

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
99年度工作計畫
(修訂一版)

台灣電力公司

中華民國九十八年十二月

99年度工作計畫

目錄

頁次

摘要

目錄.....	i
圖目錄.....	iii
表目錄.....	iv
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 花崗岩地質穩定性分析.....	3-1
3.1.2 花崗岩深層地質調查.....	3-2
3.1.3 花崗岩體分布特性分析.....	3-4
3.2 處置技術的研究發展.....	3-10
3.2.1 岩塊熱傳導試驗.....	3-10
3.2.2 區域性地下水量估算技術發展.....	3-11
3.2.3 實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗.....	3-12
3.2.4 用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析.....	3-13
3.3 用過核子燃料處置的功能評估.....	3-14
3.3.1 近場二維評估程式參數取樣及多重運跑技術建立.....	3-14
3.4 SNFD2009報告審查答覆說明與修訂.....	3-15
4. 預期成果分析.....	4-1

圖目錄

	頁次
圖 3-1：500公尺井下調查資料之導水裂隙帶研判	3-7
圖 3-2：小規模試驗場附近之裂隙網路模擬結果	3-8
圖 3-3：1號及4號井剖面上330-360 m裂隙區之流通路徑演算結果.....	3-8
圖 3-4：有效介質理論(EMT)說明圖	3-9
圖 3-5：典型的地下岩體立體分布之示意圖	3-9

表目錄

	頁次
表 4-1：預期成果及效益	4-2

1. 概述

用過核子燃料最終處置計畫工作推動之目的，是永久安全隔離與阻絕放射性的核種，防止其隨地下水流遷移而影響人類生活圈，以確保民眾安全及環境品質，促進非核害環境的永續發展。

目前國際間對用過核子燃料最終處置技術之發展公認以深層地質處置較為可行。深層地質處置採用「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，讓放射性核種在進入生物圈之前已衰減至可忽略的程度。目前推動高放射性廢棄物地質處置計畫之國家，均就其所處的地質條件，選擇合適的處置母岩，來進行其最終處置計畫。由於最終處置設施的設置，從最初發展階段至處置場運轉階段，一般長達數十年，具體可行的長程計畫的確是有其需求與必要性。

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(核四廠)，將來還會有二部機組加入運轉發電，預估此四座核能電廠的八部機組運轉40年並搭配乾式貯存時程的規劃估計，將會產生約7,350公噸鈾的用過核子燃料；若延役至60年將會產生約10,190公噸鈾的用過核子燃料。為了因應我國用過核子燃料的安全處置問題，依「放射性物料管理法」第29條之規定，台電公司持續尋求國外具有放射性廢棄物最終處置技術能力或設施進行處置；在境外處置未達具體可行之前，則依「用過核子燃料最終處置計畫書(2006年7月核定版)」(以下簡稱最終處置計畫書)擬定時程，切實推動境內最終處置之技術發展及處置設施的籌建工作。

台灣電力公司長期進行地質調查與評估技術之發展，尋找與評估適合的地質條件，妥善進行我國用過核子燃料之最終處置(深層地質處置)。在我國用過核子燃料目前管理政策下，本計畫仍按「最終處置計畫書」擬定時程，持續推動境內最終處置之技術發展。

依據「最終處置計畫書」之規劃，自2005年開始進入「潛在處置母岩特性與調查評估階段(2005~2017年)」，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「我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告」(Spent nuclear fuel disposal project—2009 Progress report) (以下簡稱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。

有關花崗岩潛在處置母岩之調查，除了離島地區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，根據美國加州理工學院Shyu等研究團隊最新研究顯示可能近百萬年來已邁入穩定地塊條件，亦可作為後續潛在處置母岩的調查對象。後續除了加強本島花崗岩體穩定性的研究重點外，亦將加強岩體規模、分布與主要構造帶延伸等資訊的取得。

後續工作規劃係以SNFD2009報告為基礎，持續進行花崗岩處置母岩特性調查與功能安全評估的技術發展，以期達成潛在處置母岩特性與調查評估階段目標，準時於2017年底提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(簡稱SNFD 2017報告)，此報告中將確認(1)我國是否有合適處置母岩，(2)我國是否已齊備處置技術。為達成此任務，本計畫需逐步完成我國處置環境資料的調查與評估、深層花崗岩地質概念模式的建立，進行本土化功能安全評估技術的研發，作為後續「候選場址評選與核定階段」評估的基礎。

2. 計畫規劃

我國用過核子燃料最終處置計畫的管理策略，係先採乾式貯存並尋求國際合作(境外)處置機會，在境外處置未具體可行前，將依「放射性物料管理法」第49條規定，規劃國內放射性廢棄物最終處置設施之籌建，同時積極持續進行境內最終處置所需之潛在處置母岩調查技術發展，以及處置概念初步功能安全評估技術發展。

在我國用過核子燃料現有管理政策下，本計畫須依法按「最終處置計畫書」擬定時程，持續推動境內最終處置之技術發展。因考量用過核子燃料最終處置工作，涉及複雜的地質、鑽探、地物、水文、地化、岩力、核種傳輸等調查與資料綜合解析及評估之技術，不但專業程度需求極高，且需視各國之地質與環境之不同而因地制宜；故有必要先行對國內潛在處置地質環境進行相關調查與技術研發的工作。為確保處置場功能，須在進行實際選址與建造前，根據處置場處置概念，配合用過核子燃料之物理、化學特性及處置場之水文地質、熱傳、地下水化學及情節發展等，進行核種外釋模擬分析。由於處置系統的長期安全性無法以實際實驗直接驗證，故須以工程及科學的數據為基礎進行預測性的分析，再將分析結果與法規標準比較，以確認處置場長期功能與安全評估結果之適合性。

