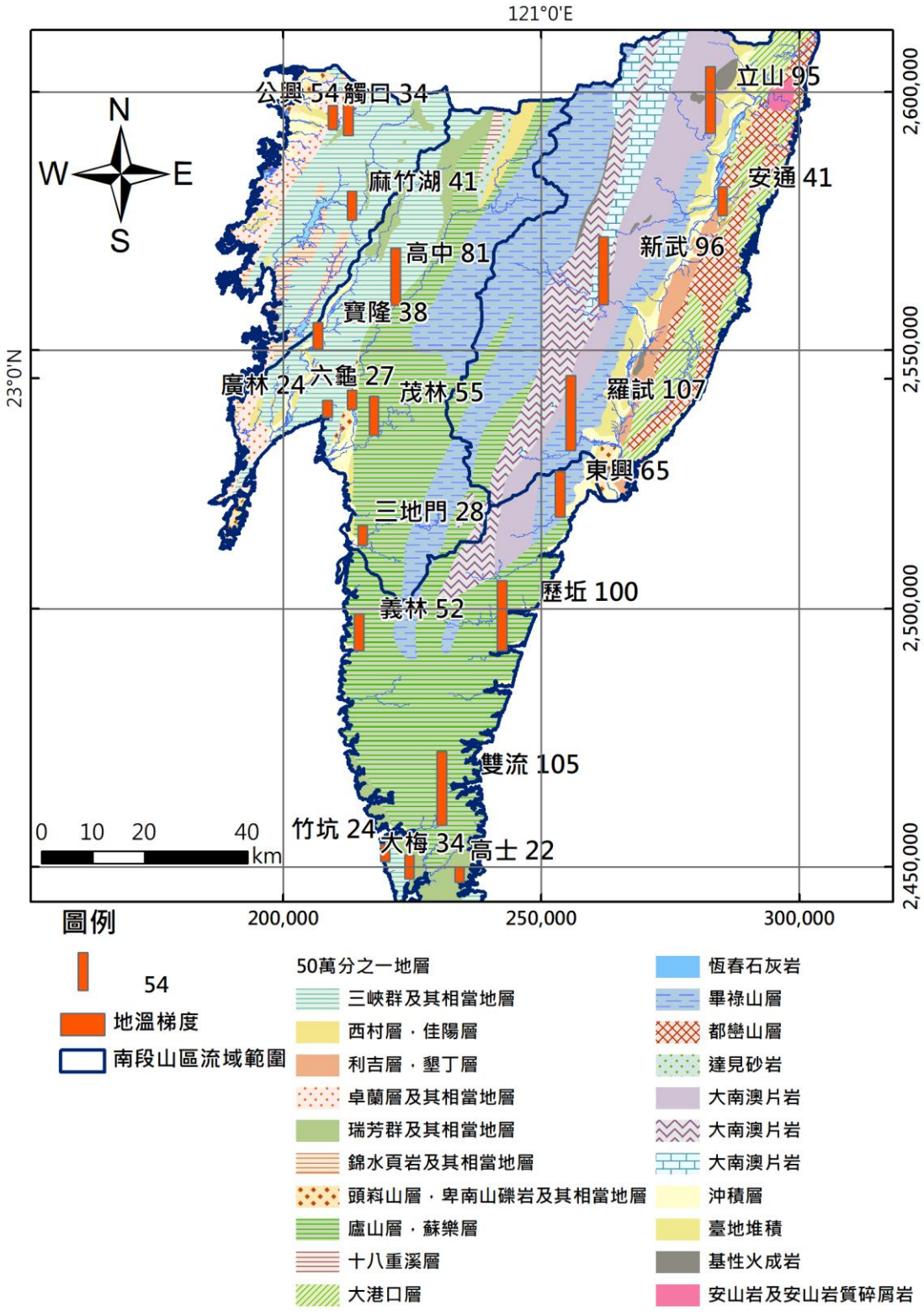


圖 3-45：臺灣南段山區地溫梯度量測成果與地層分布圖

資料來源：經濟部中央地質調查所(2014)；經濟部中央地質調查所(2015)；經濟部中央地質調查所(2016)；經濟部中央地質調查所(2017)

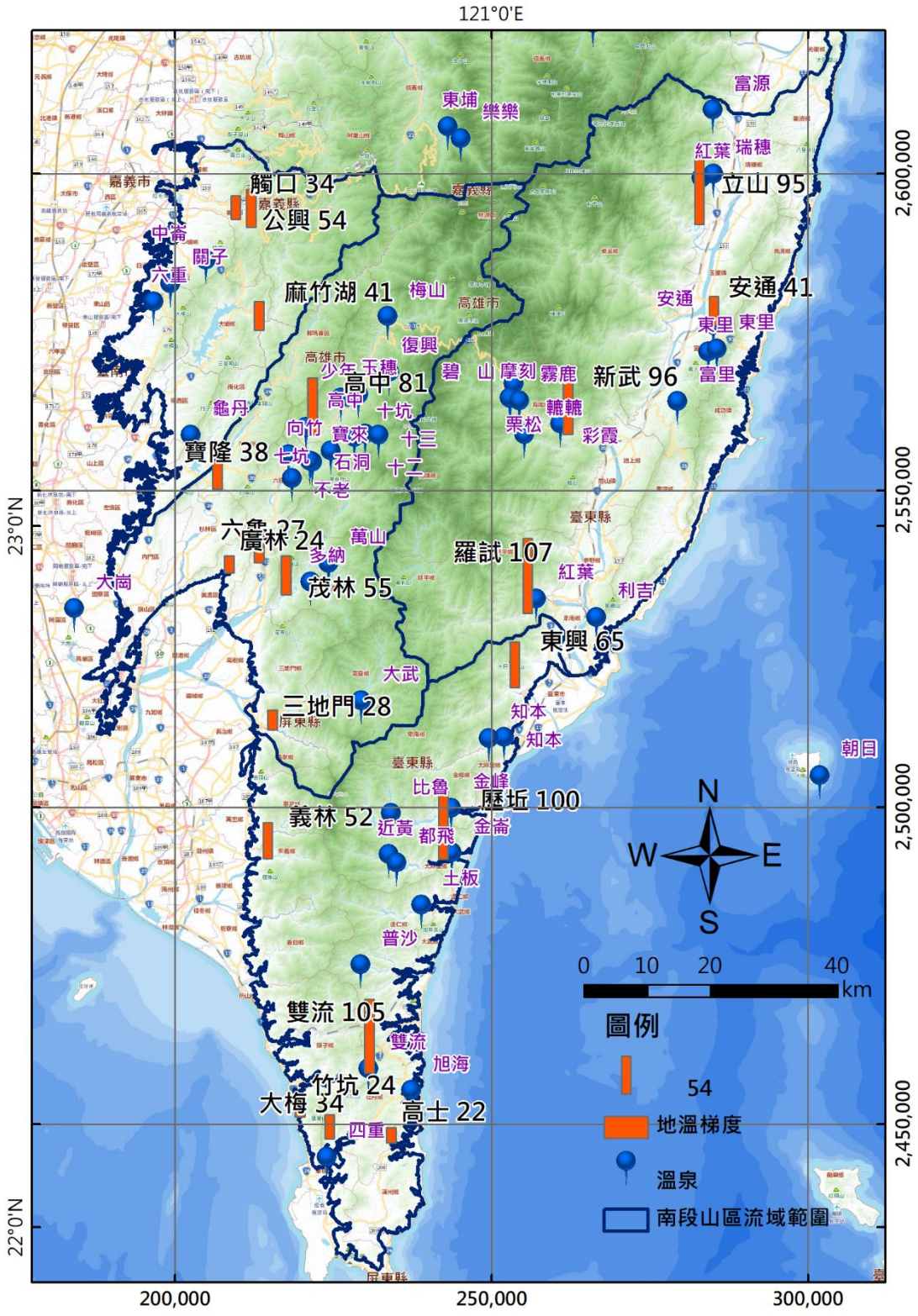


圖 3-46：臺灣南段山區地溫梯度量測與鄰近溫泉點位分布圖

資料來源：經濟部中央地質調查所(2014)；經濟部中央地質調查所(2015)；經濟部中央地質調查所(2016)；經濟部中央地質調查所(2017)

3.4.2. 岩石力學場址特徵化技術與模式發展

本項工作彙整國內外岩石力學描述模型發展趨勢，進行整合研析，探討岩石力學描述模型之建置流程與調查技術需求，以及不同階段岩石力學描述模型所需之參數特性。接著進行岩石力學數據蒐集與參數分析工作，收集過去在臺灣山區不同岩層與不同深度之鑽孔岩心室內試驗結果及地表露頭分析結果，進行現地數據與參數分析，依不同數據屬性分類(如依岩性、地質單元、地層層序或年代等)建立經驗公式。此外，本工作也彙整參考案例之應力量測成果，探討處置場址之應力分布情形與長期穩定性，研究成果可分為4個工作項目，詳述如後。

(1) 岩石力學描述模型之建置流程與調查技術需求

岩石力學描述模型建置過程中，包含現地調查資料的數據分析與各種場域之岩石力學分析模式的建立，而岩石力學分析模式建立之目的係為「描述處置場址的材料與力學特性」或說明「不同地質作用對處置設施及其鄰近區域之應力場與變形行為之影響」，而為達成上述目的，需探討不同場域尺度模式之情況，國際上一般常分為：場址模式(local model)及區域模式(regional model)2種(圖 3-47)。場址模式需包括處置場及其鄰近區域範圍(約5 km^2至10 km^2)，深度範圍需包含處置設施周圍岩體(約400 m至700 m)，而區域模式則須包括場址面積及其任何可影響到場址條件的地質作用(間接影響或直接影響)範圍，因此區域模式面積可涵蓋數百平方公里。

岩石力學描述模型的調查程序可分階段進行，以瑞典SKB為例(SKB TR-01-29)，分為可行性研究(FS)階段、場址初步調查(ISI)階段、場址完整調查(CSI)階段與場址細部調查(DC)階段，而待細部調查階段以後，若資料仍存有較高的不確定性，無法滿足後續工程設計與安全評估應用需求，則啟動補充調查階段，增補場址調查數據以及降低數據與分析之不確定性，岩石力學描述模型整體流程如圖 3-48所示。

在可行性研究(FS)階段，主要是藉由蒐集過去研究資料取得潛在母岩尺度到區域性尺度的初步資料，評估該地區之母岩是否具備足夠體積與長期穩定性，可供最終處置設施之建置使用。接著進入場址初步調查(ISI)階段，除蒐集FS所獲得的資料外，也需進行一般性資料蒐集，資料大部分獲取自地質描述模型與水文地質描述模型，藉由岩石種類描述(RTD)、地質構造描述(GSD)與水文地質描述(HGD)資料，進行數據分析、資料綜合闡述並建立概念模型，在ISI階段將產生岩石力學描述模型(v0)。在場址完整調查(CSI)階段，則透過衝鑽法進行地質調查井鑽探，藉由地質調查井與露頭調查獲取現地調查數據與裂隙分布資料，以及此階段新增之RTD、GSD與HGD資料，進行數據分析、資料綜合闡述與建立描述模型的工作，產生岩石力學描述模型(v1.1)。在場址細部調查(DC)階段，則透過旋鑽法提取地質調查井的岩心樣本，並利用所有地質調查井進行現地應力量測與實驗室試驗，彙整由此階段生成的RTD、GSD與HGD資料，再進行數據分析、資料綜合闡述並建立岩石力學描述模型(v1.2)。在補充調查階段，則是針對不確定性較高或資料量不足的區域，進行地質調查井之布孔與現地調查試驗，以此獲取更新數據降低地質構造與數據之不確定性，過程中將進行多次補充調查與數據更新迭代，進而產生更新版次的岩石力學描述模型(v2.x)。其中，在進行數據分析、資料綜合闡述與建立岩石力學描述模型的細部流程如圖 3-49所示。

岩石力學描述模型就是透過不同階段的現地調查資料反覆進行數據分析、資料解釋及2個不同場域模式之驗證工作，預期岩石力學描述模型可產出的資料為：(a)岩石材料與力學特性及現地調查數據資料庫、(b)經驗證分析後之岩石力學參數列表與不確定性分析、(c)經驗證後可描述不同地質作用影響之區域模式、(d)經驗證後之場址模式。而建立的參數列表可提供後續安全評估及工程設計的不同軟體模式(model)輸入使用，亦可利用已建置的場址模式及區域模式針對安全評估及工程設計所使用之不同模擬軟體進行模式確認(validation)。

由於現地調查工作與參數特徵化採階段性的策略進行更新岩石力學描述模型，因此不同階段所需之岩石力學參數如

表 3-13所示，而岩石力學描述模型除需要表列參數與監測資料外，尚需從其他領域的描述模型獲取資料，主要來源為地質描述模型與水文地質描述模型，需求參數包含：區域及場址之裂隙帶分布、場址離散裂隙網路參數集、裂隙岩體之水文地質特性等。因此，岩石力學描述模型不僅需評估個別領域的地質作用對於處置設施的影響，也需要跨領域的合作與整合，維持場址描述模型之單元劃分一致性，以及模型解釋的共同性。綜整

表 3-13的參數需求，以及彙整過去國內用過核子燃料最終處置計畫所應用之調查技術，岩石力學描述模型所需之調查技術如表3-14所示，其中部分調查技術可橫跨多領域的描述模型。

(2) 岩石力學關聯性分析與經驗公式

本工作係針對岩石力學參數成果進行數據整合分析，從而獲取建置岩石力學應用模式發展所需之關鍵參數。現階段以蒐集過去在臺灣山區之岩石力學相關報告與調查數據，進行現地數據與參數分析，以探討岩石力學參數分布特性，並嘗試利用可獲得之數據進行關聯性分析；而後續於本工作試驗數據產出後，將依據實驗室岩石樣本試驗與分析作業之執行進度，滾動式進行岩石力學參數之關聯性分析並建立參數轉換經驗公式，期能發展適用於臺灣本島結晶岩特有的經驗公式，以提供後續分析使用。本工作透過統整各種岩性之岩石力學試驗結果，探討各種參數間之關聯性，岩石力學參數包含：岩石單軸抗壓強度與抗張強度及彈性模數之關係；岩石孔隙率與岩石體積模數之關係；岩體評分指標與岩體壓縮波波速之關係及岩體評分指標與水力傳導係數間之關聯性等，分述如下：

(a) 岩石單軸抗壓強度與抗張強度及彈性模數之關聯性分析

根據過去在臺灣山區的試驗成果(經濟部中央地質調查所，2012；經濟部中央地質調查所，2013)，由巴西試驗、靜動彈性試驗，以及單壓試驗結果進行分析，顯示彈性模數與抗

張強度各岩性地層均有相當好之正相關趨勢，成果如圖3-50至圖 3-51所示，其中以變質度高之石英砂岩其抗張強度明顯較大亦為合理之現象，而岩石因層面或葉理較發達，其單軸壓縮強度易受層面或葉理影響，因此比值相對較層面不明顯之砂性岩石低。

(b) 岩石孔隙率與岩石體積模數之關聯性分析

本工作經蒐集臺灣山區的試驗成果(經濟部中央地質調查所，2012；經濟部中央地質調查所，2013)，顯示不同岩性之體積模數與孔隙率之關係結果，不論是由比重計分析所推求之真孔隙率，或由氦氣孔隙率測定所得之有效孔隙率，其與體積模數均呈負相關之趨勢，如圖 3-52所示。

(c) 岩體評分指標與岩體壓縮波波速之關聯性分析

針對岩體評分指標與岩體壓縮波波速以及水力傳導係數分析，過去研究成果顯示聲波走時(波速)與地層破碎程度有相當之關係，且依據Barton(2002)、Barton(2006)及黃燦輝等(2012)之計畫研究結果顯示，岩體P波波速(V_p)與岩體評分指標等級具有良好的一致性，且岩體之滲透性亦可由岩體評分等級而獲得相當之關係，因此依據岩體Q值方法針對鑽孔岩心進行評分，以進一步統計與波傳速度及水力傳導係數之關係。本工作岩體分類系統乃採用挪威地工技術研究所(Norwegian Geotechnical Institute, NGI)Barton(1974)所發展的Q系統(Rock Mass Quality, Q-System)進行岩體品質評分，Q系統為改良的RQD分類系統，再加上5個參數，分別是節理組數、節理面粗糙度、節理面蝕變程度、節理面水壓折減因子以及應力折減因子，共6個參數，計算式說明如下。

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF) \quad (3\text{-}22)$$

其中，

Q=岩體評分指標。

RQD=岩石品質指標，為每1 m岩心長度≥10 cm所占百分比。

Jn=節理組數。

Jr=節理面粗糙度。

Ja=節理面蝕變程度。

Jw=節理面水壓折減因子。

SRF=應力折減因子。

式(3-22)中的RQD/J_n代表岩塊大小之指標，J_r/J_a代表岩塊間之抗剪強度，J_w/SRF代表岩體承受力。為能比較不同岩性之岩體評分結果一致性，需利用單壓強度(σ_c)將岩體評分(Q值)進行正規化($Q_c = Q \times \sigma_c/100$)，以可獲得岩體評分值$Q_c$值。根據蒐集到岩體評分值$Q_c$與波速均有正相關之趨勢，而迴歸之關係式變質岩略高於Barton所提之關係，如圖 3-53所示，此亦說明臺灣應建立適用於本土的經驗公式。

(d) 岩體評分指標與水力傳導係數之關聯性分析

本工作經蒐集經濟部中央地質調查所(2013)雙封塞水力試驗量測而得之水力傳導係數，統計相對深度之岩體評分Q_c值與實際之透水試驗區段水力傳導係數，經統計變質岩水利傳導係數(hydraulic conductivity, K)結果亦有隨Q_c值增加而遞減相關性不錯之逆相關趨勢，如圖 3-54所示。

(3) 不同尺度之力學特性資料分析

岩體變形行為主要受不連續面型態或不連續面力學性質之影響,而不同體積之岩體所可能包含的不連續數量亦不等,以致岩體變形模數、單壓強度(圖 3-55)及剪力強度等一般均隨試驗樣本體積之增加而變小,此一現象稱為尺度效應(scale effect)。尺度效應對岩體工程設計影響甚鉅，其與岩體中不連續面之存在有高度相關性。根據岩體工程影響範圍由小到大，可將材料行為視為連續體之完整岩石、受1組至2組不連續面切割的塊體、受數組不連續面切割成塊狀，到包含大量不連續面之岩體而再度可視為等效連續體之岩體。

受尺度效應之影響，實務上具有代表性之岩體力學參數不易由實驗室小尺度之力學試驗獲得，因此岩石工程設計與分析另會仰賴基於經驗法則而建立之岩體分類法。岩體分類法除已廣泛應用於隧道工程、邊坡工程與基礎工程之設計與分析外，同時，亦可透過室內試驗結果與岩體分類法取得岩體力學參數間之關係式，而此類關係式與岩體分類與不連續面組數、位態、延續性、間距、粗糙度、壁面強度、開口寬、填充物、滲水特性以及岩塊大小等特徵具高度相關性。

而關於完整岩石與破碎岩體的強度則可利用Hoek Brown破壞準則(Hoek Brown failure criterion)進行分析，圖 3-56為瑞典SKB針對各種不同裂隙岩體的條件下，其採用之岩體強度計算經驗公式。

針對完整岩石的強度，Hoek et al. (1992)改良過去經驗公式，提出可用下列公式進行描述：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c(m_i\sigma_3/\sigma_c + s)^a \qquad (3\text{-}23)$$

其中，

σ_1=完整岩石之最大主應力，[F/L^2]。

σ_3=完整岩石之最小主應力，[F/L^2]。

σ_c=完整岩石之壓縮強度，[F/L^2]。

m_i、s、a=岩石材料常數，若為完整岩石則a=0。

當岩體有1組不連續面(或岩體中僅有1組優勢裂隙)案例，由於無法直接使用Hoek Brown破壞準則進行計算，完整岩石的部分可以利用式(3-23)，而不連續面的部分，瑞典SKB建議可利用Barton (1973)提出的公式計算節理面(裂隙)的剪力強度(τ)：

$$\tau = \sigma_n \times tan\left(\varphi_b + JRC \times log_{10}(JCS/\sigma_n)\right) \qquad (3\text{-}24)$$

其中，

σ_n=正向應力，[F/L²]。

φ_b=裂隙之基礎摩擦角，[°]。

JRC=節理面粗糙度。

JCS=節理面壁體之單壓強度，[F/L²]。

當具有2組不連續面(或多組不連續面)案例，需先確定2組裂隙是否對於岩體的變形行為皆有決定性的影響，若其中有1組裂隙影響明顯較小，則比較適用於式(3-24)，若2組裂隙(或多組不連續面)對於岩體變形皆有影響，則可用Hoek Brown破壞準則進行計算(Hoek and Brown, 1997)：

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \qquad (3\text{-}25)$$

其中，

σ_1'=岩體之最大主應力，[F/L²]。

σ_3'=岩體之最小主應力，[F/L²]。

σ_c=完整岩石的抗壓強度，[F/L²]。

在完整岩石樣本情況，岩石之變形行為可視為連續體(式(3-23))；而當包含1組不連續面之岩體(式(3-23)與式(3-24))，或是包含2組以上不連續面之岩體時(式(3-25))時，其變形行為之探討需涵蓋不連續面的特性與其力學行為；若岩體包含大量不連續面，則亦可視為等效連續體進行岩體變形行為之模擬。此現象也代表著當岩石力學描述模型在特徵化與模式建置過程中或是進行模式升尺度(upscaling)的過程中，需特別注意不連續面(裂隙)之影響，並視不連續面影響程度，選擇適合之控制方程式進行模式運算。

(4) 參考案例岩體之應力分布特性探討

本工作係蒐集臺灣離島及本島結晶岩地區現地應力大小及其主應力方向等資料，目的在於歸納研究區域之應力場分布，並藉由主應力方向判別其屬於正斷層應力場、逆斷層應力場或走向滑移斷層應力場，據以搭配數值分析軟體，以離散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)建立初步之三維應力場與岩石變形特性評估模式，分析岩石與裂隙在受力作用後之變形特性及擴展情形。本工作已先行完成臺灣離島結晶岩地區既有調查報告及相關文獻內之現地應力數據蒐集，茲分述如後。

(a) 現地應力獲取方法

現地應力數據可透過直接量測或間接推測獲得

(i) 直接量測

直接量測係指透過試驗方式求得現地應力數據，其中深井的試驗可分為鑽孔方式(borehole methods)與岩心量測方式(core-based methods)兩類。鑽孔方式是透過在鑽孔內加壓產生裂隙，或觀測鑽孔因應力釋放產生變形或破裂等方法來量測現地應力，主要包含水力破裂法(hydraulic fracturing)、既存裂隙水力法(hydraulic tests on preexisting fractures)、套鑽法(over-coring)及井孔破裂(borehole breakout)等。岩心量測方式則是利用岩心因應力釋放所產生之變形來量測現地應力，主要包含音射法(acoustic emission)、音射速率分析(acoustic emission rate)、變形率分析(deformation rate)、非彈性應變回復法(anelastic strain recovery)、岩心直徑變形分析法(diameter core deformation)等。

(ii) 間接推測

間接推測係指透過地球科學觀測方式求得現地應力數據，主要包含全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)、震源機制(earthquake focal mechanism)、斷層擦痕(slickenside of fault)等方法。

除了現地應力數據之取得外，建置最終岩石應力模式(Final Rock Stress Model, FRSM)亦為相關數據應用到數值模擬或工程設計之關鍵，ISRM曾提出建置最終岩石應力模式之流程(表 3-15，Stephansson and Zang, 2012)，其以最佳評估應力模式(Best Estimate Stress Model, BESM)及既有資料為基礎，加入應力量測方法(Stress Measurement Methods, SMM)所獲得之新資料後，決定整合的應力(Integrated Stress Determination, ISD)，並根據整合結果建置最終岩石應力模式。

(b) 臺灣離島參考案例岩體之現地應力調查成果

臺灣離島結晶岩測試區過去曾進行多項現地應力調查，其使用方法包含水力破裂法、既存裂隙水力法、岩心直徑變形分析法等，茲分述如後。

(i) 水力破裂法

臺灣離島結晶岩體之現地應力曾採水力破裂法於KMBH01進行量測(楊明宗等人，2003；林蔚等人，2005；台灣電力公司，2013)，其分別於深度175 m、238 m、292 m、306 m及430 m施作，該方法最早係應用於石油開採(Clark, 1949)，而後發展為現地應力量測方法。其首先於井孔內針對試驗段進行封塞，透過地面高壓泵將壓裂液注入到試驗段後，利用液壓使岩石產生裂隙。理論上，最初生成裂隙面之法向量應平行於最小主應力(σ_3)，若配合造成裂隙生成時之液壓，即可得知最小主應力之大小及方向，並配合岩覆深度等資料推算各主應力之大小及方向。根據水力破裂法量測之結果顯示，KMBH01的應力場為走向滑移斷層應力場，詳細數據如表 3-16所示。

(ii) 既存裂隙水力法

林蔚等人(2005)曾於KMBH01深度268 m至320 m處以既存裂隙水利法進行現地應力量測，該方法之原理與水

力破裂法相同(Cornet, 1993)，惟其進行試驗之區段係選定於岩體中原本便已存在之裂隙，並量測造成該裂隙破裂時之液壓，藉以得知垂直於該裂隙面之主應力大小。根據既存裂隙水力法量測之結果顯示，KMBH01的應力場為走向滑移斷層或逆斷層應力場，詳細數據如表3-16所示。

(iii) 岩心直徑變形分析法

吳致緯(2017)利用KMBH01深度143.81 m至144.00 m、237.00 m至237.22 m及303.00 m至303.23 m之岩心進行分析，由於岩心橫切面原始應為圓形，在應力釋放後其橫切面將變形為橢圓形，故藉由量測橫切面之最大直徑(d_{max})與最小直徑(d_{min})，以及岩心之楊氏模數、柏松比即可計算水平軸差應力(Funato and Chen, 2005; Funato et al., 2012; Ito et al., 2013; Funato et al., 2014)，該研究進一步配合岩覆厚度、岩心定向資料、水力破裂法所獲得之最小主應力量值，計算出最大主應力之大小及方向。根據岩心直徑變形分析法量測之結果顯示，KMBH01的應力場為走向滑移斷層應力場，詳細數據如表 3-16所示。

(c) 臺灣離島參考案例岩體之應力數據彙整

根據前述文獻蒐集及表 3-16可知，各項現地應力的分析結果隨著不同深度、岩石異向性等均有所差異。水力破裂法所獲得之現代應力場為走向滑移斷層應力場，其最大主應力方向在深度175 m至430 m間相當一致，方位角約略在西北-東南走向的283.6°至306.4°之間，而岩心直徑變形分析法所得之現代應力場亦為走向滑移斷層應力場，在深度143.81 m至303.23 m之間，最大主應力方向由較淺處的西北-東南走向327.6°至341.9°，隨深度增加變為東北-西南走向的1.9至24.9，以及南北向的327.6至4.8。然而，既存裂隙水力法所

獲得之應力場為走向滑移斷層或逆斷層應力場，最大主應力方向約為西北-東南走向的306°至339°。

表 3-13：不同階段所需之岩石力學參數及其用途

資料來源：引用並修改自SKB TR-01-29 (SKB, 2001, p129)

調查目標	參數	調查階段				用途
		FS	ISI	CSI	DE	
裂隙/破碎帶	裂隙幾何特性參數		✓	✓	✓	在岩石力學模式區分岩體為不同岩性的分區
完整岩石之材料及力學特性	彈性模數		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	柏松比		✓	✓	✓	
	單壓強度(σ_c, m_i, s)		✓	✓	✓	
	抗拉強度		✓	✓	✓	
	剪力強度			✓	✓	
裂隙之材料及力學特性	正向勁度			✓	✓	岩石力學(離散裂隙網路)模式所需參數
	剪向勁度			✓	✓	
	剪力強度(JRC, JCS, ϕ_b, ϕ_r)			✓	✓	
不同岩性之裂隙岩體	彈性模數		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	柏松比		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	變形模數		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	剪力強度		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	基礎摩擦角(ϕ_b)		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	岩體分類法(RMR, Q)		✓	✓	✓	評估岩體之材料與力學特性及場址適宜性
	壓力波波速(Vp)		✓	✓	✓	岩石力學模式之動態分析
	剪力波波速(Vs)		✓	✓	✓	岩石力學模式之動態分析
	抗拉強度		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	單壓強度(σ_{ci}, m_b, s)		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
密度與熱特性	密度		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
	熱膨脹係數/熱傳導係數		✓	✓	✓	岩石力學模式所需參數
邊界條件與補充資料	場址應力大小與應力方向		✓	✓	✓	評估場址穩定性
	場址岩體變形觀測資料		✓	✓	✓	岩石力學模式之驗證資料
	地震活動監測	✓	✓			

表 3-14：岩石力學描述模型所需之調查技術

分項	調查類別	調查技術	所屬之SDM領域
地質構造及大地應力調查技術	孔井方法現地應力調查技術	套鑽法量測技術	岩石力學SDM
		平鈑千斤頂量測技術	岩石力學SDM
		水力破裂法量測技術	岩石力學SDM
		既存裂隙水力破裂量測技術	岩石力學SDM
		地表露頭套鑽法量測技術	岩石力學SDM
		孔內攝影搭配四向井徑量測技術	岩石力學SDM
	岩心方法現地應力調查技術	岩心音射(AE)量測技術	岩石力學SDM
		岩心非彈性應變回復(ASR)量測技術	岩石力學SDM
		岩心直徑試驗法(DCDA)量測技術	岩石力學SDM
	地質構造現地應力調查技術	全球衛星定位系統觀測	地質SDM；岩石力學SDM
		震源機制解	地質SDM；岩石力學SDM
		斷層擦痕及古應力反演技術	地質SDM；岩石力學SDM
岩石材料與力學特性調查	完整岩石樣本性質量測與分析	岩石一般物理性質試驗(含水量、孔隙率、吸水率、單位重及比重等)	岩石力學SDM
		消散耐久性試驗	岩石力學SDM
		動態彈性參數量測	岩石力學SDM
		靜態彈性參數量測	岩石力學SDM
		單軸壓縮試驗	岩石力學SDM
		點荷重試驗	岩石力學SDM
		巴西試驗	岩石力學SDM
		岩石直接剪力試驗	岩石力學SDM
		岩石三軸壓縮試驗	岩石力學SDM
		岩石潛變試驗	岩石力學SDM
		岩石單向度膨脹試驗	熱學SDM;岩石力學SDM
		岩石熱傳導特性試驗與熱擴散係數量測	熱學SDM;岩石力學SDM
	不連續面樣本性質量測與分析	岩體評分指標(RMR, Q-value)	岩石力學SDM
		裂隙正向勁度試驗	岩石力學SDM
		不連續面直接剪力試驗(剪向勁度量測)	岩石力學SDM
		節理壁面抗壓強度試驗(JCS)	岩石力學SDM
		X光繞射試驗 (黏土礦物成分)	地球化學SDM；岩石力學SDM
地質單元及地球物理調查技術	地球物理井測技術	孔內波速調查	岩石力學SDM；地質SDM
		音攝式孔內攝影井測技術	地質SDM;水文地質SDM;岩石力學SDM
		溫度井測技術	熱學SDM;岩石力學SDM
		地磁井測技術	地質SDM；岩石力學SDM
		自然加馬井測技術	地質SDM；岩石力學SDM
		孔內變形量測	岩石力學SDM；地質SDM
		垂直震測剖面探測	地質SDM；岩石力學SDM

分項	調查類別	調查技術	所屬之SDM領域
長期監測與樣本分析技術	地表長期監測	微震監測及資料解析	岩石力學SDM
		地震監測及資料解析	岩石力學SDM
		全球衛星定位連續監測與時序分析	岩石力學SDM
		地表剝蝕速率監測技術	地表系統SDM;岩石力學SDM

表 3-15：最終岩石應力模式之建置流程

Best estimate stress model (BESM)	● Data extraction ● Analysis of field data on morphology, topography, and geology ● Compilation and analysis of borehole and drill core data	Existing data
Stress measurement methods (SMM)	● Borehole methods ● Core-based methods ● Earthquakes	New data
Integrated stress determination (ISD)	● ISD model ● Numerical modeling	Integrated data
Final rock stress model (FRSM)		Final data

資料來源：修改自Stephansson and Zang (2012)

表 3-16：臺灣離島結晶岩體參考案例之現地應力數據

σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_1方向 (trend/ plunge, °)	量測深度 (m)	岩樣年代 (Ma)	應力場	使用方法	參考文獻
8.30	4.64	4.58	304.1/0	175	N/A	走向滑移斷層	水力破裂法	楊明宗等人(2003)；林蔚等人(2005)；台灣電力公司(2013)
8.41	6.31	4.54	301.8/0	238	N/A			
9.84	7.74	6.25	306.0/0	292	N/A			
10.68	8.11	5.73	306.4/0	306	N/A			
14.43	11.4	9.38	283.6/0	430	N/A			
10.29 至 12.34	6.66 至 8.62	0.76 至 2.14	306/0 至 339/0	268 至 320	N/A	走向滑移斷層或逆斷層	既存裂隙水力法	林蔚等人(2005)
7.45 至 8.59	3.71	2.90	327.6/0 至 341.9/0	143.81 至 144.00	N/A	走向滑移斷層	岩心直徑變形分析法	吳致緯(2017)
8.37 至 9.50	6.11	4.95	001.9/0 至 024.9/0	237.00 至 237.22	N/A			
13.24 至 16.70	7.81	6.41	327.6/0 至 004.8/0	303.00 至 303.23	N/A			

資料來源：楊明宗等人(2003)；林蔚等人(2005)；台灣電力公司(2013)；吳致緯(2017)

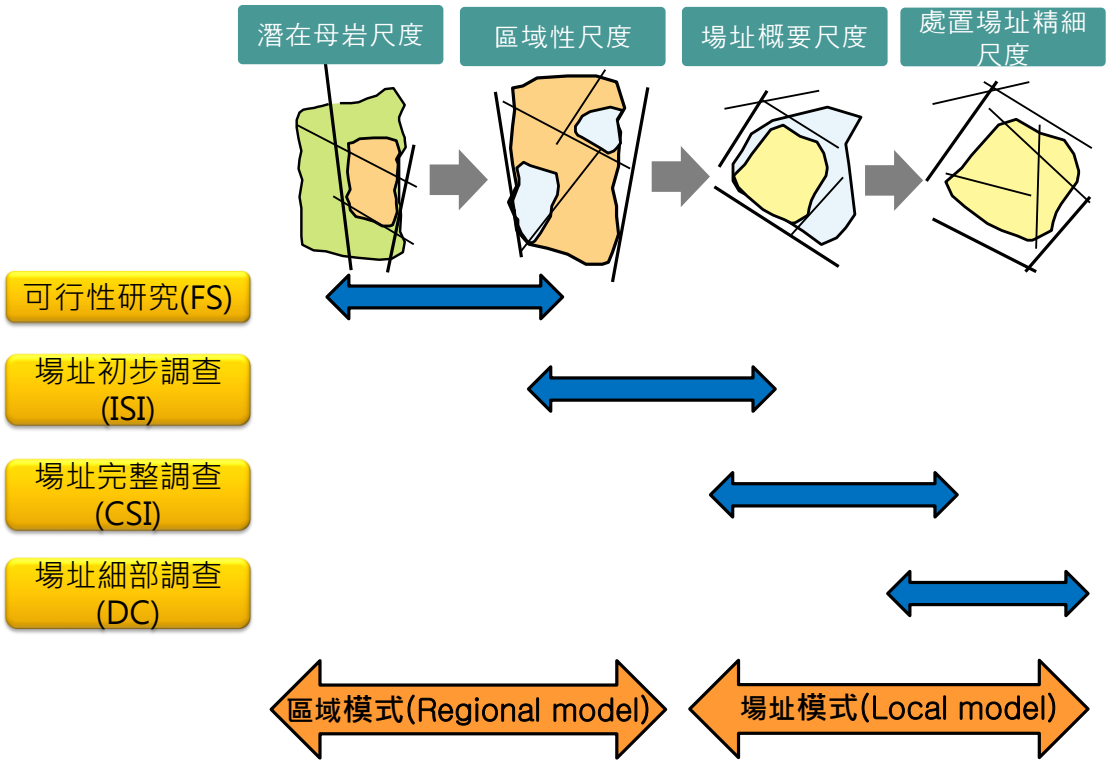


圖 3-47：不同階段所需的調查範圍(尺度)以及兩個岩石力學分析模式涵蓋範圍之關係圖

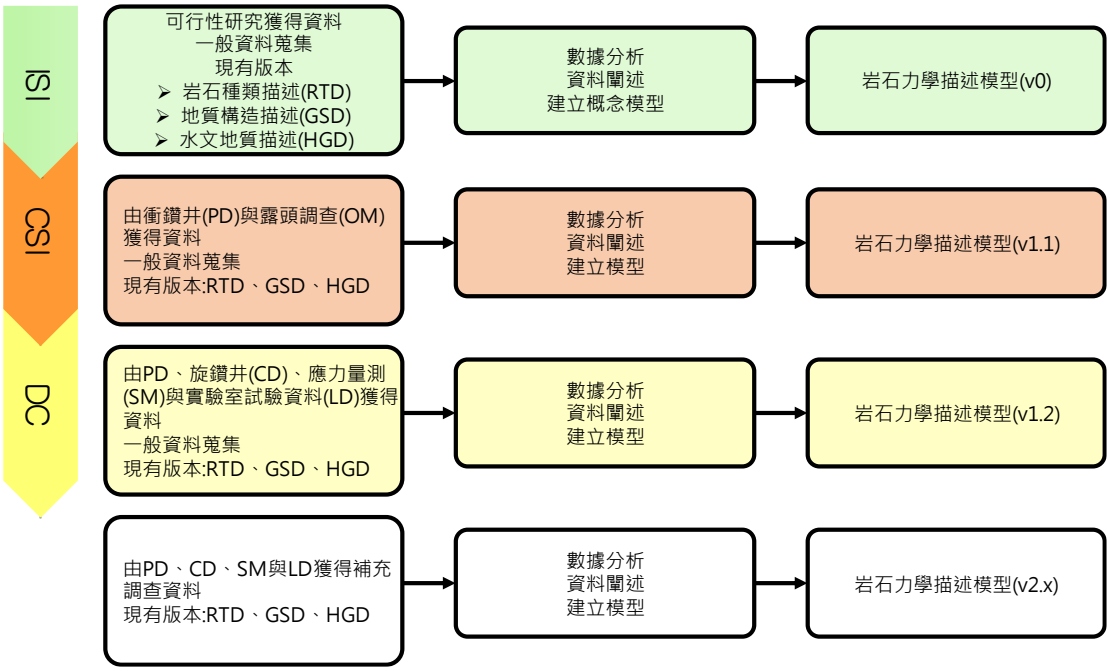


圖 3-48：岩石力學描述模型建置流程圖

資料來源：引用並修改自 SKB TR-01-29 (SKB, 2001, p127)

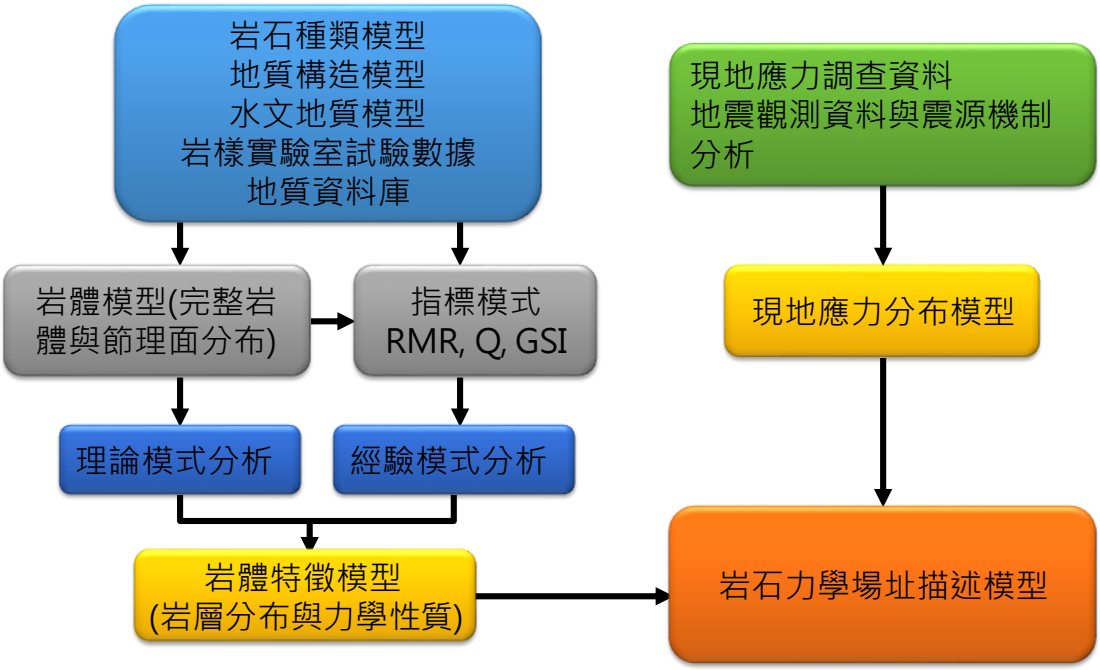


圖 3-49：岩石力學描述模型之參數特徵化與建置流程

資料來源：引用並修改自SKB TR-01-29 (SKB, 2001, p131)

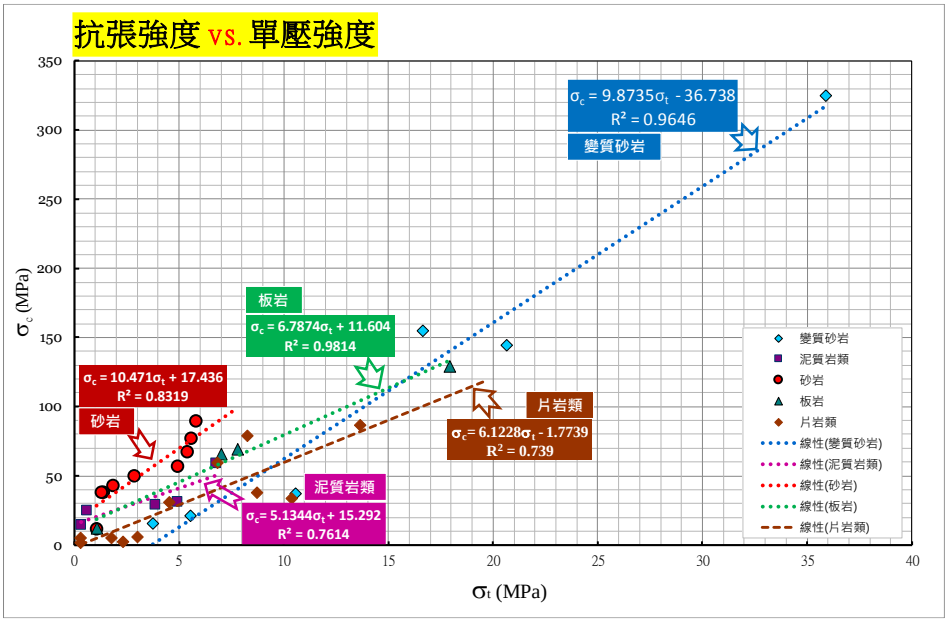


圖 3-50：不同岩性抗張強度與單壓強度關係圖

註：

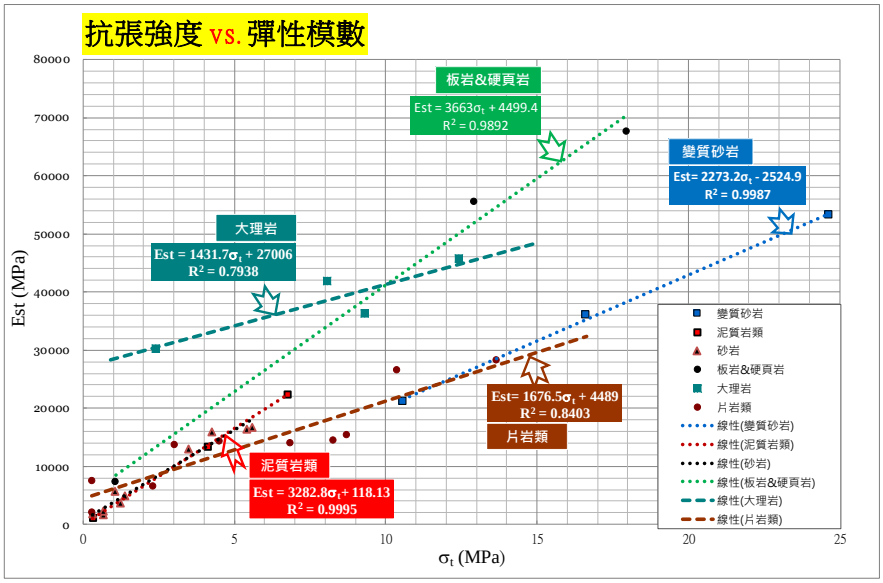
藍色菱形：變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-25)

紫色正方形：泥質岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-25)

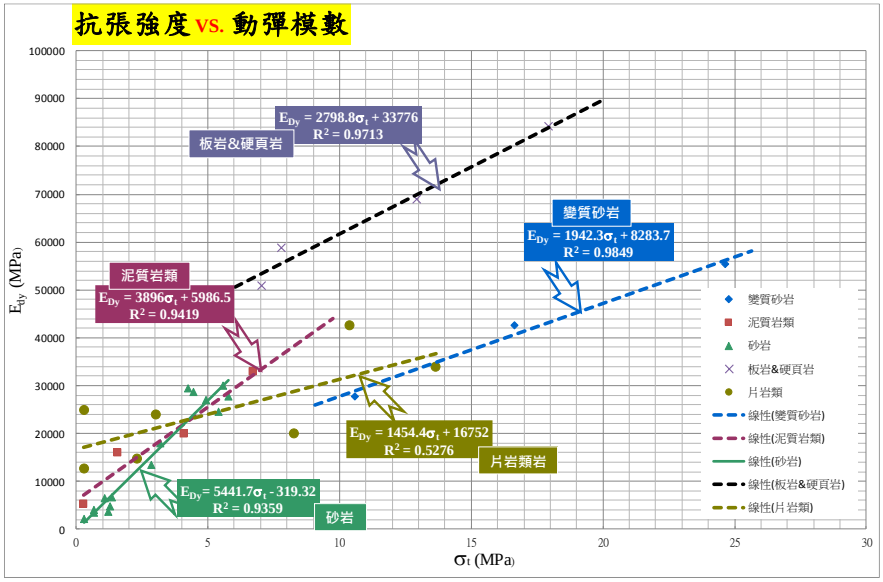
紅色圓形：未變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-25)

深藍色三角形：板岩及硬頁岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-25)

紅色菱形：片岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-25)



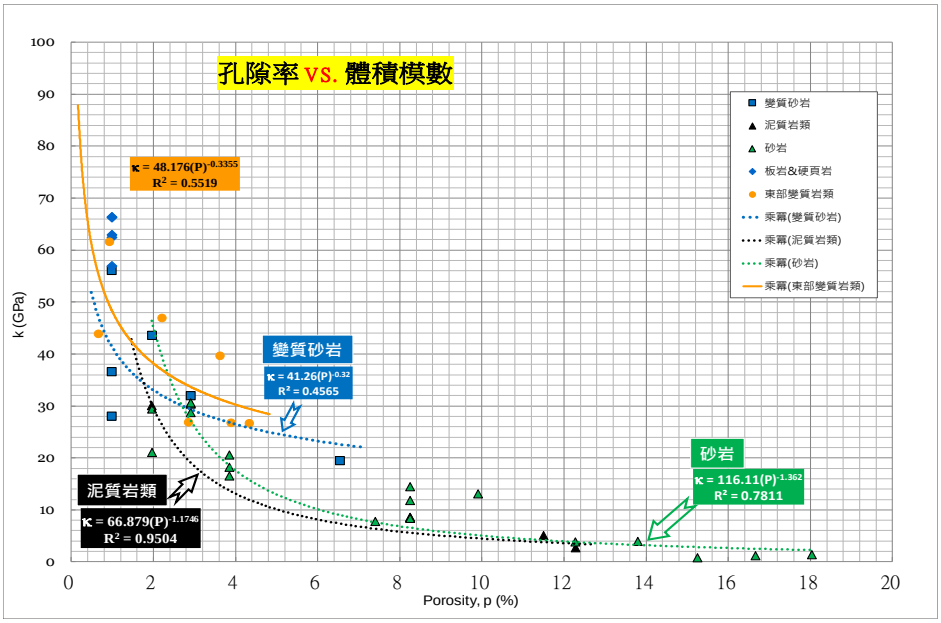
(a) 靜彈性模數



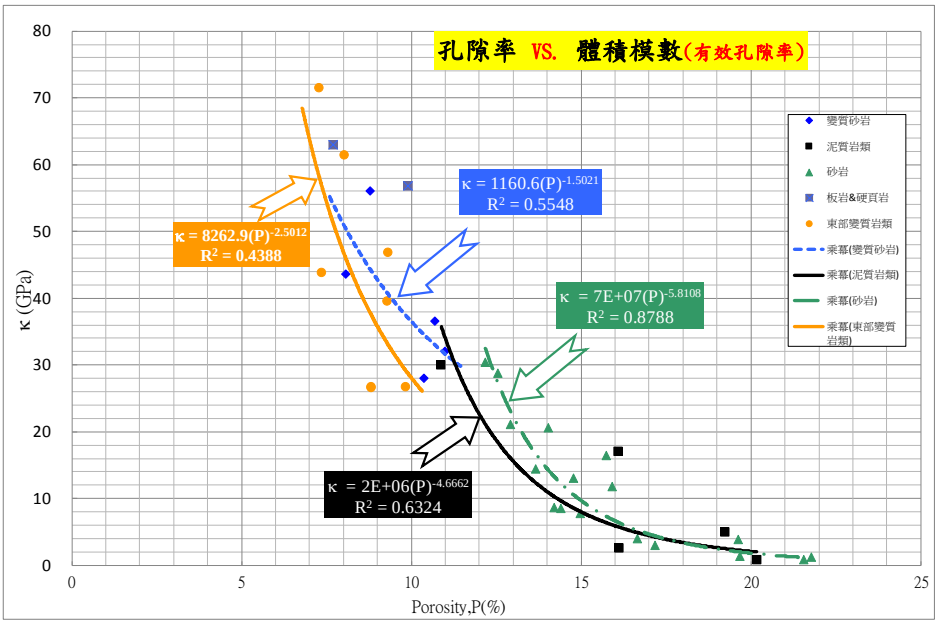
(b) 動彈性模數

圖 3-51：不同岩性抗張強度與動彈性模數關係圖

註(a)：
藍色正方形：變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-23)
紅色正方形：泥質岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-23)
紅色三角形：砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-23)
深藍色圓形：板岩及硬頁岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-23)
綠色正方形：大理岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-23)
紅色圓形：片岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-23)
註(b)：
藍色菱形：變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-24)
紫色正方形：泥質岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-24)
綠色三角形：砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-24)
打叉形：板岩及硬頁岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-24)
綠色圓形：片岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-24)



(a)真孔隙率



(b)有效孔隙率

圖 3-52：不同岩性孔隙率與體積模數關係圖

註(a)：
藍色正方形：變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-26)
黑色三角形：泥質岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-26)
綠色三角形：砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-26)
藍色菱形：板岩及硬頁岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-26)
橘色圓形：大理岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-26)
註(b)：
藍色菱形：變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-27)
黑色正方形：泥質岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-27)
綠色三角形：砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-27)
藍色正方形：板岩及硬頁岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-27)
橘色圓形：東部變質砂岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-27)

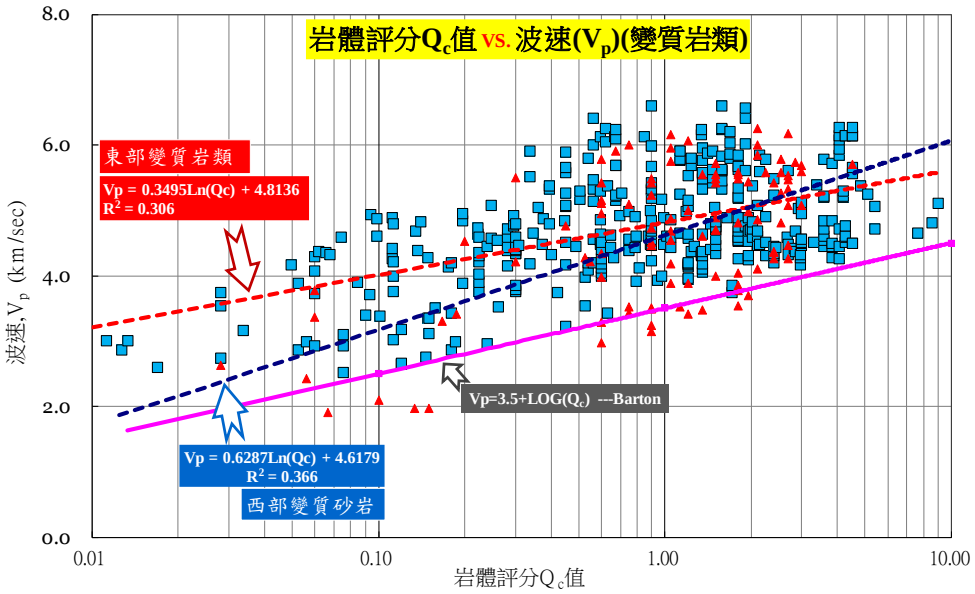


圖 3-53：岩體評分Q值與波速Vp(km/sec)

註：
紅色三角形：西部變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-28)
藍色正方形：東部變質岩類(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-29)
紫色實線：Barton, N. (2006), Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy, Taylor & Francis.

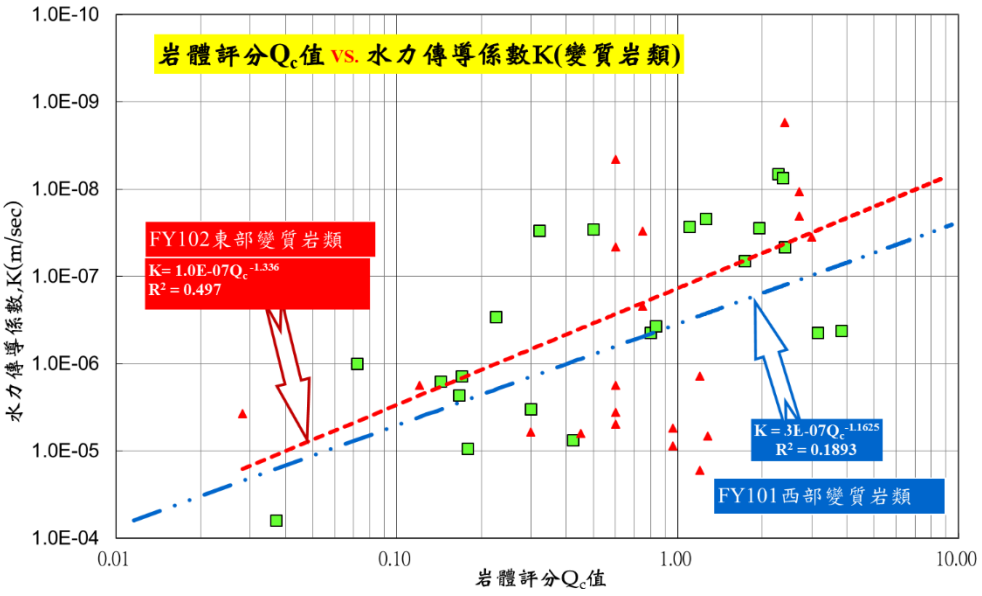


圖 3-54：岩體評分Q值與水力傳導係數K(m/sec)

註：
紅色三角形：東部變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013，圖2.3.4-28)
綠色正方形：東部變質砂岩(經濟部中央地質調查所，2013)

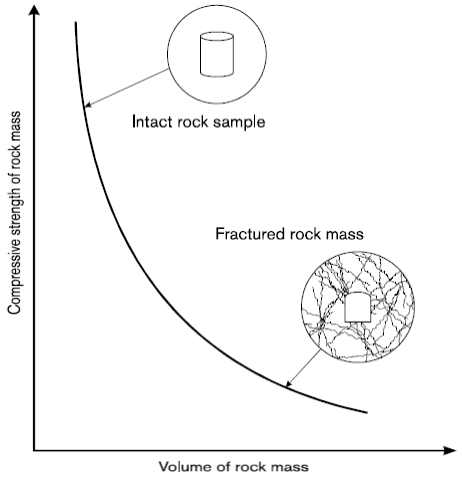


圖 3-55：尺寸效應對岩石單壓強度影響之示意圖

資料來源：SKB TR-01-29 (SKB, 2001, p125)

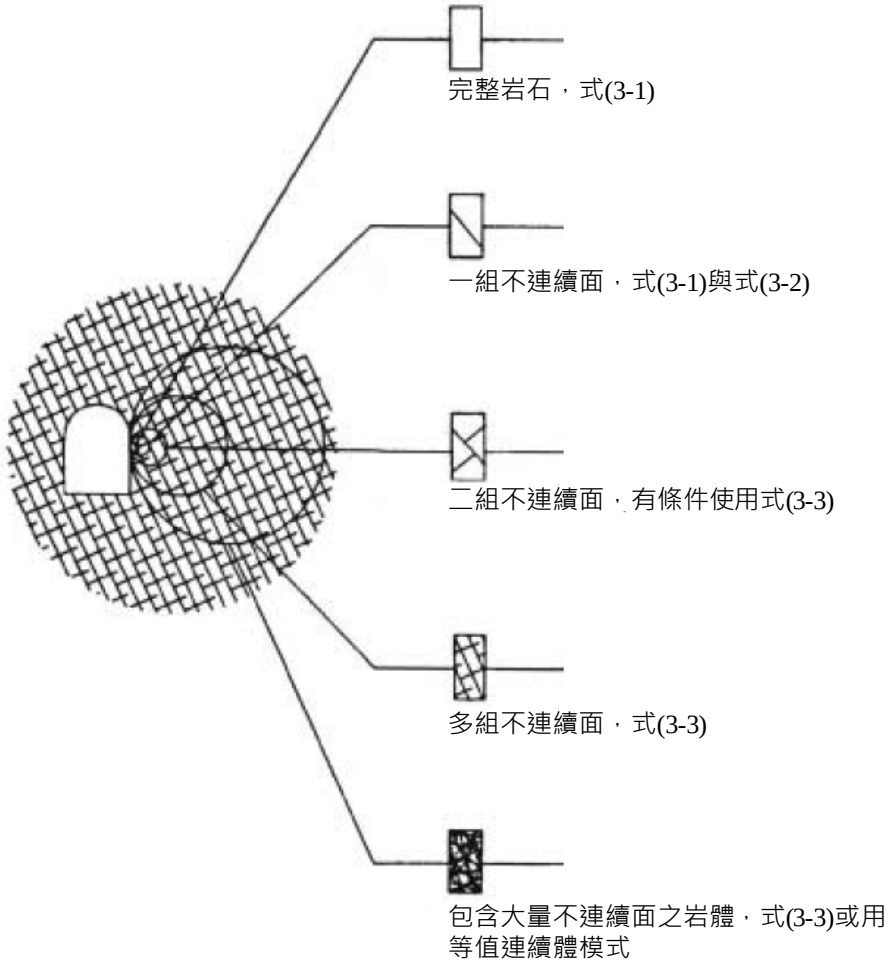


圖 3-56：不同試體尺寸與其採用之Hoek-Brown破壞準則計算公式條件

資料來源：引用並修改自SKB TR-01-29 (SKB, 2001, p142)

4. 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進

4.1. 用過核子燃料特性研究與分析技術

4.1.1. 核種存量與衰變熱分析技術

因用過核子燃料內部的放射性核種具衰變作用特性，會隨著時間逐漸改變廢棄物罐中的放射性核種組成與盤存量，在技術發展上，需考量各種放射性核種的衰變作用以計算子核種的形成，直到衰變到穩定的核種，同時也會計算衰變過程中釋放出的α、β、γ射線、中子等能量及分布條件，以提供進行相關工程障壁性能需求計算與安全評估核種傳輸與遲滯計算。

108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本項工作使用美國橡樹嶺國家實驗室所發展的SCALE6程式集(ORNL, 2011, p550-p637)，版次為6.1.3。SCALE6為一套計算反應器中子物理與屏蔽分析的程式集，其中ORIGEN-ARP程式為其中的程式模組，功能為計算用過核子燃料燃耗與衰變分析，其介面為Windows GUI介面，便於使用。

(2) 參數需求說明：

(a) 用過核子燃料幾何參數：用過核子燃料之幾何參數來源為本公司核一、二廠所使用燃料型號之設計。

(b) 用過核子燃料的燃耗值：取自SIMULATE-3程式的計算結果。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 用過核子燃料在不同條件下的衰變熱敏感度分析：

利用ORIGEN-ARP進行用過核子燃料衰變熱在不同設定條件下的敏感度分析，討論在不同燃料設計、不同鈾濃化度、不同退出燃耗及不同冷卻時間下的比較。探討用過核子燃料退出爐心之後並冷卻20年至100年期間，影響衰變熱的主要參數，評估案例如表 4-1。

CASE1:計算結果顯示於圖 4-1。從圖上可以得知，相同型式但不同鈾濃化度的用過核子燃料在每個時間點的衰變熱幾乎沒差異，皆與冷卻時間呈現相同下降趨勢。第20年的冷卻

時間的衰變熱最大差異不到3%，之後隨著冷卻時間增加而差距越來越小；整體而言，低濃化度的燃料衰變熱比高濃化度的衰變熱稍微高一些。

CASE2:計算結果呈現於圖 4-2。從圖上可知道，相同鈾濃化度但不同燃料型式的用過核子燃料在每個時間點的衰變熱幾乎沒差異，皆與冷卻時間呈現相同下降趨勢。第20年冷卻時間點的衰變熱最大差異不到2%，但會隨著冷卻時間慢慢增加，至第100年時約為5%，差異仍然很小。

CASE3:計算結果繪於圖 4-3。從圖上可知道，相同燃料但不同燃耗值的用過核子燃料在每個時間點的衰變熱差異非常大，雖然皆隨著冷卻時間而下降，但下降曲線幅度皆不同。整體而言，用過核子燃料的高燃耗值越高，其衰變熱就越大，其隨著冷卻時間的下降比例也大，但整條曲線仍在低燃耗燃料的曲線上方。在第20年冷卻時間，衰變熱差異73%，之後隨著冷卻時間增加而差距縮小，但在第100年冷卻時間點仍有50%的差距。

綜觀以上，影響用過核子燃料衰變熱的最大的2個條件為燃耗值以及冷卻時間。燃耗越高，衰變熱數值就越大；冷卻時間越短，衰變熱數值就越大，但是衰變熱對於不同燃料設計的差異不大。

(b) 衰變熱關係曲線：

使用核一廠全部用過燃料冷卻至2054年底至2104年底的各年衰變熱總和，以2054年底的衰變熱總和為基準，歸一化至1,200 W得到CSALL衰變熱曲線，如圖 4-4所示。將其歸一化至1.0，並以3項指數函數做曲線擬合得到CSALL衰變熱方程式，如圖 4-5所示。

(c) 廢棄物罐裝填用過核子燃料之排程：

在不考慮未來週期之用過核子燃料的前提下，冷卻至2054年底，廢棄物罐熱負載的平均值，核一廠為1,131 W，核二廠為1,256 W。

考慮我國的地理位置地溫較高，降低廢棄物罐的熱負載，可以在不利的地質條件下取得符合經濟效益的處置孔間距，因此，規劃裝載期程的順序為核一廠最先，核二廠其次，藉由更長的冷卻時間，來降低核二廠用過核子燃料的衰變熱。

假定封裝場每年可以處置50罐，依據各核電廠運轉40年的用過核子燃料數目，可分別計算封裝場處置完各核電廠用過核子燃料所需要的時間如下列：

(i) 核一廠 6,874束燃料573罐需時11.5年

(ii) 核二廠 11,016束燃料918罐需時18.4年

(d) 分析單一廢棄物罐之最大總衰變熱與核種存量

表 4-2是計算各核電廠用過核子燃料第一年裝載時，用過核子燃料衰變熱的平均值，以及廢棄物罐熱負載的平均值。由表 4-2的結果可知，依據裝載期程初步規劃，兩個電廠第一年裝載時廢棄物罐熱負載的最大平均值是1,148 W，加計50 W的保守度(SKB, 2010h, p56)後得到1,198 W，取整數1,200 W，做為現階段廢棄物罐熱負載的設計值，提供給處置孔熱間距分析使用，唯實際配置用過核子燃料時，熱負載的上限是1,150 W。

另有關核種存量計算係利用SCALE6執行，其中ORIGEN-ARP程式為其中的程式模組，功能為計算用過核子燃料燃耗與衰變分析。SCALE程式集也是國際上常見並具有公信力的程式。本節的工作最主要的目的是要評估RG 3.54修訂1版(US NRC, 1999, p1-p26)搭配CR-6999方法(US NRC, 2010, p1-p63)計算的衰變熱與ORIGEN-ARP的計算值哪一個較為保守。RG 3.54修訂1版是美國核管會評估用過核子燃料衰變熱所使用的管制導則，由於放射性核種的衰變不會因為其所在環境的不同而發生改變，可適用於保守評估高放用過核子燃料冷卻時間在110年內的衰變熱。

將核一廠的用過核子燃料以退出週期來做分類，也就是退出批次，同一批退出的用過核子燃料到2054年底的冷卻時間皆

相同。本研究會將每一批退出的核子燃料裡選擇最大燃耗值的燃料束來作為分析對象，共53束燃料(一號機26束，二號機27束)。依上述將核一廠兩部機組每一批退出的核子燃料裡選擇最大燃耗值的燃料束來作為分析對象，共53束燃料(一號機26束，二號機27束)，詳細資料列於表 4-3及表 4-4，根據以上表格的數據進行ORIGEN-ARP的計算，擷取輸出檔的衰變熱計算結果，與RG 3.54修訂1版的計算值進行比較。由圖 4-6及可以看到，藍色長條為RG 3.54修訂1版計算結果，紅色則為ORIGEN-ARP的計算結果，RG 3.54修訂1版的衰變熱計算結果皆大於ORIGEN-ARP的計算結果。可以認定RG 3.54修訂1版方法的計算結果，相較於ORIGEN-ARP的保守。因此，在評估廢棄物罐的最大熱負載，會使用RG 3.54修訂1版的方法計算每一束燃料的衰變熱來進行評估，但RG 3.54的適用範圍為最大冷卻時間110年，長期的衰變熱冷卻曲線仍須ORIGEN-ARP的應用。

擷取輸出檔的核種濃度數據，依據參考資料(邱一夫，2017，p4-2)篩選的34個重要核種進行評估，結果列於表 4-5及表 4-6。表格中的紅底紅字代表核種在該燃料為最大值。

(4) 結果與討論：

(a) 影響用過核子燃料衰變熱的最大的2個條件為燃耗值及冷卻時間。燃耗越高，衰變熱數值就越大；冷卻時間越短，衰變熱數值就越大，但是衰變熱對於不同燃料設計的差異不大。

(b) 現階段熱間距分析使用CSALL衰變熱曲線，來代表每一個廢棄物罐其熱負載隨時間之變化是合理的假設。

(c) 依據「用過核子燃料最終處置計畫書2018年修訂版」所預估的用過核子燃料總數量，廢棄物罐的最低需求為2,571罐。

(d) 配合裝載期程的初步規劃，現階段廢棄物罐熱負載的設計值是1,200 W，提供給處置孔熱間距分析使用，唯實際配置用過核子燃料時，熱負載的上限是1,150 W。

表 4-1：核種存量與衰變熱分析技術之案例編號與說明表

案例編號	案例說明
CASE1:	固定在平均比功率(specific power)為23 MW/MTU、燃耗值為45,000 MWD/MTU，進行鈾濃化度在3.0、3.5、4.0、4.5的條件下，冷卻時間從20年至100年每間隔5年進行衰變熱計算。
CASE2:	固定在平均比功率(specific power)為23 MW/MTU、鈾濃化度為3.0、燃耗值在45000 MWD/MTU，進行燃料型式為8×8、9×9、10×10的條件下，冷卻時間從20年至100年每間隔5年進行衰變熱計算。
CASE3:	固定在平均比功率(specific power)為23 MW/MTU、鈾濃化度為3.0，進行燃耗值在35,000 MWD/MTU、45,000 MWD/MTU、55,000 MWD/MTU的條件下，冷卻時間從20年至100年每間隔5年進行衰變熱計算。

表 4-2：各核電廠用過核子燃料第一年裝載時廢棄物罐熱負載的平均值

冷卻至2054年底		平均衰變熱(W)	廢棄物罐熱負載平均值 (W)
核 一		94.2	1,131
冷卻至2065年底		平均衰變熱(W)	廢棄物罐熱負載平均值 (W)
核二	不含未來週期產生的692束用過核子燃料	89.4	1,073
	加入未來週期產生的692束用過核子燃料	95.7	1,148

表 4-3：核一廠一號機各退出批次最大燃耗的用過核子燃料資訊

退出週期(批次)	最大燃耗 MWD/kgU	燃料數量	燃料ID	載入週期	受輻照的週期數	鈾重(g)	濃化度	比功率 MW/ kgU	至2055的冷卻時間(年)
2	17.457	256	LJ1477	1	2	186,111	1.900	16.642	74.186
3	19.325	64	LJ1306	1	2	186,111	1.900	17.860	73.052
4	24.613	112	LJC871	2	3	182,612	2.660	27.755	72.233
5	33.31	128	LJC891	2	4	182,612	2.660	26.859	71.107
6	33.144	132	LJL102	3	4	182,185	2.840	24.890	69.797
7	33.902	124	LJL120	4	4	182,185	2.840	24.631	68.477
8	33.333	124	CH1116	6	3	175,382	3.140	28.134	67.208
9	33.737	104	CH1067	7	3	175,382	3.140	28.408	65.841
10	31.244	104	CH2183	8	3	175,382	3.140	25.262	64.378
11	34.118	83	CH1312	8	4	175,871	3.000	21.687	63.170
12	34.472	92	CH2450	9	4	175,382	3.140	24.180	62.184
13	34.807	107	CH2543	10	4	175,382	3.140	25.340	61.063
14	36.091	117	CH1661	10	5	175,382	3.140	20.453	59.762
15	34.995	124	CH2551	12	4	175,382	3.140	24.132	58.367
16	37.032	141	CBA111	13	4	177,994	3.000	23.491	56.940
17	38.257	128	CBD104	15	3	177,433	3.250	28.322	55.334
18	36.831	152	CAD149	16	3	177,433	3.250	27.494	53.951
19	43.082	116	CAC110	15	4	177,994	3.000	19.388	52.348
20	39.712	128	CAF015	18	3	177,654	3.260	30.024	50.970
21	41.441	104	CAF131	18	4	177,410	3.250	22.891	49.364
22	43.772	125	C1A096	20	3	178,011	3.507	32.061	47.860
23	44.622	101	C1B062	21	3	178,190	3.505	30.973	46.279
24	49.232	104	C1B520	21	4	178,055	3.505	23.692	44.710
25	51.725	100	C1C038	22	4	178,241	3.845	25.061	43.123
26	51.718	112	C1D080	23	5	178,522	4.031	25.782	41.792
27	50.659	408	C1E060	24	4	177,842	4.026	25.406	40.085

表 4-4：核一廠二號機各退出批次最大燃耗的用過核子燃料資訊

退出週期(批次)	最大燃耗 MWD/ kgU	燃料數量	燃料ID	載入週期	受輻照的週期數	鈾重(g)	濃化度	比功率 MW/ kgU	至2055的冷卻時間(年)
2	18.787	191	LJ4661	1	2	186,111	1.900	20.532	73.427
3	21.141	140	LJ4802	1	3	186,111	1.900	18.461	72.378
4	29.759	128	LJL284	2	3	182,540	2.840	28.570	71.271
5	33.688	132	LJL247	2	4	182,540	2.840	24.184	70.088
6	32.782	116	LJL503	4	3	182,398	2.840	30.108	68.816
7	33.556	131	LY1906	4	4	182,398	2.840	23.094	67.556
8	34.583	116	CH2030	6	3	175,382	3.140	29.604	66.247
9	31.422	108	CH2136	7	3	175,382	3.140	26.220	64.803
10	33.358	112	CH1342	7	4	175,871	3.000	20.392	63.353
11	33.528	100	CH2296	8	4	175,382	3.140	20.939	62.142
12	34.435	89	CH1632	9	4	175,382	3.140	22.732	60.882
13	35.152	84	CH1711	10	4	175,382	3.140	24.937	59.923
14	35.438	132	CH1744	10	5	175,382	3.140	20.204	58.786
15	39.042	116	CAA035	12	4	178,531	2.990	26.270	57.178
16	36.274	148	CBA004	12	5	178,531	2.990	19.226	55.775
17	37.858	132	CBC042	15	3	178,049	3.250	27.437	54.205
18	38.989	116	CAD027	16	3	178,049	3.250	29.894	52.882
19	41.66	112	CBE163	16	4	177,433	3.250	23.589	51.351
20	38.56	100	CBG054	18	3	177,823	3.300	29.413	49.907
21	43.655	116	C2A102	19	3	178,055	3.505	31.573	48.359
22	49.319	120	C2A112	19	4	178,055	3.505	24.463	46.863
23	51.034	96	C2B018	20	4	178,190	3.505	24.786	45.263
24	50.165	108	C2C048	21	4	178,375	3.828	24.483	43.833
25	50.639	112	C2D504	22	4	178,142	4.005	24.522	42.252
26	51.786	116	C1E512	23	4	178,412	4.036	24.897	40.704
27	51.389	104	C2F007	24	4	178,412	4.036	24.766	39.115
28	51.336	408	C2G523	25	4	177,278	4.047	24.227	37.605

表 4-5：核一廠一號機各退出批次代表性燃料的重要核種計算結果

單位：g (紅底紅字代表該核種的最大值)

單位: g	退出週期	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	ID	LJ1477	LJ1306	LJC871	LJC891	LJL102	LJL120	CH1116	CH1067	CH2183	CH1312	CH2450	CH2543	CH1661	CH2551	CBA111	CBD104	CAD149	CAC110	CAF015	CAF131	C1A096	C1B062	C1B520	C1C038	C1D080	C1E060
	燃耗 GWD/MTU	17.457	19.325	24.613	33.31	33.144	33.902	33.333	33.737	31.244	34.118	34.472	34.807	36.091	34.995	37.032	38.257	36.831	43.082	39.712	41.441	43.772	44.622	49.232	51.725	51.718	50.659
	冷卻時間 (年)	74.186	73.052	72.233	71.107	69.797	68.477	67.208	65.841	64.378	63.170	62.184	61.063	59.762	58.367	56.940	55.334	53.951	52.348	50.970	49.364	47.860	46.279	44.710	43.123	41.792	40.085
分裂與活化產物	c14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	cl36	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	ni59	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	se79	4.85E-01	5.33E-01	6.69E-01	8.77E-01	8.78E-01	8.95E-01	8.63E-01	8.72E-01	8.15E-01	8.79E-01	8.89E-01	8.96E-01	9.25E-01	9.01E-01	9.44E-01	9.79E-01	9.46E-01	1.08E+00	1.01E+00	1.05E+00	1.12E+00	1.14E+00	1.23E+00	1.31E+00	1.32E+00	1.29E+00
	sr90	8.93E+00	9.92E+00	1.34E+01	1.71E+01	1.78E+01	1.87E+01	1.92E+01	2.01E+01	1.96E+01	2.10E+01	2.21E+01	2.29E+01	2.39E+01	2.44E+01	2.57E+01	2.84E+01	2.85E+01	3.13E+01	3.25E+01	3.41E+01	3.87E+01	4.07E+01	4.42E+01	4.93E+01	5.21E+01	5.33E+01
	zr93	7.06E+01	7.71E+01	9.91E+01	1.28E+02	1.29E+02	1.31E+02	1.28E+02	1.29E+02	1.21E+02	1.30E+02	1.32E+02	1.33E+02	1.37E+02	1.33E+02	1.38E+02	1.45E+02	1.40E+02	1.57E+02	1.49E+02	1.54E+02	1.65E+02	1.68E+02	1.81E+02	1.93E+02	1.96E+02	1.92E+02
	nb94	1.07E-04	1.26E-04	1.59E-04	2.39E-04	2.23E-04	2.30E-04	2.26E-04	2.31E-04	1.97E-04	2.17E-04	2.22E-04	2.30E-04	2.22E-04	2.27E-04	2.38E-04	2.57E-04	2.42E-04	2.73E-04	2.77E-04	2.65E-04	3.20E-04	3.24E-04	3.32E-04	3.51E-04	3.49E-04	3.35E-04
	tc99	8.19E+01	8.99E+01	1.12E+02	1.46E+02	1.45E+02	1.48E+02	1.43E+02	1.45E+02	1.36E+02	1.46E+02	1.48E+02	1.49E+02	1.53E+02	1.49E+02	1.55E+02	1.61E+02	1.56E+02	1.76E+02	1.66E+02	1.72E+02	1.83E+02	1.86E+02	2.00E+02	2.12E+02	2.14E+02	2.10E+02
	pd107	2.11E+01	2.46E+01	2.75E+01	4.40E+01	4.16E+01	4.31E+01	3.66E+01	3.74E+01	3.29E+01	3.96E+01	3.87E+01	3.93E+01	4.17E+01	3.97E+01	4.77E+01	4.69E+01	4.42E+01	5.97E+01	4.96E+01	5.30E+01	5.43E+01	5.60E+01	6.53E+01	6.59E+01	6.33E+01	6.11E+01
	sn126	2.02E+00	2.29E+00	2.67E+00	3.88E+00	3.76E+00	3.87E+00	3.52E+00	3.57E+00	3.24E+00	3.70E+00	3.67E+00	3.72E+00	3.89E+00	3.74E+00	4.15E+00	4.19E+00	4.00E+00	5.00E+00	4.39E+00	4.63E+00	4.84E+00	4.97E+00	5.62E+00	5.80E+00	5.70E+00	5.53E+00
	i129	1.56E+01	1.75E+01	2.08E+01	2.92E+01	2.85E+01	2.93E+01	2.70E+01	2.73E+01	2.50E+01	2.81E+01	2.80E+01	2.83E+01	2.95E+01	2.85E+01	3.13E+01	3.18E+01	3.05E+01	3.70E+01	3.32E+01	3.47E+01	3.64E+01	3.72E+01	4.15E+01	4.29E+01	4.25E+01	4.14E+01
	cs135	3.95E+01	4.16E+01	4.61E+01	6.17E+01	6.72E+01	6.91E+01	6.00E+01	6.03E+01	6.11E+01	7.18E+01	6.88E+01	6.72E+01	8.02E+01	6.98E+01	8.42E+01	7.71E+01	7.63E+01	1.06E+02	7.65E+01	9.54E+01	8.20E+01	8.54E+01	1.09E+02	1.15E+02	1.14E+02	1.14E+02
	cs137	2.16E+01	2.45E+01	3.14E+01	4.32E+01	4.40E+01	4.64E+01	4.55E+01	4.75E+01	4.55E+01	5.06E+01	5.24E+01	5.44E+01	5.74E+01	5.81E+01	6.41E+01	6.90E+01	6.86E+01	8.12E+01	7.94E+01	8.45E+01	9.41E+01	9.94E+01	1.11E+02	1.22E+02	1.26E+02	1.28E+02
鈍系核種與子核	th232	1.32E-03	1.37E-03	1.92E-03	2.17E-03	2.26E-03	2.25E-03	2.29E-03	2.27E-03	2.17E-03	2.16E-03	2.22E-03	2.20E-03	2.21E-03	2.15E-03	2.14E-03	2.26E-03	2.20E-03	2.15E-03	2.20E-03	2.20E-03	2.31E-03	2.28E-03	2.32E-03	2.51E-03	2.58E-03	2.51E-03
	u236	4.03E+02	4.24E+02	5.90E+02	6.69E+02	7.04E+02	7.10E+02	7.41E+02	7.44E+02	7.22E+02	7.21E+02	7.49E+02	7.52E+02	7.61E+02	7.53E+02	7.33E+02	7.95E+02	7.84E+02	7.64E+02	8.08E+02	8.16E+02	8.90E+02	8.94E+02	9.10E+02	1.01E+03	1.06E+03	1.05E+03
	pu240	3.43E+02	3.82E+02	3.63E+02	4.84E+02	4.80E+02	4.88E+02	4.92E+02	4.96E+02	4.66E+02	5.11E+02	5.05E+02	5.08E+02	5.22E+02	5.10E+02	4.29E+02	4.45E+02	4.30E+02	5.00E+02	4.65E+02	4.90E+02	5.23E+02	5.31E+02	5.67E+02	5.90E+02	5.94E+02	5.84E+02
	th229	2.22E-07	2.43E-07	3.12E-07	4.61E-07	4.73E-07	4.83E-07	4.31E-07	4.27E-07	3.85E-07	4.70E-07	4.45E-07	4.32E-07	5.16E-07	4.27E-07	5.31E-07	4.81E-07	4.45E-07	8.81E-07	4.61E-07	6.43E-07	5.24E-07	5.54E-07	9.55E-07	1.01E-06	9.56E-07	9.00E-07
	u233	1.04E-03	1.15E-03	1.50E-03	1.96E-03	1.96E-03	1.97E-03	1.91E-03	1.90E-03	1.72E-03	1.85E-03	1.86E-03	1.85E-03	1.89E-03	1.79E-03	1.89E-03	1.91E-03	1.82E-03	1.94E-03	1.83E-03	1.84E-03	1.94E-03	1.92E-03	2.00E-03	2.11E-03	2.11E-03	2.01E-03
	np237	3.92E+01	4.44E+01	5.73E+01	7.98E+01	7.88E+01	8.05E+01	7.43E+01	7.52E+01	6.73E+01	7.65E+01	7.65E+01	7.72E+01	8.07E+01	7.70E+01	8.89E+01	9.01E+01	8.66E+01	9.88E+01	9.19E+01	9.46E+01	9.97E+01	1.01E+02	1.11E+02	1.17E+02	1.17E+02	1.13E+02
	am241	1.02E+02	1.17E+02	1.35E+02	1.78E+02	1.72E+02	1.76E+02	1.59E+02	1.61E+02	1.45E+02	1.69E+02	1.65E+02	1.67E+02	1.75E+02	1.68E+02	1.83E+02	1.83E+02	1.78E+02	1.93E+02	1.84E+02	1.83E+02	1.91E+02	1.92E+02	2.02E+02	2.05E+02	2.04E+02	1.97E+02
	cm245	1.80E-02	3.04E-02	6.50E-02	2.89E-01	2.31E-01	2.58E-01	5.07E-02	5.42E-02	3.54E-02	6.68E-02	6.08E-02	6.36E-02	7.66E-02	6.55E-02	5.60E-01	4.64E-01	3.93E-01	1.04E+00	5.42E-01	6.65E-01	5.95E-01	6.50E-01	9.42E-01	7.33E-01	5.44E-01	5.15E-01
	pb210	1.07E-08	1.00E-08	1.27E-08	1.14E-08	1.18E-08	1.12E-08	1.18E-08	1.11E-08	1.09E-08	9.87E-09	9.79E-09	9.25E-09	9.03E-09	8.31E-09	7.14E-09	6.96E-09	6.63E-09	5.79E-09	5.53E-09	5.31E-09	4.96E-09	4.55E-09	4.33E-09	4.35E-09	4.27E-09	3.89E-09
	ra226	1.73E-06	1.64E-06	2.10E-06	1.91E-06	1.99E-06	1.91E-06	2.02E-06	1.93E-06	1.90E-06	1.74E-06	1.75E-06	1.67E-06	1.64E-06	1.54E-06	1.36E-06	1.35E-06	1.30E-06	1.14E-06	1.13E-06	1.09E-06	1.05E-06	9.78E-07	9.28E-07	9.46E-07	9.45E-07	8.79E-07
	th230	5.13E-03	4.97E-03	6.50E-03	6.11E-03	6.43E-03	6.28E-03	6.67E-03	6.50E-03	6.49E-03	6.06E-03	6.17E-03	6.02E-03	5.96E-03	5.76E-03	5.33E-03	5.44E-03	5.35E-03	4.85E-03	4.92E-03	4.83E-03	4.85E-03	4.66E-03	4.51E-03	4.72E-03	4.81E-03	4.62E-03
	u234	2.55E+01	2.55E+01	3.39E+01	3.46E+01	3.65E+01	3.65E+01	3.79E+01	3.77E+01	3.77E+01	3.66E+01	3.77E+01	3.75E+01	3.79E+01	3.73E+01	3.77E+01	3.91E+01	3.89E+01	3.83E+01	3.84E+01	3.89E+01	4.01E+01	3.99E+01	4.05E+01	4.31E+01	4.44E+01	4.38E+01
	u238	1.80E+05	1.80E+05	1.75E+05	1.73E+05	1.73E+05	1.72E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.65E+05	1.66E+05	1.68E+05	1.67E+05	1.67E+05	1.67E+05	1.67E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.65E+05	1.65E+05	1.65E+05
	pu238	4.12E+00	5.21E+00	7.18E+00	1.43E+01	1.40E+01	1.49E+01	1.13E+01	1.17E+01	9.96E+00	1.35E+01	1.31E+01	1.34E+01	1.55E+01	1.40E+01	2.23E+01	2.15E+01	2.04E+01	3.14E+01	2.36E+01	2.75E+01	2.68E+01	2.84E+01	3.63E+01	3.75E+01	3.61E+01	3.53E+01
	pu242	3.16E+01	4.09E+01	5.31E+01	1.06E+02	9.59E+01	1.01E+02	7.63E+01	7.90E+01	6.33E+01	8.72E+01	8.36E+01	8.60E+01	9.47E+01	8.72E+01	1.24E+02	1.19E+02	1.10E+02	1.61E+02	1.28E+02	1.38E+02	1.41E+02	1.47E+02	1.80E+02	1.83E+02	1.73E+02	1.65E+02
	cm246	1.22E-03	2.34E-03	5.49E-03	3.99E-02	2.99E-02	3.47E-02	5.50E-03	5.98E-03	3.53E-03	7.77E-03	6.91E-03	7.42E-03	9.47E-03	7.69E-03	8.21E-02	6.68E-02	5.25E-02	2.03E-01	8.38E-02	1.14E-01	1.02E-01	1.16E-01	2.00E-01	1.56E-01	1.10E-01	1.01E-01
	ac227	5.33E-08	4.97E-08	6.29E-08	5.63E-08	6.45E-08	6.38E-08	6.27E-08	6.12E-08	6.49E-08	6.56E-08	6.44E-08	6.15E-08	7.03E-08	6.15E-08	6.11E-08	5.86E-08	5.90E-08	6.72E-08	5.29E-08	6.30E-08	5.34E-08	5.35E-08	6.58E-08	7.04E-08	7.23E-08	7.07E-08
	pa231	1.18E-04	1.08E-04	1.39E-04	1.14E-04	1.32E-04	1.30E-04	1.33E-04	1.30E-04	1.41E-04	1.36E-04	1.36E-04	1.31E-04	1.45E-04	1.31E-04	1.30E-04	1.28E-04	1.31E-04	1.37E-04	1.18E-04	1.36E-04	1.19E-04	1.20E-04	1.41E-04	1.54E-04	1.61E-04	1.61E-04
	u235	1.20E+03	1.06E+03	1.43E+03	8.23E+02	9.73E+02	9.27E+02	1.12E+03	1.10E+03	1.27E+03	9.67E+02	1.05E+03	1.03E+03	9.50E+02	1.02E+03	9.32E+02	1.03E+03	1.12E+03	6.18E+02	9.42E+02	8.39E+02	8.64E+02	8.18E+02	6.00E+02	6.57E+02	7.47E+02	7.96E+02
	pu239	7.72E+02	7.89E+02	7.79E+02	7.87E+02	7.95E+02	7.94E+02	8.05E+02	8.06E+02	7.97E+02	8.09E+02	8.07E+02	8.10E+02	8.13E+02	8.10E+02	7.69E+02	7.74E+02	7.78E+02	7.55E+02	7.73E+02	7.65E+02	7.94E+02	7.94E+02	7.89E+02	8.01E+02	8.10E+02	8.04E+02
	am243	3.38E+00	4.71E+00	7.78E+00	1.94E+01	1.66E+01	1.77E+01	7.43E+00	7.79E+00	5.78E+00	9.00E+00	8.45E+00	8.75E+00	1.00E+01	8.93E+00	2.96E+01	2.62E+01	2.37E+01	4.23E+01	2.87E+01	3.21E+01	2.88E+01	3.04E+01	3.89E+01	3.43E+01	2.92E+01	2.78E+01
	total	1.86E+05	1.86E+05	1.83E+05	1.83E+05	1.82E+05	1.82E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.76E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.78E+05	1.77E+05	1.77E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.77E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.79E+05	1.78E+05

表 4-6：核一廠二號機各退出批次代表性燃料的重要核種計算結果

單位：g (紅底紅字代表該核種的最大值)

	退出週期	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	ID	LJ4661	LJ4802	LJL284	LJL247	LJL503	LY1906	CH2030	CH2136	CH1342	CH2296	CH1632	CH1711	CH1744	CAA035	CBA004	CBC042	CAD027	CBE163	CBG054	C2A102	C2A112	C2B018	C2C048	C2D504	C1E512	C2F007	C2G523
單位:g	燃耗 GWD/MTU	18.787	21.141	29.759	33.688	32.782	33.556	34.583	31.422	33.358	33.528	34.435	35.152	35.438	39.042	36.274	37.858	38.989	41.66	38.56	43.655	49.319	51.034	50.165	50.639	51.786	51.389	51.336
	冷卻時間 (年)	73.427	72.378	71.271	70.088	68.816	67.556	66.247	64.803	63.353	62.142	60.882	59.923	58.786	57.178	55.775	54.205	52.882	51.351	49.907	48.359	46.863	45.263	43.833	42.252	40.704	39.115	37.605
分裂與活化產物	c14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	cl36	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	ni59	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	se79	5.20E-01	5.79E-01	7.99E-01	8.92E-01	8.70E-01	8.88E-01	8.91E-01	8.19E-01	8.62E-01	8.67E-01	8.88E-01	9.04E-01	9.11E-01	9.91E-01	9.29E-01	9.73E-01	9.98E-01	1.05E+00	9.90E-01	1.12E+00	1.24E+00	1.27E+00	1.27E+00	1.29E+00	1.32E+00	1.31E+00	1.30E+00
	sr90	9.68E+00	1.08E+01	1.61E+01	1.79E+01	1.83E+01	1.89E+01	2.02E+01	1.95E+01	2.05E+01	2.15E+01	2.27E+01	2.36E+01	2.41E+01	2.67E+01	2.58E+01	2.90E+01	3.07E+01	3.27E+01	3.28E+01	3.82E+01	4.21E+01	4.47E+01	4.75E+01	5.05E+01	5.33E+01	5.51E+01	5.68E+01
	zr93	7.53E+01	8.33E+01	1.18E+02	1.31E+02	1.28E+02	1.30E+02	1.32E+02	1.22E+02	1.27E+02	1.29E+02	1.32E+02	1.34E+02	1.35E+02	1.45E+02	1.37E+02	1.44E+02	1.47E+02	1.55E+02	1.46E+02	1.65E+02	1.82E+02	1.87E+02	1.89E+02	1.92E+02	1.96E+02	1.95E+02	1.94E+02
	nb94	1.27E-04	1.44E-04	2.04E-04	2.27E-04	2.38E-04	2.21E-04	2.43E-04	2.02E-04	2.05E-04	2.02E-04	2.17E-04	2.31E-04	2.16E-04	2.68E-04	2.17E-04	2.51E-04	2.71E-04	2.70E-04	2.63E-04	3.17E-04	3.37E-04	3.55E-04	3.34E-04	3.32E-04	3.45E-04	3.40E-04	3.33E-04
	tc99	8.76E+01	9.74E+01	1.33E+02	1.48E+02	1.44E+02	1.47E+02	1.48E+02	1.36E+02	1.43E+02	1.44E+02	1.47E+02	1.50E+02	1.51E+02	1.63E+02	1.53E+02	1.60E+02	1.64E+02	1.73E+02	1.63E+02	1.82E+02	2.01E+02	2.06E+02	2.07E+02	2.10E+02	2.14E+02	2.13E+02	2.11E+02
	pd107	2.36E+01	2.81E+01	3.52E+01	4.27E+01	4.10E+01	4.24E+01	3.89E+01	3.32E+01	3.82E+01	3.69E+01	3.86E+01	4.00E+01	4.05E+01	5.19E+01	4.63E+01	4.63E+01	4.84E+01	5.34E+01	4.70E+01	5.41E+01	6.55E+01	6.92E+01	6.29E+01	6.14E+01	6.36E+01	6.28E+01	6.20E+01
	sn126	2.22E+00	2.56E+00	3.30E+00	3.85E+00	3.72E+00	3.83E+00	3.69E+00	3.27E+00	3.60E+00	3.55E+00	3.67E+00	3.76E+00	3.80E+00	4.45E+00	4.06E+00	4.15E+00	4.30E+00	4.66E+00	4.22E+00	4.83E+00	5.63E+00	5.88E+00	5.59E+00	5.55E+00	5.72E+00	5.66E+00	5.60E+00
	i129	1.69E+01	1.93E+01	2.54E+01	2.91E+01	2.82E+01	2.90E+01	2.81E+01	2.52E+01	2.74E+01	2.71E+01	2.80E+01	2.86E+01	2.89E+01	3.33E+01	3.07E+01	3.15E+01	3.26E+01	3.49E+01	3.20E+01	3.63E+01	4.15E+01	4.32E+01	4.16E+01	4.15E+01	4.26E+01	4.23E+01	4.19E+01
	cs135	3.66E+01	4.43E+01	5.61E+01	6.97E+01	5.88E+01	7.15E+01	5.99E+01	5.98E+01	7.33E+01	7.39E+01	7.17E+01	6.86E+01	7.95E+01	8.17E+01	9.17E+01	7.84E+01	7.57E+01	9.40E+01	7.63E+01	8.26E+01	1.07E+02	1.10E+02	1.13E+02	1.16E+02	1.20E+02	1.19E+02	1.18E+02
	cs137	2.38E+01	2.72E+01	3.87E+01	4.45E+01	4.50E+01	4.68E+01	4.83E+01	4.53E+01	4.92E+01	5.08E+01	5.38E+01	5.63E+01	5.77E+01	6.76E+01	6.41E+01	7.03E+01	7.48E+01	8.13E+01	7.91E+01	9.28E+01	1.06E+02	1.14E+02	1.16E+02	1.21E+02	1.29E+02	1.33E+02	1.36E+02
鋼系核種與子核	th232	1.36E-03	1.43E-03	2.19E-03	2.29E-03	2.23E-03	2.23E-03	2.30E-03	2.18E-03	2.15E-03	2.20E-03	2.19E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.18E-03	2.11E-03	2.23E-03	2.23E-03	2.25E-03	2.17E-03	2.32E-03	2.37E-03	2.34E-03	2.51E-03	2.57E-03	2.56E-03	2.51E-03	2.45E-03
	u236	4.18E+02	4.41E+02	6.77E+02	7.10E+02	7.02E+02	7.08E+02	7.50E+02	7.24E+02	7.16E+02	7.42E+02	7.49E+02	7.54E+02	7.56E+02	7.45E+02	7.28E+02	7.95E+02	8.03E+02	8.17E+02	8.10E+02	8.89E+02	9.10E+02	9.14E+02	1.00E+03	1.05E+03	1.06E+03	1.06E+03	1.05E+03
	pu240	3.71E+02	4.19E+02	4.35E+02	4.87E+02	4.74E+02	4.85E+02	5.06E+02	4.68E+02	5.02E+02	4.93E+02	5.04E+02	5.12E+02	5.15E+02	4.56E+02	4.26E+02	4.42E+02	4.56E+02	4.92E+02	4.52E+02	5.22E+02	5.68E+02	5.78E+02	5.81E+02	5.85E+02	5.95E+02	5.92E+02	5.86E+02
	th229	2.30E-07	2.68E-07	3.96E-07	4.96E-07	4.23E-07	4.83E-07	4.39E-07	3.86E-07	4.67E-07	4.56E-07	4.48E-07	4.35E-07	4.93E-07	5.44E-07	5.91E-07	4.75E-07	4.61E-07	6.47E-07	4.34E-07	5.32E-07	9.41E-07	1.01E-06	9.57E-07	9.61E-07	1.01E-06	9.79E-07	9.70E-07
	u233	1.11E-03	1.25E-03	1.81E-03	2.00E-03	1.92E-03	1.93E-03	1.96E-03	1.74E-03	1.82E-03	1.81E-03	1.82E-03	1.84E-03	1.83E-03	1.96E-03	1.83E-03	1.87E-03	1.87E-03	1.91E-03	1.78E-03	1.95E-03	2.08E-03	2.07E-03	2.09E-03	2.09E-03	2.09E-03	2.02E-03	1.95E-03
	np237	4.29E+01	4.95E+01	7.06E+01	8.05E+01	7.79E+01	7.94E+01	7.78E+01	6.79E+01	7.43E+01	7.37E+01	7.61E+01	7.79E+01	7.85E+01	9.31E+01	8.70E+01	8.93E+01	9.12E+01	9.56E+01	8.91E+01	9.96E+01	1.12E+02	1.15E+02	1.14E+02	1.14E+02	1.17E+02	1.16E+02	1.14E+02
	am241	1.13E+02	1.30E+02	1.57E+02	1.75E+02	1.71E+02	1.75E+02	1.66E+02	1.46E+02	1.64E+02	1.60E+02	1.65E+02	1.69E+02	1.71E+02	1.87E+02	1.82E+02	1.82E+02	1.84E+02	1.85E+02	1.80E+02	1.91E+02	2.04E+02	2.07E+02	2.02E+02	2.00E+02	2.01E+02	1.98E+02	1.95E+02
	cm245	2.64E-02	4.91E-02	1.43E-01	2.51E-01	2.29E-01	2.45E-01	6.22E-02	3.66E-02	5.85E-02	5.15E-02	5.98E-02	6.71E-02	6.94E-02	7.15E-01	4.98E-01	4.44E-01	5.07E-01	6.81E-01	4.53E-01	5.89E-01	9.50E-01	1.10E+00	6.54E-01	5.30E-01	5.99E-01	5.78E-01	5.29E-01
	pb210	1.01E-08	9.61E-09	1.26E-08	1.20E-08	1.12E-08	1.10E-08	1.12E-08	1.10E-08	1.01E-08	1.01E-08	9.37E-09	8.82E-09	8.72E-09	6.95E-09	7.10E-09	6.68E-09	6.12E-09	5.81E-09	5.40E-09	5.11E-09	4.82E-09	4.35E-09	4.58E-09	4.44E-09	4.07E-09	3.71E-09	3.40E-09
	ra226	1.64E-06	1.58E-06	2.11E-06	2.01E-06	1.91E-06	1.88E-06	1.93E-06	1.92E-06	1.77E-06	1.79E-06	1.69E-06	1.61E-06	1.60E-06	1.32E-06	1.35E-06	1.31E-06	1.22E-06	1.17E-06	1.11E-06	1.07E-06	1.01E-06	9.28E-07	9.88E-07	9.74E-07	9.09E-07	8.46E-07	7.88E-07
	th230	4.98E-03	4.86E-03	6.64E-03	6.47E-03	6.26E-03	6.24E-03	6.50E-03	6.51E-03	6.12E-03	6.27E-03	6.07E-03	5.90E-03	5.88E-03	5.24E-03	5.34E-03	5.37E-03	5.15E-03	5.02E-03	4.93E-03	4.91E-03	4.73E-03	4.51E-03	4.84E-03	4.89E-03	4.72E-03	4.54E-03	4.35E-03
	u234	2.54E+01	2.55E+01	3.61E+01	3.67E+01	3.60E+01	3.65E+01	3.78E+01	3.77E+01	3.66E+01	3.79E+01	3.77E+01	3.75E+01	3.78E+01	3.77E+01	3.80E+01	3.91E+01	3.87E+01	3.92E+01	3.87E+01	4.03E+01	4.10E+01	4.07E+01	4.32E+01	4.44E+01	4.45E+01	4.41E+01	4.33E+01
	u238	1.80E+05	1.79E+05	1.73E+05	1.73E+05	1.73E+05	1.73E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.65E+05	1.68E+05	1.68E+05	1.68E+05	1.67E+05	1.66E+05	1.67E+05	1.66E+05	1.66E+05	1.65E+05	1.65E+05	1.65E+05	1.65E+05	1.65E+05	1.64E+05
	pu238	4.72E+00	6.38E+00	1.07E+01	1.46E+01	1.34E+01	1.49E+01	1.23E+01	1.00E+01	1.29E+01	1.26E+01	1.34E+01	1.39E+01	1.50E+01	2.40E+01	2.27E+01	2.15E+01	2.26E+01	2.71E+01	2.24E+01	2.66E+01	3.56E+01	3.83E+01	3.53E+01	3.51E+01	3.75E+01	3.74E+01	3.71E+01
	pu242	3.82E+01	5.07E+01	7.51E+01	9.98E+01	9.43E+01	9.87E+01	8.47E+01	6.44E+01	8.19E+01	7.72E+01	8.33E+01	8.84E+01	9.01E+01	1.37E+02	1.19E+02	1.17E+02	1.24E+02	1.39E+02	1.19E+02	1.40E+02	1.81E+02	1.95E+02	1.72E+02	1.66E+02	1.74E+02	1.71E+02	1.69E+02
	cm246	1.96E-03	4.36E-03	1.54E-02	3.33E-02	2.89E-02	3.24E-02	7.09E-03	3.67E-03	6.69E-03	5.72E-03	6.88E-03	7.93E-03	8.36E-03	1.16E-01	7.05E-02	6.27E-02	7.58E-02	1.18E-01	6.56E-02	1.01E-01	2.02E-01	2.48E-01	1.33E-01	1.05E-01	1.21E-01	1.16E-01	1.06E-01
	ac227	4.79E-08	4.75E-08	6.32E-08	6.58E-08	5.76E-08	6.59E-08	5.97E-08	6.39E-08	6.83E-08	7.04E-08	6.59E-08	6.13E-08	6.99E-08	5.60E-08	6.94E-08	5.93E-08	5.46E-08	6.31E-08	5.40E-08	5.44E-08	6.57E-08	6.38E-08	7.19E-08	7.49E-08	7.36E-08	7.21E-08	7.15E-08
	pa231	1.06E-04	1.02E-04	1.35E-04	1.34E-04	1.21E-04	1.35E-04	1.26E-04	1.39E-04	1.41E-04	1.48E-04	1.39E-04	1.30E-04	1.46E-04	1.18E-04	1.46E-04	1.30E-04	1.21E-04	1.34E-04	1.22E-04	1.21E-04	1.39E-04	1.36E-04	1.57E-04	1.66E-04	1.65E-04	1.65E-04	1.66E-04
	u235	1.10E+03	9.38E+02	1.21E+03	9.42E+02	1.00E+03	9.49E+02	1.04E+03	1.26E+03	1.01E+03	1.11E+03	1.05E+03	1.01E+03	9.89E+02	8.13E+02	9.66E+02	1.05E+03	9.82E+02	8.27E+02	1.04E+03	8.69E+02	5.96E+02	5.32E+02	7.17E+02	7.87E+02	7.64E+02	7.83E+02	7.72E+02
	pu239	7.85E+02	8.07E+02	7.98E+02	7.96E+02	7.98E+02	7.95E+02	8.09E+02	7.97E+02	8.08E+02	8.05E+02	8.08E+02	8.11E+02	8.11E+02	7.67E+02	7.71E+02	7.78E+02	7.76E+02	7.64E+02	7.77E+02	7.94E+02	7.89E+02	7.89E+02	8.00E+02	8.05E+02	8.06E+02	8.06E+02	8.03E+02
	am243	4.30E+00	6.11E+00	1.23E+01	1.74E+01	1.65E+01	1.72E+01	8.57E+00	5.91E+00	8.24E+00	7.57E+00	8.39E+00	9.09E+00	9.34E+00	3.41E+01	2.78E+01	2.56E+01	2.76E+01	3.25E+01	2.57E+01	2.86E+01	3.91E+01	4.29E+01	3.17E+01	2.83E+01	3.04E+01	2.97E+01	2.85E+01
	total	1.86E+05	1.86E+05	1.83E+05	1.83E+05	1.82E+05	1.82E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.76E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.75E+05	1.79E+05	1.79E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.77E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.78E+05	1.77E+05

