用過核子燃料最終處置計畫

候選場址評選與核定階段

110 年度成果報告

(修訂一版)

台灣電力公司

中華民國111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

110年度成果報告

摘要

110年度成果報告係配合用過核子燃料最終處置計畫(2018年核 定版)第二階段「候選場址評選與核定階段」之里程碑,進行「場址合 適性調查技術」、「安全評估技術」之技術精進,以及為能完備2025 年之安全論證,亦逐步發展我國初步安全論證技術,並且考量各階段 成果之完善保存,將資料庫建置議題納入精進。

於場址合適性調查與調查技術精進方面,110年度主要執行臺灣 海域中生代基盤岩特性調查、現地調查試驗程序與整備、地質構造及 大地應力調查、長期監測與樣本分析技術、地質描述模型與資料視覺 化技術等5項工作。

工程設計方面,110年度完成初步安全論證報告各項對應章節之 發展成果內容編撰。此外,著重於發展長期性能評估技術,包括地震 對處置深度應力影響評估,以及完成建立近場三維模型,進行緩衝材 料受侵蝕後之質量再分布對於廢棄物罐造成之影響評估。

安全評估技術精進方面,110年度完成初步安全論證報告各項對 應章節之發展成果內容編撰。此外,完成建立Q1、Q2、Q3釋出途徑 的近場放射性核種傳輸模式及評估。完成參考日本分析案例,針對地 殼抬升/侵蝕作用進行案例驗證及技術建立。完成化學侵蝕作用之侵 蝕試驗建置與階段性數據分析。

資料庫建置方面,考量最終處置計畫屬長程計畫,為能完善各階段研究成果之長期保存,110年度則持續精進數據管理系統,確保各項成果保存與可追溯性。

關鍵字:用過核子燃料、最終處置、場址合適性、工程設計、安全評 估

1.	概述	1-1
2.	計畫目的	2-1
	2.1 計畫目標	2-1
	2.2 工作規劃	
3.	場址合適性調查與調查技術	3-1
	3.1 臺灣海域中生代基盤岩特性調查	3-1
	3.1.1 底質剖面探勘	
	3.1.2 火花放電反射震測	
	3.1.3 長支距多頻道反射震測探勘	
	3.1.4 海域重力與磁力探勘	3-19
	3.2 現地調查試驗程序與整備	
	3.2.1 現地鑽探及取樣作業	
	3.2.2 現地水文地質試驗作業	
	3.2.3 現地套鑽施作與變位量測標準作業	
	3.3 地質構造及大地應力調查	3-110
	3.3.1 現地應力量測技術演練	3-110
	3.3.2 區域應力模式建置	3-117
	3.4 長期監測與樣本分析技術	
	3.4.1 全球衛星定位連續監測與時序分析	
	3.4.2 微震監測及資料解析	
	3.5 地質描述模型與資料視覺化技術	
	3.5.1 岩石力學場址特徵化技術與模式發展	
4.	工程設計	4-1
	4.1 安全論證	4-1
	4.1.1 初步安全論證報告	4-1
	4.2 長期性能評估技術	4-23
	4.2.1 地震對處置設施影響之地動模型評估	4-23
	4.2.2 侵蝕作用下廢棄物罐力學演化分析	4-28
5.	安全評估技術	5-1
	5.1 安全論證	5-1
	5.1.1 初步安全論證報告	5-1
	5.2 安全評估技術精進	5-10
	5.2.1 核種傳輸評估技術精進	5-10

	5.2.2	地殼抬升與侵蝕作用情節建立與分析	5-20
	5.2.3	膨潤土受裂隙水流侵蝕試驗	5-31
6.	資料庫		6-1
	6.1 高	高放處置資料庫	6-1
	6.1.1	資料庫精進	6-1
7.	參考文鬳	肤	7-1

圖目錄

啚	3-1:臺灣海域新生代沉積物等厚度圖	3-35
圖	3-2:花嶼地質圖	3-36
啚	3-3:底質剖面儀資料處理流程圖	3-37
圖	3-4:底質剖面及解釋圖(SBP-Line01)	3-38
圖	3-5:底質剖面及解釋圖(SBP-Line02)	3-39
圖	3-6:底質剖面及解釋圖(SBP-Line03)	3-40
圖	3-7:底質剖面及解釋圖(SBP-Line04)	3-41
圖	3-8:火花放電反射震測資料收集流程圖	3-42
圖	3-9:火花放電反射震測資料處理流程	3-43
圖	3-10:火花放電反射震測測線 Line01 震測剖面	3-44
圖	3-11:火花放電反射震測測線 Line02 震測剖面	3-45
圖	3-12:火花放電反射震測測線 Line03 震測剖面	3-46
圖	3-13:火花放電反射震測測線 Line04 震測剖面	3-46
圖	3-14:火花放電反射震測測線 Line05 震測剖面	3-47
圖	3-15:火花放電反射震測測線 Line06 震測剖面	3-47
圖	3-16:火花放電反射震測測線 Line07 震測剖面	3-48
圖	3-17:火花放電反射震測測線 Line08 震測剖面	3-48
圖	3-18:火花放電反射震測測線 Line09 震測剖面	3-49
圖	3-19:火花放電反射震測測線 Line10 震測剖面	3-50
圖	3-20:火花放電反射震測測線 Line11 震測剖面	3-51
啚	3-21:海域長支距多頻道反射震測資料收集策略圖	3-52
啚	3-22:海域多頻道反射震測資料處理流程圖	3-53
圖	3-23:海域多頻道反射震測測線 Line-01 震測剖面	3-54
圖	3-24:海域多頻道反射震測測線 Line-02 震測剖面	3-55
圖	3-25:海域多頻道反射震測測線 Line-03 震測剖面	3-56
圖	3-26:海域多頻道反射震測測線 Line-04 震測剖面	3-57
圖	3-27:海域多頻道反射震測測線 Line-05 震測剖面	3-58
圖	3-28:海域多頻道反射震測測線 Line-06 震測剖面	3-59
圖	3-29:海域多頻道反射震測測線 Line-07 震測剖面	3-60
圖	3-30:長支距多頻道反射震測剖面各層面速度分布圖	3-61
圖	3-31: SeaSpy 表拖磁力儀	3-62
圖	3-32:交叉點誤差分析	3-62
圖	3-33:本次調查採用之海、陸上重力儀	3-63
圖	3-34:高度修正量所需要之重力儀與參考基站高程差示意圖	3-64
圖	3-35:110年度海上磁力測勘作業磁力異常分布	3-65
圖	3-36:110 年度海上重力測勘作業重力異常分布	3-66

3-37: 鑽探日報表(範例) 3-7	'8
3-38: 滲透試驗數據計算表 3-7	'9
3-39:單封塞滲漏試驗設備配置	0
3-40: 資料記錄器測錄熱脈衝之量測波形)1
3-41: 熱脈衝流速儀於自然水流量測之儀器配置)1
3-42: 孔內自然水流調查作業流程)2
3-43:熱脈衝流速儀於抽水狀態量測之儀器配置)3
3-44: 孔內抽水狀態調查作業流程)4
3-45:水力干擾試驗現地基本配置範例)5
3-46:封塞水力試驗設備配置)6
3-47:公路側比對用之露頭	20
3-48:完整露頭三維模型點雲資料及萃取之裂隙	21
3-49:露頭三維模型局部放大之點雲資料及萃取之裂隙	2
3-50:井下裂隙分布統計圖 3-12	23
3-51:調查區內各 GPS 連續觀測站 ITRF2014 參考框架之速度場 3-14	2
3-52:調查區內各 GPS 連續觀測站相對於澎湖白沙站(S01R)之速度場.3-14	3
3-53:2021 年海底地震儀布放位置圖	0
3-54:2021年4月18日22時地震報告與OBS波型資料	51
3-55: 調查區地震觀測資料成果 3-15	52
3-56: 調查區 0 至 20 公里地震分布水平剖面圖 3-15	;3
3-57:調查區地震規模-頻率圖	;4
3-58:b-value 線性評估	;4
3-59:調查區 0-10 公里淺層地震 b-value 分區圖	5
3-60:棋盤格測試恢復區域之速度成像	6
3-61: 調查區地震分布與推估線型構造 3-15	;7
3-62: 淺層(<15 km)地震分布與推估線型構造	8
3-63: 深層(>15 km)地震分布與推估線型構造	58
3-64: 地震震源三維空間分布 3-15	;9
3-65:各項岩石力學參數之變異係數比較	55
3-66:裂隙資料及初步離散裂隙網路參數集建置成果(單層)	6
3-67:裂隙資料及初步離散裂隙網路參數集建置成果(分層)	57
3-68:分層建置離散裂隙網路之裂隙分布概況	58
4-1: 重要核種篩選流程	7
4-2: SNFD 2021 報告參考案例地質單元的平面空間分布圖	8
4-3: SNFD 2021 報告參考案例地質單元空間分布圖與垂直示意圖 4-1	8
4-4:地下設施規劃配置圖4-1	9
4-5:處置隧道內處置孔配置圖 4-1	9
4-6: 氣候演化與海平面變化情形 4-2	20
	3-37: 鎖探日粮表(範例)

啚	4-7:200 km_radius 之累計地震發生率與規模關係	4-20
圖	4-8: AS_K01 之累計地震發生率與規模關係	4-21
圖	4-9: DS_K01 之累計地震發生率與規模關係	4-21
圖	4-10:安全評估中放射性核種傳輸模式所需輸入參數	4-22
圖	4-11:廢棄物罐概觀	4-36
圖	4-12:銅殼及鑄鐵內襯尺寸	4-36
圖	4-13:廢棄物罐各元件模型及其網格劃設	4-37
圖	4-14:緩衝材料1環至2環侵蝕模型	4-37
圖	4-15:緩衝材料1環侵蝕後至100年分析結果	4-38
圖	4-16:緩衝材料2環侵蝕後至23年分析結果	4-38
圖	4-17:緩衝材料1環侵蝕後鑄鐵內襯應力值	4-39
圖	4-18:緩衝材料2環侵蝕後鑄鐵內襯應力值	4-39
圖	4-19:緩衝材料受圓柱形侵蝕模型	4-40
圖	4-20:緩衝材料侵蝕半徑 0.134m 分析結果	4-40
圖	4-21:緩衝材料侵蝕半徑 0.067m 分析結果	4-41
圖	4-22:緩衝材料侵蝕半徑 0.034m 分析結果	4-41
圖	4-23:侵蝕半徑 0.134m、0.067m 及 0.034m 之鑄鐵內襯應力值	4-42
圖	4-24:分析緩衝材料質量下降後力學演化之模型	4-42
圖	4-25:緩衝材料質量下降後之鑄鐵內襯 von Mises 應力分析圖	4-42
圖	5-1:安全論證方法流程圖	5-7
圖	5-2: 鑽探工作人員劑量評估結果	5-8
圖	5-3:使用污染井水對居住人員之劑量評估結果	5-8
圖	5-4:使用污染土壤農耕之劑量評估結果	5-9
圖	5-5:近場核種傳輸模式的區塊相關資訊示意圖	5-17
圖	5-6:不同釋出路徑下功能測度值的累積分布函數	5-17
圖	5-7:近場放射性核種釋出所造成生物圈曝露群體的平均年有效劑量	5-18
圖	5-8:不同近場釋出路徑所造成生物圈曝露群體的平均年有效劑量	5-18
圖	5-9:放射性核種自不同路徑釋出時的相對釋出峰值	5-19
圖	5-10:抬升作用與侵蝕作用對處置設施長期安全性的影響	5-26
圖	5-11: 地殼抬升/沉降與侵蝕/沉積之相互作用關係圖	5-26
圖	5-12: 地表、風化層底部及處置設施平均標高	5-27
圖	5-13:各階段之廢棄物罐數量與時間關係圖	5-27
圖	5-14:日本抬升/侵蝕案例概念模型	5-28
圖	5-15:日本抬升/侵蝕3階段總計量曲線	5-28
圖	5-16: 第2階段、第3階段總計量曲線	5-29
圖	5-17:地下水遷移情節劑量結果	5-29
圖	5-18:設施正上方建設和居住情節劑量結果	5-30
圖	5-19:化學侵蝕作用示意圖	5-36

圖	5-20	:	化學侵蝕概念模型	5-37
圖	5-21	:	化學侵蝕試驗模具設計示意圖	5-37
圖	5-22	:	化學侵蝕試驗設備配置圖	5-38
圖	5-23	:	試體飽和過程之擠出距離影像紀錄	5-38
圖	5-24	:	試體飽和過程之擠出距離隨時間之變化	5-39
圖	5-25	:	試體於不同水流率之擴張距離影像紀錄	5-39
圖	5-26	:	試體於不同水流率之擴張距離隨時間之變化	5-40
圖	5-27	:	膠體累積流失量隨時間變化	5-40
圖	5-28	:	不同水流率膠體累積流失量與試驗時間之關係	5-41

表目錄

表	1-1:「用過核子燃料最終處置計畫書」各階段名稱、時程及目標一覽表1-3
表	3-1:110年度海域火花放電反射震測探勘各測線施測參數。
表	3-2:110年度海域火花放電反射震射探勘測線基本資料
表	3-3:火花放電反射震測各測線資料之垂直解析度分析
表	3-4:110年度海域(長支距)多頻道反射震測探勘各測線施測參數
表	3-5:110年度海域(長支距)多頻道反射震測探勘測線基本資料
表	3-6:海上磁力儀規格表
表	3-7:海上重力儀規格表
表	3-8:陸上重力儀規格表
表	3-9:地質鑽探常用之方法與其適用之地質條件
表	3-10:地質鑽探之取樣情形與地層變化之確認方式
表	3-11: HQ-3 岩心管規格
表	3-12:水文地質鑽井計價標準(HQ-3 鋼纜式取樣法全程取樣)
表	3-13:公路旁露頭之裂隙調查結果3-119
表	3-14: 露頭三維模型之裂隙分析結果3-119
表	3-15:臺灣本島結晶岩案例之應力場數據
表	3-16:調查區鄰近之 GPS 連續觀測站一覽表
表	3-17:經時序分析所得各方向分量速度場比較表
表	3-18:經時序分析所得各方向分量速度場比較表(含本期新站)
表	3-19:調查區鄰近之 GPS 原參考框架與相對於 S01R 之速度場比較表 3-139
表	3-20:GPS 連續站雜訊分析成果表
表	3-21:最終處置計畫 GPS 速度場成果一覽表(相對 S01R) 3-141
表	3-22: OBS 布放經緯度及深度資訊表
表	3-23: OBS 回收經緯度及深度資訊表
表	3-24:臺灣本島東部結晶岩之岩石力學試驗參數
表	3-25:臺灣本島東部結晶岩之裂隙試驗參數
表	3-26:區域應力場與岩石變形特性評估模式建置重要參數
表	4-1:我國用過核子燃料預估數量 4-5
表	4-2:廢棄物罐之設計功能及設計需求
表	4-3:廢棄物罐相關設計規格 4-5
表	4-4:廢棄物罐材料規格
表	4-5:緩衝材料設計功能、性質及設計需求
表	4-6: 模擬地下水化學組成物質與含量 4-8
表	4-7:緩衝材料元件規格及參數 4-8
表	4-8:處置隧道相關設計需求4-9
表	4-9:回填材料設計功能、性質及設計需求

表 4-10:回填材料製造及安裝等相關設計需求	. 4-10
表 4-11:回填材料塊體及膨潤土填充料規格	. 4-10
表 4-12:回填材料安裝後之設計參數、設計規格及安裝要求	. 4-10
表 4-13:回填材料安裝後之乾密度(估算)	4-11
表 4-14:處置孔相關設計需求	4-11
表 4-15: 參考案例地質單元參數	4-11
表 4-16:參考案例之 DFN 參數集	. 4-12
表 4-17:參考案例熱學與力學特性	. 4-13
表 4-18:參考案例之水力特性參數	. 4-14
表 4-19:參考案例之地下水組成	. 4-15
表 4-20: 圍阻安全功能、安全功能指標、安全功能指標標準彙整	. 4-15
表 4-21:遲滯安全功能、安全功能指標、安全功能指標標準彙整	. 4-16
表 4-22:鑄鐵材料參數	. 4-31
表 4-23:銅殼材料參數	. 4-31
表 4-24:方管材料參數(型號:S355J2H)	. 4-32
表 4-25:封蓋材料參數(型號:S355J2G3)	. 4-32
表 4-26:緩衝材料(膨潤土)密度 2,050 kgm3之材料參數	. 4-32
表 4-27:緩衝材料(膨潤土)密度 2,000 kgm3之材料參數	. 4-33
表 4-28:緩衝材料(膨潤土)1,950 kgm3之材料參數	. 4-33
表 4-29:緩衝材料(膨潤土)的孔隙參數	. 4-33
表 4-30:緩衝材料(膨潤土)的孔隙比與回脹壓力	. 4-34
表 4-31:廢棄物罐 1/2 處不同緩衝材料密度之鑄鐵應力分析結果	. 4-34
表 4-32:廢棄物罐 1/4 處不同緩衝材料密度之鑄鐵應力分析結果	. 4-35
表 5-1:放射性核種盤存量與其瞬時及腐蝕釋出分率	. 5-14
表 5-2:各放射性核種的生物圈劑量轉換因子	. 5-15
表 5-3:不同路徑下各功能測度值的平均值	. 5-15
表 5-4:近場核種傳輸模式區塊的幾何	. 5-16
表 5-5: 試體於不同條件下之最終擴張距離	. 5-36
表 5-6:不同水流率條件下單位時間下之膠體流失率	. 5-36

1. 概述

用過核子燃料屬我國法規定義之高放射性廢棄物,需要審慎尋找 共同認可的處置方式,以確保可以長期摒除在可能影響人類目前生活 環境之外。參考國際發展現況,並依據「高放射性廢棄物最終處置及 其設施安全管理規則」之要求,用過核子燃料之最終處置須採深層地 質處置,並且以天然障壁及工程障壁之多重障壁概念進行設計。

台電公司依照我國「放射性物料管理法」與「放射性物料管理法施行細則」之相關規定,於2004年提出「用過核子燃料最終處置計畫書」經主管機關核定後據以實施,並且每4年檢討修正最終處置計畫。 近期已核定2018年修訂版,處置計畫的期程自2005年至2055年共有 5個階段,其執行內容如下:

(1) 潛在處置母岩特性調查與評估階段(2005年~2017年);

- (2) 候選場址評選與核定階段(2018年~2028年);
- (3) 場址詳細調查與試驗階段(2029年~2038年);
- (4) 處置場設計與安全分析評估階段(2039年~2044年)
- (5) 處置場建造階段(2045年~2055年)。

台電公司於2017年底向主管機關提報「我國用過核子燃料最終 處置技術可行性評估報告」(SNFD 2017報告,台電公司,2017),並 經國際同儕審查後,確認達成主管機關要求釐清包括國內具有合適之 處置母岩、最終處置設施工程設計及長期安全評估與技術能力等3項 議題的目標。結論包括:「(1)確認我國具有結晶岩深層地質處置之可 行性;(2)排除西南部泥岩的處置可行性;及(3)需持續關注中生代基 盤岩的研究以探討其處置可行性。」

目前屬處置計畫第二階段「候選場址評選與核定」,期程自 2018 年開始至 2028 年止,為期 11 年。現階段主要目標與重要里程碑如表 1-1 所示。為符合處置計畫推動需求,除進行候選場址建議調查區域 之調查與評估工作,建立候選場址功能與安全評估技術外,亦參考國 際處置發展趨勢與原能會的要求,學習國際經驗研究安全論證的建置 方法,台電公司將據以落實於工作計畫逐步推動,並將成果呈現於成

果報告中,以順遂候選場址評選與核定作業及逐步朝初步安全論證方 向執行。

表 1-1:「用過核子燃料最終處置計畫書」各階段名稱、時程及目標一覽表

階段名稱	爭 潛在處置母岩特性調查與評估		處置母岩特性調查與評估 候選場址評選與核定		場址詳細調查與試驗		處置場設計與安全分析評估		處置場建造	
預定時程		2005年~2017年		2018年~2028年		2029年~2038年		2039年~2044年		2045年~2055年
主要目標	(1)	完成我國潛在處置母岩特 性調查與評估	(1)	完成候選場址調查區域的調 查與評估並建議優先詳細調	(1)	完成場址可行性研究報 告(FR)	(1)	完成申請建造許可所需的 安全分析報告(SAR)	(1)	完成處置場之建造與運轉 試驗
	(2)	建立潛在處置母岩功能/ 安全評估技術	(2)	查之場址 建立候選場址功能/安全評估 技術	(2)	完成場址環境影響說明 書(EIS)	(2)	完成建築執照申請程序並 取得建照	(2)	完成運轉執照之申請與取 得
重要里程*	(1)	2009年提出我國用過核子 燃料最終處置初步技術可 行性評估報告	(1)	2025年完成處置場概念設計	(1)	2033年完成場址地表地 質調查	(1)	2043年完成安全分析報告 (SAR)	(1)	2052年完成接收暫存設施 之建造及取得運轉執照
	(2)	2016年建立潛在處置母岩 功能/安全評估技術	(2)	2026年完成候選場址之特性 調查與評估	(2)	2033年開始進行試驗直 井與地下試驗設施規劃 與建造	(2)	2043年完成地下技術驗證 工作	(2)	2054年完成處置場建造與 交通運輸設施
	(3)	2017年提出我國用過核子 燃料最終處置技術可行性 評估報告	(3)	2027年完成候選場址功能/安 全評估技術之建立	(3)	2036年完成處置場初步 設計	(3)	2043年完成處置場及接收 暫存設施細部設計與交通 運輸規劃設計	(3)	2055年完成處置場運轉執 照之申請與取得
	(4)	2017年提出候選場址的建 議調查區域	(4)	2028年底提出優先詳細調查 的場址	(4) (5)	2037年完成場址可行性 研究報告(FR) 2038年完成場址環境影 鄉前明書(FIS)	(4)	2044年完成建築執照申請 程序並取得建照		

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

2. 計畫目的

2.1 計畫目標

依據用過核子燃料最終處置計畫,第二階段「候選場址評選與核 定」目標的重要里程碑為:

- (1) 2025 年完成處置場概念設計
- (2) 2026年完成候選場址之特性調查與評估
- (3) 2027 年完成候選場址功能/安全評估技術之建立
- (4) 2028 年底提出優先詳細調查的場址

並且為符合原能會要求(105 年度放射性廢棄物最終處置計畫執 行成果報告審查會議紀錄),提報更新技術報告。在沒有特定場址之 情形下,將善用國外發展經驗及聚焦國內研發資源,持續精進「區域 特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」等 3 項核心技術, 作為第二階段工作推動之 3 大主軸。

台電公司為實質推動前述任務,以及符合第二階段目標「完成候 選場址調查區域的調查與評估並建議優先詳細調查之場址」、「建立 候選場址功能/安全評估技術」,將基於 SNFD 2017 報告的研究能量 與技術可行性下,強化各項技術連結與國內人才、技術資源的跨領域 整合,持續參採國際處置先進技術,執行 3 大核心技術精進。依原能 會要求於 2021 年提出「初步安全論證報告」,以及 2025 年提出「安 全論證報告」。並且,應辦理同儕審查,確保台電公司相關處置技術 可達最佳現有技術且符合國際水準,以提升處置設施的安全性,確保 公眾安全及環境品質。

2.2 工作規劃

綜上所述,110 年度工作規劃包括(1)場址合適性調查與調查技術:持續關注中生代基盤岩的研究以探討其處置可行性、進行現地調查試驗程序與整備,作為區域調查期之前置作業、依規劃建立現地應 力量測之標準作業程序,進行相關地質構造及大地應力調查、持續記 錄 GPS 連續觀測站之數據,瞭解臺灣本島花崗岩體區域特性並發展 相關解析技術以及蒐集既有文獻與實驗結果,藉由各項數據歸納與分 析,建置小尺度岩石力學評估模式;(2)工程設計方面:進行初步安全 論證報告相關章節發展成果之撰寫、進行處置設施母岩特性研究區域 之地震動特性模型不確定性評估以及進行廢棄物罐受緩衝材料侵蝕 後之圍壓評估與侵蝕過程之剪力位移分析評估;(3)安全評估方面:進 行初步安全論證報告相關章節發展成果之撰寫、建立 Q3 路徑的近場 核種傳輸模式與 Q1 至 Q3 放射性核種釋出率分析測試、參考日本 H12 報告建立抬升/侵蝕評估方法技術建立與案例驗證以及建置澎潤土受 裂隙水流侵蝕試驗並取得相關參數。

除前述「區域特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」 3項核心技術,本階段工作亦執行資料庫建置與發展,參考 IAEA 安 全標準中 SSR-5與 SSG-23對放射性廢棄物最終處置品質要求,以數 位化方式管理相關數據及品保資料,確保資料可檢視性及可回溯性, 並透過帳號權限管理,確保資料之完整性。

綜整 110 年度工作成果,分述如第3章至第6章。

3. 場址合適性調查與調查技術

3.1 臺灣海域中生代基盤岩特性調查

基於「SNFD 2017 報告結論:(3)需持續關注中生代基盤岩的研究 以探討其處置可行性」。就過去文獻指出,中生代基盤岩非屬單一岩 類,可能包括基性-中性噴出岩、半深成岩及經輕度變質之沉積岩等, 除花嶼具地表露頭可於地表觀察外,僅中油公司已發表之鑽井資料可 供比對。為進一步了解臺灣海域及其鄰近島嶼中生代基盤岩之岩石特 性與其深度分布,及評估其處置合適性與可行性,本計畫規劃以文獻 調查方式蒐集既有文獻資料及彙整,並建立初步的地質概念模式,以 評估其岩性與深度分布範圍,作為探討處置可行性之基礎。

本項工作預計執行期程5年,109年已完成文獻整理與調查並建 立初步地質概念模式,自110年起逐年進行地球物理調查作業,逐步 強化與精進該地質概念模式,作為後續安全評估分析及處置可行性評 估之基礎。

本項工作調查區域多位於澎湖群島的西南側水域,水深多淺於 100 公尺,地體構造以澎湖地台(Penghu Platform, PHP)為主體,西北 緣鄰近澎湖盆地(Penghu Basin, PHB),以及東南側為台南盆地(Tainan Basin, TNB)的北緣。根據前人研究指出,屬於基盤高區的澎湖地台, 其海平面下數百公尺深的岩層定年結果多形成於中生代(圖 3-1)(Lin et al., 2003),且於花嶼出露晚白堊紀到早第三紀的安山岩質凝灰岩為 代表(圖 3-2)(顏一勤、李寄嵎, 2017;林殿順, 201)。希望藉由多項 反射震測資料,了解澎湖地台及花嶼周邊環境淺部地層及構造特徵。

目前規劃執行之地球物理調查方法包括震波測勘、重力及磁力測 勘等方法,由於不同地球物理探勘方法其探測解析度、探測深度、探 測對象等條件皆有所差異,探勘工作完成後必須綜合各項探勘成果才 能對待釐清議題產出完整的地質環境解釋。而為達成上述目標,則需 要考量各項地球物理探勘的探勘特性,規劃不同空間解析度的測線分 布及需要的測線總長度,因此現階段的預期成果皆以不同地球物理探

勘項目所需之測線長度為主,並輔以資料解析及成果判釋進行區域地 質環境的評估工作,作為建構區域地質模型之基礎。

3.1.1 底質剖面探勘

3.1.1.1 作業方式

底質剖面儀(Sub-bottom Profiler)是利用聲波穿透海床,因為海床 下沉積物特性(介質)差異,或沉積層的層面與層面間岩性的不連續, 而產生之聲波阻抗(Acoustic Impedance)變化,使得聲波以反射的情況 被儀器的接受器接收,進而轉譯成不同的沉積層面。底質剖面測勘系 統則進一步利用訊號調頻(FM)的方式,加上訊號自對比(Autocorrelation)的方法,來提高儀器對淺部地層探測的穿透度與解析度, 並可以量化分析聲波通過海底沉積物時的衰減情況,求得更清晰的沉 積地層剖面影像。

本項工作係租用國內小型船舶或研究船於目標海域範圍進行資 料收集作業,採用之底質剖面儀依租用船舶不同而有作業方式區別, 若使用底拖式底質剖面儀,需以對地2至3節之船速進行底質剖面資 料收集作業;若使用船載式底質剖面儀,則以固定對地5至6節船 速,或配合其他協同施測儀器規範之船速限制進行底質聲納剖面資料 收集作業,利用收集的資料描繪調查區海床淺部沉積物之特性及海床 的構造,配合其他地球物理調查結果評估構造於淺部地層之分布情形, 並判斷構造是否切穿海床及其活動特性。

底拖式底質剖面採用美國 Edgetech 公司發展的 Discover-SBP 軟 體來進行資料的收集、即時展示與記錄。因底質剖面影像具高解析度, 因此資料容量相對龐大,為避免資料記錄時系統不穩定或是人為疏忽, 造成資料全部的遺失,在作業時的資料記錄上,以 600 Mb(Megabyte) 為單一檔案的最大儲存上限。當單一檔案容量達到此限制時,收集系 統會啟動自動換檔的功能。如此,可於資料收集當下,適時檢視資料 的完整度,如有必要,可以即時檢修系統與進行資料補測,避免資料 遺失的憾事發生。 資料解析方面,底拖式底質剖面資料利用國內學術單位開發之 Acoustic FileAnalyser(AFA)、Data Amending Tool(DAT)與 Terrain-Based Towed-Sonar Layback(TBTSL)等軟體進行資料合併、高度計修 正、定位修正與回置等步驟;船載式底質剖面資料由於在資料收集階 段已經將資料坐標修正至船隻 GNSS 位置,因此並不需要上述修正, 可直接由複波線分析法步驟開始進行資料處理作業,而後續流程則與 底拖式底質剖面資料處理流程一致,並搭配商業軟體 SonarWiz.Map 來進行資料的後處理與成果的展示,資料處理流程如圖 3-3,流程說 明如下:

(1) 資料合併(Joint Data)

為了能對單一測線進行完整的處理,第一步是將屬於同一測線的個檔案合併成一個檔。由於在收集過程中為了避免資料因系統或人為因素而損失,每儲存 600MB 會換一個新檔,因此每條測線的檔案大小皆會超過 4GB 以上,即使是 Edgetech 自有的軟體也無法處理,故利用團隊自行開發的軟體 AFA 來 進行合併動作。

(2) 海床選取(Bottom Track)

合併完成的單一測線資料再使用自有開發軟體 TBTSL 進行 回置(Layback)時,有時底拖式底質剖面資料所記錄的地形與 壓力計與本團隊整編的高解析海底地形在比對上會出現局部 區域地形無法對應的情況。這是由於底拖式底質剖面儀拖曳 時,儀器離海床高度超出實體高度計作業的範圍,造成軟體 在讀取底拖式底質剖面的資料時無法得到正確的海床位置所 致。本團隊利用底質剖面的影像選取海床位置的方式,來修 正實際作業時資料所記錄高度計數值錯誤的情況。透過 SonarWiz.Map 軟體(底拖式底質剖面處理軟體)將修正高度計 資料轉為數值資訊*.CSV 檔案。

(3) 高度計修正(Altitude Correct Cdd Into JSF) 為修正上述錯誤值,藉由前一步驟所得到之修正高度計數值 資訊(*.CSV),使用自有開發軟體 Data-Amending 來進行高 度計的修正。先讀取原始底拖式底質剖面的高度計資料,再 將修正後高度計資料數值檔資訊寫回.jsf檔案中。

(4) 回置(Layback)

本團隊利用自行開發的地形比對的軟體 TBTSL 來進行底拖 式底質剖面儀的回置定位工作,此部分是使用 TBTSL 讀取 資料,將其中的壓力計(即為拖魚距海面高度)與高度計(即為 拖魚距海床高度)資料相加,得到一個海底地形剖面圖,並利 用此剖面來與高解析海底地形剖面比對,找出兩者在地形上 的特徵點,並將兩者相連結來使得底拖式底質剖面儀的資料 得到正確的位置,最後將此修訂的位置資訊重新寫回.jsf 檔 中,完成底拖式底質剖面儀的探勘資料的定位工作。其中,回 置作業包含沿測線(Along-track)及側向偏移(Lateral Offset)回 置。

(5) 複波線分析(Complex Seismic Trace Analysis)

利用複波線分析概念,設計聲源訊號的最小相位波形與絕對 振幅值進行迴旋運算,即可逆推出底質剖面的實際反射訊號 及波形,之後進行頻譜分析及濾波來壓制雜訊,大幅提高資 料的訊噪比。

- (6) 資料輸入(Import Data)
 將做過上述步驟的資料輸入 Edgetech 公司所發展的 Discover SBP 來進行展示。
- (7) 調整資料振幅增益參數(Gain Adjust) 此步驟利用 Edgetech 公司所發展的 Discover-SBP 軟體來對 資料訊號振幅強弱進行調整,以達到最佳的影像強度呈現, 此數值可以由自行決定。
- (8) 調整資料時變振幅增益參數(Time Variation Gain, TVG) 由於聲波在穿透地層時會因擴散與吸收效應逐漸損失能量, 故反射訊號強度與穿透深度成反比關系,為了使深部構造能 夠清楚的顯示出來,TVG的參數修正是不可或缺的。TVG的 作法是利用一補償函數,將深部的弱訊號增強或減弱,以達

到較完整且清晰的影像。可選擇先對影像進行上一步驟參數 的應用,再依據影像品質來決定是否進做 TVG 參數的應用。 此參數也是依處理者自行決定。

(9) 底質剖面地形誤差平移

回置後之底質剖面可計算與海底地形的相減深度平均值,透 過 SonarWiz.Map 軟體的 Offset Sensor Depth(OSD)選項填入 平均深度差異值後,最後轉成 SEGY 檔並將平均差異值代入 底質剖面,使底質剖面之深度能夠更加吻合海底地形。底拖 式底質剖面儀的地形深度與實際水深有差異作業深度越淺, 差異越小;反之,差異越大。在 1,500 m 區域,與實際地形深 度約差 20 至 30 m。底質剖面深度修正後以達到與海底地形 深度一致性。

(10) 剖面圖形化輸出

在 TBTSL 回置的步驟中,不只是進行側掃聲納資料的重定 位,並利用補 Ping 的動作,使得底質剖面的 trace 等間距化, 對於 trace 密度相當高的底質剖面而言,無疑進行了各 ping 間 的速度修正,即達到自動化的回置步驟。最後,同樣是利用 Edgetech 公司所發展的 Discover-SBP 來進行資料圖形化的輸 出。

(11)影像調整

藉由繪圖軟體(Photoshop)消除上界的訊號(Top Mute),主要包括儀器位置與水體影像。

3.1.1.2 成果說明

依 110 年度工作計畫之規劃,110 年度預計施作測線長度為 50 公里,並完成前述測線之資料解析與成果判釋,相關成果說明如下:

調查區域的底質剖面圖及剖面解釋如圖 3-4 至圖 3-7 所示,由 於底質剖面的聲源相較於火花放電或長支距震測的震源有較高的頻率,因此在海床以下數十公尺的範圍內可以得到相當清晰的地層剖面 影像,雖然無法像前述2種其他調查方法可以得到大型的深部構造, 但是卻可以清楚探知淺層地質以及海床表面的實際情形,例如近海床 的不連續面等垂直構造、近代沉積環境變化所產生的不整合面、以及 此區域常見的沙波分布等,因此我們在底質剖面的影像解釋方面也以 上述的淺層或海床特徵進行判讀。

參考蒐集取得之多音東水深資料結果,調查海域之海床上存在許 多沙波堆積的特徵,沙波的形成主要反應當地沉積環境具有一定強度 的底流存在,且底流的強度足以將海床沉積物進行搬運之後再重新堆 積,進而形成波浪狀的形貌。另一方面,由於底質剖面具有較高解析 度的特性,我們可以清楚判斷沿測線的海床目前是否為穩定堆積或是 正處於侵蝕作用進行中的不同型態。若為前者,海床及近海床的層序 會顯示平行堆積且連續性佳的層序;後者則是會顯示崎嶇的海床形貌 以及在海床處被截切(Truncation)的層序等;而介於堆積/侵蝕兩者之 間的則是搬運環境,典型的搬運環境即為前文所提到廣泛存在於調查 區域內的沙波特徵。前述沙波特徵且在底質剖面的影像上可以清楚判 釋,且亦可看到沙波底部與淺部地層的交界面(圖 3-4 至圖 3-7 黃色 虛線)。

透過高解析的底質剖面資料,我們可辨識接近海床或直接出露於 海床的斷層或裂隙等垂直向不連續面構造,依目前取得之影像判釋, 不連續面長度短且未向下延伸,多數被其上方現生的沉積物或沙波所 覆蓋,且未切穿上方所堆積的沉積物,應可視為近期內沒有活動的構 造,意味目前調查之區域屬相對穩定之構造區域,惟目前調查資料仍 屬片段,仍續透過與後續年度之調查成果比對,方可做出進一步判釋 結果。

3.1.2 火花放電反射震测

震測探勘是利用人工震源來產生震波,震波經由海水傳入地底且 穿透至地下地層,當震波穿透至各地層介面亦會反射並返回地表再利 用水中受波器接收來自地底的反射訊號,最後傳回船上並記錄下來, 藉由處理從地底下傳回的一系列震波資料能得到一個連續的地下剖 面影像。依據不同頻率的聲源可以得到不同解析度與深度的地層剖面。 一般而言,頻率越低的震源訊號穿透深度越佳,傳統震測採用之 頻率約在100Hz以下,可以取得較深部的地層構造資訊,因其波長較 長,層間解析度相對較差;火花放電震源是透過電極在海水內放電, 經由放出的高壓電流通過海水介質,使電極周圍的海水快速蒸發膨脹 並產生近似空氣槍震源之震波,其頻率可控制於 0.1 至1 kHz 之間, 對淺層構造產出較高解析度之震測資料。

3.1.2.1 作業方式

本次震測調查作業與資料收集流程如圖 3-8,各流程說明如下:

(1) 參數設定依據不同地質構造環境的需求來選擇所需的震源鎗類型,並

設定施測參數,包括使用能量、炸點間距、資料記錄長度。 (2) 甲板安裝

將所選用的火花放電震源鎗裝置於浮桶上並固定在甲板的 A 架上。接收浮纜則是通常固定於船舷邊。

(3) 系統安裝

震源鎗、浮桶與接收浮纜於甲板上固定好後,將訊號線從甲板布置到儀器室,並將L5主機與資料收集主機等系統主機安裝於儀器室。

(4) 海上作業

海上作業開始前有 2 步驟,首先,根據預先規劃之測線及施 測參數輸入至 EIVA 或 DELPH 震測資料收集系統進行同步運 作,以同時驅動 L5 主機與接收浮纜訊號接收時間。將震測系 統皆設定完畢後,再至甲板上進行火花放電震測系統海上施 放作業。當船行駛至預先設定與規劃測線起始點的距離即施 放震源與接收浮纜,施放順序通常為接收浮纜先施放入海, 避免與震源鎗的拖曳繩及拖曳纜線出現交纏的狀況,而後再 透過 A 架與絞盤施放浮桶以及火花放電系統震源鎗,並將拖 曳繩固定於甲板。系統主機與儀器施放皆完成後,在進入規 劃之測線前會先進行接收浮纜的雜訊測試以及震源鎗試炸, 以確保資料的品質達到本案所需。

(5) 資料收集

以上步驟確認資料品質達到本案所需,開始正式進入規劃之 測線進行震測資料收集。當船持續行駛至規劃之測線上將會 自動釋放震源並同時開始記錄震測資料,並依規劃之炸測間 距距離進行炸測。到達規劃測線終點後,EIVA系統即可停止 炸測,並上收震源與接收浮纜,航向下一條測線。

依前述流程執行火花放電反射震測作業,蒐集取得之震測資料處理流程如圖 3-9,測勘時各測線之施測參數如,資料處理軟體使用 Paradigm公司發展之商業軟體Echos,處理流程說明如下:

(1) 震測資料輸入

本案使用之兩套 DELPH 及 Geometrics 記錄系統之紀錄格式 分別為 SEGY 及 SEGD,將其輸入震測資料處理軟體, Paradigm Echos 後,即開始進行資料品質及錯誤資料移除步驟。

(2) 幾何定位

將航行施測參數包括炸測間距、頻道間距等資訊,輸入至 Echos 軟體,建立沿著測線所產生的同中點(Common Mid Point, CMP)在空間中的實際位置,便可將同炸點集合轉為同 中點集合。此步驟是多頻道火花放電反射震測資料重要的步 驟之一,相較於單頻道收集的資料可以增加空間解析度。

(3) 頻率濾波

此步驟與標準震測資料處理流程相仿,訊號在接收時,震源 與受波器都會產生和接收到不是真實地層訊號的雜訊,所以 可以設計不同的濾波器去除雜訊,提高訊號雜訊比。頻率濾 波是指設計一個頻率範圍,切掉低頻雜訊與高頻雜訊,保留 中間頻率的訊號。在設計帶通濾波時會先做頻譜分析 (Spectral Analysis)找出主頻訊號的分布情形,以決定濾波頻率範圍。

(4) 真實振幅還原

此步驟與標準震測資料處理流程相仿,收集回來的資料振幅 會受到球面擴散(Spherical Divergence)或非彈性衰滅 (Inelastic Attenuation)效應。球面擴散是指波傳遞時的波前近 似點震源擴散,因此能量隨著距離而自然衰減。非彈性衰減 是指波在同一均質地層內會有非彈性吸收震波的情形。真實 振幅還原的目的就是要修正此2種效應以還原真實振幅。

(5) 海浪效應修正

與傳統震測不同的是,火花放電反射震測的接收器浮纜較輕 且敏感度及採樣頻率較高,因此會將浮纜隨海面擺動的效應 記錄到一連串的反射訊號上。在剖面上即可觀察到海床反射 到時會受海浪效應影響而產生誤差。為了修正此誤差,若是 單頻道震測剖面則可使用簡單的移動平均來修正海床到時。 若為多頻道震測剖面,則是將同中點幾何以水速 1500 m/s 做 垂直隔距時差修正後,使用 Echos 中的殘餘靜態修正模組透 過移動平均值與交對比的方式,來給定每個同中點的到時。 使每一個同中點集合的海床反射都修正至同一到時,此步驟 對重合後的影像呈現相當重要。

(6) 震源特徵解迴旋

火花放電震源與傳統空氣鎗震源不同的是其每次震源爆炸所 產生的波形都不一樣,使得海床反射面形成多層的樣貌。因 此假定直達波的第一層反射波形為震源爆炸的主要脈衝 (Primary Pulse)或是透過水聽器記錄每一次震源爆炸的主要 脈衝波形,針對每一條波線進行自身的震源波形解迴旋,消 除震源爆炸時所產生的週期性雜訊,如氣泡效應、鬼波等,可 將多層的海床反射修正成一層。

(7) 複反射消除

在淺水域執行反射震測, 複反射消除對成果的展示是一重大 關鍵。火花放電反射震測與傳統長支距震測最大的不同是因 為接收浮纜長度不夠, 無法提供足夠的速度資訊來消除複反 射。因此,本案預計使用 SRME(Surface Related Multiple Estimation)以波線追跡法的原理和水速 1,500 m/s 來模擬海床 複反射出現的位置並加以消除。

(8) 重合

經以上處理步驟之後,通過同中點的訊號描線可以互相疊加 成為一條描線,使真實的信號得以加強,無規則的雜訊將被 消除或減弱,因而得到品質較好的剖面。

(9) 時間域移位

移位目的是修正傾斜層面的斜向入射和繞射(Diffraction)情形。本案預計使用 Paradigm Echos™的 F-K migration 方法進行移位處理,先將時間域資料轉到頻率域資料,在頻率域空間中依照特定的頻率進行移位修正。此處理方法需要給地層速度值,火花放電反射震測因為接收浮纜支距不夠長,僅能使用水速 1,500 m/s 做移位。

3.1.2.2 成果說明

110 年度完成的火花放電反射震測作業測線數共 11 條,單一測線長度最長超過 80 公里,因施測時天候與海況均佳,故完成之測線 累積長度約 621 公里,超出原規劃工作數量(原規劃 110 年度調查測線長 400 公里),亦超前整體調查進度。參考 109 年度文獻調查成果, 測線規劃橫跨澎湖地台至台南盆地西北緣,可藉此觀察比較相鄰地體 構造之間淺部地層的差異,並以與區域構造線垂直為原則,故測線走 向皆為西北-東南向,以觀察到較正確的構造位態,較易觀察區域構 造的分布型態,各測線施測參數如表 3-1,測線之基本資料如表 3-2。

資料品質的方面,本次調查作業各測線垂直向的解析能力,以水速(1,500 m/s)作為震波傳遞的波速,代入公式(波速=頻率×波長)計算 震波波長,並以 1/4 波長為本次調查資料最低可辨識垂直解析度,110

年度火花放電反射震測調查各測線之最低垂直向解析度均小於 1.2 公 尺,資料品質極佳,各測線頻譜詳如表 3-3。

火花放電反射震測資料的判讀方式與傳統反射震測法相近,均基 於震測地層學的觀念,依地層反射之接觸關係(如頂覆、下覆、上覆或 侵蝕截切等),將主要層序界面界定出來,其反映了過去地體構造活 動或沉積環境的改變,這些改變會造成沉積物堆疊的方式、物理性質、 顆粒大小、岩性有所變化;而層序界面上下的地層其震測相特徵也可 能有所不同。而斷層的判斷標準為:1.剖面中層序有明顯錯動、2.錯 動的線形有明顯延伸至截穿海床或基盤面。其餘錯動不明顯或延伸長 度較短的線形特徵,為求謹慎則暫未進行構造上的解釋,待後續年度 資料更為完整後再進一步分析釐清。

110年度火花放電反射震測資料的地層與構造的判釋,各震測剖面及其解釋剖面詳如圖 3-10 至圖 3-20,震測線初步判讀結果說明如下:

各剖面中可觀察到 3 個主要強反射面(圖中層面一、層面二與層 面三),其反射連續性佳,廣布於目前所蒐集的測線區域。層面一的反 射特徵較崎嶇,下方地層多向上被此反射面侵蝕截切,顯示為一侵蝕 面的特徵,與下方地層多為交角不整合的關係。此侵蝕面深度多淺於 200 公尺,向東南經過義竹斷層後,深度才急遽加深。層面一上方的 地層反射特徵多為水道切填(Channel Cut and Fill)的侵蝕及沉積特徵, 抑或受到波浪作用形成沙波相互交疊的型態,在多數區域的海床上可 觀察到大量的現生沙波。層面一以上的地層多向上被海床侵蝕截切, 顯示本區域至今仍以侵蝕為主要營力。

