

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

台灣電力公司

中華民國 115 年 01 月

115 年度工作計畫目錄

頁次

115 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.....	3-3
3.2.1 區域地質描述模型.....	3-3
3.2.2 岩石力學描述模型.....	3-4
3.2.3 水文地質描述模型.....	3-5
3.2.4 地球化學描述模型.....	3-6
3.2.5 傳輸特性描述模型.....	3-7
3.2.6 地表系統描述模型.....	3-8
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 岩體特性評估之更新.....	4-1
4.1.2 地下設設配置規劃的更新.....	4-2
4.1.3 製作地下設施配置圖.....	4-3
4.1.4 通風換氣排水等設備相關檢討的更新.....	4-4
4.2 處置設施概念設計研析.....	4-5
4.2.1 緩衝與回填材料膠體臨界水質研究及侵蝕模式建立.....	4-5
4.2.2 地下水質對膨潤土組成變化分析.....	4-9
4.2.3 有氧條件下銅殼孔蝕模擬分析技術.....	4-10
5. 安全評估.....	5-1
5.1 安全功能與量化分析.....	5-1
5.1.1 遠場放射性核種傳輸解析解.....	5-1
5.1.2 生物圈評估參數重要性研究.....	5-2
5.1.3 非人類生物輻射影響評估方法建立.....	5-3
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.....	6-4
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)。依據我國用過核子燃料最終處置計畫書指出，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 (台電公司，2023)。

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 等鈾系 (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」擬定期程及規劃，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

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。

計畫每 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，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：「完成候選場址調查區域的調查與評估並建議優先詳細調查之場址」及「建立候選場址性能/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「候選場址性能/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結晶岩區架設高密度且包覆性佳的微震監測網(Heping Seismic Network, HPSN)，包含本計畫自建(17 站)、中研院測站(3 站)、國立中正大學(4 站)，以及國家地震工程研究中心(1 站)，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，同時亦納入中央氣象署(8 站)之觀測資料共同進行微震事件挑選，以提升事件定位與分析之精度，技術面則建置提高資料處理效率的自動化流程，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，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域的 25 個地震站進行地震監測外，本年度於資料處理端將持續應用 114 年度建立之人工智慧地震事件辨識技術，進行地震波相挑選，再透過地震定位、震源叢集分布、地震活動度分析、震源機制解分析、b 值分析與三維速度模型建立等，評估觀測區之地震活動潛勢與潛在構造特徵。

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，更新地震目錄。
- (2) 分析並更新區域地震活動度、震源機制解與地震 b 值。
- (3) 更新區域三維速度模型，並綜整觀測成果評估潛在構造特徵。

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，針對臺灣本島結晶岩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，作為建立臺灣本島結晶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

本工作為長期監測工作，將持續蒐集台電公司於前期計畫所設置之 GNSS (Global Navigation Satellite System) 地表變形連續觀測站(共 9 站)之觀測數據，另蒐集雷達干涉影像，針對臺灣本島結晶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；除既有 GNSS 固定站之觀測外，本年度將持續評估觀測區範圍內各 GNSS 固定站之現地條件，如設置地點周圍障蔽情況、土地使用取得難易程度、施工便捷性(交通運輸、水電供應及周遭環境等)等條件，選出最合適的地點以建置雷達角反射器設備，除現地條件外，設置時應考慮設置地點衛星飛行之軌道與入射角度，進一步計算設置地點之角反射器的方位角與仰角作為施工參考，預期將完成共 5 站 InSAR 衛星反射站設置，並透過 InSAR 技術提供高精度且大範圍之地表變形量測成果，預期可提高整體觀測效益，並進一步瞭解案例區結晶岩體地表變形趨勢。

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) 持續處理新蒐集之觀測資料，更新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) 完成 5 站 InSAR 衛星反射站設置，並進行初步數據研析。

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地質離散裂隙網路模型 (Geological Discrete Fracture Network, Geo-DFN)，本項工作利用既有井孔內攝影結果，以人工方式針對井下裂隙進行裂隙分布分析，並綜整各項文獻蒐集與調查成果，據以建置區域地質離散裂隙網路模型，透過該模型呈現各地質單元離散裂隙之空間分布特性。

3.2.1.2 工作內容

在離散裂隙網路參數集建置方面，本項工作蒐集既有試驗井內之孔內攝影儀結果，並以人工測繪標記裂隙深度位置，測繪時將針對孔內裂隙，量測其位態(orientation)、強度(intensity)、內寬(aperture)、型態(categories)等特性，並記錄該深度之岩石特性如岩性及破碎程度等。綜整裂隙特性並篩選出優勢之裂隙群集，藉以建置地質離散裂隙網路參數集，以作為生成序率式離散裂隙網路之依據。

在區域地質離散裂隙網路描述模型建置方面，本項工作預計綜整各項地表地質與地下地質之相關文獻或調查成果，依據前年度劃設地質單元與地質構造之成果，在不同地質單元內，建置三維數值模型並生成離散裂隙網路，以利視覺化呈現裂隙之空間分布特性。

