



行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

行政院原子能委員會放射性物料管理局

委託研究計畫研究報告

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之

國際資訊研析

子計畫一：放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗

技術建立之資訊研析

計畫編號：104FCMA019

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

受委託機關（構）：國立中央大學

報告日期：中華民國 105 年 12 月



低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之  
國際資訊研析

子計畫一：放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗  
技術建立之資訊研析

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫一主持人：董家鈞

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 114 萬元(子計畫一經費)

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)



## 中文摘要

放射性廢棄物處置之成功，需建立完整的調查審驗技術，以確認建造與運轉之安全。站在管制單位的角度，安全評估報告之審查技術規範建立極端重要。透過包含五個子計畫的整合型計畫，期能逐步精進放射性物料安全管理技術發展，整合計畫近程（本年度）目標，在於彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術，研析國內於安全評估審查技術發展所面臨問題，並分別由場址特性、工程設計、長期穩定、生物圈劑量評估以及長期安全等角度，進行安全分析審查技術建立精進所需之國際資訊研析。整合計畫遠程目標，希望能逐步提升我國內放射性廢棄物安全評估之審驗能力；同時，期能逐步建立近場、遠場傳輸模擬之驗證技術能力。本計畫屬於上述整合型計畫之子計畫一，工作目標為場址特性調查與審驗技術國際資訊評析，本年度工作重點為參考瑞典核燃料暨核廢棄物營運公司（SKB）技術報告 TR-14-01：Safety analysis for SFR Long-term safety Main report for the safety assessment SR-PSU。除了針對場址特性進行回顧研析外，同時整合計畫亦彙整了其他四個子計畫的研析成果，分別整理成場址特性、設施設計、安全評估三大章，並綜整出研析結論，以作為我國放射性廢棄物安全評估審驗能力建立之參考。

## **Abstract**

The success of radioactive waste disposal requires comprehensive assessment to evaluate the risk related to facility construction and operation. To improve the regulation techniques on risk assessment of low-level waste disposal repository, this project focuses on reviewing the international experiences of risk assessment and verification techniques for long-term safety of low-level waste tunnel disposal. Working items include site characterization, facility design, long-term stability, radiological dose, and long-term safety assessment. The objective of this project is to improve the regulation ability of Taiwan. The verification technologies of long-term safety assessment of near-field and far-field radionuclide transport will be critically reviewed and developed.

# 目錄

中文摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	3
圖目錄 .....	5
表目錄 .....	8
第一章 前言 .....	9
第二章 放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立國際資訊研析 .....	11
2.1 前言 .....	11
2.2 初始狀態與場址特性演化 .....	11
2.2.1 處置場周圍環境 .....	12
2.2.2 廢棄物 (Waste) .....	13
2.2.3 場址初始狀態 .....	18
2.2.4 演化之外在條件 .....	18
2.2.5 場址封閉後之正常演化 .....	21
2.3 設施設計 .....	38
2.3.1 處置設施簡介 .....	38
2.3.2 封閉後的處置場描述 (Description of repository after closure) .....	40
2.3.3 安全原則 .....	45
2.3.4 特徵事件作用 .....	47
2.3.5 情節選定 .....	51
2.4 安全評估 .....	58
2.4.1 瑞典Forsmark低放射性廢棄物處置場安全評估概念 .....	58
2.4.2 近場安全評估 .....	60
2.4.3 地質圈作用關鍵議題 .....	63
2.4.4 生物圈核種傳輸 .....	64
2.4.5 生物圈核種劑量評估 .....	65
2.5 結論 .....	66
2.5.1 初始狀態與場址特性演化 .....	66
2.5.2 設施設計 .....	67
2.5.3 安全評估 .....	68
第三章 國內潛在場址之場址特性調查成果蒐集 .....	70
3.1 台東縣達仁鄉 .....	70
3.2 金門縣烏坵鄉 .....	71
第四章 台灣近岸與離島坑道處置場址特性調查審查假想案例建置 .....	72
4.1 台東縣達仁鄉 .....	72
4.1.1 初始狀態 .....	72

4.1.2 正常演化 .....	83
4.2 金門縣烏坵鄉.....	89
4.2.1 初始狀態 .....	89
4.2.2 正常演化 .....	104
第五章 台灣近岸與離島可能之特殊地質與其因應之調查要項 .....	105
5.1 台東縣達仁鄉.....	105
5.1.1 隧道工程湧水事件 .....	105
5.1.2 海底山崩 .....	111
5.2 烏坵場址附近 1604 年泉州地震介紹.....	114
第六章 綜合研析場址特性調查評估要項 .....	117
6.1 審查導則之要求.....	117
6.2 安全評估之需要參數.....	122
6.3 根據國外經驗回饋國內場址特徵化需求.....	124
6.4 國內場址特性地質特殊性.....	125
第七章 結論與建議 .....	127
7.1 結論.....	127
7.2 建議.....	128
參考文獻 .....	129



## 圖目錄

圖 2.1 SFR綜覽圖。.....	12
圖 2.2 SFR1 與SFR3 處置設施布置示意圖。.....	13
圖 2.3 SFR 目前或即將使用的放棄物包件種類。.....	16
圖 2.4 FORSMARK地區在全球暖化氣候類型相關條件的演化，包含永凍土、凍結深度及海岸高度相對變化，圖中 0 KA AP為 2,000 AD。.....	20
圖 2.5 FORSMARK地區在早期冰緣氣候類型相關條件的演化，包含永凍土、凍結深度及海岸高度相對變化，圖中 0 KA AP為 2,000 AD。.....	20
圖 2.6 FORSMARK地區在延伸全球暖化氣候類型相關條件的演化，包含永凍土、凍結深度及海岸高度相對變化，圖中 0 KA AP為 2,000 AD。.....	21
圖 2.7 在全球暖化氣候類型下，公元 3,000 年FORSMARK地區植被及土地利用之模型分布圖。.....	22
圖 2.8 在全球暖化氣候類型下，公元 5,000 年及公元 12,000 年FORSMARK地區植被及土地利用之模型分布圖。.....	24
圖 2.9 （上圖）全球暖化類型下不受人類影響及（下圖）延伸全球暖化類型下土地利用類似於當今狀況於公元 5,000 年FORSMARK地區植被及土地利用之模型分布圖。.....	25
圖 2.10 全球暖化氣候類型下，公元 40,000 年FORSMARK地區植被及土地利用之模型分布圖。.....	26
圖 2.11 早期冰緣氣候類型下，公元 20,000 年FORSMARK地區植被及土地利用之模型分布圖。.....	27
圖 2.12 2000 AD和 2500 AD兩個時期在SFR1 及SFR3 廢棄物處置場釋放粒子的排放區位置。.....	29
圖 2.13 3,000 AD在SFR1（左圖粉紅區塊）及SFR3（右圖粉紅區塊）廢棄物處置場粒子（粒子密度如右下所示）的排放區位置。.....	30
圖 2.14 5,000 AD及 9,000 AD在SFR1（左圖粉紅區塊）及SFR3（右圖粉紅區塊）廢棄物處置場粒子（粒子密度如右下所示）的排放區位置。.....	31
圖 2.15 處置場相對於海岸線之條件下，SFR1 及SFR3 的流量變化（M <sup>3</sup> /YR）。.....	32
圖 2.16 膨潤土功能的降解造成通過SFR 1 中處置場的流量（M <sup>3</sup> /YR）變化。.....	33
圖 2.17 膨潤土功能的降解造成通過SFR 3 中處置場的流量（M <sup>3</sup> /YR）變化。.....	34
圖 2.18 SFR地區及SDM-SITE FORSMARK區域（左圖）與只有SFR地區（右圖）之氯離子隨深度的分佈，圖中不同顏色代表不同類型的地下水。.....	35
圖 2.19 各處置坑道之預估放射性廢棄物處置總量。.....	39
圖 2.20 核種活度占比歷線。.....	40
圖 2.21 放射毒性占比歷線。.....	40
圖 2.22 SFR1 與SFR3 的封閉規劃示意圖及豎坑的細部概觀。.....	41
圖 2.23 BLA低放射性處置坑道於SFR 1 區域之 1BLA示意圖。.....	43
圖 2.24 封閉後之 1BLA處置窖斷面圖。.....	43

