

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
103年度工作計畫
(修正二版)

台灣電力公司

中華民國 103 年 1 月

103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.....	3-1
3.1.2 深層地質特性.....	3-2
3.1.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性.....	3-2
3.1.2.2 水文地質.....	3-4
3.1.2.3 水文地球化學.....	3-5
3.1.2.4 核種傳輸路徑.....	3-6
3.1.2.5 岩石特性.....	3-8
3.1.3 地質處置合適性研究.....	3-9
3.1.3.1 台灣的大地構造架構.....	3-9
3.1.3.2 抬升與沉陷作用.....	3-10
3.1.3.3 氣候與海平面變遷.....	3-11
3.2 處置設計與工程技術.....	3-12
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.....	3-13
3.2.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能.....	3-14
3.2.3 整體處置概念.....	3-15
3.2.4 設計流程.....	3-17
3.2.5 影響處置概念的因子.....	3-17
3.2.6 工程障壁系統及處置設施的設計需求.....	3-17
3.2.7 工程障壁的穩定性.....	3-18
3.2.7.1 處置場熱水化作用之初步分析.....	3-18
3.2.7.2 處置場開挖擾動帶之力學特性研究.....	3-19
3.2.7.3 工程障壁熱力-力學穩定性研究.....	3-19
3.2.7.4 深層地下設施受震穩定性之研究.....	3-21
3.2.7.5 氣體遷移.....	3-22
3.2.7.6 膨潤土特性.....	3-22
3.2.8 建造/運轉/封閉技術.....	3-23
3.2.9 處置場營運管理技術.....	3-25
3.3 安全評估.....	3-25
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.....	3-26

3.3.2	安全評估方法.....	3-26
3.3.3	處置系統與功能.....	3-27
3.3.4	情節發展.....	3-29
3.3.5	基本情節.....	3-29
3.3.6	變異情節.....	3-30
3.3.6.1	地表淹水因素分析及影響作用之研究.....	3-31
3.3.6.2	颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響之研究.....	3-32
3.3.6.3	地質演化作用與地震循環概念模型之研究.....	3-32
3.3.6.4	地震對廢棄物罐破壞特性之系統分析.....	3-33
3.3.7	安全案例分析.....	3-34
3.3.7.1	所需核種特性相關參數之評估研究.....	3-35
3.3.7.2	參數不確定性分析.....	3-36
3.3.8	安全評估的可信度.....	3-37
3.3.8.1	天然類比研究.....	3-37
3.4	國際同儕審查規劃.....	3-38
4.	預期成果分析.....	4-1
5.	參考文獻.....	5-1

表目錄

	頁次
表 2-1：SNFD2017報告預定章節	2-7
表 4-1：預期成果及效益	4-2

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，加上目前正在進行的龍門計畫(龍門電廠)，最近的將來還會有2部機組加入運轉發電。其中，核一、二廠4座機組為沸水式，核三廠2座機組為壓水式，龍門電廠2部則為進步型沸水式反應器。預估此4座核能電廠的8部機組運轉40年將會產生約7,350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}Tc 、 ^{135}Cs 、 ^{129}I 等分裂產物及 ^{237}Np 、 ^{239}Pu 、 ^{243}Am 及 ^{247}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，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1000 m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屏障系統，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可忽略的程度。

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」階段規劃達成2個重要里程碑，首先於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);最後於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,於2010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)」。

在過去幾年中,潛在母岩特性調查技術之發展重點,集中於建立花崗岩體測試區特性調查與評估相關之處置技術發展,總計在花崗岩測試區完成約500點地表重/磁力探測、16 km地電阻剖面探測、3000 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,建構出花崗岩測試區初步地質概念模式。期能透過各項技術整合性的驗證,供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,據以完成SNFD2009報告。

根據SNFD2009報告的研究結果顯示:台灣地區活動構造、地震、火山活動及地質災害均有其侷限分布的特性;除了離島花崗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花崗岩體,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或與離島花崗岩類似,在後續的潛在處置母岩調查工作中,將加強本島花崗岩體穩定性的研究。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,以取得後續驗證所必要之基礎數據;同時將已成熟應用於離島花崗岩體之調查研究技術,移轉應用於本島花崗岩體特性調查中,逐步發展熱、水、力、化特性相關之調查與評估技術,並進行各項特性擴尺度效應探討,藉以取得完整地下岩體調查數據,以利後續本島花崗岩體穩定性評估工作之進行。

2. 計畫規劃

台電公司依照「放射性物料管理法」與「施行細則」之相關規定，於2004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2006年核定。台電公司必須確實依「用過核子燃料最終處置計畫書」規劃工作內容執行，並依每4年檢討修正之規定，考量國際發展趨勢及國內實際進展狀況，進行規劃工作內容之修正；近期已於2011年1月完成修訂版的核備(台電公司，2011)，其全程工作規劃包含5個任務階段：

- (1) 潛在處置母岩特性調查與評估階段(2005~2017年)
- (2) 候選場址評選與核定階段(2018~2028年)
- (3) 場址詳細調查與試驗階段(2029~2038年)
- (4) 處置場設計與安全分析評估階段(2039~2044年)
- (5) 處置場建造階段(2045~2055年)

上述各階段之時程、目標及重要里程碑，簡述如圖 2-1所示。

「用過核子燃料最終處置計畫」自2005年起，展開「潛在處置母岩特性調查與評估階段」，規劃於2017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)，以完成兩大主要目標：(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(2018~2028年)候選場址調查區域。

為順利達成2017年規劃階段目標，台電公司於2009年完成的SNFD2009報告(台電公司，2010)，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，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變異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，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，考量日本與我國地質環境的相似性，原子能委員會亦要求SNFD2017報告需參考日本H12報告(JNC, 2000)架構編寫。據此，SNFD2017報告之預定章節內容詳如表 2-1所示，其中，「地質環境」、「處置設計與工程技術」、「安全評估」等三大章，為本計畫工作後續推動之三大主軸：

(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演化特性；

(b) 深層地質特性：

包括水文地質、水文地球化學、核種傳輸路徑、岩石特性等，建構地質圈概念模式之關鍵項目；

(c) 地質處置合適性研究：

包括台灣的大地構造、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) 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：

103年度尚無工作項目。

(b) 工程障壁系統與地質處置母岩的功能：

103年度尚無工作項目。

(c) 整體處置概念：

103年度工作以我國參考之處置概念為基礎，針對工程障壁系統之基本概念進行描述，並彙同工作項目(f)工程障壁系統及處置設施的設計需求之內容，進行工程障壁系統之概念與設計需求規劃。

(d) 設計流程：

本節內容將於2017年針對處置場之工程障壁與處置設施之設計準則與設計方法進行綜合說明。

(e) 影響處置概念的因子：

利用已知之地質調查資訊，探討地質環境及母岩性質對處置場環境與工程設計之影響，以做為處置場地表設施及地下設施設計之參考。

(f) 工程障壁系統及處置設施的設計需求：

依據國際間之處置概念需求以及考慮我國的地質環境條件，針對廢棄物罐之抗腐蝕性、力學性能、輻射屏蔽功能等需求，研擬適合我國處置概念之工程障壁基本需求與設計需求。

(g) 工程障壁的穩定性：

為建立處置場工程障壁穩定性之分析技術，103年度分別針對下列各項分析技術進行初步規劃及發展：處置場熱水化作用之初步分析，建立熱水化地下水流概念模式；處置場開挖擾動帶之力學特性研究，探討開挖擾動帶對處置場之力學影響；工程障壁熱力-力學穩定性研究，初步建構放射性廢棄物處置場模型，以建立未來工程障壁穩定性之分析模型；深層地下設施受震穩定性之研究，分析地震對處置場地下設施之安全影響。

(h) 建造/運轉/封閉技術：

103年度尚無工作項目。

(i) 處置場營運管理技術：

103年度尚無工作項目。

(3) 安全評估

(a) 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：

103年度尚無工作項目。

(b) 安全評估方法：

103年度尚無工作項目。

(c) 地質處置系統與功能：

透過數值模式分析，以裂隙統計結構作為裂隙描述方法，建立、測試與驗證離散裂隙與連續體升尺度參數分析技術。103年度工作包含離散裂隙岩體水流模式參數升尺度技術開發，依據質量守恆基本概念，建立離散裂隙統計參數與升尺度等效參數間的關係，量化升尺度參數對水流模式分析之差異。

(d) 情節發展

103年度尚無工作項目。

(e) 基本情節：

103年度尚無工作項目。

(f) 變異情節：

就台灣的特性因素進行變異情節分析，103年度工作包含地表淹水因素分析及影響作用、颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響、地質演化作用與地震循環概念模型之研究。

(g) 安全案例分析

依據虛擬處置場場址安全評估概念模型與變異情節，整合近場、遠場安全評估及生物圈人體輻射劑量率評估等，進行用過核子燃料深層地質處置場之全系統評估。103年度工作包含功能/安全評估所需核種特性相關參數之評估研究及不確定性與參數敏感度分析技術之研究。

