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

中華民國九十九年六月

我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告

摘要

根據放射性物料管理局2006年7月核定之「用過核子燃料最終處 置計畫書」的要求,台電公司應針對「處置環境條件的調查研究」、 「處置技術的研究發展」,及「用過核子燃料處置的功能評估」等三 大議題,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」。

在「處置環境條件的調查研究」方面,本報告主要係根據國內外 現有相關文獻與最終處置計畫歷年成果的彙整評析,說明台灣地質環 境、影響地質環境穩定性相關之主要天然事件、潛在處置母岩的基本 特性與認知,以及深地層特性調查技術的發展現況與後續建議。根據 現階段的評析結果顯示:花崗岩是目前台灣地區較具可行性之潛在處 置母岩,主要分布於台灣東部大南澳變質帶中,以及金門、馬祖及烏 近等離島;台灣地區雖處於地質不穩定帶,但活動構造、地震、火山 活動及地質災害均有其侷限分布的特性;未來若要進行潛在處置母岩 之岩體穩定性研究,需要詳細瞭解岩體規模、分布與主要構造帶延伸 等資訊,建議配合發展中的空中磁測調查解析技術,加強三維與高解 析探測技術之發展,應可有效掌握國內潛在處置母岩的特性。台電公 司目前已於技術發展測試區建立500公尺深度結晶岩體的深地層特性 調查與資料解析的相關基礎技術,除取得測試區的相關地質特性參數 外,並已順利完成地質概念模式,供發展與測試功能安全評估模式, 俾完備母岩特性調查至處置功能評估整體流程之初步技術可行性評 估。

在「處置技術的研究發展」方面,本報告係針對用過核子燃料最 終處置的評估範圍,說明工程障壁處置設施與天然障壁的基本概念, 以及各組成要件應具備的功能,並就國際間之工程障壁與處置設施技術的研究發展現況,擬定我國用過核子燃料最終處置場之處置概念與

i

初步設計,作為進行初步技術可行性安全評估與分析的參酌依據來源。

在「用過核子燃料處置的功能評估」方面,本報告主要整合技術 發展測試區的現地特性資料與地質概念模式、虛擬處置場的概念設計 與假設條件,以及國內外相關研究數據,並依據處置場情節發展結 果,建立適用於我國之近、遠場及生物圈評估模式與全系統分析程式 架構,透過數值模擬工具,分析虛擬處置場之概念設計是否符合法規 安全標準,並據以說明功能評估技術的發展現況,作為後續研究發展 與改進之依據。處置場功能/安全評估為一連續循環反饋計算與修訂 的分析工作,未來候選場址經評選後可進行處置場建置的可行性研 究,經不斷地評估、分析與反饋結果,持續調整現地調查工作或相關 試驗的重點方向,以確定最終處置場址符合工程技術可行與長期處置 安全的目標。

本報告內容架構共分為五章。第一章為緒論,簡述地質處置技術 之發展現況、處置概念與世界各國發展的趨勢。第二章說明我國地質 概況與作用、潛在母岩基本特性與認知、調查技術發展現況與成果 等。第三章說明工程障壁與處置設施技術的評估假設、我國工程障壁 與處置設施的基本概念與設計成果、各組成物件所需具備的功能與特 性。第四章則依據第二章測試區的現地特性資料與地質概念模式,與 第三章之處置設施基本概念,進行定率式基本案例評估分析與參數敏 感度及不確定性之機率式分析,以初步檢視我國處置場功能評估技術 能力的現況。第五章則總結評估成果,並提出後續研究發展的方向與 建議。

關鍵字:用過核子燃料、最終處置、處置環境、潛在母岩特性調查、 功能與安全評估、核種傳輸、花崗岩

ii

Preliminary Feasibility Assessment Report for the Spent Nuclear Fuel Final Disposal Technology in Taiwan

ABSTRACT

According to the demands in the "Long-Term Disposal Plan for Domestic Spent Nuclear Fuel" approved by Fuel Cycle and Material Administration in July, 2006, the Taipower company should address the "Preliminary Feasibility Assessment Report for the Spent Nuclear Fuel Final Disposal Technology" in 2009 (SNFD2009 report). This report principal parts: "Disposal Environment should include three Investigation," "Development of Disposal Technologies," and "Performance Assessment of Spent Nuclear Fuel Disposal."

In"Disposal Environment Investigations," the tectonic setting of Taiwan. natural events affecting the stability of geological environment, basic characteristics and understanding of potential host rocks, and comments on development of further technologies for deep geological investigation are stated. All the contents are based on literature review and previous achievements of the final disposal projects. According to conclusions of the study at present, granite is the more potential host rock for repository in Taiwan, which is distributed in the Tananao metamorphic belt in eastern Taiwan, and in the Kinmen, Matsu, and Wu-Chiu offshore islands, etc. Even though Taiwan is under unstable tectonic environment, active structures, earthquake activities, volcanic activities and geological harzards took place in the restricted regions. For arrangement the research of stability of potential host rocks in the future, we need to realize the size and distribution of granitic batholiths and the spread of main structures in detail. Furthermore, the developing aeromagnetic survey is suggested to conduct for progressing three dimention and high resolution exploring techniques. Through the aeromagnetic survey, we could know the characters of potential host rocks for repository in Taiwan well. The Taipower company has established the basic

iii

techniques for deep strata investigation of 500m depth crystalline plutons and for data processing in the test site. According, we not only obtained the related geological parameters of test site but built up the preliminary geological concept model. These data could provide useful information for developing and testing the performance assessment. It is eventually to integrate the preliminary technology feasibility assessment for the overall process of host rock investigation and performance assessment for final disposal.

In "Development of Disposal Technologies," it defined the assessment area of spent nuclear fuel final disposal. It also explained the fuctionalities and basic concepts of natural and engineered barriers. Based on these achievements and findings coupled with the researches in the worldwide, the disposal concepts and preliminary design of a final disposal site are made. These findings will be used to creat the data base of preliminary feasibility safety assessment.

In "Performance Assessment of Spent Nuclear Fuel Disposal," this report compiled in-situ characteristic data from test area for technology development. Also, it illustrated the geological model, design concepts of a hypothesis site and collection of available data in the world. According to FEPs and scenarios development, assessment models for near-, far-field, biosphere and total system assessment can be built. Through numerical calculations, it will show whether the design concepts for hypothesis site is in accordance with the laws and regulatories. Moreover, the calculation results could be the base to modify and improve the assessment models. Performance assessmenet is a series of modification and iteration work. The assessment result will export to in-situ work. Accordingly, goal of field investigation and laboratory tests could be adjusted to assure feasibilities of engineering and long-term safety.

The SNFD2009 report includes five chapters. The first chapter contains introduction of disposal works to current technologies, disposasl concepts, and development trend in the worldwide. The second chapter describes the geological environment in Taiwan, characteristics and knowledge of the host rock, and current status and

iv

achievement of investigation technologies. The third chapter illustrated the assumption for assessing the performance of engineered barriers, the design concepts of engineered barrier system and facilities, and functionality of each components in engineered barriers systems. According to the description of geological models in the second chapter and illustration of engineered barrier systems in the third chapter, deterministic and probabilistic calculations are carried out for base case study and parameter sensitivity and uncertainty analyses. The fifth chapter is the conclusion, it contains an evaluation of the current achievement, and point out a direction for further studies.

Keywords: Spent nuclear fuel, Final disposal, disposal environment, Performance and safety assessment, Granite

v

		頁次
摘要		
目錄		vi
圖目錄		ix
表目錄		xvii
1、緒論		1-1
1.1. 序	·吉	1-1
1.2. 用	過核子燃料地質處置研究發展的背景	1-3
1.3. 用	過核子燃料特性化	1-6
1.4. 處	置需求	1-11
1.5. 地	質處置概念	1-11
1.6. 地	質處置研究發展	1-15
1.7. 我	國地質處置概念與技術可行性評估方法	1-20
2、 地質環	境條件的研究調查	2-1
2.1. 地	質環境	2-5
2.1.1.	地質概述	2-5
2.1.2.	主要構成岩體	2-30
2.1.3.	水文地質	2-57
2.1.4.	蝕變作用產物	2-94
2.1.5.	地下資源種類與分布	2-114
2.1.6.	地質調查技術研究發展	2-131
2.2. 地	質環境的變化	2-180
2.2.1.	地震活動	2-180
2.2.2.	斷層活動	2-190
2.2.3.	地殼上升與剝蝕作用	2-202
2.2.4.	火成活動	2-213
2.2.5.	氟候變遷與海平面變化	2-229
2.3. 潛	在處置母岩特性	2-250
2.3.1.	花崗岩	2-250
2.3.2.	泥岩	2-289
2.3.3.	中生代基盤地層	2-315

5.	處置技術	盱的研究發展	3-1
3	3.1. 評作	古的假設	3-1
	3.1.1.	處置用過核子燃料的程序	3-1
	3.1.2.	處置技術評估的範圍	3-9
	3.1.3.	工程障壁與處置設施技術評估的假設	3-15
3	3.2. 工利	呈障壁與處置設施的基本概念	
	3.2.1.	工程障壁的基本概念	
	3.2.2.	我國處置設施的基本概念	
3	3.3. 工利	呈障壁的相關技術	3-35
	3.3.1.	外包裝	3-35
	3.3.2.	緩衝材料	3-50
	3.3.3.	摘要與未來任務	3-76
3	3.4. 處旨	置設施的相關技術	3-78
	3.4.1.	設計研究	3-78
	3.4.2.	興建	3-90
	3.4.3.	運轉	3-94
	3.4.4.	封閉	3-94
4、	用過核一	子燃料處置的功能評估	4-1
Z	4.1. 評作	古障壁功能的方法	4-1
	4.1.1.	多重障壁系統的組成	4-1
	4.1.2.	地下水外釋情節	4-3
	4.1.2. 4.1.3.	地下水外釋情節 分析的模式鏈	4-3 4-5
۷	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地介	地下水外釋情節 分析的模式鏈 寶環境模擬與工程障壁系統的條件定義	4-3 4-5 4-7
Z	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地有 4.2.1.	地下水外釋情節 分析的模式鏈 質環境模擬與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義	4-3 4-5 4-7 4-7
۷	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地行 4.2.1. 4.2.2.	地下水外釋情節 分析的模式鏈 質環境模擬與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 地下水演化的地球化學模式	4-3 4-5 4-7 4-7 4-20
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地有 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近均	地下水外釋情節 分析的模式鏈 寶環境模擬與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 地下水演化的地球化學模式 易環境	4-3 4-5 4-7 4-7 4-7 4-20 4-25
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地介 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近步 4.3.1.	地下水外釋情節 分析的模式鏈 寶環境模擬與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 地下水演化的地球化學模式 楊環境 工程障壁系統	4-3 4-5 4-7 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地介 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近年 4.3.1. 4.3.2.	地下水外釋情節 分析的模式鏈 寶環境模擬與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 地下水演化的地球化學模式 易環境 工程障壁系統 熱狀況	4-3 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地行 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近年 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3.	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地行 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近年 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3. 4.3.4.	地下水外釋情節 分析的模式鏈 寶環境模擬與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義 地下水演化的地球化學模式 場環境 J程障壁系統 水文地質條件 工程障壁系統的孔隙水化學	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43 4-45
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地有 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近年 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3. 4.3.4. 4.3.5.	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43 4-45 4-46
2	4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地行 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近年 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3. 4.3.4. 4.3.5. 4.3.6.	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43 4-45 4-46 4-55
2	 4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地行 4.2.1. 4.2.2. 4.3. 近年 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3. 4.3.4. 4.3.5. 4.3.6. 4.3.7. 	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-43 4-43 4-45 4-46 4-55 4-62
2	 4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地行 4.2.1. 4.2.2. 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3. 4.3.4. 4.3.5. 4.3.6. 4.3.7. 4.4. 工利 	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43 4-45 4-45 4-62 4-65
2	 4.1.2. 4.1.3. 4.2.1. 4.2.2. 4.3.1. 4.3.2. 4.3.3. 4.3.4. 4.3.5. 4.3.6. 4.3.7. 4.4.1. 	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43 4-45 4-46 4-55 4-62 4-65 4-66
2	 4.1.2. 4.1.3. 4.2. 地貨 4.2.1. 4.2.2. 4.3.3. 4.3.4. 4.3.5. 4.3.6. 4.3.7. 4.4.1. 4.4.2. 	地下水外釋情節	4-3 4-5 4-5 4-7 4-7 4-20 4-25 4-25 4-25 4-27 4-43 4-45 4-45 4-46 4-65 4-66 4-68

4.4.4.	分析的輸入資料	
4.4.5.	分析的結果	
4.5. 地質	圈核種傳輸模擬	
4.5.1.	介紹	
4.5.2.	地質圈核種傳輸介質分類	4-124
4.5.3.	核種在多孔性介質的傳輸模擬	4-128
4.5.4.	核種於裂隙介質的傳輸模擬	4-134
4.5.5.	敏感度分析	4-148
4.5.6.	分析假設與參數變動的範圍	4-157
4.5.7.	核種遲滯效應的分析	4-165
4.6. 案例]說明	4-167
4.6.1.	案例背景說明	4-167
4.6.2.	情節分析	4-170
4.6.3.	計算與分析	4-172
4.6.4.	功能評估	4-182
4.6.5.	重要參數之不確定性分析	4-184
5、 結論與建	議	5-1
5.1. 地質	環境研究	5-1
5.2. 處置	技術的研究發展	
5.2.1.	地質調查技術	
5.2.2.	廢棄物本體	5-5
5.2.3.	廢棄物罐	5-5
5.2.4.	緩衝回填材料	5-6
5.2.5.	近場環境	5-7
5.3. 多重	[障壁系統的功能評估	5-7
5.3.1.	功能評估	5-7
5.3.2.	安全分析	5-9
6、 參考文獻	ξ	6-1
7、 中英對照	{檢索	7-1

圖目錄

		頁次
圖	1-1:台灣核能電廠位置	1-10
圖	1-2:最終處置概念示意圖	1-14
圖	2-1:台灣地理位置圖	2-7
圖	2-2:台灣地形分區圖	2-8
啚	2-3:全球板塊與火山帶分布圖	2-10
圖	2-4:台灣地質分區圖	2-18
圖	2-5:台灣鄰近地區大地構造架構圖	2-22
圖	2-6:台灣板塊構造立體示意圖	2-22
圖	2-7:台灣及鄰近區域海域地形、大地構造架構及剖面關係圖。	2-23
圖	2-8:台灣(含附近海域)地質分區及地質剖面示意圖	2-24
圖	2-9:台灣碰撞演化示意圖	2-25
圖	2-10:台灣弧陸碰撞模式與最大水平應力軌跡	2-28
圖	2-11:台灣及其鄰近地區第四紀至今水平大地應力分布	2-29
圖	2-12:台灣地質圖	2-34
圖	2-13:台灣北部岩區之各類火成岩之分布	2-37
圖	2-14:台灣東部岩區之各類火成岩之分布	2-37
圖	2-15: 澎湖地區之火成岩分布	2-38
啚	2-16:台灣西部陸地區域之火成活動分布圖	2-38
圖	2-17:台灣西部麓山帶與海岸平原之沉積物分布圖	2-40
啚	2-18:中央山脈岩區之沉積物分布圖	2-41
圖	2-19:海岸山脈岩區之沉積岩分布圖	2-43
啚	2-20:中央山脈板岩區岩性分布圖	2-45
圖	2-21:中央山脈變質雜岩區(大南澳片岩)岩性分布圖	2-46
啚	2-22:台灣東部片麻岩體之分布圖	2-48
圖	2-23:岩體強度分級圖	2-52
啚	2-24:台灣地層岩體強度分級分布圖	2-56
圖	2-25:台灣地區地下水文地質圖	2-60
圖	2-26:台灣地區地下水資源分區圖	2-64
圖	2-27:台灣地下水資源圖一地下水流模數圖	2-69
圖	2-28:台灣地下水資源圖一地下水逕流係數圖	2-70
圖	2-29:台灣地下水資源圖-河川基流係數圖	2-71
圖	2-30: 環保署水質監測位置及結果(水溫)圖	2-77
圖	2-31:環保署水質監測位置及結果(酸鹼度)圖	2-78
圖	2-32:環保署水質監測位置及結果(導電度)圖	2-79

圖	2-33: 水利署地下水監測網位置分布圖2-85
圖	2-34:水利署水質監測位置及結果(酸鹼度/氧化還原電位/導電度)圖(一)2-86
圖	2-35:水利署水質監測位置及結果(酸鹼度/氧化還原電位/導電度)圖(二)2-87
圖	2-36:水利署水質監測位置及結果(酸鹼度/氧化還原電位/導電度)圖(三)2-88
圖	2-37:水利署水質監測位置及結果(Pipper)圖(一)
圖	2-38: 水利署水質監測位置及結果(Pipper)圖(二)
圖	2-39:水利署水質監測位置及結果(Pipper)圖(三)
圖	2-40: Piper水質菱形圖及水質型態分類圖2-93
圖	2-41:新竹與苗栗地區各種粒徑含水層之透水係數分布圖
圖	2-42:新竹、苗栗與屏東平原地區礫石層透水係數分布圖
圖	2-43:新竹、苗栗與屏東平原地區粗砂層透水係數分布圖
啚	2-44:新竹、苗栗與屏東平原地區細砂層透水係數分布圖
啚	2-45:澎湖鳥嶼的玄武岩層具有柱狀節理及層間紅土2-106
圖	2-46:大屯山火山區馬槽鑽井之熱水換質礦物分布
置	2-47:金瓜石礦體及地質構造分布圖2-108
置	2-48:金瓜石礦床礦脈帶分布圖2-109
圖	2-49:金瓜石本山礦體構造的垂直分布圖
圖	2-50: 金瓜石石筍地區礦化作用分布圖2-111
圖	2-51:龜山島外海氣孔柱冒出熱液之氣體成分圖
圖	2-52:台灣西南部泥火山與地質構造分布圖
圖	2-53:台灣金屬礦物資源分布圖2-118
置	2-54:台灣非金屬礦產資源分布圖2-125
置	2-55:台灣能源礦產及地下水資源分布圖2-130
置	2-56:花崗岩質技術發展測試區(K區)執行成果摘要(一):地質概念模式
置	2-57:花崗岩質技術發展測試區(K區)執行成果摘要(二):地質特性參數
啚	2-58: 瑞典Forsmark場址空中磁測構造解釋圖2-144
置	2-59:磁力異常圖幅成果示意圖2-145
圖	2-60:國內已具備可行的地表地球物理探測技術。2-146
圖	2-61:臺灣地區布蓋重力異常圖2-147
置	2-62:台中縣大安溪南岸反射震測剖面圖2-148
置	2-63:桃園縣爺亨地區大地電磁電阻影像剖面圖
圖	2-64:金門-澎湖間之海上震測剖面圖
置	2-65:烏坵鄰近海域之海床聲波剖面圖2-149
置	2-66:小坵嶼BH-12井孔之標準地物井測圖
圖	2-67:小坵嶼井孔內井壁影像圖2-150
圖	2-68:空中電磁波探測技術2-151

置	2-69:日本Origi地熱田三維電性構造結果圖(大地電磁技術)2-151
圖	2-70:海域電磁波探測技術2-152
圖	2-71:印尼Darajat地熱田微震震央分布圖2-153
圖	2-72:芬蘭Olkiluoto場址地下主要破碎帶分布圖(垂直震測剖面技術)2-153
圖	2-73:最終處置場址水文地質孔內量測示意圖
圖	2-74: 岩層滲漏試驗(lugeon test)示意圖2-159
啚	2-75:水文地質單孔水力試驗示意圖2-160
啚	2-76:水力脈衝試驗設計示意圖2-160
啚	2-77:熱脈衝式孔內微流速量測儀器及量測記錄
圖	2-78:利用封塞設備長期觀測裂隙壓力隨時間之變化
圖	2-79:通井地化井測結果與主要導水裂隙判釋圖
啚	2-80:深層地下水採樣方法示意圖2-166
啚	2-81:深層地下水封塞監測及採樣設備
圖	2-82:雙封塞抽水洗井及取樣過程水質監測紀錄
啚	2-83:瑞典SKB臍帶式雙封塞地下水取樣與監測設備
啚	2-84:日本JNC串管式雙封塞地下水取樣與監測設備2-168
啚	2-85:深層地下水封塞取樣水質分析結果與鈾的穩定相圖
啚	2-86:澳洲CSIRO發展之Hollow Inclusion Stress Cell2-175
圖	2-87:現地應力套鑽法試驗步驟示意圖
圖	2-88:現地應力水力破裂法(HF)與既存裂隙水力法(HTPF)試驗示意圖2-179
圖	2-89:現地應力水力法試驗示意圖2-179
圖	2-90:台灣地震與地體構造圖2-181
圖	2-91:台灣地震分區圖2-183
圖	2-92:集集大地震發生前之台灣地區地震震央分布圖
圖	2-93:集集大地震發生後之台灣地區地震震央分布圖
圖	2-94:台灣二十世紀以來災害性地震震央位置圖
圖	2-95:台灣活動斷層分布圖(第一版)2-195
圖	2-96:台灣活動斷層分布圖(第二版)2-196
圖	2-97:台灣地震震央分布與地震剖面圖2-201
圖	2-98:台灣全新世構造隆升速率(不含平原及山區)
圖	2-99: 嘉南、高雄平原構造隆升(正值)及沉降(負值)速率2-205
圖	2-100:台灣地盤升降率等值線圖2-207
圖	2-101:台灣地區垂直運動速度場2-208
圖	2-102:台灣侵蝕速率圖2-210
圖	2-103:台灣1970-1999年期間侵蝕速率圖
啚	2-104:台灣現代造山運動(≦5Myr)時期之核飛跡剝露率圖2-212
圖	2-105:台灣北部火山帶(NTVZ)活動的時空分布圖
圖	2-106:台灣海域歷史火山噴發位置圖2-219

啚	2-107:台灣東部岩區火成岩時空分布圖	2-221
圖	2-108: 吕宋島弧火山岩噴發活動的時空分布	2-222
圖	2-109:大陸東南及台海一帶晚白堊紀至新生代火山岩分布圖	2-226
圖	2-110:大陸東南及台海一帶第三紀玄武岩分布時空演變圖	2-227
圖	2-111:台灣全年等溫線圖(1956-1985年)	2-235
圖	2-112:台灣全年等降水量圖(1956-1985年)	2-237
圖	2-113:全球過去15萬年之氣候變遷	2-241
圖	2-114:全球過去15萬年之海水面變化	2-241
圖	2-115:全球過去1.8萬年之氣候變遷	2-242
圖	2-116:台灣2萬年至今(全新世)的絕對海水面曲線	2-242
圖	2-117:全球未來百年平均溫度演變趨勢圖	2-245
圖	2-118:台灣地區特定地點未來兩百年海水面上升情景	2-246
圖	2-119:金馬離島未來兩百年海水面上升情景	2-247
圖	2-120:台灣地區未來15萬年海水面自然變遷示意圖	2-249
圖	2-121:大陸沿海及台灣西部離島花崗岩分布圖	2-253
圖	2-122:台灣花崗岩偏光顯微鏡下黑雲母與針狀鈦鐵礦包裹體	2-261
圖	2-123: 偏光顯微鏡下呈現太武山岩體黑雲母的殘片狀特徵	2-261
圖	2-124:台灣東部花崗岩之地球化學分類	2-262
圖	2-125:台灣東部花崗岩與福建花崗岩類之岩石化學比較圖	2-262
圖	2-126:台灣東部花崗岩與福建花崗岩類之岩石化學蛛網圖	2-263
圖	2-127:台灣東部花崗岩歷經兩次變質作用	2-264
圖	2-128:台灣東部大南澳變質帶之壓力-溫度-時間演化路徑	2-264
圖	2-129:台灣東部溪畔隧道旁溪畔岩體與大理岩邊界處的褶皺構造	2-269
圖	2-130:台灣東部溪畔岩體中具伸張特性的高角度韌性剪切帶	2-269
圖	2-131:台灣東部花崗岩之破碎帶為地下水的主要通道	2-270
圖	2-132:金門花崗岩常見的冷卻節理與輝綠岩脈群	2-271
圖	2-133:太武山斷層帶根據鑽井鑽遇斷層面深度推算之位態	2-272
圖	2-134:台灣地體構造可區分為三個緊臨的條帶	2-278
圖	2-135:台灣地體構造的三個橫向剖面示意圖	2-279
圖	2-136:台灣大地構造演化示意圖	2-280
圖	2-137:台海地區岩漿活動與大地構造演化圖	2-281
圖	2-138:台灣地區震源分布及無震帶	2-286
圖	2-139:中央山脈東側剝蝕率與造山帶平均剝蝕率之比較	2-287
圖	2-140:福建東南花崗岩區張裂型大地構造演化示意圖	2-288
圖	2-141:金門地區新生代張裂環境演育的半地塹式抬升與沈陷模式	2-288
圖	2-142:台灣西南部平原區及麓山帶地質概圖	2-290
圖	2-143:台南一號鑽井地質剖面圖	2-291
圖	2-144: 嘉南平原水文地質觀測網泥岩質基盤深度分布圖	2-292

2-145: 嘉南平原南段楠梓-鳳鳴水文地質剖面	2-293
2-146:台灣西南部泥岩出露區及附近地區地質圖	2-296
2-147:台灣西南部平原區鑽井地下水流向示意圖	2-304
2-148:台灣西南部泥岩出露區及附近地區地質構造圖	2-308
2-149:台灣西南部地震、斷層構造及泥火山分布圖	2-311
2-150:台灣西南部外海、平原區與麓山帶之地層與各天然氣儲集層	2-312
2-151:中央山脈泥岩地層與921震後地震分布關係圖	2-313
2-152:台灣西部基盤岩頂面深度及構造分布圖	2-316
2-153:台灣西部中生代基盤岩剖面圖	2-317
2-154:台灣鄰近地區大地構造	2-318
2-155:台灣西部及台灣海峽中生代基盤岩分布深度圖	2-319
2-156:台灣及台灣海峽中生代基盤岩剖面示意圖	2-322
2-157:台灣鄰近地區高磁力基盤與地震震源分布圖	2-323
2-158:澎湖花嶼火山雜岩地球化學岩性分析結果及樣本位置圖	2-325
2-159:台灣西部中生代高磁力基盤岩形成之古地理位置圖	2-326
2-160:中油公司IT1鑽井岩心的孔隙率與深度變化圖	2-328
2-161:台灣海峽及鄰近地區火山分布及始新世地層剝蝕厚度圖	2-329
2-162:台灣西部中生代基盤岩與地震、構造分布圖	2-331
2-163:澎湖地區震測剖面之地層與構造解析	2-332
2-164:台灣海峽台西盆地震測剖面之地層與構造解析	2-333
2-165:台灣西部中生代基盤岩震測剖面之地層與構造解析	2-334
2-166:澎湖海域至西部平原中生代基盤岩剖面圖	2-335
3-1:核燃料之結構示意圖 (NRC, 2009)	3-24
3-2: KBS-3型廢棄物罐剖面	3-26
3-3:廢棄物罐組件結構圖	3-27
3-4:處置設施概念圖	3-30
3-5: 處置隧道與處置孔剖面	3-34
3-6:地下處置設施配置圖	3-34
3-7:廢棄物罐篩選程序概念	3-49
3-8: 美國Black Hills Bentonite產區分佈	3-53
3-9: Black Hills Bentonite之原礦	3-53
3-10:蒙脫石組構圖	3-55
3-11:日興土添加不同比例花崗岩之熱傳導係數變化	3-59
3-12:一維半無限域中線狀熱源配置	3-61
3-13:黏土含量與水力傳導係數關係圖	3-63
3-14:回脹變形試驗儀器示意圖	3-65
3-15:回脹壓力試驗儀器示意圖	3-65
3-16:不同黏土體積比與平衡回脹應變之關係	3-66
	 2-145:嘉南平原南段楠梓一鳳鳴水文地質刳面. 2-146:台灣西南部泥岩出露區及附近地區地質圖 2-147:台灣西南部平原區鏡井地下水流向示意圖 2-148:台灣西南部平原區鏡井地下水流向示意圖 2-149:台灣西南部北寬、斷層構造及泥火山分布圖 2-150:台灣西南部外海、平原區與蒐山帶之地層與各天然氣儲集層 2-151:中央山脈泥岩地層與921寬後地震分布關係圖 2-152:台灣西部基盤岩頂面深度及構造分布圖 2-153:台灣西部中生代基盤岩刻面圖 2-154:台灣西部人也灣海峽中生代基盤岩分布深度圖 2-155:台灣西部人也灣海峽中生代基盤岩分和高園 2-155:台灣西部中生代基盤岩刻面示意圖 2-157:台灣西部中生代基盤岩刻面示意圖 2-156:台灣及台灣海峽中生代基盤岩刻面示意圖 2-157:台灣西部中生代高磁力基盤與地震、構造分布圖 2-163:澎湖花岫區震測剖面之地層與構造解析 2-161:台灣海峽台西盆地震測剖面之地層與構造解析 2-162:台灣西部中生代基盤岩裏山霞、構造分布圖 2-163:澎湖地區震測剖面之地層與構造解析 2-164:台灣海峽台西盆地震測剖面之地層與構造解析 2-165:台灣西部中生代基盤岩裏山園 3-11:核燃料之結構示意圖 (NRC, 2009) 3-2:KBS-3型廢棄物罐剖面 3-3:廢棄物罐創曲 3-3:廢棄物罐組件結構圖 3-4:處置設施配置圖 3-7:廢棄物罐晶遷 3-7:廢棄物罐晶 3-11:村點 Bentonite產區分佈 3-9:Black Hills Bentonite產區分佈 3-9:Black Hills Bentonite產區分佈 3-11:該點上含量與水角導係數關係圖 3-11:自興土添和不同比例花崗岩之熱傳導係數變化 3-11:自興地線大綠海廠電 3-11:該點一個 3-12:一輪和小爾比納花崗光之熱傳導係數變化 3-11:前日興地線最麗添配圖 3-11:百里地上國一和自己 3-12:一輪半無限域中線,點添配圖 3-14:回賬變形試驗儀器示意圖 3-14:回賬變形試驗儀器示意圖 3-15:回賬慶和試驗儀器示意圖 3-15:四點一種和目標和回點,這次目標。

3-17:不同黏土乾密度與平衡回脹應變之關係	3-66
3-18:最大回脹壓力與黏土乾密度之關係	3-68
3-19:緩衝回填材料地化分析工作架構	3-71
3-20:緩衝回填材料核種傳輸特性研究工作架構	3-71
3-21:盤狀緩衝材料塊體壓製完成外觀	3-74
3-22:環狀緩衝材料塊體壓製完成外觀	3-74
3-23:不同壓實速率下之壓實曲線	3-75
4-1:系統性安全評估之分析架構	4-6
4-2:測試區虛擬含水層分區示意圖	4-18
4-3:測試區虛擬含水層A區之E-E'剖面圖	4-18
4-4:測試區虛擬含水層B區之I-I'剖面圖	4-18
4-5: 測試區水井位置	4-19
4-6:多重障壁概念	4-26
4-7:廢棄物罐剖面	4-26
4-8:處置場熱傳問題所考慮之熱來源	4-28
4-9:核一廠一號機用過子核料之衰變熱與時間分佈曲線	4-32
4-10:單一廢棄物罐溫度分布	4-34
4-11:5組廢棄物罐分析條件溫度分布圖	4-36
4-12:廢棄物罐表面溫度隨處置時間關係圖	4-38
」4-13:核一廠用過核子燃料衰變熱曲線(燃耗度40000 MWd/MTIHM)	4-40
4-14:六組處置區之溫度輪廓線	4-42
4-15:隧道口水平(X方向)應力分佈圖	4-56
4-16:隧道口垂直位移分佈圖	4-56
4-17:孔隙率與開挖面距離之迴歸關係	4-57
4-18:BWR型式廢棄物罐吊運的有限元素分析模式	4-60
4-19:廢棄物罐焊道殘留應力的有限元素分析模式	4-61
4-20:完全冷卻後的焊道殘留等效應力	4-61
4-21:輻射對處置場組成要素之影響	4-63
4-22:核種在近場環境釋出機制示意圖	4-70
4-23: 垂直置放處置概念	4 70
	4-72
4-24:垂直置放方式之核種外釋路徑	4-72 4-73
4-24: 垂直置放方式之核種外釋路徑 4-25:水平置放處置概念	4-72 4-73 4-73
 4-24:垂直置放方式之核種外釋路徑 4-25:水平置放處置概念 4-26:水平置放方式之核種外釋途徑 	4-72 4-73 4-73 4-74
 4-24: 垂直置放方式之核種外釋路徑 4-25:水平置放處置概念 4-26:水平置放方式之核種外釋途徑 4-27: INPAG-N程式與解析解於環狀柱體內濃度分佈 	4-72 4-73 4-73 4-74 4-86
 4-24:垂直置放方式之核種外釋路徑 4-25:水平置放處置概念 4-26:水平置放方式之核種外釋途徑 4-27:INPAG-N程式與解析解於環狀柱體內濃度分佈 4-28:INPAG-NV2程式與解析解於環狀柱體內濃度分佈 	4-72 4-73 4-73 4-74 4-86 4-87
 4-24: 垂直置放方式之核種外釋路徑 4-25:水平置放處置概念 4-26:水平置放方式之核種外釋途徑	4-72 4-73 4-73 4-74 4-86 4-87 4-88
 4-24: 垂直置放方式之核種外釋路徑 4-25:水平置放處置概念 4-26:水平置放方式之核種外釋途徑	4-72 4-73 4-73 4-74 4-86 4-87 4-88 4-91
	 3-18:最大回賬壓力與黏土乾密度之關係

啚	4-32:SITE-94之近場核種釋出率	4-95
啚	4-33:INPAG-N程式模擬SITE-94之近場核種釋出率	4-96
啚	4-34: TILA-99報告之REPCOM程式近場核種釋出率(分裂/活化產	物)4-100
啚	4-35: INPAG-NV2評估程式模擬TILA-99之近場核種釋出率(分裂	/活化產物)
		4-101
啚	4-36: TILA-99報告之REPCOM程式近場核種釋出率(超鈾系衰變	鏈核種)
		4-102
啚	4-37: INPAG-NV2評估程式模擬TILA-99之近場核種釋出率(超鈾	系衰變鏈核
	種)	4-103
圖	4-38: RT-NV-(I)案例之分裂/活化產物核種釋出率	4-114
啚	4-39: RT-NV-(I)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率	4-115
啚	4-40: RT-NV-(Ⅱ)案例之分裂/活化產物核種釋出率	4-116
啚	4-41: RT-NV-(Ⅱ)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率	4-117
啚	4-42: ART-NV-(I)案例之分裂/活化產物核種釋出率	4-118
啚	4-43: ART-NV-(I)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率	4-119
啚	4-44: ART-NH-(I)案例之分裂/活化產物核種釋出率	4-120
啚	4-45: ART-NH-(I)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率	4-121
啚	4-46:裂隙岩體分類模式	4-123
啚	4-47:連續孔隙介質	4-126
啚	4-48:核種於裂隙介質傳輸之概念圖	4-127
啚	4-49:溶質分子之三種力學延散運動機制	4-130
啚	4-50:Pe影響穿透曲線的情況	4-133
圖	4-51:地下水在裂隙介質中流動之水平平行平板模式概念	4-135
啚	4-52:核種在裂隙介質中傳輸之水平平行平板模式概念示意圖	4-136
啚	4-53:模擬核種於裂隙傳輸區域之幾何結構概念示意	4-136
啚	4-54:與CRYSTAL程式對I-129核種外釋率曲線之比較	4-143
啚	4-55:與CRYSTAL程式對超鈾系衰變鏈核種外釋率曲線之比較	4-144
啚	4-56:與INPAGFC對C-14、CI-36、I-129外釋率曲線之比較	4-146
啚	4-57:與INPAGFC對 Pu-240->U-236->Th-232衰變鏈核種外釋率由	由線之比較
		4-147
啚	4-58:不同延散係數之核種濃度隨時間變化情形	4-149
啚	4-59:不同遲滯因子之核種濃度隨時間變化情形	4-150
啚	4-60:地下水流速對核種外釋率之影響	4-154
啚	4-61:裂隙內寬對核種外釋率之影響	4-155
圖	4-62:裂隙間距對核種外釋率之影響	4-156
圖	4-63:近場徑向傳輸基本案例(I)之遠場外釋率	4-161
圖	4-64:近場徑向傳輸基本案例(II)之遠場外釋率	4-162
啚	4-65:近場軸/徑向(廢棄物罐垂直置放)傳輸時遠場外釋率	4-163

4-66:近場軸/徑向(廢棄物罐水平置放)傳輸時遠場外釋率	4-164
4-67:母岩孔隙率變動範圍之核種外釋率	4-166
4-68:虛擬處置場位置(圓圈為可能之虛擬場址)	4-168
4-69:测試區東部花崗岩半地塹模式	4-169
4-70:虛擬處置場核種外釋之水文地質剖面示意	4-169
4-71:BIOMOD-1 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐垂直置放)	4-176
4-72:BIOMOD-1 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐水平置放)	4-177
4-73:BIOMOD-2 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐垂直置放)	4-178
4-74:BIOMOD-2 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐水平置放)	4-179
4-75:生物圈 BOIMOD-1 之重要核種輻射劑量率比例	4-181
4-76:近場核種外釋率不確定性分析結果	4-193
4-77:近場核種外釋率敏感度分析之散佈圖	4-198
4-78: 遠場核種外釋率不確定性分析結果	4-198
4-79:近、遠場核種總外釋率峰值之CCDF	4-199
4-80:近、遠場核種總外釋率峰值發生時刻之CCDF	4-199
4-81:生物圈輻射劑量率不確定性分析結果(BIOMOD-1 模式)	4-201
4-82:總劑量率峰值對發生時刻之散佈圖(BIOMOD-1 模式)	4-201
	 4-66:近場軸/徑向(廢棄物罐水平置放)傳輸時遠場外釋率

表	目	錄
· v •	-	~

	頁次
表	1-1:用過核子燃料長程處置計畫發展特性四個主要階段說明1-5
表	1-2:核能電廠營運資訊1-7
表	1-3:用過核子燃料數量預估1-7
表	1-4:四座核電廠商轉40年用過核子燃料主要放射性核種活度與熱能估算.1-8
表	1-5: 國際高放射性廢棄物處置研發近況1-19
表	2-1:台灣地區東南西北方位極點位置與座標2-9
表	2-2: 地質時間表2-26
表	2-3:台灣主要火成岩分布地點與主要岩性
表	2-4:台灣各類火成岩岩性及分布地點一覽表
表	2-5:台灣各類沉積岩特性一覽表
表	2-6:台灣各類變質岩岩性及分布地點一覽表
表	2-7:台灣各類岩石工程特性參數一覽表
表	2-8:依據岩石單壓強度之岩體分級準則
表	2-9:岩體結構類型之分類準則
表	2-10:台灣地層岩性組合與岩體強度分級一覽表
表	2-11:台灣地區火成岩與離島花崗岩單壓強度初步統計
表	2-12:台灣地區地下水文地質分類表2-59
表	2-13: 甘迺迪公司與水資會調查(研究)面積分區比較表
表	2-14:台灣地區水資源與地下水資源分區
表	2-15:台灣全區各縣市天然地下水資源蘊含量評估結果2-72
表	2-16:台灣各地下水分區之基本水質數據統計表
表	2-17:水質分類表(根據總溶解固體量)2-93
表	2-18:金瓜石地區金、銅之生產量2-117
表	2-19:台灣溫泉區可使用量潛能估計2-129
表	2-20:用過核子燃料最終處置計畫技術發展與應用成果2-134
表	2-21: 大地應力量測方法比較2-172
表	2-22:台灣近代主要災害性地震2-188
表	2-23:世界各國以斷層活動時代為基礎的活動斷層分類2-194
表	2-24:日本活斷層研究會的斷層活動度等級2-194
表	2-25:台灣的地震斷層2-194
表	2-26:中國東南及台灣地區新第三紀以來火山活動年代範圍
表	2-27:台灣地區各氣象站月平均氣溫統計表2-234
表	2-28:台灣地區各氣象站月平均降雨量統計表2-236
表	2-29:台灣地區性海水面變遷推估速率

2-30:IPCC第三次評估報告建立的六個未來發展情境	2-245
2-31:台灣地區特定地點未來兩百年海水面上升情景	2-246
2-32:金馬離島未來兩百年海水面上升情景	2-247
2-33:未來15萬年全球氣候情境	2-248
2-34:台灣地區未來15萬年海水面自然變遷情景	2-249
2-35:我國花崗岩類產狀、規模、年代及地體環境比較表	2-252
2-36:台灣西南部鑽井泥層之物理特性	2-297
2-37:台灣西南部出露泥岩之物理特性	2-298
2-38:台灣西南部泥岩之化學組成	2-302
2-39:台灣西南部泥岩自由回脹試驗結果	2-303
2-40:台灣西南部泥岩限制回脹試驗結果	2-303
2-41:台灣西南部平原區泥岩層水力傳導係數模擬與試驗值比較表.	2-314
2-42:澎湖地區地層表	2-324
2-43:我國潛在處置母岩長期穩定性比較表	2-338
3-1:各國高放射性廢棄物輸出入政策	3-7
3-2: 高放射性廢棄物國際合作處置推動案例歷程表	3-8
3-3:廢棄物罐之基本設計要求	3-38
3-4:緩衝材料預期之功能	3-51
3-5: 滑潤石族黏土礦物種類	3-55
3-6:瑞典緩衝材料T-H-M-C交互耦合作用	3-57
3-7:核種遷移試驗技術分項計畫六年度工作內容	3-72
3-8:處置場地表設施系統需求	3-83
3-9:深層地質處置場地下設施系統需求	3-88
3-10:隧道開挖工法之比較	3-93
4-1:测試區12口研究水井的之水文參數	4-15
4-2: 測試區#006及#010水井鑽探地質分析	4-15
4-3:DRASTIC系統於測試區含水層之評分	4-16
4-4:#006水井水力梯度分析	4-16
4-5:#010水井水力梯度分析	4-17
4-6:FEHM程式中所使用之相關參數	4-33
4-7: KMBH01封塞取樣水質分析	4-53
4-8:評估KMBH01不同深度處置環境下銅材之腐蝕速率	4-54
4-9:不同處置期間,銅材腐蝕速率評估	4-54
4-10:不同時間區間的腐蝕深度評估	4-54
4-11:計算之主要核種初始存量表(核一、二、三廠)	4-108
4-12:評估程式模擬應用之工程障壁特性	4-110
4-13:評估程式模擬應用之核種特性	4-111
4-14:與 CRYSTAL 程式驗證用之輸入參數	4-142
	 2-30: IPCC第三次評估報告建立的六個未來發展情境. 2-31: 台灣地區特定地點未來雨百年海水面上升情景. 2-32: 金馬離島未來雨百年海水面上升情景. 2-33: 未來15萬年全球氣候情境. 2-34: 台灣地區未來15萬年海水面自然變遷情景. 2-35: 我國花崗岩類產狀、規模、年代及地體環境比較表

表	4-15: 孔隙介質核種傳輸模式選用參數表	4-149
表	4-16:多重平行均匀裂隙核種傳輸模式選用參數	4-153
表	4-17:現階段案例分析遠場引用參數表	4-158
表	4-18:核種特性參數表	4-158
表	4-19:遲滯因子引用參數	4-166
表	4-20:BIOMOD-2 模式數據	4-175
表	4-21:核種DCF 值	4-175
表	4-22:不同時間區間銅材的腐蝕深度評估	4-183
表	4-23:緩衝材料之分配係數	4-186
表	4-24:有效擴散係數上下限值	4-186
表	4-25:核種之溶解度限值	4-189
表	4-26:花崗岩之分配係數數值	4-190
表	4-27: 遠場機率式分析之參數	4-191
表	4-28:評估參數代號	

1、緒論

1.1. 序言

我國用過核子燃料最終處置計畫書(台灣電力公司,2006)在主管 機關審查期間,委員要求台電公司彙整過去20年我國用過核子燃料最 終處置計畫研究成果做一階段報告,經討論後決議參酌日本H3報告 (PNC,1992)的精神與內涵,針對我國地質環境,完成現有處置環境 資訊的蒐集研析及以虛擬場址進行簡化情節之初步功能/安全評估案 例分析,以有別於日本H3的架構方式來撰寫本報告;主要用於驗證 說明最終處置計畫自潛在處置母岩的現地調查(花崗岩質)、處置概 念、處置功能/安全評估,在現有數據條件下之初步整體技術流程的 建置狀況,並說明相關技術在後續國內其他區域驗證時之發展項目與 建議。

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,本報告就「在台灣的 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?」、「是否已具備基本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。

藉由上述成果,除說明國內現階段之用過核子燃料最終處置技術 的研究發展現況外,並得以藉由階段性成果報告的彙整及研析,檢視 各發展技術範疇的缺漏或不足之處,除可提供未來更嚴密及更完善之 處置技術發展規劃外,更能經由系統性且完整性之研究成果的展現, 作為民眾溝通之基礎並建立民眾信心,達成我國用過核子燃料最終處 置場設置與營運的長程目標。

1.2. 用過核子燃料地質處置研究發展的背景

我國目前對於用過核子燃料(Spent Nuclear Fuel, SNF)的管理政 策是在乾式貯存後進行最終處置,但不排除在遵守國際核子保防協定 下,尋求在國外進行用過核子燃料再處理之可行性;並且繼續執行用 過核子燃料及高放射性廢棄物(High Level Waste, HLW)最終處置方 案之規劃,儘速提出先期可行性方案及實施方案(行政院, 1997)。依 據「放射性物料管理法施行細則」(原能會, 2003)第四條規定"高放射 性廢棄物:指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃 取殘餘物"。由於台灣目前尚無採行再處理措施,因此法規中所提及 之高放射性廢棄物實際上即指用過核子燃料。

由於用過核子燃料的最終處置是核能發電後端營運中最關鍵的 課題。如何安全處置用過核子燃料以確保公眾安全,維護環境品質, 是整個處置工作最重要的環節。為因應我國用過核子燃料的安全處置 問題,台灣電力公司於1983年底研訂完成「我國核子反應器用過核燃 料處理研究計畫書」,並於1984年初報請行政院核定實施。自此之後, 國內相關產、官、學、研單位即開始投入用過核子燃料最終處置的相 關規劃、管理及研究工作。

就用過核子燃料長程處置計畫發展特性分類,自1986年開始至 今,共歷經:處置概念初步研發階段、初期工作規劃、區域調查技術 準備,及調查實施與技術發展階段等四個主要階段(台灣電力公司, 2006, P.5-1);各階段之執行成果及效益說明如下表 1-1:

(1) 處置概念初步研發階段(1986/05~1988/06):

完成場址準則、場址調查及設計等基本概念之研訂;對國際上用 過核子燃料最終處置的可能方法與技術進行有系統的瞭解與認 知。

- (2) 初期工作規劃階段(1988/11~1991/06): 完成1991年版全程工作規劃書,並提出花崗岩、中生代基盤岩、 泥岩為較具潛力之處置母岩的建議,作為後續工作規劃之基礎。
- (3) 區域調查技術準備階段(1993/08~1998/10):

完成結晶岩質測試場之調查技術演練,作為後續母岩特性調查技術之基礎,並適時支援低放射性廢棄物最終處置計畫候選場址相關調查與評估所需技術。期間並同步發展不確定性與敏感度分析 相關之功能安全評估概念系統。

(4) 調查實施與技術發展階段(1999/05~2005/03): 此階段於國內進行深地層跨孔試驗整合性調查與解析能力建 立,以及處置場設計概念之研擬及設施配置之初步規劃,花崗岩 特性、文獻、參數、情節分析之整合性資料庫建立等工作,作為 後續現地調查、核種傳輸、功能/安全評估之整合依據。

近期之研發計畫係因應「放射性物料管理法施行細則」(原能會, 2003)規定,由台灣電力公司擬訂「用過核子燃料最終處置計畫書 (2004年版)」提報主管機關放射性物料管理局核定,此後完成「用過 核子燃料最終處置計畫書(2006年7月核定版)」(台灣電力公司,2006, P.1-14),訂定處置場開始運轉的規劃時程為2055年。自2005年起,迄 2055年止,全程工作共分為「潛在處置母岩特性調查與評估階段」、 「候選場址評選與核定階段」、「場址詳細調查與試驗階段」、「處 置場設計與安全分析評估階段」及「處置場建造階段」等五個階段。 此外,依據2006年7月核定之「用過核子燃料最終處置計畫書」(台灣 電力公司,2006, P.2-2),最終處置計畫每四年應檢討修正;修正時, 應敘明理由及改正措施,報經主管機關核定後執行。

本計畫目前處於「潛在處置母岩特性調查與評估階段」,本報告 旨在彙整過去20年我國用過核子燃料最終處置計畫研究結果,參酌各 核能先進國家發展之用過核子燃料處置概念,針對我國地質環境,完 成現有處置環境資訊的蒐集研析及以虛擬場址進行簡化情節之初步 功能/安全評估案例分析。透過此一階段之檢討,來評估現行我國用 過核子燃料最終處置方案與處置技術發展規劃之可行性;初步評估之 方式僅就純技術層面為之,至於如輿情反映等非技術性層面暫不予考 慮,俾報告能明確呈現我國所處之地質環境與現行技術層次。

表 1-1:用過核子燃料長程處置計畫發展特性四個主要階段說明

階段/時程/單位	階段性目標
處置概念初步研發階段	參考國外文獻及我國地質、水文及岩體特性等既
(第一階段)	有資料,建立選擇處置場址應有之準則;我國用
1986/05~1988/06	過核燃料最終處置區域或位置之調查與評估規
核研所、能礦所、地調所	劃;處置場初步概念之訂定。
初期工作規劃階段	結晶岩區、中生代基盤岩區、泥岩區與離島之地
(第二階段)	質調查;完成調查區域評選規範及程序,並擬定
1988/11~1991/06	需優先調查之地區;以航照地質判釋技術研究各
核研所、能資所、地調所	離島之地質特性。
區域調查技術準備階段	建立完成地下水文地質特性參數量測等十項技
(第三階段)	術,並引進地球物理井測儀器設備;功能/安全評
區域調查前四年計畫	估技術引進地化模式及岩石圈傳輸模式等技術,
1993/08~1998/10	並建立初步功能/安全評估系統概念及模式架構規
能資所、核研所	劃等技術。
	發展及引進國內缺乏且必需建立之調查技術與設
拥本审论的计准承屈贴的	備;進行潛在母岩特性評估之現場調查工作;花
前旦貝加兴役机资度陷役	崗岩特性、文獻、參數、情節分析之整合性資料
(宿住母名村住嗣宣兴首伯	庫建立;進行功能/安全評估參數敏感度及不確定
(11枚) 前一年計畫	性分析技術、拉丁超立體參數取樣技術、可靠度
<u> </u>	分析技術、情節分析技術等研究;處置場設計概
兴夜领千及町重 1999/05~2005/03	念之研擬及設施配置初步規劃;廢料罐材料、設
能資所、核研所	計、製造等彙整分析與評估;結合現有之現地資
	料並輔以國外相關資料,進行核種在地質圈之傳
	輸評估研究,並建置相關之支援模式。

1.3. 用過核子燃料特性化

台灣共有四座核能電廠(三座運轉中,一座建造中),各電廠均有 雨部輕水式機組,其營運資訊如表 1-2,相關位置如圖 1-1。其中, 金山電廠(核一廠)採用GE BWR-4型反應器,Mark I型圍阻體;國聖電 廠(核二廠)採用GE BWR-6型反應器,Mark III型圍阻體;馬鞍山電廠 (核三廠)採用Westinghouse 3-loop PWR型反應器;龍門電廠(原核四 廠)採用GE ABWR。所有電廠均由台灣電力公司負責營運。

目前退出反應器之用過核子燃料均貯存於各電廠之用過核子燃料池中。核一廠與核二廠燃料池曾經兩次進行燃料池框架重整 (re-racking),核三廠曾經進行一次燃料池框架重整,以增加貯存空 間。但核一廠與核二廠仍預估將分別於2010與2015達到貯存限額。因 此目前均積極推動於廠區內進行乾式貯存之計畫。核三廠經過燃料池 框架重整後預估可貯存40年運轉期間產生之用過核子燃料(AEC, 2006)。

針對四座核能電廠各機組運轉40年及延役至60年等不同情況,估 算可能的用過核子燃料數量與其相當的燃料鈾重量如表 1-3 (台灣電 力公司,2006,表4-1,P.4-2)所示。以四座電廠均運轉40年所產生的 用過核子燃料預估數量合計約為BWR 19,076束組件(assemblies), PWR 3,842束組件、ABWR 13,208束組件,合計約相當於7,347頓鈾燃 料重量(tU)。用過核子燃料經出爐冷卻40年後,其產出之主要核種種 類、活度經計算後如表 1-4所列,表中龍門機組數據因尚無實際運轉 資料可供參考,係暫以核二機組資料推算而得之結果(台灣電力公司, 2006,表4-2,P.4-3)。

機組	反應器型式	裝置容量 (MWe)	商業運轉年份	現況
金山1號機 (核一廠)	BWR/4	636	1978	運轉中
金山2號機 (核一廠)	BWR/4	636	1979	運轉中
國聖1號機 (核二廠)	BWR/6	985	1981	運轉中
國聖2號機 (核二廠)	BWR/6	985	1983	運轉中
馬鞍山1號機 (核三廠)	PWR	951	1984	運轉中
馬鞍山2號機 (核三廠)	PWR	951	1985	運轉中
龍門1號機 (龍門電廠)	ABWR	1,350	-	建造中
龍門2號機 (龍門電廠)	ABWR	1,350	-	建造中

表 1-2:核能電廠營運資訊

表 1-3:用過核子燃料數量預估

土山	雨	1	!號機	2	2號機	六部機合計 (不含龍門電	八部機合計 (含龍門電
壽齡	電敞					敞)	敞)
		燃料量	鈾燃料重量	燃料量	鈾燃料重量	鈾燃料重量	鈾燃料重量
		(束)	(KgU)	(束)	(KgU)	(KgU)	(KgU)
	核一廠	3,760	669,280	3,772	671,529		
	核二廠	5,772	969,350	5,772	974,256		7,346,919
40	核三廠	1,917	815,032	1,925	817,201	4,916,647	
	龍門 電廠	6,604	1,215,136	6,604	1,215,136		
	核一廠	5,152	917,056	5,164	919,347		
	核二廠	7,932	1,332,101	7,884	1,330,741		
60	核三廠	2,685	1,141,555	2,693	1,143,232	6,784,031	10,185,823
	龍門 電廠	9,244	1,700,896	9,244	1,700,896		

(台灣電力公司,2006,表4-1, P.4-2)

雨麻嫩细	北 辛 抑	核-	一廠	核二廠		核三廠		龍門電廠	
电敞戏组	十衣助 (年)	一號機	二號機	一號機	二號機	一號機	二號機	一號機	二號機
核性	(平)	活度(Ci)							
C-14	5.73E+03	1.16E+03	1.16E+03	1.68E+03	1.69E+03	1.28E+03	1.28E+03	2.11E+03	2.11E+03
Cl-36	3.01E+05	8.30E+00	8.32E+00	1.20E+01	1.21E+01	1.07E+01	1.07E+01	1.51E+01	1.51E+01
Ni-59	7.6E+04	1.33E+03	1.34E+03	1.93E+03	1.94E+03	2.54E+03	2.55E+03	2.42E+03	2.42E+03
Ni-63	1.001E+02	1.57E+05	1.57E+05	2.27E+05	2.28E+05	3.18E+05	3.19E+05	2.84E+05	2.84E+05
Se-79	1.13E+06	3.10E+02	3.11E+02	4.50E+02	4.52E+02	4.84E+02	4.85E+02	5.64E+02	5.64E+02
Rb-87	4.75E+10	1.55E-02	1.56E-02	2.25E-02	2.26E-02	2.55E-02	2.56E-02	2.82E-02	2.82E-02
Sr-90	2.879E+01	2.04E+07	2.05E+07	2.96E+07	2.97E+07	3.37E+07	3.38E+07	3.71E+07	3.71E+07
Mo-93	3.5E+03	5.59E-01	5.61E-01	8.10E-01	8.14E-01	2.12E+01	2.13E+01	1.02E+00	1.02E+00
Zr-93	1.53E+06	1.88E+03	1.89E+03	2.72E+03	2.74E+03	2.47E+03	2.48E+03	3.41E+03	3.41E+03
Nb-94	2.03E+04	7.83E+01	7.85E+01	1.13E+02	1.14E+02	1.16E+03	1.16E+03	1.42E+02	1.42E+02
Tc-99	2.111E+05	9.83E+03	9.86E+03	1.42E+04	1.43E+04	1.53E+04	1.54E+04	1.79E+04	1.79E+04
Pd-107	6.5E+06	9.93E+01	9.93E+01	1.43E+02	1.44E+02	1.30E+02	1.31E+02	1.80E+02	1.80E+02
Sn-126	1E+05	6.28E+02	6.30E+02	9.10E+02	9.15E+02	9.05E+02	9.07E+02	1.14E+02	1.14E+02
I-129	1.57E+07	2.50E+01	2.50E+01	3.61E+01	3.63E+01	3.65E+01	3.66E+01	4.53E+01	4.53E+01
Cs-135	2.3E+06	4.14E+02	4.15E+02	6.00E+02	6.03E+02	5.79E+02	5.80E+02	7.52E+02	7.52E+02
Cs-137	3.007E+01	3.19E+07	3.20E+07	4.63E+07	4.65E+07	4.92E+07	4.93E+07	5.80E+07	5.80E+07
Sm-147	1.06E+11	3.10E-03	3.11E-03	4.50E-03	4.52E-03	4.49E-03	4.50E-03	5.64E-03	5.64E-03
Th-232	1.405E+10	3.71E-07	3.72E-07	5.37E-07	5.40E-07	6.36E-07	6.37E-07	6.74E-07	6.74E-07
U-236	2.342E+07	1.75E+02	1.75E+02	2.53E+02	2.54E+02	3.01E+02	3.01E+02	3.17E+02	3.17E+02
Pu-240	6.563E+03	3.79E+05	3.80E+05	5.48E+05	5.51E+05	5.71E+05	5.73E+05	6.88E+05	6.88E+05
Th-229	7.34E+03	4.12E-04	4.14E-04	5.97E-04	6.00E-04	6.72E-04	6.74E-04	7.49E-04	7.49E-04
U-233	1.592E+05	6.24E-02	6.26E-02	9.04E-02	9.09E-02	5.10E+02	5.11E+02	1.13E-01	1.13E-01
Np-237	2.144E+06	3.19E+02	3.20E+02	4.63E+02	4.65E+02	5.50E+02	5.51E+02	5.80E+02	5.80E+02
Pu-241	1.435E+01	1.73E+07	1.74E+07	2.51E+07	2.52E+07	2.08E+07	2.08E+07	3.15E+07	3.15E+07
Am-241	4.322E+02	2.99E+06	3.00E+06	4.33E+06	4.45E+06	3.57E+06	3.58E+06	5.42E+06	5.42E+06
Cm-245	8.5E+03	4.56E+02	4.57E+02	6.60E+02	6.64E+02	5.24E+02	5.26E+02	8.28E+02	8.28E+02
Ra-226	1.6E+03	2.90E-03	2.90E-03	4.21E-03	4.23E-03	4.71E-03	4.72E-03	5.27E-03	5.27E-03
Th-230	7.7E+04	3.12E-01	3.13E-01	4.52E-01	4.54E-01	5.05E-01	5.06E-01	5.67E-01	5.67E-01
U-234	2.44E+05	9.50E+02	9.53E+02	1.38E+03	1.38E+03	1.53E+03	1.53E+03	1.73E+03	1.73E+03

表 1-4:四座核電廠商轉40年用過核子燃料主要放射性核種活度與熱能估算

雨山桃山	北喜加	* 弃 彻 核 一 廠		核二廠		核三廠		龍門電廠	
电敞风组	十衣朔 (午)	一號機	二號機	一號機	二號機	一號機	二號機	一號機	二號機
1次 个里	(+)	活度(Ci)	活度(Ci)	活度(Ci)	活度(Ci)	活度(Ci)	活度(Ci)	活度(Ci)	活度(Ci)
U-238	4.468E+09	2.11E+02	2.11E+02	3.05E+02	3.07E+02	2.53E+02	2.53E+02	3.83E+02	3.83E+02
Pu-238	8.77E+01	2.45E+06	2.45E+06	3.54E+06	3.56E+06	3.89E+06	3.90E+06	4.44E+06	4.44E+06
Pu-242	3.733E+05	1.67E+03	1.67E+03	2.41E+03	2.43E+03	1.96E+03	1.96E+03	3.03E+03	3.03E+03
Cm-246	4.73E+03	1.06E+02	1.06E+02	1.54E+02	1.54E+02	1.32E+02	1.32E+02	1.93E+02	1.93E+02
Pa-231	3.276E+04	2.54E-02	2.55E-02	3.69E-02	3.69E-02	3.99E-02	4.00E-02	4.62E-02	4.62E-02
U-235	7.038E+08	9.03E+00	9.06E+00	1.31E+01	1.31E+01	1.42E+01	1.42E+01	1.64E+01	1.64E+01
Pu-239	2.411E+04	2.35E+05	2.36E+05	3.41E+05	3.43E+05	3.42E+05	3.43E+05	4.28E+05	4.28E+05
Am-243	7.37E+03	2.40E+04	2.40E+04	3.47E+04	3.49E+04	2.77E+04	2.77E+04	4.36E+04	4.36E+04
Total A	Activity Ci)	7.59E+07	7.62E+07	1.10E+08	1.11E+08	1.12E+08	1.13E+08	1.38E+08	1.38E+08
Total Heat (Watt)		5.43E+05	5.45E+05	7.87E+05	7.91E+05	6.34E+05	6.39E+05	9.87E+05	9.87E+05

*四座核電廠商轉40年數量:核一廠一、二號機約669與671頓;核二廠一、二號機約969與974頓;核三廠一、二號機約815與817頓; 龍門電廠一、二號機皆約為1215頓。參考燃料:BWR/ABWR:核一廠一號機cycle18,fuel16,initial enrichment 3.14%, burn-up 35900MWd/MTIHM; PWR:核三廠二號機cycle13,fuel14B1,initial enrichment 4.40%, burn-up 48268MWd/MTIHM 所有燃料皆出爐冷卻 40年計。

(台灣電力公司,2006,表4-2, P.4-3)



圖 1-1:台灣核能電廠位置

1.4. 處置需求

由於用過核子燃料處置對於人類環境影響之可能性是屬於長期 且持續的,因此用過核子燃料最終處置設施需有系統性的工程方法 (如工程障壁系統等)與相對應的管理對策據以實施。對於現今享受核 能所帶給我們極為便利與潔淨能源的同時,亦產生將來必須處理或處 置用過核子燃料的問題。基於用過核子燃料存在可能會對後代子孫與 生活環境造成健康上的影響與衝擊,更應負起相關處置技術發展責 任,以及針對相關管理制度面與法規上加以確立與考慮,而非將問題 遺留給下一代承擔。

台灣用過核子燃料最終處置設施之設置依法應考慮國民之安全 與環境保護,並應尊重有關國際公約(行政院,1997)。放射性廢棄物 最終處置設施之興建應向主管機關提出申請,經審核合於放射性物料 管理法第十七條規定,發給建造執照後,始得為之(原能會,2002): (1) 符合相關國際公約之規定。

- (2) 設備及設施足以保障公眾之健康及安全。
- (3) 對環境生態之影響合於相關法令規定。
- (4) 申請人之技術與管理能力及財務基礎等足以勝任其設施之經營。

此外,放射性廢棄物最終處置設施依法應接收全國所產生之放射性廢棄物(原能會,2002)。

1.5. 地質處置概念

台灣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)。其要點包括:

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○·二五毫西弗。
- 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,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公尺的穩定地質環境中(圖 1-2),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 包含處置母岩(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。在此,人工障壁亦即利用工程方法構築的工 程障壁(engineered barrier)。用過核子燃料最終處置場環境可分成三 部分:(1)近場環境(near-field)、(2)遠場環境(far-field),及(3)生物圈 (biosphere)。近場主要包含工程障壁和其四周受開挖影響的周圍母岩 (又稱開挖擾動帶),遠場指近場外圍的地質母岩,即地質圈,生物圈 則指位在遠場上方而生物活動時會直接接觸到的環境區域。 深層地質處置的具體作法包括採行調查、設計、評估的反覆性 (iteration)方法,反覆分析以確保處置之安全性。深層地質處置的優 點包括(JNC, 2000a):

- (1) 深層地質處置的安全性不需要長期監管與主動維護。
- (2) 多數主要核能國家均可自其所屬的地質環境中找到適當的場址。
- (3) 推動處置場設置所需的主要技術為既有可行的。
- (4) 評估與設計的技術於多數國家,如瑞典、瑞士、德國、歐洲共同 體(歐盟前身)、荷蘭、比利時、美國與芬蘭等均已建立且驗證可 行。
- (5) 地質處置概念原則上不再將廢棄物回收,但若確屬必要,亦非不可進行。



圖 1-2:最終處置概念示意圖

1.6. 地質處置研究發展

目前推動高放射性廢棄物地質處置計畫之國家(表 1-5),如美國、法國、瑞典、比利時、瑞士、日本、芬蘭、捷克等,均就其所處的地質條件,選擇合適的處置母岩,進行其最終處置之研發。部份國家如加拿大、德國、西班牙、英國等,在對於如何推動處置工作如選址程序與公眾溝通等議題方面,進行策略規劃與研議。

由於高放射性廢棄物對人類生態環境的影響相當深遠,因此世界 各國在選擇處置場址時,都採取十分審慎保守的策略面對之。除了詳 細調查自己國內的地質條件與工程技術外,也積極地進行場址調查技 術與最終處置技術的發展,在經過階段性縝密的功能與安全評估後, 穩健地推動最終處置作業。

目前國際間雖然尚無商業上用過核子燃料/高放射性廢棄物處置設施開始運轉,然而用來處置與用過核子燃料一樣具有長半化期核種 之超鈾元素(TRU)的美國新墨西哥州廢棄物隔離先導廠(WIPP)處置 設施,已於1999年3月26日正式運轉。

瑞典之處置母岩與我國的虛擬場址同屬於花崗岩質母岩,其高放 射性廢棄物管理計劃是由1972年組成的SKB(瑞典核子燃料供應公 司)負責。對於高放射性廢棄物管理之規劃,SKB在1977年、1978年 及1983年分別提出了KBS-1、KBS-2與KBS-3報告。SKB於2006年已完 成用過核子燃料封裝廠的相關法規,同時對於Forsmark最終處置場的 設計與深度將由原先的400公尺增加至450與500公尺(SKB,2007)。目 前SKB於2009年6月3日公布瑞典核廢料最終存放場址在Forsmark,未 來將向SKI提出建廠執照申請。此外SKB亦持續發展下列的研究領 域,包括:

- 群分離與核轉換(Partitioning and Transmutation, P&T)再處理後 及直接處置等差異研究;
- (2)對於氣候變遷的議題,則與同樣鄰近西格林蘭冰緣的芬蘭合作共同研究氣候暖化海平面上升及回填材料凍結後對處置場的影響;
- (3) 電廠燃料燃耗度(burnup)增加後的影響;

- (4) 廢棄物罐的腐蝕效應;
- (5)處置母岩中緩衝材料經沉積(deposition)、侵蝕(erosion),與回填 材料中原開挖土石材料拌合不同比例膨潤土後其整體膨脹性 (swelling)可能造成的材料變形(deform);
- (6) 以生態系統觀點進行生物圈劑量評估等。

另一個同屬以花崗岩質母岩為處置母岩的國家為芬蘭,依據1994 年國會通過的核能法修正案,芬蘭所有的放射性廢棄物,必須直接在 國內處理、貯存與處置,且不得有其他放射性廢棄物自境外移入。 IVO(ImatranvVoima Oy)及TVO兩家公司於是共同成立Posiva公司專 門處理核廢棄物問題,該公司在1999年5月申請在Olkiluoto廠址附近 地下500公尺深的岩層內興建永久性用過核子燃料最終處置場,包括 一個封裝場(Encapsulation)及儲存場,當地議會已同意這個方案,芬 蘭政府並於2000年12月作出正面的原則決策,國會也在2001年5月通 過,預訂2010年動工興建,2020年正式使用。目前Posiva公司正在 ONKALO地區進行花崗岩地下實驗室之施工(2004-2009年),將於深度 417公尺處建造運輸隧道,並於200-300公尺深度進行試驗與探查工 作。目前深度位於312公尺,開挖隧道長度為3297公尺。芬蘭處置概 念以參考瑞典KBS-3概念為主,適合自身條件為輔,同樣是以三條豎 井與地下連通,分別區隔為人員、作業、與廢棄物運輸用途。一條方 形主隧道貫穿處置場,處置隧道由主隧道向兩側展開,廢棄物罐以垂 直置放方式進行處置。

用過核子燃料之最終處置技術發展,國際間有許多國家皆已進行 中,國際合作與交流確實有其必要,我國亦曾進行相關技術之國際合 作,在功能與安全評估部份包含技術報告之審查或諮詢(芬蘭Posiva 公司)、評估程式之平行驗證或技術顧問之諮詢(美國GAI高得聯合公 司)、技術研討之交流(瑞士NAGRA、芬蘭Posiva公司、美國SNL桑地 亞國家實驗室),和上述各國及法國與日本之交流,以取得技術經驗。 在現地調查與資料解析技術方面,歷年來曾派員接受瑞典SKB、瑞士 NAGRA、瑞士Solexperts、芬蘭JP-Fintact、美國SNL、美國Century、
SNFD2009

日本OYO、日本Raax、澳洲Fugro、澳洲Geosoft等國際知名單位的相 關調查技術與資料解析的專業訓練。除了積極參與各項國際會議外, 並與各國相關專業技術人員保持密切聯繫,透過相互的參訪與技術交 流,掌握相關調查與資料解析技術的最新發展趨勢。因此透過與國際 相關單位的技術資訊交流、整合技術引進、技術人員互訪、國際性研 討會的辦理及國際性合作計畫之參與等方式,國際區域合作處置對於 計畫未來的發展,除與國際發展趨勢正確接軌而達到事半功倍的效果 外,更可以提昇計畫執行的國際透明度,降低核子擴散的可能性。

為達成安全處置高放射性廢棄物之目的,各核能國家莫不投入大 量的人力與物力進行研發工作。從國際原子能總署(IAEA)倡議之「用 過核燃料管理安全及放射性廢棄物管理安全聯合公約」(Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)(IAEA, 1997)於2001年正式生效 後,高放射性廢棄物之處置研發進入一個新的里程,該公約促使各締 約國正視用過核子燃料安全管理問題,並加強規劃與研發。2006年5 月 國 際 原 子 能 總 署 (IAEA) 與 歐 洲 經 濟 合 作 發 展 組 織 核 能 署 (OECD-NEA)聯合發布「地質處置安全需求」(Geological Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements)標準(IAEA, 2006a)。該標準 為各國之高放射性廢棄物地質處置問題提供一個可參考的共同依據。

近年來地質處置的國際研發趨勢均朝向與安全、技術或公眾溝通相關的議題努力,包括以下幾點(EC,2004; Chapman, 2006; IAEA, 2006b):

- 處置研發工作實驗室規模之基礎科學研究成果,如何逐步轉化為現場實務之應用技術。
- (2) 由於高放射性廢棄物處置所需考慮的時間極長,安全性無從實際驗證,如何建立處置場之安全論據(safety case),運用合理的核種傳輸情節與可靠的評估程式進行安全評估,以提升處置安全之信心。
- (3)各國安全或技術準則的差異性,使處置場安全標準可能有所不同。鑒於高放射性廢棄物安全處置時間極長,政府政權乃至於國

家疆界實無太大意義,如何建立國際性共通的安全法規與技術準 則以供各國參考依循。

- (4)對於產生少量的高放射性廢棄物或長半化期廢棄物(如TRU)之國家,由於數量少,性質迥異,基於安全與經濟的考慮,是否有建立國際共同處置場的可行性。
- (5)處置場設置對於場址附近民眾影響乃至於加諸後代人類負擔的 道德性與正當性問題,應如何取得協調與平衡。
- (6)如何在安全的前題之下使處置場的建造經濟有效,以免因高昂的處置費用減損核能發電的效益,或造成後端基金無法支付所需費用之窘境。

此外,值得注意的是2006年2月6日美國能源部發布全球核能夥伴 (Global Nuclear Energy Partnership, GNEP) 倡議(DOE, 2007), 期結合 相關核能國家開發新式用過核子燃料再處理技術,以達到減少核武擴 散與減少放射性廢棄物數量之目的。然而,在「主權國家」(Sovereign States)的條件限制下,台灣目前尚無法成為GNEP組織的會員國。然 因美國隨能源政策改變,已在2009年6月將GNEP相關預算刪除,美國 能源部亦表示不再追求該國內的商業再處理。另外,由於台灣的核反 應器均為美國設計與供應,核子燃料亦大部分由美國供應,因此需遵 照我國與美國及國際原子能總署簽訂之「中華民國政府與美利堅合眾 國政府民用原子能合作協定」(中華民國政府,1955),以及「中華民 國政府與美利堅合眾國政府及國際原子能總署適用防護事項協定」 (中華民國政府,1964)進行管制。前述協定要求,我國用過核子燃料 如欲進行再處理,不論是境內或境外再處理,均必須取得美國的同 意。未來因應美國核能政策的變化,台灣不排除以再處理後之高放射 性廢棄物作為地質處置之標的物。後續相關之研發計畫亦將考慮以再 處理後高放射性廢棄物處置之可行性作為用過核子燃料直接處置的 替代方案。

表	1-5	:	國際高放射性廢棄物處置研發近況	
---	-----	---	-----------------	--

國家	處置計畫推動近況			
	高放射性廢棄物處置政策目前尚未明確,持續在HADES泥岩地下實驗			
比利時	室進行PRACLAY計畫。2025年以前不建處置場。			
	(http://www.avn.be/doc.php?nd=o2&tid=2≶=1&docid=29&site=1)			
	2004年底NWMO提出用過核燃料管理研究報告,已於2007年完成政府			
加拿大	審查。2008-2014年間將採所謂適應性階段管理(Adaptive Phased			
	Management)方案推動處置場選址計畫。(http://www.cnsc.gc.ca/)			
	自1985年起開展高放射性廢棄物地質處置研究工作。規劃策略部分提			
	出總體實施方案:場址(處置場選址和場址評價)-地下實驗室-處置場			
	(處置場建設)三部曲,以及21世紀中葉建成中國高放射性廢棄物地質處			
中國	置場的工作目標。近期研發現況重點包括:(1)甘肅北山地區為重點預			
	選區;(2)處置概念為深地層豎井-坑道概念;(3)處置對象為玻璃固化			
	體、超鈾廢棄物與少量重水式乏燃料;(4)候選圍岩為花崗岩;(5)初步			
	確定使用內蒙古膨潤土為首選緩衝回填材料。			
	(http://www.caea.gov.cn/n16/index.html)			
	2010年前由SURAO持續進行可行性研究,處置場預定於2065年開始營			
死儿	運。(http://www.sujb.cz/)			
	2004-2009間進行ONKALO花崗岩地下實驗室之施工,於深度417公尺			
芬蘭	處建造運輸隧道,並於200-300公尺深度進行試驗與探查工作。預定於			
	2020年開始進行處置。(http://www.stuk.fi/)			
	ANDRA於2005年底彙整15年研發心得及Bure泥岩地下實驗室成果,向			
法國	政府提出Dossier 2005報告。2006年六月國會通過Planning Act,規定			
	ANDRA後續廢棄物管理方向,預定2025年啟用深層地質處置場。			
	(http://www.cea.fr/)			
	2002年底AkEnd委員會提出處置場選址程序建議,2007年已通過決議。			
德國	德國政府雖規劃處置場於2030年服役,但相關安全問題仍待釐清,目			
	前未進行現地工作。(http://www.bmu.de/allgemein/aktuell/160.php)			
日木	2007年1月Kochi縣Toyo鎮提出自願探查場址申請,目前已撤回申請。			
ы / т -	處置場預定於2030年代後期開始營運。(http://www.jaea.go.jp/)			
 齿 岡	規劃在2016年將建造一處用過核子燃料中期貯存設施。處置相關技術			
74 🖾	由KAERI持續研發中。(http://www.kaeri.re.kr/index_e.html/)			
西班牙	2010年前不對用過核子燃料與高放射性廢棄物之處置方式進行決策。			
	(http://www.csn.es/)			
	Forsmark與Laxemar可能場址的初步調查工作執行至2007年。原規劃於			
1. 11	2008年提出處置場建造申請,並於2010年開始建造,2017年開始處置。			
瑞典	目前SKB於2009年6月3日公布瑞典核廢料最終存放場址在Forsmark,未			
	來將向SKI提出建廠執照申請。			
	(http://www.skb.se/default24417.aspx)			
	NAGRA於2002年提出Opalinus Clay Project泥岩調查報告,聯邦委員會			
瑞士	(Federal Council)於2006年6月核可相關內容,規劃於2040-2050年期間取			
	得處置場商用營運執照。(http://www.ensi.ch/)			

英國	CoRWM委員會從2003年成立,針對廢棄物管理方案進行檢討,於2006
	年7月提出結論,並於2007年6月公布。建議高放射性廢棄物採深層地
	質處置,目前進行概念規劃中。(http://www.environment-agency.gov.uk/)
	美國DOE原於2006年7月發布執照申請(license application)工作規劃,並
	於2008年6月正式向NRC提送執照申請,法定審查時間為三年,NRC預
ΎΕ	估可能會申請延長一年,處置場最早預定開始接收廢棄物的時間為
夫凶	2017年。目前美國已在2009年5月將Yucca Mountain處置計畫的2010年
	預算刪減至執照申請所需,所有與處置場設施開發有關的經費都被刪
	除。(http://www.doe.gov/)

1.7. 我國地質處置概念與技術可行性評估方法

本報告除了進行處置環境條件的基礎研析,評估是否有適合的岩 體具備做為用過核子燃料最終處置的潛能外,同時透過歷年技術發展 及應用成果,評估台灣是否已具備500公尺深度結晶岩體的深地層特 性調查與資料解析的相關基礎技術。另外,依據本報告在測試區技術 發展所得的現地調查與資料解析結果,對處置概念與技術可行性進行 初步評估;評估目的在說明台灣現階段所建立之地質調查資料及處置 設施功能性的整合性評估基礎技術,以驗證台灣現行評估技術能力與 檢視初步之處置安全可行性,以做為本計畫後續於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研發改進之依據。

評估的範疇係針對不特定之虛擬場址進行處置設施封閉後的長 期安全評估。在虛擬場址的處置概念方面,用過核子燃料採深層地質 處置方式,以花崗岩為潛在母岩,而處置設施則以多重障壁原則進行 參考概念開發。評估所使用的數據原則上以本土性數據為主,在現階 段未能取得的數據則參考國外相關文獻進行合理的保守假設。

評估方法係考量用過核子燃料經適當處置容器包封後,置放於地 下深處之工程障壁系統中,在處置場封閉後,核種隨時間遷移至人類 環境的過程與影響。其中,地下水是核種遷移的重要媒介。在處置容 器可能發生的不同破壞機制下(包含腐蝕、初始製造缺陷等),地下水 與用過核子燃料作用(包含溶解、擴散等),而將核種帶出處置場,沿 著地層中之裂隙傳輸(包含延散、平流、擴散)至生物圈,經由人類抽 取後飲用地下水的行為造成核種對人體輻射劑量。依據上述可能的情 節與核種傳輸途徑,與自然環境的認知建立概念模型與數理方程式,

以適當的電腦程式進行模擬與分析,其後將判釋的分析結果與法規要 求相比較,以檢驗處置技術的安全與可行性。

總之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、遠場之核種外釋率與生物圈之人體劑量率建立評估 程式與處置場全系統安全分析能力,並針對近場、遠場及生物圈等三 個子系統程式建立具有參數取樣子系統及不確定性與參數敏感度分 析子系統之全系統評估程式。其可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,俾利未來安全評估工作方向之參考。 整體而言,現階段(2009年)本報告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之分析技術,完成最終處置之初步技術可行性 評估。

2、地質環境條件的研究調查

根據我國法規的定義(原能會,2008),高放射性廢棄物指備供最 終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物。由於台灣 目前尚無採行再處理措施,因此法規中所提及之高放射性廢棄物,現 階段即指用過核子燃料。

雖然在過去數十年間,最終處置高放射性廢棄物的國際合作構想 曾多次被提及,但均未成功(台灣電力公司,2006)。因此,除非有其 他國家願意最終處置我國高放射性廢棄物,且獲得美國的同意(詳第 1.6節),否則我國就必須在領土範圍內進行高放射性廢棄物的最終處 置。故,「放射性物料管理法」明文要求(第四十九條):主管機關應 督促廢棄物產生者規劃國內放射性廢棄物最終處置設施之籌建,並要 求廢棄物產生者解決放射性廢棄物最終處置問題。

高放射性廢棄物最終處置的基本要求是選擇適當的環境,將高放 射性廢棄物永久安置,使其與人類生活圈隔離,以確保民眾安全及環 境品質。海床處置、深井處置、冰層處置、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,一般成認「深層地質處置」是較為可行的一種處置方式(林 朝宗、何信昌,1992)。

所謂「深層地質處置」是利用深部岩層的隔離阻絕特性,採用「多 重障壁」的概念,將高放射性廢棄物埋在深約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,有效阻絕或遲滯核種的外釋與遷移, 以換取足夠的時間使高放射性廢棄物的輻射強度在影響生物圈之前 已衰減至可忽略的程度。

由於高放射性廢棄物的放射性強度強、半衰期長,因此,「深層 地質處置」設施必須具備長期的阻絕或遲滯核種遷移的能力,而此阻 絕時間的尺度可能需高達數萬年,已遠超過所有已知人工設施的使用 期限或經驗。然而,地球已經歷過數十億年的地質演化,地球上,到 處均可發現形成年齡超過百萬年而至今仍穩定存在的地層,雖然相關

的地質演化仍持續在進行,但變化的速度相當緩慢,尤其是越深的地層。因此,在「深層地質處置」的所謂「多重障壁」概念中,母岩的優劣,便成為確保萬年阻絕時間尺度的關鍵因子。

除了必須具備足夠的空間容納地下處置設施外,理想的處置母岩 環境必須具備下面的特性:

- (1) 良好的核種阻絕與工程特性:
 - (a)低導水特性、低核種溶解度、對核種具高吸附性,以遲滯核種在地下水中的遷移速度;
 - (b) 高導熱性,以防核種衰變放熱導致溫度過高所引發不利的物理及化學變化;
 - (c)高可塑性,避免因應力變化所造成的岩體破裂,進而增加核種的遷移速度;
 - (d) 岩石強度大,能維持地下開挖的穩定性,減少施工期間的工程問題。
 - (e) 化學穩定性,避免因放射性物質的介入而破壞「多重障壁」的功能。

實際上絕無一種岩石能完全滿足上述所有條件,例如,可塑性高的岩石,其強度必然較低。以「多重障壁」的觀點,如岩層欠缺的條件能以工程障壁克服及補足,即可被考慮為處置母岩(林朝宗、何信昌,1992;林朝宗等3人,1987)。

(2) 較低的地下資源開採可能性:

「深層地質處置」所需的阻絕時間尺度,高達數萬年,已遠超過 人類文明的發展史。相信原始人類一定無法想像,今天的我們對 煤、油氣等地下資源的興趣及依賴;在數十年前,我們亦無法想 像台灣會進行地溫梯度井的開鑿,用以獲取溫泉資源;在可預期 的將來,台灣亦有可能利用西部深層鹽水層或廢棄油氣構造進行 CO₂的地質封存作業(能源局,2008)。凡此種種,雖然讓我們了 解無法明確預知後代子孫對地下資源種類的興趣,但在處置母岩 的現階段研究上,至少仍應盡量避開目前已知人類有興趣的地下 資源地區,例如油氣、礦產、地下水資源的潛在地區。

(3) 地質環境長期穩定性:

處置母岩環境除了須具備良好的核種阻絕與工程特性,用以評估 處置設施的短期功能外,更必須對地質環境的長期穩定性有所了 解,用以預測萬年尺度的處置設施功能;地震、斷層、地殼上升 與剝蝕作用、火成活動、氣候變遷與海平面變化等均為必須了解 的重點。

整體而言,深地層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 (2003)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,其最終處置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、地球化學環境有利核種遷移的遲滯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 場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)。

台灣地區的地質構造複雜,對於「深層地質處置」有其先天不足 之處,但與台灣地質環境相似或更複雜的日本、瑞士,清楚的認知無 法忽視發展最終處置技術及方式的必要性,因此長期以來積極在其國 內進行相關的研究,期能在先天不利的環境下,選擇最有利的地區及 方向進行相關的研究。

依據2006年7月放射性物料管理局核定之「用過核子燃料最終處 置計畫書」(台灣電力公司,2006),自2005年起,迄2055年止,全程 工作共分為「潛在處置母岩特性調查與評估階段」(2005~2017年)、

「候選場址評選與核定階段」(2018~2028年)、「場址詳細調查與試 驗階段」(2029~2038年)、「處置場設計與安全分析評估階段」 (2039~2044年)及「處置場建造階段」(2045~2055年)等五個階段,並 要求台電公司於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」(即本報告),用以檢驗我國相關技術的初步可行性。 長程處置計畫發展至今(詳1.2節),曾建議花崗岩、泥岩及中生代基盤 岩,可作為台灣處置母岩的研究對象(林朝宗、何信昌,1992;台灣 電力公司,2006),近期為保留因應國際發展新趨勢之彈性,充分應 用核能先進國家對用過核子燃料最終處置設施籌建所需之技術發展需求(台 灣電力公司,2008),在母岩調查技術發展方面,主要鎖定於花崗岩 質潛在處置母岩的技術發展,而在泥岩與中生代基盤岩類方面,除彙 整以往調查研究成果外,仍持續蒐集研析相關文獻資料,以保留後續 處置母岩評估選擇的彈性。

本章節編排方式,主要係參考2006年7月放射性物料管理局核定 之「用過核子燃料最終處置計畫書」(台灣電力公司,2006)的建議內 容及方式而進行。本章前兩節(第2.1節及第2.2節),係以全國角度綜 觀地質概況、主要構成岩體、水文地質、變質作用產物、地下資源種 類與分布等地質環境的研究現況,特別是針對地震活動、斷層活動、 地殼上升與剝蝕作用、火成活動及氣候變遷與海平面變化等現有研究 成果進行研析,並根據前述資料的研析結果,於本章第三節(第2.3節) 中,綜合說明台灣相關潛在母岩的現有地質特性資訊、地下資源開發 潛勢、地質環境穩定性等,作為評估後續調查區域的參考依據。除此 之外,本章第2.1.6節詳細說明國內母岩特性調查技術的發展現況及後 續發展建議,並摘錄近期於花崗岩質技術發展測試區所得的地質特性 參數與初步地質概念模式,供驗證功能安全評估能力(詳第4.6節),以 完備現地調查至功能評估的整體流程之初步技術能力驗證。

2.1. 地質環境

台灣地區介於歐亞大陸東緣與菲律賓海板塊交界處,處於環太平 洋火山與地震帶中。台灣島因菲律賓海板塊上的呂宋島弧,與歐亞大 陸東緣大陸棚的張裂盆地發生「弧陸碰撞」,導致台灣島山脈的隆升 與台灣西南海域的沈陷。主要地震的發生與板塊的聚合運動有關,台 灣地層的變形與構造的走向,受到「弧陸碰撞」擠壓的影響,大多為 北北東-南南西分布;然而台灣東北部構造線有轉向東北的趨勢,且 發育了台北盆地和蘭陽平原兩個山中裂谷,以及碰撞運動發生後出現 了大屯和基隆兩個火山群,顯示除碰撞運動外,在台灣東北海域的琉 球島弧及沖繩海槽的發育-受制於菲律賓海板塊對歐亞大陸的隱沒 作用-也對台灣島的地質演化起了重要的影響。

2.1.1. 地質概述

2.1.1.1. 台灣的地理

台灣位於亞洲大陸的東南沿海、日本琉球群島的西南方,及菲律 賓呂宋群島的北方,屬於太平洋西岸的海島。台灣(中華民國)現行管 轄土地範圍主要包括台灣地區及金馬地區(圖 2-1)。台灣地區包括台 灣本島、散布在四周海域的21座離島(綠島、蘭嶼、琉球嶼...等島嶼) 以及澎湖群島,面積約36,000 km²,其東西南北方位之極點位置座標 如表 2-1所示。金馬地區位居福建省東南海岸外,金門列島總面積為 150.46 km²,除大金門本島之外,尚包括小金門、大膽、二膽等12個 島嶼。馬祖列島總面積為28.80 km²,包括南竿、北竿、高登及其附屬 小島共計35個島嶼。

台灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交界處,處於環太平洋 地震及火山帶上(圖 2-3)。台灣本島是典型的板塊碰撞下產生之大陸 邊緣島嶼,不僅地震頻繁,劇烈的造山運動造成超過海拔3,000 m的 高山達200座以上,地形起伏變化大。由於板塊的碰撞使得台灣島抬 昇,成為西太平洋邊緣的重要造山帶,以中央山脈為主軸的山地縱貫 全島,略呈向西凸出的弧線。在山地西側有丘陵、台地及平原分布。

中央山脈將台灣分為不對稱的兩半,東側隔一狹長的東部縱谷,與海岸山脈相望。在台灣本島的東面,海底斜坡則以1:10的坡度急降到太平洋中,離岸50km處的太平洋底,海水已經深逾4,000m;位於台灣本島西部之台灣海峽,其深度則絕大部份淺於100m。

根據徐鐵良(1982)的台灣地形分區圖(圖 2-2),將台灣地區分為 八個地形區,分別是山地、火山、丘陵、台地、盆地、火山島嶼、平 原和隆起珊瑚礁及珊瑚石灰岩。台灣本島平均高度為660 m,平均坡 度14°40',平均每平方公里的起伏(相對高度)為312 m。若以高度1,000 m、坡度30°、相對高度(單位面積最高點與最低點的高度差)500 m為 山地與丘陵的分界標準,另以高度100 m、坡度10°、相對高度100 m 為丘陵與平原的界限,則台灣全區山地、丘陵、平原面積之比約為 3:4:3。另外根據高度分析結果顯示,1,000 m以下的土地面積佔 69.1%,2,000 m以下的土地面積佔90%左右,3,000 m以下的土地面積 佔99.1%。換言之,在3,000 m以上的土地面積尚不及1%。



圖 2-1:台灣地理位置圖

資料來源:內政部,2005



圖 2-2:台灣地形分區圖

資料來源:徐鐵良,1982,P9

나 됴 미	主位	經 度		主任	緯 度	
地區別	力业	東經極點	所在地	力位	北緯極點	所在地
山灣山区	極東	124°34'09"	宜蘭縣赤尾嶼東 端	極南	21°45'18"	屏東縣恆春鎮七 星巖南端
口污地世	極西	119°18'03"	澎湖縣望安鄉花 嶼西端	極北	25°56'21"	宜蘭縣黃尾嶼北 端
山繼士自	極東	121°59'15"	台北縣貢寮鄉三 貂角	極南	21°53'50"	屏東縣恆春鎮鵝 鑾鼻
口污平到	極西	120°01'00"	雲林縣口湖鄉外 傘頂洲	極北	25°18'20"	台北縣石門鄉富 貴角
当机群自	極東	119°42'54"	澎湖縣湖西鄉查 母嶼東端	極南	23°09'40"	澎湖縣七美鄉南 端
御御叶町	極西	119°18'03"	澎湖縣望安鄉花 嶼西端	極北	23°45'41"	澎湖縣白沙鄉目 斗嶼北端
 	極東	118°19'		極南	24°25'	
並「」	極西	118°27'		極北	24°28'	
毛山	極東	120°30'	東引鄉世尾山東 岸	極南	25°56'	莒光鄉林拗嶼南 岸
 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	極西	119°51'	南竿鄉津沙村西 岸	極北	26°23'	東引鄉北岸
烏坵	東	119°27'		北	24°59'	

表 2-1:台灣地區東南西北方位極點位置與座標

資料來源:內政部,中華民國統計年鑑 94年版





圖 2-3:全球板塊與火山帶分布圖

(a)全球板塊構造分布圖;(b)現生火山分布圖及環太平洋「火環」(Ring of Fire) 資料來源:美國地質調查所(USGS)

2.1.1.2. 台灣的地質

有關台灣的地質分區所依據的條件,包括地理的位置、地形上的 差別、地層沉積的環境,以及地體的架構等。依據何春蓀(1986)的地 質分區(圖 2-4),台灣共可分為七個地質分區,由西向東大致可歸納 為西部麓山帶、中央山脈、海岸山脈等三個主要地質區,分別敘述如 下:

2.1.1.2.1. 西部麓山地質區

西部麓山帶地質區(圖 2-4, I、II、III)主要由新第三紀(表 2-2) 碎屑岩層組成,也有一小部漸新世的地層,主要的岩石是砂岩和頁岩 的互層,局部夾有石灰岩和凝灰岩的凸鏡體或薄層,總厚度可以達到 8,000 m以上。由於本區內礦產的開發和其他的地質活動,是一個地 質資訊上知道得最多的地質區。本區內很多詳細的區域地質調查已經 完成,有詳明的地質圖、地下地質和構造研究資料,所以有關本區的 地質認識要比其他兩區為多。此外,澎湖群島(I)和濱海平原(II)兩地 質分區,在地質上也可以歸併在本地質區內。

2.1.1.2.1.1. 澎湖群島

台灣海峽中的澎湖群島(圖 2-4,I)大小共計64個島,除了花嶼之 外全部都是玄武岩質火山島。這些島嶼主要是由玄武岩流組成,多有 明顯的柱狀節理特徵,其間還夾有一些沉積岩層。各島千篇一律都是 方山的外形,海拔最高不過75.5 m,其實平坦的島頂就是玄武岩流之 台地面。

澎湖各島的玄武岩流可能是自裂隙或孔洞噴出,初期岩流多為海 底火山岩;後來又有在海面之上形成的。年代大約在10 Ma前上下, 與台灣西部麓山帶的中新世(表 2-2)火山活動同期。玄武岩中多氣 孔,有的氣孔後來受到熱液及地下水的沈澱等作用,而充填了一些礦 物如方解石、霰石等等,呈現同心圓狀構造,這就是著名的「文石」。

形成澎湖群島的原因和台灣西部麓山帶的中新世(表 2-2)火山活動應相同,都是由於古南海板塊張裂所造成的張裂作用與岩漿活動。

2.1.1.2.1.2. 濱海平原

濱海平原(圖 2-4,II)由第四紀(表 2-2)晚期至全新世之未固結沖 積層所覆蓋,其地層多屬河流或洪流沖積土砂而構成之沖積層,主要 由黏土、粉砂、砂和礫石所組成,質地較為鬆軟,其厚度視地區不同 而異。

2.1.1.2.1.3. 西部麓山帶

西部麓山帶(圖 2-4, III)除了零星出露的小規模火成岩體之外, 主要由未變質之漸新世以後至第四紀(表 2-2)之砂岩、頁岩及礫岩所 組成。範圍包含屈尺-潮州斷層(圖 2-4)以西的整個西部丘陵及阿里 山山塊,西與西部濱海平原(現代沖積層)為鄰,由中央山脈西側的起 伏山地開始,向西漸變為較低緩的山地和丘陵,更向西則是台地,全 區海拔大多低於2,000 m,只有在接近阿里山一帶局部的高度可達 2,700 m。由鑽井資料可知,濱海平原的現代沖積層之下,甚至台灣 海峽的沉積物之下,都有與本區相連貫的岩層,只是未出露於地表。 這些岩層並向西延伸至濱海平原及台地之下。

西部麓山帶岩層的主要沉積年代與東側的中央山脈板岩系相當 或更年輕,只是尚未經過變質。若將板岩系與麓山帶合併來看,則可 發現岩層年代大體由東向西漸年輕,變質度也是由東向西漸弱。原來 兩區都是海底巨厚沉積物的一部分,所以本區的岩層是當年相對上部 的沉積物;之後又由於距造山運動核心較遠,因而未受變質。岩層在 南北向也有變化,年代由北向南逐漸年輕,北部常見的漸新世及早中 新世(表 2-2)地層到了南部都不復見;地層厚度方面則南比北厚。

西部麓山帶的西半側則是較年輕的上新-更新世(表 2-2)地層。 同樣的在北部可以發現一個海進-海退循環;可是南部就是相對單調 的海相地層了。從組成、組織和岩相分布來看,這些地層的碎屑沉積 物主要是來自東側的中央山脈,當時中央山脈(包括東半側的西部麓

山帶)已因造山運動而隆起,成了沉積物的供應者。除了常見的砂岩 和頁岩之外,本區還有兩種很具特色的岩層,一是南部上新世海相地 層是由巨厚的泥岩組成,這些泥岩岩性單調,膠結度不佳,往往形成 惡地地形(月世界)以及泥火山現象;另一是中北部更新世的濱海相地 層中出現大量的礫岩,在地形上形成許多台地。

至於西部麓山帶東半側的地層年代較老,屬於漸新一中新世(表 2-2)。最老的漸新世地層僅出露在台北盆地東北側,而中新世的地層 可說是本區主體,全區都是由砂岩和頁岩組成。在北部的中新世地層 中可明顯發現到濱海相一淺海相交替出現的三個沉積循環,代表沉積 當時的環境有周期性的變化,一般我們是將之簡化解釋成海退一海進 的循環。台灣地區主要的煤層即出現在海退時期的濱海相地層中。到 了濁水溪以南,早中新世的地層已難見到,而晚中新世的地層則是較 深海的沉積環境,且看不出如北部一樣的周期性變化。由沉積物的組 成及分布看來,這些漸新一中新世地層的碎屑是來自福建的中生代基 盤,當時台灣島尚未形成,只是一片緊臨亞洲古陸的海底,接受來自 古陸河川帶來的大量沉積物。

2.1.1.2.2. 中央山脈地質區

中央山脈(圖 2-4)構成台灣本島主要的山嶺,包括所有亞變質的 第三紀(表 2-2)地層和先第三紀的變質雜岩系。可再分為東、西兩個 地質亞區。東地質亞區為中央山脈東翼地質區(圖 2-4,V),包括太 魯閣帶(圖 2-4,Va)和玉里帶(圖 2-4,Vb)兩個亞區;西地質亞區即 為中央山脈西翼地質區(圖 2-4,IV),可以再分為西部的雪山山脈帶 (圖 2-4,IVa)和東部的脊樑山脈帶(圖 2-4,IVb)兩個不同岩性構造 單位。

2.1.1.2.2.1. 中央山脈西翼

中央山脈西翼(圖 2-4, IV)的大部分是由堅硬或是經過輕度變質 的泥質沉積岩所組成,所以粗稱為中央山脈西翼板岩系。範圍包含了 中央山脈的脊樑山嶺和它的西側山地,到了屏東以南則涵蓋了山脈的

整個南端,在山脈東側從玉里到台東的一條狹長區域也屬於本區,形成從南端包夾著東翼變質雜岩區之勢。

雖然在構造上,這個板岩系與更西側的西部麓山帶沉積岩區以屈 尺一潮州斷層為界(圖 2-4),但實際上兩區之間在年代與岩性上卻很 難作截然不同的劃分。基本上兩區的地層都是屬於新生代第三紀(表 2-2)的沉積岩,生成年代大致上來說是本區較老;兩區原來都是海底 巨厚沉積物的一部分,所以本區的岩層是當年相對下部的沉積物。另 一方面,本區雖稱為板岩系,但其實在靠西側的岩層嚴格來說只是較 一般堅硬的沉積岩,還稱不上是真正的變質岩,所以常可聽到「硬頁 岩」或「硬砂岩」的稱謂;再往東則才是變質程度遞增的輕度變質岩。 正因為兩區地層的變質程度是向東漸增的,實在很難找出一個沉積岩 與變質岩的明顯界限,所以就以縱貫其間的大斷層構造為界。本區可 說是比西部麓山帶先沉積、先變質,又先受造山運動隆起的部分。

至於再以東的部分就不同了。本區與中央山脈東翼變質雜岩區是 兩個時代差異很大的岩區,那些變質雜岩遠比本區的板岩系古老,可 說是整個變質岩區的底部基盤,而本區及西部麓山帶的較新岩層則覆 蓋在這基盤之上。

在岩石及地層上,本區可再分成西北部的「雪山山脈帶」與主軸 的「脊樑山脈帶」,一般認為其間是以所謂的梨山斷層為界(圖 2-4)。 兩區最大的差異是脊樑山脈帶大多由較細粒、泥質的硬頁岩或板岩構 成;而雪山山脈帶則在泥質岩層中夾有許多較粗粒、砂質的厚層硬砂 岩或石英岩。這表示在當初的沉積環境中,西北部有位於淺海或濱海 的沉積時期,而中南部則大多處於深海沉積環境。此外,本區也有零 星分布的火山碎屑岩,其中以玄武岩質較為常見。

本區變質作用發生的年代當然是晚於沉積時期,與上新一更新世 的「蓬萊造山運動」有關(距今約6 Ma前,菲律賓海板塊向西北碰撞 歐亞大陸板塊,互相擠壓、褶皺、隆起,造成今天台灣島上高山綿延 的面貌,稱之蓬萊造山運動。這個碰撞作用直到今天仍持續的進行 中)。菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊在陸地上的交界,大致即為花東 縱谷。因而本區的岩石是愈向東邊(愈接近碰撞邊界即壓力源),其變

質程度愈高。值得注意的是,本區內的岩層年代與變質程度並無一致 的分布關係。控制岩層年代的因素是當年沉積的先後順序,之後歷經 各種變動,受褶皺及斷層等作用後實已非常複雜;與控制變質程度的 因素-距碰撞壓力源的遠近並不相同。因此不能說愈老的岩層,其變 質度就一定較高;反之亦然。

2.1.1.2.2.2. 中央山脈東翼

中央山脈東翼變質雜岩區(圖 2-4, V)是全台灣出露地表最古老 的岩石區,整個區域都是變質程度較高的變質岩。範圍北自蘭陽平原 南緣,南至台東附近,全長約240 km;西側與中央山脈西翼板岩系為 鄰,東側大致緊鄰太平洋-花東縱谷一線,北部寬可達30 km,到了 台東附近則僅剩10 km左右的寬度,佔台灣陸地面積的14%。

這個變質雜岩區主要是由原來的沉積岩與火山岩,經過多次變質 作用而成的各種片岩所構成,因此本區又有「大南澳片岩」之名;變 質石灰岩(大理岩)也是常見的岩石。此外,也夾有一些片麻岩、角閃 岩、變質基性火成岩及蛇紋岩等等。主要的片岩有三種,分別為從泥 質沉積岩變質而成的黑色片岩(又稱泥質片岩)、由基性火山岩變質而 成的綠色片岩,以及由砂質沉積岩變質而成的矽質片岩。依據岩石內 變質礦物的分析,整個變質雜岩區可再粗分為西側生成環境相對低壓 高溫的太魯閣帶,與東側生成環境相對高壓低溫的玉里帶,這兩個變 質帶雖然經歷的變質環境不同,但研究證實兩者皆經過同樣的變質時 期。除了所受變質作用的差異之外,所有的大理岩、片麻岩體僅見於 太魯閣帶,表示此帶的原岩中有大量的石灰岩質與花崗岩質岩石;而 玉里帶內則幾乎全是黑色片岩夾雜少量綠色片岩,再加上許多變質基 性岩體的組合,指出此帶的原岩是較單調的泥質沉積岩加上大量的海

這一個變質岩系因為缺少化石和足夠的定年資料,所以在地層劃 分命名及對比上也就產生各種變質雜岩中常有的困難問題。因為要根 據地層原理劃分變質岩系是很困難的,它們缺少可資鑑定的化石,其 岩層的層序也無法確定。

2.1.1.2.3. 海岸山脈地質區

中央山脈和海岸山脈(圖 2-4, VII)之間以東部縱谷(圖 2-4, VI) 分界,這是構造上一個重要的單位,一般認為東部縱谷即歐亞大陸板 塊與菲律賓海板塊在台灣的衝撞過程中,兩板塊縫合線位置之所在, 故將其單獨列為另一地質亞區。海岸山脈主要由新第三紀(表 2-2)地 層所組成,但是沉積物的地質環境和西部麓山區者完全不同,所以岩 性也大不相同。本區內地層以火山岩、含有火山物質的沉積岩、濁流 作用造成的碎屑沉積岩、和混雜無層理的混同層為其代表。

2.1.1.2.3.1. 東部縱谷

東部縱谷(圖 2-4, VI)北起花蓮溪口,南迄卑南溪口,長度約150 km,寬度在3~6 km之間,由於縱谷本身是一個活動的板塊邊界,菲 律賓海板塊不斷的向歐亞大陸板塊擠壓、聚合,同時也伴隨著左移運 動,因此,縱谷的地殼變形及斷層活動,就十分活躍。而且因為左移 的剪切、拉張,使縱谷形成若干的地壘和地塹,如米崙台地、卑南山 台地及池上的大坡池等。另外,在花蓮的大富和台東的池上,也因為 這個左移的拉張而形成了相對高區(地壘),發生了分水嶺的作用,遂 使縱谷分成花蓮溪、秀姑巒溪及卑南溪等三大水系,因此東部縱谷是 一構造通谷(具有谷中分水嶺的河谷,在地形學上稱為「通谷」)。

東部縱谷的特性有成直線形、狹隘之谷地、地形起伏很小、水系 奇特、及地震的高頻率等,這些現象顯示縱谷與構造有密切關係,斷 層作用是谷地裂開的直接原因。另外一個特性是有相當厚度的堆積 物,並且兩側為一系列的沖積扇所圍繞,這些沖積扇大部分來自中央 山脈的河川。這些堆積物是第四紀(表 2-2)沖積層或堆積層,它整合 或不整合覆蓋於中央山脈變質岩之上,或海岸山脈的混同層之上,是 最年輕的地層,形成年代為全新世。

2.1.1.2.3.2. 海岸山脈

台灣島大部分地區位在歐亞大陸板塊上,只有海岸山脈(圖 2-4,VII)是屬於菲律賓海板塊,與綠島、蘭嶼同屬呂宋火山島弧系統 的一部分。其範圍西以東部縱谷與中央山脈為界,北從花蓮溪口,向 南延伸至台東縣的卑南大溪河口,長約150km。

海岸山脈基本上由火山岩、碎屑沉積岩及混同層等三套岩層組成,除了少許的熔岩流及深成岩(火成岩的一種,為岩漿侵入地下深 處凝固而成,也稱之為侵入岩),絕大部分的地層都是沉積岩,年代 從中新世跨越到更新世(鄧屬予,2002)。

海岸山脈主要以火山碎屑岩為主,有角礫岩、礫岩、砂岩、凝灰 岩和石灰岩,這些岩層是由海底火山噴發所造成,構成呂宋火山島弧 的主體。混同層的主體是一套層理不明的泥岩,其中夾雜許多不明的 岩塊,岩塊的直徑小至數公分,大至數公里(鄧屬予,2002)。碎屑沉 積岩的部份,是由砂岩、頁岩、礫岩及少數的石灰岩所組成。從岩石 的碎屑判斷其來源可知,西側中央山脈變質岩區,及原先形成的火山 岩均為重要的供應來源,只是在時間上,早期是以火山岩為主要供應 來源,當中央山脈地區隆起後,成為後期重要的沉積來源區。

位於本區東南外海的綠島及蘭嶼,在地質構造上其實是與海岸山 脈相連的,它們都是由安山岩質的熔岩和集塊岩構成,年代與海岸山 脈相近,而位於最東南側的小蘭嶼則擁有最年輕的地質,僅數十萬 年,是第四紀(表 2-2)最新火山活動的產物。



圖 2-4:台灣地質分區圖

資料來源:何春蓀,1986,P18

2.1.1.3. 台灣的大地構造

根據台灣及鄰近地區大地構造架構(圖 2-5),顯示台灣地區介於 歐亞大陸東緣與菲律賓海板塊交界處,處於環太平洋火山與地震帶 中。菲律賓海板塊在台灣東北方,沿琉球海溝向北隱沒到歐亞大陸板 塊之下,在台灣南方,菲律賓海板塊沿馬尼拉海溝以西北方向仰衝於 歐亞大陸板塊之上(圖 2-6)。菲律賓海板塊從新生代(表 2-2)早期以 來,一直朝西北移動,目前仍以每年約7 cm的速度,向歐亞大陸板塊 移動。

在台灣東北方的歐亞大陸板塊上,有琉球島弧,在台灣南方菲律 賓海板塊有呂宋島弧,台灣東部的海岸山脈是呂宋島弧的北段,呂宋 島上的火山列向北延伸,順著一連串海脊,通過蘭嶼與綠島,可銜接 台灣東部的海岸山脈。若觀察台灣與鄰近地區的區域地形、台灣地質 分區及大地構造剖面關係(圖 2-7),不難理解台灣島因菲律賓海板塊 上的呂宋島弧,與歐亞大陸東緣大陸棚的張裂盆地(圖 2-8)發生「弧 陸碰撞」(Malavieille et al., 2002; Teng and Lin, 2004),導致台灣島 山脈的隆升與台灣西南海域的沈陷(Teng and Lin, 2004)。呂宋島弧 在台灣向下俯衝撞擊大陸地殼,由於大陸地殼比重較輕,因此受到壓 縮與抬升,形成「弧陸碰撞」並造就出台灣的山脈(鄧屬予, 2002, P68)。

台灣地層的變形(deformation)與構造的走向(圖 2-8),受到「弧 陸碰撞」擠壓的影響,大多為北北東-南南西分布;然而台灣東北部 構造線有轉向東北的趨勢,且發育了台北盆地和蘭陽平原兩個山中裂 谷,以及碰撞運動發生後出現了大屯和基隆兩個火山群,說明了除碰 撞運動外,在台灣東北海域的琉球島弧及沖繩海槽的發育-受制於菲 律賓海板塊對歐亞大陸的隱沒作用-也對台灣島的地質演化起了重 要的影響(鄧屬予,2002; Teng and Lin, 2004)。

在弧陸碰撞的框架中,從橫切台灣的地質剖面來看相當清楚(圖 2-8),台灣東部的花東縱谷可視為島弧和大陸板塊的縫合線,縱谷東 邊的海岸山脈原屬呂宋島弧,縱谷以西則屬歐亞邊緣,由東向西的碰

撞擠壓,台灣山脈的岩層被塑造成一系列平行的褶皺和斷層,沿北北 東-南南西方向排列。在山脈西緣,台灣海峽和西部平原地層大致平 整,往東進入碰撞山脈後,原本覆蓋在板塊大陸邊緣的沉積層,被抬 升出露在西部麓山帶和中央山脈,形成第三紀的沉積岩和板岩層。大 陸邊緣的先第三紀(表 2-2)基盤,則成為中央山脈的大南澳變質雜岩 (圖 2-8);再往東進入海岸山脈,呂宋島弧系統的岩層出露地表,包 括火山弧安山岩層、海溝內壁的混同層、和週遭的濁積層(鄧屬予, 2002,P68)。

台灣東北部的構造趨勢,係折向東北,最後趨向東西,山脈中出 現了兩個第四紀(表 2-2)裂谷盆地(台北和宜蘭盆地),和兩組火山群 (大屯和基隆)。由地震的震央分布顯示該區下方有一向北傾斜的隱沒 帶,而地震的震源機制,則指示該區的地殼正處於伸張狀態,表示台 灣東北部已不再屬於碰撞帶(鄧屬予,2002,P69)。

茲將台灣的「弧陸碰撞」過程的地質演化(圖 2-9)敘述如下:

在一千萬年(10 Ma)以前,台灣島並不存在,台灣地區是一片淺 海,位於中國大陸邊緣上。當時,菲律賓海板塊遠在台灣東南方的大 洋中,不斷朝北北西方向移動,一方面向北隱沒到大陸板塊之下,另 一方面向西仰衝到南海之上。隨著菲律賓海板塊不斷向北北西移動, 呂宋島弧也逐漸地靠近大陸邊緣。島弧的北端在一千萬年前左右,開 始衝上大陸邊緣,揭開了弧陸碰撞的序幕(圖 2-9 A)。

在一千萬到五百萬年(5~10 Ma)前之間,呂宋島弧逐步擠近大陸 邊緣。當大陸邊緣被拖入隱沒帶時,大量的陸緣沉積物在海溝被刮 起,塞進增積岩楔中,使得增積岩楔愈長愈大(圖 2-9 B)。

到了五百萬年(5 Ma)前, 呂宋島弧的北端衝上了大陸邊緣, 並且 把增積岩楔推出了海面, 形成一座小島。當時島的位置在現今宜蘭南 澳東方約200 km的西表島(屬琉球)附近,島上並沒有高山,只有一些 丘陵, 不過, 已經形成碰撞山脈的雛型。菲律賓海板塊在五百萬年前 轉向,開始朝西北方向移動。呂宋島弧因而更加速衝上大陸邊緣, 並 推著碰撞山脈向西遷移(圖 2-9 C)。

在三百萬年前左右,碰撞山脈已上升成高山,規模和現在的中央 山脈相當。隨著呂宋島弧持續地衝撞,山脈不斷地向西加寬、向南延 伸,終於發展成今日的中央山脈。在碰撞的後期,呂宋島弧的北段也 被擠壓抬升,貼附在中央山脈的東側,形成海岸山脈。

當碰撞運動向西南遷移時,琉球島弧下向北隱沒的菲律賓海板塊 隨之西進,插入碰撞山脈北端的下方,造成隱沒作用的反轉。隨著隱 沒的反轉,隱沒帶上方的山脈出現琉球島弧的火山作用,而山脈失去 了碰撞的支撐則開始垮塌下沉,山脈的中央擴張成一裂谷盆地(圖 2-9 D)。

如今弧陸碰撞運動仍在進行,並不斷地向南傳遞(圖 2-9)。在台灣的東南外海,呂宋島弧北端的綠島和蘭嶼正朝向中國大陸挺進。在 台灣的中南部,碰撞山脈仍在成長,但在台灣的東北部,隱沒作用已 經反轉,碰撞運動停止,原本碰撞所抬升的山脈正在垮塌;山脈的中 央分裂成宜蘭平原,並不斷地擴張(鄧屬予,2007)。



圖 2-5:台灣鄰近地區大地構造架構圖

縮寫說明:CEL—Celebes Sea; ECS—East China Sea(東海); HB—Huatong Basin(花 東盆地); JS—Japan Sea(日本海); MT—mariana Trough(馬里亞納海槽); OT—Okinawa Trough(沖繩海槽); PVB—Parece Vela Basin; SB—Shikoku Basin; SCS—South China Sea(南海); SL—Sulu Sea; WPB—West Philippine Basin。 資料來源: Teng and Lin, 2004



圖 2-6:台灣板塊構造立體示意圖

資料來源:何春蓀,1986,P145



圖 2-7:台灣及鄰近區域海域地形、大地構造架構及剖面關係圖 縮寫說明:HP—Hengchun Peninsula(恆春半島);MAW—Manila Accretional Wedge(馬尼拉增積楔);LV—Longitudinal Valley(東部縱谷);SLT—South Longitudinal Trough(南縱谷海槽) 資料來源:Malavieille et al., 2002



圖 2-8:台灣(含附近海域)地質分區及地質剖面示意圖 資料來源:Teng and Lin, 2004



圖 2-9:台灣碰撞演化示意圖

資料來源:鄧屬予,2007,P8

表 2-2:地質時間表

元 Eon	代 Era	紀 Period	世 Epoch	放射性定年 大約數字 (留位: 五萬年以前)
		第四紀	全新世 Holocene	(半位·日禹平以前) 0.01
	新生代 Cenozoic	Quaternary	更新世 Pleistocene	1.6
		第三紀 Tertiary	上新世 Piocene	5.3
			中新世 Miocene	23.7
			漸新世 Oligocene	36.6
			始新世 Eocene	57.8
			古新世 Paleocene	66.4
顯生元	中生代	白堊紀 Creaceous		144
Phanerozoic		侏羅紀 Jurassic		208
	Mesozoic	三疊紀 Triassic		245
		二疊紀 Permian		286
		石炭紀 Carboniferous		360
	古生代	泥盆紀 Devonian		408
	Paleozoic	志留紀 Silurian		438
		奧陶紀 Ordovician		505
		寒武紀 Cambrian		570
隱生元 Cryptozoic				4600

資料來源: 王執明, 1991, P13

2.1.1.4. 台灣的大地應力

台灣是呂宋島弧衝撞中國大陸邊緣所形成的褶皺山脈,故影響台 灣地區應力分布因素相當複雜。在上新世(表 2-2)至更新世期間 (4~0.5 Ma),台灣地區的古應力變化(圖 2-10),大致可因經歷呂宋島 弧碰撞亞洲大陸,或因沖繩海槽擴張跨騎到呂宋島弧上,而可分為二 至三期的古應力變化時期(Angelier et al., 1986;李錫堤, 1986)。

綜整近幾年研究成果(Suppe et al., 1985; Yeh et al., 1991; 鄭世 楠, 1995; Hu et al., 1996; 余水倍、胡植慶, 2002), 顯示台灣大部 份區域主應力(圖 2-11) 方向呈東南一西北方向;東北部區域應力場 受沖繩海槽擴張影響,最大水平應力(壓力軸)平行於沖繩海槽,呈東 西向;西北部之最大主應力(壓力軸)為北北西方向;西南部則呈現西 北西方向;整體來說,最大主應力(壓力軸)方向呈扇狀分布。



圖 2-10:台灣弧陸碰撞模式與最大水平應力軌跡 資料來源:李錫堤,1986,P118



圖 2-11:台灣及其鄰近地區第四紀至今水平大地應力分布 說明:(a)水平大地壓應力分布(粗線段代表最大主應力軸方向,點線為平均應力 方向);(b)主要應力場與第四紀碰撞方向示意圖(點線表示同(a));北台灣(NT) 最大主應力平均方向為159度;中台灣(CT)為122度;南台灣(ST)為107度;東台 灣縱谷(LV)為128度。(粗線為斷層滑動方向、井下裸孔徑擴、地震斷層面解等資 料所得最大主應力方向,點線為數值模擬結果。) 資料來源:Hu et al., 1996, P249

2.1.2. 主要構成岩體

構成岩體是影響地質環境極為重要的條件因素之一,由構成岩體 的特性與分布可以詮釋過去地質演化的歷史,也可以說明現在地形、 地貌具象表徵演育之本質,同時也是本計畫對於處置場址環境,與潛 在母岩主體選定的重要特性條件。

台灣最古老的岩體為中央山脈東翼的地區(圖 2-4),時代大約是 古生代(表 2-2)晚期或中生代,以變質岩為主,常稱之為先第三紀變 質岩,出露岩石有片麻岩、大理岩、片岩與板岩等常見的變質岩。在 此變質岩西側的第三紀地層中,出露的岩石有變質砂岩、硬頁岩與板 岩等。在第三紀中期的中新世以後,中央山脈地質區的西側為西部麓 山帶地質區,除北部的大屯火山群、基隆火山群(安山岩為主)及澎湖 群島(玄武岩為主)的火成岩外,大部分以沉積岩為主,出露的岩石分 別有礫岩、砂岩、頁岩與石灰岩等。中央山脈東側的海岸山脈地質區, 則由火成岩和沉積岩所組成,沉積岩的部份,是由砂岩、頁岩、礫岩 及少數的石灰岩所組成,火成岩中以安山岩、集塊岩及玄武岩質凝灰 岩為主(徐鐵良,1992,P30)。台灣各類岩石之分布如圖 2-12。位於 鄰近中國東南沿海的各個離島(金門、馬祖等),則是以花崗岩為其主 要之構成岩體。

基本上,台灣地區沉積岩的分布最廣,其分布面積約佔台灣總面積的三分之二,其次為變質岩,而以火成岩分布的面積最小(徐鐵良, 1992, P138)。以下就從我國常見的岩石來敘述各種岩類的特性。

2.1.2.1. 火成岩

火成岩是熾熱岩漿冷卻後形成的岩石,依據岩漿冷卻環境,火成 岩可分為噴出岩及深成岩兩種類型。岩漿噴出地表所形成的岩石稱為 噴出岩,又稱火山岩,如玄武岩與安山岩;另一種是岩漿侵入地底就 冷卻形成的岩石稱為深成岩,又稱侵入岩,如花崗岩與輝長岩。侵入 岩因冷卻的時間較為緩慢,所以生成的礦物顆粒較大,而噴出岩中的 礦物顆粒粗細不均,但一般都比較細。火山爆發時噴出的物質有粗

細,火山灰形成的岩石稱為凝灰岩,粗粒的火山塊形成的岩石稱為火山角礫岩(陳文山,2002,P18)。台灣地區較為常見的是噴出岩,深成岩則多見於金門、馬祖等外島。

火成岩因為岩漿成分相異,而形成不同種類的岩石;花崗岩由酸 性的岩漿形成,安山岩由中性的岩漿,玄武岩則是由基性岩漿構成, 因此火成岩中的礦物組成就會產生很大的差異。尤其SiO2重量百分比 含量的多寡是火成岩分類重要的根據,花崗岩中含有較高的SiO2含 量,相對玄武岩SiO2含量就較低。火成岩直接由岩漿凝固而成,因此 岩石結構與沉積岩或變質岩不同;火成岩中礦物外型都非常完整,且 礦物都交織狀鑲崁在一起,不像沉積岩的礦物外型都已被磨損,也不 像變質岩大都具有一片片的片理結構,且礦物都具有定向的排列(陳 文山,2002,P18~19)。由岩石的結構及組成礦物外型完整等因素, 使得火成岩成為用過核子燃料深地層處置場址優先考慮的潛在母岩 之一,國外許多國家也選定火成岩類的花崗岩為處置母岩(如芬蘭、 瑞典等),後續針對花崗岩質潛在母岩的特性論述,於2.3.1節中有完 整詳細的說明。

台灣之主要火成岩分布地點與岩性如表 2-3所示,可分為北部岩區、東部岩區與西部岩區。各類火成岩之岩性、主要礦物與產地整理如表 2-4所示。

北部火成岩區主要就是大屯及基隆兩大火山群,加上東北部外海 諸島。此區的火成岩主要是2 Ma以內的近代岩漿活動所形成。火山群 的火成岩覆蓋在第三紀(表 2-2)沉積岩盤之上,大部分都是安山岩類 的火山岩,僅有極少山頭屬於玄武岩質,而除了火山熔岩流之外,凝 灰岩及角礫岩等火山碎屑岩遍布主要火山體周邊。北部火成岩區各類 火成岩之分布詳如圖 2-13所示(莊文星,1999, P138)。

東部岩區包括整個海岸山脈、綠島、蘭嶼及小蘭嶼。在地質年代 方面,火山碎屑堆積跨越很長的時代,自20 Ma至0.1 Ma前不等,大 致上來說北部的年代較老,而向南逐漸變為年輕。大部分由安山質岩 石構成,以都巒山層為代表,大多為集塊岩;另有奇美火成雜岩與台
灣蛇綠岩系等。東部火成岩區各類火成岩之分布詳如圖 2-14所示(陳 正宏,1990, P20)。

西部火成岩區主要以玄武岩為主,包括澎湖群島(但花嶼屬於安山岩質熔岩)、關西一竹東一角板山地區及公館附近地區,分布圖詳圖 2-15與圖 2-16。在地質年代方面,最老自60 Ma(花嶼安山岩)至10 Ma(西部陸地玄武岩)。

2.1.2.2. 沉積岩

地表岩石遭受風化與侵蝕後形成的岩石碎屑,經過搬運沉澱為沉 積層,之後經過膠結形成堅硬的沉積岩。碎屑在搬運過程中會被磨 損,所以沉積岩中的礦物外型都已損毀,但沉積物顆粒都具有良好的 海選度,沉積岩的主要特徵是具有一層層平行的層理。台灣的沉積岩 種類不多,主要差異在細部的成分及組織上,隨地區和地層差異而有 所不同(鄧屬予,1997)。各類沉積岩之岩性、粒徑大小、主要礦物、 沉積環境與分布整理如表 2-5所示。

在西部麓山帶及海岸平原區之沉積岩分布,如圖 2-17所示。沉 積物來源來自中國大陸及台灣本島之中央山脈。砂岩中以石英、鉀長 石、雲母、火山碎屑與變質岩屑為主。而泥岩中以石英、伊萊石、高 嶺石、綠泥石及長石為主。上新一更新世(表 2-2)後的沉積物來源逐 漸轉變,雖以閩浙為主,但源自中央山脈者漸多。其證據包括了(1) 出現輕度變質之岩屑、(2)高結晶度的伊萊石與綠泥石明顯增多、及(3) 角礫形的碎屑逐漸變多。

在中央山脈岩區部份(圖 2-18),又可分為大南澳雜岩(變質沉積 岩)與板岩層(輕度變質沉積岩)。板岩層的沉積岩相以陸棚堆積層為 主,包括近濱相之砂頁岩、遠濱相之泥岩與石灰岩、陸坡相之泥岩與 砂泥岩互層與濱海相之礫岩與砂岩。大南澳雜岩之沉積相,則包括淺 海相之石灰岩和砂岩與深海相的泥岩、石灰岩、礫岩和燧石;此岩區 內的砂岩富含石英及岩屑;礫岩多燧石、石英岩、板岩與火山岩礫岩; 而石灰岩則含有大型有孔蟲與海百合化石。至於恆春半島主要為陸坡

相濁流岩與傾瀉層,包含了礫岩(砂岩礫)、砂岩(石英及岩屑)、泥岩(伊萊石及混層黏土)與石灰岩(珊瑚、藻類及有孔蟲碎屑)。



圖 2-12:台灣地質圖

資料來源:地調所,2000

岩區	火成岩分布地點		主要岩性
北部岩區	大山火山群		凝灰岩、高鋁玄武岩、輝石安山
	人也人口利		岩、角閃石安山岩
	基隆火山群		石英安山岩
	觀音山		鹼長基玄武岩及輝石安山岩
	草嶺山		白榴基玄武岩
	黄尾嶼		鹼長基玄武岩及輝石安山岩
	彭佳嶼、棉花嶼、花瓶	瓦嶼	高鋁玄武岩、輝石安山岩
	龜山島		輝石安山岩
東部岩區	做人派训工		凝灰岩、枕狀熔岩、玄武岩質角
	朱合溪刮面	÷	礫岩及安山岩質角礫岩
	本美	女	輝石安山岩、角閃石安山岩、角
	可夫—豆頂地區	Ш <u>ц</u>	礫岩、白色凝灰岩及中酸凝灰岩
	烏石鼻、三仙台	石	輝石安山岩
	綠島、小蘭嶼	大只	集塊岩、黑雲母角閃石安山岩
	蘭嶼		集塊岩、凝灰岩及角閃石安山岩
	明山水式磁也	蛇	玻璃質玄武岩、粗粒玄武岩、基
	開山入风稚石	綠	性和超基性深成岩
	利士业式磁生	岩	玻璃質玄武岩、粗粒玄武岩、基
	们百入风神石	類	性和超基性深成岩
西部岩區	澎湖群島		鹼性玄武岩、矽質玄武岩
	關西-竹東和角板山地	品	
	公館地區		