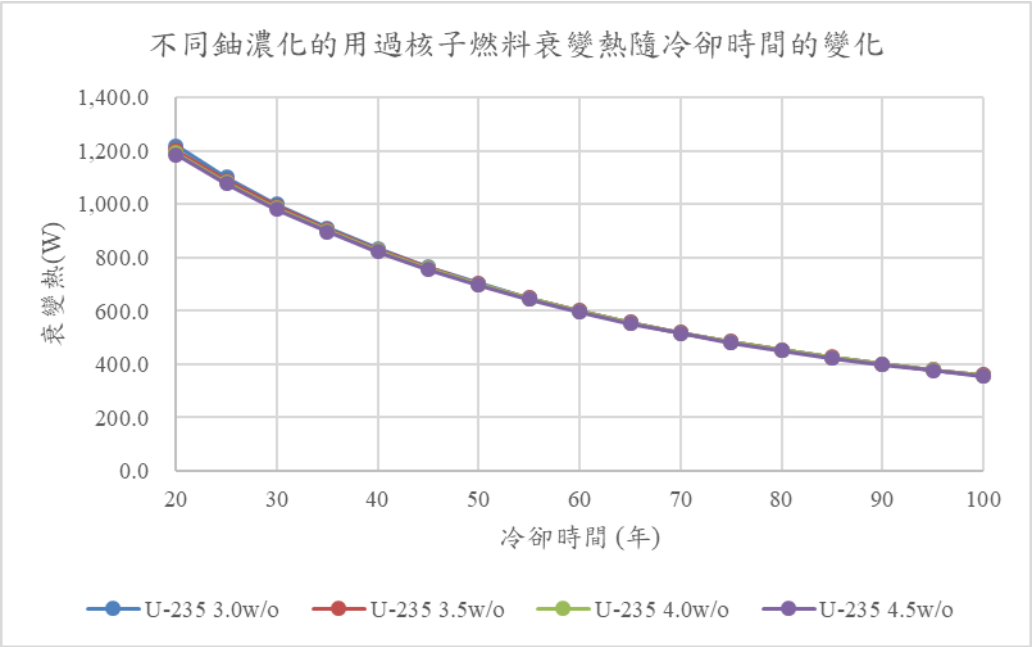


圖 4-1：不同鈾濃化的用過核子燃料衰變熱隨冷卻時間的變化

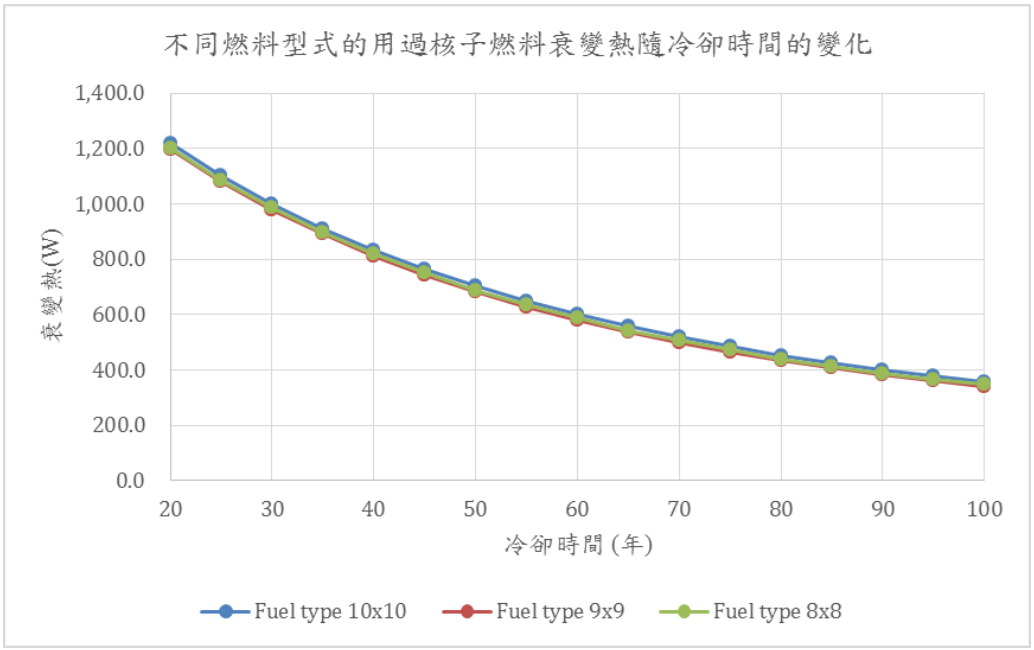


圖 4-2：不同燃料型式的用過核子燃料衰變熱隨冷卻時間的變化

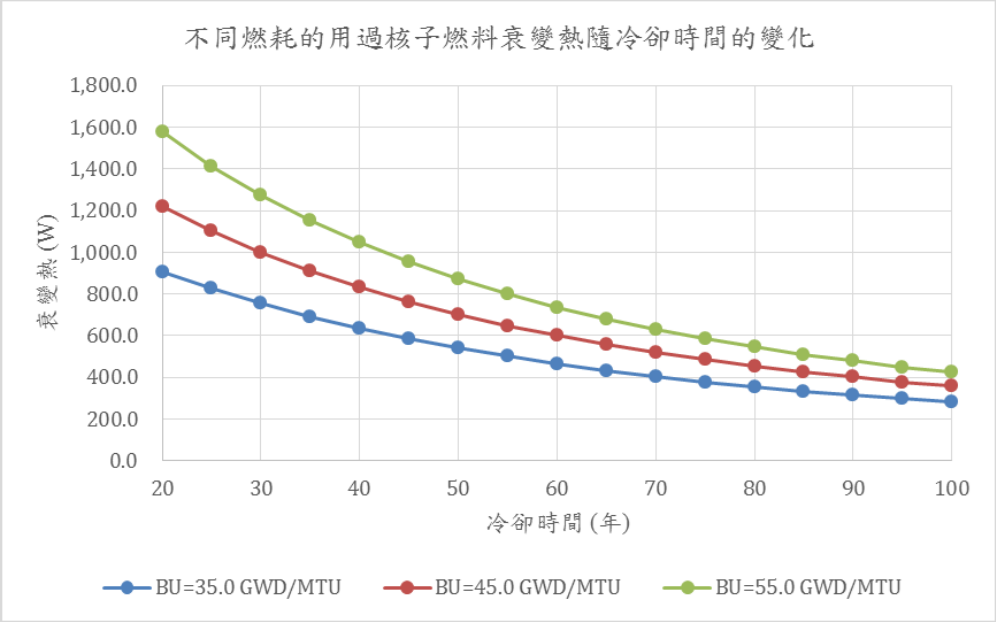


圖 4-3：不同燃耗的用過核子燃料衰變熱隨冷卻時間的變化

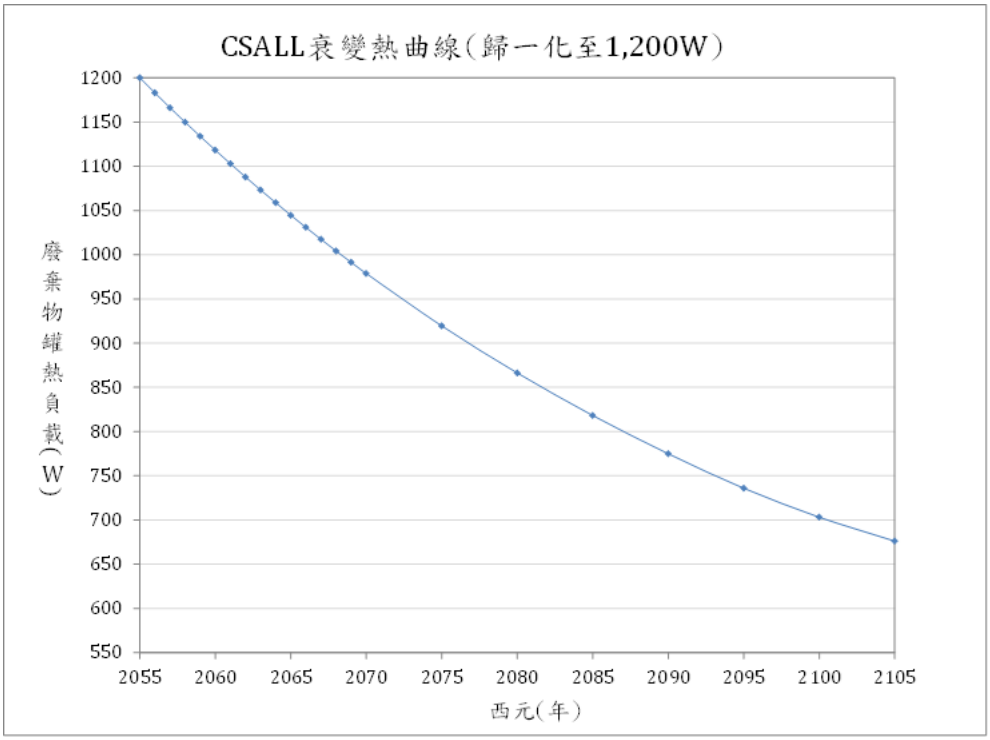


圖 4-4：核一廠CSALL衰變熱曲線

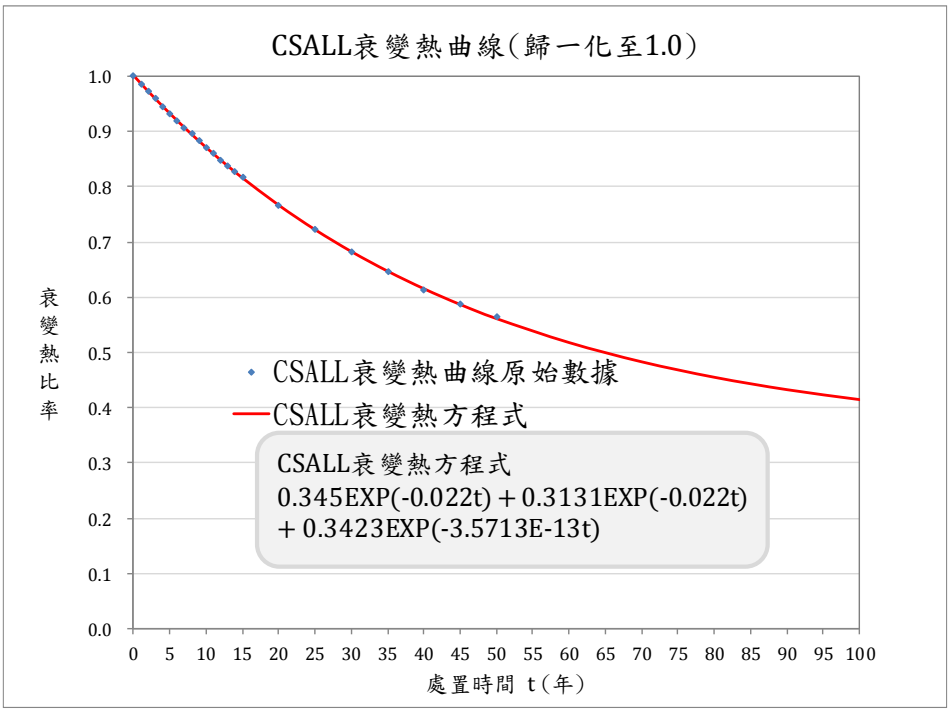


圖 4-5：核一廠CSALL衰變熱方程式

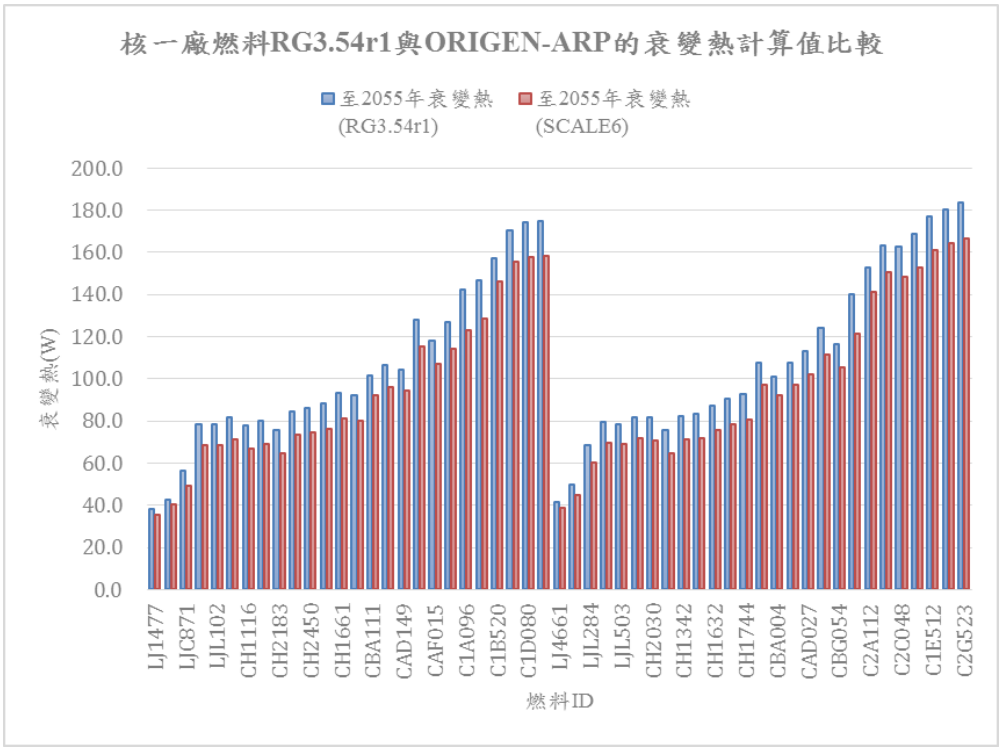


圖 4-6：核一廠燃料RG 3.54修訂1版與ORIGEN-ARP的衰變熱計算值比較

4.1.2. 核臨界安全分析技術

誘發核分裂(臨界)作用探討廢棄物罐內誘發核分裂與臨界的可能性。在放射性衰變過程所放出的中子，可能引起燃料內部可分裂材料發生核分裂，在廢棄物罐完整時，大部分的中子會遷移出廢棄物罐，使得廢棄物罐內部不會達到臨界狀態，故可忽略此作用。但要注意的是，當中子與氫原子核發生碰撞而緩速後，會使與U-235、Pu-239的作用機率增加；故當廢棄物罐被水腐蝕穿透後，水中的氫會在廢棄物罐內對中子形成良好的緩速劑，使核反應度增加。此時當中子的產生速率大於消耗速率，則會達到臨界狀態且會有大量能量被釋出，可能造成工程障壁失效並使放射性物質釋出。處置設施參考設計中，於運轉及處置階段必須符合臨界安全標準，即包含不確定度的有效中子增殖因數(keff)，必須小於0.95。本年度之研究重點為廢棄物罐設計之臨界安全。

SNFD2017報告的臨界分析係以間接比較方式，判斷國內之BWR與PWR用過核子燃料類型，是否可以被SKB臨界分析所使用的極限反應度燃料類型所涵蓋。透過與SKB結果比較，可初判我國BWR類型用過核子燃料應可適用SKB建立的可接受裝載標準。而108年度開始建立屬於我國本土化之臨界安全評估方法，直接以本計畫之廢棄物罐設計以及我國之用過核子燃料為標的，自最初之挑選設計基準燃料開始，並執行符合我國用過核子燃料特性的參數敏感度分析。

108年度工作成果主要在挑選出設計基準燃料，並以敏感度分析廢棄物罐之材料組成與設計參數對於反應度之影響，總結保守參數組合，以作為後續臨界安全分析使用。須強調的是，現階段成果尚未納入燃耗額度，所有分析皆是以新燃料狀態下計算，因此有效中子增殖因子可能會高於0.95。本年度結果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本項工作使用MCNP計算機程式建立臨界分析模式與計算有效中子增殖因子，版次為6.2.0，程式說明如MCNP6.2程式使用手冊(Los Alamos National Laboratory, 2018)。

(2) 參數需求說明：

廢棄物罐：廢棄物罐之尺寸參數來源如4.2.1小節，緩衝材料尺寸參數來源如4.2.2小節，材料組成參考SKB技術報告(Lennart Agrenius, 2010)，整理如表 4-7。

用過核子燃料：用過核子燃料之參數來源為本公司核一、二廠所使用燃料型號之設計與運轉歷程資料。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 核一、二廠BWR用過核子燃料的設計基準燃料：

國內使用之BWR用過核子燃料共有8種型式，為挑選代表燃料型式，以5.0 wt% U-235濃化度、處置孔模式、無燃耗、廢棄物罐內充滿水、標稱(Nominal)參數設置計算各燃料型式之有效中子增殖因子。計算結果如表 4-9，BWR燃料型式以ATRIUM10有效中子增殖因子最大，將作為BWR用過核子燃料代表燃料型式。

(b) 設計基準燃料與廢棄物罐設計參數之保守參數組合：

為了解廢棄物罐各參數對於有效中子增殖因子的影響，將進行參數敏感度分析並找出最保守參數組合。執行參數敏感度分析各項案例包含如表 4-8：

(i) 材料組成敏感度分析

鑄鐵內襯之鐵含量－結果如表 4-10與圖 4-7，其中ΔK/σ為改變參數後之有效中子增殖因子，減去標稱參數組合案例的有效中子增殖因子，再除以MCNP統計誤差(本報告以下同)。如ΔK/σ大於0，則代表改變該參數將會使有效中子增殖因子增加，反之如果ΔK/σ小於0，則代表改變參數將會使有效中子增殖因子減少，如ΔK/σ落在-2至2之間，則代表有效中子增殖因子差異不具有統計意義。結果顯示鑄鐵內襯的鐵含量與有效中子增殖因子呈現負相關趨勢，其原因為鑄鐵內襯中的鐵元素會吸收中子，而碳與矽元素會緩和中子，因此，隨著鐵含量減少與碳、矽含量增加，有效中子增殖因子會增加。以

臨界觀點來看，鑄鐵內襯鐵含量越低則越保守，但也需考量實務製造上，鑄鐵內襯的鐵含量不可能無限降低。以瑞典KBS-3廢棄物罐為例，鑄鐵內襯的鐵含量在90.02% - 95.13%之間。因此，臨界分析中，敏感度分析只分析到最低90%的鑄鐵內襯鐵含量，並將此做為下限值回饋到設計規範中。碳含量上限值6 %及矽含量上限值4%則為鐵含量90%時對應的平衡濃度。

鑄鐵內襯密度－結果如表 4-11與圖 4-8，顯示鑄鐵內襯密度對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的增加，將挑選標稱值7.1 g/cm^{3}作為保守參數組合設定。

燃料通道材料組成－結果如表 4-12與圖 4-9，顯示燃料通道材料組成，對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的差異，將挑選標稱值97.57%作為保守參數組合設定。

燃料通道鐵密度－結果如表 4-13與圖 4-10，顯示燃料通道鐵密度對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的增加，將挑選標稱值7.85 g/cm^{3}作為保守參數組合。

(ii) 燃料組件於燃料通道內水平位移

因燃料組件於燃料通道內會有水平位移的可能，因此，分析燃料組件徑向朝內（Radial In）移動及燃料組件徑向朝外（Radial Out）移動兩種最極端的案例對於有效中子增殖因子的影響，如圖 4-11所示。其對於有效中子增殖因子的影響如表 4-14，顯示燃料組件於燃料通道內徑向朝內移動會使有效中子增殖因子明顯上升，將以此作為保守參數組合設定。

(iii) 廢棄物罐製造公差敏感度分析

燃料通道間距－結果如表 4-15，顯示越小的燃料通道間距，會造成有效中子增殖因子上升，故將以最小燃料通道間距作為設計保守參數組合設定。

燃料通道開口大小－結果如表 4-16，顯示越小的燃料通道開口，會造成有效中子增殖因子上升，故將以最小燃料通道開口作為保守參數組合設定。

燃料通道厚度－結果如表 4-17，顯示燃料通道厚度對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的影響，將以標稱值作為保守參數組合設定。

鑄鐵內襯直徑－結果如表 4-18，顯示鑄鐵內襯直徑對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的影響，將以標稱值作為保守參數組合設定。

銅殼厚度－結果如表 4-19，顯示銅殼厚度對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的增加，將以標稱值作為保守參數組合設定。

燃料通道長度－結果如表 4-20，顯示燃料通道長度對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的影響，將以標稱值作為保守參數組合設定。

銅殼長度－結果如表 4-21，顯示銅殼長度對於有效中子增殖因子沒有具有統計意義的影響，將以標稱值作為保守參數組合設定。

廢棄物罐內溫度－結果如表 4-22與圖 4-12。分析結果顯示廢棄物罐溫度在0 °C到20 °C之間的有效中子增殖因子變化在統計誤差內，之後有效中子增殖因子隨廢棄物罐溫度上升而下降。將採用廢棄物罐溫度20 °C、水密度0.9982 g/cm^{3}作為保守參數組合設定。

(4) 結果與討論：

綜合以上參數敏感度分析結果，總結保守參數組合設定如下：

(a) 選擇ATRIUM10代表BWR用過核子燃料；

(b) 90%鑄鐵內襯的鐵含量；

(c) 7.1 g/cm^{3}鑄鐵內襯密度；

(d) 97.57%燃料通道鐵含量；

(e) 7.85 g/cm^{3}燃料通道鐵密度；

(f) 燃料組件徑向朝內位移；

(g) 最小燃料通道間距；

(h) 最小燃料通道尺寸；

(i) 標稱燃料通道厚度；

(j) 標稱鑄鐵內襯直徑；

(k) 標稱銅殼厚度；

(l) 標稱燃料通道管長度；

(m) 標稱銅殼長度；

(n) 廢棄物罐溫度20°C；

其中因鑄鐵內襯之鐵含量呈現與有效中子增殖因子呈負相關趨勢，以臨界觀點來看，鑄鐵內襯鐵含量越低則越保守，但也需考量實務製造上，鑄鐵內襯的鐵含量不可能無限降低。以瑞典KBS-3廢棄物罐為例，鑄鐵內襯的鐵含量在90.02% - 95.13%之間。因此，臨界分析中，敏感度分析只分析到最低90%的鑄鐵內襯鐵含量，並將此做為下限值回饋到設計規範中。碳含量上限值6 %及矽含量上限值4%則為鐵含量90%時對應的平衡濃度。

表 4-7：廢棄物罐與傳送護箱尺寸參數

參數名稱	用途	需求細節內容	採用值
BWR廢棄物罐幾何	建立臨界分析MCNP模型所需幾何參數	鑄鐵內襯高度	4643 mm
		鑄鐵內襯直徑	949 mm
		鑄鐵內襯底部厚度	60 mm
		燃料通道間距	210 mm
		燃料通道開口大小	160 mm × 160 mm
		燃料通道厚度	10 mm
		燃料通道長度	4533 mm
		銅殼長度	4905 mm
		銅殼厚度	49 mm
		銅殼外徑	1050 mm
		銅殼內徑	952 mm
		銅殼上部內凹處尺寸1 (高度×直徑)	50 mm × 850 mm
		銅殼上部內凹處尺寸2 (高度×直徑)	35 mm × 821 mm
		銅殼下部內凹處尺寸 (高度×直徑)	75 mm × 850 mm
緩衝材料幾何尺寸	建立臨界分析MCNP模型所需幾何參數	高度	6905 mm
		直徑	1750 mm
		底部距廢棄物罐厚度	500 mm
		頂部距廢棄物罐厚度	1500 mm

表 4-8：核臨界安全分析技術之案例編號與說明

案例編號	案例說明	
Case1	材料組成敏感度分析	鑄鐵內襯之鐵含量
		鑄鐵內襯密度
		燃料通道材料組成
		燃料通道鐵密度
Case2	燃料組件於燃料通道內水平位移	-
Case3	廢棄物罐製造公差敏度分析	燃料通道間距
		燃料通道開口大小
		燃料通道厚度
		鑄鐵內襯直徑
		銅殼厚度
		燃料通道長度
		銅殼長度
		廢棄物罐內溫度

表 4-9：代表燃料型式挑選

燃料型式	wt% U-235	處置孔案例		
		K-eff	σ	K-eff+2σ
BWR				
GE8-1	5.00	0.95667	0.00035	0.95737
GE8-2	5.00	0.95672	0.00034	0.95740
ANF8	5.00	0.95387	0.00036	0.95459
ANF92	5.00	0.95547	0.00034	0.95615
GE9B	5.00	0.96308	0.00035	0.96378
ATRIUM9B	5.00	0.95517	0.00035	0.95587
GE12	5.00	0.96836	0.00035	0.96906
ATRIUM10	5.00	0.96928	0.00034	0.96996

表 4-10：鑄鐵內襯材料組成敏感度分析

鑄鐵內襯材料組成(重量百分比)			BWR	
Iron	Carbon	Silicon	K-eff	ΔK/σ
0.9000	0.0600	0.0400	0.97119	5.6
0.9223	0.0474	0.0303	0.97018	2.6
0.9423	0.0374	0.0203	0.96988	1.8
0.9523	0.0320	0.0150	0.96928	-
0.9623	0.0274	0.0103	0.96835	-2.7
0.9823	0.0174	0.0003	0.96743	-5.4

表 4-11：鑄鐵內襯密度敏感度分析結果

鑄鐵內襯密度 (g/cm³)	BWR廢棄物罐	
	K-eff	ΔK/σ
6.8	0.96904	-0.7
6.9	0.96877	-1.5
7.0	0.96926	-0.1
7.1	0.96928	-
7.2	0.96878	-1.5
7.3	0.96838	-2.6

表 4-12：燃料通道鐵含量敏感度分析結果

燃料通道材料組成(重量百分比)						BWR廢棄物罐	
Fe	C	Si	Mn	P	S	K-eff	ΔK/σ
0.9600	0.0100	0.0134	0.0160	0.0003	0.0003	0.96910	-0.5
0.9700	0.0050	0.0084	0.0160	0.0003	0.0003	0.96869	-1.7
0.9757	0.0022	0.0055	0.0160	0.0003	0.0003	0.96928	-
0.9800	0.0001	0.0034	0.0160	0.0003	0.0003	0.96887	-1.2

表 4-13：燃料通道密度敏感度分析結果

Density（g/cm³）	BWR廢棄物罐	
	K-eff	ΔK/σ
7.6	0.96882	-1.4
7.7	0.96928	0.0
7.8	0.96819	-3.2
7.85	0.96928	-
7.9	0.96864	-1.9
8.0	0.96806	-3.6
8.1	0.96780	-4.4
8.2	0.96762	-4.9

表 4-14：燃料組件水平位移敏感度分析結果

位移方式	BWR廢棄物罐	
	K-eff	ΔK/σ
Radial In	0.98322	41.000
Centre	0.96928	-
Radial Out	0.91852	-149.294

表 4-15：燃料通道間距敏感度分析結果

燃料通道間距(mm)	K-eff	ΔK/σ
BWR廢棄物罐		
206.0	0.97429	14.735
210.0	0.96928	-
211.0	0.96734	-5.706

表 4-16：燃料通道開口大小敏感度分析結果

燃料通道開口大小(mm)	K-eff	ΔK/σ
BWR廢棄物罐		
156.2	0.97619	20.324
160.0	0.96928	-
163.8	0.95928	-29.412

表 4-17：燃料通道厚度敏感度分析結果

燃料通道厚度(mm)	K-eff	ΔK/σ
BWR廢棄物罐		
9.0	0.96929	0.029
10.0	0.96928	-
11.0	0.96861	-1.971

表 4-18：鑄鐵內襯直徑敏感度分析結果

	BWR廢棄物罐	
鑄鐵內襯直徑(mm)	K-eff	ΔK/σ
949.0	0.96928	-
949.5	0.96883	-1.324

表 4-19：銅殼厚度敏感度分析結果

	BWR廢棄物罐	
銅殼厚度(mm)	K-eff	ΔK/σ
48.7	0.96806	-3.588
49.0	0.96928	-
49.3	0.96869	-1.735

表 4-20：燃料通道長度敏感度分析結果

燃料通道長度(mm)	K-eff	ΔK/σ
BWR廢棄物罐		
4523.0	0.96928	0.000
4533.0	0.96928	-
4538.0	0.96928	0.000

表 4-21：廢棄物罐長度敏感度分析結果

燃料通道長度(mm)	K-eff	ΔK/σ
BWR廢棄物罐		
4902.25	0.96928	0.000
4905.00	0.96928	-
4908.25	0.96928	0.000

表 4-22：廢棄物罐內溫度敏感度分析結果

	BWR廢棄物罐	
廢棄物罐溫度(℃)	K-eff	ΔK/σ
4.0	0.96889	-1.147
10.0	0.96916	-0.353
20.0	0.96928	0.000
30.0	0.96880	-1.412
40.0	0.96721	-6.088
50.0	0.96752	-5.176
60.0	0.96626	-8.882
70.0	0.96563	-10.735
80.0	0.96460	-13.765
90.0	0.96375	-16.265
100.0	0.96257	-19.735

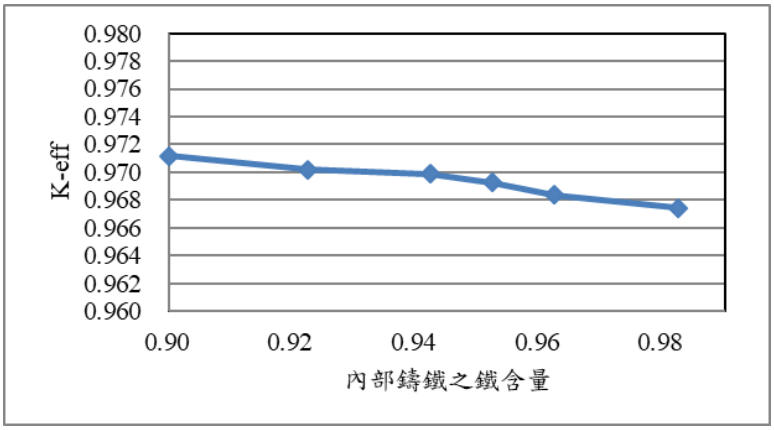


圖 4-7：鑄鐵內襯之鐵含量與有效中子增殖因子趨勢圖

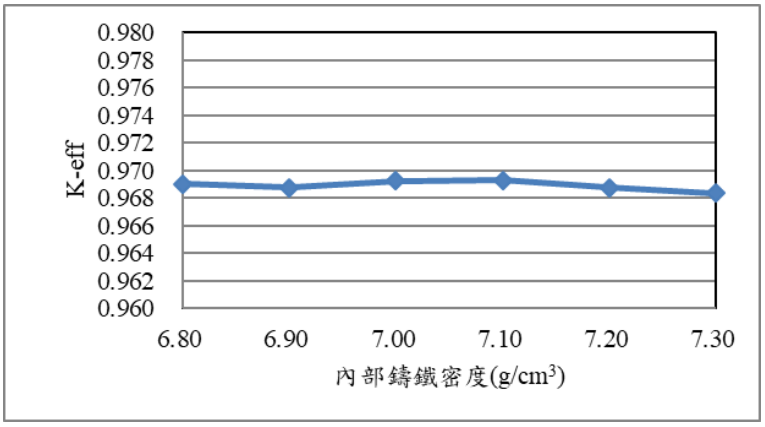


圖 4-8：鑄鐵內襯密度與有效中子增殖因子趨勢圖

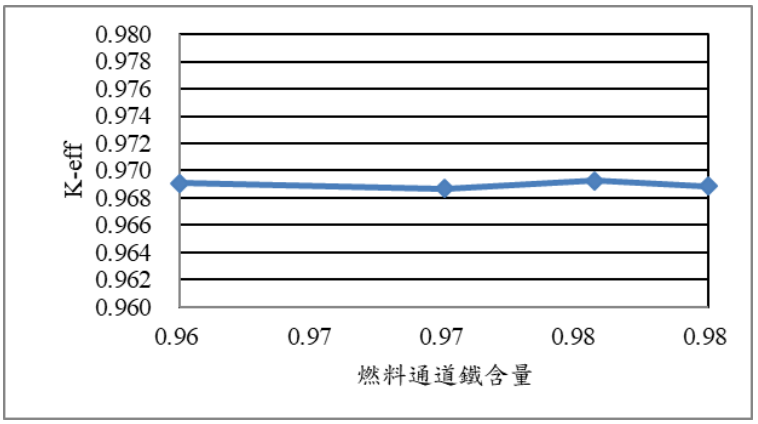


圖 4-9：燃料通道鐵含量與有效中子增殖因子趨勢圖

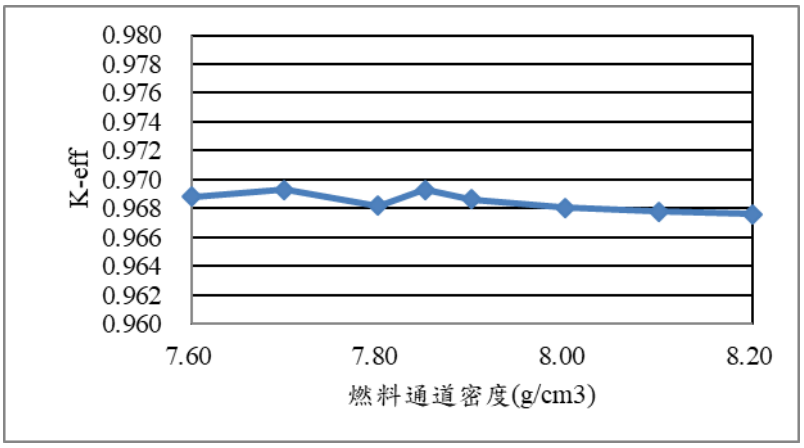


圖 4-10：燃料通道密度與有效中子增殖因子趨勢圖

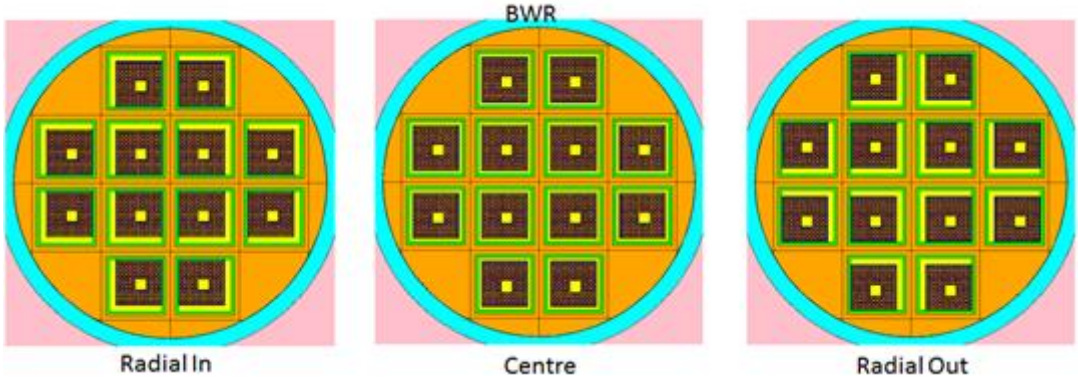


圖 4-11：燃料組件於燃料通道中水平位移

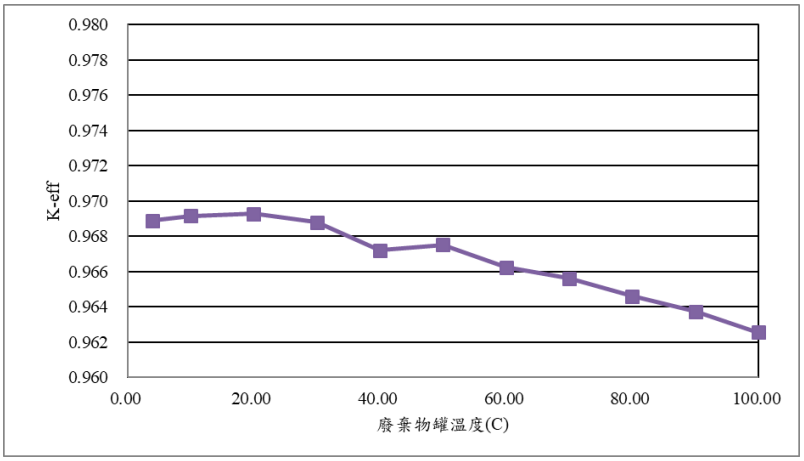


圖 4-12：廢棄物罐內溫度與有效中子增殖因子趨勢圖

4.2. 工程障壁設計與性能評估

4.2.1. 廢棄物罐設計

我國現階段廢棄物罐設計係以瑞典KBS-3之銅殼廢棄物罐作為參考，廢棄物罐設計前提(POSIVA and SKB, 2017, p39-p50)，設計鑄鐵內襯提供足夠強度(SKB, 2010f, p34)，包括能承受45 MPa等向負載(SKB, 2010g, p23)，同時裝載設計維持次臨界反應等性能，以具備放置用過核子燃料之安全性。此種以鑄鐵內襯提供足夠強度，並承受外界的壓應力及剪切力，而以抗蝕能力良好的銅質外殼作為包封容器的設計；另也因銅具有良好延展性，在受力作用下允許塑性應變，發揮其功能。

SNFD2017報告以瑞典SKB所設計之廢棄物罐進行技術可行性評估，由於我國沸水式用過核子燃料之長度較瑞典用過子燃料規格尺寸長，瑞典廢棄物罐高度設計將無法滿足國內需求，故108年度則依據我國核一廠BWR燃料束最大長度，訂定內襯方管、上下蓋板及廢棄物罐整體長度規格。108年度工作成果說明如下：

(1) 繪圖工具軟體說明：

在廢棄物罐初步設計中所採用之繪圖軟體為Autodesk AutoCAD LT 2020繪圖軟體，其檔案格式為dwg，為二維繪圖的常用標準格式。

(2) 廢棄物罐設計圖面：

依據廢棄物罐初步設計結果進行繪製設計圖面，廢棄物罐銅殼與鑄鐵內襯尺寸圖面分別圖 4-13、圖 4-14、圖 4-15，圖 4-15之A-A斷面尺寸如圖 4-16，廢棄物罐上端及下端細部尺寸分別如圖 4-17、圖 4-18，封蓋剖面圖如圖 4-19。封蓋為鑄鐵內襯上端密封燃料束功用，為避免無法與鑄鐵內襯接合，故設計以5°向內縮之設計，以利於後續安裝之用。

(3) 廢棄物罐材料設計參數：

在材料參數部分，由於瑞典SKB已針對廢棄物罐之銅殼、鑄鐵內襯及緩衝材料等進行相關材料試驗，依據其試驗結果定義各構件

所使用之材料參數，以便於後續進行廢棄物罐抗圍壓分析與抗剪力位移分析使用，在鑄鐵的材料性質，需定義出降伏強度和極限強度的標準值，而表 4-23 (SKB, 2010f, p25)則是由低應變速率的材料單軸拉伸試驗測試值。對於廢棄物罐的結構包括鑄鐵內襯、方管、外部銅殼及封蓋，依據幾何形狀及材料強度可知廢棄物罐抵抗外力作用主要由鑄鐵內襯及方管，外部銅殼強度較鑄鐵內襯與方管低，而其具有良好延展性，在剪力位移或彎矩作用下將對於屬於細長狀之廢棄物罐產生彎曲變形，由於銅具有良好延展之特性，可在較大之變形下仍可包覆廢棄物罐，並具有抵抗腐蝕之特性。銅的材料性質，彈性模數取為120 GPa，其範圍為115 GPa至128 GPa，柏松比為0.308(如表 4-24)。關於方管及封蓋之材料參數分別如表 4-25、表 4-26。

表 4-23：鑄鐵材料參數

彈性	
彈性模數(MPa)	166,000
柏松比	0.32
塑性	
應力(MPa)	應變(-)
293	0
324	0.01
349	0.02
370	0.03
389	0.04
404	0.05
418	0.06
428	0.07
438	0.08
447	0.09
456	0.1
465	0.11
472	0.12
478	0.13
484	0.14
488	0.15
491	0.16

資料來源：SKB(2010e, p19)

表 4-24：銅殼材料參數

彈性	
彈性模數(MPa)	120,000
柏松比(-)	0.308
塑性	
應力(MPa)	應變(-)
72	0
178	0.1
235	0.2
269	0.3
288	0.4
300	0.5

資料來源：SKB(2010e, p23)

表 4-25：方管材料參數(型號：S355J2H)

彈性	
彈性模數(MPa)	210,000
柏松比(-)	0.3
塑性	
應力(MPa)	應變(-)
412	0
587	0.14104
613	0.18304

資料來源：SKB(2010e, p23)

表 4-26：封蓋材料參數(型號：S355J2G3)

彈性	
彈性模數(MPa)	210,000
柏松比(-)	0.3
塑性	
應力(MPa)	應變(-)
335	0
540	0.138207
564	0.180407

資料來源：SKB(2010e, p23)



圖 4-13：廢棄物罐銅殼尺寸

註：單位為毫米(mm)。

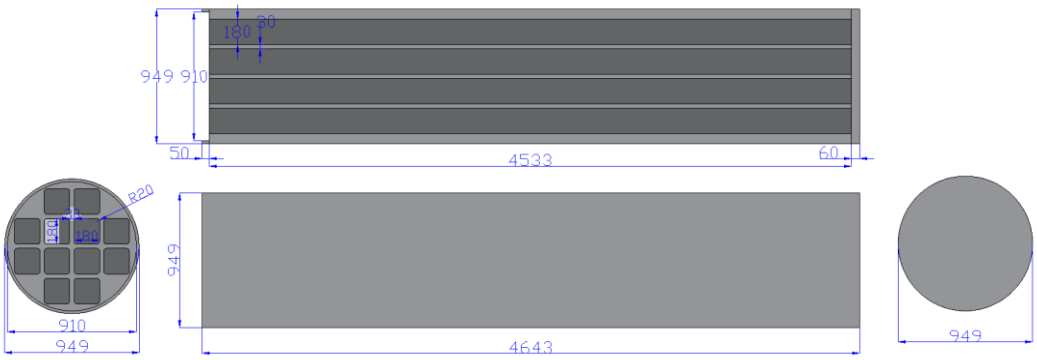


圖 4-14：廢棄物罐鑄鐵內襯尺寸

註：單位為毫米(mm)。

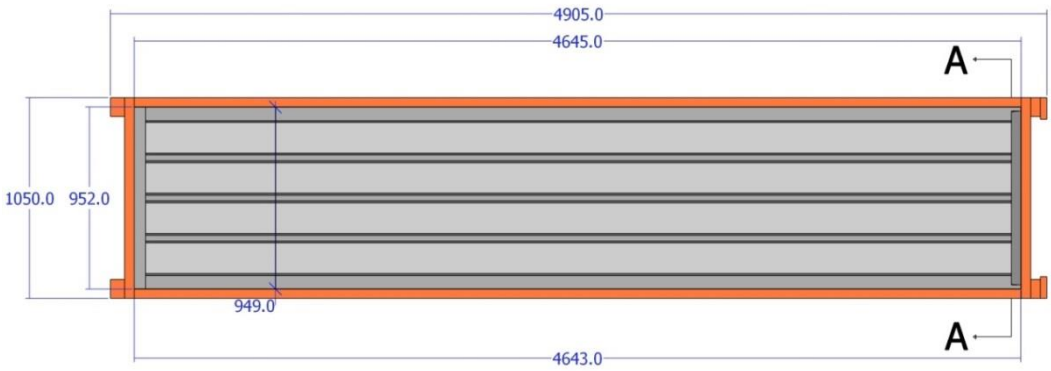


圖 4-15：廢棄物罐銅殼與鑄鐵內襯尺寸

註：單位為毫米(mm)。

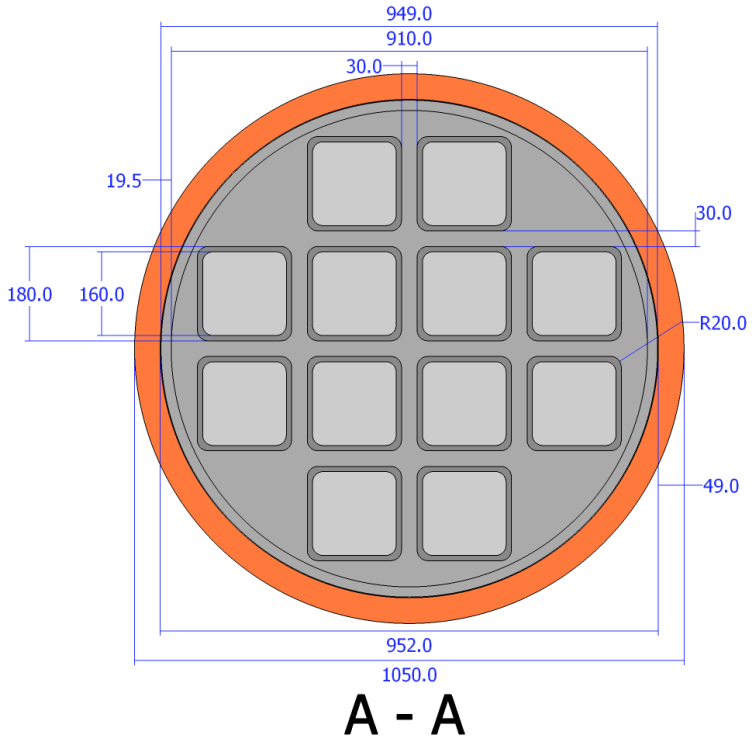


圖 4-16：廢棄物罐斷面尺寸

註：單位為毫米(mm)。

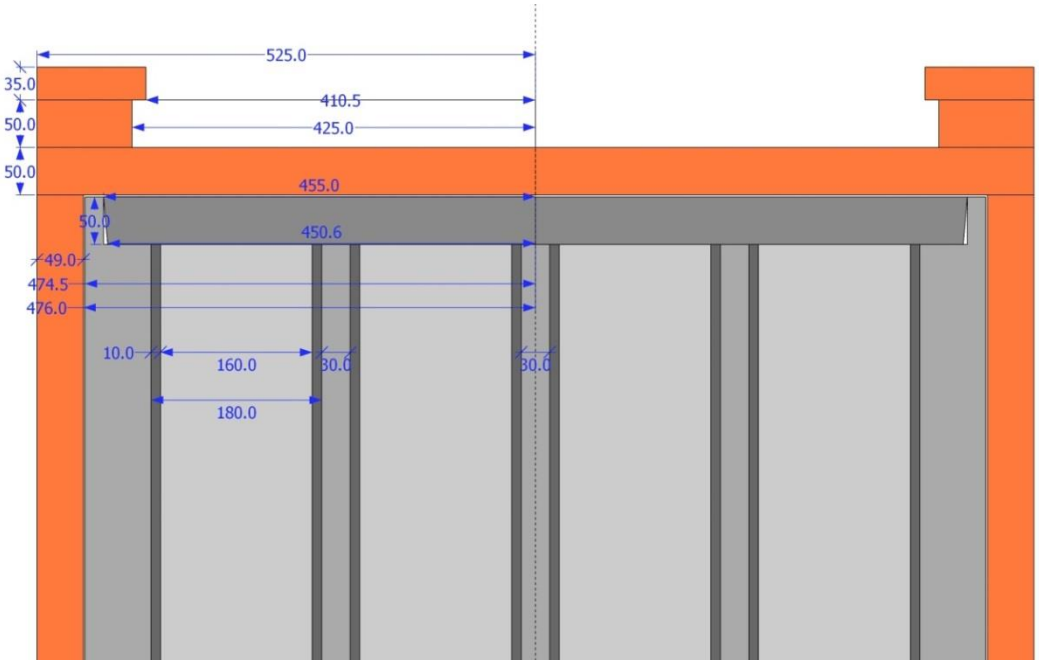


圖 4-17：廢棄物罐上端細部尺寸

註：單位為毫米(mm)。

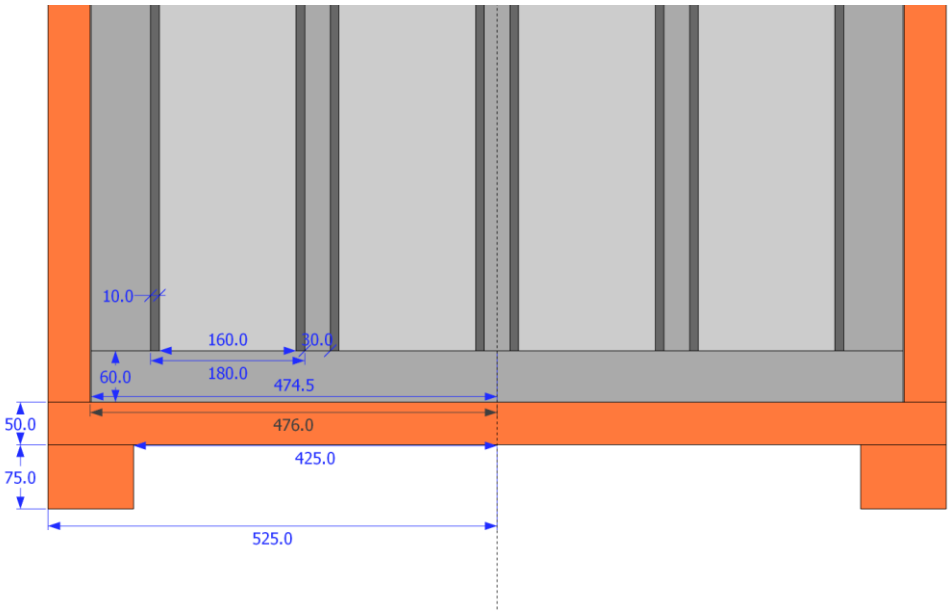


圖 4-18：廢棄物罐下端細部尺寸

註：單位為毫米(mm)。

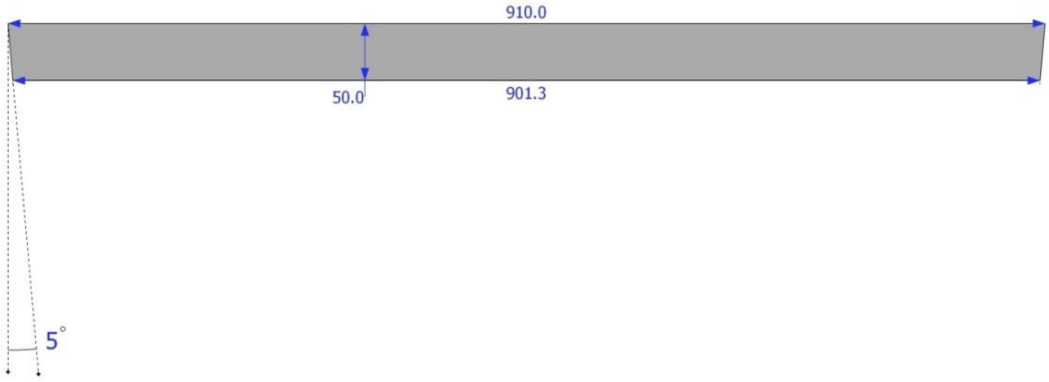


圖 4-19：鑄鐵內襯頂部封蓋尺寸

註：單位為毫米(mm)。

4.2.2. 緩衝材料設計

依據第4.2.1節廢棄物罐規格設計精進，並基於KBS-3處置概念與緩衝材料安全功能指標需求，修訂處置孔尺寸及處置孔內緩衝材料之尺寸規格設計，包括廢棄物罐周圍環狀塊體、廢棄物罐底部及頂部之實心盤狀塊體，並依據緩衝材料規格計算安裝後初始飽和密度。另結合「第4.2.4節 廢棄物罐抗剪力位移之性能分析技術」、「第4.2.5節未飽和膨潤土特性分析」及「第4.2.6節 緩衝材料與回填材料性質特性分析」之性能分析成果，可確認緩衝材料設計可符合安全需求。108年度工作成果說明如下：

緩衝材料為壓實成特定密度條件之膨潤土，安裝於處置孔內並置於廢棄物罐與母岩之間，為多重障壁概念之重要安全單元之一。考量處置設施設計以多重障壁原則來維持處置設施的功能與安全，所要求的緩衝材料障壁功能如下：

(1) 限制平流傳輸。
(2) 減少微生物活性。
(3) 避免膠體傳輸。
(4) 使廢棄物罐維持在中立位置。
(5) 不影響其他工程障壁功能。
(6) 在處置設施環境中長時間演化下，緩衝材料仍保有原來的設計功能。

依據設計功能定義設計需求，設計功能所對應之緩衝材料性質與設計參數及設計需求如表 4-27所示，其中設計需求為提供緩衝材料規格設計之基準。為使緩衝材料保持其障壁功能，緩衝材料在處置孔中的密度必須滿足設計需求之條件，因此，緩衝材料的元件設計與安裝亦必須可達到預期的密度要求。為能有效控制緩衝材料在處置孔內安裝時可達到預期的密度條件，亦必須限制處置孔開挖幾何形狀與尺寸。表 4-28為處置孔設計所考量之性質及其對應之設計需求，圖 4-20為處置孔設計需求之幾何條件。當緩衝材料安裝前，其設計與施工方

法需考量製造、安裝、性能測試及安裝後檢測之可行性，因此，需考量緩衝材料製造及運轉相關的設計需求，如表 4-29所示，以提供高品質的緩衝材料元件製備及安裝技術條件，滿足緩衝材料設計所要求之規格。緩衝材料的參考原料為純膨潤土，依表 4-27中之緩衝材料設計功能，對於緩衝材料需不影響其他工程障壁功能，基於設計需求對膨潤土成分之要求，訂定緩衝材料原料參考設計需求如表 4-30。

處置孔設計尺寸如圖 4-21，依廢棄物罐設計尺寸、表 4-28中之緩衝材料厚度需求，設計處置孔直徑1,750 mm、高8,155 mm。緩衝材料元件包含安裝於廢棄物罐上方及下方之實心塊體、安裝於廢棄物罐周圍之環形塊體、及填充於緩衝材料塊體與處置孔壁間工作縫隙之膨潤土填充料，緩衝材料元件設計如圖 4-22，各元件之參考設計規格如表 4-31。緩衝材料安裝於處置孔內之設計如圖 4-21，緩衝材料塊體元件底部設計為575 mm厚之底部實心塊體，並依廢棄物罐底之基腳設計凹槽以利廢棄物罐安裝定位；依廢棄物罐及處置孔尺寸設計內徑1,070 mm、外徑1,650 mm環形塊體，使環形緩衝材料塊體內緣與廢棄物罐間距10 mm，外緣與處置孔壁間距50 mm以利安裝，考量廢棄物罐高度，設計環形塊體厚度為830 mm塊體1塊，800 mm塊體5塊，依續將厚度830 mm塊體1塊、厚度800 mm塊體5塊由下至上堆疊，安裝於廢棄物罐周圍；廢棄物罐上方亦設計厚度500 mm倒置的凸型實心塊體，以嵌入廢棄物罐頂蓋之凹槽，上方再堆疊500 mm厚之實心塊體填滿處置孔，緩衝材料塊體安裝完成後外圍與處置孔壁間距50 mm之工作縫以膨潤土填充料填充，以完成處置孔內緩衝材料之設計。整體緩衝材料設計，厚度575 mm之底部實心塊體1塊、廢棄物罐周圍厚度830 mm環形塊體1塊、厚度800 mm環形塊體5塊、廢棄物罐上部厚度500 mm倒置凸形實心塊體1塊、厚度500 mm實心塊3塊、厚度750 mm實心塊體1塊，整體處置孔深度為8,155 mm。

依緩衝材料元件設計規格，計算處置孔內緩衝材料各部位之飽和密度，結果如圖 4-23所示，即緩衝材料設計規格可符合前述表 4-27之設計需求。且依所計算之各部位緩衝材料初始安裝密度條件，對應MX-80型膨潤土之回脹壓力及水力傳導係數試驗結果(如圖 4-24及圖

4-25)，確認所設計之緩衝材料密度條件下，其回脹壓力皆為2 MPa以上，水力傳導係數皆低於10^{-12} m/s，其性質符合設計需求。

表 4-27：緩衝材料設計功能、性質及設計需求

設計功能	性質及設計參數	長期安全的設計需求
限制平流傳輸	影響回脹壓力與水力傳導係數之相關性質 材料組成：蒙脫石含量， 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸	滿足限制微生物活性及避免廢棄物罐受剪力破壞的密度條件 (水力傳導係數應小於10^{-12} m/sec、回脹壓力應超過1 MPa)
減少微生物活性	影響回脹壓力之相關性質 材料組成：蒙脫石含量 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸	緩衝材料安裝後的初始飽和密度大於1,950 kg/m^3，以確保在可能材料損失的餘裕下，緩衝材料仍可提供2 MPa的回脹壓力乾燥狀態下的膨潤土蒙脫石含量需為75%至90%(重量比) (限制微生物活性條件，回脹壓力超過2 MPa)
避免膠體傳輸	影響孔隙曲折度與尺寸之性質 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸	滿足限制微生物活性及避免廢棄物罐受剪力破壞的密度條件 (緩衝材料在飽和密度超過1,650 kg/m^{3}時膠體傳輸可忽略)
使廢棄物罐維持在中立位置	影響回脹壓力之性質 材料組成：蒙脫石含量 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸	滿足限制微生物活性及避免廢棄物罐受剪力破壞的密度條件 (回脹壓力應超過0.2 MPa)
不影響其他工程障壁功能	影響回脹壓力、壓力分布、勁度、剪力強度之性質 材料組成：蒙脫石含量 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸 安裝後幾何：塊體元件尺寸與位置、膨潤土填充料填塞間隙寬度	緩衝材料安裝後之初始飽和密度應小於2,050 kg/m^3，以避免緩衝材料對廢棄物罐有過高的剪力影響。 乾燥狀態下的膨潤土蒙脫石含量需為75%至90%(重量比)
	影響廢棄物罐周圍化學條件之性質 材料組成：有機碳、硫化物、總硫量	有機碳含量應小於1%(重量比) 硫化物含量不超過0.5%(重量比)(對應的黃鐵礦接近1%) 總硫量不超過1%(重量比)

資料來源：SKB (2010a, p20-p21)

表 4 27：緩衝材料設計功能、性質及設計需求(續)

設計功能	性質及設計參數	長期安全的設計需求
在處置設施環境中長時間演化下，緩衝材料仍保有原來的設計功能	影響緩衝材料的支撐能力、維持最小回脹壓力、最大水力傳導係數、可接受勁度與剪力強度、孔隙曲折度與尺寸、化學組成之相關性質 安裝後幾何：塊體尺寸與位置、膨潤土填充料填塞間隙寬度	依照緩衝材料尺寸，以及其他影響緩衝材料及處置孔幾何的要求(即安裝後的初始質量與飽和密度)。
	影響緩衝材料的支撐能力、維持最小回脹壓力、最大水力傳導係數、可接受勁度與剪力強度、孔隙曲折度與尺寸、化學組成之相關性質 材料組成：蒙脫石含量 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸	緩衝材料受陽離子及氯離子濃度高於1 M以上影響下，回脹壓力仍可保持大於2 MPa及水力傳導係數小於10^{-12} m/sec。 回脹後剪力強度不應超過廢棄物罐抗剪驗證分析的剪力條件。
	影響緩衝材料熱傳之性質 材料組成：蒙脫石含量 安裝後密度：統體密度、含水量、元件安裝後尺寸 安裝後幾何：塊體尺寸與位置、膨潤土填充料填塞間隙寬度	考量緩衝材料幾何尺寸、含水量、處置孔間距，使緩衝材料溫度小於100 ℃。

資料來源：SKB (2010a, p20-p21)

表 4-28：處置孔設計需求

設計考量	處置孔所需性質需求	設計需求
廢棄物罐周圍、上部、及下部具有足夠的緩衝材料厚度，以提供保護廢棄物罐之功能	處置孔的直徑與高度有足夠空間容納緩衝材料與廢棄物罐	緩衝材料設計厚度為廢棄物罐周圍350 mm、上部1,500 mm、下部500 mm。 廢棄物罐尺寸參照「第4.2.1節 廢棄物罐規格設計」。
要求處置孔底部水平條件，以確保緩衝材料塊體及廢棄物可有效安裝於中立位置	處置孔底部的傾斜度須能滿足緩衝材料塊體安裝且能處置廢棄物罐	處置孔底部傾斜度過大會造成緩衝材料塊體無法有效安裝於處置孔中立位置，而造成無法安裝廢棄物罐，故限制處置孔底部最大傾斜度應小於1/1,750。
限制處置孔開挖幾何尺寸，以確保所設計的緩衝材料元件安裝後的密度可維持在設計需求內	處置孔幾何變異不可大於緩衝材料設計規格的要求	水平斷面不可超過標準設計斷面之7%。 依廢棄物罐直徑1,050 mm、廢棄物罐周圍緩衝材料厚度350 mm，為確保緩衝材料塊體可安裝至處置孔內，處置孔設計直徑尺寸為1,750 mm，直徑至少達到1,745 mm。

資料來源：SKB (2010a, p23)

表 4-29：製造及運轉相關的設計需求

設計考量	性質需求	設計需求
緩衝材料的原料，及其製造、檢驗、試驗及檢驗方法必須為純熟的技術 緩衝材料的設計規格必須在品質的條件下被製造與安裝	緩衝材料必需可製造成所需的密度	-
	須要求緩衝材料元件的尺寸、重量及含水量的條件，使緩衝材料可在高品質的要求下進行製造、運送及安裝	廢棄物罐處置的參考流程及緩衝與回填材料的安裝 處置孔的參考設計

資料來源：SKB (2010a, p22)

表 4-30：緩衝材料原料參考設計需求

設計參數	設計規格(重量百分比)	可接受變化範圍(重量百分比)
蒙脫石含量	80至85	75至90
硫化物含量	極少	<0.5
總硫含量(包括硫化物)	極少	<1
有機碳	極少	<1

資料來源：SKB (2010a, p26)

表 4-31：緩衝材料元件參考設計規格

-	緩衝材料元件設計參數	緩衝材料元件規格	可接受誤差
實心塊體	乾密度(kg/m^3)	1,710	+/- 20
	含水量(%)	17	-
	尺寸(mm)	H:500 D:1,650	+/-1
環形塊體	乾密度(kg/m^3)	1,770	+/- 20
	含水量(%)	17	-
	尺寸(mm)	H: 800/最底部H: 830 D_{outer}:1,650 D_{inner}:1,070	+/-1 - -
膨潤土填充料	填充後乾密度(kg/m^3)	1,000	+/-40
	含水量(%)	17	-
	尺寸(mm)	16×6×8	-

註：可接受誤差值參考SKB (2010a, p28)

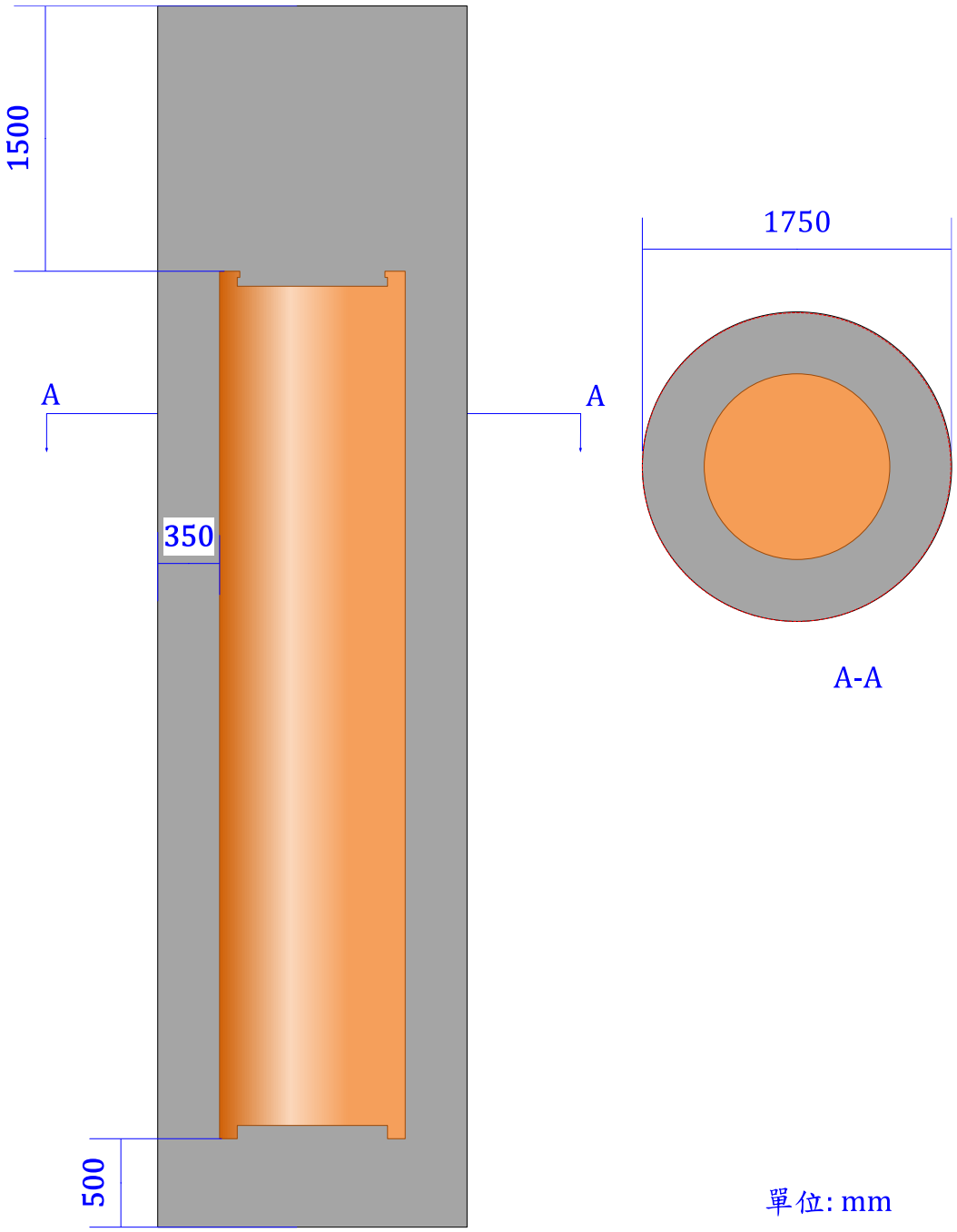


圖 4-20：處置孔設計需求之幾何條件

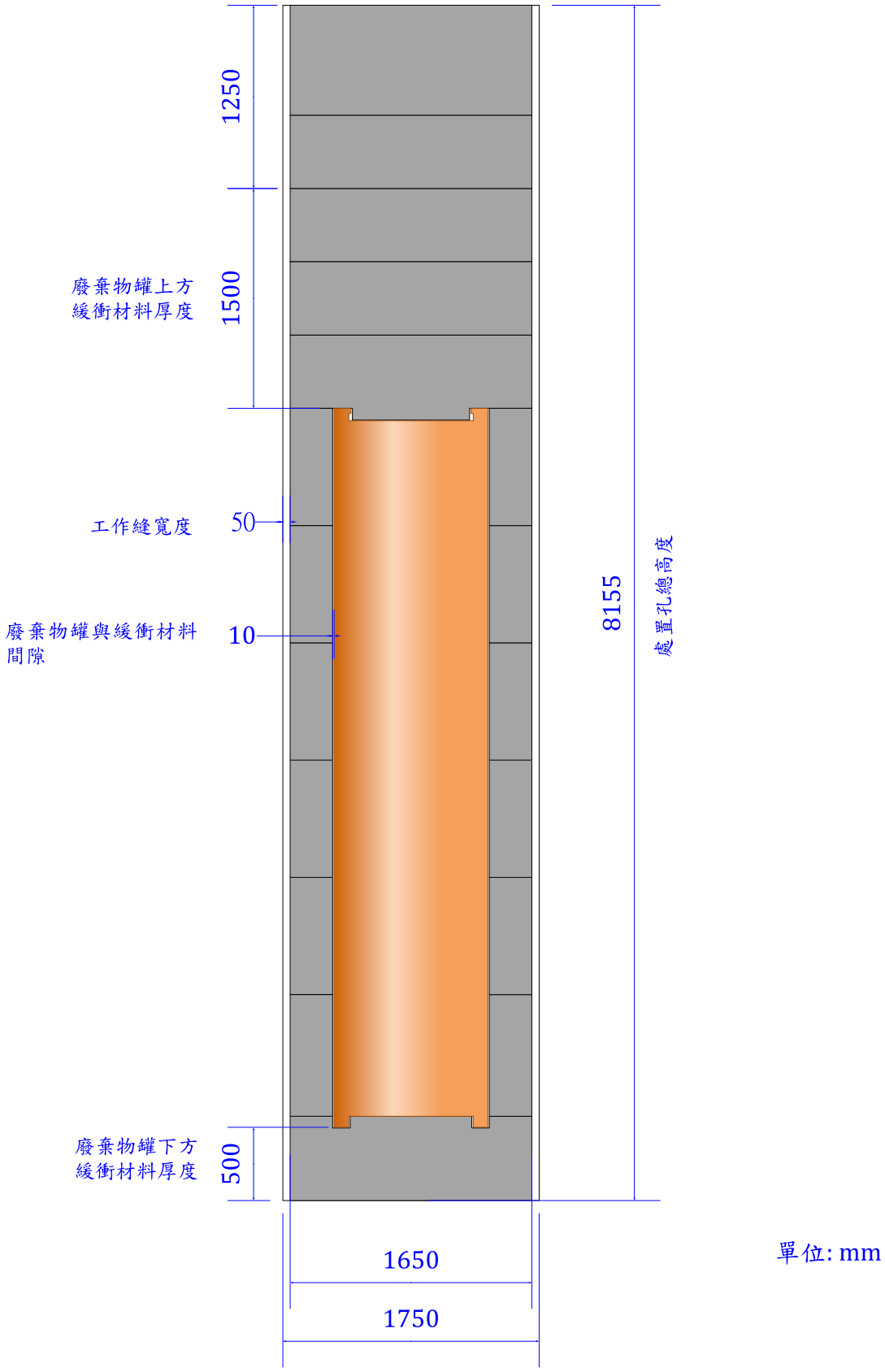
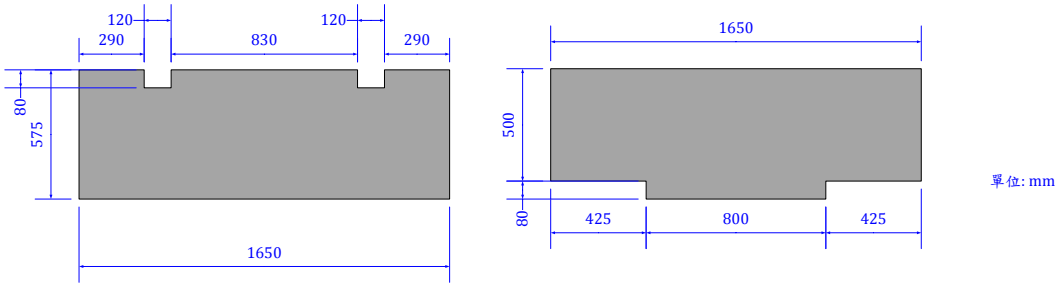
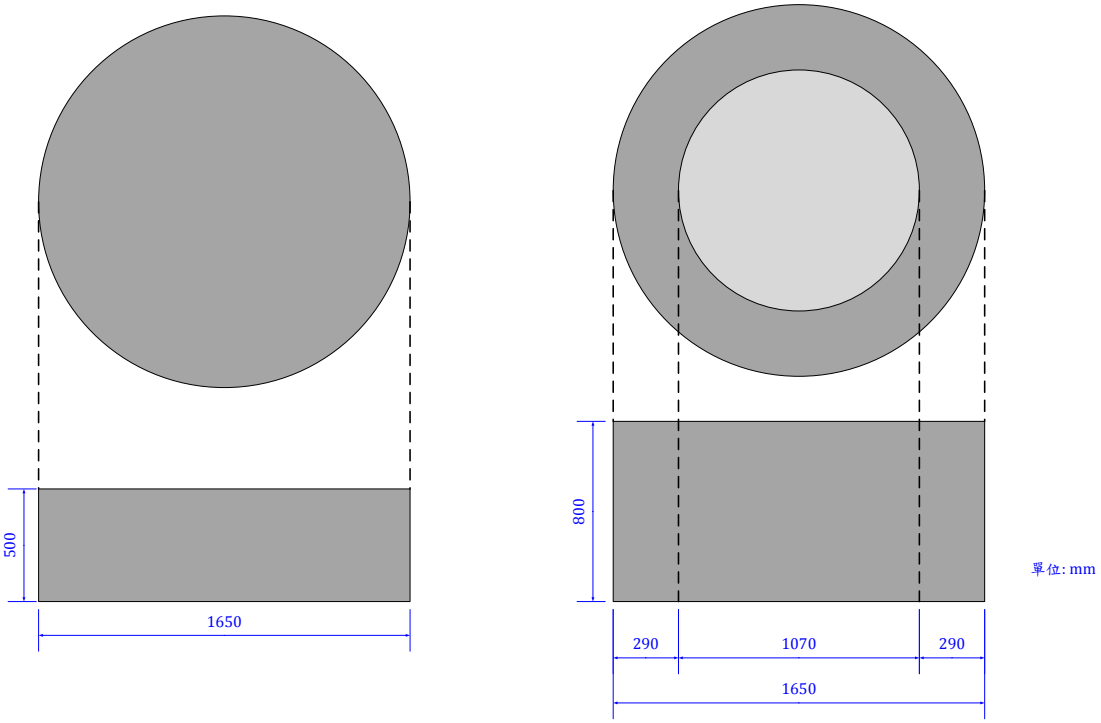


圖 4-21：處置孔尺寸與緩衝材料設計



(a) 廢棄物罐上部及下部緩衝材料塊體細部規格



(b) 頂部實心緩衝材料塊體及環形緩衝材料塊體規格

圖 4-22：緩衝材料元件設計

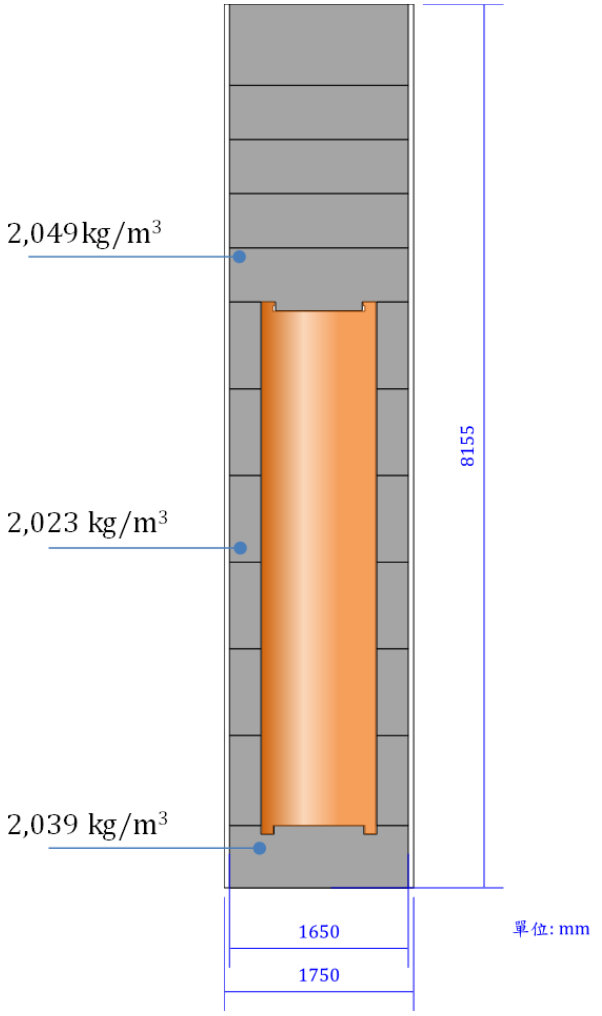


圖 4-23：處置孔各部位緩衝材料飽和密度及對應之乾密度

註：括號內為乾密度

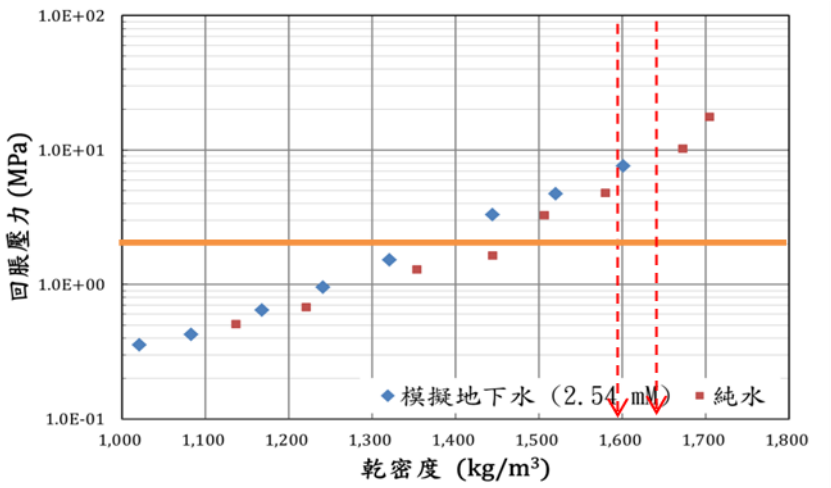


圖 4-24：MX-80型膨潤土於純水及模擬地下水質條件下不同乾密度之回脹壓力

資料來源：蕭宇翔、張清土(2019，p4-24)

註：橘色線段為緩衝材料回脹壓力之安全需求條件，需大於2 MPa以滿足設計功能。

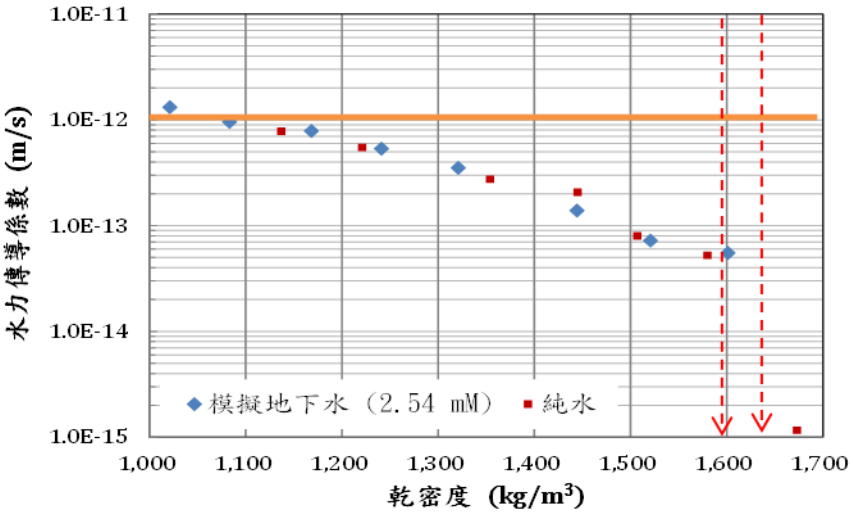


圖 4-25：MX-80型膨潤土於純水及模擬地下水質條件下不同乾密度之水力傳導係數

資料來源：蕭宇翔、張清土(2019，p4-25)

註：橘色線段為緩衝材料水力傳導係數之安全需求條件，需小於10^{-12} m/s以滿足設計功能。

4.2.3. 廢棄物罐抗圍壓性能評估

廢棄物罐抗圍壓性能評估依據為參照第4.2.1節廢棄物罐設計成果，考量緩衝材料在地下處置環境受到靜水壓力與緩衝材料造成之回脹壓力，施加於廢棄物罐之均勻圍壓作用，並考量緩衝材料與其再飽和過程，以及在緩衝材料受侵蝕或由於處置孔產生變形狀況下，可能發生不均勻圍壓的現象，將廢棄物罐形成彎矩作用的不利效應，故需藉由此項研究進行廢棄物罐力學之性能評估。

考量我國燃料規格較瑞典SKB長，相較SNFD2017之廢棄物罐長度增加70 mm，故108年度成果主要進行廢棄物罐幾何尺寸修訂及相關性能評估，將依調整後之廢棄物罐幾何尺寸，除持續增加案例探討廢棄物罐均勻圍壓分析外，本年度亦納入廢棄物罐不均勻圍壓分析，期能了解廢棄物罐圍壓破壞型態。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本項目工作係利用有限元素數值分析軟體Abaqus進行廢棄物罐抗圍壓性能評估，Abaqus可針對固體或是結構力學問題進行數值分析，特別是能針對高度的非線性材料及非線性行為，進行完整的模擬，包括金屬、橡膠、複合材料、鋼筋混凝土及大地材料(岩石、土壤)等，均可執行結構分析；不僅能針對結構問題執行分析，還能利用在熱傳導和土壤力學、流體力學等各種耦合問題進行分析。Abaqus軟體為將構件、材料性質、組裝、分析步驟、構件交互作用、負載、網格和分析作業，劃分為各自獨立或相關的執行作業，一般情況可以依上述排列方式進行分析程序，但是也可針對上述任何1個作業執行獨立性的修改；幾何構件完成後並賦予材料性質，此時可以執行網格劃分，也可於最後邊界條件負載完成後，再執行劃分。若此結構屬於多構件組合，則可在組裝和交互作用作業下，定義結構之接觸性質，並在分析步驟中選擇適用的計算模組，賦予迭代子步，執行模擬分析。

(2) 參數需求說明：

在廢棄物罐抗圍壓性能分析中，所需之廢棄物罐幾何尺寸與材料參數，依第4.2.1節廢棄物罐設計進行設定，而在不均勻圍壓分析案例，主要考量緩衝材料因處置孔壁具有裂隙，使地下水滲入致緩衝材料產生不均勻回脹壓力，以及處置孔變形擠壓而產生之壓力會傳遞至廢棄物罐。而緩衝材料之回脹壓力值為依據瑞典SKB所進行之緩衝材料回脹壓力試驗，緩衝材料孔隙比及密度關係所推算出之回脹壓力。

$$e = \frac{\rho_s - \rho_m}{\rho_m - \rho_w} \tag{4-1}$$

其中，

e=膨潤土孔隙比，[-]。

ρ_s =膨潤土固體密度，[kg/m^3]。

ρ_w=液體密度，[kg/m^3]。

ρ_m=膨潤土飽和密度，[kg/m^3]。

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{e}{e_0}\right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{4-2}$$

其中，

σ=膨潤土回脹壓力值，[kPa]。

σ_0= MX-80膨潤土之回脹壓力經驗式參考值(1,000 kPa)，[kPa]。

e =膨潤土孔隙比，[-]。

e_0=膨潤土之參考孔隙比(1.1)，[-]。

β=參考係數(-0.19)，[-]。

(3) 計算案例與結果說明：

依我國BWR燃料束長度藉由數值分析軟體，進行廢棄物罐設計完成廢棄物罐於處置後靜水壓力及回脹壓力所產生之均勻圍壓分析，確認廢棄物罐能符合圍壓設計準則；並進行緩衝材料因回脹壓力影響對於廢棄物罐造成不均勻圍壓之分析案例，確認廢棄物

罐能承受不均勻圍壓引致之彎矩與剪應力，分析案例如表 4-32及表 4-33：

(a) 均勻圍壓分析

廢棄物罐於地下處置環境中，將會承受到地下水壓，以及緩衝材料吸收水份對廢棄物罐產生之回脹壓力。為更精確建立廢棄物罐抗壓能力資料，採用Abaqus數值模擬方式，進行圍壓範圍為5 MPa至170 MPa的分析，分析結果如表 4-34、圖4-26；結果可發現，隨圍壓增加而安全係數持續減少的趨勢，廢棄物罐可以承受到130 MPa的壓力。另由於鑄鐵材料出現塑性之降伏點為293 MPa，故在約80 MPa之為圍壓作用下恰好使鑄鐵由彈性狀態轉變為塑性狀態。因此，由80 MPa至120 MPa之圍壓鑄鐵最大von Mises應力相近，超過120 MPa圍壓作用將依據鑄鐵材料塑性性質反應最大von Mises應力。

(b) 不均勻圍壓分析：

在廢棄物罐抗不均勻圍壓分析案例中，將依緩衝材料飽和前後分為2種分析案例，並且由緩衝材料飽和狀態下再細分處置孔變形狀況，以模擬廢棄物罐處置過程所受之不均勻圍壓情況。緩衝材料飽和前將分為2種案例，第1種為正常情形呈圓柱形之處置孔，僅因處置孔裂隙使緩衝材料於飽和過程中為不均勻飽和狀態，處置孔並未出現變形情況，由於緩衝材料不均勻飽和狀態而產生不均勻圍束壓力；第2種為緩衝材料除了由於不均勻飽和狀態，處置孔亦產生變形呈現香蕉形狀，具有8 mm之變位，此將增加對於廢棄物罐之圍束壓力值，其分析結果如表 4-35、圖 4-27；緩衝材料飽和後之不均勻圍壓分析案例將分為3種，壓力分布方式將對於廢棄物罐產生中間段具有較大之彎曲應力，第1種分析案例為處置孔可能因挖掘過程不適當、或處置環境之岩層脫落等情形，使處置孔內之幾何形狀並非圓柱形，而呈現香蕉形狀，假設於處置孔上下2端具有8 mm之變位，第2種分析案例為處置孔內壁因岩層崩塌而產生更大之變位，處置孔在此變位達33 mm

下，將會降低緩衝材料對於廢棄物罐之擠壓作用，第3種分析案例為前2種案例同時發生時之情況，故為前2種案例之變位相加而得(δ_1=8 mm，δ_2=33 mm)，3種案例之分析結果如表 4-36、圖 4-28。

(4) 結果與討論：

本研究針對瑞典SKB對於廢棄物罐受緩衝材料不均勻圍壓作用案例進行瞭解，並藉由有限元素軟體Abaqus進行分析。由分析結果可知，廢棄物罐力學支撐強度來源主要來自鑄鐵內襯結構，銅外殼主要用以具有延展性及抗腐蝕功能，其對強度貢獻相較來得低，當利用瑞典SKB依據處置孔因岩層條件或施工狀況產生剝落或崩塌，或者產生裂隙導致地下水滲入緩衝材料，造成其於特定區域產生不均勻圍壓作用等實際可能發生之不利情況，轉換為對於廢棄物罐造成不同情況之圍壓作用案例，進行廢棄物罐不均勻圍壓分析，再探討鑄鐵之安全係數，判別廢棄物罐是否達到破壞。此利用鑄鐵材料性質判別廢棄物罐安全性流程，可檢核廢棄物罐相關設計參數是否符合安全功能，在緩衝材料飽和前之案例分析，藉由鑄鐵內襯分析之von Mises應力，依其材料之容許應力395 MPa計算其圍壓分析安全係數，即安全係數等於容許應力除分析應力，安全係數小於1時，顯示對於廢棄物罐之鑄鐵內襯造成安全性不足。此案例之安全係數仍可維持3.5，故廢棄物罐應可保持其安全性能。

表 4-32：廢棄物罐抗圍壓之案例編號與說明(均勻圍壓)

案例編號	案例說明	案例編號	案例說明
Case1：	壓力5 MPa	Case11：	壓力80 MPa
Case2：	壓力10 MPa	Case12：	壓力90 MPa
Case3：	壓力15 MPa	Case13：	壓力100 MPa
Case4：	壓力20 MPa	Case14：	壓力110 MPa
Case5：	壓力25 MPa	Case15：	壓力120 MPa
Case6：	壓力30 MPa	Case16：	壓力130 MPa
Case7：	壓力40 MPa	Case17：	壓力140 MPa
Case8：	壓力50 MPa	Case18：	壓力150 MPa
Case9：	壓力60 MPa	Case19：	壓力160 MPa
Case10：	壓力70 MPa	Case20：	壓力170 MPa

表 4-33：廢棄物罐抗圍壓之案例編號與說明(不均勻圍壓)

案例編號	案例說明	
Case1：飽和前廢棄物不均勻圍壓	σ_1=6.594 MPa σ_2=0 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)
	σ_1=7.823 MPa σ_2=0 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)
Case2：飽和後廢棄物罐不均勻圍壓	σ_1=7.503 MPa σ_2=5.832 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)
	σ_1=6.860 MPa σ_2=4.122 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)
	σ_1=7.823 MPa σ_2=3.727 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)

表 4-34：廢棄物罐圍壓參數分析

壓力(MPa)	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**
von Mises應力(MPa)	16.76	33.52	50.28	67.04	83.8	100.6	134.1	167.9	203.5	240.2
安全係數	23.6	11.8	7.9	5.9	4.7	3.9	2.9	2.4	1.9	1.6
壓力(MPa)	**80**	**90**	**100**	**110**	**120**	**130**	**140**	**150**	**160**	**170**
von Mises應力(MPa)	279.3	293.9	296.7	305.7	350.2	392.1	424.3	450.4	476.2	491
安全係數	1.4	1.3	1.3	1.3	1.1	1.0	0.9	0.9	0.8	0.8

表 4-35：飽和前廢棄物罐不均勻圍壓分析結果

廢棄物罐長度(mm)			4,835	4,905
1.	σ_1=6.594 MPa σ_2=0 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)	88.4	90.95
2.	σ_1=7.823 MPa σ_2=0 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)	107.8	111.6
	第2項之安全係數		3.7	3.5

表 4-36：飽和後廢棄物罐不均勻圍壓分析結果

廢棄物罐長度(mm)			4,835	4,905
1.	σ_1=7.503 MPa σ_2=5.832 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)	46.2	47.42
2.	σ_1=6.860 MPa σ_2=4.122 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)	70.27	72.28
3.	σ_1=7.823 MPa σ_2=3.727 MPa	分析之鑄鐵內襯應力值(MPa)	105.3	109
	第3項之安全係數		3.8	3.6

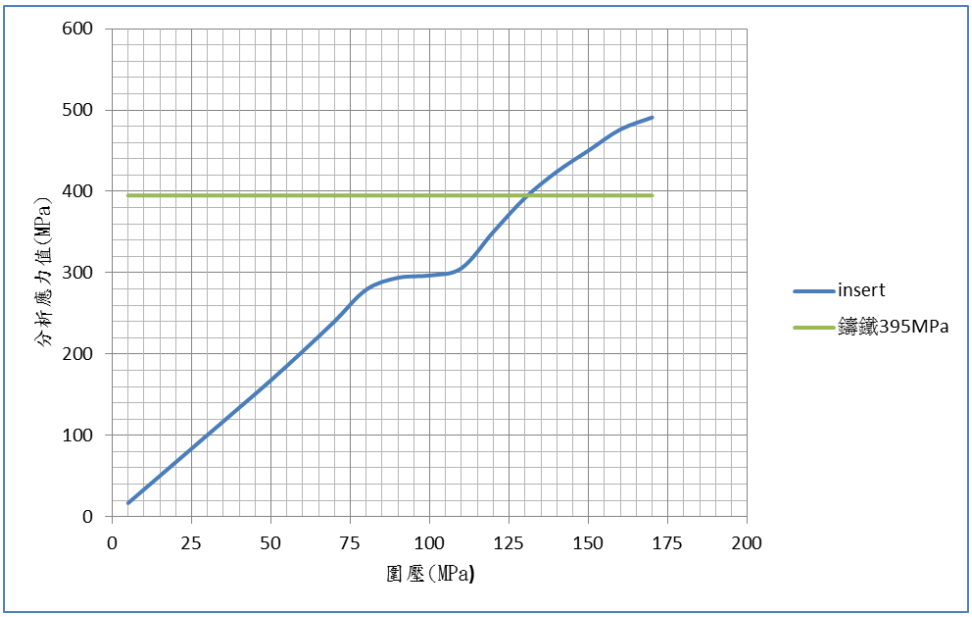


圖 4-26：廢棄物罐均勻圍壓分析結果圖

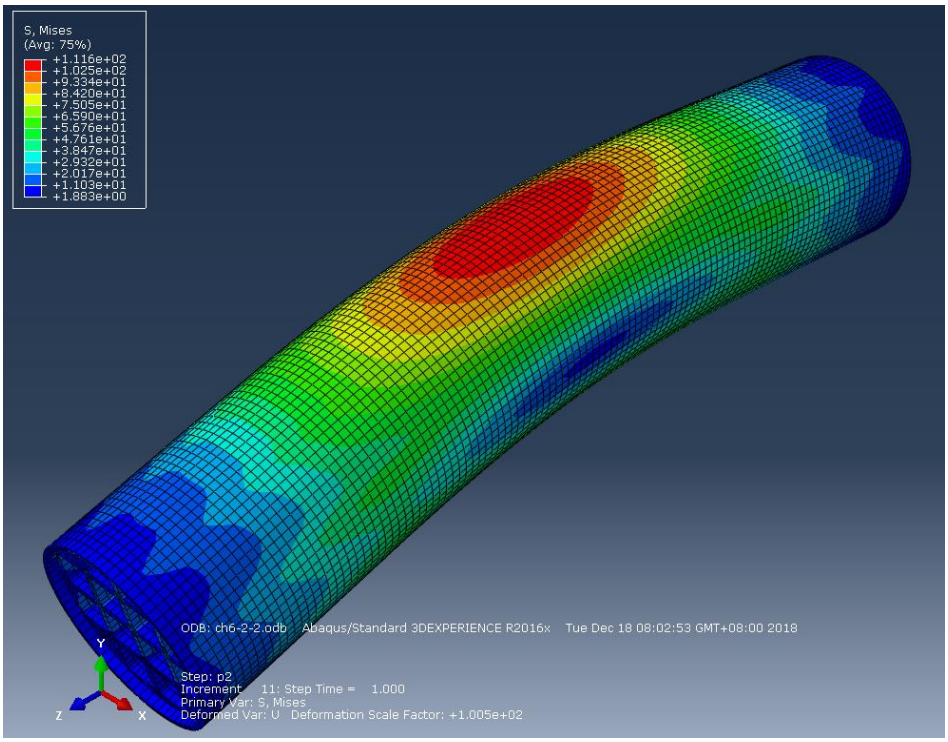


圖 4-27：飽和前不均勻圍壓分析結果圖(廢棄物罐長度4,905 mm)

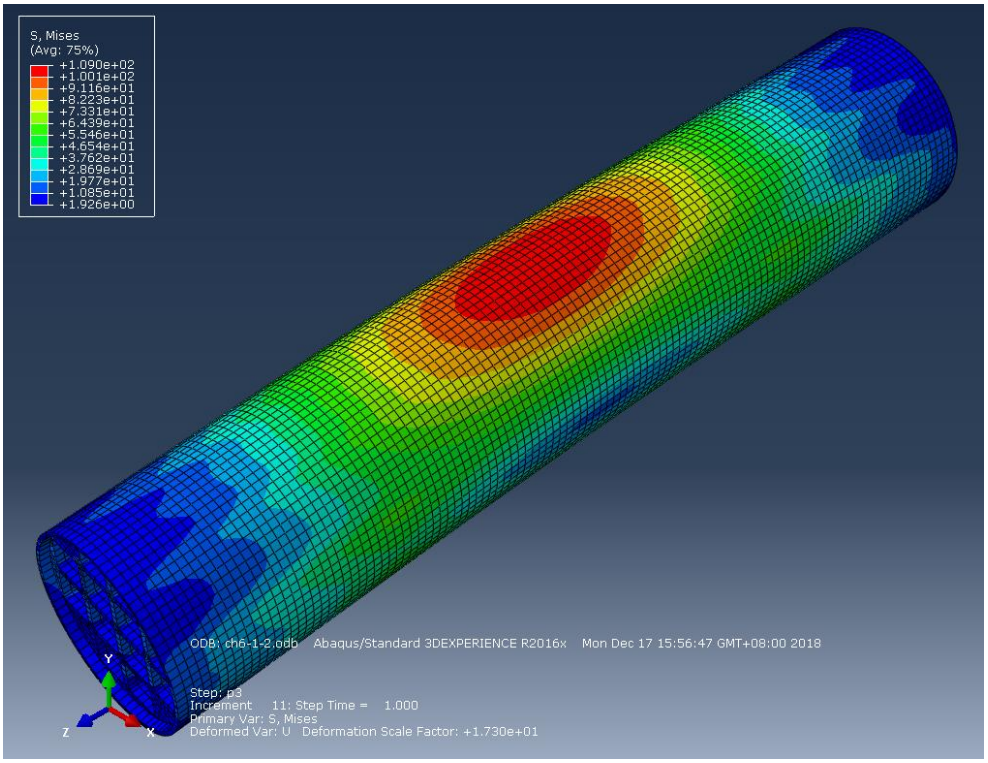


圖 4-28：飽和後不均勻圍壓分析結果圖(廢棄物罐長度4,905 mm)

4.2.4. 廢棄物罐抗剪力位移之性能分析技術

設計銅外殼之廢棄罐主要功能為抗腐蝕，而附屬功能是必須具有足夠的延展性，以允許塑性應變。當受到來自地下水壓力的負荷和膨潤土膨脹的壓力，銅會變形，直到與鑄鐵內襯接觸；岩石裂隙受地震作用而產生位移，將會對廢棄物罐產生剪力作用，也將導致銅罐的變形，因此，在設計時也需要探究廢棄物罐抗剪力的性能。參照第4.2.1節廢棄物罐設計與第4.2.2節緩衝材料設計成果，藉由數值分析模式，確保其廢棄物罐之內襯結構、銅殼等組件與緩衝材料之設計於剪力位移影響下，仍處於安全範圍內，並且確認廢棄物罐在銅殼長期之材料潛變作用下，仍能保持完整性。

SNFD2017與108年成果之差異，為廢棄物罐幾何尺寸進行修改，本次108年成果較SNFD2017所使用之廢棄物罐長度增加70 mm，以及擴充廢棄物罐抗剪力位移位置及角度之分析案例，過去SNFD2017為廢棄物罐1/2、1/4處90°、22.5°之剪力位移分析案例，而本次108年成果則增加廢棄物罐1/8處之分析案例，並且在剪力位移分析之角度部分，增加67.5°、50°、45°三種剪力位移角度，使廢棄物罐抗剪力位移分析案例增加至15組，較過去SNFD2017多，可較完整了解廢棄物罐抵抗剪力位移情況。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

利用數值分析軟體Abaqus建置廢棄物罐與緩衝材料模型，並且進行模擬處置孔因裂隙產生之剪力位移作用。

(2) 參數需求說明：

短期剪力位移分析：廢棄物罐幾何尺寸與材料參數依據第4.2.1節廢棄物罐設計進行設定，緩衝材料之設定則依據第4.2.2節緩衝材料設計，並以緩衝材料已產生回脹壓力作用下為前提，進行建置模型。

長期剪力位移分析：考慮長期圍壓作用對廢棄物罐產生潛變效應。在有限元素分析的方法，採用冪次法則(power-law model)模式，模擬於在固定負載作用下的潛變行為，此方法可分為時間硬

化(time hardening)和應變硬化(strain hardening)模擬；一般潛變曲線的取得，乃是採用單軸固定初始應力下之靜態負載實驗所獲得之結果，在潛變曲線中，總應變可分為彈性應變和潛變，在潛變行為試驗過程中為採用固定溫度和負載的情況下進行，故可採用與時間相關的Norton冪次法則進行模擬(Elsevier, 2008, p77)，如式(4-3)：

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = A\sigma^n t^m \tag{4-3}$$

其中，

ε_c=潛變，[-]。

t=時間，[sec]。

σ=應力，[Pa]。

A=常數，[-]。

n=常數，[-]。

m=常數，[-]。

廢棄物罐銅殼潛變模擬採用Abaqus內建潛變模擬公式，如式(4-3)，輸入參數為A、n、m、必需由潛變試驗所得潛變曲線結果進行曲線擬合獲得公式參數。依據瑞典SKB所提供之銅殼潛變與時間關係進行曲線模擬結果如圖 4-29，圖中紅線和藍線為瑞典SKB所採用不同固定負載狀態下的試驗曲線，分別以170 MPa及175 MPa進行潛變試驗，綠線及紫線則是本分析所採用之參數模擬結果，其參數如表 4-37，此參數為同時擬合170 MPa和175 MPa壓力試驗結果參數。

(3) 計算案例與結果說明：

短期剪力位移分析為可能的破壞情況，剪力位移作用方式依據位置及角度而有不同之分析案例，可參考圖 4-30。位置由廢棄物罐頂部起分為廢棄物罐長度的1/2、1/4、1/8處，角度由廢棄物罐長軸方向起分為22.5°、45°、50°、67.5°及90°。

長期剪力位移分析則為了解廢棄物罐於長期受力下產生潛變所造成之影響，由於銅殼材料的潛變作用影響相較鑄鐵內襯來的嚴重，故參考瑞典SKB力學分析過程，只考慮銅殼材質承受長期負載產生潛變效應造成廢棄物罐力學行為的影響，故在依據潛變試驗所得資料設定銅殼之材料參數後，進行廢棄物罐長期剪力位移分析，針對角度90°進行廢棄物罐1/2、1/4處之長期剪力位移分析。

上述短期及長期剪力位移相關評估案例表 4-38。

(4) 結果與討論：

短期剪力分析：剪力位移分析案例為假定裂隙錯動位置及角度變化，當處置孔發生錯動致剪力位移發生時，錯動的岩層將擠壓緩衝材料並推動廢棄物罐，並且參照瑞典SKB所給定之廢棄物罐各組件之材料參數(如表 4-23至表 4-26)，以1 m/sec之剪力位移速率進行分析，分析程序首先進行緩衝材料回脹壓力與靜態水壓平衡之分析，對於廢棄物罐造成圍壓作用，接著設定處置孔的錯動而對於廢棄物罐及緩衝材料造成剪力作用，藉由有限元素分析了解廢棄物罐受力情形，分析結果如表 4-39及表 4-40，於廢棄物罐1/4位置各角度剪力位移分析變形結果如圖 4-31，其中在廢棄物罐1/2、1/4、1/8位置進行90°、67.5°、50°、45°、22.5°之5 cm剪力位移分析結果圖分別如圖 4-32至圖 4-34，由於處置孔產生錯動推動緩衝材料，緩衝材料隨著剪力位移方向擠壓廢棄物罐，而不致使錯動的裂隙直接作用於廢棄物罐上，可在地震力的抵抗發揮緩衝功能，依據鑄鐵容許應力評估廢棄物罐在抵抗外力作用之安全係數。由分析結果可知，在剪力位移位置在1/8處時，以45°之剪力位移分析所得之鑄鐵應力值最大，在廢棄物罐鑄鐵內襯上端與封蓋間具有較小斷面以容納封蓋之設計，此處仍會受角度較小之剪力位移作用下產生較大之應力。

在銅殼分析結果應變值皆較低，在低角度之剪力位移作用下，將會造成銅殼頂部突出之幾何形狀造成較高之應變，最大值為14.58%，而銅殼之容許應變值為40%，故皆能保持在安全範圍內，

在廢棄物罐1/2、1/4、1/8處各角度之銅殼應變圖如圖 4-32至圖4-34，廢棄物罐在剪力位移作用下之破壞模式仍以鑄鐵內襯達破壞為主，而緩衝材料為土壤性質，主要功能為緩衝剪力位移直接對於廢棄物罐作用而導致之破壞，緩衝材料由分析結果研判仍能維持安全功能。

長期剪力分析：分析結果如表 4-41，鑄鐵內襯應力分析結果圖如圖 4-35、銅殼潛變分析結果如圖 4-36。其中PEEQ為Abaqus軟體中等效塑性應變(equivalent plastic strain)，當其大於0時，表示材料已達降伏狀態，並且一般不應超過材料的破壞應變(failure strain)。由結果可知，在10萬年剪力位移作用下，銅殼產生潛變作用，將略使廢棄物罐鑄鐵內襯應力值降低。

表 4-37：式(4-3)潛變曲線擬合參數

參數代號	A	n	m
擬合參數	7.6×10^{-26}	10.16	-0.649

表 4-38：廢棄物罐抗剪力位移之案例編號與說明

案例編號	案例說明	
Case1：短期剪力位移分析	廢棄物罐位置：1/2	角度90
		角度67.5
		角度50
		角度45
		角度22.5
	廢棄物罐位置：1/4	角度90
		角度67.5
		角度50
		角度45
		角度22.5
	廢棄物罐位置：1/8	角度90
		角度67.5
		角度50
		角度45
		角度22.5
		角度90
Case2：長期剪力位移分析	廢棄物罐位置：1/2	角度90
	廢棄物罐位置：1/4	角度90

表 4-39：廢棄物罐短期剪力位移鑄鐵應力分析結果

剪力位移		鑄鐵內襯分析之von Mises stress(MPa)	剪力位移安全係數
位置	角度	5 cm剪力位移	
1/2	90	302.2	1.31
	67.5	298.7	1.32
	50	284.1	1.39
	45	266.0	1.48
	22.5	243.7	1.62
1/4	90	321.6	1.23
	67.5	312.1	1.27
	50	302.6	1.31
	45	300.8	1.31
	22.5	254.8	1.55
1/8	90	305.0	1.30
	67.5	325.8	1.21
	50	324.2	1.22
	45	326.7	1.21
	22.5	272.1	1.45

註：藉由鑄鐵內襯分析之von Mises應力，依容許應力395 MPa計算其剪力位移之安全係數，即安全係數等於容許應力除分析應力，安全係數小於1時，顯示該位置及角度之剪力位移將對於廢棄物罐之鑄鐵內襯造成安全性不足。

表 4-40：廢棄物罐短期剪力位移銅殼應變分析結果

剪力位移		銅殼應變(%)
位置	角度	5 cm剪力位移
1/2	90	2.66
	67.5	5.82
	50	5.49
	45	5.01
	22.5	0.04
1/4	90	2.12
	67.5	0.79
	50	0.47
	45	0.45
	22.5	10.04
1/8	90	6.72
	67.5	10.15
	50	5.69
	45	5.37
	22.5	5.87

表 4-41：廢棄物罐長期剪力位移分析結果

剪力位移		鑄鐵內襯分析之von Mises stress(MPa)	剪力位移安全係數
位置	角度	5 cm	
1/2	90	288.9	1.37
1/4	90	316.7	1.25

