

用過核子燃料最終處置計畫  
潛在處置母岩特性調查與評估階段一  
106 年度工作計畫  
(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國 106 年 2 月



# 106 年度工作計畫目錄

	頁次
1. 概述 .....	1-1
2. 計畫規劃 .....	2-1
2.1. 計畫目標 .....	2-1
2.2. 工作規劃 .....	2-2
3. 地質環境 .....	3-1
3.1. 區域環境地質 .....	3-1
3.2. 深層地質特性 .....	3-3
3.3. 地質處置合適性研究 .....	3-17
4. 處置技術與工程設計 .....	4-1
4.1. 輻射源項及核種特性研究 .....	4-2
4.2. 處置概念與系統設計技術 .....	4-4
4.3. 廢棄物罐研發技術 .....	4-8
4.4. 緩衝與回填材料研發技術 .....	4-11
4.5. 處置設施設計/建造/運轉/封閉/管理技術研發 .....	4-15
5. 安全評估 .....	5-1
5.1. SNFD2017報告安全評估案例與參數敏感度分析 .....	5-2
5.2. 安全評估流程建立與方法研究 .....	5-4
5.3. 安全評估分析模式建立與執行 .....	5-13
5.4. THMC實驗與模擬技術研發 .....	5-24
5.5. 核種遷移實驗設施建置 .....	5-27
5.6. 天然類比評估研發技術 .....	5-31
6. 國際同儕審查 .....	6-1
7. 預期成果分析 .....	7-1
8. 參考文獻 .....	8-1

## 圖目錄

	頁次
圖2-1：用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃.....	2-5
圖5-1：安全評估11步驟關聯圖.....	5-12
圖5-2：臺灣FEPs架構.....	5-12

## 表目錄

	頁次
表3-1：地質環境現地參數評估模式之比較.....	3-8
表3-2：三維水文地質數值模式輸入參數.....	3-9
表5-1：安全評估模式之比較分析.....	5-23
表7-1：年度工作項目、預期成果及效益.....	7-2

## 1. 概述

我國自 1978 年(民國 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，龍門計畫(龍門電廠)因國內政策轉變進行封存工作，一號機完工進行封存，二號機停工。其中，核一、二廠 4 座機組為沸水式(boiling water reactor, BWR)，核三廠兩座機組為壓水式(pressurized water reactor, PWR)，龍門電廠兩部則為進步型沸水式反應器。預估此 3 座核能電廠的 6 部機組運轉 40 年將會產生約 5,048 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；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  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{135}\text{Cs}$ 、 $^{129}\text{I}$  等分裂產物及  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{243}\text{Am}$  及  $^{247}\text{Cm}$  等錒系核種，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。

用過核子燃料最終處置的基本要求是選擇適當的環境，將用過核子燃料永久安置，使其與人類生活圈隔離，以確保民眾安全及環境品質，促進非核害環境的永續發展。海床處置、深孔處置、冰層處置、井注處置、太空處置及深層地質處置是幾種曾被各國考慮的處置方案。上述這些方案經過國際間多年的研究後，一般咸認「深層地質處置」是較為可行的一種處置方式。而所謂的「深層地質處置」係採用「多重障壁」的概念，利用深部岩層的隔離阻絕特性，將用過核子燃料埋存在深約 300 至 1,000m 的地下岩層中，再配合包封容器、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，可以有效使外釋而遷移的核種受到隔離與阻絕的效果，以換取足夠的時間，讓用過核子燃料的輻射強度在影響人類目前生活環境之前已衰減至法令規定所容許的限值。我國法規限值依民國 102 年 01 月 18 日

修正公布之「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，其中第 9 條規定高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外一般人所造成之個人年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗。第 10 條規定高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外關鍵群體中個人所造成之個人年風險，不得超過一百萬分之一。

我國用過核子燃料處置之推動，係依「用過核子燃料最終處置計畫書(2006 年核定版)」之擬定時程及規劃，切實執行境內最終處置之技術發展及處置設施的籌建工作。本階段(2005~2017 年)為「潛在處置母岩特性調查與評估」階段，預計規劃達成 2 個重要里程碑：(1) 於 2009 年提出「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告」(簡稱 SNFD2009 報告)；(2) 於 2017 年提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(簡稱 SNFD2017 報告)。目前已完成近程工作主要目標——彙整過去長程計畫研發成果與蒐集國內外相關資料，於 2009 年提出 SNFD2009 報告，該報告內容涵蓋「處置環境條件的調查研究」、「處置技術的研究發展」、「用過核子燃料處置的功能評估」等技術發展成果，並於 2010 年 7 月獲原能會同意核備。台電公司依核備之 SNFD2009 報告內容，據以修訂並完成「用過核子燃料最終處置計畫書(2010 年修訂版)」，於 2011 年 1 月獲原能會核定公告。此外，本計畫依據原能會要求之 SNFD2017 報告目標，修訂近程工作規劃，完成「用過核子燃料最終處置計畫書(2014 年修訂版)」，已於 104 年 3 月完成核備。

OECD (2009, p.3)指出地質處置要求地質圈的長期穩定特性。所謂長期穩定，非指狀態一直不變，而是地質圈相當緩慢而持續的演變過程裡，能維持符合安全處置的地質條件。根據 SNFD2009 報告(台電公司，2010)的研究結果顯示：臺灣地區活動構造、地震、火山活動及地質災害均有其侷限分布的特性；除了離島結晶岩體具備長期地質穩定特性外，過去認為位於板塊邊界之本島結晶岩體，根據最新研究顯示可能近百萬年來，已邁入相對穩定地塊的地質環境條件。且因其地質及構造特性可能與離島結晶岩類似，故在後續的潛在處置母岩調查工作中，將加強本島結晶岩體穩定性的研究。初期進行岩體規模、

分布與主要構造帶延伸等資訊的調查研究，取得後續評估及驗證所必要之基礎參數；同時將先前於離島結晶岩體發展之調查研究技術，移轉應用於本島結晶岩體，以蒐集本島結晶岩體相關地質參數。並發展結晶岩體及工程障壁系統之熱、水、力、化特性相關之調查與評估技術，藉以取得完整地下岩體調查數據，以利後續本島結晶岩體穩定性評估工作之進行。

在過去幾年中，潛在母岩特性調查技術之發展重點，集中於建立結晶岩體測試區特性調查與評估相關之處置技術發展，總計在結晶岩測試區完成約 500 點地表重/磁力探測、16 km 地電阻剖面探測、3,000 m (6 孔) 地質鑽探，及地物/水文/地化/岩力等各式孔內探測作業，並透過整合性的地質、地物、水文、水化學及環境資料解析，建構出結晶岩測試區初步地質概念模式，完成結晶岩體參考案例 (Reference Case)。期能透過各項特性技術整合性的驗證，參考瑞典 KBS-3 處置概念，以深層地質現地量測數據，運用 SR-site 技術流程 (SKB, 2011, p24)，供處置設計與工程技術及功能/安全評估技術之發展，以完備現地調查至功能評估的整體作業流程。

本計畫後續工作規劃，依據原能會要求以日本核燃料循環開發機構 (JNC) 於平成 12 年完成之「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」報告 (以下簡稱 H12 報告；JNC, 2000) 為參考依據，持續進行本島結晶岩處置母岩特性調查，同時進行處置工程技術、基本情節及替代情節之功能/安全評估技術的初步發展工作，以期達成潛在處置母岩特性調查與評估階段目標，準時於民國 106 年底提出「SNFD2017 報告」。原子能委員會要求 SNFD2017 報告應達成我國用過核子燃料處置計畫的 3 項階段性目標 (2011 年 2 月 22 日會議紀錄) 包括：

- (1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置；
- (2) 地質處置技術能力是否完備；
- (3) 地質處置設施長期安全性之評估。



根據已核備、公告之期程規劃，現階段尚未涉及選址作業，在無特定場址條件下，持續進行增進地質處置相關技術能力，宏觀全國環境地質(大地構造)、地質合適性調查(火山、斷層活動、地殼抬升或沈陷、氣候及海平面變遷等影響因子)，並建立相關深層地質調查、處置設計與工程技術及安全評估技術，逐年累進成果，如期達成 2017 年階段目標。

## 2. 計畫規劃

### 2.1. 計畫目標

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

- (1) 潛在處置母岩特性調查與評估階段(94~106 年)
- (2) 候選場址評選與核定階段(107~117 年)
- (3) 場址詳細調查與試驗階段(118~127 年)
- (4) 處置場設計與安全分析評估階段(128~133 年)
- (5) 處置場建造階段(134~144 年)

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

「用過核子燃料最終處置計畫」自 94 年起，展開「潛在處置母岩特性調查與評估階段」，並規劃於 106 年達成提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(簡稱 SNFD2017 報告)，藉以達成兩項目標：完成我國潛在處置母岩特性調查與評估，及建立潛在處置母岩功能 / 安全評估技術，並建議下階段(107~117 年)候選場址調查區域。

為順利達成 106 年規劃之階段目標，台電公司已於 98 年完成 SNFD2009 報告(台電公司，2010)，其中初步說明我國具有潛在處置

母岩，並具備初步處置技術之可行性。據此，本計畫近程工作規劃，將以 SNFD2009 報告為基礎，持續進行潛在處置母岩特性調查，同時進行處置工程技術及功能 / 安全評估技術之研究發展，以期達成「潛在處置母岩特性調查與評估」階段目標，於 106 年底提出「SNFD2017 報告」。基於原子能委員會要求 SNFD2017 報告應達成用過核子燃料處置計畫之 3 項階段性目標(100 年 2 月 22 日會議紀錄)為：

- (1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置；
- (2) 地質處置工程技術能力是否完備；
- (3) 地質處置設施長期安全性之評估。

## 2.2. 工作規劃

為求善用國外發展經驗及聚焦國內研發資源，SNFD2017 報告章節架構以「地質環境」、「處置設計與工程技術」及「安全評估」等 3 章為核心，並作為本計畫工作推動之 3 大主軸，簡要說明如下：

### (1) 地質環境

#### (a) 區域環境地質

有鑑於地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性，針對我國國土範圍不同潛在處置母岩的地質環境特徵，根據既有公開資料，宏觀說明大地構造環境與地質圈長期演化特性，完成 SNFD2017 報告撰寫；

#### (b) 深層地質特性

以本土深層地質現地量測數據建立的參考案例，分別針對影響處置安全重要的地下水傳輸特性，包括：水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑、岩石特性等，建構整合的地質概念模式(Geosynthesis)(JNC, 2000, c3p7)，並參考瑞典(SKB)最新處置技術(Andersson et al., 2013, p. 1049)，建立本土參考案例。參考案例為工程設計與安全評估分析技術發展之基礎，據以與瑞典 SKB 進行國際交流，相關成果均為 SNFD2017 報告撰寫的主要內容；

#### (c) 地質處置合適性研究

蒐集影響本土地質圈長期演化的相關資訊，內容包括我國國土的大地構造(涵蓋火山活動及斷層作用)、抬升與沉陷作用、氣候與海平面變遷等，建立處置環境長期穩定性的影響因子的量測技術及評估能力，提供後續階段安全評估之用。

## (2) 處置設計與工程技術

深層地質處置技術主要利用多重障壁概念，以層層的障壁來阻滯用過核子燃料中放射性核種的遷移，使核種到達人類生活環境時，放射性已衰減至安全限值以下。

多重障壁可分成天然障壁(處置母岩及岩石圈)及工程障壁(廢棄物本體、廢棄物罐、緩衝材料與回填材料)。當考量工程障壁在吸附核種及遲滯核種遷移的安全功能上所扮演的角色，針對工程障壁包括廢棄物本體、廢棄物罐、緩衝材料及回填材料的研究，對近場環境功能/安全評估益形重要。

由於工程障壁需配合當地之地質環境條件，現階段在尚未決定處置場址之前，技術之發展是參考國外與我國相類似之潛在處置母岩所發展的工程障壁系統，或引進相關技術及設備，或加入國際合作取得共同研究成果，期獲得本土適用的處置技術基礎。

## (3) 安全評估

依照國際原子能總署(IAEA)的定義，「功能評估」為：對廢棄物處置系統或分系統功能進行預估，並將分析所得結果與適當之標準或準則進行比較；「安全評估」則是以輻射劑量(radiation dose)或輻射危險度(radiation risk)為主要指標，評估整體處置系統之安全性(IAEA, 2006, p10-p11)，而依據我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之第 9 條規定，高放處置設施之設計應確保其輻射影響對設施外一般人所造成之個人年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗；另於第 10 條規定，高放處置設施之設計應確保其輻射影響對設施外關鍵群體中個人所造成之個人年風險，不得超過一百萬分之一。綜合上述，功能/安全評估的

最終目的，在於整合廢棄物特性、工程障壁功能及場址特性，就整個處置系統的功能進行整體性的量化分析與模擬，以評估處置系統的適當性與安全性。

依深層地質處置的概念設計需求，功能/安全評估系統建構分為：近場、遠場及生物圈。在近場部分，其主要安全功能為隔離，藉由廢棄物罐、緩衝材料及回填材料所構成的近場環境，提供放射性核種與地質圈環境隔離的第一道屏障。而遠場環境其主要安全功能為遲滯，藉由地質岩層極低的地下水流速，以及核種與地質圈的各種地化作用，如錯合、吸附/脫附、溶解/沉澱、氧化/還原、基質擴散及酸鹼中和等，達到延遲核種遷移的效果。生物圈係指放射性核種釋出/遷移後，最終進入與人類活動接觸之生活環境，其範圍包括地表水、土壤及大氣等。生物圈評估的主要功能，是分析計算各種媒介途徑，最後可能衍生的核種濃度與劑量，作為與設計或安全標準比較之基準。

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

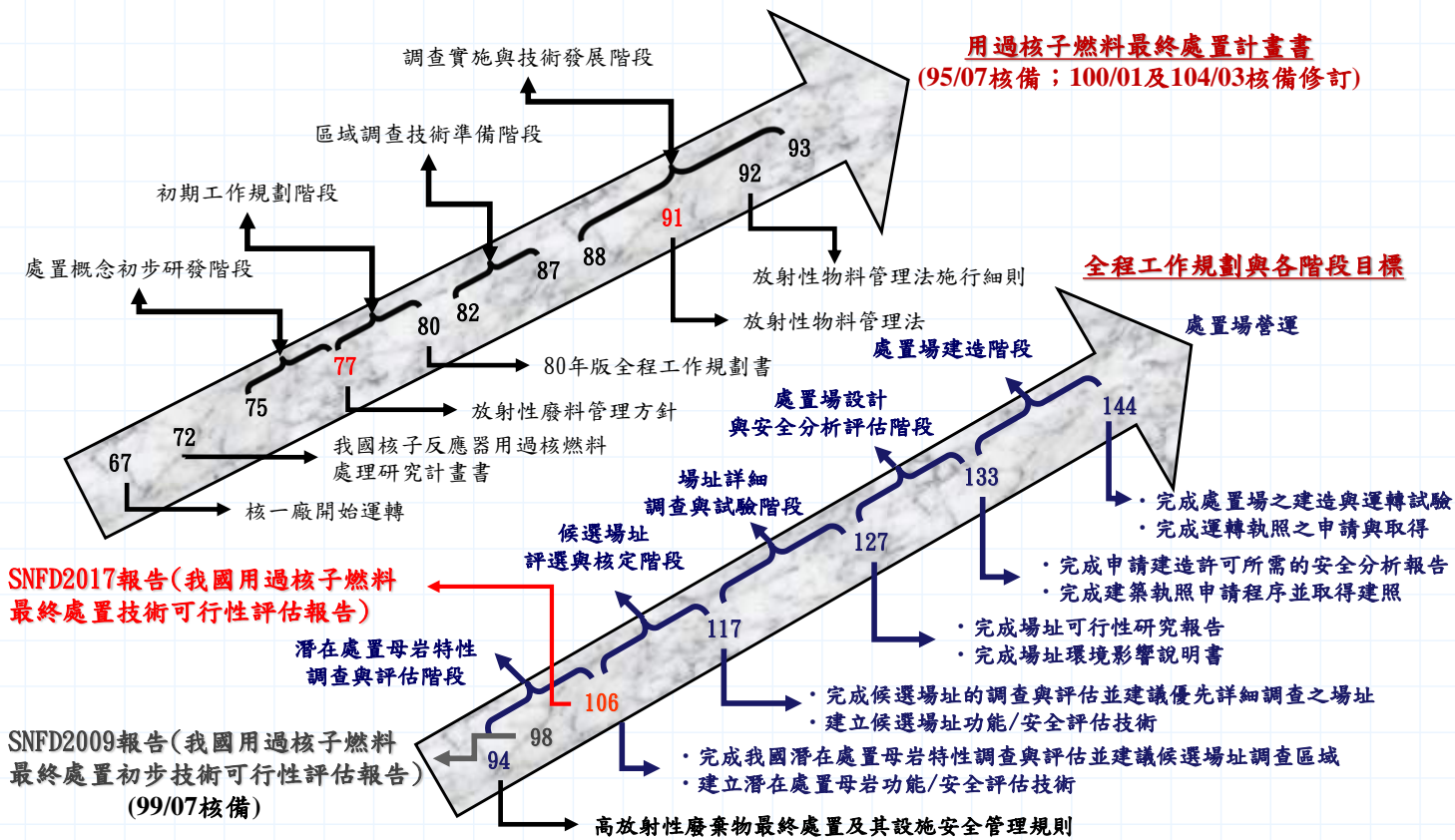


圖 2-1：用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃

### 3. 地質環境

根據主管機關 104 年 5 月針對台電公司 103 年「用過核子燃料最終處置計畫執行成果報告」之審查結果(三)「有關計畫場址特性調查技術研究成果(如深層地質特性、鑽探與井測、水文地化…等現地調查資料)應以水文地質模式加以整合以利判釋，並應回饋於設施設計與功能/安全評估等工作，另台電公司應加強國際技術合作管道，請國外核廢料專責單位或專家審視以提升計畫成果品質及公信力」。為因應主管機關之審查要求，台電公司與日本 NUMO、瑞典 SKB 及芬蘭 POSIVA 等專責機構，建立國際合作與技術交流平台。並於 104 年成果報告中，完成 SNFD2017 報告參考案例之表二(地質概念模式及參數)，據以自 104 年度與 SKB 展開技術合作，針對參考案例進行地下水流場模擬工作，相關成果規劃於 106 年度彙整成 SNFD2017 報告，說明根據地質環境量測數據建構之水文地質模式，運用於處置技術與工程設計、功能/安全評估等技術發展之階段成果。

#### 3.1. 區域環境地質

臺灣地質資訊在經濟部中央地質調查所公開出版的地質圖幅及研究報告中，已有豐富的公開資訊。SNFD2017 報告進行彙整區域地質既有資訊時，進一步參考國內外學術文獻，探討過去數百萬年來之地質長期演化紀錄及趨勢，用以評估未來長期地質作用對深層地質處置安全性的影響。

區域環境地質主要係說明地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性，並以綜觀之角度，探討臺灣的大地構造與地質環境特徵。在 SNFD2009 報告中已分別針對臺灣的地質環境、影響地質環境的自然因子及臺灣 3 種潛在處置母岩(花崗岩、泥岩、中生代基盤岩)的地質環境特徵，完成初步的彙整(台電公司，2010，p2-250~2-338)。

在此基礎上，台電公司參照日本 H12 報告之架構，更新及彙整 SNFD2017 報告所需臺灣地質環境特徵資料，至 104 年度分別就地體架構、岩層分布及第四紀構造分布蒐集資訊，宏觀檢視過去全國普查

結果，針對臺灣的大地構造與地質環境演化之最新發展趨勢，探討 3 種潛在處置母岩更新資料，作為 SNFD2017 報告編撰之依據。105 年度進一步以地體構造長期演化觀點，探討深層特性及長期穩定性。106 年度將歷年累積成果均彙整說明於 SNFD2017 報告中。

針對區域環境地質及長期演化歷程已呈現出重要更新資訊，106 年度進行 SNFD2017 報告的編撰，包括：

(1) 地體架構方面：

國內外近來針對臺灣地體構造架構研究，最新資訊顯示現在臺灣東部，約 13 百萬年前原本為深海環境，歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊間，存在因南中國海板塊張裂活動而漂移的微陸塊，並曾因南中國海板塊對菲律賓海板塊的隱沒作用，因而隱沒至呂宋島弧下方 (Shao et al., 2015, Fig. 4)，而後在弧陸碰撞作用影響下拼貼回歐亞大陸邊緣 (Lu and Hsu, 1992, p.38; Shyu et al., 2005, Fig. 3)；在弧陸碰撞發生同時，菲律賓海板塊隱沒至臺灣東北部歐亞大陸的方向，在 5-8 百萬年前以往北或東北方向隱沒，而後此隱沒帶才往西遷移影響到臺灣東部山區 (Lallemand et al., 2013, p.61)。

(2) 深層地質方面：

本計畫長期進行空中磁力探測技術及磁力與地電探測等技術發展，用以驗證臺灣山區地下地質架構特性、岩層與構造空間分布與幾何關係，針對全國性岩層與構造分布受地體架構的影響，參考上述地質長期演化更新資訊，進一步探討岩體規模、水文地質、地震分布、抬升與沉陷作用等對深層地質特性的影響，甚至延伸至未來地體構造演化可能的趨勢，均作為 SNFD2017 報告重要更新內容。

(3) 未來地體構造之演化：

過去數百萬年深層地質所受到的各種地質作用，均刻劃紀錄在現有的地質材料上，透過特性調查技術的精進，可以了解過去數百萬年曾經對地質處置安全條件的影響。進而推估未來地體構造保留此地質特性下，數百萬年尺度可能影響地質處置安全的程度。



