

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
101年度工作計畫

台灣電力公司

中華民國一〇〇年十二月

101年度工作計畫

目錄

	頁次
目錄.....	i
表目錄.....	ii
1. 概述.....	1-1
2. 計畫規劃.....	2-1
3. 規劃工作事項.....	3-1
3.1 處置環境條件的調查研究.....	3-1
3.1.1 區域環境地質.....	3-1
3.1.2 深層地質特性.....	3-2
3.1.3 地質處置合適性研究.....	3-3
3.1.4 地質處置環境穩定性研究.....	3-4
3.2 處置技術的研究發展.....	3-5
3.2.1 岩塊熱效應試驗.....	3-5
3.2.2 地質實驗室特性調查技術發展.....	3-6
3.2.3 實驗室岩體核種遷移與傳輸試驗.....	3-7
3.2.4 近場緩衝回填材料特性之研究.....	3-7
3.3 用過核子燃料處置的功能評估.....	3-8
3.3.1 最終處置概念模式與變異情節之研究.....	3-8
3.3.2 近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之研究.....	3-10
3.3.3 功能與安全評估發展歷年研究成果彙編.....	3-11
4. 預期成果分析.....	4-1

表目錄

	頁次
表 2-1：「2017年我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」預定章節	2-3
表 4-1：預期成果及效益	4-2
表 4-2：99~101年度工作規劃、預期成果及效益	4-4

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、三廠的六部核能機組，加上目前正在進行的龍門計畫(龍門電廠)，最近的將來還會有二部機組加入運轉發電。其中，核一、二廠四座機組為沸水式，核三廠兩座機組為壓水式，龍門電廠兩部則為進步型沸水式反應器。預估此四座核能電廠的八部機組運轉40年將會產生約7,350公噸鈾的用過核子燃料，若運轉至60年將會產生約10,186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，審慎尋找適當的處置方式，一直是核能技術發展的重點之一。

用過核子燃料最終處置的基本要求是選擇適當的環境，將用過核子燃料永久安置，使其與人類生活圈隔離，以確保民眾安全及環境品質，促進非核害環境的永續發展。海床處置、深孔處置、冰層處置、井注處置、太空處置、及深層地質處置是幾種曾被各國考慮的處置方案。上述這些方案經過國際間多年的研究後，一般咸認「深層地質處置」是較為可行的一種處置方式。而所謂的「深層地質處置」係採用「多重障壁」的概念，利用深部岩層的隔離阻絕特性，將用過核子燃料埋存在深約300至1000公尺的地下岩層中，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。

目前，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(2010年修訂版)」(以下簡稱2010年修訂版)之擬定時程，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。依據

「2010年修訂版」之規劃，2005~2017年為「潛在處置母岩特性與調查評估」階段。此階段任務的兩個重要里程碑為於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」（以下簡稱SNFD2009報告），以及於民國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(以下簡稱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，於民國98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，於民國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，據以完成「2010年修訂版」，作為後續工作計畫推動之長程規劃依據。

在過去幾年中，台灣電力公司將潛在母岩特性調查技術之發展重點，集中於離島花崗岩體測試區之處置技術發展，期能透過各項技術的整合性驗證，取得關鍵技術的能力與成果，以及測試區的地質特性參數、構造及建構初步地質概念模式，供功能安全評估技術發展應用，以完備現地調查至功能評估的整體作業流程。總計在離島測試區完成約500點地表重/磁力探測、16 km地電組剖面探測、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，建構出離島測試區初步地質概念模式。

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，根據最新研究顯示有可能已逐漸邁入相對穩定地塊條件，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，並引入熱-水-力-化特性調查研究，進行各項特性

擴尺度效應探討研究，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。

本計畫後續工作規劃係以SNFD2009報告為基礎，持續進行本島花崗岩處置母岩特性調查，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，準時於民國106年底提出「SNFD2017報告」。目前擬訂SNFD2017報告的目標，包括下列三項主要議題：(1)能否找到合適的花崗岩進行地質處置；(2)地質處置技術能力是否完備；(3)地質處置設施長期安全性之評估。此報告中將確認(1)我國是否有合適處置母岩，(2)我國是否已齊備關鍵處置技術。為達成此任務，本計畫需逐步完成我國花崗岩潛在母岩特性的調查與評估、建置深層花崗岩地質概念模式，以及本土化變異情節之功能安全評估技術的研發，作為撰寫SNFD2017報告的重要參考依據。

2. 計畫規劃

目前本計畫於「潛在處置母岩特性調查與評估」階段(2005~2017)，乃根據「用過核子燃料最終處置計畫書」近程工作之規劃，分成「處置環境條件的調查研究」、「處置技術的研究發展」及「功能安全評估技術建立」等三大主軸推動相關的研究發展工作，於潛在處置母岩特性調查與評估階段完成時，根據本土環境之數據，進行最終處置技術可行性綜合評估，於民國106年提出「SNFD2017報告」；該報告將依據未來數年內調查評估成果試圖提出國內適合最終處置場候選場址建議調查區域，並依據調查成果評估處置關鍵技術發展之可行性，作為最終處置計畫下階段工作規劃之基礎。

目前擬訂SNFD2017報告的目標，包括下列三項主要議題：(1)能否找到合適的花崗岩進行地質處置；(2)地質處置技術能力是否完備；(3)地質處置設施長期安全性之評估。有鑑於我國與日本的地質環境相近，日本於平成12年完成「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—」(以下簡稱H12報告)，為日本核廢料處置長期投入大量資源所累積之經驗與成果，其目標、章節架構及研究發展要項等，有助於檢驗我國現階段處置技術發展情形，並釐清後續技術發展方向。參照日本於2000年完成之H12英文版報告(H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan)之章節架構，擬定SNFD2017年報告章節如表 2-1所示。

