

用過核子燃料最終處置計畫
候選場址評選與核定階段
108 年度工作計畫
(修訂三版)

台灣電力公司

中華民國 108 年 3 月

108 年度工作計畫目錄

	頁次
1. 概述	1-1
2. 計畫目標	2-1
3. 區域特性調查精進	3-1
3.1. 區域地質探測技術與資料解析	3-1
3.1.1. 潛在母岩空中磁力探測.....	3-1
3.1.2. 空中磁力測勘與資料解析之無人載具空中調查技術發展.....	3-4
3.1.3. 地球物理三維成像技術.....	3-6
3.1.4. 地質單元三維建模及展示技術	3-8
3.1.5. 深層流體影響性評估技術.....	3-11
3.2. 水文地質	3-14
3.2.1. 坑道面開挖擾動帶裂隙分布評估技術研究.....	3-14
3.2.2. 裂隙參數分布特性統計研究.....	3-16
3.2.3. 裂隙岩體地下水流分析技術精進.....	3-18
3.3. 長期監測.....	3-20
3.3.1. 全球衛星定位連續監測與時序分析.....	3-20
3.3.2. 微震監測及資料解析.....	3-22
3.4. 岩石力學描述模型	3-24
3.4.1. 岩石力學調查技術演練與發展	3-24
3.4.2. 岩石力學場址特徵化技術與模式發展	3-26
4. 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進	4-1
4.1. 用過核子燃料特性研究與分析技術.....	4-3
4.1.1. 核種存量與衰變熱分析技術	4-3
4.1.2. 核臨界安全分析技術.....	4-5
4.2. 工程障壁設計與性能評估	4-7
4.2.1. 廢棄物罐設計.....	4-7
4.2.2. 緩衝材料設計.....	4-9
4.2.3. 廢棄物罐抗圍壓性能評估	4-10
4.2.4. 廢棄物罐抗剪力位移之性能分析技術	4-11
4.2.5. 未飽和膨潤土特性分析.....	4-13
4.2.6. 緩衝材料與回填材料性質特性分析	4-15
4.3. 地下設施設計.....	4-17
4.3.1. 處置設施熱間距設計.....	4-17

4.3.2. 地下設施配置設計	4-18
4.4. 水文地質演化趨勢分析	4-20
4.4.1. 地下水流場演化分析	4-20
4.5. 工程障壁參考演化分析	4-22
4.5.1. 緩衝材料與回填材料參考演化	4-22
4.5.2. 廢棄物罐參考演化	4-24
4.6. 核種傳輸分析技術	4-26
4.6.1. 核種釋出途徑分析	4-26
4.6.2. 近場核種傳輸分析技術	4-27
4.6.3. 遠場核種傳輸分析技術	4-28
4.6.4. 生物圈核種傳輸分析技術	4-29
4.7. 情節發展與案例分析技術	4-31
4.7.1. 工程障壁安全功能指標	4-31
4.7.2. 情節分類與發展	4-33
4.7.3. 封閉後安全評估劑量與風險分析技術	4-34
5. 參考文獻	5-1

圖目錄

	頁次
圖 1-1：用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃.....	1-3
圖 4-1：108年度工程技術與安全評估技術精進工作計畫關鍵路徑圖.....	4-2

1. 概述

我國自 67 年開始利用核能發電，迄今共有核一、二、三廠的 6 部核能機組，其中，核一、二廠 4 座機組為沸水式反應器(Boiling Water Reactors, BWR)，核三廠 2 座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，其半衰期長達數十萬年，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 年提報行政院原子能委員會核定之「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，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個階段來進行(如圖 1-1)，為確保處置計畫符合國際現況發展，處置計畫書每4年檢討修訂，目前處置計畫依原子能委員會104年3月核備之「用過核子燃料最終處置計畫書(2014年修訂版)」切實執行。目前「潛在處置母岩特性調查與評估階段」已於106年結束，台電公司分別於98年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(SNFD2009報告)」及106年底提報「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SNFD2017報告)」，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。

在過去幾年中，台電公司將潛在母岩特性調查技術之發展重點，集中於離島結晶岩測試區之處置技術發展，期能透過各項技術的整合性驗證，取得關鍵技術的能力與成果，以及測試區的地質特性參數、構造及建構初步地質概念模式，供功能與安全評估技術發展應用，以完備現地調查至功能評估的整體作業流程，階段性成果已彙整於SNFD2017報告。

本階段(107年至117年)將遵循國內相關法規要求，進行候選場址之評選及調查工作；並依原能會核備之處置計畫書之規劃，進行候選場址建議調查區域之調查與評估工作，建立候選場址之功能及安全評估技術，務實推動用過核子燃料最終處置計畫。

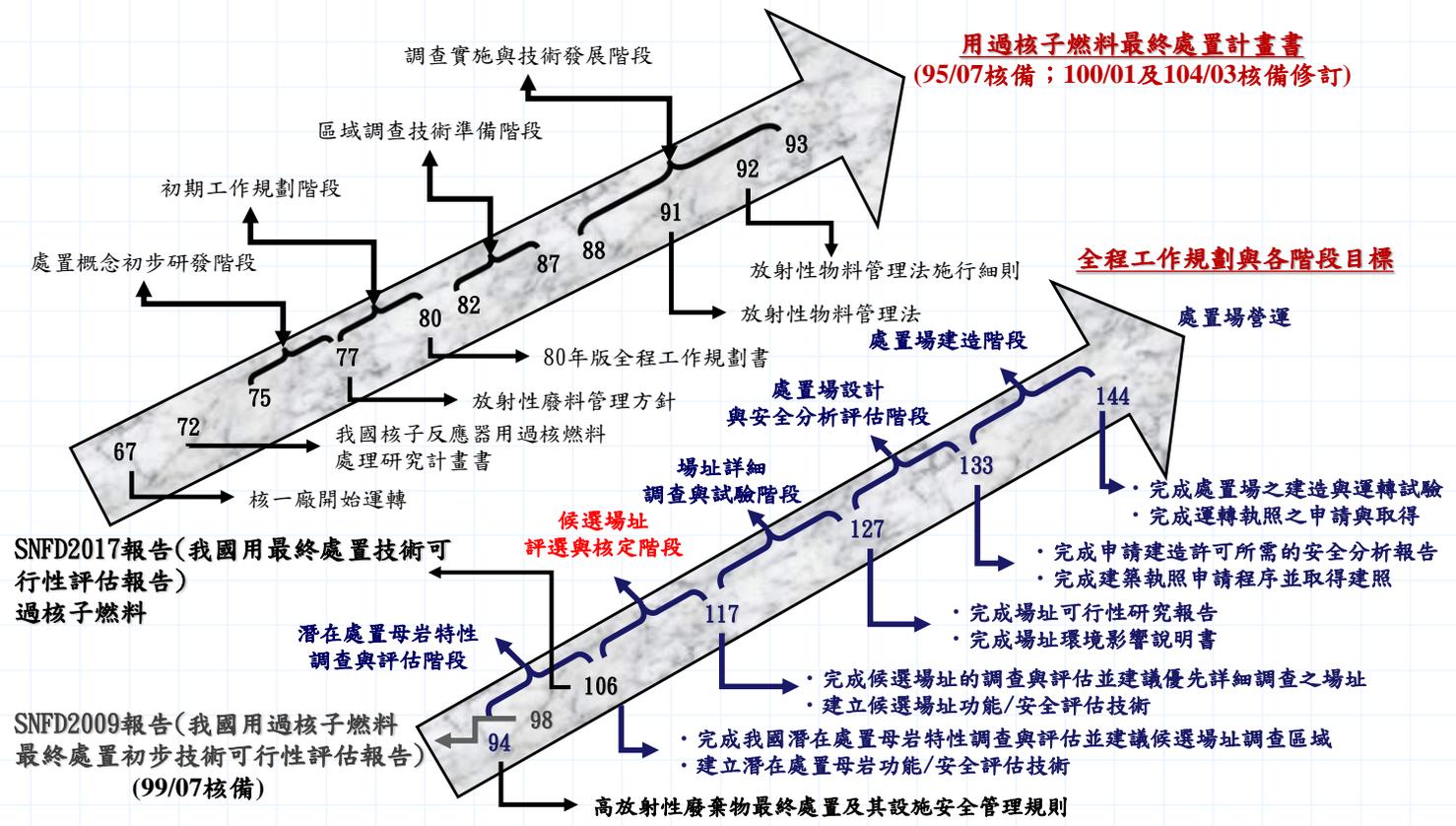


圖 1-1：用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃

2. 計畫目標

依據用過核子燃料最終處置計畫第 2 階段「候選場址評選與核定階段」之目標，及符合原能會要求提報更新技術報告(「105 年度放射性廢棄物最終處置計畫執行成果報告」審查會議紀錄)，在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，108 年度之年度研發工作將持續精進「區域特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」等 3 項核心技術，作為第 2 階段工作推動之 3 大主軸。

參照台電公司 106 年底提報之 SNFD2017 報告指出，臺灣西部離島及東部均存在合適的花崗岩體，且具備足夠的岩體尺寸及地質特性可供處置；中生代基盤岩目前尚未發現可能影響處置設施安全之地質因子，惟仍須進一步調查與評估，並以離島結晶岩測試區為參考案例，說明國內已發展具備深層地質特性調查評估之能力與技術，深層地質調查成果可供後續工程設計與安全評估之技術分析，並參考瑞典 KBS-3 處置概念，建立工程障壁與處置設施長期穩定性的性能評估能力，並透過全系統的安全評估，整合處置技術發展，展現我國已具備地質處置設施長期安全性的評估技術能力。

有鑑於處置計畫第 2 階段將進行候選場址的調查與評估技術工作，以及發展建立處置場概念設計，本階段重要工作，基於 SNFD2017 報告的研究能量與技術可行性下，強化各項技術連結與國內人才、技術資源的跨領域整合。爰此，在無候選場址之前提下，將持續精進整合 3 項核心技術領域「區域特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」之相關技術能力。區域地質特性調查方面將持續進行區域調查技術的研究、提升調查數據的處理分析能力，並擴大場址描述模型的技術發展；處置設施設計與安全評估方面，將依循國內用過核子燃料特性條件，變更廢棄物罐設計規格，以持續精進安全分析技術。

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 及放射性廢棄物最終處置安全論證導則 SSG-23 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)依主管機關要求，須於 2025 年提報安全論證報告，目前將參酌 SNFD 2017 報告國際同儕審查結果與原能會審查結論，並持續蒐集國際間已發布之高放處置設施安全論證報告，作為 2025 安全論證報告內容規劃之參考，相關成果將呈現於年度工作執行成果。

108 年度工作計畫將依前述相關規劃進行，第 3 章為區域特性調查精進、第 4 章為處置設施工程設計技術及安全評估技術精進，詳細工作項目與內容分述如下：

3. 區域特性調查精進

3.1. 區域地質探測技術與資料解析

為進一步瞭解區域地質構造特性，透過地球物理探測及解析方法(如：磁力法、大地電磁法、震波波速等)，進行岩體地下分布範圍調查及資料解析工作，與地下地質構造判釋，詳細工作規劃如下：

3.1.1. 潛在母岩空中磁力探測

3.1.1.1. 研究目的

空中磁力探測(airborne magnetic survey)技術是大區域探測最有效的方法(董倫道、林蔚，2014，p158)，能在最短時間內收集到測點均勻分布且大量的高品質資料，各先進國家均以此探測成果，作為區域地質架構分析與地面調查規劃的基礎。自1990年後，由於量測儀器與飛行器科技的大幅進步，使得空中地球物理探測的效率更高，成本更低廉，而所發揮的效果更大。在空中進行磁力探測時，因施測時幾乎不受地形及地物影響，故能獲得非常大量且近乎均勻分布的測點，是地面探測無法比擬的。先進的空中地球物理探測技術，不僅能滿足區域地質調查需求(Grauch et al., 2001, p708)，也是礦產資源探勘的利器(Pettit, 2009, p106)，亦能以低空飛行及較密之測線間距(小於100 m)方式，執行高解析度地質探測，達到場址精查的需求(Jaques et al., 1997, pp167 - pp171)。

基於空中磁力探測的高機動性與涵蓋面積廣大的特性，也為了解國內潛在處置母岩的區域性分布及其鄰近地質構造資訊。過去透過與澳洲 Fugro Airborne Survey (FAS) 公司的合作方式，已完成了國內首次的空中磁力探測工作，更新地體架構、地下地質構造與岩體分布等重要資訊。現階段已成功建立了本土化自主性的空中磁力探測技術，關鍵技術包括：測勘規劃、測線導航、飛行現調、影像加強、三維磁力向量逆推與磁力構造解釋等。

基於 SNFD2017 報告結果，臺灣地區存在可供處置之花崗岩體，岩體大部分深埋地下，岩體的分布範圍與構造須透過各種不同地球物

理方法進行探測與評估，就歷年研究成果指出，磁力測勘在離島地區及臺灣東部等處的調查成果均已獲得陸上花崗岩體分布的重要資訊。透過過去陸域空中磁測資料解析結果，初步顯示位於台灣東部的花崗岩體，深度約可達 6 公里，且有向海延伸之可能性，以目前既有資料判斷，估計向海延伸約達 2 至 3 公里間，為瞭解完整花崗岩體之分佈特性，故有必要進行探測。

為進一步瞭解花崗岩體向海域延伸可能之分布範圍，及考量海域的深層地質處置亦可能是我國未來地質處置概念選項之一。本項目工作擬基於本島花崗岩體及鄰近區域海域的空中探測成果進行分析，綜合陸域及海域空中磁測資料，透過最新的三維逆推技術進行整體分析，以評估花崗岩體向海域延伸的分布情形，期能獲得完整有關花崗岩體的空間分布，作為候選場址特性評估及調查規劃之參考依據。