離島結晶岩分布區域因不受到弧陸碰撞作用影響，千萬年前的海岸與今日海岸相近，顯示無明顯的抬升與剝蝕作用，但氣候變遷循環性影響下，每百萬年可能歷經近十次海島變內陸沙漠的環境變化。相較之下，臺灣島因弧陸碰撞的造山作用而浮出海面，僅近 5 百萬年以來形成高山地形；且近 2 百萬年來受到菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊下的影響；近年來研究普遍發現，近 1 百萬年來東北部已轉以張裂構造活動為主，山脈北端轉為沉陷盆地甚至沒入海下，並伴生火山活動(鄧屬予，2007，p.7)。對於未來地體架構演化及各類潛在處置母岩特性的影響，需要宏觀陸、海域受板塊運動控制時空演化的關係，進而了解不同地區地質環境的變遷與長期穩定性的差異。

### **3.2. 深層地質特性**

在「深層地質處置」概念中，主要的處置設施將建構於遠離人類生活環境的深地層。深層地質的特性上，具穩定的力學條件、合適的水文地球化學條件、低地下水流速，以及有效的遲滯外釋核種的條件(Andersson et al., 2013, p. 1045)。為了建立模擬與評估的技術(表 3-1)，深層地質特性需以現地數據建立案例，本計畫根據 H12 報告架構，分成下列各節進行研究。

#### **3.2.1. 地質圈特性對多重障壁概念的重要性**

處置母岩及其地質環境有關的地質圈特性，除了決定天然障壁對核種的遲滯功能外，亦會影響工程障壁的性能。例如：母岩的熱與力學特性，除了與天然障壁的穩定性有關外，也直接影響工程障壁的功能；若母岩性質不佳，將縮短工程障壁的使用年限，處置安全也受到影響。同樣地，地下水的流動特性與水文地球化學條件，除了影響核種在地層的遷移速率與分布情形外，亦是影響廢棄物罐腐蝕速率的關鍵因素。當然，處置母岩所面臨的大地構造活動、抬升與沉陷、氣候與海平面變遷等地質環境特性，均對遲滯核種傳輸的多重障壁功能，造成關鍵的影響(JNC, 2000, c3p3)。

依不同地區的不同母岩，會採用不同的地質處置概念與處置工程設計；各國均規劃數十年，以分階段方式，經由文獻篩選、初步場址調查、至詳細場址調查等階段，由當地地質環境數據獲致功能/安全評估結果，以詳細調查結果來完成安全的處置場設計(JNC, 2000, c6p16)。我國將於 106 年完成潛在處置母岩特性調查與評估階段，有鑑於工程設計與功能/安全評估技術發展需要，針對結晶岩廣泛採用的瑞典 KBS-3 概念與技術(Andersson et al., 2013, p.1049)，透過國際合作方式，與瑞典專責機構(SKB)進行技術交流。

台電公司以目前本土結晶岩體所獲得之現地調查資料，建立參考案例；並從地質與地球物理調查資料建立概念模式，以呈現三維深層岩體與地質構造分布的幾何形貌，據以描述岩性、地質構造與水文地質特性，提供工程設計與功能/安全評估之用。以下分別針對水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑、岩石特性等，說明 106 年技術發展的規劃：

### 3.2.2. 水文地質

基於 SNFD2017 報告所需之概念模式建構分析能力的考量，已於離島結晶岩體長期建立水文地質調查技術，例如雙封塞水力試驗、跨孔示蹤劑試驗、以不同封塞段長度進行擴尺度水力試驗、封塞段裂隙水壓長期監測等，取得水力傳導係數、延散度、裂隙寬度、擴散係數等參數特性，104 年底已完成 SNFD2017 報告參考案例，提供 105 年工程設計與功能/安全評估技術發展之用。

水文地質模擬技術則利用美國 Lawrence Berkeley 國家實驗室發展的 TOUGH2 軟體，及既有現地參數化資料，於 103 年度建構二維模擬之技術基礎；104 年度進一步以三維模擬水文地質數值模型與地下水流場；105 年度加強國際合作，與瑞典 SKB 進行技術交流，雙方透過參考案例，針對地下水流的模擬結果，分別比較雙方水文地質的三維數值模型，探討結晶岩緻密岩性、導水裂隙帶與高角度岩脈群等特性，以及其對深層水文地質特性長期演化的影響，有助於建立參考案例所需基本地下水流場資料，提供功能/安全評估技術發展，

作為 SNFD2017 報告撰寫的依據。在此基礎上，106 年度技術發展規劃如下：

### 3.2.2.1. 地下水文地質3D數值模型建立技術發展

#### (1) 研究背景

在深層地質處置概念中，地下水的流動特性，是影響核種在地層遷移速率與分布的主要因子。根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A4 項)研究發展規劃說明：「裂隙岩體中的地下水流頗為複雜，必須持續研發各種先進水文地質技術，配合地質構造特性，以逐步調查其水力與傳輸特性，以及地下水流分布。」有鑑於深層地下水的流動特性乃隨地區之不同而異，在處置場址尚未確定前，研究發展的關鍵在於現地特性調查資料與解析的整合，由於現場工作常受天然及人為條件影響，可獲得空間與時間有關的現地數據有限，無法全面了解水文地質行為。透過模擬與驗證方式，將現地試驗數據導入模型計算後的結果，可以在空間或時間上評估地質深層特性的演變，提昇處置功能/安全評估的技術能力。

#### (2) 研究目的

主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A7 項)要求：「水文地質現地試驗以及相應分析模式實例應用研究—佈置密集的鑽孔進行裂隙、水力傳導係數與現地應力試驗，據以評估水文地質特性，選擇適用的分析模式進行分析、驗證與修正，積累特性調查與水文地質模擬實戰經驗，應為國內精進處置技術迫切的課題。」台電公司以特性調查資料最為完備的離島結晶岩體為參考案例，進行區域性地下水文地質 3D 數值模型實例研究，以完成區域地下水流進行數值模擬，並與瑞典 SKB 針對參考案例三維數值模擬結果進行技術交流。

#### (3) 研究內容

##### (a) 資料彙整與評估

現地數據採用 SNFD2017 參考案例表二(Reference Case Table 2)，應用的模擬器為 TOUGH2-MP，使用等效連續介質方法，利用有效孔隙介質來近似裂隙-母岩基質系統，在裂隙-基質的局部熱力學平衡假設下，通過一系列有效參數的輸入，沿用基於連續介質假設的經典滲流理論，來模擬水流。表 3-2 摘自參考案例表二，列出本項目工作模型所用參數。

(b) 建構模型邊界

建構模型邊界，模型邊界可利用高程圖數化後得到模型邊界圖。本研究假設 K 區數值模型的側邊界，除最西部邊界假設為無流(no flow)外，其餘側邊界皆假設為定溫與定水頭(Dirichlet boundary type)。整個模型東西約 10 km，南北約 14 km，深度為海平面下 2 km。考量 F2 尺度(20 m)與整個模型相差太大，故初步規劃以不規則網格(irregular mesh)建立模型。

(c) 建立概念模型

數值概念模型摘自參考案例表二，最大高程約為 240 m 至 250 m，模型地表溫度固定為 23.5 °C，地表壓力固定為一大氣壓( $1.01 \times 10^5$  Pa)，並據此做為模型頂部邊界條件。入滲量假設為 35 mm/yr，作為模型源項。太武山斷層(F1)(位態 N64E/70N)，切過整個模擬區域，形成主要導水裂隙(Main Water Conductive Fracture, MWCF)，太武山分支裂隙(F2)為模型中另一 MWCF，F2 與 F1 相交於地表以下約 320 m 至 350 m 處。輝綠岩脈(D1 至 D10)為模型中另一重要構造，幾乎不導水，水力傳導係數僅約為  $1.0 \times 10^{-11}$  m/s。輝綠岩脈與花崗母岩交界處可能形成細微導水通道，但要描述此現象之數值模擬，有實質收斂困難。故在研究之初，假設輝綠岩脈為阻水構造，地下水流遭遇輝綠岩脈，可能改變流動方向。有鑑於模擬區域將近百平方公里，建構數值模型不僅挑戰模擬區域大，亦挑戰模擬的各構造分別具不同位態，雖然太武山斷層(F1)與輝綠岩脈(D1 至 D10)傾角近乎垂直，但太武山

分支裂隙傾角  $50^\circ$ ，且寬度僅 20 m；因此，在製作網格上需格外留意，以 TOUGH2-MP 而言，最複雜且耗時的工作為建立數值網格，以避免相同岩性網格產生不相連且不連續狀況。

#### (4) 預期研究成果

運用特性調查現地量測數據，建立模擬範圍近百平方公里的區域性水文地質 3D 數值模型模擬技術，與計算結果分析能力，提供功能/安全評估範例輸入參考值，據以達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A4 及 A7 項)要求。

表 3-1：地質環境現地參數評估模式之比較

模式建立	SKB 使用之程式碼	地質環境使用之程式碼
三維大區域地下水流模擬	DarcyTools、 ConnectFlow、 TOUGH2、FracMan	TOUGH2
三維裂隙網路模擬	DarcyTools、 ConnectFlow、FracMan	FracMan
水文地球化學熱力學及 反應動力學模擬	GWB	GWB
再飽和作用電阻率監測 正演模式	SensInv2D	COMSOL

表 3-2：三維水文地質數值模式輸入參數

General I.C. and B.C. (Assume no flow boundary condition @ the left and bottom boundaries)					
Item	Data range			Reference value	
Temperature @ water table (°C)	23.4 to 23.9			23.5	
Thermal gradient (°C/100 m)	1.5 to 1.8			1.7	
Pressure @ surface (Pa)	NA			$1.01 \times 10^5$	
Ave. Precipitation rate (mm/yr)	650 to 1650			1080	
Infiltration rate (mm/yr)	-80 to 190			35	
Hydraulic Properties					
Rock and Structure Units	R0 (Regolith)	R1, R2, R3 (Granite mass)	F1 (Taiwushan fault)	F2 (Taiwushan branch fracture)	D0-D10 (Dyke)
Strike/dip	Thickness=70 m	--	N64E/70N Width=200 m	N80W/50S Width=20 m	N30E/80N Width=100 m per 1000 m
Hydraulic conductivity (m/s)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-10}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-11}$
Effective Porosity (%)	10	0.5	0.01	0.015	0.68
Wet heat conductivity ( $W / m \cdot ^\circ C$ )	2.0	3.0	2.0	2.0	3.0
Specific heat ( $J / kg \cdot ^\circ C$ )	800	800	800	800	800
Dry density ( $kg / m^3$ )	2000	2750	2600	2600	2750

註：

R0 代表風化層(regolith)，為離島結晶岩表面較為破碎部分，導水性佳。R1、R2、R3 代表完整岩體；而由於其參數數值大小相近，故在僅列出 R1 數值作為代表。F1 與 F2 分別代表太武山斷層與其分支裂隙。D0 至 D10 為輝綠岩脈，在 SNFD2017 參考案例表二中假設為一帶狀分布，每間隔 1000 m 即出現一寬度 100 m 的岩脈群。

### 3.2.3. 水文地球化學

地下水的化學特性，除了直接影響核種的溶解度外，在地下水的酸鹼度及氧化還原條件上，亦影響工程障壁(如緩衝回填材料)及天然障壁(母岩)的圍阻功能。因此，研析處置環境地下水的化學特性及其可能的演化機制，對潛在處置母岩功能/安全評估至關重要(JNC, 2000, c3p9)。基於 SNFD2017 報告所需，在地下水地球化學演化方面，101 年起已逐年進行離島及本島結晶岩體的破裂帶蝕變礦物分析，並與新鮮母岩礦物組成進行比較，獲致數個代表性蝕變(岩-水反應)遠近變化，104 年度起提供水文地球化學應用新鮮及風化岩心礦物組成，進行模擬研究並建構其可能反應路徑，此成果提供離島結晶岩體參考案例，評估化學環境變化(如地質處置地下開挖導致的影響)的可能趨勢之用。105 年度則基於熱力學平衡的基本假設，以地化模式軟體(如 GWB: Geochemist's Workbench®, Version 9.0)進行模擬運算，針對深層裂隙岩層連通狀況的長期岩-水反應過程，以水文地球化學反應路徑模擬結果，評估 1 萬年及 10 萬年間的長期演化特性。在此基礎上，106 年度技術發展上，規劃本島結晶岩體水文地球化學資料蒐集工作，進一步模擬本島結晶岩體深層地下水長期演化特性，說明如下：

#### 3.2.3.1. 深層地下水長期演化特性研究

##### (1) 研究背景

主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A7 項)要求：「水文地質現地試驗以及相應分析模式實例應用研究—佈置密集的鑽孔進行裂隙、水力傳導係數與現地應力試驗，據以評估水文地質特性，選擇適用的分析模式進行分析、驗證與修正，積累特性調查與水文地質模擬實戰經驗，應為國內精進處置技術迫切的課題。」地下水長期存留在岩石中，岩-水反應演化下，導致不同地區有不同的水文地球化學特性；而這些可能的改變，對深層地質處置的核種穩定性(溶解度及遲滯特性)，扮演著關鍵的影響角色，同時也是深層地質處置功能/安全評估所必須考量的重要因子。過去計畫長期累積離島結晶岩水文地球化學特性調查與模擬評



估能力；在此基礎上，進一步利用本島結晶岩體的礦物組成分析資料，並蒐集既有的地下水水質參考資料，進行其岩-水反應路徑模擬，以瞭解本島結晶岩體的岩-水化學反應機制，並推估深層地下水的長期演化特性，據以跟離島結晶岩體深層地下水長期演化特性進行對比。

## (2) 研究目的

利用岩-水反應路徑模擬，來瞭解岩石及其周圍水質條件，在不同的外在時空背景變化下，可能發生的化學變化，例如：pH 和 Eh 的改變、次生礦物的形成，建立研析處置環境地下水的化學特性及其可能的演化機制的技術能力，對不同結晶岩體的功能/安全評估技術發展至關重要。

## (3) 研究內容

### (a) 反應路徑模擬

106 年度先蒐集本島結晶岩體的礦物組成分析資料，以及既有地下水質資料，比照過去離島結晶岩體水文地球化學模擬所需基本資訊進行彙整。採用 GWB 進行反應路徑模擬所需參數表的建置。針對每種情境案例的反應路徑模擬，均會包含相對反應速率，及採用礦物溶解或沉澱反應速率方程式之反應動力等兩種模式；前者可供快速研判反應系統達最終平衡時的化學特性，後者則供研判反應系統隨時間的可能演化情形。

### (b) 礦物資料蒐集

本島結晶岩體鄰近大理岩與片岩接觸帶。岩理上多具明顯的片麻狀構造，具有暗色鐵鎂礦物含量多的特徵，初步從肉眼辨識主要礦物組成為長石、石英、黑雲母，並含有綠泥石、方解石、黃鐵礦等礦物。片麻狀構造發達的岩段可能是岩體在地殼深部受到韌性剪切帶活動的影響，靠近剪切帶中心的礦物變形最大，顆粒變細，片麻狀構造最發達；相較之下，遠離剪切帶的岩段，不受剪切帶影響，呈現原有岩體特徵，礦物仍具散點狀分布與流動構造的花崗岩(但仍受過輕度變

質作用影響)，因此可知本島結晶岩體受變質與變形作用前的原岩為花崗岩。此特徵與芬蘭片麻岩質母岩類似。原本花崗岩體主要組成如長石類、石英礦物，屬於不具核種吸附能力的礦物；僅含少量雲母類礦物，具核種吸附能力。因地質演化歷程，經歷了輕度至中度變質作用，形成具明顯葉理構造之變質花崗岩體，在主要組成的石英、長石類礦物中，均間夾或富集具核種吸附能力的礦物，如綠泥石類、雲母類、絹雲母類、方解石等。這些礦物資訊對岩水反應研究相當關鍵。

#### (c) 地化模擬作業

地下水質資料方面，此區經查未曾進行封塞取樣分析，現階段僅以現有公開資料蒐集為主。針對反應路徑中可能參與反應的礦物相，將蒐集深層地層完整新鮮岩樣的分析資料，用以決定礦物種類及組成比例，並蒐集相對應的熱力學資料。在反應路徑模擬過程中，礦物相的選擇是一個相當關鍵且繁瑣的工作，尤其是涉及反應時間的計算。至於各礦物的溶解或沉澱、離子與離子間的可能化學反應，在不同化學環境下，會有不同的反應路徑；因此，需要針對模擬結果與岩樣實際觀察礦物特徵相互比對，修正計算軟體的設定。透過反應動力學模擬結果，與實際岩樣礦物分析的比對與調整，力求反應路徑模擬結果具有合理性與代表性。

#### (4) 預期研究成果

蒐集本島結晶岩體水文地球化學基礎資料，進行其岩-水反應路徑模擬，後續年度可針對不同情節演化，瞭解岩-水化學反應機制，進而推估深層地下水的長期演化特性。提供未來進行功能/安全評估之用，亦可提供離島與本島結晶岩特性比較的依據。

#### 3.2.4. 核種傳輸路徑

在結晶岩深層地質特性中，由於岩性緻密的關係，可作為天然的屏障。地下水順著裂隙網路緩慢流動，少數連通的裂隙帶將成為核種

的主要傳輸路徑。因此，瞭解岩體中裂隙構造的分布為處置設施是否安全的重要條件之一(JNC, 2000, c3p11)。雖然連通的裂隙網路是核種的主要傳輸路徑，但核種亦可藉由其在裂隙圍岩的擴散機制，降低其在地下水中的濃度，且在裂隙中的充填物與圍岩的礦物組成，對不同的核種會造成不同的吸附效應，使得由處置設施近場外釋的核種，可能因圍岩擴散及吸附等機制而遲滯核種由地質圈遷移至人類生活圈的傳輸速度。

本計畫結合現地裂隙量測數據，模擬結晶岩裂隙的地下水流分布情形，以發展 DFN 穩態地下水流數值模擬方法，104 年度以裂隙統計特性進行三維離散裂隙網路數值模擬，應用已發展的 DFN 穩態地下水流數值模擬技術，模擬結晶岩裂隙的地下水流分布特性。105 年度針對擴尺度議題，以參考案例岩層與構造幾何資訊與水文地質特性(Reference Case: Table 2)，透過與瑞典 SKB 國際交流，建立模擬案例，持續發展裂隙連通性模擬技術及考量岩脈群阻水構造對劉場的影響。在此基礎之上，106 年度技術發展規劃如下：

#### 3.2.4.1. 整合型三維離散裂隙岩體地下水流數值模擬方法研究

##### (1) 研究背景

處置系統模擬應涵蓋的區域，即近場處置坑道所在的母岩及遠場的裂隙岩體，並盡可能延伸至生物圈，相關的空間尺度可能達到近百平方公里；若將整個模擬區域均視為 DFN，在無法調查到如此大範圍深部岩體的裂隙構造分布下，需以模擬方式獲得代表性的裂隙特性參數。DFN 數值模擬產生的裂隙數目動輒超過 $10^7$ 個，所有的 DFN 數值模擬程式均無法處理如此數目龐大的裂隙量，故以 DFN 概念進行結晶岩體近百平方公里尺度的地下水及溶質傳輸模擬的可行性極低。若能在保持岩體水力特性的條件下，將 DFN 轉換為等效多孔介質(Equivalent Porous Medium, EPM)，並以計算效率相對較高的 EPM 模擬軟體(如 TOUGH2 等)，對轉換後的 EPM 進行地下水流模擬，則不僅可加快模擬速度，且仍可保持岩體中的重要水力特性。

## (2) 研究目的

根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A4 項)研究發展規劃說明：「裂隙岩體中的地下水流頗為複雜，必須持續研發各種先進水文地質技術，配合地質構造特性，以逐步調查其水力與傳輸特性，以及地下水流分布。」基於過去計畫長期累積離散裂隙模擬的技術基礎，本計畫自 106 年度起發展 DFN 轉換為 EPM 的擴尺度方法。

## (3) 研究內容

運用 SNFD2017 參考案例表二(Reference Case: Table 2)的現地數據，包括井錄資料、地表測線資料、坑道採樣測線及視窗資料，以及地球物理大尺度線形構造資料等，據以分析基本裂隙參數包括：裂隙位態、裂隙強度及裂隙大小；有關地下水流的參數(如導水係數及裂隙內寬)，將參考類似岩性的文獻資料；完成 DFN 數值模擬的裂隙參數表，利用商業軟體 FracMan V7.5，對 SNFD2017 參考案例表二進行全區域的 DFN 數值模擬。採用體積平均擴尺度公式(Wen and Gómez-Hernández, 1996, pxi; Renard and de Marsily, 1997, p254)，發展 DFN 擴尺度計算程式，以 4 種基準(benchmark) DFN 案例所得的理論滲透係數張量，驗證本計畫發展的擴尺度計算程式，並根據地下水流模擬數目與擴尺度計算結果誤差之關係，決定擴尺度所需的最少地下水流模擬數目。

## (4) 預期研究成果

根據 SNFD2017 參考案例表二的地質構造概念模式，在模擬 K 區 DFN 時，大尺度的 F1 與 F2 構造，以及平行的輝綠岩脈構造視為定率式(deterministic)裂隙構造，不包含在 DFN 數值模擬的對象，故在計算裂隙強度時，僅計算完整岩體中的裂隙強度。以深度 70 m 為界，將岩體中序率(stochastic)裂隙之模擬定義區域，分別產出代表淺層風化裂隙岩層及深層裂隙岩層的兩個次裂隙區域。進而分別分析出適用於淺層裂隙岩層及深層裂隙岩層的序率裂隙參數表，以提供三維 DFN 數值模擬使用，提供功能/安全評估範