為達成2017年目標，本計畫短期整體工作規劃(~2013)為：完成地質實驗室建置及坑道周遭岩體構造測繪工作，以作為後續地質實驗室各項技術研發及配置的基本底圖，進行地質鑽孔之調查研究，以及空中磁測成果驗證探測調查工作與近場系統整合研究之熱水力耦合模擬技術之發展。中期整體工作規劃(~2015)為：進行花崗岩穩定性調查研究，規劃於東部花崗岩體地區進行地震儀陣列監測與GPS長期

監測工作；並進行花崗岩深層特性調查與技術驗證、洪水/地震情節評估技術之發展。於長期整體工作規劃(~2017)為：進行花崗岩體穩定性之驗證與變異情節功能安全評估技術發展工作；並完成國內處置技術可行性評估報告。

針對短期整體工作規劃目標，擬訂99~101年度之工作項目及內容包括：

- (1) 處置環境條件的調查研究：
 - (A) 區域環境地質
 - (B) 深層地質特性
 - (C) 地質處置合適性研究
 - (D) 地質處置環境穩定性研究
- (2) 處置技術的研究發展：
 - (A) 岩塊熱傳試驗
 - (B) 地質實驗室特性調查技術發展
 - (C) 實驗室岩體核種遷移與傳輸試驗
 - (D) 近場緩衝回填材料特性之研究
- (3) 用過核子燃料最終處置的功能評估：
 - (A) 最終處置概念模式與變異情節之研究
 - (B) 近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之研究
 - (C) 功能與安全評估發展歷年研究成果彙編

綜上所述，在民國106年提出「SNFD2017報告」之長期目標下，本計畫將配合短期、中期及長期整體工作規劃來執行。而自100年度起，本計畫將依據短期整體工作規劃目標，逐漸進行上揭各項工作，其執行方式擬依處置環境條件的調查研究、處置技術的研究發展及用過核子燃料最終處置的功能評估等三項說明於第3章。

表 2-1：「2017年我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」預定章節

1、台灣用過核子燃料管理策略與處置計畫
1.1. 緣起
1.2. 管理
1.3. 執行策略
2、處置系統與安全概念
2.1. 各國處置系統概念概述
2.2. 我國處置系統概念概述
2.3. 安全案例概述
3、地質環境
3.1. 區域環境地質
3.1.1. 地質圈對用過核子燃料地質處置的重要性
3.1.2. 台灣地質環境特徵
3.2. 深層地質特性
3.2.1. 地質圈特性對多重障壁概念的重要性
3.2.2. 水文地質
3.2.3. 水文地球化學
3.2.4. 核種傳輸路徑
3.2.5. 岩石特性
3.3. 地質處置合適性研究
3.3.1. 台灣用過核子燃料地質處置之地質環境
3.3.2. 台灣的大地構造
3.3.3. 抬升與沉陷作用
3.3.4. 氣候與海平面變遷
3.4. 結論
4、處置設計與工程技術
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
4.2. 工程障壁系統與地質處置母岩的功能

- 4.3. 整體處置概念
 - 4.3.1. 工程障壁系統
 - 4.3.2. 處置設施
- 4.4. 設計流程
- 4.5. 影響處置概念的因子
 - 4.5.1. 熱與輻射
 - 4.5.2. 地質與地形條件
 - 4.5.3. 處置母岩特性
 - 4.5.4. 處置深度
- 4.6. 工程障壁系統及處置設施的設計需求
 - 4.6.1. 廢棄物罐
 - 4.6.2. 緩衝材料
 - 4.6.3. 工程障壁系統
 - 4.6.4. 地下設施
 - 4.6.5. 回填材料
 - 4.6.6. 處置場設計
- 4.7. 工程障壁的穩定性
 - 4.7.1. 再飽和特性
 - 4.7.2. 力學穩定特性
 - 4.7.3. 受震穩定性
 - 4.7.4. 氣體遷移
 - 4.7.5. 膨潤土特性
- 4.8. 建造/運轉/封閉技術
 - 4.8.1. 建造階段
 - 4.8.2. 運轉階段
 - 4.8.3. 封閉階段
- 4.9. 處置場營運管理技術

5、安全評估

- 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

- 5.2. 安全評估方法
 - 5.2.1. 相關法規
 - 5.2.2. 安全評估案例的建置方法
 - 5.2.3. 模式建構
 - 5.2.4. 安全評估可信度
- 5.3. 處置系統與功能
 - 5.3.1. 處置系統特性
 - 5.3.2. 處置系統功能
- 5.4. 情節發展
 - 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
 - 5.4.3. 情節分析之定義
- 5.5. 基本情節
 - 5.5.1. 基本情節定義
 - 5.5.2. 基本情節的工程障壁系統
 - 5.5.3. 基本情節的地質環境
 - 5.5.4. 基本情節的生物圈
- 5.6. 變異情節
 - 5.6.1. 變異情節定義
 - 5.6.2. 變異情節分析
- 5.7. 安全案例分析
 - 5.7.1. 定義
 - 5.7.2. 案例分析
 - 5.7.3. 不確定性分析
 - 5.7.4. 比較各國安全標準
- 5.8. 安全評估的可信度
 - 5.8.1. 情節、模式、模組及資料庫的建置
 - 5.8.2. 天然類比研究
 - 5.8.3. 評估報告比較