(h) 安全評估的可信度

103年度尚無工作項目。

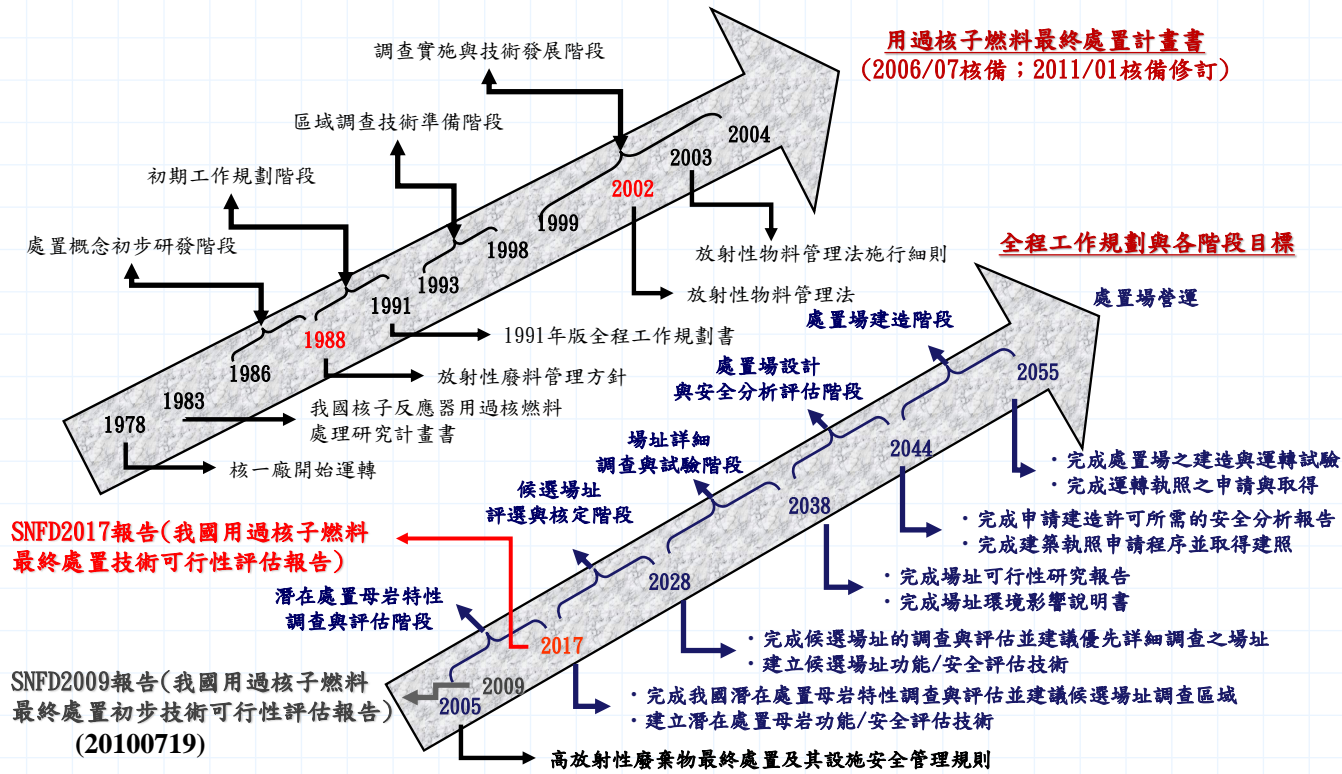


圖 2-1：用過核子燃料最終處置計畫之計畫沿革及全程工作規劃

表 2-1：SNFD2017報告預定章節

SNFD2017報告(預定章節)	H12報告章節(JNC, 2000)
1 台灣用過核子燃料管理策略與處置計畫	I High-Level Radioactive Waste Management in Japan
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
2 處置系統與安全概念	II The Geological Disposal System and the Safety Concept
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
3 地質環境	III The Geological Environment of Japan
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 流通路徑參數的定義	3.2.4.2 Definition of flow 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
4 處置設計與工程技術	IV Repository Design and Engineering Technology
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 熱與輻射	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
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 工程障壁系統	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 回填材料	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
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
5 安全評估	V Safety Assessment
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
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 情節分析之定義	5.4.3 Definition of scenarios
5.5 基本情節	5.5 The Reference Case
5.5.1 基本情節定義	5.5.1 Definition of the Reference Case
5.5.2 基本情節的工程障壁系統	5.5.2 The EBS Reference Case
5.5.3 基本情節的地質環境	5.5.3 The geosphere Reference Case
5.5.4 基本情節的生物圈	5.5.4 The biosphere Reference Case
5.6 變異情節	5.6 The Alternative Cases
5.6.1 變異情節定義	5.6.1 Analysis of alternative cases within the Basic Scenario
5.6.1.1 洪水情節定義	
5.6.1.2 地震情節定義	
5.6.2 變異情節分析	5.6.2 Analysis of perturbation scenarios
5.6.2.1 洪水情節發展	5.6.3 Analysis of isolation failure scenarios

5.6.2.2 地震情節發展	5.6.4 Identification of key uncertainties
5.7 安全案例分析	5.7 Synthesis of calculation cases illustrating overall system performance
5.7.1 定義	5.7.1 Definition of cases
5.7.2 案例分析	5.7.2 Results of cases illustrating overall system performance in different geological environments
5.7.2.1 基本情節案例分析	
5.7.2.2 變異情節案例分析	
5.7.3 不確定性分析	5.7.3 Comparison of results with overseas safety standards
5.7.3.1 參數不確定性之分布	
5.7.3.2 參數不確定性分析	
5.7.4 比較各國安全標準	5.7.4 Supplementary safety indicators
5.8 安全評估的可信度	5.8 Reliability of the safety assessment
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 結論	5.9 Summary and conclusions
6 選址技術與安全標準	6 Technical Basis for Site Selection and Development of Safety Standards
<p>本章節內容主要在說明：H12報告的研究內容，確實滿足日本AEC公布之 "Guidelines on Research and Development Relating to Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste in Japan" (AEC, 1997)所要求的研究主題，且其 (H12報告)執行成果，可作為後續研究工作的技術基礎。我國主管機關目前並無對應標準可供對比，若主管機關於2017年以前公告選址與處置設施之相關規範及標準，則將補充納入。</p>	
7 結論與未來發展	7 Conclusions and Future R&D Requirements
7.1 結論	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(2005~2017)」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報告之預定章節中的三大工作主軸(地質環境、處置設計與工程技術、安全評估)內容(表 2-1)，逐年規劃、推動並完成相關的研究/調查工作。103年度計畫規劃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報告中需證明日本存在合適的地質環境，以進行高放射性廢棄物地質處置。同時，也必須藉由現地深達1,000 m的量測與觀測工作，以獲取深地層中的地下水及岩層資料。此外，亦必須針對可能改變地質環境的自然現象，取得足以信賴之資訊，以證明日本存在某些區域不受這些自然現象所影響。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」所需調查評估技術的發展驗證，用以確認SNFD2017報告所需的「技術可行性」外，並參考日本H12報告的發展經驗，針對台灣地質環境取得評估「深層地質處置」條件的地質資訊，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)的資訊彙整研析與特性研究工作，做為整備SNFD2017報告所需之必要資訊；「地質環境」相關研究工作規劃，依SNFD2017報告預定章節(表 2-1)共可分為：(1)區域環境地質、(2)深層地質特性，以及(3)地質處置合適性研究等3大類。

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，及台灣三大潛在處置母岩(花崗岩、泥岩、中生代基盤岩)的地質環境特徵，作一初步的資訊彙整(台電公司，2010)。在此基礎上，本計畫參照日本H12報告架構，更新及彙整SNFD2017報告所需之台灣地質環境特徵資訊，目前於101年度完成離島花崗岩地區階段調查成果(1999-2012)彙編，繼而於102年度蒐集台灣東北地區地體構造架構之更新資訊，本計畫以這些獲致的更新內容，於103年度將進一步研析地體構造的時空演化，進行國內地質處置合適性研究及深層地質特性研究成果彙整，提供後續撰寫SNFD2014報告「台灣地質環境特徵」相關內容之依據。

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

地質圈(處置母岩及其地質環境)的特性，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，也會直接影響工程障壁的功能；若母岩性質不佳，將會縮短工程障壁的使用年限，處置安全也會受到影響。同樣地，地下水的流動特性與化學條件，除了會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，具有關鍵的影響性(JNC，2000)。

台灣花崗岩體主要分布在東部大南澳片岩帶中，以花崗片麻岩為主，在源頭山、大濁水(和平)、飯包尖山、溪畔及開南岡等岩體均有水力發電隧道、鐵公路交通隧道等數十年以上累積的工程技術經驗。這些工程累積了許多深層地質特性相關之工程地質資料，加上本計畫過去持續進行區域岩層與構造分布測勘，逐年建立探勘深地層岩性與構造空間分布的相關技術，如磁力、地層電阻等非破壞性探勘技術，可進一步累積本土花崗岩長期穩定性評估之資訊。

自99年度開始進行深層地質特性調查技術發展，至101年度已初步在和平地區獲得測試區岩層與構造分布資訊，透過針對和平花崗岩體所進行的一系列深層特性調查研究，顯示在花崗岩與大理岩交界處常因構造作用形成剪切帶，有可能成為地下水良好通道。就區域地質上，亦利用空中磁測三維逆推技術，獲致和平岩體深部與開南岡岩體相連，規模較地表出露為大，直徑達14 km，厚度達6 km，其核心岩體為地震相對安靜地區。

102年度繼續利用過去所建立之技術，以國內規劃或進行中的重大公共工程為技術測試對象，在其工程進行前，預先解析及評估隧道工程所可能面臨的地下岩性與構造分布特性，逐步蒐集有關此岩體之地表地質與地表地物調查資訊(如地表磁力、大地電磁等)，103年度擬綜合上述結果，針對開南岡岩體建構初步的地質與構造概念模式，以呈現岩層與主要構造帶分布等資訊，待後續年度公共工程完成後，透過預測與實際結果的比對，作為SNFD2017報告所需之技術可行性的驗證實例，以及後續技術精進的參考依據。

同時，103年度起擬加強解析東部其他岩體規模資料，規劃利用本計畫已建立的磁力資料解析流程，運用於東部其他岩體(如源頭山、飯包尖山及溪畔等岩體)，逐年擷取適當範圍之磁力資料，進行磁力三維逆推處理，以分析區域性地下岩體與構造分布，未來將提供SNFD2017年報告評估東部岩體規模與分布的重要資訊。

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。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(JNC, 2000)。然而，深層地下水的流動特性，不同地區均有其獨特的特性，且深層水文地質資訊普遍缺乏。因此，在處置場址未定之前，世界各國主要將心力集中於相關深層水文特性調查與資料解析技術的發展，以因應場址調查階段對掌握深層水文地質特性的需求。

