用過核子燃料最終處置計畫

候選場址評選與核定階段

107年度成果報告

(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國108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

107年度成果報告

摘要

本報告為「用過核子燃料最終處置計畫」於107年度工作成果摘 要報告。內容涵蓋「區域特性調查技術精進」、「處置設施合適性與 設計方案評估精進」、「安全評估精進」、「整合性技術」等技術發 展成果。

區域特性調查技術精進方面,主要成果包括:

- (1)透過地球物理三維逆推處理技術,建立離島結晶岩測試區(K區) 三維地層電阻模型及三維磁感率模型,顯示該區域高磁感率及高 電阻率地層特徵係為以花崗岩體為主,異常帶所判釋的線型構造 與地表花崗岩體露頭上所見剪切帶的方向一致,反應該區域主要 的地質構造。
- (2)針對離島結晶岩測試區分別完成岩心取樣及地表露頭的岩石採 樣,分析並建構完整新鮮的花崗岩體到破裂蝕變帶之岩礦組成與 結構變化,提供後續地化反應模擬作為必要輸入參數;透過不同 定年分析方式獲得岩體形成、高溫熱事件或變質年代,提供建構 後續地質演化史等相關研究,提升區域地質概念模式之完整。
- (3)長期監測方面,利用驗潮站與衛星測高資料,針對臺灣附近海域 之相對與絕對海水面上升速率進行估算,皆顯示越往南速率越增 加;利用本島結晶岩測試區微震觀測資料,獲致震源機制解與應 力反演分區之結果,以及地震破裂尺度及相對應之應力降。

處置設施合適性與設計方案評估精進方面,主要成果包括:

(1) 輻射源項及核種特性研究,包括:(a)進行用過核子燃料存量與源 項特性評估,完成SNFD2017報告重要核種選擇之適用性確認, 以及初步建立高放處置資訊管理系統之本土用過核子燃料特性 資料庫;(b)進行地下水輻射分解研究,完成我國用過核子燃料 內之α、β、γ射源與地下水輻射分解的反應機制,以及輻射水解 產物影響之研析,並提出廢棄物罐內殘留水限制量。

- (2)處置系統適用性驗證與調整方案研究,進行災害歷史地震震源模型及其敏感度分析,採用混合法地震波模擬(Hybrid Simulation) 完成針對1920年花蓮外海地震之震源參數評估。
- (3)廢棄物罐技術方案研究,包括:(a)進行廢棄物罐金屬材料抗蝕性 能評估與測試,以不同配比之酸鹼度與氯離子濃度進行腐蝕試 驗,完成腐蝕行為特性探討,以及無氧銅鹼氯腐蝕後拉伸力學性 質的影響評估,另亦以參考案例建立廢棄物罐銅質外殼壽命預測 模式,完成銅質外殼壽命預測;(b)發展銅質材料摩擦攪拌銲接 與檢測技術,完成銲道抗蝕性探討與建立銲接機械設備與銲接工 具設計的相關技術經驗;(c)發展廢棄物罐鑄鐵製造與檢測技術, 完成全斷面縮尺型鑄鐵內襯的試製及加工,測試取樣樣品的力學 性質以瞭解鑄件的品質。
- (4) 緩衝材料與回填材料研發技術研究,包括:(a)進行回填材料設計 與施工,完成回填材料塊體製作方式與程序探討,以及檢驗項目 探討,並建立我國小型塊體壓製技術,取得膨潤土塊體乾密度與 壓製應力之關係數據;(b)進行緩衝材料高圍壓力學參數測試, 完成廢棄物罐重量所造成緩衝材料沈陷評估,確認緩衝材料之設 計規格;(c)發展工程障壁高圍壓縮尺測試設備與方法,完成模擬 工程障壁在現地應力下之高圍壓三軸壓力試驗,回饋高放處置系 統之性能評估。
- (5)處置設施設計技術方案研究,進行隧道支撐材料之長期耐久性分析與驗證研究,完成隧道支撐材料低鹼混凝土複合材料耐久性之 探討及分析。

安全評估成果精進方面,主要成果包括:

(1)安全評估流程建立與方法研究,包括:(a)進行安全評估方法精進, 完成高放處置技術先進國家之安全評估方法論研析,並發展我國 之安全評估方法論與步驟;(b)發展安全評估技術資料庫,完成網頁操作介面,建立計畫管理及知識管理系統架構。

- (2)安全評估分析模式建立與執行研究,包括:(a)進行分析模式的選 用與開發,依燃料特性、生物圈、廢棄物罐侵蝕、地震引起剪力、 水文與核種遷移等6個主要模擬項目之需求,完成符合我國現階 段數值模式選用、分析及提出各模式精進方向;(b)發展工程障 壁系統評估技術,完成膨潤土膠體形成、釋出、吸附放射性核種 之案例評估,以及利用GoldSim模擬膨潤土膠體促進放射性核種 釋出驗證。
- (3) 熱力(T)-水力(H)-力學(M)實驗與模擬技術研發,包括:(a)進行 緩衝與回填材料受水力作用影響,完成氣體傳輸實驗設備建置, 進行實驗流程之開發與建立,並完成緩衝材料氣體滲透試驗,取 得所需參數;(b)測試緩衝材料與回填材料受化學作用影響,完 成硫酸鹽還原菌活性試驗,獲取所需參數及影響探討;(c)進行緩 衝材料耦合驗證及數值模擬,與國際相關TH耦合作用數值模擬 進行比對驗證,以及TH效應下之影響探討。

整合性技術方面,主要成果包括:

- (1) 針對地質圈長期穩定性評估,綜整地表觀測成果與深層岩體地下水長期演化特性,由全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)連續觀測成果獲致地表三維速度場變化,本島結晶 岩測試區越靠近海岸地區沉陷趨勢越明顯;經由對本島結晶岩測 試區裂隙地下水長期演化案例研析,顯示導水裂隙的水文地化環 境,受到大理岩圍岩的碳酸鈣化學平衡系統所影響。
- (2) 根據參考案例地質概念模式及相關參數表,完成三維裂隙網路升 尺度模擬及三維地下水流場模擬,顯示地下水流場主要受控於地 表高程,自地表入滲的地下水,會經由地形高區補注至周圍地勢 較低的岩體,海淡水交界面則形成島嶼典型的碗型分布;高導水 性的斷層構造係為鹽水傳輸初期的快速流動路徑,而低滲透率的 輝綠岩脈則主要影響後期甚至穩態的鹽水分布。

- (3)離島結晶岩測試區海平面下降之地下水流數值模式,完成以中國 大陸沿海、臺灣海峽及臺灣本島之數值地形圖為基礎,海平面下 降後,離島結晶岩測試區之(a)河系分布及集水區演化;(b)區域 性補注率評估方法;(c)水文地質概念模式建構;(d)並進行穩態 地下水流場分析之相關評估。
- (4)核種遷移試驗與評估技術,進行室內試驗室模擬核種於緩衝材 料、回填材料與處置母岩遷移行為,完成建立批次吸附實驗、母 岩及膨潤土擴散試驗,獲取絕、鈾與釷核種之各項參數並探討實 驗結果。
- 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

107年度成果報告目錄

1. 概述	
2. 計畫目的	2-1
2.1. 計畫目標	2-1
2.2. 工作規劃	2-2
3. 區域特性調查技術精進	
3.1. 區域與構造地質	
3.1.1. 離島結晶岩三維磁感率及電阻率模型	
3.2. 地球化學	
3.2.1. 離島結晶岩測試區之岩礦組成與年代分析	
3.3. 長期監測	
3.3.1.驗潮站監測地殼變動與絕對海水面變化	
3.3.2. 構造活動性微震監測與分析	
4. 處置設施合適性與設計方案評估精進	
4.1. 輻射源項及核種特性研究	
4.1.1. 用過核子燃料存量與源項特性評估	
4.1.2. 地下水輻射分解	
4.2. 處置系統適用性驗證與調整方案	
4.2.1. 災害地震震源模型及其敏感度分析	
4.3. 廢棄物罐技術方案	
4.3.1. 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能評估與測試	
4.3.2. 銅質材料摩擦攪拌銲接與檢測技術	
4.3.3. 廢棄物罐鑄鐵製造與檢測技術	
4.4. 緩衝材料與回填材料研發技術	
4.4.1. 回填材料設計與施工	
4.4.2. 緩衝材料高圍壓力學參數測試	
4.4.3. 工程障壁高圍壓縮尺測試設備與方法	
4.5. 處置設施設計技術方案	
4.5.1. 隧道支撑材料之長期耐久性分析與驗證研究	
5. 安全評估精進	
5.1. 安全評估流程建立與方法	
5.1.1. 安全評估方法精進	

5.1.2.	安全評估資料庫	5-6
5.2. 安全	全評估分析模式建立與執行	5-13
5.2.1.	分析模式的選用與開發	5-13
5.2.2.	工程障壁系統評估技術	5-20
5.3. 熱ス	カ(T)-水カ(H)-カ學(M)實驗與模擬技術研發	5-40
5.3.1.	緩衝與回填材料受水力作用影響	5-40
5.3.2.	緩衝與回填材料受化學作用影響	5-42
5.3.3.	緩衝材料耦合試驗及數值模擬	5-44
6. 整合性	技術	6-1
6.1. 地位	質圈長期穩定性評估	6-1
6.1.1.	地表監測與岩體變動趨勢分析	6-1
6.1.2.	結晶岩深層地下水化學長期演化特性	6-14
6.2. 地-	下水分析模式驗證與技術精進	6-26
6.2.1.	整合型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬	6-26
6.2.2.	離島結晶岩測試區海平面下降之地下水流數值模式	6-38
6.2.3.	離島結晶岩測試區域地下水流場演化模擬	6-46
6.3. 核利	重遷移試驗與評估技術	6-55
6.3.1.	室內試驗室模擬核種於緩衝材料、回填材料與處置母岩遷和	多
	行為	6-55
7. 結論		7-1
7.1. 區均	或特性調查技術精進	7-1
7.2. 處]	置設施合適性與設計方案評估精進	7-3
7.3. 安全	全評估精進	7-8
7.4. 整合	合性技術	
8. 參考文	獻	

圖目錄

圖	2-1:用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃
圖	3-1:離島結晶岩測試區地表地質圖幅3-13
圖	3-2:離島結晶岩測試區AMT測點分布圖
圖	3-3:離島結晶岩測試區電阻率三維數值網格
圖	3-4:離島結晶岩測試區AMT三維逆推之三維電阻率模型
圖	3-5:離島結晶岩測試區高電阻率地層分布之三維模型之立體圖
圖	3-6:離島結晶岩測試區之地質剖面及水文地質概念模式
圖	3-7:離島結晶岩測試區地層電阻率等深度切面圖
圖	3-8:離島結晶岩測試區磁力三維數值網格
圖	3-9:離島結晶岩測試區高磁感率地層分布之三維模型立體圖
圖	3-10:離島結晶岩測試區地層磁感率等深度切面圖
啚	3-11:離島結晶岩測試區不同深度之電阻率與磁感率線型構造分布圖 3-22
啚	3-12:離島結晶岩測試區CC'剖面之電阻率分布及構造比對圖
啚	3-13:離島結晶岩測試區CC'剖面之磁感率分布及構造比對圖
啚	3-14:W區鑽井岩心與M區露頭岩石QAP岩性分類圖
圖	3-15:W區鑽井岩心與M區露頭岩石TAS岩性分類圖
圖	3-16:W區鑽井岩心與M區露頭岩石 SiO2 vs. K20 圖
圖	3-17:W區鑽井岩心與M區露頭岩石
圖	3-18:W區岩心鋯石鈾鉛定年結果圖
圖	3-19:W區小坵嶼岩脈定年結果與地質剖面示意圖
圖	3-20:臺灣附近海域之衛星測高SLR速率(1993年至2015年)。
圖	3-21:臺灣附近各海域SLR速率分析圖
圖	3-22:本島結晶岩測試區地表地質圖
啚	3-23:本島結晶岩測試區震源機制解與大地應力反演分區示意圖
圖	3-24:本島結晶岩測試區震源機制解東西方向投影剖面圖
啚	3-25:臺灣海峽區域震源機制逆推結果及位置分布
啚	3-26:臺灣海峽區域震源機制解之P、T軸水平投影分布與其他應力
	結果比較圖
啚	3-27:本島結晶岩測試區小型地震破裂尺度分析成果
圖	3-28:全臺與本島結晶岩測試區(ML > 4.5)之地震有效斷層破裂範圍
	分布圖
啚	3-29: 地震矩(M0)、有效斷層破裂範圍(Ae)和應力降(Δσ)關係圖
圖	3-30: 淺層地震之條件機率分布
圖	4-1:用過核子燃料特性表單簡易查詢使用者Web頁面
圖	4-2:廢棄物罐特性簡易查閱使用者Web介面4-12
圖	4-3:用過核子燃料關鍵核種篩選流程4-12
啚	4-4:地下輻射水解影響示意圖4-13
圖	4-5:輻射水解3個階段的主要反應
圖	4-6:實驗室傳統滴定設備
啚	4-7:分光光度計(PRO-779, Prema)

啚	4-8:碘定量分光光度計法之H2O2分析標準曲線	. 4-15
圖	4-9:模型D之強地動產生區配置	4-22
圖	4-10:日治時期全臺7個測候所之位置	4-23
圖	4-11:模型A各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較	. 4-24
圖	4-12:模型B各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較	. 4-25
圖	4-13:模型C各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較	. 4-26
圖	4-14:模型D各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較	. 4-27
圖	4-15:模型A各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較	. 4-28
圖	4-16:模型B各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較	. 4-29
圖	4-17:模型C各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較	. 4-30
圖	4-18:模型D各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較	. 4-31
圖	4-19:模型A各測候所之模擬加速度反應譜與衰減律估算值比較	4-32
圖	4-20:模型B各測候所之模擬加速度反應譜與衰減律估算值比較	4-33
圖	4-21:模型C各测候所之模擬加速度反應譜與衰減律估算值比較	. 4-34
圖	4-22:模型D各測候所之模擬加速度反應譜與衰減律估算值比較	4-35
圖	4-23:1920年花蓮外海地震最佳震源模型幾何	4-36
圖	4-24: 無氧銅在有氧環境不同氯離子濃度腐蝕450天之重量變化	. 4-48
圖	4-25:SEM觀察無氧銅於氯離子濃度0.001 mol/L條件下腐蝕450天之	
	表面型態	4-49
圖	4-26:有氧環境氯離子濃度0.001 mol/L腐蝕450天後之塔伏分析圖	. 4-50
圖	4-27:有氧環境鹼氯腐蝕對無氧銅抗拉強度與伸長率之影響	. 4-50
圖	4-28:有氧環境無氧銅鹼氯腐蝕450天之斷面型態觀察	. 4-51
圖	4-29:高放射性廢棄物深層處置銅質外殼腐蝕評估/模擬模式流程圖	4-52
圖	4-30: 長300 mm×寬50 mm×厚15 mm的試片在進給速率60 mm/min	
	下進行摩擦攪拌銲接後之銲道表面	. 4-52
圖	4-31: 銲接後工具之表面	. 4-53
圖	4-32:厚度15mm試片,進給速度45mm/min條件下之超音波檢測	. 4-53
圖	4-33:全斷面縮尺型鑄鐵內襯之造模照片	. 4-54
圖	4-34:全斷面縮尺型鑄鐵內襯之澆鑄照片	. 4-55
啚	4-35:全斷面縮尺型鑄鐵內襯之拆模及切取附鑄試片	. 4-55
啚	4-36:全斷面縮尺球墨鑄鐵內襯之液滲(PT)檢驗滲透液作業	. 4-56
圖	4-37:全斷面縮尺球墨鑄鐵內襯之UT檢驗照片	4-56
圖	4-38: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	. 4-70
圖	4-39: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	. 4-70
圖	4-40:塊體乾密度與壓製應力之關係	. 4-71
圖	4-41:研究範圍示意圖	. 4-71
圖	4-42:各組試驗之沉陷分佈	. 4-72
圖	4-43:各組試驗之總沉陷量	. 4-72
圖	4-44:緩衝材料沉陷模擬示意圖	4-73
圖	4-45:模擬流程圖	4-74
圖	4-46:廢棄物罐沉陷的對數座標	4-75
圖	4-47:廢棄物罐沉陷的線性座標	. 4-75

圖	4-48:誤差評估	. 4-76
圖	4-49:最佳化後廢棄物罐之沉陷量對數圖	. 4-76
圖	4-50:最佳化後廢棄物罐沉陷量線性圖	. 4-77
圖	4-51:FLAC 3D模型圖	. 4-77
圖	4-52:界面表面	. 4-78
圖	4-53: 飽和密度1,900 kg/m ³ 與2,050 kg/m ³ 10萬年的沉陷歷時曲線	. 4-78
圖	4-54: 飽和密度1,900 kg/m3時廢棄物罐下方之沉陷分布	. 4-79
圖	4-55: 飽和密度2,050 kg/m3時廢棄物罐下方之沉陷分布	. 4-79
圖	4-56:一般土壤用三軸室	. 4-80
圖	4-57:大尺寸三軸室外部主要元件	. 4-80
圖	4-58: 鋁合金加勁橫樑	. 4-81
圖	4-59:加壓機	. 4-81
圖	4-60:油壓至30 MPa	. 4-82
圖	4-61:水壓至30 MPa	. 4-82
圖	4-62:油壓幫浦	. 4-83
啚	4-63: 試驗影片之擷取細節照片	. 4-84
圖	4-64:大尺寸三軸室示意圖及試體軸力測試結果	. 4-85
圖	4-65:母岩裂隙位移引致廢棄物罐變形之概念圖	. 4-85
圖	4-66:廢棄物罐剪切試驗裝置	. 4-86
圖	4-67:廢棄物罐和緩衝材料安裝過程	. 4-86
圖	4-68:在定剪切總位移時,3種不同剪切速率與總推力的關係	. 4-87
圖	4-69:廢棄物罐可能破壞型式	. 4-87
圖	4-70:剪切後之廢棄物罐	. 4-88
啚	4-71:瑞典SKB剪切模擬試驗概念配置圖	. 4-88
圖	4-72:室內剪力試驗之儀器設備	. 4-89
圖	4-73:感測器安裝配置圖	. 4-89
圖	4-74:試驗配置示意圖	. 4-90
圖	4-75:大氣養護條件下不同取代量之砂漿試體乾縮率(W/C=0.6)	. 4-95
圖	4-76: 大氣養護條件下不同取代量之混凝土試體乾縮率	. 4-95
圖	4-77:試體M之齡期及應變關係	. 4-96
圖	4-78:鋼筋腐蝕試驗(混凝土養護齡期180天)	. 4-96
圖	4-79: 養護齡期91天XRD分析	. 4-97
圖	4-80:日本JAEA試體編號HFSC424之SEM影像(×1,000倍)	. 4-98
圖	4-81: 配比M24之SEM影像(×5,000倍)	. 4-98
啚	5-1:腐蝕情節-圍阻安全功能架構	5-8
圖	5-2:腐蝕及剪力情節-核種傳輸與遲滯架構	5-9
圖	5-3:封閉後安全評估方法流程	. 5-10
圖	5-4:計畫管理功能網頁	. 5-11
圖	5-5:知識管理功能網頁	. 5-12
圖	5-6:所有燃料組件量測與預測比較趨勢圖	. 5-35
圖	5-7:核種遷移分析技術與其他軟體及參數間之關係圖	. 5-36
圖	5-8:不同水流速度下之蒙脫石釋出率	. 5-37
圖	5-9:GoldSim驗證近場膠體促進核種釋出結果	. 5-37
圖	5-10:GoldSim模擬遠場膠體促進核種釋出數值解與解析解比較	. 5-38

圖	5-11:利用GoldSim評估遠場不存在膠體及地下水中含0.01 kg/m ³ 及	
	10 kg/m ³ 之膠體時,Pu-242之遠場釋出率	5-38
圖	5-12:瑞典SKB利用FAR33(數值解)評估遠場不存在膠體及地下水中	
	含0.01 kg/m ³ 及10 kg/m ³ 之膠體時,Pu-242之遠場釋出率,	
	並與MARFA(數值解)之評估結果比較	5-39
圖	5-13:不同遠場水流傳輸阻抗下,不同膠體濃度對遠場遲滯效率之影	
	響	5-39
圖	5-14:預先飽和試驗之回脹壓力	5-54
圖	5-15: 氣壓、應力及出流氣體流率隨時間之變化	5-54
圖	5-16:硫酸鹽還原菌活性試驗,實驗室照片	5-55
圖	5-17:緩衝材料擴散試驗,試驗執行照片	5-55
圖	5-18:於周圍安裝PVC注水管	5-56
圖	5-19: 感測器位置示意圖	5-56
圖	5-20:溫度變化歷程	5-57
圖	5-21:相對濕度變化歷程	5-57
圖	5-22: 壓力變化歷程	5-58
圖	5-23:自然含水試體注水曲線	5-58
圖	5-24: 飽和緩衝材料之軸向、徑向應力—應變曲線	5-59
圖	5-25:溫度30℃之飽和緩衝材料軸差應力─應變曲線	5-59
圖	5-26: 圍壓13.5MPa之軸差應力—應變曲線相應孔隙水壓分布	5-60
圖	5-27:不同溫度條件圍壓13.5 MPa之飽和緩衝材料軸差應力—應變曲	
	線	5-60
圖	5-28:p-q空間破壞包絡線	5-61
圖	5-29:以FLAC3D依據COMSOL建立之熱-水耦合試驗幾何模型	5-61
圖	5-30:熱-水耦合數值分析之溫度分布結果	5-62
圖	5-31:熱-水耦合數值分析之含水量分布結果	5-62
圖	5-32:以FLAC3D依日本JNC熱-水耦合室內試驗建構之緩衝材料三維	
	數值模型	5-62
圖	5-33:JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之溫度分布	5-63
圖	5-34:JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之溫度比較	5-63
圖	5-35:JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之溫度比較	5-63
圖	5-36:JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之含水量分布	5-64
圖	5-37:JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之含水量比較	5-64
圖	5-38: JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之含水量比較	5-64
圖	6-1:GPS連續觀測站訊號品質分析圖	6-8
圖	6-2:臺灣本島結晶岩測試區之GPS連續觀測成果(一)	6-9
啚	6-3:臺灣本島結晶岩測試區之GPS連續觀測成果(二)	6-10
圖	6-4:定期觀測樁水平方向時間序列圖	6-11
圖	6-5:本項目工作之GPS連續觀測站與GPS定期觀測樁位置分布圖	6-12
圖	6-6: PCA時序分析成果	6-13
圖	6-7:反應路徑模擬情境示意圖	6-21
圖	6-8: CaseZ1/K1反應路徑模擬結果比對圖	6-22
圖	6-9: CaseZ2/K2反應路徑模擬結果比對圖	6-23
圖	6-10: CaseZ4/K4反應路徑模擬結果比對圖	6-24

圖	6-11:CaseK1、CaseK2、CaseK4在1萬年及10萬年反應期間之反應	
	路徑模擬結果圖	6-25
圖	6-12:離島結晶岩測試區三維數值網格以及其岩性的空間分布	6-33
圖	6-13:離島結晶岩測試區參考案例中DFN模擬結果	6-33
圖	6-14:離島結晶岩測試區ECPM軸向滲透率空間分布	6-34
圖	6-15:平均海水面以下500 m及1,000 m的Xb 隨時間分布情形	6-35
圖	6-16:離島結晶岩測試區地下水流場鹽度分布與深層地下水水質對照	
	圖	6-36
啚	6-17: zone A在平均海水面以下500 m及1000 m的地下水速度向量場	6-37
圖	6-18: zone B在平均海水面以下500 m及1000 m的地下水速度向量場	6-37
圖	6-19:海平面下降後之地形示意圖	6-41
圖	6-20: 海平面下降120 m後之地形分布圖	6-41
啚	6-21:離島結晶岩測試區海平面下降之模擬範圍劃定結果	6-42
圖	6-22:離島結晶岩測試區海平面下降之邊界條件設定	6-42
啚	6-23:使用MODFLOW生成計算網格並進行水文地質單元之水力傳導	
	係數設定	6-43
啚	6-24:使用MODFLOW進行離島結晶岩測試區海平面下降之穩態地下	
	水流場於z=-504 m模擬結果	6-43
啚	6-25:使用DarcyTools生成非結構化之計算網格	6-44
啚	6-26:使用DarcyTools進行水文地質單元之水力傳導係數設定	6-44
啚	6-27:使用DarcyTools進行離島結晶岩測試區海平面下降之穩態地下	
	水流場於z=-504 m模擬結果	6-45
啚	6-28:情境A(基本案例)模型不同剖面的鹽水質量分率分布圖	6-52
啚	6-29:情境A與情境B(深度500m)的鹽水質量分率分布比較圖	6-53
圖	6-30:情境A與情境B(深度500m)的壓力分布比較圖	6-53
圖	6-31:情境A與情境C(深度35m)的鹵水質量分率分布比較圖	6-54
圖	6-32:情境A與情境C(深度70m)的鹵水質量分率分布比較圖	6-54
圖	6-33: 銫、鈾與釷於MX-80膨潤土之分配係數	6-59

表目錄

表	3-1:離島結晶岩測試區岩石磁感率量測結果表	3-11
表	3-2:W區鑽井岩心與M區露頭岩石之礦物含量計數結果	3-35
表	3-3:測高衛星相關資訊	3-47
表	3-4:臺灣附近海域PSMSL資料庫之潮位站資訊	3-48
表	3-5:臺灣附近海域中央氣象局提供之潮位站資訊	3-49
表	3-6:臺灣附近各海域絕對、相對SLR速率與地表垂直變動速率	3-50
表	3-7:臺灣現有潮位與GPS共站觀測相對、絕對SLR變動速率一覽表	3-50
表	3-8:本島結晶岩測試區大地應力分區反演結果列表	3-61
表	3-9:全臺與本島結晶岩測試區中大型地震(ML>4.5)規模與發生次	
	數表	3-61
表	3-10:全臺與本島結晶岩測試區中大型地震個數統計	3-62
表	4-1:國外輻射水解研究案例彙整	4-7
表	4-2: 重要核種之α、β及γ射源分類結果	4-7
表	4-3:存在鐵離子的情況下進行額外的反應及速率常數	4-8
表	4-4:H2O2分析方法整理	4-9
表	4-5:Si衰減律各週期下之係數	4-20
表	4-6:1920年花蓮外海地震最佳震源參數	4-21
表	4-7:無氧銅於有氧環境30℃鹼氯溶液腐蝕450天後XRD分析腐蝕產	
	物之結果	4-43
表	4-8:無氧銅於有氧環境氯離子濃度0.001 mol/L條件下腐蝕450天之	
	塔伏分析結果	4-43
+		
衣	4-9:參考案例之腐蝕作用篩選	4-44
表表	4-9:參考案例之腐蝕作用篩選4-10:案例之邊界條件	4-44 4-45
衣表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 	4-44 4-45 4-46
表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 	4-44 4-45 4-46 4-46
表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE 3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46
表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE 3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE 4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-46
衣表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE 3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE 4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-46 4-47
表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE 3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE 4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-15:CASE 5離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47
衣表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-15:CASE5離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47
衣表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47
衣表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-15:CASE5離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-66
表表表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE 3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE 4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-15:CASE 5離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-66 4-67
表表表表表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-15:CASE5離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-67 4-67 4-67
表表表表表表表表表表表表表表表	 4-9:参考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-12:CASE2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-13:CASE3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料 4-14:CASE4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-67 4-67 4-68
表表表表表表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-67 4-66 4-68 4-68
表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選 4-10:案例之邊界條件 4-11:CASE1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-67 4-67 4-68 4-68 4-68 4-68
表表表表表表表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-67 4-66 4-68 4-68 4-68 4-69
表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表表	 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選	4-44 4-45 4-46 4-46 4-46 4-47 4-47 4-47 4-47 4-67 4-67 4-68 4-68 4-68 4-69 4-69

表	4-28: 混凝土卜作嵐材料比例	4-94
表	4-29:保護層深度和擴散係數對鋼筋混凝土開始腐蝕時間	4-94
表	5-1:主要模擬項選用之模式	5-32
表	5-2:各個熱卡計設施之量測不確定	5-33
表	5-3: 遠場膠體促進核種傳輸與解析解驗證中所使用之參數	5-34
表	5-4:遠場膠體促進核種傳輸與瑞典SKB評估結果比較中所使用之參	
	數	5-34
表	5-5: 遠場膠體促進核種傳輸案例模擬中所使用之假設參數	5-34
表	5-6:硫酸鹽還原菌活性試驗,試驗膨潤土硫酸鹽還原菌分析結果	5-51
表	5-7:緩衝材料擴散試驗結果	5-51
表	5-8:實驗成果之力學參數	5-52
表	5-9:瑞典SKB平行驗證使用材料參數一覽表	5-52
表	5-10:日本JNC熱-水耦合試驗條件一覽表	5-53
表	5-11:日本JNC熱-水耦合試驗初始含水量與加熱條件	5-53
表	6-1:GPS連續觀測站訊號品質分析統計表	6-6
表	6-2:2018年水準控制系統高程變化分析表	6-6
表	6-3:GPS定期觀測樁修正後之水準高程檢測成果表	6-7
表	6-4:反應路徑模擬情境及其假設條件	6-19
表	6-5:本島結晶岩測試區附近之地下水水質	6-20
表	6-6:離島結晶岩測試區參考案例所有岩石之水文地質參數	6-32
表	6-7:序率裂隙模擬參數表	6-32
表	6-8:不同模型邊界條件設定列表	6-51
表	6-9:離島結晶岩測試區地下水主要元素成分(地下深度300 m至500	
	m)	6-58
表	6-10:配置合成地下水所用之試劑成分	6-58
表	6-11:離島結晶岩測試區粉碎花崗岩之批次吸附實驗條件	6-58

1. 概述

我國從事原子能的和平應用已有多年的歷史,原子能科技已廣泛 應用於醫、農、工、學及核能發電等領域,與國人的生活息息相關, 但也無可避免的帶來放射性廢棄物問題。放射性廢棄物的安全管理, 近年來成為社會大眾關心的議題;其中有關放射性廢棄物的最終處 置,更是各界關注的焦點。放射性廢棄物管理,已不僅是一項科技議 題,也是一項政經及社會議題。

我國自67年開始利用核能發電,迄今共有核一、二、三廠的6部 核能機組,其中,核一、二廠4座機組為沸水式反應器(Boiling water reactor, BWR),核三廠2座機組為壓水式反應器(Pressurized water reactor, PWR)。預估此3個核能電廠的6部機組運轉40年,所產生的用 過核子燃料組件(assemblies)預估數量合計約為BWR 17,890束組件, PWR 4,320束組件。

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,因鈾濃縮度降低, 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」。高放射性廢棄物指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理 所產生之萃取殘餘物。高放射性廢棄物具有相當高之放射性,會釋放 大量的衰變熱,所含之放射性核種中,如99Tc、135Cs、129I等分裂產物 及237Np、239Pu、243Am及247Cm等錒系核種,其半化期長達數十萬年, 且部分核種為α發射體,對人體具長期潛在的輻射危害,因此審慎尋 找共同認可的處置方式,確保高放射性廢棄物可以長期摒除在可能影 響人類目前生活環境之外,一直是核能技術發展的重點之一。

用過核子燃料最終處置的基本要求是選擇適當的環境,將用過核 子燃料永久安置,使其與人類生活圈隔離,以確保民眾安全及環境品 質。海床處置、深孔處置、冰層處置、井注處置、太空處置、及深層 地質處置是幾種曾被各國考慮的處置方案。上述這些方案經過國際間 多年的研究後,一般認為「深層地質處置」是較可行的一種處置方式。

所謂「深層地質處置」是利用深部岩層的圍阻與隔離特性,採用「多重障壁」的概念,將用過核子燃料深埋在約 300 m 至 1,000 m 的

1-1

地下岩層中,再配合廢棄物罐、緩衝材料與回填材料等工程設計,藉 由人工與天然障壁所形成的多重障壁系統,可以有效遲滯核種的釋出 與遷移,以換取足夠的時間,使用過核子燃料中的放射性物質在影響 人類生活環境之前,已衰減至可忽略的程度。

由於最終處置設施的設置,從最初發展階段至處置設施運轉階 段,一般長達數十年,研擬具體可行的全程工作規劃,可說是長程計 畫能否順利完成的關鍵所在。因此,我國用過核子燃料長程處置計畫 在 80 年曾研擬出「全程工作規劃書」,將全程工作分為「區域調查」 階段、「初步場址調查」階段、「候選場址評選」階段、「詳細場址 調查」階段、「場址確認」階段及「處置場建造與試驗」階段等 6 個 執行階段。當初主要的參考依據,除了延續「我國用過核子燃料長程 處置計畫」之前產出的各項成果報告之外,最主要是參考美國能源部 所提出的場址特性調查計畫(Site Characterization Plan, SCP),以及 瑞 典 核 子 燃 料 及 廢 棄 物 營 運 公 司 (Nuclear Fuel and Waste Management Co., SKB)的研發經驗,並考慮我國客觀環境發展而成。

台電公司依照「放射性物料管理法」第二十九條及「放射性物料 管理法施行細則」第三十七條中相關條文規定,並參考國際用過核子 燃料最終處置技術發展現況與趨勢、我國地質環境、以及我國用過核 子燃料長程處置計畫地質調查與技術發展之經驗與成果,於93年擬定 「用過核子燃料最終處置計畫書」,並經主管機關於95年7月核定(台 電公司,2006);自94年起,迄144年完成處置設施之建造為止,全程 工作共分為「潛在處置母岩特性調查與評估」階段(94年~106年)、「候 選場址評選與核定」階段(107年~117年)、「場址詳細調查與試驗」 階段(118年~127年)、「處置場設計與安全分析評估」階段(128年 ~133年)及「處置場建造」階段(134年~144年)等5個階段來進行。

「潛在處置母岩特性調查與評估階段」已於106年結束,台電公司分別於98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(SNFD2009報告)」及106年底提報「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SNFD2017報告)」。依99年核備之SNFD2009報告,已初步說明國內具有潛在處置母岩,並具備初步處置技術之可行

1-2

性。而SNFD2017報告係以SNFD2009報告為基礎,強化說明潛在處置 母岩之特性、處置工程技術及長期安全評估技術。確認國內具有合適 之處置母岩、最終處置設施工程設計及長期安全評估能力與技術,並 透過國際專家同儕作業,確認報告內容符合國際水平且已達成第1階 段設定目標,可接續執行第2階段「候選場址評選與核定」之相關技 術發展。目前SNFD2017報告已完成原能會物管局之相關審查意見答 復並於107年底核備。

在過去幾年中,台電公司將潛在母岩特性調查技術之發展重點, 集中於離島結晶岩測試區之處置技術發展,期能透過各項技術的整合 性驗證,取得關鍵技術的能力與成果,以及測試區的地質特性參數、 構造及建構初步地質概念模式,供功能與安全評估技術發展應用,以 完備現地調查至功能評估的整體作業流程。107年度除就針對 SNFD2017報告之審查意見答復說明、修訂處置計畫書2018版、編撰 隔年度工作計畫書等工作內容外,也依據107工作計畫書進行技術發 展,詳細成果與內容分述如下:

2. 計畫目的

2.1. 計畫目標

台電公司為了因應用過核子燃料安全處置的需求,於72年研訂核 子反應器用過核子燃料處理研究計畫書,並於74年報請行政院核定後 據以實施。此長程處置計畫之發展,自75年開始至93年間,共歷經: 處置概念初步研發、初期工作規劃、區域調查技術準備,以及調查實 施與技術發展階段等4個主要階段。台電公司依照「放射性物料管理 法」與「放射性物料管理法施行細則」相關規定,於93年底提出「用 過核子燃料最終處置計畫書」,經奉原能會於95年核定。台電公司必 須依照「用過核子燃料最終處置計畫書」規劃內容確實執行各項工作, 並依每4年須進行檢討修正一次之規定,以及考量國際發展趨勢與國 內實際進展狀況,對規劃工作內容進行修正。104年3月已完成2014年 修訂版的核備(台電公司,2015),其規劃全程工作包含5個任務階段: (1) 潛在處置母岩特性調查與評估階段(94年~106年)

- (2) 候選場址評選與核定階段(107年~117年)
- (3) 場址詳細調查與試驗階段(118年~127年)
- (4) 處置場設計與安全分析評估階段(128年~133年)
- (5) 處置場建造階段(134年~144年)

上述各階段工作將透過地質調查、工程設計與安全評估迭代改進以達成目標,各階段之時程、目標及重要里程,如圖 2-1所示。

107年度已進入用過核子燃料最終處置計畫之第2階段「候選場址 評選與核定階段(107年~117年)」,目前尚未選定候選場址之情形下, 將善用國外發展經驗及聚焦國內研發資源,持續以「區域特性調查」、 「處置設施合適性與設計方案」及「安全評估」等3項核心技術,作 為第2階段工作推動之3大主軸。107年度成果報告仍以精進3項核心 技術,分別於第3章、第4章及第5章說明;另外,基於完成第一階段 之階段性研究成果後,針對3項核心技術進行整合與討論,於第6章提 出關鍵之整合技術性議題,包括:(1)地質圈長期穩定性評估;(2)地 下水流分析模式驗證與技術精進;(3)核種遷移試驗與評估技術。 2.2. 工作規劃

107年度工作計畫書以「區域特性調查技術精進」、「處置設施 合適性與設計方案評估精進」及「安全評估精進」與「整合性技術」 等4個項目,承接上一階段「潛在處置母岩特性調查與評估階段」相 關研究成果,並作為邁入第2階段「候選場址評選與核定階段」的起 始推動目標,工作規劃說明如下:

(1) 區域特性調查技術精進

區域特性調查技術精進可作為後續候選場址評選與核定階段的 調查數據基礎,據以建立地質概念模式相關背景參數。

(a) 區域與構造地質

利用大尺度的地球物理逆推技術,進行離島結晶岩體三維磁 感率與電阻率模型的建立,比對岩體電阻率及磁感率的特 徵,研判地下岩體分布與構造位置。

(b) 地球化學

藉由實驗室尺度的岩礦分析技術,提供離島結晶岩體岩礦組 成與特性分析,建構完整新鮮的花崗岩體到破裂蝕變帶之岩 礦組成與結構變化,並利用定年分析結果配合鑽井岩心之地 化分析,判斷岩體形成年代。

(c) 長期監測

監測驗潮站潮位資料及結合衛星測高成果探討臺灣周圍海 水面變化,分析臺灣附近海域相對海水面變動速率以及絕對 海水面變動速率,作為後續地表抬升/沉陷作用的參考依據; 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。

(2) 處置設計與工程技術精進

深層地質處置技術主要利用天然障壁及工程障壁之多重障壁概 念,使用過核子燃料中放射性核種的遷移達到圍阻及遲滯效果, 使核種到達人類生活環境時,放射性已衰減至安全限值以下。 107年度工作規劃進行探討源項及核種特性,並針對廢棄物罐、 緩衝材料、回填材料等工程障壁組件進行研發,以及處置設施系統適用性進行調整與設計。

由於工程障壁需配合特定場址之地質環境條件進行設計,目前尚 未選定候選場址之情形下,處置設計與工程技術之發展仍參考國 際與我國相類似之潛在處置母岩所發展的工程障壁系統,或引進 相關技術及設備,並加入國際合作取得共同研究成果,期獲得本 土適用的處置技術基礎。

(3) 安全評估精進

安全評估的最終目的,在於整合用過核子燃料特性、地質調查及 工程技術之相關成果,進行整個處置系統的功能整體性量化分析 與模擬,以評估處置系統的適當性與安全性。

107年度工作規劃進行安全評估方法論之建立與精進,並且著重 分析模式執行的選用與開發,以及THMC實驗建置與模擬技術研 發。另外亦同步發展計畫管理與知識管理體系,以奠定未來整體 發展之基礎,作為成果展示與增進安全評估信心之證明。

現階段已建立安全評估的基礎整合能力,安全評估模式包括用過 核子燃料特性、處置設施概念、近場環境、遠場環境及生物圈傳 輸等模組化分項分析系統,經組合後成為一個全系統的安全評估 模式,以進行處置設施評估;各分項系統之功能評估,則配合後 續詳細場址調查工作之實際狀況,持續提昇評估能力。

(4) 整合性技術

107年度針對上述3項核心技術進行整合與討論,提出關鍵之整合 技術性議題,說明如下:

- (a)利用地表監測技術與深層導水裂隙的水文地化環境模擬評估地質圈長期穩定性,進一步瞭解岩體抬升/沉陷特性以及 岩體深層裂隙的長期岩-水反應過程。
- (b) 地下水的流動特性除了影響緩衝材料的侵蝕及廢棄物罐的 腐蝕之外,更是核種在地層中遷移與分布的重要因素;故建

構考量相關演化過程之地下水流分析模式並進行驗證為重 要任務。

(c)為提供安全評估及工程障壁設計時所需之本土參數,亦將透過建置核種遷移實驗室,進行本土化離島結晶岩測試區或東部結晶岩測試區深地層環境之重要核種遷移試驗模擬與驗證分析,提供國內功能安全評估之參考。



圖 2-1:用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃

3. 區域特性調查技術精進

區域特性調查技術精進的相關研究成果,可作為後續候選場址評 選與核定階段的調查數據基礎,據以建立地質概念模式相關背景參 數。以下利用較大尺度的地球物理逆推技術,進行離島結晶岩測試區 三維磁感率與電阻率模型的建立,以及藉由實驗室尺度的岩礦分析技 術,提供離島結晶岩測試區岩礦組成與特性分析。另外,針對長期性 監測資料進行持續性的蒐集與解析,則利用驗潮站潮位資料結合衛星 測高成果探討臺灣周圍海水面變化,作為地表抬升/沉陷作用的參考 依據;並且利用本島結晶岩測試區微震監測網之觀測資料探討區域地 殼活動構造特性,作為掌握地下斷層活動的評估因子。

3.1. 區域與構造地質

3.1.1. 離島結晶岩三維磁感率及電阻率模型

SNFD2017報告中使用既有傳統聲頻大地電磁探測(Audio Magneto-Tellurics, AMT)及磁力探測數據,以一維或二維逆推處理獲 得地下地質的電阻率及磁感率特性,解析裂隙岩體內地質構造與導水 裂隙帶幾何型態與分布特性,並建立離島結晶岩測試區參考案例的地 質概念模式。瞭解深層結晶岩體的岩層分布、幾何型態及構造延伸性, 係為候選場址評選與核定階段建立地質概念模式的關鍵技術,俾以提 供後續地下水流場模擬三維地質與構造分布及參數化分析使用。

107年度成果係根據既有空中磁測技術發展經驗,精進地表地球 物理三維逆推技術,重新彙整離島結晶岩測試區既有聲頻大地電磁探 測與磁力探測數據,透過三維逆推處理,分別建立三維地層電阻模型 及三維磁感率模型,說明如下:

(1) 離島結晶岩測試區地質背景

根據中央地質調查所五萬分之一地質圖幅資料(如圖 3-1所示), 離島結晶岩測試區岩層年代由老至年輕依序分別為金龜山片岩、 太武山花崗岩(簡稱太武山岩體)、斗門花崗岩(簡稱斗門岩體)、 成功片麻岩、田埔花崗岩、金門層、烈嶼玄武岩,以及全區均有 分布的紅土礫石層與現代沈積物。地表出露範圍最大的兩個花崗 岩體,一為太武山花崗片麻岩體(簡稱太武山岩體),一為斗門花 崗岩體(簡稱斗門岩體)。

(a) 太武山花崗片麻岩體

太武山花崗岩之岩性屬於花崗片麻岩體,主要出露於離島結 晶岩測試區的東部,其次亦出露於西南隅的塔山至翟山一 帶,以及烈嶼的局部地區。太武山花崗片麻岩體的周遭,都 有明顯的大型剪切構造帶,並富集同構造侵入的角閃岩脈, 就岩體邊界與圍岩間接觸關係來看,屬於橫移構造構成的犬 牙交錯(zig-zag)的接觸關係。此岩體分布以太武山及北太武 山出露面積最大,其次為美人山、寨子山及獅山,其餘地區 多因長期剝蝕成平原,受第三紀沈積層及第四紀沖積層所覆 蓋。太武山花崗片麻岩體受到後期角閃岩脈、未變形花崗岩 脈、基性岩脈群等侵入體所截切,其中角閃岩脈侵入活動會 伴生局部的混合岩化現象(如長英質岩脈富集、片麻狀片理 呈現層狀構造特徵等)。

(b) 斗門花崗岩體

斗門花崗岩體為灰白色、中至粗粒的花崗岩,主要礦物為正 長石、斜長石及石英,並含角閃石、黑雲母等鐵鎂質礦物。 岩體面積約5km²,少有花崗岩脈或基性岩脈群截切,岩體礦 物分布也較為均質。斗門岩體侵入太武山岩體中,岩體邊界 處未見明顯交界,接觸帶多為漸變的接觸關係。就岩體分布 的形貌來看,為一類似橢圓形侵入體,長軸方向約為北東向。

(2) 電阻率三維逆推

大地電磁測勘之野外量測訊號為一電場與磁場隨時間變動之序 列,必須經過資料處理後始能獲得地下地層的資訊,說明如下: (a) 三維逆推處理

(i) 大地電磁資料三維逆推處理係根據視電阻率(apparent resistivity)與相位測深曲線(phase sounding curve)資料進行處理,以獲取地下不同深度的真實地層電阻率分布。採用WSINV3DMT程式(ver. 1.0.0; Siripunvaraporn

et al., 2006, p1), 係使用阻抗張量作為觀測資料, 包含 40個AMT測點(測點位置如圖 3-2所示)的Zxx、Zxy、 Zyx、Zyy等全張量紀錄, 平均選取1Hz至10,000 Hz中的 16組頻段進行逆推處理。

- (ii) 依據位場理論,探測解析度通常為波長(或資料測點間 距)的1/4,故大地電磁與磁力三維逆推之網格設定概以 測點間距的1/4為主。三維網格係以測點分布區域之中 心點為模型原點,水平方向的網格間距為600 m,外圍 網格間距則以1.3倍數逐漸增大;大地電磁探測依據電 磁波穿透之集膚深度理論淺部解析度較高,深部解析度 較低,故以垂直方向網格以隨深度逐漸增大設計,自最 小50 m起以1.1倍的級數逐漸加大,網格數總計51,000 個網格(圖 3-3),經過20次迭代後所獲得的三維電阻率 模型(3D resistivity model)(如圖 3-4)。三維逆推須同 時考量各方向的資料反應,具有較高的可信度,然而調 查區域邊緣因資料較少,可信度相對較低;調查區域內 部則因探測資料較多,則其可信度相對較高。
- (b) 三維電阻率模型

以岩層的導電特性而言,完整緻密的花崗岩與花崗片麻岩將 呈現高達數千ohm-m的高電阻率特徵,風化的花崗岩電阻率 略低,而淺部的沖積層電阻率最低(約在數百ohm-m以下), 因此高電阻率分布區域可概略指示花崗岩之分布。此外,受 到地體構造作用,亦可能造成花崗岩體較為破碎而形成導水 裂隙帶,呈現相對較低電阻的特徵,分析說明如下:

(i) 高電阻率地層分布之三維模型分析

由三維模型(如圖 3-5)顯示,高電阻岩層幾乎涵蓋整個 離島東部地區,自深部向上延伸至淺部,並且往四周延 伸擴散,具有西北-東南向的帶狀分布;離島西半部地區 之高電阻岩層則主要源自於西南與西北兩端的深部,向 上延伸往東方擴展,呈現層狀分布;離島中部呈現空白

3-3

區域並往東北方延伸,顯示地層電阻率較低,可能屬於 較為風化或破碎之岩體,或者與地質構造有關。

- (ii) 電阻率切片圖分析
 - 自圖 3-5三維模型中擷取從地表到深度-1,500m, 繪製 地層電阻率等深度切面圖(如圖 3-7)。整體地層電阻分 布型態具有西北-東南及東北-西南方向的帶狀分布,並 呈現高低電阻交錯之現象。離島結晶區岩體應具備高電 阻特徵,而分布在高電阻區塊兩側或阻隔高電阻區塊延 伸的低電阻,常呈帶狀的分布,形成低電阻異常帶。初 步研判具有2組不同方向的電阻線型構造,如圖 3-7切 面圖中黑色虛線標示。參考地質資料顯示,太武山岩體 的周遭,都有明顯的大型剪切構造帶,並富集同構造侵 入的角閃岩脈,以北東向或西北向與花崗變晶狀閃長岩 質片麻岩帶或糜嶺岩帶作斷層接觸。對比上述電阻線型 構造與地質資料,研判圖 3-7所標示之電阻不連續構 造,其可能反應為岩體的破碎帶或地質不連續構造。電 阻不連續構造(RF1)隨深度增加具有往北移動之現象, 研判為一高角度(約70°)向北傾斜的帶狀破碎帶,亦參考 金門地區五萬分之一地質圖幅與剖面(林蔚等,2011, p25-p26),圖幅中描述太武山斷層帶切過太武山,通過 太武山公墓,並於南、北太武山之間形成約北60°東延 伸的斷層谷,並可依附近鑽井判斷太武山斷層構造為一 北64°東、向北傾斜70°的正斷層,因此,對應為太武山 斷層構造。自深度1,000m以下,離島結晶岩測試區東部 的西南區塊,出現顯著的低電阻異常,與圖 3-5中空白 區域相對應,其係屬於電阻不連續構造RF2之深部區域。 RF2構造約沿著斗門岩體的東北緣,向東南延伸穿過太 武山岩體中部,呈現西北走向,其與地質上的剪切構造 走向相當接近。研判RF2構造可能為一穿越太武山岩體

3-4

的剪切破碎帶構造,其深部區域可能具有較大範圍的岩 體破碎與含水,致使呈現低電阻異常。

(3) 磁力三維逆推

107年度整合離島結晶岩測試區既有的磁力探測數據,以及測點 不足處之補充調查數據,共計選擇544組的磁力資料進行磁力三 維逆推處理。同時,考慮不同岩層之磁感率特性,並且進行野外 岩層露頭磁感率量測與分析,作為磁力逆推結果對岩體分布解析 之參考依據。其中,磁力資料逆推過程採用Geosoft公司開發的 VOXI軟體,使用全磁場強度(Total Magnetic Intensity, TMI)網格 進行三維逆推,三維磁力網格的大小,水平方向為100 m;磁力 測勘逆推之解析深度則與測點資料分布距離有關,淺部解析度較 高,深部解析度較低,因此取垂直方向網格垂直方向為50 m,深 部250 m以下,則以1.08倍數逐漸加大,總計1,735,992個網格(如 圖 3-8所示),並於逆推過程中先扣除二階趨勢面後,再擷取資料 作為逆推的觀測網格。說明如下:

(a) 岩石磁感率量测分析

共計完成64處岩層露頭之磁感率量測(如表 3-1所示),特性 說明如下:

- (i) 花崗岩一般具有較高磁感率,其磁感率大多分布在1×
 10⁻³ SI至1×10⁻² SI,平均磁感率約為5.853×10⁻³ SI, 最高值達2.578×10⁻² SI。
- (ii) 花崗片麻岩在岩體組織上呈現明顯的片麻狀構造,其磁 感率較花崗岩為低,大多分布約在1×10⁻⁴ SI至1×10⁻³ SI之間,約低於花崗岩10倍左右,平均磁感率約為1.95× 10⁻³ SI,最高值達5.774×10⁻³ SI。
- (iii)離島結晶岩測試區分布之黑綠色岩脈多為輝綠/閃長岩脈,具有最高的磁感率,磁感率普遍都在1×10⁻² SI以上,平均磁感率達2.408×10⁻² SI。此外,另有一些顏色較淡的綠色岩脈,其多位於海邊且受風化影響程度較

大,研判岩層露頭較不具代表性,磁感率則明顯偏低, 平均磁感率約為6.41×10⁻⁴SI。

(b)三維磁感率等值面分析

利用感應磁化分量(MVI-Proj)磁感率的三維模型進行分析, 磁感率分布範圍約在1×10⁻⁴ SI至1×10⁻² SI。離島結晶岩 測試區高磁感率地層分布之三維模型立體圖(如圖 3-9),參 考岩石磁感率量測資料,顯示花崗岩/花崗片麻岩具有較高 磁感率特徵,概可據以研判離島結晶岩測試區之空間分布。

- (i) 高磁感率(3×10⁻³ SI)岩體分布區塊約自太武山往西及 往北兩側擴展,在深部處磁感率岩體連貫成一大區塊, 往淺部則約呈兩柱狀向上延伸至約深度500 m處,約可 對應為未受到地質剪切構造作用影響,並且具有原始火 成岩組織結構的花崗岩體(圖 3-9 (a))。
- (ii) 磁感率(1×10⁻³ SI)岩體幾乎涵蓋離島地區的東北部, 包含主要出露的太武山岩體與斗門岩體,並呈現許多西 北-東南向的帶狀延伸,主要分布約深度500m以下,約 可對應為花崗岩至花崗片麻岩的交錯區域(圖 3-9 (b))。
- (iii)磁感率(5×10⁻⁴ SI)岩體幾乎已涵蓋整個離島地區地表 出露的花崗/花崗片麻岩露頭位置,顯示花崗/花崗片麻 岩在離島結晶岩測試區域東部有大範圍的分布。除了地 表露頭所見區域外,在太武山以北的地區,地表沉積物 與紅土礫石層之下亦仍潛伏有花崗/花崗片麻岩的分布 (圖 3-9(c))。
- (C) 磁感率切片圖分析
 - (i) 由地層磁感率等深度切面圖(如圖 3-10),顯示淺部岩層磁感率分布較為凌亂,可能為高頻訊號受到雜訊干擾較大,或受到地質剪切構造作用影響,致使磁感率具有較大的變化;自深度100 m以下各切面圖則顯示高磁感率之特徵逐漸顯現,主要約略呈現東北-西南與西北-東

南方向,反應此區域地質構造的方向與可能分布。依據 地層磁感率在空間上的分布型態與延續性,研判磁力不 連續構造如圖 3-10黑色虛線標示,主要為中斷高磁感 率區塊延伸且呈現相對低磁感率特徵的線型分布,且對 應於各不同深度的切片圖,亦可發現具有相似的構造。

- (ii) 深度500 m以下之磁感率切面圖(圖 3-10),顯示高磁感率岩體逐漸形成聚集與連貫,反應地下岩體於深部呈現一體分布。研判離島東部之地下岩體主要約位於該區域的中央地區,並向四周延伸擴展,其岩體分布位置與地表出露以及於各海岸出露之花崗岩位置相當一致;西部則主要分布於西南與西北隅及其他帶狀區域,其中,西南隅地區可對應於地表花崗岩出露,其他地區則為岩體潛伏於深度約150 m以下。
- (4) 地下岩體與構造分布

地下地層因不同的組成物質、膠結狀況、含水程度等,造成各項 地層物理特性的差異。綜整上述電阻與磁力資料分析結果顯示, 大部分的花崗岩體呈現高電阻率與高磁感率可對應的特徵,經與 地質資料比對及地表岩體露頭的驗證,均能有效的描繪地下岩體 與構造的分布,說明如下:

- (a) 依據電阻率與磁感率地層分布之三維模型(圖 3-5與圖 3-9)研判,離島結晶岩測試區東部地區的地下岩體在地層深 部約呈現東北-西南向寬廣的帶狀分布,自深部向上延伸則 以西北-東南向以帶狀向四周擴展,連接至地表具有花崗岩 出露的各個區域;離島西部地區的地下岩體則位於西南與西 北部兩處之深部向上延伸,除對應在西南隅地表出露的花崗 岩之外,另潛伏於西北部及西部其他零星地區在地下深度約 150 m以下。
- (b) 從三維電阻率與磁感率異常帶與線型構造分布顯示(圖 3-7 與圖 3-10),兩者皆具有東北-西南向與西北-東南兩組方向 約略垂直的主要線型構造,此與地表花崗岩體所見兩組北東

向與北西向的剪切帶葉理方向一致,反應主要的地質構造方 向。電阻率與磁感率線型構造之分布位置相當的一致,有助 於對不連續構造的判釋與確認,經地表及地下地質資料進行 驗證,則可有效提升對構造分布的掌握。整合電阻率與磁感 率探測資料,研判主要有4組約呈共軛方向的不連續構造(如 圖 3-11所示),說明如下:

- (i) RF1與MF1構造:電阻與磁測資料中,皆具顯著的線型特徵,分布位置與方向十分接近,且亦與地質資料中太武山斷層的走向位置相當,研判為一不連續構造,並可對應為太武山斷層構造,約呈70°高角度向北傾斜,呈現一帶狀的破碎帶構造。
- (ii) RF2與MF2構造:此不連續構造在電阻與磁測資料中,其 分布位置與方向亦相當的一致,在深部地區始有些差 異,研判約呈現近70°至80°的高角度向東傾斜。對照地 表地質資料顯示,此不連續構造約沿著斗門岩體的東北 緣,向東南延伸穿過太武山岩體中部,但地表多為沖積 層或植被覆蓋不易觀察。依其構造走向與地質上的剪切 構造走向相當接近,研判可能為一穿越太武山岩體的剪 切破碎帶。
- (iii) RF3與MF3構造:電阻線型構造(RF3)對應地表地質狀況顯示,東側為花崗岩體出露的地區,西側則為紅土礫石層、現代沉積物與金門層,研判可能代表地質不連續構造,約呈現接近垂直(大於85°)的高角度向東傾斜。 而磁力線型構造(MF3)則位於RF3之東北,約位於地表花崗岩體之西南邊緣,對比地表地質資料顯示,本構造北端約位於斗門岩體的西緣,往東南延伸兩側皆為花崗片麻岩,未見顯著的地質破碎構造,研判本構造可能為不同時期花崗岩的岩性差異表現,其接觸帶可能類似太武山岩體與斗門岩體為漸變的接觸關係。