5.9. 結論

6、選址技術與安全標準

本章節內容主要在說明：H12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)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。

7、結論與未來發展

7.1. 結論

7.2. 未來發展

3. 規劃工作事項

依據第2章99~101年規劃之工作項目，配合本計畫民國106年目標需要，就處置環境條件調查研究、處置技術的研究發展及用過核子燃料處置之功能評估短期所需之技術發展，分別規劃本年度(101年)需展開之研究工作，說明於后。

3.1 處置環境條件的調查研究

處置環境條件的調查乃針對我國地質環境條件，基於長期安定性的考量所進行最終處置技術可行性的調查與研究。根據「SNFD2009報告」對我國地質環境累積資料回顧及針對處置技術發展的建議，最終處置計畫推動潛在處置母岩特性調查與研究工作，將聚焦於符合處置概念深度的深層花崗岩質環境特性調查工作，以提供長期安全性評估之用。

自本年度(101年)起，本計畫針對「處置環境條件的調查研究」所推展之各項調查工作，分成區域環境地質、深層地質特性、地質處置合適性研究、地質處置環境穩定性研究等四大項，其成果將可作為編撰SNFD2017報告第二章地質環境(表 2-1)之依據。

3.1.1 區域環境地質

SNFD2009報告已完成地質環境(涵蓋地質概述、主要構成岩體、水文地質、蝕變作用產物、地下資源種類與分布、地質調查技術研究發展等)，以及地質環境的變化(涵蓋地震活動、斷層活動、地殼上升與剝蝕作用、火成活動、氣候變遷與海平面變化等)之現有資料彙整與回顧。在後續的潛在處置母岩調查工作中，將加強本島花崗岩體調查技術發展，以取得其岩體規模、分布與主要構造帶延伸等資訊。

針對本島花崗岩體分布區域，本計畫已於96年度展開空中磁力探測作業，並取得大範圍的岩體與構造等分布資訊。去年度(100年)則

針對地質實驗室之預定區域進行大地電磁測勘，以期獲得地下地層電阻率分布影像剖面，藉此瞭解該區域地下岩體之分布、延伸與連接關係，並獲取岩體與圍岩接觸帶之構造與含水特性等資訊。本年度(101年)除延續進行鄰近地區花崗岩體之大地電磁測勘工作外，亦將針對地質實驗室之預定區域，整合空中磁測資料與大地電磁測勘資料，自過去空中磁力測勘資料擷取約15至20公里範圍之數據，進行磁力三維逆推工作，以獲取該區域花崗岩體的磁力三維分佈圖，藉此描述地質實驗室之預定區域周圍花崗岩體之構造特性，含水裂隙構造之分布則由大地電磁法測得低電阻帶之分布來輔助說明，用以評估地下岩體之完整性、裂隙含水特性與圍岩接觸構造關係等特性，以區域性岩體分布、規模、邊界位置及含水裂隙構造帶分布為研究標的(如考量處置環境條件資訊，以解析地表至1公里深的地球物理資訊為重點，但如考量岩體穩定性資訊及大地構造架構，則解析深度要求達磁力記錄的極限)，並作為後續進行地質鑽探、岩體穩定性分析與建立地質概念模式之參考依據。而為了吸取國外專業技術與經驗，磁力三維逆推工作將與澳洲Fugro公司進行國際合作，藉此強化本土化技術。

3.1.2 深層地質特性

(1) 本島花崗岩體深層地質特性

為瞭解本島花崗岩體之深層地質特性，本計畫在去年度(100年)即規劃針對本島東部花崗岩區域，建置一口深約500公尺的地質探查孔，作為後續取得相關深地層特性參數之基本試驗平台。目前已完成鑽井租地、整地、移機等作業，展開鑽探工作，預計於本年度(101年)完成鑽探工作後，後續規劃展開地球物理標準井測工作(分成物性井測與位態井測兩類，物性井測項目包括：自然加馬、自然電位、16“及64“電阻、側向電阻、井徑、電導度、溫度、全波型超音波探測及加馬能譜等項目；地層位態井測項目包括：超音波電視井測、構造位態井測及孔內攝影等)。此外，本年度(101年)規劃針對此地質鑽探所取得的岩心，進行岩心井錄工

作，提供後續進行水文地質、地球化學、岩石力學等孔內調查/試驗規劃之參考。井錄內容則包含岩性特徵、工程與構造特性、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。

(2) 離島花崗岩體深層地質特性

為深入探討離島花崗岩之地質長期演化模式，及後續進行岩—水化學反應模擬之所需，本年度(101年)規劃針對過去於離島花崗岩所取得鑽探岩心，進行較詳盡的岩石礦物特性分析。主要的工作內容包含岩樣採集、岩樣前處理、岩相分析、礦物組成分析、定年和全岩化學分析。另外，本年度(101年)也將持續於離島花崗岩地區進行區域性井下裂隙帶壓力的長期監測，研析其變化趨勢並計算各深度裂隙之壓力梯度，以利後續區域性地下水流速之計算。

(3) 離島花崗岩調查成果(1999-2012)彙編

自1999年開始，本計畫針對花崗岩質潛在處置母岩的特性調查，係以離島花崗岩地區為優先調查對象，並陸續完成地表地質調查、岩石定年與特性分析，進行約500點地表重/磁力探測、16 km地電組剖面探測、超過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，建立跨孔試驗整合性調查與解析能力，測繪主要斷層及其裂隙帶位態，並透過整合性的資料解析，建構出K區初步地質概念模式。為達成民國106年目標，本項目針對SNFD2017年報告架構(表 2-1)，展開資料綜整與研析工作，本年度(101年)將規劃綜整過去(1999年至2012年間)於離島花崗岩所獲得的深層地質調查與技術發展成果，並綜整代表性深層地質特性參數，作為計畫後續調查與試驗規劃之參考。

