

用過核子燃料最終處置計畫
候選場址評選與核定階段
114 年度工作計畫
(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國 114 年 1 月

114 年度工作計畫目錄

頁次

114 年度工作計畫目錄.....	i
圖目錄.....	iii
1. 前言.....	1-1
2. 計畫目標.....	2-1
3. 場址合適性調查與調查技術.....	3-1
3.1 長期監測與樣本分析技術.....	3-1
3.1.1 微震監測及資料解析.....	3-1
3.1.2 地表變形監測及時序分析.....	3-2
3.2 地質描述模型與資料視覺化技術.....	3-4
3.2.1 區域地質描述模型.....	3-4
3.2.2 水文地質描述模型.....	3-5
3.2.3 地球化學描述模型.....	3-6
3.2.4 岩石力學描述模型.....	3-8
3.2.5 地表系統描述模型.....	3-9
3.2.6 傳輸特性描述模型.....	3-10
4. 工程設計.....	4-1
4.1 用過核子燃料地質處置設施概念規劃.....	4-1
4.1.1 參考案例岩體特性評估.....	4-1
4.1.2 概念設計的更新.....	4-2
4.1.3 概念設計之封塞與換氣可行性分析.....	4-3
4.2 處置設施概念設計研析.....	4-5
4.2.1 地表設施需求.....	4-5
4.2.2 用過核子燃料封裝廠流程概念.....	4-5
5. 安全評估.....	5-1
5.1 安全功能與量化分析.....	5-1
5.1.1 用過核子燃料長期演化.....	5-1
5.1.2 廢棄物罐長期演化.....	5-2
5.1.3 緩衝及回填材料長期演化.....	5-3
5.1.4 替代或補充安全指標研析與應用.....	5-4
5.1.5 無意人為入侵分析技術.....	5-5
5.1.6 生物圈評估模型建立與評估.....	5-6
6. 整合性技術.....	6-1

6.1	資料庫建置.....	6-1
6.1.1	資料庫精進.....	6-1
6.2	THMC 耦合分析技術.....	6-2
6.2.1	DECOVALEX.....	6-2
6.2.2	SKB GWFTS Task Force.....	6-3
7.	參考文獻.....	7-1

圖目錄

頁次

圖 1-1：用過核子燃料最終處置計畫全程規劃	1-3
------------------------------	-----

1. 前言

我國自 67 年開始利用核能發電，迄今共有核一、二、三廠 3 座核能電廠的 6 部核能機組，其中，核一、二廠 4 部機組為沸水式反應器(Boiling Water Reactors, BWR)，核三廠 2 部機組為壓水式反應器(Pressurized Water Reactors, PWR)。預估此 3 座核能電廠的 6 部機組運轉 40 年，所產生的用過核子燃料組件(assemblies)預估數量合計約為 BWR 17,890 束組件，PWR 4,320 束組件，約相當於 4,913 公噸鈾的用過核子燃料。

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

經過國際間多年的研究後，一般咸認「深層地質處置」是高放射性廢棄物較為可行的最終處置方式。所謂「深層地質處置」是利用深部岩層的隔離阻絕特性，採用「多重障壁」的概念，將用過核子燃料埋在深約 300 m 至 1,000 m 的地下岩層中，再配合廢棄物罐、緩衝回填材料等工程設施。藉由人工與天然障壁所形成的多重障壁系統，有效阻絕或遲滯核種的釋出與遷移，以換取足夠的時間使用過核子燃料的輻射強度在影響生物圈之前已衰減至可忽略的程度。

我國用過核子燃料處置之推動，係依台電公司 95 年提報前行政院原子能委員會¹核定之「用過核子燃料最終處置計畫書」擬定時程及規劃，執行境內最終處置之技術發展及處置設施的籌建工作，處置計畫書每 4 年檢討修訂，以確保處置計畫符合國際現況發展。處置計畫

¹ 行政院原子能委員會已於 2023 年 9 月 27 日改制為核能安全委員會。

全程工作共分為「潛在處置母岩特性調查與評估(94年~106年)」階段、「候選場址評選與核定(107年~117年)」階段、「場址詳細調查與試驗(118年~127年)」階段、「處置場設計與安全分析評估」階段(128年~133年)及「處置場建造(134年~144年)」階段等5個階段(如圖 1-1)。「潛在處置母岩特性調查與評估階段」已於106年結束，台電公司分別於98年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD 2009報告，台電公司，2009)」及106年底提報「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SNFD 2017報告，台電公司，2017)」，達成第1階段重要里程碑，報告結論包括：「(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。」確認國內具有合適之處置母岩、最終處置設施工程設計及長期安全評估能力與技術。

依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」，自2018年開始已進入「候選場址評選與核定(107年~117年)」階段，本階段工作在運用「潛在處置母岩特性調查與評估」階段所建立之技術及獲致的成果，包括初步取得的岩體可能範圍、大小尺寸、構造的可能位置及基本地質特性等資料，從具有合適的潛在處置母岩並可能列為未來處置設施設置的數個地區中，進行潛在場址的特性與安全評估等相關研究，提供區域性環境與潛在場址地質條件的基礎資料，各項結果亦反覆回饋於本階段之功能安全評估技術建立，同時亦從潛在場址處置設施功能與安全觀點，提供作為提出建議候選場址之參考。

用過核子燃料最終處置計畫全程規劃



圖 1-1：用過核子燃料最終處置計畫全程規劃

2.計畫目標

依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」，本階段(107年至117年)整體計畫發展策略規劃分為2期進行，分別為前4年「調查準備期(107年~110年)」與後7年「區域調查期(111年~117年)」；另，依前行政院原子能委員會(現已改制為核能安全委員會)於109年3月24日以物三字第1090000825號核定之「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」，規劃工作依照「場址合適性」、「工程設計」與「安全評估」等架構進行技術工作規劃與發展路徑圖，以達成本階段主要目標：「完成候選場址的調查與評估並建議優先詳細調查之場址」及「建立候選場址安全評估之技術」。

就「場址合適性」工作規劃，「調查準備期」承續第一階段發展之潛在處置母岩特性調查技術，持續精進通用型之區域特性調查技術，並視國內高放選址法規立法進度，於「區域調查期」開始進行候選場址區域調查及技術發展。本階段工作將依：「現地調查試驗程序與整備」、「地質單元及地球物理調查」、「水文地質及地球化學調查」、「地質構造及大地應力調查」、「長期監測與樣本分析技術」與「地質描述模型與資料視覺化建構技術」等6大技術面向分項進行，以期於115年完成「候選場址之特性調查與評估」相關工作。