3-8

- (iv) RF4與MF4構造:RF4構造在深部則為高電阻岩體阻擋 並未向下延伸,在深部地區反而呈現近80°的高角度向 北傾斜的不連續構造,對比地表地質資料顯示,RF4構 造係位於太武山岩體東南緣與出露於東南海岸花崗岩 之間,地表為近代的沖積層,研判可能為一範圍較為寬 廣的破碎帶。而MF4構造位於太武山岩體的東南緣,西 北側地表為花崗片麻岩出露,東南側地表則都為近代的 沖積層,研判MF4構造可能為破碎帶或不同岩性岩體的 分界。
- (c) 依據SNFD2017報告參考案例表二之CC'剖面位置,分別自三 維電阻率及磁感率模型 擴取相對位置之地層電阻率及磁感 率資料,套疊中央地質調查所(2011)地質剖面圖,依據三者 於三維空間的分布特性,研判岩體分布並與地質構造進行套 疊比對與判釋。
 - (i) 地下地層主要呈現高電阻特徵,顯示為一緻密的花崗岩 主體,低電阻的分布係指示岩體中可能的裂隙密集帶或 破碎帶之分布,而剖面兩端淺部的低電阻則應屬於岩體 邊界且為受海水影響所致。剖面中段偏向西北側一帶, 具有一相當寬廣的低電阻帶自地表往下延伸,研判為一 破碎帶構造,呈現高角度向北傾斜,可對應為太武山斷 層構造(如圖 3-12所示)。
 - (ii) 依地層磁感率分布型態,研判高磁感率地層為以花崗岩為主之岩體,主要分布於剖面兩端與中間區域;剖面中間區段為大範圍的花崗岩體,此岩體兩側與低磁感率區接觸,接觸面皆呈現高角度向北傾斜,其中西北側的接觸面為磁力不連續構造,約可對應為太武山斷層,推測此低磁感率區為一破碎構造帶;東南側的低磁感率區亦可能為一不連續構造或屬於其他不同性質的岩層,由於地表為沉積物覆蓋且無岩層露頭,需待後續調查與確認(如圖 3-13所示)。

(iii) 綜合兩者判釋結果顯示,由電阻率與磁感率模型所研判 之線型構造(RF1與MF1)位置與傾斜位態相當接近。剖 面中段區域之花崗岩體大致呈現高電阻率與高磁感率 的對應特性,而研判呈現低電阻特徵的岩體破碎帶,通 常位於高低磁區的交界處附近;低磁性岩體(Low Magnetic Rock, LM)則對應於高電阻中具有局部低電阻 特徵的區塊。

編號	岩石種類	磁感率	岩石露頭坐標 (WGS84)	
		(*10 ⁻³ SI)	經度	緯度
1	花崗岩	5.252	118°27'45.66"	24°25'43.64"
2	律晶花崗岩	0.699	118°27'45.66"	24°25'43.64"
3	細粒花崗岩	1.163	118°27'45.66"	24°25'43.64"
4	花崗岩(細粒)	1.715	118°26'28.46"	24°30'26.94"
5	花崗岩(粗粒)	7.555	118°26'45.43"	24°30'28.06"
6	花崗岩(粗粒)	13.682	118°26'45.43"	24°30'28.06"
7	花崗岩(粗粒)	10.718	118°27'06.99"	24°29'31.26"
8	花崗岩	0.737	118°25'41.30"	24°27'29.04"
9	花崗岩	2.139	118°25'40.67"	24°27'28.91"
10	花崗岩	7.679	118°25'41.11"	24°27'29.59"
11	花崗岩	4.608	118°28'24.80"	24°26'50.93"
12	花崗岩	5.223	118°28'18.65"	24°26' 37.43"
13	花崗岩	9.798	118°28'06.57"	24°26' 28.70"
14	花崗岩	3.793	118°23'16.42"	24°26' 05.37"
15	花崗岩	6.923	118°23'45.26"	24°26' 07.57"
16	花崗岩	5.535	118°26'25.66"	24°24'41.88"
17	花崗岩	5.535	118°26'30.90"	24°24'43.57"
18	花崗岩	4.929	118°27'55.42"	24° 28'51.45"
19	花崗岩(色黑粗粒)	25.78	118°26'45.76"	24°30'29.09"
20	花崗岩	3.629	118°26'15.16"	24°30'17.90"
21	花崗岩	3.762	118°26'04.78"	24°29'59.16"
22	花崗岩	6.953	118°24'36.01"	24°31'39.89"
23	花崗岩	6.851	118°25'10.70"	24°31'16.54"
24	花崗岩	6.737	118°17'17.22"	24°24'33.39"
25	花崗岩	1.124	118°19'05.63"	24°23'23.17"
26	花崗岩	0.938	118°19'05.63"	24°23'23.17"
27	花崗岩	4.597	118°19'43.15"	24°23'19.23"
花崗岩	平均磁感率	5.853		
28	花崗片麻岩(風化)	0.120	118°24'03.47"	24°27'01.84"
29	花崗片麻岩(風化)	0.111	118°23'34.74"	24°27'28.67"
30	花崗片麻岩(風化)	0.055	118°24'01.02"	24°26'42.59"
31	花崗片麻岩	1.384	118°27'16.85"	24°25'07.62"
32	花崗片麻岩(風化)	0.158	118°23'49.95"	24°26'54.12"
33	花崗片麻岩(風化)	0.07	118°24'31.12"	24°25'54.77"
34	花崗片麻岩	5.76	118°26'12.89"	24°24'35.25"
35	花崗片麻岩	5.558	118°25'50.34"	24°30'26.64"
36	花崗片麻岩	3.15	118°23'51.99"	24°30'39.90"
37	花崗片麻岩	1.962	118°16'53.46"	24°24'44.48"
38	花崗片麻岩	0.349	118°18'20.34"	24°23'54.41"
39	花崗片麻岩	1.139	118°24'47.77"	24°27'42.25"
40	花崗片麻岩	0.325	118°24'47.78"	24°27'42.26"
41	花崗片麻岩	5.774	118°24'56.23"	24°27'47.35"
42	花崗片麻岩	0.215	118°25'18.06"	24°27'56.18"
43	花崗片麻岩(風化)	0.159	118°25'26.28"	24°28'04.19"
44	花崗片麻岩(風化)	0.068	118°25'31.14"	24°26'38.85"
45	花崗片麻岩	5.649	118°24'41.40"	24°27'47.88"
46	花崗片麻岩	5.04	118°24'41.40"	24°27'47.88"
花崗片麻	氟岩平均磁感率(1)	1.95		

表 3-1:離島結晶岩測試區岩石磁感率量測結果表

編號	岩石種類	磁感率	岩石露頭坐	標 (WGS84)
		(*10 ⁻³ SI)	經度	緯度
47	花崗片麻岩	-0.126	118°23'18.86"	24°27'51.20"
48	花崗片麻岩	-0.088	118°24'48.78"	24°25'40.97"
49	花崗片麻岩	-0.029	118°25'00.29"	24°27'48.40"
50	花崗片麻岩	-0.053	118°25'12.95"	24°27'53.77"
51	花崗片麻岩	-0.082	118°24'55.35"	24°27'46.25"
52	花崗片麻岩	-0.052	118°25'21.33"	24°27'58.43"
53	花崗片麻岩	-0.012	118°25'31.14"	24°26'38.85"
花崗。	片麻岩平均磁感率(2)	-0.063		
54	黑綠色岩脈	33.12	118°27'06.99"	24°29'31.26"
55	黑綠色岩脈	52.29	118°23'45.70"	24°26'07.35"
56	黑綠色岩脈	15.54	118°19'05.62"	24°23'23.16"
57	黑綠色岩脈	37.23	118°19'05.63"	24°23'23.17"
58	黑綠色岩脈	25.17	118°19'05.63"	24°23'23.17"
59	灰黑色岩脈	2.806	118°28'18.82"	24°26'38.51"
60	黑色岩脈	2.413	118°28'18.82"	24°26'38.51"
黑絲	录色岩脈平均磁感率	24.08		
61	綠色岩脈(風化)	0.55	118°24'47.77"	24°25'42.08"
62	綠色岩脈(風化)	0.14	118°26'25.66"	24°24'41.88"
63	綠色岩脈(風化)	0.343	118°26'30.90"	24°24'43.57"
64	綠色岩脈	1.531	118°25'41.30"	24°27'29.04"
綠	色岩脈平均磁感率	0.641		

表 3-1:離島結晶岩測試區岩石磁感率量測結果表(續)

註1:磁感率單位(SI)為國際單位制。

註2:磁感率為正值表示物質的磁性為順磁性,負值表示物質的磁性為反磁性。



圖 3-1:離島結晶岩測試區地表地質圖幅

資料來源:金門地區五萬分之一臺灣地質圖及說明書,中央地質調查所(2011)。


圖 3-2:離島結晶岩測試區AMT測點分布圖



圖 3-3:離島結晶岩測試區電阻率三維數值網格



圖 3-4:離島結晶岩測試區AMT三維逆推之三維電阻率模型 註:圖(a)為原始三維立方體電阻模型;以及圖(b)為陸地區域三維電阻模型。



圖 3-5:離島結晶岩測試區高電阻率地層分布之三維模型之立體圖 註1:圖(a) 4000 ohm-m等電阻面;圖(b) 1000及4000 ohm-m等電阻面;圖(c) 離島結晶岩測試區地表地質圖。

註2:1000 ohm-m等電阻面為灰色區塊,4000 ohm-m等電阻面為黃色區塊。 註3:黑色多邊形範圍為地表地質圖花崗/花崗片麻岩露頭分布位置。



圖 3-6:離島結晶岩測試區之地質剖面及水文地質概念模式 資料來源: SNFD2017技術支援報告附件A(第3.4.1.3節,圖 3-26)。



圖 3-7:離島結晶岩測試區地層電阻率等深度切面圖

註1:本項目工作透過三維逆推解析技術,重新解析離島結晶岩測試區之構造位置,與SNFD2017報告透過二維逆推解析結果(圖 3-6)進行比對。

註2:RF1、RF2、RF3、RF4構造空間分布位置,約略可分別對應於SNFD2017報告描述之F1、F11、F9、F7構造;透過本項目工作三維逆推解析所獲得之RF1~RF4的三維空間 分布型態,將更有利於了解離島結晶岩測試區地下地質構造。

註3:RF1至RF4以長虛線表示。RF1:東北-西南向橫跨試驗區東部;RF2:西北-東南向橫跨試驗區東部;RF3:西北-東南向於試驗區東部與中部交界處;RF4:東北-西南向於 試驗區東南部。



圖 3-8:離島結晶岩測試區磁力三維數值網格

註:三維網格間距於水平方向為100m,垂直方向為50m,深部250m以下,則以1.08倍數逐漸 加大,總計1,735,992個網格。



圖 3-9:離島結晶岩測試區高磁感率地層分布之三維模型立體圖

註1: (a) 離島結晶岩區岩層磁感率為3×10⁻³ SI 之等值面立體圖; (b) 離島結晶岩區岩層磁感率為1×10⁻³ SI之等值面立體圖; (c) 離島結晶岩區 岩層磁感率為5×10⁻⁴ SI之等值面立體圖; (d) 離島結晶岩區地表地質圖。

註2:紅色區塊代表磁感率3×10⁻³ SI 等值面;黃色區塊代表磁感率1×10⁻³ SI等值面;青色區塊代表磁感率5×10⁻⁴ SI 等值面。



圖 3-10:離島結晶岩測試區地層磁感率等深度切面圖

註1:MF1、MF2、MF3、MF4構造概可分別對應於SNFD2017報告參考案例描述之F1、F11、F9、F7構造。

註2:MF1至MF4以長虛線表示。MF1:東北-西南向橫跨試驗區東部;MF2:西北-東南向橫跨試驗區東部;MF3:西北-東南向於試驗區東部與中部交界處;MF4:東北-西南向 於試驗區東南部。



圖 3-11:離島結晶岩測試區不同深度之電阻率與磁感率線型構造分布圖

註:灰色區塊為地表花崗岩體分布位置,RF1~RF4為電阻線型構造(藍色虛線),MF1~MF4為電阻線型構造(紅色虛線)



(b)



圖 3-12:離島結晶岩測試區CC'剖面之電阻率分布及構造比對圖 註1:圖(a)為電阻率分布剖面圖;圖(b)為電阻率剖面套疊磁感率判釋構造。 註2:紅色線段與對應之圖示與文字為電阻率判釋結果;黑色線段與對應之圖 示與文字為磁感率判釋結果。

(a)



圖 3-12:離島結晶岩測試區CC'剖面之電阻率分布及構造比對圖(續)

註1:圖(c)為離島結晶岩體測試區GC-GC'地質剖面圖;圖(d)為電阻率剖面套疊磁感率判釋構造(CC')與地質剖面(GC-GC')三維空間特性分布。 註2:紅色線段與對應之圖示與文字為電阻率判釋結果;黑色線段與對應之圖示與文字為磁感率判釋結果。

註3:地質剖面圖資料來源係參考中央地質調查所(2011)之CC'地質剖面圖,並且為避免混淆,因此本報告將CC'剖面編修為GC-GC'剖面。



圖 3-13:離島結晶岩測試區CC'剖面之磁感率分布及構造比對圖 註1:圖(a)為磁感率分布剖面圖;圖(b)為磁感率剖面套疊電阻率判釋構造。 註2:紅色線段與對應之圖示與文字為電阻率判釋結果;黑色線段與對應之圖 示與文字為磁感率判釋結果。



圖 3-13:離島結晶岩測試區CC'剖面之磁感率分布及構造比對圖(續)

註1:圖(c)為離島結晶岩體測試區GC-GC'地質剖面圖;圖(d)為磁感率剖面套疊電阻率判釋構造(CC')與地質剖面(GC-GC')三維空間特性分布。 註2:紅色線段與對應之圖示與文字為電阻率判釋結果;黑色線段與對應之圖示與文字為磁感率判釋結果。

註3:地質剖面圖資料來源係參考中央地質調查所(2011)之CC'地質剖面圖,並且為避免混淆,因此本報告將CC'剖面編修為GC-GC'剖面。

3.2. 地球化學

3.2.1. 離島結晶岩測試區之岩礦組成與年代分析

地下水的化學特性是不同來源的水(如:天水、海水、高溫地熱流 體等)與不同性質的圍岩(如:花崗岩、泥岩等)長期反應後,呈現出現 地特有的水文地球化學性質。利用地下水化學組成加上圍岩環境條件 參數(礦物組成),配合不同情境的地化模擬運算,可用以瞭解岩石與 地下水交互反應下的離子交換、礦物溶解或沉澱的平衡關係,並建構 出更完整之地質概念模式。詳細礦物組成的分析,則需建立於完整岩 相觀察與全岩地化成分特性之上,因此,應完成岩相觀察到的礦物結 構,與全岩地化組成的特徵基礎後,進階分析判釋微尺度下的礦物組 成,並透過不同定年分析方式獲得岩體形成、高溫熱事件或變質年代, 提供岩體演化過程,並成為地質概念模式之重要制約;同時所獲得之 礦物與岩石組成,亦可提供後續地化反應模擬作為必要輸入參數。

SNFD2017報告已利用既有現地量測的地下水化學組成,加上圍 岩環境條件參數(礦物組成),配合不同情境的地化模擬運算,據以瞭 解離島結晶岩測試區與地下水交互反應下,離子交換、礦物溶解或沉 澱的平衡關係,以期未來能建立水文地球化學概念模式,發展概念模 式長期演化的評估技術(例如Site Descriptive Model, SDM)。

107年度分別針對離島烏坵地區(以下簡稱W區)WCBH-03與 WCBH-08兩口鑽井取得之岩心進行樣本分析,以及離島馬祖地區(以 下簡稱M區)侵入岩體(白沙花崗岩、東引閃長岩、橋仔花崗岩、塘岐 輝綠岩、基性岩脈)進行地表露頭岩石取樣,共計取得60組岩石樣品, 分析離島結晶岩測試區與破碎帶詳細岩石與礦物組成,建構完整新鮮 的花崗岩體到破裂蝕變帶之岩礦組成與結構變化。分析結果除可提供 地化反應模擬運算中之關鍵地質參數,亦可加強後續地質演化史等相 關研究,提升區域地質概念模式之完整,作為候選場址評選與核定階 段探討地質演化模式及岩-水反應模擬之必要資訊,說明如下:

(1) 礦物組成

在偏光顯微鏡下計數每一片岩石薄片中的礦物含量比例,組成體 積百分比請參見表 3-2。

(a) W區鑽井岩心

WCBH-03與WCBH-08鑽井岩心主要為淡色的花崗岩類與暗 色的閃長岩類。淡色的花崗岩類主要礦物組成為石英、斜長 石、鹼性長石(主要是微斜長石與條紋長石)、黑雲母與不透 光礦物,另含無法計數之少量綠泥石、榍石、磷灰石、鋯石、 黏土礦物,不含閃石類礦物;暗色的閃長岩類主要礦物組成 為石英、斜長石、角閃石與不透光礦物,另含無法計數之少 量綠泥石、榍石、磷灰石、鋯石、黏土礦物。整體而言,隨 鑽井深度加深,並未出現岩心礦物相組成差異的現象。

(b) M區露頭岩石

M區侵入岩體露頭岩石包括:淡色的花崗岩類、暗色的閃長 岩類、輝綠岩與基性岩脈。淡色的花崗岩類主要礦物組成為 石英、斜長石、鹼性長石(主要是微斜長石與條紋長石)、黑 雲母與角閃石,次要礦物有輝石、白雲母、絹雲母、綠泥石 與不透光礦物,以及少量的綠簾石、磷灰石與鋯石;暗色的 閃長岩類主要礦物組成為斜長石、石英、角閃石、黑雲母與 鹼性長石,次要礦物有絹雲母與不透光礦物,以及少量的輝 石、綠簾石、綠泥石、磷灰石、鋯石、榍石、方解石與螢石; 暗色的輝綠岩主要礦物組成為斜長石、鹼性長石、角閃石、 輝石與黑雲母,以及少量的絹雲母、磷灰石與不透光礦物; 暗色的基性岩脈主要礦物組成為斜長石、角閃石、輝石、石 英,次要礦物有絹雲母、綠泥石、方解石、螢石與不透光礦 物,以及少量的綠簾石、磷灰石與鋯石。

(2) 岩石分類

利用岩石所含石英、斜長石與鉀長石之比例,比對QAP分類圖 (Streckeisen, 1976, p8),進行詳細岩石分類(如圖 3-14所示)。 (a) W區鑽井岩心:

- (i) W區酸性侵入岩由正長花崗岩(syenogranite)、二長花 崗岩(monzogranite)、花崗閃長岩(granodiorite)、英雲 閃長岩(tonalite)、石英二長閃長岩(quartzmonzodiorite)、石英閃長岩(quartz diorite)與閃長岩 (diorite)所組成。理論礦物相計算結果集中分布在二長 花崗岩、花崗閃長岩與石英二長閃長岩,有別於實際岩 石樣本集中分布在正長花崗岩、二長花崗岩、英雲閃長 岩、石英閃長岩與閃長岩,可能是受控於理論計算模型 (CIPW norm)的設定。
- (ii) W區岩心有部分落在少見之富石英花崗岩(quartz-rich granitoids)與石英岩(quartzolite)區域內,研判此類花 崗岩和閃長岩曾受到程度不一之糜嶺岩化作用或蝕變 作用,產生許多再結晶礦物,特別是石英的比例大幅增 加,所以在計數礦物含量時,造成石英含量異常的高, 故投影作圖均落入富石英花崗岩的範圍,此分析結果亦 解釋部分裂隙帶樣本較新鮮圍岩往富集石英的方向偏 移的現象。
- (b) M區露頭岩石:
 - M區露頭樣本分析結果顯示侵入岩岩性種類很廣,由花崗岩類的正長花崗岩、二長花崗岩、花崗閃長岩、英雲閃長岩、基性岩脈的石英閃長岩、閃長岩/輝長岩與二長(輝綠)岩所組成。其中MA25樣本在QAP分類圖中屬於英雲閃長岩,但從岩相來看,係屬富含硬綠泥石的硬綠泥石岩(chloritoid rock),為中低度變質作用下之產物;而基性岩脈配合岩相來看,係屬於細粒長英質基質伴隨火山玻璃的淺侵入岩脈。
- (3) 岩相特性
 - (a) W區鑽井岩心

新鮮閃長岩與其裂隙帶皆呈現半自形柱狀、斑狀結構,斑晶 為斜長石與角閃石,呈半自形-他形板狀。次生石英粒徑小且 晶形不佳,部分成條帶狀分布並具有動態重結晶特徵,或以 脈狀產狀侵入斜長石內;斜長石表面絹雲母、黏土化;少數 角閃石呈現固定方向排列,顯示可能存在後期剪切作用,並 產生重結晶的次生石英。不透明礦物被包裹在其它礦物之 中,晶形也受其他礦物所限制。新鮮花崗岩類與其裂隙帶呈 現中粒花崗結構、塊狀結構。石英與鹼性長石為自形粒狀, 斜長石為半自形-自形板狀。鹼性長石常有絹雲母化,斜長石 常有絹雲母化、黏土化現象,表面可見裂隙;另有顆粒小且 晶形不佳的石英,推測是後期的次生石英,常以脈狀或條帶 狀聚集分布於長石周圍或內部;原生石英沒有明顯蝕變,但 部分斑晶邊緣模糊不清,與少數脈狀次生石英侵入,上述現 象說明岩石受後期蝕變的影響程度大。

(b) M區露頭岩石

花崗岩類呈現中粒至細粒花崗結構、塊狀結構。石英為他形 粒狀,斜長石與鹼性長石為半自形-他形板狀。斜長石常有絹 雲母化、黏土化現象,聚片雙晶和環帶結構;鹼性長石蝕變 程度明顯,常有絹雲母化,發育卡式雙晶、格子雙晶,條紋 長石具明顯條紋結構,可見與石英呈文象交生。黑雲母與角 閃石呈綠泥石化、綠簾石化;不透明礦物呈半自形,多分布 在長石中。輝綠岩呈現輝綠結構。斜長石與鹼性長石斑晶為 半自形-他形板狀,斜長石絹雲母化、黏土化現象,具有聚片 雙晶和環帶結構;鹼性長石蝕變程度明顯,常有絹雲母化, 發育卡式雙晶、格子雙晶,條紋長石具明顯條紋結構。輝石 為半自形短柱狀,角閃石為半自形板狀,輕微蝕變,輝石發 育簡單雙晶,與角閃石呈反應邊結構;不透明礦物呈半自形, 往往被包裹在其它礦物之中,晶形也受其它礦物所限制。閃 長岩類呈現斑狀結構,但基質具顯微晶質結構。石英為他形 粒狀,熔蝕呈渾圓狀,並見基質嵌入現象;斜長石與鹼性長 石斑晶為半自形-他形板狀,斜長石大量絹雲母化、黏土化現 象,聚片雙晶和環帶結構;鹼性長石蝕變程度明顯,常有絹

雲母化,發育卡式雙晶。黑雲母呈綠泥石化、綠簾石化;不 透明礦物呈半自形,多分布在長石中。

- (4) 岩石組成
 - (a) 全岩主要元素分析:
 - (i) 根據岩石主要元素Na₂O+K₂O和SiO₂成分,可繪製TAS岩 性分類圖。圖 3-15顯示W區小坵嶼主要岩石集中為SiO₂ 含量分布於70 wt%至78 wt%之酸性花崗岩體,與SiO₂ 含量分布於52 wt%至60 wt%之中性閃長岩脈;M區岩石 的SiO₂含量分布極廣,以60 wt%至78 wt%之中酸性到 酸性之花崗閃長岩與花崗岩組成主體,部分52 wt%至 58 wt%之中性閃長岩體與岩脈,以及小部分48 wt%至 52 wt%基性輝綠岩體與岩脈。
 - (ii) W區鑽井岩心裂隙帶與其周圍新鮮圍岩比較,並無明顯因蝕變造成之全岩主要元素明顯變化,僅部分裂隙帶有K20與CaO的小程度富集,可能是由於蝕變產生的次生礦物多為碳酸鹽類礦物、雲母、泥石類或黏土類礦物,以及部分裂隙帶有易遷移的鈉元素(Na2O)輕微降低,整體蝕變程度都不大。
 - (iii)利用岩石化學成分中的K₂O和SiO₂成分作圖(圖 3-16), 可以判別岩石特性與演化。W區鑽井岩心與M區露頭岩 石K₂O和SiO₂分布範圍很大,屬於中鉀至高鉀鈣鹼性演 化系列(Medium-K and High-K calc-alkaline series),但 M區露頭岩石相較於W區鑽井岩心較高的K₂O,整體來說 西部離島岩石都落在相似特性的範圍內。
 - (b) 微量元素分析:
 - (i) W區鑽井岩心稀土元素分布圖(圖 3-17(a)-(i, ii))顯示,
 新鮮花崗岩類圍岩組成相當一致,也沒有深度上的差異,皆表現右傾之輕稀土元素(Light Rare Earth Element, LREE: La-Sm)富集與銪(Eu)元素負異常,僅在 重稀土(Heavy Rare Earth Element, HREE: Gd-Lu)部分

有較明顯的分化;新鮮閃長類圍岩組成也相當一致,相 較於花崗岩類輕稀土右傾與銪(Eu)元素負異常程度較 小。銪(Eu)負異常可能是受到斜長石結晶分化作用或是 岩漿後期換質作用影響。而裂隙帶岩心基本上整體趨勢 與其圍岩相似。岩石微量元素蛛網圖(圖 3-17(b)-(i, ii))顯示,新鮮花崗岩類與閃長岩類圍岩組成相當一致, 亦沒有深度上的差異。花崗岩類皆表現明顯的鈮(Nb)、 鉭(Ta)、鍶(Sr)、磷(P)和鈦(Ti)虧損和輕微鋯(Zr)虧損, 鋇(Ba)、Sr、P虧損同樣是受到長石結晶分化的影響,而 Ti、Nb的虧損表示岩漿由地殼重熔而來; 閃長岩類蛛網 圖趨勢線右傾程度較緩,輕微Nb、Ta、Sr、P和Ti虧損。 裂隙帶岩心基本上整體化學趨勢與其圍岩相似且集中, 但受到鉀蝕變的岩心,亦呈現明顯P、Ti虧損。

- (ii) M區露頭岩石稀土元素分布圖(圖 3-17(a)-(iii))顯示, 花崗岩類具有大範圍的輕稀土元素富集變化與銪元素 虧損變化);而閃長岩與基性岩脈則顯示輕稀土元素依 然富集且範圍集中,並無明顯或僅有微小Eu負異常。岩 石微量元素蛛網圖(圖 3-17(b)-(iii))顯示,多變的大離 子半徑元素含量(Large Ion Lithophile Elements, LILE), Ba、Sr、U、P虧損,顯示受到長石與磷灰石結晶分化的 影響,還有明顯的Nb、Ta與Ti虧損現象,花崗岩類以上 元素的虧損變化幅度相對大於閃長岩與基性岩脈。
- (5) 定年分析
 - (a) 定年分析方法

不同定年法可得到代表不同意義的岩體年代,以深成岩(例 如:花崗岩、閃長岩、輝長岩)來說,由於侵入岩漿在地殼深 處緩慢冷卻形成岩體,故利用高溫封存溫度礦物的定年法 (例如:鋯石鈾鉛定年),所得到的年代可視為岩體形成年代, 而中溫封存溫度礦物的定年法(例如:角閃石/黑雲母氫氫定 年),所得到的年代可視為岩體冷卻年代;而噴出岩(例如:

流紋岩、安山岩、玄武岩)係為岩漿噴出快速冷卻所形成,所以全岩氩氩定年法即可代表岩體的形成年齡。

(b) W區結晶岩體之定年結果

為更精確地判斷W區結晶岩體之形成年代,配合其鑽井岩心 之地化分析,針對WCBH03與WCBH08鑽井岩心共6組樣品, 進行鋯石鈾鉛定年分析(圖 3-18)。綜合分析結果顯示,W區 花崗岩與閃長岩體形成年代為132 Ma(million years,百萬 年)至136 Ma,而後約120 Ma侵入閃長岩岩脈。部分從岩心 分離出來的鋯石具有古老年代,此類鋯石稱為繼承鋯石,獲 得的多期次古老年齡大致分布於早元古代、晚元古代、晚古 生代石炭紀和早中生代三疊紀,顯示W區下方地殼基底過去 一直經歷地層疊加重熔事件,而在最新一期形成的W區花崗 岩體內的鋯石上,留下過去老的年代紀錄,此與華南地殼紀 錄事件十分相符(Chen et al., 2006, p130-132; Hsieh et al., 2008, p447-449)。

- (6) 時空演化分析
 - (a)由於鋯石鈾鉛定年法的封存溫度高(>800°C),目前常用來指 示花崗岩形成年代及變質岩的結晶年代,以及探討岩漿演化 過程。從以上W區鑽井岩心6個岩樣的定年結果顯示(圖 3-18),繼承鋯石具有多期次的古老年齡,指示W區下方地殼 基底遭遇不斷重熔產生岩漿,在岩漿上升侵入冷卻後形成W 區火成岩,且並未有隨深度出現年齡上的變化,顯示花崗岩 主體大致是在一次岩漿事件中形成,此岩漿演化與K區、M區 花崗岩體的形成機制相同。
 - (b) W區花崗岩形成的時代,應發生於132 Ma至136 Ma之間(圖 3-18),而閃長岩脈則是隨後於約120 Ma侵入花崗岩主體內; 結合W區少數地表岩體的氫氫定年結果(李寄嵎,2000, p17),顯示W區的閃長岩脈侵入年代亦為相符的120 Ma,而 基性(粗玄岩)岩脈則在約86 Ma侵入(圖 3-19(a))。雖在李寄 嵎 (2000, p17)的研究中,曾嘗試分離輝長岩中可供氫氫定

年的礦物,但未曾成功,故僅能就野外層序上判定輝長岩生 成年代應較花崗岩為老。

- (c) 綜整上述成果,W區形成之火成岩在136 Ma至85 Ma之間, 由老至新依序可區分為基性火成岩(輝長岩)、酸性火成岩 (花崗岩)及侵入之酸性(花崗岩)、中性(閃長岩)和基性(粗玄 岩)岩脈(圖 3-19(b))。將W區岩體形成年齡,與同在華南大 陸邊緣的K區、M區等花崗岩離島一同比對,可以大致互相對 應出近似時期的岩漿事件與形成岩體,亦可與大陸平潭地區 所劃分的岩石單元作對比(李寄嵎等,2015,p4)。
- (7) 岩-水反應演化
 - (a) W區花崗岩體於132 Ma至136 Ma岩漿侵入後逐漸冷卻,亦受 到區域應力的影響下,主要在岩體內部發育許多裂隙帶或剪 切帶,而成為地下水流通之管道;在長期岩-水反應下,演化 出程度不同的蝕變現象。
 - (b) 由整體W區鑽井花崗岩岩心分析結果,表層岩層較鬆散破碎,但花崗岩體則相對完整,裂隙帶或剪切帶的母岩,在長期與地下水反應下,最普遍且快速出現斜長石發生絹雲母化、黏土化現象,表面並可見裂隙,以及黑雲母與角閃石的綠泥石化、綠簾石化;隨著石英逐漸出現溶解,產生次生的重結晶石英,粒徑小且晶形不佳,並以條帶狀分布,或脈狀產狀侵入斜長石內;而少數角閃石呈現固定方向排列,顯示花崗岩體可能受後期剪切應力作用影響。
 - (c) W區小坵嶼地表並未發現明顯之斷層構造,但地表密布延伸 性大多不佳之節理,主要分為高傾角與近水平兩類之節理 組,屬岩體近地表解壓造成的節理。解理表面甚少礦物充填, 常出現氧化作用之鏽染現象,程度隨深度而減小,遇節理密 集處或地下水流動明顯處,有嚴重鏽染,且常有礦脈充填 (如:石英脈)。

表:	3-2:	W	區鑽井	岩心與	М	區露頭岩	石之	_礦物含	量計	數結果	2
----	------	---	-----	-----	---	------	----	------	----	-----	---

Sample								_		-			• .	_	-	
No.	Depth (m)	QAP Rock type	Qtz	Plag	Kfs	Bt	Hbl	Рух	Mus	Ser	Chl	Epi	Apt	Zrn	Opa	Others
WC01	21.60-21.80	Syneogranite	36	15	43	5									1	
WC02*	23.80-23.90	Syneogranite	34	15	42	6	2								1	
WC04	39.45-39.70	Quartz diorite	10	55		5	28								2	
WC05*	48.52-48.65	Tonalite	14	51		3	28								4	
WC06	49.81-50.00	Quartz diorite	10	49		2	35								4	
WC07	53.45- 53.60	Monzogranite	37	20	37	5									1	
WC08*	54.38-54.48	Quartz-rich	60	16	18	5									1	
		granitoids													-	
WC10*	74.25-74.40	Monzogranite	35	34	23	6									2	
WC11	83.00-83.20	Syneogranite	40	15	38	5									2	
WC13	123.02-123.22	Syneogranite	3/	15	36	10									<u>Z</u>	
WC15	14/.65-14/.80	Monzogranite	30	30	25	8									1	
WC16	160./4-100.90	Monzogranite	35	29	27	2	20								2	
WC10	25 95 26 00	Quartz diorite	9	39	24	10	20								۲ ۲	
WC10 WC19	61 10-61 25	Syneographie	33	15	41	8									2	
WC20*	69 20-69 30	Ouartz diorite	10	55	71	1	32								2	
WC20	68 90-69 00	Quartz diorite	12	61		1	23								4	
WC22*	79 35-79 40	Monzogranite	37	20	34	7	23								2	
WC24	101.00-101.20	Monzogranite	37	22	33	6									2	
WC25	108.85-109.00	Ouartz diorite	12	56		2	28								2	
WC26	172.80-173.00	Syneogranite	41	17	35	6									1	
WC28	202.45-202.62	Quartz diorite	8	53			35								4	
WC29	244.82-245.00	Syneogranite	40	17	35	6									2	
MA01	surface	Syneogranite	34	10	35		15			2	2	1			1	
MA02	surface	Granodiorite	20	45	20	5	5				2		1		2	
MA03	surface	Tonalite	15	50		5	25				1		1		2	Sph (1)
MAOA	surface	Topalito	15	55	2	2				10	1	1		~1	2	Vol gls
MA04	Surface	Tollante	15	33	3	2				10	1	1		< <u>1</u>	3	(10)
MA05	Surface	Monzogranite	25	37	22	5				2	8	<1	<1	<1		
MA06	Surface	Tonalite	30	50	5	5	3	1					1	1	3	Cal (1)
MA07	Surface	Monzogranite	30	30	30	5					2		1	1	1	
MA08	Surface	Granodiorite	30	40	15	5	3			1			1	1	4	
MA09	Surface	Tonalite	30	55	5	2	2			1			1	1	1	Sph (1)
					-											FI (1)
MA10	Surface	Diorite/Gabbro/		50	5		10	15			1		1		5	Grd mas
MA11	Surface	Cranadiarita	20	FO	10	2	10	2			2		1		2	(13)
MA11 MA12	Surface	Delorito	20	40	20	۲ ۲	10	10		1	2		1		2	
MA12 MA13	surface	Monzogranite	20	24	30	10	7	10		1	3		1		3	
MAIJ	Suilace	Diorite/Cabbro/	20	24	34	10	/				5		1		1	(a) (6)
MA14	surface	Anorthite		63			24			5						Fl(2)
MA15	surface	Monzogranite	30	25	35		7			1	1				1	(2)
MA16	surface	Monzogranite	32	31	30					-	-	5			2	
MA17	surface	Quartz diorite	5	60			25			2	4	2			2	
MA18	surface	Monzogranite	20	30	25	15				2	7				1	
MA19	surface	Monzogranite	25	25	34		8		2	3	2				1	
MA20	£	C	25	10	20		2			2	2				1	Grd mas
MAZU	surrace	syneogranite	25	10	20		2			2	2				1	(38)
MA21	surface	Monzogranite	23	35	30				4	5	2				1	
MA22	surface	Syneogranite	40	10	30		10				9				1	
MA23	surface	Diorite/Gabbro/		60				20		2	8				4	Vol gls (6)
		Anorthite	0.5				1.0			-	Ľ.					, o. p.s (o)
MA24	surface	Syneogranite	35	15	35		10				4				1	
MA25	surface	Mozonite	30	25						1	3				3	Chld (38)
MA26	surface	Monzogranite	35	20	35		6				3				1	
MA27	surface	Monzogranite	35	30	20		10		2	2	1				1.0	0.1.(0)
MA28	surface	Diorite/Gabbro/		35			30	15			8				10	Cal (2)
MADO	aurfoaa	Anortnite	25		E	2	0			2				1	2	
MA29	surrace	Tomalite	25	55	5	۲ ۲	ð			۲ ۲			2	1	2	
MA30 MA31	surface	Tonalite	20	60	5	5	E			5			2	1	2	
MA31	surrace	i onalite Diorito /Cabbro /	20	60	5	5	5			2				1	2	
MA32	surface	Anorthite		45			30	4		10			1		10	
MA33	surface	Tonalite	20	60	5	5				5			2	1	2	
MA34	surface	Tonalite	20	60	5	5				8			4	1	1	
MA35	surface	Monzogranite	44	20	25	5				0	5			1	1	
MA36	surface	Granodiorite	28	40	15	3					10		1	1	2	
MA37	surface	Monzogranite	30	25	25	10					6		1	1	2	

註: Qtz: quartz;Plag: plagioclase; K-feld: K feldspar; Bt: biotite; Hbl: Hornblende; Pyx: Pyroxene; Mus: muscovite; Ser: sericite; Chl: chlorite; Epi: epidote; Apt: apatite; Zrn: zircon; Opa: opaque minerals; Sph: sphene; Vol gls: volcanic glass; Cal: calcite; Fl: fluorite; Chld: chloritoid mineral; Grd mas: ground mass



圖 3-14:W區鑽井岩心與M區露頭岩石QAP岩性分類圖

註: (1a): Quartzolite; (1b): Quartz-rich granitoids; (2): Alkali-feldspar granite; (3): Syenogranite; (4): Monzogranite; (5): Granodiorite; (6): Tonalite; (7): Alikali-feldspar quartz syenite; (8): Quartz syenite; (9): Quartz monzonite; (10): Quartz-monzodiorite/monzogabbro; (11): Quartz-diorite/gabbro/anorthosite; (12): Alkali-feldspar syenite; (13): Syenite; (14): Monzonite; (15): Monzodiorite/Monzogabbro; (16): Diorite/Gabbro/Anorthite. 灰色方形:小坵嶼露頭岩石與鑽井岩心,礦物組成由岩石薄片鑑定獲得(李寄嵎, 2000,表 3)。 綠色方形:小坵嶼鑽井岩心,礦物組成由Norm計算獲得(林鎮國, 2000,表3-8)。 藍色實線區塊:K區鑽井岩心(謝佩珊與林蔚, 2012,附錄, c7p1-c7p58)。 藍色虛線區塊:H區鑽井岩心(謝佩珊, 2015,圖2-9, c2p27)。





圖 3-16:W區鑽井岩心與M區露頭岩石 SiO₂ vs.K₂O 圖



圖 3-17:W區鑽井岩心與M區露頭岩石

註:圖(A)為稀土元素分布圖;圖(B)為蛛網圖。



圖 3-18:W區岩心錯石鈾鉛定年結果圖



圖 3-19:W區小坵嶼岩脈定年結果與地質剖面示意圖 註:(A)W區小坵嶼岩脈定年資料(引用自李寄嵎(2000, pB2-B3));(B)DD'剖面圖重繪自林華

松(2000,圖版4),剖面位置如(A)所示。

3.3. 長期監測

3.3.1. 驗潮站監測地殼變動與絕對海水面變化

藉由建構臺灣地區絕對海水面觀測系統,可取得氣候變遷影響下 臺灣周緣海水面的變化數據,進而探討數十至百年時間尺度之海水面 變遷的影響機制。SNFD2017報告亦已說明臺灣周圍海域(100°E至 130°E與10°N至30°N之間),在1993年至2012年期間的絕對海水面變 化速率為4 mm/yr至5 mm/yr,上升速率大於全球海水面的上升速率 (郭重言等,2015,p4-15)。

105年度經海潮、逆氣壓以及基準偏移改正後的驗潮站資料中, 仍包含海水面變動與地表垂直變動訊號,因此計算成果係為相對於岸 邊基準點之海水面上升(Sea Level Rise, SLR)速率,顯示臺灣四周海域 相對海水面呈現上升情形。全部時間段資料計算的相對海水面速率平 均值為(3.51±0.19) mm/yr,其中橫瀾島為(19.33±2.26) mm/yr,約 為平均速率的5倍,原因為該站地表垂直變動所導致,因此各區域驗 潮站須搭配GPS觀測成果作為地殼變動分析需求,進一步提高絕對海 水面變化的精度。

106年度蒐集驗潮站與衛星測高的既有資料,利用改正數據計算 10年與20年的相對與絕對海水面升降變動速率。以AVISO衛星測高海 水面資料(1993年至2015年),計算臺灣附近海域絕對SLR速率,初步 瞭解臺灣附近海域絕對海水面幾乎皆為上升情形,整個臺灣附近海域 (10°N至30°N與110°E至130°E)之絕對SLR速率為(3.6±0.3) mm/yr,與 全球平均值3.2 mm/yr (Cazenave and Cozannet, 2014, p17)相近。若 以驗潮站資料計算絕對SLR速率時,所有潮位站資料皆經海潮、逆氣 壓效應、基準偏移以及地表垂直變動等改正,估算得絕對SLR速率平 均值為2.6 mm/yr,主要可能因潮位站位置分布不平均而造成此項差 異現象。

107年度除了持續進行相對與絕對海水面升降變動速率的計算, 同時利用臺灣少數幾座的驗潮站與GPS觀測站共站之觀測成果,進一 步分析驗潮站基準與GPS高程的差異,作為後續資料觀測與分析驗證 參考。說明如下:

- (1) 衛星測高與潮位觀測資料蒐集與整理
 - (a) 衛星測高資料
 - (i) 主要使用兩種AVISO衛星測高資料,分別為0.25°×0.25°
 月平均網格(grid)之海水面異常(sea level anomalies)資料,以及衛星沿軌跡點測高海水面異常資料。
 - (ii) 網格資料主要結合ERS-1/-2、Envisat、Saral/AltiKa、 Cryosat-2、Topex/Poseidon (T/P)、Jason-1/2 (J-1/2)、 GFO及HY-2A等衛星測高資料;沿軌跡點衛星測高資料 將包含T/P及Jason-1/2等資料(測高衛星相關資料如表 3-3所示)。
 - (b) 潮位觀測資料

潮 位 觀 測 資 料 主 要 使 用 平 均 海 水 面 永 久 服 務 中 心 (Permanent Service for Mean Sea Level, PSMSL) 16個潮位站 資料(如表 3-4),以及Lan et al. (2017, p1)分析中央氣象局 19個潮位站資料(詳如表 3-5)。

(2)海水面變動速率擬合計算 相對於岸邊基準點之海水面變化速率,利用6參數擬合公式(3-1) 擬合海水面變化,並以最小二乘法解算未知參數,估算出相對海 水面升降變動速率(郭重言等,2015,c4p11)。

$$SL(t) = a + bt + csin(2\pi t) + dcos(2\pi t) + esin(4\pi t)$$

+ fcos(4\pi t) (3-1)

其中,

SL:為衛星測高或潮位站觀測海水面高度變化之時間序列, [mm/yr]。

由於衛星測高所觀測海水面高度不受固體地球變形之影響,為相對於參考橢球之絕對量,可視為絕對海水面之變動速率;而潮位 站資料需經地表垂直變動改正後,為相對於各自參考基準之絕對 量。因此,利用公式(3-1)可擬合改正後之衛星測高與地表垂直變 動改正後的潮位站資料,進一步估算出臺灣附近海域絕對海水面 變化速率。

- (3) 衛星測高資料分析與應用
 - (a) 依據潮位站與衛星測高沿軌跡點間之距離,以加權平均(距離倒數平方)方式,可計算潮位站周圍半徑(經緯度2°範圍內)的測高資料平均值,作為該潮位站之海水面高度(Lan et al., 2017, p4)。
 - (b)利用公式(3-1)擬合衛星測高海水面高,可計算出臺灣附近海域的絕對SLR速率;比較衛星測高網格資料與距離加權平均潮位站2°內之測高沿軌跡點資料(如圖 3-20所示)所得的絕對SLR速率,其結果十分相近。後續利用衛星測高沿軌跡點的資料,與潮位觀測資料的相對SLR速率,計算各潮位觀測站的垂直變動速率。
- (4) 相對海水面變動速率
 - (a) 潮位觀測資料處理

潮位觀測站的數據受到日月引力與大氣壓力影響,亦受到人為造成基準偏移的影響,計算水面升降變動速率時,需改正海潮、逆氣和基準不一致等效應。因此,根據Lan et al. (2017, p5)之潮位站資料處理方法,依序進行海潮、逆氣壓、基準偏移以及地表垂直變動等改正。資料處理則利用調和分析法(harmonic analysis) (Schwartz, 2005, p990)分析海潮,將主要已知週期的潮汐影響去除,包括半日潮汐(semidiurnal tide)、全日潮汐(diurnal tide)、以及年週期的長期潮汐等。

此外,亦須將海水面變化受到颱風或其他突發瞬變氣象之「異常值」逐一剔除(Wunsch and Stammer, 1997, p79)。

(b) 相對海水面變動速率計算成果

各區域潮位站相對SLR速率如表 3-6及圖 3-21 (a)所示,各 資料皆已進行海潮效應、逆氣壓效應以及基準偏移等改正; 綜合海水面變化與地表垂直變動訊號,則可利用公式(3-1)擬 合計算相對SLR速率。相對SLR速率為綜合海水面變化與地表 垂直變動量,計算相對SLR速率更能夠瞭解實際海岸地區海 水面變動程度。臺灣附近海域相對海水面皆呈現上升情形, 臺灣東部海域(區域I)、香港海域(區域III)以及日本海域(區 域V)相對SLR速率約為2.3 mm/yr至3.5 mm/yr,而臺灣西部 海域(區域II)與菲律賓(區域IV)相對SLR速率分別為12.2 mm/yr與6.0 mm/yr,造成相對速率大於其他海域的原因為 臺灣西南部沿岸地表沉陷嚴重,及臺灣周圍絕對SLR速率隨 位置靠近赤道(緯度越小)而增加的影響。

- (5) 絕對海水面變動速率
 - (a)臺灣周圍絕對SLR速率如表 3-6、圖 3-20與圖 3-21 (b)所示,顯示衛星測高與潮位站資料估算絕對SLR變化趨勢非常一致,臺灣附近各海域絕對海水面變化皆呈現上升情形,且絕對SLR速率由北往南逐漸增加。
 - (b)臺灣附近海域絕對海水面皆呈現上升情形,臺灣東部海域 (區域I)、臺灣西部海域(區域II)、香港海域(區域III)以及日 本海域(區域V)絕對SLR速率約為1.8 mm/yr至2.8 mm/yr;而 菲律賓(區域IV)絕對SLR速率為4.9 mm/yr,顯示臺灣南方海 域絕對SLR速率較北方海域為大。
 - (c)臺灣海域海水面容易受到氣候變化之年際(El Nino Southern Oscillation, ENSO;又稱「聖嬰現象」)或年代際(Pacific Decadal Oscillation, PDO;又稱「太平洋年代際振盪」)變動 等因素影響(Zhang and Church, 2012, p5)。可使用兩個氣候 指標分別為南方振盪指數(Southern Oscillation Index, SOI)

與PDO指數,分析臺灣海水面變化與ENSO及PDO現象之相關 性;這兩個指數皆與海水面氣壓、信風(trade winds)和海水 溫度變化有關;特別是西太平洋的海水面變化受到信風與海 水溫鹽變動造成海水密度的變化,所以當西太平洋海水面上 升時,SOI與PDO指數分別顯示出正或負的變化趨勢;此結果 意味著低頻氣候震盪對臺灣周遭海域的海水面影響相當顯 著,而趨勢變動主要是受PDO現象影響(Cheng et al., 2016, p3125)。

- (6) 和平港潮位與GPS連續觀測站共站觀測系統初步成果
 - (a) 和平港潮位觀測資料已累積近19個月,初步分析各分潮振幅、相位等資料,可辨識該地區潮型(tidal type)屬於以半日 潮為主的混合潮型。
 - (b) 和平港潮位站觀測自2017年4月設置迄今,最高潮位發生在 2018年8月12日6時12分,水位為1.609m;最低潮位發生在 2018年1月31日18時15分,水位為-1.172m;最大潮差約 2.291m。上述潮汐水位高程系統採用內政部2001臺灣高程 基準(TaiWan Vertical Datum 2001,簡稱TWVD 2001)。
 - (c)利用和平港潮位近19個月觀測資料,估算平均相對海水面變動速率為79.0 mm/yr。
 - (d) 以2017年4月至2018年1月為觀測期距,分析和平港GPS連續 觀測站高程變化時序資料,估算地表垂直變動速率為(-6.0) mm/yr。因2018年2月6日發生花蓮地震,震後地表變形不確 定是否已恢復穩定,故僅以上述期距進行分析。
 - (e)絕對海水面變化速率可經相對海水面變化速率扣除地表垂 直變動速率獲得,但和平港地區之潮位觀測期距僅1.5年,考 慮地球、月球與太陽公轉的天文特性,需要更長的期距時間, 方可估算合理的海水面變化速率。
- (7) 驗潮站與GPS觀測站共站資料分析
 - (a) 國內現有驗潮站與GPS觀測站共站的觀測站,分別為龍洞
 (Longdong; LD)、蘇澳(Su-ao; SA)、富岡(Fugang)與高雄港

(Kaohsiung)等4站(如表 3-7所示)。分析潮位與GPS的共站 觀測資料顯示,由GPS觀測資料所獲得之垂直向變動速率, 4站皆為沉陷趨勢,其中以蘇澳站有較大的沉陷速率,其相 對海水面變動速率也有較大的上升速率。比對GPS垂直向變 動速率與絕對海水面變動速率顯示,除富岡站較為接近外, 其他3站皆有較大差異,主要為垂直變動的修正量所導致。 因潮位站觀測期距較長,而GPS觀測資料期距較短,特別是 在2012年至2015年間整體GPS垂直速度場有變大的趨勢,導 致計算後的絕對海水面變化速率也變大。

(b) 整體而言,共站觀測為直接取得兩種觀測數據的方法,換算 相對海水面變動速率至絕對海水面變動速率時,理論上可行 且合理,但目前可供計算分析的共站資料期距有限,且易受 短期時間內垂直變動速率異常之影響,進而高估絕對海水面 之變動速率。

住日日红	加制器公	發射時間	告告:当告(よ)		
闻生石柵	研发单位	發射時間	結束時間	】 里夜岘州(八)	
ERS-1	ESA	1991/07	2000/03	3; 35; 168	
T/P	NASA/CNES	1992/08	2006/01	9.9156	
ERS-2	ESA	1995/04	2011/07	35	
GFO	U.S.Navy	1998/10	2008/11	17	
Jason-1	NASA/CNES	2001/12	2013/07	9.9	
Envisat	ESA	2002/03	2012/04	30; 35	
Jason-2	NASA/CNES	2008/06	Present	9.9	
Cryosat-2	ESA	2010/04	Present	369 dasys with 30 day sub*cycle	
HY-2	CAST	2011/08	Present	14; 168	
Altika/Saral	CNES/ISRO	2013/02	Present	35	

表 3-3: 測高衛星相關資訊

註1:衛星測高取自法國衛星海洋數據存檔、驗正與解釋資料中心(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic, AVISO) (http://www.aviso.oceanobs.com/en/).