例輸入參考值，據以達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A4 項)要求。

### 3.2.5. 岩石特性

岩體的熱與力學性質是影響處置設施設計與建造的重要因素。考量 SNFD2017 報告所需之岩石特性資訊與評估分析能力，自 101 年度起針對本土結晶岩進行實驗室參數分析，也針對國內、外現有各類緩衝材料進行資料蒐集。102 年度開始進行本島及離島結晶岩樣的一般物理性質、熱特性及力學等試驗，至 103 年度完成各項試驗，取得參數(如單位重、含水量、比重、吸水率、孔隙率、熱傳導係數、比熱、熱膨脹係數、單軸壓縮強度、抗拉強度、完整岩石的凝聚力及內摩擦角、岩石弱面的凝聚力、內摩擦角、靜彈性模數、靜態柏松比、動彈性模數、動剪力模數、動態柏松比、點荷重強度指數等)，顯示本島結晶岩體岩石特性參數，與日本及芬蘭結晶岩的參數範圍一致。104 至 105 年度完成加溫(最高溫為 80°C)岩石強度與變形參數試驗，累積不同深度、不同溫度的量測資料，相關成果均呈現於 SNFD2017 報告，提供工程設計與功能/安全評估所須之岩石特性參數。

此外，自 101 年起以實驗室尺度進行結晶岩塊的熱與力學量測，並建立相關模擬能力，至 104 年已建立膨潤土與岩塊之熱-力耦合交互影響試驗與模擬能力。在此一基礎上，進一步建置含加熱器、壓實鑄型的膨潤土塊及結晶岩塊尺度的近場環境，進行熱-力耦合岩塊試驗與數值模擬工作。自 105 年開始展開膨潤土及花崗岩近場區域之再飽和現象分析。針對花崗岩及膨潤土再飽和現象的數值模擬需求，建立室內電阻量測花崗岩及膨潤土的設備，並獲取相關參數值，以利後續建構處置場坑道三維電阻率正演數值模型。106 年技術發展規劃如下：

#### 3.2.5.1. 膨潤土及花崗岩近場區域之再飽和現象分析

##### (1) 研究背景

在處置場運轉至封閉階段，工程障壁系統中緩衝材料因鄰近地下水入侵將逐漸趨向飽和。根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(B1 項)研究發展規劃說明：「亟需研究各種緩衝材料特性，測試及選用再飽和及未飽和環境下都能減緩封裝材料的鏽蝕作用，並阻滯地下水流的緩衝材料。」有鑑於測試緩衝材料自未飽和至飽和過程對地下水流阻滯能力，需避免破壞性的監測方法所造成局部的地下水傳輸通道。因此，國際上對於膨潤土與近場花崗岩的再飽和現象評估，多藉由電阻率變化量測為基礎的監測系統，透過建立電阻率與工程障壁材料含水飽和的關係，評估緩衝材料與近場花崗岩的再飽和行為。為確保處置場緩衝材料，所具備的長期阻滯地下水流特性，可運用現地監測電阻變化的技術進行長時間監測與評估，104 年度起蒐集國際相關技術資訊，並於 105 年度開始組裝室內實驗設備，106 年度規劃發展緩衝材料(膨潤土)與近場區域花崗岩之再飽和監控技術，並逐步建立其對應參數。

#### (2) 研究目的

藉由建立電阻率參數與膨潤土、花崗岩的飽和度關係，以及建構處置場坑道三維電阻率正演數值模型，模擬地下水入侵再飽和時與地電阻監測影像之關係。初步掌握岩塊尺度工程障壁系統再飽和監測技術，藉由監測電阻率變化與飽和度關係，進一步將現地監測資料與功能評估結果進行比對驗證，可供未來坑道試驗技術發展所需。

#### (3) 研究內容

利用 105 年度所建立之室內電阻率量測試驗方法，準備膨潤土與花崗岩試體，並持續量測不同飽和狀態花崗岩與膨潤土電阻率。此外，利用室內試驗建立之膨潤土與花崗岩電阻率參數，及 105 年度完成之正演模擬技術，模擬處置坑道三維電阻率正演數值模型，模擬於地下水環境處置坑道的含水量變化，分析逆推電阻率影像，據以探討電阻率的變化反映再飽和的過程。

#### (4) 預期研究成果

根據不同飽和條件膨潤土與花崗岩電阻率參數，應用於處置場坑道三維電阻率正演數值模型中，模擬地下水入侵時於處置坑道之電阻率監測影像剖面，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(B1 項)之要求。

### 3.3. 地質處置合適性研究

各國在進行處置場址評選、處置設施功能/安全評估時，均因大地構造環境與地質條件特性的不同，所需考量的地質圈特性亦會有所不同。需避開的不合適自然條件，通常都有公開資料，如：活火山、活動斷層、泥貫入體及礦產資源分布位置等，距離不利條件夠遠，則所受影響會大幅降低。

臺灣的地質環境大致上與日本類似，除大地構造與演化特性相近外，原本日本地質處置計畫僅考量玻璃固化的再處理核廢料(JNC, 2000, c1p1)，在福島核災後也考慮直接處置用過核子燃料的可行性。由今觀之，臺灣與日本的地質處置計畫推動時程與目標相近：目前均未選定候選場址，亦未決定處置母岩種類；未來仍規劃十多年進行處置場址評選；但調查與評估技術的最新成果，均以花崗岩為技術發展展示的對象(如 JNC 完成的 H12 報告，及 NUMO 於 2015 年編撰的安全案例報告)。

在技術發展上，臺灣與日本均保留未來各種潛在處置母岩的可能性，長期進行一般性處置設施功能/安全評估的技術發展，並聚焦在考量與大地構造架構有關的地質演化、火山活動、斷層(地震)活動，以及抬升與沉陷、氣候與海平面變遷等環境因子對處置設施的長期安全影響。有鑑於這些與自然條件有關的深層地質資料，須相當長時間的調查及技術發展，以確實掌握現地特性隨長時間地質尺度演變的資料，如此才能據以探討數十萬年乃至數百萬年尺度長期穩定的功能/安全評估條件。

### 3.3.1. 臺灣的大地構造架構

臺灣位於歐亞大陸東緣，坐落於環太平洋構造活動帶上，因此，臺灣地區的火山活動和斷層(地震)活動，皆與臺灣大地構造的演化息息相關。

考量 SNFD2017 報告所需之大地構造架構特性資訊與評估分析能力，103 年度開始進行臺灣大地構造架構與演化等相關文獻資料(空間上涵蓋臺灣及臺灣海峽周邊海陸域資料，時間上涵蓋控制各岩層形成之地質歷史)的蒐集與回顧，藉此掌握臺灣大地構造架構與火山活動時空變化的更新資訊與認知。至 105 年度起針對臺灣北部的火山活動與相應產生的深層熱流特性，以及北部正斷層系統，過去百萬年來地質歷史的紀錄，進行相關文獻資料的蒐集與回顧，提供火山活動及其影響範圍的研究成果，作為 SNFD2017 報告撰寫的依據。

根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A6 項)研究發展規劃說明：「...地震頻繁且規模更大，而國內隧道維護檢測經驗顯示地下坑道受震可能出現襯砌裂縫、結構損傷等現象，研究報導亦指出斷層錯動、地表破壞與地層震動皆可能造成地下坑道不同型式的應力增量與結構損傷，然此部分國內外研究皆不多見，有必要自岩體波傳特性、岩石動力反應、裂隙受震反應以及相應的分析模式等，及早投入研究。」本計畫除蒐集全國地震站網資料，自 101 年度開始針對地震網涵蓋不足地區增設微震站，累積數年本島結晶岩區域性微震資料，可監測區域變形及破裂產生之地震叢集分布，以數值解算地震特徵，並進行細部應力條件之逆推，以呈現出不同深度岩體應力條件的變化，以及微震空間分布與結晶岩體周遭構造的關係，提供 SNFD2017 報告撰寫的依據；並於 104 年度取得美、日井下地震陣列的地震數據進行研究，105 年度建立之深層結晶岩盤地震衰減模式，採用井下之量測紀錄，獲致不同大小之地震隨距離與深度衰減之關係。此外，岩石動力反應與裂隙受震反應的分析模式，亦與瑞典 SKB 合作進行技術交流，相關規劃詳見第 4 章。



長期而言，本計畫持續蒐集微震站網監測數據，針對地震帶孕震構造、深層地殼大地應力變化及裂隙延伸等議題，逐步發展調查與解析技術，106 年度技術發展規劃如下：

### 3.3.1.1. 構造活動性微震監測與分析技術建立

#### (1) 研究背景

日本西南部與臺灣東北部均受到菲律賓海板塊對歐亞大陸隱沒作用的影響。菲律賓海板塊在臺灣東南側與歐亞大陸板塊發生弧陸碰撞作用；同時，臺灣東北端向歐亞大陸下方進行隱沒作用，甚至拉張出弧後盆地，形成沖繩海槽。深層地震顯示從碰撞帶往弧後拉張區域的大地應力，有從擠壓應力場轉橫移斷層，進而變成張裂應力場的趨勢。根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A6 項)規劃，構造活動性的微震監測與分析技術建立，有助於明確了解區域應力環境與岩體破裂模式。

#### (2) 研究目的

根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A6 項)研究發展規劃，針對臺灣結晶岩體應考量到受到高地震頻率及更大地震規模影響，建立相關評估技術。本計畫以實測微震數據，研析岩體波傳特性、岩石動力反應、裂隙受震反應以及相應的分析模式。

#### (3) 研究內容

基於 105 年以日本井下陣列數據，完成地盤地震衰減模式，探討隨處置深度之震波衰減關係，於 106 年度規劃利用本島微震監測網蒐集的數據，發展地震叢集資訊分析與震波成像分析技術。並以地震觀測資料，進行區域性地殼應力方向逆推，了解深層地下應力與地震活動度之關係。在此孕震技術解析基礎上，評估震源破裂尺度及岩體受強震條件下的地動響應。

#### (4) 預期研究成果

在尚無本島結晶岩體井下陣列時，本計畫以地震站網蒐集的震波數據，結合深層岩體的波速資料，可進一步發展評估岩體地下強地動行為相關技術。有鑑於我國並無地下實驗室可取得相關資料，

多年蒐集日本、美國井下地震陣列數據後，可針對我國所需建立泥岩及結晶岩體地下深層地盤受震衰減模式分析技術，進而比較泥岩與結晶岩之震波衰減特性。提供功能/安全評估所需裂隙受震反應之用，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一 (A6 項) 要求。

### 3.3.2. 抬升與沉陷作用

岩體的抬升或沉陷，主要受大地構造架構及其演化特性控制。對於「深層地質處置」而言，岩體的抬升伴隨著剝蝕作用，將對深層地質處置有不利影響；相對地，岩體發生沉陷並伴隨著沉積作用，剝蝕侵蝕作用因而停止，對深層地質處置的環境條件有利 (JNC, 2000, c3p33)。

根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一研究發展規劃 (A1 項) 說明：「...區域地質穩定性需要長期的觀測分析，依據國內最近的 GPS 及水準測量資料，臺灣本島地表的抬升速率最高可達每年 2 至 3 公分，這個數字遠大於以前的認知，因此地表抬升對地下處置可能的影響應加以重視，相關的監測研究亦應盡早開始，以便在 2017 年時能有足夠的監測資料做為分析評估的基礎。」以及 (A3 項) 說明：「...現地調查研究，以確實估算第四紀以來的地體抬升及地表侵蝕速率...。」自 101 年起本計畫蒐集不同時間尺度評估岩體抬升或沉陷的研究資料，包括數十年尺度的 GPS 連續監測數據、數千年至數萬年尺度的河階演化研究、數百萬年尺度的熱歷史定年研究等，至 106 年撰寫 SNFD2017 報告中，針對臺灣山區已獲致不同時間尺度剝蝕速率估算方法，完成相關國內外研究成果的回顧 (Derrieux et al., 2014, p231; Chen et al., 2015, p2264)，摘述如下：

#### (1) 量測河流沉積物的方式：

分析數十年主要河流懸浮物載量紀錄，顯示中央山脈估計範圍為 2 mm/year 至 8 mm/year；而全台為 5 mm/year，接近由河流沉積物的宇宙核素測定剝蝕率 5 mm/year 的估值；此法受到颱風

和地震導致的土石流與山崩作用影響甚鉅，即無法代表長期地質時間的剝蝕率。

(2) 以低溫定年估算冷卻率的方式：

應用數百萬年尺度的低溫定年法，主要靠核飛跡法的年代值，加上熱歷史與構造歷史的演化，估計出中央山脈的剝蝕率範圍約 3 mm/year 至 6 mm/year，但近年來重新再以二維熱-力學演化模型加上熱流校正後，顯示整個造山帶呈現較低的剝蝕率，約 2 mm/year 至 4 mm/year (Fuller et al., 2006, p1; Derrioux et al., 2014, p231)。

(3) 應用磁黃鐵礦分布的估算方式：

Horng et al. (2012, p11)提出造山帶剝蝕速率自晚期上新世以來有加速的現象，從原本低於 1 mm/year 提升到高於 2 mm/year，符合臺灣弧陸碰撞作用發生的時間。

(4) 宇宙核素分析的方式：

Derrioux et al. (2014, p243)利用宇宙核素所獲得的臺灣山區流域剝蝕率範圍，發現臺灣中央山脈東西兩側的剝蝕率有明顯差異，符合大陸楔模式，西側剝蝕率較低(~1 mm/year 至 3 mm/year)，有較低緩的山形；東側較高(~4 mm/year 至 5 mm/year)，位於較深部變質岩與較陡峭的山勢，河流下切較深，因而反映出剝蝕率較高(Derrioux et al., 2014, p. 242)。應用宇宙核素方法獲得流域的剝蝕率，遠低於由水準測量山區高抬升率的範圍(10 mm/year 至 15 mm/year, Ching et al., 2011, p. 7)，也遠低於河流懸浮物估算的剝蝕率範圍(最高達 20 mm/year, Dadson et al., 2003, p 649)。

Derrioux et al. (2014, p231)指出若以整個造山帶來看剝蝕速率，不同的估計方式都涵蓋了 3 mm/year 至 5 mm/year 這個範圍，對局部地區或大區域而言似乎都沒辦法更精確了。從河流沉積物來估算，顯然受到颱風和地震導致的土石流與山崩作用影響甚鉅，即無法代表長期地質時間的剝蝕率。另一方面，低溫年代學的模式因臺灣碰撞作

用可能不屬於一種穩定剝蝕的作用，因此探討長時間的剝蝕率應更為審慎。河階演育研究提供了數千年至數萬年尺度抬升與剝蝕作用的研究案例，透過東部大範圍具代表性 20 條河系的陡峭率及宇宙核素剝蝕率的比較(Chen et al., 2015, p2264)，顯示山脈北段剝蝕率已長期降低且趨於穩定，屬於後造山期坍塌的大地構造環境。在此基礎上，106 年度技術發展規劃如下：

### 3.3.2.1. 地表變形監測與岩體變動趨勢分析

#### (1) 研究背景

臺灣花蓮與中壢連線以北，受到菲律賓海板塊向歐亞大陸隱沒作用的影響，造山運動在近百萬年間已轉為後造山期張裂、崩毀及沉陷的大地構造環境。大地應力從擠壓應力場轉橫移斷層，進而變成張裂應力場的趨勢，影響了區域的地殼變動。根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A1 及 A3 項)規劃，需進行數十年、數百年至數萬年、百萬年時間尺度的地殼變動分析，了解抬升與剝蝕作用或沉陷與沉積作用對岩體長期穩定性的影響。

#### (2) 研究目的

根據主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A1 及 A3 項)研究發展規劃，針對臺灣結晶岩體持續進行大範圍地殼變動監測，分析長期抬升或沉陷速率，據以探討結晶岩體之長期穩定性。

#### (3) 研究內容

基於 101 至 105 年 GPS 連續監測結晶岩體沉陷趨勢的數據，於 106 年度規劃擴大學界合作，聯合解算區域性共 10 個 GPS 連續站數據，將相鄰任 3 站形成之三角網，利用 GPS 速度場，以 Calc\_str 程式來計算應變。此 10 個 GPS 站跨過數個山間河系及大地應力轉變區域，藉由各 GPS 連續站全天候高精度連續觀測的特性，估計各站的水平及垂直速度場，對於岩體的位移變形在三維空間中的伸張及壓縮行為，推導變形位移的行為趨勢，提供岩體長期穩定性評估之用。

#### (4) 預期研究成果

持續累積結晶岩體 GPS 連續觀測站高精度定位解算的成果，進而利用大範圍 GPS 監測網數據，研析區域性岩體抬升或沉陷作用的機制，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A1 及 A3 項)要求。

### 3.3.3. 氣候與海平面變遷

由於全球氣候變遷為海水面長期演變之驅動力，海水面變遷對處置系統造成之衝擊包括：改變地下水流和地下水化性、地下水位變動、海/淡水介面遷移、侵蝕/淤積作用等，若足以干擾處置系統的穩定地質環境，長期對處置設施功能的影響將為後續功能/安全評估的重點。本計畫 101 至 104 年度蒐集涵蓋山間數個河域的地形資料，並藉由臺灣全島研究沉陷盆地與沉積層序的基礎資料，解析河系地形演育、廣域的山脈沉陷與盆地演化歷程，以及代表性沖積扇的海/淡介面變遷。

自 104 年度起，台電公司與瑞典 SKB 合作，以參考案例為標的，蒐集數值模型所需不同時間尺度之地殼變動與海水面升降資料，據以探討海/淡介面的變遷，建構水文地質概念模式模擬氣候變遷下循環性海平面升降的演化與影響，作為 SNFD2017 報告論述的依據。

另一方面，105 年起為了解海水面高精度資料、測高衛星及區域地殼變動相關研究的關聯性，展開絕對海水面資料蒐集，106 年度技術發展規劃如下：

#### 3.3.3.1. 臺灣地區絕對海水面變化之研究

##### (1) 研究背景

對於處置場址的功能/安全評估卻是不可忽略的，因為海水面的升降變化，會影響地下水流特性、地下水化學特性和地殼應力變化，這些都是處置場址選擇的重要因素(SKB, 2013, p11)。103 年度起蒐集地質歷史紀錄相關文獻，分析臺灣東部萬年尺度海水面升降及河口沖積扇海淡介面變遷歷史，104 年度根據西南部相關文獻，萬年尺度海淡介面變遷亦完成詳盡地質歷史回顧。這些文

獻顯示臺灣不同地區的地殼升降變動有差異，即使有相同海水面變遷條件下，海淡介面變遷亦有差異。針對氣候與海平面變遷，已完成不同時間尺度資料蒐集彙整，針對參考案例安全評估所需的百萬年尺度參考演化，使用 DarcyTools 模擬不同時間尺度下，海水面變遷與地下水流場變化詳見第 5.3 節的規劃。

在此基礎上，進一步發現近期海水面變遷紀錄上，特別是驗潮站的紀錄可以提供臺灣各地區地殼變動數十年尺度的參考。Chang et al. (2012, p.98)指出利用驗潮站記錄即時陸地與海水位相對的變化，可用以估計數十年尺度臺灣沿岸地區地殼垂直運動量；同時，需參考測高衛星於臺灣周圍海域的測量值，取得絕對海水面變化的時間序列，進一步探討長期海水面變化與陸地垂直地殼變動的趨勢。

有鑑於海水面之變化並非均勻性的，存在一些區域性的差異，這些差異可能來自於海底地形起伏、地體的抬升/沉陷、洋流流速和路徑改變、地球重力場的變化以及大氣環境的影響等因素。因此，需要透過多項的研究比對，方能估計出區域的變化量值，作為後續功能/安全評估參考使用。在近期海水面變遷紀錄上，特別是驗潮站的紀錄可以提供臺灣各地區地殼變動數十年尺度的參考。Chang et al. (2012, p.98)指出利用驗潮站記錄即時陸地與海水位相對的變化，可用以估計數十年尺度臺灣沿岸地區地殼垂直運動量；同時，需參考測高衛星於臺灣周圍海域的測量值，取得絕對海水面變化的時間序列，進一步探討長期海水面變化與陸地垂直地殼變動的趨勢。105 年度經海潮、逆氣壓以及基準偏移改正後的驗潮站資料中，仍包含海水面變動與地表垂直變動訊號，因此計算成果為相對於岸邊基準點之 SLR 速率，顯示臺灣四周海域相對海水面呈現上升情形，由全部時間段資料計算的相對海水面速率平均值為  $3.51 \pm 0.19$  mm/year，其中橫瀾島為  $19.33 \pm 2.26$  mm/year，約為平均速率的 5 倍，原因為該站地表垂直變動所導致，將於後續年度進行地殼變動分析。

## (2) 研究目的

為建構臺灣地區絕對海水面觀測系統，藉此取得受氣候變遷影響下之臺灣周緣海水面變化資料，作為後續環境衝擊的直接佐證數據，進而探討數十至百年時間尺度之海水面的變遷與氣候變遷的影響機制，提供後續研究抬升/沉陷作用的參考基準資料。

(3) 研究內容

進行臺灣地區絕對海水面變化研究，將進行附近海域測高衛星與驗潮站資料改正，利用改正數據計算 10 年與 20 年的相對與絕對海水面升降變動速率。後續將結合臺灣少數幾座驗潮站與 GPS 觀測站共站，進一步分析驗潮站基準與 GPS 高程的差異，作為後續資料觀測與分析驗證參考使用，觀測資料將納入相對和絕對海水面變化速率的估算工作中。

(4) 預期研究成果

長期計畫建構臺灣地區絕對海水面的監測與研析技術，評估氣候變遷影響海水面升降與岩體抬升/沉陷作用的影響關聯性，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A1 及 A3 項)要求。

#### 4. 處置技術與工程設計

用過核子燃料最終處置工程特點，與一般工程相較，在於地下設施存在地質不確定性、設施完整性的確保期程長、並且須考慮各種內部因素的變化。因此，在工程設計需求的考慮，需包括貯存的燃料、材料特性、地質與地下水參數、地震環境與氣候演化變遷，使工程設施的失效可能性降低，發揮圍阻放射性廢棄物的功能。為使最終處置工程能確實發揮其功能，我國主管機關已採法規加以規範，「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第 8 條，規定「高放處置設施應採多重障壁之設計」；因此，工程設計之研究對象，除了天然障壁的處置母岩以外，包括廢棄物罐、緩衝材料、回填材料、處置孔、處置隧道及封塞，構成工程障壁；以及運轉期間的接收系統與封裝廠等地表設施、豎井、斜坡道與運轉隧道等地下連通設施。這些系統與組件所受的熱、水、力、化作用，均為評估設計需求，而導致設計需求的地震、地質、氣候影響亦須研究，方能建立分析模型或進行測試，以確認設計成果。