3.1.1.2. 研究內容

為瞭解本島花崗岩體向海域的延伸範圍，本項目工作規劃為期 1 年，108 年度將針對該區域鄰近海域之空中磁力探測資料進行處理與解析，研究範圍將涵蓋海岸線向東延伸約 30 km 的區域，期能增進對本島花崗岩體空間分布的瞭解，作為候選場址特性評估及調查規劃之參考。

本項目工作 108 年度工作規劃，說明如下：

(1) 磁力資料處理

資料處理的目的在於強化來自岩層的磁力特徵，是磁力資料解釋工作前重要的一環，本工作將進行的主要資料處理項目包括：濾波、向上延伸、歸極換算及微分等。

(2) 磁力三維逆推

本計畫將以全磁力強度(TMI)網格做為輸入資料，進行三維逆推(3D inversion)處理，以獲得地下岩層磁感率的三維分布。

(3) 磁力解釋

依據前述工作所獲得的各種磁力異常圖及三維磁感率模型，並藉由與研究區內相關地質及地球物理資料比對，進行地下岩體及構造分布解釋。

3.1.1.3. 預期研究成果

- (1) 完成本島花崗岩體近岸海域之地下岩體分布及構造解析。
- (2) 獲致本島花崗岩體向海域延伸的範圍。

3.1.2. 空中磁力測勘與資料解析之無人載具空中調查技術發展

3.1.2.1. 研究目的

區域調查階段因探測面積大，故以較高的飛行高度及較大的測線間距，以動力性能高的直升機進行空中探測是經濟有效的方式。但是在場址調查階段，必需降低飛行高度至 100 m 左右，並縮小測線間距至 100 m 以下，來提高對地下構造的解析度(Kramar, 2016, p26)，故必需開發更機動的載具以更貼近地貌飛行的方式獲取高精度資料，以因應接續的場址調查需求。

本計畫過去已建立以有人直升機作為飛行載具進行空中磁力探測之技術，並成功應用於區域調查(董倫道、林蔚，2014，pIX)，因應本階段計畫須取得較精細的場址調查資料，規劃以無人機作為飛行載具以提高調查效率、獲取高精度資料，並且降低生命損失風險(Thomson et al., 2007, p31; Legault and Unsworth, 2015, p16-22)。

本項目工作擬在既有空中磁力探測的基礎上，開發以無人機(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)作為飛行載具的空中重力與磁力聯合探測系統，以提高現場調查的機動性，並透過重力與磁力之三維逆推與整合解釋技術，提高對地下岩體三維分布及地質構造解釋的可靠性。

3.1.2.2. 研究內容

本項目工作規劃自 108 年起至 111 年止為期 4 年，最終目的在於開發高機動性的無人機空中重力與磁力聯合探測系統(UAV Gravity/Magnetic Integrated Survey System)，以因應接續場址調查之需求。108 年度工作規劃在於建立以無人機作為飛行載具的空中磁力探測系統，說明如下：

(1) 5 kg 級空中磁力探測載具設計製作

與磁力儀設備製造商(例：加拿大 GEM 公司)合作，設計製作無人機空中探測專屬的輕量化載具，預期將包括：一或二個磁力感測器、雷達高度記錄、姿態記錄、資料即時無線電傳輸、自動數據備份等功能。

(2) 12 kg 級高酬載長滯空無人機載具設計製作

與無人機設備製造商(例如：Avix Technology Inc.)合作，修改既有之商業無人機，改造成適合執行空中地球物理探測的高酬載長滯空無人機系統。並且將開發 UAV 空中重磁探測專用的測勘規劃與自動導航軟體，特別是建立地貌飛行的作業能力，包括：作業程序及自動導航設計或硬體改裝設計。

(3) 無人機空中磁力探測系統組裝與測試

自過去曾經完成空中磁力探測的區域中，截取面積約 8 km²至 10 km²區域，作為無人機空中磁測系統測試之用，測試區域將包括平地與山區，以測試地貌飛行的能力，測試結果將與過去研究成果及國外技術進行比較，並回饋作為系統改善與功能提升的依據。

3.1.2.3. 預期研究成果

本項目預期工作成果為開發無人機協同作業的空中重力與磁力聯合探測系統，以低空之地貌飛行作業，搭配重力與磁力三維逆推與整合解釋技術之建立，獲取高精度的地下三維磁力與密度模型，作為建構地質描述模型的重要基礎資訊，108 年度預期成果說明如下：

- (1) 完成 5 kg 級空中磁力探測載具設計製作。
- (2) 完成 12 kg 級高酬載長滯空無人機載具設計製作。
- (3) 完成無人機空中磁力探測系統設計開發及飛行測試。

3.1.3. 地球物理三維成像技術

3.1.3.1. 研究目的

三維地質概念模型(3D geological conceptual model)是地質調查的重要產出，是建構場址描述模型(Site Description Model, SDM)的必要輸入(SKB, 2011, p56)。而三維地球物理成像(3D geophysical imaging)技術是以三維逆推為核心，將量測的地球物理數據轉換為合理的三維物性模型，藉以分析地質單元分布與地層物性特徵間之關聯性，是建構三維地質概念模型的關鍵技術。

本計畫在「潛在母岩特性調查與評估階段」已初步分別建立重力、磁力、聲頻大地電磁(Audio Magnetotelluric, AMT)及震波速度(Seismic velocity)等三維成像技術，並成功應用於大區域特性調查。因應本階段目標需求，提升小區域地下構造分布與物理特性之解析能力，是本階段之重要技術發展目標之一。此外，地球物理併合逆推(geophysical joint inversion)技術之目的則在於建立同時滿足大多數探測資料的最佳物性概念模型，以提高整合解釋(integrated interpretation)與建構地質概念模型的效率。

有鑑於 AMT 探測是場址調查中重要的地表地球物理探測技術之一，未來進入候選場址調查作業時，透過加密測點並搭配三維成像技術，以提高三維地電阻模型(3D resistivity model)的解析度。然而，傳統的 AMT 三維逆推處理(台灣電力公司，2017，p3-93)，並未將地形起伏納入三維網格進行逆推處理，故未能切實地反映真實地形下的三維地電阻模型。

臺灣地區地形起伏劇烈，進行三維逆推處理時，勢必不能忽略地形對逆推處理所造成的影響。因此，本項目工作擬建立將地形納入網格的 AMT 三維逆推技術，以獲取更貼近起伏地形下的三維地電阻模型進而解釋岩體與構造分布。並在磁力與重力等資料三維逆推的基礎上，建立併合逆推技術，降低三維物性模型的非唯一性(non-unique)，加速地質單元判釋及岩體與地質構造分析，建構合理的地質概念模型。

3.1.3.2. 研究內容

本項目工作規劃自 108 年起至 111 年止為期 4 年，全程工作目的為精進非震測類型地球物理三維成像技術能力，建立不同資料間之三維併合逆推技術，推演合理的三維物性模型，作為建構三維地質概念模型及 SDM 的重要基礎。108 年度主要工作內容為：建立包含地形之 AMT 三維成像技術，並挑選已經擁有 AMT 探測資料且母岩為花崗岩的區域，作為技術測試的場域，同時精進測試區之三維地電阻模型。

108 年度工作規劃說明如下：

(1) 起伏地形三維網格設計與理論模擬測試

建立起起伏地形三維網格自動產生技術，涵蓋地表下與地面上的網格，AMT 測點則位於地面上的網格，再融入三維逆推處理，並以理論模型進行模擬測試，以驗證處理技術的正確性。

(2) 精進 AMT 三維逆推技術

擬優先挑選臺灣地區既有 AMT 探測資料的區域作為技術測試的場域，將過去量測的資料以本項目工作開發的三維成像技術進行再處理，建構起伏地形下真實的三維地電阻模型。

(3) 精進三維地電阻模型

透過上述三維地電阻模型的建立，並與測試區內相關地質及地球物理探測成果進行套繪及綜合解釋，分析測試區地下岩體與構造分布，提供地質概念模型建置工作所需之關鍵資訊。

3.1.3.3. 預期研究成果

本項目工作預期研究成果為建立包含地形之 AMT 三維成像技術與三維併合逆推技術，獲得反映起伏地形下的三維地電阻模型，精進三維地球物理成像技術能力。並藉由在花崗岩區的技術測試，精進對測試區地下岩體分布與構造的瞭解。

(1) 完成包含地形之 AMT 三維成像技術建置。

(2) 完成本計畫既有臺灣花崗岩區之 AMT 資料再處理，建構能反映起伏地形下的三維地電阻模型，並分析地下岩體與構造分布。

3.1.4. 地質單元三維建模及展示技術

3.1.4.1. 研究目的

區域地質描述模型可以提供地質構造與地質調查數據的空間分布關係，藉由整合各類地質資料至模型中，可作為候選場址評選及功能/安全評估的整合性關鍵資訊。透過三維視覺化展示技術的協助 (Andersson, et al., 2013, p1047; SKB, 2008, p431)，將與地質相關的各類資料以立體空間方式展示，以提供更為精確的地質特性評估與參考，作為後續規劃的參考依據。

區域地質調查技術及方法與時俱進，資料及內容會因設備更新、調查方法變更，而有所提升或改變，因此地質描述模型的解析度也會隨之提升。本項目工作主要目標為彙整各類地質調查資料，但地質調查數據格式及類型眾多且複雜，彙整不易，故本研究將建構不同性質之資料進行轉換與合併流程，作為資料匯入地質描述模型的前處理程序，而後建構與充實相關的地質描述模型內容及後續相關數值模擬計算之重要參考依據。

藉由數位化與視覺化地質描述模型，可提供本計畫相關人員利用三維視覺化地質描述模型作為溝通平台，使人員在查詢與使用資料上更為便利，並作為後續安全論證及場址評選之重要參考依據，以及各項功能/安全評估所需的空間尺度及地質參數之共同來源，以確保評估資料來源的一致性，強化全系統評估之完整性。

3.1.4.2. 研究內容

本項目工作自 108 年起至 111 年止為期 4 年，主要工作項目包含：

(1) 持續整合地質調查解析成果：

地質調查資料會隨計畫執行期間持續補充與更新，故本項目亦持續更新與維護參考案例參數表之內容，並加強資料之統計特性，此參數資料亦可作為數值模擬之重要資料來源。

(2) 更新與精進參考案例之地質描述模型及參數資料：

精進本計畫參考案例相關地質資料(例如：地表高程資訊、地化、地物與地質等)，利用專業地質軟體建立、彙整與更新參考案例之地質描述模型，藉以加強地質描述模型之完整性與可用性。

(3) 地質描述模型相關資料格式轉換：

考量地質描述模型所需資料的來源與格式眾多且複雜，因此於轉換與整合資料上具有高困難度，本計畫將建立各類二維與三維資料格式轉換流程，提供計畫人員可針對相關資料進行前置處理作業。

(4) 建立與更新地質描述模型的三維電腦模型物件格式電子檔：

利用專業軟體整合地質調查資料，建構參考案例之地質描述模型數位化物件格式檔案，並利用二維與三維視覺化技術展示地質描述模型中各類資料，提供計畫人員於溝通、展示及資料解析上之便利性。

108 年之工作規劃內容說明如下：

(1) 整合與更新地質調查成果與解析

本項目工作主要為更新與彙整 SNFD2017 參考案例表格內容(林鎮國等，2016，ch2)，如地質概念模式及特性參數相關資料，並增加部分數據資料統計特性，使資料具備不確定性分析之用途。擴大地質描述模型所涵蓋之空間範圍，提供計畫相關人員於不同尺度資料分析時之參考依據，更可提供參考案例之各項評估分析時，所需的地質描述模型異質性與空間尺度。規劃工作內容包括：

(a) 更新參數特性資訊

(i) 更新 SNFD2017 參考案例表二數據：例如入滲量。

(ii) 更新增加裂隙統計特性資訊：根據持續進行之 K 區地表裂隙量測結果，更新增加裂隙特性參數。

(b) 增加地質描述模型構造線型數量

前期技術發展階段 SNFD2017 參考案例地質概念模式僅考慮 F1 與 F2 構造，本年度項目工作將會將過去經地質與地物調查判釋之其他主要構造線型，適量增加至地質描述模型中。

(c) 擴大水文地質描述模型空間尺度

- (i) 針對區域尺度：擴大建立離島 K 區之區域水文地質描述模型，涵蓋空間範圍北側將擴展至大陸河流流域範圍，南側將擴展至海域。
 - (ii) 針對場址尺度：擴大建立離島 K 區之場址水文地質描述模型，涵蓋空間範圍將擴展至鄰近海岸之海域。
- (2) 製作與精進離島地質描述模型的三維電腦模型物件
- 依據不同地質資料建構具空間資訊與地質參數的三維電腦模型物件，考量資料格式與內容複雜度，須依據資料格式制定轉換流程與使用技術。另外地質描述模型之三維電腦模型物件，可由具空間資訊處理能力之軟體進行三維視覺化展示，提供計畫人員三維檢視及查詢模型相關資料，擴展地質描述模型資料的使用性與討論性。

3.1.4.3. 預期研究成果

本項目工作預期研究成果，包含完成建構與更新本計畫相關地質資料參數表，並轉換各類地質資料格式，利用專業地質軟體彙整各類調查資料，建構及更新本島與離島地質描述模型，並依據計畫所需空間尺度進行調整，以精進參考案例之地質描述模型，作為後續數值模擬所需的資料整合參考。108 年度預期成果為：

- (1) 完成彙整與更新 SNFD2017 參考案例表二資料，並擴大模型考量空間尺度、增加參數統計特性與構造線型分析資訊。
- (2) 完成參考案例之地質描述模型的三維電腦模型電子檔。