「工程設計」工作規劃方面，因目前尚無明確場址，故工程設計相關工作，將著重於持續發展通用的工程設計相關技術與處置系統本土適用性驗證，技術發展主題包含概念設計與接續的設計分析工作，以及精進長期性能評估技術。本階段工作包括：「處置系統適用性分析與設計調整」及「工程障壁特性與性能評估」2部分進行，以期於114年完成「處置場概念設計」。

「安全評估」工作規劃方面，因目前尚無明確場址，故安全評估相關工作，將著重於發展用過核子燃料最終處置設施特定需求的封閉後長期安全評估技術，涵蓋工程障壁及地質環境在不同情節下處置設施核種外釋的特徵、事件及作用(FEPs, Feature, Events, and Process)。本階段工作包括：「建立通用性封閉前安全評估技術」及「建立通用

性且符合安全論證的封閉後安全評估技術」，並配合調查期所取得之調查成果，以期於 116 年完成「候選場址功能/安全評估技術」。

除前述 3 項核心技術，本階段工作亦包括：(1)持續推動國際技術合作，確保處置技術發展符合國際水平，目前台電公司已與多國簽訂合作備忘錄，就技術發展與經驗回饋方面持續交流，並加入國際熱—水—力—化耦合研究計畫 DECOVALEX，持續與國際專家團隊進行技術精進與交流；(2)持續進行高放處置相關資料庫之更新與維護，參考國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)所發布之放射性廢棄物處置安全要求 SSR-5(IAEA, 2011)及放射性廢棄物最終處置安全論證導則 SSG-23(IAEA, 2012)對品質之要求，強化計畫相關文件及資訊之品保作業，以確保計畫成果的可檢視性及可回溯性；(3)依據核安主管機關管制要求，已於 2021 年完成「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告(簡稱 SNFD2021 報告)」並將於 2025 年完成「我國用過核子燃料最終處置安全論證報告(簡稱 SNFD2025 報告)」。

3.場址合適性調查與調查技術

3.1 長期監測與樣本分析技術

3.1.1 微震監測及資料解析

3.1.1.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.1.5節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第5.5.2節規劃執行。

地質環境背景資料長期監測技術的發展，為處置設施地表系統描述模型建構的基礎。藉由長期監測數據，對於區域性的地震與斷層活動、抬升、沉陷及侵蝕等作用之調查，配合現有地形資訊與地質圖等進行綜合解析，考量監測技術的時間因素與長期監測數據之間的空間分布關係，將可實現對地表地形未來演化模型建立的概念化及數值化。

自99年度起本項工作已陸續於本島花崗岩案例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。本階段為提供更完整的岩體受震之影響性評估，除須持續進行微震監測網的長期監測，納入中央氣象署²及其它單位的地震網資料，同步進行系統化統計特性分析外，另建置提高資料處理效率的自動化流程，精進資料處理流程，據以提升地震資料解算效率。

3.1.1.2 工作內容

本工作為長期監測工作，將透過分析地震觀測網長期監測資料，了解研究區地震活動度並探討岩體受地殼應力時，造成岩體裂隙(斷層)發育所產生之地震序列發展，進一步評估區域地體構造之時間及空間地震活動性，解析區域潛在裂隙或線型構造之發育模式，再透過震源破裂機制與位態訊息，了解應力環境與條件，據以評估目標區域岩體的穩定性。而為應對長期、場址級高密度微震網連續觀測資料所產生之大量數據資料，除持續針對本島結晶岩區25地震站進行地震

² 中央氣象局已於2023年9月15日改制為交通部中央氣象署。

監測外，本年度於資料處理端將採用深度學習演算法訓練的地震波相挑選模型(Liao et al., 2022)，建立自動化挑選地震 P 波和 S 波之處理流程，該作法係採用以 U-Net 為基礎並結合多任務學習(Multi-Task Learning, MTL)的機器學習架構(Ruder, 2017; Liu et al., 2019; Crawshaw, 2020)，以提高地震事件偵測和地震波相辨識的精確度，另導入不同深度學習技術，如循環殘差(recurrent-residual) U-Net 和注意力網路(attention networks)等，以達到同時學習地震訊號偵測和地震波相挑選任務的目標，使模型能夠有效地捕捉和學習地震波形數據中的時空特徵，整體而言，將有助於降低人為誤差、減少人工辨識所帶來的標準問題，並優化大量數據之處理效率。

3.1.1.3 預期成果

- (1) 持續維護地震站運作及累積觀測資料，並完成地震資料前處理與解算，獲得區域地震叢集分布。
- (2) 完成區域地震活動機率密度分析、震源機制解分析、地震 b 值解釋分析。
- (3) 完成區域三維速度成像及潛在構造空間分布評估。

3.1.2 地表變形監測及時序分析

3.1.2.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 年修訂版)」第 7.1.1.5 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 5.5.2 節規劃執行。

本項工作自 101 年度起持續記錄地表變形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，逐步精進調查與解析技術，作為建立臺灣本島花崗岩體地表抬升與沉降趨勢評估之參考依據。本階段除連續觀測站監測外，將以雷達干涉量測技術(Radar Interferometry, InSAR)提供地殼變形補充資訊，分析目標區域周圍構造活動產生的變形現象，並精進分析地表變動速度場與變形活動行為的技術能力。

3.1.2.2 工作內容

本項目為長期監測工作，將持續蒐集 GNSS (Global Navigation Satellite System)連續觀測站觀測數據及雷達干涉影像，針對臺灣本島花崗岩體之地表變形趨勢，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，據以探討案例區花崗岩體地表變形趨勢。

InSAR 地表站係將衛星微波信號透過由數個互相垂直的平面所組成之角反射器返回至衛星的入射方向，形成強烈的回波，可在 SAR 影像中形成高強度反射訊號，有利於 InSAR 解算形成高相干性，成為穩定的觀測點位。而透過人工角反射器(Corner reflector)的設置(又可稱為 InSAR 地表站)，可獲得更強且穩定之回波訊號，有效提高訊噪比，並降低噪訊的影響，亦可克服 InSAR 解算技術既有限制(如植被覆蓋區、受地形或建築物遮蔽區域)，擴大 InSAR 可應用區域。若將建站位置置於 GNSS 連續觀測站周圍，更可以此作為地面控制點對 InSAR 解算成果進行校正，並配合地面觀測資料進行精度評估及比對。InSAR 地表站須選於透空性良好無受遮蔽之區域，本身反射強度低且周圍無大型反射物處尤佳，且可代表目標區域形變特徵的位置，在範圍區域內均勻分布以提高空間代表性，並安裝在堅固的基礎上確保其位置穩定，降低風雨等自然因素的影響，且需考量人員及公共安全，並方便進行定期檢查和維護。