表 2-3:台灣主要火成岩分布地點與主要岩性

資料來源:陳正宏,1990,P2

表 2-4:	台灣各類火成岩岩性。	及分布地點一覽表	
			_

岩性	主要礦物	顆粒大小	分布地點
它小些	長石、角閃石、輝	肉眼可見的顆粒	觀音山、大屯、基隆火山群、
女山石	石、黑雲母、石英	1~3 mm	海岸山脈、龜山島、綠島、蘭
(入山石)			峋。
玄武岩	斜長石、角閃石、	1 mm以下	澎湖群島、海岸山脈
(火山岩)	輝石、橄欖石		
花崗岩	石英、正長石、黑	0.5~50 mm	金門、馬祖等外島
(深成岩)	雲母、白雲母		
編巨山	輝石、角閃石、斜	約0.3~0.7 mm	中央山脈東斜面,東澳,烏石
件 衣石	長石、橄欖石		鼻,大濁水北溪,海岸山脈南
(沐成石)			部,關山,利吉,虎頭山
蛇紋岩	蛇紋石	非常細	東部海岸山脈與中央山脈
(深成岩)			
海太山	火山灰、玻璃質碎	4mm以下	零星分布於台灣北部基隆、台
(火石	屑		北、桃園及新竹以及台東都巒
(八山石)			山層成斷續延伸之岩帶

註:火山岩又稱為噴出岩,深成岩又稱為侵入岩



圖 2-13:台灣北部岩區之各類火成岩之分布

資料來源:莊文星,1999,P124



圖 2-14:台灣東部岩區之各類火成岩之分布

資料來源:陳正宏,1990,P20



圖 2-15: 澎湖地區之火成岩分布

資料來源:莊文星,1999,P219



圖 2-16:台灣西部陸地區域之火成活動分布圖 資料來源:莊文星,1999,P204

•				
岩性	粒徑大小	主要礦物	沉積環境	分布
	直徑大於2	視礫石源岩種	陸相沉積環	台灣西部麓山帶,礫
7分 山	mm	類	境	石台地如林口湖口火
馀石			(山麓沖積扇)	炎山大肚山八卦山
				等,東部海岸山脈
7小山	介於1/16~2	石英、長石和雲	河口或濱海	台灣西部麓山帶、海
ゆ石	mm	母	沉積環境	岸平原與海岸山脈
	小於1/256	黏土礦物,或石	静水沉積環	台灣西部麓山帶及海
頁岩	mm	英粉砂粒	境,如沼澤湖	岸山脈,常與砂岩形
			泊或大洋	成厚薄不一的互層
	小於1/256	黏土礦物,或石	遠洋海底沉	台灣西部麓山帶南
泥岩	mm	英粉砂粒	積環境	段,台南縣到高雄縣
				的丘陵地
一 十 山	粒度從緻密	碳酸鈣或含有	多為淺海環	南部的大、小岡山、
石火石 (陈知珊瑚礁)	到肉眼可見	碳酸鎂、黏土等	境	半屏山、壽山及恆春
()至延珊瑚礁)	均有			半島

表 2-5:台灣各類沉積岩特性一覽表



圖 2-17:台灣西部麓山帶與海岸平原之沉積物分布圖 資料來源:鄧屬予,1997,P48



圖 2-18:中央山脈岩區之沉積物分布圖

資料來源:鄧屬予,1997,P70

海岸山脈岩區(圖 2-19)之沉積物來源,來自於呂宋島弧之火山岩 體與中央山脈之沉積岩與變質岩。此沉積岩區中之砂岩碎屑若為火山 岩碎屑者,以斜長石及安山岩岩屑為主要成分,以都巒山層及蕃薯寮 層為代表;若為沉積岩碎屑者,以石英鉀長石及泥岩岩屑為主要成 分,蕃薯寮層及八里灣層可為其代表;若是為變質岩碎屑者,且以板 岩變質砂岩及石英岩為主要成分者,則其來源自中央山脈之板岩層, 以八里灣層為代表;但若以多量的大理岩與片岩為主要成分者,其來 源自大南澳雜岩,以卑南山礫岩較為常見。此沉積岩區中之泥岩分 布,各地層也有極大之差異;都巒山層多為蒙脫石,此係火山岩風化 或換質作用而來;蕃薯寮層和利吉層則為低結晶度之伊萊石、高嶺石 及綠泥石,此為沉積岩風化而來;而八里灣層為高結晶度之伊萊石及 綠泥石,此為沉積岩風化而來;而八里灣層為高結晶度之伊萊石及 綠泥石,此為沉積岩風化而來;而八里灣層為高結晶度之伊萊石及 綠泥石,此為完積岩風化而來,而此沉積岩區中石灰岩主要出露於都 巒山層之頂部,以薄層石灰岩型態出現,係屬火山島弧緣礁之堆積 物,常夾大量的安山岩及生物碎屑,在其他地層中多以零星的石灰岩 塊出現。

2.1.2.3. 變質岩

變質作用是指岩石所處環境的物理或化學條件改變時,造成岩石 中礦物組成或結構改變,例如頁岩發生變質作用時,其中的黏土礦物 會轉變成為絹雲母,並且會集中生長在同一個面上,造成岩石容易破 裂。這種裂面稱為劈理面,此時頁岩就變質成為板岩或片岩。

變質作用經常是大範圍的作用,大規模的變質活動都與板塊擠壓 作用有關。因為板塊碰撞擠壓會造成大範圍岩石的溫度與壓力產生改 變,形成岩石內部礦物組成產生變化,且強烈變形。台灣東部正是處 於菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊的碰撞帶,使得歐亞大陸板塊邊緣的 岩層產生變質,因此中央山脈出露多種變質岩,如片麻岩、大理岩、 片岩、板岩等(陳文山,2002,P21)。



圖 2-19:海岸山脈岩區之沉積岩分布圖

資料來源:鄧屬予,1997,P91

中央山脈板岩區的岩性分布如圖 2-20所示,本區岩石僅輕度變 質,或有稱硬頁岩、硬砂岩等名稱。以地質單元為區隔,脊樑山脈帶 大多由較細粒、泥質的硬頁岩或板岩構成;雪山山脈帶則在泥質岩層 中夾有許多較粗粒、砂質的厚層硬砂岩或石英岩。而在南、北的空間 分布上,也有相當的岩性差異。原因在當初的沉積環境中,西北部有 位於淺海或濱海的沉積時期,而中南部則大多處於深海沉積環境。

中央山脈變質雜岩區,又稱大南澳黑色片岩或泥質片岩,主要由 泥質沉積岩變質而成的。其中分布之岩石有綠色片岩,此係由基性火 山岩變質而成的;矽質片岩,則是由砂質沉積岩變質而成的;大理岩 則屬於變質石灰岩。此外偶夾有一些片麻岩、角閃岩、變質基性火成 岩及蛇紋岩等。本區各類岩性分布圖 2-21所示(何春蓀,1986,P27)。 其中,片麻岩因其礦物組成與花崗岩相似,岩體特性也適合作為潛在 處置母岩,所以其分布範圍(圖 2-22)與特性相關研究,有後續深入探 討研究之必要。各類變質岩之岩性、原岩、生成環境、主要礦物與產 地整理如表 2-6所示。



圖 2-20:中央山脈板岩區岩性分布圖

資料來源:何春蓀,1986,P41



圖 2-21:中央山脈變質雜岩區(大南澳片岩)岩性分布圖 資料來源:何春蓀,1986,P27

表 2-6:台灣各類變質岩岩性及分布地點一覽表

岩性	原岩	生成條件	主要礦物	分布地點
	頁岩、泥岩、	低温、低壓	黏土礦物、石	中央山脈西翼,北横公
板岩	細粒凝灰岩		英、雲母、長	路及新中横公路沿
			石	線、中橫及南橫的西段
υщ	頁岩、泥岩、	中低温、中壓	石英、雲母、	中央山脈東翼變質雜
万石	玄武岩		長石	岩區
口应也	火成岩、矽質	高溫、高壓	長石、石英、	中央山脈東翼變質雜
万胍石	沉積岩		雲母	岩带的北段
十田山	石灰岩	高温、低壓	方解石或白	中央山脈東翼變質雜
八圩石			雲石	岩區的西側
	富含石英之	高温、低壓	石英	東北角龍洞,北横公路
	砂岩			四稜、中橫公路宜蘭支
石英岩				線沿線、中橫公路天
				冷、谷鬬至梨山一带、
				霧社附近
	橄欖岩	低溫至高溫	蛇紋石、柘榴	花蓮的壽豐、萬榮、瑞
蛇紋岩			子石、輝石、	穗、卓溪、宜蘭的南澳
			角閃石	



圖 2-22:台灣東部片麻岩體之分布圖 資料來源:王執明等2人,1995,P136

2.1.2.4. 工程特性

台灣地區的各類岩石工程特性參數如表 2-7所列,各工程參數主 要來自相關的試驗室分析資料,包括了比重、孔隙率、吸水率、單軸 抗壓強度、間接抗張強度、縱波傳波速度、剪力波傳波速度及耐蝕度。 變質岩與火成岩之比重較沉積岩來得高,岩石強度(抗壓與抗張強度) 也呈現相類似的情況。

岩體分級多應用於地下設施與隧道工程方面,過去多以岩石單壓 強度做為分級的依據,因其為岩石材料力學性質的重要參數,也是岩 體特性的重要指標,如果岩體較為完整時,岩石的強度就代表岩體的 強度。

有關台灣地區地層的岩體強度分級,參照地調所(2008)整理都會 區及周緣坡地環境地質資料庫圖集資料(原始精度比例為五萬分之 一),係依據岩石單壓強度與岩體結構類型為分級準則,將岩體強度 分成七個等級,參考圖 2-23所示。其中岩石單壓強度係參考國際岩 石力學協會(ISRM,1981)與Franklin(1975)的岩體分級方法,將岩石強 度分成八級(參考表 2-8)。通常岩體中不連續面的發育程度會影響岩 體強度,或由於不連續面的間距縮小導致單位體積內之不連續面數量 增加,造成不連續面的間距縮小導致單位體積內之不連續面數量 增加,造成不連續面的密度愈高,而岩體強度降低,所以岩體結構類 型亦為一重要的參考指標。岩體結構類型不易作量化數值,僅能依野 外調查所獲得之不連續面狀態,作半定量的評估分成六類(參考表 2-9)。綜整上述的分類方法,可將台灣地區各地層的岩體強度分級整 理出來,並分別出不同岩性組合之岩體強度分級;台灣地層岩體強度 分級分布圖如圖 2-24所示。

在中央山脈東翼地質區所出露之變質雜岩,包含了片岩、大理 岩、角閃岩與片麻岩等岩類;片岩與片麻岩類岩石多為層狀至薄層結 構,岩石單壓強度在250至500 kg/cm²,岩體強度分級上為第III至IV 級,大理岩則為塊狀裂隙結構,岩石單壓強度亦在在250至500 kg/cm² 間,岩體強度為第III級。相較於沉積岩至輕度變質岩為主的西部麓山 帶地質區,大部份的岩石為層狀至薄層結構,岩石單壓強度在250

kg/cm²以下,岩體強度分級為第IV至VI級,只有局部屬於砂岩質的岩 性地層,屬於整體至塊狀結構,岩石單壓強度大於250 kg/cm²,岩體 強度分級可為第I至III級;而砂頁岩互層之岩性地層,多屬於層狀至 薄層結構,岩石單壓強度在50至200 kg/cm²之間,岩體強度分級為第 IV至V級。泥岩質岩性的代表地層古亭坑層,主要為塊狀結構,岩石 單壓強度在25至50 kg/cm²之間,其岩體強度分級為第V級(參考表 2-10所示)。

台灣地區火成岩的單壓強度統計資料如表 2-11所示;大部分的 火成岩單壓強度在800 kg/cm²以下,屬於塊狀至塊狀裂隙結構,岩體 強度分級為第III級;而離島花崗岩單壓強度在700至1700 kg/cm²間, 岩石結構亦多為塊狀至塊狀裂隙結構,岩體強度分級為第II至III級。

表 2-7:台灣各類岩石工程特性參數一覽表

工程參數	比重	孔隙率	吸水率	單軸抗壓強度	間接抗張強度	縱波傳波速度	剪力波傳波速度	耐蝕度(%)
岩石種類	-	(%)	(%)	(kg/cm²)	(kg/cm²)	(m/sec)	(m/sec)	
安山岩(新鮮)	2.6-3.0	3.0-9.5	0.9-2.5	800-1500	30-90	3000以上	1500-2500	95-97
安山岩(風化)	2.0-2.5	4.0-10.0	5.0-9.0	150-350	8-15	2000-3000	1500以下	75-85
玄武岩	2.7-3.1	0.5		700-3500				
凝灰岩		1-4		1000以上				
花崗岩	大於2.6			2000以上		2400以上	1500以上	
砂岩(五指山層)	2.5-2.65	2.5-4.5		350-850	20-80			96以上
砂岩(木山層)	2.5-2.8	4-6		300-650	30-60			
砂岩(大寮層)	2.5-2.8	部份>15		210-600				
砂岩(石底層)	2.45-2.8	10-19		140-640				
砂岩(南港層與	2.35-2.65	10-20		100-400	30以下			90以下
湊合層)								
砂岩(頭嵙山層				120以下				0-30
香山相)								
頁岩				20以下				
片麻岩	2.8-30	<2		1000-1500	105-125			96以上
石英(片)岩	2.6-2.9	1.0-3.0		1000-1800		2500-4500	1200-2100	97-99
板岩				500-750	25-45			
角閃片岩	2.9-3.4	1.8-2.5		650-950	80-105			96以上
花崗片麻岩*1	2.6-2.8	0.3-0.8	0.1-0.3	757-1687	69-146			

*1: 林蔚等4人,2005,表4-7、表4-8、表4-9及表4-12

整理自:徐鐵良,1992,地質與工程,台灣工程基本資料叢書之四,中國工程師學會,494頁。(第六章內容,137-161頁)



圖 2-23:岩體強度分級圖

```
資料來源:地調所,2008,P11
註:1 MPa = 10.1976 kg/cm<sup>2</sup>
```

•			
岩石強	度等級	單壓強度(MPa)	編碼
EW(超	⑥弱岩)	<1	Н
UU (甘花山)	VW2	1~2.5	G
♥₩(世羽石)	VW1	VW1 2.5~5 W2 5~10	F
W(品些)	W2	5~10	E
₩(羽石)	W1	単歴強度(MPa) <1	D
MS(‡	1強岩)	25~50	С
S(強岩)		50~100	В
VS(甚	强岩)	100~250	А

表 2-8:依據岩石單壓強度之岩體分級準則

資料來源:地調所,2008,P9,參考ISRM(1981)與Franklin(1975)。

岩體結構類型	岩體地質類型	不連續面發育情況
整體結構	岩性單一的巨厚層,	層理或劈理不明顯;節理一般不超過
	層厚2公尺以上。	1~2組,出現密度底,延展性差,多閉
		合;構造變形輕微、單斜構造地區。
塊狀結構	岩性單一,層厚0.6公	層理或劈理不明顯;一般為2~3組的節
	尺以上。	理,少量貫穿延展性佳的節理及分離岩
		理塊,其它不規則裂隙少見,節理面多
		閉合。
塊狀裂隙結構	岩性單一,層厚0.6公	節理至少在2組以上,交叉切割,有許
	尺以上。	多分離岩塊,不規則裂隙發育,屬於應
		力集中帶。節理間距在0.2~0.6公尺之
		間。
層狀結構	層厚0.2~0.6公尺間,	層理或劈理明顯;節理為次要不連續
	單一岩性或軟弱相間	面。
	層狀岩層 。	
薄層結構	薄互層、頁岩、板岩、	層理、頁理、劈理、片理高度發育;節
	千枚岩、片岩、層厚	理通常為次要裂隙。
	小於0.2公尺。	
碎裂結構	應力集中破碎帶、構	節理間距0.2公尺以下,有多組節理,不
	造擠壓破碎岩體、斷	規則裂隙高度發育,岩體嚴重分離。
	層帶、剪裂帶。	

表	2-9	:	岩體結構類型之分類準則	

資料來源:地調所,2008,P10

地質 分區	地層 (地塊)	岩性組合	岩體強 度分級	地質 分區	地層 (地塊)	岩性組合	岩體強 度分級
		大理岩片 岩互層	III		七十分回	石灰岩	IV
	東澳片岩	角閃岩	II v III		坎下条僧	砂岩間夾 泥岩	IV
		片岩	IV		上维局	砂岩	V
	楓樹山角閃岩	角閃岩	III		八支信	泥岩	V
	源頭山片麻岩	片麻岩	III			砂岩間夾 泥岩	IV
1.	南澳嶺片岩	石英片岩	III \ IV			泥岩	V
中央		大理岩片 岩互層	IV		北寮頁岩	泥岩偶夾 砂岩	IV
山 脈	武塔片岩	石英片岩	Ш			砂岩偶夾 泥岩	IV
東羽		片岩	III	西部		砂岩間夾 泥岩	V
異地	大濁水片麻岩	花岡 片麻岩	III	麓山带	六重溪層	砂岩泥岩 互層	IV 、 V
質區	開南岡片麻岩	花岡 片麻岩	III			砂岩偶夾 泥岩	IV
	九曲大理岩	大理岩	III	地		泥岩	V
	谷園片岩	片岩	IV	質區	古亭坑層	泥偶夾砂 岩	V
		石英片岩	IV			砂岩	VI
	白楊片岩	石英岩片 岩互層	III			砂岩頁岩 互層	IV • V
	玉里層	片岩	IV		竹皕崎屬	泥岩	V
	變質基性岩	變質 基性岩	II		113项"可省	砂岩間夾 頁岩	III
		砂岩	V	-		砂岩	III
西		石灰岩	П v Ш			砂岩頁岩 互層	III
可麓	二重溪層	砂岩偶夾 泥岩	III		沄水溪層	砂岩偶夾 頁岩	III
山 帶		砂岩泥岩 互層	V			石灰岩	III
地		泥岩	V				
質回	出下穷品	泥岩間夾 砂岩	V				
區	「次 「 茶 僧	泥岩	V				
		砂岩	IV				

表 2-10:台灣地層岩性組合與岩體強度分級一覽表

摘錄修改自地調所,2008。

表 2-11. 台灣地區火成宕與離島花崗宕甲壓強度初步統計							
<u> 当</u>							
石任	點	數	最大值	最小值	平均值	$A+\sigma$	Α-σ
安山岩	馬槽	4	721	174	403	604	202
凝灰岩	中和	5	811	92	430	694	166
凝灰角礫岩	綠島	4	861	537	711	826	596
玄武岩	澎湖	12	781	356	577	723	431
花崗岩	馬祖	2	1420	1153	1287	1421	1153
花崗片麻岩 *1	金門	18	1687	757	1188	1428	948

711:ム繼山匠业出出的融自扩出出留原改在初上估計

資料來源:岩石力學,施國欽,1999, P2-10。

*1:林蔚等4人,2005,表4-11



圖 2-24:台灣地層岩體強度分級分布圖

資料來源:修改自地調所,2008,P32(原始地質圖幅精度比例為五萬分之一)

2.1.3. 水文地質

2.1.3.1. 台灣地下水資源概述

水資源可分為地面水與地下水兩部份,在水文循環中,雨水降落 地面後,除一部份蒸發散外,其餘大部份為地面逕流匯集成河溪,另 一部份滲入地下,成為地下水,或復滲出流入河溪(水利署,2005)。

台灣地區雨量豐富,年平均降雨量約達2.45 m(1949~2003年),折 算體積約900億m³,惟時間與空間分配不均,各地雨量集中於每年之 5~10月,且山地降雨多於平地(經濟部水資源局,2000)。

台灣河川受降雨季節支配,豐枯流量相差懸殊,又各河川受地形 影響,大多是陡坡、流短,攔蓄不易;颱洪期間流量大增,然多瞬即 入海;而枯水期則流量銳減,除東部區域之河川尚有餘水供引用外, 西部各河流量幾已全部引用殆盡,久已不敷分配,故興建水庫或依賴 地下水源,以支應不足之水量。

在一般情形下,平原、盆地、河谷等地區,若有完善之井體與抽 水設備,則可抽用地下水,復由於抽用地下水受時間與空間之限制甚 少,開井容易,成本亦低,因此各界競相開發地下水,以補充地表水 之不足。然而地下水為有限之資源,其補注時空之拘限甚嚴,非取之 不盡,用之不竭。古人對水之需求僅侷限於飲用及灌溉,取水容易, 今則人口增多,科技進步,農工商各業發達,需水日殷,各標的之用 水日益擴大,在地面水不足供應之下,目前台灣地區之地下水開發, 部份已達嚴重超抽階段。

政府為蒐集更完整之水文地質、地下水水文及水質資料以有效管理地下水資源,委由經濟部自1992年度起執行「台灣地區地下水觀測網整體計畫」,全程分三期共17年(1992~2008年),在台灣地區(含澎湖本島)11個地下水區規劃建立517站水文地質調查站,990口地下水觀測井,並進行地下水相關試驗調查。至2008年底止,該計畫已於濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東平原、蘭陽平原、新苗地區、台北盆地、桃園中壢台地、台中地區、花東縱谷、及澎湖地區共建置妥672口地

下水觀測井,並進行了地下水位觀測與地下水水質監測。(經濟部水利署,2009)

2.1.3.2. 地下水文地質

台灣地區之地下水地質依各岩層之含水性能約可分為兩大類。第 一類為膠結甚固之岩層,稱為固結岩層(表 2-12及圖 2-25),此類岩 層多屬第三紀(表 2-2)變質雜岩及第三紀亞變質岩,鮮能儲有大量地 下水,僅在岩層裂縫及節理之間或斷層附近蓄有少量地下水。另一類 為未膠結而鬆散之岩層,稱未固結岩層(表 2-12及圖 2-25),屬第四 紀岩層,多為地表堆積物與河谷或盆地中之沉積物,包括河相、湖相、 河口灣相、或海相等沉積物,在地形上皆以海岸台地、河階台地、與 沖積平原出現,其間多孔隙,為台灣地區地下水之主要來源,尤以現 代沖積層水量最豐,亦為被開發利用最廣泛之岩層。

2.1.3.3. 地下水資源分區及水資源分區

2.1.3.3.1. 台灣地區地下水資源分區

台灣地區地下水資源分布之劃分,歷年來均以地形或是地質條件 來區分。在1958年時,美國甘迺迪工程顧問公司應水資會聘請來台研 究地下水,該團專家G.E.Bell參照國內各專家之意見,將台灣地下水 資源分為九區,如表 2-13所示。1969年水資會編製地下水文地質圖 時,重新檢討地下水資源分區。經參照地形、地下水文、地下水地質 等特性,並以甘迺迪公司之分區為藍本,將台灣地下水資源之分布, 重新劃為九個區域(圖 2-26),而其與甘迺迪公司分區之差異詳見表 2-13,而此分區成為後續台灣地下水調查研究以及規劃工作所採行之 分區依據。

分類		說明	地下水產狀	顏色
	B 4	由粗粒多孔岩石組成,含水	地下水較豐富	淡粉
固結岩層 Consolidated		量極豐,如白砂岩等		
		由石灰岩、珊瑚岩等組成,	地下水部份豐富,水源	淡藍
	B 3	含水量部份豐富,如中央山	較深	
		脈以東之變質岩等		
固結岩層	B2	由砂岩組成顆粒不大,但多	局部可得豐富地下水常	淡紫
Consolidated		裂縫,如南港砂岩等	成泉水存在	
Rocks		由頁岩或板岩組成,含水性	極少地下水或無地下水	桃紅
	B1	較差,包括安山層、火山塊		
	51	及凝灰岩,全島中央山脈之		
		火山岩及變質岩屬之		
	B0	由泥岩組成,含水性甚差,	無地下水	深藍
		分布於台南岡山一带		
		由砂礫及少量粘土所組成之	地下水廣泛,且豐富	黄色
	A4	現代沖積層,分布於西部沿		
		海一帶蘭陽平原及花蓮台東		
		縱谷平原等地		
		由砂礫組成,部份半固結,	地下水廣泛,部份豐富	淡綠
	12	不包括紅土層之台地均屬		
未固結岩層	ЛЈ	之,分布於縱谷平原及西南		
Unconsolidated		部沖積平原		
Rocks		由砂礫層及紅土層組成,分	地下水部份豐富	棕色
	A2	布於桃園、中壢及大肚山等		
		之台地		
		由鬆礫石及砂頁岩組成,分	含水量較差,局部有地	綠色
	Λ1	布於北部及東部沿海地區,	下水	
	AI	如頭嵙山層、都戀山層、觸		
		口山層、火山碎屑岩等		

表 2-12:台灣地區地下水文地質分類表

資料來源:水利署,2005。



圖 2-25:台灣地區地下水文地質圖

資料來源:水資會,1986

SNFD2009

表 2-13: 甘迺迪公司與水資會調查(研究)面積分區比較表

研究單位分區	甘迺迪公司 ¹ (G.E. Bell) (km ²)	研究單位分區	水資會 ² (km ²)	差異
台北盆地	330	台北盆地	380	仍依照甘迺迪公司之範圍,並將大漢溪及新店溪上游兩岸透水地區已有水 井開發,列入台北盆地內
桃園台地	750	桃園中壢台地	1,090	將原本甘迺迪公司台北盆地西側海岸地區之範圍,列入該區域內
海岸台地	300	新竹苗栗臨海地區	900	本區內多台地,亦有地下水之開發,與海岸地區沖積層一併列為鄰海地區
台中台地	600	台中地區	1,180	北邊大安溪以北地區及南邊烏溪以南地區均併入該區域內
濁水溪扇形沖積地	3,200	濁水溪沖積扇	1,800	因北邊烏溪以北地區併入台中地區,南邊北區八掌溪地區劃入嘉南平原, 故僅包含濁水溪以北之彰化地區及濁水溪以南之雲林地區
台南平原	1,620	嘉南平原	2,520	將八掌溪以北至北港溪以南地區併入本區
屏東平原	920	屏東平原	1,130	區域和甘迺迪公司之範圍大致相同
宜蘭平原	400	蘭陽平原	400	區域和甘迺迪公司之範圍相同
花蓮台東縱谷平原	800	花蓮台東縱谷	930	區域和甘迺迪公司之範圍大致相同
合計	8,920	合計	10,330	

資料來源:1.水資會,1972,「台灣地下水資源之估計」;2.水資會,1992,「台灣地區地下水資源」。

2.1.3.3.2. 台灣地區水資源分區

1979年行政院會通過「台灣地區綜合開發計畫」,將原來七個水 資源區調整為四區。水資會為配合此綜合開發計畫,亦以此四區範圍 作為水資源之分區,其範圍及面積如表 2-14所示。由於地下水資源 分區與綜合開發計畫分區之範圍不同,以上之水資源分區範圍多涵蓋 數個地下水資源區。

2.1.3.4. 台灣地下水資源圖說明書

台灣地區位於亞熱帶氣候區,全年降雨量豐沛,加以台灣地區地 狹人稠,地形起伏變化極鉅、集水區地勢陡峭、河川源短流急,皆不 易涵蓄水份。1949年至2003年之年平均降雨量約達2.45 m,(經濟部水 資源局,2000),但因降雨時空分布極不均勻,約78%雨量集中於每年 5~10月間之豐水期。此外,降雨之空間分布差異亦大,山地降雨多於 平地,西部地區愈往南則分配愈不平均,其中尤以南部區域之豐、枯 水期逕流量比例高達9:1,中部與東部區域則以8:2之比例次之,北 部區域6:4最小。

此外,近年來台灣地區經濟蓬勃發展,工商業發展迅速,且在低 水價政策的環境下,生活及工業等各標的用水量均逐年成長,依據經 濟部水利署(原經濟部水資源局)2001年之「台灣地區水資源開發綱領 計畫」統計資料,1989~1998年間台灣地區(不含澎湖、金門、馬祖) 之年平均總降雨量為892億m³,平均總用水量推估值為181億m³,其 中地下水抽用量為63億m³(佔34.94%)。如此,大量而無節制的抽取地 下水,造成部份地區地層嚴重下陷及引發地下水資源枯竭、污染等問 題。

天然地下水資源可定義為可被再補注的地下水流量(吳銘志, 2003),其可被再補注的來源則為:(1)大氣降雨的地表入滲;(2)地表 河川的入滲;(3)相鄰含水層間的滲流等;亦即,天然地下水資源在 整體水文循環中,將持續不斷地被更新補充。因此,天然地下水資源

與所謂的地下水之「安全出水量」(safety yield)(或視之為地下水之可 持續產流量; sustainable yield)間的關係,則可明確地由下式表示之:



圖 2-26:台灣地區地下水資源分區圖

資料來源:水資會,1992

水資源分區			地下水資源分區				
區域	面積 (km ²)	範圍	區別	面積 (km ²)		占全區域%	
北部	7,347	台北市、縣 基隆市 宜蘭縣	台北盆地 蘭陽平原	380 400	2.410	33	
		桃園縣新竹縣	桃園中壢台地 新苗地區(新竹部分)	1,090 540	2,110		
中部	10,507	苗栗縣 台中縣、市 南投縣 彰化縣	新苗地區(苗栗部分) 台中地區	300 1,180	3,280	31	
		家林縣	濁水溪沖積扇	1,800	1,800		
南部	10,004	嘉義縣 台森縣、市 高雄市、縣 屏 劇縣	嘉南平原 屏東平原	2,520 1,130	3,650	36	
東部	8,114	花蓮縣 台東縣	花蓮台東縱谷	930	930	11	
合 計	36,002				10,270	29	

表 2-14:台灣地區水資源與地下水資源分區

資料來源:水利署,2005

$$Q_{S} = Q_{GW} + \frac{W}{\Delta t} + \Delta Q$$

其中, Q_S 代表地下水安全出水量(或地下水之可持續產量); Q_{GW} 為天然地下水資源量(即天然地下水產流量或地下水補注量); W表含水層的儲存量; Δt 為抽汲時間; ΔQ 為額外的地下水資源量,例如:於地下水抽汲中來自地表河川的滲流。對長時間而言,即當 $\Delta t \rightarrow \infty$ 時, $W/\Delta t \rightarrow 0$;且若無 ΔQ 的存在時,則 Q_S 實際上僅由 Q_{GW} 所決定。因此, Q_{GW} 乃被視之為地下水資源中可以被無限時持續抽汲之上限量,亦即為所謂的地下水安全出水量(Q_S)。

 Q_{GW} 可由地下水流的量化特性予以描述,這個特性可以下列三個 特徵參數值表示之,即:地下水流模數值(modulus of groundwater flow,M)、地下水逕流係數(coefficient of groundwater flow recharged by precipitation, K_1)、河川基流係數(coefficient of river recharged by groundwater flow, K_2)。茲敘述如后:

地下水流模數(M)(圖 2-27)係指區域含水層中之Q_{GW}與流域面積 (F)之比值;亦即表示單位時間內每單位流域面積之地下水流量值, 通常以liter/(km² sec)為其表示單位,其亦即為含水層之天然產水特 性,可用以下公式表示:

$$M = \frac{Q_{GW}}{F}$$

其中, Q_{GW}為天然地下水資源量或天然地下水產流量(liter/sec), F代表特定河川水文觀測站上游之集水區面積(km²)。

地下水逕流係數(K₁)(圖 2-28)係指區域含水層中之Q_{GW}與年降雨 量(P)之百分比值;亦即表示地下水產流量中,由降雨補注部份之比 值,通常以百分比值(%)表示之,該係數說明了有多少百分比值部份 的地下水資源量(Q_{GW})是來自於大氣降雨所補注。然而,值得注意的 是,那些具有完備灌溉系統的區域(如屏東平原),該地區有部份的天

然地下水資源係由人工的補注而得,而此係數(K₁)則僅代表區域天然 地下水補注量與降雨量間的比例關係。公式如下:

$$K_1 = \frac{Q_{GW}}{P}$$

其中, P代表特定河川水文觀測站上游集水區內之平均年降雨量。

河川基流係數(K₂)(圖 2-29)係指區域含水層中之Q_{GW}與河川逕流 量(Q_{RF})之百分比值;亦即表示河川逕流量中,由地下水補注部份之 比值,通常以百分比值表示之(%)。該係數說明了河川逕流量中有多 少百分比例的量是由地下水流所提供。公式如下:

$$K_2 = \frac{Q_{GW}}{Q_{RF}}$$

其中, Q_{RF}代表特定河川水文觀測站之平均年逕流量。以上公式 為定性表示,經由以上公式估算各參數值時,必須注意滿足單位平衡 之要求。

天然地下水流量(QGW)為上述公式之重要參數。而為因應台灣地 區複雜之地形,圖 2-27至圖 2-29中之天然地下水流量估算,可分為 山區及平原區等兩部份描述:山區天然地下水流量之估算,主要係依 據河川基流理論並依據台灣地區之實際狀況加以改良求得。於進行山 區之天然地下水流量估算時,首先選取山區各河川未受人工引蓄水影 響之各水文觀測站,針對其河川流量觀測資料進行月平均值之計算。 計算結束後,則依據各水文觀測站之觀測資料,進行引用資料之選 取,選取之標準為觀測時間需大於5年,且其上游之流域面積需大於 30km²。待水文觀測站選取完成後,挑選最低月平均值為山區天然地 下水流量值。平原地區之天然地下水流量,其推估方法首先為將各平 原區所能蒐集得到之地下水位資料繪製各平原區之地下水等位線 圖,並將各平原區依據取用之導水係數值的井點繪製徐昇網格;再由 各網格中利用達西定律求取各網格區中之天然地下水流量值。
表 2-15為台灣本島16縣市及台灣全區平原及山區天然地下水資 源蘊含量一覽表。由此表可(1)決定任何區域或鄉鎮行政區內之天然 地下水資源量,利用比較不同區域之結果,決定各該地區是否具有在 地下水開發上的潛力;(2)所得到的地下水資源補注之定量資料可作 為區域安全出水量之評估,藉此以提供作為淡水地下水資源開發之依 據,使之成為任何目的使用之最可靠且可保護之供應水源;(3)決定 河川逕流量中屬於地下水部份的量,其可作為在地下水過度開發使用 地區,在河川逕流上可能產生變化之預測;(4)就自然水平衡和台灣 全區內或其他不同區域內之水資源總量中,地下水流之貢獻量的特性 分析;(5)以地下水補注量作為地下水受污染潛勢能或傳輸機制之區 域特性評估之重要基準值。



圖 2-27:台灣地下水資源圖一地下水流模數圖 資料來源:水利署,2003



圖 2-28:台灣地下水資源圖-地下水逕流係數圖 資料來源:水利署,2003



圖 2-29:台灣地下水資源圖—河川基流係數圖 資料來源:水利署,2003

表 2-15. 台灣全區各縣市大然地下水資源總含重評估結果							
	平原區	山區	地下水總蘊含量				
宜蘭縣市	268.86	1560.00	1828.86				
基隆縣市	3.24	163.98	167.22				
臺北縣市	394.26	2279.20	2673.46				
桃園縣市	374.21	207.14	581.35				
新竹縣市	164.17	440.39	604.56				
苗栗縣市	303.64	401.77	705.41				
臺中縣市	419.77	633.54	1053.31				
南投縣市	310.89	1629.76	1940.65				
彰化縣市	377.02	6.29	383.31				
雲林縣市	313.70	14.70	328.40				
嘉義縣市	131.28	210.56	341.84				
臺南縣市	214.49	70.01	284.50				
高雄縣市	279.22	644.38	923.60				
屏東縣市	719.79	589.10	1308.89				
臺東縣市	293.58	1390.68	1684.26				
花蓮縣市	292.26	2229.79	2522.05				
台灣全區	4860.38	12471.29	17331.67				

表 2-15:台灣全區各縣市天然地下水資源蘊含量評估結果

註:單位為百萬立方公尺

資料來源:吳銘志,2003,D3-5

2.1.3.5. 地下水水質

2.1.3.5.1. 地下水的化學特性

就化學的觀點而言,地下水不是純水(H2O),而是一種複雜的溶 液。賦存於岩石圈中的地下水,不斷與岩石、土壤發生化學反應,並 在與大氣圈、水圈和生物圈進行水量交換的同時,交換化學成分。而 人類活動對地下水化學成分的影響,在時間上雖然只佔悠長地質歷史 的一瞬,然而在許多情況下,這種影響已深刻地改變了地下水的化學 性質。地下水的化學成分是地下水與環境(自然地理、地質背景與人 類活動)長期相互作用的產物。一個地區地下水的化學性質,反映了 該地區地下水的歷史演變。因此,研究地下水化學成分,可以幫助我 們回溯一個地區的水文地質歷史,闡明地下水的起源與形成(王大純 等6人,1998)。

在地殼中分布最廣的元素如氧、鈣、鈉、鉀、鎂等,一般來說在 地下水中也是相當常見的。有一些元素,如矽、鐵等,在地殼中分布 雖廣,但在地下水中卻不多。而另一些元素,如氯等則恰恰相反,在 地殼中分布極少,但在地下水中卻是大量存在的。造成上述差異的主 要因素,主要是因為它們的溶解度不同所造成,最易溶解於水中的是 一些鈉和鉀的氯化物、碳酸鹽和硝酸鹽,它們在水中的飽和量可達全 重的40%。鈣鎂硫酸鹽的溶解度較差,碳酸鹽就更差,這些物質的溶 解度介於0.1~0.001%之間。至於各種矽酸鹽的溶解度更低,基本上, 可認為是不溶於水的。各種物質的溶解度,除了決定於它們本身的性 質外,還與水溫有關。大多數鹽類的溶解度隨溫度的增高而加大,而 氟體的溶解度則相反,它隨溫度的升高而減少(單信瑜,2005)。

地下水中溶解的成分通常以離子形態、化合物分子狀態以及游離 氣體狀態存在。常見的成分主要有氯化鈉(NaCl)、硫酸鈉(Na₂SO₄)、 碳酸鈉(Na₂CO₃)、重碳酸鈉(NaHCO₃)、氯化鈣(CaCl₂)、氯化鎂 (MgCl₂)、硫酸鈣(CaSO₄)、碳酸鈣(CaCO₃)、重碳酸鈣[Ca(HCO₃)₂]、 硫酸鎂(MgSO₄)、碳酸鎂(MgCO₃)等,其中又以NaCl、MgCl₂、Na₂SO₄、 Ca(HCO₃)₂為主。這些鹽類常見於各種不同礦化程度的地下水中,成

離子狀態存在。因此,地下水中主要有K⁺、Na⁺、Ca⁺²、Mg⁺²、CO₃⁻²、 HCO₃⁻、SO₄⁻²、Cl⁻等8種離子。此外,還可能有NO₃⁻、NO₂⁻、OH⁻、 Fe⁺²、Mn⁺²、NH₄⁺和H⁺離子。在鹼性水中,矽酸亦可呈離子狀態存在, 而在酸性水中,則有Fe⁺³、Al⁺³等。地下水中的氣體主要有CO₂、H₂S、 O₂、N₂、CH₄、及氡等。至於地下水中的膠體物質則有氫氧化鐵 (Fe(OH)₃)、氫氧化鋁(Al(OH)₃)、矽酸(H₂SiO₃)和有機化合物(單信瑜, 2005)。

地下水中所溶解之各種離子、分子或化合物的總量稱為總礦化度 (總溶解固體),為評價地下水水質的一項基本指標(表 2-17)。礦化的 程度主要取決於土壤和岩石的成分、滲透性和地下水的埋藏深度。一 般來說,淺層地下水由於滲過地殼表層的大量降水多次沖刷土壤和岩 石,所含鹽類貧乏,礦化度低。乾旱地區的淺層地下水,常因岩土毛 細管作用的強烈蒸發,使得地下水的礦化度較高。而埋藏較深的地下 水,較不受氣候條件的影響,水溫較高且與圍岩反應時間較長,故岩 石的成分對地下水的成分有重要的意義。整體而言,地下水的礦化度 隨水的埋藏深度的增大而增高。

除此之外,水體中的某些敏感性參數例如溫度(T)、酸鹼值(pH)、 導電度(EC)、氧化還原電位(Redox)、溶氧(DO)等,也是描述水體水 質特性的重要參考指標。地下水的溫度取決於埋藏的自然環境、地質 條件與埋藏深度。淺層地下水之水溫接近當地之年平均氣溫,深層地 下水因受到地溫梯度的影響,一般越往深處水溫越高。水溫的改變, 也會影響水體中的某些性質,例如溶解性氣體(如氧、二氧化碳等)的 溶解度、鹽度、pH值等。pH值為水中氫離子濃度之指標,天然水的 pH值大約在6~9範圍內。水中溶解物質的溶解度、離子形態、特性、 行為和效應都與pH值有密切關係。導電度指的是水體導電能力的強 弱,其大小與溶解性離子濃度有密切的關係,因此根據其導電度的大 小,可估算水中總溶解固體物的含量。氧化還原電位反應電子轉移潛 勢之程度,是判斷地層/地下水化學環境不可或缺之基本參數;它不 是對水中某一特定氧化還原反應的度量,而是水體環境氧化還原能力 的綜合反映。一般而言,近地表的環境多偏向氧化,越深層則越趨向

還原環境。另外,水體之氧化還原電位亦可由水中某些溶解物質的存 在或型態來判斷,例如溶氧、金屬之離子電價態(Fe⁺²/Fe⁺³)、無機氮 之電價態(NO₃⁻/NH₃)、無機硫之電價態(SO₄⁻²/H₂S)、甲烷等。溶氧係 指溶解於水中的氧量,為評估水體品質的重要指標項目之一。地下水 的溶氧主要來自地面水的補注,但因為在其流動過程中,有機物或其 他物質的化學反應會逐漸消耗氧氣,故年代越久或深度越深的地下 水,通常其溶氧量也較低。

2.1.3.5.2. 國內地下水水質監測現況

目前國內進行的地下水監測基本上有兩大系統:環保署與水利 署。因設置目的不同,環保署的地下水水質監測深度較淺(<~30 m), 以地下水污染預防之監測為主;水利署的水質測量深度較深(<~300 m),以地下水資源之永續利用監測為主。基本上,兩者的水質監測深 度,均與用過核子燃料深地層處置的所需深度(~500 m),尚有一段差 距。然而,相關水質資訊,對於評估核種遷移至生物圈的影響,仍具 有相當重要的參考價值。

為建立全國地下水水質長期資料,並維護地下水資源,前省環保 處於2005年6月完成「台灣省區域性地下水水質監測站網整體規劃」 工作,決定出區域性淺層地下水水質監測站網的設置數量與位置,以 供區域性地下水水質監測井網設置的參考。為落實規劃成果,依行政 院環保署所核准之「台灣省區域性地下水水質監測站網設置實施計 畫」,自2006年度起分年補助縣市政府進行地下水水質監測井設置工 作,至2002年設置完成全國區域性地下水監測井431口設置(圖 2-30~ 圖 2-32)。區域性地下水監測井的採樣監測工作,自2002年起由環保 署整合於「環境水質北、中、南採樣監測計畫」執行,地下水水質採 樣頻率約為每季採樣監測1次,以提供地下水污染預防之參考。監測 項目包括水溫、酸鹼值、導電度、總硬度、總溶解固體物、氯鹽、氨 氦、硝酸鹽氮、硫酸鹽、總有機碳、砷、鍋、絡、銅、鉛、鋅、錳、

在水利署方面,係自1988年起由行政院農委會補助台灣省水利局 辦理「改善台灣地區地下水文基本資料收集系統之規劃研究」,分五 期各四年,完成台灣地區之地下水觀測站網規劃。該計畫自1992年起 實施,規劃建立517站水文地質調查站及990口地下水觀測井,以收集 水文地質及地下水水文等資料,建立國家性水文監測站網,作為地下 水資源永續利用之參考依據。該計畫具有兩項基本目的:一為提供水 源調配之水質依據;再則為提供污染監測的參考。而水質檢測的項目 則包括水溫、pH、氧化還原電位、導電度、溶氧、總溶解固體、主 要陰陽離子(如鉀、鈉、鈣、鎂...)、重金屬(如鋅、鎘、鉻、汞...)等 共31項。

水利署的監測井在設置之前均經過嚴謹的佈井分析,選擇在監測 結果對於水位與水質趨勢研判最具有效益者,每一測站的距離約為5 km,大都設置於國中、國小校園內。在每一測站位置均設置不同深 度的監測井以監測不同含水層的水質,一般每站有2~4口的監測井, 這些井的深度約界於40~300 m間,可以反映出不同深度含水層的整體 水質變化趨勢。環保署的監測井也多設置於各地的國中小學之內,逐 年陸續增加中。環保署的監測井深度多在30 m以內,主要目的在偵測 有污染之虞地區的非拘限含水層(地表下第一個含水層)之地下水現 況(單信瑜,2005)。



圖 2-30:環保署水質監測位置及結果(水溫)圖

數據資料來源:環保署,2008



圖 2-31:環保署水質監測位置及結果(酸鹼度)圖

數據資料來源:環保署,2008



圖 2-32:環保署水質監測位置及結果(導電度)圖

數據資料來源:環保署,2008

2.1.3.5.3. 台灣地區地下水水質現況

台灣地區之地下水水質監測計畫,無論是環保署或水利署均是分 階段、分區域陸續進行。此外,由於環保署的監測井深度大多侷限在 地表下第一個含水層(約在30 m以內),與深地層處置所需之深度(~500 m)差距較大,因此,本文僅摘錄經濟部水利署地下水觀測網計畫之相 關水質監測成果(水利署,2006a,2006b),繪製成圖表(圖 2-33 ~圖 2-39及表 2-16),並依照全國10個地下水區(台北盆地、桃園中壢台 地、新竹苗栗臨海地區、台中地區、濁水溪沖積扇、嘉南平原、屏東 平原、蘭陽平原、花蓮台東縱谷及澎湖地區),外加金門地區,來說 明台灣地區目前的地下水水質現況。其中,關於Piper水質圖及水質分 類定義,請參考圖 2-40之說明。

(1) 台北盆地:

北為大屯山區、西為林口台地、東及南為西部麓山帶地層。地形 平緩,大多在20m高度以內,由南往北漸次降低。基盤由東南向 西北變深,沿山腳斷層(圖 2-95)為最深,達600~700 m。更新世 (表 2-2)以來地層共有四層,由下往上分別為:板橋層、五股層、 景美層、松山層。本區的水文地質,受控於古新店溪及大漢溪的 沉積,景美及板橋應為目前的地下水補注區,往中和及三重一 帶,松山層漸厚,約50~100 m,形成區域性的阻水層。

(2) 桃園中壢台地:

台灣西北部海岸分布一系列台地,表層常有紅土,紅土之下是厚 可達20m的礫石層,桃園台地是其中之一。根據日據時期之調查, 桃園台地應是古大漢溪沖積而成的,稱為「古石門沖積扇」,後 因沖積扇隆起及台北盆地陷落,古大漢溪轉向東北,流入台北盆 地。桃園台地的最南部是湖口台地,地層已經隆起與傾斜,分布 一些向斜、背斜及斷層構造。其餘台地面與地層大致是平的,但 地形可分成數個階面,例如店子湖面、中壢面等。依現有的資料, 台地南側的龍潭及楊梅一帶,礫石層較厚,至少有50~100 m,往 北的中壢及桃園市,只有上部0~30 m有礫石,即所謂的「紅土台

地礫石層」。「紅土台地礫石層」到了海邊的觀音及蘆竹,厚度 不足10 m。除此之外,地層都以砂泥互層為主,地層傾斜應不大。 因為泥層不薄且層次很多,在垂直方向上,形成了許多阻水層。 以福興站為例,深度300 m內,至少可分出4層含水層。第1層就 是最淺的礫石層,往下層次複雜,大致以50 m厚算一層。第1含 水層(簡稱淺層)和第2-4含水層(深層)的水位差異很大,以福興站 為例,淺層水位是約4 m,而第2、3、4含水層分別是20、29、29 m,相差10~20 m。

(3) 新竹苗栗臨海地區:

本區地形變化很大,多屬於丘陵及切割之河谷地形,地層上主要 為頭嵙山層所構成,但褶皺及斷層眾多,使地層傾斜走向變化很 大。因此地下水觀測井的分層建置後,對比非常困難。例如本區 的三條大斷層:竹東斷層、新城斷層及前緣斷層,使頭嵙山層、 地層重複出現二次,因此水位、水質難以以分層觀念明確對比。 故目前暫以上部100 m內為第一含水層。

(4) 台中地區:

台中地區地下水文區位於台灣西部麓山帶之西緣及濱海地質區 之範圍內,大致位於車籠埔斷層之西側,出露之地層包括更新世 之頭料山層、紅土台地堆積層和階地堆積層,及全新世之沖積 層,這些年輕地層結構較為鬆軟;而車籠埔斷層以東(豐原丘陵) 接近台中盆地之地層,主要為地質年代較老且固結程度較高之上 新世-更新世(表 2-2)(卓蘭層及錦水頁岩)。台中地區的地下水系 統相當複雜,包含許多的次區域,由北而南分別為:大甲平原、 后里台地、清水平原、大肚台地、台中盆地及八卦山,其中最重 要的地下水區是台中盆地。廣義的台中盆地南可達南投,主要的 河系北有大甲溪,南為大里溪及大肚溪(烏溪)。

(5) 濁水溪沖積扇:

濁水溪沖積扇跨彰雲兩縣,東西寬約40 km,南北長約60 km,主 要是由濁水溪所沖積而成。扇頂標高約100 m,地形呈扇狀由東 往西北、西及西南漸低,接台灣海峽。濁水溪沖積扇最重要的地

下水補注區位於扇頂,以厚層礫石層為主,分層並不明顯,沒有 主要的阻水層(泥層),地下水上下流通並無限制。向西、西北、 西南,砂泥層厚度漸厚,層次漸多,大致有三層主要的阻水層(泥 層),地下水上下流通已受限制。本區地下水觀測井的深度,一 般介於200~300m之間。

- (6) 嘉南平原:
 - 根據各種水文資料,本區以鹽水溪為界,粗分為北段及南段。嘉 南平原北段地形平緩,大都在20 m高度以內,由東往西漸次降 低;河流多成曲流,由東往西流向台灣海峽。嘉南地區的地層極 複雜,多為砂泥互層,分層明顯但延續性不佳,層厚變化大,並 沒有主要的含水層(砂層),地下水上下流通不佳。嘉南平原北段 地下水觀測網觀測井的深度,一般介於200~290m之間。嘉南平 原南段地形平緩,大都在20 m高度以內,由東往西漸次降低。因 地形平坦,河流多成曲流,由東往西流向台灣海峽。因為台灣造 山前緣斷層由此經過,位置約在鹽水溪之北岸,因此高雄地區地 下地質以一系列之褶皺構造為主。於水文地質上,則基盤之深淺 相差很大,在向斜構造內的觀測井,如五林、仁德,鑽深至250 m 仍不見基盤,但位於背斜軸之岡山、一甲等站,不及40m,即鑽 遇基盤。因此深度50 m以下的含水層因有背斜地層相隔,雖然深 度相同,但無法連通。
- (7) 屏東平原:

屏東平原地下水文區,除了地形平坦之平原區域以外,尚包括位 於平原西側之嶺口台地和鳳山丘陵,總面積約1,236 km²。依據經 濟部中央地質調查所之調查研究,地表面起至深約250 m皆為未 固結沉積物組成。而該未固結沉積岩層主要是由荖濃溪、隘寮溪 和林邊溪沖積而成。若以深度作為分層參考,第一含水層的深度 約在0~60 m,第二含水層的深度約在60~120 m,第三含水層的深 度約在120~250 m,而超過250 m者屬於第四含水層。

(8) 蘭陽平原:

蘭陽平原位於沖繩海槽的西南端,為蘭陽溪入海沖積而成,目前 地形下陷中心軸略成東西向,谷地漸向南北方向開張,因為西邊 山區帶來大量沉積物,因此宜蘭地區西側地下地質以礫石及粗砂 層為主,往東入海,很快接海相的厚泥層。局部沉積速率非常快, 達1.5 cm/yr,是濁水溪(彰雲地區)的兩倍。

(9) 花東縱谷:

花東縱谷地區北起花蓮縣立霧溪下游,經海岸山脈和中央山脈間 的谷地,到台東縣的知本溪下游,全長約183 km,寬2~7 km,平 均寬度約為3~4 km,面積約800 km²。本縱谷帶主要係由花蓮溪、 秀姑巒溪及卑南溪等溪流沖積而成;其堆積物之來源主要為西面 之中央山脈變質岩及東面之海岸山脈火成岩、沉積岩等。縱谷內 之三大水系,長期切蝕及隆起活動盛行已久,致沖積扇及河階台 地基為發達,沖積扇皆出現於縱谷西側之中央山脈河流出口處, 扇形向東展開。主要的地層有更新世(表 2-2)之米崙礫岩、紅土 台地堆積層和台地堆積層及全新世沖積層。花東縱谷內之地層為 沖積層,沖積層厚度應超過100 m。構成本區之沖積層主要為卵 石及砂礫層所組成,其中孔隙率較多,透水性能甚強,積聚之地 下水量,自必相當豐富,因之,本縱谷平原內地下水量之蘊藏量, 僅次於濁水溪沖積扇及屏東平原;而與台北盆地、宜蘭平原等並 列為台灣省蘊藏地下水次多之區域。

(10) 澎湖地區:

澎湖群島由一百多個島嶼及岩礁所組成,其中以澎湖本島、白沙 島、及西嶼島的面積最大,三島的面積約106 km²,佔整個澎湖 群島的83%。澎湖群島的高度並不高,澎湖本島、白沙島及西嶼 島的最高點只有40~58 m。92年的年雨量約760 mm,90%的雨量 集中在3~8月,而9月至2月為旱季。根據中央地質調查所的研究, 澎湖群島最老的地層是花嶼火山雜岩,年代應是中生代(表 2-2) 或更早,其次是新生代早期的白沙島層,以粉砂及砂岩為主。再 來是澎湖層,此層為一至三層的玄武岩夾砂泥層、火山凝灰岩及 石灰岩。澎湖層的年代,根據中油公司通樑一號鑽井,距井口深

度0~60 m的玄武岩年代約是8百萬年前,相當於第三紀中新世晚 期,距井口深度250~320 m的玄武岩年代約是17百萬年前,相當 於中新世中期。澎湖層以上是第四紀的小門嶼層、湖西層、及現 代堆積層。區域的水文地質分層大約可將0~50 m劃分為第一含水 層;50~100 m為第二含水層;100~150 m以泥層為主,可視為阻 水層;第三含水層為150 m以下。

(11) 金門地區:

金門本島如啞鈴狀,自腰部分成東西兩部;東半島幅員較廣但起 伏較劇,境內以大武山最高,海拔約為253 m,東半島兩側為低 · 漥谷地,其餘為較低丘陵地;西半島山嶺較少,除中央部由紅土 層形成之雙乳山,昔果山等丘陵地外,西半島大部份均較平坦。 全島並無大川,東北方最大溪流金沙溪長僅約3 km,注入金沙 港,東方之山外溪,注入料羅灣,此外東邊之前埔溪,西邊之浯 江溪等皆流短坡陡,雨後即行斷流,平時均為旱溪。金門島之地 質主要為中生代(表 2-2)以前或中生代之花崗片麻岩及侵入體及 岩脈構造,其基盤岩石分布甚廣,在此基盤侵蝕面上有各種第四 紀沉積岩之堆積,即所謂之金門層和更新世玄武岩之披蓋等。金 門之地下水分布概況,依據金門縣政府「金門地區89年度地下水 觀測站井建置案」計畫報告資料顯示,金門島地下水含水層有2 種,1種為片麻岩(及其連帶之火成岩)中之節理帶或破碎帶,其次 為第四紀沉積岩中之砂礫層。前者通常較難捉摸,且一般情形都 屬於不良之含水層;後者主要為金門層下部含有潔淨砂礫層數 層,為良好含水層。由往昔地電阻測探調查結果可知,在賢庵以 南地區,含水層僅厚10 m左右,且含水層主要由砂質粉土所組 成,透水性不佳;在榜林至前山門一帶,含水層厚達100 m,主 要由砂及礫石層組成,透水性亦良好;在湖浦至中堡一帶,含水 層厚約40 m左右,主要由砂及礫石層組成,透水性良好;在金沙 地區,含水層厚約30m,主要由砂及粉土所組成,透水性則不佳; 而在下湖地區,含水層厚約10m,主要由砂組成,透水性良好。



圖 2-33:水利署地下水監測網位置分布圖



圖 2-34:水利署水質監測位置及結果(酸鹼度/氧化還原電位/導電度)圖(一)

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。



圖 2-35:水利署水質監測位置及結果(酸鹼度/氧化還原電位/導電度)圖(二)

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。



圖 2-36:水利署水質監測位置及結果(酸鹼度/氧化還原電位/導電度)圖(三)

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。



圖 2-37:水利署水質監測位置及結果(Pipper)圖(一)

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。



圖 2-38:水利署水質監測位置及結果(Pipper)圖(二)

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。



圖 2-39:水利署水質監測位置及結果(Pipper)圖(三)

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。

	酸鹼值		氧化還原電位(mV)		導電度(mS/cm)	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
台北盆地	5.59	8	-151	208	195	11200
桃園中壢台地	5.47	7.98	-158	328	132	3040
新竹苗栗地區	5.38	8.81	-155	375	193	1700
台中地區	5.62	7.33	-51	340	160	693
濁水溪沖積扇	5.66	10.6	-266	407	130	32500
嘉南平原	6.39	10.03	-504	55	2.48	475000
屏東平原	5.66	8.22	-361	268	141	51100
蘭陽平原	6.32	8.6	-255	234	148	44800
花蓮台東縱谷	6.01	7.84	-92	76	373	1070
澎湖本島	6.71	8.47	-139	160	976	1763
金門地區	4.33	7.54	—	—	273	1200

表 2-16:台灣各地下水分區之基本水質數據統計表

數據資料來源:水利署(2006b, 2007)。

表 2-1/・水質分類表(根據總浴解固算

類別(Class)	總溶解固體量(TDS:mg/L)		
淡水(Fresh)	0~1,000		
微鹹水(Brackish)	1,000~10,000		
鹹水(Saline)	10,000~100,000		
滷水(Brine)	> 100,000		

資料來源:Fetter, 1994, P434



圖 2-40: Piper水質菱形圖及水質型態分類圖

(I) Ca(HCO₃)2型: 鹼土類重碳酸鹽,正常淺層自由地下水、雨水、河水等。

(Ⅱ)NaHCO3型:鹼重碳酸鹽,淡水性深層受壓地下水。

(Ⅲ) CaSO4或CaCl2型:鹼土類非碳酸鹽,礦山、火山性的水,溫泉、坑內水或農業污染之地下水。(Ⅳ) Na2SO4或NaCl型:鹼類非碳酸鹽,與海水有關或曾受海水污染之地下水。

圖中A表陰離子當量(meq/L)濃度: $[CO_3^{2^-}+HCO_3^-]$ 佔20%, $[SO_4^{2^-}+CI]$ 佔80%, 陽離子當量濃度 (meq/L): $[Ca^{2^+}+Mg^{2^+}]$ 佔40%, $[Na^++K^+]$ 佔60%。

2.1.4. 蝕變作用產物

在自然環境條件之長期演變下,岩層原本的組成會受到風化作 用、成岩作用及熱水換質(蝕變)等影響而改變組成或結構,特別是與 地下水的交互作用,形成具吸附性的次生礦物,因此蝕變作用產物向 來是處置技術發展的重要研究項目(PNC, 1992)。本節內容與2.1.2節 中變質岩較高溫度與壓力下的形成作用有所區別,主要討論岩層因物 理、化學作用發生的改變,包括受到風化、成岩、蝕變等作用,使原 本新鮮礦物組成與結構發生改變,依照本土氣候環境及地質營力特 性,特別是在深部岩層受到地下水長期影響的改變也是討論重點。以 下分為風化作用、成岩作用、蝕變作用等三部份來說明。

2.1.4.1. 風化作用

風化作用(weathering)是岩石、土壤及其礦物組成,經直接接觸 大氣圈,而於原地發生崩解的過程;地表附近的岩石最容易受到風化 作用的影響。風化作用主要分為機械風化及化學風化兩種作用。機械 風化作用或稱物理風化作用,是透過直接接觸大氣圈的熱、水、冰及 壓力等條件,導致岩石、土壤的崩解;化學風化作用則直接受到大氣 圈化學物質的影響,或是生物成因的化學物質引起的生物風化作用, 導致岩石、土壤及其組成礦物的崩解。處於亞熱帶氣候地區的台灣平 均一年受到四個颱風影響,平均年降雨量達2.5m/yr,加上地震頻繁, 導致快速的山脈剝蝕崩移及快速的河流切蝕(Dadson et al., 2003),風 化作用對地表岩層的影響是非常普遍的現象。Selvaraj and Chen(2006)指出台灣的沉積物與沉積岩具有不成熟化育(immature)的 特性,普遍含有伊萊石、綠泥石及未變質的長石礦物,明顯反映出受 到物理風化作用影響(特別是自陡峭的山地,在快速剝蝕與搬運條件 下,停滯時間較短),但或多或少均受過化學風化作用(如矽酸鹽的風 化作用)所影響。

風化作用與侵蝕(erosion)作用的差別在於前者未經移動,後者可 能受到水、風、冰及重力的影響而崩解與移動。從現今地質背景因素 分析,台灣頻繁的地震作用常造成土石動搖及山崩地滑,從1900至 1998的資料顯示風化剝蝕作用,明顯因地震因素而加劇(Dadson et al., 2003)。從台灣地區離岸、近岸到河流的沉積物,經系統性採樣與分 析發現,主要受到不穩定的侵蝕作用所控制,而穩定的侵蝕作用多發 生在山區高度風化的沉積物上(Selvaraj and Chen, 2006)。

Dadson et al. (2003)指出不同地質時間尺度的研究顯示,中央山 脈東部的剝蝕率約在3~6 mm/yr範圍內(雖然有些短期數十年間的研 究,如GPS觀測結果指出中央山脈東部有較高的剝蝕率)。中央山脈屬 於相當年輕的造山帶,在持續擠壓、隆升及長期剝蝕的結果,台灣東 部出露了綠色片岩相的變質岩帶。相較之下,雪山山脈及西部麓山帶 沉積層,處於水平方向變形劇烈的逆衝斷層帶上,全新世(表 2-2)以 來均呈現出較高的河流切蝕率(5~12 mm/yr)及剝蝕率(15 mm/yr);近 來根據U-Th-He溫度定年學之熱歷史演化及相映侵蝕率研究發現,蓬 萊運動造山過程中,數百萬年來雪山山脈平均呈現出比中央山脈高的 剝蝕率(Beyssac et al., 2007)。一般認為剝蝕率會依山勢及降雨量來 定,但在台灣不見得如此,Dadson et al. (2003)比較了山勢最高、降 雨量大的中央山脈山區的河道輸沙狀況,顯示此區抗風化力最持久。 究其原因,一則此區變質度由西向東、由南向北增加,使岩石強度因 此增加三數量級(自0.1增至253 MPa); 二則最高的剝蝕率發生在地勢 最低的西部麓山帶或地震頻繁的雪山山脈,顯示在台灣地區,影響風 化速率的因素,除地勢及雨量外,包括大地應力的擠壓、構造活動及 地震作用等也是重要的影響因素。

2.1.4.2. 成岩作用

沉積物在堆積後,在變成岩石的過程中,發生的化學、物理及生 物等作用的影響,均歸為成岩作用(Diagenesis)。這些影響發生於地 下,所處的溫度與壓力均很低,但足以改變岩石原本的礦物組成或構 造,包括壓密作用、溶解作用、膠結作用、沈澱作用等,導致沉積物 顆粒、岩屑及化石殼體等物質在成岩作用中被其他礦物成份所取代, 此類改變往往與地下水與沉積物的交互反應有關。因此,成岩作用並 不包括地表的風化作用,但隨成岩作用所處的溫度與壓力增劇,成岩 作用將逐漸變為變質作用。

從台灣西北部天然氣儲氣層打鹿頁岩(如鐵砧山地區)的研究顯 示,打鹿頁岩的砂岩層之儲集性質良好。因孔隙率的變化,成岩作用 的壓密作用與膠結作用會降低儲集性能;而裂縫作用、白雲石化作用 以及長石或方解石之溶蝕作用,則會提昇儲集性能。成岩過程產生之 自生性粘土礦物,以高嶺石為主,對砂層孔隙之阻塞較不嚴重,且因 地層埋壓較淺,岩性仍多屬疏鬆,使原生孔隙得以保存,因此儲集性 能良好(林國安等八人,2003)。

成岩作用影響水資源的蘊藏量。呂學諭等3人(2002)研究新苗地 區含水層水文地質特性,指出此區第四紀(表 2-2)的礫石層為現代河 流所沖積而成,故其沉積物稱為全新世沖積層;然而,台地或丘陵地 形為古河流的沖積平原,受後期構造運動抬起,再經現代河流切割而 成,多屬更新世地層(以頭嵙山層為主),受到較長時間的成岩作用, 已有些微的膠結現象。

由新苗地區35口觀測井量測得礫岩、粗粒砂岩及細粒砂岩等透水 係數特性,可觀察到不同粒徑岩層的透水係數分布範圍皆在 0.001~0.01cm/sec之間(圖 2-41),顯示岩層透水特性不受粒度影響, 而受其他發育的孔隙(如裂隙)所影響(呂學諭等三人,2002)。相較之 下,屏東平原的礫石層(圖 2-42)、粗砂層(圖 2-43)及細砂層(圖 2-44) 等岩層,並未受成岩作用影響,透水係數分布範圍較大。



圖 2-41:新竹與苗栗地區各種粒徑含水層之透水係數分布圖 資料來源:呂學諭等三人,2002



圖 2-42:新竹、苗栗與屏東平原地區礫石層透水係數分布圖 資料來源:呂學諭等三人,2002



圖 2-43:新竹、苗栗與屏東平原地區粗砂層透水係數分布圖 資料來源:呂學諭等三人,2002



圖 2-44:新竹、苗栗與屏東平原地區細砂層透水係數分布圖 資料來源:呂學諭等三人,2002

2.1.4.3. 熱液蝕變作用

熱液蝕變作用(hydrothermal alteration)是地下熱液(如溫泉或岩 浆來源的熱水)與岩層反應的結果,與日本地區一樣,台灣屬於地質 史上常發生火山活動的地區,火山的熱液活動使岩層的礦物組成和結 構,產生物理或化學上的改變,使岩石產生新的礦物或造成礦物組織 的變異,為自然界中常見的變質作用(metamorphism)之一。

台灣地處歐亞大陸東緣與菲律賓海板塊交界處,曾發生過多次造 山作用之地質事件,相伴形成許多變質岩類(參見2.1.2.3節),就形成 機制而言,可以從變質火成岩、變質沉積岩、熱液變質岩及動力變質 岩等,找到一些跟深成岩層有關的蝕變作用加以深入探討。台灣地區 的變質火成岩類有:(1)變質基性岩(包括綠色岩和綠色片岩、藍閃片 岩、角閃岩及蛇紋岩等);及(2)變質花崗岩(包括正片麻岩、副片麻岩、 混合岩等)。台灣地區的變質沉積岩類有:(1)結晶石灰岩或大理岩; 及(2)變質泥岩、變質砂岩、變質礫岩及變質燧石等。台灣地區的熱 力變質岩多分布在火山區(如台北大屯火山群)、溫泉區(如宜蘭礁溪溫 泉)及地熱區(如宜蘭清水地熱田)附近,其變質岩多與熱液活動 (hydrothermal activity)及蝕變作用(alteration)有關。動力變質岩的分 布則侷限在構造帶附近,因斷層活動將礦物磨碎並發生再結晶作用而 形成,例如花崗岩受韌性斷層作用影響,在韌性剪切作用密集帶上可 形成片麻狀構造(傳統上稱此動力變質岩為片麻岩);沉積岩區斷層上 的動力變質作用,如「921」震後目前正進行車籠埔斷層帶的「台灣 車籠埔斷層鑽探計畫」(TCDP)研究,其發現包括斷層泥的黏土與地 下流體反應形成方解石脈,以及活動斷層的摩擦熱會形成斷層泥融熔 並冷卻成玻璃質岩石。

2.1.4.3.1. 蝕變礦化帶及帶狀分布

台灣地處環太平洋火環的西緣,發生過多次火山作用及岩漿侵入 活動。因岩漿作用或後火山作用產生的熱力變質岩,是台灣最主要蝕 變作用的產物,多分布在火山岩(如台北大屯火山群)附近,受火成侵

入活動的影響,發生各種類型蝕變作用,包括絹雲母化、矽化、碳酸 岩化、方解石化、綠泥石化、去氧作用等。其礦化帶及分布多與火山 體的熱液活動有關。相較之下,其他蝕變作用發生的類型,如:溫泉 區(如宜蘭礁溪溫泉)、地熱區(如宜蘭清水地熱田)、泥火山區(如高屏 地區)及斷層帶(如西南部的旗山斷層及中部的車籠埔斷層),大致分布 均與主要斷層構造帶有關,但其伴生的蝕變作用並無礦化帶報導。

與火山作用有關的熱液變質作用,常以火山本體為中心,形成帶 狀 蝕 變 及 礦 化 的 分 布 , 如 大 屯 火 山 群 , 由 於 受 天 水 及 地 下 火 山 氣 體 (含 H₂S和SO₂)混合所形成中性至強酸性之熱水影響,造成此區周圍安山 岩的蝕變,尤其在現存的噴氣孔附近,原岩所含的鹼性、鐵等成分被 熱液溶蝕及遷移,僅殘留砂、鋁等成分,因而發生黏土化、明礬石化 和砂化作用,並在噴氣孔及周圍岩石的表面結晶出硫磺及硫化鐵礦 物。依據熱液蝕變的產物及生成環境,可將大屯火山分成兩亞區:第 一區為火山本體(接近噴氣孔之周圍),距地下水面較遠,且屬於氧化 带,易形成高嶺石,且只有少量禾樂石,局部含有鋁英石,常伴隨蛋 白石質氧化矽與白矽石;第二區為週緣火山碎屑區(噴氣孔之外圍地 帶),位於地下水面下或附近,屬於還原帶,易形成禾樂石、蒙脫石、 高嶺石等黏土礦物的混層礦物,亦常伴生白砂石。此外,大屯山熱液 活動除在地表形成熱液換質帶(如黏土化帶、蒙脫石化帶、蛋白石化 帶和明礬石化帶等),亦在垂直方向形成如高嶺石化帶、黏土化帶、 膨潤石化帶、綠泥石化帶和綠簾石化帶等不同的換質帶(景馨月、江 威德,2005)。

金瓜石地區的金銅礦床與熱液變質作用息息相關,由礦體中心向 外變化,如金瓜石本山地區的圍岩換質作用(圖 2-50),即是由礦體所 屬的矽化作用為中心,向兩旁或頂上,變為黏土化作用,最後變為綠 泥石化作用(譚立平、魏稽生,1997)。矽化作用為熱液蝕變中非常普 遍的一種換質作用,乃含二氧化矽的深成熱液,將二氧化矽沈澱或充 填在礦床及圍岩附近,因此岩石的石英及蛋白石矽石(opaline silica) 含量增加。金瓜石地區的矽化作用在安山岩、砂岩及頁岩中均可發 現;較重要的矽化岩石位在本山北端的本山露天礦場矽化安山岩、本

山南端的樹梅及第三長仁矽化南港砂岩等(譚立平、魏稽生,1997)。 矽化安山岩會使原有斑岩構造僅保留石英斑晶,並溶蝕其他礦物而留 下孔隙,充填次生的二氧化矽,形成堅硬多孔狀岩石;矽化砂岩會保 留原本的碎屑狀構造,但矽化作用溶蝕礦物顆粒而形成球狀孔隙,具 多孔構造的特徵,有利於礦液遷移或形成礦體(方建能、余炳盛, 1995)。

黏土化作用乃深成熱液與圍岩反應,濾去碳酸鈣成分並廣泛形成 黏土礦物。低至中度黏土化作用由高嶺石、蒙脫石、地開石及伊萊石 等黏土礦物組成;高度黏土化作用通常發生在矽化帶的外圍,且黏土 化程度由內向外遞減。黏土化安山岩的黑雲母會變質而形成絹雲母, 角閃石、長石等礦物也會被黏土取代,但都能保有原來礦物的外形。 黏土化安山岩的成份含高達90%的黏土,因而顏色呈白色,且質地鬆 軟。金瓜石地區的黏土化作用分布,在本山本脈北端東側厚約20 m, 西側厚約10 m。本山至草山公路可見本脈頂部的黏土化安山岩,寬度 逾100 m(譚立平、魏稽生,1997)。

綠泥石化作用為發生在淺溫及溫泉礦床的換質作用。典型現象為 黑雲母蝕變成綠泥石,並遷移出SiO2成分以利附近矽化作用所需,因 此安山岩基質的顏色會偏向綠色。綠泥石化作用會增加碳酸鹽礦物 (如方解石)、綠泥石、綠簾石及鈉長石等,其他常見礦物還包括绢雲 母、黝簾石及黃鐵礦等。綠泥石化作用在金瓜石地區本山及武丹山安 山岩體內廣泛存在;在砂岩及頁岩中並不明顯(方建能、余炳盛, 1995)。綠泥石化作用在中央山脈變質玄武岩、東部海岸山脈都巒山 層、澎湖花嶼的安山岩及金門輝綠岩脈也相當普遍。

2.1.4.3.2. 第四紀之前岩層之蝕變作用

台灣地區已知最早的沉積岩為250 Ma的石灰岩,在台灣西部佳里 地區地下鑽井中發現,且在242 Ma前已經變質為大理岩或結晶石灰岩 (Jahn et al., 1992)。台灣東部同時期大理岩的變質年代則為185 Ma(Jahn et al., 1986),相當接近東部最老花崗岩侵入年代160 Ma(俞 震甫、羅清華, 2002)。此後,早白堊紀(表 2-2)太平洋海板塊快速增

生,影響處於歐亞大陸邊緣的古台灣,發生南澳運動,形成板塊邊界 增積體特有的藍閃石片岩,主要分布在玉里帶,其高壓低溫相變質年 代為110 Ma(Lo et al., 1996),以及其後主要分布在太魯閣帶,約在 90~80 Ma(Jahn et al., 1986)因「後造山型(post-orogenic)」花崗岩侵入 形成的高溫低壓變質作用(林蔚,2001),兩者組成了南澳運動伴生形 成之成雙變質作用(陳肇夏,2000)。目前對此一時期的熱液變質作 用,僅知變質度高達角閃岩相的變質作用,遍及花崗片麻岩、角閃岩 及部分片岩;與花崗岩侵入作用相關的偉晶岩脈,分布在花崗岩附近 及片岩中,但未發現大理岩中有任何矽卡岩化成礦作用的跡象。

35~40 Ma前發生一期變質作用,僅在台灣東部變質岩帶中的玄武 岩脈、花崗岩部份變質礦物、偉晶岩及花崗岩所含的角閃岩包體中可 定年出此一紀錄,如鉤鍶法測玄武岩脈(37 Ma)、花崗岩(35~37 Ma) 及其內之角閃岩捕獲體(40 Ma)、偉晶岩(40 Ma)等(Jahn et al., 1986); 或如鉀氫法測玄武岩脈、片麻岩等亦有介於30~35 Ma之年代記錄(王 執明、藍晶瑩, 1995)。這些年代均低於岩體生成年代,可能反映地 質構造熱事件(thermal event)之冷卻年代(王執明、藍晶瑩, 1995),可 能跟南中國海張裂活動相伴的熱事件有關(Jahn et al., 1986;王執明、 藍晶瑩, 1995)。分布於花東縱谷的古海板塊殘塊,即受熱液變質作 用影響的蛇綠岩套(ophiolites)——包含蛇紋岩、輝長岩、輝綠岩及玄 武岩等岩類,以及受熱液變質作用影響的海底沉積火山灰(如台東樟 原主要由蒙脫石所組成的日興土)是此一時期重要的熱液變質作用產 物。

第三紀(表 2-2)噴發活動形成的澎湖玄武岩,含有許多孔隙及裂隙填充物(如圖 2-45),包括綠土(smectites,含蒙脫石及皂石(saponite))及方解石。從化學成份及同位素研究顯示,蒙脫石的鐵含量及氫氧同位素較皂石高,代表兩者形成的條件與地下水成份的差異。在玄武岩形成後期發生的熱液蝕變作用下,皂石可能自40~50°C的地下水沈澱,蒙脫石可能形成在20~40°C溫度下,沈澱自與海水混合的地下水,方解石可能形成於雨水來源的地下水,其形成溫度更低於蒙脫石的範圍(Yui et al., 1999)。

最近一次影響現有台灣形貌及地體架構的地質事件是晚第三紀 (表 2-2) (約6.5 Ma)開始至今的造山運動,伴生的變質作用分布也最 廣,幾乎涵蓋整個中央山脈(除南端恆春地區外)和雪山山脈的大部 分,其變質沉積岩由於變質度不高,最多只到綠色片岩相;分布於中 央山脈東翼的結晶質基盤岩(如花崗岩、花崗片麻岩及角閃岩等)的變 質作用常見長石發生絹雲母化,而石榴子石和黑雲母的綠泥石化,以 及角閃石的陽起石化等退變質現象,可能與基盤岩受造山運動影響, 脫離原本深理變質條件,隨岩體抬升而發生退變質作用(陳肇夏, 2000, p. 212)。根據數十年來多處中央山脈溫泉區鑽探結果顯示,於 地面下數百公尺至三千公尺的熱水溫度多介於150~230°C之間,高於 一般山脈的地溫梯度,可能由於中央山脈在近數百萬年來曾快速抬 升,形成年輕的山脈,以最近一期變質溫度達200~475°C之間,變質 度達到葡萄石-綠纖石相至綠色片岩相,使原來地殼深處的岩石快速 抬升下,造成區域性的地溫梯度達45~60°C/km,高於台灣西部的30 °C/km,因此當天水滲入地下,在此區可以因深循環而加熱,形成溫 泉及相關的熱水換質或蝕變作用(陳肇夏,2000)。

2.1.4.3.3. 第四紀岩層之蝕變作用

大屯火山群地熱區為一長約18 km,寬約3 km的狹長地帶,約略 分布在金山斷層沿線,大部分屬於高溫溫泉及噴氣孔,大屯火山群的 熱水屬於酸性含硫酸鹽、氯化物的成份,於圍岩之安山岩熔岩流、火 山碎屑岩及沉積岩層形成許多熱水換質礦物,隨深度變化的熱水換質 礦物種類包括(李清瑞等3人,1994):(1)淺部的地表氧化帶(0~250 m) 溫泉與硫氣孔周圍:硫磺、黃鐵礦、明礬石、低溫方英石、石英、高 嶺石、蒙脫石等(以新北投溫泉為代表;陳肇夏,2000);(2)深部火山 岩(250~1500 m):蒙脫石、綠泥石、方解石、濁沸石、威拉基石、綠 簾石、鈉長石、冰長石、伊利石、硬石膏、黃鐵礦、石英等(以馬槽 E205號井為例,圖 2-46);(3)深部砂岩儲集層(>1500 m):明礬石、 黃鐵礦、葉蠟石、石英、硫磺等(以馬槽E208號井為例,圖 2-46)。
SNFD2009

基隆火山群的金瓜石礦床是東亞最富金銅礦產的火山熱液蝕變 礦床,也是國內研究熱水換質作用帶狀分布最詳盡的地區。金瓜石熱 液系統的發育,始於1.1 Ma基隆山火山噴發作用的安山岩漿,侵入到 中新世(表 2-2)沉積岩層(圖 2-47),熱液及火山氣體沿著斷層和破碎 帶上湧,並與地下水混合,產生強酸具高氧化態的熱液,與圍岩交互 作用後,以裂縫充填、浸染及換質等方式形成淺溫高硫化型金礦床。 而後,深部岩漿漸漸冷卻,但熱液活動持續發生。酸性熱液隨著斷層 和破裂帶循環至更外圍或更深處(圖 2-48),因而形成較為中性的熱 液,足以形成後期淺溫低硫化型金礦床(如圖 2-49;譚立平、魏稽生, 1997;余炳盛、王詠絢,2006)。

宜蘭平原為琉球島弧隱沒帶及沖繩海槽張裂帶往西延伸的末端,在此延伸帶上的龜山島即屬於非常年輕的火山,因此,宜蘭礁溪 溫泉、清水地熱及土場地熱,可能都跟此構造帶的發育,造成火山氣 體與熱液上升至地表的通道有關。宜蘭的清水地熱區,主要是中新世 (表 2-2)的板岩和硬頁岩為主,夾有些許砂岩,均為受到過輕度變質 作用的沉積岩層。從氧同位素分析結果顯示出,隨深度增加,氧同位 素會因地熱伴生的熱水循環而產生系統性的變化(+14.6~+11.7 ‰),此 蝕變作用產生的水與岩之間交互反應,可反映在氧同位素比率上,並 顯示出岩石的透水係數具有非常低的特性(Yui et al., 1993)。

龜山島東端外海水下10~20 m處一群噴氣孔,超過30座不斷冒出 火山氣(如H₂S)及熱液(pH最低為1.52),氣孔桂底部成分幾為純硫的成 分,冒出的黃色熱液溫度高達78~116 °C,流速達158 ton/hr,含有硫 磺顆粒,逸氣中達92%含量為CO₂,亦含少量H₂S;白色熱液溫度較低, 介於30~65 °C,流速僅7.0 ton/hr。鎂及二氧化矽的分析資料顯示,熱 液可能自地表下915~1350 m處湧出,熱液中所含硫酸及氯的成分多來 自火山源的氣體,由氦同位素分析甚至顯示出地函來源的特性(Chen et al., 2005)。從CO₂-S-HCl三端元圖對氣體特性的分析,顯示龜山島 樣本具有高S_{total}/HCl、CO₂/S_{total}比值,與大屯山地區相當;相較之下, 從N₂-He-Ar三端元圖對來源特性相映的板塊構造體系分析,顯示龜

SNFD2009

山島樣本落於分離板塊及地函柱熱點的氣體特性區域,不同於大屯山 地區位於聚合板塊的氣體特性(圖 2-51; Chen et al., 2005)。

分布於台灣西南部泥岩區的旗山斷層及古亭坑背斜,具有地質構 造帶上的泥火山(圖 2-52),常有沼氣及流體噴出,分析泥火山氣 體及水質所得到的來源資訊,顯示泥火山的流體含有較高的Cl、Na、 K、Ca、Mg、NH4含量及較低的SO4、B含量,泥火山氣體中主要成分 為CH4及CO2,研判可能是來自海水的沉積物,經過成岩過程擠壓出 孔隙水後釋出,順主要構造帶遷移到近地表處(You et al., 2004)。採 自古亭坑背斜與高屏平原之泥火山的泥漿水,呈現較輕的氧同位素比 值,配合氯離子成份來分析,可以推論泥火山流體為天然氣水合物的 解離水,同時也顯示甲烷逸氣的來源,可能是海床底下結冰的天然氣 水合物。採自台灣西南部斷層沿線(如旗山斷層與觸口斷層)的泥火山 樣本,則有比較重的氧同位素組成,並可推算出形成於溫度約為 160~210 ℃(深5~7公里處)的地底,代表泥漿水可能在地底深處高溫 下,因黏土礦物脫水過程使流體與礦物間交互作用後產生(Yang et al., 2004)。



圖 2-45:澎湖鳥嶼的玄武岩層具有柱狀節理及層間紅土

									SNFD2	009LinkP- 1
	E	205			深		E	E 208		
	硬石膏	詠簾石	方解石	ん 石 武		石充 石黄	方解石	家藤石	硬石膏	柱 状 固
() () () () () () () () () () () () () (七星山安山岩		non.ed Market ESME		- 200-					100 1 × × 余 × × 楽 × × 上 × ×
14			- 40°		400-				_	安 x x 山 x 光 x 光 x
ř J					- 600 -					r i i i i i i i i i i i i i i i i i i i
Ř					- 800 -					来 山
山安	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	KACH BERH Refet Bened	sanna Saisean Saisean Marain Kaisean		-1000-	2				¢
L					-1200 -	?			NALES ESECTI Manana Antonia Manana Manana Manana Manana Manana Manana	*
0.12					-1400-					五指し、次

1

村主

Х

X

X

SNFD2009

圖 2-46:大屯山火山區馬槽鑽井之熱水換質礦物分布 資料來源:摘自李清瑞等三人,1994



圖 2-47:金瓜石礦體及地質構造分布圖

資料來源: 譚立平、魏稽生, 1997



圖 2-48:金瓜石礦床礦脈帶分布圖

資料來源:譚立平、魏稽生,1997



圖 2-49:金瓜石本山礦體構造的垂直分布圖

資料來源:譚立平、魏稽生,1997



圖 2-50:金瓜石石筍地區礦化作用分布圖 資料來源:方建能,1995;譚立平、魏稽生,1997



圖 2-51:龜山島外海氣孔柱冒出熱液之氣體成分圖

(a) CO₂-S-HCl三端元圖:顯示龜山島樣本具有高S_{total}/HCl、CO₂/S_{total}比值,與大 屯山地區(TVG)相當;

(b) N₂-He-Ar三端元圖:顯示龜山島樣本落於分離板塊及地函柱熱點的氣體特性 區域,不同於大屯山地區(TVG)位於聚合板塊的氣體特性。

資料來源:摘自Chen et al., 2005



圖 2-52:台灣西南部泥火山與地質構造分布圖

縮寫說明:烏山頂(WST),小份尾(HFW),滾水坪(KSP),小滾水(HKS),大滾水(TKS), 龍船窩(LC),中崙(CL)。

資料來源: You et al., 2004

2.1.5. 地下資源種類與分布

台灣島位處板塊碰撞之處,由於菲律賓海板塊,由東向西隱沒在 台灣本島所屬的歐亞大陸板塊之下(Tsai,1978),致大陸地殼與海洋 地殼混合而部份熔融,造成各種不同的中性火成岩漿,孕育出各種不 同型式的礦產資源,如金瓜石和奇美等地區的安山岩,這些安山岩質 岩漿經分化作用而成的熱液,造成金銅礦床,而金瓜石即為遠東地區 最大的含銅金礦,但其他金屬礦床則相當貧乏。

何春蓀(1986)將台灣分為島中央的中央山脈、東部的海岸山脈、 西部的西部麓山等三個地質區。中央山脈的地質區最重要的礦產是板 岩或千枚岩中的含金石英脈。東部海岸山脈地質區的礦床主要為含金 的斑岩銅礦。西部麓山地質區的主要的礦產是中新世(表 2-2)地層所 含的煤、石油和天然氣,但無經濟可採的金屬礦床分布。

2.1.5.1. 台灣金屬經濟礦物

台灣最值得開發的金屬礦產資源(圖 2-53),首推金瓜石地區的含 銅金礦,已生產的純金,無論官方數字或民間估計,都高居遠東第一, 剩餘礦量的開發潛力仍非常高。過去台灣曾經生產過的礦產,有中央 山脈的山金、東海岸的砂金、奇美斑岩銅礦的銅、中央山脈塊狀硫化 物礦床的銅和硫化鐵,關山附近的鎳礦、金面山鉛鋅礦物、萬里硫砷 銅礦、大屯火山群的硫化鐵、坪林的汞、西北部沿海的磁鐵礦砂、大 屯火山群和桃園中壢一帶的褐鐵礦、和西帽山的錳礦。由於一般礦石 品位低,礦量少,大多不具經濟價值。茲將較具開發潛力的金屬礦床 概述如下:

(1) 金瓜石地區銅金礦床:

包括金瓜石或本山附近的含銅金礦,九份及武丹山的金礦,均分 布於臺北縣瑞芳鎮。金瓜石地區的礦床有明顯的帶狀構造及圍岩 換質作用。礦床以金瓜石的含銅金礦床最重要,九份和武丹山的 金礦床則居第二。根據官方記錄,過去百年來金、銀、銅產量統 計如表 2-18所示(譚立平、魏稽生,1997,P14)。表中武丹山的

官方黃金生產資料,比實際生產的短少很多。因為在1933~1945 年間,日本礦業的生產將武丹山的黃金產量,列入金瓜石計算; 另武丹山自1962~1976年間有生產黃金,但此一資料目前已不能 查明。

(2) 中央山脈金礦:

中央山脈金礦露頭分布遼闊,砂金在多數中央山脈河谷中皆有發 現。日據時代,自1914至1939年曾在中央山脈進行多次有規模的 探勘,日人探勘結果迄今未公佈,亦無檔案留在台灣。惟一資料 是小笠原美津雄在第二次大戰之後返國之前簡要口述(顏滄波, 1950), 東台灣金礦脈成礦區分布如圖 2-53。砂金的主要分布在 中央山脈東側,但西側亦有不少砂金。含金最富的河川為立霧 溪,其次為宜蘭大濁水溪(和平溪)、南投濁水溪及大甲溪上游。 惟東海岸及中央山脈段丘砂金現已無開採價值,至於中央山脈礦 床則值得進一步探勘(譚立平、魏稽生,1997)。在屏風山地區, 程正(1993)的液包體及熱螢光研究結果,顯示該地區有非常高的 地温梯度與高温,表示地下可能還有火成岩體。此研究顯示中央 山脈金的來源是與岩漿有關,而不是由原來在變質岩的金,經區 域變質作用而集中。屏風山和金瓜石金礦的河川沉積物中的重礦 物都有很多鉛和砷,唯一不同是屏風山區的鉛多銅兩倍以上,而 金瓜石則銅多鉛兩倍以上。酸性火成岩的鉛比基性的多十倍以 上,而銅相差不多;推測中央山脈梨山斷層之下的火成岩比金瓜 石地區的石英安山岩更為酸性。

(3) 含金斑岩銅礦:

已知的含金斑岩銅礦主要分布在海岸山脈的奇美及都巒山,此外 在蘭嶼也發現這型礦床(圖 2-53)。斑岩銅礦是目前最重要的銅 礦,主要分布在太平洋兩側,是海洋板塊俯衝而隱沒在大陸板塊 之下,海洋板塊和大陸板塊混合,局部熔融產生中性岩漿所帶熱 水造成的礦床。海岸山脈與蘭嶼屬菲律賓海板塊,因此有斑岩銅 礦之分布。在1937~1939年,日本礦業在奇美探勘銅礦,光復後 則由瑞陽銅礦接手經營。在1966年開鑿探巷五處,據瑞陽公司之

估計,儲量約為115萬噸,平均品位為1.15%。然而礦石實際收回 之品位為0.4%。浮選所得的精砂全部運日本製煉,至1976年停 工,全部精製之電銅合計為561噸(譚立平、魏稽生,1997)。

(4) 塊狀硫化物銅-鉛-鋅-硫化鐵礦床:

塊狀硫化物礦床(massive sulfide deposits)是指一種通常產在輕 度至高度區域變質岩中的含黃銅礦一方鉛礦一閃鋅礦一硫化鐵 礦物及金銀礦床。已知的塊狀硫化物礦床多產在中央山脈大南澳 片岩或石墨質片岩中。在台灣的塊狀硫化物礦床所含的礦物以銅 及硫代鐵礦物為主。僅很少含銅礦的地區曾被小規模開採或試 採,包括銅山、東澳和銅門。其他規模都極小,衹有探勘,而從 未正式開採,主要分布如圖 2-53。在1917~1920年時,日本藤田 組曾在銅山採礦,金銅礦務局(台灣金屬礦業公司前身)接手後, 估計坑內確定礦石儲量為1.8萬噸,含銅4.35%,金0.19ppm,硫 26.8%。光復後由峰源銅礦承租開採,在1964~1980年間,共產銅 2197噸(譚立平、魏稽生,1997)。

東澳銅礦在1914年開始鑿坑探勘,1919~1923年間,共生產約1.4 萬噸礦石,自行設爐提煉。本礦在678 m長的主坑中時斷時續, 含銅僅0.70%(譚立平、魏稽生,1997)。

(5) 其他金屬礦床及經濟礦物:

除了前述的金銅礦床外,台灣尚有萬里地區的金及硫砷銅礦和關 山的鎳礦,雖曾探勘,但未曾開採。坪林汞礦床、西部沿海磁鐵 礦砂(含鈦鐵礦)、陽明山及桃園中壢一帶的褐鐵礦、台灣多處黃 鐵礦(硫化鐵礦)及西帽山錳礦等礦床曾經少量開採,不過質差量 少,如今都已經停產。

表 2-18:金瓜石地區金、銅之生產量

地區	金(公斤)	銅(噸)
金瓜石	62,937	119,101
九份	26,162	—
武丹山	4,825	
總計	93,924	119,101

資料來源:譚立平、魏稽生,1997,P14



圖 2-53:台灣金屬礦物資源分布圖

資料來源:地調所,2006a

2.1.5.2. 台灣非金屬礦產

台灣的非金屬礦產(圖 2-54)主要包括大理岩、石灰岩、白雲岩、 蛇紋岩、矽砂、粘土、石膏、長石、滑石、雲母、石棉、硫磺、石墨 等,茲將較重要者概述如下:

(1) 大理岩:

大理岩為經過變質的再結晶石灰岩,主要分布在中央山脈東斜面 變質岩區內。大理岩分布伴同於大南澳群片岩,其範圍北自花蓮 縣和平溪,南至臺東縣知本主山,南北長達200 km,東西寬達10 km, 是本省分布最廣的礦產, 其品質頗佳, 碳酸鈣含量一般在95% 以上。主要供作水泥原料,亦有作為建材、工藝品等之用。根據 礦務局2007年統計資料,做為原料之大理岩2006年的產量約為 2549萬噸(礦務局,2007)。由於受到沉積環境影響,一般而言, 北段呈厚層塊狀體,向南延伸則有漸分歧變薄直至消失之趨勢。 分布在北段和平地區東部九曲層之大理岩礦體,呈厚層塊狀體, 厚度達1,000~2,000 m;而分布在該區西部之長春層及騾馬望層, 成多層的薄層,厚度變化大,有數公分至達數百公尺不等,多以 100 m左右為主。向南延伸至中段鳳林地區,皆成多層狀薄層礦 體,其中較重要之礦體可分6個帶(陳志賢,鄭瑞熾,1990)。再南 延伸至關山地區,大理岩分布面積減小,出露不多,且呈不連續 之凸鏡體薄層,厚度為10~30 m不等,常與各類片岩互層出現, 厚度小、片節理發達、品質差。

(2) 石灰岩:

具開發價值的石灰岩礦床分布在台灣西部、西南部及東部地區。 石灰岩幾乎賦存在第三紀(表 2-2)的每一世中。用途包括煉鋼、 水泥原料、玻璃,造紙,肥料等農工原料等,主要分布如圖 2-54 所示。根據礦務局2007年統計資料,做為原料之石灰石2006年的 產量約為35萬噸(礦務局,2007)。茲說明如下: (a) 北部地區:

自南港向西南延伸,包括南港、南勢角、土城清水坑、龜山 兔子坑、竹頭角及關西赤柯山、馬福、橫山等地,其中以關 西赤柯山之礦床最具規模,為北部地區石灰岩礦之主要產 地。以產量而言,自1943年開始開發至1996年之年產規模達 450萬噸,所產石灰岩均供作水泥用原料。惟1996年後,各 礦場均陸續停產,1998年僅在新竹縣生產的原料用石灰岩年 產量約為280萬噸(魏稽生、譚立平,1999)。

(b) 西部地區:

包括嘉義公田山及關子嶺之枕頭山石灰岩礦,兩者屬於分離 而年代不同之獨立礦床。公田山石灰岩礦呈扁豆狀體夾存於 細粒砂岩與頁岩互層中,生成年代相當於中新世(表 2-2)中 期。本礦床於1978年由欣欣水泥公司開發,供作水泥用原 料,年產規模50萬噸,該礦權於1997年底到期即停採。枕頭 山石灰岩礦有二層,露出於枕頭山頂及其山麓。上層之厚度 20~100 m,下層厚2~20 m,石灰岩品位變化相當大,主要以 小規模開採供作燒石灰等之原料,年產規模約25萬噸(魏稽 生、譚立平,1999)。

(c) 南部地區:

自北而南,計有大崗山、半屏山、壽山、鳳鼻頭、琉球嶼及 恆春等,石灰岩為含多量珊瑚、貝、藻類及有孔蟲化石之珊 瑚礁石灰岩。此地區石灰岩已長期大量開發,供作南部各大 水泥廠之主要原料,共計年產規模約1,000萬噸,其礦權已於 1997年底到期而停止開採(魏稽生、譚立平,1999)。

(d) 東部地區:

分布在海岸山脈都蘭山層與大港口層之間,賦存於中新世 (表 2-2)之白色至淡黃色緻密石灰岩層,一般呈凸鏡狀或薄 層產出。其主要產地有大港口、成功及東河等,礦床規模小, 均少有開發利用。石灰岩品位變化大,氧化鈣含量在30~50% 間。

(3) 白雲岩:

白雲岩是台灣重要的碳酸鎂來源。白雲岩通常以凸鏡狀、層狀或 不規則囊狀體,賦存於大南澳片岩中的變質結晶石灰岩(大理岩) 內。白雲岩廣泛分布在中央山脈向北延伸近200 km的變質岩帶 中,在石灰岩再結晶作用期間,鈣被鎂分子所取代所致,其分布 如圖 2-54。主要用途為直接或間接用作耐火材料,其次為製造 玻璃及燒製白雲石灰泥及肥料。主要分布於台灣東部地區,北自 大濁水向南南西延伸至臺東,綿延約200 km。以北段大濁水溪(和 平溪)及花蓮一帶之礦體較具規模,愈往南延伸則愈深入於高山 中,礦體亦少出露。因此,北段白雲岩礦較具開發價值,而南段 之白雲岩礦,除清昌山區之外,開採頗多困難。1994~1998年間 之白雲岩年產量分別約為26.4、19.6、11.6、20及18.1萬噸(魏稽 生、譚立平,1999)。另根據礦務局2007年統計資料,2006年的 產量為6.1萬噸(礦務局,2007)。

(4) 蛇紋岩:

台灣的蛇紋石礦物通常形成於蛇紋石化之岩石中,多由煌斑岩、 橄欖岩、輝長岩及其他基性或超基性火成岩衍生,通常以岩脈、 岩株或其他小規模的侵入岩體型態形成。主要用於煉鋼,也可用 於廉價如油漆業之填充料及農業原料。主要分布於花蓮縣和臺東 縣,且也見於中央山脈中部地區(圖 2-54)。花蓮豐田為台灣蛇紋 岩的重要產地,岩體通常呈凸鏡體。1994~1998年間,原料用蛇 紋岩年產量分別約為26.8、28.2、34.6、28.4及30.6萬噸(魏稽生、 譚立平,1999),另根據礦務局2007年統計資料,作為原料用蛇 紋岩2006年的產量為39.3萬噸(礦務局,2007)。

(5) 矽砂:

矽砂或石英砂用於製造不同等級的玻璃時,亦稱之為玻璃砂。台 灣的矽砂一般和中新世(表 2-2)含煤層的砂岩伴生。在北台灣的 四個含煤岩層分別是五指山層、木山層、石底層和南莊層。這些 岩層均含厚層的白砂岩,其可用於製造玻璃的原料。產地有台北 縣福隆、基隆大武崙、台北縣萬里、崁腳、南勢角,新竹縣關西, 苗栗縣銅鑼、公館等。分布如圖 2-54。台灣地區矽砂礦場所採

之矽砂約有90%左右採自南莊層白砂岩,因其岩層鬆軟易採。根 據礦務局2007年統計資料,2006年的產量為9.8萬噸(礦務局, 2007)。

(6) 脈石英及石英岩:

多數賦存於先第三紀(表 2-2)的結晶岩類中,脈石英通常呈白色 塊狀、乳白色種類,少有較大且透明度高的石英結晶(水晶)。中 央山脈之原生脈石英賦存在包括大南澳片岩至廬山層等地層 中,海岸山脈之脈石英產在安山岩;石英岩主要分布於台灣東部 與南投、水社大山一帶,品質可供矽鐵、矽質天然耐火磚等之使 用;重要的礦床露頭分布如圖 2-54。根據礦務局2007年統計資 料,2006年水晶的產量為2.4噸(礦務局,2007)。

(7) 黏土:

黏土是非常普遍的土狀物質,來自不同類的岩石,主要是由黏土 礦物組成,係陶瓷和耐火工業的主要原料。黏土分布廣泛,涵蓋 於早第三紀(表 2-2)到現代地層中,包括中新世含煤層中的沉積 黏土,以及大屯火山群的蝕變安山岩或集塊岩衍生出來的黏土。 前者廣泛分布在臺北縣、新竹縣和苗栗縣地區,後者發現在北台 灣的火山及其周圍地區,其分布如圖 2-54。根據礦務局2007年 統計資料,2006年瓷土產量4107噸,火粘土的產量為125噸(礦務 局,2007)。

(8) 石膏:

石膏為天然產出之硫酸鈣礦物,一般石膏有兩種:一為含水硫酸 鈣(CaSO4·2H2O)之石膏;一種為無水硫酸鈣(CaSO4)之硬石膏, 兩者經常共生產出,一般作為陶器模型、塑像、建築材料等。在 台灣已知有兩種型態的石膏礦床,均和第三紀(表 2-2)或第四紀 的火山活動有關。第一種屬於熱液礦脈,係由熱液經結晶作用形 成,如金瓜石礦山中為金銅礦脈的脈石礦物。在東部海岸山脈, 此種熱液石膏礦床分布較廣,主要含石膏礦的地區是由安山岩流 與集塊岩組成,主要礦床分布如圖 2-54。第二種型態是和火山 區硫氟孔的噴發物有關聯,少量賦存於大屯山火山群和宜蘭外海

龜山火山島。目前台灣並無天然石膏之生產,早期在花蓮縣靜浦 秀姑鑾溪近海口之東岸,有小型石膏礦之地下開採,目前全已廢 棄。

(9) 長石:

長石為重要的造岩礦物之一,火成岩、沉積岩及變質岩三大岩類 均可賦存長石礦物,為製作玻璃與陶瓷的重要材料。台灣長石礦 源主要賦存於東北部南澳地區的偉晶岩、蘇澳和平地區的片麻 岩、澎湖花嶼島上的斑岩,以及外島金門地區的花崗岩與花崗片 麻岩。其中南澳、和仁、及金門地區賦存的長石礦曾一度為國內 長石市場的主要來源。在1975年前,省產長石年產量均未超過萬 噸。自1976年後產量超過萬噸,1979年後維持年產量超過2.5萬 噸。1987年更超過2.8萬噸。1988年長石年產量尚有1.9萬噸,1992 年降到2216噸,1994年為854噸,以後至1996年僅有20噸,其後 未有生產記錄(魏稽生、譚立平,1999)。

(10) 滑石:

滑石為含水矽酸鎂礦物,質軟,具滑感,通常被研成粉末,以製造顏料、肥料、紙張、陶瓷、橡膠和殺蟲劑的原料或填充料。滑石礦床多產生於東台灣大南澳片岩的蛇紋岩及結晶岩類中,緻密塊狀的滑石又稱皂石、石鹼或塊滑石。在台灣的滑石礦物多數屬皂石等級,常與石棉共生於蛇紋岩及富鎂的片岩中。主要產地為花蓮縣豐田,清昌溪下游,卓溪清水溪上游,宜蘭縣南澳源頭山。 台灣滑石生產開始在第二次世界大戰,當時在豐田作為開採石棉礦的副產品,1948年後滑石產量漸增。1994~1998年間之滑石年產量分別為4290、3500、1500、1331及73噸(魏稽生、譚立平,1999),根據礦務局2007年統計資料,2006年已無生產紀錄(礦務局,2007)。

(11) 雲母:

在台灣賦存有四種雲母礦物類, 白雲母、黑雲母、絹雲母及鉻雲母, 這些雲母均屬造岩礦物, 以呈片狀、鱗片狀散布於結晶片岩 或安山質岩類中。其用途除塗料、顏料、醫藥、化粧品配料外,

其具有絕緣性可用於電線及焊條之被覆層,橡膠及塑膠之填充料 等。重要的雲母礦床分布於本島東北海岸,以及南部橫貫公路沿 線一帶的山區,如台東縣海端鄉向陽。向陽地區絹雲母礦曾進行 較重要的提選研究(廖學誠、溫紹炳,1977);政府礦業單位為配 合產業東移政策,於1995年完成向陽礦業專業區規劃開發計畫。 目前有大量生產者僅存向陽礦場,1994~1998年間之雲母年產量 分別約為522、979、851、780及775萬噸(魏稽生、譚立平,1999), 根據礦務局2007年統計資料,2006年產量約為484萬噸(礦務局, 2007)。

(12) 石棉:

石棉係指易被分離成纖維的礦物群,在台灣石棉主要賦存於蝕變 蛇紋石中,其大部分來自基性或超基性岩類。其用途可纖成防火 布,石棉繩,耐熱填墊材料等,大部份石棉礦床經濟上不甚重要, 係因為由透閃石和陽起石組成,只有少數石棉屬於溫石棉礦物才 具經濟類型。國內石棉在1988 年僅生產22噸,1989年77噸,1991 年80噸外,其後並無生產記錄(魏稽生、譚立平,1999)。

(13) 寶石:

台灣出產之寶石大多屬半寶石類,以台灣玉(閃玉)、玉髓(藍玉 髓、紫玉髓)、文石、珊瑚、薔薇輝石(玫瑰石)、石榴子石、碧玉 等為代表。在台灣自產寶石類中,以澎湖的文石、豐田的閃玉以 及都蘭山的藍紫玉髓曾有探勘及生產,盛名一時。在1994~1998 年國內寶石年產量分別為1798、758、53356、5108及2990噸(魏 稽生、譚立平,1999),根據礦務局2007年統計資料,2006年已 無生產紀錄(礦務局,2007)。



圖 2-54:台灣非金屬礦產資源分布圖

資料來源:地調所,2006b

2.1.5.3. 台灣能源礦產

能源有關的天然資源(圖 2-55)主要包括石油、天然氣、煤、放射性礦物及地熱溫泉等,分別說明如后。

- (1) 油氣區域之分布:
 - (a) 台灣之油氣分布於中央山脈西側及東部海岸山脈之第三紀 (表 2-2)地層中,但經開發之油氣田及可能產油氣較大之構 造,多分布於台灣西部第三紀沉積盆地內,尤以苗栗為最, 並延展至台灣海峽中。台灣西北部油氣田生產層,以中新世 打鹿頁岩所夾儲油氣砂岩的產量最為豐富。南部油氣田的油 氣則產於上新世及上部中新世等較新地層內。曾開採過原油 及天然氣的地區以出磺坑、錦水、鐵砧山、青草湖、新營及 八掌溪等礦區所產油氣較為重要。苗栗地區為台灣陸上生產 天然氣及原油最豐富區域,產油氣層分布於中新世關刀山砂 岩至五指山層之間,其中又以打鹿頁岩內所夾儲油砂岩之油 氟蘊藏量最豐,目前台灣陸上油氣之產出仍以打鹿頁岩最 多。台灣歷年探獲油氣的地區如圖 2-55。
 - (b) 台灣光復後迄1995年底,中油公司在陸上地區鑽獲油氣生產的井數共有152口,於1995年時之生產井數為101口,累計年產量為天然氣僅約9億立方公尺,原油約6萬公秉。惟於1978年產量達最高峰時之年產量為天然氣19億7千多萬立方公尺,原油25萬多公秉。自1959~1997年度,累計已生產天然氣約399億立方公尺,原油約399萬公秉(魏稽生,2000)。根據礦務局2007年統計資料,2006年原油產量23,564公秉,天然氣產量為462,958立方公尺(礦務局,2007)。
- (2) 煤:
 - (a) 煤礦曾經是台灣重要的天然資源之一,按其地理位置可分為 北部及中部兩大煤田區,所有已開發之煤田幾乎全部集中於 北部煤田區內,中部煤田所含之煤層既薄且劣,難作大規模 開採,而在台灣南部及東部缺乏已知的煤礦資源。北部煤田

區自台灣東北端基隆之澳底海岸一帶起向西南延伸,經桃園、新竹、苗栗、至臺中之大安溪,全長約120 km,平均寬度有20 km,含煤區之全面積約為2,000 km²,共分為26個主要煤田。

- (b) 具經濟價值的含煤層屬第三紀(表 2-2)之中新世煤系。主要 含煤地層為:(1)下部含煤層(木山層):分布於基隆一帶;(2) 中部含煤層(石底層):以臺北最為發達,為台灣最厚之煤層, 煤產量佔台灣總產量的大部份;(3)上部含煤層(南莊層):在 新竹與苗栗境內發育最佳,為全省分布最廣煤系,唯其經濟 價值較低。由於台灣煤層薄,開採條件差,在政府政策下, 已全面停採。北部煤區的含煤地層分布可自東北海岸的澳底 和金山兩煤田向西南延伸到大安溪流域,煤田分布情形如圖 2-55。中部煤區有三個煤田,分別是集集大山煤田、鳳凰山 煤田及阿里山煤田,分布於南投縣、嘉義縣境內。煤層厚度 較薄且不規則、開發價值低。除上述中新世(表 2-2)含煤地 層外,也有其他較小、不重要的煤田。這些岩層中的煤級較 低劣,經濟價值不高,包括白冷層、澳底層之煤層等。
- (c) 光復後,經政府之積極輔導及煤礦業者之努力配合,產量逐 年增產,於1952年突破200萬頓生產量,1957年礦突破300萬 頓。再於1961年突破400萬頓,3年後1964年產量終於突破500 萬頓,並至1968年5年間維持500萬頓水準。1969年以後因低 價油源競爭,能源結構變化燃料油進入發電市場,並因台灣 煤礦開採已久,普遍進入深部採掘,採掘條件惡化,成本增 高等影響,產量開始減產,至1977年已降至為300萬頓以 下,而於1984年發生三次大災變降至200萬頓。爾後政府政 策上淘汰不安全或不經濟煤礦,台灣煤礦年產量繼續萎縮, 1989年生產約78萬噸與光復當時產量幾乎相同,至2000年已 完全停採。1912~1998年止累計生產量共1億8千餘萬頓,其 中光復至1998年生產1億3千846萬餘頓。
- (3) 放射性礦物:

能礦所曾於1981年間進行全省的放射性礦物調查,以西南部海岸 地區重砂資源為重點探勘。早期亦有成功大學、核研所等單位曾 進行局部地區的調查研究,也探獲多處異常地帶,但迄未進行開 採。本省西南海岸之重砂中富含獨居石及鋯石,獨居石含有釷及 稀有金屬,稀有金屬礦資源為重要工業原料之一。由於海岸變 遷,地形、礦床大幅變化,台灣西南海岸之重砂目前已無積極採 礦開採。國內重砂在1988年生產4297頓,1989年1593頓,1990年 減至46頓,1992年又增產6413頓,至1993年為180頓,其後並無 生產紀錄(魏稽生,2000)。

- (4) 溫泉及地熱資源:
 - (a) 台灣位處環太平洋火山帶,根據台灣地熱資源初步評估結果,全台灣地區有近百處顯示具溫泉地熱徵兆(圖 2-55),但較具開發地熱潛能者有 26 處,理論蘊藏量約有600 MW, 包括大屯山、清水、廬山、金崙、知本等處。其中大屯山因係屬火山性地熱泉,其酸性成分高,成為發電利用之瓶頸, 而清水及土場地區則蒸氣含量少,影響發電價值。
 - (b) 台灣之溫泉主要分布北部、中央山脈及其兩側山地,一部分 分布於周圍海上小島。全島除了雲林縣、彰化縣及澎湖縣三 縣沒有溫泉外,其餘各縣境均有溫泉分布。若依溫泉成因分 類,有火山溫泉、變質岩溫泉、和沉積岩溫泉等三大分布區。 其可使用量潛能之估計如表 2-19所示。
 - (c)火山區的溫泉除龜山島與綠島各一處外,其餘均集中在大屯火山群區,大部分屬於高溫溫泉及噴氣孔。中央山脈變質岩區的溫泉絕大多數分布在山谷底部河床之上,周圍多被高山所環繞,形成高山深谷的地形特徵。變質岩區溫泉溫度多在60~99℃之間,地下熱水(hydrothermal water)溫度則多在150~200℃之間。沉積岩的溫泉主要分布在中央山脈的外圍地區、西部麓山帶、以及海岸山脈,溫泉的溫度大多屬於中溫(50~75℃)及低溫溫泉(25~50℃),適合作為觀光休閒利用。

 温泉類型
 温泉區名稱
 年可使用量 (×10⁶m³)
 水温

 火山地區之熱水氣與地表 或淺層地下水混合型
 陽明山馬槽
 1.1~1.5
 以60~70 ℃計

 變質岩或沉積岩區岩盤深 低四本 山川
 仁澤
 2.4~4.1
 以80~90 ℃計

礁溪

1.7~2.3

以50℃計

表 2-19:台灣溫泉區可使用量潛能估計

循环热水型

之地下水混合型

岩盤深循環熱水與沖積層



圖 2-55:台灣能源礦產及地下水資源分布圖

資料來源:地調所,2006c

2.1.6. 地質調查技術研究發展

處置母岩是場址調查首要的考量,場址的調查與評估工作主要由 大區域潛在處置母岩的範圍大小界定開始著手,然後逐步篩選與縮小 調查範圍,並加強對深地層特性的了解,直至最後確認場址為止。調 查的順序則是從空中、海上、地表至深入地下,先進行遙測判釋、空 中及海上探測,得到大尺度、大範圍的區域地質、水文地質等資料; 接著實施地表調查、鑽探及孔內量測作業,經過特性調查資料之綜合 研判後,建構初步之概念模式及處置可行性評估要件,以評選出一處 優先詳細調查的場址。此優先調查場址須透過更密集的試驗直井及地 下試驗的實施,使調查工作能掌握未來深層地質處置場的特性,以獲 得包括地下水流、地球化學、岩石力學等現地調查資料,以建構優先 調查場址的地質概念模式,進行場址設計模式的修正與可行性的驗 證。上述之工作最後整合出可供場址確認所需之核種遷移概念模式。 至此,調查工作可告一段落,配合功能/安全評估及審查作業,方能 完成場址評估及確認工作。

母岩特性之調查與評估過程涉及了許多困難度極高的現地調查 與資料綜合解析之技術;這些技術之執行,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做不同程度的整合。

從區域調查技術準備階段(詳第1.2節)開始至今,台電公司依各階 段技術發展的不同特性需求,分別在國內BS、PD、SL、HTL、PSH、 W、K等技術發展測試區,進行各種地表與孔內調查技術的研究發展 工作(詳表 2-20)。由於純屬技術發展,因此在相關現地工作過程中, 並未遭遇民眾抗爭等情事,但下述相關經驗,值得後續相關單位參考: (1)各項現地調查技術發展及建立過程中,必須謹慎考量設備的移動 性。尤其是深地層特性的相關調查設備尺寸,往往重達數千公 斤,因此不論是由國外引進或自行發展,均應妥善考慮設備的模 組化設計。

- (2)本計畫為因應坑道實驗室之規劃與建置,將逐步結合國內學研各 界人力進行技術建立與傳承工作,擴大參與廣度以彌補規模之不 足。
- (3) 孔內技術的發展與測試應用,因必須保持裸孔狀態,因此儀器使用風險性高,容易因卡孔而損壞,保險公司承保意願低且理賠率 很低;計畫應將相關孔內器材,以耗材科目編列,避免因卡孔損壞,而延遲研發進度。

自2004年台灣電力公司依法規 (放射性物料管理法施行細則) 要求,擬訂「用過核子燃料最終處置計畫書(2004年版)」提報主管機 關放射性物料管理局後,參考長程處置計畫的過去研究結果建議:花 崗岩質岩體應做為優先調查對象(台灣電力公司,2006),因此過去幾 年來,台灣電力公司將地表及孔內調查技術發展重點,集中於花崗岩 質技術發展測試區—K區,期能透過各項技術的集中發展與整合性驗 證,在最短的期程內,驗證各項技術的發展成果與能力,取得測試區 的地質特性參數與建構初步地質概念模式,供驗證功能安全評估能 力,以完備現地調查至功能評估的整體流程之初步技術能力驗證,順 利達成近程工作目標: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」。

除了進行地表地質調查、岩石定年分析外,總計在K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,並透過整合性的資料解 析,建構出K區初步地質概念模式、主要斷層及其裂隙帶位態(圖 2-56),並彙整其地質特性參數如圖 2-57所示。

長程處置計畫歷年來相關調查技術的發展內容與應用成果,彙整 說明如表 2-20 (台灣電力公司, 2006);相關技術發展狀況,概述如 后。



圖 2-56:花崗岩質技術發展測試區(K區)執行成果摘要(一):地質概念模式



圖 2-57:花崗岩質技術發展測試區(K區)執行成果摘要(二):地質特性參數

表 2-20:用過核子燃料最終處置計畫技術發展與應用成果

類別	技術名稱	目的	應用成果	備註
地球物理	高精度二維反射震測技	透過地表人為產生震波,探	SL測試場探測深度達1,000m,比較分析炸藥、	
現地調查	術	測深層地質構造。	重鎚與震盪震源的優劣及適用性。	
地球物理	雷達井測技術	藉發射雷達波探測含水破裂	完成HTL測試場小規模技術驗證,完成W區各	
現地調查		带的位置與側向延伸性,並	井孔探測,獲得該井孔地層破碎帶位置資訊。	
		可據以分析各破碎帶的真實		
		位態。		
地球物理	特殊地形反射震测處理	針對山區困難地形環境下反	BS測試場及PD測試場,在地表起伏情況下探測	引進MIT IXL震測資料
資料解析	技術	射震測探測資料,發展特殊	斷層分布。	處理系統
		資料處理技術,還原深部地		
		層構造。		
地球物理	地球物理井测技術	探测井孔週圍地層物理性	完成PSH測試場、HTL測試場、K區花崗岩特性	引進美國Century地物
現地調查		質,做為岩層特性、地層對	調查之井下地層探測試驗,驗證各項量測技術	井测系统
		比、岩層結構與裂隙。	之特性,並分析井間地層分布。	
地球物理	三維反射震測資料處理	建立三維反射震測測勘規	完成BS測試場小尺度現場探測試驗,並據以測	
資料解析	技術	劃、資料處理及資料展現技	試資料處理軟體各項功能。	
		術。		
地球物理	跨孔雷達井測技術	探测雨井孔間地層傳波特	完成HTL測試場小規模技術驗證,獲得兩井孔	引進瑞典RAYMAC雷
現地調查		性,用以分析雨井孔間地層	間傳波速度與電磁波衰減率分布狀況。	達井測系統
		破碎带分布狀況。		
地球物理	跨孔地電阻井測技術	探测雨井孔間地層導電特	完成HTL測試場小規模技術驗證,完成W區井	
現地調查		性,用以分析雨井孔間地層	深200m探测,獲得井孔間破碎帶分布狀況;K	
		連通性與破碎帶分布狀況。	區花崗岩特性調查及KMBH01-02-04跨孔地電	
			阻井測。	

表 2-20:用過核子燃料最終處置計畫技術發展與應用成果(續)

類別	技術名稱	目的	應用成果	備註
地球物理	孔內攝影井測技術	獲取鑽井孔壁光學影像,透	W區各探測井之孔內攝影,獲得高解析度之孔	引進日本RAAX孔內攝
現地調查		過資料處理與分析,據以計	壁影像,並據以分析裂隙破碎帶等分布;K區花	影系統
		算層面及裂隙等之真實傾角	崗岩特性調查。	
		與走向。		
地球物理	垂直震测剖面探测技術	評估垂直震測剖面探測技術	完成技術手冊。	參訪芬蘭
技術評估		在花崗岩區探測破碎帶的可		VIBROMETRIC公司
		行性。		
地球物理	反射震測資料解釋技術	引進反射震測資料解釋技	K區及W區鄰近海域海上震測資料解釋,瞭解該	引進INTERGRAPH震
資料解析		術,藉由電腦強大的分析整	區海域主要地質構造型態。	測解釋系統
		合功能,協助快速合理的解		
		釋。		
水文地質	裂隙水頭壓力量測	建立地下水流場壓力分布,	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	引進雙封塞及多封塞系
現地調查		分析地下水流向。	址調查、HTL測試場、K區花崗岩特性調查。	統,執行深度可達地表
				下500 m
水文地質	封塞水力試驗	計算地下水流動參數,評估	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	
現地調查		裂隙流動能力。	址調查、HTL測試場、K區花崗岩特性調查。	
水文地質	封塞追蹤稀釋試驗	計算溶質傳輸參數,評估裂	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	
現地調查		隙傳輸能力。	址調查、HTL測試場、K區花崗岩特性調查及	
			KMBH01-02-04跨孔試驗。	
水文地質	微流速儀量測	研判裂隙地下水流動方向及	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	引進熱脈衝式微流速
現地調查		流速。	址調查、HTL測試場、K區花崗岩特性調查。	儀,執行深度可達地表
				下1000 m

SNFD2009

表 2-20:用過核子燃料最終處置計畫技術發展與應用成果(續)

類別	技術名稱	目的	應用成果	備註
水文地質	干擾試驗	研判裂隙連通性。	PSH測試場。	
現地調查				
水文地質	滲漏試驗	研判導水層滲漏程度及其穩	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	引進鋼纜吊式滲漏試
現地調查		定度。	址調查、K區花崗岩特性調查。	驗設備,執行深度可達
				地表下800 m
水文地質	MODFLOW模擬	建立孔隙介質地下水流數值	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	
資料解析		模式。	址調查。	
水文地質	TOUGH2模擬	建立裂隙介質地下水流、溶	HTL測試場。	
資料解析		質傳輸及熱傳數值模式。		
水文地質	FRACMAN模擬	建立岩層裂隙分布(Fracture	K區花崗岩特性調查。	
資料解析		Network)模式。		
水文地質	地質統計模擬	分析地質特性參數(如裂隙	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	
資料解析		間距、長度、寬度等)空間分	址調查。	
		布特性。		
地球化學	地化模式模擬技術	推估用過核子燃料深層處置	PSH測試場地化模擬、W區岩-水反應模擬、銅	引進並建立EQ3/6、
資料解析		之未來地下水質狀況及核種	及鈾溶解度範圍估算、K區花崗岩特性調查。	PHREEQCI及
		可能的溶解度範圍。		MINEQL+等地化模式
				的模擬技術。
地球化學	地下水現場水質敏感	獲取深層地下水敏感性水質	PSH測試場地下水敏感性參數量測、W區地下水	引進相關設備於88年
現地調查	性參數量測技術	參數(溫度、容氧量、酸鹼	敏感性參數現地量測、K區花崗岩特性調查。	度之量測深度達200 m
		度、氧化還原電位及酸鹼度)		水深,90年度之量測深
		之代表性數值。		度達1000 m水深。

表 2-20:用過核子燃料最終處置計畫技術發展與應用成果(續)

類別	技術名稱	目的	應用成果	備註
地球化學	熱力學資料庫建立與	建立並整合地化模式模擬、	W區岩-水反應模擬、岩石熱容量估算、穩定相	
資料解析	整合技術	穩定相圖繪製,及岩石熱容	圖計算與繪製。	
		量估算時所需的熱力學基礎		
		資料。		
地球化學	環境同位素應用技術	估算地下水年代及地下水混	W區地下水年代調查。	
資料解析		合特性。		
地球化學	深層地下水通井採樣	獲取深層地下水溶解性氣體	PSH測試場試驗井溶解性氣體取樣及量測。	
現地調查	技術	之代表性水樣。		
地球化學	Eh-pH穩定相圖應用技	推算用過核子燃料深層處置	鐵(Fe)、銅(Cu)、鈾(U)、鋂(Am)、鈽(Pu)、釷(Th)	
資料解析	術	之化學穩定區間及其溶解度	及錼(Np)的穩定區間評估及溶解度範圍估算。	
		範圍。		
地球化學	调查资料空间分布之	提昇現地調查資料的應用潛	W區地表地質、鑽井分布走向、岩心特性分布	
資料解析	數值模擬與展示技術	能及展現概念模式。	及地下水電導度分布等三度空間視覺化分布圖	
			計算與繪製。	
地球化學	敏感性化學參數變化	地層裂隙連通性調查。	PSH測試場試驗井裂隙連通性量測。	
現地調查	與裂隙連通性調查技			
	術			
地球化學	深層地下水封塞監測	獲取深層地下水敏感性參數	K區花崗岩特性調查。	
現地調查	及採樣技術	數值及代表性水樣。		
岩石應力	大地應力套鑽法量測	岩石應力現地量測。	低放射性廢棄物最終處置計畫W區第一階段場	
現地調查	技術		址調查、HTL測試場調查。	
岩石應力	水力破壞法量測技術	深層岩石應力現地量測。	K區花崗岩特性調查。	
現地調查				

表 2-20:用過核子燃料最終處置計畫技術發展與應用成果(續)

類別	技術名稱	目的	應用成果	備註
功能安全	近場功能安全評估技	評估近場環境核種外釋之處	處置場工程障壁功能安全評估	
評估技術	術	置場功能與安全性		
功能安全	遠場功能安全評估技	評估遠場環境核種外釋之處	處置場地質圈功能安全評估	
評估技術	術	置場功能與安全性		
功能安全	生物圈功能安全評估	評估生物圈環劑量評估	處置場生物圈安全評估	
評估技術	技術			
功能安全	機率式功能安全評估	系統之機率性功能安全評估	機率式評估模式技術建立	
評估技術	技術			
功能安全	情節發展分析技術	運用於系統功能安全評估	情節發展分析技術建立	
評估技術				
功能安全	處置概念分析技術	運用於系統功能安全評估	處置概念、處置場安全需求與處置場設施配置	
評估技術			規劃與評估	
功能安全	廢料罐及其材料初步	運用於系統功能安全評估	廢料罐及其材料初步評估	
評估技術	評估技術			

資料主要來源:台灣電力公司,2006,用過核子燃料最終處置計畫書(2006年7月核定版),表5-2。

2.1.6.1. 地球物理調查技術

2.1.6.1.1. 概述

地球物理技術(geophysical technology)是一門結合地質與物理的 學科,透過精密儀器以非破壞方式量測地球的震波速度、重力、磁力、 導電度、放射性等特性,用來研究地球結構,以及肉眼難以察覺之地 下構造。其分支包括:地震學、地熱學、水文學、物理海洋學、氣象 學、重力及大地測量學、大氣電學及地磁學、構造物理學、探勘地球 學及工程地球物理學、地質年代學及地球進化論等(Sheriff, 1984)。

地球物理技術已廣泛且成功地應用在石油探勘、工程地質調查、 資源探勘、及環境污染偵測等領域;以物理性質的角度,提供對地下 地質構造、岩體及地下水分布等之瞭解。應用於核能廢料處置場調查 方面,需特別加強資料的解析度與地下構造解釋的合理性,因此必須 視狀況需要,採用一種以上技術進行探測,並參照其它調查資料交互 比對,經整合分析歸納出結論,以獲得最合理的地下構造解釋。

2.1.6.1.2. 國內現有技術概況

地球物理技術依量測位置不同,可區分為:(1)空中地球物理、(2) 地表地球物理、(3)海上地球物理、(4)孔內地球物理等四類,各項技 術概述及國內發展概況依序說明如下:

(1) 空中地球物理技術:

空中地球物理(airborne geophysics)技術係將精密儀器裝設在飛 行載具上進行量測,故施測作業不受地形、地物限制,可以在短 期間內獲得大範圍地下構造資訊。世界各先進國家均利用此技術 進行區域調查,是篩選潛在及候選場址的重要參考(Almén and Zollman, 1991; SKB, 2000; Isaksson, et al., 2004; Korhonen, et al., 2004)(),常用的方法包括:空中磁力、空中重力、空中放射性、 空中電磁等(Jaques et al., 1997; Triumf et al., 2003)。美國曾於 1968年協助中油公司針對台灣海峽東半部,實施一次空中磁測 (Bosum, 1970),之後30餘年來,國內從未實施空中物探工作,直
到2007年間台電公司首度將空中磁力技術引進國內,並針對國內 重點區域進行區域調查,奠定了國內執行空中磁力之測勘規劃、 現調飛航與資料處理(圖 2-59)等基礎技術能力(董倫道等2人, 2007)。

(2) 地表地球物理技術:

地表地球物理(surface geophysics)泛指在地表施测的地球物理方 法(圖 2-60),已有許多成熟的技術可應用於探測深部或淺部之地 層結構,包括:重力法、磁力法、震測法、直流地電阻法、交流 地電阻法等。應用時需視調查範圍、目的與精度等要求,適度地 調整測點或測線數量。一般而言,重力法(gravity survey)及磁力 法 (magnetic survey) 較常應用於大範圍之地下地質構造調查 (Hsieh and Hu, 1972; 圖 2-61); 震測法(seismic method)、直流 地電法(DC geoelectric method)、及交流地電法(AC geoelectric method),則較常應用於特定地質構造之探測(Barnes and Mereu, 1996; Cosma et al., 2001; NAGRA, 2002)(圖 2-62及圖 2-63)。 國內的地表地球物理技術能力已初具能力,學術機構與工程顧問 公司偏重於建立淺層之調查技術,主要應用在工程地質調查方 面,中油公司以發展深部反射震測技術為主,工研院則同時具備 淺層與深層調查的技術能力。台電公司曾於1996至1998年間發展 起伏地形高精度反射震测技術(工研院能資所,1996),並完成三 維反射震測技術應用可行性評估。總體而言,因應未來深地層處 置所需之深地層調查技術,國內現有的地表調查技術大多能在轉 變探測參數後直接應用。

(3) 海上地球物理技術:

海上地球物理(marine geophysics)泛指在海域施測的地球物理方法。當調查範圍涵蓋海域地區或場址鄰近海域時,除可應用空中 地球物理探測技術進行大範圍調查之外,通常透過海上震測法針 對特定構造進行調查,以獲得海水深度、海床沉積物厚度、斷層 位態與活動性等資訊(Boggs et al., 1979; Yu and Song, 2000)。 國內的海上地球物理技術大多建立在海研一號探測船,主要由學 術機構負責執行,已建立的技術項目包括:海上反射震測、海上 磁力、海上重力、海床聲波剖面及側掃聲納等技術。台電公司曾 於1998年應用海床聲波剖面法、反射震測法及聲納法等技術,針 對我國西部離島海域進行海域地下地質探測(董倫道等2人, 2000;董倫道等8人,2000)(圖 2-64及圖 2-65)。

(4) 孔内地球物理技術:

孔内地球物理(borehole geophysics)泛指在井孔内施测的地球物 理方法,在井孔內量測因更接近地層且遠離人為雜訊干擾,因此 孔內地球物理探測所獲得的資料品質往往優於地表探測。依作業 時所使用的井孔數量,可區分為單孔地物井測與跨孔探測兩類。 透過近距離量測岩層的各種物理特性,有助於更清楚掌握岩層物 理性質、層面與斷層位態、破碎帶連通性等訊息(Olsson et al., 1987; Majer et al., 1990)。國內學術單位與工程顧問公司所建立 的單孔地物井測技術,只能在深度500 m以上的井孔內施測,中 油公司及工研院則具有1,000 m深井之探測能力。至於跨孔探測 技術部份,國內目前僅工研院曾完成多種探測技術試驗(董倫到 董3人,1998;郭泰融等3人,2000;董倫道等3人,2001),少數 學術機構與工程顧問公司則正在進行跨孔地電阻與電磁波之工 程地質調查應用研究。台電公司自1998年陸續引進單孔雷達井 测、地物井测、孔內震波井測與孔內攝影井測等設備,具有在 1,000 m井深內進行量測的能力(圖 2-66及圖 2-67)。並曾針對跨 孔地電阻探測、跨孔震波探測及跨孔雷達探測等技術,進行技術 評估與現地試驗(董倫道等2人,1996;郭泰融等2人,1997;陳 文山等3人,2001)。

2.1.6.1.3. 未來技術發展建議

依據國內現有技術能量,考量處置母岩特性與需面對的測勘環 境,並考慮資源之有效運用,建議未來重點技術發展項目如下:

(1) 空中電磁探測技術:

台電公司已引進的空中磁力技術主要應用在地質構造解釋方面 (Gunn, 1997; Campbell, 2006),後續仍應加強建立高精度空中磁 測現調與解釋技術。由於地層內地下水狀況是場址篩選的重要因 子,因此後續應引進空中電磁(airborne electromagnetics)技術 (Triumf et al., 2003; Korhonen et al., 2004.; Isaksson et al., 2004; Smith et al., 2005),利用空中探測不受地形地物限制的優 點,在最短時間內快速掃描大範圍內地層含水狀況,有助於掌握 主要含水破碎帶的分布狀況。空中電磁技術係將高功率的發射線 圈固定在固定翼飛行載具上,或懸掛在直昇機下方(圖 2-68a), 發射線圈發射電磁波進入地下,因地層內含水狀況差異引發不同 程度的次生電磁場,根據接收與分析次生電磁場訊號特性,可以 獲得代表線圈下方不同深度地層的導電率,由地層導電率的高低 變化,據以掌握地下水狀況(圖 2-68b)。

(2) 三維大地電磁探測技術:

大地電磁探測技術具有深部地層探測的優點,且國內也已具備該 項技術能力,但僅止於一維與二維探測。未來應提昇三維探測與 資料處理解析能力,可據以完整掌握場址內地下三維構造形貌 (圖 2-69)(Uchida, 2005),也可應用於監測地層內地下水變化情 形(Yamane et al., 2000; Newman et al., 2005)。

(3) 海域電磁探測技術:

若未來處置場址位於離島或濱海地區時,海上反射技術常應用來 探測海床下地質構造,但是反射震測技術較無法有效反應地層中 含水狀況。海域電磁法(marine electromagnetics method)的原理與 大地電磁法或人控音頻大地電磁法類似,將特殊的電磁波接收器 安裝在海床上(Constable et al., 1998),接收來自天然或人工發射 電磁波的地層響應,可以獲得海床下深度數千公尺內地層的電性 構造(圖 2-70),據以掌握海床下地層內地下水狀況(Weitemeyer et al., 2006; Constable and Srnka, 2007)。

(4) 岩層破裂微震監測技術:

微震監測技術係在地表及井孔內安裝敏感的微地震儀,經定位處 理後可用以分析地下岩體破碎狀況的時空分布與破裂特性(圖 2-71)(Pramono and Colombo, 2005; Kwiatek et al., 2008)。瑞典 Äspö地下實驗室曾應用本技術,分析隧道開挖中及開挖後,地下 岩體破裂的空間分布。本項技術亦可用以瞭解孔內水力破壞試驗 後,井孔附近岩體破裂的分布特性(Kaieda et al., 2000; Fischer et al., 2008),提供處置母岩大地應力分析與處置場安全性評估之重 要資訊。

(5) 多方位垂直震测剖面技術:

在如花崗岩等潛在處置母岩進行破裂帶探測時,傳統的探測方面 常面臨解析度不夠的問題,因此必需搭配高解析度的探測技術。 多方位垂直震測剖面法(multi-azimuth vertical seismic profile method),將震源設在以井孔為中心但不同方位與距離處,透過 孔內一系列三向震波接收器,接收來自不同方位的震波訊號 (Willis et al., 2007),經資料處理分析後,可獲得井孔附近但不與 井孔相交之破碎帶的位置(圖 2-72; Cosma et al., 2003),有效提 高對破碎帶空間分布的掌握度。



圖 2-58:瑞典Forsmark場址空中磁測構造解釋圖

說明:(a)全磁力異常彩現圖(黑框為場址模型範圍);(b)線形判釋成果圖(白色線 條為磁力線形)

資料來源: Korhonen et al., 2004.