圖 2.25 2-5BLA低放射性處置坑道於SFR 3 區域之 2-5BLA示意圖。	43
圖 2.26 2-5BLA坑道寬度及高度之概念示意圖。	44
圖 2.27 1BLA在封閉後的斷面示意圖。	44
圖 2.28 安全原則與時間的關聯性。	45
圖 2.29 SR-PSU之安全分析十步驟示意圖。	47
圖 2.30 SR-PSU之特徵事件作用工作流程示意圖。	48
圖 2.31 母岩核種傳輸特性變化示意圖	53
圖 2.32 通過處置設施之流量變化示意圖。	54
圖 2.33 暴露途徑示意圖。	54
圖 2.34 各情節處理不確定性類型示意圖。	57
圖 2.35 SR-PSU的安全評估資料與模式架構。	61
圖 2.36 1BLA水文模擬處置窖區塊分區（左）與廢棄物包件控制體積（右）示意圖。	61
圖 2.37 SR-PSU之 1BLA處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖。	62
圖 2.38 SR-PSU之 2-5BLA處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖。	62
圖 2.39 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖。	64
圖 4.1 達仁鄉建議候選場址鄰近區域之歷年平均月雨量分布圖。	72
圖 4.2 達仁鄉建議候選場址空拍照片。	74
圖 4.3 台東縣達仁鄉建議候選場址流域概況圖。	75
圖 4.4 台東縣達仁鄉建議候選場址自然生態調查範圍圖。	76
圖 4.5 達仁鄉周邊鄉鎮行政區域圖。	79
圖 4.6 場址鄰近區域人口分布圖。	79
圖 4.7 原住民保留地資訊。	81
圖 4.8 1880-1990 年全球平均海水面變化曲線。	84
圖 4.9 台灣現代造山運動（ $\leq 5\text{MYR}$ ）時期之剝露率。	87
圖 4.10 台灣侵蝕速率圖。	87
圖 4.11 烏坵附近地區溫度記錄。	90
圖 4.12 烏坵附近地區月平均雨量紀錄。	90
圖 4.13 1897-2007 年間侵台颱風路徑分類統計圖。	91
圖 4.14 烏坵場址地形圖。	92
圖 4.15 小坵附近海域海底地形圖。	93
圖 4.16 小坵附近海域三維立體海底地形圖。	93
圖 4.17 小坵主要集水區分布圖。	94
圖 4.18 小坵非集水區漫地流流向圖。	95
圖 4.19 小坵地表淺部大地應力分布圖。	100
圖 4.20 小坵平均水質之STIFF 圖。	103
圖 5.1 豎井橫坑開挖地質剖面圖。	106
圖 5.2 豎井橫坑開挖地質平面圖。	107
圖 5.4 各鑽孔岩心主破碎帶照片。	108
圖 5.3 豎井周圍鑽孔位置圖。	108

圖 5.5 基地地質圖。.....	109
圖 5.6 地質剖面圖。.....	110
圖 5.7 LALLEMAND ET AL. (2015) 研究區域之海底地形圖，KR03 為岩心採樣位置，S1-S8 為海底山崩位置。.....	112
圖 5.8 搭配台灣海底地形圖（科技部海洋學門資料庫，2013）比對並圈繪圖 5.7 之大致位置。紅色星號為達仁場址，黃色圓點為綠島。.....	112
圖 5.9 (A) 三個海底山崩位置 (LS1、LS2 與 LS3) 及 (B) ~ (D) 產生最大之海嘯高度，黑箭為滑動方向；(B) LS1；(C) LS2；(D) LS3 造成之海嘯高度。.....	113
圖 5.10 泉州海外大震地震地質略圖。.....	115
圖 5.11 1604 年福建泉州海外 8 級地震災害及等震線分布圖。.....	116

## 表目錄

表 2.1 1-5BLA內的廢棄物種類與數量。	18
表 2.2 溫帶氣候域下，封閉後 1,000 年期間，滲透之含鹽地下水預期成分	35
表 2.3 溫帶和冰緣氣候時期期間，處置場未被海覆蓋之SFR區域淺層地下水的預期成分	36
表 2.4 初始狀態FEPS與其處理考量	48
表 2.5 廢棄物型式之溶質擴散傳輸作用影響表	49
表 2.6 SR-PSU與氣候相關之FEPS與處理方式	51
表 2.7 主要情節安全功能與說明	55
表 2.8 低可能性情節與其安全功能檢視	56
表 2.9 低可能性情節合併為組合情節	57
表 2.10 各情節發生機率	58
表 2.11 長期安全評估與處置設施各元件安全功能之潛在議題	59
表 2.12 SR-PSU之安全功能與安全指標	60
表 2.13 選址工作相關之安全功能與安全指標	60
表 2.14 近場安全評估與工程障壁相關之關鍵議題	62
表 2.15 SR-PSU地質圈作用變數與定義	63
表 2.16 生物圈核種傳輸區塊名稱與說明	65
表 4.1 歷年降水量統計資料	73
表 4.2 1999 年~2014 年最高溫、最低溫、最大平均風速（蒲福風級）	73
表 4.3 計畫區域鄰近水質監測站水質成果表	75
表 4.4 台東地區雨水水質資料	75
表 4.5 現有水井水質檢驗成果表	75
表 4.6 民國 103 年達仁鄉已登錄土地面積概況表	80
表 4.7 硬頁岩表面化學組成	81
表 4.8 地質介質對鈷及銻之分配係數彙整表	82
表 4.9 水力傳導係數表	82
表 4.10 達仁場址之地下水體氫離子濃度指數（PH 值）調查成果	83
表 4.11 台灣地區性海平面變遷推估速率	84
表 4.12 未來 15 萬年的全球氣候情境	85
表 4.13 小坵於頻率年 25 年時之不同延時降雨強度	95
表 4.14 地表水質分析	96
表 4.15 小坵岩石物性一覽表	100
表 5.1 1604 年泉州地震之史料（重點摘錄自吳祚任，2015）	114