3.1.3 地質處置合適性研究

許多自然環境的變動可能影響地質環境的長期穩定性，隨著地質變動歷史紀錄、深層處置環境的特性調查、參數化與模擬技術的發展，使得各國處置條件各異。H12報告指出，各個國家不同場址都會

受到大地構造環境(tectonic setting)及獨特自然條件的影響。為此，H12報告列舉出地質環境受大地構造、火山作用、活動斷層、以及抬升與剝蝕作用等的影響範疇，用以評估其對地球化學、水力特性與傳輸路徑等之影響程度。有鑑於此，因SNFD2009報告已調查得知離島花崗岩測試區未明顯受大地構造、火山活動、活動斷層及抬升與剝蝕作用影響，因此本計畫後續將進一步以地球化學合適性相關研究中之物種穩定性分析研究，作為離島花崗岩後續處置技術發展項目。

在去年度(100年)工作中，本計畫以過去於離島花崗岩區所獲得的平均深層水質條件為基礎，建立鈾(U)、銅(Cu)、鐵(Fe)等物種的Eh(pe)-pH穩定相圖，藉此瞭解上述物種在該水質條件下的穩定性與穩定型態，提供評選處置環境地化合適性(Eh vs pH)之必要資訊。而本年度(101年)則規劃結合Eh(pe)-pH穩定相圖與地化模式的模擬，來探討上述物種的溶解度範圍與溶解度特性，作為後續功能安全評估進行核種遷移模擬計算之參考依據。

3.1.4 地質處置環境穩定性研究

有鑑於SNFD2009報告回顧成果顯示，離島花崗岩體較具地質穩定特性條件；相較之下，台灣本島位於環太平洋地震帶，加上國內過去對本島東部花崗岩體的穩定性調查甚少，故有必要針對影響地質處置環境穩定性(如水文、地化等)之自然事件(如地震、活動構造、地殼抬升與剝蝕、火山活動、氣候變遷等)(OECD, 2003)，投入更多的調查與研究工作，作為評估此潛在處置母岩合適性之參考依據。為此，本計畫於去年度(100年)即規劃針對本島東部花崗岩體地區，規劃地震儀陣列監測與GPS長期觀測等兩項工作。目前建站如期展開，建站與測試工作將延續至本年度(101年)，預期將可獲得花崗岩體高精度GPS連續監測站獲致的抬升或沉陷之位移變化量等資訊，監測該區花崗岩體受地震影響程度，同時對地質實驗室開挖鑽炸過程所產生的人工震源，亦可經由地震站監測記錄後，提供後續研判坑道開挖擾動可能衍生之裂隙位置，作為後續穩定性評估之參考。

3.2 處置技術的研究發展

深層地質處置技術主要利用多重障壁概念，以層層的障壁來遲滯用過核子燃料中放射性核種的遷移，使核種到達生物圈時，其放射性已衰減至安全限值以下。多重障壁可分成天然障壁(處置母岩)及工程障壁(包封容器及緩衝回填材料)，其對隔離/遲滯核種遷移所扮演的角色，在近場環境功能/安全評估上益形重要。因此，在進行處置前，有必要針對上述之障壁材料，進行材料特性對隔離/遲滯核種遷移效果之各項研究，並取得重要的特性參數。另外，考量未來地質實驗室相關研究之需求，本計畫亦將規劃在坑道內辦理各項調查/試驗，以利後續工作之進展。

3.2.1 岩塊熱效應試驗

在深層地質處置系統中，用過核燃料衰變熱的傳遞，主要以熱傳導方式依序經由金屬包封容器、緩衝材料、回填材料及周圍母岩，將熱量由設施往外傳遞。此核種衰變釋放出的熱能，將對深層處置場周圍岩體產生熱效應之溫度場改變。過去本計畫已利用暫態平面熱源法以及熱探針法分別針對離島花崗岩之岩心與岩塊進行熱傳導係數量測，並以量測之熱傳導係數為基礎，進行小比例岩塊熱效應試驗與數值模擬，藉此建立相關試驗與數值模擬之能力。

去年度(100年)本計畫規劃進行為期兩年的岩塊與緩衝材料複合介質之熱傳導試驗工作。進行的主要工作在於緩衝材料熱效應試驗文獻資料的蒐集與研析，以及試驗材料模型的製作與量測儀器的配置規劃；而本年度(101年)則將進行岩塊與緩衝材料複合介質之熱效應試驗，及熱效應之數值模擬分析，以探討花崗岩塊與緩衝材料於受熱作用下的溫度場變化情形，並取得功能評估案例所需的熱傳導特性參數。

3.2.2 地質實驗室特性調查技術發展

本計畫為完備國內處置環境調查、處置工程技術及功能安全評估等技術，以期達成民國106年階段目標，去年度(100年)已開始進行地質實驗室的籌建工作：尋求與規劃於國內已知且鄰近道路的花崗岩體，建置水平深入岩體百公尺以上、直徑約6公尺之試驗坑道。目前台電公司規劃委託國內隧道工程專業團隊施工，預計民國102年中可以完工。