圖 2-59:磁力異常圖幅成果示意圖

(a)測線分布圖,(b)全磁力異常圖,(c)經歸極換算之磁力異常圖,(d)經歸極換算 與一次垂直微分處理之磁力異常圖,(e)區域磁力異常圖,(f)剩餘磁力異常圖,(g) 解析信號處理之磁力異常圖,(h)經傾斜微分處理之磁力異常圖。



圖 2-60:國內已具備可行的地表地球物理探測技術。 說明:(a)重力探測、(b)磁力探測、(c)震波探測、(d)地電阻探測



圖 2-61:臺灣地區布蓋重力異常圖

資料來源: Hsieh and Hu, 1972.



圖 2-62:台中縣大安溪南岸反射震測剖面圖

資料來源:董倫道等3人,2006。



圖 2-63:桃園縣爺亨地區大地電磁電阻影像剖面圖



圖 2-64: 金門-澎湖間之海上震測剖面圖

資料來源:董倫道等2人,2000。



圖 2-65:烏坵鄰近海域之海床聲波剖面圖 資料來源:董倫道等8人,2000。



圖 2-66:小坵嶼BH-12井孔之標準地物井測圖 資料來源:董倫道等8人,2000。



圖 2-67:小坵嶼井孔內井壁影像圖

資料來源:董倫道等8人,2000。



圖 2-68:空中電磁波探測技術

(a)空中電磁波飛行載具;(b)地層電阻剖面圖 資料來源:Fugro Airborne Surveys Website; http://www.fugroairborne.com.



圖 2-69:日本Origi地熱田三維電性構造結果圖(大地電磁技術) (a)電性構造三維網格圖;(b)不同深度地層電阻率水平切面圖 資料來源:Uchida, 2005。



圖 2-70:海域電磁波探測技術

(a)水下電磁波發射器;(b)海床電磁波接受器;(c)海床下地電阻剖面圖:(d)海床 下地電阻剖面立屏圖

資料來源: Scripps Institution of Oceanography Marine EM Laboratory website; http://marineemlab.ucsd.edu/。



圖 2-71:印尼Darajat地熱田微震震央分布圖 資料來源: Pramono and Colombo, 2005。



圖 2-72:芬蘭Olkiluoto場址地下主要破碎帶分布圖(垂直震測剖面技術) 資料來源: Cosma et al., 2003。

2.1.6.2. 水文地質調查技術

2.1.6.2.1. 現地試驗技術

2.1.6.2.1.1. 概述

對於最終處置計畫而言,水文地質現地試驗技術之任務有二(蔣 立為等5人,1998):(1)經由孔內量測、觀測或試驗技術(圖 2-73), 計算岩層或裂隙地下水流及溶質傳輸所需參數,如水力傳導係數 (hydraulic conductivity)、貯水係數(storage coefficient)、水力延散係 數(hydraulic dispersion coefficient)、延散度(dispersivity)、水力內寬 (hydraulic aperture)及有效孔隙率(effectivie porosity)等;(2)建立岩層 地下水流概念模式(groundwater flow conceptual model),以協助最終 處置場址進行功能及安全評估。

2.1.6.2.1.2. 國內現有技術概況

水文地質孔內量測技術包括(蔣立為等6人,2001)下列七項:

- (1) 岩層滲漏試驗或稱漏程試驗(lugeon test)(圖 2-74):主要目的是 在地質鑽探過程中,若遇破裂地層,發生漏漿情況時,恐影響後 續鑽鑿工作進度,必須進行灌漿作業,此試驗數據即可作為灌漿 量的參考,亦可用以進行該破裂段水力參數計算之用。
- (2) 單井水力試驗(single borehole hydraulic test)(圖 2-75):主要目的是在鑽孔完成後針對特定段或裂隙進行水力試驗,再由試驗數據計算水力傳導係數。
- (3) 水力脈衝試驗(hydraulic pulse test) (圖 2-76):主要目的亦是鑽 孔完成後針對完整岩層進行水力試驗,再由試驗數據計算完整岩 層水力傳導係數,通常用於量測低水力傳導特性之岩段。
- (4) 跨孔干擾試驗(cross-hole interference test):主要目的是在利用壓 力變化(例如進行抽水試驗),瞭解各鑽孔間裂隙的連通性。
- (5) 跨孔示蹤試驗(cross-hole tracer test):經由確認的連通裂隙進行 各鑽孔間示蹤試驗,以計算溶質傳輸參數。

- (6) 熱脈衝式微流速量測(microflowrate measurement by heat-pulse flowmeter)(圖 2-77):微流速儀井測目的為判斷導水裂隙的位置,並觀察孔內深層地下水流向及流速的變化藉以建立深層地下 水概念模型。
- (7) 裂隙壓力長期自動觀測(fracture pressure head long-term monitoring)(圖 2-78):利用長期壓力觀測數據可分析其與地表 水文間互動關係,研判岩層裂隙間流動行為,以協助地下水流概 念模式的建立。

上述之技術目前均已建立完成,分別於沉積岩及火成岩體地質鑽 孔中進行技術驗證(蔣立為等4人,1996a&b;蔣立為等5人,1998), 地質鑽孔多數為90°直井,少部份為水平向下40°~45°斜井,最大執行 深度為500m,鑽孔直徑為96mm。

2.1.6.2.1.3. 未來技術發展建議

水文地質現地試驗技術目前正朝向二維及三維水力掃瞄試驗 (Hydraulic Tomography, HT)技術方向研發,最終期望建立區域性有效 三維裂隙地下水流概念模式。日後需要建立之技術包括:(1)裂隙水 流通路(flow path)確認,須整合孔內地物探測技術(如孔內雷達、攝影) 及大型示蹤試驗技術與建立數值分析模組;(2)地層裂隙幾何分布, 這方面亦須整合地表震測及大型示蹤試驗技術與建立數值分析模組。

2.1.6.2.2. 裂隙網路建構

2.1.6.2.2.1. 概述

水文地質領域中所謂的裂隙(fracture),泛指岩體中因大地應力作 用而產生的力學破壞(USNRC, 1996, p11),此類破壞造成岩體性質的 不連續分布,故亦稱為岩體的不連續面(discontinuity)。依照不連續面 的相對運動情形,裂隙可粗分為具有相對運動的斷層(fault),以及無 相對運動的節理(joint) (Priest, 1993)。此外,文獻上亦出現裂縫 (fissure, crack)一辭,亦泛指岩體中的脆性破壞。因此,在水文地質

的應用上,仍然用「裂隙」代表岩體中因脆性破壞形成的不連續面,可能表示岩體中的斷層、節理、裂隙帶(fracture zone)或剪切帶(shear zone)等。

用過核子燃料最終處置的相關技術,一般均希望利用潛在母岩的 低母岩滲透性,發揮其天然障壁(natural barrier)的功用,如結晶岩類 的花崗岩。而花崗岩因為在其形成的過程中,會因為大地應力、地表 解壓、岩脈入侵、岩漿冷卻等作用,產生大小尺度不同的裂隙;而因 為花崗岩本身的低滲透性特性,故裂隙即形成地下水、溶質及核種等 可能的流動路徑。因此,在功能安全評估工作中,為了模擬核種外洩 至生物圈的劑量大小及所需之最短時間,岩體中的裂隙分布,為模擬 程式中的重要輸入資料。

2.1.6.2.2.2. 國內現有技術概況

岩體裂隙分布的調查,除了地表的量測之外,更直接的方法為利 用鑽井的方式調查,兩者均有其限制及優缺點。在實際應用上,通常 需要整合兩者的量測結果,方能對岩體的裂隙分布作較準確的估計 (劉台生,2007)。地表裂隙調查,可採用簡單的測線法(劉台生,2007)。 此法乃在與裂隙走向正交的方向上佈一條測線,量測並記錄每一條與 測線相交的裂隙之位態、長度、內寬、在測線上的位置等定量資料, 以及裂隙端點特性、滲水狀況、與其他裂隙之相交情形等定性資料。 以所獲得的資料,分析出裂隙參數的統計特性,並可進一步模擬出裂 隙分布情形(Priest, 1993; Kulatilake et al., 2003; 劉台生,2007)。地 表量測方法的好處為可以獲得裂隙參數的直接量測資料,但測線長度 可能受到地表覆蓋的影響而有限制,而地表覆蓋亦可能影響裂隙的延 伸性而無法記錄完整的端點尖減情形。此外,地表裂隙容易受到風化 作用的影響,故裂隙內寬值大小的不確定性大;且地表裂隙的分布與 深部岩體裂隙分布的特性是否相同,亦為地表量測的限制。

裂隙的孔內調查技術在國際上已發展相當完整,國內亦具備完整 的設備及量測技術(如孔內雷達技術,郭泰融等,1997;地球物理井 測及孔內攝影技術,郭泰融等,2003)。裂隙的孔內量測,主要利用

孔內攝影機或孔內超音波探測器,量測井內的裂隙位態,及估算其裂隙內寬等,其缺點為無法量測到裂隙的長度及其延伸性。孔內雷達探測技術透過向井壁發射具方向性的雷達波,可將測深延展至井孔周圍 5公尺以上,且由於其具有方向性的特點,因此可充份掌握裂隙之位 態及其延伸方向,其缺點為無法獲得微小裂隙(如裂隙內寬1mm以下 之裂隙)之資訊,未來應結合不同孔內量測技術,以獲得較完整之裂 隙分布及其延伸方向的資訊。岩體中的裂隙分布,為探討岩體中地下 水流及溶質傳輸的初步工作,而後者的貢獻,則在連結功能安全評估 工作中之核種傳輸模擬,以探討處置系統的可行性。

2.1.6.2.2.3. 未來技術發展建議

為模擬岩體中之地下水流及溶質傳輸,在現場工作中可利用跨孔 干擾試驗及示蹤劑試驗,以分析岩體之滲透性及傳輸特性。而在模擬 工作方面,基本上有三種不同的概念:離散裂隙網路 (Discrete Fracture Network, DFN)模式、當量連體模式(Equivalent Continuum Model, ECM)及合成模式(Hybrid Model)。此三種模式的主要差別,即 在於採用何種概念,處理岩體中裂隙分布對岩體流動及傳輸特性造成 的影響。三種方法各有其考量的基礎,亦各有優缺點,且在文獻上亦 有相當多成功的應用案例(Poteri et al., 2002)。

DFN的主要精神,為利用現場資料所獲得之裂隙參數特性,實際 模擬出岩體中可能的裂隙分布。而岩體中的流傳模擬,則仔細考慮地 下水及溶質在每一條裂隙中的分布,以及在裂隙交點的質量守恆關 係,自上游開始,計算出地下水及溶質在下游的分布(Dershowitz et al., 2004)。因DFN考慮每一條裂隙的影響,故其主要的缺點為數值計 算量需求太大。有鑑於此,ECM並不實際考量每一條裂隙的貢獻,而 是採取類似有效介質理論(Effective Continuum Theory, EMT) (Hestir and Long, 1990)的方法,計算出數值網格中的當量係數值,將此異質 性的岩體參數帶入地下水質能數值模擬程式,如TOUGH2(Pruess et al., 1999),計算出岩體中的地下水及溶質分布(劉台生,2002; Liu et al., 2004)。比較DFN及ECM可發現,此兩種模式的優缺點幾乎完全相

反。因此,許多研究學者嘗試擷取兩者長處,而發展出所謂的合成模式。而合成模式的精神,乃利用DFN的離散網路模擬能力,以解析重點岩體區域(如近場附近岩體)中複雜網路的流傳特性,以及利用ECM的強大計算能力,以計算例如地質圈附近的流傳情形(Benke and Painter, 2003)。

關於裂隙地層幾何分析與模擬相關技術(如DFN、ECM、Hybrid Model)發展,除已初步進行其理論彙整研析外,另根據現地量測資 料,產生二維DFN模擬結果,並配合粒子追蹤法(Particle tracking)的 溶質傳輸模擬方法,分析並比對深部岩體(330~360 m深度)的自然梯 度追蹤試驗數據(劉台生,2009)。

以上討論的模擬工作中尚須考慮到擴尺度(upscaling)的問題。岩 體的傳輸參數特性已知隨著尺度的增加而漸增,因此,從小尺度的實 驗室試驗(≤1 m)或現場試驗(10~100 m)結果,如何能求出區域性(≥ 1000 m)流傳數值模擬所需之輸入資料,即為擴尺度所討論的問題。 文獻上討論的擴尺度問題,大部分為利用從多孔介質發展的理論 (Wen and Gomez-Hernandez, 1996; McKenna and Rautman, 1996; Renard and de Marsily, 1997)為基礎,應用至裂隙岩體中的擴尺度問 題。在裂隙岩體水文地質方面,Vidstrand (2001)在Äspö場址,利用改 變水力試驗中的封塞段長度,討論理論公式估計裂隙水力傳導係數的 正確性。而Walker et al. (2005)同樣在Äspö場址,比較四種不同擴尺 度理論公式估計所得之水力傳導係數值,以評估對功能安全模擬工作 的影響;擴尺度問題已列入未來技術發展的重點工作項目之一。

目前已在花崗岩測試區(K區)取得水力傳導係數擴尺度修正的初 步關係式(請參考圖 2-57),其取得方式主要是透過在特定鑽探井中, 以不同間距尺度的雙封塞,進行孔內水力試驗後,根據所解析的水力 傳導係數值與封塞間距的關係,建立初步關係式。未來透過東部花崗 岩坑道型實驗室的順利籌建後,擬規劃於坑道型實驗室內,進行不同 跨孔間距之擴尺度相關試驗。



圖 2-73:最終處置場址水文地質孔內量測示意圖



圖 2-74: 岩層滲漏試驗(lugeon test)示意圖



圖 2-75:水文地質單孔水力試驗示意圖



圖 2-76:水力脈衝試驗設計示意圖



圖 2-77:熱脈衝式孔內微流速量測儀器及量測記錄



2.1.6.3. 地球化學調查技術

2.1.6.3.1. 概述

核種的溶解度取決於地下水的水質特性,因此,就用過核子燃料 深地層處置環境的調查研究而言,地球化學(geochemistry)調查之主 要目的為獲取處置環境地下水的水質特性資料,以結合相關的資料與 基礎理論,建立其地球化學模式(geochemical model),並進行地化模 擬,來推估深地層未來地下水質狀況及核種可能的溶解度範圍。

針對處置環境的調查需求,重要的地下水水質特性資料包括水質 敏感性參數(如溫度、酸鹼值、電導度、氧化還原電位和溶氧)、主要 和微量溶解性成分、溶解性氣體,與同位素組成(氫、氧、碳)等。而 這些資料的取得,將有助於瞭解處置環境的地下水特性、來源、年齡 與形成機制,作為建構地下水地化模式之基礎,以及進行地化模擬時 所需之地下水水質參考條件。

2.1.6.3.2. 國內現有技術概況

由於用過核子燃料最終處置係採「深層地質處置」概念,因此, 利用探勘井進行深層地下水的採樣或以水質儀器進行相關的孔內量 測,是獲取深層地下水水質特性參數最直接的方式。但由於深地層孔 內調查所可能面臨的高水壓(>30 bar),及調查孔徑(<10 cm)的限制特 性,故需要特殊規格或設計的儀器設備,來克服其特有且嚴苛的調查 環境,以獲得具代表性的深層地下水樣及其水質特性。

目前,針對潛在母岩特性調查所執行之地球化學孔內調查工作, 主要是以地化井測的方式,取得通井地下水的水質敏感性參數分布特 性,並搭配岩心井錄及其他孔內試驗結果,來判斷主要導水裂隙之位 置;另以雙封塞的方式,取得深層裂隙地下水水樣,以進行其化學成 分的分析工作。在水質成分分析部分,為了避免水樣中的某些敏感性 離子(如HCO3⁻、CO3⁻²、PO4⁻³、SO4⁻²、S⁻²、NO3⁻、NO2⁻等陰離子)濃 度,因長程運送而產生變化,因此最好能於取樣後,馬上進行分析工 作,以提高分析數據之可信度(林鎮國、張育德,2003;張育德、林

鎮國,2004);在完成水質成分分析後,則依據分析數據,進行各種基本水質圖(如Stiff圖)的繪製與判釋。

地化井測所使用的儀器設備主要元件包含水質測棒、控制系統及 捲揚系統(林鎮國、張育德,2002),最大量測深度可達水下1,000 m。 透過該設備可量測孔內地下水不同深度水層之水質敏感性參數值(如 溫度、電導度、酸鹼度、氧化還原電位及溶氧等),作為判斷主要導 水裂隙位置之參考依據(圖 2-79)。

深 層 地 下 水 採 樣 方 法 大 致 可 分 為 通 井 取 樣 (open borehole sampling)及封塞取樣(pack-off sampling)兩大類,如圖 2-80。一般而 言,通井取樣的設備操作較封塞取樣簡單、設備的購置與操作成本相 對較低,且操作的安全性較高,因此經常被用來作為一般淺層地下水 監測井的取樣方法。而此類地下水取樣設備所取得的水樣,其水質通 常僅代表井篩段的「平均」水質,同時也比較容易受到他層地下水體 的干擾。至於封塞取樣(pack-off sampling)則具備取得特定區段的地 層地下水,且不易受其他水層干擾水質的優點,故所取得的水樣較具 有代表性。但由於其操作難度及成本很高,因此,相關的設備與技術 在國內外並不常見,主要應用於深層地質處置的調查。而根據封塞設 備下放至取樣深度的不同方式,大致上可分為串管式(pipe-stream)及 臍帶式(umbilical)兩類;後者操作較方便,但成本及卡井風險較高。 另外,部份相當昂貴的封塞取樣設備,因考量嚴格的地下水取樣標 準,因此在封塞段內具備水質敏感性參數(溫度、酸鹼度、電導度、 氧化還原電位)量測設備,以監測洗井與取樣期間封塞段內的水質變 化。

由於國外針對處置場調查的現行作法,是以封塞取樣來進行深層 地下水的採樣。因此,為了滿足場址調查的基本需求,並符合國內特 殊的調查環境,在潛在場地調查工作正式展開前,便積極投入深層地 下水封塞監測及採樣技術的相關研究,並初步完成首套由國內自行組 裝之「深層地下水封塞監測及採樣設備」(圖 2-81)(林鎮國、張育德, 2003;張育德、林鎮國,2004)。深層地下水封塞監測及採樣設備主 要係一結合雙封塞單元、水質監測單元、及氣動式抽水單元的組件,

用以進行HQ(96mm)尺寸井封塞段的抽水洗井、取樣、化學敏感性參 數即時量測。其主要操作原理是利用雙封塞隔絕特定裂隙段與孔內其 他區域,進行封塞段中的抽水洗井以及裂隙水的採樣工作,同時在操 作過程中,亦利用安裝於封塞段中的水質監測儀器,來進行導水裂隙 內之水質敏感性參數(溫度、酸鹼度、電導度、氧化還原電位及壓力) 的量測(圖 2-82),並據以判斷封塞的緊密性與取樣的時機,並獲取裂 隙地下水之代表性水樣。在操作深度能力方面,由於部分設備零組件 的耐壓上限為70 bar,因此該設備之最大操作深度大約在700 m水深左 右,而目前實際最深的執行深度為500 m水深。

在國外相同的技術領域當中,較為著名的有瑞典SKB的臍帶式 (umbilical)雙封塞地下水取樣與監測設備(Almén and Zellman, 1991, P111~120;圖 2-83),及日本JNC的串管式(pipe-string)雙封塞地下水 取樣與監測設備(Hama et al., 1995, P20~25; Koide et al., 1998, P59~71;圖 2-84)。以上兩者設備除了可進行地下水的封塞取樣外, 皆配備孔內化學敏感度參數感應器(酸鹼值、氧化還原電位,電導度 和溫度),可進行封塞段水質的現地監測與封塞段取樣。

2.1.6.3.3. 未來技術發展建議

台電公司長期以來致力於相關深地層孔內調查的技術發展,包含 孔內地球物理、水文地質試驗、現地應力量測及地球化學調查;相關 調查技術能力已達700~1,000 m深度,實測深度達500 m(垂直孔及斜 孔)。其中,地球化學調查之的主要目的為獲取技術試驗區之深層地 下水的水質特性。截至目前為止,已完成技術試驗區KMBH01(垂直 井,鑽進長度501 m)、KMBH04(垂直井,鑽進長度560 m)、KMBH03 地質探查孔(70度斜井,鑽進長度504 m)、KMBH05(垂直井,鑽進長 度504 m)和KMBH06(垂直井,鑽進長度504 m)等五口地質試驗孔之地 化井測、地下水封塞取樣,及水質分析等工作。圖 2-85為上述水樣 之酸鹼值(pH)及氧化還原電位(Eh),套疊於鈾的穩定相圖的結果,該 圖顯示對於用過核燃料的主要成份UO2 (uraninite)而言,其在技術試

驗區的深層(> 390 m)地化條件下,是處於化學穩定的狀態(溶解度小於10⁻⁶ M),不太容易溶解。

上述建立之地球化學孔內調查技術,已陸續在國內相關地質鑽井 中,完成相關的現地功能測試與資料取得工作。在未來的工作方向 中,除了持續改進使用上所發現的缺陷外,技術發展重點將著重於水 質與溶解性氣體的長期監測技術,並進行整體設備的模組化,使設備 在運送、操作或維護上更具便利性與機動性,以提升本項調查工作的 品質與效率。



圖 2-79: 通井地化井測結果與主要導水裂隙判釋圖



圖 2-80:深層地下水採樣方法示意圖



圖 2-81:深層地下水封塞監測及採樣設備



圖 2-82:雙封塞抽水洗井及取樣過程水質監測紀錄



圖 2-83:瑞典SKB臍帶式雙封塞地下水取樣與監測設備

資料來源: Laaksoharju et al., 1995



資料來源: Hama et al., 1995; Koide et al., 1998



圖 2-85:深層地下水封塞取樣水質分析結果與鈾的穩定相圖 說明:pe之定義為電子濃度對數值的負數(pe=-log([e⁻]),在80℃條件下,其和氧化 還原電位(Eh)間之關係為 pe ≅ Eh / 0.070。

2.1.6.4. 現地應力量測技術

2.1.6.4.1. 概述

大地應力係指地層岩體處在未經人為擾動天然狀態下所具有的 內應力。大地應力產生的原因包括:重力、構造板塊移動、地溫梯度、 地表剝蝕作用等;其中以重力和構造板塊移動為最主要的現地應力產 生因素。

由於用過核子燃料最終處置之地下結構物,往往深達地下數百公 尺,以致擾動原始岩體之應力平衡,尤其大跨度的地下結構物對周圍 岩體的穩定性要求更高,因此於工程設計與施工時,不能忽視現地應 力對工程安全的影響。例如在地下結構物興建方面,為使結構更穩 定,一般儘量使隧道頂拱(crown)與側壁所承受之壓應力差達到最 小。故於地下結構物之設計與佈置時,將地下結構物的長軸方向,儘 量不要垂直於現地應力中的最大主應力方向,以避免受到較大的壓 力,而有擠壓和剪切破壞之虞(Martino and Chandler, 2004)。

2.1.6.4.2. 國內現有技術概況

大地應力量測方法有震源機制解(earthquake focal mechanism data)、井孔壁剝落(borehole breakout data)、現地應力量測(in-situ stress measurements)、近期地質資料(young geologic data)等,各量測方法比較如表 2-21所示。

其中推估現地應力主應力大小與方向的方法,主要分成理論的應 力逆推(stress inversion)及實際現地應力量測兩種方式。應力逆推主要 有:(1)利用震源機制解逆推大地應力(李錫堤等5人,1992);(2)藉由 現地的地質證據,如開口節理(吳禮浩,1994)、斷層滑痕面(slickenside) 及滑痕面(striation)推求古應力方向與古應力分期(李錫堤,1986)。然 而,利用理論的逆推方法僅能求得主應力軸的方向,但無法確切得到 實際大地應力值的大小。所以,如欲獲得實際現地應力值,則需由現 地應力量測技術來求得。

現地應力量測方法,大致可分為直接法與間接法兩大類,直接法 是指由量測儀器所記錄的應力值直接決定現地應力,而不需經由岩體 的其他物理性質來推算求得,如水力破裂法(hydraulic fracturing methods)(陳錦清及俞旗文,1994;楊明宗等4人,2004)、平鈑千斤頂 試驗(flat jack test)等;間接法是指利用與應力有關的物理量之變化 (如岩體變形或應變)而間接求得,然後根據已知或假設的公式,推算 得現地應力,常用的方法包括:套鑽法(over-coring method)(石作珉等 4人,1994)、孔底法(doorstopper method)、音射法(acoustic emission) 等(Ljunggren et al., 2003)。上述現地應力量測法中,以套鑽法及水力 破裂法使用最為廣泛。國內最近有關現地應力評估的大型計畫為台灣 車籠埔斷層鑽井整合型計畫(Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, TCDP)(馬國鳳等人,2004),該計畫利用深鑽井(井深約2km)及相關試 驗資料,針對活動構造監測所發展之大地應力量測技術。

以下就台電公司於潛在處置母岩特性調查計畫中發展的套鑽法 與水力破裂法兩種現地應力量測技術說明如后。

表 2-21:大地應力量測方法比較

量测方法	優點	缺點
震源機制解	可得知大區域主應力軸方向。	無法得知應力大小 , 需由假設
		岩體力學參數,再透過數值模
		擬方式推估。
井孔壁剝落	可量得深地層應力。	淺地層可能因無井孔壁剝落現
		象,無法得知現地應力。
現地應力量測	可量得現地應力大小與方向。	試驗費用高。
近期地質資料	可得知大區域主應力軸方向。	無法得知應力大小,需由假設
		岩體力學參數,再透過數值模
		擬方式推估。

2.1.6.4.2.1. 現地應力套鑽法

現地應力套鑽法是在鑽孔內量測預定位置上岩體經解壓後之回 復變形量,屬於應力釋放量測現地應力的方法之一,在已開挖的地下 空間(如隧道、坑道)中,屬於最常使用的方法。

量測孔內變形的儀器可分為兩大類:第一種為量測岩體解壓後孔 直徑大小之變形量,常用之量測工具為美國礦務局(U.S. Bureau of Mines)所發展的USBM Type Gage;另一種為量測岩體解壓後孔壁回 復應變,典型之量測工具為澳洲科學及工業研究機構(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)所發展的CSIRO HI Cell(圖 2-86)(Hollow Inclusion Stress Cell)。

USBM Type Gage量測工具只能量得與測試孔軸方向垂直之平面 上二度空間應力大小與方向,因此欲取得三度空間應力大小與方向, 則必須在至少三個不同方向之鑽孔內進行試驗。而CSIRO HI Cell, 其儀器埋設的單一測試孔內,即可量得三度空間應力大小與方向。其 原理是利用Hollow Inclusion Stress Cell(圖 2-86)上有三組(A,B,C)花 列式應變計(strain gauge rosettes)(每組三個單一應變計)與三個沿著 圓周方向之單一應變計,共12個單一應變計分設於不同方向上,因此 在單一測試點上可量得當地三度空間之應力大小與方向。

茲將應用CSIRO HI Cell設備實施套鑽法之實施步驟(圖 2-87)說 明如后(Sjöb et al., 2003):

(1) 在試驗坑道中選定測試岩壁,鑽鑿一大孔至預定的量測位置前方約30 cm,於超過應力集中帶進行試驗。此乃因試驗坑道開挖後, 會破壞原平衡的岩體應力狀態,而使坑道周圍岩體產生變形,並 重新應力調整達到新平衡應力,故為量測岩體原始應力,試驗點 位置應超過應力集中帶,而應力集中帶與坑道開挖形狀、大小及 施工品質有關,如圓形隧道於開挖後應力集中範圍約為距離隧道 中心3~4倍隧道半徑。但對要求條件較嚴格工程,可於完工後利 用監測數據研判應力集中帶。

SNFD2009

- (2) 從該處的中心位置再往前鑽一同心圓之小導引孔(pilot hole)約 60 cm長。
- (3) 將量測孔內變形的儀器安置並固定於該小孔之內。
- (4) 再鑽大孔,直至超過儀器長度,於套鑽過程中同時讀取資料。
- (5) 取出套鑽岩心及其中之儀器。
- (6)從套鑽取得之岩樣於現場即刻實施雙軸壓縮試驗(biaxial compressive tests)以量取岩體之基本材料性質楊氏模數(Young's modulus)與柏松比(Poisson ratio),然後依假設之線彈性理論(theory of linear elasticity),將現地所量取之孔內變形數據轉化成應力,最後使用數學空間幾何之座標轉換方法,以求得該地之主應力大小與方向。

此外,套鑽法的應力量測儀器必須裝設於連續(無破裂面)岩體 內,並且在應力量測後實施現地雙軸壓縮試驗,亦必須取得完整之岩 心,以量測該岩體之楊氏模數(Young's modulus)與柏松比(Poisson ratio)。因此,正確地鑽鑿試驗井與其尾端之同心圓導引孔技術,以 牢靠地將量測儀器固定在連續岩體之孔壁上的裝設技術,就是套鑽法 之關鍵技術所在,本項試驗技術已於沉積岩體地質鑽孔中完成技術驗 證試驗工作。



圖 2-86: 澳洲CSIRO發展之Hollow Inclusion Stress Cell



圖 2-87:現地應力套鑽法試驗步驟示意圖
2.1.6.4.2.2. 現地應力水力法

現地應力水力試驗的方式包含有水力破裂法(Hydraulic Fracturing,以下簡稱HF),及既存裂隙水力法(Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures,以下簡稱HTPF)雨種。其中HF原是1950年代被 應用於油田的開發,主要在鑽井中利用加注水壓來製造人工裂隙以提 高石油的產量。Hubbert and Wills(1957)在應用此技術時發現水力破 裂產生的裂隙與岩體應力間存有一定關係,後來Haimson and Fairhurst(1970)基於該項發現,發展出水力破裂法的現地應力量測技 術與理論。而HTPF首先是由Cornet and Valette(1984)提出,它是利用 鑽孔中數條不同位態的既存裂隙,以快速加注水壓方式進行現地應力 水力試驗,並假設所得既存裂隙重新張開後,瞬間閉合壓力等於裂隙 面法線方向應力,來求取該試驗段的岩體應力狀態。HTPF與HF試驗 使用的設備大致相同,其差別在於HF是在完整岩段進行試驗,所得 試驗結果為現地二維或擬三維應力狀態;HTPF是在彼此位態相異的 既存裂隙岩段進行試驗,所得試驗結果經座標轉換可得現地三維應力 狀態,如圖 2-88所示。

HF與HTPF試驗所使用設備為同一系統,設備施測深度為 1000m,其組件包括鑽探設備、注水加壓、封塞、壓力記錄、拓印及 孔內攝影等單元,其中HF試驗在國內係採拓印方式記錄裂縫破裂方 位,HTPF則以孔內攝影或其他地球物理探測法(如Televiewer)確定既 存裂隙深度與位態。

茲將HF及HTPF試驗示意圖如圖 2-89所示,詳細試驗步驟說明如后(Kim and Franklin, 1987; Haimson and Cornet, 2003):

(1) 测試位置的選擇:

首先檢視鑽探岩心及孔內攝影結果,於HF試驗時儘可能選擇均質 且等向性高的岩石為測試段,以避開節理、潛在裂隙或互層等弱 面,並詳細記錄深度、岩石種類等相關資料。HTPF試驗則選擇 位態相異的既存裂隙,並同樣詳細記錄深度、岩石種類等相關資 料。

- (2) 測試段的封堵: 利用捲揚機及高壓注水鑽桿將膨脹封塞置於選定的測試位置,並 結合注水加壓與記錄系統後,開始加壓膨脹封塞,封堵測試段。
- (3) HF試驗的裂縫破裂: 進行HF第一次加注水壓試驗時,直至完整岩壁產生裂縫,求得破 裂壓力(Pc1)。
- (4) 裂縫重開及閉合壓力的量測:
 - (a) HF試驗則於第一次注水加壓後需再進行第二次循環加壓,使 裂縫重新張開,其壓力稱為重開壓力(Re-open Pressure, Pc2),此時加壓時間通常超出1分鐘,使破裂面得以繼續延 伸,然後再次關閉注水壓力,觀察裂隙水壓消散情形,求得 第二裂隙閉合壓力(Ps)。此步驟通常需反覆數次試驗,以求 平均閉合壓力。
 - (b) HTPF則同樣利用加壓幫浦加注高速水壓,使既存裂隙得以 重新張開,在加注水壓力下降瞬間,關閉注水壓力並同樣觀 測水壓消散情形,此時裂縫逐漸閉合,所測得既存裂隙閉合 壓力Psk,此步驟與HF試驗相同通常需進行反覆數次循環試 驗,以求平均閉合壓力。
- (5) 封塞洩壓取出封塞: 將膨脹封塞洩壓後自鑽孔取出,即完成HF第一階段試驗與HTPF 試驗。
- (6) HF試驗的裂縫方位拓印: 取出膨脹封塞後,HF試驗需再進行第二階段試驗,將拓印系統置 放於裂縫產生位置,並加注介於Pc1與Pc2之間水壓力,使剛才HF 試驗產生的裂痕重新開張並拓印於拓印封塞表面,再由數位羅盤 儀記錄裂縫方位資料判斷最大水平主應力的方向。

現地應力水力法試驗因可利用地質鑽孔內,及在地下水位面以下進行現地應力量測,且資料整理不需要參考岩體之楊氏模數,可避免

楊氏模數取值不正確而引起的誤差,經過多年發展,目前已成為應用於深層應力量測最為可行的方法之一。

受限於封塞段間之人工裂隙(施加高壓產生)不一定是垂直裂縫的理想條件,傳統單一鑽孔的水力破裂法(HF)僅能得到現地二維或擬 三維應力狀態;既存裂隙水力法(HTPF)利用單一地質鑽孔中之既存裂 隙進行試驗,可解析現地三維應力狀態,其試驗條件雖需符合解析範 圍內既存裂隙彼此位態需相異之基本假設限制,但可與套鑽法或其他 現地應力量測試驗結果相互比較驗證,以更加了解HTPF於三維現地 應力量測上的適用性。對於上述HF與HTPF試驗技術目前均已建立完 成,並於火成岩體地質鑽孔中完成技術驗證試驗工作(楊明宗等4人, 2004)。

有鑑於現地應力水力法(HF/HTPF)適用於深地層現地應力的量 測,現地應力套鑽法適用於坑道內或淺層現地應力的量測,用過核子 燃料深地層處置概念係透過坑道建置與運輸,將其埋在深度約 300-1000 m的地質環境,因此現地應力水力法(HF/HTPF)與套鑽法兩 者均為計畫後續現地應力(坑道/深孔)調查的所需技術。

2.1.6.4.3. 未來技術發展建議

大地應力量測隨著近年來檢測技術的快速發展,目前國外有發展 音射法(acoustic emission)與變形率變化法(deformation rate analysis) 的方式,其試驗方法係利用鑽孔所得岩芯,經過室內岩石三軸試驗機 與進行單壓荷重時接收音射訊號或量測試體受壓的變形量,而求得現 地應力,故上述兩項可為未來大地應力量測技術發展方向。



圖 2-88:現地應力水力破裂法(HF)與既存裂隙水力法(HTPF)試驗示意圖 資料來源:摘自Ljunggren et al., 2003



圖 2-89:現地應力水力法試驗示意圖

2.2. 地質環境的變化

2.2.1. 地震活動

2.2.1.1. 地震成因

地震的成因可能源自斷層錯動、火山爆發、地面塌陷、山崩以及 隕石撞擊地面,但整體而言,由斷層錯動所引發的地震仍佔多數,全 世界幾乎有90%以上的地震屬於斷層錯動引起。斷層錯動主要是因為 地球的板塊運動所造成,根據板塊運動學說,地球外殼約100 km厚的 部份稱為岩石圈,由許多塊體構成,這些塊體即稱為板塊。在它們的 底下存在著有黏滯、流體狀的軟流圈(asthenosphere),厚度在100~200 km,軟流圈的熱對流可使其上的岩石圈板塊移動,同時在板塊的邊 緣上,因為它們相互的運動發生碰撞,造成斷層的錯動產生地震。

目前對於因斷層錯動所造成地震的發生過程,多以美國學者 Reid(1910)所提出的彈性回跳學說加以闡釋。簡單來說,當地殼受力 時,其較柔軟的部份,例如斷層帶及其鄰近之受擾動的地層,較容易 發生變形。地殼不斷的受力後,當斷層內部承受的剪應力超過斷層本 身的剪力強度時,斷層即發生滑動。當滑動發生時,扭曲的地盤同時 回彈,並向四面八方傳遞彈性波。如同一條鋼片被扭曲以至於斷折, 鋼片回彈反復顫動而將能量釋放出來,其中部份能量以地震波形式傳 播到各地,還有部份能量則以力學能或熱能方式散逸(呂佩玲、2005)。

2.2.1.2. 台灣的地震活動

台灣位在地震頻繁的環太平洋地震帶上,全球超過70%的地震發 生在此地震帶內。台灣地區位於歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊接觸, 是典型板塊碰撞下產生之大陸邊緣島嶼,菲律賓海板塊向歐亞大陸板 塊擠壓,台灣島遂得以誕生並成長,此造陸運動迄今仍在持續進行, 也引發了台灣旺盛的地震活動(圖 2-90)。

SNFD2009



圖 2-90:台灣地震與地體構造圖

根據地質資料推測,菲律賓海板塊相對於歐亞大陸板塊之板塊運動約為每年7 cm,由東南向西北方向移動(圖 2-11),這部份的資料已由全球衛星定位系統觀測資料得到證實。

台灣的地震活躍帶大致可分為東北部、東部及西部三個地帶(圖 2-91);由於地震大多發生在板塊接觸地帶,台灣東部的菲律賓海板 塊向北隱沒傾斜至歐亞大陸板塊之下,造成台灣東北部地震發生頻率 有集中於板塊隱沒帶之現象;於台灣南部也可觀察到向東隱沒之傾斜 地震帶;至於台灣西部之震源分布,則主要為集中於斷層構造區附近 之淺層地震。台灣地區地震活動之主要地震帶為:

(1) 東部地震帶:

北起宜蘭東北海底向南南西延伸經過花蓮、新港至台東,並可一 直延伸到呂宋島;此帶北端自宜蘭與環太平洋地震帶延伸至西太 平洋海底者相連,南端幾與菲律賓地震帶相接,整體呈現近似弧 形並面朝太平洋,亦和台灣島相平行,寬約130 km,此區的地震 集中在歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊的碰撞帶。

(2) 東北部地震帶: 此帶自琉球群島向西南延伸,經宜蘭、蘭陽溪上游至花蓮附近, 震源深度從淺層延伸到300 km深。

(3) 西部地震带:

自台北南方經台中、嘉義而至台南,寬約80 km,大致與島軸平 行。地震發生頻率較低,且均屬淺層地震(深度約10 km),往往造 成地面劇烈錯動,因之地震災害較大,而且餘震次數也較多。

台灣自1897年起即設有地震觀測站,並於1900年起有地震觀測記錄資料,地震觀測歷史已逾百年,自1900~2004年間共收錄超過二十四萬筆規模大於2的地震。



圖 2-91:台灣地震分區圖

資料來源:Tsai, 1977



圖 2-92:集集大地震發生前之台灣地區地震震央分布圖 資料來源:饒瑞鈞,2002



圖 2-93:集集大地震發生後之台灣地區地震震央分布圖 資料來源:饒瑞鈞,2002

SNFD2009

以空間分布特性而言,台灣地區百年來規模大於4以上的地震有 10,710個,震源深度最深幾近300 km,由地震活動在空間上的震源分 布特性可以發現,台灣地區震源深度較深的地震,大部分都是在台灣 東北部發生,且台灣東部大約在北緯24°附近,依震源分布明顯呈現 向北隱沒的傾斜地震帶,而在該地區地震深度小於20~30 km之地震, 形成帶狀向東北延伸至琉球群島附近,原稱琉台地震帶,由於位於台 灣東北部又稱東北部地震帶。

此外,台灣南部約東經121°附近,隱約呈現向東隱沒之傾斜地震帶,但是在此地區所發生的地震較少,所呈現的隱沒作用也比較模糊。台灣西部之震源分布,則主要為集中於斷層構造區附近之淺層地震。除了在台灣西部的北港與觀音重力高區,以及在台灣東部花東縱谷中段西側的地震較少以外,整體而言,整個台灣地區之地震活動都非常頻繁。而由近年地震活動的分布型態可以發現,目前的板塊作用方式與以往之長期觀測結果大致相同。

而就時間分布特性來說,由百年來的地震個數分布顯示,在 1900~1972年之間的初期地震觀測,因為地震儀器較為簡陋、地震站 的設置數量稀少、以及相關硬體設備不夠精良,所以只能記錄到地震 規模大於4以上的地震資料,平均每年的觀測資料只有42個地震。在 1973~1993年之間的地震觀測,由於地震觀測網陸續建立與改善,平 均每年的地震觀測資料已增加到5,080個地震(所有等級)。

中央氣象局地震網自1993年11月以後,對地震資料的蒐錄,同時 採用傳統的系統自動偵測方式以及連續記錄數位資料的方式進行,此 一軟體更新彌補了以往微震不易為系統自動偵測而遺漏的缺憾,其對 於強震與微震間相關性之探討,提供了豐富資料。在1994~1998年之 間的地震觀測,因使用連續數位方式記錄資料,使得所蒐錄的地震個 數大幅增加,平均每年的觀測資料有16,077個地震,大約增為軟體更 新前的三倍。1999年更因為集集大地震、嘉義地震與成功地震等多次 大規模地震序列,使得觀測資料大增,除了每年固定觀測到的一萬多 次的地震個數以外,單就集集大地震的餘震個數統計便已超過一萬多

次。集集大地震是近百年來在台灣陸地上所發生的最大地震,1999 年亦是台灣自有地震觀測以來,地震觀測資料最為龐大的一年,為地 震研究提供前所未有的珍貴強震觀測資料。

由百年來的地震累積能量與累計地震規模分析顯示,台灣地區的 地震活動一直都非常頻繁,地震規模大於7以上的地震有38個,平均 每年的累計地震規模為7.16。在1905~1925年間有多次大規模的地震 活動,其中包括1906年規模7.1的嘉義梅山地震,因此其累計地震規 模偏大於平均值。在1925~1950年間只有少數幾次大規模的地震活動, 其中包括1935年規模7.1的新竹一台中地震與1941年規模7.2的嘉義中 埔地震,因此其累計地震規模偏小於平均值。在1950~1972年間大規 模的地震活動又變得較為活躍,1973年以後地震活動再度略顯平靜, 直到1999年的921地震開始數年才又有較大規模的地震活動(呂佩 玲,2005)。

2.2.1.3. 台灣的災害性地震

根據歷史文獻的地震記載,台灣近百年曾經發生多次災害性的地 震(表 2-22及圖 2-94);例如1906年梅山地震、1935年新竹一台中大 地震、1941年中埔地震、1951年花東縱谷地震、1964年白河地震、1986 年花蓮地震以及造成重大傷亡的1999年集集大地震等。如果將記載的 時間再往前追溯到明清兩代,造成超過10人以上死亡的重大災害地震 至少有30次,其中有14次地震造成百人以上的死亡,造成千人以上死 亡的毀滅性重大災害地震則有4次,分別是1848年彰化地震(1,030人死 亡)、1906年梅山地震(1,258人死亡)、1935年新竹一台中地震(3,276 人死亡)與1999年集集地震(2,415人死亡)。若以地震發生的地點粗略 地對30次重大災害地震分群,可分為4區:台灣西部地區(19次)、東 部地區(9次)、北部基隆地區(1次)與南部屏東地區(1次)。

表 2-22:台灣近代主要災害性地震

地震名稱	發生時間 (年/月/日)	震央(經度/緯度)	震源深 度(km)	規模 (ML)	人口死傷/房屋損毀	地質現象與災害
斗六地震	1904/11/06	北港溪下游(120.3/23.5)	7	6.1	145死158傷/3840 棟	新港附近發生地裂與噴砂。
梅山地震	1906/03/17	嘉義縣民雄(120.5/23.6)	6	7.1	1,258死 2,385傷/20,987棟	民雄至大連坑一帶發生斷層,長約13km,三疊 溪至埤仔頭、中洋仔庄至番婆一帶發生龜裂。 龜裂帶多噴砂、噴泥及噴水現象。
南投地震	1916/08/28	濁水溪上游(120.9/23.7)	45	6.8	16死 159傷/5,499 棟	埔里至阿里山多處山崩,埋沒14戶。
新竹-台中地 震	1935/04/21	苗栗縣關刀山附近 (120.8/24.3)	5	7.1	3,276死 12,053傷 /54,688棟	新竹臺中烈震,伴生獅潭、屯子腳斷層。新竹 苗栗地區地裂,大關刀山山崩,中港溪流域噴 土沙,地下水噴出,地鳴。
中埔地震	1941/12/17	嘉義中埔附近(120.5/23.4)	12	7.1	358死733傷/15,606棟	嘉義地方烈震,並造成草嶺山崩,形成震生湖 清水潭。
新化地震	1946/12/05	台南新化附近(120.2/23.1)	5	6.1	74死 482傷/4,038 棟	伴生新化斷層,自那拔林延伸至鹽行,長約 12km。地裂、噴水、噴泥、井水變位、電桿與 鐵路歪斜等現象。
花東縱谷地震 系列	1951/10/22	花蓮東南東15km (121.7/23.8)	4	7.3	68死 856傷/2,382 棟	米崙斷層再度活動,自花蓮港延伸至壽豐東北 附近。多處山崩,玉里地區地裂,玉里、壽豐 等地發生噴水及地鳴,並有鐵路彎曲下沈現象。
	1951/11/25	台東北方30km(120.9/23.0)	36	7.3	17死 326傷/1,598 棟	伴生玉里地震斷層,自瑞穗北方延伸至富里以 南,全長約43km。地裂、山崩、噴水、地鳴、 發光等現象。
恆春地震	1959/08/15	恆春(121.3/21.8)	20	7.1	17死 68傷/2,589 棟	恆春半島多處地裂,滿洲鄉發生山崩。
白河地震	1964/01/18	臺南東北東43km (120.6/23.2)	18	6.3	106死 650傷/36,320 棟	嘉南烈震,有地裂、噴砂。
花蓮地震	1986/11/15	花蓮東偏南10km (121.7/23.9)	15	6.8	13死 45傷/75 棟	蘇花及橫貫公路全線中斷,北迴鐵路鐵軌扭 曲。中和華陽市場2/3 房屋倒塌。
集集地震	1999/09/21	南投縣集集附近 (120.75/23.87)	7	7.3	2,415 /29失蹤 11,305人傷 /全毀51,711半倒53,768户	造成地表長約80km的地表破裂,以及在卓蘭- 石岡地區形成寬約20km的地表褶皺變形帶

資料來源:李元希等5人,2002

開發最早的西部地區所發生的重大災害地震達19次數最多,約佔 2/3,所造成的災害亦較嚴重,共造成10,819人死亡,佔98%強。台灣 西部地區重大災害地震發生頻率較高且災害較嚴重,主要原因是台灣 西部地區開發較早、經濟建設發達、人口集中,另一方面是西部地區 地震的震源較淺,所以雖然東部地區所發生的地震頻率較高、地震規 模較大(1811年花蓮地震規模7.5,1815年花蓮地震規模7.7,1882年台 東地震規模7.5,1922年蘇澳地震規模7.6),但所造成的災害遠較地震 發生頻率低、地震規模較小的西部地區為少。此外,發生在北部地區 的1867年基隆地震,據推斷應是台灣地區唯一因海嘯造成災害的地 震;還有1959年發生於南部的恆春地震,雖然震央位於海上,但仍對 一向少有地震侵襲的屏東縣釀成不小災害(李元希等五人,2002)。

2.2.1.4. 集集地震特性

1999年9月21日凌晨1時47分,台灣發生了廿世紀以來規模最大的 地震,也是台灣近半世紀以來唯一地震規模大於7的地震(芮氏規模 7.3)。這是百年以來第二慘重的地震災害,根據統計有2,415人死亡與 29人失蹤,受傷人數有11,305人,房屋全毀51,711戶,半倒53,768戶(內 政部消防署,2007)。

集集地震造成地表長約80 km的地表破裂,以及在卓蘭-石岡地 區形成寬約20 km的地表褶皺變形帶。陳文山等人(2001)依照地表破 裂的形態與地質特性,將地震斷層帶劃分為4個斷層區段,由南至北 為竹山段、草屯段、石岡段與卓蘭段。這些區段大都以一條右移的平 移斷層為分界。上述斷層區段都可以對比至斷層,竹山段為大尖山斷 層,草屯段為車籠埔斷層,石岡段為石岡斷層,卓蘭段沒有形成一條 主要的逆斷層,而是造成區域性的地表褶皺以及小區域的逆斷層(陳 文山等人,2000)。從地震斷層的構造特性來看,大尖山斷層為右移 為主的平移斷層。車籠埔斷層的移動方向為北偏西70°~90°,傾角約 30°~40°向東,屬於正衡的逆斷層。石岡斷層為北偏西35°~40°,傾角 約30°向東,屬於左向斜移逆斷層;卓蘭段以褶皺為主,形成一主要

的背斜構造,由背斜軸向來看主應力方向約為北偏西40°(陳文山等7人,2000;陳文山等11人,2001)。

2.2.2. 斷層活動

2.2.2.1. 活動斷層的定義

各國學者或官方機構有關活動斷層的定義,雖無一致性結論,但 至少重點都包含一個近期錯動(recent offset)的時間基準,以及強調未 來再發作(recurrence)或再活動的可能性。活動斷層討論的時間基準從 「數百年以來」、「全新世(表 2-2)以來」或「第四紀(表 2-2)以來」 皆有,美國原子能委員會、國際原子能委員會、日本活斷層研究會及 經濟部中央地質調查所採用的定義就有不同考量:

(1) 美國原子能委員會的定義:

為核能電廠選址的需要,只要符合下列一項或一項以上準則的能動斷層(capable fault)(USAEC, 1973):

- (a) 以往35,000年內曾經有過一次接近錯移地表之斷層。
- (b) 以往500,000年內曾有超過一次接近地表斷層活動之斷層。
- (c)與上述準則認定之活動斷層有構造上的關聯,且能推測為可能會發生錯移之斷層。
- (2)國際原子能委員會的定義: 除了美國原子能委員會所使用的三項準則外,國際原子能委員會 增加了兩項(IAEA, 1972):
 - (a) 斷層有潛移(creep)之證據,「潛移」意指緩慢之位移,不一定會產生有感地震(macro-earthquake)。
 - (b) 地形上有地表斷裂、扭曲或錯移(offset)現象等證據。
- (3) 日本活斷層研究會(1980; 1992):
 活動斷層為自第四紀(表 2-2)以來曾經錯移過,且推測沿此破裂面將來仍可能再度活動的斷層。
- (4) 經濟部中央地質調查所:
 張徽正等4人(1998)的「台灣活動斷層概論-五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書」,彙整台灣地區過去有關活動斷層之調查

文獻及資料,將活動斷層定義為更新世(表 2-2)晚期(距今約 100,000年)以來曾發生錯移之斷層。

2.2.2.2. 台灣的地震斷層

台灣的地震主要發生在東部海域、花東縱谷以及西部麓山帶變形 前緣(圖 2-94)。而台灣地區的地震記錄,可分為史料記載以及地震觀 測儀的觀測記錄兩類。台灣地震的史料最早可追溯至明朝(西元1604 年),部份學者即根據古書中對地震災害的記載及描述,推估這些災 害性地震的地震規模、最大震度、及震央所在,由於所取決的標準不 同,因此定出之震央位置、震度、及地震規模皆有些許的差異性存在 (徐明同,1980,1983;Tsai,1985;鄭世楠、葉永田,1989;鄭世楠 等5人,1996)。台灣在1891年裝置了第一部地震儀,而地震觀測科學 化的時代則在1897年後才開始。其後,台灣各地陸續裝設地震儀,地 震相關資料才較為詳細。1898~1995年之間台灣地區共發生123次災害 性地震,而嘉南地區災害性地震次數最為頻繁(徐明同,1980;鄭世 楠等5人,1996)。鄭世楠等4人(1999)整理近一百年來台灣地區災情最 為慘重的十次震災資料,其中數次大地震更在地表產生地震斷層(表 2-25)。

2.2.2.3. 台灣的活動斷層分布

張徽正等4人(1998)的「台灣活動斷層概論-五十萬分之一台灣 活動斷層分布圖說明書」,係彙整台灣地區過去有關活動斷層之調查 文獻及資料,依據活動斷層最近之活動時期,將活動斷層區分為二 類。第一類活動斷層為全新世(10,000年內)以來曾經發生錯移之斷 層;第二類活動斷層則為晚更新世以來曾經發生錯移之斷層;對於部 份學者專家曾提出其為活動斷層,但於彙編時仍無法明確歸類者,則 暫時列為存疑性活動斷層。共列出51條活動斷層,其中第一類者9條, 第二類者15條,存疑性者27條(圖 2-95)。 經濟部中央地質調查所林啟文等5人(2000)以張徽正等4人(1998) 之活動斷層版本(圖 2-95)為基礎,彙整921震後最新調查資料,依下 列準則進行活斷層分類:

- (1) 第一類活動斷層(全新世活動斷層):
 - (a) 全新世(表 2-2) (距今10,000年內)以來曾經發生錯移之斷層。
 - (b) 錯移(或潛移)現代結構物之斷層。
 - (c) 與地震相伴發生之斷層(地震斷層)。
 - (d) 錯移現代沖積層之斷層。
 - (e) 地形監測證實具潛移活動性之斷層。
- (2) 第二類活動斷層(更新世晚期活動斷層):
 - (a) 更新世(表 2-2)晚期(距今約100,000年內)以來曾經發生錯移
 之斷層。
 - (b) 錯移階地堆積物或台地堆積層之斷層。
- (3) 存疑性活動斷層(第四紀活動斷層):有可能為活動斷層的斷層, 包括對斷層的存在、活動時代及再活動性存疑者。
 - (a) 將第四紀(表 2-2)岩層錯移之斷層。
 - (b) 將紅土緩起伏面錯移之斷層。
 - (c) 地形呈現活動斷層特徵,但缺乏地質資料佐證者。
 - (d)對於部分學者提出其為活動斷層,但編圖時仍無法依文獻資料加以明確歸類為前述二類者。
 - (e) 存疑性活動斷層未來經過進一步詳細調查後,可依新獲取之 資料再將其歸類為第一、二類活動斷層或非活動斷層。

在加入較新的調查資料並調整部份活動斷層之分類等級後,共列 出42條活動斷層(圖 2-96),包括台灣北部的10條斷層,中部的10條斷 層,西南部的9條斷層,南部的6條斷層,以及東部的7條斷層。屬於 第一類活動斷層有12條,第二類活動斷層有11條,存疑性活動斷層有 19條(林啟文等5人,2000)。



回 2-94, 石房一一世紀以來火苦性地展展兴位 1 註:黑色線段為中央地質調查所公布之42 條活動斷層位置 資料來源:饒瑞鈞, 2002

表	2-23:	世界各國	國以斷層	活動時代為	岛基礎的活	動斷層分類
---	-------	------	------	-------	-------	-------

地 質	時 代	時間	斷層活動	
笙曲勾	全新世	10,000年以來	活動性	
牙 四 《C	更新世	1,650,000年以來	潛在活動性	
第三	三 紀	65,000,000年以來	非活動性	

資料來源:林啟文等5人,2000

表 2-24:日本活斷層研究會的斷層活動度等級

	第四	紀以來的	平均滑移速	き 率(m/1000yr.))	
等	級	AA	Α	В	С	
平均滑移	;速率(S)	$100 > \mathbf{S} \ge 10$	$10 > \mathbf{S} \ge 1$	$1 > \mathbf{S} \ge 0.1$	$0.1 > S \ge 0.01$	
次州市広・ロナ江航区田市人,1002						

資料來源:日本活斷層研究會,1992

表 2-25:台灣的地震斷層

地震斷層	地震日期	地震規 模	斷層走向	斷層長度 (km)	*水平位移 (cm)	* 垂直位移 (cm)
梅山斷層	1906/03/17	7.1	N53~75°E	13.5	240	180
獅潭斷層	1935/04/21	7.1	N20~30°E	21	_	300
屯子腳斷層	1935/04/21	7.1	N60°E	20	200	60
神卓山斷層	1935/04/21	7.1	N20~30°E	10	_	60
新化斷層	1946/12/05	6.1	N70~80°E	6	200	76
米崙斷層	1951/10/22	7.3	N20~55°E	10	200	120
玉里斷層	1951/11/25	7.3	N20~30°E	43	163	130
瑞穗斷層	1972/04/24	6.9	N25°E	2.5	—	70
車籠埔斷層	1999/09/21	7.3	*	100	>500	980

資料來源:Hsu and Chang, 1979;李元希等5人, 2002



圖 2-95:台灣活動斷層分布圖(第一版)

資料來源:張徽正等4人,1998



圖 2-96:台灣活動斷層分布圖(第二版)

資料來源:林啟文等5人,2000

2.2.2.4. 地震活動與地表斷層之關連性

就世界上各構造形式的地震活動而言,在純粹走向滑移 (strike-slip)的構造環境下,地震或無地震伴隨之變形,多集中於走向 滑移斷層帶附近,分隔兩側較無變形之區塊。然在伸張或擠壓的構造 環境下,變形(無論有無地震伴隨)多分布在大區域和較分散的斷層帶 上;同時,各區塊因伸張而變薄,因擠壓而增厚,甚而促使先前存在 的構造或斷層再活動。台灣褶皺逆衝帶多屬擠壓環境,從台灣本島地 表活動斷層與地震分布相比較,其分布多不集中,很難分辨地震活動 與地表斷層是否有直接的關係。此等中、小規模地震之活動性最有可 能代表非均質區塊的次要內部變形,而較大規模地震(M>5)及其餘震

從1991年台灣全省地震觀測網更新至今的地震活動來分析,我們 大致發現兩個主震-餘震序列,也就是集集和池上主震-餘震序列, 可直接連繫地震活動與地表斷層之關係(圖 2-97)。集集主震區域的地 震分布形態明顯顯示斷坡-斷坪-斷坡(ramp-flat-ramp)之構造,亦 即,集集主震位於深度約10 km平緩之斷坪上,此斷坪在東西兩側之 延伸均為一向東高角度傾斜之斷坡。主震位置亦靠近10 km深度之斷 坪和向地表延伸至車籠埔斷層之斷坡的交界。而位於車籠埔斷層下盤 之地震活動則與集集主震之位置類似,多集中於一深度約10 km平緩 之斷坪或滑脫面(décollement)上(饒瑞鈞, 2002)。

另一例子則為池上地區之主震一餘震序列。根據饒瑞鈞(2002)的 研究,池上地區之地震為兩個地震序列之組合為2003年5月及2006年 5~6月。此地區之地震分布又與集集地震斷層有所不同,它雖亦有斷 坡一斷坪構造,然其斷坪卻位於20~25 km深度,向東傾斜角度約20°; 向淺部延伸則為兩段式,13~21 km向東傾斜42°,4~13 km向東傾斜 72°。此地震斷層在地表的延伸為池上斷層,而其在深部的延伸(20~25 km深)則應為增厚的島弧形態之海岸山脈之地殼底部—莫荷面 (Moho)(地殼與地函之分界面,亦稱莫荷不連續面)。

2.2.2.5. 潛在之盲斷層

所謂盲斷層,是潛藏在地表下沒有顯露於外的斷層,根據饒瑞鈞 (2002)之研究,除了集集和池上主震-餘震序列可直接連繫地震活動 與地表斷層之外,有一些明顯的地震序列無法直接連繫地震活動與地 表斷層。這些地震群如1993年12月大埔地震序列,及1999年10月嘉義 地震序列(圖 2-97)。它們的特色均為存在一向西傾斜約45°之地震斷 層帶。此斷層帶深度為10~15 km(大埔),10~17 km(嘉義);均於10 km 處停止,並無穿過地表,也並未與任何已知地表斷層相關。此等深部 盲斷層,一般均解釋為與先前存在的高角度正斷層的重新活動。

另一種形態的盲斷層為位於佳里及其外海和台南地區之地震 群。過去十年來,在這兩區域出現之地震活動特性為:地震震源主要 分布於7~16 km深度(佳里及其外海)和12~18 km深度(台南地區)。此兩 群地震並無如集集地震或嘉義地震有特定地震斷層面,而是地震活動 多集中在上述深度,極少發生於近地表6 km。此兩地震群之地震活動 形態非常類似車籠埔斷層下盤之地震活動,集中於上部地殼底部之滑 脫面。

2.2.2.6. 活動斷層之古地震研究

地震學家嘗試從過去的地震歷史記錄與斷層帶的挖掘研究,了解 斷層活動的時間與位移量,來推算長期以來地震發生的時間是否有規 律性,若具有規律性就以此推算下一次發生大地震的時間。雖然古地 震的研究也並非能準確預測地震發生的時間、地點與地震規模;但是 可以作為地震的預警;提供國家在執行重大建設之前有預期的規劃。 集集地震之後,台灣的地質學者全力的投入斷層的古地震研究,以下 就針對目前成果概述如后。

2.2.2.6.1. 車籠埔斷層

車籠埔斷層(圖 2-96)目前大致可以解析出5次的古地震事件(不含集集地震),發生的年代為西元1650~1520年、1270~1160年、

1060~1030年、570~400年、240~50年(Chen et al., 2007)。從上述的研究成果而言,車籠埔斷層每一次的地表破裂的隆起高度約1~2.5 m, 這個高度變化大致與集集地震的隆起高度相當。而由這些古地震的資 料分析結果,研判古地震規模可能都在7.0以上。另外,由集集地震 的前三次(N-3)古地震,至集集地震時間間距來看,每次地震相距時 間約300~400年。另外可以由古地震的特性可以推演下次發生大地震 的可能發生時間約在西元2340±90年。

2.2.2.6.2. 新城斷層

新城斷層(圖 2-96)從槽溝剖面以及野外剖面來看,都已截切至紅 土階地的地表以及未紅土化階地,而最近一次的大地震發生約於300 年以內(碳14定年),比對台灣歷史地震紀錄,此期間在桃竹苗地區發 生的大地震共有三次,分別為1811年、1815與1881年,這些地震的受 震範圍均可以遠至福建及台灣南部,並於桃竹苗地區造成重大傷亡, 若以受震範圍評估地震規模,1811年與1815年地震可能都屬於規模7 以上的大地震(徐明同,1983;鄭世楠與葉永田,1989);1811年與1815 年兩者之一可能與新城斷層最近一次的活動有關(陳文山等14人, 2003b)。

新城斷層的長期活動性或週期尚未有足夠的資料,但以目前資料 可評估最近一次地震活動造成的地表抬升量,約為1.3~1.85 m。此種 規模的地表變形量可以比擬於集集地震的地表變動,因此新城斷層上 次活動的地震規模可能大於7.0。

2.2.2.6.3. 九芎坑斷層

九芎坑斷層(圖 2-96)是由卓蘭層逆衝至六雙層、紅土礫石層及階 地礫石層之上。從斷層傾角以及其與觸口斷層的關係來看,九芎坑斷 層可能是觸口斷層(圖 2-96)斷坡向前(向西)的分枝斷層。從斷層截切 近代階地沉積層以及晚更新世(表 2-2)沉積層(碳14定年約47,100± 1,750BP; BP為Before Present之縮寫)的關係,顯示九芎坑斷層應屬於 第一類的活動斷層(陳文山等11人,2003a)。

2.2.2.6.4. 新化斷層

新化斷層(圖 2-96)從研究中共發現三次的古地震紀錄,最早一次 形成時間約在西元前7,500~6,600年,第二次發生時間約為西元前 20~360年。第三次就是西元1946年。斷層結構來看屬於右向平移斷 層,且斷層已經切穿至地表(陳文山等9人,2004a)。從淺層震測剖面 以及野外調查顯示,新化斷層帶是由數條正斷層構成寬約數百公尺的 變形帶,表示長期以來,新化斷層帶是呈現拉張的構造環境(石瑞銓, 2003;黃勝群,2004)。因此,目前針對新化斷層的古地震研究僅有 一處槽溝,所呈現的古地震事件,尚不足以代表全新世(表 2-2)以來 完整的古地震時序,因為每次事件產生的地表斷裂位置,極可能不在 同一斷層,因此以目前之研究成果,尚無法呈現完整的古地震層序。

2.2.2.6.5. 花東縱谷斷層

花東縱谷斷層之各個區段(或區塊),由槽溝地層與構造特徵分析 結果可知,槽溝內連同1951年所紀錄之地震事件共計有三次,而斷層 兩側地層高差約為2.5 m。第一次地震事件為1951年11月花東地震所 造成的地表破裂,地表隆起高度為0.75 m。第二與第三次的地震時間 都相當年輕,發生在西元1600年以來,地表隆起高度1.75 m,預測其 地震規模在7.0以上(陳文山等12人,2004)。大約400年以來,花東縱 谷斷層(中段地區)共發生了三次大地震,可以想見大地震的時距約為 百年左右,其週期非常的短。所以花東縱谷斷層是目前須更進一步進 行評估的斷層。

SNFD2009



圖 2-97:台灣地震震央分布與地震剖面圖

資料來源:饒瑞鈞,2002,P46~47

2.2.3. 地殼上升與剝蝕作用

地殼垂直活動(上升/沉降)與剝蝕作用為一長期且漸進之作用。而 此作用所累積之效果,將使處置於地底下具放射性之用過核子燃料所 在位置深度漸淺或漸深,而逐漸進入或逐漸遠離人類生活圈,進而影 響與威脅人類之生活。因此,在考量長期處置之時間效應時,必須重 視地殼垂直活動與剝蝕作用此兩種營力對地層之影響。

2.2.3.1. 第四紀時期台灣之地殼垂直活動

台灣地處之西太平洋地區,其大地構造環境係由三個主要的板塊 鑲接而成,即太平洋板塊、菲律賓海板塊及歐亞大陸板塊(詳2.1.1.3 節)。台灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊的縫合線上。就台灣而 言,此縫合線即為花東縱谷,縱谷以西的中央山脈及其西之麓山帶與 西部濱海平原(詳2.1.1.3節)屬於歐亞大陸板塊的邊緣部份;縱谷以東 為菲律賓海板塊的西緣;於上新世(表 2-2)中期菲律賓海板塊與歐亞 大陸碰撞,引發了台灣地質史上一次大規模的造山運動,將原本位於 海平面以下台灣區的沉積物隆起,並開始接受侵蝕作用。至更新世早 中期造山運動違於高潮,陸地隆升更為迅速,台灣島大部份地區已露 出水面,由於陸地隆升之速率大於侵蝕速率,造成今日有高達3,000 m 以上的山脈,並造就了今日的台灣島。至今,菲律賓海板塊仍以每年 約7 cm的速度向西北方向移動,對歐亞大陸邊緣產生持續性的擠壓。

台灣並不是每個地區都是隆升。配合既有的隆升速率與地形,無 海階發育或沒有留下古海水面證據的侵蝕性海岸,如東北海岸、蘇花 海岸及台東、大武海岸,推測幾千年以來(或更久)應是處於緩慢隆升 (甚至沉降)的狀況。至於平原地區,則大都是以沉降為主。

綜合前人對台灣於此長時間尺度範圍內之地殼上升與沉降特性 研究,可綜整獲得下列地殼上升與沉降定量資料:

(1) 台灣在更新世(表 2-2)造山運動時期的隆升速率約在5 mm/yr以上(詹新甫, 1985)。

- (2) 劉聰桂(1982)以核分裂飛跡法,測定中央山脈在更新世造山運動
 高潮時期(0.58~0.128 Ma前)之平均隆升速率達每年10.7±2.2
 mm;而最近六十萬年的平均隆升速率每年約8.9±1.9 mm。
- (3) 彭宗宏等(1977)的測定,恆春半島、台南一帶及海岸山脈的平均 上升率自9,000年以來大約都是每年5.0±0.7 mm;至於台灣北部海 岸一帶,在1,500~5,500年前的隆升率却非常小,不大於每年2 mm;但在5,500~8,500年前,隆升率則高達每年5.3 mm。
- (4) 謝孟龍(2005)推算台灣島各海岸全新世的構造隆升、沉降速率(圖
 2-98)結果顯示:
 - (a) 上升地區: 北海岸、竹苗海岸約為每年上升1~2 mm;恆春半島局部區域 可達每年3~4 mm;西南丘陵外緣與花東海岸南段上升最快皆 達每年5 mm以上(甚至高達每年1 cm)。
 - (b) 下降地區:

蘭陽溪平原是全島(可能為全球)全新世沉降最快的平原,每 年可達1 cm以上;屏東平原所屬的高屏溪出海口,其沉降速 度可達每年5~6 mm;濁水溪平原的構造運動較穩定,每年沉 降速率在1~2 mm;嘉南、高雄平原顯著受到構造運動影響, 形成一系列的向斜與背斜(台地),向斜地區構造沉降速率每 年可達3~4 mm(圖 2-99)。



圖 2-98:台灣全新世構造隆升速率(不含平原及山區) 資料來源:謝孟龍,2005,P57



圖 2-99: 嘉南、高雄平原構造隆升(正值)及沉降(負值)速率 資料來源: 謝孟龍, 2005, P56

2.2.3.2. 當今台灣之地殼垂直活動與剝蝕作用

陳惠芬(1984)應用聯勤總部測量署於1914~1979年間,台灣1,543 個三角點測量的結果,計算其高程差來代表地盤的升降量,研究台灣 現今地盤升降的情形,其結果如圖 2-100所示。圖中顯示了台灣島除 了四周沿海有幾個沉降地帶外,全島都在上升。

台灣從1990年起,由中央研究院地球科學所在全島佈設一百多個 GPS觀測站,並運用此高精度GPS設備來進行地殼變動(水平、垂直方 向)之觀測研究。郭隆晨、余水倍(2002)根據1993~1999年的觀測資料, 將台灣地盤升降情形,以垂直變動速度場來表示(圖 2-101),其中上 升率較大的區域,集中在中央山脈玉山以南到高雄茂林一帶,上升率 約5 mm/yr;最大上升區則在南橫公路附近的梅山至天池地帶。另一 個上升區域,則出現在中部地區中央山脈附近,即梨山、小雪山、虎 子山、丹大林區及合歡山所環抱而成地區,平均上升速率約5 mm/yr。

下降快速的地區出現在雲林、嘉義沿海地區,平均下降率約10~70 mm/yr,最大下降點出現在西部沿海,雲林貓兒干的沉降速率約86 mm/yr;往南在口湖附近則以每年約62 mm之速率下降;再往南,則 是嘉義布袋前東港偵測到65 mm/yr的下降率。再者,於雲林北港的追 蹤站也有35 mm/yr的年下降率。另外,在宜蘭平原三塊厝、宜蘭市等 地也有約10 mm/yr的下降速率。

由三角點檢測成果算出之台灣地盤的升降(圖 2-100),和高精度 GPS來進行台灣地殼垂直變動之觀測研究成果(圖 2-101)作一相對性 比較,發現台灣當今之地盤升降型態,在空間上之分布大致趨於一致。

剝蝕作用(denudation)包括風化作用(weathering)、塊體移動(mass movement)、侵蝕作用及搬運作用(transportation),總效果是使地表物 質不斷被移走,地面逐步下降,直至外力作用消失或造成平地為止。 而影響剝蝕速率的因素極多,包括陸地抬升速率、岩性、氣候、雨量、 地形坡度、地表植物覆蓋情形等。



圖 2-100:台灣地盤升降率等值線圖

資料來源:陳惠芬,1984,P131



圖 2-101:台灣地區垂直運動速度場 (澎湖S01R參考站速度為零,等值線間格5mm/yr) 資料來源:郭隆晨、余水倍,2002,P69

台灣地區地形坡度陡急,雨量豐沛,風化作用盛行,這些條件均 促使地表接受快速的剝蝕。圖 2-102乃李遠輝(1976)推測台灣全島陸 地物理性剝蝕速率之成果;虛線左側地區年侵蝕速度較低,大部分在 3 mm/yr以下;虛線右側(山地部份)的侵蝕速度平均5.5 mm/yr,此與 Dadson(2004)對台灣山區之30年期間(1970~1999)之侵蝕速率研究成 果(圖 2-103),即標高大於500 m之山區平均侵蝕速率為6 mm/yr相當 吻合;另就長時間範圍尺度,利用台灣東逆衝斷層帶及變質岩山區代 表現在造山運動(≦5 Ma)之核飛跡磷灰石之定年樣品,量測出在中央 山脈東翼之剝露率為3~6 mm/yr(圖 2-104),此與前述山區平均侵蝕速 率5.5~6 mm/yr之值仍相當一致,而與世界各地相比較,本島山地侵 蝕速率仍顯得非常地高。

由上述諸多資料顯示,台灣陸地上昇速率自更新世(表 2-2)末期 造山運動高潮時期結束後,已有逐漸減緩的趨勢,而以最近的上昇速 率與侵蝕速率相當,造成近期台灣陸地之高度無顯著之變化。若以全 新世之台灣海岸地區地殼之上升/沉降速率在-10~+5 mm/yr範圍值估 算,則未來十萬年台灣海岸地區之地殼高度變化在-1000~+500 m間。 日本所估算其國內大部份地區,於未來十萬年之地殼上升低於+100 m (JNC, 2000a)。台灣現階段仍有部分處於地殼活動劇烈之區域,意即 未來在用過核子燃料深層地質處置場選址時,仍應避開構造活動及地 殼變動劇烈的地區,並對處置場址所在局部區域之上昇/沉降速率與 侵蝕速率做詳細的調查、監測與評估,來估算場址歷經長期上升/沉 降與侵蝕之累積作用後,不會暴露而影響生物圈之最佳可設置深度。



圖 2-102:台灣侵蝕速率圖

資料來源:詹新甫,1985,P16



圖 2-103:台灣1970-1999年期間侵蝕速率圖

註:黑色箭頭表由大於400km² 流域區內諸河川懸浮質含量,懸浮質含量係由靠 近海岸之水文測站觀測記錄。黑色圓點為水文觀測站;黑色三角點係代表水庫; 灰色陰影區域則無觀測資料。

資料來源:Dadson,2004,P74


圖 2-104:台灣現代造山運動(≦5Myr)時期之核飛跡剝露率圖 註:虛線為剝露率等值線;單位:mm/yr 資料來源:Dadson,2004,P80

2.2.4. 火成活動

台灣地區位於環太平洋火山帶(或稱太平洋火環-Circum-Pacific Ring of Fire)之西隅,自中生代(表 2-2)以來發生過數次火成活動,此 區火成活動的歷史,可追溯到主要基盤岩形成、重要構造事件、乃至 近代火山活動及地熱資源。火成活動乃地下深部(數十公里至數百公 里處)產生的岩漿,溫度高達650~1,300 ℃,上升到地表發生噴發作用 形成火山岩,或者是侵入岩層中經岩漿冷卻固結形成深成岩。火山岩 因快速冷卻的關係,結晶霏細,多玻璃質及氣孔,以熔岩流、碎屑、 角礫及火山灰為主要產狀;深成岩因慢速冷卻,結晶粗大,以岩體、 岩株、岩脈、岩床等為主要產狀,常為大陸地殼深部的主要組成。

在中生代(表 2-2)時期,西太平洋火環的火成活動(包括日本、韓國、大陸東南、台灣、菲律賓、越南等地),與古太平洋板塊與歐亞 大陸板塊的相互運動有密切關係。在新生代時期,台灣地區的火成活 動則與南中國海板塊隱沒至菲律賓海板塊,以及菲律賓海板塊隱沒至 歐亞大陸板塊有關。

火成活動對用過核子燃料處置場址的選址,是一個重要考量因 素。Smith and Keenan(2005)針對美國雅卡山處置場所進行火成活動 的研究指出,根據美國環保署(USEPA)的準則,美國能源部(USDOE) 以災害發生的機率來評估火成活動的影響,若在1萬年內未發生1次噴 發活動,則無須考慮火成活動對處置場的影響。2004年美國法庭判定 環保署以1萬年為標準,需重新檢討,因此USDOE可能需確保處置場 的安全達100萬年。除了火山活動發生的機率外,火成活動(包括侵入 及噴發活動)的時空分布、岩漿特性、岩漿來源深度及成因等都需納 入評估的因素。

2.2.4.1. 火山活動

岩漿在地表的噴發活動,除了噴出高熱的熔岩流、大小不一火山 碎屑物、火山灰、火山氣等現象外,還伴生與火山活動相關的地震, 乃至地殼變動。許多火山岩地層都是火山活動的殘跡,甚至有保留火

SNFD2009

山形貌的,若依其活動年代的記錄分類,可分為活火山(active volcanoes)、休火山(dormant volcanoes)及死火山(extinct volcanoes)等 三類。傳統上,以歷史記錄或一萬年內有噴發活動的火山為活火山, 但現今認為活火山的定義,可根據火山監測結果一若顯示火山地底下 可能存在岩漿庫,且正在產生岩漿或進行岩漿遷移的活動者,可歸類 為活火山;休火山為有潛在噴發可能的活火山,也可能是年輕的死火 山,需進一步調查;至於死火山則為地底下岩漿庫已不存在,無噴發 活動之虞(Szakacs, 1994)。

台灣的火山分布依時空、板塊運動的作用,有明顯的侷限性。陳 正宏(1990)根據火成岩分布、岩性及板塊構造體系的差異,將台灣地 區新生代(表 2-2)主要火成岩分成三個岩區:北部岩區、東部岩區及 西部岩區(表 2-3),但此分區不包括中央山脈的變質火成岩,如綠色 岩、片麻岩及角閃岩等。中國東南及台灣新第三紀以來(約22 Ma前至 今)火山活動發生的地區及其年代範圍參見表 2-26,顯見絕大部份地 區火山活動歷史久遠,但值得注意的是台灣北部及台灣東南之鄰近地 區,有部份年輕火山的噴發記錄。

2.2.4.1.1. 北部岩區

台灣北部及外海小島一系列之晚上新世-第四紀(表 2-2)的火山 活動,構成所謂台灣北部火山活動帶(Northern Taiwan Volcanic Zone,NTVZ),主要分布區域(圖 2-105)為大屯火山群、基隆火山群、 觀音山、草嶺山及東北外海之離島-彭佳嶼、棉花嶼、花瓶嶼、黃尾 嶼、赤尾嶼及龜山島(陳正宏,1990)。台灣北部火山活動約自2.8 Ma 前開始,大約是晚上新世時期,並持續至約十幾萬年前仍有活動的記 錄。其中較早活動的岩體為東北外海的赤尾嶼與棉花嶼,以及陸上的 大屯火山群,不同的定年方法顯示三者皆約在同一時期噴發(約 2.6~2.8 Ma)。

另外,由地下鑽井資料推測,台灣東北部外海約在晚上新世(表 2-2)時期有廣泛的火成活動,其火成岩分布的範圍甚廣,約在棉花嶼 至黃尾嶼之間稍偏南之海域。較為年輕的噴發活動分布在外海的黃尾

嶼、彭佳嶼、以及陸上的大屯火山群、觀音山和草嶺山岩體,除大屯 火山群外,最晚的噴發時間皆持續至約20萬年前,大屯火山群中則有 年輕於20萬年前的噴發記錄。除赤尾嶼、黃尾嶼和草嶺山外,其餘各 岩體自最早的噴發時間以來皆持續活動一段時間,惟最長的時期至今 不過稍大於2百萬年,仍屬極短的火山活動時期。噴發時間和岩體的 分布並沒有呈現一定的關係,在時空的關係上,屬隨機的分布,且在 普遍近20萬年前(甚或更為年輕)仍有噴發記錄的火山活動(王國龍, 2000)。茲將各火山岩之岩性特徵簡介如下:

大屯火山群位於台灣最北端,是一個由廿餘座大小不等的火山及 火山丘所構成的地質單元,與台灣北部一大片由沉積岩組成的地質環 境截然不同,這個區域所有相關的火山體統稱為大屯火山群,其分布 範圍大致以崁腳斷層(圖 2-95)、淡水河及北部海岸線所包絡者為界。 大屯火山群由上新世(表 2-2)至更新世的火山碎屑岩及安山質(少部 分為玄武質)熔岩所組成,座落在中新世之沉積岩層之上,並且覆蓋 了金山斷層(圖 2-95)。這些火山多屬層狀火山,亦即各主要火山體之 中,常有火山碎屑岩與火山熔岩交互出現,不僅如此,各亞群的火山 岩也彼此交錯,使得火山體的結構十分複雜。本區多數的火山碎屑岩 厚度約在數公尺至十餘公尺之間,顯示火山初期的噴發並不很劇烈, 而火山熔岩之厚度約在數公尺至十公尺之間,因此後續供應之岩漿相 當豐沛;不論碎屑岩或熔岩常可發現受硫氣或熱液的影響產生強烈的 換質。由於定年學的限制,大屯火山群的噴發時間一度曾被認定為老 於20萬年的休火山,但台北盆地鑽井發現約1萬年左右沉積層中,夾 有源於大屯山噴發的火山灰層,以及伴生火山活動的森林大火殘跡 (Chen and Lin, 2002)。此外,現代溫泉氣化學成份分析(謝佩珊, 2000;楊燦堯等6人,2003),及地球物理微震監測(Lin et al., 2005), 都顯示大屯火山群下方地殼深處仍有岩漿庫存在(Chen and Shen, 2005) •

基隆火山群主要包含五個火山岩體,即基隆山、武丹山、本山、 草山和雞母嶺,前三者屬侵入岩,後兩者屬噴出岩;此外尚有較小規 模者出露於金瓜石附近(如新山),在九份及武丹坑東南亦有潛伏之安

山岩。另外位於基隆東北方6km海上的基隆島,在地理位置、噴發時 間及岩性上,亦與上述岩體十分相近,故可包含在本火山群之中。這 些火山岩體絕大部分為含有石英顆粒之安山岩,陳正宏(1990)認為這 些石英有部分可能並非源於基隆火山群之安山質岩漿。整個基隆火山 群之岩性均大同小異,其後火山作用的熱液活動形成金瓜石礦床,為 東南亞第一大金銅富集的礦床。

觀音山是台灣北部火成岩區中最西北側之火山單元,以淡水河與 大屯火山群相隔,基本上為單一中心噴發的複式火山。以火山地形的 觀點,觀音山顯然是一個不完整的火山,但依理論推算仍可回復成為 一個標準的火山錐體,火山外形不完整的主要原因,除了受侵蝕之 外,研判係受劇烈火山爆裂的影響,炸燬了火山錐體。火山岩露頭除 觀音山主體外,尚有含黑雲母之安山岩脈出露於觀音坑,以及鹼長基 玄武岩出露於萬年塔和福隆山。

草嶺山位於桃園大溪南方4 km處,是一個由火成岩構成的小山 頭,與上覆之第四紀(表 2-2)台地礫石層,及下接之上新世二鬮層均 呈不整合接觸關係。所產出的火山岩屬玄武岩類的白榴基玄武岩 (absarokite),即岩石的基質中除有鹼性長石之外,甚至含有白榴石 (leucite),為一種鉀含量相當高的玄武岩,經常發現挾有以白色砂岩 為主的沉積岩捕獲體(xenolith)。根據前述層位上的關係,陳正宏 (1990)從白色砂岩捕獲體中之鋯石,卻得到0.9±0.5 Ma之核飛跡定年 結果,推測此應代表砂岩鋯石重新癒合之時代,可能與火山岩噴發之 時間相去不遠。

彭佳嶼、棉花嶼、及花瓶嶼為三個座落在台灣東北方海上之火山 島嶼,距基隆約55 km。彭佳嶼有凝灰岩、集塊岩、火山碎屑岩和熔 岩,另外可以看到有明顯的岩脈貫穿至頂上,故判斷彭佳嶼應至少有 兩次的噴發。棉花嶼面積比彭佳嶼小很多,大致只能看到一層熔岩, 其上有些浮石凝灰岩之堆積。花瓶嶼可能亦為接近玄武岩質的輝石安 山岩。黃尾嶼是我國最東北方島嶼一釣魚台群島中唯一的火山島,整 個島嶼由玄武岩所構成。

地區		主要火山活動的距今年代(Ma)			
浙江*1			10.5~2.5		
福建內帶*1		5.0~0.7			
福建外带及中外带(含金厚	19.2~11.7			
台灣及台海一帶	北部	岩區*2	2.8~<0.007		
	東部岩區*1,3		24.55~0.02		
	-	公館*1	23.0~16.3		
	西部	關西-竹東和板山*1	14.1~7.1		
	叶岩 區	澎湖群島*1	17.6~8.2		
沖繩海槽*2					
吕宋島弧北段火山!	島鏈*	3	22.4~0.02		
南中國海*3		29~16			
雷瓊地區*1		7.5~<0.01			
中南半島*1		3 Ma左右最為鼎盛(16 Ma開始)			

表 2-26:中國東南及台灣地區新第三紀以來火山活動年代範圍

資料來源:*1 李寄嵎,2003

*2 王國龍,2000

*3 Yang et al., 1996



圖 2-105:台灣北部火山帶(NTVZ)活動的時空分布圖 資料來源:王國龍,2000

龜山島位於宜蘭東北約20 km之海中,是一個由輝石安山岩所構 成的火山島,東西最寬距約3 km,南北寬約1 km。略分為頭、中、尾 三部份,頭部係屬殘留之崩陷火山,由厚200 m之兩輝安山岩(斑晶礦 物可同時見到直輝石與斜輝石)質集塊岩組成,仍有旺盛的熱液作用 之後火山活動。從南岸之崖壁可觀察到五層由熔岩和集塊岩交迭的層 序。根據陳于高等人(Chen et al., 2001)採集龜山島火山熔岩中的沉 積岩捕獲體,進行石英的熱螢光定年分析,發現龜山島火山噴發年代 約在7,000年前。宋聖榮(2006)觀察龜山島火山岩的產狀,主要是熔岩 流與火山碎屑岩的互層,含有熔岩丘。熔岩流有渣狀熔岩、塊狀熔岩 和塊熔岩,並無枕狀熔岩的出露,且熔岩的表面為紅棕色,這顯示龜 山島的熔岩流可能是陸上噴發的產物。根據前述定年層位岩層上覆兩 層熔岩流及火山灰,宋聖榮(2006)認為7,000年來發生過四次噴發活 動,屬於活躍的現生火山。鍾孫霖等人(Chung et al., 2000)研究龜山 島熔岩流的岩石化學及岩漿成因,發現屬於隱沒帶形成的岩漿,噴發 在弧後張裂的盆地中。這些熔岩具有高鎂安山岩的岩石化學特徵,源 於地函物質和地殼的部份融熔作用(朱秋紅,2005),現今地球物理微 震分析,亦顯示龜山島下40km處有岩漿發生,並有反映岩漿通道的 高Vp/Vs帶連至龜山島(Lin et al., 2004)。

综合上述北部岩區火山岩的時空分布,顯示大屯山火山群及龜山島兩地,最新研究證實具有活火山的特徵,而相關近海活火山噴發的歷史記錄,也受到關注(Chen and Shen, 2005),在世界火山名錄中, 台灣鄰近海域有5處火山噴發的報導(圖 2-106)。



圖 2-106:台灣海域歷史火山噴發位置圖

縮寫說明:QRVF-第四紀琉球火山前緣;NTVZ-北台灣火山帶;OT-沖繩海槽; NPP-核能電廠;K-龜山島;Y-Yonaguni島;I-Irimote島;H-Hsiaolanhsu島。編號 根據Simkin and Siebert (1994)

資料來源: Chen and Shen, 2005

2.2.4.1.2. 東部岩區

東部岩區包括整個海岸山脈、綠島、蘭嶼及小蘭嶼;另外,散佈 花東縱谷的利吉層火成岩塊,屬於海洋板塊蛇綠岩系岩層,受弧陸碰 撞板塊運動影響形成的移置岩塊,不在火成活動討論範圍內。

海岸山脈有一大部分為安山岩質岩層,稱為都巒山層,以安山岩 質集塊岩為主;另有一些深成岩及熔岩,稱為奇美火成雜岩(陳正宏, 1990)。海岸山脈以南之綠島、蘭嶼及小蘭嶼等火山離島,岩性與都 巒山層相似(圖 2-107)。東部岩區為南中國海板塊隱沒至菲律賓海板 塊下,形成的火山島鏈,視為北呂宋島弧的一部份。北呂宋島弧可分 為東西兩個火山島鏈,在北緯20°以北合併為一,東邊島鏈較為年輕 (大多屬於第四紀火山,圖 2-108),包括東部岩區的綠島及小蘭嶼; 西邊島鏈較老,地勢較平緩,有厚層石灰岩,包括東部岩區的蘭嶼(圖 2-108; Yang et al., 1996)。

由於弧陸碰撞的關係,屬於北呂宋島弧最北端的海岸山脈,已經 脫離原來的隱沒帶,與台灣東部大南澳片岩帶縫合,應不致再發生火 山活動。但屬於呂宋島弧東邊年輕島鏈的綠島及小蘭嶼,則尚處於隱 沒帶中,受到隱沒作用影響,仍具有潛在噴發活動的可能性。



圖 2-107:台灣東部岩區火成岩時空分布圖 註:方框內為K-Ar、Ar-Ar定年資料,單位為Ma(百萬年)。 資料來源: Richard et al., 1986, P88



圖 2-108: 呂宋島弧火山岩噴發活動的時空分布 註:方框內為K-Ar、Ar-Ar定年資料,單位為Ma(百萬年)。 資料來源: Yang et al., 1996

2.2.4.1.3. 西部岩區

西部岩區與北部岩區無地理上的區隔,但西部岩區岩漿活動以玄 武岩為主,主要分布在中新世(表 2-2)地層中,由東北向西南可分為 (1)公館地區,(2)關西一竹東及角板山地區,以及(3)澎湖群島。西部 岩區火山岩分布參見圖 2-15及圖 2-16,其中澎湖群島的花嶼屬於變 質火山岩類不在火山活動討論範圍。

澎湖群島的地形,是以玄武岩熔岩流形成的熔岩平台,由熔岩流 冷卻形成的柱狀節理相當發達,呈現出以方山為主的地貌。澎湖本島 海拔高度為56 m,白沙島為42 m,西嶼為58 m,地勢有由南往北漸為 低緩的趨勢,保有中新世(表 2-2)火山熔岩流噴發活動之原始地形, 部份近岸地區可見全新世高海水期造成的海蝕洞、海蝕崖及海蝕平 台,以及低地濱海相堆積的全新世地層所形成的沙灘、沙洲及礫灘。 在漸新世至中新世時,此區地處的澎湖台地為台灣海峽的高區,但在 一千七百萬年前至一千五百萬年前,中新世全球大海進的最高潮,此 區構成了濱海相的沉積環境。及至一千五百萬年前至一千萬年前之 間,為全球海水面大海退的時期,因此在最後期熔岩流噴發時,此區 已屬於陸相沉積環境(Lin, 2001)。

澎湖群島地下地質方面,根據馬公、白沙及西嶼等地近三十口深 度達150 m附近的鑽井資料顯示,地表下有多層厚數公尺至十公尺的 玄武岩,間夾數公尺至數十公尺厚的砂質、凝灰質或泥質沉積層。在 馬公、白沙及西嶼地區,在中新世(表 2-2)時期受到半地塹張裂系統 的影響,玄武岩噴發亦順著約略北東向的分布,以白沙為核心有一千 二百萬年前熔岩流帶的分布,兩側的西嶼與馬公則有一千萬年前至八 百萬年前熔岩流的分布(李寄嵎,1994)。此外,中油公司於1966年於 白沙島進行的899 m通樑一號井鑽探所取得的資料,為此區目前最完 整的地下地質資料,可分成三段(曹恕中等4人,1999):(1)井下0~320 m間有兩層,分別厚約60 m(0~60 m間,約為8 Ma前噴發)及70 m(250~320 m間,約為17 Ma前噴發)的玄武岩,其間夾有凝灰岩質、 泥質或頁岩質沉積岩及薄層玄武岩。(2)井下320~503 m間的泥岩及泥

質砂岩互層,依所含有孔蟲及石灰岩化石資料,地層年代可歸為中新 世早期。(3)井下503~899 m經熱液蝕變的中生代砂岩及粉砂岩,間夾 一段厚約40 m的斑岩(675~715 m間)。因此,目前馬公、白沙及西嶼 等地,諸多鑽井鑽取的150 m深度的沉積岩類,多為中、晚中新世(表 2-2)約17~8 Ma前之間沉積的地層。

台海地區的盆地發育,由北至南,包括大陳島、東引島、南日島、 澎湖等地塹形式發育的盆地,多屬張裂型盆地(rifting basin),自古新 世(表 2-2)以來即有零星的火山岩體存在,利用氫一氫同位素定年法 系統性的分析噴發年代,並綜合陸上及井下的定年資料顯示,台灣西 部與鄰近海域盆地內的火山活動,主要出現在晚古新世一晚始新世 (57~38 Ma)與中新世(21~6 Ma)(李寄嵎,2003)。

根據區域大地構造的研究,台海一帶位於穩定歐亞大陸板塊西緣 的被動大陸邊緣,根據在鄰近海域第三紀(表 2-2)地層的鑽井資料與 震測剖面顯示,此區域第三紀地層的形成,主要受到晚白堊紀以來, 長期張裂構造伸展與盆地沈陷的發育所控制,而未受到上新一更新世 台灣弧陸碰撞運動的影響(Lin, 2001)。但依據澎湖地區斷層的古應力 分析顯示,在中新世為張裂型應力系統,而在上新一更新世轉為壓縮 應力系統(Angelier et al., 1990)。

從更宏觀尺度來看,西部岩區火山活動,屬於中國東南沿海及台 海地區在第三紀(表 2-2)以來,普遍發生以玄武質岩類為主的大陸內 部張裂環境火山活動的一部份,甚至與南中國海的擴張,及印澳和歐 亞兩大板塊的碰撞等構造運動有密切關係。自白堊紀以來,中國東南 及台海地區之大地構造型態,即由原來受古太平洋海板塊隱沒作用的 之擠壓環境,轉為張裂環境(Teng and Lin, 2004),從大陸岩石圈內部 產生拉張現象,產生一系列大陸內部張裂盆地及火成活動(圖 2-109),逐漸往南推進的結果,最後在漸新世於大陸東南大陸岩石圈 邊緣,發生南中國海的張裂活動,以及遍佈歐亞大陸東部的第三紀玄 武岩噴發活動(Chung et al., 1997)。

綜合現有的定年資料,可將中國東南及台海地區第三紀(表 2-2) 火山活動,各地區岩漿活動的豐度隨時空演變的關係展現如圖 2-110

所示。根據台灣西部岩區玄武岩類之定年研究,近十餘年來經由鉀-氫定年法系統性的分析,已確証應屬中新世噴發的產物(李寄嵎, 2003),故台灣西部新第三紀的大陸板塊內部玄武岩類應在中新世 時,活動最為頻繁。若就中國東南岩區之新生代玄武岩類而言,新第 三紀之中、晚期亦為噴發最旺盛的時期;綜合而言,可歸納以下列特 點:

- (1)各地主要的火山活動都在南海擴張晚期,或是停止擴張之後發生。前者以台灣西部麓山帶公館期火山岩,及福建外帶火山岩為代表;其餘地區均在南海擴張停止後,才有大量玄武岩噴發。
- (2)大陸東南及台海一帶火山活動之初始噴發年代來看,大致上有由南至北,由東向西有逐漸年輕的趨勢。而火山活動停止的時間,亦具有上述之規律性。
- (3) 在大約12 Ma開始,台灣附近受到弧陸擠壓與碰撞效應的影響 (Teng, 1990),區內張裂作用陸續發生停滯,並轉趨閉合,從而 影響各區的火山活動,在晚中新世(表 2-2)結束時,台灣海峽一 帶的張裂活動及伴生火山活動即告終止。因此,浙、閩地區火山 活動終止與遷移的關係為(圖 2-110):在東西方向係從福建外帶 及中外帶(~12 Ma)最先結束,岩浆活動向西側之福建內帶(0.7 Ma)遷移;而在南北方向則是從靠近碰撞區之福建外帶(~12 Ma) 最先終止,然後向北到浙江外帶之臨海(4.6 Ma),最後再往西北 方向之內帶的嵊縣(3.5 Ma)及內帶的諸暨(2.5 Ma)推進,有遠離台 海一帶的趨勢。



圖 2-109:大陸東南及台海一帶晚白堊紀至新生代火山岩分布圖 資料來源:李寄嵎,2003



圖 2-110:大陸東南及台海一帶第三紀玄武岩分布時空演變圖 資料來源:Hoa et al., 2003

2.2.4.2. 温泉及地熱活動

台灣地區與第四紀(表 2-2)火山活動有關的溫泉及地熱活動,以 大屯火山群區最為明顯,其分布呈一狹長地帶並受地層與斷層帶所控 制。火山活動之後,殘餘之岩漿庫上方仍保有高溫,地表水滲入地下, 流經岩漿庫上方,被加溫之後即成熱水,並儲存在五指山層砂岩孔隙 或裂隙之內,小部分熱水順沿斷層帶或岩層裂隙所形成的通道,上升 至地表,形成溫泉或噴氣孔。噴氣孔的形成條件為高溫熱水(>100 ℃)上升至地下水面時汽化,所產生之蒸汽繼續順沿裂隙上升至地 面,而產生噴氣現象。一般噴氣孔的蒸汽溫度與當地水的沸點相同, 約在98~100 ℃,但是大油坑地區主要噴氣孔噴出過熱蒸汽,溫度高 達120~130 ℃(魏稽生,2000)。如前節所述,現今地球物理微震監測 及溫泉氣地球化學分析,均證實大屯火山群地下岩漿庫的存在。

在清水及土場地熱區,地球物理微震分析(Lin et al., 2001),及地 熱噴氣和溫泉氣的地球化學分析(謝佩珊, 2000),亦證實該地區地熱 及溫泉來源,與地下岩漿庫有密切關係。龜山島海底也有旺盛的地熱 及熱液活動,而清水及土場地熱活動的地體構造後期演育的張裂條 件,與宜蘭外海的龜山島所處的張裂盆地,均被認為是沖繩海槽張裂 所影響;目前發現菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸下的隱沒作用,導致 龜山島火山作用的岩漿生成(朱秋紅, 2005),龜山島下方地殼深40km 處的岩漿庫源區(Lin et al., 2004),可能是此地區溫泉及地熱活動的 主要來源。

2.2.5. 氣候變遷與海平面變化

利用深厚岩層的隔離阻絕特性,並採用「多重障壁」概念建置之 深層地質處置場,因所涉及的時間尺度長達萬年以上,此期間穩定的 地質環境,為決定處置系統是否能發揮預期阻絕功能的重要因素之 一,而「氣候變遷與海平面變化」則為影響與威脅處置場址地質環境 長期穩定性之四項自然活動之一(其他三項為: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。

另一方面,氣候變遷於短期方面,造成區域異於昔日之異常性氣 候變化加劇,諸如:氣溫之劇升/降、降雨量/日數之增加或減少、颱 風/暴雨增加,造成區域性乾旱/水澇、山崩/土石流…等災變現象之發 生,此皆因區域性氣候變遷,改變了流域的水文、水力狀況,影響河 流的搬運、侵蝕能力;改變山坡上的植被,影響沉積物顆粒的大小及 供應量,而大幅的增加了大地侵蝕或風化之速率所致。

2.2.5.1. 台灣地區近代氣候概況

台灣地區主要位於北緯22°~25°之間(圖 2-1),北緯23.5°的北回 歸線橫越台灣的中南部,主要經過花蓮縣的舞鶴、高雄縣的南玉山、 嘉義縣的吳鳳和東石、嘉義市、及澎湖縣等地。由於台灣地區緯度較 低,太陽終年均接近天頂,屬於亞熱帶氣候,特徵是終年溫暖、雨量 豐沛。惟氣溫與雨量的季節變化及區域差異非常明顯,主要係因台灣 多山地,而氣溫隨著海拔高度的增高而遞減,因此雖在同一緯度上, 高山上的氣溫就和平地的氣溫就有明顯的差別,從平地到高山可包括 熱、溫、寒三帶不同變化。

台灣位於於歐亞大陸東南方之太平洋上。歐亞大陸是全球最大陸 塊,太平洋又是全球最大海洋,陸塊與海洋的物理性質(如比熱、熱 容量、和熱傳導等)不同,因而在歐亞大陸和太平洋交界地區形成全

球最顯著的季風氣候。夏季季風是由太平洋與南海吹向亞洲大陸,冬 季季風則由亞洲大陸吹向太平洋與南海。因此台灣大部分地區,尤其 是在中南部,夏季多雨,盛行西南風,然此季之雷雨頻仍,颱風來襲 時,更造成強風豪雨;而冬季則全境盛行東北風,除東北部沿海地區 外,普遍少雨。夏季影響台灣地區的主要氣壓系統為亞熱帶太平洋高 壓系統,氣壓南高北低,但梯度甚小,盛行之西南季風並不強盛。冬 季則為蒙古高壓(或名西伯利亞高壓)系統強盛之東北季風控制全 境,除東北部因有地形雨比較冷濕外,中南部大致晴朗乾燥。

台灣氣候要素之系統儀器觀測最早者始於1897年,計有台北、台 中、澎湖、台南及恆春五處,其餘各地的觀測時間長短不一。對設立 處置場而言,氣溫及雨量在各項氣候因素中最為重要,茲將彼等在台 灣各地之分布及其變化情形,敘述如後:

2.2.5.1.1. 氣溫

台灣各地之氣溫隨著地理環境之不同而有所差異。若以台灣本島 平原地區而論,各地的年平均氣溫均在22~25 ℃之間(表 2-27)。其 中台北的年平均氣溫為22.7 ℃,恆春則為25.0 ℃,南北之間的溫差 大約為3 ℃。由於台灣地區之地形起伏大,氣溫隨地形升高而遞減的 情形極為顯著(圖 2-111),在海拔高度達3,845 m的玉山觀測站,其年 平均氣溫僅有3.9 ℃。再由表 2-27,台灣地區夏季(7月)平均氣溫最 高,除山區外,其平均溫度均高於28 ℃,而且南北之間的溫差不到1 ℃。就冬季(1月)而言,除山區外,台灣各地平均溫度均超過15 ℃, 但南北之間的溫差卻過5 ℃。綜合而言,台灣除山區外,夏季是普遍 高溫炎熱,南北的溫差小;冬季則北部比較涼爽,南部相當溫暖。

2.2.5.1.2. 雨量

台灣地形複雜,不但山地面積廣且有中央山脈縱貫南北,加上季風的影響,使降水(主要為降雨)在時間及地域分布,呈現十分不均匀的現象。在約2,500 mm的年平均雨量中,約有78%的雨量集中於5~10月,乾季則是11月至翌年2月(表 2-28)。

而在北、中、南、東四個地區之年平均雨量分布中,以北部2,938 mm最高,月雨量分布也較為平均,約有60%的雨量分布於5~10月; 中部地區2,121 mm,東部地區為2,545 mm次之;南部的年平均雨量為 2,476 mm,但雨量分配最不平均,約有90%雨量分布在5~10月,而11 月至翌年2月雨量均在50 mm以下,顯得異常乾旱。

台灣年雨量分布如圖 2-112所示,主要受冬夏雨季盛行季風與屏 障地形交會的方向所影響,因此高山多於平地,東岸多於西岸。中部 山區平均年雨量多在3,000 mm左右,迎風山坡地可達4,000~5,000 mm。東部沿海各地年雨量自1,500~3,000 mm不等,西部平原則多在 1,500~2,000 mm。自中央山脈至西部沿海地區,雨量隨高度之減少而 遞減,至澎湖地區僅有1,000 mm左右。

2.2.5.2. 台灣過去之氣候變遷

2.2.5.2.1. 台灣過去200萬年以來之氣候變遷

古氣候變遷可藉由:湖泊淤泥沉積物中的花粉、矽藻等化石的定 年;陸地上的黃土堆積層的沉積剖面;冰岩心中微量氣體含量;海洋 沉積物有孔蟲殼的碳酸鈣,氧同位素種類比例;樹木的年輪與珊瑚的 年生長輪等方法,來瞭解古氣候的變化。

就如同全世界其他地區一樣,台灣地區在第四紀(表 2-2)時(過去 2 Ma),冷暖變化不斷地反覆發生而具下列之特徵:

- (1) 依據台灣西部及北部各地花粉研究,台灣在過去2 Ma的氣候從未 停止變遷,且至少經歷五次明顯的冷暖循環。
- (2)更新世早期與中晚期氣候變遷頻率及幅度不同,亦即更新世中、 晚期以來的冷暖變遷較為突然且幅度較大,而早期的氣候狀況則 比中、晚期穩定,雖亦仍有冷暖變化,但幅度可能較小(Liew, 1982;劉平妹,1984),顯示台灣地區第四紀大致的氣候變化與 世界平均變化頗為一致。
- (3) 更新世最早期(約1.95~1.75 Ma前)可能存有變冷且為乾冷的氣候 趨勢(Liew, 1982;劉平妹, 1984);早更新世晚期(約0.7~0.9 Ma

前)還發生過一次明顯的轉冷事件(Liew, 1986; 1988),而至少存 有一次冷一暖循環。

2.2.5.2.2. 台灣過去15萬年以來之氣候變遷

全球過去15萬年之氣候變遷包括了上次間冰期(12.8~7.1萬年前約近6萬年間)、上次冰期(約7~1萬年前且1.8萬年前全球溫度達最低)、及目前之全新世(表 2-2)暖期(即1萬年前,溫度升到與現今相似之程度),為一完整之「暖-冷-暖」古氣候變遷模式(圖 2-113)。地球在此15萬年中,溫暖時期僅持續了短暫時間,多數時候的溫度處於緩慢震盪下降狀態,比較起來,升溫的過程快速,短短時間內氣候就發生劇烈改變,今日地球氣候可對比至間冰期的高階狀態。

全球海水面於此15萬年變化的趨勢與氣溫變化十分相似,圖 2-114顯示,上次間冰期(約12.5萬年前)與上次冰期(約1.8萬年前)之海 水面降低幅度最高可達130 m左右(Shinn, 2001)。

相對地,台灣地區於上次間冰期的氣候相當溫暖,溫暖程度甚至 可能在全新世(表 2-2)之上,而最溫暖時期可能比目前尚高出3℃左 右。台灣地區於上次冰期涵蓋了氧同位素階的4、3、2階,氣候以乾 冷為主,其中4.5~3.5萬年前為冰期中的短暫暖期,由大漢溪下游地 區、中部丘陵區、及濁水溪沖積扇之花粉分析均可發現。小暖期 (4.5~3.5萬年)後,還於3.5~3萬年前還出現短暫潮濕期,此外於1.4~1 萬年前濕度亦有增加現象。7萬年前較今日溫度下降達8~10℃,古雪 線在3,400 m以下;2萬年前則較今日下降5℃左右,古雪線在3,500 m 左右,雖然寒冷現象有趨緩現象,但乾燥程度反而加強,降雨量可能 只有今日一半。這種冰期早期溫度比晚期為低的狀況在西藏高原也有 發現,但與一般溫帶區有別。約1萬年前脫離上次冰期後,夏季季風 增強,大氣溫度明顯上升。

月份 地名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
淡水	15.1	15.3	17.3	21.2	24.3	27.0	28.8	28.5	26.7	23.7	20.4	17.0	22.1
鞍部	9.8	10.3	12.8	16.4	19.2	21.9	23.2	22.6	20.8	17.8	14.5	11.3	16.7
台北	15.8	16.0	18.0	21.8	24.7	27.4	29.3	28.9	27.1	24.4	20.9	17.5	22.7
竹子湖	11.7	12.2	14.6	18.1	20.9	23.5	24.8	24.5	22.7	19.8	16.4	13.3	18.5
基隆	15.8	15.8	17.6	21.1	24.2	27.1	29.0	28.6	26.8	24.0	20.8	17.6	22.4
彭佳嶼	15.6	15.5	17.3	20.4	23.3	26.1	28.1	27.8	26.3	23.7	20.4	17.4	21.8
花蓮	17.8	18.0	20.1	22.7	24.9	27.1	28.4	28.0	26.7	24.6	21.9	19.2	23.3
蘇澳	16.3	16.5	18.7	21.4	24.2	26.9	28.5	28.1	26.4	23.7	20.8	17.6	22.4
宜蘭	16.0	16.4	18.7	21.6	24.2	26.7	28.4	28.0	26.2	23.4	20.2	17.3	22.3
東吉島	17.4	17.7	20.1	23.1	25.4	27.2	28.1	27.8	27.0	25.1	22.2	19.2	23.4
澎湖	16.7	16.8	19.4	23.0	25.6	27.6	28.7	28.5	27.7	25.4	22.1	18.7	23.4
台南	17.3	18.2	21.0	24.5	27.1	28.4	29.0	28.4	28.0	25.8	22.3	18.7	24.1
高雄	18.8	19.7	22.3	25.2	27.2	28.4	28.9	28.3	27.9	26.4	23.4	20.2	24.7
嘉義	16.1	16.8	19.4	22.9	25.5	27.6	28.4	27.8	26.7	24.3	20.9	17.4	22.8
台中	16.2	16.8	19.4	23.0	25.7	27.5	28.5	28.0	27.2	24.9	21.4	17.8	23.0
阿里山	5.7	6.7	9.0	11.1	12.6	14.0	14.2	14.0	13.3	12.0	9.8	7.1	10.8
大武	20.1	20.6	22.6	24.7	26.5	28.0	28.6	28.1	27.2	26.0	23.7	21.3	24.8
玉山	-1.5	-1.1	1.0	3.3	5.5	7.0	7.7	7.5	7.0	6.3	3.9	0.7	3.9
新竹	15.3	15.3	17.6	21.5	24.4	27.4	28.7	28.3	26.6	23.8	21.0	17.8	22.3
恆春	20.6	21.1	23.1	25.2	26.9	27.9	28.3	27.9	27.4	26.3	24.0	21.6	25.0
成功	18.8	19.1	21.0	23.2	25.2	27.1	28.1	27.8	26.8	25.0	22.5	19.9	23.7
蘭嶼	18.4	18.8	20.4	22.4	24.2	25.6	26.2	25.9	25.2	23.7	21.5	19.3	22.6
日月潭	14.1	14.7	16.9	19.3	21.0	22.2	22.9	22.5	22.1	20.8	18.2	15.3	19.2
台東	19.2	19.6	21.7	24.0	26.0	27.7	28.7	28.4	27.3	25.6	23.0	20.4	24.3
梧棲	15.9	15.8	18.4	22.3	25.3	27.8	29.0	28.7	27.3	24.4	21.1	17.6	22.8

表 2-27:台灣地區各氣象站月平均氣溫統計表

資料統計期間:1971~2000年;單位:℃

資料來源:中央氣象局全球資訊網,http://www.cwb.gov.tw



圖 2-111:台灣全年等溫線圖(1956-1985年) 資料來源:氣象局,1990,PI-17

月份 地名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計
淡水	120.5	173.5	192.2	178.3	219.5	230.6	147.6	215.1	223.5	185.5	131.7	101.6	2,119.6
鞍部	319.3	315.2	288.2	242.5	319.7	322.6	261.5	435.0	617.3	823.4	578.5	369.2	4,892.4
台北	86.5	165.7	180.0	183.1	258.9	319.4	247.9	305.3	274.6	138.8	86.2	78.8	2,325.2
竹子湖	269.3	277.3	240.3	207.8	275.3	294.7	248.3	446.0	588.1	837.3	521.9	320.1	4,526.4
基隆	335.8	399.0	332.3	240.9	296.1	286.7	150.4	212.8	360.8	413.4	394.7	332.1	3,755.0
彭佳嶼	134.0	168.6	179.9	166.6	203.1	200.5	106.2	188.1	186.7	131.9	144.0	114.8	1,924.4
花蓮	71.9	99.9	86.6	96.1	195.0	219.6	177.3	260.6	344.3	367.4	170.6	67.7	2,157.0
蘇澳	371.6	351.5	224.6	207.9	264.1	252.3	169.3	285.7	520.6	757.1	747.2	457.6	4,609.5
宜蘭	155.3	175.2	132.2	134.2	222.7	186.7	145.5	243.8	441.2	442.3	360.2	188.4	2,827.7
東吉島	19.2	31.9	41.3	67.2	136.7	202.0	158.7	177.7	77.7	28.4	21.0	13.1	974.9
澎湖	21.9	50.2	52.9	92.4	123.2	164.1	131.6	170.8	74.2	26.1	20.1	23.5	951.0
台南	19.9	28.8	35.4	84.9	175.5	370.6	345.9	417.4	138.4	29.6	14.7	11.3	1,672.4
高雄	20.0	23.6	39.2	72.8	177.3	397.9	370.6	426.3	186.6	45.7	13.4	11.5	1,784.9
嘉義	27.6	57.7	62.2	107.6	189.2	350.7	304.3	422.1	148.9	22.7	12.2	20.9	1,726.1
台中	36.3	87.8	94.0	134.5	225.3	342.7	245.8	317.1	98.1	16.2	18.6	25.7	1,642.1
阿里山	87.8	144.0	161.4	256.8	530.9	711.1	590.7	838.9	344.7	136.1	46.6	61.1	3,910.1
大武	54.9	54.0	48.9	82.3	198.2	367.4	366.5	428.3	338.1	223.7	80.8	46.1	2,289.2
玉山	116.0	148.9	138.9	248.9	454.2	513.3	361.5	499.4	257.2	152.7	77.8	85.6	3,054.4
新竹	74.8	152.5	196.5	191.3	282.4	279.2	140.0	206.8	114.9	44.5	44.8	55.0	1,782.7
恆春	25.7	27.7	19.9	43.5	163.9	371.3	396.3	475.2	288.3	141.9	43.2	20.6	2,017.5
成功	77.2	73.4	75.3	96.4	189.8	204.7	251.1	325.9	351.6	336.8	136.6	79.6	2,198.4
蘭嶼	273.9	219.8	163.0	164.8	263.0	262.9	225.0	275.0	394.2	331.0	273.7	235.0	3,081.3
日月潭	52.4	103.3	119.3	192.1	354.3	483.8	349.6	431.8	199.9	54.9	25.0	38.2	2,404.6
台東	43.2	47.5	43.1	73.8	156.9	247.8	280.5	308.2	299.4	236.0	78.0	41.7	1,856.1
梧棲	28.5	84.5	106.1	131.0	222.5	217.7	165.9	213.2	68.7	9.9	14.9	20.1	1,283.0

表 2-28:台灣地區各氣象站月平均降雨量統計表

資料統計期間:1971~2000年;單位:mm

資料來源:中央氣象局全球資訊網,http://www.cwb.gov.tw



圖 2-112:台灣全年等降水量圖(1956-1985年) 資料來源:氣象局,1990,PI-33

2.2.5.2.3. 台灣過去1.8萬年以來之氣候變遷

在上次冰期後期約1.8萬年前左右,北極冰原的發育到達極致, 稱為上次冰期最盛期(Last Glacial Maximum, LGM)。自此以後,全球 氣溫便開始急速上升,而於1萬年前正式脫離冰期進入溫暖的全新世 (表 2-2)。由於氣候非線性回饋的影響,由冰期過渡到全新世的氣候 是極度不穩定的,在長期暖化的過程中,氣溫來回震盪劇烈,其中又 以發生於1.1~1萬年前(校正年代約1.3~1.15萬年前)的新仙女木 (Younger Dryas)回冷事件最為明顯。

進入全新世(表 2-2)以後,全球溫度仍緩緩上升,至全新世中期 達最高,大概比目前還高出1~2 ℃,稱之為全新世大暖期或氣候適宜 期,Bard et al.(1996)估計6,000年前的海水面,比一萬年前(全新世之 初)要高出55 m左右。大暖期之後,溫度長期屬於下降趨勢,但其中 2,000年前左右曾經歷一次較小幅度的暖化時期。上次冰期最盛期以 來的氣候曲線如圖 2-115所示。

相對地,台灣地區上次冰期最盛期的的乾冷氣候,一直持續到約 1.7萬年前開始有減緩趨勢,真正乾涼的上次冰期最盛期,其植物分 布較今日垂直下降至少850 m,溫度要比今日低超過6 ℃以上,年雨 量也可能要遠低於今日1,000 mm以上。距今約1.3~1萬年間,氣候表 現出冰期與間冰期之間的過渡現象,稍稍轉暖變濕,但氣候狀況相當 不穩定,大約在1.1~1萬年前,有新仙女木短暫回冷事件發生。