## 第一章 前言

我國正積極進行低放射性廢棄物處置作業規劃，目前經濟部已核定 2 處建議候選場址，台灣電力公司亦進行處置技術發展與技術建置中。為提升低放射性廢棄物處置設施的安全性，管制單位擬透過國際處置資訊研析，逐步建置合宜的審查技術與規範，以做好把關工作，爰委託國立中央大學辦理整合性計畫「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之國際資訊研析」，該整合型計畫共計有五個子計畫，子計畫名稱分別為：「子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立之資訊研析」、「子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計審驗技術建立之資訊研析」、「子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置工程地質與長期穩定審驗技術建立之資訊研析」、「子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置核種傳輸審驗技術建立之資訊研析」、「子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈與劑量評估審驗技術建立之資訊研析」。

國際間的低放處置設施型態包括近地表處置與坑道處置等等不同種類。目前經濟部核定之 2 處建議候選場址，台電公司初步處置概念均擬以坑道處置為主。許多國際具低放射性廢棄物處置經驗之機構（如：瑞典 SKB 或日本 NUMO），均已針對坑道處置提出報告，相關議題包括場址描述報告（SKB, 2013）、工程設施安全評估方法（SSM, 2015）、坑道處置方式之封閉規劃（SKB, 2014a）、國際坑道處置近場與遠場傳輸驗證技術報告（NUMO, 2011；SKB, 2014b；SKB, 2014c）、安全評估相關報告（IAEA, 2011a；IAEA, 2011b；NDA, 2015；NRC, 1981；NRC, 1989；SKB, 2013b；SKB, 2014d；SKB, 2014e；SKB, 2014f；SKB, 2014g；SKB, 2014h；SKB, 2014i；SKB, 2014j）等。為確保我國放射性廢棄物處置安全，管制單位有必要強化坑道處置安全性，逐步精進審查技術與相關管制法規，並落實本土化。因此，管制單位擬針對坑道處置概念，長期精進以下各項審查技術，包括：（1）坑道處置場址特性審驗技術建立；（2）坑道處置工程設計審驗技術建立；（3）坑道處置工程地質與長期穩定審驗技術建立；（4）坑道處置核種傳輸審驗技術建立；（5）坑道處置生物圈與劑量評估審驗技術建立，並綜整國內潛在場址特性，最終期能達成以下目標：（1）提供適宜國內之調查項目與提升審驗能力；（2）整合建立近場遠場傳輸之整合驗證技術能力；（3）提升國內低放處置安全評估工作與相關規劃之實質效益；（4）有利於未來精進「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則（第 0 版）」相關章節。

上述目標之達成，預期利用四年時間，針對處置坑道之場址特性、工程設計、長期穩定、生物圈劑量評估以及長期安全等，透過國際資訊研析、審查要項研究、驗證方法評估、審查規範建立（修正）等四步驟漸次推動，近程目標在於彙整國外放射性廢棄物坑道處置設施安全評估審查技術，研析國內在安全評估審查技術發展所面臨問題與精進對策，長程目標則是協助管制單位建立坑道處置安全審查及分析驗證之能力，以使國內處置管制技術能與國際接軌。

本報告主要針對子計畫一（以下簡稱本計畫）計畫執行成果進行說明。為提升管制技術及持續精進審查規範，102 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置場址特性與設施設計審查規範精進之研究」（原委會物料管理局，2013）已針對審查導則場址及設施設計相關

條文，提供修訂方向建議，並在 103 年度針對審查導則場址相關條文，提出「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則（第 0 版）之場址特性修訂草案」（以下簡稱審查導則之場址特性修訂草案），並在 104 年度持續進行場址之特性描述審查規範精進之研究（原委會物料管理局，2015）。

本計畫為上述計畫之延續性計畫，著眼重點為坑道處置之場址特徵化，並審酌國內場址特殊性，透過國際資訊研析，重新審視我國審查規範，並持續精進。

本報告第一章為計畫說明；第二章為國際資訊研析，此章節依各個子計畫進行分組，共同研讀瑞典核燃料暨核廢棄物營運公司（Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company，簡稱 SKB）技術報告 TR-14-01：Safety analysis for SFR Long-term safety Main report for the safety assessment SR-PSU（SKB，2014），並由本報告進行彙整；第三章為近年來針對國內潛在場址之場址特性研究之進程進行說明；第四章根據兩處候選場址「場址特性參數評估報告」（階段性報告，尚未定稿）（台灣電力公司，104a; 104b）之特性參數，並與國外場址調查成果（TR-14-01）比較，可了解國內潛在場址特性調查之優缺點與不足處，並可在未來針對不足處進行補強；第五章則介紹關於國內潛在場址之特殊地質環境，其中說明台東縣達仁鄉潛在場址附近的某隧道施工中所遭遇到之狀況，可做為該潛在場址坑道開挖時的參考依據。另外，該場址附近海域發生海底山崩造成局部海嘯之可能性亦在本章說明。金門縣烏坵鄉潛在場址方面，1604 年的泉州地震造成震央附近明顯影響，此地震在本場址附近，因此，本計畫亦彙整相關文獻並進行介紹；第六章則是綜合研析結果，透過審查導則、場址安全評估所需參數及國內外技術研究結果進行討論；最後第七章提出本計畫之結論與建議。

## 第二章 放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立國際資訊研析

### 2.1 前言

如前所述，除了本子計畫預定完成的工作項目之外，整合計畫擬針對國內處置場之審查技術建立，研析瑞典核燃料暨核廢棄物營運公司（Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company，簡稱SKB）技術報告TR-14-01：Safety analysis for SFR Long-term safety Main report for the safety assessment SR-PSU（SKB，2014），該技術報告對我國未來低放處置安全評估審查作業應具參考價值。該審查報告內容共十二章，本文依TR-14-01主題內容分為三個討論項目，其內容包含：初始狀態與場址特性演化（4.1-4.2；4.4-4.8；第6章）、設施設計（第1-3章；4.3；第5章；第7章）及安全評估（第8-11章）。各子計畫分工如下：