3.1.5. 深層流體影響性評估技術

3.1.5.1. 研究目的

深層流體對處置環境的影響性評估，是日本針對核廢料地質處置投入的一項評估技術。日本因考量到其地質環境強烈受到火山活動與地熱活動影響，因此發展本項評估技術。過去在日本 H12 報告中，僅考慮到日本火山活動與地熱活動特性，但後續開始認為跟火山或岩漿活動相關的深循環流體，是另一項相關須列入評估的地質特性，深層流體(deep-seated fluid)的溫度與化學組成可能是深層地質處置的影響因子，過高的地溫梯度會加速地下水的流動速率，進而增加核種遷移的速率；地下水化學性質的改變，降低多重障壁遲滯核種遷移的功能(JNC, 2000, c3p24)。在 H17 報告後，開始以過去火山與地熱活動資料為基礎，著手進行相關評估技術發展。目前這項評估在日本的處置技術規劃中(2015~2021 年第 3 期中長期計畫)，仍持續進行與發展。

SNFD2017 報告之國際同儕審查考慮到臺灣的地質環境與日本相似，臺灣高地溫梯度的地區除受到火山活動影響之外，亦可能為深層流體受到複雜的地體構造環境影響所致，因此提出臺灣也應考慮進行此項評估的建議。過去臺灣的確並未考慮到與火山與岩漿活動相關的深循環流體，對處置環境可能造成的影響，故在了解日本相關報告(例如：CoolRep H26)與目前規劃(2015~2021 年第 3 期中長期計畫)的實際執行項目(地表/地下流體地化分析、地物探測、地質構造解析)後，提出本項目工作規劃。

臺灣位於歐亞板塊和菲律賓海板塊之交界帶，亦為北呂宋島弧和琉球島弧 2 個島弧系統的轉接點，並位於太平洋火環帶上。臺灣複雜的地體構造形成多元構造環境：北部的島弧火山活動；東北部的地殼張裂、火成岩入侵活動；中央區域的弧陸碰撞與地殼抬升現象；西南部變形前緣的增積岩體構造，因而造就各類型的地熱流異常區。地熱異常區域的高熱流特性可能影響地質的長期穩定性，對於放射性廢棄物之深層地質處置亦可能產生負面影響；而深層流體(氣體與液體)可

能經由構造產生之通道，向上遷移至近地表，改變淺層地下水質特性，影響深層地質處置的合適性。

本計畫為精進深層地質處置合適性研究，擬透過解析深層流體之地球化學特性以探討其來源，並搭配地球物理資料及圍岩特性以推測可能流徑，提供未來進行處置合適性論述之自然影響因子。

3.1.5.2. 研究內容

本項目工作自 108 年起至 111 年止為期 4 年，將針對本島花崗岩及其鄰近地區，進行深層流體之地球化學特性研析、流體特徵補充調查和區域構造地質資訊彙整研析。深層流體遷移至近地表後常以土壤氣、水溶氣、溫泉氣泡和溫泉水、地下水等地表特徵形式存在，本項目工作將針對上述類型流體進行現有文獻資料彙整分析，配合流體特徵補充調查分析，獲得深層流體之地球化學組成(成分和同位素等)，用以探討深層流體可能的來源或其組成之端點成分(end component)。掌握地球化學組成與可能來源後，進一步整合區域構造地質及地球物理資料，以加強辨識區域深層流體可能流徑和可能的高連通性構造，作為候選場址評選時地質合適性之參考。108 年度工作規劃說明如下：

(1) 國內外深層流體影響評估方法與發展現況資料彙整

蒐集並瞭解各國對於深層流體影響評估的研究成果及發展現況。

(2) 國內既有流體地球化學特性成份組成資料彙整

彙整溫(冷)泉氣泡、地下水等地球化學資料，歸納整理流體成分組成及同位素特性，提供流體來源解析資訊。彙整區域地質構造之土壤氣和水溶氣等流體地球化學特性，提供研析流體路徑所需資訊。

(3) 流體特徵補充調查規劃與整備

根據國內外深層流體影響評估彙整資料，規劃國內補充調查項目(例如：水體、氣體、地表土壤氣體和水溶氣體等)、分析項目(例如：化學組成、同位素比值和逸氣通量等)、評估規劃補充調查取樣點位，以及整備所需採樣調查工具與裝置。

3.1.5.3. 預期研究成果

本項目工作預期研究成果為：透過流體地球化學特性分析探討深層流體來源，進行國內深層流體影響評估，並且整合區域構造地質資料解析深層流體可能之流徑，建構區域深層流體之概念模式。提供最終處置之地質合適性評估所需參考依據。108 年度預期成果說明如下：

- (1) 完成國內外深層流體研究發展的現況評估。
- (2) 完成國內既有流體地球化學資料的彙整。
- (3) 完成地表特徵補充調查規劃與整備。

3.2. 水文地質

3.2.1. 坑道面開挖擾動帶裂隙分布評估技術研究

3.2.1.1. 研究目的

對於高放射性廢棄物深層地質處置環境而言，一旦工程障壁系統喪失其圍阻核種的功能時，開挖擾動帶內之開挖損傷帶是提供核種從近場環境傳輸至遠場地質圈，進而到生物圈的潛在路徑，因此，正確地描述開挖損傷帶的特性即成為功能/安全評估中的重要議題。本項目工作目的為進行坑道面開挖損傷帶裂隙分布評估，建立非破壞性開挖損傷帶裂隙探測解析所需之地球物理調查技術，以及完成開挖損傷帶案例研析。

考量目前國內因欠缺適當的研究場址，故在坑道開挖損傷帶的研究方面相對較少，且他國的研究成果並無法百分之百移植應用於國內之地質環境，特別是與區域地質環境有關的開挖損傷帶空間分布與特性等。有鑑於開挖損傷帶特性對放射性廢棄物安全處置的重要性，故有必要在建立地下實驗室之前，針對開挖損傷帶之探測與評估技術進行先期研究，以瞭解更貼近真實處置環境下的開挖損傷帶特性。因此，本項目工作將針對地下實驗室或礦場調查相關之國際案例進行研析，參考國際在開挖損傷帶調查曾經使用過的技術，以既有坑道進行測試，建立對開挖損傷帶之非破壞性探測與解析技術能力，並獲致岩體開挖損傷帶之相關物理與水力等特性。

3.2.1.2. 研究內容

坑道開挖損傷帶之岩體物性，會與周圍完整岩體的特性不同 (Saiani, 2008, p803)，因此透過觀察或量測坑道壁至周圍岩體的物性變化特徵，可評估開挖損傷帶之分布情形。開挖損傷帶之調查方法相當多元，透過各類方法的相互印證，有助於掌握開挖損傷帶分布特性，因此挑選與發展各項開挖損傷帶之探測方法有其必要性。

本項目工作規劃為期 1 年，以既有坑道探測技術為發展目標，對開挖損傷帶評估技術投入先期探測技術能量。將以既有坑道作為測試基礎，利用地球物理探測技術進行技術評估與驗證，於 108 年度工作

成果完成後，根據技術發展實質成效，再據以討論後續規劃。相關工作規劃說明如下：

(1) 開挖損傷帶技術國際案例研析

蒐集國際間針對開挖損傷帶研究的相關案例，綜整探測技術與解析成果進行說明，參考國際間針對開挖損傷帶曾使用的地球物理探測技術，提供本土化調查技術項目選定與測試。

(2) 開挖損傷帶探測技術建立與測試

為建立開挖損傷帶之非破壞性探測與解析能力，本項目工作利用透地雷達探測技術、地電阻探測技術、震波層析成像技術、超音波探測技術等，針對既有坑道進行全坑道壁面探測及相關資料解析。

3.2.1.3. 預期研究成果

針對開挖損傷帶國際案例研析結果，建立國內研發架構與本土坑道非破壞檢測及解析技術。本項目工作 108 年度預期成果為：

(1) 完成國際開挖損傷帶研究發展的現況評估。

(2) 針對既有坑道完成各項地球物理探測試驗及相關資料解析，作為探討開挖損傷帶定性分布範圍評估之參考依據。

3.2.2. 裂隙參數分布特性統計研究

3.2.2.1. 研究目的

預測核種在岩體中可能的傳輸路徑，是放射性廢棄物深層地質處置的重要研究工作。考量花崗岩體為我國目前所優先發展處置技術的潛在處置母岩，其完整岩石(intact rock)的滲透係數小，孔隙率亦遠較其他沉積岩體低，流體不易以滲透方式於岩體中傳播，因此岩體間的破裂面即成為地下水流體傳輸之主要路徑，亦為評估放射性核種傳輸途徑的調查目標。

本項目工作基於 SNFD2017 參考案例的裂隙參數統計分析技術，應用於臺灣本島花崗岩體裂隙參數分析，以參數統計分析結果以及古應力特徵量測進行區域性解釋，探討裂隙參數空間分布特性。

裂隙參數的量測係為建構三維裂隙模型以及評估核種可能傳輸路徑中最基本的工作，透過對岩體露頭、坑道面及孔內裂隙參數的量測數據，運用地質統計技術，分析裂隙參數之統計特性，瞭解裂隙參數空間分布之異質性及異向性。配合地表應力脆韌性構造特徵量測工作，可用以探討裂隙形成機制、應力方向及裂隙參數分布隨空間變化特性，相關調查結果將可提供後續建構裂隙網路模型與地下水流場數值模擬，作為輸入參數資料，分析裂隙參數分布對於岩體內傳輸特性之影響。

3.2.2.2. 研究內容

本項目工作規劃為期 1 年，藉由地表裂隙量測方式，取得本島花崗岩裂隙參數分布數據與脆韌性構造特徵，探討裂隙參數分布隨空間變化特性以及區域性應力場分布，108 年度工作規劃說明如下：

(1) 裂隙量測地點之踏勘及評選

野外露頭裂隙測量範圍以本島東部地區出露面積較大的花崗片麻岩體為主，評選量測區域以便於施測，並且有足以產生代表性裂隙數目之自然露頭或是開挖剖面。

(2) 裂隙參數量測與分析

擬採用測線採樣法測量選定區域內裂隙參數，包括裂隙位置、裂隙走向、軌跡半長以及其他定量參數，用以繪製裂隙軌跡分布圖，並經過模擬統計分析過程計算參數之最佳分布。

(3) 區域古應力場量測分析

以現地應力特徵調查量測工作，配合其他地質構造截切關係，分析臺灣本島花崗岩體中所記錄之構造證據，並將後期斷層擦痕構造進行古應力反演，最後再整合各構造分期結果，得到相對應的演化關係圖。

(4) 裂隙參數與古應力場綜合性分析

藉由野外露頭裂隙量測、脆韌性構造與斷層擦痕量測，以及過去井測判識結果，搭配古應力場方向解析與時間序列演化，評估臺灣本島花崗岩體應力場分布狀態，綜合探討臺灣本島花崗岩體裂隙發育與地質構造的關聯性。

3.2.2.3. 預期研究成果

利用於臺灣本島花崗岩體量測裂隙參數統計分布結果，並且搭配古應力場反演模型進行綜合分析，本項目工作 108 年度預期成果為：

- (1) 完成本島花崗岩體量測區域裂隙參數特性統計分析，並建立離散裂隙網路參數集。
- (2) 完成區域古應力場分布，供後續建構裂隙網路模型與地下水流場數值模擬之用。

3.2.3. 裂隙岩體地下水流分析技術精進

3.2.3.1. 研究目的

本項目工作之計畫需求為：精進處置深度地下水流速(單位面積的流量)模擬結果的論證基礎，建置及留存相關數值模擬及其參數不確定性與敏感度分析的系統化論證文件；該地下水流速的數值為處置計畫之各項功能評估及安全評估的關鍵輸入參數。

持續精進「地下水流場模擬」及「參數不確定性與敏感度分析」，係 SNFD2017 報告之國際同儕審查結論中，明確建議臺灣後續應持續精進的研究項目，亦是各國目前持續精進中的研究項目。針對處置計畫而言，量化評估被深埋處置的核種在未來數十萬年間的可能遷移特性，例如其遷移至人類生活圈的可能需求時間及核種濃度，是決定處置設計及處置環境是否可符合處置安全性的最關鍵資訊，而地下水流場模擬是達成此關鍵資訊的必要手段。相關的量化評估，主要仰賴電腦程式的數值模擬。然而數值模擬具有其不確定性，不確定性的來源包含模擬過程所採用的概念及情境模式、參數(及條件)設定、電腦程式的選擇及使用等(Röhlig, 2015, p3)。

不確定性與敏感度分析是一體兩面的分析工作；其中，不確定性分析係藉由定性化的方式探討可能影響模擬結果的不確定性因子，而敏感度分析則透過實際的電腦模擬(或理論計算)，量化各不確定性因子的設定或輸入數值對模擬結果的影響程度(或稱為模擬系統的擾動應答分析)。由於即便針對同一數值模擬案例的輸出結果，所欲探討模擬結果的焦點亦可能有所不同(如壓力分布、鹽度分布、特定區域內的流速等)。因此，在進行不確定性與敏感度分析前，必須先針對模擬結果的討論主題，決定其「功能測度值(performance measures)」，方能聚焦模擬結果的討論及分析。針對處置計畫的地下水流場模擬而言，最關鍵的功能測度值為「流經預定處置位置(及深度)的地下水流速」，亦是各項功能評估及安全評估的關鍵輸入值(台灣電力公司，2017，c5.8)。

3.2.3.2. 研究內容

針對地下水流場模擬，本研究將以 TOUGH 系列軟體為主要數值模擬工具，探討參數不確定性與敏感度分析對其功能測度值的影響，用以加強模擬結果的論證基礎。本研究工作自 108 年起至 111 年止為期 4 年，主要將以 SNFD2017 報告之參考案例的地下水流場模擬經驗為基礎，進行模擬區域的變化(如包含海域及不同的模擬深度)、邊界條件的改變(如定水頭或無水流邊界條件)，及水文地質參數的變化(如多孔介質或裂隙岩體單元的水力傳導係數)。本研究工作 108 年度工作規劃說明如下：