進入1萬年前的全新世(表 2-2)後,則意味真正暖濕氣候的來臨。 發生於早~中全新世的大暖期,在全省都可發現紀錄。大致而言,台 灣 地區 全 新 世 大 暖 期 約 發 生 於 9,500~4,000 年 前 , 其 中 又 以 9,500~8,500年前及7,000~5,000年前最為鼎盛,當時氣候甚至比目前 更暖和,海水面較現今高出約2.4 m。在大暖期之後,溫度略有下降, 直到約2,000年前左右,溫度再次稍微升高1~2 ℃。

過去1.8萬年主要古水文狀況變動時期,約在1.3~1.2萬年前、 9,000~7,000年前、6,000~5,000年前、2,000多年前及數百年以來,分 別有雨量突然增加的現象。

末次冰期距今約2萬年前,當時全球海水面較現今低約120m,之 後氣候變暖,海水面一直持續的上升至今。初期約從2~1.4萬年前期 間,海水面回升的速度較緩慢,平均每千年約6m。之後1.4~0.6萬年 前之間,海水面上升的速度約每千年10m。6,000年前至今,海水面 的變動則趨於穩定,沒有太多的變化,至今的海水面變動大約不會超 過0.3~0.5m (Church et al., 2001)。

針對台灣地區全新世(表 2-2)海水面的變化研究,謝孟龍(2005) 運用地質調查所西南部平原岩心資料,建立台灣20,000年至今(全新 世)的絕對海水面曲線(圖 2-116)。圖中顯示之後1.1~1萬年前之間, 海水面上升的速度大於13 mm/yr,10,000~6,500年前之間,海水面上 升速度約8~9 mm/yr,但自6,500年前以來,海水面變動甚微。

2.2.5.2.4. 台灣百年以來之氣候變遷

過去一百年,全球平均地表氣溫約上升了0.6 °C,以北半球而 言,增溫程度可能是過去一千年來最大的。台灣地區百年來溫度亦呈 緩慢上升趨勢,上升速率在1.0~1.4°C/100yr 之間,此較全球平均地 表氣溫上升0.6°C/100yr為高。表示台灣暖化趨勢較全球明顯,且夏季 增溫的幅度較冬季明顯,平地較山區明顯。雨量方面,台灣北部地區 平均年降雨量逐年增加,但年降雨日數逐年減少,亦即降雨強度有逐 漸增大的趨勢;山區春季降水量長期屬減少趨勢。依台灣各氣象站百 年來降雨資料統計分析,以基隆和台北氣象站為例,近百年來之平均 降雨量分別增加了1,185mm/98年(或12.1mm/年)和268mm/103年(或 2.6mm/年),而年降雨日數分別減少14.6天/98年(或0.15天/年)和27.8天/103年(或0.27天/年),依此計算,每雨日之降雨量分別增加約50%及30%(黃金山,2001)。

依據IPCC在2001年公佈的「第三次氣候評估報告」(IPCC TAR) 中,有關海水面上升趨勢的評估結果及分析全球潮位計觀測紀錄顯 示,在20世紀的百年間,全球海水面上昇速率約1.0~2.0 mm/yr,而以 高緯地區上升較為快速,由台灣所處緯度研判海水面上升速率約為 1.5 mm/yr。

劉啟清(2000)應用中央氣象局西岸之基隆、台中、高雄、蟳廣嘴、 東岸之富岡等五地,穩定度較高的驗潮站18年以上觀測資料分析海水 面變化顯示:台灣地區海水面變動趨勢為東岸下降,西岸及宜蘭平原 上升;楊任徵(2002)依此進一步估算海水面變化率,並排除20世紀台 灣海域之「全球性海水面變遷」速率為1.5 mm/yr後,推估出基隆、 台中、高雄、蟳廣嘴、富岡等五特定地點之「地區性海水面變遷」速 率(表 2-29)。

澎湖地區基於以下因素研判澎湖海平面上升速率和全球一致: (1)四周海域珊瑚礁並未在陸地發現,顯示沒有明顯地殼上升運動;(2) 全新世(表 2-2)中期較高海水期的臨濱相堆積,現仍保留在沿岸平 原,顯示無明顯沉降作用發生;(3)沒有明顯地震紀錄,顯示澎湖群 島為台灣附近地殼最穩定的地區,並且為研究海平面變化的好地點 (陳于高,1997)。

金門與馬祖地區由於缺乏長期監測資料,無法評估海平面變動趨勢,而由中國國家海洋局分析其沿海48個站之紀錄顯示,在中國沿海各區海平面變化情形大多數為上升趨勢,其中東海上升率為1.9 mm/yr,南海為2.0 mm/yr,略高於全球海平面上升速率(中國科普博覽網站,2001)。因此,若金馬等離島海平面上升速率以2.0 mm/yr計, 在排除全球海水面上升趨勢(1.5 mm/yr)之後,地區性海水面變遷推估為0.5 mm/yr。

基隆	台中	高雄	蟳廣嘴	富崗	澎湖	金馬
-1.1	-0.3	0.7	1.2	-7.1	0	0.5

表 2-29:台灣地區性海水面變遷推估速率

單位:mm/yr

資料來源:楊任徵,2002



圖 2-113:全球過去15萬年之氣候變遷

資料來源:引自Jenkins,2001;郭兆敏,2002



圖 2-114:全球過去15萬年之海水面變化

資料來源:Shinn,2001;郭兆敏,2002 註:由海洋氧-18同位素(¹⁸O)分析,所定出來地球氣候變遷的時期,稱為海洋同

註:由海洋氧-18同位素(°O)分析,所定出來地球氣候變遷的時期,稱為海洋同位素階(Marine isotope stage),或氧同位素階,數字越小越接近現在。



圖 2-115:全球過去1.8萬年之氣候變遷

資料來源:引自Jenkins,2001;郭兆敏,2002



圖 2-116:台灣2萬年至今(全新世)的絕對海水面曲線

註: 粗黑曲線為絕對海水面; 5,000年來的海水面曲線乃澎湖群島所記錄者; 11,000~20,000年前的海水面曲線,乃建立自Sunda Shelf(陰影部份為其不確定範圍)

資料來源:謝孟龍,2005

2.2.5.3. 台灣未來之可能氣候變遷

2.2.5.3.1. 台灣未來百年之氣候變遷

IPCC(2001)綜合化石能源使用狀況、人口成長與經濟發展三種主要因素,分析未來六種可能發展的情境(表 2-30),獲取百年大氣中二氧化碳濃度和硫氧化物濃度,以估算全球平均氣溫演變趨勢。結果顯示:若以1990年全球平均溫度作為比較的基準,至2100年,六種情境平均溫度均上升,增溫幅度介於1.4~5.8℃之間(圖 2-117)。

依上述IPCC對未來百年全球暖化導致氣候變遷所作的預測,在 這幾種可能發生的氣候變遷情景(表 2-30)發展下,預期百年內全球和 台灣地區海水面顯著的變化亦勢不可免。海水面變遷所考量的因素包 括:極地和高緯地區冰雪融化,以及海水水體的熱脹效應。台灣海水 面變遷除了上述全球性的因素外,還要考量地區性的長期變遷因素 (板塊運動、地殼垂直變動、地層下陷、沖蝕/淤積)。楊任徵(2002)推 估台灣地區特定地點,在未來200年海水面上升情景(累積發生機率 99%),推估結果如表 2-31及圖 2-118所示。另因最終處置場設施並 非都必須用未來最嚴謹狀況檢驗(例如:接收碼頭),因此,楊任徵 (2002)以金馬離島為例,推估未來兩百年累積發生機率由60~99%的海 水面上升情景,推估結果如表 2-32及圖 2-119所示。

2.2.5.3.2. 台灣未來15萬年之氣候變遷

Moren及Passe(1999)曾應用三個簡單模型,推算未來15萬年全球 氣候特徵,推算結果如表 2-33所示。

依據Moren及Passe的研究結果,若按全球氣候的冷、暖轉折,可 將未來15萬年,區分為八個時段,除了未來5,000年仍延續目前氣候 狀況外,預期在未來15萬年期間,將出現四個冷期和三個暖期。一般 而言,冷期持續約3萬年;暖期則相對的較短,約維持1萬年左右,就 會進入下個冷期。

由台灣古氣候研究結果顯示,冰河未曾在此區出現(Liew et al., 1999)。國外古氣候研究結果亦顯示,上一次冰期最盛期(LGM)(約在

22,000~19,000年前)冰層和凍原範圍向南延伸,距台灣仍有相當距離。因此,在Moren及Passe (1999)全球氣候變遷情境,四個冷期北半球冰層和凍原南下擴散範圍不及台灣地區的情況下,全球海水面下降,是影響台灣地區相對海岸線變動的主要因素。

在有了上述氣溫長期演變的預測後,楊任徵(2002)假設:「上一 次冰期最盛期海水面約比目前低約130 m(Yokoyama et al., 2000; CLIMAP, 1981),並假設下一冰期最盛期(約在未來10萬年)海水面最 低點同為130 m;未來各冷、暖期海水面,也比照前一間冰期相同氣 溫時的水平」前題下,來估算台灣海水面變遷情景,估算結果結果如 表 2-34及圖 2-120所示。

情境	特點
A1FI	密集使用化石能源,人口成長緩慢,全球均衡發展
A1T	非化石能源擴張迅速,人口成長緩慢,全球均衡發展
A1B	各類能源均衡使用,人口成長緩慢,全球均衡發展
A2	人口持續成長,全球非均衡發展
B1	在A1人口成長情況下,全球永續發展的最佳解決方案
B2	地區性經濟、社會和環境永續發展的解決方案

表 2-30: IPCC第三次評估報告建立的六個未來發展情境

資料來源: IPCC, 2001; 楊任徵, 2002



圖 2-117:全球未來百年平均溫度演變趨勢圖 資料來源:IPCC, 2001;楊任徵, 2002

西元 地點	1990	2025	2050	2075	2100	2150	2200
基隆	0	14	26	46	76	188	374
台中	0	17	31	52	85	201	391
高雄	0	20	37	61	96	217	412
蟳廣嘴	0	22	40	65	101	225	422
富岡	0	-7	-10	-5	10	92	248
澎湖	0	18	33	55	88	206	397
金馬	0	20	36	59	94	214	408

表 2-31:台灣地區特定地點未來兩百年海水面上升情景

單位:cm

註:表內數字表示累積發生機率99%之海水面上升高度(負值代表海水面下降) 資料來源:楊任徵,2002



圖 2-118:台灣地區特定地點未來兩百年海水面上升情景 資料來源:楊任徵,2002

西元 發生機率(%)	1990	2025	2050	2075	2100	2150	2200				
60	0	8	16	25	34	59	86				
70	0	10	18	27	39	70	106				
80	0	11	20	32	47	85	133				
90	0	13	25	39	58	111	181				
95	0	15	29	45	68	139	238				
97.5	0	18	33	52	80	171	303				
99	0	20	36	59	94	214	408				

表 2-32:金馬離島未來兩百年海水面上升情景

單位:cm

註:表內數字表示累積發生機率60~99%之海水面上升高度 資料來源:楊任徵,2002



圖 2-119·金馬離島未來兩百年海水面上 資料來源:楊任徵,2002
表 2-33:未來15萬年全球氣候情境

期間(kyr)	氣	候特徵
0~5	•	和目前相近
	•	逐漸步入冷期,全球平均氣溫約較目前低約8℃,於未來20~30
		kyr期間達冰河最大量。
	•	北半球高緯高山冰層開始擴張範圍,最遠延伸至目前波羅的海。
		凍原擴及波羅的海南岸及部份Smaland高地。
5~30	•	期初北半球高緯地區海岸線呈下降趨勢;後期北半球高緯地區地
		殼承受冰層壓力而呈逐漸下陷趨勢,目前波羅的海沿岸浸入水
		中。
	•	陸地蓄積冰層使得全球海水面逐漸下降,冰層及凍原擴散範圍僅
		及於中高緯地區,台灣地區海水面隨全球趨勢,逐漸下降。
	•	暖期,氣溫快速回昇,但仍較目前為冷,氣溫較目前低約1℃。
	•	北半球高緯地區凍原範圍向北退卻。
30~40	•	冰層融化。
	•	北半球高緯地區海岸線呈下降趨勢。
	•	台灣地區海水面逐漸上升,但仍較目前為低。
	•	進入新的冷期,未來60kyr氣溫約比目前低約10℃,其後冷期達
		於最高點,冰層蔓延北半球高緯地區。
40~70	•	北半球高緯地區冰層及凍原範圍向東南擴張;未來60~70 kyr期
		間地殼受冰層及凍原壓縮,北半球高緯大部份海岸地區為海水淹
		沒,凍原蔓延北半球高緯地區。
	•	台灣地區海水面隨全球趨勢下降,約較目前低。
	•	暖期,逐漸回暖但仍較目前低約5℃。
70~80	•	冰層及凍原迅速退卻,並小於未來20~30kyr 期間所覆蓋的範圍。
	•	北半球高緯地區海岸線因地殼上昇而下降。
	•	台灣地區海水面回升,但較目前低。
80~110	•	新的冷期開始,未來100 kyr氣溫約比目前低約12℃,之後冰河
	_	達於最大。
	•	北半球高緯冰層和凍原向南延伸;未來100~110kyr期間冰層覆蓋
		整個斯堪地那維亞半島,經俄維斯曼延至波闌和德國北部。
		北半球局緯海岸線卜降。
	•	台湾地區海水面隨全球趨勢下降。
110~130		间冰期,全球風温迅速回暖。
		北半球尚經地區冰層和凍原退回至日則輕圍。
		北千球尚羅地區海库線1/9略尚於日則位直。
		取暖期出現於木米120Kyr, 很可能略尚於日則乿温。
		台湾地區海水面回升,但戰日則為低。
130~150		用始利的冰期循環。
		向鮮小價和保保開始回半鮮地區延伸。 曲士可始和土本60.70km期間首次签图和公司
		明木り 能和木米00~/UK yr 期间 曼延 範圍 相 近。
	•	台湾地區海水面卜降至取低點。

資料來源: Moren and Passe, 1999;楊任徵, 2002

表 2-34:台灣地區未來15萬年海水面自然變遷情景

距今萬年	0.5	2.8	4	6.6	8	10	12	13	15
海水面(m)	-22	-88	-11	-110	-55	-132	6.6	-5.5	-99
註:以目前海水面為基準,不準度約 ±10%									

資料來源:楊任徵,2002



圖 2-120:台灣地區未來15萬年海水面自然變遷示意圖 資料來源:楊任徵,2002

2.3. 潛在處置母岩特性

2.3.1. 花崗岩

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。

2.3.1.1. 花崗岩分布

就現有地質資料來看,花崗岩的分布以台灣東部中央山脈中花崗 岩出露最多,西部離島則有金、馬、烏坵等花崗岩島嶼出露。這些地 區的花崗岩,分別座落在歐亞大陸最東緣的兩大變質帶:(1)台灣東 部的大南澳變質帶;以及(2)靠近福建東南沿海的長樂-南澳變質帶 (金、馬、烏坵等島嶼)。前者花崗岩靠近菲律賓海板塊與歐亞大陸板 塊交界處,多以斷塊(以斷層為界)方式分布;後者位於台灣海峽西側 福建東南海岸,多以侵入體的形式分布。各地分布花崗岩的規模、年 代及大地構造環境簡單表列比較於表 2-35。

(1) 台灣東部花崗岩:

在台灣東部大南澳變質帶中的花崗岩,包括奇瑤谷、源頭山、大 濁水、飯包尖山、溪畔及開南岡等地區六個出露面積較大的岩 體。其中有些岩體事實上為數個小岩體所組成,但圍岩間是否還 有岩體相連,並不清楚,台灣東部花崗岩地理分布參見圖 2-22 所示。岩體延伸因植被茂密、路途艱險,對於中央山脈東翼的岩 體分布目前調查資料甚少,目前展開之空中磁測調查可補台灣東 部花崗岩分布及岩體規模調查的不足。

(2) 離島花崗岩:

離島地區花崗岩位於大陸沿海一帶,屬於歐亞大陸板塊內部的岩 體,位於世界著名中生代(表 2-2)環太平洋花崗岩帶西緣的華南 花崗岩帶之東南隅(圖 2-121),自早白堊紀燕山運動(Yanshanian Orogeny)形成以來(約140~100 Ma),即未再次受到造山運動影 響,在華南地塊中屬於較穩定的地區,新生代以來的地層記錄顯 示,此區僅隨台海長期張裂活動而抬升、剝蝕與海水面升降作用 所影響。

2.3.1.2. 花崗岩特性

台灣花崗岩地質基礎調查始於日人石井氏於1897年發現立霧溪 口花崗片麻岩礫石,出口氏於1911年調查其沿溪岩體之分布,市村 氏、小笠原氏等於1932至1941年間,陸續對台灣花崗片麻岩多處岩體 之分布、產狀及岩性的調查報導,而後顏滄波教授於1954年首先將台 灣的六個花崗片麻岩體深入描述與研究(王執明、藍晶瑩,1995)。國 內地質調查高峰主要為經濟部礦產測勘團與礦業研究所(工研院能環 所前身)在50年代展開礦業調查,由工程單位及工研院能礦所(工研院 能環所前身)於70至80年代展開之蘇花濱海地區公路及鐵路沿線工程 地質調查,以及中央地質調查所五萬分之一圖幅測繪工作中,由林啟 文、林偉雄、高銘健等人完成南澳(林啟文等3人,1993)、三星(林啟 文、林偉雄,1995)、蘇澳(林啟文、高銘健,1997)等圖幅。根據這些 資料,將岩石種類、組成、變質度、地質構造等特性整理如下:

(1) 岩石種類:

台灣東部花崗岩本身分成六大岩體,但各岩體岩性變化不因變質 作用而改變,仍保有原岩花崗岩、石英二長岩及花崗閃長岩為主 之岩性。然而野外觀察各岩體,多依野外產狀稱呼為花崗岩、片 麻岩(分為正片麻岩及副片麻岩)及混合岩等。現地勘查發現源頭 山、飯包尖山及溪畔岩體均有花崗岩露頭,確實存有典型的花崗 岩;而開南岡岩體,則以花崗片麻岩為主。除源頭山岩體含有許 多角閃岩包體,呈現岩性的不均質外,其他岩體均相當均質。以 下分別就野外及岩相特性,說明各類岩石的特性。

分布	產狀	規模	形成年代 (Ma, 百萬年)	地體環境			
山緣击如	斷塊/變質帶	十餘公里長、	90~80 Ma	聚合板塊邊界			
百得朱印	的岩體	數公里寬					
人間	侵入體/變形	數公里長、數	140~100 Ma	張裂大陸邊緣			
金门	花崗岩	公里寬					
ह नेव	侵入體	南竿、北竿雨	100 Ma	張裂大陸邊緣			
向祖		島					
A LC	侵入體/變形	大坵、小坵兩	120 Ma	張裂大陸邊緣			
向虹	花崗岩	島					

表 2-35:我國花崗岩類產狀、規模、年代及地體環境比較表



圖 2-121:大陸沿海及台灣西部離島花崗岩分布圖 資料來源:林蔚,2001

(a) 花崗岩:

花崗岩主要可在溪畔隧道旁的溪畔岩體、南澳南溪中游飯包 尖山及南澳北溪中下游的源頭山岩體等地觀察到。礦物顆粒 呈散點狀分布,粒度中至細粒,灰色至灰白色,局部伴生偉 晶岩脈,岩體邊界多發育因剪切帶活動形成的片麻岩。源頭 山岩 體、大濁水(和平)岩 體及溪畔岩 體有角閃岩 包體 (xenolith),後二岩體亦夾大理岩包體(王執明、藍晶瑩, 1995)。經野外勘查發現源頭山岩體所含角閃岩包體數量, 是所有岩體中最高的,顯示源頭山岩體為最不均質的花崗 岩。

(b) 片麻岩:

片麻岩為變形花崗岩,位於花崗岩邊緣或內部的剪切帶上, 粒度中至細粒,長石及石英呈長條狀分布,顯示變形溫度大 於500 ℃。片麻岩與片岩或大理岩圍岩的接觸帶多為剪切 帶,且片麻岩葉理均與剪切帶及圍岩的葉理平行,顯示為同 期構造所致,因此片麻理的發育可能形成於岩體因構造活動 並接觸圍岩時,根據和平岩體剪切帶的定年結果(王珮玲, 1998)顯示剪切作用應為3~4 Ma時發生,即蓬萊運動所致。

(c) 混合岩:

混合岩為變質岩因高度變質作用產生部份融熔的岩漿,因而 形成具有岩漿流動狀構造的片麻岩。台灣東部岩體中以源頭 山岩體最具代表,花崗岩、片麻岩及混合岩構造紛呈,還夾 有角閃岩或混合岩包體,岩體組成相當不均質。

(d) 圍岩:

主要為大南澳變質岩常見的片岩、大理岩、角閃岩及變質砂 岩等。源頭山岩體北側與大理岩及角閃岩相接;南側與片岩 及變質砂岩相接。飯包尖山岩體侵入到片岩及變質砂岩中, 開南岡岩體及大濁水(和平)岩體則與大理岩及片岩或變質砂 岩相接。溪畔岩體則包在大理岩中。根據穩定同位素研究顯

示,台灣東部花崗岩是以自地殼下方向上頂入大理岩中(俞 震甫、羅清華,2002);由大南澳變質帶熱力演化的時空分 布來看,岩體在蓬萊造山運動時向上抬升頂入中央山脈的岩 層中,並以岩體為中心向外產生變質作用(Beyssac et al., 2007)。

- (2) 礦物組成:
 - (a) 台灣東部花崗岩的花崗岩類之主要組成礦物為石英、長石、 黑雲母及白雲母,次要礦物有角閃石類、綠簾石類、綠泥石 類、石榴子石類、矽線石礦物,附屬礦物有鋯石、榍石、磷 灰石、金紅石、磁鐵礦、鈦鐵礦、針鐵礦、磁黃鐵礦、黃鐵 礦、方解石等(王執明、藍晶瑩,1995)。
 - (b) 由於台灣東部花崗岩複合了白堊紀南澳運動及上新世至今的蓬萊運動等至少兩次變質用的影響,許多礦物均非原生的岩體組成,乃反映了變質條件而形成。最常見的變質作用包括綠泥石化作用(在綠色片岩相變質度下,使黑雲母轉變為綠泥石)及鈉長石化作用(使鈣長石轉變為絹雲母及鈉長石等礦物)。因此,此一變質作用的影響,使台灣東部花崗岩與大陸東南區常見的花崗岩,在岩性特徵上呈現明顯的不同。此外,以台灣東部花崗岩所含黑雲母中常見的鈦鐵礦(圖2-122)及金紅石包裹體為例,這些包裹體的形成乃由於Ca與Ti成份在綠色片岩相溫壓條件下,順黑雲母受剪切作用產生的解理面擴散,而形成鈦鐵礦針狀包裹體(Yui et al., 2001)。
- (3) 岩石化學組成及岩石分類:
 - (a) 岩石化學組成以岩石的主要氧化物組成來表示(可據以計算標準礦物組成,即NORM),以標準礦物含量長石類礦物與石英的比例進行花崗岩類岩石分類,可避免因變質作用影響造成岩石分類的失據,台灣東部六大花崗岩的分類參見圖 2-124所示(王執明、藍晶瑩,1995)。
 - (b) 台灣東部花崗岩與福建地區後造山期花崗岩類(約100 Ma前 形成)之全岩地球化學組成,呈現極高的相似性(圖 2-125)。

由於台灣東部花崗岩有些岩體經變形作用形成片麻岩類,需 採用地球化學分類來區分岩性:大部分屬於花崗岩、閃長花 崗岩及二長花崗岩類(圖 2-124)。若將華南最後一期花崗岩 漿活動中,年代相近的福建漳州岩體花崗岩(100 Ma)、金門 細粒花崗岩(101 Ma)與台灣東部花崗岩(90~80 Ma)相比較, 主要化學成分上無論(K₂O+Na₂O) vs. SiO₂哈克圖(圖 2-125) 或包含微量元素可以指示岩漿特性的蛛網圖(圖 2-126),均 顯示這三區岩漿活動來自相同性質的源區、相同地體環境及 具備相同岩漿演化特性(林蔚, 2001),均可歸為「後造山型」 花崗岩類。

(4) 變質度:

岩體的變質度影響岩石的礦物組成、均質性及岩石強度,因此是 岩性分析重要的研究議題;花崗岩的變質作用未若變質泥岩有豐 富的變質礦物來指準壓力與溫度的相變化,通常變質度的研究可 根據構造變形程度、接觸的 圍岩或岩 體本身的 地質 溫度計 (geothermometer)與地質壓力計(geobarometer)、再佐以溫度定年 學的變質演化史來制約變質條件。以下內容乃根據Ernst and Jahn (1987)、陳肇夏(1998)、王執明、藍晶瑩(1995)、Beyssac et al. (2007)等研究大南澳變質帶的成果彙整成簡要的說明:

(a) 由構造變形程度推估:

從大南澳變質帶岩石的岩相學微構造來看,變質帶的變形程 度可以達到300~400 ℃的溫度範圍的變形特徵(Pulver et al., 2002)。另外,位於花崗岩邊緣或內部的剪切帶上的片麻岩, 其長石及石英呈長條狀分布,顯示剪切帶變形溫度大於500 ℃。以和平地區剪切帶發生的年代為例,最晚可形成於3~4 Ma之蓬萊運動期間(王珮玲, 1998)。

(b) 地質溫度計及地質壓力計推估:

片麻岩和混合岩內包含了一些早期的角閃岩相礦物群(圖 2-127),指示為變質溫度達550~700 ℃,變質壓力達3~5

kbar;還有晚期綠色片岩相礦物群指示了350~510 ℃的變質 溫度及3 kbar的變質壓力(俞震甫、羅清華,2002)。

(c) 蓬萊運動與近期變質作用:

約90~80 Ma (百萬年前)台灣東部花崗岩形成,乃花崗岩漿侵 入到歐亞大陸邊緣與古太平洋板塊之交界處,岩漿固結成岩 體後,歷經至少兩期變質作用(圖 2-127):第一期為高角閃 岩相變質作用,變質礦物之年代落於白堊紀範圍;第二期為 綠色片岩相變質作用,相關變質礦物年代落於中新世至上新 世範圍,顯示為蓬萊運動所致,其主要是弧陸碰撞作用過程 中,疊加(overprinted)在第一期岩體上的再變質作用(Ernst and Jahn, 1987)所造成。

(d) 由於構造與變質作用共同影響,台灣東部花崗岩顯現出了幾種特性,包括:由黑雲母及白雲母組成的葉理、糜嶺岩帶的發育、以及基性岩脈的綠泥石化作用(黑雲母變成綠泥石礦物)及鈉長石化作用(鈣長石變成鈉長石、絹雲母等礦物)(Yui et al., 2001)。此一後期發生的變質作用,若以壓力-溫度-時間路徑(P-T-t path)來推估弧陸碰撞前後大南澳變質帶的變質作用演化歷程(圖 2-128),可以發現台灣東部花崗岩曾在中新世之前出露地表,而後再於中新世晚期沈陷於海面下(其上有南蘇澳層沉積),並開始另一循環的變質作用,直至蓬萊造山運動弧陸碰撞作用下再次抬升造山。

金門的地質調查始於日據時代,市村毅(1941)最早調查岩性的種類,並繪製花崗岩分布簡圖。其後林朝棨、陳培源及宋國良等學者對金門地區礦產的調查,繪製出第一幅金門五萬分之一地質圖(陳培源,1970)。此後,有更多的地質工作者在金門進行不同領域的調查與研究,包括定年學(Jahn et al., 1974, 1976; Lo et al., 1993; 李寄嵎, 1994; 林蔚, 1994; 楊小青, 1998),礦物岩石與地球化學(Chen, 1984; 孫麗敏, 1990; 李寄嵎, 1994; 林蔚, 1994; Lan et al., 1995, 1997; Lin et al., 1997)及大地構造演化的研究(Jahn et al., 1976; Lo et al.,

1993;楊小青,1998;林蔚,2001)。這些資料顯示,金門地區火成 岩類與變質岩類的岩石學、地球化學、定年學方面,是長樂-南澳變 質帶上研究最詳盡的。根據這些資料,將岩石種類、組成、變質度、 地質構造等特性整理如下:

(1) 岩石種類:

位於廈門灣外的金門島及烈嶼,屬於福建東南之長樂-南澳深斷裂 帶所影響的地質區,由中生代的片麻岩及花崗岩構成基盤,上覆第 三紀地層及玄武岩流。金門島出露的岩層由老至新可劃分為:金龜 山片岩、太武山花崗岩、斗門花崗岩、成功片麻岩、田埔花崗岩、 金門層、雙乳山玄武岩及紅土礫石層;烈嶼則劃分為羅厝片岩、青 岐片麻岩、將軍堡混合岩、后頭雜岩、九宮花崗岩、金門層、烈嶼 玄武岩及紅土礫石層。其中規模較大的花崗岩僅太武山岩體及斗門 岩體,以下分別就產狀、岩石分類、礦物組成等特性,說明花崗 岩之各類岩石的特性。

(a) 太武山岩體:

太武山花崗片麻岩體出露於天摩山、寒舍花、美人山、后扁、 田埔、復國墩、峰上、料羅等地海岸線以東,涵蓋太武山區, 西至尚義至中蘭等地。此岩體呈現出斑狀變晶組構、眼球狀 組構、層狀組構,以及弱片理至強片理狀組構,通常層狀組 構及強片理組構可見到塑性變形拉長的長英質礦物,顯示受 到塑性剪切作用,形成具有糜嶺岩帶特徵的組構,顯示太武 山花崗片麻岩為變形花崗岩(deformed granites)。

(b) 斗門岩體:

斗門花崗岩位於象山金剛寺、高坑至斗門之間,跨擎天水庫 兩側,西及西北界位於高坑村至斗門村附近。岩體中有許多 小型塑性剪切帶,並含有多量的鐵鎂礦物包體(mafic enclaves)。斗門岩體邊界處未見明顯侵入構造,與太武山花 崗片麻岩的接觸帶,多為漸變的接觸關係。斗門岩體內部流 動構造或片麻狀構造發達,顯示侵入體可能順剪切帶侵入, 且發生半固態變形作用(subsolidus deformation)形成的塑性 剪切變形的現象。

(c) 圍岩:

太武山岩體的圍岩可能是變質沉積岩和火山岩(如金龜山片 岩),斗門岩體則侵入太武山岩體中,並在圍岩產生接觸圈 型混合岩化作用,使靠近斗門岩體的花崗片麻岩類部分融熔 出混合岩。

(2) 礦物組成:

太武山岩體通常呈現灰色、褐黃至淺粉紅的顏色,主要礦物為正 長石、斜長石、石英及黑雲母,或含少量白雲母、角閃石、磷灰 石、鋯石、石榴子石、磁鐵礦、鈦鐵礦等附屬礦物。偶有綠泥石、 綠簾石、絹雲母等退變質作用形成的次生礦物。斗門岩體主要呈 灰色至深灰色,中至粗粒,以正長石、斜長石、石英、黑雲母及 角閃石為主要礦物。

(3) 岩石化學組成及岩石分類:

雖然太武山岩體受到構造與變質的影響,但可由岩石化學來進行 岩性特徵的分類,根據圖 2-125顯示,絕大部份太武山型花崗片 麻岩及斗門花崗岩的資料,均落於花崗岩的範疇,且與台灣花崗 岩的特性類似(圖 2-125)。此外,林蔚(1994)由岩石化學特性的 研究發現,太武山岩體屬於高鉀鈣鹼性花崗岩,應生成於大陸內 部張裂環境(林蔚,2001)。相較之下,斗門岩體的英雲閃長岩類 呈現出低鉀鈣鹼性花崗岩的地球化學特徵(圖 2-125),與長樂-南澳變質帶的英雲閃長岩質變形侵入體一致(Chen et al., 2004)。而出露在田埔具未變形細粒花崗岩產狀的田埔花崗岩, 則落於花崗閃長岩類及花崗岩類的範疇,與福建東部廣泛出露的 花崗岩及台灣東部花崗岩在岩石化學上具一致性(圖 2-126)。

(4) 變質度:

金門地區基盤岩出露的主要組成岩類,包括了花崗片麻岩、斑狀 片麻岩、角閃岩、花崗岩及輝綠岩。其中太武山岩體由花崗片麻 岩、斑狀片麻岩及角閃岩脈等岩類構成,均屬於高度變質岩類。

至於斗門花崗岩為具有片理狀流動構造及基性包體特徵的深位 侵入型花崗岩類。

(a) 由構造變形程度推估:

在太武山花崗片麻岩中常見混合岩產狀及構造,因花崗片麻 岩受熱使含水鐵鎂礦物(例如:角閃石及黑雲母,參見圖 2-123)脫水,導致花崗片麻岩的部份融熔,而形成混合岩的 構造現象。相較之下,斗門岩體以流動構造為主,其礦物組 成以角閃石、黑雲母、斜長石及石英為主,顯示此一深位侵 入體固結後,仍處於角閃岩相變質作用的條件。由於太武山 花崗片麻岩約在1億年前抬升到了淺部地殼(約10公里深)的 位置(林蔚,1994),細粒花崗岩株、岩脈及輝綠岩脈群順張 性的節理侵入,太武山花崗片麻岩體均未呈現出接觸變質的 現象,也無反應邊緣產生。

(b) 地質溫度計及地質壓力計推估:

根據北太武山的花崗片麻岩角閃石地質壓力計分析結果,估 計變質壓力曾高達5.5~7.9 kbar,約24~28公里深(Lo et al., 1993),屬於下部角閃岩相的變質作用;南太武山花崗片麻 岩的分析值也類似(Lan et al., 1997),顯示太武山花崗片麻岩 體的變質度,具有區域上的一致性。

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 輸的遲滯遲滯作用有顯著貢獻(SKB, 2009)。



圖 2-122:台灣花崗岩偏光顯微鏡下黑雲母與針狀鈦鐵礦包裹體 資料來源:Yui et al., 2001:採樣地點為大濁水岩體



圖 2-123: 偏光顯微鏡下呈現太武山岩體黑雲母的殘片狀特徵 註:採樣地點為金門翟山海岸



圖 2-124:台灣東部花崗岩之地球化學分類 資料來源:王執明、藍晶瑩,1995

縮寫說明: An (鈣長石); Ab (鈉長石); Or (正長石); TN (英雲閃長岩); GD (花崗閃 長岩); QM (石英二長岩); TD (奧長花崗岩); G (花崗岩); Ki (奇瑤谷岩體); F (飯包 尖山岩體); Ka (開南岡岩體); Y (源頭山岩體); T (大濁水岩體); C (溪畔岩體)



圖 2-125:台灣東部花崗岩與福建花崗岩類之岩石化學比較圖 說明:紅色圓圈-福建火成岩帶之花崗岩類;紫色圓圈-長樂南澳變質岩帶(包含金 門)之花崗岩類;綠色方形-台灣東部大南澳變質帶之花崗岩類



圖 2-126:台灣東部花崗岩與福建花崗岩類之岩石化學蛛網圖 說明:(A)福建火成岩帶漳州岩體之花崗岩類(年代為100 Ma);(B)金門之細粒花 崗岩類(年代為101 Ma;資料來源:林蔚,2001);(C)台灣東部大南澳變質帶之花 崗岩類(年代為90-80 Ma;資料來源:王執明、藍晶瑩,1995)。此三地花崗岩類 岩石化學顯示岩性相當類似。



圖 2-127:台灣東部花崗岩歷經兩次變質作用

資料來源:王執明、藍晶瑩,1995 說明:第(I)期為角閃岩相變質作用,可能發生於白堊紀的南澳運動;第(II)期為 綠色岩相變質作用,可能發生於中新世至上新世的蓬萊運動(Ernst and Jahn, 1987)



圖 2-128:台灣東部大南澳變質帶之壓力-溫度-時間演化路徑 資料來源:葉恩筆,1997

2.3.1.3. 花崗岩構造特性

台灣東部花崗岩自白堊紀形成後,歷經大陸邊緣張裂活動與南中 國海板塊對菲律賓海板塊隱沒作用,以及近期弧陸碰撞等地質作用的 影響,因此構造特性相當複雜。相較之下,福建東南沿海離島的花崗 岩僅受到燕山運動影響,而後台海張裂活動僅有局部正斷層系統的發 育,構造特性保留了岩體形成的構造序列與形貌。

(1) 台灣東部花崗岩構造種類與特性:

大南澳變質帶的岩層均有發達的葉理、褶皺及斷層,在有限的調查資料中顯示有些地區明顯受到構造區塊影響(如Pulver et al., 2002),或有構造期次的變化(如李元希, 1997),或可歸納出巨視類似褶皺的變化(如羅偉、楊昭男, 2005;俞震甫、羅清華, 2002)。 整體而言,台灣東部花崗岩常見的構造種類與特性分述如下:

韌性剪切帶礦物結晶鑲嵌緊密,規模大小不一,發育在溪畔 岩體西界與大理岩交界處為大型的韌性剪切帶(Crespi et al., 1996),使此區岩體產狀如副片麻岩(paragneiss)(王執明、藍 晶瑩,1995),此韌性剪切帶之長石及石英礦物已變形如條 帶,特別是接觸帶上複合了走向滑移剪切作用及正斷層作 用。岩體內部有些韌性剪切帶顯見礦物由原本散點狀分布的 火成岩特徵,轉變為排列緊密的片麻狀條帶特徵(如溪畔岩 體白沙橋附近),甚至變形溫度高於500 ℃的韌性剪切帶, 會發育超塑性的變形作用,不僅形成片麻狀構造,部份岩漿 流動的混合岩構造(如南澳北溪中下游的源頭山岩體)。

(b) 褶皺:

中視構造尺度上常見等斜的緊密褶皺及層間褶皺(如圖 2-129所示)。這類褶皺常重複出現在巨型褶皺或複似向斜/ 背斜中,例如「砂卡礑複似向斜」位於錐麓複似背斜東側, 軸部出現九曲大理岩和長春片岩,兩翼出現對稱的開南岡岩 體之塊體;此外,和仁到清水地區以開南岡岩體為核心(背

斜軸部),由大理岩褶皺構成「和仁複式背斜」,為一自蘇 花公路向西南延伸的巨視構造(羅偉、楊昭男,2005)。

(c) 葉理:

葉理是變質礦物具有方向性的排列特徵,台灣東部花崗岩的 葉理發育往往跟剪切帶活動有關,大型剪切帶上甚至使岩體 均佈片麻狀葉理(如開南岡岩體)。台灣東部花崗岩的葉理大 多為次生構造,屬於岩體形成後受構造作用發育的類型。但 變質度達角閃岩相的源頭山岩體,甚至發育許多混合岩化的 流動狀葉理(flowage),大部分發育在花崗岩質岩漿侵入角閃 岩帶附近(如四區溫泉旁露頭)。

(d) 斷層:

台灣東部花崗岩的斷層種類很多,早期以剪切擠壓形成的走 滑斷層,常伴生在剪切帶或褶皺軸附近;後期往往是正斷層 發育的重力坍塌構造(Crespi et al., 1996;李元希, 1997)。 斷層帶規模大者可能形成河谷,如立霧溪在燕子口兩岸岩層 錯移關係,即反映了河谷乃順橫移斷層進行下切侵蝕。以溪 畔岩體來看,岩體附近的圍岩如大理岩和片岩,斷層發育很 多,密度高;但岩體本身斷層數量銳減,多為正斷層或橫移 斷層(圖 2-130)。

(e) 節理或裂隙:

從溪畔坑道所見,早期節理多伴生斷層發育,晚期節理則為 張性垂直節理(圖 2-130),最後期節理則為平行地形或河谷 的解壓節理。台灣東部花崗岩的節理滲水不斷,地下水相當 豐沛,且多以方解石為充填物,甚至形成石灰華或鐘乳石(圖 2-131)。

(f) 輝綠岩脈:

在花崗岩中,不連續面是影響地下水特性的主要因素之一, 在台灣東部花崗岩常見的不連續面,除了前述剪切帶、斷 層、節理或裂隙外,還有一些變質輝綠岩脈。源頭山岩體是 輝綠岩脈數量出現最多的地方,這些輝綠岩脈依地球化學特 性顯示,非形成於島弧地區或隱沒帶,而是在大陸內部張裂環境發育到極致下的產物,其岩性與澎湖玄武岩近似(林蔚,2001),但年代應為白堊紀晚期,跟偉晶岩脈侵入時間相當(林啟文,1998)。

(g) 剝蝕節理:

由於台灣東部花崗岩山勢較為陡峭,又有河谷發育,剝蝕節 理多順陡峭的地形面發育,形成較高角度的剝蝕節理。岩體 附近又多與大理岩接觸,地下水溶解的碳酸鈣成份,易在此 類節理中充填、沈澱及結晶出方解石。

(2) 台灣東部花崗岩之構造分期:

李元希(1997)將大南澳變質帶的構造演化分為五期,由老至新為: (a) 韌性剪切帶及伴生的緊密褶皺;(b)具伸張線理的韌性走向滑 移 剪 切 帶 ; (c) 偃 臥 褶 皺 及 伴 生 的 夾 皺 劈 理 (参 見 圖 2-129); (d) 韌性正斷層及伴生的葉理(參見圖 2-130);(e)脆性正斷層及伴生 的重力褶皺、走向滑移斷層及節理。這五期構造演化顯示溪畔岩 體所在大南澳變質帶,在造山帶形成的過程中,從早期深層岩層 的構造發育,經過抬升剝蝕作用到發育淺層的構造,大地應力對 山脈岩層的影響,有明顯由擠壓往引張的轉變,特別是後期已進 入山脈塌陷的階段,此階段以脆性變形的重力坍塌構造為主(圖 2-130);張性構造的伸張方向約在東北-西南方向或東西方向,特 別是最後期或近期的脆性正斷層發育時,最大主應力方向接近鉛 直方向,顯示以重力坍塌方式控制了山脈的變形(李元希,1997)。 由溪畔岩體之坑道調查發現,此走向滑移或橫移斷層作用,以及 後期正斷層作用的坍塌構造,均形成岩體中主要之導水裂隙帶, 裂隙帶中富含方解石礦物之充填物,可能源自於地下水溶解圍岩 大理岩後,經遷移、沈澱於裂隙中而成(圖 2-131)。

(3) 金門花崗岩構造特性:

金門位於長樂-南澳深斷裂帶的中段,花崗片麻岩基盤常見構造 作用的影響。花崗岩類侵入構造可依岩體侵位深度差異,可明顯 分為深位侵入型(以花崗片麻岩及角閃石黑雲母片麻岩為主)及淺

位侵入型(以花崗岩、偉晶岩為主)兩類;在侵入作用同時伴生了 橫移斷層的韌性剪切作用。在花崗岩侵入後,大地構造環境以張 裂構造為主,各岩體廣泛出現張裂節理及大小規模不等的正斷層 帶,約與台海張裂及沈陷的時期相當。最後,因岩體抬升與剝蝕 至接近地表,在結晶基盤岩上,廣泛發生因解壓作用形成的大型 洋蔥狀剝蝕節理。

(4) 金門花崗岩構造分期:

林蔚等(2003)將金門花崗岩的構造演化分為八期,由老至新為:

- (a) 侵入構造:太武山岩體因受到後期變質與變形作用影響,無 侵入構造特徵;斗門岩體中流動構造發育最為明顯。斗門岩 體侵入太武山岩體之深度甚深,與白堊紀早期燕山運動之左 移剪切帶活動有關,並導致太武山岩體發生混合岩化作用。
- (b) 混合岩構造:往往與角閃岩脈共生,為燕山運動同構造侵入 作用之產物。
- (c) 韌性剪切構造:以燕山運動期的左移剪切活動為主,後期疊加晚燕山期張裂環境的右移剪切構造。
- (d) 細粒花崗岩脈及偉晶岩脈侵入構造:多順被動張性節理侵入 並快速冷卻成岩脈,顯示侵入當時侵位深度相當淺,且已屬 於張裂型大地構造環境。
- (e) 冷卻節理:多伴生在細粒花崗岩脈或偉晶岩脈附近,為基盤 岩快速冷卻收縮的結果(圖 2-132)。
- (f) 輝綠岩脈群侵入構造:往往順東北向張性節理侵入,此類節 理亦多與基盤岩的冷卻節理(圖 2-132)相伴而生,此外岩脈 內又發育許多岩脈自身形成的冷卻節理。
- (g) 正斷層構造:以東北向的太武山斷層及金龜山斷層為代表(圖 2-133)。
- (h) 剝蝕節理:岩體剝蝕近地表時,因風化及解壓作用形成的節理,多為最後期之低角度構造,並平行地表發育。



圖 2-129:台灣東部溪畔隧道旁溪畔岩體與大理岩邊界處的褶皺構造 資料來源:李元希,1997



圖 2-130:台灣東部溪畔岩體中具伸張特性的高角度韌性剪切帶 資料來源:李元希,1997



圖 2-131:台灣東部花崗岩之破碎帶為地下水的主要通道 地點:台灣東部溪畔坑道;破碎帶富含方解石充填物。



圖 2-132:金門花崗岩常見的冷卻節理與輝綠岩脈群



圖 2-133:太武山斷層帶根據鑽井鑽遇斷層面深度推算之位態

2.3.1.4. 花崗岩地質史

地質史是了解岩體過去受到地質作用影響的過程,可據以推估未 來是否具有潛在影響岩體地質環境的因素。由於台灣東部花崗岩與福 建沿海的花崗岩地處不同的大地構造環境,因此分別討論其大地構造 演化過程及地質史。

台灣東部花崗岩的大地構造演化過程,有兩種大地構造演化論述:(1)大陸楔(continental wedge)模式下的台灣造山作用(例如何春 蓀,1986; Fuller et al.,2006及其引用之相關文獻等);(2)陸緣塊體組 合成的台灣造山運動(Lu and Hsu, 1992; Shyu et al.,2005),其差異也 影響了台灣東部花崗岩長期穩定性的現有認知,值得深入討論,以下 就兩者在蓬萊運動前大地構造演化,及其對台灣東部花崗岩影響進行說明:

(1) 蓬萊運動前大地構造演化:

- (a) 蓬萊運動發生前,此區地體架構在中新世時(約8Ma之前), 有被動大陸邊緣架構(Teng and Lin, 2004)與塊體分離及隱 沒帶架構(Lu and Hsu, 1992)等解釋。在此架構下,蓬萊運動 之弧陸碰撞過程,前述兩者有不同的論述,在此做一比較。 前者(被動大陸邊緣架構)認為此區為張裂的大陸斜坡,並無 隱沒帶系統存在,因為菲律賓板塊向西北移動,把呂宋島弧 撞進大陸邊緣,使島弧北段將原本陸緣海盆的沉積岩推擠成 山。後者(塊體分離及隱沒帶架構)認為大南澳片岩帶屬於大 陸東緣在中新世前因海板塊張裂而漂離的塊體,因中新世時 (約15 Ma)發生海板塊向東對大南澳片岩帶的隱沒作用,而 使塊體漂向大陸,並發生大南澳片岩帶的隱沒作用,而 使塊體漂向大陸,並發生大南澳片岩帶與台灣西部之基盤岩間, 曾存有一海洋板塊,在隨後之呂宋島弧與大南澳片岩帶的碰 撞(約5 Ma)時隱沒消逝。
- (b) 在蓬萊運動之弧陸碰撞過程中,新近研究均重視台灣東部花 崗岩鄰近的大南澳片岩普遍發生的張裂構造, Pulver et al.

(2002)認為跟呂宋島弧(包括海岸山脈)向北漂移,使大南澳 片岩帶相對地橫移脫逸(extrusion)有關,因此可能產生塊體 的剪切而張裂(transtension)。根據葉恩肇(1997)整理之大南 澳片岩帶受蓬萊運動影響之壓力-溫度-時間路徑(P-T-t Path,參見圖 2-128),顯示變質作用超過石英、雲母、長石、 角閃石等礦物的塑性變形起始溫度;大部分溫度定年學的資 料顯示此變質溫度下,同位素重置(reset)後的年代值。因此, 可推估大南澳片岩帶曾因蓬萊運動之弧陸碰撞作用 (Teng and Lin, 2004), 或弧陸碰撞之前的隱沒作用(Lu and Hsu, 1992),使之深埋至綠色片岩相變質度的地殼深度(約6~12公 里),再因持續碰撞擠壓而抬升。構造上的證據顯示,近1.5 Ma 以來,此區已開始發展張裂(乃至沈陷)的構造。由於岩體受 到擠壓轉變為張裂作用的影響,現有定年資料在岩體剝蝕與 抬升的解釋上,已有不同的看法;若考慮張裂作用的重要 性,則抬升率將大幅降低。如前所述,西部沉積層堆積史來 推估台灣東部山脈的抬升,也支持抬升剝蝕率向下修正的看 法(Simoes and Avouac, 2006)。

- (2) 蓬萊運動對台灣東部花崗岩的影響:
 - (a) 台灣屬於世界最年輕的造山帶之一,其山脈隆起的成因,與
 B宋島弧與歐亞大陸邊緣在近數百萬年來的「弧陸碰撞」
 (arc-continent collision)有關。
 - (b) 台灣東部花崗岩為中央山脈東翼大南澳片岩帶重要的組成 岩層,在弧陸碰撞中亦受到綠色片岩相變質作用所影響 (Ernst and Jahn, 1987),許多放射性定年結果因而顯示重置 (reset)的年代值,並在近期的蓬萊運動中發生快速抬升,使 位於宜蘭至花蓮間的台灣東部花崗岩核飛跡定年 (fission-track dating)結果,一致呈現出年輕的年代值 (0.9~1.5 Ma),且由北往南年輕的趨勢,顯示弧陸間斜碰撞 的影響(Liu et al., 2001; Willett et al., 2003; Fuller et al., 2006)。

- (3) 近期構造演化:
 - (a) 過去對台灣造山運動之中央山脈形成模式,均主張近期山脈發生快速抬升與剝蝕作用(如Huang et al., 2006),使中央山脈東翼屬於深層變質岩的岩層剝蝕出露(Lo et al., 1995; Pulver et al., 2002)。近來發現山脈坍塌的張裂性斷層遍佈於中央山脈(Crespi et al., 1996;李元希, 1997),顯示近期構造活動即便仍受菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊斜碰撞的影響,但山脈的長期穩定性已因張性構造的發育而增加,剝蝕率也因此有長期降低的趨勢。偃臥褶皺的發育,即為山脈坍塌的證據之一,偃臥褶皺的主葉理面受鉛直方向的作用力(即重力)影響,因此世界上許多造山帶中,山脈坍塌伴生出許多偃臥褶皺,基本上都是重力形成的(李元希, 1997)。
 - (b)此外,關於張性斷層的證據,整體而言中央山脈東翼花崗岩 所在的大南澳變質帶,於和平地區以南,由伸張線理的觀察 發現,最大伸張的方向是以東南向西北伸張,在造山過程中 至少在1.5~1.1 Ma已形成(王珮玲,1997),與橫移壓縮的構 造作用有關,使伸張線理的分布垂直於板塊移動的方向,且 與台灣造山運動的斜碰撞運動關係密切(李元希,1997)。
 - (c) 根據Shyu et al. (2005)研究指出,活動斷層及活動褶皺在台灣呈現明顯的分帶特性,受三大地殼單元所控制,包括西部歐亞大陸、分離的陸塊(即大南澳片岩帶)及菲律賓海板塊的呂宋島弧(圖 2-134)。在此構造體系下,台灣西部歐亞大陸單元下插至大南澳片岩帶所在地殼單元的界面,可能是台灣西南部高雄、台南及屏東下方地殼深部地震存在的主因;相較之下,位於此界面之上的區塊(包括大南澳片岩帶及台灣東部花崗岩),則呈現出較少的震源分布(Shyu et al., 2005)。

另一方面,位於台灣海峽西側的福建沿海離島(如金、馬、烏坵等地),在花崗岩形成時期,與台灣東部花崗岩的大地構造演化是息息相關的。根據鄧屬予(2002)及Teng and Lin (2004)提出的大地構造

演化模式,顯示福建東南沿海的花崗岩與台灣東部花崗岩,均受到太 平洋海板塊隱沒到歐亞大陸板塊的隱沒作用影響,形成大陸邊緣的 「安地斯山型」岩漿活動(圖 2-136之圖A至圖C)。同樣地,根據岩漿 活動反映的大地構造演化過程,林蔚(2001)提出福建沿海的花崗岩先 於140~110 Ma發生侵入與變質作用,而台灣東部花崗岩後於90~80Ma 發生侵入與變質作用,此一由內而外的岩漿活動遷移,反映古太平洋 海板塊向東退縮(retreat),向海一側發生拉張作用的過程,此一過程 持續發生到中新世,形成數千萬年的張裂型被動大陸邊緣張裂活動 (圖 2-137)。

根據金門地區地質調查地質史所整理的火成岩侵入活動與岩層 形成時序,可反映出華南大陸東南緣穩定地塊形成的過程,簡述如下: (1) 岩層:

- (a) 位於廈門灣外的金門島及烈嶼,屬於福建東南之長樂-南澳 深斷裂帶所影響的地質區,由中生代的片麻岩及花崗岩構成 基盤,上覆第三紀地層及玄武岩流。
- (b) 金門島出露的岩層由老至新可劃分為:金龜山片岩、太武山 花崗岩、斗門花崗岩、成功片麻岩、田埔花崗岩、金門層、 雙乳山玄武岩及紅土礫石層;烈嶼則劃分為羅厝片岩、青岐 片麻岩、將軍堡混合岩、后頭雜岩、九宮花崗岩、金門層、 烈嶼玄武岩及紅土礫石層。
- (2) 岩層形成年代、成因與鄰近地區地層之對比關係:
 經勘查福建東南沿海圍頭、廈門、龍海一帶,進行岩性、產狀、
 構造型態與截切關係等對比,發現:
 - (a) 金龜山片岩及羅厝片岩之岩性以白雲母石英片岩為主,可能 與龍海之親營山組對比。太武山花崗岩及青岐片麻岩 (160~140 Ma)原岩為鹼性花崗岩侵入體,與龍海地區島美岩 體或漳浦岩體可能為同期岩漿活動產物,侵入親營山組,而 後均受到長樂-南澳深斷裂帶的剪切作用(130~110 Ma)影 響,而具片麻狀構造。將軍堡混合岩及成功片麻岩均為英雲 閃長岩脈,分布在北東向或北西向的剪切帶上,前者侵入羅

厝片岩,後者侵入太武山花崗岩,常伴生角閃岩脈,並導致 圍岩發生混合岩化作用(migmatization),與圍頭的石圳岩體 同屬於長樂-南澳深斷裂帶上同造山期(syn-orogenic)岩浆活 動的產物。后頭雜岩的岩性主要為流紋岩質碎屑火山岩及斑 岩岩脈,多已高度風化(高嶺土化),可與遍佈閩東的南圓組 對比。田埔花崗岩及九宮花崗岩分別侵入到成功片麻岩及將 軍堡混合岩中,均為後造山期(post-orogenic)侵入活動的產 物,其岩性及年代(101 Ma)可與漳州複式岩體對比。

(b) 金門地區遍佈了東北向的張性(tensional)輝綠岩脈群(92~76 Ma),侵入到基盤岩的冷卻節理中,在閩東沿海地區非常普遍;晚白堊紀至早第三紀此區正斷層(如太武山斷層及金龜山斷層)活動影響而抬升與剝蝕,於半地塹谷地之古河道上,堆積了金門層及紅土礫石層,約中新世中期,金門層發生沈積間斷,同時發生與澎湖期相當之玄武岩噴發活動,可與龍海的流會玄武岩對比。此後,此區花崗岩以緩慢剝蝕方式出露地表,其上岩層堆積僅受海水面升降所影響,類似澎湖群島均屬於此區域地質穩定的地塊。



圖 2-134:台灣地體構造可區分為三個緊臨的條帶

資料來源: Shyu et al., 2005

說明:台灣地體構造可視為一個火山島弧(指呂宋島弧北段的海岸山脈),縫合著 一個大陸地殼殘片(指中央山脈)再貼在大陸邊緣(指雪山山脈以西)。DF:變形前 緣(Deformation Front);LCS: 梨山-潮州縫合帶(Lishan-Chaochou Suture);LVS: 縱 谷縫合帶(Longitudinal Valley Suture);WF:西部麓山帶(Western Foothills);CeR: 中央山脈(Central Range);CoR:海岸山脈(Coastal Range);HP:恆春半島 (Hengchun Peninsula);P:梨山-潮州縫合帶上的枕狀熔岩流露頭。A-A'、B-B'及 C-C'剖面示意圖參見圖 2-135所示。



圖 2-135:台灣地體構造的三個橫向剖面示意圖

資料來源: Shyu et al., 2005

說明:A-A'、B-B'及C-C'地理位置參見圖 2-134所示。這三個剖面也反映台灣造 山運動的三個階段,最南段的A-A'剖面反映弧陸未碰撞的架構;中段的B-B'剖 面反映弧陸碰撞作用現貌;北段的C-C'剖面反映三個條帶已接合並受到菲律賓海 板塊隱沒作用影響。CHF: 彰化斷層(Changhua Fault); CLPF: 車籠埔斷層 (Chelungpu Fault); LSF: 梨山斷層(Lishan Fault); CRF: 中央山脈斷層(Central Range Fault); LVF: 縱谷斷層(Longitudinal Valley Fault)。



圖 2-136:台灣大地構造演化示意圖

資料來源: Teng and Lin, 2004

說明: CMR: Central mountain range; CO: Coastal Range; HT: Hsuehshan Trough; MP: Mindoro-Palawan block; NJ: Nanjihtao Basin; SCS:South China Sea Basin; SCSR: South China Sea rift。



圖 2-137:台海地區岩漿活動與大地構造演化圖

資料來源:林蔚,2001

說明:(A)侏羅紀至早白堊紀(約140 Ma以前)古太平洋板塊向西隱沒至歐亞大陸 邊緣,大陸內部廣泛發生板內型張裂環境的岩漿活動;(B)早白堊紀(約120 Ma左 右)西太平洋發生洪流玄武岩噴發活動,歐亞大陸邊緣亦發生廣泛的燕山運動; (C)燕山運動後期(約110-100 Ma)造山帶內部形成張裂環境的後造山型花崗岩(如 福建、金門等),造山帶邊緣則發生高壓低溫相變質作用(如台灣東部大南澳變質 帶);(D)晚白堊紀(約90-80 Ma)造山帶內部形成張裂型火山活動,造山帶邊緣則 形成張裂環境之後造山型花崗岩(如台灣東部花崗岩);(E)晚白堊紀至始新世隱沒 作用停止,大陸邊緣發生板內型張裂環境的玄武岩噴發活動,台灣東部大南澳變 質帶無島弧岩漿活動發生;(F)中新世大陸邊緣張裂與南中國海板塊。 2.3.1.5. 花崗岩長期穩定性

就區域地質而言,台灣東部花崗岩過去因接近歐亞大陸板塊與菲 律賓海板塊邊界,推論可能長期受到劇烈的板塊運動影響,過去並未 列入潛在處置母岩考量範圍。火山活動、地震活動及活動斷層均為板 塊邊界常見的地質災害,就過去長程處置計畫調查區域評選所能獲得 的有限資料而言,板塊邊界理論上應存在許多不利於處置技術特性調 查與評選的條件。

然而,日本同為板塊邊界的複雜地質條件(較台灣東部為複雜的 是,日本為太平洋海板塊、菲律賓海板塊、歐亞大陸、北美板塊等聚 合的地區),通島均有無數火山活動、地震活動、活動斷層的威脅, 但日本平成12年(JNC, 2000a)提出的處置技術可行性報告顯示,日本 仍能在其本土找到適合進行高放射性廢棄物最終處置的深層地質條 件。因此,至今日本在處置技術發展上仍不懈精進其調查與安全評估 技術。

有鑑於此,台灣東部即便如日本島地質之複雜性,都應深入調查 其深層地質特性,評估是否真不適宜進行作為潛在處置母岩。根據本 節收集與分析之現有研究顯示,台灣東部花崗岩相鄰的板塊邊界非隱 沒帶,而屬於橫移斷層類型;深部地殼存在「無震帶」,顯示地震活 動並非均布全區;此外岩體並非長期抬升,近百萬年來以張裂及沈陷 構造發育為主,並有長期逐漸降低剝蝕率的趨勢。

(1) 台灣東部花崗岩的長期穩定性:

台灣東部花崗岩位於歐亞大陸最東緣接合菲律賓海板塊的板塊 邊界附近,因此處於世界最活動的地震帶上,但是中央山脈東翼 的地震活動空間分布,並非均匀的分布在台灣東部花崗岩附近, 反而是侷限在板塊活動的深部構造上,由於震源隨板塊深度而分 布,此類地震發生的深度較深,即便震度規模大者也會因距離而 降低危害。

(a) 台灣東部花崗岩之地震分布與「無震帶」:

新近針對台灣東部花崗岩相鄰板塊邊界的地震活動研究指 出,規模大於4 旦深度小於35公里的地震分布,幾乎不出現 在台灣東部花崗岩分布的範圍(Chou et al., 2006);甚至針對 深層地震的分布研究發現,中央山脈東翼深部地殼存在「無 震帶(aseismic zone)」(參見圖 2-138),可能與強度高的大陸 地殼塊體有關(Lin, 2000)。為何在中央山脈下方地殼中有無 震帶的存在?由低地震震源分布及P波或S波地殼波速降低 等特性,長久以來引發許多地球物理的爭論,許多論點認為 可能與此區存在熱的、具塑性變形的物質(Wu et al., 1997; Lin, 2000)、甚或受到隱沒至菲律賓海板塊下的歐亞大陸板 塊 滑 脫 分 離 作 用 (detachment) 的 影 響 (Lallemand et al., 2001)。Chen et al. (2004)認為除上述因素外,也有可能是因 為隱沒的含水礦物發生脫水作用,產生流體並降低了該深度 的有效應力使然。

(b) 台灣東部花崗岩之剝蝕與抬升演化史:

一般對年輕於10 Ma定年資料的解釋,採行該年代所記錄之 礦物封存溫度,反映岩層抬升的地溫梯度相應變化,可根據 岩體中所含低溫年代學分析的記錄來推估岩層隨構造活 動、山脈風化剝蝕而抬升至出露的溫度年代變化曲線(即冷 卻率)。台灣東部花崗岩利用核飛跡鋯石及磷灰石定年結果 推算出近1 Ma有極高的冷卻率或剝蝕率,可能是岩體因弧陸 碰撞而快速抬升的證據(Liu et al., 2001; Huang et al., 2006)。另一方面,Fuller et al. (2006)亦根據同樣方法加上更 多的分析數據及抬升模式推算,發現台灣東部花崗岩其實有 長期逐漸降低剝蝕率的趨勢(圖 2-139a, b)。而且可能在2 Ma 前即已達到剝蝕的穩定狀態,並無加速抬升剝蝕的條件;相 較於台灣東部花崗岩來說,近2 Ma來台灣西部的構造活動劇 烈且岩層剝蝕厚度也高了許多(Beyssac et al., 2007)。Johnson et al. (2005)就數十年來全球衛星定位系統的監測資料模
擬,也發現中央山脈與台灣東部花崗岩未來十年具備沈陷的 趨勢(圖 2-139c)。

(2) 金門花崗岩的長期穩定性:

温度定年學乃利用放射性定年法分析礦物或全岩之年代值,在參 考各種不同定年法間,同位素平衡與溫度的關係——即封存溫度 (closure temperature)條件的差異,進而討論花崗岩從侵入到冷卻 的年代記錄,以代表地體環境的熱事件演化過程。其中,各定年 分析礦物的封存溫度高於500 °C的定年法,包括鈾鉛法鋯石 (>700 °C)、釤釹法全岩(>650 °C)及氫氫法角閃石(550±50 °C) 較能反映岩漿侵入年代或高溫變質年代,例如太武山岩體侵入年 代根據鈾鉛定年法鋯石分析為139 Ma前(Yui et al., 1996),而氫 氫法角閃石定年得到100 Ma前的年代(Lo et al., 1993),反映此區 受到100 Ma前田埔細粒花崗岩侵入作用的影響(林蔚, 1994)。另 一方面,對於封存溫度低於300 °C的冷卻年代分析稱為低溫年代 學,使用包括:鉀氫/氫氢法黑雲母(300±50 °C)、鉀長石(200± 50 °C)及核飛跡法鋯石(230±20 °C)、磷灰石(120±20 °C)等方法 來解析冷卻史,較易反映地溫梯度的變動,可用來解析上部地殼 剝蝕抬升的歷史與長期穩定性。

- (a) 金門花崗岩之侵入活動與地殼變動:
 - 金門地區基盤岩的形成受到大陸東南白堊紀造山運動(稱之 為燕山運動)的影響甚鉅,約140 Ma前此區受到大陸裂谷型 岩浆活動影響,形成太武山鹼性花崗岩,侵入到古生代地層 中(即金龜山片岩,可對比至鄰近大陸地區的親營山組變質 沉積岩)。而後因太平洋板塊隱沒作用加劇而發生燕山運動 (約130 Ma至110 Ma之前),同造山期侵入活動順長樂-南澳左 移剪切帶侵入,伴生混合岩化作用及角閃岩相變質作用等影 響,使太武山花崗岩變成具片麻狀構造的岩脈或具混合岩特 徵的基盤岩。燕山運動後期山脈坍塌並發生張裂作用(約110 Ma至100 Ma前),全區均受到後造山期侵入活動、右移剪切 活動及張裂構造活動所影響,金門地區以細粒花崗岩脈及基

性岩脈的侵入作用為主,並發育許多偉晶花崗岩脈及張性半 塑性剪切帶,此時花崗岩漿活動停止,僅有順張裂節理侵入 基性岩脈群發育,此區已屬於非造山期的大地構造張裂環境 (圖 2-141)。

(b) 金門花崗岩之張裂活動與塊體差異抬升:

金門地區新生代大地構造環境,以張裂環境演育為主,金龜 山斷層與太武山斷層等正斷層系統,組合了半地塹式抬升與 沈陷模式(圖 2-140),由低溫定年學的溫度-時間冷卻路徑 (圖 2-140a),可以清楚看到斷層上下盤的差異抬升與冷卻關 係,此一模式也說明了斷層活動導致的地殼不穩定,僅發生 於新生代早期。近30 Ma來,斷層可能不再活動。約30 Ma 前金門的基盤岩出露地表,金門層在半地塹谷地(古九龍江 河道)沉積,屬於陸相環境,但在15 Ma前因全球海進作用達 到高峰而使金門地區四面環海(類似今日),隔絕與鄰近大陸 地區河系的連繫,金門層停止沉積;約15 Ma前至10 Ma前, 全球海進作用在達到高峰後,發生海退作用,四周環海的金 門地區再度成為陸相環境。當13 Ma前大陸內部張裂型玄武 岩流在金門地區噴發時,海水面的高度與海岸相對位置,約 與今日相當;換言之,金門地區與澎湖地區一樣均為國土範 圍內較穩定的地區。



圖 2-138:台灣地區震源分布及無震帶

資料來源: Lin, 2000; p. 191, Fig. 2

說明:點線標示東北(A-A')及南台灣(B-B')的班尼奧夫帶(Benioff zone) 虛線及問號標示C-C'剖面顯示的無震區域,稱之為「無震帶(aseismic regions)」 (中央氣象局1992-1996年地震規模大於3的資料投影;摘自Lin, 2000)



圖 2-139, 中央山脈東側剥蝕平與造山带平均剥蝕平之比較 (a) 約5 Ma前的推測地形高度(實線標示)與侵蝕率(虛線標示)之關係(摘自Fuller et al., 2006; Fig. 14) ,顯示台灣東部花崗岩所在(箭頭標示)之地形與侵蝕率均屬 較低的地區;

(b) 中央山脈東側(含台灣東部花崗岩)侵蝕率(虛線標示)與造山帶平均侵蝕率(實 線標示)的時間演變圖(摘自Fuller et al., 2006; Fig. 14),顯示台灣東部花崗岩所在 之大南澳變質帶侵蝕率數百萬年來有逐漸降低的趨勢;

(c)由數十年來全球定位系統的記錄模擬未來抬升率的趨勢(摘自Johnson et al., 2005),顯示台灣東部花崗岩及中央山脈均較台灣其他地區相對具有沈陷的趨勢 說明:空心箭頭所指處為台灣東部花崗岩之概略位置



圖 2-140:福建東南花崗岩區張裂型大地構造演化示意圖



圖 2-141:金門地區新生代張裂環境演育的半地塹式抬升與沈陷模式

2.3.2. 泥岩

比利時、法國、瑞士選擇具有低滲透率及高吸附力特性的泥質岩 類作為處置母岩,因此分布於台灣本島泥質岩類亦列為潛在處置母岩 特性調查與資料蒐集的對象(林朝宗等5人,1991)。台灣泥岩分布主 要在西南部平原區地下及麓山帶(圖 2-142),及海岸山脈等地,屬於 未變質的泥岩層;另外,在雪山山脈及中央山脈亦有泥岩層出露,屬 於輕度變質的泥岩(包括硬頁岩、板岩等)。

2.3.2.1. 西南部泥岩分布

西南部泥岩區北自新營附近的龜重溪,南抵高雄壽山與旗楠公路 附近之麓山丘陵。主要的地層包括新化、關廟的六雙層;左鎮、南化、 古亭及田寮等地區的古亭坑層;烏山頭水庫附近的二重溪層、崁下寮 層、六重溪層;位於高雄、台南兩縣之北寮頁岩、芋埔頁岩、鹽水坑 頁岩;以及恆春半島西半部從枋寮南延至墾丁國家公園的墾丁層。

經中油公司油氣探勘的震測剖面及鑽井資料發現,台灣西南部泥 岩地下延展頗為廣泛,遍及西南部平原區,越往西南海域方向越深 厚。臺南一號探井位於成功大學附近,井深5,151m,除地表以下375m 為砂頁岩互層為主之二重溪層以外,其餘總鑽進深度4,776m均為泥岩 (圖 2-143)。位於高雄縣的中洲三號鑽井深度4,420m,自地表下635m 開始鑽入泥岩,至停鑽為止均為泥岩。根據資料研判,泥岩岩層厚度 有由北向南及由東向西增厚之趨勢,在泥岩出露區測得地層厚度在 2,000m以上,在西南部平原厚度達4,000m以上,到了高雄外海,泥岩 厚度更達7,000m以上(林朝宗等5人,1991)。

此外,由水利署地下水觀測網200-300公尺鑽井資料顯示(圖 2-144),鑽遇的泥質基盤岩頂部的深度有由東往西傾斜之趨勢。另根 據嘉南平原南段楠梓-鳳鳴水文地質剖面圖(圖 2-145),除第一地下 水層具較高的砂層比例外,多為半固結的緻密泥岩質基盤(賴慈華等7 人,2007)。



圖 2-142:台灣西南部平原區及麓山帶地質概圖



圖 2-143:台南一號鑽井地質剖面圖 第51,1001,P518

資料來源:林朝宗等5人,1991,P5-18



圖 2-144: 嘉南平原水文地質觀測網泥岩質基盤深度分布圖 資料來源: 賴慈華等7人, 2007



圖 2-145: 嘉南平原南段楠梓-鳳鳴水文地質剖面 資料來源: 賴慈華等7人, 2007

2.3.2.2. 西南部泥岩特性

台灣西南部泥岩地層並非全由泥岩所組成,其夾有若干厚薄不一 的砂岩夾層,此些砂岩層的所在層位不定,多為古河道沉積砂層。泥 岩在台灣西南部地表出露的地區(圖 2-146),呈現遭受強烈侵蝕的惡 地地形景觀,其崩塌裸露地超過25 km²且尚在擴大中,沖蝕率每年約 在6~8 cm,表土流入率約為56mm/1000mm雨量(陳時祖等,1984),裸 露地坡度多在35°至50°之間,分布於海拔50~100 m之丘陵地帶。由於 濕旱顯著,乾季時,泥岩龜裂造成裂縫滲入深處,造成泥岩更易崩解 及被沖蝕。泥岩沖蝕裸露以左鎮、玉井、南化、龍崎、田寮等地最為 嚴重。

2.3.2.2.1. 物理特性

羅建育(1988)曾針對臺灣南部古亭坑層泥岩取105個古亭坑層泥 岩樣品進行篩選,結果小於10μm的顆粒佔58.57%;在大於10μm 顆 粒中,以20~30μm 粒級含量最高,平均佔泥岩之15.31%;其他粒級 平均含量分別如下:30~45μm 佔7.84%,45~63μm 佔6.19%,10~ 20μm 佔5.88%,63~90μm 佔4.91%,大於90μm 者佔1.30%。平均 顆粒度範圍介於5.60~7.50φ之間,平均值為6.72φ(9.5μm),屬於細坋 砂。

高雄田寮「月世界」泥岩之粒徑組成為砂粒5%(粒徑>0.05mm)、 坊粒60%(粒徑0.05~0.002mm)、及粘粒35%(粒徑<0.002mm):而「玉 井」泥岩之組成砂粒32%、坊粒53%、及粘粒15%(萬鑫森等2人,1995)。 西南部泥岩出露地區之物理性質相關調查試驗結果如表 2-35。Lee et al.(2007)整理台灣西南部出露泥岩之物理特性如表 2-37,發現以粉 土(粒徑0.06~0.002mm)佔55.0~79.2%為主,黏土(粒徑<0.002mm) 的15.8~42.0%為次,砂(粒徑>0.06mm)含量較少。但含砂量卻與採 樣地區有關,即採樣地點愈往南,含砂量愈少。

經濟部水利署曾委託工研院能資所在西南部平原地區設置地層 下陷監測井,並取岩心進行物理及力學試驗,其中包括許多泥岩層之

樣品,地表30m以下之相關試驗結果整理如表 2-36,其中顆粒組成以粉土佔38.4~69.0%為主,黏土的28.4~61.3%為次,砂含量較少。 與表 2-37近地表之試驗結果類似,仍以細顆粒為主。

根據表 2-37,泥岩之液性限度在29.0~42.2%之間,塑性限度則 在7.4~25.4%,塑性指數10.5~24.8%,但大部份集中在14~18%之 間;根據表 2-36,其液性限度在28.3~43.3%之間,塑性限度則在15.8 ~23.5%,塑性指數12.0~19.8%,大部份集中在13~18%之間,顯示 泥岩屬於低塑性地質材料。

泥岩之土粒比重集中在2.71~2.75,不因採樣地點而有所差異。 但玉井與旗山樣本之含水量卻有頗大之差異,應是受採樣後之保存狀 況之影響,泥岩之自然含水量接近17% (Lee et al., 2007)。在表 2-36 中,比重在2.65~2.74之間,其中以台南科學園區之土粒比重略小, 在2.65~2.69之間。含水量17.0~33.3%之間,惟大部分集中在21.0~ 24.1%之間。林朝宗等5人(1991)認為泥岩較深處之含水量約4%。由此 可知泥岩之含水量可能因取樣地點、取樣方法、取樣深度等不同,而 有頗大的差別。

泥岩雖然有不低的孔隙比,但由於細顆粒含量很高,孔隙細微流 通性低,因此滲透性極低。在台南西埔鑽井(試驗深度82-100公尺)及 高雄鹿埔鑽井(試驗深度0-202公尺)之現場試驗結果,透水係數在0.9 ~1.5×10⁻⁶ cm/sec之間(林朝宗等5人,1991);鄭志鴻(1996)、林宗曾 (1998)指出台灣西南部泥岩的滲透係數極低,實驗室量測的滲透係數 介於5.98×10⁻⁶~6.97×10⁻⁹ cm/sec之間,新鮮泥岩的滲透係數則介於 2.5×10⁻⁷~1×10⁻⁸ cm/sec,夯實泥岩的滲透係數則維持在5.98×10⁻⁶~ 6.97×10⁻⁹ cm/sec。在恆春地區(石門層)之泥岩樣品,其透水係數大部 分在0.16~4.4×10⁻⁶ cm/sec(工研院能資所,2002)。由此可知,西南部 泥岩透水性雖與一般對於屏障材料低透水性(<10⁻⁷ cm/sec)之要求相 近,但若與瑞士北部地區之Opalinus 黏土層(約10⁻¹³ cm/sec),及比利 時Mol-Dessel之黏土層(10⁻¹² cm/sec)相較,則相去甚遠。



圖 2-146:台灣西南部泥岩出露區及附近地區地質圖 資料來源:轉繪自林朝宗等5人,1991

SNFD2009

表 2-36:台灣西南部鑽井泥層之物理特性

鑽井地點	Gs	e	w(%)	$\gamma_d(t/m^3)$	阿太堡限度(%)		DI(0/2)	粒徑組成(%)		沉 庄 (m)	
					LL	PL	1 1(70)	S	М	С	(不)又(111)
台 南 下營國小	2.73	0.92	33.3	1.9	43.3	23.5	19.8	0.3	38.4	61.3	64~64.8
	2.72	0.63	23.2	2.1	28.3	15.8	12.5	0.1	55.0	44.9	77.55~78.3
	2.70	0.46	17.0	2.2	29.8	16.5	17.3	2.6	69.0	28.4	94.3~95.15
	2.71	0.74	24.1	1.9	33.8	16.5	17.3	18.0	50.4	31.6	96.1~96.95
	2.68	0.59	22.0	2.1	31.2	18.0	13.2	0.3	50.9	48.8	66.75~67.6
台 南	2.67	0.62	23.2	2.0	31.7	18.5	13.2	0.1	51.1	48.8	67.6~68.4
科學園區	2.69	0.75	26.1	1.9	30.5	17.3	13.2	0.3	54.5	45.2	71~71.85
	2.65	0.64	21.0	2.1	31.5	16.9	14.6	1.2	67.0	31.8	96.95~97.75
高雄永安	2.74	0.84	28.8	1.9	34.0	22.0	12.0	1.0	39.8	59.2	36.5~37.3
新港國小 鹽田分校	2.72	0.65	23.8	2.0	30.6	16.2	14.4	1.9	38.5	59.6	53.3~53.75

資料來源:工研院能資所,2001&2003

SNFD2009

表 2-37:台灣西南部出露泥岩之物理特性

採樣地點 Gs	Ca	e	w(%)	$\gamma_d(t/m^3)$	阿太堡限度(%)		$\mathbf{DI}(0/1)$	粒徑組成(%)			会卫 士郎
	US				LL	PL	1 1(70)	S	М	С	今亏 又麻
東山	2.73	—	17.0	1.90	42.2	25.4	16.8	10.0	55.0	35.0	李德河等(2005)
烏山頭	2.75	—	17.0	2.17	37.0	21.0	16.0	10.0	65.0	25.0	楊金在(1975)
玉井	2.71	0.47	17.4	1.86(2.18)	31.6	17.1	14.5	5.0	79.2	15.8	莊長賢(1976)
關廟	2.73	—	_	_	32.2	7.4	24.8	6.0	78.0	16.0	林晉祥(1975)
龍崎	_	0.24	—	2.2	31.4	20.9	10.5	2.0	70.6	27.6	謝文元(1995)
田寮	2.71	_	_	2.24~2.26	41.0	23.0	18.0	1.1	56.9	42.0	葉信宏(1999)
旗山	2.71~2.72	0.22~0.27	1.73~2.00	2.14~2.24	28.2~30.3	16.0~18.8	_	6.0	64.0	30.0	許琦(1999)
柴山	2.72	_	_	_	35.1	20.4	14.7	4.0	65.7	30.3	陳煒鳴 (1997)

資料來源:Lee et al., 2007, P85

說明:Gs:specific gravity; e:void ratio; w:water content; PI:plastic index; S:sand; M:silt; C:clay

2.3.2.2.2. 礦物組成與化學特性

台灣西南部泥岩主要由粉土及黏土顆粒組成,其礦物組成以石英 為主,富集於粉土顆粒,黏土礦物則以伊萊石最多、綠泥石次之,富 集於黏土顆粒,膨脹性黏土含量較少(林朝宗等5人,1991;陳冠廷、 雷大同,2007),蔡金郎(1984)利用X 光繞射法分析進行泥岩礦物成 分分析的結果,其主要礦物成分分別為:石英(28.45%)、伊萊石(平均 含量30.54%)、綠泥石(28.70%);次要礦物則包含長石、方解石與高 嶺石等,至於膨脹性粘土的含量則相當少量。另顏富士、蔡鎰輝(1985) 分析六雙層、二重溪層、古亭坑層及茅埔坑層等大量的泥岩樣品,亦 指出泥岩中黏土礦物的種類是以伊來石和綠泥石為主。台南下營國小 與台南科學園區地層下陷監測井之泥岩樣品,黏土礦物以伊萊石最 多、綠泥石次之,其他尚包括高嶺石,及少量膨土(工研院能資所, 2001)。林宗曾等4人(1996)亦指出泥岩礦物除了石英、伊萊石,還包 括少量的鋁酸鈣膠體(calcium aluminate hydrates, CAH)和矽酸鈣膠體 (calcium silicate hydrates, CSH),此雨種主要膠體將砂、沈泥及粘土 顆粒膠結成岩,在岩化過程中產生類似水泥水化作用,因此泥岩在乾 燥狀態時相當堅硬。

有關泥岩的化學組成,早在1943年,林讚生就曾針對高雄燕巢滾 水坪泥火山分析噴出物的化學組成。林宗曾等4人(1996)、張育德 (1996)、廖正傑(2004)分別針對旗山、曾文溪及二仁溪流域、及田寮 地區泥岩,分析其化學成分,其結果如表 2-38所示。由表中可得知 主要化學成分為SiO₂,其次為Al₂O₃、Fe₂O₃,另外還有部分CaO及 MgO。顏富士、蔡鎰輝(1985)取自六雙層、二重溪層、及古亭坑層泥 岩樣品之陽離子交換容量(CEC, Cation Exchange Capacity)分別為 8.3、8.8、8.9 meq/100g;陳宏達(2002)取自高雄內門之泥岩,其CEC 在12.09~12.81 meq/100g;藍培倫(2005)取自恆春泥岩,分析不同粒 徑大小之CEC,在11.28~14.09 meq/100g,對硒的遲滯較銫為佳。由 此可知,西南部泥岩之CEC約在8~14 meq/100g之間,對放射性核種 吸附能力不如比利時Mol-Dessel之黏土層(CEC約為24.0 meq/100g)。

有關泥岩之pH植,上部古亭坑層與下部古亭坑層泥岩之pH值分 別為8.7及8.6(顏富士、蔡鎰輝,1985);高雄燕巢滾水坪泥火山噴泥 之pH在8.26~8.30(林昭遠,1997);高雄內門泥岩pH值為8.9(陳宏達, 2002);台南龍崎泥岩pH 值在8.21~8.53(邱盈達等3人,2007)。因此, 可得知泥岩之pH值在8~9之間,屬弱鹼性之地質材料,而此係泥岩 為海相環境中沉積所致。而pH值的增加,能提升核種與土壤的分配 係數而增加核種的吸附量(董瑞安、周鳳英,2000)。pH值在核種吸脫 附反應中有重要的影響,主要在於改變黏土礦物表面電荷,並與吸附 的金屬離子產生競爭的效應。

2.3.2.2.3. 回脹與崩解特性

泥岩表層一旦遇水即迅速軟化、崩解,故每遇豪大雨就會造成極 大的土壤侵蝕及流失;但泥岩乾燥時卻又堅硬如石,並極易龜裂崩 落,在泥岩出露地區形成奇特的尖銳嶙峋泥岩地形景觀。

在上節中得知,泥岩之礦物組成以石英、伊萊石、及綠泥石,其 膨脹潛能並不高。因此,泥岩中之黏土礦物並非遇水產生膨脹及崩解 現象的主要原因,而是將砂、沈泥及粘土顆粒膠結成岩的鋁酸鈣膠體 (CAH)和矽酸鈣膠體(CSH)所造成。依據許琦等4人(1999)針對泥岩之 溶出試驗顯示,泥岩在吸水過程中溶出離子當量濃度的高低,依序為 Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺>Al³⁺>K⁺>Fe³⁺,且 Na⁺ 於溶出試驗初期便大量 溶出,可見鈉在崩解過程中,首先即解離出來。在新鮮泥岩地區低窪 地經雨水浸洗,乾涸後地表往往生成一層白色的結晶物,經XRD繞射 儀分析,確知其為硫酸鈉(Na₂SO₄) 的結晶(許琦等4人,1999)。由於 硫酸鈉極易溶於水而解離為鈉與硫酸根離子,硫酸根又會與泥岩膠結 膠體產生反應生成硫酸鈣,而使體積發生回脹,進而造成崩解,而回 復到原來未膠結的狀態(Lee et al., 2007)。

Lee et al. (2007)曾取高雄田寮崇德水庫未擾動泥岩樣品,進行回 脹及崩解試驗(swelling and slaking test)。未加載正向壓力之自由回脹 試驗(free swelling test)結果如表 2-39,最大應變量在10.55~16.95% 之間,平均12.45%,且第4號樣品之完成回賬時間大約為10,000分鐘

(≈6.9日)。在單向度回賬試驗時,則分別以 0.5、1、2、4 kgf/cm² 之 軸向壓力加載,用以限制回賬,結果如表 2-40表所示。荷重由0.5 kgf/cm² 增至4.0 kgf/cm²時,泥岩的回脹率由 2.55%降至0.15%,表 示在較大的荷重狀況下,泥岩的回脹應變也愈早達到平衡。這是由於 高荷重下回脹應變有限,致使孔隙比無法增大,並由於垂直應力的作 用,泥岩顆粒回脹以填充內部孔隙為主,而無法如自由回脹增大其總 體積。此外,較深層泥岩長期受沉積壓密作用,顆粒間產生較高之應 力,使相鄰面之膠結作用力較強,也就是具有較強之固結變質鍵,增 強了上體抵抗體積變化的能力(許琦等4人,1999)。

根據崩解耐久性試驗結果,高雄田寮泥岩之第一循環崩解耐久性 指數(Id₁)在57.1~67.3%,平均62.0%,第二循環崩解耐久性指數(Id₂) 在23.3~42.1%,平均31.1%(李德河等3人,2002a&b),兩者在Gamble (1971)之耐久性分類均屬低耐久性,表示泥岩很難抵抗遇水崩解的破 壞,易遭降雨逕流沖蝕,也是泥岩出露地區形成「月世界」奇特地形 景觀的主要原因。

2.3.2.2.4. 泥岩水文地質特性

西南部平原區地下700公尺以上多為更新世以來沉積含薄層砂岩的泥岩層,由地下水觀測網水文地質資料發現,200-300公尺以上的 泥岩層所夾的砂岩層約有二至三層,為主要含水層,但因泥岩層阻隔 使地下水垂向流通不易(圖 2-147, Lu et al., 2008)。

在鹽水溪以南的平原地區,為活躍的新期構造運動控制區,包含 數個海相泥岩組成的基盤高區,與其間不同型態的沉積谷地。根據鑽 井資料,各鑽井間的岩性變化極大,除最上部地下水層具較高的砂層 比例外,多為半固結的緻密泥質基盤,不具良好的地下水資源。根據 地下水質調查資料結果,Lu et al.(2008)認為西南部地下水地球化學 特性深受地層鹵水之影響,根據地下水觀測井之水質及氫氧同位素分 析結果,地層水含有高度蒸發的海水,代表在沿海地區最上部地下水 層,可能受海水影響或潟湖蒸發作用,淺層地下水有鹽化情形。民眾 為取用淡水飲用或養殖用,大量抽取深層地下水不僅可能造成地下水 鹽化,亦可能導致地下水流速加快。

表 2-38:台灣西南部泥岩之化學組成

採樣地點	化學組成	參考文獻
高 雄 燕 巢 滾 水 坪 泥 火山	$SiO_2(63.49\%)$ \land $Al_2O_3.Fe_2O_3(21.53\%)$ \land $CaO(2.71\%)$	林 讃 生 (1943)
旗山	$SiO_{2}(48.27\%) \cdot Al_{2}O_{3}(17.23\%) \cdot CaO(6.04\%) \cdot Fe_{2}O_{3}(5.90\%) \cdot K_{2}O(4.67\%) \cdot Na_{2}O(4.25\%) \cdot MgO(2.72\%) \cdot CuO(0.39\%) \cdot SrO(0.09\%) \cdot MnO(0.06\%) \cdot ZnO(0.05\%) \cdot NiO(0.02\%)$	林宗曾等4人 (1996)
曾 文 溪 流 域	$SiO_{2}(67.55\pm3.81\%) \times Al_{2}O_{3}(13.90\pm1.82\%) \times Fe_{2}O_{3}(5.09\pm0.66\%) \times K_{2}O(2.79\pm0.32\%) \times MgO(1.73\pm0.23\%) \times Na_{2}O(1.54\pm0.15\%) \times CaO(0.25\pm0.12\%) \times MnO(0.06\pm0.01\%) \times L.O.I^{*}(5.68\pm0.94)$	張育德
二 仁 溪 流 域	SiO ₂ (62.70 \pm 2.88%) \cdot Al ₂ O ₃ (16.15 \pm 1.27%) \cdot Fe ₂ O ₃ (5.98 \pm 0.39%) \cdot K ₂ O(3.07 \pm 0.21%) \cdot MgO(1.90 \pm 0.17%) \cdot Na ₂ O(1.53 \pm 0.15%) \cdot CaO(0.24 \pm 0.08%) \cdot MnO(0.06 \pm 0.01%) \cdot L.O.I(6.83 \pm 0.73)	(1996)
田寮	O(49.41%) 、Si(25.57%) 、Al(9.14%) 、 Fe(5.91%) 、C(3.29%) 、K(2.96%) 、 Mg(1.27%) 、Ca(1.08%) 、Na(0.81%) 、 Ti(0.56%)	廖 正 傑 (2004)

拦口伯毕	含水	量(%)	最大變形量	最大應變量
你吅衚狁	試驗前	試驗後	(mm)	(%)
1	8.02	16.45	2.21	11.05
2	4.39	16.16	3.39	16.95
3	8.05	16.89	2.25	11.25
4	8.61	20.60	2.11	10.55

表 2-39:台灣西南部泥岩自由回脹試驗結果

資料來源:Lee et al., 2007, P86

表 2-40:台灣西南部泥岩限制回脹試驗結果

扎ム原力	含水	量(%)	最大變形量	最大應變量	
 	試驗前	試驗後	(mm)	(%)	
0.5	4.56	9.59	0.51	2.55	
1	5.73	11.63	0.33	1.65	
2	5.63	10.12	0.22	1.10	
4	4.34	8.91	0.03	0.15	

資料來源:Lee et al., 2007, P86



圖 2-147:台灣西南部平原區鑽井地下水流向示意圖

資料來源: 摘自Lu et al., 2008

說明:剖面III、IV所選擇的鑽井分別位於曾文溪北、南兩側,參考碳同位素年代 可將地下含水層分三至四層,因泥岩層阻隔造成垂向流動不易。

2.3.2.3. 泥岩構造特性

依 據 林 朝 宗 等 5 人 (1991) 對 泥 岩 區 地 質 驗 證 的 調 查 成 果 , 西 南 部 泥岩分布區主要地質構造線略呈北北東或東北走向。主要的斷層有左 鎮斷層、 龍船斷層、 木柵斷層、 小滾水斷層以及旗山斷層(圖 2-148), 其中左鎮斷層走向的呈N40°W方向,屬左移斷層,斷層兩側岩性略有 差異; 龍船斷層走向N20°E左右, 為泥岩地區內最主要之上衝斷層, 其北延部份為木柵斷層所切,木柵斷層南延部份為旗山斷層所切,此 二斷層可以做為泥岩之東界斷層。小滾水斷層呈N30°E走向,為一斷 面向東的背斜軸部斷層,許多泥火山現象於此斷層延展方向並呈帶狀 分布;此外尚有應菜龍斷層,為一走向略近東西方向之右移斷層,向 東延展為龍船斷層所截,向西延展不遠即告消失。此外在泥岩出露區 內處處可見一些小斷層,其斷層斷面上大多充填斷層泥,斷層泥之產 狀與前述左鎮斷層或應菜龍斷層之斷層泥近似,但其厚度則自0.1~5 cm之間不等,根據玉井之西埔地區的200 m地質探井結果顯示,在鑽 井時所遇到的漏水現象,很可能即是由此等小斷層之裂隙流矢,小斷 層對日後之用過核子燃料長程處置場之影響,需進行審慎研究。茲將 此等斷層性質概述於后:

(1) 左鎮斷層:

左鎮斷層走向N40°W,斷層延展經過左鎮附近而得名。本斷層之 露頭在左鎮東南(西埔鄉坑內)一帶出露良好,斷層泥厚度約為 0.5~2 m之間,由黑灰色狀似硬頁岩且略具光澤之泥質碎片所組 成,泥岩風化後在乾燥狀態下多呈淺灰色或黃灰色,而斷層泥之 顏色較深,因此甚易辨識。由斷層兩側泥岩及斷層泥之礦物成份 分析結果比較,可以初步認為斷層是在低溫及較高壓力下形成。 此外,觀察斷層面擦痕,大致呈水平方向,判斷其為左移斷層, 由於左鎮西北側地區一般岩層露頭不佳,未能確實追蹤其西北側 延展情況。

(2) 龍船斷層:

龍船斷層為縱貫泥岩區中部的主要逆衝斷層,斷層西側為古亭坑 層,而斷層東側上盤為相當於糖恩山砂岩之烏山層與其上覆地層 古亭坑層,兩側岩層均因斷層擾動而有地層倒轉現象。斷層線之 延展大致呈弧狀,弧頂向西,北段走向的為北北東方向,為木柵 斷層所截切,南段延展方向北北西,延展甚遠。中油公司曾於龍 船一帶自本斷層上盤進行鑽探,於地表以下2,106 m鑽過斷層, 因此可以判斷本斷層為高角度之逆衝斷層。

(3) 木柵斷層:

本斷層大約呈南北走向,亦稱內門斷層,為一斷面向東之逆衝斷層,斷層的西側出露泥岩岩層,而東側則為時代較老之長枝坑層 及其以上之地層。

(4) 旗山斷層:

為台灣南部地區主要斷層之一,斷層線之走向為N30°~50°E。斷面傾向東南,傾角自50°~90°。本斷層乃臺南西南地區泥岩地層之東界,由於斷層之逆衝性質,使中新世地層逆掩於西側上新一更新世(表 2-2)地層之上。

(5) 小滾水斷層:

小滾水斷層為小滾水背斜軸部之局部斷裂,研判其為一斷距頗大 之逆斷層,斷層斷面向東,西側相對降盤為古亭坑層中上部岩 層,東側相對上昇側局部出露中新世(表 2-2)地層,因此應為覆 瓦狀逆掩斷層系統之一。

(6)應菜龍斷層: 為一東西向斷層,斷面向南,傾角約50°左右。斷層東延部分為 龍船斷層所截,斷層露頭在二仁溪支流上游可見斷層向西展約 3km後即無法追蹤,斷層帶最寬約2m,斷層泥的厚度約0.8m, 其特徵為黑灰色碎屑狀,略具光澤。

泥岩地區的褶曲構造走向約略與主要斷層構造線平行(圖 2-148),均呈北北東或東北走向。在北側的九層林背斜及玉井向斜為 兩翼地層傾角較平緩的開敞式褶皺構造,而南側的褶皺構造則兩翼地

層傾角較大,部分褶皺之西翼地層有倒轉現象,茲將泥岩出露地區之 褶皺構造逐一敘述如次:

- (1)九層林背斜: 本背斜構造軸線走向N30°E,兩翼岩層均為玉井頁岩,東翼較平緩,西翼略陡,背斜的南端為左鎮斷層所截,並由於拉曳作用 而使軸線略作逆時針方向轉折。
- (2) 玉井向斜: 為泥岩北側之主要構造,為一向南低角度傾沒之開敞向斜構造, 兩翼地層均為玉井頁岩,傾角均在10°上下;本向斜向南延展亦 見斷層拖曳現象。
- (3)小滾水背斜:
 本背斜出露有限,在月世界以北其兩端均為小滾水斷層所截。
 (4)內門向斜:
 - 為泥岩區東半部之主要構造,兩翼岩層多為泥岩,僅軸部附近出現石灰岩凸鏡體,似為二重溪層之底部。本向斜軸線做南北走向, 西翼地層在軸部傾角30°左右,向西地層漸陡,在靠近龍船斷層 附近已有地層傾倒現象;東翼地層出露有限,傾角在40°以內。
- (5) 鹿埔向斜:

本向斜軸線略做南北走向,為一向南傾沒之向斜構造,其北延部 分為龍船斷層截切。向斜兩翼岩層均為古亭坑層,岩層傾角在 40°~70°之間,東翼略陡。向斜軸部之岩層傾角較緩約20°~30°之 間。地調所曾選擇本向斜軸部附近,進行一口深200 m地質鑽井, 以瞭解地下地質概況。



圖 2-148:台灣西南部泥岩出露區及附近地區地質構造圖 資料來源:轉繪自林朝宗等5人,1991

2.3.2.4. 泥岩地質史

台灣島約在6 Ma前受到東側菲律賓海板塊上的火山島弧的碰撞 擠壓,造成歐亞大陸海盆中的沉積層受擠壓,形成海底沉積層大規模 的隆起造成台灣島(詳2.1.1.2節)。西部麓山帶、台地與平原的岩層大 都屬於第三紀晚期的岩層,以中新世的沉積岩層為主,部分屬於第四 紀以來造山運動所堆積的岩層。台地與海岸平原主要是剛受到造山運 動的影響,部分剛隆起的海岸平原形成了台地地形,這些隆起的台地 岩層主要為礫石與砂岩。從井下資料來看,愈接近麓山帶的平原之下 為厚層礫石層,愈遠離山麓帶而接近海岸地區則以砂層為主,並夾有 部分的泥層(地調所,1999)。

晚第三紀(表 2-2)台灣進入造山運動的構造環境,亦造就新生代 以來,台灣的兩個不同的構造環境,這兩個不同的構造環境也形成鄰 近地區沉積盆地中的沉積物產生變化;造山運動之前的沉積物比較 細,造山運動之後相對比較粗。此外,全球海水面的變化造成淺海大 陸棚的沉積環境也起了很大的改變,同時也促成沉積物粗細的變化, 而晚第三紀造山運動之前的沉積物的粗細變化,主要取決於海水面的 變動。另一形成泥岩的成因是沉積環境的因素,台灣處在歐亞大陸的 最東側,所以在沉積之當時台灣東側的環境就比西側深,因為距離較 遠。而沉積物質主要是來自大陸棚西側之歐亞大陸,所以愈往東沉積 物愈細,如台灣西南部的古亭坑層與玉井頁岩、海岸山脈的蕃薯寮層 與八里灣層以及恆春半島的石門層。所以出露台灣島上的泥岩地層, 形成原因與構造環境、全球海水面的變化、古地理環境等三個因素有 關(陳文山,2002)。

台灣西部周圍海域的沉積環境是呈現北部較淺,南部較深,因為 三千多萬年以來南中國海持續的擴張,使得台灣西南側的陸棚沉積環 境受到盆地張裂的影響而變得越來越深。因此,晚第三紀(表 2-2)與 第四紀沉積在台灣南部地區的岩性皆以泥質為主。

2.3.2.5. 泥岩長期穩定性

國內西南部人口密集度高,沿海地區魚塭養殖業發達,且因超抽 地下水而地層下陷。此外,由地下水觀測網資料相關研究發現,西南 部地下水因潟湖的蒸發作用而具高鹽度特徵,致使民井加深取用深層 地下水,但因超抽導致地下水流速加快現象,如表 2-41所示,由碳 -14定年結果求得的水力傳導係數大約在10⁻⁵~10⁻³ m/s的範圍內,相較 於現地抽水試驗的結果要大上1~2個數量級(Lu et al., 2008)。

國內西南部地區活動構造多、地層隆升快但剝蝕率高,山地多形 成泥岩惡地形;此外,此區地震深度淺、災害性地震頻率高(圖 2-149a,b)、泥岩層中夾有富甲烷及二氧化碳的天然氣儲存層(圖 2-150)、主要構造帶沿線又有泥火山噴發作用(圖 2-149c),上述天然 事件特性亦為泥岩處置條件評估要考慮的影響條件。

中央山脈的泥質岩層地形險峻、因複雜的構造作用形成許多剪切 帶與破碎帶常順著板岩及硬頁岩的葉理構造分布、且受高雨量及風化 作用影響具有較高的剝蝕率等因素,可能影響用過核子燃料處置功 能,加上921震後地震分布集中在鄰近的中央山脈泥質岩層分布地區 (圖 2-151),導致桃、竹、苗、中、投等縣山區地層鬆動,每每颱風 豪雨即導致山崩地滑及土石流,上述因素說明分布於中央山脈的泥岩 層,並不適合作為潛在處置母岩調查對象;至於海岸山脈泥岩因為延 伸性有限,多為惡地形,又位於弧陸碰撞帶之主要地震、斷層活動帶 上,亦不建議列為調查對象。



圖 2-149:台灣西南部地震、斷層構造及泥火山分布圖

說明:圖(a)顯示地震規模,圖(b)顯示地震震源深度(摘自Lacombe et al., 2001); 圖(c)顯示麓山帶泥岩出露區的泥火山多沿主要斷層構造帶分布(摘自You et al., 2004)。



圖 2-150:台灣西南部外海、平原區與麓山帶之地層與各天然氣儲集層 說明:由地下水觀測網鑽井鑽得更新世泥岩質地層包括六雙層、二重溪層及古亭 坑層;由中油油氣鑽井鑽得深層地層及重要岩層介面(數字1-8所示)。六雙層大部 份為泥岩,夾砂岩或粉砂岩互層的頁岩,最厚可達1040公尺。二重溪層岩性以泥 質砂岩主,中夾泥岩,厚約830公尺,底部有數十公尺砂岩是台灣西南部唯一生 產油氣的地層。古亭坑層位於高雄麓山帶往西南海域延伸,以泥岩為主,偶夾薄 層泥質砂岩,在中洲中油鑽井中地下635公尺以下至4421公尺均為古亭坑層。(摘 自能源局,2008)



圖 2-151:中央山脈泥岩地層與921震後地震分布關係圖 (資料來源說明:地震資料:交通部中央氣象局地震測報中心;地層資料:經濟 部中央地質調查所)

Well pairs	Distance (km)	Travel time (yrs)	Hydraulic gradient (´10 ⁻³)	K (m/s) calculated	K (m/s) in situ testing
N03-1→N02-2	10.7	5447	1.98	3.14×10 ⁻⁵	6.97×10 ⁻⁵
N03-2→N02-2	11	1803	1.68	1.15×10 ⁻⁴	6.97×10 ⁻⁵
N02-1→N01-1	10.7	764	0.99	4.48×10^{-4}	
N09-1→N08-2	10.1	2949	2.81	3.86×10 ⁻⁵	2.08×10 ⁻⁵
N09-3→N08-3	9.7	3195	1.47	6.54×10 ⁻⁵	2.16×10 ⁻⁵
N08-1→N07-1	6.7	5369	0.23	1.72×10^{-4}	6.05×10 ⁻⁵
N08-2→N07-3	7.5	1497	0.88	1.80×10 ⁻⁴	2.13×10 ⁻⁵
N12-1→N11-2	8.5	428	0.52	1.21×10 ⁻³	1.95×10 ⁻⁶
N12-2→N11-2	8	424	0.56	1.07×10 ⁻³	1.95×10 ⁻⁶
N12-2→N11-3	9.3	899	2.46	1.33×10 ⁻⁴	3.12×10 ⁻⁵
N11-1→N10-1	13.2	5076	0.1	8.20×10^{-4}	4.84×10 ⁻⁵
N11-2→N10-3	13.3	3559	negative		4.96×10 ⁻⁵
N11-3→N10-4	13.6	5936	negative		5.57×10 ⁻⁵
N10-4→N13-1	10.4	5733	0.37	1.55×10 ⁻⁴	1.88×10 ⁻⁵
N10-4→N13-2	10.5	5495	0.52	1.16×10 ⁻⁴	2.22×10 ⁻⁶
N22-1→N21-2	5.9	351	5.06	1.05×10 ⁻⁴	4.70×10 ⁻⁵
N21-2→N20-2	12.5	9402	negative		1.63×10 ⁻⁴

表 2-41:台灣西南部平原區泥岩層水力傳導係數模擬與試驗值比較表

資料來源:Lu et al. (2008)

2.3.3. 中生代基盤地層

台灣其他具有潛在處置母岩條件的岩層為分布於西部海域及平 原區新生代沉積層下方的中生代基盤岩。中生代基盤岩屬於華南中生 代地層的延伸,在離島花崗岩區(金、馬、烏坵地區,參見2.3.1節)、 澎湖地台(即澎湖群島)、北港高區(台灣西南部平原區及海域)及觀音 高區(台灣西北區海域)、以及中央山脈東側大南澳片岩帶(台灣東部宜 蘭至花蓮一帶,參見2.3.1節)等地。本研究討論之中生代基盤岩歸於 其他潛在處置母岩的,主要為涵蓋澎湖群島的西部海域及台灣西南平 原區下方的中生代基盤岩,屬於台海地區地震較少(圖 2-151)、地殼 穩定的變質沉積岩或火山岩地層所組成。

過去數十年經中油公司在台灣海峽及西部平原區,進行地球物理 測勘及地層鑽探,發現自澎湖至本島西部濱海平原北港附近,存在一 東西延長的基盤高區(圖 2-152),且為該區域之重力高區,明顯影響 台灣西側地層沉積的厚度(圖 2-153)與構造的變形作用(圖 2-152)。 一般認為在基盤高區北側,台灣地層及構造形成向西北突出之弧形, 相對的在南側,形成S狀轉折(圖 2-154),都與基盤高區存在位置有 關。對於此一穩定地塊,除了前述構造特徵外,特別是西部海域的離 島地區,在前陸盆地撓曲前緣(圖 2-155),因遠離台灣造山帶變形前 緣,在全球定位系統長期監測下,認定屬於台灣穩定地區地殼變動監 測不動的基準點(例如:澎湖白沙)。

本研究為彙整現有調查資料,初步依分布、岩層特性、構造特性 及長期穩定性等內容,綜合論述中生代基盤岩處置環境之特性,以利 與花崗岩、泥岩等潛在處置母岩之比較。



圖 2-152:台灣西部基盤岩頂面深度及構造分布圖

說明:根據中油資料描繪的基盤岩為「先中新世地層」,包括始新世及中生代基盤岩。Kuanyin High-觀音(重力)高區; Peikang High-北港(重力)高區。縮寫: STFZ-三義斷層; PTFZ-八卦斷層; CTFZ-旗山斷層。N至S剖面圖參見圖 2-153所示。 資料來源: Mouthereau et al. (2002)



圖 2-153:台灣西部中生代基盤岩剖面圖

說明:剖面位置參見圖 2-152所示,根據中油資料描繪的基盤岩為「先中新世地 層」,包括始新世及中生代基盤岩。詳細的中生代基盤岩剖面及構造判釋參見圖 2-165所示。縮寫:STFZ-三義斷層帶; PTFZ-八卦斷層帶; CTFZ-旗山斷層帶。 資料來源:Mouthereau et al. (2002)



圖 2-154:台灣鄰近地區大地構造

說明:台灣因呂宋島弧對歐亞大陸邊緣進行「弧陸碰撞」作用,導致台西盆地與 台南盆地的東側發生變形並快速隆起,變形前緣(deformation front,參見圖 2-157) 因北港基盤高區形成S形轉折。資料來源:黃奇瑜(2005)



圖 2-155:台灣西部及台灣海峽中生代基盤岩分布深度圖

說明:圖示為中生代基盤岩上覆新生代沉積層厚度分布,即反映中生代基盤岩頂 部之深度位置。紅色線為前陸盆地撓曲前緣。縮寫:PHP-澎湖地台;KYP-觀音 地台;PHB-澎湖盆地;NJB-南日島盆地;TB-台西盆地;TNB-台南盆地。資料 來源:Lin et al. (2003)。
2.3.3.1. 中生代基盤岩分布

台灣鄰近地區地質,根據黃奇瑜(2005)研究,可分成大陸邊緣(包括西部平原區、西部麓山帶及雪山山脈)、隱沒增積岩體(中央山脈西側中新世板岩帶及恆春半島)、先隱沒後侵蝕隆昇的歐亞大陸(中央山脈東側始新世板岩帶及古生代變質岩帶),以及呂宋火山島弧與弧前盆地(海岸山脈),分布如(圖 2-154)所示。台灣海峽東側及西部平原區為自中新世晚期開始發育典型的前陸盆地(foreland basins),以中生代基盤岩重力高區(或稱北港高區)為界,北為台西盆地,南為台南盆地(圖 2-154)。

因澎湖地區各島嶼出露面積小調查不易,海域調查經費龐大,深 層地質特性調查困難度極高,需透過彙整中油公司過去震測及鑽井資 料(Lin et al., 2003),才能廓劃出中生代基盤岩深層地層分布(圖 2-155)。Angelier et al. (1990)及Mouthereau et al. (2002)整理中油公司 資料顯示,中生代基盤高區可能以東西延伸方向為主,北側的磁力高 區部分已隨台西盆地的發育而沉陷,南側則沉陷發育台南盆地(圖 2-152及圖 2-153)。

整體而言,因中新世晚期造山運動形成的前陸盆地而使基盤岩向 東沉陷與傾斜,故澎湖地區分布最淺,但往台灣西部則沉陷越深(圖 2-156),大部分基盤岩所在深度均深於2000公尺。此外,近幾年新的 調查資料發現,台灣海峽少震、少構造的穩定地塊(圖 2-157),不僅 涵蓋過去東西延伸的基盤高區,還應包括位於台灣中部平原區延伸到 澎湖地區的磁力基盤高區(Hsu et al., 2008;李奕亨,2009)。從區域 地質、構造與磁力特性,均以東北向為主,顯示此一東北向分布的基 盤高區,可能是福建沿海長樂-南澳變質基盤南段的延伸(Chen et al., 2009),因白堊紀晚期至第三紀台海的張裂活動而位於現在位置。

2.3.3.2. 中生代基盤岩特性

2.3.3.2.1. 澎湖群島

澎湖群島地層出露於地表者有花嶼火山雜岩、澎湖層、小門嶼 層、湖西層和現代海濱堆積物。根據中央地質調查所出版之澎湖群島 五萬分之一地質圖說明書,此區的地層分層、主要岩性及厚度,摘述 如表 2-42所列(曹恕中等,1999)。中油公司於1966年在澎湖縣白沙島 進行通粱一號地質探查井的鑽探工作,該井曾鑽遇中生代地層。位於 深度503.5公尺以下之中生代岩石,以熱水變質之長石砂岩、次長石 砂岩、砂岩、粉砂岩、及玢岩或玄武岩為主。深度592至695公尺間, 深度愈深,經熱水變質作用之程度,亦隨之增強。因未發現任何化石, 故其地質年代不詳,但其岩性類似台灣西部嘉義平原褒忠一號井內所 鑽遇基盤高區之中生代地層岩石(曹恕中等,1999)。

澎湖群島的花嶼是海峽中唯一出露的中生代基盤岩,花嶼岩層以 安山岩熔岩流為主(圖 2-158),含有許多流紋岩質、石英安山岩質及 玄武岩質岩脈,以及少部份變質沉積岩(楊小青,1989)。根據Chen et al. (2009)的地球化學研究顯示,部分岩樣明顯受到熱液蝕變作用影 響,呈現富鉀趨勢(圖 2-158 a)。此外,這些火山岩形成的年代稍晚 於中生代,根據安山岩核飛跡法鋯石定年結果為65-61 Ma左右(楊小 青,1989),根據安山岩及流紋岩的鈾鉛法鋯石定年結果為63-59Ma 之間(Chen et al., 2009)。此地安山岩與福建、浙江一帶分布的中生代 火山岩產狀類似,年代與岩性均有地質時空演化上的關連性(圖 2-159; Chen et al., 2009)。

2.3.3.2.2. 台灣西部平原

中油公司自1986年至1961年間,在台灣西部嘉義平原北港附近設置的褒忠一號井、北港二號井、水林一號井、北港三號井及蒜頭一號井,均鑽遇中生代或古新世地層,主要為長石砂岩、頁岩及石灰岩。 特別是北港二號井內(深度1,691m)中生代地層鑽取的岩心含有白堊 紀菊石化石Holcophylloceras aff. Mediterraneum (Newmayr),證實有 中生代地層的存在(林朝棨、周瑞燉,1984)。



圖 2-156:台灣及台灣海峽中生代基盤岩剖面示意圖

說明:不整合構造縮寫ROU—rift-onset unconformity; BU—breakup unconformity; BFU—basal-foreland unconformity。深灰色AA'、BB'、CC'及DD'剖面線之位置, 參見圖 2-155。資料來源: Lin et al. (2003)

SNFD2009





說明:左圖:高磁力基盤(紅色)與中生代基盤(黃色斜線)分布圖,右圖:地震震源分布圖及921震源位置(星號標示),縮寫:A-鹿港磁力 高區(LMH);B-中央山脈東翼無震帶;C-大屯火山群;D-呂宋島弧(LA);PI-澎湖群島;PH-北港高區;DF-台灣造山帶變形前緣;MT-馬尼拉海溝;OT-沖繩海槽。資料來源:Hsu et al. (2008)。

地質年代			地層名稱	主要岩性	厚度	附註
新	第四紀	晚全新世	現代海濱 堆積物	石英砂、泥、礫石和 珊瑚、有孔蟲及貝殼 碎片	<5公尺	現代種有孔蟲
		早全新世	湖西層	灰黄色至灰褐色粉砂 質泥岩,下部有含化 石砂層	約2-7公 尺	含現代種貝殼
		更新世	小門嶼層	有孔蟲為主的石灰岩 與鐵質石英砂岩	約15-20 公尺	含鹿類化石與哺 乳類化石
生代	第三紀	中新世	澎湖層	一至三層玄武岩岩 流,最多可見四層, 局部間夾砂岩、泥岩 和砂泥岩薄互層、凝 灰質砂岩或火山凝灰 角礫岩	約70公 尺	玄武岩之鉀氫放 射性年齡在8-17 百萬年前之間。 沉積岩中發現有 孔蟲及超微化石
		早第三紀	白沙島層 (地下地 層)	<i>粉砂岩與砂岩為主</i>	約200公 尺	
中生代	古新世-白堊紀		花嶼火山 雜岩	變質安山岩、安山岩 質岩脈、流紋岩質岩 脈、玄武岩質岩脈為 主,含泥質捕獲岩和 少數火山碎屑沉積岩	-	僅見花嶼,火山 岩之變質年齡為 六千五百萬年至 六千萬年前

表 2-42:澎湖地區地層表

資料來源:曹恕中等人 (1999)



圖 2-158:澎湖花嶼火山雜岩地球化學岩性分析結果及樣本位置圖 說明:圖(a) K₂O vs. SiO₂圖顯示火山岩類包括A-安山岩;D-石英安山岩;R-流紋 岩,各岩類粗黑線圈合範圍標示楊小青(1989)資料,主要屬於高鉀鈣鹼性,部分 樣本(例如L-07樣本,即圖(b) HY-L-07野外照片所示)具有富鉀趨勢,乃受到熱液 蝕變作用影響(Chen et al., 2009)。圖(b)標示採樣位置及花嶼地質簡圖。流紋岩脈 及石英安山岩脈主要呈現北西向侵入構造,顯示古新世噴發的安山岩熔岩流冷卻 固結後,此區之大地應力以東北向張裂為主,後期流紋岩質岩漿順被動張裂節理 侵入。資料來源: Chen et al. (2009)



圖 2-159:台灣西部中生代高磁力基盤岩形成之古地理位置圖 說明:浙閩粵中生代火山帶(斜線標示)噴發活動,呈由北到南逐漸年輕的趨勢。 虛線區塊標示台海地區高磁力基盤岩形成時於中生代的古地理位置;暗灰色區塊 標示因南中國海板塊對菲律賓海板塊隱沒作用,使現在中生代高磁力基盤岩因拉 張作用移到現在位置。構造帶:①政和-大埔斷裂帶;②長樂-南澳斷裂帶;③福 建濱海斷裂帶。縮寫說明:HYu-花嶼;Ma-百萬年;火山岩岩性:A-安山岩; D-石英安山岩;R-流紋岩。資料來源:Chen et al. (2009)

Mouthereau et al. (2002)指出中油公司進行大範圍震測調查中生 代基盤岩的分布時,主要依據中新世地層底部有一強烈的反射面,反 映一普遍性不整合面發生在漸新世,其下的地層(包括北港高區及觀 音高區等基盤)可能為形成於始新世乃至中生代的砂岩或輕度變質砂 岩。Lin et al. (2003)也指出此一不整合面下的先中新世基盤岩明顯較 為 緻 密 , 孔 隙 率 (<0.1) 遠 低 於 上 覆 的 中 新 世 地 層 (0.3~0.4) , 參 見 圖 2-160所示。Lin et al. (2003)根據中油鑽井岩心分析,得到漸新世不整 合發生沉積間斷及剝蝕作用,估計出始新世地層剝蝕厚度如圖 2-161 所示,顯示中生代基盤岩主要分布在台灣海峽始新世地層剝蝕厚度最 厚的區域,也就是反映出其地層下方之中生代基盤岩抬升最高,導致 越深處 高結晶度的基盤隆升在地殼最淺的位置, 也長期成為此區穩定 的地塊。類似像這樣的基盤岩地塊,西為長樂-南澳變質帶(包括金 門、烏坵的花崗岩及片岩),東為大南澳變質帶(包括中央山脈東翼花 崗岩、大理岩及片岩),均在漸新世出露地表,並有一普遍的沉積間 斷與不整合存在。這些地塊之間則以沈陷裂谷及海槽(trough)相隔, 並發育成數個沉積盆地,往往伴生張裂型大地構造的火山活動(圖 2-161) •

2.3.3.3. 中生代基盤岩構造特性

中生代基盤岩構造研究的重要性在於具備長期穩定的特徵,即便 在近期造山運動影響下,地層與構造變形前緣(圖 2-157)明顯受到中 生代基盤岩影響,形成向西北突出之弧形及S狀轉折(圖 2-154)。此 外,中生代基盤岩分布區域也是台海地區少震、少構造的地區(圖 2-162)。考量到中生代基盤岩由於大範圍埋深超過2000公尺,調查不 易,文獻中有關構造特性的分析,主要是解析中油公司震測剖面資料 (圖 2-163及圖 2-164)。



圖 2-160:中油公司IT1鑽井岩心的孔隙率與深度變化圖 資料來源:Lin et al. (2003)

SNFD2009



圖 2-161:台灣海峽及鄰近地區火山分布及始新世地層剝蝕厚度圖

而自新生代以來,台灣西側沉積層的厚度,也受控於中生代基盤 岩正斷層構造(Mouthereau et al., 2002),而於盆地間沉積巨厚的始新 世張陷盆地沉積層(圖 2-163),或中新世巨厚的弧前盆地沉積層,且 正斷層密度越往東越高,地層層面呈現向東傾斜(圖 2-164),因此在 台灣西部平原下,台西盆地底部的中生代基盤岩深度,已沈陷到超過 2000公尺以下;台南盆地底部的中生代基盤岩或古生代基盤岩則有較 高的正斷層密度,基盤岩沈陷深度甚至超過4000公尺以下(圖 2-165);但相較之下,在中生代基盤高區(如北港高區)新生代沉積層 相當薄,且斷層密度較低(圖 2-153及圖 2-165)。

由福建沿海地區及金門島較為詳盡的地表地質調查,加上中油公司台灣海峽海域地球物理調查,均顯示區域性的構造特性具有大範圍的一致性,自晚白堊紀以來,華南大陸邊緣火成岩基盤,因大地構造 張裂活動,形成許多北東向的正斷層系統,類似北美西部的盆嶺構造 域(Basin and Range),形成地塹(盆地)與地壘(丘陵)的地貌(林蔚, 2001;Teng and Lin, 2004;楊小青等人,2008)。在澎湖群島西側的 沈陷形成澎湖盆地,與澎湖群島的中生代基盤岩高區(例如花噢),以 及東北側的台西盆地,顯示在始新世至中新世期間,此區受到張裂大 地構造環境控制,形成典型盆嶺構造形貌(圖 2-166)。

2.3.3.4. 中生代基盤岩長期穩定性

由於台灣及鄰近地區地區末次冰期距今2萬年前的海水面較現今 低約120公尺,之後因間冰期氣候變暖,海水面開始逐漸上升達到現 今位置。6千年前至今海水面變動則趨於穩定,變動不超過0.3-0.5公 尺,因此台灣及鄰近地區,自晚全新世以來海水面的變動與全球性變 化趨勢一致(陳于高,1993;陳文山等人,2004)。藉由海水面升降, 與澎湖地區研究過去海水進退沉積的遺跡,可以說明全新世以來,此 區處於構造穩定、地殼無隆升或沉陷運動的狀態(陳于高,2003)。



圖 2-162:台灣西部中生代基盤岩與地震、構造分布圖 說明:台灣西部海域中生代基盤岩分布區域(Lin et al., 2003),同圖 2-155所示; 黑色陰影區標示台灣鄰近地區高磁力異常基盤,色點標示地震震源深度及規模, 同圖 2-157所示(Hsu et al., 2008);構造線為台灣鄰近海域地區構造調查現有資料 投影的線形,部分構造線屬性資料詳見圖 2-152。資料來源:李奕亨(2009)



圖 2-163:澎湖地區震測剖面之地層與構造解析

說明:剖面AA'位置參見圖 2-155。資料來源: Lin et al. (2003)

SNFD2009



圖 2-164:台灣海峽台西盆地震測剖面之地層與構造解析

說明: 剖面BB'位置參見圖 2-155。上圖空白處為海陸交界無資料。資料來源: Lin et al. (2003)

SNFD2009



圖 2-165:台灣西部中生代基盤岩震測剖面之地層與構造解析

說明:圖(a)中生代基盤岩深度分布圖(參見圖 2-155),實線標示中油公司震測剖面,紅白點為油氣探查鑽井;圖(b)台灣西南部震測剖 面圖(Lin, 2001),紅線為被動大陸張裂盆地與上覆之前陸盆地地層間的不整合面,紫線為中/古生代基盤岩頂部不整合面,義竹斷層以 南為古生代基盤岩;圖(c)根據震測及鑽井資料繪製的地質剖面圖,顯示中生代基盤岩深度已超過2000公尺。資料來源:能源局(2008)



圖 2-166:澎湖海域至西部平原中生代基盤岩剖面圖 資料來源:Yang et al. (2006)

澎湖群島地形平緩,多為20公尺以下的平原,許多地形面仍與地 下玄武岩熔岩流平行,顯示保有中新世原始地貌(陳于高,1993)。由 玄武岩鉀氫年代資料得知,澎湖群島中新世中期(16-8 Ma)發生岩漿活 動,且多為陸相噴發,形成具柱狀節理的玄武岩流,在此期間澎湖群 島受海水侵蝕和發育最頂部之紅壤層。直到更新世才有小門嶼層覆 蓋,以及全新世的湖西層堆積(陳于高,1993;曹恕中等人,1999)。

就千萬年尺度來看,在中新世於海水面附近噴發的玄武岩流,至 今仍位於海水面附近,與金門地區相類似,顯示一千萬年尺度以來地 殼垂直隆升率非常低。此外,由花嶼現地勘查火山熔岩流產狀,顯示 花嶼的基盤岩在白堊紀末至新生代初期已出露地表,並發生這些安山 岩及流紋岩岩漿的噴發活動,且其後數千萬年來均在地表未受造山運 動深埋、變形或變質的影響,長期具備穩定的地殼條件。

就百萬年尺度來看,澎湖周圍海域震測資料顯示,自上新世以來,沉積層已不受張裂型斷層活動的擾動,近期地震資料也顯示澎湖 地區相當安定少震,因此屬於長期構造穩定的地區(陳于高,1993)

就萬年尺度來看,澎湖群島因為沒有隆起珊瑚礁,表示全新世以 來沒有地殼隆升作用;在標高低於5公尺的平原,有許多全新世高水 位堆積層,顯示沒有區域的沉陷作用,只受海水面升降變化的影響(陳 于高,1993)。以碳14定年法分析海濱堆積物之貝殼與珊瑚碎片得到 澎湖地區之海水面在4千年前約比現在海水面高出2.3公尺,而後逐漸 降低(陳于高,1993)。

基於上述證據,長期以來澎湖地區一直視為地殼最穩定的地區。 現今利用全球衛星定位訊號研究台灣地殼運動速度場,多以澎湖白沙 為穩定的參考點,評估台灣地區地殼相對運動情形。

根據前述研析結果顯示,西部海域及平原區新生代沉積層下方的 中生代基盤岩屬於相當穩定的地層,但除花嶼以外均位於海下1000 m 深度以下,越往本島延伸越深(西部平原下超過2000 m深),因此岩層 分布已超出目前處置概念設計的深度(300~1000m深)。雖然海面下中 生代基盤深度可能較淺,但鑑於海域調查所費昂貴,欲取得大範圍海 域中生代基盤岩地下地質、構造、水文地質、地球化學及氣體等深層

特性參數,目前國內並無相關海上調查設備與操作經驗(僅中油公司 耗費鉅資在特定油氣潛能區進行之探勘工作,已說明於第2.3.3節), 短期間除已完成之空中磁測解析外,無足夠社經條件進行深井鑽探、 井下試驗及海上震測等調查,取得功能安全評估所需之參數。因此, 現階段除根據空中磁測資料進行岩層及構造分布之資料解析外,並未 規劃進一步推展中生代基盤岩之深層地質特性調查工作。

根據OECD (2003)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,符合最終處置的安全性應具備:(1) 長期的地質穩定性;(2)合適的物理、化學及構造特性;(3)不利或擾 動的條件越少越好;(4)調查技術的可行性;(5)可預測性等條件。目 前本報告彙整的研究成果顯示,綜合比較我國各潛在處置母岩長期穩 定性(表 2-43),以泥岩形成年代最短、地質不穩定條件最多,因此未 來調查技術的挑戰也最大;相較之下,西部離島及本島東部花崗岩均 有千萬年以上或至少百萬年的長期穩定潛力,較具可調查性和可預測 性,建議成為我國潛在處置母岩的調查對象。

用過核子燃料最終處置計畫過去所發展的現地調查技術,主要集 中於適用硬岩(如花崗岩)所需的深層地質特性調查與資料解析技 術,應可滿足後續建議規劃中的台灣東部花崗岩的基本調查需求,更 進一步(地球物理/水文地質/地球化學/現地應力)調查技術的發展需求 建議,請參考第2.1.6節之詳細說明;針對軟岩(如泥岩),本計畫過去 亦曾建立鑽探與取樣技術,但相關孔內調查技術,後續如確有需要, 可參照過去發展經驗自行發展,或自法國/瑞士/比利時等國家引進。 因此,本報告在泥岩與中生代基盤岩類方面,彙整以往調查研究成果 外,未來仍持續蒐集研析相關文獻資料,以保留後續處置母岩評估選 擇的彈性。簡言之,用過核子燃料最終處置計畫目前已成功建置500 公尺深度結晶岩體之特性調查及資料解析技術,相關技術業已成功應 用於花崗岩測試區(詳第2.1.6節),產出結果應用於發展初步功能安全 評估技術(詳第4.6節),以完整說明我國由地質調查、資料解析至功能 安全評估整體流程。