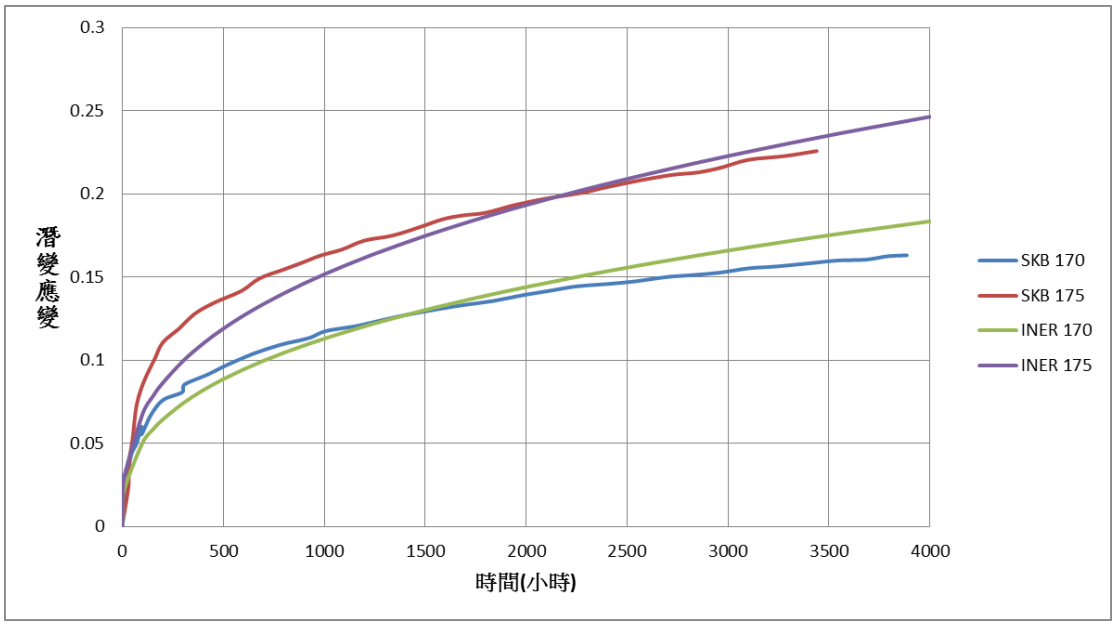


圖 4-29：式(4-3) 170 MPa與175 MPa曲線擬合結果

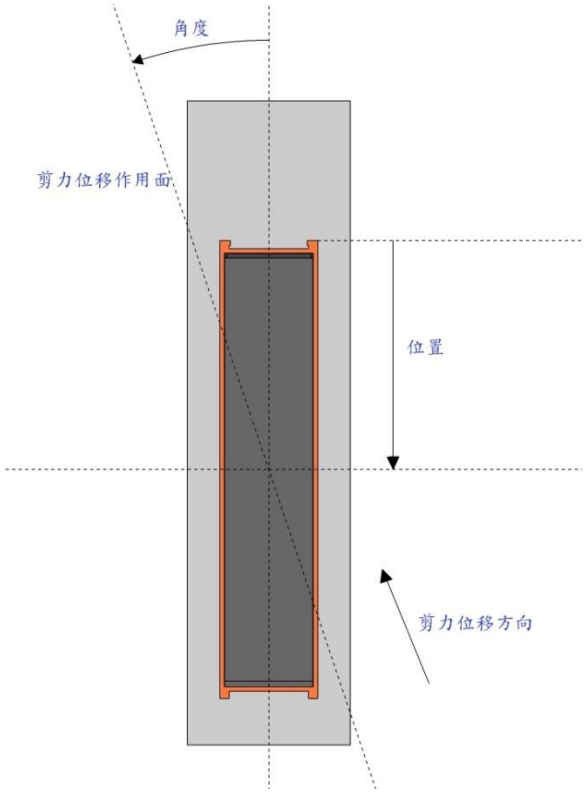


圖 4-30：處置孔剪力位移作用方式

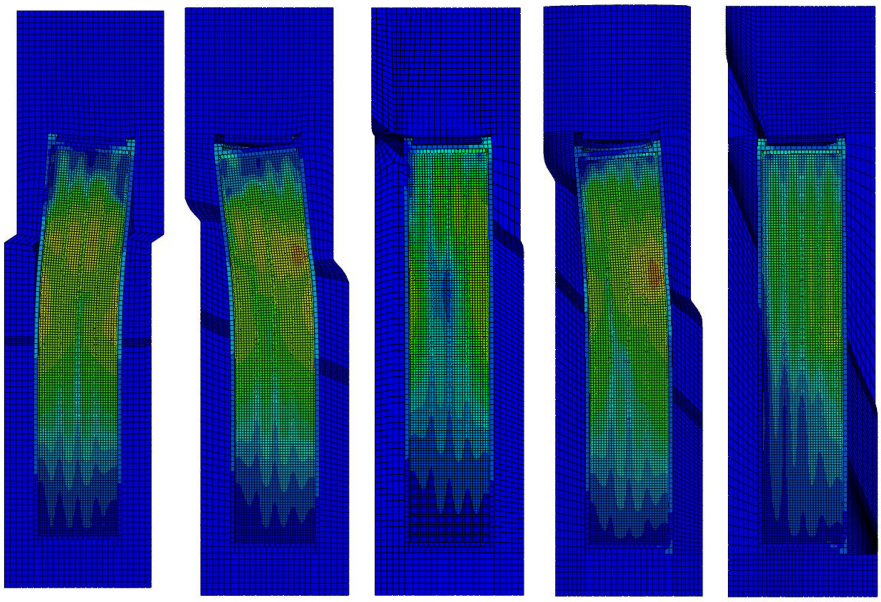


圖 4-31：廢棄物罐1/4處位置各角度剪力位移分析結果

註：由左至右剪力位移角度分別為90°、67.5°、50°、45°、22.5°。

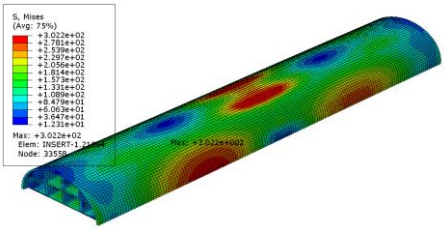
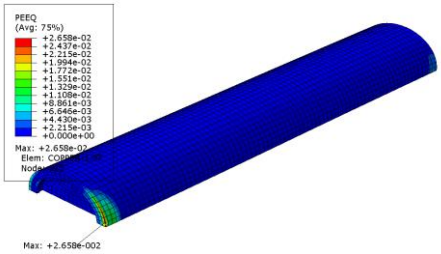
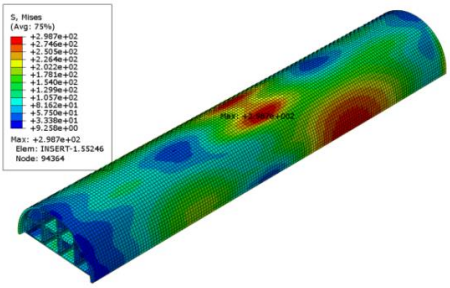
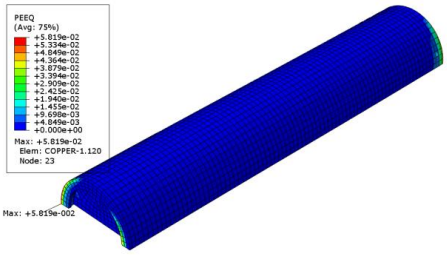
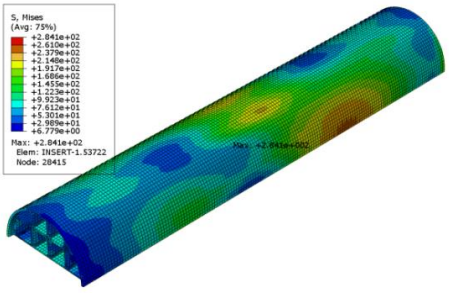
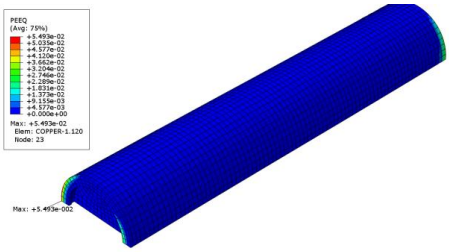
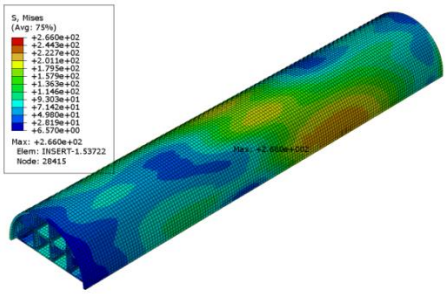
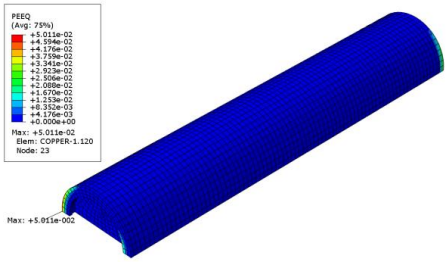
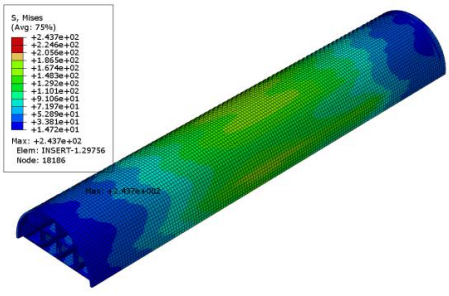
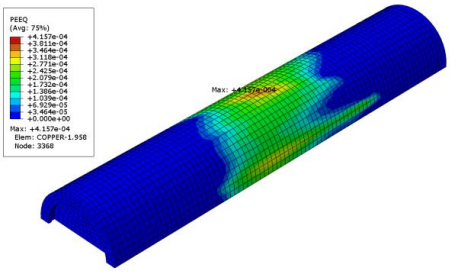
角度	鑄鐵內襯(von Mises stress, MPa)	銅殼(PEEQ)
90°		
67.5°		
50°		
45°		
22.5°		

圖 4-32：廢棄物罐1/2處各角度之5 cm剪力位移鑄鐵應力分析結果

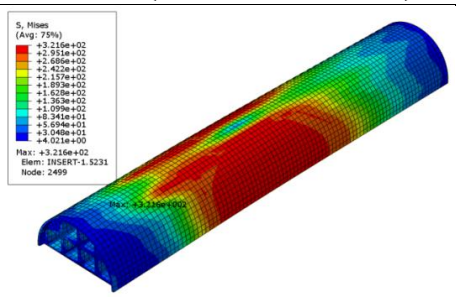
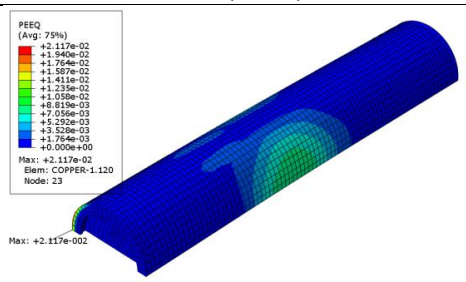
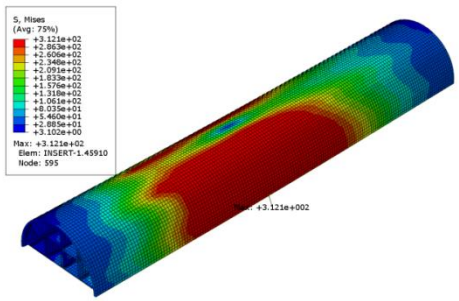
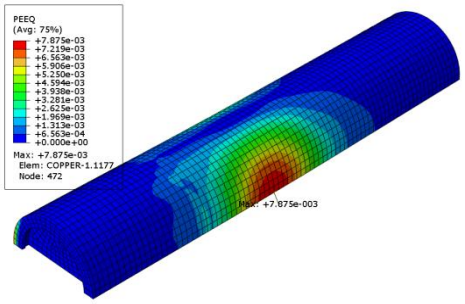
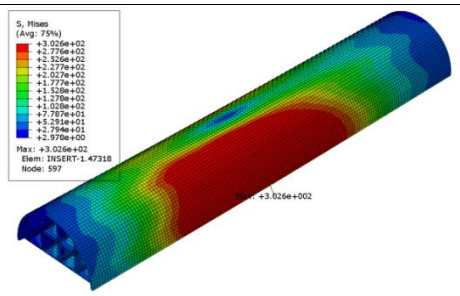
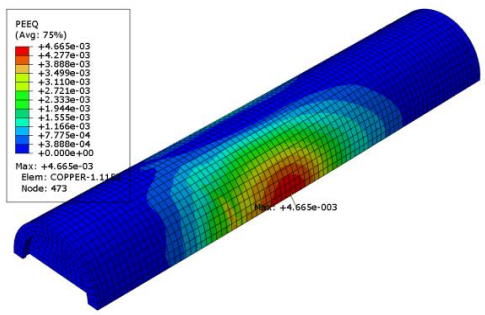
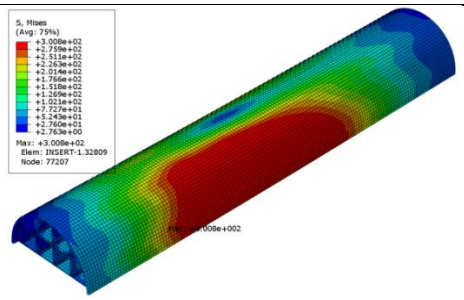
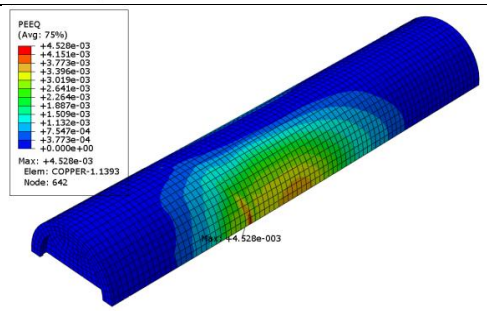
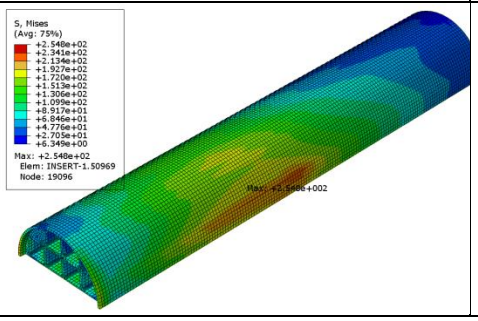
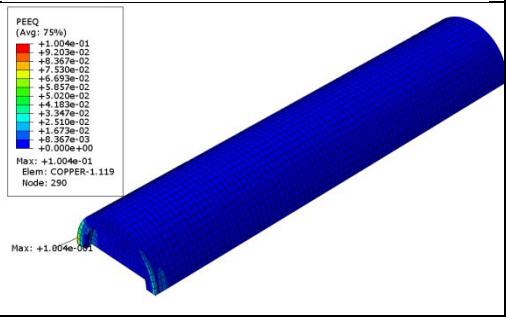
角度	鑄鐵內襯(von Mises stress, MPa)	銅殼(PEEQ)
90°		
67.5°		
50°		
45°		
22.5°		

圖 4-33：廢棄物罐1/4處各角度之5 cm剪力位移銅殼應變分析結果

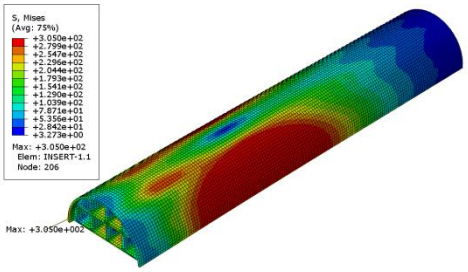
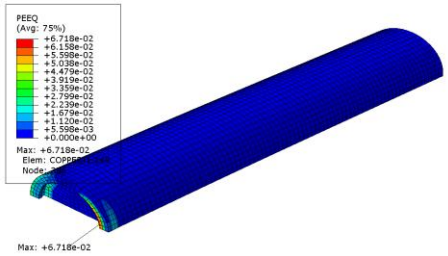
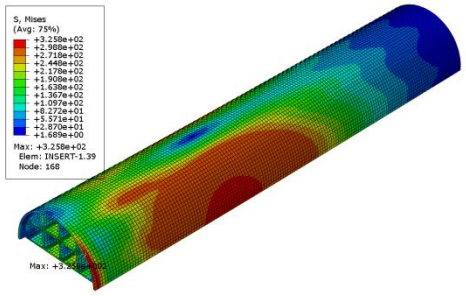
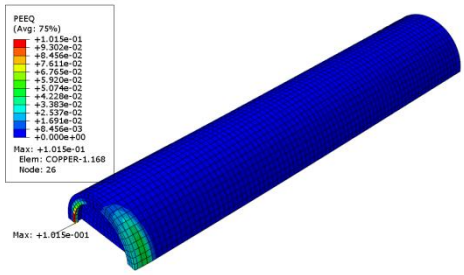
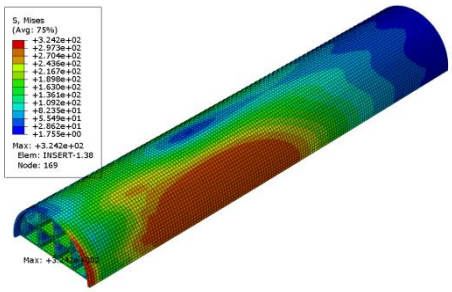
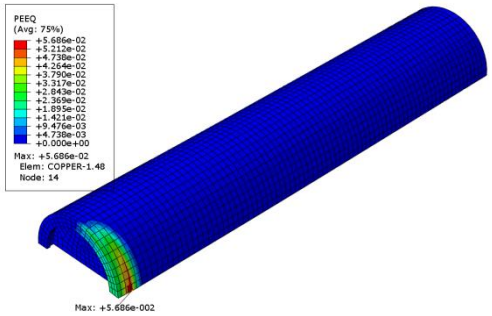
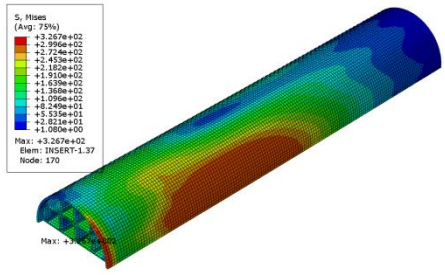
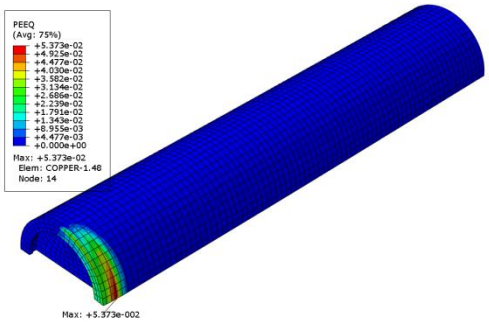
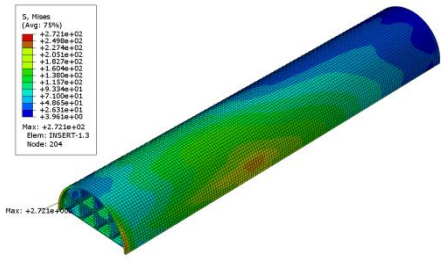
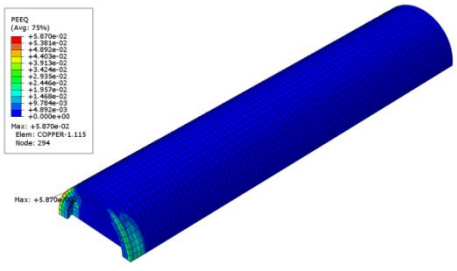
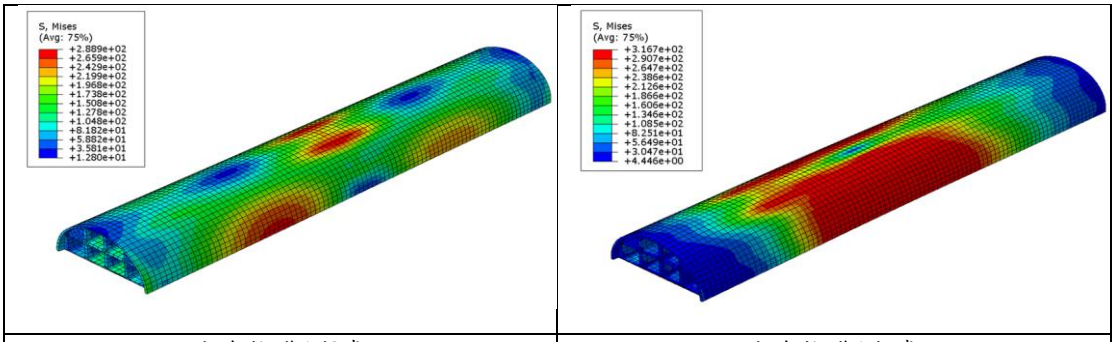
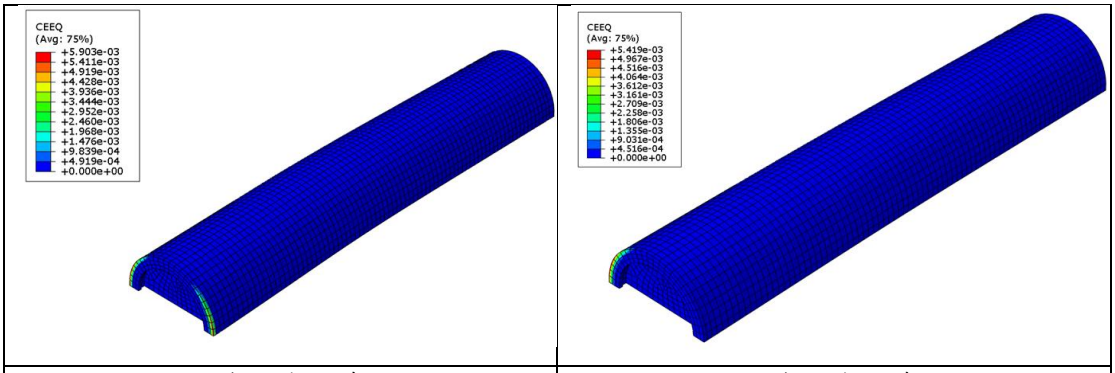
角度	鑄鐵內襯(von Mises stress, MPa)	銅殼(PEEQ)
90°		
67.5°		
50°		
45°		
22.5°		

圖 4-34：廢棄物罐1/8處各角度之5 cm剪力位移銅殼應變分析結果



廢棄物罐1/2處	廢棄物罐1/4處

圖 4-35：廢棄物罐1/2處及1/4處90°之5 cm長期剪力位移鑄鐵應力分析結果



廢棄物罐1/2處	廢棄物罐1/4處

圖 4-36：廢棄物罐1/2處及1/4處90°之5 cm長期剪力位移銅殼潛變分析結果

4.2.5. 未飽和膨潤土特性分析

本項目工作為探討未飽和膨潤土受力後之力學行為，廢棄物罐下方的膨潤土主要功能是防止廢棄物罐與母岩直接接觸，緩衝材料受到廢棄物罐以及回填材料之重量後，除了根據初始飽和度產生之瞬時變形量，後續吸水導致緩衝材料達飽和狀態所產生回脹壓力亦會影響其功能性，因此，需進行緩衝材料之變形分析，以確認符合安全功能。

本年度工作成果與SNFD2017之差異，除配合廢棄物罐尺寸、處置孔及緩衝材料設計變更調整重新進行分析外，另考量緩衝材料安裝初期未飽和狀態至飽和過程之沉陷分析及回脹力評估。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本研究以FLAC3D作為主要之模擬軟體，FLAC3D為一三維有限體積法(finite-volume method)數值軟體，主要用來求解工程力學之問題並廣泛運用在大地工程(geomechanics)之中，其特點之一為組成模型可自行撰寫後匯入。本研究以Alonso於1990年提出的Barcelona Basic Model(BBM)作為未飽和土壤之組成模型(Alonso et al., 1990, p405-p430)，BBM組成模型為Modified Cam-Clay (MCC)之延伸，新增吸水力參數將土壤於未飽和狀態之力學行為納入考量，藉由FLAC3D內提供之UDM方式匯入後，進行測試與驗證以確保程式碼之正確性。

(2) 參數需求說明：

廢棄物罐規格：依據第4.2.1節廢棄物罐設計規格計算後，廢棄物罐重量約落在200 kN，後續以此重量進行模擬計算。

緩衝材料及回填材料規格：依據第4.2.2節緩衝材料及回填材料規格設計，以及緩衝材料與回填材料乾密度分別設定為：1,700 kg/m^{3}與1,600 kg/m^3，進行數值模式相關測試。膨潤土參數及初始條件如表 4-42：

(3) 計算案例與結果說明：

(a) BBM組成模型匯入與驗證：

本項工作以FLAC3D進行數值模型建置以及運跑，而BBM組成模型並非FLAC3D程式中內建之組成模型，但FLAC3D提供了UDM (User-Defined Model)流程讓使用者可以根據需求自撰組成模型後再匯入FLAC3D中；UDM包含2種方式：(1) FISH程式碼，(2) Dynamic Link Library (DLL)，其中BBM組成模型之降伏曲面、塑性力學中的流動法則與硬化法則以及額外新增之參數，皆定義在BBM的DLL檔中，而有關於回脹壓力的計算則由內建之FISH程式碼完成，如圖 4-37所示。

本研究首先進行BBM組成模型匯入FLAC3D之工作，後續與Alonso之文獻數據比對，以確保程式碼之正確性。Alonso文獻中(Alonso et al., 1990, p405-p430)以單一元素之未飽和土壤進行模擬，經由不同加載路徑測試模型之反應，如圖4-38所示。控制吸水力(等同控制水流進出)及周圍壓力形成不同加載路徑，如圖 4-39所示。

(b) 未飽和緩衝材料之瞬時變形量：

依據第4.2.1節及第4.2.2節之各項工程障壁設計規格，以及如參數需求說明各項設定，針對未飽和階段下承受上方廢棄物罐自重及回填材料自重後所產生之變形量，本身分析案例包含7個不同含水量作為初始條件，如表 4-43所示；目的是為了呈現膨潤土內含水量之多寡對於沉陷量大小之影響。

(c) 未飽和緩衝材料之回脹壓力分析：

緩衝材料產生回脹壓力後，同時有回脹量產生，此一特性將影響沉陷量，且會改變緩衝材料之密度及平均應力。若緩衝材料回脹量過大，將導致緩衝材料密度降低且回脹壓力也下降，此2物理量為安全性能分析之重要參數，若低於所設定之準則將不符合安全性能分析。

其中，回脹量之分析受到許多因素之影響，其中影響較為顯著的是：母岩裂隙之位置與水壓(入流位置與入流水壓)、膨潤土與母岩間之界面性質及膨潤土之基本性質。由於母岩裂隙之位置與水壓為近場分析完成後之結果，且膨潤土與母岩

間之界面性質有多項參數尚未確定，因此，本研究目前做了幾項假設：

(i) 處置設施入流位置目前為假設位置，入流水壓則參考地下水流場演化分析結果約為1 MPa，以地下水頭差約100 m來進行設定，換算下來之水壓約為1 MPa。

(ii) 膨潤土與母岩之接觸面假設為光滑平面，2者間並無任何摩擦力，此假設將使得分析結果之回脹量大於實際值。

以上假設用來簡化數值模型及增加收斂性，能夠先快速地建立起回脹量分析之數值模型，並得到初步模擬結果來觀察緩衝材料之回脹行為。

本研究為了探討回填材料與緩衝材料介面之行為，以處置孔底部均勻進水之情節進行探討，於FLAC3D中將底部水壓設定為1 MPa，假設材料均為等向性並以等向性流體模型(Isotropic fluid model)進行模擬，並依變形量7個案例(表4-43)進行評估。

(4) 結果與討論：

(a) BBM組成模型匯入與驗證：

圖 4-39顯示了所有加載路徑所對應的吸水力及圍壓，以ACEF與ABEF為例，初始狀態為A點(吸水力＝0.2 MPa，圍壓＝0.15 MPa)，而前者先提高其圍壓後再降低其吸水力，於圖4-40可以看出ACEF體積逐漸縮小，2段不同斜率表示彈性段與塑性段，後續吸水至飽和段(E→F)則出現大幅體積縮小，表示吸水崩塌(collapse)之現象，此為BBM組成模型特性之一；而ABEF路徑在一開始為吸水至飽和段(A→B)，出現小幅度的吸水回脹，表示吸水回脹(swelling)之現象，此為BBM組成模型特性之一，使得體積微微上升，後續圍壓持續加載則體積逐漸縮小。

(b) 未飽和緩衝材料之瞬時變形量：

將表 4-43中，7個案例之初始條件輸入進FLAC3D後運跑至數值模型達到穩定狀態之結果彙整於圖 4-43中；在圖 4-43中可以看出，沉陷量與緩衝材料含水量之關係，當含水量逐漸提高後，FLAC3D計算出的沉陷量也越來越大，此結果反映出了土壤在含水量提高的情況下，其剪力強度會逐漸下降之特性。

一般而言，緩衝材料之含水量約莫落在17%左右，因此，將針對含水量為16.5%之案例#3及含水量為19.3%之案例#4進行探討。由圖 4-44中可看出2個案例運跑至穩定狀態時，下區域之平均密度大約為1,714 kg/m^3，較原先1,700 kg/m^{3}提高了一些。圖 4-45與圖 4-46，分別顯示了案例#3與案例#4平均應力分布及垂直沉陷量分布之結果，如先前之原因，2者之結果差異並不顯著。因此，當緩衝材料初始含水量在10%至20%之間，其變形量計算之結果將十分相近。

(c) 未飽和緩衝材料之回脹壓力分析：

由圖 4-47至圖 4-50中，顯示了7個不同初始含水量之回脹壓力分析結果，圖中可以看出廢棄物罐底部之緩衝材料區域將產生最大之回脹壓力，而根據初始含水量提高，最後，計算出的回脹壓力也些微提高。

本分析案例假設緩衝材料達到完全飽和時，將產生最大量之回脹壓力，因此，當緩衝材料達到完全飽和時，FLAC3D則停止運算，但在此時緩衝材料與回填材料均未達到平衡狀態，若計算持續進行，上方回填材料之飽和度也會隨時間而趨近飽和。緩衝材料之回脹壓力計算結果，如圖 4-47至圖 4-50所示，其中顯示了7個不同初始含水量之回脹壓力分析結果；圖中可以看出廢棄物罐底部之緩衝材料區域，將產生最大之回脹壓力，而根據初始含水量提高，最後計算出的回脹壓力也些微提高。

表 4-42：膨潤土參數及初始條件表

	回填材料	緩衝材料	母岩
流體模型	等向性流體模型(Isotropic fluid model)		
滲透係數	2×10^{-21} m^2	5.2×10^{-21} m^2	1×10^{-19} m^2
乾密度	1,600 kg/m^3	1,700 kg/m^3	2,710 kg/m^3

表 4-43：未飽和膨潤土之案例編號說明

案例編號	案例說明		
	含水量(%)	飽和度(-)	吸水力(MPa)
Case 1	8.2	0.30	124.1
Case 2	11.0	0.41	71.2
Case 3	16.5	0.61	33.0
Case 4	19.3	0.71	19.9
Case 5	21.6	0.8	10.9
Case 6	24.6	0.91	4.3
Case 7	26.6	0.98	1.3

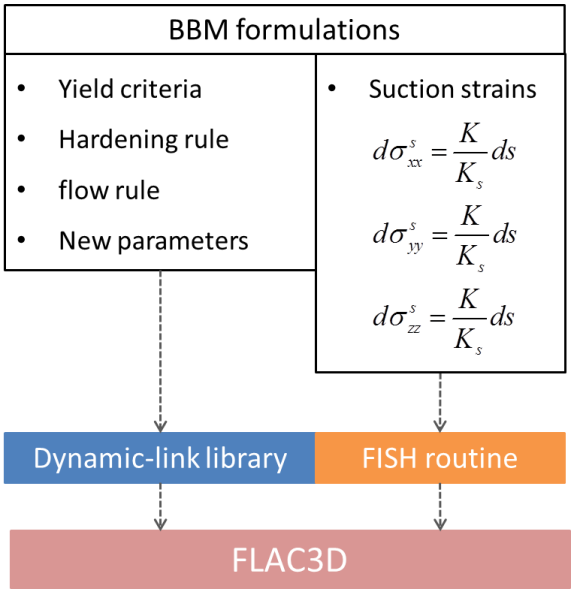


圖 4-37：匯入BBM組成模型之方式

中英文對照：BBM formulations(BBM 公式)、Yield criteria(破壞準則) 、Hardening rule(硬化法則)、Flow rule(流動法則)、New parameters(新參數)、Suction strains(吸水應變) 、Dynamic-link library(動態連接資料庫) 、FISH routine(FISH副程式)。

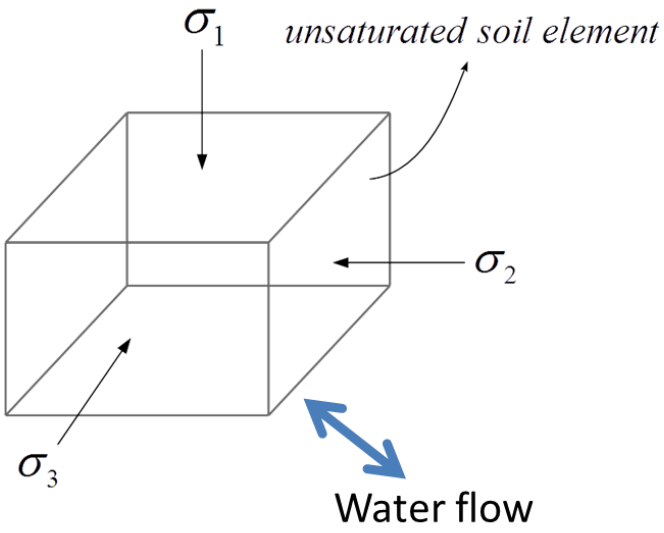


圖 4-38：文獻案例-單一未飽和土壤元素

中英文對照： unsaturated soil element(未飽和土壤元素)、Water flow(水流)。

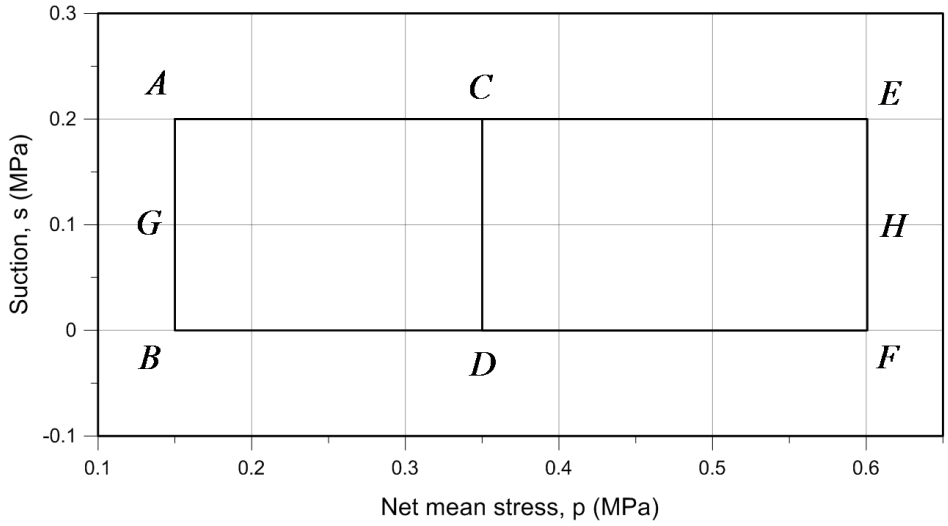


圖 4-39：文獻案例-加載路徑

中英文對照： Suction(吸水力)、Net mean stress(平均應力)。

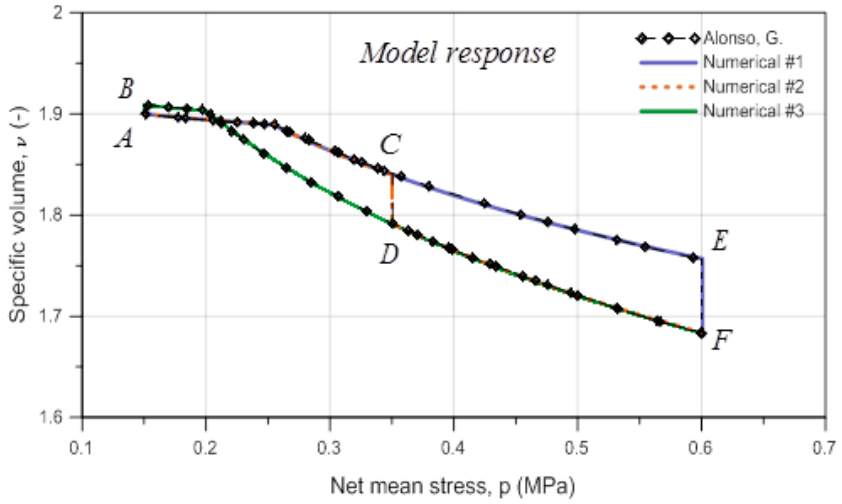


圖 4-40：FLAC3D運跑結果與文獻比對-1

中英文對照： Specific volume(比容)、Net mean stress(平均應力)。

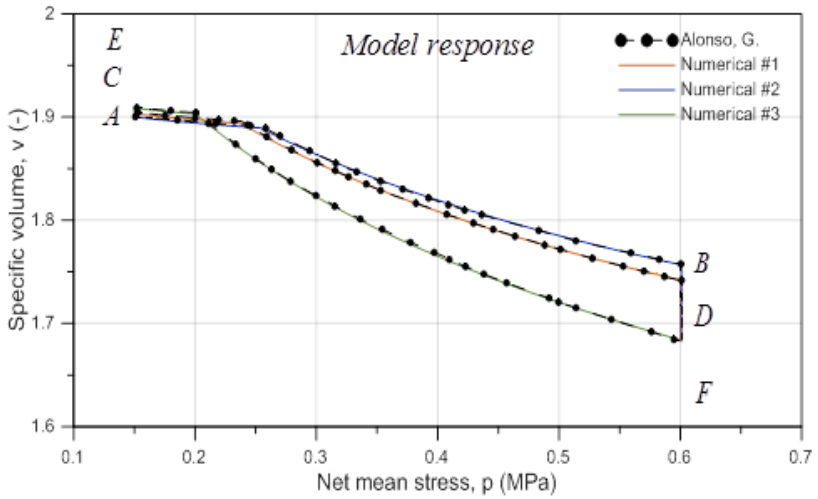


圖 4-41：FLAC3D運跑結果與文獻比對-2

中英文對照： Specific volume(比容)、Net mean stress(平均應力)。

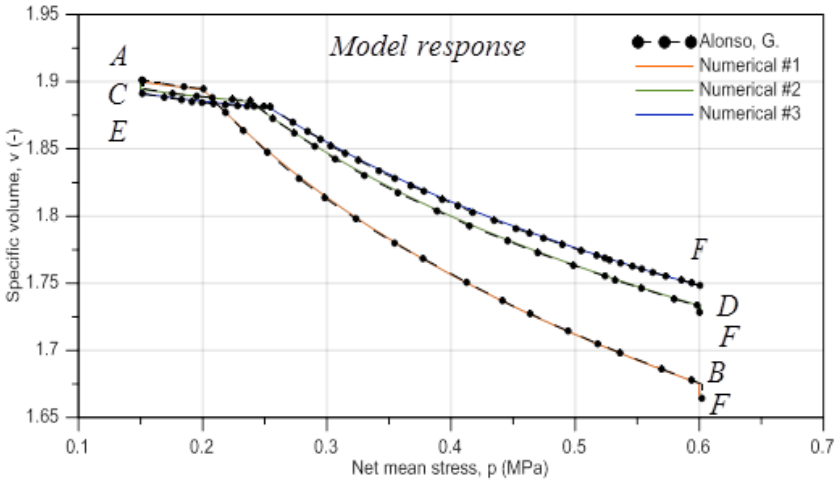


圖 4-42：FLAC3D運跑結果與文獻比對-3

中英文對照： Specific volume(比容)、Net mean stress(平均應力)。

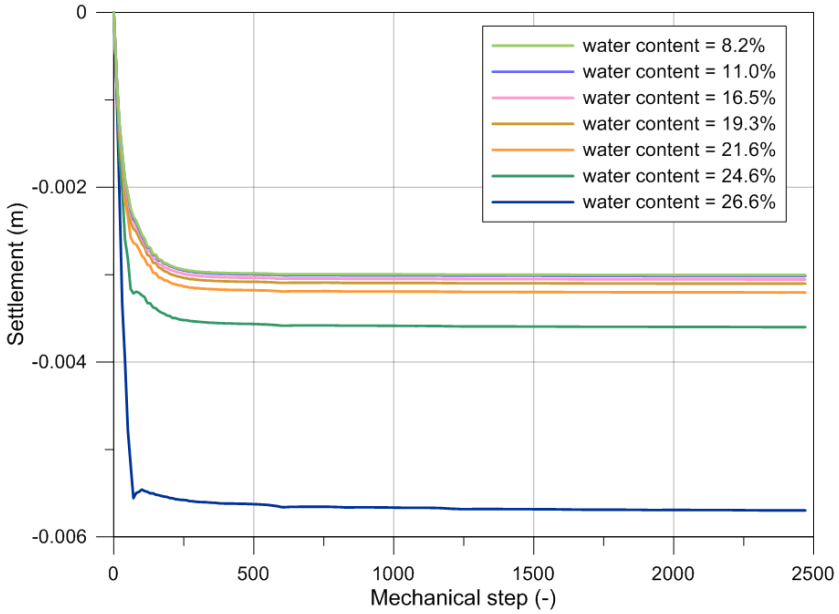


圖 4-43：未飽和沉陷量分析結果

中英文對照： Settlement(沉陷量)、Mechanical step(計算步)。

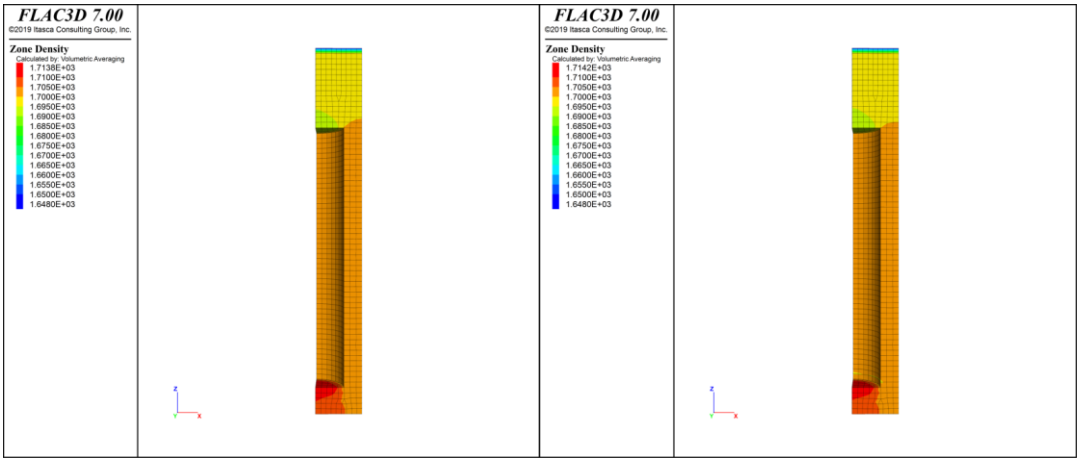


圖 4-44：密度分布(case#3：左；case#4：右)

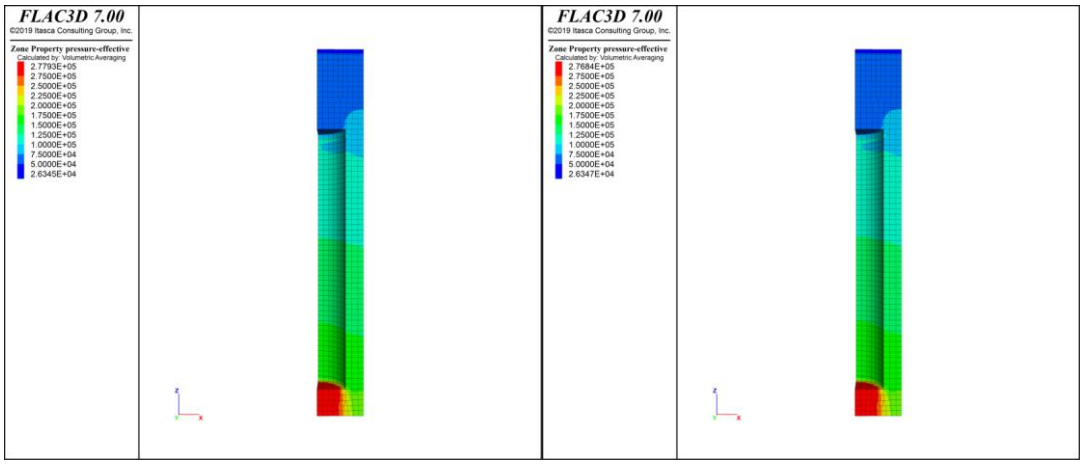


圖 4-45：平均應力分布(case#3：左；case#4：右)

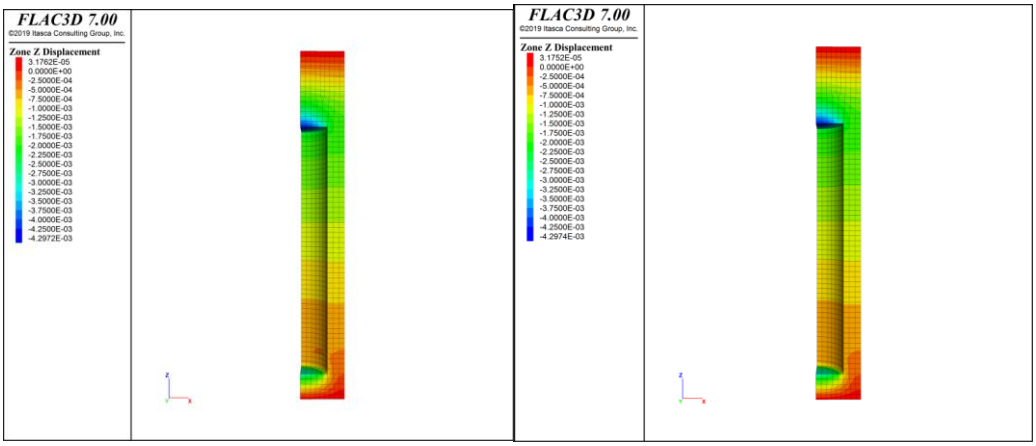


圖 4-46：垂直沉陷量分布(case#3：左；case#4：右)

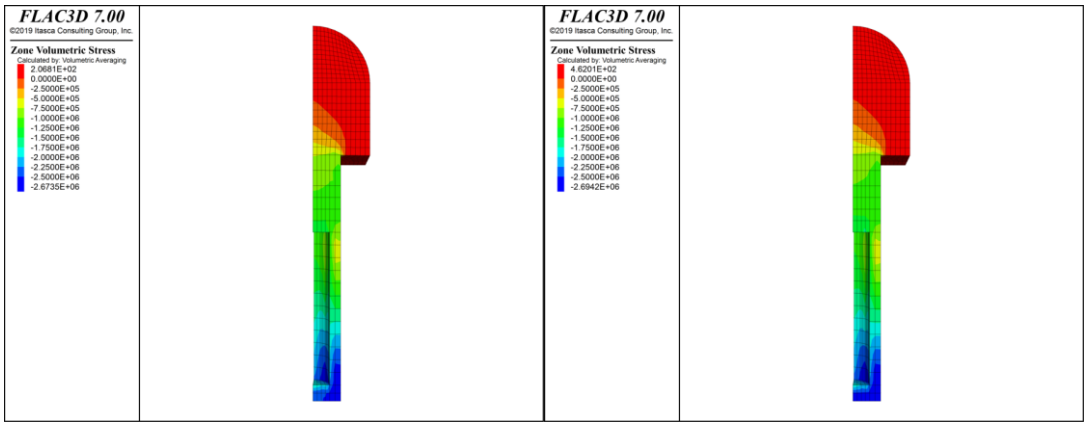


圖 4-47：回脹壓力分布(case#1-w8.2%：左；case#2-w11%：右)

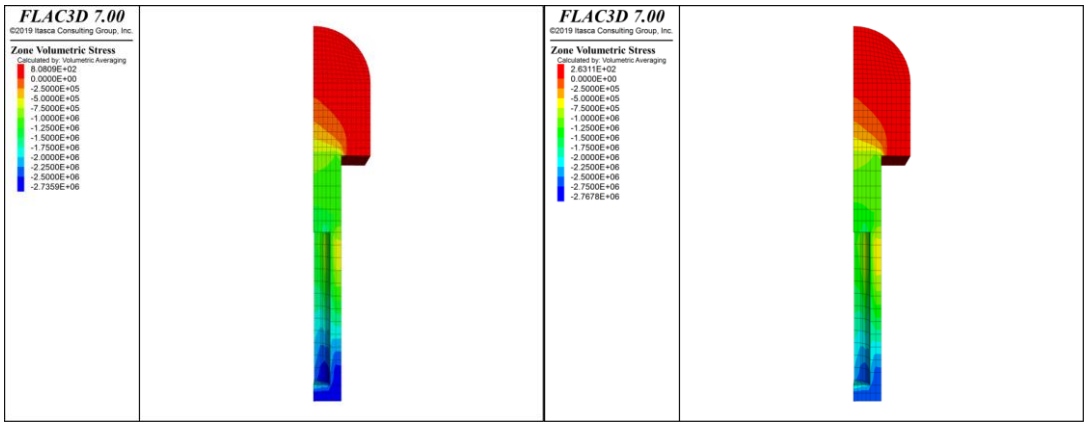


圖 4-48：回脹壓力分布(case#3-w16.5%：左；case#4-w19.3%：右)

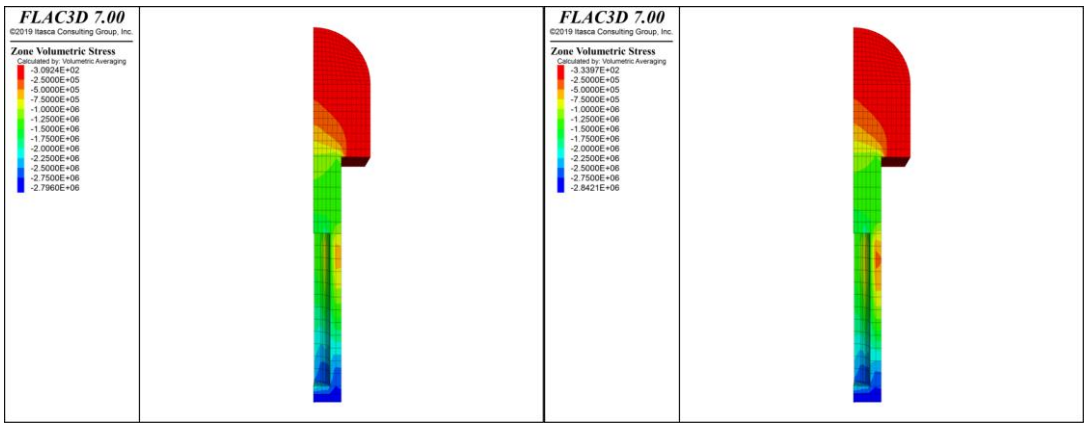


圖 4-49：回脹壓力分布(case#5-w21.6%：左；case#6-w24.6%：右)

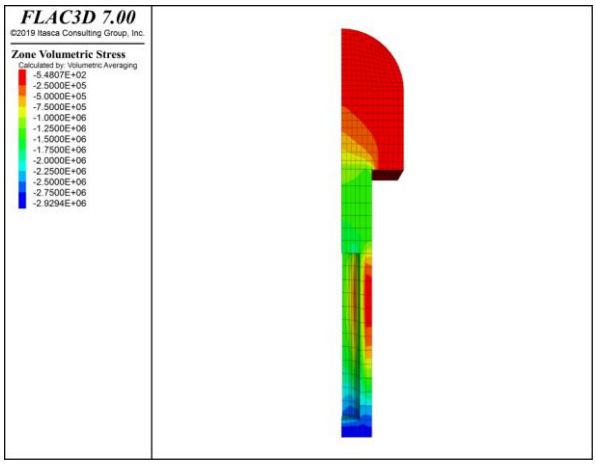


圖 4-50：回脹壓力分布(case#7-w26.6%)

4.2.6. 緩衝材料與回填材料性質特性分析

回填材料必須有足夠對應的回脹壓力以抵抗緩衝材料回脹/擴張的作用，因此，確保回填材料之設計，可有效使緩衝材料飽和密度維持在特定條件，以滿足其原本的性能設計需求。為分析回填材料之設計，是否可抵抗緩衝材料因地下水入滲時之回脹上舉；可基於緩衝材料的回脹特性與回填材料的可壓縮性，來評估回填材料與緩衝材料界面間因回脹/擴張而產生的上舉作用，進而評估緩衝材料飽和後之回脹力分布，以及回填材料抵抗緩衝材料回脹上舉之能力。

本項之工作為探討緩衝材料與回填材料介面間飽和後膨脹之力學行為，對比於SNFD2017報告研究內容為新的技術發展。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本研究以FLAC3D作為主要之模擬軟體，FLAC3D為三維有限體積法(finite-volume method)數值軟體，主要用來求解工程力學之問題，並廣泛運用在大地工程(geomechanics)之中，其特點之一為內建程式碼FISH，能夠來用來控制數值求解步驟及撰寫副程式新增耦合關係。

(2) 參數需求說明：

廢棄物罐規格：依據第4.2.1節BWR形式廢棄物罐規格及廢棄物罐重量，包含罐體自重外，將參考SKB TR-10-11報告沉陷量分析章節，使用200 kN裝填之燃料束重量進行計算。

緩衝材料及回填材料規格：依據第4.2.2節緩衝材料及回填材料規格設計，緩衝材料乾密度根據不同案例設定為：1,700 kg/m^3、1,650 kg/m^{3}及1,600 kg/m^3；回填材料之乾密度，則維持在1,600 kg/m^3。

(3) 計算案例與結果說明：

本研究主要探討緩衝材料與回填材料介面間飽和後膨脹之力學行為，總共進行3種不同初始乾密度之案例，如表 4-44所示。本研究以Barcelona Basic Model(BBM)作為緩衝材料與回填材料之

組成模型，並模擬未飽和至飽和過程中緩衝材料與回填材料之力學行為；BBM組成模型由Alonso於1990年提出(Alonso et al., 1990, p405-430)，其能模擬部份未飽和土壤之特性並與實驗結果有良好擬合程度，因此，廣泛使用在未飽和土壤分析中。

(a) 回脹壓力試驗模擬與比對：

為了增加回脹壓力計算結果之正確性，本研究首先以回脹壓力實驗做為比對對象(蕭宇翔、張清土，2019，p4-25)，以確保數值模型之合理性。實驗以MX-80型膨潤土作為試驗材料，膨潤土試體為圓餅狀並放置於實驗容器之中，試體周圍為固定邊界，因此，試體吸水後只能夠向上回脹；試體於底部均勻進水，而水壓維持在1 MPa，試體上方加裝一個壓力感測器，來偵測膨潤土完全飽和後所產生的回脹壓力值，配置如圖 4-51。本實驗總共進行了8種不同初始乾密度膨潤土之回脹壓力測試，回脹壓力實驗結果如圖 4-52所示，詳細數值彙整於表 4-45中。由實驗結果中可以看出，當膨潤土初始乾密度越高，完全飽和時所產生之回脹壓力也越大。

數值模擬部分則根據實驗之配置，於FLAC3D中建立數值模型，數值模型之幾何與網格劃分如圖 4-53所示。依據實驗設定之邊界條件，FLAC3D數值模型底部維持水壓為1 MPa，而隨時間推移試體將從底部開始向上飽和，如圖 4-54所示。FLAC3D數值模型將持續計算直到試體完全飽和後，觀測其產生之回脹壓力，並與實驗數值進行比對。

(b) 緩衝材料與回填材料界面分析：

經由與實驗比對後，本研究後續建立了處置孔模型，針對緩衝材料初始乾密度進行3種不同之案例，如表 4-44所示。進行緩衝材料回脹壓力與回脹量之評估，並觀測緩衝材料與回填材料介面間之位移大小，以確保回填材料具備抵抗緩衝材料上舉之能力。

FLAC3D單一處置孔模型如圖 4-55所示。假設緩衝材料完全飽和時產生最大回脹壓力與回脹量，本研究設定緩衝材料由

底部均勻進水，FLAC3D數值模型計算至緩衝材料達到完全飽和為止。

常見之緩衝材料設計密度約落在1,700 kg/m^{3}左右，本研究設定3個不同初始密度之案例，針對緩衝材料初始乾密度為1,700 kg/m^3、1,650 kg/m^{3}及1,600 kg/m^{3}進行回脹壓力分布計算，而上方回填材料則維持在乾密度為1,600 kg/m^3。

(4) 結果與討論：

(a) 回脹壓力試驗模擬與比對：

FLAC3D數值模型再經由特定修正後，同樣進行了8個案例之分析，數值分析與實驗數據比對之結果如圖 4-56所示。

由圖 4-56可看出經過模型修正後，FLAC3D所計算出之回脹壓力與實驗趨勢大致相同，且有良好的擬合結果。

(b) 緩衝材料與回填材料界面分析：

為了確認回填材料抵抗緩衝材料上舉之能力，緩衝材料與回填材料之界面分析結果彙整於表 4-44之中。從表 4-44中可看出在初始狀態下，緩衝材料與回填材料界面因受到回填材料自重之影響而產生向下沉陷量，因3種案例之初始含水量相同，表示緩衝材料強度相同，所以3種案例之初始變形量皆為一致；當水流進入緩衝材料後，緩衝材料吸水而向上膨脹，緩衝材料完全飽和時為最大回脹量。

表 4-44中，當初始乾密度越大時，緩衝材料與回填材料界面之回脹壓力及回脹量也越大，而此分析結果與先前實驗發現之現象相同。

回脹壓力與回脹量之分布如圖 4-57至圖 4-59所示。本研究針對3種不同初始乾密度之緩衝材料進行分析，水流由底部均勻進入處置孔內，並維持水壓在1 MPa之下。假設緩衝材料達到完全飽和後，將在緩衝材料與回填材料界面上產生最大回脹壓力與回脹量，因此，當緩衝材料完全飽和後FLAC3D數值模型則停止計算，並記錄當下之分析結果。

其中可看出在最大回脹壓力(緩衝材料乾密度＝1,700 kg/m^3)時，緩衝材料與回填材料界面之變形量為4.8 mm，說明回填材料具備充足的能力，來抵抗緩衝材料回脹上舉。

(c) 不同水質回脹壓力及水力傳導係數試驗：

為探討緩衝材料滿足避免平流傳輸之安全功能要求之低限值所對應之密度範圍，設定試驗最低密度1,000 kg/m^3，以及膨潤土本身之最大夯實密度條件，為約1,700 kg/m^3之MX-80型膨潤土；並考量不同水質對回脹及水力傳導性質之影響，分別以水質條件為純水、人工調配之模擬場址地下水，以及不同濃度比例之海水條件下，進行回脹壓力及水力傳導係數試驗。由於膨潤土之層狀矽酸鹽黏土特性，其層隙間存在之一價及二價之可交換性陽離子會影響其膨脹能力，且地下水中一價及二價陽離子濃度過高則會因滲透平衡而限制其膨脹程度，故對於緩衝材料而言，地下水中之一價及二價陽離子是主要探討標的。地下水成分之pe及部分物種會受到環境影響，現地厭氧環境與地面上好氧環境所存在之物種種類及狀態會有所不同，若要完全重現現地調查之地下水水質，需要極度嚴格之厭氧高壓試驗環境，本次研究僅就實驗探討目的及執行可行性，以一般實驗室環境進行，並探討主要影響膨潤土回脹行為之一價及二價陽離子為主。實驗用之模擬場址地下水成分如表 4-46，地下水成分為現地調查實測數據而得，為利於試驗進行，選取主要影響膨潤土行為之陽離子，並配合主要陰陽離子進行人為調配，做為模擬地下水，模擬場址地下水的陽離子濃度為2.54 mM，包含Na^+、K^+、Ca^{2+}、Na^{2+}等4種陽離子，並以此成分為基礎，將其濃縮成10%海水、50%海水和100%海水，其分別對應陽離子濃度78.4 mM、392 mM和784 mM。圖 4-60為模擬場址地下水濃度對MX-80膨潤土試體回脹壓力之影響，整體來說，隨著模擬場址地下水濃度的提升，回脹壓力也隨之下降。在高乾密度1,600 kg/m^3，地下水濃度為2.54 mM之回脹壓力與去離子水之回脹壓力差

異不大；地下水濃度為10%海水(78.4 mM)和地下水濃度為50%海水(392 mM)之回脹壓力還有超過6 MPa，但濃度到達100%海水(784 mM)，回脹壓力有急遽下降的現象，此時回脹壓力為3 MPa。圖 4-61為模擬場址地下水濃度對MX-80膨潤土試體水力傳導係數之影響，實驗以不同乾密度試體經不同濃度之地下水，量測出流量計算水力傳導係數。實驗結果顯示，整體來說，水力傳導係數隨著乾密度增加而降低，乾密度超過1,400 kg/m^3，水力傳導係數都低於10^{-12} m/s，但隨著地下水濃度的提升，以乾密度1,400 kg/m^3為分界，在較高乾密度之試體，水力傳導係數在本實驗無明顯趨勢變化；而在低乾密度之試體，水力傳導係數受到濃度變化影響現象較顯著。

以緩衝材料尺寸與密度設計規格及性能分析結果，對應回脹壓力試驗結果，確認緩衝材料規格符合可滿足安全功能回脹壓力要求，即限制回脹壓力避免造成廢棄物罐及周圍處置母岩額外壓力、抑制微生物活性、膠體過濾等功能；以緩衝材料尺寸與密度設計規格及性能分析結果，對應水力傳導係數試驗結果，確認緩衝材料規格符合避免平流傳輸之安全功能要求。

表 4-44：回脹壓力分析-緩衝材料與回填材料界面之分析結果

案例編號	-	案例說明		
	乾密度 (kg/m^3)	初始界面變形量* (mm)	界面回脹壓力 (MPa)	最大界面回脹量* (mm)
Case1	1,700	-2.5	1.5	45
Case 2	1,650	-2.5	1.0	25
Case 3	1,600	-2.5	0.5	10

註：*正值表示向上回脹，負值表示向下沉陷。

表 4-45：回脹壓力實驗-實驗結果

No.	乾密度 (kg/m^3)	回脹壓力 (MPa)	水力傳導係數 (m/s)
1	1,705	17.7	5.90×10^{-17}
2	1,673	10.2	1.16×10^{-15}
3	1,580	4.8	5.23×10^{-14}
4	1,507	3.3	7.99×10^{-14}
5	1,445	1.6	2.07×10^{-13}
6	1,354	1.3	2.74×10^{-13}
7	1,221	0.7	5.47×10^{-13}
8	1,137	0.5	7.79×10^{-13}

表 4-46：模擬場址地下水成分

成分	分子量
NaCl	58.44
$NaNO_3$	84.99
K_2SO_4	174.27
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	246.48
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	256.41
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	236.15

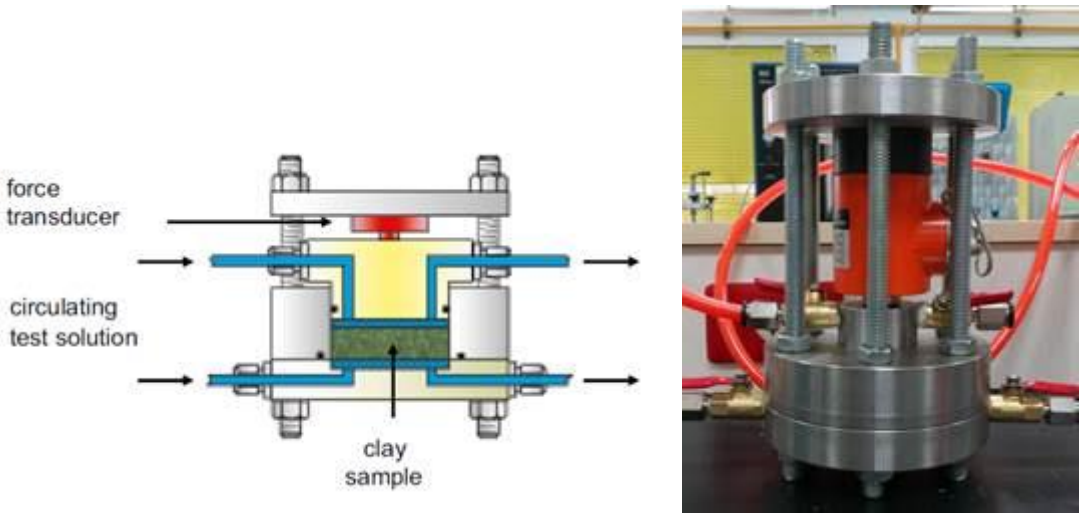


圖 4-51：回脹壓力實驗-實驗配置圖

資料來源：左圖為Karnland et al.(2006, p35)；右圖為蕭宇翔、張清土(2019，p4-25)

中英文對照：force transducer(力感測器)；circulating test solution(循環試驗水樣)；clay sample(膨潤土試體)。

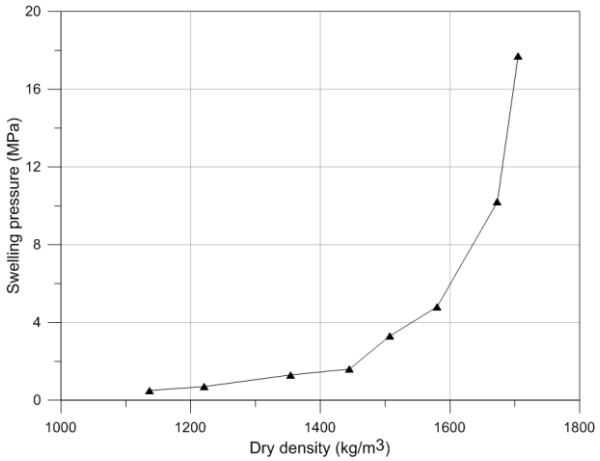


圖 4-52：回脹壓力實驗-回脹壓力vs.初始乾密度

資料來源：蕭宇翔、張清土(2019，p4-25)

中英文對照：Swelling pressure(回脹壓力)、Dry density(乾密度)。

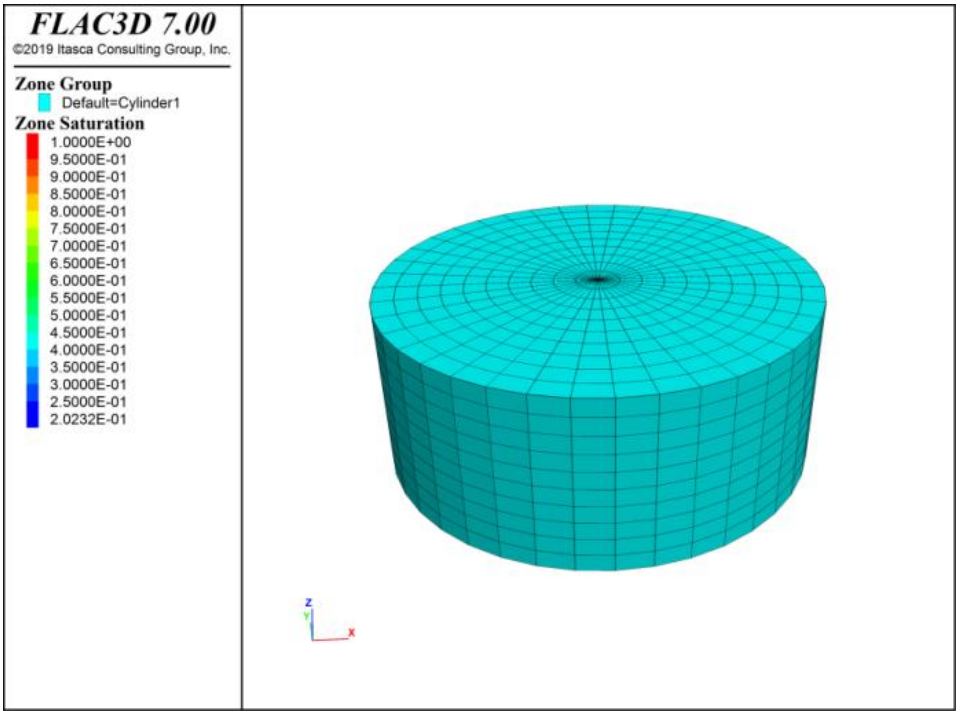


圖 4-53：FLAC3D數值模型幾何與網格劃分

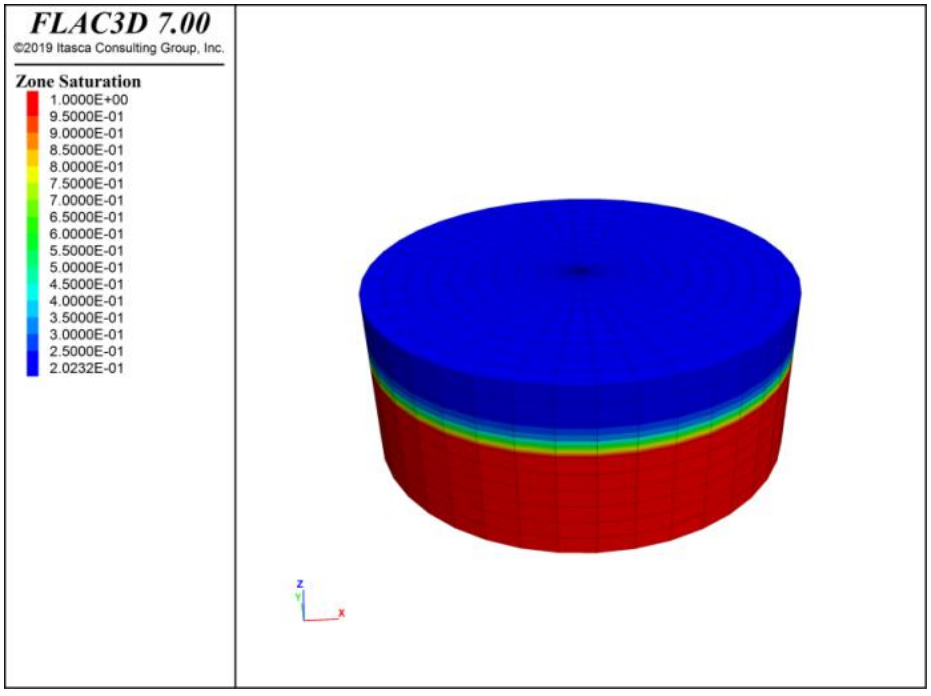


圖 4-54：FLAC3D數值模型由底部開始向上飽和示意圖

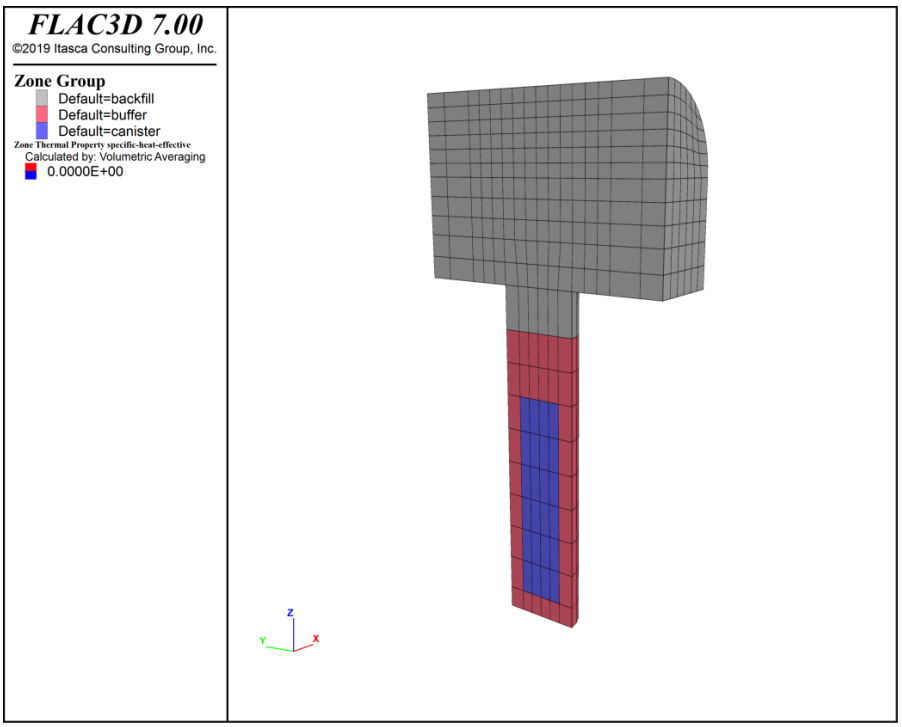


圖 4-55：處置孔模型幾何與網格劃分

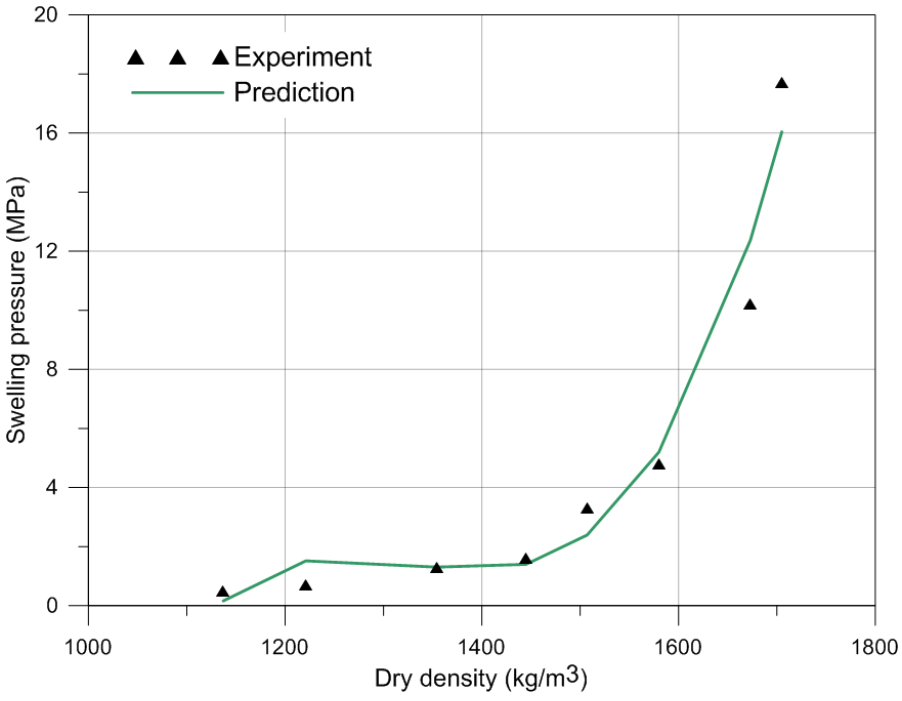


圖 4-56：FLAC3D數值模型分析結果與實驗比對

中英文對照：Swelling pressure(回脹壓力)、Dry density(乾密度)。

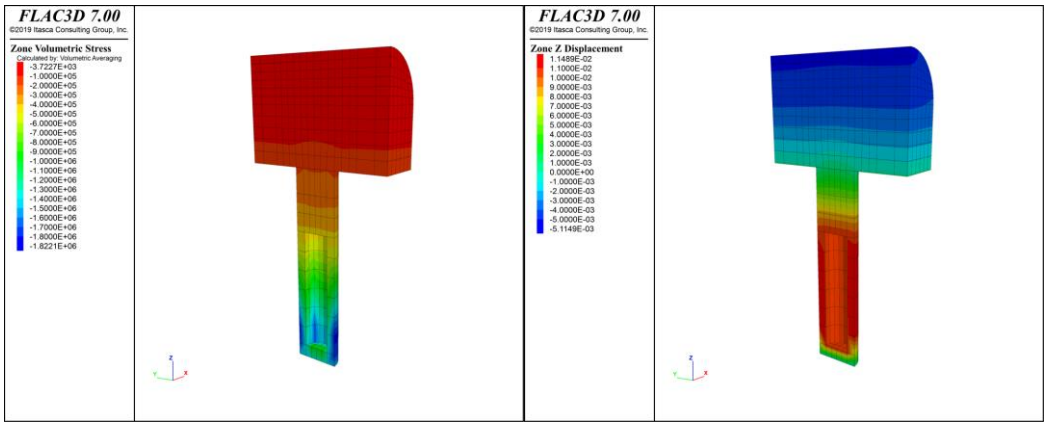


圖 4-57：回脹壓力分布：左；回脹量分布：右 (密度=1,700 kg/m^3)

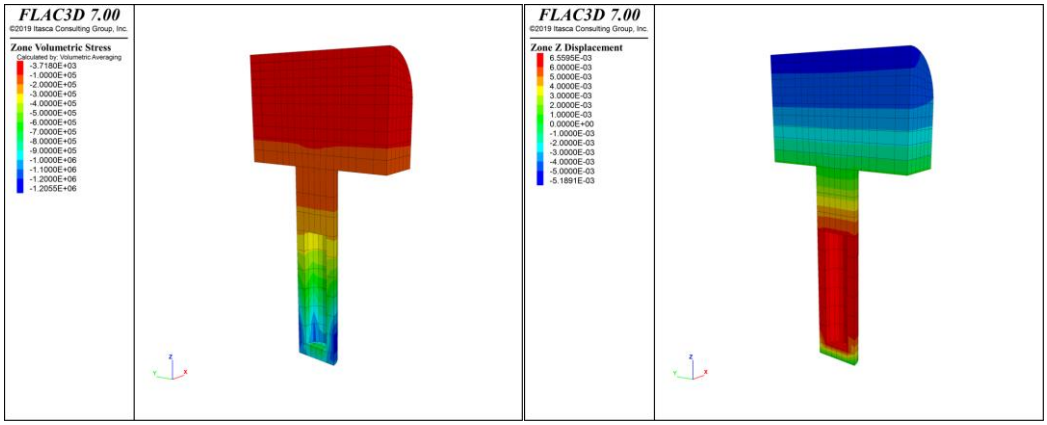


圖 4-58：回脹壓力分布：左；回脹量分布：右 (密度=1,650 kg/m^3)

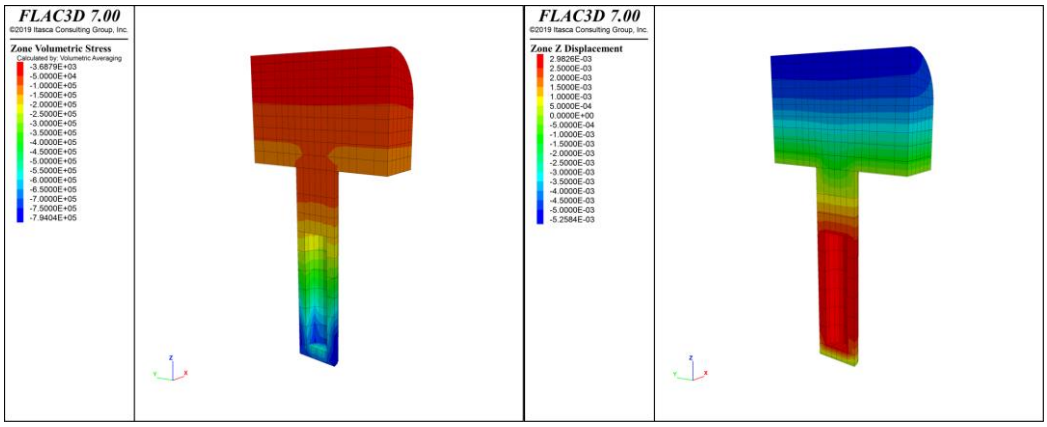


圖 4-59：回脹壓力分布：左；回脹量分布：右 (密度=1,600 kg/m^3)

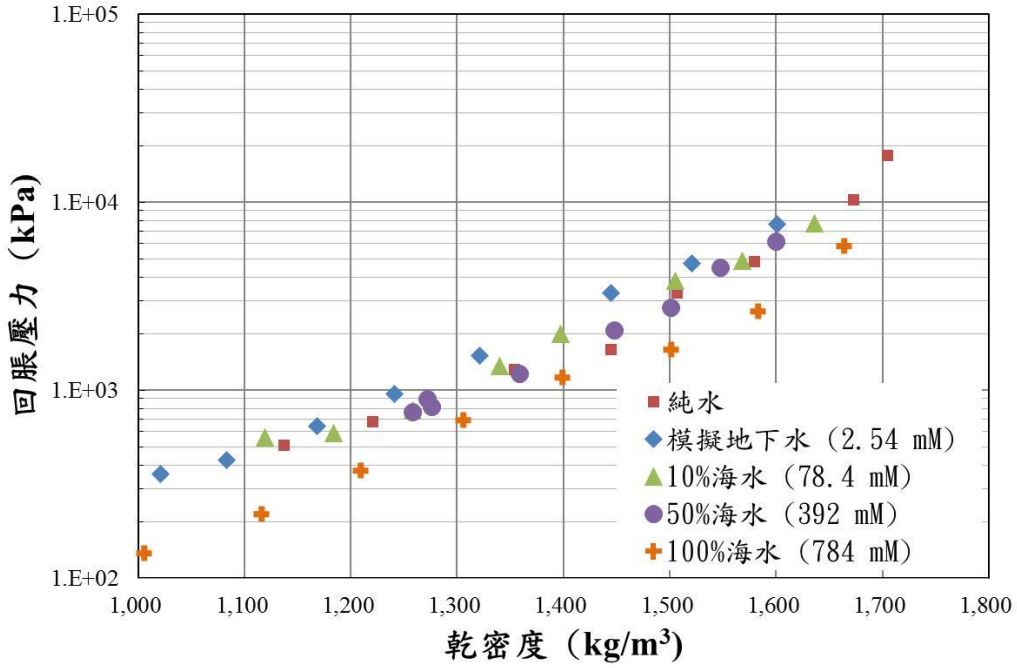


圖 4-60：不同密度及水質之回脹壓力

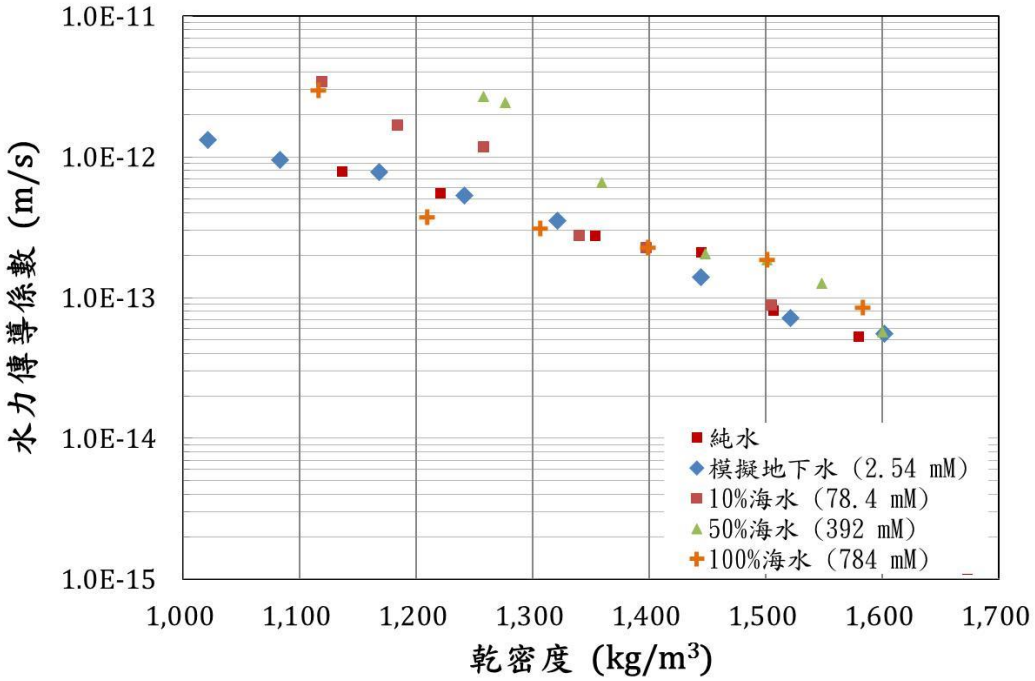


圖 4-61：不同密度及水質之水力傳導係數

4.3. 地下設施設計

4.3.1. 處置設施熱間距設計

因用過核燃料仍會持續遞減地釋放出衰變熱，當其放置在廢棄物罐內時仍會透過熱傳導將熱量往外傳遞。為防止包圍在廢棄物罐周圍的膨潤土因吸收來自本身廢棄物罐及其他廢棄物罐的熱量，而造成溫度過高(超過100 ℃)喪失功能，埋置於處置設施內之廢棄物罐彼此間的距離(熱間距)，必須有適當地設計。

影響熱間距之參數包含廢棄物罐之初始熱負載、岩層熱傳導係數、地表溫度、地溫梯度、衰變熱衰變曲線、處置設施配置等，其中岩層熱傳導係數影響尤為重要。相較於SNFD2017報告使用之參數，本報告使用國內最新參數，以進行最新且符合國內情況之熱間距計算。

108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本項工作係使用美國The MathWorks公司出品的商業數學軟體MATLAB R2018a進行分析計算。將計算結果使用微軟公司(Microsoft Inc.)的Excel 2010軟體進行圖形繪製，進行解析解熱間距評估。另使用ANSYS公司出品的計算流體力學軟體Fluent，進行數值解計算。

(2) 參數需求說明：

(a) 廢棄物罐之初始熱負載為1,200 W，與過去1,315 W評估方法之差異說明如下：

過去國內對於廢棄物罐之初始熱負載經評估為1315W，其評估方法係以所有用過核子燃料平均燃耗約為37 GWd/MtU，與平均保守冷卻50年進行衰變熱概估計算，取得12束沸水式反應器類型燃料組件衰變熱約為1,311W，而4束壓水式反應器類型燃料組件衰變熱約為1,049 W，故保守假設廢棄物罐初始熱負載為1,315 W。

在本報告中，廢棄物罐初始熱負載的評估是依據先處置核一廠用過燃料再處置核二廠用過燃料的裝載期程規劃，在封裝場每年可以處置50罐廢棄物罐的前提下，得到如第4.1.1節表4-2所示之各核電廠用過核子燃料第一年裝載時廢棄物罐熱負載的平均值，由該表可知，核一廠與核二廠裝載第一年時廢棄物罐熱負載平均值的最大值為1,148 W，加計50 W的保守度後得到1,198 W，取整數1,200 W，做為現階段廢棄物罐熱負載的設計值。

簡而言之，過去是把所有燃料的燃耗資料與冷卻時間資料先各自平均之後，得到一束具代表性的燃料，再以此具代表性的燃料來估計廢棄物罐的初始熱量。現在是用每束燃料自己的燃耗與冷卻時間先計算出自己的衰變熱後，再配合裝載期程和封裝速率的假設，以各廠所有燃料衰變熱的平均值來估計各廠自己廢棄物罐的初始熱量。

(b) 岩層熱傳導係數(thermal conductivity)：2.3 W/(m·K)。

(c) 岩層熱容(thermal capacity)於配置為$2.152 \times 10^6\ J/(m^3\ K)$。

(d) 地表溫度為23.8 ℃。

(e) 溫度餘裕(margin)假設為8 ℃。

如4.1.1節所述，參考核一廠用過燃料資料及使用RG 3.54修訂1版計算用過核子燃料的衰變熱後，單一廢棄物罐內之用過核子燃料初始功率為1,200 W，以3項自然指數擬合之方程式如(4-4)所示，其中t表示時間(年)，y表示衰變比率。

$$y = 0.345 \times \mathrm{e}^{-0.022 \times t} + 0.3131 \times e^{-0.022 \times t} + 0.3423 \times e^{-0.00000000000035713 \times t} \qquad (4\text{-}4)$$

參考圖 4-62，廢棄物罐高度2Hc為4.905 m；廢棄物罐半徑R_0為0.525 m；R_1為廢棄物罐半徑加上10 mm厚之空氣間隙，其值為0.535 m；R_{bp}為廢棄物罐中心至膨潤土外圍之半徑，其值為0.825 m；R_2為R_{bp}再加上50 mm間隙填充之膨潤土顆粒，其值為0.875 m。

(3) 計算案例與結果說明：

圖 4-63顯示在不同初始功率和不同地溫梯度下，廢棄物罐頂部膨潤土最高溫與熱間距之關係圖。

明顯地，在相同地溫梯度和熱間距下，當初始功率愈大，膨潤土之最高溫也愈高。例如在地溫梯度為1.9 ºC/100 m和9 m熱間距條件下，初始功率為1,000 W, 1,100 W和1,200W時，其膨潤土最高溫分別為90.05 ºC, 94.93 ºC, 99.80 ºC (參考三條綠色曲線)。

在相同的初始功率和熱間距下，地溫梯度愈大，膨潤土之最高溫愈高；例如在初始功率為1,200 W和9 m熱間距下，地溫梯度為1.5 ºC/100 m, 1.7 ºC/100 m和1.9 ºC/100 m時，其膨潤土最高溫分別為97.80 ºC, 98.80 ºC, 99.80 ºC (參考三條粗虛線)，均低於100 ºC。地溫梯度每增加0.1 ºC/100 m時，膨潤土最高溫上升0.1 ºC。

在相同的初始功率和地溫梯度下，熱間距愈大，膨潤土之最高溫愈低；例如在地溫梯度為1.9 ºC/100 m和1,200W之初始功率下，當熱間距為9 m, 10 m, 11 m時，其膨潤土最高溫分別為99.80 ºC, 98.36 ºC, 97.28 ºC，考慮1,200 W初始功率、2.3 W/(m·K)之岩層熱傳導率、23.8 ℃之地表溫度，以及1.9 ℃ /100m之地溫梯度及9 m熱間距等條件，本區廢棄物罐頂部之膨潤土最高溫度為99.80 ℃ ，符合膨潤土設計準則。圖 4-64顯示在不同地溫梯度下(1.5 ℃/100 m至2.0 ℃/100 m)，不同熱間距與膨潤土最高溫之關係。在考量膨潤土最高溫不超過100 ℃的情形下，當地溫梯度愈大時，所需的熱間距愈大。地溫梯度在1.5 ℃/100 m至2.0 ℃/100 m之範圍內，地溫梯度每增加0.1 ℃/100 m時，熱間距必須增加約0.3 m，方符合膨潤土設計準則。

表 4-47係使用單罐對稱無限邊界配置模式，在熱間距為6 m, 7 m, 8 m和9 m的情形下，利用解析解和數值解計算膨潤土最高溫之比較結果(尚未加入不準度)。在上述熱間距範圍內，解析解與數值解之結果相近，說明其解析解方法具有可信度。

(4) 結果與討論：

本報告之熱間距設計係使用國內核一廠用過燃料衰變熱資料，配合最新更新之廢棄物罐高度及處置孔尺寸，推算出之地表溫度和地溫梯度等條件，利用MATLAB程式進行熱間距之解析解計算。為符合設計準則中之膨潤土最高溫度低於100 ℃，可以在固定初始功率之下，增加熱間距以降低溫升。或者，可在固定熱間距之下，採用較低的初始功率，然而，初始功率與用過燃料特性(例如：燃耗、冷卻時間)和廢棄物罐內之用過燃料配置有關，無法任意地降低初始功率。根據核一廠用過燃料資料及適當配置，可獲得1,200 W之初始功率。利用此初始功率，計算出在2.3 W/(m·K)的岩層熱傳導率之條件下，熱間距必需大於9 m，方可符合設計準則。

於1,200 W初始功率、2.3 W/((m·K))之岩層熱傳導率、23.8 ℃之地表溫度及1.9 ℃/100 m 之地溫梯度及9 m熱間距等條件下，計算所得之本區廢棄物罐頂部膨潤土最高溫度為91.80 ℃，低於100 ℃，尚有溫度餘裕8.2 ℃，符合設計準則。

在熱間距6 m, 7 m, 8 m和9 m範圍內，利用解析解和數值解計算膨潤土最高溫之比較結果顯示解析解與數值解之結果相近，說明解析解方法具有可信度。

表 4-47：膨潤土最高溫比較

熱間距(m)	6	7	8	9
解析解膨潤土最高溫(°C)	100.56	96.53	93.77	91.8
數值解膨潤土最高溫(°C)	102.8	98	94.8	92.7
最高溫差值(°C)	2.36	1.47	1.03	0.9

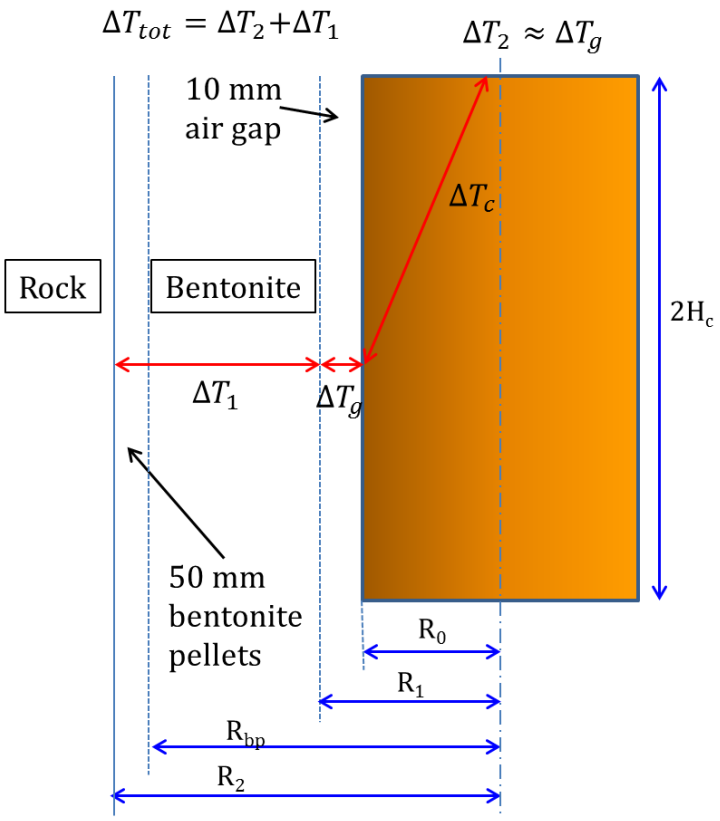


圖 4-62：廢棄物罐與處置孔之相對位置

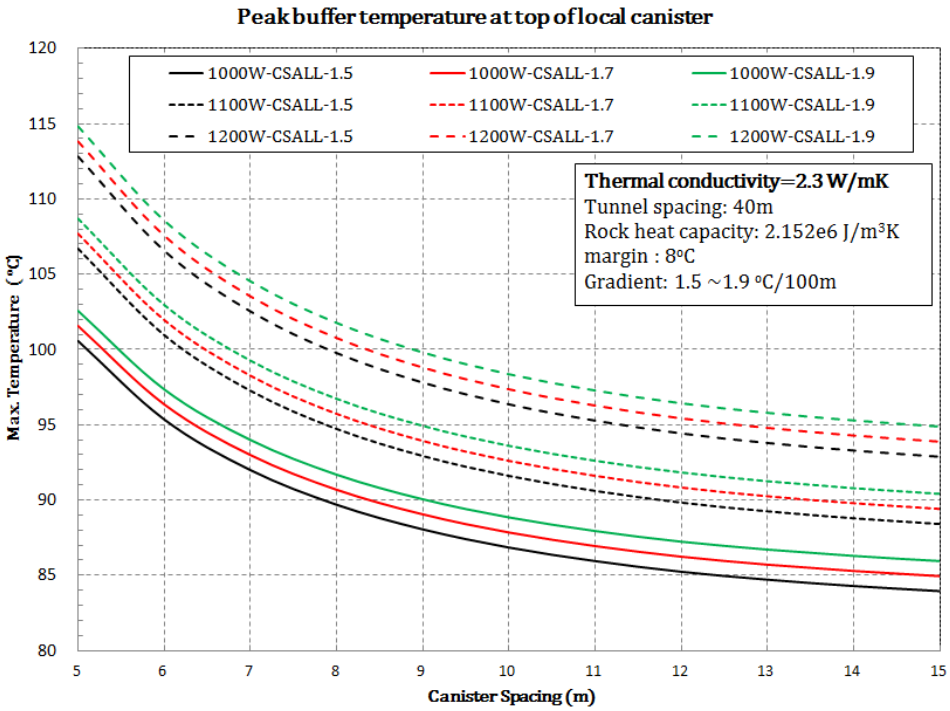


圖 4-63：膨潤土最高溫與熱間距之關係

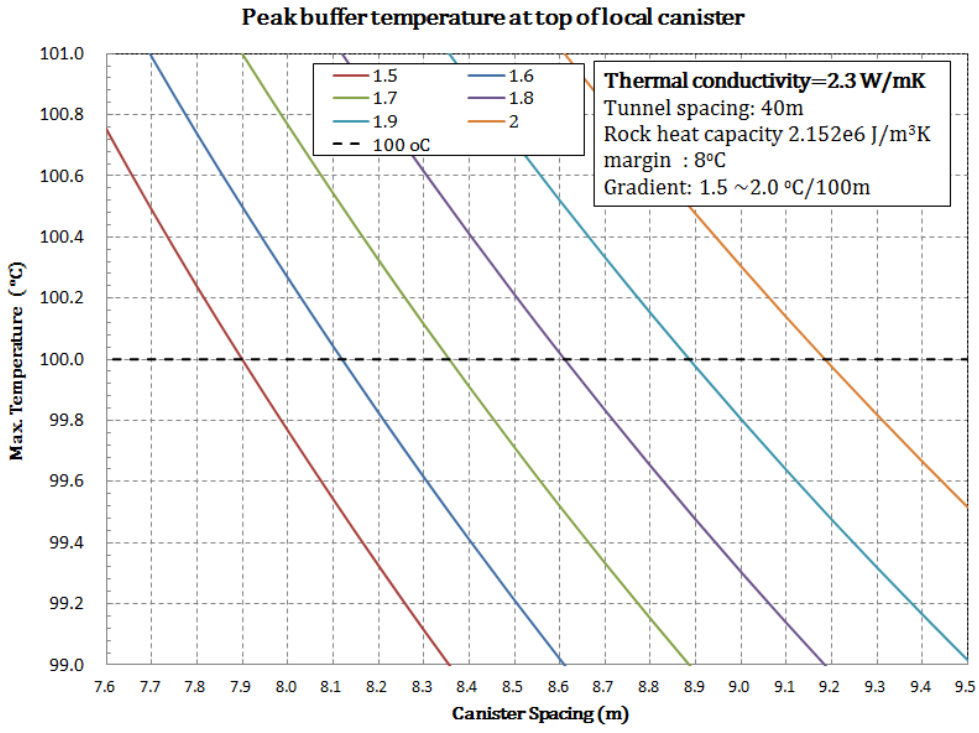


圖 4-64：不同地溫梯度下之熱間距與膨潤土最高溫之關係

4.3.2. 地下設施配置設計

地下設施的性能受到岩石應力、地質構造、裂隙剪力位移、地下水流等外在因素影響。本研究考量前述因子，進行處置隧道及處置孔配置，並探討外在因素對地下設施的影響。

本研究蒐集國內外相關研究文獻瞭解處置孔總數、所需母岩空間餘裕與處置設施合適範圍的評估方法論，以及探討所需考慮之裂隙截切廢孔準則(Extend Full Perimeter Criterion, EFPC)、地下水流動、岩石應力、地質構造等因素，對於地下設施配置的處置區塊位置、方位與數量之影響。彙整各種因素對地下設施長期安全性之影響，建立配置設計所需考量定性或定量的關鍵因子。另前期SNFD2017報告，已完成3DEC斷層地震動態模擬技術開發，亦針對地震引致裂隙位移進行初步分析。然而SNFD2017裂隙建置模式，僅以單一裂隙代表裂隙叢集，且並未考量處置區域地質構造的影響；因此，在108年度考量離散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)形式，依據模擬需求及電腦效能進行DFN簡化，進行3DEC地震引致裂隙位移動態模擬。此外，震源參數存在不確定性，亦蒐集震源資料，以震源邏輯樹的概念，給予不同的震源參數相對應之權重，並疊加各種震源所導致之裂隙位移量，視為裂隙總同震位移量；而邏輯樹中的滑移速率，則轉換為地震再現期。使用震源邏輯樹可將具有不確定性的問題，以一系列有條理的分支和節點表示可能情節。本研究之邏輯樹依據過去執行地震危害度分析所蒐集之資料及經驗，決定各分支之參數，並依參數分布狀況自行判斷權重。

100萬年間隨時間變化的裂隙同震位移量，將以3DEC模擬出單次地震引致裂隙剪力位移量，接著根據地震再現期計算邏輯樹中每一條分支的100萬年裂隙同震位移量，最後，將每條分支之結果乘以權重獲得最終成果。依據位態，離島結晶岩測試區的裂隙可區分成5個相異之叢集。因此，本項工作將分別針對5個裂隙叢集分析截切率之貢獻，探討裂隙位態於截切率分析影響。

SNFD2017與108年成果之差異，本年度工作之處置區塊的位置、處置隧道的數量、長度，處置孔的數量皆有所改變，並且進行該區域的入流量、陽離子強度分析；亦重新計算總廢孔率，以及各裂隙叢集造成之廢孔率。地震引致裂隙位移方面，採用較SNFD2017更為複雜之裂隙模型，並且新增震源邏輯樹之概念，計算單次地震及百萬年地震情況下之裂隙同震位移。108年度工作成果說明如下：

根據用過核子燃料數量與「第4.3.1節處置設施熱間距設計」成果，BWR(每罐裝12束)和PWR(每罐裝4束)所需廢棄物罐數，分別為1,491罐和1,080罐，合計2,571罐。所需處置孔總數至少為2,571孔。處置孔間距9 m，處置隧道間距40 m，每個處置孔所需面積為360 m^2。

綜合考量所需處置孔總數、「處置設施熱間距設計」提供之處置孔及處置隧道之熱間距、EFPC準則、岩石應力，並且考量「第4.4.1節地下水流場演化分析」提供之地下水區域流場初步成果，進行入流量分析；加上「第3.1.4節地質單元三維建模及展示技術」所提供之地質構造模型後，處置設施配置如圖 4-65。處置區塊位置遠離F1與F2斷層構造，距離約1.5 km以上，考量施工及通風需求，設計2個處置區塊，每個處置區塊有52條處置隧道，西(左)邊處置區塊處置隧道長度250 m(每個處置隧道可置放25個處置孔)，東(右)邊處置區塊處置隧道長度300 m(每個處置隧道可置放30個處置孔)，合計總處置孔數2,860個，符合處置設施範圍面積，處置孔餘裕約11%。

依據研究區域的現地應力，處置區塊的處置隧道方位需介於N46.4°W至N106.4°W之間，為了有效將處置區塊置放岩石領域內，考量地下設施配置盡量降低異質性與有效的緊密配置，以及單元D輝綠岩脈地質構造概念模型的方位與間距，處置區塊的處置隧道方位設計為N60°W。連通設施圓形豎井直徑設計為3.5 m，開挖穩定性分析採1/2對稱建置長14 m、寬7 m、高500 m模型，安全係數結果顯示最小的安全係數為2.3、並發生在最深層的開挖面上，由於豎井由地表延伸至深度500 m的處置設施處，現地應力隨深度遞增，故開挖後之應力分布變化最明顯。

(1) 地震引致裂隙位移分析：

模型設定方面，本工作依據震源邏輯樹(圖 4-66)建立2組模型(圖4-67)。模型1長度550 km、寬度500 km、深度60 km之模型，適用於震源邏輯樹中斷層長度450 km之案例。模型2長度191 km、寬度160 km、深度60 km，適用於震源邏輯樹中斷層長度71 km之案例。

為便於後續結果輸出，模型中濱海斷層的座標系設定，走向逆時針旋轉52度至正北向，斷層長度在邏輯樹分為450 km和71 km兩種案例。450 km斷層的孕震深度分別為10 km、15 km、20 km。斷層長度71 km之案例孕震深度則為25 km。

由於濱海斷層在模型中走向逆時針旋轉52°，因此，離島結晶岩測試區之裂隙亦須進行相同之調整。調整後之裂隙位態(傾角，傾向)依序為(73,193)、(52,112)、(61,49)、(68,302)、(15,303)。另一方面，由於DFN參數集內包含從5.64 m至564 m之裂隙，為了網格設定之需求，並且縮短模型運跑所需的時間，依照DFN參數集之公式，選取直徑為240 m至360 m之裂隙進行分析，相對應之裂隙密度為0.001。由於裂隙的同震剪力位移量受到與孕震斷層距離影響，因此，裂隙與濱海斷層的距離設定，亦參照場址與濱海斷層之實際距離。

研究成果顯示單一裂隙的同震位移可區分出尖峰剪力位移量(peak shear displacement)及殘餘剪力位移量(residual shear displacement)，而尖峰剪力位移量的最大值定義為最大尖峰剪力位移量，殘餘剪力位移量最大值定義為最大殘餘剪力位移量(圖4-68)。由於108年度研究使用離散裂隙網路，因此，可計算各個裂隙前述2項成果，並統計其平均值。