除安全考量外，原則上，坑道面不噴漿，並採自然排水、強制通風等方式建置，以利後續地質實驗室相關試驗之進行。地質實驗室建置過程中，擬安裝監測儀器以評估建置期間工程對地下岩體的影響性；地質實驗室建置完成後，將先進行坑道面之主要岩脈/裂隙/斷層分布及位態的量測與資料建置，以及岩體應力分布、地下水分布之量測與測繪工作，做為後續相關試驗規劃的重要參考依據。其中岩體現地應力規劃以套鑽法及水力破裂法進行量測；而地下水分布之量測，則依地質構造分布資訊，規劃建置調查孔群，進行跨孔試驗。為此，本年度(101年)將針對地質實驗室未來特性調查需求，先行發展坑道裂隙量測分析，與裂隙網路數值模擬兩項技術。

(1) 坑道裂隙量測分析

本年度(101年)將結合國內學界既有技術，利用光學測繪(以地面光達及傳統照相進行比較)與人工測繪等兩種方式，針對本島東部花崗岩區既有的坑道進行坑道內裂隙的量測與資料比對，藉此建立坑道裂隙光學量測與解析技術能力。

(2) 裂隙網路數值模擬技術

本年度(101年)將以花崗岩測試區坑道裂隙量測數據，發展具備裂隙參數統計分析功能的裂隙網路模擬程式(DFN_NET)及自動驗證模組(DFN_OPT)，作為未來遠場裂隙系統數值模擬之工具。參考國內外文獻其他量測方法，擬與本計畫的量測結果進行比較；同時將利用其他裂隙網路模擬程式進行模擬，以驗證本計畫的模擬結果。而此模

組與擴尺度模組結合後，未來將可供地下水流模組、溶質傳輸模組、REV計算模組結合應用，用以模擬岩體中不同的水文地質問題。

3.2.3 實驗室岩體核種遷移與傳輸試驗

用過核子燃料深層地質處置概念主要是藉由多重障壁(multiple barriers)系統，將高放射性廢料永久自我們的生活圈隔離。而各層多重障壁實際能發揮之阻擋功能，就成為評估放射性廢棄物處置安全時關注的焦點。由於障壁的阻擋功能是藉核種在障壁中的遷移參數值來呈現，故核種遷移參數值的取得，是處置功能安全評估中不容忽略的要項。

去年度(100年)本計畫以粉碎之離島花崗岩樣為材料，進行核種(Cs、Se)吸附特性的實驗，並同時以離島花崗岩之岩樣薄片進行I、Cs、Se之擴散實驗，以期獲得核種吸附之分配係數(Kd值)與擴散係數。而本年度(101年)除延續上述之相關試驗外，亦規劃針對離島花崗岩之完整岩塊進行碘離子之傳輸試驗。同時也將進行岩樣之表面化學及礦物成分對核種吸附特性的模擬與分析，藉此找出貢獻Kd值關鍵礦物，並達到數據驗證之目的。

3.2.4 近場緩衝回填材料特性之研究

緩衝回填材料為工程障壁重要安全因子之一，因靠近廢棄物體而受衰變熱作用，故需具備適當之熱傳導特性，使其有效地降低近場之熱負荷所造成之緩衝回填材料劣化影響，且受熱時若具備最小之乾燥收縮量，則可免因乾燥收縮造成裂隙成為核種外釋或地下水入侵之途徑。處置場封閉後亦將受到地下水入侵之影響，當地下水入侵近場環境時，將成為水-熱作用之環境，加上處置場位於地下數百公尺處，廢棄物體亦受到大地應力變動作用、水份入侵後及緩衝回填材料回脹特性等影響，緩衝回填材料需能具備受長期大地應用作用下具克服潛變與變形之特性，其適當之回脹特性可使其發揮自我癒合之功能，將處置坑周圍之裂縫或空隙填滿；水份入侵浸潤後造成之回脹壓力不可

過大，以避免破壞廢棄物罐周圍母岩。過去國內有專家學者針對不同緩衝材料進行材料特性及工程性能相關研究，主要以MX-80型膨潤土及我國國產之日興土為主，由研究成果得知，我國國產日興土之基本特性與工程性質，如土壤細度、塑性性質、回脹性能等，皆亞於國際間相關學界常用之緩衝材料。延續100年度探討各國候選緩衝材料基本特性之研究成果為基礎，本年度(101年)之工作內容為探討各國產源產出之緩衝材料受特定熱、水、力等環境條件作用下，其工程性質與耐久性之影響。

3.3 用過核子燃料處置的功能評估

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年達成並完成我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告之重要里程碑。為達成潛在處置母岩特性調查與評估現階段技術需求並提供後續民國106年「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」之技術基礎，本年度(101年)在用過核子燃料處置的功能評估部分將進行：(1)最終處置概念模式與變異情節相關研究；(2)近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之研析；(3)功能與安全評估發展歷年研究成果之彙編。

3.3.1 最終處置概念模式與變異情節之研究

基於台灣本島位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊聚合交界處，一般從板塊聚合之本島上的特殊山嶺地形的研究中可以反映造山運動、侵蝕率以及氣候變遷等相互間之特殊關係。因此最終處置場址受到地體抬昇率與地表侵蝕率作用，大約在10萬年後處置區上方覆蓋厚

度逐漸減小，再加上氣候變遷海水面可能上升的環境因素，使得處置場上方地面可能接近僅稍高於海水面或為海水淹沒，此時廢棄物體所含放射性核種可能容易外釋到生物圈海洋環境之中。所以本年度(101年)計畫將針對前述本島地表上升速率與地表侵蝕速率及周圍海平面的變化趨勢及海嘯等環境影響因素綜合分析結果，假設處置場址直接遭受海水的淹沒入侵後，核種直接外釋至海洋中之情形下，分析探討影響處置場址的因素，包含特徵、事件與過程(FEPs)分析、曝露途徑與情節系統分析，以作為後續洪水情節之功能與安全評估概念模式研究之依據。