潛在處置母岩		花崗岩		泥岩	中生代基盤岩
		西部離島	本島東部	西南部	台灣海峽~西部
岩性		花崗岩/片麻岩	花崗岩/片麻岩	粉砂岩/泥岩	火山岩/變質沉積
					岩
形成年代		100~140 Ma	80∼90 Ma	1∼2 Ma	60 Ma
	千萬年前	13 Ma (海岸)	10 Ma深海	淺海或陸地	10 Ma (海岸)
	百萬年穩	無沉陷(海岸)	6.5∼3.5 Ma	6.5∼3.5 Ma	無沉陷(澎湖海
地	定性		快速隆升造山	快速沉陷	岸);快速沉陷(台
			待調查	3.5~0.5 Ma沉陷	灣西部中生代基
質			1.5 Ma張裂沉陷	0.5 Ma快速隆升	盤岩深度
					>2000m)
<u></u> н	萬年穩定	待調查	待調查	活動斷層	5千年來不動
X	性				
		板塊內部	板塊邊緣	板塊內部	板塊內部
大地構造環境		張裂	擠壓轉張裂	擠壓	張裂
		(遠離變形前緣)	(變形帶)	(變形前緣)	(遠離變形前緣)
地震		無震	待調查「無震帶」	地震带	無震
活動構造		待調查	待調查	密集區	魚
海平面升降/		海平面上升/島	山地	海平面上升/海	海平面上升/島
Ŧ	最墙攀瀑	嶼;		濱;	嶼;
		海平面下降/陸地		海平面下降/陸地	海平面下降/陸地

表 2-43:我國潛在處置母岩長期穩定性比較表

3、處置技術的研究發展

本章闡述用過核子燃料最終處置技術評估範圍、處置設施基本概念及處置技術發展。

3.1. 評估的假設

目前全球所有的核能電廠每年約產生12000噸的用過核子燃料, 對核能產業發展而言,用過核子燃料的管理與處置一直是重要的挑戰 (El Baradei, 2004)。用過核子燃料具有高放射性,且所含核種半化期 較長,確保用過核子燃料可以長期隔離在可能影響生物圈的環境之 外,一直是核能技術發展的重點之一。

3.1.1. 處置用過核子燃料的程序

國際上對用過核子燃料之管理措施,在管理技術上有三種方式:(1) 最終處置前,先進行溼式貯存或乾式貯存

- (2) 先再處理,以回收鈾及鈽等可用物質後,然後對高放射性廢棄物 進行處置
- (3) 先核種群分離(partitioning)與核轉換(transmutation),然後處置。
 在處置方法上有下列兩種方式:
- (1) 境內直接處置或再處理後處置
- (2) 國際合作直接處置或再處理後處置

其中溼式貯存或乾式貯存並未實際解決最終問題,而核種群分離 與核轉換技術仍屬研發階段,需時間突破,所以在可預見的未來,實 際可行的方式有直接處置與再處理後處置兩種方案。目前各國採取再 處理後處置或直接處置之方案,主要係考慮處置場之選址難易、核能 產業規模、鈾原料價格、核能機組種類、核子擴散及保防要求及國家 核能政策等因素。對我國而言,直接處置與再處理後處置在技術面上 有二種方式:

(1) 直接處置:

(a) 中期貯存後,境內最終處置。

(b) 中期貯存後,境外最終處置(國際合作)。

(2) 再處理:

(a) 運送境外再處理(目前國內尚無發展再處理技術之規劃)。

(b) 中期貯存後,再處理或配合第四代核反應器研發之再處理。

3.1.1.1. 中期貯存方案

由於目前世界各國用過核子燃料地質處置計畫大多還在發展階段,造成貯存在核電廠用過核子燃料池中的用過核子燃料遠超過建造時的預期數量,而必須建造用過核子燃料最終處置前之中期貯存設施 以提供所需之貯存容量。

用過核子燃料處置前之中期貯存除了在安全性與短期的成本效 益上提供了良好的方法,更在用過核子燃料的處置或再處理技術上, 爭取到更多技術發展與計畫推動所需的時間。在安全上,目前用過核 子燃料濕式、乾式與長期等不同形式的貯存技術已開發完成,美國核 能管制委員會(NRC)更提出利用乾式貯存技術將可維持100年安全性 的結論(Bunn et al., 2001)。此外,在鈽元素擴散可能性的問題上,雖 然用過核子燃料中含有可作為武器用的鈽元素,但因封存在燃料九及 燃料護套內,再加上貯存過程中具有嚴密的安全戒備,因此鈽元素因 不當途徑而被再提煉製成武器的機率甚低。

乾式貯存並非用過核子燃料處置的替代方案,因此在執行乾式貯存的同時,用過核子燃料處置的發展須持續進行;至於乾式貯存營運 年限的規劃,則建議與一般反應爐運轉之30到50年年限為宜(Bunn et al., 2001)。

初步估算核一廠2018年(民國107年)執照期滿時,用過核子燃料 共7532束,核二廠2022年(民國111年)執照期滿時,用過核子燃料共 11544束。核一廠原規畫於2009年進行用過核子燃料之乾式貯存,在 移出濕式貯存之其中1366束核子燃料後,原濕式貯存空間可使用至該 廠執照期滿,該廠之乾式貯存工程已於96年進行申照程序中。核二廠

計畫於2014年(民國103年)進行類似之移轉功能(燃料2049束),核三廠 之濕式貯存則可運轉至除役(台灣電力公司,2006)。

3.1.1.2. 再處理

從反應爐取出的用過核子燃料的重元素(heavy elements),仍約含 有96%的鈾、1%的鈽及3%的分裂產物(即真正的廢棄物僅佔3%), 用過核子燃料再處理之目的在於回收其中可再使用的鈽及鈾,並將其 製成新燃料後供核能電廠繼續使用,其他核分裂生成物屬高放射性廢 棄物,則以玻璃固化程序處理,最後這些固化的高放射性廢棄物仍須 進行深層地質最終處置。

再處理作業係將經過5年以上冷卻期的用過核子燃料,送到再處 理廠,經過切碎、溶解、萃取、分離等處理程序後,取得鈾及鈽等再 生原料。目前再製燃料係以鈽與回收之耗乏鈾(depleted uranium)混合 製成所謂的「混合氧化物(mixed oxide, MOX)燃料」使用,而再處理 回收的鈾,亦可經過濃縮後製成新燃料使用。以法國為例,再處理每 一公噸用過核子燃料會產生約0.115立方公尺的高放射性廢棄物及 0.234立方公尺的中、低放射性廢棄物(核研所,1998),這些廢棄物都 必須運回原產生用過核子燃料的國家。若以國內八部核能機組運轉40 年估算,可產生約7350公噸的用過核子燃料,若採用再處理方式,將 會產生中、低放射性廢棄物約8600桶,以及高放射性廢棄物約4200 桶(均以每桶200公升計)。所以再處理後產生的高放射性廢棄物(長半 化期)較少,中、低放射性廢棄物較多,且須運回國內處置。

在國際間核能技術發展上,第四代反應器(Generation IV)倡導國 (如美國、歐洲、日本、俄羅斯等)希望能發展出較簡單、爐心熔毀機 率極低之新型核子反應器,預計在2030年左右開始部署,就能源節碳 及經濟效益上,可以與最好的石化燃料(煤、石油、天然氣等)發電廠 競爭,且較不會引發核武擴散。為達成有效的使用自然資源及放射性 廢棄物處理最佳化之雙重目的,第四代反應器的技術發展重點在於藉 由用過核子燃料的再處理技術,將鈽用於輕水式反應器,加上新一代 核反應器內長半化期放射性廢棄物(微量超鈾元素)的轉變,期使長半

化期放射性廢棄物減少約100倍,而留下的殘餘物質經過數百年後, 其放射性就約與原生天然鈾相當(USDOE, 2001;洪正聰與陳冠宇, 2002)。

我國目前並無用過核子燃料再處理設施,但英國與法國均有提供 他國用過核子燃料再處理的服務,台電公司的核反應器係由美國設計 與供應,核子燃料亦大部分由美國供應,需遵照我國與美國及國際原 子能總署簽訂之「中華民國政府與美利堅合眾國政府民用原子能合作 協定」(中華民國政府,1955),及「中華民國政府與美利堅合眾國政 府及國際原子能總署適用防護事項協定」(中華民國政府,1964)內容 的要求,我國用過核子燃料如欲進行再處理,不論境內或境外再處 理,均必須取得美國的同意。

3.1.1.3. 核種群分離與核轉換

用過核子燃料的放射毒性(radiotoxicity)主要來自於鈽及鋂等核種,因此鈽與鋂核種的群分離與核轉換(partitioning and transmutation)為目前主要的研究對象。核種的群分離及核轉換具有下述的特性(台灣電力公司,2006):

- 可降低長半化期核種的含量,做為未來用過核子燃料處置的配套
 措施之一。
- (2) 需要更多的用過核子燃料再處理工作,可能會產生新類型的廢棄物。

核種的群分離及核轉換仍在技術發展階段,為歐盟放射性廢棄物 管理的主要研究項目之一,目前的研究重心在建立微量核種(例如鋂 Am)的分離方法,及進行加速器核種轉換方法及設備 (Accelerator-Driven System, ADS)的設計開發與其他相關核子燃料特 性的基礎研究,技術理論上可有效降低長半化期核種的含量,進而降 低高放射性廢棄物的放射性毒性。

3.1.1.4. 境內直接處置

國際間針對直接處置的研究工作已進行數十年,主要研究重點包 括:處置場址之調查與選址、處置技術發展、處置場概念設計、處置 場安全評估等事項。其中,處置場址之調查與選址包括:長期地質環 境資料蒐集、候選區域調查與篩選準則的確定,及場址特性調查等工 作。處置技術發展與處置場概念設計包括:量測技術、分析技術、驗 證技術、設計概念,及配合建照申請進行之各式設計等。處置場安全 評估包括:處置母岩對核種傳輸的遲滯效應研究、工程障壁材料特性 與吸附能力研究、熱傳導研究、環境影響評估等事項。這些研究工作 尚需長期進行才可獲得完整成果,以確保安全上無顧慮。目前決定採 用直接處置用過核子燃料方案的國家如美國、瑞典、加拿大等,其最 終處置場的發展,由技術研發、場址調查到獲得建造許可,約需三十 至四十年之久。

各國為提升處置場安全性與技術可信度,都規劃經由場址評選、 特性調查、處置場設計、建造及運轉等階段,達到最終處置的目的 (IAEA, 2003a)。在經費評估方面,針對用過核子燃料再處理與直接處 置所需成本,據研究報告的分析(OECD, 1993; MIT, 2003; Bunn et al., 2003),均指出再處理的費用為直接處置的1.5-2.5倍(Bunn et al., 2003);此外,即使不計再處理所分離出高放射性廢棄物的最終處置 費用,再處理方案在短期內仍為較不經濟的選擇(MIT, 2003)。

台灣區域地質多屬中、新生代的岩石,直接處置用過核子燃料, 必須經過詳細的地質探勘與長時間的技術發展,才能取得進行處置場 安全評估所需之各式資料,並使評估結果達到必要之可信度。台電公 司依據「用過核子燃料最終處置計畫書(2006年版)」持續尋找國內適 當的深層地質處置場址,並將先建造用過核子燃料乾式貯存設施,以 進行乾式貯存。在我國最終處置場完成建造及開始運轉前,如再處理 方案可行,可隨時自乾式貯存設施取出用過核子燃料,進行再處理, 以回收鈾、鈽等資源,保留了再處理或直接送往處置場進行處置的彈 性。

SNFD2009

3.1.1.5. 國際合作處置

依據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)動力反應器資訊系統(Power Reactor Information System, PRIS) 顯示,迄今全世界共有436部核能發電機組運轉中(IAEA, 2009),分屬 31個國家。2003年11月,國際原子能總署主席Dr. Mohamed El Baradei 公開建議:目前全世界的用過核子燃料暫存於超過50個臨時貯存設施 中,等待再處理或深層地質處置,並非每一個國家均有適合的地質條 件與財力來進行深層地質處置,因此不同國家間的區域性或國際性的 用過核子燃料與高放射性廢棄物的管理與處置,是未來應考慮的發展 方向(UIC, 2003; El Baradei, 2004)。

用過核子燃料的國際合作處置方式,可使各國有較多的機會選擇 更適當的場址,避免在不適宜的地質條件下建造地質處置場及各國對 高放射性廢棄物處置投資之重覆付出,且因處置場由數國共用,國際 上場址數目少,在技術、環保及經濟上,可更有效地執行處置場之建 造、安全使用及監管,不但可以增加處置過程的透明度,還可以降低 核子擴散的可能性。

雖然國際原子能總署已訂有放射性廢棄物跨國運送之法規,國際 上也有放射性廢棄物跨國運送之實際經驗,但就國際合作處置用過核 子燃料或高放射性廢棄物的最終處置場而言,目前國際上尚在開發 中,尚無運轉的案例。以下將首先針對目前國際間對「境外處置」有 較明確政策的國家(表 3-1),進行相關政策與情勢的說明,其次是「境 外處置」的現況說明(表 3-2)。

國家	法律及政策
俄羅斯	1991年俄國環保法規不允許輸入用過核子燃料。
	1995年後,除少數舊合約限制外,經由俄國「再處理」所產生的高
	放射性廢棄物,須於30天內送回用過核子燃料的原產生國。
	2001年7月,俄羅斯總統普丁(Vladimir Putin)簽署相關法規,同意在
	未來20年內可輸入2萬噸的用過核子燃料,進行「技術性貯存」或
	「再處理」。
美國	美國原子能法明定「與美國進行核子合作的團體(國家、地區)必須
	同意:除非美國同意,否則不得轉移核物質至第三者或其他國家,
	及不得進行核物質的再處理或改變其成份」。
	美國「用過核子燃料輸入管制及安全操作法」規定除非滿足特定條
	件,否則美國不得輸入用過核子燃料。
日本	無明確法規禁止放射性廢棄物的輸入。
芬蘭	原子能法明文規定禁止在芬蘭境內管理、貯存或處置他國的用過核
	子燃料。
瑞典	瑞典國會數度公開宣示,禁止在瑞典境內進行他國用過核子燃料或
	高放射性廢棄物的場內貯存或最終處置。
法國	法國法律規定,非源自於法國本身的用過核子燃料,不得在法國境
	內進行最終處置。
德國	無明確法規禁止放射性廢棄物的輸入。
英國	除再處理或非營利目的外,英國不得輸出或輸入放射性廢棄物,且
	再處理所產生的高放射性廢棄物均須送回原產生國。

表 3-1:各國高放射性廢棄物輸出入政策

(台灣電力公司,2006)

表 3-2:高放射性廢棄物國際合作處置推動案例歷程表

案例	歷程說明
盤古計畫	1997年盤古資源公司澳洲分公司推動一個多國聯合處置場的計
	畫,考慮西澳內陸、南非及阿根廷尋找地質處置場。
	1998年西澳歐非色盆地所屬州政府立法規定任何在當地推動的放
	射性廢棄物處置國際計畫,須經該政府同意。澳洲政府行文告知盤
	古公司:澳洲的政策絕對禁止外國的放射性廢棄物的輸入,未來此
	一政策亦不將改變。
	2001年10月,計畫停止推行。
防止核子擴	2000年防止核子擴散信託計畫執行機構向瑞士、日本、韓國及我國
散信託計畫	等進行遊說,以期能協助運送用過核子燃料至俄羅斯進行境外處
	置。
	2004年,計畫停止推行。
SAPIERR計	盤古計畫終止後,盤古計畫成員在2002年2月22日於瑞士成立
畫	ARIUS協會,希望透過非營利的合作方式,先行探討國際合作處置
	的可能性。
	ARIUS協會及斯洛伐克在2003年分別取得瑞士政府及歐盟的支
	持,共同成立SAPIERR計畫,探討在歐洲成立區域性最終處置場的
	技術及法律可行性。
全球核能夥	2006年2月6日美國能源部發布全球核能夥伴(Global Nuclear Energy
伴(GNEP)	Partnership, GNEP)倡議(DOE, 2007), 期結合相關核能國家開發新
	式用過核子燃料再處理技術,以達到減少核武擴散與減少放射性廢
	棄物數量之目的。然因美國隨能源政策改變,已在2009年6月將
	GNEP相關預算刪除,美國能源部亦表示不再追求該國內的商業再
	處理。

(台灣電力公司,2006)

3.1.2. 處置技術評估的範圍

3.1.2.1. 地質環境調查技術

地質環境調查技術發展的重點有兩方面:(一)進行處置設施場址 (site)的地質環境長期穩定性評估(二)處置母岩的特性研究。在第一部 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、陸昇、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。在母岩特性研究方面,主要在發展綜合 評估地質、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,建立具代表性的母岩特性參數,以正確描述處置岩體及其 地質環境的特徵與行為,並架構各種概念模式,提供功能/安全評估 的基礎資訊。

3.1.2.2. 工程障壁與處置設施技術

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 用過核子燃料中放射性核種的傳輸,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 物體、包封容器及緩衝回填材料(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

台灣區域的情況來看,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。

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三部分:(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,此三部分再加上岩壁內側 因開挖而受到的擾動帶(視開挖方法與使用機具之不同而不等,約在 0.05公尺至3公尺之間),即組成一般習稱的「近場」環境(near-field)。

3.1.2.2.1. 廢棄物體

我國目前考量是將用過核子燃料直接處置,因此廢棄物體 (wasteform)即指用過核子燃料。經由獲得用過核子燃料內的核種含 量、活性大小及衰變熱,結合核種含量與核種之半化期、年攝入限度 等資料,可建立關鍵度指標,根據此關鍵度指標可以篩選關鍵性核 種,作為安全評估之源項(source term)及核種遷移/遲滯實驗之依據。

欲把用過核子燃料束置入包封容器內,瑞典採用的固封法是將完整的用過核子燃料束直接置入包封容器中,並以固體穩定物(如鉛、銅)填塞空隙部份;美國的固封法偏向於將燃料棒密化後再以氣體穩定物(如氮、氦)充填空隙。由於燃料束在包封容器內緊密的堆疊,因此除了空間能得到最佳利用外,並能增加燃料束之力學穩定性,減少處理及運送期間發生燃料束損壞的意外風險。

3.1.2.2.2. 廢棄物罐

廢棄物罐的壽命應有多長並無一定標準,端視其在廢棄物罐於多 重障壁概念扮演的角色而定。用過核子燃料在熱液(hydro-thermal)環 境下之化學耐久性很差(亦即瀝濾率會增加),因此為減少放射性核種 的釋出量,應避免用過核子燃料在熱液條件下與地下水接觸。用過核

SNFD2009

子燃料中的分裂產物: Sr-90及Cs-137 (半化期約為30年)為主要的產 熱核種,故若廢棄物罐能維持300年(10個半化期)以上而不破裂,此 時整體用過核子燃料的衰變餘熱已降至最初的百分之一左右,應可排 除發生熱液效應的可能性。美國及加拿大對包封容器的要求壽命分別 為300至1000年及500年,主要是基於上述之考量(台灣電力公司, 2006)。

選擇廢棄物罐的材料時,首先須符合法規要求,其次再考慮材料 價格及工業來源。廢棄物罐容易被氧和硫所腐蝕,這些物質存在於處 置場通道和處置坑中,也有的是被地下水以溶解的形式帶來,而有些 氧化劑則是由水被輻射水解所產生。廢棄物罐的材質與厚度直接影響 其被腐蝕的速度及障壁功能,多種腐蝕形式中,以均勻腐蝕、局部腐 蝕(罅隙腐蝕及孔蝕)及應力腐蝕龜裂對廢棄物罐的壽命可能構成威 脅。另外,常伴隨腐蝕反應而發生的氫脆化(hydrogen embrittlement) 亦是應注意的問題。因此廢棄物罐研究是為了找出最適宜處置場特性 的容器材料,為達到此目的,必須配合處置場環境特性,進行多種材 料的不同腐蝕模式研究,而這些材料至少須分屬兩類不同材質,以避 免實驗時出現共同失效模式(common failure mode)。

3.1.2.2.3. 緩衝回填材料

黏土、天然及合成沸石、活性碳、金屬粉及乾燥劑等都曾被考慮 作為緩衝回填材料之物質。根據許多國家多年來對緩衝回填材料的研 究結果(Smellie, 2001)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、回脹性等方面有相當良好的功能, 因此亦曾被建議作為緩衝回填的主要材料。美國懷俄明州生產的 MX-80膨潤土是相當典型的海相沉積礦床,MX-80也是目前較大規模 開採的商業化膨潤土,加拿大、日本、中國大陸等國也有膨潤土礦區 進行開採及研究。

考慮坑道回填所需之緩衝回填材料需求量很大,而上述之MX-80 膨潤土,雖然具有良好之功能,但將來各國處置設施相繼建造後,對 於原料供應穩定性及價格上將較難掌握,所以本土材料的開發與研究

是必要的。國內根據以往的調查資料顯示,含蒙脫石的黏土區,主要 分布在台灣東部海岸山脈之風化黏土,位於台東縣樟原之日興礦業公 司是目前國內已進行商業開採的膨潤土礦場。

考量目前較為成熟的工程障壁設計,瑞典KBS-3的設計概念 (SKB, 1999)提出以膨潤土(bentonite)與石英砂(quartz sand)之混合物 作為緩衝回填材料。加拿大AECL(Atomic Energy of Canada Limited) 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H12報告(JNC, 2000b)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。綜合各國之研 究,緩衝回填材料之重點研究方向如下:

- (1) 緩衝及回填材料的功能與成分規格之測試研擬。
- (2) 緩衝及回填材料長期穩定特性研究,項目包含緩衝回填材料的化學穩定性、回脹(swelling)特性、核種吸附及傳輸特性、力學性質、熱力學特性、透水性質,及塊體組合性質等主題。

3.1.2.2.4. 近場環境

近場環境包括廢棄物體本身、包封容器、緩衝回填材料,及周邊 的開挖擾動帶等條件因素。由於處置場建造過程及用過核子燃料處置 期間產生的熱與輻射會使得周圍環境的物性及化性產生改變,預期會 發生的效應將包含開挖行動引起的岩石物性改變、岩石及地下水由於 輻射引起的物性及化性變化、熱所引起的包封容器及岩石的力學性質 改變、岩石 - 地下水系統及地下水流場受到用過核子燃料產生熱及挖 掘開採行動而有所變化。為了瞭解上述效應是否會如預期發生,並探 討發生後對近場環境造成之影響,因此應進行下列的研究:

(1) 處置坑道的穩定性

處置母岩在處置場建造過程受到開挖行動的影響,完整性將受到 破壞,是否因此使得岩層產生移動、變形,以致於無法維持長時 期的完整,為研究重點之一。而在用過核子燃料放置後,近場岩

石是否會由於溫度變化, 體積膨脹而使穩定性受到影響進而使得 包封容器也承受額外壓力, 亦需深入研究分析。

(2) 處置場耦合效應研究

用過核子燃料放置後,整個處置場溫度隨時間變化情形,以及造成之水—熱—力學(hydro-thermal-mechanical)耦合效應,此部份研究相當複雜,很難以實驗模擬此效應,通常藉電腦程式予以評估,但在程式模擬上仍有一些不確定性,有待克服。

- (3) 輻射效應分析 研究輻射造成之水解現象及對處置場環境造成之氧化還原介面 改變等諸多效應。
- (4) 近場地下水化學特性研究 配合材料特性分析實驗研究地下水中所含的粒子、酸鹼值及探討 在處置場熱輻射環境特性下的變化,此部份研究亦為包封容器腐 蝕現象研究之基礎工作,二者應密切配合進行。
- (5) 近場水文地球化學反應研究 針對地下水/膨潤土/水泥及混凝土間交互作用下的水文地球化學 條件進行研究,利用EQ3/6、PHREEQE等電腦程式分析水泥/日 興土、水泥/MX-80膨潤土等工程障壁材料,在交互作用達到平衡 下,近場可能之水文地球化學條件,以作為安全評估及核種遷移 /遲滯實驗之依據。
- (6) 回填/封阻試驗研究 緩衝回填材料必須在現場進行處置坑道的回填/封阻試驗,以驗 證在實驗室之技術可確實應用於現場設施中,否則不但會高估緩 衝回填材料實際的功能,回填/封阻不佳的坑道反而會提供地下 水流及核種傳輸的捷徑。

上述的研究項目,皆需在地下實驗設施中進行,方可具有代表性。

3.1.2.3. 功能/安全評估技術

用過核子燃料處置場的安全與否,與場址的選擇、處置場系統的 設計、工程障壁的功能與品質、處置母岩的地質構造條件等息息相 關。功能/安全評估的目的是量化模擬與分析處置場的功能與安全 性,以確保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(Feature, Events, and Process, FEPs),經由各種FEPs的分析 組合,架構處置場安全年限期間發生之各種可能情節,並利用量化模 擬技術評估情節發生時,對處置場可能之功能與安全影響。

3.1.2.4. 地下實驗設施與技術驗證

前述的許多技術發展,事實上都需要一個場地來進行操作演練, 以確保技術發展工作的落實;另有些必要的特性參數或資料因精度、 尺度之要求,則需藉助於現地實驗來取得具代表性或有意義的數據; 這些困難與限制的突破,便突顯出地下實驗設施的重要性。

現地詳細數據的取得、調查與處置技術的驗證及展示(民眾溝通) 為建造地下實驗設施的主要目的,因此,在最終處置場實際建造前, 有其設置的必要性。在「場址詳細調查與試驗」階段(2019~2028年), 則建議開始地下實驗設施的規劃與建造,並進行相關的地下現地試 驗。在此之前,國際間的相關規劃與建造經驗,尤其是以花崗岩質母 岩為主的瑞典、芬蘭及日本等國的處置場功能安全評估與地下實驗設 施,其規劃與建造的經驗與技術交流,應為相關工作的主要重點。

3.1.3. 工程障壁與處置設施技術評估的假設

為進行相關技術研究與案例分析驗證之需要,對於國內法規要求 尚未齊備部分,乃假設將依據或參考國際做法與要求。我國及國際上 之相關法規要求謹介紹如下。

3.1.3.1. 處置設施功能準則

處置設施功能需求必須滿足政策與法規的要求,各國法規如瑞典 SR-97 (SKB, 1999)報告、日本H12 (JNC, 2000a)報告,對於處置設施 整體功能之要求大致有以下的重點:

- 處置設施封閉與停止監管後,其隔離廢棄物之安全性不得仰賴於 後代之維護。
- (2)處置深度應足以減緩地表事件的影響與增加人類無意侵入之困難。
- (3) 設施應採多重障壁概念設計,處置場整體安全不得依賴於單一組成。
- (4) 應執行場址調查計畫,以取得設計與安全評估所需資訊。
- (5) 設施須經適當設計、建造、運轉與封閉,避免對處置系統的隔離 功能產生不利影響。
- (6) 應建立符合系統功能評估及操作與運輸要求之廢棄物接收準則。
- (7) 應執行監測計畫,監測處置場建造與廢棄物置放之變化。
- (8) 應建立及維護紀錄系統,詳盡紀錄與保管安全有關之資訊。
- (9)對於影響安全之行為應建立品質保證計畫,包括相關之研究發展。

至於各次系統如廢棄物體、廢棄物罐、緩衝回填材料之功能準則,基本上並不會在法規中規定,主要原因為其技術性高且仍精進中,因此法規大體上只要求處置執行者應使用可行的最佳方法進行合理的設計與評估,保留其作業之彈性。這些次系統功能準則多見於各

國處置執行或研發單位之技術報告中如瑞典SR-97 (SKB, 1999)報告、日本H12 (JNC, 2000a)報告等。

國際原子能總署推動之「用過核子燃料管理安全及放射性廢棄物 管理安全聯合公約」(IAEA, 2001)第7條亦對於設施設計與建造提出指 引,要求各締約國應採取適當步驟,以確保:

- (1)用過核子燃料管理設施的設計和建造應能提供合適的措施,限制 對個人、社會和環境的可能輻射影響,包括排放或非受控釋放造 成的輻射影響。
- (2) 在設計階段即應考慮用過核子燃料管理設施除役的概念計畫,並 在必要時考慮有關的技術規範。
- (3) 設計和建造用過核子燃料管理設施時,所採用技術應有經驗、試驗或分析的支持。

設計準則的目的在規劃安全的設施與系統,必須考量地質與工程 技術,可行性、安全性與經濟性等因素,應採用必要的先進技術進行 施工與管理,且反覆進行評估。

我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」(原能 會,2005)對於處置場設計準則之相關規定如下:

- (1) 高放射性廢棄物最終處置應採深層地質處置之方式。
- (2) 高放處置設施應採多重障壁之設計。
- (3) 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○·二五毫西弗。
- (4) 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。
- (5) 高放處置設施之重要結構、系統及組件設計,應符合下列規定: (a)可進行檢查、維護及測試,並符合核子保防作業之要求(b)防範可預期之天然災害(c)具備意外事件緊急應變功能(d)確保高放射性廢棄物之各項作業,於正常運作及預期意外事件時,均能維持次臨界狀態(e)具有火災或氣爆之防護功能(f)其他經主管機關指定之事項。

(6) 高放處置設施封閉之設計,應確保地下通道及鑽孔封填後,不得 成為放射性核種傳輸之關鍵途徑。

3.1.3.2. 管制/評估時間與空間之考量

處置設施之安全性須彙整場址特性、處置系統概念、情節等,模擬核種外釋特性,並進行確認。由於用過核子燃料所含核種其半化期可能長達百萬年,因此如何將功能評估計算之時間尺度列入管制,亦 為法規制定之重點。

各國評估時間尺度的考量以下列三種為主:

- (1)考量地質、氣候、地形變遷可能的自然週期,以及進行處置系統 評估計算的可靠性,以一萬年為評估核種劑量變化的參考基準, 如加拿大、芬蘭、法國等(NEA, 1997)。
- (2)考量用過核子燃料衰變至與天然鈾礦輻射背景相當之時間,評估時間為十萬年到百萬年,如各國專案報告如日本H12(JNC, 2000a)、芬蘭TILA-99(Vieno et al., 1999)、瑞士Kristallin-I (NAGRA 1994)、瑞典SR-97(SKB, 1999)與SITE-94(SKI, 1996)等均明確提出。
- (3)考量輻射風險而不於法規明定時間,僅要求須評估至最大曝露風 險發生之時間。

事先設定評估之時間並不代表作為安全分析的計算終點,而是一 個最低的時間要求,或視為使用技術的分野。基於不確定因素的考 量,所謂一萬年指的是在此涵蓋時間尺度內,必須充分使用具時間意 義的模式與真實資料來進行定量評估。而超過此時間值,可以使用較 簡單的計算或基於專家假設,對於處置場的安全性作定性說明。亦 即,在前一萬年的計算可以用劑量為功能評估標準,在大於一萬年的 長時間時,可以跟天然核種相比較作為補充標準。雖然長時間之計算 有其必要,但須謹記隨時間增加,定量計算的不確定性越高,僅能視 為一種安全的參考指標。因此評估之結果亦應充分說明其不確定性。
以美國為例,美國環保署1985 年的標準係以機率方法計算永久 封閉後超過一萬年的互補累積分佈函數(complementary cumulative distribution function, CCDF),以表示累積常規化釋出到人類可到達環 境之放射性(NEA, 1997)。

美國核能管制委員會法規10 CFR 60.113 (USNRC, 1997)亦曾對 某些處置場次系統設定量化之時間準則,例如:

- (1) 廢棄物包件在處置場封閉後300-1000年間仍應維持完整功能。
- (2) 控制核種從工程障壁釋出的速率(例如處置場封閉一千年內,每 年釋出不得高於廢棄物留存量比例的十萬分之一)。
- (3) 未處置前地下水移動的時間至少在一千年以上。

此外,美國環保署於2008年9月提出40CFR197報告,針對Yucca Mountain擬定一套進一步之量化時間準則(NRC之標準需據以修訂符 合EPA之標準)(EPA, 2008):

- (1) 在處置場封閉後一萬年間,劑量之上限為150 μSr/yrs。
- (2) 在處置場封閉後一萬年~一百萬年間,劑量之上限為1 mSr/yrs。
- (3) DOE需與一百萬年間考慮氣候變遷、地震、火山活動、廢棄物罐 腐蝕之影響以維持處置場之安全。
- (4) 確定此處置場封閉後一百萬年間外釋劑量之輻射防護標準與國家科學院(National Academy of Sciences, NAS)一致。

日本原子力委員會(JAEA, 1997)在時間尺度的安全評估方面強調:下一個冰河期預計將於一萬年後發生,冰河對人類環境與地質環境的長期穩定性必須加以評估預估。

法國DSIN/IPSN基本安全準則(RFS)處置場參考演化狀況,評估時間至少一萬年(Raimbault et al., 1997)。在超過十萬年的假想狀況下,可能造成異常曝露的事件可以用風險觀念加以表示。此外,處置場封閉後的監管可以有效防止人類之侵入,撤除監管且處置場被遺忘的時間概估為處置場封閉後五百年,此時間內假設無人類侵入之可能。

德國法規並無特別規定安全評估之時間尺度。但核安主管機關的 意見認為應評估超過一萬年,因為一萬年內通常可以免於考慮冰川、

構造運動、或火山等地質變遷。超過一萬年的評估則須證明無不可被 接受的風險(Arens, 1997)。

雖然在評估時間尺度上仍存有許多討論空間,但其不變的精神是 希望在不同時間所發生的輻射效應均能被審慎評估,評估時間尺度應 涵蓋廢棄物可能的有害期限。

處置空間的管制較少見於法規,基本上有兩項重點,一為場址調 查與評估之範圍;一為處置場之深度與管制範圍。前者之評估範圍一 般以完整之地質構造區與水文地質區等為目標。後者則如法國DSIN /IPSN基本安全準則(RFS)之建議(Devillers, 1997):基於安全因素的 考量,未來深層處置場設置深度應大於200公尺,以減少地表活動可 能造成的干擾;基於經濟與安全因素的共同考量,處置場的設置深度 則以不超過600公尺為宜。以及美國 10 CFR 60 (USNRC,1997)定義之 封閉後管制區域(postclosure controlled area),其最大範圍不能超過10 km。

3.1.3.3. 輻射劑量與風險限值之考量

輻射劑量與風險是各國處置相關法規之規範重點。原則性的管制 目標各國均參考國際原子能總署(IAEA, 1995a,b)與原子能署(NEA, 1999)等國際機構的準則訂定規範。即:

- (1) 未來世代所受到的潛在輻射影響,不得大於現代可接受之水準。
- (2) 處置安全的判斷應基於所有輻射的影響,而無視於國界之存在。
- (3)廢棄物應安全處置,而不須以長期監管與復育來增加後代之負擔。
- (4) 處置對民眾造成之輻射影響應考量社會、經濟因素合理抑低。
- (5) 設施停止監管前之輻射影響評估應符合廢棄物與場址相關之劑 量限值,撤除監管後應符合風險標的。
- (6) 須證明處置設施之核種釋出不會顯著增加人類可接受環境之放射性。

在劑量與風險限值考量上各國莫不以國際輻射防護委員會 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)之標準為 參考基準,再分別根據國情擬定各國之標準。依據國際輻射防護委員 會 1998 針對長半化期固體廢棄物處置發布的第81號報告 (ICRP,1998),規定正常曝露狀態下個人年劑量限值為3.00E-01 mSv/yr,對應之輻射風險為1.00E-05/yr。

目前英國並無高放射性廢棄物處置法規,對於低中放射性廢棄物 之規定為:監管撤除前,整體場址相關之劑量限值,不得造成關鍵群 體代表性個人超過5.00E-01 mSv/yr。監管撤除後,處置設施對潛在曝 露群體的代表性個人,造成之輻射風險須符合1.00E-06 /yr之風險標 的(Duncan, 1997)。

法國在處置場參考演化狀況下個人有效等效輻射劑量須低於 2.50E-01mSv/yr (Raimbault, and Barber, 1997)。

芬蘭規定在可合理預測的時間範圍內(約一萬年)對最可能曝露個人之劑量限值為1.00E-01 mSv/yr,對可能造成輻射曝露增加之事件應定性討論,如果可能的話應定量評估其風險(Ruokola, 1997)。

德國封閉後個人年劑量限值不得大於3.00E-01 mSv/yr (Arens, 1997)。

瑞士參考 IAEA 安全基準 SS 111-F(1995)建立技術指引 HSK-R-21,規定處置場封閉後個人劑量限值為1.00E-01 mSv/yr。機 率風險不得大於1.00E-06 /yr (Zurkinden, 1997)。

美國核能管制委員會(NRC)為了調和國家科學院(National Academy of Sciences, NAS)及國際輻射防護委員會(ICRP)的建議,因此對於關鍵群體的輻射暴露有效等量劑量考慮採用 2.50E-01~3.00E-01 mSv/yr (Knapp, 1997)。

除了輻射劑量與風險限值外,證明隔離功能的安全指標尚可包括 如核種在環境中的濃度及生物圈的流通量(flux)、放射毒性、地下水 流速等。

目前各國對於處置安全的管制大多以劑量與風險為限值,我國亦 不例外。我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」對 於處置場設計準則之相關規定如下:

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。

由於用過核子燃料處置所需考慮的時間長達萬年,因此其安全性的確認有賴功能/安全評估技術,以電腦程式進行模擬,藉合理評估 處置系統隨時間變化之情形,考慮長時間、不均質與變異環境、不確 定性等來加以驗證。

3.1.3.4. 處置場封閉前與封閉後之考量

處置場生命週期一般以封閉前後劃分為兩大部分,封閉前之運轉 期間其管制重點在於工作場所之輻射管制、工業安全、環境保護、品 質管制等。而封閉後的安全考量強調處置系統之長期穩定性,如果處 置系統能夠確保其穩定,才能有效將廢棄物與人類可達之環境隔離。

功能評估是證明處置工作能否滿足法規安全輻防準則的系統性 分析方法。必須要建立處置概念與系統,並評估此一處置系統隨時間 之可能變化。功能評估的過程包括系統認定、情節建構、程式模擬等。 其中程式模擬技術包括定率(deterministic)與機率(probabilistic)方 法,二者應當相輔相成,雖然我們致力於量化評估結果,但這些結果 仍然須基於大量的定性(qualitative)假設與專家判斷。但在不確定性與 參數敏感度分析方面仍是以定量(quantitative)的研究為主,以幫助釐 清處置場功能隨時間的可能變化。

封閉後評估之技術性安全原則包括:

- (1) 應用各種不同的保守方法進行評估。
- (2) 處置系統應整體評估。
- (3) 應使用接近真實環境之資料。
- (4) 應進行不確定性與參數敏感度分析。
- (5) 應導入風險評估觀念與天然類比成果。

(6) 人類侵入應列入評估。

在封閉後長時期的處置安全分析中,環繞著兩個主題:不確定性 的處理及時間架構的需求。處置場封閉後,隨時間增加,功能評估的 性質將有所不同,且不確定因素亦隨之增加,因此長時間尺度評估的 結果僅能視為一種安全的指標,而非真正影響的預測。所以應該發展 出具國際共識的格式化方法以評估長期影響,例如參考關鍵群體及生 物圈的觀念。

3.2. 工程障壁與處置設施的基本概念

3.2.1. 工程障壁的基本概念

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。

3.2.1.1. 用過核子燃料

(1) 功能需求

用過核子燃料處置功能需求主要為短半化期核種宜經適當衰變 且衰變熱(decay heat)應經適當降溫至便於進行處置操作、釋出熱 能不宜對處置場工程障壁的長期效能造成不利之影響、用過核子 燃料宜耐地下水溶解作用之影響等。

(2) 處置設計數量概念說明

我國運轉中之反應器共六部,四部為沸水式(BWR),兩部為壓水 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(圖 3-1為核燃料之結構示意圖)。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)。



3.2.1.2. 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。

(1) 功能需求

廢棄物罐有幾項基本功能需求,以提供處置場必要的廢棄物隔離性(SKB, 1999):

- (a) 能長時間保持完整性。
- (b) 具初始的完整性。
- (c) 具對處置環境的化學抵抗力。
- (d) 在處置環境下具長期的力學強度。
- (e) 對處置場中其他障壁不致產生不良影響。
- (f) 廢棄物罐材料不得對緩衝材料功能產生不良影響。
- (g) 能限制近場之熱與輻射劑量。
- (h)即使地下水進入廢棄物罐中,用過核子燃料物質組態仍在次 臨界狀態。
 - (i) 能限制廢棄物罐向下施於膨潤土之壓力。
- (2) 規格概念說明

將我國用過核子燃料組件規格與瑞典比較,除我國BWR之燃料高 度稍高外,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公分,外徑105公分,銅殼厚度5公 分,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燃料組件或四個PWR燃料組件,廢棄物罐剖面型態如圖 3-2,組件結構如圖 3-3所示。



圖 3-2: KBS-3型廢棄物罐剖面

(單位:mm)



(a) BWR形式廢棄物罐



(b) PWR形式廢棄物罐

圖 3-3:廢棄物罐組件結構圖

3.2.1.3. 緩衝材料

緩衝材料使用目的在環繞廢棄物罐周圍,以防止地下水流入罐 內,維持廢棄物罐在定位,並遲滯核種遷移。

(1) 功能需求

緩衝材料的功能需求包括(SKB, 1999):

- (a) 能長期完整包圍及保護廢棄物罐抵抗外部岩層之應力作用。
- (b) 能防止地下水流經廢棄物罐,防止腐蝕物質與廢棄物罐接 觸。
- (c) 具適當導熱性使廢棄物罐表面溫度低於100 ℃。
- (d) 具適當密度與強度能承受廢棄物罐之荷重。
- (e) 回脹性不得對岩石及廢棄物罐產生過高之壓力。
- (f) 具適當的柔軟度能容納岩石潛變位移。
- (g) 能允許受腐蝕廢棄物罐可能產生的氣體遷移離去。
- (h) 對核種有吸附與遲滯效能。
- (i) 對微生物與膠體有過濾功能。
- (j) 具化學緩衝能力。
- (k) 對其他工程障壁材料無不利影響。

此外,基於經濟性考慮,緩衝材料須為易於取得、施工者。

(2) 概念說明

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、膨潤土之 回脹力、膨潤土之水力傳導係數、膨潤土阻滯核種傳輸之能力、 膨潤土之導熱性等因素。參考瑞典SR97(SKB, 1999)提出概念, 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公尺,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為厚1.5公尺。考慮可能核種障壁 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公 尺。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公尺,整個處置孔置放直徑為1.75公尺,為廢棄物罐直 徑與原始膨潤土厚度之和,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。

3.2.1.4. 回填材料

參考處置概念之回填材料為膨潤土與花崗岩岩屑之混合物,在處 置作業結束後,以回填材料將地下開挖之處置隧道、洞穴、坡道及豎 井等依設計確實回填,以抑制地下水流通與處置場障壁之化學變化。

(1) 功能需求

回填材料的功能需求為必須維持隧道穩定,並保持緩衝材料於處 置孔中。此外亦須限制地下水的流動,不能使地下水水質劣化, 須具有長期的化學穩定性等。

(2) 概念說明

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,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,以減少回填材料需求成本,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 關係與場址地下水流與地下水化學組成有密切關係。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。

3.2.2. 我國處置設施的基本概念

我國參考處置概念之設施區分為地表設施、連通設施、與地下設施三大部分(圖 3-4),茲將設施基本概念概述如後,詳細之設施設計可見3.4.1節。



圖 3-4:處置設施概念圖

(紀立民, 2002)

SNFD2009

3.2.2.1. 地表設施概念

依據國外相關研究(BfS, 1994; Simmons et al., 1994; Baumgartner et al., 1996; SKB, 1996)指出,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。依據參考處置概念所擬定之詳細地表設施項目可見3.4.1節中表 3-8。

各地表設施之實際配置並未影響封閉後之安全評估,因此現階段 尚未進行細部研究。

3.2.2.2. 連通設施概念

處置場之地下設施位在地下300至1000公尺深處,與地表設施間 需以豎井或斜坡道聯絡。地表與地下之間交通隧道型式選擇需考慮地 質、安全、運輸量、封閉措施、成本、地下設施形貌、開挖方式等。 豎井使得深層處置場的位置必須位於地表設施的正下方;而斜坡道則 使處置場位置有較大的彈性範圍,可調整中心位置以適應廢棄物罐的 運輸條件,且運送護箱亦可考慮在斜坡道內卸除。

本研究之參考處置概念暫以四條豎井作為地表與地下之聯繫。四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。四個豎井直徑均暫定為5公尺。

3.2.2.3. 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 處置區配置之說明,茲分述如下:

(1) 處置孔配置

廢棄物罐採垂直置放,處置孔間距與下列因素有關(SKB, 1999):

- (a) 廢棄物罐內填放之用過核子燃料數量。
- (b) 緩衝材料厚度。
- (c) 廢棄物罐表面與緩衝材料內可允許的溫度。

- (d) 母岩原始温度。
- (e) 緩衝材料導熱性。
- (f) 母岩導熱性。
- (g) 處置隧道間距。
- (h) 每單位水平面積所允許的熱荷載。
- (i) 熱所產生應力對岩石強度之影響。
- (j) 限制處置孔間水力連通之需求。

處置場中並非所有處置孔的位置都能理想使用,可能的影響因素 包括:岩性(岩體成分)、地下水流到處置孔的情形、鑽孔的穩定 性、長期安全性、地質構造影響等。由處置孔之可用性可以估計 出實際所需之處置岩體大小。參考處置概念研提之處置隧道與處 置孔剖面如圖 3-5所示。主要係依據瑞典SR97(SKB, 1999)的初 步設計,而本計劃僅直接考慮尺寸之變動,並未就各組成部分如 膨潤土與處置孔大小等之功能性與經濟性進行整合評估,未來需 視特定組成部分的研究成果加以調整,以求得最適尺寸。所設定 之廢棄物罐高度與處置隧道高度配合我國用國核燃料組件分別 假定為4.91公尺與4.10公尺,隧道寬3.60公尺,處置孔深度7.91 公尺,直徑1.75公尺,處置孔間距6公尺。

(2) 處置隧道與處置區配置

紀立民(2002)曾參考瑞典SR97(SKB, 1999)之設計概念,假設考慮 核一廠、核二廠、核三廠及核四廠運轉40年產生之3652個廢棄物 罐,其估算數量系依據台電公司(2001)之統計資料。處置隧道間 距40公尺計,圖 3-6為初步規劃之處置場地下設施配置構想,考 慮施工與處置作業效能,單一處置隧道長為320公尺,可處置53 個廢棄物罐,每一處置區包含六條處置隧道,共處置318個廢棄 物罐。分區之目的可以加強管理,並保持適應地質環境調整之彈 性,各區分期獨立施工,可以增加運轉安全,並回饋施工經驗以 改善後續之工程。處置區之間原則上相距60公尺,整個處置場劃 分為12個處置區,共可容納3816個廢棄物罐,足以容納推估之廢

SNFD2009

棄物罐數量。整個地下處置區域長約1340公尺,寬約800公尺, 所需處置面積約1.1平方公里以上,其中尚不含地下運轉作業區 與避開不適用母岩所需之空間。施清芳等(2007)重新推估核一廠 至核四廠運轉40年將產生3940個廢棄物罐,考量核四廠尚未竣工 運轉,廢棄物數量與處置概念之更新將於後續計畫逐步進行。

(3) 運轉隧道與作業區

處置場以環狀之運轉隧道為中心,以確保運轉時期之安全與效 率。運轉隧道亦為馬蹄型開挖面,假定寬度及高度均為5公尺, 處置隧道由運轉隧道向兩側展開,分期施工並進行處置作業,主 要運轉作業區設於地表設施正下方,位於處置區域一側之適當距 離處,包括控管中心、施工作業區、廢棄物轉運區、人員休息區、 物料區等。

上述為參考處置概念處置孔配置、處置隧道與處置區配置。依據 參考處置概念所擬定之詳細地下設施項目可見3.4.1節中表 3-9。







3.3. 工程障壁的相關技術

工程障壁是由廢棄物體、廢棄物罐、緩衝材料與回填材料共同構成。工程障壁系統材料包含由銅外殼、鑄鐵內裡所組成之廢棄物罐, 純膨潤土之緩衝材料及膨潤土、岩屑混合之回填材料。在我國之參考 處置概念中,廢棄物罐即為全部之包封容器,亦即不再另外包含額外 之外包裝(overpack),因此本文所指外包裝即指廢棄物罐。

3.3.1. 外包裝

在深層地質處置中,放射性廢棄物罐或外包裝(以下皆稱廢棄物 罐)的設計良窳會直接影響到放射性核種的釋出時間,對於處置場的 安全性關係密切。包含瑞典、芬蘭、加拿大、比利時、美國、德國、 法國、瑞士、日本等各國均針對其可能的場址條件,發展出適合的廢 棄物罐設計。其使用環境、材料選擇及設計上各有特點,而相關的研 發工作,如材料測試、製造技術、檢驗技術等,均仍在繼續發展中。

在國內的相關技術發展,陳本康(1994)研究工程障壁特性,整 理當時國際上已有之廢棄物罐材料選擇情形。黃克尤與李瑞益(2002) 評析國際間使用不同材質廢棄物罐之設計考量及一般要求準則,探討 處置場地質條件與地下水化學間的關係,評估各國選擇不同候選廢棄 物罐、測試用水及處置地下環境的相異處。依據其測試結果,評析候 選材料在不同地下水環境下之腐蝕抗性,並針對目前國際間所廣泛採 用的廢棄物罐材料,在不同處置條件下的優劣性,做一初步的評比。 李瑞益與吳晃昭(2003)則針對廢棄物罐失效機制、廢棄物罐材料遴選 考量、廢棄物罐製作過程及不同型式之腐蝕機制進行評估,初步擬訂 廢棄物罐之幾何尺寸基本參數。在使用銅質廢棄物罐的情況下,蒐集 國際廢棄物罐腐蝕資料,利用地化分析程式EQ3/6分析在不同水化學 條件下之地化平衡條件,建立銅質廢棄物罐之腐蝕速率評估模式。此 外,依據所擬定的受力情節計算BWR型式廢棄物罐之結構彈、塑性變 形反應。結果顯示,廢棄物罐內部分元件發生局部塑性變形,但都仍 在材料破損極限之內,結構之完整性可以維持。李瑞益與吳晃昭

(2005)針對廢棄物罐及其材料之特性進行分析,包括國際間廢棄物罐 的發展現況(材料之選擇、銅質廢棄物罐的發展重點),廢棄物罐材料 篩選考量因素、準則及程序,並針對銅質廢棄物罐精進其腐蝕模式以 評估腐蝕速率及使用壽命;在結構應力分析上,則對於廢棄物罐在吊 運作業中的承載能力分析及電子束焊接後的殘留應力進行評估。

3.3.1.1. 廢棄物罐功能性需求與篩選準則

廢棄物罐材料之選擇,需符合其主要功能需求,即在一定設計年限內,將用過燃料及其所含之放射性物質包封在罐內,不釋出至其外之空間,並維持在運轉過程時的安全需求。在處置場的環境下,廢棄物罐需滿足的需求如下(李瑞益等,2005)

(1) 輻射防護

廢棄物罐需能有效屏蔽廢棄物體的輻射強度,至一定的標準以下,以利運輸、搬運作業。以瑞典為例,其限制廢棄物罐表面劑量在1 Gy/h以下。

(2) 臨界控制

廢棄物罐在充填用過核子燃料後,在廢棄物罐充滿水的情況下, 需維持在次臨界狀態;中子有效增殖因子需小於0.95。

(3) 力學強度

廢棄物罐需提供足夠的力學強度,以承受岩石及障壁施加之負載、地層水力靜壓、緩衝材料充水及受熱回賬壓及岩體沿著裂隙快速位移等產生之負載。潛變所產生的總變形量需小於一個限值,(例如銅質廢棄物罐的總潛變量需小於4%)以確保廢棄物罐結構之完整性。

(4) 溫度限值

以水在一大氣壓下免於沸騰的現象產生的溫度(100℃)作為高低 溫的分界。目前除了少數國家如美國採取高溫處置概念外,其餘 國家大皆採用低溫處置概念。在低溫的處置概念中,廢棄物罐的 表面溫度,在處置過程中及處置場封閉後,皆須符合溫度限值。 在深地層的處置方式中,處置場封閉後,廢棄物體內的衰變熱, 會使廢棄物罐及其周遭的近場區域的溫度上升至一最大值後,然 後再逐漸降低;而處置場的壓力在處置過程中,則會從開挖、處 置期與外界大氣相通的一大氣壓,逐漸回復至該地層深度的水力 靜壓,其值將遠大於1大氣壓,在該淨水壓力下,水的沸騰溫度 也會大於100 ℃(例如:在淨水壓力為深度100m的地層處,水力 靜壓約為10 bar或1 MPa,此時,水的沸騰溫度約180 ℃),但在 保守的設計原則下,廢棄物罐的表面溫度仍限制在100℃以下; 且在設計實務上,表面溫度設計要求設定在90 ℃以下,以保留 足夠的設計餘裕。當廢棄物罐表面的溫度限值設定在100 ℃以下 時,每一只廢棄物罐所容許裝填的用過核子燃料的數量或衰變熱 大小,也必須相對應加以限制,為滿足此需求,每個廢棄物罐所 允許的衰變熱限值為2 kW,相當於4束經冷卻30年左右的PWR用 過燃料產生的衰變熱。

(5) 抗腐蝕性

廢棄物罐材料需提供足夠的厚度,以滿足在設計年限中,廢棄物 罐可免於因腐蝕所導致之失效。例如:瑞典銅質廢棄物罐厚度5 公分,焊接區域的最小連續焊接面需保持在1.5公分以上。

- (6) 與緩衝材料及岩體具相容性 廢棄物罐材料與緩衝材料之選用,需整體考量,避免因彼此間之 交互作用,導致材料劣化或不利於岩體結構穩定性之維持。
- (7)可製作性及成本 廢棄物罐材料之選用,必須考量其材料資源之充足性及可製作性 及運轉維修之便利性,在一定額度的成本費用下,達到廢棄物罐 應有之功能需求。

	說明	設計要求
輻射劑量限值	在設計年限內,輻射劑量	個人輻射劑量小於
	需低於輻射防護安全限	2.50E-01 mSv/year °
	值。	
廢棄物罐表面劑量限值	避免表面污染,廢棄物罐	廢棄物罐表面輻射劑量限
	厚度可有效屏蔽、衰减輻	值<1 Gy/h。
	射強度	
臨界性	避免在一般及廢棄物罐充	有效增殖因子小於0.95。
	满水條件下發生臨界反	
	應。	
力學結構完整性	需提供足夠之力學強度,	在設計年限內,總應變量
	以承接來自岩體、緩衝材	小於4%。岩體沿裂隙快速
	料及地層靜壓。	位移10cm,仍維持足夠之
		力學強度。
表面温度限值	避免對緩衝材料及岩體造	高溫概念:溫度小於180℃
	成傷害,降低廢棄物罐之	低溫概念:溫度小於100℃
	腐蝕。	
化學穩定性及腐蝕抗性	廢棄物罐材料與周邊環境	如設計年限一萬年,腐蝕
	具相容性,腐蝕產物亦不	允許厚度1 cm,則平均腐
	致產生不利影響。平均腐	蝕速率需小於 1μm/a。
	蝕速率小於廢棄物罐腐蝕	
	允許厚度與設計年限的比	
	值。	

表 3-3:廢棄物罐之基本設計要求

(李瑞益、吴晃昭,2005)

3.3.1.2. 廢棄物罐材料篩選技術

廢棄物罐材料篩選需考量之技術議題,可概分為(1)環境(2)材料 (3)材料/環境交互作用(4)規格及檢驗(5)使用壽命評估等(李瑞益等, 2003)。

(1) 環境

處置場環境的條件對於廢棄物罐材料有著直接而深遠的影響,所 需考量的參數不單單是目前的環境條件,且需參考處置場環境過 去的演變歷史,及處置過程中對環境所引入的擾動,推估處置場 環境未來可能之演化,並評析在不同處置期間,其對廢棄物罐及 處置系統的衝擊。在處置場環境方面,所涵蓋的主要參數包括

- (a) 水力及氣候:包括(i)地下水流量及流動方向(ii)處置場區域
 之溫度分佈(iii)壓力(iv)降雨量及(v)洪水量。
- (b) 地球化學條件:(i)水化學條件(ii)酸鹼度(iii)氧化還原電位 (iv)濾瀝礦物的型式及濃度(v)放射化學組合物(vi)廢棄物罐 腐蝕產物。
- (c) 火山及地震:(i)火山的型態及頻率(ii)地震的效應。
- (d) 地質狀況(i)母岩條件(ii)熱循環效應(iii)輻射效應。
- (2) 材料

對於材料本身,其所需考量之因素及內容為

- (a) 材料特性:包括:(i)化學組成(ii)材料表面特性(iii)材料主體
 性質(iv)力學性質。
- (b) 連接面及焊接面之穩定度:對於(i)焊接區(ii)熱影響區及(iii) 不同金屬介面連接區需加以評估。
- (3) 材料/環境交互作用 材料之選擇需配合處置場環境加以選擇,並對材料與環境二者間 之交互作用加以評估,包括
 - (a) 乾式腐蝕:在廢棄物罐尚未置入處置場內及處置場操作、封 閉初期,水氣尚未進入或處於未飽和時期,廢棄物罐會經歷 一段乾式腐蝕期,包括:(i)氣體及金屬交互作用及(ii)氧化。

- (b) 溼式腐蝕:處置場中的地下水,會逐漸地經緩衝材滲入廢棄物罐外層,並發生不同型式的溼式腐蝕。在溼式腐蝕中,由於水的介入,提供了腐蝕過程中電解質傳導媒介,故腐蝕的速率,一般均遠較乾式腐蝕嚴重,而其主要的腐蝕形式為(i)均勻腐蝕(ii)局部腐蝕(包括:點蝕、加凡內腐蝕(galvanic corrosion)、間隙腐蝕、應力腐蝕及去合金化腐蝕)。
- (c) 氫脆化:在長期的地下水化學條件下,伴隨著氧化還原反應 產生的氫氣,可能溶解在地下水中,並滲入廢棄物罐金屬材 料中,發生吸氫反應而形成氫化物,並導致廢棄物罐因氫脆 化而破裂。對於氫脆化所需評估的包括(i)固體溶解或吸氫的 能力(ii)氫化物的形式及其對結構的影響及(iii)氧化物還原 所釋出氫的量及形式。
- (d) 輻射及放射性產物:廢棄物體所釋出之輻射能量,可導致物 質因吸收該能量而產生輻射分解,並衍生出其他放射性物 質。就廢棄物體而言,其所含的放射性核種、強度及半化期 的長短,與廢棄物罐包封的廢棄物型態有極大的關連性;阿 爾伐及貝他放射線的能量密度高,但其在極短的距離中,即 可被有效隔離;因此,在有廢棄物罐做為屏蔽的情況下,加 馬射線所導致的輻射效應需特別重視。輻射及放射性產物的 評估重點為(i)廢棄物型態(ii)加馬輻射及(iii)氣體、蒸氣及水 輻射分解。
- (e) 微生物效應:土壤或處置環境可能存在多種不同型態的微生物,微生物的成長具有群聚的特性,並會局部改變地下水化學條件,使廢棄物罐發生局部腐蝕(King, 1996);微生物的成長及遷徒,也會伴隨著放射性核種之傳輸。對於微生物效應,需對(i)微生物的型態(ii)成長狀況(iii)對廢棄物罐材料劣化的影響(iv)環境變遷及(v)放射性核種傳輸等加以評估。
- (f) 力學效應:廢棄物罐在深地層環境下,來自地層及岩體的應力源包括(a)水力靜壓及(b)靜岩壓力。其中水力靜壓 (hydrostatic oressure)來自在該深度條件下,地下水本身重量

所提供的壓力;靜岩壓力(lithostatic pressure)為地層岩石重 量所累積的壓力,其所呈現的為岩體內岩石的應力狀態。在 等向性情況下,各方向施加的壓力相同,在深地層環境下, 該壓力可使得岩體的體積變小,密度增加,在岩體內的孔隙 空間變小,並有效降低地下水在岩石內的流動。對於廢棄物 罐而言,在處置封閉初期,處置場與外界相通,其壓力略高 於1大氣壓,但封閉後,隨著地下水的逐漸滲入並達飽和狀 態,水力靜壓也隨之提升。例如:若地層水深度500m時,水 力靜壓即約為50 bar,或5 MPa左右。在工程障壁中,靜岩壓 力主要由緩衝及回填材料來承受,廢棄物罐需承受的應力源 為水力靜壓及來自緩衝材料的回賬壓。

- (g) 廢棄物罐及緩衝材料交互作用:廢棄物罐外層與岩體間以緩 衝回填材料做填補,在多重障壁設計概念的原則下,緩衝材 料 需 具 備 (i) 低 水 力 傳 導 性 (ii) 自 癒 能 力 (iii) 高 吸 附 能 力 及 (iv) 長期結構穩定性(莊文壽,2000)。再者,緩衝材料在地下水 逐漸充滿緩衝材料結構內的孔隙時,會導致材料回脹,並將 回脹力施加在廢棄物罐上。膨潤土緩衝材料對於廢棄物罐的 效能包括:(i)隔絕或降低侵蝕性氧化介質與廢棄物罐接觸, 從而降低廢棄物罐的氧化及腐蝕(ii)低滲水性以有效降低水 傳輸至廢棄物罐表面,降低廢棄物罐的腐蝕速率(iii)在廢棄 物罐外層發生破孔的情況下,低的水傳輸量也減緩了水自破 孔進入廢棄物罐內層的量,降低內層材料如碳鋼或不銹鋼的 腐蝕、劣化速率(iv)限制放射性氣體及水溶性分子釋放至周 圍岩體的速率。可知,廢棄物罐與緩衝材料有極密切的關 係,緩衝材料施加在廢棄物罐的回脹力,可能為一均勻或不 均匀的回脹壓,為廢棄物罐結構的主要荷重來源之一,為廢 棄物罐力學結構完整性評估不可或缺之一環。
- (h)廢棄物體及廢棄物罐交互作用:用過核子燃料在裝填置入廢 棄物罐前,需先進行檢驗以確認其結構之完整性而無破損然 後進行抽真空、包封作業;一旦用過核子燃料包封在廢棄物

罐後,此時廢棄物罐內部係處於一乾燥而僅殘留少數氣體的 環境,用過核子燃料上護套因腐蝕失效的機率不大;然而, 在廢棄物罐搬運、處置的過程中,仍有可能因程序或人為的 錯誤動作,導致部分燃料破損;因此,就風險評估的角度而 言,廢棄物罐內用過核子燃料發生破損,其釋出之侵蝕性放 射性氣體或核種自廢棄物罐內部發生侵蝕也必須列入考 量,而其評估重點為(i)加凡內腐蝕(ii)放射性氣體侵蝕(iii) 放射性核種侵蝕等。

- (4) 規格及檢驗
 - (a) 材料規格:即使合於標準規範(例如ASTM)的產品,其中某些雜質的含量對於廢棄物罐在處置環境下的長期效能表現有相當大的影響。瑞典SKB所使用的無氧銅的純度在99.99%以上,其對雜質的含量有嚴格的限制,而在銅材中加入微量50 ppm的磷,不僅有利於改善潛變延展性,並可緩和雜質硫的影響,提高再結晶溫度;金相分析並顯示,雜質硫有在晶界區域聚集的傾向,成為孔洞及微裂縫的起始點,不利於材料之力學強度及潛變延展性;因此晶粒必須限制在400 μm以下,而為利於非破壞性檢測作業,SKB限制晶粒大小在250μm以下(Sandström, 2001)。再者,銅的力學強度不高,材質軟而易於變形,無法承受撞擊或墜落的事件,其內層需以鑄鐵等剛性強的金屬材料做為內襯材料,以承受施加在廢棄物罐上的負載。
 - (b) 製程規格:就廢棄物罐的製作,其成型方式對於廢棄物罐本 體的殘留應力分佈、製造缺陷的型態及分佈、連接面的接合 方式及金相微結構等,有直接的關連性;廢棄物罐接合面的 焊接,對於焊接區及熱影響區域的金相微結構,會產生一定 程度的影響,局部的力學強度會產生變動,局部金相微結構 的差異,使得加凡內腐蝕(Galvanic Corrosion)的傾向有提高 的趨勢,故焊接程序之良窳,直接影響到廢棄物罐的結構完 整性。再者,腐蝕的發生,大皆從廢棄物罐表面與其他介質

發生接觸的地方開始,表面若有局部的凹陷或雜質污染,就 可能成為腐蝕的起始位置,故廢棄物罐需做適當的表面處 理;廢棄物罐成型及焊接過程中所可能引入的殘留應力,需 經過適當的熱處理程序,以消除或降低殘留應力的影響;適 當的熱處理對於材料之均質化、金相微結構及材料韌性或強 度等的改善,有顯著的效果。在進行局部的熱處理時,則有 導致殘留應力重新分佈的效應需加以考量。亦即在製程規格 中,對於(i)廢棄物罐尺寸規範(ii)成型及製造程序(iii)焊接程 序(iv)表面處理及(v)不同階段的熱處理程序,應有明確而嚴 格的規範,以確保廢棄物罐的品質符合控管標準。

- (c) 檢驗:檢驗的目的在於確保產品的品質符合規格接收標準, 並藉由檢驗的程序,及早診斷、發現影響品質的相關問題, 以及早加以改善,提高產品的可靠度。檢驗的方式有非破壞 及破壞性檢驗等2種,其中破壞性檢驗主要用來提供輔證資 訊,以補非破壞檢驗之不足。在非破壞檢驗中,對於產品在 製作過程發現有巨觀上的瑕疵或缺陷,經由專業檢驗人員目 視檢驗,即可及早判定產品是否符合產品規格,並於製程加 以改正。對於產品在製作過程及成品若檢驗方式採用全面檢 驗的方式進行,則將是一相當冗長的過程,其所涉及的不僅 是檢驗成本提高、效率變差,且由於檢驗項目繁瑣,對於關 鍵輸入參數(key input variables)對產品所可能導致的顯著影 響,反而失去應有的重視。故對於各項檢驗項目,需應用統 計學上的方法,從管理及生產成本、品質情報、檢驗數量及 對從業人員的心理壓力等不同層面加以考量,採取適當的取 樣分析方法,以達到最佳化的效益。
- (5) 使用壽命評估

廢棄物罐的設計使用年限,配合其功能需求,一般動輒在千年、 萬年以上。就工程的角度而言,目前一般工程材料上所使用的外 插法,其所應用的時間領域約為測試期間的3~10倍左右;因此, 若要仰賴短期的(數月、數年或數十年)的實驗數據,應用、外插

至千年或萬年以後,是具爭議性的。而由於安全評估上所面臨的 時間廣度達萬年甚至百萬年,其中又隱含相當高的不確定因素。 美國國家學術科學委員會(National Academy of Sciences, NAS) 於1995年建議(OECD/NEA, 2004),將時間領域概分為兩大部分, 以處置場封閉後的一萬年做為分界;在封閉後的1萬年間,需進 行嚴謹的安全評估,確保其符合安全限值;在一萬年至地質穩定 的期間(百萬年),應估算最高劑量發生的時間及大小。此一建議 並為美國環境保護署(The United States Environmental Protection Agency, USEPA) 及 美 國 核 管 會 (US Nuclear Regulatory Commission, USNRC)所認可採用。此一論述的基本意涵在於:長 期安全評估所可涵蓋的時間領域必須在現有的科學證據足以驗 證的區間,而非一味地加以無限擴展。對於廢棄物罐在處置場環 境下,所需滿足的一般準則,例如輻射防護、臨界控制、溫度限 值、可製作性等,皆可在處置場運作階段經由適當的設計分析, 確保其符合需求;至於材料的抗腐蝕性、與緩衝材料及岩體具相 容性及力學強度劣化等,則與岩體內地球化學(geochemistry)(或 簡稱地化)條件的演變息息相關。就現實面而言,尚無法將材料 靜置在模擬處置場地化條件下數十年或數百年後,然後評估廢棄 物罐材料是否適用於該處置場環境,以及因其衍生之力學強度劣 化特性,與緩衝材料及岩體交互作用下腐蝕產物對環境及長期穩 定度的影響。就目前的認知,地質圈或礦物的演進或穩定度可以 百萬年計(Ewing, 2001);但在工程材料方面,除了極少數的貴金 屬(如金、銀、銅)外,在人類有限的歷史記錄中,並無足夠的實 證證明工程材料的劣化或腐蝕試驗,其在時間上的廣度可達數千 年,並直接應用至核廢棄物的長期處置上。在此一前提下,如何 應用現有的工程技術,以保守地評估廢棄物罐的使用壽命是必須 加以探討的;以下就機制模擬分析、測試方法、壽命評估方法、 模式驗證及現場偵測等不同面向,加以討論。

(a) 腐蝕機制模擬分析:對於廢棄物罐材料的腐蝕研究,目前世界各國的做法,為參考處置母岩的地化條件,並使用更嚴苛

的模擬水化學條件進行相關測試、分析;例如美國使用十 倍、千倍或數千倍於雅卡山計畫J-13水井離子濃度的模擬水 及飽和溶液,進行各項腐蝕測試,其測試結果,提供給為廢 棄物罐劣化分析程式WAPDEG的基本輸入資料,做為評估廢 棄物罐失效與否的重要參考依據。再者,若能掌握廢棄物罐 在處置場環境下可能的腐蝕演化途徑(Corrosion Evolutionary Path, CEP),並就其腐蝕機制加以評析,並從而 進行腐蝕損傷(corrosion damage)分析,如此可提高壽命評估 的可信度(Macdonald, 2003)。在機制模擬分析中,對於(i)基 材金屬(ii)焊接區及(iii)熱影響區等,皆需納入評估分析,若 其無法滿足廢棄物罐所需之年限需求,可及早發現並加以改 進。

- (b) 測試方法及樣品:廢棄物罐的材料特性,尤其是潛變及長期腐蝕行為,對於長期完整性的維持有直接的關聯性。以腐蝕測試而言,相關的測試參數,如材質、模擬水化學溶液的條件如pH,溶氧,主要陰陽離子濃度、溫度、流場分佈、氧化還原電位及應力分佈,需能切實掌握,然後擬定測試方法,參照標準規範(如ASTM)的程序,進行不同型式及不同條件下的腐蝕測試,如長期腐蝕浸入試驗、電化學腐蝕試驗及微生物誘發試驗等,而測試結果則提供模式分析驗證。測試的樣品,應包含(i)原型樣品(ii)生產過程中樣品及(iii)成品等,以確保廢棄物罐材料品質的穩定性及可靠度。
- (c)壽命評估方法:影響廢棄物罐使用壽命的參數之間,是彼此 有關連性的,並可能是非線性關係的。例如:製造瑕疵可能 導致材料性質劣化、孔蝕/間隙腐蝕及應力腐蝕破裂等 (Macheret, 1999),腐蝕也會造成局部材料性質劣化,並影響 近場環境的水化學;應力超過某一限值時,金屬可能在腐蝕 不嚴重的情況下發生脆裂;金屬表面經過一段長時間的孕育 或誘導,鈍化膜局部成為應力集中的裂紋源,裂紋一旦生 成,在應力及裂紋區封閉電池自催化腐蝕共同作用下,裂紋

迅速成長以至破裂。由於各參數間彼此具相關性,再者對於 未來變化的預測包含著不確定因素,因此壽命評估方法,需 採取整合式評估模式,應用統計學原理,將資訊加以整合, 並經由:監測、評估、改善、驗證的策略,以在彼此相關而 有限的資訊下,做出合理的壽命評估。

- (d) 模式驗證:模式的驗證可採用(a)自然對比(b)加速實驗(c)解 析方法。對於金屬材料而言,除了少數貴金屬外,腐蝕是一 個自然的趨勢並使得金屬以穩定態的化合物存在,再者絕大 部分的金屬及合金材料,都是最近幾世紀內才完成提煉、開 發的,因此就時間的廣度而言,使用自然對比的方法應用在 金屬材料上時,有其先天上的限制。即使如此,我們仍可從 一些例證中,如中國周朝出土的青銅器,十六、十七世紀沈 沒海底的金屬材料等,顯示某些金屬材料的耐蝕性確實可歷 經一段相當長的時間而仍維持其結構之完整性。對於廢棄物 罐材料的篩選,在運作的實際面,需運用加速實驗來加以驗 證材料選擇之合適性,而無論是長期浸入試驗、電化學實驗 微生物誘發腐蝕實驗、應力腐蝕實驗等,可都歸屬於加速實 驗的範疇,其基本的原則係評估遠較處置場環境嚴苛的環境 下,評估材料的腐蝕上限,並篩選出合適的廢棄物罐材料。 模式的驗證也可使用解析方法,從材料破裂、腐蝕的機制本 身出發,其中涉及複雜數學模式的推導及各參數間耦合關係 的評析,起始及邊界條件的釐定等,唯解析方法的結果,仍 需有足夠的實驗數據做驗證,以證明解析方法之合宜性。
- (e)現場偵測:處置場封閉是提供處置系統最後配置之系統化作業,因此現場偵測的作業以封閉前後做一分界。在處置場封閉前,廢棄物罐之設計、製造需符合設計準則之要求,需能承受營運期間合理預期發生之意外,並不致產生不可接受之損害。處置場封閉後,其安全不應依賴於擴充及連續之積極監管措施,監管期之長短,需考量廢棄物之放射衰變性及其潛在危險性、預定之活動及資料保存之歷史經驗等決定;而

一旦不再監管後,影響處置隔絕性與包封能力失效所造成之 輻射後果,應仍符合安全標準(林善文,2002)。

3.3.1.3. 廢棄物罐篩選程序

廢棄物罐的基本需求為在一定的設計年限中將廢棄物體的放射 性物質包封在罐內,限制具離子化放射線的釋出量,承受廢棄物體的 衰變餘熱,並確保系統處於次臨界狀態。再者,廢棄物罐的設計需確 保結構之完整性及熱效能可有效達成,以滿足輻射安全防護之功能需 求。

設計中,需分別針對輻安、結構完整性、臨界性、熱功能及化學 穩定性及相容性,進行功能評估,使其能滿足管制及設計限值;在滿 足基本功能需求後,則需就環境、材料、環境/材料交互作用、規格 及檢驗、及使用壽命評估等不同層面,探討廢棄物罐是否可滿足所需 之年限需求,值得注意的是,處置期間的時間廣度長達萬年以上,此 其間處置場內的地質、水文環境等也隨著時間在演變之中,故評估中 需整體性地將處置場環境變遷的因素納入考量。再者,在基本情節 外,需依據特徵、事件及作用(features events and processes, FEPs)所 列有關廢棄物罐的相關情節,評估其所可能造成的影響,廢棄物罐是 否發生破損、失效,發生失效的機率和數量,及其所衍生之放射性核 種外釋所造成的輻射劑量,是否可滿足法規或設計限值。

廢棄物罐之篩選,在符合法規輻射安全的基本前提下,需就遴選 廢棄物罐的經濟層面進行成本效益分析。成本效益分析需從整體性或 全系統的角度切入,而不單單只是廢棄物罐本身的生產成本,其所需 考量的包括:廢棄物罐本身的價格、廢棄物罐之裝置容量及所需之數 量、廢棄物罐處置之運轉維護費用、外在配合設施(如包封站)、處置 場深地層的開挖及處置費用,都與廢棄物罐的型式及大小息息相關。 其他如:操作之便利性及在維持在一段期間內(如在處置期間,或封 閉後數十年間)廢棄物罐仍可進行再回收的彈性,也需加以考量。基 本上,廢棄物罐的裝置容量愈大,則其處置單價相對降低;從工程的 層面而言,尤其是處置概念採用深地層處置時,廢棄物罐的體積及重

量宜限定在一定範圍以內,以方便處置工程之作業。據此,廢棄物罐 篩選程序建議如圖 3-7所示。

SNFD2009



圖 3-7:廢棄物罐篩選程序概念

(李瑞益等,2005)

3.3.2. 緩衝材料

依據參考處置概念,緩衝材料環繞於廢棄物罐周圍,而回填材料 則充填於處置隧道中。目前採用參考緩衝材料為純膨潤土,而回填材 料則由碎石與膨潤土之混合物組成。一般而言,緩衝/回填材料所需 之功能與試驗技術類似。因此,本節針對緩衝/回填材料之相關技術 一併敘述如後。

3.3.2.1. 緩衝材料功能性需求概述

緩衝材料使用目的在環繞廢棄物罐周圍,防止地下水流入,維持廢棄物罐在定位,並遲滯核種傳輸。此外,基於經濟性考慮,緩衝材 料須為易於取得、施工者(紀立民,2002)。

緩衝材料的功能需求(表 3-4)為:

- (1) 長期完整包圍及保護廢棄物罐抵抗外部岩層之應力作用。
- (2) 防止地下水流經廢棄物罐,防止腐蝕物質與廢棄物罐接觸。
- (3) 適當導熱性使廢棄物罐表面溫度低於100℃。
- (4) 適當密度與強度能承受廢棄物罐之荷重。
- (5) 回脹性不得對岩石及廢棄物罐產生過高之壓力。
- (6) 適當的柔軟度能容納岩石潛變位移。
- (7) 能允許受腐蝕廢棄物罐可能產生的氣體遷移離去。
- (8) 對核種有吸附與遲滯效能。
- (9) 對微生物與膠體有過濾功能。
- (10) 具化學緩衝能力。
- (11) 對其他工程障壁材料無不利影響。

預期功能	說明
1.低水渗透性	飽和前延遲地下水和廢棄物罐接觸;飽和後延遲地下水流
	過緩衝材料
2.核種高遲滯能力	吸附放射性核種並延緩其傳輸
3.膠體過濾	過濾膠體物質
4.化學緩衝效應	保持緩衝材料孔隙水在還原條件;控制地下水pH值的變化
5.熱傳導性	控制廢棄物餘熱對工程障壁的增溫
6.氣體滲透性	廢棄物罐腐蝕氣體可滲透通過
7.廢棄物罐支撐	支撑廢棄物罐長期在緩衝材料中
8.應力緩衝效應	解除置岩變形及廢棄物罐腐蝕產物所引起的應力
9.長期能力	長時間下不會變質、不會有流出物,仍能維持其緩衝功能
10.操作性與製造容量	製造容易、工作性佳、容易獲得且便宜
11.高回脹潛能	可填塞緩衝材料和廢棄物罐、圍岩之間的空隙

表 3-4:緩衝材料預期之功能

(莊文壽,2002)

SNFD2009

參考處置概念係使用膨潤土作為緩衝材料。膨潤土之厚度取定於 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、膨潤土之回脹力、膨潤土 之水力傳導係數、膨潤土阻滯核種傳輸之能力、膨潤土之導熱性等因 素。

3.3.2.2. 緩衝材料規格

參考處置概念係使用膨潤土作為緩衝材料,國際上採用之候選緩 衝材料以美國黑丘膨潤土(black hills bentonite)為典型,商業名稱為 MX-80。其主要成分為75%的鈉蒙脫石(Na-montmorillonite),其他的 組成礦物有斜長石(plagioclase) 5~8%,石英(quartz)10~15%,次要成 分有黃鐵礦(pyrite)、方解石(calcite)、岩鹽(halite)、硬石膏(anhydrite) 及其它黏土礦物,如高嶺石(kaolinite)與伊利石(illite)。Black Hills Bentonite主要之產區(圖 3-8)為美國懷俄明州(Pusch, 2002),Black Hills Bentonite之外觀為淡黃色粉末(圖 3-9),原礦則呈現暗灰至深黃 色(Pusch, 2002)。

上述之MX-80膨潤土,雖然具有良好之功能,但將來各國處置設施相繼建造後,對於原料供應穩定性及價格上將較難掌握,所以本土 材料的開發與研究是必要的。國內含蒙脫石的黏土區,主要分布在台 灣東部海岸山脈之風化黏土,位於台東縣樟原之日興礦業公司是目前 國內已進行商業開採的膨潤土礦場。日興土是由日興礦業公司所生 產,產地位於台東縣長濱鄉樟原村都巒山層中。日興土由第三紀火山 灰、凝灰岩或安山集塊岩等,在地下受水熱作用產生之變質礦物群而 形成,目前正在開採礦區初步估計礦藏量約有320萬噸。日興土礦區 的黏土其礦物相是以鋁蒙脫石為主的變質礦物群,其他共生礦物相包 括伊利石—蒙脫石交錯層、綠泥石、高嶺石、黃鐵礦、石英、白矽石、 方解石、白雲石、斜長石和石膏等(陳文泉,2004)。





(Pusch, 2002)



圖 3-9: Black Hills Bentonite之原礦

(Pusch, 2002)
膨潤土之主要成分蒙脫石 (montmorillonite) 屬滑潤石族 (smectite) 黏土礦物,滑潤石族黏土礦物包含二八面體與三八面體蒙脫石黏土礦 物(表 3-5)。蒙脫石為一種高活性之黏土礦物,以交換陽離子種類之 不同可分為納型蒙脫石 (Na-montmorillonite) 與鈣型蒙脫石 (Ca-montmorillonite),其組構如圖 3-10所示。(Mitchell, 1993)



圖 3-10:蒙脫石組構圖

(Mitchell, 1993)

表	3-5	:	滑潤石	族黏	土	礦物種類
---	-----	---	-----	----	---	------

礦物分類	礦物種類	化學式
二八面體	蒙脫石(Montmorillonites)	$(OH)_4Si_8(Al_{3.34}Mg_{0.66})O_{20}$
(Dioctahedral)		\downarrow
		Na _{0.66}
	鋁蒙脫石(Beidellite)	(OH) ₄ (Si _{6.34} Al _{1.66})Al _{4.34} O ₂₀
		\downarrow
		Na _{0.66}
	鐵蒙脫石(Nontronite)	$(OH)_4 (Si_{7.34}Al_{0.66})Fe_4^{3+}O_{20}$
		\downarrow
		Na _{0.66}
三八面體	鋰蒙脫石(Hectorite)	$(OH)_4Si_8(Mg_{5.34}Li_{0.66})O_{20}$
(Trioctahedral)		\downarrow
		Na _{0.66}
	鎂蒙脫石(Saponite)	(OH) ₄ (Si _{7.34} Al _{0.66})Mg ₆ O ₂₀
		\downarrow
		Na _{0.66}
	鋅蒙脫石(Sauconite)	$(OH)_4 (Si_{8-y}Al_y)(Zn_{6-x}) O_{20}$
		\downarrow
		Na _{0.66}

(Mitchell, 1993)

3.3.2.3. 緩衝材料試驗技術

緩衝材料其主體侷限在內側與廢棄物罐接觸部分,外側與底部與 圍岩接觸,上部與回填材料接觸。依據前節所述緩衝材料之功能性, 可得在這些有限空間裏所產生的各種作用,包括熱傳(thermal)、水力 (hydraulic)、力學(mechanical)、化學(chemical)等四類作用(簡稱 T-H-M-C作用)。上述存在於處置環境內之T-H-M-C作用並非單一存 在,而常為兩項以上同時存在並交互影響,稱之為耦合作用(coupling effect)(吳柏林,2005)。瑞典對於T-H-M-C之間所可能產生之交互耦 合作用項目及相互關係(表 3-6)有詳盡之說明(陳文泉,2002)。此外, 緩衝材料之獲取亦需符合操作性與製造容量之要求。

						緩	衝材	料									
	廢料罐 與緩衝 材料交 互作用	熱-水力- 力學-化學 作 用 程 序	變動參數	輻射強度	溫度	含水量	氟 體 濃 度	水力變數	緩衝材料尺寸	孔隙尺寸	回脹壓力	膨潤土組成	孔隙水組成	膨潤土含量	不純物含量	緩衝材 料與地 質圈交 互作用	
	→ 輻射	輻射衰	ŧ	£	1	4			لم					4	4	→ 輻射	
	 熱量	熱傳	字		đ	4	4	4	4					4	4	► 熱量	
	\leftrightarrow	水傳	翰	8	4	£	4	Ł	4	Ļ		4	e	4		\leftrightarrow	
	水、 氟體	氟體傳輸	/溶解		4	4	ද 1	¢Ĵ	لي	4	ل م		1	4		水、	
	$ \clubsuit $	回服	r Z			4	4		đ	¢	¢	4	4	đ			
	壓力、	緩衝材與回填材交 互作用							•					•		壓力	
	容器移								ę		स्य			Ċ		黏土	
	動、黏 土侵入	熱膨	脹		4	4	4	æ	4	ट्री						侵入	
廢	$ \rightarrow $	平流	ž					4					स्र			↔	地
料	溶質	摄影	t		4	4				4		el.	स्री			溶質	質
罐		離子交換	/吸附			8				4		শ্র	ধ				圈
		蒙脫石框	目轉變		4							শ্র	¢	1	1		
		雜質溶解	與沉澱		4								থ		ধ		
		膠體外釋.	與侵蝕					4				4	¢Ĵ	1			
		輻射效	t應	4										শ্র	1		
		孔隙水	射解	4		4	1						1				
		微生物	作用			4	4						Å		4		
	\rightarrow	核種傳	序輸		4	4	£	4	4	4		र्थ	₽			-	
	核種	-移注	츘													核種	
		- 擴青	枚														
		-吸序	付														
		-膠體(專輸														
		- 衰多	變														
		-物種升	形成														

表 3-6:瑞典緩衝材料T-H-M-C交互耦合作用

3.3.2.3.1. 熱傳試驗技術

熱能的來源包括用過核子燃料的衰變熱以及地溫梯度。熱、溫度 及輻射強度等,不會受到緩衝材料幾何形狀的影響,用過核子燃料放 射的主要輻射作用為γ與中子輻射。

處置作業進行時,緩衝材料直接與熱的廢棄物罐表面接觸,熱能 經由傳導大量地通過緩衝材料,並使緩衝材料的溫度漸漸昇高。緩衝 材料若不能快速地將熱能傳導進入圍岩,則熱能會在緩衝材料內累 積,使得緩衝材料的溫度逐漸增高。當溫度長期大於100℃時,伊利 石化作用有可能會發生,即蒙脫石會轉換成為伊利石(illite),這會導 致緩衝材料功能的降低。此外,廢棄物罐所放射的γ與中子輻射,經 過緩衝材料的輻射衰減作用後,輻射強度會降低。熱傳量測試驗技術 說明如下:

(1) 穩態熱傳導係數量測技術

以暫穩態之熱流計法量測技術(劉台生,2002),採用之實驗設備 為日本EKO 公司所發展的HC-074(FOX-150)實驗裝置。此儀器原 理是根據1989年日本JIS 所發展,以電力功率換算為熱流量的計 測方式。實驗樣品為台東縣樟原的日興礦業公司商業生產之膨潤 土(日興土)。日興土分別添加10%~30%的粉碎花崗岩、10%~30 %的矽砂,以及30%的泥岩等材料進行實驗。實驗結果(圖 3-11) 發現:添加不同母岩材料確可提高其熱傳性質,然增加的幅度不 大(劉台生,2002)。



圖 3-11:日興土添加不同比例花崗岩之熱傳導係數變化 Temp:溫度 Thermal Conductivity:熱傳導係數 (劉台生,2002)

(2) 暫態熱傳導係數量測技術

田永銘(2001、2002)以室內暫態熱傳導係數量測試驗,相較於穩 態量測方法而言具有更大的適用性,而且量測時間可大幅的縮 短。而其中最主要應用在土壤熱傳導係數的量測方面的為熱探針 (thermal probe)法(如式3-3-1)。一維單向度熱傳導(圖 3-12)之熱 傳導係數試驗採用材料為美國Black Hills Bentonite,混合不同比 例之花崗岩碎石,試驗結果熱傳導係數在純膨潤上為 0.66(W/m-K),而隨花崗岩碎石添加比例之增加而上升。與前述 穩態量測試驗結果相較,添加30%花崗岩碎石比例時,熱傳導係 數增加皆在0.1以內。由本試驗可得知,當花崗岩碎石比例添加 超過30%以上,熱傳導係數會有較顯著之增加。

$$k = \frac{q}{4\pi (T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$
(3-3-1)

其中,

k : 熱傳導係數(W/m.K)。

q :單位長度熱源所釋出的熱量(W/m)。
 T₁、T₂ :量測時間t₁至t₂之對應溫度(K)

t :時間(sec) (量測時間t₁至t₂)



3.3.2.3.2. 水力傳導試驗技術

緩衝材料的水力性質包括含水量、水壓力、地下水流、氣體壓力 與氣體流動等,後四項主要與緩衝材料飽和時的狀態有關。此處討論 氣體的原因是氣體可能會溶於地下水中,而使壓力減低,地下水流提 高,所以氣體可能是一種快速的傳輸機制。

緩衝材料的孔隙中存在著負毛細壓力,這會使圍岩中的地下水傳 輸進入緩衝材料,當緩衝材料飽和後,水的傳輸速度就會變的非常緩 慢。緩衝材料的飽和過程中會發生氣體傳輸的現象,其中包括水蒸氣 將從緩衝材料中較熱的部分移動到外圍較冷的部分並凝結,而緩衝材 料內原先就含有一些氣體,這些氣體也會溶解在孔隙水中並離開緩衝 材料,此外,水飽和後,將造成廢棄物罐的腐蝕導致氫氣的產生,其 結果也會促進緩衝材料內的氣體傳輸現象,進而影響緩衝材料的穩定 性以及放射性核種的傳輸。

黃偉慶(2000)以三軸柔性壁滲透儀參考ASTM D5084-90進行水 力傳導係數(在此同滲透係數, hydraulic conductivity)試驗。試驗土樣 為高嶺土、日興土與Black Hills Bentonite。改變黏土含量來探討不同 塑性指數黏土對緩衝材料水力傳導係數的影響。試驗所得之不同黏土 之水力傳導係數(圖 3-13),其中美國之Black Hills Bentonite水力傳導 係數最小,約為1.00E-13~1.00E-14 m/sec。



圖 3-13:黏土含量與水力傳導係數關係圖

(黃偉慶,2000)

3.3.2.3.3. 力學試驗技術

廢棄物罐須長期固定在一定位置內,故緩衝材料必須擁有足夠的 勁度及強度,以減少廢棄物罐因自重的沉陷所造成的潛變和地震或其 他岩體移動所造成圍岩的變形。此外,緩衝材料必須具備一定的回脹 潛能,使緩衝材料具有自癒能力(self-healing)。處置場內部溫度甚高, 使得緩衝材料產生乾縮裂縫,此時必須藉由流進處置場內的地下水與 緩衝材料作用產生回脹來填補乾縮裂縫,此外,亦可修補處置場內各 介面所產生的裂面,以阻絕地下水的進出。回脹力學試驗技術茲說明 如下:

緩衝材料必須具備一定的回脹潛能,使緩衝材料具有自癒能力。 田永銘(2001)改良國際岩石力學學會(International Society for Rock Mechanics, ISRM)針對回脹性岩石回脹試驗建議方法,進行包括室內 自由回脹試驗與回脹壓力試驗,使其更適用於大量試驗及穩定水溫進 行,如圖 3-14及圖 3-15所示。試驗採用美國Black Hills Bentonite及 國產日興土,分別混合不同比例之花崗岩碎石。試驗所得之回脹變形 與黏土密度、碎石含量之關係如圖 3-16及圖 3-17所示。在高度夯實 情況下,Black Hills Bentonite之回脹體積應變約為900%,日興土之 回脹體積應變則近200%,而回脹變形隨著黏土密度降低及碎石含量 增加而遞減。

SNFD2009



圖 3-14:回脹變形試驗儀器示意圖

(田永銘, 2001)



圖 3-15:回脹壓力試驗儀器示意圖

(田永銘, 2001)



Clay dry density:黏土乾密度 (田永銘,2001)



圖 3-17:不同黏土乾密度與平衡回脹應變之關係 Clay dry density:黏土乾密度 (田永銘, 2001)

回脹壓力之試驗結果將最大回脹壓力與修正黏土乾密度可歸納 出最大回脹壓力(Maximum Swelling Pressure, MSP (MPa))與Black Hills Bentonite黏土乾密度(kN/m³)之關係:

$$MSP(MPa) = 0.54 + 0.0000288 \times EXP(0.7 \cdot \gamma_{dc})$$
(3-2)

其中,

MSP :最大回賬壓力(MPa)。
 γ_{dc} :黏土乾密度(kN/m³)

由所得之試驗結果與文獻中回賬壓力試驗結果之比較(圖 3-18),可知Black Hills Bentonite回賬壓力略大於日本所採用膨潤土之 回賬壓力(JNC, 2000b)。



圖 3-18:最大回賬壓力與黏土乾密度之關係 Effect Clay Dry Density:有效黏土乾密度 Max. Swelling Pressure:最大回賬壓力 (田永銘, 2001)

3.3.2.3.4. 化學試驗技術

緩衝材料的化學狀態受到蒙脫石含量以及蒙脫石成分所控制,黏 土礦物實際的組成包括表面離子種類、所含雜質的差異性以及孔隙水 成分等。

緩衝材料內的化學演化(chemical evolution)是一連串傳輸現象與 化學反應的綜合過程,地下水中的溶質通常藉由平流與擴散傳輸,緩 衝材料內的平流幾乎都只發生在飽和過程中,之後就以擴散作用為 主,地下水通過緩衝材料時,緩衝材料黏土顆粒表面的離子經由離子 的交換或吸附可能會被其他離子置換,這種作用的發生會造成蒙脫石 的化學衰敗現象,例如伊利石化作用。緩衝材料內的雜質經歷不同的 溶解/沉澱作用後,會造成緩衝材料孔隙度的改變。緩衝材料在回脹 後會填塞進入圍岩的裂隙中,膠體物質形成後經由地下水的搬運離 開,將導致緩衝材料的逐漸侵蝕,核種與膠體結合後會變得具有高度 移動性。輻射作用會持續相當長的時間,可能會改變處置孔的化學環 境、局部影響氧化還原電位(Eh)、酸鹼值(pH)等,直接對緩衝材料造 成衝擊,而孔隙水能經由輻射分解作用分解。最後,微生物的作用在 緩衝材料內發生,產生腐蝕物質與氣體。

緩衝材料經過水的飽和後,放射性核種會在緩衝材料內傳輸,尤 其是透過緩衝材料孔隙間的擴散,可能也會發生在黏土顆粒的表面, 飽和緩衝材料內的傳輸現象不是平流就是膠體傳送。放射性核種可能 會被黏土顆粒的表面所吸附,這種吸附作用會受到放射性核種的化學 形態(chemical form)影響,而化學形態則受到緩衝材料內物種演化過 程的化學環境所影響。實驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗技術茲說 明如下:

鄧希平等(2002-2006)以為期六年進行「實驗室核種遷移與緩衝回 填材料試驗」(鄧希平等,2005)。試驗是以花崗岩碎石、石英砂及MX-80 為緩衝材料,進行其化學穩定及比例混合化性探討、核種傳輸特性的 研究。而所進行的實驗工作,分成地化(geochemistry)分析及核種傳

輸特性研究兩條主軸(圖 3-19、圖 3-20、表 3-7)。主要建立技術包括:

- (1) 模擬深層地質處置實驗裝置與條件的建立;
- (2) 化學穩定性的研究;
- (3) 好氧及厭氧環境之核種傳輸特性;
- (4) 核種傳輸特性資料庫建立。



圖 3-19:緩衝回填材料地化分析工作架構



圖 3-20:緩衝回填材料核種傳輸特性研究工作架構

佰日	批次實驗(BT)					管柱實驗 (CT)		條件				模式模擬		
-7, 1			Cs 、	Se		Cs	Cs Se		BT		T	Th^{10}	ВТ	СТ
	B^1	G^2	Q^3	B+G ⁴	B+Q ⁵	Diff ⁶	Ad-D ⁷	a ⁸	an ⁹	a ⁸	an ⁹			01
02-03 Sep.	\checkmark	\checkmark		\checkmark			\vee^2	\vee		\vee			\vee	
04-05 Mar.	~	\checkmark		~			\vee^2		\checkmark	$\mathbf{\vee}$			V	\vee
05-06 Mar.	>		\vee		\sim		\vee^3	\vee	\vee	\vee		\checkmark	~	\vee
06-07 Mar.	$\mathbf{\vee}$		\vee		\vee	\vee^2	\vee^3	\checkmark	\vee		\vee	\checkmark	\checkmark	\vee
07-08 Mar.	>			\vee	\checkmark	\vee^1		\checkmark	\vee		\checkmark		\checkmark	\checkmark
08-09 Mar.	\sim			\vee	\checkmark	\vee^1		\checkmark	\vee		\checkmark		\checkmark	\vee

;	表	3-7	:	核種遷移試驗技術分項言	計畫:	六年	-度工	作内	容

(1)膨潤土;(2)花崗岩;(3)石英砂;(4)膨潤土+花崗岩;(5)膨潤土+石英砂;(6)
擴散實驗;(7)平流延散實驗;(8)好氧;(9)厭氧;(10)Thorium

3.3.2.3.5. 緩衝材料操作與製作技術

由於用過核子燃料最終處置所需的緩衝材料數量龐大,因此緩衝 材料之獲取需符合操作性與製造容量、穩定性之要求。田永銘(2003) 設計合適之製作模具,壓製1/18縮尺比例之盤狀及環狀緩衝材料塊 體,以進行緩衝材料之壓製技術建立,如圖 3-21及圖 3-22所示。由 不同壓實速率之試驗結果顯示,在含水量為8.1 %時,加載速率由 1.50E-01 kN/sec增加至5 kN/sec所造成之乾密度差異在1 %以內(如圖 3-23所示),由此可知實用壓實速率範圍內壓實速率對膨潤土粉末之 壓實行為影響並不明顯。試驗結果並以微觀力學模式為基礎,建立膨 潤土-碎石混合物壓實曲線之預測方法。僅需針對純膨潤土進行壓實 試驗,求得其壓實曲線即可預測不同體積比之膨潤土-碎石混合物之 壓實曲線,如此將可大幅減少實驗數量。



圖 3-21:盤狀緩衝材料塊體壓製完成外觀

(田永銘,2003)



圖 3-22: 環狀緩衝材料塊體壓製完成外觀

(田永銘,2003)





Overall Dry Density:整體乾密度 Compaction Stress:壓實應力 (田永銘, 2003)

3.3.3. 摘要與未來任務

用過核子燃料處置計畫至目前已針對銅質廢棄物罐材料篩選考 量因素、準則及程序,並針對銅質廢棄物罐腐蝕模式以評估腐蝕速率 及使用壽命;在結構應力分析上,則對於廢棄物罐在吊運作業中的承 載能力分析及電子束焊接後的殘留應力進行評估。在後續的研究方 面,除了持續掌握國際間廢棄物罐的發展趨勢外,處置母岩的地化條 件為用過核子燃料長程處置中最重要的一環,後續應強化地化評估模 式(如地化分析程式EQ3/6)之應用,評估處置母岩在引入工程設施後 可能之地化演變情況,以及未來環境之變遷。在結構力學方面,焊接 及其程序,仍為廢棄物罐結構中亟需強化的重點。未來研發重點至少 應包括下列(李瑞益等,2005):

- (1) 在廢棄物罐及其周圍在不同處置階段之地化環境演進,以評估廢 棄物罐腐蝕及劣化過程。
- (2)局部或少數廢棄物罐失效情況下,放射性核種在地下水環境之溶 解度,除了評估對其餘廢棄物罐之影響外,並作為工程及天然障 蔽效能及輻射劑量評估之參考。
- (3) 工程障壁系統中,廢棄物罐、緩衝及回填材料,彼此間及與母岩 環境之相容性及穩定性評估。
- (4) 評析廢棄物罐不同焊接加工的製程,對於焊道及熱影響區之效 應,以及如何消除焊接殘留應力的熱處理方法及程序改進。
- (5)廢棄物罐材質與尺寸評定與國內潛在區域區域性環境的交互作用。

粘土、天然及合成沸石、活性碳、金屬粉及乾燥劑等都曾被考慮 作為緩衝回填材料之物質。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,在滲透性、離子交 換、膨脹性等方面有相當良好的功能,因此被建議作為緩衝回填的主 要材料。國內根據以往的調查資料顯示,含蒙脫石的黏土區,主要分 布在台灣東部海岸山脈之風化粘土,位於台東縣樟原之日興礦業公司

是目前國內已進行商業開採的膨潤土礦場。用過核子燃料處置計畫至 目前已針對部分室內材料試驗進行初步技術建立與發展,包括熱傳、 水力傳導、力學、化學以及緩衝材料操作與製作技術。另外,綜合各 國之研究,緩衝回填材料仍須強化之重點研究方向如下:

- (1) 評估確認緩衝及回填材料種類。
- (2) 緩衝及回填材料的功能與成分規格之測試研擬。
- (3) 緩衝及回填材料長期穩定特性進階研究,項目包含緩衝回填材料的化學穩定性、核種吸附及傳輸特性、回脹特性、力學性質、熱力學特性、透水性質、熱水耦合性質及塊體組合性質等主題。

3.4. 處置設施的相關技術

3.4.1. 設計研究

處置場基本設施可概略分為下列三個部分: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。

3.4.1.1. 地表設施

地表設施若以功能性及使用性作為區分,可以分為六大系統: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場中最重要的運作系 統,包括用過核子燃料接收、包裝、暫貯等功能。處置場須有對外聯 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場的安全運 作,監控輻射外洩之危害,並避免其對環境造成二次污染,處置場必 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。此六大母系統內包含 若干子設施,可使整體處置場地表設施更趨完備。目前用過子核燃料 深層地質處置場概念設計階段之地表設施系統功能與需求(如表 3-8) 說明如下(童琮樟,2005):

(1) 地上管理與行政系統

為地表設施之作業中心,行政與管理之業務均設於本區,為人員 密集區。本區需與廢棄物作業區保持適當距離,避免輻射或溫度 對作業人員或儀器設備產生不良影響。可能之次系統包括:

- (a) 機電系統:提供處置場運作所需之機電設備與必要之安裝空間。
- (b) 儀控系統:提供處置場運作所需之儀控設備、自動化作業設備、中央控制設備等與必要之安裝空間;並將各輻射偵測站

測得之輻射量資料直接由網路傳輸至該系統,作為緊急事故 之應變與輻射防護之依據。

- (c)通訊系統:提供地表設施廣播、通訊、資訊傳播、及對外聯 絡等所需之設備與器材。
- (d) 行政系統:為處置場行政管理之中心,負責處置場之人事與 行政事務管理,以及外界之聯絡工作。
- (e) 服務系統:提供操作人員餐飲、休憩、與娛樂等所需設備與空間,並設醫療保健中心,以供操作人員之疾病診治及定期身體檢查。
- (f)保安系統:提供地表設施安全維護所需之監視設備、緊急通報設備、保全管制與門禁措施與設備等,避免處置場遭受破壞。
- (g)保修系統:提供處置場地表設施中各類儀器設備零件備分、 緊急維修、例行養護等所需之儀器與機具。
- (h) 紀錄系統:提供監視、監測、通訊、資料登錄等各類型文件 式或電子式資訊之備份與儲存。
- (2) 放射性廢棄物管理系統

為處置場地表設施的核心系統,因直接接觸到放射性廢棄物的處 理過程,為避免輻射或溫度對作業人員或儀器設備產生不良影響,須加設安全圍籬,且進出此區必受到管制。包括以下次系統:

- (a) 接收系統:進行核燃料運輸護箱經由陸路運輸至處置場地表設施之接收工作,包括編號查驗、登錄等。
- (b)包裝系統:在此系統中進行容器轉換過程,將核燃料束由運 輸護箱轉換至處置容器中,隨後進行容器罐封閉作業,而後 運送至豎井口進行最終處置作業。
- (c) 暫貯系統:處置容器進行處置前之暫貯設施,包括所需之空
 間、移送機具、登錄、監視設備等。
- (d) 置放系統:為置放處置容器及緩衝材料之倉儲設施。

- (e)回收系統:必要時回收處置容器所使用之機具設備。包括緩 衝/回填材料開挖設備、吊架、移土設備、除污與輻射屏蔽 設備等。
- (3) 環境監測與輻射管制系統

進行地表設施之輻射與非輻射作業時,會產生輻射外洩或污染環 境之廢棄物,此時須加以環境監測、管制及處理,才不致造成環 境污染及危害,包括以下之次系統:

- (a) 輻射監測系統: 偵測環境輻射劑量、放射性核種之類別與活 度等。
- (b) 非輻射監測系統:監測處置場建造時之地表與地下設施之應 力、應變變化情形,作為施工與設計之參考,以及處置場建 造完成後之長期穩定性判斷之依據。
- (c) 汙染處理系統:處置場所產生之汙染包括廢水及垃圾兩種, 以廢水居多,又可分為放射性廢水及非放射性廢水兩種。放射性廢水為經除污及冷卻所產生之廢水,必經嚴格的處理過 程才可排放;而非放射性廢水多為人員使用過後之廢水及處 置場內之逕流水,可收集、處理及再利用。
- (4) 岩石處理系統

岩石處理系統主要分為棄置堆放和回填處理兩大系統,分述如 下:

- (a) 岩石棄置堆放系統:接收、運送開挖出之岩石,進行壓碎處理,以達安全貯存置放之原則。
- (b) 岩石回填處理系統:主要功能為將原本壓碎棄置之岩石混合 部分比例之膨潤土以成回填材料,進行地下處置場之回填工 作。
- (5) 運輸系統

將用過核子燃料從電廠運輸至處置場之運輸系統,所需之次系統 包括:

(a) 港口碼頭系統:為船舶運輸之重要設施,提供船舶靠港之重件碼頭。

- (b) 堤防系統:提供防波、防止海水倒灌之安全考量。
- (c) 裝卸作業系統:當船舶載運核燃料運輸護箱或緩衝材料等物品至港口碼頭時,利用港口作業機械將物品從船舶上裝卸至碼頭上的倉儲系統。
- (d) 倉儲系統:為港口碼頭中暫時貯存的設施,在船舶運輸物品材料至港口碼頭時,可供暫時儲存用。
- (e)道路系統:採用陸路運輸系統將核燃料運輸護箱及緩衝材料 等物料運輸至最終處置場,其主要設施有運輸車、路線設 施、及行進路線途中的保全防護措施等。
- (6) 輔助系統

提供處置場地表設施正常運轉及異常情況下所需之輔助設備與機具。

- (a)供電/配電系統:在一般操作情況下,處置場之電力供應設施能接收來自場外的電力,並分配到各處之用電設施,(包括地表及地下運作設施、照明設施及通訊設施等)。異常操作情形下(外來之電力中斷),處置場內之供電系統也能產生電力供給重要設施使用。
- (b)供水/排水系統:給水系統之主要功能在於貯存、處理和分配各種用水給各設施使用,主要設施有原水引水管、原水貯存池、處理設施及輸配水網。另外經過處理可再利用之廢水,也由給水系統分配使用。排水設施之主要功能在於排放過多或不必要的水量,主要設施有雨水下水道、汙水下水道、明渠排水道。
- (c) 消防系統:消防系統之功能在於偵測、警示及撲滅火災;其 主要設施有防火供水設施、滅火設施和火災偵測及警示設施。
- (d) 燃料供應系統:燃料供應系統之功能為接收、貯存和分配用於備用發電機、救火抽水機,及蒸汽鍋爐取代燃料的柴油, 和地表及地下交通工具、運作設施所使用的柴油及汽油。

(e) 緊急避難系統:為遇上天災及人為疏失所造成之緊急危難時,提供緊急避難之路線標示與援助設備等,藉以疏散工作人員及保存重要設施。

表	3-8	:	處置場地表設施系統需求	ĸ
1	00		交上 》 巴伦 巴尔 巴丽	ı

系統名稱	次系統名稱	系統功能
地上管理與行政系	機電系統	為處置場地表設施主要運轉中心,
統	儀控系統	確保處置場之正常運作及安全維
	通訊系統	護。
	行政系統	
	服務系統	
	保安系統	
	保修系統	
	紀錄系統	
放射性廢棄物管理	接收系統	為放射性廢棄物在進入最終處置階
系統	包裝系統	段前之前置作業系統,包括核燃料
	暫貯系統	接收、裝填、暫貯等功能。
	置放系統	
	回收系統	
環境監測與輻射管	輻射監測系統	提供環境監測、輻射管制及污染控
制系統	非輻射監測系統	制等功能之設備系統。
	汙染處理系統	
岩石處理系統	岩石棄置堆放系統	接收開挖出的岩石,並作處理,以
	岩石回填處理系統	達安全置放之原則。
運輸系統	港口碼頭系統	為島嶼型處置場必備的系統,提供
	堤防系統	船舶運輸、裝卸及倉儲等功能,並
	裝卸作業系統	設置堤防以防止海水倒灌之安全考
	倉儲系統	量。
	道路系統	
輔助系統	供電/配電系統	提供處置場地表設施正常運轉及異
	供水/排水系統	常情況下所需之輔助設備與機具。
	消防系統	
	燃料供應系統	
	緊急避難系統	
	通訊系統	
	照明系統	

3.4.1.2. 地下設施(含連通設施)

地下設施若以功能性作為區分,可概分為兩大部分: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,係因應處置場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,包括廢棄 物罐、緩衝材料、回填材料等。

地下設施若以設計與實際運轉觀點為考量,則可依據系統特性作 不同之規劃。目前用過核子燃料深層地質處置場概念設計階段之地下 設施系統功能與需求(表 3-9)說明如下(許秀真等, 2003):

(1) 豎井系統

聯絡地表設施與地下設施間之通道可為豎井或斜坑設計,現階段 初步以豎井為參考設計,但視未來場址特性不排除部分改採或併 採斜坑設計之可能。廢棄物運送應有專用之豎井,與一般工作人 員所使用者應有所區隔。此外豎井亦作為機具與施工材料運輸、 地下設施通風、緊急逃生等之通道。可能之次系統包括:

- (a) 捲揚系統:包括捲揚機、鋼纜、捲盤、支架等。
- (b) 吊掛系統:包括施工期間簡單之吊籃系統、工作台架、運轉 期間之電梯設備等。
- (2) 地下控管系统

為地下作業的運轉中心,主要儀控設備均設於本區。本區需與廢 棄物管理區保持適當距離,避免輻射或溫度對作業人員或儀器設 備產生不良影響。可能之次系統包括:

- (a) 機電系統:提供處置場運作所需之機電設備與必要之安裝空間。
- (b) 儀控系統:提供處置場運作所需之儀控設備、自動化作業設備、中央控制設備等與必要之安裝空間。
- (c)通訊系統:提供地下設施廣播、與地面通訊、地下通訊等所 需之設備與器材。

- (d) 服務系統:提供作業人員管理、地下導覽、休憩等所需設備 與空間。
- (e)保安系統:提供地下設施安全維護所需之監視設備、緊急通報設備、保安管制與門禁措施與設備等。
- (f)保修系統:提供控管中心各類儀器設備零件備分、緊急維修、例行養護等所需之儀器與機具。
- (g)記錄系統:提供監視、監測、通訊、資料登錄等各類型文件 式或電子式資訊之備份與儲存。
- (3) 放射性廢棄物管理系統
 - 為處置場的核心系統之一, 攸關輻射作業安全, 提供正常與異常情況下放射性廢棄物管理所需之設備。包括以下次系統:
 - (a) 接收系統:進行廢棄物罐從豎井系統移轉到地下設施之接收工作,包括編號查驗、登錄等。
 - (b) 檢整系統:廢棄物罐送抵暫貯區或處置區前之檢查與整理, 包括容器完整性檢驗與測試、表面輻射劑量檢測等。
 - (c) 暫貯系統:廢棄物罐進行處置前之暫貯設施,包括所需之空間、移送機具、登錄、監視設備等。
 - (d)運輸系統:將廢棄物罐由檢整區或暫貯區運送至處置隧道/ 處置孔之載具(軌道車或輪形車)以及相關之定位設備與穩定 設備。
 - (e)置放系統:輔助運輸系統將廢棄物罐垂直置入處置孔或水平 推入處置隧道所使用之機具設備。包括推進設備、吊架、動 力設備、輻射屏蔽設備等。
 - (f) 回收系統:必要時回收廢棄物罐所使用之機具設備。包括緩 衝/回填材料開挖設備、吊架、移土設備、除污與輻射屏蔽 設備等。
- (4) 處置坑道系統

負責處置場(參看圖 3-6)聯絡隧道、運轉隧道、處置隧道、及處 置孔之施工與維護。作業內容包括坑道開挖、岩盤穩定、湧水控 制、岩塊清運等。包括以下次系統:

- (a) 聯絡隧道:基於輻射安全考量,將地下運轉中心與處置區以
 聯絡隧道相隔離,以確保運轉期間作業人員所受之輻射劑量
 能合理抑低。
- (b) 運轉隧道:地下設施運轉期間之主要通路,隧道尺寸略大於 處置隧道提供施工與運輸之通路,通常採環狀設計,使雙向 皆可通達豎井區,確保作業人員之安全。
- (c)處置隧道:為放射性廢棄物進行置放的隧道,其尺寸需考慮 人員機具通行及處置容器置放所需之必要空間,並減少對圍 岩之擾動。
- (d)處置孔:處置容器採垂直式置放時,於隧道底部鑽挖之直
 孔。通常採機械式鑽挖,以減少對圍岩之擾動。
- (5) 工程障壁系統

系統:

進行處置隧道之緩衝材料置放、回填、封阻(seal)作業。包括以下次系統:

- (a) 材料系統:包括材料之運送、貯存、級配、製備等所需之空間與設備。
- (b)施工系統:進行緩衝/回填材料置放、夯實、穩定等作業, 所需之設備與機具。
- (6) 環境監測與輻射管制系統 進行地下設施輻射與非輻射的環境監測作業,以及正常作業下的 污染區管制,與異常情況下的輻射污染除污與管制。包括以下次
 - (a) 輻射監測系統: 偵測環境輻射劑量、放射性核種類別、活度等。
 - (b) 非輻射監測系統:包括岩盤變位、地下滲水等的長期監測儀器與設備。

(c) 污染管制系统:污染管制之作業程序與除污之機具與設備。

(7)功能驗證系統 於處置場地下設施設置一處先導處置區,以便進行相關之地下試 驗與處置技術驗證。包括以下次系統:

- (a) 實驗設計系統:與實驗相關之場地與儀器設備設置。
- (b) 量測分析系統:短期或長期量測分析驗證實驗數值變化之儀 器設備。
- (8) 設施封閉系統

用過核子燃料處置作業全部完成,經過評估並取得法規主管機關 核可後,進行地下設施拆除以及地下空間封填所需之作業程序與 設備。包括以下次系統:

- (a) 設施拆除系統:進行地下設備拆解、清運所需之設備與機具。
- (b) 隧道封閉系統:進行地下開挖空間如聯絡隧道、運轉隧道、 豎井、貯存區、控制中心等之封閉與回填作業所需之設備與 機具。
- (9) 輔助系統 處置場在正常運作下應獨立成自主體系,避免作業意外發生時輻 射污染之擴散。因此應有包括以下的次系統
 - (a) 地下通風系統:提供地下通風所需之抽風/送風設備, 包含
 限制氣流方向之氣鎖(air-lock)設計,以及過濾污染氣體之相
 關設備。
 - (b) 供電系統:提供地下設施運轉所需之輸配電線路與設備。
 - (c)供水/排水系統:提供地下設施運轉所需之給水設備,以及 積水抽除設備,包含儲水桶、蓄水池、過濾器等。
 - (d) 壓縮空氣系統:提供地下施工所需之壓縮空氣。
 - (e) 燃料供應系統:提供地下運輸工具或動力設備所需之燃料。
 - (f) 消防系統:提供消防警示與自動滅火系統等。
 - (g) 緊急逃生系統:提供緊急逃生之標示、通道與緊急援助設備等。

表 3-9:	深層	,地質	處置	場地下	設施系	、統需求	Ż
--------	----	-----	----	-----	-----	------	---

系統名稱	次系統名稱	系統功能
取业么从	捲揚系統	提供聯絡地表與地下設備之通道。
宣开系统	調掛系統	
	機電系統	地下運轉中心,裝置地下主要操控設備,對處
	儀控系統	置作業進行監控管理。
	通訊系統	
地下控制系統	服務系統	
	保安系統	
	包修系統	
	記錄系統	
	接收系統	提供放射性廢棄物管理與處置作業所需之設備
	檢整系統	及機具。
放射性廢棄物	暫貯系統	
管理系統	運輸系統	
	置放系統	
	回收系統	
	聯絡隧道	提供坑道施工與穩定性維護之相關設備與機
虚置拉道系统	運轉隧道	具。
处且儿垣尔沁	處置隧道	
	處置孔	
工程陪辟系统	材料系統	提供處置場緩衝材料與回填材料貯放、製備、
工程件主示机	施工系統	與施工之設備。
晋 谙 腔 測 與 輻	輻射監測系統	提供環境監測、輻射管制等所需之設備。
秋光显 风头福 射管制系统	非輻射監測系統	
21 B #177 %C	污染管制系统	
功能驗證系統	實驗設計系統	提供進行先到驗證地下實驗所需之空間與儀
	量测分析系统	器,並進行分析。
铅施封閉系統	設施拆除系統	提供設施拆除、清運,以及隧道地下空間封閉
	隧道封閉系統	所需之設備。
	地下通風系統	提供處置場正常運轉與異常情況下所需之輔助
	供電系統	設備與機具。
	供水/排水系統	
	壓縮空氣系統	
輔助系統	燃料供應系統	
	消防系统	
	緊急逃生系統	
	通訊系統	
	照明系統	

3.4.1.3. 設計方法

處置場設計工作是一項重大的工程案件,有必要採行具有系統 性、結構性的方法,循序漸進,逐步精進,採行之方法為系統需求法 (system requirement approach)。系統需求法以系統性的方法判別建造 及運轉處置場的所有的資料需求,包括處置系統的設計及功能分析, 以列出所有的資料需求。其步驟為:

- 定義系統設計目標:即為永久安全隔離我國用過核子燃料於單一處置設施。
- (2) 定義系統功能:亦即處置方式之選擇。本案採行深層地質處置、 多重障壁之原則進行設計。處置場功能之目的需能提供用過核子 燃料運轉期間及封閉後之安全性,且限制核種釋出至人類可及環 境。
- (3) 定義系統需求:系統需求係為達成前述功能,所需提供之主、次要設施及設備、進行廢棄物接收、處理、置放等作業、並考慮廢棄物可回收性、設施封閉與除役等、以及提供運轉所需之輔助服務等。
- (4) 定義資料需求:資料需求則包括相關於各項設施設計所需之廢棄 物特性、場址特性、材料特性、施工方法、設備/機具規格、場 址變遷行為之預測、功能/安全評估結果之回饋等。

3.4.1.4. 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, 為處置場發展的重要三項領域,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。

概念設計階段工作擬定之設計基本步驟如下:

- (1) 確認設計目標與設計需求。
- (2) 擬定工作時程。
- (3) 釐清法規與適用準則。
- (4) 確認設計背景資料。
- (5) 蒐整設計相關資料。
- (6) 規劃主要/次要系統。
- (7) 釐清系統介面關係。
- (8) 決定設計參數。
- (9) 進行設計分析。
- (10) 建立設計規格。
- (11) 概估經費需求。
- (12) 審查與資料增補。
- (13) 編寫設計說明。

前述步驟為概念設計階段的基本工作流程,後續處置工作進行初步設計與細部設計時,流程應包括設計變更與修正、設計驗證、發包施工、設計維護等相關步驟。

3.4.2. 興建

3.4.2.1. 施工方法

處置場初期建造時程通常約在五年左右,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)(盧俊鼎, 2003)。鑽炸工法與隧

道鑽掘機工法二者在工程方面之差異性比較(表 3-10),擇要列舉如下:

- (1) 開挖速率:隧道鑽掘機工法最明顯的效益就是高開挖速率,與傳統鑽炸工法相比約快四至六倍。主要因其為機械開挖,且開挖期間可同時進行支撐工程。另外,作業手的工作皆各自分工互相配合,工作內容單純化,訓練容易。
- (2) 超挖量:一般而言,雖然良好的開炸控制可以降低超挖量,甚至 有所謂的「平滑開炸法」。但是在傳統鑽炸工作中超挖量還是很 少能低於10%的。如控制不良,隧道之超挖量可能會高達25%。 隧道中超挖的部分,最後還是要以混凝土回填,因此工程成本自 然隨超挖量而增加。隧道鑽掘機工法的優點之一即可減少超挖 量。
- (3)支撑數量:由過去經驗得知,在類似的地質狀況下施工, 隧道 鑽掘機工法所需鋼支保(supports)數量平均而言為鑽炸工法的 1/12,鋼支保數量較傳統工法可節省90至95%,對整體工程可降 低相當之經費。而對其他型式的支撐而言(如岩栓、噴凝土),也 是以採用隧道鑽掘機工法較經濟。
- (4) 勞力需求:在施工效率比較中,必須考慮勞力需求。雖然在隧道 鑽掘機工法中,每個作業班的組成較為龐大,但是其工作效率 通常可達傳統鑽炸工法四倍以上。同時因為分工細,工人訓練較 容易,技術養成較快。另外,在妥善作業流程規劃下,隧道鑽 掘機工法的作業班組成尚可縮小。
- (5)機具設備與耗材:鑽炸工法中設備成本主要為鑽堡、出碴機械及必要的維生系統(如通風機、抽水機等)。在長隧道施工中還要加上工作橫坑與豎井,成本頗高;同時亦需加上耗材成本如鑽頭鑽桿及炸藥等。相對地隧道鑽掘機工法主要設備成本為隧道鑽掘機本身的折舊或租金。對於多數的隧道工程計畫而言,隧道鑽掘機在工程結束後尚有相當的剩餘價值,經整修後可考慮在其他計劃中使用。另外,施工所需之用電量甚鉅,對於電力的調度,應有妥善的計畫與安排。隧道鑽掘機的訂製交貨時間較長,對於工程

進度的安排須非常謹慎。隧道鑽掘機設備的成本相當高,且其重 覆使用性又較鑽炸法為低,故須詳細評估地質狀況、施工期限、 相關經驗、隧道長度及斷面大小等各相關因素。

- (6) 臨時性構造:由於隧道鑽掘機工法的開挖速率平均而言較鑽炸工 法快四倍,在施工計劃中往往可以避免採用施工期臨時性構造物 如橫坑、豎井等。因此而可以節省相當的工程成本。
- (7) 隧道斷面:全斷面隧道鑽掘機並非完全優於傳統鑽炸工法。由於 隧道鑽掘機的鑽掘機頭為圓盤,故所挖掘之隧道斷面必為圓形。 若需要挖掘其他形狀,則必須配合其他方式開挖修正,此乃隧道 鑽掘機之限制之一。且所挖掘之斷面尺寸僅可作數公分之調整, 無法像傳統鑽炸工法具有較大之彈性。隧道鑽掘機一般以使用於 地質變化不大、岩石強度較高之長隧道較為普遍。
- (8) 地質環境:在決定使用隧道鑽掘機工法之前,應詳細評估地質條件,並依地質條件訂製或租用合適的隧道鑽掘機。甚至若地質條件不佳 可考慮以傳統鑽炸工法進行隧道開挖工程。否則非但不能獲得機械開挖所帶來的的高效率,反而會因機械損毀及工程停頓,造成意外的工程延誤及工程費用的大幅增加。

3.4.2.2. 施工

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 (SKB, 1999)處置孔以機械式垂直鑽掘1.75公尺的直孔,在岩壁產生之 新裂隙不超過10公分距離,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公分,在底部產生約0.8-1.5公尺之開挖擾動帶。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。

鑽炸工法	自由斷面鑽掘工法	全斷面鑽掘工法
任何地質	軟岩~中硬岩	軟岩~硬岩
較低	低~中等	高
慢	中等	甚快
2~3月	3~6月	9~18月
2週	2週	8~12週
無限制	中等	較大
無限制	約5公尺	約200~300公尺
約30度	約15度	10度~30度
任意	任意	圓型
任意	任意	1.8~12公尺
大	中等	小
大	小	小
不良、高	尚可、中	良好、低
無限制	無限制	可能
無限制	1000公尺以上	約0.8D*1000公尺
大	小	小
大	中	小
小	小~中等	大
小~中	小~中	小~大
低	高	高
高	中	低
大	小	小
較小	較小	高
	鑽任較慢2~3月22 無無約任任大大 不無無 大 大小小低高大較作何低 2~3週限限30意意 良限限 30意意 、制制的度 4 人 人 4 人 4 人 4 人 4 人 4 人 4 人 4 人 4 人	鑽炸工法自由斷面鑽掘工法任何地質軟岩~中硬岩較低低~中等慢中第 $2~3月$ $3~6月$ $2週$ $2週$ 無限制中等無限制約5公尺約30度約15度任意任意大中等大小不良、高尚可、中無限制1000公尺以上大小大小大小大中八小~中等大小大小大小大小大小板····中小····中小····中次~中····中大····較小較小較小較小

表 3-10:隧道開挖工法之比較

(郭福隆、廖同柏, 1991; 胡邵敏, 2006)

3.4.3. 運轉

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公尺深的地下設施,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;或直接移轉到輪形 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。

3.4.4. 封閉

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合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。

4、用過核子燃料處置的功能評估

4.1. 評估障壁功能的方法

4.1.1. 多重障壁系統的組成

如第3章所述,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(isolation)、遲滯(retardation)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裝進高性能的金屬製廢棄物 罐,廢棄物罐再放置在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 過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,其輻射性已衰變至無害的程度。

4.1.1.1. 工程障壁系統

工程障壁包括廢棄物罐、緩衝材料與回填材料,其功能設計與材 料選擇要能夠達到耐久、隔絕或遲滯核種外釋等功能需求,工程障壁 各組成單元的功能需求與材料選擇已於第3章詳述,在此不予贅述。

4.1.1.2. 天然障壁系統

天然障壁系統亦即所謂之地質圈,其主要功能在保護工程障壁與 包含其內之放射性廢棄物免於長期地質作用之影響,岩體的選擇要考 慮具備長時期穩定性以及其他有利於用過核子燃料處置的功能,其一 般性功能需求與參考處置概念說明如下。