3.2.1.3 預期成果

- (1) 提出地質離散裂隙網路參數集。
- (2) 提出區域地質離散裂隙網路模型。

3.2.2 岩石力學描述模型

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 5.6.4 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，以過去執行計畫所取得之岩心為試驗樣本進行岩石熱膨脹試驗，此外，亦將分析近年完成之岩石力學試驗數據，提出模型建置所需之岩石力學參數表。

3.2.2.2 工作內容

岩石熱膨脹試驗方面，將測量岩石在溫度變化時之尺寸變化特性，透過加熱或冷卻樣品，記錄其長度、體積或形狀變化，進而分析其熱膨脹係數，藉以評估地層之熱力學特性，作為模式建立與驗證依據。

岩石力學參數表方面，將綜合近年之岩石力學試驗成果，包含完整岩石力學試驗、岩體不連續面力學試驗，以及岩石熱特性試驗等。

3.2.2.3 預期成果

- (1) 岩石熱膨脹試驗數據 10 組。
- (2) 岩石力學參數表。

3.2.3 水文地質描述模型

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 5.6.2 節規劃執行。

深層地質處置議題中，主要以水為媒介，把核種傳輸至人類生活圈，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，須考量的水文地質單元包含水力土壤域、水力岩體域與水力導水域，因此本工作將綜整臺灣本島結晶岩參考案例(SNFD2025)過去所蒐集的數據資料與文獻報告，進行參考案例特徵化分析，建置參考案例水文地質描述模型，並建置水文地質數值模型，瞭解參考案例之地下水流場分布特性，提供後續工程設計與安全評估技術分析應用。

3.2.3.2 工作內容

本項工作為利用過去已蒐集之水文地質相關試驗數據與文獻報告，包含土壤層、裂隙岩體與完整岩石等，建立符合臺灣本島結晶岩參考案例之區域尺度與場址尺度水文地質描述模型，並提出水文地質參數表，可供後續模式分析與專家討論使用。

首先，承接區域地質描述模型之地質單元，再依照水力特性提出水文地質單元分區需求，並建置參考案例之水文地質單元。研析國際水文地質相關描述模型建置程序，再依照上述數據資料彙整，探討其數據分布特性與範圍，利用地下水位長期觀測資料進行描述模型邊界

與參數率定，提出水文地質描述模型之參數表，並探討參考案例之地下水流場分布與地下水流動速率。

3.2.3.3 預期成果

- (1) 完成臺灣本島結晶岩區域之岩屑層(包含土壤層)、裂隙岩體與完整岩石等，水文地質數據蒐集與分析，探討其數據分布範圍。
- (2) 建置水文地質描述模型分析程序，進行臺灣本島結晶岩參考案例之參數特徵化。
- (3) 完成建置臺灣本島結晶岩參考案例水文地質描述模型，探討地下水水流場分布情形與地下水流動速率。

3.2.4 地球化學描述模型

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 5.6.3 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，而除母岩外，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，本項工作將針對臺灣本島結晶岩參考案例提出地球化學描述模型之參數表，並建置地球化學數值模型，探討其長期演化特性。

3.2.4.2 工作內容

本工作參考國際核能處置先進國家岩石礦物化學組成分析項目，整合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，包含不同深度地下水組成與礦物組成等。其中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。

本工作將進一步依照所提出的地球化學參數表，建置地球化學數值模型，參考基本案例演化情節模擬海平面受到冰河時期影響後之變化情形，並依照可能的氣候演化條件，進行海進和海退的模擬，藉此探討地下化學環境隨氣候變遷演化情形與其作用機制，研析其化學環境之長期穩定性。

3.2.4.3 預期成果

- (1) 完成臺灣本島結晶岩礦物組成與地下水組成之數據蒐集與統計數據分析。
- (2) 研析國際上地球化學描述模型之所需參數，完成建置臺灣本島結晶岩區之地球化學描述模型參數表，探討參數分布範圍。
- (3) 建置地球化學數值模型，依照基本案例演化情節，探討化學特性演化情形。

3.2.5 傳輸特性描述模型

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 5.6.6 節規劃執行。

在國際高放射性廢棄物處置安全評估中，核種由處置場外釋的過程，將經由岩體中的水力導水域(Hydraulic Conductor Domain, HCD)和水力岩體域(Hydraulic Rock Domain, HRD)，最終經由近地表之土壤域(Hydraulic Soil Domain, HSD)傳輸至生物圈，而天然障壁(地質圈)之遲滯能力主控於岩層與土壤傳輸特性，對應將影響傳輸至生物圈的時間與放射性核種的活度。地質圈之遲滯能力是選址過程中所需考慮的要素之一，受到裂隙之通道水流效應、岩體之擴散與延散特性、岩體對於核種的吸附特性、遲滯特性等影響，均是性能評估與安全評估的關鍵影響因子。因此，如何有效獲得研究區域天然障壁之傳輸特性與遲滯能力，對於後續傳輸特性描述模型之建立具有關鍵影響。本項

工作將針對臺灣本島結晶岩參考案例提出傳輸特性描述模型之參數表，並建置傳輸特性數值模型，探討流經地下設施之流動路徑與核種傳輸特性。

3.2.5.2 工作內容

本項工作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區域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，可提供後續安全評估分析與長期地下水演化參考使用。