層面二與層面三為兩個連續性佳且多為互相平行的層面,此2個 層面的傾向與走向與大區域的趨勢相符,整體來說,在調查區域內基 盤及其以上的地層之分布,主要向西北及東南傾斜,可能因西北及東 南各有一個陷落盆地所致;而地層分布在花嶼附近則相對抬升達到最 高點。此外,層面二與層面三之間的地層也相對的連續性較佳。層面 三下方偶然可觀察到微弱的基盤反射訊號,由於火花放電法的穿透力 有限,訊號至基盤附近即多已衰減,透過與傳統反射震測資料進行比

對,仍可大致推測基盤可能的位置與形貌(如圖 3-10 至圖 3-20 中黃線)。

在構造上,根據目前所蒐集到的測線,在調查區域南部可觀察到 一系列正斷層的分布(圖 3-12、圖 3-13),顯示本區域可能主要受控 於張裂作用或重力沉降作用等構造機制。而這些正斷層的分布在側向 上有顯著的變化,位於澎湖群島西方的澎湖地台區域,斷層構造數量 相對較少,且多未切穿海床或層面一的侵蝕面,顯示可能為年代較古 老的構造,近期的構造活動較不活躍;然而部分測線向東南延伸到靠 近義竹斷層的區域,還未進入台南盆地之前,連同基盤及其上方的地 層多被密集且斷距大的正斷層所截切,並多出露於海床上,顯示為近 期活躍的斷層構造;再往南,通過義竹斷層進入台南盆地,地層急遽 加深,斷層的密度及錯距亦大幅增加,在義竹斷層的海床上可觀察到 有明顯地形落差,推測近期仍有活動事件,不過現階段由於火花放電 反射震測的資料多落於調查區域西側,因此上述構造解釋還需要未來 更多資料加入進行分析,以得到更全面的區域淺層構造解釋。

3.1.3 長支距多頻道反射震測探勘

海域多頻道反射震測探勘原理係布放空氣鎗(Air Gun)的人工震 源(Seismic Source),及由水聽器(Hydrophone)所組成的受波器浮纜 (Streamer)。操作時利用高壓空氣壓縮機將 2,000 或 3,000 psi 的高壓 空氣灌注至空氣鎗中,以等時間或者等距離方式瞬間釋放高壓空氣, 當高壓空氣釋放至海水中時,將會壓縮海水而形成氣泡,此會在水中 瞬間製造壓力差,而形成聲波往海床及其以下的地層傳播,而當該波 動接觸至地層介面時,將會形成反射波傳回受波器浮纜,浮纜中的水 聽器可偵測反射波所導致的壓力差。經過解算過後,則可得地層的反 射訊號波形,透過一系列資料處理步驟後,可獲得測線沿線的地下構 造資訊。為了提升反射震測震源的地層穿透深度、地層解析力及資料 品質,通常會將多支不同容積的高壓空氣鎗組合成空氣鎗陣列(Air Gun Array),並依據探勘標的之目標深度,布放不同長度之受波器浮 纜,以取得較好之解析資料。

3.1.3.1 作業方式

震測測線主要由幾個區塊所組成,分別為供航行至炸點及儀器測 試的 Approaching(RUN-IN)階段,資料穩定收集的 ON-LINE 階段,及 遠離航線的 RUN-OUT 階段等三階段,如圖 3-21 所示。船航行至預 定開炸的第1個炸點前約3海浬處,航速降至約3節,開始布放受波 器浮纜及震源。儀器布放完成後,航速提升至5節,開始進行背景雜 訊資料收集,收集約5分鐘後,再進行空氣鎗暖啟動(Soft Start),以 及進行空氣鎗波形調校,此步驟將會按1組平行陣列式空氣鎗為最小 單位進行,每組調校完成後,則是4組平行陣列一起開炸調校,調校 完成後航行至測線 Approaching 區塊,開始按規劃每37.5m 震響空氣 鎗炸測並進行資料收集。當船航行至「上線(On Line)」,區塊的第1 個炸點,通常此炸點震源及受波器浮纜均已拉直,因此定義此炸點為 第一良好炸點(First Good Shot, FGSP),此後按測線規劃持續炸測至 最後一個炸點(Last Good Shot, FGSP)後開離航線,並往下一航線行進, 至此完成單一航線資料收集,開資料收集流程將重複進行,直至所有 測線收集完畢為止。

海域多頻道反射震測的資料處理流程如圖 3-22,流程說明如下: (1) 震測資料輸入

船上所收集之震測資料格式通常為 SEG-D,將其輸入震測資 料處理軟體,Paradigm Echos 或 Landmark ProMAX 中,視情 況將資料取樣率由一般的 2 ms(Mili-seconds)轉為 4 ms(Muliseconds),開始進行資料品質及錯誤資料移除步驟:

a. 炸點集合剖面展示(Shot-gather Profile Display)

SEG-D 資料輸入系統後,在資料處理之前,為了檢視原始 資料品質,所選擇的展示方式,給予初步的濾波和自動增 益控制得到震測剖面影像,可以幫助判斷資料來源的完整 性,將品質不好的資料適當的刪除。通常某一接受器壞掉, 於不同炸點集合皆可以看到此接收器訊號較其他接收器 變差,甚至看不到海床反射訊號,若濾波效果仍不好,可 刪除此接收器的訊號。

b. 近支距剖面展示(Near-offset Profile Display)

與炸點集合剖面展示同為資料處理之前原始資料品質檢 視的步驟,選擇近支距的波道展示近支距炸點剖面(Nearoffset Trace Profile),給予初步的濾波和自動增益控制得 到震測剖面影像,可以幫助判斷資料來源的完整性,將品 質不好的資料適當的刪除。

- (2) 濾波與振幅修正(Filter and Amplitude Correction)
 - 濾波器(Filter)的設計是為了提高信號/雜訊比(Signal/noise ratio),降低雜訊、提高真實訊號的解析度。濾波氣的設計須 實際視現場資料收集的頻率範圍而定,一般來說,深部地殼 探測震測使用 3-16-32-64 Hz 帶通濾波範圍較能去除高頻雜 訊。振幅修正又稱為真實振幅還原(True Amplitude Recovery), 也就是將受到球面擴散(Spherical Divergence)或非彈性衰減 (Inelastic Attenuation)效應所導致之振幅衰減現象予以修正, 以期使信號提升而接近真實的振幅大小。球面擴散指的是震 波以近似點震源向四面八方擴散,並且隨著距離而自然衰減。 非彈性衰減代表地層中有非彈性的吸收效應,使振幅逐漸減 小。
- (3) 幾何定義(Geometry Setting)

利用航行定位資料與震測系統參數、受波器以及炸點位置等, 建立幾何資訊,將同炸點集合轉換為同中點(CMP Number)在 空間上的實際位置。此步驟為多頻道反射震測震測的資料處 理最重要的處理步驟之一,如幾何定義不正確,將影響之後 包括速度分析、垂直隔距時差修正及移位修正等步驟的處理 結果。經幾何定義後,將記錄有相同位置的描線集合為同中 點集合,而此同中點集合剖面將會反映更真實的海底形貌。 此外,在水平地層中,同中點集合剖面裡同一地層的訊號呈 拋物線分布,有助於之後速度分析和垂直隔距時差修正步驟 之進行。

(4) 去除鬼波(De-ghos)

海域震測資料的鬼波,實際上是因為震源與接受器浮纜為了 不受海表面風、波、流的影響一般會沉入一段深度(由 5m 至 25 m 不等),但如此就會使得震源所產生之震波除直接抵達水 聽器(Hydrophone)外,有機會先抵達水面再被水聽器接收到, 此會使得所收集到的波形除震源所產生的正向脈衝(Pulse), 其後一小段時間延遲後會同時出現一段逆向脈衝。本研究利 用 Paradigm Echos 之去除鬼波工具,輸入不同震源與接收器 深度以模擬鬼波並找出最佳深度值以去除。

(5) 預測解迴旋(Predictive Deconvolution)

震測資料中常會受到氣泡效應(Bubble Effect)、水波震盪效應 (Reverberation)、複反射(Multiple)等週期性雜訊的影響,而掩 蓋了真實的反射訊號。解迴旋的主要目的,就是要去除這些 隨時間週期性出現的雜訊。使用預測解迴旋的方法,亦即預 測將會發生的雜訊週期的變化以及其波形,來減弱、消除這 些訊號。首先要執行自對比(Autocorrelation)測試,求出雜訊 的週期性信號參數,一共有 2 個參數:解迴旋運算子長度 (Decon Operator Length, DOL)、解迴旋濾波器預測距離 (Operator Predictive Distance, OPD)。其中,解迴旋運算子長 度指的是雜訊 1 週期的長度,而解迴旋濾波器預測距離則是 雜波信號從零秒開始第 1 個信號之半週期距離。接下來再利 用預測解迴旋的技術來消除、壓低複反射的能量,保留下真 實的震波信號。

(6) 速度分析(Velocity Analysis)

速度分析步驟為獲得地層物理性質之重要步驟,作法使用震 測資料所提供的速度分析工具,將數個同中點集合資料進行 重新的集合化以製造超集合(Super Gather),藉以增加資料支 距,而後進行相似譜(Semblance Spectrum)計算後,同時參考 傳統固定速度分析法(Constant Velocity Analysis),之速度進 行速度挑選。該處速度分析結果將與下一步驟去除複反射往 返數次,直到地層複反射得到最高程度壓制後,輸出最後速 度值。

(7) 去除複反射(Multiple Suppression)

一般而言,海上震測資料由於接收器位於近海水面位置,往 往會產生海床複反射。另外,震源訊號亦會在地層間震盪產 生層間複反射,這些複反射能量與主要反射能量相仿,往往 對於震測地層解釋造成困擾,因此須移除之。本研究使用一 般消除海床複反射之 Radon Transform、Surface-related multiple attenuation(SRMA)與 K-L transform 之雞尾酒式綜合 方法以消除複反射。

- (8) 垂直隔距時差修正(Normal Moveout Correction) 由於震源到受波器之間的支距隨著不同的受波器而改變,使 各受波器接收到同一地層的信號到達時間不同,垂直隔距時 差修正就是要將各受波器接收的同一反射面信號到達走時, 都修正成垂直入射的來回走時,以消除時間差。如同震源與 各受波器在同一位置上(同中點位置),震波垂直向下入射,經 地層反射再垂直被同一點的受波器接收。垂直隔距時差修正 需要速度分析的資訊,速度分析需要足夠的受波器數量、重 合數和支距長度才能分析,但本研究的受波器重合數與支距 長度不夠,所以用隨深度線性增加的速度函數來套用修正。
- (9) 重合(Stack)

經過垂直隔距時差修正後,通過同中點的各接收器之訊號描線可以互相疊加成為一條描線,使真實的信號得以加強,無 規則的雜訊將被消除或減弱,因而得到品質較好的剖面。將 同中點的數條描線(Traces)的信號疊加即稱為重合。

(10) 時間域移位(Time Migration)

重合後的剖面,仍然會有因單一反射點或斷層所造成的繞射、 傾斜面位置變淺的現象。本研究將速度分析中所獲得最佳重 合速度先進行移為速度處理後,產生移位速度並使用 Kirchoff migration 法進行時間域移位處理,以產生時間域移位剖面, 瞭解整體測線之海床至地層的變化。

(11) 時深轉換(Time-Depth Conversion)

經過時間域移位後的資料雖可清楚辨識地下構造的形貌,但 由於地層深度依然使用走時為單位,其地層與構造形貌與真 實狀況仍有一段差距。因此,本案將試地層速度品質及狀況 進行時間與深度域轉換,將時間域剖面轉換為真實的深度, 以利於其他地球物理探勘資料進行整合分析。

3.1.3.2 成果說明

110 年度海域(長支距)多頻道反射震測探勘作業由國內研究船執 行,調查作業以固定船速 5 節進行探勘作業,過程中值班人員會固定 15-30 分鐘進行 1 次人工記錄,確保探勘設備運作正常。因作業時會 依據現況需求來調整所需的震源鎗陣列組合,並設定施測參數,包括 使用能量、炸點間距、資料記錄長度等,因此每條測線的施測參數雖 然大致相同但仍然會按照現場狀況進行調整,本次作業各測線施測參 數詳如表 3-4; 震測線基本資訊如表 3-5。

110 年度調查測線主要位在澎湖群島的西南方海域,測線總數 7 條(含垂直檢核線 1 條),測線長度達 255.9 公里,海域(長支距)多頻 道反射震測資料解釋的方法及構造判釋標準與火花放電反射震測法 相同,各剖面及其解釋剖面詳圖 3-23 至圖 3-29,初步構造判釋及說 明如下:

由各震測剖面中,皆可觀察到幾條連續性佳、廣布於研究區域的 主要強反射面,其中1條(圖 3-23 至圖 3-29 中黃線)最明顯且反射強 度最高,其深度約 300 至 700 公尺之間,反射面以上之層序反射訊號 連續性佳、地層較平整、較少受到構造截切;而反射面下方的地層與 其接觸關係多為侵蝕截切或頂覆,地層也較雜亂或受到擾動而旋轉傾 斜。推測該反射面的可能為基盤與上方沉積物的交界,反射面之下是 受到壓密作用較為堅硬的基盤,其上則為沉積地層。 回顧臺灣新生代地質環境受控於兩個主要地質事件,分別為古近 紀的南海張裂,以及晚期中新世發生的弧陸碰撞(Lin et al., 2003)。南 海張裂時期,於臺灣海峽發育一系列的張裂盆地,包含鄰近測區的澎 湖盆地;後因於早期漸新世南中國海海洋地殼的生成而結束。其後於 外大陸邊緣再次發生張裂,使得台南盆地陷落,義竹斷層便成為台南 盆地與澎湖地台(或稱北港高區)之間的邊界斷層(圖 3-1)。到了晚中 新世時期,菲律賓板塊與歐亞板塊斜向碰撞造山,形成臺灣造山帶及 其西側前陸盆地(Teng, 1990; Lin et al, 2003; Teng and Lin, 2004)。 上述的地質事件形成 3 個主要區域性不整合面,將臺灣新生代地層劃 分為同張裂、後分離(被動大陸邊緣)以及前陸盆地層序(Lin et al., 2003),上述區域不整合面分別為:

(1) 張裂初始不整合面(Rift-Onset Unconformity, ROU)

分布於各張裂盆地下方,年代約為晚期白堊紀到早期古近紀 的地層缺失,代表大陸地殼初始張裂的時間,張裂不整合面 的下方為基盤岩,上方為沉積層。

(2) 分離不整合面(Breakup Unconformity, BU)

廣布於歐亞板塊,年代約為漸新世時期(37至30百萬年前), 表示大陸地殼停止張裂、海洋地殼開始形成並擴張。因本案 的調查區域主要位於澎湖地台構造高區,漸新統以下的新生 代地層多已遭侵蝕殆盡,根據澎湖群島(花嶼除外)陸海域地質 多為中新世地層直接覆蓋於中生代基盤岩石上(林殿順,2019), 因此 BU 的位置多與 ROU 重合,推測圖 3-23 至圖 3-29 的 黃線可能為此反射面,亦即代表了基盤岩頂部的位置。然而 在澎湖盆地鄰近地區的張裂盆地下方,BU 和 ROU 才可以分 別開來,不過由於目前本調查區域的張裂初始不整合面相關 解釋乃根據前人於周圍區域之研究推估而得,於調查區域內 目前尚未有直接的年代控制,因此為求謹慎本案將 ROU 暫歸 類於「區域性不整合面」,此不整合面定義為:有觀察到較明 顯的不整合現象的邊界即將之標示出來的反射面。

(3) 前陸基底不整合面(Basal Foreland Unconformity, BFU)

顯示晚期中新世造山運動的起始,因受臺灣造山帶荷重致使 臺灣海峽地殼撓曲,形成前陸盆地,在盆地西側形成前凸起 (Foreland Forebulge, Lin and Watts, 2002)。研究區域的西側及 大部分區域皆位於前凸起的位置,亦即構造高區,沉積環境 可能以侵蝕作用為主或沒有沉積,因此本案的區域不容易觀 察到此不整合面的存在,並且也造成區域內多有上新統至更 新統的地層缺失。

此外,依據各剖面資料處理的速度分析時,觀察到有 4 個主要層 面(如圖 3-23 至圖 3-29 中層面一、層面二、層面三、基盤),其反射 連續性佳,廣布全區,層間速度(Interval Velocity)在同一層上大多一 致,層面一為 1,800 公尺/秒、層面二為 2,000 公尺/秒、層面三為 2,200 公尺/秒、基盤為 2,600 公尺/秒(圖 3-30);層面一的反射特徵較崎嶇, 下方地層多向上被此反射面侵蝕截切,顯示為一侵蝕面的特徵,與下 方地層多為交角不整合的關係。此侵蝕面深度約 200 公尺上下,向東 南經過義竹斷層後,深度才急遽加深。層面二與層面三為兩個連續性 佳且多為互相平行的層面,此兩個層面的傾向與走向與大區域的趨勢 相符,整體來說,調查區域內基盤及其以上的地層之分布,主要向西 北及東南傾斜,可能因西北及東南各有 1 個陷落盆地所致;而地層分 布在花嶼附近則相對抬升達到最高點。

3.1.4 海域重力與磁力探勘

3.1.4.1 作業方式

(1) 磁力測勘

本次磁力測勘作業採用加拿大 Marine Magnetics 公司開發的 Sea Spy 磁力儀,規格表列如表 3-6,磁力資料蒐集的過程中, 為避免船體鋼鐵組件影響到磁力資料的收集,布放之磁力儀 與船尾相距 2 倍船身長度,如此方能減低船體本身對磁力儀 的影響。在航次進行時,同步以紙本每 15 分鐘記錄一筆磁力 資料及 GNSS 資料,以防磁力值或是 GNSS 資料因故沒有記 錄,讓資料後續處理有參考依據;另一目的為記錄當時的作 業現況,比如有其他船隻經過或者是船隻轉彎等等,愈詳細 記錄當時的資料收集狀況,有助於後續的資料處理。 本次調查使用的磁力儀其所蒐集的資料為全磁場(Total Field), 其數值的大小受觀測點緯度的影響,在兩極地區最靠近地球 磁極其值最大,接近赤道地區則減小,在臺灣周邊海域的測 量值約介於 42,000 至 46,000 nT 之間。資料處理的初步動作 就是要先剔除嚴重錯誤的資料點,在此本案使用張逸中博士 所提供的程式(Chang et al., 2011),可以將資料做 2D 平面的 展示,找出資料的最大與最小值,並將錯誤的點先剔除,然後 才作進一步的修正。

實際測得的磁力觀測值是由不同的因素貢獻的綜合效果,其 中主要包含:

- a. 觀測時地球內部的主磁場(Main Field)。
- b. 觀測地點的地質構造

因觀測地點的地質構造不同,內部所含的鐵磁性物質多寡 不同受地磁場影響,產生不同的感應磁場(Induced Field) 如火成岩區與沉積岩區的不同或岩脈與斷層等構造的存 在;而海洋地殼的磁力值,主要是在其形成後溫度降至居 禮溫度(Curie Point Temperature)以下所記錄的熱殘磁 (Remanent Field)。

c. 磁測當時的日變化效應(Diurnal Variation)

由於太陽輻射會使得地球的電離層物質游離,而這種現象 會影響地球磁場的變化,這個變化在每天的不同時間會有 不同的變化,一般在當地時間的(Local Time)清晨(6時) 磁力值最低,之後逐漸上升,於中午12時升至最高後又 逐步下降。為了使磁力資料可以直接反應地下構造,必須 對磁力資料作修正以消除與構造無關的磁力值,修正過後 的磁力值即為磁力異常(Magnetic Anomaly)。

調查取得之磁力觀測資料,資料處理流程說明如下:
a. IGRF 修正(IGRF Reduction)

國際地球磁場參考值 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)是將收集觀測到的地磁場資料後,利用位 場理論(Potential Theory)建立的地球磁場參考值。所以, 在收集磁力資料後會做 IGRF 修正,扣除因地球內部主磁 場所造成的磁力貢獻量,本案收集資料以最新發表的 IGRF12 作為修正模型。

b. 日變化修正(Diurnal Variation Reduction)

通常利用一連續觀測站的觀測記錄找出長時間變化的趨勢,再將此變化趨勢扣除。在海上磁力施測,無法架設長期紀錄站,但可利用陸上的固定連續觀測站取得日變化資料,以離施測地點最近的地磁固定站為基準站,並且觀察 是否在施測期間有發生磁爆事件造成磁力觀測值巨大擺 盪變化。

c. 儀器位置修正

由於船上 GNSS 衛星接收儀的位置與磁力儀感測器真正 的位置有一段距離差,因此,將 GNSS 的位置修正到感測 器真正的位置,獲取磁力儀正確的座標位置後,再進行以 上的修正。

d. 資料整編

在完成各航次資料蒐集之後,為了整編所有磁力資料,使 用交叉點誤差分析的技術(Cross-over Error, XOE, Hsu, 1995,圖 3-32),將不同航次的磁力資料整編在一起。在 不同時間不同航次的磁力測量可能會有不同的參考基準 面,此時各航線經過同一位置的值可能有差異,即使是同 一個航次,因為施測狀況及時間不同,在同一個點也會有 所變化。當 2 條測線交叉通過同一個交叉點(Cross-over Point),此時如果只考慮地質條件所測得的觀測值應該相 同;但由於觀測儀器的誤差、基準面的誤差、船隻航行的 定位準確度、潮汐變化等都會使得此 2 測量值不見得相 同而有差值。交叉點誤差分析在於估計各航次的相對準確性,調整各航次的基準面,將此誤差值降到最低。

e. 成果判釋

磁力資料經過上述過程的資料處理後,使用繪圖軟體製成 磁力異常圖。在磁力異常圖上根據磁力異常振幅不連續面, 判釋構造的存在。為了瞭解研究區域深部磁性基盤的特性, 可使用增強解析訊號法(Eanced Analytic Signal, Hsu et al., 1996)解析訊號技術最大優點,在於其結果不受磁源因不 同磁化方向的影響,可找出磁力基盤有變化的區域,如斷 層、岩脈等。另外,使用新的尤拉解迴旋法(Euler Deconvolution, Hsu, 2002)結合解析訊號法來進行逆推地 下構造位置。此方法主要好處是可經由磁力資料逆推得到 地下構造的位置、深度及構造指標(N)。此方法也可應用 在三維資料的計算上。藉由此種方法分析所收集的磁力資 料,可得到可能構造的空間分布及其幾何形貌。亦可透過 頻譜分析法(Spectrum Analysis, Tanaka et al., 1999)推算 磁性基盤深度與其厚度。

(2) 重力測勘

本次重力測勘作業採用用 Microg LaCoste 生產的 Air-Sea System II Gravity Meter,做為海域重力觀測使用;陸上重力 儀與陸上重力基準站重力值的聯結則採用 SCITREX 生產的 CG-6 Autograv Survey Gravity Meter 重力儀進行(圖 3-33)。 在每個航次出發前,皆必須量測船後甲板與水面高度差與碼 頭重力參考基準站與水面高度差,施測目的主要為量測船上 重力儀至碼頭基準測站的高程差,以提供高度修正使用,也 為重力修正值提供一個參考量。在航次進行的同時,在航次 進行時,同步以紙本每 15 分鐘記錄 1 筆重力資料及 GNSS 資 料,並記錄船的動態(如轉彎、加、滅速等影響加速度變化之 行為),讓資料後續處理有參考依據。

調查取得之重力觀測資料,資料處理流程說明如下:

a. 重力記錄聯結陸上基準站:

由於進行海上重力觀測並非使用絕對重力儀紀錄,故必須 有一參考重力基準值。因此,在航次出發前必須從距離最 近的已知重力基準站引點至船載重力儀附近岸邊碼頭測 量,取得重力差異,以便在海上重力蒐集後進行資料處理。 重力基準參考站以內政部建構之絕對重力點與一等重力 點為優先考量。

b. 高度修正

停泊港內的船隻受潮汐影響、以及重力儀位置與岸邊碼頭間的高度差,此高程的變化會影響重力讀值,因此必須作高度修正。在每個航次出發前都實施潮位量測,量測的項目包括岸邊(碼頭)到水面的高度差 (h_1) ,以及船甲板到水面的高度差 (h_2) ,由於船甲板到重力儀擺放位置的距離是固定的 (h_3) ,因此可以換算成重力儀到岸邊的高度差 ΔH

 $\Delta H = h_1 - h_2 + h_3$

基本上高程每增加1 m重力測量值會降低約0.3086 mGal,故高度修正為:

 $g_{altitude} = \Delta H \times 0.3086 \ (mGal)$

如此每個航次前的後甲板水深量測數據提供計算出每個 航次的△H,即可得到各航次的高度修正量。

c. 紀錄穩定性

研究船在航線轉彎時,因速度及方向有較劇烈的變化,因 此會對儀器所記錄的重力值產生明顯的影響,由於船轉彎 之向心加速度不易估計,而轉彎以後也需十餘分鐘重力儀 才會慢慢穩定下來。這也就是為什麼作重力觀測時,船速 和航向必須經常保持一致,故凡有船向偏移時,該段資料 都必須審慎檢視。一般在船行轉彎處時重力會偏離正常紀 錄值,因此,處理資料時會捨棄此時資料,保留船行轉彎 前與轉彎後穩定的正常紀錄值內的資料。

d. 船速修正(Eötvös Correction) 船速的變化會產生加速度因此會對重力值觀測會產生影響,這項變化記錄在重力資料裡的 EOTVOS CORR 項, 亦即船速修正:

 $g_{Eotvos} = 7.503 \times V \times \cos \varphi \times \sin \alpha + 0.004154 \times V^2$

其中, V= 船速, [knots]; $\varphi = 緯度; \alpha = 船向$ 。

e. 緯度修正

地球因自轉而略呈扁平狀,受此影響地球赤道與兩極地球 半徑不相等,另外地球自轉時赤道地區與極區所受離心力 也不同。此兩種影響造成在赤道與兩極的重力異常值相差 達 5185.87 mGal,所以在重力資料處理時必須做緯度修 正。因觀測緯度差異所造成的重力效應可以用全球重力參 考場來表示,全球重力參考場(1980 Reference Gravity Formula)為:

 $\gamma_{1980} = 9780327(1 + 0.005302 \sin^2 \varphi + 0.0000058 \sin^2 2\varphi)$

其中, φ=緯度。

f. 資料整編

不同時間不同航次的重力測量可能會有不同的參考基準 面,為了將不同航次所收集的資料整編在一起,必須使用 交叉點誤差(Corss-over Error, XOE)分析的技術(Hsu, 1995) 估計各航線經過同一位置的可能誤差。當兩條測線交叉通 過同一個交叉點(Corss-over Point),此時如果只考慮地質 條件所測得的觀測值應該相同。但由於觀測儀器的誤差、 基準面的誤差、船隻航行的定位準確度、潮汐變化等都會 使得此 2 測量值不見得相同而有差值。交叉點誤差分析 則在於估計各航次的相對準確性,調整各航次的基準面, 將此誤差值降至最低。

g. 成果判釋

重力資料經過上述過程的資料處理後,使用繪圖軟體製成 重力異常圖。如此得到的海上重力異常值亦即自由空間重 力異常值(Free-Air Gravity Anomaly),因為觀測點就在海 平面,不須再作自由空間修正。而利用自由空間異常值與 水深資料,可計算獲得布蓋重力異常(Bouguer Gravity Anomaly)。可藉由布蓋重力異常判斷海床下可能因存在 密度差異與幾何不同的構造。此外,若能配合震測資料獲 得的地下構造初始樣貌,將其當成控制參數,可進行重力 模擬,其結果更為可信,並能與震測結果相驗證。

3.1.4.2 成果說明

(1) 磁力測勘

本項海上磁力測勘作業,預計自 110 年起於4年內完成測線 長度 1,000 公里之測勘,原規劃於 110 年度完成 250 公里長 之測線,因該年度船期配合與天候條件均佳,實際完成測線 長度為 497 公里,較原規劃多出近一倍,亦超前全項工作進 度,工作成果說明如下:

資料收集完成後,先剃除嚴重錯誤的資料點(資料顯示測量值 應位於 41,100-46,000 nT 之間),之後利用國際地球磁場參考 值 IGR 進行 IGRF 修正,完成 IGRF 修正後再利用事先架設 之磁力背景基站所收集之磁力日變化背景值進行日變化修正, 並進行儀器位置修正,即可得到沿測線分布的磁力異常值資 訊。當 2 條測線交叉通過同一個交叉點,此時如果只考慮地

3-25

質條件所測得的觀測值應該相同。但由於觀測儀器的誤差、 基準面的誤差、船隻航行的定位準確度、潮汐變化等都會使 得此2測量值不見得相同而有差值。交叉點誤差分析則在於 估計各測線的相對準確性,調整各測線的基準值,將此誤差 值降至最低。完成前述各項修正後,110年度磁力測勘之測線 磁力異常分布(圖 3-35)。

(2) 重力測勘

本項海上重力測勘作業,預計自 110 年起於4年內完成測線 長度 1,000 公里之測勘,原規劃於 110 年度完成 250 公里長 之測線,因該年度船期配合與天候條件均佳,實際完成測線 長度為 502 公里,較原規劃多出一倍,亦超前全項工作進度, 工作成果說明如下:

重力探勘航次出航前,會由陸上工作人員先行進行陸上重力 基準站引點的作業,重力基準站位於高雄小港區的一等水準 點G117,於碼頭邊固定點進行重力測量,每次測量時間為一 分鐘,連續量測5次,取誤差最小的3點其平均值。

重力資料收集後,在資料處理第一步,為剔除明顯錯誤資料 點。接下來須進行一系列資料修正,包括高度修正、船速與船 向修正、緯度修正、潮汐修正、交叉點誤差分析等。停泊港內 的船隻受潮汐、以及重力儀位置與岸邊碼頭間的高度差,會 影響重力讀值,因此在航次出發前和入港後都實施潮位量測, 量測的項目包括岸邊(碼頭)到水面的高度差,以及船甲板到水 面的高度差。將以上量測資訊代入高度修正公式即可得到各 航次的高度修正量;而在潮汐修正部份,採用 NAO99.b 全球 潮汐預測模式來計算測點處的潮位高度,以航次出發前的水 位紀錄與潮高求取。

在完成上述資料修正之後,採用交叉點誤差分析技術整編所 有測線的資料,將不同測線資料整編在一起。完成 110 年度 重力測勘之測線重力異常分布(圖 3-36)。

3-26

因目前僅完成調查區域西側之海上重、磁力測勘作業,後續(111 年度)將持續進行測勘作業,並預計可於 111 年度完成全案原規劃 1,000 公里重、磁力測勘作業,並將以全調查區域之測勘結果重新計 算全區域之重、磁力異常分布,並配合其他震測測勘結果,進行區域 構造特性之判釋依據。

測線 編號	頻道數	浮纜型號	近支距 (m)	震源型號	震源 距船 尾(m)	震源 能量 (J)	擊發 間距 (m)	紀錄長度/ 延遲長度 (ms)	船速 (knot)	取樣率 (ms)
Line01	24	MicroEel	61.5	EDL1020	20	2,000	6.25	1,000/0	5	0.25
Line02	24	MicroEel	61.5	EDL1020	20	2,000	6.25	1,000/0	5	0.25
Line03	24	MicroEel	61.5	EDL1020	20	2,000	6.25	1,000/0	5	0.25
Line04	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25
Line05	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25
Line06	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25
Line07	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25
Line08	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25
Line09	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	4.5	0.25
Line10	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25
Line11	24	MicroEel	61.5	ELP1250	20	4,000	9.375	1,400/0	5	0.25

表 3-1:110年度海域火花放電反射震測探勘各測線施測參數。

表 3-2:110年度海域火花放電反射震射探勘測線基本資料

測線名稱	測線位置描述	測線長度	震测剖面圖號
Line01	澎湖群島西方,測線走向西北-東南向	38.1 公里	圖 3-10
Line02	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	37.9 公里	圖 3-11
Line03	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	87.1 公里	圖 3-12
Line04	澎湖群島西方,測線走向西北-東南向	88.2 公里	圖 3-13
Line05	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	61.8 公里	圖 3-14
Line06	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	62.5 公里	圖 3-15
Line07	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	63.9 公里	圖 3-16
Line08	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	61.2 公里	圖 3-17
Line09	澎湖群島西方,測線走向西北-東南向	38.5 公里	圖 3-18
Line10	澎湖群島西方,測線走向西北-東南向	39.7 公里	圖 3-19
Line11	澎湖群島西方,測線走向西北-東南向	42.4 公里	圖 3-20
測線總長		621.3 公里	



表 3-3:火花放電反射震測各測線資料之垂直解析度分析

註:水速以 1,500 m/s 計算。



表 3-3:火花放電反射震測各測線資料之垂直解析度分析(續)

註:水速以 1,500 m/s 計算。

測線 名稱	測線頻譜分析	平均 頻率	波長	垂直向 解析度
Line09		346 Hz	4.3 公尺	1.08 公尺
Line10	Line 10 Spectrum	310 Hz	4.8 公尺	1.20 公尺
Line11	Line11 Spectrum	326 Hz	4.6 公尺	1.15 公尺

表 3-3:火花放電反射震測各測線資料之垂直解析度分析(續)

註:水速以 1,500 m/s 計算。

測線編 號	頻道數	震源配 置	震源總 容積 (in ³)	紀錄 長度 (sec)	取様 頻率 (ms)	炸測 間距 (m)	近支距 (m)	遠支距 (m)	船速 (knot)
Line-01	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5
Line-02	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5
Line-03	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5
Line-04	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5
Line-05	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5
Line-06	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5
Line-07	132	1,240	1,240	10	2	50	200	1,837.5	5

表 3-4:110年度海域(長支距)多頻道反射震測探勘各測線施測參數

表 3-5:110年度海域(長支距)多頻道反射震測探勘測線基本資料

測線名稱	測線位置描述	測線長度	震测剖面圖號
Line-01	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	39.7 公里	圖 3-23
Line-02	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	46.9 公里	圖 3-24
Line-03	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	42.2 公里	圖 3-25
Line-04	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	36.4 公里	圖 3-26
Line-05	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	44.7 公里	圖 3-27
Line-06	澎湖群島西南方,測線走向西北-東南向	30.4 公里	圖 3-28
Line-07	澎湖群島西南方,測線走向東北-西南向	15.6 公里	圖 3-29
測線總長		255.9 公里	

表 3-6:海上磁力儀規格表

儀器樣式	表拖磁力儀	底拖磁力儀
使用模式	拖曳式	拖曳式
最大解析度	0.001 nT	0.001 nT
精確度	0.1 nT	0.1 nT
工作範圍	18,000-120,000 nT	18,000-120,000 nT
取樣範圍	4 Hz-0.1 Hz	4 Hz-0.1 Hz
最大拖曳電纜長度	300 m	
最大拖曳深度		6,000 m

表 3-7:海上重力儀規格表

元件	變量	規格	
	範圍	20,000 毫伽 (mGal) 全球	
傳感器	漂	每月老化3毫伽(mGal)	
	温度設定點	46°至55℃	
	平台前後傾斜	± 22 度	
瑶它儿亚厶	平台橫搖	± 25 度	
禄疋儿十百	平台週期	4 分鐘	
	平台阻尼	臨界值 0.707	
hr 生1 2 休	記錄速率	1 Hz	
控制系统	序列埠	RS-232	
	解析度	0.01 毫伽 (mGal)	
	靜態反復精度	0.05 毫伽 (mGal)	
	動態反復精度	1.0 毫伽 (mGal) 或更好	
系統性能	50,000 mGal 水平加速度	0.25 毫伽 (mGal)	
	100,000 mGal 水平加速度	0.50 毫伽 (mGal)	
	100,000 mGal 垂直加速度	0.25 毫伽 (mGal)	
	海上精度	< 1.00 mGal	
	工作温度	5°至40°C	
	貯存溫度	-10°至50℃	
		平均 240 瓦	
	動力設備(UPS)	最大 450 瓦 80-265	
雜項		VAC, 47-63 Hz	
	R 🕂	71*56*84 cm	
		28*22*33 in	
	香量	儀器:86kg	
		UPS: 30kg	
重力單位	1 Gal = 1 cm/sec ² ;地球表面重力值為 978 到 983 伽		

項目	規格說明
傳感器	使用靜電歸零的熔融石英
解析度	0.1 microGal
標準偏差	< 5 microGal
工作範圍	全球 (未重設可達 8,000 mGal)
殘留漂移	<20 microGal/天
無補償漂移	<200 microGal/天
自動傾斜補償範圍	±200 角秒
自動修正	潮汐,儀器傾斜,溫度,嘈雜樣本濾波器,地震噪聲濾波器,漂移
資料輸出率	使用者選擇,可達10Hz
GNSS 準確度	標準<3m
電池容量	2 X 6.8 Ah (10.8 V) 可充電鋰電智能電池;在 25°C 下全天運行
電量消耗	在 25°C 時 5.2 Watts
工作温度	-40°C 至+45°C;
數位資料輸出	USB 和藍芽
儀器尺寸	21.5 cm (H) x21 cm x 24 cm
儀器重量	5.5 kg (包含電池)

表 3-8:陸上重力儀規格表



圖 3-1:臺灣海域新生代沉積物等厚度圖

資料來源: Lin et al. (2003)。

註: PHP:澎湖地台(Penghu Platform); PHB:澎湖盆地(Penghu Basin); TNB:台 南盆地(Tainan Basin)。圖中,義竹斷層(Yichu Fault)為澎湖地台與台南盆 地之間的邊界斷層。



圖 3-2:花嶼地質圖

資料來源:顏一勤、李寄嵎(2017)。 註:花嶼全島以安山岩質凝灰岩為主,根據陳正宏等(Chen et al., 2010)的鋯石 鈾鉛定年結果顯示該岩體年代為晚白堊紀末期至早期古新世。



圖 3-3:底質剖面儀資料處理流程圖



圖 3-4: 底質剖面及解釋圖(SBP-Line01)





圖 3-5: 底質剖面及解釋圖(SBP-Line02)



圖 3-6: 底質剖面及解釋圖(SBP-Line03)



垂直構造(斷層、裂隙) ———— 不整合面 ———— 沙波底部

圖 3-7:底質剖面及解釋圖(SBP-Line04)



圖 3-8:火花放電反射震測資料收集流程圖



圖 3-9:火花放電反射震測資料處理流程





圖 3-10:火花放電反射震測測線 Line01 震測剖面



圖 3-11:火花放電反射震測測線 Line02 震測剖面



圖 3-12:火花放電反射震測測線 Line03 震测剖面



圖 3-13:火花放電反射震測測線 Line04 震测剖面



圖 3-14:火花放電反射震測測線 Line05 震测剖面



圖 3-15:火花放電反射震測測線 Line06 震测剖面



圖 3-16:火花放電反射震測測線 Line07 震測剖面



圖 3-17:火花放電反射震測測線 Line08 震測剖面



圖 3-18:火花放電反射震測測線 Line09 震测剖面





圖 3-20:火花放電反射震測測線 Line11 震測剖面



圖 3-21:海域長支距多頻道反射震測資料收集策略圖



圖 3-22:海域多頻道反射震測資料處理流程圖



圖 3-23:海域多頻道反射震測測線 Line-01 震測剖面





圖 3-24:海域多頻道反射震測測線 Line-02 震測剖面





圖 3-25:海域多頻道反射震測測線 Line-03 震測剖面

■■ 海床
┏面一(不整合面)
■ 層面二
── 層面三
■■ 複反射
■■ 區域性不整合面
📕 不連續面
📕 水道切填(?)
■■ 基盤


圖 3-26:海域多頻道反射震測測線 Line-04 震測剖面

▶ 海床
 ▶ 層面一(不整合面)
 ▶ 層面二
 ▶ 層面三
 ▶ 複反射
 ■ 區域性不整合面
 ■ 不連續面
 ■ 水道切填(?)
 ■ 基盤



圖 3-27:海域多頻道反射震測測線 Line-05 震測剖面



圖 3-28:海域多頻道反射震測測線 Line-06 震測剖面



圖 3-29:海域多頻道反射震測測線 Line-07 震測剖面



圖 3-30:長支距多頻道反射震測剖面各層面速度分布圖

註:上圖為震測剖面及四個作為速度參考之主要反射層(層面一、層面二、層 面三、基盤);下圖為相同剖面對應之速度分布圖,其餘剖面皆依照相同 標準確認主要地層後進行速度分析處理。



圖 3-31: SeaSpy 表拖磁力儀



圖 3-32:交叉點誤差分析





圖 3-34:高度修正量所需要之重力儀與參考基站高程差示意圖



圖 3-35:110 年度海上磁力測勘作業磁力異常分布



圖 3-36:110 年度海上重力測勘作業重力異常分布

3.2 現地調查試驗程序與整備

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2018年修訂版)」 第7.1.1.6節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第5.6.4節規 劃執行,其目的係參考國外專業機構(如:高放處置專責機構、美國材 料和試驗協會、國際岩石力學協會等)標準及建議方法,與國內現有 現地施作程序及施測結果,建立「現地鑽探及取樣作業」、「現地水 文地質試驗作業」、「現地套鑽法施作與變位量測標準作業」等區域 調查所需之現地調查作業程序,以確保調查資料之可信度與可追溯 性。

3.2.1 現地鑽探及取樣作業

地質鑽探為獲取地質資料中最直接且最被廣泛應用的地質調查 方法,經由地質鑽探所獲得之岩心資料,搭配孔內調查試驗結果可作 為研究人員解析或評估地質環境或條件之重要參考依據。一般而言, 地質鑽探目的可分為2大類:第一類為掌握區域性地質狀況,如驗證 地質模型、地下地層或構造特性探查、地層層序研究及資源探勘等; 另一類鑽探則為瞭解細部或特定範圍內岩層特性(如水文地質與力學 特性等),做為各項孔內試驗調查用與設計建置為長期觀測用之鑽孔 等。

一般均匀地層之地質鑽探,對鑽探者而言為輕而易舉之工作,然 臺灣位於歐亞大陸板塊與太平洋菲律賓海板塊之碰撞交界處,地殼運 動激烈、斷層與地質構造複雜,鑽探過程很容易面臨到困難地質且地 層變異程度高之情況,例如未固結的岩層或砂土層、易遇水膨脹之頁 岩、剪裂帶、破碎帶、斷層帶以及堅硬岩層等,致使鑽探岩心取樣率 不佳,且又因孔壁軟硬程度不一致,造成循環泥漿漏失、大量地下水 湧出及鑽具卡鑽等問題(劉武志,1991)。此外,因未來處置設施預定 設計深度達 500 m 以上,然國內現階段岩層地質鑽探深度多以 100 m 的淺層為主,深層鑽探的案例與技術成熟度相對較低,實務之地質鑽 探進尺深度雖已有多孔超過 1000 公尺,然因地熱開發之鑽探目的為

鍵區段之孔壁方式進行,且通常不會採用全程取樣,此目的與方法和 高放計畫之需求不同,在高放計畫部分,須整孔全程取樣來執行相關 岩石物理特性及力學試驗,且鑽探過程需以清水或薄泥漿方式處理為 主,以確保鑽孔可以提供多次或重複性之孔內調查使用,以獲取完整 且連續之地層特性數據供場址描述模型建置、概念設計與安全評估使 用。因此,面對臺灣地下岩層的高變異性與複雜度及用過核子燃料最 終處置計畫評估需求,本項工作根據不同岩層特性與應用目的建立合 適的淺層與深層鑽探方法選擇標準與施工管理規範。

目前國內外較常用之地質鑽探方法與其適用之地層特性如表 3-9 所示,根據地層條件的差異,大致上可區分為土層鑽探與岩層鑽 探, 土層鑽探的方式包括:水沖鑽(Wash Boring)、螺旋鑽(Auger Drilling)、衝擊鑽鑿法(Percussion Drilling)及旋鑽法(Rotary Drilling) 等,所取之土樣可分為擾動與未擾動土樣,且可透過取樣分析土壤組 成以及各項參數;而岩層鑽探的方法則以衝擊鑽鑿法及旋鑽法為主, 其中旋鑽法又可區分為取岩心鑽探 (Core Drilling)與不取岩心鑽探 (Non-core Drilling)2 種。表 3-10 為 4 種常用之鑽探工法的取樣情形、 適用孔徑與其如何判斷地層變化之方法。根據其適用性與處置計畫需 求,目前應以衝鑽法與旋鑽法為主,其中衝鑽法可適用的鑽探口徑範 圍 最 廣 且 平 均 鑽 鑿 速 率 較 快,一般 可 做 為 長 期 監 測 用 與 現 地 抽 水 試 驗 用之觀測井;而旋鑽法可取得完整的土樣與岩樣,有利後續的樣品物 理特性與力學試驗分析,此外鑽探機具可搭配不同的井架系統而彈性 增加鑽探深度或孔內試驗需求來調整孔徑,故為目前國內最常應用於 裂隙岩層鑽探之工法,此外鑽孔亦可提供進行各項孔內試驗調查及水 樣採集分析,如孔內攝影、地物井測,以及地化、水文地質及水力等 現地試驗。

地質鑽探是處置計畫中各項現地調查、試驗、採樣與觀測工作最 前端也最重要的先導項目,因此對於鑽探程序需建立完整且詳實的流 程及注意要點。目前國內相關各單位並尚未統整一套現地地質鑽探及 取樣作業之標準規範,係因各單位鑽探目的均不相同,故整合及制定 出滿足多項需求目標之規範實屬不易,為此,今(111)年度經濟部中央

地質調查所已委託專業廠商研擬國內通用性之鑽探與取樣規範,後續 應可參考其計畫成果來強化本項工作規劃架構。而本報告所述之作業 規範為中央地調所依照十餘年來之現地實務調查經驗,所擬定之「水 文地質鑽探取樣、試驗及觀測井建置」,此作業規範過去已廣泛運用 於裂隙岩體淺層(深度 100 m)之鑽探作業,並納入全程取樣原則及所 需配合之孔內井測調查項目,目前除全程取樣之範圍未達高放處置場 之預設深度外,其鑽探方法及取樣原則應可滿足高放計畫之需求。而 關於國際規範部分,則可參考 ASTM(2018)。爰此,本項工作盤點國 際對鑽探工法、施做流程、搭配之儀器設備與施工管理程序,彙集國 內現階段於不同地層之鑽探經驗,建立標準化鑽探工作程序,並擬定 其施工管理程序,詳細工作方法如下。