有鑑於此，本計畫長期以來在離島花崗岩技術發展測試區，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，用以取得水力梯度、水力傳導係數、延散度、裂隙寬度等參數特性。考量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，103年度除規劃在離島花崗岩技術發展測試區，以多裂隙段封塞設備持續進行孔內裂隙水壓長期監測工作外，亦將進行水文地質數值模型建構技術之研究。

其中，孔內裂隙水壓長期監測工作主要根據過去離島深井量測的裂隙岩層地下水壓力資料進行分析，包括針對1號鑽井之裂隙及緻密岩層等不同水文地質單元的水力參數之分析，以提供水文地質數值模式建構之用；此外，亦進行區域性井下裂隙帶壓力的長期監測資料的解析，結合監測區域之南、北側建立2處微型水文氣候長期監測站取得的水文氣象資料，探討離島花崗岩體各深度裂隙壓力間在自然環境狀態下之長期變化趨勢，以供後續區域流場數值分析應用。

針對水文地質數值模型建構技術之研究工作，102年度進行現地調查/試驗資料的研析與評估，據此決定模型範圍，並根據試驗參數定義模型邊界條件與初始條件，103年度將利用美國Lawrence Berkeley國家實驗室發展的TOUGH2軟體，參考通過1號與6號鑽井的

剖面之現有調查資料，建立通過此一剖面之二維水文地質數值模型，以利在電腦平台解析並展示多年研究成果。

由於102年度已與國內相關科研計畫合作，針對花崗岩以外之岩層，進行水文地質調查技術之合作研究發展，初步已進行井群洗井作業，了解井況並協助驗證裂隙空間分布，在此基礎上擬於103年度開始進行沉積岩裂隙岩層導水裂隙之封塞水力試驗，藉此瞭解計畫過去於花崗岩區所建立之水文地質調查技術，是否也能運用於其他岩性之水文地質特性調查。

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，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。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，是潛在處置母岩安全評估中一項重要且基本的工作(JNC, 2000)。

代表性的深地層水質資料及詳細的礦物組成，是評估水文地球化學環境合適性的必要基本資訊，而地化模擬技術是探討水文地球化學環境的長期演化(穩定)特性的必要能力。透過歷年的技術發展成果，目前已成功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，並成功取得離島花崗岩的深地層裂隙水質資料，及其周圍的新鮮與風化岩樣的礦物組成資訊，雖然資訊數量有限，但在技術可行性的發展驗證階段，已可做為建立花崗岩質地化反應模擬技術的基礎。

考量SNFD2017報告所需之水文地球化學特性資訊與評估分析能力，101年度在地下水地球化學演化方面，已完成U、Se、Cu和Fe在

離島花崗岩水質條件下之Eh(pe)-pH穩定相圖繪製及溶解度模擬計算。102年度開始進行花崗岩質地化反應模擬技術研究與花崗岩之岩礦特性分析等2項工作。其中，在花崗岩質地化反應模擬技術研究方面，102年度進行國內外有關花崗岩質地化反應模擬之文獻資料的蒐集及研析，並選取合適的地化模式進行文獻案例之模擬測試；103年度將利用蒐集的國內深層特性調查所得之地質資訊(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，進行國內花崗岩質母岩案例之地化反應模擬，藉此探討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。另外，在花崗岩之岩礦特性分析方面，102年度已針對前期計畫所取得之本島花崗岩樣，進行岩石樣品之前處理工作(含岩石產狀、岩性與微視構造紀錄)及初步完成的主要元素全岩地化分析，103年度將持續進行岩相、全岩微量元素地化、礦物組成及鋁石鈾-鉛同位素定年等分析工作，透過系統化實驗分析工作，以取得後續地質演化模式與地化反應模擬之必要資訊。

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布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，並考量SNFD2017報告所需之核種傳輸路徑評估分析能力，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。此項工作於國內花崗岩區之試驗隧道中，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，並將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布，並根據設定的邊界條件及質量守恆原則，模擬出試驗母岩中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。

其次，101年度於本島花崗岩，經由鑽探與井下量測工作，已完成岩心井錄與地球物理標準井測，獲取本島花崗岩之岩性特徵、構造特性、不連續面類型、裂隙型態與角度，以及裂隙充填物等基本資訊。102年度繼續針對SNFD2017報告水文地質裂隙傳輸特性化參數所需，進一步進行岩心井錄、孔內攝影及地球物理井測之資料綜合解析，獲致孔內裂隙帶與鄰近地表露頭的地質構造特性、位態及空間分布等相關資訊。103年度擬將進行原岩心取樣鑽井附近代表性露頭之測線取樣，以取得地表裂隙量測之參數，並與井下裂隙參數整合後，完成和平花崗岩體之深井與地表裂隙特性化量測工作，提供後續水文地質概念模式必要之裂隙參數資訊。

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花崗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花崗岩樣之擴散實驗外，亦針對本島之花崗岩樣，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。103年度繼續針對離島花崗岩之完整岩塊與岩石薄片進行實驗工作，藉由更長的觀察時間來提高核種擴散係數的可靠度。此外，本島地質材料特性分

析與吸附特徵分析主要進行好氧環境實驗，同時輔以厭氧環境與部分之放射性示蹤劑實驗。

3.1.2.5 岩石特性

岩體的熱與力學性質是影響處置場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花崗岩樣，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 年度先進行岩石樣品之加工或前處理等作業，於 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)。此外，102 年度已於國內現有坑道，安裝裂隙變形監測設備，103 年度將整理裂隙兩側岩體相對位移之歷時資料，分析其是否有明顯的相對位移；若有，則分析其相對位移方位，作為後續取得裂隙變形資訊，用以評估岩體穩定性之參考依據。

其次，為瞭解膨潤土與岩塊之熱-力學交互影響關係，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花崗岩塊尺度的近場環境，進行兩年期熱-力學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-力學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-力學交互作用室內試驗，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，提供後續現地熱-力學試驗規劃及近場功能評估之參考依據。

3.1.3 地質處置合適性研究

在進行處置場址評選、處置設施功能安全評估時，各國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，故在進行處置場址評選、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場的影響性。

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年度將規劃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年度也將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年報告中，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，前期計畫已於本島花崗岩之特定岩體區域建置3站地震觀測站，並搭配國內研究單位的8個地震觀測站，組成一個涵蓋岩體區之近場觀測網，利用寬頻及靈敏之地震儀進行連續觀測，以完整記錄岩體及附近地區之微震與強震活動訊號。102年度持續進行現有花崗岩體地震觀測站的地震資料蒐集與處理外，亦在中央山脈山區增設4個地震觀測

站，針對山區微震提昇定位精度，103年度將綜合解析花崗岩體地震特性，以及大地電磁法獲致之電阻，利用電阻與震波併合成像技術解析地下岩層分布，以利綜合解釋此區地震叢集線型分布及斷層破裂機制，有助於瞭解區域性花崗岩體及圍岩，因地震或開挖行為對斷層構造活動的影響性。

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年度擬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。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年度將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，有助於本計畫於SNFD2017報告中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。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，已針對本島花崗岩體與其鄰近構造接觸帶分布區域，完成3處GPS連續觀測站(含副樁)與3組GPS定期觀測樁的建置，

自101年至今持續累積本島花崗岩體與其鄰近構造接觸帶的實際位移觀測數據。而102年度已增加1處GPS連續觀測站、4組GPS定期觀測樁及石質水準樁3組，103年度亦在不易設置監測樁的位置，額外增設3支鋼標樁，以增加監測點位的密度，組成更完善的GPS觀測網，迄今累積此區域花崗岩體及鄰近岩層之位移觀測數據，提供103年度進行GPS時間序列資料分析，獲取影響地表形態變化的綜合指標資訊，作為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年度將擴大蒐集區域性河階定年資料，提供後續地形演育之研析彙整，以期在累積足夠資料後針對不同潛在處置母岩的本土河階案例，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，103年度將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)，來探討台灣的剝蝕作用與剝蝕率，作為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，進而影響處置場之功能。

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年度開始針對本島花崗岩區域之代表性河道出海口沖積扇，製作近海至河道之數值地形模式(DEM)，用以辨識 10^4 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，以獲取此區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^2 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，並逐年蒐集此區域水文水理相關資訊。103年度擬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，以了解河口、海域萬年以來海進層序及地形演育的地質紀錄，提供後續建構水文地質概念模式之用。

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，以多層的障壁來阻滯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、廢棄物罐及緩衝回填材料(buffer and backfill)，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、芬蘭等以花崗岩為處置母岩的國家，研究結果顯示：花崗岩對於阻滯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。以我國區域的情況來看，天然障壁受先天環境的限制，可供選擇的地區非常有限，若以花崗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，以確保處置場之安全。

本分項處置設計與工程技術屬於現階段「功能安全評估技術建立」主軸之範疇，亦為「SNFD2017報告」中章節之一，103年度將進行「工程障壁系統概念與設計需求」、「處置概念影響因子探討」、「工程障壁的穩定性」等相關研究。

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

我國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2005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」(原能會，2005a)，依據上述法規之要求，我國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(buffer and backfilled material)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。

3.2.2 工程障壁系統與地質處置母岩的功能

花崗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花崗岩帶(Mesozoic Circum-Pacific Granitic Belt)的西緣，出露的中生代基盤岩中夾有許多花崗岩，考量到國際高放射性廢棄物處置技術發展至今，以花崗岩為處置母岩的技術最為成熟(如芬蘭、瑞典)，因此花崗岩為「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。

花崗岩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(SKB, 2009)。

處置場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(如花崗岩)作為處置母岩時，工程障壁在吸附核種以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場設計、母岩篩選條件等。處置場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、緩衝材料、回填材料等(紀立民，2002)，說明如後。