本工作將延續上面之參數表，建置傳輸特性數值模型，模擬基本案例情節之海水面變化影響，並加入特定核種，探討地下設施一旦核種外釋後，其傳輸特性與傳輸路徑，瞭解核種外釋之影響與風險。另外考量參數類別與特性不一，將參採國際上於描述模型分類法之經驗，依照各領域描述模型分開論述，但其初始條件與邊界條件將與水文地質模型相同設定。

3.2.5.3 預期成果

- (1) 結合國際數據資料庫，完成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。
- (2) 依照參數表建立傳輸特性數值模型與基本案例情節，建立傳輸特性數值模型，模擬特定核種外釋路徑與傳輸特性。

3.2.6 地表系統描述模型

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 5.6.5 節規劃執行。

為建立本土地表系統空間與時間分布特性，本工作將蒐集臺灣本島結晶岩區域氣象站、地表流量站及地下水位監測站，其氣象觀測數

據包含：氣壓、降雨量、溫度、相對濕度、風向與風速等歷時變化，可用以進行氣象資訊之時序資料記錄；地表流量觀測數據包含：流量歷時變化；而地下水位觀測數據，則是記錄地下水位歷時變化。同時，並將氣象觀測數據與地表水或地下水時序性觀測資料進行比對分析，藉由探討地表流量與地下水位之變化情形，並瞭解其季節性之變化特性及可能之影響因子。

3.2.6.2 工作內容

本項工作為能掌握本土地表系統之時空變化特性，故著重於蒐集並整合氣象與水文監測資料。氣象資料部分涵蓋降雨、氣溫、氣壓、濕度等基本數據，藉以建立長期氣象變化紀錄；水文監測資料部分則包括地表流量與地下水位等長期連續紀錄，地表水可透過流量監測，反映其逕流之動態特徵；地下水位觀測則提供含水層水位之基本特性。透過與研究區域鄰近之中央氣象署、水利署資料之綜合比對分析，探討降雨、地表逕流與地下水位間的交互關係，並分析季節性變化特徵及其可能影響因子，進而勾勒地表系統描述模型之建置與後續水文評估工作。

本工作將針對各監測資料進行交互比對與綜整分析，以探討降雨事件與地表逕流及地下水位變動之關聯性。藉由此一分析過程，瞭解區域水文系統的季節性變化，進而提供建構地表系統描述模型所需的關鍵參數，並提供後續水文地質模擬評估之應用。

3.2.6.3 預期成果

- (1) 完成蒐集臺灣本島結晶岩區域 1 處氣象、1 處地表及 1 處地下水歷時資料數據，本年度預計彙整自民國 111 年至 114 年之歷時資料，氣象資料頻率為每 1 小時/筆，地表流量與地下水位之資料頻率為每 10 分鐘/筆。
- (2) 探討地表系統時序性資料其季節性變化特性及可能之影響因子。

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 岩體特性評估之更新

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 7.1.2.2 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。

115 年度預計以描述模型資料中，岩心紀錄與孔內攝影所得到的裂隙密度及分布型態等特性，考量尺度效應的影響，再利用第 3 章室內岩石力學試驗與熱力學試驗結果評估母岩岩體升尺度的岩石力學特性及熱特性參數，並依據分析結果進行概念規劃設計之更新。預期成果將比較更新參數與 113 年度的研究結果之差異，確認目前設定的岩石力學特性及熱特性是否適當，再依據分析的結果更新地下設施之配置與設計。

4.1.1.2 工作內容

115 年度將進一步分析臺灣本島結晶岩參考案例描述模型之參數更新(如：岩石力學試驗資料與岩石熱特性試驗資料等)，驗證 112 年度與 113 年度地下設施概念設計規劃中之參數值設定的適當性(是否可作為參考案例地質條件的代表性數值)，詳細工作內容如下：

- (1) 依據參考案例描述模型資料分析結果，驗證 112 年度與 113 年度隧道穩定性評估數值解析參數值之適當性，並視需求進行更新。
- (2) 依據參考案例描述模型的岩石熱特性資料及相關文獻資料，以及其他廢棄物罐熱效應評估所需之相關物理參數與岩心試驗結果。
- (3) 依據上述新取得資料的分析結果，驗證 112 年度與 113 年度廢棄物罐熱效應評估參數、地溫梯度設定值是否適當，並視需求進行物理參數值的設定更新。

4.1.1.3 預期成果

- (1) 因應參考案例描述模型的更新，完成臺灣本島結晶岩參考案例的岩體強度與變形特性的設定。
- (2) 因應參考案例描述模型的更新，完成隧道穩定性評估數值解析的參數設定。
- (3) 因應參考案例描述模型的更新，完成臺灣本島結晶岩參考案例的熱特性設定。
- (4) 因應參考案例描述模型的更新，完成廢棄物罐熱影響評估數值解析的參數設定。

4.1.2 地下設設配置規劃的更新

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。114 年的概念設計中以 dead-end type(處置隧道僅一端連結主隧道)進行處置隧道概念規劃，而 115 年預計配合參考案例描述模型更新，以及蒐集國內外專家建議，進行運轉隧道的配置、隧道底部中央設施位置修正以及處置隧道由 dead-end type(單一出入口型隧道)修訂為 panel type(處置隧道兩端皆連結主隧道)的設計規劃。