2.1節：前言（總計畫）

2.2節：初始狀態與場址特性演化（子計畫一、子計畫三）

2.3節：設施設計（子計畫二、子計畫三）

2.4節：安全評估（子計畫四、子計畫五）

2.5節：結論（總計畫）

2.1節首先針對TR-14-01之研讀進行規劃及說明；2.2節初始狀態與場址特性演化介紹了瑞典處置場之初始狀態及其周圍環境，初始狀態區分為為廢棄物與處置場及其周遭環境，接下來針對不同的演化環境進行處置場封閉後1,000年內的評估；2.3節敘述了處置場設施設計，首先對SFR處置設施進行介紹，規劃處置之放射性廢棄物，以IBLA處置窖為例敘述處置場封閉後之情況，並且必須確保處置場之設計及封閉後之環境處於安全狀態；2.4節則為處置場安全評估結果，其中包含對近場之評估、地質圈之作用議題及生物圈核種傳輸進行說明；最後是針對以上議題進行總結。

主計畫彙整文獻研讀完成之報告，接著執行交叉研讀的工作，其目的是要讓各個子計畫能了解並且熟悉其他領域之內容，並且透過交叉閱讀可提供不同專業領域之專業建議，使本章之內容更加完整，除可提供做為未來低放射性廢棄物處置之重要參考依據外，亦收專業交流溝通之效。

### 2.2 初始狀態與場址特性演化

本節共分為四個小節，首先說明場址周圍環境，並且介紹處置場內廢棄物之分類，接著為場址之初始狀態，所述初始狀態係安全評估（safety of assessment）的基本評估項目之一，同時也是指處置場在封閉後，啟動處置場效能評估分析程序，並且立即定義相關的預期狀態（expected state）。最後為場址封閉後處置場及其周遭環境可能的氣候變化，並根據不同氣候類型說明場址特性演化過程。

## 2.2.1 處置場周圍環境

SFR預計封存的日期是2075年，本處所描述的初始狀態區分二部分介紹，其一為廢棄物（waste）與處置場（repository），其二為處置場所處周圍環境（environs）。目前，部分的處置場（SFR1）屬營運階段，計畫中的擴建部分（SFR3）仍處規劃階段，如圖2.1。處置場封閉後的周圍環境係假設與現在相同，並根據SFR進行的場址評估、場址描述模型（Site Descriptive Model）、SDM-PSU（SKB，2013）、生物圈綜合報告（SKB，2014d）及氣候報告（SKB，2014e）擬定周圍環境初始狀態，其內容包括了氣候、地表系統（surface system）、母岩（bedrock）、水文地質（hydrogeology）與地下水化學（groundwater chemistry）。

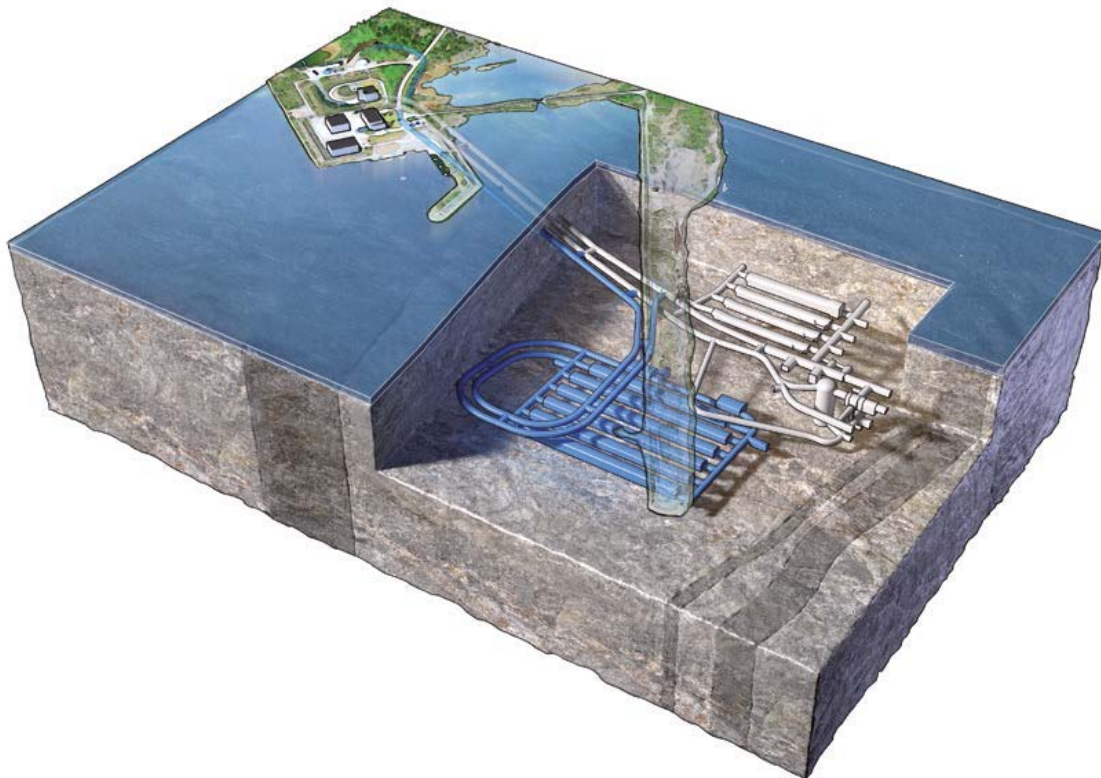


圖 2.1 SFR 綜覽圖。淺灰色部分為現有的處置場（SFR1），藍色部分為已計畫的擴建部分（SFR3）。處置窖包括了豎坑（存放中階廢棄物）、1-2BMA 處置窖（存放中階廢棄物）、1-5BLA 處置窖與BRT 處置窖（用以存放反應器壓力槽，reactor pressure vessels，RPVs）。

SFR是一座於1988年開始營運，接收短半化期之低放射性廢棄物處置設施。處置設施位於波羅的海之海床下，設施上方覆蓋約有60公尺之花崗岩層。SFR1為現今已存在之地下處置設施，包含有4條處置坑道，以及1座70公尺高的混凝土豎坑（concrete silo）。SFR3預計擴建新增6條處置坑道，其規劃坑道深度之岩覆約為120公尺，其高程位置大約在SFR1混凝土豎坑底部。規劃接收之廢棄物包含瑞典核能電廠與相關核能設施之運轉與除役廢棄物，其中包含1條可處置9個沸水式反應爐之處置坑道。SFR1與SFR3之設施布置如圖2.2所示。