(1) 功能需求

一般而言,天然障壁系統主要功能需求歸納如下:

(a) 化學環境安定性:處置母岩的選擇直接或間接的影響到地球化學環境的安定性,包括地下水的氧化還原電位、酸鹼值、

鹽度、有機酸、硫化物含量等,廢棄物罐設計(材質、厚度) 及處置場功能評估時應審慎考慮所處之地質環境。

- (b) 地層與岩體力學穩定性:地震活動較少且地層安定之場址較 利於廢棄物之長期處置,不致因地層之錯裂或擠壓,造成廢 棄物罐之扭曲甚至破損。
- (c)核種遷移阻滯性:低滲透性、低孔隙率且少裂隙之地層,有助於延緩地下水之流動,地層中之部分礦物對特定核種具有吸附效果,可阻滯核種遷移。此外,將放射性廢料處置於適當深度的地質環境中,亦能延長核種遷移時間,使之在長期的遷移過程中,逐漸衰變至無害之程度。
- (d) 人類侵入防止性:場址的選擇應避免位於有豐富天然資源的 地區,一方面除造成資源的浪費外,也增加未來人類因探礦 活動而無意間侵入處置場之可能。適當的地質環境可避免前 述困擾,而其厚度亦為防止人類侵入的障壁之一。
- (e)施工可行性:處置場須有足夠適當的母岩空間足以容納預定處置的廢棄物量。此外,均質且裂隙少之地質環境有助於處置設施之規劃與配置,並促進施工安全性,大地應力作用顯著或有害氣體(如沼氣)存在之地質環境對深地層處置場的施工易產生危害。
- (2) 概念說明

國際間認定適於作為處置母岩之地層主要為花崗岩、泥岩與鹽 岩,而台灣地區並無鹽岩地層存在,本島西南部雖有廣大的泥岩 區,但人口密集且地震頻繁,因此計畫初步以結晶岩(花崗岩為 主)為優先潛在處置母岩。以花崗岩類為主的結晶岩經各國長期 研究,業已證實其為合適處置母岩,優點包括通常分布於構造穩 定地區、導熱性良好、施工穩定性高等。

處置深度的考量係基於隔離廢棄物增加核種遷移時間、減少人類 無意侵入的機會,以及施工可行性與經濟效益的考量。300~1000公 尺是各國研究結果大致認為可能合適的深度,此深度將隨實際調查時

配合良好岩體的分布作調整,以避開主要斷層,另亦須考慮功能評估核種遷移之時間結果。

4.1.2. 地下水外釋情節

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之相互關係也必須清楚瞭解。

4.1.2.1. 基本情節與演化

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。

基本情節本質上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,其概括性假設包含:

- 處置場封閉時,所有的工程障壁都能按照設計規格發揮其應有的功能。
- (2) 處置場在封閉後的十萬年內,仍能維持現今的氣候條件。
- (3) 生物圈的生態系統(ecosystem)型態和目前狀況的相似。
- (4) 系統演變的考量時間限制在某時段內。

當外部條件有變化時,此基本情節就必須修正為變異情節之情 況,由於本報告旨在建立初步之評估技術能力,故初期仍僅就外部條

件於評估期間仍維持目前環境之條件進行初步評估。本報告基本情節 的演化過程如下:

- (1)處置場封閉後,地下水重新侵入處置場,母岩及緩衝/回填材料 會重新飽和,膨潤土遇水產生回賬將廢棄物罐周圍空隙以及其他 空隙等填塞。
- (2)處置場封閉後十萬年,廢棄物罐因腐蝕而失效(廢棄物罐瞬間消失),廢棄物本體(waste form)溶解於地下水中,所含放射性核種隨著地下水外釋到近場。
- (3) 放射性核種在緩衝材料內藉由擴散作用外釋,遷移出工程障壁系統進入母岩。
- (4)從工程障壁系統中遷移出來之放射性核種則隨地下水之流動,繼續在處置場周圍之母岩裂隙中遷移並進入主要導水通道(斷層或破碎帶)。
- (5) 放射性核種在主要導水通道內遷移進入地表的沉積層。
- (6) 沉積層中的放射性核種經由水井之抽水而進入生物圈食物鏈體 系。
- (7) 潛在曝露群體飲用該水井後受到輻射曝露。

4.1.2.2. 水井飲用情節

上述基本情節的演化過程,潛在曝露群體是飲用位於地表沉積層 的水井,而受到輻射曝露,在此將此情節定義為水井飲用水情節。依 據水井飲用水情節的演化進行用過核子燃料處置的功能評估時,在生 物圈分析上,參考國際原子能總署(IAEA)提出之BIOMASS6報告 (IAEA, 2003),提出之案例ERB1A及ERB1B參考生物圈情節(reference biosphere scenario)。ERB1A不考慮詳細之處置場址環境,僅合理假設 水井位在測試區某一位置,當地居民習慣地直接飲用含水層中之水 源,而受到輻射曝露。此外,並假設遠場模擬結果提供的水中核種濃 度傳遞至水井,該核種濃度即為生物圈分析之來源端,其中包含許多 核種由地下水釋出,井水中每一核種的濃度假設均為常數,所以生物 圈個人有效劑量將運用劑量轉換因子進行計算。

ERB1B基本假設條件則是於遠場與生物圈交接處,每個核種以等 速率釋出方式藉由遠場傳輸模式進入含水層,接著由含水層到水井的 過程中,核種濃度會隨時間變化,並伴隨著地下水流動而有延散 (dispersion)、平流(advection)與稀釋等效應發生。最後,剩餘之核種 會藉由水井抽水後,直接被測試區之當地居民飲用,始產生個人年有 效劑量。當未來處置場址確認後,並獲得更詳細的場址環境特性資 料,屆時若進行水井飲用水情節分析仍舊參考ERB1B的假設時,須再 依據IAEA建議的14項參考要點進行參數之篩選,方可獲得更為正確 之個人年有效劑量。此14項參考要點如下所示:

- (1) 潛在曝露群體之描述(包括對於當地用水量之需求)
- (2) 飲水在人們飲食所佔之比例(即每人之飲水量)
- (3) 關鍵群體在處置場周圍之居住用地範圍
- (4) 抽取水井之水源作為家庭用水項目(包括烹煮、洗滌)
- (5) 作為家庭用水前,水源的分配情形(農用、觀光用)
- (6) 處置場當地的氣候特性說明
- (7) 以每半年或10個月的時間記錄氣候的變化區隔
- (8) 分別就當地區域氣候的變化做空間上的氣候劃分說明
- (9) 介紹當地的生物圈系統種類
- (10) 處置場周圍土壤地質特性說明
- (11) 處置場區附近的表面水體流況
- (12) 了解飽和層水體變化以分析水平衡情形
- (13) 了解含水層中之水中化學成分(如pH值)
- (14) 各水井下方含水層之水文參數調查

4.1.3. 分析的模式鏈

本分析報告於全系統安全評估以INPAG-N、INPAG-NV2及 INPAG-NH進行近場核種外釋率評估,以INPAG-F進行遠場核種外釋 率評估,以及以AMBER進行生物圈人體劑量率評估。有系統性的進 行安全評估的流程如 所示,先由近場外釋開始評估,接著進行遠場 外釋評估,最後則進行生物圈人體劑量率評估,這一種有系統性的評 估流程係由一全系統架構程式所統整。



圖 4-1:系統性安全評估之分析架構

4.2. 地質環境模擬與工程障壁系統的條件定義

4.2.1. 區域水文模式與工程障壁系統的條件定義

地下水是放射性核種遷移至人類可接觸環境的重要媒介,因此區 域水文地質特性則被列為評估與選擇場址的要項之一。廢棄物罐因腐 蝕而使其內部所含之放射性核種經溶解、瀝濾(leaching)、擴散 (diffusion)後,先傳輸至工程障壁系統與地質圈,最後則進入生物圈。

4.2.1.1. 地下水流動與分佈之考量

若放射性核種在水文地質環境中不易溶解,或溶解後在遷移過程 中因環境改變而被吸附或沈澱,或是遷移速度非常緩慢以致在到達人 類可接觸環境時,即已衰變至不足危害人類健康與安全的程度,不論 上述任何一種狀況,均可有效地阻止放射性核種的釋出而達到圍阻與 隔離的目的。影響地下水流動與分佈之成因說明如下:

(1) 地下水的分佈

地下水的分佈主要是受地形、氣候及地質等因素的控制。地形起 伏狀況直接支配地下水面的高低,並影響地下水流動的速度與方 向;氣候則控制著降雨量的多寡與蒸發散失的強弱,關係著地下 水的補注量與流出量的大小;地質條件則決定水分傳送之快慢與 變化,及岩層儲存水量之性質。根據各岩層之含水性能的差異而 有含水層(aquifer)、難透水層(aquitard)及不透水層(aquiclude)的 區分。其中,含水層滲透率高並可提供地下水循環的管道,而且 該岩層的地下水儲藏量多,因此,各區含水層的分佈及與處置母 岩在層位上的關係應予以確定;此外,難透水層、不透水層之滲 透率較含水層為低。岩層內的裂隙或破碎帶乃是地下水的主要儲 存所在或是流動路線,故為使處置場能遠離循環水流區,節理、 斷層等裂隙的調查與有效密封極為重要。處置母岩與地表之間若 無含水層是為有利條件。然而若含水層僅在近地表處分佈,則仍 然可以考慮在該區設立深層地質處置場,但在場址調查階段應就

含水層對處置場之設計與構築及未來含水層被開發利用而可能對自然障壁所造成之衝擊等進行功能與安全評估。

(2) 地下水流動影響因子

不論廢棄物特性或處置方式為何,場址所在之地質環境應該是地 下水流動相當緩慢之區域,以避免過量的放射性核種經由地下水 而從處置場外釋至生物圈。地下水係在岩石孔隙中或裂縫破碎帶 中流動,故控制地下水流動的因子,除了水力梯度外,與岩石之 原生水文地質特性(如岩層滲透率、孔隙率)及次生水文地質特性 (如裂隙)均有密切關係。影響地下水流動之因子茲分述如后:

(a) 水力梯度(hydraulic gradient)

水壓面的坡度是調水力梯度。地下水面為通氣帶(vadose zone)和飽和帶(saturation zone)的分界面,離地面的深度從數 公尺到數百公尺。一般而言,地下水面隨著氣候、地形、大 氣壓力、地震等因素而變動,其中以地形與氣候的影響最為 顯著。地下水面之高度在各區的差異將使地下水產生流動, 且水力梯度越大者,水流速度也就越快。故水力梯度低的地 區,地下水流緩慢,可增長放射性核種遷移至生物圈所需的 時間,對隔離用過核子燃料的處置是項有利的條件。

- (b) 岩層滲透率(rock permeability)
 - 地下水在單位水力梯度之影響下,通過單位橫斷面積岩石之 流量稱之滲透率。滲透率的高低,主要決定於孔隙的大小與 連貫性。滲透率低的岩層,地下水流動不易,因此,常被列 為處置母岩而在選擇場址時優先考慮。一般而言,砂岩、礫 岩、多孔石灰岩等的滲透率較高;而泥質岩(頁岩、泥岩、 黏土)、花崗岩及變質岩等滲透率較低,適合作為處置母岩。
- (c) 岩層孔隙率(rock porosity)

孔隙率係指岩石孔隙體積與總體積之比。孔隙率隨岩石的不同而有差異,又和組成岩石顆粒的形狀、排列淘選度(sorting)、及膠結度(cementation)等有關(何春蓀,1986)。岩石孔隙率的大小影響地下水的流速、岩石對核種的吸附效果

放射性物質之熱效應及輻射效應作用等,故各岩層的孔隙率 應列入場址調查與評估的範疇。

(d) 裂隙(fracture)

岩石形成之後,由於受到外界因素影響而產生節理及斷層等 裂隙(稱為次生孔隙),進而改變原有的水文地質特性。裂隙 除支配地下水流動的方向外,其產狀亦控制箸地下水的儲存 與遷移狀況。對可塑性岩層而言,在裂隙發生之後,還有癒 合的可能;但脆性岩層由於缺乏自癒能力(self-healing),因 此,對滲透率低的脆性岩層而言,裂隙乃是地下水流動最重 要的管道。故在場址調查時,岩層中裂隙分佈之頻率、數量 及其水力傳導係數的量測尤其重要。

(3) 地下水流動速度

根據達西定律(Darcy's 1aw),地下水流動的速度和流量及水力梯 度成正比。因此,水力傳導係數低且水力梯度小者,其地下水流 動也就較為緩慢,將有助於延緩放射性核種的遷移。此外,不同 透水性岩層之排列順序,亦能影響地下水流。假使處置母岩之上 方具有多層的不透水層,便可減緩地下水流動的速度,顯現出多 重障壁的功能。

(4) 地下水流動方向與流程

地下水流的方向主要是受地形與地質構造的影響,地下水的流動 方向關係著放射性核種從工程障壁系統遷移至生物圈所需經過 路程的長短(稱為流程);若在相同的水流速度下,較長的流程, 所需運行的時間較久,這將更有利達到隔離與圍阻的效果。故欲 增加流程,除需將用過核子燃料置入相當深度的岩層外,地下水 流動的方向也是探討的重點。在飽和帶中處置用過核子燃料時, 若在用過核子燃料置放之前,母岩或周圍水文地質環境內有向下 或以水平為主的水力梯度則是一項有利的條件。亦即區域性之地 下水流方向若遠離生物圈,對設立處置場而言是相當有利。

4.2.1.2. 测試區水文資料與水力梯度評析

(1) 測試區地下水資料說明

本分析資料,係利用在國內某具花崗岩地質特性處進行測試之數 據,該測試區(圖 4-2)由於年平均降雨量約1072mm低於年蒸發量 1653 mm(經濟部水利署,2005),使得地面水收集相當不容易。 更因為島嶼(本概念設計參考島嶼)面積狹小,逕流延滯之時間極 為短暫,因此地表逕流無法集中聚集形成溪流,使得水資源應用 極為困難。因為地形使得流量短小且急,故幾乎無法涵蓄水源。 在此種情形下,當地民眾多依賴地下水為主,測試區的地下水分 佈共分為4個地帶(中鼎工程股份有限公司,2003):

(a) 中西部古槽谷地带

本區基岩深度約160m左右,含水層達30~40m之粗砂礫石層,為測試區地下水源最豐富的地區。

- (b) 東半島南部三角地帶 其含水層厚度約在20~30m間,基岩深度參差不一,本區適合 以多井串聯水井開採。
- (c) 東半島一帶 該區既有井深約在15~20 m之間,故本區亦適合以多井串聯 方式開採地下水。
- (d) 東半島西北地區及西半島一帶 含水層均在10 m以內,屬於現代沖積層,此地帶靠近海岸, 且地面下3 m左右有海相沉積層之灰色黏土含貝殼層,經地 殼上升歷久沖積而成。

由上述的資料顯示,測試區豐富的地下水含量存於西部地區,而 東部地區則還是多數依賴湖庫供水。金門縣政府(2003)之報告針 對其所建置12座地下觀測井分析水位統計資料,結果顯示測試區 西部與東部均有較強的局部擾動,顯示可能局部使用地下水。 中鼎工程股份有限公司(2003)之報告針對地下水的水文參數蒐 集,得到測試區12口研究水井的相關位置名稱、地下水位、含水

層厚度、抽水量及滲透係數如表 4-1。由表 4-1其含水層厚度判 斷,平均厚度約36 m,且含水層厚度在平均值以上者多數位於測 試區西部,由代表東部之#006、#007、#008和#010水井抽水量得 知東部地下水水量不足。另外,測試區除部分地勢較高之區域水 位較深外,根據現場調查該區一般地下水位多在地表下19 m以 內,且每個月的變化幅度在2 m以內。地下水的流向,大致是由 山區流向海洋,以測試區西部而言,地下水流方向由島中央向四 周海邊流出;而在測試區西部與測試區東部連接處因高山阻隔而 造成地下水流之連通性不佳。測試區東部地區因花崗岩脈之裸 露,連通性亦屬不佳。地下水污染潛勢評估研究方面,依據經濟 部水利署(2005)之報告,顯示測試區西北部與東南部至海邊區域 為高污染潛勢區域。

- (2) 测試區地下含水層分析
 - 依據先前資料所述東部區的地下水含量遠低於西部地區,甚至於 居民的用水,多數得依賴湖庫中的水,或是以管線將西部地區之 地下水抽回使用。因此,東部地區居民多數以湖庫的水為主要飲 水來源,若地下水是核種外釋主要途徑且湖庫之水源來自於天 水,此可有效降低而減低對人體直接的接受輻射劑量傷害之可能 性。然而,测試區東部居民之飲用水量有一部分是來自於西部地 下水的供應,這將使得評估東西區地下含水層的相通問題更顯得 重要。如果放射性核種有機會透過含水層移行,則評估由測試區 東部遷移至西部地區之地下水特性。由於現代沉積岩、紅土礫岩 層、砂岩、礫岩皆可以成為較佳的含水層;而黏土層因為具有較 低的滲透係數,則可視為良好的阻水層。對於沉積岩的部分,依 花崗片麻岩的區隔可將其分為三個區域如圖 4-2,其中A區為測 試區的西部地區,此區的沉積岩厚度最多可以達到170 m; B區為 测試區的東北方,大部分區域只有20m多,最厚可以達到50m; C區則為測試區的東南方,最厚可以達到60 m(經濟部水利署, 2004)。黏土層可分為兩種黏土層,分別為黏土層A層,其厚度約

5.0E-1至10 m;黏土層B層的厚度則在5.0E-1 m至2 m。再依據經 濟部礦產測勘之鑽井資料,將測試區地層可區分為下列的5種:

- (a) 現代沉積層與紅土礫石層
- (b) 黏土層A
- (c) 壤土質砂層
- (d) 黏土層 B
- (e) 壤土質砂層、砂岩夾雜礫石層

依據測試區的沉積岩分佈將A區分為5700個網格,B區分為4200 個網格,C區分為5772格。B區中有一水井(#006),與主裂隙核種 釋出點距離1800 m,此外C區亦有另一口水井(#010),與主裂隙 核種釋出點距離4800 m。由於中間花崗片麻岩的阻隔,致使東南 方的C區與西部A區的含水層是不相連。將A區以東西向的方式切 為4個水文地質剖面分別為E-E'、F-F'、G-G'及H-H';在B 區則是切為5個水文地質剖面分別為I-I'、J-J'、K-K'、L-L' 及M-M'。A區的四個剖面(圖 4-3)主要可供判斷的剖面E-E'; 同理,圖 4-4主要的判斷剖面為I-I'。由E-E'剖面圖之E'點可 以看出含水層最高處,並沒有超過水平面30m,相對於I-I'剖面 圖的I'點,其花崗岩層之高度卻是在水平面上40多m處。兩者相 互對照下,可得知地下水流連通性不佳。

(3) 测試區地下水流速分析

測試區的西半部,花崗岩基岩由南部丘陵露頭向北傾斜,其上的 沉積層厚度由露頭區向北漸增。在西部的中央地區,其沉積層的 厚度最多可以達到150 m左右,而平均的厚度約60 m左右,其中 含有透水性佳之砂礫層數層,導水係數介於14.4至144 m²/day之 間。考慮水井 #006與 #010之地下水流速,兩口水井均屬於淺井 開發之水井,其地下水流速經過單位換算後,#006的地下水流速 為4.2E-2 m/yr,#010的地下水流速為7.26E-1 m/yr。由數值上可 以看出這兩口水井之地下水流速屬於低流速,至於為何這兩個地 方的流速較慢,則需要檢討其含水層的特性。研究測試區地下水

污染潛勢之相關研究,洪瑛鈞(2002)經由DRASTIC系統進行兩大 部分資料的獲得,一是水文地質圖文資料(Hydrogeologic setting);一是相對性分級及使用水文地質參數。此種分析方式是 美國環保署(US EPA)於1985年時提出,目的主要在了解地下水受 污染的程度,主要取決於該地區之水文、地文及地質狀況。在這 裡面要考慮的水文地質參數共有7項,分別如下:

- (a) 地下水位深度(Depth to water)
- (b) 淨補注量(Net recharge)
- (c) 含水層介質(Aquifer media)
- (d) 土壤介質(Soil media)
- (e) 地形坡度(Topography)
- (f) 未飽和層影響(Impact of vadose zone)
- (g) 含水層水力傳導特性(Conductivity of the aquifer)

其中與含水層特性較為相關者為含水層介質的部分,地下水如果 在鬆散的砂層或是礫石層的流速將較快速;若是在緊密砂層或黏 土層者,其地下水流速將較慢。DRASTIC系統將這7項水文地質 參數分別轉換成0~10分的分數等級,利用不同的等級分數判定各 個水文參數所影響的比重。對於含水層介質的性質將決定地下水 在其間的流動力,且影響污染物傳輸及擴散之速度。整體而言, 介質顆粒越大或是裂縫孔隙越多,則其滲透性佳且遲滯力越差, 因此地下水之流速就越快,其所對應之分數也越高。洪瑛鈞(2002) 由 #006與 #010水井的地質鑽井資料(表 4-2),可以看出深度與 不同土壤條件之比對關係,且發現其在#010水井下之介質有多量 的砂以及2 m的礫石層,更進一步驗證地下水流速分析時,#010 水井底部含水層流速大於#006水井底部含水層流速;表 4-3則是 DRASTIC系統對測試區所做之含水層評分表,分數高者代表流速 快且滲透性佳。透過表 4-3的評分表分析東北方及東南方的區 域,代表#006與#010水井所在位置,由其對照的評分表即可得知 此兩處的地下水流速相對較低。

(4) 测試區水力梯度分析

藉由測試區當地所做的水井水位監測(經濟部水利署,2004),加 上後續生物圈評估區域為測試區東部為主,由圖 4-5之示意,圖 中分別取#006、#007、#008及#010等四口水井,再以#006與#007 水井為一組、#008與#010為一組,則可利用達西定律中i=h/L(水 力梯度=水井水頭差/水井距離),推得#006與#010兩口水井之水力 梯度值。表 4-4為#006水井之水力梯度之分析資料,時間點取自 2003年2月至2004年10月共計19筆資料(2筆遺缺),且經由與#007 水井彼此間的水頭差與距離2083 m比值取平均值,所得之水力梯 度值為3.31E-3。表 4-5為#010水井之水力梯度之分析資料,時間 點取自2003年2月至2004年10月共計15筆資料(6筆遺缺),且經由 與#008水井彼此間的水頭差與距離3167 m比值取平均值,所得之 水力梯度值為1.65E-3,可做為未來處置場規劃設計之參考。

水井編號	地下水位 (地表下,m)	含水層厚度 (m)	抽水量(m ³ /day)	K值(cm/sec)
#001	9.0	41.0	65	7.0E-3
#002	6.0	50.0	144	2.3E-3
#003	19.0	81.0	121	1.1E-2
#004	18.0	48.0	108	6.2E-3
#005	15.0	43.0	58	1.3E-2
#006	3.0	29.0	27	2.6E-4
#007	1.5	31.0	29	1.0E-4
#008	0.5	21.5	107	1.5E-2
#009	22.0	26.0	79	5.2E-3
#010	6.0	30.0	92	3.2E-3
#011	2.0	9.5	7	1.2E-4
#012	1.0	24.0	14	1.2E-4

表 4-1: 测試區12口研究水井的之水文參數

K值:滲透係數

(中鼎工程股份有限公司,2003)

表 4-2: 测試區#006及#010水井鑽探地質分析

#006水井	厚度(m)	#010水井	厚度(m)
紅土	4	粉砂	6
粉土	9	砂	12
砂	1	黏土	1
花崗片麻岩	>17	粉砂	2
		砂	1
		礫石層	2
		砂	5
		粉砂	1
		砂	2
		花崗片麻岩	>4

(經濟部水利署,2004)

含水層介質	分數(水文參考影響比重)
礫石	10
粗砂	9
粗中砂	8
中砂	7
中細砂、壤質砂土	6
細砂	5
壤土、紅壤土、含黏土質細砂	4
粉砂、泥、黏土含砂	3
黏土	2
風化之砂岩	1

表 4-3:DRASTIC系統於測試區含水層之評分

(洪瑛鈞,2002)

表 4-4:#006水井水力梯度分析

井號	井號:#006		井號:#007		水力梯度
日期	水位(m)	日期	水位(m)	L(m)	i=h/L
200302	8.60	200302	16.04	2083	3.572E-3
200303	8.55	200303	16.03	2083	3.591 E-3
200304	9.15	200304	16.48	2083	3.519 E-3
200305	9.26	200305	16.76	2083	3.601 E-3
200306	9.52	200306	16.88	2083	3.533 E-3
200307	9.03	200307	16.54	2083	3.605 E-3
200308	9.85	200308	17.19	2083	3.524 E-3
200309	8.88	200309	16.69	2083	3.749 E-3
200310	7.91	200310	16.28	2083	4.018 E-3
200311	7.58	200311	15.94	2083	4.013 E-3
200312	7.75	200312	15.69	2083	3.812 E-3
200401	8.21	200401	15.39	2083	3.447 E-3
200404	7.99	200404	15.69	2083	3.697 E-3
200405	8.26	200405	15.79	2083	3.615 E-3
200406	8.08	200406	15.58	2083	3.601 E-3
200407	12.18	200407	16.07	2083	1.867 E-3
200408	12.32	200408	16.23	2083	1.877 E-3
200409	13.13	200409	17.38	2083	2.040 E-3
200410	12.21	200410	16.86	2083	2.232 E-3
平均值					3.311 E-3

註:#號#006水位h1,#號#007水位h2,h=h2-h1

(經濟部水利署,2004)

井號	井號:#008		井號:#010		水力梯度
日期	水位(m)	日期	水位(m)	L(m)	i=h/L
200302	13.72	200302	8.68	3167	1.59141 E-3
200303	13.71	200303	8.58	3167	1.61983 E-3
200304	13.86	200304	8.62	3167	1.65456 E-3
200305	13.91	200305	8.92	3167	1.57562 E-3
200306	13.88	200306	9.08	3167	1.51563 E-3
200307	13.59	200307	8.56	3167	1.58825 E-3
200308	13.87	200308	9.00	3167	1.53773 E-3
200309	13.77	200309	9.30	3167	1.41143 E-3
200404	13.45	200404	7.73	3167	1.80613 E-3
200405	13.61	200405	7.73	3167	1.85665 E-3
200406	13.59	200406	7.66	3167	1.87243 E-3
200407	13.54	200407	7.58	3167	1.88191 E-3
200408	13.55	200408	7.58	3167	1.88506 E-3
200409	13.89	200409	8.74	3167	1.62614 E-3
200410	13.64	200410	9.18	3167	1.40827 E-3
平均值					1.65540 E-3

表 4-5:#010水井水力梯度分析

(經濟部水利署,2004)



圖 4-2: 測試區虛擬含水層分區示意圖



⁽經濟部水利署,2004)



圖 4-4:測試區虛擬含水層B區之I-I'剖面圖

⁽經濟部水利署,2004)



4.2.2. 地下水演化的地球化學模式

4.2.2.1. 地下水演化歷程及影響因素

一般而言,地下水的化學性質與其來源、水循環途徑、所接觸的 地質型態以及地質環境有著密不可分的關係,因此地下水於深層地質 環境中之形成歷程為地下水演化推估之重要環節。本節將針對地下水 演化歷程及影響因素做一通盤分析。

一般地下水的來源型態大致可簡化成降水(雨水)及鹽水兩種型 態。降水部分所溶解的物質量通常小於鹽水中所含的含量,且兩者主 要溶解的物質種類主要分成氣體與離子型態兩大部分。可溶解於地下 水的氣體包括了N₂、O₂,、CO₂、Ar、H₂、H₂S以及CH₄等;而地下水 離子成分及組成則包括Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Fe³⁺、Al³⁺等陽 離子及SO₄²⁻、Cl⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻等陰離子。

因為地下水組成的特性深受地下水的來源、取樣深度、岩石種 類、氧化還原狀態等因素影響,且於地下水特性的地球化學 (geochemistry)(或簡稱地化)歷程推估中,使用動力學模式只能模擬簡 單實驗系統,基於深層地下水流速遠小於地表水流速,導致地下水、 氟體與礦物的接觸時間長,故以熱力學的平衡模式為評估基礎較為適 當。

此外,影響核種傳輸的深層地下水特性分析亦應廣括溶解、沈 澱、錯合、氧化還原、吸附及擴散等反應來加以深入探討。同時,氧 化還原狀態下溶解物種的型態變化、地下水的pH(由新鮮礦石風化作 用與有機物狀態決定,風化作用越強、pH越高)、氧化還原電位Eh(由 鐵、硫、碳之氧化還原過程與有機物氧化作用決定)、以及溶解之各 離子濃度(由地下水來源和不同新鮮礦石之間交互關係來加以決定) 等為此特性分析中四項最主要的影響因素。

由上述之推論結果,可知深層地下水之地球化學演進歷程如以降 水形成地下水為例,可分為下列幾個階段考量:

(1) 第一階段:

降水在空氣中吸收CO2與O2。

(2) 第二階段:

降水在空氣中吸收CO₂與O₂後,在土壤中吸收有機物產生的CO₂。 (3) 第三階段:

降水與生成之CO₂與岩石層中所產生的礦物種類依其溫度、氧化還原狀態、溶解物種的型態、地下水的pH、氧化還原電位Eh等因素而形成具有地區代表性的地下水特性。

鹽水演化成地下水之地球化學歷程因未於空氣中和CO2與O2接 觸,故可僅考慮第三階段之主要決定步驟。另因我國用過核子燃料計 畫現階段之虛擬場址周遭係圍繞著花崗片麻岩之處置母岩,其處置型 態屬深層處置(離地表約500公尺)。用過核子燃料廢棄物罐與材料交 互作用的研究(李瑞益等,2005)成果中曾針對芬蘭Olkiluoto研究場 址的地下水條件(Ahonen et. al, 1995),及能資所在KMBH01 區域不 同深度環境下之水質條件(林鎮國等,2003),估算銅材之腐蝕速率。 由能資所的封塞水樣分析顯示KMBH01的斷層帶應是一透水係數很 低的斷層帶,其孔隙內的地下水水質特性屬於還原性淡水,故其於氧 化還原型態可合理假設屬於還原態。未來氧化還原狀態則仍需依據實 際場址設計與其規劃深度,廣泛地進行地下水質鑽勘調查,以及其與 關鍵物種之Eh-pH相圖等地球化學領域分析加以判定與確認。

4.2.2.2.國際間使用地球化學模式評估地下水特性之經驗

由前節可知,地下水演化歷程及影響因素是相當複雜的研究議題,然在目前國際間,於用過核子燃料深層處置部分亦有諸多國家依 其地質環境及考量假設等情況下,使用不同的地球化學模式來加以推 估地下水組成與特性。

目前各國於處置場評估及應用的地球化學模式選擇上,大致可分 為兩大系統:

(1) EQ3/6地球化學模式部分:

目前美國雅卡山計畫(Yucca Mountain Project)進行處置場評估時,即是使用EQ3/6地球化學模式來評估近場的地球化學反應(McNeish et al., 2003)。

(2) PHREEQE及PHREEQC地球化學模式系列部分:

如日本(JNC,2000b、2005)、西班牙(Enresa,1997)、瑞典(SKB, 2006)等國均以PHREEQE及PHREEQC等地球化學模式系列進行 地下水化學特性評估與溶解度限值計算。而日本(JNC,2000b、 2005)、芬蘭(Andersson et al.,2007)等國則採用PHREEQC此模式 進行孔隙水化學特性及相關地球化學評估分析。

4.2.2.3. 我國地球化學模式評估技術發展及現況

我國用過核子燃料長程處置計畫自1998年起即針對各類地球化 學模式展開研究與探討。如已完成EQ3/6、MINEQL+、GeoChemPC 及PHREEQC系列等地球化學模式之探討與比較(林鎮國,1999),同時 針對上述諸多地球化學模式提出建議:如考慮反應路徑計算及熱力學 資料庫之完整性,EQ3/6地球化學模式較為適合我國用過核子燃料長 程處置計畫之需求。

另外亦運用EQ3/6地球化學模式分別求解及繪製在在不同溫度 (25°C及80°C)條件下,鐵、銅(用過核子燃料廢棄物罐的可能主要材 質); 鈾(用過核子燃料的主要成份)、鋂(Am)、鈽(Pu)、釷(Th)及錼(Np) 等核種於純水與氯離子、碳酸根離子及硫酸根離子濃度中的 Eh(pe)-pH 穩定相圖,用以探討其在不同化學條件下的穩定特性,及 決定其溶解度的模擬範圍(林鎮國等,2002、2003、2005);同時藉由 研析活性係數函數之理論並比較其適用範圍,做為選定適當活性係數 修正模式之基礎(劉振字等,2002)。此研究成果顯示分別於四種地球 化學水質模擬程式MINEQL、MINTEQA2、PHREEQC及EQ3/6進行實 例模擬並分析不同活性係數模式,包括Debye-Hückel、Davies、改良 Debye-Hückel及Pitzer等四種模式之理論分析。由於在未經修正四組 模式資料庫條件下,四種模擬之水質濃度分布有很大之差異,顯示資 料庫熱力學數據之差異,對模擬結果有很大的影響,無法求得相近之

離子活性係數。此外Pitzer公式雖可適用高濃度之鹽水,但其所需輸 入之參數眾多繁複,內建之組成數據有限,故並不適用於評估地化反 應之模擬。故研究模擬結果則建議以Davies公式最適合於模擬高低濃 度鹽水溶液之活性係數模式,並作為中高放射性核種遷移過程中地球 化學模擬之依據。目前國內已完成國際間各類泛用型熱力學資料庫之 整合(林鎮國等,1999),未來本計畫如需評估處置場址化學條件下的 工程障壁穩定特性及地下水質活性係數適用範圍等,該整合成果均可 提供各計畫執行單位做為相關功能/安全評估之基礎。

至於用過核子燃料廢棄物罐與材料交互作用的研究(黃克尤等, 2002; 李瑞益等, 2003; 李瑞益等, 2005)可分成三個分析階段: 首 先是以國際間包括瑞典、芬蘭、日本、加拿大、瑞士、比利時、德國、 西班牙及美國等國研究場址參考地下水資料,評析國際間使用不同材 質廢棄物罐之設計考量及一般要求準則。同時亦探討處置場地質條件 與地下水化學間的關係,評估各國選擇不同候選廢棄物罐、測試用水 及處置地下環境的相異處。並依據前述的測試結果評析候選材料在不 同地下水環境下之腐蝕抗性,針對目前國際間所廣泛採用的廢棄物罐 材料,包括:銅、鈦、鋯合金、不銹鋼、高合金不銹鋼、鎳基超合金 及碳鋼等,在不同處置條件下的優劣性做一初步的評比。若考量我國 用過核子燃料未來若採取深地層處置,長期而言廢棄物罐將歷經早期 數百年的氧化環境後才進入還原性的地球化學環境中。如在芬蘭早期 遊選廢棄物罐材料時,也曾將鈦合金視為優先考量的材料之一,但由 於鈦合金在長期的地下水化學條件下,有吸氫而產生氫脆化的潛在問 題,故十餘年前芬蘭即不考慮使用鈦合金做為廢棄物罐材料;而加拿 大原先廢棄物罐設計年限為500年,並採用鈦合金為廢棄物罐材料, 後來也改為考慮使用銅廢棄物罐的設計,以延長廢棄物罐的壽命。而 如採用表面鈍化而耐蝕如不銹鋼、鈦、鎳鉻基合金等金屬材料,其在 空氣接觸的金屬表面與水溶液中易形成複雜的氧化物膜,使得其具極 佳的抗蝕性。對於此類型的耐蝕材料,當鈍化膜受到局部破壞時,發 生局部腐蝕的可能性反而增加。故評比結果建議選用與我國處置概念 相似的瑞典、芬蘭的銅質廢棄物罐做為參考廢棄物罐。

第二階段則對於深層處置環境屬鹽性還原條件時,從腐蝕及成本 的角度而言,選用銅質廢棄物罐廣為世界各核能先進國家所採用之最 佳選擇方案之一。對於銅質廢棄物罐的腐蝕模式發展亦利用地球化學 分析程式EQ3/6分析在不同處置條件下之地球化學平衡條件,並據以 發展腐蝕評估模式。其研究結果顯示此階段所發展的預估模式與實驗 數據相當吻合。

第三階段係對前一階段所發展之銅質廢棄物罐的腐蝕評估,運用 腐蝕活化能的概念,將溫度的效應及溶氧的變化納入考量,以建置腐 蝕速率修正式。其結果分析顯示銅質廢棄物罐在歷經處置初期、處置 中期及處置後期等三個不同處置條件的時間區段(參閱第4.3.5.2節), 並在各區段水質條件屬低硫鹽性還原處置母岩條件下應用腐蝕速率 限值的概念,以地球化學分析程式EQ3/6評估廢棄物罐結構,其廢棄 物罐本體結構應可維持完整性達十萬年或更長的時間。

4.3. 近場環境

4.3.1. 工程障壁系統

用過核子燃料深層地質處置採用之多重障壁(multi-barriers)係指 可遲滯放射核種之瀝濾、洩漏、遷移的廢棄物固化體、容器、填充材 料、結構物以及地層等人工和天然障壁的多重組合(物管局,1996)。 多重障壁系統主要包含「工程障壁」(engineering barrier)及「天然障 壁」(natural barrier)兩大部分,前者是以人為的手法來阻滯放射性核 種之遷移,包含廢棄物體本身、廢棄物罐、緩衝材料、回填材料等工 程設施,而後者則是指地質圈與生物圈,包含處置母岩(host rock)部 分及其上面的覆蓋岩,及地表、河川、海洋與大氣之自然環境等。工 程障壁係用來彌補天然障壁的不足,使地質事件僅能有限地影響處置 系統之完整性,不至於完全喪失其安全圍阻的功能;而天然障壁則用 來保護工程障壁,維持其長期完整性(Pusch, 1994)。

目前我國所採用之多重障壁系統(圖 4-6)包含由銅外殼、鑄鐵內 裡所組成之廢棄物罐(圖 4-7),純膨潤土之緩衝材料及膨潤土、岩屑 混合之回填材料等所構成之工程障壁系統,及花崗岩質母岩之天然障 壁系統。圖 4-7中顯示兩種不同型式之廢棄物罐,BWR型式廢棄物罐 可置放12束用過核燃料,PWR型式廢棄物罐則為4束。詳細之工程障 壁系統說明如3.2.1節。



圖 4-6:多重障壁概念

(紀立民,2002)



圖 4-7:廢棄物罐剖面

(紀立民,2002)

4.3.2. 熱狀況

用過核子燃料中的放射性核種會因衰變而釋放熱能,此一熱能的 釋放,影響最終處置場相關設施之配置與設計。熱能可藉由熱傳導與 對流等機制由廢棄物罐經工程障壁而傳入地層,因而影響處置場近場 的溫度分佈與地下水流動狀況。當處置場受熱且溫度高於150℃時, 將會增加地下水對流效應及廢棄物罐的材料腐蝕速率(周齊生, 1988);而當緩衝層溫度高於100℃時,膨潤土將轉變成伊利石 (illite),此將降低其不透水性及吸附核種的功能(莊文壽等,2000)。 這些溫度的不利效應都可能增加核種由廢棄物罐外釋,及隨地下水沿 著地層裂隙移動至生物環境的機率。

我國深層地質處置概念中,處置場設施運轉的基本假設為核電廠 用過核子燃料先經過中期貯存40年後,再移至最終處置場。處置地層 環境所考慮的熱能來源有三(圖 4-8),分別為地溫梯度、地下水水流 溫度及用過核子燃料衰變熱;其中若考慮的地下水流速很緩慢的話, 則處置場的初始溫度分佈就相當於當地的地溫分佈。



圖 4-8:處置場熱傳問題所考慮之熱來源

(涂倉維等,2003)

4.3.2.1. 熱傳模式

自然界中熱流的傳遞方式包括以下三種:傳導(conduction)、對流(convection)與輻射(radiation),而目前考慮之最終處置概念,處置 地層為飽和含水層,所考慮的熱流傳遞方式主要為傳導與對流兩種形 式。於地下處置設施中,用過核子燃料衰變熱的傳遞,係由金屬包封 容器開始,先以熱傳導機制流經緩衝及回填材料層,再以熱傳導與對 流的機制傳送至周圍母岩,並繼續往外傳遞。依據能量守恆的基本原 理,在暫態的環境之下,流體通過物體單位面積的熱流量變化量 $(\bar{v}\cdot\nabla\phi)$,加上經傳導通過物體單位面積元素的熱流量變化量 $(\bar{v}\cdot\lambda\nabla\phi)$,加上物體內單位體積在單位時間內熱源所釋出之熱量 $(\bar{\varrho})$,必須等於單位體積之該物體升高溫度所吸收之總熱量。控制方 程式之向量表示式如下(4-1):

$$\rho C \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \phi \right) = -\nabla \cdot \lambda \nabla \phi + \dot{Q}$$
(4-1)

其中,

 ϕ : 溫度(K)。 \vec{v} : 速度向量(m/s)。 λ : 熱傳導係數(thermal conductivity)(W/m.K)。 : 單位體積熱產生率(volumetric heat generation rate) Q(W/m³)。 ρ : 該物體之密度(density)(kg/m³)。 C : 比熱(specific heat)(J/kg.K)。

若考慮無地下水流動之情形下,熱流傳遞主要以熱傳導之機制向 外傳遞,因此控制方程式(4-1)可以簡化如下:

SNFD2009

$$\rho C \,\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla \,\cdot \lambda \nabla \,\phi + \dot{Q} \tag{4-2}$$

如果該物體是處在穩態(steady state)的環境下,則該物體之溫度 升高或降低與時間無關,因此方程式(4-2)左邊項 $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$,而得到如下 新的熱傳導控制方程式:

$$-\nabla \cdot \lambda \nabla \phi + \dot{Q} = 0 \tag{4-3}$$

在考慮用過核子燃料深層地質處置之熱傳問題中,控制方程式 (4-1)裡的O即為用過核子燃料的衰變熱強度。

4.3.2.2. 單罐與多廢棄物罐溫度分佈評估

在我國用過核子燃料長程處置地質圈評估研究(林志森等, 2000;劉台生,2002;賴成銑等,2002;涂倉維等,2003)中,曾使 用解析解及TOUGH2與FEHM等數值模式,分析單罐與多罐廢棄物罐 之近場溫度分佈情況。

涂倉維等(2003)曾以FEHM計算三維單罐廢棄物罐之近場熱傳溫 度分布,處置孔間距為6公尺,基本假設為每個廢棄物罐裝置容量為2 噸鈾。所考慮之地表溫度為20 °C、地溫梯度3.00E-02 °C/m,於地下 500公尺深度之地溫為35 °C。圖 4-9為核一廠一號機所產生之用過核 子燃料衰變熱,單一熱源來自用過核子燃料之衰變熱,保守採用圖中 燃耗度最大值(35990 MWd /MTIHM)之衰變熱曲線;緩衝回填材料及 母岩之熱傳導係數分別為0.75 W/m.K及2.51 W/m.K,,其餘參數則可 參考表 4-6(涂倉維等,2003)。

以此條件評估單一廢棄物罐(圖 4-10),在純熱傳導機制下,近場 溫度分佈隨時間變化的情形(時間為1、3、7、10、120、200、500、 1000年),此條件下之單一廢棄物罐表面最高溫度為72.6 ℃。且因用 過核子燃料衰變熱具隨時間而衰變的性質,因此分析結果顯示:衰變
熱之影響時間約在處置兩百年後廢棄物罐中衰變熱的影響已微,與周 圍的地溫只相差8 ℃。500年後,因衰變熱的造成處置地層的溫度上 升已相當微小,所影響的幅度已很有限。



圖 4-9:核一廠一號機用過子核料之衰變熱與時間分佈曲線 Heat Generated:衰變熱 Time after discharge from reactor:自反應爐取出後時間 Max. & Min. Burnup:最大與最小燃耗度 (涂倉維等,2003)

滲透係數	(岩體) (廢料罐) (膨潤土)	К	$1 \times 10e-18 \text{ m}^2$ $1 \times 10e-22 \text{ m}^2$ $4.5 \times 10e-20 \text{ m}^2$
孔隙率	(岩體) (廢料罐) (膨潤土)	Ψ	0.01 0 0.43
熱傳導係數	(岩體) (廢料罐) (膨潤土)	κ _r	2.51 W/(m • K) 40 W/(m • K) 0.75 W/(m • K)
密度	(岩體) (廢料罐) (膨潤土)	ρr	2700 kg/m ³ 5880 kg/m ³ 2700 kg/m ³
比熱	(岩體) (廢料罐) (膨潤土)	Cr	855 J/(kg • K) 500 J/(kg • K) 1150 J/(kg • K)
地表	溫度	Ts	20°C
地温梯度			0.03°C/m
處置深度			500m

表 4-6:FEHM程式中所使用之相關參數



圖 4-10:單一廢棄物罐溫度分布

(R,Z)座標為直角座標(FEHM之原始輸出座標)(涂倉維等,2003)

此外,於2噸鈾/罐裝置容量下,涂倉維等(2003)曾採處置孔設計 間距為6公尺、處置隧道間距為 40 公尺初步模擬五罐廢棄物罐的熱 傳影響(圖 4-11),結果顯示廢棄物罐表面溫度最高為84.1 ℃,膨潤 土外側溫度為71.1 ℃,可符合現階段概念模式設計標準(廢棄物罐表 面溫度必須小於100 ℃)。



Contour of Temperature Rise(°C)–Lateral View 5cans-2ton-6m-T20 yrs

圖 4-11:5組廢棄物罐分析條件溫度分布圖 (R,Z)座標為直角座標(FEHM之原始輸出座標) (涂倉維等,2003)

同上述於模擬五罐廢棄物罐的熱傳影響,由廢棄物罐表面溫度隨 處置時間之變化情形(圖 4-12),得知用過核子燃料在處置後200年 內,熱量衰減的比率很高,但處置200年至1000年後,熱量遞減的比 率就已趨緩(圖 4-9)。另外裝置容量對處置場初期的溫度效應較大, 隨著時間增長,裝置容量對溫度的影響趨於平緩。意即時間越久,裝 置容量的多寡影響處置場的溫度的影響越小。



圖 4-12:廢棄物罐表面溫度隨處置時間關係圖

案例:廢棄物罐5罐,罐中心間距為6m,排列最中間之廢棄物罐 Time after waste emplacement:廢棄物處置後之時間 Temperature:溫度 (涂倉維等,2003)

4.3.2.3. 處置坑道區域熱傳分析

陳元章等(2005)進行處置場三維熱傳分析,評估雙處置坑道、多 罐用過核子燃料垂直置放之情況,進行模擬區域分布之網格建立並測 試模式分析結果。採用核一廠燃耗度40000 MWd/MTIHM的用過核子 燃料組件所產生之用過核燃料衰變熱(圖 4-13)之單一熱源(陳元章, 2005),依據FEHM程式所建立熱傳模式有限元素網格,以隧道間距25 m與40 m、及處置孔間距6 m至18 m的假設下,計算 6×20 個廢棄物 罐矩陣的熱傳問題。計算中考慮地表溫度為20 ℃、地溫梯度0.03 ℃ /m,於地下500公尺深度之地溫為35 ℃。



圖 4-13:核一廠用過核子燃料衰變熱曲線(燃耗度40000 MWd/MTIHM) Heat Generated:衰變熱量 Time after discharge from reactor:離開反應器之時間

(時二五於 2005)

(陳元章等,2005)

分析結果得知,處置隧道中央因為熱偶合的關係使得溫度較高, 而隧道兩端點溫度因為偶合作用影響較小則溫度為最低,處置隧道與 處置隧道間幾乎以其中線為對稱軸,溫度向兩隧道遞增,最高點於處 置隧道中心點,也就是廢棄物罐處置之位置。由處置9年後之六組處 置區的水平面溫度分布(圖 4-14),觀察得知處置區相互之間之熱耦合 現象比隧道間影響來的小,且在運轉隧道之圍岩溫度並無明顯的變 化,主要溫度改變的區域僅限在每個處置區內。



圖 4-14:六組處置區之溫度輪廓線

(X,Y)座標為直角座標(陳元章等,2005)

4.3.3. 水文地質條件

近場圍岩之水文地質包括地下水之分佈、流動狀況及其化學性質 為評估之重點(何恭算,1988),其中,地下水之分佈、流動狀況於第 2章中有詳盡之說明。而地下水的化學性質對工程障壁的耐久性 (durability)、放射性核種的留滯(retention)、遲滯(retardation)和在溶 液中的溶解、遷移,及在不同時間溫度下與圍岩作用的程度均有極重 要之角色。地下水之化學性質可由地下水的組成及溶解核種能力兩方 面說明如下:

(1) 地下水的組成

地下水與不同礦物相接觸後,由於風化、蝕變、溶解等作用而將 離子釋放出來的結果,使地下水之組成直接受到影響。其中酸鹼 值(pH值)、溫度及地下水與圍岩接觸的時間乃是控制此等作用的 主要因素。另外,在水中發生的離子交換及沈澱等作用同樣可以 影響地下水的組成。以水化學的觀點而言,許多未經擾動的地下 水中最重要的是二氧化碳-碳酸(CO₂ - H₂CO₃)系統,此一系統可 直接或間接地影響水中的酸鹼值及碳酸氫根(HCO³⁻)、鈣、鈉、 鎂、氟、亞磷酸根(HPO4⁻²)等離子的濃度;另一重要的化學系統 是二價鐵-氧(Fe⁺² - O₂),對水的氧化還原性質相當重要。因此, 當地下水流經不同介質後,由於組成及濃度上的改變,將使水中 之酸鹼值及氧化還原狀態發生變化,進而影響放射性核種在水中 的溶解與遷移。此外,由於地下水與圍岩作用的結果,可能使圍 岩溶解而增加其滲透率,此等作用對處置系統的運作或自然障壁 的完整性可能造成不良的影響。

(2) 溶解核種的能力

為避免放射性核種從廢棄物罐中瀝濾出來,進而被地下水帶至人 類可接觸環境,除需發展並選擇適當的工程障壁系統以減少地下 水與廢棄物接觸的機會外,找尋有利的水文地質環境,使得地下 水溶解核種的能力降至最低,亦是可行的辦法。地下水溶解核種 的能力,主要決定於酸鹼值、氧化還原電位(Eh值)及碳酸根

(CO₃-2)濃度等。此外,地下水中如氫氧根(OH⁻)、碳酸根(CO₃-2)、 硫酸根(SO₄-2)、磷酸根(PO₄-3)、氟離子(F⁻)及氯離子(C1⁻)等會和 放射性核種(尤其超鈾元素)作用,亦將影響核種在地下水中的溶 解度。地下水的氧化還原狀態對氧化鈾的溶解、廢棄物罐的腐 蝕、以及超鈾元素在地下水中的化性有顯著的影響。一般從二價 鐵的濃度可知未經擾動的深層地下水乃屬還原狀態。因地下水與 二氧化鈾在還原狀態下容易達到平衡,亦即可降低地下水對核種 的溶解,故還原環境有利於用過核子燃料的處置。

任何地區目前所具有的水文地質環境均將隨著地質時代的演進 而產生不同程度的改變。除了人類有意或無意的擾動甚難預測外,水 文地質的長期變化可從自然狀況下的變化及衰變熱的影響兩方面來 說明:

(1) 自然狀況改變的影響

在自然狀況下所發生的變化中,有許多事件將直接或間接的影響 場址的水文地質系統。如新裂隙形成、風化或侵蝕作用等將造成 岩層水力傳導係數的改變、地下水流出量的增減、陸地的升降均 將影響水力梯度的大小;氣候變化則影響風化、侵蝕速率、以及 地下水補注量的大小等。

(2) 衰變熱的影響

用過核子燃料產生之衰變熱將使處置場及其附近之岩層和地下 水的溫度升高,其增加幅度需視廢棄物處置的方式與數量而定。 假使原先之地溫加上衰變熱產生之溫度超過母岩所能承受的限 度,則將導致物理性破壞(如形成裂隙)、迫使含水礦物之水份釋 出、甚者可能發生相變(phase change)從而影響岩石強度或降低放 射性核種的吸附能力。溫度的升高,更可加速地下水與用過核子 燃料-母岩間之化學反應,並可驅使地下水向上流動,使得該區 的水文地質環境因而受到擾動。

4.3.4. 工程障壁系統的孔隙水化學

4.3.4.1. 水化學分析技術

深層地下水化學特性的分析檢測,須經由地化模式加以驗證,並 進一步推算含水層之水質與礦物化學物種及濃度,氧化還原電位等。 地化模式係使用離子對的質量作用、質量平衡、電中性、電子守恆、 相平衡、熱力學資料庫等化學平衡原理建立平衡方程式,再以數值分 析方法解出化學機制為水合錯合物反應、酸/鹼反應、氧化/還原反應、 溶解/沈澱反應、吸附/脫附反應、固相/液相反應、及離子交換反應等。

針對地化模式,前期研究曾就四種地球化學水質模擬程式 MINEQL、MINTEQA2、PHREEQCI及EQ3/6進行實例模擬(戴國邦等, 1996;劉振宇等,2002),如下節所述。

4.3.4.2. 地球化學反應之活性係數

當用過核子燃料處置場在地下水入侵後,其地質水文化學與放射 性物種發生化學反應時,由於地下水中溶液離子間之作用力,必須藉 由活度係數(activity coefficient)修正,以獲得其正確之化學活性,求 得化學平衡之放射性物種之生成(speciation)濃度,而離子之化學活性 為化學活性係數與莫耳濃度之乘積。一般而言,活性係數為物種影響 其所參與的平衡反應之有效程度的一種測量值,會隨著離子強度改變 而改變。在稀薄離子濃度之水溶液(<0.001 M)時,因離子強度達到最 小,其有效程度為固定值,所以其化學活性係數約為1,物種活性與 其莫耳濃度相同,而熱力學平衡常數與濃度平衡常數也相等,亦即此 時,在化學反應計算時可以濃度替代化學活性。但當水溶液濃度昇高 時,離子強度增加時,離子損失其部分有效程度,而其活性係數減小, 例如0.1 M LiBr之溶液其化學活性係數小於 1。然而在高離子強度 時,活性係數通常會增大,有時大於1,如前述LiBr濃度繼續昇高至 20 M時,則其平均之化學活性濃度則高達485,但是要對此種溶液之 行為加以解釋是很困難的。換言之,若不作適當之修正,而以濃度替 代化學活性,則其計算出之離子濃度將與實際之離子濃度產生485倍 之誤差。

劉振宇等(2002)建立地球化學反應在高/低濃度鹽水之活性係數 模式,藉由研析活性係數函數之理論,比較其適用範圍,做為選定適 當活性係數修正模式之基礎。並就常用之四組地球化學水質模擬程式 MINEQL、MINTEQA2、PHREEQCI及EQ3/6進行實例模擬,分析不同 活性係數模式之模擬結果,建議適合於中高濃度鹽水溶液模擬之活性 係數模式,作為中高放射性核種遷移地化模擬之依據。研究成果完成 影響水質模擬精度因素之討論、活性係數中Debye-Hückel、Davies、 改良Debye-Hückel及Pitzer等四種模式之理論分析、執行水質模擬之 測試基本步驟,以及四組地球化學水質模擬程式之功能說明。以假設 之水質為模擬問題範例,進行四組模擬模式,在未經修正四組模式資 料庫條件下,四種模擬之水質濃度分布有很大之差異,但在修正四組 模式資料庫使其一致並採用相同之活性係數修正模式後,則可獲得四 組相同之水活性係數及溶質濃度分布結果,顯示資料庫熱力學數據之 差異,對模擬結果有很大的影響。同時將模式應用於分析不同活性係 數模式對模擬水質濃度及活性係數之影響,並應用於模擬小坵及內灣 地下水水質之活性係數。綜合而言,Davies公式較適合模擬高低濃度 鹽水,可作為計算高低度鹽水溶液活性係數修正之模式依據。

4.3.5. 包裝容器材料的腐蝕

4.3.5.1. 銅質廢棄物罐腐蝕模式

黃克尤等(2002)及李瑞益等(2003)應用Butler-Volmer方程式,並 藉由國際間現有的銅材腐蝕實驗數據,建置了銅的腐蝕速率與溶氧、 硫離子濃度及氯與銅氯離子平衡係數間的關係式:

$$R = a_1 [O_2]^{\alpha} (1 + a_3 \left\{ \frac{[CuCl^+][Cl^-]}{[CuCl_2^-]} \right\}^{\gamma}) + a_2 [S]^{\beta}$$
(4-4)

各元素、離子的濃度大小,係利用地化分析程式EQ3/6計算在不同處置環境下或測試環境下,各離子間的平衡濃度得之,配合彙整之腐蝕實驗數據,估算式(4-4)中腐蝕速率常數 a_1 及 a_2 分別為375及270 $\mu m/yr$;加成常數 a_3 為1.96E-02;功率常數 α , β , γ 則分別為 3.00E-01,1及5.00E-01。亦即腐蝕速率可以下式表之:

$$R = 375[O_2]^{0.3}(1+0.0196K^{0.5}) + 270[S]$$
(4-5)

其中,

平衡常數
$$K$$
 : $\frac{[CuCl^+][Cl^-]}{[CuCl_2^-]}$ 。

銅材在鹽性低溶氧或還原條件下具有相當良好的耐蝕性,若在低 溫條件下即可測得任何顯著的腐蝕現象,則表示該材料將不適合於當 作使用年限需長達萬年以上的廢棄物罐材料;因此,一般腐蝕實驗需 採用加速實驗,亦即在較高的溫度進行腐蝕實驗。在李瑞益等(2003) 的分析中,主要應用了加拿大AECL在95 ℃以上的鹽滷環境及其他的 實驗數據建立評估式。唯該式係依據高溫實驗數據推估而得,在應用 至實際的處置狀況時,係屬過度的保守。因在腐蝕或氧化的過程中, 耐蝕金屬表面會形成一層氧化鈍化膜,以防制或減緩材料的進一步腐 蝕或氧化,因此隨著時間增長,腐蝕速率會減小。而當溫度升高時, 鈍化膜層的保護效能降低,發生陽極溶解的速度增加;亦即在高溫時

在上述的陳述中,可藉由以下數學模式說明:

$$h = kt^{\frac{y_n}{h}} \tag{4-6}$$

其中,

h : 腐蝕的厚度單位(μ m)。

t : 為時間單位(yr)。

n :功率常數。

k : 溫度相關之腐蝕速率常數,其代表方程式為

$$k = k_o e^{-E_{RT}}$$

$$(4-7)$$

其中,

k。:其中某一參考溫度之腐蝕速率常數。

E :反應過程的活化能(KJ/mol)。

R : 氣體常數,其值為 8.3144 J/mol。

T : 絕對溫度(K)。

(4-6)式中,功率常數n的值一般為2~4左右。對於銅材的氧化而 言,n值的大小約為2。在高溫環境下(大於400 ℃),Gusakov等(1999) 的實驗顯示,銅的氧化速率在開始為線性增加,但經過一段時間後, 則以開根號方式的關係增加,維持線性的時間會隨著溫度增加而拉 長,例如在600~900 ℃,維持線性的時間約20~80分鐘左右。Posdorfer 等(2000)的浸入實驗顯示,銅表面形成的氧化層Cu2O的成長速率與時 間的關係以指數方式減小,而氧化層CuO則以開根號方式的方式增 加。n值大於1時,氧化層的成長速率係小於線性的;此時,隨著時間 增加,腐蝕深度的成長速率會趨於緩和,氧化或鈍化膜的成長、加厚, 減緩了材料的氧化與腐蝕速率。由(4-7)式,在兩個不同溫度T₁、T₂的 條件下,腐蝕速率參數k₁、k₂的比值為:

$$\frac{k_1}{k_2} = e^{-\frac{E}{R}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}$$
(4-8)

在溫度T₁小於T₂的情況下,其k₁對k₂比值小於1;當溫度T₂固定而 T₁降低時,此比值將變的更小。當溫度下降時,腐蝕速率會依循(4-8) 式降低。

活化能Q的大小,與發生腐蝕、氧化的程序有關。Kobanenko等 (2001)評估在一具強侵蝕性溶液中(Cu/ 0.1M NaHCO₃+0.1 M KCNS),溶液溫度在20~80 ℃間,估算在熱平衡條件下,反應過程 的活化能約為55.7 kJ/mole,可做為腐蝕速率評估的參考。

4.3.5.2. 腐蝕速率評估

李瑞益等(2003)評估不同研究場址水質條件下的銅材腐蝕速率。其基本假設為:

- (1) 在廢棄物罐製作完成,經過暫存、裝載廢棄物體、包封作業、安置在處置場內等作業,及至處置場封閉前,期間約數年~數十年之間,廢棄物罐係曝露在大氣環境之下。在未置入廢棄物前,廢棄物罐溫度接近於周圍大氣環境溫度,置入廢棄物後,由於廢棄物體的衰變餘熱,會使廢棄物罐表面溫度上升而較周圍環境溫度高,其局部區域屬於熱空氣乾燥區,而其表面溫度仍低於設計溫度限值100 ℃,腐蝕型態為乾燥腐蝕。
- (2) 在處置場開挖處置期間,處置作業中所引入的工程材料、淡水、 及處置場區域的水質曝露在大氣環境,會改變處置場局部區域的 水質條件。作業過程中所引入的物質,造成處置場域環境的擾動,並達到一個新的平衡狀態,溶氧及各離子濃度的變化及平衡 條件,可應用地化模式加以模擬分析。
- (3) 在處置場封閉後,除了原先在作業過程中,環境、地下水所含或溶解的空氣外,處置場開挖區經緩衝、回填材料回填後,其所能存留空氣的空間相當有限。SKB的研究顯示(Hermansson, 1999), 環繞在廢棄物罐周圍的膨潤土緩衝材料體積約11 m³,保守假設 含氧量為30莫耳的狀況下,則即使膨潤土中黃鐵礦(Pyrite)的含 量僅占0.2%左右,則僅需其中的3%(8莫耳)左右的黃鐵礦發生 的氧化反應,即可將氧氣消耗殆盡。根據估算,氧氣在處置場封 閉間會以指數衰減的方式經由黃鐵礦氧化反應消耗掉;預估99.7%以上的氧氣在封閉120年時,其含量由原先在開放空間的20% 降低至0.05%。實際上,膨潤土緩衝材料中的黃鐵礦的含量,如

MX-80,為1%左右,大於上述的假設值,氧氣的消耗速率會較快一些,因此上述為一保守的假設。

(4)處置場封閉後,地下水會經過岩縫裂隙,逐漸滲入至近場環境並 逐漸回復到飽和狀態;由於緩衝材料具低滲水性的障壁功能,地 下水不會立即而是緩慢逐漸侵入,然後到達廢棄物罐的表面。

在腐蝕速率的評估中,配合水質及處置溫度的條件需應用適當的 評估模式以求得其所對應的腐蝕速率。例如:在處置初期,並保守地 假設廢棄物罐與大氣相通,且廢棄物罐已浸入在飽和地下水中,保守 假設廢棄物罐表面溫度處在高溫環境下,此時使用地化分析程式EQ 3/6計算地下水中溶氧及各離子的平衡濃度,然後估算銅材之腐蝕速 率。在處置場封閉後,近場環境與其周遭的處置母岩間會達到一個近 穩態化的新平衡條件,其地下水環境趨向於未受擾動前的水質條件, 廢棄物體的衰變餘熱以指數函數的形式迅速衰減,在數十年或數百年 間使得廢棄物罐表面溫度及處置場近場區域達到一最高溫,然後再逐 漸散降低並趨近於未受擾動前的溫度分佈,此期間,處置場的氧氣已 由黃鐵礦的氧化反應而消耗殆盡,當溫度降低時,則引入修正式,進 行腐蝕速率評估。

針對芬蘭Olkiluoto研究場址的地下水條件(Ahonen, 1995)能環所 在KMBH01區域不同深度環境下之水質條件(林鎮國等, 2003),估算 銅材之腐蝕速率。能環所的封塞水樣分析(表 4-7),分析結果顯示 KMBH01的斷層帶應是一透水係數很低的斷層帶,其孔隙內的地下水 水質特性屬於還原性淡水,該受壓含水層所涵蓋的岩石範圍應可作為 未來處置場母岩的考量對象。李瑞益與吳晃昭(2005)為評估銅材腐蝕 狀況,以處置期間廢棄物罐近場環境的含氧量及溫度變化來概分處置 區段,概分為(1)處置初期(2)處置中期及(3)處置後期等3個區段。

(1) 處置初期:

高溫高含氧期,此處的高溫仍低於設計限溫100 ℃以下,廢棄物 罐的腐蝕氧化由於處置場環境殘存的容氧空間有限及緩衝材料 的隔絕,減緩了腐蝕的速率,初估此一處置初期的時間寬度,參

考SKB的研究(Werme, 1992),以氧氣的消耗由原先的20%降低至 0.05%,約120年左右。

(2) 處置中期:

高溫低含氧期,雖然處置場的含氧量在100年時,已降低至0.1% 以下,但處置場環境的最高溫度發生在處置場封閉後的數百年 間,此一時期為一高溫低含氧期,期間發生在處置場封閉後百年 ~千年左右。

(3) 處置後期:

低溫還原期,此時處置場已逐漸回復至未受擾動前的水質條件。 在正常情節條件下,廢棄物罐經處置初期及處置中期後,仍維持 其完整性而未破損,其後的處置期為處置後期階段。此一階段的 時間寬度可長達數千年、萬年,甚或更長的時間。

從廢棄物罐處置所需的時間寬度而言,處置初期及處置中期兩階 段的腐蝕速率評估固然相當重要,但是由於其所需的年限需求高達千 年、萬年或更久的時間,在處置後期的處置環境下,廢棄物罐所能提 供免於因腐蝕破損的年限,是廢棄物罐長期處置或場址位置選擇首先 必須考慮的。依據KMBH01在不同深度處置環境下的水質條件,估算 銅材在該等環境下之腐蝕速率,參見表 4-8;可發現在深度353 m處 的處置環境下,其具較低的腐蝕速率,其值為1.82E-01 μm/yr。而在 深度491 m處,其所估算出的腐蝕速率反而較高;而其關鍵在於在該 兩深度附近,岩性皆為花崗片麻岩,但可能分別存在5及16組裂縫, 深度351 m處的岩體結構較為完整且含氧量較低;地化井測結果並顯 示,在深度449.4~477.1 m的深度間,有斷層帶及破碎帶,斷層中的主 要破裂面及節理方向均為50度以上的高角度裂隙,並可能為地下水主 要通道(林鎮國等, 2003)。

以芬蘭YJT-95及我國KMBH01-02的水質做參考(表 4-9),估算在 處置初期,處置中期及處置後期的銅材腐蝕速率。可發現在處置初期 及處置中期,兩不同處置環境所估算之腐蝕速率並無太大差異,處置 初期及中期的腐蝕速率分別為27.6及4.5 μm/yr 左右。但長期處置

期,則KMBH01-W2的腐蝕速率1.82E-01 μm/yr 為芬蘭YJT-95腐蝕速率7.70E-02 μm/yr 的2.3倍,其主要差異的原因則為二者的含氧量不同所致。

廢棄物罐腐蝕深度的計算,可以腐蝕速率對時間的積分而得。即

$$h = \int_{0}^{t} R(t)dt = \int_{0}^{t_{1}} R_{1}(t)dt + \int_{t_{1}}^{t_{2}} R_{2}(t)dt + \int_{t_{2}}^{t_{3}} R_{3}(t)dt$$

$$h < \sum_{i=1}^{3} R_{i}^{\max}(t_{i} - t_{i-1})$$

$$(4-10)$$

其中,

h : 腐蝕總深度(cm)。

R : 腐蝕速率(µm/yr)。

$$R_i^{\max}$$
:在第I時間區段最大之腐蝕速率(μ m/yr)。

t :時間(yr)。

下標*i*,1,2,3 :不同處置期間之分段點。

應用腐蝕速率限值的概念,各時間區段內的最大腐蝕速率小於或 等於 R_i^{max},腐蝕總厚度h恆小於各區段腐蝕速率最高值與時間長度的 乘積。在第一區段間,腐蝕速率一開始有上升的趨勢,此乃對應於廢 棄物罐在一開始時,表面溫度會上升然後再降低,並假設在此區間地 下水為高含氧狀態。分析上述三個處置階段在不同時間區間的之腐蝕 深度(表 4-10),各區段之腐蝕以線性的方式計算,忽略腐蝕速率會由 於氧化、鈍化膜的成長、加厚而降低,腐蝕速率之估算採用各區段最 初腐蝕速率,其值為各該區段之最高值,所估算出之腐蝕總厚度,應 屬足夠保守。估算在1萬年期間,芬蘭YJH-95及我國KMBH01-W2水 質條件下的腐蝕總厚度分別為0.8及0.9 cm。經十萬年時間,腐蝕總厚 度則分別增加為1.5及2.6 cm。因此,若廢棄物罐外層銅材為5 cm,則 在如芬蘭YJT-95及我國KMBH01-W2二者的水質條件下,廢棄物罐的 耐蝕性,應可維持廢棄物罐結構完整性達十萬年或更長的時間。

表	4-7:	KMBH01	封寒取	様水	啠	分析
1X	- -, .	KNIDHUI	习丑书	小水小	只	ハヤト

分析項目	單位	KMBH01-W1 ^a	KMBH01-W2 ^b	KMBH01-W3 ^c	KMBH01-W4 ^d	KMBH01-W5 ^e	分析儀器	MW
Temperature	°C	26.01	28.89	31.42	31.42	23.198	IDRONAUT	—
Conductivity	mS/cm	0.292	0.376	0.321	0.333	0.271	IDRONAUT	—
Oxygen	ppm	0.23	0.02	0.06	1.76	0.03	IDRONAUT	—
pH	pН	6.29	6.92	9.76	9.44	6.71	IDRONAUT	—
Redox	mV	151	-206	-666	-668	-44	IDRONAUT	_
HCO ₃	mg/L	37.5	67.6	46.6	54	53.2	HACH(D.T)	61.01
CO ₃ ²⁻	mg/L	_	_	4	1.6	_	HACH(D.T)	60.01
PO ₄ ³⁻ , reactive	mg/L	0.07	0.09	0.225	0.1	0.075	HACH(S.P)	94.97
PO_4^{3-} , total	mg/L	0.31	0.17	0.3	0.185	2.17	HACH(S.P)	94.97
SO ₄ ²⁻	mg/L	12.5	10.5	13	3.5	9	HACH(S.P)	96.06
S ²⁻	mg/L	0.004	0.003	0.021	0.265	0.003	HACH(S.P)	32.06
NO ₃	mg/L	1.7	0.4	0.3	0.35	1.4	HACH(S.P)	62.00
NO ₂	mg/L	0.002	0.002	0.0015	0.001	0.079	HACH(S.P)	46.01
NH ₃	mg/L	1.87	0.045	0.89	0.465	0.145	HACH(S.P)	17.03
SiO ₂	mg/L	5.049	5.666	5.753	4.625	5.988	HACH(S.P)	60.08
F	mg/L	0.92	0.83	1.95	2.62	0.52	HACH(S.P)	19.00
CI ⁻	mg/L	45.2	43.4	30.8	22.6	40.2	HACH(S.P)	35.45
Fe,Total	mg/L	0.58	0.77	0.63	0.16	0.13	ICP	55.85
Cu	mg/L	0.0067	0.0075	0.0461	0.0036	0.0044	ICP	63.54
Ca ²⁺	mg/L	19.6	26.8	14.5	5.93	16.1	ICP	40.08
Mg ²⁺	mg/L	4.1	3.73	0.53	0.27	3.17	ICP	24.31
Na ⁺	mg/L	16.2	17.2	26.8	27.4	11.6	ICP	22.99
K ⁺	mg/L	4.66	4.48	4.43	2.33	3.28	ICP	39.10
Cd	mg/L	ND<0.001	ND<0.001	0.006	0.001	ND<0.001	ICP	112.40
Cr	mg/L	0.002	0.001	0.013	ND<0.001	0.003	ICP	52.00
Mn	mg/L	0.33	0.37	0.17	0.012	0.31	ICP	54.94
Ni	mg/L	2.4	3.28	2.13	1.75	2.62	ICP	58.71
Pb	mg/L	0.008	ND<0.005	ND<0.005	0.016	0.018	ICP	207.19
Zn	mg/L	0.46	0.93	0.1	0.15	0.038	ICP	65.37
As	mg/L	ND<0.0005	ND<0.0005	0.0007	_		ICP	74.92

p.s.

a.KMBH01-1:深度195.1~198.1m;採樣時間:2003/04/11PM19:08~2003/04/11PM22:38 b.KMBH01-2:深度351.1~354.1m;採樣時間:2003/04/14AM09:30~2003/04/15AM07:00

MW: 分子量(Molecular Weight);(林鎮國等, 2003)

c.KMBH01-3:深度489.1~492.1m;採樣時間:2003/04/16PM12:55~2003/04/16PM17:32 d.KMBH01-4:深度489.1~492.1m;採樣時間:2003/04/23AM09:50~2003/04/23PM14:00 e.KMBH01-5:深度37.1~40.1m;採樣時間:2003/04/30PM21:40~2003/04/30PM22:05

表 4-8:評估KMBH01不同深度處置環境下銅材之腐蝕速率

處置位置	KMBH01-01	KMBH01-02	KMBH01-03a	KMBH01-04a	KMBH01-05
處置深度b	197 m	353 m	491 m	491 m	39 m
長期處置腐					
蝕速率	0.374	0.182	0.252	0.693	0.203
(µm/yr)					

(a) 在同樣位置,不同時間點取得的水質分析,進行腐蝕速率計算

(b) 處置深度假定為水質取樣點的中間區域

(李瑞益等,2005)

表 4-9:不同處置期間,銅材腐蝕速率評估

地下水組成 環境	芬蘭 YJT-95	KMBH01-W2
處置初期(高溫高溶氧期)	27.8 μm/yr	27.6 µm/yr
處置中期(高溫低溶氧期)	4.5 μm/yr	4.5 μm/yr
長期後置(低溫低溶氧期)	0.077 µm/yr	0.182 µm/yr

(李瑞益等,2005)

表 4-10:不同時間區間的腐蝕深度評估

地下水組成環境	芬蘭 YJT-95	KMBH01-W2
處置初期(0~120 年)	0.334 cm	0.331 cm
處置中期(120~120 年)	0.4 cm	0.4 cm
處期後期 1000年	0.077 cm	0.182 cm
處期後期 10000年	0.77 cm	1.82 cm
評估處置時間長度10000年 之腐蝕總深度	0.811 cm	0.913 cm
評估處置時間長度100000 年之腐蝕總深度	1.504 cm	2.551 cm

(李瑞益等,2005)

4.3.6. 結構力學條件

4.3.6.1. 開挖擾動帶評估

用過核子燃料進行深層地質處置之坑道與運轉隧道建造開挖 時,將因開挖的作用而對圍岩形成擾動及造成現地岩體應力釋放,使 得隧道周圍岩體特定區域內,應力及應變產生變化或形成微裂隙,並 改變水力傳導或吸附行為,影響岩體對於核種傳輸的阻滯能力。處置 場之功能安全評估,對於放射性核種可能釋出的情節及途徑均需加以 探討,以確實釐清並確認可能之因素。因此對於隧道或處置坑道開挖 過程中,對岩體造成的擾動與行為特性的瞭解有其必要性。開挖擾動 帶的形成及其行為,與其原始的地質條件有密切的關係,良好的地質 環境配合精良的鑽挖技術,將可使開挖擾動帶的範圍控制在0.1~1 m 之間(盧俊鼎,2005)。對於年代較為年輕之岩層,其岩體大地應力較 低的地質環境以鑽炸法開挖為較適切的方式,而鑽炸的過程通常將形 成較大範圍的開挖擾動帶。機械式開挖多使用於地層環境穩定之地 質,而對於岩體所造成之擾動程度亦鑽炸法為小且易於控制。

盧俊鼎(2005)以FLAC3D程式進行開挖輪進、處置孔佈設應力評 估,分析隧道口應力水平(X方向)分佈情形(圖 4-15)及隧道口之垂直 位移分佈(圖 4-16)。另由瑞典及芬蘭等機械式鑽挖後量測之岩體孔隙 的變化資料分析得知,岩體孔隙率在距離開挖面5 mm的範圍內變化 最為劇烈,達到20 mm之後的變化趨勢便已穩定,因此可初步認定距 開挖壁面20 mm處為可能的擾動範圍,而50 mm處之岩體孔隙率為原 狀岩體的孔隙率。將上述孔隙率與距離開挖面之變化的數據經過迴歸 分析後(圖 4-17),得孔隙率與岩體壁面距離之關係如式(4-11):

$$Por = -0.1097 \ln(D) + 0.6023 \tag{4-11}$$

其中,

- Por :孔隙率。
- D : 距開挖面之距離(mm)。



圖 4-15:隧道口水平(X方向)應力分佈圖

(盧俊鼎, 2005)



圖 4-16:隧道口垂直位移分佈圖

(盧俊鼎, 2005)



圖 4-17: 孔隙率與開挖面距離之迴歸關係

Distance:距開挖面距離 Porosity:孔隙率 (盧俊鼎,2005)

4.3.6.2. 緩衝材料回脹壓力之影響

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。

田永銘(2001)進行一系列室內自由回賬試驗與回賬壓力試驗,所 得結果如3.3.2.3.3節中所述。據此所得Black Hills Bentonite之最大回 賬壓力(MPa)與黏土乾單位重(kN/m³)之關係,可作為廢棄物罐強度設 計之依據。

4.3.6.3. 廢棄物罐應力分析

依據廢棄物罐之應力分析(黃克尤等,2002;李瑞益等,2003、 2005),其一為廢棄物罐在吊運作業中的承載能力分析,另一項為電 子束焊接後的殘留應力評估。採用ABAQUS程式進行分析,在吊運作 業分析方面,參考瑞典及芬蘭銅質廢棄物罐的吊運方式(Hedman, 2002;Jalonen,2004);針對參考廢棄物罐之設計,進行廢棄物罐吊運 裝置及電子束焊接焊道的承載能力評估,並探討薄壁化廢棄物罐吊凈 運特性。在殘留應力評估方面,參考ASM的作業方式(ASM,1990), 在數秒鐘內將熔接所需的能量輸入焊道區內,以達到電子束焊接焊道 的效果;然而,在焊接過程中,瞬間內在局部區域所導入的大量熱能, 會造成局部區域顯著的溫度梯度,伴隨著銅材的高熱膨脹率而導致廢 棄物罐焊道區的局部變形,其所引入的熱應力,在廢棄物罐冷卻後, 會在焊道附近區域,留存顯著的殘留應力;因此,焊接區的殘留應力 評估,包含著一系列的結構熱傳暫態分析,殘留應力為廢棄物罐焊接 區歷經焊接熱處理後所留存的應力分布情況。

廢棄物罐在吊運作業中的承載能力分析以及電子束焊接後的殘 留應力評估,此兩項應力分析結果分述如下:

(1) 廢棄物罐吊運分析

以BWR型式廢棄物罐吊運之有限元素模式(圖 4-18a)及網格配 置(圖 4-18b)進行分析,發現在廢棄物罐外殼薄化的過程中,應 力的最大值將由法蘭(圖 4-18a)處,逐漸轉移至焊道處。但是廢 棄物罐因薄壁設計而減少重量,其承吊能力由3.75 G提升至4.05 G;此處必須注意的是該分析中為一軸對稱計算,若實際廢棄物 罐的吊運中,吊鉤與法蘭不是軸對稱的接觸狀態時,對於法蘭的 受力應該要更趨於保守。

(2) 廢棄物罐焊道殘留應力評估

因為焊接過程中對於結構的不均勻加熱及冷卻而造成各部材料 不均勻的膨脹及收縮,而其過程中主要的現象變化包括溫度及變 形兩個部份。在本研究中,將先做焊接時的熱傳導計算,再以熱 傳導計算的結果作為後續焊接殘留應力分析的依據。建立軸對稱 模式(圖 4-19),劃分右上角的元素密集區為焊道區。藉由有限元 素分析殘留應力顯示,焊接過程中瞬間內在局部區域所導入的大 量熱能,會造成局部區域顯著的溫度梯度,伴隨著銅材的高熱膨 脹率而導致廢棄物罐焊道區的局部變形,其所引入的熱應力,在 廢棄物罐冷卻後,會在焊道附近區域,留存顯著的殘留應力(圖 4-20);對於結構完整性的維持是相當不利的,必須在焊接後實施 消除殘留應力的措施。



(a) BWR型式廢棄物罐吊運狀態



(b) BWR型式廢棄物罐吊運分析網格

圖 4-18:BWR型式廢棄物罐吊運的有限元素分析模式 (李瑞益等,2005)



圖 4-19:廢棄物罐焊道殘留應力的有限元素分析模式

(李瑞益等,2005)



圖 4-20:完全冷卻後的焊道殘留等效應力

(李瑞益等,2005)

4.3.7. 輻射效應

用過核子燃料之短半化期的分裂產物及長半化期的超鈾元素為 處置場主要之輻射來源。這些輻射可能直接或間接影響處置場各組成 要素的性能,間接效應如地下水的輻射分解(簡稱輻射水解)而改變所 造成之影響。

輻射對處置場之效應可分為兩個階段討論,即廢棄物罐失效前及 失效後(圖 4-21)。廢棄物罐失效前,處置場之輻射主要為加馬輻射, 至於阿伐及貝他等微粒輻射大部分被廢棄物罐阻擋;在廢棄物罐失效 後,主要之輻射來自於超鈾元素的阿伐衰變。由於阿伐粒子穿透力很 弱,其對處置場組成元素直接效應並不顯著,因此廢棄物罐失效後這 段時間以阿伐輻射水解的間接效應為主,尤其是用過核子燃料的釋出 及核種遷移。

針對輻射對處置場址之影響,提出輻射及輻射水解對用過核燃料的瀝濾及溶解、廢棄物罐的腐蝕,以及對回填物和母岩的可能影響(焦自強,1988)說明如下。



圖 4-21:輻射對處置場組成要素之影響

(焦自強,1988)

(1) 用過核子燃料

用過核子燃料在處置期間所受到的輻射損害比起反應器中運作 是微不足道的,輻射對用過核燃料的影響主要源於輻射水解改變 地下水氧化狀態,進而影響用過核子燃料之瀝濾性質。在還原態 地下水中,用過核子燃料表面30 μm處確有因輻射水解而變為 氧化態之情況,但稍遠處又立即恢復為還原態。此因在用過核子 燃料表面產生一些輻射水解氧化產物,而稍遠處又在度結合反應 所致。輻射水解產物以H2、O2及H2O2最為穩定,其中氫分子對二 氧化鈾的氧化作用不大且有可能散逸,而二氧化鈾被過氧化氫氧 化之速率為溶氧的200倍,因此過氧化氫是造成用過核子燃料在 氧化條件下溶解最可能之原因。

(2) 廢棄物罐

游離輻射對廢棄物罐之影響可分為三部分,即金屬本身、金屬表 面的氧化層及腐蝕介值。前兩種反應以粒子輻射最為重要,後者 主要考慮加馬輻射之影響。輻射水解會產生一些強氧化劑,如 H₂O₂、OH、及HO₂等。OH、及HO₂的壽命很短,除非很接近金 屬表面才可能產生明顯效應,因此穩定分子產物才是主要之氧化 劑。這些輻射水解產物不但直接參與腐蝕反應,且可能改變腐蝕 介值的氧化電位間接影響腐蝕反應。由於輻射水解產物是依累積 劑量而增加,因此若廢棄物容器受到輻射威脅時,應增加廢棄物 罐之厚度。

(3) 緩衝/回填材料

輻射可能直接破壞緩衝/回填材料的結晶構造,或經由輻射水解 改變緩衝/回填材料內水之氧化電位。前者將間接影響緩衝/回填 材料之導水度、導熱度及吸附性質,後者將改變放射性核種之化 學狀態而影響核種之吸附與遷移。由於阿伐粒子的射程很短,除 非有大量的鈽、鋂等阿伐發射體穿過回填物,否則不會造成輻射 直接損害。且因這些核種之溶解度極低,所以這種情況機率極小。

4.4. 工程障壁系統核種傳輸模擬

「多重障壁系統」包括工程障壁及天然障壁系統,工程障壁系統 定義為"人為置於處置場內之工程材料,包括廢棄物體(waste form)、廢棄物罐(canister)、緩衝材料(buffer material)、回填材料 (backfill material)、封塞材料(seals)等"。工程障壁系統為處置場多 重障壁基本設計之一環,目的在強化放射性廢棄物處置場場址天然障 壁之隔離效能,以達到遲滯核種遷移並確保環境與人類安全之最終目 的。

進行近場環境之核種外釋評估時,須考慮近場環境及工程障壁可 能之阻隔作用、釋出與傳輸過程之種種因素,這些因素主要有(1)廢 棄物本體之核種存量(2)釋出之化學機制(廢棄物型態)(3)傳輸之機制 (在緩衝材料之擴散、開挖擾動帶之傳輸)(4)工程及天然障壁之物理性 質(地下水流速/流量、孔隙率、擴散係數、裂隙等)(5)工程及天然障 壁之遲滯性質(吸附)等。

國際上許多國家在進行近場安全評估(safety assessment),大都以 概念化之徑向傳輸模式為主要分析方法,如瑞士(NAGRA, 1994)、瑞 典(SKI, 1996)、德國(Luhrmann et al., 2000)與日本(JNC, 2000a)等。因 此,核能研究所於2000至2004年建立核種自工程障壁徑向釋出之評估 技術(Zhou, 2000;張福麟等, 2002;林佳蓉等, 2003),此技術包括 概念模式、數學模式、與電腦程式等之建立,以及確定式(deterministic) 與機率式(probabilistic)分析技術(朱信忠等, 2002;朱信忠等, 2003)、 案例分析等(朱信忠, 2002、2003;盧俊鼎, 2005)。

為進一步探討並評估外釋概念模式對核種於近場環境外釋的影響,核能研究所又於2005至2007年發展廢棄物罐垂直置放之軸向/徑向/坑道多途徑釋出(Zhou, 2004;朱信忠, 2006),及廢棄物罐水平置放替代方案多途徑核種釋出之概念模式與安全分析技術(Zhou, 2005),建立了考慮近場廢棄物罐垂直與水平置放之軸徑向核種外釋之定率式評估分析能力。在考慮核種經由軸徑向外釋概念模型下,以

評估近場的核種外釋,能更貼近核種於真實情況之工程障壁與近場母 岩環境下的釋出行為。

本章節所介紹之近場評估模式包括RT-NV、ART-NV及ART-NH 模式。此三種模式之差異性說明如下:

- RT-NV模式(Radial Transport Model for Radionuclide Near-Field Release with Canister Vertical Emplacement):廢棄物罐為垂直置 放,考慮核種傳輸方向為廢棄物罐徑向方向,所採用之評估程式 為INPAG-N(Zhou, 2000; 2002);
- (2) ART-NV模式(Axial and Radial Transport Model for Radionuclide Near-Field Release with Canister Vertical Emplacement)廢棄物 罐為垂直處置,考慮核種傳輸方向為廢棄物罐軸向與徑向方向, 所採用之評估程式為INPAG-NV2(Zhou, 2004);
- (3) ART-NH模式(Axial and Radial Transport Model for Radionuclide Near-Field Release with Canister Horizontal Emplacement)廢棄物 罐為水平處置,考慮核種傳輸方向為廢棄物罐軸向與徑向方向, 所採用之評估程式為INPAG-NH(Zhou et al., 2005)。

4.4.1. 介紹

工程障壁系統核種外釋模擬技術,係用過核子燃料長程處置潛在 母岩調查與評估階段,發展初步功能/安全評估模式之近場安全分析 技術研發項目,主要為發展工程障壁系統之核種外釋評估模式,藉由 模式之發展與模擬,進而建立工程障壁系統功能/安全評估之技術。 同時透過與源項特性評估模式、地質圈核種傳輸評估模式、生物圈輻 射劑量評估模式、機率式評估技術及不確定性與參數敏感度分析 (uncertainty and sensitivity analysis)技術等模式之串連與整合,達到 建立國內放射性廢棄物深層地質處置之初期的全系統安全評估能 力,並進行實際應用之分析與評估。
4.4.1.1. 主要研究目的

此項研究之目的在於發展近場工程障壁系統及其周圍環境之核 種外釋評估模式與技術,藉由模式之建立、程式之開發與假設案例之 測試,並透過國外案例進行驗證比較,達到建立可符合國內初期處置 設施概念之評估能力。此外,也同時彙整、歸納、分析國內外對於工 程障壁核種外釋評估時所需之參數及數值,以供進行不確定性與參數 敏感度分析(uncertainty and sensitivity analysis)之用。藉由上述研究 完成工程障壁系統核種外釋評估程式及評估技術的建立,以因應未來 我國用過核子燃料最終處置之實務工作所需。

4.4.1.2. 研究方法與內容

廢棄物罐垂直置放方式之徑向與軸/徑向核種外釋概念模式,係 根據90年度計畫(紀立民等,2002;洪錦雄等,2002)所建立之處置容 器垂直置放概念,此概念參考瑞典KBS-3概念(SKBF/KBS,1983;SKB, 1999);而廢棄物罐水平置放方式之軸/徑向核種外釋概念模式則依據 91年計畫(楊尊忠等,2003)所建立之處置容器水平置放概念。針對用 過核子燃料基質(matrix)之溶解、核種在廢棄物罐、緩衝材料、開挖 擾動帶、處置隧道及近場母岩等之可能外釋情節,建構工程障壁系統 與近場環境核種外釋評估之概念模式與數學模式,並據此開發近場環 境核種外釋之分析電腦程式—INPAG-N、INPAG-NV2及INPAG-NH, 做為階段性分析工程障壁系統核種外釋分析之主要工具。

近場核種外釋評估模式建構之主要流程分述如下:

- 國外以結晶岩為母岩之工程障壁系統組成、外釋情節及評估參數
 等資訊之蒐集彙整及探討。
- (2) 根據工程障壁系統概念模式與可能之外釋情節,發展各個組成屏 壁之核種外釋數學模式,並建構電腦程式及除錯(debug)。
- (3)評估程式之驗證工作,包括以解析解進行驗證,並與瑞典SKI之 SITE-94(1996)、日本JNC之H12(2000a)及芬蘭TILA-99(1999)等報 告的計算案例進行平行計算比對驗證,以確認評估程式之可靠 性。

近場核種外釋評估技術建立與發展之主要流程分述如下:

- (1) 蒐集、分析、歸納國內外有關工程障壁系統核種外釋評估時所需 之特性參數及其數值範圍。
- (2) 以近場核種外釋之徑向與軸/徑向評估程式,進行基本外釋情節 下核種從工程障壁釋出率的模擬計算與測試技術。
- (3) 以近場核種徑向外釋之全系統安全評估模式架構為基礎,搭配參 數取樣技術與電腦程式及參數敏感度分析技術與電腦程式,據以 建立不確定性與參數敏感度分析技術與能力,以評估近場各參數 對核種外釋之影響程度與範圍,提供有效評估方法作為評估結果 可靠度與參數重要性評選的參考依據。

4.4.2. 傳輸模式

模擬工程障壁系統核種外釋之RT-NV、ART-NV及ART-NH模式 的對應評估程式,係針對我國處置場設計的概念,由核能研究所與美 國科技監測公司(Monitor Scientific LLC,簡稱MSCI)共同發展而成; 分別有RT-NV模式之INPAG-N程式與ART-NV模式之INPAG-NV2程 式、及ART-NH模式之INPAG-NH程式。以下各節將就RT-NV、ART-NV 及ART-NH模式之概念模型、數學模式、及外釋情節等進行說明。

4.4.2.1. 外釋情節及概念模型

RT-NV模式之評估假設條件如下:

- 處置場封閉後,廢棄物罐在某一特定年限後因完全腐蝕掉而喪失 了圍阻功能;
- (2) 廢棄物罐喪失圍阻功能後,地下水開始接觸到廢棄物本體;
- (3)廢棄物本體表面、晶格邊界(grain boundary)、及間隙(gap)邊緣等 之放射性核種,因溶解之機制及溶解度限制作用而溶解於地下水 中;
- (4)廢棄物本體基質內之放射性核種,隨廢棄物本體基質之溶解而逐 漸溶解於地下水中;

- (5) 溶解於地下水的放射性核種因擴散(diffusion)機制而離開廢棄物本體,並往外遷移;
- (6) 溶解於地下水中之核種在工程障壁內以擴散機制而往外遷移;
- (7) 核種在工程障壁內之遷移主要機制為分子擴散原理,並受限於衰退、滋生、吸附、擴散、及溶解度限制等自然物理現象之作用;
- (8) 以單一個廢棄物罐為評估基礎;
- (9) 由於廢棄物罐之設計壽命相當長,處置場溫度分佈已恢復至自然 的地溫梯度狀態,故不考慮廢棄物本體溫度對核種遷移的影響。

INPAG-N程式即依據上述之假設,模擬放射性核種自廢棄物本體 釋出,經由工程障壁系統各單元與開挖擾動帶(excavation disturbed zone,簡稱 EDZ)後,到達近場母岩之核種外釋流率。本工程障壁系 統(圖 4-22所示)及核種外釋途徑假設核種的傳輸為徑向傳輸,一旦廢 棄物罐腐蝕毀壞,則整個廢棄物罐將消失不見並充滿水而成飽和狀 態,廢棄物本體中之核種隨即溶解於水中,成為核種後續傳輸之初始 源頭。由於緩衝材料之水力傳導係數極微小,所以核種在緩衝材料中 的傳輸機制以擴散機制為主。最後,核種遷移至開挖擾動帶(EDZ)後 隨著地下水的流動,由開挖擾動帶以平流(advection)、延散 (dispersion)、及擴散機制繼續遷移至近場周圍地質圈。圖 4-22顯示 核種在工程障壁中之遷移完全以核種分子擴散為動力,而在開挖擾動 帶及周圍地質圈之遷移則以地下水平流為主、地下水流動延散及核種





圖 4-22:核種在近場環境釋出機制示意圖

廢棄物罐垂直與水平置放之ART-NV與ART-NH模式假設核種係 由破壞之廢棄物罐內的廢棄物本體釋出,經由緩衝材料、開挖擾動 帶、到達周圍之近場母岩及處置隧道(水平置放另增加考慮運轉隧道 效應)。垂直置放之處置概念(圖 4-23)考慮核種外釋模式所考慮之核 種外釋途徑(圖 4-24),核種外釋途徑包括處置坑軸/徑向釋出;水平 置放之處置概念則如圖 4-25所示,其核種外釋模式所考慮到核種外 釋途徑如圖 4-26所示。圖 4-23及圖 4-25水平置放之概念模型除考 量核種沿著處置隧道軸/徑向釋出,並考慮有無主導水裂隙通過處置 隧道之情況(圖 4-26)。圖 4-23及圖 4-25大略顯示本處置概念包含工 程障壁之廢棄物本體(裝填於廢棄物罐內)、廢棄物罐、廢棄物罐周圍 之緩衝材、及處置隧道之回填材等,圖中並同時標示出各單元之概念 設計尺寸。圖 4-24及圖 4-26則大略顯示核種由內向外遷移之途徑, 除了有處置坑徑向之遷移途徑外,亦包含了處置坑及處置隧道之軸向 遷移途徑。圖 4-26也顯示了兩種情況;其中一種情況是斷層未通過 處置隧道(上圖),此時核種主要遷移方向為前往運轉隧道;另一種情 況則是一條斷層通過處置隧道(下圖),此時核種主要遷移方向為前往 斷層。

根據近場環境之工程障壁系統概念,據以發展垂直處置與水平處 置之軸/徑向多途徑核種釋出模式。近場ART-NV及ART-NH概念模式 之外釋情節除與前述RT-NV模式相同外,並考慮「核種經由開挖擾動 帶,向外遷移至近場處置母岩及處置隧道(水平置放另增加考慮運轉 隧道效應)等途徑,再釋出至附近地質圈」之情節,包含其中各外釋 途徑所相對需考慮之核種吸附、活度的衰退與滋生、化學元素的溶解 限度、及分子擴散等效應。



圖 4-23: 垂直置放處置概念

(洪錦雄等,2002)



#:區塊編號

圖 4-24: 垂直置放方式之核種外釋路徑



圖 4-25:水平置放處置概念

(許秀真等,2003)



圖 4-26:水平置放方式之核種外釋途徑

4.4.2.2. 概念模式與數學模式

4.4.2.2.1. 概念模式

廢棄物罐垂直與水平置放之核種近場徑向與軸/徑向之評估程式 係以區塊模式(compartment model)來設計(Romero et al., 1991),核種 徑向傳輸之INPAG-N程式主要包括廢棄物本體、廢棄物罐、緩衝材料 及開挖擾動帶四個區塊;核種軸/徑向傳輸之INPAG-NV2及 INPAG-NH程式除考慮上述四個主要區塊外,並增加母岩裂隙及基質 區塊、處置隧道及運轉隧道區塊,其中各區塊之作用與意義分述如下: (1)廢棄物本體區塊:代表固態用過核子燃料,在本區塊中考慮二種

不同廢棄物特性種類:

- (a) 瞬間釋出類:存在於間隙及晶格邊界上之放射性核種,在與
 地下水接觸時,其所含之放射性核種即刻溶解於地下水中;
- (b) 基質劣化溶解類:固結在一起的廢棄物本體,其所含之放射 性核種將隨著此本體之劣化溶解而溶解於地下水中。
- (2)廢棄物罐區塊:本區塊具有一定設計年限之圍阻功能,當年限一 到本區塊即喪失阻滯功能,且是第一個承受到放射性核種的區 塊。核種在此區塊中將受到化學元素溶解限度之支配,核種並藉 由擴散行為遷移到周圍之緩衝材料中。
- (3) 緩衝材料區塊:介於廢棄物罐與開挖擾動帶間的人工材料區,核 種在緩衝材料區塊之主要機制為化學元素的溶解限度、吸附作 用、及分子擴散效應。
- (4) 開挖擾動帶:係鑽孔附近的母岩因鑽掘所產生高裂隙部分,考量 其水力傳導能力較高,核種傳輸除了分子擴散作用外並考慮地下 水平流及延散作用。INPAG-N程式模擬的最終結果即地下水流經 開挖擾動帶時,將核種帶出至周圍母岩之釋出流率。
- (5)母岩裂隙及基質區塊:部份母岩會與處置隧道接讓,故此部份母 岩亦納入近場環境之模擬系統。母岩各區分為裂隙及基質二個區 塊,因母岩基質水力傳導能力低,核種在基質部份僅以擴散作用

傳輸,而在裂隙部份之傳輸則增加平流與延散作用,另外,母岩裂隙與母岩基質間的之質量交付作用作用亦納入考量。

(6)處置隧道與運轉隧道區塊:軸/徑向評估程式INPAG-NV2與 INPAG-NH將處置隧道與運轉隧道視為零濃度邊界,模擬當核種 到達此零濃度邊界時,被較大量之地下水所稀釋。INPAG-NV2 及INPAG-NH之評估程式分析結果為由廢棄物本體遷移至零濃 度邊界的核種外釋流率,包括核種經由處置隧道、運轉隧道及處 置母岩的核種外釋流率,並為遠場環境核種傳輸模擬的輸入資 料。

4.4.2.2.2. 數學模式

為評估上述概念模式中工程障壁系統之功能,評估程式以「質量 平衡方程式」做為數學理論之依據,數學模式主要包含質量平衡方程 式通式、廢棄物本體之質量變化方程式、區塊內總濃度計算方程式及 區塊間之質量交換方程式(Zhou, 2000; 2002; 2004; Zhou et al., 2005),各數學式分述如下:

(1) 質量平衡方程式通式:

$$V_{n} \frac{dA_{n,i}}{dt} = -\lambda_{i} V_{n} A_{n,i} + \lambda_{i-1} V_{n} A_{n,i-1} + \sum T_{x \to n} (C_{x,i} - C_{n,i}) - \sum T_{n \to y} (C_{n,i} - C_{y,i}) + \sum Q_{x \to n} C_{x,i} - \sum Q_{n \to y} C_{n,i}$$
(4-12)

其中,

- V_n : 第 n_h 區塊之體積(m³);
- $A_{n,i}$: i_{th} 核種在 n_{th} 區塊中之總濃度(mol/m³);

 λ_i : i_{th} 核種之衰變常數(1/yr);

 $T_{x \to n}$: x_{th} 與 n_{th} 區塊之間的質量交換係數(m³/yr);

 $Q_{x \to n}$: x_{th} 與 n_{th} 區塊之間的地下水流率(m³/yr);

 $C_{n,i}$: i_{th} 核種在 n_{th} 區塊中之水溶性濃度(mol/m³)。

(2) 廢棄物本體(用過核子燃料)區塊之質量變化方程式:

$$\frac{dM_{i}}{dt} = -\lambda_{i}M_{i} + \lambda_{i-1}M_{i-1} - \delta(t_{fail})M_{i}f_{g} - \frac{M_{i}f_{m}}{t_{alter}}h(t - t_{fail}),$$

$$0 \le t \le t_{fail} + t_{alter}$$
(4-13)

其中,

- $$\begin{split} M_{i}(t) &: t時間時_{i_{h}} 核種的量(mol);\\ \lambda_{i} &: i_{h} 核種之衰變常數(1/yr);\\ \delta(t) &: 狄雷克脈衝函數(Dirac function);\\ t_{fail} &: 廢棄物罐潰壞時間(yr);\\ f_{g} &: 廢棄物本體核種存量中間隙(gap)及晶格(grain)之比例,又稱瞬釋分率(instant release fractions);\\ f_{m} &: 廢棄物本體核種存量中之基質材料比例, f_{g}+f_{g}=1;\\ h(x) &: 赫維塞德步階函數(Heaviside step function), 當 x \ge 0,\\ 則 h(x)=1; 當 x < 0, 則 h(x)=0; \end{split}$$
- t_{alter}:廢棄物本體之基質材料完全變質且溶解時間(yr)。

(4-13)式中右邊前二項為放射性的衰變與滋生之質量變化,後二 項為廢棄物本體中之瞬釋部分與基質部分因溶解現象所產生的 質量損失。初始條件為某一參考時間點之核種存量。

(3)區塊內總濃度 在廢棄物罐、緩衝材料、開挖擾動帶及母岩之各區塊,濃度可用 下式來表示:

$$A_{i,j} = \phi_j C_{i,j} + (1 - \phi_j) \rho_j S_{i,j} + P_{i,j}$$
(4-14)

其中,

 $A_{i,i}$: i_{th} 核種在第 j_{th} 個區塊中之總濃度(mol/m³);

- $C_{i,i}$: i_{th} 核種在第 j_{th} 個區塊中之水溶性濃度(mol/m³);
- $S_{i,j}$:第 j_{th} 個區塊中,固體物質所吸附 i_{th} 核種之重量莫爾濃度(mol/kg);
- : 第 j_{th}個區塊中,每單位體積所沉澱 i_{th}核種之莫爾數 P_{i,j} (mol/m³);
- ϕ_i :第 j_h 個區塊中之孔隙率;
- ρ_i : 第 j_h 個區塊中固體物質之顆粒密度(solid density)。

假設化學元素 e(為 i_{th} 核種之化學元素)在第 j_{th} 個區塊中之吸附為線性平衡,亦即單位重量之固體介質所吸附化學元素 e之濃度, 與存在於液體中濃度之比值為一常數,稱為分配係數(distribution coefficient) $K_{d_{e,j}}$ (m³/kg),故吸附項以 $C_{i,j}$ 、 $K_{d_{e,j}}$ 、與 $S_{i,j}$ 來表示, 如(4-15)式:

$$S_{i,j} = K_{d_{e,j}} C_{i,j}$$
(4-15)

而化學元素e在第 j_{th} 個區塊中之容量因子 $\alpha_{e,j}$ (capacity factor),亦即可存在於液相與固相間之容量和,若利用分配係數來定義,則可表示如(4-16)式

$$\alpha_{e,j} = \phi + (1 - \phi)\rho_j K_{d_{e,j}}$$
(4-16)

所以(4-14)式可用分配係數與容量因子表示如(4-17)式

$$A_{i,j} = \alpha_{e,j} C_{i,j} + P_{i,j}$$
(4-17)

在(4-17)式中所說明的,即當元素e沒有化學沉澱發生時,第 j_{th}個區塊中之總濃度為水溶性濃度與容量因子之乘積。因此,溶解於水中之濃度可示如下式:

$$C_{i,j} = \begin{cases} \frac{A_{i,j}}{\alpha_{e,j}} & \text{if } \frac{\sum_{l} A_{l,j}}{\alpha_{e,j}} < S_{e}, & \text{or } P_{i,j} = 0; \quad (a) \\ \frac{A_{i,j}}{\sum_{l} A_{l,j}} S_{e} & \text{if } \frac{\sum_{l} A_{l,j}}{\alpha_{e}} \ge S_{e}, & \text{or } P_{i,j} \ge 0. \quad (b) \end{cases}$$
(4-18)

$$\sum_{l} A_{l,j}$$
: 第 j_{th} 個區塊中所有化學元素e之同位素 l 濃度的總和
(mol/m³);

 S_e :化學元素e之溶解度(mol/m³)。

(4-18)式中之情況(a)為化學元素e之所有同位素l濃度的總和小於 該元素的溶解度限值,所以沒有核種沉澱;情況(b)為所有同位素 l濃度的總和超過該元素的溶解度限值,即有沉澱現象,而可溶 解於水中元素之同位素l,則根據總濃度之比例來分配溶解限 度,以控制元素e之同位素溶解於水中不會超過溶解限度。而超 過之量則沉澱下來,當水溶性濃度小於溶解限度時,此沉澱部分 將會再溶解至再達溶解限度為止。

(4)區塊間之質量傳輸 核種在相鄰介質間之擴散傳輸,可用質量傳輸係數來說明。核種 從區塊m到區塊n之擴散率,可表示如(4-19)式

$$\dot{m}_{diff,m\to n} = T_{m\to n} \left(C_m - C_n \right) \tag{4-19}$$

其中,

$$C_m$$
 :區塊m之水溶液濃度(mol/m³);

 C_n :區塊n之水溶液濃度(mol/m³);

$$T_{m \to n}$$
:區塊m與區塊n間之質量傳輸係數(m³/yr)。

質量傳輸係數是由介質間之交界面Amn,與該二介質擴散度 (diffusivity)之調和平均數相乘而得,擴散度之定義為:擴散長度 與有效擴散係數之比值,所以,質量傳輸係數可由(4-20)式獲得:

$$T_{m \to n} = A_{mn} \frac{1}{\frac{d_m}{D_m} + \frac{d_n}{D_n}}$$
(4-20)

其中,

D :有效擴散係數(m²/yr);

d :相鄰區塊之交界面至區塊中心的距離(m)。

4.4.2.3. 評估程式之參數定義

進行近場環境之核種外釋率評估時,多以假設情節中之核種外釋 能力做為評估重點,參數均集中在工程障壁對核種傳輸與遲滯作用方 面的水與化學性質。以下針對這些參數之定義及在模式應用時應注意 下列各點

(1) 核種存量(inventory)

為存在於廢棄物本體中之核種,相對於某一時間點之存量,程式以「每個廢棄物罐存有核種之莫耳數(moles/canister)」來表示,為評估程式模擬時之核種初始值。

(2) 密度(density)

定義為「單位體積中所含介質之質量」,常用單位為(kg/m3)。 在工程障壁系統模式中,將包含廢棄物罐、緩衝材料、開挖擾動 帶及近場母岩等介質之密度,為計算核種在各介質中吸附量之主 要參數。材料密度之定義常見為顆粒密度(solid density, *P_s*)及乾 密度(dry density, ρ_d),評估程式所採用之密度為不包含孔隙之顆 粒密度。

(3) 孔隙率(porosity)

定義為「材料中孔隙體積與整體體積之比值」,無單位因次,通 常以百分比表示並介於0與100%之間。在工程障壁系統模式計算 中,需包含廢棄物罐、緩衝材料、開挖擾動帶及近場母岩等介質 之孔隙率。

(4) 擴散係數(diffusion coefficient)

擴散行為係為溶質在空氣或水之介質中由高濃度向低濃度區域 之移轉行為,根據Fick's Law可得知,通量密度(Flux density)與 單位距離之溶質濃度間的關係即為擴散係數D,常用單位為 (m2/s)。在工程障壁系統模式中,將包含廢棄物罐、緩衝材料、 開挖擾動帶及母岩等介質之擴散係數,為計算核種在各介質中擴 散之能力。雖然各核種對各介質均有不同之擴散係數,然而國外 進行評估之案例中,除非有足夠之資料,否則各核種可視為對同 一介質均有相同之擴散係數。

- (5)分配係數(distribution coefficient) 定義為線性等溫模式(N=1)在平衡狀態下之吸附係數,故為某微量成分之固相與液相濃度之比;用於廢棄物處置時,則為某特定核種釋出時,在岩石或土壤等固相與地下水等液相中之濃度比,此比例代表著核種在單位質量介質中被吸附之質量,常用單位為(m³/kg),不同核種在不同介質中有不同之分配係數。介質對核種之分配係數值較大時,代表核種在該介質較容易被吸附,亦即對核種有較好之阻滯作用。在工程障壁系統模式中,需包含廢棄物罐、緩衝材料、開挖擾動帶及母岩等固相介質之分配係數。
- (6) 地下水流速(groundwater flow velocity) 定義為單位時間內地下水流流經兩地之距離,故地下水流速為地 下水在單位時間內流經某含水層之距離。國內之處置概念採用結

晶岩作為處置母岩,由於緻密之結晶岩孔隙率相當低因而地下水流速相當緩慢,故地下水流速之單位採用(m/yr)。

(7) 溶解度限值(solubility limit)

溶解度之定義為物質於某固定溫度時,飽和溶液中之濃度,常用 單位為(mol/l)或(mol/m³)。在工程障壁系統評估時,主要是計算 各化學元素(核種)與地下水作用所產生量的變化。在近場環境 中,地下水可能以氧化或與還原狀態存在,因此將呈現不同之溶 解度值。故評估時,需注意其為氧化或還原狀態下之溶解度限值。

(8) 工程障壁系統之幾何尺寸(geometric size) 所需之資料包含廢棄物罐之內徑與外徑及高度、緩衝材料之內徑 與外徑、開挖擾動帶之寬度、外圍母岩裂隙之內寬(aperture)與裂 隙間距(spacing)等。

4.4.2.4. 程式驗證與國際案例比較

以一環狀圓桂體(annular cylinder)之溶質傳輸模擬廢棄物罐周圍 緩衝材料之核種遷移行為,將所得之解析解與INPAG-N評估程式計算 結果進行比較。另外,並以INPAG-N程式來模擬計算日本H12與瑞典 SITE-94報告之核種在近場外釋的案例,及運用INPAG-NV2程式模擬 計算芬蘭TILA-99報告之近場評估案例,進行雙方電腦程式評估結果 的驗證比較,以探討本文所提出之評估程式的應用範疇與能力,做為 程式實際應用之驗證測試。

4.4.2.4.1. 解析解比較

為驗證INPAG-N、INPAG-NV2、及INPAG-NH評估程式在工程障 壁區塊中之計算結果之正確性,乃利用以下環狀圓柱體之溶質傳輸解 析解(analytic solution)作為驗證基礎。假設此環狀圓柱體之內徑為a, 外徑為b,則溶質在此環狀圓柱體內之傳輸方程式如(4-21)式:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r}, \quad t > 0, \quad a < r < b$$
(4-21)

其中,

C :溶質之水溶性濃度(mol/m³);
D :溶質在環狀體中之擴散係數(m²/yr);
r :距環狀中心之距離(m);
t :時間(yr)。

假設初始與邊界條件為

$$C(r,0) = 0$$

$$C(a,t) = C_0$$

$$C(b,t) = 0$$
(4-22)

(4-22)式中CO為初始濃度值, Carslaw等(1959)解出正規化的水溶 性濃度(normalized concentration)之解析解:

$$\frac{C(r,t)}{C_0} = \frac{\ln(b/r)}{\ln(b/a)} + \pi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-D\alpha_n^2 t} \frac{J_0(b\alpha_n) J_0(a\alpha_n)}{J_0^2(a\alpha_n) - J_0^2(b\alpha_n)} \times [Y_0(b\alpha_n) J_0(r\alpha_n) - J_0(b\alpha_n) Y_0(r\alpha_n)]$$
(4-23)

其中, J_0 和 Y_0 為第零階(zeroth order)的Bessel函數的第一類與第二 類(first and second kind), α_n 為(4-24)式方程式的根

$$J_{0}(\alpha a)Y_{0}(\alpha b) - J_{0}(\alpha b)Y_{0}(\alpha a) = 0$$
(4-24)

由於工程障壁系統中核種在緩衝材料間之遷移行為與上述環狀 圓 柱 體 內 之 質 量 傳 輸 相 似 , 為 驗 證 INPAG-N、 INPAG-NV2 及 INPAG-NH 程 式 所 得 之 數 值 解 是 否 合 理 , 將 所 得 之 解 析 解 與 INPAG-N、INPAG-NV2及 INPAG-NH評估程式之計算結果進行比較。 本模擬計算假設為不會衰變的穩定化學元素及非常低的溶解度,該元 素以穩定釋出率自廢棄物罐釋出,並進入緩衝材料之環狀區塊,以模 擬 C(a,t)=C0 之邊界條件;而在緩衝材料外側,則有大量地下水存 在而可完全稀釋所釋出之濃度,以模擬 C(b,t)=0 之邊界條件。根據 此假設,模擬計算該元素在環狀圓柱體之緩衝材料之傳輸情形。

圖 4-27為(4-23)式解析解計算所得之1年、10年和100年濃度與距離之分布曲線,及由INPAG-N程式計算相對應之1年、10年和100年的結果曲線。圖 4-28及圖 4-29為解析解計算所得之0.1年、1年、10年和100年濃度與距離之分布曲線,及由INPAG-NV2及INPAG-NH程式計算相對應之0.1年、1年、10年和100年的結果曲線。由圖 4-27~圖 4-29可知, INPAG-N、INPAG-NV2、及INPAG-NH評估程式計算所得 之濃度分佈曲線與解析解所得者相當一致。因此可以初步驗證 INPAG-N、INPAG-NV2及INPAG-NH程式對純擴散性質量傳輸分析有 可接受之合理性與正確性。



圖 4-27: INPAG-N程式與解析解於環狀柱體內濃度分佈 Radius of Buffer Block:緩衝材料塊半徑 Normalized Concentration:正規化濃度 Analytic solution:解析解



圖 4-28:INPAG-NV2程式與解析解於環狀柱體內濃度分佈 Radius of Buffer Block:緩衝材料塊半徑 Normalized Concentration:正規化濃度 Analytic solution:解析解



圖 4-29: INPAG-NH程式與解析解於環狀柱體內濃度分佈 Radius of Buffer Block:緩衝材料塊半徑 Normalized Concentration:正規化濃度 Analytic solution:解析解

4.4.2.4.2. 日本H12評估案例之模擬比較

為驗證INPAG-N程式之正確性,除與解析解之結果比對外,並利 用INPAG-N程式模擬計算國外已有之評估案例,以探討INPAG-N程式 之實際應用的能力。以日本JNC之H12功能評估報告(JNC, 2000a&b) 及瑞典核能管制委員會(SKI)之SITE-94安全評估報告(SKI, 1996)為模 擬對象,比較INPAG-N程式計算與此二報告中在近場環境之核種外釋 量的差異。MESHNOTE為日本高放射性廢料處置計畫作為 H12 近場 功能評估的程式,具有與INPAG-N類似的系統概念模式。此程式以有 限差分之方法,來求解放射性核種穿越環狀之緩衝材料區域的圓柱擴 散傳輸程式。核種在緩衝材料區域內的擴散傳輸受到線性的吸附作 用,而且每個元素亦受到本身溶解度的限制。

MESHNOTE與INPAG-N程式的相似性如下:

- (1) 圓柱狀的廢棄物罐為緩衝材料所包圍。
- (2) 緩衝材料區塊是以擴散方式傳輸。
- (3) 考慮核種的衰減與滋生。
- (4) 考慮吸附作用與溶解度限。
- (5) 核種隨著地下水經由開挖擾動帶外釋至遠場。

MESHNOTE程式計算核種在工程障壁系統外釋的基本概念模式 中,有以下的假設:

- (1) 廢棄物罐在處置1000年後即潰壞而完全喪失阻隔之功能;
- (2) 當廢棄物罐潰壞後,內部之廢棄物本體立即與地下水接觸,在玻璃體中之放射性核種隨著玻璃體之溶解而釋出,在計算時則忽略玻璃體之表面積因溶解而產生的變化。
- (3)核種的溶液濃度將受到元素之溶解度的限制,亦即玻璃體內之同 位素核種將依各自濃度之權重而承擔溶解度值,但不考慮地下水 中穩定同位素之濃度,同時假設核種之溶解與沉澱的平衡速度, 相較於該核種之傳輸速度為快。

- (4) 核種穿越緩衝材料是藉由擴散作用來傳輸,並藉著線性及可逆的 吸附在緩衝材料而遲滯。
- (5)從緩衝材料釋出之核種,則立即且完全地與開挖擾動帶之地下水充分混合,不考慮核種在開挖擾動帶(EDZ)中之吸附作用,故核種之總質量流因此流入貫穿EDZ之裂隙中,而進入遠場(或地質圈)之傳輸路徑。

綜合以上所述,核種在H12概念中之傳輸,與INPAG-N程式最大 差異在廢棄物本體溶解部份,其餘的物理、化學現象幾乎完全相似。 INPAG-N程式可設定基質間隙的釋出量為零,及廢棄物本體基質之溶 解率,即可模擬核種從基質之釋出量。

比較H12報告核種自工程障壁之外釋分析(圖 4-30),INPAG-N對 應模擬之計算結果(圖 4-31),發現兩者在處置封閉後之5.0E+05年 間,Cs-135佔了絕大部分的釋出量,二程式之釋出結果均顯示最大釋 出量大於1.0E+05 Bq/yr。INPAG-N程式如同H12之結果,約在7.0E+04 年後,因玻璃固化體中Cs-135的完全溶解而迅速減少其釋出率;在 5.0E+05年後,則由Zr-93之子核種Nb-93M佔較大釋出量,最大釋出率 皆約在6.0E+04 Bq/yr。在1.0E+07年時,INPAG-N與H12之外釋結果顯 示相對較大外釋率除了Nb-93m外(已有衰減趨勢),還有Np-237、 Pb-210、及U-233均大於1.0E+01 Bq/yr。綜合上述,利用INPAG-N程 式來模擬H12中核種從工程障壁系統釋出率之結果,說明INPAG-N程 式可以充分反應出核種在緩衝材料及開挖擾動帶傳輸之情形,可知 INPAG-N程式模擬結果與H12報告中之結果,有相當的一致性。



圖 4-30:H12報告核種於工程障壁之釋出率曲線

Time after disposal:處置後時間 Release rate:外釋率 (轉繪自JNC, 2000a)



圖 4-31: INPAG-N程式模擬H12案例之近場核種釋出率

Time:時間 Release rate:外釋率 (張福麟等,2002)

4.4.2.4.3. SKI之SITE-94評估案例之模擬比較

瑞典SKI評估之處置概念係以KBS-3型為評估之概念模式,與 INPAG-N程式之概念模式相同,廢棄物本體種類亦同為用過核燃料, 工程障壁系統之形式亦相當類似。SITE-94報告(SKI, 1996)係以 CALIBRE程式做為近場之評估工具,為用於計算核種在緩衝材料區與 部份近場岩體傳輸之圓柱座標有限差分程式。CALIBRE與INPAG-N 二程式相同處歸納如下:

- 放射性核種隨著廢棄物本體基質的溶解,及基質間隙的瞬間溶
 解,形成的核種遷移的源項。
- (2) 考慮核種的衰變與滋生。
- (3) 考慮核種元素的吸附作用及溶解度限制。
- (4) 在緩衝材料區域中的傳輸方式以擴散為主,近場岩體內亦以擴散傳輸方式為主。

但CALIBRE與INPAG-N二程式亦有以下三點差異性

- (1) CALIBRE程式沒有考慮開挖擾動帶,而是模擬近場岩體,包括母 岩基質與存在裂隙二部分,考慮的傳輸行為在近場岩體裂隙中有 擴散、平流,在母岩基質則為岩體擴散來計算核種之遷移。
- (2) CALIBRE程式中,核種經由擴散方式從緩衝材料外釋至近場岩體中,而且以任意大的距離作為零濃度的有效外側邊界。在 INPAG-N中,是以隨著時間變化的距離作為零濃度的有效外側邊界。
- (3) CALIBRE為考慮軸/徑向有限差分程式,而INPAG-N是僅考慮徑 向之區塊模式程式。

雖然二程式間存在上述差異,但由於有類似的處置概念及廢棄物 本體型式,仍是值得用來作比較的。以下則說明INPAG-N程式模擬計 算時,對不同現象的處理方式:模擬分裂產物計算時,SITE-94報告 中係假設結構體部分的存量在1000年內發生溶解,而在INPAG-N程式

設定方面是把結構體的存量當作是間隙存量(gap inventory),意即在 與水接觸後便會產生瞬間溶解。SITE-94報告對於護套、晶格邊界及 用過核燃料基質是使用不同的溶解時間,分別為1.0E+04年、2.7E+04 年、1.5E+04年。但在INPAG-N的計算上,晶格邊界與用過核燃料基 質是假設在1.5E+04年內發生溶解。

圖 4-32為SITE-94核種近場釋出的計算結果,而INPAG-N相對應 模擬計算結果如圖 4-33所示。比較圖 4-32與圖 4-22之結果可知, 從開始釋出後持續到處置後1.0E+05年間,相對較大釋出率的核種分 別以C-14、Cs-135、I-129、Cl-36為主;而在處置1.0E+05年後,則以 Ra-226及Th-230二核種有較大的釋出率。由核種總釋出率曲線可看出 此二曲線的趨勢有相當的吻合程度;從處置後1000年到1.0E+06年之 間,因Tc-99、Pd-107、Pa-231、Np-237等核種在廢棄物罐區域以及 緩衝材料區域內,達到溶解度限而成飽和溶液,故核種維持穩定的釋 出率。

由上述模擬結果顯示對於所有核種的最大釋出率值的比率都在 2.4倍以下,且兩套不同程式在最大釋出率的時間的計算結果而言, 均有良好的一致性。



圖 4-32:SITE-94之近場核種釋出率

Time:時間 Flux:外釋通量 (SKI, 1996)



圖 4-33:INPAG-N程式模擬SITE-94之近場核種釋出率

Time:時間 Release rate:外釋率 (張福麟等,2002)

4.4.2.4.4. 芬蘭TILA-99評估案例之模擬比較

為驗證本文所提出評估程式的合理性與適用性,除以解析解進行 驗證比較外,本節亦比較INPAG-NV2程式與芬蘭TILA-99REPCOM程 式(Vieno et al., 1999)之近場評估案例,計算兩者在近場環境傳輸的核 種外釋量,進行評估結果的驗證分析比較,以探討INPAG-NV2評估 程式之應用範疇與能力。

芬蘭處置概念係採用瑞典KBS-3型之概念模式,與我國之處置概 念模式相同,廢棄物本體之種類亦同為用過核子燃料,工程障壁系統 採用之配置亦相當雷同。而近場評估程式同為考慮軸/徑向傳輸之區 塊模式,故利用INPAG-NV2評估程式來模擬芬蘭近場評估案例,具 有相當程度的合適性。芬蘭近場評估案例採用REPCOM程式作為評估 工具,此程式係利用區塊模式所建構。INPAG-NV2評估程式與 REPCOM二程式間之相同處如下

- (1) 同考慮核種軸/徑向傳輸之區塊模式。
- (2) 廢棄物本體之外釋機制包含基質溶解及基質間隙的瞬間溶解,形成核種遷移的源項。
- (3) 考慮核種衰變與滋生。
- (4) 考慮核種之吸附作用及溶解度限制。
- (5) 緩衝材料僅考慮擴散傳輸機制。
- (6) 處置隧道與處置母岩皆考慮擴散與平流傳輸機制。

但此兩評估程式亦具有下述之相異處

- REPCOM程式無考慮開挖擾動帶之影響,INPAG-NV2評估程式則 將開挖擾動帶區塊納入評估程式。
- (2) REPCOM程式各區塊之區塊數皆為可變動,故側向與頂部緩衝材料區塊數可不同; INPAG-NV2評估程式僅緩衝材料層為可變動區塊數且軸、徑向區塊數相同。

(3) REPCOM程式對於近場環境軸向與徑向方向之水流流量,可分別 給定一數值加以模擬; INPAG-NV2評估程式則以分流比例因子 給定軸、徑向之流量比例。

雖二程式存在上述三點差異,但可藉由下列處理方法完成近似的 模擬評估比較,說明如下

- INPAG-NV2評估程式之開挖擾動帶區塊厚度近似於零,以模擬 無開挖擾動帶存在之情況。
- (2)朱信忠等(2002)研究指出,區塊數多寡僅影響高吸附性核種的初期釋出量,對所有核種的峰值與峰後釋出量皆不影響。由於安全評估著重於核種最大外釋率與最大外釋率出現時間,故區塊數差異性不影響主要評估結果。
- (3)芬蘭近場環境之模擬評估,係分別給定各區塊之水流流量,故分別依據各區塊之面積、流量,求取軸向及徑向流量比例,以給定 分流比例因子。

進行案例模擬比較時,係以TILA-99(Vieno et al., 1999)報告中所 考慮的基本情節(RS-disappearing canister),所採用參數作為計算模擬 所輸入參數。大部份參數取自於TILA-99報告中之數據。由於兩個評 估程式仍存在些許差異,所以模擬計算時部分參數則以假設值或該報 告使用資料推估而得。圖 4-34與圖 4-36所示者分別為TILA-99報告 中REPCOM程式模擬近場分裂活化產物與超鈾系衰變核種之外釋曲 線;而圖 4-35與圖 4-37所示者則分別為INPAG-NV2評估程式所計算 之近場分裂活化產物與超鈾系衰變核種之外釋曲線。比較圖 4-34至 圖 4-37中之核種總釋出率曲線,可看出兩套不同評估程式之模擬曲 線趨勢相當近似。由廢棄物本體源項開始釋出後至處置時間1.0E+06 年中,處置前期(1.0E+04~1.0E+05年間)之近場模擬評估較大釋出率的 核種分別為C-14、CI-36、Sn-126;而在處置後期(1.0E+05~1.0E+06 年間),則以Ra-226核種具有較大的釋出率。處置期間 (1.0E+04~1.0E+06年),因Tc-99、Pd-107、I-129、Pa-231、Np-237等

