

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  
104年度工作計畫  
(修訂二版)

台灣電力公司

中華民國 104 年 2 月

(此頁為空白頁)

## 104年度工作計畫目錄

1. 概述.....	1-1
2. 計畫規劃.....	2-1
3. 規劃工作事項.....	3-1
3.1 地質環境.....	3-1
3.1.1 區域環境地質.....	3-3
3.1.2 深層地質特性.....	3-4
3.1.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性.....	3-4
3.1.2.2 水文地質.....	3-5
3.1.2.3 水文地球化學.....	3-6
3.1.2.4 核種傳輸路徑.....	3-7
3.1.2.5 岩石特性.....	3-8
3.1.3 地質處置合適性研究.....	3-11
3.1.3.1 台灣的大地構造架構.....	3-11
3.1.3.2 抬升與沉陷作用.....	3-13
3.1.3.3 氣候與海平面變遷.....	3-14
3.2 處置設計與工程技術.....	3-17
3.2.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力.....	3-17
3.2.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能.....	3-18
3.2.3 整體處置概念.....	3-19
3.2.3.1 工程障壁系統.....	3-19
3.2.3.2 處置設施.....	3-19
3.2.4 設計流程.....	3-20
3.2.5 影響處置概念的因子.....	3-21
3.2.5.1 熱與放射性.....	3-21
3.2.5.2 地質與地形條件.....	3-22
3.2.5.3 處置母岩特性.....	3-23
3.2.5.4 處置深度.....	3-23
3.2.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求.....	3-24
3.2.6.1 廢棄物罐.....	3-25
3.2.6.2 緩衝材料.....	3-26
3.2.6.3 工程障壁的規格與配置.....	3-26
3.2.6.4 地下設施.....	3-26
3.2.6.5 回填與封塞.....	3-27

3.2.6.6 處置場設計.....	3-27
3.2.7 工程障壁的穩定性.....	3-27
3.2.7.1 再飽和特性.....	3-28
3.2.7.2 力學穩定特性.....	3-28
3.2.7.3 受震穩定性.....	3-29
3.2.7.4 氣體遷移.....	3-29
3.2.7.5 膨潤土特性.....	3-30
3.2.8 建造/運轉/封閉技術.....	3-31
3.2.8.1 建造階段.....	3-31
3.2.8.2 運轉階段.....	3-32
3.2.8.3 封閉階段.....	3-32
3.2.9 處置場營運管理技術.....	3-33
3.3 安全評估.....	3-33
3.3.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段安全評估的範疇及目標.....	3-34
3.3.2 安全評估方法.....	3-34
3.3.2.1 相關法規.....	3-34
3.3.2.2 安全評估案例的建置方法.....	3-35
3.3.2.3 模式建構.....	3-35
3.3.2.4 安全評估可信度.....	3-36
3.3.3 處置系統與功能.....	3-36
3.3.3.1 處置系統特性.....	3-36
3.3.3.2 處置系統功能.....	3-37
3.3.4 情節發展.....	3-37
3.3.4.1 特徵/事件/作用(FEPs)之建置.....	3-37
3.3.4.2 特徵/事件/作用(FEPs)之篩選.....	3-38
3.3.4.3 情節定義.....	3-38
3.3.5 參考案例.....	3-38
3.3.5.1 參考案例定義.....	3-38
3.3.5.2 工程障壁系統參考案例.....	3-39
3.3.5.3 地質環境參考案例.....	3-39
3.3.5.4 生物圈參考案例.....	3-40
3.3.6 替代案例.....	3-41
3.3.6.1 基本情節之替代案例分析.....	3-41
3.3.6.2 擾動情節分析.....	3-41
3.3.6.3 隔離失效情節分析.....	3-42
3.3.6.4 關鍵不確定性之確認.....	3-42
3.3.7 計算案例之整合分析.....	3-43
3.3.7.1 案例定義.....	3-43

3.3.7.2 案例分析結果說明.....	3-43
3.3.7.3 比較各國安全標準.....	3-43
3.3.7.4 補充的安全指標.....	3-44
3.3.8 安全評估的可信度.....	3-44
3.3.8.1 情節、模式、模組、及資料庫的建置.....	3-44
3.3.8.2 天然類比研究.....	3-44
3.3.8.3 評估報告比較.....	3-44
3.4 國際同儕審查規劃.....	3-45
<b>4. 預期成果分析.....</b>	<b>4-1</b>
<b>5. 參考文獻.....</b>	<b>5-1</b>

## 表目錄

	頁次
表 2-1：SNFD2017報告預定章節 .....	2-5
表 4-1：年度工作項目、預期成果及效益 .....	4-2

## 1. 概述

我國自67年開始利用核能發電，迄今共有核一廠、核二廠、核三廠的6部核能機組，加上目前正在進行的龍門計畫(原核四廠)，將來還會有2部機組加入運轉發電。其中，核一廠、核二廠4座機組為沸水式，核三廠2座機組為壓水式，核四廠2部為進步型沸水式反應器。預估此4個核能電廠的8部機組運轉40年將會產生約7,714公噸鈾的用過核子燃料。由於用過核子燃料中所含的放射性核種，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，一直是用過核子燃料最終處置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，藉以確保民眾安全及環境品質，進而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。上述各項方案經過各國學者專家多年研究後，咸認「深層地質處置」為一較為可行的處置方式。而「深層地質處置」係採用「多重障壁」概念，利用深層岩層的隔離阻絕特性，將用過核子燃料埋存在深約300至1000 m的地下岩層中，之後輔以包封容器、緩衝與回填材料等工程設施，藉以形成人工的與天然的多重障壁系統，可以使外釋而遷移的核種受到有效地隔離與阻絕，藉以換取足夠的時間，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可忽略的程度。

我國用過核子燃料處置之推動，係依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2006年核定版)」所擬時程及規劃工作內容，切實執行境內最終處置之技術發展及處置設施之籌建工作。因此本階段(94~106年)為「潛在處置母岩特性調查與評估」階段，而本階段預計規劃2個計畫

目標，首先於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」(簡稱SNFD2009報告)；最後於106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)」(台電公司，2010)。根據已完成近程工作目標，彙整過去長程計畫成果與蒐集國內外相關資料，於98年所提SNFD2009報告中，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，該報告於99年7月獲原能會同意核備，並上網公告。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)」(台電公司，2011)。

在過去幾年中，潛在母岩特性調查技術之發展，類似日本深層地質特性調查的技術發展路徑(JNC, 2000)，集中於建立結晶岩體研究區特性調查與評估，發展相關之處置技術，總計在結晶岩研究區完成約500點地表重/磁力探測、16 km地電阻剖面探測、3000 m (6孔)地質鑽探及地物/水文/地化/岩力等各式孔內探測，並透過整合性的地質、地物、水文、水化學及環境資料解析，建構結晶岩研究區初步地質概念模式。期能透過各項技術整合性驗證，藉以發展功能/安全評估技術，期使現地調查至功能評估的整體作業流程均趨於完備，進而完成SNFD2009報告。

根據SNFD2009報告中有關研究結果顯示：台灣地區活動構造、地震、火山活動及地質災害之分布均存在局部性；除了離島結晶岩體具備長期地質穩定性外，位於板塊邊界之本島結晶岩體，根據近年來的研究結果顯示可能在近百萬年來，逐漸趨於相對穩定。為求整體評估離島與本島結晶岩體之深層地質條件與長期演化趨勢，本階段進行潛在處置母岩調查工作中，除建立深層特性調查技術能力外，亦將加強結晶岩體長期穩定性的研究。初期進行岩體規模、分布與主要構造帶延伸等調查研究，藉以提供熱-水-力-化耦合等評估技術所需的本土基礎數據，以利後續完成處置設計、建立本土工程技術及完成安全評估相關技術發展。

## 2. 計畫規劃

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。100年1月已完成修訂版的核備(台電公司，2011)，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)，藉以完成下列目標：(1)完成我國潛在處置母岩特性調查與評估，(2)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。

為求善用國外發展經驗及聚焦國內研發資源，因此在考量日本與我國地質環境之相似性後，原子能委員會要求SNFD2017報告須參考日本H12報告(JNC, 2000)之架構編寫。據此，SNFD2017報告之章節內容詳如表 2-1所示，其中「地質環境」、「處置設計與工程技術」、「安全評估」等3章，即為本計畫後續工作之3項主軸：

#### (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，針對我國國土範圍地質環境特徵，宏觀說明大地構造環境與地質長期演化特性；

##### (b) 深層地質特性

取得本土深層地質現地量測數據，包括水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑、岩石特性等，建構地質圈概念模式之關鍵項目；

##### (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影響處置環境長期穩定性的影響因子。

#### (2) 處置設計與工程技術

##### (a) 處置設施概念研究

蒐整國外深層處置設施之設計概念資訊，內容包括法規要求、天然類比資訊、處置設施設計影響因子、處置設施系統等，建立國內參考處置概念。

(b) 處置設施設計研究

彙整國內外深層處置設施之設計資訊，內容包含廢棄物容器規格、緩衝材料特性、回填材料特性等工程障壁系統的設計研究。

(c) 工程技術

取得國內外深層設施之建造、運轉、封閉等技術資訊，進行工法經濟效益與影響之探討，並發展處置設施之營運和管理技術。

(3) 安全評估

(a) 安全評估方法

建立國內處置設施安全評估方法，內容包含彙整國內外高放處置法規、研析安全評估案例的建置方法、安全評估模式比較等。

(b) 情節發展

研析國外高放處置考量之情節、建置國內情節篩選準則、定義基本情節與分析情節。

(c) 整合分析研究

處置設施安全評估整合分析，內容包含核種遷移模型建構、參數蒐整、情節案例分析比較、國內外安全標準比較、安全指標分析技術、安全評估可信度(天然類比資訊、資料庫、各國評估報告)等。



表 2-1：SNFD2017報告預定章節

<b>SNFD2017報告(預定章節)</b>	<b>H12報告章節(JNC, 2000)</b>
<b>1. 台灣用過核子燃料管理策略與處置計畫</b>	<b>I. High-Level Radioactive Waste Management in Japan</b>
1.1 緣起	1.1 Utilization of nuclear energy and generation of HLW
	1.1.1 Nuclear energy production and the nuclear fuel cycle
	1.1.2 Characteristics of HLW
1.2 管理	1.2 Management of HLW
	1.2.1 Fundamental principles
	1.2.2 Selection of geological disposal
1.3 執行策略	1.3 Geological disposal program for HLW
	1.3.1 General background to research and development
	1.3.2 The second progress report on research and development for HLW disposal: H12
<b>2. 處置系統與安全概念</b>	<b>II. The Geological Disposal System and the Safety Concept</b>
2.1 各國處置系統概念概述	2.1 Worldwide evolution of the geological disposal concept
2.2 我國處置系統概念概述	2.2 The Japanese geological disposal concept
2.3 安全案例概述	2.3 Components of the safety case
	2.3.1 Definition of safety goals
	2.3.2 Demonstrating the feasibility of disposal
<b>3. 地質環境</b>	<b>III. The Geological Environment of Japan</b>
3.1 區域環境地質	3.1 Introduction
3.1.1 地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性	3.1.1 The role of the geosphere in HLW disposal
3.1.2 台灣地質環境特徵	3.1.2 Geological setting of Japan
3.2 深層地質特性	3.2 Geosynthesis
3.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性	3.2.1 Characteristics of the geosphere of importance to the multibarrier concept
3.2.2 水文地質	3.2.2 Hydrogeology
3.2.3 水文地球化學	3.2.3 Hydrogeochemistry
3.2.4 核種傳輸路徑	3.2.4 Transport pathways
3.2.4.1 流通路徑的定義	3.2.4.1 Definition of flow pathways
3.2.4.2 流通路徑參數的定	3.2.4.2 Definition of flow

<b>SNFD2017報告(預定章節)</b>	<b>H12報告章節(JNC, 2000)</b>
義	pathway parameters
3.2.4.3 基質的擴散效應	3.2.4.3 Matrix diffusion
3.2.5 岩石特性	3.2.5 Lithological properties
3.3 地質處置合適性研究	3.3 Feasibility of siting a HLW repository in Japan
3.3.1 台灣用過核子燃料地質處置之地質圈特性	3.3.1 Features of the geosphere of specific relevance to HLW disposal in Japan
3.3.2 台灣的大地構造架構	3.3.2 Tectonic setting of Japan
3.3.2.1 火山活動	3.3.2.1 Volcanism
3.3.2.2 斷層活動	3.3.2.2 Faulting
3.3.3 抬升與沉陷作用	3.3.3 Uplift and subsidence
3.3.3.1 台灣抬升/沉陷特性	3.3.3.1 Features of uplift/subsidence in Japan
3.3.3.2 剝蝕作用	3.3.3.2 Denudation
3.3.4 氣候與海平面變遷	3.3.4 Climatic and sea level changes
3.4 結論	3.4 Conclusions
<b>4. 處置設計與工程技術</b>	<b>IV. Repository Design and Engineering Technology</b>
4.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力	4.1 Objectives of H12 with respect to design and engineering
4.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能	4.2 Role of the EBS and the host rock in geological disposal concepts
4.3 整體處置概念	4.3 Outline disposal concept
4.3.1 工程障壁系統	4.3.1 EBS components
4.3.2 處置設施	4.3.2 Emplacement configuration
	4.3.3 The disposal facility
	4.3.4 Concept for disposal panels and panel layout
4.4 設計流程	4.4 Design methodology
4.5 影響處置概念的因子	4.5 Factors influencing the disposal concept
4.5.1 熱與放射性	4.5.1 Heat production and radioactivity
4.5.2 地質與地形條件	4.5.2 Geological and topographic conditions
4.5.3 處置母岩特性	4.5.3 Properties of the host rock
	4.5.3.1 Mechanical properties
	4.5.3.2 Thermal properties
	4.5.3.3 Hydraulic properties
	4.5.3.4 Chemical properties

<b>SNFD2017報告(預定章節)</b>	<b>H12報告章節(JNC, 2000)</b>
4.5.4 處置深度	4.5.4 Disposal depth
	4.5.4.1 Long-term safety
	4.5.4.2 Characteristics of the geochemical environment
	4.5.4.3 Current construction and investigation technologies
	4.5.4.4 Mechanical stability of tunnels
	4.5.4.5 Thermal stability of the EBS
4.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求	4.6 Design requirements of the EBS and disposal facility
4.6.1 廢棄物罐	4.6.1 Overpack
	4.6.1.1 Corrosion resistance
	4.6.1.2 Pressure resistance
	4.6.1.3 Radiation shielding
	4.6.1.4 Thickness of the overpack
	4.6.1.5 Manufacture of the overpack
	4.6.1.6 Composite overpacks
4.6.2 緩衝材料	4.6.2 Buffer
	4.6.2.1 Thermal properties
	4.6.2.2 Hydraulic properties
	4.6.2.3 Mechanical properties
	4.6.2.4 Chemical properties
	4.6.2.5 Gas permeability
	4.6.2.6 Buffer specifications
	4.6.2.7 Installation and quality control
4.6.3 工程障壁的規格與配置	4.6.3 Specifications and emplacement of the EBS
4.6.4 地下設施	4.6.4 Disposal drifts and underground facilities
	4.6.4.1 Mechanical stability and dimensions of the disposal drifts
	4.6.4.2 Disposal drift spacing and waste form pitch
	4.6.4.3 Excavation disturbed zone
4.6.5 回填與封塞	4.6.5 Backfilling and sealing
4.6.6 處置場設計	4.6.6 Repository layout
4.7 工程障壁的穩定性	4.7 Integrity of the EBS