本工作項目預計因應參考案例描述模型的更新版，再依據最新的隧道穩定性與廢棄物罐熱影響評估結果，配合多方專家的建議事項，更新並改良地下設施的配置規劃。

4.1.2.2 工作內容

- (1) 地下設施的位置與深度的規劃

彙整參考案例描述模型更新版水文地質描述模型與地下水流場解析結果，並綜合考量力學穩定性、熱力學穩定性及施工可行性（通風），更新地下處置設施位置與深度規劃。

- (2) 處置隧道、聯絡隧道、運轉隧道與豎井的穩定性分析

本項目預計將運用於第 4.1.1 節確認或更新之岩盤與熱解析用之參數值，並針對前述規劃之地下設施位置與深度，進行處置隧道、聯絡隧道、運轉隧道與豎井之開挖分析，以評估其穩定性，執行處置隧道及周邊隧道等穩定性評估之確認或更新作業。評估過程中將同步確認或更新處置隧道與處置孔間距分析，並執行熱力學參數敏感度分析。

(3) 地下設施整體配置規劃的更新

彙整上述依據參考案例描述模型更新版進行(1)、(2)項的評估與更新結果以及現行地下設施規劃設計時所發現的問題及專家與審查委員之建議，進行地下設施整體配置規劃的更新。

4.1.2.3 預期成果

- (1) 因應參考案例描述模型的更新，完成參考案例區域內地下設施的設置位置與設置深度規劃設計。
- (2) 因應參考案例描述模型的更新，完成處置隧道、聯絡隧道、運轉隧道與豎井的隧道開挖穩定性分析。
- (3) 完成 SDM 更新後參考案例場址之處置隧道與處置孔間距分析更新，並探討熱力學參數設定之敏感度。
- (4) 依據隧道開挖穩定性分析與處置隧道、處置孔的間距設計規劃更新結果，更新地下設施整體配置規劃。

4.1.3 製作地下設施配置圖

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。

本項工作將依據第 4.1.2 節地下設施整體配置規劃的成果，繪製更新地下設施配置後的平面圖以及鳥瞰圖，提供後續設計、評估與民眾溝通使用。

4.1.3.2 工作內容

本項工作預計實施的內容如下：

- (1) 依據地下設施配置規劃的成果，繪製處置隧道、主要隧道、聯絡隧道、運轉隧道等的平面圖。
- (2) 繪製處置隧道、主要隧道、聯絡隧道、運轉隧道以及包含豎井的鳥瞰圖。

4.1.3.3 預期成果

- (1) 地下處置設施的平面配置圖。
- (2) 地下處置設施的鳥瞰圖。

4.1.4 通風換氣排水等設備相關檢討的更新

4.1.4.1 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 7.1.2.2 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。

本項工作預計依據第 4.1.2 節中地下設施整體配置規劃更新的結果，評估現行通風、換氣、排水等設備的可行性，並依據評估結果進行更新。

4.1.4.2 工作內容

針對第 4.1.2 節中地下設施整體配置規劃更新的結果，評估現行通風換氣、排水等設備的可行性。

(1) 通風換氣系統

本項工作首先依據第 4.1.2 節中規劃的整體地下設施的配置，規劃地下設施施工、運轉與封閉各階段的施工流程示意圖。其次根據概略的施工流程選擇各施工階段中需要評估討論的設施與規劃，依據日本通風換氣技術指南並使用通風網路分析法(ventilation network analysis method)確定所需的通風量，進一步探討為滿足容量所需要的設備規劃。此外，視實際施

工需求，本工作項目預計於評估通風系統的同時，評估使用空調系統降低工作溫度的可行性。

(2) 排水系統

本工作項目預計整理地下設施的功能以及針對湧水處理的設計要求，並針對第 4.1.2 節規劃的地下設施整體配置結果，進行地下設施排水系統的規劃研究，預計彙整排水系統需要的規格、設計排水容量、規劃排水路線、排水管道以及其他隧道內側排水工程，降低或防止湧水流入地下設施的措施。

(3) 水力封塞與力學封塞

本工作項目預計依據第 4.1.2 節的地下設施整體配置規劃結果，針對處置隧道回填所需力學封塞與其他地下設施隧道於封閉回填所需水力封塞進行概念規劃，確認目前規劃的水力封塞及力學封塞的安裝位置與設計是否適宜，並視評估結果進行配置位置與封塞設計的調整更新。

4.1.4.3 預期成果

- (1) 更新通風換氣設備規劃。
- (2) 更新排水設備規劃。
- (3) 規劃水力封塞、力學封塞與設置位置。

4.2 處置設施概念設計研析

4.2.1 緩衝與回填材料膠體臨界水質研究及侵蝕模式建立

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 7.1.2.1 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 6.1.4 節規劃執行。