註2: ESA= European Space Agency

註3: CNES= Centre National d'Etudes Spatiales (French space agency)

註4: ISRO= Indian Space Research Organisation

註 5 : NASA= National Aeronautics and Space Administration

註 6 : CAST= Chinese Academy of Space Technology

Country		Station name	Station ID			Data period		
Country	Ch.	Eng.	Abbr.	Station ID.	LOU(Lat(°)	RLR	Metric
	閘坡	Zhapo	ZP	610002	111.8	21.6	1959-2015	1959-2015
	西沙	Xi Sha	XS	610004	112.3	16.8	1990-2012	1989-2012
	坎門	Kanmen	KM	610016	121.3	28.1	1959-2015	1959-2015
	橫瀾島	Waglan Island	WGI	611007	114.3	22.2	1994-2015	1994-2015
China	鰂魚涌	Quarry Bay	QB	611010	114.2	22.3	1986-2015	1986-2015
	大廟灣	Tai Miu Wan	TMW	611012	114.3	22.3	1997-2015	1997-2015
	大浦滘	Tai Po Kau	ТРК	611014	114.2	22.4	1963-2015	1963-2015
	尖鼻咀	Tsim Bei Tsui	TBT	611017	114.0	22.5	1974-2015	1974-2015
	石壁	Shek Pik	SP	611023	113.9	22.2	1998-2015	1998-2015
	內斯	Nase	NS	646003	129.5	28.5	1981-2015	1981-2015
	中之島	Nakano Sima	NKNS	646011	129.9	29.8	1984-2015	1965-2015
Japan	沖繩	Okinawa	OKNW	646021	127.8	26.2	1975-2015	1975-2015
	那霸	Naha	NH	646024	127.7	26.2	1966-2015	1966-2015
	石垣島	Ishigaki	IGK	646042	124.2	24.3	1986-2015	1986-2015
Dhilippinog	黎牙實比	Legaspi	LGSP	660021	123.8	13.2	1947-2015	1947-2015
Philippines	宿霧	Cebu	СВ	660101	123.9	10.3	1935-2015	1935-2015

表 3-4:臺灣附近海域PSMSL資料庫之潮位站資訊

資料來源: Holgate et al., 2013, p493。

	Station name		Station	Record	Loca	ation	Doriod	
Ch.	Eng.	Abbre.	no.	(minutes)	Lat.	Long.	Fellou	
			1511	60	25.16	121.74	1991/01-1995/03	
			151	6	25.16	121.74	1995/04-2000/12	
基隆	Keelung	KL	1514	6	N/A	N/A	2003/01-2004/12	
			1513	6	25.16	121.74	2005/01-2006/07	
			1516	6	25.16	121.75	2006/08-2015/12	
龍洞	Longdong	LD	1226	6	25.10	121.92	2001/05-2015/12	
插社	Congfang	CE	153	60	24.89	121.87	1976/09-2002/12	
仪机	Genglang	UI.	123	6	24.89	121.87	1996/05-2008/05	
葒澜	Su-20	SA	124	6	24.59	121.87	1991/11-2005/10	
林庆	5u-a0	ЪЛ	1246	6	24.59	ion Perio Long. 121.74 1991/01-19 121.74 1995/04-20 N/A 2003/01-20 121.74 2005/01-20 121.75 2006/08-20 121.74 2005/01-20 121.75 2006/08-20 121.75 2006/08-20 121.87 1976/09-20 121.87 1996/05-20 121.87 1991/11-20 121.87 1991/06-20 121.87 1991/06-20 121.83 1993/03-20 121.19 1976/10-20 121.19 1976/10-20 121.19 2001/01-20 121.19 2001/01-20 121.19 2001/01-20 121.50 1992/07-20 120.75 1906/05-20 120.75 2007/01-20 120.71 2001/01-20 120.72 1001/01-20 120.71 2001/01-20 120.71 2001/01-20 120.72 2004/03-20 120.74 <td< td=""><td>2005/10-2015/12</td></td<>	2005/10-2015/12	
た 庙	Huplien	н	125	6	23.98	121.62	1991/06-2003/09	
化进	nualien		1256	6	23.98	121.62	2003/12-2015/12	
式功	Changgong	СНС	127	6	Lat.Long.25.16121.7425.16121.7425.16121.7425.16121.7525.10121.8724.89121.8724.89121.8724.59121.8723.98121.6223.98121.6223.98121.6223.98121.8724.59121.8723.98121.6223.98121.6223.98121.6223.99121.3822.79121.9922.06121.5022.05120.7521.95120.7521.95120.7521.95120.7521.99120.7122.46120.4422.61120.29N/AN/A23.41120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.45120.1423.62120.1423.62120.1423.62120.1423.62120.1423.62120.1423.62120.1423.62120.1423.62120.5324.29120.5324.29120.5324.29120.5324.29120.5324.29120.5324.29120.5324.29120.4425.17121.24 <td>121.38</td> <td>1993/03-2005/12</td>	121.38	1993/03-2005/12	
成功	Chenggong	CIIU	1276	6	23.10	121.38	2002/01-2015/12	
宣国	Fugang	FG	158	60	22.78	121.19	1976/10-2002/09	
田间	Tugang	IU	1586	6	22.79	121.19	2001/01-2015/12	
繭嶼	Lanvu	LY	139	6	22.06	121.50	1992/07-2007/09	
刷子	Lanyu		1396	6	22.06	121.51	2007/01-2015/12	
後壁	Houbibu	UDU	119	6	21.95	120.75	1996/05-2007/11	
湖	moubillu	IIDII	1196	6	21.95	120.75	2007/01-2015/12	
蟳廣	Syunguang	0.07	149	60	21.99	120.71	1976/08-2002/09	
嘴	zui	202	1496	6	21.99	120.71	2001/01-2015/12	
東港	Donggang	DG	118	6	22.46	120.44	1998/03-2003/07	
			1186	6	22.47	120.44	2003/12-2015/12	
古井	Kaahajung	VC	148	60	22.62	120.28	1987/01-2006/08	
同姓	Kaonsiung	K3	1486	6	22.61	120.29	2004/03-2014/12	
收軍	liangiun	IC	146	60	N/A	N/A	1979/01-2001/09	
府平	Jiangjun	Ju	1176	6	23.21	120.08	2002/01-2015/12	
			116	6	23.44	120.14	1993/01-2004/08	
東石	Dongshi	DS	1162	6	23.45	120.14	1999/03-2012/02	
			1166	6	23.45	120.14	2012/02-2015/12	
担法	Wengang	WC	1361	60	N/A	N/A	1963/02-2002/05	
-m 16-	wengang	wu	1366	6	23.47	120.12	2003/01-2015/12	
澎湖	Penghu	рн	135	6	23.56	119.57	1991/06-2007/11	
12/10/	Tengnu	1 11	1356	6	23.56	119.58	2007/11-2015/12	
箔子	Poriliao	D71	115	6	23.62	120.14	1995/04-2004/06	
寮	DUZIIIAU	DLL	1156	6	23.62	120.14	2004/08-2015/12	
臺中港			1433	10	24.29	120.53	1993/02-1997/06	
	Taichung	TCD	143	6	24.29	120.53	1997/07-1999/10	
	Port	ILP	1434	6	24.29	120.50	2001/07-2004/12	
			1436	6	24.29	120.53	2004/01-2015/12	
新竹	Hsinchu	HSC	112	6	24.85	120.92	1992/05-2015/12	
77. 151	Ilara '	11.47	111	6	25.12	121.24	1992/10-2007/12	
竹闺	Jnuwei	JVV	1116	6	25.12	121.24	2007/01-2017/11	
ink de	T	ΠC	110	6	25.17	121.42	1991/06-1995/10	
沃尔	Tainsul	15	1102	6	25.18	121.42	1999/06-2015/12	

表 3-5:臺灣附近海域中央氣象局提供之潮位站資訊

資料來源:整理自郭重言等人,2016,c2p12;郭重言等人,2017,c2p8;Lan et al.,2017,p4。

註:N/A為資料中未展示之數據。
-		Absolute Sea	Relative Sea	Vertical Land
Area	Station Name	level trend	level trend	Motion Rates
		(mm/yr)	(mm/yr)	(mm/yr)
	Keelung	2.7 ± 0.3	1.2 ± 0.3	1.5 ± 0.5
Area I	Longdong	1.6 ± 0.6	4.1 ± 0.6	-2.5 ± 0.9
	Gengfang	3.5 ± 0.6	-0.8 ± 0.6	4.2 ± 0.7
	Su-ao	1.1 ± 0.4	6.3 ± 0.4	-5.2 ± 0.5
	Hualien	-0.5 ± 0.5	5.7 ± 0.5	-6.2 ± 1.0
	Chenggong	1.3 ± 0.4	3.4 ± 0.4	-2.1 ± 0.9
	Fugang	2.9 ± 0.4	1.1 ± 0.4	1.8 ± 0.5
	Lanyu	1.9 ± 1.1	2.2 ± 1.1	-0.4 ± 0.7
	Ishigaki	2.0 ± 0.6	1.6 ± 0.6	0.3 ± 0.3
	Kanmen	3.2 ± 0.6	4.5 ± 0.6	-1.3 ± 0.6
	Houbihu	1.6 ± 0.8	19.4 ± 0.8	-17.8 ± 1.3
	Syunguangzui	2.4 ± 0.4	12.7 ± 0.4	-10.3 ± 0.6
	Donggang	2.8 ± 0.7	8.5 ± 0.7	-5.7 ± 0.7
	Kaohsiung	2.7 ± 0.4	2.1 ± 0.4	0.6 ± 0.4
Area II	Jiangjun	2.5 ± 0.5	5.6 ± 0.5	-3.1 ± 0.5
Altali	Dongshi	2.4 ± 0.5	33.4 ± 0.5	-31.0 ± 0.7
	Wengang	1.8 ± 0.6	25.3 ± 0.6	-23.5 ± 0.9
	Penghu	2.2 ± 0.4	-3.4 ± 0.4	5.6 ± 0.4
	Boziliao	2.1 ± 0.6	28.9 ± 0.6	-26.8 ± 0.9
	Taichung Port	3.7 ± 0.5	7.6 ± 0.5	-3.9 ± 1.1
	Hsinchu	2.8 ± 0.4	1.8 ± 0.4	1.0 ± 1.1
	Zhapo	2.4 ± 0.6	2.0 ± 0.6	0.4 ± 0.5
	Xi Sha	5.7 ± 0.6	5.0 ± 0.6	0.6 ± 0.2
	Waglan Island	2.7 ± 0.9	13.3 ± 0.9	-10.6 ± 0.8
Anoo III	Quarry Bay	2.3 ± 0.6	1.7 ± 0.6	0.5 ± 0.5
Alea III	Tai Miu Wan	2.1 ± 1.1	2.3 ± 1.1	-0.2 ± 1.0
	Tai Po Kau	2.5 <u>+</u> 0.6	2.3 ± 0.6	0.2 ± 0.5
	Tsim Bei Tsui	2.4 ± 0.7	2.0 ± 0.7	0.5 ± 0.6
	Shek Pik	2.2 ± 0.8	-0.9 ± 0.8	3.2 ± 0.7
Area IV	Legaspi	4.8 ± 0.6	6.6 ± 0.6	-1.8 ± 0.4
Area IV	Cebu	5.0 ± 0.6	5.4 ± 0.6	-0.4 ± 0.8
	Nase	1.7 ± 0.5	1.5 ± 0.5	0.2 ± 0.3
Aron V	Nakano Sima	2.5 ± 0.4	3.3 ± 0.4	-0.8 ± 0.4
Aled V	Okinawa	2.7 ± 0.5	2.1 ± 0.5	0.6 ± 0.3
	Naha	2.4 ± 0.5	2.3 ± 0.5	0.1 ± 0.2

表 3-6:臺灣附近各海域絕對、相對	對SLR速率與地表垂直變動速率
--------------------	-----------------

註1:區域I為臺灣東部海域、區域II為臺灣西部海域、區域III為香港海域、區域 IV為菲律賓海域、區域V為日本海域。

註2:資料來源為中央氣象局潮位站資料。

表 3-7:臺灣現有潮位與GPS共站觀測相對、絕對SLR變動速率一覽表

Station Name	Tidal Data Period	Relative Sea level trend (mm/yr)	Vertical Land Motion Rates (mm/yr)	GPS Data Period	Absolute Sea level trend (mm/yr)
Longdong	2001-2015	4.1 ± 0.6	-0.8 ± 0.2	2003-2015	4.9
Su-ao	1997-2015	6.3 ± 0.4	-4.9 ± 0.1	2002-2015	11.2
Fugang	1993-2014	1.1 ± 0.4	-2.0 ± 0.1	2003-2018	3.1
Kaohsiung	1993-2014	2.1 ± 0.4	-2.8 ± 0.1	2004-2018	4.9

註: 垂直變動速率摘自GPSLAB(http://gps.earth.sinica.edu.tw/main.jsp)。



圖 3-20:臺灣附近海域之衛星測高SLR速率(1993年至2015年)。 註:背景圖為AVISO測高網格資料所估算,圓圈為加權平均潮位站2°範圍之沿軌跡點測高資料,根據測站與沿軌跡點間之距離,以加權平均(距離倒數平方)方式,平均潮位站周圍半徑經緯度2°範圍內的沿軌跡點測高資料。



圖 3-21:臺灣附近各海域SLR速率分析圖 註1:(a)臺灣附近各海域相對SLR速率;(b)臺灣附近各海域絕對SLR速率 註2:平均區域內潮位站估算之SLR(1993年至2015年) 註3:區域I為臺灣東部海域、區域II為臺灣西部海域、區域III為香港海域、區域IV為菲律賓海 域、區域V為日本海域。

3.3.2. 構造活動性微震監測與分析

地震活動所產生的震波訊號,可供探討地質圈破裂或斷層錯動位 置及空間分布。掌握斷層位置的空間分布,或是在地表下發生錯動位 置,係為處置區域評選或處置工程設計所需的關鍵資訊。因此,處置 場址的篩選及建造,必須明確瞭解活動斷層帶的分布及區域應力環境 可能引發之岩體破裂(地震)模式,以避斷層活動損及多重障壁及坑道 的功能。本項目工作利用本島結晶岩測試區微震監測網,蒐集微小地 震觀測資料,可據以解析鄰近不同區域震源機制的差異,進而計算地 震活動破裂尺度,藉由地震觀測成果瞭解大地應力的轉變。此外,亦 蒐集臺灣海峽及西部離島記錄的地震數據,進行震源機制研析,提供 不同地體構造間孕震環境的差異,建立候選場址評選與核定階段所需 基礎資訊。

SNFD2017報告中已針對本島結晶岩測試區的地震特性說明相關 研究成果,顯示結晶岩體屬於地震頻率較低的區域,且震源機制解顯 示深度小於10 km的地震,大多為張裂型式的正斷層所引起的地震。 107年度持續利用本島結晶岩測試區之微震監測網,並且整合國內研 究單位的微震觀測站之觀測資料,探討本島結晶岩測試區之地殼活動 構造特性,說明如下:

(1) 本島結晶岩測試區地質背景介紹

臺灣未來百萬年之地體構造體系,在地質時間尺度地推演下,可 以合理地預期仍會受東北部的琉球島弧系統、南部的北呂宋島弧 系統、菲律賓海板塊之西北向的持續性移動,及其移動所產生的 北呂宋島弧與歐亞板塊的弧陸碰撞造山運動(north Luzon arc and Eurasian continent Arc-Continent collision, LEAC Orogeny) 所影響(林鎮國等, 2017, ch3.1.3.1)。

(a)本島結晶岩測試區內出露6個面積較大的結晶岩體,由北至 南可分為源頭山、奇瑤谷、和平、飯包尖山、溪畔及開南岡 等(如圖 3-22所示)。結晶岩體周圍的圍岩主要為片岩、大理 岩、角閃岩及變質砂岩等,如源頭山岩體北側與大理岩及角 閃岩相接,南側與片岩及變質砂岩相接,飯包尖山岩體侵入

到片岩及變質砂岩中,溪畔岩體的圍岩為大理岩,開南岡岩 體及和平岩體與大理岩、片岩或變質砂岩相接(林鎮國等, 2017,c3p144)。

- (b)在此複雜的板塊邊界擠壓或拉張的應力環境隨時空演變下, 脆性地質材料將因而產生破裂行為,亦即斷層活動,進而產 生地震叢聚的現象。
- (2) 本島結晶岩測試區之震源機制與應力反演

為掌握本島結晶地區地震震源特性,透過分析地震觀測訊號,可 進一步推測出未知斷層的破裂面位態和震源的受力型態;而大地 應力狀態的時空變化往往反映出背景地震活動和地形上的改變, 因此可藉由地震資料間接探討大地應力場的變化。

- (a) 震源機制解與大地應力方向
 - (i) 透過微震監測網所觀測之震波訊號,採用P波初達波相 極性法(first motion polarity)計算震源機制解,若初達 波相數量較少或分布不均時則採用波形求解(Zhu and Helmberger, 1996, p1634-p1641)及格點搜尋(grid search method)方法,找出所有可能解與真實波形進行 比對,以逆推震源機制解之最佳解。
 - (ii) 參考Robinson and Mcginty (2000, p16140-16149)方法,將所有斷層面解透過隨機重複取樣以推估信賴區間,分別計算最大、最小主應力之方向角和傾角分布, 即可得到最佳應力解之95%信賴區間,並加入庫倫破壞 準則(Coulomb failure criterion)應力軸方向、破裂面和 摩擦係數之間的關係以獲致最可能之斷層面。
- (b) 區域震源機制與應力反演結果

區域震源機制解與應力反演分區結果如圖 3-23所示,依據 重定位結果將震源分布特性劃分5區,區域應力反演結果彙 整如表 3-8所示,說明如下:

(i) I區所得最適斷層面解為接近東北-西南向之正斷層,與
 過去觀測結果一致,推測I區造山運動淺部地塊可能伴

隨著正斷層發育,且與I區所在之地震深度位置較淺有 很好的吻合;

- (ii) II區所得最適斷層面解為右移斷層,推測II區可能存在 舊有斷層系統,導致斷層兩側速度不一致所產生的地震 活動;亦或是次生斷層系統,則須更多的證據進行佐證;
- (iii) III區所得最適斷層面解為逆衝斷層; IV區所得最適斷層面解為走向滑移斷層,與重定位震源排列之主要線性一致,推測為塊體旋轉所導致;
- (iv) V區所得最適斷層面解為走向滑移斷層(Strike=207.9°, Dip=79°, Rake=-37°),可能反映美崙斷層活動特性。
 - (v)綜整區域震源機制解與其分布深度之關係(如圖 3-24 所示),利用東西方向的剖面呈現區域震源機制解之成 果,顯示此區域震源機制解多分布於深度0km至30km 之間。
- (3) 臺灣海峽區域的震源機制分析
 - 為提升寬頻地震觀測網之包覆性, 地震目錄分別取自Wu et al.(2008, p1471)、陳硯歆(2010, p45-p46)與中國地震臺網中心 及中央氣象局, 1996年至2016年發生於臺灣海峽間芮氏規模大 於3.5的地震事件; 1996年之前的震源機制則參考陳硯歆(2010, p45-p46)及Kao and Wu (1996, p16)之研究成果。
 - (a) 震源機制分析結果

臺灣海峽區域震源機制解在逆推時均經過等級篩選,扣除誤差過大的解並與自動解交互比對後,最終得到可信賴的震源機制26筆,輔以14筆全球中心地震矩張量(Global Centroid Moment Tensor, GCMT)和陳硯歆(2010, p45-p46)及Kao and Wu (1996, p16)的研究成果,繪製臺灣海峽震源機制分布如圖 3-25所示。

(i) 顯示臺灣海峽區域地震主要為40 km內淺層地震,部分 震源發生在過去曾有大地震活動的構造上,並具有一致 的斷層面解。

- (ii) 臺灣海峽西南地區自1991以來的地震活動幾乎都是10km至16 km深的正斷層錯動,斷層面以東西走向為主。
- (iii)臺南濱海區域地震分為極淺層(10 km以內)與淺層(10 km至20 km間)兩種震源模式,極淺層震源以走向滑移為主(如地震1999/07/01);淺層震源則為東北-西南走向的正斷層型態,過去此區濱海處少有淺源正斷層地震發生。
- (iv) 苗栗外海在2015年有一起地震序列發生,主餘震序屬於帶有走向滑移分量的逆斷層。就整體臺灣海峽而言,苗栗外海是相當寧靜的區域,過去苗栗外海區域地震非常稀少,此次地震因規模小而後續餘震分布又不明確,尚無法對該區域的斷層面做出明確的判斷。
- (V) 福建地區與海峽西側福建沿海尚有零星的地震,這些震 源機制有正斷層、走向滑移形式,沒有特定的型態。根 據黃昭與王善雄(2006,p18)研究福建地體構造顯示, 除了平潭海外段從第三紀正斷層斷裂轉為逆斷層活動 以外,整體濱海斷裂帶是以走滑運動為主。
- (b) 區域地震應力軸分布型態

將臺灣海峽震源機制解結合Jian et al. (2018, p1)對陸上地震 逆推結果統整轉換為地震P軸與T軸水平投影,探討應力空間 分布與特徵(圖 3-26(b)&(c))。顯示大尺度上地震P軸應力 與全球地殼應力場及古應力、現地應力及地震應力方向趨勢 近似(圖 3-26(a)&(b)),不同地質構造區應力方位稍有角度 偏轉變化。臺灣西岸到臺灣海峽中線之間大致呈現南北向伸 張,特別是臺灣海峽西南區域,幾次大地震的T軸應力也皆 為南北方向,與該處地函為南北向流動有關(Kao and Wu, 1996, p26; Zheng et al., 1998, p283);海峽中線至大陸沿海 則轉向凌亂(圖 3-26(b)&(c))。顯示現今臺灣海峽T軸應力 主要受控區域構造的影響,大尺度上菲律賓海板塊擠壓的影 響則向西逐漸減弱。 (4) 本島結晶岩測試區震源尺度分析

透過地震歷時、振幅與波形等資訊,針對本島結晶岩測試區鄰近 斷層震源參數進行推估,以瞭解潛在的斷層有效斷層面尺度,進 而評估斷層錯動時可能影響的程度。以下分別針對小型與中大型 地震進行地震破裂尺度分析說明:

(a) 小型地震破裂尺度分析

針對小型地震震源尺度分析目的,選用2014年1月至2015年 6月微震監測網所紀錄3,053個小地震,進行觀測頻譜擬合與 震源破裂尺度分析。將本島結晶岩測試區地震與 Abercrombie (1995, p24029)之地震矩、拐角頻率與破裂半 徑關係比較(圖 3-27 (a)&(b)),本島結晶岩測試區地震拐角 頻率因資料採樣點與觀測頻譜擬合限制解析頻率為2 Hz至 40 Hz,約對應地震矩10¹² Nm以上之範圍(圖 3-27 (a))。破 裂半徑分布範圍同樣以40 Hz為限制解析頻率,破裂半徑分 析區間則由數十公尺至數百公尺之間,小於20 m則無法解析 (圖 3-27 (b))。以地震矩大於10¹² Nm的1,098個地震事件進 行應力降分析,獲致平均值為71 bar,考慮一個標準差,其 應力降的迴歸結果為17 bar至288 bar之間,與一般地殼型地 震之應力降30 bar相較,本島結晶岩測試區之地震所計算的 應力降較大(如圖 3-27 (c))。

(b) 中大型地震破裂尺度分析

分別針對全臺和本島結晶岩測試區中大型地震進行破裂尺 度與對應之應力降進行分析。全臺和本島結晶岩測試區 *M_L*>4.5之中大型地震(自1995年7月至2015年10月)發生次 數如表 3-9所示。參照Yen and Ma (2011, p471)之破裂尺度 經驗公式,描繪有效斷層破裂範圍並以側向深度剖面表示 (如圖 3-28)。為進一步瞭解本島結晶岩測試區地震的空間 分布(圖 3-28 (d)),於東西及南北方向分別繪製3條剖面, 深度為0 km至100 km,考慮剖面位置向外延伸2 km範圍內 之地震有效斷層破裂長寬。本島結晶岩測試區中大型地震多 分布於東側如剖面C-C'(圖 3-28 (e))及南側如剖面F-F'(圖 3-28 (f)),島內型地震的次數明顯少於島外型地震,而北側 如剖面D-D'則較無中大型地震發生。進一步利用地震矩的大 小及有效破裂面積計算其所對應之應力降範圍,全臺地震事 件之地震矩介於10¹⁵ Nm至10²⁰ Nm之間,而破裂面積則介 於0.5 km² 至4 km²,所對應之應力降則介於10 bar至1,000 bar 之間(如圖 3-29(a));本島結晶岩測試區之地震事件其 地震矩大小皆小於10¹⁸ Nm,而破裂面積皆小於2 km²,所對 應之應力降則約略介於100 bar至1,000 bar 之間(如圖 3-29(b))。

(5) 震源機率破裂模式分析

利用震源破裂機率模式分析方法,依據過去的地震活動紀錄,選 取所需的空間及深度範圍,並利用各種統計模型推算間震時間 (inter-event time)之更新模式後,再進一步利用此更新模式,參 照目前條件推算未來地震發生的條件機率,地震資料來源及參數 設定說明如下:

- (a)使用中央氣象局地震中心所發布之地震目錄,分別為1973年至2015年及1994年至2015年。研究範圍則分別為全臺地區
 (21°N至26°N,119°E至123°E)以及本島結晶岩測試區(24.1°N至24.6°N,121.3°E至121.9°E)。
- (b)考量氣象局在震源深度定位時所產生的實際誤差,參考前人研究(Wen et al., 2014, p321)評估模式,將「淺層地震活動」 定義為地表至地下40 km內的地震活動,另將地下35 km以 下的地震活動稱為「深層地震活動」,兩者中間有5 km的緩 衝帶以考量定位誤差。
- (c) 地震資料選用規模大於或等於下限值4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 及6.5進行分析。全臺地區及本島結晶岩測試區選取後的地 震個數統計如表 3-10所示。

- (d) 地震觀測資料使用各種不同的統計分布適配,並產生各部分的最佳適配模型之後,為了進一步選出最佳的適配模型,採用兩種統計量評估參數,分別為概似函數及均方根誤差 (root-mean-square error, RMS error),各自以能產生最大概 似函數值及最小均方根誤差值的模型為最佳的適配模型。
- (e)將適配評估結果採用顯著水準0.1進行假設檢定,並令「虛無假設」為「觀測資料的統計分布符合特定統計模型」。本島結晶岩測試區的更新模式中,「虛無假設」被否決的比例較使用全臺低,推測原因為範圍較小且構造相對相似,致使有較高的機會產生自相似的機制;當涵蓋範圍較廣時,無法輕易由單一統計模型描述。
- (f)為進一步縮小評估範圍,將本島結晶岩測試區的空間網格細分以建立取樣點,在垂直與水平方向間距皆為0.05°,並以每個取樣點為中心,上下左右各延伸0.05°作為同一方格的選取範圍,因此每一方格的邊長為0.1°,共產生120個方格再進行分析。經由分析顯示,以對數常態為最佳模式,且「有效網格」(地震個數大於5個)範圍依循震央位置,以沿海或海域範圍為主。
- (g) 淺層地震各規模下限之條件機率如圖 3-30所示,如下所述:
 - (i) 地震規模4.0以上,發生的條件機率在東半部多數區域
 未來1年內發生可達50%,5年內的條件機率達到80%以
 上;但西側區域在5年內則僅有40%。
 - (ii) 地震規模4.5以上,在1年內的發生機率僅宜蘭、花蓮交界的濱海地區達到50%,但東半部在5年內的發生機率 幾乎都達到80%或以上。
 - (iii) 地震規模5.0以上,在東半部未來5年內發生機率達到60%至80%。
- (6) 震源尺度分析與震源機率破裂模式分析之應用 利用本島結晶岩測試區之震源尺度分析結果,可評估此區域潛在 的有效斷層面尺度,進而評估斷層錯動時可能造成的有效破裂範

圍;震源機率破裂模式分析結果,則參照目前地震目錄估算本島
結晶岩測試區地震發生的條件機率,可用以瞭解潛在斷層的分布
及區域應力環境可能引發之岩體破裂(地震)模式。兩項分析結果
可用於對處置場址受斷層錯動(地震)事件之危害度風險評估。

參數	參數 最大應力軸		最小應力軸		最適斷層面解
區域	走向	傾角	走向	傾角	斷層型態
Ι	160°	46°	282°	27°	正斷層 (Strike: NE-SW)
II	154°	18°	60°	12.1°	右移斷層
III	104°	38°	306°	49.9°	逆斷層
IV	164°	12°	68°	26.2°	走向滑移斷層
v	142°	26°	246°	26.4°	走向滑移斷層 (Strike=207.9°, Dip=79°, Rake=-37°)

表 3-8:本島結晶岩測試區大地應力分區反演結果列表

註1:Strike為走向、Dip為傾角、Rake為斷層擦痕線理與水平的夾角。

註2:區域I至V為圖 3-23中所劃分之區域。

表:	3-9:	全臺與本	島結晶岩測試區	中大型地震(ML>	> 4.5)規模與發生次數表
----	------	------	---------	-----------	----------------

全臺地震目錄 (199507-201510)				
規模(ML)	次數(次)			
$4.5 < M_L \leq 5.0$	1146			
$5.0 < M_L \le 5.5$	413			
$5.5 < M_L \leq 6.0$	109			
6.0 < ML	87			
合計	1755 次			
本島結晶岩測試區地震	【目錄(199507-201510)			
規模(ML)	次數(次)			
$4.5 < M_L \leq 5.0$	116			
$5.0 < M_L \le 5.5$	31			
$5.5 < M_L \leq 6.0$	5			
$6.0 < M_L$	1			
	153 次			

	規模下限											
	4	.0	4.	5	5	.0	5.	5	6.	0	6.	5
					숲	臺						
時間	浚	深	浅	深	浚	深	淺	深	淺	深	浚	深
'73-'15	7970	2188	2735	805	848	292	214	93	79	24	25	9
'94-'15	4034	1457	1391	546	437	209	123	75	54	20	16	9
	本島結晶岩測試區											
'73-'15	558	113	184	39	44	17	10	1	2	0	1	0
'94-'15	373	83	118	23	22	10	6	0	1	0	1	0

表 3-10:全臺與本島結晶岩測試區中大型地震個數統計

註:「淺」表示為震源深度0 km至40 km;「深」表示為震源深度大於35 km。





資料來源:五十萬分之一臺灣地質圖,中央地質調查所(2000)。



圖 3-23:本島結晶岩測試區震源機制解與大地應力反演分區示意圖 註1:HPSN地震網有23站,自2015/1/1至2015/12/31重新定位後獲得5,952筆重 定位地震事件,並進行震源機制解的求取,得到3,011組地震機制解。 註2:依據重定位結果依震源分布特性劃分為5區,分別為I、II、III、IV及V區。 註3:藍色機制為正斷層,紅色機制為逆斷層,其餘綠色機制為走向滑移斷層。



圖 3-24:本島結晶岩測試區震源機制解東西方向投影剖面圖

註1:東西方向範圍與圖 3-23相同。利用圖 3-23之震源機制解結果,以不同深度分布的方式呈現。

註2:震源機制解藍色表示正斷層,紅色表示逆斷層,綠色表示走向滑移斷層。



Focal mechanism inversion results

圖 3-25:臺灣海峽區域震源機制逆推結果及位置分布

註1:以區域波形法針對1996年至2017年發生於西臺灣至臺灣海峽間芮氏規模大於3.5的地震事件,重新解算逆推出的震源機制結果(位置以彩色星號標示),加 上歷史目錄震源機制(實心圓圈標示)共有40個地震事件可供應力分析所使用。 黑色星號標示1604年與1999年大地震位置。

註2:震源機制球之顏色代表地震矩中心深度,球之大小與規模成正比。

註3:圓圈與星號之顏色代表逆推解算之初始參考震源目錄深度。



圖 3-26:臺灣海峽區域震源機制解之P、T軸水平投影分布與其他應力結果比較圖

註1:P為最大主應力軸向量,T為最小主應力向量。

註2: (a)為前人應力研究之結果比較。綠色線段標示井孔崩落資料之水平最大應力(SH) (Suppe et al., 1985, p9)、紅色線段為第四紀碰撞相關之古應 力(σ₁),資料取自Hu et al., (1996, p247)。咖啡色線段為全球地殼應力(SH)場(Heibach et al., 2010, p3)。

註3:圖(b)與圖(c)顯示121°E以西之地震P軸與T軸水平投影之方位(藍色線段),線段越短代表傾角越接近垂直,線段中心的實心圓為地震震央位置, 其顏色代表震源深度。咖啡色線段同圖(a),說明見註1。



圖 3-27:本島結晶岩測試區小型地震破裂尺度分析成果

- 註1:圖(a) 本島結晶岩測試區地震拐角頻率(f_c)與前人研究結果比較。紅色三角 形為本項目工作所使用之測試用地震,其拐角頻率由P波訊號所計算;黑色實 心圓與白色菱形分別為Abercrombie (1995, p24029)中,由P波與S波計算之拐 角頻率。
- 註2:圖(b)本島結晶岩測試區地震震源破裂半徑(r)與前人研究結果比較。紅色 三角形同註1;黑色實心圓為Abercrombie (1995, p24029)中,所計算之震源破 裂半徑;4條虛線分別代表應力降由0.1 MPa至100 MPa之應力降等值線。
- 註3:圖(c)本島結晶岩測試區地震大於10¹²Nm地震事件的冪律關係與經驗式迴 歸。黑色點為地震事件。紅色實線為平均應力降;藍色虛線為正負一個標準差 的應力降;錄色虛線為正負2個標準差的應力降。



圖 3-28:全臺與本島結晶岩測試區(M_L > 4.5)之地震有效斷層破裂範圍分布圖

註1:圖(a)為全臺有效斷層破裂範圍上視投影圖,圖中藍色方框為已知震源機制之有效斷層破裂面積,紅色圓圈為未知震源機制之有效斷層破裂面積;圖(b)為圖(a)沿經度線投影深度0 km至200 km之剖面圖;圖(c)為圖(a)沿緯度線投影深度0 km至200 km到面圖。

註2:圖(d)為本島結晶岩測試區有效斷層破裂範圍上視投影圖,灰色區域為本島結晶岩測試區花崗岩露頭分布位置,藍色方框以及紅色圓圈同註1。 註3:圖(e)為圖(d)中標示為A-A'、B-B'、C-C'之南北向投影剖面圖,其橫軸為深度(km),縱軸為緯度(°N);圖(f)為圖(d)中標示為D-D'、E-E'、F-F'之 東西向投影剖面圖,其橫軸為經度(°E),縱軸為深度(km)。

註4:資料來源為氣象局即時地震觀測網(CWBSN)以及臺灣寬頻地震網(BATS)所收錄之地震目錄,時間期距自1995年7月至2015年10月。







圖 3-30: 淺層地震之條件機率分布

註:由左至右使用之芮氏規模下限分別為4.0、4.5、5.0;(a)至(c)為1年內發生不同規模下限之條件機率分布,(d)至(f)則為5年內之條件機率分布。

4. 處置設施合適性與設計方案評估精進

為逐步建立用過核子燃料最終處置工程技術、並提供後續研究計 畫相關工程設計資訊,107年度研究含括輻射源項及核種特性研究、 處置系統適用性驗證與調整方案、廢棄物罐技術方案、緩衝材料與回 填材料研發技術及處置設施設計技術方案。研究主題包括輻射源項評 估、地下水輻射分解、災害性地震模型、廢棄物罐金屬抗蝕評估與測 試、廢棄物罐外殼材料銲接與鑄造、緩衝材料力學參數、回填材料施 工及隧道支撐材料耐久性等。針對我國用過核子燃料與處置環境,進 行處置設施設計需求研擬之研究,作為後續概念設計方案建立與評估 的基準;建立製造施工與檢測及長期性能測試分析技術,以利後續計 畫的概念設計方案研擬。

4.1. 輻射源項及核種特性研究

4.1.1. 用過核子燃料存量與源項特性評估

參考國際發展資訊,自2001年起由經濟合作暨發展組織核能署 (Organisation for Economic Co-operation and Development/ Nuclear Energy Agency, OECD/ NEA)召集用過核子燃料鑑定資料專家群(the NEA Expert Group on Assay Data for Spent Nuclear Fuel, EGADSNF) 重建更新樣品資訊後,完成初版的SFCOMPO (Spent Fuel Composition)用過核子燃料組成資料庫,並將其轉換為HTML頁面,整 合至NEA網站。該資料庫設計用來協助用過核子燃料實驗鑑定 (experimental assay)研究與視覺化的關聯式資料庫 (relational database)。使用者可取得、繪製與輸出與用過核子燃料樣本之相關資 料,包括同位素組成資訊、反應器運轉歷程與相關設計參數等。 SFCOMPO-2.0 於 2017 年 6 月 公 開 發 表 (Michel-Sendis, 2017, p779p788),其同位素樣品來自各個國家116組用過核子燃料組件與296根 燃料棒,分屬於8種不同反應器類型,共44個反應器機組,其中包含 國內使用的壓水式反應器與沸水式反應器類型。該資料庫對於整個核 子燃料循環有潛在廣泛的應用,包含運轉期間的事故分析、中期濕式 貯存、運輸、再處理與地質處置安全分析等。資料庫中提供的實驗數

據,可作為3大方向的應用:(1)核種存量預測驗證;(2)當燃料運轉或 設計資料遺失時,評估預測核種的不確定範圍;(3)核截面資料驗證 (Evaluated Nuclear Data File, ENDF)。整體而言,該資料庫的架構與 內容,極具參考價值。

依據高放處置之工作目標需求與處置規劃時間,本研究訂定各組 用過核子燃料組件冷卻時間終點,建立用過核子燃料特性資料庫。

現階段依據所蒐集到的資訊,產生個別用過核子燃料的特性資 訊,並以表單方式彙整,建構用過核子燃料組件條件清單與其產生用 過核子燃料特性資料,作為用過核子燃料資料庫之核心數據。資料庫 內,包含中子射源、光子射源、活度與衰變熱,以及34個重要核種存 量資訊,以表單方式呈現,如圖 4-1所示,該表單包含目前已建立核 電廠(其中CS為核一廠/金山電廠之簡稱;KS為核二廠/國聖電廠之簡 稱;MS為核三廠/馬鞍山電廠之簡稱)總計1,800筆用過核子燃料資訊, 皆依據燃料編號顯示規格、條件與特性資訊,並提供可依各項條件(欄 位)排序與簡易網頁搜尋之功能,如圖 4-1即針對總燃耗欄位進行小 到大的排序。

此外,針對廢棄物罐特性資訊,開發整合性用過核子燃料特性之 簡易查詢使用者介面頁面,並整合至資訊系統用過核子燃料最終處置 計畫-發展功能/安全評估技術資料庫之Web頁面如圖 4-2所示,該頁 面即展示出於核一廠2號機退出之用過核子燃料中,隨機選取12組裝 載至廢棄物罐之整體特性,其衰變熱僅670.09 W,平均1組用過核子 燃料約為55 W左右,最高為編號CS2109之用過核子燃料組件,其衰 變熱約為85.48 W,整體廢棄物罐衰變熱總和約為SNFD2017報告之設 計限值1,315 W值的一半,顯示用過核子燃料組件特性分布廣泛,考 量廢棄物罐裝載熱限值條件,在廢棄物罐裝載策略上具有相當大的操 作空間,值得發展適當有效的演算法,以執行廢棄物罐裝填最佳化。

4.1.2. 地下水輻射分解

用過核子燃料於處置過程中,地下水會因接觸輻射射源而分解產 生過氧化氫(H2O2)及自由基(H·、HO·、HO2·)、OH-及H3O+等氧化物,上

述產物易對高放處置設施之金屬材料造成加速腐蝕的現象,相關國際 以執行之研究案例彙整如表 4-1。本研究主要為根據蒐集與研析國外 文獻,並且配合本計畫已有之分析能力,初步探討地下水輻射分解相 關議題,以提供後續安全分析、廢棄物罐設計及整體性評估的參考, 說明如下:

用過核子燃料內α、β及γ射源分析

針對SNFD2017報告所選定之34個重要核種,進行各項核種之基本特性探討與分析,完成α、β及γ射源分類(如表 4-2),作為後續造成水輻射分解反應的射源項資料。

- (2)射源項與地下水輻射分解機制的相關反應機制 本研究針對反應機制之國際文獻進行蒐集與研析,如下說明:
 - (a) 瑞典研究結果顯示:用過核子燃料在水中劑量率高於5×10⁻⁴ Gy/s時,輻射分解產出的氫氣濃度為恆定,約為1×10⁻³ mol/dm³,並且與時間和劑量無關;在劑量率低於5×10⁻⁶ Gy/s時,氫氣產量的對數與劑量率的對數成比例(SKB, 1982a,p14)。瑞典皇家理工學院,研究用過核子燃料的溶解 對水輻射分解影響,使用UO₂模擬用過核子燃料,實驗UO₂的 溶解對水輻射分解影響及H₂產生對水輻射分解反應的抑制 作用;實驗結果使用動力學模擬程序MAKSIMA-CHEMIST, 對輻射分解影響下UO₂的溶解,進行了模擬驗證,實驗結果 表明UO₂在水中因輻射產生氧化反應,反應的速率決定步驟 是單電子轉移,UO₂的氧化反應速率受OH·和CO₃··擴散的限制 (Ekeroth, 2003, p29)。
 - (b) 美國能源研究中心研究結果顯示:水會因接觸輻射射源產生 分解產生過氧化氫及自由基,上述產物易對處置設施材料造 成加速腐蝕的現象。地下水一旦與用過核子燃料接觸,影響 示意如圖 4-4所示。地下水與用過核子燃料接觸將可能發生 化學作用,其反應取決於地下水組成和流速,而來自用過核 子燃料產生的γ射線會穿透鋯合金管壁,並在一定程度上引

起罐內水的輻射分解。此外,α及β射線也可能會對周邊的水 進行輻射分解。地下水入侵或是殘留在廢棄物罐內的水,會 因接觸輻射射源而分解產生過氧化氫、自由基及氫氣,反應 機制如圖 4-5及式(4-1):

 $H_2O(liq) \rightarrow e_{aq}^- + OH^+ + H^- + HO_2^+ + H_3O^+ + OH^- + H_2O_2 + H_2$ (4-1)

氧化物質可以與銅和鐵表面反應,造成材料加速腐蝕,加速 核種釋出的可能性,對環境產生衝擊。了解地下水受射源影 響,產生水解效應的機制,以及分析地下水中H2O2與自由基 的含量變化,將有助於用過核子燃料最終處置設施的安全分 析。

(3) 不同處置環境下對水輻射分解反應的影響:

隨著處置環境的演化地下水條件可能造成水輻射分解速率或產物的變化;例如:在潮濕空氣中的廢棄物罐與緩衝材料之間的間隙,氮化合物被γ輻射分解形成硝酸,造成對廢棄物罐腐蝕的影響,或是在地下水中存有鐵離子的情況下,進行額外的反應如表 4-3;結果可見鐵離子會與水輻射分解產物發生反應,而產生更 多的氫氣及自由基(SKB, 1982a, p19)。故輻射水解可能對於處置 元件造成影響,說明如下:

(a)廢棄物罐的影響方面:討論其產物對障壁材料的影響,障壁材料包括廢棄物罐及緩衝材料與回填材料。用過核子燃料之短半化期的分裂產物及長半化期的超鈾元素,為處置設施主要之輻射來源。這些輻射可能直接或間接影響處置設施各組成要素的性能,間接效應如地下水的輻射水解而改變所造成之影響。游離輻射對廢棄物罐之影響可分為3部分,即金屬本身、金屬表面的氧化層及腐蝕介質。前兩種反應以粒子輻射最為重要,後者主要考慮γ輻射之影響。輻射水解會產生一些強氧化劑,如H₂O₂、OH及HO₂等。OH及HO₂的壽命很短,

除非很接近金屬表面才可能產生明顯效應,因此,穩定分子 產物才是主要之氧化劑。這些輻射水解產物不但直接參與腐 蝕反應,且可能改變腐蝕介質的氧化電位,間接影響腐蝕反 應。探討輻射水解產物對廢棄物罐之腐蝕影響部份,經過廢 棄物罐腐蝕評估結果,依目前處置設施環境及地下水評估結 果,在參考案例分析中,廢棄物罐無論在完整緩衝材料保護 下或是在緩衝材料遭侵蝕之平流條件下,經過100萬年都不 會發生任何廢棄物罐失效的情形,輻射水解在100萬年演化 後對廢棄物罐腐蝕貢獻僅為0.011 mm,對於具有50 mm設計 的廢棄物罐影響不大。

- (b) 緩衝材料及回填材料影響方面:輻射可能直接破壞材料的結晶構造,對膨潤土中蒙脫石成分的穩定性有直接影響。前者將間接影響緩衝材料及回填材料之導水度、導熱度及吸附性質,後者將改變放射性核種之化學狀態而影響核種之吸附與遷移。但是瑞典SKB實驗使用3×10⁷ Gy輻射劑量(比處置設施中的狀況,要多出幾個數量級),用微鹹水浸泡濕密度2,050kg/m³的膨潤土照射1年,結果發現蒙脫石含量沒有顯著變化。只要廢棄物罐完好無損,緩衝材料及回填材料就不會曝露於α和β輻射;假設有早期的廢棄物罐失效,最接近罐殼的緩衝材料中α射線總活度,將使100萬年後之膨潤土吸收劑量達到8×10⁶ Gy。以MX-80膨潤土為例,蒙脫石約占90%以上,蒙脫石的非結晶化(amorphisation)劑量為3×10¹⁰ Gy;所以,估計100萬年內蒙脫石不會因為輻射效應而產生非結晶化(SKB, 2010a, p161)。
- (4) 輻射水解相關反應機制及產物濃度分析方法:

本研究分析地下水中自由基與H2O2的含量變化,將有助於對高放 處置場的安全分析及整體性維護有所幫助。其輻射水解產物與其 濃度分析方法,國際目前大多採用滴定法(titration)、分光光度 計法(spectrophotometry)、螢光法(fluorescence),以及化學發光 法(chemiluminescence)等4項類別,其中本計畫期間進行完成2 種方法測試,在高濃度(0.25 wt%至70 wt%) H2O2樣品時用滴定 法,如圖 4-6滴定設備進行過錳酸鉀滴定法,用H2O2標準液建立 分析實驗步驟;在低濃度(0.05 mg/L至9 mg/L) H2O2樣品時,可 使用如圖 4-7分光光度計於波長353 nm測吸收光,用吸光度對 H2O2濃度作標準曲線,碘定量方法建立之標準曲線如圖 4-8所 示。其他相關方法與說明彙整如表 4-4。

國家	單位	研究項目	實驗方法	参考文獻
瑞典	SKB	用過核子燃料的 溶解對輻射水解 影響、輻射水解 對膨潤土(MX-80) 中核種Tc(IV)遷移 的影響研究	直接輻射水 解實驗、間 接輻射水解 實驗、水分 解產物分析	SKB(1978)、 SKB(1982a)、 SKB(1982b)、 SKB(2006)、 SKB(2010a)、 SKB(2017)、 Ekeroth(2003)
英國	BGS	在具有豐富鈾礦 的環境下,天然 銅的腐蝕特性及 水的α輻射分解引 起的氧化潛在影 響	X-ray分析、 XRD分析、 SEM分析	SKB(2002a)
日本	JAEA	在核能電廠內輻 射水解對材料腐 蝕研究、輻射水 解產物對材料影 響、輻射水解產 生的氧化物累積 量評估	電廠內環路 實驗、水分 解產物分 析、腐蝕分 析	JAEA(2011a)、 JAEA(2011b)、 JAEA(2007)
美國	Energy Frontier Research Center	用過核子燃料對 輻射水解影響	水分解產物 分析、腐蝕 分析	Rodney(2015)

表 4-1:國	國外輻射水	解研究	案例彙整
---------	-------	-----	------

表 4-2:重要核種之α、β及γ射源分類結果

α射源	β射源	γ射源
232Th 、 236U 、 240Pu 、 229Th 、 233U 、 237Np 、 241Am 、 245Cm 、 226Ra 、 230Th 、 234U 、 238U 、 238Pu 、 242Pu 、 246Cm 、 231Pa 、 235U 、 239Pu 、 243Am	¹⁴ C、 ³⁶ Cl、 ⁵⁹ Ni、 ⁷⁹ Se、 ⁹⁰ Sr、 ⁹³ Zr、 ⁹⁴ Nb、 ⁹⁹ Tc、 ¹⁰⁷ Pd、 ¹²⁶ Sn、 ¹²⁹ I、 ¹³⁵ Cs、 ¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Pb、 ²²⁷ Ac	¹²⁹ I、 ²¹⁰ Pb、 ²⁴¹ Am、 ¹³⁷ Cs、 ²²⁶ Ra、 ²³⁵ U

反應	速率常數(M ⁻¹ s ⁻¹)
$Fe^{2+} + OH \rightarrow Fe^{3+} + OH^{-}$	3.4×10^{8}
Fe^{2+} + $H_2O + e^{-}aq \rightarrow Fe^{3+}$ + OH^- + H^+	1.2×10^{8}
H^+ + $H_2O \rightarrow H_2$ + OH^-	10 ⁻²
Fe^{2+} + $H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+}$ + OH^- + OH^-	60
Fe^{2+} + H \rightarrow Fe^{3+} + H ⁻	1.3×10^{7}
$Fe^{2+}+O_2^{-}\rightarrow Fe^{3+}+O_2^{2-}$	4×10^{8}
Fe^{3+} + $e^{-}aq$ \rightarrow Fe^{2+}	2×10^{10}
$Fe^{3+} + O_2 \rightarrow Fe^{2+} + O_2$	4×10^{8}
$H_2O+O_2 \rightarrow HO_2 \rightarrow OH^-$	10 ⁻³
Fe^{3+} + H \rightarrow Fe^{2+} + H ⁺	10 ⁸
Fe ³⁺ + OH⁻→FeOH	10^{4}
FeOH→Fe ³⁺ + OH ⁻	10 ⁻⁹

表 4-3:存在鐵離子的情況下進行額外的反應及速率常數

資料來源: SKB(1982a, p19)

表 4-4:H2O2分析方法整理

類別	方法	H2O2範圍	反應機制和檢 測條件	性能評估/干 擾
滴定法 (titration)	碘定量法 (iodometric)	0.1 wt%至6 wt%	將氧化碘氧化 成碘,再使用 硫代硫酸鹽和 澱粉滴定。	在低濃度下, 容易受到干擾 導致不準確。
	過錳酸鉀法 (permanganate)	0.25 wt%至 70 wt%	將過錳酸鹽還 原成亞錳離 子。	低濃度下不準 確。
	硫酸鈰法 (ceric sulfate)	1 wt%至13 wt%	使用亞鐵指示 劑滴定至淡藍 色。	低濃度下不準 確。
	碳酸鈷法 (cobalt carbonate)	0.1 mg/L以 下	在Co ³⁺ 和碳酸 鹽之間形成紫 外線吸收複合 物,在260 nm 有吸光。	還原劑和複合 劑與游離氯影 響是未知的。
分光光度計法 (spectrophotometry)	碘定量法 (iodometric)	0.05 mg/L至 10 mg/L	氧化碘氧化成 碘在在pH=5 時帶有鉬酸鹽 結晶,在351 nm有吸光。	氧化劑干擾檢 測結果。
	草酸鈦法 (titanium oxalate)	0.1 mg/L至 50 mg/L	有色過氧鈦複 合物的形成, 在400 nm有吸 光。	一些紫外線吸 收物質、濁 度、顏色與游 離氯的影響是 未知的。
	過氧化酶-無色晶體 法(peroxidase enzyme-leuco crystal)	0.1 mg/L至 10 mg/L	在過氧化物酶 催化劑存在 下,用H2O2氧 化無色結晶紫 染料,在596 nm有吸光。	通常無干擾, 顏色形成緩 慢,對陽光敏 感,游離氯的 影響是未知 的。
	過氧化酶-對苯二胺 硫酸鹽法 (peroxidase enzyme-DPD)	0.02 mg/L至 10 mg/L	在過氧化氫酶 催化下,H2O2 氧化DPD,在 551 nm有吸 光。	游離氯可能造 成干擾,顏色 不穩定。
	Copper-DMP	0.03 mg/L至 10 mg/L	Cu(II)的還原 和銅-DMP複 合物的形成, 在454 nm有吸 光。	在氯存在下, 顏色穩定。
	過氧化釩 (peroxovanadium)	4 mg/L至10 mg/L	 (V)的減 少和過氧氨陽 離子的形成, 在450 nm有吸 光。 	偵測極限高, 干擾未知。

表 4-4:H202分析方法整理(續)

類別	方法	H2O2範圍	反應機制和檢 測條件	性能評估/干 擾		
螢光法	過氧化酶-POHPAA 法(peroxidase enzyme-POHPAA)	>0.001 mg/L	過氧化物酶催 化H ₂ O2氧化 POHPAA,在 400 nm有螢 光。	氯會造成干 擾。		
(fluorescence)	過氧化酶- scopoletin法 (peroxidase enzyme-scopoletin)	>0.00005 mg/L	過氧化氫酶催 化H2O2氧化 scopoletin,測 量395 nm處的 螢光衰減。	氯會造成干 擾。		
化學發光法 (chemiluminescence)	發光胺法(luminol)	>0.002 mg/L	在鈷或銅存在 下用H2O2催化 分解luminol, 檢測分解產物 的發光。	自然界水中含 礦物質會造成 干擾,游離氣 的干擾是未知 的。		

資料來源:翻譯修改自Philip and Gregory.(2009, p11)

知識管理整合系統 用過核子燃料特性資料庫

功能1 功能2

根據 id 欄位,做 A → Z 排序

id	Fuel_ID	Plant_Unit	Fuel_Type	Enrichment_wt	Total_Burnup	Discharged_Cycle	Cooling_time_day	Neutron_neutron_s	Gamma_photoh_s	Activity_Ci	Power_watts	c1 4	se79	sr90	zr93	nb94	tc99	pd107	sn126
1	CS1268	CS1	ATRIUM10	3.800	40	22	17470	2.50E+07	5.47E+15	2.85E+04	109.3000031	4.35E- 05	1.32E- 02	4.14E-01	1.71E+00	1.37E- 06	1.76E+00	4.01E-01	3.04E- 02
2	CS1232	CS1	ATRIUM10	3.350	40	21	18019	3.15E+07	5.16E+15	2.71E+04	106.6999969	4.52E- 05	1.30E- 02	3.82E-01	1.66E+00	1.52E- 06	1.74E+00	4.46E-01	3.19E- 02
3	CS1274	CS1	ATRIUM10	2.530	40	20	18605	5.23E+07	4.70E+15	2.52E+04	103.9000015	4.89E- 05	1.25E- 02	3.30E-01	1.56E+00	1.85E- 06	1.69E+00	5.51E-01	3.52E- 02
4	CS1206	CS1	ATRIUM10	3.760	39	21	18019	2.18E+07	5.16E+15	2.69E+04	103.8000031	4.24E- 05	1.29E- 02	3.90E-01	1.67E+00	1.33E- 06	1.72E+00	3.88E-01	2.96E- 02
5	CS1078	CS1	ATRIUM10	2.580	37	22	17470	4.02E+07	4.78E+15	2.56E+04	101.3000031	4.44E- 05	1.18E- 02	3.42E-01	1.47E+00	1.64E- 06	1.59E+00	4.80E-01	3.17E- 02
6	CS1250	CS1	ATRIUM10	2.350	37	22	17470	4.78E+07	4.69E+15	2.53E+04	101.3000031	4.55E- 05	1.16E- 02	3.30E-01	1.44E+00	1.74E- 06	1.58E+00	5.12E-01	3.27E- 02
7	CS1073	CS1	ATRIUM10	2.350	40	18	19693	5.36E+07	4.33E+15	2.32E+04	98.88999939	4.98E- 05	1.24E- 02	2.97E-01	1.53E+00	1.93E- 06	1.68E+00	5.78E-01	3.61E- 02
8	CS1168	CS1	ATRIUM10	3.320	37	20	18605	2.16E+07	4.67E+15	2.44E+04	96.01000214	4.13E- 05	1.21E- 02	3.48E-01	1.56E+00	1.36E- 06	1.63E+00	3.95E-01	2.90E- 02
9	CS1118	CS1	ATRIUM10	3.620	37	20	18605	1.78E+07	4.74E+15	2.46E+04	95.84999847	4.02E- 05	1.22E- 02	3.58E-01	1.58E+00	1.27E- 06	1.64E+00	3.67E-01	2.81E- 02
10	CS1185	CS1	ATRIUM10	2.490	35	22	17470	3.39E+07	4.55E+15	2.43E+04	95.76999664	4.20E- 05	1.12E- 02	3.26E-01	1.40E+00	1.54E- 06	1.52E+00	4.50E-01	2.99E- 02
11	CS1010	CS1	ATRIUM10	3.940	38	18	19693	1.52E+07	4.59E+15	2.36E+04	93.58999634	4.05E- 05	1.27E- 02	3.47E-01	1.65E+00	1.23E- 06	1.69E+00	3.57E-01	2.82E- 02
12	CS1299	CS1	ATRIUM10	3.140	38	17	20198	2.37E+07	4.27E+15	2.23E+04	91.94000244	4.33E- 05	1.23E- 02	3.12E-01	1.57E+00	1.48E- 06	1.66E+00	4.32E-01	3.06E- 02

圖 4-1:用過核子燃料特性表單簡易查詢使用者Web頁面

選月	用用過核子炒	燃料群及廢棄物罐/讀	度箱裝載組件數					
待選用 □ CS_ □ CS_ □ KS_ □ KS_ □ MS, □ MS,	1 2 2 1 2 _1 _2 _2	嬔料群		廢棄物罐	/媵箱装載組件數		¢	
廠到	€物罐/護箱	整體特性@2055 000						
光子強	達度:1.267E	+16						
沽度強 衰變熱	度:65430 :283.2000	00076						
選月	用之用過核子	₽燃料組件清單(燃約	科群: CS_1,組件數:	4)				
id	Fuel_ID	Enrichment_wt	Total_Burnup	Discharged_Cycle	Cooling_time_day	Neutron_neutron_s	Gamma_photoh_s	Activity_Ci
243	CS1128	2.180	25	3	26665	5.55E+06	1.93E+15	9.83E+03
97	CS1276	3.720	32	13	22289	6.99E+06	3.35E+15	1.70E+04
55	CS1275	2.580	38	8	24532	2.39E+07	3.15E+15	1.64E+04
22	CS1081	2.970	35	19	19108	2.05E+07	4.24E+15	2.22E+04

圖 4-2:廢棄物罐特性簡易查閱使用者Web介面



圖 4-3:用過核子燃料關鍵核種篩選流程

資料來源: 蔡世欽(2016, p3-10)



圖 4-4:地下輻射水解影響示意圖

資料來源: Rodney(2015, p255)



圖 4-5:輻射水解3個階段的主要反應

資料來源: Sophie(2011, p239)



圖 4-6:實驗室傳統滴定設備



圖 4-7:分光光度計(PRO-779, Prema)


圖 4-8:碘定量分光光度計法之H2O2分析標準曲線

4.2. 處置系統適用性驗證與調整方案

4.2.1. 災害地震震源模型及其敏感度分析

本島東部結晶岩測試區位於菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊 的交界處,一直以來為臺灣地震活動頻繁的地區。該區域曾於1920年 發生芮氏規模8.3之花蓮外海地震,該地震發生於臺灣時間12點21分, 震央位置位於花蓮東方外海,經度122.0°E,緯度24.0°N,震源深度 20 km。發震時,全島震度皆在3級以上。透過對其歷史文獻及觀測資 料之分析,將有助於瞭解臺灣東部隱沒板塊潛在大型災害性地震的可 能發震情境及其震源特性,並作為後續地震危害度及地震引致裂隙位 移模擬評估參數之參考。

本研究針對1920年花蓮外海地震,使用混合法地震波模擬 (Hybrid Simulation),進行震源參數評估。震源參數採用日本地震調 查研究推進本部(Headquarters for Earthquake Research Promotion, HERP)制定的「特定孕震斷層之地震強振動模擬方法準則(以下稱為 Recipe)」(HERP, 2008, p1-p29; Irikura 2006, p341-p352),分成巨 觀震源參數、微觀震源參數及其他參數。巨觀震源參數,如斷層幾何、 地震矩及斷層面平均滑移量等參數。微觀震源參數,如強地動產生區 域(asperity)之面積、平均滑移量、斷層滑移角度、斷層破裂速度及震 源持續時間等參數;其他震源參數則為速度構造。

透過蒐集1920年花蓮外海地震之文獻資料,包含當時所記錄之 全臺震度分布、震源或震央位置,以及由前人研究所歸納出之斷層幾 何與地震矩規模等參數,以Recipe建立模型A、B、C及D,共4組震源 參數模型。本研究在模型A至D中,於斷層面上擺放1個位於不同位置 之強地動產生區域,並分別命名為Asp-1至Asp-6進行敏感度分析,如 圖 4-9以模型D為例。最後,以這些模型進行地震模擬,並由其結果, 評估最佳的參數模型。

評估各參數模型模擬結果的方式,包括歷史震度分布、最大地震動加速度及加速度反應譜。由於1920年花蓮外海地震的地震波形並 未全部被保留至今,本研究無法利用比較模擬波形與觀測波形的差 異,來評估模擬結果,因此,採用日本Si et al.(2013, p114-p116)以

隱沒帶事件回歸得到的衰減律,與模擬所得的最大地震動加速度與加速度反應頻譜進行比較。其衰減律如式(4-2):

$$\log SA(T) = b(T) + g(X) - kX$$
(4-2)