- (1) 蒐集國內外鑽探技術文件與文獻及施工經驗:目前國內除各 工程單位及工程顧問公司於施工前會進行淺層地質鑽探來 瞭解地層概況外,因經濟部中央地質調查所(以下簡稱地調 所) 肩負全國基本地質調查、地質資源調查、地質災害調查與 地質資訊服務之重責大任,遂自民國 87 年起至民國 108 年 9 月已根據各項調查需求,完成47,161孔深淺層不同深度之地 質鑽探工作,範圍涵蓋平原區與山區地下岩層,此外,為能 提供中央與地方各單位辦理國土規劃、復育、保安及監測等 應用所需,已於民國 99 年完成工程探勘資料庫建置,且亦匯 集諸多施工經驗與鑽探成果,針對旋轉取心的地質鑽探技術 提出施工標準。有鑑於處置場址調查除了需藉由水文地質鑽 孔進行各項孔內試驗調查工作外,亦採用各種室內試驗方法 來瞭解岩石之基本物理及力學特性,為能獲取較完整之岩 心,本項工作將以地調所過去多年推動鑽探工作之實務經驗 為基礎,建立標準化的施工程序與其管理重點。以下分別簡 述主要施工程序及岩心管理要點。
 - a. 國內水文地質鑽探方法與岩心取樣技術:目前業界執行地 調所相關計畫多以改良式旋鑽機(KH-2L)搭配 HQ-3 鋼纜 式岩心取樣法(Wireline Coring Method)進行,係利用旋轉

方式帶動 HQ 口徑(96 mm)鑽桿並連同鋼纜式三層岩心管 (Triple-tube Core Barrel,規格如表 3-11 所示)進行鑽鑿。 當鑽進預定取樣深度時,需將鑽機機動軸最上方鑽桿卸 下,由鑽桿管口放入連接鋼索之拋射桿,使拋射桿與鑽桿 底部岩心管內管上端之爪狀矛頭接合,利用捲揚機即可吊 出內管與取樣器,此過程可免除每次取樣重複拆卸鑽桿的 繁瑣動作,進而加快鑽探速度以及減少鑽孔之擾動,同時 孔壁亦會因泥漿水持續迴流而增加其穩定性,並提高岩心 之取樣率。一般而言,岩心取樣時每次提取長度最高以 1 m 為原則(但得視現場地質狀況調整),以達到最高取樣 率。而關於施工管理之標準,地調所係規定每孔如有累計 3 次未達最低取樣率,則需棄孔重鑽,或另鑽相同深度孔 補足;如重鑽 3 次仍未達契約要求,則視同廠商能力不 足,無法履行契約要求,得終止合約。地調所規範之旋鑽 岩心取樣率標準如下:

- (a) 未固結岩泥層取樣率 90%為標準,但不得低於 75%。
- (b) 未固結岩砂層取樣率 85%為標準,但不得低於 70%。
- (c)未固結岩礫石層以旋鑽方式取樣,不得擊碎,取樣率 70%為標準,但不得低於 50%。
- (d) 半固結岩及固結岩取樣率 90%為標準,但不得低於 75%。

而取樣率的高低也與鑽探過程所採用之循環水特性有極高關聯性,理論上鑽探過程中,轉速越快,鑽頭壓力越大, 其鑽進速度也越快,因此孔底內因鑽進所產生的岩屑也越 多,而岩屑會影響鑽頭表面與岩石表面接觸面積減少,使 得鑽進速率減少,因此循環水便成為一個重要的介質,可 以將岩屑排出孔外,同時本身的黏滯性與流速造成的壓力 也可穩定孔壁。一般的循環水材質分為清水、泥漿、皂土 與超泥漿。清水在鑽孔深度 200 m 以上或是完整性較好 之岩盤,其效用良好且成本很低;泥漿由於其比重與岩屑

本身比重相近,因此對於排除岩屑功效不大,但穩定孔壁 效果不錯;而皂土造壁性高,且比重約為1.8,因此對於 特殊的地層是不錯的選擇,但在環境保護上卻也是一大問 題;至於超泥漿其功效無論在比重、穩定孔壁等方面皆優 於皂土,其與皂土比較,具有配方簡單、不須預拌池便能 即拌即用、比重與水相近、於鹽水中不易劣化等特點,且 其易於回收運輸,並可無限次重複使用,亦不會造成環境 行染,在特殊地層或有特定條件的鑽探方法,效果極為良 好。然因處置場址調查之水化學採樣與分析需求,對於處 置計畫中的循環水使用,應盡可能採用清水,除遇到深層 困難地質無法處理情況,方可酌量使用超泥漿,並且需於 完井後搭配長時間抽水洗井,以使水質可具地層代表性。

- b. 不同鑽探取樣率計價標準:地調所針對水文地質鑽鑽探取 樣計價標準建議如表 3-12 所示。
- c. 鑽探取得之岩心,若屬未固結或半固結岩層,則在鑽井現 場儘量維持現地含水狀況,置於全新塑膠岩心箱內(HQ: 每箱放置4m岩心/NQ:每箱放置5m岩心),若有漏失 部分,則以保麗龍填充,並標示漏失位置;但礫石層與固 結岩,全部置於岩心箱。
- d. 在進行岩心拍照前,應以刮刀小心清理岩心表面或切面, 使能清楚呈現岩層之沉積構造、層理、生物痕跡等特徵。 拍照方式以高階數位相機拍攝,並將電子檔存成光碟或隨 身碟。
- e. 每口鑽井岩心需使用同一規格的新品岩心箱與棧板儲放。 岩心需配合施工需求規定,如選擇放置 HQ 尺寸(岩心儲 槽寬約 80 mm),每箱放置 4 m 之塑膠岩心箱來儲放,原 則上不得造成岩心與岩心箱的變形。岩心箱尺寸為 1,075 mm×372 mm×90 mm (誤差各需小於 5%),需儲放於 堆高機專用的高密度聚乙烯(High-Density Polyethylene, HDPE)材質棧板上,棧板尺寸為1,140 mm×1,140 mm×

140 mm (誤差各需小於 5%),棧板動荷重達 1,000 kg、靜 荷重達 3,000 kg 或以上。不同鑽井之岩心箱不得混合堆 置於同一棧板,每一棧板每層放置 3 箱,原則上最多放置 6 層(18 箱)岩心箱。如果同一鑽井岩心箱的多出數超過 3 箱時,即需以另一棧板儲放;如果在 3 箱以內時,則准許 將此多出之岩心箱合併儲放於全鑽孔位置最深的一塊棧 板上。岩心箱與棧板之整理,需使用 3 分棉索,將岩心箱 與棧板牢固綑綁,棉索僅能於側面位置打結,以避免造成 岩心箱表面的不平整。完成後運送至業主指定地點保管, 不得在運送過程中造成岩心與岩心箱的任何損壞。

- f. 岩心紀錄:水文地質鑽探所鑽取之岩心,若屬未固結或半 固結沉積物岩心,可參考地調所「未固結沉積物之分類及 地質鑽探岩心紀錄規範」記錄之;若屬固結岩層岩心,則 依「Geo2010 岩心紀錄規範」(含岩石品質指標(RQD)及裂 隙描述)記錄之。
- (2) 在國際鑽探技術方面,無論在場域(陸上或離岸)、鑽探方式(水 平或垂直)、取樣深度等,均有國內值得借鏡之處。近年來隨 著監測技術的盛行,國際間開始將各式感測計與鑽探設備結 合,例如鑽探參數記錄器(Drilling Parameter Recorder, DPR) 的應用,即可在鑽探過程同時記錄貫入速率(Penetration Rate)、旋轉速度、推力(Thrust Pressure)、扭力、鑽探液體壓 力(Drilling Fluid Pressure)及鑽探液體流進與流出量隨深度的 變化等(Sadkowski et al., 2010),透過這些即時參數可讓工程 師在現場立即掌握地層的特性,如土壤分類或岩層的破碎度 等,對於岩性、透水層或含水層的判斷亦提供了相當重要之 依據。隨著通訊技術與人工智慧的日新月異,部分國際知名 的鑽商,如美國 Halliburton 公司或法國 Schlumberger 公司 等,亦在鑽探技術上發展更高端的加值應用,以提升鑽探的 成本效益,同時滿足更多的工程應用與需求,包含:

- a. 鑽探自動化:利用物理模型及機器學習(Machine Learning)達到鑽進最佳化,透過震動及壓力的監測參數來 自動控制鑽機運作,除了增加岩心的提取效率外,亦大幅 減少鑽進錯誤與鑽孔坍塌的風險。
- b. 定向鑽探:透過可旋控(Rotary Steerable)鑽頭及操作軟體, 搭配渦輪機、孔內感測計及漿液的調整使鑽頭在最短的時間精確地到達鑽探的預定位置,增加鑽進的效率。
- c. 孔內感測計應用:在鑽探過程透過孔內感應計的即時數 據,直接調控鑽孔孔徑、扭力及摩擦力,降低鑽孔的成本 與風險。
- d. 鑽頭、泥漿與添加物的最佳化應用:因地制宜使用最符合 地層環境之鑽頭材料與材質,控制能達到最大鑽進效率的 鑽井泥漿及添加物配比,同時減少漿液對環境的危害。
- e. 隨鑽井測技術:在鑽探過程直接取得各式孔內地球物理訊號,並即時回傳地表進行監測與分析,如電磁(Electrical Magnetic)、電阻、自然加馬、電阻影像、磁振(Magnetic Resonance)、震測等,這些資料在儲油層、地質、地物及 岩石力學探勘與評估均提供相當重要的資訊。
- f. 鑽壓最佳化應用:於鑽探過程監測孔隙或裂隙的壓力,再透過鑽壓管理系統(Managed Pressure Drilling, MPD)來控制孔底壓力,其效益包括增加貫穿速度、減少瞬間湧入或流出之漿液(如地下水)、增加井壁的穩定性、減少套管使用、降低泥壁效應及縮孔風險等。
- (3) 另一方面,根據國外各單位執行高放相關計畫經驗,其深井 鑽探規劃應考量之議題可分為數個項目(Beswick, 2007),茲將 其彙整說明如下:
 - a. 井深與口徑:井孔的規劃應由最底部往地表方向進行,其 中,最深處的口徑可基於需要在井孔內進行探測的儀器尺 寸來決定,包含各儀器適用之最大與最小口徑,以儀器能 正常運行,並提供正確的資料為原則。整體而言,影響口

徑的因素有(a)地球物理井測儀器尺寸、(b)有線井測施作 儀器尺寸、(c)水文地質井測系統(封塞、探頭、線材等)、 (d)現地應力量測儀器尺寸、(e)示蹤劑試驗需求、(f)岩心 取樣尺寸、(g)地下水採樣需求、(h)地下水壓監測系統、 (i)井孔封存、(j)各項設備於井孔內之可用性等。

- b. 地質條件:場址特徵調查可能在一個或多個地質條件有高度變化的環境中進行,應基於既有的調查成果,把各種可能的地質條件納入考量,推估預期會遭遇的困難地質條件、其所在深度以及可能的解決方法等。
- c. 井孔穩定性:井孔的規劃設計需將所有潛在影響井孔穩定 性的狀況均考慮進去,例如不穩定地層的坍塌、特定黏土 材料遇水的水合作用、應力釋放導致的崩落等。
- d. 套管施作:鑽井過程中,套管施作與否受控於(a)地層的穩定性與不穩定地層材料崩落至井孔內的風險、(b)受壓流體的出現與否,例如受壓含水層或氣體等、(c)流體是否從孔壁發生滲流、(d)是否通過不允許被汙染的含水層等。套管的設計必須能承受上述不利因子所造成的地層壓力或液壓等,同時符合鑽探作業能持續進行的需求。一旦鑽井施作的方法選定後,遭遇不同困難地層所對應的套管設計方案也應先行備妥,以便即時因應各種突發狀況。
- e. 風險控管:鑽探過程中必然存在固有的風險,當進行大口徑之深井鑽探作業時,風險控管的重要性更加顯著,相關作業最主要的風險來源包含(a)地面與井下設備故障、(b)受壓流體的湧入、(c)漏失循環(Lost Circulation),例如遭遇高孔隙率之地層、(d)封塞等設備受阻於井孔內、(e)井測設備受阻於井孔內或纜繩斷裂、(f)差異吸附(Differential Sticking),例如井孔內液壓高於高孔隙率地層之孔隙壓力、(g)鑽探施作人員的經驗不足、(h)其他因地質條件所造成非預期狀況等。
- (4) 建立鑽探過程的標準紀錄文件

紀錄資訊需包含鑽探日報表(如:計畫名稱、場址地點、承包 商、鑽探領班及助手、每日施做進度、地質單元與描述、開工 前後之地下水位深度、迴水率、提取率、取樣深度、標準貫入 試驗(Standard Penetration Test, SPT)、岩盤滲漏試驗(Lugeon Test)、鑽機及引擎規格、岩心管規格及長度、鑽頭規格等)及 困難地質處理對策說明紀錄檔。其中標準貫入試驗均需依照 規範(ASTM, 1999)要求施做。此外,紀錄檔內容亦需符合台 電公司相關工安規定之要求。依據上述需求,初步規劃日報 表如圖 3-37,岩盤滲漏試驗紀錄與計算表如圖 3-38。

鑽探方法		沖洗法 (Wash Boring)	螺旋鑽 (Auger Drilling)	街鑽法 (Percussio n Drilling)	旋鑽法 (Rotary Drilling)				
礫石層		×	×	√?	√?				
砂層		✓	✓	√?	√?				
粉砂層	未固結岩層	✓	✓	√?	√?				
黏土層		?	✓	✓緩慢	✔緩慢				
砂層夾帶卵礫石或巨礫		×	×	√?	√?				
頁岩	低度到中等	×	×	✓	✓緩慢				
砂岩	強度岩層	×	×	✓	✓				
石灰岩	上ない言な	×	×	✓緩慢	✓				
火成岩(花崗岩、玄武岩)	中寺到尚寺	×	×	✓緩慢	✓				
變質岩(板岩、片麻岩)	浊反石屑	×	×	✓緩慢	✓				
具有裂隙或孔隙之	岩石	×	×	✓	√!				
地下水位面以_	F	?	✓	✓	✓				
地下水位面以-	F	✓	?	✓	✓				
✔=適合之鑽探方法;✔?=有坍孔危險;✔!=需洗井以持續鑽探;?=有潛在疑慮;									
★=不適合之鑽探方法									

表 3-9:地質鑽探常用之方法與其適用之地質條件

資料來源:修改自 Elson 與 Shaw(1995)。

表 3-10:地質鑽探之取樣情形與地層變化之確認方式

目前常用之	沖洗法	螺旋鑽	衝鑽法	旋鑽法	
鑽探方法	(Wash Boring)	(Auger Drilling)	(Percussion Drilling)	(Rotary Drilling)	
特色	[優點] 可取得擾動及不擾動土樣。 [缺點] 薄層或夾層易被忽略硬土、硬岩、 及卵礫石層效果不佳。	[優點] 可取得擾動及不擾動土樣 可以手鑽或動力鑽。 [缺點] 受限於探測深度,難搭配現地試 驗。 樣品是擾亂混合的,無法確知土層	[優點] 可取得擾動土樣 適合於礫石層及含溶洞的石灰岩層 的鑽探。 [缺點] 無法取不擾動土樣且對地層干擾衝 擊影響程度大。	[優點] 可取得擾動及不擾動土樣 可快速且直接取得岩心樣品且亦較 少受到擾動。 [缺點] 較不適用於礫石層的鑽探。	
鑽探方式	又稱濕法取樣。利用約 1.5 m 至 2 m 的套管先打入。以鑽頭接在鑽桿 配合高壓水流,在套管內來回沖 洗,以達到鑽探的目的。	的愛化處。 利用螺絲形鑽頭,以輕微下壓力及 旋轉動作連結取樣。以手鑽時,其 深度無法達到5m以上;以動力鑽 時,則可達30m,但只適用於地下 水面以上的探查。此法主要應用於 覆蓋層的厚度調查。	利用空壓設備的動力鑽機,由鑽頭 快速上下振動達到鑽進的目的。	地質調查應用最多的鑽探方法。主 要是利用鑽機以高速旋轉方式達到 鑽進的目的。旋轉過程中,水或泥 漿被泵入中空的鑽桿,自鑽頭噴 出。	
地層變化之確認方法	可由鑽桿阻抗情形及迴水情形掌 握,或由固定深度取樣判斷。	由取出之土樣判斷。	可由鑽鑿速度變化或受阻抗之情況 判斷,另亦可由鑽鑿過程產生之岩 屑與出水情況判斷。	可由鑽鑿速度變化或受阻抗之情況 判斷,另亦可由鑽鑿過程迴水情形 及岩心結果判斷。	
鑽探孔徑	2 in. 至 4 in.	2 in. 至 5 in.	4 in.至 16 in.	1-7/8 in. 至 4-7/8 in. [AQ-PQ size]	

表 3-11:HQ-3 岩心管規格

最大取樣長度	1.5 m 至 3.0 m
岩心管型式	鋼纜式三層管
鑽頭外徑	96 mm
鑽頭內徑	63.5 mm

表 3-12:水文地質鑽井計價標準(HQ-3鋼纜式取樣法全程取樣)

岩性	採取率	計價標準
	90%以上	單價 100%
泥層	75% 至 90%	單價 70%
	75%以下	不計價
	85%以上	單價 100%
砂層	70% 至 85%	單價 70%
	70%以下	不計價
	70%以上	單價 100%
礫石層	50% 至 70%	單價 70%
	50%以下	不計價
业田社也工	90%以上	單價 100%
十回結石及 田社亗	75% 至 90%	單價 70%
山后石	75%以下	不計價

鑽探日報表

計畫名稱:				計畫編號:		鑽	鑽孔編號:		鑽探領班及助手;							
場址地點: 天氣;							日期:		第	頁	共 頁	作業時間:上午 / 下午 /				
奎管	樣品	深	度	鑽進	鑽進	標準	貢入讀	試驗	提	ROD	迴水	迥水	地下水位	泣深度(m)	: (開工)/ (收工)	
口徑/深度	編號	ģ	Æ	方式	時間	lst 15cm	2nd 15cm	3rd 15en	取 a 率	%	· 颜 名			地質單元與描述(含困難地質處理對策)		
/																
/																
/																
/																
/																
/																
/																
/																
/																
/																
/																
/																
本日進	尺数		(m)			鑽材	幾及引	擎艿	見格					灌葉位置		
提取薄	管数		(支)			岩心管規格及長度						現地試驗				
标率贯入家	试验数		(次)			鑽	瑌	規	格					重要记事		
劈管取	樣數		(組)			抽力	化機及	引き	ě規格					鑽採領班	; 督導人員;	
承包商:										1	答 婆耳	L位:				

圖 3-37:鑽探日報表(範例)



圖 3-38: 滲透試驗數據計算表

3.2.1.1 現地套鑽施作與變位量測標準作業

本試驗目的係利用孔內應變計配合鑽探直接量測場址岩體的自 然現地應力,並參考 ISRM(2006)、ASTM(2008)之規範訂定標準作業 程序,茲分述如下。

- (1) 試驗設備
 - a. 探測器(孔內應變計 Borehole Deformation Gauge, BDG):
 含9個電阻式應變計,安裝在3個環(Rosettes)上(每個環3個,各相差60°),每組應變計量測方向:(a)與鑽孔長軸
 平行方向;(b)與鑽孔長軸正交方向;(c)與鑽孔長軸夾45
 [°]方向,在此陣列組合下可代表空間上7個不同方向。應
 變計準確度達±13×10⁻⁵ mm、解析度達25×10⁻⁶ mm,內建
 溫度感應計以評估套鑽過程溫度影響讀值的程度。
 - b. 鑽機設備:包括鑽機、鋼纜、鑽頭、(內建)鑽孔清洗刷等。
 - c. 校正夾具(Calibration Jig):用在試驗前後校正感應計應變 量測值。
 - d. 雙軸試驗設備(Biaxial Testing Equipment):包括荷重計、
 壓力計、油壓幫浦及應變指示器,用在現地量測試體的彈
 性楊氏模數及柏松比。
 - e. 其它:包括資料記錄器、手提電腦、黏著劑(Glue)、安裝 工具轉接頭(Cell Adapter)及訊號纜線。
- (2) 試驗流程
 - a. 取用「套鑽法現地應力量測紀錄表」,並將量測數據記錄
 於表內。
 - b. 試驗前須校正探測器,尤其是探測器曾遭受震動等因素而 嚴重影響讀值。
 - c. 先鑽一孔徑為 76 mm 的主孔至預定深度,用刨刀(Planing Tool)研磨孔底使其平順,預定深度決定要件包括:(a)岩性為均質;(b)不得有開口裂隙,如試驗段不符上述要件, 應再繼續鑽掘 1 m 至 3 m 到下一個試驗段。

- d. 鑽一個孔徑 36 mm 的小孔,檢視小孔岩心以確認試驗段 岩體是否適合進行量測。
- e. 清洗鑽孔將鑽掘岩屑去除,過程中檢視回收孔水水質及小孔開放性(openness),並檢查回收孔水是否有岩屑。應於進行套鑽前 10 min 至 15 min 沖洗鑽孔。
- f. 組裝探測器,利用黏著劑將應變計固定在探測器上,藉安裝桿(Iinstallation Tool)將探測器安裝在小孔中,應變計應 埋入小孔(Pilot Hole)深度至少約 70 mm 處。
- g. 安裝桿上需固定一陀螺儀以確保推進之方向,用安裝桿前端鼻錐(Nose Cone)施壓將量測元件(Gauge)固定在小孔中,並將安裝桿與探測器分離自洞中取出。
- h. 將探測器放置隔夜直到黏著劑完全硬化後進行套鑽,記錄
 應變計讀值變化。
- i. 待套鑽至預定深度後截斷岩心並將其自岩心管(Core Barrel)取出。於套鑽完成後 5 min 至 10 min 沖洗鑽孔, 在小孔岩心取出前應先靜置 5 min 至 10 min,以觀察溫度 或其他非理想(Non-ideal)岩石行為是否對應變讀值造成 影響。
- j. 在取回岩心或拆解應變計前應確認資料已確實記錄。
- k. 於現場進行雙軸試驗或由鄰近鑽孔岩心,進行靜彈性模數
 量測,以用於計算現地應力。
- 記錄試驗資料,包括鑽進速度、轉速及洗孔相關資訊(時 間或水質等)、套鑽試體長度、鑽孔同心度(Concentricity, 即小孔兩端岩心的厚度)、參考線及岩心的參考位態(由陀 螺儀讀數確認)、應變計位置(確認應變計環之分布差異為 120°)、岩性描述,包含微裂隙(Microcracks)位置、間距及 位態、描述岩石結構及表徵,包括片理、節理及其位態特 徵(如傾向及傾角),如取出之岩心有裂隙,需載明其位置、 位態及破壞特性。

(3) 參數計算

根據前項數據進行參數計算,並將計算結果登錄至「套鑽法 現地應力量測成果表」,各參數計算方法如後。

$$f_1 = D(1 + 2\cos 2\theta)(1 - \nu^2)/E + D\nu^2/E$$
(3-1)

$$f_2 = -Dv/E \tag{3-2}$$

$$f_3 = D(1 - 2\cos 2\theta)(1 - \nu^2)/E + D\nu^2/E$$
(3-3)

$$f_4 = D(4\sin 2\theta)(1 - \nu^2)/E$$
(3-4)

$$J_1 = f_1 l_1^2 + f_2 l_2^2 + f_3 l_3^2 + f_4 l_1 l_3$$
(3-5)

$$J_2 = f_1 m_1^2 + f_2 m_2^2 + f_3 m_3^2 + f_4 m_1 m_3$$
(3-6)

$$J_3 = f_1 n_1^2 + f_2 n_2^2 + f_3 n_3^2 + f_4 n_1 n_3$$
(3-7)

$$J_4 = 2f_1l_1m_1 + 2f_2l_2m_2 + 2f_3l_3m_3 + f_4(l_1m_3 + l_3m_1)$$
(3-8)

$$J_5 = 2f_1m_1n_1 + 2f_2m_2n_2 + 2f_3m_3n_3 + f_4(m_1n_3 + m_3n_1)$$
(3-9)

$$J_6 = 2f_1m_1l_1 + 2f_2n_2l_2 + 2f_3n_3l_3 + f_4(n_1l_3 + n_3l_1)$$
(3-10)

$$U = J_1 \sigma_x + J_2 \sigma_y + J_3 \sigma_z + J_4 \tau_{xy} + J_5 \tau_{yz} + J_6 \tau_{zx}$$
(3-11)

其中, D=鑽孔直徑, [m]。 $\theta=鑽孔徑向軸與坐標空間水平向之夾角, [°] 。$ <math>v=柏松比。 E=彈性模數, [N/m2]。 f=空間係數, [m3/N]。 J=方向係數, [m3/N]。 U=試驗量測之變位, [m]。 $\sigma=正應力, [N/m2]$ 。 $\tau=剪應力, [N/m2]$ 。 $\pi, l, n=鑽孔空間座標系統 X, Y, Z 軸修正, 修正式如下:$ $<math>l_1=X'軸與 X 軸之方向餘弦$ 。 $n_1=X'軸與 Z 軸之方向餘弦 。$ $l_2=Y'軸與 X 軸之方向餘弦 。$ m₂=Y'軸與Y軸之方向餘弦。
n₂=Y'軸與Z軸之方向餘弦。
l₃=Z'軸與X軸之方向餘弦。
m₃=Z'軸與Y軸之方向餘弦。
n₃=Z'軸與Z軸之方向餘弦。

3.2.2 現地水文地質試驗作業

本項工作參考國際最終處置計畫發展經驗,編撰我國用過核子燃 料最終處置計畫的調查標準作業程序,建立之現地水文地質試驗項目 包括滲漏試驗技術、流速儀量測技術(Flowmeter Measurement)、水力 干擾試驗技術(Hydraulic Interference Test)、封塞水力試驗(Double Packer Test)等 4 項,可做為未來高放計畫相關試驗執行之依據。

3.2.2.1 滲漏試驗技術

(1) 試驗目的

本試驗旨在針對鑽孔內特定岩層區段或特殊地質構造進行大 區段透水特性試驗,以量化地層大範圍滲透率乃至計算水力 傳導係數(Hydraulic Conductivity, K)。其原理與封塞水力試驗 相仿同樣是在封堵之試驗區段施加人為邊界條件的轉換,來 觀察試驗區段壓力水頭隨時間的變化趨勢,以針對該區段水 力傳導係數進行推估。主要差別在於所施加壓力為分階逐步 試驗,且試驗形式多以單個封塞為之,試驗區段(Test Intervals)主由鑽探人員依鑽探進度、鑽探過程水位動態、迴 水率、鑽進率、岩心提取率來選擇。

- (2) 參考規範
 - a. ISO (2012), Geotechnical investigation and testing—geohydraulic testing—part 3: water pressure tests in rock, ISO 22282-3:2012(E), 26 p.
 - b. ASTM (2019), ASTM D4630-19, Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Low-Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the

Constant Head Injection Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, <u>www.astm.org</u>.

- c. Vaskou, P., de Quadros, E. F., Kanji, M. A., Johnson, T., and Ekmekci, M. (2019), ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(10), pp. 4155-4174.
- (3) 試驗設備
 - a. 膨脹封塞(Inflated Packer):用於隔離待試驗區段受外在地層的影響,使其可藉由人為控制給定不同壓力水頭,進行水力試驗之操作。封塞材質為耐高壓充氣橡皮,封塞充氣後延展長度建議必須超過0.5m,用以隔離試驗區段的頂部和底部,依試驗需求不同封塞型號之適用深度、膨脹極限、井孔尺寸皆有適用性標準規格。
 - b. 封塞壓力供給源(Pressure Source for Inflating Packers): 泛指移動式高壓鋼瓶或固定式儲槽,其可透過氣閥連接增 壓器(Pressure Intensifier)提供穩定惰性氣體(如氮氣)至膨 賬封塞,使其膨脹或洩氣。壓力供給上限最高不超過 1 MPa(145 psi),而增壓速度必須低於洩壓速度的 1%。
 - c. 壓力計或壓力傳感器(Pressure Transducers):主要用於量 測試驗段內部壓力隨時間之變化。壓力控制精度至少應為 63 kPa(9.14 psi),包括記錄系統引入的誤差,解析度至少 應為 1 kPa(0.15 psi)。
 - d. 流量計(Flow Meters)與流量記錄器:用於量測試驗段進出
 地下水流量,可量測範圍必須控制在 70 cm³/s 至 1,000 cm³/s 之間,精度則須控制在±1%之間。
 - e. 地表供電設備:於現場提供系統之電源。
 - f. 資料記錄器及控制裝置:用以記錄分階壓力與水量變化及 存取資料。
 - g. 鑽井設備與捲揚系統:鑽機(Drilling Rig)應輕便、易操控、 具備鑽掘垂直孔及水準孔能力,鑽進方式應以旋鑽

(Rotary)為主以減少孔壁破壞(Formation Damage),鑽孔完成後應清除孔內泥漿和異物殘留。捲揚系統包含三角架、 吊頭、鑽桿夾和鑽桿應有效或平穩對接,並確保不會受拉 力產生永久變形。

- h. 其他:水槽(Water Reservoir)、離心幫浦(抽水馬達)、發電機、導水管線。
- i. 主要設備配置說明如圖 3-39 所示。
- (4) 試驗流程
 - a. 在試驗啟動前,試驗人員必須確實掌握試驗場址環境的基本資訊,包括試驗區段的岩性、試驗代表性體積、可支配時間、計畫費用考量、儀器設計參數之容受上限、其他環境限制條件等因素之影響。於鑽探過程也須掌握不連續面的深度、迴水率及鑽探特殊狀況。
 - b. 以單封塞形式進行滲漏試驗多在鑽探過程中進行,鑽探人員必須在試驗前確實將岩屑或沉積物洗出,再以清水清洗乾淨,在某些軟弱或破碎岩層會在孔中添加皂土穩固孔壁,此類鑽孔較不容易進行有效試驗,因此要特別針對這些區段洗孔後再行施測。洗井循環時間建議至少持續10min至15min,且至井水乾淨為止。
 - c. 如鑽孔有發現嚴重崩塌導致探測儀無法順利下放,則需立 即洗孔處理,在任何處理方式皆無法順利施作情況下,則 應當廢孔並鑽新孔重新施測。
 - d. 於試驗前必須檢視掌握鑽探過程地下水位動態、迴水率、 鑽進率、岩心提取率,瞭解地層及地下水狀況,或地質因 鑽探造成的缺陷,盡可能讓試驗場址平坦以利置放所有設 施。此試驗一般選擇於地下水位面以下(飽和水層)進行, 若選擇於地下水位面以上(通氣層)進行試驗,則應自地表 灌水以維持試驗段處於飽和的狀態。
 - e.承上,於試驗前必須確認井體狀態,包括鑽探位置、鑽探 高程、鑽探深度、鑽探孔徑、是否坍孔、是否有置放套管

及其深度,以瞭解井體狀況,降低設備卡孔風險。必要時可應用攝影設備輔助探查孔內狀況。

- f. 滲漏試驗設備下放之前必須進行檢核和校正工作,包括封 塞橡皮是否破損、設備接頭止水、異物清除、試驗段長度 確認、地表壓力與水壓計的校正和歸零、抽水幫浦最大揚 程是否符合深度需求、水壓計精度是否符合深度需求、線 盤電纜接頭檢查、發電機油耗、鋼瓶氮氣含量、捲揚系統 等零件功能確認。下放鑽桿內必須檢視是否具有異物填充 如泥土、鐵鏽、鑽屑,如有必須立即清除乾淨。
- g. 滲漏試驗設備下放前必須連接所有電源線、流量及壓力訊 號傳輸線,並透過電腦介面確認成功連結。若現地無自動 記錄設備,試驗人員則須詳實以手抄的方式記錄數據變 化,後續立即建檔。
- h. 滲漏試驗設備下放前於鑽孔上方確實組裝捲揚系統,並調整使其對準鑽孔中心點,其後將封塞組裝完成設備吊放在 鑽孔適當位置或待試驗區段。
- i. 設備吊放至目標深度後開始進行試驗。為確保試驗精準度 與結果代表性,單封塞的試驗長度(L)不建議設置過長, 一般建議以1.5m至3.0m為佳。此外,建議於封塞上下 各裝置一組壓力計,以掌握封塞充氣前後壓力水頭變化。
- j. 試驗首先打開壓力鋼瓶啟動封塞進氣,待封塞膨脹完成試驗區段頂部封堵,上下分層壓力水頭即出現不同步之變化。建議現地人員稍加觀察壓力水頭變化趨勢,進行封塞與孔壁貼合狀態確認。水位變化觀測頻率建議設定小於每筆5 min。
- k. 啟動抽水馬達由地表注水進入試驗段,當壓力水頭平穩後,由地表關閉連通閥提高試驗水頭,以 0.3 MPa、0.5 MPa、0.7 MPa、1.0 MPa、0.7 MPa、0.5 MPa、0.3 MPa 分 階逐步提升與降低試驗壓力水頭的方式進行觀測試驗流量Q(L/min)。每一階試驗以 10 min 為原則,並建議同時

測錄分層地下水位變化狀態。試驗階數和變壓增量可依現 地狀況調整。

- 待試驗完成,將試驗數據存檔後,關閉注水開關,打開洩 壓裝置使封塞逐步釋放壓力,待封塞內部壓力降至安全值 後小心將設備上移至後續觀測區段,或自孔中取出。
- m. 此試驗流程亦可應用雙封塞形式進行滲漏試驗。
- n. 最後將分階壓力與流量紀錄輸入試算表或運算資料庫中, 即可繪製流量壓力關係曲線,透過迴歸分析內插計算出有 效應力為 1 MPa 時的流量,即可依 LU=Q/L 換算水力傳 導係數(Hydraulic Conductivity, K), LU 為岩體滲透指標 Lugeon 值,定義為為在 10 kg/cm²之壓力下,每公尺試驗 深度每分鐘之滲流量(L),即 1 Lu = 1 L/min·m·MPa。若試 驗過程之最高壓力水頭無法達到 1 MPa (10 kg/cm²)時,則 採用線性外差來推估 Lugeon 值,並於試驗紀錄中加註說 明。

3.2.2.2 流速儀量測試驗技術

(1) 試驗目的

地層透水性是水文地質的重要參數,然岩層的非均質性與裂隙往往造成地質材料隨著深度而有垂直方向的變化,因此如 何有效地定量化描述水力傳導係數在空間上的分布一直是深 地質處置領域所努力發展的方向。 流速儀可藉由量測井孔內垂向的地下水流流動,推估地層側 向透水性質並尋找透水區段,因此選用在低流速環境具有良 好解析能力的熱脈衝流速儀,建立試驗標準作業程序,一般

來說可依照試驗過程是否抽水,分為自然水流量測方法與抽 水狀態量測方法。

- (2) 參考規範
 - a. Posiva (2011), Drilling and Associated Drillhole Measurements of the Pilot Hole ONK-PH12, p1-p148.

- b. Molz, F. J., Morin, R. H., Hess, A. E., Melville, J. G., Guven, O. (1989), The Impeller Meter for Measuring Aquifer Permeability Variations - Evaluation and Comparison with Other Tests. Water Res, 25, p1677-p1683.
- c. Paillet, F. L., Hess, A. E., Cheng, C. H, Hardin, E. (1987), Characterization of Fracture Permeability with High-Resolution Vertical Flow Measurements during Borehole Pumping. Ground Water, 25, p28-p40.
- d. Paillet, F. L. (1998), Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. Water Resources Research, 34(5), p997-p1010.
- (3) 量測原理

熱脈衝流速儀長 2.24 m, 直徑為 50 mm, 其主要結構靠近流 速儀的底端,由加熱線圈及上下 2 個高靈敏度溫度感測器所 組成,加熱線圈距離上方及下方感測器皆為 5 cm。當水流通 過加熱線圈時,可以控制加熱元件瞬間釋放能量,產生脈衝 式的熱源,放熱動作同時也啟動資料記錄器開始量測流速, 由於流體的熱傳導相當慢,因此熱源主要藉由水的強制對流 (Forced Convection)來傳遞。熱源隨著水流移動一段時間,會 由上方或下方的溫度感測器偵測到溫度的變化,尖峰溫度初 始變化的瞬間與開始加熱時間的差異可藉由資料記錄器讀 取,發熱線圈和溫度感測器距離又固定為 5 cm,即可以計算 管中水流流速。當井管內水流向上移動,加熱線圈瞬間加熱 之水流將會被上方溫度感測器偵測到溫度上升,則熱脈衝曲 線朝上方改變;反之,曲線則朝下方變化,藉此獲知管內水流

- (4) 孔內自然水流量測方法
 - a. 儀器配置

在孔內自然水流量測方法中,儀器設備包含熱脈衝流速 儀、捲揚系統、資料記錄器及電源供應系統,其中捲揚系 統,包括捲揚機、三腳架、測深轉盤等,主要功用為將流 速儀置入試驗井內,吊放速率範圍為0m/min至20m/min, 而測深轉盤則可透過轉盤轉動圈數記錄流速儀所在深度; 資料記錄器可使用 Winlogger 軟體與電腦連接,測錄熱脈 衝之量測波形(圖 3-40);電源供應系統可依現地狀況與 電力需求選擇發電機或鉛蓄電池供電儀器,現地配置如圖 3-41 所示。若試驗井之井徑大於 76 mm,一般會在熱脈 衝流速儀加裝置中器,以確保量測位置靠近井管中心。

b. 量測試驗步驟

圖 3-42 為孔內自然水流調查現地作業流程圖,試驗步驟 如下:

- (a) 於試驗井設置本試驗系統。
- (b) 啟動 Winlogger 軟體進行參數設定,並將吊放流速儀 至待測深度。
- (c) 開啟新測錄視窗(New Log)。
- (d) 溫度感測器平衡(Equalise):執行溫度感測器平衡功能,在溫差尺度調整至 500 CPS 條件下,靜置數分鐘直至溫度曲線達平衡條件。各深度第一次測錄需靜置至少 5 min,並滿足平衡溫度曲線維持直線達 15 s 以上,以確保完整測錄熱自然水流;第二次量測以後,平衡溫度曲線須維持直線超過前次量測之脈衝反應時間,以確保完整測錄當下脈衝反應。
- (e) 熱脈衝流速量測:執行加熱線圈加熱(Fire Heaters)。 第一次脈衝加熱僅供測試,不記錄脈衝反應時間,熱 突破曲線變化幅度需超過 250 CPS 才判定加熱成功, 等待突破曲線回復至直線變化達 3 s 以上,以確保感 測器完整記錄尖峰溫度之變化,記錄熱脈衝反應時間 (Accept and Store)並輸出突破曲線 ASC 檔案(Export Data)。

- (f)每個深度位置需重複上述2步驟,至少量測3筆熱脈 衝反應數據,每筆熱脈衝流速量測結果誤差需小於 10%,方可視為有效量測數據。若位於管內水流紊亂 處,則需累積熱脈衝量測數據超過5筆後,方能完成 該深度之測錄(Exit)並儲存脈衝反應時間表(TXT 檔 案)。
- (g) 吊放流速儀至下一處待測深度,流速儀吊放移動速率 需小於1m/min,避免擾動管內水流,靜置時間需超 過5min後,重複步驟(iii)至步驟(vi),至試驗完成。 建議每孔試驗井量測區段為地下水位面以下至孔底 位置,量測間距為2m,並可視量測流速變化狀況或 地質的複雜度狀況縮短量測間距,以確切掌握孔內自 然水流之流量變化。
- (5) 孔內抽水狀態量測方法

在建於單一含水層內的淺井之中,井管內受到不同深度的輕 微水頭變化而造成的自然垂直水流通常不易被偵測而可以忽 略。然而,若是在穿透數個含水層的深井當中,受到不同含水 層間水頭差所造成的水力坡降影響,驅動井管內的水流垂直 流動,但這樣的自然流動卻可能會影響熱脈衝流速儀量測結 果所推估得到之地層透水性分布狀態,因此一般進行熱脈衝 流速儀的現地試驗前必須先在不抽水的狀態下進行量測,再 將所得到之背景自然水流速度作為抽水狀態下校正之用 (Paillet, 1998)。

a. 儀器配置

熱脈衝流速儀於現地的配置如圖 3-43 所示,其必須在井 管中的地下水位面以下進行量測,完整的實驗系統包括有 熱脈衝流速儀、捲揚系統、電源供應系統、資料記錄器、 沉水式抽水機和地下水位計等設備,若試驗井之井徑大於 76 mm,一般會在熱脈衝流速儀加裝置中器,以確保量測 位置靠近井管中心。抽水機為提供井管內垂向水流流動的 主要元件,可有效提高井管內水流速度,增加量測解析能 力,因此一般都會裝設抽水機來進行操作,若環境不允許 抽取地下水,則可以利用注水的方式進行。

b. 量測試驗步驟

圖 3-44 為孔內抽水狀態調查現地作業流程圖,試驗步驟 如下:

- (a)於試驗井設置本試驗系統,參考地下水位及預期抽水
 洩降幅度設置抽水機、水位計以及初始熱脈衝流速儀
 量測深度。
- (b) 啟動水位計觀測背景地下水位,至少 20 min,再啟動 抽水機,觀測試驗井水位洩降情形與量測抽水之流 量,以確保進行定量抽水,地下水位洩降量需至少達 10 m以上或抽水量需超過 10 L/min。
- (c)接著進行最佳抽水條件測試,在無水流狀態下,脈衝 平均反應時間約為23s,提升抽水量將初始熱脈衝流 速儀量測深度之脈衝反應時間縮減至1.5s內,用以 提升管內流速,增加試驗整體解析能力。
- (d) 調整至最佳抽水量後,需靜待地下水流場達穩定狀態 (Steady-state Condition),定量抽水時間需至少維持 3 hr以上,且水位洩降變化量需小於 5 cm/hr。
- (e) 開啟新測錄視窗。
- (f) 溫度感測器平衡:執行溫度感測器平衡功能,在溫差 尺度調整至 500 CPS 條件下,靜置 1 min 直至溫度曲 線達平衡條件。各深度第一次測錄需靜置至少 1 min, 並滿足平衡溫度曲線維持直線達 5 s 以上;第二次量 測以後,平衡溫度曲線須維持直線超過前次量測之脈 衝反應時間,以確保完整測錄當下脈衝反應。
- (g) 熱脈衝流速量測:執行加熱線圈加熱。第一次脈衝加 熱僅供測試,不記錄脈衝反應時間,熱突破曲線變化 幅度需超過 250 CPS 才判定加熱成功,等待突破曲線

回復至直線變化達3 s 以上,以確保感測器完整記錄 尖峰溫度之變化,記錄熱脈衝反應時間並輸出突破曲 線 ASC 檔案。

- (h)每個深度位置需重複上述2步驟,至少量測3筆熱脈 衝反應數據,每筆熱脈衝流速量測結果誤差需小於10 %,方可視為有效量測數據。若位於管內水流紊亂處, 則需累積熱脈衝量測數據超過5筆後,方能完成該深 度之測錄並儲存脈衝反應時間表(TXT檔案)。
- (i) 吊放流速儀至下一處待測深度,靜置時間需超過 1 min後,重複步驟(v)至步驟(viii),至試驗完成。建議 每孔試驗井量測區段為洩降水位面以下 3 m 至孔底位 置,量測間距為 1 m,並可視量測流速變化狀況或地 質的複雜度狀況縮短量測間距,以確切掌握孔內自然 水流之流量變化。
- (j) 完成量測後停止抽水,靜待水位回升至平衡狀態,以水位計記錄水位回復變化情形,記錄時間為停止抽水後超過1hr或水位變化量小於5 cm/hr。

3.2.2.3 水力干擾試驗技術

(1) 試驗目的

水力干擾試驗的主要目的,即是透過主井抽水行為來觀察其 洩降影響半徑範圍內不同位置的鄰井在不同深度的壓力反應 (Pressure Responses),其可看做是一種複井多區段抽水試驗設 計,觀測井多半以封塞分段阻隔後再進行分區抽水。當定量 抽水行為穩定後,原則上與抽水位置連通性較佳的區段壓力 水頭反應較大且時間較短,反之連通性較差的區段其壓力水 頭反應較小,且時間較長,藉此可獲得不同位置與深度的水 力參數,每一組抽水和觀測井的響應資料可建立一組獨立的 方程,通過交換抽水點和觀測點即可獲得多組抽水響應資料, 即可建立多組獨立的方程來逆推導水係數(Transmissivity,T)
與貯水係數(Storativity, S)的空間分布,進而掌握整體範圍的水力連通性。

- (2) 參考規範
 - Ramey Jr, H. J. (1980). A drawdown and build-up type curve for interference testing. In Third Invitational Symposium on Well Testing, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, pp. 130-134.
 - Kamal, M. M. (1983). Interference and pulse testing-A review. Journal of Petroleum Technology, 35(12), pp. 2-257.
 - c. ASTM (2019), ASTM D4630-19, Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Low-Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, <u>www.astm.org</u>.
- (3) 試驗設備
 - a. 多組膨脹封塞(Multi-Inflated Packers):用於同步阻隔多處 試驗區段受外在地層的影響,使其可藉由人為控制給定不 同壓力水頭,進行水力試驗之操作,瞭解橫向水力連通性。 封塞材質為耐高壓充氣橡皮,封塞充氣後延展長度建議必 須超過 0.5 m,用以隔離試驗區段的頂部和底部,依試驗 需求不同封塞型號之適用深度、膨脹極限、井孔尺寸皆有 適用性標準規格。
 - b. 多組封塞壓力供給源 (Pressure Source for Inflating Packers):泛指移動式高壓鋼瓶或固定式儲槽,其可透過 氣閥連接增壓器 (Pressure Intensifier)提供穩定惰性氣體 (如氮氣)至膨脹封塞,使其膨脹或洩氣。壓力供給上限最 高不超過1 MPa(145 psi),而增壓速度必須低於洩壓速度 的1%。
 - c. 多組壓力計或壓力傳感器(Pressure Transducers):主要用於量測試驗段內部壓力隨時間之變化。壓力控制精度至少

應為 63 kPa(9.14 psi),包括記錄系統的誤差,解析度至少 應為 1 kPa(0.142 psi)。

- d. 多組流量計(Flow Meters)與流量記錄器:用於量測試驗段進出地下水流量,可量測範圍必須控制在 70 cm³/s 至 1,000 cm³/s 之間,精度則須控制在正負 1%之間
- e. 地表供電設備:於現場提供系統之電源。
- f. 多工資料記錄器及控制裝置:用以同時記錄多組分階壓力 與水量變化及存取資料。
- g. 鑽井設備與捲揚系統:鑽機(Drilling Rig)應輕便、易操控、 具備鑽掘垂直孔及水準孔能力,鑽進方式應以旋鑽 (Rotary)為主以減少孔壁破壞(Formation Damage),鑽孔完 成後應清除孔內泥漿和異物殘留。捲揚系統包含三角架、 吊頭、鑽桿夾和鑽桿應有效或平穩對接,並確保不會受拉 力產生永久變形。
- h. 其他:水槽、離心幫浦(抽水馬達)、發電機、導水管線。
 i. 主要設備配置説明如圖 3-45 所示。
- (4) 試驗流程
 - a. 在試驗啟動前,試驗人員必須建立場址基本概念模型,並 確實掌握試驗場址環境的基本資訊,包括試驗區段的岩 性、試驗代表性體積、可支配時間、計畫費用考量、儀器 設計參數之容受上限、其他環境限制條件等因素之影響。 於鑽探過程也須掌握不連續面的深度、迴水率及鑽探特殊 狀況。
 - b. 所有鑽孔完成鑽探進度後必須確實將岩屑或沉積物洗出, 再以清水清洗乾淨,在某些軟弱或破碎岩層會在孔中添加 皂土以穩固孔壁,此類鑽孔較不容易進行有效試驗,因此 要特別針對這些區段洗孔後再行施測。
 - c. 所有鑽孔有發現嚴重崩塌導致探測儀無法順利下放,則需 立即洗孔處理,在任何處理方式皆無法順利施作情況下, 則應當廢孔並鑽新孔重新施測。

- d. 於試驗前必須檢視岩心紀錄、岩心照片及地質柱狀圖,並 盡可能掌握鑽探過程地下水位動態、迴水率、鑽進率、岩 心提取率,瞭解地層及地下水狀況,或地質因鑽探造成的 缺陷,盡可能讓試驗場址平坦以利置放所有設施。
- e. 承上,於試驗前必須完成地表岩石露頭位態(Attitude)量測,掌握岩層走向(Strike)、傾角(Dip)或傾向(Dip Direction)。
- f. 承上,於試驗前必須確認井體狀態,包括鑽探位置、鑽探 高程、鑽探深度、鑽探孔徑、是否坍孔、是否有置放套管 及其深度,以瞭解井體狀況,降低設備卡孔風險。
- g. 承上,於試驗前若能掌握井下地球物理測量訊號尤佳,特別包括孔內攝影、井徑、地溫或水質資料,可做為後續試驗過程水量或壓力水頭變化的輔助性參考資訊。
- h. 多封塞設備下放之前必須分別進行檢核和校正工作,包括 封塞橡皮是否破損、設備接頭止水、異物清除、試驗段長 度確認、地表壓力與水壓計讀的校正和歸零、抽水幫浦最 大揚程是否符合深度需求、水壓計精度是否符合深度需 求、線盤電纜接頭檢查、發電機油耗、鋼瓶氮氣含量、捲 揚系統等零件功能確認。下放鑽桿內必須檢視是否具有異 物填充如泥土、鐵鏽、鑽屑,如有必須立即清除乾淨。
- 多封塞設備下放前必須連接所有電源線、流量及壓力訊號 傳輸線,並透過電腦介面確認成功連結。
- j. 多封塞設備下放前於鑽孔上方確實組裝捲揚系統,並調整 使其對準鑽孔中心點,其後將封塞組裝完成設備吊放在鑽 孔適當位置或待試驗區段。
- k. 所有設備吊放至目標深度後即可開始進行試驗,主試驗井 操作流程包括:封塞充氣、分層壓力水頭紀錄、地表注水、 施加試驗水頭、觀測試驗流量皆與雙封塞水力試驗一致。 而觀測井需同步記錄封塞完成後分層水壓變化,以供後續 進行連通性診斷分析(Diagnostic Analysis)。

- 待試驗完成,將試驗數據存檔後,關閉注水開關,打開洩 壓裝置使封塞逐步釋放壓力,待封塞內部壓力降至安全值 後小心將設備上移至後續觀測區段,或自孔中取出。
- m. 水力試驗數據之解析必須依據地質構造和含水層型態,包括裂隙含水層、侷限、自由、滲漏含水層等,選擇適合的理論模型來與試驗觀測資料進行匹配,進而解釋地下水流動行為模式,推估裂隙岩體含水層水文地質參數。而藉由理論模式亦可解釋試驗含水層的型態,以及試驗區段之孔徑、孔壁和邊界效應的影響,以輔助推估出最符合研究地區之水文地質參數。

3.2.2.4 封塞水力試驗

(1) 試驗目的

本試驗旨在針對鑽孔內特定岩層區段或特殊地質構造進行小範圍水力傳導特性試驗,來計算分層導水係數 (Transmissivity, T)、水力傳導係數(Hydraulic Conductivity, K) 和貯水係數(Storativity, S)。其原理主要是在封堵之試驗區段 施加人為邊界條件的轉換,來觀察試驗區段壓力水頭隨時間 的變化趨勢,以針對特定水文地質參數進行推估。 試驗區段(Test Intervals)的選擇可依照岩心描述、地球物理井 測結果為之,選擇出現岩性變化、不連續面(Discontinuities)特 性或流速變化處進行試驗。

(2) 參考規範

ASTM (2019), ASTM D4630-19, Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Low-Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.