本階段在 SNFD2009 報告完成初步可行性評估後，開始採用瑞典 KBS-3 系統做為我國工程技術本土化的對象，本土化發展可區分為實體設計建造技術、測試技術、數值模擬技術等方面；因此，本階段除配合階段性的 SNFD2017 報告，完成技術可行性評估之任務，並參與各項審查及報告修改與補充工作；另一方面，則為賡續執行 KBS-3 處置系統本土化之研究，主要進度包括輻射源項及核種特性、處置概念與系統設計技術、廢棄物罐技術、緩衝與回填材料技術及處置設施設計/建造/運轉/封閉/管理技術，除進一步佐證技術我國最終處置技術之可行性，並累積數據、技術與經驗，修正長期預測模式，朝向達成最終處置工程之路邁進。

配合上述技術發展目的，本年度在處置技術與工程設計發展規劃上，將於後續小節區分 5 項子項計畫進行研究背景、研究目的、研究內容與預期研究成果之說明，5 項子項計畫分別為：

- (1) 輻射源項及核種特性研究
- (2) 處置概念與系統設計技術



- (3) 廢棄物罐研發技術
- (4) 緩衝與回填材料研發技術
- (5) 處置設施設計/建造/運轉/封閉管理技術研發

#### 4.1. 輻射源項及核種特性研究

##### (1) 研究背景

- (a) 用過核子燃料廢棄物罐設計，需採用我國核子燃料特性進行分析，並且在進行安全評估時，也應使用我國之關鍵核種，包含輻射劑量、核子臨界、核熱分佈、水輻射分解與氣體分裂產物等核種特性，均為本土化研究議題，並根據這些特性及法規要求，建立我國之設計需求，以及處置設施運轉期間的安全性，藉由研究過程建立預測評估模式。
- (b) 因此，將根據我國核能電廠現況，參考核一、二、三廠用過核子燃料輻射源項，統計分析用過核子燃料運轉與特性資訊，並預估台電公司各核能機組到除役時將產生，而須送往最終處置的保守數量。再以 ORIGEN-S 程式/方法為基礎，評估用過核子燃料衰變熱與輻射特性，並進行必要的分析工作。

##### (2) 研究目的

- (a) 根據臺灣核能電廠實際運轉歷程，提出適合我國條件之用過核子燃料射源項特性、關鍵核種存量等評估資訊，確保廢棄物罐設計，在罐體熱傳、輻射屏蔽與核子臨界方面符合要求。並建立整合性用過核子燃料特性資料庫，針對廢棄物罐或處置設施進行最佳化之探討。
- (b) 為掌握水輻射分解及其產物的反應機制，以瞭解地下水與射源項產生的水輻射分解反應產物，則需對廢棄物罐材料或外部材料的影響，分析處置場中水輻射分解效應的產生機制，以供高放處置計畫進行相關的安全評估分析。

##### (3) 研究內容

105 年度已完成源項、核種盤存量、衰變熱、臨界、罐體熱傳與屏蔽之初步計算。本年度則依據評估經驗回饋、資料收集程度更新與資料庫建立等目標，持續進一步研究。

(a) 用過核子燃料存量與源項特性評估技術研究

依據安全評估初步成果之回饋及運轉歷程相關資訊更新，進行重要核種研究，並持續對 SCALE 系統 ORIGEN-S 模組更新參數及運算，對高放處置初始熱源、輻射源項、氣體分裂產物與關鍵核種存量，進行保守合理的評估。

並且規劃執行用過核子燃料特性資料庫建立，持續蒐集國內電廠用過核子燃料組件設計與運轉歷程資訊，據此評估 FEPS 各種考量條件下(乾貯、高放近場或遠場等)射源項與關鍵核種資訊，並將其彙整、發展出簡明易瞭解之查詢使用者介面，以建立整合性核後端用過核子燃料特性資料庫。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.4.1 節熱與放射性之科學論證。

(b) 廢棄物罐核子臨界、表面輻射劑量率與熱傳分析

針對 105 年度完成之工作項目，持續以蒙地卡羅法計算機程式(MCNP 等)，進行用過核子燃料貯存於廢棄物罐後之臨界分析，針對燃料束裝載進行較佳化裝載策略研究，了解安全餘裕。並執行燃耗效益(burnup credit)等臨界分析研究。

表面輻射劑量率則以蒙地卡羅法計算機程式進行廢棄物罐表面輻射劑量率計算，作為後續廢棄物罐屏蔽設計與工作人員劑量評估之依據。

熱傳分析則以國內用過核子燃料射源項衰變熱作為參數，評估廢棄物罐表面溫度，作為處置場規劃之依據。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.4.1 節熱與放射性之科學論證。

(c) 地下水輻射分解研究

根據國際文獻研究結果，用過核子燃料處置場中的關鍵核種若與地下水接觸，將會造成水輻射分解反應，產生過氧化氫

( $H_2O_2$ )及自由基( $H^*$ ,  $HO^*$ ,  $HO_2^*$ ,  $OH^-$ ,  $H_3O^+$ )，其反應產物易對處置場中廢棄物罐或其他材料造成加速腐蝕現象，並影響其他相關內部組件。故本研究將分析水輻射分解之反應機制、反應產物以及產量估算，配合相關現地資料或設計條件提出產物之分析結果，並評估水輻射分解反應產物對內部組件造成的影響，以提供後續安全分析、廢棄物罐設計及整體性評估的分析方法。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.4.1 節熱與放射性之科學論證。

#### (4) 預期研究成果

##### (a) 用過核子燃料存量與源項特性評估技術研究

持續提升存量與源項特性評估技術，建立有關之沸水式與壓水式反應器用過核子燃料組件廢棄物罐衰變熱與活度隨時間變化示意圖，廢棄物罐屏蔽分析所需廢棄物罐表面劑量率之射源項，廢棄物罐熱傳分析之衰變熱源，廢棄物罐臨界分析之燃料組件核種組成，近場、遠場與生物圈安全評估核種組成等資訊。

##### (b) 廢棄物罐核子臨界、表面輻射劑量率與熱傳分析

持續提升核子臨界與表面輻射劑量率及熱傳分析技術、更新計算結果，提供廢棄物罐溫度分佈與時間之關係。

##### (c) 地下水輻射分解研究

完成地下水輻射分解現象研究，探討我國用過核子燃料內阿伐、貝它射源分析、射源項與地下水輻射分解機制的相關反應機制及輻射水解產物對廢棄物罐效應之影響，提出殘留水限制量的建議。

## 4.2. 處置概念與系統設計技術

### (1) 研究背景

(a) 現階段採 KBS-3 系統作為處置工程發展基礎，此系統的設計流程與設計參數決定方法，須深入研究以便進行本土化設計。

之前已辦理研討會邀請瑞典專家，講述 KBS-3 之處置配置設計方法，重要影響因素包括熱傳能力與地震剪力，將進一步進行本土化設計案例研究，提升處置工程能力。

- (b) 長期穩定評估方面(處置場封閉後)，廢棄物罐受裂隙剪力之影響，是廢棄物罐失效的主因之一，此裂隙剪力位移源自於地震的發生，故對處置場配置設計須建立地震導致剪力位移的設計需求，評估離散裂隙網路和處置場配置的幾何關係，以及地質環境長期變遷導致的應力演化。參考瑞典方法，需以動態地震模擬技術，結合震源參數研究與離散裂隙網路，獲得岩體裂隙之剪力位移量，並透過多次將離散裂隙網路實現值，建立離散裂隙網路和處置場配置的幾何關係統計資料，方能提供做為廢棄物罐圍阻失效數量之評估。
- (c) 對於短期的運轉安全，我國引進 KBS-3 系統，除了廢棄物罐與緩衝材料的設計，尚有地表設施、地下連通設施、運轉設備等結構系統組件，為確保營運安全，需進行耐震設計工作；因此，將地震危害度應用於最終處置運轉設施，為必要之發展，確定所需的地震設計反應譜之後，才能進一步進行廠房與隧道設計最佳化，評估設備的引進或自行設計。

## (2) 研究目的

- (a) 本土化工程設計首先將研究 KBS-3 處置概念在我國的適用性，建立各處置設施之設計流程，評估我國與其他國家的差異，在處置場配置的需求，廠房或地下結構的自行設計，組件由國外引進或是在國內生產，建立評估資料，以決定自主設計或是既有設計最佳化的程度，在建立高放處置場設計成果時，需提供佐證資料。
- (b) 工程障壁與處置設施之設計及配置，需達成處置安全功能指標，確保處置設施應於設計年限內執行必要功能，使得處置系統能有效阻絕放射性物質。處置系統地下設施的斷面設計，須考慮運轉期間之地震危害度，計算隧道周圍岩石之安全係數；長期穩定性方面，計算廢棄物罐受地震剪力設計需求，

配置設計方面須計算離散裂隙網路和處置場配置的幾何關係；因此，將研究相關設計參數，以提供設計之需(隧道長軸方向、處置孔配置及隧道尺寸等)。

### (3) 研究內容

105 年度已完成處置設施配置、廢棄物罐、緩衝材料、封塞等設計資料蒐集，探討處置設施配置設計的流程；對歷史地震對深層處置設施的影響，則邀請專家學者進行討論與資料彙整，獲得初步震源參數；而地震模擬技術的建立方面，則已建立分析模式，並與國際研究成果加以比較，驗證我國自主技術。本年度則將持續進行參數研究，並由模擬的成果回饋評估參數的不確定性，建立決定處置設施的地震設計需求的方法，做為持續不斷累積地震、地質參數而更新地震需求模式的基礎，使我國處置設施設計跨入特定場址(Site Specific)設計的第一步。

#### (a) 處置概念與設計流程及佈置研究

持續進行 KBS-3 文獻資料蒐集，研究處置設施之設計流程，探討處置設施的設計影響因子，以及最佳化設計技術，並依照參考案例之地質參數，建立我國設計案例。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.2 節整體處置概念及工程障壁系統與地質處置母岩的功能、第 4.3 節設計流程、第 4.4 節影響處置概念因子、第 4.5.3 工程障壁的規格與配置、及第 4.5.6 節處置設施設計之科學論證。

#### (b) 地震危害度分析

蒐集文獻建立海陸域斷層震源特性參數，彙整研究區域之地震目錄，統計地震發生頻率，建立震源參數邏輯樹，依照核能規範的方式進行地震危害度分析、參數拆解分析。研究場址地層速度構造，考量波傳分析參數不確定性，執行地盤反應分析，建立設計需求之地震反應譜。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.4 節地下設施之科學論證。

#### (c) 災害歷史地震震源模型及其敏感度分析研究

依照 SKB SR-Site 之地震剪力評估技術，研究地震模擬法規與案例，進行我國 2 個歷史地震之研究：1604 年泉州地震、1920 年花蓮地震，分析震源幾何模型，獲得震源參數，評估參數不確定性，提供剪力設計需求數值模擬所需參數。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.6 節處置設施設計之科學論證。

(d) 廢棄物罐剪力設計需求研究

參考 SKB SR-Site 做法，使用模擬軟體 3DEC 模擬地震引發鄰近裂隙之位移量，瞭解廢棄物罐剪力設計需求；統計裂隙幾何特性和位移量之關係，利用離散裂隙網路多次實現值，進行處置孔配置影響研究，提供處置配置設計參數。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.6 節處置設施設計之科學論證。

(4) 預期研究成果

(a) 處置概念與設計流程及佈置研究

預計完成 KBS-3 處置概念發展歷程文獻整理，並說明 KBS-3 本土化的適用性，建立處置配置設計流程及佈置技術。

(b) 地震危害度分析

完成地震危害度分析，提供運轉相關設計所需地震反應譜，為單自由度結構之地震反應與結構頻率關係圖，應用於耐震分析。由參數拆解進一步評估控制地震之規模與距離範圍，由地盤反應分析結果，或深層處置設施之地盤放大效應，提供地下設施地震分析參考。

(c) 災害歷史地震震源模型及其敏感度分析研究

進行地體速度構造、震源斷層幾何參數評估。以地震模擬進行波傳計算，並觀測震度比較，回饋檢討震源參數之不確定性。產生特定歷史地震之震源參數模型，包括巨觀參數、微觀參數，供剪力位移模擬使用。

(d) 廢棄物罐剪力設計需求研究

完成剪力位移模擬數值模式，比對國際研究成果，提升處置配置設計之地震剪力位移需求擬定能力，使處置配置設計本土化能力提升。

### 4.3. 廢棄物罐研發技術

#### (1) 研究背景

- (a) 深層地質處置相當重視地震引起的不均勻載重對廢棄物罐影響，因此，採用分析或測試進行廢棄物罐耐震能力的驗證，是具體說明安全性的方法。我國處置概念參考瑞典 SKB，其廢棄物罐受岩體裂隙剪力位移的驗證工作，結合地震設計需求與數值分析、力學試驗，建構出連貫的廢棄物罐長期安全資訊。我國的地震環境與瑞典不同，且位於地震帶，相較瑞典地震頻率高，因此技術本土化工作，應持續關注與發展廢棄物罐耐震設計與評估技術。
- (b) 工程障壁圍阻失效的主因包括地震剪力位移、腐蝕，在 KBS-3 處置系統，廢棄物罐採用銅殼的低腐蝕率來抵抗腐蝕，並且於廢棄物罐外包覆高密度的緩衝材料，降低地下水流速，延緩各種腐蝕因子接觸廢棄物罐的時間，進而延長廢棄物罐失效年限。腐蝕失效年限為安全評估重要參數，進行 KBS-3 系統本土化過程，需積極引進評估方法、以及進行本土化試驗，累積相關數據。
- (c) 工程技術的發展，數值分析、測試驗證及實體製造過程，三者均不可偏廢，數值分析可進行長期預測；但沒有未經過測試驗證的數據，難以證明預測可信度；而實體製造更是工程的根本，沒有實體製造技術的研究，無法進行測試，對於工程的推動更顯示缺乏決心與動力。故我國在廢棄物罐製造評估技術的發展，將選擇於國內具有發展潛力及經濟可行性之項目，進行實體製造技術研究。

#### (2) 研究目的

- (a) 為建立廢棄物罐之耐震能力資料，結合地震剪力位移設計需求，評估整體廢棄物罐在地震事件下之失效比率，需參考瑞典方法建立廢棄物罐與緩衝材料整體數值模型，進行受震剪力位移之分析，並作為後續耐震能力設計最佳化、廢棄物罐設計修改及測試驗證之參考。
- (b) 依照地化特性配置模擬地下水溶液，並透過長期曝露試驗，建立廢棄物罐抗蝕性之基本資料，材料本身的抗蝕特性，建立腐蝕評估試驗數據；引進瑞典 SKB 之腐蝕評估模式，探討地化參數的影響，藉此作為後續本土化廢棄物罐防蝕性能與設計發展之參考依據。
- (c) 為使工程技術發展能進入實體測試、累積本土驗證數據與能力之階段，應著手開始進行廢棄物罐製造研究，故針對國內現階段可執行鑄鐵內襯鑄造技術、銅殼摩擦攪拌銲接技術及非破壞性檢測方法，開始進行鑄造成品的試做、摩擦攪拌銲接參數研究及檢測工具的建立。並由製造的經驗與檢測結果，對各種造成瑕疵的可能性加以探討，尋求減低瑕疵的可能方法，以供後續建立可接受瑕疵的準則的參考。期於未來國內能自主發展廢棄物罐，完成摩擦攪拌銲接機具，並執行檢測以確保品質。

### (3) 研究內容

本年度將延續目前工作，分析評估工作包括廢棄物罐與緩衝材料耐震能力分析、材料抗蝕性能測試及腐蝕模式參數影響評估；實體製造技術工作將進行鑄鐵內襯試體鑄造、銅材料摩擦攪拌銲接及非破壞檢測技術發展，並由鑄鐵試體取樣進行破裂韌性測試研究，以持續研究並建立本土化技術。

#### (a) 廢棄物罐受岩體裂隙錯動影響數值分析

參考 SKB 做法，並參考 SKB 對廢棄物罐與緩衝材料的力學測試數據，使用有限元素軟體，設定地震引致既有破裂面之位移量，由分析結果與材料破壞準則，決定安全係數，並與 SKB 技術報告比較。



本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.6.3 節受震穩定性之科學論證。

(b) 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能測試驗證

進行銅材料於還原環境之腐蝕機制探討、腐蝕模式評估方法研究。持續銅材料與鑄鐵腐蝕試驗，量測腐蝕電位、速率、銅離子與鐵離子析出量，並由腐蝕產物的物化性分析等表面微觀結構觀察，藉此評估材料的腐蝕因素，並比較既有預測模式。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.1 節廢棄物罐之科學論證。

(c) 廢棄物罐破裂韌性試體鑄造與特性量測

鑄鐵內襯是由鑄鐵澆鑄後車削製造而成，將實際進行鑄造工作，探討鑄鐵的鑄造瑕疵，以及瑕疵對於廢棄物罐結構穩定的影響，取樣進行鑄鐵破裂韌性實驗規劃與探討。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.1 節廢棄物罐之科學論證。

(d) 銅質材料摩擦攪拌銲接與非破壞性檢測技術可行性評估

持續以國內現有的摩擦攪拌銲接技術與機具，對板厚 5 mm 至 25 mm 之間的無氧銅直板，進行對接試片銲接，研究在此板厚區間內可靠之銲接參數。利用可行之非破壞性檢測技術，在銲接參數確定過程中利用來檢測銲後試片，並探討未來技術運用之可行性。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.1 節廢棄物罐之科學論證。

(4) 預期研究成果

(a) 廢棄物罐受岩體裂隙錯動影響數值分析

完成各種地震引致裂隙錯動位移影響的分析結果，比較 SKB 報告，提供耐震能力資訊，並作為後續測試驗證時測試條件設定之用。

(b) 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能測試驗證

利用腐蝕試驗進行腐蝕性能測試，了解銅材料與鑄鐵的抗蝕特性，評估腐蝕量的影響因素，並與國際間的相關研究比較，提供腐蝕模式參考。

(c) 廢棄物罐破裂韌性試體鑄造與特性量測

完成廢棄罐鑄造工作，建立國內自製廢棄物罐鑄鐵內襯的案例，研究鑄造的瑕疵對廢棄物罐之影響。

(d) 銅質材料摩擦攪拌銲接與非破壞性檢測技術可行性評估

完成無氧銅直板摩擦攪拌對接之銲接工作，研究銲接的板厚區間內可靠之銲接參數，提供後續國內發展銲接機具之參考。進行非破壞檢測技術研究，建立進行銅片與銲接後試片的量測程序，以及國內銅材料摩擦攪拌銲接量測之發展紀錄，作為銲接與檢測技術改進之參考。

#### 4.4. 緩衝與回填材料研發技術

(1) 研究背景

(a) 緩衝材料位於廢棄物罐與處置母岩之間，發揮遲滯功能，減緩廢棄物罐失效後的核種釋出影響，並延遲與阻絕地下水及其它地下環境影響因子破壞廢棄物罐。我國目前參考 KBS-3 設計，採用純膨潤土為緩衝材料，並已建立初步之設計規格，接著須建立實驗室熱、水、力參數驗證設備，以檢驗緩衝材料製造成品之性能，所得之參數成果可做為緩衝材料設計之驗證，並提供後續工程障壁完整性測試所需；另應逐步建立多組合格之替代材料，以因應可能採購需求；故對各種不同來源之膨潤土，應加以研究、建立參數資料庫。

(b) 處置作業結束後，需以回填材料將地下開挖之處置隧道、聯絡通道及豎井等確實回填，以抑制地下水流與降低處置設施工程障壁之化學變化，故水力傳導度、夯實特性、回脹特性與力學特性，為回填材料之研究內容重點。而施工方式是影響這些特性主因，為確保品質符合規格要求，現場施工的控管與檢測技術應加以建立。

(c) 緩衝材料與回填材料的長期力學穩定性評估，為設計驗證的必要工作。緩衝材料為黏土材料、受壓會產生沉陷，但使用膨潤土則具有回脹特性，長期穩定性需評估廢棄物罐的沉陷量，則同時考慮緩衝材料沉陷與回脹的長期變化。另外，為研究回填材料在鄰近處置隧道開挖鑽炸時可能受到震波的影響，或是地震時可能的水力耦合現象，故有必要了解回填材料在動態條件下的行為。

## (2) 研究目的

### (a) 緩衝/回填材料基本性質試驗及回填材料設計施工研究

歷年研究本計畫已依據國內參考處置概念設計，以膨潤土與結晶岩岩屑之混合物作為回填材料，並規劃於處置作業結束後，以回填材料將地下開挖之處置隧道、處置孔、聯絡通道及豎井等確實回填，以抑制地下水流與處置設施工障壁之化學變化。Chijimatsu 等人(1999, pA-1)的研究中曾比較現地夯實法及預鑄塊體後堆疊的施工方法比較，預鑄塊體後至現地堆疊的工法可縮短施工時間，且較能控制施工品質。本研究將參考瑞典 SKB 回填設計需求與施工技術，以純膨潤土預鑄塊體至現地堆疊、周圍以膨潤土顆粒(pellets)方式回填處置隧道，以提高回填品質，訂定適宜我國之回填材料設計需求。

### (b) 緩衝材料高圍壓力學參數測試

以三軸設備探討緩衝材料在高圍壓環境下的力學行為，並藉由單向度壓密試驗瞭解膨潤土的壓縮性質，綜合建立緩衝材料的各項參數後，以土壤力學之方法，評估廢棄物罐長時間後的沉陷行為。

### (c) 緩衝材料振動反應測試

使用國內現有之中央大學地工離心機進行模型模擬，在 10 g 離心力場中進行振動台試驗，在離心模型試體為 1/10 縮尺的廢棄物罐與緩衝材料之處置孔環境，藉由輸入多種振動事件，以及考慮緩衝材料在處置期間的乾濕不同狀態，探討處