<b>SNFD2017報告(預定章節)</b>	<b>H12報告章節(JNC, 2000)</b>
4.7.1 再飽和特性	4.7.1 Resaturation
4.7.2 力學穩定特性	4.7.2 Mechanical stability
	4.7.2.1 Rock creep
	4.7.2.2 Overpack corrosion product expansion
	4.7.2.3 Overpack sinking
4.7.3 受震穩定性	4.7.3 Seismic stability
4.7.4 氣體遷移	4.7.4 Gas migration
	4.7.4.1 Diffusion of dissolved hydrogen
	4.7.4.2 Gas migration
4.7.5 膨潤土特性	4.7.5 Extrusion of bentonite
4.8 建造/運轉/封閉技術	4.8 Construction, operation and closure
4.8.1 建造階段	4.8.1 Construction phase
	4.8.1.1 Construction technologies
	4.8.1.2 Countermeasures against perturbations
4.8.2 運轉階段	4.8.2 Operational phase
	4.8.2.1 Transportation and emplacement of waste packages
	4.8.2.2 Backfilling of the disposal tunnels and main tunnels
4.8.3 封閉階段	4.8.3 Closure
4.9 處置場營運管理技術	4.9 Technical overview of management of the disposal site
	4.9.1 Basic principle of geological disposal and international consensus on institutional control
	4.9.2 Basic concept of management of the disposal site
	4.9.3 Disposal site management and control components
	4.10 Conclusions
<b>5. 安全評估</b>	<b>V. Safety Assessment</b>
5.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段安全評估的範疇及目標	5.1 Objectives and scope of the safety assessment
5.2 安全評估方法	5.2 Safety assessment methodology
5.2.1 相關法規	5.2.1 The AEC Guidelines
5.2.2 安全評估案例的建置方法	5.2.2 Development and treatment of safety assessment cases

<b>SNFD2017報告(預定章節)</b>	<b>H12報告章節(JNC, 2000)</b>
5.2.3 模式建構	5.2.3 Modeling strategy
5.2.4 安全評估可信度	5.2.4 Confidence in the safety assessment
5.3 處置系統與功能	5.3 Geological disposal systems and their safety functions
5.3.1 處置系統特性	5.3.1 Features of geological disposal systems
5.3.2 處置系統功能	5.3.2 Safety functions and detrimental factors
5.4 情節發展	5.4 Scenario development
5.4.1 特徵/事件/作用(FEPs)之建置	5.4.1 Identification and classification of relevant FEPs
5.4.2 特徵/事件/作用(FEPs)之篩選	5.4.2 Screening of FEPs
5.4.3 情節定義	5.4.3 Definition of scenarios
5.5 參考案例	5.5 The Reference Case
5.5.1 參考案例定義	5.5.1 Definition of the Reference Case
5.5.2 工程障壁系統參考案例	5.5.2 The EBS Reference Case
5.5.3 地質環境參考案例	5.5.3 The geosphere Reference Case
5.5.4 生物圈參考案例	5.5.4 The biosphere Reference Case
5.6 替代案例	5.6 The Alternative Cases
5.6.1 基本情節之替代案例分析	5.6.1 Analysis of alternative cases within the Basic Scenario
5.6.2 擾動情節分析	5.6.2 Analysis of perturbation scenarios
5.6.3 隔離失效情節分析	5.6.3 Analysis of isolation failure scenarios
5.6.4 關鍵不確定性之確認	5.6.4 Identification of key uncertainties
5.7 計算案例之整合分析	5.7 Synthesis of calculation cases illustrating overall system performance
5.7.1 案例定義	5.7.1 Definition of cases
5.7.2 案例分析結果說明	5.7.2 Results of cases illustrating overall system performance in different geological environments
5.7.3 比較各國安全標準	5.7.3 Comparison of results with overseas safety standards
5.7.4 補充的安全標準	5.7.4 Supplementary safety indicators
5.8 安全評估的可信度	5.8 Reliability of the safety assessment

<b>SNFD2017報告(預定章節)</b>	<b>H12報告章節(JNC, 2000)</b>
5.8.1 情節、模式、模組及資料庫的建置	5.8.1 Development of scenarios, models, codes and datasets
5.8.2 天然類比研究	5.8.2 Natural analogues
5.8.3 評估報告比較	5.8.3 Comparison with other safety reports
5.9 總結	5.9 Summary and conclusions
<b>6. 選址技術與安全標準</b>	<b>VI. Technical Basis for Site Selection and Development of Safety Standards</b>
<b>7. 結論與未來發展</b>	<b>VII. Conclusions and Future R&amp;D Requirements</b>
7.1 台灣地質處置之技術可信度	7.1 The technical reliability of geological disposal in Japan
7.2 未來發展	7.2 Research and development on geological disposal after the year 2000
	7.2.1 General features of research and development
	7.2.2 Strategy for R&D after the year 2000
	7.2.3 Specific goals of the R&D program
	7.3 Afterword for foreign audiences: Japanese waste management in the 21st century

### 3. 規劃工作事項

為順利達成「潛在處置母岩特性調查與評估階段(94~106年)」之任務目標—於民國106年底提出「SNFD2017報告」，台電公司自102年度起已依照SNFD2017報告各章節中之三項工作主軸(地質環境、處置設計與工程技術、安全評估)內容(詳表 2-1)，逐年規劃、推動並完成相關研究/調查工作(圖 3-1)。有關104年度計畫推動之工作項目及內容說明如下。

#### 3.1 地質環境

根據日本AEC之放射性廢棄物管理準則，H12報告中須證明日本存在合適的地質環境，藉以進行高放射性廢棄物地質處置。同時也須藉由深地層的現地量測與觀測，獲取深地層中的地下水及岩層資料。此外，亦須針對可能改變地質環境的自然現象，取得足以令人信賴之資訊，藉以證明日本確實存在某些區域不受這些自然現象影響。

有鑑於此，本計畫針對台灣地質環境所規劃之工作，除了進行「地質環境」調查評估技術發展所需驗證外，亦進行西部離島、台灣海峽、台灣西部、台灣東部及鄰近海域等各區域之地質環境普查工作，藉以確認SNFD2017報告所需「技術可行性」外，並參考日本H12報告之發展經驗，藉以在台灣地質環境下取得評估「深層地質處置」所需地質資料，並加強相關地質影響因子(如火山、斷層、地震、抬升沉陷等因子)之彙整研析與特性研究，作為整備SNFD2017報告之必要資料；而「地質環境」相關研究工作，依據SNFD2017報告各章節(詳表 2-1)之編排，共可分為：(1)區域環境地質、(2)深層地質特性及(3)地質處置合適性研究等3類。

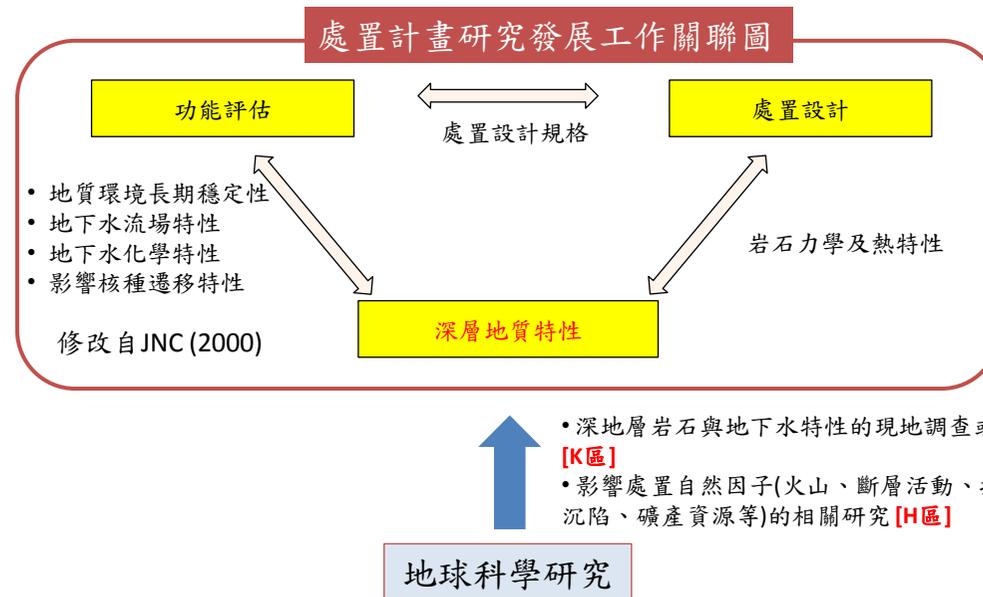


圖 3-1：地質環境研究與地質處置技術發展關係

註：K區為離島測試區，主要以深層特性調查與現地試驗取得岩石與地下水特性化參數；H區為本島東部測試區，主要量測自然現象的活動歷史以取得參考案例。

### 3.1.1 區域環境地質

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，探討台灣的大地構造與地質環境特徵。在SNFD2009報告中已分別針對台灣的地質環境、影響地質環境的自然變化因子及台灣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，作一初步的彙整(台電公司，2010)。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報告所需台灣地質環境特徵資料，於101年度完成離島結晶岩地區階段調查成果(1999-2012)彙編，並於102年度完成蒐集台灣東北地區地體構造架構之更新。台電公司藉由上述地質環境更新內容，於103年度進行國內地質處置合適性研究及結晶岩深層地質特性研究，相關成果作為「地質環境」之後續規劃參考。至於在參考日本H12報告編排之SNFD2017報告，須宏觀討論全國地質環境之需求；因此104年度開始將彙整過去全國普查結果，為提供台灣的大地構造與地質環境演化之最新發展趨勢，作為SNFD2017報告編撰之依據，逐年探討3種潛在處置母岩更新資料，分別就地體架構、岩層分布及第四紀構造分布蒐集資訊：

#### (a) 地體架構

如H12報告所示，複雜的地體架構形成後，距今有多長時間已無明顯變動，將是了解此區長期穩定性重要課題。故持續更新國內外針對台灣地體構造架構資訊，說明歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊、以及南中國海板塊相互活動的關係。

#### (b) 岩層分布

岩層分布受地體架構影響，地質史研究可分析大陸邊緣岩層發育與位移的時空關係，乃至侵入活動與火山活動的時空演化關係。

#### (c) 第四紀構造分布

由定年資料與地體構造邊界的分析，進一步探討地體架構演變過程，致使岩層分布發生變化，以及活動斷層所在位置，與地體構造演化之關係。

### 3.1.2 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中，因此，如何掌握與建構深地層母岩周圍的岩石特性與構造空間分布的地質概念模式，是處置研究工作的首要任務，亦是探討水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑等特性，與相關地質環境特性的關鍵性基礎工作。

#### 3.1.2.1 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)。

參考日本H12報告作法，針對過去所缺乏的地質圈資料，99年度開始在既有深層地質特性調查技術上，發展地質圈的自然影響因子相關調查技術，於101至103年度間已在深層地震遍佈的本島東部結晶岩地區，將空中與地表地球物理及地表地質資料加以整合，並建立解析大區域岩層與構造分布之技術。自104年度起，將基於SNFD2017報告全國通盤考量之需求，進行全國深層地質資料之整合，並參考日本H12報告(JNC, 2000)以既有石油調查於陸、海域獲得的深層地質資料，探討沈積岩區潛在處置母岩特性，或藉由蒐集既有地下工程(交通、採礦、水力發電等)所得山區地下岩層與構造相關資料，建構本土代表性深層地質與構造概念模式，作為整合空中與地表地球物理，以及地表地質與地下地質等解析技術的發展平台(JNC, 2000)，以提供後續水文地質、地球化學、岩石力學及自然影響因子整合解析合適性

之基礎。相關成果將逐年累進彙編在年度報告中，至2017年完成全盤工作。

### 3.1.2.2 水文地質

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。對於一個具有緩慢地下水流(通量)的深層地質條件而言，核種在地層的低遷移速度，是評量處置設施功能優劣的關鍵因子(JNC, 2000)。然而，深層地下水的流動特性乃隨地區之不同而異，且深層水文地質資料普遍缺乏。因此，在處置場址尚未確定前，主軸工作集中於深層水文相關特性調查與資料解析技術的發展，並以模擬與驗證方式提昇處置安全評估的技術。

有鑑於此，本計畫即長期在離島結晶岩技術發展研究區進行深層水文地質相關調查技術的發展，例如雙封塞水力試驗、跨孔追蹤試驗、水力傳導係數擴尺度試驗、封塞段裂隙水壓長期監測等技術，藉以取得水力梯度、水力傳導係數、延散度、裂隙寬度等長期參數特性。基於SNFD2017報告所需之水文地質調查技術與概念模式建構分析能力之考量，於103年度利用美國Lawrence Berkeley國家實驗室發展的TOUGH2軟體及既有現地參數化資料，針對安全評估參考案例之需求，建構二維模擬之技術基礎(圖 3-2)，有助於建立參考案例所需基本地下水流場資料，提供後續計畫用以架構SNFD2017報告第5.5節相關技術發展之用。104年度起將與國外研究機構合作，以三維模擬參考案例之需求，進行水文地質數值模型與地下水流場建構技術相關的研究，藉以探討結晶岩導水裂隙帶與高角度岩脈群對深層水文地質特性的影響，逐年累進技術發展成果，有助於探討淺層與深層水文地質的差異，增進深層處置安全的評估能力，將整合呈現在SNFD2017報告中。

### 3.1.2.3 水文地球化學

在「深層地質處置」概念中，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，水文地球化學特性也是決定是否適合進行深層地質處置之主要參考因素之一。而合適的水文地球化學環境，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。因此，處置環境中地下水的化學特性及其可能演化機制之研析，於潛在處置母岩安全評估中是一項重要的且基本的工作(JNC, 2000)。

代表性的深地層水質資料及詳細的礦物組成作為評估水文地球化學環境合適性的必要基本資料，而地球化學模擬是探討水文地球化學環境的長期演化(穩定)特性必要技術。透過歷年技術發展成果，目前已建構深地層裂隙水質的取樣技術及岩樣詳細礦物組成的分析技術，作為建立結晶岩質地球化學反應模擬技術的基礎。基於SNFD2017報告所需水文地球化學特性資訊與評估分析能力之考量，在地下水地球化學演化方面，101年度已完成U、Se、Cu和Fe在離島結晶岩水質條件下之Eh(pe)-pH穩定相圖繪製及溶解度模擬計算；102與103年度已利用國內深層特性調查所得地質資料(如原岩及其裂隙帶之礦物組成、水文地質架構等)為基礎，建構可能的水文地球化學模型，藉以進行國內結晶岩質母岩案例之地化反應模擬；104年度將根據前述裂隙岩層岩水反應的研究結果，探討溶解度計算應用於工程開挖過程前後水文地球化學特性的變化範圍，以及深層地下水的化學演化歷程，以利後續探討深層地下水的長期演化特性。此一研究對處置工程設計及功能安全評估相當關鍵，將可依據現地水文地球化學特性來提升處置安全性，也可應用於探討熱力學長期穩定性的理論基礎(JNC, 2000)。

### 3.1.2.4 核種傳輸路徑

在最終處置系統是否能安全運作的議題上，母岩的地質環境必須滿足下列2項功能(JNC, 2000)：長期的穩定性與遲滯核種遷移的功用。連通的裂隙網路是地下水與核種的主要傳輸路徑，因此，瞭解岩體中裂隙構造的分佈為處置設施是否安全的重要條件之一(JNC, 2000)。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，稀釋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洩的核種，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。