鑒於上列因素，除考量現地條件外，本年度佈設角反射器之地點擬挑選在研究區域內之地面控制點(如 GNSS 固定站)周圍，作為大範圍 InSAR 觀測之校正及比對之用，同時評估 InSAR 成果精度，提高整體設置效益。

3.1.2.3 預期成果

- (1) 持續累積觀測區內既有 GNSS 連續觀測站之觀測資料，並蒐集觀測區內其他單位所設置之連續觀測站資料。
- (2) 完成觀測資料處理，獲得觀測區之水平速度場及垂直速度場，評估速度場變動趨勢。

- (3) 規劃及建置 InSAR 地表站。進行初步數據研析並與 GNSS 站數據同步檢校。

3.2 地質描述模型與資料視覺化技術

3.2.1 區域地質描述模型

3.2.1.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 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 5.6.1 節規劃執行。

為建置區域地質描述模型內之 Geo-DFN，本工作將利用二維視窗法，以人工量測方式針對露頭進行裂隙分布調查。此外，本工作亦將綜整各項文獻蒐集與調查成果，據以建置去特徵化之區域地質描述模型，透過該模型呈現地質單元與地質構造之空間分布特性。

3.2.1.2 工作內容

在二維視窗法方面，本工作將針對露頭進行裂隙人工測繪量測，測繪時將針對露頭之裂隙，量測其位態、間距、長度、粗糙度、內寬、軟弱夾心、滲水情形等特性，並記錄該露頭之岩石特性如岩性、強度、風化情形等。

在去特徵化之區域地質描述模型建置方面，本工作將綜整各項地表地質與地下地質之相關文獻或調查成果，作為劃設地質單元與地質構造之基礎。根據上述綜整成果，本工作將進行地質單元分類，而後提出各地質單元、地質構造或不連續面之幾何分布參數建議，並將其建置為三維數值模型，以利視覺化呈現其空間分布特性。

3.2.1.3 預期成果

- (1) 二維視窗法裂隙測繪成果。
- (2) 去特徵化之區域地質描述模型。

3.2.2 水文地質描述模型

3.2.2.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022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5.6.2節規劃執行。

因土壤層多半由風化的母岩形成，其水力特性與完整岩石或裂隙不同。本工作擬執行地表入滲試驗，透過量測表土層之入滲特性與速率來獲得未飽和土壤層的入滲特性，並會選擇不同地點之表土層進行試驗，亦會選擇於乾、溼季進行。本工作將蒐集相關地表入滲設備，瞭解其優劣與適用性後，針對不同土壤材料特性之地點，選用適宜之量測設備進行試驗，以可獲取具代表性之土壤層飽和水力傳導係數。

深層地質處置任務中水是唯一媒介，可把核種運輸至人類生活圈，因此如何描繪水文地質特性並建置水文地質描述模型為後續模式技術發展至關重要的議題。一般而言，參考案例須考量的水文地質單元包含水力土壤層、水力岩體域與水力導水域，因此本工作除獲取地表入滲與土壤試驗數據外，將綜整所有可蒐集之數據資料建置數據特徵化技術，產製參考案例水文地質描述模型並提供後續工程設計與安全評估技術分析應用。

3.2.2.2 工作內容

本項工作將於選定之地點進行地表入滲試驗，地表入滲試驗之調查成果預計可以獲得土壤類型、土壤類型形狀因子、入滲設備之水位下降速率、土壤飽和水力傳導係數等資訊。此外，將綜合評估過去文獻研究及前期土壤採樣分析成果，於不同地點執行地表入滲試驗，以取得不同地點、岩性與不同季節(乾濕季)之現地土壤特性，並分析各採樣點試驗結果之差異性；同時，配合重新執行土壤採樣與比對歷年鄰近採樣點位之現地條件，以獲得土壤類型及形狀因子等特性參數。

除將整合上述表土層調查資料與過去已蒐集之文獻調查數據外，同時將分析既有裂隙調查資訊，建置臺灣本島結晶岩參考案例之水文地質描述模型參數表，依照結晶岩特性建置序率式模型與定率式模型

並率定其參數，本工作預計彙整參考案例大理岩與片麻岩之水文地質離散裂隙網路參數集，並透過大量生成離散裂隙網路模型，生成多組水文地質離散裂隙網路實現值，分析各組之連通裂隙強度與裂隙強度分布，從中挑選其第一四分位數、平均值、第三四分位數、最大值對應之 4 組代表性之場址尺度裂隙網路實現值，並探討其不確定性；而在定率式方法上，則將採取多孔隙介質模式建置定率式水文地質模型，首先蒐集氣體滲透試驗、封塞試驗成果或跨孔水力試驗等數據成果，進行岩體特性之分類與分層，描述不同岩性與岩層之幾何分布，再透過既有觀測井之水位觀測資料，率定不同水文地質單元之水力特性參數，從而獲取具代表性之水文地質描述模型。相關分析結果都將提供工程設計與安全評估使用，以利後續長期穩定性分析之進行。

3.2.2.3 預期成果

- (1) 完成蒐集 10 組現地地表入滲試驗試驗數據。
- (2) 完成序率式方法之水文地質離散裂隙網路參數集，並透過統計方式選取 4 組裂隙網路實現值進行比較，探討其不確定性。
- (3) 建置定率式方法之連續體多孔介質模式並獲取其水文地質參數。

3.2.3 地球化學描述模型

3.2.3.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 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 5.6.3 節規劃執行。

母岩之岩石礦物組成為影響地下水成分的主要因素，除母岩外，裂隙為地下水主要流動路徑，故裂隙填充物亦影響地下水成分與核種的的傳輸及吸附特性。岩石與裂隙填充物組成特性可提供地下水成分演化模擬之重要參數，結合區域地下水化學性質，可提供岩-水反應之過程與機制的解釋。