核種在近場環境內達到其溶解度限值而成飽和溶液,故這些核種在釋 出一段時間後維持穩定的核種外釋率。而核種Th-229、Th-230及 Pa-231之釋出率在1.0E+06年時仍為持續成長階段,但其外釋率較最 大外釋率核種C-14已小2~3個數量級。在與國際案例驗證比較中,雖 兩套評估程式在架構上存在著些許差異,但對於兩者計算結果之核種 外釋曲線趨勢、最大釋出率與最大釋出率的發生時間而言,均有頗為 相近的評估結果,可初步驗證本文所提出之評估程式的適用性與合理 性。



圖 4-34: TILA-99報告之REPCOM程式近場核種釋出率(分裂/活化產物) Time:時間 Release rate:外釋率 (Vieno et al., 1999)



圖 4-35: INPAG-NV2評估程式模擬TILA-99之近場核種釋出率(分裂/活化產物) Time:時間

Release rate:外釋率



圖 4-36: TILA-99報告之REPCOM程式近場核種釋出率(超鈾系衰變鏈核種) Time:時間 Release rate:外釋率 (Vieno et al., 1999)


圖 4-37: INPAG-NV2評估程式模擬TILA-99之近場核種釋出率(超鈾系衰變鏈核

種)

Time:時間 Release rate:外釋率

4.4.3. 分析的假設

如4.4.2.2節所述,INPAG-N程式係以廢棄物罐內之用廢棄物本體 中心為工程障壁系統之計算起始邊界條件,當廢棄物罐腐蝕後即隨著 基質溶解而以固定的溶解速率釋出,故INPAG-N評估程式之初始條件 係「用過核子燃料在處置時之核種存量(mol/canister)」,即源項之初 始存量,其他介質均為零核種濃度值。程式的另一終點之邊界條件, 係假設在開挖擾動帶外側與裂隙母岩接觸之交界面,並假設此交界面 在核種未釋出前為零濃度值。INPAG-NV2與INPAG-NH之初始邊界條 件與INPAG-N程式皆為「用過核子燃料在處置時之核種存量」,而其 他介質為零核種濃度值,另一邊界則為處置隧道和零濃度邊界區塊所 指定之零濃度邊界。

4.4.3.1. 核種外釋行為之假設與模擬

用過核子燃料以多重障壁概念置放在深層處置場後,最保守的觀 念係假設此處置場設施不受到人為之破壞,而且地球化學與物理特性 均與現階段之狀態相同,由廢棄物罐的腐蝕而形成核種外釋的初始驅 動力,進而在多重障壁及地質圈中遷移與傳輸,最後進入生物圈中。 本文即基於此假設情節來評估核種在工程障壁系統外釋之行為。根據 此假設情節, INPAG-N評估計算時則有以下的假設

- (1)廢棄物罐在處置十萬年後即潰壞而完全消失並喪失阻隔之功 能,(依據4.3.5.2節所述,於測試區之處置母岩條件下,廢棄物 罐的耐蝕性,可維持結構完整性達十萬年以上,故本文保守假設 廢棄物罐壽命為十萬年),該區域則形成一充滿地下水之環狀區 域。
- (2)廢棄物罐潰壞後,內部之廢棄物本體立即與地下水接觸,用過核 子燃料基質中之放射性核種隨著基質之溶解而釋出,在計算時則 假設基質之溶解率為定值而不隨表面積而產生變化。
- (3) 核種的水溶液濃度將受到化學元素之溶解度的限制,亦即用過核子燃料基質內同位素核種將依各自濃度之權重而分配溶解度

4-104

值,但不考慮地下水中穩定同位素之濃度,同時假設核種之溶解 與沉澱的平衡速度,相較於該核種之傳輸速度為快。

- (4) 核種穿越緩衝材料是藉由擴散作用來傳輸,並藉著在緩衝材料中 線性及可逆的吸附作用而達到遲滯的效果。
- (5)從緩衝材料釋出之核種,則立即且完全地與開挖擾動帶之地下水充分混合,核種之總質量流因此流入貫穿EDZ之裂隙中,最後進入地質圈(或遠場)之傳輸路徑。

INPAG-NV2與INPAG-NH程式之評估計算假設,除與上述 INPAG-N程式之前四項假設相同外,並有以下假設

- (1)從緩衝材料釋出之核種,經由軸、徑向方向進入開挖擾動帶,隨 著地下水流進入母岩,在母岩中考慮吸附作用之阻滯效果與溶解 度限制之機制。
- (2) 最後經由處置母岩中之擴散與平流機制,傳輸進入處置隧道與運轉隧道等之零濃度邊界。近場外釋總質量和為傳輸至零濃度邊界之總質量和,最後進入地質圈(或遠場)之傳輸路徑。

4.4.4. 分析的輸入資料

4.4.3節所採用之評估程式參數數據係為進行解析解與國際案例 驗證比較,故參數數據來源為自行假設或完全源引自國外報告。為進 行我國之RT-NV、ART-NV與ART-NH模式的案例評估、分析與計算, 本節將介紹評估程式所採用之參數資料及數據,包括進行核種質量傳 輸計算所需與近場或工程障壁有關的資料,以提供4.6節進行案例分 析所需。分析的輸入資料茲分別說明如下

- (1) 核種特性:含核種名稱、半化期、子核種、初始存量、間隙與晶 粒間之存量、基質蝕變時間(alteration time)、評估核種之時間 點、及核種化學元素的溶解度等。
- (2)廢棄物罐特性:含腐蝕時間、腐蝕物之密度、分配係數及孔隙率, 以及核種在腐蝕物中之擴散係數等(若廢棄物罐因腐蝕而完全消 失,則腐蝕物之密度為0kg/m³,而腐蝕物之孔隙率為1)。

- (3) 緩衝材料特性:含緩衝材料之密度、擴散係數與分配係數、孔隙 率等。
- (4) 開挖擾動帶特性:含開挖擾動帶之密度、擴散係數與分配係數、 孔隙率等。
- (5)母岩特性:含母岩之密度、擴散係數與分配係數、孔隙率、母岩 裂隙之內寬、及裂隙與裂隙之間距、地下水平均流速等
- (6)幾何特性:含廢棄物罐之內徑與外徑、緩衝材料之外徑、開挖擾動帶之外徑、廢棄物罐之長度、處置隧道與運轉隧道設計尺寸等。
- (7) 與數值計算有關之設定:計算允許誤差、最大計算(輸出)時間、計算之時間間距等。

以下三節將分別依核種種類與存量、工程障壁系統特性資料及工 程障壁系統之地化資料進行說明。

4.4.4.1. 核種種類及存量

本節所模擬之核種種類及存量(inventory),係運用ORIGEN-II源 項分析電腦程式及用過燃料特性資料庫(Characteristics of Data Base System, CDBS),針對台電核一、二廠用過核燃料進行計算分析後, 所獲得之用過核子燃料特性資料(劉凌振,2002)。以沸水式反應爐 (BWR)之用過核子燃料在經過40,000 MWd/MTIHM的燃耗度後,自爐 心取出而歷經40年的水池冷卻後計算所得之各核種活度,經換算為每 個廢棄物罐核種之數量做為評估之核種之種類與存量數值(表 4-11),包含分裂與活化產物,及4N、4N+1、4N+2、4N+3之超鈾元素 核種等。在所考慮之核種中,分裂與活化產物之核種在計算時並不考 慮衰變所產生之子核種,而超鈾系衰變系系列之核種,則依各自之衰 變鏈所產生之子核種進行核種之衰變與滋生之計算。超鈾元素之核種 衰變鏈整理如下

(1) 4N: Pu-240 \rightarrow U-236 \rightarrow Th-232

(2) 4N+1: Cm-245 \rightarrow Pu-241 \rightarrow Am-241 \rightarrow Np237 \rightarrow U-233 \rightarrow Th-229

- (3) 4N+2: Cm-246 \rightarrow Pu-242 \rightarrow Pu-238 \rightarrow U-238 \rightarrow U-234 \rightarrow Th-230 \rightarrow Ra-226
- (4) 4N+3: $Am-243 \rightarrow Pu-239 \rightarrow U-235 \rightarrow Pa-231$

以各核種每個廢棄物罐中之數量為計算的初始存量 (表 4-11),其中IRF(Instant release fractions)值為瞬釋分率,即用過核子 燃料之核種在與地下水接觸時即瞬間溶解釋出之量與該核種總量之 比值,此因子存在於分裂與活化產物之核種中,超鈾元素之核種並無 瞬間釋出之現象,故不考慮此因子。

RNs ($\&$ HL ka@)Ac (Bq) ($?=$ L< H)	衣 +11,前并人工女孩性例如行里衣(孩 一 一廠)					
(放射性核種)(汚皮)(半化期)(廢棄物罐数目)(每種其商数)(瞬釋分率)C-141.18E+155.73E+0324861.47E+025Cl-369.11E+123.01E+0524862.31E+036Ni-632.23E+171.00E+0224861.08E+020.5*Ni-632.23E+171.00E+0224861.69E+013Rb-871.97E+104.75E+1024863.27E+015*Sr-902.24E+192.88E+0124867.41E+015*Nb-944.85E+132.03E+0424863.18E-040.5*Nb-944.85E+132.03E+0424861.58E+030.2Pd-1071.18E+146.50E+0624867.58E+010.2Pd-1071.18E+146.50E+0624862.18E-010.2Sn-1267.69E+141.00E+0524861.81E+010.2Sn-1267.69E+141.00E+0524861.11E+013Cs-1373.46E+193.01E+0124862.31E+013Sm-1473.15E+091.06E+1124866.91E+021Ra-2264.07E+091.60E+0324867.87E+10-Th-2304.11E+117.54E+0424861.29E+07-Th-2311.00E+1124862.08E+06U-2331.00E+111.59E+0524863.84E+02-U-2341.20E+152.46E+0524863.84E+02-U-2357.48E+127.04E+0824866.81E+	RNs	Ac (Bq)	t _{1/2} (yr)	N _{canister}	mol/canister	IRF(%)
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	(放射性核種)	(活度)	(半化期)	(廢棄物罐數目)	(每罐莫爾數)	(瞬釋分率)
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	C-14	1.18E+15	5.73E+03	2486	1.47E-02	5
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Cl-36	9.11E+12	3.01E+05	2486	2.31E-03	6
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Ni-59	1.86E+15	7.60E+04	2486	7.26E-02	0.5*
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Ni-63	2.23E+17	1.00E+02	2486	1.08E-02	0.5*
Rb-87 $1.97E+10$ $4.75E+10$ 2486 $3.27E-01$ 5^* Sr-90 $2.24E+19$ $2.88E+01$ 2486 $2.18E-01$ 0.25 Zr-93 $1.48E+15$ $1.53E+06$ 2486 $7.41E-01$ 5^* Nb-94 $4.85E+13$ $2.03E+04$ 2486 $3.18E-04$ 0.5^* Mo-93 $1.21E+15$ $4.00E+03$ 2486 $1.58E-03$ 0.5^* Tc-99 $1.17E+16$ $2.11E+05$ 2486 $7.58E-01$ 0.2 Pd-107 $1.18E+14$ $6.50E+06$ 2486 $2.18E-01$ 0.2 Sn-126 $7.69E+14$ $1.00E+05$ 2486 $1.85E-02$ 2 I-129 $3.01E+13$ $1.57E+07$ 2486 $1.11E-01$ 3 Cs-135 $5.03E+14$ $2.30E+06$ 2486 $2.31E-01$ 3 Sm-147 $3.15E+09$ $1.06E+11$ 2486 $2.31E-01$ 3 Sm-147 $3.15E+09$ $1.60E+03$ 2486 $8.75E+10$ $-$ Th-229 $8.08E+08$ $7.34E+03$ 2486 $7.87E+10$ $-$ Th-230 $4.11E+11$ $7.54E+04$ 2486 $4.09E-06$ $-$ Th-232 $5.18E+05$ $1.41E+10$ 2486 $9.52E-07$ $-$ Pa-231 $3.00E+10$ $3.28E+04$ 2486 $3.84E-02$ $-$ U-233 $1.00E+11$ $1.59E+05$ 2486 $3.84E-02$ $-$ U-234 $1.20E+15$ $2.46E+05$ 2486 $6.81E-01$ $-$ U-235 $7.48E+12$ $7.04E+08$ 2486 $4.30E+0$	Se-79	3.88E+14	1.13E+06	2486	1.69E-01	3
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Rb-87	1.97E+10	4.75E+10	2486	3.27E-01	5*
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Sr-90	2.24E+19	2.88E+01	2486	2.18E-01	0.25
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Zr-93	1.48E+15	1.53E+06	2486	7.41E-01	5*
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Nb-94	4.85E+13	2.03E+04	2486	3.18E-04	0.5*
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Mo-93	1.21E+15	4.00E+03	2486	1.58E-03	0.5*
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Tc-99	1.17E+16	2.11E+05	2486	7.58E-01	0.2
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Pd-107	1.18E+14	6.50E+06	2486	2.18E-01	0.2
I-129 $3.01E+13$ $1.57E+07$ 2486 $1.11E-01$ 3 Cs-135 $5.03E+14$ $2.30E+06$ 2486 $2.60E-01$ 3 Cs-137 $3.46E+19$ $3.01E+01$ 2486 $2.31E-01$ 3 Sm-147 $3.15E+09$ $1.06E+11$ 2486 $6.91E-02$ 1 Ra-226 $4.07E+09$ $1.60E+03$ 2486 $8.75E-10$ $-$ Th-229 $8.08E+08$ $7.34E+03$ 2486 $8.75E-10$ $-$ Th-230 $4.11E+11$ $7.54E+04$ 2486 $4.09E-06$ $-$ Th-232 $5.18E+05$ $1.41E+10$ 2486 $9.52E-07$ $-$ Pa-231 $3.00E+10$ $3.28E+04$ 2486 $1.29E-07$ $-$ U-233 $1.00E+11$ $1.59E+05$ 2486 $2.08E-06$ $-$ U-234 $1.20E+15$ $2.46E+05$ 2486 $3.84E-02$ $-$ U-235 $7.48E+12$ $7.04E+08$ 2486 $6.81E-01$ $-$ U-236 $2.14E+14$ $2.34E+07$ 2486 $6.46E-01$ $-$ U-238 $1.87E+14$ $4.47E+09$ 2486 $1.07E+02$ $-$ Pu-239 $2.58E+17$ $2.41E+04$ 2486 $1.27E-01$ $-$ Pu-239 $2.58E+17$ $2.41E+04$ 2486 $7.91E-01$ $-$ Pu-240 $4.87E+17$ $6.56E+03$ 2486 $4.05E-01$ $-$ Pu-241 $1.26E+19$ $1.44E+01$ 2486 $2.27E-02$ $-$ Pu-241 $1.26E+19$ $1.44E+01$ 2486 $2.27E-02$ $-$	Sn-126	7.69E+14	1.00E+05	2486	1.85E-02	2
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	I-129	3.01E+13	1.57E+07	2486	1.11E-01	3
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	<u>Cs-135</u>	5.03E+14	2.30E+06	2486	2.60E-01	3
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	<u>Cs-137</u>	3.46E+19	3.01E+01	2486	2.31E-01	3
Ra-226 $4.07E+09$ $1.60E+03$ 2486 $8.75E-10$ $-$ Th-229 $8.08E+08$ $7.34E+03$ 2486 $7.87E-10$ $-$ Th-230 $4.11E+11$ $7.54E+04$ 2486 $4.09E-06$ $-$ Th-232 $5.18E+05$ $1.41E+10$ 2486 $9.52E-07$ $-$ Pa-231 $3.00E+10$ $3.28E+04$ 2486 $1.29E-07$ $-$ U-233 $1.00E+11$ $1.59E+05$ 2486 $2.08E-06$ $-$ U-234 $1.20E+15$ $2.46E+05$ 2486 $3.84E-02$ $-$ U-235 $7.48E+12$ $7.04E+08$ 2486 $6.81E-01$ $-$ U-236 $2.14E+14$ $2.34E+07$ 2486 $6.46E-01$ $-$ U-238 $1.87E+14$ $4.47E+09$ 2486 $1.07E+02$ $-$ Np-237 $4.63E+14$ $2.14E+06$ 2486 $1.27E-01$ $-$ Pu-239 $2.58E+17$ $2.41E+04$ 2486 $7.91E-01$ $-$ Pu-240 $4.87E+17$ $6.56E+03$ 2486 $4.05E-01$ $-$ Pu-241 $1.26E+19$ $1.44E+01$ 2486 $2.27E-02$ $-$ Pu-242 $1.83E+15$ $3.73E+05$ 2486 $8.57E-02$ $-$ Am-241 $3.00E+18$ $4.32E+02$ 2486 $1.64E-01$ $-$ Am-243 $3.09E+16$ $7.37E+03$ 2486 $2.85E-02$ $-$ Cm-245 $8.88E+14$ $8.50E+03$ 2486 $9.37E-04$ $-$	Sm-147	3.15E+09	1.06E+11	2486	6.91E-02	1
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Ra-226	4.07E+09	1.60E+03	2486	8.75E-10	—
$\begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	Th-229	8.08E+08	7.34E+03	2486	7.87E-10	—
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Th-230	4.11E+11	7.54E+04	2486	4.09E-06	
Pa-231 $3.00E+10$ $3.28E+04$ 2486 $1.29E-07$ $-$ U-233 $1.00E+11$ $1.59E+05$ 2486 $2.08E-06$ $-$ U-234 $1.20E+15$ $2.46E+05$ 2486 $3.84E-02$ $-$ U-235 $7.48E+12$ $7.04E+08$ 2486 $6.81E-01$ $-$ U-236 $2.14E+14$ $2.34E+07$ 2486 $6.46E-01$ $-$ U-238 $1.87E+14$ $4.47E+09$ 2486 $1.07E+02$ $-$ Np-237 $4.63E+14$ $2.14E+06$ 2486 $1.27E-01$ $-$ Pu-238 $3.84E+18$ $8.77E+01$ 2486 $4.30E-02$ $-$ Pu-239 $2.58E+17$ $2.41E+04$ 2486 $7.91E-01$ $-$ Pu-240 $4.87E+17$ $6.56E+03$ 2486 $4.05E-01$ $-$ Pu-241 $1.26E+19$ $1.44E+01$ 2486 $2.27E-02$ $-$ Pu-242 $1.83E+15$ $3.73E+05$ 2486 $8.57E-02$ $-$ Am-241 $3.00E+18$ $4.32E+02$ 2486 $1.64E-01$ $-$ Am-243 $3.09E+16$ $7.37E+03$ 2486 $2.85E-02$ $-$ Cm-245 $8.88E+14$ $8.50E+03$ 2486 $9.37E-04$ $-$ Cm-246 $2.79E+14$ $4.73E+03$ 2486 $1.63E-04$ $-$	Th-232	5.18E+05	1.41E+10	2486	9.52E-07	—
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Pa-231	3.00E+10	3.28E+04	2486	1.29E-07	—
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	U-233	1.00E+11	1.59E+05	2486	2.08E-06	—
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	U-234	1.20E+15	2.46E+05	2486	3.84E-02	—
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	U-235	7.48E+12	7.04E+08	2486	6.81E-01	_
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	U-236	2.14E+14	2.34E+07	2486	6.46E-01	—
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	U-238	1.87E+14	4.47E+09	2486	1.07E+02	—
Pu-238 $3.84E+18$ $8.77E+01$ 2486 $4.30E-02$ $-$ Pu-239 $2.58E+17$ $2.41E+04$ 2486 $7.91E-01$ $-$ Pu-240 $4.87E+17$ $6.56E+03$ 2486 $4.05E-01$ $-$ Pu-241 $1.26E+19$ $1.44E+01$ 2486 $2.27E-02$ $-$ Pu-242 $1.83E+15$ $3.73E+05$ 2486 $8.57E-02$ $-$ Am-241 $3.00E+18$ $4.32E+02$ 2486 $1.64E-01$ $-$ Am-243 $3.09E+16$ $7.37E+03$ 2486 $2.85E-02$ $-$ Cm-245 $8.88E+14$ $8.50E+03$ 2486 $9.37E-04$ $-$ Cm-246 $2.79E+14$ $4.73E+03$ 2486 $1.63E-04$ $-$	Np-237	4.63E+14	2.14E+06	2486	1.27E-01	—
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Pu-238	3.84E+18	8.77E+01	2486	4.30E-02	—
Pu-240 $4.87E+17$ $6.56E+03$ 2486 $4.05E-01$ $-$ Pu-241 $1.26E+19$ $1.44E+01$ 2486 $2.27E-02$ $-$ Pu-242 $1.83E+15$ $3.73E+05$ 2486 $8.57E-02$ $-$ Am-241 $3.00E+18$ $4.32E+02$ 2486 $1.64E-01$ $-$ Am-243 $3.09E+16$ $7.37E+03$ 2486 $2.85E-02$ $-$ Cm-245 $8.88E+14$ $8.50E+03$ 2486 $9.37E-04$ $-$ Cm-246 $2.79E+14$ $4.73E+03$ 2486 $1.63E-04$ $-$	Pu-239	2.58E+17	2.41E+04	2486	7.91E-01	_
Pu-241 1.26E+19 1.44E+01 2486 2.27E-02 Pu-242 1.83E+15 3.73E+05 2486 8.57E-02 Am-241 3.00E+18 4.32E+02 2486 1.64E-01 Am-243 3.09E+16 7.37E+03 2486 2.85E-02 Cm-245 8.88E+14 8.50E+03 2486 9.37E-04 Cm-246 2.79E+14 4.73E+03 2486 1.63E.04	Pu-240	4.87E+17	6.56E+03	2486	4.05E-01	—
Pu-242 1.83E+15 3.73E+05 2486 8.57E-02 Am-241 3.00E+18 4.32E+02 2486 1.64E-01 Am-243 3.09E+16 7.37E+03 2486 2.85E-02 Cm-245 8.88E+14 8.50E+03 2486 9.37E-04 Cm-246 2.79E+14 4.73E+03 2486 1.63E.04	Pu-241	1.26E+19	1.44E+01	2486	2.27E-02	_
Am-241 3.00E+18 4.32E+02 2486 1.64E-01 - Am-243 3.09E+16 7.37E+03 2486 2.85E-02 - Cm-245 8.88E+14 8.50E+03 2486 9.37E-04 - Cm-246 2.79E+14 4.73E+03 2486 1.63E-04 -	Pu-242	1.83E+15	3.73E+05	2486	8.57E-02	_
Am-243 3.09E+16 7.37E+03 2486 2.85E-02 - Cm-245 8.88E+14 8.50E+03 2486 9.37E-04 - Cm-246 2.79E+14 4.73E+03 2486 1.63E.04 -	Am-241	3.00E+18	4.32E+02	2486	1.64E-01	_
Cm-245 8.88E+14 8.50E+03 2486 9.37E-04 - Cm-246 2.79E+14 4.73E+03 2486 1.63E-04 -	Am-243	3.09E+16	7.37E+03	2486	2.85E-02	—
$\begin{bmatrix} Cm^{-246} & 2.79E^{+14} & 4.73E^{+03} \end{bmatrix} = 2486 \begin{bmatrix} 1.63E^{-04} & - \end{bmatrix}$	Cm-245	8.88E+14	8.50E+03	2486	9.37E-04	_
CIII-2+0 2.77L+14 +.75L+05 2400 1.05L+04	Cm-246	2.79E+14	4.73E+03	2486	1.63E-04	—

表 4-11:計算之主要核種初始存量表(核一、二、三廠)

註:IRF為核種之瞬釋分率,主要引用自TILA-99(1999);上標*表引用自EC(1999) (Vieno et al., 1999、EC, 1999)

4.4.4.2. 工程障壁之特性資料

有關工程障壁特性之幾何尺寸係採用90及91年度計畫所建立之 處置隧道與處置孔概念(圖 4-23;圖 4-25)(紀立民與洪錦雄,2002; 許秀真等,2003)。INPAG-N、INPAG-NV2及INPAG-NH程式計算所 需之工程障壁特性資料彙整如表 4-12(表中應用程式N、V、H分別代 表INPAG-N、INPAG-NV2、INPAG-NH程式)。

4.4.4.3. 地化資料

模擬所需之地化資料包括:參考水體、緩衝材料、裂隙母岩等之 有效擴散係數、核種元素之溶解度、及核種元素之分配係數 (distribution coefficient)等。由於國內目前在這方面之資料仍相當缺 乏,本文主要參考國內外報告所提供之溶解度、分配係數、擴散係數 等參考資料,詳見表 4-13所列之核種特性資料。

衣 + 12·首伯住式侠妍恋川之工住伴室村	表	4-12:	評估程式	模擬應用	之工程障	壁特性
----------------------------------	---	-------	------	------	------	-----

名稱		數值	應用程式	資料來源及備註
成弃临大赚	存量起算時間	40 yr	$N \cdot V \cdot H$	INER ¹
廢末初个窟	完全溶解時間	3.6E+05 yr	$N \cdot V \cdot H$	SITE-94
	假設壽命	1.0E+05 yr	$N \cdot V \cdot H$	INER ²
	內半徑	0.475 m	$N \cdot V \cdot H$	INER ³
	外半徑	0.525 m	$N \cdot V \cdot H$	INER ³
廢棄物罐	高	4.91 m	$N \cdot V \cdot H$	INER ³
	蝕物孔隙率	1.0	$N \cdot V \cdot H$	完全腐蝕
	密度	0	$N \cdot V \cdot H$	為完全消失情節
	蝕物擴散係數	6.31E-02 m ² /yr	$N \cdot V \cdot H$	水中分子擴散係數
	外半徑	0.875 m	$N \cdot V \cdot H$	INER ³
	上層厚度	1.5 m	V	INER ³
	下層厚度	0.5 m	V	INER ³
緩衝材料	廢棄物罐間距	1.2m	Н	INER ⁴
	密度	$2,780 \text{ kg/m}^3$	$N \cdot V \cdot H$	INER ¹
	孔隙率	43%	$N \cdot V \cdot H$	TILA-99
	擴散係數	3.15E-03 m ² /yr	$N \cdot V \cdot H$	TILA-99
	外半徑	0.93 m	$N \cdot V \cdot H$	INER ¹
	密度	2650 kg/m^3	$N \cdot V \cdot H$	EEL^1
開挖擾動帶	孔隙率	1.23%	$N \cdot V \cdot H$	INER ¹
	擴散係數	6.31E-02 m ² /yr	$N \cdot V \cdot H$	水中分子擴散係數
	運轉隧道厚度	0.1m	Н	INER ⁴
	高	4.1 m	V	INER ³
坊道	寬	3.6 m	V	INER ³
沉垣 (回填材料)	密度	$2,700 \text{ kg/m}^3$	V	TILA-99
	孔隙率	20%	V	TILA-99
	擴散係數	6.31E-03 m ² /yr	V	TILA-99
母	地下水流速	3.16 m/yr	$N \cdot V \cdot H$	EEL ¹
	母岩密度	2650 kg/m^3	V v H	EEL ²
	母岩孔隙率	0.58%	V v H	EEL^2
	母岩擴散係數	3.15E-06 m ² /yr	V v H	TILA-99
	裂隙間距	0.081 m	$N \cdot V \cdot H$	EEL ³
	裂隙內寬	4.73E-3 m	$N \cdot V \cdot H$	EEL^4
	裂隙擴散係數	$6.31E-02 \text{ m}^2/\text{yr}$	$N \cdot V \cdot H$	水中分子擴散係數

(1).TILA-99: Vieno et al., 1999 (6).INER⁴: 許秀真等, 2003

(2).SITE-94 : SKI, 1996

(3).INER¹:陳智隆,2006 (8).EEL²:林蔚等,2005

(7).EEL¹:歐陽湘等,2006

(4).INER²:李瑞益等,2005

(5).INER³:洪錦雄等,2003

(9).EEL³: 2/19技術討論會, 2006

(10).EEL⁴:張傳盛等,2005

RNs		溶解度限值	緩衝材料分配係數	開挖擾動帶分配係數
		(mol/m^3)	(m^3/kg)	(m^3/kg)
C	C-14	1.0E+06	0	1.0E-03
Cl	Cl-36	1.0E+06	0	1.0E-04
Ni	Ni-59 Ni-63	1.0E-01	5.0E-01	2.0E-01
Se	Se-79	1.0E-03	5.0E-03 [5.5E-03]	5.0E-04 [1.9E-03]
Rb	Rb-87	1.0E+06	3.0E+00	2.0E+00
Sr	SR-90	1.0E-02	2.0E-01	1.0E-02
Zr	Zr-93	5.0E-05	1.0E+00	4.0E-01
Nb	Nb-94	1.0E+00	1.0E+00	1.0E-01
Mo	Mo-93	1.0E+06	3.0E+00	2.0E+00
Tc	Tc-99	5.0E-05	1.0E-01	2.0E-01
Pd	Pd-107	1.0E-05	1.0E-01	1.0E-01
Sn	Sn-126	5.0E-03	2.0E-01	2.0E-01
Ι	I-129	1.0E+06	1.0E-03	5.0E-04
C.	Cs-135	1.05.06	1.0E+00	1.0E-01
Cs	Cs-137	1.0E+06	[6.5E-02]	[3.5E-02]
Sm	Sm-147	1.0E-02	1.0E+00	4.0E-02
-	Pu-238 Pu-239			
Pu	Pu-240 Pu-241 Pu-242	5.0E-04	3.0E+00	2.0E+00
U	U-233 U-234 U-235 U-236 U-238	3.0E-04	5.0E-01	1.0E+00
Th	Th-229 Th-230 Th-232	5.0E-04	3.0E+00	5.0E-01
Cm	Cm-245 Cm-246	5.0E-05	3.0E+00	5.0E-01
Am	Am-241 Am-243	5.0E-04	3.0E+00	5.0E-01
Np	Np-237	5.0E-05	1.0E+00	5.0E-01
Ra	Ra-226	1.0E-04	5.0E-01	5.0E-01
Pa	Pa-231	1.0E-05	2.0E-01	2.0E-01

表 4-13:評估程式模擬應用之核種特性

(1).引用資料來源TILA-99: Vieno et al., 1999

(2).[]為清華大學數據:鄧希平等,2005

4.4.5. 分析的結果

近場釋出分析的範圍係指用過核子燃料在廢棄物罐失效後,核種 溶解於地下水中,並隨地下水在工程障壁、開挖擾動帶、處置坑道及 部份處置母岩的遷移過程。近場遷移有關之核種存量、核種溶解度及 分配係數及工程障壁特性參數數據分別說明於表 4-11、表 4-12及表 4-13。分析的模式如4.4節所述,分析工具則利用本文前述之評估程 式,分別以INPAG-N、INPAG-NV2及INPAG-NH程式進行模擬計算。 進行分析之案例內容說明如下:

- (1)分析案例(I):模擬分析的對象分別為RT-NV、ART-NV及 ART-NH模式,以本文4.4節所述之參數數據做為評估程式模擬分析的輸入資料,案例分析結果末碼以「I」標記,如RT-NV-(I)。
- (2) 分析案例(Ⅱ):以基本案例(Ⅰ)之參數數據為主,緩衝材料及母 岩對於Se及Cs核種之分配係數則以本土化數據(鄧希平等,2005) 替代,做為評估程式模擬分析的輸入資料,案例分析結果末碼以 「Ⅱ」標記,如RT-NV-(Ⅱ)。

圖 4-38 與圖 4-39 為利用 INPAG-N程式模擬計算所得之 RT-NV-(I)案例的核種釋出結果;而圖 4-40 與圖 4-41 則為利用 INPAG-N程式模擬計算所得之RT-NV-(II)案例的核種釋出結果。由 RT-NV-(I)與RT-NV-(II)案例分析結果可知,核種由廢棄物本體溶解 釋出後至處置時間1.0E+7年中,處置前期(1.0E+05~1.0E+06年間)之近 場模擬計算較大釋出率的核種主要為分裂/活化產物核種,於處置後 期(1.0E+06~1.0E+07年間),則以超鈾系衰變鏈核種具有較大的釋出率 比重。

以個別核種而言,近場主要較大釋出率之核種分別為Cl-36、 Se-79、Zr-93、Tc-99及I-129。其中,Cl-36、Se-79與I-129核種因瞬間 釋出因子(IRF)較大且於緩衝材料及開挖擾動帶幾乎不吸附之特性, 故在廢棄物罐失效時(1.0E+05年),核種則有較大的瞬間釋出率。Zr-93 與Tc-99則因核種初始存量較高,故在處置前期為較高釋出比例之核

4-112

SNFD2009

種,但因Zr-93與Tc-99之溶解度限值較Cl-36、Se-79與I-129核種低且 緩衝材料與開挖擾動帶介質對其吸附性較高,故Zr-93與Tc-99核種之 最大釋出時間較晚且釋出量約低於Cl-36與Se-79一個數量級。

由於分析案例之廢棄物罐壽命達1.0E+05年,半化期較短之分裂/ 活化產物核種在未達廢棄物罐壽命時即已衰變耗盡(如C-14、Ni-63、 Sr-90、Cs-137核種),而部份未耗盡核種之釋出曲線則多為衰退段。 此外,因一般分裂/活化產物核種之半化期較衰變鏈核種為短,所以 在評估年限(1.0E+06年)後,主要釋出核種為超鈾系衰變鏈核種,以 Ra-226與Np-237核種為主。但整體相較之下,超鈾系衰變鏈核種之最 大釋出率較分裂/活化產物核種約低1~2個數量級。故針對近場核種釋 出的分析結果,如採用較長壽命之廢棄物罐,可有效圍阻可能為較大 釋出率之核種。

RT-NV-(Π)案例中,因緩衝材料及開挖擾動帶對Se核種之吸附性 與RT-NV-(I)案例差異極微,故兩案例之Se核種的釋出結果相近;而 RT-NV-(Π)案例之緩衝材料及開挖擾動帶對Cs元素之吸附性皆小於 RT-NV-(I)案例,故RT-NV-(Π)案例之Cs核種的尖峰釋出率約大於 RT-NV-(I)案例一個數量級。但因Cs核種非主要近場釋出核種,故整 體而言對於核種的總釋出率影響甚小。

由INPAG-N程式之模擬結果可知,RT-NV-(I)案例與RT-NV-(Ⅱ) 案例之核種總釋出曲線相差甚小,故INPAG-NV2與INPAG-NH則僅針 對分析案例(I)進行模擬計算。

圖 4-42與圖 4-43為利用 INPAG-NV2程式模擬計算所得之分析 案例(I)的核種釋出結果;而圖 4-44與圖 4-45則為利用 INPAG-NH 程式模擬計算所得之分析案例(I)的核種釋出結果。由基本案例的計 算結果可知,三個近場評估程式之基本案例的核種釋出曲線相似。而 尖峰釋出率部份,因 INPAG-NV2與 INPAG-NH程式除考慮核種沿著廢 棄物罐徑向傳輸之效應外,並增加考慮沿著廢棄物罐軸向傳輸的阻滯 效應,故核種總釋出劑量曲線的峰值較 INPAG-N評估結果約減少 40%。

4-113



圖 4-38: RT-NV-(I)案例之分裂/活化產物核種釋出率

Time:時間



圖 4-39: RT-NV-(I)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率

Time:時間



圖 4-40: RT-NV-(Ⅱ)案例之分裂/活化產物核種釋出率

Time:時間



圖 4-41: RT-NV-(Ⅱ)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率

Time:時間 Release rate:釋出率



圖 4-42: ART-NV-(I)案例之分裂/活化產物核種釋出率

Time:時間



圖 4-43: ART-NV-(I)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率

Time:時間



圖 4-44: ART-NH-(I)案例之分裂/活化產物核種釋出率

Time:時間 Release rate:釋出率



圖 4-45: ART-NH-(I)案例之超鈾系衰變鏈核種釋出率

Time:時間 Release rate:釋出率

4.5. 地質圈核種傳輸模擬

4.5.1. 介紹

核種藉地下水流而遷移(migration)的過程中,其路徑或行為會受 環境周圍孔隙或地質構造裂隙所影響,而評估傳輸環境周圍地質岩體 及地下水流流動能力時,常區分為三種概念模式(圖 4-46):離散裂隙 模式(discrete fracture model)、連續裂隙模式(continuous fracture model)、及當量離散模式(equivalent discrete model),並配合適當數值 評析方法,將其概念模式轉換為電腦數值程式(Dershowitz et al., 1988)。

假設核種傳輸環境存在高滲透性岩體時,其岩體有效孔隙分佈集 中或裂隙密佈叢集處,即成為影響地下水流流動的主要因素。當核種 傳輸環境存在低透水性岩體,如結晶花崗岩或玄武岩,母岩近似不透 水介質時,水流幾乎只於裂隙之間流動,換言之,核種即在此裂隙傳 輸。

4-122



圖 4-46: 裂隙岩體分類模式

⁽改繪自Dershowitz et al., 1988)

4.5.2. 地質圈核種傳輸介質分類

(1) 多孔性介質(porous medium;又稱孔隙介質) 由於現地地質之複雜性,裂隙岩體(fractural rock)之裂隙幾何參 數常無法有效的定量化,故採用離散模式進行裂隙岩體模型建立 時,將因裂隙資料缺乏而造成模式不適用的情況,且進行離散模 式模擬時常須大量且複雜之運算。為解決上述問題,Long等 (1982)以裂隙網路進行導水性質之研究,認為在岩石材料不具透 水性下,裂隙構成之導水網路可視為孔隙介質處理,以單一值表 現其整體導水係數,且可將岩層視為當量孔隙介質(equivalent porous medium, EPM)。Snow(1970)最早採用連續正交裂隙模式進 行裂隙岩體模型建立,將現地裂隙視為三組垂直正交裂隙系統 (圖 4-47), σ_x、σ_y及σ_z分別代表三座標軸方向之圍壓應力,且 裂隙無限延伸,裂隙間距符合負指數分佈,各組裂隙在三座標軸 方向之平均間距(bx、bv及bz)則相等,據此之後即為連續裂隙岩體 模式之發展。由於裂隙岩體由岩基(rock matrix)與裂隙所組成, 其中裂隙為水流之主要通道,但當岩基為多孔介質如砂岩、頁岩 等時,岩基之滲透相當良好,或者是岩基存在相當多之微裂隙, 或稱為次要裂隙(subcritical fracture)時,岩基之透水性相對於裂 隙而言雖然較低,但也將影響裂隙岩體中水流情況。為解決此一 問題,可將裂隙岩體視為兩種介質之結合,故學者 Barenblatt(1960)與Renshaw(1996)等發展雙介質模式解決此一問 題,該模式又可分為雙孔隙模式(Double Porosity Model, DPM)及 雙透水性模式(Dual Permeability Model, DKM)。雙孔隙率模式是 假設裂隙岩體中包含裂隙面與多孔隙質岩基,則此岩體之透水係 數變化受兩介質之影響;而雙透水性模式則假設裂隙岩體之岩基 不具透水性,裂隙面為水流之唯一通道,其中主要裂隙面提供大 部分之水流通過,而裂隙岩體中較密集之次要裂隙面(微裂隙)常 形成主要裂隙面間連通之通道,因此雙滲透性模式主要為考慮此 次要裂隙面造成之水流連通效應。

(2) 裂隙介質(fractured medium)

離散裂隙岩體模式是將每一裂隙視為單元體,對任一裂隙之幾何 參數須有詳細之調查,較適合較小規模之區域。針對現場小規模 運用方法,常藉由研究區裂隙參數調查結果,配合裂隙參數之分 佈特性,以隨機方式產生符合現場分佈特性或假設狀況下之裂隙 網路,並藉由蒙特卡羅(Monte Carlo)隨機法,以序率(stochastic) 分析之觀點進行岩體水力模型或核種傳輸模擬,進而建構離散裂 隙岩體,而由於裂隙岩體存在系統的複雜性與場址尚未確認下, 在現階段地質圈功能/安全評估模式應用上,乃以平行版模式(將 會於下節說明),模擬核種於均勻裂隙傳輸情況(圖 4-48)。



圖 4-47:連續孔隙介質

(Snow, 1970)



圖 4-48:核種於裂隙介質傳輸之概念圖

(Winberg, 1999)

4.5.3. 核種在多孔性介質的傳輸模擬

核種或溶質於多孔性介質中之傳輸機制可歸因於分子間的碰撞 與外力的推動,前者即所謂的分子擴散(molecular diffusion),而後者 則為力學傳輸(mechanical transport),兩者共構的現象為延散 (dispersion)(圖 4-49)。核種於地下水流中傳輸的主要機制是力學延 散,它不僅與整個流體的運動有關,同時也與考量介質中的破裂面導 水通路或是孔隙的複雜性結構有關。假設某一時段中,二個極為接近 的污染物溶質分子,在下一時段卻可能分開,主要有三個不同的原因 在影響其運動:第一個原因(圖 4-49(a))是靠近孔隙通道路徑邊緣的 溶質分子,其遷移的速率較靠近通道中央者緩慢;第二個原因(圖 4-49(b))是孔隙大小不同的變化,使得溶質分子沿著孔隙軸向移動的 速度不一;第三個原因(圖 4-49(c))是相鄰的污染物溶質分子,會沿 著不同的路線,流向不同的通道,而這些不同的顆粒可能在下一個通 道再會合,亦可能持續分離更遠,不再會合。

Bear(1972)以 Pe (peclet number) 來表示分子擴散與力學傳輸間的相對重要性,其定義為:

$$Pe = \frac{VS}{D_d} \tag{4-25}$$

其中,

- D_d : 延散係數(m²/yr)。
- V : 地下水平均流速(m/yr)。
- S : 特性長度(m)。

當 Pe>1 時,表示力學式的傳輸強於分子擴散的機制,當 Pe<1 時,則表示力學式的傳輸小於分子擴散的機制。對於污染物在多孔介

4-128

質中之傳輸,地下水流的速度通常被視為遠大於分子擴散的速度,因此多孔介質中的污染物傳輸常被視為力學式傳輸。



1為t時刻,2為t+△t時到液體質點的位置

圖 4-49:溶質分子之三種力學延散運動機制 (改繪自Bear J., 1972) 核種或溶質分子於多孔性介質中傳輸之一維核種傳輸控制方程 式可表示如下:

$$R\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v\frac{\partial C}{\partial x} - R\lambda C$$
(4-26)

其中,

- C: 核種濃度(mol/m³)。
- D : 延散係數 (m^2/yr) 。
- R : 遲滯因子(-)。
- V : 地下水流速度(m/yr)。
- t : 時間(yr)。
- x : 地下水流動方向上的位置。
- λ : 核種衰變常數(1/yr)。

遲滯因子:

$$R = 1 + \frac{(1-\phi)\rho K_d}{\phi} \tag{4-27}$$

其中,

- ρ : 介質密度(kg/m³)。
- K_d : 核種分配係數(m³/kg)。

(4-26)式之初始與邊界條件,可寫成

 $C(x,0) = 0 \quad x > 0 \tag{4-28}$

SNFD2009

$$vC - D\frac{\partial C}{\partial x} = \Psi(t), \quad \mathbf{x} = 0$$

$$C(\infty, t) = 0, \quad t > 0$$

其中

$$\Psi(t)$$
 : 溶質分子在入口邊界處之輸入流率(flux)(mol/m²yr)。

Sauty(1980)以溶質傳輸理論推導連續注入與瞬間注入之解析解 標準穿透曲線(break through curve),其方法主要將濃度及時間無因次 化,並引進 peclet number 觀念來解釋延散之概念。對於不吸附 (R=1.0)且不衰變(λ=0.0)之溶質而言,其階狀函數(step function)注入 之解析解為

$$C_r(t_r, P_e) = 0.5 \left\{ erfc\left(\left(\frac{P_e}{4t_r}\right)^{0.5} \left(1 - t_r\right)\right) + \exp(P_e)erfc\left(\left(\frac{P_e}{4t_r}\right)^{0.5} \left(1 + t_r\right)\right) \right\}$$
(4-29)

其中, Cr=C/C0、tr=vt/x、C0 為初始注入濃度(mol/m³)。

以(4-29)式計算核種或溶質在孔隙介質中傳輸,不同 Pe之濃度 隨時間變化曲線(圖 4-50)結果顯示隨Pe增大時,代表力學式傳輸的效 應增大,而擴散效應減小,故在時間初期時,溶質相對地較晚釋出, 故溶質的濃度相對的較低。當 Pe小於1時,即濃度受擴散效應之影響 較為顯著,初期溶質的濃度增加較快,而後漸趨飽和;當Pe等於1時, 力學式傳輸與擴散效應等效共同影響溶質的遷移;當 Pe大於1時,溶 質的遷移主要受力學式傳輸的控制,初期溶質較緩慢釋出,故初期溶 質的濃度相對的較低,隨著力學式傳輸(水流)的作用,於時間中期會 出現溶質的濃度快速增加之情況。



圖 4-50:Pe影響穿透曲線的情況

t_r: 無因次化時間

C_r:相對濃度

若考慮吸附及衰變效應,Zuber(1974)對脈衝函數注入所提供之解析解為:

$$C(x, t) = \frac{M}{vA} \frac{1}{\sqrt{4\pi D't}} \frac{x}{v't} \exp\left(-\frac{(x-v't)^2}{4D't}\right) \exp(-\lambda t)$$
(4-30)

其中

$$D' = \frac{D}{R}$$
$$v' = \frac{v}{R}$$

式中,M:脈衝注入的核種質量(mole)

A: 垂直水流方向的截面積(m²)

(4-30)式可以用來分析、探討各種不同地質及傳輸參數對核種或 溶質濃度曲線的影響。

4.5.4. 核種於裂隙介質的傳輸模擬

核種於裂隙介質(fractured medium)中之傳輸可視為在一對間隙 狹窄的水平平行平板中傳輸(圖 4-51),地下水在兩平板中的間隙間流 動著,並伴有橫向及縱向的延散作用,而核種的傳輸則伴有平流 (advection)、分子擴散、延散、吸附、衰變及滋生等機制。核種可能 吸附於裂隙表面的壁上及擴散至母岩的孔隙中並吸附在其中,吸附是 遲滯核種遷移的重要機制,而分子擴散與橫、縱向延散是降低核種濃 度峰值的重要機制(圖 4-52)。核種在裂隙介質中傳輸之幾何結構概念 模型(圖 4-53)之 2b 為裂隙內寬(fracture aperture)、l+2b 則為裂隙 間距(fracture spacing)、 L_g 為裂隙長度(即核種在裂隙中之總傳輸距 離)、x 為地下水平流方向的位置。



圖 4-51:地下水在裂隙介質中流動之水平平行平板模式概念



圖 4-52:核種在裂隙介質中傳輸之水平平行平板模式概念示意圖



圖 4-53: 模擬核種於裂隙傳輸區域之幾何結構概念示意

Zhou(2001)與Zhou et al.(2004) 根據地質圈傳輸概念模型(圖 4-51至圖 4-53),建立核種在裂隙介質中傳輸之數學模式,其假設條 件為:

- (1) 核種在歷經近場工程障壁時,已充分達到濃度平衡,故在裂隙傳 輸時,不再考慮核種之溶解度限值(solubility limit)。
- (2) 裂隙假設都是地下水可通行的,且有其單位孔隙率。
- (3) 裂隙之地下水流為由處置孔流向生物圈之一維流。
- (4) 岩體內之地下水流為近似之棲止水(perchered water)。
- (5) 核種可能吸附於裂隙表面壁上,及擴散至母岩基質裡並吸附在其中,此深度定義為「吸附深度」(sorption depth)。
- (6) 考慮線性平衡之吸附模式。
- (7)因為裂隙層很薄,假設橫向延散特性是存在的,且能均匀的混合 垂直於地下水流方向之濃度。
- (8) 模式中的參數,如孔隙率、地下水流速、吸附係數及延散係數等為常數。
- (9) 核種在岩體之擴散只發生在垂直裂隙之方向。
- (10) 遠場與生物圈的交接面之核種濃度,為隨時間變化之濃度,當超 越模擬區域時即設為零。

Zhou(2001)與Zhou et al.(2004) 等所推導之裂隙介質核種傳輸數 學方程式為:

$$\frac{\partial A_{f,i}}{\partial t} + v_f \frac{\partial C_{f,i}}{\partial x} - D_L \frac{\partial^2 C_{f,i}}{\partial x^2} = \lambda_{i-1} A_{f,i-1} - \lambda_i A_{f,i}
+ a_f \phi_m D_m \frac{\partial C_{m,i}}{\partial z} \bigg|_{z=b}, \quad 0 < x < L_g, \quad t > 0.$$
(4-31)

其中,

 A_f : 核種在裂隙中之濃度(mol/m³)。

$$C_f$$
: 核種在裂隙液相中之濃度(mol/m³)。

- D_L : 核種在裂隙中之延散係數(m²/yr)。
- D_m : 核種在岩體中之擴散係數 (m^2/yr) 。
- t : 時間(yr)。
- *v_f*: 地下水在裂隙中之流速(m/yr)。
- λ: 核種衰變常數(1/yr)。
- **♦***m* : 岩體孔隙率(-)。
- *a_f*: 裂隙中每單位體積水的潤濕表面積(=1/b)(1/m)。
- Lg: 核種在裂隙中的傳輸距離(m)。
- a : 裂隙內寬(m)。
- *s*: 裂隙間距(m)。
- *l*: 相鄰二裂隙間基質之半, *l*=(*s*-*a*)/2(m)。
- *b* : 裂隙內寬之半, b=a/2 (m)。
- x : 地下水在裂隙中平流方向之位置 (m)。
- 下標 i : 代表 I 核種, 而 i-1 代表 i 核種的母核種。
- 下標 *m* : 母岩基質(matrix)。
- 下標 f : 裂隙(fracture)。

(4-31)式左邊第1項為核種在裂隙單位體積之濃度改變速率,第 2、3項為核種之平流及擴散/延散影響項;方程式右邊第1、2項為核 種生成(in-growth)與衰變(decay)速率,最後一項為核種從裂隙表面擴 散進入母岩基質中之速率。

核種在母岩基質中之傳輸方程式如下:

$$\frac{\partial A_{m,i}}{\partial t} - D_m \frac{\partial^2 C_{m,i}}{\partial z^2} = \lambda_{i-1} A_{m,i-1} - \lambda_i A_{m,i}, \quad b < z < l, \qquad t > 0.$$
(4-32)

其中,

- A_m : 核種在母岩基質中之總濃度 (mol/m^3) 。
- C_m : 核種在母岩基質液相中之濃度(mol/m³)。
核種在裂隙及裂隙液相中之起始濃度

$$A_{f,i}(x,0) = 0, \quad C_{f,i}(x,0) = 0, \quad 0 \le x \le L_g.$$
 (4-33)

裂隙入口邊界處核種之輸入速率條件:

$$\left(-D_L \frac{\partial C_{f,i}}{\partial x} + v_f C_{f,i}\right)_{x=0} A_s = \dot{m}_i \qquad t > 0.$$
(4-34)

其中,

 \dot{m}_i : 裂隙入口邊界處第 i 個核種的輸入速率(mol/yr)。 A_s : 裂隙開口總截面積(m²)。

假設地下水中核種濃度在無窮遠處為零,則

$$A_{f,i}(x=\infty,t)=0, \quad C_{f,i}(x=\infty,t)=0, \quad t>0.$$
 (4-35)

母岩基質之起始核種濃度為零

 $A_{m,i}(x,z,0) = 0, \qquad C_{m,i}(x,z,0) = 0, \qquad b \le z \le l, \qquad 0 \le x \le L_g.$ (4-36)

裂隙和母岩基質交接面液項濃度為連續的,其方程式為

$$C_{f,i}(x,t) = C_{m,i}(b,x,t), \quad 0 \le x \le L_g, \quad t > 0.$$
(4-37)

母岩基質中線為鏡射線,取其流通量為零

$$\left. \frac{\partial C_{m,i}}{\partial z} \right|_{z=l} = 0, \quad 0 \le x \le L_g, \quad t > 0.$$
(4-38)

從導入裂隙間距之觀念及式(4-38)母岩基質中線為鏡射線之邊界 條件設定,可以得知 Zhou(2001)與Zhou et al.(2004)所推導之裂隙介 質核種傳輸數學方程式屬多重平行均勻裂隙模式(multiple, parallel, uniform fractures model)。

(4-31)式與(4-32)式可用 compartment 方法以數值法求解 (Romero et al., 1991; Zhou, 2001)或以拉普拉氏轉換(Laplace transform)配合數值法之拉普拉氏逆轉換求解(GoldSim, 2001; Zhou et al., 2004),而數值法之拉普拉氏逆轉換最常被使用的方法為 Talbot 法(Talbot, 1976)與 De Hoog 法(De Hoog et al., 1982)雨種。 Zhou(2001) 根據 compartment 方法之原理,將式(4-31)與式(4-32) 配合上述之初始與邊界條件,以福傳程式語言(FORTRAN programming language)撰寫出一套電腦程式名為 INPAGFC;而 Zhou et al.(2004) 則根據拉普拉氏轉換理論與方法,搭配 Talbot 氏數值 法之拉普拉氏逆轉換,以福傳程式語言撰寫出一套電腦程式名為 INPAGFL。INPAGFL 程式是本計畫目前採用來進行核種遠場傳輸分 析的程式,因此下面特別以國外的 CRYSTAL 程式(SKI, 1996)及 Zhou(2001) 的 INPAGFC 程式來驗證 INPAGFL 程式。

瑞典SKI之SITE-94報告(SKI, 1996)中遠場分析程式為CRYSTAL 程式,為求解放射性核種於裂隙介質中傳輸現象,此裂隙假擬為平板 模式,考慮核種於裂隙中平流傳輸效應及母岩基質中擴散與延散 (diffusion/dispersion)效應等,並應用線性平衡吸附(linear equilibrium sorption)模式模擬核種於裂隙表面與岩基之吸附作用。我國目前發展 之處置概念與瑞典KBS-3相類似,均為深層地質處置,母岩結構為花 崗岩類結晶岩,CRYSTAL程式之控制方程式、吸附模式、邊界條件 等均與INPAGFL程式相同,其求解方式也是運用拉普拉氏轉換進行數 值運算。採用與瑞典 CRYSTAL 程式之核種外釋結果來進行 INPAGFL 程式驗證,輸入參數如表 4-14,分別選用I-129核種與4N+1

衰變鏈核種(Cm-245 - Am-241 - Np-237 - U-233 - Th-229)結果顯示 (圖 4-54與圖 4-55)兩套程式之計算結果十分吻合。

/- //		/	
參數	數值	單位	資料來源
傳輸長度	100	m	假設值
裂隙間距	1	m	SITE-94, P.533
裂隙內寬	6.5E-04	m	SITE-94, P.533
岩體密度	2.7E+03	kg/m ³	SITE-94, P.533
岩體孔隙率	1.0E-03	-	SITE-94, P.533
地下水達西流速	1.7E-03	m/yr	SITE-94, P.407
延散度	2.5	m	DOE, 2001
裂隙擴散係數	6.37E-02	m²/yr	SITE-94, P.533
岩體有效擴散係數	9.5E-04	m²/yr	SITE-94, P.533
吸附深度	5.0E-02	m	SITE-94, P.533

表 4-14:與 CRYSTAL 程式驗證用之輸入參數

(Zhou et al., 2004 and SITE-94 : SKI, 1996)



Time:時間

Release rate:外釋率 (Zhou et al., 2004)



圖 4-55:與CRYSTAL程式對超鈾系衰變鏈核種外釋率曲線之比較 Time:時間 Release rate:外釋率 Ref.: Zhou et al., 2004

與 INPAGFC 程式(Zhou, 2001)之比較則分別對三種單一衰變核 種(C-14、Cl-36、I-129)及 Pu-240 → U-236 → Th-232 之超鈾系衰變 鏈核種等進行外釋率的比較,C-14、Cl-36、與I-129 屬被活化性的核 種,它們有一部分會存在用過核子燃料的表面及晶格的間隙與邊界 上,此部分與地下水接觸時會受溶解度限制之作用而瞬間溶解釋出, 瞬間溶解釋出的含量在核種存量(inventory)術語中稱為瞬釋分率 (instant release fraction, 簡稱為 IRF); 而超鈾系衰變鏈核種則屬分 裂產物,存在於用過核子燃料的基質中,它們隨著基質之劣化變質 (alteration)溶解而逐漸釋出。圖 4-56為對 C-14、Cl-36、與I-129 等 三種單一衰變核種之遠場外釋率的計算結果之比較,實線者為 INPAGFL 程式之計算結果,而虛線者則是 INPAGFC 程式之計算結 果,結果顯示兩套不同程式之計算結果非常的接近。而對 Pu-240 → U-236 → Th-232 衰 變 鏈 核 種 之 遠 場 外 釋 率 計 算 結 果 之 比 較 則 示 於 圖 4-57中,其結果顯示兩套不同程式之計算結果雖有差異,但相差並不 大;對於 Pu-240 母核種而言,兩者之分佈曲線非常接近;對於 U-236 及 Th-232 兩個子核種而言,兩套程式的外釋率峰值非常接近,在外 釋初期時,INPAGFC 程式的結果比較偏低,但相差並不大,在外釋 晚期時, INPAGFL 程式的結果變成比較偏低而且下降速率加快。在 外釋晚期時,由於其外釋率已經過了峰值期,且其數值也與峰值相差 數個數量級,因此其重要性相對的降低,故兩套程式的計算差異也就 不重要。



圖 4-56:與INPAGFC對C-14、Cl-36、I-129外釋率曲線之比較

Time:時間

Annual release rate:年外釋率



圖 4-57:與INPAGFC對 Pu-240->U-236->Th-232衰變鏈核種外釋率曲線之比較 Time:時間

Annual release rate:年外釋率

4.5.5. 敏感度分析

(1) 孔隙介質—不規則或非均匀性土壤顆粒交接而形成的地層或地 質,常因顆粒的非平整與粗糙角度的作用,造成土壤顆粒間孔隙 分佈不一,而此孔隙交接所形成的空間,然而水流或核種即藉此 交接空間而形成的連續孔隙,作為其流動或傳輸的最主要路徑。 而綜合水流與傳輸效應的表現,取遲滯因子與延散係數,進行參 數敏感度分析(表 4-15), 延散係數(D)輸入數值為1、10、100 m²/yr,遲滯因子(R)也是輸入數值為1、10、100 (無因次),研究 其對Am-241核種(衰變常數,λ,為1.5E-03 1/yr),於觀測位置100 m處外釋行為的影響,並以式(4-30)作為分析工具,分析所得結 果示於圖 4-58(圖示中 D 的單位為 m²/yr)及圖 4-59中。由圖 4-58顯示,當遲滯因子為1時,延散係數乃為分子間碰撞與水流 外力影響所造成之綜合效應,可知當延散係數大時,其釋出時間 早,在介質中所遷移時間(duration)較長,相對地,延散係數小時, 則相反;由圖 4-59顯示遲滯因子(R)對核種濃度釋出之影響,當 R增大時,延遲核種釋出的能力即增加,因而造成核種濃度明顯 下降,並且有效地降低其外釋率。綜言之,評估若以孔隙介質之 考量核種之傳輸行為,延散係數會延遲核種的釋出,但遲滯因子 (由於核種本身的吸附性質),即能有效地降低其外釋率。

案例說明	延散係數敏感度分析	遲滯因子敏感度分析	
參數	參數值	參數值	
水流速度	1 (m/yr)	10 (m/yr)	
	$100 (m^2/yr)$		
延散係數	$10 (m^2/yr)$	$20 (m^2/yr)$	
	$1 (m^2/yr)$		
		100	
遲滯因子	1	10	
		1	
孔隙率	1.0E-02		
核種衰變常數	Am-241 : 1.5E-03 (1/yr)		
觀測位置	100 (m)		
最大觀測時間	1.0E+04 (yr)		

表 4-15: 孔隙介質核種傳輸模式選用參數表



圖 4-58:不同延散係數之核種濃度隨時間變化情形

Time:時間

Release concentration:外釋濃度



圖 4-59:不同遲滯因子之核種濃度隨時間變化情形

Release concentration:外釋濃度

(2) 裂隙介質—地質圈水文地質參數與場址特性(site characteristics) 有極大的相關,現階段計劃時程著重於花崗岩的調查與研究,是 以裂隙介質為模擬目標,故下列的敏感度分析及核種遲滯特性研究,參考花崗岩區的現地參數,中數據依特性分為幾何特性、岩 體特性、及傳輸特性等三種,其中岩體特性(裂隙間距及內寬)及 傳輸特性(母岩地下水流速)為主控裂隙地下水流速與核種傳輸 之主要因子(4-39)式,因此利用上述 INPAGFL 程式作為核種於 裂隙介質傳輸之敏感度分析。在實際現場中,由於現地地質的不 確定因素相當多(層面、裂隙及斷層等)都會影響地下水流速,所 以地下水流速也是存在相當大的不確定性,而地下水在裂隙間與 母岩中之流速可由下式表示:

$$V_f = V_{ROCK} \frac{s}{a} \tag{4-39}$$

其中,

 V_f : 地下水在裂隙中之流速(m/yr)。

V_{ROCK}: 地下水在母岩中之達西(Darcy)流速(m/yr)。

s : 裂隙間距(m)。

a : 裂隙內寬(m)。

為了解地下水流機制對核種遷移之影響,故選用長半化期與低吸 附性核種(I-129)進行相關參數敏感度分析(裂隙內寬、裂隙間距與母 岩地下水流速)。地下水流速採用1×10⁻⁵ (m/yr)之級數間(大區域尺度 下)(JNC,2000a),此參考值將作為敏感度分析之基準,對核種進行 敏感度分析外(核研所,2006),並對地下水流速影響因子(包含內寬與 間距)探討其對核種外釋行為影響。

據陳元章等人研究結果(2005)發現:當地下水流速越大時,其尖 峰值出現的越快,且消逝的也越快,故地下水流速為影響核種外釋率

的關鍵參數。因此擴大其地下水流速參數範圍,進行其對核種外釋率 之敏感度分析(圖 4-60),結果顯示當地下水流速由1.0×10⁻¹ m/yr減慢 為 1.0×10⁻¹⁰ m/yr 時,不僅核種釋出率變小,且時間亦明顯延遲。

由(4-39)式可知影響核種傳輸之裂隙地下水流速,將受裂隙間距 與裂隙內寬的量值而有所改變,而在(4-39)式右邊乘項的倒數(a/s), 為在裂隙岩體中的動態孔隙率(dynamic porosity),此孔隙率將會隨著 現地的裂隙分布情況而有所差異。因I-129核種半化期長且不具吸附 性質,參考目前現有之資料,如,討論這三個參數(V_{ROCK}、s 和a)對 核種(I-129)之尖峰外釋率的探討研究。以裂隙內寬(圖 4-61)與裂隙間 距(圖 4-62)進行敏感度分析為例,可發現裂隙內寬影響外釋率的程度 有限(圖 4-61),只在裂隙內寬為 0.1 m 此數量級時,外釋率曲線會 較明顯改變,其它數量級之外釋率曲線幾乎重疊,裂隙內寬的變化 在 1.0E-04 m ~ 1.0E-01 m 之範圍時,裂隙內寬的變化並沒有對外釋率 造成顯著的影響。此外,亦發現此多重均勻裂隙模式受裂隙間距影響 相當明顯(圖 4-62),並隨著裂隙間距擴大,其相對的核種外釋率越 高,裂隙間距對遠場核種外釋率的影響程度遠大於裂隙內寬。

介質/ 特性	名稱	數值		資料來源
幾何	傳輸距離	100 m		假設值
特性				
岩體特性	密度	2.68E+03	kg/m ³	林蔚等,2005,pp.106
	孔隙率	5.9E-03	-	林蔚等,2005,,
				pp.106
	裂隙間距	1.0E-1~10	m	假設值
	裂隙内宽	1.0E-05~1.0E-01	m	假設值
	母岩地下水流速	1.0E-10~1.0E-01	m/yr	假設值
傳輸 特性	延散度	10	m	假設值
	裂隙擴散係數	6.31E-02	m ² /yr	Philip B. et al., 1994,
				pp.122
	岩體有效擴散係	3.15E-06	m ² /yr	Vieno et
	數			al.,1999,pp.120
	吸附深度	0.0	m	假設值

表 4-16:多重平行均匀裂隙核種傳輸模式選用參數



圖 4-60:地下水流速對核種外釋率之影響

Release rate:外釋率

Groundwater velocity:地下水流速



圖 4-61: 裂隙內寬對核種外釋率之影響

Time:時間 Release rate:外釋率 Aperture:裂隙內寬



圖 4-62:裂隙間距對核種外釋率之影響

Time:時間 Release rate:外釋率 Spacing:裂隙間距

4.5.6. 分析假設與參數變動的範圍

在進行地質圈核種傳輸分析時,鑑於在初期評估資料之不足,故 以較保守觀念來採用參數數值,並應用多重平行均勻裂隙介質傳輸模 式,來建構核種釋出之分析程式 INPAGFC 及 INPAGFL,相關的假 設條件包含以下幾項(Zhou, 2001; Zhou et al., 2004):

- (1) 平板型通水裂隙穿過處置孔之廢棄物罐。
- (2) 核種由近場釋出進入處置母岩。
- (3) 核種在通水型裂隙與母岩中傳輸。
- (4) 核種經由此通水裂隙到達地質圈與生物圈之交界面。
- (5) 核種在此裂隙概念模式的傳輸行為,包括在裂隙中的平流、縱向 之延散與擴散作用、橫向延散、裂隙的表面吸附作用,及在母岩 中之岩體擴散與吸附等作用。

地質圈評估模式需要定義所處置的母岩節理情況及空間範圍 等,地質圈範圍之起始點設定為處置孔外圍之開挖擾動帶與母岩的接 觸面,終點為母岩與生物圈之接觸面,母岩與生物圈之接觸面解釋為 母岩中主要裂隙接觸到所有能與地表接觸的面;若是母岩延伸進入海 岸,則母岩與海水交接面為界面;若是有通水裂隙的發生,通水裂隙 就是地質圈的終點。

由於深地層地質異質、異向性及參數不確定性影響下,地質圈選用的參數皆必須在合理現地考量下,並與國外相似地質處置情況下 (TILA-99、SITE-94、H12)擇選合理且範圍不致太超過的情況,作為 合理參數運跑的依據(近場引用數據可參考4.4.4節)。針對母岩特性主 要以現地調查為主,並配合國外數據做為檢核輸入參數的適用性,表 4-17中母岩性質為密度、孔隙率、擴散係數與地下水流速,而導水通 道(裂隙)性質為傳輸距離、裂隙間距、裂隙內寬、擴散係數與延散度 等;核種於花崗岩質母岩中分配係數則引用自芬蘭TILA-99報告(表 4-18)。

	遠場參數	數值	說明
母	密度	$2.65E+03 \text{ kg/m}^3$	林蔚等,2005,pp.106
岩	孔隙率	5.8E-03	林蔚等,2005,pp.106
	擴散係數	3.15E-06 m ² /yr	Vieno et al.,1999,pp.253
	地下水流速	3.16 m/yr	歐陽湘等,2006,pp.4-42,4-100,4-168
			(K值引用BH01、BH02、BH04之58組
			資料計算平均值,i保守假設為0.1)
導	傳輸距離	1.0E+03 m	測試區水文地質圖,保守假設值
水	裂隙间距	BH01_186-196_(249,82):	EEL建議值(歐陽湘等,2006,
通		8.1E-02 m	pp.4-100,pp.4-168)
道			2/19技術討論會(2006)
			BH01_186-196_(249,82) : 0.081m
			BH02_158-176_(248,70) : 0.038m
			BH04_50-75_(43,82) : 0.185m
	裂隙内寬	4.73E-03 m	張傳聖等,2005,pp.3-39
	擴散係數	6.31E-02 m ² /yr	Philip B. et al., 1994, pp.122.
	延散度	75 m	EEL建議值
			2/19技術討論會(2006)

表 4-17:現階段案例分析遠場引用參數表

表 4-18: 核種特性參數表

八列江小文山	母岩介質中之分配係	超鈾系衰變鏈	母岩介質中之分配係
分裂活化産物	數(K_d ,m ³ /kg)	核種	數(K _d ,m ³ /kg)
C-14	1.0E-03	Pu-238	
Cl-36	1.0E-04	Pu-239	
Ni-59	2 OF 01	Pu-240	2.0
Ni-63	2.0E-01	Pu-241	
Se-79	5.0E-04	Pu-242	
Rb-87	0.0	U-233	
Sr-90	1.0E-02	U-234	
Zr-93	4.0E-01	U-235	1.0
Nb-94	1.0E-01	U-236	
Mo-93	0.0	U-238	
Tc-99	2.0E-01	Th-229	
Pd-107	1.0E-01	Th-230	5.0E-01
Sn-126	2.0E-01	Th-232	
I-129	5.0E-04	Cm-245	5 OF 01
Cs-135	1 OF 01	Cm-246	J.0E-01
Cs-137	1.0E-01	Am-241	5 OF 01
Sm-147	4.0E-02	Am-243	J.0E-01
		Np-237	5.0E-01
		Ra-226	5.0E-01
		Pa-231	2.0E-01

(TILA99: Vieno et al., 1999, pp.118)

遠場評估環境依性質可區分為幾何特性、岩體特性、傳輸特性、 (表 4-17)及核種特性等(表 4-18),本階段遠場功能/安全評估將配合 近場進行下述案例分析:

- (1) 基本案例(I):以表 4-17所述之參數數據做為多重平行均勻裂隙 模式程式的輸入資料,並區分近場核種來源為徑向傳輸、軸/徑 向傳輸。
- (2) 基本案例(II):以基本案例(I)之參數數據為主,緩衝材料對於Se及Cs元素之分配係數則以本土化數據(鄧希平等,2005),做為多重平行均勻裂隙模式的輸入核種特性參數。

因部分核種於廢棄物罐存量(inventory)中有較高之瞬釋分率,在 基本案例(I),由圖 4-63可發現核種於廢棄物罐破裂時(約10⁵yr時), 核種釋出量短時間內偏高,遠場岩體延遲與遲滯效應後,在相同時間 後(約1.01E+05 yr時),其尖峰處略為下降,總外釋率量值在此峰段 (1.0E+05~1.01E+05 yr)間主要由Se-79、I-129、CI-36、C-14及Rb-87 等核種占較大之比例;於時間約1.5×10⁵~6.0×10⁵ yr間出現另一峰段, 其總外釋率量值主要由Tc-99、Zr-93、Cs-135、Np-237等核種占較大 之比例;而分裂活化產物約在2.30E+06 yr前幾已全部外釋,在 2.30E+06 ~1.0E+07 yr間主要由超鈾系衰變鏈核種U-238、U-234、 Th-230、Ra-226等核種佔較大比例。另外,由徑向傳輸基本案例(II)(圖 4-64)發現,因本土化數據中僅變動Se與Cs之緩衝材分配係數值,其 中Se分配係數值較案例(I)為大,但Cs-135分配係數值較案例(I)為小, 故其總外釋率峰值有些微的降低(尖峰值約將降低2.2E-03),且峰值發 生時刻出現約在後期2.8E+05 yr,較案例(I)約晚1.8E+05 yr。

由圖 4-65~圖 4-66可發現當近場軸/徑向核種傳輸,經遠場傳輸 1000 m後,在評估時間1.0E+05~1.0E+07 yr間,所有核種均已達尖峰 外釋點,且總外釋率量值主要由Se-79、I-129、CI-36、C-14及Rb-87、 Ni-59, Se-79, Zr-93, Tc-99, Pd-107, Sn-126, I-129, Cs-135 等分裂活

化產物,及Np-237, U-233, Th-229, Ra-226等超鈾系衰變鏈核種所累積,其餘核種外釋率值則相對較低。



(a) 分裂/活化產物



(b) 超鈾系衰變鏈核種

Time:時間

Release rate:外釋率

圖 4-63:近場徑向傳輸基本案例(I)之遠場外釋率



(a) 分裂/活化產物



(b) 超鈾系衰變鏈核種

Release rate:外釋率

圖 4-64:近場徑向傳輸基本案例(II)之遠場外釋率



(a) 分裂/活化產物





Release rate:外釋率

圖 4-65:近場軸/徑向(廢棄物罐垂直置放)傳輸時遠場外釋率



(a) 分裂/活化產物





Release rate:外釋率

圖 4-66:近場軸/徑向(廢棄物罐水平置放)傳輸時遠場外釋率

4.5.7. 核種遲滯效應的分析

核種於遠場傳輸時,不同核種會因孔隙介質或裂隙介質的岩體性 質的差異,而表現出不同的傳輸行為,如I-129處在任何岩體狀況下, 因其本身對岩體具有低吸附特性,想利用核種吸附特性來達到遲滯的 效果將會很有限,核種遲帶因子可由式(4-27)表示。由式(4-27)可知遲 滞因子會隨母岩孔隙率而變化,因此影響其對核種的遲滯能力,故針 對母岩孔隙率進行分析(表 4-19),引用瑞典花崗岩之母岩密度及分佈 係數參數值,採可能孔隙率分佈之範圍為5.0E-04~5.0E-02,假設為對 數均一分佈(Log-uniform distribution),利用拉丁超立體取樣(Latin hypercube sampling)法(Iman et al., 1980; Iman et al., 1984; Helton et al., 2003;朱信忠, 2002;朱信忠等, 2002),進行100組取樣, 再利 用每個孔隙率的值,帶入式(4-27),求取遲滯因子,可得知其數值範 圍約在56.0~6616.0之間,並利用INPAGFL 程式進行100次計算(圖 4-67),發現其初始外釋時間的範圍約在1.0E+03年到1.0E+04年間,隨 著遲滯因子的增大而延遲,而核種釋出率也有明顯的下降,顯示遲滯 效應產生作用,使得核種在岩體內停留的時間增加,相對地延遲其釋 出時間,且孔隙的增加間接地影響了與岩體間接觸的機會,同時也提 供在岩體內足以反應(遲滯、擴散或吸附)的時間。

<i>v</i> -				
孔	取樣範圍	5.0E-04~5.0×E-02	假設值	
隙	分佈型態	對數均一分佈	假設	
率	取樣數目	100組	拉丁超立體取樣	
	密度	2.7E+03 (kg/m ³)	SITE94 (SKI, 1996)	
	分配係數	$1.0E-03 (m^{3}/kg)$	SITE94 (SKI, 1996)	
遲滯因子		56.0~6616.0	經式式(4-27)轉換而得	

表 4-19: 遲滯因子引用參數



圖 4-67:母岩孔隙率變動範圍之核種外釋率

Time:時間 Release rate:外釋率

4.6. 案例說明

本計畫潛在處置母岩特性調查與評估階段期將於2017年完成建 立潛在處置母岩功能/安全評估技術,本案例分析擬假設花崗岩為適 用母岩,純粹就安全評估技術之初步評估能力提出說明,為便於進行 計算、分析與說明,將建構虛擬處置場核種外釋之水文地質概念模 型。本節將依據虛擬處置場場址安全評估概念模型與基本情節,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。

4.6.1. 案例背景說明

案例分析之虛擬場址位於測試區東部(圖 4-68),選定虛擬場址考 量之主要因素有(a)測試區東部山區底部具有主要巨積花崗岩(b)測試 區的人口分佈主要集中於測試區西部地區,東部地區人口較少,因此 假設測試區東部主要山區底部為虛擬場址之位置,該區域分別為山區 北側岩體、山區南側與山區東南側。山區北側存在一主要斷層E3斷層 (圖 4-69),山區受E5斷層截切,在山區南側則存在另一未知的斷層。 另外,淺層地下水流向由山區向海岸呈現放射狀分佈(劉建宏等, 2003),主要地下水流方向則以小規模試驗場址之深層地下水流向為 主。淺層地下水流向分為兩種,一種是從E3斷層往西北北方向流動, 另一種是從E5斷層往東南南方向流動;而深層地下水可能流向為東南 往西北方向流動,從E5斷層穿過E3斷層後,繼續往西北北方向流動。 假設虛擬場址(圖 4-70)具有單一母岩岩質,而不考慮其中的岩性差異 及未知可能的裂隙分佈。



E:東西向構造線 W:南北向構造線 A:北側 B:南側 C:東南側

圖 4-68:虛擬處置場位置(圓圈為可能之虛擬場址)



圖 4-69: 測試區東部花崗岩半地塹模式

(林蔚等,2005)



圖 4-70:虛擬處置場核種外釋之水文地質剖面示意

本案例分析之假設處置場(圖 4-70)位於主要山區地表下方500 m 深處,深層地下水流經虛擬場址後,於地質圈的主要流通管道可能為 主導水通道E3,處置場邊界距 E3 斷層約有 1000 公尺的距離。同 時根據淺層地下水流向,生物圈影響的範圍可能集中於山區北側地 區。

4.6.2. 情節分析

情節發展之目的乃在藉由瞭解處置場址地區環境未來之相關可 能演變,以協助確認未來可能演變之關鍵性情節。情節分析的第一步 是基本情節的選擇,基本情節必須是合理的,同時也是建構其它情節 的參考點。本質上,基本情節是假設處置場完全依據既定設計規格所 建造,且外部環境條件未來仍然維持目前的樣子,其概括性假設包含 (吳禮浩,2005):

- 處置場關閉時,所有的工程障壁都能按照設計規格發揮其應有的功能。
- (2)處置場在關閉後的一萬年內,場址區域仍能維持現今的氣候條件。
- (3) 生物圈的生態系統(ecosystem)型態和目前狀況的相似。
- (4) 系統演變的考量時間限制在某時段內。

4.6.2.1. 基本情節的基本假設

- (1) 地質與地表環境保持和現在條件一樣,沒有太大的改變;在進行 模式評估時,處置系統選擇的邊界條件是以現在的條件為基礎, 不考慮未來的演化。
- (2) 工程障壁系統之功能均按照預期,發揮在設計時所付與之功能。

基本情節:

- (1)處置場封閉後,地下水開始入侵,處置場周圍岩體以及緩衝材料 經過一段時間後會重新飽和,膨潤土(即指緩衝材料)回脹產生回 脹壓力,將廢棄物罐四周空隙及處置橫坑的開挖擾動帶封塞。
- (2) 在某個處置時間後,廢棄物罐因腐蝕而失效。
- (3) 在廢棄物罐失效後,部分位於用過核子燃料體表面及晶格間隙與 邊界之放射性核種,遇到地下水時立即溶解(受到該環境下之化 學元素溶解度限度的控制)並外釋到近場環境,而用過核子燃料 基質(matrix)部分則因逐漸變質退化(alteration)而溶解,其所含之 放射性核種隨基質之溶解向外釋出。
- (4) 外釋的放射性核種傳送經過廢棄物罐周圍的緩衝材料到達近場母岩,每個核種的濃度受到該環境下之化學元素溶解度限度的控制。
- (5) 放射性核種以分子擴散(molecular diffusion)的機制通過緩衝材 料層,並依其化學吸附特性而吸附在緩衝材料上。
- (6) 放射性核種通過緩衝材料層後,以平流(advection)、延散 (dispersion)及分子擴散的機制從處置隧道遷移到周圍處置岩體。
- (7) 放射性核種在處置岩體內繼續以平流、延散及分子擴散的機制向 外傳輸與移動。
- (8) 放射性核種遷移出地質母岩後,繼續以平流、延散及分子擴散的 機制經過覆蓋沉積層的傳輸途徑。
- (9) 最後,放射性核種散佈到生物圈,人類經由各種途徑接受到劑量。

4.6.2.2. 基本情節的演化

有關地下水外釋情節已於第4.1.2節說明基本情節與演化及水井 飲用情節,本節擇要如下:

(1)處置場封閉後,地下水重新開始侵入處置場,經過一段時間後, 母岩及緩衝/回填材料會重新飽和,緩衝材料遇水產生回脹將廢 棄物罐周圍空隙以及廢棄物罐與母岩的空隙等填塞。

- (2)處置場封閉10⁵年後,廢棄物罐因腐蝕而失效(此時,廢棄物罐瞬間消失),廢棄物體開始溶解於地下水中,所含放射性核種開始 外釋到近場環境中。
- (3) 放射性核種藉由分子擴散作用外釋,遷移出工程障壁系統進入周 圍母岩。
- (4)從工程障壁系統中遷移出來之放射性核種則隨地下水之流動,繼續在處置場周圍之母岩裂隙中遷移,穿過地質母岩並進入主要導水通道(斷層或破碎帶)。
- (5) 放射性核種在主要導水通道內遷移進入地表的沉積層。
- (6) 沉積層中的放射性核種經由水井之地下抽水而進入生物圈食物 鏈體系。
- (7) 潛在曝露群體因飲用該井水而受到輻射劑量。

4.6.3. 計算與分析

4.6.3.1. 核種釋出率分析

用過核子燃料深層地質處置場系統之主要評估對象為(1)近場(2) 遠場(3)生物圈。近場主要包含為工程障壁及受開挖影響的周圍母 岩,遠場則為構造完整的地質母岩,生物圈則為生物活動時會直接接 觸到的環境區域。核種在近場之遷移機制主要為分子擴散;核種在遠 場(地質圈)中之遷移機制主要為地下水平流與延散及分子擴散;而核 種離開地質母岩後透過種種途徑進入人體內或體外曝露則為生物圈 劑量評估,其機制主要食物鏈及地下水飲用。生物圈劑量評估的主要 目的是分析計算從處置場外釋出來之核種,在生物圈中經由各種傳輸 途徑及食物鏈而對人類所造成的輻射劑量,並與法規值比較,以確定 該處置場的安全性。根據前述基本情節,假定生物圈核種傳輸主要來 自飲用井水;飲用井水情節可分成兩種模式:第一個模式假設地質圈 之核種外釋直接提供作為計算井水中之核種濃度(WELL-97; Vieno,1997),此類似於IAEA之參考案例 ERB1A(IAEA,2003),該 核種濃度即為生物圈飲水情節之源項,WELL-97/ERB1A 模式,簡稱 生物圈模式-1(BIOMOD-1)。第二個模式假設由地質圈之核種外釋,

經過水井附近的淺地層含水層之遷移,然後再進入水井,此種模式類 似為於IAEA之參考案例ERB1B(IAEA, 2003),簡稱生物圈模式 -2(BIOMOD-2)。為符合上述模式本報告之生物圈評估分析則採用 AMBER程式(AMBER, Enviros and Quintessa Ltd., 2003、2005)。

BIOMOD-1 生物圈模式之個人年有效劑量採用下式進行計算:

$$H_{E,i} = C_{w,i} \times I \times DCF_i \tag{4-40}$$

式中:

$$H_{E,i}$$
:放射性核種 i 的年輻射劑量率 (Sv/yr) 。

 $C_{w,i}$: 井水中放射性核種 *i* 的濃度(Bq/m³)。

I: 飲用水的每人年飲用率(m^{3}/yr)。

 DCF_i :放射性核種 i 的攝入劑量轉換係數(Sv/Bq)。

BIOMOD-2 生物圈模式之個人年有效劑量的計算式如下:

其餘參數單位同(4-12)式。

 $C_{w,i}(x,t) = A_{F,i}(x,t,x_0) \times F(x_0)$ (4-42)

式中:

 $C_{w,i}(x,t)$: 放射性核種 *i* 在含水層(*x*,*t*)位置的濃度(Bq/m³)。 $A_{F,i}(x,t,x_0)$: 含水層的傳輸因數(yr/m³)。

4.6.3.2. 生物圈劑量計算參數

在 BIOMOD-1生物圈模式中,水井之核種濃度乃假設源自遠場 之外釋,其分率為1.0 %(Vieno and Nordman, 1999),水井每年之抽 水量為1000 m³/yr,每人每年飲水量則為1.095 m³/yr。 BIOMOD-2生 物圈模式則依據測試區參數(表 4-20,核種攝入劑量轉換係數DCF (dose conversion factor)(表 4-21)乃參考我國游離輻射防護安全標準 (原能會, 2007)及ICRP-72 報告(ICRP, 1996)。

4.6.3.3. 生物圈劑量率分析

BIOMOD-1生物圈模式分析案例之生物圈劑量,近場採用之核種 外釋評估模式為軸/徑向傳輸模式,廢棄物罐垂直與水平置放之結果 分別如圖 4-71及圖 4-72所示,結果顯示劑量率峰值分別為2.27E-8 Sv/yr與2.09E-8 Sv/yr,兩者相差不大。其次,BIOMOD-2生物圈模式 之分析結果則分別如圖 4-73及圖 4-74所示,結果顯示劑量率峰值分 別為1.65E-8 Sv/yr與1.46E-8 Sv/yr,兩者相差不大。比較BIOMOD-1 與BIOMOD-2之結果(圖 4-73至圖 4-74),顯示以BIOMOD-1生物圈模 式分析計算所得的劑量率數值較高,此乃BIOMOD-2生物圈模式增加 考慮近地表含水層之遲滯與稀釋效應,故劑量率降低。經與法規值比 較,BIOMOD-1模式之劑量率峰值低於法規值2.5E-4 Sv/yr(原能會, 2007)。再者,對於整體總劑量率影響最大者為超鈾系衰變鏈核種(圖 4-71至圖 4-74),其中在1.0E+06年前由I-129與Se-79為主要影響總劑 量率之核種,1.0E+06至1.0E+07年之間則是Ra-226、Th-229為主要影
表 4-20:BIOMOD-2 模式數據

參數名稱	數值	單位
含水層內部地下水流速	7.26E-01	m/yr
含水層孔隙率	2.5E-01	-
水力傳導係數	1.0E-05	m/yr
區塊(compartment)長度	180	m
遲滯係數	核種決定	-
延散度	180	m
含水層密度	2000	kg/m ³
水井抽水量	9.0E+04	m ³ /yr

表 4-21:核種DCF 值

计任	攝取(ingestion)	计任	攝取(ingestion)
	DCF值(Sv/Bq)	极種	DCF值(Sv/Bq)
C-14	5.8E-10	Am-241	2.0E-07
Cl-36	9.3E-10	Pu-241	4.8E-09
Ni-63	1.5E-10	Np-237	1.1E-07
Ni-59	6.3E-11	U-233	5.1E-08
Se-79	2.9E-09	Th-229	4.9E-07
Sr-90	2.8E-08	Cm-246	2.1E-07
Zr-93	1.1E-09	Pu-242	2.4E-07
Nb-94	1.7E-09	Pu-238	2.3E-07
Tc-99	6.4E-10	U-238	4.5E-08
Pd-107	3.7E-11	U-234	4.9E-08
Sn-126	4.7E-09	Th-230	2.1E-07
I-129	1.1E-07	Ra-226	2.8E-07
Cs-135	2.0E-09	Am-243	2.0E-07
Cs-137	1.3E-08	Pu-239	2.5E-07
Sm-147	4.9E-08	U-235	4.7E-08
Pu-240	2.5E-07	Pa-231	7.1E-07
U-236	4.7E-08	Mo-93	3.1E-09
Th-232	2.3E-07	Rb-87	1.5E-09
Cm-245	2.1E-07		

(原能會,2005)



(a) 分裂/活化產物



(b) 超鈾系衰變鏈核種

圖 4-71:BIOMOD-1 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐垂直置放)



(a) 分裂/活化產物



(b) 超鈾系衰變鏈核種

圖 4-72:BIOMOD-1 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐水平置放)



(a) 分裂/活化產物



(b) 超鈾系衰變鏈核種

圖 4-73: BIOMOD-2 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐垂直置放)



(a) 分裂/活化產物



(b) 超鈾系衰變鏈核種

圖 4-74:BIOMOD-2 生物圈模式之劑量率(廢棄物罐水平置放)

以 BIOMOD-1 模式定率式分析廢棄物罐垂直置放案例之各時 間點重要核種外釋率比例(圖 4-75),在1.5E+05 年以前,Se-79和 Tc-99合計佔有最大比例,約92%,在2.5E+05 年以前主要是分裂活 化產物之50%比例;時間後期,由於超鈾系衰變鏈核種開始釋出,在 5.0E+05 年超鈾系衰變鏈核種即佔約58%之比例(Np-237和Th-229), 在1.0E+06 年以後主要由超鈾系衰變鏈核種佔大部份比例,Th-232 為其它核種之子核種(Pu-240 ->U-236->Th-232),且其半衰期長達 1.41E+10 年,於時間8.1E+06 年以後只剩下 Th-232 核種還有一些 活度,其它核種活度已非常小。



圖 4-75: 生物圈 BOIMOD-1 之重要核種輻射劑量率比例

4.6.4. 功能評估

目前我國處置概念所採用之廢棄物罐為由銅外殼、鑄鐵內裡所組成。研究芬蘭Olkiluoto研究場址的地下水條件(Ahonen, 1995)及 KM-BH01區域不同深度環境下之水質條件(林鎮國、張育德, 2003), 估算銅材廢棄物罐之腐蝕速率(李瑞益、吳晃昭, 2005)。其分析方法 是以處置期間廢棄物罐近場環境的含氧量及溫度變化概分處置時間 區段,將之劃分為(1)處置初期、(2)處置中期、及(3)處置後期等三個時間區段。

依上述所使用的三個處置時間階段進行銅材之腐蝕深度分析,估 算在不同時間區間的腐蝕深度(表 4-22),且各區段的腐蝕都以線性的 方式計算,忽略腐蝕速率會由於氧化、鈍化膜的成長與加厚而降低, 腐蝕速率之估算採用各區段最初腐蝕速率,其值為各該區段之最高 值,所估算出之腐蝕總深度,應屬足夠保守。在1萬年期間,芬蘭YJH-95 及KM-BH01-W2的腐蝕總深度分別為0.8 cm及0.9 cm。經處置十萬年 時,腐蝕總深度則分別增加為1.5 cm及2.6 cm。因此,若廢棄物罐外 層銅材為5 cm,則在如芬蘭YJT-95及KM-BH01-W2二者的水質條件 下,廢棄物罐的耐蝕性,應可維持廢棄物罐結構完整性達十萬年或更 長的時間。

地下水組成 環境	芬蘭 YJT-95	KM-BH01-W2
處置初期(0~120 年)	0.334 cm	0.331 cm
處置中期(120~120 年)	0.4 cm	0.4 cm
處期後期 1,000 年	0.077 cm	0.182 cm
處期後期 10,000 年	0.77 cm	1.82 cm
評估處置時間長度一萬年之	0.811 cm	0.913 cm
腐蝕總深度		
評估處置時間長度十萬年之	1.504 cm	2.551 cm
腐蝕總深度		

表 4-22:不同時間區間銅材的腐蝕深度評估

4.6.5. 重要參數之不確定性分析

根據第4.6.3.3節之定率式分析結果發現,BIOMOD-1生物圈模式 較BIOMOD-2分析所得劑量率高,且BIOMOD-1之劑量率峰值較法規 限值低,符合法規要求。本節重要參數之不確定性綜合結果乃採用 BIOMOD-1之劑量率結果進行說明。

4.6.5.1. 不確定性與參數敏感度分析之參數說明

進行安全評估之核種外釋不確定性與敏感度分析,參考國內外評 估參數之上下限範圍及分布型態,近遠場評估參數合計共有13個種類 屬分佈型之參數,分別為:(1)緩衝材料密度與孔隙率、(2)緩衝材料 有效擴散係數與分配係數、(3)溶解度限值、(4)母岩密度與孔隙率、 (5)母岩有效擴散係數與分配係數、(6)母岩裂隙內寬與間距、(7)地下 水流速、及(8)延散度,各參數說明如下:

(1) 緩衝材料密度與孔隙率

根據我國現階段之處置概念,緩衝材料係採用MX-80膨潤土,故 參考國內、外以MX-80膨潤土做為緩衝材料的評估報告數據,做 為不確定性與參數敏感度分析數據的上、下限值。緩衝材料密度 上、下限分別為2,780 kg/m³及2,640 kg/m³,採用均勻分佈型態; 孔隙率上、下限分別為0.43及0.36,採用均勻分佈型態。

- (2) 緩衝材料之有效擴散係數與分配係數
 因緩衝材料採用MX-80膨潤土,故緩衝材料之有效擴散係數及分配係數則以SITE-94(SKI,1996)、SR-97(Lindgren and Lindström,1999)、TILA-99(Vieno and Nordman,1999)評估報告數據做為評估模式的主要引用來源。分配係數上、下限彙整如表 4-23,有效擴散係數上、下限分別為2E-10 m²/sec及4E-11 m²/sec(表4-24)。
- (3) 溶解度限值

溶解度限值主要依據國際間相關文獻(SITE-94、SR-97、TILA-99、H12(JNC,2000a),這些國家在地化條件大致以高pH

值且還原條件之淡水為基本之分析條件,因此本案例亦以高pH 值且還原條件之溶解度限值做為參數數據上下限值引用來源(表 4-25)。

遠場核種傳輸數據之不確定性與敏感度分析,依性質可區分為幾 何特性、岩體特性、傳輸特性、及核種特性等,其中在地質岩體空間 上往往存在不確定性來源,包含本身岩體的異質與異向性、採樣的誤 差及觀測上的疏忽等,勢必會相對地程度上影響核種外釋,因此參考 國外文獻及國內本土數據,在合適之分佈型態上,以拉丁超立體取樣 法 (Latin hypersube sampling, Iman et al., 1980; Iman and Shortencarier, 1984; Helton and Davis, 2003; 朱信忠, 2002; 朱 信忠、吴典諺,2002)進行參數取樣(密度與孔隙率、有效擴散係數、 裂隙內寬與間距、地下水流速、延散度、分配係數等),並以數據組 排列技術(Scheuer and Stoller, 1962; Iman and Conover, 1982)將所 取得的數據組進行無相關排列後,再行送入電腦程式進行核種外釋率 分析。數據組的排列方式有三種分別為:隨機排列、無相關排列、及 特定相關排列。對於無相關排列的數據組而言,參數數值之變動是獨 立的、無相關性的;也就是參數與參數間之相關性係數 (partial correlation coefficient)非常小。對於隨機排列的數據組而言,參數 與參數間之相關性是隨機的;有的相關性係數可能很大,有的可能很 小,它們是隨機的,無法預測。至於特定相關排列的數據組,則必須 要對各個參數間之相關性有充分的了解才能進行;例如知道岩體密度 與孔 隙 率 間 具 有 0.7的 相 關 性 , 那 麼 就 可 對 數 據 組 進 行 特 定 相 關 排 列,使得岩體密度與孔隙率間之相關性係數值接近0.7,而餘者則非 常小。

元素	SITE-94	SR-97	TILA-99	Min.	Max.
С	0.01	0	0	0	0.01
Cl	0	0	0	0	0
Ni	1	0.1	0.5	0.1	1
Se	0.01	0.003	0.005	0.003	0.01
Sr	0.02	0.01	0.2	0.01	0.2
Zr	1	2	1	1	2
Nb	0.5	0.2	1	0.2	1
Tc	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1
Pd	0.1	0.01	0.1	0.01	1
Sn	0.2	3	0.2	0.2	3
Ι	0.001	0	0.001	0	0.001
Cs	0.01	0.05	1	0.01	1
Sm		1	1	1	1
Pu	5	3	3	3	5
U	5	1	0.5	0.5	5
Th	1	3	3	1	5
Cm	2	3	3	2	5
Am	2	3	3	2	5
Np	1	3	1	1	5
Ra	0.1	0.01	0.5	0.01	0.5
Pa	1	0.3	0.2	0.2	1

表 4-23:緩衝材料之分配係數

分配係數單位:(m³/kg)

表 4-24:有效擴散係數上下限值

介質	SITE-94	SR-97	TILA-99	GRS-SPA	Min.	Max.
緩衝材料 有效擴散 係數 (m ² /sec)	4.00E-11	2.00E-10	1.00E-10	-	4.00E-11	2.00E-10
母岩有效 擴散係數 (m ² /sec)	3.00E-14	4.00E-14	1.00E-13	3.17E-11	3.00E-14	3.17E-11

- (4) 母岩密度、孔隙率 母岩之密度與孔隙率皆引用國內花崗岩測試區現地調查所得數 據此兩項參數引用最大值各為0.0079、2680 kg/m³(楊明宗等, 2003;林蔚等,2005),最小值為0.0038、2620 kg/m³。
- (5) 母岩擴散係數與分配係數
 有效擴散係數參數則以評估報告所提供之最大與最小值,各為
 3.17E-11 m²/sec 與3.00E-14 m²/sec ((表 4-18);分配係數則採處
 置母岩為結晶岩類之芬蘭TILA-99報告之分配係數(表 4-26)。
- (6) 裂隙內寬、裂隙間距 依據測試區現地調查數據,經統計分析採裂隙內寬最大與最小值 各為1.32E-2 m、2.50E-4 m,裂隙間距最大與最小值各為0.185 m、0.038 m(表 4-27)。
- (7) 母岩地下水流速

母岩地下水流速由水力傳導係數換算而得,水力傳導係數採58組 數據(BH01-02-04 裂隙連通性及跨孔追蹤試驗;張傳聖等, 2005),經統計分析後取95%上限及5%下限作為採樣上下限值, 以對數常態分佈(log-normal distribution)型態並假設水力梯度為 0.1情況下,換算為母岩地下水流速最大與最小值為46.451 m/yr 與1.422 m/yr(表 4-27)。

(8) 延散度

延散度(dispersivity)數值取為傳輸距離之1/40~1/5作為上下限值,引用最大值與最小值各為200m與25m(表 4-27)。

參數敏感度分析採用階步迴歸技術(stepwise regression technique, Neter et al., 1990;朱信忠, 1997),進行分析時可以直 接使用原始數據組(raw data),也可在分析前,先將每一變數(含獨立 變數與應變數)之100個數值轉換成其對應之階位(rank),然後再根據 這些階位數據組進行迴歸分析;另外一種數據處理方式是兩者混合, 對於線性型分佈(如均勻分佈, uniform distribution;常態分佈, normal

SNFD2009

distribution 等)之參數直接採用原始數據,而對數型(logarithmic,如 log-uniform、log-normal 等)則取其對數值,然後再根據這些階位數 據組進行迴歸分析。將數值轉換成階位之處理方式,可以視為是數據 線性化處理的一種技術,所謂階位轉換,以 100 組數據為例,就是 根據其數值之大小,最小者以 1 來取代,最大者以 100 來取代, 餘者類推。對於參數敏感度分析而言,欲分析參數敏感度之優先順序, Arnold(2006)認為使用階位數據進行參數敏感度分析,其結果將會比 使用原始數據者來得有意義,其相關性關係會比較明顯,尤其是對於 橫跨數個數量級之數據組的分析。不過採用原始數據組來進行分卻有 一個好處,那就是所得的迴歸式可以被用來預測系統在其他條件下的 表現,而採用 Rank 數據(階位數據)分析所得的迴歸式就無此功能。 階步迴歸分析的一個特點是:越重要的變數(即本案例分析之參數)會 越早納入迴歸式,因此從迴歸式中變數排列的順序即可知道變數之優 先順序。

為探討各參數之敏感度,其可採用的數值組也有數種不同的方 式,例如可以選定某一特定時間點之外釋率,也可以採用每一回合之 外釋率峰值當標的物,也可以採用每一回合之外釋率峰值發生的時刻 當標的物。由於輻射劑量率是真正關心的焦點,故分析標的物將設定 為外釋率峰值,並採用數據階位轉換為進行參數敏感度分析。

テキ CITE O	SITE 04	SR	-97		Ц 12	Min	Moy
儿亲	SIIE-94	Beberg	Ceberg	TILA-99	п-12	IVIIII.	IVIAX.
C	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	—	1.E+06	1.E+06
Cl	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	—	1.E+06	1.E+06
Ni	2.E+00	1.E+06	1.E+06	1.E-01	—	1.E-01	1.E+06
Se	2.E-05	3.E-06	3.E-06	1.E-03	3.E-06	3.E-06	1.E-03
Sr	1.E-03	3.E+00	1.E-01	1.E-02	—	1.E-03	3.E+00
Zr	6.E-07	3.E-06	3.E-06	5.E-05	1.E-03	6.E-07	1.E-03
Nb	1.E-05	1.E+00	1.E+00	1.E+00	1.E-01	1.E-05	1.E+00
Тс	3.E-05	8.E-06	8.E-06	5.E-05	4.E-05	8.E-06	5.E-05
Pd	1.E-03	4.E-06	4.E-06	1.E-05	1.E-06	1.E-06	1.E-03
Sn	2.E-05	4.E-06	5.E-06	5.E-03	5.E-03	4.E-06	5.E-03
Ι	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	—	1.E+06	1.E+06
Cs	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06	1.E+06
Sm	_	8.E-04	8.E-04	1.E-02	2.E-04	2.E-04	1.E-02
Pu	2.E-06	5.E-07	1.E-07	5.E-04	3.E-05	1.E-07	5.E-04
U	1.E-02	1.E-04	1.E-04	3.E-04	8.E-06	8.E-06	1.E-02
Th	4.E-03	1.E-06	1.E-06	5.E-04	5.E-03	1.E-06	5.E-03
Cm	7.E-06	2.E-06	9.E-07	5.E-05	2.E-04	9.E-07	2.E-04
Am	7.E-06	9.E-05	9.E-05	5.E-04	2.E-04	7.E-06	5.E-04
Np	2.E-06	1.E-04	6.E-05	5.E-05	2.E-05	2.E-06	1.E-04
Ra	5.E-05	5.E-04	1.E-01	1.E-04	1.E-09	1.E-09	1.E-01
Pa	2.E-05	3.E-04	3.E-04	1.E-05	2.E-05	1.E-05	3.E-04

表 4-25:核種之溶解度限值

溶解度限值單位:(mol/m³)

元素	SITE-94	SR-97	TILA-99	GRS-SPA	Min.	Max.
С	0.001	0.001	0.001 0.001		0.001	0.001
Cl	0	0	0.0001	0	0	0.0001
Ni	0.5	0.02	0.2	0.5	0.02	0.5
Se	0.01	0.001	0.0005	0.01	0.0005	0.01
Sr	0.005	0.0002	0.01	0.01	0.0002	0.01
Zr	4	1	0.4	1	0.4	4
Nb	2	1	0.1	1	0.1	2
Tc	0.01	1	0.2	0.5	0.01	1
Pd	0.1	0.01	0.1	0.5	0.01	0.5
Sn	0.1	0.001	0.2	0.5	0.001	0.5
Ι	0.0005	0	0.0005	0.001	0	0.001
Cs	0.1	0.05	0.1	0.042	0.042	0.1
Sm	_	2	0.04	5	0.04	5
Pu	5	5	2	5	2	5
U	5	5	1	1	1	5
Th	1	5	0.5	1	0.5	5
Cm	5	3	0.5	5	0.5	5
Am	5	3	0.5	5	0.5	5
Np	1	5	0.5	1	0.5	5
Ra	0.5	0.02	0.5	0.5	0.02	0.5
Pa	0.5	1	0.2	1	0.2	1

表 4-26:花崗岩之分配係數數值

分配係數單位:(m³/kg)

參	範圍	分布型態	備註	Reference
數		(平均值、標準差)		
	最小值0.038	均匀分佈	間距最小情況	EEL建議
裂	最大值0.185		BH01_186-196_(2	值:
隙	單位:m		49,82) : 0.081m	2/19技術討
間			BH02_158-176_(2	論會(CCU
距			48,70) : 0.038m	提供)
			BH04_50-75_(43,	
	目14050日4	当你八人	82) · 0.185m	71 m
	取小值2.30E-4	常悲分佈 広告: 470F 0		5 用
列	取大值1.32E-2	均值 · 4./3E-3		BH-01-02-0 1 - 列 欧 内
农政	甲位·m	標準差:5.09E-3		4~农原内
原内				見做平留及
内安				凶 式刀 机 ^紀
見				不,
				 旅停至寺 (2005)
		對數堂能公佑	K估控對對世能	(2003) K估引用歐
ĸ	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓	到 数 〒 ◎ 万 №	八值休 <u>时</u> 级市恐 公佑取槎後,乖上	民间介州欧
<i>h</i>	取八值+0+.51 單位:m/yr	Log 与 值 · 1.91	水力梯度(01)求	(2006)
値		L0g你干左,0.757	况从没(0.1)永 得丹兰地下水流	(2000) BH01 、
道			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	BH02、
「係			×C	BH04 <i>≿</i> 58
對				組資料套疊
~~				分佈曲線
延	25~200	均匀分布		L/40~L/5 ,
散	單位:m			L為遠場傳
度				輸距離
母	最大2680	均匀分布		
岩	最小2620			
密	單位:kg/m ³			
度				
母	最大0.79%	均匀分布		
岩	最小0.38%			
孔				
隙				
率				

表 4-27:遠場機率式分析之參數

4.6.5.2. 不確定性與參數敏感度分析

(1) 近場

分析近場徑向RT-NV評估模式(INPAGN) 100 組個別總外釋率 (圖 4-76),其中灰色線為個別總外釋率,另以不同顏色繪出 5 百分位數 (percentile)、50百分位數、95百分位數、及平均值之 曲線,圖中叉號為定率式分析之總外釋率曲線。若定率式之評估 曲線落在 5百分位數或 95百分位數曲線之外,此則表示運跑定 率式時所採用的某些數據是趨向於不保守(non-conservative)。結 果可知確定式分析之總外釋率約介於5百分位數~50百分位數之 間。



圖 4-76:近場核種外釋率不確定性分析結果

將數據經由階位轉換後進行階步迴歸分析 (Step-wise regression),得下式之迴歸關係式:

 $Rank(PeakRate) = 3.1959E+01 + 5.1106E-01 \times Rank(DCBENT)$

- 4.2350E-01 × Rank(RAKDBEN)
+ 2.5466E-01 × Rank(SESOL)
+ 1.7240E-01 × Rank(CMKDROCK)
- 1.6242E-01 × Rank(SRKDROCK)
+ 1.5915E-01 × Rank(RASOL)
- 1.4423E-01 × Rank(CSKDROCK)

參數代號說明列於表 4-28。階步迴歸分析會先計算出誤差平方 總和值(sum of square error),接著每欲納入(或刪除)一個參數來 進行分析時,會再計算誤差平方總和值的變化幅度;若變化幅度 大於所設之篩選準則,則將該參數納入迴歸式中,直至誤差平方 總和值的變化幅度低於所設之篩選準則時,方結束分析。由此可 知在所設定的迴歸分析條件下共有 7 個參數被選上,其優先順 序由前往後依序為:DCBENT、RAKDBEN、SESOL、 CMKDROCK、SRKDROCK 、RASOL、CSKDROCK。式中參數 前的數字代表迴歸曲線的斜率,若為正,則表示該參數與外釋率 峰值呈現正相關,反之則為負相關,數字越大,代表參數影響愈 明顯。由於 DCBENT 參數(緩衝材料擴散係數)排在第 1 位, 因此 DCBENT 是最需要優先釐清與縮小不確定性範圍的參 數。各參數變化值對近場釋出率之散亂圖(scatter plot;圖 4-77),圖中每個小圖就是每個參數對外釋率峰值的散亂圖,小圖 中的縱軸都為總外釋率峰值,而橫軸則為各個參數之數值,小圖 上的標籤為參數代表符號。對於被挑選上的參數而言,圖 4-77 之小圖以由左而右、由上而下之順序,代表與總外釋率峰值之影 響程度的大至小,即左上角第一個參數對近場釋出率最敏感,然

後往右遞減至最右端,再往下一列之最左側而依序遞減,圖上紅 色曲線者就是被挑選上的參數,而紅色線就是迴歸線。分析結果 顯示緩衝材料擴散係數(DCBENT)及Ra在緩衝材料之分配係數 (RAKDBEN)與對近場核種釋出率最敏感。除了上述兩個最敏感 參數外,後續五個影響參數分別為Se核種溶解度、Cm及Sr核種 在母岩之分配係數、Ra核種溶解度、Cs核種在母岩之分配係數。 由分析結果可知,緩衝材料擴散係數對近場核種外釋率影響最為 顯著,為降低評估結果的不確定性,須特別加強此參數試驗結果 的精確性。

(2) 遠場

分析遠場外釋率(採INPAGFL)不確定性,可知100回合定率式分 析之總外釋率(圖 4-78: 遠場核種外釋率不確定性分析結果; 圖 中Time after disposal意指處置後的時間)約介於5百分位數~50百 分位數之間, 並低於平均值。分別計算100回合總外釋率峰值及 發生時間之 CCDF(complementary cumulative distribution function)分佈,分別表示如圖 4-79及圖 4-80,圖中同時標示出 定率式分析之核種外釋率峰值與發生時刻,分別比較近場 (1.7015E+05 Bq/yr, 1.0012E+05 年)與遠場(7.5251E+04 Bq/yr, 2.8E+5 年)之結果(圖 4-79),可知近場之核種總外釋率峰值有 58% 的機率會大於定率式分析結果,而遠場者則約有 80% 的 機率會大於定率式者,因此遠場定率式分析之參數數值設定並不 保守。圖 4-79之結果也顯示近場之核種總外釋率峰值的範圍為 1.0471E+05 Bq/yr 至 3.8973E+05 Bq/yr 之間,而遠場之核種總 外釋率峰值的範圍為 6.2269E+04 Bq/yr 至 3.546E+05 Bq/yr 之 間,因此遠場核種傳輸因地質母岩之吸附作用而降低核種總外釋 率峰值。圖 4-80之結果則顯示近、遠場之核種總外釋率峰值發 生時刻的 CCDF 分佈相差不大,這表示核種在 1000 公尺地質 母岩中之傳輸時間,並沒有明顯的延遲,這是因為所設定之地下 水流速較快的緣故,其中約有 68% 是因瞬釋分率(instant release

fraction)核種而造成早期即有峰值的出現,對於這一部分的釋出,遠場傳輸之遲滯作用效果不大。將數據以階位轉換後經迴歸分析,可得迴歸關係式:

Rank(PeakRate) = 2.4720E+01 + 5.7359E-01 × Rank(DARCYVEL) + 3.3309E-01 × Rank(DCBENT) - 3.1906E-01 × Rank(RAKDROCK) + 2.0982E-01 × Rank(RASOL) + 2.0262E-01 × Rank(TCSOL) - 1.8438E-01 × Rank(TCSOL) - 1.5973E-01 × Rank(THKDBEN) - 1.4545E-01 × Rank(TCKDROCK)

參數代號見表 4-28。由此可知在所設定的迴歸分析條件下共有 8 個參數被選上,其優先順序由前往後依序為:DARCYVEL、 DCBENT、RAKDROCK、RASOL、TCSOL、RAKDBEN、 THKDBEN、TCKDROCK。顯示影響遠場外釋率較明顯者有達西 流速(DARCYVEL)、緩衝材擴散係數(DCBENT)、Ra溶解度 (RASOL)、Tc溶解度(TCSOL),以上呈正相關。Ra於母岩之 Kd(RAKDROCK)、Ra於緩衝材之Kd(RAKDBEN)、Th於緩衝材之 Kd(THKDBEN)、Tc於母岩之Kd(TCKDROCK),以上呈負相關。 影響核種於遠場外釋最重要參數為達西流速(DARCYVEL),即水 流於母岩中之傳導能力,故母岩滲透性質與導水能力,將是造成 遠場核種外釋率的主因。

評估參數	代號	使用區域	註
裂隙內寬	APERTURE	近、遠場	
達西流速	DARCYVEL	近、遠場	
核種在膨潤土中之擴散係數	DCBENT	近場	
核種在母岩中之擴散係數	DCROCK	遠場	
膨潤土之密度	DENBENT	近場	
母岩之密度	DENROCK	近、遠場	
延散度	DISPERSITY	遠場	
膨潤土之孔隙率	POROBENT	近場	
EDZ之孔隙率	POROEDZ	近場	
母岩之孔隙率	POROROCK	近、遠場	
裂隙間距	SPACING	近、遠場	
評估參數	代號	使用區域	
核種溶解度	(Nuclide)-SOL	近場	*
核種在膨潤土中之分配係數	(Nuclide)-KDBEN	近場	*
核種在母岩中之分配係數	(Nuclide)-KDROCK	近、遠場	*

表 4-28:評估參數代號

(*與各別核種特性有關)

DCBENT	SESOL	ICMKDROCK	SRKDROCK	RASOL	CSKDROCK	APERTURE
DARCYVEL	DENROCK	POROBENT	POROEDZ	, SPACING	AMSOL	CMSOL
NISOL	NPSOL	PASOL	PDSOL	PUSOL	SMSOL	SNSOL
SRSOL TCSOL	THSOL	USOL	ZRSOL	AMKDBEN	CKDBEN	CMKDBEN
CSKDBEN I IKDBEN	NBKDBEN	NIKDBEN	NPKDBEN	PAKDBEN	PDKDBEN	PUKDBEN
SEKDBEN	SRKDBEN	TCKDBEN	THKDBEN	UKDBEN	ZRKDBEN	AMKDROCK
CLKDROCK	INBKDROCK	J NIKDROCK	NPKDROCK	PARDROCK	PDKDROCK	[PUKDROCK
RAKDROCK	SMKDROCK	SNKDROCK	TCKDROCK	THKDROCK	UKDROCK	ZRKDROCK

圖 4-77:近場核種外釋率敏感度分析之散佈圖



圖 4-78: 遠場核種外釋率不確定性分析結果



圖 4-80:近、遠場核種總外釋率峰值發生時刻之CCDF

(3) 生物圈

以 BIOMOD-1 生物圈模式分析 100 回合運跑的輻射劑量率不 確定性 (圖 4-81:生物圈輻射劑量率不確定性分析結果 (BIOMOD-1 模式))及 5百分位數、50百分位數、95百分位數、 平均值及定率式輻射總劑量率峰值,以供比較。結果可知定率式 分析之曲線座落在 5百分位數與 50百分位數之間,這表示定率 式分析之參數數值設定並非保守,因此導致輻射總劑量率峰值曲 線出現偏低之現象。輻射總劑量率峰值範圍為 1.5455E-08 Sv/yr 至 6.681E-07 Sv/yr 之間,而其對應的發生時刻為 1.0002E+05 年至 1.4E+06 年之間,輻射總劑量率峰值與其發生時刻之分佈 圖如圖 4-82:總劑量率峰值對發生時刻之散佈圖(BIOMOD-1 模 式)

所示,圖中之叉號所示者為 100 回合之個別對應數值,而圓點 所示者則為定率式分析之結果。圖 4-82:總劑量率峰值對發生 時刻之散佈圖(BIOMOD-1 模式)

之結果顯示有一部分劑量率峰值發生在廢棄物罐腐蝕損壞的時刻附近,此部分是由瞬釋分率核種所造成,這一部分的劑量率並 非最大;另外有一部分是锕系衰變鏈核種所造成,這一部分釋出 的時間較晚。



圖 4-81: 生物圈輻射劑量率不確定性分析結果(BIOMOD-1 模式)



圖 4-82:總劑量率峰值對發生時刻之散佈圖(BIOMOD-1 模式)

將數據以階位轉換後經迴歸分析,可得迴歸關係式:

 $Rank(PeakDose) = 4.8222E+01 + 6.0065E-01 \times Rank(DARCYVEL)$

- 4.8115E-01 × Rank(RAKDROCK)

+ 1.9196E-01 × Rank(DCBENT)

- 1.7051E-01 × Rank(RAKDBEN)

+ $1.4833E-01 \times Rank(RASOL)$

 $+ 1.5853E-01 \times Rank(SRSOL)$

 $-1.3941E-01 \times Rank(DCROCK)$

 $-1.4110E-01 \times Rank(AMKDBEN)$

- 1.4194E-01 × Rank(THKDBEN)

+ 1.2871E-01 × Rank(USOL)

- 1.2846E-01 × Rank(IKDROCK)

+ 1.2799E-01 × Rank(AMKDROCK)

- 1.1521E-01 × Rank(NPKDROCK)

+ 1.1181E-01 × Rank(TCKDROCK)

1.0511E-01 × Rank(DISPERSITY)

參數代號見表 4-28。由此可知在所設定的迴歸分析條件下共有 15 個參數被選上,其優先順序由前往後依序為:DARCYVEL、 RAKDROCK、DCBENT、RAKDBEN、RASOL、SRSOL、DCROCK、 AMKDBEN、THKDBEN、USOL、IKDROCK、AMKDROCK、 NPKDROCK、TCKDROCK、DISPERSITY。以階步式迴歸分析技 術來進行參數敏感度分析,可以利用分析準則之設定限制被選上 之參數數目的多寡,所設定的準則越嚴苛,則所挑選上的數目就 越少。迴歸分析之結果顯示影響輻射總劑量率較明顯者有達西流 速(DARCYVEL)、Ra於母岩中之Kd(RAKDROCK)、緩衝材擴散 係數(DCBENT)、及其它等。本案例分析結果顯示,影響輻射總 劑量率最重要參數為達西流速(DARCYVEL),即水流於母岩中之 傳導能力,故母岩滲透性質與導水能力,將是影響生物圈劑量率 的主要因子,故在進行相關岩體或母岩的滲透性與傳導能力的評 估時,應確實掌握相關數據,以備採用合理數值。

5、結論與建議

5.1. 地質環境研究

在排除非技術性的議題條件下,本報告在地質環境研究方面已建 構500公尺深度結晶岩體之特性調查技術及地質概念模式的開發與建 置。報告中對地質環境的資料整合論述,在目前「潛在母岩特性調查 與評估階段」僅針對我國是否存在可做為潛在處置母岩之岩體以全國 角度綜觀其地質概況、主要構成岩體、水文地質、變質作用產物、地 下資源種類與分布等地質環境的研究現況,特別是針對地震活動、斷 層活動、地殼上升與剝蝕作用、火成活動及氣候變遷與海平面變化等 現有研究成果進行回顧說明。研究結果顯示:台灣地區雖處於地質不 穩定帶,但活動構造、地震、火山活動及地質災害均有其侷限分布的 特性;除了離島地區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,根據最新研究顯示可能近百萬年來已邁入穩定 地塊條件,建議亦可作為後續潛在處置母岩的調查對象。除了岩體穩 定性的研究重點外,未來亦必須加強本島花崗岩規模、分布與主要構 造帶延伸等相關研究。以台灣地區未來15萬年尺度之可能氣候變遷而 言,最高的海水面可能比現在高7m,最低的海水面可能比現在低 130m。台灣地震的成因主要來自於斷層錯動,災害性地震主要發生 於台灣西部,主要原因是西部地區開發較早、經濟建設發達、人口集 中,另一方面是西部地區地震的震源較淺。台灣地區的地下資源,除 淺層地下水外,尚有生產者為大理岩、石灰岩、白雲岩、蛇紋岩、雲 母、矽砂、黏土、石油與天然氣,但規模均相當有限。

本報告關於潛在處置母岩基本特性研究的相關成果,摘要說明如下:

(a) 花崗岩質潛在處置母岩:

就現有地質資料來看,花崗岩的分布以台灣東部中央山脈中花崗岩出露最多,西部離島則有金、馬、烏坵等島嶼出露花崗岩。

(i) 本計畫過去成果驗證了離島地區花崗岩,自早白堊紀燕山運動(Yanshanian Orogeny)以來,此區即未再次受到造山運動

影響,少有地震,在一千多萬年來處於較穩定的地區,僅隨 台海長期張裂活動而抬升、剝蝕,及海水面升降作用所影響;就地質特性而言,具備做為處置母岩的潛能。離島花崗 岩目前並無主要礦產資源開採。

- (ii) 根據空中磁測調查結果發現,台灣東部花崗岩體可分成兩 區,磁測資料有明顯差異:一為夾於片岩層中的岩體(以源 頭山、飯包尖山及奇瑤谷岩體為主),一為夾於大理岩層中 的岩體(以大濁水、溪畔及開南岡岩體為主)。雖然台灣東部 花崗岩體自6.5百萬年以來受到「弧陸碰撞」作用影響發生 造山運動及變質作用,因變質作用形成的葉理構造雖不影響 地下水流動,但斷層與破碎帶為主要導水通道,其所含裂隙 填充物及葉理的次生礦物,可能對核種吸附與遲滯效應扮演 重要角色。另外,根據芬蘭、瑞典及日本均有文獻指出花崗 岩及花崗片麻岩,因變質作用產生之變質礦物與次生礦物, 對核種吸附與遲滯作用有顯著影響。此外,但根據最新文獻 資料顯示,台灣東部花崗岩體位於台灣東部地震分布較少的 地區,抬升與剝蝕速率亦低於中央山脈其他地區,且近百萬 年來所在地塊已廣泛發生張裂構造,就地質構造學理上而言 可能已邁入較穩定階段,具備做為處置母岩的潛能,但因本 區前人研究較少,故須加強其岩體穩定性、規模、分布與主 要構造帶之相關研究調查工作。本區花崗岩體本身並無主要 礦產資源開採,而某些岩體周圍區域,除尚有水泥原料開採 外, 並無主要礦產資源開採。
- (b) 泥岩質潛在處置母岩:

台灣泥岩分布主要在西南部平原區、及麓山帶,及海岸山脈等 地,屬於未變質的泥岩層;另外,在雪山山脈及中央山脈亦有泥 岩層出露,屬於輕度變質的泥岩(包括硬頁岩、板岩等)。台灣西 南部泥岩地層並非全由泥岩所組成,其夾有若干厚薄不一的砂岩 夾層,此些砂岩層的所在層位不定,多為古河道沉積砂層。泥岩

層的主要形成時代,屬中新世晚期至更新世,亦即距今約5.5百 萬年至40萬年之間所沉積而成。

- (i) 西南平原區地表下之泥岩地層,地下700公尺以上多為更新 世以來沉積含薄層砂岩的泥岩層,先天上,因泥岩層阻隔使 地下水垂向流通不易。然而,因國內西南部人口密集度高, 沿海地區魚塭養殖業發達,超抽地下水而使地層下陷,且西 南部地下水因潟湖的蒸發作用而具高鹽度特徵,致使民井加 深取用深層地下水,進而導致地下水流速加快現象,不利深 地層處置。
- (ii) 國內西南部地區活動構造多、地層隆升快但剝蝕率高,山地 多形成泥岩惡地形;此外,此區地震深度淺、災害性地震頻 率高、泥岩層中夾有富甲烷及二氧化碳的天然氣儲存層、主 要構造帶沿線又有泥火山噴發作用,上述天然事件特性亦為 泥岩處置條件評估要考慮的影響條件。
- (iii)中央山脈的泥質岩層地形險峻、因複雜的構造作用形成許多 剪切帶與破碎帶常順著板岩及硬頁岩的葉理構造分布、且受 高雨量及風化作用影響具有較高的剝蝕率等因素,可能影響 用過核子燃料處置功能。加上921震後地震分布集中在中央 山脈泥質岩層分布地區,導致桃、竹、苗、中、投等縣山區 地層鬆動,每每颱風豪雨即導致山崩、地滑及土石流。上述 因素說明分布於中央山脈的泥岩層,若規劃作為潛在處置母 岩調查對象,需要更精細的調查技術來避免上述天然事件的 影響;至於海岸山脈泥岩因為延伸性有限,多為惡地形,又 位於弧陸碰撞帶之主要地震、斷層活動帶上,亦不建議列為 調查對象。
- (c) 其他:

台灣其他具有潛在處置母岩條件的岩層為西部海域的中生代基 盤岩。根據本計畫之空中磁測初步解析結果,並參考中油公司西 部海域及平原區震測與鑽井資料,發現西部海域中生代基盤岩, 除花嶼以外均位於海下1000 m深度以下,越往本島延伸越深(西

部平原下超過2000 m深),因此岩層分布已超出目前處置概念設計的深度,除根據空中磁測資料進行岩層及構造分布之資料解析外,現階段並未規劃進一步推展深層地質特性調查工作。

5.2. 處置技術的研究發展

5.2.1. 地質調查技術

處置技術的研究發展在地質調查技術方面,初期除了建構於國內 既有良好的地質調查技術,並與國內學術界保持良好的合作交流模式 外,從長程處置計畫開始至今,台電公司亦透過國際合作與交流,完 成了多項母岩深地層特性調查所需的現地調查與資料解析技術的研 究發展工作,依特性可分為地球物理、水文地質、地球化學與大地應 力等四大類。本報告透過相關技術的發展與實際應用成果(詳第2.1.6 節與第4.6節),說明我國目前已具備500公尺深度結晶岩體的深地層特 性調查與資料解析的相關基礎技術。除此之外,為因應後續詳細調查 所需的技術需求2017年向主管機關提報技術可行性評估報告需要,相 關技術發展重點簡述如下:

(a) 驗證技術的研發:

為具體呈現我國處置技術研發成果對過去已建立之調查與評估 技術將循國外發展經驗同時參酌國內地質環境特性在經費允許 下逐步發展自主相關驗證技術,以確保自主技術的品質與可行 性。

- (b) 地球物理調查技術: 後續擬加強空中電磁探測、三維大地電磁探測、岩層破裂微震監 測、多方位垂直震測等技術研究發展工作。
- (c)水文地質調查技術: 岩體地下水流速是參數敏感度分析結果中影響核種外釋率的重要因子,因此特別需加強地下水流速的量測技術與能力,後續擬建議加強水力掃瞄試驗、大型示蹤試驗、地層裂隙幾何分析技術 與模擬技術的相關研究發展工作。
- (d) 地球化學調查技術:

擬建議加強裂隙水質與溶解性氣體長期監測技術的相關研究發展工作。

(e) 大地應力調查技術: 配合未來工程開發與處置場設計需要,大地應力調查技術的相關 研究發展工作,例如音射法與變形率變化法等,亦須儘早規劃展 開。

5.2.2. 廢棄物本體

我國目前考量是將用過核子燃料直接處置,因此廢棄物本體即指 用過核子燃料。為進一步瞭解廢棄物體的整體特性及對周遭環境可能 產生的反應,促進對核種遷移現象的瞭解,未來技術發展規劃可朝向 用過核子燃料之瀝濾、氧化、燃料護套鋯金屬之腐蝕機制與特性等方 向推動。

5.2.3. 廢棄物罐

廢棄物罐的壽命應有多長並無一定標準,端視其在廢棄物罐於多 重障壁概念扮演的角色而定。用過核子燃料在熱液(hydro-thermal)環 境下之化學耐久性很差(亦即瀝濾率會增加),因此為減少放射性核種 的釋出量,應避免用過核子燃料在熱液條件下與地下水接觸。用過核 子燃料中的分裂產物:Sr-90及Cs-137(半化期約為30年)為主要的產熱 核種,故若廢棄物罐能維持300年(10個半化期)以上而不破裂,此時 用過核子燃料的衰變餘熱已降至最初的千分之一左右,應可排除發生 熱液效應的可能性。