為瞭解核種在地質圈傳輸路徑的能力與地質圈對核種遷移之遲滯能力，並基於SNFD2017報告所需之核種傳輸路徑評估分析能力之考量，在裂隙參數化與模擬技術方面，101年度已完成發展整合離散裂隙網路(Discrete fracture network, DFN)之3D裂隙結構模擬及自動驗證模組(DFN\_NET及DFN\_OPT)，102年度針對技術發展測試岩體，進行離散裂隙網路結構之模擬，藉此瞭解岩體中的裂隙參數及特性。此項工作於國內結晶岩區之試驗隧道中，以人工視窗採樣法進行裂隙資料的量測，並利用DFN\_NET及DFN\_OPT程式，模擬出最接近現場觀測資料的DFN結果。103年度根據此DFN結果，假設岩體中地下水流主要發生於裂隙網路，並利用連通裂隙網路簡化為數個互相連接的一維渠道，以數值遞歸演算法(Recursive algorithm)計算出岩體中連通裂隙網路的路徑，展示岩體中導水裂隙可能的空間分佈，並根據設定的邊界條件及質量守恆原則，模擬出結晶岩裂隙的地下水流分佈情形，以發展DFN穩態地下水流數值模擬方法。在此基礎上，104年度將評估現地量測的裂隙數據，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佈特性。

另外，關於核種在岩體中的傳輸特性(如吸附、擴散、傳流與延散機制等)，前期計畫係利用離島之結晶岩樣來進行核種傳輸的各項

實驗。自102年度開始除了持續於實驗室中進行離島結晶岩樣之擴散實驗外，亦針對本島之結晶岩樣，展開地質材料特性(陽離子交換量與鐵含量)分析、核種吸附實驗，以及基質擴散實驗等相關工作，藉此瞭解核種傳輸特性與本島地質材料特性之間的關聯性，至104年度繼續針對離島結晶岩之完整岩塊與岩石薄片進行實驗工作，同時輔以厭氧環境與部分之放射性追蹤劑實驗，藉由更長的觀察時間來提高核種擴散係數的可靠度。特別是自104年度起，針對SNFD2017報告所需，重新檢視關鍵核種篩選成果，一方面更新SNFD2009報告之關鍵核種基礎資訊，另一方面及早展開實驗以增補核種傳輸相關參數。

### 3.1.2.5 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，102年度開始利用前期計畫所得之本島結晶岩樣，進行一般物理性質、熱特性及力學等試驗，以取得其岩石物理性質、熱特性及力學參數。由於試驗項目種類繁多且各試驗所需岩樣的標準也不一，因此，102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)。104年度將完成加溫(最高溫暫定為80°C)岩石強度與變形參數試驗，藉由國內自主性室溫及加溫之試驗系統與分析能力之建立，將繼續展開其他結晶岩鑽井不同深度岩樣的岩石力學系統性分析工作，逐年累積量測與分析資料，可藉以提供日後地下隧道規劃、設計、隧道開挖損傷(Excavation Damaged Zone, EDZ)分析評估、支撐打設、監測佈設、安全評估所須之必要參數。

為瞭解膨潤土與岩塊之熱-力耦合交互影響關係，在既有岩塊熱場量測與模擬的基礎上，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。102

年度已完成膨潤土塊體製作及量測儀器發展、設計與配置，並利用數值模擬方法，初步評估熱-力耦合室內試驗預期結果來修正設計配置，103年度主要進行膨潤土與岩塊系統熱-力耦合交互作用室內試驗，探討以膨潤土為主之工程障壁系統於受熱作用下與岩塊之間的應力變化情形，以提供近場功能評估之參考。在上述設備與技術發展的基礎上，104年度開始探討近場區域的膨潤土及結晶岩之再飽和現象，基於SNFD2017報告近場功能評估技術發展之需要，逐年展開膨潤土再飽和現象研究之數值模擬及相關室內試驗。

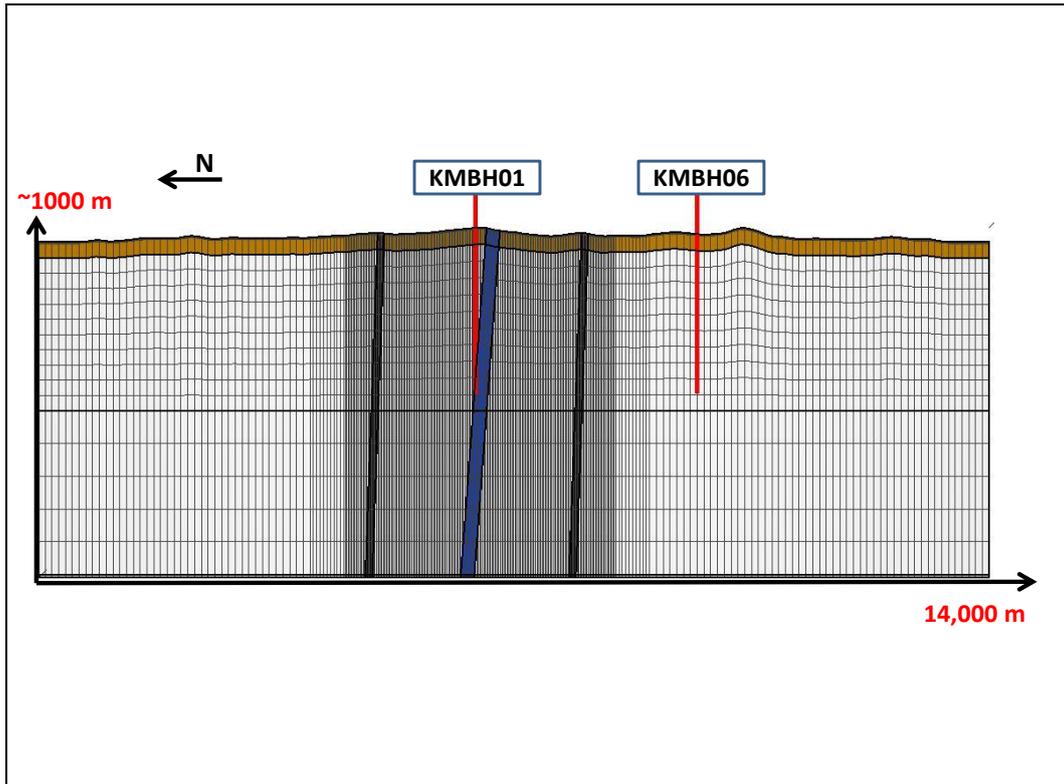


圖 3-2：二維模型網格規劃

### 3.1.3 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。除了具備獨特的大地構造與其演化特性外，台灣的地質環境大致上與日本類似，故未來進行處置場址評選、處置設施功能/安全評估時，均需面臨及考量與大地構造架構有關的大地構造演化、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影響性。有鑑於這些資料的取得，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(long-term stability)的安全評估條件(JNC, 2000; OECD, 2009)。

#### 3.1.3.1 台灣的大地構造架構

台灣位於歐亞大陸東緣，坐落於環太平洋構造活動帶上，因此，台灣地區的火山活動和斷層(地震)活動，皆與台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年度開始進行台灣大地構造架構與演化等相關文獻資料(空間上涵蓋台灣及台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，藉此掌握台灣大地構造架構的更新資訊與認知。同時，103年度起針對台灣的火山活動與特性，進行相關文獻資料的蒐集與回顧，作為後續火山活動及其影響性研究工作規劃的基礎，與潛在處置區域篩選之依據。

此外，針對台灣斷層活動的相關資訊，在SNFD2009報告中，已根據中央地質調查所所公布的台灣活動斷層分布圖為基礎，彙整台灣已知活動斷層的相關研究資訊(台電公司，2010)。然而，除了大地構造因素所產生的活動斷層外，重大工程開發的擾動行為亦可能導致斷層構造的活動或產生新的地下水與核種氣體的管道。有鑑於此，102年度起持續蒐集中央山脈山區結晶岩體地震觀測站的地震資料，針對

山區微震提昇定位精度；為了綜合解釋此區地震叢集線型分布及斷層破裂機制，103年度開始綜合解析結晶岩體地震特性(涵蓋規模小於3的無感地震)，以及大地電磁法獲致之深層電阻資料，透過國際合作方式於104年度將建立電阻與震波併合成像技術，結合電阻探測對地層含水特性具有高敏感度，而震波探測對構造具有較高解析度的特點，併合成像分析有助於建構震源區地下構造模型，提供SNFD2017報告具關鍵的技術發展成果。

另外，有鑑於H12報告強調地震為自然影響因子之一，相當重視岩體波傳特性之基礎研究，本計畫於103年度開始初步蒐集國外井下地震資料，作為後續地震衰減模式精進及緩衝材料力學性質試驗規劃之依據。另深層地質處置地震衰減研究至為關鍵，本計畫將加強蒐集國外井下陣列的量測資料相關工作，除有助於了解深層地盤之受震反應，並可作為深層地盤地震衰減模式發展之依據或作為現有地表地震衰減模式之修正基礎，目前蒐集以日本及美國井下地震資料為主。此外，目前蒐集國內外與緩衝材料力學性質相關之資料多屬靜力性質，故本計畫需了解不同環境因素對力學性質的影響，從先進國家相關研究結果比較，並規劃後續動力性質相關研究，即針對緩衝材料最佳工程性質的動態試驗加以規劃。

此外，參考日本於東濃地區觀測深層地下水受地震影響之氬氣變化，顯示出地下水氬氣監測與地震關連性研究為探討地震影響的靈敏指標。故於102年度開始進行地震與氬氣徵兆關聯性研究工作，探討位於地震帶上的破裂含水層中，地下水水氬現地揮發逸散的物理化學機制。103年度在結合地震帶震源機制解釋基礎上，進行地震帶的地下水水氬濃度觀測作業，深入探討地震斷層作用之張裂應力場下多種氣體在地下水的濃度變化。104年度將持續監測以累積長期數據，計算有水氬濃度異常的地震之震時體積應變，與發震之地震斷層構造特性的關聯性，提供SNFD2017報告完整探討長期觀測氬氣敏感指標與活動斷層的關聯性。

### 3.1.3.2 抬升與沉陷作用

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，岩體發生沉陷將伴隨著沈積作用，將會對深層地質處置的環境條件有利(圖 3-3)(JNC, 2000)。而在評估岩體抬升或沉陷的方法中，GPS測量是利用衛星量距的一種方法，雖然相較其他調查方法，是觀測期距最短(只能觀測近數十年的變化趨勢)，但對於觀測大範圍地殼變動(特別是水平向變動)是在大地測量中，較具高準確度及快速的方法，故廣範被用於抬升與沉陷作用的相關研究中。

考量SNFD2017報告所需之岩體的抬升/沉陷資訊與評估分析能力，在前期計畫中，已針對本島結晶岩體與其鄰近構造接觸帶分布區域，進行GPS連續觀測站與GPS定期觀測樁的建置，自101年至今持續累積本島結晶岩體與其鄰近構造接觸帶的實際位移觀測數據，組成完善的GPS觀測網，逐年累進結晶岩體及鄰近岩層之水平及垂直位移之觀測數據，自103年度開始以此量測數據進行GPS時間序列資料分析，獲取影響地表形態位移變化的綜合指標資訊，104年度開始將展開區域性長時間地殼變動研究，以蒐集既有的陸、海域震測資料，探討萬年來冰期結束後，於河口沖積扇海進層序地層中記錄的抬升或沉陷作用，以及數百萬年尺度造山帶逆衝擠壓作用，轉變為數十萬年至百萬年間發育成沉陷盆地之地殼變動機制，作為SNFD2017報告評估岩體地質穩定性之參考依據。

此外，有鑑於日本H12報告對於抬升/沉陷作用，以及氣候與海平面變遷等議題，均大量仰賴日本諸多河階(river terraces)研究成果，以期藉由地質、地形、河階定年(geochronology on river terrace)及地體抬升作用的制約，來預測未來河階演育、河流下切在陸域長時間對處置環境的影響與評估(JNC, 2000)。故102年度開始規劃參考日本H12報告的河階研究架構，進行本土河階研究相關資料的蒐集與回顧，獲致西南部泥岩山區活動構造、地體抬升及河階演育的經典案

例，103年度開始擴大蒐集區域性河階定年資料，至104年度將涵蓋泥岩及結晶岩區，提供地形演育研析不同潛在處置母岩的本土河階案例，有助於SNFD2017報告比較區域性抬升與沉陷作用，提供地殼變動抬升/沉陷作用與河流地形演育等研析所需長期穩定性與情節分析必要的估算資訊。

另外，有鑒於剝蝕作用對地質環境的影響，包括因減少處置環境覆蓋層的厚度，或改變地形地貌，而導致地下水流場改變。因此，102年度蒐集台灣剝蝕作用的相關研究資料，並進行其定年學與剝蝕率資料的彙整。為通盤了解剝蝕作用於台灣造山作用的爭議，103年度開始利用不同的分析方式(如地形/氣候變遷分析、河/海階剝蝕率分析、熱歷史演化分析及岩體剝蝕分析等)，並結合國內學界研發能量，累進研究工作至104年度，無論泥岩或結晶岩之造山帶抬升作用、剝蝕作用，以及山間盆地沉陷作用相關研究，均能持續累積分析資料，對SNFD2017報告完整探討剝蝕率至為關鍵，將提供後續長期穩定性評估及地質處置合適性考量之參考資訊。

### 3.1.3.3 氣候與海平面變遷

根據SNFD2009報告指出，氣候變遷與海平面變化是影響與威脅處置場址地質環境長期穩定性之4項自然活動之一(其他3項為：斷層活動、火山活動、地殼垂直活動和剝蝕)。由於全球氣候變遷為海水面長期演變之驅動力，海水面之變遷則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，以致干擾處置系統的穩定地質環境，進而影響處置設施之功能(圖 3-3)。

考量SNFD2017報告所需之氣候與海平面變遷資訊與評估分析能力，本計畫自102年度開始針對本島結晶岩區域之代表性河域出海口沖積扇，製作近海至河道之數值地形模式(DEM)，用以辨識10,000年以來，末次冰期結束至今，海平面上升、河口堆積與海階變化的地形紀錄，以獲取此河域因氣候變遷導致海平面上升與沖積扇堆積的地形

演變證據。102年度透過歷史衛星影像立體對，已取得其出海口往中央山脈，約50 km<sup>2</sup>面積高精度數值地形模式，配合定期進行水準網測量，以利後續長期記錄沖積扇及河道的地殼變動情形，並逐年蒐集此河域水文水理相關資訊。103年度以此數值地形模式圈繪河、海階地形，並蒐集沖積扇與近海海域之震測剖面，了解河口、海域萬年以來海進層序及地形演育的地質紀錄。104年度起將擴大蒐集涵蓋山間數個河口的高解析度地形資料，基於台灣全島研究沉陷盆地與沈積層序的基礎資料，從宏觀角度探討山間沉陷盆地發育與河口地形數千年尺度之長期穩定性紀錄，解析河系地形演育、河口沖積扇的海/淡介面變遷，以及廣域的山脈沉陷與盆地演化歷程(圖3-3)，提供後續建構水文地質概念模式之用。