置孔內各位置地加速度變化，了解 KBS-3 設計的地震反應實測結果；並由膨潤土壓力變化、不同試體深度之孔隙水壓歷時變化，探討振動環境下的工程障壁穩定性。

(d) 回填材料動態三軸試驗

回填材料在動態過程的變化影響，包括鄰近隧道採用鑽炸工法施工，可能對既有回填材料產生影響；或是地震導致近場岩體與回填材料的含水量變化。可藉由室內試驗建立數據，以便進一步藉由水力耦合模式，探討其影響程度。

(3) 研究內容

105 年度已開始進行緩衝材料與回填材料之試驗研究，包括基本性質試驗、力學參數試驗、整體穩定性驗證試驗，其中力學試驗包括壓密與三軸試驗，驗證試驗包括動態三軸與離心機振動台試驗，本年度將持續進行，以了解其材料特性，並獲悉處在深層現地應力環境下之力學行為與受震時的反應。

(a) 緩衝/回填材料基本性質試驗及回填材料設計施工研究

為確立國內深層地質處置設施回填材料之設計需求及條件，參考國際間回填材料設計需求與考量之報告(瑞典 SKB 報告等)，論述回填材料設計參數目的與設計準則，訂定國內回填材料設計需求，並依設計需求進行水力傳導度及回脹試驗，確認回填材料參考設計密度範圍，以做為回填材料規格設計之參照。回填材料製造與施工部份參考瑞典與芬蘭之製造與施工技術，進行技術探討與可行性分析，以做為我國未來回填材料施工技術參考。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.5 節回填與封塞之科學論證。

(b) 緩衝材料高圍壓力學參數測試

持續進行緩衝材料試體製作、三軸壓縮試驗、單向度壓密試驗，彙整試驗結果，建立力學參數，進行廢棄物罐沉陷評估。針對後續高圍壓環境之力學研究，則評估所需測試項目，進行高圍壓設備之開發。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.6.2 節力學穩定性之科學論證。

(c) 緩衝材料振動反應測試

持續進行不同試驗條件的離心模型振動試驗，量測成果包括高放廢棄物罐的動態反應、不同深度緩衝材料的超額孔隙水壓之激發及消散歷時，以及廢棄物罐身的土壓力歷時。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.6.3 節受震穩定性之科學論證。

(d) 回填材料動態三軸試驗

進行回填材料的基本物性試驗、動態三軸試驗，由動態三軸試驗記錄軸差應力、軸向應變及孔隙水壓等數值，彙整試驗數據，探討回填材料之各組成的動態反應。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.5 節回填與封塞及第 4.6.3 節受震穩定性之科學論證。

(4) 預期研究成果

(a) 緩衝/回填材料基本性質試驗及回填材料設計施工研究

建立回填材料參考設計與設計規格，並探討相關施工方法，以供未來國內處置場工程障壁系統材料選擇與設計之參考。

(b) 緩衝材料高圍壓力學參數測試

完成緩衝材料三軸試驗、單向度壓密試驗，獲得力學與壓密參數。藉由試驗結果評估廢棄物罐長時間的沉陷行為，整理實驗數據建立數值模擬可使用土壤參數表。

(c) 緩衝材料振動反應測試

完成離心機離心模型振動試驗，記錄工程障壁受震之變化，包括廢棄物罐的動態反應、不同深度緩衝材料的超額孔隙水壓之激發及消散歷時，以及廢棄物罐身的土壓力歷時，提供穩定性驗證量測資料。

(d) 回填材料動態三軸試驗

完成不同回填材料試體的動態三軸不排水剪力試驗，評估不同回填材料的水壓與動態反應，整理的實驗數據，建立可供數值模擬使用的數據檔及建議土壤參數表。

#### 4.5. 處置設施設計/建造/運轉/封閉/管理技術研發

##### (1) 研究背景

- (a) 用過核子燃料處置設施之建造、運轉、封閉階段之流程，與工程設計息息相關。瑞典 KBS-3 系統與我國的最終處置流程，最大差別在於瑞典設有集中式濕式中期貯存廠 (Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel, CLAB)，其用過核子燃料封裝廠將建於 CLAB 旁，整合的設施稱為 CLINK，因此瑞典的高放處置流程涵蓋中期貯存設施；另一項差異，則是我國法規要求「高放處置設施之設計，應確保高放射性廢棄物放置後五十年內可安全取出」，故 KBS-3 在我國的流程與相關設施將與瑞典不同。基於我國與瑞典在此部分的差異，我國應研擬本土的最終處置流程，了解各操作單元的需求，評估所需地面及地下設施的配置、機具的操作空間及所影響的隧道斷面尺寸，以及建造施工技術是否可行。並考慮用過核子燃料在中期貯存的政策仍持續演進中，例如高低放處置設施是否共構之議題，可能對處置設施的配置、設計需求有所衝擊，提供高放處置工程設計建立可能方案，以及對應的成本評估，使後續設計與評估工作能有所依循。
- (b) 高放處置地下設施的量體龐大，施工期程長，並且為了長期穩定性，在隧道設計分析與材料的使用均應仔細考量，因此對於隧道開挖與支撐方式需進行地震分析，了解開挖穩定分析與受震前後的應力應變，建立基本的安全係數資料，以瞭解處置隧道的安全性。

材料的使用，如果採用傳統混凝土當作支撐材料，當地下水與混凝土接觸後，從混凝土中滲透出的高鹼性孔隙水，會造成膨潤土的性能喪失或改變廢棄物罐包覆材料的腐蝕速率，

導致廢棄物罐的體積穩定性受到影響，因此，需發展低鹼混凝土的技術。

而隧道的封閉對處置設施的長期安全亦非常重要，藉此避免處置設施及地表間的水形成導水通道，方能符合法規「高放處置設施封閉之設計，應確保地下通道及鑽孔封填後，不得成為放射性核種遷移之關鍵途徑」的要求。並且須防止坑道回填時因膨脹或推擠沉降等因素而破壞障壁穩定性，在斜坡道、豎井上部與鑽孔的封閉設計，也應特別注意需能阻擋無意者闖入處置場內；因此，封塞設計為工程設計的重要一環，須能提供力學束制與地下水壓控制功能，並避免人為入侵。

- (c) 處置場營運管理亦是影響工程設計與處置技術發展的因子，故應立即展開適用於我國處置場的營運管理技術要項研究，釐清適用於我國處置場的營運管理項目，以利後續發展適用於我國的處置場營運管理模式。

## (2) 研究目的

處置設施的建設推動須結合設計、施工與管理，故應對用過核子燃料離開中期貯存設施後，至處置完成的生命週期流程、建造方法、工程材料、機具設備與管理作為加以研究，提供擬定規格、制定計畫及形成管理程序之需，進而提升本土設計之能力。

## (3) 研究內容

### (a) 處置隧道支撐技術發展研究

進行處置隧道之低鹼混凝土研究，包括低鹼性混凝土配比設計與試體製作，進行力學性能測試、試體乾縮試驗、低鹼混凝土鋼筋腐蝕長期驗證試驗、滲透試驗、長期潛變試驗等工作。進行處置隧道斷面受震穩定分析；進行處置隧道封塞案例力學分析，建立相關結構安全資訊。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.4 節地下設施及第 4.5.5 節回填與封塞之科學論證。

### (b) 建造運轉封閉作業技術研究

依據國內用過核子燃料管理現況，探討將用過核子燃料由核電廠燃料池或中期乾式貯存場移運、燃料重裝密封、廢棄物罐傳送至處置孔之流程，以及可能的替代方案，並包括再取出技術研究、機具設備研究。並對於高低放共構議題進行研析，提出可能對處置設施的潛在影響，及進行工程與經濟性的探討。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.7 節建造/運轉/封閉技術之科學論證。

(c) 處置設施營運管理技術研究

蒐集管理學資訊，結合處置流程研究，分析工程障壁材料的供應鏈及設計要求，探討所需採取之品質管理作為、方法與標準，並評估最終處置設施於各階段所需要之監測項目與方法。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.8 節處置設施營運管理技術之科學論證。

(d) 用過核子燃料最終處置成本估算

對國內外處置成本相關資訊進行蒐集，以做為未來效益評析、財務措施規劃管理及發展策略制定的基礎參考資訊。依照所蒐集之資訊發展最終處置初步成本推估架構，以供系統性的成本估算、情境調整、細部資訊更新及後續發展時使用。本期工作針對各階段所需執行之工作與時程部份，將依照既有五階段工作時程目標，參考國外過往執行與規劃案例資訊，進行所需執行之工作與時程之初步規劃，並就國內技術能力與機具材料供應狀況探討分析，以估算各階段成本並貼近我國情勢。

本子項計畫將持續 105 年的工作內容，將成果提供後續計畫執行之參考。

(4) 預期研究成果

(a) 處置隧道支撐技術發展研究



拌製不同配比低鹼混凝土試體，分別進行力學性能測試與耐久性測試，並針對低鹼混凝土內埋鋼筋進行長期腐蝕試驗，了解低鹼混凝土的抗蝕及抗滲透特性。

(b) 建造運轉封閉作業技術研究

參考國際間發展之建造、運轉、封閉階段之技術與規劃，完成各個主要操作單元所涉及之流程與機具評估，發展再取出之可行程序。

(c) 處置設施營運管理技術研究

完成最終處置設施品質管理需求評估與環境管理監測需求與技術評估。

(d) 用過核子燃料最終處置成本估算

包括各階段所需執行工作與時程規劃、各階段成本、國內技術能力與機具材料供應狀況之技術可行性探討分析、最終處置設施建置之成本估計，以及初步的成本推估架構。

## 5. 安全評估

為能建構處置設施長期之安全，需透過安全論證集合相關科學證據與各種辯證，並透過資訊公開、透明及可追溯性，整體說明處置設施在安全上的品質與證明，達到可信度的水平。而建構安全論證中最重要核心元素為安全評估，安全評估是具備系統性與邏輯性的分析方法，用以量化分析處置設施可能造成的危害，一般國際上是以劑量或是風險作為衡量指標，同時安全評估亦可與場址調查、工程設計反覆迭代回饋，提供處置設施特性與設計之安全功能及其衡量指標，以整體安全之觀點提出最終處置計畫之發展路徑。

預計於 106 年底提出之 SNFD2017 報告，報告中將彙整說明國內潛在處置母岩特性調查與評估階段所達成之目標，已建置並具備地質處置設施長期安全性之評估技術與發展水平；為此，本計畫於 106 年度整體發展，將持續強化評估模式技術發展與模式連結之水平，以及情節建構與案例分析的可信度與不確定性；並在參考案例分析上，進行安全評估數據、情節案例分析與文件化的建立，同時亦可配合 SNFD2017 報告送交 OECD 執行國際同儕審查，提升安全評估技術發展透明度與可信度，以期能於潛在處置母岩特性調查與評估階段完成參考案例安全論證之示範，彙整現階段安全評估技術缺口與下階段發展重點。

配合上述之技術發展目的，本年度在安全評估技術發展規劃上，將於後續小節區分 6 項子項計畫進行研究背景、研究目的、研究內容與預期研究成果之說明，6 項子項計畫分別為：

- (1)SNFD2017 報告安全評估案例與參數敏感度分析
- (2)安全評估流程建立與方法研究
- (3)安全評估分析模式建立與執行
- (4)THMC 實驗與模擬技術研發
- (5)核種遷移實驗設施建置
- (6)天然類比評估研發技術

## 5.1. SNFD2017報告安全評估案例與參數敏感度分析

### (1) 研究背景

在發展 SNFD2017 報告中，考量尚未有最終處置場址，但為盡早展開場址調查技術、工程設計技術與安全評估技術發展之整合，臺灣參考日本 H12 報告的作法，透過所謂參考案例(Reference Case) (JNC, 2000, c5.5)的建構，採用表格化的清楚條列方式，提供包含相關概念模式、資料及假設條件的說明，供相關研究單位，盡早共同建立、測試、分享與精修相關處置技術能力。參考案例共包含 3 個表格及其對應的輔助說明文件，此 3 個表的名稱及內容分別為：

- (a) 表一：法規要求及處置概念
- (b) 表二：地質概念模式及特性參數
- (c) 表三：安全評估模式及參數

本子項計畫可說是 SNFD2017 報告情節安全評估的專案子項計畫，著重運用安全評估方法論，以 11 步驟進行參考案例之安全評估，參照本計畫與 SKB 專家之國際交流合作之成果回饋，立基於 SR-Site 的架構概念上，運用上述表一所建立之 KBS-3 處置概念及表二所建立之離島結晶岩測試區地質概念模式與特性參數，發展安全評估能力，展現本計畫研究團隊在安全評估論證之能力。

### (2) 研究目的

- (a) 建構與完成主情節(包括腐蝕情節、剪力情節)、干擾情節之論述
- (b) 運用所建立之模式連結、全系統安全評估技術，整合圍阻失效機率分析與核種遷移，評估對關鍵群體之劑量與風險影響

### (3) 研究內容

#### (a) 基本情節評估案例與參數敏感度分析

建立以安全功能與安全功能指標分析法，分析關鍵 FEPs 之內部交互作用機制與變數之演化，建構基本情節或是主要情節。主要情節分別考量腐蝕情節與剪力情節，並以圍阻安全

(Containment)及核種傳輸遲滯(Retardation)兩方面，整合現階段已建立成熟之模式鍊，以 GoldSim 軟體建構全系統模式鍊之核心要素，進行腐蝕情節與剪力情節之劑量危害量化分析與參數敏感度分析。

執行過程中亦將配合國際同儕審查作業，說明安全評估技術發展之透明度與可信度，以期能於潛在處置母岩特性調查與評估階段完成參考案例安全論證之示範，展示國內已具備的安全評估技術，同時能回饋彙整現階段安全評估技術缺口與下階段發展重點。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.8 節主要案例與變異案例量化分析之科學論證。

#### (b) 替代情節評估案例分析研究

一般而言，基本情節為場址在自然狀況下的演化狀態，對於極端的外部初始條件，將建構替代情節或是干擾情節，據以透過安全評估量化分析程序，更能掌握此極端外部條件下，處置設施的圍阻功能與危害影響，此可助於補足基本情節未考慮到的情節，達到強化安全論證之信心水平。本研究所考量的極端外部條件包括：全球暖化極端情境、多次地震頻率之極端情境及未來人類活動；工作內容亦將包括情節論述、建構，並建立量化分析方法，完成干擾情節劑量危害之量化分析。執行過程中亦將配合國際同儕審查作業，透過交流回饋提升替代情節評估案例分析研究水平。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.9 節干擾情節量化分析結果之科學論證。

### (4) 預期研究成果

#### (a) 基本情節評估案例與參數敏感度分析

完成參考案例中關鍵 FEPs 之交互作用機制研究成果，助於建立安全評估模式鍊，並配合安全功能與安全功能指標分析推演，可完成基本情節或是主情節之建構與完整論述，透過 GoldSim 軟體完成處置設施全系統模式之量化分析，完成參

考案例之腐蝕情節與剪力情節之劑量危害評估。同時亦透過 GoldSim 軟體具備參數敏感度分析之功能，以百萬年之劑量貢獻為衡量標準，完成參數敏感度分析，分析腐蝕情節與剪力情節中的重要參數。

(b) 替代情節評估案例分析研究

以參考案例完成替代情節或是干擾情節之建構與完整論述，包括全球暖化極端情境、多次地震頻率之極端情境及未來人類活動，並完成安全評估之分析。

## 5.2. 安全評估流程建立與方法研究

### (1) 研究背景

本子項計畫成立之目的，主要為支持 SNFD2017 報告安全評估所需量化程序的技術發展，並透過與國內或是國際之技術交流合作研究，可提升技術發展品質。在技術發展上，將區分安全評估方法論研究、FEPs 資料庫建置、外部條件演化發展、安全評估之劑量與風險分析技術發展及安全評估之可信度分析研究。

在安全評估方法論研究上，將強化建立具系統與邏輯性之分析方法，透過分析可能影響處置設施的 FEPs，配合未來場址特性與工程設計提供安全功能之衡量指標，並可考量處置設施隨時間之演化，建構合理情節以量化分析處置設施可能造成的危害；同時此方法論亦將具備不確定性的考量要點，如此，才能有助於整體用過核子燃料最終處置計畫中，配合各階段目標建立安全論證之安全信賴水平。

在 FEPs 資料庫建置研究上，因用過核子燃料的處置牽涉時間太長、影響空間太大及包含許多不確定性，無法以傳統工程方法直接度量處置設施的設置，對未來人類與自然環境造成的衝擊；當進行用過核子燃料最終處置設施的安全評估時，首先，需儘可能地蒐集、彙整所有可能產生的潛在效應，並將影響處置設施長期安全之因素，依特性歸類為特徵(Features)、事件(Events)與作用(Processes)3類，簡稱 FEPs；FEPs 資料庫必須考量所有影響的

因素，不論是重要的或不重要的、直接的或間接的、自然的或人為引起的，透過集合各領域的專家學者，進行充分討論與研究，確保重要影響因素沒有被遺漏，作為各種情節案例發生原因、機率、後果與相互影響等評析之依據。

在外部條件演化發展研究上，在時間上需於安全評估時間尺度間，探討深地質下各種內部作用機制隨時間演化並對工程障壁的交互影響，而內部作用機制將受外部條件的極大作用或是長久作用變化，而產生直接或是間接的影響；這些外部條件包括氣候相關議題、大規模地質作用、未來人類活動及少數可想像之隕石流星衝擊或其他作用等。

在安全評估之劑量與風險分析技術發展研究上，依據國際輻射防護委員會於 2007 年提出之 ICRP-103 號建議書，對高放射性最終處置設施造成的曝露情境可視為潛在曝露，採用劑量約束或是風險約束可促使處置設施的工程設計、技術需求可達到輻射防護最適化之原則；另外，各國對於如何規範處置設施的長期安全準則均有所差異，此差異亦將造成各國在情節建構或是安全評估方法論發展有所差異。

在安全評估之可信度分析研究上，因安全評估須能對處置設施長期安全提出可信度的推理，在不確定性分類上可區分為情節不確定性、模式不確定性及數據與變數不確定性；隨著深地質處置技術的發展，已奠定更多有關 FEPs 與交互作用機制的科學研究成果，可藉由對之中的不確定性也有更多的研究發現。

綜合上述，本子項計畫的研究成果，為 SNFD2017 報告安全評估發展量化程序的技術基石，未來亦可隨著用過核子燃料最終處置計畫，建立安全評估技術之可信度，建構安全論證的核心價值，提升長期安全的信賴水平。

## (2) 研究目的

(a) 建立具系統邏輯性的安全評估方法論，方法論可以安全功能為問題導向分析提供子系統功能需求，並可執行建構具時間演化之情節。

- (b) 建立可涵蓋臺灣外部條件、深地質內部作用之 FEPs 資料庫，提供作為安全評估情節建構的依據。
- (c) 蒐集與研究臺灣及鄰近地區的冰河周期循環及現今全球暖化等氣候議題相關資訊與文獻，建立臺灣外部條件之演化發展。
- (d) 蒐集與研究國際輻射防護委員會(ICRP)與國際原子能總署(IAEA)對處置設施之安全評估劑量與風險規範，建立一套符合國內法規規範之風險評估方法與理論研究
- (e) 安全評估之可信度分析研究上，將以處置設施子系統安全功能與指標需求，整合 FEPs 交互作用機制的科學研究成果與開發的模式鍊，建立影響處置系統安全功能之不確定性要素。

### (3) 研究內容

#### (a) 安全評估方法論研究

為整合建立 SNFD2017 報告之安全評估可行性技術，105 年著手建置之安全評估方法，係參考瑞典 SKB 發展 SR-Site 的 11 步驟，並按我國目前處置技術發展技術水平，將其 11 步驟演繹為如圖 5-1 所示之關聯圖。首先透過 FEP 資料庫的建置與篩選(步驟 1)，彙整出我國處置設施須考慮的 FEPs；根據彙整之 FEPs，進行處置設施初始條件之狀態描述，並訂定整個處置系統的邊界條件(步驟 2)；同時亦根據 FEPs 彙整之外部條件(external condition)，探討其對處置系統之影響，包括氣候變遷相關議題與未來人類活動(步驟 3)；對已決定的 FEPs，進行交互作用機制之實驗與分析模式研究，範圍包括用過核子燃料、廢棄物罐、緩衝材料與回填材料及地質圈等(步驟 4)；依據工程設計前提與地質環境的初始條件，建立處置概念之安全功能，並訂定處置設施個別系統之安全功能指標(步驟 5)。

於安全評估量化分析中，依據地質概念模式彙整相關參數(步驟 6)，並於安全評估的時間尺度下，發展影響處置設施之參考演化(步驟 7)；結合上述步驟 3 至步驟 7 的成果，可

完成主要情節發展，建立基本案例，同時以系統性組合一系列變異案例(步驟 8)；透過全系統整合模式計算各案例的劑量影響(步驟 9)。此外，部分外部條件具顯著干擾，未納入上述主要情節分析程序者，如未來人類入侵、全球暖化氣候變異等，則於步驟 10 進行干擾情節案例分析；最後，綜整分析各種情節之影響而得到安全評估結論(步驟 11)，相關結論可回饋至工程設計，透過如此地循環檢視，完成地質處置工程障壁的最佳可行技術探討。

為實際測試此安全評估方法論的可行性，105 年度亦以 SNFD2017 報告參考案例建立情節案例與參數敏感度分析，如本計畫書 5.1 節所述；本年度則將透過參考案例的實作經驗回饋，進行安全評估 11 步驟之執行細節研究，落實方法論的理論基礎，完善建立我國最終處置計畫發展所需的安全評估技術理論根基，並將配合國際同儕審查之建議回饋於技術發展上。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.2 節安全評估與風險計算方法之科學論證。