本計畫為掌握大範圍地下潛在處置母岩可能的分布，及瞭解主要地質構造特徵，以逐步篩選出較適合的潛在處置母岩區域。空中磁測調查工作是掌握潛在處置母岩分布區域的關鍵，故本計畫自民國95年起透過國際合作進行，引進澳洲之空中磁測技術，針對國內潛在處置母岩進行大範圍的空中磁測調查工作。依據調查結果，本計畫已掌握本島花崗岩所在位置及其地下岩體範圍，同時也獲得花崗岩體的部分基本特性。

國內花崗岩特性方面，部分岩體已具備千萬年來的長期地質穩定特性；此外，對位於板塊邊界過去認為較不穩定之本島花崗岩體，本

計畫也進行初步的地表踏勘與資料分析，而根據最新文獻資料顯示，本島花崗岩體可能近百萬年來亦已邁入較為穩定的地塊條件。因此，SNFD2009報告中彙整我國目前花崗岩深層地質特性調查技術的發展與實際應用成果，成果顯示工作團隊已具備500公尺深度結晶岩體(花崗岩)的深地層特性調查與資料解析的相關基礎技術，同時透過初步功能安全評估之案例分析後，其安全性可進一步獲得驗證。

本計畫為取得深層地質特性與參數，已進行花崗岩質潛在處置母岩深層地質調查之重磁力逆推的線形構造解析、六孔深達500公尺的地質探查孔、超過一萬四千公尺大地電磁法探測、以及一系列有系統的井下地質、構造、地球物理、水文地質、地球化學特性等現地調查與試驗工作；上述所獲得地下地質之特性資訊，已於SNFD2009報告中驗證裂隙構造模式所需的重要數據，並整合成初步地質概念模式，提供建立初步功能/安全評估之核種傳輸模擬的重要資訊，做為初步評估本土花崗岩質潛在處置母岩安全性之依據，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」之重要目標。

由於國外這類花崗岩已有進行最終處置功能與安全評估之案例，故國內花崗岩類作為潛在處置母岩的選擇，其安全性無論就岩體特性或是岩體穩定性方面均值得期待，及進一步的深入調查。因此，本計畫近期將以花崗岩質潛在處置母岩之處置環境條件的調查研究、處置技術的研究發展及處置的功能評估為工作主軸，在現有成果累積的基礎下，考量階段性目標與年度工作內容及時程需要，99年度預定執行項目包括：

- (1) 處置環境條件的調查研究：
 - (A) 花崗岩地質穩定性分析
 - (B) 花崗岩深層地質調查
 - (C) 花崗岩體分布特性分析
- (2) 處置技術的研究發展：
 - (A) 岩塊熱傳導試驗
 - (B) 區域性地下水量估算技術發展

- (C) 實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗
 - (D) 用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析
- (3) 用過核子燃料處置的功能評估：
- (A) 近場二維評估程式參數取樣及多重運跑技術建立
- (4) SNFD2009報告審查答覆說明與修訂。

3. 規劃工作事項

「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」—99年計畫，規劃之工作事項分成四部份：(1)「處置環境條件的調查研究」，(2)「處置技術的研究發展」，(3)「用過核子燃料處置的功能評估」，(4)「SNFD2009報告審查與修訂」等，詳見下列各節。

3.1 處置環境條件的調查研究

目前我國用過核子燃料最終處置計畫，對於潛在處置母岩特性的調查，以花崗岩為優先進行區域分布、深層地質特性等調查工作。為了解花崗岩體分布、岩性、主要構造帶分布、圍岩接觸關係與地質演化史等特性，以空中磁測資料解析岩體規模與構造分布，並長期監測500公尺深井水文地質及地球化學特性，建構初步基礎地質特性資料，作為後續岩體特性之地質、構造、水文地質、地球物理、地球化學及岩石力學等調查工作規劃參考，並作為花崗岩質潛在處置母岩評估的依據。99年度規劃之「處置環境條件的調查研究」相關工作，乃基於前一年度成果，接續進行特性調查技術研究發展工作，擬分為花崗岩地質穩定性分析、花崗岩深層地質調查、花崗岩體分布特性分析等三大部分說明：

3.1.1 花崗岩地質穩定性分析

本項目已於SNFD2009報告之「處置環境條件的調查研究」章節中，彙整花崗岩體現有調查資訊，並針對地震活動、斷層活動、地殼上升與剝蝕作用、火成活動、氣候變遷及海平面變化等地質災害與環境變遷資料進行穩定性分析。

有鑑於在用過核子燃料地質處置系統中，地下水是影響核種釋放、遷移最主要的媒介。核種在地下水中的遷移行為，不僅取決於地

下水的流動狀態，也深受地下水化學特性的影響和控制。其中氧化還原電位(Eh)、酸鹼值(pH)與主要離子濃度等水質參數，在影響核種傳輸的化學反應/作用中，更是扮演著重要的支配角色。

因此，本項目為國內首次進行，目前選定少震地區、無斷層活動、具非常低上升與剝蝕作用的花崗岩地區，針對深層(約500公尺深)導水裂隙段(圖 3-1)，進行裂隙地下水水質長期監測設備組裝。裂隙地下水水質長期監測進行的方式與所需之設備，大致上與雙封塞抽水洗井及取樣工作類似。設備之主要元件包含封塞模組、化學感應器模組及抽水模組。其中，封塞模組用以隔絕特定裂隙段與孔內其他區域；而化學感應器模組則是用來量測導水裂隙之水質敏感性參數(例如氧化還原電位、酸鹼度)。本項目擬於99年持續進行導水裂隙段水質參數的長期監測工作，以瞭解花崗岩裂隙地下水水質的變化趨勢與可能影響因素，作為後續花崗岩地質長期穩定性評估與驗證技術發展的參考依據。