其中,

T =週期, [sec]。
SA =譜加速度, [gal]。
X =場址至斷層面的最短距離, [km]。
k = 0.003 or 0.002;為衰減律於T < 0.3s or T ≥ 0.6s之係數, [-]。

b(T)則如式(4-3):

$$b(T) = \begin{cases} a_1(T)M_W + \sum d_i(T)S_i + h(T)D + \varepsilon_1(T) \\ M \le 8.3 \text{ or } M \le 7.5 \text{ if } T \ge 2s \\ a_2(T)M_W + \sum d_i(T)S_i + h(T)D + \varepsilon_2(T) \\ M > 8.3 \text{ or } M > 7.5 \text{ if } T \ge 2s \end{cases}$$

$$(4-3)$$

其中,

$$T = 週期, [sec]。$$

 $M_w = 地震矩規模, [-]。$
 $d_i = 震源類型參數; 分為隱沒帶介面型震源及隱沒帶內部型震源, [-]。$
 $S_i = 斷層類型參數; 當 $S_i = 0$ 時,代表此斷層不屬於上述任何震源;當
 $S_i = 1$ 時,代表此斷層屬於上述任一震源, [-]。
 $D = 震源深度, [km]。$
其餘參數如 $a_1, a_2, h, \epsilon_1 及 \epsilon_2 則為衰減律之係數,皆列於表 4-5中。$$

g(X)則如式(4-4):

$$g(X) = \begin{cases} -\log(X+C); D \le 30km\\ 0.6\log(1.7D+C) - 1.6\log(X+C); D > 30km \& X \ge 1.7D \end{cases}$$
(4-4)

其中,

c = 0.0055 × 10^{0.5M}w or 0.0028 × 10^{0.5M}w; 為 衰 減 律 於 T < 0.3s or T ≥ 0.6s之 係 數 , [-]。

而歷史震度之比較,根據Wu(2003,p386)之研究中提及,以最大 地震動速度(Peak Ground Velocity, PGV)評估的震度及房屋損害度與 傷亡較為密切。在缺乏儀器觀測資料之歷史震度紀錄,利用PGV所推 估之震度應會與間接透過災損和體感所得出之震度較為符合。故本研 究使用日治時期在臺灣所設置之7個測候所(圖 4-10)所留下之體感 震度,與模擬結果之最大地震動速度轉換之震度值進行比較。其公式 如式(4-5):

$$I_t = 2.14 \times \log_{10}(PGV) + 1.89 \tag{4-5}$$

其中,

 $I_t = 震度, [級]。$

PGV =最大地震動速度, [cm/s]。

在震度比較方面,以模型D之殘差值最小,其值為0.43,出現在 強地動產生區為Asp-3位置上的模型(如圖 4-11至圖 4-14)。模擬之 最大地震動加速度與衰減律的比較方面,亦是模型D有最小之殘差值, 其值為0.41,出現在強地動產生區為Asp-3位置上的模型(如圖 4-15 至圖 4-18)。最後,則是加速度反應譜的比較,此處以模擬地震波形 各週期下的譜加速度所產生之加速度反應譜與衰減律之反應譜進行 比較。比較時選擇模型A至D中,歷史震度及PGA殘差值最小的強地動 產生區位置,以及與衰減律之反應譜計算殘差值最小者。4組模型中 以D之殘差值為最小,其在7個測站所得到的平均值為0.68(如圖 4-19 至圖 4-22)。

透過對1920年花蓮外海地震既有文獻之探討,本研究建立了4組 震源模型,並以強地動地震波模擬方法得到目標測站之模擬波形,再

經由震度值、PGA及反應譜,與觀測紀錄和衰減律之比較,進行強地 動產生區的敏感度分析,而進一步了解1920年花蓮外海地震可能之 震源參數。而在所有假設之震源模型中,以模型D之結果與觀測紀錄 及衰減律估算值最為接近,故推估引發1920年花蓮外海地震之震源, 應為一沿著琉球海溝走向為290°,向北傾約44°,且其長可能為120 km,寬則為60 km的斷層面。該次地震所釋放之應力至少達10 MPa左 右,規模約為M_W8.2,而強地動產生區則位於斷層面上最靠近臺灣之 區域(圖 4-23)。詳細之震源參數整理如表 4-6。

表	4-5	:	Si衰減律各週期	下	之係數
1	10				

Т	a1	a2	h	d(intra)	d(inter)	e1	e2
PGA	0.5715	-0.0618	0.009	0.1532	-0.0794	-0.3347	4.8992
0.1	0.5435	0.0149	0.0109	0.1125	-0.1026	0.106	4.4289
0.15	0.5632	0.003	0.01	0.1346	-0.1055	0.0569	4.6353
0.2	0.5646	-0.0187	0.0093	0.1871	-0.0605	0.025	4.8599
0.25	0.6001	-0.0802	0.0089	0.1659	-0.0946	-0.2238	5.3885
0.3	0.6246	-0.0496	0.0084	0.1608	-0.0775	-0.4348	5.1429
0.4	0.6296	-0.0801	0.0078	0.1757	-0.0838	-0.5861	5.3208
0.5	0.63	-0.1383	0.0073	0.1718	-0.0726	-0.695	5.7114
0.6	0.6261	-0.1246	0.0069	0.1704	-0.0637	-0.7698	5.4563
0.7	0.6343	-0.1507	0.0065	0.1568	-0.0583	-0.8798	5.6355
0.8	0.6428	-0.2196	0.0062	0.173	-0.0347	-0.9966	6.1928
0.9	0.67	-0.2921	0.006	0.1736	-0.0558	-1.2224	6.7926
1	0.6834	-0.3291	0.0058	0.18	-0.0704	-1.3557	7.0575
1.5	0.7352	-0.3164	0.0048	0.2017	-0.0871	-1.891	6.8051
2	0.7843	0.1482	0.0042	0.1357	-0.128	-2.3476	2.5895
2.5	0.8306	0.1734	0.0037	0.0826	-0.1513	-2.7504	2.2843
3	0.8422	0.1825	0.0033	0.0728	-0.127	-2.9291	2.1437
5	0.9647	0.1626	0.0022	0.0025	-0.289	-3.9748	2.098
10	0.9696	0.0831	0.0006	0.048	-0.2778	-4.5504	2.3704
PGV	0.6644	-0.2951	0.0066	0.0885	-0.135	-2.0972	5.8245

資料來源: Si et al.(2013, p114)

表 4-6:1920年花蓮外海地震最佳震源參數

巨觀震源參數		微觀震源參數				
斷層機制型態	逆斷層	強地動產生	區域	滑移角 λ(°)	85	
走向 Ф (°)	290	強地動產生區域 面積 Sa(km ²)	1,584	破裂速度 Vr (km/s)	2.7	
傾角 δ (°)	44	強地動產生區域 寬Wa(km)	40	f _{max} (Hz)	10.0	
地震矩規模 Mw	8.2	Sa/S	0.22			
斷層長 L (km)	120	平均滑移量 Da (m)	20			
斷層 寬 W (km)	60	地震矩 M _{0a} (N•m)	1.11×10^{21}			
斷層面積 S (km ²)	7,200	應力降 Δσa (MPa)	45.53			
斷層上端深 Hs (km)	5.34	背景區	域	-		
斷層下端深 Ha (km)	47.34	面積 Sb(km²)	5,616			
地震矩 M ₀ (N•m)	2.51×10^{21}	平均滑移量 Db(m)	7			
平均滑移量 D (m)	8.2	地震矩 M _{0b} (N•m)	1.41×10^{21}			
平均應力降 Δσ (MPa)	10	有效應力 σ _b (MPa)	10.84			



圖 4-9:模型D之強地動產生區配置

註:上方及左方為經緯度座標,右方及下方為二度分帶投影座標。



圖 4-10:日治時期全臺7個測候所之位置

註1: TAP(臺北)、TCU(臺中)、TAI(臺南)、TNN(臺東)、HWA(花蓮)、HEN(恆春) 與PNG(澎湖)。

註2:上方及左方為經緯度座標,右方及下方為二度分帶投影座標。



圖 4-11:模型A各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較



圖 4-12:模型B各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較



圖 4-13:模型C各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較



圖 4-14:模型D各強地動產生區之模擬結果與觀測震度比較



圖 4-15:模型A各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較

註:紅色圓圈為模擬震度,黑色實線為衰減律估算值。



圖 4-16:模型B各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較

註:紅色圓圈為模擬震度,黑色實線為衰減律估算值。



圖 4-17:模型C各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較

註:紅色圓圈為模擬震度,黑色實線為衰減律估算值。



圖 4-18:模型D各強地動產生區之模擬PGA與衰減律估算值比較

註:紅色圓圈為模擬震度,黑色實線為衰減律估算值。



圖 4-19:模型A各測候所之模擬加速度反應譜與衰減律估算值比較

註:黑色實線為模擬加速度反應譜,黑色虛線為衰減律估算值。



圖 4-20:模型B各測候所之模擬加速度反應譜,黑色虛線為衰減律估算值。



圖 4-21:模型C各測候所之模擬加速度反應譜,黑色虛線為衰減律估算值。



圖 4-22:模型D各測候所之模擬加速度反應譜與衰減律估算值比較

註:黑色實線為模擬加速度反應譜,黑色虛線為衰減律估算值。



圖 4-23:1920年花蓮外海地震最佳震源模型幾何 註:上方及左方為經緯度座標,右方及下方為二度分帶投影座標。

4.3. 廢棄物罐技術方案

4.3.1. 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能評估與測試

4.3.1.1. 廢棄物罐銅質(無氧銅)外殼於鹼氯環境下耐腐蝕性能之研究

本研究為了解廢棄物罐銅質外殼在處置設施環境的抗蝕特性,以 建立本土之廢棄物罐腐蝕評估技術能力,參照腐蝕環境變化朝向鹽度 與鹼性增加之情節推演,配製酸鹼度為pH7至pH11及不同氯離子濃度 之鹼性氯離子(簡稱鹼氯)溶液,執行無氧銅450天長期浸泡腐蝕實驗, 以評估銅質外殼於有氧環境鹼氯條件的腐蝕行為特性,以及進行無氧 銅鹼氯腐蝕後對拉伸力學性質的影響評估,說明如下:

(1) 腐蝕實驗結果:

完成無氧銅於4種氯離子濃度(分別為0.001 mol/L、0.01 mol/L、 0.1 mol/L及1 mol/L)與3種pH值(pH7、pH9及pH11)之30 °C鹼氯 溶液之浸泡30天、90天、180天、270天、365天及450天後,分 別測量重量變化,圖 4-24為浸泡450天之結果,再將各試片重量 變化、試片面積(4.6 cm²)及腐蝕時間等參數,以較保守線性方式 估算金屬腐蝕損耗厚度,獲得圖 4-24(a)中[Cl⁻]: 0.001 mol/L條 件下,pH值7、9、11的腐蝕速率分別為6.1 μ m/y、5.4 μ m/y、 0.25 μ m/y; [Cl⁻]: 0.01 mol/L條件下,pH值7、9、11的腐蝕速率 分別為8.7 μ m/y、8.0 μ m/y、0.73 μ m/y。圖 4-24(b)中[Cl⁻]: 0.1 mol/L條件下,pH值7、9、11的腐蝕速率分別為9.3 μ m/y、9.2 μ m/y、6.1 μ m/y; [Cl⁻]: 1 mol/L條件下,pH值7、9、11的腐蝕速 率分別為40 μ m/y、43 μ m/y、53 μ m/y。

上述腐蝕速率分析結果顯示,當溶液為較低氯離子濃度條件 (0.001 mol/L與0.01 mol/L)時,pH值由pH7上升至pH11時,腐蝕 速率會顯著降低,分別是[Cl-]:0.001 mol/L條件下由6.1 µm/y降 至0.25µm/y,與[Cl-]:0.01 mol/L條件下由8.7 µm/y降至0.73 µm/y。但是對高氯離子濃度條件(0.1 mol/L與1 mol/L)時,pH值 增加對腐蝕速率影響變成很小或者是沒有相關性,此外,在相同 pH值條件下,腐蝕速率皆隨氯離子濃度增高而增加。

- (2) 腐蝕450天後的腐蝕產物以X光繞射分析結果如表 4-7所示,主要為氯離子濃度低時形成緻密性氧化銅(Cu20/Cu0),以及氯離子濃度高時形成鬆散剝落的氧氯化銅(Cu2(OH)3Cl),圖 4-25為低氯離子濃度(0.001 mol/L)不同pH值腐蝕450天形成緻密性氧化膜之表面形態。
- (3) 以電化學塔伏分析(TAFEL)低氯離子濃度條件(0.001 mol/L)腐 蝕450天試片(圖 4-26),獲得腐蝕電位、腐蝕電流密度及腐蝕速 率等結果,如表 4-8所示。結果顯示腐蝕速率(腐蝕電流密度)隨 pH值增加而減少,呈現鹼性增加具抑制腐蝕之趨勢。
- (4) 無氧銅鹼氯腐蝕實驗結果與瑞典SKB研究結論(SKB, 2002b, p69)
 是相似的。瑞典SKB的結論提出:
 - (a) 在有氧階段維持低氯離子濃度條件但pH值先增加的推演情境下,銅殼腐蝕在pH值大於pH9時會有鈍化(passivation)抑制腐蝕速率之情況,此結論與(1)第2段所述「低氯離子濃度條件(0.001 mol/L與0.01 mol/L)時,pH值由pH7上升至pH11時,腐蝕速率會顯著降低」之結果是一致的;
 - (b) 當pH值沒有變化,但氯離子濃度增加的推演情境下,銅的腐 蝕是較活躍的(active),與(1)第2段所述「在相同pH值條件 下,腐蝕速率皆隨氯離子濃度增高而增加」之結果是相符合 的。
- (5)無氧銅腐蝕後拉伸試驗,如圖 4-27所示,結果顯示抗拉強度未 受驗氣腐蝕所影響,僅伸長率隨腐蝕時間呈現些微下降趨勢。分 析拉伸試片之斷面形態顯示頸縮現象、杯形斷口及韌窩等特徵, 如圖 4-28所示,仍保有典型延性材料斷面特徵,因此,總結無 氧銅驗氯腐蝕不會對拉伸力學性質產生明顯效應。

後續的腐蝕試驗將朝向局部腐蝕的研究,例如應力腐蝕龜裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC)與孔蝕(pitting),因局部腐蝕所耗損 銅殼數量雖然不大,但所產生之裂紋深度卻遠大於均勻腐蝕厚度,對 廢棄物罐抗蝕性能評估具重要影響。另外對銅質外殼加工或摩擦攪拌

銲接後殘餘應力條件,在應力腐蝕試驗中亦需探討其效應;長期目標 是進行(無氧)還原環境的銅腐蝕試驗,以提供廢棄物罐長期演化環境 之腐蝕行為評估參考。

4.3.1.2. 廢棄物罐銅質外殼壽命預測模式分析與建置

本研究建置廢棄物罐銅質外殼壽命預測模式,並以離島結晶岩作 為參考案例,考量環境的現地資料,篩選出可能發生的腐蝕作用,再 以腐蝕來源加以分類為有限的腐蝕作用與長期的腐蝕作用;其中,有 限腐蝕作用在合理範圍內進行保守假設,以計算論證的方式,說明有 限腐蝕作用可能造成之腐蝕深度影響範圍;而對於無氧時期之長期腐 蝕作用,依照地下水流分析模擬,在不同處置環境與情節的結果,進 行廢棄物罐的長期腐蝕作用評估。最後,對各評估結果進行總結,完 成參考案例之廢棄物罐銅質外殼壽命預測分析評估,說明如下:

(1) 深層地質處置銅質外殼腐蝕評估/模擬模式:

評估/模擬模式流程圖如圖 4-29所示,首先探討案例之處置設 計、處置環境及腐蝕作用,接續對於案例先進行腐蝕作用定性分 析,再進行定量計算,最終以定性分析與定量計算之結果完成腐 蝕評估。此流程對於處置設施及所處環境,分析所有造成廢棄物 罐的腐蝕作用及其影響程度,再篩選出主要的腐蝕作用進行腐蝕 計算,因此,涵蓋所有腐蝕作用以達成完整的腐蝕評估。

- (2) 銅腐蝕產物對緩衝材料體積穩定性的影響: 當腐蝕產物Cu₂S在緩衝材料中,雖然體積可能回脹2倍到3倍,但 因為其多孔較鬆散的結構,可以預期其所產生的回脹壓力,將不 會影響膨潤土體積穩定性。
- (3) 定性分析之結果討論:

參考國際資料進行參考案例之腐蝕作用定性分析,結果如表 4-9 所示,銅質外殼的應力腐蝕龜裂在參考案例中,不會同時達成應 力腐蝕龜裂條件;地電流或雜散電流腐蝕在參考案例中,只有在 非常高的交流密度下才能觀察到腐蝕作用;微生物腐蝕在參考案 例中,已將微生物的還原反應間接造成銅的腐蝕反應,歸類於全 面腐蝕;銅質外殼的全面腐蝕與局部腐蝕在參考案例中,銅質外 殼之腐蝕反應主要以全面腐蝕為主,在無氧環境下,銅質外殼不 會有局部腐蝕發生,因此,在後續定量計算時,無氧環境主要以 全面腐蝕為主,有氧環境下則計算局部腐蝕之腐蝕程度。

(4) 定量計算之結果討論:

定量計算區分有限腐蝕作用與長期腐蝕作用。有限腐蝕作用在篩 選腐蝕作用時,這些作用的影響時間有限,且經由案例計算得知 經過100萬年,所造成的總腐蝕深度未到mm等級,故歸類為有限 腐蝕作用。而長期腐蝕作用之腐蝕劑來源,主要來自地下水中的 腐蝕劑,在還原環境時此腐蝕劑主要為硫化物,若廢棄物罐在完 整緩衝材料保護下,考量銅質外殼製造過程誤差與有限腐蝕作用 之影響,保守假設銅質外殼剩餘厚度為47 mm,硫化物濃度為 5.37×10⁻⁶ mol/L,經過100萬年,廢棄物罐腐蝕失效的可能性非 常低。因此,造成廢棄物罐可能發生腐蝕失效之情形,較有可能 發生在緩衝材料被侵蝕之情節。然而,在參考案例之水質條件下, 選定了不同的水文地質變異案例與區域梯度變異案例如表 4-10 所示, CASE 1的 膨潤 土 侵 蝕 時 間、 銅 質 外 殼 腐 蝕 時 間 與 銅 質 外 殼 失效時間如表 4-11所示,變異案例CASE 2至CASE 5也使用相同 假設進行腐蝕評估,其結果分別如、表 4-12、表 4-13、表 4-14 與表 4-15所示,緩衝材料被侵蝕之情節無論是基本案例或是變 異案例,廢棄物罐因腐蝕而失效所需之時間皆超過100萬年。因 此,既使在較可能發生腐蝕失效之緩衝材料被侵蝕之情節,在參 考案例之處置環境條件下廢棄物罐腐蝕失效的可能性還是非常 低。

(5) 腐蝕評估成果比較:

表 4-16為封閉初期氧氣誘發腐蝕評估結果比較,參考案例封閉 初期氧氣誘發腐蝕評估結果為腐蝕深度0.102 mm,而局部腐蝕的 評估結果在參考案例的環境下,僅有緩衝材料未飽和時期可能發 生局部腐蝕(經驗值0.102 mm);在封閉初期氧氣誘發局部腐蝕可

用孔蝕比值做保守評估,若使用表面粗糙度之評估結果,將相近於使用孔蝕比值經驗值之結果。

4.3.2. 銅質材料摩擦攪拌銲接與檢測技術

本研究為銅腐蝕研究,先行製備銲接試片,並測試銲道的抗蝕性、 累積建立銲接機械設備與銲接工具設計的相關技術, 說明如下:

- (1)進行厚度15 mm純銅長銲道銲接,以工具轉速1,000 rpm,在不同進給速率下之拉伸強度皆仍可達到母材強度的90%以上,伸長率亦可達母材伸長率的75%以上。隨著進給速率增加,進給銲接中銲道的溫度會隨之降低,最大軸向負荷會隨之增加,這是因為工具與材料的摩擦時間縮短,導致工具與材料之間所產生的摩擦熱量隨著進給速率提升而減少,進而影響材料軟化程度,圖 4-30所示其中之一組成品外觀。
- (2)預孔能有效降低探針變形程度,因為預孔減少探針在下壓過程承 受阻力的時間,使探針在進給時仍能保有一定程度的硬度,能承 受進給時所受到的阻力,進而使變形量減少。
- (3)進給速率越慢,銲道溫度越高,則材料越易晶粒成長及軟化,並 且越易於銲道2側產生溢料。但進給速率越快,探針對底部材料 的攪拌能力就越差。同時,攪拌進給速率越快,攪拌區產生較細 的晶粒結構組織,同時晶粒也較不易成長。
- (4) 超耐熱合金因其高溫特性,能有效減少工具變形,使工具之重複使用性提高。主因在於超合金本身有較好的高溫強度,並由於本身熱傳係數較低,銲道有較好的蓄熱與升溫效果,由於銲道高溫軟化效果較佳,使工具的下壓負荷較小,銲接工具也比較能重複使用,銲接工具實驗後之外觀如圖 4-31所示。
- (5)由非破壞檢測結果得知,在進給起點及終點容易產生瑕疵,這是因為在銲接過程中起點及終點相對較不穩定,可能會使材料無法受到均勻攪拌,進而產生瑕疵,整體而言,銲道的銲接品質良好,圖 4-32所示之量測結果為厚度15 mm,進給速度45 mm/min條件下之試片。

(6)量測銅材攪拌銲接銲道(Friction Stir Welding, FSW)與銅母材之 電化學腐蝕實驗,於3.5 wt% NaCl水溶液下,以標準三極腐蝕槽 (ASTM, 2004, p3)進行有氧環境電化學腐蝕量測,參考電極為 Ag/AgCl。結果顯示,經銲接後的銲道與銅質母材的腐蝕電位差 異不大,雖然測試分析結果的腐蝕電流較大,但實際接觸的電解 液的開路電位2組試片幾乎相同,故2者耐蝕差異不大,結果如表 4-17所示。

4.3.3. 廢棄物罐鑄鐵製造與檢測技術

本研究目標在評估國內自製BWR廢棄物罐內襯的可行性,提出製作與替代方案、完成全斷面縮尺型鑄鐵內襯(即相同半徑,但高度僅為1,250 mm)的試製及加工,測試取樣樣品的力學性質以瞭解鑄件的品質,說明如下:

- (1) 由於KBS-3內部鑄鐵內襯的燃料通道方管之最大長度為4,463 mm,核一廠用過核子燃料束之最大長度經估算為4,523.3 mm, 如表 4-18所示,不足長度為60.3 mm,需將鑄鐵內襯長度及外部 銅殼長度增加61 mm。
- (2)本次研究主要試製BWR全斷面縮尺型球墨鑄鐵內襯,另外,也額 外試製PWR全斷面縮尺型球墨鑄鐵內襯(以明瞭尺寸差異),試製 結果顯示;在拉伸性質測試、金相組織分析及尺寸量測之檢測結 果,均能符合規格要求。相關試製及加工照片如圖 4-33、圖 4-34、圖 4-35及圖 4-36所示。
- (3) 全斷面縮尺型鑄鐵內襯之液滲(Penetrant Testing, PT)與超音波 (Ultrasonic Testing, UT)之檢測結果,均屬合格通過,檢驗作業 照片如圖 4-36及圖 4-37所示。
- (4)本次試製特別針對BWR全斷面縮尺型球墨鑄鐵內襯進行試製, 高度約為全尺寸的1/4,未來全尺寸的主要差異在於澆鑄溫度、 及鑄件上方要預留切除的長度等、由於廠商已有鑄造大型風機塔 架的經驗,經由此次試製,未來可由國內廠商承製此類大型鑄件。

- pH=7		pH=9	pH=11
[Cl [.]]: 0.001 mol/L	Cu2O CuO Cu2(OH)3Cl	Cu2O Cu2(OH)3Cl	NA
[Cl ⁻]: 0.01 mol/L	Cu2O Cu2(OH)3Cl	Cu2O Cu2(OH)3Cl	Cu2O CuO
[Cl ⁻]: 0.1 mol/L	Cu ₂ O Cu ₂ (OH) ₃ Cl	Cu2O Cu2(OH)3Cl	Cu2O Cu2(OH)3Cl
[Cl ⁻]: 1 mol/L	Cu2(OH)3Cl	Cu2O Cu2(OH)3Cl	Cu2O Cu2(OH)3Cl

表 4-7:無氧銅於有氧環境30℃鹼氯溶液腐蝕450天後XRD分析腐蝕產物之結果

註:NA代表無測試訊號。

表 4-8: 無氧銅於有氧環境氯離子濃度0.001 mol/L條件下腐蝕450天之塔伏分析結果

試片條件	腐蝕電位(mV)	腐蝕電流密度(A/cm²)	腐蝕速率(mm/yr)
0.001 mol/L pH 7	-426.01	67.792	0.78774
0.001 mol/L pH 9	-385.84	28.859	0.33534
0.001 mol/L pH 11	-426.01	0.1118	0.00132

表 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選

腐蝕作用	参考案例之腐蝕作用說明	作用類別
鑄鐵內襯腐蝕	銅質外殼內的水和氣體所造成 的腐蝕影響非常小,幾乎可以 忽略不計。	不考慮。不影響銅質外 殼腐蝕深度。
鑄鐵內襯的應力腐 蝕龜裂	對於應力腐蝕龜裂的發生,除 了特定的化學環境以外,尚需 材料存在拉應力,然而處置設 施中,廢棄物罐受均勻圍壓, 不易有拉應力之發生。	不考慮。不影響銅質外 殼腐蝕深度。
銅與鑄鐵之伽凡尼 腐蝕	較可能發生在銅質外殼破壞後 之時期,且主要造成鑄鐵腐 蝕。	不考慮。不影響銅質外 殼腐蝕深度。
銅質外殼的全面腐 蝕	腐蝕劑來源可分為空氣輻射分 解的硝酸、輻射水解的氧化 劑、封閉前大氣的氧、封閉後 初期受限的氧、黃鐵礦的硫化 物、硫酸鹽還原菌產生的硫化 物還有地下水的硫化物等。	需考局 前時的的受化劑 限中腐 有。 前 時 時 的 和 定 新 的 和 的 和 的 和 的 和 的 和 的 和 的 和 的 和 的 和 的
銅質外殼的局部腐 蝕	銅質外殼在無氧環境下,不會 有局部腐蝕發生。局部腐蝕反 應可能發生在有氧環境下。	需考慮。由於在有氧環 境下可能存在之腐蝕劑 並不會造成大量腐蝕, 因此,所造成局部腐蝕 程度很小。
銅質外殼的應力腐 蝕龜裂	應力腐蝕龜裂媒介不易透過擴 散到達銅表面,所以,沒有足 夠發生應力腐蝕龜裂的媒介; 此外,腐蝕電位與pH值並沒 有高於Cu ₂ O/CuO反應線之 上,因此,應力腐蝕龜裂不會 發生。	不考慮。不會同時達成 應力腐蝕龜裂條件。
地電流或雜散電流 腐蝕	岩石基質的孔隙水離子是主要 的電負載體,增加外部電場並 不會造成明顯的腐蝕增加,因 此可忽略地電流或雜散電流所 造成之腐蝕影響。	不考慮。只有在非常高 的交流電電流密度下才 能觀察到腐蝕作用。

表 4-9:參考案例之腐蝕作用篩選(續)

腐蝕作用	参考案例之腐蝕作用說明	作用類別
微生物腐蝕	沒有文獻提出有微生物會直接 造成處置環境中的銅發生嚴重 腐蝕。	不考慮。已將微生物的 還原反應間接造成銅發 生腐蝕反應,歸類於全 面腐蝕。
純水中的銅腐蝕	由熱力學的角度看來,銅在純 水中的反應幾乎不會發生。	不考慮。此機制不會發 生。
輻射對孔蝕、SCC 和氫脆的影響	在非常高劑量率的照射下,會 使銅鈍化並導致孔蝕,並認為 輻射照射後會促進銅吸收氫及 增加SCC和氫脆的可能性。	不考慮。僅在非常高劑 量率的照射下,才有可 能發生。

表 4-10:案例之邊界條件

案例 (Case)	密度流	上邊界	測邊界	說明
1	無	鹽度=0%; 靜水壓力= 0 Pa	鹽度= 0%; 淨入滲率= 0mm/y	簡化密度流的效應。 以功能評估結果,選定 此案例為基本案例。
2	無	鹽度=0%; 靜水壓力= 0 Pa	鹽度= 0%; 淨入滲率= 0mm/y	CASE 1的變異案例;簡 化密度流的效應;假設 -700 m以下母岩的水力 傳導係數為10 ⁻¹² m/s。
3	無	鹽度=0%; 靜水壓力= 0 Pa	鹽度= 0%; 淨入滲率= 0mm/y	CASE 1的變異案例;簡 化密度流的效應;假設 岩脈的水力傳導係數為 10 ⁻¹² m/s。
4	無	鹽度=0%; 靜水壓力= 0 Pa	鹽度= 0%; 淨入滲率= 0 mm/y	CASE 1的變異案例;簡 化密度流的效應;同時 假設-700 m以下的母岩 及所有岩脈的水力傳導 係數降低為10 ⁻¹² m/s。
5	無	鹽度=0%; 靜水壓力= 0 Pa	鹽度= 0%; 區域梯度= 1%	CASE 1的變異案例;簡 化密度流的效應;假設 受西方大陸地區的梯度 影響,在NNW-SSE 方向有1%梯度差異。

	一种权权际的	西一 取应0 四八	风叭间的放示的峰	4 只 小 1
處置孔編號	等效流率 (m ³ /yr)	侵蝕時間 (yr)	腐蝕時間 (yr)	失效時間 (yr)
DH-631	0.0119	1.61×10^{5}	2.96×10^{7}	2.98×10^{7}
DH-121	0.0092	1.79×10^{5}	3.87×10^{7}	3.89×10^{7}
DH-2712	0.0086	1.85×10^{5}	4.09×10^{7}	4.11×10^{7}
DH-2594	0.0077	2.01×10^{5}	4.60×10^{7}	4.62×10^{7}
DH-1433	0.0071	1.99×10^{5}	5.02×10^{7}	5.04×10^{7}

表 4-11:CASE 1離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料

 $\frac{DH-1433}{\Xi : [HS^-]=5.37 \times 10^{-6} \text{ mol/L} \circ}$

表 4-12: CASE 2離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料

虚置习编辑	等效流率	侵蝕時間	腐蝕時間	失效時間
火 見りし ※明初し	(m ³ /yr)	(yr)	(yr)	(yr)
DH-631	0.0163	1.41×10^{5}	2.17×10^{7}	2.19×10^{7}
DH-121	0.0134	1.53×10^{5}	2.63×10^{7}	2.65×10^{7}
DH-1433	0.0104	1.70×10^{5}	3.40×10^{7}	3.42×10^{7}
DH-1258	0.0100	1.72×10^{5}	3.52×10^{7}	3.54×10^{7}
DH-398	0.0093	1.78×10^{5}	3.82×10^{7}	3.84×10^{7}

註: [HS⁻]= 5.37×10^{-6} mol/L。

表 4-13: CASE 3離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料

虚罢了绝跳	等效流率	侵蝕時間	腐蝕時間	失效時間
処里での開加	(m^3/yr)	(yr)	(yr)	(yr)
DH-631	0.0132	1.54×10^{5}	2.68×10^{7}	2.70×10^{7}
DH-121	0.0099	1.74×10^{5}	3.59×10^{7}	3.61×10^{7}
DH-1433	0.0092	1.79×10^{5}	3.86×10^{7}	3.88×10^{7}
DH-1258	0.0080	1.89×10^{5}	4.40×10^{7}	4.42×10^{7}
DH-2594	0.0069	2.11×10^{5}	5.17×10^{7}	5.17×10^{7}

註: [HS⁻]= 5.37×10^{-6} mol/L。

表 4-14: CASE 4離散裂隙網路中最短5個失效時間的廢棄物罐資料

處置孔編號	等效流率 (m ³ /vr)	侵蝕時間 (vr)	腐蝕時間 (vr)	失效時間 (vr)
DH-631	0.0165	1.41×10^{5}	2.15×10^{7}	2.16×10^{7}
DH-121	0.0133	1.54×10^{5}	2.66×10^{7}	2.68×10^{7}
DH-1433	0.0108	1.68×10^{5}	3.29×10^{7}	3.30×10^{7}
DH-1258	0.0100	1.73×10^{5}	3.54×10^{7}	3.55×10^{7}
DH-398	0.0092	1.79×10^{5}	3.85×10^{7}	3.86×10^{7}

註:[HS⁻]=5.37×10⁻⁶ mol/L。

表	4-15	: CASE	5離散	裂隙網路	中最	短5個分	夫效日	年間的]廢	棄物	罐	資料
---	------	--------	-----	------	----	------	-----	-----	----	----	---	----

唐罢了绝踪	等效流率	侵蝕時間	腐蝕時間	失效時間
处重机等的	(m^3/yr)	(yr)	(yr)	(yr)
DH-631	0.0139	1.51×10^{5}	2.55×10^{7}	2.56×10^{7}
DH-121	0.0103	1.71×10^{5}	3.44×10^{7}	3.46×10^{7}
DH-1433	0.0091	1.80×10^{5}	3.90×10^{7}	3.92×10^{7}
DH-1258	0.0083	1.87×10^{5}	4.29×10^{7}	4.31×10^{7}
DH-2712	0.0080	1.91×10^{5}	4.45×10^{7}	4.47×10^{7}

註:[HS⁻]=5.37×10⁻⁶ mol/L。

表 4-16:封閉初期氧氣誘發腐蝕評估結果比較

-	參考案例	SKB TR-10-66	瑞典/芬蘭	加拿大	瑞士
全面腐 蝕深度 (mm)	0.102	0.123	0.084	0.17	<0.100
局部腐 蝕深度 (mm)	0.102 (經驗值) 0.408 (保守值)	-	0.084 (經驗值) 0.34 (保守值)	0.1 (表面粗糙度)	<0.100 (表面粗糙度)

表 4-17:塔伏分析銅質攪拌銲接與銅基材結果

-	開路電位 (V)	腐蝕電位(mV)	腐蝕電流(uA/cm²)	腐蝕速率(mm/yr)(有氧環境)
FSW-1	0.047	-147.11	83.98	3.0394
FSW-2	0.045	-164.60	90.09	3.3691
Cu-1	0.031	-153.75	2.22	0.0802
Cu-2	0.025	-116.49	2.21	0.0799

表 4-18:燃料束長度變化評估

燃料設計	燃料束長度 (mm)	燃料棒長度 (mm)	預估最長伸 長量 (mm)	預估最終燃 料束長度 (mm)	備註
GE8×8-1	4,474.5	4,067	48.8	4,523.3	-
GE8×8-2	4,474.5	4,067	48.8	4,523.3	-
SPC8×8-2	4,350.8	4,089.4	49.1	4,399.9	-
GE9B	4,474.5	4,067	48.8	4,523.3	-
ATRIUM-10	4,470.0	4,081	49.0	4,470	中央大水 棒,需考慮 錯四合金照 射成長量
GE12	4,468.1	4,076	48.9	4,517	僅4束





(a) 氯離子濃度0.001 mol/L及0.01 mol/L呈現重量增加

(b) 氯離子濃度0.1 mol/L及1 mol/L呈現重量減少

圖 4-24: 無氧銅在有氧環境不同氯離子濃度腐蝕450天之重量變化



pH=7



pH=9



pH=11

圖 4-25:SEM觀察無氧銅於氯離子濃度0.001 mol/L條件下腐蝕450天之表面型



圖 4-26:有氧環境氯離子濃度0.001 mol/L腐蝕450天後之塔伏分析圖



圖 4-27:有氧環境鹼氯腐蝕對無氧銅抗拉強度與伸長率之影響


側面頸縮



杯形斷口



韌窩斷面特徵

圖 4-28:有氧環境無氧銅鹼氯腐蝕450天之斷面型態觀察



圖 4-29:高放射性廢棄物深層處置銅質外殼腐蝕評估/模擬模式流程圖



圖 4-30:長300 mm×寬50 mm×厚15 mm的試片在進給速率60 mm/min下進行 摩擦攪拌銲接後之銲道表面



高速鋼 Inconel 601 Nimonic 75

圖 4-31: 銲接後工具之表面



圖 4-32:厚度15 mm試片,進給速度45 mm/min條件下之超音波檢測



圖 4-33:全斷面縮尺型鑄鐵內襯之造模照片 註:圖(a)為鋼鐵方管組裝;圖(b)為鋼鐵方管定位;圖(c)為造模;圖(d)為含澆鑄口之鑄模。



圖 4-34:全斷面縮尺型鑄鐵內襯之澆鑄照片 註:圖(a)為添加球化劑和接種劑;圖(b)為澆鑄。



圖 4-35:全斷面縮尺型鑄鐵內襯之拆模及切取附鑄試片 註:圖(a)為拆模;圖(b)為切取附鑄試片。



圖 4-36:全斷面縮尺球墨鑄鐵內襯之液滲(PT)檢驗滲透液作業



圖 4-37:全斷面縮尺球墨鑄鐵內襯之UT檢驗照片

4.4. 緩衝材料與回填材料研發技術

4.4.1. 回填材料設計與施工

為提供用過核子燃料最終處置設施之安全,回填材料之障壁功能 需考量在長時間的環境影響下,仍能保持原本的設計功能及性能,以 維持處置設施的安全性。當回填材料安裝前,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。考量處置設施設 計採多重障壁原則,針對用過核子燃料提供相對的防護避免有害影 響,並且抵抗可能發生的環境事件或作用,以維持處置設施的功能與 安全;因此,所要求的回填材料障壁功能需求如表 4-19第1欄所示。 設計需求主要提供回填材料的設計規範,包含回填材料設計所要求的 性質與參數,提供給回填材料設計參照的定量訊息。回填材料之功能 需求、設計參數及設計需求如表 4-19所示。

回填材料之參考設計,是依前述之設計參數分別給定一個設計 值,在驗證參考設計時,應該表示回填材料的設計參數值可符合設計 需求,且有相對應的生產及施工技術。目前回填材料之參考設計,考 量施工效率及回填均勻度,以預壓製膨潤土塊體送至隧道堆疊之方式 回填。依我國目前處置隧道設計尺寸底部寬度420 cm、高480 cm(含 頂拱),以可製造塊體尺寸規格及最大面積塊體充填量進行設計,目 前參考設計各元件之規格如表 4-20,回填材料塊體及處置隧道岩壁間 之間隙及處置隧道底床,則以膨潤土填充料填充。

回填材料塊體製作方式為單軸壓縮方法,製作程序如下:

- (1) 依表 4-20中之塊體元件規格,計算目標尺寸塊體之體積,並以 需求之乾密度計算出需填充之膨潤土重量;
- (2) 將膨潤土均勻充填入塊體模具中,並整平表面;
- (3)於膨潤土上方置入上壓桿,將模具運送入壓力機中,以單向施加 壓力使塊體壓實至目標尺寸。

為避免壓製過程中因膨潤土孔隙間的空氣產生額外的內壓力,影響壓製塊體之效率,模具須具備排氣設計。膨潤土填充料可以滾壓式

的壓錠設備製作膨潤土顆粒, 粒料幾何尺寸可依填充率進一步測試, 以取得最佳之粒料尺寸。

回填材料塊體之檢驗項目如下:

- (1) 膨潤土原料分析: 檢驗膨潤土中之蒙脫石含量須大於50%以上,以確保回填材料之 回賬特性可符合需求;硫化物含量小於0.5%,總硫含量(包含硫 化物)小於1%,有機碳含量小於1%,以避免膨潤土中的礦物成份, 會對緩衝材料及廢棄物罐可能造成的化學影響。
- (2)含水量量測: 製作塊體前,調整膨潤土原料之含水量為一致,以利塊體之壓製 及乾密度之計算。
- (3) 塊體密度與尺寸之檢驗: 量測壓製完成之塊體重量及體積,以計算塊體成品是否符合參考 設計規格。
- (4)填充料密度與尺寸之檢驗:
 量測壓製完成之填充料單一顆粒重量及體積,以計算填充料成品
 是否符合參考設計規格。

由表 4-19中之設計需求得知,回填材料達到設計需求之控制參 數為回填材料之設計密度,圖 4-38及圖 4-39分別為MX-80型膨潤土 於不同密度條件下之回脹壓力與水力傳導係數之關係,參考設計之規 格可經由材料的試驗確認是否符合設計需求,依表 4-20所計算出處 置隧道回填後之乾密度約為1,461 kg/m³,在可能的誤差條件下之乾 密度為1,408 kg/m³,而在此乾密度條件下之MX-80型膨潤土於純水條 件下的回賬壓力約為1.5 MPa,皆符合設計需求之條件,考量地下水 條件影響,以模擬離島結晶岩測試區地下水條件下,其回賬壓力約為 2.5 MPa;而不同乾密度之水力傳導係數在乾密度1,408 kg/m³時,純 水條件及模擬離島結晶岩測試區地下水條件下的水力傳導係數約為 2×10⁻¹³ m/s,亦符合設計需求之條件。

本研究進行小型塊體壓製技術發展,建立膨潤土塊體乾密度與壓 製應力之關係數據,如圖 4-40,以不同含水條件之MX-80型膨潤土試 體、含水量15.7%之SPV-200膨潤土試體及含水量8.2%之高廟子GMZ 膨潤土試體進行試驗; SPV-200膨潤土與MX-80型膨潤土同為美國 American Colloids公司生產的膨潤土,具相似化學組成,僅土壤粒徑 尺寸之差異。由結果可知SPV-200膨潤土與MX-80型膨潤土雖然成分 大致相同,但是因為其土顆粒粒徑分布之差異,造成壓製同樣乾密度 之塊體,MX-80型膨潤土的壓製應力會小於SPV-200膨潤土及GMZ膨 潤土,且此情況會隨著乾密度的提升而愈明顯。從塊體製作施工的角 度,MX-80型膨潤土粒徑較SPV-200膨潤土及GMZ膨潤土大,在製作塊 體的過程中較能避免揚塵,減少在製作過程中因材料逸散造成重量損 失,導致塊體乾密度下降的情形。總結以上,無論在壓製塊體時所需 之應力,以及施工時塊體品質之穩定,MX-80型膨潤土皆具有較好的 施工特性。

取得塊體乾密度與壓製應力之關係,可評估壓置設備容量,以利 後續規劃大尺寸或原型尺寸之塊體製造技術發展與規劃。依據圖 4-40 塊 體 壓 製 應 力 與 乾 密 度 之 關 係 , MX-80 型 膨 潤 土 於 含 水 量 17% 時, 壓製塊體密度達乾密度1,700 kg/m³,所需之壓製應力為155 kgf/cm²(約15 MPa);依表 4-20規劃之參考回填材料塊體規格,製作 長70 cm、寬66 cm、高52 cm塊體所需之抗壓機容量約707 Tf。另製 作長70 cm、寬60 cm、高25 cm塊體所需之抗壓機容量約643 Tf,故 規劃採用1,000 Tf之壓力設備,即可將含水量18%之MX-80型膨潤土, 製作成上述設計尺寸及密度1,700 kg/m³。壓置設備規格除設備容量 之外,亦需考量模具設計之尺度,壓製設備之工作空間需可容納所設 計模具之尺寸,即除塊體尺寸之外,亦需考量模具外模的尺寸。 壓置 設備之行程亦為考量之重點,一般抗壓設備行程約為100 mm至300 mm之間,考量模具本身高度及膨潤土填料至模具的鬆土體積、加上 模具上壓桿之高度,故壓置設備之高度空間與壓製行程亦需納入考 量。必須於模具設計時,測試膨潤土之充填係數,即預壓實塊體之統 體密度(壓實狀態下之膨潤土含水重除以體積),與膨潤土鬆散狀態下

之統體密度之比,進而計算膨潤土填模後之高度,評估模具外模高度、 壓桿長度、與壓置塊體所須之空間與行程,以及因不同膨潤土材料粒 徑及含水量而產生之差異。考量拆模之角隅破壞,於模具4個角隅處 設計圓弧狀,以降低脫模時之破壞情形。

4.4.2. 緩衝材料高圍壓力學參數測試

防止廢棄物罐沉陷為緩衝材料的安全功能之一,可避免廢棄物罐 與處置孔底部的母岩直接接觸。驗證緩衝材料的設計具有此項安全功 能的方式,通常採用沉陷量評估(SKB, 2011a, p255),當長期沉陷量 評估結果,與廢棄物罐底部的緩衝材料厚度相比非常微小,則可證明 緩衝材料可維持此項安全功能。因此,廢棄物罐長期沉陷評估技術, 在用過核子燃料最終處置性能/安全評估的發展具有必要性。

本研究評估緩衝材料沉陷主要發生位置如圖 4-41所示,由於緩 衝材料初期為不飽和狀態,會有吸水回脹現象,本研究未考慮回脹對 廢棄物罐的抬升量,僅針對飽和後緩衝材料之密度進行分析。為預測 廢棄物罐重量所造成的沉陷,採用土壤力學評估法及FLAC 3D數值模 式進行分析,並與瑞典SKB的報告結果進行比較,分析結果可供確認 緩衝材料之規格足以確保安全功能,並對數值分析能力長期發展所需 研究提供經驗。

本研究為模擬在廢棄物罐重量作用下,廢棄物罐底部緩衝材料的 沉陷歷時。先以傳統壓密實驗結果,進行土壤力學評估法之沉陷計算, 並與瑞典SKB報告中以ABAQUS進行的廢棄物罐沉陷數值模擬結果比 較;再以彈性、多孔彈性和黏彈性模型的FLAC 3D模型進行分析,模 擬飽和密度1,900 kg/m³與2,050 kg/m³的緩衝材料於10萬年後的沉陷結 果。

土壤力學評估法依據單向度壓密實驗得到的參數,進行沉陷分析 計算,初步估計廢棄物罐的沉陷量。沉陷分為3個部分,彈性沉陷階 段、壓密沉陷階段和潛變沉陷階段。3個階段的沉陷量及總沉陷量則 於表 4-21中呈現,並繪製壓密沉陷於圖 4-42以利比較,最終計算各 試驗總沉陷量且繪製於圖 4-43。依照實驗結果所得之參數進行計算,

廢棄物罐底部緩衝材料壓密沉陷量,緩衝材料統體單位重為18 kN/m³ 之試體,總沉陷量為33.168 mm,而緩衝材料的統體單位重為20 kN/m³之試體,總沉陷量為14.009 mm (詳見表 4-21)。壓密分析法在 加載到最後1階時(12.8 MPa),通過位移斜率得出的潛變沉陷,遠遠 大於數值模擬中施加在廢棄物罐的荷重,因此,潛變沉陷值會較大。 此一結果若對照瑞典SKB之試驗條件約與SKB-4及SKB-1之模擬條件 相當,對應之模擬結果分別為2.42 mm及0.35 mm,故土壤力學評估 法結果相當保守。其主要原因為10萬年之長期沉陷評估主要之沉陷量 來自潛變,而壓密試驗所得之潛變斜率由於僅進行約1年的時間,故 用以評估10萬年之潛變量過於保守,因此,10萬年之長期沉陷評估,故

FLAC 3D模型模擬範圍如圖 4-44,模擬分析流程如圖 4-45,將 緩衝材料區分為壓密及潛變2個階段,而為保守評估忽略緩衝材料回 脹階段,壓密階段的材料模式考慮為彈性模型與孔隙模型,潛變階段 考慮為彈性模型與標準黏滯性模型。而為了確認模型的合適性,先進 行FLAC 3D數值模型、與瑞典SKB ABAQUS數值模型沉陷值模擬結果 的相互驗證,數值模型使用之輸入參數如表 4-22所示,包括單向度 壓密試驗和三軸試驗、FLAC 3D使用手冊與瑞典SKB之技術報告(SKB, 1999;Åkesson et al., 2010;SKB, 2011a)。數值模型模擬總計共9組, FLAC 3D模型模擬結果詳如圖 4-46和圖 4-47(實線為FLAC 3D之分 析結果,虛線則為瑞典SKB採用ABAQUS之分析結果)所示,不同之模 型(Drucker Prager及Elastic)與所使用之數值分析軟體,使試驗結果 有所差別(ABAQUS與FLAC 3D),根據表 4-23,ABAQUS模型與FLAC 3D模型在不同初始條件下,廢棄物罐於10萬年後之沉陷預估差值從 0.2 mm到16.45 mm不等

在參考瑞典SKB成果進行參數最佳化,其中參數最佳化係為了獲 得與瑞典SKB更接近的結果,參數研究進行了試驗8(此試驗具有最大 的不同)。透過改變柏松比、並以乘數增加彈性模數。在運行35個試 算後如圖 4-48,最終沉陷結果與瑞典SKB結果進行比較,以誤差最小 之調整後的柏松比以及彈性模數乘數,作為最佳化後之輸入。結果如

圖 4-49和圖 4-50(實線為FLAC 3D之分析結果,虛線則為瑞典SKB採 用ABAQUS之分析結果)所示,可得和瑞典SKB報告(Åkesson et al., 2010)幾乎一致之結果(詳見表 4-24),10萬年後廢棄物罐的沉陷差異 範圍在0.05 mm到6.12 mm。

廢棄物處置孔FLAC 3D數值模型如圖 4-51所示,界面如圖 4-52 之設定,依據前述最佳化參數研究,緩衝材料各項輸入參數包括飽和 密度、孔隙率、Biot模數、彈性模數、柏松比、體積模數、剪切模數 如表 4-25所示,其中根據SNFD2017報告緩衝材料之設計密度1,900 kg/m³至2,050 kg/m³, FLAC 3D數值模型模擬結果,廢棄物罐10萬年 的沉陷歷時如圖 4-53所示,圖 4-54與圖 4-55則分別為飽和密度 1,900 kg/m³與2,050 kg/m³廢棄物罐下方緩衝材料的沉陷分布。最大 沉陷預估值分別為0.24 mm及 0.66 mm, 故以目前SNFD2017報告所 設計之飽和密度在1,900 kg/m³與2,050 kg/m³的條件下,廢棄物罐之 沉陷量以FLAC 3D數值模型模擬的最大沉陷預估值在0.24 mm至0.66 mm之間,而此結果因在相同柏松比的前提下,所計算出之彈性模數 及體積模數下,密度1,900 kg/m³會高於2,050 kg/m³故導致沉陷有差 異之結果。而此結果因在相同柏松比的前提下,所計算出之彈性模數 及體積模數下,密度1,900 kg/m3會高於2,050 kg/m3故導致沉陷有 差異之結果。現階段的模擬主要係搭配為期1年的單向度壓密試驗結 果,評估10萬年之長期潛變仍屬不足,在保守假設下,緩衝材料亦未 考量其回脹之特性,僅考量緩衝材料已飽和無回脹壓力狀態下之長期 壓密及潛變。

4.4.3. 工程障壁高圍壓縮尺測試設備與方法

深層地質處置主要概念為包含廢棄物罐、緩衝材料、回填材料等 工程障壁系統及周圍母岩,發揮核種的圍阻與遲滯功能。由於用過核 子燃料最終處置需考慮高應力與高水壓環境、斷層錯動以及地震等影 響,所造成岩體裂隙錯動或潛變,而導致緩衝材料和廢棄物罐的受剪 變形或位移行為,甚至受到不同溫度環境時的受剪行為,目前已採用

數值模型進行廢棄物罐耐剪力性能分析,為驗證數值模型的可靠性, 不少國家已開始剪力模型試驗。

因此,為了可進行縮尺廢棄物罐與緩衝材料的剪力試驗,一般三 軸室(如圖 4-56)無法裝載本研究之試體,且無法承受高圍壓,因此, 需要建構大尺寸三軸室等特殊之設備,相較傳統三軸試驗有較大的加 壓空間,能對試體進行高圍壓與軸壓試驗,除模擬試體處於工程障壁 系統之現地應力條件,亦考量可能的障壁破壞情節下現地應力條件, 故屬於特制化之前端研究。

本研究之目的在建立可容納廢棄物罐與緩衝材料縮尺試體的大 尺寸高圍壓三軸室,設計上需針對特殊荷重裝置設計,而該試驗具有 展示的效果,可瞭解縮尺廢棄物罐與緩衝材料的受剪變形行為,有助 於提高對處置系統性能評估的準確性。

大尺寸三軸室設備完成設計與製作後,利用萬能壓縮試驗機進行 緩衝材料圓柱試體的軸力加壓測試,並利用油壓機提供30 MPa室壓條 件下的滲漏檢查。測試結果顯示,此設備能在承載高室壓環境(30 MPa)下不發生滲漏情況,且加壓軸桿能夠確實傳遞預期的軸力,並使 高強度的緩衝材料圓柱試體達到破壞狀態,說明如下:

(1) 完成大尺寸高圍壓三軸室之設計及製作,並完成功能測試:

由ASME規範可得到三軸室尺寸及材料選用之條件與結果,如圖 4-57,外罩厚度3 cm,可承受的理論容許壓力為62.2 MPa;頂蓋 與底座皆為5 cm厚,可承受的理論容許壓力為48.1 MPa。施加30 MPa室壓後,在柏松比為0.275時,檢核頂蓋所受內部應力時會超 過材料容許應力,且有0.1 cm的變形,因此於頂蓋開口處增設加 勁橫樑減少變形,如圖 4-58。

使用有限元素法(Finite Element Method, FEM)數值模行分析結 果顯示,施加30 MPa室壓後,頂蓋在有加勁橫樑情況下,在頂蓋 於中間開孔處會有最大應力40.320 MPa,符合本研究三軸室對設 計應力的要求,且最大變形量為0.047 cm。

執行測試大尺寸三軸室的驗證程序著重於滲漏與軸力施加,試驗 表格如表 4-26。在壓力為30 MPa的測試項目下,逐漸地增加三

軸室的內部壓力,由0 MPa至30 MPa測試三軸室的上、下O型環 等止漏設施的作用。試驗主要透過高壓管傳遞水壓至大尺寸三軸 儀內部(圖 4-59),油壓及水壓分別使用2個壓力計量測(圖 4-60 和圖 4-61),試驗過程以油壓幫浦(圖 4-62)逐漸增加室壓直到 30 MPa。加載試驗以影片記錄(圖 4-63)。試驗結果為大尺寸三 軸室在30 MPa下,軸桿處、接合處並無滲漏情況。在軸桿加壓試 驗,置放試體尺寸為高10 cm、直徑5 cm的緩衝材料圓柱試體於 三軸室裡,以油壓千斤頂於加壓軸桿上施加軸力,由於此試驗目 的為測試試體所能承載之軸向壓力,故試驗過程中並無加水,以 保持試體之最大強度,而後增加軸向力直至試體破壞,試驗示意 圖及試驗結果如圖 4-64。

- (2) 評估國際上最終處置之廢棄物罐剪力試驗方法:
 - Boergesson(1986, p6-p68)提及母岩運動作用對廢棄物罐的影響 之基本概念如圖 4-65所示,因此進行1/10縮尺的廢棄物罐大尺 寸剪切試驗,以探討剪力和剪切速率對緩衝材料及其中的廢棄物 罐處置系統之影響,其實驗裝置如圖 4-66所示,試驗模型如圖 4-67所示。試驗中分別以0.031 mm/s、1.9 mm/s和160 mm/s 3 種不同的剪切速率進行試驗,結果顯示在具有相同剪力位移值 (15 mm)的條件下,較大的剪切速率需要較大的剪切力(如圖 4-68所示)。因此,裂隙錯動時,快速剪切速率所產生的剪切力, 與裂隙潛變位移時較低剪切速率產生的剪切力,2者之間存在相 當大的差異。

另一方面,這項試驗還同時模擬吸水過程中緩衝材料的回賬壓 力,尤其是在剪切過程中廢棄物罐的破壞型式等有參考價值的資 訊。根據該報告,由於母岩剪切作用,有5種可能的變形型式(如 圖 4-69所示)。試驗結束緩衝材料被移除後,廢棄物罐最可能的 變形行為如圖 4-69(e),實際試驗後變形情況如圖 4-70所示。然 而,在報告中並未提及靜水壓力、上覆壓力和溫度效應,且本研 究中的剪切面固定為水平面,無法模擬處置系統受不同角度剪切

的情況,除此之外該實驗程序中的荷重是定速率,並未考慮動態 和圍壓荷重效應的影響。

Boergesson(1986, p42)使用安裝於日本東海研究中心的BORE-SHEAR計畫之設備,進行1/10或1/5原型縮尺模型的位移-剪力行 為研究,試驗使用體積密度為1,950 kg/m³、2,000 kg/m³、2,050 kg/m³ 的飽和膨潤土;位移速率為0.01 m/s、0.1 m/s、1.0 m/s;最大位 移為緩衝材料環塊的30%至60%。圖 4-71顯示此本研究的試驗 設備配置與設計。

Nishimura et al.(2006, p153-p158)進行工程障壁系統受剪切之 研究,於日本東海研究中心建立1套液壓剪切裝置,探討1/20縮 尺廢棄物罐與緩衝材料系統受2種不同的剪切速率(0.1 m/s和 0.01 m/s)和2種不同剪力位移(40 mm和70 mm)情況下的行為 (圖 4-72)。剪切試驗前,緩衝材料利用蒸餾水使其飽和,試體內 分別安裝配置總壓力計、孔隙水壓計、位移計以及荷重感測器, 配置圖如圖 4-73所示,同時進行一系列數值模型模擬,而後縮 尺剪切試驗結果進行比較。此研究結果顯示剪切速率越快,內部 總壓力越大,與瑞典SKB關於剪切速率對總壓力的影響之研究結 果一致。

Boergesson and Hernelind(2006, p43)於2006年提出在Äspö Pillar施作原型剪切試驗之穩定性的可行性研究,試驗使用完全 飽和之緩衝材料,原型剪切試驗配置如圖 4-74所示。因設備的 極限推力為23,750 kN,比較難以執行大尺寸試體的快剪切速率 試驗,因此,本研究以0.1 m/s的剪切速率進行測試。