各地震矩規模相對應的裂隙剪力位移量彙整於表 4-48。多次地震的計算需考量邏輯樹中的滑移速率(slip rate)，以及3DEC模擬所得之斷層平均滑移量，計算地震再現週期，計算公式如式(4-5)：

$$\text{地震再現週期} = \text{斷層平均滑移量} / \text{滑移速率} \quad (4\text{-}5)$$

為了計算百萬年尺度內多次地震所造成的裂隙剪力位移，本研究做出以下假設：

(a) 地震僅限於邏輯樹中的震源模式。

(b) 裂隙並未因剪力位移而生長。

(c) 裂隙無震間期的潛變。

(d) 裂隙的強度並未受到地質作用影響而改變。

(e) 離島結晶岩測試區的斷層及岩脈皆未產生錯動。

在符合以上假設的前提下，將可結合地震次數、各個地震矩規模所造成的裂隙剪力位移量及邏輯樹權重進行分析。分析結果顯示裂隙叢集1在100萬年內可能累積77.29 mm的最大尖峰剪力位移量，平均尖峰剪力位移量達27.12 mm，最大殘餘剪力位移量達65.88 mm，平均殘餘剪力位移量達23.68 mm。裂隙叢集2在100萬年內可能累積54.17 mm的最大尖峰剪力位移量，平均尖峰剪力位移量達11.73 mm，最大殘餘剪力位移量達45.40 mm，平均殘餘剪力位移量達9.00 mm。裂隙叢集3在100萬年內可能累積38.66 mm的最大尖峰剪力位移量，平均尖峰剪力位移量達14.74 mm，最大殘餘剪力位移量達36.11 mm，平均殘餘剪力位移量達12.00 mm。裂隙叢集4在100萬年內可能累積63.80 mm的最大尖峰剪力位移量，平均尖峰剪力位移量達13.43 mm，最大殘餘剪力位移量達51.87 mm，平均殘餘剪力位移量達11.07 mm。裂隙叢集5在100萬年內可能累積16.26 mm的最大尖峰剪力位移量，平均尖峰剪力位移量達3.65 mm，最大殘餘剪力位移量達13.44 mm，平均殘餘剪力位移量達2.54 mm(如表 4-48；圖 4-69)。其中，在100萬年的多次地震評估期間，僅有裂隙叢集1、裂隙叢集2、裂隙叢集4的最大尖峰剪力位移量，以及裂隙叢集1和裂隙叢集4的最大尖峰剪力位移量大於50 mm，顯示前述叢集對廢棄物罐的影響可能較為顯著。而平均尖峰剪力位移量則全數皆小於30 mm。部分叢集之所以具有較高之裂隙位移量，研判係由於地震發生過程中，離島結晶岩測試區大致處於走向滑移的應力狀態。

因此，高傾角裂隙容易因走向滑移而累積較大的位移量。其中，裂隙叢集1及裂隙叢集4又因為走向與最大主應力方向大致呈現30°，故具有最大之尖峰剪力位移量。

另一方面，考量到裂隙叢集1、裂隙叢集4可能會累積最大的裂隙剪力位移量，理想且能有效降低廢棄物罐剪力失效的方法，即為使裂隙叢集1、裂隙叢集4截切廢棄物罐的比例低於裂隙叢集2、裂隙叢集3、裂隙叢集5。因此，本研究依照目前的配置方案，分別計算不同叢集的裂隙對截切廢孔率的貢獻。計算結果顯示叢集1、裂隙叢集4具有較低的截切廢孔率，裂隙叢集2、裂隙叢集3、裂隙叢集5則貢獻較高的截切廢孔率(圖 4-70)。這項結果與理想的配置狀況相符，裂隙叢集1、裂隙叢集4與處置孔的截切率遠小於裂隙叢集2、裂隙叢集3、裂隙叢集5；因此，不需重新調整處置孔及處置隧道配置。此外，目前計算出的總廢孔率為4.2%，處置孔餘裕約為11%，尚有6.8%的空間可進行處置孔調適。若有必要，也可依據開挖時的調查結果，選擇鄰近孔位進行處置，無須改變處置孔的配置位置。

(2) 處置孔水壓及入流量分析：

本研究依據「第4.4.1節地下水流場演化分析」所提供之區域流場初步結果，應用FracMan軟體來建構現階段離島結晶岩測試區的複合域模型邊界，分析各時間段之處置隧道與處置孔之水壓及入流量值。各時間段之水壓分布如圖 4-71，以隧道仰拱處之頂點及處置孔之部分網格點作為入流量觀測點，開挖後各時間段之入流量分析結果，如圖 4-72，圖中橫坐標為時間(單位為Day)，縱座標為入流量(單位為L/min)，顯示開挖初期入流量較大，隨時間增加而入流量減小，並趨於穩態之定值。此原因係由於裂隙內部地下水的壓力差為驅使地下水流動的重要因素，開挖階段由於開挖面上的裂隙網格點設定為大氣壓力，因壓力差的關係，裂隙內部之水流會逐漸湧入隧道面，因開挖初期裂隙內部壓力差較大，導致地下水湧入隧道開挖面的流量較大，而後期則因為裂隙內部壓力差逐漸變小，因此，入流量減小。整體而言，隧道及處置孔的

入流量介於1.78×10^{-6} L/min至1.76×10^{-3} L/min；處置孔水壓在封閉後初期為4.94 MPa至5.60 MPa，後期達到穩態則為4.98 MPa至5.48 MPa。另外，亦將「地下水流場演化分析」初步結果與地下設施配置進行GIS疊圖分析，探討處置區塊的地下水鹽度、流速及陽離子強度。處置區塊之地下水鹽度約0.13‰至0.25‰，流速約10^{-7} m/s至10^{-9} m/s，陽離子強度則為3.250 mM至5.540 mM。

(3) 處置孔廢孔率與失效評估分析：

廢孔率的計算方面，可以透過大量的DFN實現值，模擬處置設施與裂隙截切的情形，本研究使用2,000次實現值，以單一處置隧道，進行處置孔、廢棄物罐與裂隙截切分析，每次實現值之廢孔率統計如圖 4-70，單一處置隧道沒有廢孔的次數最多，次多的為該處處置隧道只廢1孔，整體而言，廢孔數量的次數呈指數遞減。

考慮地下處置設施設計，進行廢孔率評估，則需考慮地下處置設施設計共有104條處置隧道，假設每條處置隧道彼此獨立，在2,000次實現值中，隨機取104次的廢孔結果來計算廢孔率，探討地下處置設施配置可能的廢孔率。2,000次隨機取樣的結果如圖4-73，整體呈現常態分布，依據本研究地下處置設施設計的廢孔率介於2.0%至6.0%之間，其中以4.0%至4.5%之間的次數最多。此外，以累積移動平均值來探討廢孔率統計代表性與收斂性，從圖 4-74可以看出，DFN實現值次數在1,500次以後，標準差降至0.15%，斜率也趨近於0，廢孔率平均值收斂至4.2%。處置隧道長度300 m和250 m的廢孔率平均值差異不大，如圖 4-75。

表 4-48：地震裂隙剪力位移

裂隙叢集		地震矩規模 7.3	地震矩規模 7.93	地震矩規模 8.27	地震矩規模 8.51	第100萬年地震裂隙剪力位移預期值
1	最大尖峰剪力位移量(mm)	0.04	0.31	2.36	28.18	77.29
	平均尖峰剪力位移量 (mm)	0.03	0.26	0.5	10.92	27.12
	最大殘餘剪力位移量 (mm)	0.0083	0.16	2.27	24.04	65.88
	平均殘餘剪力位移量 (mm)	0.0058	0.13	0.46	10.08	23.68
2	最大尖峰剪力位移量(mm)	0.04	0.91	3.7	7.59	54.17
	平均尖峰剪力位移量 (mm)	0.03	0.19	0.69	1.87	11.73
	最大殘餘剪力位移量 (mm)	0.011	0.52	3.36	6.32	45.40
	平均殘餘剪力位移量 (mm)	0.01	0.1	0.61	1.43	9.00
3	最大尖峰剪力位移量(mm)	0.04	0.21	0.31	18.13	38.66
	平均尖峰剪力位移量 (mm)	0.03	0.17	0.25	5.72	14.74
	最大殘餘剪力位移量 (mm)	0.011	0.07	0.24	18.04	36.11
	平均殘餘剪力位移量 (mm)	0.01	0.06	0.19	5.23	12.00

表 4-48：地震裂隙剪力位移(續)

裂隙叢集		地震矩規模 7.3	地震矩規模 7.93	地震矩規模 8.27	地震矩規模 8.51	第100萬年地震裂隙剪力位移預期值
4	最大尖峰剪力位移量(mm)	0.05	1.58	3.71	10.29	63.80
	平均尖峰剪力位移量 (mm)	0.04	0.16	0.81	2.16	13.43
	最大殘餘剪力位移量 (mm)	0.049	1.42	3.37	6.04	51.87
	平均殘餘剪力位移量 (mm)	0.033	0.1	0.71	1.68	11.07
5	最大尖峰剪力位移量(mm)	0.02	0.15	0.36	6.24	16.26
	平均尖峰剪力位移量 (mm)	0.015	0.07	0.13	0.87	3.65
	最大殘餘剪力位移量 (mm)	0.006	0.08	0.28	5.56	13.44
	平均殘餘剪力位移量 (mm)	0.003	0.03	0.1	0.74	2.54

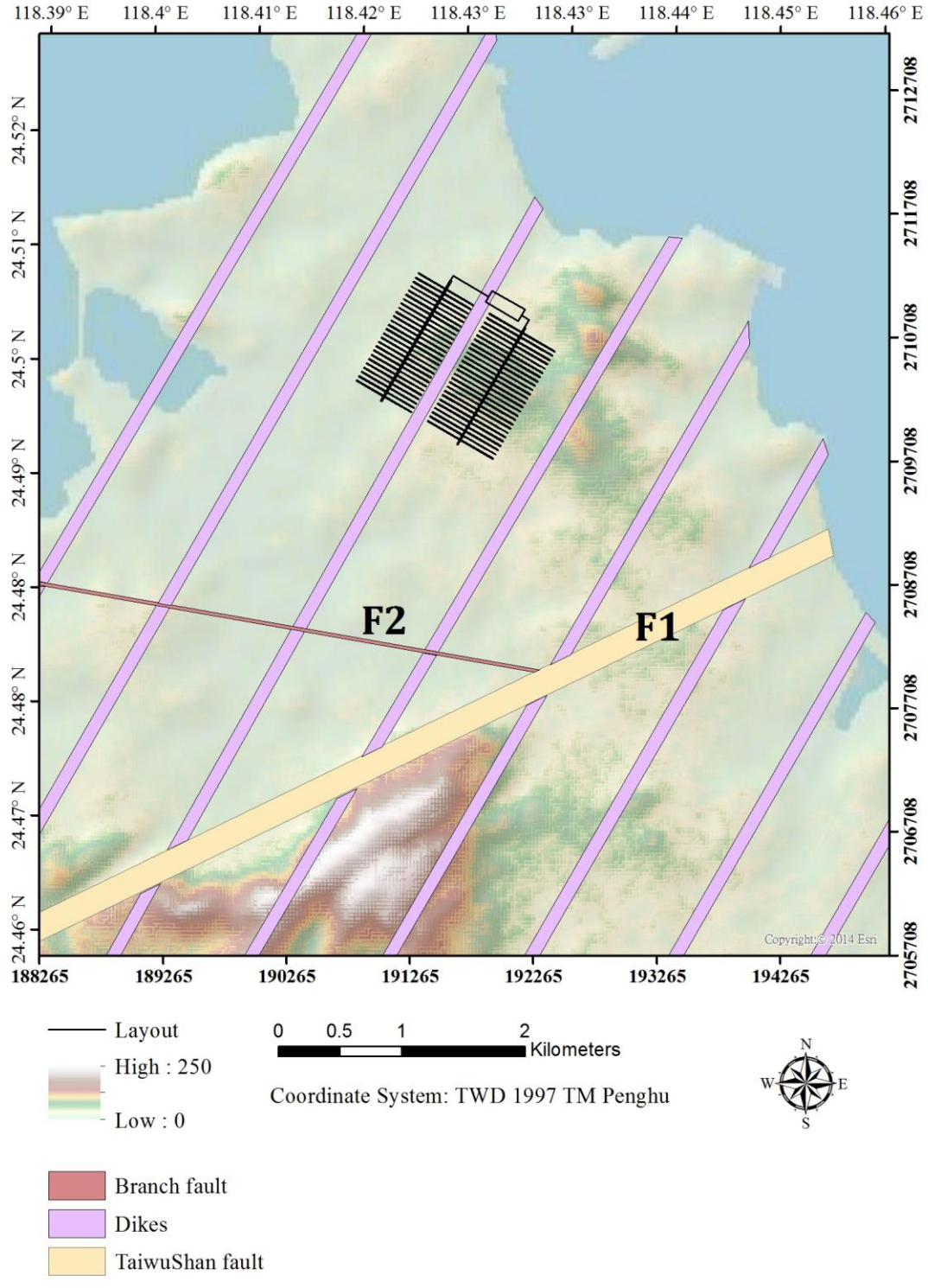


圖 4-65：地下設施配置設計

中英文對照：Branch fault(分支斷層)；Dikes(岩脈)；TaiwuShan fault(太武山斷層)；layout(配置)；Coordinate System: TWD 1997 TM Penghu(座標系統：TWD 1997 澎湖二度分帶)。

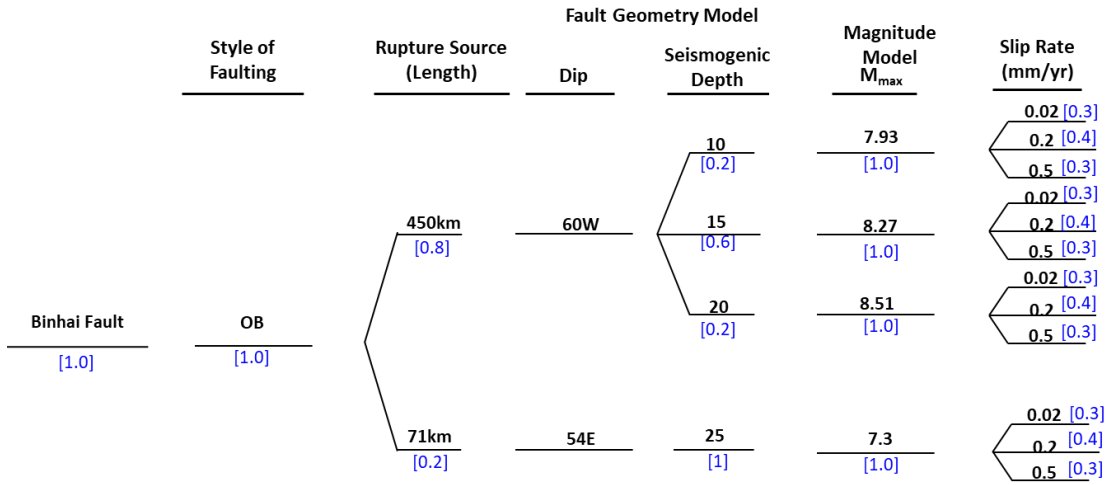


圖 4-66：震源邏輯樹

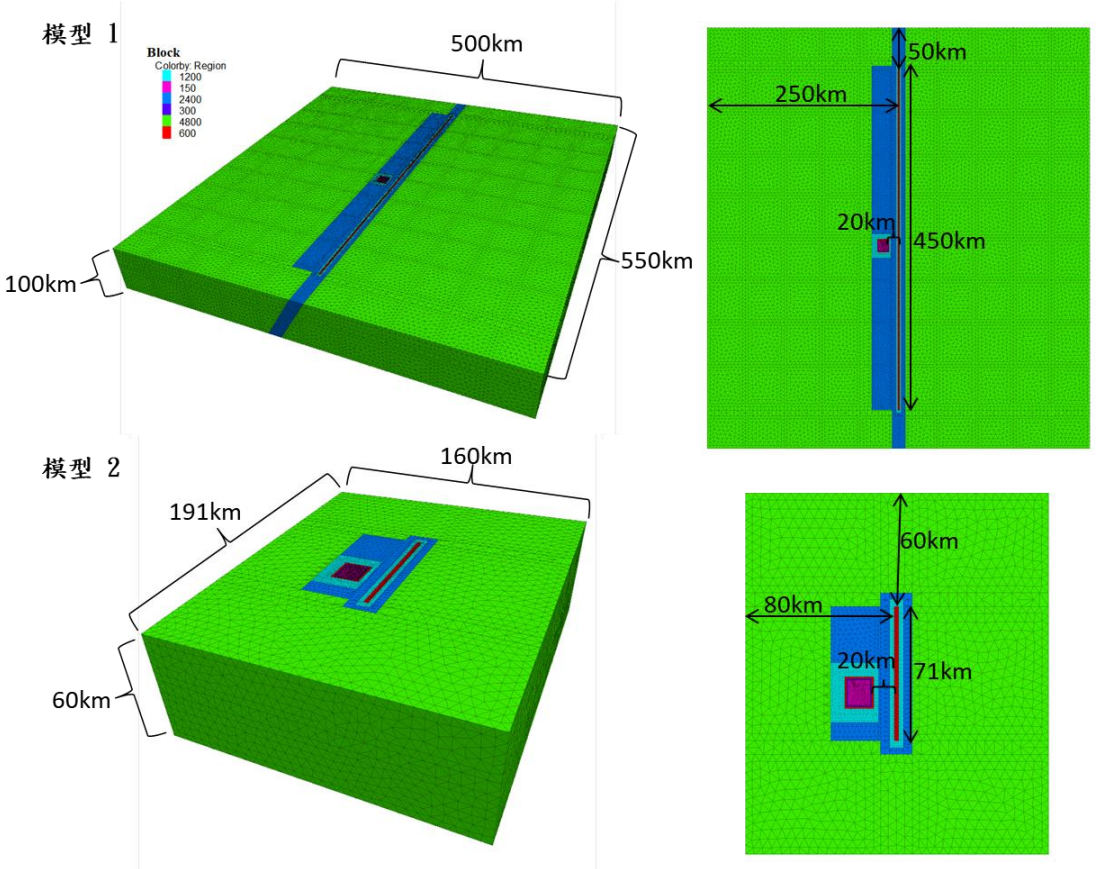


圖 4-67：基本模型

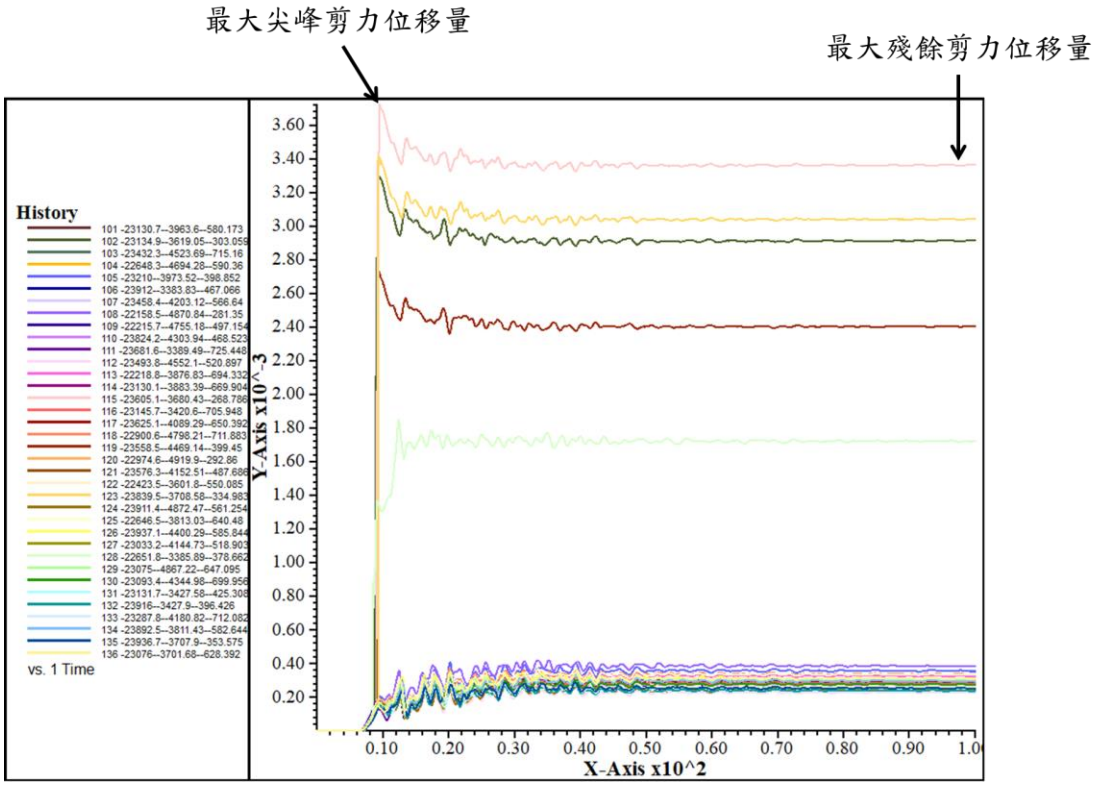


圖 4-68：最大尖峰剪力位移量與最大殘餘剪力位移量

註：橫軸為模擬的時間，單位為 s；縱軸為裂隙剪力位移量，單位為m。

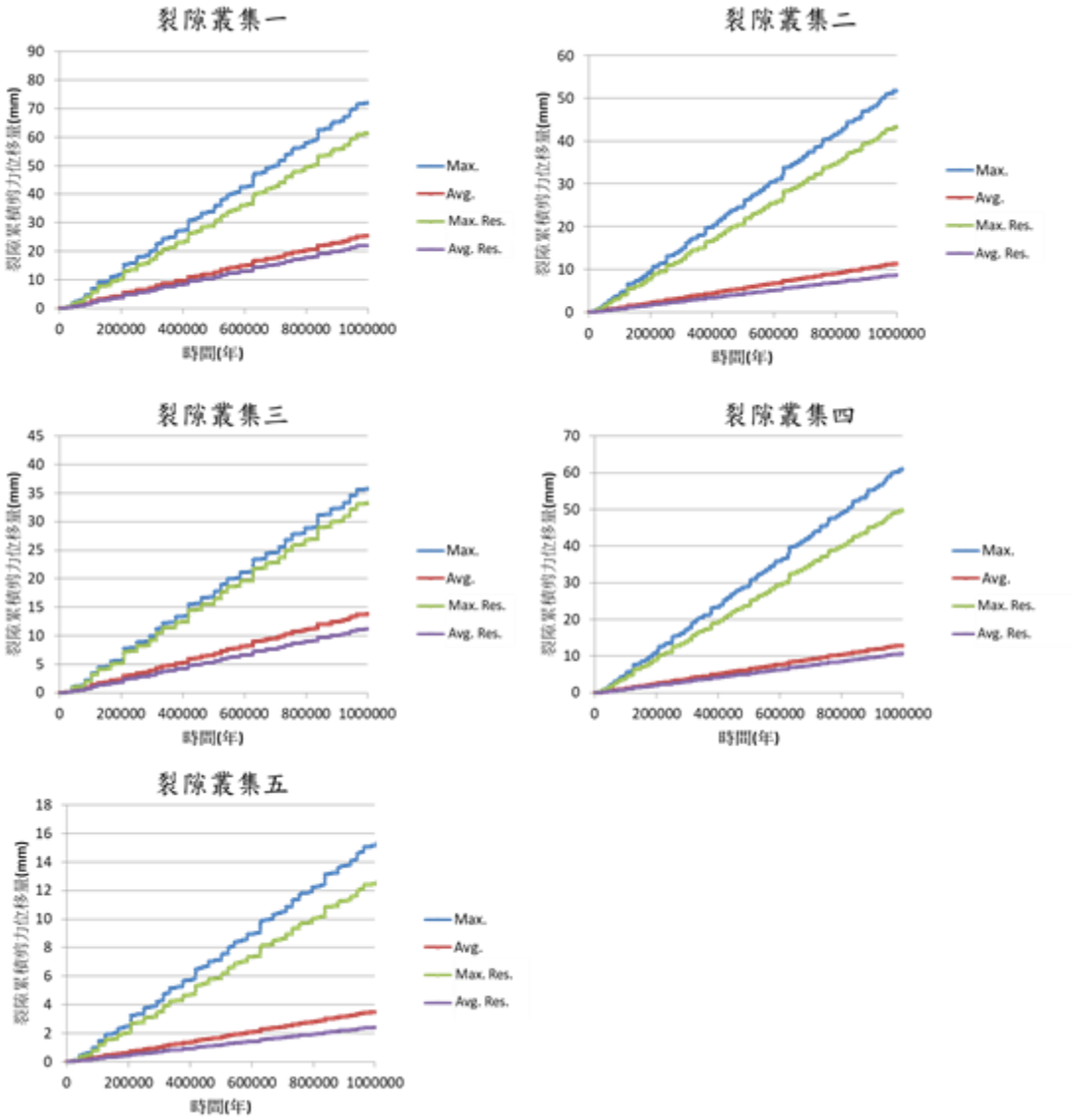


圖 4-69：各裂隙叢集之地震引致裂隙剪力位移與時間之關係

中英文對照：Max.(地震引致最大尖峰剪力位移量與時間之關係)；Avg.(地震引致平均尖峰剪力位移量與時間之關係)；Max. Res.(地震引致最大殘餘剪力位移量與時間之關係)；Avg. Res.(地震引致平均殘餘剪力位移量與時間之關係)。

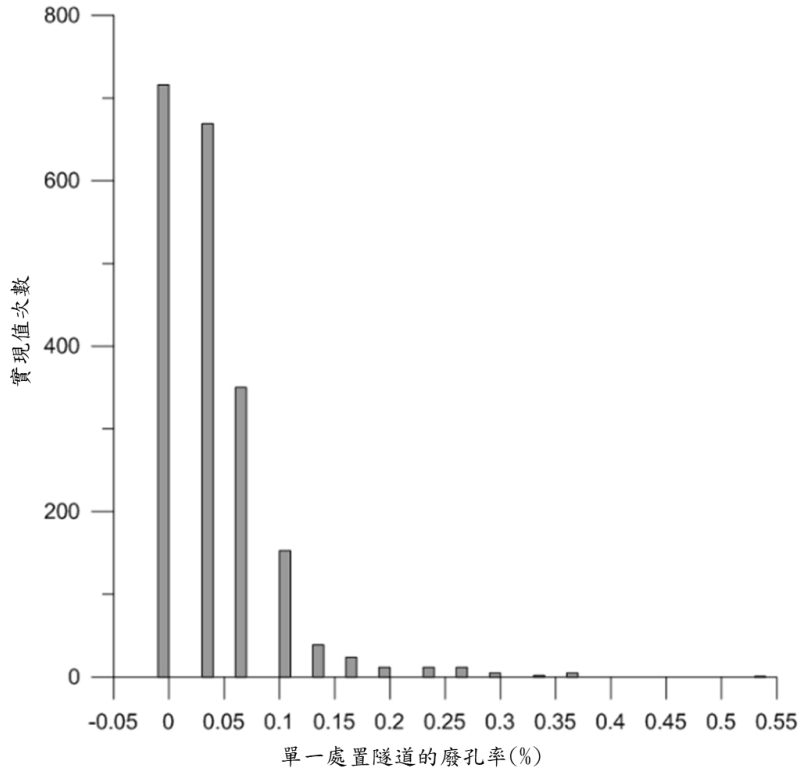
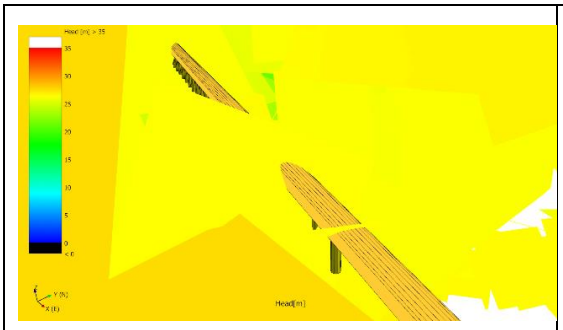
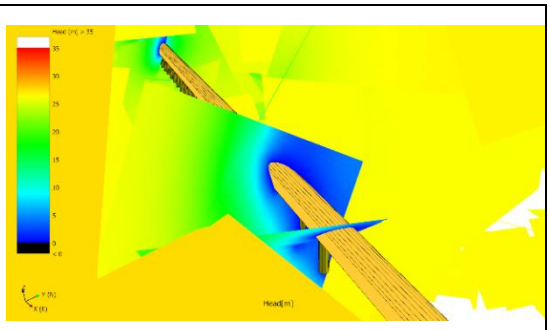


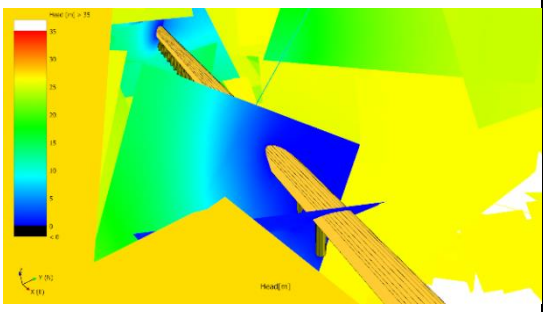
圖 4-70：2,000次DFN實現值的單一處置隧道廢孔率次數分布



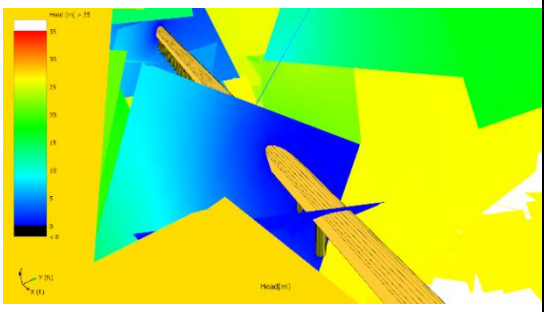
Time: 0 day(未開挖前)



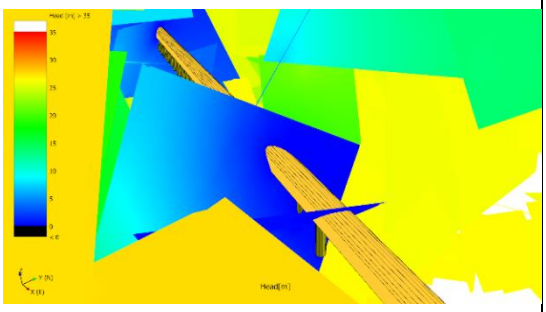
Time: 1 day



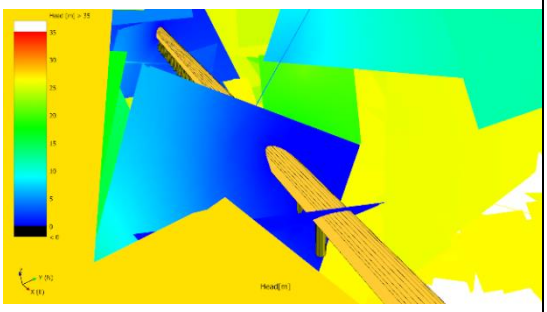
Time: 10 day



Time: 40 day



Time: 70 day



Time: 100 day

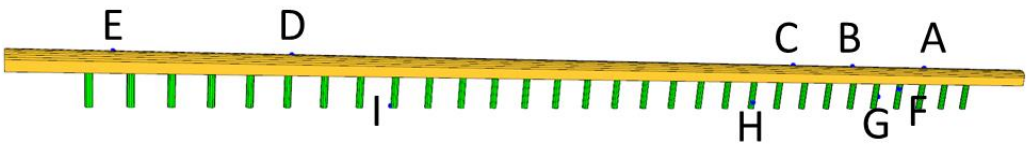


圖 4-71：各時間段之水壓分布及入流量觀測點

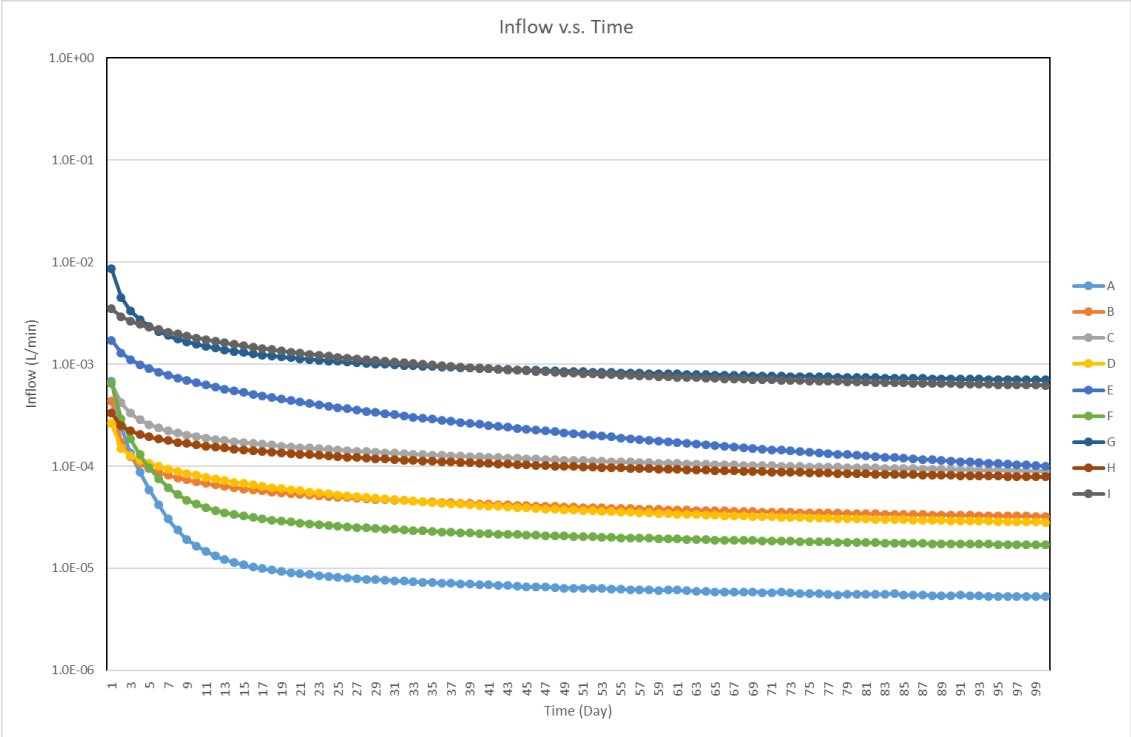


圖 4-72：開挖後各時間段之入流量

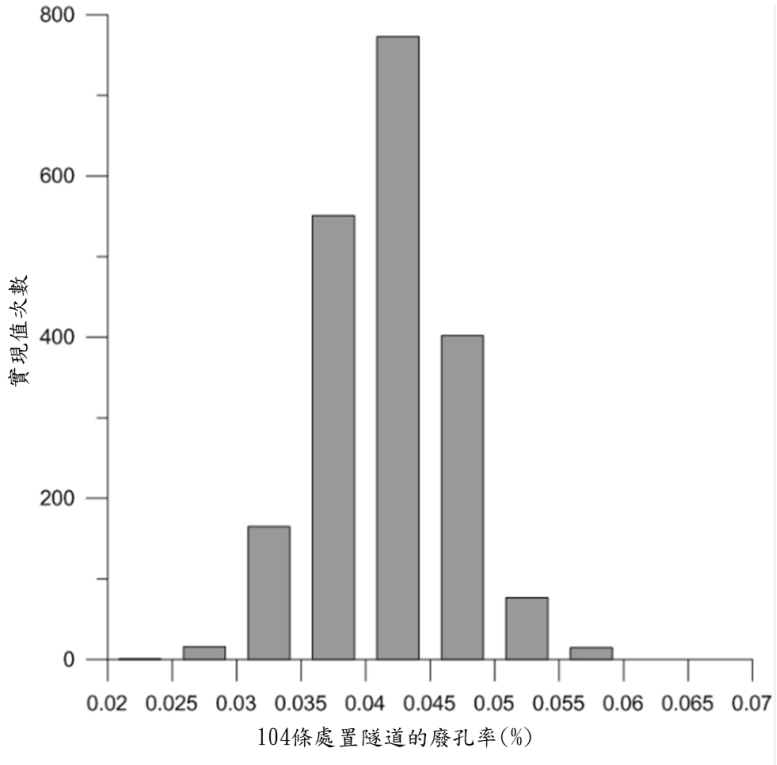


圖 4-73：在2,000次實現值結果中，隨機挑選104個計算廢孔率

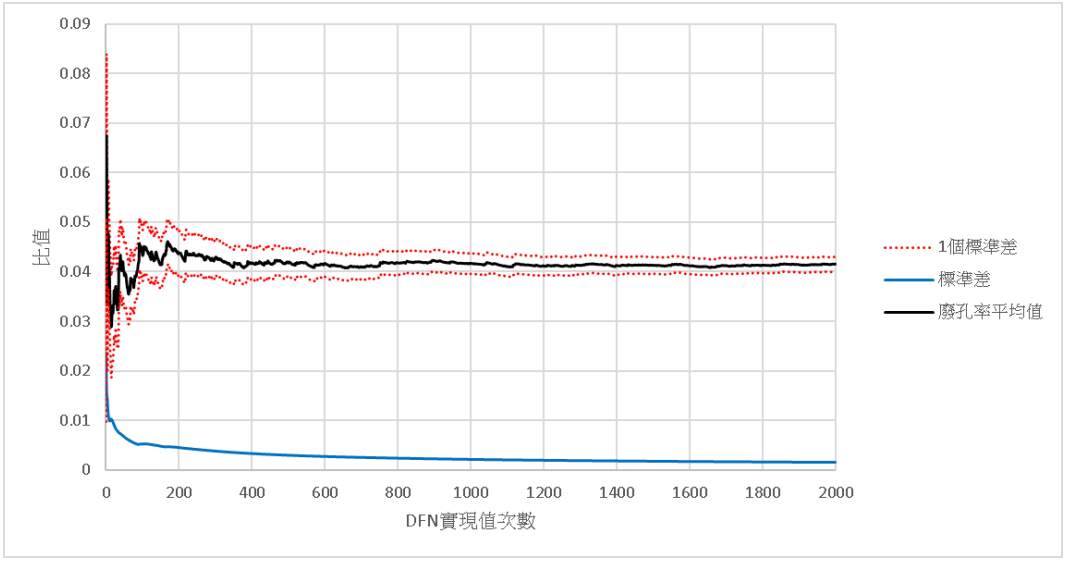


圖 4-74：廢孔率累積移動平均值、標準差與DFN實現值次數之關係

註：處置隧道長300 m與30個處置孔。

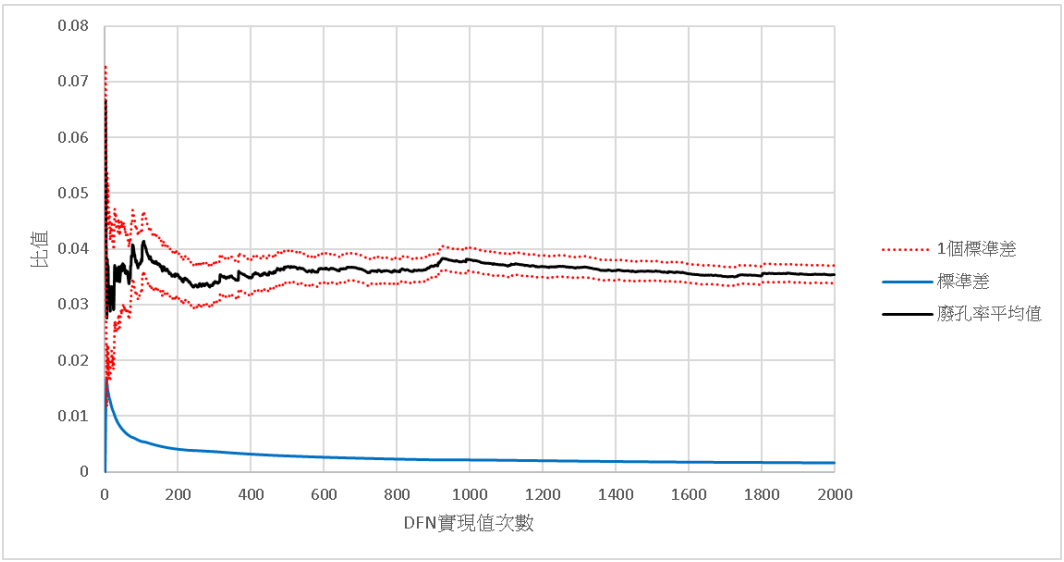


圖 4-75：廢孔率累積移動平均值、標準差與DFN實現值次數之關係

註：處置隧道長250 m與25個處置孔。

4.4. 水文地質演化趨勢分析

4.4.1. 地下水流場演化分析

為了提供緩衝材料侵蝕、廢棄物罐腐蝕及放射性核種傳輸於整個安全評估過程中所需之地下水流特性參數，必須基於離島結晶岩測試區之水文地質特徵，並考量地下設施配置設計方案，針對隨外部條件變化之地下水流場進行分析，藉以獲得處置設施周圍與遠場之地下水流場演化趨勢。

依據SNFD2017技術發展基礎，108年度成果之精進項目包括：(1)基於離島結晶岩測試區之地質特徵及離散裂隙網路資訊，自行轉換成等效水力特性參數，即參數設定上達成本土化；(2)建立考量鹽度耦合之地下水流場模擬分析技術，並依據對應外部條件設定合理之鹽度及水流邊界條件，執行地下水穩態流場模擬；(3)導入主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之結構，精進處置設施周圍與遠場之地下水流場分析技術；(4)整合上述研究成果，完成封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之穩態地下水流場分析。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本研究使用瑞典SKB公司擁有之DarcyTools進行分析計算。DarcyTools係由瑞典SKB公司、MFRDC(Michel Ferry, R&D Consulting)、CFE AB(Computer-aided Fluid Engineering AB)共同開發的模擬程式，為模擬孔隙介質與裂隙介質流場的工具，目的為放射性廢棄物處置之場址調查評估，並實際運用於瑞典SR-Site計畫的地下水模擬工作(Vidstrand et al., 2010, p1-p190)。

(2) 參數需求說明：

(a) 模擬範圍及水文地質概念模式：依據第3.1.4節地質單元三維建模及展示技術之研究成果，區分為區域尺度模型及場址尺度模型，並依據不同尺度模型的自然條件訂定相對應之邊界條件。

(b) 離散裂隙網路參數集：使用與SNFD2017參考案例相同之參數集內容。

(c) 水力特性參數：離島結晶岩測試區內使用1次實現值之離散裂隙網路進行等效水力特性轉換；超出離島結晶岩測試區外之區域，則採用各水力單元之水力特性參數建議值。

(d) 地下設施配置：依據第4.3.2節之地下設施配置研究成果。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) **地下設施配置(含主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶)及封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之模擬區域：**

(i) 地下設施配置(含主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶)：處置設施相關物件包含主隧道、處置隧道、處置孔及主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶，其中，主隧道與處置隧道底部開挖損傷帶之設定，瑞典SKB TR-08-08報告(Bäckblom, 2008, p1-p77)針對開挖損傷帶的結果進行蒐集及影響評估；瑞典SKB公司(SKB, 2010d, p137-p392)彙整與開挖損傷帶之有關實驗，總結出瑞典SKB公司設定開挖損傷帶之參數。因此，本研究依據國際文獻蒐集結果，使用厚度為0.3 m、水力傳導係數3.33×10^{-8} m/s進行參數設定(如圖 4-76所示)。

(ii) 封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之模擬區域及水力特性參數輸入與水文地質參數轉換與設定：鑑於目前僅有離島結晶岩測試區之地質調查資訊(林鎮國等人，2015，p1-1-4-20)，超出離島結晶岩測試區範圍，需要進行相關水文地質單元及水力特性參數之假設，因此，本研究假設離島結晶岩測試區以外之水文地質單元僅有R0及R#(即F1、F2及D#僅存在於離島結晶岩測試區中)，且厚度及水力傳導係數亦遵照SNFD2017參考案例之設定(即R0厚度為70 m、R0水力傳導係數為1.0×10^{-5} m/s、R#水力傳導係數為1.0×10^{-10} m/s)(林鎮

國等人，2015，p1-1-4-20)；模擬深度則保持與SNFD2017報告中參考案例設定相同，即維持2 km。

完成1次實現值之離散裂隙網路生成及等效水力參數轉換後，即可獲得不同網格的等效水力特性參數，並應用於後續案例1至案例4之模擬。以控制地下水流動的滲透性(permeability)為例，圖 4-77為處置設施區域的等效滲透性分布；除了滲透性以外，孔隙率對於傳輸行為也是重要的參數之一，圖 4-78直接顯示處置設施區域的等效孔隙率轉換結果，由此圖可明顯看到處置設施受到裂隙的截切，其等效孔隙率也明顯提升，表示等效水力特性參數成功地轉換及設定。

(b) **鹽度耦合之地下水流場模擬分析技術：**

本研究使用DarcyTools建立含鹽度之地下水穩態流場模擬技術，藉由側邊界條件引入鹽度的設定，精進離島結晶岩測試區穩態地下水流的模擬結果。

DarcyTools使用質量分率傳輸方程式(mass fraction transport equation)描述鹽度的傳輸(Svensson, 2010, p1-p183；Svensson and Ferry, 2010, p1-p166；Svensson et al., 2010, p1-p144)，方程式如下：

$$\frac{\partial \rho\theta C}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho uC-\rho\gamma D_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho vC-\rho\gamma D_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho wC-\rho\gamma D_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)=QC+Q_c \quad (4\text{-}6)$$

其中，

ρ=流體密度，[M/L^3]。

θ=孔隙率，[-]。

C=質量分率，[-]，在此表示鹽水質量分率。

t=時間，[T]。

x、y、z=直角座標系統之3個主方向，[-]。

u、v、w=直角坐標系統中達西流速在x、y、z的分量，[L/T]。

γ=壓縮度，[-]。

D_x、D_y及D_z=x方向、y方向及z方向之有效擴散係數，[L^2/T]。

Q=源/匯項，[M/L^3T]。

Q_c=固定區域(immobile zone)的源/匯項，[M/L^3T]。

而流體特性包含黏滯係數及密度等，目前先假設流體的黏滯係數為定值且不可壓縮，僅密度隨著鹽度的變化而改變，描述方式如式(4-7)：

$$\rho = \rho_0\left[1 + \alpha_1 S + \alpha_2 S^2 - \beta_1(T - T_p) - \beta_2(T - T_p)^2\right] \quad (4\text{-}7)$$

其中，

ρ=流體密度，[M/L^3]。

ρ_0=純水密度，[M/L^3]。

S=鹽度，[-]。

T=溫度，[℃]。

T_p=參考溫度，[℃]。

α_1=線性鹽度係數，[-]。

α_2=2次鹽度係數，[-]。

β_1=線性溫度係數，[-]。

β_2=2次溫度係數，[-]。

目前尚不考慮溫度對於流體特性的變化，因此假設線性溫度係數及2次溫度係數皆為0，同時僅考慮線性鹽度係數為0.008的設定，因此，流體密度將僅與鹽度相關，再配合達西定律求解速度場，並將不同空間的流體密度代回式(4-6)後，即可計算鹽度傳輸；至於海水的鹽度數值則是使用3.2%進行設定，雖然SNFD2107參考案例曾建議全球平均海水鹽度為

3.51%，但進一步探究目前模擬區域其實屬於南中國海，因此，應該使用針對南中國海的平均海水鹽度，而此數值則為3.2%(林鎮國等人，2015，p3-41)。

(c) **封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之穩態地下水流場分析：**

完成計算網格生成、水力特性參數及水文地質參數轉換與設定後，即可依據水文地質概念模式設定的邊界條件，進行穩態地下水流場模擬。其中，依據第3.1.4節之地質單元三維建模設定，模擬尺度分為區域尺度及場址尺度，而區域尺度的模擬區域是參考集水區劃分理論之方法，選定自然邊界作為劃分依據，因此，在邊界條件設定上亦須要遵照自然邊界設定合適的邊界條件。

依據模擬區域劃分成果，將高山陵線設定為無流動邊界、河流設定為定水頭(constant head)邊界、頂部為入滲邊界、底部為無流動邊界，如圖 4-79所示；場址尺度的邊界條件則將海洋最外圍設定為無流動邊界並引入鹽度3.2%(林鎮國等人，2015，p3-41)、陸地之頂部為入滲邊界、整個模型底部為無流動邊界，如圖 4-80所示。

本研究將運用4個案例展示技術發展成果，各樣案例如表4-49，並依據其對應的設定執行穩態地下水流場模擬。4個案例的模擬區域範圍、有無主隧道底部及處置隧道底部開挖損傷帶、邊界條件設定等比較資訊詳如表 4-50所示，而各案例之細部條件及模擬結果分別如下所述：

(i) 案例1：

圖 4-81為案例1之穩態地下水壓力分布模擬結果，顯示壓力分布最高地區為離島結晶岩測試區中央之太武山，越往海岸線靠近則壓力逐漸減少，此外，結果亦顯示隨著深度的增加，壓力有逐漸增加的趨勢，因此，整體流場將由中央太武山往外、往下呈輻射狀向外，然後到達一定深度後再往上方流動。

圖 4-82為案例1之穩態鹽度分布模擬結果，顯示鹽度耦合之設定成功並完成運跑，且明顯有海淡水交界面的情況發生，而此現象可能會影響質點傳輸途徑，致使質點沿著此交界面移動。

(ii) 案例2：

圖 4-83為案例2之穩態地下水壓力分布模擬結果，顯示壓力分布最高地區為離島結晶岩測試區中央之太武山，越往海岸線靠近則壓力逐漸減少，此外，結果亦顯示隨著深度的增加，壓力有逐漸增加的趨勢；因此，整體流場將由中央太武山往外、往下輻射狀向外，然後到達一定深度後再向上方流動。整體壓力分布及地下水流動趨勢與案例1的結果(圖 4-81)並無重大差異。

圖 4-84為案例2之穩態鹽度分布模擬結果，顯示鹽度耦合之功能成功設定並完成運跑，且明顯有海淡水交界面的情況發生，而此現象可能會影響質點傳輸途徑，致使質點沿著此交界面移動。整體鹽度分布與案例1的結果(圖 4-82)並無重大差異；然而，案例2(圖 4-84)在鹽度模擬結果的收斂程度較差，可由部分圖中發現原本應該是海水鹽度的區域有部分鹽度約為2.4%至2.6%的數值(黃色及橘色色標)出現，推究結果可能是因為多了主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之設定，導致網格數量上升外，其水力傳導係數值又較母岩及緩衝材料與回填材料高，導致處置設施周圍有許多差異甚大的水力特性參數，致使模式在求解時難以收斂。因此，藉由此案例的回饋，顯示若增加主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶時，除了運算時間增加外(因為網格數量增加)，也同時要小心數值難以收斂的情事。

為了比較案例1及案例2在穩態壓力分布及穩態鹽度分布的差異，圖 4-85為案例1及案例2的穩態壓力分布於z=-504 m剖面之比較，其中，藍線為案例1的模擬結果，

紅線為案例2的模擬結果，顯示壓力分布在太武山、太武山南方及其他海域的模擬結果非常一致，但在太武山北方的處置設施位置則有些許差異(為了清楚比較模擬差異，圖 4-85中不匯入處置設施物件)，因此，處置設施底部開挖損傷的存在確實會造成處置設施深度的流場受到影響，但大致的趨勢還是相同，即由太武山主控流場，且壓力由離島結晶岩測試區中央往外逐漸降低。此外，2個案例的壓力分布在離島結晶岩測試區中的分布受到東北-西南走向的岩脈群及F1、F2導水構造的影響，顯示水文地質單元對於壓力分布確實有所影響。

圖 4-86為案例1及案例2的穩態鹽度分布於z=-504 m剖面之比較，其中，藍線為案例1的模擬結果，紅線為案例2的模擬結果，顯示鹽度分布在處置設施位置的結果一致(為了清楚比較模擬差異，圖 4-86中不匯入處置設施物件)，但越往海岸線則差異越大，此外，案例2的鹽度為3等值線於部分區域確實有不平滑的情事發生，這也呼應了案例2結果難以收斂的事實。

(iii) 案例3：

圖 4-87為案例3之穩態地下水壓力分布模擬結果俯視圖，結果顯示大趨勢的地下水將由西北往東南方向流動，而在上邊界為入滲的條件下，離島結晶岩測試區中的太武山不再扮演重要的角色；因此，若質點從處置設施釋出，則傳輸位置可能依據大趨勢的地下水流影響，往南方或東南方向一路移動；此外，目前的流場趨勢可能會讓質點由處置設施釋出後往底部運移，在沒有其他的影響因素下，傳輸時間及傳輸路徑皆可能甚長，且質點亦可能沒有地表釋出點。

(iv) 案例4：

有鑑於此現象可能無法進行安全評估計算及建立生物圈評估技術，因此，額外設定上邊界為定水頭案例(即案

例4)，藉以讓質點能夠有效於陸地釋出，作為後續評估技術建立之基礎。

本案例使用與案例3相同的模擬區域、計算網格、等效水力特性參數轉換及設定，唯一不同為上邊界條件由入滲改為定水頭。圖 4-88為案例4之穩態地下水壓力分布模擬結果俯視圖，結果顯示壓力分布結果與地形一致，表示上邊界條件為定水頭的設定無誤。雖然大趨勢的地下水將保持由西北往東南方向流動，但離島結晶岩測試區中的太武山則再度扮演重要的角色，致使離島結晶岩測試區中保有由內向外輻射狀的小區域流場；因此，若質點從處置設施釋出，傳輸位置首先將受到鄰近的小趨勢流場(即太武山)主控，往北方、西北方及東北方移動，少部分則受到小區域流場及大趨勢流場的合力作用，往西南方向移動；此外，質點的傳輸路徑將縮短且有地表釋出的情事發生。

為了比較案例3及案例4的穩態壓力分布差異，圖 4-89為案例3及案例4的穩態壓力分布於z=-504 m剖面之比較，其中，藍線為案例3的模擬結果，紅線為案例4的模擬結果，顯示上邊界條件確實影響壓力分布，其中，案例3的地下水將由西北往東南方向流動，且離島結晶岩測試區中的太武山並未扮演重要的角色，因此不影響處置設施位置的流場(為了清楚比較模擬差異，圖 4-89中不匯入處置設施物件)；但案例4的壓力分布則由地形主控，因此，離島結晶岩測試區中的太武山將主控處置設施位置的流場，雖然大趨勢流場還是西北往東南方向，但太武山對於處置設施的影響順序還是優先於大趨勢流場。

表 4-49：地下水流場演化分析之案例編號與說明

案例編號	案例說明
Case1：	使用場址尺度模型及其水文地質概念模式，在沒有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的條件下進行後續計算網格生成、等效水力特性參數轉換及設定； 邊界條件設定則依據模擬區域劃分成果，將海洋最外圍設定為無流動邊界並引入鹽度3.2%(林鎮國等人，2015，p3-41)，陸地之頂部為入滲邊界，入滲率則依據SNFD2017參考案例設定為35 mm/yr(林鎮國等人，2015，p3-45)，整個模型底部為無流動邊界
Case2：	使用與案例1相同的設定，但在具有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的條件下進行後續分析。除了依據原有之主隧道、處置隧道及處置孔之物件進行計算網格建構及水力特性參數設定外，同時使用厚度0.3 m、水力傳導係數3.33×10^{-8} m/s之設定，且於處置隧道開挖損傷帶不考慮封塞設計的影響下，匯入開挖損傷帶之物件並執行計算網格建構及其水力特性參數設定。邊界設定則與case1設定相同。
Case3：	本案例使用區域尺度模型及其水文地質概念模式，模擬海平面下降120 m條件下的穩態地下水流場，其中，海平面下降案例目前未有地質調查或其他模擬結果/證據可供鹽度的邊界條件或源/匯項設定，因此，暫不引入鹽度相關功能。 本案例為具有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的設定，而區域尺度模型的邊界條件設定則依據模擬區域劃分成果，將高山陵線設定為無流動邊界、河流設定為定水頭邊界、頂部為入滲邊界、底部為無流動邊界。
Case4：	本案例使用與案例3相同的模擬區域、計算網格、等效水力特性參數轉換及設定，唯一不同為上邊界條件由入滲改為定水頭，定水頭數值目前先假設與地表地形相同

表 4-50：4個地下水流分析案例資訊

案例編號	模擬尺度	有/無開挖損傷帶	上邊界條件	有/無鹽度設定
案例1	場址尺度	無	入滲	有
案例2	場址尺度	有	入滲	有
案例3	區域尺度	有	入滲	無
案例4	區域尺度	有	定水頭	無

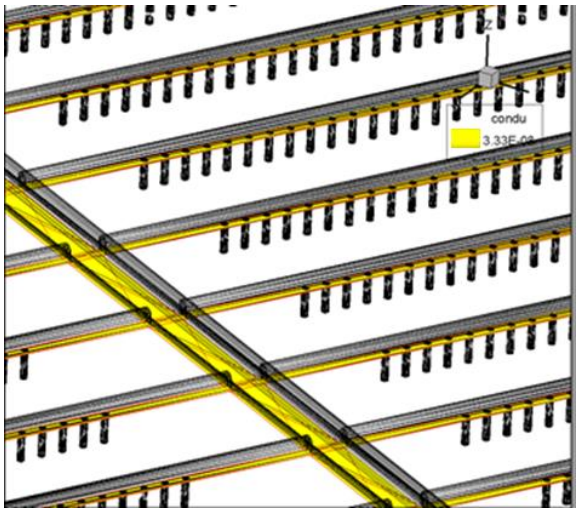


圖 4-76：處置設施及主隧道與處置隧道底部開挖損傷帶物件圖

註(1)：灰色處置設施；黃色表示主隧道與處置隧道底部開挖損傷帶。

註(2)：主隧道與處置隧道底部開挖損傷帶之水力傳導係數設定係依據國際文獻蒐集成果。

註(3)：condu表示水力傳導係數(m/sec)。

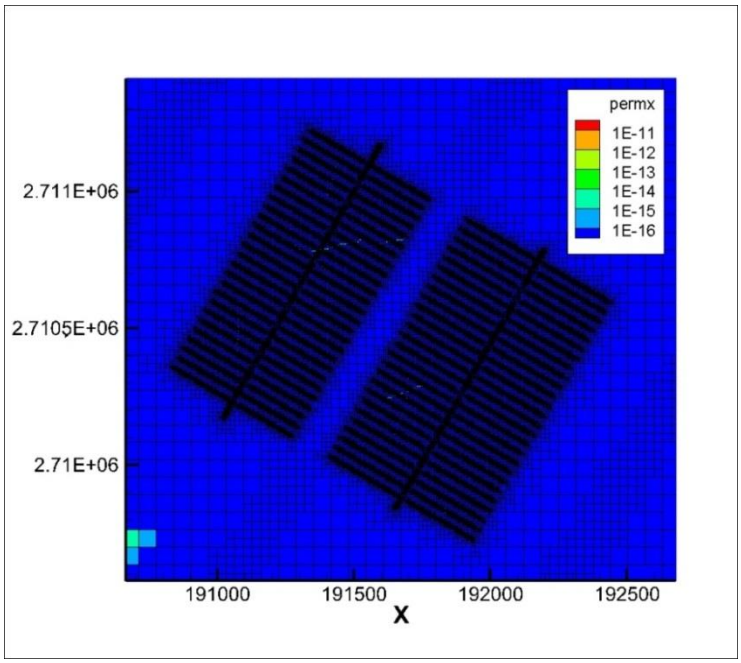


圖 4-77：處置設施及其周圍之等效滲透性轉換結果

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：perm表示滲透性(m^2)。

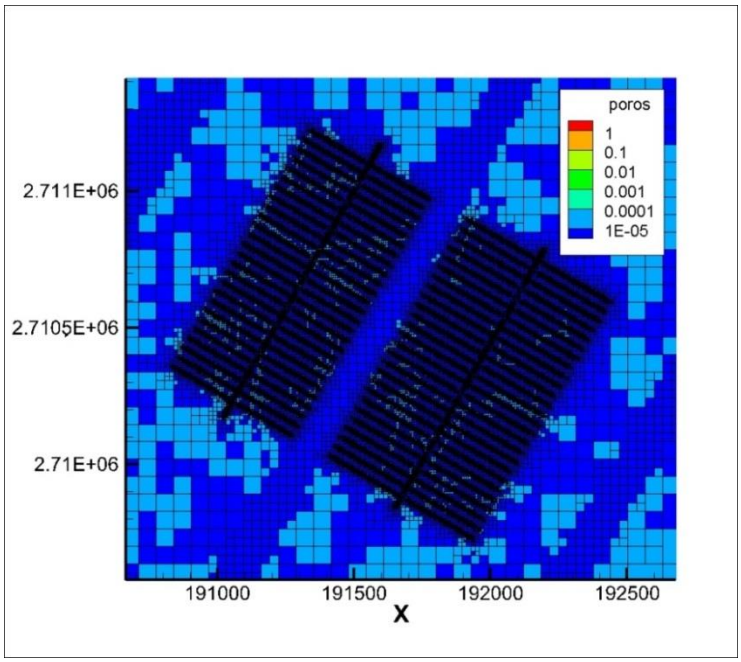


圖 4-78：處置設施及其周圍之等效孔隙率轉換結果

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：poros表示孔隙率(-)。

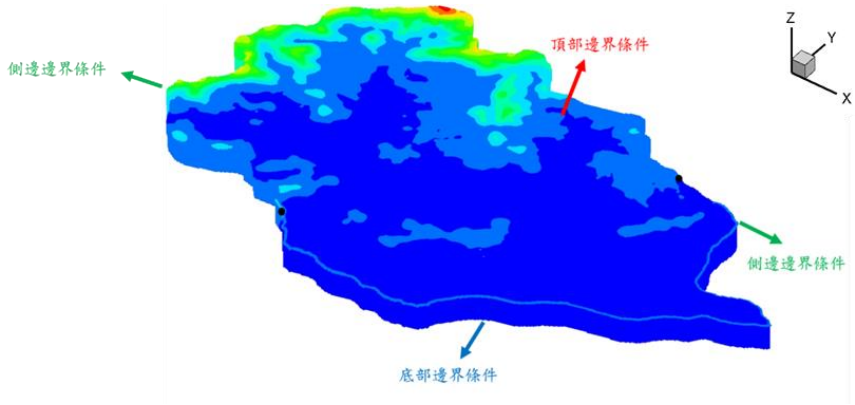


圖 4-79：區域尺度模型之邊界條件設定

註：左側邊界之高山陵線設定為無流動邊界；右側邊界之河流設定為定水頭邊界；頂部為入滲邊界；底部為無流動邊界。

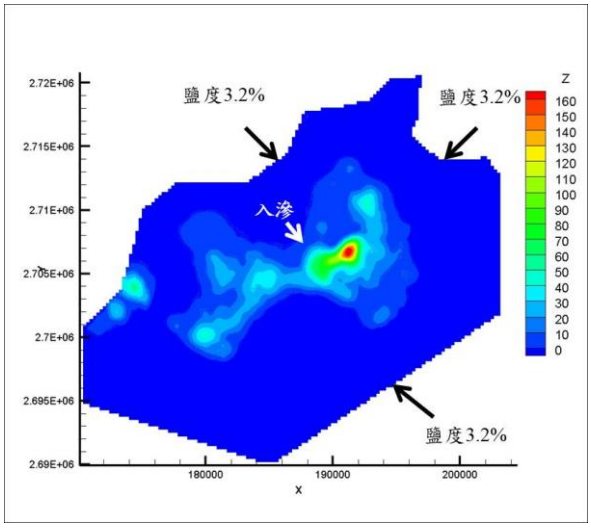


圖 4-80：場址尺度模型之邊界條件設定

註：海洋最外圍設定為無流動邊界並引入鹽度3.2%、陸地之頂部為入滲邊界，整個模型底部為無流動邊界。

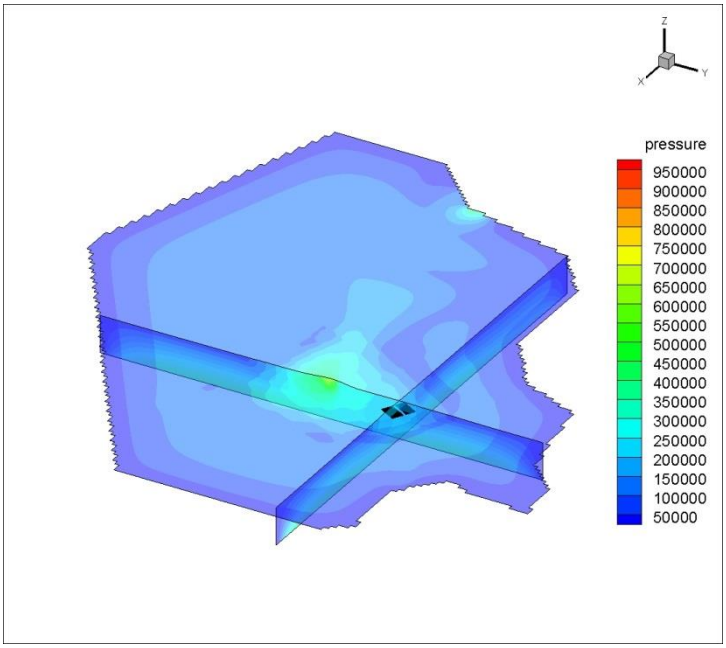


圖 4-81：案例1之穩態地下水壓力分布

註(1)：此圖為通過處置設施中心的3個剖面，分別為x=191600、y=2710500及z=-504 m。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

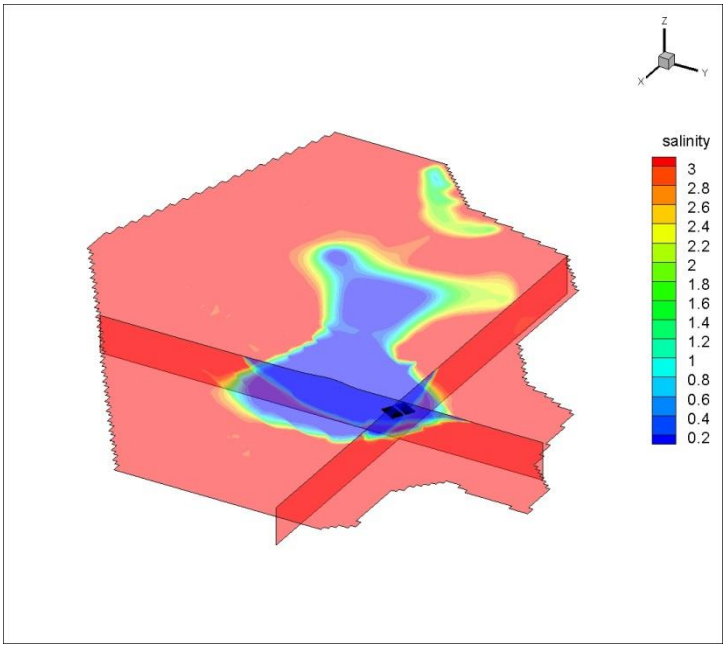


圖 4-82：案例1之穩態鹽度分布

註(1)：此圖為通過處置設施中心的3個剖面，分別為x=191600、y=2710500及z=-504 m。

註(2)：salinity表示鹽度(%)。

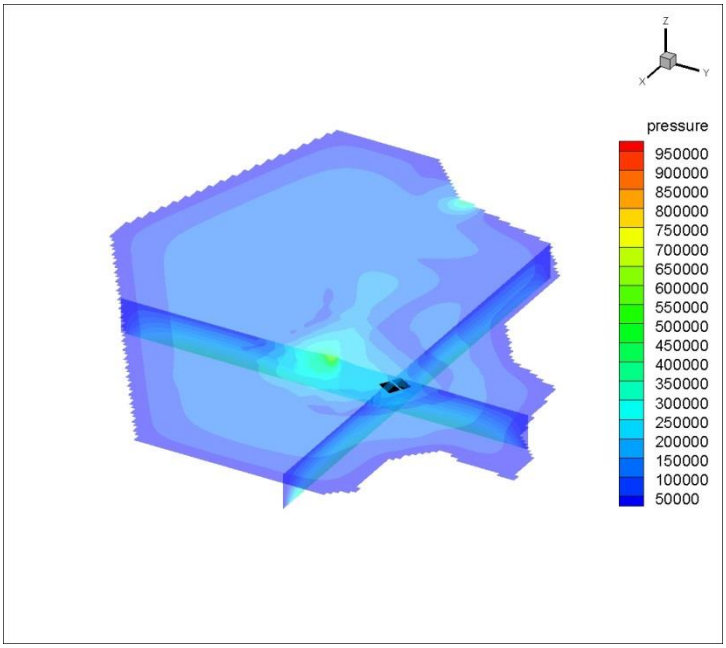


圖 4-83：案例2之穩態地下水壓力分布

註(1)：此圖為通過處置設施中心的3個剖面，分別為x=191600、y=2710500及z=-504 m。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

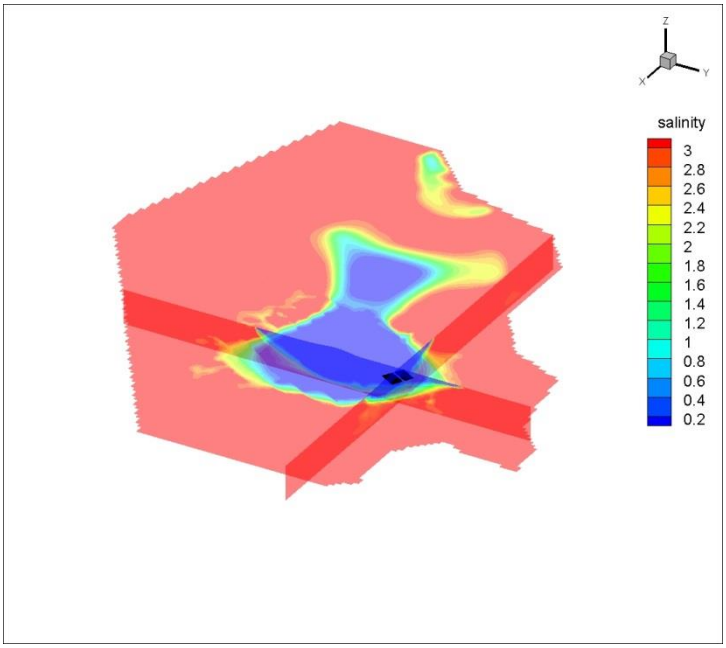


圖 4-84：案例2之穩態鹽度分布

註(1)：此圖為通過處置設施中心的3個剖面，分別為x=191600、y=2710500及z=-504 m。

註(2)：salinity表示鹽度(%)。

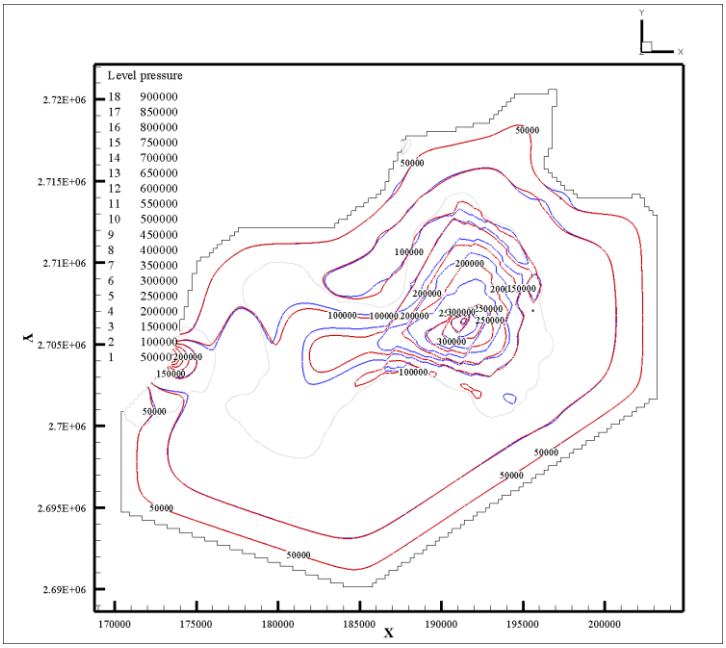


圖 4-85：案例1及案例2於z剖面之穩態壓力分布等值圖

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：藍線為案例1模擬結果；紅線為案例2模擬結果；黑線為模擬邊界；灰線為金門島之海岸線。

註(3)：Level表示等值線編號(-)；pressure表示壓力(Pa)。

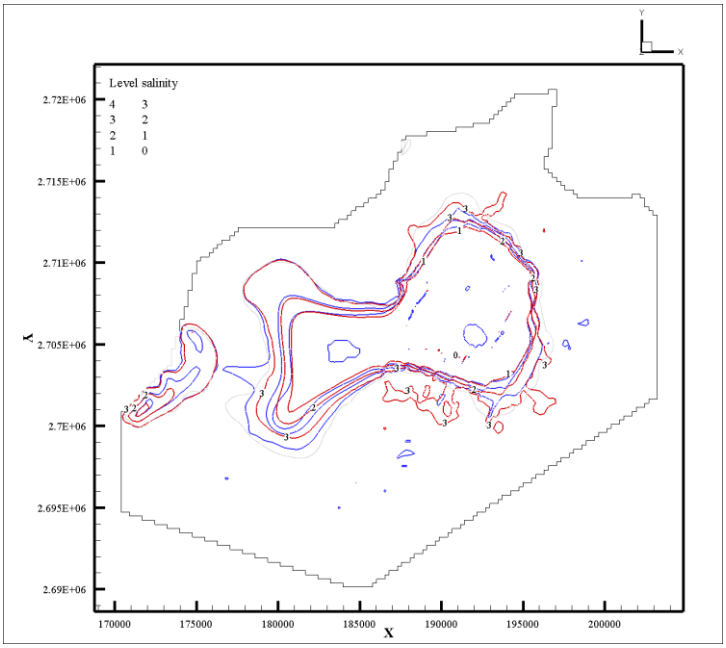


圖 4-86：案例1及案例2於z剖面之穩態鹽度分布等值圖

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：藍線為案例1模擬結果；紅線為案例2模擬結果；黑線為模擬邊界；灰線為金門島之海岸線。

註(3)：Level表示等值線編號(-)；salinity表示鹽度(%)。

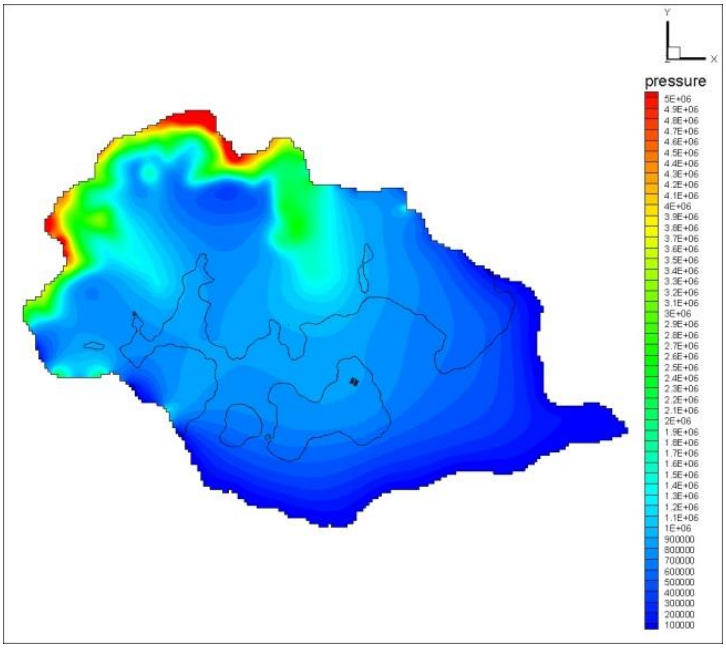


圖 4-87：案例3於z剖面之穩態地下水壓力分布

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

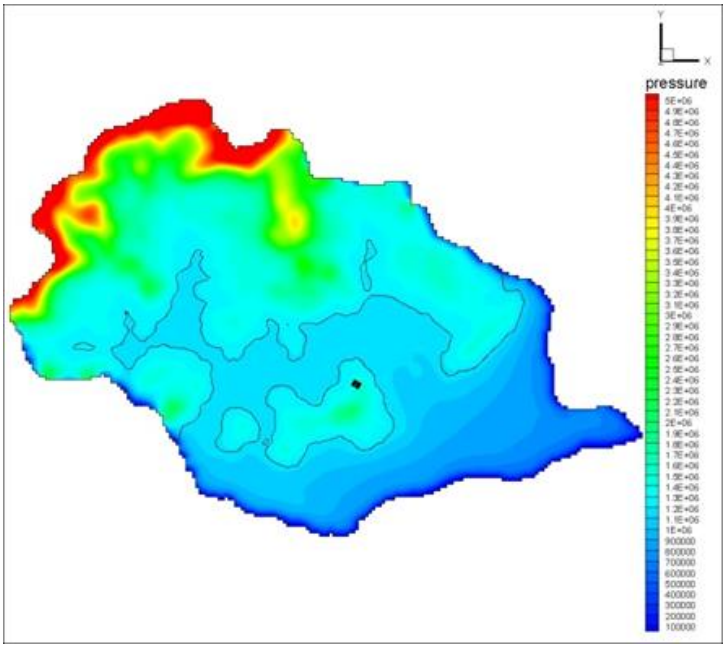


圖 4-88：案例4於z剖面之穩態地下水壓力分布

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

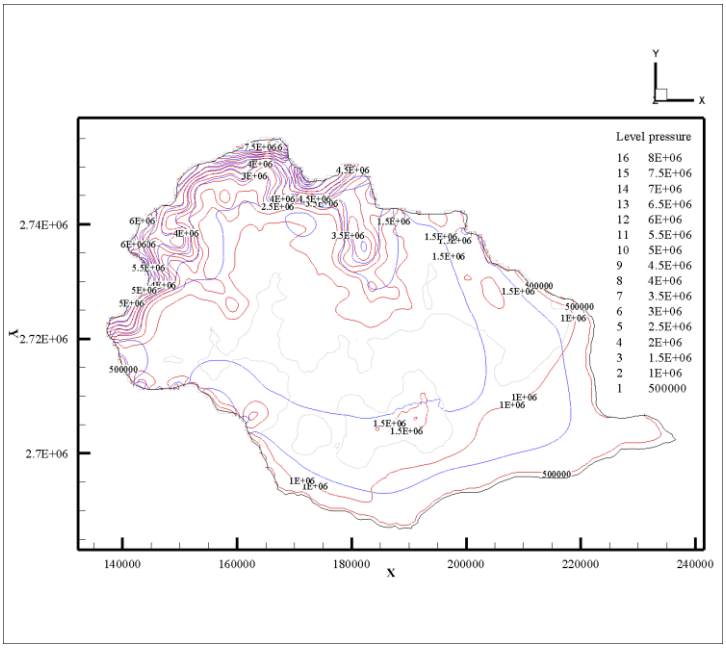


圖 4-89：案例3及案例4於z剖面之穩態壓力分布等值圖

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：藍線為案例3模擬結果；紅線為案例4模擬結果；黑線為模擬邊界；灰線為金門島及福建東南沿海之海岸線。

註(3)：Level表示等值線編號(-)；pressure表示壓力(Pa)。

4.5. 工程障壁參考演化分析

4.5.1. 緩衝材料與回填材料參考演化

深層地質處置的安全評估時間尺度長達100萬年，需發展處置設施演化分析技術，運用系統性分析方法了解處置設施總體演化，並分析各項環境條件對處置設施的長期演化影響。本項目工作藉由各項試驗建置、並於試驗過程中獲取相關數據成果，加以分析各類環境下影響過程與演化趨勢探討，包括：處置隧道封閉前初期之管流侵蝕作用試驗、未飽和水分傳輸作用及廢棄物罐破裂之特殊情節下於緩衝材料中產生之氣體遷移作用，以及熱-水-力耦合試驗。108年度工作成果說明如下：

(1) 管流侵蝕試驗：

本研究進行水平管流侵蝕試驗，分別使用4組不同的水溶液：去離子水、合成地下水、重量百分濃度1%的$NaCl/CaCl_2$鹽水，以及3.5%的$NaCl/CaCl_2$鹽水；水溶液注入速率固定為0.01 L/min；充填以MX-80膨潤土製成之膨潤土顆粒，粒徑為3/4 in至3/8 in、固定乾密度約1,600 kg/m^3，均勻填入試驗容器中；試驗時間為48 hr。執行緩衝材料水平管流侵蝕試驗所設計之容器，如圖 4-90所示，容器長度1 m，內直徑10 cm，2側裝設有防止試驗膨潤土漏出的金屬孔洞檔板，以及注入、流出水溶液的通道，設備組裝後的照片如圖 4-91。

各試驗初始條件記錄整理如表 4-51；將累積流失固體量以一次曲線回歸後，可得平均流失速率，試驗數據分析結果如表 4-52。試驗數據顯示，去離子水(試驗編號1)在試驗前期流失速率較低，中期時流失速率上升，至後期時趨於穩定；合成地下水(試驗編號2)於出流穩定後，流失速率較為固定。使用1%鹽水(試驗編號3)在出流約2 hr後，因試驗容器內管流通道封閉，造成容器入流的壓力建立，使出流端出流停止無法蒐集出流水，試驗無法繼續而中斷；使用3.5%鹽水(試驗編號4)則是在試驗時間約2 hr管流通道

封閉，入流壓力建立。試驗編號3總試驗時間為19 hr、編號4則為4 hr，此時入流水仍未到達出流端，因水份無法出流而試驗中斷。此現象與瑞典SKB文獻中的試驗結果類似(Sandén et al., 2008, p23)，該文獻之試驗尺寸、長度與本研究之試驗容器同等，同樣使用MX-80膨潤土壓實顆粒裝填，以3.5%的$NaCl/CaCl_2$鹽水作為注入的水溶液，流速同樣為0.01 L/min。圖 4-92為瑞典SKB報告內的試驗容器照片，可以見到膨潤土受壓推動造成的斷裂，圖4-93為本研究試驗編號4於試驗時間4 hr試驗中斷時的照片，照片中可見2處方形空洞處，位於容器上端，此為濕潤膨潤土受壓向右推擠時產生的空間，此現象與瑞典SKB文獻中試驗結果相似(Sandén et al., 2008, p23)。

瑞典SKB研究報告中，對於侵蝕試驗結果提出雙對數圖中的線性關係之模式(Sandén et al., 2008, p46-p48)，如式(4-7)：

$$m_s = \beta \times (m_w)^{\alpha} \qquad (4\text{-}8)$$

其中，

m_s=累計受侵蝕膨潤土量，[g]。

m_w=累計侵蝕水量，[g]。

α=線性關係之斜率參數，[·]。

β=特定累積水流量下的侵蝕基準參數，[·]。

如圖 4-94所示，試驗結果坐落於α=0.65、β=0.02–2.0的區間內。水平管流侵蝕試驗結果(試驗編號1及編號2)，累積出流水量對累積流失量之雙對數圖如圖 4-95所示，上下斜直線對應瑞典SKB研究報告之模式；圖中可見試驗數據坐落於瑞典SKB研究報告提出的模式區間內。

(2) 小型熱水力耦合試驗：

本研究延續107年度成果，完成小型熱水力耦合試驗，於膨潤土塊體內以加熱器模擬廢棄物罐衰變熱，膨潤土塊體外側注入純水

以模擬地下水入侵之行為，外圍以水浴控制試體之邊界溫度，試驗過程利用溫度、壓力、相對濕度感測器量測膨潤土試體受熱-水-力作用下，濕度分布及膨脹壓力變化，並針對試驗數據取得之濕度分布變化及膨脹壓力變化結果，並於試驗結束後，拆解設備量測膨潤土試體各部位之含水量，分析熱-水-力作用對水份傳輸之影響，以小型耦合試驗觀察之結果初步進行膨潤土受熱-水-力作用下之參考演化行為說明，圖 4-96為感測器位置之示意圖，試驗結果說明如下：

(a) 溫度變化說明：

在溫度方面，本實驗之加熱方式採用定功率加熱，溫度變化歷程為3階段，如圖 4-97之(a)：

(i) 加熱階段：加熱一段時間俟溫度達到穩定。

(ii) 關閉熱源與再次開啟熱源階段：為觀察各項感測器回復的情形及靈敏度，於試驗第115天將加熱器關閉，待溫度降至環境溫度23 ℃及各項感測器數值平穩後，於第155天時再次將加熱器開啟。

(iii) 注水階段：於試驗第196天進入注水階段。注水後，溫度顯著下降並漸趨平穩。

(b) 相對濕度變化說明：

相對濕度之變化依上述3階段之溫度變化歷程，如圖 4-97之(b)，分別說明如下：

(i) 加熱階段：因加熱造成的乾燥效應，此時加熱使水氣由內而外傳遞，使相對濕度下降，又W2較W3距熱源近，故較早發生濕度變化及平衡，且可於第76天時觀察出W3之濕度值始高於W2。

(ii) 關閉熱源與再次開啟熱源階段：關閉熱源後，初始降溫時水氣由外而內傳遞，將使濕度值下降，於第115天可觀察出此結果，而後因水氣持續向內傳遞，外部水氣流經感測器，使相對濕度上升；其後再次開啟熱源時，可

觀察出W2及W3濕度再次下降，由濕度變化趨勢中亦可得知愈接近熱源，濕度受熱的影響愈顯著。

(iii)注水階段：於試驗第196天進入注水階段後，相對溼度顯著增加，於加熱棒附近可看出因為注水而使相對濕度升高的情形，但注水後試體內部皆有溫度下降的現象，並漸趨平穩，而加熱棒附近因溫度下降，將降低土壤乾燥的能力。

(c) 壓力變化說明：

壓力之變化依上述三階段之溫度變化歷程，如圖 4-97之(c)，分別說明如下：

(i) 加熱階段：無顯著變化。

(ii) 關閉熱源與再次開啟熱源階段：無顯著變化。

(iii) 注水階段：進入注水階段後，壓力開始有顯著變化，且其變化有逐漸收斂之趨勢。最外側(S3)的壓力較中間(S2)低，原因有可能為外層的膨潤土填充料整體密度較低，外緣膨潤土吸水膨脹後，相較於靠近塊體中心的膨潤土有較多的延伸空間，故壓力較小。

(d) 含水量分布說明：

本試驗為模擬膨潤土受地下水滲透之情形，故在試驗腔體周圍預留4個注水孔(如圖 4-98藍色箭頭處)，並安裝4條直徑6 mm之PVC注水管與壓力體機控制器連接，以作為注水之管道，於試驗進行196天時開始注水並觀察其注水壓力，俟注水壓力達50 kPa後，將壓力體積控制器切換為壓力控制模式，使注水壓力維持在50 kPa，同時記錄每日流量。試驗進行至第288天時，因加熱器故障而結束試驗，將結束試驗設備拆解，並量測試驗試體之含水量。拆解後，觀察試體頂部之水份分布，如圖 4-98，圖中紅圈處為膨潤土顆粒(乾密度1,300 kg/m^3)及膨潤土塊體(乾密度1,600 kg/m^3)，可由目視觀察出靠近熱源(黃色虛線處)試體較乾燥(顏色較淺)，經由分層鑽孔取樣量測含水量分布如圖 4-99，由結果得知各層含

水量分布均勻，同一徑向位置不同方向之含水量亦相近。試體之初始含水量為9%，各量測位置之含水量皆高於初始含水量，且因水份由外側注水向內傳輸及溫度梯度之影響，外側(徑向位置8.4 cm處)為較低密度之膨潤土顆粒含水量最高，內側(徑向位置2.2 cm處)含水量最低。

(e) 緩衝材料未飽和水分傳輸參考演化之說明：

緩衝材料在未飽和條件下中之水傳輸，取決於溫度、緩衝材料之初始飽和度及密度。驅動緩衝材料水飽和的主要來源為處置孔中相對濕度的梯度，促使緩衝材料從圍岩中吸收水。而當緩衝材料吸水後，將導致體積膨脹，進而產生膨脹壓力，並使其內部孔隙率改變；當孔隙率改變時，其水力傳導係數及熱傳導度亦會隨之發生變化，由上述現象得知為一熱-水-力耦合作用。依小型耦合試驗之觀察，濕度分布及膨脹壓力演化可參考圖 4-100。

(3) 氣體滲透試驗：

本試驗延續採用107年度所建置之氣體滲透試驗設備，以乾密度1,600 kg/m^{3}之MX-80型膨潤土及混合30%砂之參考緩衝材料，進行預先飽和試驗及氣體傳輸試驗，探討試體於飽和狀態下之氣體傳輸特性。2組試驗分別以代號BuGas001及BuGas002表示，而試驗條件及試體資料如表 4-53及表 4-54所示。

(a) 預先飽和試驗：

預先飽和試驗開始，對試體2端通以循環水，試體表面快速吸水膨脹，故2組試體因膨脹產生之壓力於初期皆呈現十分明顯之上升趨勢，而後逐漸趨緩(如圖 4-101)，最後達壓力平衡則顯示試體已達飽和，純MX-80膨潤土試體之回脹壓力為5.95 MPa；混砂膨潤土試體之回脹壓力則為3.35 MPa，由吸水飽和曲線亦可觀察出純膨潤土達到飽和所需時間遠大於於混砂試體，亦顯示其阻止水分進入之效果優於混砂試體。

(b) 氣體傳輸試驗：

依據飽和膨潤土氣體遷移理論，回脹壓力為阻止氣體進入之抵抗力(Harrington, 2003, p25-p45)，因此可預期突破現象至少會發生在氣壓高於回脹壓力時，同時考量氣壓累積耗時對實驗期程之影響，故採用略低於回脹壓力之數值作為試驗初始氣壓。

(i) 純膨潤土試體：

氣體採用定流率方式注入，注入流率為0.006 ml/min，注氣過程中可觀察氣壓及應力值皆隨著氣體累積於前端而上升，如圖 4-102之(a)，試驗開始第16天，因實驗室發生跳電及泵浦洩漏檢修，至第22天回復試驗供氣，將泵浦氣壓調升回10 MPa，而後持續以0.006 ml/min之流率進行注氣；然而僅相隔4 hr，當氣壓達10.43 MPa時即發生激烈的突破現象，氣壓快速下跌至0.42 MPa，荷重元量測之應力值最低降至2.32 MPa，伴隨著出流端氣體快速洩出，而尖峰流量高於流量計之量測極限，因此，顯示為極值3.25 ml/min。此外，可觀察到氣體除水設備之吸水材料開始由藍色轉為紫色(如圖 4-103)，即氣體通過時挾帶出了一定量的水分。

突破現象過後，下游未再量測到氣體出流，上游之注入氣壓再度開始慢慢累積回升，顯示氣體通道已閉合；而軸向應力開始顯著回升，明顯高於氣壓回升趨勢，約於4天後趨緩達到平衡，應力值為5.1 MPa，推測無法再回升的部分可能是氣體通過時挾帶微量水分而出，造成塊體部分去飽和現象，因此，應力值略低於初始回脹壓力。將系統切換至供水模式，進行再次飽和，觀察應力變化情形；而應力確實在注水後再度上升，於5.48 MPa時達到穩定，如圖 4-102之(b)。

為觀察突破現象發生後之膨潤土塊體，是否因氣體通道曾經存在而改變材料均勻度，氣體通道成為緩衝材料之弱面，造成通道在受壓後會再度開啟，本試驗於再注水

飽和程序後，再度開始注氣試驗，流率同為0.006 ml/min。

氣壓與應力如同第1次注氣時開始緩慢上升，於注氣開始第21天，觀察到2次較明顯之短暫氣體出流，持續時間不長，分別於5 min內流出3.8 ml及15 min內陸續流出3.3 ml，所對應之氣壓無觀察到明顯變化。當氣壓升至26.62 MPa時，下游端量測到之少量氣體出流逐漸增加，但系統氣壓仍持續攀升，直至達27.06 MPa，下游端出現大量氣體洩出，氣壓亦快速跌落，而後於13.05 MPa至13.97 MPa間微幅變動，維持近似穩定之平衡狀態；而出流氣體流率則在突破當下監測到極值，後續進入氣壓近似穩定階段後，氣流呈現批次式的出流，當氣體開始流出時，前端氣壓便隨著開始微幅下降，而當氣體不再流出時，氣壓則再度慢慢累積上升，到達特定壓力時又會再度出現氣體出流，此現象藉由氣壓及土中應力之微妙平衡，使氣壓得以維持在近似穩態的階段。

為觀察飽和膨潤土之氣體滲透性是否隨注入流率而改變，將注入流率上調至0.03 ml/min，約1 hr後即出現再突破現象，當下壓力值為13.67 MPa，氣壓亦於短時間內洩降至大氣壓，未再出現近似穩態之階段。

(ii) 混砂膨潤土：

混砂膨潤土試體之試驗同樣以0.006 ml/min之流率注入氣體，氣壓隨著氣體量之累積而開始緩慢上升，於第11天時氣壓無預警洩降，並且未量測到出流氣體，因此，試驗暫停並開始進行檢修，於更換壓力計接頭部後已修正該問題，將注入端氣壓回調至暫停前之狀態後再次開始注氣試驗。

突破現象發生於12.58 MPa時，氣體傳輸狀態十分猛烈而迅速，於現象發生77 min之內，氣壓由12.58 MPa降至0.02 MPa。而後下游端未再量測到氣體流出，氣壓再度

隨著注氣量累積而緩慢上升，推測氣體通道已於壓力洩降後閉合。

而過程中應力值由11.74 MPa降至1.22 MPa，而觀察到應力降至最低點後回升的時間點較氣壓早30 min，可能再度佐證了應力於突破現象發生後先驟減又再度回復，是因被氣壓壓縮之膨潤土在解除高壓後開始膨脹，接觸到容器底端反力面，故量測到的應力回升，不一定與氣體通道閉合時機直接相關。

於第1次突破現象發生後，氣壓再度累積上升，於16.88 MPa時發生第2次突破，下游端之氣流同樣於氣壓洩降後停止排出，氣壓及應力再度累積上升(如圖 4-104)。

於第1次注氣試驗過後進行再注水飽和程序，以觀察突破現象發生後之混砂膨潤土塊體，是否因氣體通道曾經存在而改變材料均勻度，氣體通道成為緩衝材料之弱面。

於本試驗結果中觀察到，乾密度1,583 kg/m^{3}純膨潤土之回脹壓力為5.95 MPa，第1次突破壓力為10.43 MPa；有效黏土密度1,449 kg/m^{3}混砂膨潤土之回脹壓力為3.35 MPa，突破壓力為12.58 MPa。突破現象會發生於高於回脹壓力時，而混砂膨潤土試體之突破壓力略高於純膨潤土試體之原因，可能因純膨潤土試體注氣加壓途中曾持壓於10 MPa一段時間，便於再度開始注氣時發生突破。如同文獻所述(Harrington and Horseman, 2003, p12-p35)，氣體會在氣壓高於回脹壓力時開始進入膨潤土內部，而氣體通道之發展需要時間，因此，於持壓試驗中同樣可觀察到突破現象，但突破壓力可能低於階段性升壓或持續升壓之試驗組。

純膨潤土塊體之第1次突破壓力為10.43 MPa，經注水再飽和後之突破壓力上升至27.06 MPa，顯示出膨潤土於氣體通過

後，只要地下水持續飽和膨潤土，其自癒能力十分顯著，氣體通道未以明顯的弱面持續存在土中。

混砂膨潤土塊體第1次突破壓力為12.58 MPa，突破後通道閉合導致之第2次突破壓力為16.88 MPa(如表 4-55)，從數值上可推斷，即使經過1次突破現象，塊體內曾存在氣體通道，然而通道會在氣壓洩降至足夠低點後閉合，隨著壓力再次累積，再次突破之壓力值並未較第1次來得低，即使未經過再供水飽和，緩衝材料未因氣體遷移過程而產生永久通道或出現更容易被氣體穿透之弱面；此結果亦可能受注氣過程之極高氣壓影響，試體被壓密使強度上升，進而導致氣體更難突破緩衝材料，然而氣體通道之閉合仍顯著展現了緩衝材料之自癒能力。

於本試驗之4次突破現象中(含氣體通道擴張再突破)，存在3次之氣體於當下大量洩出後，於短時間內便不再出流，未出現一般岩石氣體滲透試驗預期之穩態流；純膨潤土試體第2次注氣階段之突破現象，則於突破當下出現極值後，開始進入氣壓近似穩定階段，氣流呈現批次式的出流，當氣體開始流出時，前端氣壓便隨著開始微幅下降，而當氣體不再流出時，氣壓則再度慢慢累積上升，到達特定壓力時又會再度出現氣體出流，此現象藉由氣壓及土中應力之微妙平衡，使氣壓得以維持在近似穩態的階段；然而該現象卻非正規乾燥材料氣體實驗之穩定狀態，雖然氣壓近乎穩定，氣流卻呈階段性的流出，推測是膨潤土中微小氣體通道的多次開啟與閉合，或是氣體通道幾何結構上的轉變與切換所造成(Harrington and Horseman, 2003, p34-p40)。

將純膨潤土塊體實驗組中，突破後近似穩態階段之量測數值帶入達西定律計算，求得氣體滲透性約介於3×10^{-22} m^2至3×10^{-21} m^2之間；然而從文獻及本試驗結果中可觀察到，相近壓力下之氣體滲透性卻於1個級數間跳動，而非單一常數，

可見飽和膨潤土之氣體傳輸特性與乾燥岩土材料存在顯著差異。

如同文獻所述(Horseman et al., 1999, p144-p148)，氣體可能並未流經飽和黏土之原有孔隙，因飽和黏土之密封性極佳，欲量測材料之氣體滲透性，必須於突破現象發生後，方能於下游端量測到氣體流率，進而計算滲透性，因此，氣體滲透性並非孔隙材料特性，即不隨供給壓力或氣體流率而改變，反而是依據氣體傳輸過程所產生之氣體通道數量、廣度、裂隙分布而變化之變數。

經由2組試驗之結果，本土建置之氣體滲透試驗可確實觀察記錄飽和緩衝材料之氣體傳輸過程，包含氣壓累積、突破現象發生及緩衝材料之自癒過程，並對其特性有初步瞭解，試驗中觀察到之現象可總結為下列6點：

(i) 當進入系統之氣體量高於氣體於飽和緩衝材料之擴散傳輸速率時，氣相會開始產生，致使氣壓累積上升。

(ii) 突破現象發生之氣壓需高於試體之回脹壓力。

(iii) 突破現象發生後，若洩降後之氣壓未低於回脹壓力，氣體持續從下游端流出，氣壓維持於近似穩態，然而氣體通道之幾何結構不穩定且易變動，因此，氣壓與氣流仍會微幅變動。

(iv) 突破現象發生後，當氣體快速排空，使氣壓低於回脹壓力時，氣體通道則會閉合，因氣體無法傳輸而使氣壓再度累積上升；無論純膨潤土亦或是混砂膨潤土材料，皆展現良好之自癒能力。

(v) 於氣體通道閉合後，氣體仍需累積至高於回脹壓力方能突破試體，未因氣體突破現象發生而產生永久通道，且未觀察到因通道曾存在而出現明顯弱面。

(vi) 氣體傳輸試驗過後，未發現試體有去飽和之現象，推測氣體不是以取代孔隙水之二相流進行傳輸，而是透過擴展氣體通道傳輸。

透過試驗之探討，可觀察到試驗使用之緩衝材料於乾密度1,600 kg/m^{3}條件下，氣體會在氣壓高於回脹壓力時以突破氣體通道之方式遷移，而氣體離開使氣壓降低後，當氣體通道內之氣壓不足以支撐時，氣體通道將閉合，緩衝材料回復原狀態，仍維持其遲滯功能，氣體僅能以擴散方式遷移；氣體需再次累積至高於緩衝材料回脹壓力時，才有機會再度擴展出氣體通道離開系統。

表 4-51：緩衝材料水平管流侵蝕試驗，各試驗初始條件

試驗編號	1	2	3	4
試驗水溶液	去離子水	合成地下水	1.0%鹽水	3.5%鹽水
溶液離子強度	0	2.54 mM	229 mM	800 mM
水溶液流率	0.01 L/min	0.01 L/min	0.01 L/min	0.01 L/min
膨潤土塊體重	7,512.2 g	7,723.8 g	7,625.7 g	7,678.7 g
膨潤土塊體含水率	12.0%	14.0%	12.9%	13.6%
膨潤土塊體總體乾密度	842 kg/m^3	847 kg/m^3	852 kg/m^3	839 kg/m^3

表 4-52：緩衝材料水平管流侵蝕試驗數據分析結果

試驗編號	1	2	3	4
試驗時間	48 hr	48 hr	19 hr	4 hr
開始出流時間	5.8 hr	5.6 hr	5.9 hr (約2 hr後停止出流)	-
流失固體重	254.2 g (3.38%)	73.9 g (0.957%)	0	-
平均流失速率	試驗前期(16 hr至24 hr)： 1.8 g/hr 試驗後期(28 hr至48 hr)： 9.8 g/hr	20 hr至48 hr： 1.7 g/hr	-	-

表 4-53：純膨潤土試體之試驗條件

編號	項目	條件
1	試驗編號	BuGas001
2	緩衝材料	MX-80型膨潤土
3	乾密度	1,583 kg/m^3
4	直徑	5 cm
5	高度	5 cm
6	飽和用水	離島結晶岩測試區地下水
7	溫度	30 °C
8	初始氣壓	5 MPa
9	注氣流率	0.006 ml/min、0.03 ml/min

表 4-54：混砂膨潤土試體之試驗條件

編號	項目	條件
1	試驗編號	BuGas002
2	緩衝材料	30%石英砂 70% MX-80型膨潤土
3	乾密度	1,678 kg/m^3
4	有效乾密度	1,449 kg/m^3
5	直徑	5 cm
6	高度	5 cm
7	飽和用水	離島結晶岩測試區地下水
8	溫度	30 °C
9	初始氣壓	2 MPa
10	注氣流率	0.006 ml/min

表 4-55：突破壓力統計表

突破壓力(MPa)				
-	第1次注氣		第2次注氣	
試驗編號	第1次突破	第2次突破	第1次突破	再突破
BuGas001	10.43	-	27.06	13.67
BuGas002	12.58	16.88	>27	-

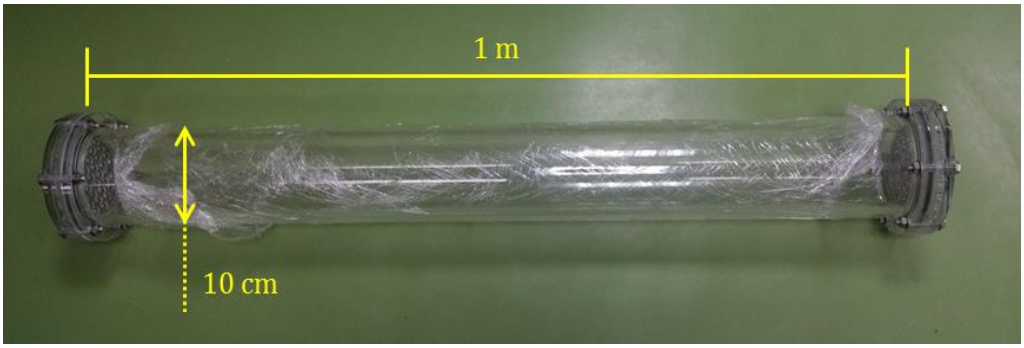


圖 4-90：水平管流侵蝕試驗容器照片

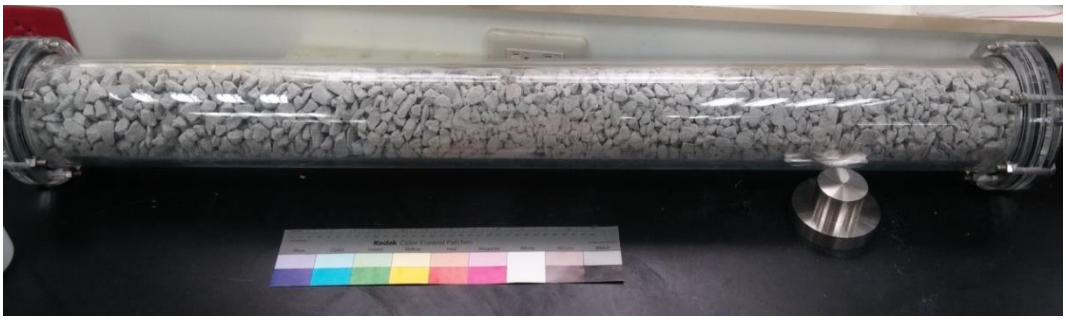


圖 4-91：裝填膨潤土顆粒之水平管流侵蝕試驗容器

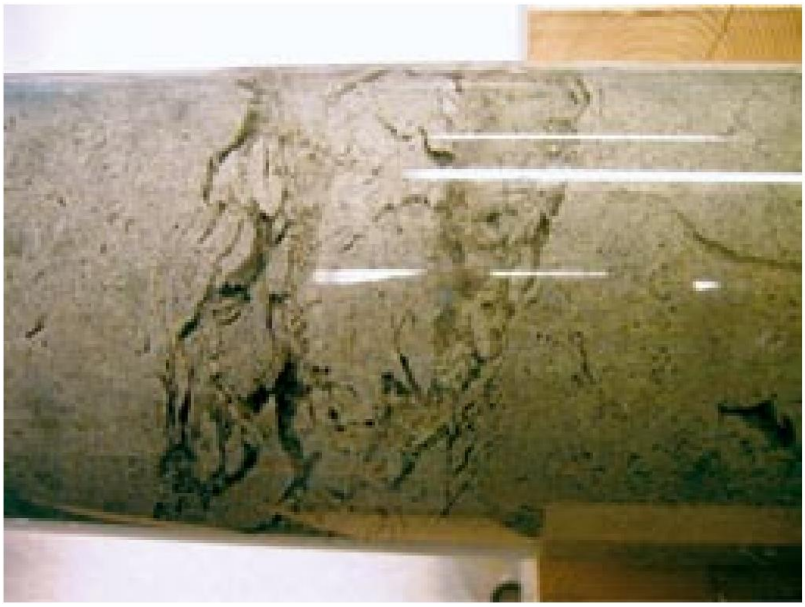


圖 4-92：水平管流侵蝕試驗，瑞典SKB文獻試驗照片

資料來源：Sandén et al. (2008, p23)