#### (b) FEPs 資料庫建置

自 2001 年開始建置 FEPs 資料庫，隨著國際 NEA2.1 版資料庫的陸續更新，以及配合 SNFD2017 報告安全評估方法論的建置，105 年已先以 NEA2.1 版本的資料庫為主體，參考瑞典 Forsmark 安全評估建置的 SR-Site FEPs 資料庫分類架構；並以 SNFD2017 報告參考案例場址特性與 KBS-3 處置設計概念，篩選出 FEPs 關鍵清單，併同作為 SNFD2017 報告參考案例之安全評估技術展示。

為奠定未來具備整體發展性，106 年在 FEPs 資料庫發展策略上，將重新整合臺灣原始資料庫，與 NEA2.1 版本 FEPs 資料庫、SKB SR-Site FEPs 資料庫及日本 H12 之 FEPs 資料庫，交互參照；並研究 FEPs 分類法，完成臺灣 FEPs 資料庫的進版更新。同時為使 FEPs 篩選作業能完整記錄、保存 FEPs 資



料管理系統，將發展以 Web 方式進行資料庫管理與審核功能。

建置臺灣 FEPs 資料庫分類目錄，分門別類列表管理，目錄架構包括初始狀態 (initial state)、內部交互作用機制 (internal processes)、內部作用變數 (internal variables)、生物圈 (Biosphere) 及外部因子 (external factors)，如圖 5-2 所示；同時進行與 NEA2.1 目錄回朔連結功能，記載篩選過程中的判視理由、依據與結果，確保各個 FEPs 具可回朔性。本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.3 節 FEPs 與交互作用機制之科學論證。

#### (c) 外部條件演化發展

探討外部條件演化對處置設施於深地質下各種內部作用機制之影響，包括氣候相關議題、大規模地質作用、未來人類活動及少數可想像之隕石流星衝擊或其他作用等。105 年配合 SNFD2017 報告參考案例之評估需求，以冰河循環期為設定基礎，彙整國內外資訊，初步建構全球海平面變化、溫度與降雨等氣候因子變異，以及海岸線位移、地殼抬升、風化侵蝕等地形變化影響，以利 SNFD2017 報告工作進展。

106 年將持續上述研究基礎，並擴大蒐集國際評估經驗，瞭解處置場系統百萬年的演化議題對安全評估的影響，如日本 H12 報告中進行自然現象影響評估中，探討氣候/海平面變化與抬升/侵蝕現象，並提出對輻射劑量評估分析例證。瑞典 SKB 針對 Forsmark 及 Laxemar 地區，分別就各自過去的氣候變遷進行研究，根據研究成果探討冰河前進/後退，所造成地殼的抬升/沉陷等定量的預測，與地表地形景物的變化，並評估計算放射性核種到生物圈導致人員曝露的劑量轉換因子。本工作項目整理氣候相關議題應用於處置設施參考演化範疇內的重要研討項目，依據安全評估分析類別，分為大氣、地形、生物圈、地質圈及工程障壁；並對冰河周期循環與現今全球暖化等氣候議題相關知識，進行通盤研討。同

時，亦將持續與國內學者專家交流與合作，共同對本土性的古氣候學及近代全球暖化氣候變異等，進行相關文獻蒐集與研究。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.6.1 節外部條件演化之科學論證。

(d) 安全評估劑量與風險分析技術發展

105 年所建置之安全評估方法，係參考瑞典 SKB 發展 SR-Site 的 11 步驟，該方法論為符合瑞典 SSMFS 2008:37 所規範的防護評估要點，包括：

- (i) 尋求處置場設計可以達到最佳化及最可行技術，以風險 (risk) 來衡量處置場設計的最佳化。
- (ii) 若處置設施於封閉後 1,000 年內有發生廢棄物罐失效釋出情節時，法規規範須計算年集體劑量，直到 10,000 年。
- (iii) 處置設施設計應確保封閉後對曝露群體的代表個人最大健康損害風險不超過  $10^{-6}/\text{yr}$ 。其中健康損害風險可以利用 ICRP-60 的劑量風險係數計算所對應的劑量 (劑量風險係數為  $0.073/\text{Sv}$ )。
- (iv) 風險分析應至少涵蓋約 10 萬年或週期的冰期循環，直到在風險和環境影響方面預期到最大後果發生。
- (v) 對處置設施封閉後 1,000 年前後，應基於科學知識與證據，對各種處置設施可能發生的過程，包括其環境與生物圈特性，來評估設施的防護能力。
- (vi) 若部分情節事件影響的群體很小，最大健康損害風險則可不超過  $10^{-5}/\text{yr}$ 。

106 年度，本工作項目將彙整國際間輻射防護資訊 (如 ICRP、IAEA 等)，進行處置設施長期輻射安全之管理策略研究，並依據國內「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之規範要求，配合 SNFD2017 報告安全評估案例與參數敏感度分析所完成之參考案例評估經驗之回饋，完成風險評估之

方法與理論研究，以供未來可具體回饋應用於我國發展最終處置計畫之安全評估與工程設計，作為最優化、最合理化概念設計之依據。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.10 節計算案例之整合分析之科學論證。

(e) 安全評估可信度分析

為了提供處置場封閉後長期演化關於現象學知識方面有足夠的科學基礎，在建構具有安全功能概念的情節及安全評估方法論，常導入的指標包括安全指標(Safety indicators)、性能指標(Performance indicators)及安全功能指標(Safety function indicators)。SKB 自 2006 年起著手發展一套具有系統性的安全功能及安全功能指標，作為衡量處置系統中特定部分所需維持的障壁安全之量化指標，並應用於 SR-Site 場址。本研究將探討安全功能及安全功能指標，作為安全評估之可信度分析基石。

SNFD2017 報告中，運用安全評估方法論以參考案例進行技術應用成果展示，成果之中亦包含探討參考案例之安全評估可信度，106 年將以 SNFD2017 報告的經驗回饋，研析國際安全論證中對各種不確定性的處理策略，同時也將配合國際同儕審查作業，將國際專家的建議整合討論，增進安全評估之可信度分析技術與信心水平。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.11 節安全評估的可信度之科學論證。

(4) 預期研究成果

(a) 安全評估方法論研究

完成安全評估方法論 11 步驟之執行細節與連結應用研究，奠定方法論的應用基礎，並配合國際同儕審查之建議，彙整回饋於技術發展。

(b) FEPs 資料庫建置

完成臺灣 FEPs 資料庫之重新整合與進版更新，其中包括與 NEA2.1 版本 FEPs 資料庫、SKB SR-Site FEPs 資料庫，另生物圈將以日本 H12 之 FEPs 資料庫進行交互參照；同時將舉行 FEPs 資料庫專家審查座談會，提升臺灣 FEPs 資料庫之應用可行性與完整性。

(c) 外部條件演化發展

完成氣候相關議題對影響處置設施參考演化之重要項目，如對大氣、地形、生物圈、地質圈及工程障壁等；並集合國內、外文獻與專家學者交流合作，彙整對冰河周期循環與現今全球暖化等氣候議題相關知識成果與研究。

(d) 安全評估劑量與風險分析技術發展

完成國際間輻射防護資訊(如 ICRP、IAEA 等)，並提出其對處置設施防護管理理念，進行處置設施長期輻射安全之管理策略研究，完成風險評估之方法與理論研究。

(e) 安全評估可信度分析

研析國際各國發展安全論證中，對各種不確定性的處理策略，同時也彙整國際同儕審查對安全評估可信度的建議，結合 SNFD2017 報告參考案例的評估經驗提出整合討論，增進安全評估之可信度分析技術與信心水平。

(f) 技術發展藍圖與技術發展路徑之研議

綜合研析本年度之安全評估流程建立與方法研究成果，彙整研議下一階段之技術發展藍圖與技術發展路徑。

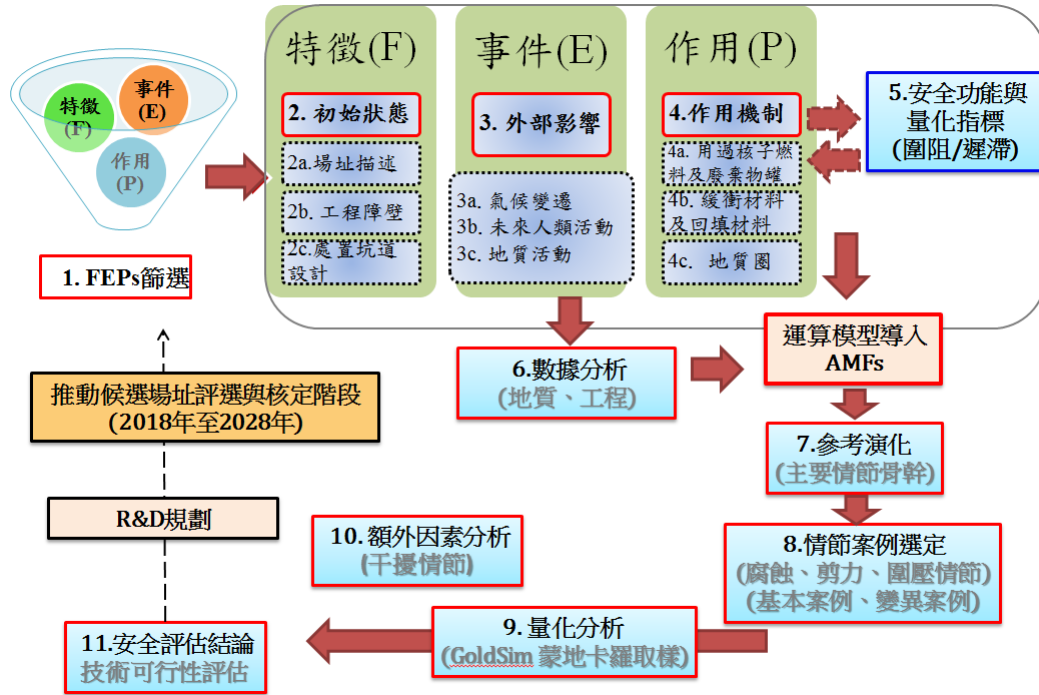


圖 5-1：安全評估 11 步驟關聯圖



圖 5-2：臺灣 FEPs 架構

### 5.3. 安全評估分析模式建立與執行

#### (1) 研究背景

安全評估是發展安全論證中提供量化指標的重要一環，也是建構安全論證的核心要素，然而安全評估需要能對長期安全提出可信度的推理，由於安全評估時間尺度相當久，需長達 100 萬年，故在無法以實驗達成驗證下，發展安全評估分析模式是其中的要徑。本子項計畫成立之目的，主要即因應安全評估技術需求，發展各項之分析模式，並藉由子項計畫整合管理，可促使各項分析模式發展能具備模式整合間的正確性與一致性，掌握安全評估不確定性的管理。

106 年度所提出的安全評估分析模式技術發展，主要包括：

- (a) 分析模式的選用與開發
- (b) 廢棄物罐破壞模式評估技術研究
- (c) 工程障壁系統評估技術研究
- (d) 岩體裂隙傳輸評估技術研究
- (e) 生物圈劑量評估技術研究

在分析模式的選用與開發上，由於安全評估的過程中需要使用大量數值模式，進行相關系統分析以證明其適當性，為了瞭解不同模式之間交互作用機制以及資料轉換的介面與方式，需針對安全評估建構模式整合。目前在技術可行性發展階段，將研究 SKB 之分析模式技術成果，並配合國內各項模式發展現況，提出整合建議並作為 SNFD2017 報告安全評估之技術支援。

廢棄物罐破壞模式評估技術研究方面，在 KBS-3 設計概念下，可藉由工程障壁的設計延緩各種因子對廢棄物罐的破壞，然而工程障壁在製造或是施工運轉仍存在誤差而可能使安全功能無法維持；因此，在破壞模式評估技術研究上，將針對廢棄物罐初始缺陷進行研究，掌握其對整體處置設施長期安全的影響。

在工程障壁系統評估技術研究上，主要將考量處置場場址內部受母岩地質條件、水文地質、核種傳輸機制、廢棄物型態、工程障

壁等因素作分析，其中內部組件受到各種作用隨時間演化發生造成的交互影響與變化，對於後續分析核種釋出量及釋出時間點方面，扮演著相當重要的角色。處置場中的工程障壁系統包含：廢棄物罐、緩衝材料、回填材料及其它內部組件，隨著時間的演進都會受到母岩地質條件及熱、力學、水文與化學作用的影響。因此，在探討安全評估所需要的相關資訊時，必須掌握上述系統組件在百萬年間的變化情況。

在岩體裂隙傳輸評估技術研究上，因完整的功能安全評估必須參考處置場場址的母岩地質條件、水文地質、核種傳輸機制、廢棄物型態、工程障壁等因素作分析，其中需發展具考量處置設施場址配置的水文地質概念模型，以及提升建立離散裂隙評估技術研究與開發裂隙與連體模式等效參數升尺度技術，以供探討處置孔周圍與地質圈地下水流特性，可掌握決定放射性核種向外釋出的關鍵參數。

在生物圈劑量評估技術研究，將考量放射性核種於生物圈中的傳輸作用以及建立人類受輻射曝露之途徑；除此之外，基於處置場安全評估涵蓋期程甚長（一般達 10 至 100 萬年），亦須考量生物圈環境的演化預測，在合理情境下預測未來生活環境與方式，以使當代以及下一代都能獲得處置安全之保障。

綜合上述，本子項計畫的研究成果，為 SNFD2017 報告安全評估所需分析模式發展的技術基石，隨著用過核子燃料最終處置計畫的持續發展，穩健建立安全評估技術水平與精確度，達到量化安全評估的可信度，建構安全論證的核心價值。

## (2) 研究目的

### (a) 分析模式的選用與開發

探討國際間針對放射性廢棄物地質處置安全評估所使用的數值模式種類與分析方法，了解各模式如何妥善的被應用在安全評估當中。進而評估我國目前既有的分析能力，研究是否引進或自行開發適用於我國安全評估相關的各項數值模式，完成提出分析模式的選用與開發整合建議。

(b) 廢棄物罐破壞模式評估技術研究

建立廢棄物罐針孔破壞機制，並運用安全評估模式練，進行對處置設施長期安全之影響評估，用以表示廢棄物罐在多重防護障壁設計下的重要性，提供 SNFD2017 報告之安全評估可信度。

(c) 工程障壁系統評估技術研究

研究工程障壁系統受各作用影響機制隨時間演進的變化行為，包括探討核種受膠體吸附機制與吸附後的遷移行為，彙整內部工程障壁系統組件受演化，以及對處置場安全評估劑量分析結果的影響。

(d) 岩體裂隙傳輸評估技術研究

本項工作將了解與研究離散裂隙網路 (Discrete Fracture Network, DFN) 與等效連續模式 (Equivalent Continuum Model, ECM) 這兩種模式的分析理論與模擬方法，並藉由已知的結晶岩體裂隙統計資訊建構離散裂隙網路模型，建立水流與質點追蹤分析技術；另一方面，以複合域 (Dual Domain) 的迭代方式研究離散裂隙網路模式與連體模式耦合分析核種傳輸行為，並作為開發連體模式等效參數升尺度技術之分析工具，最終應用於實際裂隙調查場址。

(e) 生物圈劑量評估技術研究

探討與建立符合臺灣地區環境與居民狀況的生物圈情節，配合外部條件演化，進行生物圈情境之演化，包括探討氣候變遷造成可能之地景與居民飲食習慣之改變，評估農漁產物變化影響，依照不同謀生之生活狀況完成生物圈劑量轉換因子之計算，提供後端 Goldsim 分析軟體進行模式整合，評估處置設施造成關鍵群體之危害影響評估。

(3) 研究內容

(a) 分析模式的選用與開發



蒐集國際間放射性廢棄物地質處置安全評估相關領域所使用的數值模式，分析各模式的應用方式與適用條件，並針對模式之間的驗證與比較做完整的評估。

本工作項目將依據各評估分項之需求，選用符合我國現階段安全評估需求的數值模式。模式的選用已於 SNFD2017 報告案例中，引進瑞典 SKB 的評估模式流程圖 (Assessment Model Flow Chart, AMF) 概念，配合第一階段技術發展水平，建構適用於我國的分析流程。由於臺灣的氣候條件屬熱帶氣候期、亞熱帶氣候期及溫帶氣候期，僅有本島小部分高山地區有發現冰河遺跡；另瑞典 SSMFS 2008:37 有明確規範：「處置設施封閉後的前 1,000 年，可透過量測數據和其他有關初始條件，如氣候與生物圈條件等，進行詳細分析，說明對處置場及其周圍環境的演化過程，以使風險分析的執行具備高水平的可信度。」；因此，依國內高放處置計畫發展策略，預估當處置設施封閉後的前 1,000 年，臺灣氣候環境將與現況相近。故 106 年將持續 105 年所彙整的安全評估模式，如表 5-1 所示，將透過與瑞典 SKB 安全評估流程所使用的數值模式進行比較，以審視未來高放處置計畫長程發展之技術精進需求；同時亦將針對所選用之程式，建立模式基準校驗 (benchmark)，並透過國際文獻或與國內、外專家/專業機構審視交流，強化安全評估技術應用之合理性與可信度。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.11.3 節模式的驗證、校驗與確認之科學論證。

(b) 廢棄物罐破壞模式評估技術研究

在 105 年執行各項主要情節案例之安全評估技術可行性評估時，主要著重建立 KBS-3 設計概念之分析技術，故在 SNFD2017 報告參考案例 FEPs 分析中，假設工程障壁之製造、建造、運轉皆能如同工程設計一般完美。然而事實上，工程障壁之製造、建造、運轉皆存在不確性；故在 106 年度，將彙整各國進行最終處置場安全評估時，對廢棄物罐破

壞的假設與分析模式，並加以區分為單一廢棄物罐破壞模式，或處置場內所有廢棄物罐的破壞機率分佈形式。針對各種不同的破壞模式，將分別分析建立相關數學模式，並在安全評估分析程式中，以其內建之方程式或自行建構數學程式的方式，建置相關的廢棄物罐破壞模式之數學方程式，進行數值驗證或案例驗證，以確認分析模式的正確性。

同時 106 年度將上述所建立的技術，運用 SNFD2017 報告參考案例中進行廢棄物罐初始缺陷，將其視為另一個干擾情節，評估對處置設施的長期安全影響，如此可瞭解廢棄物罐破壞模式對處置場安全的影響，提供工程障壁設計優化之參考。

#### (c) 工程障壁系統評估技術研究

評估處置設施完整之功能安全，在空間上需考量廢棄物型態、工程障壁，以及受母岩地質、水文地質、核種傳輸等條件，探討處置設施內部作用機制；在時間上需於安全評估時間尺度間，探討各種內部作用機制隨時間演化的交互影響；故參考演化是情節建構合理性與安全評估可信度的重要基礎。

在 105 年研究成果中，配合安全評估時間尺度為 100 萬年，已依處置設施演化探討面向，設定演化時間框架分為：(1)開挖與運轉階段、(2)封閉後與當代環境條件相似階段、(3)剩餘冰河期及(4)接續冰河週期等 4 個時期，並探討外部條件、生物圈、近場熱分布、水文地質、岩石力學、化學條件、緩衝材料與回填材料及廢棄物罐的演化過程，將重要的 FEPs 與內部作用機制進行本土化技術建立。然因影響處置設施之內部作用繁多，106 年將持續進行相關研究工作，蒐集目前國際間安全評估文獻，探討內部參考演化的相關文獻資料，規劃建立重要內部作用機制之模式分析與實驗技術，並針對內部組件整合可能於各時期的影響機制，精進參考演化架構。此外也蒐集安全評估中核種遷移的相關文獻，並針對膠體的吸附機制及核種被膠體吸附後之傳輸行為機制，進行定性影響趨勢研究。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.6.3 節近場熱演化至第 5.6.8 廢棄物演化之科學論證。

(d) 岩體裂隙傳輸評估技術研究

SNFD2017 報告中，透過與 SKB 的國際合作與技術交流，已完成岩體裂隙傳輸評估技術與安全評估量化程序的整合。106 年度，將紮根技術發展，根據參考案例之現有地質資訊，以及過去相關調查的成果進行彙整，配合案例場址之地層分布情形、地下水位調查結果，搭配數位地形資訊，運用案例之三維水流模型，開發安全評估模型之分析技術。技術建立當中，亦將同步引進本土化所開發的離散裂隙評估技術與裂隙與連體模式等效參數升尺度技術研究成果，完成技術可行性評估。

在本土化開發的離散裂隙評估技術方面，應用 FracMan 分析模組，來模擬現地岩體之裂隙特性、水流流場分佈及質點軌跡分析等，研究步驟如下：

- (i) 裂隙網路模型產生：依據裂隙產生模式，生成裂隙岩體模型；
- (ii) 有限元網格產生：本分析採用三角形有限元，將裂隙面細分成有限元網格型態；
- (iii) 水流分析與質點軌跡：設定邊界水頭條件及質點釋放面，產生水流流場與探討質點於此裂隙網路模型之移動軌跡；
- (iv) 核種傳輸分析：將質點軌跡輸入至遠場評估程式，以 Goldsim 進行核種傳輸之計算，所考慮之機制包括水流於地質圈之平流、縱向延散、母岩基質擴散及核種吸附等機制。

ECM 模式的應用時機，在模擬大範圍區域之岩體水流行為時，研究步驟如下：

- (i) 藉由 DFN 之裂隙生成理論，產生原始裂隙岩體模型，而 ECM 分析即由此原始裂隙岩體模型開始，經由建立連續且正交之單元網格，將其套疊至原始裂隙岩體模型上。
- (ii) 將原 DFN 模型之裂隙特性(如裂隙密度 P32、滲透係數等)參數，轉換為於各單元網格內之當量參數(如當量裂隙密度、當量滲透係數等)。
- (iii) 以連續體概念模式分析 ECM 之水流流場。
- (iv) 本計畫規劃透過參與工研院與瑞典 SKB 合作發展離島結晶岩測試區初步 DFN/ECM 模式，同步自行發展此方面評估模式之能力，此模式可於未來其他潛在場址(含離島結晶岩測試區)進行模式驗證，為未來關鍵能力奠定良好的基礎。