參酌瑞典SKB與日本NUMO對最終處置場長期穩定性的功能評估重點在岩體應力與地下水流場受到自然環境變遷(例如地震、海平面上升、冰河期等作用)後之重分布情況。針對我國特殊地質環境，本計畫擬先就地震、海平面上升之影響進行相關文獻的蒐集分析，以及試驗、監測等工作，俾在確認是否有合適潛在母岩之階段目標上取得必要的評估數據。此外，延續100年度之研究發展，擬探討地震活動對地下處置場之影響。其包括除因地震造成處置場周圍母岩、隧道及處置坑等地下設施破壞或變形外，地震作用亦影響地下環境之變化，如地下水位變化、地下水壓變化、地下水化學等。故本年度(101年)延續100年度地震作用對地下環境之影響，探討地震活動對地下水及地下環境變化做為未來地震危害分析因子及情節分析研究基礎。

工作執行方法於101年度為分析洪水情節之特徵、事件與過程(FEPs)、曝露途徑與系統分析；探討地震活動對地下設施影響及處置場設施之相關研究等。而執行流程則可分為判別可能造成核種外釋傳輸之特徵、事件及程序等因素，將影響因素以邏輯結構方式組合分析，如以交互作用矩陣分析法，定義核種釋出與傳輸情節；以及探討地震活動對地下設施影響及處置場設施等之相關研究。

3.3.2 近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之研究

由於用過核子燃料最終處置場近場環境(包括廢棄物本體、廢棄物罐、處置坑道緩衝區與回填區、坑道旁開挖擾動帶及周圍所接觸母岩等)的效應及長期演化(evolution)程序，主要是受熱量(thermal, T, 簡稱熱)、水力(hydraulic, H, 簡稱水)、力學(mechanical, M, 簡稱力)與化學(chemical, C, 簡稱化)等四項較為重要的因素所影響。上述影響因素對處置場的演化會依其涉及之時間與空間尺度特性持續產生效應，且各因素間的耦合效應(coupled process)使得處置系統演化更形複雜，其效應的相關參數與影響程度也隨場址狀況而改變。依據用過核子燃料最終處置計畫書2010年版中，技術發展與應用需求期程規劃明訂功能/安全評估技術發展需進行近場分析模擬技術與模式建構。

本項工作內容如下：(1)首先蒐集有關岩石裂隙滲流分析之理論，評估後進行數值分析方程式之推導與程式之發展；(2)建構近場廢棄物罐、緩衝材料、與含裂隙之岩石模型，進行二維飽和地下水之案例分析；(3)結合前期所發展之程式，進行熱-水-力(含裂隙發展)的近場耦合模擬。

為符合潛在處置母岩特性調查與評估階段及未來候選場址評選與核定階段對處置場熱-水力-力學-化學(T-H-M-C)耦合效應研究之技術需求，本年度(101年)擬接續並應用去年度(100年)熱、水、力、化個別或可能耦合行為對近場環境與核種遷移之影響探討，及進行用過核子燃料最終處置場近場環境的演化效應與程度分析等研究成果，將依據主計畫核能研究所、子計畫高雄第一科技大學兩個項次進行下列評估工作之重點分工，俾利建立近場緩衝回填材料達飽和後熱、水、力、化等於潛在處置母岩特性調查與評估階段評估能力與技術：

- (1) 主計畫(核能研究所)之研究方法與步驟部分，首先建立個別可能影響近場核種遷移行為熱、水、化等特性模擬模組，其次並參考我國用過核子燃料垂直置放之安全評估處置概念建構近場內含廢棄物罐、緩衝材料等之二維概念模型，最後以進行近場緩衝回

填材料達飽和後伴隨熱水化狀態下特性核種遷移行為模擬案例初步分析。主計畫暫擬採用LBNL發展之TOUGHREACT熱水化模擬套件，其內含熱、水、化等特性模擬模組，進行近場核種遷移行為模擬。

- (2) 在子計畫(高雄第一科技大學)熱-水-力(含裂隙發展)耦合模擬部分之研究方法與步驟，首先將綜合並應用完成之各項放射性廢棄物地下處置場的應力、溫度及水力耦合影響的研究成果，進一步建立岩體熱水力耦合行為的數值分析能力。其次同時參照國內外有關的廢棄物罐與緩衝材料之研究，建構近場廢棄物罐與緩衝材料之模型，並進行二維飽和地下水之案例分析，以完成確認與驗證二維熱與水之評估與岩石裂隙滲漏特性之模擬。子計畫則擬以之前自行研發的FEM程式應用於熱-水-力(含裂隙發展)的近場耦合模擬。

本(101)年度近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬研究之整體目標則為分別進行主計畫(核能研究所)熱-水-化及子計畫(高雄第一科技大學)熱-水-力耦合之相關二維模擬技術發展與建立，俾利於中期(~2015)與長期(~2017)整體工作中持續進行熱-水-力-化耦合介面連接技術發展與三維功能安全評估工作之推動。

3.3.3 功能與安全評估發展歷年研究成果彙編

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100年)已歷經25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，有必要全面性回顧檢討歷年功能/安全評估技術發展有關之成果，以作為後續研發規劃之參考應用。

本年度(101年)工作內容將彙編用過核子燃料長程處置計畫歷年有關發展功能/安全評估技術之目標與成效。預計依長程處置計畫階段，蒐集功能/安全評估技術研發相關報告，建立清單。再彙整各階段的評估概念、假設、工具、參數、與評估結果等。說明各階段之重點，並製作圖表說明其關聯與歷程。