3.1.2 花崗岩深層地質調查

深層地質調查之目的在獲取深層地質相關參數，用以判讀岩層地質、構造、岩性、水文、地化等特性，供地質概念模式建立之用。本項目98年度已針對小規模試驗場斷層帶進行跨孔追蹤稀釋試驗，並進行自然梯度追蹤稀釋試驗數據分析(圖 3-2及圖 3-3所示)，進而於99年度規劃建立適合小規模試驗場傳輸之裂隙連體模式(Fracture Continuum Model, FCM)，以估計透水係數分布，提供後續建構地質概念模式、功能安全評估傳輸模擬之參考。

FCM乃根據 Kirkpatrick (1973)提出的有效介質理論(Effective Medium Theory, EMT)，將二維裂隙網路中每一條裂隙均視為可導水(Conductive)，並同時考慮裂隙網路的連通性(Connectivity)，以計算出數值網格中的傳導量(Conductance, L^2/T)。David *et al.* (1990)比較 EMT與裂隙網路理論計算的有效傳導量，發現若裂隙機率分布函數為均勻分布或是具有峰值的分布，則EMT估計結果將非常接近裂隙網路

計算之理論值；然而，若傳導量機率分布為負指數分布，則EMT的估計結果將明顯不同於裂隙網路計算的理論值。EMT的理論基礎擇要介紹如圖 3-4所示，若數值網格中具有七條不同內寬之裂隙，每條裂隙之傳導量為 C_i ，則計算此網格中的有效傳導量之步驟如下：

- (1) 去除Dead-end區段，即某一區段僅一端與其他區段連通，而另一端則沒有連通到其他區段，如圖 3-4右上方之圖。
- (2) 將剩餘的區段中每一區段均指定相同的傳導量 C^* ，而 C^* 值則根據 Kirkpatrick (1973)的公式計算：

$$\sum_{i=1}^N \frac{C^* - C_i}{\left(\frac{z}{2} - 1\right) C^* + C_i} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

其中 z 為平均座標數(Coordination Number)，而座標數則定義為相交於任一節點的裂隙區段總數。

- (3) 在保持平均座標數及平均裂隙間距不變的情形下，將步驟二的結果轉換為晶格(Lattice)結構，如圖 3-4右下方之圖，並在缺少區段的位置上填滿傳導量為零的虛擬區段，如圖 3-4下方中央之結果。故填滿零區段的晶格結構的區段中共有 $(1-z/4)$ 的比例為零傳導區段，而有 $z/4$ 的比例區段傳導量為 C^* 。
- (4) 重複利用方程式(1)以計算晶格結構中的有效傳導量 C^{**} ，經過代數運算後可知 $C^{**} = (z/2 - 1)C^*$ 。
- (5) C^{**} 則為此數值網格中的有效傳導量，並可根據此有效傳導量計算裂隙滲透係數。

若假設此數值網格上下邊界存在一固定水頭差 Δh ，且假設垂直此水頭差方向共有 N_f 個裂隙數目，則通過此數值網格的流量為

$N_f C^{**} \Delta h$ 。此外，根據達西定律，通過此數值網格的流量可表示為 $K_b L_x L_y \Delta h / L_z$ ，其中 L_x , L_y 及 L_z 分別為此網格在 x -、 y -及 z -方向的大小。以上兩流量值大小應相等，則此網格的有效水力傳導係數 (Effective Hydraulic Conductivity, K_b) 則為

$$K_b = \frac{N_f C^{**} L_z}{L_x L_y} \dots\dots\dots (2)$$

故 McKenna and Reeves (2005) 則根據方程式 (2)，估計裂隙岩體中的有效滲透係數，此即所謂的 FCM 方法。若要利用 FCM 產生裂隙滲透係數空間分布，則需要知道 N_f 及 z 值。McKenna and Reeves (2005) 分別根據指標模擬 (Indicator Simulation) 及循序高斯模擬 (Sequential Gaussian Simulation) (Deutsch and Journel, 1998) 的地質統計模擬方法產生，其中指標模擬及循序高斯模擬所需的半變異數模式，可根據現場資料推估，或採用合理的假設模式。

利用 FCM 估計所得的裂隙滲透係數分布，可以直接帶入連體模式的地下水流及溶質傳輸模擬程式，以分析岩體中的傳輸特性。因連體模式的流傳模擬程式的計算效率，一般均較 DFN 模式的流傳計算程式高，若本計畫未來的功能安全評估工作中需要模擬大範圍的岩體核種傳輸模擬時，則結合 FCM 及連體流傳數值模擬程式，在數值計算效率上將較佔優勢。本年度工作根據以上之 EMT 及 FCM 理論，利用小規模試驗場水力試驗、裂隙水力傳導係數之地質統計分析所得資料，模擬二維裂隙之裂隙滲透係數分布，提供後續建構地質概念模式、功能安全評估傳輸模擬之參考。

3.1.3 花崗岩體分布特性分析

為掌握國內幾個潛在處置母岩的大尺度分布情形，及其鄰近區域地質構造資訊，本分項計畫在 97~98 年與澳洲 Fugro 公司技術合作，取

得對花崗岩、泥岩、及中生代基盤岩等潛在處置母岩部份地區的高精度全磁力網格(TMI Grid)成果，完成磁力資料解釋與逆推處理，建置調查區內地下岩體構造之點狀分布圖。在此基礎上，本計畫99年度工作將繼續完成三維岩體分布解析技術，並利用地下地質三維展示軟體呈現岩體規模，預期將可據以掌握調查區花崗岩質潛在處置母岩分布及其鄰近主要地質構造等重要資訊。主要工作內容包括：