在裂隙與連體模式等效參數升尺度技術上，將持續以自行開發裂隙網路生成模式，同步開發符合裂隙網路之數值網格生成模式，利用熱-水-化耦合分析程式 TOUGHREACT，做為計算分析工具，建立包括離散裂隙網路與母岩的熱-水-化耦合分析模式，模式可同時分析裂隙與母岩交換的核種傳輸行為。模式將採用複合域迭代方式，亦即，裂隙域與母岩域分別由兩個不同模式組成，對每一分析時間，兩模式需以內部迭代方式進行資訊交換達到收斂，此交換資訊包括壓力及核種濃度等。此新建立的模式將做為連體模式等效參數升尺度分析工具，將裂隙岩體由小(觀測)尺度(數公尺)推延至遠場(數公里)尺度。技術建立後將模式應用於實際裂隙調查場址，以裂隙調查區域的裂隙統計結構為基礎，進行升尺度分析，模擬公里級尺度下核種遷移行為。

本子項計畫成果，係為支 SNFD2017 技術支援報告(3)第 3.5 節裂隙網路參數之科學論證。

- (e) 生物圈劑量評估技術研究

生物圈核種傳輸評估之首要工作，為建立複雜生活情節生物圈劑量評估 AMBER 程式運跑技術，利用 AMBER 程式區塊模式計算不同環境介質中放射性核種之濃度，以評估不同關鍵曝露群體之輻射劑量。由於我國地形、氣候等條件皆與日本相近，因此，將參考日本 H12 報告中生物圈模型情節假設，及依據離島居民飲食習慣與生態環境，建立臺灣本土生物圈概念模式與劑量評估技術。此外，將依據生物圈情節特性，調查與整合生物圈評估所需參數組合，以評估不同曝露群體間所接受輻射劑量。

同時，隨著氣候變遷將伴隨著地景與居民飲食習慣之改變，依據分析，地球約每 10 萬年會重覆冰河期循環，當冰河期來臨，地球溫度可能比現在降低約 8°C，而海平面可能降到比目前低 120 m。如此一來，臺灣西岸到大陸的土地將連結在一起，其中的離島成為內陸。溫度變化會影響地表生態發展，也會影響到人類農漁業培植捉捕的種類，地形改變地表水文也會影響人類活動區域。

農牧作物與淡海水魚撈養殖種類會隨氣候變遷的變化，也會隨民眾需求而改變，要完全掌握變化情形有實質困難。但是不可否認，相似氣候類型地區食物生產狀況類似，而民眾飲食習慣也會類似。臺灣位在太平洋西側亞熱帶位置，依照氣象局 1981 年至 2010 年統計結果，台北年平均溫度 23 °C，台中 23.3 °C，而台南 24.3 °C，依照地球暖化與冰河期溫度下降可能溫度範圍變化，未來臺灣的氣溫剛好約略在東京與曼谷兩個都會區現在溫度之間，所以將蒐集分析從溫帶到東亞國家(如日本、韓國、中國、菲律賓、越南、泰國、馬來西亞、新加坡、印尼)之飲食資料，評估各地可能農牧漁業產收狀況，同時類比瞭解氣候變遷造成居民飲食習慣可能影響。完成評估後，再運用已經發展完成的複雜曝露情境生物圈劑量評估 AMBER 程式運跑模型與技術，以修正參數計算生物圈劑量轉換因子。由於相關研究議題需要跨領域合作，故有

必要與國內氣候變遷相關研究進行合作，透過舉行論壇研討確認研究成果之合理性。

本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.5.4 節生物圈參數及第 5.6.2 節生物圈演化之科學論證。

#### (4) 預期研究成果

##### (a) 分析模式的選用與開發

執行國際相關安全評估數值模式種類與分析方法之研究，進而評估我國目前既有的分析能力，完成提出分析模式的選用與開發整合建議。

##### (b) 廢棄物罐破壞模式評估技術研究

以廢棄物罐初始缺陷之假設，完成建立廢棄物罐針孔破壞機制之研究，並運用安全評估模式練，進行對處置設施長期安全之影響評估。

##### (c) 工程障壁系統評估技術研究

研究工程障壁系統受各作用影響機制隨時間演進的變化行為，包括探討核種受膠體吸附機制與吸附後的遷移行為，完成彙整內部工程障壁系統組件受演化，及對處置場安全評估劑量分析結果的影響。

##### (d) 岩體裂隙傳輸評估技術研究

依據結晶岩質之母岩裂隙特性，建立離散裂隙網路模型與開發裂隙與連體模式等效參數升尺度技術，完成水流與質點追蹤分析技術研究，並配合後續採用 Goldsim 計算核種傳輸之需求，完成輸出輸入資料轉換之整合與解析，落實關鍵技術本土化。

##### (e) 生物圈劑量評估技術研究

完成探討與建立符合臺灣地區環境與居民狀況的生物圈情節，配合外部條件演化，進行生物圈情境之演化，包括探討氣候變遷造成可能之地景與居民飲食習慣之改變，評估農漁產物變化影響，依照不同謀生之生活狀況完成生物圈劑量轉

換因子之計算，提供後端 Goldsim 分析軟體進行模式整合，  
評估處置設施造成關鍵群體之危害影響評估。

(f) 技術發展藍圖與技術發展路徑之研議

綜合研析本年度之安全評估分析模式建立與執行研究成果，  
彙整研議下一階段之技術發展藍圖與技術發展路徑。

表 5-1：安全評估模式之比較分析

模式建立	SKB 使用之程式碼	SNFD2017 報告使用之程式碼
緩衝材料與岩石溫度	3DEC	FLAC3D
緩衝/回填材料飽和過程的 THM 行為	Abaqus	COMSOL/ABAQUS
完整岩石變形(地質圈)	3DEC	-
再活化(Reactivation)	3DEC	-
裂隙生成	3DEC	-
FPI (Full Perimeter Intersecting fractures) 計算	FPI script in MATLAB	3DEC
飽和過程中的化學變化(地質圈)	PHAST	-
灌漿劣化(Grout degradation)	CODE_BRIGHT	-
飽和過程的地下水流與鹽度	DarcyTools	-
回脹	Abaqus/ CODE_BRIGHT	COMSOL/ABAQUS
緩衝材料化學與其內的核種遷移	PHAST/TOUGHREACT	-
緩衝/回填材料內初始含氧的消耗	PHAST	-
腐蝕計算(包含緩衝材料侵蝕)	Analytical expressions (Excel)	Analytical expressions (Excel)
溫暖期的水文模式 (Hydro temperate domain)	ConnectFlow	-
冰期循環下的地下水組成	PHREEQC	-
溶解度	Simple Functions	GoldSim
近場核種傳輸	COMP23	GoldSim
遠場核種傳輸	FARF31/ MARFA	GoldSim
生物圈地貌模式	Ecolego/ MIKE_SHE/ Pandora/ Erica	Amber

註：表中欄位以「-」表示，係指目前尚未完整發展該技術之評估模式，SNFD2017 報告中並未使用，將配合未來所提出之分析模式的選用與開發整合建議，提出具體發展計畫。



## 5.4. THMC實驗與模擬技術研發

### (1) 研究背景

我國現階段參考處置概念，廢棄物罐為使用銅質外殼鑄鐵內裡之材質，周圍以夯實之膨潤土做為緩衝材料，以阻隔與遲滯廢棄物罐之有害物釋出或地下環境中可能造成廢棄物罐破壞之物質接觸使廢棄物罐腐蝕，並以回填材料回填處置隧道以維持隧道支撐、阻滯地下水流及抑止緩衝材料回脹至處置隧道中而失去原本的設計密度。而緩衝材料及回填材料之原料為高回脹特性之膨潤土，為確保膨潤土製成之工程障壁元件，可符合安全需求且長時間維持所需的功能，必需進行相關的材料特性試驗及參數試驗，以提供處置場工程障壁設計規格之參考，以及模擬處置環境條件之數值分析研究，確認緩衝及回填材料設計可在長時間及環境影響下仍能保持原本的安全需求，因此，本研究將發展近場 THMC 模擬試驗技術及數值分析技術，以提供安全分析的佐證。

### (2) 研究目的

緩衝材料設計之主要需求，為保護廢棄物罐不受處置環境周圍有害物質影響，有效阻隔與遲滯核種釋出至人類生活圈或有害物入侵破壞廢棄物罐，且選用之膨潤土材料成份應不可具有對廢棄物罐有害之物質。回填材料設計之主要需求，主要提供處置隧道支撐及回填處置隧道空間以阻滯地下水流，並且提供處置孔內的緩衝材料適當的壓力以維持體積，保持緩衝材料原有的設計密度條件。故在處置場工程障壁緩衝材料與回填材料選擇與設計評估時，需分析與驗證膨潤土中的成份及相關環境交互作用對廢棄物罐安全影響的限度，以及緩衝材料及回填材料的功能設計是否符合安全需求，與長時間影響下之耐久性能。考量處置場場址之環境特殊性，需發展本土緩衝與回填材料特性試驗研究及數值分析技術，以對應不同場址環境提出相應的設計與安全論證。針對環境影響對緩衝材料及回填材料特性之試驗研究，本年度針對緩衝材料與回填材料規劃環境影響試驗及處置場近場環境 THMC 耦合

作用模擬試驗與數值分析技術發展，各工作項說明如下：「硫化物對緩衝材料侵蝕速率研究」，以確認處置環境中及膨潤土材料中，硫化物的生成以及生成產物對廢棄物罐的腐蝕影響；「腐蝕氣體對緩衝材料侵蝕速率研究」考量廢棄物罐受腐蝕作用產生的氣體滲透行為，以評估對緩衝材料的安全影響；「地下水化學組成對緩衝材料/回填材料影響研究」探討地下水對膨潤土材料之回脹特性及礦物組成影響；「緩衝材料熱-水-力-化耦合縮尺實驗研究」以小尺度模型試驗探討夯實膨潤土材料受熱-水-力作用交互影響下之水份傳輸變化及壓力變化，同時發展感測器的安裝技術與感測器耐久性測試，本階段先針對熱-力作用之影響；「緩衝材料熱-水-力-化耦合特性研究」利用具溫度場之三軸試驗設備獲得膨潤土材料之力學參數；「緩衝材料熱-水-力-化耦合數值模擬研究」建立熱-力耦合數值分析模型與驗證，以供後續案例評估技術發展。本階段之研究主要著重於設備之建置與技術發展之建立，107年度將延續本階段的試驗研究與數值技術，建立長期延續性的發展，以逐步建立本土的緩衝材料與回填材料之參數特性與長期影響的數據參數，以做為我國處置場設計之安全論證資料。

### (3) 研究內容

#### (a) 硫化物對緩衝材料侵蝕速率研究

參考國際上之相關研究，探討處置環境中硫化物來源，包含：由緩衝材料溶解於地下水中的硫化物、存在於緩衝材料中之硫酸鹽還原菌生成之硫化物、存在於地下水中之硫化物，以及緩衝材料與廢棄物罐間界面影響。為瞭解硫酸鹽在緩衝材料中之擴散行為，將建置硫酸鹽擴散試驗設備，取得硫酸鹽之擴散係數；為探討硫酸鹽還原菌對銅質材料之腐蝕作用，本階段將培養硫酸鹽還原菌，並混合於膨潤土樣本中養成，以利後期建置緩衝材料與廢棄物罐界面試驗設備之樣本。

#### (b) 腐蝕氣體對緩衝材料侵蝕速率研究

為利後續得以觀察緩衝材料之氣體滲透性、突破壓力及閉合壓力，對氣體於緩衝材料之遷移機制能有初步了解，以供評

估腐蝕產生之氣體對緩衝材料影響所需之相關參數，此階段將規劃並建置氣體傳輸實驗設備，使用密封耐高壓之不鏽鋼容器，連接水循環裝置及注氣設備，建置定容一維氣體傳輸試驗裝置，達成初步研究技術之建立。

(c) 地下水化學組成對緩衝材料/回填材料影響研究

參考國際間之研究成果，探討緩衝/回填材料於地下處置環境中，膨潤土在飽和過程及完全飽和後，與地下水的相互作用機制，分析評估在我國地質條件下之地下水化學作用過程。利用實驗室調配模擬參考場址之地下水，並改變不同的濃度倍數，進行水樣對膨潤土回脹試驗，分析膨潤土在不同濃度水樣條件下之回脹行為，回脹試驗方法為固定體積限制位移以量測垂直應力，並於試驗完成後分析膨潤土樣本之成份變化。

(d) 緩衝材料熱-水-力-化耦合縮尺實驗研究

以小尺度模型熱-水-力試驗，探討夯實膨潤土材料受熱-水-力作用交互影響下，量測水份傳輸變化及壓力變化，同時發展感測器的安裝技術與感測器耐久性測試。為增加耦合試驗過程收集到的數據的可靠度，將試驗過程中使用之感測器進行校正後，再建置熱-水-力耦合縮尺試驗。試驗建置完成後先進行熱-力耦合程序，並取得熱-力耦合試驗之數據。

(e) 緩衝材料熱-水-力-化耦合特性研究

為執行緩衝材料受到場址與周圍環境的熱(T)-水(H)-力(M)-化(C)作用之影響，本研究擬建立具備溫度場之三軸試驗設備，探討不同壓實密度緩衝材料受溫度作用的力學特性，試驗獲得緩衝材料受溫度影響下之彈性模數、柏松比、凝聚力、摩擦角、及不排水剪力強度，以岩石力學或土壤力學之方法分析，評估緩衝材料受熱-力作用對力學特性的影響。

(f) 緩衝材料熱-水-力-化耦合數值模擬研究

彙整國際間處置場耦合數值分析技術發展與相關研究成果，建立數值分析技術理論與分析模型假設基礎，並發展本土處

置場近場熱-力耦合分析模型，計算緩衝材料、回填材料及圍岩之溫度、應力與位移隨時間變化之關係。

(4) 預期研究成果

- (a) 完成「緩衝材料硫化物擴散試驗設備」建置，以期瞭解硫化物於緩衝材料中之擴散行為，建立未來緩衝材料設計與功能評估驗證技術之基礎。
- (b) 建置「緩衝材料氣體滲透試驗裝置」，以利後續觀察氣體於壓密緩衝材料之傳輸過程與特性，求得所需之試驗成果。
- (c) 彙整國際間對於地下水化學組成與緩衝/回填材料之相互關係研究，分析地下水中影響緩衝/回填材料功能的因子，並探討我國參考案例中之地下水成分對緩衝/回填材料回脹性能之影響，以提供未來相關設計與功能驗證之依據。
- (d) 完成「緩衝材料熱-水-力耦合縮尺模型」建置，並取得熱-力耦合程序之數據，以供後續緩衝材料耦合作用數值模擬比對之數據及參數驗證模型。
- (e) 完成「溫度場三軸試驗設備」建置，並取得溫度作用條件下，緩衝材料之力學特性參數，以提供未來工程設計與功能驗證之依據。
- (f) 建立我國本土處置場近場熱-力耦合模擬技術，完成熱-力耦合數值分析模型與驗證，並探討廢棄物罐熱效應產生之應力增量對工程障壁產生之影響。

## 5.5. 核種遷移實驗設施建置

(1) 研究背景

在「深層地質處置」概念中，岩體的抬升或沉陷主要係取決於大地架構及其演化特性。對於放射性廢棄物「深層地質處置」而言，岩體的抬升將縮短處置深度與人類生活圈的安全距離，進而降低岩層對核種遷移的隔離功能，相反地，岩體的沉陷將使放射性廢棄物逐漸遠離人類生活圈。處置母岩的評估，除了需考慮岩層之地質、水文、地震和岩石力學特性等條件外，其水文地球化學特

性更是決定是否適合進行深層地質處置的關鍵。而地下水的流動特性，是影響核種在地層遷移速率與分布的主要因子。所謂合適的水文地化環境，係指其具備高的放射性核種遲滯能力、高的化學緩衝能力，以及低的核種溶解度之地下水化學特性。除了直接影響核種的溶解度外，地下水的化學特性，尤其是地下水的酸鹼度及氧化還原條件，對工程障壁(如緩衝回填材料)及天然障壁(母岩)的屏障功能亦具有重要的影響性。一個具有緩慢地下水流(通量)的深層地質條件，使核種在地層的遷移速度低，是考量處置場功能優劣與否的關鍵因子。

對於工程障壁之膨潤土性能的壽命與受環境影響而變質的速率、熱作用造成的物理-化學變化、廢棄物罐沉陷的問題、或其它處置場材料造成的交互影響、阻水性能與膠體滲濾功能，可提供相對長時間尺度下(如數十萬年至百萬年)之資訊，並考量相當長半化期的核種，如分裂產物(如 Tc-99、I-129…)及錒系元素(U、Th、TRU)等，在近場與遠場的遷移行為，模擬處置場環境交互影響之複雜情況做長期穩定性能評估是相當重要的工作。

針對功能安全評估中之重要核種遷移參數評估研究，包括：結晶岩(如花崗岩)與其他母岩等，由於地下水是放射性核種遷移至人類可接觸環境的重要媒介，廢棄物罐因腐蝕而使其內部所含之放射性核種經溶解、滲濾(leaching)、擴散(diffusion)後，先傳輸至工程障壁系統與地質圈，最後，則進入生物圈。因此，在放射性核種之特性，包括：半衰期、活度、溶解度、分配係數、擴散係數、遲滯因數等，均被列為評估與選擇場址的要項之一。本研究根據放射性核種盤存量評估結果，以及該核種在水中的物理或化學特性、半衰期、生物圈劑量轉換因子等資料，綜合考量篩選出潛在關鍵核種，作為安全評估之核種遷移計算、實驗與研究之根本。

膠體的種類眾多，包括鐵、鋁水合物、懸浮固體、微生物及天然溶解性有機物等，其中，存在自然界中的膠體以鐵、鋁水合物為最大宗。由於其顆粒粒徑小、比表面積大，且多帶有負電性，不

僅會吸附放射性核種，更具有隨水流移動的能力，因此會改變核種的分配係數值及遷移能力。近年來對於有機物與蒙脫石形成的膠體釋出的研究中，發現在地下水於低離子濃度時容易形成膠體，此膠體的釋出將會伴隨著蒙脫石的流失，為近場核種傳輸考慮機制。而蒙脫石或有機物與鐵、鋁水合物之間的交互作用，亦會影響這些天然吸附劑的吸附行為。過去的研究成果指出，地下水的腐植質、微生物可能在水飽和破裂孔隙介質(裂縫岩層)，形成有機膠體，因膠體的可移動性以及可觀的吸附表面積，會吸附放射性核種，當作載體(carrier)，且基於親水效應，具有加速核種傳輸的潛能，尤其對於對水溶解度較低的放射性核種，吸附於膠體表面而隨地下水遷移，成為另一項傳輸機制。因此，瞭解膠體對核種吸附及遷移行為的影響，為安全評估之重要工作之一。有鑑於國外相關研究單位(瑞典、芬蘭、日本、瑞士、比利時、西班牙及美國等)，多年來已進行相關長程實驗室核種遷移研究計畫，探討相關參數之重要性與不確定性，定期公佈其報告或發表相關成果於國外的重要期刊雜誌，提供相關研究學者參考。

## (2) 研究目的

本計畫將建置核種遷移實驗室設施，模擬及彙整深地層處置中的重要及難測核種之遷移參數(如：分配係數與擴散係數)，作為國內唯一運用熱測試放射化學實驗與模擬交互驗證的系統性研究單位，提供最終處置場之安全評估及工程障壁設計時所需本土化參數輸入之完整性及重要參考依據，並強化評估模式的合理性。當核種不是以單純溶質傳輸(近場或遠場介質與液相形成之二相系統)，而是與膠體作用之後傳輸(近場或遠場、膠體介質與液相形成之三相系統)，複雜程度相對提高許多。因此，本研究目的有：

- (a) 膠體的組成、分類 [含無機膠體(如粘土，方解石，鐵、鋁水合物)與有機膠體(如微生物和有機物)]、在地下水中的粒徑分布與物理化學特性。
- (b) 膠體穩定性分析：其目的為了解膠體形成之條件，如膨潤土膠體穩定性強烈地依賴於地下水離子強度。

- (c) 膠體吸脫附特性分析：其目的為探討膠體對於放射性核種之吸附與脫附影響情形。
- (d) 膠體加速核種遷移的現象與機制：探討有機膠體於膨潤土中對核種膠體遷移之影響，如強吸附性核種於膨潤土有極高的分配係數(Kd 值)，但在有機膠體存在的條件下，形成錯合物，Kd 值有大幅降低之趨勢。
- (e) 研究近場(膨潤土)、遠場(花崗岩)地下水中膠體含量、穩定性與地層深度、鹽度、溶液離子強度、離子吸附競爭或 pH 值對核種吸附率的關聯性。如地層越深及鹽度越高，膠體濃度降低。

### (3) 研究內容

- (a) 重要核種於工程障壁/岩體裂隙之吸附反應與擴散行為研究  
本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.4.2 節核種傳輸遲滯安全功能與指標之科學論證。
- (b) 膠體於工程障壁/岩體裂隙之傳輸影響研究：進行文獻回顧，蒐集、整理國際資料，探討膠體於近場(緩衝/回填材料)及遠場(岩體裂隙)之傳輸影響，瞭解膠體的形成及在地下水中的特性、粒徑分布、種類(如腐植酸有機物、無機化合物)、特性，探討膠體在緩衝/回填材料及母岩的傳輸行為等研究。  
本子項計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 4.5.2 節緩衝材料及第 4.5.2.4 節化學特性之科學論證之科學論證。