- (1) 用過核子燃料：我國運轉中之反應器共6部，4部為沸水式(BWR)，2部為壓水式(PWR)，正在興建中的核四廠為進步型沸水式反應器(ABWR)。BWR組件含8 ×8或9 ×9，10 ×10燃料棒，PWR為17 ×17燃料棒。我國用過核子燃料處置數量，目前暫以核一廠、核二廠、核三廠與核四廠運轉40年為參考處置概念基準(紀立民，2002)。
- (2) 廢棄物罐：在進入最終處置場前，我國中期貯存採用不鏽鋼製容器，而目前我國參考處置概念採用瑞典KBS3銅質外殼鑄鐵為內裡的廢棄物罐(SKB, 1999)參考設計。將我國用過核子燃料組件規格與瑞典比較，除我國BWR之燃料長度稍長外，其餘燃料組件尺寸規格與瑞典近似。因此單就廢棄物罐尺寸規格而言，暫不考慮廢棄物罐熱傳、腐蝕、應力等問題，將廢棄物罐之尺寸定為高491 cm，外徑105 cm，銅殼厚度5 cm，內裡為具有容納燃料組件空間之鑄鐵模。每個廢棄物罐放入12個BWR燃料組件或4個PWR燃料組件。
- (3) 緩衝材料：我國參考處置概念係使用純膨潤土做為緩衝材料，膨潤土之厚度取決於力學、化學、水文、熱力、氣體傳輸等性質與功能需求。例如膨潤土與廢棄物罐之交互影響、膨潤土之承載力、回脹力、水力傳導係數、阻滯核種傳輸之能力、導熱性等因素。參考瑞典SR97 (SKB, 1999)所提出之概念，為使廢棄物罐位於開挖擾動帶外，廢棄物罐頂部到處置隧道底部為2.5 m，考慮低水力傳導係數(hydraulic conductivity)及作業屏蔽，則廢棄物罐上方膨潤土厚度1.5 m。考慮所需之核種障壁與膨潤土支承廢棄物罐荷重功

能，設定底部膨潤土厚度為0.5 m。由於緩衝材料導熱性較圍岩差，較厚的緩衝材料將減少放入廢棄物罐中之用過核子燃料數量，基於此因素及整個處置時程需考慮維持廢棄物罐周圍的擴散障壁，設定廢棄物罐側向緩衝材料厚度為0.35 m，整個處置孔置放直徑為1.75 m，為廢棄物罐直徑與緩衝材料厚度之和，並須考慮置放所需膨潤土與廢棄物罐間隙，膨潤土與岩壁間隙。

- (4) 回填材料：參考處置概念之回填材料係以適當比例膨潤土與岩屑混合。從環境與經濟的觀點，為使用現地花崗岩岩屑，可以對處置場大量挖方產生之岩屑加以利用，以減少回填材料之需求成本，岩屑與適當比例之膨潤土混合後，可以填塞岩石顆粒間隙，強化阻止地下水流通之功能需求，且其回脹壓力能促使隧道壁穩定化。膨潤土與岩屑的級配關係、場址地下水流與地下水化學組成等有密切關係。瑞典SR97(SKB, 1999)選擇的回填材料是10~30%膨潤土與岩屑的混合物，經現地夯實後，預估其水力傳導係數不超過 $1.00E-10m/s$ ，與難透水圍岩之水力傳導係數近似。

我國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，基本概念概述如下：

- (1) 地表設施概念：參考處置概念之主要地表設施包括：交通設施、廢棄物接收處理廠、包封工廠、管理中心、豎井設施、緩衝/回填材料工廠、材料暫貯場、環境監測設施、公用設施、其他設施等。
- (2) 連通設施概念：參考處置概念暫以4條豎井作為地表與地下之聯繫。4條豎井區分不同用途，包括人員進出、物料與設備運輸、廢棄物運輸、通風、水電供應、緊急逃生等用途。4個豎井直徑均暫定為5 m。
- (3) 地下設施概念：參考處置概念之主要地下設施概念包括處置孔配置、處置隧道與處置區。

103年度工作以我國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，進行工程障壁系統之概念與設計需求規劃。

3.2.4 設計流程

我國深層地質處置場之設計流程必須是有系統的(systematic)、有結構的(structured)、反覆計算(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場。處置場設計工作架構包括設施設計、功能評估與場址特性調查，此為處置場發展的重要3項領域，彼此間必須緊密配合。設計工作本身由設計目標的建立，到設計功能與設計需求，及更詳盡的設計參數間。亦即欲達成設計目標的理念，必須由廣泛的設計參數資料加以配合。設計工作亦須配合設計準則、設計要求、設計假設的外部條件，在品質保證與品質管制下進行設計驗證，以落實設計成果。

3.2.5 影響處置概念的因子

深地層處置場之處置概念影響因子，其工作項目包含熱與輻射、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，為決定處置場設計之關鍵，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。處置母岩特性考量其力學性質、熱性質、水力特性、化學特性等，本研究利用已知之地質調查資訊，探討地質環境及母岩性質對處置場環境與工程設計之影響，以做為處置場地表設施及地下設施設計之參考。

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場設計、母岩篩選條件等。處置場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、緩衝材料、回填材料等組成，其功能分別為：

- (1) 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。
- (2) 緩衝材料：為防止地下水流入，維持穩定廢棄物罐，並遲滯核種傳輸。
- (3) 回填材料：處置場運轉完成後封閉之用，為防止人員進入與隧道支撐，利用回填材料回填所有開挖通道以防止成為地下水入侵管道，延遲處置場再飽和過程。

本研究依據國際間之處置概念需求以及考慮我國的地質環境條件，針對廢棄物罐之抗腐蝕性、力學性能、輻射屏蔽功能等需求，研擬適合我國處置概念之工程障壁之基本需求與設計需求。本研究可供SNFD2017報告中第4.6節有關工程障壁系統之相關內容。

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的分析與評估，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。規劃之工作項目如下列子節所述。本研究成果可供SNFD2017報告中第4.7節有關工程障壁的穩定性之相關內容。

3.2.7.1 處置場熱水化作用之初步分析

本計畫103年度將進行熱水化地下水流傳輸概念模式之建立與分析，建立近場裂隙之熱水化地下水流傳輸概念模式並進行初步分析，以利瞭解用過核子燃料最終處置場中熱水化之地下水流傳輸可能途徑與行為。並將進行熱水力理論模式之建立與分析，建立適用於岩體之熱水力孔彈性理論模式並進行初步分析，提供未來相關評估之基礎。

為建立熱水化地下水流傳輸數值模式，須先建立熱水化分析概念模式。本研究首先進行文獻與資料之蒐集、整理與分析，針對資料探

查可分為兩部分，第一部分為場址地表特性的初步探查，包括地表資料蒐集與分析，如地表高程、地表水文探查及遙測與航照影像判釋等資訊；第二部分為水文地質資料蒐集，包括岩性、處置場所在母岩之特性、破碎帶位置及特性、現地鑽孔岩心判釋等資訊。藉由資料之整合與分析，以獲得熱水化概念模式中地層岩性、結構以及各項水文、化學、熱力等特性，建立熱水化地下水流概念模式。

3.2.7.2 處置場開挖擾動帶之力學特性研究

地下處置場之周圍岩體會受處置隧道及處置坑開挖時產生之應力重新分佈，而在工程障壁安置完成且廢棄物罐安置後，處置場近場在一段長時間後將會發生緩衝材料膨脹、廢棄物罐本身重量使緩衝材料產生沉陷、廢棄物罐腐蝕物質產生膨脹造成的變形、及岩體重量產生的潛移。從安全評估的角度來看，評估工程障壁及處置母岩應力狀態之影響為一重要的議題。

根據日本H12報告進度報告中的Supporting Report 2的4.3.2節指出，地下處置隧道的近場穩定性分析內容，包含岩石潛變(creep)分析。本分項內容規劃有關岩石力學特性進行分析研究。在103年度將完成以下之工作內容：

- (1) 建立EDZ(Excavation disturbed zone)數值模擬技術
 - (a) 進行造成開挖擾動帶(簡稱EDZ)相關因子探討以及力學數值模擬EDZ技術之研究。
 - (b) 引進數值模擬技術。
- (2) 初步完成EDZ數值模擬案例分析
進行EDZ數值模擬相關案例之力學特性分析。

3.2.7.3 工程障壁熱力-力學穩定性研究

本階段研究主要內容為建構放射性廢棄物處置場模型。研究可分為二部份，第一階段為模式之建立。先收集且彙整相關研究資料，再根據其研究成果進行網格劃分、邊界及參數設定與敏感度等因子執行

程式之驗證動作。當分析結果與前人研究所得研究結果趨勢相當吻合時，即代表本研究所建立之模式可應用於往後之案例分析；若分析結果與前人研究之比較趨勢未符合理想，則應重新檢討其分析模式之正確性，重新建立並繼續相關之驗證動作。最後建立一套適合我國地質條件的處置場模型。第二階段為MX-80與日興土雙案例分析，將上述2種緩衝材料以第一階段所建立之模型分別進行案例分析，兩案例均採不同歷時分別對不同距離熱源(高放射性廢棄物罐)之觀測點，分析熱效應對於溫度變化之趨勢、應力分佈及位移趨勢等情形，並對所得之結果數據予以分析。103年度預定完成之工作項目如下：

- (1) 建立一套數值分析模式，基於處置坑道與處置孔垂直置放概念，模擬用過核子燃料處置場於深層岩體開挖與處置期間周圍岩體熱-力學行為作用下岩盤與工程障壁穩定性。
- (2) 分析處置場深層岩體與周圍工程障壁受用過核子燃料餘熱作用後產生之熱效應對力學性質之影響。
- (3) 探討不同緩衝材料之案例(MX-80及日興土)於處置場封閉階段時，緩衝材料因用過核子燃料罐熱源影響下其熱-力學行為分析。
- (4) 探討處置場在封閉階段時，處置場周圍岩體與工程障壁在熱效應影響下是否產生沉陷及位移作用。