(3) 試驗設備

- a. 膨脹封塞(Inflated Packer):用於隔離待試驗區段受外在地層的影響,使其可藉由人為控制給定不同壓力水頭,進行水力試驗之操作。封塞材質為耐高壓充氣橡皮,封塞充氣後延展長度建議必須超過0.5m,用以隔離試驗區段的頂部和底部,依試驗需求不同封塞型號之適用深度、膨脹極限、井孔尺寸皆有適用性標準規格。
- b. 封塞壓力供給源(Pressure Source for Inflating Packers): 泛指移動式高壓鋼瓶或固定式儲槽,其可透過氣閥連接增 壓器(Pressure Intensifier)提供穩定惰性氣體(如氮氣)至膨 賬封塞,使其膨脹或洩氣。壓力供給上限最高不超過 1 MPA(145 psi),而增壓速度必須低於洩壓速度的 1%。
- c. 壓力計或壓力傳感器(Pressure Transducers):主要用於量 測試驗段內部壓力隨時間之變化。壓力控制精度至少應為 63 kPa(9.14 psi),包括記錄系統引入的誤差,解析度至少 應為1 kPa(0.15 psi)。
- d. 流量計(Flow Meters)與流量記錄器:用於量測試驗段進出 地下水流量,可採用量測範圍介於 70 cm³/s 至 1,000 cm³/s 間之設備進行試驗,另須依不同試驗方式選擇合適的對應 設備與精度控制。
- e. 地表供電設備:於現場提供系統之電源。
- f. 資料記錄器及控制裝置:用以紀錄分層壓力與水量變化及 存取資料。
- g. 鑽井設備與捲揚系統:鑽機(Drilling Rig)應輕便、易操控、 具備鑽掘垂直孔及水準孔能力,鑽進方式應以旋鑽 (Rotary)為主以減少孔壁破壞(Formation Damage),鑽孔完 成後應清除孔內泥漿和異物殘留。捲揚系統包含三角架、 吊頭、鑽桿夾和鑽桿應有效或平穩對接,並確保不會受拉 力產生永久變形。
- h. 其他:水槽、離心幫浦(抽水馬達)、發電機、控制台、導
 水管線。

i. 主要設備配置說明如圖 3-46 所示。

- (4) 試驗流程
 - a. 在試驗啟動前,試驗人員必須確實掌握試驗場址環境的基本資訊,包括試驗區段的岩性、試驗代表性體積、可支配時間、計畫費用考量、儀器設計參數之容受上限、其他環境限制條件等因素之影響。於鑽探過程也須掌握不連續面的深度、迴水率及鑽探特殊狀況。
 - b. 鑽探完成後必須確實將岩屑或沉積物洗出,再以清水清洗 乾淨,在某些軟弱或破碎岩層會在孔中添加皂土以穩固孔 壁,此類鑽孔較不容易進行有效試驗,因此要特別針對這 些區段洗孔後再行施測。
 - c. 如鑽孔有發現嚴重崩塌導致探測儀無法順利下放,則需立 即洗孔處理之,在任何處理方式皆無法順利施作情況下, 則應當廢孔並鑽新孔重新施測。
 - d. 於試驗前必須檢視岩心紀錄、岩心照片及地質柱狀圖,並 盡可能掌握鑽探過程地下水位動態、迴水率、鑽進率、岩 心提取率,瞭解地層及地下水狀況,或地質因鑽探造成的 缺陷,盡可能讓試驗場址平坦以利置放所有設施。
 - e. 承上,於試驗前必須確認井體狀態,包括鑽探位置、鑽探高程、鑽探深度、鑽探孔徑、是否坍孔、是否有置放套管及其深度,以瞭解井體狀況,降低設備卡孔風險。
 - f. 承上,於試驗前若能掌握井下地球物理測量訊號尤佳,特別包括孔內攝影、井徑、地溫或水質資料,可做為後續試驗過程水量或壓力水頭變化的輔助性參考資訊。
 - g. 封塞設備下放之前必須進行檢核和校正工作,包括封塞橡皮是否破損、設備接頭止水、異物清除、試驗段長度確認、 地表壓力與水壓計讀的校正和歸零、抽水幫浦最大揚程是 否符合深度需求、水壓計精度是否符合深度需求、線盤電 纜接頭檢查、發電機油耗、鋼瓶氮氣含量、捲揚系統等零

件功能確認。下放鑽桿內必須檢視是否具有異物填充如泥 土、鐵鏽、鑽屑,如有必須立即清除乾淨。

- h. 設備下放前必須連接所有電源線、流量及壓力訊號傳輸線,並透過電腦介面確認成功連結。
- 設備下放前於鑽孔上方確實組裝捲揚系統,並調整使其對 準鑽孔中心點,其後將封塞組裝完成設備吊放在鑽孔適當 位置或待試驗區段。
- j. 設備吊放至目標深度後開始進行試驗。首先打開壓力鋼瓶 啟動封塞進氣,待封塞膨脹完成試驗區段頂部與底部封 堵,分層壓力水頭即出現不同步之變化。建議現地人員稍 加觀察壓力水頭變化趨勢,進行封塞與孔壁貼合狀態確 認。
- k. 啟動離心幫浦由地表注水進入試驗段,並將試驗段中原本 包含的空氣包擠送至地表排出。當壓力水頭平穩後,由地 表關閉連通閥門並提高試驗水頭,一般會以2kg壓力水 頭為原則,以獲得顯著可觀測之試驗流量。
- 試驗過程注水(或抽水)時間應超過 30 min,水位觀測時間 至少 2 hr 為原則,建議於測錄時記錄分層地下水位變化 狀態。
- m. 待試驗完成,將試驗數據存檔後,關閉注水開關,打開洩 壓裝置使封塞逐步釋放壓力,待封塞內部壓力降至安全值 後小心將設備上移至後續觀測區段,或自孔中取出。
- n. 水力試驗數據之解析必須依據地質構造和含水層型態,包括裂隙含水層、侷限、自由、滲漏含水層等,選擇適合的理論模型來與試驗觀測資料進行匹配,進而解釋地下水流動行為模式,推估裂隙岩體含水層水文地質參數。而藉由理論模式亦可解釋試驗含水層的型態,以及試驗區段之孔徑、孔壁和邊界效應的影響,以輔助推估出最符合研究地區之水文地質參數。

3-99



圖 3-39:單封塞滲漏試驗設備配置



圖 3-40:資料記錄器測錄熱脈衝之量測波形



圖 3-41:熱脈衝流速儀於自然水流量測之儀器配置



圖 3-42: 孔內自然水流調查作業流程



圖 3-43:熱脈衝流速儀於抽水狀態量測之儀器配置



圖 3-44: 孔內抽水狀態調查作業流程



圖 3-45:水力干擾試驗現地基本配置範例



圖 3-46:封塞水力試驗設備配置

3.2.3 現地套鑽施作與變位量測標準作業

本試驗目的係利用孔內應變計配合鑽探直接量測場址岩體的自 然現地應力,並參考 ISRM(2006)、ASTM(2008)之規範訂定標準作業 程序,茲分述如下。

(1) 試驗設備

- a. 探測器(孔內應變計 Borehole Deformation Gauge, BDG):
 含9個電阻式應變計,安裝在3個環(Rosettes)上(每個環3個,各相差60°),每組應變計量測方向:(a)與鑽孔長軸
 平行方向;(b)與鑽孔長軸正交方向;(c)與鑽孔長軸夾45
 [°]方向,在此陣列組合下可代表空間上7個不同方向。應
 變計準確度達±13×10⁻⁵ mm、解析度達25×10⁻⁶ mm,內建
 溫度感應計以評估套鑽過程溫度影響讀值的程度。
- b. 鑚機設備:包括鑽機、鋼纜、鑽頭、(內建)鑽孔清洗刷等。
- c. 校正夾具(Calibration Jig):用在試驗前後校正感應計應變 量測值。
- d. 雙軸試驗設備(Biaxial Testing Equipment):包括荷重計、
 壓力計、油壓幫浦及應變指示器,用在現地量測試體的彈 性楊氏模數及柏松比。
- e. 其它:包括資料記錄器、手提電腦、黏著劑(Glue)、安裝 工具轉接頭(Cell Adapter)及訊號纜線。
- (2) 試驗流程
 - a. 取用「套鑽法現地應力量測紀錄表」,並將量測數據記錄
 於表內。
 - b. 試驗前須校正探測器,尤其是探測器曾遭受震動等因素而 嚴重影響讀值。
 - c. 先鑽一孔徑為 76 mm 的主孔至預定深度,用刨刀(Planing Tool)研磨孔底使其平順,預定深度決定要件包括:(a)岩

性為均質;(b)不得有開口裂隙,如試驗段不符上述要件, 應再繼續鑽掘1m至3m到下一個試驗段。

- d. 鑽一個孔徑 36 mm 的小孔,檢視小孔岩心以確認試驗段 岩體是否適合進行量測。
- e. 清洗鑽孔將鑽掘岩屑去除,過程中檢視回收孔水水質及小孔開放性(openness),並檢查回收孔水是否有岩屑。應於進行套鑽前 10 min 至 15 min 沖洗鑽孔。
- f. 組裝探測器,利用黏著劑將應變計固定在探測器上,藉安裝桿(Iinstallation Tool)將探測器安裝在小孔中,應變計應 埋入小孔(Pilot Hole)深度至少約 70 mm 處。
- g. 安裝桿上需固定一陀螺儀以確保推進之方向,用安裝桿前端鼻錐(Nose Cone)施壓將量測元件(Gauge)固定在小孔中,並將安裝桿與探測器分離自洞中取出。
- h. 將探測器放置隔夜直到黏著劑完全硬化後進行套鑽,記錄
 應變計讀值變化。
- i. 待套鑽至預定深度後截斷岩心並將其自岩心管(Core Barrel)取出。於套鑽完成後 5 min 至 10 min 沖洗鑽孔, 在小孔岩心取出前應先靜置 5 min 至 10 min,以觀察溫度 或其他非理想(Non-ideal)岩石行為是否對應變讀值造成 影響。
- j. 在取回岩心或拆解應變計前應確認資料已確實記錄。
- k. 於現場進行雙軸試驗或由鄰近鑽孔岩心,進行靜彈性模數
 量測,以用於計算現地應力。
- 記錄試驗資料,包括鑽進速度、轉速及洗孔相關資訊(時 間或水質等)、套鑽試體長度、鑽孔同心度(Concentricity, 即小孔兩端岩心的厚度)、參考線及岩心的參考位態(由陀 螺儀讀數確認)、應變計位置(確認應變計環之分布差異為 120°)、岩性描述,包含微裂隙(Microcracks)位置、間距及 位態、描述岩石結構及表徵,包括片理、節理及其位態特

徵(如傾向及傾角),如取出之岩心有裂隙,需載明其位置、 位態及破壞特性。

(3) 參數計算

根據前項數據進行參數計算,並將計算結果登錄至「套鑽法 現地應力量測成果表」,各參數計算方法如後。

$$f_1 = D(1 + 2\cos 2\theta)(1 - \nu^2)/E + D\nu^2/E$$
(3-12)

$$f_2 = -Dv/E \tag{3-13}$$

$$f_3 = D(1 - 2\cos 2\theta)(1 - \nu^2)/E + D\nu^2/E$$
(3-14)

$$f_4 = D(4\sin 2\theta)(1 - \nu^2)/E$$
 (3-15)

$$J_1 = f_1 l_1^2 + f_2 l_2^2 + f_3 l_3^2 + f_4 l_1 l_3$$
(3-16)

$$J_2 = f_1 m_1^2 + f_2 m_2^2 + f_3 m_3^2 + f_4 m_1 m_3$$
(3-17)

 $J_3 = f_1 n_1^2 + f_2 n_2^2 + f_3 n_3^2 + f_4 n_1 n_3$ (3-18)

$$J_4 = 2f_1l_1m_1 + 2f_2l_2m_2 + 2f_3l_3m_3 + f_4(l_1m_3 + l_3m_1)$$
(3-19)

$$J_5 = 2f_1m_1n_1 + 2f_2m_2n_2 + 2f_3m_3n_3 + f_4(m_1n_3 + m_3n_1)$$
(3-20)

$$J_6 = 2f_1m_1l_1 + 2f_2n_2l_2 + 2f_3n_3l_3 + f_4(n_1l_3 + n_3l_1)$$
(3-21)

$$U = J_1 \sigma_x + J_2 \sigma_y + J_3 \sigma_z + J_4 \tau_{xy} + J_5 \tau_{yz} + J_6 \tau_{zx}$$
(3-22)

其中,

D=鑽孔直徑, [m]。 heta=鑽孔徑向軸與坐標空間水平向之夾角, [°]。 v=柏松比。 $E=彈性模數, [N/m^2]。$ $f=空間係數, [m^3/N]。$ $J=方向係數, [m^3/N]。$ U=試驗量測之變位, [m]。 $<math>\sigma= 正應力, [N/m^2]。$ $\tau= 剪應力, [N/m^2]。$ m, l, n=鑽孔空間座標系統 X, Y, Z 軸修正, 修正式如下: $<math>l_1=X'軸與 X 軸之方向餘弦。$ m_1 =X'軸與Y軸之方向餘弦。 n_1 =X'軸與Z軸之方向餘弦。 l_2 =Y'軸與X軸之方向餘弦。 m_2 =Y'軸與Y軸之方向餘弦。 n_2 =Y'軸與Z軸之方向餘弦。 l_3 =Z'軸與X軸之方向餘弦。 m_3 =Z'軸與Y軸之方向餘弦。 n_3 =Z'軸與Z軸之方向餘弦。

3.3 地質構造及大地應力調查

3.3.1 現地應力量測技術演練

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2018年修訂版)」 第7.1.1.4節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第5.4.1.節規 劃執行,其目標在於盤點孔內現地應力調查技術,在目前在無特定場 址的情況下,依規劃建立現地應力量測之標準作業程序,井孔崩落法 主要是結合四軸井徑量測與孔內攝影結果進行現地應力方向之分析, 因此需求環境主要為裸孔狀態,其主要適用於破碎程度相對低之火成 岩、變質岩與成岩作用較佳之沉積岩,本工作考量井孔崩落法(四軸 井徑量測探頭搭配孔內攝影調查分析)僅需於裸孔狀態下以探頭方式 施作(Plumb and Hickman, 1985; Ringgaard, 2007),較套鑽法、平鈑千 斤頂法及水力破裂法之試驗流程簡易、快速且場地限制條件較少,故 選為優先技術建置項目。

3.3.1.1 四軸井徑量測

本試驗之目的係利用高解析度井徑探測儀量測鑽孔的井徑剖面, 同時交互比對孔內攝影結果,做為探討現地應力方向之依據,並參考 ISRM (2006)之規範訂定標準作業程序,茲說明如下。

(1) 試驗設備

- a. 探測器(Caliper Sonde):可伸張或縮短3軸至6軸(arm)彈簧臂量測井徑,訊號不受地下水影響,但僅適用在裸孔的條件下施測。
- b. 裝甲鋼纜(Armoured Cable):用以懸吊探測器及傳輸訊號。
- c. 鋼纜絞盤(Winch)及三腳架(Tripod):用以架設及吊放探測器。
- d. 轉盤(Mast):上方安裝已校正滑輪(Sheave),用以記錄探 測深度。
- e. 地表供電設備:於現場提供系統之電源。
- f. 資料記錄器及控制盒:用以顯示井徑隨深度變化及存取資料。
- (2) 試驗流程
 - a. 取用「現地井測調查紀錄表」,並將基本資料、施測參數、
 試驗概況等記錄於表內。
 - b. 先進行探測器校正,採用已知內徑的大小金屬環(各一個) 來校正探測器的井徑量測值,至少校正 2 次,大環的內徑 需大於孔徑最大值,小環的內徑須小於孔徑最小值,如探 測器有方向指示器(如陀螺儀),亦須於探測前校正。
 - c. 於鑽孔上方組裝轉盤及三腳架,並調整使其對準鑽孔中心點,其後將探測儀吊放在鑽孔適當位置。
 - d. 連接所有電源線、深度訊號傳輸線,並透過電腦介面確認
 成功連結。
 - e. 打開探測器及資料記錄器電源,將初始深度歸零。
 - f. 收縮彈簧臂,將探測器下放至孔內底端初始位置。
 - g. 打開彈簧臂,將探測器以4 m/min 至 20 m/min 的速度拉升,記錄井徑隨深度變化。
 - h. 其他記錄資料包括孔位、孔號、深度、傾斜度及方向、鑽
 頭尺寸、套管深度及內徑、吊放速度。

- 待整孔側錄完成後將訊號存檔,關閉探測儀及記錄器的電
 源,收縮彈簧臂後將探測儀自孔中取出,確認探測儀無異
 狀後清洗並妥善收藏。
- j. 完成數據彙整後,將井測結果登錄至「孔內井測調查成果 表」。

3.3.1.2 孔內攝影

本試驗之目的在於連續掃描鑽孔內影像剖面來獲取鑽孔岩層狀況、特殊地質構造、節理以及裂隙分布情形,以評估岩層破碎程度、特殊地質構造描述、計算場址主要不連續面位態叢集,並參考 ISRM (2014)之規範訂定標準作業程序,茲說明如下。

(1) 試驗設備

- a. 探測器:依探測原理不同可分為音射式及光學式兩種來掃描孔壁的全景(Panoramic)影像。其中音射式探測儀需藉由地下水做為傳播訊號的媒介,因此僅能在有水的鑽孔中施測,如孔內地下水位過深,則應採用光學式探測儀,惟在探測過程須保持水質清晰,以維持影像的解析度。此外,探測儀直徑通常介於40 mm 至72 mm,適用的孔徑約在42 mm 至180 mm,孔徑<110 mm 的影像品質較佳,且探測器需內建陀螺儀以進行影像定向。</p>
- b. 裝甲鋼纜(Armoured Cable):用以懸吊探測器及傳輸訊號, 如為垂直鑽孔(傾斜角度介於 75°至 90°)要足以承受探測 儀重量及水壓,尤其是深井調查時,如為水平或傾斜角度 介於 0°至 75°之鑽孔則需要量測桿(Measuring rods)輔助。
- c. 鋼纜絞盤(Winch)及三腳架(Tripod):用以架設及吊放探測器。
- d. 轉盤(Mast):上方安裝已校正滑輪(Sheave),用以記錄探 測深度。
- e. 地表供電設備:於現場提供系統之電源。

- f. 資料記錄器及控制盒:用以顯示孔壁影像隨深度變化及存 取資料。
- g. 鑽井設備:鑽機(Drilling Rig)應輕便、易操控、具備鑽掘 垂直孔及水平孔能力,不論是衝鑽(Percussive)或旋鑽 (Rotative)皆可接受,但鑽孔應用清水沖洗乾淨。在某些狀 況下,如岩盤上方為土層或風化岩盤,可採用套管保護 (Lining),鑽進保持穩定,轉速應控制低於 600 rpm,使孔 壁表面平順。
- (2) 試驗流程
 - a. 取用「現地井測調查記錄表」,並將基本資料、施測參數、
 試驗概況等記錄於表內。
 - b. 於鑽探過程先行記錄不連續面的深度、位態及開口寬度 (Aperture)。
 - c. 鑽探完成後必須確實將岩屑或沉積物洗出,再以清水清洗 乾淨,在某些軟弱或破碎岩層會在孔中添加皂土以穩固孔 壁,此類鑽孔採用光學式探測器較不容易有效探測,因此 要特別針對這些區段洗孔後再行施測。
 - d. 如鑽孔有發現嚴重崩塌導致探測儀無法順利下放,則需再 下放鑽桿洗孔處理之,在任何處理方式皆無法順利施作情 況下,則應當廢孔並鑽新孔重新施測。
 - e. 於探測前分析岩心紀錄及地質柱狀圖,瞭解地層及地下水狀況,或地質因鑽探造成的缺陷,盡可能讓試驗場址平坦以利置放所有設施。
 - f. 連接幫浦及水線以利清洗驗孔岩屑、泥漿或沉澱物。
 - g. 於鑽孔上方組裝轉盤及三腳架,並調整使其對準鑽孔中心點,其後將探測儀吊放在鑽孔適當位置。
 - h. 連接所有電源線、影像及深度訊號傳輸線,並透過電腦介 面確認成功連結。
 - 打開探測器及資料記錄器電源,將初始深度歸零,吊放探 測儀開始進行影像側錄,側錄過程探測儀應由上至下緩慢

下放,吊放速度保持穩定,一般會低於 1.5 m/min 以獲得清晰影像。

- j. 於側錄時記錄地下水位、岩體完整度或裂隙狀況。
- k. 待整孔側錄完成後將影像存檔,關閉探測儀及記錄器的電源,小心的將探測儀自孔中取出,確認探測儀無異狀後清洗並妥善收藏。
- 完成數據彙整後,將井測結果登錄至「孔內攝影調查成果 表」。

3.3.1.3 井孔崩落法技術演練初步成果

本節主要說明利用音射式孔內攝影進行現地應力方向量測之演 練初步成果,目前可透過孔內攝影之井孔崩落(breakout)分布特性,量 測不同深度的現地應力方向分布特性,如圖 3-47 及圖 3-48,可發現 地層深度除了與應力大小有關外,對於其主應力方向亦有明顯的影 響,後續將再與其他井測訊號進行比較分析。



圖 3-47:現地應力方向變化情形(明顯 breakout 現象-深色區段)



(a) 深度 60 m 至 80 m

最小主應力(breakout)方向:75.8° 最大主應力:165.8°





(b)深度 80 m 至 100 m

圖 3-48:不同深度之現地應力方向分布情形

3.3.2 區域應力模式建置

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2018年修訂版)」 第7.1.1.4.節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第5.4節規劃 執行,其目的在於彙整109年度之岩樣分析結果、本工項地表露頭調 查結果、以及臺灣本島結晶岩地區岩石力學性質與裂隙幾何特性資 料,並蒐集臺灣本島結晶岩地區現地應力大小及其主應力方向等資 料,歸納研究區域之岩石力學特性與瞭解區域應力場分布,以建置離 散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)模型以及三維區域應力 模式,各項成果茲說明如後。

3.3.2.1 裂隙幾何特性

(1) 地表裂隙

本工作已針對臺灣本島結晶岩地區進行地表露頭調查,並利 用無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)對1組露頭 進行三維點雲模型建置,而後分析其裂隙分布情形。本項工 作選定露頭之岩性為花崗片麻岩,在傳統調查方法部分,由 於該露頭位處溪流對岸,人車無法直接到達,故於公路側之 露頭進行調查(圖 3-49),由該露頭共發現六組裂隙,包含一 組片麻理、一組解壓節理,以及另外四組節理,其位態與間距 等資料如表 3-13 所示,此結果亦將提供作為後續三維點雲模 型分析成果比對使用。

基於空間中至少三個點便可形成一個面的概念,本項工作利 用點雲資料進行裂隙的萃取,而為了避免萃取出過少點雲所 構成的零碎面,本項工作設定每個裂隙面至少需包含2,000個 點雲,惟此數值可視露頭岩石特性或UAV拍攝成果而定。 透過上述程序,本工作總計於該露頭萃取出17,231個裂隙(圖 3-50、圖 3-51),並利用其位態資料進行赤平投影分析,由各 組裂隙之位態統計結果可以得知(表 3-14),同組裂隙之走向 與傾角角度的標準差大致都在10°左右,而8組裂隙中,共有 6組可與公路旁露頭之裂隙調查結果對應,並可額外發現2組

3-117

在公路旁露頭較不明顯之裂隙,顯示此方法確實可更全面性 的涵蓋完整露頭裂隙資料,進一步比對後亦可發現,點雲分 析結果與公路旁實際量測結果之位態差值大致都在一個標準 差左右,其中片麻理之走向與傾角差值更僅各為1°及3°,顯示 三維點雲模型成果與現地量測數值相當接近,未來可更廣泛 應用於人車不可及之露頭調查,且透過大量資料統計結果, 亦可計算各組裂隙之平均值、標準差等資訊。

(2) 井下裂隙

本工項利用臺灣本島東部結晶岩區之既有鑽井調查資料進行 井下裂隙分布統計,分析結果顯示,裂隙分布之位態甚為集 中(圖 3-52),其叢集位態約為 N85.97°E/49.09°W,而破碎帶 分 布 之 位 態 與 裂 隙 相 當 接 近 , 其 叢 集 位 態 約 為 N78.62°E/47.37°W,其中,最大破碎帶寬度達 1.22 m,最小則 約為 4.58 cm,各數據均可提供未來相關模式建置分析時參考 使用。

表 3-13:公路旁露頭之裂隙調查結果

編號	位態	間距	備註
1	N34E/46E		片麻理
2	N84E/85S		解壓節理
3	N70E/36S	70 cm	中等角度向東南傾斜之裂隙
4	N34E/62E	110 cm	中高角度向下游倾斜之裂隙
5	NS/84E	30 cm	高角度向下游倾斜之裂隙
6	N32E/74W	140 cm	高角度向上游倾斜之裂隙

表 3-14:露頭三維模型之裂隙分析結果

編號	叢集位態	平均值	標準差	備註	與公路旁露頭量 測結果差值
1	N35E/49E	走向:N35.1E 傾角:50.7E	走向:10.8° 傾角:10.8°	片麻理	走向:1° 傾角:3°
2	N71E/75S	走向:N71.3E 傾角:73.8S	走向:11.0° 傾角:9.7°	解壓節理	走向:13° 傾角:10°
3	N66E/41S	走向:N68.9E 傾角:39.7S	走向:9.6° 傾角:9.7°	對應公路旁露頭 之編號3裂隙	走向:4° 傾角:5°
4	N69E/82N	走向:N70.0E 傾角:78.7N	走向:11.4° 傾角:7.7°	無	
5	N40E/77E	走向:N36.1E 傾角:78.6E	走向:8.8° 傾角:5.6°	對應公路旁露頭 之編號4裂隙	走向:6° 傾角:15°
6	N81W/77S	走向:N76.9W 傾角:73.7S	走向:8.0° 傾角:9.2°	無	
7	N10E/80E	走向:N7.6E 傾角:76.7E	走向:7.3° 傾角:8.4°	對應公路旁露頭 之編號5裂隙	走向:10° 傾角:4°
8	N39E/81W	走向:N35.5E 傾角:78.8W	走向:8.5° 傾角:7.7°	對應公路旁露頭 之編號6裂隙	走向:7° 傾角:7°



```
圖 3-49:公路側比對用之露頭
```



圖 3-50:完整露頭三維模型點雲資料及萃取之裂隙



圖 3-51:露頭三維模型局部放大之點雲資料及萃取之裂隙



圖 3-52:井下裂隙分布統計圖

註:圖中粉紅色圓點代表裂隙,灰色圓點代表破碎帶。

3.3.2.2 應力場數據

岩石變形行為除受其材料特性影響外,區域應力場亦為關鍵的影響因素,因此,本工作蒐集臺灣本島結晶岩案例岩體之應力大小及其 主應力方向等資料,目的在於歸納研究區域之應力場分布,並藉由主 應力方向判別其屬於正斷層應力場、逆斷層應力場或走向滑移斷層應 力場,茲分述如後。

(1) 應力場調查成果

臺灣本島結晶岩案例岩體曾進行多項應力場調查,其使用方法包含非彈性應變回復法、斷層擦痕、震源機制及全球衛星 定位系統等,茲分述如後。

- a. 非彈性應變回復法:李偉誠(2015)利用 HCBH01 深度 133.605 m 至 575.700 m 之間的九段岩心進行分析,在鑽 探取出岩心後,立即於試體表面黏貼應變計,並量測各方 向隨時間改變的非彈性應變量,進而計算各主應力大小, 其結果顯示,HCBH01 的應力場為正斷層應力場,且拉張 方向為東北-西南向,研究中進一步指出,該孔岩心的非 彈性應變過程僅約四天就不再有顯著變化,且各個樣本之 間的非彈性應變回復量並無隨深度變化的現象,並推測該 孔岩心為非異相性,且孔隙率偏低。
- b. 斷層擦痕:林朝彦(2015)利用和平地區野外調查與岩心描述之斷層擦痕資料進行古應力反演,其中,野外的擦痕資料以大理岩為主,而岩心的擦痕資料則以變質花崗岩為主,研究指出該區的構造先後順序可分為6期,依序為:
 (a)區域葉理與早期石英礦脈:反應歐亞板塊與菲律賓海板塊斜向碰撞時期的逆斷層應力場;(b)假玄武玻璃:同造山時期之陷落構造所形成的正斷層應力場;(c)壓扁構造:亦為同造山時期之陷落構造所造成;(d)急折帶:沖繩海槽擴張所形成之走向滑移斷層應力場;(e)斷層擦痕:可分為早期的走向滑移斷層應力場以及後期的正斷層應力場;

(f)開口導水裂隙與方解石脈:拉張性環境所造成之正斷層應力場。

- c. 震源機制:Huang 等人(2012)利用震源機制解析的應力結 果顯示,和平以北的區域為正斷層應力場,和平以南為逆 斷層應力場,而和平地區則位於過渡轉換帶,以走向滑移 斷層應力場為主。台電公司亦曾以 2011 年 7 月至 2012 年 8 月之地震觀測資料解析應力場(台電公司,2013),其結 果指出在淺於 10 km 的範圍內以正斷層應力場為主,而 深度在 10 km 以下的範圍則以逆斷層應力場為主。
- d. 全球衛星定位系統:Hsu 等人(2009)利用 1993 至 1999 年 間的 GPS 速度場資料進行分析,其結果顯示臺灣東北部 之地表位移有順時鐘旋轉的現象,而和平一帶的應變場為 南北向擠壓的環境。
- (2) 現地應力數據彙整

由各觀測方法所獲得之現地應力數據彙整如表 3-15 所示,其 中,非彈性應變回復法之結果顯示(李偉誠,2015),HCBH01 在深度 575.7 m 以內的範圍均為正斷層應力場,其σ₁、σ₂與σ₃ 的應力梯度分別為 26 MPa/km、22 MPa/km 與 19 MPa/km,而 軸差應力之梯度則約為 7 MPa/km。

斷層擦痕之結果則顯示(林朝彦,2015;Wu et al.,2014;王珮 玲,1998),和平溪下游及 HCBH01 的古應力場可分為 6 期, 包含:(a) 4.1 Ma 至 3 Ma 間,北偏東 83°擠壓之逆斷層應力 場,形成區域葉理;(b)3 Ma 左右,北偏東 51°拉張之正斷層 應力場,形成假玄武玻璃;(c)1.5 Ma 至 1.09 Ma,南北向擠 壓之走向滑移斷層應力場,形成急折帶;(d)南偏西 67°擠壓 之走向滑移斷層應力場;(e)北偏西 84°拉張之正斷層應力場; (f)北偏東 69°拉張之正斷層應力場,形成開口填充裂隙。

震源機制與全球衛星定位系統方面,Huang 等人(2012)與 Hsu 等人(2009)之研究結果均顯示和平地區為走向滑移斷層應力 場,前者更進一步指出最大、最小主應力方向各約為北偏東 69.2°、北偏西 25.4°。台電公司的研究則顯示(台電公司, 2013),深度 10 km 附近為正、逆斷層應力場的分界。

表 3-15:臺灣本島結晶岩案例之應力場數據

σ1 (MPa)	σ2 (MPa)	σ3 (MPa)	σ1方向 (trend/ plunge, °)	σ2方向 (trend/ plunge, °)	σ3方向 (trend/ plunge, °)	量測深度 (m)	年代 (Ma)	應力場	使用 方法	参考文獻
3.8	3.1	2.4	165.9/61.2	286.1/15.4	23.3/23.7	133.605 至 133.805	N/A			李偉誠(2015)
8.1	4.6	3.4	52.1/61.8	144.8/1.4	235.6/28.2	267.650 至 267.830	N/A			
8.8	6.2	3.8	32.1/62.7	126.2/2.1	217.3/27.3	292.000 至 292.170	N/A	 正斷層 	非性變復	
10.3	5.8	4.3	299.7/65.6	52.1/9.8	146.1/22.2	352.330 至 352.570	N/A			
10.6	8.7	7.0	259.3/80.9	133.8/5.3	43.1/7.4	399.360 至 399.660	N/A			
12.7	8.1	6.8	356.5/66.1	111.7/10.7	205.9/21.2	446.130 至 446.330	N/A			
13.3	10.7	7.3	161.8/73.7	331.1/16.1	61.9/2.8	493.350 至 493.600	N/A			
14.2	9.8	9.2	351.0/77.8	172.5/12.2	82.5/0.3	530.390 至 530.600	N/A			
16.3	12.3	9.7	335.2/66.0	75.9/4.7	168.0/23.5	575.440 至 575.700	N/A			
N/A	N/A	N/A	83/23	183/22	312/57	N/A	4.1 至 3	逆斷層		林朝彦(2015)、吳等人 (Wu et al., 2014)、王珮 玲(1998)
N/A	N/A	N/A	305/65	145/24	51/8	N/A	3	正斷層		
N/A	N/A	N/A	113/2	17/72	204/18	N/A	1.5 至 1.09	走向滑移斷層	 擦痕	
N/A	N/A	N/A	113/2	17/72	204/18	N/A	N/A	走向滑移斷層		
N/A	N/A	N/A	46/65	181/18	276/16	N/A	N/A	正斷層		
N/A	N/A	N/A	262/65	161/5	69/24	N/A	N/A	正斷層		
NI/A	NI/A	NI/A	60 2/16 8	204 8/67	224 6/15 2		1994 A.D.至	走向滑移斷層	震源	Huang 等人(Huang et
IN/A	IN/A	IN/A	09.2/10.8	204.8/07	554.0/15.2	IN/A	2005 A.D.		機制	al., 2012)
NI/A	NI/A	NI/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2011 A.D.至	淺於 10 km 為正斷層、	震源	台電公司(2013)
IN/A	IN/A	N/A	IN/A	IN/A	IN/A	1N/A	2012 A.D.	深於 10 km 為逆斷層	機制	
									全球	Hsu 等人(Hsu et al., 2009)
N/A N/A	N/A	N/A	A N/A N/A	N/A	N/A	N/A	1993 A.D.至	走向滑移斷層	衛星	
	1N/ A			1N/A			1999 A.D.		定位	
									系統	

資料來源:李偉誠(2015);林朝彦(2015);吳等人(Wu et al., 2014);王珮玲(1998); Huang 等人(Huang et al., 2012);台電公司(2013); Hsu 等人(Hsu et al., 2009)。

3.4 長期監測與樣本分析技術

根據原能會「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」第8條要 求,「場址避免位於地質構造有明顯抬升、沉降、褶皺或斷層活動變 化的地區」。臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交接處,屬於一地 質特性(如震源分布、地表變形等)複雜的區域,為使台電公司未來在 評選場址分析作業時能有足夠且客觀的震源分布及地表變形作為參 考依據,台電公司持續規劃於臺灣板塊邊界區域,佈設臨時寬頻地震 站及 GPS (Global Positioning System) 地表變形連續觀測站,以便對 板塊邊界區域的地震活動與地表變形進行長期的連續監測。

國外先進國家早已將 GPS、OBS 與微震等長期監測資料應用於 場址合適性調查;以北歐國家芬蘭為例,在 1995 年即針對 Olkiluoto 場址建立 GPS 觀測網,隔年又納入 Kivetty 與 Romuvaara 場址增設 GPS 定期觀測項目,持續長期監測與分析至 2005 年,藉以量測各場 址裂隙帶與地表之變形(Ahola et al., 2006)。針對 Olkiluoto 場址的 GPS 監測工作,也自 1994 年持續觀測至 2021 年,以累積足夠的觀測數 據,估算各測站之水平與垂直速度場變動(Haapalehto et al., 2021)。為 建立觀測區地表變形及地震相關資料,須透過長時間累積足量之連續 觀測結果,以分析區域地表變形變化量及地震分布特性,進而瞭解區 域應力與應變特性及相關背景資訊。

3.4.1 全球衛星定位連續監測與時序分析

(1) 研究目的

由於臺灣本島花崗岩體區域位於歐亞板塊與菲律賓板塊交接 處,同時受到不同板塊運動隱沒作用影響。本項工作由歷年 GPS 連續觀測站解算成果顯示,此區域在水平速度場方面為 速度方向的轉折區域,垂直速度場方面則靠近海岸地區皆呈 現沉陷的趨勢,越往山區則沉陷趨勢越不明顯。本項工作自 101 年度起持續記錄 GPS 連續觀測站觀測數據,針對臺灣本 島花崗岩體區域進行長期性觀測,以瞭解區域岩體的抬升或 沉陷趨勢,逐步發展調查與解析技術,逐年累積並建立臺灣

3-128
本島花崗岩體地區相關地質構造分析所需之基礎數據,作為 建立臺灣本島花崗岩體區域地表變形趨勢評估之參考依據。

(2) 研究內容

本項目為長期監測工作,自 101 年度起持續記錄 GPS 連續 觀測站觀測數據,針對臺灣本島花崗岩體之地表變形趨勢, 利用本計畫既有之 GPS 連續觀測站,持續進行連續觀測站之 資料解析,逐年累積觀測資料與觀測數據分析,據以探討臺 灣本島花崗岩體分布區域地表變形趨勢。110 年度工作規劃 項目包含:

- a. 累積觀測區內既有 GPS 連續觀測站之觀測資料(至 110年),並蒐集觀測區內其他單位所設置之連續觀測站資料。
- b. 以時序分析方法與空間濾波技術處理 GPS 連續觀測資料,改善資料精度,提升地表變形信號,獲得觀測區之水 平速度場及垂直速度場,以探討區域地表之變形趨勢。
- (3) 執行成果
 - a. 觀測區內 GPS 連續觀測資料蒐集

為進行後續地表變形分析,本項觀測資料蒐集板塊邊界研究區域鄰近其它單位所屬 GPS 連續觀測站觀測數據與分析成果。110 年度蒐集之 GPS 連續觀測站觀測資料包括:

- (a) 自 109 年度起計畫新增建置之 GPS 連續觀測站,包括 HGCJ、HGCF、HGCD、HGCA、HGCE、HGCI、HGCX、HGCC等站,陸續於 109 年 10 月後啟動觀測記錄,資料累積約 1 年或不足 1 年。
- (b) 用過核子燃料最終處置計畫所建置之 GPS 連續觀測 站,觀測數據蒐集自 2011 年 8 月迄 2020 年 12 月底 止,包括了 HGC1、HGC2 與 HGC3 等站累積 9 年多 的觀測資料;HGC4 站於 2014 年 1 月開始觀測,已持 續累積了7年的觀測資料;2017 年 4 月之後另有5站 GPS 連續觀測站陸續建置完成,只累積3年半左右的 觀測資料。目前這系列觀測站已於 2021 年 1 月起停

止觀測任務,現正重新規劃復建 HGC1 連續觀測站, 藉以接續已長達9年的觀測成果。

- (c)來自於「臺灣東部地震研究中心」(E-TEC; Eastern Taiwan Earthquake Research Center)的觀測資料與分 析成果,該中心是在國科會計畫補助下,結合中央氣 象局、國家地震工程研究中心、中央地質調查所及相 關學術機構,共同合作建置於國立東華大學內,研究 中心持續對臺灣東部地震進行相關的觀測與研究整 合。觀測資料成果包括自 2011 年以來的 GPS 連續觀 測站長期監測,如表 3-16 所列示之各站,後續將討 論其三維坐標解算與時間序列分析的結果。
- b. 地表變動長期趨勢分析與成果
 - (a) 用於時序分析的觀測資料如下:
 - I. 用過核子燃料最終處置計畫執行成果,時間期距 自 2011 年 8 月至 2020 年 12 月,GAMIT/GLOBK 程式(King, 2002; King and Herring, 2002)套用 ITRF2014 框架解算三維坐標成果。
 - II. 臺灣東部地震研究中心分析成果,時間期距自
 2011年至 2021年11月,使用 GAMIT/GLOBK 程式 (King, 2002; King and Herring, 2002)套用
 ITRF2014框架解算三維坐標成果。
 - III. 本期計畫執行觀測記錄成果,使用 Bernese (Dach, et al.,2007)程式套用 ITRF2014 框架解算三維坐 標成果。
 - (b) 用於時間序列與雜訊分析的工具程式包括:
 - I. MIT GGMatlab 工具程式(Herring, 2003)。
 - II. TSAnalyzer 工具程式(Wu, 2017)。

III. CATs 程式(Williams, 2008)。

(c) GPS 時間序列使用以下方程式(Nikolaidis, 2002)來表示,上述時序分析工具程式皆以此基礎進行開發,進

行相關的趨勢估算,以獲得定量估計濾波後坐標序列 的特性,分析坐標序列的頻譜特徵與季節性變化的特 點(Langbein and Johnson, 1997, Mao et al., 1999,; Nikolaidis, 2002,; Williams, 2003)。

$$y(t_{i}) = a + bt_{i} + c \sin(2\pi t_{i}) + d \cos(2\pi t_{i}) + e \sin(4\pi t_{i}) + f \cos(4\pi t_{i}) + \sum_{j=1}^{n_{k}} g_{j}H(t_{i} - T_{gj}) + \sum_{i=1}^{n_{h}} h_{j}H(t_{i} - T_{hj})t_{i} + \sum_{j=1}^{n_{k}} k_{j}exp(-(t_{i} - T_{kj})/\tau_{j})H(t_{i} - T_{kj}) + v_{i}$$
(3-23)