- (1) 透過專家討論會議，決定模擬範圍、邊界條件及水力傳導係數變動範圍。
- (2) 本研究參數不確定性與敏感度分析將進行多組不同參數條件設定案例的數值模擬，各案例可能涉及百萬網格數以上的地下水流場模擬，須建立專用伺服器進行模擬分析，故伺服器之建置與調校為必要且重要的前置工作。
- (3) 製作三維數值模擬網格；本項目工作各案例在同一模擬軟體環境中將盡可能採用相同或類似的網格設定，進行參數不確定性與敏感度分析，以利聚焦於不同影響因子(如不同起始條件、邊界條件等)對功能測度值的影響分析。

3.2.3.3. 預期研究成果

本項目工作預期成果，將持續以 TOUGH 系列軟體進行不同功能測度值之不確定度與敏感度模擬分析，以強化模型的論證基礎。108 年度預期研究成果說明如下：

- (1) 建構具共識基礎之地下水流場模擬的參數及條件變動範圍
- (2) 製作百萬網格數規模的三維數值模擬網格，及電腦伺服器環境設定。

3.3. 長期監測

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，有關長期監測工作規劃如下：

3.3.1. 全球衛星定位連續監測與時序分析

3.3.1.1. 研究目的

為符合原能會公告之「高放射性廢棄物最終處置設施場址規範」之要求，場址應避免位於山崩、地陷或火山活動之虞的地區，以及地質構造有明顯抬升、沉降、褶皺或斷層活動變化的地區，並提供「候選場址評選與核定階段」所需之評選參考依據，本項工作針對臺灣東部地區花崗岩體之穩定性進行研究，延續 GPS 連續觀測站觀測數據，據以分析臺灣本島花崗岩體地表長期變化趨勢，探討臺灣本島花崗岩體區域之地殼變形，提供臺灣本島花崗岩體地區地表變形趨勢與長期穩定性評估之用，增加研判區域穩定性與建構區域地表應變模式。

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。本計畫由歷年 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。本項目工作將持續利用本計畫位於臺灣本島花崗岩體地區之 GPS 連續觀測站，進行觀測資料長期性資料解析，以期能更瞭解此區域地表變形趨勢，作為長期性地殼穩定性研究之參考依據。

3.3.1.2. 研究內容

自 101 年度起本計畫持續蒐集 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。

本項目工作為長期工作，將持續蒐集 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，並確保連續觀測站資料接收品質，提升資料可信度，逐年累積觀測資料與觀測數據分析，提供臺灣本島花崗岩體近年抬升或沉陷趨勢，據以探討臺灣本島花崗岩體區域地表的長期穩定性。108 年度工作規劃說明如下：

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

3.3.1.3. 預期研究成果

本項目工作預期研究成果為：藉由持續蒐集本計畫既有 GPS 連續觀測站資料，以獲得臺灣本島花崗岩體地表變形逐年累積之觀測數據，分析區域性地殼抬升或沉陷趨勢，進一步瞭解臺灣本島花崗岩體區域地表應變率變化情形，探討地殼於觀測期間內之變動特性，分析成果將可作為臺灣本島花崗岩體地區地殼變形長期穩定性研究評估之參考。108 年度預期成果說明如下：

- (1) 累積 GPS 連續觀測站之觀測資料及時間區間，提升資料解析能力，獲致臺灣東部花崗岩體區域之地表位移趨勢。
- (2) 持續進行 GPS 連續觀測站資料解算，獲致資料接收期間三維坐標成果並計算速度場解析，探討臺灣本島花崗岩體區域之速度場變化趨勢。

3.3.2. 微震監測及資料解析

3.3.2.1. 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。然而臺灣位處活躍的板塊交界帶，地震產生與岩體破裂彼此間的交互作用及關係亦相對複雜，難以劃定一特定的時間段及範圍，即可代表該區域的地震概況。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，並納入氣象局及其它單位的地震網資料，並建置提高資料處理效率的自動化流程，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。

此外，為了獲致斷層的衍生(derivation)與分布資訊及其活動潛勢，本項目工作將針對地震叢集進行分析，並嘗試透過其主震及餘震的地震序列之空間分布，觀察斷層可能之位態及衍生；亦精進震源機制解的解算技術，獲致更多的解算結果以提供區域地殼應力場分布之解算，並綜合分析震源機制解之結果、地震叢集的空間分布及區域地殼應力場分布，加強調查區域斷層衍生及分布的可信度，並獲致更多的潛在斷層分布及活動潛勢資訊，以作為候選場址評選的參考依據。

為了瞭解區域中不同岩體受震之影響性，本計畫全程之規劃將發展周遭噪訊分析技術(Ambient-Noise-Analysis)。此技術對淺層地殼剪力波速亦有較高的解析力，並透過其訊號連續性的優勢，可解算兩測站間表面波波速的連續變化，又因監測網間之兩兩測站所夾岩體不盡相同，因此可藉由觀測其表面波波速受震前後之連續變化，配合震源特性，如地震規模、破裂方向、震源位置等參數，瞭解區域中不同岩體受震之影響性。由於此分析技術的方法是將長時間的資料進行疊加，故進行持續監測以累積資料實為必要，且此技術的資料前處理及準備工作相當費工且費時，因此，全程規劃須先持續累積資料，並進行資料品質管控及修正等前處理工作，同時間透過文獻持續更新專業知識，並在逐年的規劃中進行實作以累積經驗，最終完成技術之建置。

3.3.2.2. 研究內容

本項目工作規劃將持續累積微震監測資料，進行地震資料前處理及解算，也針對地震叢集進行分析，並重新解算震源機制解分布狀況，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，本計畫規劃以 4 年的時間，建立自動化資料處理流程，以精進資料前處理的效率；並且利用既有的微震監測網地震波形資料，建立周遭噪訊分析技術，觀測受震前後表面波行經淺層地殼時的波速變化，瞭解區域中不同岩體受震的影響性。108 年度工作規劃說明如下：

(1) 持續累積微震監測資料

維持微震監測網的穩定作業，並將地震資料進行前處理及演算，包含波相檢拾 (waveform picking)、地震定位 (earthquake location)、波形反演 (waveform inversion) 等資料處理。

(2) 增加震源機制解的解算筆數，並針對地震叢集進行分析。

(3) 彙整既有地震分析資料，並進行系統化統計分析。

3.3.2.3. 預期研究成果

本項目工作預期成果，將持續累積微震監測網觀測資料，以提供臺灣本島花崗岩體更詳細的地震相關調查，並建立資料前處理的自動化流程，以提升資料處理的效率。此外，藉由建置周遭噪訊技術，以探討淺層地殼構造分布及岩體受震之影響性。最後，配合震源特性分析及周遭噪訊分析結果，瞭解臺灣本島花崗岩體地震的特性，並探討區域中不同岩體受震前後的變化。108 年度預期研究成果說明如下：

(1) 持續累積微震監測網觀測資料，並進行地震資料前處理與解算，獲致地震叢集分布。

(2) 完成地震叢集分析，評估潛在斷層可能的衍生及分布資訊。

(3) 完成既有地震資料的系統化統計分析(地震分布及規模之時空演化、歷年地震定位誤差值變化等)。

3.4. 岩石力學描述模型

3.4.1. 岩石力學調查技術演練與發展

3.4.1.1. 研究目的

國際上針對放射性廢棄物之最終處置，多以深層地質處置為主要的評估方案，而深層地質處置之概念係將放射性廢棄物放置於地下岩層適當深度中，利用天然障壁(母岩)以及工程障壁(緩衝材料、回填材料)之功能特性，達到圍阻與遲滯放射性核種之目的，如何決定最佳深度與選取合適岩層進行施工，主要取決於岩層的岩石力學特性，而透過岩石力學現地調查技術發展，可獲取不同岩層之參數特性，並提供後續場址描述模型、隧道設計與施工、地震剪力情節的安全評估工作使用。為因應未來候選場址或處置場址之調查任務，現地調查技術亟需更新與精進，以提供更為精確的數據資料與參數，補足目前工程設計與安全評估模型缺乏之模式驗證工作。

3.4.1.2. 研究內容

有鑑於國內目前未有候選場址，因此在無特定場址之前提下，將以蒐集本土現場岩類及目標處置岩類之岩石力學參數為先，並將相關數據匯入區域地質模型中，用以建立初階之地質描述模型，接著透過既有試驗設施與設備，發展實驗室與現地相關調查技術，包含現地應力調查技術、岩心樣本性質分析與量測及岩石力學相關地球物理井測技術等。本項工作將整合室內試驗與裂隙岩體的現地試驗數據資料，探討各項試驗量測誤差、獲得數據之代表性及不確定性。108年預計研究內容如下：

- (1) 蒐集本土現場岩類及目標處置岩類之岩石力學參數，並探討數據量測誤差及參數不確定性，以供後續年度建立初階地質描述模型與小尺度岩石力學模型。
- (2) 發展四軸井徑搭配孔內攝影量測技術，瞭解試驗場址之主要應力分布情形。
- (3) 進行岩樣實驗室試驗，量測其物理與力學特性。
- (4) 發展岩樣熱傳導特性量測技術。

- (5) 進行溫度井測試驗，瞭解不同岩層與地域之孔內溫度分布範圍與特性。
- (5) 進行自然伽馬井測試驗，建立不同岩性之自然伽馬數值分布範圍與特性探討。

3.4.1.3. 預期研究成果

- (1) 建立上述現地試驗項目(包含現地應力量測方法與孔內地球物理井測調查)之標準試驗程序與輸出資料之文件規範。
- (2) 完成上述現地試驗項目之技術演練，探討試驗技術限制及其獲得之參數代表性與試驗誤差。
- (3) 完成實驗室岩心樣本性質分析與量測(物理與力學特性)之標準試驗程序與輸出資料之文件規範，並探討現有室內分析參數數據之關聯性。
- (4) 完成不同岩層與地域之地溫梯度分布範圍與特性。
- (5) 完成不同岩層之自然伽馬分布範圍與特性。

3.4.2. 岩石力學場址特徵化技術與模式發展

3.4.2.1. 研究目的

岩石力學描述模型，係針對現地調查資料進行數據整合分析，從而獲取建置岩石力學概念模式所需之關鍵參數。岩石力學概念模式包含基本的力學及變形行為與岩石之熱傳特性及熱變形特性。變形行為係利用岩石的彈性參數(體積模數與剪力模數)描述岩體受力後之變形行為，以及利用其強度參數檢核受力後之破壞機制。而岩石在受熱過程中所產生的熱應力也會影響其破壞機制，因此熱性質也將一併考慮在本項建置技術中。

本項目工作自 108 年起至 111 年止為期 4 年，108 年主要為數據蒐集與參數分析階段，擬收集過去在臺灣山區不同岩層與不同深度之鑽孔岩心室內試驗結果及地表露頭分析結果，進行現地數據與參數分析，將依不同數據屬性分類(如依岩性、地質單元、地層層序或年代等)建立經驗公式，並探討過去室內試驗數據品質與經驗公式之正確性。後續工作將以前述成果，進行系統性綜整分析，產生岩石力學描述模型所需之參數集、建置岩石力學模型與導入場址模型所需之確認機制。本研究將彙整參考案例與測試區域之各關鍵項目成果，據以建置岩石力學概念模型，分析處置場址之應力分布情形與場址穩定性。

3.4.2.2. 研究內容

本研究將以目前 SNFD2017 參考案例之調查資料為基礎，持續蒐集岩石力學相關資料，108 年預計研究內容為：

- (1) 蒐集臺灣山區不同岩性之岩石力學資料，進行臺灣山區調查資料數據分析。
- (2) 蒐集國內外文獻資料，建立岩石力學描述模型之建置流程、瞭解所需具備之調查技術，並初步建立概念模型建置流程。
- (3) 進行不同岩性參數關聯性分析，建置本土化各種岩性的岩石力學參數轉換之經驗公式。

3.4.2.3. 預期研究成果

本項工作 108 年度預計成果為：

- (1) 建立岩石力學描述模型之建置流程與現地試驗程序。
- (2) 建置岩石力學關聯性分析與經驗公式，瞭解不同岩性之岩石力學參數轉換關係。
- (3) 完成不同尺度(實驗室與現地)之力學特性資料分析。
- (4) 探討參考案例岩體之應力分布特性研究。

4. 處置設施工程設計技術及安全評估技術精進

從 SNFD2017 報告之執行經驗計畫，可以確認處置技術與安全評估發展須隨處置進程滾動推進，逐步提升其可信度。而本計畫 3 項核心技術領域「區域特性調查」、「處置設施工程設計」及「安全評估」，亦須隨處置進程持續精進與整合。區域特性調查相關技術的發展，已規劃於第 3 章；而本章節將整合處置設施工程設計技術及安全評估技術精進，透過設計分析與安全評估的迭代回饋過程，結合性能評估與安全評估，逐步提升工程障壁系統之長期穩定性，同時亦可逐步降低不確定性。