(1) 空中磁測資料處理與圖幅輸出：

以全磁力網格圖檔作為輸入，使用Geosoft公司開發的Oasis Montaj重磁資料處理軟體進行資料處理與圖幅輸出。

(a) 空中磁測資料處理：

針對全磁力網格圖以GIS圖層方式呈現，以方便後續資料解釋時不同圖層之套疊。

(b) 磁力異常圖幅輸出：

將全磁力異常圖、區域磁力異常圖及剩餘磁力異常圖等圖幅，經配色後以適當比例輸出。

(2) 空中磁測三維構造解析技術建立：

(a) 磁力異常線形判讀：

依據資料處理後所獲得的區域及剩餘磁力異常圖，在地理資訊系統平台上，搭配數位地形與已知之地表地質資訊，進行構造線形判讀分析。

(b) 尤拉解迴旋處理：

由資料處理軟體自動解算對應的構造解，藉設定適當的條件，並比對前述線形判讀結果與既有岩層導磁特性等資訊，篩選出合理的構造解。

(c) 三維構造展示：

將具有三度空間座標的構造解經分類後，本分項工作將嘗試匯入如：Geosoft Oasis Montaj或Golden Software Voxler等三維展示軟體，將地下構造搭配地形圖以三維方式呈現，以提高對地下構造空間分布的掌握度。

(3) 空中磁測三維岩體分布解析技術建立：

(a) 韋納解迴旋處理：

由資料處理軟體自動解算岩體界面位置、岩體導磁率、傾角等。藉設定適當的可接受條件，並比對前述線形判讀結果與岩層導磁特性等資訊，篩選出合理導磁率解。

(b) 三維岩體分布展示：

將具有座標的地下岩體導磁率資訊，匯入如Geosoft Oasis Montaj或Golden Software Voxler等三維展示軟體，將地下岩體搭配地形圖以三維立體方式呈現如圖 3-5，以提高對地下構造空間分布的掌握度。