其中,

- a 為截距;
- b為震間地殼線性移動速率;
- c、d:年週期變化;
- e、f:半年週期變化;
- gj:同震位移或更換儀器天線的偏移量;
- hj: 震後線性移動速率;
- kj: 震間指數衰減係數;
- vi:测量殘差;
- H: 階梯函數;
- tj: 鬆弛時間。

- (d) 時序分析成果
 - I. 分析用過核子燃料最終處置計畫觀測成果的時序 資料,使用 CATs 與 GGMatlab 工具程式分析結 果如表 3-17 所列示。
 - II. 本期計畫執行解算成果,使用 TSAnalyzer 工具程 式分析結果如表 3-18 所列示。
 - III.使用臺灣東部地震研究中心研究整合平台之 GPS 連續觀測站的成果資料,使用 CATs 與 GGMatlab 工具程式分析時間序列中線性趨勢、週期性變化、 雜訊大小與同震變形等參數歸納結果如表 3-19 所列示。
 - IV. 由表 3-17 顯示在 2018 年花蓮地震前、後時間序 列圖來看,大致地震後 HGC1-4 連續站都有加速 往東南東方向移動趨勢,垂直向變動由微幅下降 轉為上升約 8mm/yr 至 22 mm/yr 間。
 - V. HGCA 至 HGCJ 之時間序列只有數個月資料,所 以計算出之速度場誤差較大,建議累積足夠的觀 測量,才能獲得比較可靠的速度場值。
- (e) 雜訊特性分析
 - I. 進一步將 GPS 每日坐標時間序列資料進行頻譜分析,可以對其雜訊性質與強度獲得進一步的了解, 經過空間濾波後之時間序列,更能代表實際的地 表位移,獲取高精確度的估計速度場值(饒瑞鈞, 2014)。該研究亦指出,若要能夠考慮到 GPS 連續 站的週期特性,進行速度場估計的最小時間段應 大於 2.5 年。
 - II. 以用過核子燃料最終處置計畫觀測成果的時序資料,透過CATs進行雜訊種類頻譜分析,歸納成果如表 3-20 所示,可以發現大部分雜訊以週期性雜訊為主。

- III. 經過分析發現測站並非單一由白噪聲(White Noise)所影響,反而是有色噪聲(Colored Noise)高 於白噪聲,這樣的影響無法單獨以長時間單站的 資料累積而去除誤差;且後續須累積足夠長的時 序資料,方可以空間濾波的方式來去除測站間週 期性的誤差,降低雜訊對 GPS 時序資料的影響, 提升估算 GPS 速度場之精度。
- (f) 長期變動趨勢說明
 - I. 水平方向速度場:
 - (I) 由表 3-19 與圖 3-53(a)可以明顯看出,在 ITRF2014 參考框架下,大部份水平速度場變 動方向往東南,在花蓮地區縱谷北段與海岸 山脈略呈東北方向,靠近合歡山一帶則是往 北或東北;速度場量級最大可達 65.57 mm/yr 在蘇澳站(SUAO),速度場最小的則在梅峰站 (MFEN)約 2.53 mm/yr。處置計畫所建置各站 水平速度場變化特性,與區域之變動方向一 致,大部份皆朝東南。
 - (II) 藍色箭矢標示的部分為本計畫觀測站之解析成果,包括前期所建置的 HGC1、HGC2、HGC3 與 HGC4 等站,與本期計畫新增建置的 GPS 連續觀測站(HGCA、HGCD、HGCE、HGCJ與 HGCF)。新增建置的各站,因觀測時間較短(僅 一年或未滿一年),多為圖中誤差橢圓較大者, 代表分析成果誤差較大。
 - (III) 扣除花蓮地震同震的位移影響,與本計畫 新增 GPS 連續觀測站之時序分析成果資料如 表 3-18、表 3-19 與圖 3-53(a)所示,可以看 出這些 GPS 連續觀測站皆為往東南東方向的 水平移動趨勢,雖然本計畫新增之 GPS 連續

觀測站,資料時間序列太短,計算出的速度場 誤差較大,但水平變動趨勢與水平速度場變 動方向趨勢與本區相鄰其他觀測站甚為一致。

II. 相對澎湖白沙站之水平速度場

若針對澎湖白沙站(S01R)進行速度場修正處理, 藉以探討區域性相對水平變動之特性。由表 3-19、表 3-21 與圖 3-54(a)等資料顯示,相對於 白沙站約以花蓮和平地區為一個速度場方向變化 的轉折帶,在和平地區的北端宜蘭至南澳地區, 水平速度場略朝東南至南南東,而在和平地區的 南端靠近立霧溪處約略轉向西,在往南至花蓮銅 門或鳳林一帶與脊梁山脈地區,皆朝向西北西至 西北的方向,沿台7甲線靠近宜蘭地區則又轉向 為北北東。整體調查區水平速度場呈現一個順時 針的轉向變化,其中心位置約在花蓮和平地區。 水平速度場的量級約在 1.49 mm/yr 至 42.85 mm/yr之間。

- III. 垂直方向速度場
 - (I)由表 3-19 與圖 3-53(b)可以明顯看出,在 ITRF2014 參考框架下,靠海岸地區如宜蘭平 原、蘇澳至和平一帶與海岸山脈北段垂直速 度場的變動趨勢明顯沉陷,而靠山區的部份 則是明顯抬升;沉陷的速度量級最大可至 -13.28 mm/yr 在南澳站(NAAO),抬升最為顯著 的則是在亞泥站(NDH8)約 36.94 mm/yr。
 - (II) HGC1、HGC2、HGC3與HGC4等站扣除花蓮 地震同震的位移影響,與本計畫新增GPS連 續觀測站(HGCA、HGCD、HGCE、HGCJ與 HGCF)之時序分析成果資料如表 3-18 與圖 3-53(b)所示,可以看出除了HGC1、HGC4 略

為抬升外,其餘各站皆為沉陷的垂直變動趨勢。本計畫新增之白沙橋站(HGCE),由於資料時間序列短,受到環境遮蔽訊號影響大,致觀測資料品質較差,計算出的垂直速度場誤差相對較大。

IV. 相對澎湖白沙站之垂直速度場

若針對澎湖白沙站進行速度場修正處理,以期探 討區域性相對垂直變動之特性。由表 3-19、表 3-21、與圖 3-54(b)等資料顯示,靠海岸地區如宜 蘭平原、海岸山脈一帶垂直速度場的變動趨勢明 顯沉陷,而靠山區的部份則是明顯抬升。沉陷的 速度量級最大可至 -10.86 mm/yr 在南澳站 (NAAO),抬升最為顯著的則是在亞泥站(NDH8) 約 39.36 mm/yr。

c. 綜合評估

依據原能會於 2013 年 1 月 18 日發布之「高放射性廢棄 物最終處置及其設施安全管理規則」及 2017 年 3 月 29 日 訂定發布之「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」, 對於處置設施場址之要求,須避免位於「地殼具明顯上升 或侵蝕趨勢的地區」;本項工作據以廣泛蒐集潛在母岩分 布區域之 GPS 連續觀測站成果,並加密設置觀測站進行 長期監測,以獲得地表抬升或沉陷的長期變動趨勢,提供 建置處置場的參考依據。依現階段 GPS 連續觀測資料分 析成果顯示,臺灣東部結晶岩區域仍具有潛力,尚無發現 不利處置之因素 將持續進行觀測與分析。

表 3-16:調查區鄰近之 GPS 連續觀測站一覽表

項次	测站	测站代碼	站名	所屬單位	經度	緯度	测站高程	資料解算期距	接收儀型號	天線型號	天線柱形式
	代碼										
1	BLOW	BLOW	布洛灣	CWB	121.57125	24.17176	375	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
2	CHNT	CHNT	崇德	CWB	121.66190	24.14921	38	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
3	CLAN	CLAN	棲蘭	CWB	121.51201	24.60225	453	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
4	HNSN	HNSN	環山	CWB	121.30807	24.33770	2002	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
5	HUAL	HUAL	花蓮	CWB	121.61352	23.97539	46	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	屋頂型
6	HUAN	HUAN	合歡山	CWB	121.27263	24.14348	3421	2012/12-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型深錨鋼架式
7	HUAP	HUAP	和平國小	CWB	121.74945	24.30900	43	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
8	ILAN	ILAN	宜蘭	CWB	121.75663	24.76404	28	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
9	JYAN	JYAN	佳陽	CWB	121.22635	24.24247	1967	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
10	MFEN	MFEN	梅峰	CWB	121.17248	24.08216	2236	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型深錨鋼架式
11	NAAO	NAAO	南澳	CWB	121.81022	24.44934	25	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型深錨鋼架式
12	NDHU	NDHU	東華大學	CWB	121.55082	23.89724	57	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
13	NIUT	NIUT	牛鬥	CWB	121.56159	24.63478	386	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
14	NSAN	NSAN	南山	CWB	121.38281	24.42820	1132	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
15	PEPU	PEPU	北埔	CWB	121.61034	24.01788	36	2012/12-2019/07	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型深錨鋼架式
16	SHUL	SHUL	水璉國中	CWB	121.56274	23.78762	58	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
17	SLIN	SLIN	西林	CWB	121.44141	23.81186	202	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM115000.00	地上型鋼架式
18	SLNP	SLNP	雙連埤	CWB	121.63564	24.75312	491	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
19	SOFN	SOFN	壽豐	MOI	121.59817	23.87027	58	2012/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	屋頂型
20	SPAO	SPAO	西寶	CWB	121.48487	24.20502	984	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
21	SUAO	SUAO	蘇澳	CWB	121.86709	24.59239	24	2011/08-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
22	TUNM	TUNM	銅門	CWB	121.49358	23.96521	195	2012/12-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式
23	YENL	YENL	東管處	CWB	121.60185	23.90351	88	2012/05-2021/10	TRIMBLE NETRS	TRM57971.00	地上型鋼架式

註:單位名稱縮寫:中央氣象局(CWB)、內政部地政司(MOI),東華大學臺灣東部地震研究中心(NDHU)。

表 3-16:調查區鄰近之 GPS 連續觀測站一覽表(續)

項次	测站代碼	站名	所屬單位	緯度	經度	測站高程	資料解算期距	接收儀型號	天線型號	天線柱形式
24	NDH1	化仁國小	NDHU	121.59559	23.96236	49	2013/10-2021/10	Septentrio polaRx4	G5ANT_52AT1	屋頂型
25	NDH2	南華國小	NDHU	121.54738	23.94823	112	2013/10-2018/12	Septentrio polaRx4	G5ANT_52AT1	屋頂型
26	NDH3	太昌國小	NDHU	121.56526	23.99549	93	2013/10-2021/10	Septentrio polaRx4	G5ANT_52AT1	屋頂型
27	NDH4	鯉魚山	NDHU	121.51987	23.91679	605	2014/10-2021/10	Septentrio polaRx4	G5ANT_52AT1	屋頂型
28	NDH5	美崙校區	NDHU	121.61812	24.01004	65	2014/10-2021/10	Septentrio polaRx4	G5ANT_52AT1	屋頂型
29	NDH6	台泥	NDHU	121.73103	24.30302	946	2017/04-2021/10	Leica GR30	Leica AR25	水泥柱式
30	NDH7	和平港	NDHU	121.75516	24.29532	27	2017/04-2021/10	Leica GR30	Leica AR20	屋頂型
31	NDH8	亞泥	NDHU	121.60511	24.11571	705	2017/06-2021/10	Leica GR30	Leica AR25	水泥柱式
32	NDH9	美崙山	NDHU	121.61277	23.99017	103	2017/06-2021/10	Leica GR30	Leica AR20	水泥柱式
33	NDHA	金洋國小	NDHU	121.74923	24.42681	134	2017/04-2021/10	Leica GR30	Leica AR20	水泥柱式

註:單位名稱縮寫:中央氣象局(CWB)、內政部地政司(MOI),東華大學臺灣東部地震研究中心(NDHU)。

	GGMatlab分析地震前	GGMatlab分析地震後
5日月	2011/08至2018/02	2018/03至2020/12
HGC1-North	-18.39 ± 0.04	-19.80 ± 0.07
HGC1-East	38.57 ± 0.03	39.01 ± 0.04
HGC1-Up	1.36 ± 0.09	3.53 ± 0.23
HGC2-North	-23.43 ± 0.05	-24.49 ± 0.07
HGC2-East	32.19 ± 0.05	33.57 ± 0.08
HGC2-Up	-6.36 ± 0.11	-4.19 ± 0.15
HGC3-North	-21.39 ± 0.05	-22.34 ± 0.07
HGC3-East	29.91 ± 0.04	31.29 ± 0.08
HGC3-Up	-4.11 ± 0.10	-2.14 ± 0.15
HGC4-North	-24.48 ± 0.11	-26.26 ± 0.09
HGC4-East	41.05 ± 0.09	41.47 ± 0.08
HGC4-Up	-3.00 ± 0.22	2.05 ± 0.23
HGC5-North	-39.46 ± 6.00	-28.15 ± 0.12
HGC5-East	43.94 ± 3.69	46.59 ± 0.11
HGC5-Up	-36.68 ± 13.54	5.45 ± 0.29
HGC6-North	-128.43 ± 23.21	-24.07 ± 0.17
HGC6-East	132.3 ± 15.04	49.73 ± 0.17
HGC6-Up	-157.53 ± 29.16	2.99 ± 0.32
HGC7-North	-120.59 ± 17.26	-31.18 ± 0.18
HGC7-East	84.24 ± 8.37	43.04 ± 0.14
HGC7-Up	-115.66 ± 25.36	4.35 ± 0.30
HGC8-North	-54.10 ± 9.90	-18.03 ± 0.14
HGC8-East	12.31 ± 11.18	23.33 ± 0.18
HGC8-Up	-57.19 ± 33.92	43.84 ± 0.38
HGC9-North	12.52 ± 16.76	-3.97 ± 0.21
HGC9-East	40.95 ± 14.28	16.86 ± 0.19
HGC9-Up	-170.59 ± 52.31	21.11 ± 0.82

表 3-17:經時序分析所得各方向分量速度場比較表

註:資料分析採用 CATs(Williams, 2008, p147)和 GGMatlab (Herring, 2003, p194)等工具程式。

表 3-18:經時序分析所得各方向分量速度場比較表(含本期新站)

測站 代號	测站 名稱	V _N	V _E	V _h	水平 速度	方位角 (°)	資料解算期距
HGC1	和平	-19.92	38.10	2.33	42.99	117.60	2011/08-2020/12
HGC2	和中	-24.92	32.51	-5.04	40.96	127.47	2011/08-2020/12
HGC3	和仁	-22.77	30.23	-3.17	37.85	126.99	2011/08-2020/12
HGC4	澳花	-25.35	41.14	0.11	48.32	121.64	2014/01-2020/12
HGCA	立霧山	-14.56	22.35	-4.96	26.67	123.08	2021/03-2021/09
HGCD	和平林道	-12.13	29.39	-3.46	31.79	112.43	2020/11-2021/09
HGCE	白沙橋	-12.80	22.39	12.24	25.79	119.76	2021/03-2021/09
HGCF	碧侯	-19.02	37.47	-0.84	42.02	116.91	2020/10-2021/09
HGCJ	武塔	-18.37	33.46	-7.49	38.17	118.77	2020/10-2021/09

註 1:其中 2018 年 2 月 6 日花蓮發生規模 ML 6.26 強震, HGC1-HGC4 計算 之速度場已扣除地震所造成之同震變形部分。

註 2: 資料分析採用 CATs(Williams, 2008)和 GGMatlab (Herring, 2003)等工具 程式。

註 3:水平速度場角度以北方為 0°起算;速度單位為 mm/yr。

項次	测站	站名	資料解算期距	V _N	V _E	V _h	水平 速度	方位角 (°)	V _N	V _E	V _h	水平 速度	方位角 (°)
	代碼				IT	RF 2014 框	架			相對澎湖	朝白沙参考立	ቴ(S01R)	. ,
1	BLOW	布洛灣	2012/05-2021/10	-9.09	23.37	6.25	25.08	111.25	-5.02	-5.00	8.67	7.09	44.89
2	CHNT	崇德	2012/05-2021/10	-13.76	29.22	21.64	32.30	115.22	-9.69	0.85	24.06	9.73	174.99
3	CLAN	棲蘭	2011/08-2021/10	-10.63	36.32	5.07	37.84	106.31	-6.56	7.95	7.49	10.31	129.53
4	HNSN	環山	2011/08-2021/10	-2.54	22.51	24.02	22.65	96.44	1.53	-5.86	26.44	6.06	104.63
5	HUAL	花蓮	2012/05-2021/10	-2.04	12.47	-1.38	12.64	99.29	2.03	-15.90	1.04	16.03	97.28
6	HUAN	合歡山	2012/12-2021/10	1.63	12.06	21.02	12.17	82.30	5.70	-16.31	23.44	17.28	109.26
7	HUAP	和平國小	2011/08-2021/10	-25.03	36.67	2.47	44.40	124.32	-20.96	8.30	4.89	22.54	158.40
8	ILAN	宜蘭	2011/08-2021/10	-19.87	38.43	-2.64	43.26	117.34	-15.80	10.06	-0.22	18.73	147.51
9	JYAN	佳陽	2012/05-2021/10	3.84	19.22	6.07	19.60	78.70	7.91	-9.15	8.49	12.10	130.84
10	MFEN	梅峰	2012/05-2021/10	2.51	-0.28	5.61	2.53	173.63	6.58	-28.65	8.03	29.40	102.93
11	NAAO	南澳	2011/08-2021/10	-32.92	42.15	-13.28	53.48	127.99	-28.85	13.78	-10.86	31.97	154.47
12	NDHU	東華大學	2012/05-2021/10	0.27	5.3	-5.71	5.31	87.08	4.34	-23.07	-3.29	23.47	100.65
13	NIUT	牛鬥	2011/08-2021/10	-8.31	37.22	1.4	38.14	102.59	-4.24	8.85	3.82	9.81	115.60
14	NSAN	南山	2011/08-2021/10	-5.09	27.29	1.19	27.76	100.57	-1.02	-1.08	3.61	1.49	46.64
15	PEPU	北埔	2012/12-2019/07	-5.88	15.19	18.61	16.29	111.16	-1.81	-13.18	21.03	13.30	82.18
16	SHUL	水璉國中	2012/05-2021/10	15.36	5.21	5.33	16.22	18.74	19.43	-23.16	7.75	30.23	129.99
17	SLIN	西林	2012/05-2021/10	0.12	5.96	18.04	5.96	88.85	4.19	-22.41	20.46	22.80	100.59
18	SLNP	雙連埤	2012/05-2021/10	-14	34.85	-2.9	37.56	111.89	-9.93	6.48	-0.48	11.86	146.87
19	SOFN	壽豐	2012/08-2021/10	13.63	7.64	-7.95	15.63	29.27	17.70	-20.73	-5.53	27.26	130.49
20	SPAO	西寶	2012/05-2021/10	-5.39	23.09	17	23.71	103.14	-1.32	-5.28	19.42	5.44	75.96
21	SUAO	蘇澳	2011/08-2021/10	-39.67	52.21	0.96	65.57	127.23	-35.60	23.84	3.38	42.85	146.19
22	TUNM	銅門	2012/12-2021/10	-5.03	7.58	27.21	9.10	123.57	-0.96	-20.79	29.63	20.81	87.36
23	YENL	東管處	2012/05-2021/10	11.8	9.55	8.12	15.18	38.98	15.87	-18.82	10.54	24.62	130.14

表 3-19:調查區鄰近之 GPS 原參考框架與相對於 S01R 之速度場比較表

註:水平速度場角度以北方為0°順時針方向起算;速度單位為mm/yr。。

項次	測站 代碼	站名	資料解算期距	V _N	V _E	V _h	水平 速度	方位角 (°)	V _N	V _E	V _h	水平 速度	方位角 (°)
	T V MARY			ITRF 2014 框架						相對澎	胡白沙参考ゴ	ቴ(S01R)	
24	NDH1	化仁國小	2013/10-2021/10	-6.63	10.43	5.7	12.36	122.44	-2.56	-17.94	8.12	18.12	81.88
25	NDH2	南華國小	2013/10-2018/12	-1.84	8.47	8.17	8.67	102.26	2.23	-19.90	10.59	20.02	96.39
26	NDH3	太昌國小	2013/10-2021/10	-11.15	12	21.2	16.38	132.90	-7.08	-16.37	23.62	17.84	66.61
27	NDH4	鯉魚山	2014/10-2021/10	-10.86	3.52	9.38	11.42	162.04	-6.79	-24.85	11.80	25.76	74.72
28	NDH5	美崙校區	2014/10-2021/10	-16.14	17.14	7.47	23.54	133.28	-12.07	-11.23	9.89	16.49	42.94
29	NDH6	台泥	2017/04-2021/10	-20.88	48.04	-0.38	52.38	113.49	-16.81	19.67	2.04	25.87	130.52
30	NDH7	和平港	2017/04-2021/10	-27.37	41.07	0.98	49.35	123.68	-23.30	12.70	3.40	26.54	151.41
31	NDH8	亞泥	2017/06-2021/10	-15.16	22.07	36.94	26.78	124.49	-11.09	-6.30	39.36	12.75	29.60
32	NDH9	美崙山	2017/06-2021/10	-0.11	16.45	7.93	16.45	90.38	3.96	-11.92	10.35	12.56	108.38
33	NDHA	金洋國小	2017/04-2021/10	-24.5	44.58	2.98	50.87	118.79	-20.43	16.21	5.40	26.08	141.57

表 3-19:調查區鄰近之 GPS 原參考框架與相對於 S01R 之速度場比較表(續)

註:水平速度場角度以北方為0°順時針方向起算;速度單位為mm/yr。。

GPS Site	white noise(mm)	colored noise(mm)	days
HGC1 (N)	2.2721 ±0.1018	6.6328 ±0.5672	1078
HGC1 (E)	1.6068 ±0.1440	8.8617 ±0.5710	1078
HGC1 (U)	20.6341 ±0.5923	17.9746 ± 5.1634	1078
HGC2 (N)	2.3740 ±0.0990	7.1518 ±0.5360	1078
HGC2 (E)	1.2468 ±0.1793	9.4824 ±0.5609	1078
HGC2 (U)	8.1649 ±0.2621	13.5166 ± 1.7704	1078
HGC3 (N)	2.2307 ±0.1117	7.7788 ±0.5711	1078
HGC3 (E)	1.2273 ±0.1749	9.6375 ±0.5382	1078
HGC3 (U)	9.0613 ±0.3252	13.1165 ±2.5149	1078
HGC4 (N)	2.2751 ±0.0938	6.5271 ±0.5205	1078
HGC4 (E)	1.7163 ±0.1369	8.3498 ±0.5899	1078
HGC4 (U)	8.0360 ±0.3081	15.7255 ±2.0960	1078

表 3-20:GPS 連續站雜訊分析成果表

註 1:N 代表南北向分量,E 代表東西向分量,U 代表垂直向分量。

註 2: 白噪聲 = White Noise; 有色噪聲= Colored Noise。

表 3-21:最終處置計畫 GPS 速度場成果一覽表(相對 S01R)

测站 代號	测站 名稱	V _N	V _E	V _h	水平 速度	方位角 (°)	資料解算期距
HGC1	和平	-15.85	9.73	4.75	18.60	148.46	2011/08-2020/12
HGC2	和中	-20.85	4.14	-2.62	21.26	168.77	2011/08-2020/12
HGC3	和仁	-18.70	1.86	-0.75	18.79	174.32	2011/08-2020/12
HGC4	澳花	-21.28	12.77	2.53	24.82	149.03	2014/01-2020/12
HGCA	立霧山	-10.49	-6.02	-2.54	12.09	29.85	2021/03-2021/09
HGCD	和平林道	-8.06	1.02	-1.04	8.12	172.79	2020/11-2021/09
HGCE	白沙橋	-8.73	-5.98	14.66	10.58	34.41	2021/03-2021/09
HGCF	碧侯	-14.95	9.10	1.58	17.50	148.67	2020/10-2021/09
HGCJ	武塔	-14.30	5.09	-5.07	15.18	160.41	2020/10-2021/09

註1:三維速度值為相對於參考白沙站(S01R)之成果。

註 2:水平速度場角度以北方為 0°起算;速度單位為 mm/yr。



圖 3-53:調查區內各 GPS 連續觀測站 ITRF2014 參考框架之速度場

註 1:(a)水平向速度場;(b)垂直向速度場(箭頭向下表示沉陷,箭頭向上表示抬升)。 註 2:各站資料時間期距請詳參表 3-16。



圖 3-54:調查區內各 GPS 連續觀測站相對於澎湖白沙站(S01R)之速度場

註 1:(a)水平向速度場;(b)垂直向速度場(箭頭向下表示沉陷,箭頭向上表示抬升)。 註 2:各站資料時間期距請詳參表 3-16。

3.4.2 微震監測及資料解析

(1) 研究目的

本計畫自 99 年度起已陸續於本島花崗岩區架設高密度且包 覆性佳的微震監測網,持續累積長期的地震觀測資料、進行 地震活動度及地震特性分析等相關研究。然而臺灣位處活躍 板塊交界帶,地震產生與岩體破裂彼此間交互作用及關係亦 相對複雜,難以劃定一特定時間區段及空間範圍,完善描述 該區域地震概況。因此,為了提供更完整的岩體受震之影響 性評估,有必要維持微震監測網的長期監測,並納入氣象局 及相關研究單位地震網資料,解算地震資料及分析震源特 性,並彙整過往分析資料,進行系統化統計分析。

另本項工作資料解析已執行多年並逐年設定階段性目標,陸續對監測區進行地震危害度、地震活動度及區域地震機制應 力分析、地震發生機率及破裂規模等研究,並對潛在目標岩 體提出相關重要資訊及建議。未來本項工作將考量納入安全 評估重要參數,評估處置場長期穩定安全分析。

(2) 研究內容

本項目為長期監測工作,研究內容為持續累積微震監測資料, 進行地震資料前處理及解算,並針對地震叢集進行分析,評 估斷層可能的衍生及分布資訊及活動潛勢。另,針對繁雜且 重複資料的前處理作業,建立自動化資料處理流程,以精進 資料前處理的效率,110年度工作項目包括:

- a. 地震站維護及持續蒐集微震監測網觀測資料,並進行地震 資料前處理與解算,評估地震叢集空間分布特性。
- b. 完成既有地震資料的系統化統計分析(含規模頻率分布
 圖、b-value 解釋與討論)。

c. 完成區域 3D 速度成像圖及潛在構造空間分布評估。

(3) 執行成果

本項長期監測工作至今已收錄相關國內研究單位共 25 個寬 頻微震觀測站,包含兩座海拔 2,800 m 以上的高山站,另加 入海底地震儀補充東部海域觀測,以提高所收集地震測站後 方位角包覆度並連續記錄揀選區域微小地震活動。期藉由完 整連續觀測建立地震叢集資訊,並探討板塊邊界的孕震機制 與地殼活動構造特性。相關執行成果說明如下:

a. 海底地震儀設置

本年度海底地震儀觀測使用民間私有海釣船「天隆號」進 行布放及回收,觀測時間自 2021 年 3 月 30 日至 2021 年 4 月 23 日止,使用儀器為 MicrOBS Plus 海底地震儀,共 布放 5 顆海底地震儀並全數成功回收,布放時船隻位置座 標如表 3-22。儀器回收時利用聲波釋放器喚醒 OBS,啟 動熔斷保險絲的機制,使 OBS 脫離重錘並浮上海面後回 收,回收時船隻位置座標如表 3-23,布放與回收位置比 較如圖 3-55。經初步檢視回收測站之觀測資料後,可見 各站皆可確實記錄到因地震事件所產生之振幅訊號,另將 所記錄之資料對比氣象局所記錄之較大規模之地震報告, 如 2021 年 4 月 18 日 22 時 11 分 39.5 秒在花蓮縣政府西 南方 19.1 公里發生芮氏規模 5.8 的有感地震,及隨後 3 分 鐘發生的芮氏規模 6.2 地震,震央位在花蓮縣政府西南方 20.4 公里處,OBS 均清楚接收到此有感地震波型資料(圖 3-56)。

b. 地震震源叢集分布(平面分布與深度分布)

本項目持續從連續波形資料中選取出微震事件的 P 波、S 波初動時間,逆推地震發震時間與震源位置,並計算地震 規模以進行地震目錄資料庫建構。本年度收錄自 2019 年 觀察震源分布情形,震源深度主要分布淺於 30 km,投影 至地表後可見地震多分布於南澳至和平沿海地區,推測為 板塊交界處,主要發震機制由板塊構造活動如碰撞、隱沒 所引起(圖 3-57(a) Zone 1)。另以深度做為分類依據,將 震源深度 0 至 20 km,每 5 公里繪製一水平剖面如圖 3-58, 可見南澳至和平沿海地區由淺至深皆可觀察到地震發生,

而深度 10 至 20 km 間區域內地震則集中於此區域。觀測 區西側,另有一群地震事件叢集,該叢集震源深度相較於 沿海地區較淺,大約集中分布於深度 2 km 至 8 km 間(圖 3-57 (a) Zone 2),此地震群可能肇因於高磁力基盤與較軟 弱岩體接觸應力集中之破裂行為有關。此兩地震叢集間, 呈現地震相對安靜帶(Relatively Aseismic Zone)之特徵, 此區域地震發生頻率明顯偏低,據本島東部花崗岩體地震 活動研究指出(台電公司,2019),經比對不同高程之微震 密度分布及花崗岩體出露範圍,發現花崗岩體屬於地震頻 率較低的區域,而震源則是密集分布於花崗岩與圍岩接觸 帶或圍岩內部,故推測地震活動可能與本島花崗岩體存在 有關,此一推測亦可由圖 3-58 中 0 至 5 km 之震源分布 圖所觀察到,和平岩體與開南崗岩體間存在一密集地震分 布,另飯包尖山岩體周圍亦出現明顯與花崗岩體構造相似 之線型地震分布。

c. 地震資料系統化統計分析

彙整之地震連續資料進行挑選判釋後,初步分析針對地震發生個數進行時序統計分析。地殼中的地震規模分布通常遵循古登堡-里希特冪定律(Gutenberg&Richter,1944): log10N = a-bM,其中 a 是地震總數,b 是地震數量相對規模的分布特性,N 是震級等於或大於的地震數。b 值決定 了冪定律的斜率,用於描述頻率地震規模分布,高 b 值代 表小地震數量較多且大地震數量較少。分析全區地震事件 記錄時間起自 2019 年 10 月至 2021 年 5 月,其規模頻率 分布如圖 3-59 所示,使用最小完整規模(Mc)評估方法為 最大曲率法(Maximum Curvature Approach, Wiemer and Wyss, 2000; Mignan and Woessner, 2012)。最小完整規模 對應 b 值關係如圖 3-60 所示,最小完整規模 Mc 為 1.2 時,所得之 b 值為 0.92±0.01,線性擬合程度高。Chen et al. (2019, p403)曾針對此監測區 1973 至 2018 年間的 10

起規模較大的地震序列進行 b 值分析,約略為 0.63 至 0.96。

另將淺層地震深度 0-10 km,並依 10 km 格點間距,進行 b 值分區統計分析,由於監測時間及目錄完整度不易規範 及量化,使用不同地震數量篩選條件,進行初步統計分析 測試結果如圖 3-61,分析結果顯示西側地震叢集 b 值小 於 1,而東側地震叢集區 b 值則大於 1,普遍趨勢偏高。

d. 區域三維速度成像及潛在構造分布評估

本 案 採 用 雙 差 分 層 析 成 像 法 (Double-Difference Tomography Method, TomoDD Method) (Zhang and Thurber, 2003), 在多次疊代過程中, 初達波走時殘差方均 根(Root Mean Square, RMS),分別從原先的 0.7045 降低 90.9% 至 0.0640 秒, 有效降低模型與定位誤差, 使得運算 所得之參數更為符合觀測資料。圖 3-62 為三維 P 波速度 模型之高程切面圖,圖中紅色代表低速,藍色代表高速。 續將地震震源叢集分布套疊已知斷層位置及花崗岩位置 如圖 3-63,並由震源叢集分布推估潛在構造分布線型位 置如圖中黑色虛線,另為明顯區分震源叢集,以深度 15 km 做為分界點, 繪製圖 3-64 及圖 3-65, 初步綜合觀察 可見南澳至和平沿海地區,無論是地震分布、斷層走向及 本計畫推測之線型構造,與地表露頭花崗岩體分布走向相 似,自南段明顯北北東-南南西線形特徵,位於海岸山脈 與中央脊梁山脈之縫合帶向北延伸之地帶,至北段則轉為 東-西向或東南-西北向,有明顯順時針旋轉特徵。地震多 發生於和平溪口,南北向沿海岸線分布。此區域地震成因 及叢集分布型態往西北傾沒特徵(圖 3-66,紅色箭頭標示 隱沒方向)及覆瓦狀構造模式(圖 3-66,灰色線段標示地 震密帶集),與菲律賓海板塊隱沒構造特徵相符,對比所 蒐集的文獻中, Huang et al. (2014)所提出的板塊邊界構造 理論模型同樣指出菲律賓海板塊自板塊前緣基盤上方,向

北隱沒至歐亞大陸板塊下方,並以向西傾的方式在北臺灣下方產生碰撞,因此產生沿板塊邊界排列之地震事件。

表 3-22:OBS 布放經緯度及深度資訊表

站位	布	放經度	有	「放緯度	布放深度
OBS01	122度	1.625分	24度	21.235分	2869.49公尺
OBS02	122度	5.137分	24度	12.444分	3251.0公尺
OBS03	122度	6.149分	24度	4.510分	2914.53公尺
OBS04	122度	1.197分	23度	59.928分	3023.74公尺
OBS05	121度	57.068分	23度	51.504分	3158.15公尺

表 3-23:OBS 回收經緯度及深度資訊表

站位	回收	經度	回	收緯度	回收深度
OBS01	122度	1.726分	24度	21.593分	2877.03公尺
OBS02	122度	5.253分	24度	12.932分	3249.51公尺
OBS03	122度	6.276分	24度	5.019分	2934.83公尺
OBS04	122度	1.385分	24度	0.391分	3025.23公尺
OBS05	121度	57.505分	23度	52.332分	3113.78公尺



圖 3-55:2021 年海底地震儀布放位置圖

註:紅色三角形為OBS實際布放點,藍色三角形是OBS回收點。



圖 3-56:2021 年 4 月 18 日 22 時地震報告與 OBS 波型資料



圖 3-57:調查區地震觀測資料成果

註:(a)2019年10月至2021年5月之地震事件分布,圖中圓點為地震事件,其地震事件震源深度以顏色標示,由淺至深為暖色系(紅)至冷色系(紫),Zone 1為主要地震發震區域,Zone 2為觀測區西側地震叢集;(b)為沿經度線投影深度40 km內之地震分布;(c)為沿緯度線投影深度40 km內之地震分布。



圖 3-58:調查區 0至 20 公里地震分布水平剖面圖

- 註1:圖為二度分帶座標系統(TWD97);圓點為2019年10月至2021年5月期間, 震源深度0至20公里之地震事件分布,其震源深度以顏色標示,由淺至深為 暖色系(紅)至冷色系(紫);紅色線段為已知斷層地表位置。
- 註2: (a)-(d)分別為震源深度0至5 km、5至10 km、10至15 km及15至20 km之震 源分布位置。



圖 3-59:調查區地震規模-頻率圖

註:資料起迄為 2019年 10 月至 2021 年 5 月。



圖 3-60: b-value 線性評估



圖 3-61:調查區 0-10 公里淺層地震 b-value 分區圖

註 1:網格設定為 10km,最小規模 0.9,搜尋半徑 6 km。 註 2:最低網格篩選條件: 30(a,b)、40(c,d)及 50(e,f)。 註 3:事件選取數量: 100(a,c,e)及 150(b,d,f)。



圖 3-62:棋盤格測試恢復區域之速度成像



圖 3-60:棋盤格測試恢復區域之速度成像(續)



圖 3-63:調查區地震分布與推估線型構造

註:圓點為 2019 年 10 月至 2021 年 5 月之地震事件,其震源深度以顏色標示, 由淺至深為暖色系(紅)至冷色系(紫);紅色線段為已知斷層地表位置;黑 色虛線為本計畫觀測後推估之線型構造。



圖 3-64: 淺層(<15 km)地震分布與推估線型構造



圖 3-65:深層(>15 km)地震分布與推估線型構造

註:圓點為篩選 2019 年 10 月至 2021 年 5 月期間地震事件,其震源深度以顏 色標示,由淺至深為暖色系(紅)至冷色系(紫);紅色線段為已知斷層地表 位置;黑色虛線為本計畫推估之線型構造。



圖 3-66: 地震震源三維空間分布

註:色階標示深度為0至40km之震源,(a)-(d)分別為三維空間逆時針不同視 角。(a)為西南向東北俯視;(b)為由南向北;(c)為由東南向西北;(d)為由 東往西俯視。紅色箭頭標視菲律海板塊往西北隱沒方向,灰色虛線為地震 密集帶,可能為潛在構造。

3.5 地質描述模型與資料視覺化技術

3.5.1 岩石力學場址特徵化技術與模式發展

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2018 年修訂版)」 第7.1.1.6節,以及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第5.6.4 節之相關規劃執行,其目的在於蒐集臺灣本島結晶岩地區既有文獻及 調查報告內之岩石試驗數據,並彙整台電公司於 109 年度完成之 13 項岩石試驗數據,其統計結果已彙整於表 3-24、表 3-25,並可歸納 以下初步結論:

- (1) 由分析結果可知(圖 3-67),變異係數大於1之參數包含大理 岩之吸水率、大理岩之孔隙率(依變異係數由高至低排列), 其參數不確定性均偏高,若用於模式建置時,可能導致模式 不確定性增加。
- (2)各項岩石熱學性質參數中,雖以花崗片麻岩之熱擴散係數具 有最高之不確定性,然其變異係數僅 0.15,相較於其他岩石 力學參數而言,仍屬相當穩定的參數。

本工作亦已彙整前述資料,以離散裂隙網路(DFN)建立初步之三 維區域應力模式,過程中所使用之重要參數概如表 3-26 所示。本工 作初步分為2種方式進行建模,包含單層建模與多層建模,前者係以 井孔全深資料不分層建置單一模式,後者則以每200m深度為單位建 置多層模式。

單層建模之成果如圖 3-68 所示,該圖中主要呈現依據井孔裂隙 資料所產製之離散裂隙網路模型,而圖 3-69 則為三層建模之成果及 其在受應力作用後之位移情形,該模型之裂隙分布較單層建模更為細 緻(圖 3-70),有利於後續與其他鑽孔或裂隙調查資料進行比對檢核。 另外需注意,由於此成果主要係根據臺灣本島結晶岩既有鑽井之井下 裂隙分布統計結果進行建置,因受限於鑽井數量極為有限,且分布較 為單一,此成果僅建議使用於特定小範圍區域,不應作為廣域範圍(區 域尺度)使用。

表 3-24:臺灣本島東部結晶岩之岩石力學試驗參數

試驗及 參數名稱	岩性	完成組 數	最大值	最小值	第一 四分位數	中位數	第三 四分位數	平均值	標準差	變異係數		
		•		岩石-	一般物理性質試驗	儉(合計120組)						
人儿旦	花崗片麻岩	78	0.18%	0.02%	0.03%	0.04%	0.05%	0.05%	0.03%	0.52		
含水重	大理岩	42	0.36%	0.03%	0.04%	0.05%	0.07%	0.07%	0.06%	0.88		
才吵声	花崗片麻岩	78	11.39%	2.60%	4.79%	5.15%	5.57%	5.29%	1.16%	0.22		
扎原平	大理岩	42	14.54%	0.60%	0.93%	1.41%	3.68%	2.75%	2.90%	1.05		
ヨーレダ	花崗片麻岩	78	0.84%	0.19%	0.26%	0.28%	0.31%	0.30%	0.10%	0.33		
吸水平	大理岩	42	0.60%	0.01%	0.03%	0.05%	0.12%	0.10%	0.12%	1.24		
留从手	花崗片麻岩	78	$2.77 t/m^3$	2.63 t/m ³	2.70 t/m ³	2.73 t/m ³	2.75 t/m ³	2.72 t/m ³	0.04 t/m ³	0.01		
单位 里	大理岩	42	2.75 t/m ³	2.49 t/m ³	2.68 t/m ³	2.69 t/m ³	2.71 t/m ³	2.68 t/m ³	0.05 t/m ³	0.02		
	消散耐久性試驗(合計124組)											
第2循環消散	花崗片麻岩	71	99.9%	99.4%	99.6%	99.7%	99.7%	99.7%	0.1%	0.001		
耐久性指數	大理岩	53	99.8%	98.9%	99.5%	99.6%	99.7%	99.6%	0.2%	0.002		
留厭改府	花崗片麻岩	84	153.6 MPa	28.9 MPa	79.1 MPa	108.3 MPa	132.0 MPa	103.3 MPa	31.7 MPa	0.31		
半座强反	大理岩	29	148.9 MPa	19.1 MPa	83.0 MPa	113.4 MPa	132.1 MPa	105.7 MPa	36.1 MPa	0.34		
				静	彈性模數試驗(合	計 113 組)						
提氏描載	花崗片麻岩	84	38.77 GPa	5.66 GPa	14.99 GPa	17.90 GPa	20.77 GPa	18.77 GPa	5.85 GPa	0.31		
初以供致	大理岩	29	80.78 GPa	20.67 GPa	44.30 GPa	69.83 GPa	75.55 GPa	60.32 GPa	18.38 GPa	0.30		
柏松叶	花崗片麻岩	84	0.36	0.10	0.13	0.15	0.20	0.17	0.05	0.32		
1012 10	大理岩	29	0.37	0.14	0.21	0.29	0.32	0.26	0.06	0.23		
	•		-	<u>,</u>	岩石潛變試驗(合	計100組)				-		
第1階段	花崗片麻岩	71	785.18 GPa	96.83 GPa	163.78 GPa	198.86 GPa	226.81 GPa	215.27 GPa	97.34 GPa	0.45		
彈性模數	大理岩	29	2757.09 GPa	457.50 GPa	914.64 GPa	1015.18 GPa	1015.18 GPa	525.41 GPa	148.95 GPa	0.28		
第2階段	花崗片麻岩	71	894.43 GPa	140.83 GPa	437.61 GPa	504.86 GPa	614.15 GPa	1162.52 GPa	537.77 GPa	0.46		
彈性模數	大理岩	29	2620.48 GPa	419.27 GPa	974.30 GPa	1446.56 GPa	1446.56 GPa	1355.47 GPa	575.21 GPa	0.42		
	三軸壓縮試驗(合計103組)											
尖峰強度凝	花崗片麻岩	94	104.26 MPa	0.15 MPa	20.44 MPa	37.13 MPa	57.11 MPa	39.73 MPa	23.99 MPa	0.60		
聚力	大理岩	9	63.98 MPa	16.21 MPa	16.21 MPa	50.26 MPa	61.24 MPa	44.67 MPa	18.18 MPa	0.41		
尖峰強度摩	花崗片麻岩	94	70.6°	4.2°	19.7°	27.7°	32.5°	27.6°	11.7°	0.42		
擦角	大理岩	9	32.5°	7.9°	13.4°	14.8°	24.9°	19.1°	8.8°	0.46		

表 3-24:臺灣本島東部結晶岩之岩石力學試驗參數(續)

試驗及	يلي يلي	完成組	里上仕	里儿佐	第一	由 / + +/-	第三	亚屿体	1金 걮 天	磁田龙机			
參數名稱	石性	數	取入值	取小狙	四分位數	111-32	四分位數	一个均值	保华左	罗共侨教			
				岩石	;直接剪力試驗(台	合計100組)							
泪怒取力	花崗片麻岩	76	2.2 N/m ²	0.0 N/m ²	0.6 N/m ²	0.8 N/m ²	1.1 N/m ²	0.9 N/m ²	0.5 N/m ²	0.54			
仍破水刀	大理岩	24	3.0 N/m ²	0.0 N/m ²	0.7 N/m ²	1.1 N/m ²	1.4 N/m ²	1.1 N/m ²	0.7 N/m ²	0.66			
泪麻按岛	花崗片麻岩	76	42.0°	13.5°	24.0°	28.0°	31°	27.1°	5.7°	0.21			
忧净探丹	大理岩	24	50.0°	21.0°	30.9°	35.5°	39°	35.2°	7.2°	0.21			
					巴西試驗(合計1	20組)							
台 廷 改 府	花崗片麻岩	70	15.2 MPa	2.5 MPa	7.4 MPa	9.2 MPa	10.5 MPa	9.1 MPa	2.6 MPa	0.29			
机浓浊及	大理岩	50	11.3 MPa	0.1 MPa	7.0 MPa	8.2 MPa	9.1 MPa	7.9 MPa	2.2 MPa	0.28			
	動彈性模數試驗(合計113組)												
動態楊氏模	花崗片麻岩	84	52.79 GPa	1.13 GPa	14.67 GPa	18.16 GPa	23.43 GPa	19.41 GPa	8.21 GPa	0.42			
數	大理岩	29	87.09 GPa	32.32 GPa	63.65 GPa	74.32 GPa	77.21 GPa	70.15 GPa	11.21 GPa	0.16			
動態剪力模	花崗片麻岩	84	22.36 GPa	4.65 GPa	7.23 GPa	9.50 GPa	11.47 GPa	9.84 GPa	3.16 GPa	0.32			
數	大理岩	29	33.60 GPa	13.89 GPa	25.05 GPa	28.60 GPa	29.56 GPa	27.20 GPa	4.06 GPa	0.15			
枯松止	花崗片麻岩	84	0.34	-0.95	-0.10	0.14	0.20	0.02	0.29	18.55			
和松口	大理岩	29	0.33	0.16	0.27	0.30	0.31	0.29	0.04	0.13			
		-			熱學性質(合計1	00組)							
熱傳導	花崗片麻岩	70	3.04 W/(m·K)	1.90 W/(m·K)	2.25 W/(m·K)	2.37 W/(m·K)	2.47 W/(m·K)	2.38 W/(m·K)	0.22 W/(m·K)	0.09			
係數	大理岩	30	2.97 W/(m·K)	2.04 W/(m·K)	2.61 W/(m·K)	2.65 W/(m·K)	2.76 W/(m·K)	2.66 W/(m·K)	$0.16 \text{ W/(m \cdot K)}$	0.06			
熱擴散	花崗片麻岩	70	1.63 mm ² /s	0.70 mm ² /s	0.96 mm ² /s	1.05 mm ² /s	1.13 mm ² /s	1.05 mm ² /s	0.16 mm ² /s	0.15			
係數	大理岩	30	1.63 mm ² /s	1.13 mm ² /s	1.18 mm ² /s	1.24 mm ² /s	1.28 mm ² /s	1.25 mm ² /s	0.11 mm ² /s	0.08			
止劫	花崗片麻岩	70	1.07 J/(g·K)	0.76 J/(g·K)	0.96 J/(g·K)	0.98 J/(g·K)	1.00 J/(g·K)	0.98 J/(g·K)	0.04 J/(g·K)	0.04			
と熟	大理岩	30	1.07 J/(g·K)	0.79 J/(g·K)	1.02 J/(g·K)	1.05 J/(g·K)	1.06 J/(g·K)	1.01 J/(g·K)	0.08 J/(g·K)	0.08			