透過 107 年度工作計畫執行過程，得知我國沸水式用過核子燃料之長度較瑞典用過核子燃料規格尺寸為長，若參照 KBS-3 的廢棄物罐設計高度則無法滿足國內處置需求。爰此，108 年度工作計畫將依循國內用過核子燃料特性條件，以 SNFD2017 報告所採用之設計為基準，研析我國用過核子燃料之尺寸改變，進而影響廢棄物罐高度等各處置單元規格變更之相關議題，因應廢棄物罐與緩衝材料規格變更所需之性能評估案例計算，配合國內地質特性等重要條件，持續深入探討處置設施之設計方案。為精進安全評估技術，亦將加強探討廢棄物罐與緩衝材料安全功能之相關內部作用及處置設施參考演化分析技術，並分別以腐蝕情節與剪力情節完成處置設施系統之安全分析，評估對關鍵群體之劑量與風險影響。圖 4-1 所示為綜整 108 年度「處置設施工程設計技術及安全評估技術精進」工作項目之關鍵路徑，可管控各工作項目執行成果與邊界條件、變數傳遞之一致性，逐步推動對模式與參數不確定性之探討。

章節	工作內容	日期	2019年度															
			一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月				
4.1	用過核子燃料特性研究與分析技術 探討我國用過核子燃料組件規格與瑞典SKB尺寸不同，進而影響工程障壁相關組件之設計。		↓															
4.2	工程障壁設計與性能評估 (1) 依我國用過核子燃料組件規格，進行廢棄物罐及內襯結構規格設計，以及緩衝材料於廢棄物罐周圍環狀塊體、廢棄物罐底部及頂部實心盤狀塊體之尺寸設計。 (2) 進行廢棄物罐抗圍壓及抗剪力位移之性能評估分析。 (3) 進行緩衝材料與回填材料防止沉陷及抵抗上舉之性能評估分析。		↓															
4.3.1	處置設施熱間距設計 重視國內地質之地溫條件，結合用過核子燃料衰變熱分析，依據不同廢棄物罐熱負載下降額度，深入探討計算處置孔間距之關鍵議題。			↓														
4.3.2	地下設施配置設計 (1) 完成處置設施配置設計，以及配置圖繪製。 (2) 進行活動斷層引致裂隙位移模擬，完成多次地震累積造成裂隙位移量評估。				↓													
4.4	水文地質演化趨勢分析 (1) 結合水文地質場址特徵化技術與模式發展，匯入處置設施配置設計圖，分析水文聯通路徑。 (2) 設定封閉後與當代環境條件相似期之邊界條件，執行穩態流場模擬，完成質點傳輸及功能測度值運算。																	
4.5	工程障壁參考演化分析 (1) 建立相關實驗包括：管流侵蝕、熱水力耦合試驗、氣體滲透試驗，完成緩衝材料及回填材料作用探討。 (2) 進行廢棄物罐剪力失效率分析，以及評估隨時間改變之同殼腐蝕深度變化。																	
4.6.1	核種釋出途徑分析 (1) 進行處置孔與裂隙截切之質點追蹤模擬及功能測度值運算。 (2) 進行開挖擾動帶對於處置設施外釋途徑之影響分析。																	
4.6.2	近場核種傳輸分析技術 建立近場二維核種擴散傳輸模式，並與國際案例進行評估與驗證。(Goldsim)																	
4.6.3	遠場核種傳輸分析技術 持續發展遠場核種傳輸技術，精進取樣分析功能，以及利用MARFA建立一維核種擴散傳輸模式並完成技術驗證。																	
4.6.4	生物圈核種傳輸分析技術 (1) 建立地表系統環境介質區塊演化模型，如陸地區塊及水域區塊模組，並進行地表環境介質核種活度濃度分布計算。 (2) 以食物鏈概念進行陸地生態系統潛在輻射曝露途徑分析。 (3) 根據上述成果，交叉分析計算出生物圈劑量轉換因子BDCF，以及找出關鍵曝露群體。																	
4.7	情節發展與案例分析技術 (1) 分析適用於本土性之通用型工程障壁(廢棄物罐、緩衝材料與回填材料)之預期安全功能指標。 (2) 依各處置元件不同的失效模式與可能的演化情形，發展廢棄物罐腐蝕之主要情節。 (3) 依外部條件地震條件，發展地震相關之干擾情節。 (4) 整合核種傳輸分析技術，設定情節之案例分析，進行近場、遠場、生物圈之核種傳輸計算，完成劑量與風險分析。																	
關鍵路徑																		

圖 4-1：108年度工程技術與安全評估技術精進工作計畫關鍵路徑圖

4.1. 用過核子燃料特性研究與分析技術

4.1.1. 核種存量與衰變熱分析技術

4.1.1.1. 研究目的

透過核反應器的設計，核子燃料內的可分裂核種經吸收中子後，可發生連鎖的核分裂反應，並產生許多分裂產物與銅系元素等放射性核種，這些放射性核種存量以及在衰變過程中所釋出的熱能量(以下簡稱衰變熱)，將是後續處置設施工程設計與安全評估所需要的重要資訊。在 SNFD2017 報告中，採用平均燃耗概估值(37 GWd/MtU)與冷卻時間 50 年的條件，計算單一廢棄物罐裝載用過核子燃料之最大總衰變熱為 1,315 W；然影響核種存量與衰變熱分析之重要條件包括燃料設計、退出燃耗、以及冷卻時間等，如以處置設施運轉時間為 2055 年以及運轉 50 年來看，搭配合適的裝載排程規劃，合理的燃料冷卻時間應約為 70 年至 80 年之間，故預期 SNFD2017 所評估的單一廢棄物罐之初始核種存量以及衰變熱將具有一定的保守度。基於考量我國地表與母岩溫度較瑞典、芬蘭等國家高，預期處置設施近場受到衰變熱之分布影響將較為明顯，此亦將是處置孔間距設計分析之關鍵議題，為此，須持續精進對用過核子燃料之核種存量與衰變熱分析技術，另本項目成果將提供第 4.3 節處置設施熱間距設計分析及第 4.7.3 節封閉後安全評估劑量與風險之案例計算。

4.1.1.2. 研究內容

因應 BWR 燃料長度及廢棄物罐尺寸修訂，本工作項目先行規劃就 BWR 燃料之燃料設計、退出燃耗、以及冷卻時間與衰變熱的敏感度分析，瞭解衰變熱特性曲線，組合以上參數的影響評估與廢棄物罐燃料裝載排程規劃，以期進一步更新燃料射源項衰變熱邊界條件，並依據運轉時程，初步規劃廢棄物罐裝填用過核子燃料之排程，分析單一廢棄物罐之最大總衰變熱與核種存量，108 年規劃工作內容為：

- (1) 進行核一、二廠用過核子燃料之使用歷程數據更新與初步規劃廢棄物罐燃料裝載排程。

- (2) 利用核種生成、衰變等機制，採用具備遷移與截面處理程式進行模擬計算，分析核一、二廠用過核子燃料之燃料設計、退出燃耗、以及冷卻時間與衰變熱敏感度測試，及其關係曲線。
- (3) 結合上述各項參數的組合影響評估與排程規劃，評估出合理的燃料射源項與衰變熱邊界條件。

4.1.1.3. 預期研究成果

- (1) 更新統計至 2017 年 12 月底之退出用過核子燃料使用歷程數據，並建立核一、二廠的用過核子燃料在不同燃料設計、不同退出燃耗、以及不同冷卻時間下的衰變熱敏感度分析以及衰變熱關係曲線。
- (2) 依據運轉時程，初步規劃廢棄物罐裝填用過核子燃料之排程，分析單一廢棄物罐之最大總衰變熱與核種存量。

4.1.2. 核臨界安全分析技術

4.1.2.1. 研究目的

用過核子燃料的最終處置是將其放置在由鑄鐵與銅所構成的廢棄物罐中後，存放在地質條件穩定的處置場中。由於用過核子燃料內仍存在可分裂核種，在吸收中子後，可發生連鎖的核分裂反應。連鎖的核分裂反應若持續發生可能導致放射性核種的外釋或人員的傷害。避免用過核子燃料發生臨界事件為確保用過核子燃料最終處置的安全要求之一，國內外相關法規對此均有規定。對於用過核子燃料放置在最終處置場中在正常運轉與意外狀況下的臨界安全問題，必須經由建立妥善的核臨界分析技術，計算廢棄物罐的中子有效增值因子 (effective multiplication factor)，確認其符合法規的限值。

4.1.2.2. 研究內容

依據現有核一、二廠用過核子燃料設計型式，建立其廢棄物罐的臨界安全分析模型，保守考慮核燃料初始濃縮度、可燃毒物含量等分析條件，分別找出 BWR 用過核子燃料反應度最大的核燃料型式作為設計基準燃料，然後進行與廢棄物罐設計參數相關的靈敏度分析，以最保守的參數組合計算中子有效增殖因子。依據法規要求在包含不準度與計算偏差後的中子有效增殖因子必須小於 0.95，對於所使用的臨界安全分析程式必須量化其計算偏差與不準度。本項分析工作將使用 MCNP 程式為分析工具，必須與臨界實驗做驗證以量化 MCNP 應用於臨界分析的偏差與不準度。參考國際上現行的作法必須考慮燃耗額度 (burnup credit) 方能符合法規要求，因此將會進行與燃耗額度相關的參數分析。最後將制訂 BWR 用過核子燃料的裝載入廢棄物罐的最小燃耗限值，只要用過核子燃料的燃耗退出燃耗大於最小燃耗限值，即可以符合臨界安全法規的要求。

108 年規劃工作內容為：

- (1) 建立核一、二廠不同型式之用過核子燃料裝載入廢棄的 MCNP 臨界安全分析模式，計算其中子有效增殖因子，分別篩選出 BWR 設計基準燃料。

- (2) 以設計基準燃料進行與廢棄物罐設計參數相關的靈敏度分析，找出最保守的參數組合。

4.1.2.3. 預期研究成果

108 年度預期成果說明為：

- (1) 確認核一、二廠 BWR 用過核子燃料的設計基準燃料。
- (2) BWR 用過核子燃料的設計基準燃料與廢棄物罐設計參數的保守參數組合。

4.2. 工程障壁設計與性能評估

4.2.1. 廢棄物罐設計

4.2.1.1. 研究目的

廢棄物罐基本功能，是將用過核子燃料及其所含放射性物質包封在罐內，不使其中的核種釋出至生物圈，並維持運轉過程中符合輻射安全的法規要求。故廢棄物罐須滿足的性能需求包括：可避免入滲的地下水直接與用過核子燃料接觸、具長時間的力學結構完整性、具有一定程度抗環境腐蝕的能力、對其他工程障壁材料不致產生不良影響，在廢棄物罐腐蝕後讓核種處於還原環境等。

國際上對於廢棄物罐通常採用複合結構設計：以內襯結構作為力學穩定支撐、而外殼採用耐腐蝕材料；其中，內襯需考慮用過核子燃料特性，在結構穩定、貯存空間最大化及整體成本考量之下取捨。

經評估我國用過核子燃料的尺寸影響，得知我國沸水式用過核子燃料之長度較瑞典用過核子燃料規格長，故 108 年度以 SNFD2017 報告所採用之設計為基礎，依照我國 BWR 燃料束尺寸，訂定內襯方管、上下蓋板及廢棄物罐整體長度規格。

4.2.1.2. 研究內容

廢棄物罐內襯概念設計過程，包括：設計需求研究、決定可行之材料，依照我國廢棄物罐特性決定內襯尺寸與空間設計等。本年度工作針對 107 年度研究成果所擬定之國內用過核子燃料的總長度，並依據 SNFD2017 報告中的廢棄物罐材料規格，進行適用本土化燃料的內襯設計。

- (1) 基於 KBS-3 處置概念，並針對我國 BWR 用過核子燃料的總長度進行內襯結構設計需求研究。
- (2) 建立廢棄物罐高度、內襯結構之設計圖雛形，並以工程製圖軟體完成設計圖繪製。

4.2.1.3. 預期研究成果

- (1) 基於 KBS-3 處置概念，完成廢棄物罐內襯高度設計變更，以便能容納國內用過核子燃料。
- (2) 研析國際資料確認燃料安裝所需間隙，訂定內襯方管、上下蓋板長度規格，完成廢棄物罐高度、內襯結構之設計圖雛形。

4.2.2. 緩衝材料設計

4.2.2.1. 研究目的

緩衝材料主要設計為壓實成特定密度條件之膨潤土，安裝於處置孔內並置於廢棄物罐與母岩之間，為多重障壁概念之重要安全因子之一。設計時需考量緩衝材料應具備之功能，如需滿足限制平流傳輸、抑制微生物活性、膠體滲濾性質、緩衝廢棄物罐外部之力學影響(剪力及外在壓力負載)、維持廢棄物罐保持中立位置及維持本身性能之長期穩定性等設計需求，提供圍阻及遲滯功能之目的。

4.2.2.2. 研究內容

本項目工作參照第 4.2.1 節之廢棄物罐設計，基於 KBS-3 處置概念與安全功能指標需求，修訂處置孔內緩衝材料之尺寸規格設計，包括廢棄物罐周圍環狀塊體、廢棄物底部以及頂部之實心盤狀塊體，透過本項工作項目的執行，亦可完成處置孔尺寸設計，提供後續工作項目進行工程障壁性能評估作業。

- (1) 依循第 4.1 節用過核子燃料特性及第 4.2.1 節廢棄物罐規格設計，並基於 KBS-3 設計基準與安全功能，訂定緩衝材料功能與設計需求。
- (2) 依循緩衝材料設計需求，設計廢棄物罐周圍環狀緩衝材料塊體、廢棄物底部以及頂部之實心盤狀塊體之尺寸與密度條件。
- (3) 依據上述緩衝材料設計規格，計算緩衝材料安裝後，廢棄物罐頂部、底部及廢棄物罐周圍緩衝材料之飽和密度，以確認可符合設計需求。

4.2.2.3. 預期研究成果

依據 BWR 用過核子燃料尺寸所訂定之設計參數以及廢棄物罐設計規格，完成廢棄物罐周圍環狀塊體、廢棄物底部以及頂部之實心盤狀塊體之緩衝材料設計規格，並以工程製圖軟體完成處置孔設計圖繪製。