3.2.3.2 工作內容

本工作首先參考國際核能處置先進國家岩石礦物化學組成分析項目，分為：(1)岩象學分析、(2)主要礦物半定量分析、(3)元素成分分析，各項目分析方法如下：

- (1) 岩象學分析：利用偏光顯微鏡進行不同樣本之薄片分析，包含母岩特性及裂隙礦物。
- (2) 主要礦物半定量分析：以 X 光繞射(X-ray diffraction, XRD)等技術，進行樣本主要礦物定性與半定量分析。
- (3) 元素成分分析：以掃描電子顯微鏡(Scanning electron microscope, SEM) - X 射線能量散布分析儀(Energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)、X 光螢光分析法(X-ray fluorescence, XRF)或感應耦合電漿質譜分析儀(Inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS)等技術進行樣本元素含量分析。

本工作考量高放射性廢棄物處置計畫之進程，將整合上述資料與過去已蒐集之文獻調查數據，建置臺灣本島結晶岩參考案例之地球化學描述模型參數表，將包含不同深度地下水組成與礦物組成等，地下水組成涵蓋主要元素、微量元素與溶解氣體濃度等；礦物組成則涵蓋研究區域內大理岩與片麻岩的礦物組成百分比，這些資訊可提供後續安全評估分析與長期地下水演化參考使用。

3.2.3.3 預期成果

- (1) 完成蒐集 5 組臺灣本島結晶岩之岩象分析。
- (2) 完成蒐集 5 組臺灣本島結晶岩之岩石或裂隙礦物組成數據。
- (3) 提出地球化學描述模型之參數表，包含地下水組成與礦物組成。

3.2.4 岩石力學描述模型

3.2.4.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022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。

為滿足岩石力學描述模型建置之需求，本工作將依國際規範或建議方法，進行9項完整岩石之力學試驗、2項岩體不連續面之力學試驗，以及3項岩石熱特性試驗，而後彙整分析各項試驗數據，作為模型建置之基礎。試驗樣本係以過去執行計畫所取得之岩心為主。

3.2.4.2 工作內容

在完整岩石之力學試驗方面，將執行岩石一般物理性質試驗、消散耐久性試驗、單軸壓縮試驗、岩石潛變試驗、三軸壓縮試驗、巴西試驗、岩石直接剪力試驗、靜態彈性參數試驗、動彈性模數試驗等9項試驗。

在岩體不連續面之力學試驗方面，將包含裂隙正向勁度試驗，以及節理面抗壓強度試驗(Joint Compressive Strength)等2項試驗。

而岩石熱特性試驗方面，則涵蓋岩石熱傳導係數試驗、岩石熱擴散係數試驗，以及岩石比熱試驗等3項試驗。

3.2.4.3 預期成果

- (1) 岩石一般物理性質試驗、消散耐久性試驗、單軸壓縮試驗、岩石潛變試驗、三軸壓縮試驗、巴西試驗、岩石直接剪力試驗、靜態彈性參數試驗、動彈性模數試驗等，各80組試驗數據及統計分析結果。
- (2) 裂隙正向勁度試驗、節理面抗壓強度試驗等，各80組試驗數據及統計分析結果。
- (3) 岩石熱傳導係數試驗、岩石熱擴散係數試驗、岩石比熱試驗等，各80組試驗數據及統計分析結果。

3.2.5 地表系統描述模型

3.2.5.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022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5.6.5節規劃執行。為建立本土地表系統空間分布特性，本工作將進行土壤樣本採集，並進行各項土壤力學試驗參數分析，據以取得建置地表系統所需之數據，分析項目包括含水量、單位重、孔隙率、粒徑分布、比重、液性限度、塑性限度與土壤持水特性曲線(soil water characteristic curve)等參數，據以提供後續進行各項三維數值分析使用。

3.2.5.2 工作內容

因本工作所需參數繁多，為求得所需參數，需進行之主要試驗有4項：第1項土壤統一分類試驗是將土壤統一分類程序標準化及書面化的過程，可獲得土壤分類、粒徑分布與比重；第2項阿太堡限度及指數試驗即為土壤液性限度、塑性限度及塑性指數試驗；第3項壓力鍋試驗可求出土壤持水特性曲線，可獲取特定基質吸力下所對應之體積含水量；第4項土壤含水量試驗則可求得土壤在烘乾的條件下所求得之含水量，結合1、3、4的試驗結果，即可生成土壤統一分類試驗報告。本工作之室內試驗均參照美國材料試驗協會(ASTM)或國際間執行高放處置相關機構之試驗規範。

為增加對於地表系統的瞭解，須建立本土空間的分布特性，本工作將進行土壤樣本採集以獲得相關之資訊，預計於研究區域內採集風化層之樣本，並將依據所取得的土壤樣本進行各項土壤力學試驗參數之分析，評估其試驗分析所獲得之參數。

本年度擬採取10個樣本，採樣樣本主要落在研究區域內交通可達處，同時考量於不同集水區內進行廣域採樣，以期獲得具區域代表性之土壤特性。

3.2.5.3 預期成果

- (1) 完成10個位於研究區域之土壤樣本採集。

(2) 完成 10 處土壤樣本之各項土壤力學試驗參數分析。

3.2.6 傳輸特性描述模型

3.2.6.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 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 5.6.6 節規劃執行。

用過核子燃料最終處置的水文地質空間通常可分為裂隙域 (Hydraulic Conductor Domain, HCD)、岩石域 (Hydraulic Rock mass Domain, HRD) 與土壤域 (Hydraulic Soil Domain, HSD)，溶質傳輸最重要的傳輸機制為平流及延散，主要影響核種在 HSD 的傳輸特性參數為延散係數，延散主要的描述來自於孔隙介質的異質性，Massabò et al. (2007) 提出一個室內測量土壤延散係數的方法，在實驗室建置圓形土柱設備，並取兩觀測點進行濃度觀測，本項工作將採集土樣並建置土壤延散係數量測設備。

3.2.6.2 工作內容

依照採取土樣的薄管大小，設計可容納相同尺寸的實驗設備，土箱設備使用圓形設計，頂端設計一內環做為注入示蹤劑之管路，柱體側邊設計可放入偵測儀器的孔洞，底部設置透水版使水流可以均勻流出，實驗流程為製造穩態流場後注入示蹤劑，並測量穿透曲線，並利用穿透曲線推估延散係數。

考量高放射性廢棄物處置計畫之進程，整合上述資料與過去已蒐集之文獻調查數據，建置臺灣本島結晶岩參考案例之傳輸特性描述模型參數表，提供研究區域之岩石與土壤有效擴散係數、延散度、不同核種吸附係數與最大擴散深度等重要參數，參數設定結果將可提供後續安全評估分析與長期地下水演化參考使用。