本計畫以不同數值模型作為分析工具，日本H12報告中所採用之數值模型為有限元素法(FEM)以評估坑室之安全性，本計畫所採用之分工具為利用耦合FLAC3D與TOUGH2進行分析。FLAC3D為利用有限差分法(Finite Difference Method)之數值方法進行運算，可對土壤、岩體或工程結構物等做三維之力學模擬，亦可模擬岩體因溫度變化使其應力值發生改變之熱力-力學耦合關係。而TOUGH2亦是利用有限差分法進行運算，在工程上應用於多孔隙介質、裂隙介質、多相流之水流及溶質傳輸，並可改變模擬岩層溫度，以求得影響地下水文各種性質之熱力-水力耦合關係。而後利用上述2套軟體共通之溫度關係進行耦合，反覆疊代至收斂，以模擬用過核子燃料深層處置場之周圍岩體，於單孔處置坑與不同間距之雙孔處置坑兩種例形式中，在長

期歷時之不同時段、不同觀測距離與範圍，受廢棄物罐所引起之溫度場、應力場、位移及地下水文性質之關係及影響。

3.2.7.4 深層地下設施受震穩定性之研究

為保持工程障壁系統安置後之完整性，需考慮其受地震擾動時之穩定性，尤其是外包裝在慣性力作用下不可有明顯的位移，緩衝材料受地震應力下不致達到剪力破壞條件。

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，本計畫整合國內外地震研究發展，瞭解地震活動對地下設施之重要影響因子為基礎，分析台灣地區地震特性，獲得一個最有可能發生而且極可能造成嚴重災害的地震，推算其強地動參數。因目前學界所建議評估設計地震之架構，其對象為地表場址(自由場)，然而斷層產生錯動後，應力波向外傳遞到地表的過程中，因應力波能量守恆之故，故地表所承受到之地震強度將大於深層地層位置處，故所獲得深層地下設施位置之設計地震必須加以修正，以符合深層地下設施之實際狀況。為能適切瞭解設計地震歷時下深層地下設施之安全性，故使用數值方法將深層地下設施斷面建置成三維數值模型，分析其安全性。最後，配合其他子計畫所得之 10^5 年後研究區場址之升降參數，使用所建構之分析模式，進行深層地下設施覆土應力與地震強度雙重改變的情況下，深層地下設施安全性之情節分析。103年度預定完成之工作項目如下：

(1) 地表地震強度推估。以Deterministic model(定值式地震危害度分析)評估研究區鄰近斷層所能產生之最大規模地震，及其對場址所產生之地震強度，作為保守之設計地震歷時。

(2) 深層地下坑室設計地震歷時推估。配合其他子計畫所得之10萬年後研究區場址之上升/下降參數，推估屆時之覆土厚度，並將定值式地震設計地表加速度，修正至坑室所在深度應有之地震強度。

(3) 地下坑室於地震力下之動態分析。將前一年度計畫所建置之2D地下坑室數值模型，配合斷面圖，擴展成3D以進行分析。

(4) 地下坑室於地震力下之情節分析。此為兩年期計畫之階段性成果，配合其他子計畫之所得之相關參數，將之與上述第一年度與第二年度本子計畫之分析構件與模式進行整合，以3D地下坑室數值模型分析於設計地震力之情節下，進行坑室安全性之情節分析。

3.2.7.5 氣體遷移

深地層處置場之包封容器受地下環境之還原環境影響下造成腐蝕作用，進而產生氫氣，氫氣則假設一開始溶解於緩衝材料中之孔隙水中，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，因此有必要評估可能之氫氣生成量及遷移量。本年度先行探討處置場近場環境中，廢棄物包封容器氣體生成之成因及氣體遷移行為之探討，研究工作內容如下：

(1) 包封容器氣體生成成因

探討在處置場環境中，包封容器材料之受腐蝕作用生成氣體之成因，以及氣體特性之探討。

(2) 氣體擴散及傳輸行為探討

依據包封容器所生成之氣體，探討於地下環境中之擴散與傳輸行為。

3.2.7.6 膨潤土特性

在處置場的高熱環境下，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。當周遭水文與熱產生穩定平衡時，緩衝材料將重新飽和，此時緩衝材料需具有自癒能力以填補微裂隙。因此，常選擇黏土質材料作為緩衝材料。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。

膨潤土材料做為處置場緩衝材料或回填材料，其規格設計與膨潤土材料之來源、數量、處置場環境影響因子、處置場緩衝/回填材料設計需求有關，本研究分析國際間緩衝/回填材料設計方法與規格，瞭解各材料之基本特性、設計準則、設計完成之材料性能，以做為我國未來緩衝材料設計之參考。

3.2.8 建造/運轉/封閉技術

處置場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)。

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為之以減少開挖擾動。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，在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。此外，通風與排水亦為施工與運轉期間必備之重要措施。

處置場估計每年有處置100個廢棄物罐之效能，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。處置場地下設施在運轉期間之處置作業概念假定如下：

- (1) 廢棄物罐經由豎井電梯運抵500 m深的地下設施，由地下控管中心以遙控作業方式對廢棄物罐進行登錄與檢視。
- (2) 廢棄物罐視情況以軌道方式移轉到暫貯區域；或直接移轉到輪型運輸車輛上，直接送往處置區電腦指定的處置孔進行處置。
- (3) 處置孔預先完成底部與側壁緩衝材料之置放作業。
- (4) 運輸車輛將廢棄物罐運抵處置孔上方，定位後將廢棄物罐安置處置孔中。
- (5) 封填置入廢棄物罐之處置孔，並加蓋板防止膨潤土脹溢。
- (6) 處置坑道暫不回填，保留可回收之機制。

處置場完成全部用過核子燃料處置後，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須加以補強，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。

處置場之回填與封閉措施假定如下：

- (1) 逐次拆除運輸軌道與管線設備。
- (2) 各處置隧道以適當配比之膨潤土及岩屑所組成之回填材料分層夯實回填。
- (3) 回填時破碎帶以灌漿方式封阻或以混凝土封阻。
- (4) 處置隧道口以混凝土封阻。
- (5) 運轉隧道與連通設施(豎井)，以適當設計之回填措施與材料加以回填。

處置場完成封閉後，對處置場須進行觀察、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」。監管期結束後監管設施亦應清除，環境進行復育，處置區範圍設立永久標示。處置有關之資訊亦應提報主管機關、地方政府等相關單位參考保存。本節將於

未來之計畫研究內容將以SNFD2009基本處置概念為基礎，進行進一步探討建造/運轉/封閉技術之發展。

3.2.9 處置場營運管理技術

由於處置場開挖及運轉或者由於潛在的自然現象造成的地質環境變化，必須保持在基本的設計要求內，以確保處置場可維持長期的隔離性能及安全性。為確保處置場的設計需求之安全性，必須透過處置場管理進行驗證。本節將於未來之計畫研究內容中規劃相關處置場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)或是輻射危險度(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。

有關用過核子燃料處置的功能/安全評估，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，先後建立虛擬處置場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，及處置場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。並於民國98年完成「SNFD2009報告」之重要里程碑。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，103年度將進行「地質處置系統特性」、「變異情節」、「案例分析」、「不確定性分析」等相關研究。

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

用過核子燃料最終處置場的安全與否，係與場址的選擇、處置場系統的設計、工程障壁的功能與品質、以及處置母岩的地質構造條件等息息相關。而功能/安全評估的目的乃是將處置場的功能與安全性予以量化模擬，以佐證其能符合法規的安全要求與標準。

除了發展功能/安全評估所需的量化模擬技術外，功能/安全評估工作首需建立影響處置場核種外釋的情節分析技術，以做為評估比較的基準。情節分析主要在檢視可能影響處置場功能與安全的特徵、事件及作用(FEPs, Feature, Events, and Process)，經由各種FEPs的分析組合，架構極為可能在處置場安全年限期間發生的各種情節，並利用量化模擬技術評估這些情節發生時，所可能對處置場功能與安全所產生的影響。

為充分發揮近場阻絕功能，以及遠場遲滯之功能，俾有效延緩核種進入人類生活圈，進而降低其輻射危害，故2010~2017年間有關處置場之功能/安全評估技術的研發工作將依照SNFD2009報告審查委員建議強化本土化調查數據的應用，發展本土裂隙網路之核種傳輸分析，以及地震等變動情節下的功能安全分析工作。

3.3.2 安全評估方法

深層地質處置場之多重障壁可概分為天然障壁與人為的工程障壁2種，前者為利用穩定、質佳的深層地質母岩做為天然障壁，而後者則包含了廢棄物本體安定化、廢棄物罐、廢棄物罐周圍之緩衝材料、處置隧道之回填材料、隧道之封塞及裂隙缺口之灌漿等人為工程障壁。這些障壁的實際功能表現通常都是很難以實驗方式事先進行測量，絕大部分都必須在適當的假設條件下，以理論方式進行預測及評估，並將應用理論預估所得數值植入處置場封閉後的安全分析中。

在進行深層地質之多重障壁處置場全系統安全分析時，一般都根據傳輸途徑及傳輸機制之特性，將放射性核種從廢棄物本體內遷移至人體整個過程的分析，劃分為近場、遠場及生物圈等3類不同分析，

並分別建立不同分析技術與電腦程式。近場核種外釋率分析是負責評估放射性核種從廢棄物本體內遷移至處置坑周圍母岩的外釋速率。遠場核種傳輸速率分析則是負責評估放射性核種從處置坑周圍母岩遷移至地表含水層之外釋速率，而生物圈人體劑量率分析則負責評估放射性核種透過人類、動、植物各種活動及食物鏈所造成的人體劑量率。

欲對處置場全系統之安全評估進行有系統分析，乃針對近場、遠場及生物圈等3個子系統程式建立一套全系統評估程式架構，可以有系統的依序連結3個子系統程式，並處理評估程式之輸出、入介面問題。此外，也在全系統評估程式架構中建立參數取樣子系統程式及不確定性與參數敏感度分析子系統程式，使得此全系統評估程式可以對處置場全系統之安全分析進行機率式之評估，以瞭解處置場全系統安全分析結果之不確定範圍及各參數對安全分析結果之敏感程度，並將分析結果回饋給處置場設計人員及場址、參數之調查人員，做為調整未來工作方向之參考，國內相關法規亦規定處置場之安全分析必須進行不確定性與參數敏感度分析。