4.2.3. 廢棄物罐抗圍壓性能評估

4.2.3.1. 研究目的

廢棄物罐的力學失效因素包括圍壓與剪力位移，圍壓主要考量處置孔內膨潤土之回脹壓力與靜水壓力，由於我國位處亞熱帶地區，應不致有冰層載重現象，因此，無須像瑞典、芬蘭考慮冰層導致的壓力。本項性能評估，將針對各廢棄物罐內襯概念設計，依照設計基準需求、配置概念設計所決定的靜水壓力，以及與膨潤土概念設計之回脹壓力，進行抗圍壓安全係數分析。

4.2.3.2. 研究內容

本項目工作將依第 4.2.1 節設計成果，考量緩衝材料在地下處置環境受到靜水壓力與緩衝材料造成之回脹壓力，施加於廢棄物罐之均勻圍壓作用。另外，考量緩衝材料與其再飽和過程，以及在緩衝材料受侵蝕狀況下，可能發生不均勻圍壓的現象，將廢棄物罐形成彎矩作用的不利效應，故 108 年度將進行均勻圍壓與不均勻圍壓的情節建立與應力分析，以瞭解各案例對於廢棄物罐可能造成之不利影響，並且確認其具有安全餘裕之設計，108 年規劃研究內容為：

- (1) 依據廢棄物罐之設計，以有限元素分析軟體進行廢棄物罐均勻圍壓分析，確認其符合設計準則之規定，並瞭解廢棄物罐所能承受之圍壓。
- (2) 藉由特定不均勻圍壓案例，確認廢棄物罐在承受彎矩、剪應力情形下，所能表現之力學性能。
- (3) 確認廢棄物罐之設計，如未能符合圍壓分析之設計準則，則重新進行設計，以符合廢棄物罐安全性考量。

4.2.3.3. 預期研究成果

- (1) 藉由有限元素數值分析軟體，進行緩衝材料因回脹壓力影響對於廢棄物罐造成不均勻圍壓之分析案例，
- (2) 廢棄物罐在符合圍壓設計準則下，進行廢棄物罐於處置後靜水壓力及回脹壓力所產生之均勻圍壓分析，確認廢棄物罐之安全性。

4.2.4. 廢棄物罐抗剪力位移之性能分析技術

4.2.4.1. 研究目的

廢棄物罐力學支撐主要由內襯提供，但為避免剪力斷裂，複合結構的廢棄物罐外殼，通常選用延展性佳的材料，以便能包覆變形後的廢棄物罐內襯。廢棄物罐抗剪力性能分析，通常依據設計基準需求，例如瑞典設定 5 cm 剪力位移需求，在數值分析後，由廢棄物罐材料容許應力，提供設計方案之安全係數，此長期性能評估亦須考慮潛變效應，結合於數值分析中，驗證廢棄物罐在演化的各階段安全性。

4.2.4.2. 研究內容

SNFD2017 報告主要參照瑞典 KBS-3 處置概念所建立之廢棄物罐為研究對象，以有限元素分析軟體進行廢棄物罐抗剪力位移性能評估，瞭解瑞典 SKB 所設計之廢棄物罐抵抗剪力位移之功能，本項目工作目標，主要為確保依據我國燃料束型式所進行廢棄物罐之設計，其廢棄物罐之內襯結構、銅殼等組件與緩衝材料之設計於剪力位移影響下，仍處於安全範圍內，並且確認廢棄物罐在使用銅殼作為廢棄物罐包封材料，其在長期之潛變作用下，仍能保持完整性。108 年度規劃工作為：

- (1) 參考 SNFD2017 報告提出廢棄物罐受地震裂隙位移影響之數值分析成果，並且依據廢棄物罐概念設計，進行廢棄物罐剪力位移之性能分析。
- (2) 考量銅殼之材料潛變行為，進行處置孔內之剪力位移分析，其對於廢棄物罐所產生之作用。
- (3) 藉由剪力位移分析，確認廢棄物罐及緩衝材料之設計，是否符合安全餘裕範圍內，如未符合設計準則，則重新修改設計內容。

4.2.4.3. 預期研究成果

- (1) 以有限元素數值分析軟體，考量地震引致裂隙剪力位移量，在數值建模過程中，直接設定緩衝材料與廢棄物罐受裂隙截切後之網格位移變化，進行廢棄物罐抗剪力位移之性能分析。

- (2) 考量銅殼因長期潛變行為影響對廢棄物罐所造成之反應，確認廢棄物罐符合性能要求。

4.2.5. 未飽和膨潤土特性分析

4.2.5.1. 研究目的

本項目工作為探討未飽和之膨潤土受力後之力學行為，廢棄物罐下方的膨潤土主要功能是防止廢棄物罐與母岩直接接觸，緩衝材料受到廢棄物罐以及回填材料之重量後，除了根據不同初始飽和度產生不同之瞬時變形量，後續吸水導致緩衝材料飽和度變化及產生回脹壓力，因此需進行緩衝材料之變形分析，以確認符合安全功能。

本項目工作在中長期技術發展策略上，希冀透過本項技術發展，掌握未飽和膨潤土之力學特性，並藉由數值模擬軟體 FLAC3D 建立處置孔模型，以模擬處置孔中之未飽和膨潤土受力後材料特性，並更進一步考量水流進入處置孔造成之回脹壓力、飽和度變化等影響。

4.2.5.2. 研究內容

本研究以適用於未飽和土壤之 BBM (Barcelona Basic Model) 組成模型進行緩衝材料分析，BBM 組成模型由 Alonso(1990)所提出，其由 MCC (Modified Cam-Clay) 延伸而來，藉由加入吸水力 (suction) 參數將 MCC 延伸為 BBM 組成模型，因此 BBM 破壞準則 (failure criterion) 中將不飽和土壤中含水量影響強度納入考量，於 p-q-s 三維空間中可以形成一破壞曲面，而於 p-q 平面上之投影面積隨著 s 值降低而縮小，反應飽和土壤剪力強度較低之物理特性。本研究 108 年規劃研究內容：

- (1) 透過 FLAC3D 內建程式語言 FISH 完成 BBM 匯入 FLAC3D 中之工作，並與文獻比較確認程式碼之正確性。
- (2) 依照第 4.2.1 節與第 4.2.2 節的設計參數，於 FLAC3D 中建立處置孔幾何模型，並模擬緩衝材料初始狀態下，承受廢棄物罐本身自重，以及處置孔上方回填材料自重產生之瞬時變形量分析。
- (3) 考量地下水流經由母岩裂隙進入緩衝材料中，探討緩衝材料飽和度改變進而產生回脹壓力，並結合廢棄物罐本身自重，以及處置孔上方回填材料自重的影響，評估緩衝材料變形量。

4.2.5.3. 預期研究成果

- (1) 依據第 4.2.1 節與第 4.2.2 節之設計參數，完成緩衝材料受力後引致瞬時變形量評估。
- (2) 完成緩衝材料未飽和階段下，產生之回脹壓力大小與分布，以及變形量評估。
- (3) 確認廢棄物罐下部區域的緩衝材料可具備維持廢棄物罐定位符合性能要求。

4.2.6. 緩衝材料與回填材料性質特性分析

4.2.6.1. 研究目的

回填材料必需有足夠對應的膨脹壓力以抵抗緩衝材料回脹/擴張的作用，需使緩衝材料飽和密度維持在特定條件，以維持其原本的設計需求。可基於緩衝材料的回脹特性及回脹壓力，與回填材料的可壓縮性，來計算緩衝材料因回脹/擴張而產生的上舉作用造成的密度損失程度，為研究緩衝材料因回脹上舉擠出處置孔的現象，本研究分別利用解析解及數值模型，來評估回填材料抵抗緩衝材料回脹上舉之能力。

4.2.6.2. 研究內容

在處置場長期安全考量下，緩衝材料之設計需求，主要與其回脹壓力及水力傳導係數條件有關，而地下水質亦影響回脹壓力及水力傳導性質。本研究考量地下水條件對回脹壓力及水力傳導係數之影響，量測 MX-80 型膨潤土於不同密度及水質條件下之回脹壓力及水力傳導係數，以建立我國本土緩衝材料數據資料，可提供緩衝材料設計、緩衝材料設計規格驗證、及數值模擬所需之水力及力學參數之用。

108 年規劃研究內容為：

- (1) 以 FLAC3D 及解析解計算回填材料抵抗緩衝材料膨脹上舉應力分析，提供維持緩衝材料體積之性能驗證說明，以確認緩衝材料上區域厚度設計及回填材料密度設計符合安全功能需求。
- (2) 為探討緩衝材料滿足避免平流傳輸之安全功能要求之低限值所對應之密度範圍，設定試驗最低密度 $1,000 \text{ kg/m}^3$ ，及膨潤土本身之最大夯實密度條件約為 $1,700 \text{ kg/m}^3$ 之 MX-80 型膨潤土，分別以水質條件為純水、不同濃度比例之海水條件下，進行回脹壓力及水力傳導係數試驗，以緩衝材料尺寸與密度設計規格對應回脹壓力試驗結果，確認緩衝材料規格符合可滿足安全功能回脹壓力要求，即限制回脹壓力避免造成廢棄物罐及周圍處置母岩額外壓力、抑制微生物活性、膠體過濾等功能；以緩衝材料尺寸與密

度設計規格對應水力傳導係數試驗結果，確認緩衝材料規格符合避免平流傳輸之安全功能要求。

4.2.6.3. 預期研究成果

- (1) 完成目前回填材料設計規格之驗證方法建立，計算回填材料抵抗緩衝材料上舉能力分析，評估回填材料設計規格符合設計及安全功能需求。
- (2) 完成 MX-80 型膨潤土於乾密度 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 至 $1,700 \text{ kg/m}^3$ 間，且水質條件為純水、不同濃度比例之海水條件下之回脹壓力及水力傳導係數試驗，並評估緩衝材料尺寸及密度設計規格對應回脹壓力及水力傳導係數，可符合緩衝材料設計及功能安全需求。

4.3. 地下設施設計

4.3.1. 處置設施熱間距設計

4.3.1.1. 研究目的

由於我國地溫梯度高於瑞典、芬蘭等國家，預期處置設施近場受到衰變熱之分布影響將較上述等國明顯，且配合第 4.1 節之衰變熱分析技術精進成果，有必要重新調整處置孔間距之設計。為此，本項目工作將重新分析處置孔熱間距，依據 SNFD2017 報告的經驗回饋，深入探討數值模型之參數敏感度。同時，依據其計算的單一廢棄物罐之最大總衰變熱，並擴大考量國內地質數據的分布範圍。

4.3.1.2. 研究內容

藉由熱傳導(heat conduction)方程式計算分析，提出在最大總衰變熱下，合適的處置孔間距設計。

- (1) 本項工作將以 SNFD2017 報告為基礎，以不同地溫梯度條件下進行熱間距之解析解(A analytical solution)評估，計算在特定衰變熱功率之下的處置孔間距。
- (2) 以較精確之分析程式計算膨潤土與母岩之溫度分布，作為確認解析解之可信度及餘裕之評估依據。
- (3) 依據不同廢棄物罐熱負載變化，重新計算處置孔間距。

4.3.1.3. 預期研究成果

依據單一廢棄物罐之最大總衰變熱，擴大考量國內地質數據的分布範圍，以緩衝材料不得超過 100°C 之安全功能指標，完成處置孔間距設計。雖然現階段尚未進行不確定性分析，後續將參考國際相關分析經驗，探討目前分析方法所需要的餘裕，以進行處置設施熱間距設計。

4.3.2. 地下設施配置設計

4.3.2.1. 研究目的

由於地下設施的安全性及效能可能受到地下水流動、岩石應力、地質構造等外在環境影響，因此除透過工程障壁設計以外，需仰賴配置設計方案降低外在環境對地下設施之影響。地下設施包括處置孔、處置隧道、主隧道、斜坡道、通風豎井及相關之連通隧道等。地下設施須具備工程障壁系統安裝之功能，須依場址地質特徵條件與未來演化環境的需求進行規劃設計，決定適宜的深層處置深度、分析應力、水流參數條件設計處置隧道與處置孔之位置，提供工程設計。

4.3.2.2. 研究內容

本項目工作考量岩脈、斷層、現地應力與地下水的影響，完成處置區域配置概念設計及相關設計圖檔，並且蒐集及彙整國際花崗岩地下設施設計需求規範、國內花崗岩區域之影響因子與條件、水文環境資料、隧道鑽探施工及高放射性廢棄物最終處置之相關法規，作為後續訂定地下設施設計需求之參考，後續亦將持續發展技術以符合高放射性廢棄物放置後 50 年內可安全取出。108 年度規劃工作為：

- (1) 蒐集國際上花崗岩地下設施設計需求規範，以及彙整國內對於隧道、鑽探施工之法律規範，以作為後續設定地下設施設計需求規範之參考。
- (2) 依照用過核子燃料數量，評估所需處置孔總數以及熱間距，估算所需母岩空間餘裕，評估處置設施範圍。
- (3) 依據離島結晶岩區測試區之地質資料，考量 EFPC 準則等因素，評估處置區塊(panel)位置、方位與數量。
- (4) 利用 3DEC 進行地震引致裂隙位移模擬，並考量岩脈、斷層等構造的影響，亦將完成多次地震累積造成裂隙位移量評估。
- (5) 依照裂隙受震位移模擬成果，並加以探討裂隙位態於截切率分析影響，進而微調處置孔的配置。