3.2.6.3 預期成果

(1) 採集土樣與建立室內示蹤劑試驗土箱設備。

- (2) 量測 10 組示蹤劑穿透曲線並推估土壤延散係數。
- (3) 提出參考案例傳輸特性模型之參數表。

4. 工程設計

4.1 用過核子燃料地質處置設施概念規劃

4.1.1 參考案例岩體特性評估

4.1.1.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022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。

地下處置設施周圍母岩的岩石力學與熱力學特性是地下設施規劃與安全性評估的重要參數。為符合SNFD2025報告進度排程，本項工作已根據描述模型之研究區域調查數據，獲取參考案例母岩的岩石力學與熱力學特性參數，執行地下處置設施的概念設計並取得初步成果。考量伴隨描述模型之迭代與更新，本項工作將依據前一章節更新之數據資料與參數表，彙整可用於概念規劃設計之參考案例岩體特性參數，更新概念設計規劃的內容，以期滿足處置設施長期穩定性以及安全性評估的要求。

4.1.1.2 工作內容

- (1) 利用參考案例研究區域更新版本的場址描述模型(site descriptive model，以下簡稱SDM)相關新調查資料(岩石力學試驗資料、岩石熱力性質試驗資料等)進行以下研析，並對已進行之岩石力學及熱力性質規劃進行調整及更新。
- (2) 依據新的岩石力學試驗資料與文獻資料，進行資料分析與記錄。
- (3) 依據文獻資料之鑽孔岩心觀察、鑽孔攝影等結果，整理出裂隙特性、密度等資料，用於參考案例之母岩性質的評估。依據上述調查及分析結果，確認目前設定的岩體的物理特性與岩石力學參數是否需要更新，以提供後續坑道穩定性評估使用。

- (4) 依據研究區域新的文獻資料更新岩石熱特性試驗數據以及現地溫度井測調查結果，整理岩石室內試驗結果，以建立分析廢棄物罐熱效應的熱力學特性參數。
- (5) 依據上述結果，確認目前於廢棄物罐熱效應評估所使用的岩體物理特性、熱力學特性以及地溫梯度分布是否需要更新。

4.1.1.3 預期成果

完成更新數據與文獻資料之綜整分析，針對概念設計所需之參考案例岩石力學與熱特性參數進行率定，獲取具代表性之參數設定值。

4.1.2 概念設計的更新

4.1.2.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.2.2節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第6.2.3節規劃執行。

SDM更新後，須重新確認之前引用之SDM版本所進行的概念設計分析結果，如深度設定、處置隧道與處置孔的間距是否滿足隧道穩定性。若原來的設定值無法滿足地下處置設施的穩定性，或是有影響安全評估的疑慮時，則需要重新設定規劃地下處置設施的配置。

4.1.2.2 工作內容

依據在4.2.1節中確認(或更新)的岩石物理特性、岩石力學和熱力學特性，評估下列項目中目前已經研析的結果，進行隧道穩定性的確認與重新評估，並且視需要進行下列概念設計位置之調整與更新：

- (1) 地下處置設施位置與深度規劃
- (2) 處置隧道與周邊隧道等的穩定性評估
- (3) 處置隧道與處置孔的間距分析
- (4) 地下處置設施整體配置規劃
- (5) 運轉階段中隧道的耐震穩定性評估
- (6) 封閉後處置隧道的地震穩定性評估

4.1.2.3 預期成果

- (1) 依據 SDM 更新內容，評估周圍母岩的岩石力學與熱力學特性，並更新於參考案例地下處置設施深度分析結果。
- (2) 依據 SDM 更新內容重新評估參考案例地下處置設施的處置隧道與周邊隧道等的隧道穩定性評估。
- (3) 依據 SDM 更新內容重新分析並設定參考案例地下處置設施中處置隧道與處置孔的間距。
- (4) 依據 SDM 更新內容，進行參考案例地下處置設施整體規劃配置的更新。
- (5) 依據 SDM 更新內容，針對更新後的地下處置設施整體規劃配置進行運轉中隧道的耐震穩定性評估。
- (6) 依據 SDM 更新內容，針對更新後的地下處置設施整體規劃配置進行封閉後隧道的耐震穩定性評估。

4.1.3 概念設計之封塞與換氣可行性分析

4.1.3.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 年修訂版)」第 7.1.2.2 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 6.2.3 節規劃執行。

概念設計可行性相關分析的目的是針對先前研究的概念設計中關於力學封塞與水力封塞、通風換氣等議題，進行研究與探討，以增進概念設計整體規劃的可行性。

4.1.3.2 工作內容

本項工作預計進行下列項目。有關廢棄物處置隧道及周邊隧道的截面形狀與規模，預計使用 113 年度之前的研究結果。

- (1) 力學封塞與水力封塞的評估
 - a. 封塞案例之蒐集與彙整

針對處置隧道回填後設置的封塞進行相關文獻研究，研析高放處置先進國家之技術報告中，處置研究案例以及地下研究設施的封塞試驗案例。依據這些文獻的研析結果，確定封塞須具備的機能與基本要求。

b. 封塞概念規劃與評估

根據文獻調查的結果，規劃封塞的設置位置、要求條件與基本規格。在設定封塞的規格時，會進行封塞結構的基本評估，再依據設定的規格與結構，製作水力封塞以及力學封塞的基本結構圖 (CAD)。

(2) 換氣系統

本項工作預計針對放射性廢棄物地層處置等地下設施，整理地下隧道通風系統的類型與設計概念。另一方面，依據調查成果，針對目前的地下處置設施整體配置規劃的結果，整理通風系統的基本概念和須考量因素。選擇在施工、運轉及封閉等階段中，通風條件情況最嚴格的案例，設定通風扇的容量，並說明可滿足設計容量的設備。此外，使用通風網路分析方法 (ventilation network analysis method) 探討上述通風系統的可行性。通風網路分析將地下設施中的隧道群視為一組空氣流經的風道，像網狀一樣相互連接的風道稱為通風網路。通風網路分析是一種透過計算通風網路中各風道的風量，預測地下溫度、通風環境以及評估必要的通風設備的方法。