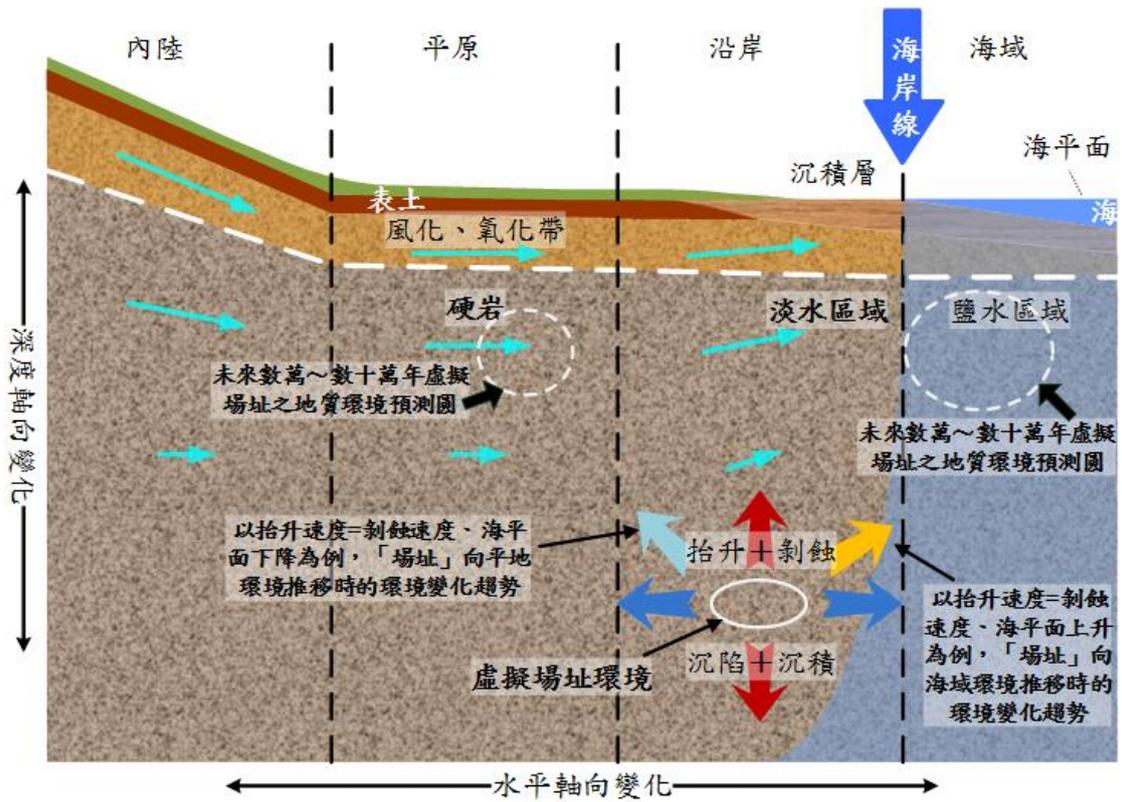


圖 3-3：地質圈與氣候長期變遷示意圖

(摘自102年度成果報告圖 3-127)

### 3.2 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，以多層的障壁來隔離與阻絕用過核子燃料之放射性核種的傳輸，使核種到達生物圈時，放射性已衰減至安全限值以下。多重障壁可分成天然障壁(natural barrier)及工程障壁(engineered barrier)，前者指處置母岩及岩石圈，後者指廢棄物本體、廢棄物罐及緩衝與回填材料(buffer and backfill material)，各障壁各自扮演不同功能。由於工程障壁設施需與各國地質環境條件配合，且需符合各國法規要求，因而成為各國積極研究的題目。例如美國Yucca Mountain場址位於厚層的未飽和帶，母岩(凝灰岩)中富含高吸附性之沸石礦物；比利時位於Mol地區的處置母岩為透水性極低的厚層黏土(boom clay)；德國位於Gorleben地區的處置母岩為鹽穹(salt dome)，具有透水性極低、長期大地應力作用下會自身閉合等優點，以上這些國家均以處置母岩為主要障壁。相對地，瑞典、瑞士、芬蘭等以結晶岩為處置母岩的國家，研究結果顯示：結晶岩對於隔離與阻絕核種外釋只扮演被動的屏障角色，其功能在於提供一個地質及物理化學上穩定的環境，而工程障壁則提供積極的吸附及阻滯核種外釋的作用。以國內區域的情況來看，天然障壁受先天環境的限制，可供選擇的地區有限，若以結晶岩或其它合適母岩為優先調查母岩，則應加強工程障壁設施的研究，以確保處置設施之安全。

#### 3.2.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力

國內用過核子燃料之最終處置有嚴謹的法規加以規範，主要法規為94年8月30日發布之「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，依據上述法規之要求，國內用過核子燃料將採多重障壁(multiple barriers)之深層地質處置方式進行最終處置。深層地質處置為國際公認適於處置高放射性廢棄物之方式，所謂深層地質處置，是將高放射性廢棄物埋在深約300至1000 m的穩定地質環境中，再配合廢棄物罐(canister)、緩衝與回填材料等工程設施，藉由人工(廢棄物

罐、緩衝與回填材料及廢棄物本身)與處置母岩(host rock)及地質圈(geosphere)障壁所組成的多重障壁，可以有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移(migration)，以換取足夠的時間使高放射性廢棄物的輻射強度在到達生物圈(biosphere)之前已衰減至可忽略的程度。

與台灣鄰近的日本在進行高放最終處置的研究過程中，亦採用多重障壁系統作為處置設施的設計概念。H12報告中亦有處置設計概念及工程技術能力之章節，其內容大意指出：於安全與合理的工程障壁系統及處置設施的目標下提供設計要求；證實可以運用目前可行或未來預期發展的工程技術，合理地建造工程障壁系統及處置設施(JNC, 2000)。本節後續將持續參照H12報告針對工程障壁系統及處置設施進行規劃如3.2.2節至3.2.8節。

### 3.2.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能

結晶岩為各核能先進國家，例如加拿大、英國、芬蘭、日本、西班牙、瑞典、瑞士等國，進行最終處置高放射性廢棄物（含用過核子燃料）技術發展相關計畫所選擇的處置母岩。台灣及福建東南地處環太平洋中生代岩漿岩帶(Mesozoic Circum-Pacific Magmatic Belt)的西緣，出露的中生代基盤岩中夾有許多結晶岩，考量到國際高放射性廢棄物處置技術發展至今，以結晶岩為處置母岩的技術最為成熟(如芬蘭、瑞典)，因此結晶岩為「用過核子燃料最終處置計畫書(2006年7月核定版)」中列為調查對象之一的潛在處置母岩。

結晶岩常因變質與變形作用形成的優向構造，有可能會影響用過核子燃料處置功能；另一方面，其裂隙填充物及葉理的次生礦物，亦有可能對核種吸附與遲滯效應扮演重要角色。根據瑞典研究報告(SK B, 2009)指出，雖然吸附作用的實驗數據有限，仍明顯支持優向構造對地下水核種傳輸的遲滯作用有顯著貢獻。

處置設施場址之處置母岩之預期的功能如下：

- (1) 具備長期穩定性，如：斷層帶少、低地層抬升率。
- (2) 具備良好的物理環境，如：低地下水流通率、力學穩定性等。

(3) 提供良好的化學環境，如：還原環境。

(4) 具備核種遲滯與吸附之天然障壁功能。

工程障壁與處置母岩是深層地質處置中多重障壁概念的主要組成單元，當考量以結晶岩質之岩體作為處置母岩時，工程障壁在吸附核種及遲滯核種傳輸的安全功能上扮演的角色，便愈形重要。工程障壁就功能上可分為3部分：(1)廢棄物體本身，(2)廢棄物罐(本文廢棄物罐即指用過核子燃料的包封容器)，包括容器內之所有結構及穩定物等，及(3)緩衝與回填材料，此3部分再加上岩壁內側因開挖而受到影響的擾動帶，即組成一般所稱的「近場」環境(near-field)。

### 3.2.3 整體處置概念

工程障壁系統概念界定之目的在提供功能評估所需，結果可提供修正處置設施設計、母岩篩選條件等。處置設施設計與功能評估均須配合場址調查資料之取得，進行反覆評估。工程障壁系統一般包括用過核子燃料、廢棄物罐、緩衝與回填材料等(紀立民，2002)。國內參考處置概念其設施區分為地表設施、連通設施與地下設施3大部分。

#### 3.2.3.1 工程障壁系統

以國內參考處置概念為基礎建立工程障壁系統之參考概念，以供未來國內處置設施工程障壁系統材料選擇與設計之參考。104年度工作規劃以國內參考處置概念為基礎，針對工程障壁系統之基本概念進行描述，並彙同3.2.6節之「工程障壁系統及處置設施的設計需求」之工作內容，完成現階段工程障壁系統之概念與設計需求規劃。

#### 3.2.3.2 處置設施

處置設施基本設施可概略分為下列3個部分：即地表設施、地下設施以及其間之連通設施(豎井或斜坡道)，其中並包含多種不同的結構(structure)、系統(system)與組件(component)，而連通設施有時也併於地下設施之規劃之中。

地表設施若以功能性及使用性作為區分，可以分為6大系統：地上管理與行政系統、放射性廢棄物管理系統、環境監測與輻射管制系統、岩石處理系統、運輸系統及輔助系統。在用過核子燃料最終處置場地表設施中，放射性廢棄物管理系統是處置設施中最重要的運作系統，包括用過核子燃料接收、包裝、暫貯等功能。處置設施須有對外聯絡的運輸系統，以便於用過核燃料及緩衝材料的運輸；且往往地處偏僻，因此各設施最好能自給自足，再加上為了維護處置設施的安全運作，監控輻射外洩之危害，並避免其對環境造成二次污染，處置設施必須設立許多的輔助系統及環境監測與輻射管制系統，諸如電力供應及給水系統、消防及警衛系統、緊急避難系統等。此6大系統內包含若干子設施，可使整體處置場地表設施更趨完備。

地下設施若以功能性作為區分，可概分為2大部分：運轉設施及工程障壁系統。運轉設施主要與運轉期間之安全性有關，包括運轉中心、運轉隧道、廢棄物管理區等，係因應處置設施運轉所需而開闢之通道或工作區。工程障壁系統則以長期處置安全為設計目標，包括用過核子燃料、廢棄物罐、緩衝材料、回填材料等。

104年度工作規劃著重於配合整體處置概念，並考量目前的建築法規和土木開挖技術與機具，合理更新處置設施之佈置。

#### 3.2.4 設計流程

國內深層地質處置設施之設計流程必須是有系統的(systematic)、有結構的(structured)、反覆計算的(iterated)、以及循序漸進的(stepwised)。設計的過程是一個逐步定量化以及合理化的過程。最終目的在於依據法規且配合既定時程，建造完成一個安全而經濟有效的深層地質處置設施。其工作架構包括處置設施設計、功能/安全評估與場址特性調查，此為處置設施發展的重要3項領域，彼此間必須緊密配合。

### 3.2.5 影響處置概念的因子

深層地質處置設施之處置概念影響因子，其工作項目包含熱與放射性、地質與地形條件、處置母岩特性、處置深度等。

處置母岩的空間範圍及體積、裂隙與斷層分布，為決定處置設施設計之關鍵（JNC, 2000），故進行整體處置設施設計前，詳細之地形調查為相當重要工作項目之一。地形條件同時影響初始岩體應力及區域地下水流，為確定地表設施及聯絡通道或豎井設置之位置重要因素。處置母岩須考量之特性有力學、熱效應、水力、化學等特性，本計畫利用已知之地質調查及可獲得之國際案例資訊，探討地質環境及處置母岩特性對處置設施環境與工程設計之影響，以作為地表設施及地下設施設計之參考。

#### 3.2.5.1 熱與放射性

深層地質處置是為了將具有放射性的用過核子燃料與人類生活環境進行隔離，故最需要了解的即為待處置之用過核子燃料具放射毒性指數(radiotoxicity index, RI)的重要核種特性。

關於衰變熱與放射活度資訊，根據日本後端管理策略，採用將用過核子燃料進行再處理(reprocessing)與玻璃固化(vitrification)(JNC, 2000)。H12報告說明再處理與玻璃固化條件，以及玻璃固化後高放射性廢棄物之規格，並圖示化表示每個包封容器中重要核種放射毒性指數與衰變熱隨時間之變化情形，供後續章節參考。

為提供SNFD2017報告中熱與放射性相關章節內容，需進行研究用過核子燃料之特性，而燃料組件的設計與運轉歷程是影響用過核子燃料內核種盤存量的關鍵，隨著核能電廠近40年的運轉時間，因演進改善，使用了數種不同設計概念的燃料組件，並因採取不同的營運策略，各階段的燃料組件運轉歷程亦有差異，故評估前須針對各個燃料組件之相關參數進行資料蒐集與整理，再根據所建立的數據資料範圍，選用具代表性保守且合理之運轉參數，針對103年度研究成果所提出之重要核種進行定性及定量評估。

104年度工作規劃著重於彙整不同核能電廠運轉策略所使用之用過核子燃料，其相關參數與總量，並分析相關沸水式反應器與壓水式反應器之用過核子燃料其具代表性之重要核種資訊，以作為處置設計中熱與放射性之相關研究內容。

### 3.2.5.2 地質與地形條件

處置母岩的空間範圍及體積、裂隙與斷層分佈，為決定處置設施設計之關鍵(JNC, 2000)，故進行整體處置設施設計前，詳細之地形調查為相當重要之工作。地形條件同時影響初始岩體應力及區域地下水流，為確定地表設施及聯絡通道或豎井設置位置之重要因素。

影響處置概念的地質與地形條件因子，在功能/安全評估的技術發展上有2項重點：(1)處置設施的地質環境長期穩定性評估；(2)處置母岩特性研究。在第1部份，應針對影響調查區域地質環境長期穩定性的自然現象，包括地震、活動斷層、火山活動、抬升、沉陷、氣候變化、地質演化等，進行觀測、調查與分析，並界定其影響範圍及程度，經由綜合分析與判釋，說明處置母岩岩體及所處地質環境的演化歷程、可能發生事件的影響，及長期穩定性的評估。在第2部份處置母岩特性研究方面，主要在發展綜合評估地質、地下水文、水化學、岩體應力及溶質傳輸等試驗或量測結果之分析技術，建立具代表性的處置母岩特性參數，以正確描述處置母岩及其地質環境的特性與行為，並建構各種概念模式，提供功能/安全評估的基礎資訊。

104年度工作規劃著重於地質環境影響處置設施設計的相關特性資料彙整，參考本計畫於研究區(K區)獲得諸多地質與地形環境的研究成果，彙整岩石地質之物理特性基本參數，以供處置設施概念設計與功能/安全評估之用。這些資訊同樣可用於取得合乎數值模擬之關鍵參數，包括水力梯度、地下水及地層的特性，供作建立概念模式及相關數值資訊的基礎。

### 3.2.5.3 處置母岩特性

深層地質處置設施的安全評估必須考量所有因子的綜合效應，根據OECD的建議，國際間經過數十年調查經驗累積，認為高放處置設施之處置環境條件，其處置母岩的安全條件應具備下列幾點：

- (1) 長期的地質穩定性(例如，低的抬升與侵蝕率，以及對於地質及氣候變化反映不靈敏的地球化學及水文地質環境)。
- (2) 合適的物理、化學及構造特性(例如，巨厚的母岩、緩慢的地下水流速、地球化學環境有利遲滯核種遷移及工程障壁系統功能的維持、岩石力學特性等)。
- (3) 不利或擾動的條件越少越好(包括，氣候及天然地質事件、處置設施內伴生的氣體或化學反應變化等，以及人類未來的入侵行為)。
- (4) 調查技術的可行性(進行技術驗證，提供足夠的證據，以利決策審定是否進行下一階段處置計畫)。
- (5) 可預測性(在相當的時間尺度內，例如百萬年內，地質環境可能發生的變化均能被考量於功能/安全評估的情境分析中)。

在「深層地質處置」的「多重障壁」概念中，處置母岩的優劣，成為確保數十萬年阻絕及遲滯核種的關鍵因子。處置母岩除了必須具備足夠的空間容納地下處置設施外，亦需考量其力學、熱效應、水力、化學等特性。104年度工作規劃著重於地質環境影響處置設施設計的相關特性彙整，參考本計畫於研究區(K區)的研究成果，依(1)岩石力學、(2)熱力學、(3)水文地質、(4)地球化學等特性，分別進行相關參數與資訊彙整，相關參數將供安全評估分析之參考。

### 3.2.5.4 處置深度

國內用過核子燃料之主要法規為94年8月30日發布之「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」。其要點規定：