4.3.2.3. 預期研究成果

- (1) 完成地震引致裂隙位移分析，並依分析結果進行位置與設置之調整。
- (2) 以離島結晶岩區測試區之地質資料，完成地下設施配置設計方案及其相關圖檔。

4.4. 水文地質演化趨勢分析

4.4.1. 地下水流場演化分析

4.4.1.1. 研究目的

為了提供緩衝材料侵蝕、廢棄物罐腐蝕及放射性核種傳輸於整個安全評估過程中所需之地下水流特性參數，必須基於離島結晶岩測試區之水文地質特徵，並考量地下設施配置設計方案，針對隨外部條件變化之地下水流場進行分析，藉以獲得處置設施周圍與遠場之地下水流場演化趨勢。

4.4.1.2. 研究內容

SNFD2017 報告引進瑞典 SKB 所發展之 DarcyTools 模擬程式，並透過國外專家指導完成離島結晶岩測試區之地下水流場分析。為持續精進地下水流場分析技術，本工作目標為持續以 DarcyTools 進行不同模式之運算及分析，針對外部條件影響，以離島結晶岩測試區為研究對象，進行封閉後及冰河期海平面下降案例之地下水穩態流場模擬分析，108 年規劃研究內容為：

- (1) 基於離島結晶岩測試區之水文地質概念模式及其水力特性參數，完成封閉後與當代環境相似階段及海平面下降案例之穩態地下水流場分析。
- (2) 基於離島結晶岩測試區之離散裂隙網路以及地下處置設施之配置設計方案，並精進 SNFD2017 技術成果，導入開挖損傷帶之結構，精進地下水流場分析技術。
- (3) 基於離島結晶岩測試區之地質特徵及離散裂隙網路資訊，並回顧前期計畫技術成果，探討水文地質模式參數設定之合理性，自主執行遠場地下水流模擬及分析技術。
- (4) 建立考量鹽度耦合之地下水流場模擬分析技術，並依據對應外部條件設定合理之鹽度及水流邊界條件，執行地下水穩態流場模擬。

4.4.1.3. 預期研究成果

- (1) 完成岩體水文地質參數轉換及設定，並進行地質圈之流場演化趨勢分析。
- (2) 完成封閉後及海平面下降案例之地下水穩態流場模擬及流場資訊分析。
- (3) 完成處置設施及開挖損傷帶等近場結構導入及確認，並進行處置設施周圍之流場演化趨勢分析。
- (4) 完成考量鹽度耦合之地下水流場模式建置及流場分析。

4.5. 工程障壁參考演化分析

4.5.1. 緩衝材料與回填材料參考演化

4.5.1.1. 研究目的

基於深層地質處置的安全評估時間尺度長達 100 萬年，故透過處置設施演化評估技術，運用系統性分析方法瞭解處置設施的總體演化，並分析各項環境條件對處置設施的長期演化影響。108 年度研究將針對處置設施封閉初期之管流侵蝕作用、未飽和水份傳輸作用，及廢棄物罐破裂之特殊情節下於緩衝材料中產生之氣體遷移作用，進行相關試驗規劃及研究成果說明。相關研究工作說明如下：

- (1) 在處置設施封閉初期，緩衝材料處於未飽和的階段，當地下水流從岩層裂隙流入處置孔，將有可能在膨潤土內部建立管流通道，膨潤土可能會受水流影響，發生侵蝕作用，造成緩衝材料的充填質量流失；為評估未飽和階段之水流侵蝕作用是否影響緩衝材料之設計功能，因此，設計管流侵蝕試驗，考量水質及水流條件，分析 MX-80 型膨潤土流失情形。
- (2) 為瞭解緩衝材料之未飽和條件下之水份傳輸，考量廢棄物罐衰變熱、地下水入侵及膨潤土遇水膨脹之力學作用，本研究建置小型熱-水-力耦合試驗設備，以試驗結果分析熱-水-力耦合作用影響下，緩衝材料之濕度分布及膨脹壓力變化之情形。
- (3) 假設廢棄物罐銅殼破損造成地下水接觸廢棄物罐之鑄鐵內襯，而導致腐蝕生成氫氣，為探討氣體是否由緩衝材料孔隙間擴散，或者因緩衝材料阻擋而無法逸散，累積至高壓後於緩衝材料內形成突破氣體通道，進而影響其遲滯安全功能。本研究藉由建立氣體滲透實驗，以提供安全評估論證氣體遷移行為對處置安全之影響。

4.5.1.2. 研究內容

基於前述說明，108 年度工作內容包括：

- (1) 利用 107 年度建立之管流侵蝕試驗設備，進行純水及合成地下水條件之管流侵蝕試驗，探討 MX-80 型膨潤土受不同水質之管流

侵蝕作用下膨潤土流失率，並觀察膨潤土受不同水質造成之管流變化。

- (2) 延續 107 年度建立之小型熱-水-力耦合試驗，於膨潤土塊體內以加熱器模擬廢棄物罐衰變熱，設備外圍以水浴控制邊界溫度，並於試體外圍注入純水，利用溫度、壓力、相對濕度感測器量測未飽和膨潤土試體受熱-水-力作用下，其濕度分布及膨脹壓力變化。
- (3) 延續 107 年度建立之氣體滲透試驗設備，進行純膨潤土及混合 30%砂膨潤土試體之氣體滲透試驗，探討廢棄物罐破損後鑄鐵內襯腐蝕產氣條件下，氣體遷移作用對緩衝材料影響，取得氣體傳輸特性曲線、突破壓力及氣體滲透率(Permeability)等參數，探討氣體傳輸後之緩衝材料自癒能力。

4.5.1.3. 預期研究成果

- (1) 完成純水及合成地下水之管流侵蝕試驗，並與瑞典 SKB 研究報告中的管流侵蝕試驗結果比對。
- (2) 完成小型熱水力耦合試驗，並針對試驗數據取得之濕度分布變化及膨脹壓力變化結果，分析熱-水-力作用對水份傳輸及膨脹之說明。
- (3) 完成純膨潤土及混合 30%砂之膨潤土試體氣體滲透試驗，取得氣體傳輸特性曲線、突破壓力及氣體滲透率等參數，探討氣體傳輸後之緩衝材料自癒能力。

4.5.2. 廢棄物罐參考演化

4.5.2.1. 研究目的

為瞭解廢棄物罐在長久的處置時間可能受到之各項作用，本研究以演化時間框架探討廢棄物罐受周圍處置環境之影響，包括地下水造成的腐蝕作用、周圍裂隙位移作用造成的剪力作用等。在中長期技術發展策略上，希冀透過本項技術發展，可提供後續進行情節發展與案例建構之依據。

4.5.2.2. 研究內容

本項目工作主要依據地下水流場演化趨勢分析，以及依據緩衝材料與回填材料參考演化，獲取廢棄物罐性能演化之評估結果，計算廢棄物罐失效率。108年工作項目為：

- (1) 廢棄物罐與裂隙截切之剪力失效評估技術是處置設施配置設計的關鍵環節之一。須依據 DFN 實現值、處置孔、斷層構造、裂隙剪力位移特徵、截切分析、區域地震特性、處置隧道與廢孔準則等地質、幾何與設計條件，進行廢棄物罐剪力失效評估，並建立百萬年尺度的廢棄物罐失效機率模式，DFN 實現值需要進行多次模擬以取得具代表性之結果，瞭解模擬結果期望值與模擬次數之關係。
- (2) 廢棄物罐之腐蝕失效評估技術係針對長期腐蝕作用進行腐蝕評估。長期腐蝕作用之主要腐蝕劑來源來自地下水中的腐蝕劑，在還原環境時，關鍵腐蝕劑主要為硫化物，並假設硫化物到達銅罐表面後即完全反應。故於安全評估中，將著重探討硫化物透過溶質傳輸到達廢棄物罐表面之通量，因此在不同處置孔中會因水流的溶質傳輸率造成不同程度銅殼耗損的腐蝕速率；然而，封閉初期至百萬年的水流參數會隨著時間變化，因此係依據不同時期之水流參數變化，探討各處置孔之廢棄物罐銅殼腐蝕狀況及演化。

4.5.2.3. 預期研究成果

- (1) 完成廢棄物罐剪力失效率分析。
- (2) 依據地下水流場、緩衝材料與回填材料參考演化，評估隨時間改變之銅殼腐蝕深度變化。

4.6. 核種傳輸分析技術

4.6.1. 核種釋出途徑分析

4.6.1.1. 研究目的

在花崗岩體中，地下水將主要藉由連通裂隙進行流動，因此，探討放射性核種於潛在廢棄物罐破壞位置釋出後之傳輸途徑及特性，將可供近場、遠場、生物圈核種傳輸計算之使用。

4.6.1.2. 研究內容

本工作於 108 年度規劃項目將結合第 4.3.2 節分析裂隙與廢棄物罐的截切關係、第 4.4.1 節之地下水流場演化趨勢分析、以及依據第 4.5.2 節獲得潛在廢棄物罐的破壞數量及位置，進行質點追蹤分析方法，以計算放射性核種從處置設施釋出後之功能測度值。

- (1) 連結第 4.4.1 節之分析技術，運用 DarcyTools 進行處置孔與裂隙截切之質點追蹤模擬，並計算潛在傳輸路徑之功能測度值。
- (2) 連結第 4.4.1 節之分析技術，基於導入開挖損傷帶之流場結果，運用 DarcyTools 進行質點經由處置隧道底部開挖損傷帶與裂隙截切之傳輸路徑追蹤模擬，並計算潛在傳輸路徑之功能測度值。

4.6.1.3. 預期研究成果

- (1) 完成處置孔與裂隙截切之質點追蹤模擬、釋出途徑分析及功能測度值運算。
- (2) 完成處置隧道底部開挖損傷帶之質點追蹤模擬、釋出途徑分析及功能測度值運算。

4.6.2. 近場核種傳輸分析技術

4.6.2.1. 研究目的

於 SNFD2017 中，考量廢棄物罐之圍阻安全可能失效，針對與廢棄物罐直接截切之裂隙，建立放射性核種可能釋出路徑，並傳輸至母岩裂隙中，此路徑在 SNFD2017 報告中訂定為 Q1 路徑。然而，位於處置隧道底部的開挖損傷帶，因具有相對高的地下水滲透度，也可能使得放射性核種藉由此路徑釋出，訂定為 Q2 路徑，因此，將就 Q2 路徑持續精進近場核種傳輸分析技術，於核種傳輸模式中發展建立二維尺度的核種擴散傳輸模式，以更真實的評估放射性核種釋出率。

另一方面，於 SNFD2017 報告中，評估核種傳輸釋出率時所使用之參數皆為確定性參數，為評估參數不確定性對核種釋出率的影響，亦將於核種傳輸模式中發展取樣分析技術。

4.6.2.2. 研究內容

為精進近場核種傳輸分析技術，108 年度工作規劃項目包括：

- (1) 蒐集近期國際近場評估模式文獻，持續利用 Goldsim 程式建立近場二維核種擴散傳輸模式，並與國際評估案例進行比較及驗證。
- (2) 蒐集近期國際於核種傳輸計算時所使用之取樣方法，如僅使用蒙地卡羅取樣 (Monte-Carlo Sampling) 法或考慮拉丁超立方取樣 (Latin Hypercube Sampling) 法，比較其於 GoldSim 程式中的優劣，並完成取樣方法之建立。

4.6.2.3. 預期研究成果

- (1) 運用 GoldSim 程式建立二維核種擴散傳輸模式，並與國際報告之模擬結果比對並完成驗證。
- (2) 運用 GoldSim 程式分析，選用較佳的取樣方法針對不確定性參數取樣，完成不確定性案例的方法建置。

4.6.3. 遠場核種傳輸分析技術

4.6.3.1. 研究目的

SNFD2017 參考案例已針對情節發展所規劃之案例，完成初步的安全評估量化分析，包含以 GoldSim 程式建立一維平板概念模型，模擬地質圈傳輸特性，並執行遠場範圍的核種傳輸評估，完整遠場的安全評估量化分析，提供生物圈評估使用之遠場核種釋出資訊，將持續進行遠場核種傳輸之取樣分析技術。

另外，亦將擴增以美國核廢棄物管制分析中心（Center for Nuclear Waste Regulatory. Analyses, CNWRA）所開發針對裂隙岩體中核種於遠場遷移分析的 MARFA 模式(The Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field)，運用蒙地卡羅評估平流(advection)、縱向延散(longitudinal dispersion)、吸附(sorption)與衰變(decay)等作用，發展建立遠場核種傳輸分析技術，此技術之先期建立，將可助於未來技術發展策略，配合地下水流評估模型之能力演進，達到提升遠場核種傳輸概念模型之評估維度。

4.6.3.2. 研究內容

- (1) 基於既有發展的 Goldsim 遠場核種傳輸技術，發展取樣分析功能。
- (2) 利用 MARFA 建立遠場母岩裂隙核種傳輸模式，並與解析解完成技術驗證。
- (3) 訂定 MARFA 遠場傳輸與 GoldSim 近場傳輸的橋接參數轉換。

4.6.3.3. 預期研究成果

- (1) 運用 GoldSim 程式執行，並選用較佳的取樣方法針對不確定性參數取樣，完成遠場核種傳輸分析案例之數據不確定性分析方法。
- (2) 完成以 MARFA 建立遠場母岩裂隙核種傳輸模式，並訂定 MARFA 遠場傳輸與 GoldSim 近場傳輸的橋接參數轉換技術。

4.6.4. 生物圈核種傳輸分析技術

4.6.4.1. 研究目的

參考 SNFD2017 報告國際同儕審查建議，應在生物圈概念模型中考量地景演化效應，108 年度目標將依循原生物圈技術，區分 2 個模型發展技術，分別為建立環境介質區塊演化模型以及生物圈生態系安全評估模型，並在生物圈模型中考量地景演化效應；其中環境介質區塊演化模型將建立具備時間變化之區塊模組，以供未來連結地景演化之功能使用，而生物圈生態系安全評估模型將針對離島結晶岩測試區之陸地生態系統，藉由食物鏈分析潛在輻射曝露途徑，建立以攝食習性為基礎之生物圈劑量評估分析技術。最後，本項目將初步結合環境介質區塊演化模型以及生物圈之陸地生態系統模型等成果，進行離島結晶岩測試區之生物圈轉換係數案例計算。