本項工作於 112 年度已計算所需換氣量與風速等相關評估作業，該年度之換氣量與風速相關評估內容主要係針對地下設施設置深度進行的可行性評估，以地下深處的地溫條件估算其通風量，確認隧道內的風速在法規基準值以下。而 114 年度的地下設施通風規劃評估，將以 113 年度已完成的整體配置之地下設施進行通氣網路解析。假設在建設與施工階段的狀態，進一步設計規劃進氣與排氣的路徑，研析通風換氣之可行性。

4.1.3.3 預期成果

- (1) 完成地下設施之力學封塞與水力封塞的概念設計規劃。
- (2) 完成地下設施之通風網路換氣分析。

4.2 處置設施概念設計研析

4.2.1 地表設施需求

4.2.1.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第6.3.2.2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。

地表設施為整體處置設施重要的一部分，透過研析國際間於地下實驗室開挖與試驗時期、處置設施開挖期、處置設施營運期、封閉前監管期等所需之地表設施，確保地表設施能輔助地下設施在不同階段之運作。

4.2.1.2 工作內容

- (1) 蒐集至少3個國家在地下實驗室開挖與試驗時期、處置設施開挖期、處置設施營運期、封閉前監管期等所需之地表設施。
- (2) 整合參考案例之「地下處置設施概念設計」及「參考案例描述模型」相關資料，提出建議之地表設施及配置。

4.2.1.3 預期成果

完成最終處置不同時期之地表設施需求國際相關資訊研析與彙整，以及透過整合參考案例相關資料，提出建議之地表設施及其配置。

4.2.2 用過核子燃料封裝廠流程概念

4.2.2.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第6.3.2.2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。

用過核子燃料封裝廠為處置設施營運期中最重要的地表設施，從電廠接收裝有用過核子燃料的傳送護箱，並將用過核子燃料取出放入廢棄物罐中，再透過焊接的方式將已裝載用過核子燃料的廢棄物罐封焊，並進行焊接檢驗，而通過焊接檢驗的廢棄物罐將進入緩衝區等待，最終處置車輛將將已裝載的廢棄物罐送達指定之處置孔。

4.2.2.2 工作內容

蒐集芬蘭 POSIVA、瑞典 SKB、加拿大 NWMO 等國際用過核子燃料處置封裝流程(濕式及乾式)資訊及文獻，包含：傳送護箱運輸之流程、廢棄物罐製造及裝載前運送之流程、用過核子燃料裝載之流程、廢棄物罐封焊作業之流程、廢棄物罐封焊檢驗程序、概述及驗收標準、廢棄物罐裝載後運送至地下處置設施之流程及用過核子燃料吊掛及運輸所需機具與設備。

4.2.2.3 預期成果

完成國際用過核子燃料封裝廠資訊與文獻蒐集與彙整，包含各元件之運輸、作業、裝載之流程概念之論述。

5. 安全評估

5.1 安全功能與量化分析

5.1.1 用過核子燃料長期演化

5.1.1.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.3.4節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第7.4.5節規劃執行。

用過核子燃料在處置場封閉後，將保持在容器內並與外界隔離。即使如此，用過核子燃料在百萬年期間還是會因長期演化的各種過程而產生變化，例如放射性物質的衰變及擴散、放射性對周遭材料造成的輻射損傷、鋳合金的長期演化、氦氣累積等，也需考量百萬年間用過核子燃料的完整性以及是否會受到生物作用。另外，廢棄物罐以及用過核子燃料在長期演化下的各種過程而產生的變化，將可能對核臨界安全造成影響，必須蒐集國際文獻加以探討。

5.1.1.2 工作內容

- (1) 蒐集國際用過核子燃料長期演化相關報告，論述在參考案例條件下用過核子燃料放射性、 UO_2 的變化(輻射損傷、放射性核種擴散、燃料氧化態)、鋳合金護套、氦氣累積、力學完整性、生物作用等在百萬年尺度內的演化情形，並提供相關論述的依據。
- (2) 以整合高放處置計畫歷年輻射源項研究成果之用過核子燃料特徵化成果為基礎，評估未來百萬年尺度內用過核子燃料輻射源項的演化情形，並提供相關論述的依據。
- (3) 研析瑞典、芬蘭等先進國家之安全論證報告，並彙整與高放處置計畫歷年用過核子燃料臨界分析研究成果，評估未來百萬年尺度內用過核子燃料的臨界分析演化情形，並提供相關論述的依據。

5.1.1.3 預期成果

完成用過核子燃料長期演化的國際資訊蒐集、研析與評估，提供高放最終處置計畫有關用過核子燃料特性在百萬年尺度內演化之論述，以及長期演化下用過核子燃料的核臨界演化情形之論述。

5.1.2 廢棄物罐長期演化

5.1.2.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.3.4節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第7.4.5節規劃執行。

廢棄物罐由內襯鑄鐵與銅殼組成，銅殼可以防止內部核種與地下水接觸，使內部核種長期隔離在廢棄物罐內部，避免核種釋出至處置環境。由於廢棄物罐在處置環境中，會受到輻射照射、溫度、力學作用與化學作用的影響，可能會造成廢棄物罐在長期演化期間之功能失效，因此，本項工作針對廢棄物罐的長期演化進行分析，以利進行後續之安全評估。

5.1.2.2 工作內容

- (1) 依 FEPs 分類與清單，參考瑞典 SKB 與芬蘭 POSIVA 之廢棄物罐長期演化報告，以參考案例條件評估廢棄物罐在百萬年尺度內的演化情形。
- (2) 分析廢棄物罐的演化分析項目，包含輻射照射對廢棄物罐的影響、溫度、靜水壓和緩衝材料膨脹壓的影響(冰河期、抬升沉陷、地震應力、潛變)、廢棄物罐內化學作用的影響、廢棄物罐外化學作用的影響(均勻銅腐蝕、均勻銅腐蝕模擬、局部腐蝕、應力腐蝕龜裂及微生物腐蝕)等。
- (3) 於參考案例環境條件下，研析缺陷廢棄物罐在百萬年尺度內的演化情形，並提供相關論述的依據。
- (4) 缺陷廢棄物罐的演化分析項目包含缺陷廢棄物罐的腐蝕評估、腐蝕產物的應力影響、鋳合金護套的腐蝕和變形、用過核子

燃料基質溶解、燃料丸與護套的放射性核種外釋、外釋放射性核種的宿命(fate)等。

5.1.2.3 預期成果

完成評估參考案例環境特性下，廢棄物罐百萬年尺度內演化情形與論述。

5.1.3 緩衝及回填材料長期演化

5.1.3.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.3.4節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第7.4.5節規劃執行。