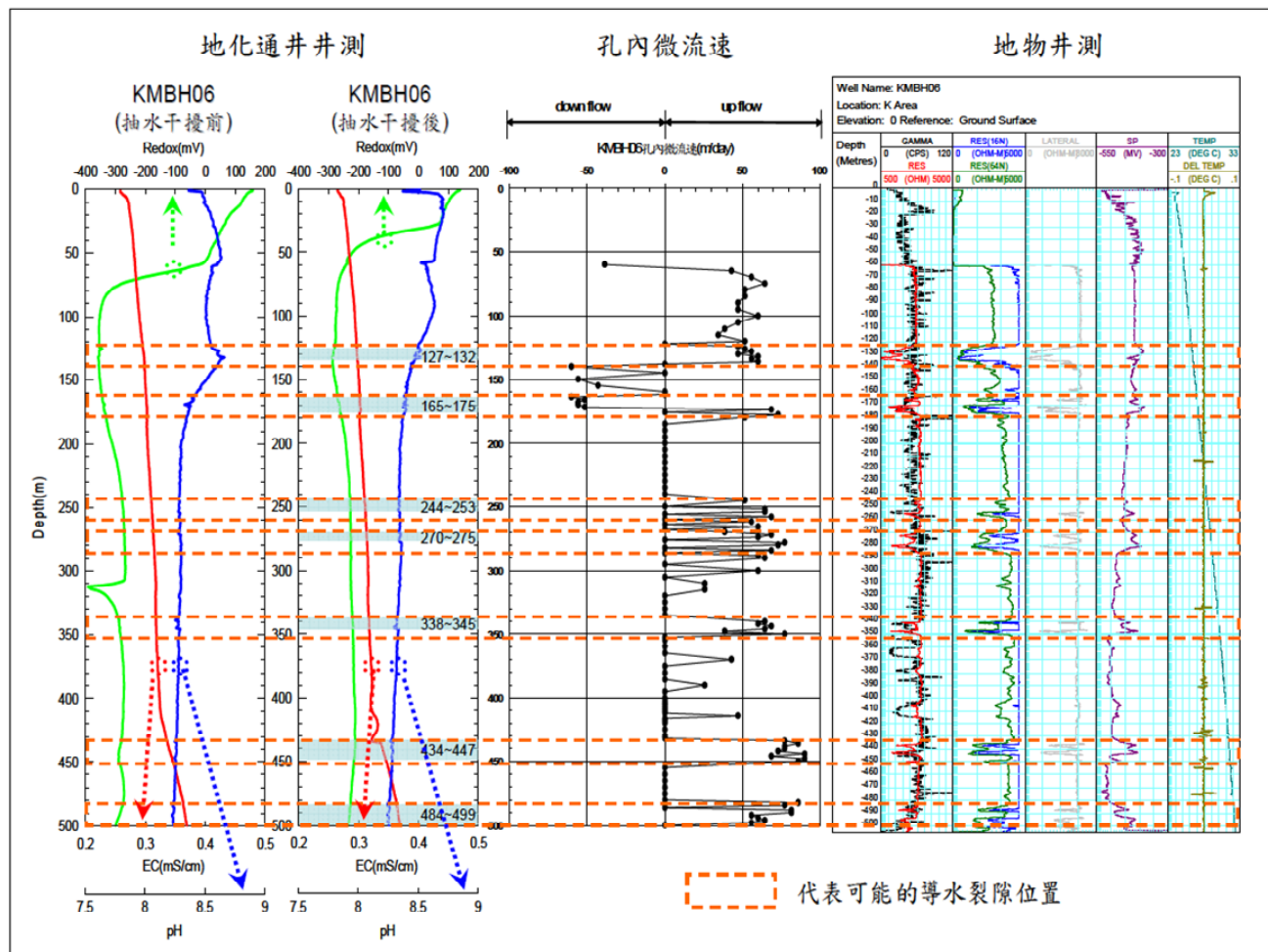


圖 3-1：500公尺井下調查資料之導水裂隙帶研判

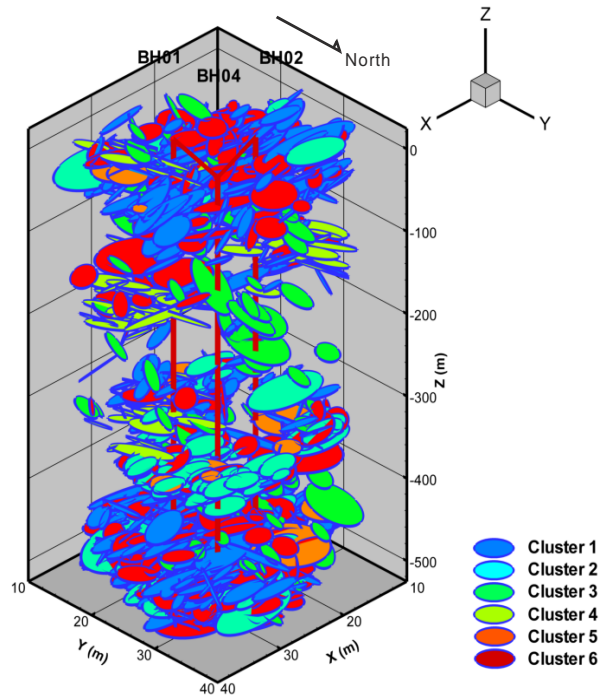


圖 3-2：小規模試驗場附近之裂隙網路模擬結果

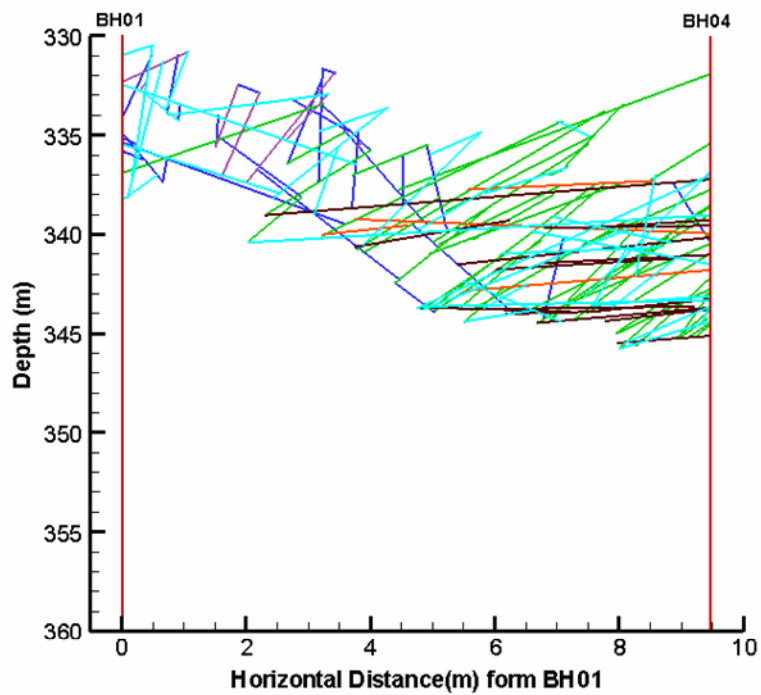


圖 3-3：1號及4號井剖面上330-360 m裂隙區之流通路徑演算結果

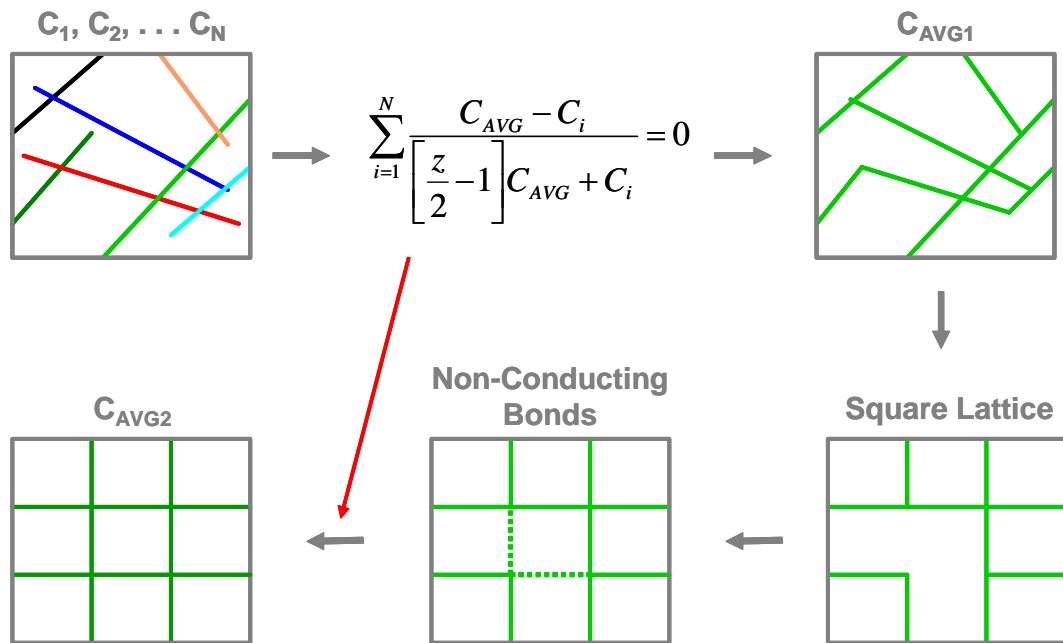


圖 3-4：有效介質理論(EMT)說明圖
(摘自2007 ICP Workshop, S. McKenna)