本計畫依據SNFD2009報告中之測試區研究現況建立虛擬處置場與核種外釋概念模式，分別就近場、遠場核種外釋率與生物圈人體劑量率建立評估程式與分析模組，及處置場全系統安全分析能力。已為我國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，並能進行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。

3.3.3 處置系統與功能

用過核子燃料深層地質處置的安全策略是利用多重障壁隔離(isolate)、遲滯(retard)放射性核種遷移進入人類活動的生物圈，其方式是將用過核子燃料放入高性能的金屬製廢棄物罐，廢棄物罐再放置於地下適當深度的穩定岩體中，並在廢棄物罐與圍岩之間以緩衝材料填充，處置橫坑、隧道、豎井及各類鑽孔則以回填材料與堵塞材料封塞。這些人工的圍阻措施稱為工程障壁，加上經適當選擇的岩體構成

之天然障壁，形成層層阻絕核種外釋的多重障壁系統(multiple barrier system；SKBF/KBS, 1983，SKB, 1999)。其確保用過核子燃料處置安全的策略是：若障壁的隔離功能失效，則利用其遲滯功能也能減緩放射性核種的外釋速度，使此等核種在到達人類生活環境之前，其放射性已衰變至無害的程度。

裂隙含水層水流及污染傳輸問題長久以來一直受到廣泛的重視，尤其是近年來重要的議題如長隧道開挖、用過核子燃料貯存場址選定與評估、二氧化碳地質封存、深層地熱替代能源等，均與裂隙含水層水流與污染傳輸特性息息相關。

岩層中的孔隙與裂隙是岩層中水體流動與污染傳輸計算的最小單元，當分析區域擴大時，以孔隙或裂隙尺度為基礎單元去分析水流與傳輸行為，除了大量的計算資源需求外，技術及經濟上都存在很大的困難性。為求技術上可行，以連續體的概念分析大區域裂隙水流與污染傳輸問題，成為目前重要的分析方法。岩層中的裂隙單元或裂隙群若以連續體（或等效參數）的概念分析，取得其間的升尺度特性及等效參數是相關分析的重要技術。

H12報告中核種傳輸模擬僅考慮一維徑向傳輸行為，未包含水流流場與力學分析、核種傳輸與化學反應模擬使用既有解析解模式。本研究特點是建立三維空間裂隙網格，針對母岩特性量化升尺度等效參數，進行大尺度分析時可以將等效參數使用於連續體傳輸模式。本研究之熱水化力學耦合模式發展可考慮地下水流流場、核種傳輸、化學反應以及力學與熱傳耦合問題，可以更合理描述傳輸物種在複雜場址條件下的傳輸行為。

103年度研究主要是透過數值模式分析，以裂隙統計結構作為裂隙描述方法，建立、測試與驗證離散裂隙與連續體升尺度參數分析技術。103年度主要工作項目為離散裂隙岩體水流模式參數升尺度技術開發，依據質量守恆基本概念，建立離散裂隙統計參數與升尺度等效參數間的關係，量化升尺度參數對水流模式分析之差異。相關成果有助於達成2017年「潛在處置母岩特性與調查階段」目標。

3.3.4 情節發展

情節發展的基本目的是要確保處置場未來可能的相關演變都已經過適當地考量，並協助確認影響處置場功能的關鍵課題。雖然情節發展不太可能建構出一個十全十美的情節，但評估者仍必須盡可能讓它完整，其中一個有效的方式是將執行過程所有內容予以文件化，並且公諸於各界，透過文件透明化及廣泛的討論，可促使資料不斷地修訂及更新，此方式除了可以確保情節的合理性、完整性外，亦可建立大眾對處置場安全之關鍵課題的一致看法。此外，情節發展和功能/安全評估一樣，必須隨著整個處置計畫的進展程度反覆地持續進行精進。

情節發展的首項步驟是確認所有可能改變處置場行為，以及影響處置系統功能與安全的所有因素，也就是必須建立完整的特徵、事件及作用報表，簡稱FEPs報表。本計畫先前成果，已彙整各國FEPs報表，成為特徵、事件及作用原始報表(FEPs source lists)，此原始報表經過重新分類、合併與篩選後，重新整合成適合我國處置計畫的特徵、事件及作用初始報表(FEPs initial lists)(莊文壽等，2001；吳禮浩等，2002)。

3.3.5 基本情節

情節是處置場設置後隨時間演化過程的描述，所謂地下水外釋情節是指未來一旦地下水入侵處置場，放射性核種將可能伴隨著地下水遷移進入地質圈再到生物圈，並對人類生活環境可能產生影響的說明。多重障壁系統是否能如預期發揮隔離或遲滯核種遷移的功能，必須經過嚴謹評估予以驗證，一般而言，利用地下水外釋情節進行處置場功能評估是主要的方法，建構地下水外釋情節必須瞭解處置場址的地質環境，以及地下水的化學與傳輸特性，同時對於工程障壁內的核種釋出機制與地化環境間之相互關係也必須清楚瞭解。評估情節的建構需要先瞭解工程障壁系統、地質圈及生物圈之水文情況、地質環境與地化條件，並考慮工程障壁系統的組成與功能設計、穩定岩體的地

質特徵及生物圈環境與關鍵群體等，以建立核種傳輸途徑。由於處置系統的組成與作用相當複雜，為了方便處置場功能評估的進行，首先要確認一個在基本條件下的地下水外釋情節，以作為其他變異情節的比較基礎。情節分析的第一步是基本情節(base scenario)的選擇，基本情節必須是高度合理的，基本情節是建構其它情節的參考點。本質上，基本情節是假設處置場是依據設計規格所建造，且外部條件仍然維持目前的環境(吳禮浩，2005)。在SNFD2009報告已發展建構基本情節，並據以建構虛擬場址核種外釋概念模式及案例的計算與分析(台電公司，2010)。

3.3.6 變異情節

在情節發展的步驟中，FEPs的分析工作必須確認那些因素如果發生，會對處置系統產生何種不同程度的重要影響，這些因素可稱之為機率性FEPs，其影響所造成處置系統的演變過程就是變異情節需要討論的範疇，變異情節依其發生原因可分成自然因素造成的現象和人為因素造成的現象2大類。(吳禮浩，2005)

如前述基本情節是建構其它變異情節(Variant Scenarios)的基礎，在SNFD2009報告已發展建構基本情節，故變異情節為現階段情節分析的要項。

評估自然現象對用過核子燃料最終地質處置的影響時，應考慮自然現象發生與變化的樣式，及區域性不同所造成的差異，並對處置環境、系統功能進行評估。目前世界上進行地質處置技術研究的國家，亦將具體地質環境條件或自然現象相關資訊的影響評估定為重要課題，並嘗試具體的探討與分析。舉例而言，日本H12報告(JNC, 2000)已於自然現象影響評估中，就一般地質環境為對象，探討地表抬升與剝蝕現象，影響處置場址深度變化之保守性的簡略方案，並提出影響評估的例證。另瑞典SKB針對Forsmark以及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。

日本H12報告已發展地下水情節(Groundwater Scenarios)之基本情節(Base Scenario)，及考慮自然現象對於處置系統的影響因素之擾動情節(Perturbation Scenarios)。SNFD2009報告已初步提出本土花崗岩虛擬處置概念之基本情節，在此基礎上，本分項比照H12報告，就台灣的特性因素進行變異情節分析，以符合106年提出SNFD2017報告之目標。規劃之工作項目如下列子節所述。

3.3.6.1 地表淹水因素分析及影響作用之研究

假設用過核子燃料最終處置場在受到地體抬升率與地表侵蝕率作用下，處置區上方覆蓋厚度逐漸減小，可能受到地表降水入侵及海平面上升等環境因素影響，使得用過核子燃料最終處置場直接遭受海水的淹沒入侵。

H12報告內容包含探討氣候變遷對降雨及海平面上升的影響，並評估降雨及海平面變異情形對地下水流況可能的影響。本研究與H12報告主要差異在於進一步模擬當海嘯發生時，海嘯波對研究區的影響。

本研究103年度主要進行的工作如後：

(1) 海嘯波對研究區沿岸地區造成海平面的變化趨勢

利用既有研究資料探討台灣臨近海嘯源模擬之參數資料及其影響範圍。使用COMCOT Model(Huang et al., 2009; Liu et al., 1998, 2009; Wang et al., 2006; Wu et al., 2009)來進行模擬海嘯的波高及溯升高度後，分析探討國內海嘯模擬結果，對於研究區沿岸可能影響的範圍及產生複合性災害的情形。

(2) 建立淹水模式的基礎網格

應用地理資訊系統軟體分析模組及其物件導向程式語言，藉由流向分析再配合研究區內數化之土壤圖、土地利用圖、道路系統圖等，進行套疊並劃分研究區，研究區劃分為若干格區。最後進行細小極狹長格區之合併及過大格區之再細分，完成研究區計算格區之格網劃分。

3.3.6.2 颱風豪雨引發土石災害對地表環境及設施影響之研究

台灣因地震或地形持續抬升而造成隆起、崩塌或是沈陷之地形變動，這些地形變動加上未來高強度極端型降雨影響下，將可能使得原本崩塌、土石流或其他複合型土砂災害之規模更為加劇。在此種地形水文環境變異及土砂災害發生頻率增加的情況下，土砂災害發生將可能對最終處置場地表設施產生毀損或破壞，對其安全性造成直接衝擊影響。