緩衝材料填充在處置孔內廢棄物罐的周圍，主要提供限制水流傳輸、限制微生物作用、過濾膠體、保護廢棄物罐抵抗剪力及額外的壓力作用、維持廢棄物罐中立、抵抗轉化、及長時間維持足夠的質量等，以達到放射性廢棄物質的圍阻與遲滯功能；回填材料填充在處置隧道空間中，主要提供隧道的填充與緩衝材料力學支撐，及限制水流傳輸，避免成為放射性或有害物質外釋的途徑。因此須掌握緩衝與回填材料在處置設施環境中的演化情形下是否仍能維持安全功能為重要的研究工作。本工作著重於處置設施近場環境長期演化過程中，考量導水裂隙穿過處置孔及處置隧道的情形下，地下水流及水質對膨潤土侵蝕之影響，以參考案例條件，評估緩衝材料受裂隙水流之侵蝕量分析，以確認在長期演化作用後緩衝與回填材料受侵蝕的程度，及推估是否維持預期之安全功能，另分析緩衝/回填材料與地下水交互作用後，膨潤土礦物及孔隙水之化學演化，以確認緩衝與回填材料於長期演化過程中材料性質之穩定性及性能。

5.1.3.2 工作內容

- (1) 緩衝材料受裂隙水流之侵蝕量分析：本項工作將延續 110 年至 112 年所建立之「緩衝材料與回填材料受侵蝕影響分析」

實驗與模式驗證研究成果為基礎，以參考案例之地下水質條件，透過雙區域模型分析緩衝材料在參考案例地下水質條件下之侵蝕量。

- (2) 膨潤土礦物及孔隙水之化學演化分析：本項工作將參考國際文獻為基礎，建立膨潤土礦物及孔隙水化學演化分析模型，並與文獻資料進行平行驗證，再以膨潤土初始礦物組成與參考案例之水質組成條件，分析膨潤土材料與參考案例地下水交互作用後之礦物組成變化與孔隙水變化。

5.1.3.3 預期成果

完成於參考案例地下水質條件下，緩衝材料受裂隙水流侵蝕量分析，以及膨潤土與參考案例地下水質條件交互作用後礦物及孔隙水分析。

5.1.4 替代或補充安全指標研析與應用

5.1.4.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.3.4節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第7.4.6節規劃執行。

本工作依據 IAEA SSG-23 安全導則 5.7.2 補充指標之建議執行。有鑒於處置系統複雜性與橫跨漫長的時間尺度，具有高度的不確性，參考國際經驗與導則建議，可藉由替代或補充安全指標強化安全評估之可信度及證明處置系統的堅固性。

5.1.4.2 工作內容

蒐集彙整 IAEA 與 NEA 替代或補充安全指標相關應用經驗與資訊，透過比對與探討處置概念設計與本土化場址環境特徵之差異與適用性，選用 2 組現階段國內安全論證案例適用之替代或補充安全指標，作為安全評估參考依據，以提升安全論證之可信度。

5.1.4.3 預期成果

完成 2 組現階段安全論證適用之替代或補充安全指標選定，並針對替代或補充安全指標，提供建議標準，供安全評估參考與應用。

5.1.5 無意人為入侵分析技術

5.1.5.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 年修訂版)」第 7.1.3.4 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 7.4.7 節規劃執行。

在最終處置設施中，用過核子燃料潛藏著難以完全避免的曝露危機；因此，在處置設施設計與安全評估中，必須考慮未來人類入侵處置設施的情節。處理未來人類活動時不確定高，為減少未來人類活動臆測，採用當代社會知識及技術條件制訂程式化情節為國際上普遍作法，並盡可能全面地理解可能影響處置設施的不同人類行為及其背景與目的，藉此建立系統性分析方法，考量技術發展與社會層面分析，選擇其代表性案例並執行安全評估。

5.1.5.2 工作內容

假設處置設施封閉後在的某個時間點發生人類入侵活動，透過 FEPs 分析認為「岩層中的鑽探」是唯一直接導致銅廢棄物罐被穿透，且造成處置系統圍阻失效之活動。因此，選擇「鑽探導致廢棄物罐穿透」作為代表性案例進行劑量評估。

5.1.5.3 預期成果

完成非設計基準情節項下的無意人為入侵情節分析案例，包括：鑽探工作人員劑量評估、使用汙染鑽孔井水劑量評估、使用汙染土壤農耕劑量評估。

5.1.6 生物圈評估模型建立與評估

5.1.6.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第7.1.3節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第7.4.7節規劃執行。

用過核子燃料最終處置系統安全評估以生物圈之人類所獲得之劑量為標的，故須建立地表環境長期變動下的劑量評估的方法。過去參考國際原子能總署(IAEA)提出的生物圈評估方法，並且完成離島結晶岩區地表環境長期演化的生物圈評估。後續將以參考案例特性與既有文獻，建立生物圈評估模型回饋至全系統安全評估。

5.1.6.2 工作內容

本項工作將以參考案例特性與既有文獻，建立參考案例之初始條件，並且根據氣候長期演化對地表環境的影響，探討參考案例在冰河週期循環與全球暖化等條件中，可能受到的影響與變化。根據地表環境的改變，建立模型評估地表環境介質可能受到的污染情況。其後，依照IAEA的建議，透過當地人類活動與特徵，考量數個潛在曝露群體(即候選的關鍵群體)，並透過與受污染之環境介質接觸的曝露途徑來評估其所獲得之生物圈輻射劑量轉換因子。不同演化條件下計算出不同潛在曝露群體的劑量轉換因子，將提供給全系統安全評估分析，以配合不同處置場演化情節進行量化分析。

5.1.6.3 預期成果

完成建立參考案例之生物圈評估模型，以及完成生物圈輻射劑量轉換因子計算。

6. 整合性技術

6.1 資料庫建置

6.1.1 資料庫精進

6.1.1.1 執行目的

本項工作基於「用過核子燃料最終處置計畫書(2022年修訂版)」第8.3節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第8.1節規劃執行。

參考IAEA安全標準(IAEA, 2006)中SSR-5與SSG-23對放射性廢棄物最終處置品質要求，以數位化方式蒐集執行中專案工作產生之報告、數據與相關品質文件並進行管理，確保資料可檢視性及可回溯性。