圖 4-93：水平管流侵蝕試驗，試驗編號4第4 hr，試驗容器照片

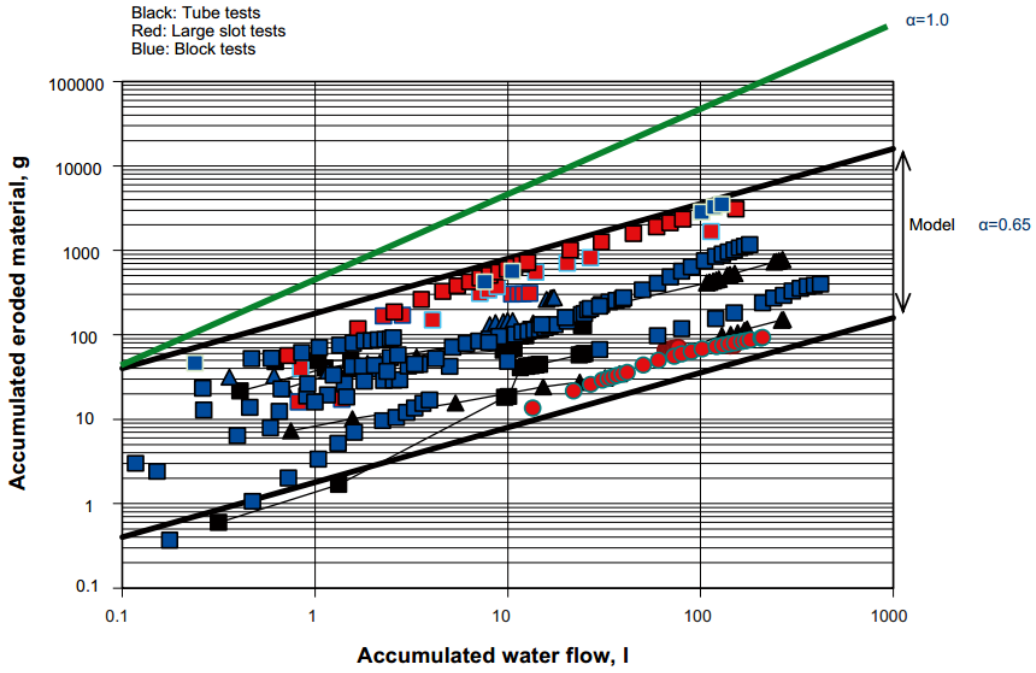


圖 4-94：水平管流侵蝕試驗，瑞典SKB文獻雙對數圖及線性關係之模式

資料來源： Sandén et al. (2008, p48)

中英文對照：Accumulated eroded material(累計材料侵蝕量)；Accumulated water flow(累計水流量)；model(模式)；Black(黑色標記)；tube test(管狀容器試驗)；Red(紅色標記)；Large slot test(大型間隙試驗)；Blue(紅色標記)；Block test(塊體試驗)。

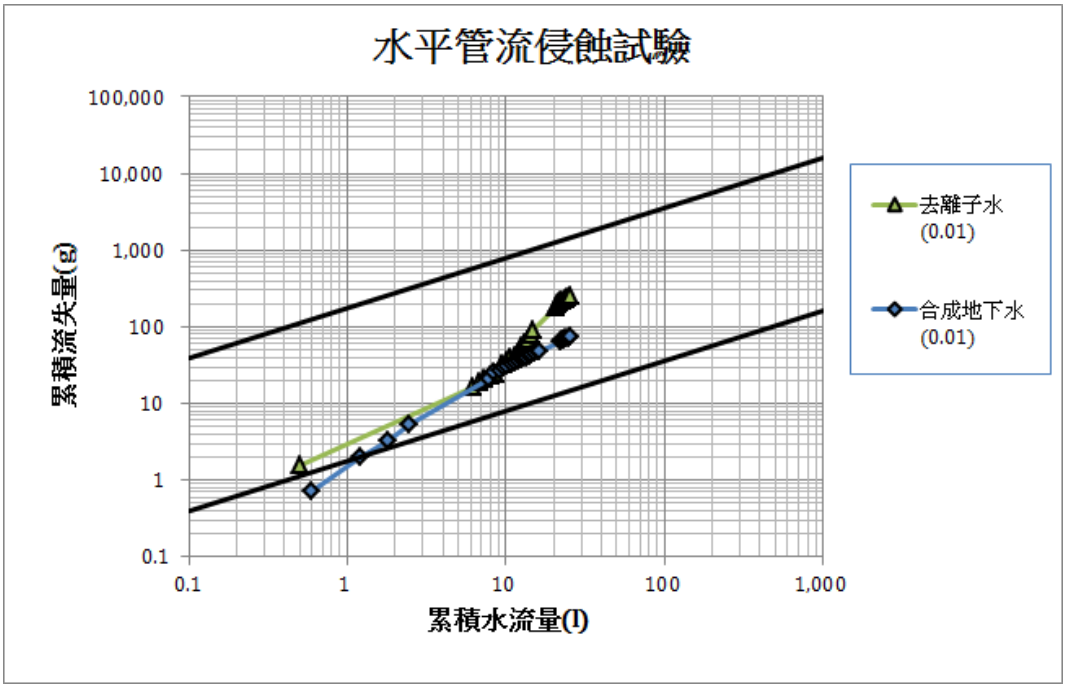


圖 4-95：水平管流侵蝕試驗，累積出流水量對累積流失量之雙對數圖

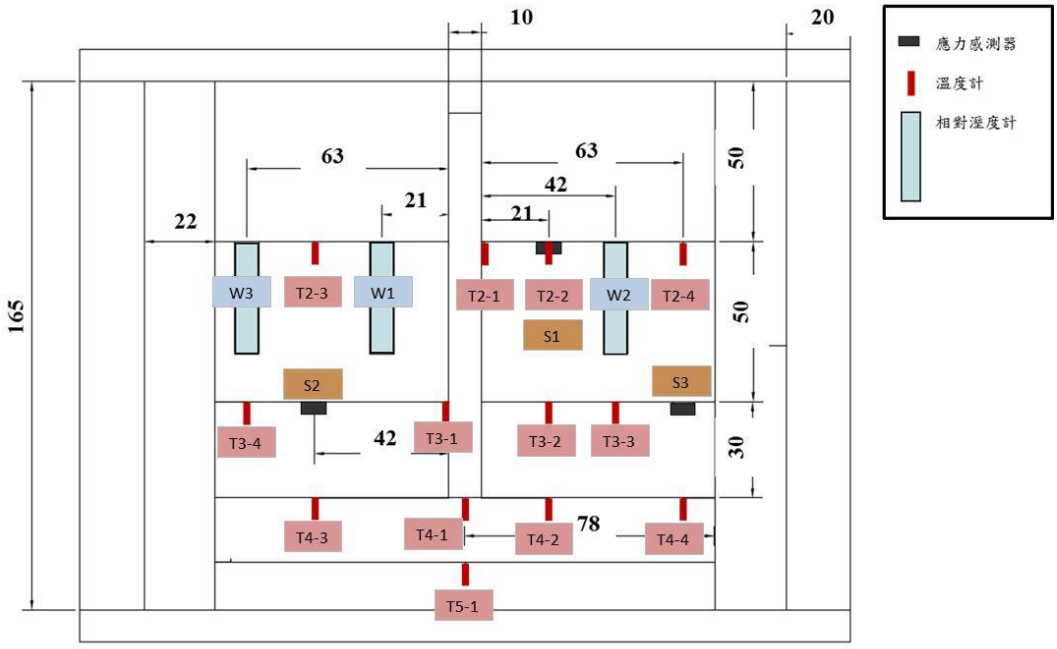
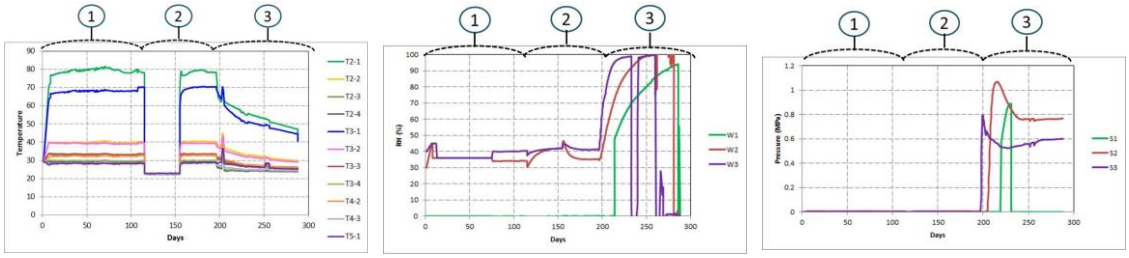


圖 4-96：感測器位置示意圖



(a) 溫度變化歷程　　(b) 濕度變化歷程　　(c) 壓力變化歷程

圖 4-97：小型熱水力耦合試驗歷程紀錄

中英文對照：Temperature(溫度)；Relative Humidity, RH(相對濕度)：Pressure(壓力)；Days(天數)。

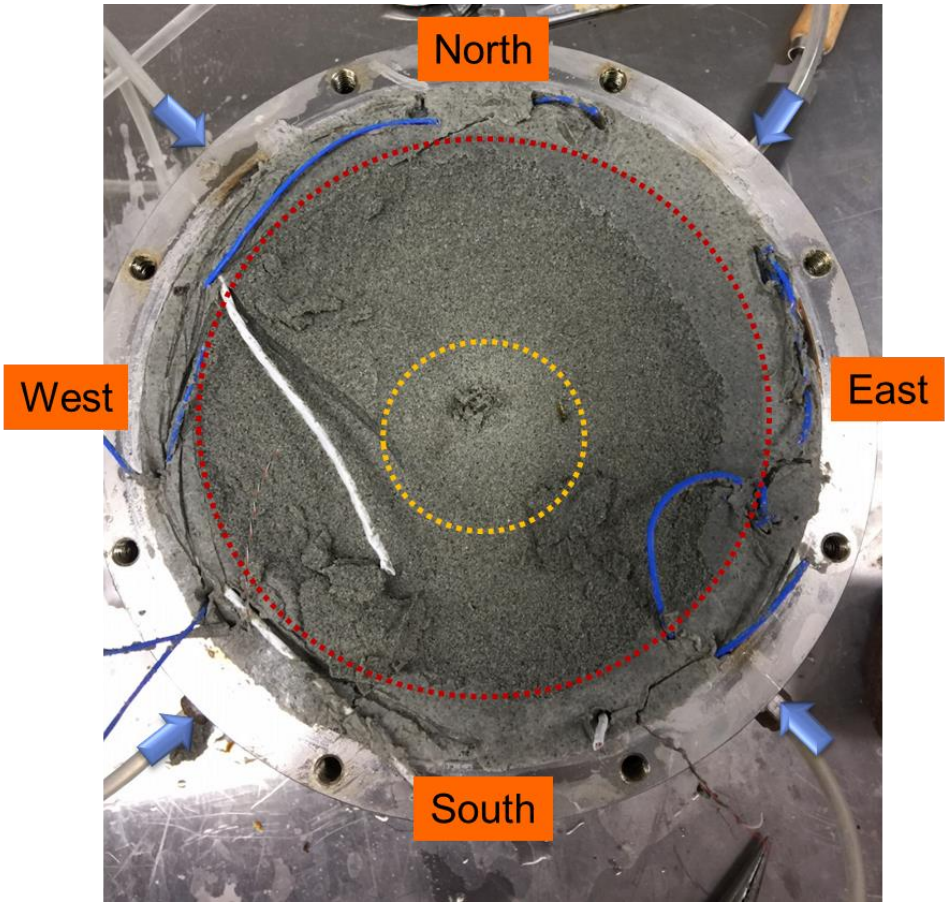
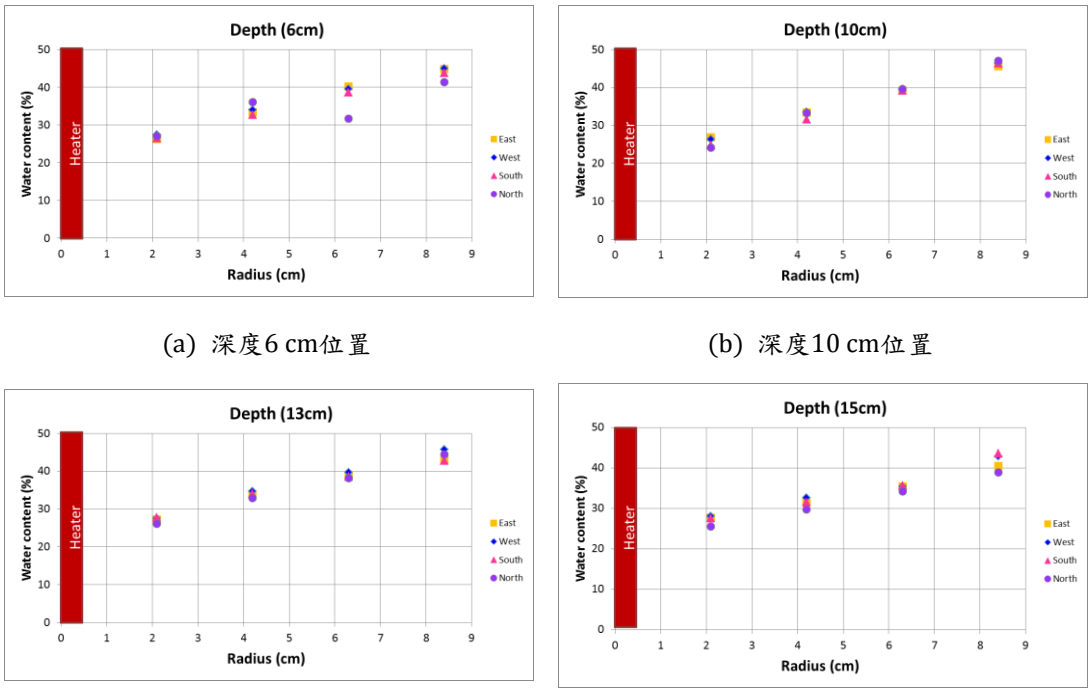


圖 4-98：小型耦合試體拆解後水份分布觀察

註：藍色箭頭為注水點位置；橘底框標示為取樣位置之徑向方向，North代表北側、South代表南側、West代表西側、East代表東側；紅色虛線為膨潤土顆粒與膨潤土塊體之邊界；黃色虛線為靠近熱源處較乾燥之區域。



(a) 深度6 cm位置　(b) 深度10 cm位置

(c) 深度13 cm位置　(d) 深度15 cm位置

圖 4-99：試體各層之含水量分布

註：深度為由試體頂部為起始0 cm往下之鑽掘深度；取樣位置之徑向方向，North代表北側、South代表南側、West代表西側、East代表東側。

中英文對照：radius(徑向距離)；Water content(含水量)。

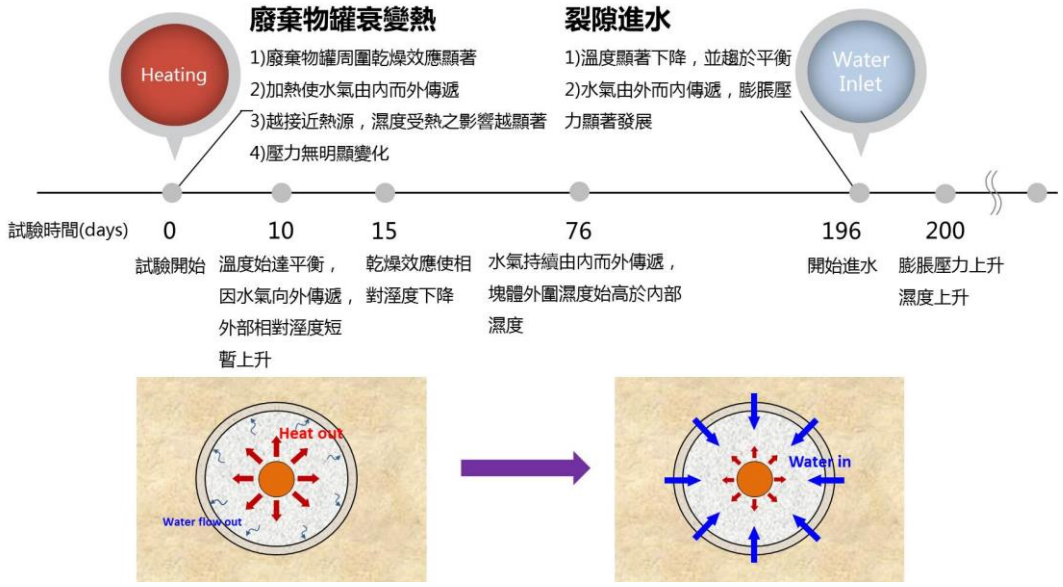
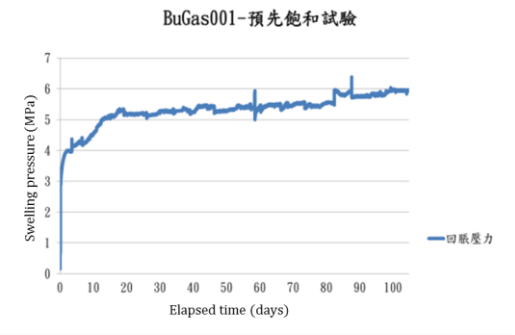
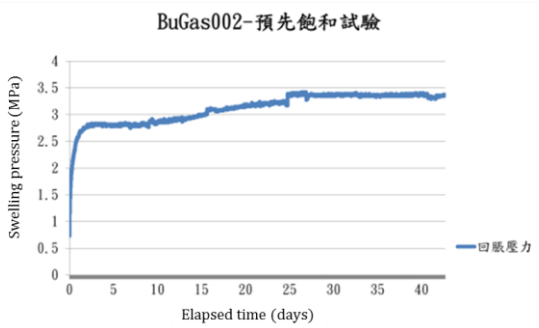


圖 4-100：小型耦合試驗濕度分布及膨脹壓力演化過程



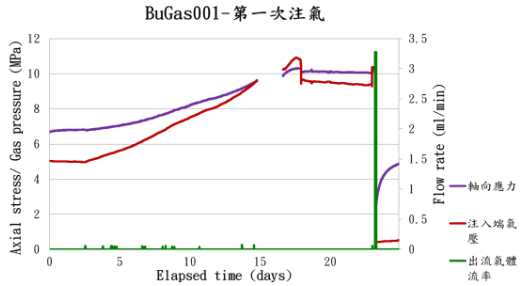
(a) 純膨潤土試體



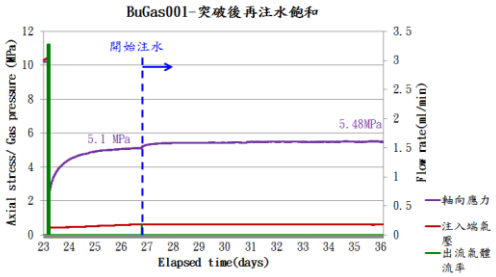
(b) 混砂膨潤土試體

圖 4-101：預先飽和試驗之回脹壓力

中英文對照：Elapsed time(試驗歷時)；Swelling pressure(回脹壓力)。



(a) 第1次注氣程序



(b) 突破後注水再飽和之變化

圖 4-102：純膨潤土塊體氣體傳輸試驗程序

中英文對照：Axial stress(軸向應力)；Elapsed time(試驗歷時)；Flow rate(流率)；Gas pressure(氣壓)。



圖 4-103：氣體除水設備吸水材料飽和變色

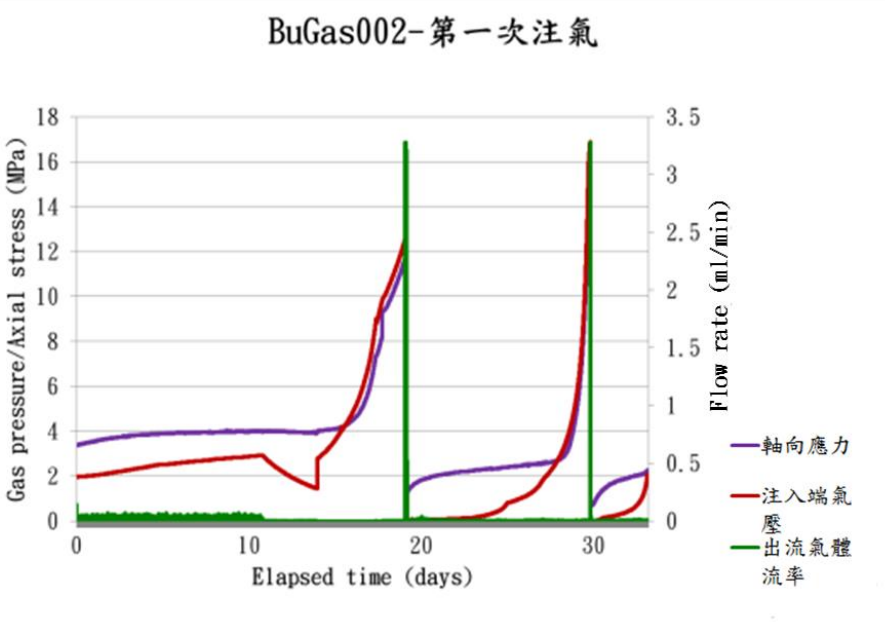


圖 4-104：混砂膨潤土第1次注氣試驗

中英文對照：Axial stress(軸向應力)；Elapsed time(試驗歷時)；Flow rate(流率)；Gas pressure(氣壓)。

4.5.2. 廢棄物罐參考演化

為瞭解廢棄物罐在長久的處置時間可能受到之各項作用，本項工作以演化時間框架探討廢棄物罐受周圍處置環境之影響，包括地下水造成的腐蝕作用、周圍裂隙位移作用造成的剪力作用等。在中長期技術發展策略上，希冀透過本項技術發展，可提供後續進行情節發展與案例建構之依據。

本期成果與SNFD2017差異性，在剪力失效評估方面，以蒙地卡羅法進行地下處置隧道與裂隙截切分析，裂隙樣本統計分布由DFN參數集描述，DFN實現值由200次增加250倍至50,000次，並且探討不同長度處置隧道的差異。腐蝕失效評估依據影響長期腐蝕作用之環境演化概述，考慮2個時期之地下水流場、地下水化學組成及處置設施中緩衝材料受侵蝕之變化，藉由緩衝材料侵蝕時間及廢棄物罐腐蝕時間，得到每個處置孔之廢棄物罐腐蝕失效時間。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

(a) 廢棄物罐與裂隙截切之剪力失效評估：

本項工作使用美國Itasca公司所發展的三維分離元素法軟體(3 dimensional distinct element method，以下簡稱3DEC)，版次為5.2。目前3DEC已應用於瑞典最終處置設施，用於分析地震所引發的不連續面位移，以及工程障壁的熱-力學分析。是國際上經常應用之軟體，具高可靠度與高信心度(Hicks, 2005, ch3.9；Barton, 2013, p259；Kana et al., 1991, p86)。

(b) 廢棄物罐之腐蝕失效評估：

本項工作以試算表涵蓋地下水流場及地下水化學組成等模擬成果，計算求得廢棄物罐銅殼腐蝕深度。地下水流場使用DarcyTools建立含鹽度之地下水流模擬技術，地下水化學組成使用PHREEQC進行水質模擬計算，PHREEQC為美國地質調查所(USGS)所開發，可於官網免費下載使用。

(2) 參數需求說明：

(a) 廢棄物罐與裂隙截切之剪力失效評估：

剪力失效評估參數需求如表 4-56。剪力位移對於廢棄物罐造成影響的先決條件是裂隙與廢棄物罐截切、且裂隙位移量超過處置孔容許位移量限值。因此，必須考慮地下設施配置設計，使用離散裂隙網(Discrete Fracture Network, DFN)進行裂隙與地下設施配置截切分析，遵循廢孔準則，最後考慮SNFD2017(台電公司，2017，ch5.4.1)廢棄物罐安全功能Can3-抵抗剪力負載，計算廢棄物罐剪力失效率(裂隙累積剪力位移超過5 cm即判斷為失效)。

地下設施配置設計如圖 4-65，包括共2個處置區域，每個處置區域有52條處置隧道，西(左)邊處置區域處置隧道長度250 m(每個處置隧道可置放25個處置孔)，東(右)邊處置區域處置隧道長度300 m(每個處置隧道可置放30個處置孔)，單一處置隧道之處置孔配置如圖 4-105，合計總處置孔數2,860個，處置隧道間距40 m，處置隧道方位設計為N60°W，處置孔間距9 m。

處置孔與裂隙截切分析，使用數值分析軟體3DEC，輸入地下設施配置設計幾何三維模型及至少3組DFN實現值，並假設裂隙為圓形極薄平面進行幾何分析，DFN參數如表 4-57，參考SKB TR-10-21報告(SKB, 2010b, ch5.1)在截切分析最佳化設定中，為考量可以完全貫穿處置隧道的最小裂隙半徑，因此，將r_{min}改為2.88 m，而最大裂隙半徑則依地質調查可以輕易偵測到的最小裂隙，r_{max}改為250 m。

(b) 廢棄物罐之腐蝕失效評估：

腐蝕失效評估參數需求須來自第4.3.2節處置設施設計及第4.4.1節地下水流演化分析之分析成果，包含每個處置孔之等效初始通量、水流速、水力傳導係數、地下水pH值、地下水鐵離子濃度。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 廢棄物罐與裂隙截切之剪力失效評估：

在廢棄物罐剪力失效率分析中，截切邏輯可分為2種：

(i) 第1種分析方法為目前瑞典SKB、芬蘭Posiva與我國(SNFD2017)所使用的，其假設裂隙半徑在100萬年內，即使裂隙面發生剪力位移，裂隙半徑不會生長變長，這些裂隙位處於地殼相對較穩定，地震較少的區域，如圖4-106 (a)。

(ii) 第2種分析方法為裂隙半徑在100萬年內會隨著裂隙面發生位移而生長變長，因為裂隙受地殼變形或地震影響的程度較高，如圖 4-106 (b)。

本研究使用第1種分析方式進行廢棄物罐剪力失效率評估，當廢棄物罐受到裂隙累積位移量達5 cm時，即為失效。依據第4.3.2節地下設施配置設計成果，最大殘餘剪力位移量如表4-48，假設裂隙剪力位移累積量隨時間的變化呈線性，可以式(4-8)求解裂隙累積位移量達5 cm的時間。

$$d(t) = \frac{t \cdot d_p}{10^6} \tag{4-9}$$

其中，

t =時間，[s]。

d_p =百萬年時裂隙中心的最大殘餘剪力位移量，[m]。

地下設施配置設計一共有2,860個廢棄物罐，假設每個廢棄物罐的失效事件獨立，使用二項分布(binomial distribution)，可以計算地下設施配置設計不同廢棄物罐數破壞之機率，如式(4-9)：

$$f(k;n,p) = \binom{n}{k} p^k * (1-p)^{n-k} \tag{4-10}$$

其中，

k =破壞罐數，[罐]。

n =處置設施之廢棄物罐數量，[罐]。

p =廢棄物罐剪力失效率，[-]。

對於廢棄物罐剪力失效評估分析，為了瞭解EFPC廢孔準則降低廢棄物罐剪力失效的效果，案例如表 4-58。

(i) 案例1分析結果：

廢棄物罐剪力失效最早的時間點約在46萬年後，剪力失效機率約百萬分之一，隨著時間增加，剪力失效機率逐漸提升至千分之一，如圖 4-107。此時間點導致廢棄物罐失效的裂隙屬於叢集1，即為表二中之裂隙叢集1，極點走向(trend)為65°，傾沒角(plunge)為17°。相較於其他裂隙叢集，叢集1的剪力位移量受濱海斷層影響最大，累積剪力位移量最快達5 cm。此外，該失效率不受隧道長度的影響(隧道長度250 m和300 m的失效率沒有顯著差異)。不使用EFPC的地下設施，廢棄物罐破壞罐數機率分布如圖 4-108，另廢棄物罐剪力失效期望值如圖 4-109。

(ii) 案例2分析結果：

廢棄物罐剪力失效時間點延後至83萬年，機率約百萬分之一，如圖 4-110。結果顯示隧道長度250 m和300 m的失效率最早時間點不同，本研究推測因為使用EFPC廢孔準則導致失效事件機率大幅降低，當事件機率極低時使用蒙地卡羅模擬方法不容易取得該事件樣本，在有限的實現次數下統計誤差增加所造成。使用EFPC後，因為250 m處置隧道和300 m處置隧道的截切分析結果有差異，因此，在計算廢棄物罐破壞數量時，分成2個處置區塊計算，300 m處置隧道的處置區塊有1,560個處置孔，廢棄物罐破壞罐數機率分布如圖 4-111；250 m處置隧道的處置區塊有1,300個處置孔，廢棄物罐破壞罐數機率分布如圖 4-112，另廢棄物罐剪力失效期望值如圖 4-109。

(iii) 案例3分析結果：

不同裂隙叢集有不同程度的剪力失效率貢獻，比較圖4-113的結果，可看出裂隙叢集造成的剪力失效率的貢獻和裂隙剪力位移量正相關，其中裂隙叢集5累積剪力位移量相當小，在百萬年內皆不會導致廢棄物罐剪力失效。而使用EFPC廢孔準則後，僅剩叢集2和叢集3會產生剪力失效，推測原因為裂隙極點接近隧道長軸方向時，較能規避EFPC廢孔準則，如圖 4-114。

(b) 廢棄物罐之腐蝕失效評估：

本研究係針對地下設施配置設計、緩衝材料與回填材料受侵蝕變化與地下水流場變化，作為廢棄物罐參考演化之腐蝕影響參數來源，經由腐蝕作用定性分析與腐蝕作用定量計算，完成廢棄物罐參考演化之完整腐蝕評估，評估案例如表4-59。

(i) 步驟1分析結果：

造成廢棄物罐全面腐蝕作用的腐蝕劑來源，可區分為幾項如表 4-60；其中，空氣輻射分解與水輻射分解之作用時間約為封閉後300年；封閉前大氣中的氧之作用時間為封閉前3年，因作用時間有限歸類為有限的腐蝕作用。此外，如封閉後初期受困的氧氣之氧氣量有限；而黃鐵礦數量少，則產生硫化物亦有限；硫酸鹽還原菌如產生的硫化物數量亦有限，這些腐蝕作用會因腐蝕因子有限亦歸類為有限的腐蝕作用。長期的腐蝕作用將會因無氧時期地下水中的腐蝕劑長期透過擴散或平流方式到達廢棄物罐表面，造成廢棄物罐長期的腐蝕。

(ii) 步驟2分析結果：

有限腐蝕作用的定量計算結果及與SNFD2017差異如下：

(*) 空氣輻射分解：

空氣輻射分解是用質量平衡(G values求出腐蝕劑總量)方法計算，腐蝕深度為0.00000126 mm。此種腐蝕作用受廢棄物罐高度由4.835 m增加為4.905 m之影響，但影響甚微。

(*) 水輻射分解：

水輻射分解是用質量平衡(廢棄物罐周圍水體求出腐蝕劑總量)方法計算，腐蝕深度為0.0114 mm。此種腐蝕作用受廢棄物罐高度由4.835 m增加為4.905 m之影響，但影響甚微。

(*) 封閉前大氣中的氧：

封閉前大氣的氧是用大氣腐蝕速率經驗值方法計算，腐蝕深度為0.0015 mm；此腐蝕作用不受處置孔高度、隧道間距、廢棄物罐高度之參數影響。

(*) 封閉後初期受困的氧氣：

封閉後初期受限的氧是用質量平衡方法計算，受置孔高度由7.83 m增加為8.155 m、隧道間距由6 m增加為9 m、廢棄物罐高度由4.835 m增加為4.905 m之影響，腐蝕深度由0.1020 mm增加為0.1034 mm。

(*) 黃鐵礦的硫化物：

黃鐵礦的硫化物是用質量傳輸(質量平衡)方法計算，腐蝕深度為0.1147 mm。此腐蝕作用受廢棄物罐高度由4.835 m增加為4.905 m之影響，但影響甚微。

(*) 硫酸鹽還原菌產生的硫化物：

硫酸鹽還原菌產生的硫化物，是用文獻HCB實驗之Cu_xS生成速率方法計算(Masurat et al., 2010, p61)，腐蝕深度為0.177 mm；此種腐蝕作用不受處置孔高度、隧道間距、廢棄物罐高度之參數影響。

(iii) 步驟3分析結果：

有限腐蝕作用之全面腐蝕加總深度為0.408 mm，除了全面腐蝕之外，局部腐蝕可能發生在有氧環境，其中封閉前大氣中的氧所造成之影響甚微，所以，封閉後初期受困的氧氣為可能造成局部腐蝕的主要環境。局部腐蝕的評估以較常見之經驗值，局部腐蝕可額外增加全面腐蝕深度的1倍，若以非常保守之孔蝕比值進行評估，局部腐蝕額外造成的腐蝕深度為全面腐蝕深度的4倍(King and Litke, 1992, p277；King et al., 2001, p132)，因此，在非常保守之狀況下，封閉後初期受困的氧氣造成額外增加之局部腐蝕深度為0.4136 mm。

銅殼厚度49±0.3 mm，考慮有限腐蝕作用之總全面腐蝕深度0.408 mm與非常保守之狀況下局部腐蝕深度為0.4136 mm，因此，在長期腐蝕作用定量計算中，保守假設銅殼剩餘厚度為47 mm，以銅殼剩餘厚度進行後續長期腐蝕作用之計算。

廢棄物罐腐蝕速率考慮「第4.4.1節地下水流場演化分析」僅針對當代海平面及海平面下降120 m，分別代表整個12萬年冰川循環中第0年與第10萬年。由於冰川循環，各處置孔依時間點有不同之廢棄物罐腐蝕速率及腐蝕劑濃度，腐蝕計算以1萬年為單位，在12萬年期間，已知AB兩點之資料，以AB兩點距離中心，做為資料分界，靠近A點部分皆以A點資料做為資料來源，靠近B點部分皆以B點資料做為資料來源。如第0年與第10萬年之時間間距，第1萬年到第5萬年使用當代海平面的水文地質資料，第6萬年到第10萬年使用海平面下降120 m的水文地質資料；第11萬年與第12萬萬年之時間間距，第11萬年使用海平面下降120 m的水文地質資料，第12萬年使用當代海平面的水文地質資料，以此類推後續冰川循環所使用的水文地質資料。

現階段，由工研院所提供之資訊及表二資料(林鎮國等人，2015)，其所示離島結晶岩測試區地下水成分，為各鑽孔在各深度段取樣的分析結果，以同地下深度地下水成分平均值表示。由於處置孔位置與鑽孔調查之位置不同，無法直接使用鑽孔資料，而需推估每個處置孔位置地下水化學組成，以供廢棄物罐銅腐蝕計算使用。故以DarcyTools所提供之地下水鹽度計算結果，配合PHREEQC數值軟體，以質量平衡之方法，將海水與地表面淡水以適當的質量分率混染，進行各處置孔的地下水化學成分計算。由於離島結晶岩測試區地下水化學特徵混染與演化模式，過去並未有明確的研究，因此，海水與淡水鹽度參考工研院表二(林鎮國等人，2015)提供之全球平均海水及全球平均河水。

若暫不考慮礦物相溶解問題，將上述資料輸入PHREEQC後，即可取得參考水體物種的分布狀況與濃度，如圖4-115與圖 4-116，再使用PHREEQC MIX模組功能，可計算此2參考水體於不同混染比例下可能產生之物種，後續配合各物種分子量即可以計算各物種濃度下的鹽度。完成後即可根據DarcyTools鹽度計算成果，使用上述2端成分，依不同質量分率混染，求得該網格之地下水化學成分布狀況。

再以不同質量分率混染而來，最後混染結果之鹽度，將與DarcyTools計算求得之地下水鹽度比較確認符合，以完成地下水化學成分計算。

由DarcyTools地下水鹽度模型計算成果，處置區域可劃分為25個含地下水鹽度網格，又考慮設計配置輸出結果，該區域共有2,860個處置孔平面位置，詳如圖 4-117至圖 4-118。因此，需計算各處置孔所在網格之鹽度。本章節使用Arc-GIS軟體的spatial-join模組，將加密後網格與處置孔位置連結，在確定全球平均海水與全球平均河

水混染計算結果，即可以計算各處置孔位置之地下水化學成分，硫化氫濃度與陽離子強度的分布狀況詳如圖4-119至圖 4-120。

關於硫化氫濃度計算合理性，可藉由PHREEQC驗算工研院表二水質分析結果比較，如表 4-61。以PHREEQC資料庫驗算表二KM5平均水質結果，求得HS^-濃度約為1.917×10^{-5} mole/L，若保守估計Stot均為HS^-供應，此結果與KM5所示Stot濃度含量屬同一級數，故評估使用PHREEQC計算現階段HS^-濃度作法屬合理。

在Darcy tool產出之當代與海平面下降120 m流場中，2,860個處置孔位置均各自計算出2組水質結果，如下說明：

當代流場：

(*) 鹽度(‰)：

最大值約0.25，最小值約0.13。

(*) 硫化氫濃度(mol/L)：

最大值約3.504×10^{-4}，最小值約2.779×10^{-4}。

(*) 陽離子強度(mM)：

最大值約5.540，最小值約3.250。

(*) 二價鐵離子濃度(mol/L)：

最大值約1.17×10^{-7}，最小值約4.72×10^{-8}。

(*) 三價鐵離子濃度(mol/L)：

最大值約1.96×10^{-27}，最小值約6.38×10^{-28}。

(*) pH值：

最大值約7.229，最小值約7.89。

海平面下降120 m流場(地下水質均以全球平均河水計算)：

(*) 鹽度(‰)：

0.105。

(*) 硫化氫濃度(mol/L)：

約 6.049×10^{-5}。

(*) 陽離子強度(mM)：

約 1.396。

(*) 二價鐵離子濃度(mol/L)：

約 2.01×10^{-7}。

(*) 三價鐵離子濃度(mol/L)：

約 3.77×10^{-21}。

(*) pH值：

表二並未敘明全球平均河水pH值，以pH7作計算。

腐蝕評估計算結果資料以海平面0 m之水文地質資料中的等效初始通量進行由大到小排序(未廢孔)，廢孔後前5高的等效初始通量之孔位分別為DH1744、DH-2142、DH-29、DH-1591、DH-1602。計算中考慮海平面0 m及-120 m之水文地質資料、水文地質資料影響之地下水組成、地下水組成影響之緩衝材料侵蝕速率。

針對緩衝材料受侵蝕變化，依照近期文獻進行參數探討。將早期SKB TR-10-64報告(SKB, 2010e, p24)之 $R_{Erosion} = A \cdot \delta \cdot v^{0.41}$，與近期SKB TR-16-11報告(SKB, 2017, p29)之流速與膨潤土質量損失率進行比對，若以SKB TR-10-64報告之方式去計算膨潤土質量損失率，可能會低估。

如圖 4-121，將SKB TR-16-11報告之時間與膨潤土質量損失率，緩衝材料侵蝕速率考慮陽離子強度0.1 mM至0.5 mM、0.5 mM至2 mM、2 mM至4 mM、4 mM至8 mM區間之影響。圖 4-122為時間及緩衝材料重量損失之關係圖，當緩衝材料重量損失達到1,200 kg，即達到平流條件。

表 4-62為廢棄物罐之銅殼腐蝕速率表，當緩衝材料重量損失未達到1,200 kg之時間點，以擴散條件進行腐蝕評估，具有較低的腐蝕速率；當緩衝材料重量損失達到1,200 kg之時間點，即以平流條件進行腐蝕評估，有較高的腐蝕速率。圖 4-123為時間與腐蝕深度之關係圖，最大之銅殼腐蝕深度發生在孔位DH-2142，在31萬年因為DH-2142之緩衝材料侵蝕已達到平流條件，因此銅殼腐蝕量有較顯著之增加趨勢，經由評估DH-2142經過百萬年的銅殼腐蝕量為7.79 mm。

表 4-56：參數需求表

項次	參數名稱	需求細節內容
1	離散裂隙網路模型之裂隙強度	P_{32}
2	離散裂隙網路模型之裂隙尺寸分布	裂隙的直徑、裂隙直徑最大值及最小值與尺寸分布。
3	離散裂隙網路模型之裂隙空間分布	裂隙領域空間分布。分布形態：均勻分布或碎形分布。
4	離散裂隙網路之裂隙位態分布	裂隙叢集分類、平均傾向、平均傾角與變異性。
5	地下處置設施配置設計	三維CAD檔，處置隧道、處置孔與廢棄物罐尺寸。
6	地震引致裂隙剪力位移量	濱海斷層地震之影響。
7	廢棄物罐抗剪安全功能指標	剪力位移量設計前提

表 4-57：離島結晶岩測試區的裂隙領域分類及DFN參數集

裂隙領域	FDMB
	深度> 70 m
裂隙叢集(極點方位角，極點傾沒角)	叢集1 = (65, 17)，費雪分布 $(\theta, \kappa = 20)$, $P_{32,rel}$=15%
	叢集2 = (344, 38)，費雪分布 $(\theta, \kappa = 18)$, $P_{32,rel}$=24%
	叢集3 = (281, 29)，費雪分布 $(\theta, \kappa = 16)$, $P_{32,rel}$=30%
	叢集4 = (174, 22)，費雪分布 $(\theta, \kappa = 17)$, $P_{32,rel}$=10%
	叢集5 = (175, 75)，費雪分布 $(\theta, \kappa = 19)$, $P_{32,rel}$=21%
	費雪分布 $f(\theta, \kappa) = \frac{\kappa sin\theta e^{\kappa cos\vartheta}}{e^{\kappa} - e^{-\kappa}}$; θ = 極點角度標準差 κ = 離散參數
裂隙強度	$P_{32} = 0.3\ \mathrm{m}^{-1}$
裂隙大小	冪次律：$k_r = 2.6, r_0 = 0.1$ m, $r_{min} = 5.64$ m, $r_{max} = 564$ m
	$P(R \geq r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{k_r}$, $P_{32}(r_{min}, r_{max}) = \frac{[{r_{min}}^{2-kr} - {r_{max}}^{2-kr}]}{{r_0}^{2-kr}} P_{32}(r_0, \infty)$ R =裂隙半徑 r_0 =最小半徑 r =任何裂隙半徑介於r_0至∞ k_r =碎形維度的指數值， 亦可稱為裂隙半徑的尺度指數 $P(R \geq r)$ =裂隙半徑R大於或等於r時的機率值 $P_{32}(r_{min}, r_{max})$ =岩體內的裂隙強度，裂隙半徑是介於 r_{min}至r_{max}的範圍
裂隙位置	均勻分布

資料來源：林鎮國等人(2015，p2-5)

表 4-58：廢棄物罐剪力失效評估之案例編號與說明

案例編號	案例說明
Case1	評估處置隧道250 m及300 m位置並代入5個叢集以不使用EFPC廢孔準則計算廢棄物罐剪力失效率、評估廢棄物罐破壞罐數機率分布，以及期望值分析。
Case2	評估處置隧道250 m及300 m位置並代入5個叢集使用EFPC廢孔準則計算廢棄物罐剪力失效率、評估廢棄物罐破壞罐數機率分布，以及期望值分析。
Case3	各別代入評估叢集1至叢集5於使用與不使用EFPC廢孔準則條件下，各叢集對於剪力失效比例。

表 4-59：廢棄物罐腐蝕失效評估之案例編號與說明

案例編號	案例說明
Step 1	腐蝕作用定性分析：針對空氣輻射分解、水輻射分解、封閉前大氣中的氧、封閉後初期困的氧氣、黃鐵礦的硫化物、硫酸鹽還原菌產生的硫化物、地下水的腐蝕劑等進行研析與定性分析。
Step 2	有限腐蝕作用定量分析：採用質量平衡(G values求出腐蝕劑總量)方法計算空氣輻射分解、水輻射分解、封閉前大氣中的氧、封閉後初期受困的氧氣等各項因素所造成之有限腐蝕作用定量計算。
Step 3	長期腐蝕作用定量分析：考量地下水流場演化分別進行「當代環境」、「海平面下降120 m」條件並且納入地下水化學邊界條件進行定量分析。

表 4-60：廢棄物罐全面腐蝕劑來源說明

腐蝕劑來源	說明
空氣輻射分解	緩衝材料在未飽和期間，潮濕空氣可能會存在於廢棄物罐與緩衝材料之間，經加馬輻射照射後會形成硝酸，最終溶於飽和之緩衝材料孔隙水中，造成廢棄物罐腐蝕。
水輻射分解	在飽和之後，輻射照射廢棄物罐附近的水，將導致腐蝕劑的形成，而這些腐蝕劑亦會導致廢棄物罐腐蝕。
封閉前大氣中的氧	在處置隧道封閉之前，廢棄物罐會有一段時間曝露於大氣環境中，這段時間由氧氣所造成的腐蝕產物為氧化銅。
封閉後初期受困的氧氣	在處置隧道封閉初期，氧氣為廢棄物罐腐蝕之最主要原因，其來源就是存在於緩衝材料與回填材料孔隙中的空氣。
黃鐵礦的硫化物	緩衝材料及回填材料中的黃鐵礦，在緩衝材料飽和後便可溶解出硫化物，若經由緩衝材料擴散到達廢棄物罐表面，將會造成廢棄物罐腐蝕。
硫酸鹽還原菌產生的硫化物	硫酸鹽還原菌可還原緩衝材料及回填材料或地下水中的硫酸鹽，使其變成硫化物溶解於水中，成為腐蝕因子的來源之一。
地下水中的腐蝕劑	地下水中所含的硫化物會透過擴散或是平流到達廢棄物罐表面，造成廢棄物罐腐蝕。

表 4-61：PHREEQC驗算工研院表二水質成果表

-	KM4	KM5	KMi	PHREEQC(KM5)
深度 (m)	300至400	400至500	300至500	依Darcytools輸出
Stot (mole /L)	1.30 $\times 10^{-4}$ mol/L	9.59 $\times 10^{-5}$ mol/L	1.05 $\times 10^{-4}$ mol/L	1.917×10^{-5} mole/L (HS^-)

表 4-62：廢棄物罐之銅殼腐蝕速率

處置孔編號	緩衝材料完整		緩衝材料侵蝕	
	當代海平面之銅殼腐蝕速率 (mm/yrs)	海平面下降120 m之銅殼腐蝕速率 (mm/yrs)	當代海平面之銅殼腐蝕速率 (mm/yrs)	海平面下降120 m之銅殼腐蝕速率 (mm/yrs)
DH-1744	1.11×10^{-7}	2.21×10^{-7}	9.59×10^{-6}	1.11×10^{-5}
DH-2142	1.03×10^{-7}	2.62×10^{-7}	8.90×10^{-6}	1.36×10^{-5}
DH-29	8.27×10^{-8}	1.23×10^{-7}	7.39×10^{-6}	5.81×10^{-6}
DH-1591	7.89×10^{-8}	9.78×10^{-8}	8.08×10^{-6}	4.53×10^{-6}
DH-1602	7.23×10^{-8}	1.10×10^{-7}	7.45×10^{-6}	5.16×10^{-6}

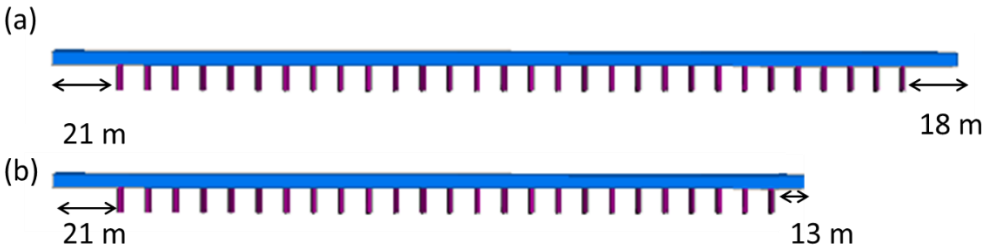


圖 4-105：處置隧道之處置孔配置圖

註：(a)300 m處置隧道；(b)250 m 處置隧道。處置孔間距9 m。

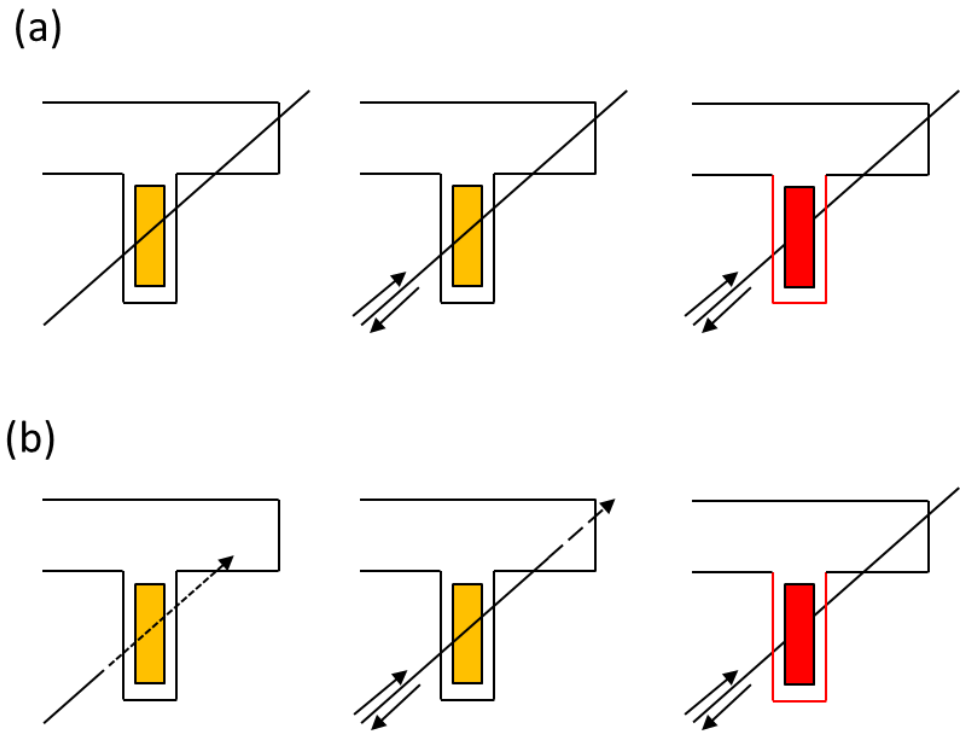


圖 4-106：廢棄物罐剪力失效率分析方法

註：(a)為裂隙半徑不生長，廢孔準則漏判的情況下，裂隙剪力位移累積至廢棄物罐失效；(b)為原本沒截切的裂隙，裂隙半徑生長後截切廢棄物罐，並累積剪力位移量至使廢棄物罐失效。

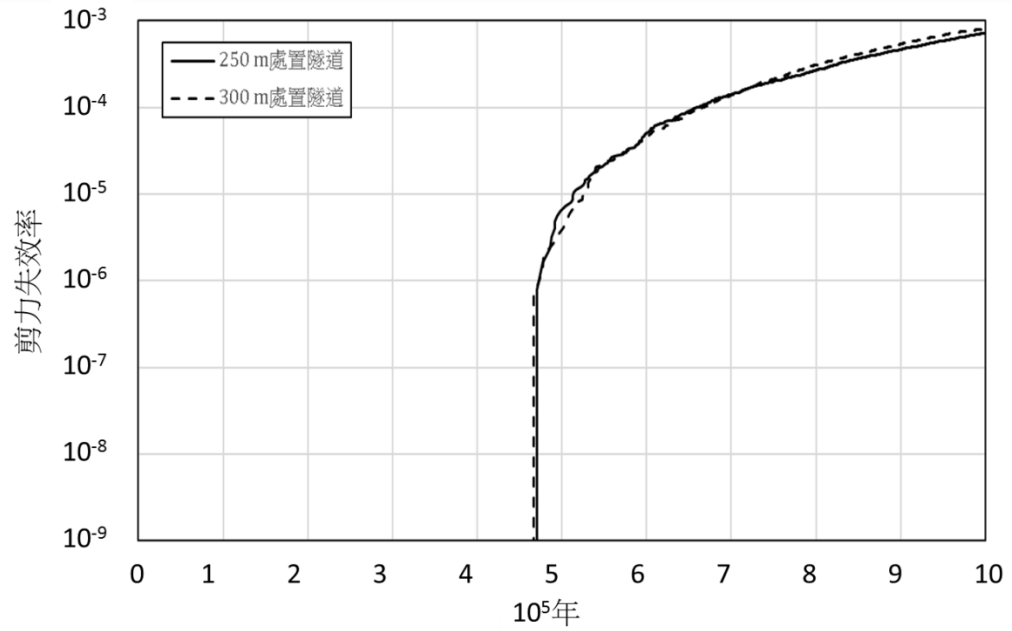


圖 4-107：不考慮EFPC廢孔準則之廢棄物罐剪力失效率

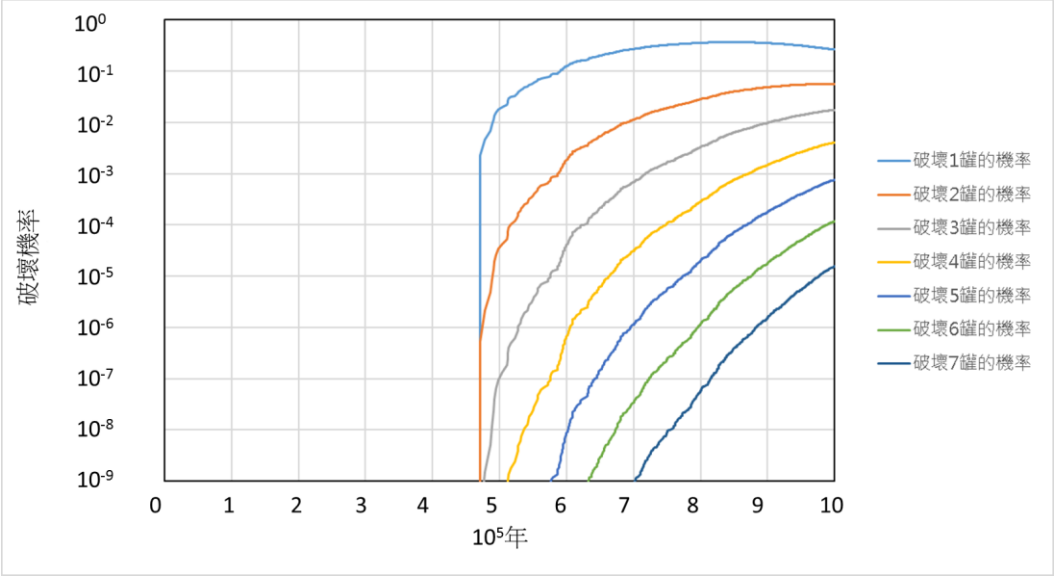


圖 4-108：2,860罐廢棄物罐，不使用EFPC的破壞罐數隨時間分布

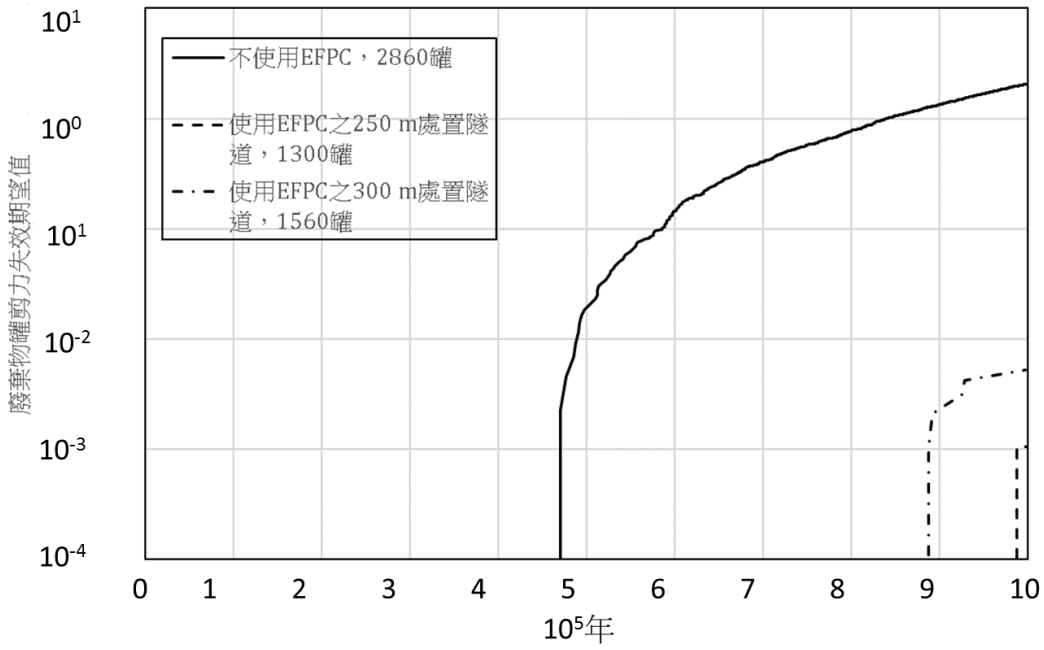


圖 4-109：廢棄物罐剪力失效期望值

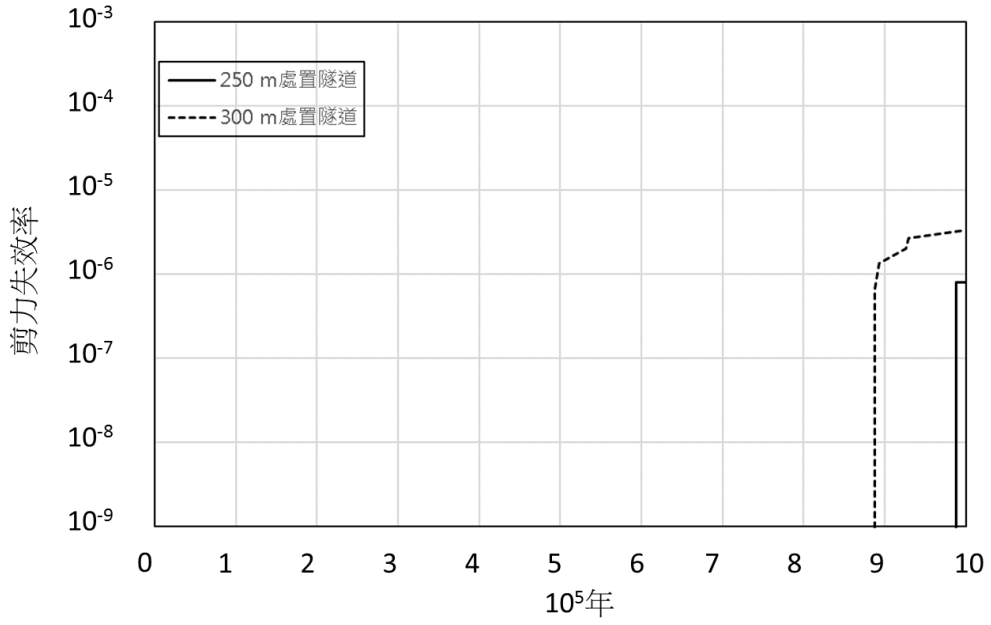


圖 4-110：使用EFPC廢孔準則之廢棄物罐剪力失效率

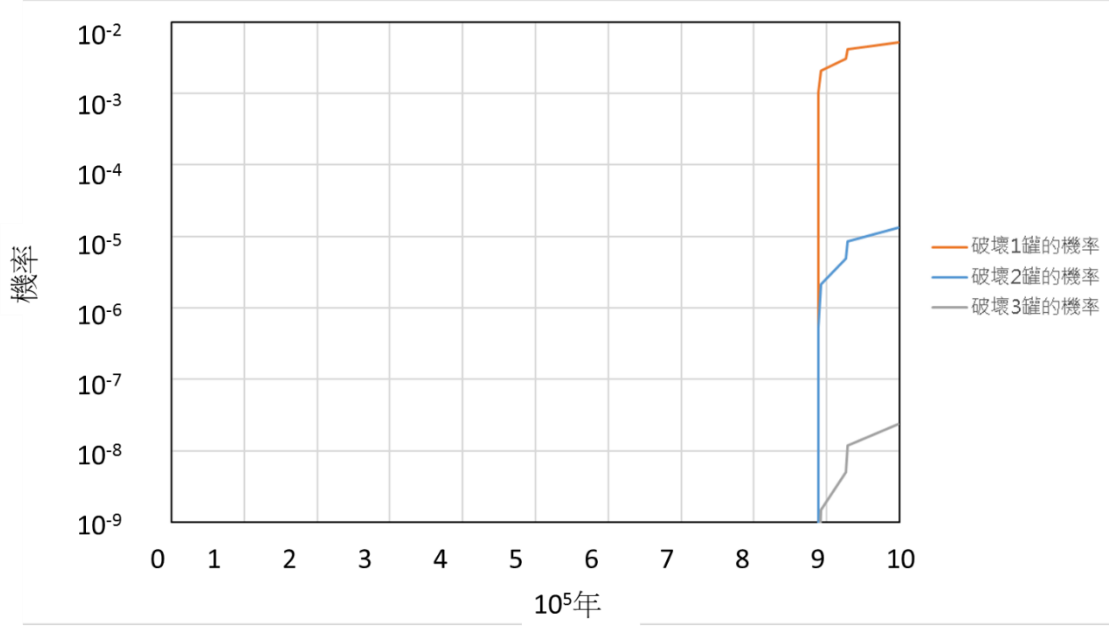


圖 4-111：300 m處置隧道，1,560個處置孔，廢棄物罐破壞罐數機率分布

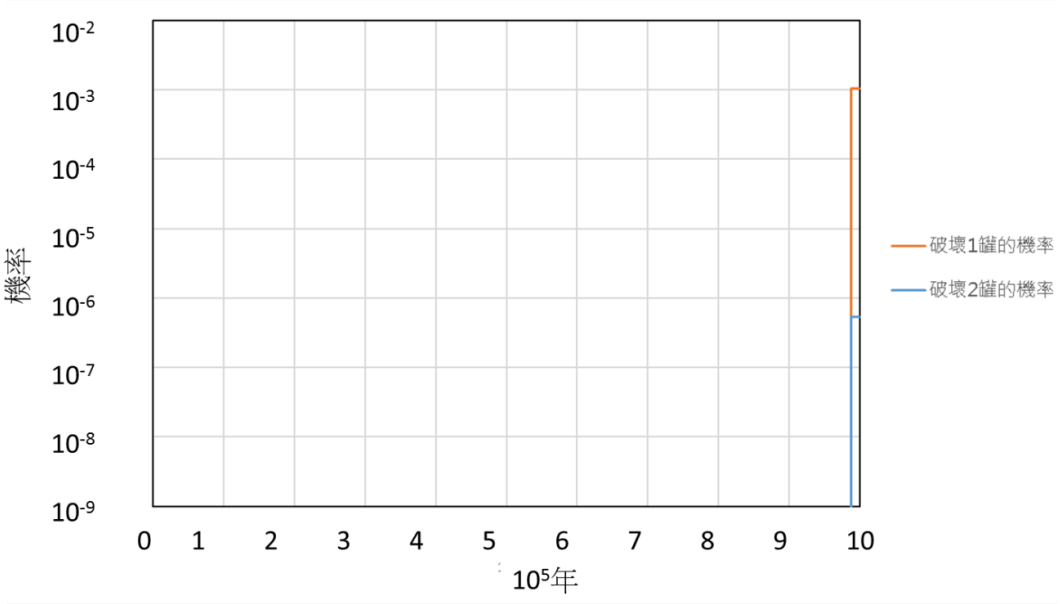


圖 4-112：250 m處置隧道，1,300個處置孔，廢棄物罐破壞罐數機率分布

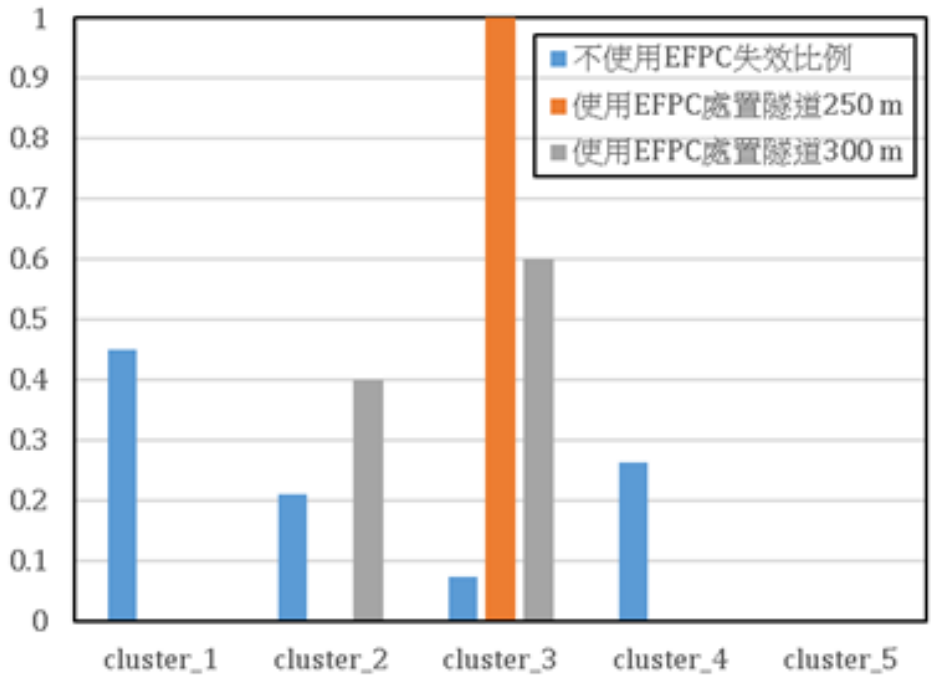


圖 4-113：不同叢集對剪力失效的比例

註：橫軸為裂隙叢集編號，縱軸為失效率(%)。

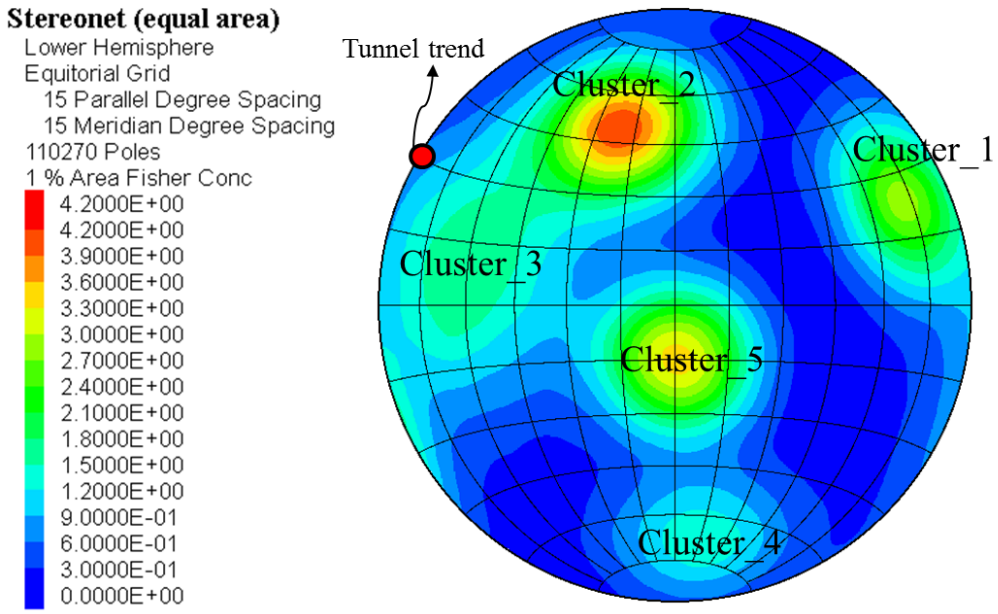


圖 4-114：處置隧道長軸方向與裂隙叢集極點之立體投影圖

中英文對照：Stereonet (投影網)；Equal area(等面積投影)；Lower hemisphere(下半球)；Equitorial grid(平行網格)；15 Parallel Degree Spacing(水平角度間距15度)；15 Meridian Degree Spacing(經線角度間距15度)；Poles(極點)；Area Fisher Conc(費雪面積集中度)。

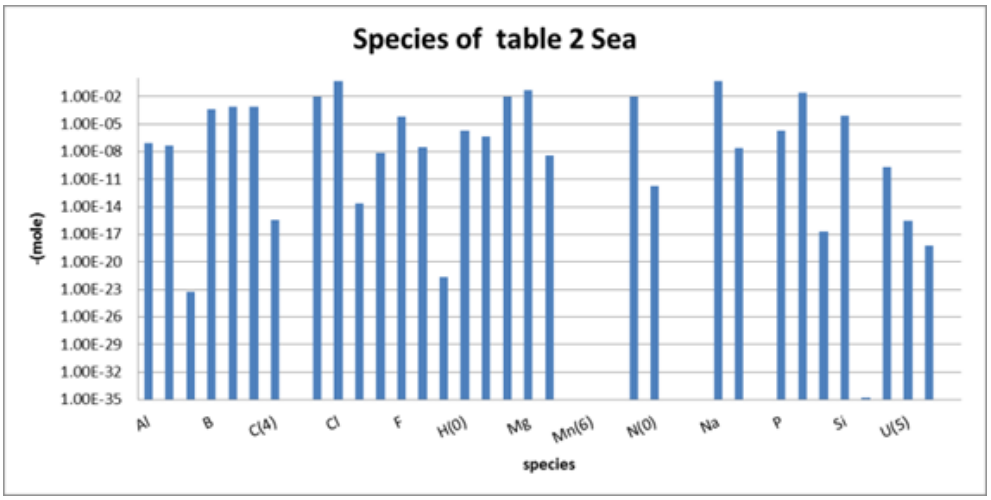


圖 4-115：PHREEQC計算表二全球平均海水物種分布圖

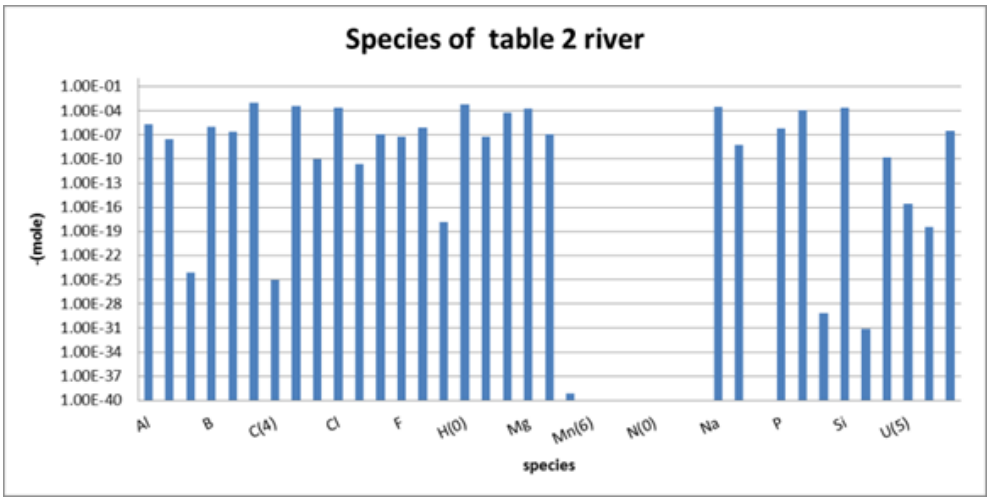


圖 4-116：PHREEQC計算表二全球平均河水物種分布圖

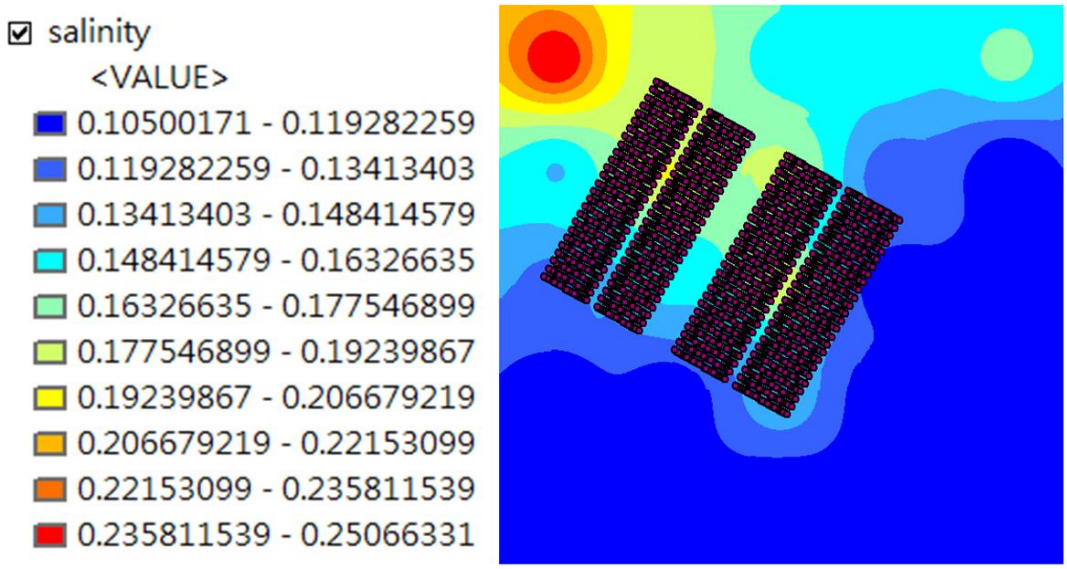


圖 4-117：當代流場環境地下水鹽度與處置孔配置位置圖

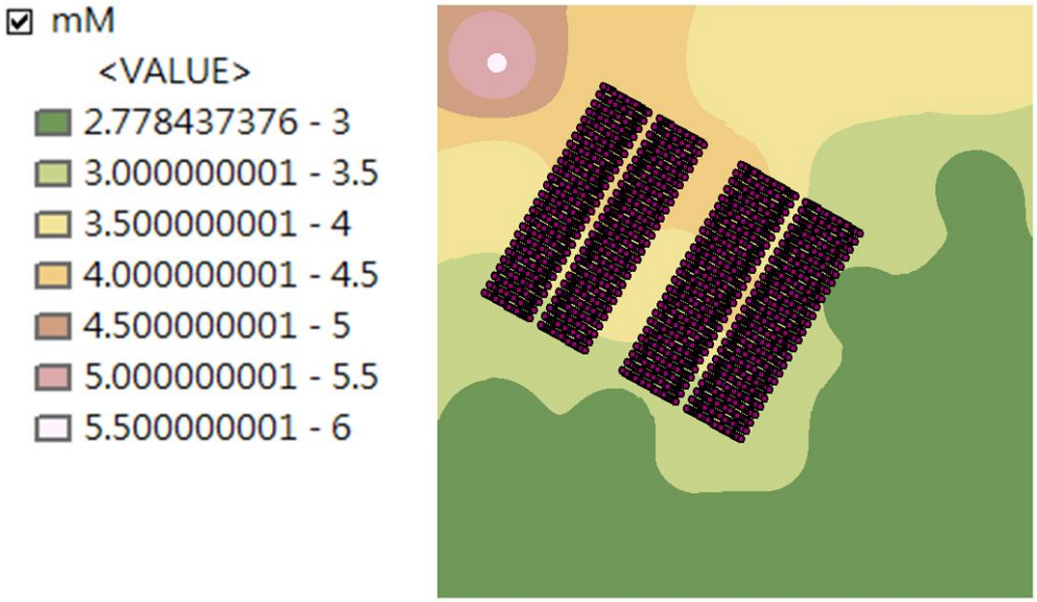


圖 4-118：當代流場環境地下水陽離子強度與處置孔配置位置圖

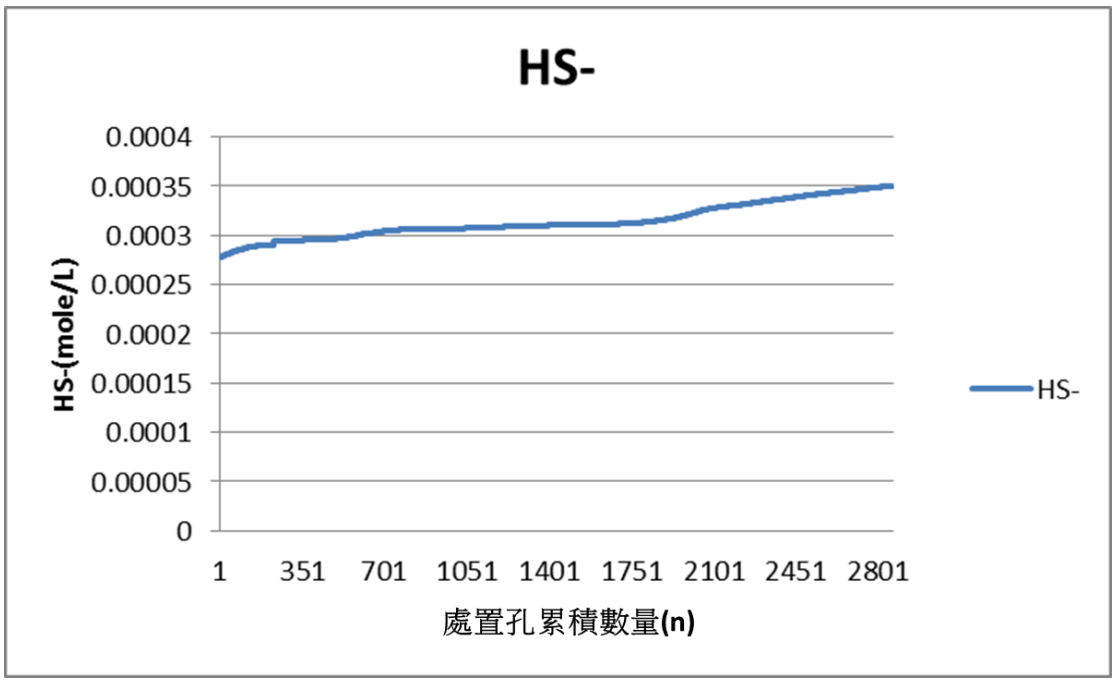


圖 4-119：當代流場環境地下水硫化氫濃度與處置孔分析結果

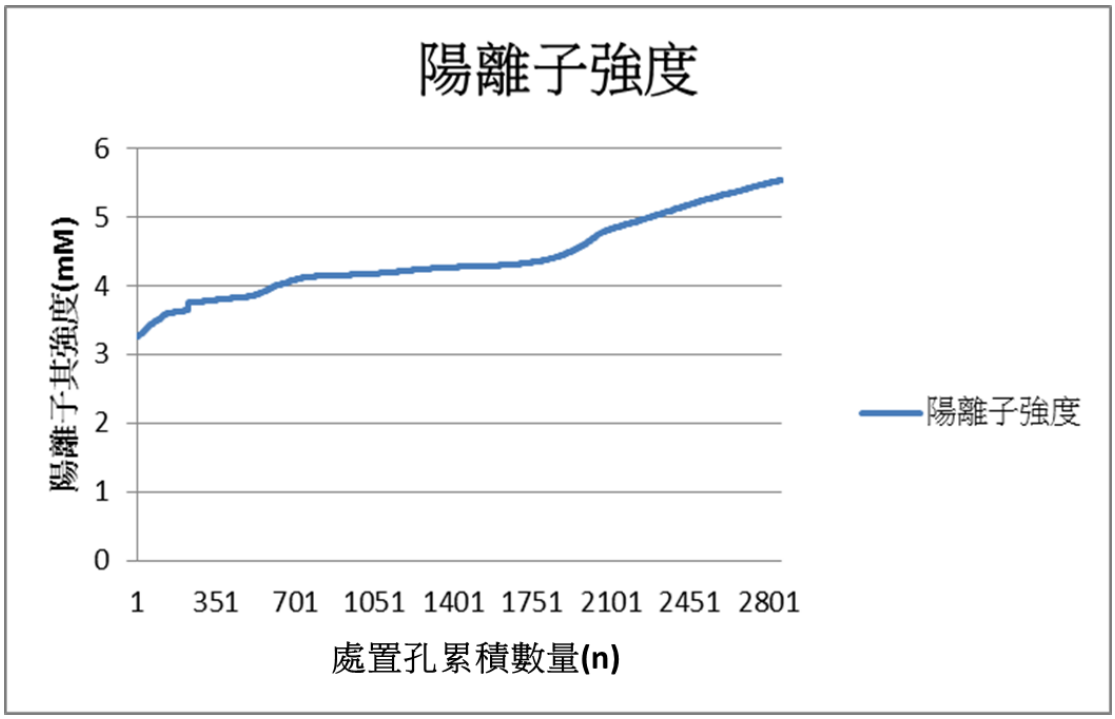


圖 4-120：當代流場環境地下水陽離子強度與處置孔分析結果

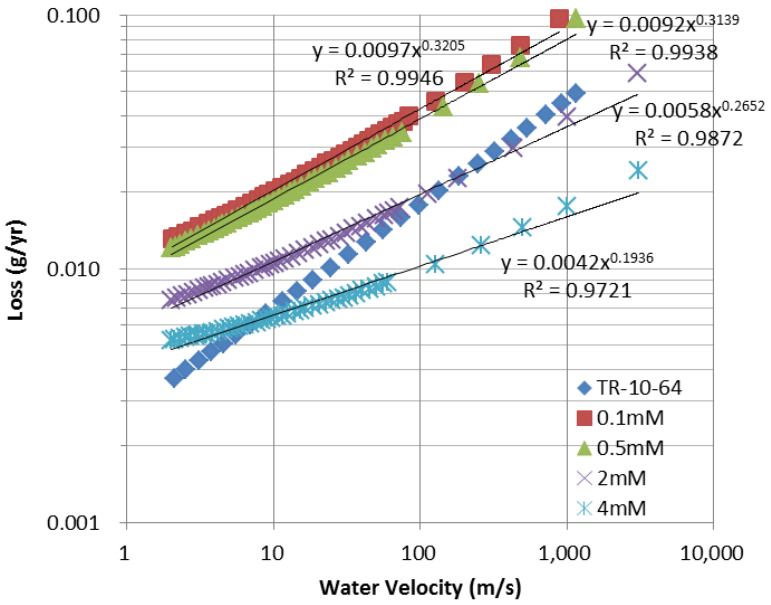


圖 4-121：水流速與緩衝材料重量損失之關係圖

中英文對照：Loss(損失)；Water Velocity(水流速)。

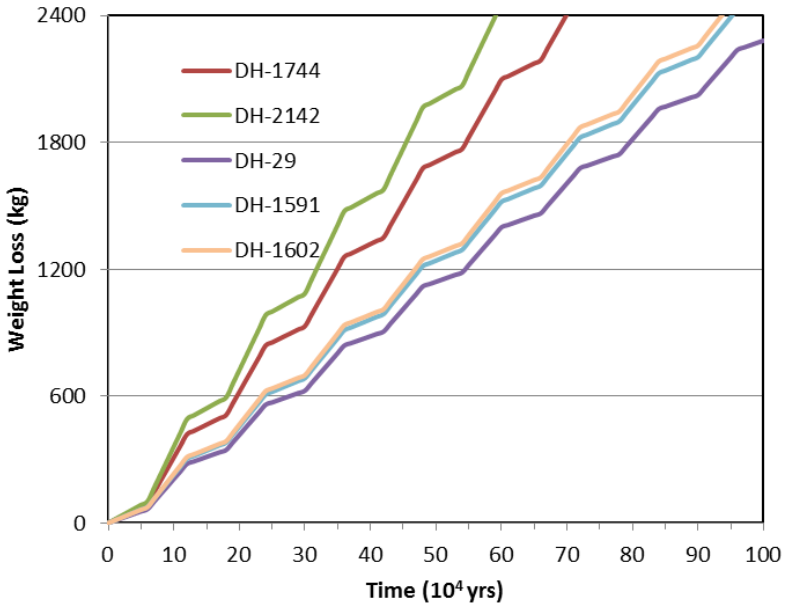


圖 4-122：100萬年緩衝材料侵蝕重量損失變化

中英文對照：Weight Loss(重量損失)；Time(時間)。

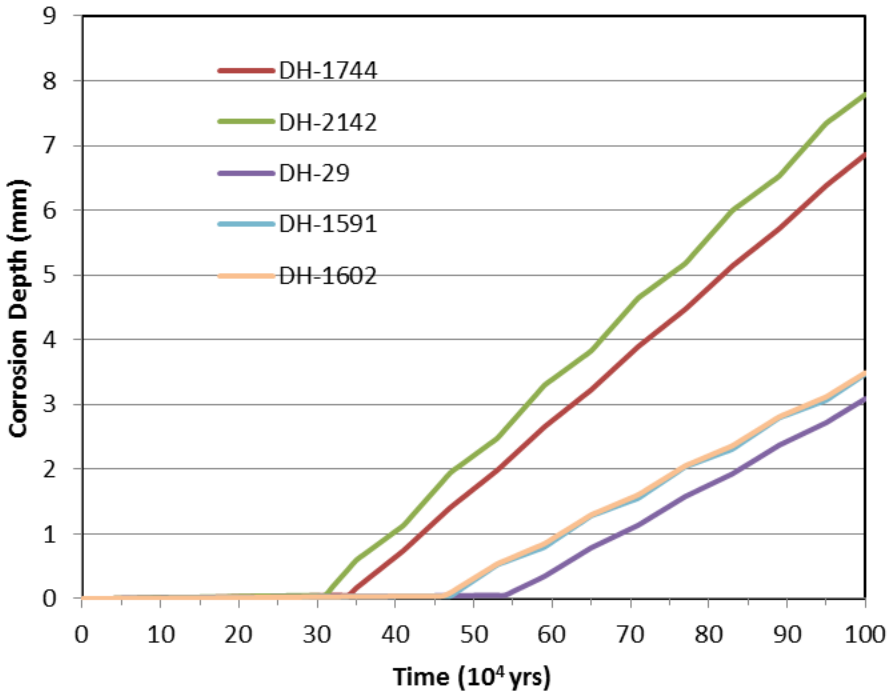


圖 4-123：銅殼腐蝕深度變化

中英文對照：Corrosion Depth(腐蝕深度)；Time(時間)。

4.6. 核種傳輸分析技術

4.6.1. 核種釋出途徑分析

在花崗岩處置母岩中，地下水將主要藉由連通裂隙進行流動，因此，探討放射性核種於潛在廢棄物罐破壞位置釋出後之主要傳輸途徑及特性是重點工作，將可供近場、遠場、生物圈核種傳輸計算之使用。

108年度工作之精進項目為基於導入主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之穩態地下水流場模擬結果，建立質點經由處置隧道底部開挖損傷帶與裂隙截切之傳輸路徑追蹤模擬技術，並計算潛在傳輸路徑之功能測度值。因此，本工作將依據第4.4.1節地下水流場演化分析之穩態地下水流場模擬成果執行質點追蹤模擬，第4.4.1節之案例1與案例2的質點追蹤模擬成果可作為開挖損傷帶之影響評估，而案例3與案例4的質點追蹤模擬成果則可代表區域尺度模型在不同上邊界條件下之釋出途徑分析。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本研究使用瑞典SKB公司擁有之DarcyTools進行分析計算。DarcyTools係由瑞典SKB公司、MFRDC(Michel Ferry, R&D Consulting)、CFE AB(Computer-aided Fluid Engineering AB)共同開發的模擬程式，為模擬孔隙介質與裂隙介質流場的工具，目的為放射性廢棄物處置之場址調查及安全性評估，並實際運用於瑞典SR-Site計畫的地下水模擬工作(Vidstrand et al., 2010, p1-p190)。

(2) 參數需求說明：

(a) 質點釋出起始位置：本研究參考瑞典SKB R-09-20報告(Joyce et al., 2010, p45)執行Q1路徑及Q2路徑之質點釋出及其途徑分析，其中，Q1路徑運算核種自廢棄物罐釋出後，經由緩衝材料擴散至裂隙截切處置孔之位置，再進一步釋出於遠場；而Q2路徑則運算核種自廢棄物罐釋出後，經由緩衝材料擴散至開挖損傷帶之位置，再進一步釋出於遠場。

(b) 穩態地下水流場：本研究依據第4.4.1節穩態地下水流場模擬結果進行質點追蹤模擬，由於目前的模擬係分別針對封閉後與當代環境相似階段及海平面下降之穩態地下水流場，因此，不討論流場隨時間變化之暫態現象，質點釋出途徑亦分別表示2個階段的模擬結果。

(3) 計算案例與結果說明：

依據第4.4.1節地下水流場演化分析之穩態地下水流場模擬成果，分別模擬Q1路徑及Q2路徑之質點傳輸情形，並撰寫後處理程式運算每個途徑之功能測度值。其中，質點傳輸情形各案例分析如表 4-63：

(a) 案例1

(i) Q1質點傳輸路徑：

依據Q1潛在釋出起始位置釋放質點並模擬質點傳輸途徑，圖 4-124上方展示Q1質點傳輸路徑的俯視圖，結果顯示釋出路徑多數順著岩脈走向往北北東移動並至近海釋出；少部分則可越過岩脈往北甚至北北西方向移動。而由側視圖(圖 4-124下方)之穩態壓力分布與穩態鹽度分布結果，顯示質點初期受到由上而下的上邊界入滲條件影響，致使質點稍微下向移動，但隨即因為海淡水交界面的作用，導致質點持續沿著此交界面移動，最終於海岸線釋出。由此案例可得知海淡水交界面除了影響壓力分布外，亦控制了質點傳輸路徑及趨勢，因此，若模擬對象或邊界條件有鹽度等相關設定時，必須加以考慮對壓力分布及質點傳輸的影響。

(b) 案例2

(i) Q1質點傳輸路徑：

依據Q1潛在釋出起始位置釋放質點並運算質點傳輸途徑，圖 4-125上方展示Q1質點傳輸路徑的俯視圖，結果顯示釋出路徑多數順著岩脈方向往北北東移動並至近海釋出；少部分則可越過岩脈往北甚至北北西方向移

動；而由側視圖(圖 4-125下方)之穩態壓力分布與穩態鹽度分布結果，可以觀察到質點初期受到由上而下的上邊界入滲條件影響，致使質點稍微下向移動，但隨即因為海淡水交界面的作用，導致質點持續沿著此交界面移動，最終於海岸線釋出。

此案例之質點追蹤模擬結果與案例1之模擬結果趨勢相同，就目前的模擬尺度、水文地質概念模式及邊界條件設定等條件下，具有開挖損傷帶的設定並不會對質點追蹤模擬結果及趨勢造成巨大影響；然而，不論是Q1路徑或是Q2路徑，皆受到海淡水交界面的影響甚鉅，因此，若模擬對象或邊界條件有鹽度等相關設定時，還是必須加以考慮對壓力分布及質點傳輸的影響。

(ii) Q2質點傳輸路徑：

依據Q2潛在釋出起始位置釋放質點並運算質點傳輸途徑，圖 4-126上方展示Q2質點傳輸路徑的俯視圖，結果顯示釋出路徑多數順著岩脈走向往北北東移動並至近海釋出；少部分則可越過岩脈往北甚至北北西方向移動；而由側視圖(圖 4-126下方)之穩態壓力分布與穩態鹽度分布結果，顯示質點初期受到由上而下的上邊界入滲條件影響，致使質點稍微下向移動，但隨即因為海淡水交界面的作用，導致質點持續沿著此交界面移動，最終於海岸線釋出。

此案例之Q2質點追蹤模擬結果與案例1之Q1路徑模擬結果趨勢相同，就目前的模擬尺度、水文地質概念模式及邊界條件設定等條件下，具有開挖損傷帶的設定並不會對質點追蹤模擬結果及趨勢造成巨大影響；然而，不論是Q1路徑或是Q2路徑皆受到海淡水交界面的影響甚鉅；因此，若模擬對象或邊界條件有鹽度等相關設定時，還是必須加以考慮對壓力分布及質點傳輸的影響。

(c) 案例3

(i) Q1質點傳輸路徑：

依據Q1潛在釋出起始位置釋放質點並運算質點傳輸途徑，圖 4-127左方之Q1質點傳輸路徑的俯視圖顯示其壓力分布受西北方福建沿海的地形影響，致使流場呈現西北往東南、部分則為北往南的趨勢，因此，質點的傳輸路徑亦順著此趨勢向南方移動至F1構造，並沿著F1構造運移一段距離後，再往地形較低處移動。而由側視圖(圖4-127右方)之穩態壓力分布可觀察到受到上邊界入滲條件的影響，質點均向下運移並沿著底部持續往南方移動。此案例為運跑質點傳輸100萬年的模擬結果，結果顯示在此案例的設定及條件下，質點在100萬年的時間內並無地表釋出點，也不會碰到模擬邊界。

(ii) Q2質點傳輸路徑：

依據Q2潛在釋出起始位置釋放質點並運算質點傳輸途徑，然而經過多次測試均獲得非常短的傳輸路徑，推測原因可能因為此案例模擬尺度甚大、上邊界為入滲加上具有主隧道及處置隧道的網格等條件，致使穩態地下水流場的收斂程度較差，進一步使得開挖損傷帶與其周圍的水力梯度甚低，導致質點傳輸十分緩慢。

(d) 案例4

(i) Q1質點傳輸路徑：

依據Q1潛在釋出起始位置釋放質點並運算質點傳輸途徑，圖 4-128左方之Q1質點傳輸路徑的俯視圖顯示質點首先受到離島結晶岩測試區中央太武山輻射狀的小尺度流場影響，致使質點向離島結晶岩測試區海岸線移動，部分略受到大尺度梯度(即西北往東南)的影響而轉向東移動，少部分質點受到處置設施東方美人山的影響而向西移動，且所有質點皆於陸地上釋出；而從剖面圖(圖 4-128右方)可以觀察到沿著向上水流之質點，可以直接釋出於島內之地形低緩處，初期為向下水流之質點，

會於質點接近底部無流量邊界時，向上反轉並移動至島外地形低緩處釋出。

(ii) Q2質點傳輸路徑：

依據Q2潛在釋出起始位置釋放質點並運算質點傳輸途徑，圖 4-129左方之Q2質點傳輸路徑的俯視圖顯示質點首先受到離島結晶岩測試區中央太武山輻射狀的小尺度流場影響，致使質點向離島結晶岩測試區海岸線移動，部分略受到大尺度梯度(即西北往東南)的影響而轉向東，少部分質點受到處置設施東方美人山的影響而向西移動，且所有質點皆於陸地上釋出；而從剖面圖(圖4-129右方)可觀察到沿著向上水流之質點，直接釋出於島內之地形低緩處，初期為向下水流之質點，會於質點接近底部無流量邊界時，向上反轉並移動至島外地形低緩處釋出。

另有關功能測度值運算與比較，相關結果與說明如下所述：

在所有的功能測度值中，由於等效初始通量及水流傳輸阻力，分別為近場及遠場之重要安全功能，對於提供合適的水文地質及傳輸環境非常關鍵，其中，對於等效初始通量的要求是越低越好；對於水流傳輸阻力的要求是越高越好(SKB, 2011, p247-p269)。因此，本報告將著重於探討不同案例之等效初始通量及水流傳輸阻力之結果，並以累積分布函數(Cumulative Distribution Function, CDF)表示，此表示方式之優點在於容易展示參數的分布並且說明參數的累積比例，對於不同案例的結果比對較能一目了然。以下將分別展示不同案例的等效初始通量及水流傳輸阻力之結果，並擷取可比較之案例進行討論。

(a) 等效初始通量

等效初始通量U(m/yr)係由計算通過處置孔截面積(m^2)的流率而得，DarcyTools可藉由模擬獲得每個處置孔的流率(m^3/yr)，而處置孔的截面積為直徑(1.75 m)乘上高度(8.155 m)，

因此，等效初始通量即體積流率除以處置孔截面積。圖 4-130展示案例1之等效初始通量CDF圖，由於此案例並無開挖損傷帶之設定，因此，僅有Q1路徑的結果。等效初始通量的最大值為2.05×10^{-5} m/yr，而整體曲線頗為平滑，且最大值與最小值差異甚小，表示水流狀態類似。

圖 4-131展示案例2之等效初始通量CDF圖，其中，此案例具有開挖損傷帶之設定，所以，分別有Q1路徑及Q2路徑的結果。由Q1路徑之結果可見最大值為2.46×10^{-5} m/yr，整體曲線非常平滑，且最大值與最小值差不大，表示，表示近場的水流狀態類似；由Q2路徑之結果可見最大值為3.64×10^{-4} m/yr，整體曲線雖亦非常平滑，但等效初始通量數值亦大於Q1路徑約1個數量級。

圖 4-132展示案例3之等效初始通量CDF圖，其中，此案例同樣具有開挖損傷帶之設定，所以分別有Q1路徑及Q2路徑的結果。由Q1路徑之結果可見最大值為9.77×10^{-5} m/yr，整體曲線非常平滑，且最大值與最小值差不大，表示水流狀態類似；由Q2路徑之結果可見最大值為1.40×10^{-4} m/yr，整體曲線雖亦非常平滑，但最大值及最小值約有1個數量級以上的差異，且部分數值甚至比Q1路徑的數值小，表示Q2路徑受到的水流影響差異甚大。

圖 4-133展示案例4之等效初始通量CDF圖，其中，此案例同樣具有開挖損傷帶之設定，所以分別有Q1路徑及Q2路徑的結果。由Q1路徑之結果可見最大值為6.44×10^{-5} m/yr，整體曲線非常平滑，且最大值與最小值差不大，表示水流狀態類似；由Q2路徑之結果可見最大值為9.12×10^{-4} m/yr，整體曲線雖亦非常平滑，但等效初始通量數值亦大於Q1路徑約1個數量級。

由以上4個案例的結果可確認不同條件下的等效初始通量最大值及分布狀態，其中，案例2、案例3及案例4的結果，皆顯

示Q2路徑的等效初始通量最大值，皆高於Q1路徑約1個數量級。

為了進一步確認主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶，對於穩態地下水流場及質點追蹤模擬結果之影響，「(三)11.地下水流場演化分析」設定了案例1及案例2，進行開挖損傷帶對於裂隙截切處置孔之Q1路徑影響評估；由案例1及案例2的Q1路徑等效初始通量CDF圖(圖 4-134)，因近場附近之裂隙連通性增加，導致案例2的變異性稍大，但2個案例的CDF曲線趨勢皆相似。然而，並不能直接表示開挖損傷帶的存在對於整體處置設施的影響，應該考慮工程設計、施工、其他功能/安全評估的結果後再進行綜合討論。

綜上所述，主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶存在與否對於處置設施周圍的流場及Q1路徑的等效初始通量數值影響不大；但若是質點從Q2路徑釋出，則在相同模擬條件及設定下，Q2路徑的等效初始通量將大於Q1路徑約1個數量級。

(b) 水流傳輸阻力

圖 4-135展示案例1之水流傳輸阻力CDF圖，由於此案例並無開挖損傷帶之設定，因此，僅有Q1路徑的結果。結果顯示水流傳輸阻力最小值為2.39×10^{7} yr/m，而整體曲線頗為平滑，且最大值與最小值差異甚小，表示質點在傳輸過程中受到的阻力及傳輸路徑非常類似。

圖 4-136展示案例2之水流傳輸阻力CDF圖，其中，此案例同樣具有開挖損傷帶之設定，所以分別有Q1路徑及Q2路徑的結果。由Q1路徑之結果可見最小值為1.43×10^{7} yr/m，整體曲線非常平滑，表示沒有突然的數值差異產生，但最大值與最小值約有1個數量級以上的差異；由Q2路徑之結果可見最小值為6.68×10^{6} yr/m，整體曲線雖亦非常平滑，但最大值與最小值約有1個數量級以上的差異。由Q1路徑及Q2路徑結果進行比較，顯示Q2路徑之水流傳輸阻力最小值略小於Q1路徑之數值；此外，Q2路徑的最大值與最小值差異亦較Q1路

徑大；但2個路徑的曲線型態及分布結果非常類似，表示質點傳輸的途徑及速度也非常相同，且水流傳輸阻力亦非常穩定，原因可能為案例2的質點受到離島結晶岩測試區中央太武山的影響，致使質點皆向北方、北北東方及北北西方傳輸，且受到海淡水交界面的效應致使質點傳輸途徑相似，並可順利於海岸線釋出，因此，整體的水流傳輸阻力差異不大。

圖 4-137展示案例4之水流傳輸阻力CDF圖，其中，此案例同樣具有開挖損傷帶之設定，所以，分別有Q1路徑及Q2路徑的結果。由Q1路徑之結果可見最小值為3.75×10^{6} yr/m，整體曲線非常平滑，表示沒有突然的數值差異產生，但最大值與最小值約有近3個數量級的差異；由Q2路徑之結果可見最小值為2.74×10^{6} yr/m，整體曲線雖亦非常平滑，但最大值與最小值亦約有近3個數量級的差異。由Q1路徑及Q2路徑結果進行比較，顯示Q2路徑之水流傳輸阻力最小值略小於Q1路徑之數值，2個路徑的曲線型態及分布結果非常類似，表示Q1質點及Q2質點的傳輸途徑及速度也非常相同；但具有甚大的最大值與最小值差異，表示不論是Q1路徑或者是Q2路徑的單一條件下，不同質點在傳輸過程中亦有不同的傳輸途徑及傳輸速度，且可能差異甚大。

由以上4個案例的結果可確認不同條件下的水流傳輸阻力最大值及分布狀態，其中，案例2及案例4的結果皆顯示Q1與Q2路徑的水流傳輸阻力趨勢與分布相似。

為了進一步確認主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶，對於穩態地下水流場及質點追蹤模擬結果之影響，「(三)11.地下水流場演化分析」設定了案例1及案例2，進行開挖損傷帶對於裂隙截切處置孔之Q1路徑影響評估；由案例1及案例2之Q1路徑水流傳輸阻力CDF圖(圖 4-138)，可見開挖損傷帶的存在提升了近場傳輸路徑的連通性，同時增加遠場傳輸之變異性，但整體趨勢與數值相似。然而，並不能直接表示開挖損傷帶的存在對於整體處置設施的影響，應該考慮工程設

計、施工、其他功能/安全評估的結果後，再進行綜合討論。本研究僅以水流傳輸阻力的結果進行論述，在此必須進行聲明。

綜上所述，主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶存在與否，對於水流傳輸阻力的影響，並無法由目前的4個案例分析結果進行完整說明，但可以確認模擬尺度及邊界條件設定，確實會影響穩態地下水流場、質點傳輸路徑及地表釋出點。

表 4-63：核種釋出途徑分析之案例編號與說明(質點傳輸)

案例編號	案例說明
Case1：	本案例使用場址尺度模型及其水文地質概念模式與邊界條件設定，在沒有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的條件下進行穩態地下水流場及穩態鹽度分布模擬，因此，僅能展示Q1路徑的質點追蹤模擬結果。
Case2：	本案例使用與案例1相同的設定，但在具有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的條件下進行穩態地下水流場及穩態鹽度分布模擬，因此，可同時展示Q1路徑及Q2路徑之質點追蹤模擬結果。
Case3：	本案例使用區域尺度模型及其水文地質概念模式，模擬海平面下降120 m條件下的穩態地下水流場。本案例為具有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的設定，因此可同時展示Q1路徑及Q2路徑之質點追蹤模擬結果；然而因海平面下降而無鹽度作用，因此，並沒有質點傳輸路徑套繪穩態鹽度分布結果可供展示。
Case4：	本案例為具有主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶的設定，因此，可同時展示Q1路徑及Q2路徑之質點追蹤模擬結果；然而，因海平面下降而無鹽度作用，因此，並沒有質點傳輸路徑套繪穩態鹽度分布結果可供展示。

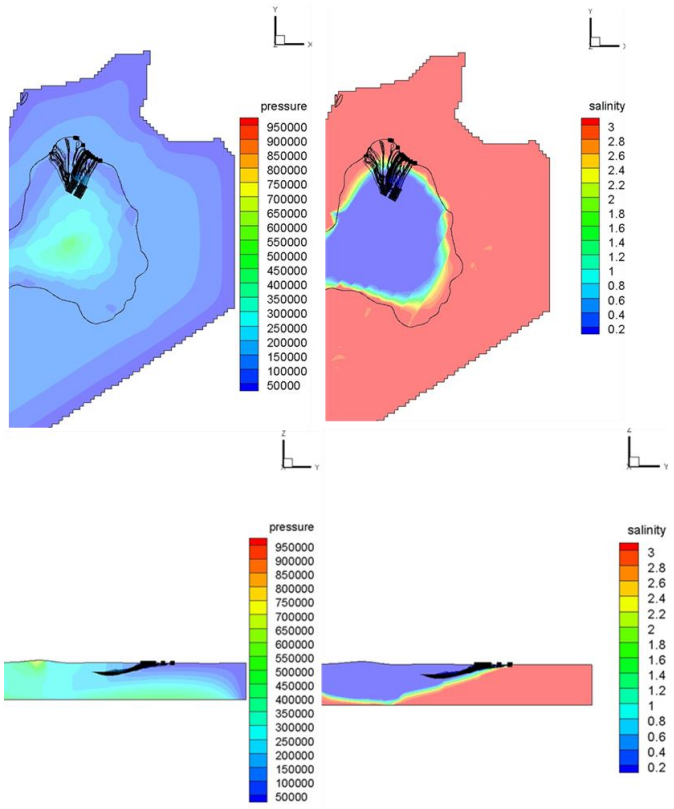


圖 4-124：案例1之Q1質點傳輸路徑圖

註(1)：上方為z=-504 m剖面；下方為x=191,600剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)；salinity表示鹽度(%)。