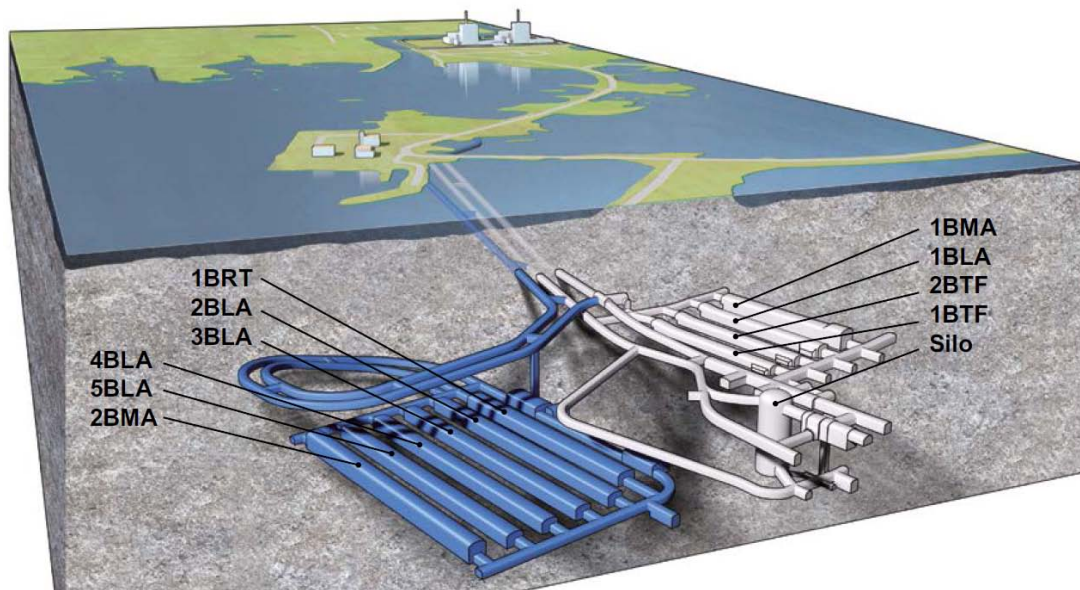


圖 2.2 SFR1 與 SFR3 處置設施布置示意圖。

有關SFR1在建造、檢查與相關條件的量測等過程，均有控制的作為並予以文件化。現有的控制計畫（control programme）包括了地下水入滲量量測（measurements of inflows of groundwater）、地下水化學（groundwater chemistry）與處置窖物理條件的檢查（inspection of the physical condition of the waste vaults）。此一控制計畫的目的，在於檢查系統的改變，例如豎坑沉陷量的持續變化，對於SFR擴建過程所採鑽炸工法（blasting）的可能影響亦一併納入。針對豎坑具有最先進的工程障壁系統，另制定了特別的控制計畫。

## 2.2.2 廢棄物（Waste）

本節內容在於描述廢棄物（waste）和廢棄物包件（waste packaging），於初始狀態報告內容中屬資訊概要說明。

### （1）廢棄物來源（Origin of the waste）

#### 1. 營運廢棄物（Operational waste）

SFR1 多數放射性廢棄物來自瑞典核電廠的營運。放射性廢棄物在反應爐核分裂過程中產生，進而產生了分裂產物（fission product），例如 Cs-137 和 I-131 以及中子。中子可以引起燃料更多的鈾核分裂（fission of uranium）。中子吸收與燃料鈾的變換結果，形成超鈾元素（transuranic element）如鈾（plutonium）和錒（americium）。如同分裂產物，如果燃料損壞，燃料本身生成的超鈾元素只會污染反應器水（reactor water）。

反應器水設備中，最大活性量（activity quantities）來自燃料棒外的活化物質（activation of substances），這些物質發生於反應器水的溶解（dissolved）或細微分解

(finely dispersed) 及材料表面的腐蝕，但它們也可能來自反應爐心表層或內部直接的活化反應並且轉移到反應器水。主迴路中的反應器水經由清理的過程除去放射性核種 (radionuclides)，反應器水在反應器清理迴路的純化方式是由離子交換樹脂以吸附(保留，交換) (retain, exchange) 放射性核種。離子交換樹脂也具備(提供)過濾能力以移除「渣滓」(crud)，例如將工程材料中具有氧化物/氫氧化物的粒子得以消散 (dispersed)。

儘管大多數放射性核種的活性已於離開反應爐心的淨化系統清除，仍有少量散佈到其他系統。相對大量的離子交換樹脂和力學過濾器樹脂被使用在沸水式反應器 (boiling water reactors)，藉以淨化由冷凝器產生的冷凝水。因為少量的放射性核種從反應器轉移到渦輪機 (turbines)，這種水及其過濾樹脂 (filter resins) 成為弱放射性。

額外的廢棄物 (additional waste)，包括離子交換樹脂、力學過濾樹脂 (mechanical filter resin) 和沉澱的污泥 (precipitation sludge)，係由水淨化系統所產生。部分放射性核種係來自核電廠儲存槽 (storage pool) 和 Clab (瑞典用過燃料集中貯存設施) (Central interim storage for spent fuel) 的用過燃料 (spent fuel)。離子交換樹脂亦用在這些核電廠的水淨化系統。固體廢棄物也是在核設施 (nuclear facilities) 產生。一些固體廢棄物由主系統或其它活性系統 (active system) 的成分組成，但大部分固體廢棄物的組成來自於經使用、污染，然後被丟棄的分類材料。

除了從核電廠和 Clink (瑞典用過燃料中期貯存與包封廠) (Central interim storage and encapsulation plant for spent fuel) 的廢棄物，營運廢棄物 (operational waste) 是在 Studsvik AB 核電廠、AB SVAFO 的活動過程中產生，並在 Ågesta 核反應器中出現。放射性廢棄物也出現在其他工業活動、研究和醫療保健。

## 2. 除役廢棄物 (Decommissioning waste)

在除役核電廠的拆解過程中將產生大量的廢金屬 (scrap metal) 和混凝土。如同營運廢棄物的情況，SFR 被分配最大量的廢棄物主要是低放和中放廢棄物 (low and intermediate-level waste)。接近反應爐或在爐心內的材料，如燃料棒或其他爐心元件，被歸列為長壽命 (long-lived) 活性廢棄物，並分配到存放長壽命、低放及中放廢棄物的 SFL 處置場。沸水式反應器 (The boiling water reactors, BWRs) 有一個內部調節器 (inner moderator tank) 和外部反應器壓力槽 (reactor pressure vessel, RPV)。反應器壓力槽具有較低的活性，可以在去污後送入 SFR 處置場。除役廢棄物的活性來自於裂變 (fission) 和活化 (activation)，分配至 SFR 的廢棄物中，屬反應器壓力槽廢棄物 (RPVs) 特別含有誘發放射性 (induced activity)。除役期間，透過去污 (decontamination) 過程以清潔材料，而去污過程產生的溶液 (solution) 係經由離子交換樹脂予以潔淨並被分配到 SFR 處置場。營運期間，當材料進入分類區後，經使用、污染 (contaminated) 後丟棄 (discarded)，此時將在除污過程中形成二次廢棄物 (secondary waste)。