第三條：高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式。

第四條：高放處置設施場址，不得位於下列地區。

(1) 活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區。

(2) 地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全之地區。

(3) 地表或地下水文條件足以影響處置設施安全之地區。

(4) 高人口密度之地區。

(5) 其他依法不得開發之地區。

第八條：高放處置設施應採多重障壁之設計。

第九條：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。

第十條：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。

第十一條：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。

依據上述法規之要求，國內用過核子燃料將採多重障壁之深層地質處置方式進行最終處置，有效阻絕或遲滯核種的外釋或遷移，以換取足夠的時間使高放射性廢棄物的輻射強度在到達生物圈(biosphere)之前已衰減至法規管制標準以下。104年度工作規劃著重於依照法規要求、工程條件與可行性，探討影響處置深度之因素。

### 3.2.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求

工程障壁系統概念界定之目的在提供功能評估所需，結果可提供修正處置設施設計、母岩篩選條件等。處置設施設計與安全/功能評估均須配合地質調查資料之取得，進行反覆評估。工程障壁系統一般包括廢棄物本體、廢棄物罐、緩衝材料、回填材料等組成，其功能分別為：

(1) 廢棄物本體(用過核子燃料)：

A. 用過核子燃料內，短半衰期核種宜經適當衰變，且衰變熱(decay heat)應經適當降溫以便於處置作業。

B. 用過核子燃料宜耐地下水溶解。

- C. 燃料護套能避免用過核子燃料直接散布於廢棄物罐內。
- D. 完整的燃料護套能避免地下水與用過核子燃料直接接觸。
- (2) 廢棄物罐：用以保護用過核子燃料與外在環境隔絕，使其所含之放射性物質包封在罐內，不釋出至其外之空間。
- (3) 緩衝材料：主要提供吸附核種功能，以遲滯核種外釋，並維持廢棄物罐穩定。
- (4) 回填材料：利用回填材料回填開挖通道，防止處置坑道成為核種外釋的通道，並延遲處置設施再飽和過程。

本計畫依據國際間之處置概念需求以及考慮國內的地質環境條件，考量廢棄物罐之抗腐蝕、抗壓能力、抗剪能力、輻射屏蔽功能、製造方法及維持次臨界，緩衝材料熱傳、水力、力學、化學、氣體滲透之特性與規格，處置隧道穩定分析等，研擬適合國內處置概念之工程障壁及處置設施的設計需求。

### 3.2.6.1 廢棄物罐

廢棄物罐須提供抗腐蝕、抗壓等力學特性(JNC, 2000)，故蒐集與彙整參考設計資料(瑞典SKB報告等)，建立廢物罐材料特性、破壞準則、數值分析模式、應力分析成果，以提供SNFD2017報告第4.6節之相關內容。104年度工作規劃如下：

- (1) 廢棄物罐材料特性與破壞準則、載重分析模型與成果  
蒐集及參考國際間設計資料(瑞典SKB報告等)，並與國內處置環境進行比較分析。
- (2) 廢棄罐之腐蝕性能測試  
蒐集及參考國際間廢棄罐之腐蝕相關文獻(包含日本H12報告、瑞典SKB報告等)，建置腐蝕量測設備與完成試片製作與準備。
- (3) 廢棄物罐之屏蔽、臨界及熱傳分析  
蒐集及彙整國內源項與國際廢棄物罐幾何與材質資料，進行廢棄物罐屏蔽、臨界及熱傳分析。

### 3.2.6.2 緩衝材料

緩衝材料的熱傳、水力、力學、化學及氣體遷移特性等影響緩衝材料在工程障壁系統中的設計要求，同時緩衝材料於製造與安裝過程之品質控制亦須特別注意(JNC, 2000)。

國內用過核子燃料最終處置計畫曾彙整有關緩衝材料的熱傳、水力、力學、化學等特性。104年度工作規劃著重於探討緩衝材料性能的設計需求，根據國際間高放射性廢棄物處置設施對緩衝材料設計時之材料特性及設計考量，再配合國內處置設施的設計概念，以決定緩衝材料之設計需求與規格。

### 3.2.6.3 工程障壁的規格與配置

104年度工作規劃著重於探討工程障壁系統之相關尺寸規格，及參考國際間設計資料(瑞典SKB報告等)，並考量國內處置設施環境及參考處置概念，以探討工程障壁之設計需求。

### 3.2.6.4 地下設施

地下處置隧道的近場穩定性需考量岩石潛變(creep)分析(JNC, 2000)。此外，H12報告中提到，如使用噴凝土或岩栓作為隧道支撐系統時，需使用混凝土作為施工材料，但傳統混凝土的高鹼性會對坑道內的回填材料造成不利影響，故須採用低鹼性混凝土(pH約為10.5到11.0間)作為隧道支撐系統，並須確認其具備足夠的強度與工作性。104年度工作規劃著重於配合整體計畫研究進程需要，彙整廢棄物罐概念設計與工程障壁概念設計成果，分析並更新國內處置設施之配置分布。

此外，並將蒐集隧道支撐之長期穩定性與低鹼性混凝土相關文獻(包含日本H12報告、瑞典SKB報告等)，並進行低鹼性混凝土配比設計方法研究與試體製作規劃。

### 3.2.6.5 回填與封塞

水力傳導度、夯實特性、回脹特性、力學特性測試技術為回填材料之研究內容重點(JNC, 2000)。過去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程障壁之化學變化。

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，以國內參考處置概念為基礎，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)，以探討國內回填材料設計需求、特性要求與設計規格，作為未來國內處置設施工程障壁系統回填材料選擇與設計之參考。104年度工作規劃著重於(1)彙整國際間有關高放射性廢物處置設施之回填材料設計需求與設計考量之相關資料(如瑞典SKB報告等)；(2)完成回填材料試體製作與動態三軸測試及不同組成之液化曲線分析，並配合地下設施之成果，完成回填材料與地下設施回填有關之設計。

### 3.2.6.6 處置場設計

處置設施設計時須考量處置設施建造、營運與封閉階段，並須考量提供安全運輸廢棄物罐以及其他組件的運轉隧道，以及處置隧道間之力學穩定與近場的溫度效應等(JNC, 2000)。104年度工作規劃著重於參考國際間高放射性廢棄物處置設施設計提出國內處置設施之設計概念。

### 3.2.7 工程障壁的穩定性

為檢驗工程障壁設置後之效能，需針對處置設施及工程障壁之規格進行各項分析與評估，如工程障壁於再飽合後之性能、長期力學穩定性、受震穩定性、氣體通過工程障壁之遷移行為、及緩衝材料因再飽和後膨脹而入侵母岩裂隙等變化(JNC, 2000)。

### 3.2.7.1 再飽和特性

處置作業經過一段時間後，緩衝材料因廢棄物罐內核種不斷釋放的衰變熱，造成水分排出，而衰變熱消散後，地下水可能再滲入處置孔內，造成緩衝材料吸水產生再飽和現象，此現象可能對廢棄物罐造成不均勻沉陷或不均勻的回脹壓力。因此，建立近場環境的熱-水-化耦合地下水流傳輸概念模式有其必要。104年度工作規劃如下：

(1) 緩衝材料於假設案例參數下熱-水-化耦合數值模式之建構及分析。

(2) 熱-水-化耦合數值模式參數之敏感度分析

緩衝材料本身的洩漏性、以及假定的核種洩漏量和洩漏深度，會影響核種外釋活度，故進行前述參數的敏感度對模式的影響。

(3) 熱-水-力耦合序率孔彈性理論模式之敏感度分析

以假設案例方式建立熱-水-力耦合孔彈性模式，並探討模式中各參數與條件之敏感度，作為後續分析之基礎與參考。

### 3.2.7.2 力學穩定特性

延續本計畫103年度研究成果，104年度工作規劃著重於探討不同緩衝材料(MX-80及日興土)於多處置孔熱源相互影響下，溫度場聯集對工程障壁與周圍岩體熱效應所產生之力學變化，並探討處置孔與處置隧道於不同間距下，其溫度場變化對周圍岩體力學之影響，以提出處置孔與處置坑道之最佳設計間距，作為處置設施概念設計之建議與參考。另於力學穩定特性中，將採用1/10縮尺比例工程障壁試體進行高圍壓三軸試驗，探討工程障壁在回填後受圍壓改變之影響，進行縮尺試驗及力學穩定性量測評估，完成力學穩定性驗證，以建立SNFD2017報告所需內容。

### 3.2.7.3 受震穩定性

地震對放射性廢棄物最終處置系統之長期安全性影響為重要研究議題之一，強震可能造成周圍母岩破壞或透過母岩震動與變形，導致地下設施發生不同程度之損害。台灣位處地震頻繁之地震帶上，自有地震紀錄以來，已累積相當多地震資料，因此，104年度工作規劃如下：

- (1) 評估研究區特定範圍內各斷層所能產生之最大地震規模，及其對處置設施所產生之地震強度，選取其中較保守之值作為設計地震資料。
- (2) 深層地質處置設施之十萬年回歸期地震強度預測。將地震危害度分析所獲得之加速度、速度及位移，計算深層地質處置設施之地盤反應分析。並進行於十萬年再現週期地震力下處置孔安全性之情節分析。本研究參照H12報告，地震危害度分析方法須包含地震波傳的震源、路徑(衰減模式)、場址3項參數；另參照美國核能法規要求產生深層岩盤面的地震反應譜與地震波形，再透過地盤反應分析獲得場址各層次的自由場地地震反應譜與地震波形。
- (3) 國內核能電廠之危害度分析已更新相關分析方法，故將進行最新地震危害度法規研究，及既有危害度模型彙整，以符合最新標準。

### 3.2.7.4 氣體遷移

深層地質處置設施之包封容器於地下環境隨時間造成腐蝕作用，進而產生氫氣，氫氣則假設一開始溶解於緩衝材料之孔隙水中，然後經擴散或遷移通過緩衝材料。若由擴散排出的氫氣量小於其氫氣產生量，則氫氣將可能累積在緩衝材料和外包裝之間，隨著越來越多氣體積聚，其壓力可能會影響周圍的緩衝材料及處置母岩之穩定性(JNC, 2000)。104年度規劃著重於探討處置設施近場環境中，氣體在緩衝材料內的遷移行為，研究工作著重於緩衝材料內氣體傳輸試驗探討，工作內容主要參考並彙整國際間緩衝材料氣體傳輸試驗之相關資料，以作為未來國內緩衝材料氣體傳輸試驗規劃之參考。另外，進行

氣體遷移行為實驗研究可行性評估，及輕水式反應器產生用過核子燃料之氣體分裂產物研究，其目的主要為探討處置設施氣體生成成因，與其對工程障壁長期穩定性之影響，作為未來模擬處置設施之氣體遷移實驗設計與安全評估之參考。另為能更確切掌握氣體分裂產物之產量與外釋機制，將進行輕水式反應器用過核子燃料氣體分裂產物研究，分析各類型輕水式用過核子燃料組件內氣體分裂產物隨時間變化之核種組成與其產量，整理關鍵核種之瞬時外釋比例(Instant Release Fraction, IRF)。

### 3.2.7.5 膨潤土特性

在處置設施的高熱環境下，緩衝材料塊初期會因高熱而產生裂隙，導致緩衝材料各項工程性質劣化。但當周遭水文與熱達到穩定平衡時，緩衝材料將重新飽和而回脹，以其自癒能力填補膨潤土內及處置孔周圍母岩內的微裂隙，因此，常選擇黏土質材料作為緩衝材料(JNC, 2000)。富含蒙脫石的黏土質材料具有高度之回脹潛能，當緩衝材料重新飽和時，其回脹能力能使緩衝材料微裂隙重新癒合。但過高回脹潛能會產生過大之回脹壓力，致使廢棄物罐遭擠壓破裂，故需控制適當之回脹潛能，使緩衝材料具良好之工程性質。

膨潤土材料作為處置設施緩衝材料或回填材料，其設計規格與膨潤土材料之來源、數量、處置設施環境影響因子、設計需求有關。104年度工作規劃如下：

#### (1) 緩衝材料設計試驗研究

緩衝材料為壓實的膨潤土塊，其密度設計須考量緩衝材料設計需求如阻水特性、力學特性、熱力性質、化學特性等，故需針對設計需求進行相關特性測試，本研究參考國際間相關之緩衝材料規格試驗方法，以作為未來規劃建立工程障壁試驗室之參考。

#### (2) 緩衝材料長期穩定特性試驗

緩衝材料長期穩定性亦為深層地質處置設施工程障壁考量之安全因素之一，緩衝材料設計時相關規格之試驗，僅能表示材料單

一特性及初始性能，為瞭解緩衝材料於安裝後及處置設施封閉後之長期行為及周圍環境之耦合影響，將分析國際間相關大尺寸耦合試驗之資訊，以作為未來國內工程障壁試驗室發展及耦合試驗參考基礎。

### 3.2.8 建造/運轉/封閉技術

處置設施建造/運轉/封閉技術須於既定時程完成，各階段須環環相扣，為使計畫得以順利進行，故應事先進行進行工作項目之研究，了解國內人員機具施作能量，以利後續擬定完整工程計畫(JNC, 2000)。104年度規劃著重於先蒐集國際建造/運轉/封閉工作項目之相關資訊，後續再就各項工法經濟效益與影響探討，作為後續國內處置設施之建造/運轉/封閉時所須之工作計畫參考。

#### 3.2.8.1 建造階段

處置設施初期建造時程通常約在5年左右，隨後配合每年處置用過核子燃料之速度，逐年進行地下處置隧道之擴挖工程。國際上如瑞典(Stripa礦場、Äspö硬岩實驗室)、芬蘭(Olkiluoto)、日本(TONO試驗場址)、瑞士(Mont Terri、Girmsel岩石實驗室)等國家所採用之施工方法主要為鑽炸工法(drilling and blasting method)與隧道鑽掘機工法(tunnel boring machine method, TBM)。

國內參考處置概念係以鑽炸法為豎井、運轉隧道與處置隧道之施工方法，處置孔則以機械鑽掘方式以減少開挖擾動。瑞典經驗顯示處置孔以機械式垂直鑽掘1.75 m的直孔，在岩壁產生之新裂隙不超過10 cm距離，但此距離須加上彈性塑性應力重新分布之影響。而鑽炸法所造成之開挖擾動帶，於處置隧道頂部及側面產生約30 cm，在底部產生約0.8-1.5 m之開挖擾動帶。開挖擾動帶將使隧道軸向水力傳導係數增加約100到1000倍，而其外之應力重新分布帶則增加約10倍。建造及運轉期間必須維護隧道的穩定及控制地下水滲流，可能採行支保、噴凝土、岩釘等支撐措施，並對含水裂隙進行灌漿處理。而對隧

道之支撐則預計採用低鹼混凝土，以避免高鹼性對膨潤土之影響。此外，通風與排水亦為施工與運轉期間必備之重要措施。

相關隧道開挖須考慮本土化地質環境，而台灣自民國六十年代後期迄今，陸續在水庫、抽蓄發電、交通及下水道建設等方面，已累積豐富的隧道工程經驗，包括隧道設計參數之決定、岩體強度及變形性、隧道周圍岩體應力分析及其隧道施工因應之開挖工法等，相關理論與實務的報告、專書相當多，本計畫將依據用過核子燃料最終處置特性擷取必要資訊進行探討。104年度規劃彙整國內相關隧道施工技術包含鑽炸工法及隧道鑽掘機工法之應用，以及面臨各類困難地質條件之因應工法，探討未來處置設施各坑道(例如聯通隧道、處置隧道、處置孔、通風豎井等)施工技術之應用，成果將針對處置設施坑道之開挖施工技術提供較適合之規劃建議。