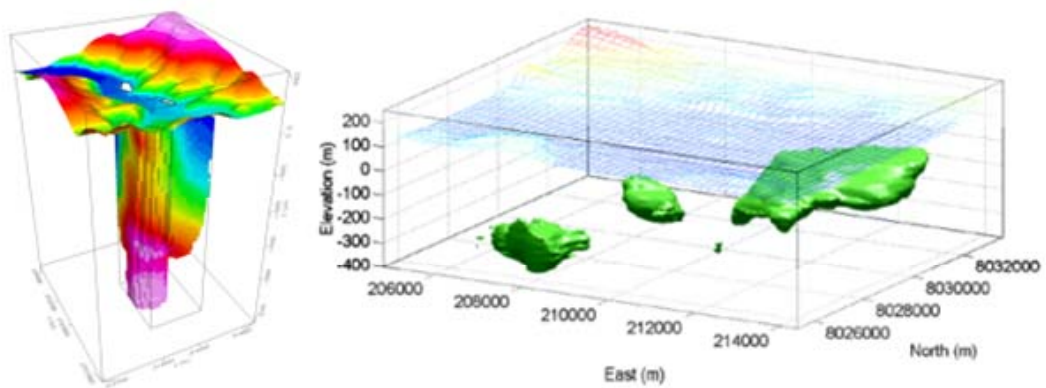


圖 3-5：典型的地下岩體立體分布之示意圖

3.2 處置技術的研究發展

近來國際能源發展趨勢上，為減少對於化石燃料的依賴，對抑制全球暖化做出貢獻，並且擴大全球對安全、潔淨和經濟的核能之利用，台電公司持續追蹤國際間核能再處理之發展趨勢，探討與核能先進技術國家合作用過核子燃料再循環利用的可行性。依據「最終處置計畫書」之規劃內容的修訂而提列經費，持續推動國內用過核子燃料/高放射性廢棄物最終處置技術發展之需求外，亦需保留因應未來再處理之彈性。

綜上所述，99年度本計畫處置技術的研究發展工作，包括岩塊熱傳導試驗(3.2.1節)、區域性地下水量估算技術發展(3.2.2節)、實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗(3.2.3節)；此外，為因應用過核子燃料再處理未來發展可能之需求，進行用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析(3.2.4節)。

3.2.1 岩塊熱傳導試驗

在我國的處置概念中用過核子燃料衰變熱的傳遞，主要由金屬包封容器、緩衝回填材料及周圍母岩，將熱量由設施往外傳遞。此核種衰變釋放出熱能，將對深層處置場周圍岩體產生熱效應之溫度場改變。由於未經外力擾動之自然深層岩體其溫度場、應力場及地下水流場原本為一穩定狀態，且其中溫度、應力與流體等因素具有相互影響之關係，若此自然深層岩體進行地下結構工程施工，勢必影響且改變原有之平衡狀態。為了瞭解用過核子燃料之核種衰變釋放出熱能對周圍岩體產生熱效應，技術上可藉由實驗室試驗或現地試驗取得相關的參數，以作為未來潛在處置母岩安全性評估之依據。一般而言，現地試驗由於尺度規模較大，可得到較具代表性之參數，但須花費較多的人力及物力；本計畫擬先在實驗室中進行岩塊試驗，針對不同的影響因子進行量化的控制試驗，以研究不同因子對參數之影響，進而評估影響因子對參數之敏感性。

本分項工作已於98年計畫中進行岩塊的熱傳導係數量測，並建立熱能對岩塊溫度場變化量測所需試驗設施。後續將探討小比例之花崗岩塊在受單一固定熱源狀況下的溫度傳導性質與溫度場分布情形，本計畫於99年度將模擬處置場周圍地溫環境，在恆溫條件下進行實驗以量測岩塊溫度受熱源影響的變化情形，並進行岩塊熱效應數值模擬，以提供未來處置環境溫度分布模擬參考。

3.2.2 區域性地下水量估算技術發展

本項目自97年度逐年蒐集分析地表水文及地下水文資料，用以發展花崗岩區域性地下水量評估技術。98年計畫工作以花崗岩測試區地質鑽孔所涵蓋之範圍為例，應用入滲面積法及地下水位變動法，以取得入滲總量之參數。

入滲面積法是利用長期氣象觀測資料(至少10年)估計入滲率(q)，再乘以有效入滲面積(A)及50%，即可估出區域安全出水量。主要使用氣象資料包括降雨量及蒸發量，地域性氣候受地理位置影響甚大。以花崗岩測試區而言，本計畫研究發現每年十月至隔年二月間雖然有降雨，但降雨並不集中，蒸發量一般多大於降雨量，因此地下補注量並不多；三月份開始有春雨發生，雨量不多，但足以潤濕表土，使雨水能補注地下水，這段期間約40%雨水會補注地下水；隨著梅雨季節來臨，雨量也逐漸增多，且降雨延時長，平均約有50%之雨水會補注地下水。

地下水位變動法(Water Table Fluctuation, WTF)(Healy and Cook, 2002)為美國地質調查所(USGS)所發展出地下水補注量的估算方法，亦可被歸類為水收支平衡法，其原理係將長期觀測之地下水位消退後抬升淨總量($\sum \Delta H_i$, m)乘上含水層之貯水係數(Storage coefficient, S)而得年平均單位面積補注量(q_{in})，其計算公式如下：

$$q_{in} = S \times \sum \Delta H_i \dots\dots\dots (3)$$

在此基礎上，本項目99年擬繼續應用地質構造及地球物理等地下地質資料估算花崗岩體體積，應用體積法提供地下水量估計值，以供功能安全評估之用。由體積法(或稱容積儲存量)估計之地下水資源蘊藏量，係將調查區範圍之體積乘上有效孔隙率(Effective Porosity)而得，可由下式表達：

$$Q = V \times \eta \dots\dots\dots (4)$$

式中，

Q = 地下水蘊藏量(m^3)

V = 調查區體積(m^3)

η = 有效孔隙率(或以破碎率表示)(%)