## (2) 材料分類 (Material types)

大部分的營運廢棄物其放射性是來自不同的水淨化系統 (water cleanup system) 廢棄物。這些廢棄物包括珠狀樹脂 (bead resin)、粉狀樹脂 (powdered resin)、力學助濾劑 (mechanical filter aid) 和沉澱污泥 (precipitation sludge)。離子交換樹脂由具有酸性或鹼性基團的有機聚合物 (organic polymer) 組成，如此可使它們具備陽離子或陰離子的交換能力。相對大量的營運廢棄物由金屬組成，包括有碳鋼 (carbon steel) 和不銹鋼 (stainless steel)。在檢修停機 (maintenance outages) 期間，若有機具設備被丟棄、修改或翻新時將產生廢金屬 (scrap metal)。

最大量的營運廢棄物主要為可燃固體廢棄物 (combustible solid waste)，因為 Studsvik 已有焚化廠或在地的近地表廢棄物處理廠，因而 SFR 的廢棄物處理量相對較小。廢棄物主要由纖維素 (cellulose) (紙，棉和木頭) 和塑料 (包括聚氯乙稀 PVC，聚苯乙烯 (polystyrene)，聚乙烯 (polyethylene) 和聚丙烯 (polypropylene)) 組成，這類型廢棄物的焚化灰 (ashes) 也存放在 SFR 處置場。除了這些材料，營運廢棄物包含石棉 (mineral wool)、磚和混凝土，及少量的其它材料形式。

Studsvik AB 核電廠 (Studsvik Nuclear AB) 並不參與具有放射性物質的材料管理，因此，需有處理這些最終廢棄物的服務單位。此類廢棄物的都具有輻射源 (spent radiation source)，包括設備輻射源 (equipment containing radiation source)、放射治療器材廢棄物 (waste from radiotherapy unit)、放射性污染物質和放射性化學廢料 (radioactively contaminated material and radioactive chemical)。這些輻射廢棄物來自廢金屬中的鐵、不銹鋼、鋁以及從可燃廢棄物如衣服、破布焚化產生的垃圾殘餘產物如灰燼、煙灰。

除役廢棄物主要包括金屬和混凝土。大量混凝土來自反應器壓力槽 (RPVs) 的生物輻射屏蔽 (biological radiation shield)。也有其他的金屬、氣體處理系統砂床中的砂、Studsvik 過去的活動產生的污染瀝青、土壤、礫石，和一些二次廢棄物。二次廢棄物是除役過程中產生的，例如纖維素、塑料和金屬。

## (3) 廢棄物包件 (Waste packaging)

在 SFR 處置場的所有廢棄物幾乎都採某種形式的廢棄物包件，例外的是大型元件如沸水式反應器內 (BWRs) 的反應器壓力槽 (RPVs)。在 SFR1 和 SFR3 所使用的不同類型的廢棄物包件如 [圖 2.3](#) 所示。

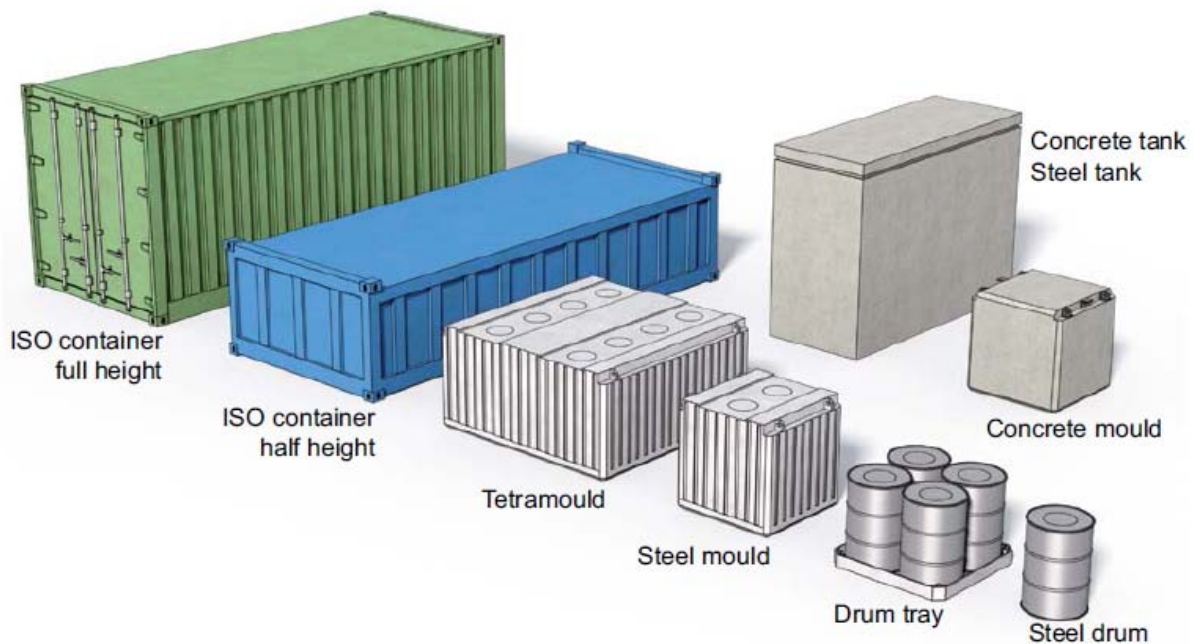


圖 2.3 SFR 目前或即將使用的放棄物包件種類，其中的不銹鋼槽（steel tank）僅使用在長壽命放射性廢棄物（long-lived radioactive waste）之中間儲存器（intermediate storage）。

### 1. 標準貨櫃（ISO container）

鋼板材質的標準貨櫃被用於存放營運或除役的低放固體廢棄物（low-level solid waste），且主要存放在 BLA 處置窖。貨櫃內，廢棄物被裝在盒（boxes）、包（bales）、桶（drums）或直接放置在貨櫃中。貨櫃由碳鋼製成，尺寸分別為「20 英尺全高或半高貨櫃」、「10 英尺全高或半高的貨櫃」。一個 20 英尺的全高度貨櫃尺寸為  $6.1 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.6 \text{ m}$ （L×W×H）。

### 2. 四方廢棄物箱（Tetramould）

SKB 計畫採用鋼板材質的四方廢棄物箱存放除役的中放射性除役廢棄物（intermediate-level decommissioning waste），且主要存放在 2BMA 處置窖。四方廢棄物箱的廢棄物主要為混凝土、鋼材與砂，廢棄物裝填入容器後將灌滿混凝土。一個四方廢棄物箱是鋼材廢棄物箱（steel mould）的四倍大，外部尺寸是  $2.4 \text{ m} \times 2.4 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ （長×寬×高）。