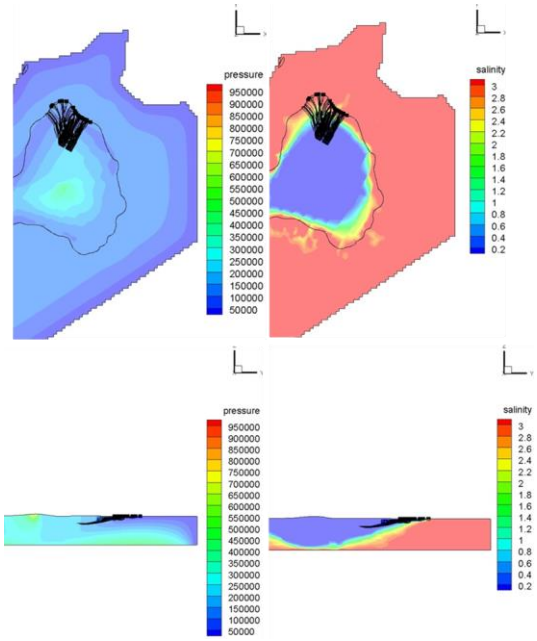


圖 4-125：案例2之Q1質點傳輸路徑圖

註(1)：此為z=-504 m剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)；salinity表示鹽度(%)。

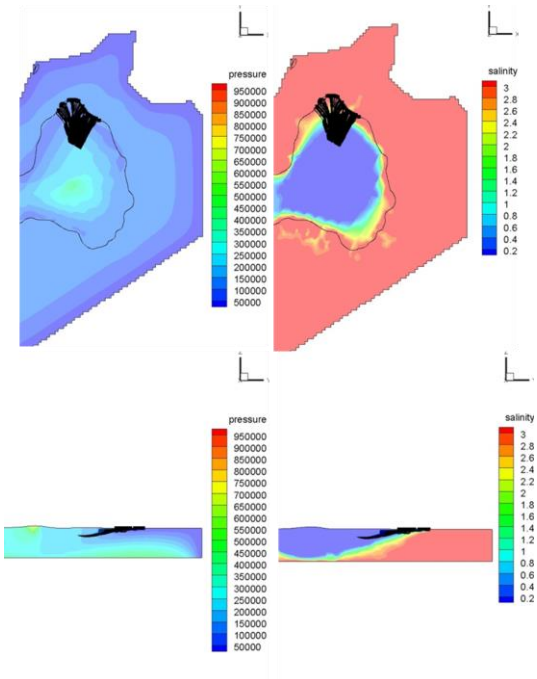


圖 4-126：案例2之Q2質點傳輸路徑圖

註(1)：上方為z=-504 m剖面；下方為x=191,600剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)；salinity表示鹽度(%)。

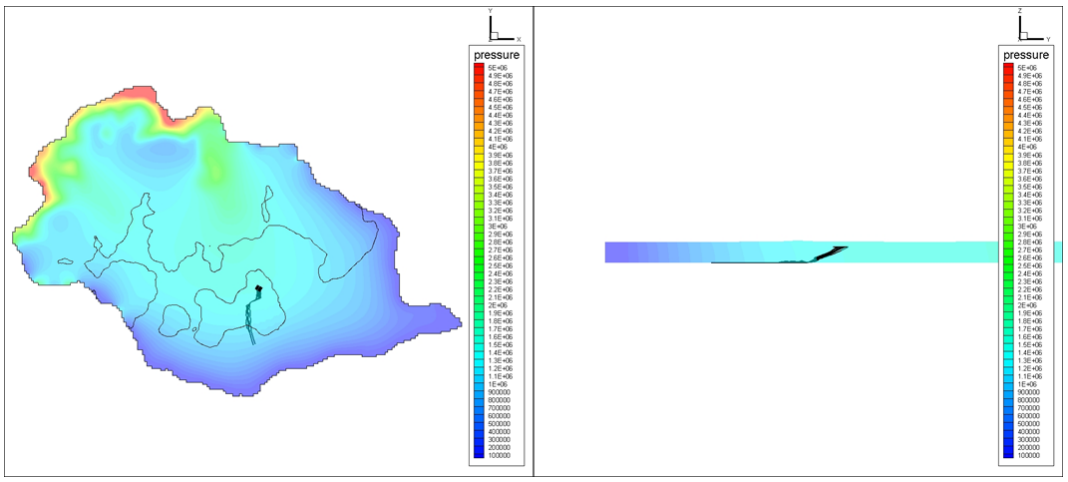


圖 4-127：案例3之Q1質點傳輸路徑圖

註(1)：左圖為z=-504 m剖面；右圖為x=191,600剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

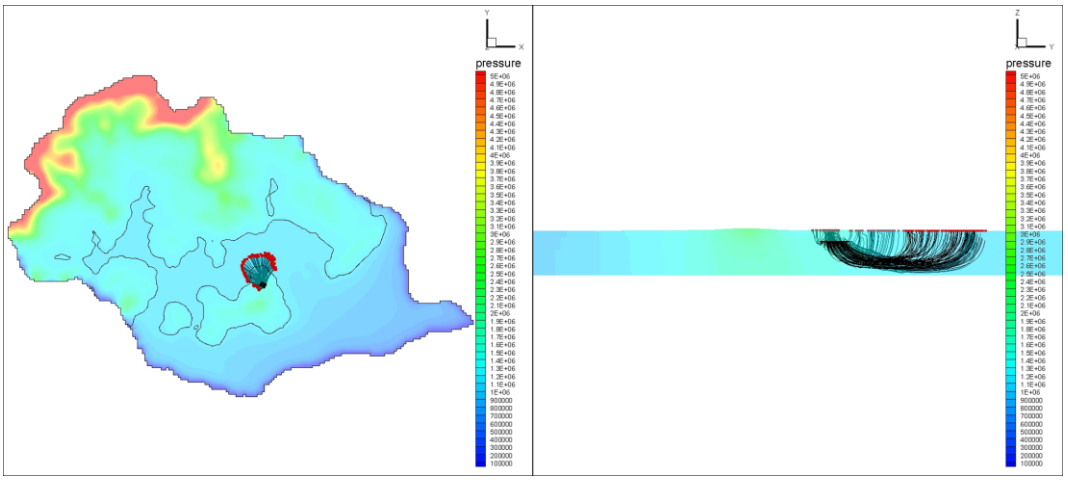


圖 4-128：案例4之Q1質點傳輸路徑圖

註(1)：左圖為z=-504 m剖面；右圖為x=191,600剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

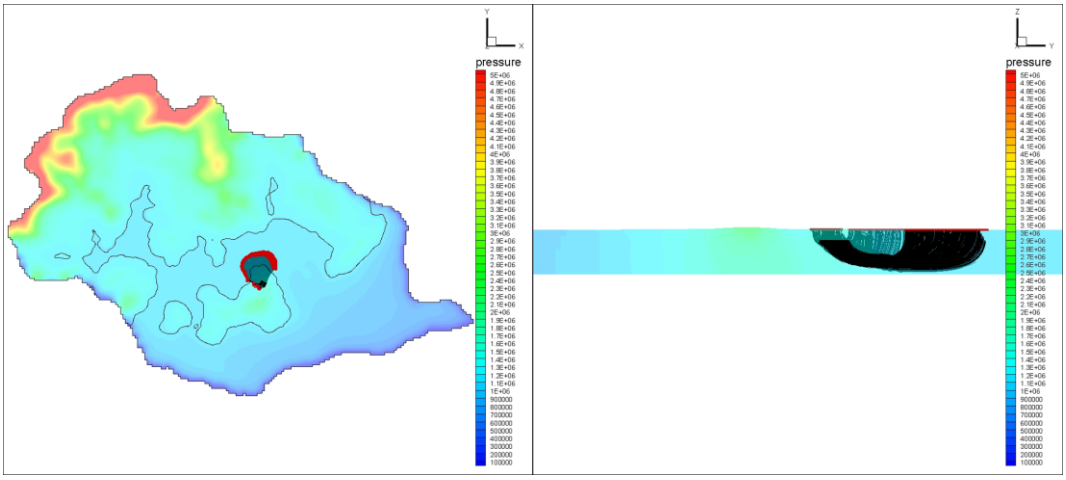


圖 4-129：案例4之Q2質點傳輸路徑圖

註(1)：左圖為z=-504 m剖面；右圖為x=191,600剖面。

註(2)：pressure表示壓力(Pa)。

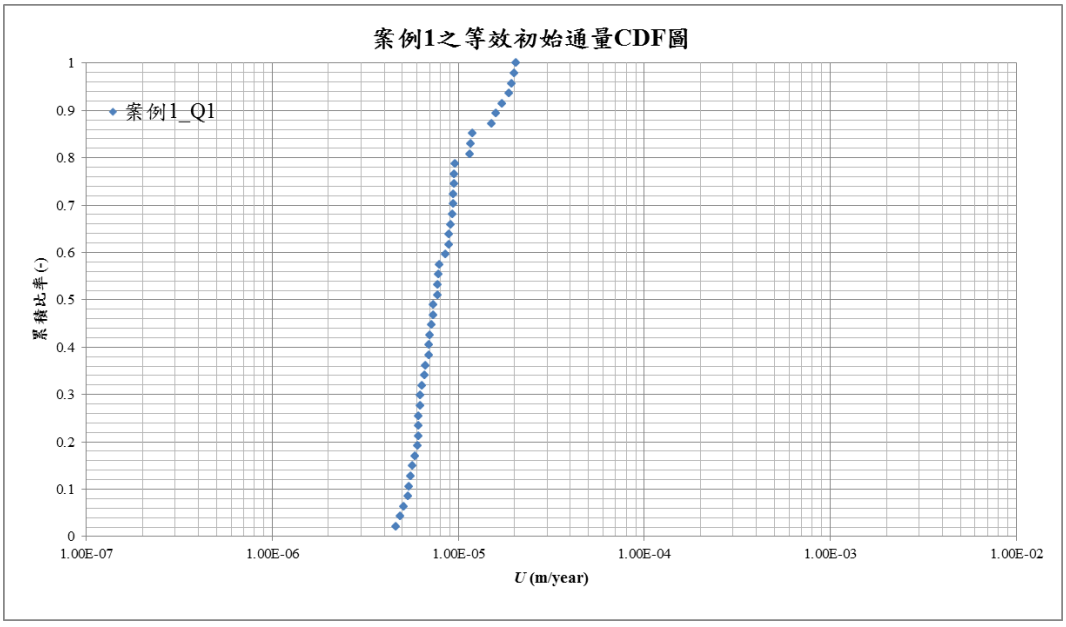


圖 4-130：案例1之等效初始通量CDF圖

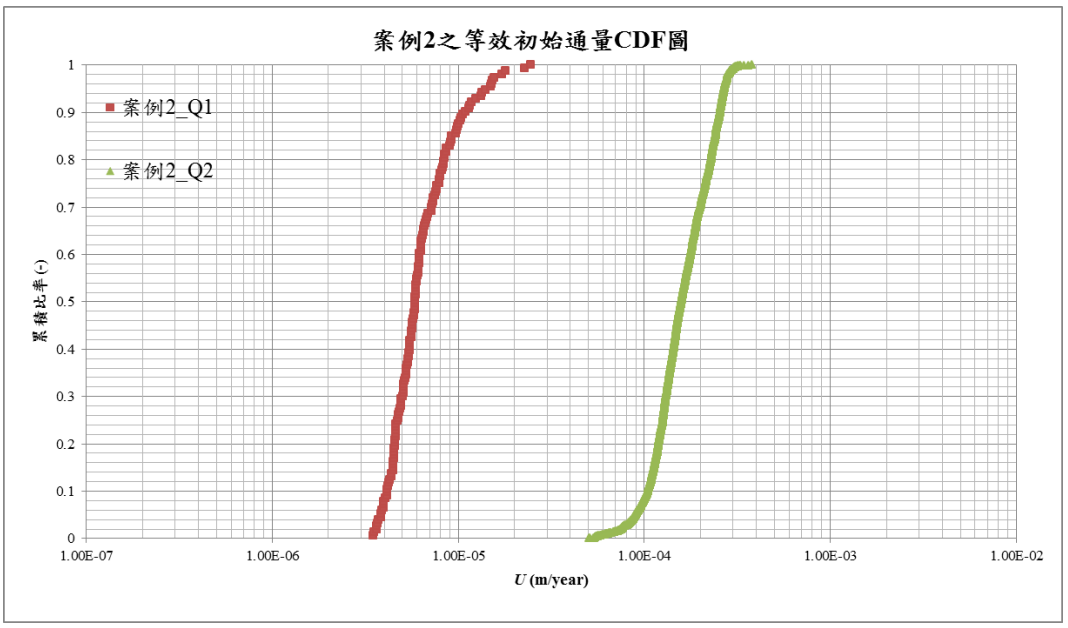


圖 4-131：案例2之等效初始通量CDF圖

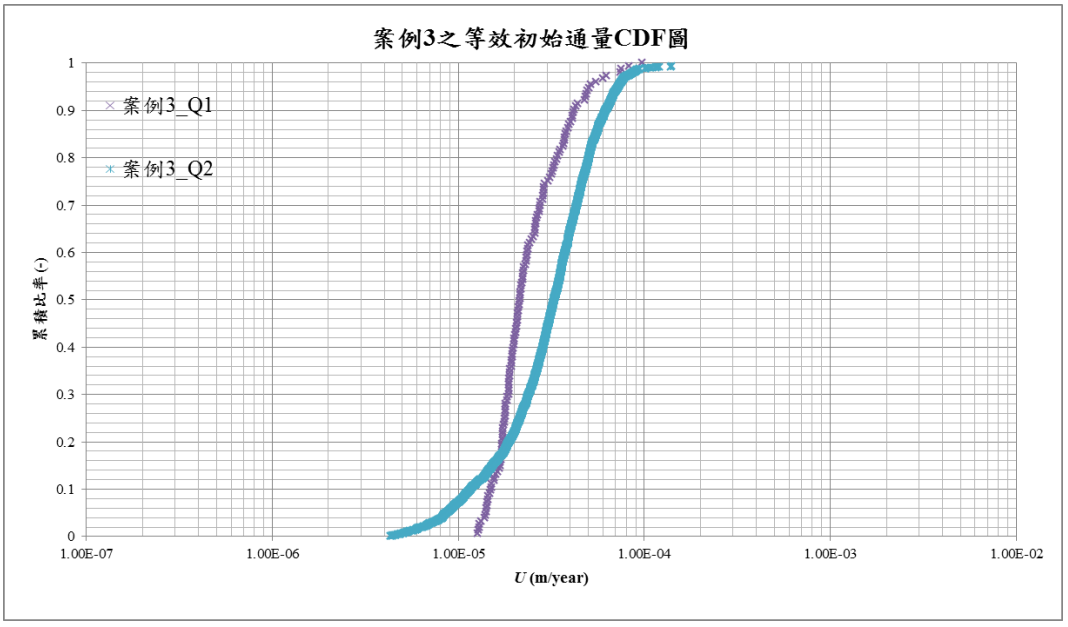


圖 4-132：案例3之等效初始通量CDF圖

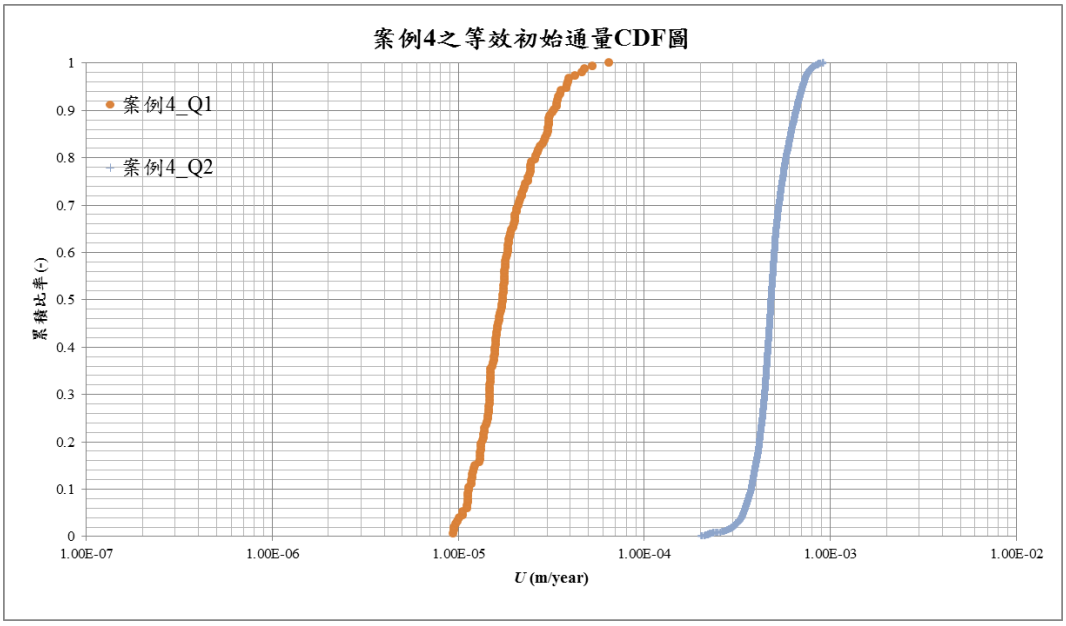


圖 4-133：案例4之等效初始通量CDF圖

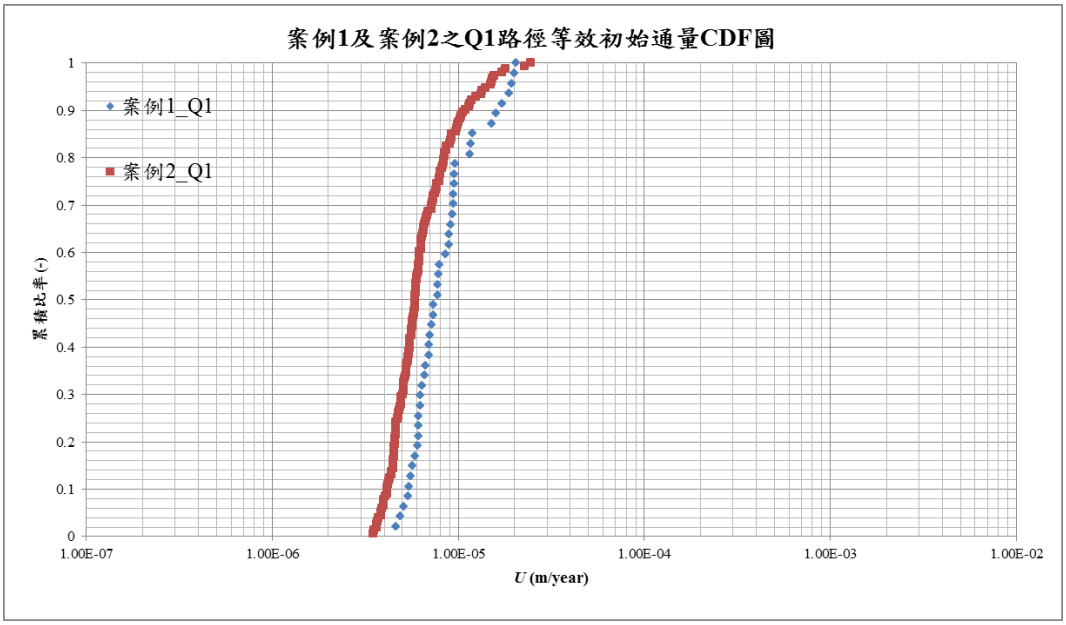


圖 4-134：案例1與案例2之Q1路徑等效初始通量CDF圖

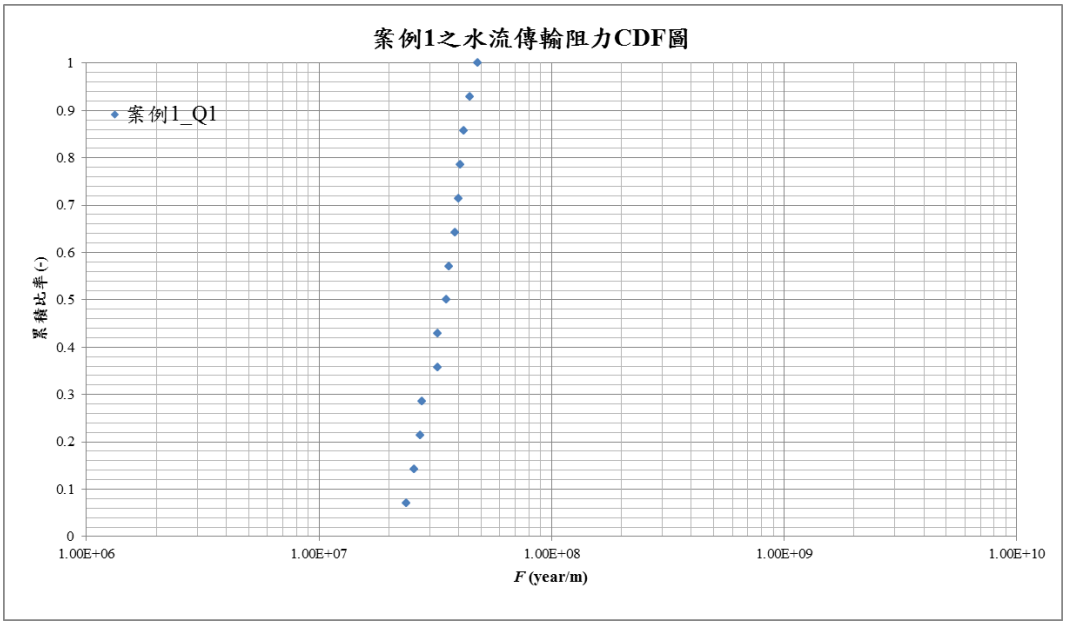


圖 4-135：案例1之水流傳輸阻力CDF圖

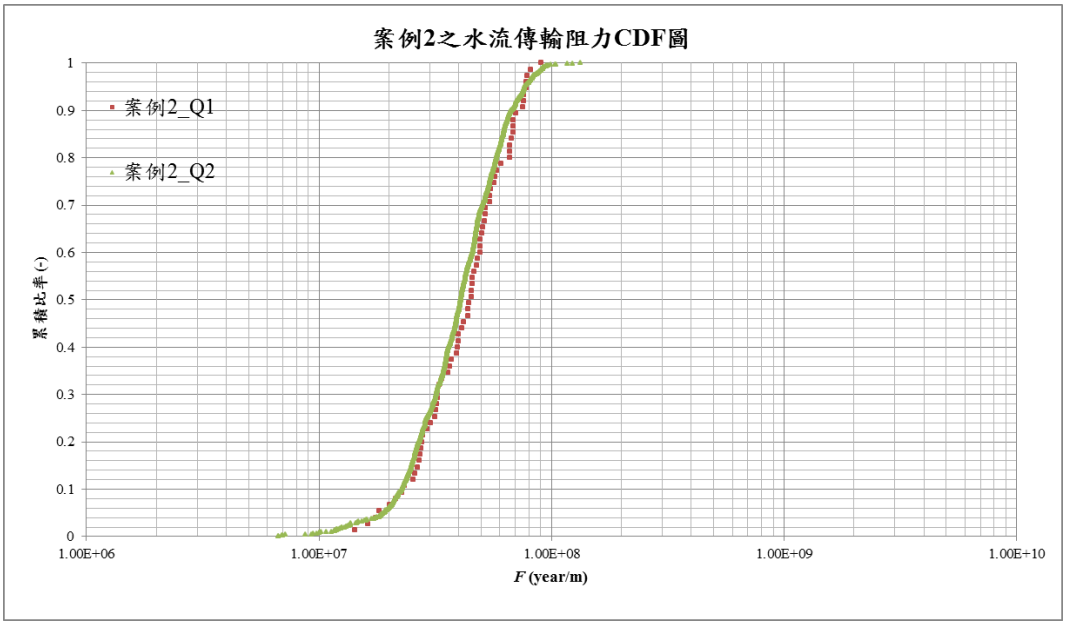


圖 4-136：案例2之水流傳輸阻力CDF圖

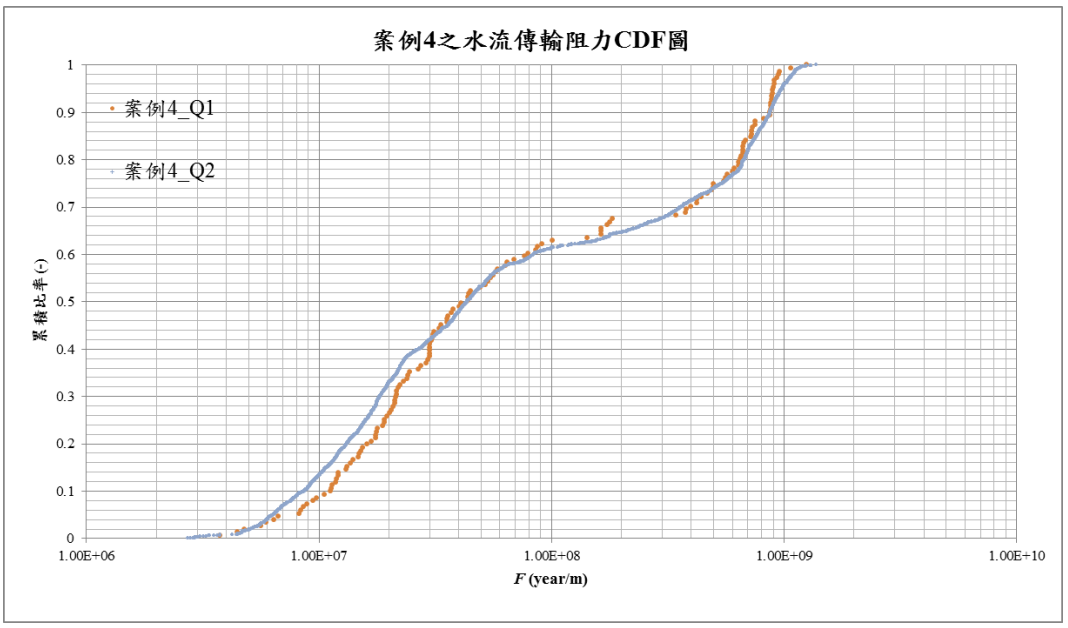


圖 4-137：案例4之水流傳輸阻力CDF圖

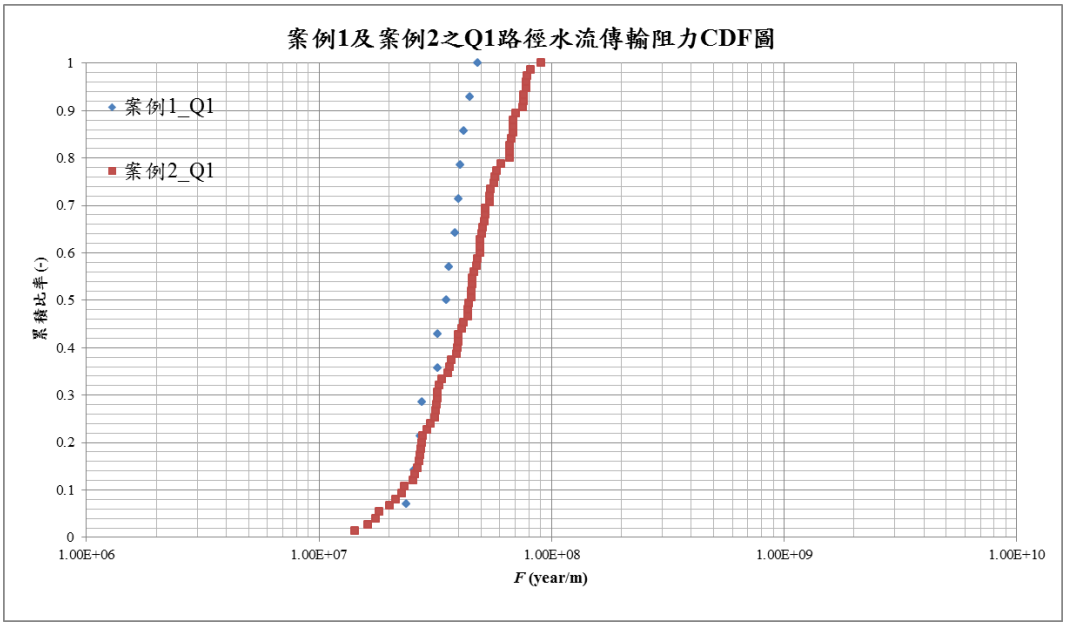


圖 4-138：案例1及案例2之Q1路徑水流傳輸阻力CDF圖

4.6.2. 近場核種傳輸分析技術

藉由本項分析技術並整合各項關鍵技術議題所提供之結果進行處置設施近場釋出與傳輸行為之安全評估，除提供後續進行遠場傳輸外，亦可探討對處置系統工程障壁性能之瞭解，包含系統中各元件與其安全功能對安全的影響及其重要性。

配合108年度工作計畫規劃，將利用Goldsim程式持續精進建立近場二維核種擴散傳輸模式，並與國際評估案例進行比較及驗證。為此，透過蒐集國際案例，瑞典SKB的SR-97報告中，近場核種傳輸模式包括多個釋出路徑，如圖 4-139所示，本節技術將根據瑞典SKB的SR-97報告中的近場核種傳輸模式進行技術建立與驗證，同時，建立近場核種傳輸評估的解析解，並與數值解之結果比較，以提升數值解之評估信心。另於安全評估中，參數將因時間、空間、環境及知識的缺乏而有不確定性。而這些不確定性將會影響評估的結果，為提升評估能力及評估核種釋出率的不確定性，108年度執行過程則利用GoldSim建立不確定性取樣分析技術，完成案例評估，以提升評估結果之健全性。

透過本章節技術完成建置後，將運用於4.7.3節，進行本土案例之案例分析計算。

108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

利用GoldSim建立近場二維核種擴散傳輸模式。

(2) 參數需求說明：

為達到驗證的目的，所使用的參數皆參考國際文獻，以在相同基準下進行比較。

近場二維核種擴散傳輸模式及近場核種傳輸解析解技術建立，係利用瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數(pessimistic canister related parameters)案例(Lindgren et al., 1999, p41)的相關參數進行評估。

近場參數不確定性評估，則係利用瑞典SKB的SR-Site報告中腐蝕失效機率性評估案例(SKB, 2010c, p65)的相關參數進行評估。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 近場二維核種擴散傳輸模式

目前瑞典SKB於其SR-Site報告中所採用之近場核種傳輸評估架構，如圖 4-140，包含Q1、Q2及Q3地下水傳輸路徑。其中，Q1為與廢棄物罐頂部截切之裂隙，Q2為處置坑道底部之開挖損傷帶，Q3為與處置坑道截切之裂隙。而瑞典SKB另於SR-97報告中，更考慮了Q4路徑，即1條位於處置孔下方的裂隙，裂隙與處置孔間隔著完整母岩(Lindgren et al., 1999, p3)，如圖 4-139。芬蘭Posiva於其報告中則與瑞典SKB的SR-Site報告相同，考慮了3個放射性核種自處置孔外釋的路徑，路徑F為與處置孔截切的裂隙、路徑DZ為處置坑道底部的開挖損傷帶及路徑TDZ為與處置隧道截切的裂隙(Poteri et al., 2014, p18)。為利用GoldSim建立近場二維核種擴散傳輸模式，本工作參考了瑞典SKB的SR-97報告中的近場核種傳輸評估架構進行建立，並與其評估之結果進行比較及驗證。其中，驗證GoldSim所建立之核種擴散傳輸模式評估之正確性，將與瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例(Lindgren et al., 1999, p41)評估結果進行比較，利用GoldSim中的區塊模式(compartment model)進行近場元件的建立，如圖 4-141，其中包括9個元件區塊，及3個等效傳輸阻力封塞(equivalent transport resistance plug)區塊，各區塊的材質、體積及水量如表 4-58；於此案例中，5罐廢棄物罐於製造時即具有微小初始缺陷，缺陷之初使面積為1 mm^2，放射性核種開始傳輸的延遲時間(t_{delay})為300年，缺陷之面積將於20,000年(t_{large})增大至0.01 m^2；於此案例中，共考慮了32個放射性核種，如表 4-59，以及各核種的盤存量、半化期及衰變鏈等等；當放射性核種釋出後，將考慮其於水中的溶解能力，並根據放射性核種自身的擴散能力於元件間以擴散機制傳輸，最後由近場傳輸至遠場後進入至生物圈。

利用GoldSim建立近場二維核種傳輸擴散傳輸模式，並以此模式評估瑞典SKB的SR-97報告中的悲觀廢棄物罐相關參數

案例，結果如圖 4-142，與SKB之結果比較，如圖 4-143。除了Pu系列核種，其餘較關鍵的放射性核種評估結果，皆有良好的一致性；在核種傳輸評估模式中，考慮了同元素放射性核種的溶解度分享功能，即同樣元素的放射性核種，將根據各放射性核種的量，按照比例共享1個溶解度限值，在Pu系列核種方面，經過測試後，若Pu系列核種不考慮溶解度限值的共享，即每個Pu系列放射性核種最高，皆可溶解6.56×10^{-6} mol/m^3的量於水中，結果如圖 4-144，則可得到與瑞典SKB相近趨勢的結果。

(b) 近場核種傳輸解析解

在近場核種傳輸解析解方面，係參考雙罐模式(dual tank model)所推導之解析解(Hedin, 2002)，其將處置設施的近場假設為2個罐子，分別為廢棄物罐(罐子1)及緩衝材料(罐子2)，並考慮2罐間溶質的傳輸阻力、緩衝材料罐的溶質釋出阻力，於罐中考慮溶質的吸附及衰減等機制，以常微分方程式描述前述機制，再利用拉普拉斯轉換求得解析解。

參考瑞典SKB其SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例(Lindgren et al., 1999, p41)，利用解析解公式計算19個放射性核種的近場年釋出活度，如表 4-59所示，結果如圖 4-145，結果與利用數值解評估之結果相比，如圖 4-142，其中，Pu-239及U-234因未於解析解中考慮與其他同元素核種共享溶解度限值功能，導致解析解之線型與數值解有些許差異(因此，Pu-239的釋出率可與圖 4-144相符)，而Th-230之趨勢也與數值解之結果不同，可能為評估衰變鏈核種釋出率解析解中，未考慮放射性核種的溶解度限值導致，其餘核種在釋出活度的趨勢上皆近似。

(c) 近場參數不確定性評估

蒙地卡羅方法一般係指某模式中，其結果將根據數個參數決定，這些參數具有不確定性，並以隨機的方式對這些參數進行取樣，再將取樣得到的參數輸入模式中進行確定性運算，

不斷重複前述過程，整合結果後，可以得到此模式的期望值；於用過核子燃料最終處置封閉後安全評估中，模式即核種傳輸評估模式，其中，參數包括處置設施中各材料的幾何及特性參數，或水流相關參數等等，前述參數皆有其本身的不確定性，利用隨機取樣法對這些參數進行取樣，再輸入核種傳輸評估模式中進行運跑。重複多次後，可了解放射性核種自處置設施釋出至生物圈的劑量期望值、最高值及最低值等等，以達到安全評估的目的；瑞典SKB採用@risk軟體進行參數取樣，@risk為Palisade軟體公司開發的風險評估插件，為微軟excel軟體之增益功能(add-in)，瑞典SKB利用@risk中的拉丁超立方方式(Latin hypercube method)根據各參數之分布進行取樣，並將取樣結果輸入其近場及遠場核種傳輸評估軟體(COMP23及FARF31)(SKB, 2010c, p50)。而一般於各個評估案例中針對各參數取樣及運跑6,916次，但取樣次數有時取決於評估案例，如廢棄物罐因地下水腐蝕失效之不確定性評估案例中，各個失效時間僅對各參數取樣50次即可收斂(則此案例的取樣次數為廢棄物罐失效次數與各參數取樣次數的乘積，為2,800次)；芬蘭Posiva採用GoldSim針對廢棄物罐初始失效情節進行不確定性評估，其對各參數進行取樣1萬次，並進行2個案例的評估(Cormenzana, 2013, p69)；日本JAEA採用GoldSim針對H12報告中的安全評估案例進行不確定評估，其利用軟體中的拉丁超立方方式對參數取樣，並評估核種釋出率(若杉圭一郎等，2002，p149-160)；英國NDA則採用GoldSim進行多個案例的不確定性評估，其對各參數進行取樣及運跑2,000次(NDA, 2016, p60)。

GoldSim中提供了2種對分布參數進行取樣的方式，分別為隨機取樣及拉丁超立方取樣。其中，隨機取樣方法即每次取樣時隨機自某1個具分布的參數取出1個定值，而拉丁超立方方法會將1個具有分布的參數的機率分布(0至1)分割成數個相等機率的區間且隨機排列，並強迫取樣時依次自每個區間中

取樣，此方法可以確保自機率分布中取樣時的均勻性，其表現在任何情況下都不會比隨機取樣來的差(GTG, 2014, p1014)。為了測試GoldSim中隨機取樣及拉丁超立方方法在參數取樣的表現，於GoldSim中建立了雙三角分布(double triangular distribution)(AACE, 2008, p6)之參數分布，如圖4-146。利用2種取樣方式對此雙三角分布取樣，觀察不同取樣次數下的結果，而在後續的案例評估中，也將利用2種取樣方法對各參數取樣，並觀察不同取樣次數下結果的收斂程度。

為驗證安全評估不確定性評估方法所用之案例，我們參考了瑞典SKB的SR-Site報告的資料及案例，進行不確定性評估方法之驗證；在資料方面，瑞典SKB的SR-Site資料報告中包含各參數之不確定性及其分布方式，如燃料基質溶解速率、燃料的瞬時釋出分率及放射性核種與材質間的分配係數等等。在案例方面，則參考了瑞典SKB的SR-Site報告之腐蝕失效機率性評估案例(SKB, 2010c, p65)。

在此腐蝕案例中，廢棄物罐周圍緩衝材料將被地下水侵蝕，並導致地下水直接以平流方式接觸廢棄物罐表面，當廢棄物罐的銅殼被腐蝕至厚度為0時，廢棄物罐的圍阻功能失效，地下水進入廢棄物罐中，將燃料基質中的放射性核種溶出並帶離近場；於模式建立方面，將利用區塊模式模擬廢棄物罐的含水空腔，並以平流方式模擬放射性核種自近場釋出。

於GoldSim中，利用隨機取樣法及拉丁超立方取樣法對輸入的雙三角分布(如圖 4-146)進行取樣，分別取樣400、2,000及5,000次後得到的機率密度函數如圖 4-147；結果顯示在取樣次數低時拉丁超立方法，可得到與原始機率密度函數較近似的結果。因此，將拉丁超立方法應用於核種傳輸評估中，應可以較少的取樣次數得到收斂的不確定性評估結果。

在驗證安全評估不確定性評估方法正確性方面，我們利用GoldSim進行瑞典SKB的SR-Site報告之腐蝕失效機率性案例

評估，近場之評估結果如圖 4-148，與瑞典SKB之評估結果進行比較，如圖 4-149，評估的結果有良好的一致性，在評估中，U的溶解度限值必須要設定的非常低(於GoldSim中設定為0)才能吻合瑞典SKB的結果，此情況與瑞典管制單位SSM(Swedish Radiation Safety Authrority)的報告有相同情況(Pensado et al., 2012, p9)；圖 4-150為2種取樣方法下，每次廢棄物罐失效時的取樣次數及對應的Ni-59近場峰值平均年有效劑量，由結果可見，低取樣次數次時，使用拉丁超立方法可得到接近收斂的結果，而隨機取樣法則需在取樣次數達約80次時才能趨近於收斂。

(4) 結果與討論：

本工作已完成近場二維核種擴散傳輸模式的建立，利用建立的模式評估瑞典SKB的SR-97報告中的案例，可得到近似的結果

在近場核種傳輸解析解方面，多數核種的釋出率趨勢及峰值劑量可與數值解相符。

在近場參數不確定性評估方法建立方面，本工作則比較了隨機取樣及拉丁超立方法，用於不確定性評估案例的優劣，結果顯示拉丁超立方法在取樣次數低的情況下，對評估結果有較好的收斂性。

本章節建置之技術將運用於4.7.3節，進行本土案例之案例分析計算。

表 4-64：利用GoldSim建立SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例核種傳輸區塊模式，各區塊的材質、體積及水量

區塊名稱	材質	體積 [m³]	水量 [m³]
B-1	緩衝材料	7.65×10^{-1}	3.14×10^{-1}
B-2	緩衝材料	6.66	2.73
B-3	緩衝材料	1.20	4.93×10^{-1}
B-4	緩衝材料	3.61	1.48
BF-1	回填材料	2.41	7.22×10^{-1}
BF-2	回填材料	75.40	22.62
C-1	水	1.00	1.00
C-2	水	5.00×10^{-8} 5.00×10^{-4} (20,000 yr)	5.00×10^{-8} 5.00×10^{-4} (20,000 yr)
P-1	緩衝材料	4.00×10^{-10} 2.00×10^{-3} (20,000 yr)	1.64×10^{-10} 8.18×10^{-4} (20,000 yr)
P-2	緩衝材料	2.75×10^{-7}	1.13×10^{-7}
P-3	回填材料	1.20×10^{-5}	3.60×10^{-6}
R-1	母岩	7.22	3.61×10^{-2}

表 4-65：近場二維核種擴散傳輸模式驗證中，所考慮的放射性核種

分裂及活化產物	4N	4N+1	4N+2	4N+3
C-14*	Pu-240	Th-229	Ra-226*	Pa-231*
Cl-36*		U-233	Th-230*	U-235*
Ni-59*		Np-237	U-234*	Pu-239*
Ni-63*		Am-241	U-238*	Am-243
Se-79*		Cm-245	Pu-242	
Sr-90*				
Zr-93				
Nb-94*				
Tc-99*				
Pd-107				
Ag-108m				
Sn-126*				
I-129*				
Cs-135*				
Cs-137*				
Sm-151				
Ho-166m				

資料來源：Lindgren et al.(1999, p14)

註：*號表示於解析解評估案例中考慮並計算

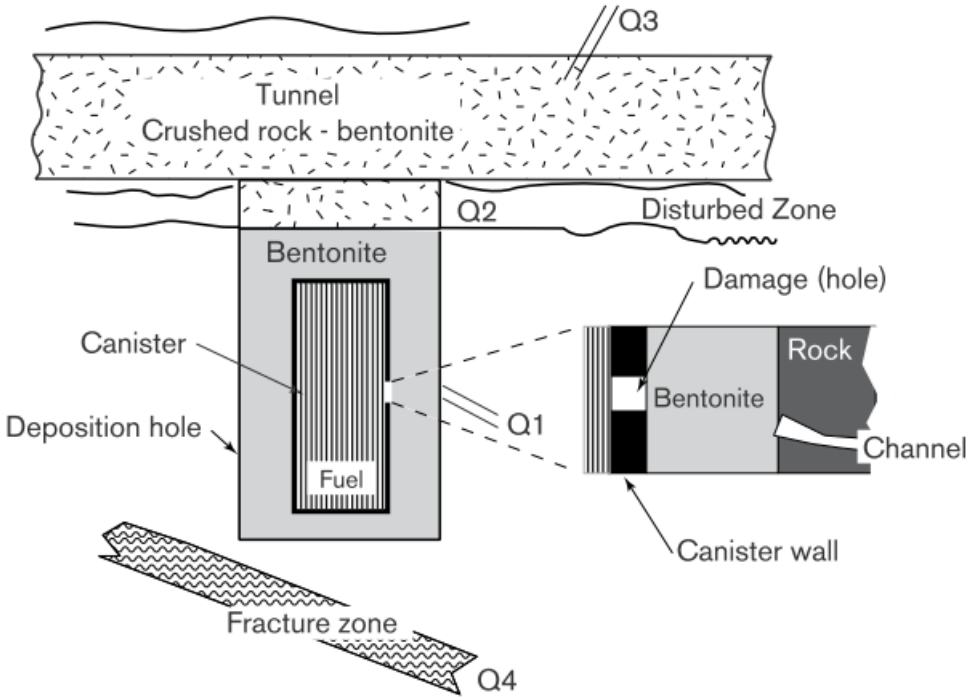


圖 4-139：瑞典SKB的SR-97報告中的近場核種傳輸評估架構

資料來源：Lindgren et al.(1999, p3)

中英文對照：Tunnel(隧道)；Bentonite(膨潤土)；Canister(廢棄物罐)；Canister wall(廢棄物罐壁)；Channel(通道)；Crushed rock-bentonite(碎石膨潤土)；Damage(損傷)；Deposition hole(處置孔)；Disturbed Zone(擾動帶)；Fracture zone(斷裂帶)；Fuel(燃料)；Hole(孔)；Rock(岩石)。

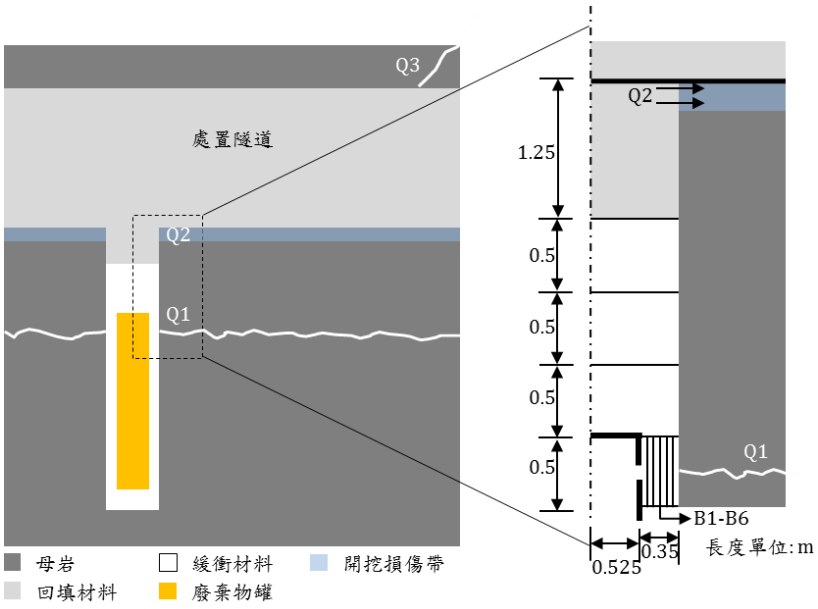


圖 4-140：瑞典SKB的SR-Site報告中的核種傳輸途徑示意圖

資料來源：重繪自SKB(2010c, p300)

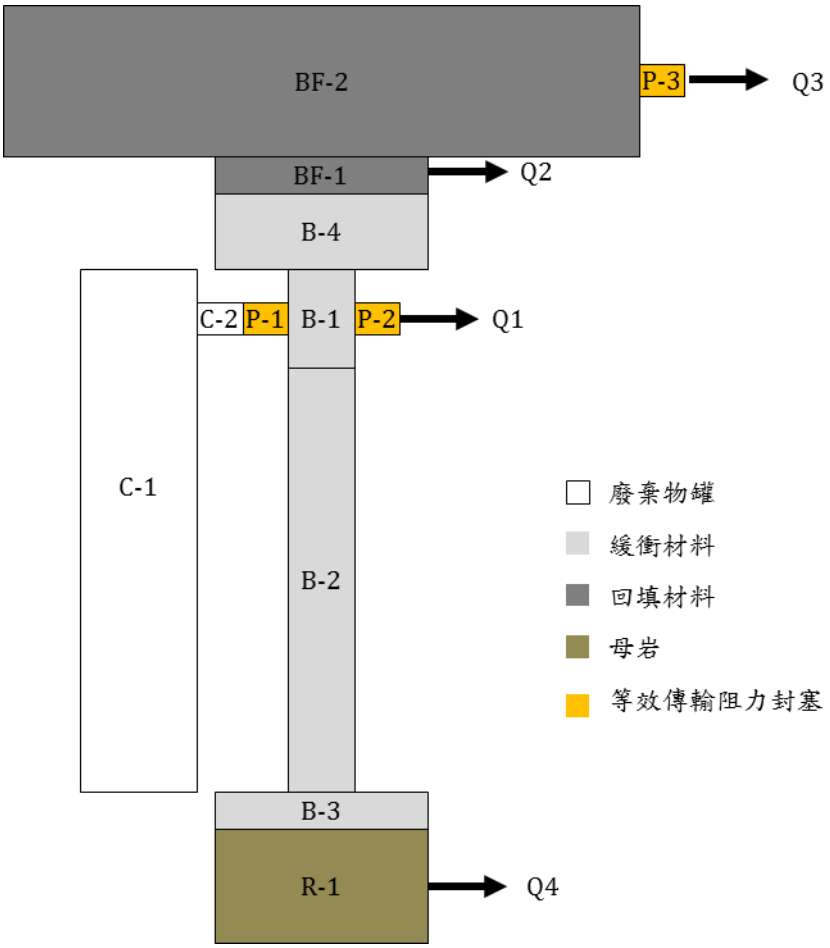


圖 4-141：利用GoldSim建立SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例核種傳輸區塊模式示意圖

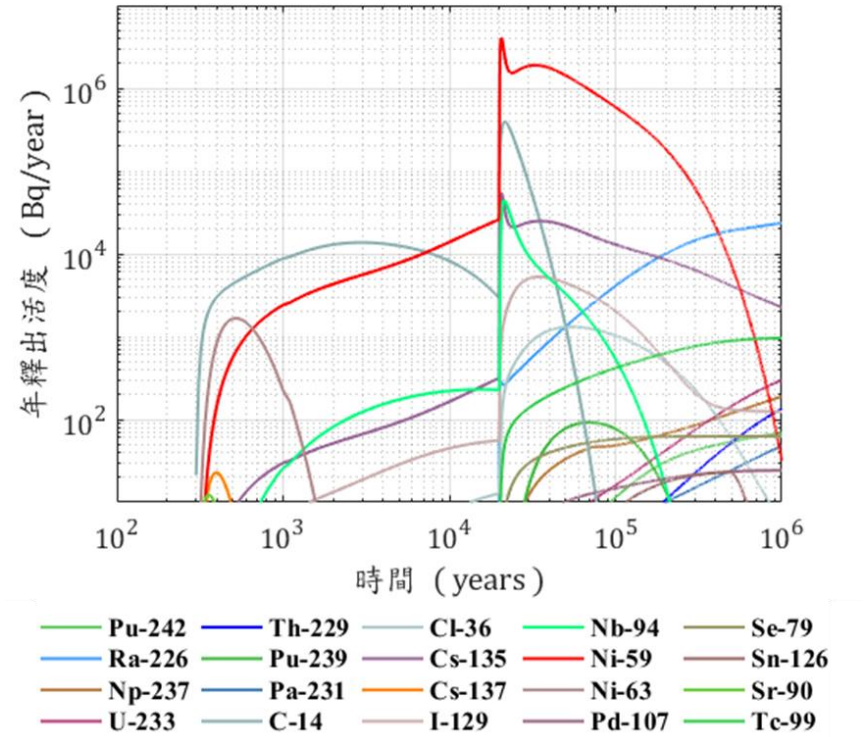


圖 4-142：利用近場二維評估模式評估瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例之評估結果

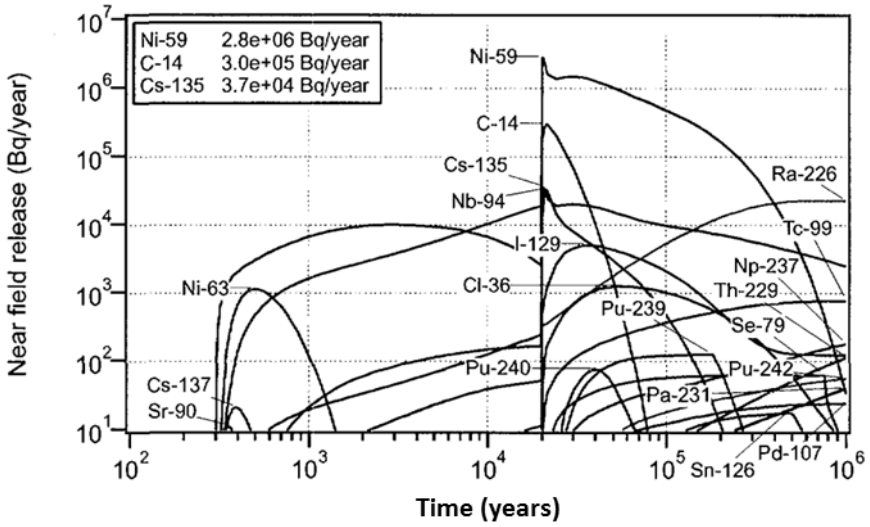


圖 4-143：瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例之評估結果

資料來源： Lindgren et al.(1999, p42)

中英文對照：Near field release (近場釋出)；Time(時間)。

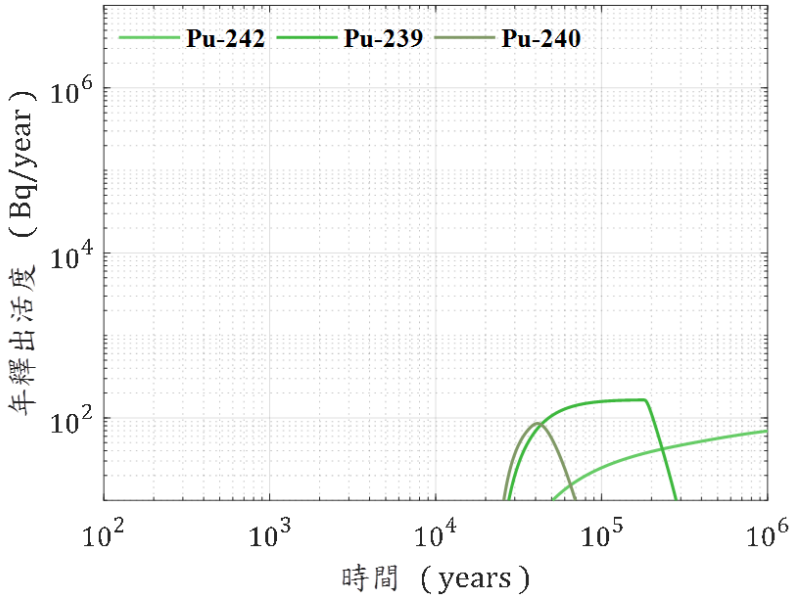


圖 4-144：利用近場二維評估模式評估瑞典SKB的SR-97報告中悲觀廢棄物罐相關參數案例中Pu系列放射性核種的結果，並不考慮Pu系列核種的溶解度限值共享

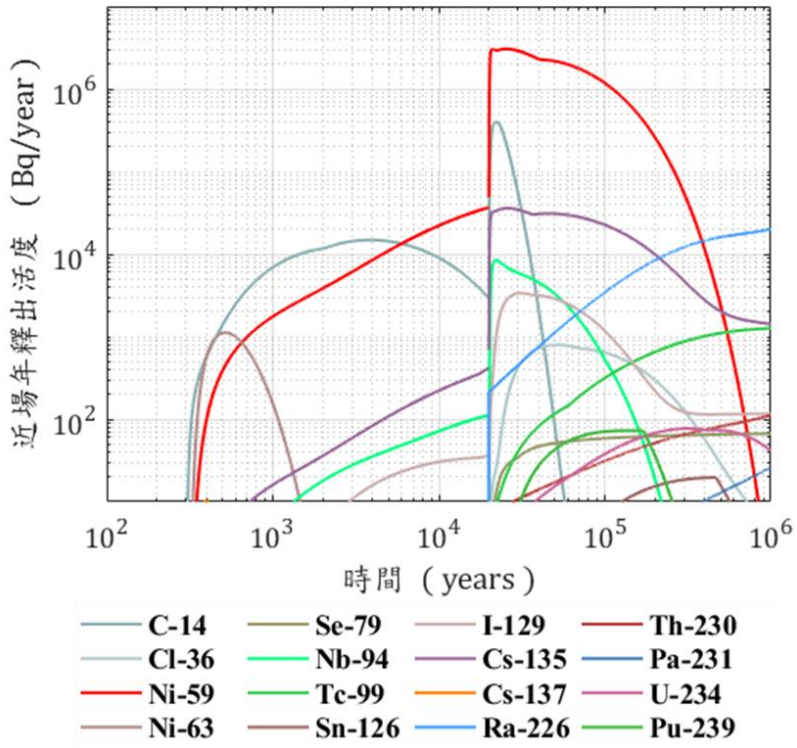


圖 4-145：利用近場解析解公式計算各放射性核種的近場年釋出活度

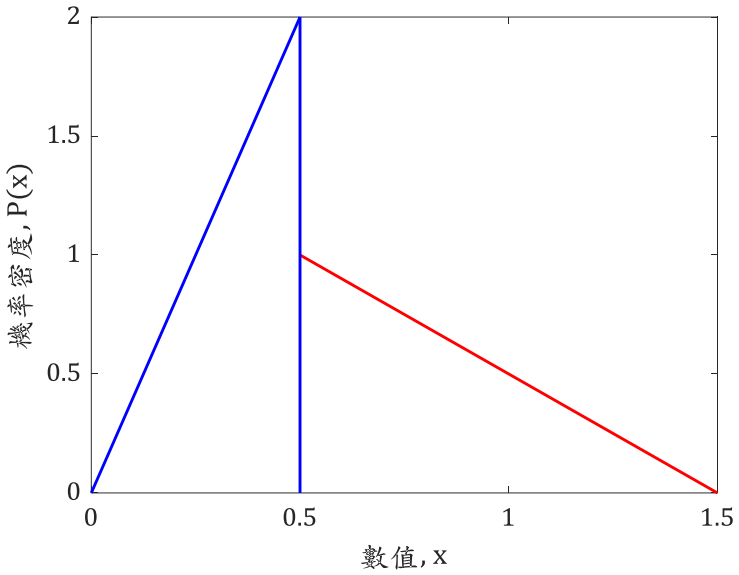


圖 4-146：雙三角分布的機率密度分布圖，其中，最小值為0，最大值為1.5，最可能值為0.5，且2個三角形的機率總和相同

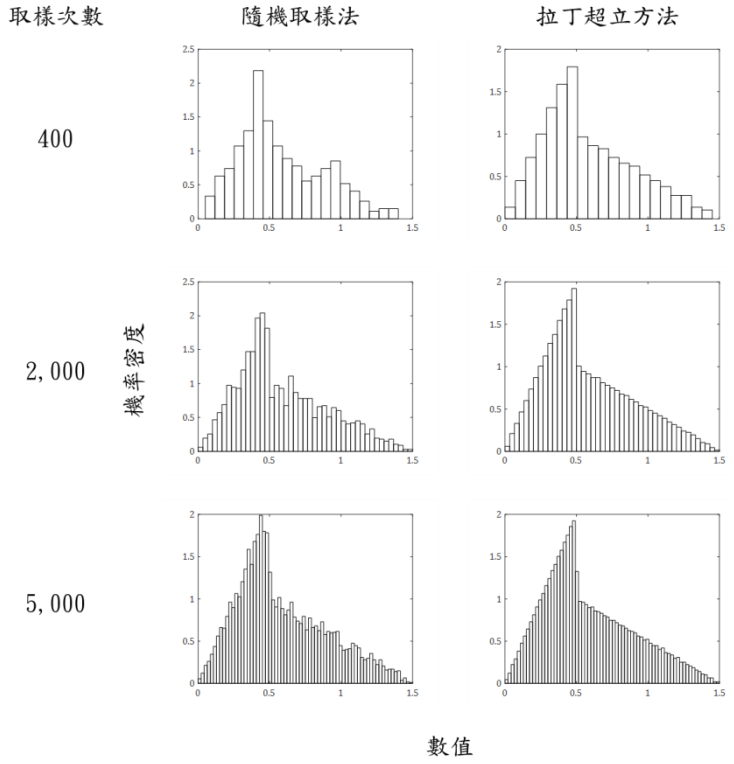


圖 4-147：利用GoldSim對1個雙三角分布取樣400、2,000及5,000次後得到的機率密度函數

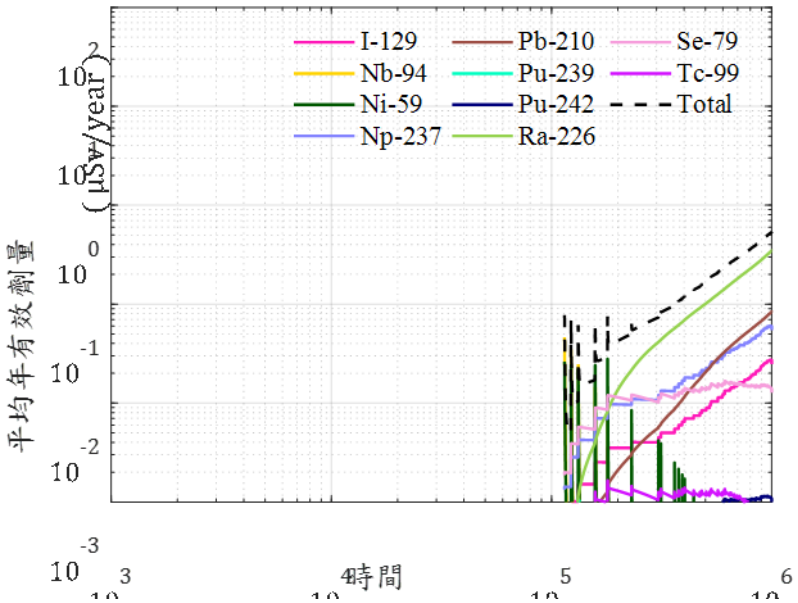


圖 4-148：利用GoldSim進行瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例近場評估結果

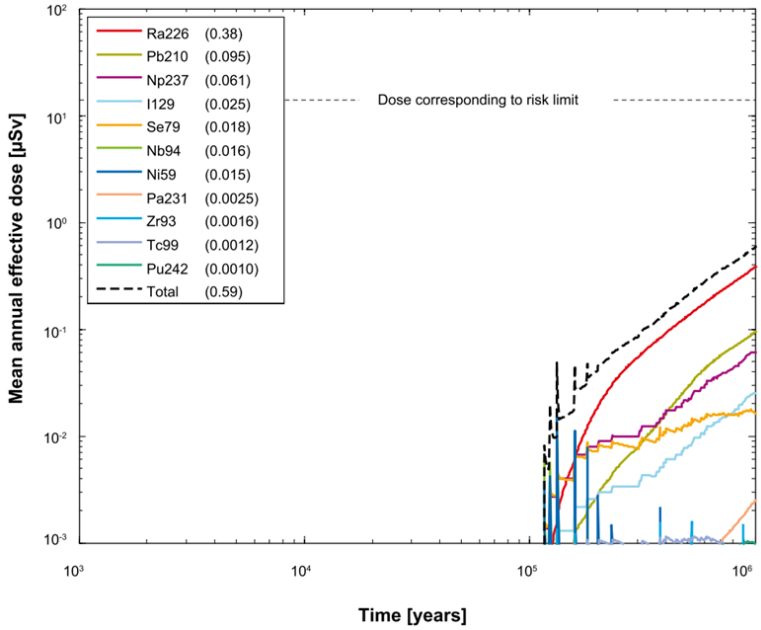


圖 4-149：瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例近場評估結果

資料來源：SKB(2010c, p300)

中英文對照：Mean annual effective dose(平均年有效劑量)；Time(時間)。

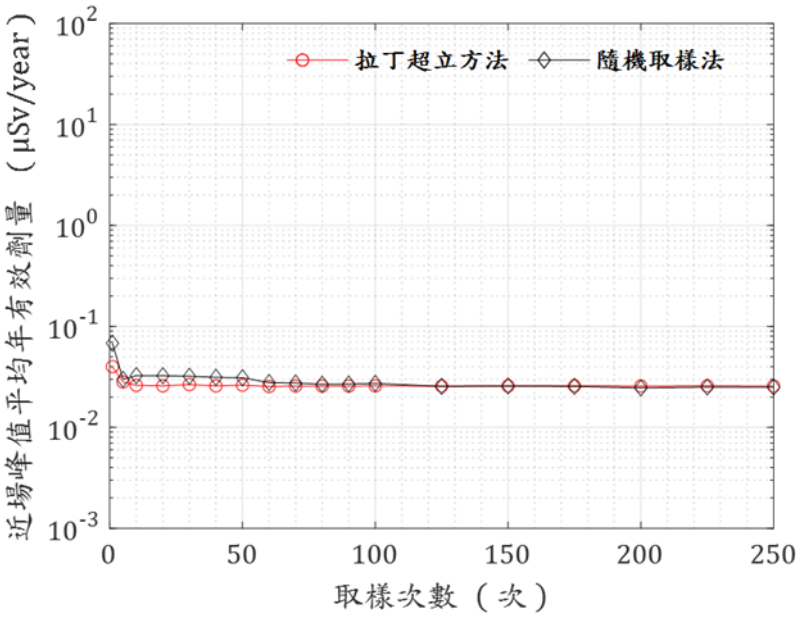


圖 4-150：利用隨機取樣及拉丁超立方方法進行參數取樣，不同取樣次數下近場的Ni-59峰值平均年有效劑量

4.6.3. 遠場核種傳輸分析技術

遠場核種傳輸分析技術是探究放射性核種在地質圈中的傳輸行為，量化地質圈所發揮的遲滯安全功能是安全評估重要一環。

配合108年度工作計畫規劃，將利用Goldsim程式建立遠場不確定性取樣分析技術，參考國際案例進行案例評估，並完成驗證，此技術將用於4.7.3節，進行本土案例之案例分析計算。

108年度於遠場核種傳輸分析技術，擴增以美國核廢棄物管制分析中心(Center for Nuclear Waste Regulatory. Analyses, CNWRA)所開發針對裂隙岩體中的MARFA(The Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field，後簡寫為MARFA)，運用蒙地卡羅方法評估平流(advection)、縱向延散(longitudinal dispersion)、吸附(sorption)與衰變(decay)等作用，發展建立遠場核種傳輸分析技術，並說明近場/遠場核種傳輸的銜接與案例測試。

108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

針對發展遠場核種傳輸分析技術，擬採用GoldSim執行不確定性技術研究，同時，也引入MARFA進行驗證案例測試及遠近場參數銜接之測試。

(2) 參數需求說明：

針對發展遠場核種傳輸分析技術之參數需求，主要包含3大區塊，首先是各核種在遠場環境下之特性，其次為遠場地質圈的水文地質特性參數，最後，則是由近場取得之各核種釋出率。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 遠場參數不確定性評估

此評估係延續4.6.2.節之內容，進行遠場參數不確定性評估，即以GoldSim進行瑞典SKB的SR-Site報告之腐蝕失效機率性案例(SKB, 2010c, p65)的遠場評估；遠場之評估結果如圖4-151，與瑞典SKB之評估結果進行比較，如圖 4-152，其中除Ac-227未模擬外，結果顯示與瑞典SKB之評估結果有良好的一致性，遠場平均、中位數、95%百分位及99%百分位的總

年有效劑量如圖 4-153，也與瑞典SKB之評估結果有良好的一致性。同時，也利用此案例搭配龍捲風圖進行參數敏感度評估，於評估中，評估各參數對100萬年時的總年有效劑量影響，評估之結果如圖 4-154，其中以燃料溶解速率對結果的影響最大(總年有效劑量介於1.45×10^{-1} μSv/yr至3.62 μSv/yr間)，其餘如水流傳輸阻力(flow related transport resistance, F)、廢棄物罐失效時間、母岩對Ra元素的分配係數及Ra元素於母岩中的有效擴散係數的不確定性，皆對評估結果有一定的影響力；圖 4-155為2種取樣方法下，每次廢棄物罐失效時的取樣次數及對應的Ni-59遠場峰值平均年有效劑量。由結果可見，拉丁超立方法約於低取樣次數下(約為60次)時可得到趨近收斂的結果，而隨機取樣方法的取樣次數，則需要約100次以上才可得到趨近收斂的結果。

(b) 建立MARFA遠場分析技術與驗證案例

MARFA驗證案例之系統設定為長度100公尺單一區段(a single segment)的水平路徑，並考慮無限及有限的基質擴散模型，與解析解曲線比較，其中，有限基質擴散的深度為4.75 mm。測試案例中，採用2放射性核種的衰變鏈(A⟶B)，2個放射性核種的半化期皆假設為10,000年。放射性核種A於初始時以0.001 mol/yr的強度進入驗證案例之系統，其衰變常數為0.0000693 yr^{-1}。於環境參數中，地下水流速為1 m/yr，縱向沿散(longitudinal dispersivity)為0.5 m，裂隙半寬(fracture half-aperture)為0.1 mm，孔隙率(θ)為0.01，母岩有效擴散系數(the matrix effective diffusion coefficient)為10^{-8} m^2/yr。放射性核種A與放射性核種B於無限基質擴散案例中的母岩遲滯因子(R)分別為1,000與100，於有限基質擴散案例中的母岩遲滯因子分別為200與500，母岩遲滯因子為分配係數之函數，關係如下：

$$R = 1 + \frac{\rho_b \times k_d}{\theta} \quad (4\text{-}11)$$

其中，

ρ_b ＝ 母岩密度，[M/m³]。

k_d ＝ 放射性核種於母岩之分配係數，[L³/M]。

θ ＝ 孔隙率，[-]。

母岩無限基質擴散案例，經MARFA SP計算取得藍色正三角形標號為母核(A)與黑色倒三角形標號為子核(B)之突破曲線點，分別符合解析解曲線A(AS_A)與B(AS_B)，如圖 4-156所示。

母岩有限基質擴散案例，經MARFA SP計算取得藍色正三角形標號為母核(A)與黑色倒三角形標號為子核(B)之突破曲線點，分別符合解析解曲線A(AS_A)與B(AS_B)，如圖 4-157所示。

(c) 建立近場/遠場之銜接技術與案例測試

近場釋出至遠場的釋出率可利用等效流率(equivalent flow rate, Q_{eq})，作為橋接進行評估；核種傳輸模式中的近場與遠場間介面，為緩衝材料與母岩裂隙之間，該處之放射性核種i的濃度為c_{BW}^{i}，而由母岩裂隙流入處置孔之地下水中放射性核種濃度為c_{W}^{i}，則放射性核種i由近場傳輸至遠場之釋出率為N_i，可以下列公式計算(Neretnieks et al., 2010, p14)：

$$N_i = Q_{eq,i}\left(c_{BW}^{i} - c_{W}^{i}\right) \quad (4\text{-}12)$$

其中，

c_{BW}^{i} ＝ 放射性核種i於緩衝材料/母岩裂隙交介面的濃度，[mol/m³]。

c_{W}^{i} ＝ 放射性核種i於母岩裂隙流入處置孔之地下水中的濃度，[mol/m³]。

N_i = 放射性核種i由近場傳輸至遠場之釋出率，[mol/yr]。

$Q_{eq.i}$ = 放射性核種i於緩衝材料/母岩裂隙交介面的流率，[m^3/yr]。

進入裂隙的水中，應不具放射性核種濃度，則c_W^i應為0，式(4-11)可簡化為下：

$$N_i = Q_{eq,i} c_{BW}^i \tag{4-13}$$

放射性核種i於緩衝材料/母岩裂隙交介面的流率$Q_{eq,i}$可以利用解析解計算，該處的幾何可以圖 4-158描述，其中，水流以常數u的流速朝x方向流動，x方向長度為L_f，y方向為母岩裂隙開口寬，長度為e_f，z方向則為側向，假設其長度為無限長，則該處溶質的平流/擴散方程式如下((Joyce et al., 2010, p153)：

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial x} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right) \tag{4-14}$$

其中：

c = 濃度，[mol/m^3]。

D = 擴散係數，[m^2/yr]。

t = 時間，[yr]。

u = 流速，[m/yr]。

x = x方向長度，[m]。

y = y方向長度，[m]。

z = z方向長度，[m]。

因地下水平流係朝x方向流動，於x方向溶質的傳輸將由平流機制主導，因此，於x方向的溶質擴散小至可以忽略，且於y方向的溶質擴散為0，則穩態條件下，式(4-13)改寫如下：

$$u\frac{\partial c}{\partial x} = D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \tag{4-15}$$

假設：

$$\tau = \frac{x}{u} \tag{4-16}$$

其中：

$\tau =$ 溶質以速度u通過長度x所需之時間，[yr]。

則式(4-15)改寫如下：

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \tag{4-17}$$

式(4-16)之初始及邊界條件為：

$$c(z > 0, \tau = 0) = 0 \tag{4-18}$$
$$c(z \leq 0, \tau > 0) = c_0 \tag{4-19}$$
$$c(z = \infty, \tau > 0) = 0 \tag{4-20}$$

則式(4-16)根據上述初始及邊界條件所解之解析解如下式(Crank, 1975,p21)：

$$c = c_0 erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{D\tau}}\right) \tag{4-21}$$
$$erfc(\Theta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_{\Theta}^{\infty} e^{-\omega^2} d\omega \tag{4-22}$$

將式(4-15)代至式(4-20)即得下式：

$$c = c_0 erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{Dx/u}}\right) \tag{4-23}$$

利用式(4-22)可計算溶質於x為L_f時的釋出率：

$$N_{L_f} = \int_0^{\infty} ue_f c_0 erfc\left(\frac{z}{2\sqrt{DL_f/u}}\right) dz \tag{4-24}$$

其中，

N_{L_f} = 於x為L_f處時的溶質釋出率，[mol/yr]。

式(4-23)積分後的結果為：

$$N_{L_f} = ue_f c_0 \bar{\tau} \tag{4-25}$$

$$\bar{\tau} = 2\sqrt{\frac{DL_f/u}{\pi}} \tag{4-26}$$

其中，

$\bar{\tau}$ = 於x為L_f時，z方向的溶質擴散平均穿透深度，[m]。

式(4-24)中的N_{L_f}及c_0即分別等於式(4-12)中的N_i及c_{BW}^i，則Q_{eq}為：

$$Q_{eq} = ue_f \bar{\tau} \tag{4-27}$$

目前採用DarcyTools軟體評估水流相關參數，上式之Q_{eq}將由其提供，作為近場的邊界條件，以得到近場放射性核種釋出率，並供遠場核種傳輸模式使用；而各放射性核種於水中的擴散係數差異不大，則式(4-12)中$Q_{eq,i}$的i可忽略，即各核種於式(4-26)中的D相同(Neretnieks et al, 2010, p14;Cussler, 2009, p126)。

於遠/近場銜接技術測試中，以SNFD2017參考案例進行：水文評估模式根據上述概念評估Q_{eq}，並帶入近場核種傳輸評估模式取得近場釋出率後，再將近場釋出率帶入MARFA中。透過測試執行SNFD2017參考案例中，2個主要情節中的各1案例，分別為剪力情節的早期失效案例以及腐蝕情節的全球暖化案例，完成近場傳輸的橋接參數轉換，擷取近場核種釋出率，提供給地質圈評估模型，並以MARFA完成遠場核種遷移評估，分別再配合全球暖化情境之BDCF以及與當代環境相似期之BDCF，取得劑量評估量化數據，最後與SNFD2017參考案例採GoldSim之執行結果進行比對與討論。

剪力情節的早期失效案例則參考SNFD2017之設定，假定於封閉後1年至1,000年間發生1次地震，造成廢棄物罐累積失效機率為3.56×10^{-5}，且假定地震發生時間為封閉後第1年。SNFD2017參考案例剪力情節的早期失效案例評估結果如圖4-159所示，左側為GoldSim評估結果，右側則為MARFA評估結果，案例中近場核種釋出主要以Cl-36與I-129為主，而Cl-36與I-129之母岩分配係數皆為0，在地質圈無遲滯效果，使得Cl-36與I-129同樣主導了遠場釋出率，2種評估結果之整體劑量率變化趨勢近似，而配合BDCF轉換為劑量率後，Cl-36劑量率峰值差異約0.2%，I-129劑量率峰值差異約0.4%，而整體劑量率峰值差異約為1.0%。

SNFD2017參考案例腐蝕情節全球暖化案例評估結果如圖4-160所示，左側為GoldSim評估結果，右側則為MARFA評估結果；案例在96萬年左右廢棄物罐失效致使放射性核種釋出，由於達到廢棄物罐腐蝕失效之要素，即為處置孔內緩衝材料區域已達到平流條件，使得放釋出核種非常迅速地通過近場抵達遠場，近場核種釋出初期以Cl-36與Ni-59等為主，後期則有Tc-99生成與累積，2種評估結果之整體劑量率變化趨勢近似，而配合BDCF轉換為劑量率後，Cl-36劑量率峰值

差異約0.6%，I-129劑量率峰值差異約4.3%，Tc-99劑量率峰值差異約1.2%，而整體劑量率峰值差異約為1.9%。

(4) 結果與討論：

在遠場參數不確定性評估方法建立方面，參考GoldSim進行瑞典SKB於SR-Site報告中的腐蝕失效機率性評估案例，執行遠場輻射劑量不確定性評估，得到相當一致的評估結果。同時，經採用隨機取樣及拉丁超立方法進行不確定性參數取樣測試，其結果顯示，拉丁超立方法在取樣次數低時，有較佳的收斂效果；未來進行本土案例評估時，可選用拉丁超立方法進行不確定性案例的評估，並得出上述不確定性分析結果，供安全評估參考，以了解處置設施整體的不確定性，並利用參數敏感度測試的結果決定優先研究的參數及議題。

在MARFA的驗證方面，依據上述驗證測試可知，由於母岩基質擴散深度與母岩遲滯因子之調整，母岩有限基質擴散案例之核種釋出率相對於母岩無限基質擴散案例皆增加。且經比對MARFA SP實作母岩有限與無限擴散驗證案例評估結果，其結果皆符合解析解結果，故初步確認MARFA評估環境設置正確，同時，解析解驗證案例執行也正確執行完成。

依據上述介面參數研析與測試案例評估結果得知，在高放處置應用相同評估條件下，MARFA可取得與GoldSim非常近似之評估結果，具體提升SNFD2017參考案例評估結果之可信度。同時，也確認完成以MARFA建立遠場母岩裂隙核種傳輸模式，以及訂定MARFA遠場傳輸與GoldSim近場傳輸的橋接參數轉換技術。上述技術得以恰如其分地應用於地質圈核種傳輸評估，提升整體安全評估技術。

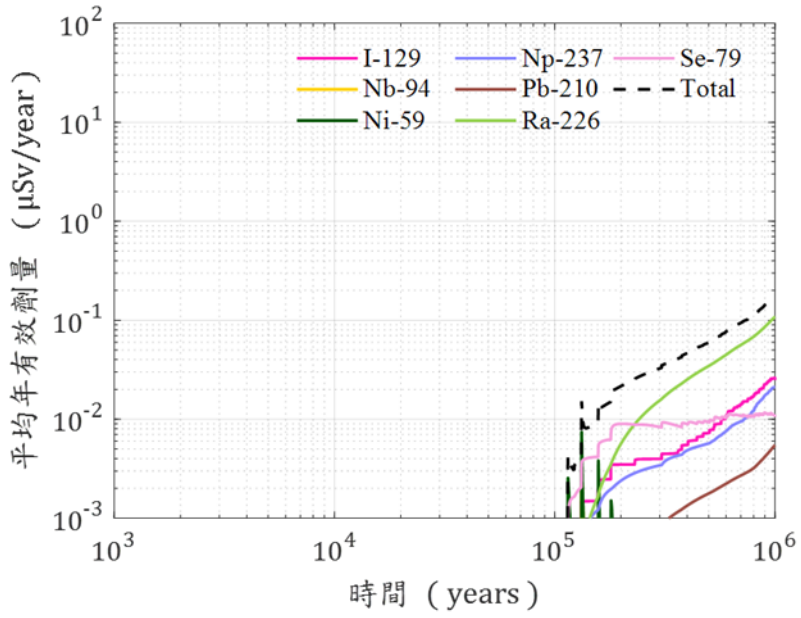


圖 4-151：利用GoldSim進行瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例遠場評估結果

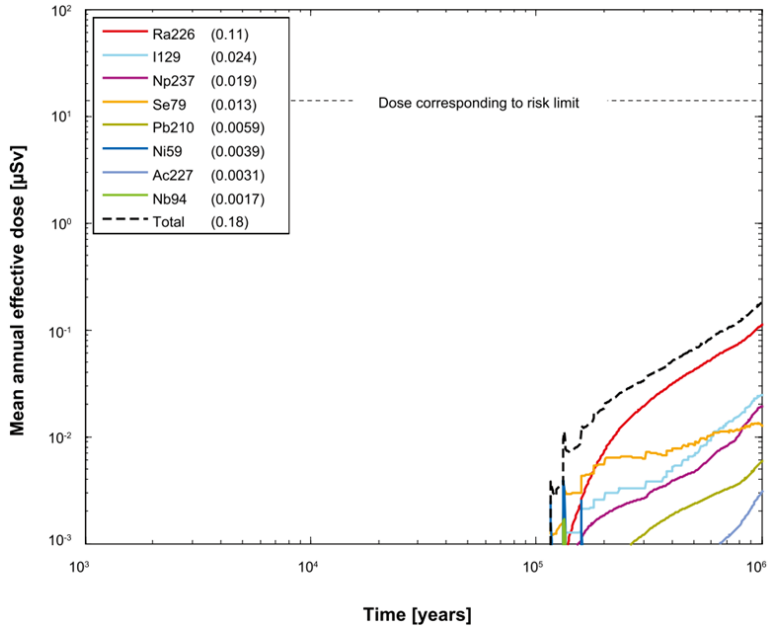


圖 4-152：瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例遠場評估結果

資料來源： SKB(2010c, p67)

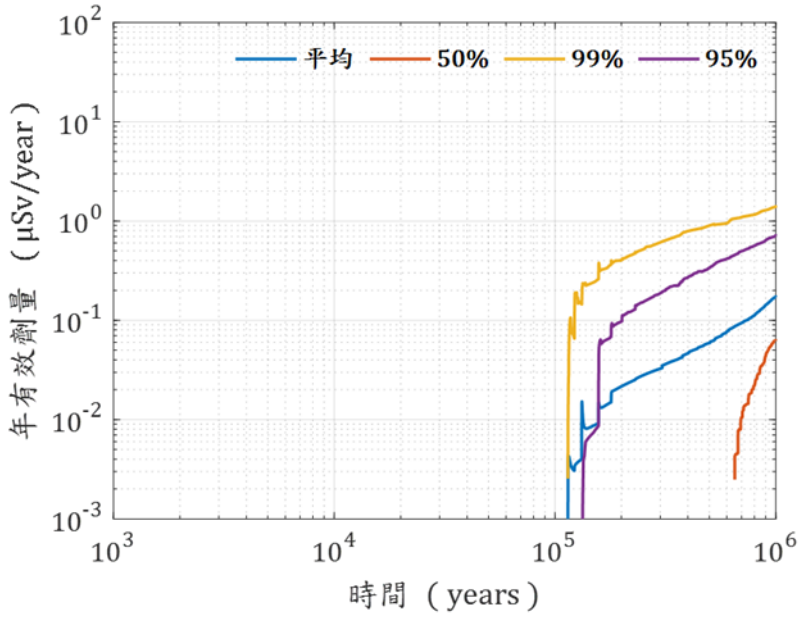


圖 4-153：遠場平均、中位數(50%)、95%百分位及99%百分位的年有效劑量

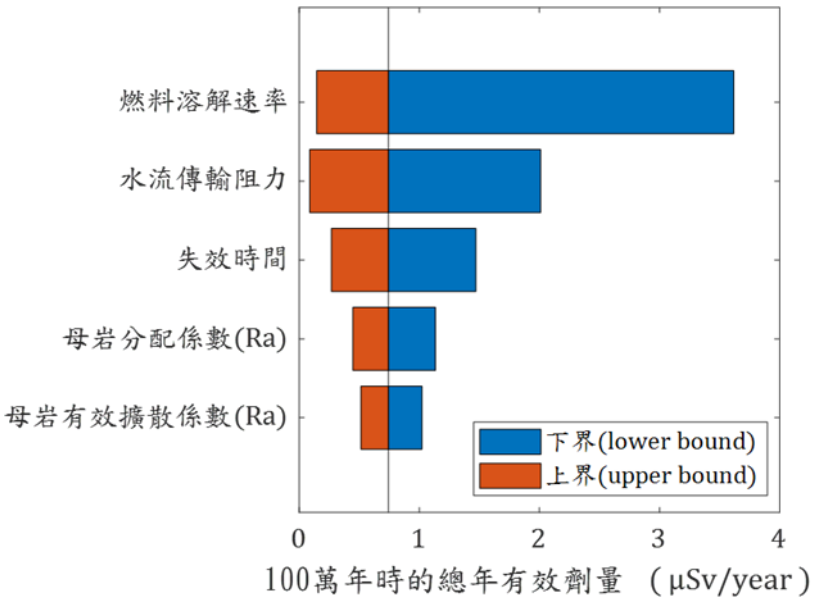


圖 4-154：瑞典SKB的SR-Site報告中不確定性腐蝕案例遠場的參數敏感度測試

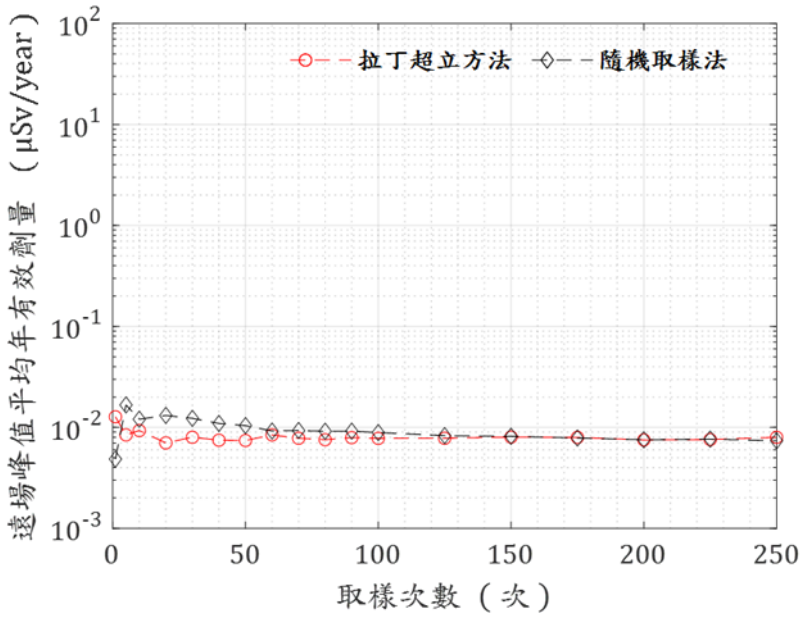


圖 4-155：利用隨機取樣及拉丁超立方方法進行參數取樣，不同取樣次數下，遠場的Ni-59峰值平均年有效劑量

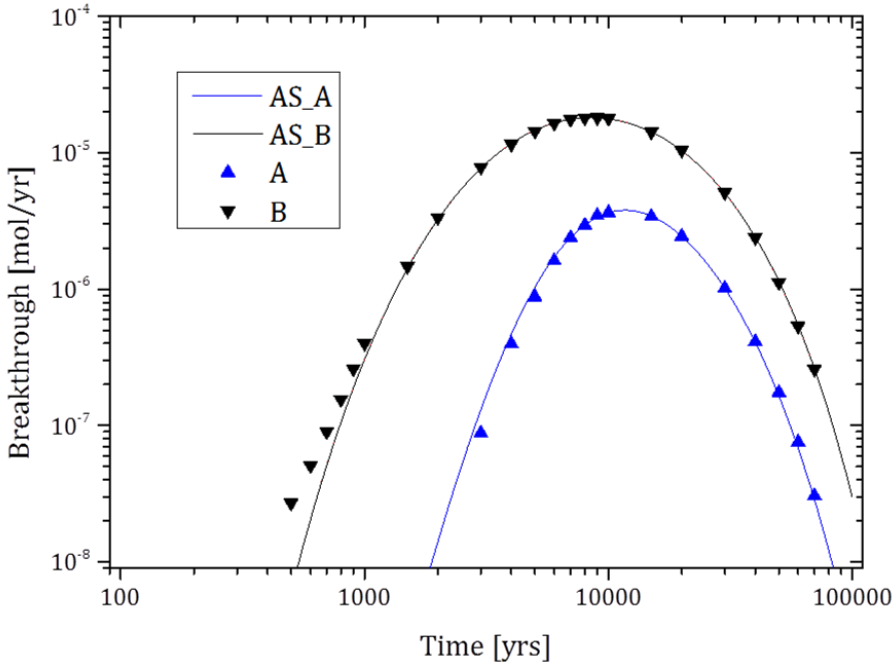


圖 4-156：MARFA SP母岩無限擴散驗證案例

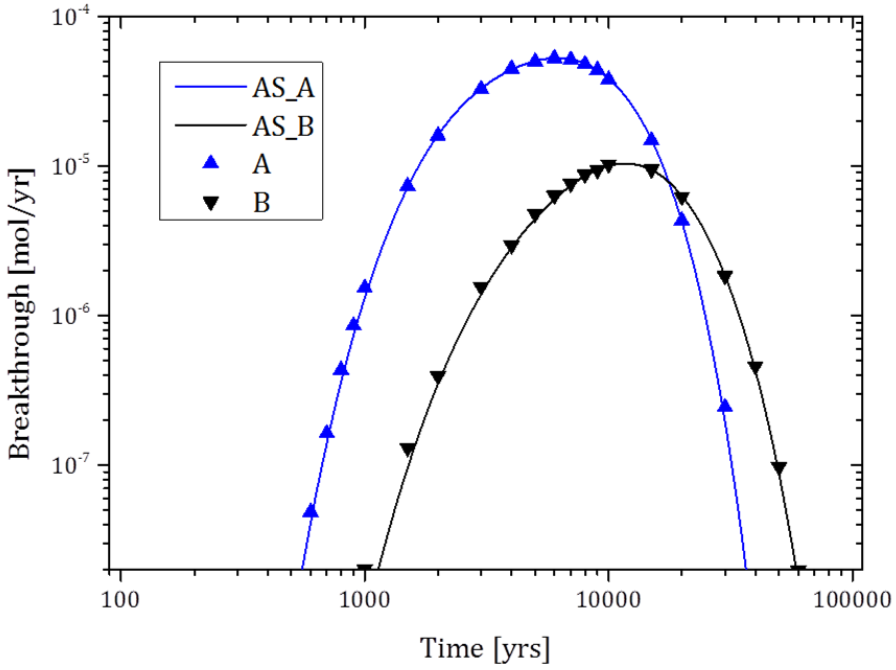


圖 4-157：MARFA SP母岩有限擴散驗證案例

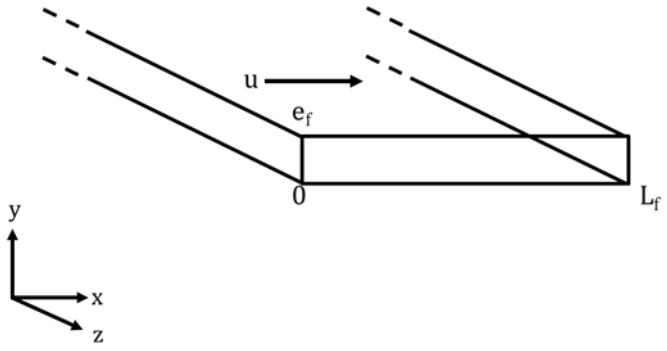


圖 4-158：緩衝材料/母岩裂隙交界面幾何示意圖

資料來源：Joyce et al.(2010, p153)

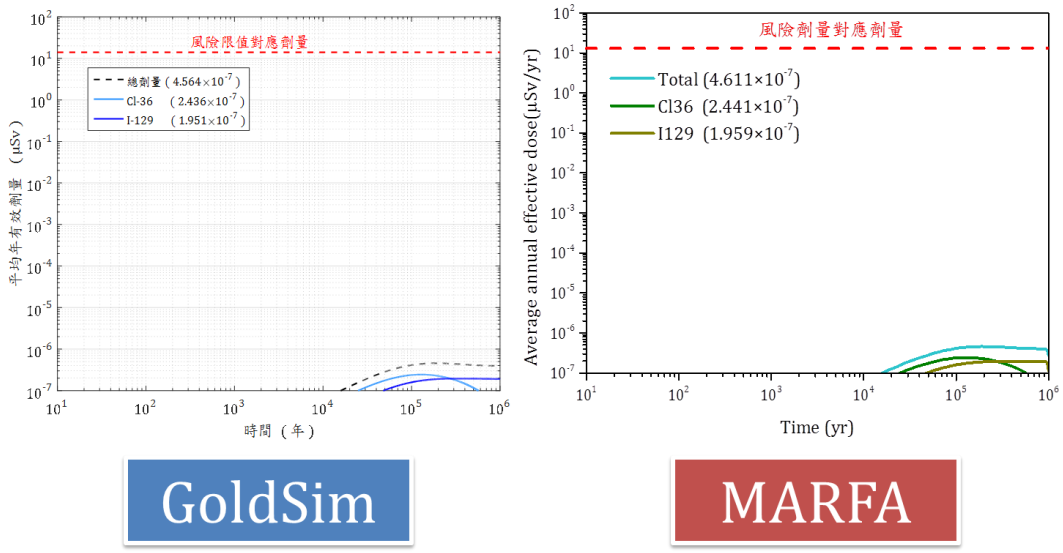


圖 4-159：SNFD2017參考案例剪力情節基本案例於早期失效之評估結果

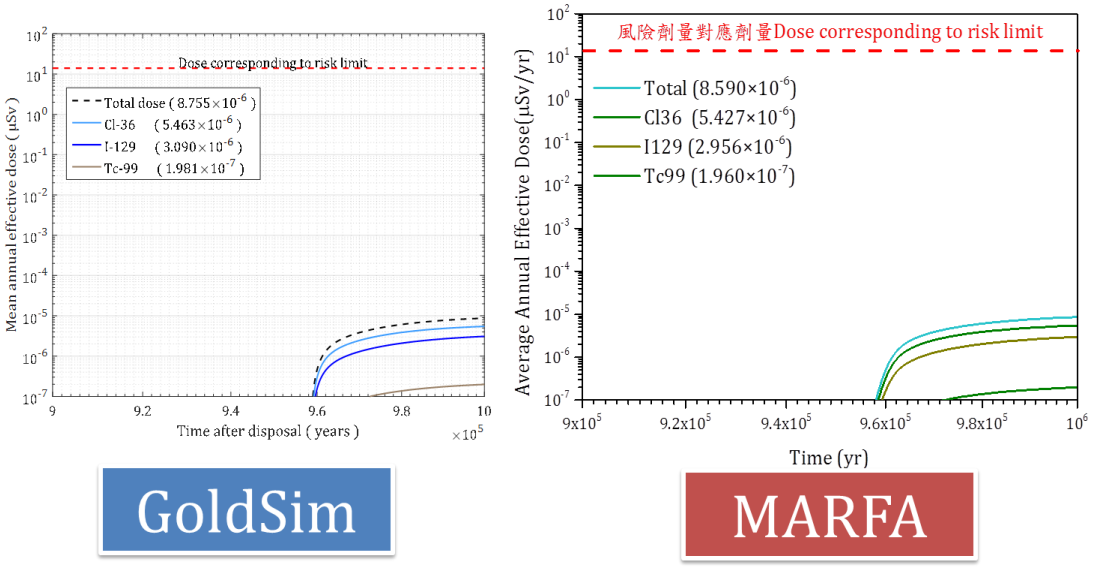


圖 4-160：SNFD2017參考案例腐蝕情節全球暖化案例之評估結果

4.6.4. 生物圈核種傳輸分析技術

生物圈複雜而多變，故找出與影響人類受到輻射曝露最關鍵的因子，為生物圈安全評估最重要的工作。根據SNFD 2017國際同儕審查與國內審查之建議，可歸納出2項影響生物圈輻射劑量評估最重的因子，其一是核種釋出至地表時之地景，其二是曝露群體的定義。故本年度108年度規劃的2項工作重點，其一為建立不同地表地景之環境介質區塊核種傳輸模組，做為未來進行地景演化模擬工作之準備，可驗證地景分布對地表環境介質核種分布之影響。第二項工作重點則是根據陸地生態系統相關之關鍵曝露途徑，找出不同之潛在曝露群體，並建立其對應之食物攝用量與空間佔用因子等特性。最後，再將兩者結合，根據核種釋出途徑計算結果設定案例，進行BDCF之計算。

為此，相比SNFD2017報告，108年度工作成果精進將可分2個方面，說明如下：

(1) 地景環境介質區塊核種傳輸模組：108年度工作根據陸地、湖河與海洋等不同地景，建立環境介質區塊核種傳輸模組外；並於模組內考量核種之縱向傳輸，於不同模組間則考量橫向之傳輸。如此的安排，除了可以考量更多地表環境介質間的作用，如毛細現象、生物擾動外，還可根據不同釋出點，反應出與釋出點不同橫向距離，對核種分布造成之影響。此外，模型中也增加不同地景對應之初級生產者之區塊，以便更清楚地描繪生物圈核種傳輸之概念模型。

(2) 潛在曝露群體定義：108年度重建系統性分析程序，更清楚地呈現BIOMASS-6報告中的潛在曝露群體(potentially exposed groups)定義方法細節，以使評估過程既能符合國內關鍵群體法規，亦能符合ICRP代表人之精神。另外，本年度工作按照SNFD 2017報告審查意見，增加考量畜牧群體，亦考量符合當地特色之釀酒群體。最後，採用更多本土資料，以建立各潛在曝露群體之食物攝用率(food consumption rate)與佔用因子(occupancy factors)，以使結果更能貼近當地現況。

為達成核種傳輸模型模組化的方向，本項工作採用GoldSim程式建構模型。GoldSim程式的擴充功能與其自由度，更符合模組化之需求，且與地質圈一致，可減少資料傳遞上之缺誤。本項工作並利用模組建立結果，根據108年K區案例進行地景模型設定並計算BDCF，並進行成果評估。

108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

本項工作利用GoldSim程式建立生物圈環境介質核種傳輸模式與劑量計算模式，並互相整合串接以計算BDCF。

(2) 參數需求說明：

本項工作需要的參數中，水文、地質相關參數大部分已於SNFD 2017報告中之表二與表三中彙整，本項工作僅更新部分參數，不足則參考國際文獻；惟考量不同生態系統時，還需考慮不同地景之生物相關參數。故有關陸地生態系統生產者相關參數，包含農田與森林的生產者生物量、生產者生物增加量、生產者衰亡量及生產者淨初級產量(net primary production)等，將於後說明。生物圈需要之參數如表 4-66所示。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 環境介質區塊模組發展

核種傳輸模組發展之過程，包含陸域與水域兩個部分。陸地生態系統之交互作用矩陣列如圖 4-161。根據交互作用矩陣即可建構陸地生態系統環境介質區塊模組之概念模型，如圖4-162所示。陸地生態系統生產者相關參數，包含農田與森林的生產者生物量、生產者生物增加量、生產者衰亡量及生產者淨初級產量(net primary production)等，列於表 4-67中。水域生態系統的交互作用矩陣如圖 4-163所示。根據交互作用矩陣建構之水域生態系統環境介質區塊模組之概念模型，如圖 4-164所示，圖上標號對應之作用列於圖右，其中標號上標為f代表淡水水域作用，標號上標為s則代表海水水域作用。水域生態系統生物相關參數，目前先蒐集各地景之生物量，

再參考POSIVA，假設生產者生物增加量與衰亡量皆與生物量相同如表 4-68。另計算C-14相關作用之參數如表 4-69所列，國內資料主要參考營建署委託國家重要濕地碳匯功能調查計畫報告，其餘不足之參數，則從SKB、POSIVA與IAEA報告中補足。

(b) 陸地生態系統潛在曝露群體定義成果

BIOMASS-6方法論定義陸地生態系統潛在曝露群體之過程與成果。研析相關文獻，整理出K區陸地生態系統食物鏈概念模型，如圖 4-165所示。

參考BIOMASS-6方法論進行K區曝露相關活動蒐集，並按照生態系統中的介質進行分類。除了農耕相關、畜牧相關外，也考慮了觀光業及K區有名的釀酒業。根據上述活動與介質整理與討論，經逐項討論找出各種曝露途徑與關鍵來源，如表 4-70所示。其後，根據嚥入曝露途徑定義潛在曝露群體，並且合併性質類似者，再按照潛在曝露群體生活習性，連結至活動地點，找出對應之曝露途徑。

本研究一共定義7組陸地生態系統之潛在曝露群體，分別為參考群體、釀酒群體、主食類農耕群體與蔬果類農耕群體、牛、豬、雞畜牧群體，將對應的關鍵攝食途徑攝食量設定為平均值(潘文涵，2016，p36)之三倍。這些潛在曝露群體的曝露途徑設定如表 4-71所示，後續即可將各項曝露途徑連結至核種傳輸模型中的環境介質(如圖 4-166)所示，並以GoldSim程式計算各生態系統環境介質核種活度濃度，以進行後續劑量計算。

(c) 0 m海平面案例模組設定如圖 4-167所示，-120 m海平面案例模組設定如圖 4-168所示。各案例生物圈劑量轉換係數計算如表 4-72，而案例1至案例5之BDCF結果，如至表 4-77。

(4) 結果與討論：

綜合比較案例1至案例5，可以發現，0 m海平面的三個案例(案例1至案例3)大多數核種的BDCF都低於-120 m海平面的兩個案例

(案例4與案例5)。這充分顯示，釋出點的位置，對結果影響非常大。根據釋出途徑分析結果，0 m海平面時之釋出點位於海中，故案例1與案例2當中，核種只會透過海洋碎波與空氣傳輸影響到陸地，故陸地生態系統潛在曝露群體之BDCF，比-120 m海平面陸地釋出之案例低3個至5個數量級。在案例3中，由於考量挖到核種釋出途徑之井水，故核種會透過井水直接傳輸至陸地上部土層，故與案例1與案例2相比，各核種之BDCF皆較大。然其BDCF與-120 m案例相比仍較低，因為大部分核種仍於海底釋出，僅部分核種透過井水直接到達陸地。而-120 m案例中，釋出點位於陸地，即所有核種都透過地下水位變化、毛細現象等作用於陸地與河流釋出。而在案例4與案例5中，BDCF依然會受到是否採用井水灌溉之影響，但差距沒有案例1、2與案例3這麼大，這也如實反應此2種不同現象之差異。

在這些案例比較中，還可以發現一個現象，就是0 m海平面狀況下，當核種釋出區域與陸地上部土層越遠時，有數個核種的BDCF，比其他核種低特別多。但是在-120 m海平面陸地釋出案例的案例中，則相對沒有低這麼多。這些核種分別是Sr-90、Cs-137、Pb-210、Pu-238及Ac-227。經過比對發現，這些核種共通的特點即其半化期較短，Sr-90之半化期為28.9年，Cs-137半化期為30.1年，Pb-210之半化期為22.2年，Pu-238之半化期為87.7年，而Ac-227之半化期為21.8年，而其他核種半化期都超過400年。根據區塊模型計算理論，區塊內各核種之平衡濃度會受到其入流量、出流量及半化期(衰變常數)所影響。當核種釋出區域離陸地上部土層區塊越遠時，其核種入流量與出流量都會變低，因此該區塊內核種平衡濃度會由半化期主導。此時，半化期越短核種核種平衡濃度就會越低。最明顯的例子是Cs-135(半化期2.3×106年)與Cs-137(半化期30.1年)，兩者雖然化學特性相同，但半化期差非常多。在海平面-120m陸地釋出有井的案例中，由於釋出核種可直接透過井水傳輸至陸地上部土層，入流量與出流量都會較高，故Cs-135之BDCF僅比Cs-137高1個至2個數量級。但在陸地釋出無井的案例中，缺

少了井水作用，入流量與出流量降低，則Cs-135之BDCF較Cs-137高出2個至3個數量級。而在0 m海平面無井與未挖到核種釋出途徑的案例中，釋出點在海中，陸地上部土層入流量與出流量都非常低，故Cs-135之BDCF較Cs-137高出4個至5個數量級。

最後，我們可以觀察到各案例中，農耕群體與畜牧群體之Th-232、Th-229、Cm-245、Th-230、Ac-227、Am-243等核種其BDCF會比參考群體大約10倍至20倍左右，而這些核種都有上部土層Kd值較高、半化期長、劑量轉換因子較大等特性。這些特性都是會造成攝食土壤與吸入灰塵等曝露途徑的曝露途徑。經過與表 4-71之比對，可以發現這些群體的攝食土壤與吸入灰塵這兩條曝露途徑確實比參考群體更嚴重。此情況顯示，由於生物圈評估中，與核種相關之參數較多，不同的曝露途徑都可能是由不同參數所主導，而各種核種的不同參數組合皆可能造成不同之BDCF計算結果，故設定多個潛在曝露群體以驗證大部分關鍵曝露途徑確有其必要性。