本項工作之成果將具有下列效益：(1)整合歷年成效，促進公眾溝通；(2)分析歷年資訊，促進知識管理；(3)整合前期技術，利於後續研發。

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)，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，本計畫工作針對處置環境條件的調查研究、處置技術的研究發展、以及用過核子燃料處置的功能評估，提報本年度(101年)之計畫工作，其預期成果及效益彙整如表 4-1所示。由於工作項目多為跨年度的長程工作，99~101年度工作項目、預期成果及效益彙整如表 4-2所示。

表 4-1：預期成果及效益

預期研究成果	預期效益
處置環境條件的調查研究	
獲取本島東部花崗岩體分布與構造等資訊，以及地質實驗室周圍花崗岩體之磁力3D逆推分布圖。	提供後續地質鑽探、岩體穩定性調查規劃之參考，以及地質概念模式建構之依據。
獲取本島東部花崗岩之岩性特徵、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。	作為後續進行水文地質、地球化學等孔內調查/試驗規劃之參考依據。
獲取離島花崗岩岩心之完整與破裂帶岩樣的岩象分析、全岩地化組成、礦物組成分析數據。	作為後續探討離島花崗岩地質長期演化模式之參考依據。
完成離島花崗岩地區之階段調查成果(1999-2012)彙編。	作為撰寫2017年處置技術可行性評估報告之基礎，並作為後續調查與驗證規劃之參考。
完成U、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。	作為潛在母岩化學條件(Eh vs pH)物種穩定特性分析，及核種遷移模擬計算之參考依據。
取得本島東部花崗岩地區之地震監測數據與定位解析結果，並完成其地震危害度之初步評估。	提供後續研判坑道開挖擾動可能衍生之裂隙位置，與本島東部花崗岩體穩定性等關鍵資訊。
獲取本島東部花崗岩體與其鄰近構造接觸帶的實際位移觀測數據。	提供後續進行花崗岩體地質穩定分析佐證之重要基礎數據。
處置技術的研究發展	
完成岩塊熱效應室內試驗及熱應力數值模擬。	作為後續現地熱效應試驗規劃、近場功能評估以及場址配置設計之參考。
建立坑道裂隙光學量測與解析技術能力。	作為後續快速取得坑道裂隙特性參數及坑道裂隙分布之參考工具。
發展整合離散裂隙網路之3D裂隙結構模擬及自動驗證模組(DFN_NET及DFN_OPT)	作為分析現場裂隙資料之數值模擬工具，此模組未來將與地下水流模組、溶質傳輸模組、REV計算模組，及擴尺度模組結合，以模擬岩體中不同的水文地質問題。
完成K區母岩核種吸附特性的研究及模擬分析，與礦物成分核種吸附特性分析。	取得本土花崗岩類核種遷移基本數據，提供功能安全評估之用。
國際間處置場近場環境緩衝材料特性之探討	提供後續緩衝材料長時間尺度力學機制穩定性研究及緩衝材料參數試驗之研究基礎，並可做為未來安全評估之參考。
用過核子燃料處置的功能評估	
洪水與地震活動對處置場或地下設施之影響分析	提供我國未來處置場變異情節功能/安全評估技術發展之參考與相關技術發展之基礎。

<p>近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之研究</p>	<p>提供潛在處置母岩特性調查與評估現階段發展近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為模擬之評估能力與技術建立，並作為2017年「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」之技術基礎。</p>
<p>功能與安全評估發展歷年研究成果彙編</p>	<p>提供後續功能與安全評估技術發展規劃之依據。</p>

表 4-2：99~101年度工作規劃、預期成果及效益

工作規劃	99年已完成成果	100預期研究成果	101預期研究成果	效益
處置環境條件的調查研究				
鑽探與井下量測		完成本島東部花崗岩第一口500公尺深取岩心地質探查井之設置	完成岩心井錄與地球物理標準井測，獲取本島東部花崗岩之岩性特徵、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。	提供鄰近地質實驗室之深層地質特性調查所需地質、構造、地物、水文地質、地球化學及岩石學試驗岩心及井下量測作業平台，以取得鄰近地質實驗室之深層地質特性調查數據。
區域岩層與構造分布測勘	建立空中磁測三維構造及岩體規模解析能力，獲致花崗岩體規模及構造分布特性	進行現地大地電磁測勘，取得地質實驗室鄰近地區之地下三度空間的地質與含水層構造分布資訊。	獲取本島東部花崗岩體分布與構造等資訊，以及地質實驗室周圍花崗岩體之磁力3D逆推分布圖。	提供後續地質鑽探、岩體穩定性調查規劃之參考，以及地質概念模式建構之依據。
地殼變動監測		完成東部花崗岩體首度建置之地震監測站及GPS連續觀測站，取得地震定位、地震危害度評估、岩體長期抬升或沉陷高精度數據。	以地震監測站連續量測記錄，取得本島東部花崗岩地區之地震監測數據與定位解析結果，並完成其地震危害度之初步評估。以GPS連續觀測站記錄，獲取本島東部花崗岩體與其鄰近構造接觸帶的實際位移觀測數據。	提供後續研判坑道開挖擾動可能衍生之裂隙位置，與本島東部花崗岩體穩定性等關鍵資訊。
區域深層地下水特性調查	獲取花崗岩裂隙水質及壓力長期監測資料；完成測	完成離島測試區三口大區域深井(均達500公尺深)之裂隙	持續進行區域性井下裂隙帶壓力的長期監測，計算各深	取得深層裂隙之長期壓力監測紀錄，用以計算大區