### (4) 預期研究成果

- (a) 106 年將完成評估鎝(Tc)、銫(Cs)兩個核種之分配係數(Kd)值所需之實驗。其中，銫(Cs)實驗建立於過去研究缺乏的高解析度的固相分析技術(例如 SEM/EDS、SIMS、RBS 或同步輻射光源 XANES 或 EXAFS 分析等)，將分析結果與過去之 Kd 值做比較，研究 Cs 在近場中的吸附現象與擴散行為，並探討 Cs 在塊狀薄片花崗岩(Intact Granite)，模擬離島結晶岩測試區相同的地球化學條件下之擴散實驗，以分析其擴散係數，了解其基質擴散(Matrix Diffusion)效應。

- (b) 建立膠體於工程障壁及岩體裂隙之傳輸行為評估技術，以供安全評估分析應用。

## 5.6. 天然類比評估研發技術

### (1) 研究背景

天然類比研究在深地層處置場安全評估中，為一重要的驗證方法，可彌補實驗室試驗及現地試驗在時間與空間尺度上的不足，並提高深地層處置概念技術評估之信賴度。因此，本期計畫將持續進行國際間天然類比研究案例資訊綜整分析，以作為 SFND2017 報告安全評估信心之佐證資訊。本計畫亦將針對目前臺灣本土地質歷史演化調查成果與考古文物演化(腐蝕，或稱化學風化)研究成果，進行文獻資料蒐集與分析。此外，在主管單位或文物擁有者允許或同意下，以不毀損文物的原則，針對臺灣本土之鐵器或銅器，利用 XRF、XRD、Raman spectrometer、SEM/EDS、TEM、Micro-CT 等儀器進行出土文物化學組成份鑑定與分析，了解出土文物的背景資訊。

### (2) 研究目的

經由研究出土金屬文物的腐蝕速率，以及原埋藏環境特性，可評估處置罐若在相似環境下的可能壽命，此資訊可提供安全評估使用，並驗證深層地質處置概念的可行性與長期安全性，並可支持安全評估所作之假設，從而增加系統的可靠性。

### (3) 研究內容

國際/國內天然類比資訊蒐集及案例探討分析：持續蒐集及更新國際天然類比案例，以及針對國內本土可能的天然類比地點(如漢本遺址)進行青銅器科技考古分析，建立相關腐蝕率研究技術。例如：利用實驗室的微電腦斷層掃描儀(Micro-CT)之高解析度成像技術，可觀察金屬文物的內部構造，而由影像的灰階變化，得知金屬材料密度高低的變化，以分析其腐蝕深度，並藉由 C-14(碳-14)的定年方式，進而推算埋藏年代的長期腐蝕速率。本子項



計畫成果，係為支持 SNFD2017 報告之第 5.11.5 節天然類比研究之科學論證之科學論證。

(4) 預期研究成果

國內本土地質環境影響因子與天然類比資訊之探討與分析，並利用實驗儀器建立本土青銅器腐蝕性研究技術，以供安全評估分析應用。

## 6. 國際同儕審查

用過核子燃料最終處置計畫研究時程長遠，且相關研究所涵蓋之專業廣泛，大部分核能先進國家皆以國際合作及同儕審查方式，確保研究技術及成果與國際同步。

台電公司自 95 年原能會核定用過核子燃料最終處置計畫書後，皆依處置計畫書執行相關研究工作，現階段首要目的即於 106 年提出 SNFD2017 報告，前述報告章節架構係依據主管機關要求，參考日本 H12 報告章節架構編擬，因此，針對 SNFD2017 報告，台電公司將規劃請國內學者專家審閱，並洽請國外放射性廢棄物處置執行機構或國際學者專家進行同儕審查。

本計畫已整合國內研究單位，並與瑞典專責機構(SKB)及芬蘭專責機構(POSIVA)國際合作交流，成功舉辦國際同儕先期審查研討會及技術交流討論會議；並藉由與日本 NUMO 簽署 MOU，參加 NUMO 召開之「高放處置技術國際交流年會」，並辦理「台日高放射性廢棄物最終處置技術研討會」，藉此建立深層地質處置技術合作管道，針對國內用過核子燃料處置技術發展現況進行國際同儕審查。同時，也與具備該技術審查經驗及能力之美國德州 Southwest Research Institute(SwRI)簽訂「SNFD2017 報告同儕審查技術服務」，並完成同儕獨立審查作業。

從瑞典 SKB、芬蘭 POSIVA 及日本 NUMO 專家之審查意見與建議中，獲得更明確之計畫發展方向，並從互動中汲取相關報告國際同儕審查之經驗。如功能/安全評估技術，以 SKB 的 KBS-3 處置概念為基礎，導入基本評估技術研究開發做為借鏡，期能在短期間內提升技術，這種手段是相當合理妥善的做法。此外，為確保最終處置計畫及工作的推動，有效順遂並能取得民眾認同，必須致力於積極公開最終處置有關之資訊，認知惟有資訊更公開透明、落實政府與團體機構間之資訊交換與圓滑的意見溝通，方能順利且有效推動最終處置工作。

## 7. 預期成果分析

本計畫目前執行「潛在處置母岩特性調查與評估」階段(94~106年)，預定於106年達成提出SNFD2017報告之階段目標。SNFD2017報告將確立國內離島及本島是否具有合適的潛在處置母岩，並依據特性調查成果評估處置技術發展之可行性，作為最終處置計畫後續工作規劃之基礎。

為達成上述之目標，本計畫針對「地質環境」、「處置設計與工程技術」、「安全評估」等3大工作主軸，提報106年度之工作計畫，其年度工作項目、預期成果及效益彙整如表7-1所示，逐年累進技術發展成果以如期於106年完成SNFD2017報告。

表 7-1：年度工作項目、預期成果及效益

106 年度工作項目	預期研究成果及效益
<b>3. 地質環境</b>	
<b>3.1 區域環境地質</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，更新臺灣涵蓋陸、海域三大潛在處置母岩之地質環境資訊。	SNFD2017 報告以全國尺度論述潛在處置母岩處置環境特性及長期演化歷程，持續強化結晶岩質地質調查資料的完備性，達成主管機關 104 年度評核會議紀錄(105 年 5 月 26 日)要求。
<b>3.2 深層地質特性(地質圈特性)</b>	
<b>3.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，更新臺灣地質圈特性對多重障壁概念的重要性。	提供 SNFD2017 報告綜合解析與比較臺灣潛在處置母岩深層特性與地質圈長期演化，說明臺灣地質圈特性，106 年度完成 SNFD2017 報告。
<b>3.2.2 水文地質</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，利用參考案例數據，建立三維水文地質數值模型，探討主要導水構造及岩脈群阻水構造對地下水流場的影響。	作為 SNFD2017 報告參考案例所需之水文地質數值模型。建立區域性水文地質 3D 數值模型模擬技術，與計算結果分析能力，提供安全評估範例輸入參考值，據以達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A4 及 A7 項)要求。
<b>3.2.3 水文地球化學</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，蒐集本島結晶岩現地深層水質資料，及建立岩水反應詳細礦物分析資料，建置對應熱力學資料，提供後續本島結晶岩裂隙地下水的地化反應路徑模擬之用。	作為 SNFD2017 報告探討離島與本島結晶岩深層地下水裂隙傳輸路徑之長期演化特性，及建構水文地球化學概念模式之基礎，提供安全評估技術發展之用。
<b>3.2.4 核種傳輸路徑</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，利用現地裂隙參數及特性，加強瑞典 SKB 國際合作，建立離散裂隙網路轉換為等效多孔介質的擴尺度技術。	與 SKB 團隊合作，解析參考案例現地數據，建立三維離散裂隙網路數值模擬參數表，提供安全評估之用，成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A4 項)要求。

106 年度工作項目	預期研究成果及效益
<b>3.2.5 岩石特性</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，量測不同飽和狀態花崗岩與膨潤土電阻率，建立模擬處置場坑道三維電阻率整演數值模型，逆推分析地下水環境進行電阻監測時電阻率影像。	作為後續現地再飽和試驗規劃及近場功能評估之參考依據，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(B1 項)之要求。
<b>3.3. 地質處置合適性研究</b>	
<b>3.3.1 臺灣的大地構造架構</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，整合臺灣大地構造架構及演化，據以了解火山活動時空分布的特性，評估未來百萬年尺度大地構造架構變遷對潛在處置母岩的影響。	SNFD2017 報告評估潛在處置母岩長期穩定性及地質處置合適性之依據。
撰寫 SNFD2017 報告，利用本島微震監測網蒐集的數據，發展地震叢集資訊分析與震波成像分析技術。並以地震觀測資料，進行區域性地殼應力逆推，了解深層地下應力對斷層活動的影響。在此孕震技術解析基礎上，評估震源破裂尺度及岩體受強震條件下的地動響應。	SNFD2017 報告評估岩體地下強地動行為相關技術，提供功能/安全評估所需裂隙受震反應之用，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A6 項)要求。
<b>3.3.2 抬升與沉陷作用</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，蒐集區域 GPS 連續觀測站資料，解算結晶岩體在三維空間中的伸張及壓縮行為，推導變形位移的行為趨勢。	SNFD2017 報告持續累積結晶岩體 GPS 連續觀測站高精度定位解算的成果，進而利用大範圍 GPS 監測網數據，研析區域性岩體抬升或沉陷作用的機制，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A1 及 A3 項)要求。
<b>3.3.3 氣候與海平面變遷</b>	
撰寫 SNFD2017 報告，進行臺灣地區絕對海水面變化研究，將進行附近海域測高衛星與驗潮站資料改正，利用改正數據計算 10 年與 20 年的相對與絕對海水面升降變動速率。	建構臺灣地區絕對海水面的監測與研析技術，評估氣候變遷影響海水面升降與岩體抬升/沉陷作用的影響關聯性，達成主管機關 100 年 11 月 22 日會議紀錄附件一(A1 及 A3 項)要求。
<b>4.1 輻射源向及核種特性研究</b>	

106 年度工作項目	預期研究成果及效益
1. 用過核子燃料存量與源項特性評估技術研究 2. 廢棄物罐核子臨界、表面輻射劑量率與熱傳分析 3. 地下水輻射分解研究	1. 以 SNFD2017 參考案例為展示案例，運用現階段之研發技術，建立初始熱源、輻射源項、氣體分裂產物與關鍵核種存量，進行保守合理的評估。 2. 以 SNFD2017 參考案例為展示案例，運用現階段之研發技術，展示評估廢棄物罐之罐體表面劑量率、溫度與臨界特性。 3. 研究用過核子燃料內阿伐、貝它射源分析，及射源項與地下水輻射分解機制的相關反應機制。
<b>4.2 處置概念與系統設計技術</b>	
1. 處置概念與設計流程及佈置研究 2. 地震危害度分析 3. 災害歷史地震震源模型及其敏感度分析研究 4. 廢棄物罐剪力設計需求研究	1. 完成 KBS-3 處置概念發展歷程文獻整理，並說明 KBS-3 本土化的適用性，建立處置配置設計流程及佈置技術。 2. 完成地震危害度分析，提供運轉相關設計所需地震反應譜、地震加速度波形。 3. 完成地體速度構造、震源斷層幾何參數評估，產生特定歷史地震之震源參數模型。 4. 完成剪力位移模擬數值模式，比對國際研究成果。
<b>4.3 廢棄物罐研發技術</b>	
1. 廢棄物罐受地震裂隙錯動影響數值分析 2. 廢棄物罐金屬材料抗蝕性能測試驗證 3. 廢棄物罐破裂韌性試體鑄造與特性量測 4. 銅質材料摩擦攪拌銲接與非破壞性檢測技術可行性評估	1. 完成各種地震引致裂隙錯動位移影響的分析結果。 2. 完成研析銅材料及鑄鐵本身的抗蝕特性，評估腐蝕量的影響因素。 3. 完成廢棄罐鑄造技術研究工作，建立國內自製廢棄物罐鑄鐵內襯試體的案例，研究鑄造的瑕疵對廢棄物罐之影響。 4. 完成無氧銅直板摩擦攪拌對接之銲接工作。
<b>4.4 緩衝與回填材料研發技術</b>	
1. 緩衝/回填材料基本性質試驗及回填材料設計施工研究 2. 緩衝材料高圍壓力學參數測試	1. 完成建立回填材料參考設計與設計規格，探討相關施工方法。

106 年度工作項目	預期研究成果及效益
3. 緩衝材料振動反應測試 4. 回填材料動態三軸試驗	2. 完成緩衝材料三軸試驗、單向度壓密試驗，獲得力學與壓密參數。 3. 完成離心機離心模型振動試驗，記錄工程障壁受震之變化。 4. 完成不同回填材料配比試體的動態三軸不排水剪力試驗，建立可供數值模擬使用的數據檔及建議土壤參數表。
<b>4.5 處置設施設計/建造/運轉/封閉/管理技術研發</b>	
1. 處置隧道支撐技術發展研究 2. 建造運轉封閉作業技術研究 3. 處置設施營運管理技術研究 4. 用過核子燃料最終處置成本估算	1. 藉由力學性能測試與耐久性測試及相關腐蝕試驗，完成處置低鹼混凝土開發。 2. 完成各個主要操作單元所涉及之流程與機具評估，發展再取出之可行程序。 3. 完成最終處置設施品質管理需求評估與環境管理監測需求與技術評估。 4. 完成處置各階段之成本估算。
<b>5.1 SNFD2017 報告安全評估案例與參數敏感度分析</b>	
1. 基本情節評估案例與參數敏感度分析 2. 替代情節評估案例分析研究	1. 以 SNFD2017 參考案例為展示案例，整合現階段已建立之模式鍊，以 GoldSim 軟體建構全系統模式鍊之核心要素，進行腐蝕情節與剪力情節之劑量危害量化分析與參數敏感度分析，相關展示成果回饋於 SNFD2017 報告之干擾情節案例安全評估章節。 2. 研究極端外部氣候條件、大地質作用與未來人類活動所造成的干擾情節，並建構案例執行危害評估，成果應用於 SNFD2017 報告之干擾情節案例安全評估章節。
<b>5.2 安全評估流程建立與方法研究</b>	
1. 安全評估方法論研究 2. FEPS 資料庫建置	1. 安全評估方法論 11 步驟之執行細節與連結應用研究，建構 SNFD2017 報告之安全評估流程。

106 年度工作項目	預期研究成果及效益
3. 外部條件演化發展 4. 安全評估劑量與風險分析技術發展 5. 安全評估可信度分析	2. 臺灣 FEPs 資料庫之整合與建置，並配合 SNFD2017 參考案例完成重要 FEPs 篩選清單，以應用於 SNFD2017 報告之情節案例建構。 3. 執行氣候相關議題，對影響處置設施參考演化之重要項目研究，包括海平面變化、溫度變化，並據以階段區分建立 SNFD2017 參考案例地形演化與冰河週期演化，研究成果用以支持 SNFD2017 報告之外部條件演化之科學論證。 4. 彙整國際間輻射防護資訊(如 ICRP、IAEA 等)，進行處置設施長期輻射安全之管理策略研究。 5. 研究國際各國發展安全論證中對各種不確定性的處理策略，以應用於 SNFD2017 報告論述 SNFD2017 參考案例之可信度分析技術展示。
<b>5.3 安全評估分析模式建立與執行</b>	
1. 分析模式的選用與開發 2. 廢棄物罐破壞模式評估技術研究 3. 工程障壁系統評估技術研究 4. 岩體裂隙傳輸評估技術研究 5. 生物圈劑量評估技術研究	1. 提出分析模式的選用與開發整合建議。 2. 建立廢棄物罐針孔破壞機制之研究。 3. 以 SNFD2017 參考案例為展示案例，研究工程障壁系統受各作用影響機制隨時間演進的變化行為，並整合國際經驗彙整對處置場安全評估之影響。 4. 執行水流與質點追蹤分析技術研究，建立與安全評估 Goldsim 計算之介面、資料轉換之整合。 5. 以 SNFD2017 參考案例為展示案例，建立符合臺灣地區環境與居民狀況的生物圈情節。
<b>5.4 THMC 實驗與模擬技術研發</b>	



106 年度工作項目	預期研究成果及效益
1. 硫化物對緩衝材料侵蝕速率研究 2. 腐蝕氣體對緩衝材料侵蝕速率研究 3. 地下水化學組成對緩衝材料/回填材料影響研究 4. 緩衝材料熱-水-力-化耦合縮尺實驗研究 5. 緩衝材料熱-水-力-化耦合特性研究 6. 緩衝材料熱-水-力-化耦合數值模擬研究	1. 完成緩衝材料硫化物擴散試驗設備建置，以期瞭解硫化物於緩衝材料中之擴散行為，建立未來緩衝材料設計與功能評估驗證技術之基礎。 2. 完成建置緩衝材料氣體滲透試驗裝置。 3. 完成彙整國際間對於地下水化學組成與緩衝/回填材料之間相互關係之相關研究。 4. 完成緩衝材料熱-水-力耦合縮尺模型建置，並取得熱-力耦合程序之數據，以供後續緩衝材料耦合作用數值模擬比對之數據及參數驗證模型。 5. 完成溫度場三軸試驗設備建置，並取得溫度作用條件下，緩衝材料之力學特性參數，以提供未來工程設計與功能驗證之依據。 6. 建立我國本土處置場近場熱-力耦合模擬技術，完成熱-力耦合數值分析模型與驗證，並探討廢棄物罐熱效應產生之應力增量對工程障壁產生之影響。
<b>5.5 核種遷移實驗設施建置</b>	
1. 重要核種於工程障壁/岩體裂隙之吸附反應與擴散行為研究 2. 膠體於工程障壁/岩體裂隙之傳輸影響研究	1. 完成評估鎔(Tc)、銫(Cs)兩個核種之分配係數(Kd)值所需之實驗。 2. 完成建立膠體於工程障壁及岩體裂隙之傳輸行為評估技術。
<b>5.6 天然類比評估研發技術</b>	
國際/國內天然類比資訊蒐集及案例探討分析	完成國內本土地質環境影響因子與天然類比資訊之探討與分析，並利用實驗儀器建立本土青銅器腐蝕性研究技術。

## 8. 參考文獻

- 台電公司(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。
- 台電公司(2015),用過核子燃料最終處置計畫書,2015年修訂版,台灣電力公司,共267頁。
- 鄧屬予(2007),臺灣第四紀大地構造,經濟部中央地質調查所特刊,第18號,第1-24頁。
- IAEA (2006), IAEA SAFETY GLOSSARY, Version 2.0, International Atomic Energy Agency.
- JNC (2000), H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basics for HLW Disposal in Japan, Project Overview report, JNC TN1410-2000-001
- Andersson, J., Skagius, K., Winberg, A., Lindborg, T., Strom, A. (2013), Site-descriptive modelling for a final repository for spent nuclear fuel in Sweden. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 69, pp. 1045-1060, DOI: 10.1007/s12665-013-2226-1.
- Chang, E.T.Y., Chao, B.F., Chiang, C.-C., Hwang, C. (2012), Vertical crustal motion of active plate convergence in Taiwan derived from tide gauge, altimetry, and GPS data. *Tectonophysics*, Vol. 578, pp. 98-106.
- Chen, Y.W., Shyu, J.B.H., and Chang, C.P. (2015), Neotectonic characteristics along the eastern flank of the Central Range in the active Taiwan orogeny inferred from fluvial channel morphology. *Tectonics*, Vol. 34, pp. 2249-2270.
- Chijimatsu, M., Sugita, Y., and Amemiya, K., (1999), A study on Manufacturing and Construction method of Buffer, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN8400 99-035.
- Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M. (2011), Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS

- observations, 2000–2008, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, B08406, doi:10.1029/2011JB008242.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C.P., Lague, D. and Lin, J.C. (2003), Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, Vol. 426, pp.648–651.
- Derrioux, F., Siame, L.L., Bourlès, D.L., Chen, R.F., Braucher, R., Léanni, L., Lee, J.C., Chu, H.T. and Byrne, T.B. (2014), How fast is the denudation of the Taiwan mountain belt? Perspectives from in situ cosmogenic  $^{10}\text{Be}$ . *Journal of Asian Earth Sciences* Vol. 88, pp. 230–245.
- Fuller, C.W., Willett, S.D. Fisher, D. and Lu, C.Y. (2006), A thermomechanical wedge model of Taiwan constrained by fission-track thermochronometry, *Tectonophysics*, Vol. 425, pp.1-24.
- Horng, C.S., Huh, C.A., Chen, K.H., Lin, C.H., (2012), Pyrrhotite as a tracer for denudation of the Taiwan orogeny. *Geochem. Geophys. Geosyst.* Vol. 13 (8), Q08Z47.
- JNC (2000), H12 Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan, Project overview report, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC-T21410-2000-001.
- Lallemend, S., Theunissen, T., Schnürle, P., Lee, C-S., Liu, C-S., Font, Y. (2013), Indentation of the Philliping Sea plate by the Eurasia plate in Taiwan: Details from recent marine seismological experiments. *Tectonophysics*, Vol.594, pp.60-79.
- Lu, C.Y., and Hsu, K.J. (1992), Tectonic Evolution of the Taiwan Mountain Belt, *Petroleum Geology of Taiwan*, No. 27, pp. 21-46.
- OECD (2009), Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock. Workshop Proceedings Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007. NEA No. 6362.

- Renard, P., and de Marsily, G.D. (1997), Calculating equivalent permeability : a review, *Advances in Water Resources*, Vol. 20, No. 5-6, pp. 253-278.
- Shao, W-Y., Chung, S.L., Chen, W.S., Lee, H.Y., and Xie, L.W. (2015), Old continental zircons from a young oceanic arc, eastern Taiwan: Implications for Luzon subduction initiation and Asian accretionary orogeny. *Geology*, Vol. 43, pp. 479-482. doi:10.1130/G36499.1
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., and Chen, Y.G. (2005), Tandem Suturing and Disarticulation of the Taiwan Orogen Revealed by its Neotectonic Elements, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 233, pp. 167-177.
- SKB (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main Report of the SR-Site project, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company Report, Technical Report TR-11-01.
- Wen, X.H., and Gómez-Hernández, J.J. (1996), Upscaling hydraulic conductivities: an overview, *Journal of Hydrology*, Vol. 183, No. 1-2, pp. ix-xxxii.