3.2.3 實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗

核種遷移及工程障壁緩衝回填材料的研究，是用過核子燃料或高放射性廢棄物最終處置計畫中不容漠視的工作，而未來處置計畫將潛在母岩鎖定為花崗岩，以進行處置功能安全評估，則本土花崗岩類相關傳輸參數，需要靠實驗室長期進行核種遷移相關試驗來取得。

根據許多國家多年來對緩衝回填材料的研究結果顯示：以蒙脫石為主要礦物成分的膨潤土(Bentonite)，在滲透性、離子交換、膨脹性等方面有相當良好的功能，因此廣受應用作為緩衝回填的候選材料。美國懷俄明州所生產的MX-80膨潤土是相當典型的海相沈積礦床，是目前較大規模開採的商業化膨潤土。另考量目前較為成熟的工程障壁設計，瑞典KBS-3的設計概念提出以膨潤土與石英砂(Quartz Sand)之混合物作為緩衝回填材料。加拿大AECL廢棄物處置計畫亦採用膨潤土混合被開挖出之壓碎花崗岩，然後以現場壓實的方式來達到設計之功能。日本在1999年H12報告中亦提出以70%膨潤土與30%石英砂之混合比作為緩衝回填材料，相關的膨潤土研究計畫在各國研究機構中亦正積極進行中。

過去本計畫已在手套箱內厭氧環境下，探討MX-80膨潤土對核種的吸附特性，實驗的核種包括Cs、Se；實驗所用的液相為人工合成地下水與人工合成海水；並使用膨潤土為緩衝材料。99年度工作乃接續過去實驗工作，擬獲得厭氧環境下緩衝回填材料(膨潤土混合石英砂及粉碎花崗岩) Cs與Se核種之吸附動力學參數、完成90°C恆溫對核種吸附之影響探討，以及持續資料庫核種傳輸參數Kd值之更新。

3.2.4 用過核子燃料再處理產生高放射性廢棄物源項特性分析

用過核子燃料經再處理後產生之高放射性廢棄物特性受再處理技術影響甚鉅，98年度計畫已針對國際間再處理方法，如UREX+或PUREX或Pyroprocessing等方法進行研究探討，並分析再處理方法之高放射性廢棄物基本特性，本年度計畫則延續上述研究，參考上述國際間再處理方法與高放射性廢棄物特性研究成果，推估計算高放射性廢棄物的活度與衰變熱變化，以提供功能安全評估之源項活度等參考依據。此外，98年度計畫已分析國際高放射性廢棄物最終處置現況，完成國際間高放射性廢棄物處置發展與差異比較，99年度則依據用過核子燃料經再處理產生高放射性廢棄物之數量與特性，進行分析與研擬我國高放射性廢棄物最終處置概念，並進行我國高放射性廢棄物之處置場配置。

本分項99年度擬定研究內容包括：

- (1) 評估分析我國用過核子燃料經再處理產生高放射性廢棄物之總活度與衰變熱。
- (2) 完成我國高放射性廢棄物之處置概念及處置場配置報告。

3.3 用過核子燃料處置的功能評估

為持續精進發展功能/安全評估技術，本年度本項工作延續過去所建立之近場二維(軸/徑向)垂直置放方式評估模式之定率式分析技術(94~96年度計畫成果報告)，完成近場二維評估模式之參數取樣與模式多重運跑的機率式分析技術。此外，98年度計畫已完成基本情節案例之近場、遠場及生物圈更新案例評估、機率式評估及近、遠場評估參數之敏感度分析與影響程度探討工作，本年度則著重於近場二維評估程式參數取樣及多重運跑技術建立，依據逐步建立之參數分布型態與參數取樣功能的子程式，完成建構近場二維評估主程式與全系統安全評估程式之架構鏈結與本土化系統介面，可提供計畫後續考量近場核種為二維(軸/徑向)外釋時，進行機率式評估與參數敏感度分析的技術，達成本土初步技術發展的階段性成果。

3.3.1 近場二維評估程式參數取樣及多重運跑技術建立

本項工作延續過去所發展之近場二維垂直置放方式定率式評估模式(94~96年度計畫成果報告)，以此評估模式架構為基礎，將九個不同分布型態之子程式(如均一分佈、常態分佈、對數均一分佈、對數常態分佈...等)建立於主視窗操作介面系統，繼之將拉丁超立體取樣及蒙地卡羅參數取樣子程式與視窗操作介面系統進程式間之架構鏈結設計，以針對參數給定條件及分佈型態，進行指定取樣數之拉丁超立體取樣及蒙地卡羅參數取樣，可獲得不同分佈型態條件下之參數母體數列。接續將隨機排列、無相關排列及特定相關排列之子程式鏈結建立於視窗操作介面系統，以進行參數母體數列之參數相關性的數據排列。

完成參數取樣之功能建立後，撰寫VB程式之圖形繪圖程式，直接於視窗操作介面系統將參數取樣數列結果進行圖形繪圖，便於使用者檢視參數取樣結果與參數給定分佈型態之正確性，並可獲得參數之散落圖(scatter plot)。完成視窗操作介面系統之取樣功能後，進行近

場二維(軸/徑向)垂直置放方式評估模式之主程式與備妥取樣數據之關連性鏈結程式設計，以針對欲進行多重運跑之近場參數，完成多重運跑輸入檔之製備，製備完成之輸入檔另可提供程式使用者進行檢核之用，而製備輸入檔可直接鏈結至主程式執行自動化之多重運跑，以建立評估程式之多重運跑功能。

完成評估程式之多重運跑功能建立後，再撰寫VB程式之圖形繪圖程式，直接於視窗操作介面系統進行多重運跑結果之圖形繪圖，以獲得多重運跑結果之不同百分比(5th百分比、50th百分比及95th百分比)與平均值的核種外釋評估結果曲線。近場二維評估程式之參數敏感度分析系統架構設計部分，則依據多重運跑結果，撰寫VB程式以繪製外釋率峰值與峰值發生時刻之機率密度函數(Probability Density Function, PDF)與累積機率密度補函數(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)圖形，以獲得取樣參數在不同評估區間之發生機率，展示機率式分析結果。