表 4-66：生物圈評估之參數需求表

項次	參數名稱	用途	資料來源與備註
1	地表土層厚度(m)	設定區塊幾何，應用至區塊各作用	SNFD 2017、SKB
2	地表土層顆粒密度 (kg/m^3)	計算土壤飽和含水量、核種吸附量、擴散量等	SNFD 2017、JAEA、SKB
3	地表土層各核種Kd值 (m^3/ kg)	計算土壤核種吸附量	SNFD 2017、IAEA、JAEA
4	地表土層孔隙率	計算土壤飽和含水量、擴散量	SNFD 2017、POSIVA、H12
5	雨量(m/yr)	用於計算地表介質間水流。	SNFD 2017
6	地下水抽取量(m/yr)	計算核種透過井水之曝露	SNFD 2017
7	灌溉水流量(m/yr)	計算核種透過灌溉造成農田之曝露	金門統計年報、灌溉原理與實用、FAO
8	植披核種濃度轉換因子 (mg/kg)/(mg/kg)	計算地表核種進入生物循環之比例	SNFD 2017、IAEA、POSIVA
9	生物量(kg/m^2)	計算地表核種進入生物循環之比例	國內文獻
10	生物增加量($kg/m^2/yr$)	計算地表核種進入生物循環之比例	國內文獻
11	生物衰亡量($kg/m^2/yr$)	計算地表核種離開生物之比例	國內文獻
12	地表侵蝕率(m/y)	計算從表土核種進入水體之量	BIOMASS-6
13	河床載運移率(kg/yr/m3)	計算河流沉積物沖刷至海洋之量	SNFD 2017
14	人工挖掘沉積物(1/yr)	計算沉積層挖掘至表土之核種量	SNFD 2017
15	海洋碎波率(1/yr)	計算海洋水體至陸地表土之核種量	SNFD 2017
16	沉積率($kg/m^2/yr$)	計算懸浮之沉積物沉澱至沉積層之量	POSIVA
17	再懸浮率($kg/m^2/yr$)	計算沉積物受到水流激起至水中之量	POSIVA
18	水中雜質濃度(kg/m^3)	水中的沉積物濃度	POSIVA
19	生物擾動率($kg/m^2/yr$)	不同土層間生物作用造成核種傳輸率	POSIVA
20	碳氣化率(kgC/m2/yr)	計算無機碳氣化進入大氣之比例	POSIVA、SKB
21	非有機碳濃度(kgC/m3)	陸地會水體中無機碳濃度	SKB、POSIVA
22	生物碳含量(%)	用於計算生物中C-14之量	POSIVA
23	空氣碳濃度(kg/m3)	用於空氣中計算C-14與C-12之比	IAEA
24	混和層高度(m)	用於設定空氣區塊體積	SKB
25	K區平均風速(m/s)	用於計算空氣中之核種擴散	氣候資料年報
26	高粱酒釀酒效率	計算高粱中核種殘存於酒中之比例	酒廠文宣
27	高粱酒密度(kg/l)	單位轉換用	自行推導
28	高粱酒中酒精體積比	計算高粱與水之比例用	酒廠文宣
29	高粱酒中水體積比	計算高粱與水之比例用	酒廠文宣
30	酒中碳濃度(kgC/l)	計算高粱酒中C-14殘留比例	自行推導
31	作物年產量($kg/m^2/yr$)	計算灌溉造成水附著作物表面之量	金門統計年報
32	灌溉期間(yr)	計算附著於農作物上之水風化作用	國內文獻
33	灌溉水量(m/yr)	計算灌溉造成水附著作物表面之量	灌溉原理與實用、FAO
34	收割時土壤附著比 (kgdw/kgfw)	計算土壤附著作物表面之量	Yucca Mountain

35	農作物穩定碳含量 (gC/kgfw)	計算C-14被農作物吸收之量	IAEA
36	動物攝食率(kg/d)	計算動物攝食農作物造成之劑量	國內文獻、BIOMASS
37	動物飲水量(m3/d)	計算動物飲水造成之劑量	SNFD 2017
38	動物嗞入土壤量(kg/d)	計算動物誤食土造成之劑量	SNFD 2017
39	動物呼吸率(m^3/hr)	計算動物呼吸造成之劑量	SNFD 2017
40	土壤佔用時間(h/d)	計算動物呼吸造成之劑量	SNFD 2017
41	呼吸率(m^3/hr)	計算人類呼吸造成之劑量	BIOMASS-6
42	氣膠濃度(m3/m3)	計算人類吸入氣膠造成之劑量	BIOMASS-6、JAEA
43	灰塵量(kg/m3)	計算人類吸入灰塵造成之劑量	JAEA
44	酒廠穀物灰塵	計算人類吸入穀物碎屑造成之劑量	自行推導
45	劑量轉換因子(Sv/Bq) or (Sv/h)/(Bq/m3)	根據介質濃度計算人類所受劑量	游離輻射防護安全標準附表三、Federal guidance report
46	食物處理殘留因子	計算食物處理造成之活度變化	IAEA
47	灌溉水截流比例 (kg/m2/yr)	計算植物表面之核種濃度	IAEA、JAEA
48	表面吸收轉置因子	計算植物內部之核種濃度	IAEA、JAEA
49	風化率(1/yr)	計算植物表面之核種濃度	IAEA、JAEA
50	土壤至農作物轉換因子 (Bq/kg)/(Bq/kg)	計算農作物內之核種濃度	IAEA、SNFD 2017、JAEA
51	畜產品核種濃度轉換係 (d/kg)	根據農作物計算動物體內核種濃度	IAEA、JAEA、SNFD 2017

表 4-67：陸地生態系統生產者相關參數

	森林	**文獻來源**	**農田**	**文獻來源**
生物質量(kg/m^2)	15	邱立文等人，2015，P.33 廖大牛，2009，表11	0.1	金門縣政府主計處，2017，表23
生產者生物增加量 ($kg/m^2/y$)	0.868	邱立文等人，2015，P.33 廖大牛，2009，表11	0.1	假設年年收割
生產者生物衰亡量 ($kg/m^2/y$)	0.368	邱立文等人，2015，P.33 廖大牛，2009，表11	0.1	假設年年收割
生產者淨初級產量 ($kgC/m^2/y$)	0.432	鄭祈全，2014，Table 8	0.26	POSIVA Oy, 2014, Table 17-97
面積比	0.63	邱立文等人，2015，P.33 金門縣政府主計處，2017，表23	0.37	邱立文等人，2015，P.33 金門縣政府主計處，2017，表23

表 4-68：水域生態系統生物相關參數

	湖泊	文獻來源	河流	文獻來源	近海	文獻來源
生物質量 (kg/m^2)	0.920	假設同下	0.248	假設同下	0.06	林幸助，李麗華，2011，P.42
生產者生物增加量 ($kg/m^2/y$)	0.920	(高苑科技大學綠工程技術研發中心，2011，表3.3-3)	0.248	(黃家勤等人，2006，表3)	0.06	假設同上
生產者生物衰亡量 ($kg/m^2/y$)	0.920	假設同上	0.248	假設同上	0.06	假設同上

表 4-69：C-14計算相關作用參數

參數		數值	來源
碳氣化率 ($kgC/m^2/yr$)	陸地	0.044	Anders Löfgren, 2010, 13.4.3
	湖泊	0.040	高苑科技大學綠工程技術研發中心，2011，表3.3-3表3.3-6瀉湖年平均碳收支計算
	海洋	0.031	高苑科技大學綠工程技術研發中心，2011，表3.3-32潮間帶-內海樣區氣體交換通量監測
碳溶解率 ($kgC/m^2/yr$)	湖泊	11.1	Eva Andersson, 2010, P.403
	海洋	23	高苑科技大學綠工程技術研發中心，2011，表3.3-32潮間帶-內海樣區氣體交換通量監測
非有機碳濃度 (kgC/m^3)	陸地	0.086	Anders Löfgren, 2010, 13.3.3
	湖泊	0.033	POSIVA-2012-28, 2014, Table16-27
	河流	0.074	POSIVA-2012-28, 2014, Table 16-33
	海洋	0.017	POSIVA-2012-28, 2014, Table 16-39
生物碳含量%	陸地	50%	POSIVA-2012-28, 2014, Table 17-190
	水域	40%	POSIVA-2012-28, 2014, Table 17-205
空氣碳含量 (gC/m^3)		0.2	IAEA, 2010, P.139
陸地植物光合作用混和層高度(m)		9.5	Rodolfo Avila, 2010, Table5-2
K區平均風速(m/s)		2.72	中央氣象局，2015 P.13、2016 P.13、2017，P.13

表 4-70：K區陸地生態系個曝露模式之關鍵曝露途徑

曝露途徑	嚥入	吸入	體外曝露
來源	水，酒，穀物，綠色蔬菜，根類 水果，牛肉，豬肉，雞肉，牛奶 內臟，雞蛋，淡水水產，海產	吸入空氣_陸地(CO2) 吸入粉塵(土壤) 吸入粉塵(穀物)	在土壤上工作 在土壤上居住

表 4-71：K區陸地生態系統潛在曝露群體曝露途徑設定

曝露途徑	曝露來源	參考群體	釀酒群體	農耕栽植群體		畜牧群體		
				主食	蔬果	牛	豬	雞
飲食偏好	水	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
	酒	Δ	◎	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
	根類	Δ	Δ	◎	Δ	Δ	Δ	Δ
	綠色蔬菜	Δ	Δ	Δ	◎	Δ	Δ	Δ
	穀物	Δ	Δ	◎	Δ	Δ	Δ	Δ
	水果	Δ	Δ	Δ	◎	Δ	Δ	Δ
	牛肉	Δ	Δ	Δ	Δ	◎	X	X
	豬肉	Δ	Δ	Δ	Δ	X	◎	X
	雞肉	Δ	Δ	Δ	Δ	X	X	◎
	牛奶	Δ	Δ	Δ	Δ	◎	Δ	Δ
	內臟	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	◎	Δ
	雞蛋	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	◎
	淡水魚	Δ	Δ	Δ	Δ	X	X	X
	牡蠣	Δ	Δ	Δ	Δ	X	X	X
吸入	吸入空氣_陸地(CO2)	O	O	O	O	O	O	O
	吸入粉塵(土壤)	O	O	O	O	O	O	O
	吸入粉塵(穀物)	X	O	X	X	X	X	X
體外	在土壤上工作	O	O	O	O	O	O	O
	在土壤上居住	O	O	O	O	O	O	O

註：Δ代表平均攝食量，◎代表三倍攝食量，X代表未發生，O代表會發生

表 4-72：生物圈核種傳輸分析技術之案例編號與說明

地表狀態	案例編號	案例說明
0m海平面	1	釋出至海底，陸地無挖井、徑井水灌溉、
	2	釋出至海底，有挖井但未挖到核種釋出途
	3	釋出至海底，有挖井且為核種釋出途徑井水灌溉。
-120m海平面	4	釋出至陸地，有挖井之井水灌溉。
	5	釋出至陸地，未挖井。

表 4-73：生物圈案例1之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq)

潛在曝露群體	參考群體	釀酒群體	農耕群體		畜牧群體		
			主食	蔬果	牛	豬	雞
C-14	8.05E-20	8.05E-20	8.24E-20	8.16E-20	1.75E-20	3.61E-20	4.98E-20
Cl-36	1.03E-16	1.04E-16	1.93E-16	2.05E-16	1.30E-16	1.93E-16	2.25E-16
Ni-59	7.24E-19	7.37E-19	1.42E-18	1.40E-18	1.40E-18	1.13E-18	1.48E-18
Se-79	1.63E-15	1.64E-15	2.36E-15	2.53E-15	7.81E-15	3.00E-15	3.19E-15
Sr-90	1.81E-19	1.83E-19	3.62E-19	3.91E-19	1.61E-19	1.60E-19	1.59E-19
Zr-93	8.00E-18	8.37E-18	2.14E-17	1.63E-17	7.79E-18	9.09E-18	7.79E-18
Nb-94	4.62E-16	4.62E-16	4.77E-16	4.74E-16	4.63E-16	4.63E-16	4.63E-16
Tc-99	4.77E-18	4.82E-18	9.64E-18	1.09E-17	5.10E-18	4.46E-18	6.13E-18
Pd-107	1.25E-18	1.27E-18	2.76E-18	2.98E-18	1.27E-18	1.26E-18	1.26E-18
Sn-126	1.56E-16	1.58E-16	2.97E-16	3.09E-16	1.35E-16	1.35E-16	1.40E-16
I-129	9.94E-16	1.01E-15	1.92E-15	1.98E-15	1.15E-15	1.60E-15	1.05E-15
Cs-135	4.17E-17	4.23E-17	6.73E-17	6.31E-17	4.79E-17	1.38E-16	7.77E-17
Cs-137	2.46E-21	2.48E-21	3.68E-21	3.48E-21	2.30E-21	6.63E-21	3.73E-21
Th-232	2.92E-15	3.07E-15	1.09E-14	9.19E-15	6.51E-15	7.20E-15	8.15E-15
U-236	5.13E-14	5.26E-14	1.11E-13	1.07E-13	5.00E-14	9.91E-14	8.15E-14
Pu-240	4.97E-16	5.04E-16	1.03E-15	1.20E-15	4.95E-16	4.97E-16	5.94E-16
Th-229	6.66E-16	7.14E-16	5.16E-15	4.87E-15	4.41E-15	4.53E-15	4.69E-15
U-233	5.40E-14	5.52E-14	1.15E-13	1.11E-13	5.06E-14	1.02E-13	8.38E-14
Np-237	2.22E-15	2.35E-15	7.34E-15	7.08E-15	4.46E-15	4.45E-15	4.46E-15
Am-241	3.09E-18	3.26E-18	3.59E-17	3.51E-17	3.36E-17	3.35E-17	3.40E-17
Cm-245	4.07E-16	4.34E-16	2.23E-15	2.06E-15	1.69E-15	1.68E-15	1.69E-15
Pb-210	1.33E-20	1.38E-20	3.41E-20	3.04E-20	1.84E-20	2.86E-20	3.54E-20
Ra-226	3.76E-16	3.91E-16	9.19E-16	9.30E-16	4.82E-16	6.99E-16	5.70E-16
Th-230	5.93E-16	6.68E-16	1.03E-14	1.03E-14	1.01E-14	1.02E-14	1.02E-14
U-234	5.35E-15	5.61E-15	1.35E-14	1.30E-14	7.22E-15	1.22E-14	1.04E-14
U-238	5.22E-15	5.45E-15	1.30E-14	1.25E-14	6.81E-15	1.17E-14	9.96E-15
Pu-238	3.22E-19	3.33E-19	4.25E-18	4.29E-18	4.11E-18	4.11E-18	4.13E-18
Pu-242	5.28E-15	5.43E-15	5.41E-14	5.52E-14	5.09E-14	5.09E-14	5.15E-14
Cm-246	9.15E-17	1.00E-16	8.27E-16	7.97E-16	7.31E-16	7.31E-16	7.32E-16
Ac-227	3.69E-20	4.30E-20	5.38E-19	5.33E-19	5.19E-19	5.19E-19	5.19E-19
Pa-231	1.21E-14	1.28E-14	5.48E-14	5.68E-14	4.22E-14	4.22E-14	4.22E-14
U-235	2.32E-14	2.39E-14	5.11E-14	4.91E-14	2.38E-14	4.56E-14	3.78E-14
Pu-239	2.18E-15	2.25E-15	2.47E-14	2.51E-14	2.35E-14	2.35E-14	2.37E-14
Am-243	1.96E-16	2.07E-16	2.35E-15	2.31E-15	2.22E-15	2.22E-15	2.24E-15

表 4-74：生物圈案例2之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq)

潛在曝露群體	參考群體	釀酒群體	農耕群體		畜牧群體		
			主食	蔬果	牛	豬	雞
C-14	7.82E-20	7.82E-20	8.01E-20	7.93E-20	1.70E-20	3.50E-20	4.84E-20
Cl-36	2.28E-16	2.30E-16	4.27E-16	4.54E-16	2.87E-16	4.27E-16	4.98E-16
Ni-59	3.72E-19	3.79E-19	7.32E-19	7.17E-19	7.18E-19	5.83E-19	7.64E-19
Se-79	1.49E-15	1.50E-15	2.16E-15	2.31E-15	7.15E-15	2.75E-15	2.92E-15
Sr-90	1.89E-19	1.91E-19	3.79E-19	4.10E-19	1.70E-19	1.68E-19	1.67E-19
Zr-93	2.63E-18	2.76E-18	7.05E-18	5.38E-18	2.57E-18	3.00E-18	2.57E-18
Nb-94	5.46E-16	5.46E-16	5.64E-16	5.61E-16	5.47E-16	5.47E-16	5.47E-16
Tc-99	7.34E-18	7.41E-18	1.49E-17	1.68E-17	7.95E-18	6.96E-18	9.56E-18
Pd-107	2.69E-18	2.74E-18	5.95E-18	6.43E-18	2.73E-18	2.72E-18	2.73E-18
Sn-126	1.54E-16	1.56E-16	3.02E-16	3.15E-16	1.42E-16	1.43E-16	1.47E-16
I-129	2.19E-15	2.23E-15	4.27E-15	4.38E-15	2.57E-15	3.58E-15	2.36E-15
Cs-135	2.30E-17	2.33E-17	3.71E-17	3.48E-17	2.65E-17	7.64E-17	4.29E-17
Cs-137	2.46E-21	2.49E-21	3.69E-21	3.48E-21	2.30E-21	6.65E-21	3.74E-21
Th-232	6.10E-16	6.42E-16	2.27E-15	1.92E-15	1.36E-15	1.50E-15	1.70E-15
U-236	1.59E-13	1.63E-13	3.46E-13	3.32E-13	1.55E-13	3.08E-13	2.53E-13
Pu-240	5.18E-16	5.24E-16	1.07E-15	1.25E-15	5.17E-16	5.18E-16	6.19E-16
Th-229	5.54E-16	5.95E-16	4.30E-15	4.05E-15	3.67E-15	3.77E-15	3.91E-15
U-233	1.68E-13	1.71E-13	3.58E-13	3.44E-13	1.57E-13	3.18E-13	2.60E-13
Np-237	8.50E-15	9.02E-15	2.86E-14	2.75E-14	1.75E-14	1.74E-14	1.74E-14
Am-241	3.12E-18	3.30E-18	3.63E-17	3.56E-17	3.40E-17	3.40E-17	3.44E-17
Cm-245	3.27E-16	3.49E-16	1.79E-15	1.65E-15	1.36E-15	1.35E-15	1.36E-15
Pb-210	1.33E-20	1.38E-20	3.41E-20	3.04E-20	1.84E-20	2.86E-20	3.54E-20
Ra-226	4.27E-16	4.44E-16	1.04E-15	1.06E-15	5.47E-16	7.93E-16	6.46E-16
Th-230	1.71E-16	1.92E-16	2.97E-15	2.95E-15	2.92E-15	2.92E-15	2.94E-15
U-234	1.66E-14	1.74E-14	4.19E-14	4.05E-14	2.24E-14	3.80E-14	3.24E-14
U-238	1.62E-14	1.69E-14	4.02E-14	3.88E-14	2.11E-14	3.64E-14	3.09E-14
Pu-238	3.24E-19	3.35E-19	4.28E-18	4.32E-18	4.13E-18	4.13E-18	4.16E-18
Pu-242	1.91E-15	1.96E-15	1.96E-14	2.00E-14	1.84E-14	1.84E-14	1.86E-14
Cm-246	8.75E-17	9.59E-17	7.92E-16	7.63E-16	7.00E-16	6.99E-16	7.00E-16
Ac-227	3.69E-20	4.30E-20	5.38E-19	5.33E-19	5.19E-19	5.19E-19	5.19E-19
Pa-231	6.86E-15	7.23E-15	3.10E-14	3.21E-14	2.39E-14	2.39E-14	2.39E-14
U-235	7.19E-14	7.39E-14	1.58E-13	1.52E-13	7.38E-14	1.41E-13	1.17E-13
Pu-239	1.40E-15	1.44E-15	1.59E-14	1.61E-14	1.51E-14	1.51E-14	1.52E-14
Am-243	1.71E-16	1.81E-16	2.06E-15	2.02E-15	1.94E-15	1.94E-15	1.96E-15

表 4-75：生物圈案例3之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq)

潛在曝露群體	參考群體	釀酒群體	農耕群體		畜牧群體		
			主食	蔬果	牛	豬	雞
C-14	1.09E-16	1.10E-16	1.24E-16	1.18E-16	1.32E-16	2.71E-16	3.76E-16
Cl-36	1.60E-14	1.61E-14	2.99E-14	3.17E-14	2.01E-14	2.99E-14	3.48E-14
Ni-59	8.35E-15	8.51E-15	1.66E-14	1.62E-14	1.64E-14	1.33E-14	1.74E-14
Se-79	1.07E-11	1.07E-11	1.54E-11	1.65E-11	5.11E-11	1.96E-11	2.09E-11
Sr-90	9.02E-16	9.15E-16	1.95E-15	2.12E-15	9.37E-16	9.28E-16	9.24E-16
Zr-93	9.24E-14	9.68E-14	2.52E-13	1.91E-13	9.27E-14	1.08E-13	9.27E-14
Nb-94	4.18E-12	4.18E-12	4.32E-12	4.30E-12	4.19E-12	4.19E-12	4.19E-12
Tc-99	1.27E-16	1.28E-16	2.62E-16	2.95E-16	1.41E-16	1.23E-16	1.69E-16
Pd-107	4.93E-15	5.01E-15	1.09E-14	1.18E-14	5.02E-15	5.01E-15	5.01E-15
Sn-126	7.93E-13	8.06E-13	1.65E-12	1.72E-12	8.23E-13	8.25E-13	8.51E-13
I-129	1.63E-14	1.66E-14	3.20E-14	3.30E-14	1.94E-14	2.70E-14	1.78E-14
Cs-135	3.20E-13	3.25E-13	5.20E-13	4.87E-13	3.73E-13	1.08E-12	6.05E-13
Cs-137	3.02E-16	3.06E-16	4.89E-16	4.57E-16	3.50E-16	1.01E-15	5.69E-16
Th-232	1.22E-11	1.28E-11	4.59E-11	3.88E-11	2.76E-11	3.05E-11	3.46E-11
U-236	1.52E-11	1.56E-11	3.31E-11	3.18E-11	1.49E-11	2.95E-11	2.43E-11
Pu-240	1.71E-12	1.74E-12	3.58E-12	4.18E-12	1.73E-12	1.74E-12	2.08E-12
Th-229	1.13E-11	1.22E-11	8.89E-11	8.39E-11	7.60E-11	7.81E-11	8.09E-11
U-233	1.61E-11	1.65E-11	3.45E-11	3.31E-11	1.51E-11	3.06E-11	2.51E-11
Np-237	1.22E-13	1.30E-13	4.13E-13	3.98E-13	2.53E-13	2.52E-13	2.52E-13
Am-241	5.90E-14	6.24E-14	7.06E-13	6.91E-13	6.63E-13	6.62E-13	6.71E-13
Cm-245	8.98E-12	9.58E-12	4.95E-11	4.57E-11	3.76E-11	3.75E-11	3.77E-11
Pb-210	2.36E-16	2.47E-16	6.83E-16	6.03E-16	3.94E-16	6.13E-16	7.59E-16
Ra-226	1.45E-12	1.51E-12	3.55E-12	3.59E-12	1.86E-12	2.70E-12	2.20E-12
Th-230	3.46E-12	3.89E-12	6.04E-11	5.99E-11	5.93E-11	5.94E-11	5.97E-11
U-234	1.59E-12	1.67E-12	4.03E-12	3.89E-12	2.16E-12	3.65E-12	3.12E-12
U-238	1.55E-12	1.62E-12	3.85E-12	3.72E-12	2.03E-12	3.48E-12	2.96E-12
Pu-238	3.67E-15	3.81E-15	5.08E-14	5.13E-14	4.93E-14	4.93E-14	4.96E-14
Pu-242	6.12E-12	6.29E-12	6.32E-11	6.44E-11	5.95E-11	5.95E-11	6.02E-11
Cm-246	2.44E-12	2.68E-12	2.23E-11	2.15E-11	1.97E-11	1.97E-11	1.97E-11
Ac-227	1.29E-15	1.53E-15	2.03E-14	2.01E-14	1.97E-14	1.97E-14	1.97E-14
Pa-231	2.24E-11	2.36E-11	1.01E-10	1.05E-10	7.81E-11	7.81E-11	7.81E-11
U-235	6.89E-12	7.08E-12	1.52E-11	1.46E-11	7.07E-12	1.36E-11	1.12E-11
Pu-239	4.53E-12	4.67E-12	5.17E-11	5.25E-11	4.92E-11	4.92E-11	4.96E-11
Am-243	2.30E-12	2.44E-12	2.80E-11	2.74E-11	2.64E-11	2.64E-11	2.67E-11

表 4-76：生物圈案例4之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq)

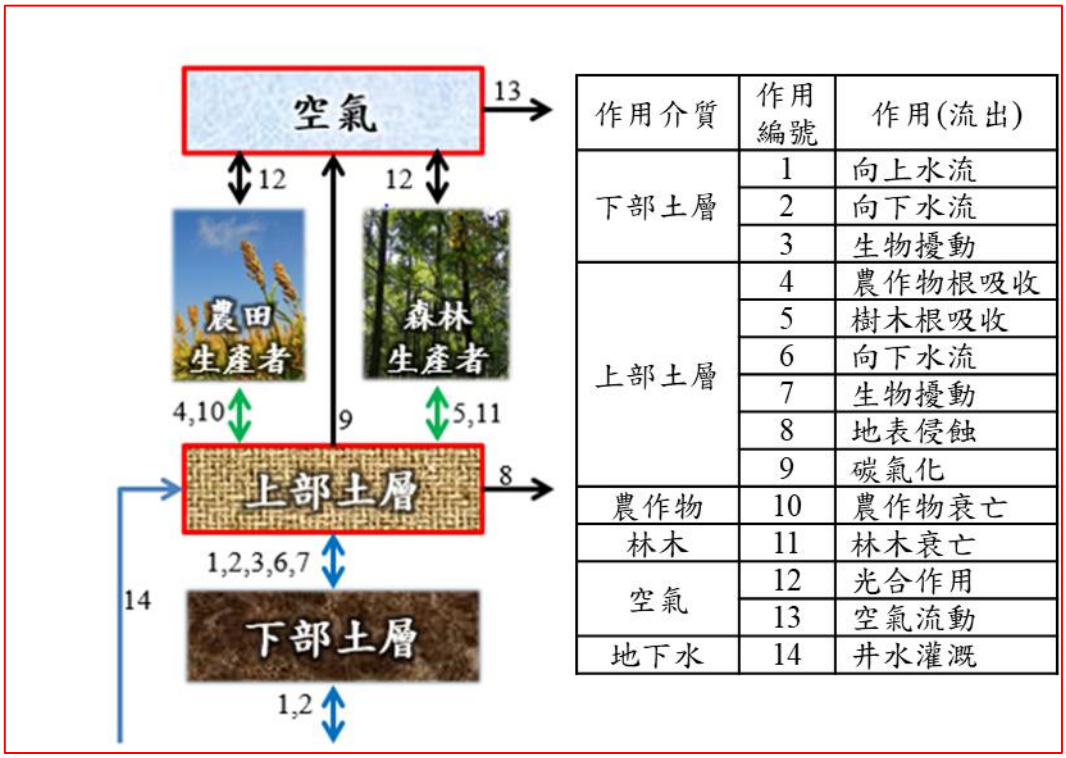
潛在曝露群體	參考群體	釀酒群體	農耕群體		畜牧群體		
			主食	蔬果	牛	豬	雞
C-14	1.34E-14	1.35E-14	1.52E-14	1.45E-14	1.61E-14	3.35E-14	4.46E-14
Cl-36	2.56E-12	2.58E-12	4.72E-12	4.98E-12	3.29E-12	5.01E-12	5.88E-12
Ni-59	2.81E-13	2.84E-13	5.48E-13	6.14E-13	4.55E-13	3.79E-13	5.35E-13
Se-79	5.81E-10	5.83E-10	8.62E-10	9.38E-10	2.70E-09	1.06E-09	1.13E-09
Sr-90	1.22E-13	1.24E-13	2.61E-13	2.93E-13	1.27E-13	1.26E-13	1.26E-13
Zr-93	6.78E-13	6.88E-13	1.60E-12	1.71E-12	7.89E-13	8.80E-13	7.89E-13
Nb-94	3.52E-10	3.52E-10	3.56E-10	3.57E-10	3.53E-10	3.53E-10	3.53E-10
Tc-99	6.13E-14	6.33E-14	1.36E-13	1.20E-13	8.16E-14	5.61E-14	1.22E-13
Pd-107	4.15E-13	4.19E-13	8.89E-13	1.01E-12	4.24E-13	4.23E-13	4.23E-13
Sn-126	5.67E-11	5.72E-11	1.13E-10	1.27E-10	5.91E-11	5.91E-11	6.07E-11
I-129	7.65E-12	7.86E-12	1.53E-11	1.36E-11	9.45E-12	1.45E-11	8.26E-12
Cs-135	4.90E-12	4.93E-12	8.70E-12	9.50E-12	6.55E-12	1.43E-11	1.25E-11
Cs-137	1.22E-14	1.23E-14	2.16E-14	2.36E-14	1.62E-14	3.54E-14	3.10E-14
Th-232	2.03E-10	2.06E-10	1.76E-09	1.74E-09	1.63E-09	1.72E-09	2.04E-09
U-236	7.74E-10	7.82E-10	1.63E-09	1.82E-09	8.09E-10	1.18E-09	1.12E-09
Pu-240	1.20E-10	1.21E-10	2.57E-10	2.93E-10	1.23E-10	1.23E-10	1.54E-10
Th-229	4.29E-10	4.32E-10	6.92E-09	6.91E-09	6.83E-09	6.90E-09	7.14E-09
U-233	8.22E-10	8.30E-10	1.67E-09	1.87E-09	7.99E-10	1.19E-09	1.13E-09
Np-237	1.35E-11	1.43E-11	4.63E-11	4.52E-11	2.91E-11	2.90E-11	2.90E-11
Am-241	5.13E-12	5.15E-12	9.06E-11	9.08E-11	8.98E-11	8.97E-11	9.07E-11
Cm-245	2.28E-10	2.31E-10	2.70E-09	2.71E-09	2.58E-09	2.58E-09	2.59E-09
Pb-210	7.35E-15	7.41E-15	3.99E-14	4.07E-14	3.51E-14	4.01E-14	5.43E-14
Ra-226	1.04E-10	1.06E-10	2.55E-10	2.84E-10	1.46E-10	1.77E-10	1.61E-10
Th-230	2.62E-10	2.64E-10	5.41E-09	5.41E-09	5.40E-09	5.40E-09	5.42E-09
U-234	8.26E-11	8.43E-11	2.29E-10	2.48E-10	1.44E-10	1.82E-10	1.76E-10
U-238	7.99E-11	8.14E-11	2.15E-10	2.34E-10	1.33E-10	1.70E-10	1.64E-10
Pu-238	4.78E-13	4.87E-13	7.36E-12	7.40E-12	7.19E-12	7.20E-12	7.23E-12
Pu-242	4.64E-10	4.72E-10	5.58E-09	5.64E-09	5.33E-09	5.33E-09	5.38E-09
Cm-246	1.03E-10	1.04E-10	1.74E-09	1.75E-09	1.72E-09	1.72E-09	1.72E-09
Ac-227	1.42E-13	1.43E-13	2.90E-12	2.90E-12	2.89E-12	2.89E-12	2.89E-12
Pa-231	2.35E-09	2.44E-09	1.11E-08	1.17E-08	8.84E-09	8.84E-09	8.85E-09
U-235	3.56E-10	3.60E-10	7.67E-10	8.52E-10	4.03E-10	5.66E-10	5.41E-10
Pu-239	3.51E-10	3.58E-10	4.60E-09	4.65E-09	4.44E-09	4.44E-09	4.47E-09
Am-243	1.31E-10	1.31E-10	2.25E-09	2.25E-09	2.23E-09	2.23E-09	2.25E-09
Po-210	1.63E-17	1.64E-17	3.19E-17	3.50E-17	1.94E-17	2.54E-17	7.22E-17

表 4-77：生物圈案例5之BDCF分析結果(Sv/yr per Bq)

潛在曝露群體	參考群體	釀酒群體	農耕群體		畜牧群體		
			主食	蔬果	牛	豬	雞
C-14	2.74E-14	2.75E-14	3.12E-14	2.97E-14	3.26E-14	6.88E-14	8.67E-14
Cl-36	8.22E-13	8.28E-13	1.46E-12	1.51E-12	1.11E-12	1.78E-12	2.12E-12
Ni-59	2.59E-14	2.62E-14	5.07E-14	5.53E-14	4.37E-14	3.62E-14	5.03E-14
Se-79	1.21E-11	1.21E-11	1.75E-11	1.89E-11	5.73E-11	2.21E-11	2.35E-11
Sr-90	6.58E-15	6.83E-15	1.59E-14	1.35E-14	6.91E-15	6.77E-15	6.64E-15
Zr-93	1.17E-13	1.20E-13	2.95E-13	2.72E-13	1.28E-13	1.45E-13	1.28E-13
Nb-94	2.39E-11	2.39E-11	2.42E-11	2.42E-11	2.39E-11	2.39E-11	2.39E-11
Tc-99	4.97E-14	5.16E-14	1.12E-13	9.27E-14	6.89E-14	4.49E-14	1.07E-13
Pd-107	1.56E-14	1.58E-14	3.42E-14	3.74E-14	1.59E-14	1.58E-14	1.58E-14
Sn-126	5.50E-12	5.56E-12	1.11E-11	1.23E-11	5.72E-12	5.73E-12	5.89E-12
I-129	6.83E-12	7.04E-12	1.38E-11	1.18E-11	8.51E-12	1.34E-11	7.35E-12
Cs-135	3.92E-13	3.96E-13	6.63E-13	6.69E-13	4.87E-13	1.24E-12	8.55E-13
Cs-137	2.09E-16	2.12E-16	3.30E-16	2.94E-16	2.33E-16	7.23E-16	3.59E-16
Th-232	3.34E-11	3.41E-11	2.68E-10	2.63E-10	2.43E-10	2.57E-10	3.04E-10
U-236	3.48E-11	3.61E-11	7.75E-11	6.67E-11	3.25E-11	7.71E-11	5.89E-11
Pu-240	6.42E-12	6.48E-12	1.37E-11	1.57E-11	6.55E-12	6.56E-12	8.17E-12
Th-229	1.26E-11	1.28E-11	1.94E-10	1.93E-10	1.91E-10	1.93E-10	1.99E-10
U-233	3.69E-11	3.81E-11	8.16E-11	7.01E-11	3.39E-11	8.12E-11	6.19E-11
Np-237	6.00E-12	6.62E-12	1.68E-11	1.37E-11	7.15E-12	7.10E-12	7.12E-12
Am-241	3.36E-14	3.41E-14	5.58E-13	5.58E-13	5.49E-13	5.49E-13	5.55E-13
Cm-245	5.66E-12	5.76E-12	6.35E-11	6.35E-11	6.02E-11	6.01E-11	6.03E-11
Pb-210	1.03E-16	1.08E-16	2.61E-16	2.20E-16	1.28E-16	2.26E-16	2.71E-16
Ra-226	7.99E-13	8.20E-13	1.96E-12	2.12E-12	1.09E-12	1.41E-12	1.23E-12
Th-230	2.76E-11	2.79E-11	5.68E-10	5.68E-10	5.67E-10	5.67E-10	5.69E-10
U-234	3.60E-12	3.85E-12	8.53E-12	7.42E-12	3.91E-12	8.49E-12	6.62E-12
U-238	3.51E-12	3.73E-12	8.24E-12	7.16E-12	3.74E-12	8.20E-12	6.38E-12
Pu-238	1.99E-15	2.05E-15	2.89E-14	2.92E-14	2.82E-14	2.82E-14	2.83E-14
Pu-242	9.63E-11	9.80E-11	1.15E-09	1.16E-09	1.09E-09	1.09E-09	1.10E-09
Cm-246	1.69E-12	1.72E-12	2.76E-11	2.76E-11	2.70E-11	2.70E-11	2.71E-11
Ac-227	2.28E-16	2.76E-16	3.41E-15	3.37E-15	3.29E-15	3.29E-15	3.29E-15
Pa-231	3.34E-10	3.47E-10	1.58E-09	1.66E-09	1.25E-09	1.25E-09	1.25E-09
U-235	1.56E-11	1.62E-11	3.49E-11	3.00E-11	1.49E-11	3.47E-11	2.66E-11
Pu-239	3.80E-11	3.87E-11	4.92E-10	4.97E-10	4.74E-10	4.74E-10	4.78E-10
Am-243	3.74E-12	3.78E-12	6.32E-11	6.32E-11	6.24E-11	6.24E-11	6.30E-11

下部土層	地下水釋出 毛細上升 吸附/脫附 生物擾動 微生物引起化學變化 擴散/延散	-	-	-
入滲 吸附/脫附 生物擾動 微生物引起化學變化	上部土層	植物吸收	植物吸收	氣體傳輸
-	衰亡/落葉/排泄 微生物引起化學變化	農作物	-	-
-	衰亡/落葉/排泄 微生物引起化學變化	-	林木	-
-	-	植物吸收	植物吸收	空氣

圖 4-161：陸地生態系統之交互作用矩陣

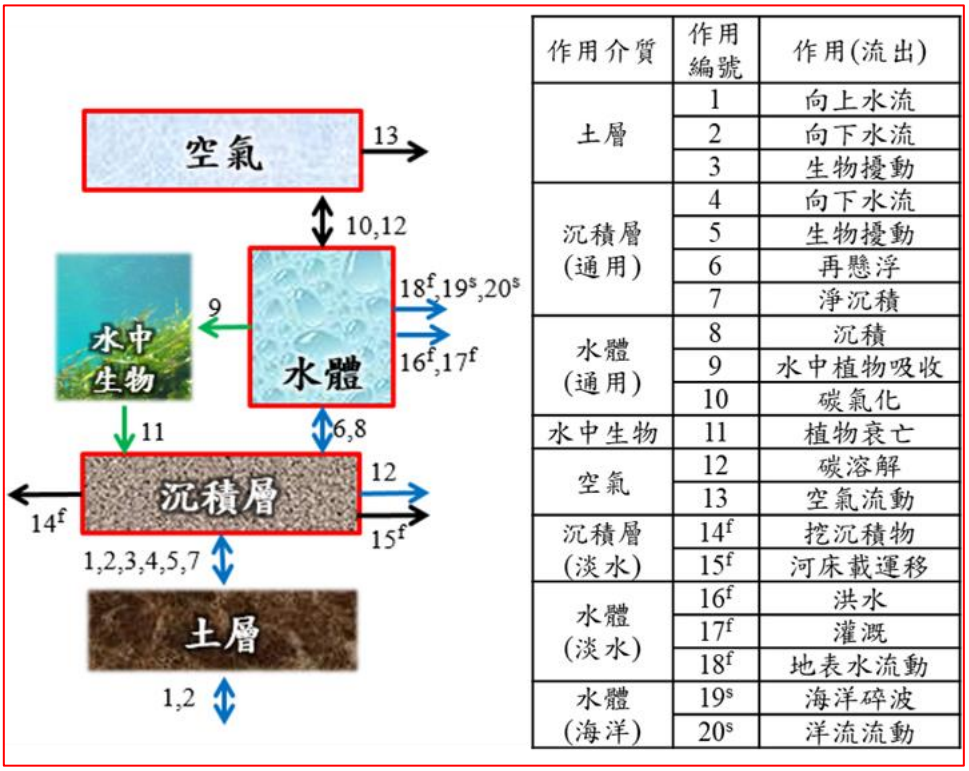


作用介質	作用編號	作用(流出)
下部土層	1	向上水流
	2	向下水流
	3	生物擾動
上部土層	4	農作物根吸收
	5	樹木根吸收
	6	向下水流
	7	生物擾動
	8	地表侵蝕
	9	碳氣化
農作物	10	農作物衰亡
林木	11	林木衰亡
空氣	12	光合作用
	13	空氣流動
地下水	14	井水灌溉

圖 4-162：陸地生態系統環境介質區塊模組之概念模型

土層	地下水釋出 毛細上升 吸附/脫附 生物擾動 微生物引起化學變化	-	-	-
入滲 吸附/脫附 生物擾動 微生物引起化學變化 沉積物再懸浮	沉積層	沉積物再懸浮 吸附/脫附	-	-
-	沉積物再懸浮 吸附/脫附	水體	植物吸收	氣體傳輸
-	衰亡/落葉/排泄 微生物引起化學變	-	水中生物	-
-	-	降雨 雨沖作用/濕沉降 溶解/沉澱	-	空氣

圖 4-163：水域生態系統的交互作用矩陣



作用介質	作用編號	作用(流出)
土層	1	向上水流
	2	向下水流
	3	生物擾動
沉積層(通用)	4	向下水流
	5	生物擾動
	6	再懸浮
	7	淨沉積
水體(通用)	8	沉積
	9	水中植物吸收
	10	碳氣化
水中生物	11	植物衰亡
空氣	12	碳溶解
	13	空氣流動
沉積層(淡水)	14^f	挖沉積物
	15^f	河床載運移
水體(淡水)	16^f	洪水
	17^f	灌溉
	18^f	地表水流動
水體(海洋)	19^s	海洋碎波
	20^s	洋流流動

圖 4-164：水域生態系統環境介質區塊模組之概念模型

註：上標f代表淡水生態系統，S代表海水生態系統，未標則皆適用。

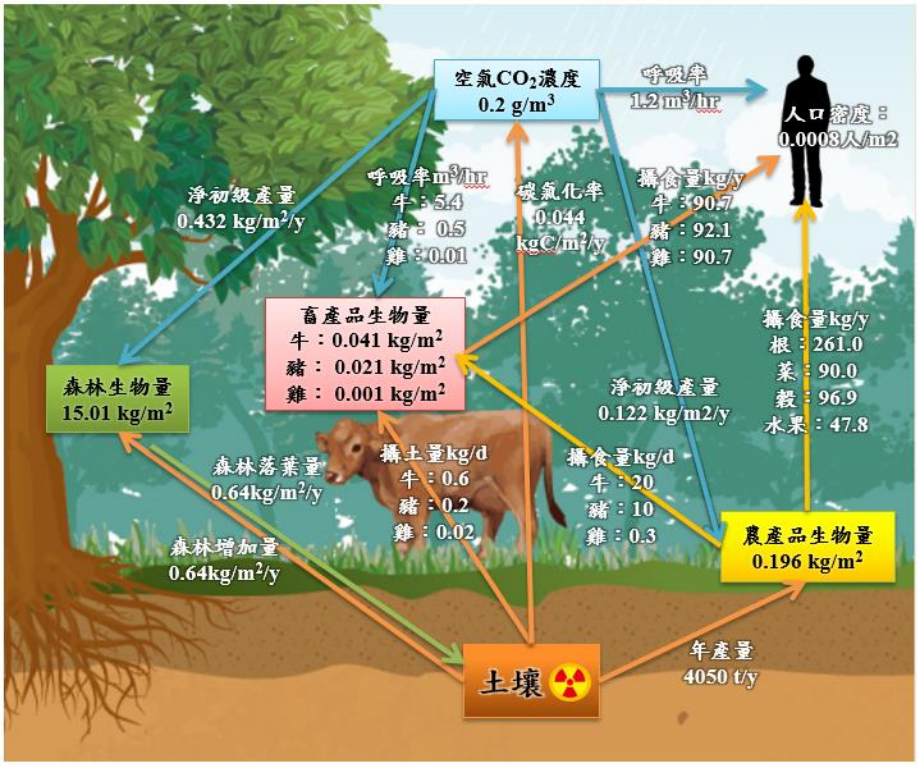


圖 4-165：陸地生態系統食物鏈概念模型

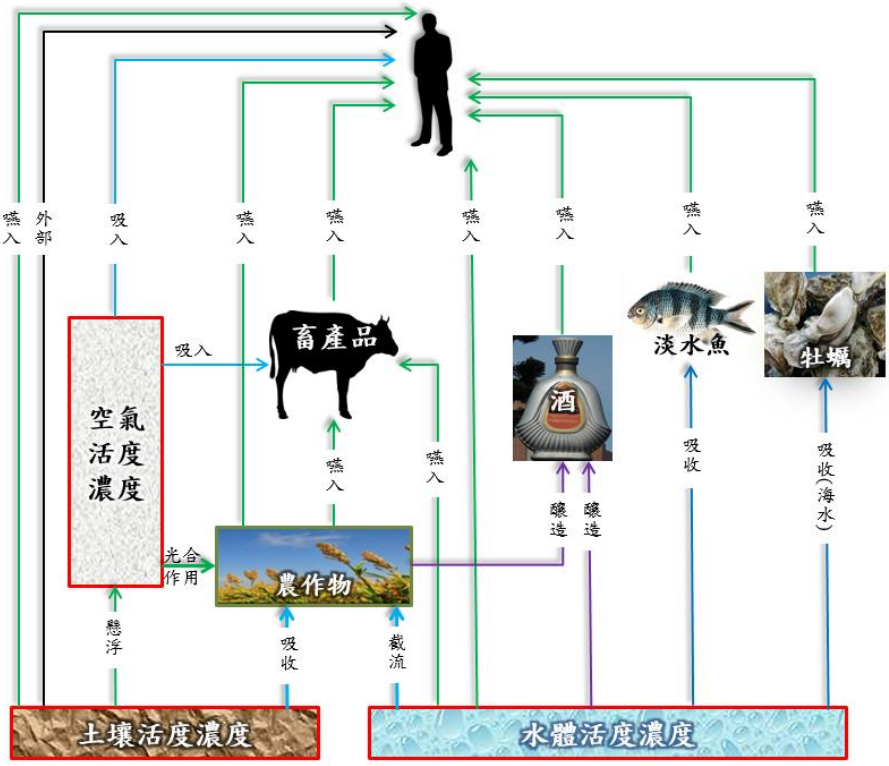


圖 4-166：關鍵曝露途徑與環境介質之連結

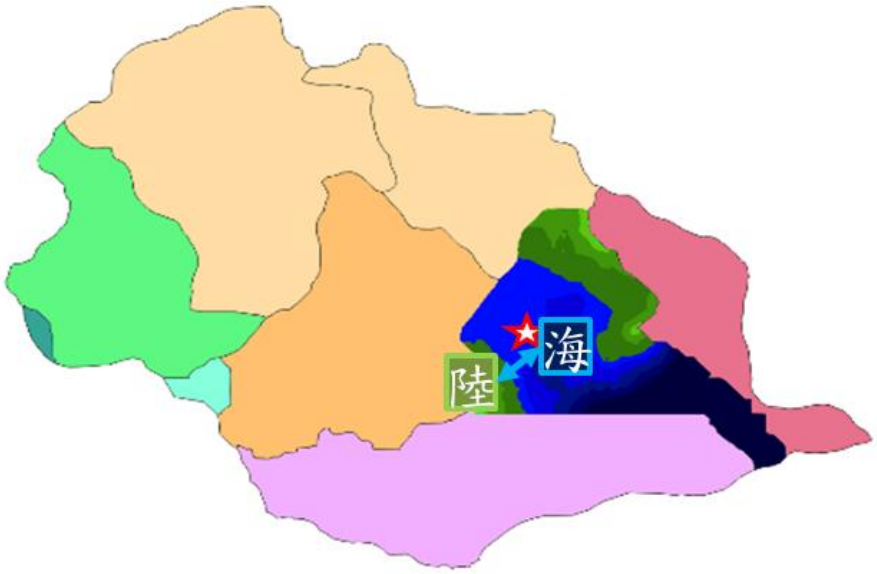


圖 4-167：0 m海平面核種傳輸模組串接設定

註：紅色星號標示處為釋出點釋出位置，位於海洋

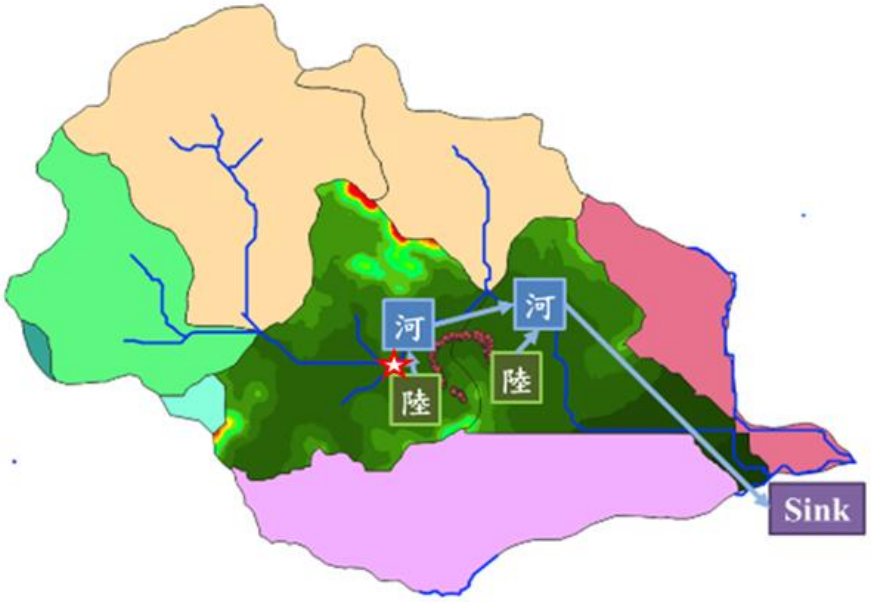


圖 4-168：-120 m海平面核種傳輸模組串接設定

註：紅色星號標示處為釋出點釋出位置，位於上游集水區

4.7. 情節發展與案例分析技術

4.7.1. 工程障壁安全功能指標

本研究彙整研析國際間對於工程障壁安全功能需求及配合國內地質條件，提出適用於本土性之通用型工程障壁之預期安全功能指標。108年度工作成果說明如下：

安全功能的概念肇始於1996年IAEA為核能電廠制定的深度防禦概念，約在同時期，瑞典SKB公司也著手評估將深度防禦應用於放射性廢棄物處置的可能性。發展與地質處置設施有關的安全功能的起點，是放射性廢棄物管理的主要目標，即保護人類和環境免受核種的輻射影響，所提的策略是圍阻和控制廢棄物並將其與生物圈隔離，有必要用多種障壁元件提供的一系列安全功能來達成此一目標(IAEA, 2006, p19)。如同前述，多數國家均在其所屬的放射性廢棄物管理上，以隔離、圍阻及遲滯做為處置的主要安全功能，並對處置系統各組件制定附屬的安全功能，儘管各國在此3項主要安全功能的差異不大，卻因各國所處置的廢棄物類型、所考慮的母岩構造，以及所採用的處置設計概念的不同，在處置系統各元件所賦予的安全功能也略不同。

表 4-78列出數個國家在處置系統元件的安全功能彙整，以芬蘭與瑞典為同一類型的國家為例，在安全功能上就顯示定義的不同，雖然定義有些不同，但在實質上都對處置系統的安全做出貢獻。對特定安全功能的重要性很大程度上，取決於母岩的構造，如表 4-78中所列芬蘭與瑞典以結晶岩為處置母岩，因此，「圍阻」相關的功能可能是主要的安全功能，但法國與瑞士以黏土層為母岩的情況下，「有限和延遲釋出」相關的安全功能可能與「圍阻」具有相同的重要性。

表 4-78中所列的安全功能大都以定性的方式列出，如避免地下水接觸廢棄物、低透水性、限制平流傳輸等，而瑞典SKB公司更為安全功能賦予可測量或可計算的指標，如廢棄物罐的安全功能之一為「提供抗腐蝕障壁」，而此抗腐蝕障壁的可量測指標為廢棄物罐銅殼厚度，此指標在SKB公司的術語中稱之為安全功能指標，做為安全評估用以衡量系統元件實現其安全功能的程度。

關於瑞典SKB安全功能概念在處置設施安全評估中的應用，SNFD2017報告多有著墨，本研究再整理加拿大、芬蘭、日本的做法，供參考。

要了解加拿大對於處置設施安全功能的認知與處理，必須先知道他們揭櫫的安全策略，包括：

(1) 安全的圍阻與隔離用過核子燃料：場址母岩的特性必須能適當地確保因人類活動或自然現象，仍能長期的將用過核子燃料圍阻與隔離於人類可接觸之環境。

(2) 對未來地質作用和氣候變遷的長期適應能力：在選址區域的岩層屬性必須是地質穩定性，而且可能在很長的時間內都維持其穩定性，以確保處置設施將不會受到如地震、冰川循環等地質作用與氣候變遷的顯著影響。

(3) 安全的建造、運轉與封閉處置設施：場址的條件必須適合對處置設施進行安全的建造、運轉與最終封閉。

(4) 能將用過核子燃料隔離於未來人類活動：必須是不可能發生如未來探勘或採礦的人類入侵活動。

(5) 可進行場址特徵化與資料判釋活動：場址的地質條件規模必須能夠實際研究，並對證明場址能提供長期安全性的重要項目進行描述。

(6) 安全運輸：場址必須具有既存或可開闢的道路，以確保可從中期貯存場安全可靠的運送用過核子燃料到處置設施場址。

芬蘭的安全概念是將這些原則如何一起應用，以達到在Olkiluoto場址條件下，對用過核子燃料安全的處置，有一完整地概念性描述。由於用過核子燃料的長期性危害，它必須在一段相當長的時間中與地表環境隔離。KBS-3方法提供一個工程與天然的多重障壁系統，以及確保足夠的處置深度，對用過核子燃料進行長期隔離與圍阻。所有的這些障壁在建立處置設施系統長期安全的需求，都有它們重要的角色，這些角色構成障壁的安全功能(參見圖 4-172)。地表環境並沒有賦予安全功能，相反，它被視為處置設施系統提供的保護對象。

日本在地質處置中，為了保護人類和避免環境受到特定放射性廢棄物的潛在危險，利用地下深層固有的穩定性，以確保長期實現「隔離」和「圍阻」的基本概念原則。表 4-80顯示了處置設施所需的安全功能。為了增強與限制相關的安全功能，應用工程措施(工程障壁)來構建與地下深層功能相結合的多重障壁。藉由在處置設施所提供這些安全功能，即使在沒有人監視的情況下，也可以保證長時間的安全性。

目前國內尚未確定處置設施的場址，因此，SNFD2017報告係以離島花崗岩作為參考標的。然而，對於國內的處置計畫而言，考慮的處置母岩還包括泥岩及中生代基盤岩

在進行選址和處置設施設計時，重要的是考慮有助於提升其安全性的場址和設計條件包括那些，例如，適當的母岩可以隔離放射性核種，進一步可以遲滯核種的釋出；包覆在廢棄物罐周圍的緩衝材料可阻擋地下水進入並提供保護的圍阻功能，這些處置設施的元件，其有助於提升處置設施安全性的各種方式，可以稱為安全功能。

處置場封閉後的長期安全性需要考慮處置設施、地質環境數十萬年的演化，並包括對處置母岩、工程障壁材料、廢棄物體和放射性核種行為的理解和整合研究，最終是要說明處置設施對所有可能的環境演化都是安全的。

臺灣可能的地質環境包括曾經探討過的3種潛在處置母岩：花崗岩、泥岩及中生代基盤岩。表 4-81為臺灣花崗岩、泥岩及中生代基盤岩等3大潛在母岩的評估結果彙整表，評估結果顯示：

(1) 臺灣西南部泥岩斷層構造多、泥貫作用明顯，且具油氣開採潛能，做為處置母岩之條件比不上花崗岩與中生代基盤岩。

(2) 雖然臺灣中生代基盤岩處於相當穩定的地質環境，但根據臺灣本島歷年的地質鑽探資料顯示，在本島西部地區，中生代基盤深度普遍在2,000 m以上，已超過國內法規要求之處置深度上限，且以目前隧道式地質處置概念而言，該深度之工程困難性較高，故可行性較低；在臺灣海峽部分區域，中生代基盤岩的深度少於1,000 m，且其側向延伸範圍及厚度均具有相當規模，具有作為

處置設施之可能性，惟目前現場調查資料有限，需進行進一步之調查，以評估其作為處置設施之合適性。

(3) 臺灣西部離島及本島東部花崗岩，經蒐集與分析過去100萬年的地質歷史，顯示兩地區均符合地質處置設施安全條件；另一方面，依照目前地體演化模式，未來100萬年的地體架構將與現在相同，代表臺灣西部離島及本島東部花崗岩，均有至少100萬年的長期穩定潛力。兩地區針對地質處置設施之安全評估要求均具備可調查性和可預測性，特別是針對火山活動、斷層活動、抬升、天然資源等自然因子，至今均尚未發現致命的不利條件，均可考量做為地質處置設施的後續調查區域，建議列為臺灣處置母岩的優先調查對象。

基於上述說明，探討處置設施元件所能提供的安全功能是有幫助的，這些元件提供的安全功能有助於實現最上位的安全功能--隔離和圍阻。不同安全功能的相對重要性，會因不同的地質環境或處理概念而異，因此，探討處置設施元件所能提供的通用性安全功能，確有其必要，本期研究著重在廢棄物罐、緩衝材料與回填材料的安全功能，其上位的安全功能主要是圍阻，而能夠實現的通用安全功能，簡述如下。

(1) 廢棄物罐：

(a) 限制放射性核種的釋出；這種安全功能是通過物理圍阻和防止水進入來實現。

(b) 防止失效；這可以通過穩固的廢棄物罐設計來實現。

(c) 穩定工程障壁的結構和幾何形狀的能力；例如，使用鑄鐵內襯來提供機械支撐。

(2) 緩衝材料與回填材料

(a) 保護廢棄物罐；例如，限制地下水進入、有利的化學環境，以及適當的物理性能來實現。

(b) 穩定工程障壁的結構和幾何形狀；例如，適當的回填設計與物理性能。

(c) 限制放射性核種的釋出；例如，有利於核種吸附的化學環境、限制地下水進入。

(d) 防止過壓；例如，容許氣體通過。

對於臺灣可能的3種處置母岩而言，實現深層地質處置安全性的最大差異是天然障壁，也就是隔離這項安全功能；至於圍阻，主要由工程障壁提供，工程障壁的主要組件，包括廢棄物罐、緩衝與回填材料，都可以使用在這3種處置母岩，因此，差異性較小。在花崗岩方面，參照SNFD2017報告述及的安全功能，對比臺灣可能的地質環境，整理成表 4-82的適用性分析；在中生代基盤岩方面，屬於與花崗岩相似的結晶岩類，在此通用階段，也可以參照前述花崗岩的安全功能，如表 4-83所示；至於泥岩，其岩石材料性質比較不同於結晶岩，其通用的安全功能可參考前面說明或表 4-78的法國與瑞士的相關內容。

表 4-78：各國處置系統元件安全功能彙整

處置元件	芬蘭 (用過核子燃料、結晶岩、KBS-3型)	瑞典 (用過核子燃料、結晶岩、KBS-3型)	法國 (玻璃固化體/用過核子燃料、黏土構造、多重障壁)	瑞士 (玻璃固化體、黏土構造、多重障壁)	日本 (玻璃固化體、未定母岩、多重障壁)
廢棄物基質/包封體/內部結構	•內襯確保可長期圍阻用過核子燃料	遲滯 •約束核種(遲滯) •沉澱 •避免臨界	•將核種固定在包裝體並限制核種釋出 -防止水接觸廢棄物 -限制基質質變，分解物局部傳輸 -限制核種溶解；維持還原環境、過濾膠體	•核種的遲滯釋出 -耐腐蝕性(Eh，pH)，特別是容器失效後 -水流量低，廢棄物基質穩定	•抑制放射性物質的濾出(HLW) -藉由玻璃基質抑制洗脫 •抑制放射性物質的濾出(TRU)
廢棄物罐	•確保可長期圍阻用過核子燃料	圍阻/遲滯 •提供抗腐蝕障壁 •抵抗圍壓負載 •抵抗剪力負載 •提供傳輸組抗 •避免燃料臨界	•將核種固定在包裝體並限制核種釋出 -防止水接觸廢棄物 -限制基質質變，解解物局部傳輸 -限制核種溶解；維持還原環境、過濾膠體	•圍阻放射性核種 -耐腐蝕性 •核種滯留/低釋出率 -滯留核種	•抑制放射性物質的濾出 -防止廢棄物與地下水接觸
緩衝材料	•提供可預測和有利於廢棄物罐的力學、地球化學和水文地質條件 •保護廢棄物罐免於受到可能危及用過核子燃料和相關的放射性核種圍阻安全功能的外部作用	圍阻/遲滯 •限制平流傳輸 •減少微生物活性 •緩衝岩石裂隙剪力效應 •防止質變 •防止廢棄物罐沉降 •限制加於廢棄物罐及母岩的壓力 •過濾膠體 •吸附核種	•延遲並減弱核種在處置設施外的遷移 -控制擴散遷移、滯留和延散到母岩 -延遲在工程障壁中傳輸 •將核種固定在包裝體並限制核種釋出 -限制核種溶解；維持還原環境、過濾膠體	•圍阻放射性核種 -幾何條件(橫向範圍和厚度或空間，深度和面積限制) -承受母岩力學條件 •核種滯留/低釋出率 -由於容器劣化而滯留核種	•抑制放射性物質的濾出 -抑制核種的平流傳輸 -抑制膠體傳輸 -吸附核種

處置元件	芬蘭 (用過核子燃料、結晶岩、KBS-3型)	瑞典 (用過核子燃料、結晶岩、KBS-3型)	法國 (玻璃固化體/用過核子燃料、黏土構造、多重障壁)	瑞士 (玻璃固化體、黏土構造、多重障壁)	日本 (玻璃固化體、未定母岩、多重障壁)
	•當廢棄物罐失效時能限制與延緩放射性核種的釋出	•允許氣體傳輸	•保護地質環境有利的特性 -限制黏土層力學形變 -散熱 -免受包裝體質變引起的化學擾動 -維持次臨界狀態		
隧道回填材料	•提供可預測和有利緩衝材料和廢棄物罐的力學、地球化學和水文地質條件 •當廢棄物罐可能失效時能限制與延緩放射性核種釋出 •提供有利處置隧道附近岩石力學穩定性	圍阻/遲滯 •抵抗緩衝材料膨脹 •限制平流傳輸 •吸附核種	•防止水的循環 -限制水流量與循環	•核種滯留/低釋出率 -填充和密封材料的穩定性(母岩中水流量低，地球化學條件) -滯留，傳輸性能(低母岩水傳導性、溶解度限制、吸附，擴散、膠體過濾) -滯留(吸附、礦物、Eh、pH、鹽度、微生物作用影響、膠體)	•抑制放射性物質的遷移 -隧道及周圍環境避免成為良好傳輸途徑
母岩	•將用過核燃料處置設施與地表環境和人類、植物和動物常棲地隔離，以及限制人類入侵的可能性，並隔離地表不斷的變遷條件 •為工程障壁提供可預測和有利的力學、地球化學和水文地質條件	圍阻/遲滯 •提供有利的化學條件 •提供有利的水文地質及傳輸條件 •提供力學穩定環境 •提供有利熱學環境	•防止水的循環 -限制水流量與循環 •延遲並減弱核種在處置設施外的遷移 -控制擴散遷移、滯留和延散到母岩 •將核種固定在包裝體並限制核種釋出 -限制核種溶解；維持還原環境、過濾膠體	•人類生活環境的廢棄物物理隔離/確保障壁系統所需的長期穩定性 -物理隔離人類生活環境的廢棄物 -保護障壁免受地面的作用和事件的影響 -場址和岩石屬性的抵抗力 -防止不允許的侵蝕 •核種滯留/低釋出率	•保護免於自然現象顯著的影響 •抑制人類接近 •抑制放射性物質的遷移 -抑制放射性物質釋出 -緩慢地下水流抑制核種遷移 -核種吸附 -核種延散

處置元件	芬蘭 (用過核子燃料、結晶岩、KBS-3型)	瑞典 (用過核子燃料、結晶岩、KBS-3型)	法國 (玻璃固化體/用過核子燃料、黏土構造、多重障壁)	瑞士 (玻璃固化體、黏土構造、多重障壁)	日本 (玻璃固化體、未定母岩、多重障壁)
	•限制傳輸和延緩可能從處置場釋出的有害物質的遷移			-傳輸特性(低水量，主要傳輸作用(平流，擴散)，釋出途徑類型和長度) -與處置相關的低影響(沒捷徑、對母或孤立岩石區域的障壁效應有輕微損害)	
封閉體	•防止地下開挖區影響處置場對地表環境和人類、植動物常棲地的長期隔離 •防止因開挖而形成的重大的導水通道，並提供其他工程障壁可預測和有利的地球化學和水文地質條件 •限制和延緩處置場有害物質的流入與釋出		•延遲並減弱核種在處置設施外的遷移 -控制擴散遷移、滯留和延散到母岩 •將核種固定在包裝體並限制核種釋出 -限制核種溶解；維持還原環境、過濾膠體	•核種滯留/低釋出率 -填充和密封材料的穩定性(母岩中水流量低，地球化學條件) -滯留，有利於傳輸性能(低母岩水傳導性、溶解度限制、吸附，擴散、膠體過濾) -滯留(吸附、礦物、Eh、pH、鹽度、微生物作用影響、膠體)	•抑制放射性物質的遷移 -隧道及周圍環境避免成為良好傳輸途徑

資料來源：POSIVA(2012, p22)、SKB(2011, p252-p267)、ANDRA(2005, p28, p61)、NAGRA(2008, p179-p186)、NUMO(2018, p6-27)

表 4-79：Posiva的處置場概念中分配給各障壁(EBS組件和母岩)的安全功能

障壁	安全功能
廢棄物罐	確保可長期圍阻用過核子燃料。此安全功能首先取決於廢棄物罐內襯鑄鐵的力學強度和外圍銅的耐腐蝕性。
緩衝材料	提供可預測和有利於廢棄物罐的力學、地球化學和水文地質條件 保護廢棄物罐免於受到可能危及用過核燃料和相關的放射性核種圍阻安全功能的外部作用當廢棄物罐失效時能限制與延緩放射性核種的釋出
回填材料	提供可預測和有利於緩衝材料和廢棄物罐的力學、地球化學和水文地質條件當廢棄物罐可能失效時能限制與延緩放射性核種的釋出提供有助於處置隧道附近的岩石力學穩定性
母岩	將用過核燃料處置設施與地表環境和人類、植物和動物常棲地隔離，以及限制人類入侵的可能性，並隔離地表不斷的變遷修條件為工程障壁提供可預測和有利的力學、地球化學和水文地質條件限制傳輸和延緩可能從處置設施釋出的有害物質的遷移
封閉	防止地下開挖區影響處置設施對地表環境和人類、植物和動物常棲地的長期隔離防止因開挖而形成的重大的導水通道，並提供其他工程障壁可預測和有利的地球化學和水文地質條件限制和延緩處置設施有害物質的流入與釋出

表 4-80：封閉後處置設施的長期安全功能

確保安全的基本概念	安全功能	說明
隔離	保護免於自然現象顯著的影響	保護廢棄物，使其不會因自然現象的顯著影響而接近或曝露在地面上
	抑制人類接近	在不使用特殊技術的情況下，使人類難以意外地接近廢棄物
圍阻	抑制放射性物質的濾出	藉由抑制廢棄物中放射性物質的濾出，降低隨地下水釋出的釋出率
	抑制放射性物質的遷移	抑制濾出的放射性物質的遷移，來降低放射性物質的遷移速率

表 4-81：臺灣3種潛在處置母岩之長期穩定性評估結果一覽表

潛在處置母岩		花崗岩		泥岩	中生代基盤岩
		西部離島	臺灣東部	臺灣西南部	臺灣海峽至臺灣西部
岩性		花崗岩/花崗片麻岩	花崗岩/花崗片麻岩	粉砂岩/泥岩	火山岩/變質沉積岩
形成年代		100 Ma至140 Ma	80 Ma至90 Ma	1 Ma至2 Ma	60 Ma
地質穩定性	千萬年尺度	13 Ma (海岸)	10 Ma (深海)	淺海或海岸	10 Ma (海岸)
	百萬年尺度	微小地殼變動	6.5 Ma至3.5 Ma (快速抬升與造山)	6.5 Ma至3.5 Ma (快速沉陷)	微小地殼變動(澎湖群島) 快速沉陷(臺灣西部中生代基盤岩，深度>2,000 m)
			3.5 Ma至1.5 Ma (抬升與剝蝕)	3.5 Ma至0.5 Ma (沉陷)	
			1.5 Ma (張裂沉陷)	0.5 Ma (快速隆升)	
	萬年尺度	微小地殼變動	張裂沉陷	快速抬升或沉陷	5,000年來不動(澎湖群島)
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
地震活動		地震相對安靜帶	地震帶至地震相對安靜帶	地震帶	地震相對安靜帶
活動構造		無	待調查	活動逆衝斷層	無
海平面/氣候變遷 (相對現今海平面-120 m至+10 m變化)		海平面上升→島嶼； 海平面下降→陸地	海平面上升→陸地； 海平面下降→陸地	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

資料來源：(SNFD2017報告)。

表 4-82：工程障壁安全功能對在地花崗岩適用性分析評估一覽表

工程障壁	安全功能	圍阻/遲滯	安全功能指標	花崗岩	
				西部離島	臺灣東部
廢棄物罐	提供腐蝕障壁	圍阻	●銅殼厚度	●	●
	抵抗圍壓負載	圍阻	●圍壓負載值	●	●
	抵抗剪力負載	圍阻	●緩衝材料密度 ●剪力位移力	●	●
	提供傳輸抵抗	遲滯	●廢棄物罐破壞後至放射性核種開始釋出的延遲時間 ●失去降低傳輸速率功能的時間	●	●
	避免燃料臨界	遲滯	●廢棄物罐的幾何 ●材料特性	—	—
緩衝材料	限制平流傳輸	圍阻、遲滯	●水力傳導係數 ●回脹壓力	●	●
	減少微生物活性	圍阻	●緩衝材料密度	—	—
	抵抗岩石剪力位移	圍阻	●緩衝材料密度	●	●
	抵抗質變	圍阻、遲滯	●溫度	●	●
	防止廢棄物罐下沉	圍阻	●回脹壓力	●	●
	限制施加於廢棄物罐及岩石的壓力	圍阻	●回脹壓力 ●溫度	●	●
	過濾膠體	遲滯	●緩衝材料密度	●	●
	吸附核種	遲滯	●有效擴散係數 ●吸附係數	●	●
	允許氣體傳輸	遲滯	●回脹壓力	●	●
回填材料	抵抗緩衝材料膨脹	圍阻	●回填材料密度	●	●
	限制平流傳輸	遲滯	●水力傳導係數 ●回脹壓力 ●溫度	●	●
	吸附核種	遲滯	●吸附係數	●	●

註解：●可以適用此項安全功能；—不太適用。

表 4-83：工程障壁安全功能對在地中生代基盤岩適用性分析評估一覽表

工程障壁	安全功能	圍阻/遲滯	安全功能指標	中生代基盤岩(臺灣海峽至臺灣西部)
廢棄物罐	提供腐蝕障壁	圍阻	●銅殼厚度	●
	抵抗圍壓負載	圍阻	●圍壓負載值	●
	抵抗剪力負載	圍阻	●緩衝材料密度 ●剪力位移力	●
	提供傳輸抵抗	遲滯	●廢棄物罐破壞後至放射性核種開始釋出的延遲時間 ●失去降低傳輸速率功能的時間	●
	避免燃料臨界	遲滯	●廢棄物罐的幾何 ●材料特性	—
緩衝材料	限制平流傳輸	圍阻、遲滯	●水力傳導係數 ●回脹壓力	●
	減少微生物活性	圍阻	●緩衝材料密度	—
	抵抗岩石剪力位移	圍阻	●緩衝材料密度	●
	抵抗質變	圍阻、遲滯	●溫度	●
	防止廢棄物罐下沉	圍阻	●回脹壓力	●
	限制施加於廢棄物罐及岩石的壓力	圍阻	●回脹壓力 ●溫度	●
	過濾膠體	遲滯	●緩衝材料密度	●
	吸附核種	遲滯	●有效擴散係數 ●吸附係數	●
	允許氣體傳輸	遲滯	●回脹壓力	●
回填材料	抵抗緩衝材料膨脹	圍阻	●回填材料密度	●
	限制平流傳輸	遲滯	●水力傳導係數 ●回脹壓力 ●溫度	●
	吸附核種	遲滯	●吸附係數	●

註解：●可以適用此項安全功能；—不太適用。

4.7.2. 情節分類與發展

情節的產生來自不確定性的存在，例如某些事件的隨機性或不可預測性、地質與生物圈的自然變異性、特徵與作用的不完整描述、對預測遙遠未來的生物圈及人類習慣的有限可能性等。總結來說，這些不確定性的存在，代表在安全評估中，處置系統或情節在非常長時間尺度的可能的演化範圍是廣泛的。

SNFD2017參考瑞典SKB將情節分為主要情節與干擾情節；為精進建立本土系統化的情節分類，108年度工作則依據ICRP 122報告(ICRP, 2013, p12)定義，將情節區分「設計基準演化情節」與「非設計基準演化情節」：(1)設計基準演化：指在設計處置設施時，根據對處置設施未來可能發生的演化，評估設施可能造成的正常潛在曝露與劑量。對於包含在設計基準演化內的自然事件，可視為規劃曝露情況，ICRP建議可應用風險約束或劑量約束(ICRP, 2013, p42)；(2)非設計基準演化：在處置設施封閉後100萬年間，發生非常不可能或極端的自然事件，導致對人類或環境造成顯著曝露。對於未考慮在設計基準演化的嚴重自然破壞事件，可視為緊急曝露與既存曝露，在設施設計階段，可透過典型或簡化計算，評估嚴重自然破壞事件的潛在影響(ICRP, 2013, p43)。在情節發展的部分，108年度工作與SNFD2017報告，均以導致安全功能失效的角度出發以發展情節。108年度工作成果說明如下：

(1) 腐蝕議題設計基準演化情節：

導致廢棄物罐發生腐蝕的原因如以下幾點：

(a) 緩衝材料中的水長期與廢棄物罐銅殼表面接觸，造成長期腐蝕；

(b) 廢棄物罐所處環境為氧化環境，造成廢棄物罐銅殼快速發生腐蝕作用。

造成上述原因(a)的發生，是因為緩衝材料的限制平流傳輸安全功能指標，無法被滿足，導致水在緩衝材料中產生平流，進而與廢棄物罐銅殼表面接觸導致腐蝕作用的發生。根據目前研究，可

能會危害緩衝材料限制平流傳輸安全功能指標的原因，為管流的形成與膨潤土的侵蝕。管流的形成與處置孔周圍地下水流速有關；膨潤土的膠體形成與侵蝕，與處置孔周圍環境的組成及條件有關。

因此，處置孔周圍的環境及條件會造成原因(a)與原因(b)的發生，而處置孔與其周圍環境的演化，又會受到外部條件的影響。以海平面的變化來說，海平面的變化可能會影響地下水流的流速變化。隨著地下水流充滿在遠場中的裂隙，裂隙表面的礦物會溶解於地下水。當平流作用不具主導力時，水相中的擴散傳輸作用將具有一定影響力。在沒有或是很少水流的情形下，於岩石基質中為擴散傳輸為主。此時幾個變因會因此而影響地質圈的安全功能：

(1) 地下水流速：海平面的變化導致地下水流速的改變，進而可能降低(degradation)地質圈流動傳輸阻力安全功能指標。過高的地下水流速，會使處置設施封閉後未飽和的緩衝材料產生管流侵蝕，導致緩衝材料的密度減少，而無法維持其安全功能，如圖 4-169。

(2) 地下水鹽度：陽離子組成：Ca^{2+}、Na^{+}、Mg^{2+}與K^{+}之4種離子為控制地下水鹽度之主要離子，其濃度變化趨勢即代表鹽度之變化趨勢，陽離子強度小於8 mM，會產生膨潤土的侵蝕效應。

(3) 地下水組成：為了維持緩衝材料與回填材料的長期穩定性，必須限制地下水中有害物質(特別是硫化物)的濃度。這邊所說的有害物質，除了硫化物的影響之外，其他的有害物質，特別是鉀及鐵，對於緩衝材料及回填材料的長期穩定性，亦有顯著的影響。

以上變因而導致膨潤土的侵蝕，會危害緩衝材料的限制平流傳輸安全功能指標，使地下水接觸廢棄物罐，加速廢棄物罐的腐蝕作

用。若是地下水的組成改變了處置設施的還原狀態，會導致對廢棄物罐銅殼的氧化作用，直接促進廢棄物罐的腐蝕作用發生。

廢棄物罐的腐蝕作用會危害到廢棄物罐提供腐蝕障壁的安全功能指標。廢棄物罐提供腐蝕障壁的安全功能指標一旦失效，會使水流入廢棄物罐，在廢棄物罐的空腔中傳輸。

當水進入廢棄物罐，燃料中燃料護套與其他結構金屬元件將開始腐蝕，導致活化產物從金屬部位釋放出來。

當燃料的包覆護套管被破壞，水即能與燃料接觸，燃料可能溶解或轉化，造成燃料基質中的鈾及其他放射性核種釋出，燃料基質於廢棄物罐失效後的溶解速率稱為「燃料基質溶解速率」。

在燃料中的放射性核種，有小部分會被分離到燃料包覆套管間隙中，也可能在燃料的晶界中。大多數分離的放射性核種是具備高度可溶性。當燃料護套被破壞，這些分離的放射性核種與水接觸時，可以快速溶解至水中，因此，在安全評估中認為是採瞬間釋放，釋放出來的量決定於分離放射性核種與其溶解度。

多數核種在處置設施的環境下擁有溶解度限值，上述水接觸燃料護套、燃料、間隙核種的過程中，燃料的核種溶解度限值，可使核種溶解於水並釋出廢棄物罐受到限制。

溶於水的核種透過廢棄物罐的水流或氣體進行傳輸，並從廢棄物罐中釋出至緩衝材料。此時，視不同的腐蝕路徑會有不同的緩衝材料密度：當廢棄物罐是因為膨潤土受到侵蝕，地下水入侵而導致腐蝕失效時，膨潤土密度通常是已經過低至無法維持緩衝材料的限制平流傳輸安全功能指標，導致核種在膨潤土中的傳輸由平流主導，並可能需要考慮膠體所促進的核種傳輸；當廢棄物罐是因為地下水的組成改變了處置設施的還原狀態所導致之腐蝕作用而失效，此時膨潤土密度可能是仍維持正常狀態，則核種以擴散傳輸為主。

位於處置隧道底部的開挖損傷帶，因具有相對高的地下水滲透度，也可能使得放射性核種藉由此路徑釋出。因此，當緩衝材料

仍保持完整時，例如，廢棄物罐是因還原狀態改變而失效，在膨潤土與母岩的交界面需考慮開挖損傷帶(Q2路徑)對地下水流速的影響，並觀察交界面水文條件是否危害地質圈提供有利的水文地質及傳輸條件安全功能指標，最後，觀察以上各路徑對生物圈的輻射影響。

最後，根據外部條件的變化，以及對處置元件安全功能的影響，可以繪製成腐蝕議題情節發展樹狀圖，如圖 4-170所示。根據圖4-170的腐蝕議題情節發展樹狀圖中的每條可能演化路徑，可以發展成多個腐蝕議題之評估案例，如圖 4-171所示。在108年度工作項目規劃中，需要完成腐蝕議題的設計基準演化情節，評估最可能的參考演化路徑。根據4.3.2節地下設施配置設計成果說明(p4-94)，處置區塊之陽離子強度低於維持緩衝材料穩定性的8 mM。因此，圖 4-171中的案例3可能成為本土處置設施在100萬年間最可能的演化路徑，且應優先評估該本土條件(陽離子強度<8 mM)是否會影響處置設施的長期穩定。故在圖 4-171中，選擇案例3進行評估，該演化過程的故事版說明，如圖 4-172所示。

假設處置孔周圍有一裂隙截切，地下水的組成會影響裂隙中的水組成變化。在裂隙一直與處置孔接觸的情況下，裂隙中對膨潤土不利的組成(主要指當地下水中的陽離子強度<8 mM的情況下)會促進膨潤土形成膠體。這些膠體會從裂隙中隨著地下水流失，導致膨潤土材料的被侵蝕，如圖 4-172的子圖1所示。當緩衝材料因受地下水侵蝕作用造成質量損失，損失質量達到一定程度時，即會使緩衝材料中發生平流，此時緩衝材料即喪失所應提供的圍阻功能，即緩衝材料無法阻止水的流入，導致地下水與廢棄物罐銅殼長期接觸，加速廢棄物罐之銅殼腐蝕，如圖 4-172的子圖2與子圖3所示。假如廢棄物罐銅殼持續發生腐蝕作用，致使廢棄物罐提供腐蝕障壁安全功能指標失效，此時地下水流即可侵入廢棄物罐內部，並與用過核子燃料接觸。當用過核子燃料束有破裂或與水接觸發生腐蝕作用導致燃料束破損，內部的放射性核種與水

接觸，造成用過核子燃料中的放射性核種溶解於地下水中。這些可溶於水的放射性核種，透過水在廢棄物罐中的流動傳輸行為，從廢棄物罐中釋出(如圖 4-172的圖4所示)；在工程障壁與地質圈中傳輸，最終釋出至生物圈(如圖 4-172圖5與圖6所示)。以上為108年度腐蝕議題的設計基準演化情節描述；其所建立的情節，經由量化分析，可進行腐蝕議題參考演化路徑下的劑量與風險評估。

(2) 地震議題非設計基準演化情節：

廢棄物罐剪力失效的發生，是由於對廢棄物罐的剪力效應，超過廢棄物罐所能承受的範圍(剪力速度小於1 m/sec以下，剪力位移大於5 cm)，導致廢棄物罐無法滿足體抗剪力負載安全功能指標而失效。

在廢棄物罐外的緩衝材料，原是保護廢棄物罐，緩衝岩體裂隙的剪力效應。然而，在緩衝材料密度過高(密度>2,050 kg/m^3，不同的膨潤土材料，其密度要求可能會不同)的情況下，緩衝材料無法緩衝岩體裂隙的剪力效應，進而對廢棄物罐造成剪力作用，當剪力作用造成的剪力位移>5 cm時，就會導致廢棄物罐的剪力失效。

除了上述因緩衝材料密度過高，使緩衝材料無法維持其緩衝岩體裂隙的剪力效應的安全功能，導致裂隙位移對廢棄物罐的剪力作用之外，在少數情況下，膨潤土的膠結作用(cementation)也會影響緩衝材料緩衝岩體裂隙的剪力效應的安全功能。膨潤土膠結作用為化學與礦物學作用而導致。由於緩衝材料不僅包含蒙脫石亦包含附屬礦物與雜質，例如MX-80和Deponit的礦物組成。這些膨潤土附屬礦物在最初開採為穩定狀態，但在處置設施內可能因暴露的液相條件不同於初始條件，如水組成與溫度的變化，致使膨潤土附屬礦物與雜質產生影響。這些礦物組成會因地下水而溶解，並在特殊條件下，於緩衝材料中與化合物產生沉澱作用，而造成緩衝材料膠結作用。膨潤土膠結作用會造成膨潤土材料的流

變(rheology)與回脹性質改變，進而影響其他特性，例如，蒙脫石的穩定性、離子交換、附屬礦物的改變等。膠結作用會造成膨潤土剪力強度的增加，當地震發生時，具膠結作用的膨潤土無法保護廢棄物罐，反而造成對廢棄物罐的剪力效應，當剪力效應超過廢棄物罐抵抗剪力負載安全功能指標時，就會導致廢棄物罐的剪力失效。

這邊值得注意的是，地震的發生不只會造成對廢棄物罐的剪力效應，同時也可能導致處置孔周圍的裂隙幾何改變，進而影響裂隙的導水係數，這些改變的地質條件，可能會影響處置孔中的膨潤土，進而影響廢棄物罐失效後，釋出的放射性核種的傳輸。

放射性核種自廢棄物罐中釋出後，核種傳輸會受到緩衝材料的狀態影響，以下說明可能發生的3種情況：

(a) 緩衝材料維持安全功能，核種傳輸以擴散傳輸為主。

(b) 緩衝材料無法滿足緩衝材料的限制平流傳輸安全功能指標，核種傳輸以平流傳輸主導：當上述地震發生以致裂隙導水係數改變時，可能造成處置孔周圍的水流增加，促進緩衝材料的侵蝕，使緩衝材料密度下降，甚至發生平流的情況，致使核種自廢棄物罐中釋出後，以平流的方式傳輸。

(c) 考慮膠體作用對核種傳輸的影響：當緩衝材料無法維持緩衝材料過濾膠體的安全功能指標時，即密度小於1,650 kg/m^3時，緩衝材料無法過濾膠體，使放射性核種以膠體或近似膠體粒子的形式傳輸。

最後，根據地震發生之後，以及對處置元件安全功能的影響，可以繪製成地震議題情節發展樹狀圖，如圖 4-173所示。根據圖4-173的地震議題情節發展樹狀圖中的每條可能演化路徑，可以發展成多個地震議題之評估案例，如圖 4-174所示。在108年度工作項目規劃下，需要發展地震相關的非設計基準演化情節。由於在108年度工作4.6.2節近場核種傳輸分析技術，規劃結合Q1路徑與

Q2路徑以持續精進近場核種傳輸模擬技術，故108年度地震議題非設計基準演化情節以圖 4-174中的案例3為代表進行安全評估。地震相關的非設計基準演化情節說明，如圖 4-175所示。

首先，假設自處置設施封閉後，有一裂隙假設與處置孔截切，當地震發生時，將導致地質圈中之裂隙產生錯動，並對處置孔造成剪力效應。當處置孔周圍裂隙產生累積剪力位移大於5 cm時，廢棄物罐失去圍阻安全功能，此時造成地下水入侵至廢棄物罐內部，並與用過核子燃料接觸，致使放射性核種釋出。當發生處置孔的剪力作用時，假設緩衝材料在未流失的情況下，仍維持緩衝材料的限制平流傳輸安全功能指標，因此，水在緩衝材料中以擴散傳輸，水侵入剪力失效的廢棄物罐後，與用過核子燃料接觸，溶於水的放射性核種，透過地下水的傳輸自廢棄物罐中釋出，在緩衝材料中擴散傳輸。地下水到達遠場後，由於裂隙的存在，假設地下水的傳輸以平流傳輸主導，最終放射性核種透過地下水的傳輸釋出至生物圈。情節與案例建立後，透過地震相關的非設計基準演化情節之量化分析，可進行地震相關的演化路徑下之劑量與風險評估。

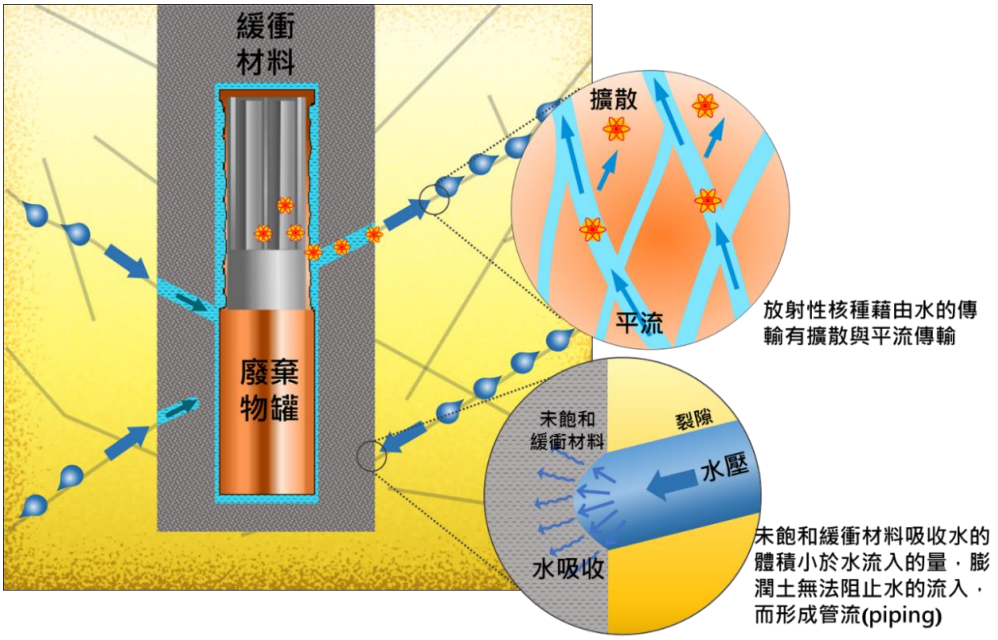


圖 4-169：管流形成過程與核種傳輸

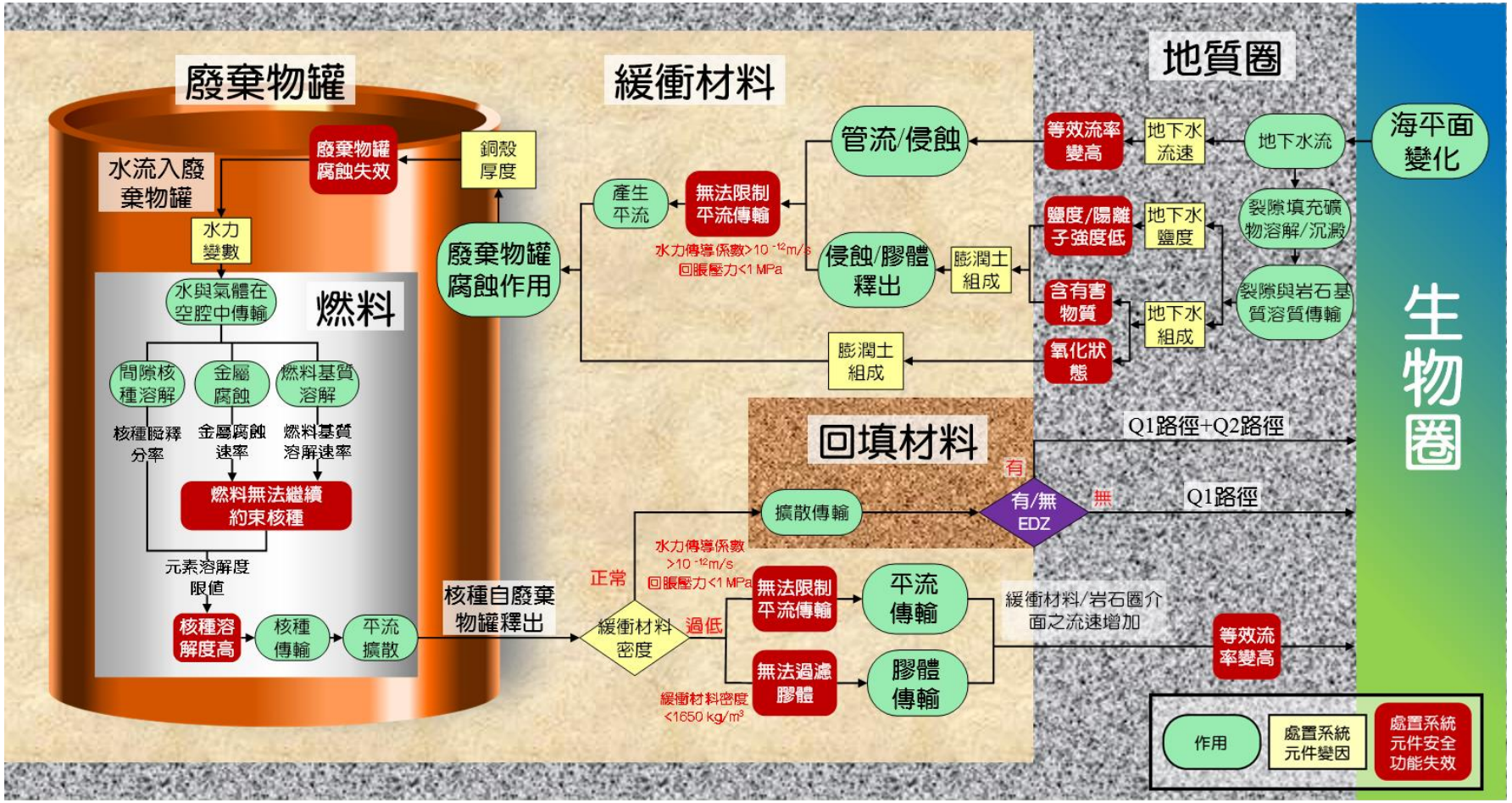


圖 4-170：腐蝕議題情節發展關係圖

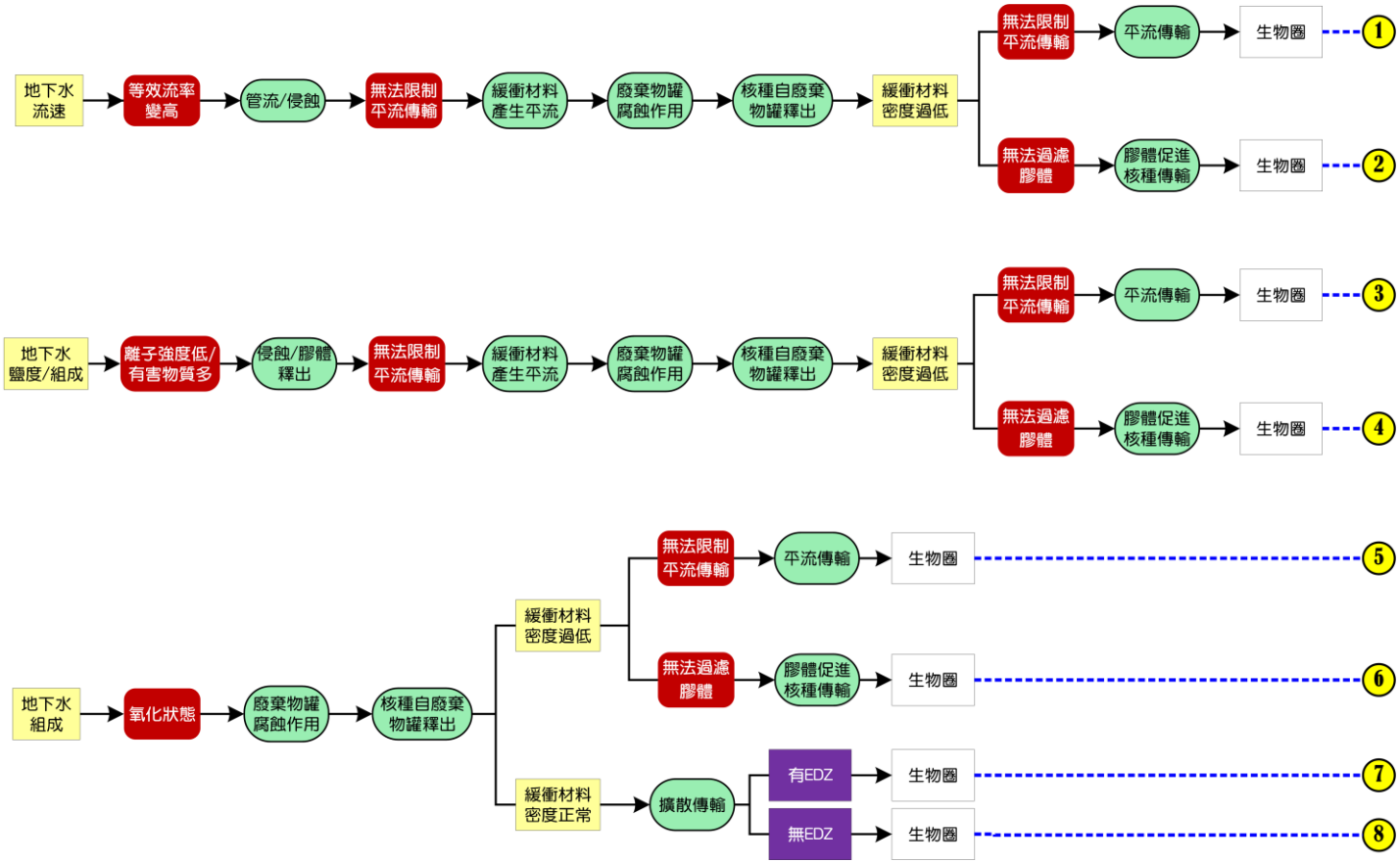


圖 4-171：腐蝕議題評估案例



圖 4-172：腐蝕議題設計基準演化情節故事版

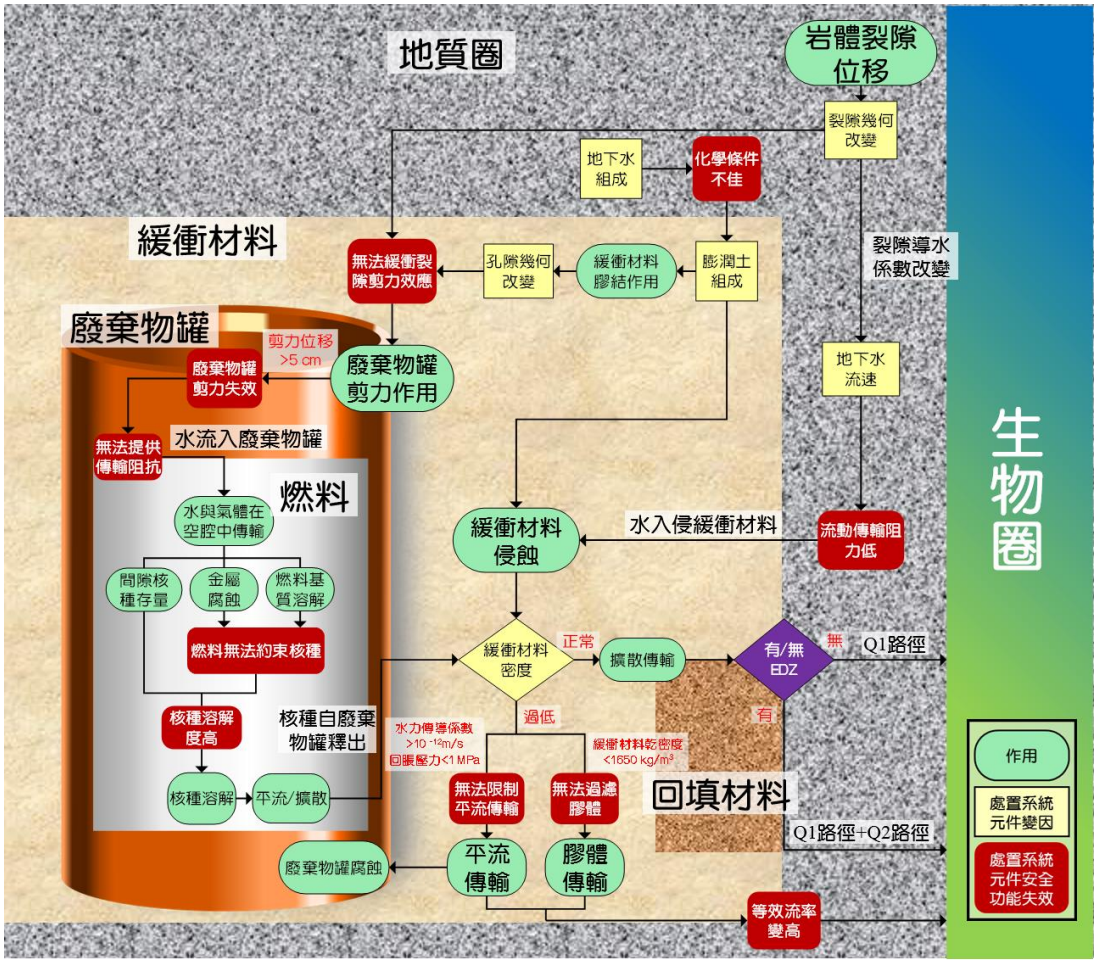


圖 4-173：地震議題情節發展關係圖

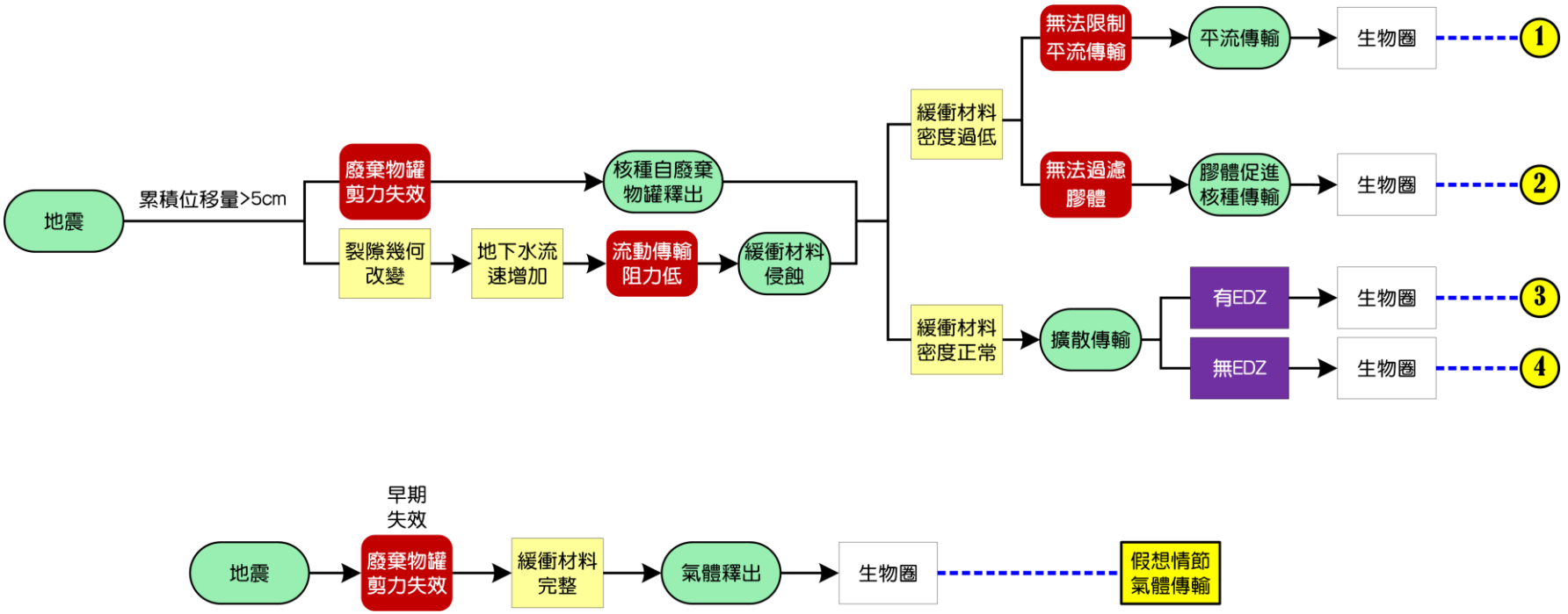


圖 4-174：地震議題評估案例

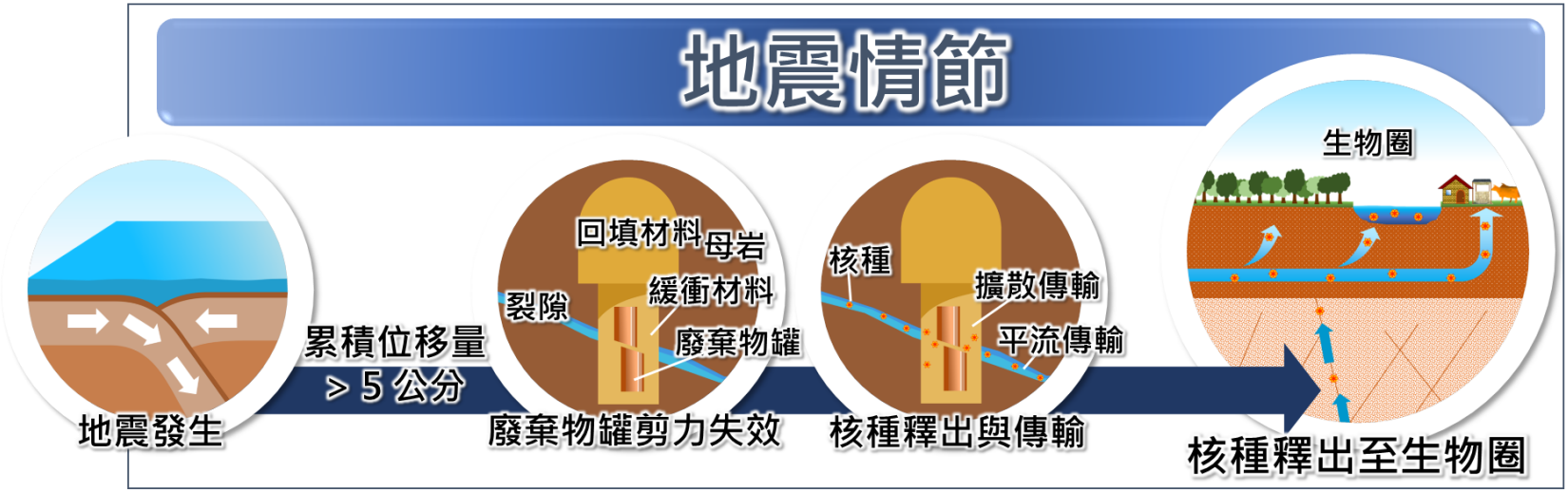


圖 4-175：地震相關非設計基準演化情節故事版

4.7.3. 封閉後安全評估劑量與風險分析技術

本項工作利用評估模式流程圖(Assessment Modeling Flowchart, AMF)整合各模式及使用之資料來源，以瞭解安全評估中所使用之模式、模式間交互關係及使用之參數來源。本項工作參考SNFD2017報告之安全評估模式鏈架構，並配合第4.7.2情節分類與發展，將安全評估模式流程圖，分為腐蝕議題設計基準演化情節及地震議題非設計基準演化情節，再依據本期計畫選用模式與執行工作內容，進行安全評估模式流程圖之更新。本項工作除進行安全評估模式與數據之連結，本期工作同時將AMF中本期所執行的各項評估模式及輸入/輸出參數與報告章節進行連結，以完成整體報告之整合工作。