表 3-25:臺灣本島東部結晶岩之裂隙試驗參數

裂隙正向勁度試驗(合計100組)											
正向勁度	花崗片麻岩	100	37.90	4.04	25.65	28.02	31.64	28.03	5.60	0.20	
			MPa/mm	MPa/mm	MPa/mm	MPa/mm	MPa/mm	MPa/mm	MPa/mm		
節理面抗壓強度試驗(合計116組)											
節理面	花岗片麻岩	82	55.4 MPa	3.4 MPa	8.1 MPa	12.7 MPa	22.5 MPa	16.2 MPa	10.5 MPa	0.65	
抗壓強度	大理岩	34	37.2 MPa	5.1 MPa	9.1 MPa	16.3 MPa	20.5 MPa	15.9 MPa	7.4 MPa	0.46	

参數		單層建模	多層建模				
		0 m至603 m	0 m至200 m	200 m至400 m	400 m至603 m		
	柏松比	0.15	0.18	0.14	0.14		
楊氏模數		17900.2 MPa	19088.1 MPa	17160.0 MPa	15187.6 MPa		
單位重		$2,740 \text{ kg/m}^3$	$2,750 \text{ kg/m}^3$	2,690 kg/m ³	2,690 kg/m ³		
現地力	垂直主應力	8.8 MPa	3.8 MPa	10.3 MPa	14.2 MPa		
	最大水平主	6.2 MPa	2 1 MDa	5.8 MDa	9.8 MPa		
	應力	0.2 IVIF a	5.1 WIF a	5.8 WIF a			
	最小水平主	3.8 MPa	2 4 MPa	4 3 MPa	$0.2 MD_0$		
	應力	5.0 WII a	2.4 WII a	4.5 MI a	<i>7.2</i> WII a		
	垂直主應力	32 10/62 70	165 0% 61 2%	200 7°/ 65 6°	351.0°/ 77.8°		
	方向	32.1 / 02.7	105.97 01.2	299.1705.0			
	最小水平主	最小水平主 217 30/ 27 30		146 19/ 22 29	172 50/ 12 20		
	應力方向	217.5727.5	23.3 / 23.1	140.1 / 22.2	172.3 / 12.2		

表 3-26: 區域應力場與岩石變形特性評估模式建置重要參數


圖 3-67:各項岩石力學參數之變異係數比較



圖 3-68:裂隙資料及初步離散裂隙網路參數集建置成果(單層)



圖 3-69:裂隙資料及初步離散裂隙網路參數集建置成果(分層)



圖 3-70:分層建置離散裂隙網路之裂隙分布概況

4. 工程設計

4.1 安全論證

4.1.1 初步安全論證報告

依據主管機關要求,處置技術仍需持續採滾動式檢討精進,依據 IAEA 所發布安全論證導則,參考「我國用過核子燃料最終處置技術 可行性評估報告(SNFD2017 報告)」國際審查及原能會審查意見,就 我國處置計畫階段及地質母岩特性,採取國際處置先進技術並於 110 年底提交「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告(以下簡稱 SNFD 2021 報告)」。初步安全論證報告的主要目的為(1)參考先進國 家處置概念,針對 SNFD 2021 報告設定之參考案例進行評估並論證 處置場之安全性、(2)根據初步安全論證報告評估結果將回饋予研發 計畫、未來場址調查工作、工程設計之發展及未來相關安全評估計畫、 (3)強化與利害關係者之間的對話,凝聚推動處置計畫的社會共識。

因我國目前尚未選定場址,故參考尚未完成選址的美國、英國、 加拿大、日本等國家,在無特定場址的情況下陸續完成通用型安全論 證報告的經驗,並輔以 SNFD2017 報告為基礎及歷年調查研究成果之 地質特性數據,建置研究用「參考案例」,藉由過去建立的相關技術 進行分析,提出量化證據,未來再透過國內外同儕審查及主管機關審 查過程進而達成共識,俾利我國處置技術符合國際水準,確保提升處 置設施安全性。

SNFD 2021 報告於國內專家審查及修訂完成後,已於 110 年底提送主管機關。後續將於 111 年度規劃辦理國際同儕審查,俾利完成初步安全論證報告。

SNFD 2021 報告之工程設計相關內容(第 4 章至第 9 章及第 14 章),110 年度成果如下說明:

第4章為處置設施初始狀態描述,處置設施系統初始狀態之詳盡描述是安全評估的基礎,包括(1)輻射源項與工程障壁初始狀態描述: a.輻射源項說明我國核一、核二及核三廠之核子燃料組件統計至 2019 年底,合計 BWR 用過核子燃料 17,890 束,以及 PWR 用過核子燃料 4.320 束(表 4-1)。並以各核電廠第一年處置時,廢棄物罐熱負載平均 值的最大者,加計 50 W的保守度(SKB, 2010c),作為處置時全部廢 棄物罐的衰變熱源,約為1,200W。另制定篩選流程進行34個重要核 種篩選(如圖 4-1)。b.處 置設施系統元件(廢棄物罐、緩衝材料/回填材 料、處置孔)之設計功能及設計需求,以及規格設定(如表 4-2 至表 4-14)。c.豎井與坡道回填、噴漿與灌漿材料、封塞、封井等各項施工 安全性之定性描述。(2)地質圈與生物圈初始狀態描述:說明與定義參 考案例建置過程與各項參數設定,主要係以我國歷年調查研究成果之 地質特性數據與生物圈相關資料,在不針對特定場址的情況下,建置 一研究用之「參考案例」(如圖 4-2 及圖 4-3),供後續工程設計及安 全評估使用。地質單元設定分為岩屑層(R0)、花崗岩母岩(R)與主要 導水構造(F1、F2),其中岩屑層代表岩體剝蝕近地表時,因風化及解 壓作用形成的節理;主要導水構造為參考歷年調查資料,假設參考案 例地區存在的主要導水構造;除表層岩屑層與導水構造外,皆設定為 花崗岩母岩。參數設定部分,分為地質學、岩石熱學與力學、水文與 水文地質學、水文地球化學、母岩傳輸特性、生態系等參數設定說明 (如表 4-15 至表 4-19)。(3)處置設施配置:處置深度設定為地下 500 m, 主隧道寬 10 m、高 7 m, 處置隧道高度為 4,800 mm(含項拱), 寬 度為 4,200 mm,處置孔直徑為 1,750 mm、高度為 8,155 mm (第 4.2.6 節),處置孔軸心間距為9m、處置隧道軸心間距40m,每個處置孔 所需面積為360m²,第一個處置孔位於距隧道入口 21 m 處,最後一 個處置孔距離隧道底端尚有 10 m 之空間。可容納 2,571 個廢棄物罐, 其處置配置如圖 4-4 及圖 4-5。西邊處置區塊:處置隧道長 250 m, 每個處置隧道可置放 25 個處置孔。東邊處置區塊:處置隧道長 300 m,每個處置隧道可置放 30 個處置孔,合計共有 2,860 個處置孔,處 置孔餘裕約為11%。

第5章為外部條件,為評估處置設施在長期演化下的安全性,需考量外部條件對處置設施維持長期功能的影響,包括(1)氣候相關議題:假設參考案例1個冰河週期循環為12萬年,並採取週期重複循

環的方式; SNFD 2021 報告參考相關研究(TraCE-21ka, 2011)於未來 百萬年之安全評估尺度下的氣候基本演化如下(圖 4-6)。(2)地體演化 相關議題:依據 FEPs 資料清單有可能影響處置設施長期安全性的因 子包含地震、抬升/沉降與侵蝕作用、火山活動共 3 項,其中因目前調 查參數不足,抬升/沉降與侵蝕作用、火山活動僅以研析國際文獻進行 方法論研析,而地震則進行地震引致裂隙位移模擬評估,蒐集與分析 過去百萬年的地質歷史,且依照目前地體演化模式,參考案例在未來 百萬年內的地體架構將與現在相同(台電公司,2019a),故針對參考案 例,使用現在已知的地質調查及地震資料,並採用邏輯樹以考量震源 參數的不確定性, SNFD 2021 報告將最大地震規模訂為 Mw 6.5。最 後,使用截切指數模式(Cornell, Van Marke, 1969)計算散布式震源的 地震發生率,其結果如圖 4-7 至圖 4-9。(3)未來人類活動:「鑽探作 業」是現今技術可行的活動裡,唯一會直接導致廢棄物罐被穿透,使 放射性核種進一步影響到人類生活圖的人類活動。於第 5.1 節中,亦 進一步進行未來人類活動情節之分析與評估。

第6章內部作用,內部作用為處置設施5個主要的系統元件(輻射源項(用過核子燃料)、廢棄物罐、緩衝材料、回填材料及地質圈)隨時間演化,受到輻射、溫度、壓力、化學及微生物等不同變因的影響,以及與變因的相互關係。目前為依據國內外相關文獻、處置計畫長期研究成果、專家會議的判讀等,可以判識和處置設施的工程障壁及母 岩長期安全性相關的作用。

第7章安全功能與安全功能指標,在安全評估中,需證明可由處 置系統各個元件的安全功能(隔離、圍阻、遲滯),維持處置設施的長 期安全,以確保放射性核種不會影響生物圈。處置系統的隔離功能, 可經由適當的選址程序予以確認。目前主要針對處置系統之圍阻與遲 滯功能進行討論,並建立量化的安全功能指標,以便全系統安全評估 應用。並且參考瑞典 SKB 與芬蘭 POSIVA 最新的研究成果(POSIVA and SKB, 2017),進行部分安全功能指標標準值的更新,如表 4-20 及 表 4-21。

第8章參數彙整與參數不確定性,初步安全論證報告之參數設定 為 SNFD2017報告所用的參考案例表(一)至表(三)(台電公司,2019a), 若有設計上的變更以及新的證據及評估資料等等,內部專家討論相關 的適用性及影響,若參數為引用自文獻,則探討參數評估時的邊界條 件、障壁狀態及其他可能影響此輸入參數及其不確定性的相關條件等 等,同時,SNFD 2021報告於 110年度召開「參數凍結之專家會議」, 邀請外部專家針對初步安全論證報告所使用參數的適用性給予意見 及建議,並於報告中說明評估模式的目的、方法、輸入參數,以及參 數如何被使用於評估模式中;根據前述流程決定目前安全評估模式中 輸入參數的數值或應被納入考慮的不確定性。為妥善決定模式的輸入 參數及其不確定性,後續預計參考相關文獻(SKB,2006)採取標準化參 數決定程序,以決定安全評估中輸入參數的數值,並進行不確定性的 評估。

第9章處置設施演化分析,係探討處置系統在安全評估時間尺度 下的長期演化,評估各系統元件在演化過程中是否能維持安全功能, 並依據相關分析結果建立後續情節發展與核種遷移評估之討論基礎。 後續安全評估將以本章建立的參考演化為基礎,進行第10章之情節 發展,並於第11章綜合探討圍阻安全功能失效之可能影響程度,最 後,於第12章進行放射性核種釋出相關風險之整體討論,相關章節 內容於 SNFD 2021 報告第 5.1.1 節說明。依據冰河循環, 分為 4 個時 期進行演化分析,開挖營運期、封閉後初始溫暖期(封閉後1,000年)、 剩餘冰河期(封閉後12萬年)、接續冰河期,並額外探討全球暖化之演 化影響。依據演化分析結果,開挖營運期及封閉後初始溫暖期(封閉 後 1,000 年)皆可維持處置設施安全功能。封閉後剩餘冰河期(封閉後 12 萬年)廢棄物罐 Can3 安全功能可能因為地震引致剪力作用,造成 廢棄物罐失效;緩衝材料因為侵蝕流失,造成質量損失,使得傳輸條 件由擴散轉會為平流,影響 Buff1 安全功能;地質圈 R1 安全功能所 需的水化學要求,可能無法持續提供有利條件。安全功能失效對處置 設施的整體影響,將量化其影響程度。在接續冰河期時,則無其他安 全功能會失效。而全球暖化之影響與封閉後初始溫暖期近似。

表 4-1:我國用過核子燃料預估數量

反應器類型	電廠	1號機 燃料束	2號機 燃料束	燃料束總數(束)
DWD	核一廠	3,482	3,484	17 200
DWK	核二廠	5,462	5,462	17,090
PWR	核三廠	2,160	2,160	4,320

資料來源:台電公司(2019b)

表 4-2:廢棄物罐之設計功能及設計需求

設計功能	性質	長期安全之設計需求
抗均勻圍壓	影響廢棄物罐圍阻性質。	須能承受緩衝材料回賬壓力 10 MPa 與靜水壓力 5 MPa (POSIVA and SKB, 2017)
抗不均匀壓力	影響廢棄物罐圍阻性質。	須能分區域承受壓力 3 MPa 至 10 MPa (POSIVA and SKB, 2017)
抗裂隙剪力	影響廢棄物罐圍阻性質。	須能承受剪切速率1m/s 且位移 5 cm (POSIVA and SKB, 2017)
輻射劑量率	達成針對輻射影響之相關規定。	個人輻射劑量小於 0.25 mSv/yr (「高放射性廢棄物最終處置及 其設施安全管理規則」第9條)
表面劑量	避免輻射影響緩衝材料、地下水輻射水解 作用,以及用過核子燃料之中子與加馬射 線對廢棄物罐材料性質造成的影響。	廢棄物罐表面輻射劑量限值 ≤1 Gy/h (POSIVA and SKB, 2017)
臨界性	避免過度能量釋放影響工程障壁與周遭母 岩,造成放射性核種存量的大幅改變,可 能導致由處置場釋出的核種增加。	需維持在次臨界狀態;中子有 效 增 殖 因 子 需 小 於 0.95 (POSIVA and SKB, 2017)

表 4-3:廢棄物罐相關設計規格

廢棄物罐相關幾何尺寸(mm)				
	銅殼			
整體長度(A)	BWR	4,905		
(含銅殼上端與下端封蓋)	PWR	4,835		
內	BWR	4,463		
门叶	PWR	4,443		
初始厚度(T)		50		
外徑(B)		1,050		
內徑(C)		850		
細部尺寸(E)		952		
細部尺寸(F)		821		
細部尺寸(G)		850		
細部尺寸(H)		953		
細部尺寸(I)		10		
細部尺寸(K)		35		
細部尺寸(L)		50		
細部尺寸(M)		50		

註:以107年5月份之統計數據預估核二廠及核三廠運轉40年可能的用過核 子燃料數量。

細部尺寸(N)				60	
細部尺寸(P)				75	
細部尺寸(Q)				50	
細部尺寸(R)				50	
鑄鐵內襯					
直徑(D)				949	
	底部厚度	(B)		60	
	內部長(C	C)		4,533	
BWR	邊距(H)			33.3	
	細部尺寸	·(N)		孔深90	
	長度(A)			4,643	
	底部厚度	(B)		80	
	內部長(C	C)		4,443	
PWR	邊距(H)		37.3		
	細部尺寸	·(N)	孔深100		
	長度(A)		4,57		
		燃料儲	存空間		
	細部尺寸(I)			20	
方管間距(K)				30	
BWR	燃料通道中心至中	中心間距(J)		210	
	燃料空間斷面(L)			160×160	
	細部尺寸(M)			10	
	細部尺寸(I)			20	
	方管間距(K)			110	
PWR	燃料通道中心至中	中心間距(J)		370	
	燃料空間斷面(L)			235×235	
細部尺寸(M)				12.5	
		鋼	蓋		
直徑(E)				910	
厚度(F)			50		
細部尺寸(G)			5°		
廢棄物罐初始熱負載限值(W)			1,200		

表 4-4:廢棄物罐材料規格

BWR 類型	型之銅外殼重	7,500 kg		
BWR 類型	型之鑄鐵重	13,700 kg		
BWR 類型	型之廢棄物罐(含燃料)重	24,600 kg 至 24,700 kg		
PWR 類型	2之銅外殼重	7,500 kg		
PWR 類型	し之鑄鐵重	16,400 kg		
PWR 類型	之廢棄物罐(含燃料)重	26,500 kg 至 26,800 kg		
	彈性模數	120 GPa		
	柏松比	0.308		
	密度	$8.9 \times 10^3 \text{kg/m}^3$		
銅殼	銅含量	無氧銅純度>99.99%以上		
	延伸率	>40%		
	延展性	>15%		
	平均精粒大小	<800 μm		
	彈性模數	166 GPa		
鑄鐵	柏松比	0.32		
	密度	$7.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$		

政止应	改 止 庙 力	>267 MPa(拉力)
	年(八志)	>270 MPa(壓力)
	極限應力	>480 MPa(拉力)
		$J_{2mm} > 88 \text{ kN/m}$
	破裂韌度	$J_{1c} > 33 \text{ kN/m}$
		$K_{lc} > 78 \text{ MPa}(m)^{1/2}$
	延伸率	>12.6 %
	彈性模數	210 GPa
	柏松比	0.3
鋼蓋	密度	$7.85 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
	降伏應力	>335 MPa(拉力)
	極限應力	>470 MPa

表 4-5:緩衝材料設計功能、性質及設計需求

設計功能	性質		長期安全之設計需求
		(1)	限制平流傳輸之安全功能指標標準,緩
			衝材料水力傳導係數應小於10 ⁻¹² m/s、
阻制亚法庙龄	影響回脹壓力與水力傳導		回賬壓力應超過1 MPa。
化 刚 丁 加 得 翔	係數之相關性質。	(2)	满足限制微生物活性,及不影響其他工
			程障壁功能中避免廢棄物罐受剪力破壞
			的回脹壓力條件。
		(1)	減少微生物活性之安全功能指標標準,
	影響回賬壓力之相關性		緩衝材料回脹壓力應大於 2 MPa。
减少微生物活性	初音口派注力 ~ 伯丽丘 哲。	(2)	緩衝材料安裝後之回脹壓力應大於 3
	只 只		MPa,以满足整體設計需求所需之最低回
			脹壓力條件。
		(1)	避免膠體傳輸之安全功能指標標準,緩
			衝材料乾密度大於 1,000 kg/m ³ 時可忽略
避免膠體傳輸	影響孔隙曲折度與孔隙尺 寸之性質。		膠體傳輸。
		(2)	满足限制微生物活性,及不影響其他工
			程障壁功能中避免廢棄物罐受剪力破壞
			的回脹壓力條件。
		(1)	防止廢棄罐沉陷之安全功能指標標準,
使廢棄物罐維持			緩衝材料回脹壓力應大於 0.2 MPa。
在中立位置	影響回賬壓力之性質。	(2)	满足限制微生物活性,及不影響其他工
			程障壁功能中避免廢棄物罐受剪力破壞
			的回脹壓力條件。
		(1)	限制施加於廢棄物罐及岩石壓力之安全
			功能指標標準,緩衝材料回脹壓力應小
	影響回脹壓力、壓力分布、		於 10 MPa。
	勤度、剪力強度之性質。	(2)	緩衝材料安裝後之回脹壓力應小於 10
不影響其他工程			MPa,以避免緩衝材料對廢棄物罐有過高
障壁功能		(1)	的男力影響。
	可御子去以外田田以留此	(1)	有機碳含重應小於1%(重重比)。
	影響廢棄物罐周圍化學條	(2)	硫化物含重不超過 0.5% (重重比) (對應
	件之性質。	(2)	的 寅 鎭 頒 接 近 1%)。
	日/ 鄉 応 任-11 山 11 上 比 从	(3)	總硫重个超過1%(重重比)。
从北上白山山山	影	(1)	依照緩衝材料尺寸,以及其他影響緩衝
維持本身設計功	1、雜行取小凹脈壓刀、取 上小力 由道公數、 訂拉 ※		材料及處置孔幾何的要求(即安裝後的初
兆之 大 期 稳 疋 性	入小川停守係數、 月接受 动 府 街 前 力 公 庄 、 7 以 小		始質量與飽和密度)。
1	切反呉労ノ 法侵、扎原田		

設計功能	性質	長期安全之設計需求
	折度與尺寸、化學組成之 相關性質。	
	影響緩衝材料的支撑能 力、維持最小回脹壓力、最 大水力傳導係數、可接受 勁度與剪力強度、孔隙曲 折度與尺寸、化學組成之 相關性質。	 (1) 緩衝材料受陽離子及氯離子濃度高於 1 M以上影響下,回賬壓力仍可保持大於 2 MPa及水力傳導係數小於 10⁻¹² m/s。 (2) 回賬後剪力強度不應超過廢棄物罐抗剪 驗證分析的剪力條件。
	影響緩衝材料熱傳之性 質。	 (1) 防止質變之安全功能指標標準,緩衝材 料溫度應小於100℃。 (2) 考量緩衝材料幾何尺寸、含水量、處置孔 間距,使緩衝材料溫度低於100℃。

資料來源: SKB (2010d)、Posiva and SKB (2017)。

表 4-6:模擬地下水化學組成物質與含量

名稱	分子量	重量 (g) (1L·H ₂ O)
NaCl	58.44	0.0572
NaNO ₃	84.99	0.0504
K ₂ SO ₄	174.27	0.008
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	246.48	0.0145
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	256.41	0.0013
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	236.15	0.0888

表	4-7	:	繧	衜	材	料	亓	件	抈	杦	及	氽	數
x	 /	•	吹叉	11	12	11	/0	11	196	石	ハ	~	女人

-	緩衝材料元件設計參數	緩衝材料元件規格	可接受誤差
	乾密度(kg/m ³)	1,710	+/- 20
實心 塊體	含水量(%)	17	-
	尺寸(mm)	H : 500 D : 1,650	+/-1
	乾密度(kg/m ³)	1,770	+/- 20
環形	含水量(%)	17	-
	尺寸(mm)	H: 800 / 最底部 H: 830 D _{outer} : 1,650 D _{inner} : 1,070	+/-1 - -
	填充後乾密度(kg/m3)	1,000	+/-40
膨潤 土填	含水量(%)	17	-
充料	尺寸(mm)	16×6×8	-

表 4-8:處置隧道相關設計需求

性能需求	設計需求
	(1) 每一次隧道爆破時,實際爆破的岩體體
	積,最大不可超過原本設計開挖隧道體
	積之30%。
	(2) 隧道橫斷面面積最大不可超過原本設計
以須限制虎黑隧道山五日極石陶石生机計的	開挖隧道斷面之35%。
必須限制處直隧道地面及個面與原九設計的 伯美估,以便相據回情計料机計相按回情。	(3) 為使處置隧道回填順利,隧道地面必須
備左值,以使似據凹填材杆設計,	足夠平坦可使設備機具在處置隧道中行
	駛。
	(4) 需避免超挖,以利確認處置隧道回填材
	料元件之設計、製造與回填安裝量,進而
	達到目標的安裝密度條件。
處置隧道之地面及牆面必須由岩石表面組成,	(1) 需限制建築材料覆蓋處置隧道的面積,
以利回填材料可直接接觸岩體。	不得超過整個處置隧道寬度。
	(1) 為不使入流水影響處置隧道回填程序,
	應確定每個處置隧道之總入流量,若總
	入流量小於 0.5 L/min 則無需進行任何處
	理措施;若總入流量為 0.5 L/min 至 1
	L/min,且隧道中具有入流量大於 0.5
在處置隧道回填材料安裝期間及飽和過程,由	L/min 之裂隙, 需進行相關導水措施; 若
處置隧道岩壁滲流之地下水不得對回填材料	總入流量大於1L/min,且隧道中具有入
有明顯損害功能之情形。	流量大於 0.25 L/min 之裂隙,需進行相
	關導水措施,以確保所開挖之處置隧道
	皆可採用(Sandén, T. et al., 2018a)。
	(2) 開挖損傷帶(Excavation Damaged Zone,
	EDZ) 之 導 水 係 數 需 低 於 10 ⁻⁸ m ² /s
	(SKB, 2010j) •

資料來源: SKB (2010e)。

表 4-9:回填材料設計功能、性質及設計需求

設計功能	性質	長期安全之設計需求
限制地下水流(以平流 的方式)流進處置隧道 中	影響回填材料飽和後之回賬壓力 及水力傳導度之相關性質。	(1) 水力傳導度需小於10 ⁻¹⁰ m/s,以 及回賬壓力需大於 0.1 MPa。
抑制緩衝材料回脹上 舉之壓力	回填材料飽和過程中及飽和後之 夯實度(緊密度)。	 (1) 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。 (2) 回填材料必須可抵抗緩衝材料之回脹應力,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。
不影響其他工程障壁 功能 維持本身設計功能之	 (1) 膨潤土中有害物含量限制。 (2) 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。 處置設施環境對回填材料水力傳 	應限制回填材料中雜質礦物的硫化物 含量,以避免成為硫化物的主要共應 來源,可能造成廢棄物罐腐蝕的原因。 -
長期穩定性	等係數與凹脈壓刀之長期影響,仍 需保有原本的設計限值。	

資料來源: SKB (2010e)。

表 4-10:回填材料製造及安裝等相關設計需求

設計考量	性質需求	設計需求
	回填材料必須能足以壓實到	-
製造、安裝測試及檢驗的方	參考設計所需之密度條件。	
法崩毁计雇 為經過良好的驗	回填材料元件設計必須可供	需配合廢棄物罐處置及緩衝
公共00日总网经迥区21 的 微 终式测试的壮振。	高品質的安裝。	材料安裝之程序進行設計。
证以,例,讯,时, 孜, 柳 可提, 供 真 已 質 的 回 值 材 料 元	回填材料的塊體元件及安裝	回填材料之設計需考量可能
1 提供同时真的口具材料儿	技術,必須考量回填材料的功	流入的進流量及配合封塞設
什衣佣及女衣投侧 以兩足	能不受地下水滲流至處置隧	計允許的地下水進流量進行
四項材料設計用安水之规格	道及在安装過程中的水力作	設計,來設計可抑制相對進流
	用影響。	量的性能。

資料來源:參考自 SKB (2010e)。

表 4-11:回填材料塊體及膨潤土填充料規格

	回填材料塊體設計參數	回填材料塊體規格	可接受誤差	
	乾密度 (kg/m ³)	1,700	+/- 50	
塊		$70 \times 66 \times 52$		
體	尺寸 (cm)	(隧道頂拱部位)	+/- 2	
		$70 \times 60 \times 25$		
膨	顆粒乾密度 (kg/m ³)	1,700	-	
潤			顆粒大小及幾何,視測試後	
土	积粒八寸 (cm)	-	之充填度決定	
填				
充	充填後密度 (kg/m ³)	1,000	+/- 100	
料				

資料來源:台電公司(2018)。

表 4-12:回填材料安裝後之設計參數、設計規格及安裝要求

	設計參數	設計規格	安裝要求
塊體	塊體填充處置隧道之體 積	排列規劃之每一斷面堆疊塊體 數量。 70×66×52:7×6塊,共42塊 70×60×25:依頂拱尺寸排列共 17塊。	>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。
膨潤	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。	依實際充填重量記錄。
土填	底床	厚度 10 cm	依實際開挖面及充填重量記 錄。
充料	乾密度(kg/m ³)	> 1,000	-

資料來源:台電公司(2018)。

-	最大塊體填充體積	最小塊體填充體積 (60%塊體填充量)
塊體乾密度 (kg/m ³)	1,700	1,700
填充料乾密度 (kg/m ³)	1,000	1,000
單位長度之隧道體積 (m ³ /m) (可容許之最大開挖面)	25	25
塊體堆疊間隙體積與塊體體 積之比	2%	2%
膨潤土填充料體積(含底床) (m ³ /m)	$25 - 16.96 \times (1 + 0.02) = 7.7$	$25 - 25 \times 0.60 \times (1 + 0.02) = 9.7$
安裝後之整體乾密度(kg/m ³)	1,461	1,408

表 4-13:回填材料安裝後之乾密度(估算)

資料來源:台電公司(2018)。

註 1:70 cm × 66 cm × 52 cm 塊 體 充 填 體 積 (m³/m): 1 × 0.66 × 0.52 × 42(塊) = 14.41° 註 2:70 cm × 60 cm × 25 cm 塊 體 充 填 體 積 (m³/m): 1 × 0.6 × 0.25 × 17(塊) = 2.55° 註 3:塊 體 充 填 總 體 積 (m³/m): 14.41 + 2.55 = 16.96°

表	4-14	:	處	置	孔	相	闗	設	計	霊	求	
· • •							1251					

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

表 4-15:參考案例地質單元參數

參數名稱	代號	說明
岩屑層	DO	地表表層岩屑層,厚度:5m至90m
	K0	模擬時建議厚度為 70 m
花崗岩母岩	R	除岩屑層與主要導水構造以外之地質單元,皆屬花崗岩母岩。
主要導水構造	F1	位態:N64E/70N;寬度>150m模擬時之寬度建議為 200m。
	F2	位態:N80W/50S;寬度約 8m至15m模擬時之寬度建議為 20m。

表 4-16:參考案例之 DFN 參數集

參數名稱	SNFD	2021参数			
列欧卡	FDMA	FDMB			
农原域	深度 < 70 m	深度 > 70 m			
	叢集1=(198,18),	叢集1=(65,17),			
	Fisher 離散因子(θ , $\kappa = 18$),	Fisher 離散因子(θ , $\kappa = 20$),			
	P _{32,rel} =26%	P _{32,rel} =15%			
	叢集 2 = (155, 4),	叢集2=(344,38),			
	Fisher 離散因子($\theta, \kappa = 15$),	Fisher 離散因子($\theta, \kappa = 18$),			
	P _{32,rel} =24%	P _{32,rel} =24%			
	叢集 3 = (264, 23),	叢集 3 = (281, 29),			
	Fisher 離散因子 (θ , $\kappa = 16$),	Fisher 離散因子 (θ , $\kappa = 16$),			
裂隙叢集	P _{32,rel} =18%	P _{32,rel} =30%			
(極點方位角, 傾伏	叢集 4 = (98, 81),	叢集4=(174,22),			
角)	Fisher 離散因子 ($\theta, \kappa = 11$),	Fisher 離散因子 (θ, κ = 17),			
	P _{32,rel} =32%	$P_{32,rel} = 10\%$			
		叢集 5 = (175, 75),			
		Fisher 離散因子 (θ , $\kappa = 19$),			
		P _{32,rel} =21%			
	Fisher 離散因子: $f(\theta, \kappa) = \frac{\kappa \sin \theta e^{\kappa \cos \theta}}{\kappa}$				
	$e^{k} - e^{-k}$ A·平均極向量的角位移				
	K. Fisher 雜點因子的密度象數				
$P_{\text{res}} = 24 \qquad P_{\text{res}} = 03$					
裂隙密度	密度 P_{32} : 單位體積岩體的裂縫面積(體積強度, m ⁻¹)				
	Power law: $k_r = 2.6$,	Power law: $k_r = 2.6$,			
	$r_0 = 0.1 m$,	$r_0 = 0.1 m$,			
	$r_{min}=4.5m,$	$r_{min}=4.5m,$			
	$r_{max} = 564 m$	$r_{max} = 564 m$			
	$P(R \ge r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^{n_T},$				
	$[r_{min}^{kr-2} - r_{max}^{kr-2}]$	$[2^{-2}]_{R}$ (m cc)			
裂隙長度(半徑)	$P_{32}(r_{min}, r_{max}) = \frac{r_0^{kr-2}}{r_0^{kr-2}}$	$-P_{32}(r_0,\omega)$			
	R: 裂隙半徑。				
	ro: 最小裂隙半徑。				
	$r: 介於 r_0 與 \infty 的裂隙半徑。$				
	<i>k_r</i> : 裂隙尺寸指數,或稱 「 裂隙半徑規模指數」(La Pointe, 2002)				
	P(R ≥ r): 圓形裂隙半徑大於等於 r 的機率。				
	$P_{32}(r_{min}, r_{max}): 體積 裂隙 強度(經r_{mi}$	n與rmax範圍間的裂隙半徑校止)。			
裂隙位置	柏松分布過程(隨機過程)	柏松分布過程(隨機過程)			
裂隙導水係數	$T = 1.51 \times 10^{-7} \times (L^{0.7})$	$T = 3.98 \times 10^{-10} \times (L^{0.5});$			
$(T, m^2/s)$	$L = \sqrt{(\pi r^2)}$	$L = \sqrt{(\pi r^2)}$			
裂隙內寬(e,m)	$e = 0.5\sqrt{T}$	$e = 0.\overline{5\sqrt{T}}$			

參數名稱	SNFD2021参数				
Unit ID	R0	R	F1	F2	
熱傳導係數 (W/(m·K))	2	2.3 - 3.0	2	2	
比熱J/(kg·K)	800*	730 - 903	800*	800*	
熱膨脹係數(1/K)	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06	
乾密度(kg/m ³)	2000*	2610 - 2770	2600*	2600*	
比重	-	2.63 - 2.79	-	-	
飽和密度(kg/m ³)	-	2620 - 2780	-	-	
孔隙率 (%)	-	0.34 - 0.77	-	-	
水吸附率 (%)	-	0.12 - 0.28	-	-	
單軸抗壓強度(MPa)	-	75.68 - 168.66	-	-	
內聚力(MPa)	-	17.99 - 29.51	-	-	
磨擦角(°)	-	47.90 - 59.08	-	-	
抗張強度(MPa)	-	6.91 - 14.06	-	-	
割線楊氏模數(GPa)	-	31.70 - 51.77	-	-	
割線柏松比	-	0.11 - 0.27	-	-	
動態剪力模數(GPa)	-	12.99 - 29.24	-	-	
動態楊氏模數(GPa)	-	30.28 - 73.60	-	-	
動態柏松比	-	0.10 - 0.27	-	-	
	-	σ _v =8.11	-	-	
現地應力(MPa) (HF@306m)	-	σ _H =10.68	-	-	
	-	σ _h =5.75	-	-	
	-	σ _v =11.4	-	-	
現地應力(MPa) (HF@430m)	-	$\sigma_{\rm H} = 14.43$	-	-	
(111 (@+5011))	-	σ _h =9.38	-	-	
	-	$\sigma_1 = -10.29 - 12.34$	-	-	
現地應力(MPa) (HTPF@300m)	-	$\sigma_2 = -6.66 - 8.62$	-	-	
(-	σ ₃ =0.76-2.14	-	-	

表 4-17:參考案例熱學與力學特性

表	4-18	:	參考	案例:	之水	力	特性	參	數	
---	------	---	----	-----	----	---	----	---	---	--

参數名稱		SNFD2021参数
	R0	$5.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-4}$
水力値道低數(m/s)	R	$4.1 \times 10^{-12} - 1.0 \times 10^{-9}$
小刀侍寺你数(m/s)	F1	$3.0 \times 10^{-8} - 1.0 \times 10^{-4}$
	F2	$3.0 \times 10^{-8} - 1.0 \times 10^{-4}$
左 故引 贻 索 (0/4)	F1	0.01
有效北原平(70)	F2	0.007 - 0.015
去於法察(m/a)	F1	2.0×10^{-5}
有效还平(111/3)	F2	$1.3 \times 10^{-4} - 2.9 \times 10^{-4}$
機械延動後數(m ² /s)	F1	2.0×10^{3}
· (加 / 3)	F2	$2.9 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-2}$
水動力延步後數(m)	F1	100
不動力延敗係数(m)	F2	0.1 - 75
佩克萊特數	F1	10
(Peclet number, Pe)	F2	8 - 1,350
山北市	F1	6
一世们反	F2	35

参數名稱	SNFD2021参数				
	地下水平均			地表	水平均
	参考案例		河流(全球)	海洋(全球)	
深度(m)	300 m至400 m	400 m至500m	300 m至500m	地表	地表
pH 值	7.67	8.98	8.60		7.5~(8.2)~8.4
pe	-3.10	-6.79	-5.73		
T(°C)	28.80	31.70	30.87	25	15
EC (mS/cm)	0.407	0.320	0.345	~0.1	~42.9
Clt (mol/L)	1.29×10 ⁻³	8.55×10 ⁻⁴	9.77×10 ⁻⁴	2.20×10 ⁻⁴	5.46×10 ⁻¹
Ct (mol/L)	1.32×10 ⁻³	1.15×10 ⁻³	1.21×10 ⁻³	8.52×10 ⁻⁴	2.33×10 ⁻³
St (mol/L)	1.30×10 ⁻⁴	9.59×10 ⁻⁵	1.05×10 ⁻⁴	1.15×10 ⁻⁴	2.82×10 ⁻²
Nt (mol/L)	2.12×10 ⁻⁵	4.03×10 ⁻⁵	3.35×10 ⁻⁵		1.07×10 ⁻²
Pt (mol/L)	1.63×10 ⁻⁶	2.05×10 ⁻⁶	1.88×10 ⁻⁶	6.46×10 ⁻⁷	2.00×10 ⁻⁶
Bt (mol/L)				9.25×10 ⁻⁷	4.16×10 ⁻⁴
Sit (mol/L)	1.18×10 ⁻³	6.90×10 ⁻⁴	8.31×10 ⁻⁴	2.31×10 ⁻⁴	7.94×10 ⁻⁵
Ft (mol/L)	1.19×10 ⁻⁴	2.11×10 ⁻⁴	1.85×10 ⁻⁴	5.26×10 ⁻⁸	6.84×10 ⁻⁵
Brt (mol/L)				2.50×10-7	8.42×10 ⁻⁴
It (mol/L)				5.51×10 ⁻⁸	5.01×10 ⁻⁷
Nat (mol/L)	1.29×10 ⁻³	1.68×10 ⁻³	1.57×10 ⁻³	2.74×10 ⁻⁴	4.68×10 ⁻¹
Kt (mol/L)	1.48×10 ⁻⁴	6.98×10 ⁻⁵	9.22×10 ⁻⁵	5.88×10-5	1.02×10 ⁻²
Cat (mol/L)	6.18×10 ⁻⁴	2.79×10 ⁻⁴	3.76×10 ⁻⁴	3.74×10 ⁻⁴	1.03×10 ⁻²
Mgt (mol/L)	1.30×10 ⁻⁴	2.00×10 ⁻⁵	6.38×10 ⁻⁵	1.69×10 ⁻⁴	5.31×10 ⁻²
Alt (mol/L)				1.85×10 ⁻⁶	7.94×10 ⁻⁸
Fet (mol/L)	1.37×10 ⁻⁵	5.18×10 ⁻⁶	7.62×10 ⁻⁶	7.16×10 ⁻⁷	3.16×10 ⁻⁸
Cut (mol/L)	1.18×10 ⁻⁷	2.76×10 ⁻⁷	2.37×10 ⁻⁷	1.10×10 ⁻⁷	7.94×10 ⁻⁹
Mnt (mol/L)	3.90×10 ⁻⁶	9.60×10 ⁻⁷	1.94×10 ⁻⁶	1.27×10 ⁻⁷	3.98×10 ⁻⁹
Znt (mol/L)	7.22×10 ⁻⁶	1.17×10 ⁻⁶	2.90×10 ⁻⁶	3.06×10 ⁻⁷	
Cdt (mol/L)	ND	3.11×10 ⁻⁸	3.11×10 ⁻⁸	8.89×10 ⁻¹¹	
Crt (mol/L)	1.92×10 ⁻⁸	2.50×10 ⁻⁷	1.35×10 ⁻⁷	1.92×10 ⁻⁸	6.31×10 ⁻⁹
Nit (mol/L)	5.59×10 ⁻⁵	3.30×10 ⁻⁵	4.07×10 ⁻⁵	5.11×10 ⁻⁹	2.51×10 ⁻⁸
Pbt (mol/L)	1.25×10 ⁻⁷	1.57×10 ⁻⁷	1.46x10 ⁻⁷		
Ast (mol/L)	ND	1.00×10 ⁻⁸	1.00×10 ⁻⁸	2.67×10 ⁻⁸	5.01×10 ⁻⁸
Ut (mol/L)				1.68×10 ⁻¹⁰	1.99×10 ⁻¹⁰
鹽度(‰)	0.279	0.208	0.228		

表 4-19:參考案例之地下水組成

表 4-20: 圍阻安全功能、安全功能指標、安全功能指標標準彙整

系統元件	安全功能	安全功能指標與標準	資料來源
廢棄物罐	Canl:提供腐蝕 障壁	銅殼厚度>0 cm	SKB, 2011
	Can2:抵抗圍壓 負載	圍壓負載<50 MPa	POSIVA and SKB,2017
	Can3:抵抗剪力 負載	廢棄物罐應能承受的最大剪切強度 為剪切速度為1m/s、對處置孔造成≤5 cm 剪力位移的剪切強度	SKB, 2011
緩衝材料	Buffl:限制平流 傳輸	 (a)緩衝材料的水力傳導係數<1×10⁻¹² m/s (b)緩衝材料的回脹壓力>1 MPa 	SKB, 2011
	Buff2:減少微生 物活性	緩衝材料回脹壓力>2 MPa	POSIVA and SKB,2017

	Buff3:緩衝岩石 裂隙剪力效應	緩衝材料密度<2,050 kg/m3	SKB, 2011
	Buff4:防止質變	緩衝材料溫度<100℃	SKB, 2011
	Buff5:防止廢棄 物罐沉陷	緩衝材料回賬壓力>0.2 MPa	SKB, 2011
	Buff6:限制施加 於廢棄物罐及岩 石的壓力	(a)緩衝材料回脹壓力<10 MPa (b)緩衝材料溫度>-2.5℃	POSIVA and SKB,2017
回填材料	BF1:抵抗緩衝材 料膨脹	回填材料之回脹壓力不可過低	POSIVA and SKB,2017
地質圈	R1:提供有利的 化學條件	 (a)還原狀態:處置設施須位於還原環境 (b)離子強度、鹽度:Σq[M^{q+}]>8 mM; TDS < 35 g/L(瞬間總溶解固體物<70 g/L) (c)限制有害物質的濃度: [NO₂⁻]<10⁻³ M;[HS⁻]<3 mg/L≈10⁻⁴ M; [K⁺]<0.1 M (d)地下水的酸鹼值(pH值)應介於5至11 (e)避免氯化物促進腐蝕: pH值>4及 [Cl⁻]<2 M 	POSIVA and SKB,2017
	R2:提供有利的 水文地質傳輸條 件	 (a) 裂隙中的流動傳輸阻抗(F)> 10,000 yr/m (b)等效流率<1×10⁻⁴ m³/yr 	SKB, 2011
	R3:提供穩定力 學環境	 (a)地下水壓須有所限制 (b)截切處置孔的剪力位移量<5 cm; 剪力位移速度<1 m/s 	SKB, 2011
	R4:提供有利的 熱學環境	母岩溫度介於-2.5 ℃至 100 ℃之間	POSIVA and SKB,2017

註:因安全功能指標與標準是參考 SKB and POSIVA 01 報告,安全功能指標 標準的量化數值為其研究結果,然而部分安全功能指標標準部分安全功能 可能因影響此項作用的因素眾多,無法使用特定值定義,因此無量化值。

表 4-21: 遲滯安全功能、安全功能指標、安全功能指標標準彙整

系統 元件	安全功能	安全功能指標與標準	資料來源
	F1:約束核種	(a)燃料基質轉化率:低 (b)金屬腐蝕率<10 ⁻³ /yr	POSIVA and SKB ,2017
燃料	F2:沉澱	核種的溶解度:低	SKB, 2011
	F3:避免核子臨界	廢棄物罐充滿水時,有效增殖因子 (keff)<0.95	SKB, 2011
廢棄物罐	Can4:提供傳輸抵抗	 (a)廢棄物罐受到損害後,至放射性核種開始釋出的時間(t_{delay}):長 (b)廢棄物罐失去降低傳輸速率功能的時間(t_{large}):長 	SKB, 2011
	Can5:避免燃料臨界	(a)應具合適的廢棄物罐幾何特性 (b)應具合適的廢棄物罐材料特性	SKB, 2011
緩衝	Buff1:限制平流傳 輸	(a)緩衝材料的水力傳導係數<1×10 ⁻¹² m/s (b)回賬壓力>1 MPa	SKB, 2011
材料	Buff4:防止質變	緩衝材料溫度<100℃	POSIVA and SKB ,2017

	Buff5:防止廢棄物	絵飾社当 回馬爾 カン0.2 MDa	POSIVA and
	罐沉陷	矮街材种凹版座刀-0.2 MIFa	SKB ,2017
T	Buff7:渦滤膠融	緩衝材料乾密度>1,000 kg/m ³	POSIVA and
	Dull/ · 迥應修腹		SKB ,2017
	Buff8:吸附核種	分配係數(K _d):高	SKB, 2011
	Buff9:允許氣體傳 輸	緩衝材料回賬壓力:低	SKB, 2011
	DE7·阳山亚达庙払	(a)回填材料的水力傳導係數<10 ⁻¹⁰ m/s	POSIVA and
回填	DF2·限利十加得期	(b)回填材料的回脹壓力>0.1 MPa	SKB ,2017
材料	BF3:吸附核種	八而伦敦(V.)· 古	POSIVA and
		分配係数(Ad)・同	SKB ,2017
地質	R1:提供有利的化學 條件	 (a)還原狀態:處置系統須位於還原環境 (b)離子強度、鹽度:Σq[M^{q+}]>8 mM; TDS <35 g/L(瞬間總溶解固體物<70 g/L) (c)限制有害物質的濃度: [NO₂⁻]<10⁻³ M; [HS⁻]<3 mg/L≈10⁻⁴ M; [K⁺]<0.1 M (d)地下水的酸鹼值(pH值)應介於5至11 	SKB, 2011
圈	R2:提供有利的水文 地質傳輸條件	 (a) 裂隙中的流動傳輸阻抗(F)> 10,000 yr/m (b)等效流率<1×10⁻⁴ m³/yr (c)母岩基質有效擴散係數(D_e):高;分配 係數(K_d):高 (d)膠體濃度:低 	POSIVA and SKB ,2017