99年度計畫根據上述所列之計畫工作內容與項目，建立並完成近場二維垂直置放方式評估模式之機率式評估功能。該計畫工作之執行方式，近場二維核種外釋分析則採用區塊模式(Compartment model)進行，並考慮處置孔附近不同外釋途徑之軸/徑向水流分率以計算近場總外釋率。本年度工作除完成近場二維評估程式之機率式評估功能與技術建立外，並針對該評估程式所有參數，針對視窗操作介面程式之取樣結果、程式製備之參數輸入檔檔案與主程式所讀取數據進行結果驗證，以確認本年度計畫所建立之視窗操作介面的程式設計與程式鏈結間的正確性與合理性。

3.4 SNFD2009報告審查答覆說明與修訂

SNFD2009年報告彙整國內現有資料，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安全評估」研究成果，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(SNFD2009)」之編撰工作，主要目的在回顧與說明現階

段已完成之成果，該報告「結論與建議」章節中，已就最終處置之初步技術可行性說明國內是否具有處置用過核子燃料初步技術可行性之評估結果與理由。

SNFD2009報告係以花崗岩質為潛在母岩岩體，藉由彙整及評析歷年來我國用過核子燃料最終處置計畫之相關成果，具體說明我國迄今是否具備潛在母岩岩體(花崗岩質岩體)調查之技術、能力與設備，並建立將現地調查數據實際應用於功能與安全的評估模式，並和法規標準進行比較，完成簡化情節下用過核子燃料處置封閉後對民眾之影響評估方法。經由此一系列完整之規劃、調查、試驗、評估與分析的技術與研究以齊備適合我國處置地質環境的自主調查與評估能力，而於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」，並據以建議候選場址調查區域，及建立潛在處置母岩功能/安全評估技術，作為後續「候選場址評選與核定階段(2018-2028)」工作的基礎架構。

SNFD2009報告在排除非技術性的議題條件下，根據台電公司長期以來所發展與累積的相關技術資料，及國內外相關文獻資料，就「在臺灣的地質環境現況下，是否有適合的岩體，可作為用過核子燃料最終處置母岩的潛能?」、「是否已建立結晶岩體的深地層特性調查與資料解析技術?」、「是否已具備處置概念的設計基礎?」、「是否已建立地質調查資料及處置設施功能/安全之整合性評估技術?」等技術性議題，進行最終處置初步自我評估。評估內容係透過深層花崗岩地質的特性調查與數據蒐集分析、小規模試驗場之各項試驗，據以建立水文地質概念模式，作為功能與安全評估之具體模擬對象；完成我國現階段之處置設施與多重障壁系統的基本概念、說明各組成物件所具備的功能與特性，據以研擬並設計我國之處置設施的配置，及工程障壁組成材料與尺寸，作為處置概念情節發展的基礎；並發展近場、遠場、生物圈及全系統架構之評估程式，藉由潛在處置母岩之環境特性及調查數據，進行簡化後之基本情節的案例分析與參數敏感度及不確

定性之機率式分析，檢視以潛在處置母岩為主體之我國虛擬處置場址的安全性。

SNFD2009報告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，對處置場全系統之安全評估進行有系統分析，分別就近場、遠場及生物圈等三個子系統程式建立一套全系統評估程式架構，系統地連結三個子系統程式，並處理其間之輸出、入的介面問題。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，以瞭解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。

台電公司於98年底之前將「用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告」(SNFD2009報告) 提送物管局審查，本年度將針對審查委員之審查意見，進行答覆說明及報告內容之修訂。

4. 預期成果分析

依照最終處置計畫書「潛在處置母岩特性與調查評估階段(2005~2017年)」的規劃，目前完成SNFD2009報告，並建立測試區案例分析所需之裂隙特性的基礎模式，作為本土初步技術發展之階段成果。本計畫將持續進行花崗岩處置母岩特性調查與功能安全評估的技術發展，以期達成本階段之目標於2017年底提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(簡稱SNFD 2017)，俾作為後續候選場址評選與核定階段評估的基礎。

本年度工作之規劃內容，將依照「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」等項目進行，其預期成果及效益彙整如表 4-1所示。

表 4-1：預期成果及效益

預期研究成果	效益
處置環境條件的調查研究	
獲取花崗岩裂隙水質長期監測資料	調查特定裂隙段地下水水質長期監測的變化趨勢，作為建構花崗岩質潛在處置母岩水文地質概念模式，並提供長期穩定性評估之用。
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	裂隙連通性及溶質傳輸參數可提供花崗岩質潛在處置母岩水文地質概念模式分析之用。
完成花崗岩體規模及構造分布特性分析	建立空中磁測三維構造及岩體規模解析能力，掌握調查區花崗岩體分布與形貌，做為後續構造驗證規劃的重要依據。
處置技術的研究發展	
完成岩塊熱傳導係數量測及熱效應數值模擬	提供未來近場環境溫度分布模擬之用。
完成花崗岩質潛在處置母岩測試區區域性地下水量估算技術之建立	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。
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	提供厭氧環境下Cs及Se核種在功能安全評估的依據，藉由各種條件下Kd值之變化與分析結果，提供安全評估所需參數。
完成高放射性廢棄物活度與衰變熱分析	提供未來進行高放射性廢棄物處置場功能安全評估計算之源項活度與衰變熱資料。
完成高放射性廢棄物處置概念	提供我國高放射性廢棄物最終處置場相關配置概念及處置場設施配置，作為最終處置場配置規劃之依據。
用過核子燃料處置的功能評估	
建立近場二維評估程式之參數取樣及多重運跑相關技術	建立近場二維核種外釋機率式評估技術與評估功能。