表 4-19:回填材料之功能需求、設計參數及設計需求

回填材料障壁功能需求	設計參數	設計需求
限制地下水流(以平流的 方式)流進處置隧道中	安裝後密度控制: 膨潤 土塊體及填充料之乾密 度與含水量控制、處置 隧道塊體與填充料之填 充量 回填材料飽和後之回賬 壓力及水力傳導係數	水力傳導係數需小於 10 ⁻¹⁰ m/s 回賬壓力需大於0.1 MPa
抑制緩衝材料回賬上舉 之壓力	安裝後密度控制: 膨潤 土塊體及填充料之乾密 度與含水量控制、處置 隧道塊體與填充料之填 充量 回填材料飽和過程中及 飽和後之夯實度(緊密 度)	膨潤土填充料及回填材 料的乾密度在一開始乾 燥狀態至完全飽和後, 必須確保皆能使緩衝材 料維持原本的設計密度 條件內。 回填材料必須可抵抗緩 衝材料之回脹壓力,使 緩衝材料能維持體積並 且保持回脹壓力大於2 MPa之條件。
對其他工程障壁無有害 影響	膨潤土原料組成-有害物 含量限制 探討材料組成對緩衝材 料及廢棄物罐可能造成 的化學影響。	-
在處置設施環境中保持 長期的耐久性與保持原 本的設計功能	安裝後密度控制: 膨潤 土塊體、及隧道底床之 乾密度與含水量控制、 處置隧道塊體、填充料 與隧道底床之填充量 處置設施環境對回填材 料水力傳導係數與回賬 壓力之長期影響,仍需 保有原本的設計限值	-

資料來源:參考自SKB (2010b, p26)

表	4-20:	回填材料之塊體	、膨潤」	:填充料規格及	、安裝後之乾密度
---	-------	---------	------	---------	----------

	設計參數	設計規格	可接受之誤差
	乾密度(kg/m ³)	1,700	+/- 50
	尺寸(cm)	$70 \times 66 \times 52$ $70 \times 60 \times 25$	+/-2
塊體	塊體填充處置隧道之體積 (m ³ /m)	16.96	> 60 %之塊體填充量,塊體 與處置隧道岩壁面保留 > 10 cm之空間,以利膨潤土 填充料管線施工
	顆粒乾密度(kg/m ³)	1,700	-
膨潤	顆粒尺寸(cm)	-	顆粒大小及幾何,視測試後 之充填度決定
土填	塊體與處置隧道岩壁面之 填充料體積	視處置隧道岩壁開挖面與回 填材料塊體間之空間而定	依實際充填重量紀錄
充料	底床	厚度 10 cm	依實際開挖面及充填重量紀 錄
	充填後乾密度(kg/m ³)	> 1,000	-
	隧道斷面總體積(m ³ /m)	25	-
回填	塊體與處置隧道岩壁間隙 體積與塊體體積之比	2 %	-
後之條	鵬潤土填充料體積(含底 床)(m ³ /m)	$25 - 16.96 \times (1 + 0.02) = 7.7$	$25 - 25 \times 0.60 \times (1 + 0.02) = 9.7$
件	安裝後之整體乾密度(kg/ m ³)	1,461.28	1,408

註:

 $70 \times 66 \times 52 \text{ cm}$ 塊體充填體積(m³/m): 1 × 0.66 × 0.52 × 42(塊) = 14.41。 70 × 60 × 25 cm 塊體充填體積(m³/m): 1 × 0.6 × 0.25 × 17(塊) = 2.55。 塊 體 充 填 總 體 積 (m³/m): 14.41 + 2.55 = 16.96。

表 4-21:總沉陷分析表

試驗	沉陷(mm)					
-	彈性	回脹與壓密	潛變	總沉陷量		
D18	1.231	-2.683	34.620	33.168		
D20	3.271	-21.469	32.206	14.008		

註:總沉陷量=彈性沉陷+壓密沉陷+潛變沉陷。

表 4-22·用於模擬長期沉陷之签	敷え	表
-------------------	----	---

試驗	飽 和 密度	孔隙率	Biot 模數	彈性 模數	柏松比	體積 模數	剪切 模數
-	[kg/m ³]	-	[Pa]	[Pa]	-	[Pa]	[Pa]
SKB-1	2,010	0.4318	4.98×10 ⁹	3.30×10 ⁷	0.46	1.83×10 ⁷	1.38×10 ⁷
SKB-2	1,950	0.4652	4.62×10 ⁹	1.65×10^{7}	0.46	9.17×10 ⁶	6.88×10 ⁶
SKB-3	1,890	0.4975	4.32×10 ⁹	8.25×10 ⁶	0.46	4.58×10 ⁶	3.44×10 ⁶
SKB-4	1,840	0.5305	4.05×10^{9}	4.13×10^{6}	0.46	2.29×10 ⁶	1.72×10^{6}
SKB-5	1,780	0.5633	3.82×10 ⁹	2.06×10 ⁶	0.46	1.15×10 ⁶	8.60×10 ⁵
SKB-6	1,720	0.5951	3.61×10 ⁹	1.03×10^{6}	0.46	5.73×10 ⁵	4.30×10^{5}
SKB-7	1,690	0.6139	3.50×10^{9}	7.51×10 ⁵	0.46	4.17×10 ⁵	3.13×10 ⁵
SKB-8	1,620	0.6528	3.29×10 ⁹	3.76×10 ⁵	0.46	2.09×10 ⁵	1.57×10^{5}

表 4-23:FLAC 3D與瑞典SKB結果比較

计路	FLAC 3D結果	瑞典SKB結果
824.430C	(mm)	(mm)
SKB-1	0.55	0.35
SKB-2	1.10	0.67
SKB-3	1.98	1.26
SKB-4	4.31	2.42
SKB-5	7.01	4.63
SKB-6	14.72	8.89
SKB-7	20.45	12.0
SKB-8	39.04	22.5

表 4-24:最佳化後FLAC 3D與瑞典SKB結果

試驗	最佳化後 FLAC 3D結果 (mm)	瑞典SKB結果 (mm)	差值 (mm)
SKB-1	0.40	0.35	0.05
SKB-2	0.77	0.67	0.10
SKB-3	1.42	1.26	0.16
SKB-4	3.11	2.42	0.69
SKB-5	5.02	4.63	0.39
SKB-6	10.83	8.89	1.94
SKB-7	15.05	12.00	3.05
SKB-8	28.62	22.50	6.12

註:差值=FLAC 3D結果-瑞典SKB結果。

表 4-25:廢棄物罐沉陷模擬的輸入參數表

Case	飽和 密度	孔隙 率	Biot 模數	Inputted Modulus	彈性 模數	柏松比	體積 模數	剪切 模數
-	kg/m ³	-	Pa	MPa	Pa	-	Pa	Pa
19	1,900	0.82	4.77×10 ⁹	69.23	4.945×107	0.4	2.88×10^{5}	2.37×10 ⁴
20.5	2,050	0.55	6.06×10 ⁹	22.18	2.218×107	0.4	9.24×10 ⁴	7.59×10 ³

表 4-26:驗證條件

試驗	室壓(MPa)	試體	主要查驗項目
P-30	30	No	漏水
T-1	0	100 mm×50 mm緩衝材料的圓 柱試體	加壓軸桿確實傳遞力量



圖 4-38: 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賬壓力



圖 4-39: 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



圖 4-40: 塊體乾密度與壓製應力之關係



圖 4-41:研究範圍示意圖



圖 4-42:各組試驗之沉陷分佈



圖 4-43:各組試驗之總沉陷量



圖 4-44:緩衝材料沉陷模擬示意圖

中英文對照:Roller boundary(圓柱邊界);Interface(界面);Canister load(廢棄物罐罐重); Water pressure(水壓);Unit(單位);Millimeter(毫米)。



圖 4-45:模擬流程圖

中英文對照: Consolidation(壓密); Creep(潛變); Initial condition(初始條件); Assign buffer properties(指定緩衝材料特性); Apply canister load(使用廢棄物罐載重); Solve and save result(解決並儲存結果); Change buffer properties (改變緩衝材料特性); 100.000 year of creep(100.000年潛變); Porous elastic(多孔彈性); Elastic(彈性); Viscosity creep(黏性潛變)。



圖 4-46:廢棄物罐沉陷的對數座標 註:SKB-為FLAC 3D之分析結果,skb-為SKB之分析結果。



圖 4-47:廢棄物罐沉陷的線性座標 註:SKB-為FLAC 3D之分析結果,skb-為SKB之分析結果。



圖 4-48:誤差評估



圖 4-49:最佳化後廢棄物罐之沉陷量對數圖 註:SKB-為FLAC 3D之分析結果,skb-為SKB之分析結果。



圖 4-50:最佳化後廢棄物罐沉陷量線性圖 註:SKB-為FLAC 3D之分析結果,skb-為SKB之分析結果。



圖 4-51: FLAC 3D模型圖



圖 4-52:界面表面



圖 4-53: 飽和密度1,900 kg/m³與2,050 kg/m³ 10萬年的沉陷歷時曲線



圖 4-54: 飽和密度1,900 kg/m3時廢棄物罐下方之沉陷分布

註:單位為m。



圖 4-55: 飽和密度2,050 kg/m3時廢棄物罐下方之沉陷分布

註:單位為m。



圖 4-56:一般土壤用三軸室



圖 4-57:大尺寸三軸室外部主要元件



圖 4-58: 鋁合金加勁橫樑



圖 4-59:加壓機



圖 4-60:油壓至30 MPa



圖 4-61:水壓至30 MPa



圖 4-62:油壓幫浦











圖 4-63: 試驗影片之擷取細節照片



圖 4-64:大尺寸三軸室示意圖及試體軸力測試結果



圖 4-65:母岩裂隙位移引致廢棄物罐變形之概念圖



圖 4-66:廢棄物罐剪切試驗裝置

參考資料: Boergesson(1986, p21-p23)



圖 4-67:廢棄物罐和緩衝材料安裝過程 參考資料: Boergesson(1986, p28)


圖 4-68:在定剪切總位移時,3種不同剪切速率與總推力的關係 參考資料:Boergesson(1986, p68)



圖 4-69:廢棄物罐可能破壞型式

參考資料: Boergesson(1986, p6)



圖 4-70:剪切後之廢棄物罐

參考資料: Boergesson(1986, p42)



Figure 4-4. Conceptual drawing of scaled rock shear analogue testing apparatus (side view, vertical central cross section).

中英文對照: Applied load(施加載重); Annular end plates(環形端板); Shearing loadig platen (剪切裝載壓板); Stainless steel test vessel(不銹鋼試驗容器); Cylinder filter(圓筒過濾器); Removable stainless steel end plate (可拆卸不銹鋼端板); End filter(尾端過濾器); Frictionless shear interface (無摩擦剪切界面); End restraining plate(端部約束板); Base support cradle(底座支架); O-ring seal (密封環); Frictionless shear surface (無摩擦剪切面); Top restraint cradle(頂部束制支架); Bentonite buffer(緩衝材料塊); Copper canister (銅罐); Cast iron insert(鑄鐵插件); Water inlet(注水孔)。

圖 4-71:瑞典SKB剪切模擬試驗概念配置圖

參考資料: SKB(2011b, p48)



圖 4-72:室內剪力試驗之儀器設備



圖 4-73: 感測器安裝配置圖

中英文對照: Buffer material(緩衝材料); Force transducer(力傳感測器); Strain transducer (應變感測器); Overpack(外包裝); Total pressure transducers(總應力感測器); Pore water pressure transducers (孔隙水壓感測器)。



圖 4-74: 試驗配置示意圖

參考資料: Boergesson and Hernelind(2006, p43)

中英文對照: Supporting plug(支撐封塞); Sliding plane(滑動平面); Shearing cylinder (剪力 缸); Steel flange(鋼輪軸); Bentonite blocks(膨潤土塊); Copper canister (銅罐); Front press beam(前壓力橫樑); Hydraulic cylinders (液壓缸); Rear press beam(後壓力橫樑)。

4.5. 處置設施設計技術方案

4.5.1. 隧道支撑材料之長期耐久性分析與驗證研究

本研究旨在探討隧道支撑材料之低鹼性水泥基質複合材料耐久 性,藉由鋼筋之腐蝕機率、氯離子擴散情形、孔隙結構分析與水化反 應物成分的耐久性分析,得知鋼筋在低鹼性砂漿與混凝土,對於鋼筋 之腐蝕機率與時間是否優於傳統砂漿與混凝土;以及藉由氯離子擴散 相關試驗,其中包括快速氯離子滲透試驗、加速氯離子滲透試驗與圍 塘試驗,交互比較氯離子之擴散行為,對低鹼性砂漿與混凝土之抗氯 離子程度進行評估。孔隙結構分布情況會影響結構物之耐久性質,故 透過壓汞孔隙試驗,對於孔隙大小與體積進行分析比較與判斷,而在 低鹼性材料中,水化反應物之存在,則透過電子顯微鏡觀察外觀並判 斷, 再利用X光繞射分析加以確認。配比設計採用ACI 211.1規範(ACI, 2002, ch1), 依據「隧道支撐系統材料規格研究」成果中所建議之配 比,進行28天抗壓強度、酸鹼值與水力傳導係數(即滲透係數)篩選之 配比,其篩選條件為28天抗壓強度>280 kgf/cm²、酸鹼值≤11及水力 傳導係數<10⁻⁸ m/s。砂漿與所使用之卜作嵐材料比例,如表 4-27所 示;混凝土與所使用之卜作嵐材料比例如表 4-28所示, 說明如下: (1) 乾縮試驗:

圖 4-75可發現當水泥砂漿乾縮之試體添加矽灰時,取代水泥 20%之矽灰和40%之飛灰的試體(M24)其乾縮量,比未添加卜作 嵐材料的試體要來的少,取代水泥40%之矽灰的試體(M40)乾縮 量則較為明顯。由圖 4-76所示,取代水泥40%之矽灰的試體 (C40)乾縮量前期,與未添加卜作嵐材料的試體差異不大;但後 期卻明顯增加,然而取代水泥20%之矽灰和40%之飛灰的試體 (C24),其乾縮量明顯比其他2個配比高出許多;而後期與取代水 泥40%之矽灰的試體(C40)接近。環狀乾縮試驗如圖 4-77所示, 對照組M之開裂時間為4天,斜率為-0.00481。

(2) 鋼筋腐蝕試驗:
所試驗之低鹼砂漿與低鹼混凝土經由180天監測下,開路電位維持-200 mV以上仍處於低於10%腐蝕機率的情況,對於現階段齡

期實屬稍短,但量測數值尚屬穩定,混凝土養護齡期180天之鋼筋腐蝕試驗如圖 4-78。

(2) 滲透試驗:

快速氯離子滲透試驗自各齡期觀察低鹼砂漿與低鹼混凝土,對照 組明顯皆屬於高氯離子滲透性,且隨養護齡期越長有下降之趨 勢;實驗組由於養護齡期28天時,就已達到氯離子滲透非常低之 標準,雖不明顯但隨養護齡期之增長仍具下降之趨勢。加速氯離 子滲透試驗藉由滲透深度所計算之氯離子非穩態遷移係數,能明 顯得知各個實驗配比之係數變化,同快速氯離子滲透試驗趨勢一 致,隨養護齡期之增長而使抗氯離子能力提高。圍塘試驗詳細試 驗步驟係參考ASTM C1543規範(ASTM, 2010, ch2)與AASHTO T259規範(AASHTO, 1980, ch2)進行作業,雖僅有單一齡期作為 氯離子滲透深度,與經計算之氯離子非穩態遷移係數進行比較, 仍可與快速氯離子滲透試驗及加速氯離子滲透試驗進行對照,整 體觀察其耐久性質優劣判斷,最佳者為M40與C40,其次為M24與 C24,最劣者為對照組M與C。

(5) 微觀結構分析:

壓汞孔隙試驗由於膠結孔隙並不具滲透行為,故觀看毛細孔隙進 行比較得知,M40在齡期28天至齡期91天期間,毛細孔隙膠少且 十分穩定,而M24毛細孔隙變化急遽下降,飛灰長期水化性質亦 會促使孔隙結構穩定,但仍需進行長期之觀察並再進一步證實。 電子顯微鏡觀測得知,各個配比孔隙隨齡期逐漸被填補C-S-H膠 體所填補,氫氧化鈣之消耗量屬具卜作嵐材料之配比最為快速, M24於齡期91天時仍可觀察到圓球狀飛灰存在,證明水化反應仍 在持續進行。

(7)水化反應物之成份與化學分析(XRD)對膨潤土之影響: 如圖 4-79所示,對照組M與實驗組M40與M24之氧化鈣與二氧化 矽可就由峰值進行對比,發現M之氧化鈣峰值較高,而M40與M24 則是二氧化矽峰值較高。混凝土的酸鹼值>11會影響膨潤土的回 脹能力,混凝土的酸鹼值來源主要來自氫氧化鈣的高鹼性,而氫 氧化鈣之峰值在M明顯居多,而M40與M24仍能發現氫氧化鈣之 峰值,但已屈指可數。

(8) 研究成果與國外研討技術報告比對:

本研究中M24與日本JAEA報告(JAEA, 2016, p16)之試體編號 HFSC424相似,其配比為40%為矽灰取代添加、20%飛灰取代添 加,JAEA之試體編號HFSC424試驗結果如圖 4-80所示,在1,000 倍率時可發現在C-S-H膠體周圍含有部分圓球,而10,000倍時可 明顯看出位於中心附近的球形顆粒,球形顆粒為尚未水化反應飛 灰顆粒。本研究圖 4-81所示,亦可發現相似圓球圖像,可驗證 本研究即使試樣養護至晚期時,仍舊會發現有尚未水化反應之飛 灰顆粒。

(9)壽命評估模式與耐久性設計準則: 本研究之低鹼性混凝土相較一般混凝土,具有較高的耐久性與使用年限,可在使用相對較少保護層設計下達到相同使用年限。

表 4-27:砂浆卜作嵐材料比例

試體編號	水泥用量(%)	矽灰用量(%)	飛灰用量(%)
М	100	0	0
M40	60	40	0
M24	40	20	40

表 4-28: 混凝土卜作嵐材料比例

試體編號	水泥用量(%)	矽灰用量(%)	飛灰用量(%)
С	100	0	0
C40	60	40	0
C24	40	20	40

表	4-29:	保護層深	度和擴散係數	数對鋼筋混凝土	開始腐蝕時間
---	-------	------	--------	---------	--------

	Chloride ion diffusion coefficient D, m^2/s							
Cover, mm	5×10^{-11}	5×10^{-13}						
	Time, yr							
25	0.56	5.6	56					
50	2.3	23.0	230					
75	5.0	50.0	500					
100	9.0	90.0	900					

中英文對照: Cover (保護層); Chloride ion diffusion coefficient (氯離子擴散係數); Time (時間)。



圖 4-75: 大氣養護條件下不同取代量之砂漿試體乾縮率(W/C=0.6)



圖 4-76: 大氣養護條件下不同取代量之混凝土試體乾縮率



圖 4-78:鋼筋腐蝕試驗(混凝土養護齡期180天)



中英文對照:Degree(角度);Arbr.Unit(任意單位)。



圖 4-80:日本JAEA試體編號HFSC424之SEM影像(×1,000倍) 資料來源:JAEA(2016, p16)



圖 4-81:配比M24之SEM影像(×5,000倍)

5. 安全評估精進

為能建構處置設施長期之安全,需透過安全論證集合相關科學證 據與各種辯證,並透過資訊公開、透明及可追溯性,整體說明處置設 施在安全上的品質與證明,達到可信度的水平。107年度研究包括: 安全評估流程建立與方法、安全評估分析模式建立與執行、耦合試驗 與模擬技術研發。

5.1. 安全評估流程建立與方法

5.1.1. 安全評估方法精進

在SNFD2017報告中所採用的安全評估方法,係參考瑞典SKB發展SR-Site評估方法的11步驟(SKB, 2011a, p24),並按我國目前之狀況,適當發展符合現況之安全評估步驟。此外,對於FEPs的分類與篩選部分,於SNFD2017報告階段,已基於2006年NEA 2.1版的資料庫, 根據臺灣地區特性與深層地質處置概念,並重點參考瑞典、日本等相關國際資料而建立「台灣FEPs資料庫」,而目前忽略之FEPs是透過模擬與分析結果判斷,例如:當評估緩衝材料在參考演化條件下,若評 估水力傳導係數小於10-12 m/s條件下,計算溶質傳輸時即可忽略平 流機制,而僅需考慮擴散傳輸。另安全評估之數值模式分析情節與 FEPs資料的連結也是有相當關連性,於SNFD2017報告中是在情節架 構分析中呈現如圖 5-1及圖 5-2。

根據2017年國際同儕審查所給予的建議,國際審查小組 (International Review Team, IRT)認同,SNFD2017報告採用2個先進 處置計畫(瑞典與芬蘭)的經驗與處置概念,並肯定SNFD2017報告在 數個領域、範疇與分析的細節上,已超越某些其他國家早期階段所做 的初步安全論證。然而,也強烈建議在處置計畫的後續階段,應調整 我國的安全評估方法論,以便能更全面考慮可能的地質環境與適宜的 處置概念,並符合更先進的國際實務作法。

因此為了精進後續安全評估方法以符合國際實務作法,首先概述 國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)對於處 置設施封閉後的輻射影響評估,所建議的安全評估要素;接著,研析

目前處置技術發展先進的國家之安全評估方法論,概述其安全評估方 法與步驟,所探討的國家除了瑞典之外,包括芬蘭、日本、法國、美 國、瑞士、加拿大、英國;最後,概述2017年的國際同儕審查對於 SNFD2017報告的安全評估方法論所給予的建議,並提出後續安全評 估方法步驟規劃與說明,以更健全與全面性的方式,發展我國處置計 畫後續的安全評估方法論。

(1) 安全評估方法要素

根據IAEA SSG-23(IAEA, 2012, p45), 安全評估主要可分為以下要素進行討論:

- (a)評估背景說明:包含評估的目的、評估的基本理念、評估的時間尺度等。
- (b)處置系統的描述:處置系統的描述應記錄有關處置系統的所 有資訊與知識,並提供做為安全評估的基礎。隨著處置計畫 的進展,處置系統的描述與安全評估以反覆精進的方式,使 獲得的資訊及對處置系統的瞭解逐漸發展與成熟。隨著對處 置系統知識的進展,可用於確定系統特性與處置設計的未來 需求。
- (c)情節發展與說明:情節可以描述處置系統可能的替代演化。 情節的發展可用來識別與定義「評估案例」。每個評估案例 可能代表或限制處置系統可能的演化。對於情節與評估案例 適當範圍的選擇與理由是很重要的,所選擇的情節會強烈影 響對處置系統的性能評估。
- (d)模式的制定與應用:一旦發展情節以後,就應進行相對應的評估。這些評估通常使用評估模式來進行。模式包含概念模式、數學模式、電腦程式。
- (e)性能模擬與結果分析,包括敏感度分析與不確定性分析:評估案例使用概念模式與場址及工程設計的資訊,並使用足夠的敏感度與不確定性分析,來分析適合的情節;後者將有助

於對處置系統的瞭解。另使用適合的方法來識別與處理不確定性與參數的相關性。

- (f)與安全標準比較:處置設施對未來人類所造成的輻射劑量只能用評估的方式,而與這些評估有關的不確定性會隨著未來時間進一步增加。對非常長時間尺度之風險與劑量進行評估,並與適合的標準進行比較,以便根據目前對處置設施的瞭解,提供處置設施是否能被接受的說明。
- (g) 必要時,進行評估的回顧與修正(即迭代)。
- (2) 瑞典與其他國家安全評估方法資訊分析整理

以下將各國的安全評估方法分成3個部分進行論述:

- (a) 定義安全功能與安全功能指標:在發展安全功能(或性能目標)與安全功能指標方面,可參考瑞典與芬蘭的作法,其系統 性的定義出處置系統元件重要的安全功能與安全功能指標, 可方便地判斷處置系統元件是否於安全評估尺度內能維持 或滿足其安全功能。而法國探討在安全評估時間尺度下,每 個處置系統元件應發揮其性能的起始時間與維持時間,可做 為參考演化很好地表現處置系統元件性能隨時間變化的方 式。
- (b)情節發展:對於情節的發展依照IAEA SSG-23所述有2種作法 (IAEA, 2012, p53),包括「由下而上法(top-down)」與「由 上而下法(bottom-up)」。「由下而上法」可參考瑞士、美國 與加拿大的作法。加拿大經歸類分析FEPs(Feature, Event, Process)後,亦使用當前的生活資訊外推,以發展情節;瑞 士篩選出影響處置設施長期安全的FEPs,並列出FEPs衍生出 的不確定性及不確定性對安全的影響,這些不確定性及不確 定性所產生的後果,就形成替代情節與評估的案例;而美國 事先進行FEPs的分類與篩選,先篩選出預期在標準情節中會 發生的FEPs,剩下被篩選出但未納入標準情節中的重要 FEPs,則可構成1個或多個干擾情節。

「由上而下法」可參考瑞典、芬蘭與法國的作法;瑞典以潛 在的圍阻安全功能失效來選擇替代情節,根據3個廢棄物罐 失效模式(包括腐蝕、圍壓與剪力),以及3種緩衝材料失效情 況(平流、凍結與變質),產生出不同的情節組合;芬蘭利用 有初始缺陷的銅廢棄物罐情節,來測試其他工程障壁與處置 母岩的性能,並根據合理判斷可能發生的情形下,在這種情 形下可能會有1個或多個安全功能嚴重下降,來發展變異情 節;而法國則是分析期待處置設施擁有的功能,最基礎的安 全功能為必須確保處置系統長期安全,包含抵抗水循環、限 制放射性核種的釋出,並將其固定在處置設施內、延緩和減 少放射性核種的遷移與維持母岩特性等,藉此依照時間尺度 與物理範圍分解為由不同處置元件完成的子功能,以便描述 處置設施結構,並解釋每個元件必須滿足的要求,依據此來 發展情節。此外,日本NUMO則是結合「由下而上法」與「由 上而下法」兩者優點,結合FEPs與安全功能作為基礎的方法 來發展情節。

(c)不確定性的處理:在進行不確定性的處理時,根據IAEA SSG-23(IAEA, 2012, p58),不確定性又分為情節不確定性、模式 不確定性、數據或參數不確定性。以瑞士為例,透過探討FEPs 的不確定性與後果產生不同的情節,處理情節的不確定性。 在發展情節的概念模式時,產生不同的替代概念與假設,以 進行概念模式的不確定性處理。在每個替代概念模式底下, 根據不同的參數衍生出的不確定性,又會產生不同的評估案 例,以處理參數的不確定性;芬蘭Posiva則利用計算案例來 分析不確定性,包括未來演化途徑的不確定性、不可能發生 事件的分析,以及不同的主要作用模式及數據的不確定性; 美國則根據Kaplan and Garrick(1981, p11-27)定義3個問題 的風險組合(risk triplet),來處理情節的不確定性(或稱偶遇 不確定性);引入替代概念模式,來解決模式發展的不確定 性;利用機率性分析與敏感度分析,以處理數據或參數不確 定性(或稱認知不確定性);法國Andra將未來演化區分為可 能演化領域與變異演化作為不確定性的管理方式,其紀錄不 確定性所造成的變異演化情況,與形成變異演化之情節,進 行性能評估;日本則強調透過調查、設計與安全評估反覆精 進的方法來增加對不確定性問題的掌控,並透過保守設計來 處理其餘不確定性,從而降低不確定性的影響。

- (3) 安全評估方法規劃
 - 本研究依據第一階段SNFD2017報告的經驗回饋、國際同儕審查 的建議、IAEA SSG-23對安全論證及安全評估方法的建議(IAEA, 2012, p44-p62),初步發展我國的處置設施封閉後安全評估方法。 為能順利銜接及推動第二階段之候選場址評選與核定,並達成第 二階段重要里程碑,將參考NEA MeSA報告之通用安全論證流程 (NEA, 2012, p28),調整我國的處置設施封閉後安全評估方法(如 圖 5-3所示),流程圖的相關說明如下:
 - (a) 流程的起點為說明評估的背景,包含處置發展的策略(包含 國家相關的法案、處置計畫的各種里程碑與決策點等)、處置 原則與評估原則、與安全評估相關法規(包含安全評估所依 據時間範圍的定義與安全指標,例如劑量與風險等)。
 - (b)安全評估的基準,即進行安全評估時所需要的資訊、知識與 工具,包含場址與設計規格、整合對作用的瞭解與作用的影響,以及評估所需用到的工具,即方法、模式、程式、數據 庫。在進入安全評估之前,需要對評估與分析所使用到的關 鍵數據進行「凍結」,使對處置系統與系統元件的安全評估 是「可追溯性」的。
 - (c)安全評估為安全論證的核心,安全評估的流程如圖 5-3所示。在安全評估中有幾個重點步驟,包含處置系統的參考演化、安全功能、情節發展。未來將持續精進我國下階段之安 全評估方法與流程。
 - (d) 在安全評估中,情節與案例分析之結果可以提供成為論證。 這些論證可以與支持處置設施安全的證據(如天然類比的結

果)相結合,建構成證據、分析、論據的整合,組成了安全論 證,以量化與證明處置設施的安全性。

(e)在安全評估過程中,也會逐步了解影響處置系統性能的關鍵 不確定性,包含模式與參數的不確定性。

相較於SNFD2017的安全評估方法流程,更新後的安全評估方法流 程將細節展示得更清楚,包含評估背景與評估基準所涵蓋的內容, 以及安全評估和場址合適性調查與概念設計之間的關聯性。該流程 圖也可清楚地與IAEA SSG-23所建議的安全論證與安全評估要素連 結,並加入對不確定性的管理流程與知識管理系統的部分。對情節 的建構與流程也直接展示在流程圖中。以上幾點也符合國際同儕審 查對安全評估方法的建議。

5.1.2. 安全評估資料庫

我國用過核子燃料最終處置計畫自1986年起,迄今歷經學習階段、初期工作規劃階段、區域調查技術準備階段、調查實施與技術發展階段、潛在處置母岩特性調查與評估階段等5個階段。

功能/安全評估技術研發工作歷經多年發展,已累積大量成果與 資料,有必要建置資訊系統進行彙整與管理,本「用過核子燃料最終 處置功能/安全評估資訊系統」(簡稱:功能/安全評估資訊系統) 蒐 集處置概念、國際經驗吸收與技術交流資訊,保存引用文獻資料、功 能/安全評估分析成果等資料,將前述資料之文字說明、圖表紀錄、 研發成果、數據彙整等數位資料以網頁展示並可加以查詢與檢索。

本系統存入歷年各項研發工作之進度及成果,並藉由「計畫管理」 功能及「知識管理平台」進行彙整及展示:

(1) 計畫管理

計畫管理之目的在於掌控計畫各項工作之進度與成果,以檢視計 畫目的與資源運用整合情形,達到輔助計畫管理者管控進度之功用。 本資料庫將資料進行數位化、儲存以及檢索,並以文件紀錄、議題追

蹤、品保作業等項目分類管理,可依不同類別查詢及展現具體成果以 達到管控之目的。

(2) 知識管理

本期計畫功能/安全評估資訊系統之知識管理工作,朝建置「技術 資料庫」及發展「整合運用平台」等2個雛型方向進行:

(a) 技術資料庫

近程技術資料庫離型上,將以成果報告與技術數據為建置目標,提供搜尋與瀏覽之功能,後續隨著計畫執行階段成果, 逐步納入管理與品保需求,以利計畫成果之展現。

(b) 整合運用平台

當前述技術資料庫建置達到一定的規模後,配合整合技術及 計畫之進展,針對某項整合技術,透過資訊技術連結並擷取 個別相關技術資料庫的數據,進行整合性分析,同時應用視 覺化技術來具體展現整體成果。

功能/安全評估資訊離型系統已建置在網路平台環境,使用者可 透過網際網路及瀏覽器操作系統所有功能。其中計畫管理主選項提供 議題追蹤、文件紀錄、品保作業等次選項資料查詢作業,網頁畫面如 圖 5-4。知識管理主選項提供研究報告、文獻、技術交流、經驗與方 法論、分析軟體與技術資料庫等次選項資料查詢作業,網頁畫面如圖 5-5。



圖 5-1:腐蝕情節-圍阻安全功能架構



圖 5-2:腐蝕及剪力情節-核種傳輸與遲滯架構



圖 5-3:封閉後安全評估方法流程

用過核子燃料最 功能/安全評估	と終處 資訊	置計 系統	ŧ		SNFD Perform	ance and Sa	afety Assessm	ent II	nformatior	n System
首頁 Index	最終處置 Final Dia	計畫 sposal		計畫管理 Program	l n Management	知識管理 Knowledg	e Management			
計畫管理		搜尋								
● 議題追蹤		議題	1 :請輸	〉	義是夏	議題內容:	輸入欲查詢議題	内容		
● 文件記錄		議題類別]: 請選	選擇	T	執行狀態:	清選擇		V	
● 品保作業		搜尋								
		議題道	自蹤 損	裂結果						
		/~~ < +ca =				***		/1/1 -		
		付合拨署	副除什的	截重:3	共1貝,日	則局弗 ⊥ 貝,	總不為弗 Ⅰ 聿 ^	'	「主	
		[1]		前往						
		議 題 別		議題	議題	內容	負責小組	執行狀態	預定完 成日期	結束追 蹤日期
			台電2 107:	公司104- 年度計畫	107年度6		計畫作業室	執 行 中	2018- 11-30	0000- 00-00
		物 管 局	台電2 107:	公司104- 年度計畫	108年度]	[作計畫書	計畫作業室	執 行 中	2018- 12-31	0000- 00-00
		物 管 局	台電2 107:	公司104- 年度計畫	SNFD2017 報告物管局	(中文版)三冊 局審查作業	計畫作業室	執 行 中	2018- 12-31	0000- 00-00
		[1]		前往						

圖 5-4:計畫管理功能網頁

	記置計畫 SNFD Performance and Safety Assessment Information System 凡系統
首頁 最終處 Index Final I	置計畫 計畫管理 知識管理 Disposal Program Management Knowledge Management
知識管理	研究報告_搜尋
● 研究報告	編 號: 名 稱:
◎ 文 獻	作者:
● 技術交流	起始年份: 1987 ▼ 結束年份: 2018 ▼
◎ 經驗與方法論	知識分類: 安全評估 ▼ 知識子分類: ▼
● 分析軟體	搜尋
● 技術資料庫_FEPs	研究報告 搜尋結果
● 技術資料庫_SNF	
	 編號:SNFD-04-IPR-020-03 計畫階段: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) 名稱:廢棄物罐破壞模式安全劑量評估報告 作者:張傑鈞、黃鈺翔 關鍵字:用過核子燃料最終處置、廢棄物罐初始缺陷、核種傳輸計算、GoldSim、廢棄物罐失效模式 出版日期:2018/5 [話擊下載]
	 編號:SNFD-03-IPR-025-03 計畫階段: 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) 名稱: 雜散裂隙網路功能評估技術研究報告 作者: 董琮檯、吳元傑 關鍵字: 參考案例、離散裂隙網路、離島結晶岩測試區、等效連續孔隙介質 出版日期: 2018/5 [點擊下載]
	編號:SNFD-05-IPR-001-02 計畫階段: 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) 名稱:國際天然類比案例探討與分析報告(修訂一版) 作者:陳亮丞、蔡翠玲、施宇鴻 關鍵字:用過核子燃料、最終處置、天然類比 出版日期: 2017/3 [點擊下載]
	編號:SNFD-05-IPR-002-02 計畫階段: 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) 名稱: 臺灣國內天然類比案例之探討與分析報告(修訂一版) 作者:陳亮丞、蔡翠玲、施宇鴻 開鍵字:最終處置、腐蝕速率、天然類比 出版日期: 2017/3 [點擊下載]
	[1] 2 3 4 5 [▶─貝][最木貝] ញ[][][][][][][][][][][][][][][][][][][]

圖 5-5:知識管理功能網頁

5.2. 安全評估分析模式建立與執行

5.2.1. 分析模式的選用與開發

用過核子燃料最終處置設施系統相當複雜,故在進行整體評估時,評估模型需適度地進行切割,而實際執行評估,則須藉由數值模型進行模擬實作。例如採用數值模型,評估廢棄物罐長時間下所受到腐蝕影響之程度,或是受到剪力進而引起廢棄物罐失效之機率等。故分析模式之建立與發展,為安全評估案例實作之骨幹。

分析模式之開發,主要基於各情節/案例之安全評估實作需求, 故發展FEPs資料庫與相關分析模式之連結,配合各項安全議題,採用 不同的模型/軟體進行實作/開發並累積u經驗,以提升整體安全評估 品質與信心建立。

107年度工作依燃料特性、生物圈、廢棄物罐侵蝕、地震引起剪 力、水文與核種遷移等6個主要模擬項目之需求,分別進行(a)選出符 合我國現階段安全評估需求的數值模式,表 5-1既列出此6主要模擬 項目所選用的模式,以及(b)針對此6個項目,分析各模式的應用方式 與適用條件。

(1) 燃料特性

基於用過核子燃料最終處置安全評估與工程設計之需求,廢棄物 罐內核種盤存量、射源項與衰變熱等特性資訊之取得,是處置設 施安全評估的重要起始點,一般即採用將核種生成、衰變等機制 納入考量之程式,進行模擬計算。因此,國際上大都選用由美國 橡樹嶺國家驗室(Oak Ridge National Labotroy, ORNL)所發展的 申照評估的標準電腦分析系統(Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, SCALE),內建屏蔽分析程序(Shielding Analysis Sequence No.2, SAS2)的控制模組,來驅動ORIGEN-S程 式進行廢棄物罐核種盤存量、射源項與衰變熱等特性評估。 ORIGEN-S適用於核子反應器與處理電廠設計研究、燃料傳輸與 貯存設計研究、燃耗效應驗證、衰變熱與輻射安全分析與環境影 響評估。

ORIGEN-S程式在程式開發時,特別關注模式的驗證,驗證工作亦 會隨著可取得的量測資料更新,而進行新一輪的驗證更新,使得 相關的評估預測範圍得以延伸擴大,並且可具體提升評估結果的 可靠度。關於ORIGEN-S數值模式的不確定性,在Gauld等人對 SCALE系統與用過核子燃料衰變熱預測之驗證報告中(ORNL, 2010, p1- p110)提到,在經量測可分裂材料之脈衝分裂輻射等實 驗數據,據以驗證ORIGEN-S之評估能力,並探討模式的不確定 性,包含實驗量測熱卡計之不確定度如表 5-2所示)、模型不確定 度、簡化不確定度與截面不確定度等。經評估量測與預測值可以 取得良好的一致性,如圖 5-6所示。此結果說明ORIGEN-S數值模 式在應用上,因具有充足的理論依據,所以,可以降低不確定性 的影響。

(2) 廢棄物罐腐蝕

對於廢棄物罐腐蝕之評估計算方式,可以分為經驗腐蝕速率 (empirical corrosion rate)、質量傳輸(mass transport)及質量平 衛(mass-balance)、反應傳輸(reactive-transport)等方法。經驗 腐蝕速率通常以實驗結果之腐蝕速率來進行計算,相較於其他方 法,經驗腐蝕速率在數學計算較為簡單方便;但在長期預測中, 通常以固定之腐蝕速率計算,較難呈現出腐蝕速率與時間之變 化。質量傳輸及質量平衡為保守的評估計算方法,可以先利用質 量傳輸進行腐蝕劑在介質中的質量傳輸速率,再對腐蝕的化學反 應系統,進行各種物質的質量平衡計算,並保守假設此反應為不 可逆反應;反應傳輸可以考慮數個化學反應的綜合效應,並可以 得到隨時間變化的腐蝕資訊,如腐蝕電位及腐蝕電流等,但其數 值模型較為複雜,亦須輸入大量且完善的參數資料;因此,需要 較多的時間與技術去研究開發模型並建立參數資料。而目前曾經 採用經驗腐蝕速率的國家有日本及法國;質量傳輸及質量平衡的 國家有瑞典;反應傳輸的國家有加拿大。

目前國內對廢棄物罐的長期腐蝕作用分析,係以質量傳輸及質量 平衡之物理化學概念做為評估計算方法,並參考相同設計概念的 國家所分析之經驗公式。腐蝕評估主要之公式概念如下:

瑞典輻射安全主管機關2013年進行審閱瑞典SKB的腐蝕計算公式,並發表正式報告(Stothoff and Manepally, 2013, ch3),報告總結認為瑞典SKB實施的Qeq方法,是一種合理和實用的數值方法,廣泛應用於各種數學物理學分支,且具高度信心。 在進行腐蝕計算公式中,不確定性主要來自參數不確定性,而參數之不確定性可由變異案例進行確認。目前國內在廢棄物罐腐蝕

致之不唯足住了田愛共采伪進行確認。百前國內在廢棄初唯腐蝕 的研究案例上,主要以離島結晶岩測試區之地質調查數據及參考 演化為發展依據,並將依據所探討的參數、條件而選定8個變異 案例,包括探討裂隙岩體水文地質模型之參數條件、探討因近代 人類活動引致全球暖化對水文地質之影響,以及探討地下水硫化 物濃度與地下水流速等主要影響銅殼腐蝕作用之參數。 (3) 地震引致剪力位移

地震引致裂隙剪力位移對最終處置設施的影響評估為重要的議題,本研究選用美國ITASCA公司開發之岩石力學相關商用軟體 3DEC程式來進行此方面的分析。瑞典最終處置設施設計與安全 功能評估,亦以3DEC程式用來分析地震所引發的不連續面位移, 以及工程障壁的熱-水-力學分析。

裂隙/廢棄物罐相切分析技術,在模擬方面的不確定性在於離散 裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)參數與實體化,可能 影響處置孔經過廢孔準則判斷後,數量設計是否足夠,或者是廢 棄物罐失效率評估。因此,在參數方面選定較保守的值,在DFN 實體化次數方面要足以使得期望值穩定,在處置設施設計面係以 期望值進行設計,而在擴充彈性設計面係以最保守結果進行設 計。實務方面的不確定性在於真實裂隙的延伸性、異向性與廢孔 準則(FPI)判斷成功機率。因此,開挖運轉階段,必須要有相關技 術背景從業人員詳細記載隧道裂隙特性。

另一分析探討廢棄物罐地震剪力影響的分析,係採用ANSYS模擬 程式,模擬廢棄物罐與緩衝材料進行剪切和潛變分析結果,確保 廢棄物罐於處置孔內受剪切負載具有完整性。

(4) 水文地質模式

國內現階段係以KBS-3處置概念做為基本概念,並以結晶岩做為 假想潛在母岩以進行研究,因此,本計畫與在裂隙岩體發展有多 年經驗的瑞典SKB公司進行技術合作,引進其開發之DarcyTools 數值模式做為分析工具,此數值模式亦應用於瑞典申請最終處置 建照申請SR-Site報告的地下水流分析中。此數值模式雖非一般廣 為使用的商業數值軟體,然而在該公司的品保程序,及申請建照 文件的嚴謹性與國際同儕審查下,其數值方式的可信度是值得信 賴的。

進行地下水流模擬必須考慮模式不確定性與參數不確定性,其中模式不確定性,主要是因離散裂隙網路的隨機生成而引起;參數

不確定性,則是因為地質參數的內在不確定性。以下為對這二種 不確定的處理方式進行說明。

離散裂隙網路是1個調查並取樣單位體積岩體中所包含之裂隙 後,使用統計分析方式解釋所取得樣本裂隙,並應用數值分析方 法,還原調查岩體中裂隙的分布狀況,最終建立合理的數值模型。 由於現地不易得到所有裂隙之幾何參數,常以統計方式歸納得各 裂隙幾何參數之分布。因此,離散裂隙網路本身即為1種近似模 擬真實岩體之假設性數值方法,致使模擬結果永遠存在不準確度 及與真實之差異性。然而,裂隙幾何與物理特性參數還是被廣泛 應用於眾多研究,作為推估裂隙岩層強度、形變、滲透性與流體 貯存能力的參考依據。過去許多研究著重於發展重現技術,或描 述裂隙的複雜幾何形狀,這些議題正是開發裂隙岩體地下水水流 與傳輸模式的挑戰。而目前處理方式為使用多組實現值 (realization),進行離散裂隙網路模式的不確定性處理,輔以統 計方式進行模擬結果之統計分析,以求得潛在廢棄物罐破壞數量 平均值與標準差等統計參數。

參數不確定性則是因處置母岩、地質構造的異質性及異向性等天 然因素而產生,不論是現地試驗或者是實驗室試驗,物理特性或 水力特性等相關參數皆可能非唯一值;因此,處理方式則係藉由 調整所欲探究參數之設定值後,在使用穩態流場及質點追蹤等結 果進行不確定性之定量,並輔以統計方式進行模擬結果(如質點 追蹤路徑等)之統計分析,以求得其平均值與標準差等統計參數。

(5) 核種傳輸

在核種傳輸模擬上,目前係採用GoldSim Technology Group開發 之GoldSim的污染物傳輸模組進行模擬,提供動態及機率式之模 擬方式,並可利用蒙地卡羅模擬(Monte Carlo Simulation)方法及 拉丁超立方取樣(Latin Hypercube Sampling)方法進行模擬, GoldSim可應用於商業、工程及科學等領域。此數值軟體已被使 用於多國放射性廢棄物處置計畫,如美國的雅卡山(Yucca mountain)放射性廢棄物處置計畫及芬蘭Posiva用於模擬用過核

子燃料之近場核種傳輸等。國內現階段僅先行選用GoldSim數值 模式進行核種遷移分析與其其他軟體及參數間進行串接及輸入, 進而執行近場及遠場之放射性核種釋出率分析,並搭配生物圈劑 量轉換因子計算核種釋出後對關鍵群體所造成之輻射劑量,並採 用ICRP-60體系所提出之劑量風險轉換係數(0.073 Sv⁻¹)(ICRP, 1990, p22),將輻射劑量轉換為輻射健康風險。GoldSim與其他數 值模式及參數間之關聯性如圖 5-7所示;核種之半化期及其子核 則根據GoldSim內建之衰變鏈(decay chain)自動帶入。

在處置元件基本特性參數方面,如緩衝材料、母岩的乾密度、孔 隙率及擴散係數、核種之溶解度限值及核種與各材質間之分配係 數等,此類參數需仰賴實驗獲得。在處置元件之幾何方面,如廢 棄物罐及緩衝材料之半徑及高度、廢棄物罐內部空隙體積及處置 孔高度,則由工程設計或經評估後提供。其餘參數如燃料基質之 溶解速率、核種之瞬釋分率、廢棄物罐失效時間、廢棄物罐失效 機率及地下水傳輸連續通道所需的延遲時間等,需經由實驗或模 式評估取得。在與地下水流相關傳輸資訊方面,目前係利用 DarcyTools評估,其將輸出等效流率、水流傳輸阻抗及平流傳輸 時間等參數。為計算生物圈中關鍵群體所受到之輻射劑量及其風 險,需利用生物圈轉換係數,將GoldSim所計算之通量率轉換為 輻射劑量,而生物圈轉換係數係利用AMBER程式計算,其分別計 算出不同氣候時期之生物圈劑量轉換係數(Biosphere Dose Conversion Factors, 簡稱BDCFs)及持續釋出與瞬時釋出之 BDCFs。

(6) 生物圈

處置設施安全評估模式的最終階段,考量核種於生物圈中傳輸作 用及人類受輻射曝露之途徑。本研究選用AMBER程式的原因,在 於它可靈活運用數學模擬運算工具,以及可供使用者自行建立動 態區塊模型。以目前在尚未確定場址前,假設潛在關鍵群體將接 受所有曝露途徑(農耕、淡水漁撈及海洋漁撈等3種生活模式)的 分析,利用該程式的區塊模組,進行封閉後與當代環境條件相似

時期與冰河氣候期,關鍵群體均考量上述3種生活模式所造成之 曝露。

基於處置設施安全評估涵蓋期程甚長(一般達10萬年至100萬 年),對於未來人類生活環境及生活型態的預測十分困難,無法精 確預測未來人類生活環境與方式,使得生物圈安全評估結果存在 一定程度的不確定性。對於生物圈模式不確定的處理,由於無法 預估未來人類生活型態的演化,普遍的做法都以當前的生活型態 做為評估的基準,並適當考量地景的可能演化,以及納入氣候變 遷因素進行封閉後的長期安全評估。目前本研究即以處置設施封 閉後,前2萬年期間生物圈系統演化與現今場址狀態相似,採用 重建末次冰河週期反覆重現12萬年參考冰河週期的演化,直至 100萬年安全評估時程的方式,來處理生物圈評估長期演化的不 確定性。

以上所述6項領域的程式間彼此分工與整合的關聯性,係先由 ORIGEN-S將 衰 變 熱 分 析 結 果 , 提 供 FLAC3D 進 行 處 置 隧 道 與 處 置 孔 的 間距分析,結果提供進行處置設施的配置,及核種遷移分析所需的尺 寸。ANSYS進行廢棄物罐剪力位移之潛變分析,提供廢棄物罐與緩衝 材料安全的設計尺寸; 3DEC根據處置設施之配置,進行裂隙與廢棄物 罐截切應力作用的分析,及配合ANSYS分析結果進行廢孔準則計算, ANSYS與3DEC分析的結果提供剪力情節廢棄物罐破壞機率,做為核種 遷移分析之依據。腐蝕計算式則分析廢棄物罐腐蝕速率分析,提供腐 蝕情節中核種遷移分析所需之廢棄物罐腐蝕率數據。DarcyTools為各 演化時間框架下各時期之區域地下水流分析之工具,提供核種遷移之 近場、遠場所需之地下水流相關參數,AMBER則進行生物圈傳輸途徑 及不同時期演化之分析,提供不同途徑之劑量轉換因子供核種遷移之 輻射影響分析。 GoldSim則承接SNDS2017報告參考案例表1、2、3與 上述各模式中與核種傳輸有關之尺寸、數據、劑量轉換因子等進行分 析,分析出劑量與風險值。根據這些模式間資料的供應與需求之關聯 性,串接成腐蝕情節安全評估模式鏈與剪力情節安全評估模式鏈。

5.2.2. 工程障壁系統評估技術

(1) 膨潤土膠體的形成及釋出

膨潤土中蒙脫石的膨脹行為主要是取決於其可交換之陽離子及 外部水的化學組成,當蒙脫石由單價陽離子(如Na+及K+)構成, 且處於低離子強度之水中,其膨脹時將產生膠體分散(colloidal dispersion)現象。緩衝材料之膨潤土若與地下水接觸,膨潤土也 可能自處置孔中向外擠出至裂隙中,被擠出的膨潤土,其黏土粒 子將會因地下水流的剪切力而被帶離,並成為膠體狀溶膠 (colloidal sol)而向外傳輸(Posiva, 2013, p379)。

為了評估低離子強度水中緩衝材料之質量損失,參考瑞典SKB與 瑞典皇家理工學院(KTH Royal Institute of Technology)所發展之 模式,評估膨潤土被地下水侵蝕進入裂隙之穩態侵蝕率,其模式 中具有3個子模式:

- (a) 蒙脫石的膨脹;
- (b) 膨潤土孔隙水中的鈉離子傳輸;
- (c) 蒙脫石凝膠(gel)/溶膠(sol)之流動。

為量化緩衝材料因平流之損失率,耦合了上述之子模式,並以數 學方式求解,結果如圖 5-8,關鍵參數包括裂隙內徑(aperture) 大小、水流速度(velocity)、處置孔直徑、於裂隙/處置孔介面處 之蒙脫石/水之分率及水化學;根據前述結果所擬和之蒙脫石釋 出率計算方式如下:

$$R = A\delta v^{0.41} \tag{5-1}$$

其中,

R = 蒙脫石釋出率, [kg/yr]。

 $\delta = 裂隙內徑, [m]。$

V= 水流速度, [m/yr]。

A= 假設侵蝕裂隙寬度0.001 m條件下,裂隙中的水流速(m/yr)對應 蒙脫石釋出量(kg/yr)所得之蒙脫石釋出常數(27.2)。

根據上式,蒙脫石之釋出率正比於水流速度之0.41次方,並直接 正比於裂隙內徑(SKB, 2010a, p157);常數27.2係流速與蒙脫石 釋出率之擬合常數(Moreno et al., 2010, p23; Posiva, 2013, p381);上式被瑞典SKB及芬蘭Posiva用於評估緩衝材料侵蝕 (SKB, 2010c, p20; Posiva, 2013, p381)。 近場/地質圈介面處之膠體濃度,則根據下式計算(Posiva, 2013,

$$m_c = R/(4r_t U_f f_v) \tag{5-2}$$

其中,

$$m_c = 膠體濃度, [kg/m^3]。$$

 $R = 蒙脫石釋出率, [kg/yr]。$
 $r_t = 處置孔半徑, [m]。$
 $U_f = 處置孔中所有裂隙每單位寬度之流率的總和, [m2/yr]。$
 $f_v = 與時間相關的流速因子, [-]$

(2) 膨潤土膠體吸附放射性核種 在膨潤土膠體吸附放射性核種方面,放射性核種與膨潤土膠體之 分配係數,與緩衝材料膨潤土之分配係數有下列關係(SKB, 2010e, p83):

$$K_c = \gamma K_d \tag{5-3}$$

其中,

p555):

 $K_c = 放射性核種與膨潤土膠體$ (bentonite colloids)之分配係數, $[m^3/kg]_{\circ}$ $K_d = 放射性核種與膨潤土緩衝材料(bentonite buffer)之分配係數,$ [m³/kg]。

 $\gamma = 膠體與膨潤土塊比表面積 (specific surface area) 之比值, [-]。$

有鑑於膨潤土是1種細粒(fine-grained)材料,且於量測膨潤土的 平衡分配係數時,是利用膠體狀之懸浮顆粒量測,此時顆粒大小 低於1μm(Ira, 2001, p955; SKB, 2010e, p83; Salas et al., 2010, p15),因此,合理假設γ約等於1;根據前述,放射性核種與膨潤 土膠體之分配係數,將採用與膨潤土緩衝材料相同之係數。

而核種n吸附於膨潤土膠體之濃度,可以下列公式計算(Posiva, 2012, p76):

$$S_n = m_c \cdot K_{c,n} \cdot C_n \tag{5-4}$$

其中,

$$S_n = 核種n於膠體上的濃度, [mol/m3]。$$

 $m_c = 膠 體 濃 度 , [kg/m³]。$

 $K_{c,n} = 膠體對核種n之分配係數, [m³/kg]。$

 $C_n = 核種n的濃度, [mol/m³]。$

(3) 地下水中膨潤土膠體吸附放射性核種遷移模式

於核種遷移模型中,近場包括用過核子燃料、廢棄物罐及緩衝材料,緩衝材料周圍可能存在導水裂隙;根據芬蘭Posiva報告 (Posiva, 2014, p22),於近場處,當緩衝材料被侵蝕,則緩衝材 料與母岩導水裂隙連接處之水流率,可以下列公式計算:

$$Q_f = 4 \cdot r_t \cdot U_f \tag{5-5}$$

其中,

 $Q_f = 緩衝材料侵蝕時由處置孔流至母岩裂隙之水流率, [m³/yr]。$ $r_t = 處置孔半徑, [m]。$

 $U_f = 處置孔中所有裂隙每單位寬度之流率的總和, [m²/yr]。$

假設緩衝材料與母岩裂隙連接處之核種n濃度為Cn,則近場核種n 釋出率為:

$$f_n = c_n \cdot Q_f \tag{5-6}$$

其中,

其中,

- $f_n = 核種n之釋出率, [mol/yr]。$
- $c_n = 核種n之濃度, [mol/m³]。$

當近場緩衝材料因被侵蝕而產生膠體,如果放射性核種與膠體有 很強的親和力,則放射性核種將吸附於膠體上,而水流則將吸附 放射性核種之膠體帶離近場,導致近場之放射性核種釋出率上 升,此效應可利用提升緩衝材料與母岩裂隙連接處之水流率模 擬,提升之水流率可以下列公式計算(Posiva, 2014, p22):

$$Q_{f+s} = 4 \cdot r_t \cdot U_f (1 + m_c \cdot K_{c,n})$$
(5-7)

mc = 膠體濃度, [kg/m³]。
 Kc,n = 膠體對核種n之分配係數, [m³/kg]。

則含膠體的近場核種n釋出率為:

$$f_{n,s} = c_n \cdot Q_f (1 + m_c \cdot K_{c,n})$$
(5-8)

 $f_{n,s} = c_n \cdot Q_f + c_n \cdot Q_f \cdot m_c \cdot K_{c,n}$ (5-9)

於GoldSim中,近場可以Cell物件模擬,其平流質量通量可以下列 公式計算(GTG, 2014, p295):

$$f_{s,i\to j} = c_{ims} \cdot q + \sum_{t=1}^{NPT_{im}} PF_t \cdot c_{its} \cdot vm_t \cdot cp_{imt} \cdot q_c$$
(5-10)

其中,

 $f_{s,i \rightarrow j}$ = 核種s由Cell物件i至Cell物件j之釋出率, [mol/yr]。 c_{ims} = 核種s於Cell物件i中的材質m的濃度,液體為[mol/m³],固體為 [mol/kg]。