當廢棄物罐失效後，放射性核種將釋出，並溶解於地下水中，傳輸至工程障壁、天然障壁及生物圈，為了解不同情節下放射性核種釋出後對關鍵群體造成的輻射劑量及風險；本工作利用核種傳輸安全評估模式，根據情節評估需求，模擬包括障壁失效、可能釋出路徑及參數不確定性等等，以完成全系統安全評估，並與法規限值比較，根據「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，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，不得超過百萬分之1。與SNFD2017報告相比，於全系統安全評估中，比較了處置孔廢孔準則使用程度對關鍵群體造成輻射劑量的差異；於剪力議題方面，評估了多次地震引致裂隙位移使廢棄物罐圍阻功能失效後的輻射劑量，亦評估參數不確定性對輻射劑量的影響。108年度工作成果說明如下：

(1) 分析軟體說明：

利用GoldSim建立安全評估模型。

(2) 參數需求說明：

各評估工作的選用模式、輸入、輸出及下游工作/模式如表 4-84所示，其中包含：

(a) 處置設施配置；

(b) 水文地質模式；

(c) 腐蝕議題設計基準演化情節圍阻安全評估；

(d) 剪力議題非設計基準演化情節圍阻安全評估；

(e) 放射性核種傳輸；

(f) 生物圈劑量。

(3) 計算案例與結果說明：

(a) 評估模式流程圖：

由腐蝕議題設計基準演化情節可知，情節主要探討之內容為廢棄物罐因銅殼腐蝕而失效之過程，腐蝕議題設計基準演化情節AMF之功能，即連結演化情節中用以評估重要作用之模式，瞭解各評估模式間上下游關係，以及輸入參數與輸出數據，成果如圖 4-176，圖中亦與本報告中各章節連結，即可根據此圖了解各章節之相關性，及各章節與此章節之串接性。地震議題非設計基準演化情節，與腐蝕議題設計基準演化情節之評估模式流程圖內容大致相似，主要不同之處在於該情節探討之廢棄物罐失效過程為地震引致裂隙剪力位移，致使廢棄物罐因力學破壞而失效之一系列過程，AMF成果如圖 4-177。

(b) 腐蝕議題設計基準演化情節之各項案例與說明，如表 4-85所示，評估結果說明如下所述：

設計基準演化情節的安全評估案例2的近場年有效劑量如圖 4-178，即近場放射性核種不經過遠場母岩裂隙的遲滯，直接傳輸至生物圈造成參考群體的輻射劑量；於此案例中，水流參數係考慮了FPC及EFPC後評估而得，1個廢棄物罐將於184,808年失效，劑量主要由Cl-36、I-129及Ni-59主導；廢棄物罐失效後，部份放射性核種的部分盤存量，將快速的釋出(相較於安全評估時間尺度)至廢棄物罐空腔中，如Cl-36、I-129及Ni-59，因這些核種具有相對長的半化期，於地下水進入罐中後，將有部分存量以瞬時及金屬腐蝕釋出(I-129不具有腐蝕釋出分率)，並被地下水快速的帶離近場，而Ni-59於

廢棄物罐失效後維持一段平穩的釋出劑量率，係因其約97%的盤存量以瞬時及金屬腐蝕方式釋出，但其溶解度限值及近場等效流率限制了釋出率，直到罐內空腔中的Ni-59傳輸完後，其年有效劑量率線即下降；Ra-226的年有效劑量率線逐漸上升，係因其母核種Th-230沉澱於罐內空腔中衰變為Ra-226所導致。

設計基準演化情節的安全評估案例2的遠場年有效劑量，如圖 4-179，即放射性核種經由母岩裂隙傳輸至生物圈後，造成參考群體的輻射劑量，大多數放射性核種經過遠場後，將被有效的遲滯，遠場釋出的峰值總年有效劑量為1.32×10^{-4} μSv/yr，主導的放射性核種為Cl-36及I-129，遠場母岩裂隙對這2個放射性核種的遲滯能力較低。

圖 4-180為設計基準演化情節安全評估案例2中，經遠場釋出的不同核種對不同潛在曝露群體的峰值年有效劑量，其中，關鍵曝露群體為畜牧群體(雞)，其峰值總年有效劑量較參考群體高約2倍，各潛在曝露群體間的峰值總年有效劑量差異不大。

設計基準演化情節的安全評估案例5的遠場年有效劑量如圖4-181，於此案例中，使用了海平面高度為-120 m時的參數，峰值總年有效劑量為2.96 μSv/yr，主導的放射性核種為Cl-36、Se-79及I-129，這3個放射性核種具備長半化期，且於此條件下於母岩基值中的分配係數為0，而有較高的年釋出劑量。

圖 4-182為設計基準演化情節的安全評估案例2至案例5，有關遠場釋出對關鍵群體所造成的平均年有效劑量，其中，除了案例5外，各案例的關鍵曝露群體皆為畜牧群體(雞)；而案例4及5的BDCFs皆考慮了利用被放射性核種污染的井水灌溉，案例5的關鍵曝露群體總年有效劑量最高，因海平面高度為-120 m時，放射性核種釋出至生物圈時，外釋點位於近

陸地或河流的土層中並污染井水，當使用該井水灌溉，將有高的放射性核種汙染，造成的峰值總年有效劑量為6.48 μSv/yr。相較之下，案例4的BDCFs為海平面高度為0 m，並考慮飲用井水(挖到核種傳輸路徑)，於此情況下，放射性核種的外釋點位於近海的土層中，雖污染井水，但造成較低的峰值總年有效劑量。

設計基準演化情節的安全評估案例6的遠場年有效劑量，如圖 4-183，與案例2的主要差異為廢棄物罐失效時間及水流相關參數，相較之下，案例6的失效時間提早約87,000年，加上採用遲滯效應更低的水流相關參數，導致遠場釋出至生物圈造成較高的年有效劑量，峰值總年有效劑量為4.60×10^{-4} μSv/yr。

圖 4-184為設計基準演化情節的安全評估案例6至案例9，有關遠場釋出對關鍵群體所造成的年有效劑量，與案例2至案例5相比，即於腐蝕圍阻功能及水流相關參數評估中未考慮EFPC，這將導致最高的關鍵曝露群體峰值總年有效劑量，提升了約20%。

(c) 剪力議題非設計基準演化情節之各項案例與說明，如表 4-86所示，評估結果說明如下所述：

非設計基準演化情節的安全評估案例1中，處置設施於利用FPC及EFPC後的失效廢棄物罐數期望值為6.24×10^{-3}罐，近場平均年有效劑量如圖 4-185，造成的峰值平均年有效劑量為7.84×10^{-8} μSv/yr；劑量主要由Cl-36、I-129、Pu-242及Ra-226主導，於此案例中，緩衝材料的厚度減少10 cm，但其仍保有遲滯功能，因此，部分放射性核種將被緩衝材料遲滯，而Cl-36及I-129因於緩衝材料中不具有分配係數，而有較高的釋出率；非設計基準演化情節的安全評估案例1的遠場年有效劑量如圖 4-186，峰值平均年有效劑量為3.76×10^{-9} μSv/yr，劑量主要由Cl-36及I-129主導。圖 4-187為非設計基

準演化情節安全評估案例1中，不同核種對不同潛在曝露群體的峰值遠場年有效劑量，其中，關鍵曝露群體為農耕(蔬果)。

圖 4-188為非設計基準演化情節的安全評估案例1至案例4，為有關遠場釋出對關鍵群體所造成的平均年有效劑量，由結果可知，在海平面高度為-120 m時，放射性核種自遠場釋出將造成高的平均年有效劑量，與海平面高度為0 m時相比，最多可相差約5個數量級。

非設計基準演化情節的安全評估案例5中，處置設施僅利用FPC後的失效廢棄物罐數期望值為1.04×10^{-2}罐，遠場平均年有效劑量如圖 4-189，造成的峰值總平均年有效劑量為6.18×10^{-9} μSv/yr，劑量主要由Cl-36及I-129主導，主要與案例1的差異為失效廢棄物罐數期望值及時間，使此案例有較高的峰值總平均年有效劑量及較早的釋出時間。

圖 4-190為非設計基準演化情節的安全評估案例5至案例8，有關遠場釋出對關鍵群體所造成的平均年有效劑量，與案例1至案例4相比，最高的峰值平均年有效劑量高出約1.4倍，即根據目前的假設及分析結果，考慮EFPC後，約可減少30%的遠場釋出年有效劑量。

圖 4-191為案例9(即以案例1為基礎，搭配不確定性參數)的遠場平均、中位數(50%)、95%百分位及99%百分位的年有效劑量，於評估中，廢棄物罐失效數量為定值，因此，並未表現於此評估結果中，根據此結果，參數的不確定性對遠場釋出所造成的年有效劑量有一定程度的影響，圖 4-192為利用案例9進行參數敏感度分析的龍捲風圖(tornado chart)，分析標的為100萬年時的平均總年有效劑量，由結果可知，於此案例中，Cl-36的瞬時釋出率、廢棄物罐失效時間及Q1路徑的水流參數等為劑量評估的關鍵。

(4) 結果與討論：

本工作項目參考SNFD2017報告之安全評估模式鏈架構，依據本期計畫選用模式與執行工作內容，完成安全評估模式流程圖之更新。

根據設計基準演化情節圍阻失效評估的結果，在現階段的評估中，廢棄物罐的抗腐蝕圍阻功能於100萬年時將不會因為腐蝕而失效，若等效初始通量、等效流率及遠場流率提升50倍時，則在僅考慮FPC時，第1罐失效的廢棄物罐將造成關鍵群體最高約7.69 μSv/yr的劑量(腐蝕議題設計基準演化情節安全評估案例9)，於考慮各項保守條件下，關鍵群體劑量不超過法規限值(法規限值為年風險不超過10^{-6} yr^{-1}，搭配ICRP-60報告中考量癌症致死率與遺傳效應的劑量風險轉換係數：7.3×10^{-2} Sv^{-1}，可求得對應的年有效劑量，為14.0 μSv/yr)(ICRP, 1990, p22)。

在非設計基準演化情節圍阻失效評估中，評估了2種條件下(僅考慮FPC及同時考慮FPC及EFPC)，多次地震導致廢棄物罐失效的平均數量，最高關鍵群體年有效劑量為案例8的9.31×10^{-4} μSv/yr，關鍵群體劑量不超過法規限值。

表 4-84：參數需求說明

評估工作	選用模式/評估方法	主要輸入參數	輸出數據	下游工作/模式
處置設施配置	SketchUp、AutoCad	處置孔間距、場址描述模型之地質構造、處置設施餘裕、廢棄物罐總量、可供處置之佔地面積	處置設施配置	水文地質模式、處置孔與裂隙截切分析、核種釋出途徑分析、核種傳輸計算
水文地質	DarcyTools	數值高層模型、處置設施配置、場址描述模型之地質構造、岩體構造水力特性、DFN參數集、工程障壁水力特性、海平面高度	功能測度值 質點傳輸途徑釋出點	隧道入流量分析、工程障壁性能評估、近場核種傳輸、遠場核種傳輸、生物圈模式
緩衝材料與回填材料回脹性質研究	(1) BBM (2) FLAC3D	母岩之水力傳導特性、緩衝材料及回填材料之水力特性、緩衝材料工作縫尺寸、回填材料開挖面幾何	回脹後之密度分布	緩衝材料侵蝕計算
緩衝材料侵蝕	瑞典SKB TR-16-11報告中的經驗式	處置孔環境化學條件、功能測度值	緩衝材料平流傳輸時間	廢棄物罐腐蝕
廢棄物罐腐蝕	瑞典SKB TR-10-66報告中的經驗式	處置孔環境化學條件、功能測度值	廢棄物罐因腐蝕失效時間 廢棄物罐失效數量	放射性核種傳輸
地震引致裂隙剪力位移分析	3DEC	地質構造與斷層幾何、DFN參數集、應力分布、速度構造與力學參數、岩體參數(岩體密度、柏松比)、斷層參數(摩擦角、膨脹角、凝聚力)、裂隙參數(摩擦角、膨脹角、張力強度、凝聚力、正向勁度、剪向勁度)、孔隙水壓、剪力模數、斷層破裂速度、剪力波速、震源參數(地震矩規模、平均滑移速	廢棄物罐位移量、廢棄物罐失效數量、廢棄物罐失效時間	放射性核種傳輸

		率)、處置設施配置、EFPC數量		
近場核種傳輸	GoldSim	廢棄物罐失效時間、廢棄物罐失效數量、重要核種存量、燃料基質溶解速率、瞬時釋出分率、金屬腐蝕速率、燃料間隙體積、達到極大缺陷時間、傳輸延遲時間、緩衝材料遲滯性質、等效流率	近場核種釋出活度	遠場核種傳輸
遠場核種傳輸	GoldSim MARFA	功能測度值、岩體擴散係數、岩體分配係數、最大擴散深度	遠場核種釋出活度	劑量與風險評估
生物圈劑量評估	ArcGIS、 GoldSim	釋出點、海平面高度、生物圈描述模型、數值高程模型、生物圈標的、潛在曝露群體、食物消耗率、空間占用因子、重要核種	個別核種之生物圈劑量轉換因子	劑量與風險評估

表 4-85：封閉後安全評估劑量與風險評估之案例編號與說明(腐蝕議題)

案例編號	案例說明
Case1	根據評估，廢棄物罐腐蝕圍阻功能在基準演化下，100萬年時不會失效，故不進行核種傳輸的評估。
Case2	於核種傳輸評估中，假設1罐廢棄物罐於184,808年失效，其水流相關參數為考慮了FPC及EFPC後所得之結果，並將等效流率及遠場流率提升50倍，使用海平面為0 m時不考慮飲用井水的BDCFs。
Case3	與案例2的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(未挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case4	與案例2的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case5	與案例2的差異為使用海平面高度為-120 m時的水流相關參數及考慮飲用井水的BDCFs。
Case6	於核種傳輸評估中，假設1罐廢棄物罐於97,815年失效，其水流相關參數為僅考慮了FPC後所得之結果，並將等效流率及遠場流率提升50倍，使用海平面為0 m時不考慮飲用井水的BDCFs。
Case7	與案例5的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(未挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case8	與案例5的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case9	與案例5的差異為使用海平面高度為-120 m時的水流相關參數及考慮飲用井水的BDCFs。

表 4-86：封閉後安全評估劑量與風險評估之案例編號與說明(剪力議題)

案例編號	案例說明
Case1	於核種傳輸評估中，使用海平面高度為0 m時的參數，並假設有6次廢棄物罐失效，廢棄物罐平均失效罐數為4.1×10^{-6}罐，其水流相關參數為考慮了FPC及EFPC後所得之結果，並使用海平面高度為0 m時不考慮飲用井水的BDCFs。
Case2	與案例1的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(未挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case3	與案例1的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case4	與案例1的差異為使用海平面高度為-120 m時的參數、水流相關參數及使用海平面高度為-120 m時考慮飲用井水的BDCFs。
Case5	於核種傳輸評估中，使用海平面高度為0 m時的參數，並假設有10次廢棄物罐失效，廢棄物罐平均失效罐數為7.07×10^{-6}罐，其水流相關參數為僅考慮了FPC後所得之結果，並使用海平面為0 m時不考慮飲用井水的BDCFs。
Case6	與案例5的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(未挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case7	與案例5的差異為BDCFs，改以海平面為0 m時考慮飲用井水(挖到核種傳輸路徑)的BDCFs進行評估。
Case8	與案例5的差異為使用海平面高度為-120 m時的參數、水流相關參數及使用海平面高度為-120 m時考慮飲用井水的BDCFs。
Case9	以案例1為基礎，搭配參數不確定性，進行不確定性評估，不確定性參數包括材質特性參數、瞬時釋出分率(instant release fraction, IRF)及腐蝕釋出分率(corrosion release fraction, CRF)等等。

設計基準演化情節(腐蝕議題)安全評估模式鏈

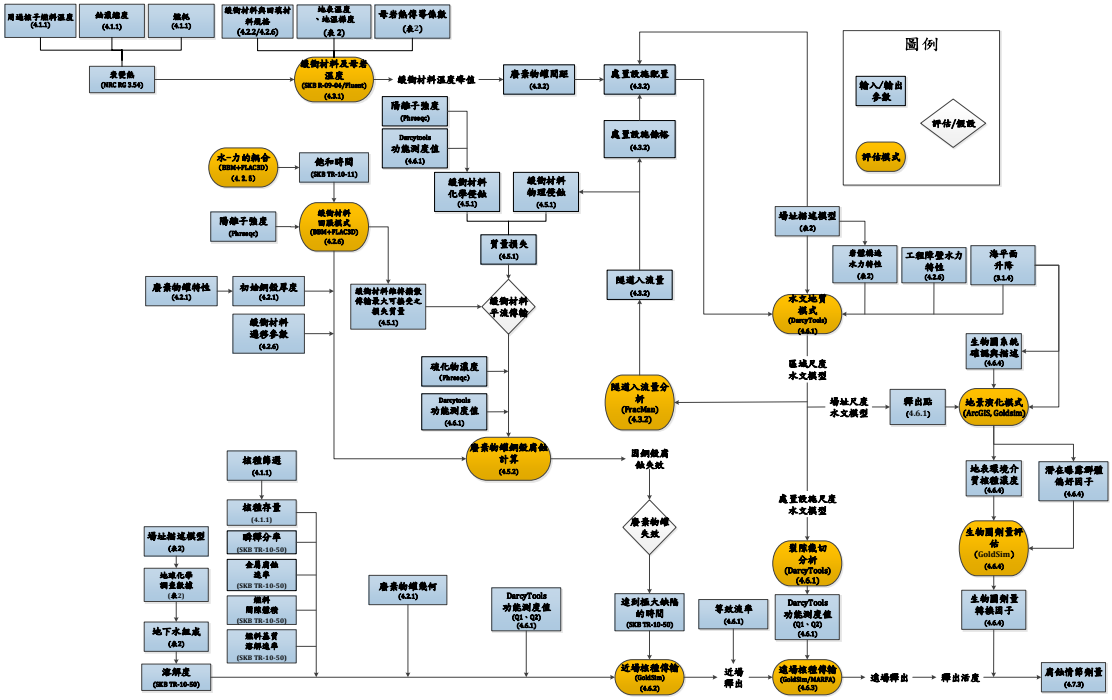


圖 4-176：腐蝕議題設計基準演化情節安全評估模式鏈

非設計基準演化情節(地震議題)安全評估模式鏈

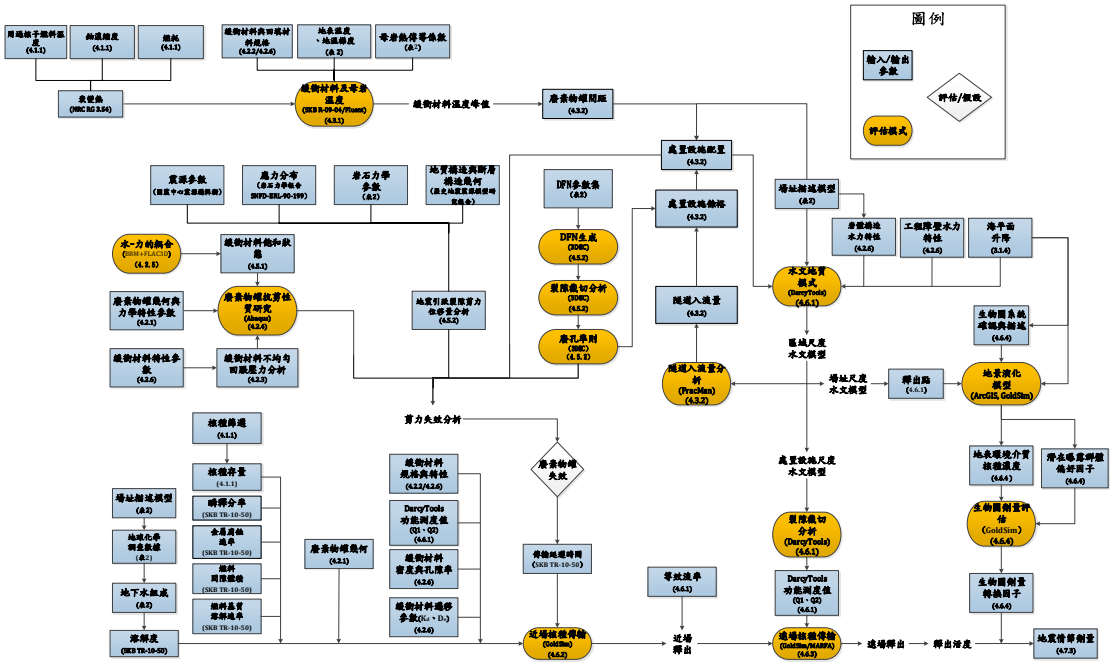


圖 4-177：地震議題非設計基準演化情節安全評估模式鏈

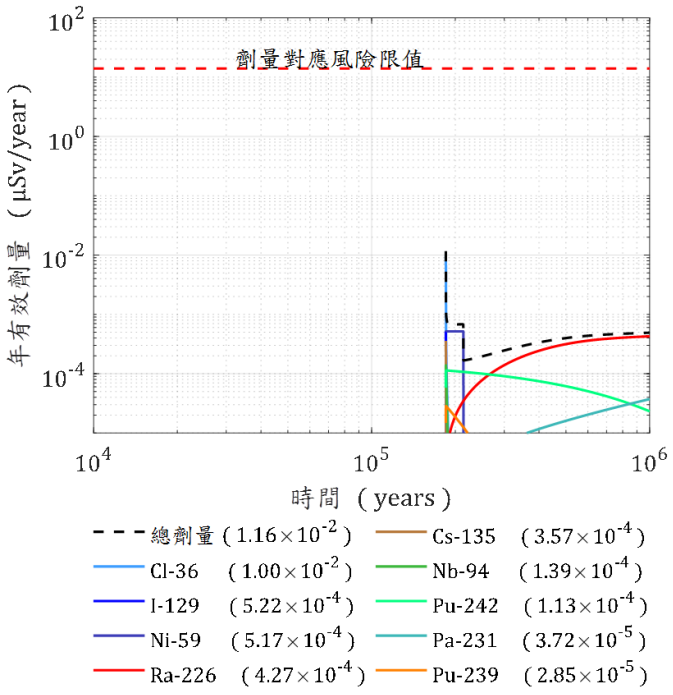


圖 4-178：設計基準演化情節安全評估案例2的近場年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值年有效劑量(μSv/yr)。

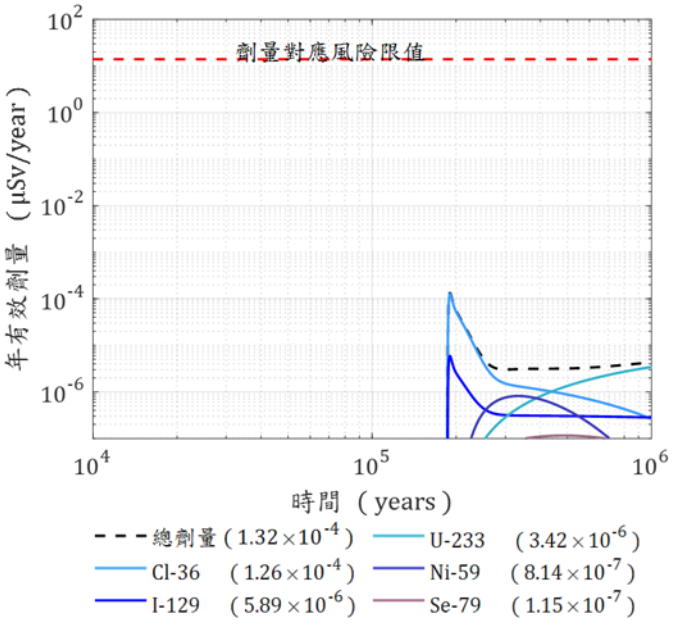


圖 4-179：設計基準演化情節安全評估案例2的遠場年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值年有效劑量(μSv/yr)。

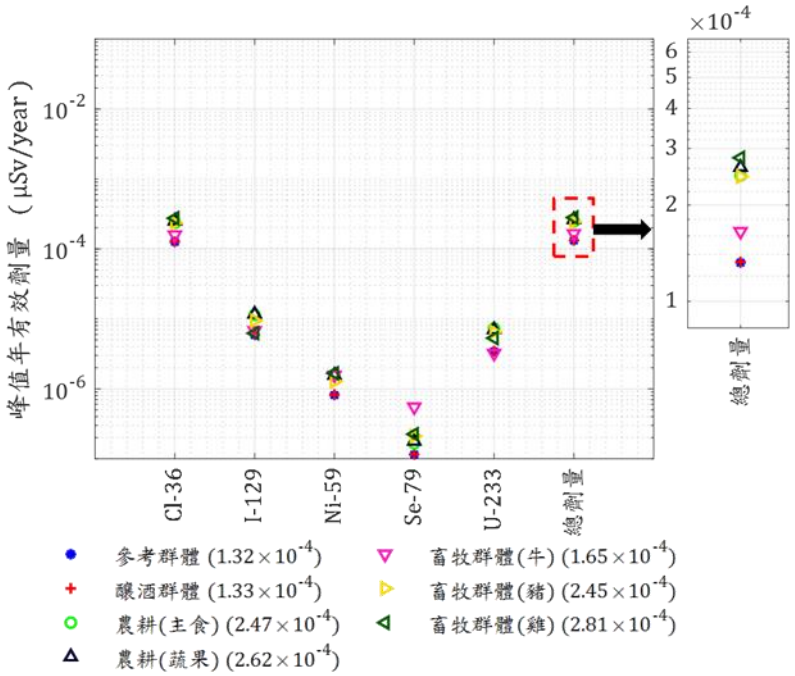


圖 4-180：設計基準演化情節安全評估案例2中，不同核種對不同潛在曝露群體的峰值遠場年有效劑量

註：括號內為該潛在曝露群體峰值總年有效劑量(μSv/yr)。

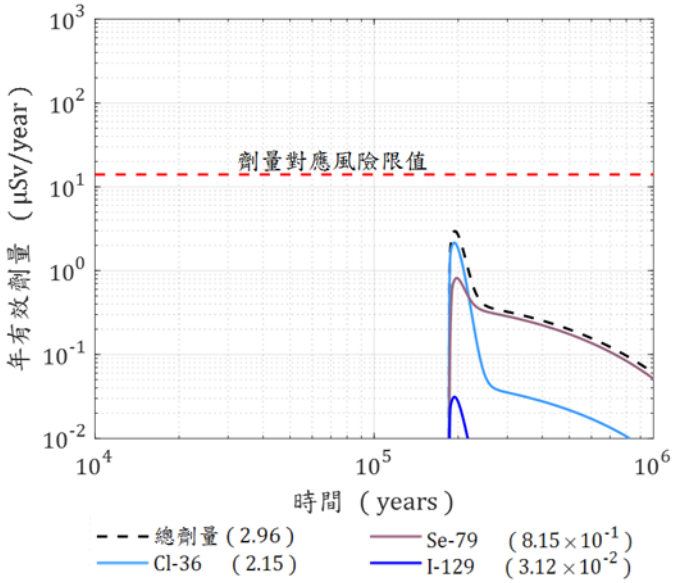


圖 4-181：設計基準演化情節安全評估案例5的遠場年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值年有效劑量(μSv/yr)。

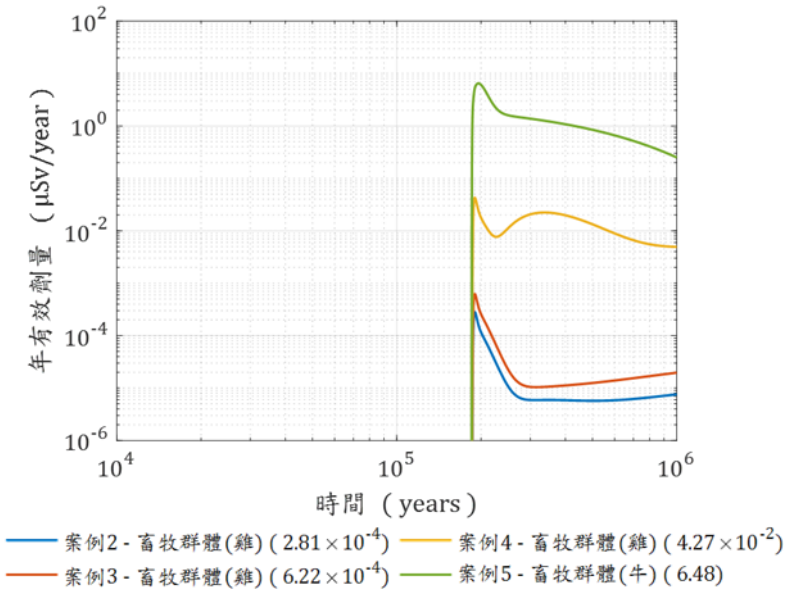


圖 4-182：設計基準演化情節安全評估案例2至案例5的遠場釋出對關鍵群體造成的年有效劑量

註：括號內為該案例關鍵曝露群體峰值總年有效劑量(μSv/yr)。

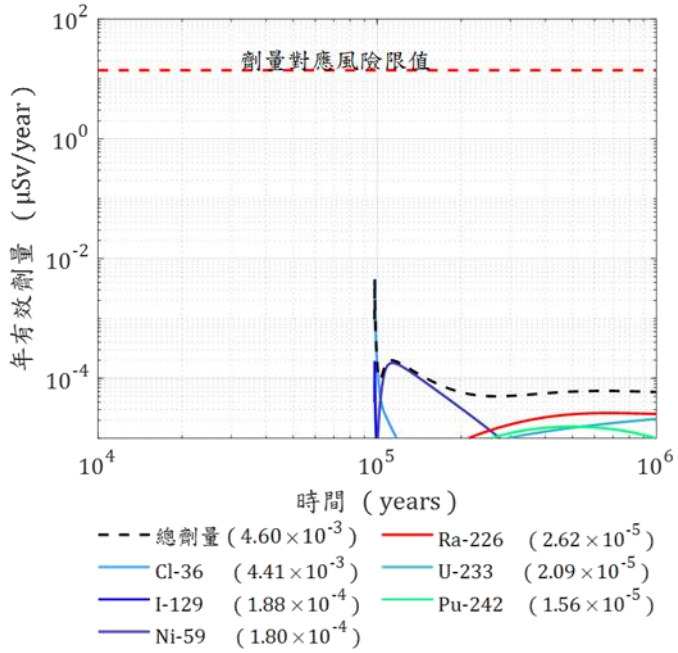


圖 4-183：設計基準演化情節安全評估案例6的遠場年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值年有效劑量(μSv/yr)。

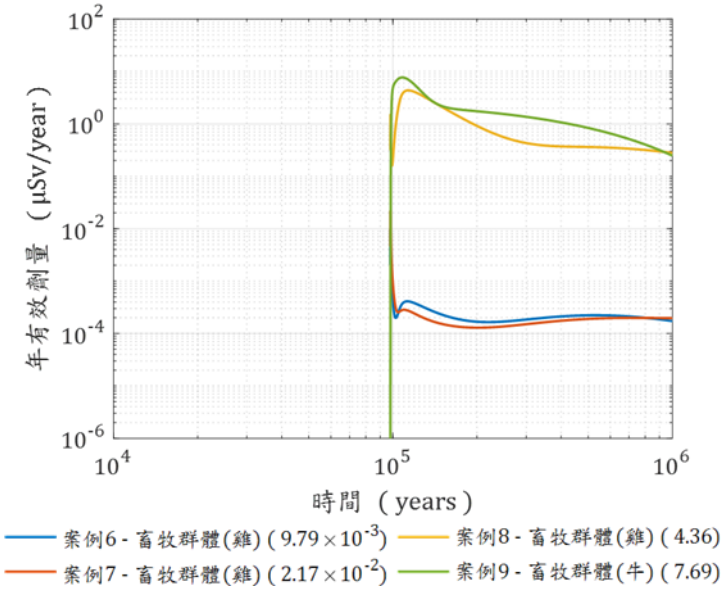


圖 4-184：設計基準演化情節安全評估案例6至案例9的遠場釋出對關鍵群體造成的年有效劑量

註：括號內為該案例關鍵曝露群體峰值總年有效劑量(μSv/yr)。

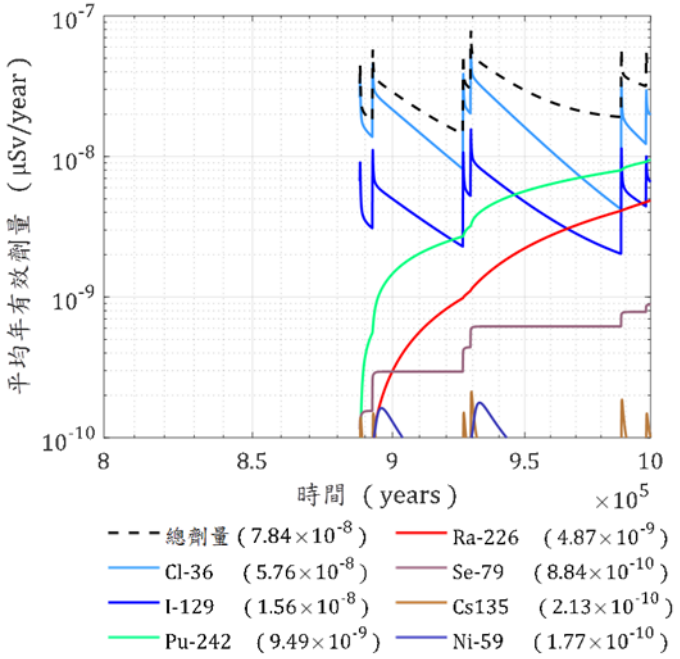


圖 4-185：非設計基準演化情節安全評估案例1的近場平均年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值平均年有效劑量(μSv/yr)。

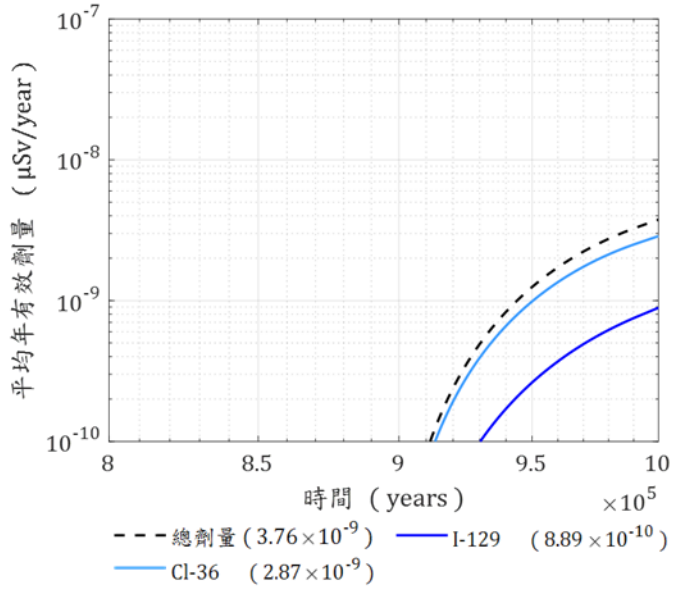


圖 4-186：非設計基準演化情節安全評估案例1的遠場平均年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值平均年有效劑量(μSv/yr)。

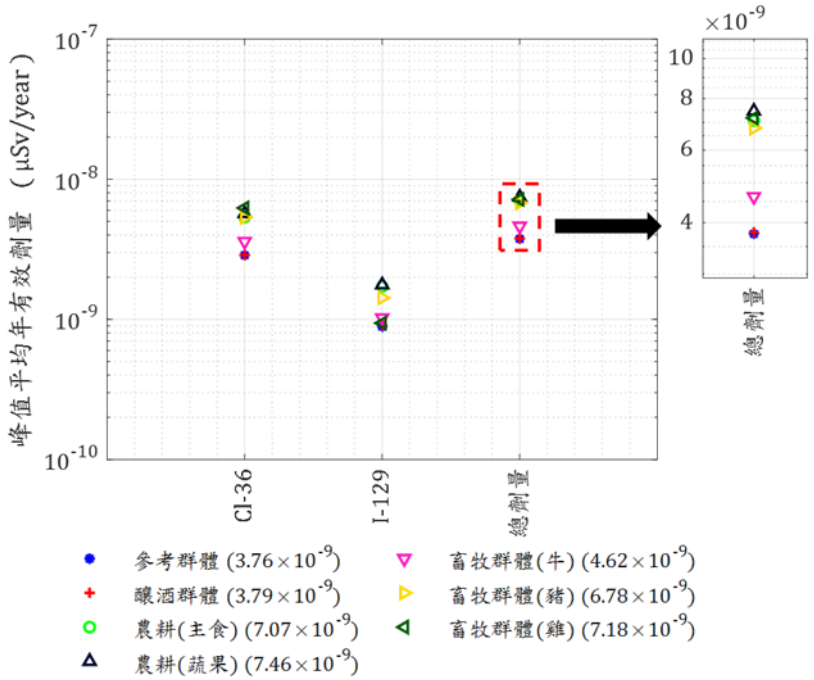


圖 4-187：非設計基準演化情節安全評估案例1中，不同核種對不同潛在曝露群體的峰值遠場平均年有效劑量

註：括號內為該潛在曝露群體峰值總平均年有效劑量(μSv/yr)。

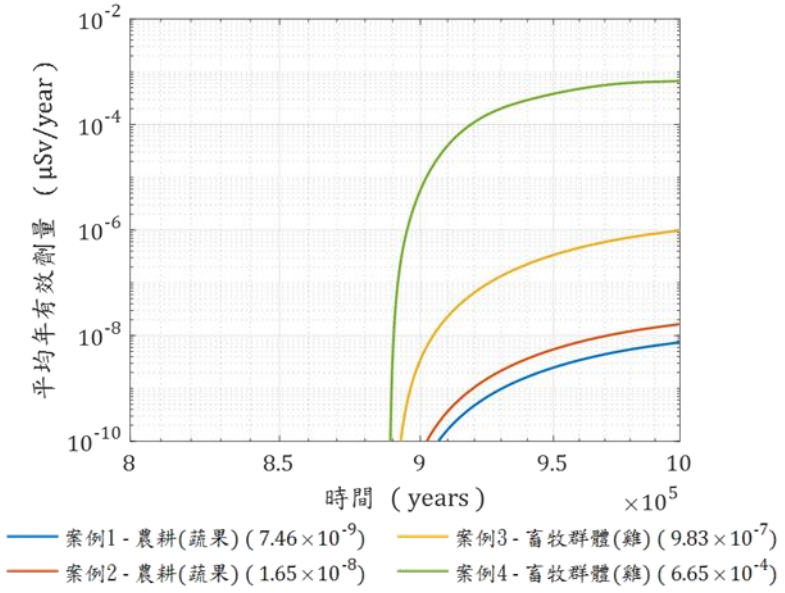


圖 4-188：非設計基準演化情節安全評估案例1至案例4的遠場釋出對關鍵群體造成的平均年有效劑量

註：括號內為該案例關鍵曝露群體峰值總平均年有效劑量(μSv/yr)。

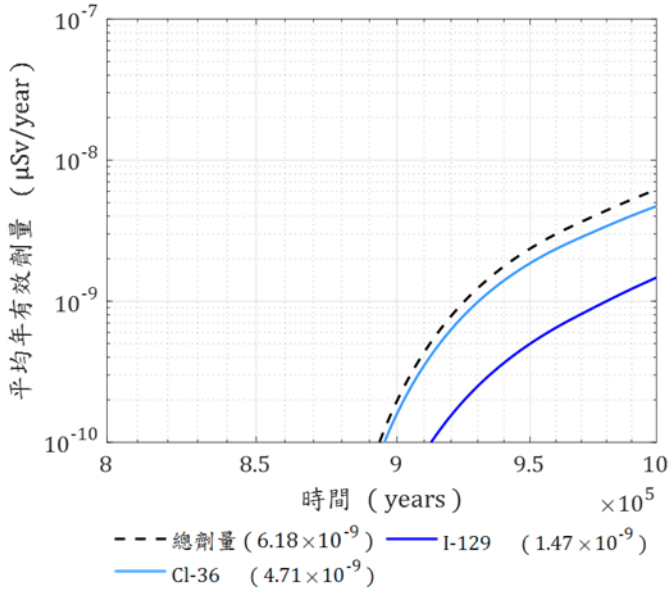


圖 4-189：非設計基準演化情節安全評估案例5的遠場平均年有效劑量

註：圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列，括號內為峰值平均年有效劑量(μSv/yr)。

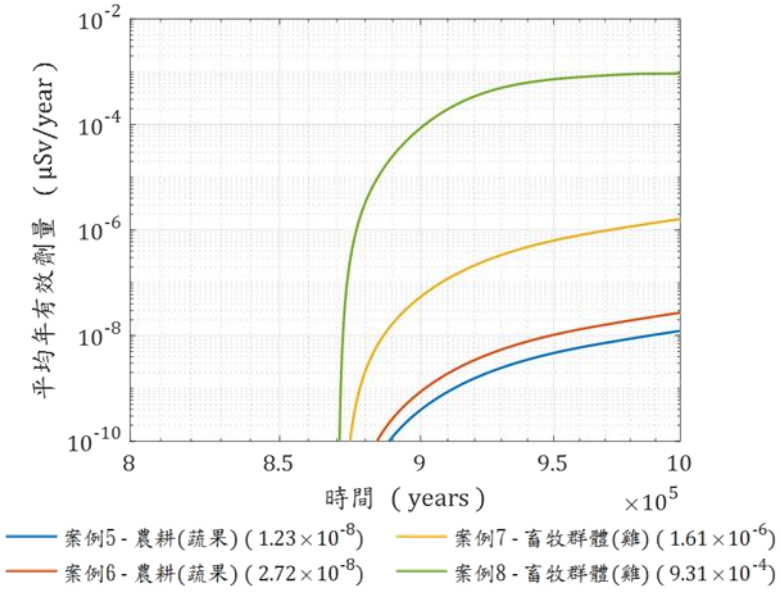


圖 4-190：非設計基準演化情節安全評估案例5至案例8的遠場釋出對關鍵群體造成的平均年有效劑量

註：括號內為該案例關鍵曝露群體峰值總平均年有效劑量(μSv/yr)。

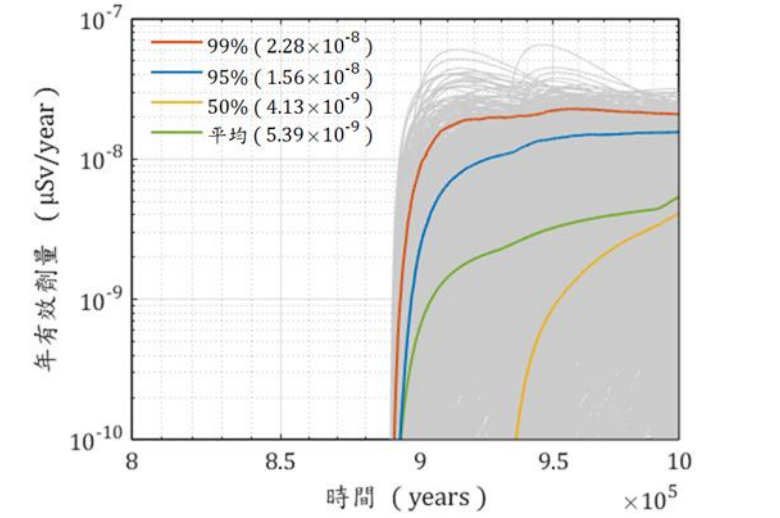


圖 4-191：案例9的遠場平均、中位數(50%)、95%百分位及99%百分位的年有效劑量

註1：括號內為峰值年有效劑量(μSv/yr)。

註2：實現值為6,916次。

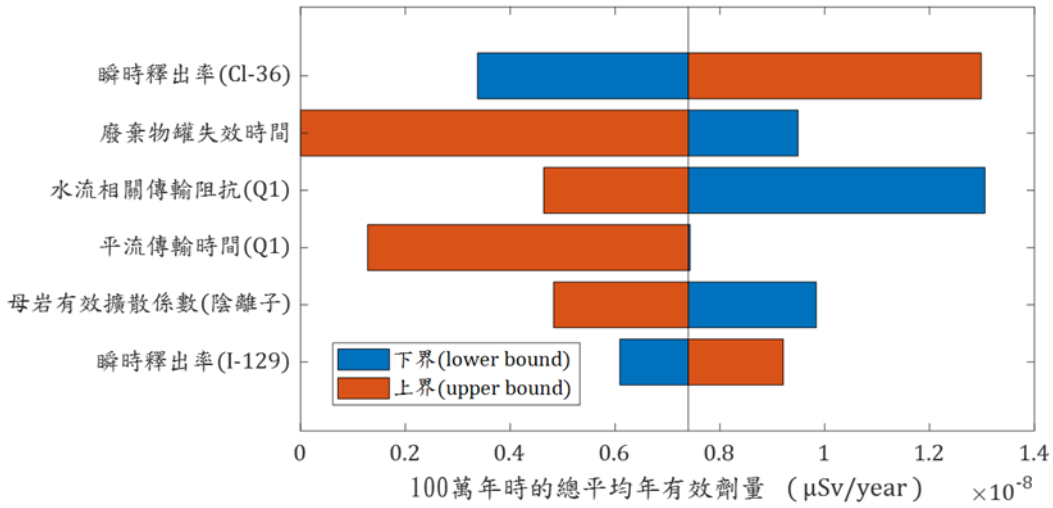


圖 4-192：利用案例9進行參數敏感度分析的龍捲風圖

註：Q1代表Q1釋出路徑，Q2代表Q2釋出路徑。

5. 結論

台電公司為落實用過核子燃料最終處置計畫第二階段「候選場址評選與核定階段」之目標，依據原能會核定之108年度工作計畫，完成「區域特性調查技術精進」與「處置設施工程設計技術及安全評估技術精進」等2項核心技術領域相關之研發工作，重要成果總結說明如後。

5.1. 區域特性調查技術精進

(1) 區域地質探測技術與資料解析

(a) 潛在母岩空中磁力探測

完成蘇澳至花蓮間海域3,202 km2面積之空中磁力探測，並彙整前期陸域空中磁測數據，產出涵蓋陸海域之全磁力強度網格及各式磁力異常圖，並透過三維磁化向量逆推，產出三維磁化向量模型，據以進行研究區域之磁力特徵及地體構造解釋。 依據磁力特徵分析，顯示陸域有4條顯著的弧形高磁條帶，間夾不同寬度的低磁區，有向東南傾斜並具覆瓦狀結構的特徵，這些弧形高磁條帶均明顯向東延伸至海域。依據三維磁化向量模型，顯示和平岩體及開南岡岩體在感應分量磁感率剖面上為正值，而其下之基盤岩體為負值，有利於識別和平岩體及開南岡岩體，依此估計開南岡岩體約向海域延伸2 km至3 km。

(b) 空中磁力測勘與資料解析之無人載具空中調查技術發展

完成空中磁力探測載具設計製作，無人飛行載具機體設計上選擇六旋翼為機身框架，飛控系統則是使用pixhawk最新式的CUAV V5 nano系統，無線通訊協定為較新規格的MAVLink通訊協定，與地面站進行單點對單點的WiFi無線通訊，具備最大距離30 km的2.4 GHz的數據傳輸，與最大距離7 km的5.8 GHz圖像傳輸，可將無人飛行載具的航行資訊與畫面，即時且快速地回傳至地面站。地面站軟體使用DJI GO軟體，是一個開放可下載的無人飛行載具操控程式，可觀看無人飛行載

具的飛行位置與畫面，亦可輸入預先規劃的飛行點位、航線、飛行姿態等資訊，以進行自動導航飛行。採用先進汽油引擎發電機作為動力驅動電力來源，滯空時間可達2 hr。可配合Geometrics公司開發之MagArrow型磁力儀進行空中磁力探測。已完成無人飛行載具空中磁力探測系統組裝與載重飛行測試。

(c) 地球物理三維成像技術

以三維電性構造軟體ModEM為基礎，在AMT三維構造模擬中，納入地表地形起伏的幾何形貌，設定邊界條件，測試對於起伏地形的空間解析能力。經過12次的迭代計算，完成了包含起伏地形的MT三維逆推理論模型測試。逆推計算得到的包含起伏地形三維電性構造，與理論測試人為建置模型十分相近，顯示已建立可反映起伏地形的MT三維成像技術分析流程；然若未來推廣至實地資料應用、模擬與解釋，仍需針對地形起伏崎嶇度、地下構造複雜度與地表測站分布密集度等現地相關條件，漸進增加環境變數，深入探討逆推成像方法的應用限制與優缺點。此外，亦針對既有台灣花崗岩區之AMT資料再處理，建構三維地電阻模型，並與測試區內相關地質成果進行套繪及綜合解釋。

(d) 地質單元三維建模及展示技術

本項目工作依據SNFD2017報告，檢視「SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告-表二：地質概念模式及特性數據」，完成彙整與更新表二資料，並擴大模型考量空間尺度、增加參數統計特性與構造線型分析資訊。完成更新之區域地質特性資訊如入滲量、裂隙統計、構造線型等。並擴大水文地質描述模型空間尺度，將其區分為區域尺度以及場址尺度，並設定模型尺度與邊界條件等。此外，亦對於離島結晶岩測試區，製作地下地質三維模型電腦物件，該物件主要以為GIS通用檔案格式Shapefile(.shp)與.kmz，.shp格式，可供三維展示及

應用，亦可配合計畫需求轉成AutoCAD展示應用之通用檔案格式。

(e) 深層流體影響性評估技術

臺灣地熱流值分布趨勢顯示於大屯火山群、宜蘭、花蓮瑞穗、台東金崙一帶和中央脊樑山脈區域，以及西南部海岸平原等地區為高熱流異常區。根據岩石與流體地球化學以及構造研究成果推測高熱流區與造山運動弧陸碰撞有密切的關係，而造成各區高熱流因素的主要因素可能為：北部因火山活動，宜蘭地區受到地殼張裂、火成岩入侵活動熱流異常區；東南部和中央地區因弧陸碰撞、地殼抬升；而西南部區域變形前緣的增積岩體受構造活動影響。

(2) 水文地質

(a) 坑道開挖擾動帶裂隙分布評估技術研究

以本島花崗片麻岩質坑道作為技術建置場域，進行開挖損傷帶之岩體特性分析，以及坑道面地球物理探測技術建置，作為國內坑道開挖損傷帶探測與評估技術之先期研究。綜合透地雷達、地電阻、震波、以及超音波判釋開挖損傷帶之成果顯示地球物理探測方法可以有效判釋開挖損傷帶深度，以技術建置場域坑道為例，其開挖損傷帶深度介於0.1 m至0.3 m之間，且藉由實際的鑽孔岩心鑑定深度可據以驗證確認。

(b) 裂隙參數分布特性統計研究

針對本島花崗岩露頭與岩心樣本，記錄地質構造特徵、礦物排列方向及礦脈截切關係，亦進行脆韌性構造與斷層擦痕量測，以解析古應力場方向及時間序列演化，評估應力場分布狀態並探討裂隙發育成因。結果顯示臺灣東部花崗岩體後期所發育的裂隙構造，大多沿著岩體中葉理弱面產生，亦即代表花崗岩體早期所發育的構造弱面，容易受後期大地應力的影響產生破裂的現象。而經由岩心描述與現地踏勘結果顯示急折帶構造為臺灣東部花崗岩體中皆可觀察到的地質構造

之一，且皆為高傾角之位態，其中以和平岩體及源頭山岩體具有脆性破裂的特徵。裂隙叢集的位態分析結果亦顯示，源頭山岩體、飯包尖山岩體、以及和平岩體的裂隙發育皆與急折帶構造有關。

(c) 裂隙岩體地下水流分析技術精進

採用TOUGH2-MP做為地下水流場的模擬器，並輔以商業版的套裝軟體PetraSim作為TOUGH2-MP的前處理(如網格產製及參數設定)，及後處理(如計算結果的視覺化展示)的輔助工具，用以大幅降低網格製作的負擔，加速相關研究的進行。結果顯示，PetraSim 可充分設定及運用TOUGH2-MP的計算功能並視覺化展示其計算結果，很適合TOUGH2-MP的使用者，但在向量及任意切面計算結果的視覺化展示方面，PetraSim的功能仍有待加強

(3) 長期監測

(a) 全球衛星定位聯繫監測與時序分析

根據地表變形已發表文獻與GPS連續觀測資料蒐集成果顯示，(i)若相對於金門測站的成果而言，臺灣本島東部花崗岩區域位於一個水平方向速度轉折區域，研究區北側沿岸往東南方向移動趨勢，而研究區南側則是往西北方向移動趨勢；(ii)若以精密單點定位方式之成果則顯示，研究區各測站在全球參考框架下皆為往東南東至東南方向移動趨勢，往南至花東縱谷北端為往東北方向，且水平向速度值大於相對定位成果。

(c) 微震監測及資料解析

微震資料平面分析結果顯示，研究區震源分布包含東、西側兩叢集。東側地震叢集分布於南澳至和平沿海地區，震央分布有明顯的北北東-南南西之線形特徵，亦為海岸山脈與中央脊梁山脈之縫合帶向北延伸之地帶，而震源三維空間分布則呈現向西北傾沒之特徵，與隱沒板塊邊界及覆瓦狀構造模

式特性有關。而西側地震叢集震源深度相對較淺，約集中分布於深度2至8 km間，推測與高磁力基盤和圍岩接觸應力集中導致破裂行為有關。兩叢集間地震發生頻率明顯偏低，呈現地震相對安靜帶特徵，則可能台灣東部本島花崗岩體存在有關。

(4) 岩石力學描述模型

(a) 岩石力學調查技術演練與發展

完成國際岩石力學試驗協會(ISRM)規範蒐集，針對場址調查需執行之孔內探測技術研擬其在使用設備、試驗程序、儀器校正、吊放速度及鑽孔條件之規定，建立現地孔內試驗之標準程序與輸出資料的文件規範。相關的孔內探測技術包含孔內攝影、自然加馬井測、井徑井測、地下水溫度井測等。此外，亦完成臺灣本島裂隙岩體近期調查數據資料蒐集，藉以探討試驗技術限制，調查的鑽孔深度為100 m，測試的地層岩性以片麻岩為主，使用的探測設備為英國Robertson Geologging生產，包括音射式孔內攝影儀、光學式孔內攝影儀、電測儀、四軸井徑探測儀、溫度探測儀等。已利用實作經驗提出調查技術的限制、影響因子及可能誤差之探討。

(b) 岩石力學場址特徵化技術與模式發展

完成彙整研析國內外岩石力學描述模型發展趨勢，探討岩石力學描述模型之建置流程與調查技術需求，以及不同階段岩石力學描述模型所需之參數特性。彙整臺灣山區不同岩層與不同深度之鑽孔岩心室內試驗歷史資料及地表露頭分析資料，進行現地數據與參數分析，依不同數據屬性分類(如依岩性、地質單元、地層層序或年代等)建立經驗公式。此外，也彙整參考案例之應力量測成果，探討處置場址之應力分布情形與長期穩定性。

5.2. 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進

(1) 用過核子燃料特性研究與分析技術

(a) 核種存量與衰變熱分析技術

使用美國橡樹嶺國家實驗室所發展的SCALE6程式，輸入核一、二廠燃料型號之幾何參數，進行用過核子燃料在不同條件下的衰變熱與核種存量分析。主要結論為：(i)依據「用過核子燃料最終處置計畫書2018年修訂版」所預估的用過核子燃料總數量，廢棄物罐的最低需求為2,571罐。(ii)配合裝載期程的初步規劃，現階段廢棄物罐熱負載的設計值是1,200 W，提供給處置孔熱間距分析使用，唯實際配置用過核子燃料時，熱負載的上限是1,150 W。

(b) 核臨界安全分析技術

使用MCNP計算機程式建立臨界安全分析模式並計算有效中子增殖因子，輸入參數為核一、二廠所使用之燃料型式設計參數與廢棄物罐設計參數。本年度成果完成設計基準燃料篩選，並以參數敏感度分析決定廢棄物罐之保守參數組合，分析所得之保守參數組合設定如下：選擇ATRIUM10代表BWR用過核子燃料；鑄鐵內襯的鐵含量90%；鑄鐵內襯密度7.1 g/cm^3；燃料通道鐵含量97.57％；燃料通道鐵密度7.85 g/cm^3；燃料組件徑向朝內位移；最小燃料通道間距；最小燃料通道尺寸；標稱燃料通道厚度；標稱鑄鐵內襯直徑；標稱銅殼厚度；標稱燃料通道管長度；標稱銅殼長度；廢棄物罐溫度20°C。

(2) 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進

(a) 廢棄物罐設計

完成廢棄物罐設計圖面與參數設定。廢棄物罐的結構包括鑄鐵內襯、方管、外部銅殼及封蓋，依據幾何形狀及材料強度可知廢棄物罐抵抗外力作用主要由鑄鐵內襯及方管，外部銅殼強度較鑄鐵內襯與方管低，而其具有良好延展性，在剪力

位移或彎矩作用下將對於屬於細長狀之廢棄物罐產生彎曲變形，由於銅具有良好延展之特性，可在較大之變形下仍可包覆廢棄物罐，並具有抵抗腐蝕之特性。銅的材料性質，彈性模數取為120 GPa，其範圍為115 GPa至128 GPa，柏松比為0.308。

(b) 緩衝材料設計

緩衝材料塊體元件底部設計為575 mm厚之底部實心塊體，並依廢棄物罐底之基腳設計凹槽以利廢棄物罐安裝定位；依廢棄物罐及處置孔尺寸設計內徑1,070 mm、外徑1,650 mm環形塊體，使環形緩衝材料塊體內緣與廢棄物罐間距10 mm，外緣與處置孔壁間距50 mm以利安裝，考量廢棄物罐高度，設計環形塊體厚度為830 mm塊體1塊，800 mm塊體5塊，依續將厚度830 mm塊體1塊、厚度800 mm塊體5塊由下至上堆疊，安裝於廢棄物罐周圍；廢棄物罐上方亦設計厚度500 mm倒置的凸型實心塊體，以嵌入廢棄物罐頂蓋之凹槽，上方再堆疊500 mm厚之實心塊體填滿處置孔，緩衝材料塊體安裝完成後外圍與處置孔壁間距50 mm之工作縫以膨潤土填充料填充。

(c) 廢棄物罐抗圍壓性能評估

利用有限元素數值分析軟體Abaqus進行廢棄物罐抗圍壓性能評估。分析結果可知，廢棄物罐力學支撐強度來源主要來自鑄鐵內襯結構，銅外殼主要用以具有延展性及抗腐蝕功能，其對強度貢獻相較來得低，當利用瑞典SKB依據處置孔因岩層條件或施工狀況產生剝落或崩塌，或者產生裂隙導致地下水滲入緩衝材料，造成其於特定區域產生不均勻圍壓作用等實際可能發生之不利情況，轉換為對於廢棄物罐造成不同情況之圍壓作用案例，進行廢棄物罐不均勻圍壓分析，再探討鑄鐵之安全係數，判別廢棄物罐是否達到破壞。此利用鑄鐵材料性質判別廢棄物罐安全性流程，可檢核廢棄物罐相

關設計參數是否符合安全功能。在緩衝材料飽和前之案例分析，此時安全係數仍可維持3.5，故廢棄物罐應可保持其安全性能。

(d) 廢棄物罐抗剪力位移之性能分析技術

利用數值分析軟體Abaqus建置廢棄物罐與緩衝材料模型，並且進行模擬處置孔因裂隙產生之剪力位移作用。分析結果顯示：(i)短期剪力分析：分別在廢棄物罐1/4、1/8位置進行90°、67.5°、50°、45°、22.5°之5 cm剪力位移分析，在剪力位移位置在1/8處時，以45°之剪力位移分析所得之鑄鐵應力值最大，在廢棄物罐鑄鐵內襯上端與封蓋間具有較小斷面以容納封蓋之設計，此處仍會受角度較小之剪力位移作用下產生較大之應力。在銅殼分析結果應變值皆較低，在低角度之剪力位移作用下，將會造成銅殼頂部突出之幾何形狀造成較高之應變，最大值為14.58%，而銅殼之容許應變值為40%，故皆能保持在安全範圍內。廢棄物罐在剪力位移作用下之破壞模式仍以鑄鐵內襯達破壞為主，而緩衝材料為土壤性質，主要功能為緩衝剪力位移直接對於廢棄物罐作用而導致之破壞，緩衝材料由分析結果研判仍能維持安全功能。(ii)長期剪力分析：在10萬年剪力位移作用下，銅殼產生潛變作用，將略使廢棄物罐鑄鐵內襯應力值降低。

(e) 未飽和膨潤土特性分析

以FLAC3D作為主要之模擬軟體；以Barcelona Basic Model(BBM)作為未飽和土壤之組成模型。分析結果顯示：(i)未飽和緩衝材料之瞬時變形量：當含水量逐漸提高後，FLAC3D計算出的沉陷量也越來越大，此結果反映出了土壤在含水量提高的情況下，其剪力強度會逐漸下降之特性。(ii)未飽和緩衝材料之回脹壓力分析：廢棄物罐底部之緩衝材料區域，將產生最大之回脹壓力，而根據初始含水量提高，最後計算出的回脹壓力也些微提高。

(f) 緩衝材料與回填材料性質特性分析

以FLAC3D作為主要之模擬軟體，以回脹壓力實驗做為比對對象，以確保數值模型之合理性。綜合緩衝材料尺寸與密度設計規格及性能分析結果，並對應回脹壓力試驗結果，確認緩衝材料規格符合可滿足安全功能回脹壓力要求，即限制回脹壓力避免造成廢棄物罐及周圍處置母岩額外壓力、抑制微生物活性、膠體過濾等功能；以緩衝材料尺寸與密度設計規格及性能分析結果，對應水力傳導係數試驗結果，確認緩衝材料規格符合避免平流傳輸之安全功能要求。

(3) 地下設施設計

(a) 處置設施熱間距設計

使用核一廠用過燃料衰變熱資料，配合最新更新之廢棄物罐高度及現地鑽孔，推算出之地表溫度和地溫梯度等條件，利用MATLAB程式進行熱間距之解析解計算。根據核一廠用過燃料資料及適當配置，可獲得1,200 W之初始功率。利用此初始功率，計算出在2.3 W/(m·K)的岩層熱傳導率之條件下，熱間距至少需為9 m，方可符合設計準則。

(b) 地下設施配置設計

完成地震引致裂隙剪力位移分析，計算百萬年多次地震之裂隙剪力位移預期值。綜合考量所需處置孔總數、處置孔及處置隧道所需熱間距、EFPC準則、岩石應力，地下水區域流場、地質構造模型等，完成處置設施配置。處置區塊位置遠離斷層構造，距離約1.5 km以上，規劃2個處置區塊，每個處置區塊有52條處置隧道，第1個處置區塊處置隧道長度250 m(每個處置隧道可置放25個處置孔)，第2個處置區塊處置隧道長度300 m(每個處置隧道可置放30個處置孔)，合計總處置孔數2,860個，符合處置設施範圍面積，處置孔餘裕約11%。

(4) 水文地質演化趨勢分析

(a) 地下水流場演化分析

使用瑞典SKB開發之DarcyTools進行分析計算。本年度精進及完成項目為：(i)主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之結構導入，精進處置設施周圍流場之分析技術；(ii)基於離島結晶岩測試區之地質特徵及離散裂隙網路資訊，依據封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之模擬區域建構計算網格，並執行1次實現值之離散裂隙網路生成後，自行轉換成等效水力特性參數；(iii)建立考量鹽度耦合之地下水流場模擬分析技術，並依據對應外部條件設定合理之鹽度及水流邊界條件，執行穩態地下水流場模擬；(iv)整合上述研究成果，完成封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之穩態地下水流場分析。

(5) 工程障壁參考演化分析

(a) 緩衝材料與回填材料參考演化

緩衝材料在不飽和條件下中的水傳輸取決於溫度、蒙脫石含量、飽和度和緩衝材料之含水量。驅動緩衝材料水飽和的主要來源為處置孔中相對濕度的梯度，促使緩衝材料從圍岩中吸收水。而當緩衝材料吸水後，將導致體積膨脹，進而產生膨脹壓力，並使其內部孔隙率改變；當孔隙率改變時，其水力傳導係數及熱傳導度亦會隨之發生變化，由上述現象得知為一熱-水-力耦合作用。

(b) 廢棄物罐參考演化

當緩衝材料重量損失未達到1,200 kg之時間點，以擴散條件進行廢棄物罐腐蝕評估，具有較低的腐蝕速率；當緩衝材料重量損失達到1,200 kg之時間點，即以平流條件進行腐蝕評估，有較高的腐蝕速率。

(6) 核種傳輸分析技術

(a) 核種釋出途徑分析

使用瑞典SKB開發之DarcyTools進行分析計算。本年度精進項目為基於導入主隧道及處置隧道底部開挖損傷帶之穩態

地下水流場模擬結果，建立質點經由處置隧道底部開挖損傷帶與裂隙截切之傳輸路徑追蹤模擬技術，並計算潛在傳輸路徑之功能測度值。因此，本工作依據地下水流場演化分析之穩態地下水流場模擬成果，分別完成：(i)質點經由處置孔與裂隙截切處；(ii)質點經由處置隧道底部開挖損傷帶與裂隙截切之傳輸路徑追蹤模擬，最終完成釋出途徑分析及功能測度質運算。

(b) 近場核種傳輸分析技術

在近場核種傳輸解析解方面，多數核種的釋出率趨勢及峰值劑量可與數值解相符。

(c) 遠場核種傳輸分析技術

採用GoldSim執行遠場核種傳輸不確定性技術研究，亦以MARFA進行驗證案例測試及遠近場參數銜接之測試。由驗證測試結果顯示，由於母岩基質擴散深度與母岩遲滯因子之調整，母岩有限基質擴散案例之核種釋出率相對於母岩無限基質擴散案例皆增加。且經比對MARFA SP實作母岩有限與無限擴散驗證案例評估結果，其結果皆符合解析解結果，故初步確認MARFA評估環境設置正確，同時，解析解驗證案例執行也正確執行完成

(d) 生物圈核種傳輸分析技術

以GoldSim程式建立生物圈環境介質核種傳輸模式與劑量計算模式，並互相整合串接以計算BDCF。案例分析結果顯示，釋出點的位置，對結果影響非常大。根據釋出途徑分析結果，0 m海平面時之釋出點位於海中，故部分案例當中，核種只會透過海洋碎波與空氣傳輸影響到陸地，故陸地生態系統潛在曝露群體之BDCF，比-120 m海平面陸地釋出之案例低約3個至5個數量級。

(7) 情節發展與案例分析技術

(a) 工程障壁安全功能指標

對於我國可能的3種潛在處置母岩而言，實現深層地質處置安全性的最大差異是天然障壁，也就是隔離這項安全功能；至於圍阻，主要由工程障壁提供，工程障壁的主要組件，包括廢棄物罐、緩衝與回填材料，都可以使用在這3種處置母岩，因此，差異性較小。對於潛在處置母岩，參照SNFD2017報告述及的安全功能，對比臺灣可能的地質環境，研究成果已整理提出適用性分析列表。

(b) 情節分類與發展

已完成腐蝕議題設計基準演化情節與地震議題非設計基準演化情節之設定與論述。研究成果已界定可能的影響機制與核種傳輸過程/途徑。情節與案例建立後，透過地震相關的非設計基準演化情節之量化分析，可進行地震相關的演化路徑下之劑量與風險評估。

(c) 封閉後安全評估劑量與風險分析技術

利用GoldSim建立安全評估模型，進行封閉後安全評估劑量與風險分析。根據設計基準演化情節圍阻失效評估的結果，在現階段的評估中，廢棄物罐的抗腐蝕圍阻功能於100萬年時將不會因為腐蝕而失效，若等效初始通量、等效流率及遠場流率提升50倍時，則在僅考慮FPC時，第1罐失效的廢棄物罐將造成關鍵群體最高約12.0 μSv/yr的劑量，於考慮各項保守條件下，關鍵群體劑量不超過法規限值。

6. 參考文獻

工研院 (2002)，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地質鑽探及調查報告(1/3)，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-154。

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)-K區地質鑽探報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-191。

工研院 (2007)，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(94~96年度計畫)－鑽探報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-235。

工研院 (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)－K區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290。

林鎮國、林蔚、謝佩珊、董倫道、錢正明、田能全、黃淞洋、劉台生、吳柏林、張育德、尹承遠 (2015)，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(104-107年度計畫)－SNFD2017參考案例及數據彙整說明報告表二：地質概念模式及特性數據，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-TR2015-0001。

中央氣象局(2015)，中華民國104年氣候資料年報第一部分-地面資料，中央氣象局。

中央氣象局(2016)，中華民國105年氣候資料年報第一部分-地面資料，中央氣象局。

中央氣象局(2017)，中華民國106年氣候資料年報第一部分-地面資料，中央氣象局。

內政部(2019)，全臺灣及部分離島20公尺網格DTM資料，內政部地政司內證資料開放平台，2019/09/20擷取自

https://data.moi.gov.tw/MoiOD/Data/DataDetail.aspx?oid=311BDE94-7054-437C-962F-62EA805969B3

台電公司(2017)，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－我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告—SNFD2017報告，TPC-SNFD2017。

台電公司(2019)，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－我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告－SNFD2017報告，TPC-SNFD2017-V1。

江協堂(2010)，臺灣東北部宜蘭平原及龜山島之地熱研究，國立臺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)，臺灣東北部宜蘭平原淺部地熱水研究，礦冶52/2，第112-121頁。

吳致緯(2017)，結晶岩地下水水資源開發之力學評估：以臺灣和平與金門為例，國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論文，共118頁。

宋聖榮(2011)，大台北地區特殊地質災害調查與監測第二期火山地質與火山活動調查與監測(4/4)四年總結報告，經濟部地質調查所，共316頁。

宋聖榮、地熱探勘團隊(2016)，臺灣東北部宜蘭地熱區的熱源，自然科學通訊，第28卷，第52-59頁。

宋聖榮、楊燦堯、吳逸民、劉聰桂、盧乙嘉、王珮玲、劉佳玫、陳洲生(2015)，岩漿活動-宜蘭地熱能源的熱源，自然科學簡訊第27卷第2期，第73-80頁。

宋聖榮、劉聰桂、吳逸民、陳洲生、羅偉、葉恩肇、張竝瑜、龔源成(2012)，宜蘭清水地熱能源研究：探勘技術平台的建立與深層地熱(3/3)，國科會研究成果報告(精簡版)，NSC101-3113-M002-001，共84頁。

李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2007)，用過核子燃料最終處置潛在處置母岩特性調查與評估階段潛在母岩特性調查(94~96年度計

畫)－地球物理孔內調查94~96年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-236。

李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2009)，用過核子燃料最終處置潛在處置母岩特性調查與評估階段潛在母岩特性調查(97~99年度計畫)－BH06裂隙特性量測與分析-地球物理孔內調查與分析執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-264。

李清瑞、韓吟龍、江道義(2013)，臺灣深層地溫及增強型地熱資源發電潛能初步評估，西太平洋地質科學，第13卷，第135-152頁。

李曉芬(2004)，大屯火山區火山氣體成份及其冷凝水之氫氧同位素組成，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，共110頁。

林正洪(2017)，臺灣北部火山地區地震與地球化學監測(2/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共108頁。

林幸助，李麗華(2011)，金門國家公園沿海濕地碳通量調查計畫，金門國家公園管理處委託國立中興大學辦理報告。

林朝彥(2015)，花蓮和平溪下游變質花崗岩之脆韌性與脆性構造研究與其地質意義，國立臺灣師範大學，地球科學研究所，碩士論文，共108頁。

林蔚、李寄嵎、楊小青、陳正宏(2011)，臺灣地質圖說明書-金門，五萬分之一地質圖幅，第77號，經濟部中央地質調查所。

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-潛在母岩特性調查計畫(93年計畫)-潛在母岩特性調查，SNFD-ERL-90-219/ SNFD-ITRI-TR2005-0219。

林鎮國、林蔚、謝佩珊、董倫道、錢正明、田能全、黃淞洋、劉台生、吳柏林、張育德、尹承遠(2015)，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－潛在母岩特性調查—SNFD2017參考案例及數據彙整說明報告：表二：地質概念模式及特性數據，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-TR2015-0001。

邱立文、黃群修、吳俊奇(2015)，第四次全國森林資源調查，行政院農委會林務局。

邱俊銘(2010)，宜蘭平原土壤氣體逸散調查及其大地構造的隱示。國立臺灣大學地質科學研究所，共96頁。

金門縣政府主計處(2017)，中華民國一〇六年八月份金門縣統計月報，金門縣政府。

金門縣農業試驗所歷年金門氣象資料(2019)，2019/10/04擷取自 https://ari.kinmen.gov.tw/cp.aspx?n=6213C044BC88D0CF

若杉圭一郎、山口正秋、小尾繁、長尾郁弥、加藤智子、鈴木祐二、江橋健、梅木博之、新堀雄一(2017)，隆起・侵食による地質・地表環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発，日本原子力学会和文論文誌，第16期，第1號，第15-33頁。

徐年盛、郭振泰、朱文生、王曉中、江崇榮、張德鑫、吳呈懋、傅大章、高尉明(1991)，放射性廢料設施及其附近地區地下水流及水質傳輸模擬之研究(一)，台大土木工程研究所水利組，水利79013。

徐春田、陳育鍾、江協堂、黃世興(2004)，臺灣西南外海之地熱研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共4頁。

高苑科技大學綠工程技術研發中心(2011)，國家重要濕地碳匯功能調查計畫總結報告書，內政部營建署城鄉發展分署。

高莉昕(2014)，南沖繩海槽海底熱液噴泉之海水溶解氣體氦同位素分析，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共79頁。

張傳聖、郭泰融、林蔚、張育德、李奕亨(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)－跨孔試驗與量測(含K區BH04鑽探報告)，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-220。

郭泰融、張傳聖、董倫道、李奕亨、陳文山、黃炎聰(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(91年計畫)－K區地球物理井測(BH1及BH2孔)報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-195。

陳文山、俞何興、俞震甫、鍾孫霖、林正洪、林啟文、游能悌、吳逸民、王國龍(2016)，臺灣地質概論，中華民國地質學會出版，共204頁。

陳文山、吳逸民、葉柏逸、賴奕修、柯明淳、柯孝勳、林義凱(2018)，臺灣東部碰撞帶孕震構造，經濟部中央地質調查所特刊，第三十三號，第123-155頁。

陳文山、黃淞洋、劉致育、李奕亨、謝佩珊、林蔚、林鎮國(2015)，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(101~103年度計畫)－HCBH01裂隙特性研究，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-308/SNFD-ITRI-TR2015-0308。

陳炳權(2017)，造山運動期間地殼動力演化：以華南沿海金門島為例，國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論文，共103頁。

陳國華(2017)，106年度精進現代化TWD97國家坐標系統變位模式工作總報告書，內政部國土測繪中心委辦計畫，共290頁。

黃立勝(1990)，臺灣西部晚新生代沉積盆地之地下溫度及地溫梯度之研究，經濟部中央地質調查所彙刊，第6號，第117-144頁。

黃旭燦、莊恭周、原振維(1986)，清水地熱區熱水蝕變礦物與熱流系統之研究，石油鑽採工程，第27期，第181-210頁。

黃家勤，劉正千，溫清光(2006)，流域非點源污染對於感潮河段動態水質影響之研究，臺南大學環境生態研究所，行政院國家科學委員會專題研究計畫。

黃燦輝、王泰典、林銘郎(2012)，山岳隧道突發性巨量湧水之地質特性與緊急因應對策研究，交通部公路總局研究報告100IA0009017X。

楊明宗、柳志錫、沈振南、林棋財、楊敏順、呂金玉(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(BH1及BH2)岩石力學報告，SNFD-ERL-90-199 / SNFD-ITRI-TR2003-0199。

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份與來源之探討，國家公園學報，13(1)，第127–156頁。

經濟部中央地質調查所(2012)，臺灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫(第1期101年度)-臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(3/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2013)，臺灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫(第1期102年度)-臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(4/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2014)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(1/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2015)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(2/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2016)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(3/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2017)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(4/4)，財團法人中興工程顧問社。

葉高華(2003)，由流體地球化學探討臺灣泥火山的成因，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共61頁。

董倫道、林蔚(2012)，臺灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測(1/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共233頁。

董倫道、林蔚(2014)，台灣北部火山活動觀測研究--臺灣北部陸海域地區空中磁力探測(1/2) 期末報告，工研院執行/中央地質調查所委辦，共277頁。

董倫道、陳文山、林蔚、林鎮國(2015)，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－潛在母岩特性調查(101~103年度計畫)－磁力與地電探測技術驗證，臺灣電力公司委辦計畫，SNFD-GEL-90-301，工業技術研究院。

廖大牛(2009)，試算台灣森林碳固定機能，台灣林業98年4月號專題。

臺灣電力公司(2013)，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-101年度計畫成果報告，臺灣電力公司，共285頁。

劉台生(2006)，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－潛在母岩特性調查計畫(94~96年計畫)－KMBH-01-02-04試驗場裂隙岩體水文地質參數之地質統計分析執行成果報告，中正大學執行/台電公司委辦，SNFD-CCU-90-245/SNFD-NCCU-TR2006-0245。

劉佳玫(2002)，臺灣南部二氧化矽熱流量及熱構造之研究，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，共94頁。

劉明坤(2014)，離散裂隙網路數值模擬：以花蓮溪畔坑道花崗片麻岩體為例，國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文，共143頁。

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。

潘文涵(2016)，國民營養健康狀況變遷調查(102-105年)，衛生福利部國民健康署。

蔡季達(2009)，菁山、竹子湖與擎天崗三口井的地溫變化，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共76頁。

蔣立為、余錦昌(2009)，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(97-99年度計畫)－區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270。

鄭又珍(2014)，宜蘭平原地下水之地球化學特徵，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共82頁。

蕭宇翔、張清土(2019)，緩衝材料熱-水-力-化耦合特性研究報告，用過核子然料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查評估階段-發展功能/安全評估技術。

聯合礦業研究所(1973)，大屯火山群地熱探勘工作報告之四，礦研所報告，第126號。

謝佩珊(2000)，臺灣地區溫泉與泥火山氣體來源初探，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共77頁。

鐘三雄、林殿順、林哲銓、劉家瑄、陳松春、王詠絢、魏正岳、陳柏淳(2016)，臺灣西南–南部海域天然氣水合物資源潛能調查研究，經濟部中央地質調查所特刊，第30號，第1–42頁。

工研院 (2002)，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地質鑽探及調查報告(1/3)，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-154。

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)-K區地質鑽探報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-191。

工研院 (2007)，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(94~96年度計畫)－鑽探報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-235。

工研院 (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)－K區調查成果(1999-2010)彙編，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-GEL-90-290。

工研院 (2015)，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(104-107年度計畫)－SNFD2017參考案例及數據彙整說明報告表二：地質概念模式及特性數據，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-TR2015-0001。

工研院(2015)，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(104-107年度計畫)－SNFD2017參考案例及數據彙整說明報告表二：地質概念模式及特性數據，工研院執行/臺灣電力公司委辦，SNFD-ITRI-TR2015-0001。

內政部(2019)，全臺灣及部分離島20公尺網格DTM資料，內政部地政司內證資料開放平台，2019/09/20擷取自

https://data.moi.gov.tw/MoiOD/Data/DataDetail.aspx?oid=311BDE94-7054-437C-962F-62EA805969B3

臺灣電力公司(2013)，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-101年度計畫成果報告，臺灣電力公司，共285頁。

台電公司(2017)，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－我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告—SNFD2017報告，TPC-SNFD2017。

台電公司(2019)，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－我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告－SNFD2017報告，TPC-SNFD2017-V1。

江協堂(2010)，臺灣東北部宜蘭平原及龜山島之地熱研究，國立臺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)，臺灣東北部宜蘭平原淺部地熱水研究，礦冶52/2，第112-121頁。

吳致緯(2017)，結晶岩地下水水資源開發之力學評估：以臺灣和平與金門為例，國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論文，共118頁。

宋聖榮(2011)，大台北地區特殊地質災害調查與監測第二期火山地質與火山活動調查與監測(4/4)四年總結報告，經濟部地質調查所，共316頁。

宋聖榮、地熱探勘團隊(2016)，臺灣東北部宜蘭地熱區的熱源，自然科學通訊，第28卷，第52-59頁。

宋聖榮、楊燦堯、吳逸民、劉聰桂、盧乙嘉、王珮玲、劉佳玫、陳洲生(2015)，岩漿活動-宜蘭地熱能源的熱源，自然科學簡訊第27卷第2期，第73-80頁。

宋聖榮、劉聰桂、吳逸民、陳洲生、羅偉、葉恩肇、張竝瑜、龔源成(2012)，宜蘭清水地熱能源研究：探勘技術平台的建立與深層地

熱(3/3)，國科會研究成果報告(精簡版)，NSC101-3113-M002-001，共84頁。

李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2007)，用過核子燃料最終處置潛在處置母岩特性調查與評估階段潛在母岩特性調查(94~96年度計畫)－地球物理孔內調查94~96年執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-236。

李奕亨、陳文山、郭泰融、林蔚(2009)，用過核子燃料最終處置潛在處置母岩特性調查與評估階段潛在母岩特性調查(97~99年度計畫)－BH06裂隙特性量測與分析-地球物理孔內調查與分析執行成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-264。

李清瑞、韓吟龍、江道義(2013)，臺灣深層地溫及增強型地熱資源發電潛能初步評估，西太平洋地質科學，第13卷，第135-152頁。

李曉芬(2004)，大屯火山區火山氣體成份及其冷凝水之氫氧同位素組成，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，共110頁。

林正洪(2017)，臺灣北部火山地區地震與地球化學監測(2/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共108頁。

林朝彥(2015)，花蓮和平溪下游變質花崗岩之脆韌性與脆性構造研究與其地質意義，國立臺灣師範大學，地球科學研究所，碩士論文，共108頁。

林蔚、李寄嵎、楊小青、陳正宏(2011)，臺灣地質圖說明書-金門，五萬分之一地質圖幅，第77號，經濟部中央地質調查所。

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-潛在母岩特性調查計畫(93年計畫)-潛在母岩特性調查，SNFD-ERL-90-219/ SNFD-ITRI-TR2005-0219。

林鎮國、林蔚、謝佩珊、董倫道、錢正明、田能全、黃淞洋、劉台生、吳柏林、張育德、尹承遠(2015)，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－潛在母岩特性調查—SNFD2017參考案例及數據彙整說明報告：表二：地質概念模式及特性數據，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-TR2015-0001。

邱俊銘(2010)，宜蘭平原土壤氣體逸散調查及其大地構造的隱示。國立臺灣大學地質科學研究所，共96頁。

金門縣農業試驗所歷年金門氣象資料(2019)，2019/10/04擷取自 https://ari.kinmen.gov.tw/cp.aspx?n=6213C044BC88D0CF

徐年盛、郭振泰、朱文生、王曉中、江崇榮、張德鑫、吳呈懋、傅大章、高尉明(1991)，放射性廢料設施及其附近地區地下水流及水質傳輸模擬之研究(一)，台大土木工程研究所水利組，水利79013。

徐春田、陳育鍾、江協堂、黃世興(2004)，臺灣西南外海之地熱研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，共4頁。

高莉昕(2014)，南沖繩海槽海底熱液噴泉之海水溶解氣體氦同位素分析，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共79頁。

張傳聖、郭泰融、林蔚、張育德、李奕亨(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)－跨孔試驗與量測(含K區BH04鑽探報告)，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-220。

郭泰融、張傳聖、董倫道、李奕亨、陳文山、黃炎聰(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(91年計畫)－K區地球物理井測(BH1及BH2孔)報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ERL-90-195。

陳文山、吳逸民、葉柏逸、賴奕修、柯明淳、柯孝勳、林義凱(2018)，臺灣東部碰撞帶孕震構造，經濟部中央地質調查所特刊，第三十三號，第123-155頁。

陳文山、黃淞洋、劉致育、李奕亨、謝佩珊、林蔚、林鎮國(2015)，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(101~103年度計畫)－HCBH01裂隙特性研究，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-90-308/SNFD-ITRI-TR2015-0308。

陳炳權(2017)，造山運動期間地殼動力演化：以華南沿海金門島為例，國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論文，共103頁。

陳國華(2017)，106年度精進現代化TWD97國家坐標系統變位模式工作總報告書，內政部國土測繪中心委辦計畫，共290頁。

黃立勝(1990)，臺灣西部晚新生代沉積盆地之地下溫度及地溫梯度之研究，經濟部中央地質調查所彙刊，第6號，第117-144頁。

黃旭燦、莊恭周、原振維(1986)，清水地熱區熱水蝕變礦物與熱流系統之研究，石油鑽採工程，第27期，第181-210頁。

黃燦輝、王泰典、林銘郎(2012)，山岳隧道突發性巨量湧水之地質特性與緊急因應對策研究，交通部公路總局研究報告100IA0009017X。

楊明宗、柳志錫、沈振南、林棋財、楊敏順、呂金玉(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(BH1及BH2)岩石力學報告，SNFD-ERL-90-199 / SNFD-ITRI-TR2003-0199。

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份與來源之探討，國家公園學報，13(1)，第127–156頁。

經濟部中央地質調查所(2012)，臺灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫(第1期101年度)-臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(3/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2013)，臺灣中段山區地下水資源調查研究整體計畫(第1期102年度)-臺灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(4/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2014)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(1/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2015)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(2/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2016)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(3/4)，財團法人中興工程顧問社。

經濟部中央地質調查所(2017)，臺灣南段山區地下水位觀測與水力特性調查(4/4)，財團法人中興工程顧問社。

葉高華(2003)，由流體地球化學探討臺灣泥火山的成因，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共61頁。

董倫道、林蔚(2012)，臺灣北部火成岩體及地質構造空中地球物理探測(1/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告，共233頁。

董倫道、陳文山、林蔚、林鎮國(2015)，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－潛在母岩特性調查(101~103年度計畫)－磁力與地電探測技術驗證，臺灣電力公司委辦計畫，SNFD-GEL-90-301，工業技術研究院。

劉台生(2006)，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－潛在母岩特性調查計畫(94~96年計畫)－KMBH-01-02-04試驗場裂隙岩體水文地質參數之地質統計分析執行成果報告，中正大學執行/台電公司委辦，SNFD-CCU-90-245/SNFD-NCCU-TR2006-0245。

劉佳玫(2002)，臺灣南部二氧化矽熱流量及熱構造之研究，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文，共94頁。

劉明坤(2014)，離散裂隙網路數值模擬：以花蓮溪畔坑道花崗片麻岩體為例，國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文，共143頁。

蔡季達(2009)，菁山、竹子湖與擎天崗三口井的地溫變化，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共76頁。

蔣立為、余錦昌(2009)，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(97-99年度計畫)－區域性地下水量估算技術資料蒐集成果報告，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-EEL-90-270。

鄭又珍(2014)，宜蘭平原地下水之地球化學特徵，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共82頁。

聯合礦業研究所(1973)，大屯火山群地熱探勘工作報告之四，礦研所報告，第126號。

謝佩珊(2000)，臺灣地區溫泉與泥火山氣體來源初探，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共77頁。

鐘三雄、林殿順、林哲銓、劉家瑄、陳松春、王詠絢、魏正岳、陳柏淳(2016)，臺灣西南–南部海域天然氣水合物資源潛能調查研究，經濟部中央地質調查所特刊，第30號，第1–42頁。

若杉圭一郎、山口正秋、小尾繁、長尾郁弥、加藤智子、鈴木祐二、江橋健、梅木博之、新堀雄一(2017)，隆起・侵食による地質・地表環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発，日本原子力学会和文論文誌，第16期，第1號，第15-33頁。

蕭宇翔、張清土(2019)，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--發展功能/安全評估技術(104-107年度計畫)--緩衝材料熱-水-力-化耦合特性研究報告，台灣電力公司委辦計畫，SNFD-06-IPR-005，核能研究所。

AACE International (2008), Risk Analysis and Contingency Determination Using Range Estimating, AACE International, AACE International recommended practise No. 41R-08.

Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A. (1990), A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, Vol. 40, Issue 3, September 1990, pp. 405-430.

Amadei, B., Stephanson, O. (1997), Rock stress and its measurement, Chapman & Hall, London, UK.

Anders Löfgren (Editor), EcoAnalytica (2010), The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp, SKB TR-10-01.

Bäckblom, G. (2008), Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-08-08.

Barton, N. (2002), Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39(2), pp. 185-216.

Barton, N. (2006), Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy, Taylor & Francis.

Barton, N. (2013), Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 249-261.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, Vol. 6(4), pp. 189-236.

Barton, N.R., and Bandis, S.C. (1990), Review of predictive capabilifies of the JCR-JCS model in engineering practice., In Rock joints, Proc. Int.symp. on rock joints, Loen, Norway,pp. 603–610.

Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, M., Trick, T., and Mayor, J.-C. (2002), Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. Engineering Geology, Vol. 66, pp. 19–38.

Bruno, V., Fairhead, J.D., Green, C.H., Leed, G., and MacKenzie, C. (2004), New insights into magnetic derivatives for structural mapping, The Leading Edge, 2, 116–119.

Chang, H.I. and Shyu, C.T. (2011), Compact high-resolution temperature loggers for measuring the thermal gradients of marine sediments, Marine Geophysical Research, Vol. 32, pp. 465-479.

Chen, S.C., Hsu, S.K., Wang, Y.S., Chung, S.H., Chen, P.C., Tsai, C.H., Liu, C.S., Lin, H.S., and Lee, Y.W. (2014), Distribution and characters of the mud diapirs and mud volcanoes off southwest Taiwan, Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 92, pp. 201–214.

Chen, X.G., Zhang, H.Y., Li, X., Chen, C.T.A., Yang, T.F., and Ye, Y. (2016), The chemical and isotopic compositions of gas discharge from shallow-water hydrothermal vents at Kueishantaom

offshore northeast Taiwan, Geochemical Journal, Vol. 50, pp. 341–355.

Chi, W.C., Wu, S.K., Lee, C.R., Chiang, H.T., Shyu, C.T., and Lin, W. (2011), A case study of crustal geothermal gradients in Tungho, Taitung, Taiwan, The Taiwan Mining Industry, Vol. 63, pp.1-7.

Clark, J.B. (1949), A hydraulic process for increasing the productivity of wells, Journal of Petroleum Technology, 1(01), pp. 1-8.

Cormenzana, J.L. (2013), Probabilistic Sensitivity Analysis for the "Initial Defect in the Canister" Reference Model, Posiva, Working Report 2013-25.

Cornet, F.H. (1993), The HTPF and the integrated stress determination methods, In: Comprehensive rock engineering, vol. 3, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, pp. 413-32 (chapter 15).

Crank, J. (1975), The Mathematics Of Diffusion, 2nd Edition, Oxford University Press.

Cussler, E.L. (2009), Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems, 3rd Edition, Cambridge University Press.

Denisse, L.A., Tejero, A, Chavez, R.E., Lopez, P.A., and Bravo, R. (2009), 3D modeling of magnetic data from an archaeological site in north-western Tlaxcala state, Mexico. Journal of Archaeological Science, 36. 1661–1671.

Dutra, A.C. and Marangoni, Y.R. (2009), Gravity and magnetic 3D inversion of Morro do Engenho complex, Central Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 28, 193–203.

Ellis, R.G. , de Wet, B., and MacLeod, I.N. (2012), Inversion of magnetic data for remanent and induced sources. ASEG Extended Abstracts 2012, 1–4. Luyendyk, A.P.J. (1997), Processing of airborne magnetic data, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 17(2), 31–38.

Fanchi, J.T. (2006) Principles of Applied Reservoir Simulation, 3rd eds., Elsevier.

for a Spent Nuclear Fuel Repository in Saturated Fractured Rock, Nuclear Technology, Volume 138, pp 179-205.

Funato, A., and Chen, Q. (2005), Initial stress evaluation by boring core deformation method, Proceedings of the 34th symposium on Rock Mechanics, JSCE, pp. 261-266.

Funato, A., Ito, T., and Mikami, H. (2014), Laboratory verification of the diametrical core deformation analysis (DCDA) developed for in-situ stress measurements. Journal of MMU, Vol. 130, pp. 515-521.

Funato, A., Ito, T., and Shono, T. (2012), Laboratory verification of the diametrical core deformation analysis (DCDA) developed for in-situ stress measurement, 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, pp. 12-588.

GoldSim Technology Group (2014), GoldSim User's Guide, Version 11.1.

Guo, T.R., Tong, L.T., and Huang, Y.T. (2018), Metamorphic geothermal reservoir characterisation-A case study in the Jinlun geothermal area, Taitung, Taiwan, Geothermics, Vol. 74, pp. 35-44.

Harrington, J.F., and Horseman, S.T. (2003), Gas migration in KBS-3 buffer bentonite, Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions, SKB, TR-03-02.

Hedin, A. (2002), Integrated Analytic Radionuclide Transport Model

Heikkinen, E., Kantia, P., Lehtimäki, T., Silvast, T., and Wiljanen, B. (2010), EDZ assessments in various geological environments using GPR method, Posiva oy, Working report 2010-04, Posiva oy working report (2010-04), 71 pp.

Hicks, T.W. (2005), Review of SKB's Code Documentation and Testing, SKI Report 2005:05.

Hoeck, E., Wood, D., Shah, S. (1992), A modified Hoek-Bown criterion for jointed rock masses., Proc. rock characterization, symp. Int.

Soc. Rock Mech.: Eurock 92 (ed. J A Hudson), pp. 209–214. London: Brit. Geol. Soc.

Hoek, E., and Brown, E.T. (1997), Practical Estimates of Rock Mass Strength, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 34., No.8., pp. 1165–1186.

Horseman, S.T., Harrington, J.F., and Sellin, P. (1999), Gas migration in clay barriers, Engineering Geology, Vol. 54, pp.139-149.

Huang, H. H., Wu, Y. M., Song, X., Chang, C. H., Lee, S. J., Chang, T. M., & Hsieh, H. H. (2014). Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. Earth and Planetary Science Letters, 392, 177-191.

ICRP (1990), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60.

ICRP (2013), Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3).

Ito, T., Funato, A., Lin, W., Doan, M.L., Boutt, D.F., Kano, Y., Ito, H., Saffer, D., McNeill, L.C., Byme, T., and Moe, K.T. (2013), Determination of stress state in deep subsea formation by combination of hydraulic fracturing in situ test and core analysis: A case study in the IODP Expedition 319, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 118(3), pp. 1203-1215.

Jenson, S.K. and Domingue, J.O. (1988), Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.54, pp.1593-1600.

Joyce, S., Simpson, T., Hartley, L., Applegate, D., Hoek, J., Jackson, P., Swan, D., Marsic, N., and Follin, S. (2010), Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-09-20.

Kana, D.D., Brady, B.H.G., Vanzant, B.W. and Nair, P.K. (1991), Critical Assessment of Seismic and Geomechanics Literature Related to a High-Level Nuclear Waste underground Repository, NUREG/CR-5440, Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission.

Karnland, O., Olsson, S., and Nilsson, U. (2006), Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-06-30.

Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G.D., Tandon, K., (2014). ModEM: a modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. Comput. Geosci., 66, 40–53.

King, F. and Litke, C.D. (1992), DEVELOPMENT OF A CONTAINER FAILURE FUNCTION FOR COPPER, Atomic Energy of Canada Limited Whiteshell Nuclear Research Establishment Pinava, Manitoba, Canada, pp. 274-289.

King, F., Ahonen, L., Taxén, C., Vuorinen, U. and Werme, L. (2001), Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Report, SKB, TR-01-23.

Kruschwitz, S. and Yaramanci, U. (2004), Detection and characterization of the disturbed rock zone in claystone with the complex resistivity method, Journal of applied geophysics, 57, pp. 63–79.

Kuo, C.H., Liu, C.M., Song, S.R., and Tsai, Y.W. (2015), Application silica heat flow on geothermal water circulation depth of the Chingshui geothermal field, Taiwan, PROCEEDINGS, Fourtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-204.

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, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 165, pp. 32–45.

Lee, C.R., and Cheng, W.T. (1986), Preliminary heat flow measurements in Taiwan, Fourth Circum-Pacific Energy and Mineral Resources Conference, Singapore.

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, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 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.

Lindgren, M., and Lindström, F. (1999), SR97 Radionuclide transport calculations, SKB, TR-99-23

Liu, C.M., Kuo, C.H., Chen, Y.H., Chen, H.F., Song, S.R., and Tsai, Y.W. (2017), The Characteristics of Petrography and Fluid inclusions of vein in geothermal system of Ilan plain, Taiwan, PROCEEDINGS, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-212.

Liu, C.M., Song, S.R., and Kuo, C.H. (2015), Silica geothermometry applications in the Taiwan orogenic belt, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, Vol. 26, pp. 387–396.

Liu, C.M., Song, S.R., Chen, Y.L., and Tsao, S. (2011), Characteristics and origins of hot springs in the Tatun Volcano Group in Northern Taiwan, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, Vol. 22, pp. 475–489.

Lu, Y.C., Song, S.R., Wang, P.L., Wu, C.C., Mii, H.S., McDonald,J., Shen, C.C., and John, C.M. (2017), Magmatic-like fluid source of the Chingshui geothermal field, NE Taiwan evidenced by carbonate clumped-isotope paleothermometry, Journal of Asia Earth Sciences, Vol. 149, pp. 124-133.

MacLeod, I.N. and Elli, R.G. (2013), Magnetic vector inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization, ASEG Extended Abstracts, 1–6.

MacLeod, I.N., Jones, K., and Dai, T.F., (1993), 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes: Exploration Geophysics, 24, 679–988.

Masurat, P., Eriksson, S., and Pedersen, K. (2010), Microbial sulphide production in compacted Wyoming bentonite MX-80 under in situ conditions relevant to a repository for high-level radioactive waste, Applied Clay Science, 47, pp. 58–64.

NDA (2016), Geological Disposal Generic Post-closure Safety Assessment, NDA, NDA Report no. DSSC/321/01.

Neretnieks, I., Liu, L., and Moreno, L. (2010), Mass transfer between waste canister and water seeping in rock fractures Revisiting the Q-equivalent model, SKB, TR-10-42.

Nicollin, F., Gilbert, D., Bossart, P., Nussbaum., Ch., and Guervilly, C. (2008), Seismic tomography of excavation damaged zone of Gallery 04 in Mont Terri Rock Laboratory, Geophysical Journal International, Vol. 172, pp. 226–239.

O'Callaghan, J.F. and ,Mark, D.M.(1984), The extraction of drainage networks from digital elevation data, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 28, pp. 323-344.

Ohba, T., Sawa, T., Taira, N., Yang, T.F., Lee, H.F., Lan, T.F., and Kazahaya, K. (2010), Magmatic fluids of Tatun volcanic group, Taiwan, Applied Geochemistry, Vol. 25, No. 4, pp. 513–523.

Pensado, O., and Mohanty, S. (2012), Independent radionuclide

POSIVA Oy (2014), Data Basis for the Biosphere Assessment BSA-2012, POSIVA 2012-28.

Poteri, A., Nordman, H., Pulkkanen, V.M., and Smith, P. (2014), Radionuclide Transport in the Repository Near-Field and Far-Field, POSIVA 2014-02, Posiva.

Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G. (1999), TOUGH2 user‟s guide, version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, Report LBNL-43134, 198 pp.

Rodolfo Avila, Per-Anders Ekström, Per-Gustav Åstrand Facilia AB (2010), Landscape dose conversion factors used in the safety assessment SR‑Site, SKB TR-10-06.

Sagong, M., Park, C.S., Lee, B., and Chun, B.S. (2012), Cross-hole seismic technique for assessing in situ rock mass conditions around a tunnel, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 53, pp. 86–93. 9-3

Saiang, D. (2008), Behaviour of blast-induced damaged zone around d underground excavations in hard rock mass, Doctoral thesis, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, ISSN 1402-1544/ISRN LTU-DT—08/60—SE/NR 2008:60.

Sandén, T., Börgesson, L., Dueck, A., Goudarzi, R., and Lönnqvist, M. (2008), Deep repository-Engineered barrier system, Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory, Clay Technology AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-08-135.

Sato, T., Kikuchi, T., and Sugihara, K. (2000), In-situ experiments on an excavation disturbed zone induced by mechanical excavation in Neogene sedimentary rock at Tono mine, central Japan. Engineering Geology, 56, issues 1-2, pp. 97–108.

Schön, J.H. (2015), Basic well logging and formation evaluation, 1st Edition, Bookboon, London.

Schuster, K. and Alheid, H.-J. (2002), Engineered barrier (EB) experiment and geophysical characterisation of the excavation disturbed zone (ED-C) experiment: seismic investigation of the EDZ in the EB niche, Mont Terri Technical Report (TR 2002-03), 77 pp.

Shyu, C.T., and Liu, C.S. (2001), Heat flow of the southwestern end of the Okinawa Trough, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, Supplementary Issue, pp. 305-317.

SKB (2010a), Design, production and initial state of buffer, Technical Report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-15.

SKB (2010b), Full perimeter intersection criteria, definitions and implementations in SR-Site, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-21.

SKB (2010c), Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, SKB, TR-10-50.

SKB (2010d), Data report for the safety assessment SR-Site, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-10-52.

SKB (2010e), Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-64.

SKB (2010f), Heikki Raiko, Rolf Sandström, Design analysis report for the canister, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-28.

SKB (2010g), Design, production and initial state of the canister, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-14.

SKB(2001), Site investigations- Investigation methods and general execution programme, SKB Report TR-01-29.

Stephansson, O., and Zang, A. (2012), ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 5: establishing a model for the in situ stress at a given site, Rock Mechanics and Rock Engineering, 45, pp.955-969.

Svensson, U. (2010), DarcyTools, Version 3.4, Verification, validation and demonstration, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-10-71.

Svensson, U. and Ferry, M. (2010), DarcyTools, Version 3.4, User's guide, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-10-72.

Svensson, U., Ferry, M., and Kuylenstierna, H.O. (2010), DarcyTools, Version 3.4 - Concepts, methods andequations, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-07-38.

Thunderhead (2017), Petrasim User Manual, Thunderhead Engineering.

transport modeling – Reproducing results for main scenarios, Swedish Radiation Safety Authrority, Technical Note 2012:58.

US NRC (1999), Spent Fuel Generation in an Independent Spent Fuel Storage Installation, Regulatory Guide 3.54, Revision 1.

US NRC (2010), Technical Basis for the Proposed Expansion of the Regulatory Guide 3.54,"Decay Heat Generation in an Independent Spent Fuel Storage Installation,CR-6999, NUREG/CR-6999.

Vidstrand, P., Follin, S., and Zugec, N. (2010), Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Forsmark, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-09-21

Vigneresse, J.L. (1995), Crustal regime of deformation and ascent of granitic magma: Tectonophysics, Vol. 249(3), pp. 187-202.

Vigneresse, J.L., Tikoff, B., and Améglio, L. (1999), Modification of the regional stress field by magma intrusion and formation of tabular granitic plutons: Tectonophysics, Vol. 302(3), pp. 203-224.

Wang, K.L., Chung, S.L., O'Reilly S.Y., Sun, S.S., Shinjo, R., and Chen, C.H. (2004), Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution of the northern Taiwan region, Journal of Petrology, Vol. 45, No. 5, pp. 975–1011.

Wu, S.K., Chi, W.C., Hsu, S.M., Ke, C.C., and Wang, Y. (2013), Shallow crustal thermal structures of central Taiwan foothills region,

Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, Vol. 24, pp. 695–707, doi:10.3319/TAO.2013.03.13.01(T).

Yang, T.F., Chen, C-H., Tien, R.L., Song, S.R., and Liu, T.K. (2003), Remnant magmatic activity in the Coastal Range of East Taiwan after arc-continent collision: fission-track date and 3He/4He ratio evidence, Radiation Measurements, Vol. 36, pp. 343–349.

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), 3He/4He 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, No. 3-4, pp. 281–286.

Yeh, E.C., (2004) Structual Evolution of Slate Belts: example from Taiwan and Eastern Pennsylvania, The Pennsylvania State University (Phd. Thesis).

Zhang, K., Wu, Y.S., and Pruess, K. (2008), User's Guide for TOUGH2-MP - A Massively Parallel Version of the TOUGH2 Code, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, LBNL-315E.

Zhang, L. (2017), Engineering properties of rocks, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, 394 p.

Zhu, W.C., Wei, J., Zhao, J., and Niu, L.L. (2014), 2D numerical simulation on excavation damaged zone induced by dynamic stress redistribution, Tunnelling and Underground Space Technology, 43, pp. 315–326.