	試區區域性地下水量估算，並提供花崗岩質潛在處置母岩測試區之入滲總量及地下水量等參數	封塞壓力監測系統安裝，展開壓力監測作業。	度裂隙之壓力梯度。	域深層地下水流速特性，提供建構地質概念模式所需之水文地質長期監測資訊。
岩水反應地化分析	獲取花崗岩裂隙水質長期監測資料		獲取離島花崗岩岩心之完整與破裂帶岩樣的岩象分析、全岩地化組成、礦物組成分析數據。	作為後續探討離島花崗岩地質長期演化模式之參考依據。
處置環境調查成果彙編	完成SNFD2009報告審查、核定及公告作業		完成離島花崗岩地區之階段調查成果(1999-2012)彙編。	作為撰寫2017年處置技術可行性評估報告之基礎，並作為後續調查與驗證規劃之參考。
處置技術的研究發展				
岩塊熱效應	完成岩塊熱傳導係數量測及熱效應數值模擬	完成緩衝回填材料實驗尺寸壓鑄成型、加熱棒安裝、岩塊鑽孔，以及試驗儀器之組裝。	完成岩塊熱效應室內試驗及熱應力數值模擬。	提供功能與安全評估之用，以及未來現地試驗規劃之依據。作為後續現地熱效應試驗規劃、近場功能評估以及場址配置設計之參考。
地下水地球化學演化	獲取花崗岩裂隙水質長期監測資料	完成U、Cu和Fe元素在離島測試區深層地下水之水質條件下的Eh(pe)-pH穩定相圖繪製工作。	完成U、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。	建立本土花崗岩地下水質條件下U、Cu和Fe元素之穩定性及穩定型態資訊，提供處置環境地球化學條件必要資訊，作為後續核種溶解度模擬計算參考依據。

地質實驗室規畫		展開地質實驗室特性調查技術發展規劃	完成地質實驗室特性調查技術發展規劃	作為後續地質實驗室特性調查工作推動之依據。
核種特性分析	緩衝回填材料之核種吸附動力學參數與影響探討，並持續資料庫核種傳輸參數Kd值之更新	展開離島測試區花崗岩樣之實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗，獲致放射性或非放射性Cs及Se好厭氧條件下之吸附動力學參數。	完成離島測試區母岩核種吸附特性的研究及模擬分析，與礦物成分核種吸附特性分析。	取得本土花崗岩類核種遷移基本數據，提供功能安全評估之用。
地質實驗試坑測勘			建立坑道裂隙光學量測與解析技術能力。	作為後續快速取得坑道裂隙特性參數及坑道裂隙分布之參考工具。
裂隙參數化與模擬技術	完成小規模試驗場花崗岩深層地質之裂隙連通性與透水係數分布等分析工作	完成離島花崗岩坑道裂隙量測，並發展整合離散裂隙網路之三維裂隙結構模擬(例如DFN_NET模式)及自動驗證模組(DFN_OPT)。	發展整合離散裂隙網路之3D裂隙結構模擬及自動驗證模組(DFN_NET及DFN_OPT)	作為分析現場裂隙資料之數值模擬工具，此模組未來將與地下水流模組、溶質傳輸模組、REV計算模組，及擴尺度模組結合，以模擬岩體中不同的水文地質問題，以供未來地質實驗室裂隙分析之用。
近場環境緩衝材料特性		國際間處置場近場環境緩衝材料特性之探討	國際間處置場近場環境緩衝材料特性之探討	提供後續緩衝材料長時間尺度力學機制穩定性研究及緩衝材料參數試驗之研究基礎，並可做為未來安全評估之參考。
近場二維程式參數取樣及多重運跑技術建立	完成近場二維評估程式之機率式分析技術，以垂直分率及回填材料孔隙率等			建立近場二維核種外釋機率式評估技術與評估功能。

	新增參數進行參數取樣，探討對核種釋出率造成之不確定性範圍。			
用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析	完成高放射性廢棄物(HLW)活度與衰變熱分析；以參考處置概念為基礎，建立處置場之設施需求與處置隧道配置，研擬我國初步 HLW 地下處置場所所需之空間。			提供未來進行高放射性廢棄物(HLW)處置場功能安全評估計算之源項活度、衰變熱與處置概念及配置，有助於我國 HLW 處置研發工作之參考及應用，以加速提昇技術能力，確保處置安全符合國際標準。
用過核子燃料處置的功能評估				
用過核子燃料最終處置系統整合模式評估與案例分析	延續98年度計畫工作成果，完成生物圈機率式分析結果之後續參數敏感度分析，以階步迴歸分析來探討生物圈總輻射劑量率峰值之參數敏感度			完成生物圈輻射劑量不確定性分析及參數敏感度分析技術與影響生物圈輻射劑量之重要參數。
最終處置概念模式與變異情節之研究		洪水與地震活動對處置場或地下設施之影響分析	洪水與地震活動對處置場或地下設施之影響分析	提供我國未來處置場變異情節功能/安全評估技術發展之參考與相關技術發展之基礎。
近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為		完成近場核種遷移行為模擬所需考量之影響因素與模擬	近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移行為之模擬技術建	提供未來發展近場緩衝回填材料達飽和後核種遷移

模擬之研究		特性概念。	立。	行為模擬之評估依據，並可作為2017年「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」之技術基礎。
功能與安全評估發展歷年研究成果彙編			進行功能與安全評估發展歷年研究成果彙編。	提供後續功能與安全評估技術發展規劃之依據。