Cits = Cell物件i中,吸附於懸浮固體t的核種s之濃度,[mol/kg]。

 $cp_{imt} = Cell物件i中,懸浮固體t於液體m中的濃度, [kg/m³]。$

q = 水 流 流 率, [m³/yr], 或 質 量 傳 輸 率, [kg/yr]。

NPT_{im} = 有多少種固體物質懸浮(suspended)於Cell物件i中的材質m中,[-]。

PFt = Boolean flag, 等於0或1,其代表是否允許懸浮於材質m中的物質t傳輸, [-]。

 $Vm_t =$ 固體顆粒t的平流速度乘數, [-]。

根據式(5-9)及式(5-10),可利用GoldSim之Cell物件評估膠體所提升之近場核種釋出率。

於遠場核種遷移模型中,遠場係指母岩裂隙;在遠場中,將採用 下列假設(SKB, 2010e, p323):

- (a) 膠體平流於水流通道中之流速與溶質相同;
- (b) 放射性核種平衡吸附至移動及非移動之膠體;
- (c) 膠體平衡吸附至裂隙表面;
- (d) 裂隙基質孔隙不存在膠體;
- (e) 膠體濃度為常數。
放射性核種於裂隙、膠體及母岩基質之質量平衡方程式如下 (SKB, 2010e, p323):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + TC = -\psi^{C \to S}(C, S) - \psi^{C \to S^*}(C, S^*) - \lambda C + \frac{D_e}{b} \frac{\partial C_m}{\partial z}\Big|_{z=0}$$
(5-11)

$$T = v \frac{\partial}{\partial x} - D_l \frac{\partial^2}{\partial x^2}$$
(5-12)

$$\frac{\partial S}{\partial t} + TS = \psi^{C \to S}(C, S) - \psi^{S \to S^*}(S, S^*) - \lambda S$$
(5-13)

$$\frac{\partial S^*}{\partial t} = \psi^{C \to S^*}(C, S^*) + \psi^{S \to S^*}(S, S^*) - \lambda S^*$$
(5-14)

$$\theta R_m \frac{\partial C}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \lambda \theta R_m C_m \tag{5-15}$$

其中,

$$C = 裂隙水中的核種濃度, [mol/m3]。
 $Cm = 裂隙基質孔隙中的核種濃度, [mol/m3]。
 $S = 吸附於移動膠體上的核種濃度, [mol/m3]。$
 $S^* = 吸附於不移動膠體上的核種濃度, [mol/m3]。
 $m_c = 裂隙中膠體的濃度, [kg/m3]。$
 $T = 被平流及延散傳輸之方程式, [yr-1]。$
 $t = 時間, [yr]。$
 $\psi = 質量傳輸函數, 表示每單位體積中的物質質量於不同狀態之傳
輸率, [mol/m3/yr]。
 $v = 流速, [m/yr]。$
 $D_l = 裂隙中縱向延散(longitudinal dispersion)/擴散, [m2/yr]。$
 $D_e = 有效擴散係數, [m2/yr]。$
 $\theta = 裂隙基質孔隙率, [-]。$
 $\lambda = 衰變常數, [yr-1]。$
 $b = 裂隙內徑的一半, [m]。$
 $z = 垂直於裂隙方向之距離, [m]。$$$$$$

 $R_m = 裂隙基質遲滯因子, [-]。$

$$C_m(x, z = 0, t) = C(x, t)$$
 (5-16)

假設膠體之附著及分離快速可逆,則式(5-13)及式(5-14)可結合:

$$R_c \frac{\partial S}{\partial t} + TS = \psi^{C \to S}(C, S) + \psi^{C \to S^*}(C, K_c S) - \lambda R_c S$$
(5-17)

式(5-11)則改寫如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + TC = -\psi^{C \to S}(C, S) - \psi^{C \to S^*}(C, K_c S) - \lambda C + \frac{D_e}{b} \frac{\partial C_m}{\partial z}\Big|_{z=0}$$
(5-18)

假設核種瞬間吸附於膠體上,則吸附於膠體上之放射性核種濃度 同式(5-4),將式(5-17)及式(5-18)合併後如下:

$$(1 + R_c m_c k_c) \frac{\partial C}{\partial t} + (1 + m_c k_c) T C = -\lambda (1 + R_c m_c k_c) C + \frac{D_e}{b} \frac{\partial C_m}{\partial z} \Big|_{z=0}$$
(5-19)

$$R_{f,app}\frac{\partial C}{\partial t} + TC = -\lambda R_{f,app}C + \frac{D_{e,app}}{b}\frac{\partial C_m}{\partial z}\Big|_{z=0}$$
(5-20)

其中:

 $R_{f,app} = (1 + R_c m_c k_c) / (1 + m_c k_c)$,即母岩裂隙中考慮吸附於不移動膠體後之遲滯因子,[-]。

 $D_{e,app} = D_e/(1 + m_c k_c)$,即考慮膠體濃度及膠體對核種分配係數後之 擴散係數, $[m^2/yr]$ 。 而式(5-16)則改寫如下:

$$\theta R_{m,app} \frac{\partial C}{\partial t} = D_{e,app} \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - \lambda \theta R_{m,app} C_m$$
(5-21)

其中:

 $R_{m,app} = (R_m)/(1+m_ck_c)$,即母岩基質中考慮膠體濃度及膠體對核種分配係數後之遲滯因子,[-]。

於GoldSim中模擬膠體於遠場傳輸時,假設膨潤土膠體皆會被傳輸,則根據式(5-20)及式(5-21),需將De及Rm轉換為De,app及Rm,app,以模擬遠場存在膠體時放射性核種之遲滯及遷移。

- (3) 利用GoldSim模擬膨潤土膠體促進放射性核種釋出驗證
 - 在近場方面,假設開挖擾動帶大小為1m³,膠體濃度為0.054 kg/m³,於開挖擾動帶中存在物質A,其溶解度限值為1mol/m³, 假設物質A於開挖擾動帶中的濃度維持在其溶解度限值,膠體與 物質A之吸附係數為10m³/kg,開挖擾動帶處之水流流出率為0.1 m³/day;則吸附於膠體上之物質A濃度可根據式(5-4)計算,為 0.54 mol/m³,將濃度與流率相乘,即可得膠體帶出物質A之釋出 率,為19.71 mol/yr,而由地下水平流傳輸之釋出率為36.50 mol/yr,則總釋出率為56.21 mol/yr;GoldSim模擬之結果如圖 5-9,模擬結果與上述計算值幾乎相同。

在遠場方面,於遠場裂隙中,若以流管(stream tube)概念模擬, 則核種於距離為L處時釋出率之解析解如下(Posiva, 1999, p114; Jussila, 2000, p29):

$$C_f(L,t) = C_0 \operatorname{erfc}[\mu t^{-0.5}]$$
(5-22)

$$\mu = (\varepsilon_p D_e R_p)^{0.5} \cdot \frac{F}{2} = (\varepsilon_p D_e R_p)^{0.5} \cdot \frac{WL}{Q}$$
(5-23)

$$R_p = 1 + \frac{\rho_s K_d}{\varepsilon_p}$$
 (5-24)
其中,
 $C_f = 距離L處,時間為t時之釋出率, [mol/yr]。$

$$t = 時間, [yr]。$$

 $\varepsilon_p = 裂隙基質孔隙率, [-]。$
 $D_e = 有效擴散係數, [m^2/yr]。$
 $R_p = 裂隙基質遲滯因子, [-]。$
 $F = 水流傳輸阻抗, [yr/m]。$
 $W = 裂隙寬度, [m]。$
 $L = 裂隙長度, [m]。$
 $Q = 流率, [m^3/yr]。$
 $\rho_s = 裂隙基質密度, [kg/m^3]。$
 $K_d = 分配係數, [m^3/kg]。$

 $C_0 = 初始進入率, [mol/yr]。$

假設於200年至210年間,每年有100 mol之穩定核種A進入裂隙, 並考慮平流傳輸時間,則式(5-22)改寫如下:

$$C_f(L,t) = C_0 \operatorname{erfc}[\mu(t-t_w)^{-0.5}] - C_0 \operatorname{erfc}[\mu(t-t_w-t_p)^{-0.5}]$$
(5-25)

其中:

 $t_w = 平流傳輸時間, [yr]。$

tp = 脈衝持續時間(length of the pulse), [yr]。

根據第5.2.2.3.節之推導結果,在假設膨潤土膠體皆會被傳輸的情況下,若要利用一維平流延散方程式及一維基質擴散方程式,來評估膨潤土膠體促進放射性核種釋出之結果,需將原式中De及Rm轉換為De,app及Rm,app,而此改變不涉及方程式的初始及邊界條件

的改變;因此,僅需將上述轉換帶入解析解公式中,以達成與數 值解驗證之需要。

於驗證案例中,不考慮地下水於裂隙中之延散效應;母岩與核種 A之分配係數為0.01 m³/kg,母岩之孔隙率為0.005,有效擴散係 數為6×10⁻¹⁴ m²/s,母岩密度為2,700 kg/m³,裂隙寬為1 m,裂 隙長度為500 m,流率為0.1 m³/yr;在膠體方面,假設膠體與核 種A之分配係數為10 m³/kg,膠體濃度為10 kg/m³、1 kg/m³及0.1 kg/m³,使用之參數彙整於表 5-3;將解析解之結果與GoldSim評 估之結果比較,結果如圖 5-10,結果顯示數值解與解析解有良 好的一致姓。

在與其他國家使用之遠場核種傳輸評估軟體評估結果比較方面, 瑞典SKB於SR-Site計畫中係利用MARFA(Painter, 2009)評估遠場 放射性核種之釋出率(SKB, 2010f, p37), 其也將MARFA評估遠場 膠 體 促 進 放 射 性 核 種 釋 出 率 之 結 果 與 其 他 軟 體 (FAR33) 比 較 (SKB, 2012, p30);於評估中,利用SR-Site計畫的腐蝕案例(SKB, 2010e, p63)中, Pu-242的近場釋出率作為遠場之輸入值, 並比較 2種評估軟體於評估遠場不存在膠體及遠場膠體密度,分別為 0.01 kg/m³及10 kg/m³時Pu-242的釋出率差異;參照瑞典SKB之 資料,利用GoldSim評估Pu-242之遠場釋出率,於評估中,Pu-242 之半化期為3.73×10⁵ yr, 遠場之平流傳輸時間(advective travel time, tw) 為 6 yr, 水 流 傳 輸 阻 抗 (flow-related transport resistance, F)為53,660 yr/m, 貝克勒數(Peclet number)為10, 母岩之乾密度為2,700 kg/m³,母岩之孔隙率為1.8×10⁻³,母岩之 基 質 擴 散 穿 透 深 度 為 12.5 m , 母 岩 與 Pu-242 之 分 配 係 數 為 1.5×10⁻² m³/kg, Pu-242之 擴 散 係 數 為 6.3×10⁻⁷ m²/yr, 在 膠 體 方 面,假設膠體皆為移動膠體,於遠場地下水中之密度分別為0 kg/m³、0.01 kg/m³及10 kg/m³,參數整理如表 5-4;評估之結 果如圖 5-11,與瑞典SKB之評估結果(如圖 5-12)有相同之趨勢, 即膨潤土膠體濃度高時,將促進放射性核種之釋出率。

(4) 膠體促進放射性核種釋出評估案例

於膠體傳輸案例中,如果核種會吸附於膠體,則將導致核種釋出 率上升;於GoldSim中,假設有10⁸ g之Sn-126(半化期為2.3×10⁵ yr)於遠場入口處水池中,其溶解度限值假設為10 g/m³;母岩與 Sn-126之分配係數假設為1.59×10⁻¹ m³/kg,母岩之孔隙率假設為 5.3×10⁻³,有效擴散係數假設為2.1×10⁻¹⁴ m²/s,母岩密度假設為 2,750 kg/m³,遠場裂隙孔徑假設為2.78×10⁻³ m,遠場水流傳輸 阻抗假設為3×10³ yr/m至3×10⁷ yr/m,此假設範圍係根據 SNFD2017報告中的剪力情節之案例分析所採用之遠場傳輸F值 而定(即8.89×10⁵ yr/m),水流傳輸阻抗值即定義了遠場裂隙對溶 質之傳輸及遲滯能力,即當水流傳輸阻抗值越高,遠場裂隙能越 有效的遲滯溶質;在膠體方面,假設膠體皆會被傳輸,膠體與Sn-126之分配係數假設為63 m³/kg,膠體於裂隙中濃度假設為0 kg/m³、0.001 kg/m³、0.01 kg/m³、0.1 kg/m³、1 kg/m³及10 kg/m³,使用之參數彙整於表 5-5;觀察裂隙遲滯Sn-126之效率, 效率之計算方法如下:

$$\eta = 1 - \frac{F_L}{F_0} \tag{5-26}$$

當效率趨近於1,則代表裂隙出口處之放射性核種峰值釋出率遠 小於裂隙入口處之放射性核種峰值釋入率,即裂隙之遲滯能力越 高;圖 5-13為GoldSim評估之結果,在相同水流傳輸阻抗下,當 膠體濃度越高,將造成遠場母岩裂隙之遲滯效率下降,而當水流 傳輸阻抗越高,則表示遠場母岩裂隙中的地下水流傳輸能力越 低,此時,高的膠體濃度,將大幅影響裂隙對Sn-126的遲滯能力, 而此結果取決於膠體濃度及放射性核種與膠體間之分配係數,即 第5.2.2.3.節所提到的De,app及Rm,app,當mckc很小時,則De,app及 Rm,app趨近De及Rm,即不影響遠場母岩裂隙對放射性核種的遲滯 能力。

表 5-1:主要模擬項選用之模式

名稱	SNFD2017的應用	界面關聯
ORIGEN-S	BWR、PWR盤存量與衰變熱分析	衰變熱結果供間距分析
		盤存量數據供核種遷移分析
FLAC3D	處置隧道與處置孔間距的分析	提供設施最佳間距之設計
		核種遷移分析
腐蝕計算式	廢棄物罐腐蝕速率分析	提供核種遷移分析所需之廢棄物
		罐腐蝕率數據
ANSYS	廢棄物罐剪力位移之潛變分析	提供廢棄物罐與緩衝材料安全的
		設計尺寸
3DEC	裂隙/廢棄物罐截切應力分析	依破壞準則做為地下設施配置
		依據破壞機率提供剪力情節分析
DarcyTools	演化時間框架下各時期之區域地下	提供核種遷移之近場、遠場所需
	水流分析	之地下水流相關參數
AMBER	生物圈傳輸途徑及不同時期演化之	提供不同途徑之劑量轉換因子供
	分析	核種遷移之輻射影響分析
GoldSim	近場、遠場之核種傳輸,及生物圈	承接相關表1、2、3中與核種傳
	劑量影響與風險評估	輸有關之尺寸、數據、劑量轉換
		因子等進行分析,分析出劑量與
		風險值

Measurement facility	Assembly	Number of repeat measurements <i>n</i>	Time range of repeat measurements (days)	Analysis method ^a	Absolute standard deviation (W)
GE-Morris	DN212	2	15	m	5.9
GE-Morris	CZ205	14	246	r	14.1
GE-Morris	CZ246	2	3	m	10.4
GE-Morris	CZ259	3	197	r	30.9
GE-Morris	MT123	3	6	m	16.7
GE-Morris	MT133	4	14	m	22.6
GE-Morris	MT228	3	12	m	15.9
Total uncertainty					16.7
HEDL	D-15	3	1115	r	95.1
CLAB	6432	2	2	m	2.00
CLAB	6432	5	18	m	1.55
CLAB	3838	2	1	m	0.45
CLAB	9329	2	2	m	0.80
CLAB	6350	2	1	m	1.77
CLAB	13847	2	0	m	0.35
CLAB	C20	4	9	m	8.24
CLAB	E38	2	1	m	0.99
CLAB	5A3	3	2	m	3.64
CLAB	5A3	2	13	m	0.34
Total uncertainty					3.94

表 5-2:各個熱卡計設施之量測不確定

^{*a*} Method of calculating standard deviation, s: r = regression, m = mean.

資料來源: ORNL(2010, p95)

中英文對照: Measurement facility(量測設施); Assembly(組件); Number of repeat measurement (重複量測次數); Time range of repeat measurement(重複量測的時間範圍); Analysis method(分析方法); Absolute standart devition(絕對標準差); Total uncertainty(總不 確定性); Method of calculating standard devistion(計算標準差的方法); regression(回歸); mean(平均值)

表 5-3: 遠場膠體促進核種傳輸與解析解驗證中所使用之參數

参 數	數值
母岩中核種A的有效擴散係數(De)[m ² /yr]	1.89×10 ⁻⁶
母岩乾密度(ρ)[kg/m ³]	2.7×10 ³
母岩孔隙率(E)[-]	5×10 ⁻³
母岩與核種A的分配係數(Kd)[m ³ /kg]	1×10 ⁻²
膠體與核種A的分配係數(K ^c _d)[m ³ /kg]	1×101
裂隙寬度(W) [m]	1
裂隙長度(L) [m]	500
水流率(Q) [m ³ /yr]	1×10-1
膠體濃度(m _c)[kg/m ³]	0.1、1及10

表 5-4: 遠場膠體促進核種傳輸與瑞典SKB評估結果比較中所使用之參數

参數	數值
Pu-242之半化期(t1/2)[yr]	3.733×10 ⁵
母岩中Pu-242的有效擴散係數(De)[m ² /yr]	6.3×10 ⁻⁷
母岩乾密度(ρ)[kg/m ³]	2.7×10 ³
母岩孔隙率(E)[-]	1.8×10 ⁻³
母岩與Pu-242的分配係數(Kd)[m ³ /kg]	1.5×10-2
膠體與Pu-242的分配係數(K ^c _d)[m ³ /kg]	3.9×101
地下水傳輸時間(tw)[yr]	6
水流傳輸阻抗(F)[yr/m]	5.366×104
貝克勒數(Peclet number) (Pe) [-]	10
基質擴散穿透深度(Mt)[m]	12.5
膠體濃度(mc)[kg/m ³]	0 \cdot 0.01 \cdot 10

表 5-5: 遠場膠體促進核種傳輸案例模擬中所使用之假設參數

参 數	數值
Sn-126盤存量(I) [g]	108
Sn-126溶解度限值(Sm) [g/m ³]	10
母岩中Sn-126的有效擴散係數(De)[m ² /yr]	6.6×10 ⁻⁷
母岩乾密度(ρ)[kg/m ³]	2.75×10 ³
母岩孔隙率(E)[-]	5.3×10 ⁻³
母岩與Sn-126的分配係數(Kd)[m ³ /kg]	1.59×10 ⁻¹
膠體與Sn-126的分配係數(K ^c _d)[m ³ /kg]	6.3×10 ¹
裂隙內徑(2b)[m]	2.78×10 ⁻³
基質擴散穿透深度(Mt) [m]	1.67
遠場水流傳輸阻抗(F) [yr/m]	3×10 ³ 至3×10 ⁷
膠體濃度(mc)[kg/m3]	0 \cdot 0.001 \cdot 0.01 \cdot 0.1 \cdot 1 \cdot 10
評估時間(t)[yr]	108





資料來源: ORNL(2010, p90)

註:實線表示量測等同於預測

中英文對照: Perdicted decay heat(衰變熱預測值); Measured decay heat(衰變熱量測值); CALB, GEMorris, HEDL (電廠名稱)



圖 5-7:核種遷移分析技術與其他軟體及參數間之關係圖



圖 5-8:不同水流速度下之蒙脫石釋出率

資料來源:圖片引用自芬蘭Posiva報告(Posiva, 2013, p381)。 註:以power-law方式擬合 中英文對照:Erosion rate(侵蝕率);Water velocity(水流速)。





圖 5-10: GoldSim模擬遠場膠體促進核種釋出數值解與解析解比較 註: C為膠體濃度(kg/m³)



圖 5-11:利用GoldSim評估遠場不存在膠體及地下水中含0.01 kg/m³及10 kg/m³之膠體時,Pu-242之遠場釋出率



圖 5-12:瑞典SKB利用FAR33(數值解)評估遠場不存在膠體及地下水中含0.01 kg/m³及10 kg/m³之膠體時,Pu-242之遠場釋出率,並與MARFA(數值解)之評 估結果比較

資料來源:引用自瑞典SKB報告(SKB,2012,p31)。 註:a為年。



圖 5-13:不同遠場水流傳輸阻抗下,不同膠體濃度對遠場遲滯效率之影響

5.3. 熱力(T)-水力(H)-力學(M)實驗與模擬技術研發

5.3.1. 緩衝與回填材料受水力作用影響

隨著地下水入侵,在緩衝材料達飽和後,若廢棄物罐失效,鑄鐵 內襯將受厭氧腐蝕而產生氣體,隨著氣體產生使氣壓持續累積,而後 以擴展氣體通道之方式離開處置孔,此遷移過程可能影響緩衝材料之 遲滯安全功能,故本研究之目的為探討氣體於緩衝材料內之遷移過程 與特性,評估其對緩衝材料安全功能之影響。

107年度延續106年度成果,使用初步建置完成之氣體傳輸實驗設備,進行實驗流程之開發與建立,並以緩衝材料試體進行試驗,確認實驗設備與程序可取得所需參數,包含回賬壓力、氣體滲透性 (permeability)及突破壓力。

實驗流程主要可分為「塊體壓製」、「安裝試驗塊體與數據量測 裝置連接」、「預先飽和試驗」及「氣體滲透試驗」四大步驟,分述 如下:

(1) 壓製塊體

為避免切割塊體時造成邊緣不均勻、材料流失或產生粗糙面,本 研究之塊體採用預先壓實成形之方式製作,使用單軸抗壓機,將 試體以直接壓製於試驗容器內,亦可避免脫模過程造成擾動或變 形之可能性。

(2) 安裝試驗塊體與數據量測裝置連接

塊體壓製完成後需妥善將透水石與濾紙置於試體兩側,以確保氣 體與水分平均接觸,並於組裝時確認塗抹真空膠防止洩漏。於預 先飽和試驗前,則須先進行數據量測裝置之連接,開啟數據擷取 程式,將荷重元、壓力計及流量計之訊號傳輸線與數據擷取裝置 連接,確認量測值可即時監測並記錄。

(3) 預先飽和試驗

本試驗採用通以循環水之方式,使試體兩面同時吸水而加速其飽 和過程;而由於膨潤土吸水膨脹之特性,試體位在侷限空間內而 無法自由膨脹,將會產生相對應的壓力擠向四周,藉由荷重元量 測該值,當應力達平衡時即為塊體之回脹壓力,該值亦是現有氣 體遷移理論中阻止突破現象發生之臨界壓力。

(4) 氣體滲透試驗

將設備切換為單向注氣模式,以微量定流率模式注入氦氣,氣體 在接觸試體前會經過預先飽和槽,避免過程中造成試體去飽和; 氣體將會開始逐漸累積於注入端而造成壓力上升,當壓力到達臨 界值時將會發生突破現象,注入端壓力驟降,並伴隨著下游端氣 體流量計量測到明顯出流,該臨界值則為突破壓力,而下游端之 穩定流率則可代入達西公式(Darcy's Law)計算氣體滲透性。

本測試試驗採用之MX-80型膨潤土作為樣品,壓製乾密度1,600 kg/m³之試體,並進行預先飽和及氣體滲透試驗。預先飽和試驗開始 後,初期之壓力值呈現十分明顯之上升趨勢,而後漸緩,可能是因為 水分開始僅能以擴散方式進入塊體中心;於106天後,壓力值維持在 5.95 MPa超過20天的時間,試體已達飽和,回賬壓力為5.95 MPa(如 圖 5-14)。

試體達飽和狀態後,開始進行氣體滲透試驗,注氣流率為0.006 ml/min。氣壓與應力隨著氣體累積而上升,於注氣開始第21天,觀察 到2次較明顯之短暫氣體出流,但持續時間不長,所對應之氣壓亦無 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,取得突破壓力為27.06 MPa; 突破後之氣壓於13.05 MPa至13.97 MPa間微幅變動,維持近似穩定之 平衡狀態(圖 5-15),將該階段流率與氣壓代入達西公式,可得氣體 滲透性約為3×10-22 m2至3×10-21 m2之間。

經由試驗結果,所建立之氣體滲透試驗可確實觀察記錄緩衝材料 之飽和及氣體傳輸過程,取得氣體滲透性、突破壓力及相關實驗參數, 並對其特性有初步瞭解,作為評估氣體對緩衝材料影響之依據。

5.3.2. 緩衝與回填材料受化學作用影響

本研究研讀文獻參考國際上之相關研究,探討處置環境及緩衝材 料中硫化物來源與擴散行為、對銅質材料之腐蝕作用、探討緩衝材料 /回填材料於地下處置環境中膨潤土與地下水的相互作用。試驗延續 106年之成果,建立硫酸鹽還原菌活性試驗,包括實驗規劃、設備設 計及建置;執行緩衝材料擴散試驗,取得擴散參數,說明如下:

(1) 獲得緩衝材料中硫酸鹽之有效擴散係數及視擴散係數

為探討處置環境緩衝材料中之硫化物之影響,設計緩衝材料擴散 試驗,利用定濃度穿透擴散(through-diffusion with constant concentration)作為試驗方法,分析硫酸鹽擴散係數:將膨潤土塊 體固定於設計之試驗容器中間,並給予塊體兩側固定的分子濃度 差;使用菲克定律(Fick's law),考慮一維擴散模式,以實驗條件 及分析結果,來計算有效擴散係數(effective diffusion coefficient)及視擴散係數(Apparent diffusion coefficients);其中 有效擴散係數為考慮孔隙介質內較小的橫截面積而定義之擴散 係數、視擴散係數為考慮溶質在孔隙材料間移動,在材料造成的 遲滯現象影響下求得之溶質擴散係數。(García-Gutiérrez et al., 2006, p37-p53; Crank, 1975, p49-p52; Birgersson et al., 2009, p153)。

本次試驗設計5組試驗塊體,包含兩種塊體飽和密度,以及不同 的塊體厚度,試驗照片如圖 5-16所示;試驗數據及計算結果如 表 5-6。其中對試驗結果比較之理論視擴散係數,為使用類似係 件下的文獻數據,並可以利用此數據推定硫化物擴散參數 (Bengtsson et al., 2015, p29);對於有效擴散係數,類似條件下 的文獻數據為使用鈉型MX-80膨潤土,乾密度於1,500 kg/m³至 1,600 kg/m³時試驗得之(Birgersson et al., 2009, p155)。擴散試 驗結果取得的擴散係數,與參考文獻數據數量級相同,數值相近。

(2)建立硫酸鹽還原菌於不同膨潤土密度中之活性影響 本次試驗參考瑞典SKB之研究報告(Bengtsson et al., 2015, p3p35),設計試驗設備、準備試驗材料及建立試驗程序,並使用與

文獻相似的試驗條件,行試驗規劃之測試。試驗使用銅片接觸膨 潤土飽和塊體,模擬緩衝材料與廢棄物罐界面,並添加硫酸鹽示 蹤劑,以分析銅片上反應生成之硫化銅;藉由設計MX-80膨潤土 之飽和密度低(1,750 kg/m³)及高(2,000 kg/m³)之條件,並設定 其他條件為適合細菌生長及硫化物生產之環境,以此來評估膨潤 土壓實密度對硫酸鹽還原菌活性的影響力。

試驗設備包括不鏽鋼試驗容器、回賬壓力感測設備、抽氣/注水 部件及分析設備,如圖 5-17;試驗材料部分包括硫酸鹽還原菌 菌株培養、製作含菌膨潤土塊體。選用MX-80膨潤土作為參考試 驗膨潤土,並混入實驗室培養的硫酸鹽還原菌,由於菌株皆為絕 對厭氧菌,培養條件十分嚴苛;菌株培養及菌數分析部分為與清 華大學原科中心合作,調配培養基,建立培養環境,並於含菌膨 潤土製備過程中不同時間測試菌株存活率;此外,試驗額外使用 2組容器,裝載設計條件相同,以混菌膨潤土壓製而成的試驗塊 體,用於分析各試驗步驟間,中斷試驗,取出試驗塊體,分析硫 酸鹽還原菌是否存活;分析結果顯示,培養、混入膨潤土中的硫

建立試驗程序後,測試各個步驟的操作實行方式、確認分析方法, 並改善遭遇到的問題、精進試驗方法及降低試驗誤差;最後,使 用與文獻相似的試驗條件時間,設計約47天、約74天及約123天 的試驗時間,開始長期試驗測試。

依據初步試驗之菌數分析顯示,硫酸鹽還原菌有充足的數量存活 至試驗結束,菌種數量平均分布於塊體各層,如表 5-7。其中CK代表 膨潤土照射滅菌,無添加菌株之對照組、SRB為含硫酸鹽還原菌之膨 潤土;標示H為較高密度(2,000 kg/m³)組別、標示L則為較低密度 (1,750 kg/m³)組別。硫酸鹽濃度分析上,硫酸鹽量與塊體質量成比 例,即高密度的組別內硫酸鹽濃度較高,而硫酸鹽還原菌的活性並未 對硫酸鹽量造成顯著降低;銅片活度分析上,各試驗組別的銅片活度 均在偵測儀器背景值以下,而未能得出分析結果,可能原因包括:試 驗時間過短,添加的示蹤劑濃度過低,或是其他試驗操作上的問題。

5.3.3. 緩衝材料耦合試驗及數值模擬

(1) 緩衝材料THM耦合縮尺試驗研究

本研究以小尺度耦合縮尺實驗模型試驗,探討夯實膨潤土材料受熱-水-力作用交互影響下之水份傳輸變化及壓力變化。本階段延續106 年度耦合試驗模型,加入水份入滲之影響,取得縮尺耦合試驗模型之溫度、應力及濕度變化歷時數據,說明如下:

本耦合試驗為了模擬地下水滲透之情形,故在試驗腔體周圍預留 4個注水孔,並安裝4條直徑6mm之PVC注水管與壓力體機控制器 連接,以作為注水之管道(圖 5-18)。

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。

圖 5-19為感測器位置之示意圖,圖 5-20為溫度變化歷程,當加 熱一段時間俟溫度達到穩定後,為觀察各項感測器回復的情形, 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。

溫度計T4-1在失效之前其溫度約為40℃,與同樣位於加熱器邊緣 的T2-1及T3-1相比,相差30℃以上,表示在加熱器的底部溫度較 低。另外,T2-1與T3-1亦相差約10℃,由以上之現象得知,加熱 器表面可能存在較顯著之溫度梯度,而靠近試體外圍的溫度(T2-4及T3-4)約為30℃,以上皆可作為日後數值模擬參考的依據。 由圖 5-20亦可知,於注水後溫度開始下降,而試驗第202天至第

204天考量注水壓力沒有上升,因此對於試驗腔體的密封性存有 疑慮,故將試體取出恆溫水槽外進行密封性檢查,以致溫度於試 體取出期間內有小段突升。待疑慮排除後,於試驗第204天將試 體放回恆溫水槽中。溫度變化隨每日注水量趨緩而有漸漸平緩的 現象,然而從取出試體至放回試體,對壓力及相對溼度影響不大。 最後,當試驗進行至第288天時,因加熱器故障而結束試驗。 在相對濕度方面,如圖 5-21所示,總體而言,在降溫階段相對 濕度上升,在升溫階段相對濕度下降,其中以W2的變化較為明

顯。在前期加熱階段,相對濕度皆先後由45%降至35%到40%, 此為加熱造成的乾燥效應所致,因W2較W3距熱源近,故較早發 生濕度變化及平衡,且因加熱使水氣由內而外傳遞,故可於第76 天時觀察出W3之濕度值始高於W2。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。

由圖 5-21可知,進入注水階段後,相對溼度顯著增加,且在注 水後試體內部皆有溫度下降的現象,而加熱棒附近因溫度下降, 進而降低土壤乾燥的能力。W1感測器之接頭接觸問題於試驗第 214天排除後即顯現相對濕度之變化。

壓力變化歷程如圖 5-22所示,由圖可知從試驗開始至第195天, 壓力皆無明顯變化,表示無論是升溫或是降溫階段,溫度對壓力 的影響較不顯著,而進入注水階段後,壓力開始有顯著變化,且 其變化有逐漸收斂之趨勢。

(2) 緩衝材料THM耦合特性研究

107年度係以飽和緩衝材料MX-80膨潤土進行力學特性之研究, 試驗後取得飽和緩衝材料的彈性模數、柏松比、凝聚力、摩擦角 和不排水剪力強度等參數,探討飽和緩衝材料在不同溫度下的力 學行為。本研究以反水壓飽和及靜壓實方法製作飽和試體,以飽 和密度約2,000 kg/m³之試體進行單軸壓縮及三軸壓縮試驗,單 軸壓縮試驗包含量測溫度30度之彈性模數、泊松比和不排水剪力 強度;三軸壓縮試驗則以溫度30℃進行圍壓8 MPa、12 MPa和13.5 MPa,並計算凝聚力及摩擦角,此外,進行圍壓13.5MPa條件下溫 度30℃、60℃、90℃之測試,量測其軸差應力和應變。

首先以反水壓飽和製作飽和試體,自然含水量17.4%之試體進行 飽和度提升測試實驗,試體乾密度為1,594 kg/m³,自然含水密度 為1,865 kg/m³,試體達飽和還需注入82.8 cc,圖 5-23為注水曲 線,注水初期注入體積達到約90 cc,是由於快速將連接管線通路 中的空間填滿,隨後注水體積開始慢慢滲入試體內部,直到實驗 日期第60天,注入體積約為140 cc,試體尚未達到飽和。在持續 飽和的過程中,實驗觀察發現圍壓與反水壓顯示數值相近,研判

可能因橡皮膜破損或是橡皮模與試體夾具脫落,造成圍壓之液壓 推擠反水壓之液壓,使其數值相近,最終宣告實驗失敗。在高圍 壓狀態下膨潤土試體自然吸水飽和需要耗費數個月的時間,且尚 須克服端面注水時產生的膨脹力與圍壓控制之平衡,使得自然飽 和試體備置不易,受限於本研究之時程,因此,改為靜壓實方法 製作飽和試體,方法為計算自然含水膨潤土壓製成飽和密度約 2,000 kg/m³之試體,所需之額外水量,將其與自然含水膨潤土混 和壓製成試體,在量測含水量,確認是否飽和。

圖 5-24為單軸壓縮試驗結果,在相同的試樣製作方式下,試樣 自身之變異,造成軸差應力範圍約在1.9 MPa至2.5 MPa,而軸向 應變約在5.8%至6.8%達到破壞,量測得彈性模數為100至140 MPa,柏松比為0.444至0.474,平均不排水剪力強度約在1.1 MPa。 圖 5-25為溫度30℃之緩衝材料軸差應力-應變曲線,隨著圍壓的 增加其強度僅約略上升,而約在軸向應變約6%之位置達到最大 強度。圖 5-26為溫度30℃圍壓13.5 MPa之軸差應力-應變曲線相 應孔隙水壓之分布,隨軸向應變的增加,軸差應力逐漸上升到達 最大產生破壞,隨後軸向應力隨軸向應變約略下降,在加載過程 中,孔隙水壓皆無明顯變化之現象,即顯示緩衝材料內之蒙脫石 對水有強大的吸引力,在本實驗條件下無法使其排出,因此無法 量測孔隙水壓力。

圖 5-27為不同溫度條件圍壓13.5 MPa之飽和緩衝材料軸差應力 一應變曲線,溫度由30℃提升至60℃,其軸差應力一應變曲線,趨 勢相當接近,尖峰軸差應力約為3 MPa,但隨著溫度提升至90℃, 軸差應力顯著降低,尖峰軸差應力約為2.3 MPa。

圖 5-28為力學實驗結果繪製成之p-q空間破壞包絡線,迴歸得 方程式q=0.0323p+1096.2,計算凝聚力及摩擦角分別為1.07 MPa、1.85度,在試樣飽和狀態下,摩爾庫倫模壞準則之包絡線 趨近於水平,獲取之凝聚力亦會趨近不排水剪力強度。實驗成果 力學參數表彙整於表 5-8。

緩衝材料試體隨著飽和度的提升,對其力學特性有顯著之影響, 相較於自然含水試體的力學行為,飽和試體的軸差應力-應變曲 線,尖峰軸差應力提早發生,無明顯尖峰應變,試體更具有延展 性,而溫度的作用在飽和試體的力學行為影響大過於自然含水試 體的力學行為,由於飽和試體受圍壓作用後,其內部孔隙水壓無 法快速排出,加上溫度作用造成內部水分逐漸蒸散,造成試體強 度顯著的下降。

(3) 緩衝材料THM耦合數值模擬

107年度主要探討深地層處置場在廢棄物罐熱效應作用下,水分 在工程障壁中的移動情形(與緩衝材料之飽和度與含水量有關), 以及在水的作用下,近場溫度重新分布之情況,藉以了解地下水 入侵對處置場帶來之影響。

參考 國 際 間 相 關 TH 耦 合 數 值 模 擬 發 展 ,考 量 水 力 作 用 納 入 耦 合 分析時,飽和環境與未飽和環境差異顯著,飽和環境下的模擬僅 考慮由固體材料與水構成,而在未飽和環境下則需再考慮孔隙的 影響。在未飽和狀態下進行水力傳導效應模擬時,材料孔隙中會 形成一負孔隙壓力,將外部水吸入材料內,在模擬過程中需考慮 各材料之持水曲線(water retention curve)。本研究團隊參考國 外試驗經驗,設計一種可以模擬溫度梯度作用下土體中水分移動 的試驗裝置,探討非飽和膨潤土在熱荷載作用下水分移動之情 況,稱為水熱梯度試驗。同時以C++改寫FLAC3D中CAM-CLAY模 式,使該材料組合律具備土壤基質吸力之變化機制,意即使原先 CAM-CLAY 中 的 巴 塞 隆 納 基 礎 模 型 (Barcelona Basic Model),除 荷 載坍塌屈服面 (Loading Collaps)外亦具備吸力增加屈服面 (Suction Increase), 並將其嵌入FLAC3D進行熱-水耦合之數值模 擬,將數值模擬結果與水熱梯度之試驗結果比對,說明2者之差 異,據此建立TH耦合數值分析技術與確立數值模型及理論基礎。 此外,本研究參考國際間TH耦合數值模擬模型及相關研究發展, 依數值分析理論及模型假設條件建立TH耦合數值模擬之基本分 析模型,包含網格之建立、材料組合律模式之假設、邊界條件與

初始條件之設定與測試,並與國外分析結果進行平行驗證,擬合相應之試驗成果驗證模型之正確性,以供處置場長期穩定性分析 及安全評估之論證依據。

與瑞典SKB案例之平行驗證中,依據瑞典SKB以COMSOL建立之幾 何模型(如圖 5-29上圖),本計畫利用FLAC3D建立數值分析模型 如圖 5-29下圖,材料參數如表 5-9,使用之初始條件與邊界條 件與SKB相同。

以圖 5-29下圖之試驗幾何模型進行熱-水耦合運跑,得到溫度分 布如圖 5-30右圖,左圖為SKB P-14-22中以COMSOL在相同條件 下進行熱-水耦合運跑之結果,距離對稱軸約0.52 m處為受熱砂 層與膨潤土塊之分界,熱傳導通過此分界時出現溫降現象,約降 至68 ℃至70 ℃左右,且在膨潤土中溫度有隨徑向距離增加而遞 減之變化情況,直至膨潤土外側時溫度約在48 ℃至50 ℃左右, 由熱傳導概念研判此應為合理之溫度分布。

以圖 5-29之試驗幾何模型進行熱-水耦合運跑,得到含水量分布 如圖 5-31右圖,左圖為瑞典SKB P-14-22中以COMSOL在相同條 件下進行熱-水耦合運跑之結果,距離對稱軸約0.52 m內的受熱 砂層為乾砂,故無含水量,膨潤土塊受到熱效應作用之影響,在 靠近砂層處其含水量由17%降至9%左右,明顯看出水分於受熱 後被向外驅趕之趨勢,右側邊界受到加熱砂層影響而升溫(與上 下零熱通量邊界不同),使得圖中出現類似雙曲線之含水量分布, 由熱傳導概念研判此應為合理之含水量分布。

在與日本核能循環發展研究所(Japan Nuclear Cycle Development Institute,簡稱JNC)案例之平行驗證中(鈴木英明, 1999),JNC設計了一項在溫度梯度變化的條件下,觀察水分在不 飽和膨潤土中移動之情況,並定時記錄不同位置之膨潤土溫度及 含水量,本計畫以FLAC3D依據其試驗配置,建置緩衝材料試體之 三維數值模型如圖 5-32,溫度與飽和度之記錄點位於節點(grid point)上,而含水量之記錄點位於中央處,熱的部分採用熱對流 模式,水的部分採用等向性流體模式,對數值模型進行熱-水耦合

分析。依據試驗條件,上下2端設為恆溫邊界,並設定水力邊界 條件為不透水邊界。藉由對膨潤土試體之熱-水耦合分析,觀察試 體之含水量與飽和度隨時間變化之情況。材料參數如表 5-10。 日本JNC以3種緩衝材料進行熱-水耦合室內試驗,該計畫採用 Kunigel OT-9607膨潤土作為平行驗證之標的,其試驗條件如表 5-11,試體安裝後,膨潤土初始含水量及加熱條件如表 5-11, 依加熱時間及上下2端之溫度梯度分為4種情況,即溫度梯度1℃/ cm加熱96小時、3℃/ cm加熱96小時、5℃/ cm加熱96小時與2 ℃/ cm加熱400小時。

將圖 5-32之數值模型於試體下端加熱,使試體上下2端之溫差分 別為10℃、20℃、30℃及50℃,其中溫差10℃、20℃及50℃的 試體加熱並持溫96小時,溫差20℃的試體加熱並持溫達400小時, 以FLAC3D進行熱-水耦合運跑,得到溫度分布如圖 5-33,從溫度 分布圖看來,緩衝材料的溫度隨著遠離熱源遞減,呈現層狀均勻 分布。將圖 5-33之分布圖量化為座標並與日本JNC文獻比如圖 5-34與圖 5-35,與底部熱源之距離為橫軸,溫度為縱軸,由圖 5-34與圖 5-35可看出日本JNC之試驗值(藍色線)與本計畫以 FLAC3D運跑得到之模擬值(紅色線)大致相符,說明此平行驗證 為有效。

同樣以圖 5-32之數值模型且加熱條件相同,以FLAC3D進行熱-水耦合運跑,得到含水量分布如圖 5-36,從含水量分布圖看來, 在溫差較小(10°C)時,底部含水量約15.2%,水分多集中在試體 中央一帶,整體含水量與初始值相去不遠;當溫差增至30°C時, 底部含水量下降至12.5%左右,水分分布逐漸向試體上部集中; 當溫差達到50°C時,底部含水量約在8%左右,水分明顯集中在 試體上端,試體中段受到加熱影響逐漸乾燥;而溫差較小(20°C) 但加熱時間達400小時的狀況下,底部含水量降到8%至9%,且水 分亦明顯集中在試體上半部,其他位置含水量則呈現隨著遠離熱 源遞增。

將圖 5-36的分布圖繪成如圖 5-37與圖 5-37之曲線圖來比較, 發現當溫差較小時,上下2端含水量的差異不大,且均接近初始 值,當溫差增加,下端進熱源處開始有去飽和(de-saturation)現 象,意即水分被向上驅趕,使上端膨潤土飽和度上升,經比對後 得知各監測位置之含水量及飽和度與JNC試驗結果大致相符。 經上述與瑞典SKB及日本JNC TN-8400報告(鈴木英明,1999)之驗 證,發現溫度之相符程度較高,含水量之趨勢亦相符,且使用之 分析工具雖不同,但只要輸入相同之初始條件、邊界條件以及物 理參數,無論溫度或含水量均可得到與文獻相符之分析結果。由 上述模擬結果可說明本研究之數值模型建置與數值分析方法兼 具正確性與合適性。

試驗設計編號	Top (MPN 10º/L)	Middle 1 (MPN 106/L)	Middle 2 (MPN 106/L)	Bottom (MPN 106/L)
СК-Н	<0.0001	ND	ND	ND
CK-L	ND	ND	ND	ND
SRB-H	14-21.6	6.8-14	6.8-14	6.8-14
SRB-L	6.8-9.6	14-21.6	6.8-14	6.8-14

表 5-6:硫酸鹽還原菌活性試驗,試驗膨潤土硫酸鹽還原菌分析結果

表 5-7:緩衝材料擴散試驗結果

試驗編號	1	2	3	4	5	單位
乾密度	1.16	1.16	1.16	1.56	1.57	g/cm ³
厚度	0.985	0.710	0.485	0.460	0.215	cm
視擴散係 數,D _a	1.17×10^{-12}	3.14×10^{-1}	1.26×10^{-1}	3.51×10^{-1}	2.19×10^{-1}	m²/s
視擴散係 數, D _a (理論 值)	1.2×10^{-1}	1.2×10^{-13}	1.2×10^{-12}	2.0×10^{-12}	2.0×10^{-13}	m²/s
誤差	-2.89%	161%	4.88%	75.7%	9.68%	-
有效擴散 係數,D _e	3.3×10^{-12}	2.1×10^{-12}	3.2×10^{-12}	1.0×10^{-12}	1.1×10^{-12}	m²/s
有效擴散 係數, D _e (理論 值)	-	-	-	7.2×10^{-11}	7.2×10^{-1}	m²/s
誤差	-	-	-	41%	45%	-

	不排水剪力強度 (MPa)	圍壓 (MPa)	p (MPa)	q (MPa)	静彈性模數 (MPa)	柏松比 (-)
S1	1.1	0	1.1	1.1	-	-
S2	1.3	0	1.3	1.3	140.3	0.474
S3	1.1	0	1.1	1.1	-	-
S4	1.0	0	1.0	1.0	103.32	0.444
S5	-	8	9.5	1.5	-	-
S6	-	12	13.6	1.6	-	-
S7	-	13.5	15.0	1.5	-	-

表 5-8: 實驗成果之力學參數

表 5-9:瑞典SKB平行驗證使用材料參數一覽表

		緩衝材料	隔絕層	加熱器	內間隙	外間隙
			(空氣)			
孔隙率	n(-)	0.363	0.01	0.01	0.99	0.99
熱傳導係數	λ dry	1.2	0.035	4.5	0.1	0.27
	W/(mK)					
	λ sat	1.2	0.035	4.5	0.1	0.27
	W/(mK)					
固體比熱	c (J/kgK)	800	800	800	1,000	1,000
滲透率	k ₀ (m ²)	1.2×10 ⁻²¹	1.0×10 ⁻³⁰	1.0×10 ⁻³⁰	1.0×10 ⁻³⁰	1.0×10 ⁻³⁰
相對滲透率	k _r (-)	Sr ³				
蒸氣擴散曲	τ(-)	1	1.0×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹⁰	1	1
折因子						
持水曲線	Po (MPa)	47.651	0.1	0.1	0.1	0.1
	λ (-)	0.05	0.6	0.6	0.6	0.6
	P1 (MPa)	320				$S_{max} = 0.01$
	λ1(-)	1				
顆粒密度	ρs (kg/	2,780	30	2,650	1	1
	m³)					

資料來源:翻譯自Lars-Erik Johannesson(2014, p35)

			-			
材料		KunigelOT-9607膨潤土				
乾密度(g/cm3)		1.	65			
上端溫度(℃)	25 25 25 40					
下端溫度(℃)	35	55	75	60		
試體總長度(cm)	10					
溫度梯度(°C/cm)	1.0 3.0 5.0 2.0					
試驗時間(hr)	96	96	96	400		
試體初始含水量(%)	16.5					

表 5-10:日本JNC熱-水耦合試驗條件一覽表

資料來源:鈴木英明(1999, p8)

	•	1 2 1.1.1			• • •
與高溫端	初始	温度梯度	温度梯度	温度梯度	温度梯度
距離(cm)	含水量	1°C/cm	3°C/cm	5°C/cm	2°C/cm
	(%)	經過96小時後	經過96小時後	經過96小時後	經過400小時後
0.5	16.02	15.34	13.09	9.45	10.29
1.5	15.79	15.57	14.25	10.95	11.16
2.5	16.02	15.88	15.24	12.00	12.02
3.5	16.22	16.01	15.69	14.00	13.07
4.5	15.89	16.03	16.17	15.97	14.79
5.5	15.99	16.06	16.42	17.32	18.12
6.5	15.88	16.38	17.04	18.60	20.19
7.5	15.96	16.40	17.30	18.95	20.41
8.5	15.86	16.45	17.38	19.25	20.59
9.5	16.13	16.60	18.06	20.39	20.91
平均	15.98	16.07	16.06	15.69	16.16

表 5-11:日本 JNC 熱-水耦合試驗初始含水量與加熱條件

資料來源:翻譯自鈴木英明(1999, p16)



圖 5-14:預先飽和試驗之回賬壓力

中英文對照: Elapsed time(試驗歷時); Swelling pressure(回賬壓力)。



圖 5-15: 氣壓、應力及出流氣體流率隨時間之變化 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 5-16:硫酸鹽還原菌活性試驗,實驗室照片



圖 5-17:緩衝材料擴散試驗,試驗執行照片



圖 5-18:於周圍安裝PVC注水管



圖 5-19: 感測器位置示意圖



圖 5-20:溫度變化歷程



圖 5-21:相對濕度變化歷程



圖 5-22: 壓力變化歷程



圖 5-23:自然含水試體注水曲線





圖 5-25:溫度30℃之飽和緩衝材料軸差應力-應變曲線



圖 5-26: 圍壓13.5MPa之軸差應力-應變曲線相應孔隙水壓分布



圖 5-27:不同溫度條件圍壓13.5 MPa之飽和緩衝材料軸差應力-應變曲線


圖 5-28:p-q空間破壞包絡線



圖 5-29:以FLAC3D依據COMSOL建立之熱-水耦合試驗幾何模型 資料來源:上圖為COMSOL by SKB(2014, p37),下圖為FLAC3D by INER。



圖 5-30:熱-水耦合數值分析之溫度分布結果

註:(a)以COMSOL進行熱-水耦合數值分析之溫度分布結果;(b)以FLAC3D進行熱-水耦合數值 分析之溫度分布結果。



圖 5-31:熱-水耦合數值分析之含水量分布結果

註:(a)以COMSOL進行熱-水耦合數值分析之含水量分布結果;(b)以FLAC3D進行熱-水耦合數 值分析之含水量分布結果。



圖 5-32:以FLAC3D依日本JNC熱-水耦合室內試驗建構之緩衝材料三維數值模

型



圖 5-33: JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之溫度分布 註:上下溫差為10℃、20℃、30 ℃、50℃,1、3、4加熱時間96小時,2加熱時間400小時



註1:上下溫差為10 ℃與20℃,加熱時間96小時與400小時 註2:JNC之試驗結果繪自JNCTN-8400,圖4.1.4(鈴木英明,1999,p13)





註1:上下溫差為30℃與50℃,加熱時間96小時

註2: JNC之試驗結果繪自 JNC TN-8400,圖4.1.4(鈴木英明, 1999, p13)



圖 5-36: JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之含水量分布 註:上下溫差為10℃、20℃、30℃、50℃,1、3、4加熱時間96小時,2加熱時間400小時



圖 5-37: JNC熱-水耦合室內試驗平行驗證之含水量比較 註1:上下溫差為10 ℃與20℃,加熱時間96小時與400小時

註2: JNC之試驗結果繪自JNC TN-8400,圖4.1.6(鈴木英明, 1999, p20)



國 5 50· JNC然 小树白主门武威 1 1 城 远之 古

- 註1:上下溫差為30 ℃與50℃,加熱時間96小時
- 註2: JNC之試驗結果繪自 JNC TN-8400, 圖4.1.6(鈴木英明, 1999, p21)

6. 整合性技術

6.1. 地質圈長期穩定性評估

地質處置設施的安全設計概念中,良好的天然障壁系統應具有穩定 的力學及化學等特性,用以維持工程障壁系統的功能性、遲滯核種在地 層遷移的能力,以及長期隔離核種於人類生活圈外的功能。當處置環境 受氣候變遷導致海平面下降時,可能會改變處置深度的地下水流及化學 特性,而影響處置環境的長期穩定性,降低多重障壁系統對放射性廢棄 物的圍阻、遲滯功能。以下內容藉由分析本島結晶岩測試區的地表監 測成果,評估地殼抬升/沉陷作用的區域變動趨勢,以及利用本島結 晶岩測試區地下水的化學特性進行情境模擬案例的探討,從地表監測 成果觀察岩體的變動趨勢至岩體深層地下水長期演化特性研析,作為 後續評估本島結晶岩測試區穩定性基礎數據。

6.1.1. 地表監測與岩體變動趨勢分析

為取得候選場址評選與核定階段所需之評選參考依據,且參照原 能會公告之「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」,場址應避免 位於山崩、地陷或火山活動之虞的地區及地質構造有明顯抬升、沉降、 褶皺或斷層活動變化的地區。因此,地質圈長期穩定性評估需就短、 中、長期不同時間尺度的地質現象,以地質調查數據建立短、中、長 期模擬與評估技術。

SNFD2017報告中已彙整全國性地質的短、中、長期抬升與剝蝕 作用、沉陷與沉積作用的地質紀錄,對臺灣近年的抬升/沉陷趨勢有 相關論述。在此基礎之上,針對本島結晶岩測試區短期地殼穩定性, 累積長時距地表觀測數據以提高觀測精度,對於潛在地質構造邊界地 殼變動差異以及抬升/沉陷作用等進行探討。

107年度持續對本島結晶岩測試區地表監測成果進行解析, 說明 如下:

(1) GPS連續觀測之參考站選擇

全球衛星定位系統(Global Positioning System, GPS)連續觀測之 資料解算處理,輔以臺灣地理位置和測站位置分布狀況進行修 正,其修正內容包含GPS連續觀測網形中基線的組成方式,以及 GPS連續觀測站參考站選擇。有關基線的組成方式則是以金門站 (KMNM-ITRF2008)為坐標參考主站,與其他站組成基線(STAR) 的方式進行解算。

(2) GPS連續觀測資料品質分析

由於GPS觀測訊號會因電離層閃爍(ionospheric scintillation)、多 路徑效應(multipath)、自然與人為雜訊對訊號的干擾、信號通過 障礙物所產生的繞射現象、天線增益與接收器本身之雜訊等因素 影響接收訊號的品質。因此對於GPS接收器所接收的訊號應採取 品質分析與管制,以確保GPS後續解算成果的品質(Yeh et al., 2007,p393)。各GPS連續觀測站衛星觀測資料品質,如MP1值(L1 載波的多路徑效應)、MP2值(L2載波的多路徑效應)均介於0.1 m 至0.4 m之間,觀測訊號品質穩定正常(如圖 6-1所示),觀測量評 估指標如表 6-1所示,經篩選後日觀測訊號品質不良者,將不納 入後續解算分析中。

- (3) 定期觀測椿量測作業與資料解算 定期觀測作業目的為補充局部區域之測量密度,目前利用GPS衛 星定位儀定期進行地面樁點外業測量,固定觀測時距使觀測成果 較不因時間或季節等週期因素影響,供岩體穩定性之分析與探 討。利用GPS定期測量可獲得每次定期觀測樁位量測之高精度水 平方向平面坐標,藉以瞭解GPS定期觀測樁於水平方向之位移變 化趨勢;垂直方向輔以水準測量,高程系統採用臺灣地區一等水 準系統(2001臺灣高程基準,TWVD2001),水準平差高程以內政 部水準點「NB9075」作為參考水準點進行計算。
- (4) GPS連續觀測資料成果與定期觀測成果綜合說明
 - (a) GPS連續觀測站HGC1至HGC4等4站之連續觀測成果,自2011 年開始針對本島結晶岩測試區進行全天候高精度連續觀測。 至2018年1月,4個GPS連續觀測站水平方向(N, E)之年變化 速率介於0.9 cm/yr至1.5 cm/yr之間。其中HGC1和HGC4皆呈

現朝東南方向位移;HGC2與HGC3水平方向皆呈現偏南方向 位移(如圖 6-2所示)。

- (b)GPS連續觀測站HGC1至HGC4等4站垂直方向之年變化速率, 累積至2018年1月,HGC1為-0.2 cm/yr,HGC2為-0.9 cm/yr, HGC3為-0.7 cm/yr,HGC4則為-0.6 cm/yr(如圖 6-2所示), 隨著觀測時間期距的增加,各測站皆穩定接收觀測資料,垂 直方向變化速率略為減少,其中以HGC2與HGC3(位於開南岡 花崗岩體)靠近海岸地區有較大沉陷速率,HGC1(位於和平花 崗岩體)較靠近山區沉陷趨勢則較小,HGC4(位於九曲大理岩 體)之沉陷趨勢則介於兩者之間。
- (c) GPS連續觀測站受到2018年2月花蓮地區地震所造成程度不一的地表位移,關於震後地表位移之變化情形,考量花蓮地 震累積至8月的資料觀測期距較短,尚無法明確指出未受到 震後變形效應之起始時間,暫不對觀測資料進行同震位移以 及震後變形修正。各GPS連續觀測站觀測資料取用時間段自 2017年至2018年8月,用以呈現地震前後之每日位移量隨時 間序列變化之趨勢。整體來說,HGC1至HGC4站於震後三維 位移量變化情形如圖 6-3所示,水平方向(N, E)與垂直方向 (h)於2018年1月至3月之間,皆呈現較大幅度的震後位移量 變化,4月以後位移量變動稍微趨緩。
- (d) 2018年定期觀測樁量測作業約為震後一個月(3月)進行施 測,由成果顯示地震後整體控制測線高程超過允許誤差(如 表 6-2所示),表示地表高程發生變異。由於受到地震影響之 故,東部區域地表變形應尚未達穩定。氣象局發布之結果亦 顯示,震後2月至3月間於研究區域內陸續尚有餘震,且此期 間研究區域的地震多分布小於15km深度,至4月後地震發生 規模逐漸變小且深度漸深,推判2月至3月間地表高程可能變 動較大,故暫不將震後定期觀測成果納入計算,而以震前累 積較長期距之觀測位移成果作為定期觀測量測結果說明。