### **3.2.8.2 運轉階段**

本計畫於SNFD2009報告已初步探討未來處置設施每年約有處置100個廢棄物罐之效能，保守考慮核一、二、三、四廠用過核子燃料數量，及最後一批用過核子燃料經過中期貯存所需時間，初步假定運轉時間約50年。104年度工作規劃著重於探討處置場地下設施在運轉期間之處置作業概念。

### **3.2.8.3 封閉階段**

未來處置設施完成全部用過核子燃料之處置後，須依法規要求進行必要之監管與除役措施。取得許可後進行封閉作業，封閉作業主要回填地下開挖之運轉隧道與作業區，並須另對天然或隧道開炸所造成岩石力學與水文性質改變的重要地點加以補強，包括使用混凝土塊體阻隔等，這些措施有助於限制水流傳輸途徑並阻止人類侵入。處置設施完成封閉後，須進行觀察、監測並執行必要之維修作業，並對處置用途之地表設施「免於監管」。104年度工作規劃著重於探討處置設

施之回填與封閉措施作業概念，並以國內參考處置概念為基礎，進行進一步探討封閉技術之發展。

### 3.2.9 處置場營運管理技術

由於處置設施開挖、運轉或因潛在的自然現象等造成的地質環境變化，必須保持在基本的設計要求內，以確保處置設施可維持長期的隔離性能及安全性。為確保處置設施的設計需求之安全性，必須透過處置設施管理進行驗證。本節將於後續年度進行探討相關處置設施管理辦法及營運之基本概念。

## 3.3 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。而「安全評估」則是以輻射劑量(radiation dose)或是輻射風險(radiation risk)作為主要指標，評估整體處置系統之安全性。功能/安全評估的最終目的，在於整合放射性廢棄物特性、工程障壁功能以及場址特性，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。

有關用過核子燃料最終處置的功能/安全評估，本計畫歷年來依據技術發展所得的現地調查資料與解析結果、處置設施概念，先後建立虛擬處置設施與基本飲用水情節下核種外釋概念模式，並分別就近場、遠場之核種外釋率與生物圈之人體劑量率，建立評估分析模組，及處置設施全系統安全分析模組(含不確定性與參數敏感度分析)，已具備用過核子燃料深層地質處置之處置設施功能/安全整合性評估所需的相關基礎技術。並於98年完成「SNFD2009報告」之本階段重要里程碑。本分項安全評估屬於現階段「功能/安全評估技術建立」主軸之範疇，亦為「SNFD2017報告」中重要章節之一，為達成前述既定之目標，始依期程進行安全評估之相關工作。

### 3.3.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段安全評估的範疇及目標

日本H12報告明確說明安全評估的目的有3部份：(1)建立可信賴的安全評估技術以運用於日本各種不同的地質環境和處置設施設計；(2)評估日本進行安全地質處置的可行性；(3)提供未來選址與發展安全標準(safety criteria)的技術支援。

參考H12報告精神，SNFD2017報告將著重於(1)建立可信賴並可適用於國內可能處置環境及對應之處置設施設計的安全評估技術；(2)運用安全評估技術並調查國內可能處置環境之資料，評估國內處置環境與設計是否符合國內法規要求；(3)安全評估結果與技術未來可提供選址與法規制定的參考依據。

### 3.3.2 安全評估方法

深層地質多重障壁處置設施系統之安全評估，乃根據傳輸途徑及傳輸機制之特性，考量放射性核種從廢棄物本體遷移至生物圈過程之不同遷移特性，劃分為近場、遠場及生物圈3大區塊，並分別建立不同的分析技術。SNFD2009報告中根據研究區之研究現況，建立虛擬處置設施與核種外釋概念模式，分別就近場、遠場與生物圈建立評估程式與分析模組，以及處置設施全系統安全分析能力，已為國內用過核子燃料深層地質處置之安全評估建立相關分析方法與技術，並建立最終處置初步評估及處置設施功能整合性評估所需的相關基礎技術。

#### 3.3.2.1 相關法規

安全評估依循日本管制法規的安全指標(safety indicator)及其對應的時間尺度(timescales)進行分析，分析的情節乃根據管制法規之要求，主要進行隔離失效情節(isolation failure scenario)和地下水情節(groundwater scenario)的評估(JNC, 2000)。

國內「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第三條規定：「高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式」；第八條規定：「高放處置設施應採多重障壁之設計」。目前國內的用過核

子燃料最終處置參考概念依據國際共識，採用多重障壁深層地質處置方式，符合國內相關法規的要求。

國內「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第九條規定：「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(mSv/yr)」；第十條規定：「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。」

104年度工作規劃著重於更新彙整國際間有關高放處置之法規資訊，並進行國際間安全評估方法之法規分析，以作為法規比較的參考依據。

### 3.3.2.2 安全評估案例的建置方法

日本H12報告之安全評估案例的發展及處理，描述相關特徵(features)、事件(events)和作用(processes)的發展、定義基本情節(base scenario)、隔離失效情節和地下水情節，以及評估計算時採用序率(stochastic)的蒙地卡羅(Monte-Carlo)模擬技術和定率分析技術。SNFD2009報告已定義國內深層地質處置安全評估的基本外釋情節，亦說明安全評估分析已建立定率式分析技術以及序率式分析技術。序率式分析技術中的參數取樣不僅運用蒙地卡羅技術，更使用拉丁超立體取樣(Latin Hypercube Sampling)技術提昇參數取樣的代表性。104年度工作規劃，將以彙整更新國際間建立安全評估案例的相關資訊，據以說明國內安全評估所需案例建置之方法與步驟。

### 3.3.2.3 模式建構

日本H12報告中主要根據其安全評估分析過程，呈現不同分析系統主要考量的核種外釋機制，並針對這些機制使用分析程式，並建立各程式之間的連結關係。SNFD2009報告已根據研究區之研究現況建立虛擬處置設施核種外釋概念模式，並分別針對近場、遠場與生物圈發展適用的評估程式，並建構SNFD2009的安全評估分析模式鏈。104

年度工作規劃著重於進行國際間安全評估模式的建構比較，作為擬定安全評估模式策略的參考，並根據本計畫模式發展現況，建構SNFD2017報告安全評估模型之分析模式鏈關係。

#### **3.3.2.4 安全評估可信度**

H12報告說明安全評估並非對地質處置系統未來演化之準確描述，因此無須去驗證及瞭解每個FEPs的細節。報告亦強調藉由對近場環境及物理-化學理論發展的掌握，並經由安全評估可信度章節內容中資料庫的建置、天然類比的研究，及其他安全報告的比較來加強安全評估的信心。本節將於SNFD2017報告中綜合說明建立安全評估結果信心的具體措施，包括情節、模式、模組及資料庫的建置，天然類比研究，評估報告比較等內容。

### **3.3.3 處置系統與功能**

#### **3.3.3.1 處置系統特性**

H12報告呈現其地質處置系統的概念圖及考量的系統元件，而目前本計畫SNFD2009報告已完成初步的處置系統概念並考量相關的處置系統元件。本章節針對SNFD2017報告所需規劃進行國內地質處置系統特性分析，主要參考研究區相關地質調查之研究成果，從安全評估的觀點依序來定義(1)潛在的核種傳輸路徑、(2)地形特徵、(3)地下水型態、(4)母岩型態、(5)水文地質特性、(6)水文地球化學特性、(7)質量傳輸特性等，初期將參考計畫成果分析地質環境、處置設施、地質與生物圈介面、參考系統之處置系統特性。

處置系統處於地下水可能侵入的環境，故對於地下水受到輻射發生分解(radiolysis)相關現象亦須加以研究，104年度工作規劃著重於整合用過核子燃料內之阿伐與貝它射源資訊，分析其隨時間變化之射源來源關鍵核種，以了解處置系統之特性。

### 3.3.3.2 處置系統功能

H12報告說明處置設施設計須考量之安全功能與有害因子，而處置系統功能係對處置元件所提供遲滯核種外釋能力及相關安全功能進行探討。在處置元件中，母岩特性是其中一個重要因子，母岩中的裂隙分佈情形影響對處置設施所提供的安全功能，因此，瞭解母岩內的裂隙特性是必要的。104年度工作規劃如下：

- (1) 以系列模式進行離散裂隙與連體量模式分析比較，量化升尺度水文參數。
- (2) 進行裂隙網路統計結構參數敏感度分析及岩層等效水力參數推估，成果可作為不同母岩特性條件及不同尺度下，核種傳輸分析時的重要依據。

此研究成果可提昇SNFD2017報告中對於核種傳輸的準確性，本計畫開發之模式可考慮多維度熱-水-力-化耦合特性，再輔以遠場分析時必要的升尺度參數分析成果，可合理提供安全評估分析模式的輸入參數。104年度工作規劃著重於進行處置系統功能研析，目的為建立安全案例分析所需之處置系統功能，分析處置系統各元件應具備之功能，以建立參考案例分析所需之處置系統功能。

### 3.3.4 情節發展

H12報告說明情節發展的程序，本計畫過去研究成果已參考國際間高放射性廢棄物處置的考量情節，並根據國內處置環境，完成初步篩選適用於國內用過核子燃料處置的情節。配合SNFD2017報告需要，將彙整國內情節發展過程以建構相關流程。

#### 3.3.4.1 特徵/事件/作用(FEPs)之建置

H12報告說明FEPs的分類表單，本計畫過去已完成初步篩選適用於國內用過核子燃料處置的FEPs原始報表。為達成SNFD2017報告，104年度工作規劃著重於審視FEPs原始報表，並進行各項資訊欄位及

建置範例報表及數位化資料庫，以完成FEPs初始報表(FEPs initial lists)。

#### **3.3.4.2 特徵/事件/作用(FEPs)之篩選**

FEPs的篩選需有紀錄，包括篩選的理由等，以達到可追溯的目的(JNC, 2000)。本計畫先前成果已將FEPs原始報表經過重新分類、合併與篩選後，重新整合為適合國內處置計畫的特徵、事件及作用初始報表。由於目前FEPs初始報表的項目仍然過多，故104年度工作規劃著重於依據現階段之需求精進篩選準則，以篩選建立符合現階段安全評估分析所需之FEPs因素。

#### **3.3.4.3 情節定義**

H12報告針對安全評估分析的基本情節、擾動情節和隔離失效情節，分別進行定義與說明。本計畫於SNFD2009報告發展建構基本情節，104年度工作規劃著重於依據現階段之需求，考量處置系統各種未來的可能情況，確認各種分析情節與情節建構技術，並定義基本情節以外之分析情節(如擾動情節與隔離失效情節等)，以供後續的模式發展與分析計算使用。

#### **3.3.5 參考案例**

##### **3.3.5.1 參考案例定義**

H12報告說明其參考處置系統和基本情節，彙整相關參數與各模式的假設而定義其參考案例。本計畫於SNFD2009報告已發展建構基本情節，為滿足SNFD2017報告，104年度工作規劃項目有：(1)定義參考案例之水文地質概念模型，以參考研究區之地理資訊為基礎，定義地下水傳輸情節之水文地質概念模型；(2)定義參考案例之核種遷移概念模型，以前述水文地質概念模型為基礎，定義地下水傳輸情節之核種遷移概念模型；(3)進行參考案例的整合分析，根據參考處置

系統與基本情節定義之參考案例核種傳輸路徑，建立各種計算案例之比較基準，以期完成參考案例核種傳輸路徑的說明。

### 3.3.5.2 工程障壁系統參考案例

H12報告說明工程障壁系統的參考案例，分別就核種於工程障壁系統的遷移概念與假設、數值模擬的分析工具與理論、使用的數據及分析結果進行說明。本計畫在SNFD2009報告已發展INPAG-N、INPAG-NV2和INPAG-NH程式，分別針對廢棄物罐垂直置放與水平置放方式之核種外釋情形進行評估，報告中亦說明相關的核種遷移概念與假設、數值分析理論、使用之參數以及國際間使用程式的驗證。為滿足SNFD2017報告源項資訊更新需要，104年度工作規劃為：(1)建立關鍵核種危害度參數，據此篩選出關鍵性核種，以衡量核種重要性程度；(2)針對近場進行概念模型假設分析、數值模式分析、分析參數判定及計算結果說明。

### 3.3.5.3 地質環境參考案例

H12報告於地質圈參考案例章節內容說明核種遷移概念模型的假設、模擬分析工具、使用數據和分析結果說明。本計畫在SNFD2009報告已發展INPAG-FL程式進行在地質圈的核種遷移評估，報告中亦說明核種遷移之概念與假設、數值分析理論、使用之參數以及與國際間使用程式的驗證結果。為更瞭解核種在地質圈母岩裂隙中的遷移特性，104年度工作規劃為(1)裂隙岩體特性參數彙整；(2)結晶岩體之分配係數與擴散係數等遠場核種遷移特性參數之彙整與分析；(3)規劃彙整於研究區的地質調查成果，進行核種於地質圈傳輸的參考案例分析；(4)建構參考案例水文地質概念模型，以安全評估的觀點依據參考案例現階段的調查結果建構安全評估地質圈分析概念模型；(5)建構遠場裂隙岩體流場及傳輸參數升尺度技術；(6)發展熱-水-力-化耦合模式的研究，探討處置設施周圍受衰變熱作用影響的核種傳輸特性。

上述第6項熱-水-力-化耦合研究，將以完成SNFD2017報告為階段性目標。103年起開始進行「工程障壁熱-力耦合穩定性研究」和「處置設施熱-水-化耦合作用之不確定性分析」的研究工作，配合核種傳輸、安全評估技術發展及處置設施設計規劃，進行地下設施與工程障壁功能性的相關研究，工作項目如下：

- (1) 地下工程設施力學特性研究；
- (2) 處置場開挖擾動帶特性模擬研究；
- (3) 工程障壁多耦合模擬研究；
- (4) 源項水-化耦合特性研究；
- (5) 廢棄物罐特性模擬研究；
- (6) 處置孔組合單位熱-水-力耦合縮尺實驗技術發展與多項耦合實驗；

本計畫熱-水-力-化耦合研究初步規劃亦如DECOVALEX計畫，視其成果及未來需要而檢討與重新規劃。

#### 3.3.5.4 生物圈參考案例

建立生物圈參考案例的目的，一方面是要配合整體用過核燃料最終處置安全評估，瞭解放射性核種從工程障壁系統，經過處置母岩及生物圈環境，如何到所關心的輻射暴露群體，及提供通量轉換劑量因子(flux to dose conversion factor)計算可能造成的輻射劑量，確保人們與環境免於游離輻射危害效應之安全目標；另一方面希望提供一個參考基準點，與可能的變異情節比較。目前國際上生物圈評估研究與實務，主要是依據IAEA BIOMASS計畫所產生的IAEA-BIOMASS-6固體放射性廢棄物處置參考生物圈報告中所提供的方法學與範例發展。SNFD2009報告已經完成IAEA-BIOMASS-6參考生物報告中的飲水情節參考範例(ERB 1A/ERB 1B)評估計算。此階段之生物圈評估，則是規劃建立複雜生活情節生物圈劑量計算方法及技術，主要是建立國際生物圈通用評估程式 AMBER 之應用技術，並用以完成

IAEA-BIOMASS-6中所提供的ERB 2A農業井範例及ERB 2A被污染地下水之天然釋出到地表環境範例演練。由於國內不管離島或是本島都面臨海洋，符合國情之生物圈概念模式與評估計算都應考慮海洋漁撈情節。為建立符合國情之生物圈輻射劑量評估概念模型，需評析國際生物圈評估技術發展現況，擷取他國評估技術優點，並歸納分析各國生物圈評估概念模式、情節與FEPs，為生物圈評估奠下良好基礎。進一步使生物圈劑量評估建模符合國情，產出合理之通量轉換劑量因子，以供整體安全評估應用。104年度工作規劃為：(1)建立複雜生活情節生物圈劑量計算方法及技術；(2)調查整合及評估生物圈評估所需項數據組合；(3)對應H12報告之農業與淡海水漁業生活情節生物圈劑量評估；(4)符合國情之生物圈評估程序研討以及生物圈概念模式建立；(5)建立符合國情之生物圈劑量評估所需生活情節及計算；(6)建構核種外釋評估概念模型。