6.1.1.2 工作內容

建置部分進階整合系統，配合原有高放計畫資料管理系統資料及介面，擴充現有資料處理功能、強化資料可檢視性及可回溯性，擬建置之進階整合系統雛形包含如下：

(1) GIS 2D 系統

建立2D地理資訊系統雛形，將地質調查相關資料以網頁形式提供使用者瀏覽，使用者於2D地圖選擇區域及地點，即可查看該地點相關詮釋資料並進行資料下載。

(2) GIS 3D 系統

建立3D地理資訊系統雛形，將SDM三維地質描述模型以網頁形式提供使用者瀏覽，使用者可於網頁拖動模型、篩選顏色區塊、座標軸等。

(3) 用過核子燃料源項資料庫系統

建立用過核子燃料源項資料庫系統，以表格及圖表方式呈現源項資料，並提供篩選功能供使用者查詢。

6.1.1.3 預期成果

用過核子燃料最終處置精進版資料庫用以儲存現有及未來高放計畫各專案產出資料，包含報告、數據資料等，整合資料來源統一管理並介接進階整合系統，進階整合系統則各以不同形式應用及呈現資料，並進一步分析資料內容，以確保資料之可檢視性及可回溯性。

6.2 THMC 耦合分析技術

6.2.1 DECOVALEX

6.2.1.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 年修訂版)」第 6.5 節、第 7.1.3 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 8.2 節規劃執行。

DECOVALEX(Development of Coupled models and their VALidation against Experiments in nuclear waste isolation)，為世界各國放射性廢棄物處置相關的研究機構與專責單位共同參與的一個國際大型合作計畫，目前已進行第 9 期 (DECOVALEX-2027)，至今有超過 10 個國家及 15 個實驗室參與其中，進行許多耦合熱力-力學-水力-化學等實驗與模式驗證。DECOVALEX 擁有目前最前端的地下實驗室試驗成果，各參與國團隊成員參加子計畫項目，並進行模型的耦合驗證。透過參與國際工作會議，與不同團隊間比較執行方法及結果，可以了解不同評估方法對結果的影響，增強對安全評估方法的能力及信心。

6.2.1.2 工作內容

- (1) 執行 DECOVELAX-2023 TASK-D；其膨潤土工程障壁系統的實驗位於日本幌延地下實驗室，實驗設備中安裝許多監測儀器，可監測試驗過程中的各種變化，包含溫度、pH、孔隙水壓、含水量、位移量等。本研究使用 COMSOL Multiphysics 軟體分析工程障壁系統中的耦合行為，COMSOL 模式中擁有地

質力學模組、熱傳模組、地下水流模組、結構力學模組，建置相關模組進行模擬驗證。

- (2) 執行 DECOVALEX-2027 國際合作計畫中全系統安全評估的參考案例；該案例係 DECOVALEX-2023 Task F 的延續，其中，處置母岩為結晶岩體，並考慮主要裂隙及數組背景隨機性裂隙於模擬區域中，模擬放射性核種自處置設施釋出情況。

6.2.1.3 預期成果

- (1) 建置耦合模擬技術，針對 DECOVALEX-2023 TASK-D 試驗數據進行模擬驗證。
- (2) 完成全系統安全評估案例的放射性核種質量傳輸模擬。

6.2.2 SKB GWFTS Task Force

6.2.2.1 執行目的

本項工作依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2022 年修訂版)」第 7.1.3 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 8.2 節規劃執行。

「SKB Task Forces on Groundwater Flow and Transport of Solutes (GWFTS)」為瑞典核燃料和廢物管理公司(Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, 簡稱 SKB)邀集的國際合作任務。每次任務選定地下實驗室完成或即將進行之裂隙地下水流與溶質傳輸特定實驗作為主題，並將實驗數據提供給所有參與此任務建模團隊進行平行建模，試圖發展與評估不同的裂隙地下水流與溶質傳輸概念與建模方法。目前任務主題為地下水流與傳輸建模之驗證方法。

藉由參與 SKB GWFTS Task Force，開發務實的建模方法，透過建模預測與真實系統的觀察進行比較，建立對裂隙岩體中流動和傳輸模型的信心，據以驗證各種裂隙岩體建模方法的適用性。參與過程亦可蒐集國際處置技術研究平台關於裂隙岩體流動和傳輸相關研究最新進展，提供用過核子燃料最終處置安全分析技術發展建議。

6.2.2.2 工作內容

進行單一裂隙規模的水流模擬與實驗結果比對，除了裂隙特徵化模擬技術驗證外，亦同時納入裂隙通道的影響因素及其影響程度，據以應用於後續的擴尺裂隙通道，並考慮規模效應與不確定性問題。試驗數據為 SKB 於實驗室進行的單一裂隙水-力耦合試驗，試體來自 Flivik 採石場。其主要技術為透過小尺度(0.2 m)的裂隙表面幾何資料，計算裂隙表面粗糙度與裂隙內寬，並考量力學行為，建立水流模式。

6.2.2.3 預期成果

- (1) 修正並優化水力特性評估方法與水流模擬運算模式。
- (2) 發展合適的擴尺度水力特性評估方法。

7. 參考文獻

- 台電公司(2009)，我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告，台灣電力公司，共 758 頁。
- 台電公司(2017)，我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告，台灣電力公司，共 559 頁。
- 台電公司(2023)，用過核子燃料最終處置計畫書(2022 年修訂版)，台灣電力公司，共 273 頁。
- 財團法人中興工程顧問社(2023)。用過核子燃料最終處置計畫-候選場址評選與核定階段-區域地質描述模型建置及評估模式應用(110-116 年度計畫)-現地調查採樣規劃書(版次：03.00)，SNFDSECI-05-SOP-004-03.00，共 63 頁。
- Crawshaw, M. (2020). Multi-task learning with deep neural networks: A survey. arXiv preprint arXiv:2009.09796.
- Liao, W. Y., Lee, E. J., Chen, D. Y., Chen, P., Mu, D., & Wu, Y. M. (2022). RED-PAN: Real-time earthquake detection and phase-picking with multitask attention network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-11.
- Liu, S., Johns, E., & Davison, A. J. (2019). End-to-end multi-task learning with attention. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1871-1880).
- Reynolds, W.D. (1993) Saturated hydraulic conductivity: field measurement. In Carter, M.R. (ed.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society Soil Science. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA. pp.599-613.
- Ruder, S. (2017). An Overview of Multi-Task Learning in Deep Neural Networks. arXiv preprint arXiv:1706.05098.