本研究主要為模擬環境變異後，土石流發生對相關地表設施可能造成影響之境況，103年度主要進行的工作如後：

(1) 不同變異境況下數值地形模型之建立

根據研究區所擬定可能環境變異境況，建立起研究區在不同變異境況下之數值地形，並進一步應用土石流數值模式進行後續分析。

(2) 不同變異境況下土石流規模及流動特性之模擬分析

根據土石流發生潛勢評估結果和可能降雨變異情況，進行不同規模之土石流流動特性模擬，並分析其土石流之流動性，如流動速度、最大堆積深度等。

(3) 探討土石流運動特性及其規模對研究區環境可能之衝擊

根據土石流流動模式模擬結果，分析探討不同土石流規模及運動特性情況下，對於研究區地表設施以及地下處置環境可能造成之衝擊影響。

3.3.6.3 地質演化作用與地震循環概念模型之研究

由於地震的發育和山脈的抬升皆和板塊運動所造成之構造有關，因此本研究將透過地質、地震及地表活動速率等3個因素對最終處置場之長期安全性影響進行研究。

H12報告內容包含長期的斷層活動、火山活動、地表抬升與侵蝕、地下水流變化分析、可能存在之破裂面分析及處置母岩地溫及力學性質分析。本研究分析潛在處置母岩地質環境演化作用內容大致上

與H12報告相似，主要差異在於台灣地區之潛在處置母岩環境並未座落於火山地區，因此將不討論火山活動之影響，同時加強對於先前存在不連續面再活動可能性之分析。

H12報告內容包含長期的斷層活動及長期地表抬升與侵蝕作用分析。本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。而大地震的發生會改變一地區之水平及垂直運動速率，也會誘發先前存在不連續面之再活動。

此外，分析大地震對潛在處置母岩地質模型短、中、長期之影響，本項目主要在於建立斷層模型方法，其為大地震對各目標分區地質模型地殼變形影響。建立斷層模型需考慮以下2個主要的變形行為：(1)由於斷層鎖定狀態(lock)導致彈性應變累積與；(2)大地震震後變形行為。在討論變形行為(1)時，依據彈性錯動理論(elastic dislocation theory)建立斷層模型；在討論變形行為(2)時，則採用黏彈性模型(viscoelastic model)。

地表升降潛勢的變化將使地下潛在處置母岩深度與大地應力發生變化，因上述潛在處置母岩環境的變化，103年度將分析探討(1)潛在處置母岩環境可能之位移及潛移可能性分析；(2)潛在處置母岩環境先前存在之不連續面之再活動可能性分析；(3)潛在處置母岩環境破裂面之分析；及(4)潛在處置母岩環境地表風化及侵蝕等作用分析。

3.3.6.4 地震對廢棄物罐破壞特性之系統分析

地震對最終處置設施的影響包括地震動與地震位移，前者屬波傳研究、後者則需考慮母岩中之斷層或裂隙受震在坑道等處產生錯位，地震位移則是對於最終處置之工程障壁-廢棄物罐與膨潤土障壁，最具有影響性。本項工作將以廢棄物罐為主體，建立各種破壞模式的強度資料，及模擬不同受震過程中廢棄物罐之反應，並依國外核能先進國家方式進行廢棄物罐之脆弱度分析，進一步提供廢棄物罐在地震事件的風險因子。

本工作內容與H12報告中因地震事件導致之廢棄物罐封閉性不足、隧道回填或填塞缺損造成核種外釋有關，將可對地震變異情節提供說明，提供核種外釋評估的背景資料。

本項目將建立廢棄物罐長期受震之邊界能力分析技術，包括廢棄物罐受震反應分析、與動態強度評估兩個方向。廢棄物罐的變異情節推演，可能在一次強烈地震時破損、亦可能經過無數中小地震後破損，而其外力來源均是邊界條件的變化。103年度主要進行的工作如後：

(1) 廢棄物罐地震分析模型

變異情節為因地震而持續改變的母岩變位與膨潤土圍壓，將於此階段完成設定方法研究，建立廢棄物罐地震分析模型。

(2) 受震反應分析

邊界條件參數變化對受震反應影響分析。

(3) 廢棄物罐之模擬

依據我國處置概念所設計之廢棄物罐為模擬對象，建立ANSYS分析模型。並製做縮尺試體進行軸力、剪力、彎矩測試，作為數值模型比對依據。

(4) 極限狀態模擬預測

進行非線性應力分析，預測廢棄物罐極限狀態。

3.3.7 安全案例分析

本計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段將完成建立潛在處置母岩功能/安全評估技術，在SNFD2009報告中已依據測試區研究現況建立虛擬處置場與核種外釋概念模式，分別就近場、遠場核種外釋率與生物圈人體劑量率建立評估程式與分析模組，及處置場全系統安全分析能力。此外，也在全系統評估程式架構中建立參數取樣子系統程式及不確定性與參數敏感度分析子系統程式，使得此全系統評估程式可以對處置場全系統之安全分析進行機率式評估，以瞭解處置場全系統安全分析結果之不確定範圍及各參數對安全分析結果之敏感程

度，並將分析結果回饋給處置場設計人員及場址、參數之調查人員，做為調整未來工作方向參考，國內的相關法規亦規定處置場之安全分析必須進行不確定性與參數敏感度分析。

本階段將依據虛擬處置場場址安全評估概念模型與變異情節，整合近場、遠場安全評估及生物圈人體輻射劑量率評估等，進行用過核子燃料深層地質處置場之全系統評估。評估所需數據依序採用測試區調查所得之現地資料、實驗研究資料與國外文獻適用數據或合理假設之參考值等。

3.3.7.1 所需核種特性相關參數之評估研究

用過核子燃料與其他廢棄物最大的差異，就是其「源項」為許多不同半化期的放射性核種，在進行處置後，這些核種釋放的衰變熱會造成處置設施周圍環境溫度上升，造成處置設施近場環境的應力，並影響地下水流、水化學等特性，此因衰變熱造成熱水力化(THMC)耦合行為，使得處置設施的安全評估更為複雜及困難；而這些放射性核種若外釋並遷移至人類生活圈，對人類所造成潛在輻射危害，其嚴重程度遠高於其他有害廢棄物造成之影響。因此，本工作將進行功能/安全評估之核種相關參數模擬評估研究，應用於我國功能/安全評估分析應用的核種相關參數輸入資料。

本研究與H12報告之差異為(1)H12報告以舊版ORIGEN2.1程式計算玻璃固化體經處置1000年後之核種與穩定同位素的盤存量，本研究內容擬以新版ORIGEN-ARP程式計算我國核電廠爐心輻射物質盤存量；(2)H12報告是考慮玻璃固化體之核種溶解度，本研究則是蒐集用過核子燃料本體，兩者不同；(3)H12報告遠場核種相關參數來自日本國內研究單位室內實驗，及國際合作所獲得的資料，本研究除了蒐集參考日本的參數資料外，也同時蒐集分析國際相關研究單位的遠場核種參數，配合我國現場調查之水文地質地球化學等資料進行數據蒐集與研析；(4)H12報告是採用ICRP26號報告的核種劑量轉換因數，本研究則蒐集ICRP60及新出版之103號報告核種劑量轉換因數資料。

103年度工作內容為(1)以ORIGEN-ARP程式計算我國核電廠爐心輻射物質盤存量；(2)近場用過核子燃料本體的核種溶解度等釋出參數；(3)核種與母岩，及裂隙衍生礦物之分配係數、擴散係數，及遲滯因數蒐集與分析；(4)ICRP60及103號報告核種劑量轉換因數蒐集與分析。

3.3.7.2 參數不確定性分析

虛擬處置場與核種外釋概念模式，分別就近場、遠場核種外釋率與生物圈人體劑量率建立評估程式與分析模組，及處置場全系統安全分析能力。欲建立一套全系統評估程式架構，可以有系統的依序連結近場、遠場及生物圈3個子系統程式，並處理其間輸出、入的介面問題，對處置場全系統之安全評估進行有系統分析。瞭解處置場全系統安全分析結果之不確定範圍及各參數對安全分析結果之敏感程度，可提供全系統評估程式架構中建立不確定性與參數敏感度分析技術與參數取樣系統程式之選擇方法，使得全系統評估程式可以對處置場全系統之安全分析進行機率式評估，最後將分析結果回饋給處置場設計人員及場址、參數之調查人員，做為調整未來工作方向參考。

H12報告中介紹了日本地質環境特性、容器設計、工程技術與安全評估方法，並考量概念處置系統的範圍，包含不同地質、表面環境與容器設計，進一步考慮各種不確定性來源在系統表現上的影響。此報告評估蒙地卡羅模擬(Monte-Carlo simulations)和決定性分析(deterministic analyses)後，採用後者搭配不同綜合情境(隔離失敗情境與地下水情境)進行分析，此外報告也考量資料和模式的不確定性，進行系統安全功能評估。

本項內容主要差異在於，過去學者於2000年H12報告研究成果中，評估不確定性方法較少，而本研究將延續歸納近年相關學者研究結果，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，更可進一步應用於各項學研子計畫之中。因此，103年度將先蒐集並研讀近

年來國內外不確定性分析、敏感度分析之文獻與報告，旨在詳細了解前人研究方法與成果，比較各種不同之分析方法，並應用於總計畫的安全功能評估，以供後續計畫研究參考。

3.3.8 安全評估的可信度

我國用過核子燃料最終處置工作自民國75年起開始積極推動，迄今(民國103年)已歷經28年。期間劃分為不同階段進行處置前期之研發工作，包括處置概念初步研發階段(1986年05月~1988年06月)、初期工作規劃階段(1988年11月~1991年06月)、區域調查技術準備階段(1993年08月~1998年10月)、調查實施與技術發展階段(1999年05月~2003年09月)、潛在處置母岩特性調查與評估階段(2005年~2017年)等。上述期間處置功能/安全評估技術發展均為重點工作之一。歷經多年來的發展，102年度計畫已完成階段性功能與安全評估成果彙編，具有溫故知新與鑒往知來的意涵，以及整合既有的技術成果與創造新的應用價值之效益，以作為後續研發規劃之參考應用。報告成果可以提供經驗傳承、計畫規劃、公眾溝通等不同面向之參考應用，並增進公眾對於安全評估技術的信心。