選擇廢棄物罐的材料時,首先須符合法規要求,其次再考慮材料 價格及工業來源。廢棄物罐容易被氧和硫所腐蝕,這些物質存在於處 置場通道和處置坑中,也有的是被地下水以溶解的形式帶來,而有些 氧化劑則是由水被輻射水解所產生。廢棄物罐的材質與厚度直接影響 其被腐蝕的速度及障壁功能,多種腐蝕形式中,以均勻腐蝕、局部腐 蝕(罅隙腐蝕及孔蝕)及應力腐蝕龜裂對廢棄物罐的壽命可能構成威 脅。另外,常伴隨腐蝕反應而發生的氫脆化亦是應注意的問題。因此

廢棄物罐研究是為了找出最適宜處置場特性的容器材料,為達到此目 的,必須配合處置場環境特性,進行多種材料的不同腐蝕模式研究, 而這些材料至少須分屬兩類不同材質,以避免實驗時出現共同失效模 式。

目前已針對銅質廢棄物罐材料篩選考量因素、準則及程序,並針 對銅質廢棄物罐腐蝕模式以評估腐蝕速率及使用壽命。在後續的研究 方面,應強化地化評估模式(如地化分析程式EQ3/6)之應用,評估工 程設施在引入處置母岩後可能之地化演變情況,以及未來環境之變 遷。在結構力學方面,焊接及其程序,仍為廢棄物罐結構中亟需強化 的重點。

5.2.4. 緩衝回填材料

粘土、天然及合成沸石、活性碳、金屬粉及乾燥劑等都曾被考慮 作為緩衝回填材料之物質。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,在滲透性、離子交 換、膨脹性等方面有相當良好的功能,因此被建議作為緩衝回填的主 要材料。美國懷俄明州生產的MX-80膨潤土是相當典型的海相沉積礦 床,MX-80也是目前較大規模開採的商業化膨潤土,加拿大、日本、 中國大陸等國也有膨潤土礦區進行開採及研究。

考慮坑道回填所需之緩衝回填材料需求量很大,而上述之MX-80 膨潤土,雖然具有良好之功能,但將來各國處置設施相繼建造後,對 於原料供應穩定性及價格上將較難掌握,所以本土材料的開發與研究 是必要的。國內根據以往的調查資料顯示,含蒙脫石的黏土區,主要 分布在台灣東部海岸山脈之風化粘土,位於台東縣樟原之日興礦業公 司是目前國內已進行商業開採的膨潤土礦場。另外,綜合各國之研 究,緩衝回填材料之重點研究方向如下:

(1) 緩衝材的擴散係數是參數敏感度分析結果中影響核種外釋率的 重要因子,因此特別需進行緩衝及回填材料的功能與成分規格之 測試。

(2) 緩衝及回填材料長期穩定特性研究,項目包含緩衝回填材料的化 學穩定性、核種吸附及傳輸特性、回脹特性、力學性質、熱力學 特性、透水性質、熱水耦合性質及塊體組合性質等主題。

5.2.5. 近場環境

近場環境包括廢棄物體本身、包封容器、緩衝回填材料,及周邊 的開挖擾動帶等條件因素。由於處置場建造過程及用過核子燃料處置 期間產生的熱與輻射會使得周圍環境的物性及化性產生改變,預期會 發生的效應將包含開挖行動引起的岩石物性改變、岩石及地下水由於 輻射引起的物性及化性變化、熱所引起的包封容器及岩石的力學性質 改變、岩石 - 地下水系統及地下水流場受到用過核子燃料產生熱及挖 掘開採行動而有所變化。為了瞭解上述效應是否會如預期發生,並探 討發生後對近場環境造成之影響,因此應進行之研究依重要性排序如 下:處置場熱-水-力學耦合效應、開挖行為及熱效應對處置坑道穩定 性的影響、緩衝回填材料現地回填/封塞特性試驗、近場地下水化學

5.3. 多重障壁系統的功能評估

5.3.1. 功能評估

國際上對於高放射性廢棄物之最終處置概念,大都採用了多重障 壁之深層地質處置的方式,我國「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;而第八條亦規定:高放處置設施應採多重障壁之設計。 目前我國的用過核子燃料最終處置概念完全依據國際之共識,採用了 多重障壁之深層地質處置的方式來進行設計,符合了我國相關法規的 要求。多重障壁概念的基本訴求之一為:處置場對放射性核種之圍阻 功能,不能因某單一障壁的失能而失效;也就是只要其中部分的障壁 組件符合了原設計的表現,則該處置場對放射性核種之圍阻能力仍能 達到相關法規對輻射防護的要求。上述法規第九條規定: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);而第十條亦規定: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。

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 壁兩種,前者為利用穩定、質佳的深層地質母岩做為天然的障壁,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等的人為 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,以理論的方式進行預 測及評估,並將理論預估所得數值直到應用到處置場封閉後的安全分 析中。

本報告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,建立虛擬處置場與核種外釋概念模式,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)。根據敏感度分析結 果發現,母岩滲透特性對核種外釋率最敏感,影響輻射總劑量率最重 要之變數為達西流速,建議應列為未來詳細調查與實驗的項目。綜觀 之,現階段(2009年)我國已具備用過核子燃料深層地質處置之地質調 查資料及處置設施功能整合性評估所需的相關基礎技術。

依據目前階段已建立功能評估技術為基礎,未來之發展將朝向下 列方向進行:

- (1)未來將視現地調查結果,建立三維離散裂隙岩體地質圈評估模式,包括岩體裂隙產生技術以及核種傳輸模擬。合理率定不同尺度之母岩滲透特性,並整合DFN與ECM列為安全評估未來之工作。
- (2)建立水井灌溉模式生物圈輻射劑量評估技術,包括生物圈整體概念評估模式分析與發展。

5.3.2. 安全分析

深層地質之多重障壁處置概念主要是藉由下列之機制來降低放 射性廢棄物對人類之傷害:

- (1) 延緩放射性核種進入人類生活圈之時間,讓自然物理衰變作用力 使其衰竭;
- (2) 阻斷放射性核種遷移之通道,降低放射性核種之傳輸速率;
- (3) 藉著固體物質對放射性核種之自然物理化學吸附作用力,降低放射性核種之傳輸速率;
- (4) 延長放射性核種進入人類生活圈之距離,讓廣大的地底空間來稀 釋放射性核種之濃度。

延緩放射性核種進入人類生活圈之時間可以靠著長壽命之廢棄 物罐來達成,阻斷放射性核種遷移之通道可以靠著慎選場址、緩衝層 及隧道回填來達成,而自然物理化學吸附作用力則可靠著慎選緩衝及 回填材料來達成;另外,藉著廢棄物本體之安定化工程處理動作,也 可以有效地降低放射性核種之外釋速率。在深層地質之多重障壁處置 場中,廢棄物本體內所含之放射性核種必須穿透過重重之阻礙,才能 到達人類之生活圈造成人體體內及體外的輻射傷害。由於重重障壁之 阻礙,放射性核種必須花很長的時間才能從廢棄物本體到達人類身 邊,在自然之衰變、吸附及稀釋作用下,當放射性核種到達人類身邊 時,其濃度已經非常的低,其輻射能力已不足以對人類造成傷害。

在進行深層地質之多重障壁處置場的全系統安全分析時,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 至人體之整個過程的分析,劃分為近場、遠場及生物圈等三類的不同 分析,並分別建立不同的分析技術與電腦程式。近場之核種外釋率分 析負責評估放射性核種從廢棄物本體內遷移至處置坑周圍之母岩的 外釋速率,遠場之核種傳輸速率分析負責評估放射性核種從處置坑周 圍之母岩遷移至地表含水層之外釋速率,而生物圈之人體劑量率分析 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而造成 人體之劑量率。

本研究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、遠場之核種外釋率與生物圈之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、遠場及生物圈等三個子系 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,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。綜觀之,現階段(2009年)本計畫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之分析技術,並能進行最終處置之 初步評估。此外,由分析結果可知緩衝材料擴散係數對近場核種外釋 率影響最為顯著,為降低評估結果的不確定性,須特別加強此參數試 驗結果的精確性。影響核種於遠場外釋最重要參數為達西流速。經系 統整合後,影響輻射總劑量率最重要參數為達西流速,即水流於母岩 中之傳導能力,故母岩滲透性質與導水能力,將是影響生物圈劑量率 的主要因子,故未來在規劃進行母岩滲透性與傳導能力之研究時,確 實應掌握相關數據之精確度。

未來之工作則依據近場軸/徑向核種外釋模式以及後續發展之地 質圈三維離散裂隙岩體評估模式、生物圈水井灌溉模式進行全系統安 全評估分析。

總結

本報告彙整過去調查之潛在處置母岩的岩類特性與地質環境成 果,以及利用離島地區所進行之小規模水力試驗所得資料,完成本土 化之地質概念模式及必要之地質環境參數,提供評估者進行初步功能 安全分析模式的建置。本報告經由簡化條件下的水井飲水情節進行了

本土化的案例分析工作,透過此案例分析,本報告確認了二大議題的 結果分述於后:

(1) 本島是否存在潛在母岩

本報告就所蒐集之我國現有地質特性資料,透過花崗岩、 泥岩及中生代基盤岩基本特性、地質史(穩定性)、大地構造、地 震及活動斷層等之比較,結果顯示出泥岩做為潛在處置母岩之條 件比不上花崗岩與中生代基盤岩,而中生代基盤岩在本島西部因 深處2000公尺以下,即使在台灣海峽下也深1000公尺餘,調查困 難、技術要求層次高,故現階段比較可行的潛在處置母岩係以花 崗岩暫為優先。依據所蒐集之資料顯示本島東部花崗岩區域可能 趨於地質穩定,而國內研究文獻之GPS調查紀錄亦指出該區之水 平垂直速度場變動小,且97年的空中磁測初步結果也顯示該區岩 體範圍足敷處置面積需求,故初步可得到之明確結論之一即為本 島確實存在一潛在母岩,但其合適性仍須待後續之進一步地下調 查與坑道實驗室來加以驗證。

(2) 我國是否具備初步技術

依據OECD及歐、美、日核能先進國家之經驗指出處置技術 之完整評估應包括調查評估作業流程、全系統評估技術,以及技 術驗證等程序。準此,本報告就建置整合調查技術之程序與方法 (產出地質概念模式)、處置概念之功能/安全分析技術發展,以 及簡化條件下虛擬處置場全系統之初步功能安全分析進行評估。

初步評估結果,所建置之整合調查的作業流程可以確切產 出功能安全所需之地質概念模式,而評估者也能據此地質概念模 式發展全系統評估之近場、遠場、生物圈評估模式,並成功的以 模式鏈方式進行全系統的初步案例分析,取得必要之完整評估分 析技術。

(3) 未來研發規劃以及發展期程

過去已利用少震、無構造影響地區之花崗岩建立現地深層 母岩特性調查技術,地球物理、水文地質、地球化學、大地應力 等調查整合技術與參數化流程。基於本階段目前已建立了初步評

估技術,但因係簡化條件下之水井飲用情節案例,尚無法瞭解諸 如洪水、地震等變動情節對處置場安全之影響,該等變動情節分 析技術之建置尚待後續的努力推展。因此,未來花崗岩潛在母岩 深層特性調查,將針對台灣地質之造山作用、洪水、地震等影響 取得現地資料,並利用坑道實驗室驗證與評估合適條件,以期於 2017年達成「潛在處置母岩特性調查與評估階段」之目標;各研 究發展項目與期程經費規劃,視實際發展狀況,依法(放射性物 料管理法實行細則)每四年調整修正於「用過核子燃料最終處置 計畫書」中,並經主管機關核定後公告。

6、參考文獻

- 工研院能資所(1996),我國用過核燃料長程處置-第三階段區域調查前 四年工作計畫-第二工作年度計畫-年度工作期末報告,台灣電力 公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-084,工業技術研究院。
- 工研院能資所(2001),嘉南平原及蘭陽平原水文地質調查88年下半及 89年度工作報告,台南地區地下水觀測網第二期計畫,經濟部中 央地質調查所。
- 工研院能資所(2002), 嘉南平原及蘭陽平原水文地質調查88年下半及 90年度工作報告, 台南地區地下水觀測網第二期計畫, 經濟部中 央地質調查所。
- 工研院能資所(2003), 嘉南平原及蘭陽平原水文地質調查91年度工作 報告,台南地區地下水觀測網第二期計畫,經濟部中央地質調查 所。
- 內 政 部 (2005) , 中 華 民 國 統 計 年 鑑 94 年 版 ; 2007/10/09 取 自 http://www.gov.tw/EBOOKS/TWANNUAL/show_book.php?path=8 _001。
- 中華民國政府(1955),中華民國政府與美利堅合眾國政府民用原子能 合作協定。
- 中華民國政府(1964),中華民國政府與美利堅合眾國政府及國際原子 能總署適用防護事項協定,1964年9月21日簽署。
- 中鼎工程股份有限公司(2003),金門地區水資源運用檢討第二期計畫,金門縣自來水廠。
- 日本活斷層研究會(1980),日本的活斷層-分布圖與資料,東京大學出版社。
- 日本活斷層研究會(1992),日本的活斷層圖,東京大學出版社。
- 水利署(2003),台灣地下水資源圖說明書,經濟部水利署。
- 水利署(2004),金門地區地下水水質、水量之監測與安全出水量及污染潛勢之評估(1/2),經濟部水利署。

水利署(2005),金門地區地下水水質、水量之監測與安全出水量及污 染潛勢之評估(2/2),經濟部水利署。

水利署(2005),台灣地區地下水資源(94年修訂版),經濟部水利署。 水利署(2006a),台灣地區地下水觀測網計畫-台灣地區地下水水質空

間分佈初步分析專題報告書,經濟部水利署水利規劃試驗所。 水利署(2006b),台灣地區地下水觀測網計畫-95年度台灣地區地下水

水質檢測分析與評估專題報告書,經濟部水利署水利規劃試驗 所。

水利署(2007),96年度台灣地區地下水質檢測分析與評估計畫期末報告,財團法人農業工程研究中心。

水利署(2009),地下水觀測網整體計畫,經濟部水利署;2009/07/22

取自 <u>http://pc183.hy.ntu.edu.tw/IntegratingPlan.php</u>。

方建能、余炳盛(1995),金瓜石-九份金銅礦導覽,台灣省立博物館。 水資會(1972),台灣地下水資源之估計,經濟部水資源統一規劃委員 會。

水資會(1986),台灣地下水地質圖,經濟部水資源統一規劃委員會。 水資會(1992),台灣地區地下水資源,經濟部水資源統一規劃委員會。 王大純、張人權、史毅虹、許紹倬、于青春、梁杏等(1998),水文地

質學基礎,北京地質出版社。

- 王珮玲(1998),鉀長石氫40/氫39同位素熱年代學之研究與應用,國立 台灣大學,地質學研究所,博士論文。
- 王執明(1991),太魯閣峽谷的變質岩,內政部營建署太魯閣國家公園 管理處。
- 王執明、藍晶瑩(1995),台灣地質之五,台灣的片麻岩,經濟部中央 地質調查所。
- 王國龍(2000),台灣北部及外海晚上新世-第四紀火山岩的地球化學特 性與岩石成因,國立台灣大學,地質學研究所,博士論文。
- 台電公司(2001),台電用過核燃料數量及鈾重資料表,台灣電力公司 核能後端營運處,核端二字第9011-0164號函。

- 台灣電力公司(2006),用過核子燃料最終處置計畫書(2006年7月核定版),台灣電力公司。
- 台灣電力公司(2008),用過核子燃料最終處置計畫書(2006年7月核定版),修訂一版,台灣電力公司。
- 市村毅(1941),金門島的地質(概要),台灣地學記事,第12卷,第2-3 號,第27-37頁。
- 田永銘、吳柏林、朱正安(2002),「放射性廢棄物處置緩衝材料回脹 及熱傳導特性研究」(II)」,行政院原子能委員會委託研究計畫 研究報告912001INER020。
- 田永銘、黃偉慶、吳柏林(2001),「放射性廢棄物處置緩衝材料回脹 及熱傳導特性研究」(I)」,行政院原子能委員會委託研究計畫研 究報告912001INER006。
- 田永銘、黃偉慶、吳柏林、王欣婷(2003),「緩衝材料壓實技術與其 特性初步探討」,行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告 NS910898。
- 石作珉、鄧博維、劉振維、蕭富元(1994),利用套鑽法量測現地應力 之研究,地工技術,第46期,第23-34頁。
- 石瑞銓(2003),地震地質調查及活動斷層資料庫建置:地球物理探勘計畫(2/5),經濟部中央地質調查所報告,第92-8號。
- 地調所(1999),台灣地區地下水觀測網第一期計畫,經濟部水資源局 /中央地質調查所。
- 地調所(2000),五十萬分之一台灣地質圖(第二版),經濟部中央地質 調查所。
- 地調所(2006a),台灣金屬礦物資源分布圖,經濟部中央地質調查所。
- 地調所(2006b),台灣非金屬礦物資源分布圖,經濟部中央地質調查 所。
- 地調所(2006c),台灣能源礦產及地下水資源分布圖,經濟部中央地質調查所。
- 地調所(2008),都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集說明書,經濟 部中央地質調查所。

朱信忠(1997), 階步式迴歸分析方法與電腦程式, 核研所對內報告, INER-OM-0337。

朱信忠(2002),參數取樣系統之設計,核研所對內報告,INER-T2798。

- 朱信忠(2002),深層地質處置工程障壁外釋不確定性研究,台電核能 月刊,第 235 期。
- 朱信忠(2003),深層地質處置工程障壁外釋之參數敏感度分析,台電核能月刊,第 245 期。
- 朱信忠、吳典諺(2002),系統評估及整合技術建立,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 全評估模式(第一年計畫),SNFD-INER-90-505,原子能委員會核 能研究所。
- 朱信忠、張福麟、莊文壽(2002),緩衝層區塊數對INPAG-N程式計算結果的影響,台電工程月刊,第 649 期。
- 朱信忠、董家寶(2003),系統評估及整合技術建立,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/安全評估模式(91 年計畫),SNFD-INER-90-531,原子能委員會核能研究所。
- 朱秋紅(2005),龜山島高鎂安山岩之成因,國立台灣大學,地質科學 研究所,碩士論文。
- 行政院(1997),放射性廢料管理方針,中華民國86年9月2日行政院台 八十六科字第三三九五一號令修正發布。
- 行政院原子能委員會放射性物料管理局(1996),放射性廢料詞彙。
- 余水倍、胡植慶(2002),臺灣一呂宋島弧的現今板塊運動,台灣大地構造,黃奇瑜主編,中國地質學會、中國地球物理學會聯合出版, 第97-144頁。
- 何春蓀(1986),普通地質學,五南圖書出版公司,台北。
- 何春蓀(1986a),台灣地質概論-台灣地質圖說明書(增訂第二版),經濟部中央地質調查所。
- 何春蓀(1986b),普通地質學,二版,五南圖書,台北市。

余炳盛、王詠絢(2006),金瓜石的金礦潛能,地質,第25卷,第3期, 第32-41頁。

何恭算(1988),場址準則 - 水文地質,我國用過核燃料長程處置計

畫第一階段工作 - 處置場設計概念研究子項報告,核能研究所。 吴柏林(2005),放射性廢棄物處置場中砂-皂土混合緩衝材料之壓實性

質,博士論文,國立中央大學土木系,中壢。

- 吴銘志(2003),台灣地區地下水文圖,水文地質調查與應用研討會論 文集,第149-165頁。
- 吴禮浩(1994),台灣北部地區新構造開口節理的初步研究,國立中央 大學應用地質研究所碩士論文,共98 頁。
- 吴禮浩(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。
- 呂佩玲(2005),台灣地震測報作業的回顧與展望,2005年台灣活動斷 層與地震災害研討會論文集,第9-22頁。
- 呂學諭、費立沅、陳文政(2002),新苗地區水文地質架構初探,「地下水觀測網整體計畫」及「地層下陷防治執行方案」九十年度成 果發表研討會論文集,經濟部中央地質調查所。

宋聖榮(2006),台灣的火山,遠足文化出版。

李元希(1997),台灣中央山脈中段在蓬萊運動中的構造演化,國立台 灣大學,地質學研究所,博士論文。

李元希、盧詩丁、石同生、林偉雄、林啟文(2002),台灣活動斷層之 回顧與展望,台灣之活動斷層與地震災害研討會,第49-62頁。

李奕亨(2009),以中尺度反射震测法研究屯子腳斷層活動機制及構造

上的意義,國立中央大學,地球物理研究所,博士論文,120頁。 李寄嵎(1994),澎湖地區玄武岩類與福建地區基性岩脈之定年學與地

球化學研究兼論中生代晚期以來中國東南地函之演化,國立台灣 大學,地質學研究所,博士論文。 李寄嵎(2003),我國用過核子燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估 階(91年計畫)-中國東南地區岩漿活動及大地構造演化之研究,工 業技術研究院委辦計畫, SNFD-GSC-90-200,國立台灣大學。

- 李清瑞、江道義、陳榮輝(1994),台灣地熱探勘資料彙編,能源研究發展基金研究報告06-3-83-0252,經濟部能源委員會委辨計畫, 工業技術研究院。
- 李瑞益、吳晃昭(2003),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/安全評估技術(91年計畫)--廢料罐及 其材料初步評估,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-INER-90-529, 核能研究所。
- 李瑞益、吳晃昭(2005),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/安全評估技術(93年計畫)--廢料罐及 其材料初步評估,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-INER-90-553, 行政院原子能委員會核能研究所。
- 李德河、林宏明、楊沂恩(2002a),泥岩邊坡之穩定處理,地工技術第 94期,第41-52頁。
- 李德河、楊沂恩、林宏明(2002b),崇德水庫結構物與泥岩接觸面及 泥岩邊坡穩定工法試驗研究,經濟部水利署南區水資源局委託專 題研究計畫期末報告書。

李德河、楊沂恩、林宏明、陳盟文(2005),南部軟岩護坡工法現地試驗之研究,南部軟岩區邊坡穩定工法研討會論文集,第43-66頁。

李錫堤(1986),大地應力分析與弧陸碰撞對於台灣北部古應力場變遷

之影響,國立台灣大學地質研究所博士論文,共370頁。

李錫堤(1986),大地應力分析與弧陸碰撞對於台灣北部應力場變遷之

影響,國立台灣大學,地質研究所,博士論文。

- 李錫堤、葉永田、鄭世楠、郭鎧紋、鍾仁光(1992),利用初達P波及S 波極性推求震源機制及區域應力狀況,交通部中央氣象局研究報 告,第439號,第186-203頁。
- 周齊生(1988),熱分析即臨界分析,我國用過核燃料長程處置計畫第 一階段工作-處置場設計概念研究子項報告,核能研究所。

林志森、蔡世欽、張傳聖(2000),岩石與緩衝回填材料熱特性量測分 析報告,我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段 前兩年計畫,SNFD-ERL-90-129,工研院能資所。

- 林佳蓉、張福麟(2003),工程障壁評估模式技術,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 技術(91年計畫), SNFD-INER-90-533。
- 林宗曾,許琦,張祖恩,鄭志鴻(1996),泥岩吸水崩解特性之顯微分析,第十一屆廢棄物處理技術研討會,第467-476頁。
- 林宗曾、許琦、張祖恩、陳宏達(1998),原狀泥岩實驗室與現地二階 段鑽孔(TSB)滲透試驗之研究,第十三廢棄物處理技術研討會, 第508-515頁。
- 林昭遠(1997),集水區泥岩裸露邊坡植生復育之研究,中興大學水土保持學報,29卷2期,第169-181頁。
- 林晉祥(1975),壓實泥岩之強度特性,國立成功大學土木工程系,碩士論文。
- 林啟文(1998),台灣東北部板岩帶與片岩帶之構造特性與構造演化, 國立台灣大學,地質學研究所。
- 林啟文、林偉雄(1995),臺灣地質圖幅說明書,第十五號三星地質圖幅,經濟部中央地質調查所。
- 林啟文、林偉雄、高銘健(1993),臺灣地質圖幅說明書,第二十二號 南澳地質圖幅,經濟部中央地質調查所。
- 林啟文、高銘健(1997),臺灣地質圖幅說明書,第十六號蘇澳地質圖幅,經濟部中央地質調查所。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正(2000),台灣活動斷層概 論-五十萬分之一台灣地區活動斷層分布圖及說明書第二版,經 濟部中央地質調查所特刊,第13號。
- 林國安、吳明賢、胡錦城、黃富文、沈俊卿、周定芳、吳榮章、邱仲信(2003),石油開發技術研究發展計畫:石油系統油氣潛能評估技術研究報告,摘要; 2009/03/24 取自,

https://web2.moeaboe.gov.tw/oil/pfpm/intro/result/list2-9192-5.as px °

- 林善文(2002),放射性廢棄物近地表處置安全要求(中譯本),IAEA安 全標準系列第WS-R-1號報告,放射性物料管理局。
- 林朝宗、何信昌(1992),從地質觀點探討我國核廢料最終處置之對策,經濟部八十一年度研究發展專題,編號81009,經濟部。
- 林朝宗、何信昌、劉桓吉(1987),地層與地質構造,我國用過核燃料 長程處置計畫研究子項報告,台灣電力公司委辦計畫,L2.04, 經濟部中央地質調查所。
- 林朝宗、張郇生、何信昌(1991),母岩特性綜合研究報告書(77-80年 計畫),台灣電力公司委辦計畫,SNFD-CSG-90-015,經濟部中 央地質調查所。
- 林朝宗、張郇生、何信昌、高銘健、陳瑞娥(1991),台灣西南部泥岩區地質驗證調查(77-80年計畫),台灣電力公司委辨計畫, SNFD-GSC-90-010,經濟部中央地質調查所。
- 林朝棨、周瑞燉(1984),台灣地質,台灣省文獻委員會,450頁。
- 林碧山、李振誥、李禎常、林宏奕(2005),破裂岩體污染物傳輸性質 之研究—以蘭嶼地區為例,第53卷,第一期,台灣水利。
- 林蔚(1994),金門地區燕山晚期花崗岩類之地球化學及熱歷史研究。

國立台灣大學,地質學研究所,碩士論文。

- 林蔚(2001),華南沿海地區晚燕山期侵入岩漿活動及大地構造意義,國立台灣大學,地質科學研究所,博士論文。
- 林蔚、張育德、張傳聖(2003),我國用過核子燃料長程處置-潛在母岩 特性調查與評估階(91年計畫)-K區花崗岩特性分析,台灣電力公 司委辨計畫, SNFD-ERL-90-190,工業技術研究院。
- 林蔚、陳文山、楊明宗、歐陽湘(2005),我國用過核燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特性調查計畫(93年計畫)-潛在母岩特性調查,台灣電力公司委辨計畫, SNFD-ERL-90-219,工業技術研究院。

林鎮國(1999),我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫(88-89年計畫)--地化模式PHREEQCI 評估報告,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-132,工業技術研究院。

- 林鎮國、張育德(2002),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)--Eh(pe)-pH穩定相圖應用技術之建立,台灣電力公司委辦計 畫, SNFD-INER-90-513,核能研究所。
- 林鎮國、張育德(2002),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)-Eh(pe)-pH穩定相圖應用技術之建立,行政院原子能委員會核 能研究所委辦計畫, SNFD-INER-90-513,工業技術研究院。
- 林鎮國、張育德(2003),K區孔內地球化學量測,我國用過核燃料長 程處置潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查計 畫,91年計畫,SNFD-ERL-90-198,能源與資源研究所/台電專 案計畫。
- 林鎮國、張育德(2003),我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查 與評估階段--潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調 查計畫(91年計畫)--核種(Am及Pu)Eh(pe)-pH穩定相圖繪製與溶 解度計算,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-203,工業技 術研究院。
- 林鎮國、張育德(2003),我國用過核燃料長程處置-潛在處置母岩特性 調查與評估階段-91年計畫-K區孔內地球化學量測,台灣電力公 司委辦計畫, SNFD-ERL-90-198,工業技術研究院。
- 林鎮國、張育德(2005),我國用過核燃料長程處置潛在母岩特性調查 與評估階段--潛在母岩特性調查計畫(93年計畫)--核種(Th及 Np)Eh(pe)-pH穩定相圖繪製與溶解度計算,台灣電力公司委辦計 畫,SNFD-ERL-90-222,工業技術研究院。
- 林鎮國、蕭善惠、林君慧、田中凡(1999),我國用過核燃料長程處置 潛在母岩特性調查與評估階段--潛在母岩特性調查計畫(88-89年

計畫)--地球化學分項報告-熱力學資料庫,台灣電力公司委辦計

畫, SNFD-ERL-90-131, 工業技術研究院。

- 林讚生(1943),台灣高雄州橋子頭滾水坪泥火山噴泥の化學成份,台灣地學記事,第5卷,第6-7號,第51-55頁。
- 邱盈達、黃國禎、吳昌翰(2007),不同草類覆蓋下泥岩土壤與紅壤理 化性質之探討,水土保持學報,39卷4期,第355-369頁。
- 俞震甫、羅清華(2002),台灣先第三紀大地構造;台灣大地構造,黃 奇瑜主編,中國地質學會、中國地球物理學會聯合出版,第 167-210頁。
- 施國欽(1999),岩石力學-大地工程學(四),初版,文笙書局,台北市。 施清芳、陳智隆、賴仁杰(2007),系統功能/安全評估整合技術,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(94-96年計畫),核能研究所SNFD-INER-90-573。
- 洪正聰、陳冠宇(2002),核物理的最新發展——譯自IUPAP核物理委員會C12的2002年報告,物理雙月刊,第24卷,第6期。
- 洪瑛鈞,2002,金門地區地下水污染潛勢分析,交通大學土木工程研 究所。
- 洪錦雄、楊尊忠、紀立民(2002),處置場設施配置規劃與評估,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/安全評估模式(第一年計畫), SNFD-INER-90-502,核能 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。
- 紀立民、洪錦雄(2002),處置場安全需求與處置概念研擬,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/安全評估模式(第一年計畫),SNFD-INER-90-501,核能研究 所。

原能會(2002),放射性物料管理法,中華民國九十一年十二月二十五 日總統華總一義字第09100248760號令制定公布全文51條,中華 民國91年12月25日公布/施行。

- 原能會(2005a),高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則,中 華民國94年8月30日會物字第0940028885號令發布。
- 原能會(2005b), 游離輻射防護安全標準。
- 原能會(2003),放射性物料管理法施行細則,中華民國92年7月30日 行政院原子能委員會訂定發布,民國97年01月24日修正。 http://law.moj.gov.tw/Scripts/Query1B.asp?no=1J016003418
- 原能會(2008),放射性物料管理法施行細則,中華民國97年01月24日 會物字第0970001432 號令修正發布。
- 孫麗敏(1990),金門及香港地區花崗岩之地球化學研究,台灣大學, 海洋研究所,碩士論文。
- 徐明同(1980),台灣之大地震,氣象學報,第26卷,第3期,第32-48 頁。
- 徐明同(1983),明清時代破壞性大地震規模及震度之評估,氣象學 報,第29卷,第4期,第1-18頁。
- 徐鐵良(1982),地質與工程,中國工程師學會。
- 徐鐵良(1992),地質與工程-台灣工程基本資料叢書之四,中國工程師 學會。
- 核能研究所(1998),核一、二廠用過核燃料運送國外進行再處理之可 行性研究,台電/核研所核能發電技術發展專案。
- 核能研究所(2002),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):國際合作 事項執行工作報告,台灣電力公司委託執行。
- 核能研究所(2005),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年計畫)期末報告, SNFD-INER-93-566。

核能研究所(2006),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(94-96年計畫),第一次 期中報告(I)。

- 核能研究所(2006),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(94-96年計畫),第二次 期中報告(II)。
- 氣象局(1990),中華民國臺灣地區氣候圖集(第一冊及附冊),林民生 主編,中央氣象局。
- 消防署(2007),歷年天然災害損失統計(年報),內政部消防署; 2007/08/30取自http://www.nfa.gov.tw/show/show.aspx?pid=19。
- 涂倉維、林佳蓉、黃經綸(2003),地質圈評估技術,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(第二年計畫),核能研究所。
- 能源局(2008),經濟部能源科技研究發展計畫97年度執行報告-二氧化 碳再利用技術及地質封存潛能評估計畫(第二年度),97-D0510, 工業技術研究院。
- 馬國鳳、黃柏壽、王乾盈、洪日豪(2004),台灣車籠埔斷層鑽井整合型計畫-斷層力學:由震波模擬、井孔力學試驗及井測資料分析應力狀態,國科會研究報告,NSC 92-2116-M-008-006。
- 張育德(1996),台灣西南部曾文溪及二仁溪地區泥岩之地球化學,國 立台灣大學,海洋研究所,碩士論文。
- 張育德、林鎮國(2004),我國用過核子燃料長程處置-潛在處置母岩特 性調查與評估階段-潛在處置母岩特性調查計畫(93年計畫)-地球 化學量測,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-220,工業技 術研究院。
- 張傳聖、郭泰融、林蔚、張育德、李奕亨(2005),跨孔試驗與量測, 我國用過核燃料長城處置潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母 岩特性調查(93年計畫),工研院能環所,SNFD-ERL-90-220。

張福麟、吳典諺(2002),工程障壁評估模式技術估,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 估技術(90年計畫), SNFD-INER-90-507。

- 張徽正、林啟文、陳勉明、盧詩丁(1998),台灣活動斷層概論(第一版)-五十萬分之一台灣地區活動斷層分布圖及說明書,經濟部中央地 質調查所特刊第10號。
- 曹恕中、宋聖榮、李寄嵎、謝凱旋(1999),澎湖群島地質圖說明書。 五萬分之一台灣地質圖說明書第73-76號,經濟部中央地質調查 所。
- 曹恕中、宋聖榮、鐘三雄(1995),澎湖群島玄武岩近火山口相之特徵, 中國地質學會84年年會暨兩岸地質學術研討會,第315-319頁。
- 莊文星(1999),台灣之火山活動與火成岩,國立自然科學博物館。
- 莊文壽、洪錦雄、董家寶(2000),「深層地質處置技術之研究」,核 研季刊,第三十七期。
- 莊長賢(1976),泥岩地區邊坡破壞原因之研究,國立成功大學土木工 程系,碩士論文。
- 許秀真、楊尊忠、紀立民、繆延武、王中虛、洪錦雄(2003),處置場 設施配置規劃與設計,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(91年計畫), SNFD-INER-90-528。
- 許琦、林宗曾、張祖恩、鄭志鴻(1999),泥岩吸水回脹行為及機制, 第八屆大地工程學術研究討論會論文集,第2019號,第1125-1135 頁。
- 陳于高(1993),晚更新世以來南台灣地區海水面變化與新構造運動研究,國立台灣大學,地質學研究所,博士論文。
- 陳于高(1997),全新世之海水面變化曲線及其在台灣西南部新構造運動上之應用,海峽兩岸地形與環境教育研討會,第136-140頁。
- 陳元章、張福麟、涂倉維(2005),地質圈評估模式技術,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/

安全評估模式(93年計畫), SNFD-INER-93-557, 原子能委員會核能研究所。

- 陳文山(2002),台灣的岩石,2002岩盤工程研討會論文集,新竹中華 大學,第17-26頁。
- 陳文山(2002),潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調查計畫(90年計畫)-台灣泥岩成因、特性與演化研究,工業技術研究院委辦計畫,SNFD-GSC-90-158,國立台灣大學。
- 陳文山、宋時驊、吳樂群、徐澔德、楊小青(2004),末次冰期以來台 灣海岸平原區的海岸線變遷,國立台灣大學考古人類學刊,第62 期,40-55頁。
- 陳文山、李錫堤、石瑞銓、楊小青、楊志成、顏一勤、劉力豪、張徽 正、侯進雄(2004),新化斷層的構造特性與古地震研究,經濟部 中央地質調查所特刊,第15期,第111-119頁。
- 陳文山、陳于高、劉聰桂、黃能偉、林清正、宋時驊、李昆杰(2000), 921集集大地震的地震斷層特性與構造意義,經濟部中央地質調 查所特刊,第12期,第139-154頁。
- 陳文山、楊志成、石瑞銓、楊小青、顏一勤、陳于高、張徽正、林偉 雄、李元希、石同生、盧詩丁(2003a),九芎坑斷層的斷層特性與 活動性研究,經濟部中央地質調查所特刊,第14期,第123-139 頁。
- 陳文山、楊志成、黃柏壽、陳于高、石瑞銓、李元希、張徽正、黃能 偉、林清正、宋時驊、李昆杰(2001),從台灣中部地區西部麓山 帶的地質構造來看集集地震斷層的特性,地質,第21期,第1卷, 第19-36頁。
- 陳文山、董倫道、郭泰融(2001),我國用過核燃料長程處置-潛在母岩 特性調查與評估階段-前二年計畫-孔內攝影井測技術報告,台灣 電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-125,工業技術研究院能源與 資源研究所。
- 陳文山、劉力豪、顏一勤、楊小青、李龍昇、游能悌、張徽正、石瑞 銓、陳于高、林啟文、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁(2003b)

新城斷層的古地震研究,經濟部中央地質調查所特刊,第14期, 第11-24頁。

- 陳文山、顏一勤、楊志成、楊小青、陳勇全、蔡坤志、朱耀國、黃能 偉、張徽正、林啟文、林偉雄、劉彥求(2004),1951年花蓮地震 斷層的古地震研究,經濟部中央地質調查所特刊,第15期,第 137-145頁。
- 陳文泉(2004),高放射性廢棄物深層地質處置緩衝材料之回脹行為研究,博士論文,國立中央大學土木系,中壢。
- 陳正宏(1990),臺灣地質之一,台灣之火成岩,經濟部中央地質調查 所。
- 陳本康(1994),工程障壁特性之研究,我國用過核燃料用過核燃料長程處置一等三階段區域調查前四年工作計畫(第一年計畫), SNFD-ERL-90-062,能源與資源研究所/台電專案計畫。
- 郭兆敏(2002),我國用過核廢料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特性調查計畫-台灣地區第四紀古氣候變遷研究報

告,工業技術研究院委辦計畫, SNFD-GSC-90-162。

- 陳宏達(2002),溶出參數對夯實泥岩襯裡回賬及滲透行為之影響,國 立成功大學,環境工程學研究所,博士論文。
- 陳志賢、鄭瑞熾(1990),東部石灰岩及蛇紋岩整體開發利用,礦業技術,第28卷,第4期,第279-300頁。
- 陳冠廷、雷大同(2007),古亭坑層泥岩水熱合成沸石之研究,資源與 環境學術研討會論文集,第295-304頁。
- 陳時祖、李元富、劉裕聰(1984),臺灣西南部泥岩坡地侵蝕特性之研究(第二期報告),國科會防災科技研究報告 NSC-74-04140-P-006-09。
- 郭泰融、張傳聖、董倫道、李奕亨、陳文山、黃炎聰(2003),我國用 過核燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特 性調查計畫(91年計畫),K區地球物理井測(BH1及BH2孔)報告, 台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-195,工業技術研究院。

郭泰融、董倫道(1997),我國用過核燃料長程處置-第三階段區域調查 前四年工作計畫-第三工作年度計畫-雷達井測技術報告,台灣電 力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-088,工業技術研究院。

郭泰融、董倫道、李奕亨(2000),我國用過核燃料長程處置-潛在母岩 特性調查與評估階段-前二年計畫-井間地層對比報告,台灣電力

公司委辦計畫, SNFD-ERL-90-123,工業技術研究院。

- 陳培源(1970),金門島及烈嶼地質說明書,經濟部金門地質礦產測勘 隊工作報告,第7-19頁。
- 陳惠芬(1984),從三角點檢測成果見到的臺灣的地盤升降,經濟部中 央地質調查所特刊,第3號,第127-140頁.
- 郭隆晨、余水倍(2002),高精度GPS觀測在地球科學上的應用,2002 年臺灣活動斷層與地震災害研討會論文集,第63-82頁。
- 陳煒鳴(1997),泥岩受含水量的影響研究及其回填工程之應用,國立 成功大學土木工程系,碩士論文。
- 陳肇夏(1998),台灣的變質岩,經濟部中央地質調查所。
- 陳肇夏(2000),溫泉及地熱資源;台灣經濟礦物第三卷:台灣能源礦 產及地下水資源,魏稽生主編,經濟部中央地質調查所,第五章, 第142-160頁。
- 陳錦清、俞旗文(1994),坪林隧道沿線水力破裂法現地應力量測,地 工技術,第46期,第35-46頁。
- 單信瑜(2005),台灣地下水資源使用與水質現況-2005水環境教育教師 研習活動教材; 2007/7/26 取自 http://www.cv.nctu.edu.tw/~wwwadm/chinese/teacher/Ppt-pdf/teac her13_shan/gwater_doc.pdf。
- 彭宗宏、李遠輝、吳大銘(1977),全新世以來臺灣島的上升率,中國 地質學會專利,第2號,第57-70頁
- 景馨月、江威德(2005),安山岩中禾樂石生長特徵與原生礦物熱液蝕 變次序之關係,中國地質學會94年會論文。
- 焦自強(1988),輻射對處置場址之影響,我國用過核燃料長程處置計畫第一階段工作 處置場設計概念研究子項報告,核能研究所。

程正(1993),以液包體與熱螢光技術探討屏風山地區金礦礦化作用與 探勘之可能性,國立成功大學,地球科學研究所,碩士論文。

- 黃克尤、李瑞益(2002),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/安全評估技術(第一年計畫)--廢料罐 及其材料初步評估,台灣電力公司委辦計畫, SNFD-INER-90-503,核能研究所。
- 黃克尤、李瑞益(2002),廢棄物罐及其材料初步評估(第一年計畫), 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,SNFD-INER-90-503,核能研究所/台電 專案計畫。
- 黃奇瑜(2005),台灣附近大地構造與新生代造山時空演化。九二一-集集大地震,地震論文,王錦華等編輯,行政院國科會「地震及 活斷層研究」跨部會重大科技計畫辦公室出版,4-42頁。
- 黃金山(2001)建構我國完整的防洪策略與體系:無法承受的颱愛「檢 討建構前瞻性防洪救災策略與體系」研討會書面資料,12-32頁。
- 黄偉慶(2000),放射性廢棄物處置場緩衝及回填材料物理性質研究,

行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告892001INER009。 黃勝群(2004),新化斷層剪切帶之淺部地下構造特徵,國立中正大

學,地震研究所,碩士論文。

- 楊小青(1989),澎湖縣花嶼火山岩之地球化學與核飛跡定年研究,國 立台灣大學,地質學系,碩士論文。
- 楊小青(1998),中國東南平潭-東山變質帶之氫同位素熱定年學研究, 國立台灣大學,地質學研究所,博士論文。
- 楊任徵(2002),我國用過核廢料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特性調查計畫-海水面變遷情景分析及不確定性探討報告,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-167,工業技術研究院。
- 楊明宗、柳志錫、沈振南、林棋財、楊敏順與呂金玉(2003),K區(BH1 及BH2)岩石力學報告,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-潛在母岩特性調查(91年計畫),工研院能資 所,SNFD-ERL-90-199。

- 楊明宗、歐陽湘、柳志錫、吳建宏(2004),水力破裂法現地應力量測 及破壞準則探討,地工技術雜誌,第99期,第5-14頁。
- 楊金在(1975),風化泥岩之邊坡穩定,國立成功大學土木工程系,碩 士論文。
- 楊尊忠、許秀真、紀立民、繆延武(2003),處置場安全需求與處置概 念研擬,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/安全評估模式(第二年計畫), SNFD-INER-90-527,原子能委員會核能研究所。
- 楊燦堯、何孝恆、謝佩珊、劉念宗、陳于高、陳正宏(2003),大屯火 山群火山氣體成份與來源之探討,國家公園學報,第13卷,第1 期,第127-156頁。
- 經濟部水資源局(2000),中華民國八十八年台灣水文年報,經濟部水 資源局。
- 萬鑫森、黃瓊慧(1995),台灣兩種泥岩礦物成分及其性質之研究,中興大學農林學報,第45卷,第1期,第55-62頁。
- 葉信宏(1999),以中空三軸試驗探討泥岩材料之力學行為研究,國立 成功大學土木工程系,碩士論文。
- 董倫道、李伯當(2000),低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫-烏坵嶼海上震測調查報告, 4ML1100-RG-4002,工業技術研究院。
- 董倫道、陳文山(2007),用過核子燃料最終處置-潛在處置母岩特性調查與評估階段-潛在母岩特性調查(94-96年度計畫)-潛在處置母岩空中磁測調查94 96執行成果,台灣電力公司委辨計畫, SNFD-EEL-90-250,工業技術研究院。
- 董倫道、陳文山、李奕亨(2006),地震地質調查及活動斷層資料庫建 置計畫-地球物理探勘計劃(5/5),經濟部中央地質調查所報告 第95-09號。

董倫道、郭泰融(1996),我國用過核燃料長程處置-第三階段區域調查 前四年工作計畫-第二工作年度計畫-地球物理井測技術報告,台 灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-072,工業技術研究院。

- 董倫道、郭泰融、李奕亨(1998),我國用過核燃料長程處置-第三階段 區域調查前四年工作計畫-第四工作年度計畫-地球斷層掃描技 術報告,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-110,工業技術 研究院。
- 董倫道、郭泰融、李奕亨、陳文山、朱義仁、林益正、黃炎聰、陳金郎(2000),低放射性廢料最終處置第一階段工作顧問服務(第一次工作變更)計畫-小坵嶼地球物理探測報告,4ML1100-RG-4900, 工業技術研究院。
- 董倫道、郭泰融、黃炎聰(2001),我國用過核燃料長程處置-潛在母岩 特性調查與評估階段-前二年計畫-跨孔探測間距效應研究報 告,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-124,工業技術研究 院。
- 葉恩肇(1997),台灣東北部蘇澳至東澳地區蓬萊造山運動之韌性剪切 變形及其構造演化,國立台灣大學,地質學研究所,碩士論文。 董瑞安、周鳳英(2000),移動性膠體對鍶及銫在土壤及地下水中遷移

影響之研究,行政院原子能委員會委託研究計畫報告。

- 詹恕齊(2008),長枝坑層砂岩室內預應力試驗推估方法之研究,國立 成功大學,土木工程研究所,碩士論文。
- 詹新甫(1985),台灣褶皺帶之昇降運動與侵蝕作用對工程之影響,台 灣坡地社區工程地質研討會論文專集,經濟部中央地質調查所。
- 廖正傑(2004),南部軟岩於環形剪力試驗及力學特性之研究,國立成

功大學,土木工程研究所,碩士論文。

- 廖學誠、溫紹炳(1977),由雲母片岩中製雲母粉之研究,礦業技術, 第15卷,第1期,第2-21頁。
- 劉台生(2002),我國用過核燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估階段前二年計畫-雙孔隙率模式應用於裂隙地下水流動特性之研

究,台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-169,工業技術研究 院。

- 劉台生(2002),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),深層地質處置概 念熱效應與處置坑道配置之分析,行政院原子能委員會核能研究 所委辦計畫,SNFD-INER-90-514,工研院能環所。
- 劉台生(2007),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-潛在母岩特性調查計畫-KMBH-01-02-04試驗場裂隙岩體水 文地質參數之地質統計分析執行成果報告,工業技術研究院委辨 計畫,SNFD-CCU-90-245,國立中正大學。
- 劉台生(2009),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-潛在母岩特性調查(97-99年度計畫)-- KMBH01-04試驗 場址之自然梯度示蹤劑試驗數據分析,台灣電力公司委辨計畫, SNFD-CCU-90-268,工業技術研究院。
- 劉平妹(1984),曾文溪剖面更新統之花粉分析,地質,第5卷,第1、 2期合刊,第1-6頁。
- 劉建宏、尹承遠、張育德、蔣立為(2003),虛擬場址區域水文現況調查與分析報告,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一潛在母岩特性調查計畫(91年計畫),工研院能環所, SNFD-ERL-90-194。
- 劉凌振(2002),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 – 源項特性評估模式技術,核能 研究所。
- 劉振宇、陳瑞昇(2002),建立地球化學反應在高/低濃度鹽水之活性 係數模式(第一年計畫),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, SNFD-NTU-90-512,核能研究所/台電專案計畫。
- 劉啟清(2000),台灣地區驗潮站及高程基準網之監測及計算工作,中 央研究院地球科學研究所專題研究計畫成果報告,台北。

劉聰桂(1982),台灣磷灰石、鋯石、榍石之核飛跡研究與其在大地構

造上之意義,國立台灣大學,地質系研究所,博士論文。 歐陽湘、林鎮國、蔣立為、董倫道、林蔚、錢正明、郭泰融、陳文山、

- 劉智超、廖啟雯、張育德、楊明宗、李奕亨、張濟權、蘇毓秀、 劉台生、衛元耀(2006),執行成果第一次期中報告,我國用過核 燃料長程處置潛在母岩特性調查與評估階段—潛在母岩特性調 查計畫(94~96年計畫), SNFD-ERL-90-252,工研院能資所。
- 蔣立為、杜培欣、余錦昌、余炘雲(1996a),我國用過核燃料長程處置 -第三階段區域調查前四年工作計畫第二工作年度計畫-水文地 質單孔多層雙封塞操作測試報告,台灣電力公司委辦計畫, SNFD-ERL-90-071,工業技術研究院。
- 蔣立為、杜培欣、余錦昌、余炘雲(1996b),我國用過核燃料長程處置-第三階段區域調查前四年工作計畫第二工作年度計畫-地下水追蹤稀釋括散實驗技術報告,台灣電力公司委辨計畫, SNFD-ERL-90-075,工業技術研究院。
- 蔣立為、杜培欣、余錦昌、余炘雲、劉建宏(1998),我國用過核燃料 長程處置-第三階段區域調查前四年工作計畫第四工作年度計畫 -地下水追蹤稀釋擴散實驗技術報告(II),台灣電力公司委辨計畫,SNFD-ERL-90-117,工業技術研究院。
- 蔣立為、劉建宏、張傳聖、劉台生、余錦昌、余炘雲(2001),我國用 過核燃料長程處置-潛在母岩特性調查與評估階段前二年計畫-多封塞設備(SPMP)試驗及裂隙地下水流特性與模式研究報告, 台灣電力公司委辦計畫,SNFD-ERL-90-127,工業技術研究院。 蔡金郎(1984),台灣西南部泥岩層礦物等之研究,國科會計畫報告,

NSC-73-0414-P006-011 •

- 鄭世楠(1995),台灣及其鄰近地區應力分布的研究,國立中央大學, 地球科學研究所,博士論文。
- 鄭世楠、葉永田(1989),西元1604年至1988年台灣地區地震目錄,中 央研究院,地球科學研究所。

- 鄭世楠、葉永田、徐明同、辛在勤(1999),台灣十大災害地震圖集, 中央氣象局。
- 鄭世楠、葉義雄、黃文紀、辛在勤、吳建興(1996),1898年-1995年台 灣地區地震目錄,中央氣象局。
- 鄧希平、許俊男、蔡世欽(2003),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—潛在母岩特性調查計畫(91年計畫),實 驗室核種遷移與緩衝回填材料試驗(二),工研院能資所委託研究 報告,SNFD-NTHU-90-207,清華大學原科中心。
- 鄧希平、許俊男、蔡世欽、李明旭(2005),實驗室核種遷移與緩衝回 填材料試驗(三),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— 潛在母岩特性調查計畫(93年計畫), SNFD-NTHU-90-225,清華大學原科中心。
- 鄭志鴻(1996),泥岩材料作為天然不透水襯裡之可行性研究,國立成功大學,環境工程所,碩士論文。
- 鄧屬予(1997),臺灣地質之九,台灣的沉積岩,經濟部中央地質調查 所。
- 鄧屬予(2002),臺灣新生代大地構造;『臺灣大地構造』,黃奇瑜主編,中國地質學會、中國地球物理學會聯合出版,第49-93頁。
- 鄧屬予(2007),臺灣第四紀大地構造,經濟部中央地質調查所特刊, 第18號,第1-24頁。
- 盧俊鼎(2005),工程障壁評估模式技術,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/安全評估技術(93年 計書), SNFD-INER-93-556。
- 盧俊鼎(2005),開挖擾動帶特性評估模式技術,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,SNFD-INER-93-559。
- 賴成銑、洪浩源(2002),地質圈評估技術,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。

賴慈華、陳瑞娥、陸挽中、黃智昭、林燕初、費立沅、江崇榮(2007), 台灣地區水文地質分區特性(簡報資料),經濟部中央地質調查 所。

- 戴國邦、程楓萍(1996),水化學現場取樣及分析技術報告,我國用過 核燃料長程處置第三階段區域調查前四年工作計畫-第二工作年 度計畫, SNFD-ERL-90-073,工研院能資所。
- 環保署(2008),全國環境水質監測資訊網,行政院環境保護署; 2008/10/08取自 http://wqshow.epa.gov.tw/。
- 謝文元(1995),不同溫度、壓力下泥岩之力學行為研究,國立成功大 學土木工程系,碩士論文。
- 謝佩珊(2000),台灣地區溫泉與泥火山氣體來源之初探,國立台灣大學,地質研究所,碩士論文。
- 謝孟龍(2005),一些簡單數字的背後:回顧臺灣千、萬年時距地塊上 升、沉降速率的研究,2005年臺灣活動斷層與地震災害研討會論 文集,第47-58頁。
- 藍培倫(2005), 硒銫在粉碎泥岩的吸附與擴散行為,國立清華大學, 生醫工程與環境科學研究所,碩士論文。
- 顏富士、蔡鎰輝(1985),台灣西南部主要泥岩坡地所含泥岩之物化性 質,行政院國家科學委員會,防災科技研究報告74-09號。
- 顏滄波(1950),台灣之高位段丘砂金,台灣銀行特產叢刊,第6號, 第61-65頁。
- 魏稽生(2000),台灣地質之十三,台灣經濟礦物,台灣能源礦產及地 下水資源,經濟部中央地質調查所。
- 魏稽生、譚立平(1999),台灣地質之十二,台灣經濟礦物,臺灣非金屬經濟礦物,經濟部中央地質調查所。
- 羅建育(1988),台灣南部古亭坑泥岩之沉積學研究,國立中山大學, 海洋地質研究所,碩士論文。
- 羅偉、楊昭男(2005),臺灣地質圖幅說明書,第二十八號新城地質圖 幅,經濟部中央地質調查所。

- 譚立平、魏稽生(1997),台灣地質之十,台灣經濟礦物,台灣金屬經 濟礦物,經濟部中央地質調查所。
- 譚立平、魏稽生(1999),台灣地質之十二,台灣經濟礦物,臺灣非金屬經濟礦物,經濟部中央地質調查所。
- 礦務局(2007),中華民國九十六年礦業統計年報,經濟部礦務局。
- 饒瑞鈞(2002),台灣的地震地體構造,台灣之活動斷層與地震災害研 討會,第30-48頁。
- AEC (2006), Taiwan National Report : Under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management , Atomic Energy Council, Executive Yuan, Taiwan.
- Ahonen, L. (1995), Chemical Stability of Copper Canisters in Deep Repository, YJT-95-19, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies.
- Almén, K.-E., and Zollman, O. (1991), Äspö hard rock laboratory -Field investigation methodology and instruments used in the pre-investigation phase, 1986-1990, SKB Technical Report TR91-21, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Andersson J., Ahokas, H., Hudson, J.A., Koskinen L., Löfman, J., Keto, V., Pitkänen, P., Mattila, J., Ikonen, A.T.K. and Ylä-Mella, M. (2007), Olkiluoto Site Description 2006, Posiva Oy, POSIVA 2007-03, POSIVA.
- Angelier, J., Barrier, E., and Chu, H.T. (1986), Plate collision and paleostress trajectories in a fold and thrust belt: the Foothills of Taiwan, Tectonophysics, 125, pp. 161-178.
- Angelier, J., Bergerat, F., Chu, H.T., Juang, W.S., and Lu, C.Y. (1990),Paleostress analysis as a key to margin extension: The Penghu Islands, South China Sea, Tectonophysics, Vol. 183, pp. 161-176.
- Arens, G. (1997), Regulating Long-Term Safety. The Konard Safety Case, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan. 1997.

- Arnold, B. (2006), Workshop on Latin Hypercube Sampling at INER, Taiwan, Sandia National Laboratories (personal communication).
- ASM (1990), Properties and Section: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Material, Handbook, Volume 2, 10th Edition.
- Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L.F., Cabioch, G., Faure, C., and Rougerie, F. (1996), Deglacial Sea-Level Record from Tahiti Corals and the Timing of Global Meltwater Discharge, Nature, 382, pp. 241-244.
- Barenblatt, G.E., Zheltov, I.P., and Kochina, I.N.(1960), Basic Concepts in the Theory of Homogeneous Liquids in Fissured Rocks, Journal of Appl Math Mech, 24(5).
- Barnes, M.K., and Mereu, R.F. (1996), An application of the 3D seismic technique for mapping near-surface stratigraphy near London, Ontario, Journal of Engineering and Environmental Ggeophysics, Vol. 1, pp. 171-177.
- Baumgartner, P., Bilinsky, Y., Ates, Y., Read, R.S., Crosthwaite, and Dixon, D.A. (1996), Engineering for a Disposal Facility Using the In-Room Emplacement Method, AECL-11595.
- Bear, J.(1972), Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, New York.
- Benke, R., and Painter, S. (2003), Modeling conservative tracer transport in fracture networks with a hybrid approach based on the Boltzmann transport equation, Water Resour. Res., Vol. 39, No. 11, p. 1324.
- Beyssac, O., Simoes, M., Avouac, J.P., Farley, K., Chen, Y.G., Chan, Y.C., and Goffé, B. (2007), Late Cenozoic Metamorphic Evolution and Exhumation of Taiwan, Tectonics (in press).
- BfS (1994), The Gorleben Salt Dome, Federal Office for Radiation Protection (BfS).
- Boggs, S., Wang, W.C., Lewis, F.S., and Chen, J.C. (1979), Sediment properties and Water characteristics of Tawian Shelf and slope. Acta Oceanogr. Taiwanica, Vol. 10, pp. 10-49.

- Bosum, W., Burton, G.D., Hsieh, S.H., Kind, E.G., Schreiber, A., and Tang, C.H. (1970), Aeromagnetic survey of offshore Taiwan, UN ECAFE CCOP Technical Bulletin, vol. 3, pp. 1-34.
- Bruno, J., E. Cera, J. de Pablo, L. Duro, S. Jordana, and D. Savage(1997), Determination of Radionuclide Solubility Limits to be used in SR 97 Uncertainties Associated to Calculated Solubilities, SKB Technical Report TR97-33, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Bunn, M., J.P. Holdren, A. Macfarlane, S.E. Pickett, A. Suzuki, T. Suzuki and J. Weeks (2001), Interim Storage of Spent Nuclear Fuel A Safe, Flexible, and Cost-Effective Near-Term Approach to Spent Fuel Management, A Joint Report from the Hrvard University Project on Managing the Atom and the University of Tokyo Project on Sociotechnics of Nuclear Energy.
- Bunn, M., S. Fetter, J.P. Holdren and B. van der Zwaan (2003), The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel, Project on Managing the Atom, Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard University, USA.
- Campbell, G. (2006), High rResolution aAeromagnetic mMapping of "lLoss-of-ground" fFeatures at pPlatinum and cCoal mMines in South Africa, South African Journal of Geology, Vol. 109, pp. 439-458.
- Carslaw, H. S., and Jaeger, C. (1959), Conduction of Heat in Solids, Oxford, University Press.
- Chapman, N. A., 2006, Geological Disposal of Radioactive Wastes Concept, Status and Trends, Journal of Iberian Geology 32 (1).
- Chen, C.H., and Hsieh, P.S., Wand,K.L., Yang, H.J., Lin, W., Liang, Y.H., Lee, C.Y., and Yang, H.C. (2009), Zircon LA-ICPMS U-Pb Ages and Hf Isotopes of Huayu (Penghu Islands) Volcanics in the Taiwan Strait and Tectonic Implication, Journal of Asian Earth Science (in press).
- Chen, C.H., and Lin, S.B. (2002), Eruptions Younger than 20 ka of the Tatun Volcano Group as Viewed from the Sediments of the

Sungshan Formation in Taipei Basin, Western Pacific Earth Sciences, Vol. 2, No. 2, pp. 191-204.

- Chen, C.H., and Shen, J.J. (2005), A Refined Historical Record of Volcanic Eruptions around Taiwan: Tectonic Implications in the Arc-continent Collision Area, TAO, 16, pp. 331-343.
- Chen, C.H., Lin, W., Lan, C.Y., and Lee, C.Y. (2004), Geochemical and Sr, Nd isotopic characteristics and tectonic implications for three stages of igneous rock in the Late Yanshanian (Cretaceous) orogeny, SE China. In: Special volume of fifth Hutton symposium on the origin of granites and related rocks, Transaction of Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, Vol. 95, No. 1-2, pp. 237-248.
- Chen, C.T.A., Zeng, Z.G., Kuo, F.W., Yang, T.Y.F, Wang, B.H., and Tu, Y.Y. (2005), Tide-influenced Acidic Hydrothermal System Offshore NE Taiwan, Chemical Geology, Vol. 224, pp.69-81.
- Chen, G.-Z., K.-C. Hsu, and C.-H. Lee (2003), Probabilistic Assessment of Contamination using the Two-Phase Flow Model, Waste Management and Research, 21.
- Chen, J.C. (1984), Geochemistry of Granite Gneiss from Chinmen. Acta Oceanographica Taiwanica Science Reports of the National Taiwan University, No. 15, pp. 39-52.
- Chen, W.S, Yang, C.C., Yen, I.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C., Ota, Y., Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S., and Lu, S.T. (2007), Late Holocene Paleoseismicity of the Southern Part of the Chelungpu Fault in Central Taiwan: Evidence from the Chushan Excavation Site, Seismol. Soc. Amer. Bull., Vol. 97, No. 1B, pp. 1-13.
- Chen, Y.G., Wu, W.S., Chen, C.H., and Liu, T.K. (2001), A Date for Volcanic Eruption Inferred from a Siltstone Xenolith, Quaternary Science Reviews, Vol. 20, pp. 869-873.
- Chou, H.C., Kuo, B.Y., Hung, S.H., Chiao, L.Y., Zhao, D., and Wu,
 Y.M. (2006), The Taiwan-Ryukyu Subduction Collision Complex:
 Folding of a Viscoelastic Slab and the Double Seismic Zone,
 Journal of Geophysical Research, Vol. 111, B04410, pp. 1-14.

- Chung, S.L., Cheng, H., Jahn, B.M., O'Reilly, S.Y., and Zhu, B.Q. (1997), Major and Trace Element, and Sr-Nd Isotope Constraints on the Origin of Paleogene Volcanism in South China Prior to the South China Sea Opening, Lithos, Vol. 40, pp. 203-220.
- Chung, S.L., Wang, S.L., Shinjo, R., Lee, C.S. and Cheng, C.H. (2000). Initiation of arc magmatism in an embryonic continental rifting zone of the southernmost part of Okinawa Trough, Terra Nova, 12, pp. 225-230.
- Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D., and Woodworth, P.L. (2001), Changes in Sea Level, in: Climate Change 2001: The Scientific Basis, eds. Houghton and Ding, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- CLIMAP (1981), Relative abundance of planktic foraminifera in the 120 kyr time slice reconstruction of sediment core GIK12392-1, doi:10.1594/PANGAEA.51983.
- Constable, S., and Srnka, L.J. (2007), An Introduction to Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods for Hydrocarhon Exploration, Geophysics, Vol. 72, No. 2, pp. WA3-WA12.
- Constable, S.C., Orange, A.S., Hoversten, G.M., and Morrison, H.F. (1998), Marine Magnetotellurics for Petroleum Exploration Part I: A Sea-Floor Equipment System, Geophysics, Vol. 63, No. 3, p. 816-825.
- Constable, S.C., Orange, A.S., Hoversten, G.M., and Morrison, H.F. (1998), Marine Magnetotellurics for Petroleum Exploration Part I: A Sea-Floor Equipment System, Geophysics, Vol. 63, No. 3, pp. 816-825.
- Cornet F.H, and Valette B. (1984), In situ stress determination from hydraulic injection test data, Journal of Geophysical Research, Vol.89, pp. 11527-11537.
- Cosma, C., Enescu, N., Adam, E., and Balu, L. (2003), Vertical and horizontal seismic profiling investigations at Olkiluoto, 2001, POSIVA 2003-01.
- Cosma, C., Heikkinen, P., Keskinen, J., and Enescu, N. (2001), VSP in crystalline rocks-from downhole velocity profiling to 3-D

fracture mapping, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 843-850.

- Crespi, J.M., Chan, Y.C., and Swaim, M.S. (1996), Synorogenic Extension and Exhumation of the Taiwan Hinterland, Geology, Vol. 24, pp. 247-250.
- Dadson, S. (2004), Erosion of an active mountain belt, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, B., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C.P., Lague, D., and Lin, J.C. (2003), Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen, Nature, Vol. 426, pp. 648-651.
- De Hoog, F.R., J.H. Knight, and N. Stokes (1982), An Improved Method for Numerical Inversion of Laplace Transforms. SIAM J. Sci. Stat. Comput., 3(3).
- Dershowitz, W.S., and H.H. Einstein (1988), Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 21, pp 21-51.
- Dershowitz, W.S., La Pointe, P.R., and Doe, T.W. (2004), Advances in Discrete Fracture Network Modeling, 2004 U.S. EPA/NGWA Fractured Rock Conference: State of the Science and Measuring Success in Remediation, pp. 882-894.
- Devillers, C. (1997), Issues in Assessing Site Suitability and in Comparing National Safety Approaches to Deep Geological Disposal, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan. 1997, p.217-226.
- DOE (2001), Yucca Mountain Science and Engineering Report, Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration, U.S. Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management.
- DOE (2007), Global Nuclear Energy Partnership Strategic Plan, GNEP-167312, Rev.0.
- Duncan, A. (1997), The UK System for Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan.

SNFD2009

- EC (1999), Spent Fuel Disposal Performance Assessment (SPA project)-Topical report 2: Near-Field Data and Models, Near-Field Performance Assessment, European Commission.
- EC (2004), Geological Disposal of Radioactive Wastes Produced by Nuclear Power: From concept to implementation, European Commission Report No: EUR 21224.
- ElBaradei, M. (2004), Nuclear Power: A Look At the Future, Statements of the Director General in International Conference on Fifty Years of Nuclear Power: The Next Fifty Years, Moscow, Russia.
- Enresa (1997), Performance assessment of a deep geological repository in granite, Empresa Nacional de Residuos Radiactvios, S.A., Enresa Publicación Tecnica Num. 02/98, Enresa, p29-p35.

Enviros and Quintessa Ltd. (2003), AMBER version 4.5

Enviros and Quintessa Ltd. (2005), AMBER version 4.7 Demonstration.

- Ernst, W.G., and Jahn, B.M. (1987), Crustal Accretion and Metamorphism in Taiwan, a Post-Paleozoic Mobile Belt, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 321, No. 1557, pp. 129-161.
- Ewing, Rodney C. (2001), The Design and Evaluation of Nuclear-Waste Forms: Clues from Mineralogy, the Canadian Mineralogist, Vol. 39, p.697~715.
- Fetter, C.W. (1994), Applied Hydrogeology 3rd edition, Macmillan, pp.434.
- Fischer, T., Hainzl, S., Jechumtalova, Z., and Eisner, L. (2008), Microseismic Signatures of Hydraulic Fracture Propagation in Sediment Formation, Proceedings, Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-185.
- Franklin, J.A. (1975), Safety and Economy in Tunneling, Proceedings of the 10th Canadian Rock Mechanical Symposium, Kingstone, Canada, pp. 27-53.

- Fugro (2009), Fugro Airborne Surveys; Retrieved 2009/07/20 from http://www.fugroairborne.com/.
- Fuller, C.W., Willett, S.D. Fisher, D., and Lu, C.Y. (2006), A Thermomechanical Wedge Model of Taiwan Constrained by Fission-track Thermochronometry, Tectonophysics, Vol. 425, pp. 1-24.
- Gamble, J.C. (1971), Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks. Ph.D. Thesis, University of Illinois-Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- GoldSim Technology Group LLC (2001), GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide, Version 1.17, GoldSim Technology Group LLC, www.goldsim.com.
- Gunn, P.J. (1997), Application of aeromagnetic surveys to sedimentary basin studies, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics
- Gusakov, A.G., A.G. Voropayev, M. L. Zheludkevich, A.A. Vecher,S.A. Raspopov (1999), Kinetics of Copper Oxidation by Atomic and Molecular Oxygen, Phys. Chem. 1.
- Haimson, B.C., and Cornet, F.H. (2003), ISRM Suggest Methods for rock stress estimation - Part 3: hydraulic fracturing(HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures(HTPF), International Journal of Rock Mechanics & Sciences, Vol. 40, pp. 1011-1020.
- Haimson, B.C., and Fairhurst, C. (1970), In situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing, Proceedings of. 11th US Symp. Rock Mech., Berkeley, SME/AIME, pp. 559-584.
- Hama, K., Seo, T., Teshima, K., Nakano, K., Nakajima, Y., Shimazaki, S., and Nishizaki, M. (1995), Development of 1,000m-class water sampling equipment, Proceeding of 1995 Fall Meeting of the Japanese Association of Groundwater Hydrology, pp. 20-25 (in Japanese).
- Hedman, T., Nystrom, A. and Thegerstrom, C. (2002), Swedish Containers for Disposal of Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste, C. R. Physique 3.
- Helton, J.C. and F.J. Davis (2003), Latin Hypercube Sampling and the Propagation of Uncertainty in Analyses of Complex Systems, Reliability Engineering and System Safety, 81.
- Hermansson H. P. (1999), Corrosion of the Copper Canister in the RepositoryEnvironment, SKI 99:52.
- Hestir, K., and Long, J.C.S. (1990), Analytical expressions for the permeability of random two-dimensional Poisson fracture networks based on regular lattice percolation and equivalent media theories, J. Geophys. Res., 95(B13), vol.21, pp. 565-21-,581.
- Hoa, K.S., Chen, J.C., Lo, C.H., and Zhao, H.L. (2003), 40Ar-39Ar
 Dating and Geochemical Characteristics of Late Cenozoic Basaltic
 Rocks from the Zhejiang-Fujian Region, SE China: Eruption
 Ages, Magma Evolution and Petrogenesis, Chemical Geology, Vol. 197, pp. 287-318.
- Hsieh, S.H., and Hu, C.C. (1972), Gravimetric and magnetic studies of Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, Vol. 10, pp. 283-321.
- Hsu, T.L., and Chang, H.C. (1979), Quaternary Faulting in Taiwan, Mem. Geol. Soc. China, No.3, pp. 155-165.
- Hu, J.C., Angelier, J., Lee, J.C., Chu, H.T., and Byrne, D. (1996),
 Kinematics of convergence, deformation and stress distribution in
 Taiwan collision area: 2-D finite numerical modeling,
 Tectonophysics, 255, pp. 243-268.
- Huang, C.Y., Yuan, P.B., and Tsao, S.J. (2006), Temporal and Spatial Records of Active Arc-Continent Collision in Taiwan: A Synthesis, Geological Society of American Bulletin, Vol. 118, No. 3/4, pp. 274-288.
- Hubbert, K.M., and Willis, D.G. (1957), Mechanics of hydraulic fracturing, Petroleum Transactions AIME, Vol.210, pp.153-156.
- IAEA (1972), Earthquake Guidelines for Reactor Siting, International Atomic Energy Agency, Technical Report Series, No.139, pp. 9-10.
- IAEA (1995a), The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series 111-F.

- IAEA (1995b), Establishing a National System for Radioactive Waste Management, Safety Series 111-S-1.
- IAEA (1997), The Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, International Atomic Energy Agency, GOV/INF/821-GC (41) /INF /12.
- IAEA (2003), Reference Biosphere for Solid Radioactive Waste Disposal: Report of BIOMASS Theme 1 of BIOsphere Modelling and ASSessment Programme, IAEA-BIOMASS-6, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2003), Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 413, IAEA, Vienna.
- IAEA (2007), http://www.iaea.org/programmes/a2/.
- IAEA, (2006a), Geological Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements, International Atomic Energy Agency, Safety Standards Series, No. WS-R-4.
- IAEA, (2006b), Safety of Radioactive Waste Disposal, International Atomic Energy Agency, Proceedings of an International Conference held in Tokyo, 3-7 October.
- ICRP (1996), ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 5, Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, Volume 26/1.
- ICRP (1998), Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, Annals of the ICRP Publication No. 81.
- Iman, R.L. and W.J. Conover (1982), A Distribution-Free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables, Commun. Statist.-Simula. Computa., <u>11(3)</u>.
- Iman, R.L., J.M. Davenport, and D.K. Zeigler (1980), Latin Hypercube Sampling (Program User's Guide), SAND79-1473, Sandia National Laboratories.

- Iman, R.L., M.J. Shortencarier (1984), A FORTRAN 77 Program and User's Guide for the Generation of Latin Hypercube and Random Samples for Use with Computer Models, NUREG/CR-3624 (SAND83-2365), Prepared for U.S. NRC by Sandia National Laboratories.
- IPCC (2001), IPCC Working Group I to the Third Assessment Report, Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, Shanghai, 17-20 January, 2001.
- Isaksson, H., Thunehed, H., and Keisu, M. (2004), Forsmark site investigation : Interpretation of airborne geophysics and integration with topography - Stage 1 (2002), SKB P-04-29, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- ISRM (1981), Rock characterization testing and monitoring, Suggested Methods, Dergamon, Oxford.
- JAEC (1997), Guidelines on Research and Development Relating to Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste in Japan, Advisory Committee on Nuclear Fuel Cycle Backend Policy.
- Jahn, B.M. (1974), Mesozoic Thermal Events in Southeast China. Nature, Vol. 248, pp. 480-483.
- Jahn, B.M., Chen, P.Y., and Yen, T.P. (1976), Rb-Sr Ages of Granitic Rocks in Southeastern China and their Tectonic Significance. Geological Society of America Bulletin, Vol. 86, pp. 763-776.
- Jahn, B.M., Chi, W.R., and Yui, T.Y. (1992), A late Permian Formation of Taiwan (Marbles from Chia-Li Well No. 1): Pb-Pb Isochron and Sr Isotopic evidence, and its Regional Geological Significance, Journal of the Geological Society of China, Vol. 35, pp. 193-218.
- Jahn, B.M., Martineau, F., Peucat, J.J., and Cornichet, J. (1986), Geochronology of the Tananao Schist Complex, Taiwan, and its Regional Tectonic Significance, Tectonophysics, Vol. 125, pp. 103-124.
- Jalonen, T. (2004), Description of Canister Llifting Collar, Letter Responding to INER's Question about Handling of Canister, Posiva, Oy.

- Jaques, A.L., Wellman, P., Whitaker, A., and Wyborn, D. (1997), High-resolution geophysics in modern geological mapping, AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, Vol. 17, No. 2, pp. 159-173.
- Jenkins, D.A. (2001), Potential impacts and effects of climate change, in: Geological perspectives of global climate change, Gerhard, L. C. Harrison, W. E., andHanson, B. M. eds., AAPG Studies in Geology 47, Chapter 3, 337-360.
- JNC (2000a), H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basics for HLW Disposal in Japan, Project Overview report, JNC-TN1410 -2000-001.
- JNC (2000b), H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Supporting Report 3, Safety Assessment of the Geological Disposal System, JNC-TN 1410-2000-004.
- JNC (2005), H17: Development and Management of the Technical Knowledge basefor the Geological Disposal of HLW -- Knowledge Management Report, Japan Nuclear Cycle Development Institute, JNC TN1400 2005-022, JNC.
- Johnson, K.M., Segall, P., and Yu, S.B. (2005), A Viscoelastic Earthquake Cycle Model for Taiwan, Journal of Geophysical Research, Vol. 110, doi: 10.1029/2004JB003516, pp. 1-15.
- Ju, S.J. (2006), A 3-D Compartment Model for Near-Field Release from a SNF Deep Geologic Repository, East Asia Forum on Radwaste Management Conference, Lung-Tan, Taiwan.
- Kaieda, H., Jones, R.H., Moriya, H., Sasaki, S., and Ushijima, K.
 (2000), Ogachi HDR Reservoir Evaluation by AE and Geophysical Methods, Proceedings World Geothermal Congress, p. 3755-3760.
- Kim, K., and Franklin, J.A. (1987), Suggested methods for rock stress determination using the hydraulic fracturing technique, International Journal of Rock Mechanics & Sciences, Vol.24, pp. 59-63.

- King F. (1996), Microbially Influenced Corrosion of Copper Nuclear Fuel Waste Containers in a Canadian Disposal Vault, AECL-11471, COG-95-519.
- Knapp (1997), The U.S. Nuclear Regulatory Commission Experience in the licensing of HLW Waste Repositories, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan. 1997.
- Kobanenko, I. and Kaluzhina, S. (2001), Influences of Temperature and Heat-transfer on Anodic Behavior of Copper in Bicarbonate-Thyocianate Solutions, Joint International Meeting - the 200th Meeting of The Electrochemical Society, Inc. and the 52nd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry - San Francisco, California.
- Koide, K., Nakano, K., and Ogata, N. (1998), Current Status of Development of Groundwater Investigation and Simulation Methodologies in the PNC's Geoscientific Study Programme, Journal of Nuclear Fuel Cycle and Environment, Vol.4, No. 2, pp. 59-71 (in Japanese with English abstract).
- Korhonen, K., Paananen, M. and Paulamäki, S. (2004), Interpretation of lineaments from airborne geophysical and topographic data- An alternative model within version 1.2 of the Forsmark modelling project, SKB P-04-241, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um, J., Wang, M., Escandon, R.F., and Narvaiz, J. (2003), Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead east tunnel, California, USA, Engineering Geology, Vol. 70, pp. 131-155.
- Kwiatek, G., Bohnhoff, M., Dresen, G., Schulze, A., Schulte, T., Zimmermann, G., and Huenges, E. (2008), Microseismic event analysis in conjunction with stimulation treatments at the geothermal research well GtGrSk4/05 in Groß Schönebeck/Germany, 33rd Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA. SGP-TR-185.

- Laaksoharju, M., Smellie, J., Nilsson, A.-C., and Skårman, C. (1995), Groundwater sampling and chemical characterisation of the Laxemar deep borehole KLX02, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden, SKB Technical Report TR95-05.
- Lacombe, O., Mouthereau, F., Angelier, J., and Deffontaines, B. (2001), Structural, Geodetic and Seismological Evidence for Tectonic Escape in SW Taiwan, Tectonophysics, 333, pp. 323-345.
- Lallemand, S., Font, Y., Bijwaard, H., and Kao, H., (2001), New insights on 3-D plates interaction near Taiwan from tomography and tectonic implications. Tectonophysics, 335, pp. 229-253.
- Lan, C.Y., Chung, S.L., and Mertzman, S.A. (1997), Mineralogy and Geochemistry of Granitic Rocks from Chinmen, Liehyu and Dadan Islands, Fujian. Journal of Geological Society of China, Vol. 40, No. 3, pp. 527-558.
- Lan, C.Y., Chung, S.L., Mertzman, S.A., and Chen, C.H., (1995), Mafic Dikes from Chinmen and Liehyu Islands, off Southeast China: Petrochemical Characteristics and Tectonic Implications. Journal of Geological Society of China, Vol. 38, No.3, pp. 183-213.
- Lee, D.H., Lin, H.M., and Wu, J.H. (2007), The Basic Properties of Mudstone Slopes in Southwestern Taiwan, Taiwan Geotechnical Society, Journal of GeoEngineering, 2, pp. 81-95.
- Li, Y.H. (1976), Denudation of Taiwan Island since the Pleistocene epoch, Geology, 4, pp. 105-107.
- Liew, P.M. (1982), Pollen stratigraphical study of the Pleistocene Chishan section (part I), Acta Geologica Taiwanica, No.21, pp. 157-168.
- Liew, P.M. (1986), Palynalogical strtigraphy and climatic implications of Pleistocene sediments in western Taiwan, Acta geologica Taiwanica, No.24, pp. 165-177.
- Liew, P.M. (1988), Quaternary stratigraphy in western Taiwan: palynological correlation; Proceedings of the Geological Society of China, Vol. 31, No. 1, pp. 169-180.

- Liew, P.M., Tseng, M.H. (1999), Climate Event from the Glacial to the Postglacial and Earth Surface Responses in Taiwan, Science Reports of Tohoku University, 7th Series (Geography), Vol. 49, pp. 183-195.
- Lin, A.T. (2001), Cenozoic Stratigraphy and Tectonic Development of the West Taiwan Basins, Ph.D. Thesis, University of Oxford.
- Lin, A.T., Watts, A.B., and Hesselbo, S.P. (2003), Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan Region, Basin Research, 15, pp. 453-478.
- Lin, C.H. (2000), Active Continental Subduction and Exhumation: The Taiwan Orogeny, Terra Nova, Vol. 14, No. 4, pp. 281-287.
- Lin, C.H., and Yeh, Y.H. (2001), Three-dimensional P and S Wave Velocity Structures of the Chingshui-Tuchang Geothermal Area in Northeastern Taiwan, Western Pacific Earth Sciences, Vol. 1, No. 1, pp. 73-84.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Pu, H.C., Hsu, C.C., Lin, T.M., You, S.H., and Huang, Y.P. (2005), Preliminary results of seismic monitoring at Tatun volcanic area of northern Taiwan, Terr. Atm. Ocean., Vol. 16, No. 3, pp. 563-577.
- Lin, J.Y., Hsu, S.K., and Sibuet, J.C. (2004), Melting Features Along the Western Ryukyu Slab Edge (Northeast Taiwan): Tomographic evidence, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, No. B12402, pp. 1-15.
- Lin, W., Chen, C.H., and Lee, C.Y. (1997), Origin of REE-depleted Leucogranites in Chinmen Island, SE Fujian, Journal of Geological Society of China, Vol. 40, No.3, pp. 587-606.
- Lindgren, M. and Lindström, F.(1999), SR-97:Radionuclide Transport Calculations, SKB Technical Report TR99-23, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Liu, H.H., Salvea, R., Wanga, J.S., Bodvarsson, G.S., and Hudson, D. (2004), Field investigation into unsaturated flow and transport in a fault: model analyses, J. Cont. Hydrol., Vol. 74, pp. 39-59.
- Liu, T.K., Hseih, S., Chen, Y.G., and Chen, W.S. (2001), Thermo-kinematic Evolution of the Taiwan Oblique-collision

Mountain Belt as Revealed by Zircon Fission Track Dating, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 186, pp. 45–56.

- Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., and Christiansson, R. (2003), An overview of rock stress measurement methods, International Journal of Rock Mechanics & Sciences, Vol. 40, pp. 975-989.
- Lo, C.H. and Yui, T.F. (1996), ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of high-pressure metamorphic rocks in Taiwan, Jour. Geol. Soc. China, 39, pp. 13-30.
- Lo, C.H., and Onstott, T.C. (1995), Rejuvenation of K-Ar Systems for Minerals in the Taiwan Mountain Belt, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 131, pp. 71-98.
- Lo, C.H., Onstott, T.C., and Wang Lee, C.M. (1993), ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating of Plutonic/metamorphic Rocks from Chinmen Island off Southeast China and its Tectonic Implications. Journal of the Geological Society of China, Vol. 36, pp. 35-55.
- Long, J.C.S., Remer, C.R., Wilsion, C.R., and Witherspoon, P.A.(1982), Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resource Research, 18(3).
- Lu, C.Y., and Hsu, K.J. (1992), Tectonic Evolution of the Taiwan Mountain Belt, Petroleum Geology of Taiwan, No. 27, pp. 21-46.
- Lu, H.Y., Peng, T.R., and Liou, T.S. (2008), Identification of the origin of salinization in groundwater using multivariate statistical analysis and geochemical modeling: a case study of Kaohsiung, Southwest Taiwan, Environmental Geology, 55, pp. 339-352.
- Luhrmann, L., Noseck, U., and Storck, R. (2000), Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a Hypothetical Repository in Crystalline Formations in Germany, GRS-154.
- Macdonald, Digby D. and George Engelhardt (2003), Prediction of Long-Term Corrosion Damage in High Level Nuclear Waste Disposal Systems, Pennsylvania State Univ. and OLI System Inc..
- Macheret, P. (1999), Analysis of Mechanisms for Early Waste Package Failure, ANL-EBS-000023, Rev.1, OCRWM.
- Majer, E.L., Myer, L.R., Peterson, J.E., Karasaki, K., Long, J.C.S., Martel, S.J., Blumling, P., and Vomvoris, S. (1990), Joint seismic,

hydrogeological and geochemical investigations of a fracture zone in the Grimsel Rock Laboratory, Switzerland, National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste, Baden, Switzerland, NTB 90-49, pp. 173.

- Malavieille, J., Lallemand, S.E., Dominguez, S., Deschamps, A., Lu, C.Y., Liu, C.S., Schnurle, P., Angelier, J., Collot, J.Y., Deffontaines, B., Founier, M., Hsu, S.K., Le Formal, J.P., Liu, S.Y., Sibuet, J.C., Thareau, N., Wang, F., and the ACT (2002), Geology of arc-continent collision in Taiwan: Marine observation and geodynamic model, GSA special paper, 358, pp. 187-211.
- Martino, J.B., and Chandler, N.A. (2004), Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory, International Journal of Rock Mechanics & Sciences, Vol. 41, pp. 1413-1426.
- McKenna, S.A., and Rautman, C.A. (1996), Scaling of Material Properties for Yucca Mountain: Literature Review and Numerical Experiments on Saturated Hydraulic Conductivity, SANDIA Report SAND95-2338 1 UC-814, Albuquerque, New Mexico.
- McNeish, J., Freeze, G., Graves, N., Helton, J., Kalinich, D., B., Knowlton, MacKinnon, R., McCord, J., Mishra, S., Pelletier, J., Ramarao, B.S., Rechard, R., Rogers, R., Saulnier, G., D.
 Sevougian and Thom, B. (2003), Total System Performance Assessment-License Application Methods and Approach, Bechtel SAIC Company, LLC. ,TDR-WIS-PA-000006 REV 00 ICN 01, U.S.DOE.
- Miller, W., R. Alexander, N. Chapman, I. McKinley, and J. Smellie(1994), Natural Analogue Studies in the Geological Disposal of Radioactive Wastes, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, NAGRA, TR-93-03.
- MIT (2003), The Future of Nuclear Power—An Interdisciplinary MIT Study, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Mitchell, J. K. (1993), Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, New York.
- Moren, L., and Passe, T. (1999), Climate and shoreline in Sweden during Weichsel and the next 150,000 years, SKB Technical

Report TR01-19, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.

- NAGRA (1994), Kristallin-I Safety Assessment Report, Technical Report 93-22, Switzerland.
- NAGRA (2002), Project Opalinus Clay, Safety report, National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste, Baden, Switzerland, NTB 02-05, pp. 472.
- NEA (1997), Regulating the Long-Term Safety of Radioactive Waste Disposal, Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan. 1997, in Cordoba, Spain.
- NEA (1999), Geological Disposal of Radioactive Waste Review of Developments in the Last Decade, OECD.
- Neter, J., W. Wasserman, and M.H. Kutner (1990), Applied Linear Statistical Models, 3rd ed., Richard D. IRWIN, Inc..
- Newman, G.A., Hoversten, M., Gasperikova, E., and Wannamaker, P.E. (2005), 3D Magnetotelluric Characterization of the COSO Geothermal Field, Proceedings, Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-176.
- OCRWM (2004), "Radioactive Waste: An International Concern", http://www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0405.shtml.
- OECD (1993), The Cost of High-Level Waste Disposal in Geological Repositories—An Analysis of Factors Affecting Cost Estimates, OECD-NEA, France.
- OECD (2003), Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence, First AMIGO Workshop Proceedings Yverdon-les-Bains, Switzerland 3-5 June 2003, NEA No. 4309, p. 189.
- OECD/NEA (2004), The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety, ISBN 92-64,02162-2, Radioactive Waste manegement, OECD/NEA.

- Olsson, O., Black, J., Cosma, C., and Pihl, J. (1987), Crosshole investigations-Final report, National Cooperative for the Storage of Radioactive Waste, Baden, Switzerland, NTB 87-35, pp. 133.
- Philip, B.B., Hanadi, S.R., and Charles, J.N.(1994), Groundwater Water Contamination- Transport and Remediation.
- PNC (1992), Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, PNC TN1410 93-059, Japan.
- Posdorfer, J. and Wessling, B. (2000), Oxidation of Copper in the Present of the Organic Metal Polyaniline, Germany.
- Poteri, A., Billaux, D., Dershowitz, W., Gómez-Hernández, J.J., Cvetkovic, V., Hautojärvi, A., Holton, D., Medina, A., and Winberg, A. (2002), Final report of the TRUE Block Scale project
 3. Modelling of flow and transport, SKB Technical Report TR02-15, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Pramono, B., and Colombo, D., (2005), Microearthquake Characteristics in Darajat Geothermal Field, Indonesia, Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, 24–29 April 2005, Antalya Turkey, p. 6.
- Priest, S.D. (1993), Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, London.
- Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. (1999), TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA.
- Pulver, M.H., Crespi, J.M., and Byrne, T.B. (2002), Lateral Extrusion in a Transpressional Collision Zone: An Example from the Pre-Tertiary Metamorphic Basement of Taiwan, in Byrne, T.B., and Liu, C.-S. (eds.), Geology and Geophysics of an Arc-Continent Collision, Taiwan: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, Vol. 358, pp. 107–120.

Pusch, R. (1994), Waste Disposal in Rock, Elsevier, Netherlands.

Pusch, R. (2002), The Buffer and Backfill Handbook Part 1 : Definitions, Basic Relationships, and Laboratory Methods, SKB Technical Report TR02-20, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.

- Raimbault, P. and Barber, P. (1997), Key Point for Safety Assessment of a Deep Disposal Facility in France, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan.
- Reid, H.F. (1910), The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol. 2, Carnegie Institution of Washington, Washington, D.C.
- Renard, P., and de Marsily, G. (1997), Calculating equivalent permeability: A review, Advances in Water Resources, 20, pp. 253-278.
- Renshaw, C.E.(1996), Influence of Subcritical Fracture Growth on the Connectivity of Fracture Networks, Water Resource Research, 32(6).
- Richard, M., Bellon, H., Maury, R., Barrier, E., and Juang, W.S. (1986), Micocene to Recent Calc-alkalic Volcanism in Easern Taiwan: K-Ar Ages and Petrography, Tectonophysics, Vol. 125, pp. 87-102.
- Romero, L., L. Moreno, and Neretnieks, I. (1991), A Compartment Model for Solute Transport in the Near Field of a Repository for Radioactive Waste (Calculations for Pu-239), SKB Technical Report TR91-48, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Routh, J., E. L. Grossman, G. A. Ulrich, and J. M. Suflita (2001),Volatile Organic Acids and Microbial Process in the YeguaFormation, East-central Texas, Applied Geochemistry, 16(2).
- Ruokola, E. (1997), Regulatory Issues Under Discussion in the Preparation of the Finnish Safety Regulations for Spent Fuel Disposal, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan.
- Sandström, R. (2001), Extrapolation of Canister Material Properties, SOU 2001:35, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.

- Sauty J.P. (1980), An Analysis of Hydrodispersive Transfer in Aquifer, Water Resource Research, 16(1), pp. 145-158.
- Scheuer E.M. and D.S. Stoller (1962), On the Generation of Normal Random Vectors. Technometrics;4.
- Selvaraj, K., and Chen, C.T.A. (2006), Moderate Chemical Weathering of Subtropical Taiwan: Constraints from Solid-Phase Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks, The Journal of Geology, Vol. 114, pp. 101-116.
- Seto, M., Nag, D.K. and Vutukuri, V.S. (1999), In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 17, pp 241-266.
- Seto, M., Soma, N., Maeda, N., Matsui, H., Villaescusa, E., Katsuyama, K. (2001), Methodology and studies of stress measurement by the AE and DRA methods using rock core (in Japanese), Shigen-to Sozai (資源と素材), Vol. 117, pp 829-835.
- Sheriff, R.E. (1984), Encyclopedic dictionary of exploration geophysics, 2nd ed. Soc. Expl. Geophys., Tulsa, OK., 323 p.
- Shinn, E.A. (2001), Coral reefs and shoreline dipsticks, in Gerhard, L.C., Harrison, W.E., and Hanson, B.M., eds., Geological Perspectives of Global Climate Change: American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology No. 47, pp. 251-264.
- Shyu, J.B.H., Sieh, K., and Chen, Y.G. (2005), Tandem Suturing and Disarticulation of the Taiwan Orogen Revealed by its Neotectonic Elements, Earth and Planetary Science Letters, Vol. 233, pp. 167-177.
- Simkin, T., and Siebert, L. (1994), Volcanoes of the World, 2nd edition: Geoscience Press in association with the Smithsonian Institution Global Volcanism Program, Tucson AZ, 368 p.
- Simmons, G.R., and Baumgartner, P. (1994), The Disposal of Canada's Nuclear Fuel Waste: Engineering for a Disposal Facility, AECL-10715.

- Simoes, M., and Avouac, J.P. (2006), Investigating the Kinematics of Mountain Building in Taiwan from the Spatiotemporal Evolution of the Foreland Basin and Western Foothills, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, B10401, pp. 1-25.
- Sjöb, J., Christiansson, R., and Hudson, J.A. (2003), ISRM Suggest Methods for rock stress estimation - Part 2: overcoring methods, International Journal of Rock Mechanics & Sciences, Vol. 40, pp. 999-1010.
- SKB (1996), Feasibility Study for Siting of a Repository within the Malå Municipality, SKB Technical Report TR96-22, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- SKB (1999), Waste, Repository Design and Sites, Background Report to SR 97, SKB Technical Report TR99-08, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- SKB (2000), Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase, SKB Technical Report TR01-03, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- SKB (2006), Model summary report for the safety assessment SR-Can, SKB Technical Report TR06-26, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- SKB (2007), RD&D 2007 Programme for Research, Development and Demonstration, , Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden; Retrieved 2008/12/23 from http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R&D2007_webb.pdf.
- 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.
- SKBF/KBS (1983), Final Storage of Spent Nuclear Fuel-KBS-3, vol.I: General.
- SKI (1996), SKI SITE-94: Deep Repository Performance Assessment Project, Swedish, SKI Report 96:36, Vol. I II.

- Smellie, J. (2001), Wyoming Bentonites : Evidence from the Geological Record to Evaluate the Suitability of Bentonite as a Buffer Material during the Long-term Underground Containment of Radioactive Wastes, SKB Technical Report TR01-26, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Smith, B.D., Cain, M.J., Clark, A.K., Moore, D.W., Faith, J.R. and Hill, P.L. (2005), Helicopter Electromagnetic and Magnetic Survey Data and Maps, Northern Bexar County, Texas, U.S. Geological Survey Open-File Report 05-1158.
- Smith, E.I., and Keenan, D.L. (2005), Yucca Mountain Could Face Greater Volcanic Threat, Eos, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 86, No. 35, pp. 317-321.
- Snow, D.T.(1970), The Frequency and Apertures of Fractures in Rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 7.
- Strickland, F.D., Ren, N.K. (1980), Use of differential strain curve analysis in predicting the in-situ stress state for deep wells, In: Proceedings 21st US Symp. Rock Mechanics, pp523-532.
- Stumm, W., and J. J. Morgan (1981), Aquatic Chemistry, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York.
- Suppe, J., Hu, C.T., and Chen, Y.J. (1985), Present-day stress distributions in western Taiwan inferred from borehole elongation, Petroleum Geology of Taiwan, 21, pp. 1-12.
- Szakacs, A. (1994), Redefining Active Volcanoes: A Discussion, Bulletin of Volcanology, Vol. 56, No. 5, pp. 321-325.
- Talbot, A. (1979), The Accurate Numerical Inversion of Laplace Transforms. IMA J. Appl. Math., 23.
- Teng, L.S. (1990), Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan, Tectonophysics, 183, pp. 57-76.
- Teng, L.S., and Lin, A.T. (2004), Cenozoic Tectonics of the China Continental Margin: Insights from Taiwan, in Malpas, J., C.J.N. Fletcher, J.R. Ali, and J.C. Aitchison, eds., Aspects of the Tectonic Evolution of China, Geological Society, London, Special Publication, Vol. 226, pp. 313-332.

- Triumf, C.-A., Thunehed, H., Kero, L., and Persson, L. (2003), Oskarshamn site investigation- Interpretation of airborne geophysical survey data: Helicopter borne survey data of gamma ray spectrometry, magnetics and EM from 2002 and fixed wing airborne survey data of the VLF-field from 1986, SKB P-03-100, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Tsai, Y.B. (1978), Plate subduction and Plio-Pleistocene orogeny in Taiwan, Petrol. Geol. Taiwan, no.15, pp. 1-10.
- Tsai, Y.B. (1985), A Study of Disastrous Earthquakes in Taiwan, 1683 – 1895, Bull. Inst Earth Sei. Academia Sinica,5, pp.1-44.
- Tsai, Y.B., Teng, T.L., Chiu, J.M., and Liu, H.L. (1977), Tectonic implications of the seismicity in the Taiwan region, Mem. Geol. Soc. China, No. 2, pp. 13-41.
- Uchida, T. (2005), Three-dimensional magnetotelluric investigation in geothermal fields in Japan and Indonesia, Proceedings of World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, pp. 1-12.
- UCSD (2009), Marine EM Laboratory Scripps Institution of Oceanography; Retrieved 2009/07/20 from http://marineemlab.ucsd.edu/.
- UIC (2003), International Nuclear Waste Disposal Concepts, Nuclear Issues Briefing Paper 49, http://www.uic.com.au/nip49.htm.
- USAEC (1973), Nuclear Power Plants, Seismic and Geologic Siting Criteria, U.S. Atomic Energy Commission, Federal Register, Vol.38, No.218.
- USDOE (2001), "Generation-IV Roadmap—Report of the Fuel Cycle Crosscut Group", DOE.
- USNRC (1996) Rock Fractures and Fluid Flow, U.S. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
- USNRC (1997), Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories, 10 CFR Part 60.
- Vidstrand, P. (2001), Comparison of upscaling methods to estimate hydraulic conductivity, Ground Water, 39(3), pp. 401-407.

- Vieno, T. (1997), WELL-97 A Stylized Well Scenario for Indicative Dose Assessment of Deep Repositories, Espoo, VTT Energy, Technical Report SPAVTT-2/97.
- Vieno, T., and Nordman, H. (1999), Safety Assessment of Spent Fuel
 Disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara, –
 TILA-99, POSIVA 99-07, Finland.
- Vomvoris S., Andrews R.W., Lanyon G.W., Voborny O., Wilson W. (1996), Methodology for Deriving Hydrogelogical Input Parameters for Safety-Analysis Models- Application to Fractured Crystalline Rocks of Northern Switzerland. NAGRA-TR 93-14.
- Walker, D., Gylling, B., and Selroos, J.O. (2005), Upscaling oh hydraulic conductivity and telescopic mesh refinement, Ground Water, 43(1), pp. 40-51.
- Weitemeyer, K., Constable, S., and Key, K. (2006), Marine EM Techniques for gas-hydrate detection and hazard mitigation, The Leading Edge, pp. 628-632.
- Weitemeyer, K.A., Constable, S.C., Key, K.W., and Behrens, J.P. Results from a Marine Controlled-Source (2006), First Electromagnetic Survey to Detect Gas Hydrates Offshore Oregon, Geophysical Research Letters, Vol. 33, L03304, dio: 10.1029/2005GL024896.
- Wen, X.H., and Gomez-Hernandez, J.J. (1996), Upscaling hydraulic conductivities in heterogeneous media: an overview, Journal of Hydrology, Vol.183, p. 24.
- Werme, L., Sellin, P., and Kjellbert, N. (1992), Copper Canister for Nuclear High Level Waste Disposal- Corrosion Aspects, SKB Technical Report TR92-26, Swedish Nuclear Fuel And Waste Management Company, Sweden.
- Willett, S.D., Fisher, D. Fuller, C., Yeh, E.C., and Lu, C.Y. (2003), Erosion Rates and Orogenic-wedge Kinematics in Taiwan Inferred from Fission-track Thermochronometry, Geology, Vol. 31, No. 11, pp. 945--948.

- Willis, M.E., Burns, D.R., Lu, R., and Toksöz, M.N. (2007), Fracture Quality from Integrating Time-Lapse VSP and Microseismic Data, Society of Exploration Geophysicists, Vo. 26, No. 9, p. 1198-1202.
- Winberg A, 1999. Scientific and Technical Status. Position Report Prepared for the 2nd TRUE Block Scale Review Meeting, Stockholm, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company. Äspö Hard Rock Laboratory. International Progress Report IPR-99-07.
- Wu, F., Rau, R., and Salzberg, D. (1997), Taiwan Orogeny: Thin-skinned or Lithospheric Collision? Tectonophysics, Vol. 274, pp. 191-220.
- Yamamoto, K., Kuwahara, Y., Kato, N., Hirasawa, T. (1990), Defermation rate analysis: A new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock sample under axial compressions, Tôhoku Geophysical Journal, Vol. 33, No. 2, pp. 127-147.
- Yamane, K., Ohsato, K., Ohminato, T., and Kim, H.J. (2000), Three-Dimensional Magnetitelluric Investigation in Kallonda Geothermal Area, Japan, Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, p. 1965-1968.
- Yang, T.F., Lee, T., Chen, C.H., Cheng, S.N., Knittel, U., Punongbayan, R.S., and Rasdas, A.R. (1996), A double Island Arc Between Taiwan and Luzon: Consequence of Ridge Subduction, Tectonophysics, Vol. 258, pp. 85-101.
- Yang, T.F., Yeh, G.H., Fu, C.C., Wang, C.C., Lan, T.F., Lee, H.F., Chen, C.H., Walia, V., and Sung, Q.C. (2004), Composition and Exhalation Flux of Gases from Mud Volcanoes in Taiwan, Environmental Geology, Vol. 46, pp. 1003-1011.
- Yeh, Y.H., Barrier, E., Lin, C.H., and Angelier, J. (1991), Stress tensor analysis in Taiwan area from focal mechanisms of earthquake, Tectonophysics, 200, 267-280.

- Yokoyama, Y., Lambeck, K., De Deckker, P., Johnston, P., and Fifield, L.K. (2000), Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima, Nature, 406, pp. 713-716.
- You, C.F., Gieskes, J.M., Lee, T., Yui, T.F., and Chen, H.W. (2004), Geochemistry of mud volcano fluids in the Taiwan accretionary prism, Applied Geochemistry, Vol. 19, pp. 695-707.
- Yu, H.S., and Song, G.S. (2000), Submarine Physiographic Features in Taiwan Region and Their Geological Significance, Journal of the Geological Society of China, Vol. 43, No. 2, pp. 267-286.
- Yui, T.F., and Chang, S.S. (1999), Formation Conditions of Vesicle/fissure-filling Smectites in Penghu Basalts: a Stable-isotope Assessment, Clay Minerals, Vol. 34, pp. 381-393.
- Yui, T.F., Liu, K.K., and Shieh, Y.N. (1993), Stable isotope systematics of argillite/slate from a deep well in the Chingshui geothermal field, Taiwan, Chemical Geology, Vol., 103, pp. 181-191.
- Yui, T.F., Shen, P., and Liu, H.H. (2001), Titanite Inclusions in Altered Biotite from Granitoids of Taiwan: Microstructures and Origins, Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 19, pp. 165-175.
- Zhou, W. (2000), Development of INPAG-N: the Near-Field Code for Total System Performance Assessment Disposal of Taiwanese Geological Disposal of Nuclear Spent Fuel. Report MSCI-2020-1, Rev.0, Monitor Scientific LLC, Denver CO., USA.
- Zhou, W. (2002), Development of INPAG-N: the Near-Field Code for Total System Performance Assessment Disposal of Taiwanese Geological Disposal of Nuclear Spent Fuel, Report MSCI-2020-1 Rev.3, Monitor Scientific, LLC, Denver, Colorado, USA.
- Zhou, W. (2004), Development of INPAG-N Version 2: the Two-Dimensional Compartment Near-Field Model for Total System Performance Assessment Disposal of Taiwanese Geological Disposal of Nuclear Spent Fuel, Report MSCI-2409-1 Rev.0, Monitor Scientific, LLC, Denver, Colorado, USA.
- Zhou, W. and Apted, M. (2005), INPAG-NH: A Model and Computer Program for Performance Assessment of Horizontal Emplacement

Repository, MSCI-2507-1 Rev.0, Monitor Scientific, LLC, Denver, Colorado, USA.

- Zhou, W.(2001), Development of INPAG-F: the Far-Field Code for Total System Performance Assessment of Taiwanese Geological Disposal of Nuclear Spent Fuel, Report MSCI-2020-5-Draft, Monitor Scientific LLC, Denver CO., USA.
- Zhou, W., M.W. Kozak(2004), INPAG-FL: Laplace Transform Solution of Radionuclide Transport in Fractured Far-Field, Report MSCI-2403-1 Rev.0.1, Monitor Scientific LLC, Denver CO., USA.
- Zuber, A. (1974), Theoretical possibilities of two-well pulse method, Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, Vol. 2, pp. 277-294.
- Zurkinden, A. (1997), Swiss Experience in Judging Safety Cases, in Proceeding of an NEA International Joint CNRA/CRPPH/RWMC Workshop, 20-23 Jan. 1997, p.231-238.

7	•	中	英	對	照	檢	索
---	---	---	---	---	---	---	---

中文	英文	頁碼
動力反應爐與核燃料開發	Power Reactor and	1-1
公司	Nuclear Fuel	
	Development Corporation	
	(PNC)	
原子能委員會(原能會)	Atomic Energy Council	1-3
	(AEC)	
用過核子燃料	Spent Nuclear Fuel (SNF)	1-3
高放射性廢棄物	High Level Waste (HLW)	1-3
框架重整	Re-racking	1-6
組件	Assemblies	1-6
多重障壁	Multiple Barriers	1-12
廢棄物罐	Canister	1-12
緩衝與回填材料	Buffer and Backfilled	1-12
	Material	
處置母岩	Host Rock	1-12
地質圈	Geosphere	1-12
遷移	Migration	1-12
生物圈	Biosphere	1-12
工程障壁	Engineered Barrier	1-12
近場環境	Near-field	1-12
遠場環境	Far-field	1-12
超鈾元素	Transuranics (TRU)	1-15
群分離與核轉換	Partitioning and	1-15
	Transmutation (P&T)	
廢棄物隔離先導廠	Waste Isolation Pilot	1-15
	Plant (WIPP)	
瑞典核子燃料供應公司	Swedish Nuclear Fuel and	1-15
	Waste Management	

中文	英文	頁碼
	Company/ Svensk	
	Kärnbränslehantering AB	
	(SKB)	
燃料燃耗度	Burn-up	1-15
封裝場	Encapsulation	1-16
芬蘭放射性廢棄物管理公	Posiva Oy	1-16
司		
瑞士國家放射性廢棄物處	National Co operative for	1-16
置合作專責營運機構	the Disposal of	
	Radioactive Waste	
	(NAGRA)	
美國桑地亞國家實驗室	Sandia National	1-16
	Laboratory (SNL)	
國際原子能總署	International Atomic	1-17
	Energy Agency (IAEA)	
歐洲經濟合作發展組織核	The Nuclear Energy	1-17
能署	Agency of the	
	Organization for	
	Economic Co-operation	
	and Development	
	(OECD/NEA)	
歐盟執行委員會	European Commission	1-17
	(EC)	
加拿大核廢棄物管理組織	Nuclear Waste	1-19
	Management Organization	
	(NWMO)	
捷克放射性廢棄物處理委	Czech Radioactive Wastes	1-19
員會	Repository	
	Authority/Správa úložišť	
	radioaktivních odpadů	

中文	英文	頁碼
	(RAWRA/SURAO)	
法國國家放射性廢料管理	French National Agency	1-19
局	for Radioactive Waste	
	Management (ANDRA)	
德國聯邦環境資源部諮詢	Arbeitskreis	1-19
委員會	Auswahlverfahren	
	Endlagerstandorte des	
	BMU (AKEnd)	
瑞典核能檢察署	Swedish Nuclear Power	1-19
	Inspectorate (SKI)	
南韓核能研究所	Korea Atomic Energy	1-19
	Research Institute	
	(KAERI)	
馬里亞納海槽	Mariana Trough	2-22
沖繩海槽	Okinawa Trough	2-22
南海	South China Sea	2-22
恆春半島	Hengchun Peninsula	2-23
馬尼拉增積楔	Manila Accretional	2-23
	Wedge	
東部縱谷	Longitudinal Valley	2-23
南縱谷海槽	South Longitudinal	2-23
	Trough	
元	Eon	2-26
代	Era	2-26
紀	Period	2-26
世	Epoch	2-26
顯生元	Phanerozoic	2-26
新生代	Cenozoic	2-26
第四紀	Quaternary	2-26
全新世	Holocene	2-26

中文	英文	頁碼
更新世	Pleistocene	2-26
第三紀	Tertiary	2-26
上新世	Piocene	2-26
中新世	Miocene	2-26
漸新世	Oligocene	2-26
始新世	Eocene	2-26
古新世	Paleocene	2-26
中生代	Mesozoic	2-26
白堊紀	Cretaceous	2-26
侏羅紀	Jurassic	2-26
三疊紀	Triassic	2-26
古生代	Paleozoic	2-26
二疊紀	Permian	2-26
石炭紀	Carboniferous	2-26
泥盆紀	Devonian	2-26
志留紀	Silurian	2-26
奧陶紀	Ordovician	2-26
寒武紀	Cambrian	2-26
隱生元	Cryptozoic	2-26
固結岩層	Consolidated Rocks	2-60
未固結岩層	Unconsolidated Rocks	2-60
安全出水量	Safety yield	2-63
可持續產流量	Sustainable Yield	2-63
地下水流模數值	Modulus of Groundwater	2-66
	Flow	
地下水逕流係數	Coefficient of	2-66
	Groundwater Flow	
	Recharged by	

中文	英文	頁碼
	Precipitation	
河川基流係數	Coefficient of River	2-66
	Recharged by	
	Groundwater Flow	
酸鹼值	рН	2-74
導電度	Electrical Conductivity	2-74
	(EC)	
氧化還原電位	Reduction-Oxidation	2-74
	Potential (Redox)	
溶氧	Dissolved Oxygen (DO)	2-74
淡水	Fresh Water	2-93
微鹹水	Brackish Water	2-93
鹹水	Saline Water	2-93
滷水	Brine Water	2-93
總溶解固體量	Total Dissolved Solid	2-93
	(TDS)	
風化作用	Weathering	2-94
不成熟化育	Immature	2-94
侵蝕	Erosion	2-95
成岩作用	Diagenesis	2-96
熱液蝕變作用	Hydrothermal Alteration	2-99
變質作用	Metamorphism	2-99
熱液活動	Hydrothermal Activity	2-99
蝕變作用	Alteration	2-99
台灣車籠埔斷層鑽探計畫	Taiwan Chelungpu-fault	2-99
	Drilling Project (TCDP)	
蛋白石矽石	Opaline Silica	2-100
後造山型	Post-orogenic	2-102
熱事件	Thermal event	2-102

中文	英文	頁碼
蛇綠岩套	Ophiolites	2-102
綠土	Smectites	2-102
皂石	Saponite	2-102
塊狀硫化物礦床	Massive Sulfide Deposits	2-116
地下熱水	Hydrothermal Water	2-128
地球物理技術	Geophysical Technology	2-139
空中地球物理	Airborne Geophysics	2-139
地表地球物理	Surface Geophysics	2-140
重力法	Gravity Survey	2-140
磁力法	Magnetic Survey	2-140
震测法	Seismic Method	2-140
直流地電法	DC Geoelectric Method	2-140
交流地電法	AC Geoelectric Method	2-140
海上地球物理	Marine Geophysics	2-140
孔内地球物理	Borehole Geophysics	2-141
空中電磁法	Airborne	2-142
	Electromagnetics Method	
海域電磁法	Marine Electromagnetics	2-142
	Method	
多方位垂直震测剖面法	Multi-azimuth Vertical	2-143
	Seismic Profile Method	
	(VSP)	
水力傳導係數	Hydraulic Conductivity	2-153
貯水係數	Storage Coefficient	2-153
水力延散係數	Hydraulic Dispersion	2-153
	Coefficient	
延散度	Dispersivity	2-153
水力內寬	Hydraulic Aperture	2-153
有效孔隙率	Effective Porosity	2-153

中文	英文	頁碼
地下水流概念模式	Groundwater Flow	2-153
	Conceptual Model	
岩層滲漏試驗或稱漏程試	Lugeon Test	2-153
驗		
單井水力試驗	Single Borehole	2-153
	Hydraulic Test	
水力脈衝試驗	Hydraulic Pulse Test	2-153
跨孔干擾試驗	Cross-hole Interference	2-153
	Test	
跨孔示蹤試驗	Cross-hole Tracer Test	2-153
熱脈衝式微流速量測	Micro-flowrate	2-154
	Measurement by	
	Heat-pulse Flowmeter	
水力掃瞄試驗	Hydraulic Tomography	2-154
孔內雷達	Borehole Radar	2-154
裂隙	Fracture	2-154
不連續面	Discontinuity	2-154
斷層	Fault	2-154
節理	Joint	2-154
裂隙带	Fracture Zone	2-154
剪切带	Shear Zone	2-154
天然障壁	Natural Barrier	2-155
離散裂隙網路模式	Discrete Fracture	2-156
	Network (DFN)	
當量連體模式	Equivalent Continuum	2-156
	Model (ECM)	
合成模式	Hybrid Model	2-156
有效介質理論	Effective Continuum	2-156
	Theory (EMT)	
擴尺度	Up-scaling	2-157
		1

中文	英文	頁碼
地球化學	Geochemistry	2-161
地球化學模式	Geochemical model	2-161
通井取樣	Open Borehole Sampling	2-162
封塞取樣	Pack-off Sampling	2-162
隧道頂拱	Crown	2-169
震源機制解	Earthquake Focal	2-169
	Mechanism Data	
現地應力量測	In-situ Stress	2-169
	Measurements	
平鈑千斤頂試驗	Flat Jack Test	2-169
套鑽法	Over-coring Method	2-169
孔底法	Doorstopper Method	2-169
音射法	Acoustic Emission	2-169
美國礦務局	U.S. Bureau of Mines	2-171
花列式應變計	Strain Gauge Rosettes	2-171
雙軸壓縮試驗	Biaxial Compressive	2-172
	Tests	
楊氏模數	Young's Modulus	2-172
柏松比	Poisson Ratio	2-172
線彈性理論	Theory of Linear	2-172
	Elasticity	
水力破裂法	Hydraulic Fracturing	2-174
	Method (HF)	
既存裂隙水力法	Hydraulic Tests on	2-174
	Pre-existing Fractures	
	(HTPF)	
變形率變化法	Deformation Rate	2-176
	Analysis	
軟流圈	Asthenosphere	2-178
錯動	Offset	2-188

中文	英文	頁碼
潜移	Creep	2-188
有感地震	Macro-earthquake	2-188
走向滑移	Strike-slip	2-195
斷坡 - 斷坪 - 斷坡	Ramp-Flat-Ramp	2-195
滑脫面	Décollement	2-195
莫荷面	Moho	2-195
剥蝕作用	Denudation	2-204
塊體移動	Mass Movement	2-204
搬運作用	Transportation	2-204
環太平洋火山帶(或稱太平	Circum-Pacific Ring of	2-211
洋火環)	Fire	
美國環保署	U.S. Environmental	2-211
	Protection Agency	
	(USEPA)	
美國能源部	U.S. Department of	2-211
	Energy (USDOE)	
活火山	Active Volcanoes	2-212
休火山	Dormant Volcanoes	2-212
死火山	Extinct Volcanoes	2-212
台灣北部火山活動帶	Northern Taiwan	2-212
	Volcanic Zone (NTVZ)	
白榴基玄武岩	Absarokite	2-214
白榴石	Leucite	2-214
捕獲體	Xenolith	2-214
張裂型盆地	Rifting Basin	2-222
上次冰期最盛期	Last Glacial Maximum	2-235
	(LGM)	
新仙女木	Younger Dryas	2-235
海洋同位素階	Marine Isotope Stage	2-238

中文	英文	頁碼
環太平洋中生代花崗岩帶	Mesozoic Circum-Pacific	2-247
	Granitic Belt	
燕山運動	Yanshanian Orogeny	2-248
地質溫度計	Geothermometer	2-253
地質壓力計	Geobarometer	2-253
豊 加	Overprinted	2-254
變形花崗岩	Deformed Granites	2-255
鐵鎂礦物包體	Mafic Enclaves	2-255
半固態變形作用	Subsolidus Deformation	2-256
副片麻岩	Paragneiss	2-262
流動狀葉理	Flowage	2-263
大陸楔	Continental Wedge	2-270
脫逸	Extrusion	2-271
張裂	Extension	2-271
重置	Reset	2-271
弧陸碰撞	Arc-continent Collision	2-271
核飛跡定年	Fission-track Dating	2-271
退縮	Retreat	2-273
混合岩化作用	Migmatization	2-274
同造山期	Syn-orogenic	2-274
後造山期	Post-orogenic	2-274
張性	Tensional	2-274
變形前緣	Deformation Front	2-275
梨山-潮州縫合帶	Lishan-Chaochou Suture	2-275
縱谷縫合帶	Longitudinal Valley	2-275
	Suture	
西部麓山带	Western Foothills	2-275
中央山脈	Central Range	2-275

中文	英文	頁碼
海岸山脈	Coastal Range	2-275
恆春半島	Hengchun Peninsula	2-275
彰化斷層	Changhua Fault	2-276
車籠埔斷層	Chelungpu Fault	2-276
梨山斷層	Lishan Fault	2-276
中央山脈斷層	Central Range Fault	2-276
縱谷斷層	Longitudinal Valley Fault	2-276
無震带	Aseismic Zone	2-280
滑脫分離作用	Detachment	2-280
封存温度	Closure Temperature	2-281
班尼奥夫带	Benioff Zone	2-283
鋁酸鈣膠體	Calcium Aluminate	2-296
	Hydrates (CAH)	
矽酸鈣膠體	Calcium Silicate Hydrates	2-296
	(CSH)	
陽離子交換容量	Cation Exchange Capacity	2-296
	(CEC)	
回脹及崩解試驗	Swelling and Slaking Test	2-297
自由回脹試驗	Free Swelling Test	2-297
觀音(重力)高區	Kuanyin High	2-313
北港(重力)高區	Peikang High	2-313
前陸盆地	Foreland Basins	2-317
重元素	Heavy Elements	3-3
耗乏鈾	Depleted Uranium	3-3
混合氧化物燃料	Mixed Oxide (MOX)	3-3
放射毒性	Radiotoxicity	3-4
加速器核種轉化設備	Accelerator-Driven	3-4
	System (ADS)	
動力反應器資訊系統	Power Reactor	3-6

中文	英文	頁碼
	Information System	
	(PRIS)	
鹽穹	Salt Dome	3-9
源項	Source Term	3-10
氫脆化	Hydrogen Embrittlement	3-11
共同失效模式	Common Failure Mode	3-11
膨潤土	Bentonite	3-11
石英砂	Quartz Sand	3-12
回脹	Swelling	3-12
特徵、事件及作用	Feature, Events, and	3-14
	Process (FEPs)	
互補累積分佈函數	Complementary	3-18
	Cumulative Distribution	
	Function (CCDF)	
美國國家科學院	National Academy of	3-18
	Sciences (NAS)	
國際輻射防護委員會	International Commission	3-20
	on Radiological	
	Protection (ICRP)	
定率	Deterministic	3-21
機率	Probabilistic	3-21
定性	Qualitative	3-21
定量	Quantitative	3-21
衰變熱	Decay Heat	3-23
外包裝	Overpack	3-35
加凡內腐蝕	Galvanic Corrosion	3-40
靜岩壓力	Lithostatic Pressure	3-40
美國環境保護署	The United States	3-44
	Environmental Protection	
	Agency (USEPA)	
		1

中文	英文	頁碼
美國核管會	US Nuclear Regulatory	3-44
	Commission (USNRC)	
地球化學	Geochemistry	3-44
腐蝕演化途徑	Corrosion Evolutionary	3-45
	Path (CEP)	
腐蝕損傷	Corrosion Damage	3-45
黑丘膨潤土	Black Hills Bentonite	3-52
鈉蒙脫石	Na-Montmorillonite	3-52
斜長石	Plagioclase	3-52
石英	Quartz	3-52
黄鐵礦	Pyrite	3-52
方解石	Calcite	3-52
岩鹽	Halite	3-52
硬石膏	Anhydrite	3-52
高嶺石	Kaolinite	3-52
伊利石	Illite	3-52
滑潤石族	Smectite	3-54
鈣型蒙脫石	Ca-Montmorillonite	3-54
耦合作用	Coupling Effect	3-56
自癒	Self-Healing	3-64
國際岩石力學學會	International Society for	3-64
	Rock Mechanics (ISRM)	
最大回脹壓力	Maximum Swelling	3-67
	Pressure	
化學演化	Chemical evolution	3-69
化學形態	Chemical Form	3-69
氣鎖	Air-Lock	3-87
系統需求法	System Requirement	3-89
	Approach	

中文	英文	頁碼
鑽炸工法	Drilling and Blasting	3-90
	Method	
隧道鑽掘機工法	Tunnel Boring Machine	3-90
	Method (TBM)	
支保	Supports	3-91
生態系統	Ecosystem	4-3
分子量	Molecular weight	4-53
廢棄物體	Waste form	4-65
封塞材料	Seals	4-65
安全評估	Safety assessment	4-65
確定式	Deterministic	4-65
機率式	Probabilistic	4-65
RT-NV模式	Radial Transport Model	4-66
	for Radionuclide	
	Near-Field Release with	
	Canister Vertical	
	Emplacement	
ART-NV模式	Axial and Radial	4-66
	Transport Model for	
	Radionuclide Near-Field	
	Release with Canister	
	Vertical Emplacement	
ART-NH模 式	Axial and Radial	4-66
	Transport Model for	
	Radionuclide Near-Field	
	Release with Canister	
	Horizontal Emplacement	
不確定性與參數敏感度分	Uncertainty and	4-66
析	sensitivity analysis	
基質	Matrix	4-67

中文	英文	頁碼
除錯	Debug	4-67
美國科技監測公司	Monitor Scientific LLC	4-68
	(MSCI)	
晶格邊界	Grain boundary	4-68
間隙	Gap	4-68
擴散	Diffusion	4-69
開挖擾動帶	Excavation disturbed zone	4-69
	(EDZ)	
平流	Advection	4-69
延散	Dispersion	4-69
區塊模式	Compartment model	4-75
狄雷克脈衝函數	Dirac function	4-77
晶格	Grain	4-77
瞬釋分率	Instant release fraction	4-77
	(IRF)	
赫維塞德步階函數	Heaviside step function	4-77
顆粒密度	Solid density	4-78
分配係數	Distribution coefficient	4-78
容量因子	Capacity factor	4-78
擴散度	Diffusivity	4-80
存量	Inventory	4-80
密度	Density	4-80
顆粒密度	Solid density	4-80
乾密度	Dry density	4-80
孔隙率	Porosity	4-81
擴散係數	Diffusion coefficient	4-81
通量密度	Flux density	4-81
地下水流速	Groundwater flow	4-81
	velocity	

中文	英文	頁碼
溶解度限值	Solubility limit	4-82
幾何尺寸	Geometric size	4-82
內寬	Aperture	4-82
間距	Spacing	4-82
環狀圓柱體	Annular cylinder	4-83
解析解	Analytic solution	4-83
正規化濃度	Normalized concentration	4-84
第一類與第二類	First and second kind	4-84
間隙存量	Gap inventory	4-94
蝕變時間	Alteration time	4-105
用過燃料特性資料庫	Characteristics of Data	4-106
	Base System (CDBS)	
遷移	Migration	4-122
離散裂隙模式	Discrete fracture model	4-122
連續裂隙模式	Continuous fracture	4-122
	model	
當量離散模式	Equivalent discrete model	4-122
多孔性介質	Porous medium	4-124
裂隙岩體	Fractural rock	4-124
當量孔隙介質	Equivalent porous	4-124
	medium (EPM)	
岩基	Rock matrix	4-124
次要裂隙	Subcritical fracture	4-124
雙孔隙模式	Double porosity model	4-124
	(DPM)	
雙透水性模式	Dual permeability model	4-124
	(DKM)	
裂隙介質	Fractured medium	4-125
蒙特卡羅	Monte Carlo	4-125
中文	英文	頁碼
------------	-------------------------	-------
序率	Stochastic	4-125
分子擴散	Molecular diffusion	4-128
力學傳輸	Mechanical transport	4-128
派克勒數	Peclet number (Pe)	4-128
穿透曲線	Break through curve	4-132
階狀函數	Step function	4-132
裂隙內寬	Fracture aperture	4-134
裂隙間距	Fracture spacing	4-134
溶解度限值	Solubility limit	4-137
棲止水	Perched water	4-137
吸附深度	Sorption depth	4-137
母岩基質	Matrix	4-138
生成	In-growth	4-138
衰變	Decay	4-138
多重平行均匀裂隙模式	Multiple, parallel,	4-140
	uniform fractures model	
區塊	Compartment	4-140
拉普拉氏轉換	Laplace transform	4-140
福傳程式語言	FORTRAN programming	4-140
	language	
擴散與延散	Diffusion/dispersion	4-140
線性平衡吸附	Linear equilibrium	4-140
	sorption	
變質	Alteration	4-145
遷移時間	Duration	4-148
外釋濃度	Release concentration	4-149
場址特性	Site characteristics	4-151
達西	Darcy	4-151

中文	英文	頁碼
動態孔隙率	dynamic porosity	4-152
外釋率	Release rate	4-152
對數均一分佈	Log-uniform distribution	4-165
拉丁超立體取樣	Latin hypercube sampling	4-165
劑量轉換係數	Dose conversion factor	4-174
	(DCF)	
攝取	Ingestion	4-175
相關性係數	Correlation coefficient	4-185
對數常態分佈	Log-normal distribution	4-187
階步迴歸技術	Stepwise regression	4-187
	technique	
原始數據組	Raw data	4-187
階位	Rank	4-187
均匀分佈	Uniform distribution	4-187
常態分佈	Normal distribution	4-187
對數型	Logarithmic	4-188
百分位數	Percentile	4-192
不保守	Non-conservative	4-192
散亂 圖	Scatter plot	4-194
互補式累積分佈函數	Complementary	4-195
	cumulative distribution	
	function (CCDF)	