在處置設施封閉後，地下水可能沿著截切處置孔之裂隙開口進入處置孔內部，當裂隙水流與緩衝材料接觸後，緩衝材料可能在回脹壓力的作用下被擠入裂隙，隨著緩衝材料擴張邊緣的增加，處置孔內緩衝材料的密度與回脹壓力將隨之降低，其流變特性(rheological

properties)亦隨之改變，從處置孔邊緣向外分別為膨潤土、凝膠(gel)、溶膠(sol)以及裂隙水流，其中這些膠體(colloid；包含凝膠與溶膠)可能藉由擴散作用(diffusion)進入流動的裂隙水流中，進而造成質量的損失，除此之外，溶膠亦可能在裂隙水流的平流(advection)作用影響下而流失，這些現象稱為緩衝材料的化學侵蝕(chemical erosion)作用。

在化學侵蝕的長期作用下，處置孔內部緩衝材料的質量損失將改變其回脹壓力和水力傳導係數，導致安全功能受到影響，進而改變廢棄物罐的受力狀態以及廢棄物罐銅殼在長期處置期間之環境，因此本項工作之目的在於化學侵蝕作用導致緩衝材料質量損失之機制研究，以及侵蝕率評估模型之建立與發展。

4.2.1.2 工作內容

本項工作參考國際文獻，發展地下水質對膠體形成之研究，建立膠體臨界水質試驗，取得臨界膠凝濃度(Critical Coagulation Concentration, CCC)相關數據資料，進行緩衝材料於不同陽離子濃度條件下之膠體穩定性分析；建立瑞典 SKB 開發之裂隙截切處置孔條件下，緩衝材料化學侵蝕率數值評估模型(KTH model)，並進行不同地下水質與地下水流速對緩衝材料質量損失率案例分析。其概念模型如圖 4-1 所示，計算域左側為地下水入流，右側則為出口，緩衝材料自半圓形(處置孔)邊界擠出，並且在擠出後受地下水流作用之影響而在裂隙中擴張。此模型透過達西定律並配合特定的黏滯係數模型描述裂隙水流之流況；且透過對流擴散方程式描述陽離子及膨潤土之擴散與對流現象，其中膨潤土之擴張則是透過動態力平衡模型(dynamic force balance model)描述，再以擴散係數的形式添加至方程式之中，各控制方程式之間則使用不同參數化方程式完成雙向耦合機制之建立工作，整體概念如下圖 4-2 所示，從圖中可以看出 KTH 模型主要變數包含時間 t 、流速 u 、壓力 p 、陽離子強度 c 、蒙脫石體積分率 ϕ 以及擴散係數 D_F 、 D ，其中擴散係數與陽離子強度和體積分率有關，如圖 4-3 所示，因此本模型可針對本土的地下水化學組成計算對應之陽離子強度，並評估相關參數對侵蝕率之影響。