註:因安全功能指標與標準是引用 SKB and POSIVA 01 報告,安全功能指標 標準的量化數值為其研究結果,然而部分安全功能指標標準部分安全功能 可能因影響此項作用的因素眾多,無法使用特定值定義,因此無量化值。



圖 4-1:重要核種篩選流程

資料來源: 蔡世欽(2016)。



圖 4-2: SNFD 2021 報告參考案例地質單元的平面空間分布圖 註:此圖未包含花崗岩母岩上覆之岩屑層。



圖 4-3: SNFD 2021 報告參考案例地質單元空間分布圖與垂直示意圖



圖 4-4:地下設施規劃配置圖



圖 4-5:處置隧道內處置孔配置圖

註: (a)300 m 處置隧道; (b)250 m 處置隧道。處置孔間距9 m。



圖 4-6: 氣候演化與海平面變化情形

資料來源:台電公司(2019b)。



圖 4-7:200 km_radius 之累計地震發生率與規模關係

註:實線為截切指數模式估算的結果;空心圓為實際觀測結果。以此地震發生率估算規模 6.5 之地震在百萬年內之個數為 145 個。



圖 4-8: AS_K01 之累計地震發生率與規模關係

註:實線為截切指數模式估算的結果;空心圓為實際觀測結果。以此地震發生 率估算規模 6.5 之地震在百萬年內之個數為 14 個。



圖 4-9:DS_K01 之累計地震發生率與規模關係

註:實線為截切指數模式估算的結果;空心圓為實際觀測結果。以此地震發生 率估算規模 6.5 之地震在百萬年內之個數為 6 個。



圖 4-10:安全評估中放射性核種傳輸模式所需輸入參數

4.2 長期性能評估技術

4.2.1 地震對處置設施影響之地動模型評估

本項工作基於「用過核子燃料最終處置計畫書(2018年修訂版)」 第7.1.2節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第6.2.4節規劃 執行,發展「場址詳細調查階段」所進行處置設施之定率式及機率式 地震危害度分析工作,作為高放射性廢棄物最終處置地表及地下設施 設計耐震依據,其中地震危害度分析關鍵所使用之地動預估式,必須 依據可能場址特性,進行適地性評估作業,提升地震危害度分析之合 理性。於此,本年度先行就臺灣最新之地動預估式進展進行初步探究 及概要彙整,進而提出潛在處置母岩區未來進行地震危害度分析工作 精進作為之相關作法。

4.2.1.1 適用性地震動特性模型初探

一般核能電廠在機率式地震危害度分析中,需要考慮的年超越機 率(Annual Exceedance Probabilities, AEPs)範圍是 10^{-4} 到 10^{-6} ,而用過 核子燃料最終處置設施因所需要考慮的年限預期更長,年超越機率則 為更低,預期從 10^{-6} 到 10^{-8} 。美國核能管制委員會(U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC)對於核能設施在進行地震危害度評估 時,皆要求執行程序必須依循「地震危害分析資深委員會(Senior Seismic Hazard Analysis Committee, SSHAC)」(NUREG/CR-6372)所訂 定第3層級(以下簡稱 SSHAC Level 3)以上之程序(SSHAC Level 3 或 者 SSHAC Level 4)。台電公司已委託財團法人國家實驗研究院國家地 震工程研究中心針對臺灣地區的4座核能電廠,以SSHAC Level 3 之 程序建置適用於各目標工址的地震源特徵(Seismic Source Characterization, SSC)模型與地震動特徵(Ground Motion Characterization, GMC)模型(國家地震工程研究中心, 2019)。

地震危害度分析中,地動模型之選擇是屬於地震動特徵(GMC)模型建置評估一部分,一般需要考慮以下幾點:

 地動模型應通過同儕審查,一般指發表在有審查機制之國際 期刊或經審查之技術報告。

- (2) 若為同一開發團隊所發表之地動模型,則應選擇近期發表成 果為主,因近期成果可以包含最新資料與學研知識成果。例 如:以 Next Generation Attenuation Relationships for Western US (NGA-West2)地動模型取代 Next Generation of Ground-Motion Attenuation Models for the western United States (NGA-West 1)地動模型。
- (3) 單純作為研究工具所發表之地動模型並不適合選擇用於地震 危害度分析計算。
- (4)發展地動模型所使用之地震資料,應明確區分淺層地殼地震 資料與隱沒帶地震資料。若地動模型同時使用淺層地殼地震 資料與隱沒帶地震資料,則地動模型應能區分二者之地震動 特性差異。
- (5)如果地動模型是為小區域所發展,且該區域非危害度分析之場址區域,則不適用。
- (6) 地動模型應涵蓋與後續結構分析應用相關之反應譜週期範圍
 (例如:0.01 s 至 3 s)。

藉由台電公司執行之「核能設施地震危害重新評估計畫一:臺灣 地區地震危害高階模型建置」計畫中所彙整之候選地動模型,預期可 作為未來高放處置設施執行地震危害度分析所參酌採用。該計畫分析 成果,係針對臺灣地區核能設施評估適用之地動模型進行分析,最終, 提出適用於評估淺層地殼地震於預估特定場址地震動大小之地動模 型有 13 個候選模型(NCREE, 2019),而適用於評估隱沒帶地震於特 定場之地動大小之地動模型則有 7 個候選模型(NCREE, 2019)。上述 13 個適用於淺層地殼地震之候選地動模型之簡稱與其對應參考文獻 如下:

- (1) ASK14 (Abrahamson et al., 2014)
- (2) BSSA14 (Boore et al., 2014)
- (3) CB14 (Campbell and Bozorgnia, 2014)
- (4) CY14 (Chiou and Youngs, 2014)

- (5) I14 (Idriss, 2014)
- (6) GK16 (Graizer and Kalkan, 2016)
- (7) LLCS11 (Lin et al., 2011)
- (8) ASB14 (Akkar et al., 2014)
- (9) Bi14 (Bindi et al., 2014)
- (10) KAAH15 (Kale et al., 2015)
- (11) Zh16 (Zhao et al., 2016a,b)
- (12) Chao18 (Chao et al., 2019)
- (13) Phùng 18 (Phùng et al., 2019a)

7個適用於隱沒帶地震之候選地動模型如下:

- (1) LL08 (Lin and Lee, 2008)
- (2) MF13 (Morikawa and Fujiwara, 2013)
- (3) AGA16 (Abrahamson et al., 2016)
- (4) Zh16 (Zhao et al., 2016a,b)
- (5) MBM17 (Montalva et al., 2017)
- (6) Chao18 (Chao et al., 2019)
- (7) Phung18 (Phung et al., 2019b)

上述所列之候選模型經過與計畫所彙整之臺灣地動資料庫資料 進行比較分析後,因國外地動模型與臺灣地動資料庫擬合存在誤差, 因此該計畫選取 7 組淺層地殼地震地動模型以臺灣的地動資料進行 調整,最後該計畫採用 7 個調整後之國外地動模型,與 2 個使用臺灣 地動資料庫發展的地動模型,共 9 個地動模型作為最後地震危害度分 析使用的地動模型,該 9 個地動模型如下(NCREE, 2019):

- (1) ASK14adj (Abrahamson et al., 2014, adjusted)
- (2) ASB14adj (Akkar et al., 2014, adjusted)
- (3) Bi14adj (Bindi et al., 2014, adjusted)
- (4) BSSA14adj (Boore et al., 2014, adjusted)
- (5) CB14adj (Campbell and Bozorgnia, 2014, adjusted)
- (6) CY14adj (Chiou and Youngs, 2014, adjusted)
- (7) I14adj (Idriss, 2014, adjusted)
- (8) Chao18 (Chao et al., 2019)

(9) Phung18 (Phùng et al., 2019b)

而適用於隱沒帶地震之地動模型亦經過比較分析後,選取了4個 地動模型作為最後地震危害度分析使用的地動模型,該4個地動模型 如下(NCREE, 2019):

- (1) LL08adj (Lin and Lee, 2008, adjusted)
- (2) AGA16adj (Abrahamson et al., 2016, adjusted)
- (3) Chao18 (Chao et al., 2019)
- (4) Phung18 (Phung et al., 2019b)

地動模型的適用性需要依賴分析場址之地動資料進行評估,然而 單一場址資料通常難以達到分析所需數量,因此需要配合區域的地動 資料庫為主,並額外加入場址之觀測資料來進行綜合評估。而對於高 放處置地下設施之地震影響性評估,其考量重點不同於一般地表結構 物,尤其需考慮堅硬岩盤內之地震動模式。一般地表結構物設計之地 震歷時計算,會以參考地盤(760 m/s)進行地震危害度分析計算,再利 用地盤反應分析,往上計算至特定地盤特性之地震歷時與地動值表 現。雖然過往地下地震監測資料顯示,地震動隨深度會有逐漸變小的 趨勢,但是對於堅硬母岩區域之地動特性仍極欠缺實際之觀測紀錄。 若以特定場址特性而言,母岩環境差異,也必然存在地震動表現的不 同,當有現地地震監測資料,經由與其他監測資料比較,可深入探討 場址區域性地表震動特性差異,除了更能瞭解場址地盤特性所造成的 場址效應外,也能透過區域差異的修正獲得現地可使用之場址特性參 考基準。另外,也必須透過長期監測不同規模大小及不同遠近距離的 地震事件,累積完整的地震資料並建立資料庫,才能有助於全面且深 入地釐清場址地震動模式,以及評估模式不確定性,應用於處置設施 設計規劃階段之地震危害度分析評估工作。

4.2.1.2 地震動特性模型之不確定性

對於機率式地震危害度分析而言,地動預估式之標準差也是一項 重要參數,尤其是用過核子燃料處置設施相關地震危害度分析成果, 由於需要考慮長回復週期之危害度時,標準差將對於分析成果有更顯 著之影響。鑑於此,對於未來應用地動預估式於場址的地震危害度分 析中,建議持續透過潛在場址之實際觀測資料,分析既有地動預估式 之推估值與場址實際觀測資料的差異,探討殘差值來源,以及這些殘 差與震源、路徑、測站之間關係,回饋於地震危害度分析,使場址之 預估地震動結果更為精確。

一般而言,衰減式中資料之變異性可以被分成 2 個部分:事件間 (Inter-event)與事件內 (Intra-event),使用二階段迴歸法 (Two-Step Regression)(Joyner and Boore, 1981)或者使用隨機效應模型(Random Effects Model)(Abrahamson and Youngs, 1992)都可以得到這 2 種資料 變異性的估計值。而事件間殘差與事件內殘差的標準差可以分別用 τ 跟 σ 來表示。而進一步分析事件內標準差 σ ,因這些事件內的殘差是 由許多測站的資料所記錄到不同的地震紀錄,我們可以進一步將事件 內標準差 σ 拆解成測站間的標準差 σ_s 與每個測站內紀錄間的標準差 σ_r 。其中紀錄間的標準差 σ_r 包含了不同路徑的變異性在內,因為這些 資料是由同一個測站記錄到來自不同地震的組成,如果我們可以估計 來自同一個區域的變異性,則可進一步將紀錄間的標準差 σ_r 拆解成來 自單一路徑的標準差 σ_p 以及剩下未能解釋的標準差 σ_0 。 σ_s 與 σ_p 代表的 是知識不確定性(Epistemic Uncertainty),對於地動預估式的研究可以 持續減小知識不確定性,同時確定隨機不確定性的大小,將有助於機 率式地震危害度分析結果更為精確。

現階段於臺灣本島東部處置母岩潛在地區,尤其以宜蘭至花蓮間 ,中央氣象局自由場強震站收錄之樣本數,尚仍無法進行完整地不確 定性分析評估工作。未來將致力於進行現地地震監測規劃,並持續追 蹤「用過核子燃料最終處置計畫候選場址」鄰近地區氣象局強震測站 記錄狀況。並逐步規劃將地震事件之氣象局所有強震測站紀錄,統整 地震資訊、測站資訊與路徑資訊,逐步地整合出完整之平坦檔案(Flatfile),且合併鄰近區域之地震測站所持續收錄之地震紀錄進行整合分 析,方可提供未來深入探討不同地動預估式之特定場址(Site-specific)

適用性評估,而應用於工程設計需求上時,達到地震危害度分析評估 準確性之提升。

4.2.2 侵蝕作用下廢棄物罐力學演化分析

廢棄物罐周圍由膨潤土所組成之緩衝材料環塊包覆,在處置期間 可能因地下水流影響,導致緩衝材料受到侵蝕,使其產生質量損失, 而由於膨潤土的回脹特性,受到侵蝕後之位置,會由其他緩衝材料因 回脹壓力作用進行填補形成質量再分布現象。參考瑞典 SKB 對於緩 衝材料侵蝕後之描述(Åkesson and Börgesson, 2010),緩衝材料侵蝕後 之質量再分布可能由於以下 2 種過程:(1)處置隧道未以封塞進行封 閉前,水流可能進入處置孔並造成緩衝材料侵蝕,如果侵蝕範圍較大 時,會在緩衝材料表面產生局部的缺口;(2)處置孔與裂隙截切情況 下,由於長時間的水流通過而使膨潤土被侵蝕。

本項工作參考瑞典 SKB 探討緩衝材料質量再分布結果(Akesson and Börgesson, 2010),建立三維近場模型,以瞭解緩衝材料受侵蝕後 之質量再分布,對於廢棄物罐造成的影響。110年度工作成果說明如 下:

(1) 模式建置

本年度使用的廢棄物罐尺寸仍依循 108 年度成果報告概念設計,外部由具延展性銅殼包覆,內部由強度較高之鑄鐵、方管及封蓋組成,詳圖 4-11,廢棄物罐中銅殼及鑄鐵內襯尺寸詳圖 4-12。

廢棄物罐模型中各元件及其網格劃設成果如圖 4-13 所示,其 中,緩衝材料模型會依據不同情境及案例(如緩衝材料環塊受 侵蝕致消失、緩衝材料外緣受侵蝕,產生圓柱狀孔隙)調整。

(2) 參數與邊界設定

廢棄物罐中鑄鐵內襯、銅殼、方管及封蓋之材料參數分別設 定如表 4-22 至表 4-25 所列,其中鑄鐵材料極限伸長率的一 半應變率所對應的容許應力為 395 MPa(von Mises 應力),鑄 鐵內襯應力分析結果須低於該值,方能代表材料未達破壞 (Raiko and Sandström, 2010);處置母岩假設為剛體,故無輸 入材料參數;緩衝材料方面,參考瑞典 SKB 分析方式(Åkesson and Börgesson, 2010)採用多孔介質彈性模式搭配 Drucker Prager 塑性模式模擬緩衝材料行為。

(3) 廢棄物罐侵蝕後受圍壓之應力分析結果

第 1 種分析案例為緩衝材料環塊可能受侵蝕之情況,依據瑞 典 SKB 之假設(Åkesson and Börgesson, 2010)設定1環及2環 受侵蝕時之模型,所建置的有限元素模型如圖 4-14(1 環高度 為自廢棄物罐頂部往下 0.5 m 之膨潤土範圍;2 環高度為自廢 棄物罐頂部往下 1.0 m 之膨潤土範圍);緩衝材料依時間重新 分布結果分別如圖 4-15 及圖 4-16。在緩衝材料 1 環侵蝕條 件下,鑄鐵內襯分析結果顯示 von Mises 應力最大值出現於 侵蝕後約 1.8 年,數值為 22.31 MPa(詳圖 4-17 左側),後續 因達力學平衡而降低,最終顯示鑄鐵內襯 von Mises 應力值 為 17.51 MPa(詳圖 4-17 右側);緩衝材料 2 環侵蝕條件下, 其 von Mises 應力最大值出現於侵蝕後約 1.1 年,數值為 20.88 MPa(詳圖 4-18 左側),後續因達力學平衡而降低,最終顯示 鑄鐵內襯 von Mises 應力值為 15.91 MPa(詳圖 4-18 右側)。 第2種分析案例參考瑞典 SKB 模型(Åkesson and Börgesson, 2010)進行模擬,係為緩衝材料外緣受圓柱狀侵蝕影響,柱狀 侵蝕半徑分別為 0.134 m、0.067 m、0.034 m 共 3 種模型(詳 圖 4-19),分析結果如圖 4-20、圖 4-21、圖 4-22。而鑄鐵內 襯分析結果並未如第1種分析案例,即在緩衝材料移動初期 會有較高之應力值,而是達平衡後即維持固定的狀態,3種不 同侵蝕半徑所分析之結果皆相近,最大值分別為 14.94 MPa、 15.02 MPa、14.54 MPa(詳圖 4-23)。

(4) 剪力位移分析設定

參考瑞典 SKB 之相關研究(Börgesson, 2010),剪力位移分析 將調降緩衝材料密度,主要分為 2 種情境,其一為密度下降 之區域,侷限於廢棄物罐 1/2 處及 1/4 處,並根據前述緩衝材 料侵蝕後質量再分布範圍分析結果,假定緩衝材料侵蝕範圍 為高度 600 mm 及 1,200 mm 共 2 種分析案例進行測試;其二 為緩衝材料整體密度下降,致緩衝材料密度、楊氏模數、塑性 應力與應變及回賬壓力數值皆產生變化。分析時藉由修正緩 衝材料於不同案例下對應之參數值來模擬,緩衝材料建置模 型如圖 4-24,緩衝材料不同密度下對應之材料力學參數詳表 4-26 至表 4-30。

(5) 侵蝕作用下剪力位移案例之分析結果

廢棄物罐在剪力位移分析案例中,需根據鑄鐵內襯應力分析 結果進行安全性評估,鑄鐵材料本身在三維受力情形下,容 許應力值為 395 MPa(von Mises 應力),故當模擬案例輸出應 力值小於 395MPa時,表示廢棄物罐仍未破壞。

廢棄物罐 1/2 處及 1/4 處,在不同緩衝材料密度下,鑄鐵內襯 應力分析結果如圖 4-25 所示,剪力位移分析案例,在緩衝材 料密度下降之情況下,緩衝材料硬度較低,在剪力位移作用 下對於廢棄物罐產生之壓力作用值亦較低,分析結果顯示在 5 cm 剪力位移作用下皆未產生破壞情形。

檢視分析結果數值資料(詳列如表 4-31 及表 4-32),其中,鑄 鐵容許應力值除以分析應力值即為安全係數,受剪力作用後 安全係數值大於 1.0 時表示廢棄物罐仍處安全餘裕狀態,因 本次分析案例安全係數值均有達至少 1.25 以上,表示安全無 虞。

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

表 4-22: 鑄鐵材料參數

資料來源: Hernelind (2010)。

表 4-23: 銅殼材料參數

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

資料來源: Hernelind (2010)。

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

表 4-24:方管材料參數(型號: \$355J2H)

資料來源: Hernelind (2010)。

表 4-25:封蓋材料參數(型號: \$355J2G3)

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

資料來源: Hernelind (2010)。

表 4-26:緩衝材料(膨潤土)密度 2,050 kg/m³之材料參數

密度(kg/m ³)	2,050
彈	· 性
楊氏模數(MPa)	462
柏松比(-)	0.49
塑	1性
應力(MPa)	應變(-)
4.62	0
6.17	0.004
7.09	0.01
7.57	0.018
7.88	0.026
8.00	0.036
7.91	0.46
7.91	1

資料來源: Börgesson (2010)。
密度(kg/m ³)	2,000
彈	性
楊氏模數(MPa)	335
柏松比(-)	0.49
塑	性
應力(MPa)	應變(-)
3.35	0
4.48	0.004
5.14	0.01
5.49	0.018
5.71	0.026
5.80	0.036
5.73	0.46
5.73	1

表 4-27:緩衝材料(膨潤土)密度 2,000 kg/m³之材料參數

資料來源: Börgesson (2010)。

表 4-28:緩衝材料(膨潤土)1,950 kg/m³之材料參數

密度(kg/m ³)	1,950			
彈性				
楊氏模數(MPa)	243			
柏松比	0.49			
塑	1性			
應力(MPa)	應變			
2.43	0			
3.24	0.004			
3.72	0.01			
3.98	0.018			
4.14	0.026			
4.20	0.036			
4.15	0.46			
4.15	1			