- (e)定期觀測地面樁點位於不同岩體上,利用各定期觀測樁之水 平位移量,觀測期距自2013年至2017年,水平方向(N、E分量)坐標位移時間序列圖(如圖 6-4所示)。定期觀測樁約以 西北-東南走向分布,結果顯示其水平方向皆呈往東南向位 移,水平位移變化速率約介於0.47±0.41 cm/yr至1.33±0.43 cm/yr之間,由結果顯示定期觀測樁所分布區域的水平方向 地表位移尚屬穩定。定期觀測樁鄰近GPS連續觀測站HGC1與 HGC4,定期觀測樁分布之範圍整體的水平速度場方向和鄰 近的連續觀測站HGC1與HGC4一致,皆為朝向東南方位移, 說明定期觀測樁設置範圍內之岩體邊界構造於觀測期間沒 有顯著活動性(如圖 6-5所示)。
- (f) 定期觀測地面樁點利用水準定期測量,獲致樁點垂向位移變 化情形,並將水準成果透過扣除GPS觀測資料所計算出之變 形速率換算而得的高程變化量,進行高程基準修正。累積觀 測期距自2013年至2017年,修正後水準累積高程變化量約 為0.5±0.1 cm至-2.3±0.1 cm (如表 6-3所示)。
- (g)利用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)對GPS連續觀測訊號時間序列進行分析。利用2012年至2018年之連續觀測資料,包含HGC1至HGC3以及聯合周圍連續觀測站組成的區域連續觀測網(共10站),使用垂直方向解算成果進行PCA分析。第一主成分分析結果呈現週期性(約1年)變化現象(如圖 6-6所示),垂直方向的高程變化確實存在年週期性訊號,其中第一主成分的時間序列分析僅占45%,第二主成分約占20%,顯示研究區域內可能存有訊號短週期性(第一主成分)與長週期(第二主成分)的變化趨勢。一般情況下,第一主成分所對應為GPS時間序列中的共同誤差(common mode error, CME)。CME為在GPS連續觀測站中存有一些未模型化的系統誤差,同時會影響觀測網中所有的測站,是GPS連續觀測站坐標時間序列誤差的主要來源之一,共同誤差主要包含與GPS解算相關的技術誤差(如高階電離層延遲、對流

層延遲),以及包含少量由其他地球物理因素(如海洋潮汐、 大氣潮汐及大氣負載)造成的誤差,且以上因素皆會對於GPS 測站坐標時間序列中的週期及半年週期訊號,造成不同程度 的影響。

(h) 藉由GPS連續觀測震前成果顯示本島結晶岩測試區,在水平 方向速度場呈現區域不同位移方向,測站分布位置可能位於 轉折區域;垂直方向速度場方面,則呈現靠近海岸地區有較 大沉陷速率,較靠近山區沉陷速率較小的趨勢。震後速度場 變化情形,後續亦須累積更長時間期距之觀測資料,以獲得 震後較為穩定之三維速度場變化趨勢。定期觀測地面樁點設 置為補充局部區域測量範圍,由於地震後地表高程發生變 異,暫不將震後成果納入計算。震前GPS定期觀測樁測量成 果水平方向皆呈往東南向位移,和鄰近之GPS連續觀測站位 移方向一致,顯示定期觀測樁設置範圍內之岩體邊界構造於 觀測期距內沒有顯著活動性,水準測量垂直方向則呈微幅沉 陷。對於垂直方向時間序列存在訊號之週期性現象,短週期 可能為受不同因素影響的觀測網系統性共同誤差,較長週期 訊號推判可能和研究區形成長期沉陷趨勢的地質因素有關。 另外可能由於研究區域測站的分布不均,且影響訊號垂向變 化的因素較為複雜,對共同誤差的空間濾波分析有其侷限 性,後續進行訊號分析時亦應針對測站不同的空間分布特 性,進一步探討GPS連續觀測網形使用的範圍。

代碼	每日觀測數量(筆)	週波脫落比值指標	RMS MP1 (m)	RMS MP2 (m)
HGC1	18000~20000	2~5	0.2~0.4	0.3~0.4
HGC2	18000~20000	1~3	0.2~0.3	0.2~0.4
HGC3	20000~23000	1~4	0.1~0.3	0.2~0.4
HGC4	36000~39000	1~2	0.1~0.3	0.2~0.3

表 6-1:GPS連續觀測站訊號品質分析統計表

註1: HGC1至 HGC4測站訊號品質資料分析日期自2015/01/01至2018/08/31。 註2: MP1(Multipath on L1, L1載波多路徑效應), MP1≤1.0 m皆可視為觀測資料 品質良好,L1載波頻率為1575.42MHz; MP2(Multipath on L2, L2載波多路徑 效應), MP2≤1.0 m皆可視為觀測資料品質良好,L2載波頻率為1227.60 MHz。 註3: MP1 = P1 - $\left(1 + \frac{2}{\alpha-1}\right)\Phi_1 + \left(\frac{2}{\alpha-1}\right)\Phi_2$; MP2 = P2 - $\left(\frac{2\alpha}{\alpha-1}\right)\Phi_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha-1} - 1\right)\Phi_2$; P(虛擬距 離觀測量); $\Phi($ 載波相位觀測量); $\alpha = {f_1/f_2}(f_1 \Rightarrow L1 \ge 頻率與f_2 \Rightarrow L2 \ge 頻率)$ 。

野時	高程差 (m)	高程差差值 (mm)	55.舱(km)	允許誤差
7#C2 3015	2018/3	2017/9-2018/3		3mm√k (mm)
NB9072	75.143	16.32	6.52	7.66
NB9073	31.966	11.48	4.04	6.03
NB9075	0.000	0.00	0.00	0.00
NB9077	-17.393	-5.05	3.58	5.68
NB9078	-34.007	-14.97	5.21	6.85
NB9080	-17.275	-27.41	11.13	10.01
NB9082	-17.150	-20.35	15.06	11.64

表 6-2:2018年水準控制系統高程變化分析表

註1:高程差為各內政部「水準樁」與內政部水準樁「NB9075」之間的高程差。 註2:2018年2月6日花蓮地區發生地震,3月份測量成果呈較大高程差差值,整 體控制測線的高程產生變異。

				-	检测	高程 (m)				
佔號	2013/3正高+ <i>ΔH</i> 』	2013/9正高+ <i>ΔH</i> b	2014/3正高+ <i>ΔH</i> c	2014/9正高+ <i>∆H</i> a	2015/3正高+ <i>∆H</i> e	2015/9正高+ <i>ΔH_f</i>	2016/3正高+ <i>∆H</i> g	2016/9正高+ <i>∆H</i> b	2017/3正高+ <i>ΔH_I</i>	2017/10正高+ <i>ΔH</i> /
C4			49.64120	49.64181	49.63960	49.64501	49.64410	49.64593	49.64696	49.64776
P1	84.90181	84.90933	84.91138	84.91455	84.916	84.921	84.927	84.929	84.930	84.933
P2	75.38267	75.38994	75.39223	75.39499	75.397	75.400	75.406	75.409	75.409	75.413
P3	134.73270	134.73787	134.74621	134.74308	134.752	134.754	134.763	134.767	134.770	134.767
P4		124.49975	124.50595	124.50508	124.51230	124.51483	124.52291	124.52602	124.52836	124.52921
P5			188.80358	188.80625	188.81173	188.81311	188.82193	188.82595	188.82833	188.82292
P6		106.64297	106.64534	106.64663	106.65046	106.65333	106.65969	106.66145	106.66281	106.66518
					修正後高	程變化量 (cm)				
佔號		2013/3-2013/9 正高+ <i>ΔH</i> k	2013/9-2014/3 正高+ <i>ΔH</i> /	2014/3-2014/9 正高+ <i>ΔH</i> m	2014/9-2015/3 正高+ <i>ΔH</i> 』	2015/3-2015/9 正高+ <i>ΔH</i> 。	2015/9-2016/3 正高+ <i>4Hp</i>	2016/3-2016/9 正高+ <i>4H</i> q	2016/9-2017/3 正高+ <i>ΔH</i> -	2017/3-2017/10 正高+ <i>ΔH</i> s
C4				-0.7	-0.4	-0.2	-0.5	-0.6	-0.2	0.3
P1		-0.5	0.7	-0.4	0.0	-0.2	0.1	-0.5	-0.3	0.6
P2		-0.5	0.8	-0.4	0.0	-0.3	0.1	-0.5	-0.3	0.6
P3		-0.7	1.4	-1.0	0.7	-0.5	0.5	-0.5	0.0	-0.1
P4			1.2	-0.8	0.5	-0.5	0.4	-0.5	-0.1	0.3
P5				-0.5	0.3	-0.6	0.5	-0.4	-0.1	-0.4
P6			0.8	-0.6	0.2	-0.4	0.2	-0.6	-0.2	0.4
					修正後累積	高程變化量 (cm)				
貼號			2013/3-2014/3	2013/3-2014/9	2013/3-2015/3	2013/32015/9	2013/32016/3	2013/32016/9	2013/32017/3	2013/32017/10
C4					-1.1	-1.3	-1.3	-2.4	-2.6	-2.3
P1			0.2	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.8	-1.1	-0.5
P2			0.2	-0.2	-0.2	-0.6	-0.4	-1.0	-1.2	-0.6
P3			0.6	-0.4	0.3	-0.2	0.3	-0.2	-0.1	-0.3
P4				0.4	0.9	0.4	0.8	0.3	0.2	0.5
P5					-0.1	-0.7	-0.2	-0.6	-0.7	-1.0
P6				0.2	0.4	-0.1	0.2	-0.5	-0.6	-0.2

表 6-3:GPS定期觀測樁修正後之水準高程檢測成果表

註1:以2009年內政部公告之正高系統為基準;ΔHa為2009年至2013年3月之正高基準變動量,ΔHb為2009年至2013年9月之正高基準變動量,其餘依此類推。

註2:修正後高程變化量係由檢測高程化算而得; ΔH_k 為2013年3月至2013年9月之修正後正高基準變動量(ΔH_b - ΔH_a); ΔH_i 為2013年9月至2014年3月 之修正後正高基準變動量(ΔH_c - ΔH_b),其餘依此類推。



圖 6-1:GPS連續觀測站訊號品質分析圖

註:圖(a)至圖(b)分別為HGC1至HGC4。



圖 6-2:臺灣本島結晶岩測試區之GPS連續觀測成果(一)

註1:圖(a)為HGC1、圖(b)為HGC2、圖(c)為HGC3、圖(d)為HGC4。

註 2: HGC1至 HGC3 資料 觀 測 期 距 為 2011年 8月 至 2018年 1月; HGC4為 2014年 1月 至 2018年 1月。

註3:三維坐標係以觀測週平均值為主,





註1:圖(a)至圖(d)分別為HGC1至HGC4。

註2: HGC1至 HGC4 資料觀測 距為 2017 年 1月 至 2018 年 8月。

註3:三維坐標係以每日觀測解算值為主。



圖 6-4:定期觀測樁水平方向時間序列圖

註:平面坐標係以每次進行3日觀測之平均值為主。



圖 6-5:本項目工作之GPS連續觀測站與GPS定期觀測樁位置分布圖 註:左上圖為GPS連續觀測站(HGC1至HGC4)與GPS定期觀測樁(P1至P6)位置分布圖;右下圖為 GPS定期觀測樁(P1至P6、C4)(以紅色表示),與其鄰近的GPS測站(HGC1與HGC4)(以藍色表示) 之水平速度場。



圖 6-6: PCA時序分析成果 註:圖(a)為垂直方向訊號之各主成分百分比;圖(b)為第一主成分時間序列分布圖。

6.1.2. 結晶岩深層地下水化學長期演化特性

針對「深層地質處置」概念中處置母岩的評估,除了需考慮岩層 之地質、水文、地震和岩石力學特性等條件外,水文地球化學特性更 是決定是否適合進行深層地質處置的關鍵。因此,研析處置環境地下 水的化學特性及其可能的演化機制,是潛在處置母岩安全評估中一項 重要且基本的工作。岩-水反應路徑模擬則是探討地下水長期演化的 常用方法,可用於瞭解岩石及其周圍水質條件,在不同的外在時空背 景變化下可能發生的化學變化,例如:酸鹼值(pH)和氧化還原電位 (Eh)的改變、次生礦物的形成,係為影響核種穩定性(溶解度及遲滯 特性)的關鍵要素,亦為深層地質處置功能安全評估所必須考量之重 要因子。

SNFD2017報告已對於本島結晶岩測試區與離島結晶岩測試區之 水質特性與岩石礦物組成進行探討,並完成離島結晶岩測試區之地化 概念模式。106年度已完成本島結晶岩測試區地下水水質和岩石礦物 組成等資料的蒐集與研析,以及模擬情境案例的建置等工作。107年 度則針對本島結晶岩測試區深層裂隙岩層的長期岩-水反應過程,完 成深層封閉裂隙、深層開放裂隙、淺層開放裂隙等3種主要裂隙地下 水的化學特性之長期演化案例研析,說明如下:

(1) 模擬工具及方法

地化反應路徑模擬所使用的工具為GWB (Geochemist's Workbench®, Version 9) (Bethke, 2008) 地化軟體中的React程式 模組,熱力學資料庫亦採用GWB軟體所內建之 「thermo.com.V8.R6+.dat」資料庫;而反應動力模擬所需礦物溶 解反應速率參數,則是參考Palandri and Kharaka (2004, p12p45)的研究成果。針對每種情境案例的反應路徑模擬,均包含相 對反應速率(CaseZx)及反應動力(CaseKx)等兩種模式;前者可供 快速研判反應系統達最終平衡時的化學特性,後者則供研判反應 系統隨時間的可能演化情形。

(2) 模擬情境及相關假設

地化反應路徑模擬案例係包含深層封閉裂隙、深層開放裂隙,及 淺層開放裂隙等3種情境(圖 6-7),用以探討不同環境條件下,水 文地球化學的可能演化情況。以上3種情境模擬案例假設花崗岩 體周圍均包覆於大理岩之內,各情境案例之起始反應礦物/水質 條件、系統邊界條件等則詳述於表 6-4。

- (3) 起始反應礦物及水質
 - (a) 起始礦物

考量一般常用地化軟體的熱力學資料庫,因礦物的命名方式 不同或資料缺乏,通常無法涵蓋所有的礦物。因此模擬前必 須先根據所使用的熱力學資料庫實際內容,將實際觀察/分 析所得到的礦物,進行適度的分類或假設。前述3種模擬情 境案例反應起始的礦物組成,均設定為本島結晶岩測試區深 層的新鮮岩樣(樣品代號:H-20),將其礦物組成比對熱力學 資料庫,針對上述起始反應礦物進行以下假設:

- (i) 石英(Quartz)含量30 vol.%。
- (ii) 鉀長石含量20 vol.%

根據岩樣之岩相分析結果,以微斜長石 (Maximum_Microcline)代表。

(iii) 斜長石類含量20 vol.%

參考此地區之斜長石的化學組成分析結果(藍晶瑩, 1989, p38-p40),以85 vol.%的鈉長石(Albite_low)及15 vol.%的鈣長石(Anorthite)的混合比例代表。

(iv) 黑雲母類含量10 vol.%

參考此地區之黑雲母類礦物的化學組成分析結果(藍晶 瑩,1989,p51),以60 vol.%的鐵雲母(Annite)及40 vol.% 的金雲母(Phlogopipe)之混合比例代表。

- (v) 白(絹)雲母類含量10 vol.%:
 因熱力學資料庫中,並無絹雲母之相關資訊,且其性質
 與白雲母相近,故以白雲母(Muscovite)代表。
- (vi) 方解石(Calcite)含量4 vol.%。

(vii) 綠 簾 石 (Epidote) 含 量 5 vol.%。

(b) 起始水質

模擬所需的水質條件係參考本島結晶岩測試區現地下水水 質調查資料(中央地質調查所,2013,c3),並配合相關的模 擬情境進行假設,水質分析結果如表 6-5所示。模擬情境案 例的起始水質條件包含淺層地下水(SGW_b)與深層地下水 (DGW_b)等兩類,其中淺層地下水的水質為平均水質(SGW_{CGS}), 在23.5℃(淺層地下水假設水溫係參考SGW_{CGS}的水溫)下與足 量碳酸鈣(大理岩之主成分)反應達平衡後的模擬水質;而深 層地下水的水質,則為SGW_{CGS}在32.6℃(深層地下水假設水溫 係參考該地區井下500 m處之地物井測溫度)下與足量碳酸 鈣反應達平衡後的模擬水質。

- (4) 模擬結果與討論
 - (a) 針對每種情境的反應路徑模擬,均包含相對反應速率 (CaseZx)及反應動力(CaseKx)等兩種模式;在反應動力模式 模擬過程中,僅針對起始反應礦物,例如石英、微斜長石、 鈣長石、鈉長石、鐵雲母、金雲母、白雲母及綠簾石,其反 應速率以動力學模擬;其餘礦物(亦包含原屬於起始礦物之 方解石)的沉澱或溶解,均假設「瞬間」達熱力學平衡條件。
 - (b) 圖 6-8至圖 6-10為3種不同情境的反應路徑,分別使用相對 反應速率及反應動力(至100萬年)的模擬結果。由結果顯示, 兩種方法的最終模擬結果均無明顯差異,顯示GWB的數值分 析結果是可以接受的。反應路徑過程中,地下水的水質變化 情形說明如下:
 - (i) 深層封閉裂隙情境(CaseZ1)
 地下水的pH值約介於7.56至10.31之間; Eh值則約介於-
 - 0.51 volts至-0.20 volts之間。而在最終熱力學平衡條件
 下,其pH值為10.31; Eh值為-0.51 volts。
 - (ii) 深層開放裂隙情境(CaseZ2)

地下水的pH值約介於7.56至8.93之間; Eh值則約介於-0.37 volts至-0.20 volts之間。而在最終熱力學平衡條件 下,其pH值為8.93; Eh值為-0.37 volts。

(iii) 淺層開放裂隙情境(CaseZ4)

地下水的pH值約介於7.12至8.49之間; Eh值則約介於-0.32 volts至-0.15 volts之間。而在最終熱力學平衡條件 下,其pH值為8.49; Eh值為-0.32 volts。

- (iv) 其中,深層封閉裂隙情境(CaseZ1)中較高的pH值,係因反應系統中的CO₂,隨著反應程度的增加而逐漸消耗殆 盡所致;而淺層開放裂隙情境(CaseZ4)中較低的pH值, 則是受模擬條件中設定較高的CO₂值(等於土壤層中的 CO₂分壓)所致。
- (c)圖 6-11為3種不同情境案例反應路徑的動力模式模擬結果, 實際岩心礦物分析中所觀察的次生礦物,例如白雲母類(絹 雲母)、方解石、綠泥石類及黏土類礦物等,均在模擬過程中 出現,可用以說明其反應路徑具有一定的代表性。經由模擬 結果可得知:
 - (i) CO₂無持續供應狀態(深層封閉裂隙情境, CaseK1) 方解石、白雲母類(絹雲母)、鈣鐵榴石(Andradite)、鈣 -鎂蒙脫石(Saponite-Ca)為反應達熱力學平衡時的主要 次生礦物,其次為碳(C)、黃鐵礦(Pyrite)。而在反應過 程中,尚有高嶺石(Kaolinite)、鈣鋁榴石(Grossular)、 鐵線泥石(Daphnite-14A)、黝簾石(Zoisite)、白雲石 (Dolomite)、鈣-鐵蒙脫石(Nontronite-Ca)、磁鐵礦 (Magnetite)等暫時性次生礦物的出現。
 - (ii) CO₂持續供應狀態(深層開放裂隙情境, CaseK2) 方解石、白雲石、鈉-鐵蒙脫石、白雲母類(絹雲母)為反 應達熱力學平衡時的主要次生礦物,其次為碳、黃鐵礦。 而在反應過程中,尚有高嶺石、鈣-鐵蒙脫石、鐵綠泥石、

碳鈉鋁石(Dawsonite)、磁鐵礦等暫時性次生礦物的出現。

- (iii)高CO2且持續供應狀態(淺層開放裂隙情境, CaseK4) 石英、碳鈉鋁石、方解石、白雲石、鈉-鐵蒙脫石、白雲 母類(絹雲母)為反應達熱力學平衡時的主要次生礦物, 其次為碳、黃鐵礦。而在反應過程中,尚有高嶺石、鈣 -鐵蒙脫石、鐵綠泥石、磁鐵礦等暫時性次生礦物的出現。
- (d) 由反應路徑模擬結果之pH值及Eh值的變化情形可知,本島 結晶岩測試區之導水裂隙的水文地化環境(CaseZ2&Z4),其 pH值及Eh值範圍,可能介於: $7.12 \le pH \le 8.93$,-0.37 volts $\le Eh \le -0.15$ volts。而上述pH值及Eh值的變動範圍,其所對 應的核種溶解度變化範圍,及Kd值的變化影響性,均應被適 度考量在後續的安全評估模擬過程中。而相較於離島結晶岩 相同情境的pH值及Eh值範圍($6.99 \le pH \le 9.75$,-0.45 volts $\le Eh \le -0.17$ volts),顯示本島結晶岩測試區之導水裂隙的 水文地化環境,因受大理岩圍岩的碳酸鈣化學平衡系統所影 響,故其pH值的變動範圍會小於離島結晶岩;至於Eh值的變 動範圍,兩者則差距不大。

树枫桂江	准边沿田	推版日本	假設條件			
快探阴现	们现代14	快	起始條件	邊界條件		
深層封閉裂隙情境	本情境假設「深層地下水」與新鮮花崗	探討在深地層無干擾狀態(理想的熱	● 岩石礦物組成=H-20	無質量及能量之交換		
(Case Z1/K1)	岩接觸後,隨即與外界隔絕,形成一封	力學平衡狀態)下,其水文地球化學	● 深層地下水組成			
	閉的反應系統。	的可能特性。	=DGW _b ($=$ DGW _a @t $=$ 0)			
			● P _{CO2} =DGW _b 之平衡CO _{2(g)} 值			
			● P ₀₂ =DGW _b 之平衡O _{2(g)} 值			
深层开放裂隙情境	本情境假設「深層地下水」與新鮮花崗	探討在深層風化條件下,其水文地	● 岩石礦物組成=H-20	P _{CO2} =定值=DGW _b 之平衡		
(Case Z2/K2)	岩接觸時,因地下水的流動,使整個反	球化學環境可能面臨的pH上限值及	● 深層地下水組成	CO _{2(g)} 值		
	應系統的風化驅動力,如CO2的含量(逸	Eh下限值。	=DGW _b ($=$ DGW _a @t $=$ 0)			
	壓),維持在一個定值。		● P _{O2} =DGW _b 之平衡O _{2(g)} 值			
浅层开放裂隙情境	本情境假設「淺層地下水」與新鮮花崗	探討在淺層風化條件下,水文地球	● 岩石礦物組成=H-20	P _{CO2} =定值=0.01 atm (土壤		
(Case Z4/K4)	岩接觸時,因受其上方土壤層的高CO ₂	化學環境可能面臨的pH下限值及Eh	● 淺層地下水組成	層之平衡CO _{2(g)} 值)		
	含量的影響,使整個反應系統的CO2風	上限值。	=SGW _b ($=$ SGW _a @t $=$ 0)			
	化驅動力,維持在一個較高的定值。		● P _{O2} =SGWb之平衡O2(g)值			

表 6-4:反應路徑模擬情境及其假設條件

註1:H-20為本島結晶岩測試區岩某深層新鮮岩樣之礦物組成。

註2:DGW_a為SGW_{CGS}(資料來源:中央地質調查所,2013,c6p118)在32.6℃下與足量碳酸鈣達平衡後的水質。

註3:SGW_a為SGW_{CGS}(資料來源:中央地質調查所,2013,c6p118)在23.5℃下與足量碳酸鈣達平衡後的水質。

註4:模擬情境案例之編號(Case Zx/Kx)係沿用離島結晶岩相似案例之既有編號,以利後續進行其水文地化特性之比較。

樣品編號	-	EHW-02S	EHW-03S	EHW-03D	EHW-05S	EHW-05D	EHW-06S	EHW-06D	EHW-08S	EHW-08D	EHW-09S	EHW-09D	SGW _{CGS}
井深	m	57	44	100	40	100	65	100	36	100	48	100	
開篩位置	m	42-54	29-41	66-75; 85-88	25-37	67-73; 79-85	50-62	82-94	21-33	82-94	30-42	70-82	
рН		7.8	8.2	8.3	8.4	8.6	8.2	8.4	7.2	8.4	7.3	8.1	8.1
水温	°C	19.8	26.2	20.5	24.2	24.6	22.4	22.8	23.2	25.2	25.5	24.6	23.5
導電度	µmho/cm	452	391	350	239	235	236	257	162	232	513	452	319.9
Eh	V	0.355	0.358	0.347	0.277	0.269	0.333	0.089	0.333	0.105	0.351	0.269	0.281
溶氧	mg/L	7.8	8.1	8.3	6.7	7.8	8	8.2	7.8	7.7	7.9	7.3	7.8
TDS	mg/L	262.1	203.3	213.5	117.1	146.2	136.8	142.1	102	134.5	297.5	248.6	182.2
總鹼度	mg/L CaCO ₃	149	126.5	110	125.2	128.6	131	139.2	59	113	239.8	241.5	142.1
氯鹽	mol/L	2.82E-05	2.82E-05	5.92E-05	8.74E-05	1.16E-04	8.74E-05	1.61E-04	1.16E-04	1.44E-04	2.76E-04	2.60E-04	1.24E-04
碳酸氫鹽	mol/L	2.96E-03	2.49E-03	2.15E-03	2.44E-03	2.47E-03	2.58E-03	2.71E-03	1.18E-03	2.20E-03	4.79E-03	4.77E-03	2.79E-03
碳酸鹽	mol/L	9.37E-06	1.98E-05	2.15E-05	3.07E-05	4.93E-05	2.05E-05	3.42E-05	9.35E-07	2.77E-05	4.78E-06	3.02E-05	2.26E-05
硫酸鹽	mol/L	5.49E-04	9.19E-04	7.30E-04	7.39E-05	1.09E-04	9.68E-05	4.89E-05	1.96E-04	6.04E-05	7.39E-05	4.37E-05	2.64E-04
硝酸鹽氮	mol/L	1.00E-05	3.87E-06	3.71E-06	5.48E-06	4.19E-06	4.19E-06		5.32E-06		2.74E-05	8.06E-06	8.03E-06
氨氮	mol/L	6.46E-06	5.87E-06	7.63E-06	7.63E-06	1.17E-05	5.87E-06	8.22E-06	7.05E-06	1.12E-05			7.96E-06
鈉	mol/L	1.61E-04	2.27E-04	1.14E-04	3.33E-04	4.25E-04	1.31E-04	1.27E-03	2.83E-04	7.96E-04	8.93E-04	1.37E-03	5.45E-04
鉀	mol/L	4.19E-05	4.68E-05	6.37E-05	2.02E-05	4.22E-05	1.59E-05	4.76E-05	2.02E-05	4.14E-05	1.66E-05	1.48E-05	3.38E-05
鈣	mol/L	1.58E-03	1.33E-03	1.16E-03	1.02E-03	9.28E-04	9.57E-04	5.23E-04	6.01E-04	6.18E-04	1.21E-03	7.60E-04	9.72E-04
鎂	mol/L	3.39E-04	6.75E-04	5.45E-04	1.46E-04	1.38E-04	2.13E-04	1.61E-04	8.10E-05	1.17E-04	8.63E-04	8.76E-04	3.78E-04
鐵	mol/L										5.37E-07	8.95E-07	7.16E-07
錳	mol/L		8.55E-07	9.46E-07	1.13E-06	7.64E-07	7.10E-07	1.42E-06		4.91E-07			9.02E-07
砷	mol/L					1.43E-07		2.24E-07					1.84E-07

表 6-5:本島結晶岩測試區附近之地下水水質

註1:原始資料取自「臺灣山區地下水資源調查研究整體計畫-第一期-臺灣中段山區流域水文地質調查及圖幅繪編」之水質數據(中央地質調查所,2013,c6p118)。 註2:氧化還原電位(Eh)值已轉換為標準氫電極電位;碳酸(氫)鹽濃度值為總鹼度的轉換值;陰陽離子的濃度值皆已轉換成mol/L單位。

註3:SGW_{CGS}代表其平均水質。



圖 6-7:反應路徑模擬情境示意圖



圖 6-8: CaseZ1/K1反應路徑模擬結果比對圖



圖 6-9:CaseZ2/K2反應路徑模擬結果比對圖



圖 6-10: CaseZ4/K4反應路徑模擬結果比對圖



圖 6-11: CaseK1、CaseK2、CaseK4在1萬年及10萬年反應期間之反應路徑模擬結果圖

註:圖中以灰色線表示的礦物,代表反應路徑模擬的起始反應礦物;以其他顏色表示的礦物,代表在反應路徑模擬過程中,隨模擬反應時間產生或消失的次生礦物。

6.2. 地下水分析模式驗證與技術精進

6.2.1. 整合型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬

探討核種傳輸的地下水流通路徑,自工程障壁、地質圈至生物圈 所需模擬地下水流場的區域,空間尺度可能到達數公里至數十公里, 若將整個模擬區域均視為裂隙岩體,則會造成DFN模擬區域的尺度太 大,導致DFN數值模擬以及DFN地下水流數值模擬的計算量太大,故 需發展能有效地提供大區域流場模擬之技術,提供候選場址評選與核 定階段安全評估之用。

經由長期研發裂隙岩體地下水流與溶質傳輸模擬技術,發展整合 型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬方法,以DFN轉換成等效連續 孔隙介質(Equivalent Continuous Porous Medium, ECPM)的方式,發 展三維ECPM地下水流數值模擬為目前最關鍵且須待發展的技術。因 此根據SNFD2017報告參考案例表二的離散裂隙參數集(DFN recipe), 以裂隙分析軟體FracMan進行三維DFN數值模擬,並將模擬區域進行 數值網格化,參照每個網格的DFN分布,利用升尺度(upscaling)理論 計算網格中的等效滲透率張量(permeability tensor),故可將DFN地 下水流類比為孔隙介質(porous medium)的地下水流,並且採用流場 模擬軟體TOUGH2-MP進行目標區域中的穩態地下水流數值模擬。因 DFN具有特定的導水性構造(Water Conducting Feature, WCF),且不 同WCF的滲透率及走向均不一致,使得轉換後的ECPM具有異質性 (heterogeneity) 且異向性(anisotropy)的特性,故ECPM中的地下水流 模擬須能處理異質性及異向性的影響,說明如下:

- (1) 建立三維數值網格與資料後處理
 - (a) 三維數值網格建立

根據SNFD2017報告參考案例表二之資料,離島結晶岩測試區 包含4種岩性:淺層固定70m厚的風化岩體(Regolith)、太武 山斷層構造(F1)及太武山分支斷層構造(F2)、近乎平行的輝 綠岩脈構造(Dyke)與花崗岩母岩(Granite),4種岩性之水文 地質參數及位態資料如表 6-6所示。上述岩性分布根據離島

結晶岩測試區地表數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)(如圖 6-12所示)。

- (b) DFN模擬方法修正
 - (i) F1及F2構造與相對裂隙強度

使用三維數值網格模型(圖 6-12)進行升尺度計算之 前,除了以106年度所發展的FracUps程式計算滲透率張 量 kb 之外,107年度更進一步對DFN模擬方法進行修正。 SNFD2017報告中描述F1及F2構造為離島結晶岩測試區 的主要導水構造,井孔內亦可觀察斷層發生的位置常伴 隨密集裂隙區,因此修正方法主要為調整DFN模擬的概 念,使裂隙強度與F1及F2構造具有正相關關係。將上述 假設與DFN數值模擬結合,先確認被F1或F2構造穿過的 網格,並以該類網格與F1或F2構造距離的倒數作為權 重,以計算網格中的相對裂隙強度(Relative Fracture Intensity, RFI)。RFI值代表裂隙出現於網格中的相對機 率,若RFI值較大,則裂隙落於該網格中的機率較大;反 之則裂隙出現的機率下降。

(ii) 岩脈中非連通小裂隙處理

除了利用RFI方式處理裂隙強度之外,為了凸顯岩脈的 阻水特性,亦假設除了F1與F2構造之外,岩脈會截切所 有的裂隙。若某裂隙被岩脈截切後完全落於岩脈中,因 岩脈假設具有高阻水(即低滲透性)特性,此類截切後的 小裂隙對岩體水力連通性的貢獻應該不高,故利用商業 軟體FracMan 7.5版的叢集分析工具,先將此類非連通小 裂隙自模擬區域去除,降低升尺度計算量。

- (2) 離島結晶岩測試區異質性滲透率空間分布
 - (a) 由 SNFD2017報告參考案例中兩個岩體定義區(FDMA及 FDMB),根據表 6-7的裂隙參數表,利用FracMan軟體模擬 出所有9組裂隙,其模擬結果如圖 6-13所示。結果顯示F1構 造(N60°E)及F2構造(N80°W)附近匯集較多的裂隙,反應F1

與F2構造附近產生明顯的裂隙區。計算模擬區域軸向滲透係 數的步驟,將FDMA及FDMB個別分為7層及20層,利用 FracMan產生'Eclipse'格式的三維數值網格,並根據圖 6-13 的3維DFN模擬結果,利用FracMan計算出每個網格中3個軸 向的滲透係數,計算結果則如圖 6-14所示。

- (b)傳統TOUGH2處理異質異向性的方式,係將該網格所屬岩層 在x、y及z等3個方向的軸向滲透率,乘上同一組滲透率修正 因子(Permeability modifier,ξ),不同網格則指定不同的ξ以 反應岩體的異質性及異向性。為要處理介質的異質性及異向 性,須先修改TOUGH2的EOS7程式,使含有異質性且異向性 的ECPM能進行地下水流數值的模擬。考量每個網格在不同 軸向的滲透率有不同的變化程度,故每個網格在3個軸向須 定義3個不同的ξ,將不同軸方向滲透率乘以該方向的ξ,以考 慮複雜的介質異質性及異向性。
- (3) 離島結晶岩測試區參考案例穩態的鹽水地下水流場
 - (a) 離島結晶岩測試區參考案例之條件設定
 - (i) 根據離島結晶岩測試區之DEM可獲得海岸線位置,並藉由地表高程資料,將海岸線的平均海水面垂直往下延伸 1,000 m,定義為地下水模擬區域的範圍,僅考慮海岸線 邊界面以內的陸塊,並未往海岸線以外範圍延伸。
 - (ii) 依據上述定義的模擬區域,將海岸線邊界面的初始條件 假設全部與海水接觸,故鹽水質量分量(X_b)為1.0,且壓 力隨深度呈現海水的靜水壓力分布;內陸部分的初始條 件則假設完全為淡水(X_b=0),壓力則為淡水的靜水壓 力分布。
 - (iii) 假設地表(Z=0)溫度為23.5℃,以及岩層中的地溫梯度 固定為0.017℃/m,據以計算任何深度的岩層所對應的 溫度。同時,依據此溫度以及模擬時獲得的壓力值,計 算混合流體所應具有的熱力學參數(如密度、動黏度 等)。

- (iv) 根據參考案例表二的地質概念模式,假設模擬區域的淨 入滲量為35 mm/yr,海岸線網格的邊界條件則設定為 定水頭邊界條件(Dirichlet boundary)(水頭壓力值僅隨 深度而變,且不同深度流體之密度及重力加速度均不隨 時間而變動)。模擬區域下邊界及左邊界的邊界條件設 定,則因缺乏深部岩體的水文地質資訊,故將左邊界及 下邊界均設定為無流量邊界,同時亦不考慮分子擴散效 應。
- (b) 鹽水地下水流場傳輸階段

平均海水面往下500m及1,000m的X_b,在不同時間的模擬結果如圖 6-15所示。鹽水的傳輸過程大致分為4個階段,相關說明如下:

- (i) 第1個傳輸階段,主要受高導水性的F1及F2構造影響, 且因鹽水密度大於淡水密度,受到重力的影響使得鹽水 往深部岩體流動,因此F1與F2構造對深部岩體中Xb分 布的影響性遠大於淺部岩體(如圖 6-15 (a)&(b))。
- (ii) 第2個傳輸階段,當沿著F1及F2構造進入的鹽水與岩脈 接觸後,受到低滲透性岩脈的阻擋,鹽水由F1及F2構造 開始往岩脈之間的岩體傳輸(如圖 6-15 (c)&(d))。
- (iii)進入第3個階段後,海岸線固定補助的鹽水也逐漸開始 往內陸傳輸,但傳輸過程中亦受到低滲透性岩脈的影響,故傳輸路徑多半集中於相鄰相鄰2個岩脈之間(如圖 6-15(e)&(f))。同時,高導水性的F1與F2構造同樣也扮 演鹽水的主要流動路徑。
- (iv) 第4個階段, X_b分布將逐漸接近穩態,時間為8×10⁶ yr
 的模擬結果如圖 6-15 (g)&(h)所示。
- (c) 穩態的鹽水地下水流場模擬結果
 - (i) 當模擬時間大於10⁶ yr的結果顯示(如圖 6-15),東北方 及太武山附近(如圖 6-15 (g)標示「zone A」及「zone B」兩處)的鹽度遠低於其他區域的鹽度,推測應該是受

到地表高程的影響,使得入滲的淡水經由此兩個高區往 周圍岩體流動。

- (ii) 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,已明確指出:「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)。 根據本項目工作模擬結果的展示及說明,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鹽度 分布(即離子強度較高)(如圖 6-16(a)所示),相對於F1 構造以北的深層地下水水質採樣分析結果(如圖 6-16 (b)及(c)所示),顯示兩者地下水離子濃度的分布趨勢大 致相同。顯見主要導水構造(如F1及F2構造)確實可能會 影響地下水質的分布特性,且隨著模擬時間增加,地下 水鹽度差異越發明顯(如圖 6-15由上而下所示)。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 離島結晶岩測試區的現地水質調查結果顯示,即便深度 500m的地下水,在太武山北侧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(如圖 6-16 (C)所示),造成此一差異的原因,推測可能為模擬案例 中,對於F1及F2構造的尺寸特性的簡化設定影響,亦有 可能為現地的地下水流場尚未達到穩態所造成的現象。
 - (iii) zone A與zone B的地下水流速度場模擬結果如圖 6-17及圖 6-18所示,空心箭號的長度正比於孔隙水流 速度,區域地表高程則分別以黑色及青色的高程等值線 表示。由圖 6-17顯示,不論在平均海水面下500 m及 1,000 m, zone A整體的地下水流方向大約平行岩脈走 向,且受到地形影響,地下水多均由高處往低處流動, 故整體地下水流的流向約為S30°W。少部分的區域性地 下水流(如zoneA的東北區域),則因區域性的地形變化,

且離海岸較近,故區域性的地下水流則有別於S30°W的 趨勢,但仍維持由高處往低處流動。由圖 6-18的zoneB 地下水流場模擬結果顯示,由於F1構造貫穿zoneB西北 側,造成該區的地下水流主要由F1所控制,因此地下水 流由太武山開始往F1方向流動。當地下水進入F1後,仍 依據地形變化往地勢低區流動。

107年度綜合上述成果,已完成大尺度模擬區域異質性與異向性 岩體中的地下水流數值模擬的技術。並將此技術應用於離島結晶岩測 試區的穩態地下水流數值模擬,結果顯示離島結晶岩測試區地下水流 場主要受控於地表高程,故自地表入滲的地下水,會經由地形高區(如 太武山高區及東北方的次高區),補注至周圍地勢較低的岩體。此外, 離島結晶岩測試區的鹽水分布同時受到高導水性的F1與F2構造,以及 低滲透性的輝綠岩脈所影響。F1與F2構造主要影響初期的鹽水傳輸, 故F1與F2形成鹽水傳輸初期的快速流動路徑;岩脈則主要影響後期至 穩態的鹽水分布。

	Density (kg/m^3)	Strike/dip (°)	Permeability (m^2)	Porosity (-)	Thickness (m)
Regolith	2000.0	NA	10 ⁻¹²	2×10^{-1}	NA
F1	2600.0	N64°E/70N	5×10^{-13}	10 ⁻²	200
F2	2600.0	N80°W/50S	5×10^{-13}	10 ⁻²	20
Granite	2750.0	NA	10 ⁻¹⁷	5×10^{-3}	NA
Dyke	2750.0	N30°E/80N	10 ⁻¹⁸	6.8×10^{-13}	100

表 6-6:離島結晶岩測試區參考案例所有岩石之水文地質參數

表 6-7:序率裂隙模擬參數表

Parameter	FDMA	FDMB
Location	Poission process	Poission process
Intensity (m^{-1})	2.4	0.3
Orientation	Set1: 198°/18°/18/26%	Set1: 65°/17°/20/15%
	Set2: 155°/4°/15/24%	Set2: 344°/38°/18/24%
	Set3: 264°/23°/16/18%	Set3: 281°/29°/16/30%
	Set4: 98°/81°/11/32%	Set4: 174°/22°/17/10%
		Set5: 175°/75°/19/21%
Size (m)	$P(R \ge r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{2.6}$	$P(R \ge r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{2.6}$
Transmissivity (m^2/s)	$T = 9 \times 10^{-9} r^{0.7}$	$T = 5.30 \times 10^{-11} r^{0.5}$
Aperture (m)	$e = 0.5\sqrt{T} = 4.743 \times 10^{-5} r^{0.35}$	$e = 0.5\sqrt{T} = 3.640 \times 10^{-6} r^{0.25}$

註1: 裂隙位態參數為: 裂隙面法向量傾向/裂隙面法向量傾角/Fisher參數 κ/P_{32} 比例 註2: r_0 可為0.05 m或0.1 m


圖 6-12:離島結晶岩測試區三維數值網格以及其岩性的空間分布 註:最西南角的網格參考點的TWD97坐標值為(186300,2700100),2D網格方向沿著正東(x)方 向及正北(y)方向分別延伸約10,400 m及13,373 m,且在x方向及y方向均分割60個網格,故在x 方向及y方向的網格大小分別約為173 m及223 m,每個四邊形網格從東北往西南向再切割成2個 三角形。



圖 6-13:離島結晶岩測試區參考案例中DFN模擬結果 註:模擬結果係利用表 6-7的序率裂隙模擬參數表,針對K區全區所產生的三維DFN,並非針對 某特定數值網格之代表性DFN。



圖 6-14:離島結晶岩測試區ECPM軸向滲透率空間分布 註1:圖(a)代表ECPM軸向滲透率三維空間分布;圖(b)為圖(a)第9層的軸向滲透率分布。

註2:圖(a)的kxx分布圖同時展示岩脈面的延伸範圍。

註3: k_{xx}、k_{yy}、k_{zz}分別表示同一個網格之滲透率張量在xx(正東)、yy(正北)與zz(垂直)方向的 分量數值;並且因太武山斷層為高角度導水構造(N64°E/70°N),因此F1構造上垂直方向的滲透 率張量分布較水平方向大。



圖 6-15:平均海水面以下500m及1,000m的Xb 隨時間分布情形



圖 6-16:離島結晶岩測試區地下水流場鹽度分布與深層地下水水質對照圖 註1:(a) 平均海水面以下1,000 m的鹽度分布;(b)深層地下水之 Piper水質圖; (c)深層地下水之 Stiff水質圖。

註 2:圖(a)黃色虛線範圍可對應至圖(b)及圖(c)紅色框內KMBH03及KMBH05離 子濃度分布。

註 2: 資料來源請參考 SNFD 2017技術支援報告附件A (第3.8.2節,圖 3-50;第3.8.2節,圖 3-51)

註3: KMBH01至KMBH06位置請參考圖 3-6所示



圖 6-17: zone A在平均海水面以下500 m及1000 m的地下水速度向量場



圖 6-18: zone B在平均海水面以下500 m及1000 m的地下水速度向量場

6.2.2. 離島結晶岩測試區海平面下降之地下水流數值模式

大尺度且深層的地下水流特性,係提供近場及遠場分析所需的重 要參數之一;在整個安全評估中,水文地質演化則為參考演化中的重 要過程之一。海平面隨著冰河循環的上升/下降將影響地下水流場, 進而影響安全評估於近/遠場的分析結果;先前雖透過與瑞典SKB公 司技術合作,初步建立離島結晶岩測試區海平面下降20 m之地下水模 擬案例,但對於海平面下降後的模擬區域劃分仍有精進空間;鑑於安 全評估方法演練及技術精進所需,107年度預計以中國大陸沿海、臺 灣海峽及臺灣本島之數值地形圖為基礎,研究海平面下降後,離島結 晶岩測試區之(1)河系分布及集水區演化;(2)區域性補注率評估方 法;(3)水文地質概念模式建構;(4)並進行穩態地下水流場分析,說 明如下:

(1) 河系分布及集水區演化:

本工作項目使用中國大陸沿海、臺灣海峽及臺灣本島之數值地形圖,在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(如圖 6-19及圖 6-20所示),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。

本研究使用水文法(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。

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(如圖 6-21所示)。

(2) 區域性補注率評估方法:

關於重要水文地質區域地下水補注率評估方法,可分為(a)經驗 公式法;(b)瞬間補注法;(c)持續補注法;(d)基流分析法。主要 依地下水系統之入流量與出流量維持水平衡(water balance)關 係,藉由地下水平衡分析(water balance analysis),以評估區域 性補注率。由於地下水平衡分析必須基於合理的穩態地下水流場 模擬結果,因此,需要將模擬結果與現地調查結果進行比對;此 外,因海平面下降後,離島結晶岩測試區之氣象及河川等水文條 件皆改變,故於離島結晶岩測試區之氣象及河川等水文條 (hydrograph)之觀測資料情形下,後續將利用離島結晶岩測試區 之地下水平衡分析結果,以數值反算推演離島結晶岩測試區之區 域性補注率合理範圍。

(3) 水文地質概念模式建構:

離島結晶岩測試區之地質調查資訊以陸域為主(工研院,2015, p1-1-4-20),陸域範圍以外則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),且單元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)(工研院,2015,p1-1-4-20);鑑於模擬範圍 擴大,因此模擬深度亦由2 km加深為4 km。

在邊界條件設定部分,依據上述河系分布及集水區演化的模擬區 域劃分成果,將高山陵線設定為無流動(no-flow)邊界、河流設定 為定水頭(constant head)邊界、頂部為定水頭邊界、底部為無流 動邊界,如圖 6-22所示。

(4) 地下水流狀況:

因海平面下降將導致模擬區域增大,同步造成網格數量以及節點 數目的增加,因此,本研究使用適用於大尺度分析的MODFLOW 及DarcyTools,並依據水文地質概念模式進行離島結晶岩測試區 海平面下降後之地下水模擬。

(a) MODFLOW:

依據前述水文地質概念模式使用MODFLOW建立分析網格,隨後匯入數值地形高程,即可求得離島結晶岩測試區之地形高程圖及其隨著地表高程起伏變化之三維數值分析網格;邊界條件則依據水文地質概念模式進行相對應之設定;水力傳導係數的設定如圖 6-23所示;穩態地下水流場於z=-504 m(廢棄物罐重心深度)模擬結果如圖 6-24所示。

(b) DarcyTools :

依據前述水文地質概念模式使用DarcyTools建立分析網格, 於母岩區域的網格大小設定為512 m×512 m×512 m;由於F1 及F2之水力傳導係數較高,而岩脈群的水力傳導係數則甚低, 以及地表高程的變化將控制流場,因此,網格大小加密為32 m×32 m×32 m,結果如圖 6-25所示。

接著進行水力特性參數的設定,由於DarcyTools可產生DFN並 進行等效水力特性參數轉換,因此於離島結晶岩測試區內使 用ECPM、離島結晶岩測試區外使用CPM的方式進行水力傳導 係數設定,此舉可使欲關注的區域有較符合現地條件的設定, 藉以提升模擬結果的精確度,結果如圖 6-26所示。最終依據 水文地質概念模式的邊界條件設定進行穩態地下水流場模 擬,z=-504m(廢棄物罐重心深度)模擬結果如圖 6-27所示。

由MODFLOW及DarcyTools的結果可獲得趨勢一致的模擬結果, 地下水流主要皆受到大尺度的地形影響,自西北方的福建山區往東南 方向移動;而離島結晶岩測試區除了受到大尺度的流場效應外,亦受 到局部地形影響,即太武山的局部地形效應。



圖 6-19:海平面下降後之地形示意圖



圖 6-20:海平面下降120m後之地形分布圖



圖 6-21:離島結晶岩測試區海平面下降之模擬範圍劃定結果



圖 6-22:離島結晶岩測試區海平面下降之邊界條件設定 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;頂部為定水 頭邊界;底部為無流動邊界。



圖 6-23:使用MODFLOW生成計算網格並進行水文地質單元之水力傳導係數設定



圖 6-24:使用MODFLOW進行離島結晶岩測試區海平面下降之穩態地下水流場於z=-504m模擬結果



圖 6-25:使用DarcyTools生成非結構化之計算網格

註(1): z=-504 m。 註(2): 紅框為離島結晶岩測試區範圍。



圖 6-26:使用DarcyTools進行水文地質單元之水力傳導係數設定 註(1):z=-504m。 註(2):此為z方向之水力傳導係數。 註(3):此為圖 6-25之紅框範圍。



圖 6-27:使用DarcyTools進行離島結晶岩測試區海平面下降之 穩態地下水流場於z=-504 m模擬結果

6.2.3. 離島結晶岩測試區域地下水流場演化模擬

花崗岩係為我國用過核子燃料深層地質處置所考慮的潛在母岩 之一,考量完整花崗岩體的水文性質具有低水力傳導度與低滲透性, 岩體中若有地下水流通道則會成為放射性核種往生物圈擴散的主要 傳輸途徑。核種在母岩中傳輸雖會經歷遲滯與稀釋,以延緩核種到達 生物圈的時間與降低活度,倘若沒有詳細評估水流的流向與流速,將 可能高估天然障壁之功能而低估核種劑量,造成處置安全上的疑慮, 或是大幅提高處置成本。因此,瞭解地下水流狀態係為處置安全評估 時的重要工作。

106年度成果已依據SNFD2017報告參考案例表二的水文地質參 數,以等效連續介質(Equivalent Continuum Model, ECM)的方式模擬 離島結晶岩測試區的地下水流場,並針對離島環境模擬需求,採用 TOUGH2-MP軟體的EOS7模組,模擬海水與淡水的交互作用。107年度 則針對候選場址評選與核定階段所需之安全評估技術,發展島嶼環境 未來區域地下水演化的模擬技術,呈現不同海水深度的邊界條件,對 於海水入侵及地下水流場的影響,預期區域水文地質三維模擬結果, 亦可回饋給現地調查後續規劃參考,說明如下:

(1) 地質概念模型

根據SNFD2017報告參考案例表二的資料,離島結晶岩測試區可分4種岩性:地表淺層風化岩體(Regolith)、花崗岩(Granite, R1, R2, R3)、近乎平行的輝綠岩脈構造(Dyke, D1-D10)、以及主要導水構造(F1, F2),水文地質參數設定如表 6-6所示。

(a) 地表淺層的風化裂隙帶(Regolith)

岩體剝蝕近地表時,因風化及解壓作用形成的節理,多為最後期之低角度構造且平行地表發育。在花崗岩基盤區,剝蝕節理所形成的風化裂隙岩層為主要淺層含水層。根據地表地質與地質鑽探結果(SNFD2017參考案例表二)及Liu et al. (2006,p4366)製作的地質柵欄圖,離島結晶岩測試區的地表風化層厚度約介於5 m至90 m,為簡化數學模擬及模型說明展示,假設淺層風化層厚度為70 m。

(b) 花崗岩(Granite, R1, R2, R3)

根據岩體密度及磁感率的差異值,太武山花崗片麻岩體可細 分為3個岩體單元(R1、R2及R3),岩體組成完整緻密,水力 傳導係數小,為離島結晶岩測試區域之主要母岩。

- (c) 輝綠岩脈(Dyke, D1-D10) 輝綠岩脈群在離島頻繁出現,呈東北-西南走向分布,位態約為N30E/80N,水力傳導係數可能低於花崗岩,扮演阻水構造時將改變地下水流向。根據地表地質調查結果,可合理假設輝綠岩脈群的出現頻率,約為每公里間距出現約100 m寬度的輝綠岩脈。
- (d) 主要導水構造(F1, F2)
 - (i) 太武山斷層(F1)

太武山斷層(F1構造)以東北-西南走向貫穿整個離島結 晶岩測試區,位態約為N64E/70N,厚度可能超過150m。 在地下水流場模擬之概念模型中,假設F1構造為高水力 傳導係數的導水構造,連通地表水與地下水。

- (ii) 太武山斷層分支裂隙帶(F2) F2構造為F1構造的分支裂隙帶,位態約為N80W/50S, 厚度僅約8 m至15 m;F2與F1構造相交於地下約320 m 至350 m深度。在地下水流場模擬之概念模型中,假設 F2構造為高水力傳導係數的導水構造。
- (2) 情境模擬設定條件

根據地表數值高程可設定模型地形及模擬邊界,模型南北向長度約14 km,東西向寬度約10 km,最大高程約為240 m至250 m, 其中地下水模擬深度則參考第6.2.1節設定為1,000 m。另考量模型西側邊界為陸地,其他側向邊界皆緊臨海水,因此設定模擬邊界條件說明如下:

(a)西側邊界假設條件,因考量離島結晶岩測試區東、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,可 將西側邊界條件簡化假設為無流邊界(no flow)及定水頭邊 界(Dirichlet boundary type),以建立模型探討海水與淡水的 交互作用。

- (b) 其他側向邊界皆臨海,均可假設為定水頭邊界,另外為考量 海水深度對模型的影響,假設下列2組不同側向邊界條件:
 - (i) 海水深度設定為1,000 m,沿海邊界皆與海水接
 í,因此設定深度0 m至1,000 m皆為海水邊界的

 網格,其鹽水質量分率X_b設定為1;
 - (ii) 海水深度僅為70 m,沿海邊界僅地表表層的風化 裂隙帶與海水接觸,因此深度70 m以上設定為海 水邊界的網格,其鹽水質量分率Xb設為1;深度70 m以下至1,000 m則為淡水邊界的網格,鹽水質量 分率Xb設定為0。
- (c) 模型上邊界設定與地表實際環境條件相符,平均地表溫度為 23.5 ℃、壓力為1.013×10⁵ Pa、平均年降雨入滲率為35 mm/yr;模型下邊界深度設定為1,000 m,邊界條件假設為 無流邊界,地溫梯度為17℃/km,地表以下壓力梯度則以靜 水壓力計算(約為10 MPa/km)。
- (3) 情境模擬分析

為呈現不同的邊界條件對海水入侵及地下水流場的影響,可將模型 假 設 為 3 組 模 擬 情 境 如 表 6-8 所 示 , 並 以 TOUGH2 Petrasim2017 (Thunderhead, 2017)進行網格製作及地下水流場 模擬的平行運算。考量便於不同模擬情境之間的相互比較,運算 過程皆採用相同網格,共計約486,252個網格及1,430,777個連結,說明如下:

(a) 情境A:基本案例

考量離島結晶岩測試區目前地質環境所設置之基本案例,西 側邊界與陸地接觸簡化邊界假設為無流邊界,其他邊界與海 水接觸因而設定地表至模擬深度底部皆為海水邊界的網格, 模擬結果可用以跟情境B及情境C進行比較。

根據前述條件進行地下水流場模擬且流場達到穩態時,三維 地下水流場模型垂直剖面的鹽水質量分率等值圖如圖 6-28 所示,且深度500 m處鹽水質量分率分布如圖 6-29 (a)所示, 顯示離島結晶岩測試區太武山及美人山一帶因高程較高,導 致周圍地區有較大的靜水壓分布,緩和了海水入侵的趨勢。 整體而言,海淡水交界亦形成一典型的碗狀外觀。

- (b) 情境B:西側陸地邊界連通性案例
 - 不同於基本案例邊界條件的設定,情境B將西側邊界設定為 定水頭邊界,模擬運算至地下水流場呈現穩態時,深度500 m處鹽水質量分率分布如圖 6-29 (b)所示。比較情境B模擬 結果與情境A (圖 6-29 (a))的差異,顯示西側邊界周圍區域 鹽水質量分率的分布明顯不同,造成此現象的原因係為情境 B中的地下水(X_b=0)可以自由流進邊界網格,西側邊界鹽水 累積的狀況相較於基本案例相對亦較不明顯。此外,比較2 組模型的壓力差異(如圖 6-30所示),顯示情境A在西側邊界 處,局部區域的壓力明顯呈現高於情境B,亦可推測應為海 水積聚所致。
- (c) 情境C: 氣候演化情節

根據SNFD2017報告所描述離島結晶岩測試區在冰期海水面 下降時,曾以風成沙丘堆積的南北向沙漠環境為主,而後受 到間冰期海水面升高影響,逐漸為海水覆蓋,四面環海形成 島嶼。因此,為考慮地下水流場經長期氣候與海平面變遷的 演變過程,情境C假設為淡水環境被海水覆蓋之模擬情節, 意即將情境C的西側邊界與情境A相同均設定為無流邊界,其 他邊界條件則修改為深度0m到70m為海水邊界(X_b=1),70 m到1,000m為淡水(X_b=0)。