### **3.3.6 替代案例**

#### **3.3.6.1 基本情節之替代案例分析**

替代案例乃利用基本情節計算近場、遠場及生物圈系統中，其可能的系統、模式或數據資料之不確定性(JNC, 2000)。本計畫於SNFD2009報告已運用參數不確定性分析技術，為達成SNFD2017報告中基本情節之替代案例計算與結果說明，104年度工作規劃為：(1)以參考案例假設與使用的參數，分別針對近場、遠場及生物圈系統進行參數不確定分析；(2)進行替代案例的分析研究，以基本情節研究分析結果歸納需要探討的替代情節，並針對歸納之替代情節進行論述與分析數據。

#### **3.3.6.2 擾動情節分析**

擾動情節對整體處置系統造成影響，考量的範圍包括自然現象：抬升/侵蝕、氣候/海水面改變；初始缺陷：外包裝(overpack)密封不完全、坑道回填不充分；未來人類行為：鑽井與飲水(JNC, 2000)。本計

畫於SNFD2009報告已建構基本情節，故變異情節(variant scenario)為現階段情節分析的要項，因此104年度工作規劃為：(1)地表淹水因素分析及影響作用之研究，以建構洪水情節對研究區域所造成之變異情節演化評估；(2)颱風豪雨引發土砂災害對地表環境及設施影響之研究，以探討土砂災害發生規模及運動特性對研究區域地表環境及地表設施可能造成之影響；(3)地質演化作用與地震循環概念模型之研究，探討地表升降潛勢變化對研究區處置母岩深度與大地應力的影響，及大地震對潛在處置母岩地質模型短、中、長期之影響；(4)進行擾動情節的分析研究對擾動情節進行定性及定量分析，包含各種擾動情節之假設與演化論述、論述與決定分析數據、進行案例計算與結果說明。

### 3.3.6.3 隔離失效情節分析

分析隔離失效情節未能如基本情節或擾動情節詳細，因其發生機率甚低，或經由適當的選址和設計方式即可予以避免，在隔離失效情節中僅簡略方式進行分析(JNC, 2000)。本計畫於SNFD2009報告已建構基本情節，故104年度工作規劃為：(1)運用風險評估分析變異情節，包含以風險方式探討人類無意侵入、抬升和侵蝕導致處置設施曝露於地表、處置設施附近的地震/斷層活動及火山活動情形；(2)依SNFD2017報告要求進行隔離失效情節分析，及探討隔離失效情節之演化與發展分析程序，包含隔離失效情節之假設與演化論述、論述與決定分析數據、進行案例計算與結果說明。

### 3.3.6.4 關鍵不確定性之確認

資料不確定性、模式不確定性和情節不確定性是對處置設施評估重要或可能重要的關鍵因素(JNC, 2000)。104年度工作規劃為：(1)歸納近年研究結果，透過文獻回顧不確定性分析、敏感度分析技術及安全功能評估技術予以提出相關性理論，應用於總體計畫之安全功能評估之中；(2)處置設施周圍環境熱-水-化耦合行為對核種遷移參數的影

響，以序率概念進行熱-水-化耦合作用的不確定性分析，並以孔彈性理論建構參考案例場址之熱-水-力耦合數值模式，模擬探討不同參數與條件狀態下處置設施之熱-水-力及熱-水-化之耦合行為。

### **3.3.7 計算案例之整合分析**

H12報告呈現基本案例與其他替代案例，惟日本該階段尚未有安全標準，故其結果將與國際間的安全標準進行比較。104年度工作規劃著重於彙整SNFD2017報告使用之基本案例和其他替代案例資訊，以作為SNFD2017報告所需章節內容之依據。

#### **3.3.7.1 案例定義**

H12報告根據前章節之基本案例與其他替代案例彙整表，說明各案例考量因素的差異。為達成SNFD2017報告章節內容需要，104年度將進行分析案例的全系統整合，包含(1)定義基本情節計算案例，及(2)定義替代情節計算案例，作為下節結果分類說明之依據，提供SNFD2017報告章節所需內容。

#### **3.3.7.2 案例分析結果說明**

H12報告呈現基本案例與其他替代案例彙整表，說明各案例使用參數的變異並說明分析成果的差異。為滿足SNFD2017報告章節中各種案例計算與結果說明，104年度工作規劃著重於針對前章節的全系統整合分析結果，進行案例分析結果說明之規劃，內容將包含前章節之全系統整合評估、不確定性整合分析或進行風險評估。

#### **3.3.7.3 比較各國安全標準**

H12報告根據前章節之基本案例與其他替代案例的分析結果，與國際間安全標準進行比較。為滿足SNFD2017報告章節內容需要，104年度工作規劃著重於進行彙整與分析各國安全標準，提供作為SNFD2017報告之計算結果與各國安全標準進行比較之依據。

### **3.3.7.4 補充的安全指標**

H12報告於安全指標說明特定元素或核種的濃度和流量、放射毒性指數等。國內「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第十條：「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」。過去國內進行放射性廢棄物最終處置安全評估計算多著重於劑量分析，故104年度工作規劃為：(1)針對個人年風險的項目進行研究，彙整文獻資料，探討並發展國內放射性廢棄物最終處置安全評估之個人年風險評估技術；(2)歸納分析國際間有關安全評估報告或法規內除劑量分析以外的安全評估參考指標，以作為處置設施安全評估執行的參考。

### **3.3.8 安全評估的可信度**

#### **3.3.8.1 情節、模式、模組、及資料庫的建置**

H12報告根據情節、模式、模組及資料庫的建置發展進行相關考量及說明，本章節後續將規劃參考H12報告說明本計畫情節發展、評估程式與分析模組及相關評估數據等建置的具體措施，並建立國內用過核子燃料特性資料庫。

#### **3.3.8.2 天然類比研究**

在H12報告將天然類比歸類為地質環境穩定與其保留核種的能力、工程障壁系統元件的演化，和地質圈遲滯核種遷移等3大主題。本計畫過去已蒐整國際間目前天然類比案例。104年度工作規劃著重於持續針對關於處置場工程障壁材料、用過核子燃料和包封容器材料之天然類比資訊整理。

#### **3.3.8.3 評估報告比較**

為提昇民眾對國內安全評估技術與分析成果的信心，並配合SNFD2017報告章節內容需要，104年度工作規劃著重於進行彙整與分

析各國安全評估報告，並與各國評估報告比較，以達成SNFD2017報告章節內容之需要。

### 3.4 國際同儕審查規劃

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年行政院原子能委員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，台電公司將規劃先請國內學者專家審閱后，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。

103年6月本計畫已聯合國內研究單位與瑞典專責機構(SK B)及芬蘭專責機構(POSIVA)，成功舉辦國際同儕審查研討會，建立深層地質處置技術合作管道，預計後續將與國際機構專家展開一系列技術交流活動，以提昇國內深層地質處置技術，並將合作成果逐年累進至SNFD2017報告中，有助於後續國際專家之同儕審查作業推動。

#### 4. 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104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 4-1所示，逐年累進技術發展成果以如期於106年完成SNFD2017報告。

表 4-1：年度工作項目、預期成果及效益

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
<b>地質環境</b>		3.1 地質環境	3 地質環境
<b>區域環境地質</b>		3.1.1 區域環境地質	3.1 區域環境地質
逐年更新台灣涵蓋陸、海域三大潛在處置母岩之地質環境資訊。	持續更新地體架構、岩層分布、第四紀構造分布相關內容，並作為SNFD2017報告之基礎。		
<b>深層地質特性(地質圈特性)</b>		3.1.2 深層地質特性	3.2 深層地質特性
以全國觀點彙整潛在處置母岩之深層特性更新資訊。	提供綜合解析與比較潛在處置母岩深層特性與地質史，作為建構SNFD2017報告所需地質圈特性之參考依據。	3.1.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性	3.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性
<b>深層地質特性(水文地質)</b>		3.1.2.2 水文地質	3.2.2 水文地質
利用已建立之二維水文地質數值模型，建立參考案例所需概念模式及參數；開始發展三維水文地質數值模型。	作為SNFD2017報告5.5節參考案例所需之水文地質數值模型。		
<b>深層地質特性(水文地球化學)</b>		3.1.2.3 水文地球化學	3.2.3 水文地球化學
利用現地深層水質及岩水反應詳細礦物分析資料，建立結晶岩地化反應模擬技術。	作為後續探討結晶岩深層地下水因開挖擾動之長期演化特性，及建構水文地球化學概念模式之基礎。		
<b>深層地質特性(核種傳輸路徑)</b>		3.1.2.4 核種傳輸路徑	3.2.4 核種傳輸路徑
利用現地井錄及坑道測繪資料，建構結晶岩裂隙的離散網路結構，並取得岩體中的裂隙參數及特性。	建立離散裂隙網路地下水流場數值模式，提供近場裂隙地下水安全評估之基礎。		
建立本土結晶岩之核種傳輸試驗能力，以取得核種在此岩體中的吸附與擴散參	作為後續探討核種在岩體中傳輸行為之參考依據。		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
數。			
<b>深層地質特性(岩石特性)</b>		3.1.2.5 岩石特性	3.2.5 岩石特性
累積本土結晶岩深層樣本一般物理性質、熱特性及力學等試驗之量測數據。	取得本土結晶岩之物理性質、熱特性及力學參數，作為後續探討岩體穩定性評估所需參數之參考依據。		
建立膨潤土與岩塊熱-力耦合室內試驗設備，進行膨潤土再飽和條件下模擬與室內試驗量測能力。	作為後續現地熱-力耦合試驗規劃及近場功能評估之參考依據。		
<b>地質處置合適性研究(台灣的大地構造)</b>		3.1.3 地質處置合適性研究 3.1.3.1 台灣的大地構造架構	3.3 地質處置合適性研究 3.3.2 台灣的大地構造架構
整合台灣大地構造架構及演化，與火山活動時空分布特性之關係，並蒐集火山監測相關數據，評估火山活動之影響範圍。	提供後續長期穩定性及地質處置合適性評估之參考依據。		
持續監測結晶岩鄰近陸、海域微震資料，建立電阻與震波併合成像技術。	作為後續長期穩定性及地質處置合適性評估之參考依據。		
地震活動區地下水水氣濃度變化與震時體積應變計算，以探討斷層活動特性。	作為後續探討地下水水氣濃度變化與地震活動關係之基礎，建立深層地質處置背景資料監測技術。		
<b>地質處置合適性研究(抬升與沉陷作用)</b>		3.1.3.2 抬升與沉陷作用	3.3.3 抬升與沉陷作用
持續現有觀測站的維護與觀測資料處理，並以時序分析技術探討地殼變動機制。	提供影響地表形態位移變化之指標資訊，作為評估岩體地質穩定性之參考依據。		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
逐年進行台灣河階研究相關資料的蒐集與回顧。	提供後續彙整區域性抬升與沉陷作用之本土河階案例，作為評估地殼變動抬升/沉陷作用之基礎。		
逐年進行台灣地區剝蝕速率資料的蒐集與彙整。	提供後續進行剝蝕作用與剝蝕率研析(如地形/氣候變遷分析、河/海階剝蝕率分析、岩體剝蝕分析等)所需資訊，作為評估地質處置合適性之參考依據。		
<b>地質處置合適性研究(氣候與海平面變遷)</b>		3.1.3.3 氣候與海平面變遷	3.3.4 氣候與海平面變遷
以高解析度大範圍數值地形模式，獲得河域受氣候變遷導致海平面上升與沖積扇堆積的地形與地層演變證據。	提供建構水文地質概念模式之基礎資料及後續進行氣候變遷影響性評估之用。		
<b>處置設計與工程技術</b>		3.2 處置設計與工程技術	第4章 處置設計與工程技術
<b>處置設計概念與工程技術能力</b>		3.2.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段處置設計概念及工程技術能力	4.1 處置設計概念與工程技術能力
<b>工程障壁系統與地質處置母岩的功能</b>		3.2.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能	4.2 工程障壁與母岩的功能
摘述工程障壁系統及地質處置母岩對處置設施之功能。	簡述處置設施工程障壁及可能之處置母岩對處置系統所提供的功能。		
<b>整體處置概念</b>		3.2.3 整體處置概念	4.3 整體處置概念
<b>整體處置概念(工程障壁系統)</b>		3.2.3.1 工程障壁系統	4.3.1 工程障壁系統
以國內參考處置概念為基礎，針對工程	提供我國處置設施工程障壁系統材料		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
障壁系統之基本概念進行描述，並彙同「工程障壁系統及處置設施的設計需求」之工作內容，進行工程障壁系統之概念與設計需求規劃。	選擇與設計之參考。		
<b>整體處置概念(處置設施)</b>		3.2.3.2 處置設施	4.3.2 處置設施
以國內參考處置概念為基礎，進行處置設施之概念設計，研擬現階段參考處置概念下處置設施之設計需求。	配合整體處置概念，並考量目前的建築法規和土木開挖技術與機具，更新繪製處置設施概念圖。		
<b>設計流程</b>		3.2.4 設計流程	4.4 設計流程
<b>影響處置概念的因子</b>		3.2.5 影響處置概念的因子	4.5 影響處置概念的因子
<b>影響處置概念的因子(熱與放射性)</b>		3.2.5.1 熱與放射性	4.5.1 熱與放射性
針對燃料組件之相關參數進行資料蒐集與整理，再根據所建立的數據資料範圍，選用具代表性保守且合理之運轉參數，針對重要核種進行定性及定量評估。	分析相關沸水式反應器與壓水式反應器之用過核子燃料代表性重要核種資訊，以作為處置設計中熱與放射性之相關研究內容。		
<b>影響處置概念的因子(地質與地形條件)</b>		3.2.5.2 地質與地形條件	4.5.2 地質與地形條件
以現有之地質調查資訊，分析地質環境對處置設施之影響因子，如母岩裂隙及斷層分布、地下水流及岩體應力等條件。	考慮國內地質環境條件與處置概念，探討地質環境及母岩特性對處置設施環境與工程設計之影響，以作為地表設施及地下設施設計之參考。		
<b>影響處置概念的因子(處置母岩特性)</b>		3.2.5.3 處置母岩特性	4.5.3 處置母岩特性
地質環境影響處置設施設計的相關特性彙整，參考本計畫於研究區的研究成果，依岩石力學、熱力學、水文地質及	探討影響處置概念之影響因子，供未來場址選擇與處置設計之參考。		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
地球化學等特性，分別進行相關參數與資訊彙整。			
<b>影響處置概念的因子(處置深度)</b>		3.2.5.4 處置深度	4.5.4 處置深度
依照法規要求、工程條件與可行性，探討影響處置深度之因素。	提供未來處置場址選擇與處置設計之參考。		
<b>工程障壁系統及處置設施的設計需求</b>		3.2.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求	4.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求
完成廢棄物罐特性與破壞準則分析，建置抗腐蝕性長期試驗之設備，及分析屏蔽、熱傳、力學及次臨界等效應。	可完成SNFD2017報告4.6相關章節相互引用之依據。	3.2.6.1 廢棄物罐	4.6.1 廢棄物罐
完成國內外既有緩衝材料之特性分析結果，配合處置設施安全之考量，提出緩衝材料所需之設計需求。	做為SNFD2017報告報告4.6相關章節及第五章相互引用之依據。	3.2.6.2 緩衝材料	4.6.2 緩衝材料
完成處置設施中工程障壁尺寸之探討，並與瑞典SKB相關設計比較探討，完成整體工程障壁之設計需求。	做為SNFD2017報告報告4.6相關章節及第五章相互引用之依據。	3.2.6.3 工程障壁的規格與配置	4.6.3 工程障壁的規格與配置
整合廢棄物罐與工程障壁概念設計之成果，探討地下設施置之方式，完成現階段處置設施之地下設施配置。	做為SNFD2017報告報告4.6相關章節及第五章相互引用之依據。	3.2.6.4 地下設施	4.6.4 地下設施
將蒐集隧道支撐之長期穩定性與低鹼性混凝土相關文獻(包含日本H12報告、瑞典SKB報告等)，並進行低鹼性混凝土配比設計方法研究與試體製作規劃。	提供適當的防護措施給未來國內處置設施之設計參考。	3.2.6.4 地下設施	4.6.4 地下設施
完成回填材料試體製作與動態三軸測試	提供作為SNFD2017報告之內容外，亦	3.2.6.5 回填與封塞	4.6.5 回填與封塞