### 3. 鋼材廢棄物箱（Steel mould）

鋼材廢棄物箱主要用於水泥基（cement-）和瀝青固化廢棄物（bitumen-solidified waste）（離子交換樹脂，過濾助劑，蒸發器濃縮物）（ion-exchange resins, filter aids, evaporator concentrates）或混凝土嵌入固體廢棄物（concrete-embedded solid waste），將存放在豎坑和 1-2BMA 窖。鋼材廢棄物箱由碳鋼製成。該鋼模具的外部尺寸是  $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 。

#### 4. 鋼桶，托盤 (Steel drum, drum tray)

鋼桶通常置放在托盤裡，主要用於水泥基 (cement-) 和瀝青固化廢棄物 (bitumen-solidified waste)，將放置在豎坑和 1-2BMA 處置窖，若是焚化灰 (ashes) 則存放在 1BTF 處置窖。此外，在 BLA 處置窖中，鋼桶則是放置在標準貨櫃內，其由碳鋼製成，部分由不銹鋼製成。鋼桶的標準尺寸是直徑 0.6 m 及高度 0.9 m。托盤可存放 4 個鋼桶，外部尺寸為 1.2 m × 1.2 m × 0.9 m (長×寬×高)。

#### 5. 混凝土槽 (Concrete tank)

混凝土箱用於存放脫水的低階放射性離子交換樹脂 (dewatered low-level ion-exchange resins)、過濾助劑 (filter aids) 和污泥 (sludge)，將存放 1-2BTF 窖。混凝土槽是由 15 cm 厚的鋼筋混凝土製造，外尺寸為 3.3 m × 1.3 m × 2.3m (L×W×H)。

#### 6. 混凝土箱 (Concrete mould)

混凝土箱主要用於固化廢棄物 (solidified waste) (離子交換樹脂、過濾助劑、蒸發器濃縮物) (ion-exchange resins, filter aids, evaporator concentrates) 或混凝土嵌入固體廢棄物 (concrete-embedded solid waste)，將存放在豎坑、1-2BMA 窖和 1BTF 窖。混凝土箱由鋼筋混凝土製成，通常為 10 cm 的壁厚，但有時更厚。混凝土箱的外部尺寸是 1.2 m × 1.2 m × 1.2m。

#### (4) 1-5BLA處置窖的廢棄物 (Waste in 1-5BLA)

BLA 處置窖用於存放低階放廢棄物。廢棄物包括垃圾和廢金屬等營運廢棄物，但有約 5% (體積) 的水泥基 (cement-) 或瀝青固化的廢棄物 (bitumen-solidified waste) (離子交換樹脂，蒸發器濃縮物和污泥) (ion-exchange resins, evaporator concentrates and sludge) 放置在 1BLA 處置窖。在 2-5BLA 處置窖內，廢棄物包括了少量的營運廢棄物，例如垃圾和廢金屬，而大部分是除役廢棄物，包括混凝土，金屬，砂，瀝青等。廢棄物的包件、腐蝕表面積和空隙的物料數量如表 2.1。

表 2.1 1-5BLA 內的廢棄物種類與數量。

Material	Weight [kg]		
	1BLA	2-5BLA	Total in 1-5BLA
Aluminium/Zinc a)	$6.30 \cdot 10^4$	$6.98 \cdot 10^4$	$1.33 \cdot 10^5$
Asphalt, gravel, soil	0	$3.60 \cdot 10^6$	$3.60 \cdot 10^6$
Concrete	$2.43 \cdot 10^5$	$1.79 \cdot 10^7$	$1.81 \cdot 10^7$
Bitumen	$1.18 \cdot 10^5$	0	$1.18 \cdot 10^5$
Cellulose	$3.05 \cdot 10^5$	$3.61 \cdot 10^5$	$6.66 \cdot 10^5$
Cement	$7.50 \cdot 10^4$	0	$7.50 \cdot 10^4$
Evaporator concentrates	$2.70 \cdot 10^2$	0	$2.70 \cdot 10^2$
Ion-exchange resins	$9.74 \cdot 10^4$	0	$9.74 \cdot 10^4$
Iron/steel	$3.77 \cdot 10^6$	$3.52 \cdot 10^7$	$3.89 \cdot 10^7$
Sand	0	$5.26 \cdot 10^6$	$5.26 \cdot 10^6$
Sludge	$7.25 \cdot 10^2$	0	$7.25 \cdot 10^2$
Other inorganic	$1.84 \cdot 10^5$	$2.51 \cdot 10^5$	$4.35 \cdot 10^5$
Other organic	$1.47 \cdot 10^6$	$2.03 \cdot 10^6$	$3.50 \cdot 10^6$
Aluminium/Zinc [m <sup>2</sup> ] a,b)	$9.33 \cdot 10^3$	$1.04 \cdot 10^4$	$1.98 \cdot 10^4$
Iron/steel [m <sup>2</sup> ] b)	$2.29 \cdot 10^5$	$1.84 \cdot 10^6$	$2.06 \cdot 10^6$
Void [m <sup>3</sup> ] c)	$4.50 \cdot 10^3$	$3.47 \cdot 10^4$	$3.92 \cdot 10^4$

a) Initial estimate from the prognosis (SKB 2013a). The safety analysis shows the necessity to limit the amounts, see Chapter 11.

b) The corrosion surface area is defined as the area that will be exposed to corrosion. Metal surfaces in contact with bitumen are not included in the definition of corrosion surface area.

c) Void, which is given in m<sup>3</sup> in the above table, is empty space inside the waste packaging i.e. above and between wastes and does not include air-filled pores.

### 2.2.3 場址初始狀態

SKB有關處置場場址之初始狀態相關調查包含氣候；地表系統（地形與風化層；地表水文系統與水化學；海洋、陸地、湖泊與沼澤生態；井與水資源管理；人口及土地利用）；基盤；水文地質；地下水化學。此部分已於104年「低放射性廢棄物處置場址特性審查規範精進之研究」（原委會物料管理局，2015）中描述，詳細說明請參照之。

### 2.2.4 演化之外在條件

為了瞭解對於處置場在未來長期安全的不確定性，預測位於Forsmark區域存放中低放射性廢棄物的SFR處置場未來氣候演化過程，並作為處置場安全評估重要參考。SFR處置場場址演化包括以下各項：

- 地表系統演化（Evolution of the surface systems）
- 熱流演化（Thermal evolution）
- 力學演化（Mechanical evolution）
- 水文地質演化（Hydrogeological evolution）
- 近地場水文循環演化（Near-field hydrological evolution）

- 地球化學演化 (Geochemical evolution)
- 廢棄物的化學演化 (Chemical evolution of the waste)
- 工程障壁的演化 (Evolution of engineered barriers)