4.6.4.2. 研究內容

為發展環境介質區塊演化模型，108 年規劃研究內容包括：

- (1) 研究 Goldsim 編寫區塊變化轉換參數。
- (2) 研究放射性核種於生物圈的曝露途徑。
- (3) 利用 Goldsim 建立核種傳輸模型中之陸地區塊模組。
- (4) 利用 Goldsim 建立核種傳輸模型中之水域區塊模組。
- (5) 結合陸地與水域區塊模組進行地表環境介質核種活度濃度分布計算。

為發展生物圈之陸地生態系統模型，108 年規劃研究內容包括：

- (1) 離島結晶岩測試區陸地生態系統之食物鏈概念模型。
- (2) 以食物鏈概念模型進行陸地生態系統可能輻射曝露途徑選定。

為建立環境介質區塊演化模型與生物圈之陸地生態系統模型之整合應用，將進行離島結晶岩測試區之生物圈轉換係數案例計算，108 年規劃研究內容包括：

- (1) 帶入離島結晶岩模式參數進行核種傳輸模型地表環境介質核種活度濃度之 Goldsim 模式進行計算，根據計算結果找出區域內受影響最大之環境介質。
- (2) 根據離島結晶岩陸地生態系安全評估之 Goldsim 模式找出之潛在曝露途徑結果，定義出潛在曝露群體，建立對應之劑量計算模型。
- (3) 根據前 2 項結果，交叉分析計算出生物圈劑量轉換因子 (Biosphere Dose Conversion Factor, BDCF)，並找出各核種於所有時間點之最大值，找出關鍵曝露群體。

4.6.4.3. 預期研究成果

- (1) 於環境介質區塊演化模型中完成陸地與水域核種傳輸模組。
- (2) 於生物圈之陸地生態系統模型完成潛在曝露群體及其曝露途徑分析。
- (3) 進行環境介質區塊演化模型與生物圈之陸地生態系統模型之初步整合分析，並以離島結晶岩測試區完成生物圈轉換係數案例計算，作為第 4.7.3 節封閉後安全評估劑量與風險分析後續分析。

4.7. 情節發展與案例分析技術

4.7.1. 工程障壁安全功能指標

4.7.1.1. 研究目的

在 SNFD2017 報告中，參考瑞典 SKB 在 SR-Site 分析報告中的安全功能觀念，發展結晶岩質地質處置安全分析的基礎，為考量不同母岩性質與各障壁間交互作用影響，而可能改變各障壁間之安全功能需求，本研究將以 SNFD2017 報告為基礎，經由 FEPs 間交互作用，聯結預期安全功能的分析，將建立通用型工程障壁安全功能及其功能指標與標準建議值為目標，以因應處置計畫第 2 階段候選場址評選之安全分析所需。

在多重障壁系統中，廢棄物罐是圍阻用過核子燃料於處置設施中重要的元件，主要功能是防止容器內的用過核子燃料外釋到周圍環境，作為環境隔離的第一道重要障壁。因此廢棄物罐的安全功能，必須能於處置設施環境下仍具有良好抗腐蝕性，及抵抗緩衝材料及母岩所帶來的圍壓及剪力作用，以維持其功能完整性。緩衝材料主要功能為減緩廢棄物罐受到外部作用的影響，同時也可在廢棄物罐受到外力作用損壞時，發揮遲滯核種釋出的功能。因此緩衝材料的安全功能，包括：防止廢棄物罐沉陷、抵抗岩石帶來的剪力位移、遏制平流傳輸發生的可能，及減少微生物活性避免對廢棄物罐產生腐蝕等。回填材料主要功能為防止緩衝材料的膨脹而影響其功能。因此回填材料的安全功能，需須能防止緩衝材料的膨脹而影響處置隧道回填之功能，同時亦應避免形成可能的導水通道，即使廢棄物罐與緩衝材料的安全功能降低時，仍能發揮遲滯核種的安全功能。

本研究將分別進行廢棄物罐、緩衝材料與回填材料等安全功能指標適用於本土性之研析，並以由上而下之方式(top-down approach)建立通用型安全功能指標清單。

4.7.1.2. 研究內容

108 年將以瑞典 SKB 公司所發展之安全功能項目，進行廢棄物罐、緩衝材料與回填材料等工程障壁安全功能指標適用於本土性之研

析，最後將表列出適用於國內通用型廢棄物罐之安全功能指標清單。為確保採用 SKB 安全功能指標的合適性，本研究將視處置設施設計與場址特性進行量化評估，而評估/計算所使用的數據將考慮台灣的本土特性。如為使廢棄物罐具有「Can1. 提供抗腐蝕」之安全功能，需要確保緩衝材料具有「Buff1. 限制平流傳輸能力」，及地質圈需「R1. 提供有利的化學條件」；然因在 SNFD2017 應用成果中，發現當地質圈不具備安全功能指標準則的「離子強度： $\sum q[Mq+] > 4 \text{ mM}$ 」時，將可能導致緩衝材料產生膨潤土膠體，並使緩衝材料被地下水流侵蝕，進而失去需提供的安全功能指標「Buff1. 限制平流傳輸」。故根據前述之情況，若未來所選定之潛在場址，其地下水之離子強度低於安全功能指標準則的 4 mM，需根據安全評估之結果進行討論分析。主要研究內容如下所列項目：

- (1) 分析國際間對安全功能之需求，釐清不同處置概念之對應的廢棄物罐、緩衝材料與回填材料等安全功能需求。
- (2) 將針對國內可能的處置環境，進行廢棄物罐、緩衝材料與回填材料等安全功能指標適用於本土性之分析。
- (3) 將以由上而下之方式，列出廢棄物罐預期安全功能指標清單。

4.7.1.3. 預期研究成果

彙整分析國際間對工程障壁安全功能需求，及配合國內地質條件，提出適用於本土性之通用型工程障壁(廢棄物罐、緩衝材料與回填材料)之預期安全功能指標。

4.7.2. 情節分類與發展

4.7.2.1. 研究內容

- (1) 依據 ICRP-122 之設計基準演化，發展主要情節，發展流程如下：
 - (a) 在安全評估尺度之下，假設因全球暖化或冰河週期循環，使海平面高度改變(升高 5 m 或下降 120 m)，在此情況下分析地質圈可能發生的演化情形。
 - (b) 在上述外部條件與地質圈演化的情況之下，進行地下水組成分析，探討緩衝材料可能發生的演化與被侵蝕的情形，當緩衝材料被侵蝕而流失了一定的質量，就會導致形成平流，使廢棄物罐因接觸到地下水而受到長期腐蝕(局部腐蝕)。根據以上兩點探討在整個演化過程中，形成情節的重要貢獻因子，並產生情節發展的樹狀圖，以發展主要情節與案例，並使整個情節發展的故事性與論述能更完整。
- (2) 依據 ICRP-122 之非設計基準演化，發展干擾情節：
 - (a) 以地震作為干擾情節的主軸，探討會導致廢棄物罐失效的外部條件，如地震頻率或地震規模(地震震度)。
 - (b) 探討不同的外部條件(地震頻率與地震規模)而導致不同的廢棄物罐失效結果(單次失效與多次失效)，以建立不同的評估分析案例。

4.7.2.2. 預期研究成果

- (1) 依各處置元件不同的失效模式與可能的演化情形，串聯發展廢棄物罐腐蝕相關的設計基準演化情節；
- (2) 依外部條件地震條件，發展地震相關非設計基準演化情節。

4.7.3. 封閉後安全評估劑量與風險分析技術

4.7.3.1. 研究目的

於安全評估中，須提出合理且正當的預期處置設施在長時間演化之情節，並據此進行案例之量化分析，提出預期的劑量或是風險，以評估處置設施是否符合法規之限值，佐證深層地質處置設施的安全性。

本工作項目將以系統性的方式整合本章各項工作項目之成果，並利用第 4.6 節之分析成果，針對廢棄物罐腐蝕相關的設計基準演化情節以及地震相關非設計基準演化情節，完成評估案例之量化分析，並將結果與法規限值進行比較探討。

4.7.3.2. 研究內容

為佐證處置設施的安全性，需整合安全評估各項技術發展成果，並利用核種傳輸分析模式建立處置設施可能的演化條件，完成情節建構與案例的評估，最後，整合分析與評估結果並與法規限值進行比較。

108 年度規劃研究內容包括：

- (1) 利用評估模式流程圖 (Assessment Modeling Flowchart) 整合各模式及使用之資料來源，以瞭解安全評估中所使用之模式、模式間交互關係及使用之參數來源。
- (2) 根據廢棄物罐腐蝕相關的設計基準演化情節，利用 GoldSim 程式建立對應之安全評估模型，完成量化分析。
- (3) 根據廢棄物地震相關的非設計基準演化情節，利用 GoldSim 程式建立對應之安全評估模型，完成量化分析。

4.7.3.3. 預期研究成果

- (1) 完成廢棄物罐地震相關非設計基準演化情節之量化分析。
- (2) 完成廢棄物罐腐蝕相關設計基準演化情節之量化分析。
- (3) 整合前述分析和評估結果並與法規限值進行比較分析。

5. 参考文献

- Alonso, E.E., Gens, A., and Josa, A. (1990), A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique* Vol. 40, No. 3, pp. 405-430.
- Andersson, J., Skagius, K., Winberg, A., Lindborg, T., Ström, A. (2013), Site-descriptive modelling for a final repository for spent nuclear fuel in Sweden, *Environ Earth Sci.*, Vol. 69, pp.1045-1060.
- Grauch, V.J.S., Hudson, M.R., and Minor S.A. (2001), Aeromagnetic expression of faults that offset basin fill, Albuquerque basin, New Mexico, *Geophysics*, 66, No. 3, pp. 707–720.
- Ganesh, B., Anatolie, C., Jagan, U., Shengchun, W., Yin, H., and Roger, C.N. (2013), Fundamental aspects of stress corrosion cracking of copper relevant to the Swedish deep geologic repository concept, SKB, TR-12-06.
- Henrik, C.M., Andersson, F.S., and Rolf, S. (2007), Creep testing and creep loading experiments on friction stir welds in copper at 75 °C, SKB, TR-07-08.
- IAEA (2010). *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, Specific Safety Guide, NO. SSG-9, pp. 1-45.
- Jaques, A.L., Wellman, P., Whitaker, A., and Wyborn, D. (1997), High-resolution geophysics in modern geological mapping, *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17, No. 2, pp. 159–173.
- 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.

- Kramar, S. (2016), Assessment Report: Airborne Geophysical Surveying and Interpretation of the Shakespeare Property Espanola Area, Ontario, Canada, Ursa Major Minerals Inc.
- Legault, J.M., and Unsworth, M. (2015), Airborne electromagnetic systems – state of the art and future directions. CSEG Recorder, Vol. 40, No. 6, pp. 22.
- Luyendyk, A.P.J (1997), Processing of airborne magnetic data. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, Vol. 17(2),pp. 31-38.
- Naoki, T. and Manabu, K. (2008), Influence of sulfide concentration on the corrosion behavior of pure copper in synthetic seawater, Journal of Nuclear Materials, Vol. 379, pp. 154-161.
- Pettit, W. (2009), Geophysical signatures of some recently discovered large kimberlite pipes on the Alto Cuilo concession in northeastern Angola, Proceedings of the Ninth International Kimberlite Conference, pp. 106–115.
- Röhlig, K.J., (2015), Review of uncertainty propagation and sensitivity analysis in SR-Site, Main Review Phase, SSM, Technical Note Report number: 2015:05, Swedish Radiation Safety Authority.
- Saiang, D. (2008), Behaviour of blast-induced damaged zone around underground excavations in hard rock mass, Doctoral thesis, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, ISSN 1402-1544 / ISRN LTU-DT--08/60--SE / NR 2008:60, p 803-p813.
- SKB (2008), Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase : SDM-Site Forsmark, SKB, TR-08-05.
- SKB (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, pp 276.
- Thomson, S., Fountain, D., and Watts, T. (2007), Airborne Geophysics – Evolution and Revolution, Proceedings of Exploration 07: Fifth

Decennial International Conference on Mineral Exploration ,19-37.

U.S. NRC (2007), A Performance-Based Approach to Define the Safe Shutdown Earthquake Ground Motion. Regulatory Guide 1.208.

U.S. NRC (2017), Seismic Design Standards and Computational Methods in the United States and Japan, NUREG/CR-7230.

Zang, A. and Stepanansson, O. (2010), Stress Field of the Earth's Crust, Springer, Dordrecht, pp322.

王泰典、王文禮、黃燦輝(1994)，台灣地區隧道反算分析之應用，海峽兩岸土力學及基礎工程暨地工技術學術研討會論文集，西安，第 492-497 頁。

台灣電力公司(2010)，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。

台灣電力公司(2017)，我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SNFD2017 報告)，台灣電力公司；行政院原子能委員會放射性物料管理局審查中。

林鎮國、林蔚、謝佩珊、董倫道、錢正明、田能全、黃淞洋、劉台生、吳柏林、張育德、尹承遠 (2016)，用過核子燃料最終處置計畫潛在母岩特性調查與評估階段－潛在母岩特性調查計畫(104~107 年度計畫)－SNFD2017 參考案例及數據彙整說明報告表二：地質概念模式及特性數據，工研院執行/台電公司委辦，SNFD-ITRI-TR2015-0001。

董倫道、林蔚(2014)，臺灣北部陸海域地區空中磁力探測(1/2)。經濟部中央地質調查所委辦計畫報告，共 275 頁。