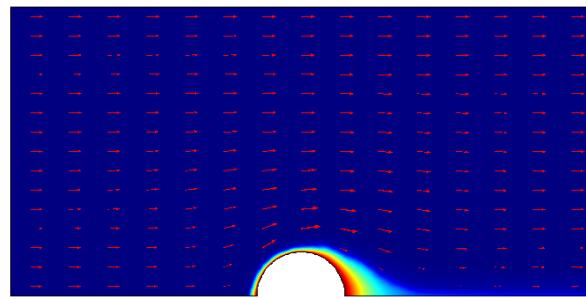


圖 4-1：緩衝材料化學侵蝕評估模型概念

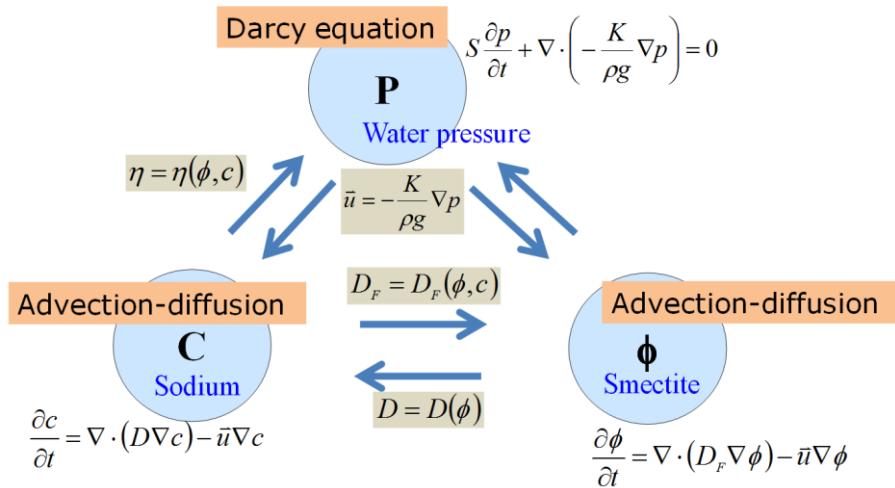


圖 4-2：KTH 模型變數耦合關係

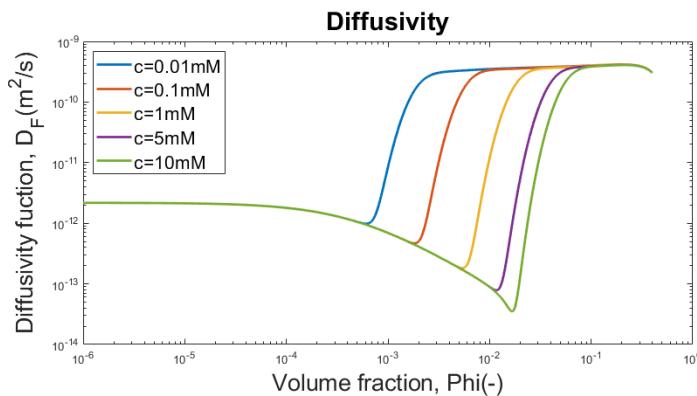


圖 4-3：不同陽離子強度下之擴散係數與蒙脫石體積分率關係

4.2.1.3 預期成果

- (1) 完成緩衝材料於不同陽離子濃度條件下之膠體穩定性分析；
- (2) 完成緩衝材料化學侵蝕數值評估模型(KTH model)於不同地下水質與地下水水流速對緩衝材料質量損失率影響之案例分析。

4.2.2 地下水質對膨潤土組成變化分析

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 7.1.2.1 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 6.1.4 節規劃執行。

處置設施近場的化學穩定性，將受到膨潤土組成的緩衝/回填材料與地下水間相互作用而影響鹼度及氧化還原能力，地下水與廢棄物罐表面接觸前，需要先於緩衝材料內傳輸，地下水可能與膨潤土礦物及孔隙水間反應而有所變化，故需評估是否會間接形成致使廢棄物罐腐蝕之物質或條件；緩衝/回填材料本身與地下水交互作用後的變化，也可能因周圍地下水質的改變而影響膨潤土本身的力學或水力性能。為確認處置設施的長期安全性，確保工程障壁之安全功能，需要考量臺灣本島結晶岩參考案例之地下水成分，探討地下水與膨潤土進行交互作用後，對膨潤土礦物組成及對孔隙水化學性質於長時間尺度下之影響。

4.2.2.2 工作內容

本項工作探討地下水與膨潤土進行交互作用後，對膨潤土礦物組成及孔隙水化學性質於長時間尺度下之影響，藉由參考案例地下水組成調製試驗水樣與膨潤土材料混和進行實驗，並同步建立對應之數值模型，透過數值分析測試與實驗結果對比與驗證，確認模型及使用之參數可合理模擬膨潤土與地下水交互作用之變化，執行步驟說明如下：

- (1) 試驗材料與地下水交互作用實驗：試驗材料使用 MX-80 型膨潤土，試驗水樣採用純水及參考案例地下水組成調配之人工地下水，將試驗水樣與 MX-80 型膨潤土混合進行實驗，並於

實驗後執行試驗土樣礦物組成分析及試驗後樣本水質分析，提供地化反應模型對比與參數校正。

- (2) 模型建立：蒐集文獻資料，確認地下水與膨潤土作用後可能發生之相關化學反應，將所蒐集之地化反應資料作為地化分析之輸入參數，利用 PHREEQC 建立地下水與膨潤土交互作用之地化反應模型，利用步驟(1)之水樣及膨潤土條件，分析膨潤土與試驗水樣交互作用後之化學變化，並與試驗結果比對，確認模型之正確性。
- (3) 利用步驟(2)所建立之地化反應模型，評估膨潤土礦物與孔隙水在長時間下化學演化之情形。

4.2.2.3 預期成果

- (1) 進行實驗室試驗，取得膨潤土與參考案例地下水交互作用後之礦物分析及水質分析結果。
- (2) 建立地下水與膨潤土交互作用之數值模擬模型，並完成與(1)項之試驗結果比對，並評估膨潤土礦物與孔隙水在長時間下化學演化之情形。

4.2.3 有氧條件下銅殼孔蝕模擬分析技術

4.2.3.1 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 7.1.2.1 節及「用過核子燃料最終處置技術建置計畫」第 6.1.4 節規劃執行。

銅殼腐蝕評估係以國內外技術及資料，依據臺灣本島結晶岩參考案例的環境與條件，透過所有腐蝕作用定性評估與篩選後，認為在百萬年的處置期間中，有超過 99% 的時間處於無氧環境，故長期演化仍以均勻腐蝕為主導機制；孔蝕則僅可能在初期有氧階段發生。惟孔蝕一旦發生，其對局部穿孔風險較為敏感，即使目前初步評估顯示不致造成銅殼穿孔，仍有必要針對有氧條件下之孔蝕行為進一步研究與分析，以降低不確定性並強化整體安全評估的完整性。

雖然國際上許多研究指出銅殼在處置場封閉後無氧環境下不會鈍化，因此不太可能會有局部腐蝕的情事；然而，國際上近期關於有氧條件下銅殼孔蝕研究指出需重新考慮銅殼表面可能被鈍化的情形，並分析出現孔蝕的原因與可能性，因此，需對於參考案例於有氧條件下銅殼孔蝕做更進一步的研究與分析確認。