情境C模擬至地下水流場呈現穩態時,深度35 m的鹽水質量 分率分布如圖 6-31 (b)所示,與情境A (圖 6-31 (a))比對 後,顯示情境A模擬結果明顯有鹽水入滲內陸的現象,但在 情境C模擬結果中並未呈現。圖 6-32為基本案例情節與情境

C於地下水流場呈現穩態時深度70 m的鹽水質量分率分布比較圖,顯示情境A鹽水入滲現象愈趨明顯,然而在情境C中沿海的鹽水質量分率分布反而變低,推測造成該現象之原因為模型假設海水深度僅70 m,因此在深度70 m海、淡水交界處,鹽水可以往下流動,反而在海岸區域沒有鹽水累積的現象。

107年度綜合以上成果,已建立大範圍海島環境的地下水文地質 三維數值模擬技術,並完成3組不同邊界條件對海水入侵及地下水流 場的情境模擬。模擬結果顯示離島結晶岩測試區地下水流場主要亦受 到地表高程所控制,因此海淡水交界面形成島嶼典型的碗型分布;若 假設為模型邊界以海水深度70m分為上下2層,上層為鹽水邊界,下 層為淡水邊界,則地下水鹽化的影響則愈趨於不明顯,推測為直接以 垂直方向往下滲入地層,鹽水並未往島嶼內陸移動。

表 6-8:不同模型邊界條件設定列表

模擬情境	邊界條件				
	頂部	底部	西側	其他側邊	
情境A(參考案例)	平均地表温度為23.5℃、 壓力為 1.013×10⁵ 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
情境B(西側陸地邊界連通性案例)			定水頭	定水頭	海水深度:1,000 m
情境C(氣候演化情節)			無流	定水頭	海水深度:70m 淡水深度:70m至1,000m

註1: 地溫梯度為17℃/km, 地表以下壓力梯度則以靜水壓力計算(約為10 MPa/km)。

註2:海水平均密度為1025 kg/m³,淡水平均密度為1000 kg/m³。

註3:上述模擬使用之邊界條件及起始條件,模擬參數均根據離島結晶岩測試區地質調查數據所設定,後續若需進行處置場功 能安全評估相關模擬,則必須採用最終處置場址實際量測數值。

混合液體(鹵水與淡水)的密度,以下式表示(Pruess et al., 1999, p41):

 $\frac{1}{\rho_{\rm m}} = \frac{1 - X_{\rm b}}{\rho_{\rm w}} + \frac{X_{\rm b}}{\rho_{\rm b}}$ (6-1)

其中,

ρ_m:混合液體密度(kg/m³);
 ρ_w:純水密度(kg/m³);
 ρ_b:鹵水密度(kg/m³);
 X_h:鹵水質量分率。



圖 6-28:情境A(基本案例)模型不同剖面的鹽水質量分率分布圖 註:圖(a) 東西向剖面(Y=2.704×10⁶, 2.706×10⁶, 2.708×10⁶以及2.710×10⁶ m);圖(b) 南北向剖面(X=1.875×10⁵, 1.895×10⁵, 1.915×10⁵以及1.935×10⁵ m)。



圖 6-29:情境A與情境B(深度500m)的鹽水質量分率分布比較圖



圖 6-30:情境A與情境B(深度500m)的壓力分布比較圖



圖 6-31:情境A與情境C(深度35m)的鹵水質量分率分布比較圖



圖 6-32:情境A與情境C(深度70m)的鹵水質量分率分布比較圖

6.3. 核種遷移試驗與評估技術

6.3.1. 室內試驗室模擬核種於緩衝材料、回填材料與處置母岩遷移行為

核種遷移行為研究為安全評估之一環,其中分配係數Kd值及擴散 係數De值等相關之遷移參數為核種傳輸模擬之重要輸入參數,本研究 探討重要核種於緩衝材料、回填材料與處置母岩之遷移行為,並建立 獲得Kd值及De值等安全評估所需參數之標準實驗方法及流程,未來將 可應用於不同核種之研究上,目前建立之方法包括:批次吸附實驗方 法是利用核種於固相介質與液相間濃度平衡原理,探討核種於液固兩 相之間的濃度分配狀況以計算分配係數(Kd值);穿透擴散實驗方法是 利用菲克定律之擴散理論,探討核種通過固相介質擴散至空白背景溶 液之濃度變化狀況,以進行有效擴散係數(De值)之計算,此方法適用 於容易擴散之低吸附性核種;內擴散實驗方法原理亦為菲克定律之擴 散理論,但其探討的是核種於固相介質內之濃度分布變化狀況,此方 法適用於不易擴散之中、高吸附性核種。除了實驗方法之建立外,實 驗成果部分,106年度成果報告中已說明鎝(Tc)及銫(Cs)之部分實驗 成果,107年度除了持續針對Cs進行實驗外,另外也針對碘(1)、鈾(U) 與針(Th)等核種進行相關研究,說明如下:

批次吸附實驗方面,採用ASTM C1733-10(ASTM, 2010)的標準方 法進行實驗,實驗溶液以離島結晶岩測試區之合成地下水添加不同核 種製備核種溶液,離島結晶岩測試區地下水組成如表 6-9所示,由於 地下水主要陽離子為Na、K、Ca、Mg,因此,以這4種陽離子進行合 成地下水配置,配置合成地下水所使用之藥品如表 6-10所示。膨潤 土實驗方面,以MX-80膨潤土進行實驗,Cs、U、Th等3個核種之實驗 結果如圖 6-33所示,MX-80膨潤土對Th之分配係數(Kd)均大於Cs及 U。而在碘離子研究方面,碘離子在水環境中主要有I-及IO3⁻2種離子 型態。一般地下水環境中主要是以I-形式存在,IO3⁻大致存在於富含氧 氟及高鹼金族離子地下水中,因此,以KI及KIO3及合成地下水進行核 種溶液配製,探討MX-80膨潤土對I-及IO3⁻之吸附性差異,批次實驗結 果顯示,I-及IO3⁻於MX-80膨潤土之分配係數均趨近於零,為不吸附之 核種。而在母岩實驗方面,以離島結晶岩之碎花崗岩進行批次吸附實

驗,實驗操作條件如所表 6-11示,實驗結果顯示Cs之分配係數Kd值 最高,約為1.14×10⁻³ m³/kg,較易吸附於花崗岩上;Tc-99於粉碎花 崗岩之分配係數Kd值約為6.4×10⁻⁴ m³/kg;I·之分配係數Kd值約為 1.8×10⁻⁴ m³/kg;而IO3⁻之分配係數Kd值則0 m³/kg。結果顯示Tc及I 均為低吸附性核種,而I的兩種型態I·及IO3⁻之吸附性不同,IO3⁻幾乎不 會吸附在花崗岩上。

擴散實驗方面,膨潤土擴散實驗以穿透擴散法進行,以MX-80膨 潤土在乾密度1.2 g/cm³、1.4 g/cm³、1.6 g/cm³、1.8 g/cm³、2.0 g/cm³ 之條件下進行擴散實驗,實驗結果顯示Tc於MX-80膨潤土之分配係數 約介於1.5×10⁻⁶ m³/kg至6.1×10⁻⁶ m³/kg之間,實驗進行14天可達擴 散平衡,而Cs於MX-80膨潤土之分配係數約介於0.094 m³/kg至0.005 m³/kg之間,且擴散實驗則須進行430天才能達到平衡狀態,顯示Cs於 膨潤土的吸附性高於Tc。

母岩擴散實驗部分,以離島結晶岩測試區之花崗岩為對象,分為 碎花崗岩及花崗岩薄片2部分進行擴散實驗,碎花崗岩之擴散實驗結 果顯示,Tc之Kd值約為4.59×10⁻⁴m³/kg,而Cs之Kd值約為0.24m³/kg 至 0.3 m³/kg。花 崗 岩 薄 片 擴 散 實 驗 方 面,由 於 花 崗 岩 薄 片 的 孔 隙 率 遠 低於膨潤土,核種於花崗岩的擴散速率遠較膨潤土慢,不適合利用之 穿透擴散法來進行實驗,因此另外採用內擴散實驗方法進行實驗,核 種主要以高吸附性之Cs為探討對象。實驗步驟是將花崗岩薄片表面磨 平並將其中一面貼附於載玻片上,再浸泡於Cs溶液中一段時間後,將 花崗岩薄片樣品取出分析Cs於薄片之濃度分布狀況,在傳統的方法 上,要分析核種於岩石薄片中之濃度分布狀況均是採用薄片切割方法 來進行,將完成實驗的固體進行切片,並分析各個切片上核種濃度 (Zhang et al., 2006, p8),以繪製核種濃度與擴散距離之分佈關係圖, 此方法在實驗操作上的困難點在於當實驗之固相介質硬度較大時,會 增加切片的難度。且一般來說,低吸附性核種採用穿透擴散法進行實 驗即可求得擴散係數,會以內擴散法來求得擴散係數的核種,通常是 難以擴散的高吸附性核種;此時為了使實驗順利進行,實驗用的固相 介質通常會製作成薄片以減少核種擴散的難度,若要將完成內擴散實

驗之固相薄片再細切成數片更薄的薄片,其難度亦會隨之增加。因此, 本研究嘗試開發不同的分析方法,分析核種於花崗岩薄片之濃度分布 情形,以建立探討高吸附性核吸附行為及擴散行為之實驗流程。本研 究分別採用拉塞福背向散射分析儀 (Rutherford Backscattering Spectrometry, RBS) 及 二 次 離 子 質 譜 儀 (Secondary Ion Mass Spectrometer, SIMS)進行固相分析,由於離島結晶岩測試區花崗岩之 礦物組成包括黑雲母、斜長石、石英、白雲母、鋰雲母、輝石等礦物, 且這些礦物並非均勻分布於整個花崗岩薄片,因此,在106年成果報 告中已說明利用RBS隨機選取花崗岩薄片之3個位置進行分析,結果 顯示 Cs於花崗岩薄片之擴散係數約為10·19 m²/s之數量級範圍內 (Tsai et al., 2017),為了探討不同礦物對Cs的吸附性,107年度研究 利用偏光顯微鏡及X光繞射儀進行花崗岩薄片礦物鑑定,選取黑雲母、 斜長石、石英進行SIMS分析,以探討不同礦物對Cs吸附性之影響, SIMS分析結果顯示Cs最容易於黑雲母中擴散, 擴散係數介於10-15 m²/s至10⁻¹⁹ m²/s之間,另外,Cs於石英之擴散係數介於10⁻¹⁸ m²/s至 10-20 m²/s之間, Cs於斜長石之擴散係數介於10-18 m²/s至10-21 m²/s 之間, Cs於石英之擴散係數介於10-18 m²/s至10-20 m²/s之間。由於花 崗岩礦物組成主要以石英為主,上述之RBS分析方法為隨機選取三個 位置進行分析,很可能分析到的礦物為石英,因此,比較RBS及SIMS 之分析結果,顯示這兩種分析方法所得之結果差異不大。

表(5-9:	離島結晶岩測試區地下水主要元素成分((地下深度300 m至500 m)
----	------	--------------------	-------------------

離子組成	平均濃度(mol/L)
Na	1.57×10-3
К	9.22×10-5
Са	3.76×10 ⁻⁴
Mg	6.38×10-5
S	1.05×10 ⁻⁴
Cl	9.77×10-4

表 6-10:配置合成地下水所用之試劑成分

分子量 (g/mol)	藥品	释取重量 (g/L)
58.44	NaCl	0.0572
84.99	NaNO ₃	0.0504
174.27	K ₂ SO ₄	0.0080
246.48	MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.0145
256.41	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	0.0013
236.15	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	0.0888

註:以上藥品均為99%純度以上德國Merck公司出品。

批次實驗條件				
固液比	1 g/30 mL			
粉碎花崗岩粒徑	20 mesh(< 0.833 mm)			
溶液基質	合成地下水			
TcO4 初始濃度	24 ppt			
Cs+初始濃度	24.43 ppm			
I 初始濃度	19.44 ppm			
IO3 初始濃度	14.03 ppm			

表 6-11:離島結晶岩測試區粉碎花崗岩之批次吸附實驗條件



圖 6-33: 銫、鈾與釷於MX-80膨潤土之分配係數

7. 結論

為因應主管機關之審查要求,台電公司與日本NUMO、瑞典SKB 及芬蘭Posiva等機構,建立國際合作與技術交流平台。並於104年成 果報告中,完成SNFD2017報告參考案例之表二(地質概念模式及參 數),據以自104年度與SKB展開技術合作,針對參考案例進行地下水 流場模擬工作,相關成果已於106年度彙整成SNFD2017報告,章節架 構分成3大工作主軸「地質環境」、「處置設計與工程技術」、「安全 評估」等技術發展,逐年規劃並完成相關的研究/調查工作,說明如 下:

7.1. 區域特性調查技術精進

- (1) 區域與構造地質
 - (a) 依據離島結晶岩測試區地層磁感率及電阻率分布型態,研判 高磁感率及高電阻地層係為以花崗岩體為主,東部地區深部 約呈現東北-西南向寬廣的帶狀分布,自深部向上延伸則以 西北-東南向以帶狀向四周擴展;西部地區則於西南與西北 部兩處之深部向上延伸。
 - (b)磁感率與電阻率異常帶與線型構造分布顯示,電阻率與磁感率線型構造之分布位置相當的一致,離島結晶岩測試區東部區域具有東北-西南向與西北-東南方向共4組約呈共軛方向的不連續構造,此與地表花崗岩體所見北東向與北西向的剪切帶葉理方向一致,反應主要的地質構造方向。綜整電阻與磁力資料分析結果顯示,大部分的花崗岩體呈現高電阻率與高磁感率可對應的特徵,經與地質資料比對及地表岩體露頭的驗證,均能有效的描繪地下岩體與構造的分布。
- (2) 地球化學
 - (a) 離島結晶岩(W區)花崗岩類由正長花崗岩、二長花崗岩、花 崗閃長岩、英雲閃長岩、石英二長閃長岩、石英閃長岩與閃 長岩所組成,研判此類岩石曾受到程度不一之糜嶺岩化作用 或蝕變作用,產生許多再結晶礦物;離島結晶岩(M區)侵入 岩由花崗岩類的正長花崗岩、二長花崗岩、花崗閃長岩、英

雲閃長岩、基性岩脈的石英閃長岩、閃長岩/輝長岩與二長 (輝綠)岩所組成。

- (b) 離島結晶岩(W區)形成之火成岩在136 Ma至85 Ma之間,由 老至新依序可區分為基性火成岩(輝長岩)、酸性火成岩(花 崗岩)及侵入之酸性(花崗岩)、中性(閃長岩)和基性(粗玄岩) 岩脈。將W區岩體形成年齡,與同在華南大陸邊緣的K區、M 區等離島花崗岩一同比對,可以大致互相對應出近似時期的 岩漿事件與形成岩體,亦可與大陸平潭地區所劃分的岩石單 元作對比。
- (3) 長期監測
 - (a) 由潮位站觀測資料(自1993年至2015年),臺灣附近海域相對 海水面皆呈現上升情形,臺灣東部海域相對海水面上升(Sea Level Rise, SLR)速率約為2.8 mm/yr;而臺灣西部海域相對 SLR為12.2 mm/yr,造成相對速率大於其他海域的原因為西 南部沿岸地表沉陷嚴重,以及臺灣周圍絕對SLR速率隨位置 靠近赤道而增加的影響。
 - (b)由衛星測高資料與潮位站資料估算1993年至2015年臺灣周 圍絕對SLR速率,兩者估算絕對SLR變化趨勢非常一致,臺灣 附近各海域絕對海水面變化皆呈現上升情形,且絕對SLR速 率由北往南逐漸增加。其中臺灣東部海域與臺灣西部海域絕 對SLR速率,分別為1.8 mm/yr及2.5 mm/yr,顯示臺灣南方 海域絕對SLR速率較北方海域為大。
 - (c)本島結晶岩測試區由微震觀測資料逆推所獲致震源機制解 與應力反演結果顯示,各區之最適斷層面解分別為:I區為接 近東北-西南向之正斷層、II區為右移斷層、III區為逆衝斷層、 IV區為走向滑移斷層以及V區為走向滑移斷層。臺灣海峽區 域之震源機制解顯示,臺灣西岸到臺灣海峽中線之間大致呈 現南北向伸張,大尺度上菲律賓海板塊擠壓的影響則向西逐 漸減弱。

(d)由震源破裂尺度分析結果顯示,本島結晶岩測試區小型地震 以地震矩大於10¹² Nm的地震事件進行應力降分析,應力降 的迴歸結果為17 bar至288 bar之間;而本島結晶岩測試區中 大型地震分析,則利用地震矩的大小及有效破裂面積推求其 所對應之應力降範圍,地震事件之地震矩大小皆小於10¹⁸ Nm,而破裂面積皆小於2 km²,所對應之應力降則約略介於 100 bar至1,000 bar。

7.2. 處置設施合適性與設計方案評估精進

(1)用過核子燃料存量與源項特性評估 本研究依據執行SNFD2017報告安全評估之經驗回饋,具體確認 合SNFD2017報告中重要核種篩選機制的合適性,以及藉由對於 源項評估技術應用與用過核子燃料特性之討論,提出可提升安全 評估可信度之方向與內容。

另外,本研究也完成用過核子燃料資料庫實作之技術建立,從資 料收集彙整、資料庫架構研擬、特性表單實作以及網頁介面資料 庫整合。資料庫需持續更新並細緻化處理國內的運轉資訊,並透 過源項技術開發提升評估特性模型的可靠度。

(2) 地下輻射水解

本研究根據相關文獻,分析輻射水解之反應機制、反應產物及產 量估算,並配合相關現地資料或設計條件,提出產物之分析結果, 並評估輻射水解反應產物對內部組件造成的影響。完成我國用過 核子燃料內α、β、γ射源分析、射源與地下輻射水解機制的相關 反應機制初步研究。不同地下水質對於輻射水解影響評估,經過 研究地下水中鐵離子會與輻射水解產物發生反應,其他離子則影 響有限。

探討輻射水解產物對廢棄物罐之腐蝕影響部份,腐蝕評估結果: 如產生局部腐蝕深度將是1.1 mm,另一方面,如果在整個內部銅 表面上均勻地發生腐蝕,則腐蝕深度將是0.03 mm。輻射水解導 致的腐蝕,輻射水解機制可以局部腐蝕深度將是0.07 mm。

- (3) 災害地震震源模型及其敏感度分析
 - 本研究建立了4組震源模型,並以強地動地震波模擬方法得到目標測站之模擬波形,再經由震度值、PGA及反應譜與觀測紀錄和 衰減律之比較,進行強地動產生區的敏感度分析,進一步了解 1920年花蓮外海地震可能之震源參數。在假設之震源模型中,以 模型D之結果與觀測紀錄及衰減律估算值最為接近,故推估引發 1920年花蓮外海地震之震源,應為一沿著琉球海溝走向為290°, 向北傾約44°,且其長可能為120 km,寬則為60 km的斷層面。該 次地震所釋放之應力至少達10 MPa左右,規模約為M_W8.2,而強 地動產生區則位於斷層面上最靠近臺灣之區域。
- (4) 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能評估與測試
 - (a)廢棄物罐銅質外殼壽命預測模式分析與建置 廢棄物罐銅質外殼壽命預測模式涵蓋所有腐蝕作用,對於腐 蝕作用之物理及化學反應等基本定律進行說明,依據分析案 例,選擇必須處理之腐蝕作用及參數,評估流程依腐蝕作用 之影響程度分為有限的腐蝕作用與長期的腐蝕作用。其中, 有限腐蝕作用在選定腐蝕作用時被認為影響腐蝕深度有限, 經由案例計算得知經過100萬年,有限腐蝕作用所造成的總 腐蝕深度未到mm等級。而長期腐蝕作用之腐蝕劑來源主要 來自地下水中的腐蝕劑,在還原環境時此腐蝕劑主要為硫化 物,若廢棄物罐在完整緩衝材料保護下,經過100萬年,廢 棄物罐腐蝕失效的可能性非常低。因此,造成廢棄物罐可能 發生腐蝕失效之情形,較有可能發生在緩衝材料被侵蝕之情 節。然而,在參考案例之水質條件下,緩衝材料被侵蝕之情 節無論是基本案例或是變異案例,廢棄物罐因腐蝕而失效所 需之時間皆超過100萬年。因此,既使在較可能發生腐蝕失
 - (b) 廢棄物罐銅質外殼於鹼氯環境下耐腐蝕性能之研究

百萬年內廢棄物罐並無失效的可能。

7-4

效之緩衝材料被侵蝕之情節,在參考案例之處置環境條件下

在地下處置設施腐蝕環境的情節推演中,認為鹽度與酸鹼值 會隨時間而增加,因此配製酸鹼度為pH7至pH11及低至高不 同氯離子濃度之鹼性氯離子(簡稱鹼氯)溶液條件,進行廢棄 物罐銅殼材質之450天長期浸泡腐蝕實驗,以評估無氧銅於 有氧環境鹼氯條件下腐蝕行為特性,並進行無氧銅鹼氯腐蝕 後對拉伸力學性質的影響評估。

實驗結果顯示,當溶液條件為較低氯離子濃度(≤0.01 mol/L) 時,pH值增加會降低氧化速率,但是對高氯離子濃度條件 (≥0.1 mol/L)時,pH值增加對腐蝕速率影響變成很小或者是 沒有相關性,此外腐蝕速率皆隨氯離子濃度增高而增加。在 低氯離子濃度的腐蝕產物主要為緻密性氧化銅(Cu2O/CuO), 但在高氯離子濃度條件下則形成鬆散剝落的氧氯化銅 (Cu2(OH)3Cl)。在低氯離子濃度條件表面形成緻密性氧化膜 (Cu2O/CuO)的試片,以電化學分析獲得腐蝕電流密度隨pH 值增加而減少之現象,亦符合瑞典SKB的研究結論,即pH值 增加具鈍化(passivation)之趨勢,以及氯離子濃度增加先於 pH值增加時,銅的腐蝕是較活躍的(active)。

由腐蝕後拉伸測試,顯示抗拉強度未受鹼氯腐蝕所影響,僅 伸長率隨腐蝕時間呈現些微下降趨勢,但斷面觀察分析仍為 典型延性材料特徵,因此,總結廢棄物罐銅殼遭鹼氯腐蝕後 不會對拉伸力學性質產生明顯效應。

(5) 銅質材料摩擦攪拌銲接與檢測技術

本研究已成功完成厚度15mm之純銅摩擦攪拌對接及20mm厚純 銅板點銲之初步研究, 銲接工具的發展有助於銲接的進程與維持 銲道的品質, 經銲接後的銲道與銅質母材的腐蝕電位差異不大, 2者耐蝕差異不大。

(6)廢棄物罐鑄鐵製造與檢測技術 試製與加工結果顯示,國內廠商已有能力承製此類大型鑄件,在 經由試製的調整製程參數下,力學性質合於規範,尺寸量測合於 加工要求,。

(7) 回填材料設計與施工

本研究依循我國處置概念,初步建立回填材料設計概念與設計需 求,以作為回填材料設計之參考。基於設計需求之考量下,建立 回填材料之膨潤土原料需求條件及檢驗清單,以利回填材料之設 計規格符合設計需求。並依照SNFD2017報告之處置隧道設計尺 寸,建立回填材料元件設計規格,包含回填材料塊體、底床材料、 及塊體與處置隧道岩壁間之膨潤土填充料。現階段之回填材料回 填施工方法,採用預鑄塊體再於現地堆疊回填之方式,有別於 SNFD2009以膨潤土混和開挖岩屑直接於現地夯實之方式,主要 考量以預鑄塊體再回填之方式較易達成較高之回填密度與均勻 性控制。且依參考設計計算回填後之乾密度可達到約1,408 kg/ m³至1,461 kg/m³,配合本研究之MX-80型膨潤土回脹壓力及水 力傳導係數試驗研究結果,純水條件下的回脹壓力約為5 MPa、 水力傳導係數為2×10⁻¹² m/s,模擬本土地下水條件下其回脹壓 力約為3 MPa、水力傳導係數為1.5×10⁻¹² m/s,皆符合設計需要 求之回脹壓力需大於0.1 MPa及水力傳導係數需小於10⁻¹⁰ m/s, 且保有長期環境影響之設計餘裕。

(8) 緩衝材料高圍壓力學參數測試

本研究為模擬在流體力學循環中廢棄物罐的沉陷。實驗程序中的 參數,首先藉由傳統壓密實驗和瑞典SKB廢棄物罐沉陷進行結果 比對及校正。結果顯示具有彈性、多孔彈性和黏彈性模型的FLAC 3D模擬,與瑞典SKB ABAQUS模擬之差異比較。

依照單向度壓密試驗結果採用土壤力學評估法進行計算,所得之 廢棄物罐底部緩衝材料壓密沉陷量,當緩衝材料統體單位重為18 kN/m³之試體,總沉陷量為33.168 mm,而緩衝材料的統體單位 重為20 kN/m³之試體,則總沉陷量為14.009 mm,此一結果若對 照瑞典SKB之模擬結果分別為2.42 mm及0.35 mm,於土壤力學評 估法結果相差甚鉅,主要原因為10萬年之長期沉陷評估主要之沉 陷量來自潛變,而壓密試驗所得之潛變斜率由於僅進行約1年的

時間,故用以評估10萬年之潛變量過於保守,故10萬年之長期沉 陷評估,若僅以壓密試驗數年之試驗結果來評估太過保守。 依不同緩衝材料初始條件,FLAC 3D與瑞典SKB ABAQUS模型驗證 與最佳化後,模擬緩衝材料10萬年之沉陷預估差值為0.05 mm至 6.12 mm,此誤差結果主要因所使用的分析軟體所對應分析模式 之差異。

故針對 SNFD2017報告中緩衝材料之設計密度 1,900 kg/m³至 2,050 kg/m³,採用 FLAC 3D進行廢棄物罐周圍緩衝材料 10萬年沉 陷量分析結果顯示分別僅有 0.24 mm及 0.66 mm之沉陷量。

(9) 工程障壁高圍壓縮尺測試設備與方法 大尺寸三軸試驗為國內自行研發設計之設備,針對預定之試驗環 境條件,以數值模型進行大尺寸三軸試驗設備的應變與應力模 擬,進而進行大尺寸三軸設備之製作,並進行組裝以及滲漏測試 與軸力施加過程。

大尺寸三軸室設備完成設計與製作後,利用油壓機提供30 MPa室 壓條件下進行滲漏檢查,並於三軸室之軸桿加載,進行緩衝材料 圓柱試體的軸力加壓測試。測試結果顯示,大尺寸三軸室在預定 之試驗環境條件下皆能正常運作,此設備能在承載高室壓環境 (30 MPa)下不發生滲漏情況,且加壓軸桿能夠確實傳遞預期的軸 力,並使高強度的緩衝材料圓柱試體達到破壞狀態。

(10)隧道支撑材料之長期耐久性分析與驗證研究

本研究主要探討隧道支撐材料之低鹼混凝土或低鹼砂漿長期耐 久性分析與驗證,鋼筋腐蝕試驗所試驗之低鹼砂漿與低鹼混凝土 經由180天監測下,開路電位維持-200 mV以上仍處於低於10%腐 蝕機率的情況,對於現階段齡期實屬稍短,但量測數值尚屬穩定。 快速氯離子滲透試驗自各齡期觀察低鹼砂漿與低鹼混凝土,對照 組明顯皆屬於高氯離子滲透性,且隨養護齡期越長有下降之趨 勢;實驗組由於養護齡期28天時,就已達到氯離子滲透非常低之 標準,雖不明顯但隨養護齡期之增長仍具下降之趨勢。藉由電子 顯微鏡觀測方式得知,各個配比孔隙隨齡期逐漸被填補C-S-H膠

體所填補,氫氧化鈣之消耗量屬具卜作嵐材料之配比最為快速, M24於齡期91天時仍可觀察到圓球狀飛灰存在,證明水化反應仍 在持續進行。本研究之低鹼性混凝土相較一般混凝土具有較高的 耐久性與使用年限,可在使用相對較少材料所建築保護混凝土腐 蝕層下達到相同使用年限,使整體結構建立所需建設規模減少, 符合長期使用年限要求之設計成效。

7.3. 安全評估精進

(1) 安全評估方法精進

本研究參考IAEA SSG-23對處置設施封閉後安全評估要素的建議 (IAEA, 2012, p44-p62),以及研析與學習更多國家對於安全評估 所採取的方法,這些國家包含芬蘭、日本、法國、美國、瑞士、 加拿大、與英國。每個國家所發展的安全評估方法論,甚至所展 示的方式,都有其特色與可參考之處。此外,2017年的國際同儕 審查,對於SNFD2017報告的安全評估方法論,也給予寶貴的建 議,因此,在本研究中也整理出IRT對於安全評估方法所給予的 建議,作為後續安全評估方法發展的參考。最後,重新審視 SNFD2017報告所得到的經驗、參考IAEA SSG-23(IAEA, 2012, p44-p62)的說明與各國的作法,完成封閉後安全評估方法流程。

(2) 安全評估資料庫

我國用過核子燃料最終處置工作自1986年起推動,迄今已超過 30年,5個計畫工作階段。本工作項目完成我國用過核子燃料最 終處置功能/安全評估技術發展各階段計畫資訊與成果彙整,依 據資料種類、屬性、格式與存在形式進行資料庫設計,發展現階 段功能/安全評估資訊系統網站。功能/安全評估資訊系統透過網 頁介面提供包括文字說明、圖表紀錄、研發成果、參考文獻等數 位資料的查詢,展現功能/安全評估技術發展成果,增進安全評 估信心。

(3) 分析模式的選用與開發

本研究綜整安全評估分析模式之國際應用情形與經驗,進行 SNFD2017報告於模擬分析時,選用這些數值模式的理由說明, 並進行基準校驗過程說明、不確定性處理過程與應用介面關聯性 的討論。

這些選用的數值模式包含源項的分析模式、工程障壁的熱效應、 剪力位移、腐蝕與侵蝕分析與計算式、地質圈的水文地質裂隙網 路與地下水流分析、生物圈行為分析模式、近場與遠場的核種遷 移、生物圈劑量分析模式等。SNFD2017報告中整合模式間的關 聯性,分別依2種廢棄物罐圍阻失效情節(腐蝕與剪力作用),以及 3種天然干擾情節(極端全球暖化、極端地震頻率與未來人類活動),完成多個封閉後長期安全分析案例的計算。

- (4) 工程障壁系統評估技術
 - 彙整花崗岩體做為處置母岩時,緩衝材料於處置設施封閉後膨潤 土膠體之產生機制及其釋出量化方式。在評估膨潤土膠體促進放 射性核種遷移方面,參考芬蘭Posiva之近場膠體遷移模式及瑞典 SKB遠場膠體遷移模式,並利用GoldSim完成個別計算,最後,將 GoldSim建立之模式用於膠體促進放射性核種之評估
- (5) 緩衝與回填材料受水力作用影響
 - 107年度已完成氣體滲透試驗之流程確立,並進行測試實驗。結果顯示本試驗裝置及流程可確實觀察記錄緩衝材料之飽和及氣體傳輸過程,取得氣體滲透性、突破壓力及相關實驗參數,並對其特性有初步瞭解,作為評估氣體對緩衝材料影響之依據。
- (6) 緩衝與回填材料受化學作用影響 本研究探討處置環境及緩衝材料中,膨潤土與地下水的相互作 用,評估在我國地質條件下之地下水化學作用影響,以提供未來 相關設計與功能驗證之依據。研究成果包括:建立硫酸鹽還原菌 活性試驗,包括實驗規劃、設備設計及建置,研究硫酸鹽還原菌 於不同膨潤土密度中之活性影響;執行緩衝材料擴散試驗,取得 緩衝材料中硫酸鹽之有效擴散係數及視擴散係數
- (7) 緩衝材料耦合驗證及數值模擬
藉由建立熱-水-力耦合縮尺試驗,由溫度變化歷程可得知,膨潤 土材料接近熱源處至試體外圍邊界處,愈近熱源之溫度愈高;於 試體周圍注入水時,溫度分布因水份滲入而有溫度下降之情形, 相對濕度計所量測之濕度變化亦可觀察出水份隨時間向試體內 部入滲至飽和,接近熱源處之感測器受溫度影響而有延遲飽和之 情形;壓力感測器亦隨著水份入滲,膨潤土因吸水回脹而產生壓 力變化。

緩衝材料三軸實驗以飽和緩衝材料試體於不同溫度及不同圍壓 條件下的實驗,探討力學參數、孔隙水壓變化及力學行為變化, 實驗結果顯示,力學參數彈性模數為100至140 MPa,柏松比為 0.444至0.474,平均不排水剪力強度約在1.1MPa,迴歸之不排水 剪力強度約為1.07 MPa;在孔隙水壓部分,由於蒙脫石對水有強 大的吸引力,造成無法量測孔隙水壓力;在相同圍壓條件下,隨 著溫度提升至90℃,造成軸差應力顯著降低。

緩衝材料試體隨著飽和度的提升,對其力學特性有顯著之影響, 相較於自然含水試體,飽和試體的軸差應力-應變曲線,尖峰軸 差應力提早發生,無明顯尖峰應變,試體更具有延展性,而溫度 的作用對高飽和狀態的影響更是顯著。

本研究經上述與瑞典SKB及日本JNC之案例驗證可知,使用之分 析工具雖不同,但只要輸入相同之初始條件、邊界條件以及物理 參數,無論溫度或含水量均可得到與文獻相符之分析結果。在熱 -水耦合模擬中,溫度之分布幾乎不受溫差大小影響,不同溫差下 其分布呈現等比例狀態,且數值模擬之結果受到圓盤試體各層初 始值不均勻程度之影響甚為明顯。此外,在水熱梯度試驗的模擬 中,上下兩端溫差較小者,水分多滯留於試體中段,各處含水量 差異不大;溫差較大者,試驗後頂部含水量約為底部之3.5倍,靠 近熱源處之含水量僅6%,飽和度亦在10%以下,說明在高溫持續 作用下,土壤中水分被驅趕至遠熱源端之物理現象,且各處含水

7-10

7.4. 整合性技術

- (1) 地質圈長期穩定性評估
 - (a)由GPS連續觀測成果(花蓮地震震前)顯示,本島結晶岩測試 區之水平方向速度場,介於0.9 cm/yr至1.5 cm/yr之間,其 中HGC1和HGC4皆呈現朝東南方向位移,HGC2與HGC3皆呈 現偏南方向位移,測站分布位置可能位於速度場轉折區域。 垂直方向速度場呈現靠近海岸地區有較大沉陷速率,較靠近 山區沉陷速率較小。震後速度場變化情形,還須累積更長時 間期距之觀測資料,才能獲得震後較為穩定之三維速度場變 化趨勢。
 - (b)本島結晶岩測試區之導水裂隙的水文地化環境pH值及Eh值範圍,可能介於:7.12 ≤ pH ≤ 8.93, -0.37 volts ≤ Eh ≤ -0.15 volts,相對應的核種溶解度變化範圍及Kd值的變化影響性,應被適度考量在後續的安全評估模擬過程中。相較於離島結晶岩pH值及Eh值範圍(6.99 ≤ pH ≤ 9.75, -0.45 volts ≤ Eh ≤ -0.17 volts),顯示本島結晶岩測試區導水裂隙的水文地化環境,受到大理岩圍岩的碳酸鈣化學平衡系統所影響,pH值的變動範圍會比離島結晶岩小,Eh值的變動範圍則差距不大。
- (2) 地下水流分析模式驗證與技術精進
 - (a)離島結晶岩測試區三維離散岩體地下水流數值模擬,顯示地下水流場主要受控於地表高程,故自地表入滲的地下水,會經由地形高區(如太武山高區及東北方的次高區),補注至周圍地勢較低的岩體。此外,鹽水分布亦同時受到高導水性的F1與F2構造,以及低滲透性的輝綠岩脈所影響。F1與F2構造主要影響初期的鹽水傳輸,故F1與F2形成鹽水傳輸初期的快速流動路徑;岩脈則主要影響後期至穩態的鹽水分布。
 - (b)考量地下水流場經長期氣候與海平面變遷的演變過程,模擬 不同海水深度的邊界條件,對於海水入侵及地下水流場的影響。結果顯示離島結晶岩測試區地下水流場除了受到地表高

程所控制,因此海淡水交界面形成島嶼典型的碗型分布之 外,若以海水深度70m區設定為鹽水及淡水邊界,則地下水 鹽化的影響則愈趨於不明顯,推測為直接以垂直方向往下滲 入地層,鹽水並未往島嶼內陸移動。

- (3) 離島結晶岩測試區海平面下降之地下水流數值模式
 - (a) 以中國大陸沿海、臺灣海峽及臺灣本島之數值地形圖為基礎,完成離島結晶岩測試區海平面下降後之河系分布。
 - (b)基於河系分布結果,並依據集水區劃分方法進行模擬區域劃 定,並輔以合理的假設建構水文地質概念模式,完成離島結 晶岩測試區海平面下降之穩態地下水流數值模擬。
- (4) 室內試驗室模擬核種於緩衝材料、回填材料與處置母岩遷移行為 在批次吸附實驗方面,以MX-80膨潤土進行實驗,實驗結果顯示 MX-80膨潤土對Th之分配係數(Kd)大於Cs及U,而I·及IO3·之分配 係數趨近於零,為不吸附之核種;以離島結晶岩之碎花崗岩進行 批次吸附實驗,結果顯示Cs之分配係數Kd值最高,約為1.14×10· ³ m³/kg,較易吸附於花崗岩上;Tc-99於粉碎花崗岩之分配係數 Kd值約為6.4×10·4 m³/kg;I·之分配係數Kd值約為1.8×10·4 m³/kg;而IO3·之分配係數Kd值則0m³/kg。Tc及I均為低吸附性核 種,而I的兩種型態I·及IO3·之吸附性不同,IO3·幾乎不會吸附在花 崗岩上。

擴散實驗方面,膨潤土擴散實驗以穿透擴散法進行,以MX-80膨 潤土在乾密度1.2 g/cm³、1.4 g/cm³、1.6 g/cm³、1.8 g/cm³、2.0 g/cm³之條件下進行擴散實驗,結果顯示Tc於MX-80膨潤土之分 配係數約介於1.5×10⁻⁶ m³/kg至6.1×10⁻⁶ m³/kg之間,實驗進行 14天可達擴散平衡,而Cs於MX-80膨潤土之分配係數約介於 0.094 m³/kg至0.005 m³/kg之間,且擴散實驗則須進行430天才 能達到平衡狀態,顯示Cs於膨潤土的吸附性高於Tc。母岩擴散實 驗分為碎花崗岩及花崗岩薄片2部分進行擴散實驗,碎花崗岩之 擴散實驗結果顯示,Tc之Kd值約為4.59×10⁻⁴ m³/kg,而Cs之Kd值 約為0.24 m³/kg至0.3 m³/kg;花崗岩薄片擴散實驗方面,並選擇

7-12

高吸附性核種Cs來進行實驗方法之建立,核種於固相之濃度分析 結果顯示,利用RBS隨機選取花崗岩薄片之3個位置進行分析,結 果顯示Cs於花崗岩薄片之擴散係數約為10⁻¹⁹ m²/s之數量級範圍 內,另一方面利用SIMS選取花崗岩薄片中石英、斜長石、黑雲母 3種不同的礦物進行分析,結果顯示Cs最容易於黑雲母中擴散, 擴散係數介於10⁻¹⁵ m²/s至10⁻¹⁹ m²/s之間,SIMS分析結果顯示Cs 最容易於黑雲母中擴散,擴散係數介於10⁻¹⁵ m²/s至10⁻¹⁹ m²/s之 間,Cs於斜長石之擴散係數介於10⁻¹⁸ m²/s至10⁻²¹ m²/s之間,Cs 於石英之擴散係數介於10⁻¹⁸ m²/s至10⁻²⁰ m²/s之間。由於花崗岩 礦物組成主要以石英為主,上述之RBS分析方法為隨機選取三個 位置進行分析,很可能分析到的礦物為石英,因此,比較RBS及 SIMS之分析結果,顯示這2種分析方法所得之結果差異不大。

8. 參考文獻

台電公司(2006),用過核子燃料最終處置計畫,台灣電力公司核能後端營運處;行政院原子能委員會放射性物料管理局,2006年核定版。

- 台電公司(2015),用過核子燃料最終處置計畫,台灣電力公司核能後 端營運處;行政院原子能委員會放射性物料管理局,2014年修訂 版。
- 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-技術支援報告(2)處置設計與工程技術。
- 李寄嵎(2000),低放射性廢料最終處置第一階段—工作顧問服務(第 一次工作變更)計畫—烏坵地區岩石定年分析報告,台電公司/泰 興工程顧問有限公司委辦計畫,工業技術研究院能源與資源研究 所,4ML1100-RG-2102-R.0。
- 李寄嵎、林建偉、葉恩肇、陳正宏(2015),馬祖地質圖說明書,二萬 五千分之一台灣地質圖說明書,經濟部中央地質調查所,共63頁。 林鎮國(2000),低放射性廢料最終處置第一階段-工作顧問服務(第 一次工作變更)計畫-小坵嶼地質圖(1/1000)說明書,台電公司

/泰興工程顧問有限公司委辦計畫,工業技術研究院能源與資源研究所,4ML1100-RG-2101-R.0。

- 鈴木英明(1999),「溫度梯度作用下緩衝材料內的水分移動與膨脹力 之測定」, JNC TN-8400, 99-020.
- 藍晶瑩(1989),臺灣片麻岩同位素定年及化學之研究。國立臺灣大學 地質研究所博士論文,共211頁。
- 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎(2015),臺灣四周海域長期性之海水面變化趨勢評估,交通部運輸研究所出版,MOTC-IOT-103-H3DB003a,臺北市。
- 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎(2016),臺灣海域為來平 均海平面升降變動率之推估,交通部運輸研究所出版,MOTC-IOT-104-H3DB003a,臺北市。

- 郭重言、林立青、藍文浩、莊文傑、李俊穎(2017),臺灣海域海平面 上升之加速特性研究,交通部運輸研究所出版,MOTC-IOT-105-H3DB003a,臺北市。
- 陳硯歆(2010),臺灣海峽震源機制及其應力狀態,國立臺灣大學海洋 研究所碩士論文,共113頁。
- 中央地質調查所(2013),臺灣中段山區流域水文地質調查及圖幅繪編 (4/4)期末報告,財團法人工業技術研究院執行/經濟部中央地質 調查所委辦。
- 蔡世欽(2016),我國用過核子燃料最終處置功能/安全評估所需核種特性相關參數之評估研究(源項及生物圈),核能研究所SNFD-INER-90-615。
- 謝佩珊(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(101~103年度計畫)—花崗岩岩 礦物特性分析執行成果報告,臺灣電力公司委辨計畫,SNFD-EEL-90-306,工業技術研究院。
- 謝佩珊、林蔚(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 花崗岩岩心礦物組成特性分析,台灣電力公司委辨計畫,SNFD-GEL-90-288,工業技術研究院。
- ASTM (2010), Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding, American Society for Testing and Materials, ASTM C1543.
- AASHTO (1980), Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration, Standard specification specification for transportation materials and methods of sampling and testing, American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO 259.
- Abercrombie, R. (1995), Earthquake source scaling relationships from -1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5-km depth, J. Geophys. Res., Vol. 100(12), pp. 24015-24036.

- ACI (2002), Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, ACI Committee 211.1.
- Åkesson, M., Kristensson, O., Börgesson, L., Dueck, A., and Hernelind, J. (2010), THM modelling of buffer, backfilland other system components. Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- ASTM (2004), Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, ASTM G5-94.
- ASTM (2010), Standard Test Method for Distribution Coefficients of Inorganic Species by the Batch Method. American Society for Testing and Materials, ASTM C1733-10.
- Bengtsson, A., Edlund, J., Hallbeck, B., Heed, C., and Pedersen, K. (2015), Microbial sulphide-producing activity in MX-80 bentonite at 1750 and 2000 kg m-3 wet density, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, R-15-05.
- Birgersson M., Börgesson L., Hedström M., Karnland O., Nilsson U., (2009), Bentonite erosion. Final report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-09-34.
- Boergesson, L. (1986), Model shear tests of canisters with smectite clay envelopes in deposition holes, SKB, TR-86-26.
- Boergesson, L. and Hernelind, J., (2006), Earthquake induced rock shear through a deposition hole Influence of shear plane inclination and location as well as buffer properties on the damage caused to the canister, SKB, TR-06-43.
- Cazenave, A., and Le Cozannet, G. (2014), Sea level rise and its coastal impacts, Earth's Future, 2, 2, pp. 15-34, doi:10.1002/2013EF000188.
- Chen C.H., Lu H.Y., Lin W., Hsieh P.S. (2006), Thermal event records in SE China coastal areas: Constraints from monazite ages of beach sands from two sides of the Taiwan Strait, Chemical Geology, Vol. 231, pp. 118-134.
- Crank, J. (1975), The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press.

- Ekeroth, E. (2003) Effects of radiolysis on the dynamics of UO₂dissolution , Royal Institute of Technology Stockholm Sweden, Licentiate thesis.
- García-Gutiérrez, M., Cormenzana, J. L., Missana, T., Mingarro, M., and Molinero, J. (2006), Overview of laboratory methods employed for obtaining diffusion coefficients in FEBEX compacted bentonite, Journal of Iberian Geology 32, pp. 37–53.
- GTG (2014), GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide, Version 6.4.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeb, D., Muller,
 B., (2010). Global crustal stress pattern based on the World
 Stress Map database release 2008. Tectonophysics 482, pp. 3-15.
- HERP (2008), Strong ground motion prediction method ("Recipe") for earthquakes with specified source faults; Retrieved from http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.p df, (in Japanese).
- Holgate, S. J., Matthews, A. P., Woodworth, L. L., Rickards, J., Tamisiea, M. E., Bradshaw, E., Foden, P. R., Gordon, K. M., Jevrejeva, S., and Pugh, J. (2013), New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level, J. Coastal Res., 29, 3, pp. 493-504, doi:10.2112/JCOASTRES-D-12-00175.1.
- Hsieh P.S., Chen C.H., Yang H.J., Lee, C.Y. (2008), Petrogenesis fo the Nanling mountains granites from South China: Constraints from systematic apatite geochemistry and whole-rock geochemical and Sr-Nd isotope compositions, Journal of Asian Earth Sciences, Vol.33, pp. 428-451.
- Hu, J.-C., J. Angelier, J.-C. Lee, H.-T. Chu, and D. Byrne. (1996), Kinematics of convergence, deformation and stress distribution in the Taiwan collision area: 2-D finite-element numerical modelling, Tectonophysics, Vol. 255, pp. 243-268.
- IAEA (2006), IAEA SAFETY GLOSSARY, Version 2.0, International Atomic Energy Agency.

- IAEA (2011), Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-14, IAEA, Vienna.
- IAEA (2012), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency, Specific Safety Guide, No. SSG-23.
- ICRP (1990), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60.
- Ira, L. (2001), Physical Chemistry (5th ed.), ISBN 978-0-07-231808-1.
- Irikura, K. (2006), Predicting strong ground motions with a "Recipe". Bulletin of the Earthquake Research Institute University, Tokyo, Vol. 81, pp. 341-352.
- JAEA (2007), TRU廃棄物処分技術検討書, Japan Atomic Energy Agency.
- JAEA (2011a), TRU廃棄物処分技術検討書, Japan Atomic Energy Agency.
- JAEA (2011b), JAEA R&D Review-2011, Japan Atomic Energy Agency.
- JAEA (2016),低アルカリ性セメント系材料の長期浸漬試験, Japan Atomic Energy Agency, JAEA-Technology 2016-011.
- 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.
- Jian, P.-R., Tseng, T. L., W. T. Liang, and P. H. Huang, (2018). A New Automatic Full-Waveform Regonal Moment Tensor Inversion Algorithm and Its Applications in the Taiwan Area, Bulletin of the Seismological Society of America, (Accepted).
- Jussila, P. (2000), Geopshere transport of radionuclides in safety assessment of spent fuel disposal, STUK-YTO-TR164.
- Kaplan, S., and B.J. Garrick (1981), On the Quantitative Definition of Risk. Risk Analysis, 1, (1): 11–27.

- Kao, H., and F. T. Wu. (1996), The 16 September 1994 earthquake (mb=6.5) in the Taiwan Strait and its tectonic implications, TAO, Vol. 7, pp. 13-29.
- Lan, W.H., Kuo, C.Y., Kao, H.C., Lin, L.C., Shum, C.K., Tseng, K.H., and Chang, J.C. (2017), Impact of Geophysical and Datum Corrections on Absolute Sea-Level Trends from Tide Gauges around Taiwan, 1993–2015, Water, 9, doi:10.3390/w9070480.
- Liu, C.W., Lin, C.N., Jang, C.S., Chen, C.P., Chang J.F., Fan, C.C., and Lou, K.H. (2006), Sustainable groundwater management in Kinmen Island, Hydrological Process, Vol. 20, pp. 4363–4372.
- Makino, H., Hioki, K., Osawa, H., Semba, T., and Umeki, H. (2012), A Challenge on Development of an Advanced Knowledge Management System (KMS) for Radioactive Waste Disposal: Moving from Theory to Practice, New Research on Knowledge Management Technology, Dr. Huei Tse Hou (Ed.), ISBN: 978-953-51-0074-4.
- Michel-Sendis (2017), SFCOMPO-2.0: An OECD NEA database of spent nuclear fuel isotopic assays, reactor design specifications, and operating data, Annual of Nuclear Energy 110.
- Moreno, L., Neretnieks, I. and Liu, L. (2010), Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow, TR-10-64.
- Nishimura, M., Hirai, T., Tanai, K., and Yui, M. (2006), A Study of Mechanical Effect of Simulated Fault Movement on Engineered Barrier System, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 932, 2006 Materials Research Society.
- 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.
- ORNL (2004), SAS2H: A Coupled One-Dimensional Depletion and Shielding Analysis Module, NUREG/CR-0200 Revision 7, Volume I, Section S2.
- ORNL (2010), Validation of SCALE 5 Decay Heat Predictions for LWR Spent Nuclear Fuel, NUREG/CR-6972 (ORNL/TM-2008/015)

- Painter, S. and Mancillas, J. (2009), MARFA version 3.2.2 user's manual: migration analysis of radionuclides in the far field, R-09-56.
- Palandri, J.L. and Kharaka, Y.K. (2004), A compilation of rate parameters of water-mineral interaction kinetics for application to geochemical modeling: U.S. Geological Survey Open File Report 2004-1068.
- Philip, J. B. and Gregory, K. (2009), Methods for the Detection of Residual Concentrations of Hydrogen Peroxide in Advanced Oxidation Processes, 04-019-01, WateReuse Foundation.
- Posiva (1999), Safety assessment of spent fuel disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99, Posiva 99-07.
- Posiva (2012), Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto -Assessment of Radionuclide Release Scenarios for the Repository System 2012, Posiva 2012-09.
- Posiva (2013), Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Models and Data for the Repository System 2012, Posiva 2013-01.
- Posiva (2014), Radionuclide Transport in the Repository Near-Field and Far-Field, Posiva 2014-02.
- Posiva (2018), The Dimensioning for the Olkiluoto Repository 2018 Update, Posiva, working Report 2018-26.
- Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999), TOUGH2 user's guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, LBNL-43134.
- Robinson, R., and Mcginty P.J. (2000), The enigma of the Arthur's Pass, New Zealand, earthquake 2. The aftershock distribution and its relation to regional and induced stress field, J. Geophys. Res., Vol. 105, pp. 16139-16150.
- Rodney, C. E. (2015) Long-term storage of spent nuclear fuel, Nature materials, Vol. 14, pp. 252-257.

- Salas, J., Molinero, J., Juárez, I., Gimeno, M. J., Gómez, J. and Auqué, L. (2010), SR-Site – hydrogeochemical evolution of the Forsmark site, TR-10-58.
- Schwartz, M. L. (2005), Encyclopedia of Coastal Science, Dordrecht, The Netherlands: Springer, pp. 1–1086.
- Si, H., Midorikawa, S., Tsutsumi, H., Wu, C., Masatsuki, T., and Noda, A. (2013), Preliminary Analysis of Attenuation Relationship for Response Spectra on Bedrock based on Strong Motion Records Including the 2011 Mw9.0 Tohoku Earthquake, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 1-2, 2013, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, pp. 113-117.
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., and Uyeshima, M. (2006), WSINV3DMT version 1.0.0 for single processor machine-User manual, 21p.
- SKB (1978), γ -radiolysis of organic compounds and α -radiolysis of water, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, KBS TR 114.
- SKB (1982a), Radiolysis of ground water from spent fuel, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKBF/KBS TR 82-18.
- SKB (1982b), Radiolysis of groundwater from HLW stored in copper canisters, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKBF/KBS TR 82-02.
- SKB (1999), Pusch, R. and R. Adey, Creep in buffer clay, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, SKB, TR-99-32.
- SKB (2002a), A natural analogue study of the corrosion of copper canisters and radiolysis effects in a repository for spent nuclear fuel, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-02-09.
- SKB (2002b), Corrosion of copper in alkaline chloride environments, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Report,

Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-02-25.

- SKB (2006), Influence of water radiolysis on the mobilization of Tc(IV) in bentonite clay, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-04-22.
- SKB (2010a), Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-47.
- SKB (2010b), Design, production and initial stat of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB TR-10-16, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2010c), Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site, SKB, TR-10-66.
- SKB (2010d), Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository: evaluation of modelling results and their implications for layout and design, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden, SKB, TR-08-11.
- SKB (2010e), Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site, SKB, TR-10-50.
- SKB (2010f), Model summary report for the safety assessment SR-Site, SKB, TR-10-51.
- SKB (2010g), Geosphere process report for the safety assessment SR-Site, SKB, TR-10-48.
- SKB (2011a), Svensk Kärnbränslehantering AB, Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project Volume II, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-11-01.
- SKB (2011b), Rodney S. Read, RSRead Consulting Inc., Effects of earthquake induced rock shear on containment system integrity Laboratory testing plan development, SKB, R-11-21.
- SKB (2012), FARF33 Version 1.1 User's Guide, SKB, R-12-01.
- SKB (2014), Tests and simulations of THM processes relevant for the buffer installation, SKB, P-14-22.

- SKB (2017), Modelling of spent fuel dissolution, mechanistic understanding of the process, workshop report, SKB, Stockholm, Sweden.
- Sophie, L. C. (2011), water radiolysis: influence of oxide surfaces on H₂ production under ionizing radiation, Water, Vol. 3, pp. 235-253.
- Streckeisen, A.L. (1976), To each plutonic rock its proper name. Earth Science Review, Vol. 12, pp.1-33.
- Stolar D. B., Willett S. D., and Montgomery D. R (2007)., Characterization of topographic steady state in Taiwan, Earth and Planetary Science Letters 261 p421-p431.
- Stothoff, S. and Manepally, C. (2013), Review and assessment of aspects of the Qeq concept, SSM, Technical Note 2013:36.
- Suppe, J., C.-T. Hu, and C. Yu-Jy. (1985), Present-day stress directions in western Taiwan inferred from borehole elongation, Petroleum Geology of Taiwan, Vol. no. 21, pp. 1-12.
- Thunderhead (2017), Petrasim User Manual, Thunderhead Engineering.
- Tsai S.C., Lee C.P., Tsai T.L., Yu Y.C. (2017), Characterization of cesium diffusion behavior into granite matrix using Rutherford backscattering spectrometry, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 409, pp. 305-308.
- Umeki, H. and Takase, H. (2010), Application of Knowledge management systems for safe geological disposal of radioactive waste, In: Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste, Ahn, J. and Apted, M.J. (Eds.) Crc Pr I Llc, ISBN-978-1-43983-109-0.
- Wu, Y.M., Teng, T., Shin, T.C., and Hsiao, N. (2003), Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Intensity in Taiwan, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No. 1, pp. 386-396.

- Wu, Y. M., C. H. Chang, L. Zhao, T. L. Teng, and M. Nakamura. (2008),
 A Comprehensive Relocation of Earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005, Bulletin of the Seismological Society of America,
 Vol. 98, pp. 1471-1481.
- Wunsch, C., and Stammer, D. (1997), Atmospheric loading and the oceanic "inverted barometer" effect, Rev. Geophys, 35, pp. 79-107.
- Yeh, T.K., Wang, C.S., Chao, B.F., Chen, C.S. and Lee, C.W (2007), Automatic data-quality monitoring for continuous GPS tracking stations in Taiwan, Metrologia, Vol. 44, pp. 393-401.
- Yen, Y. T. and K. F. Ma (2011), Source-scaling relationship for M 4.6–
 8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan, Bull. Seismol. Soc. Am., 101(2), pp. 464-481.
- Zhang, M., Takeda, M., and Nakajima, H. (2006) Strategies for solving potential problems associated with laboratory diffusion and batch experiments-Part 1: An overview of conventional test methods, WM'06 Conference, February 26-March 2, Tucson, USA.
- Zheng, T. Y., Y. S. Ai, and Q. Z. Chen. (1998), The 16 September 1994 Taiwan Strait earthquake: a simple rupture event starting as a break of asperity, Physics of the earth and planetary interiors, Vol. 107, pp. 269-284.
- Zhu, L., and Helmberger, D.V. (1996), Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, pp. 1634-1641.