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
及不同組成之液化曲線分析，並配合地下設施之成果，完成回填材料與地下設施回填有關之設計。	可提供回填材料無液化潛能之經濟性設計方法。		
完成現階段參考處置概念之處置設施設計需求。	相關研究成果呈現於SNFD2017報告中。	3.2.6.6 處置場設計	4.6.4 處置場設計
<b>工程障壁穩定性</b>		3.2.7 工程障壁的穩定性	4.7 工程障壁的穩定性
建立近場熱-水-化耦合分析概念模式；瞭解溫度場聯集對工程障壁與周圍岩體熱效應所產生之力學變化；評估研究區特定範圍內各斷層所能產生之最大地震規模，及其對處置設施造成的影響；完成緩衝材料內氣體遷移試驗探討。	提供國內參考處置概念的工程障壁系統設計基礎，發展近場熱-水-化耦合地下水流傳輸概念模式、處置設施工程障壁力學穩定性分析技術、受震分析技術。並提供氣體遷移試驗之規劃依據，相關成果可作為國內緩衝材料之設計參考。		
<b>工程障壁穩定性(再飽和特性)</b>		3.2.7.1 再飽和特性	4.7.1 再飽和特性
進行緩衝材料於假設案例參數下熱-水-化耦合數值模式之建構及分析，及熱-水-化耦合數值模式參數之敏感度分析，並探討熱-水-力耦合序率孔彈性理論模式之敏感度分析。	分析工程障壁再飽和行為，作為處置設施工程障壁概念設計之參考。		
<b>工程障壁穩定性(力學穩定特性)</b>		3.2.7.2 力學穩定特性	4.7.2 力學穩定特性
針對工程障壁在回填後受圍壓改變之影響，進行縮尺試驗模型製作，進行力學穩定性量測評估。	完成力學穩定特性量測評估，除提供SNFD2017報告所需內容外，並作為後續年度持續研究之基礎。		
<b>工程障壁穩定性(受震穩定性)</b>		3.2.7.3 受震穩定性	4.7.3 受震穩定性

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
研究最終處置設施地震危害度法規，及既有危害度模型彙整，並建立危害度分析、反應譜與地震波形。	完成初步場址設計受地震之影響。		
<b>工程障壁穩定性(氣體遷移)</b>		3.2.7.4 氣體遷移	4.7.4 氣體遷移
探討處置設施近場環境中，氣體在緩衝材料內的遷移行為，以及分析國內各類型用過核子燃料組件氣體分裂產物之核種組成與其產量。	完成輕水式反應器用過核子燃料組件氣體分裂產物分析。		
<b>工程障壁穩定性(膨潤土特性)</b>		3.2.7.5 膨潤土特性	4.7.5 膨潤土特性
進行緩衝材料設計試驗及長期穩定性試驗之研究，並參考國際間相關之緩衝材料規格試驗方法，完成縮尺塊體製作。	研究成果可供處置場緩衝材料密度設計之參考。		
<b>建造/運轉/封閉技術</b>		3.2.8 建造/運轉/封閉技術	4.8 建造/運轉/封閉技術
完成國內隧道施工技術在處置概念中豎井、運轉隧道與處置隧道之施工方法分析。	參考國際間建造、運轉、封閉階段之建造技術與規劃，以供未來處置設施建造之參考，將整合相關研究成果於SNFD2017報告中。	3.2.8.1 建造階段 3.2.8.2 運轉階段	4.8.1 建造階段 4.8.2 運轉階段
完成處置設施回填與封閉措施之作業概念。	除供未來處置設施建造之參考，並將整合相關研究成果於SNFD2017報告中。	3.2.8.3 封閉階段	4.8.3 封閉階段
<b>安全評估</b>		3.3 安全評估	第5章 安全評估
<b>安全評估的範疇及目標</b>		3.3.1 潛在處置母岩特性調查與評估階段安全評估的範疇及目標	5.1 安全評估的範疇及目標

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
<b>安全評估方法</b>		3.3.2 安全評估方法	5.2 安全評估方法
彙整國際間有關高放處置之法規資訊，並進行國際間安全評估方法之法規分析。	提供報告所需內容及作為法規比較的參考依據。	3.3.2.1 相關法規	5.2.1 相關法規
完成國際間安全評估案例的建置方法研析，及更新建立安全評估案例建置方法與步驟之相關資訊。	提供國內SNFD2017報告安全評估案例建置方法。	3.3.2.2 安全評估案例的建置方法	5.2.2 安全評估案例的建置方法
建構SNFD2017報告安全評估模型之分析模式鏈關係。	提供國內SNFD2017報告5.2.3節之內容。	3.3.2.3 模式建構	5.2.3 模式建構
建立安全評估結果信心的具體措施。	提供國內SNFD2017報告5.2.4節之內容。	3.3.2.4 安全評估可信度	5.2.4 安全評估可信度
<b>處置系統與功能</b>		3.3.3 處置系統與功能	5.3 處置系統與功能
完成安全評估所界定之地質環境、處置設施、地質與生物圈介面、參考系統，及過核子燃料內之阿伐與貝它射源資訊之處置系統特性。	提供現階段完成評估所需之處置系統特性，及做為SNFD2017報告5.3.1節之內容。	3.3.3.1 處置系統特性	5.3.1 處置系統特性
完成處置系統功能研析，建立安全案例分析所需之處置系統功能。	利用建立參考案例分析所需之處置系統功能，進行SNFD2017報告所之案例分析。	3.3.3.2 處置系統功能	5.3.2 處置系統功能
<b>情節發展</b>		3.3.4 情節發展	5.4 情節發展
完成更新FEPs初始報表，精進FEPs篩選準則及定義基本情節以外之分析情節。	提供情節建構與後續安全評估分析案例的參考依據。	3.3.4.1 特徵/事件/作用(FEPs)之建置 3.3.4.2 特徵/事件/作用(FEPs)之篩選	5.4.1 特徵/事件/作用(FEPs)之建置 5.4.2 特徵/事件/作用(FEPs)之篩選

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
		3.3.4.3 情節定義	5.4.3 情節定義
<b>參考案例</b>		3.3.5 參考案例	5.5 參考案例
<b>參考案例(參考案例定義)</b>		3.3.5.1 參考案例定義	5.5.1 參考案例定義
定義參考案例之水文地質概念模型及核種遷移概念模型，並定義基本情節之核種傳輸路徑。	完成參考案例核種傳輸路徑圖說，提供作為SNFD2017報告之案例分析的參考依據。		
<b>參考案例(工程障壁系統參考案例)</b>		3.3.5.2 工程障壁系統參考案例	5.5.2 工程障壁系統參考案例
建立關鍵核種危害度參數，並針對近場進行概念模型假設分析、數值模式分析、分析參數判定及計算結果說明。	提供關鍵核種、近場概念模型假設、數值模式分析與分析參數，作為SNFD2017報告之案例分析的參考依據。		
<b>參考案例(地質環境參考案例)</b>		3.3.5.3 地質環境參考案例	5.5.3 地質環境參考案例
進行裂隙岩體特性參數彙整、結晶岩體之遠場核種遷移特性參數彙整與分析、彙整研究區的地質調查成果，進行核種於地質圈傳輸的參考案例分析、建構參考案例水文地質概念模型、建構遠場裂隙岩體流場及傳輸參數升尺度技術，並發展熱-水-力-化耦合模式的研究，探討處置設施受衰變熱作用影響的核種傳輸特性。	提供核種於地質圈傳輸之概念模型、特性參數，作為SNFD2017報告之遠場傳輸分析的參考依據。		
<b>參考案例(生物圈參考案例)</b>		3.3.5.4 生物圈參考案例	5.5.4 生物圈參考案例
建立複雜生活情節生物圈劑量計算方法	作為SNFD2017報告之生物圈分析的		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
及技術、調查整合及評估生物圈評估所需數據組合、建立農業與淡海水漁業生活情節生物圈劑量評估、建立符合國情之生物圈評估程序、概念模式及劑量評估及建構核種外釋評估概念模型。	參考依據。		
<b>替代案例</b>		3.3.6 替代案例	5.6 替代案例
<b>替代案例(基本情節之替代案例分析)</b>		3.3.6.1 基本情節之替代案例分析	5.6.1 基本情節之替代案例分析
以參考案例假設與使用的參數分別針對近場、遠場及生物圈系統進行參數不確定分析，並進行替代案例的分析研究，以基本情節研究分析結果，歸納需要探討的替代情節，並針對歸納之替代情節進行論述與分析數據。	提供SNFD2017報告所需之基本情節替代案例計算分析之依據。		
<b>替代案例(擾動情節分析)</b>		3.3.6.2 擾動情節分析	5.6.2 擾動情節分析
進行地表淹水因素分析及影響之研究，建構洪水情節對研究區域所造成之變異情節演化評估、颱風豪雨引發土砂災害對地表環境及設施影響之研究、地質演化作用與地震循環概念模型之研究、探討大地震對潛在處置母岩地質模型短、中、長期之影響及進行擾動情節的定性及定量分析研究。	提供作為SNFD2017報告擾動情節分析之依據。		
<b>替代案例(隔離失效情節分析)</b>		3.3.6.3 隔離失效情節分析	5.6.3 隔離失效情節分析

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
探討人類無意侵入、抬升和侵蝕導致處置設施曝露於地表、處置設施附近的地震/斷層活動及火山活動情形，以及依SNFD2017報告進行隔離失效情節分析，探討隔離失效情節之假設與演化論述、論述與決定分析數據、進行案例計算與結果說明。	作為SNFD2017報告隔離失效情節分析之依據。		
<b>替代案例(關鍵不確定性之確認)</b>		3.3.6.4 關鍵不確定性之確認	5.6.4 關鍵不確定性之確認
歸納近年研究結果，透過文獻回顧不確定性分析、敏感度分析技術及安全/功能評估技術提出相關性理論，及探討處置設施周圍環境熱-水-化耦合行為對核種遷移參數的影響，並模擬不同參數與條件狀態下處置設施之熱-水-力及熱-水-化之耦合行為。	作為SNFD2017報告關鍵不確定性之確認之依據。		
<b>計算案例之整合分析</b>		3.3.7 計算案例之整合分析	5.7 計算案例之整合分析
<b>計算案例之整合分析(案例定義)</b>		3.3.7.1 案例定義	5.7.1 案例定義
定義基本情節計算案例及替代情節計算案例。	提供作為SNFD2017報告中計算案例分析之定義與分析的參考依據。		
<b>計算案例之整合分析(案例分析結果說明)</b>		3.3.7.2 案例分析結果說明	5.7.2 案例分析結果說明
針對全系統整合分析結果，進行計算案例分析結果說明之規劃。	完成各種案例計算與結果說明。		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
<b>計算案例之整合分析(比較各國安全標準)</b>		3.3.7.3 比較各國安全標準	5.7.3 比較各國安全標準
完成彙整與分析各國安全標準，作為國內計算結果與各國安全標準進行比較之依據。	提供作為結合SNFD2017報告5.5節與5.6 分析結果與各國比較之依據。		
<b>計算案例之整合分析(補充的安全指標)</b>		3.3.7.4 補充的安全指標	5.7.4 補充的安全指標
針對個人年風險的項目進行研究，探討及發展國內放射性廢棄物最終處置安全評估之個人年風險評估技術，並歸納分析國際間有關安全評估報告或法規內除劑量分析以外的安全評估參考指標，以作為處置設施安全評估執行的參考。	提供SNFD2017報告進行個人年風險評估，及作為補充的安全指標之論述依據。		
<b>安全評估的可信度</b>		3.3.8 安全評估的可信度	5.8 安全評估的可信度
<b>情節、模式、模組、及資料庫的建置</b>		3.3.8.1 情節、模式、模組及資料庫的建置	5.8.1 情節、模式、模組及資料庫的建置
完成用過核子燃料特性資料庫之各項功能規劃。	提供後續建置最終處置資料庫依據及長期研究使用之參考。		
<b>天然類比研究</b>		3.3.8.2 天然類比研究	5.8.2 天然類比研究
完成情節發展、評估程式、分析模組及相關評估數據等建置的具體措施說明，並完成工程障壁、放射性廢棄物和包封容器之天然類比資訊整理。	提供作為SNFD2017報告中安全評估的可信度章節內容。		
<b>評估報告比較</b>		3.3.8. 評估報告比較	5.8.3 評估報告比較
進行彙整與分析各國安全評估報告，並與各國評估報告比較。	完成與各國評估報告之比較。		

年度工作項目	預期研究成果及效益	對應104年度 工作計畫之章節	對應SNFD2017之章節
<b>國際同儕審查規劃</b>			
國際同儕審查。	確保研究技術及報告品質皆與國際同步外，增加民眾的接受度並提升公信力。	3.4 國際同儕審查規劃	
<b>2010~2014報告審查及修訂</b>			
回顧2010-2014研究成果，進行審查及修訂。	提供近期計畫工作規劃之參考。		

## 5. 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(2011)，用過核子燃料最終處置計畫書，2010年修訂版，台灣電力公司，共236頁。
- 吳禮浩(2005)，情節發展分析技術建立，我國用過核子燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段－發展初步功能/安全評估技術(93年度計畫)，核能研究所，SNFD-INER-90-554。
- 吳禮浩、吳典諺、莊文壽(2002)，情節發展分析技術建立，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段－發展初步功能/安全評估模式(第一年計畫)。
- 紀立民(2002)，我國用過核燃料深層地質處置概念之初期研究，我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段－發展初步功能/安全評估模式(第一年計畫)，核能研究所SNFD-INER-90-526。
- 莊文壽、吳禮浩、紀立民、施清芳(2001)，情節發展與分析技術之研究，工業技術研究院能源與資源研究所。
- Huang, Z., T.-R. Wu, S. K. Tan, K. Megawati, F. Shaw, X. Liu, T.-C. Pan, (2009), Tsunami hazard from the subduction Megathrust of the South China Sea: Part II. Hydrodynamic modeling and possible impact on Singapore, *Journal of Asian Earth Sciences*, 93-97.
- 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.
- Liu, L. F., X. Wang and Salisbury A. J., (2009), Tsunami hazard and early warning system in South China Sea, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2-12.

- 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.
- SKB (2009), Bedrock transport properties: Data evaluation and retardation model-Site descriptive modeling SDM-Site Laxemar, SKB Report R-08-100, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden
- Wang, X. and L. F. Liu, (2006), An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami, *Journal of Hydraulic Research*, 1-8.
- Wang, X. and L. F. Liu, (2006), Preliminary Study of Possible Tsunami Hazards in Taiwan Region, *Cornell University*.
- Wu, T.-R., H.-C. Huang, (2009), Modeling tsunami hazards from Manila trench to Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences*, 21-28.