4.2.3.2 工作內容

本工項考量處置設施環境有氧條件下，環境特性對於銅殼孔蝕作用之影響，針對有氧條件環境進行銅殼孔蝕模型的開發，執行步驟說明如下：

- (1) 蒐集及彙整國際上有氧條件下銅殼孔蝕模擬相關文獻與模擬方法。
- (2) 參考國際間有氧條件下銅殼孔蝕概念模型，使用 MathWorks MATLAB 或其他適用軟體，建立分析程式碼或計算方法，用於確定孔蝕之活性或鈍性行為。在尚未取得銅殼孔蝕模擬之本土參數以前，銅殼孔蝕模擬開發階段將以國際間之實驗測量資料作為孔蝕模擬開發期間之輸入參數。
- (3) 以臺灣本島結晶岩參考案例的水文地質資料進行有氧條件下銅殼孔蝕模擬分析，以確認在參考案例中銅殼鈍化的可能性。

4.2.3.3 預期成果

以臺灣本島結晶岩參考案例的水文地質資料，完成有氧條件下銅殼孔蝕模擬分析，並確認參考案例條件下銅殼孔蝕的可能性。

5. 安全評估

5.1 安全功能與量化分析

5.1.1 遠場放射性核種傳輸解析解

5.1.1.1 執行目的

在放射性廢棄物最終處置的安全評估中，通常以數值模式評估核種自廢棄物罐釋出後，經近場與遠場遷移至生物圈時的年釋出輻射活度。此過程需模擬包括核種由近場中的緩衝與回填材料進入遠場的裂隙/基質系統，其中遠場裂隙中的平流與延散作用主導核種遷移，而核種亦會向母岩基質中擴散，進而被遲滯。

為確保數值模式能準確描述遠場裂隙與基質中的核種遷移行為，本項工作將依據國際文獻建立對應之解析解，作為後續數值模型驗證的基準。透過將數值模擬結果與解析解進行比對，可確認數值模式在裂隙/基質傳輸作用下的準確性，進而提升遠場核種傳輸模擬及整體安全評估的可信度。

5.1.1.2 工作內容

依據經同儕審查國際相關文獻，並考慮放射性核種在母岩中的遷移機制及條件，建立適用於結晶岩裂隙與基質的遠場核種傳輸解析解，作為驗證遠場核種傳輸數值模式結果的依據，並附上相關參考文獻以確保可追溯性。研究流程包括：

- (1) 建立核種於母岩裂隙與基質中傳輸行為的解析解；
- (2) 應用所建立的解析解，對核種傳輸數值模式結果進行比對。

5.1.1.3 預期成果

完成核種於母岩裂隙與基質中傳輸行為的解析解建立以及與數值模式結果比對。

5.1.2 生物圈評估參數重要性研究

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 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。

在用過核子燃料最終處置安全論證的生物圈評估中，由於涉及地表氣候、水文、地質、人類活動、生物活動等各種領域，因此需要考量之參數眾多。而由於各參數會受到地表環境的不同而有很大差異，且要進行所有參數的詳細調查都需要投入較多資源。在資源與人力有限的情況下，進行生物圈評估之參數重要性研究，可以把對評估影響較大、對環境變化較敏感之參數界定出來，可進行調查資源的管控與配置，亦可增加評估結果之可靠度，改善關鍵參數引用國際參數之參數適用性問題。

5.1.2.2 工作內容

利用機率式模型，進行 SNFD 2025 安全論證中參考案例區域不同生物圈評估案例之參數不確定性分析與敏感度分析。工作內容將進行如下：

- (1) 蒐集國際機率式分析相關案例，整理相關執行方法。
- (2) 整理並發展適合國內使用之機率式分析方法與流程。
- (3) 蒐集國際與國內機率式分析所需參數機率式分布與變動範圍。
- (4) 利用 GoldSim 程式，根據參考案例建立蒙地卡羅機率式評估模型，以拉丁超立方法進行參數採樣，計算標準化迴歸係數(Standardized Regression Coefficient)以供後續敏感度排序，並進行初步測試。

5.1.2.3 預期成果

透過國際文獻分析與資料蒐集，完成以下生物圈參數重要性研究相關工作：

- (1) 適用國內目前階段之生物圈評估機率式分析方法論。

- (2) 參考案例生物圈評估相關機率式參數分布與變動範圍蒐集。
- (3) 參考案例之機率式生物圈 GoldSim 模型。

5.1.3 非人類生物輻射影響評估方法建立

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 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。

ICRP 於 2007 年提出更新的輻射防護建議後，並陸續於第 108、114、124 及 136 號報告中，提出針對非人類生物之評估方法、參數及防護理念，顯示國際間對此議題之高度重視，故本項工作旨在建立非人類生物輻射影響評估進行之方法。

5.1.3.2 工作內容

研析 IAEA、ICRP 等國際相關之非人類生物輻射評估報告，建立本地之通用非人生物評估方法流程。工作內容將進行如下：

- (1) 研讀 ICRP 非人類生物輻射影響評估相關報告，以及 IAEA 及其他國際案例相關報告，研究非人類生物輻射影響評估進行之方法、所需環境資料與參數。
- (2) 蒐集本島結晶岩區周圍之非人類生物輻射影響評估所需生態資料，彙整國內相關單位既有資料，包括台灣本島結晶岩區陸域與海域之生態及物種調查相關報告，建構後續代表生物選取所需之基本生態資訊。
- (3) 進行本島結晶岩區之非人類生物輻射影響評估測試案例，並將結果與國際執行案例進行比較。