3.3.8.1 天然類比研究

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。本研究參考本計畫過去的研究成果及國際間目前天然類比之發展現況，針對處置場類似工程障壁材料之天然類比資訊分析，分析工程障壁元件於長時間尺度下之演變，以做為未來安全評估分析結果之佐證資訊，以供未來工程障壁設計與安全評估之參考。本年度之研究內容主要針對過去SNFD計畫成果為基礎，針對目前關於處置場工程障壁材料相關之天然類比資訊整理，以期後續天然類比資訊整理與更新。

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，且至目前為止，國際上尚未有最終處置場啟用之案例，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。

台電公司自民國95年行政院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2017年提出我國用過核子燃料最終處置技術可行性報告（簡稱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進行同儕審查。

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(2005~2017年)，預定於民國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(SNFD2017報告)」之階段目標。該技術可行性評估報告，將確立國內離島及本島花崗岩是否為合適潛在處置母岩，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、安全評估等三大工作主軸，提報103年度之工作計畫，其預期成果及效益彙整如表 4-1所示。依規劃完成103年度各項工作時，除依法提報103年度成果報告外，亦將比照SNFD2017年報告架構，完成2010~2014年回顧報告，提供「用過核子燃料最終處置計畫書2014年版」修訂之參考。

表 4-1：預期成果及效益

預期研究成果	預期效益	對應SNFD2017之章節
地質環境		3 地質環境
區域環境地質		3.1 區域環境地質
逐年更新台灣三大潛在處置母岩之地質環境資訊。	提供撰寫SNFD2014報告之「台灣地質環境特徵」相關內容，並作為SNFD2017報告之基礎。	
深層地質特性(地質圈特性)		3.2 深層地質特性
完成磁力與地電探勘之測點規劃與現調工作，據以建構開南岡岩體初步地質與構造概念模式。	提供磁力與地電綜合解析地下岩體與構造分布特性，作為後續技術發展之參考依據。	3.2.1 地質圈特性對多重障壁概念的重要性
深層地質特性(水文地質)		3.2.2 水文地質
取得離島花崗岩測試區之裂隙水壓長期變化趨勢，據以進行資料分析與解釋。	作為後續修正地下地質概念模式，以及進行區域流場分析之參考依據。	
建立水文地質數值模型建構技術。	作為後續建構水文地質數值模型之基礎。	
取得本島其他岩性的水文地質現有調查資料。	作為裂隙沉積岩層水文地質特性之參考依據。	
深層地質特性(水文地球化學)		3.2.3 水文地球化學
建立花崗岩質地化反應模擬技術。	作為後續探討花崗岩深層地下水長期演化特性，及建構水文地球化學概念模式之基礎。	
完成本島花崗岩岩樣之岩相分析、全岩地化組成、礦物組成與定年分析數據。	提供後續探討地質演化模式，及地化反應模擬之必要資訊。	
深層地質特性(核種傳輸路徑)		3.2.4 核種傳輸路徑

建構技術發展測試岩體之離散網路結構，並取得岩體中的裂隙參數及特性。	作為後續建立離散裂隙網路地下水流場數值模式之基礎。	
完成本島花崗岩現有井錄資料之綜合解析，並取得其裂隙分布與特性等資訊。	作為後續評估岩體特性或規劃調查工作之參考依據。	
建立本島花崗岩之核種傳輸試驗，以取得核種在此岩體中的吸附與擴散參數。	作為後續探討核種在岩體中傳輸行為之參考依據。	
深層地質特性(岩石特性)		3.2.5 岩石特性
完成本島花崗岩一般物理性質、熱特性及力學等試驗之量測數據。	取得本島花崗岩之物理性質、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。	
建立坑道面裂隙變形監測所需技術。	作為後續取得裂隙變形資訊，用以評估岩體穩定性之參考依據。	
完成膨潤土與岩塊熱-力學室內試驗。	作為後續現地熱-力學試驗規劃及近場功能評估之參考依據。	
地質處置合適性研究(台灣的大地構造)		3.3 地質處置合適性研究 3.3.2 台灣的大地構造架構
完成台灣大地構造架構及演化，以及火山活動特性等資料的蒐集與回顧。	提供後續資料研析，作為地質處置合適性評估之參考依據。	
建立推估斷層發育衍生之地震叢集資訊分析技術。	作為後續岩體穩定性評估與斷層活動特性調查所需技術。	
瞭解在破裂含水層中地下水水氫現地揮發逸散的物理化學機制。	作為後續探討地下水水氫震前行為與地震活動關係之基礎。	
地質處置合適性研究(抬升與沉陷作用)		3.3.3 抬升與沉陷作用
完成GPS連續觀測站與定期觀測樁之增建，並持續現有觀測站的維護與觀測資料處理。	提供後續GPS時間序列資料分析，藉以獲取影響地表形態變化之指標資訊，作為評估岩體地質穩定性之參考依據。	

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。	
地質處置合適性研究(氣候與海平面變遷)		3.3.4 氣候與海平面變遷
作為後續製作其數值地形模式之基礎，藉以獲得此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。	
處置設計與工程技術		第4章 處置設計與工程技術
影響處置概念的因子		4.5 影響處置概念的因子
以現有之地質調查資訊，分析地質環境對處置場之影響因子，如母岩裂隙及斷層分布、地下水流、岩體應力等條件。	考慮我國地質環境條件與處置概念，探討地質環境及母岩性質對處置場環境與工程設計之影響，以做為處置場地表設施及地下設施設計之參考。	
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
針對廢棄物罐之抗腐蝕性、力學性能、輻射屏蔽功能等需求，研擬適合我國處置概念之工程障壁之基本需求與設計需求。	以我國參考處置概念為基礎，研擬廢棄物罐之設計需求。	
工程障壁穩定性		4.7 工程障壁的穩定性
發展工程障壁穩定性分析技術，包含工	以我國參考處置概念為基礎，發展初步	

程障壁於再飽合後之性能、長期力學穩定性與受震穩定性、氣體遷移及緩衝材料特性等分析。	近場裂隙之熱水化地下水流傳輸概念模式、開挖擾動帶力學特性分析、處置場工程障壁力學穩定性分析技術、受震分析技術。並探討工程障壁中，氣體生成之成因，以及各國緩衝材料之設計之方法與準則，做為我國未來緩衝材設計之參考。	
安全評估		第5章 安全評估
處置系統與功能		5.3 處置系統與功能
發展離散裂隙網路生成模組，以裂隙統計結構為基礎開發、測試及驗證離散裂隙網路生成模組。	建立複雜離散裂隙網格，可模擬裂隙岩層離散裂隙小尺度地下水水流與核種傳輸。	
變異情節		5.6 變異情節
台灣近岸可能發生較大地震之隱沒帶所引發海嘯之海嘯波傳遞情形及沿岸波高。	海嘯波對研究區沿岸地區造成海平面的變化趨勢。	5.6.2.1 洪水情節發展
完成研究區內之崩塌及土石流潛勢區之分析及土砂災害情節模型。	了解研究區內之歷史環境變遷特性及災害情況。評估研究區內之土砂災害發生潛勢。	5.6.2.1 洪水情節發展
完成潛在處置母岩地質環境演化作用分析。	可獲得研究區相關地質環境演化因素之影響。	5.6.2.2 地震情節發展
完成大地震對潛在處置母岩地質模型短、中、長期之影響。	可瞭解大地震對研究區之地質模型地殼變形影響。	5.6.2.1 洪水情節發展 5.6.2.2 地震情節發展
完成廢棄物罐地震分析模型、受震反應分析、廢棄物罐之模擬及極限狀態模擬預測。	獲得廢棄物罐分析模型及地震設計參數，提供未來本土化設計及審查所需，展示廢棄物罐地震性能，提供安全資	5.6.2.2 地震情節發展

	訊，建立廢棄物罐在地震事件的風險因子，提供上下游研究之連結橋樑。	
安全案例分析		5.7 安全案例分析
完成我國用過核子燃料的核種盤存量分析、關鍵性核種釋出參數分析、關鍵性核種與母岩、裂隙衍生礦物之核種遷移參數分析與ICRP報告核種劑量轉換因數資料分析。	建立ORIGEN_ARP電腦程式計算核種存量之技術，以及核種之危害度參數，作為安全評估之源項依據。分析國際相關研究單位的近、遠場核種參數資料，及ICRP報告之核種劑量轉換因數，提供安全評估使用。	5.7.2.1 基本情節案例分析
完成不確定性與參數敏感度分析技術之評析。完成功能安全評估不確定性與敏感度分析之評析。	瞭解處置場全系統安全分析結果之不確定範圍及各參數對安全分析結果之敏感程度。提供全系統評估程式架構中建立不確定性與參數敏感度分析技術。	5.7.3.2 參數不確定性分析
安全評估的可信度		5.8 安全評估的可信度
完成SNFD計畫過去工程障壁天然類比資訊整理。	以過去研究成果為基礎，進行現有資訊整理，以期後續工程障壁天然類比資訊分析與更新。	5.8.2 天然類比研究
國際同儕審查規劃		
國際同儕審查	確保研究技術及報告品質皆與國際同步外，亦為增加民眾的接受度並提升公信力。	
2010-2014年回顧		
彙整與回顧2010-2014研究成果	提出2010-2013年研究成果報告，作為SNFD2014報告撰寫之依據及提供用過核子燃料最終處置計畫書2014年修訂之參考	

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、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)。
- 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。
- 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。
- 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。
- Huang, Z., T.-R. Wu, S. K. Tan, K. Megawati, F. Shaw, X. Liu, T.-C. Pan, 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, 2009.
- 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., Tsunami hazard and early warning system in South China Sea, *Journal of Asian Earth Sciences*, 2-12, 2009.

- Wang, X. and L. F. Liu, An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami, *Journal of Hydraulic Research*, 1-8, 2006
- Wang, X. and L. F. Liu, Preliminary Study of Possible Tsunami Hazards in Taiwan Region, *Cornell University*, 2006.
- Wu, T.-R., H.-C. Huang, Modeling tsunami hazards from Manila trench to Taiwan, *Journal of Asian Earth Sciences*, 21-28, 2009.