資料來源: Börgesson (2010)。

表 4-29:緩衝材料(膨潤土)的孔隙參數

渗透係數(mm/s)	水的單位重(N/mm ³)	顆粒的體積模數 (MPa)	流體的體積模數 (MPa)
1×10^{-13}	1×10^{-5}	2,100,000	2,100
~~~~ II + JT 1'	1 (2010)		

資料來源: Hernelind (2010)。

表 4-30:緩衝材料(膨潤土)的孔隙比與回脹壓力

密度(kg/m ³ )	孔隙比	回脹壓力(MPa)
2,050	0.70	12.5
2,000	0.78	8.17
1,950	0.87	5.32
· 小十 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	0)	

資料來源: Hernelind (2010)。

表 4-31:廢棄物罐 1/2處不同緩衝材料密度之鑄鐵應力分析結果

案例	緩衝材料密度(kg/m ³ )	鑄鐵內襯von Mises應力(MPa)	安全係數
1-1	2,050	316.3	1.25
1-2	2,050+2,000(600mm)	310.6	1.27
1-3	2,050+1,950(600mm)	308.6	1.28
1-4	2,050+2,000(1,200mm)	307.3	1.29
1-5	2,050+1,950(1,200mm)	290.9	1.36
1-6	2,050+(600mm)	202.8	1.95
1-7	2,050+(1,200mm)	153.2	2.58

註:緩衝材料密度項目下案例 1-2 至 1-5,為採用緩衝材料密度 2,050 kg/m³作 為未受侵蝕部分,而侵蝕部分於案例 1-2 為 2,000 kg/m³,該侵蝕部分長 度為 600 mm。案例 1-6 及 1-7 採用緩衝材料密度 2,050 kg/m³作為未受侵 蝕部分,而侵蝕部分為完全侵蝕,該侵蝕部分長度分別為 600 mm、1,200 mm。

案例	緩衝材料密度(kg/m ³ )	鑄鐵內襯von Mises應力(MPa)	安全係數
2-1	2,050	317.1	1.25
2-2	2,000	305.4	1.29
2-3	1,950	299.4	1.32
2-4	2,050+2,000(600mm)	316.2	1.25
2-5	2,050+1,950(600mm)	315.4	1.25
2-6	2,050+2,000(1,200mm)	313.9	1.26
2-7	2,050+1,950(1,200mm)	301.8	1.31

表 4-32:廢棄物罐 1/4 處不同緩衝材料密度之鑄鐵應力分析結果

註:緩衝材料密度項目下案例 2-4 至 2-7,為採用緩衝材料密度 2,050 kg/m³作 為未受侵蝕部分,而侵蝕部分於案例 2-4 為 2,000 kg/m³,該侵蝕部分長 度為 600 mm。



# 圖 4-11:廢棄物罐概觀



## 圖 4-12: 銅殼及鑄鐵內襯尺寸

註:單位為毫米(mm)。



圖 4-13:廢棄物罐各元件模型及其網格劃設



圖 4-14:緩衝材料1環至2環侵蝕模型

註:左側為1環緩衝材料受侵蝕之示意;右側為2環緩衝材料受侵蝕之示意。



圖 4-15:緩衝材料1環侵蝕後至100年分析結果



圖 4-16:緩衝材料 2 環侵蝕後至 23 年分析結果



圖 4-17:緩衝材料1環侵蝕後鑄鐵內襯應力值

註 1: 左側為緩衝材料 1 環侵蝕後鑄鐵內襯應力最大值(約於侵蝕後 1.8 年);
 右側為1環緩衝材料侵蝕後達平衡時(約於侵蝕後 100 年)。
 註 2:應力值單位為 kPa。



圖 4-18:緩衝材料 2 環侵蝕後鑄鐵內襯應力值

註 1: 左側為緩衝材料 2 環侵蝕後鑄鐵內襯應力最大值(約於侵蝕後 1.1 年);
 右側為2環緩衝材料侵蝕後達平衡時(約於侵蝕後 23 年)。
 註 2: 應力值單位為 kPa。



圖 4-19:緩衝材料受圓柱形侵蝕模型

註:左上為所建置之緩衝材料模型,右上、左下、右下分別為侵蝕半徑 0.134 m、 0.067 m、 0.034 m。



圖 4-20:緩衝材料侵蝕半徑 0.134m 分析結果



圖 4-21:緩衝材料侵蝕半徑 0.067m 分析結果



圖 4-22:緩衝材料侵蝕半徑 0.034m 分析結果



圖 4-23: 侵蝕半徑 0.134m、0.067m 及 0.034m 之鑄鐵內襯應力值 註:單位 kPa。



圖 4-24:分析緩衝材料質量下降後力學演化之模型

註: 左側為緩衝材料環於廢棄物罐 1/2 處質量下降; 右側為緩衝材料環於廢棄 物罐 1/4 處質量下降。



圖 4-25:緩衝材料質量下降後之鑄鐵內襯 von Mises 應力分析圖

註: 左側為緩衝材料環於廢棄物罐 1/2 處質量下降之鑄鐵應力分析結果; 右側 為緩衝材料環於廢棄物罐 1/4 處質量下降之鑄鐵應力分析結果。

### 5. 安全評估技術

#### 5.1 安全論證

#### 5.1.1 初步安全論證報告

依據主管機關要求,處置技術仍需持續採滾動式檢討精進,依據 IAEA 所發布安全論證導則,參考「我國用過核子燃料最終處置技術 可行性評估報告(SNFD2017 報告)」國際審查及原能會審查意見,就 我國處置計畫階段及地質母岩特性,採取國際處置先進技術並於 110 年底提交「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告(SNFD 2021 報告)」。初步安全論證報告的主要目的為(1)參考先進國家處置概念, 針對 SNFD 2021 報告之參考案例初步評估並建構處置場之安全性、 (2)根據初步安全論證報告之評估結果將回饋予研發計畫、未來場址 調查工作、工程設計之發展及未來相關安全評估計畫中、(3)強化與利 害關係者之間的對話,凝聚推動處置計畫的社會共識。

因我國目前尚未選定場址,故參考尚未完成選址的美國、英國、 加拿大、日本等國家,在無特定場址的情況下陸續完成通用型安全論 證報告的經驗,並輔以 SNFD2017 報告為基礎及歷年調查研究成果之 地質特性數據,建置研究用之「參考案例」,藉由過去建立之相關技 術進行分析,提出量化證據,再透過國內外同儕審查及主管機關審查 過程進而達成共識,俾利我國處置技術符合國際水準,確保提升處置 設施安全性。

SNFD 2021 報告於國內專家審查及修訂完成後,已於 110 年底提送主管機關。後續將於 111 年度規劃辦理國際同儕審查,俾利完成初步安全論證報告。

SNFD 2021 報告之安全評估結果屬整合性成果,部分內容為引用 第4.1.1 節相關成果,故本節內容以第2章至第3章、第10章至第 13章及第14章進行探討,110年度成果如下說明:

第2章方法論,參考 NEA MeSA(Methods for Safety Assessment for Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste)報告之通用安 全論證流程(NEA, 2012),建立我國通用安全論證方法。此通用安全論 證方法可泛用於不同的處置概念與不同地質環境,不僅是著重安全分 析與結果,且結合更廣泛的證據、論證與分析;除此之外,此通用安 全論證流程(圖 5-1)包含安全論證的多項要素,可以說明安全評估各 組成與安全論證其他部分之間的關係與回饋。

第3章特徵/事件/作用(FEPs),檢視與篩選可能影響處置設施功 能與安全的特徵/事件/作用(Feature, Event, Process, 簡稱 FEPs)是執 行安全評估前的重要準備工作,透過大量研究各種影響因素與處置設 施交互作用之分析,訂定工程設計前提與地質初始條件下,處置設施 元件之安全功能指標,並建構處置設施於 100 萬年安全評估時間尺度 內的參考演化,發展各種可能衍生情節及案例,以分析模式鏈的方式 量化個別情節與案例下處置設施可能造成之輻射劑量影響。最後,綜 整分析各種情節之影響而得到安全評估結論,包括風險合規性危害程 度及不確定性分析。

第10章情節選定,探討處置設施長期安全性之安全評估,SNFD 2021報告參考 NEA報告(NEA, 2016),將情節區分4類:(1)設計基 準演化情節:對處置設施的設計,使處置設施位於其所處之母岩環境, 在未來100萬年最可能發生的演化。可利用此情節評估當前在母岩環 境條件中之處置設施在未來100萬年可能造成的輻射影響。(2)非設 計基準演化情節:列在參考案例FEPs清單中,但非處置設施設計時 所考慮的事件/作用。這些FEPs一旦發生,或持續影響之下,可能會 對處置設施的長期安全造成影響。故將這些FEPs發展為非設計基準 演化情節,以評估這些FEPs在未來100萬年間對處置設施長期安全 的影響以及可能產生的潛在輻射影響。(3)未來人類活動情節:因難以 預測未來人類的社會與技術發展,使用程式化方式,以代表案例進行 分析。(4)假想情節:使用非常不合理或不可能的假設,假設一個或多 個障壁之安全功能失效,評估剩餘障壁的安全功能,以說明處置系統 的穩健性。

第11章選定情節圍阻功能分析,根據第9及10章的研究成果, 確認圍阻安全功能的完整性,以及失效後的影響程度。(1)緩衝材料平 流評估結果為,由於沉陷效應不至於影響安全功能,故聚焦針對緩衝

材料平流相關的因子進行討論,其不確定性對緩衝材料演化的影響, 皆可被包含於前述 3 種案例(基本演化平流案例、初始平流案例、無 平流案例)中。因此,後續將分別針對此3種緩衝材料平流案例,對 廢棄物罐的圍阻安全功能進行探討。(2)廢棄物罐腐蝕失效評估結果 為,基本演化平流的條件下,銅殼在有氧環境及無氧環境下發生之腐 蝕作用,在封閉後100萬年大約會造成約11.02mm之銅殼腐蝕;保 守估計此時銅殼厚度約為36.8mm,不會導致廢棄物罐因腐蝕而失效。 另考量場址特性之不確定性,可能顯著影響處置設施周圍水文與水化 條件,故假設處置設施封閉後 10 萬年時,一個廢棄物罐的圍阻安全 功能因腐蝕作用而失效。(3)廢棄物罐圍壓失效評估結果為,考量廢棄 物罐承受圍壓相關因子之不確定性,評估後認為目前規劃之廢棄物罐 可提供足夠的餘裕,承受圍壓負載在 50 MPa 內;在安全評估時間尺 度內,不會因承受圍壓負載而導致廢棄物罐失效。(4)廢棄物罐剪力失 效評估結果為,針對緩衝材料平流的分析結果,分析在緩衝材料尚未 到達平流狀態的案例情形下,廢棄物罐受剪力影響的情況。最早可能 發生廢棄物罐因剪力而失效的時間,約在處置設施封閉後第22萬年, 發生率約一百萬分之一;單罐廢棄物罐在未來百萬年安全評估尺度 內,因地震造成剪力位移導致廢棄物罐失效的機率約為三千分之一, 故整體處置設施在百萬年安全評估尺度內,廢棄物罐的失效數量期望 值約為 0.87 罐。

第12章選定情節遲滯功能分析,分析廢棄物罐圍阻安全功能失 效後,放射性核種遷移的情形及對生物圈的劑量影響,以確保處置設 施在安全評估時間尺度內的遲滯安全功能;利用近場、遠場及生物圈 核種傳輸模式以定率或機率性方法評估包括設計基準演化情節及假 想情節的輻射影響。設計基準演化情節之評估結果需符合法規限值要 求,其中,廢棄物罐圍阻安全功能可能因剪力作用而失效,以機率性 方法評估該情節中的變異案例(緩衝材料失去遲滯功能)可能對生物 圈中蔬果類農耕群體造成最高的年風險峰值,約為4.59×10⁻⁹ yr⁻¹,低 於風險法規限值(10⁻⁶ yr⁻¹)約2個數量級。假想情節係用以不可能的情 況做為假設條件,以了解發生該條件的後果為何,藉此測試處置設施

的穩健性,其中評估包括廢棄物罐初始失效、放射性核種隨膠體傳輸及氣相放射性核種傳輸情節所造成的輻射後果。

第13 章其他分析與論證補充,係補充論證處置系統的長期安全 性,並說明安全評估的完整性,包括(1)未來人類活動評估結果為,在 鑽探案例下,區分鑽探工作人員與居住人員之劑量評估。鑽探工作人 員劑量評估結果如圖 5-2,顯示在處置設施封閉後 300 年發生鑽探導 致一個廢棄物罐被破壞,鑽探作業人員所接受到之劑量率約為 2.6 mSv/hr,主要的劑量貢獻核種為 Am-241,若鑽探案例發生在處置設 施封閉 1,000 年以後,劑量貢獻核種為 Nb-94。居住人員劑量評估則 又分別以使用污染井水,劑量評估結果如圖 5-3 所示。評估結果顯 示,若鑽探案例發生於處置設施封閉後 300 年,使用污染井水對該參 考群體造成的年有效劑量為 0.38 mSv/yr,主要的劑量貢獻者為 Am-241,以及使用污染土壤,劑量評估結果如圖 5-4 所示,若鑽探案例 發生於處置設施封閉後 300 年,使用污染土壤農耕,對該參考群體造 成的年有效劑量為 8.80 Sv/yr, 主要的劑量貢獻者為 Pu-238; 若鑽探 案例發生於處置設施封閉後 500 年,主要的劑量貢獻者為 Cl-36。(2) 探討非設計基準演化情節中之抬升/侵蝕案例及火山案例,但考量目 前參數有限,分別參考日本原子能研究開發機構 (Japan Atomic Energy Agency, JAEA)於 1999 年公布的研究開發成果彙整報告(JNC, 2000)針對日本抬升/侵蝕情節安全評估研究(Wakasugi, 2017),研析其 分析方法論,以及參考國際經驗(NUMO, 2020),如果處置設施受到潛 在火山活動之影響,火山通道內的岩漿,由下而上垂直貫穿處置設施, 造成部分廢棄物罐的圍阻安全功能直接失效,廢棄物罐內的放射性核 種混合在岩漿中,隨著火山噴發散佈至火山周圍鄰近區域的地表環境 中。經過一段時間後,這些混合著放射性核種的火山噴發物將逐步沉 降於地表,累積至一定厚度,並且與土壤均勻混合。最後,透過吸入、 攝入與體外曝露之曝露途徑,造成潛在曝露群體所受到的輻射影響。 (3)分析最佳化與最佳可行技術論證,目前尚未涉及到實際處置場址, 因此,針對廢棄物罐腐蝕失效及廢棄物罐剪力失效2種情節,從目前 參考設計的觀點彙整影響前述評估結果的設計因子,未來將經由設計

及風險評估兩者間的疊代,並需考量實際狀況、不確定度及經濟可行 性後,以達到最佳化的目標。此外,亦需針對參考設計中被認為不會 直接影響風險的設計相關因子進行論述,確保其不會對安全功能造成 影響,並確認是否有更佳的設計可提升其安全性。(4)FEPs 篩選後對 情節與風險分析的影響,經由 FEPs 因子的篩檢過程,可確保處置設 施長期安全性相關的重要因子皆被考慮。參考瑞典 SKB SR-Site 的經 驗與執行策略,整體安全評估論證可先盤點已發展、發展中及待發展 之技術,接著依據計畫發展推進,逐步說明各技術執行狀況,以及短 期未納入安全評估理由,完成 FEPs 分析,用以說明篩選對情節與風 險分析的影響。

第14章結論,參考國際經驗,建置研究用參考案例,採用瑞典 KBS-3處置概念做為安全評估之背景與基礎,以發展通用型安全論證 為目標,持續精進我國用過核子燃料最終處置計畫第一階段所發展之 評估技術,並彙整歷年的研究成果,透過整合量化的方式進行處置系統的安全論證與分析,確保處置系統的整體長期安全性。經過分析後, 可透過以下方式做為用過核子燃料最終處置長期安全的論證基礎:

- (1)用過核子燃料處置設施置於長期穩定且不具有經濟價值礦產的母岩深處,與人類及近地表活動隔離,使其不會受到人類社會改變的明顯影響,亦不會受到地表長期氣候變遷的直接影響。
- (2)處置系統是由天然障壁及工程障壁組成的被動天然多重障壁 系統,具備隔離、圍阻、遲滯等安全功能。
- (3)處置設施所處的地質環境應具備極低的地下水流率、良好的 力學穩定性、合適的地下水化學條件,並且維持長期穩定;而 工程障壁是參考國際已發展數十年之成熟設計。
- (4) 經由適當的設計要求,維持處置設施安全,降低熱水力化的 作用,減少對於處置設施長期安全的影響。

此外,本節重要成果亦包括於方法論中回饋之精神,包括(1)回饋 至參考設計與設計前提,參考瑞典 KBS-3 處置系統及其設計進行安 全評估後,依據相關評估結果,從安全性的觀點提供回饋,以供後續 對於處置設施設計之研發規劃。(2)回饋至詳細現地調查與場址描述 模型,根據參考案例之初始條件完成處置設施初步設計,並執行相應 之安全評估,以確保處置設施之長期安全性。初步安全論證報告中依 據各項評估結果,提供回饋予現地調查的規劃及場址描述模型(Site Descriptive Model)的建置,以確保處置設施的設計及安全評估的完整 性,並降低其不確定性,如精進可能引致地震變形帶的特徵化方法、 精進限制截切處置孔裂隙大小之方法、降低離散裂隙網路模型之不確 定性、判定連通導水裂隙、處置設施體積單元水力特性、驗證開挖損 傷帶設計需求的一致性、岩石力學、熱特性、水文地球化學及地表生 態系統。



圖 5-1:安全論證方法流程圖



圖 5-2:鑽探工作人員劑量評估結果

註:處置設施封閉後 300 年至 100 萬年發生鑽探案例之結果。



圖 5-3:使用污染井水對居住人員之劑量評估結果

註:處置設施封閉後 300 年至 100 萬年發生鑽探案例之結果。



圖 5-4:使用污染土壤農耕之劑量評估結果

- 註1:處置設施封閉後300年至100萬年發生鑽探案例之結果。
- 註 2: External (體外曝露劑量); Inhalation (吸入劑量); Ingestion (攝入劑量); Total (總劑量)。

#### 5.2 安全評估技術精進

#### 5.2.1 核種傳輸評估技術精進

當廢棄物罐的圍阻安全功能失效後,放射性核種將被地下水帶離 廢棄物罐,根據瑞典 SKB 的經驗(SKB, 2010a),放射性核種自工程障 壁(近場)釋出至地質圈(遠場)時,於近場主要經由 3 個途徑釋出,分 別為:(1)截切處置孔之連通裂隙(簡稱 Q1 路徑)、(2)處置隧道底部開 挖損傷帶(Excavation Damaged Zone, EDZ)之連通裂隙(簡稱 Q2 路徑) 及(3)截切處置隧道之連通裂隙(簡稱 Q3 路徑),如圖 5-5。

於 109 年度成果報告中已利用水文地質(Hydrogeological)模式評 估 Q1、Q2 及 Q3 路徑的功能測度值(Performance Measurement),為使 用前述功能測度值,110 年度建立包含上述釋出途徑的近場放射性核 種傳輸模式,並以 109 年度水文地質模式評估的功能測度值進行放射 性核種自各路徑的近場釋出率分析測試,建立完成之近場核種傳輸模 式可用於未來的安全評估中。110 年度工作成果說明如下:

(1) 分析軟體說明

本工作利用 GoldSim 及其汙染物傳輸模組(Contaminant transport Module)中的區塊(Compartment)元件(GoldSim Technology Group, 2014)建立近場核種傳輸模式。

- (2) 參數需求說明
  - a. 基本參數:於評估中,考慮 34 個放射性核種(台電公司, 2019a),各核種的盤存量與瞬時及腐蝕釋出分率如表 5-1 所示,燃料中放射性核種若具有瞬時釋出分率,則釋出時將瞬時釋出該分率的存量至廢棄物罐空腔中,若放射性核種具有腐蝕釋出分率,該分率的存量將於開始釋出後以每年 10⁻³ 的分率釋出(SKB, 2010b),其餘的存量則將於開始傳輸後以每年 10⁻⁷ 的分率釋出(SKB, 2010b);處置孔及處置隧道中包含緩衝及回填材料,材質特性參數參考自瑞典SKB報告(SKB, 2010a; 2010b),放射性核種的溶解度限值及於緩衝/回填材料中傳輸時的有效擴散係數、擴散可用

孔隙率(Diffusion-available Porosity)及分配係數皆參考自 瑞典 SKB 報告(SKB, 2010a; 2010b);為評估放射性核種 由處置設施釋出至生物圈所造成的輻射影響,將放射性核 種近場傳輸模式評估之年釋出活度(單位為 Bq/yr)與生物 圈劑量轉換因子(Biosphere Dose Conversion Factor, BDCF)(單位為 Sv/Bq)相乘,如表 5-2 所示,以求得生物 圈中曝露群體可能接受到的年有效劑量(單位為 Sv/yr)。

- b. 地下水流功能測度值:根據 109 年度水文地質模式的評估成果彙整Q1、Q2及Q3 路徑的功能測度值,功能測度值 包括水流傳輸阻力(Flow-related Transport Resistance, F)、 平流傳輸時間(Advective Travel Time, tw)及等效流率 (Equivalent Flow Rate, Qeq),各參數於不同路徑下的累積 分布函數(Cumulative Distribution Function, CDF)如圖 5-6 所示,平均值如表 5-3 所示,其中,Q2及Q3 路徑的 水流傳輸阻力及平流傳輸時間未使用於本工作中。
- (3) 計算案例與結果說明

為評估放射性核種於近場元件中的擴散傳輸情況,利用區塊 描述各近場元件,如圖 5-5 所示,各區塊的幾何如表 5-4 所 示,其中,P-2 區塊為緩衝材料(B-1 區塊)與母岩裂隙開口間 的等效傳輸阻抗區塊,該區塊的目的係免於模式中以數個區 塊詳細的模擬該交界面,該區塊的面積及長度根據下述公式 計算(SKB, 2010a):

$$A_p = \pi R_{dp}(2b)$$

$$F_{x,0} = \left[1 - 1.35 \log\left(\frac{b}{a}\right) + 1.6 \log\left(\frac{d}{a}\right)\right]b$$
(5-2)

其中, a=與裂隙相連接的區塊高度,[m]; A_p=P-2 區塊的面積,[m²]; b=裂隙開口寬的一半,[m]; d=緩衝材料厚度,[m]; F_{x,0}=P-2 區塊的長度,[m]; R_{dp}=處置孔直徑,[m]。

上式中,裂隙開口寬以地下水流功能測度值計算(POSIVA, 1999):

$$2b = \frac{2t_w}{F}$$
其中,  
F=水流傳輸阻力, [yr/m];  
 $t_w = 平流傳輸時間, [yr] \circ$ 
(5-3)

模式中處置隧道的長度係參考瑞典 SKB 報告,為6m,共分為3個區塊(SKB, 1998)。

於評估中,放射性核種在緩衝及回填材料中以擴散方式傳輸, 考慮了放射性核種的衰變、溶解度限值及被物質的吸附。模 式中模擬1個處置孔,該孔中的廢棄物罐空腔為1m³,廢棄 物罐銅殼於製造完成時即具有1個穿透的圓形小孔洞,該孔 洞的半徑為2mm,燃料中放射性核種於處置設施封閉後的1 千年以擴散方式自廢棄物罐中釋出至緩衝材料,擴散至與 Q1、Q2及Q3路徑相接的緩衝及回填材料區塊(即圖 5-5 中 區塊 P-2、BF-1 及 BF-4)的放射性核種將被地下水以平流方式 帶至母岩裂隙中,此處平流速率即地下水流功能測度值中的 等效流率(Qeq),為根據解析解計算的緩衝/回填材料與裂隙交 界面間的等效溶質傳輸率(Romero et al., 1999)。

評估時,以拉丁超立體取樣法(Latin Hypercube Sampling, LHS)對地下水流功能測度值之 CDF 進行取樣,共執行1萬次 實現值(Realisation),評估不同地下水流功能測度值下的近場 放射性核種年釋出活度;近場放射性核種若直接釋出至生物 圈對曝露群體造成之平均年有效劑量如圖 5-7 所示,其中, 總劑量曲線於早期主要由 Cl-36 及 C-14 主導,晚期時 Ra-226 的貢獻逐漸增加,圖 5-8 為不同釋出路徑所造成的平均年有 效劑量,由此結果可知,放射性核種自 Q1 路徑釋出造成較高 的平均年有效劑量,因 Q1 路徑距離廢棄物罐失效孔洞最近, 且 Q1 路徑的平均等效流率最高,而核種擴散至 Q2 及 Q3 路 徑時,部分放射性核種被緩衝及回填材料遲滯或於其中衰減, 且 Q2 及 Q3 路徑的平均等效流率較 Q1 路徑低,因此,釋出 時造成的平均年有效劑量較 Q1 路徑低;圖 5-9 為不同放射 性核種自不同路徑釋出時的相對釋出峰值,具有低分配係數 的放射性核種(如 C-14 及 Cl-36 等)或高分配係數但長半化期 的放射性核種(如 U 的同位素),除了由 Q1 路徑釋出外,也自 Q2 及 Q3 路徑釋出,相反的,具有高分配係數且半化期短的 放射性核種(如 Ac-227 及 Am-241 等)則主要經由 Q1 路徑釋 出。上述評估結果符合預期之情況,後續可將此模式用於未 來的安全評估中。

核種	盤存量	瞬時釋出分率	腐蝕釋出分率
	[mol/罐]	[-]	[-]
Ac-227	4.79×10 ⁻⁹	0	0
Am-241	1.12×10 ¹	0	0
Am-243	1.97	0	0
C-14	3.25×10 ⁻²	9.20×10 ⁻²	6.40×10 ⁻¹
Cl-36	7.00	8.60×10 ⁻²	1.50×10 ⁻²
Cm-245	4.40×10 ⁻²	0	0
Cm-246	7.66×10 ⁻³	0	0
Cs-135	9.83	2.90×10 ⁻²	0
Cs-137	8.52	2.90×10 ⁻²	0
I-129	3.73	2.90×10 ⁻²	0
Nb-94	2.97×10 ⁻¹	1.80×10 ⁻²	9.82×10 ⁻¹
Ni-59	6.39×10 ²	1.20×10 ⁻²	9.60×10 ⁻¹
Np-237	6.60	0	0
Pa-231	9.62×10 ⁻⁶	0	0
Pb-210	1.06×10 ⁻⁹	0	0
Pd-107	6.93	2.00×10 ⁻³	0
Pu-238	1.75	0	0
Pu-239	4.24×10 ¹	0	0
Pu-240	2.65×10 ¹	0	0
Pu-242	8.51	0	0
Ra-226	1.49×10 ⁻⁷	0	0
Se-79	1.87×10 ⁻¹	4.20×10 ⁻³	1.30×10 ⁻⁴
Sn-126	5.00×10 ⁻¹	3.00×10 ⁻⁴	0
Sr-90	5.35	2.50×10 ⁻³	0
Tc-99	2.43×10 ¹	2.00×10 ⁻³	6.10×10 ⁻⁵
Th-229	5.28×10 ⁻⁸	0	0
Th-230	4.28×10 ⁻⁴	0	0
Th-232	1.30×10 ⁻⁴	0	0
U-233	1.50×10 ⁻⁴	0	2.50×10 ⁻¹
U-234	2.55	0	0
U-235	$6.74 \times 10^{1}$	0	0
U-236	5.20×10 ¹	0	0
U-238	8.08×10 ³	0	0
Zr-93	$2.37 \times 10^{1}$	9.20×10 ⁻⁶	1 30×10 ⁻¹

表 5-1:放射性核種盤存量與其瞬時及腐蝕釋出分率

資料來源: SKB(2010a)。

核種	BDCF	核種	BDCF	核種	BDCF
	[Sv/Bq]		[Sv/Bq]		[Sv/Bq]
Ac-227	4.17×10-10	Pb-210	2.66×10-10	U-233	2.42×10-11
Am-241	2.49×10 ⁻¹¹	Pd-107	3.38×10 ⁻¹⁴	U-234	2.33×10 ⁻¹¹
Am-243	2.56×10-11	Pu-238	3.70×10 ⁻¹¹	U-235	2.24×10 ⁻¹¹
C-14	3.35×10 ⁻¹²	Pu-239	4.83×10 ⁻¹¹	U-236	2.23×10 ⁻¹¹
C-136	2.52×10 ⁻¹²	Pu-240	4.11×10 ⁻¹¹	U-238	2.14×10 ⁻¹¹
Cm-245	7.14×10 ⁻¹¹	Pu-242	1.23×10 ⁻¹⁰	Zr-93	5.04×10 ⁻¹³
Cm-246	7.11×10 ⁻¹¹	Ra-226	1.22×10 ⁻¹⁰		
Cs-135	1.31×10 ⁻¹²	Se-79	7.15×10 ⁻¹¹		
Cs-137	8.07×10 ⁻¹²	Sn-126	5.62×10 ⁻¹²		
I-129	4.98×10 ⁻¹¹	Sr-90	4.94×10 ⁻¹²		
Nb-94	5.20×10 ⁻¹¹	Tc-99	2.85×10 ⁻¹³		
Ni-59	3.45×10 ⁻¹⁴	Th-229	2.02×10 ⁻¹⁰		
Np-237	1.84×10 ⁻¹¹	Th-230	8.66×10 ⁻¹¹		
Pa-231	5.68×10 ⁻¹⁰	Th-232	9.39×10 ⁻¹¹	]	

表 5-2:各放射性核種的生物圈劑量轉換因子

表 5-3:不同路徑下各功能測度值的平均值

路徑	水流傳輸阻力(F)	平流傳輸時間(tw)	等效流率(Qeq)
Q1	$5.22 \times 10^{6}$	$2.95 \times 10^{3}$	1.73×10 ⁻⁴
Q2	$4.79 \times 10^{6}$	$2.85 \times 10^{3}$	1.68×10 ⁻⁴
Q3	$4.25 \times 10^{6}$	$2.50 \times 10^{3}$	7.97×10 ⁻⁵

區塊編號	直徑 [m]	高度 [m]	附註
0.1			廢棄物罐,以體積為1
C-1	-	-	m ³ 之區塊模擬
			穿透廢棄物罐銅殼的
C-2	4.00×10 ⁻³	5.00×10 ⁻²	失效孔洞,為水平之
			圓柱
			失效孔洞外的緩衝材
			料,厚度為 3.50×10 ⁻¹
B-1		5.00×10 ⁻¹	m,模擬時將於徑向等
			厚度分為 6 個區塊,
			各約 5.83 cm
B-2	-	1.00	廢棄物罐外圍緩衝材
B-3	1.75	3.405	料
B-4		5 00×10 ⁻¹	廢棄物罐下方緩衝材
		5.00 10	料
		1.50	模擬時將於軸向分為
B-5			3個等高度區塊,各為
	-		5.00×10 ⁻¹ m
BF-1		1.25	處置孔上方回填材料
BF-2		2.125	回填坑道上游,為水
512	-		平之圓柱
BF-3	4	1.75	處置孔上方的回填坑
	-		道,為水平之圓柱
BF-4		2.125	回填坑道下游,為水
			半之圓柱
	4.00×10 ⁻³	1.41×10 ⁻³	廢棄物罐失效孔洞與
P-1			緩衝材料間的等效傳
			輸阻抗區塊
	隨與處置孔相截切裂隙的裂隙開口寬不同而		緩衝材料與母岩裂隙
P-2	改變		開口間的等效傳輸阻
			抗區塊,計算方式參
			│考自 SKB 報告(SKB,
	1		2010a)

表 5-4:近場核種傳輸模式區塊的幾何

註:為求準確,表中部分數值的有效數字大於2位。



圖 5-5:近場核種傳輸模式的區塊相關資訊示意圖

資料來源: 重繪自 SKB(1998)。



圖 5-6:不同釋出路徑下功能測度值的累積分布函數



圖 5-7:近場放射性核種釋出所造成生物圈曝露群體的平均年有效 劑量

註:圖例依照年有效劑量由高至低、由左至右排列,括號內為平均年有效劑量 峰值(μSv/yr)。



圖 5-8:不同近場釋出路徑所造成生物圈曝露群體的平均年有效劑 量

註:圖例括號內為平均年有效劑量峰值(µSv/yr)。



圖 5-9:放射性核種自不同路徑釋出時的相對釋出峰值 註:以3條路徑中最大值為基準,計算相對釋出峰值。

#### 5.2.2 地殼抬升與侵蝕作用情節建立與分析

岩體的抬升、沉降、侵蝕變遷是人類無法控制且為自然發生的地 質現象,其發生取決於大地構造及地殼演化特性,臺灣因造山運動及 板塊運動造成岩體或地形發生抬升及沉降,亦因侵蝕作用造成地形變 化。在用過核子燃料最終處置中,地殼抬升將縮短處置深度與人類生 活圈的安全距離,進而降低地質圈隔離、圍阻、遲滯等安全功能(圖 5-10);此外,岩體的抬升與侵蝕亦可能改變處置設施周圍的地下水流 場及化學特性等,影響處置設施安全功能,改變其長期穩定性。另一 方面,岩體的沉降及其可能伴隨的沉積作用,則會使放射性廢棄物的 處置深度增加,使其與人類生活圈逐漸遠離。

在處置系統中可以被視為外部條件的地質作用包括風化、侵蝕、 沉積及地殼抬升與板塊大地構造等,這些作用於選址時應盡量避免, 且須進行相關評估。臺灣位於菲律賓海板塊和歐亞板塊的聚合邊界, 菲律賓海板塊每年向西北移動,在臺灣南方,歐亞板塊朝東隱沒到菲 律賓海板塊之下,形成馬尼拉海溝及其東側的呂宋火山島弧,在臺灣 北方,菲律賓海板塊則是朝北隱沒到歐亞板塊之下,造成琉球海溝及 其北側的琉球火山島弧和沖繩海槽。根據臺灣地區歷年應用大地測量 法、地形法、地體構造演化與熱定年法等針對抬升、沉降及侵蝕作用 的研究成果,臺灣西部離島結晶岩區域因距離板塊邊界較遠,遠離構 造變形區,地殼相對穩定,屬於千萬年尺度長期穩定的地塊,抬升或 沉降作用不明顯。

依據 ICRP-122 報告對非設計基準演化的定義,從 FEPs 清單中, 挑選出潛在影響處置設施安全的 FEPs,將其發展成非設計基準演化 情節與評估案例。在參考案例的 FEPs 清單中,抬升/侵蝕作用 (TWLSGe05)為影響參考案例的作用之一。因此,本項工作將參考日 本分析案例,針對地殼抬升/侵蝕作用進行案例驗證及技術建立。

過去由於臺灣高放最終處置計畫未曾進行過抬升/侵蝕案例的設 定與分析,故本項工作參考日本原子能研究開發機構(JAEA)於 1999 年公布的研究開發成果彙整報告(JNC, 2000)針對日本抬升/侵蝕情節

安全評估研究(Wakasugi, 2017),來建立本土抬升/侵蝕情節安全評估 分析案例。由於不同地區的抬升速率和侵蝕速率並不相同,在多樣性 的地質環境中,能夠涵蓋的範圍是有限的;因此, SNFD 2021 報告僅 以保守且簡單的模型進行安全評估。

(1) 分析軟體說明

本驗證案例參考日本抬升/侵蝕案例,以淨抬升速率、平均標高等參數,計算不同抬升階段處置設施的影響情形後,再使用 GoldSim11.1 版汙染物傳輸模組(Contaminant Transport Module)建立核種傳輸模式,計算不同情節之核種釋出量。

- (2) 參數需求說明
  - a. 淨抬升速率:可將抬升速率視為過去至未來持續且穩定的 變化趨勢,以日本全國區域範圍,取得之最近10萬年內 的抬升速率,其抬升速率廣泛地分布於0mm/y至0.3 mm/y之間(Geological Society of Japan, 2011),在此範圍 分布的數值中,日本抬升/侵蝕案例研究採用保守評估之 最大值0.3 mm/y作為抬升速率,並於整個評估期間使用 此抬升速率值。
  - b. 平均標高:假設地殼抬升速率及侵蝕速率從過去至未來, 皆維持穩定變化趨勢,當抬升和侵蝕之間的關係處於動態 平衡狀態時,任何地區的標高差異皆可透過常態分布近 似,利用抬升速率及一系列公式(圖 5-11)推導出侵蝕率、 地表平均標高及高度分散量,計算完成的平均標高關係圖 如圖 5-12。
  - c. 各階段廢棄罐數量:日本抬升/侵蝕案例研究為了模擬因 抬升/侵蝕作用而導致廢棄物罐失效的情況,當廢棄物罐 侵入地表凹陷(山谷)部分之風化帶而先喪失其安全功能, 之後隨著時間經過,透過抬升作用侵入風化帶的廢棄物罐 數量隨之增加,到達地面的廢棄物罐數量也跟著增加。換 句話說,侵入風化帶或到達地面的廢棄物罐數量將根據抬 升/侵蝕導致的地面起伏狀態而變化。

當抬升和侵蝕之間的關係處於動態平衡狀態時,在任意時間 t 的地面標高可以透過下式之高斯函數表示,其中 G(y) 代表各標高 y 的頻率:

$$G(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}D} \exp[-\frac{(y-H)^2}{2D^2}]$$

其中,

 $G(y) = 代表處置設施標高為 y 之機率分布 (probability distribution), <math>[m^{-1}]_{J}$ 。 H = 地表平均標高, [m]。 y = 處置設施標高, [m]。 D = 高度分散量, [m]。

因此在任意時間 t 到達地面的廢棄物罐的數量N_{P3}可以表示如下:

$$N_{P3}(t) = N_{all} \int_{y^0}^{y^r} G(y) dy$$

其中,

 $G(y) = 代表處置設施標高為 y 之機率分布 (probability distribution), <math>[m^{-1}]_{, 0}$  $y^r = 第r年處置設施標高, [m]。$  $y^0 = 處置設施的初始標高, [m]。$ y = 處置設施標高, [m]。 $N_{all} = 初始埋藏在處置設施中所有廢棄物罐數量, [罐]。$  $N_{P3}(t) = 存在第3階段的廢棄物罐數量, [罐]。$ 

由於日本抬升/侵蝕案例研究假設風化帶皆為相同深度,因此風化帶基準面的標高亦可以高斯函數表示,可算得第 2階段存在風化帶中的廢棄物罐數量Np2:

$$N_{P2}(t) = N_{all} \int_{y^0}^{y^r} G(y+w) dy - N_{P3}(t)$$

其中, G(y) = 代表處置設施標高為 y 之機率分布 (probability $distribution), <math>[m^{-1}]_{, 0}$   $y^r = 第 r 年處置設施標高, [m] \circ$   $y^0 = 處置設施的初始標高, [m] \circ$   $y = 處置設施標高, [m] \circ$   $w = 風化層厚度, [m] \circ$   $N_{all} = 初始埋藏在處置設施中所有廢棄物罐數量, [罐] \circ$   $N_{P3}(t) = 存在第 3 階段的廢棄物罐數量, [罐] \circ$  $N_{P2}(t) = 存在第 2 階段的廢棄物罐數量, [罐] \circ$ 

另可推導出存在第1階段的廢棄物罐數量 $N_{P1}$ 表示如下:  $N_{P1}(t) = N_{all} - N_{P2}(t) - N_{P3}(t)$ 

其中,

 $N_{all}$  = 初始埋藏在處置設施中所有廢棄物罐數量,[罐]。  $N_{P3}(t)$  = 存在第3階段的廢棄物罐數量,[罐]。  $N_{P2}(t)$  = 存在第2階段的廢棄物罐數量,[罐]。  $N_{P1}(t)$  = 存在第1階段的廢棄物罐數量,[罐]。

從上述關係式獲得每個階段中的廢棄物罐數量隨時間的變化如圖 5-13 所示。

(3) 計算案例與結果說明

地殼抬升與侵蝕作用之情節分析,為了描述地質處置系統於 每個階段之狀態及其情節設定,首先評估處置設施之平均標 高隨時間的變化,並闡明地表與處置設施之間的相對位置關 係(圖 5-12),本案例是以 0 m 的地面標高和處於-1000 m 的 處置設施的標高作為初始條件來評估,其中風化帶的設定厚 度為 100 公尺。在處置設施侵入風化帶之前,稱為第1階段 情節,處置設施持續於風化帶中上升,在處置設施到達地表 前,稱為第2階段情節,到達地表後的評估期間皆為第3階 段,以下將詳述各個階段的情節設定與細節。

a. 第1階段:

處置設施尚未到達風化層前,以當時的地質環境條件作為 前提,並考慮地質處置系統的狀態和各障壁預期的的安全 功能下建立情節,日本抬升/侵蝕案例研究參照前述在第 2 次彙總報告(JNC, 2000)中所建構之基本情節參考案例 進行設定。本驗證案例假設在第1階段中,廢棄物罐皆維 持其安全功能,僅以平均標高速率緩慢抬升。

b. 第2階段:

第 2 階段之情節在描述處置設施侵入風化層到達地表之 前的情節,其概念模型如圖 5-14 所示,參考日本過往之 風化帶的文獻調查(H. Shimemoto, 2014),其風化帶厚度 設為 100 公尺,並且在評估期間保持不變,假設風化帶 包含雨水滲透而產生向下的地下水流動以及朝下游河流 區域的水平地下水流動。在風化帶中,核種將伴隨著雨水 滲透產生向下方向的地下水流和擴散作用進行遷移。處置 設施進入風化層後,地球化學環境應該會從還原性轉變為 氧化性,因此本研究核種遷移參數亦伴隨此變化而改成氧 化條件下的參數。

c. 第3階段:

第3階段為處置設施從風化層因抬升/侵蝕作用而到達地 面。在一般情況下,當處置設施到達地表後,由於廢棄物 罐曝露於地面將被人類發覺,且人類應會採取一些干預措 施。但是在日本抬升/侵蝕案例研究,以保守方式評估抬 升/侵蝕情節對人類與環境造成的輻射傷害,故不考慮任 何的干預措施。

在處置設施到達地面後,工程障壁失去了所有安全功能, 使廢棄物罐中的核種與周圍土壤混合。混合後的核種,可 透過侵蝕作用遷移至風化層,或透過降雨滲透向下遷移。

日本抬升/侵蝕案例總劑量結果如圖 5-15 所示,該案例於第1階 段模式所使用的參數是根據日本第2次彙總報告內容建立,由於本工 作之目的在於模型建置及技術建立,本驗證案例並沒有模擬第1階段 之核種傳輸,並假設在第1階段中,廢棄物罐皆維持其安全功能,本 驗證案例之地下水遷移情節與設施正上方建設和居住情節總劑量結 果如圖 5-16 所示,其結果顯示在劑量曲線分布及最高劑量與日本案 例相符,在地下水遷移情節中,劑量結果顯示之優勢核種分別是 Np-237、U-233 以及 Th-229(圖 5-17),此結果與日本抬升/侵蝕案例相同, 而在設施正上方建設和居住情節中,整體劑量分布與數量級亦與日本 案例相同,優勢核種分別是 Th-229、Ra-226、Pb-210(圖 5-18),由於 本案例並未建置日本抬升/侵蝕案例第1 階段之基本情節,因此設施 正上方建設和居住情節之優勢核種與日本案例結果略有差異。



圖 5-10:抬升作用與侵蝕作用對處置設施長期安全性的影響



圖 5-11: 地殼抬升/沉降與侵蝕/沉積之相互作用關係圖


圖 5-12: 地表、風化層底部及處置設施平均標高



圖 5-13:各階段之廢棄物罐數量與時間關係圖



圖 5-14:日本抬升/侵蝕案例概念模型

註:本圖重繪自日本抬升/侵蝕研究(Wakasugi, 2017)



圖 5-15:日本抬升/侵蝕 3 階段總計量曲線

註:本圖 擷取自日本抬升/侵蝕研究(Wakasugi, 2017)



圖 5-16:第2階段、第3階段總計量曲線



圖 5-17:地下水遷移情節劑量結果



圖 5-18:設施正上方建設和居住情節劑量結果

#### 5.2.3 膨潤土受裂隙水流侵蝕試驗

用過核子燃料最終處置概念中,緩衝材料作為廢棄物罐及地質圈 間之緩衝屏障,應具備對力學變動、化學物質傳輸及反應之緩衝效果, 故國際間皆選用具高膨脹性及阻水特性之膨潤土作為研究標的。膨潤 土顆粒具有吸水後膨脹之特性,當處置場址地下水鹽度較低且處置孔 受裂隙截切時,膨潤土與地下水接觸之交界處則可能形成膠體 (Colloid)而隨水流遷移流失(圖 5-19),久而久之造成緩衝材料整體質 量及密度下降,該現象稱為化學侵蝕(Chemical Erosion)作用。

化學侵蝕作用概念如圖 5-20 所示,水平裂隙穿過處置孔之局部 垂直剖面,左側為處置孔,而右側為裂隙,膨潤土因吸水回脹而從處 置孔向外擠入裂隙,此自由回脹作用會受到膨潤土顆粒內部和岩 體裂 隙界面處的摩擦力阻擋,當這些反作用力達到平衡時,膨潤土擠入裂 隙之深度即為最大擴張距離。膨潤土進入裂隙距離的增加,其密度和 回脹壓力將迅速下降,流變性質也隨著距離而變化,即由內向外將從 溼化之固體(Hydrated Solid)開始將水吸入膨潤土顆粒之層間空間,轉 為持續吸水膨脹形成糊狀土(Swelling Paste),隨著黏土顆粒之佔比下 降,開始形成不再持續膨脹且相對穩定之凝膠(Gel),接著是會隨著水 流移動擴散的穩定膠體-溶膠(Sol);當膨潤土流體性質逐漸與地下水 相同時,膨潤土膠體便在此交界區域形成,並通過擴散方式遷移到流 動之地下水中,進而被帶離處置孔,造成侵蝕現象發生;除擴散之外, 膨潤土流體(即膨潤土膠體在水中的分散體,而不是固體或凝膠)也 可能以平流方式流失,而後更多的膨潤土將從處置孔擠出至裂縫中, 以填補質量損失造成密度失衡,是為質量再分布作用,而此侵蝕過程 將導致緩衝材料總質量損失,進而降低緩衝材料密度,可能影響其安 全功能。

為考量近場裂隙水流特性對緩衝材料與回填材料的侵蝕作用,本 研究發展含裂隙之水流侵蝕試驗,探討膨潤土材料於飽和後因回脹擠 壓至裂隙中,同時受水流影響下之侵蝕行為,研究成果可供後續發展 侵蝕模式研究驗證與參數調校。試驗模具設計如圖 5-21,試驗裝置 配置如圖 5-22,各設備組件說明如下:

(1) 水箱

用以盛裝欲注入人工裂隙之溶液。

(2) 注水泵浦

包含蠕動泵浦及壓力體積控制器,可進行微量注水,流率可 低至 0.2 μl/min,最高可達 100 ml/min,依試驗條件作切換使 用。

(3) 試驗台架

試驗台架主要由水平花崗岩平台與記錄器所構成,用於承載 及固定人工裂隙,確保裂隙維持水平,並透過記錄器持續記 錄膨潤土試體吸水膨脹向裂隙擠出及流失之影響變化,作為 後續影響數據分析之依據。

(4) 模擬裂隙裝置

以訂製的雙片壓克力板組成(如圖 5-21),2 側有入流及出流 水之導槽,中心則可放置壓實之環狀膨潤土試體,外圍以 Oring 阻止水分及空氣進出;組裝後留有 0.12 mm 之人工裂隙 內寬,亦為膨潤土試體能與水流接觸的高度。水流以溢流之 方式均勻從裂隙整面進入,夾帶著流失膠體之出流水會進入 收集溝出流。

(5) 膠體收集裝置

收集流經人工裂隙之出流水,以利後續進行出流膠體分析。

試驗材料採用美國懷俄明州 American Colloids 公司生產的 MX-80 型膨潤土,屬鈉型膨潤土,粒徑大小介於 0.075 mm 至 1.18 mm 之 間。試體以單軸靜態壓實法製作,壓製為直徑為 20 mm,高 10 mm 之 扁圓柱型試體,試體密度為 1,600 kg/m³。於試驗開始前,需進行試 體與設備安裝,將試體放置於化學侵蝕模具內,並將模具周圍及中心 螺絲鎖緊固定。試驗先以靜止供水方式探討飽和緩衝材料因回賬壓力 擠出(Extrusion)之現象,再以不同水流率注入模具之人工裂隙中,由 另一端出流處收集水樣量測膠體流失率,藉由試驗的觀察與取樣,求 得壓實的膨潤土材料受不同水流率條件下擠出及膠體流失速率,探討 裂隙入流水條件對膨潤土侵蝕作用之影響。試驗裝置的水流注入端皆

規劃使用流量控制系統來進行,並於出流端依流量條件規劃取樣頻率,於試驗前亦將進行進流與出流測試,以確保流量控制精確。主試驗程序可分為3個階段,說明如下。

(1) 吸水擴張程序

先以注水泵浦供水至裂隙內,確認緩衝材料受人工裂隙截切 位置與水充分接觸,並去除裂隙內滯留氣泡後,改以靜止供 水方式,以記錄器記錄緩衝材料於吸水飽和過程,因回賬壓 力擠入裂隙之現象,及擠入部分隨著時間持續擴張之變化。 緩衝材料吸水擴張距離量測則使用 IMAGE J 軟體,將拍攝影 相透過比例尺對照換算之方式,量測糊狀土擠出之距離。

(2) 水流侵蝕程序

試驗之水流率設定於 0.05 ml/min 至 1 ml/min 之間,依設定 之流率條件,開始階段性調升注入模具中,並於下游端收集 出流水。出流水樣分析使用感應耦合電漿放射光譜儀 (Inductively Coupled Plasma, ICP),量測出流水中膠體濃度, 用以計算膨潤土於不同水流率條件之流失率。

(3) 試驗後分析

試驗後分析包含擠入裂隙之膨潤土重量分析、殘餘重量分析, 確認該水質條件下造成之累積流失量。

試驗過後先以純水將裂隙中流動性膠體沖出,蒐進後進行量 測;後續將壓克力模具拆開,置入真空烘箱,以 30°C 乾燥 2 週,再分別取樣樣品槽中試體及擠入裂隙之乾燥糊狀土,量 測並記錄各別重量。

於第1階段吸水擴張程序,透過影像記錄器觀察試體吸水飽和過 程,如圖 5-23,膨潤土試體因吸水膨脹擠入模具之人工裂隙中,由圖 中可看出試體擠出裂隙的擴張範圍隨飽和的過程逐漸增加,本研究透 過影像軟體,計算膨潤土擠出裂隙之距離,試體飽和過程之擴張距離 隨時間之變化如圖 5-24 所示,在 0 至 100 小時的初期飽和過程膨潤 土擴張距離有快速的發展,後期膨脹的力量達到平衡而逐漸趨緩,在 吸水擴張程序最終的平均擴張距離為 13.3 mm。

第 2 階段水流侵蝕程序, 依序進行 0.05 ml/min、0.1 ml/min、0.5 ml/min、及1ml/min之水流率條件,試體於不同水流率擴張距離影像 紀錄如圖 5-25,隨時間變化擴張距離如圖 5-26,不同水流率條件下 試體最終平均擴張距離如表 5-5。由表 5-5 最終平均擴張距離結果可 看出,在第1階段一端進水一端止水的條件下,膨潤土吸水膨脹至擴 張距離達到平衡後,在第2階段加入水流並於另一端出水,因增加進 水使膨潤土吸收更多水份而膨脹,以及水流帶走裂隙邊緣的膨潤土, 使內部的膨潤土持續向外擴張,而使試體的擴張距離增加,且水流率 增加,擴張距離也隨之增加。試驗過程中於出流端定量收集出流水, 分別量測出流水樣本中之膠體濃度,膠體累積流失量隨時間變化如圖 5-27,另分別將不同水流率之膠體累積流失量與試驗時間關係繪製如 圖 5-28。由試驗結果可知,在流率 0.05 ml/min 的條件下,試驗第 0 至 5 天之間的膠體累積流失量有明顯的變化,原因在於在第 1 階段的 吸水擴張程序為靜水狀態,膨潤土中的膠體散布至試體周圍的裂隙 中,在剛開始取樣出流水時,膠體濃度會較高,在試驗時間第6至16 天時則逐漸平穩,流率 0.1 ml/min 的條件下,其試驗時間及累積流失 量關係之斜率與 0.05 ml/min 之條件相近,但由擴張距離影像紀錄(圖 5-25) 觀察出,水流率 0.05 ml/min 及 0.1 ml/min 在試驗過程中,因試 驗環境溫度變化造成裂隙中生成氣泡,阻檔了部份的水流接觸試體邊 緣 的 膨 潤 土 , 而 在 0.5 ml/min 的 條 件 的 試 驗 期 間 , 進 行 氣 泡 消 除 , 將 模具出水端墊高,持續於進水端進水,使水流淹沒裂隙空間使其排氣 後 再 進 行 試 驗 ,因 此 水 流 率 0.5 ml/min 條 件 的 膠 體 累 積 流 失 率 變 化 有 明顯增加,而至1ml/min的流率條件則趨穩。將圖 5-28 各水流率條 件膠體累積流失量與時間之關係進行線性迴歸,計算單位時間造成之 膠體流失率,如表 5-6。試驗結果得知,單位時間累積膠體流失率隨 水流率增加而增加,且由水流率 0.1 ml/min 至 0.5 ml/min 變化的級距 較顯著。

本階段已完成化學侵蝕試驗之設備建置,並使用純水的水質條件,進行了 0.05 ml/min 至 1 ml/min 的水流率侵蝕試驗,取得不同試驗條件下之試體擴張距離變化及累積流失率之變化;試體擴張距離隨

水流率上升而增加,單位時間之累積膠體流失率亦隨水流率增加而增 加,顯示在純水條件下,水流率將會影響膨潤土膠體侵蝕率,且會隨 著水流率上升而增加膨潤土擴張至裂隙的範圍。

表 5-5: 試體於不同條件下之最終擴張距離

試驗條件	吸水擴張	0.05 ml/min	0.1 ml/min	0.5 ml/min	1 ml/min
擴張距離(mm)	13.3	24.8	26.0	31.9	32.2

表 5-6:不同水流率條件下單位時間下之膠體流失率

試驗條件	0.05 ml/min	0.1 ml/min	0.5 ml/min	1 ml/min
單位時間之膠體流	$2.85 \times 10^{-6}$	$3.41 \times 10^{-6}$	$3.02 \times 10^{-5}$	$3.19 \times 10^{-5}$
失率 (mg/sec)				



# 圖 5-19: 化學侵蝕作用示意圖

資料來源: Schatz et al. (2013)。



圖 5-20:化學侵蝕概念模型

參考資料: Schatz et al. (2013)。



圖 5-21:化學侵蝕試驗模具設計示意圖



圖 5-22: 化學侵蝕試驗設備配置圖



圖 5-23: 試體飽和過程之擠出距離影像紀錄

註:試體為 MX-80 型膨潤土,試驗水質為純水。



圖 5-24: 試體飽和過程之擠出距離隨時間之變化

註:試體為 MX-80 型膨潤土,試驗水質為純水。



圖 5-25: 試體於不同水流率之擴張距離影像紀錄

註:試體為 MX-80 型膨潤土,試驗水質為純水。



圖 5-26: 試體於不同水流率之擴張距離隨時間之變化



圖 5-27:膠體累積流失量隨時間變化

註:試體為 MX-80 型膨潤土,試驗水質為純水。



圖 5-28:不同水流率膠體累積流失量與試驗時間之關係 註:試體為 MX-80 型膨潤土,試驗水質為純水。

### 6. 資料庫

## 6.1 高放處置資料庫

#### 6.1.1 資料庫精進

#### 6.1.1.1 持續精進數據管理系統

持續蒐集執行專案工作產生之報告、數據與相關品質文件,以數 位化方式保存建檔,並以網頁介面及檔案總管介面提供查閱及檢索。

除了建檔保存資料外,亦逐筆建立報告詮釋資料,鍵入其年份、 產出單位、作者及搜尋關鍵字等資料。

#### 6.1.1.2 品保資料管理

執行中專案目前已依據相關品質保證方案,實行資料管理及管制 措施,包括數位化保存工作程序書、相關品質文件與稽查紀錄等,資 料保存於伺服器硬碟空間及磁碟陣列內,並定期執行備份。

本計畫執行所產生之各項數據、報告、文獻之保存方案,由指定 負責人員進行管制及管理,以確保本計畫之研究成果、報告與相關參 考文獻得以完整保存,以利追溯及查詢利用。

#### 6.1.1.3 帳號權限管理

以帳號區分權限進行資料控管,分別設置管理人員及一般使用人 員角色,一般使用人員亦依其權限設置不同可使用範圍,以確保資料 不被任意竄改。

## 7. 參考文獻

王珮玲(1998),鉀長石氫40/氫39同位素熱年代學之研究與應用,國 立臺灣大學理學院地質科學研究所博士論文,共198頁。

台電公司(2013),用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調查

與評估階段-101 年度計畫成果報告,台灣電力公司,共285 頁。 台電公司(2018),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—106年度成果報告(修訂二版),台灣電力公司。 台電公司(2019a),用過核子燃料最終處置計畫潛在處置母岩特性調

查與評估階段--我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告--SNFD2017報告, TPC-SNFD2017-V1。

台電公司(2019b),用過核子燃料最終處置計畫,台灣電力公司。

李偉誠(2015),非彈性應變回復法評估花蓮和平地區及彰濱工業區之現地應力場,國立臺灣師範大學地球科學研究所碩士論文,共228頁。

- 林朝彦(2015),花蓮和平溪下游變質花崗岩之脆韌性與脆性構造研究 與其地質意義,國立臺灣師範大學理學院地球科學研究所碩士論 文,共106頁。
- 國家地震工程研究中心(2019),核能設施地震危害重新評估 計畫一: 臺灣地區地震危害高階模型建置 臺灣地區核能設施地震危害評 估專案計畫書 (定稿版 1.3.1 版),臺灣電力股份有限公司104 年度研究計畫027040000101。
- 劉武志(1991),困難地層之鑽探技術探討,臺灣鑛業,第43卷,第2 期,第96-104頁。
- 饒瑞鈞(2014)。GPS 觀測之雜訊分析研究 II (MOTC-CWB-103-E-04)。 中央氣象局。
- Abrahamson, N. A., and Youngs, R. R. (1992), A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(1), pp. 505–510.

- Abrahamson, N., N. Gregor, and K. Addo (2016), BC hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes, Earthquake Spectra, 32(1), pp. 23-44.
- Abrahamson, N.A., Silva, W.J., and Kamai, R. (2014), Summary of the ask14 ground motion relation for active crustal regions, Earthquake Spectra, 30(3), pp. 1025–1055.
- Ahola J., Ollikainen, M., Koivula, M., & Jokela, J. (2006). GPS operations at Olkiluoto, Kivetty and Romuvaara in 2005, working report 2006-63. Posiva Oy.
- Åkesson, M., Kristensson, O., Börgesson, L., Ann Dueck Clay Technology (2010), THM modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios, SKB, TR-10-11.
- Akkar, S., M.A. Sandikkaya, and J.J. Bommer (2014), Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in europe and the middle east, Bulletin of Earthquake Engineering, 12(1), pp. 359-387.
- ASTM (1999), Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation, D2113-99, 20 p.
- ASTM (2008), Standard Test Method for Determination of In Situ Stress in Rock Mass by Overcoring Method – USBM Borehole Deformation Gauge, ASTM D4623-8.
- ASTM (2018), Standard Guide for Use of Direct Rotary Drilling with Water-Based Drilling Fluid for Geoenvironmental Exploration and the Installation of Subsurface Water-Quality Monitoring Devices, ASTM D5783-18.
- ASTM (2019), Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Low-Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test, ASTM D4630-19.
- Beswick, J. (2007), Report on Deep Exploratory Borehole Drilling, EPS International Report, 182 p.

- Bindi, D., M. Massa, L. Luzi, G. Ameri, F. Pacor, R. Puglia, and P. Augliera (2014), Pan-european ground-motion prediction equations for the average horizontal component of pga, pgv, and 5 %-damped psa at spectral periods up to 3.0 s using the resorce dataset, Bulletin of Earthquake Engineering, 12(1), pp. 391–430.
- Boore, D.M., J.P. Stewart, E. Seyhan, and G.M. Atkinson (2014), NGAwest2 equations for predicting pga, pgv, and 5% damped psa for shallow crustal earthquakes, Earthquake Spectra, 30(3), pp. 1057-1085.
- Campbell, K.W., and Y. Bozorgnia (2014), NGA-west2 ground motion model for the average horizontal components of pga, pgv, and 5% damped linear acceleration response spectra, Earthquake Spectra, 30(3), pp. 1087-1115.
- Chao, S.H., Chiou, B., Hsu, C.C., and Lin, P.S. (2019), A horizontal ground motion model for crustal and subduction earthquakes in Taiwan. Accepted by Earthquake Spectra on August 17, 2019, doi: 10.1177/8755293019891711.
- Chiou, B.S.-J. and R.R. Youngs (2014), Update of the chiou and youngs nga model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra, Earthquake Spectra, 30(3), pp. 1117-1153.Hsu, Y.J., Yu, S.B., Simons, M., Kuo, L.C., and Chen, H.Y. (2009), Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms, Tectonophysics, Vol. 479, Issue 1-2, pp. 4-18.
- Committee for Geosphere Stability Research, Geological Leaflet 4 Japanese Island-arc and Geosphere Stability, Geological Society of Japan (2011), [in Japanese]
- Cornell, C.A., and Van Marke, E.H. (1969), The major influence on seismic risk, Proceedings Third World Conference on Earthquake Engineering, Sandiago, Chile, A-1, 69-93.
- Elson, R. and Shaw, R. (1995), Technical Brief No 43: Simple Drilling Methods, Waterlines, Vol. 13, Issue 3, pp. 5-18.

- GoldSim Technology Group. (2014). GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide Version 6.4. GoldSim Technology Group.
- Graizer, V., and E. Kalkan (2016), Summary of the gk15 groundmotion prediction equation for horizontal pga and 5, Bulletin of the Seismological Society of America, 106(2), pp. 687–707.
- Gutenberg, B., & C.F. Richter, (1944). Frequency of earthquakes in California, Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185-188.
- Haapalehto S., Malm M., Kaisko O., Lahtinen S. & Saaranen V. (2021). Results of Monitoring at Olkiluoto in 2020, Rock Mechanics. working report 2021-47.Posiva Oy.
- Huang, H. H., Wu, Y. M., Song, X., Chang, C. H., Lee, S. J., Chang, T. M., & Hsieh, H. H. (2014). Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. Earth and Planetary Science Letters, 392, 177-191.
- Huang, H.H., Shyu, J.B.H., Wu, Y.M., Chang, C.H., and Chen, Y.G. (2012), Seismotectonics of northeastern Taiwan: Kinematics of the transition from waning collision to subduction and postcollisional extension, Journal of Geophysical Research, Vol. 117, pp. B01313.
- Idriss, I.M. (2014), An nga-west2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes, Earthquake Spectra, 30(3), pp. 1155-1177.
- ISO (2012), Geotechnical investigation and testing—geohydraulic testing—part 3: water pressure tests in rock, ISO 22282-3:2012(E), 26 p.
- ISRM (2006), ISRM Suggested Methods for Geophysical Logging of Boreholes.
- ISRM (2006), ISRM Suggested Methods for Rock Stress Estimation Part 2: Overcoring Methods.
- ISRM (2014), ISRM Suggested Method for Rock Fractures Observations Using a Borehole Digital Optical Televiewer.

- Jan Hernelind (2010), Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load, TR-10-34, 5T Engineering AB.
- Japan Nuclear Cycle Development Institute. H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan: Supporting Report 2, Repository Design and Engineering Technology. Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2000.
- JNC (2000), H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, 2nd Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, JNC Technical Report TN1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai-mura Japan.
- Joyner, W. B., and D. M. Boore (1981), Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 71(6), pp. 2011–2038.
- Kale, Ö., S. Akkar, A. Ansari, and H. Hamzehloo (2015), A groundmotion predictive model for iran and turkey for horizontal pga, pgv, and 5, Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2A), pp. 963-980.
- Kamal, M. M. (1983). Interference and pulse testing-A review. Journal of Petroleum Technology, 35(12), pp. 2-257.Lin, P., and C. Lee (2008), Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern taiwan, Bulletin of the Seismological Society of America, 98(1), pp. 220-240.
- King, R. W. (2002). Documentation for the GAMIT GPS analysis software, MIT Internal Report. http://wwwgpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT.pdf.
- King, R. W., & Herring, T. A. (2002). Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program, MIT Internal Report. http://wwwgpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK.pdf

- Langbein, J., & Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. J. Geophys. Res., 102, 591-603.
- Lennart Börgesson (2010), Earthquake induced rock shear through a deposition hole, Verification of the bentonite material model and the calculation technique, TR-10-33, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lin, P.-S., C.-T. Lee, C.-T. Cheng, and C.-H. Sung (2011), Response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes in taiwan, Engineering Geology, 121(3-4), pp. 150-164.
- Mattias Åkesson and Lennart Börgesson (2010), THM modelling of buffer, backfill and other system components Critical processes and scenariosl, SKB, TR-10-11.
- Mignan, A., & Woessner, J. (2012). Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, doi:10.5078/corssa-00180805
- Molz, F. J., Morin, R. H., Hess, A. E., Melville, J. G., Guven, O. (1989), The Impeller Meter for Measuring Aquifer Permeability Variations - Evaluation and Comparison with Other Tests. Water Res, 25, p1677-p1683.NCREE (2019), Development of the Hazard Input Document for Taiwan using SSHAC Level 3 Methodology, Volume 3: GMC Technical Report, Taiwan Power Company, 468 p.
- Morikawa, N., and Fujiwara, H. (2013), A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake. Journal of Disaster Research, 8(5), pp. 878-888.
- NEA (2012), "Indicators in the Safety Case: A Report of the Integration Group on the Safety Case (IGSC)", OECD Publishing, Paris.
- NEA (2016), Scenario Development, Workshop Synopsis, Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2015)3.
- Nikolaidis, R. (2002). Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System, [Ph.D. dissertation]. Univ. of Calif. San Diego.

- Paillet, F. L. (1998), Flow modeling and permeability estimation using borehole flow logs in heterogeneous fractured formations. Water Resources Research, 34(5), p997-p1010.
- Paillet, F. L., Hess, A. E., Cheng, C. H, Hardin, E. (1987), Characterization of Fracture Permeability with High-Resolution Vertical Flow Measurements during Borehole Pumping. Ground Water, 25, p28-p40.
- Phung, V B., Loh, C.H., Chao, S.H., and Abrahamson, N.A. (2019b), Ground motion prediction equation for Taiwan subduction-zone earthquakes. NCREE Report, No. NCREE-19-012, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, 74 p.
- Phung, V.B., Loh, C.H., Chao, S.H., Chiou, B.S.-J. and Huang, B.S. (2019a), Ground motion prediction equation for Taiwan crustal earthquakes. NCREE Report, No. NCREE-19-011, National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan. 109 p
- Plumb RA, Hickman SH (1985), Stress-induced borehole enlargement: A comparison between the four-arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well. J. Geophys. Res., 90, 5513-5521.
- Posiva (2011), Drilling and Associated Drillhole Measurements of the Pilot Hole ONK-PH12, p1-p148.Ringgaard, J. (2007), Mapping of borehole breakouts. processing of acoustical televiewer data from KFM01A, KFM01B, KFM02A, KFM03A, KFM03B, KFM04A, KFM05A, KFM06A and KFM07C. SKB P-07-07, 1-32.
- POSIVA and SKB (2017), Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository – Conclusions and recommendations form a joint SKB and POSIVA working group, POSIVA Oy and Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, POSIVA-SKB-Report-01.
- POSIVA. (1999). Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara TILA-99 (POSIVA 99-07). POSIVA.

- Ramey Jr, H. J. (1980). A drawdown and build-up type curve for interference testing. In Third Invitational Symposium on Well Testing, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, pp. 130-134.
- Romero, L., Moreno, L., & Neretnieks, I. (1995). Fast Multiple-Path Model to Calculate Radionuclide Release from the Near Field of a Repository. Nuclear Technology, 112(1), 89-98. <u>https://doi.org/10.13182/NT95-A15854</u>
- Sadkowski, S.S., Stetson, K.P., Benoît, J., and Roche, J.T. (2010), Characterizing subsurface conditions using drilling parameters for a deep foundation project in Boston, MA, USA. In GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design, ASCE Press, Virginia, pp. 1132-1141.
- Schatz, T., Kanerva, N., Martikainen, J., Sane, P., Olin, M., Seppälä, A., and Koskinen, K. (2013). Buffer Erosion in Dilute Groundwater (POSIVA 2012-44). POSIVA Oy.
- Shimemoto, H, Wakasugi, K, Shibata, M, Yamaguchi, M, "An Approach to establish information basis of Weathered zone for the safety assessment to HLW disposal over longterm," Jpn. Geosci. Union Meeting 2014, Yokohama, Japan, 28 Apr. - 2 May, HCG36-04 (2014), [in Japanese]
- SKB (2006), Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. SKB, TR-06-09.
- SKB (2010c), Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-13.
- SKB (2010d), Design, production and initial state of buffer, Technical Report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-15.
- SKB (2010e), Design, production and initial stat of the backfill and plug in deposition tunnels, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, SKB, TR-10-16.

- SKB (1998), Discretization in COMP23 for SR97 (R-98-03). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company.
- SKB (2010a), Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site (TR-10-50). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company.
- SKB (2010b), Data report for the safety assessment SR-Site (TR-10-52).Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company.
- TraCE-21ka (2011), Simulation of Transient Climate Evolution over the last 21,000 years, NCAR; Retrieved 2019/10/2 from https://www.earthsystemgrid.org/dataset/ucar.cgd.ccsm.trace.html °
- Vaskou, P., de Quadros, E. F., Kanji, M. A., Johnson, T., and Ekmekci,
  M. (2019), ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. Rock
  Mechanics and Rock Engineering, 52(10), pp. 4155-4174.
- Wakasugi, K, Yamaguchi, M, Koo, S, Nagao, F, Kato, T, Suzuki, Y, Ebashi, T, Umeki, H, Niibori, Y, "Development of a method of safety assessment for geological disposal considering long-term evolution of geological and topographical environment by uplift and erosion." Nippon Genshiryoku Gakkai Wabun Ronbunshi (Online) 16.1 (2017): 15-33.
- Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from alaska, the western united states, and japan, Bull. Seismol. Soc. Am., 90, 859-869.
- Williams, S.D.P. (2003). The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series, J. Geodesy, 76, 483-494.
- Williams, S.D.P. (2008). CATS : GPS coordinate time series analysis software, GPS Solutions, 12, 147-153.
- Wu, C.Y., Chu, H.T., Lo, C.H., Yui, T.F., Hwang, S.L., and Shen, P.Y. (2014), The style of exhumation under active transpressive tectonic regime: Revealed by laser-fusion 40Ar/39Ar ages of

pseudotachylyte from eastern Taiwan, Geodynamics and Environment in East Asia, pp. S7-P-18.

- Wu, D., Yan, H. & Shen, Y. (2017). TSAnalyzer, a GNSS time series analysis software. GPS Solut 21, 1389–1394. <u>https://doi.org/10.1007/s10291-017-0637-2</u>
- Zhang, H., & Thurber, C. H. (2003). Double-Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California, Bull. Seism. Soc. Am, 93, 1875-1889.
- Zhao JX, Jiang F, Shi P, Xing H, Huang H, Hou R, Zhang Y, Yu P, Lan X, Rhoades DA, Somerville PG, Irikura K, Fukushima Y(2016a) Ground-motion prediction equations for subductionslab earthquakes in Japan using site class and simple geomet-ric attenuation functions. Bull Seism Soc Am 106, pp. 1535-1551.
- Zhao JX, Liang X, Jiang F, Xing H, Zhu M, Hou R, Zhang Y, LanX, Rhoades DA, Irikura K, Fukushima Y, Somerville PG(2016b) Ground-motion prediction equations for subductioninterface earthquakes in Japan using site class and simplegeometric attenuation functions. Bull Seism Soc Am. 106, pp. 1518-1534.