5.1.3.3 預期成果

透過 IAEA、國際相關文獻與本島結晶岩資料蒐集，完成以下非人生物劑量評估工作：

- (1) 完成適用於本地之通用非人生物評估方法流程建立。
- (2) 本島結晶岩區域之生態資料彙整。

(3) 進行非人類生物輻射劑量率評估。

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離形包含如下：

(1) FEPs 資料庫系統

建立 FEPs 資料庫系統離形，彙整用過核子燃料處置安全評估相關特徵、事件、作用之分類與清單，建置以階層結構形式瀏覽之網頁介面，網頁內容包含各類因子之資料及相關連結，並提供使用者使用關鍵字查詢。

(2) 知識管理系統

建立知識管理系統離形，條列用過核子燃料處置知識項目，建置以階層結構形式瀏覽之網頁介面，網頁內容包含知識項目描述及相關連結，並提供使用者使用關鍵字查詢。

(3) 需求管理系統

建立需求管理系統離形，彙整用過核子燃料處置相關需求之分類與清單，建置以階層結構形式瀏覽之網頁介面，網頁內

容包含各類需求之資料及相關連結，並提供使用者使用關鍵字查詢。

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，目前為第 9 期 (DECOVALEX-2027)，包含 18 個國際研究單位參與其中，進行熱力-力學-水力-化學等實驗與模式耦合驗證。DECOVALEX-2027 包含 8 個子計畫項目，各參與國團隊成員選擇不同處置概念與主題，就地下實驗室試驗成果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，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) ANALOG :

本項工作藉由參加 DECOVELAX-2027 子工作項目 TASK-ANALOG，執行加拿大雪茄湖(Cigar Lake)天然類比參考案例。雪茄湖是一個可充分類比「處置」這項元件之案例，鈾礦床的

周圍之黏土層則為工程障壁中緩衝材料之天然類比，對放射性核種具有良好的遲滯能力。並藉由加拿大核安會(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)提供之現地量測數據，研究鈾礦床中放射性核種(I-129)傳輸行為。分別使用PFLOTTRAN及COMSOL模式建立雪茄湖之一維近場概念模型，探討包含鈾礦床之源項分析與衰變機制，並模擬放射性核種I-129之生成與熱、水力、化學(THC)耦合行為溶質傳輸過程，計算I-129於一維近場之長期演化與濃度空間分布。

(2) FRESCIP：

FRESCIP (Fractured Rock Extrapolation, Suitability Criteria and inflow Prediction)的目的為利用鑽孔或隧道觀測到的裂隙數據預測處置孔與處置隧道的地下水水流，並評估地下處置系統場址的適當性。透過豐富的場址裂隙資料與試驗數據，建立裂隙岩體水流行為預測的信心。數據來自於芬蘭Olkiluoto與瑞典Forsmark，它們分別在2015年與2022年取得場址建造執照，且地質岩性皆為結晶岩類。此數據與試驗相當具有參考價值。

此任務主要為建立一套方法論，利用鑽孔或隧道觀測到的裂隙數據外推處置系統附近的岩體，並且能預測地下水水流，藉此評估岩體狀態對於處置系統的適當性。

(3) SAFENET2：

SAFENET-2是前期SAFENET(Safety Assessment of Fluid Flow, Shear, Thermal and Reaction Processes within Crystalline Rock Fracture Networks)的延續，主要探討結晶岩岩石中的THM裂隙力學 - 從實驗室到現地尺度規模，其任務目標為理解結晶岩岩石中的裂隙生成和演化過程，可以應用於核廢料管理和地熱儲集層工程。從SAFENET裂隙模型的基準驗證案例測試和實驗室分析，用來改進地質系統模型，以提升性能與安全評估的精度，並促進儲集層設計的優化。

SAFENET-2 將專注於模型從實驗室到現地尺度規模的擴展與驗證。

6.2.1.3 預期成果

- (1) 建置耦合模擬技術，針對 DECOVALEX-2027 TASK-ANALOG 現地量測數據進行模擬驗證，以及完成雪茄湖鈾礦床中放射性核種 I-129 近場一維傳輸模擬。
- (2) 根據裂隙數據建置場址模擬目標概念模型，以及利用統計方法評估模型是否具有代表性。
- (3) 建置裂隙耦合模擬技術，針對 SAFENET2 試驗數據進行模擬驗證。

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水流與溶質傳輸概念與建模方法。目前主題為地下水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

進行單一裂隙通道的特徵化模擬技術驗證，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。其主要技術為透過小尺度(試體長寬高分別為 0.2、0.2、0.25 公尺。裂隙位於試體高約 0.12 公尺的地方，長寬分別為 0.2、0.2 公尺)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。

將基於所開發之水力特性評估方法與水流模擬運算模式，根據小尺度裂隙評估所得水力特性，對瑞典 Äspö Hard Rock 地下實驗室之 TASS 隧道所觀測到的特定構造進行 100 公尺尺度的特徵化與模擬。其主要技術需要建立以此特定構造為主體之裂隙網路模型，並給予適當水力特性，並利用此數值模型模擬現地水力試驗。

6.2.2.3 預期成果

- (1) 完成單一裂隙通道的特徵化模擬。
- (2) 建立模擬目標隧道特定構造的概念模型。

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.