對於處置場SAP-08 (中低放射性廢棄物) 及SR-Site (核燃料廢棄物) 的正常演化, 包含了兩個未來氣候發展的因子: 1 重現過去120,000年的環境及2未來受人為溫室氣體排放的演化。安全評估根據人為溫室氣體排放與日照變化組合, 假設Forsmark地區在長時間的氣候相關的演化如下:

- 早期冰緣氣候類型 (Early periglacial climate case): 低度人為溫室氣體排放, 大氣中CO<sub>2</sub>濃度相對下降較快。
- 全球暖化氣候類型 (Global warming climate case): 中度人為溫室氣體排放, 合理的未來氣候演化。
- 延伸全球暖化類型 (Extended global warming climate case): 高度人為溫室氣體排放, 大氣中CO<sub>2</sub>濃度相對下降較慢。

氣候演化與氣候相關議題皆以氣候造成的過程 (climate-driven process) 分三種類型論述:

- 溫帶氣候域 (The temperate climate): 區域內無永凍土及冰層。假設未來大氣中的溫室氣體濃度增加, 場址有可能被海水淹沒。
- 冰緣氣候域 (The periglacial climate): 區域內覆蓋有永凍土, 氣候寒冷, 但無冰層。而此區域有永凍土存在, 但此氣候不會維持永凍土成長。場址未來可能有時候會被海水淹沒。
- 冰河氣候域 (The glacial climate): 區域覆蓋冰河或冰層。冰河氣候不一定在任何時期都具有維持冰層的環境。

#### (1) 氣候域之時序 (Timing of climate domains)

##### 1. 全球暖化氣候類型 (Global warming climate case)

此氣候條件演化(圖 2.4), 永凍土及結冰的深度及相對應的海濱高度的演化一致。這個氣候條件敘述了當今及下個世紀具有中度碳排放 (CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>) 的情況, 之後大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度漸漸下降, 冰河開始, 北半球冰層發展於公元 52,000 年開始。公元 52,000 至 102,000 年之間, 假設全球氣候逐漸冷卻, 並在北半球產生間歇性的冰層。

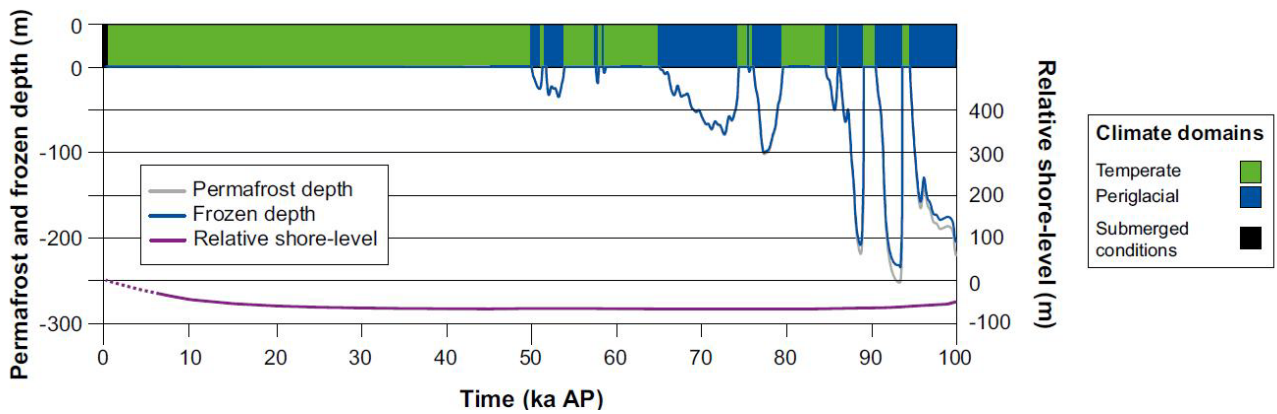


圖 2.4 Forsmark 地區在全球暖化氣候類型相關條件的演化，包含永凍土、凍結深度及海岸高度相對變化，圖中 0 ka AP 為 2,000 AD。

### 2. 早期冰緣氣候類型 (Early periglacial climate case)

此氣候條件演化(圖 2.5)，永凍土及結冰的深度及相對應的海濱高度的演化一致。在冰緣時期 15.5-18.5ka AP，永凍土及結冰的深度約 150 公尺。

Forsmark 約在西元 17,500~20,500 年間。在北高緯度太陽輻射最小值時期，溫度足以形成永凍土。過了這時期，Forsmark 氣候回到了溫帶氣候類型。西元 52,000 年開始，假設大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度更進一步的減少，足以讓北半球形成冰期。

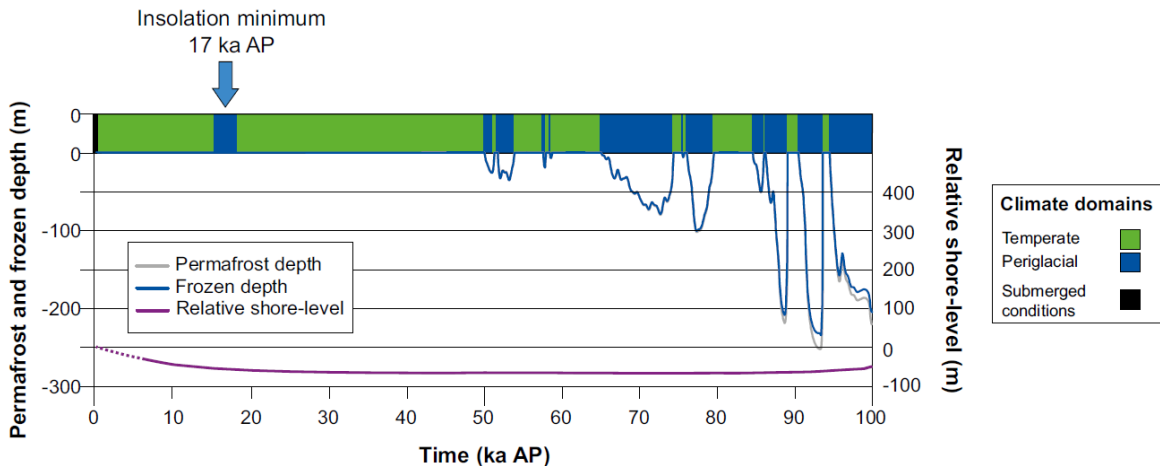


圖 2.5 Forsmark 地區在早期冰緣氣候類型相關條件的演化，包含永凍土、凍結深度及海岸高度相對變化，圖中 0 ka AP 為 2,000 AD。

### 3. 延伸全球暖化氣候類型 (Extended global warming climate case)

此氣候條件演化 (圖 2.6)，在目前至下個世紀持續高量 CO<sub>2</sub> 釋放，接著大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度漸漸減少，北半球冰河開始 (即公元 102,000 年)。從現在至 100,000 年後，假如 CO<sub>2</sub> 濃度持續高於前工業時期，未來不會有冰河期。



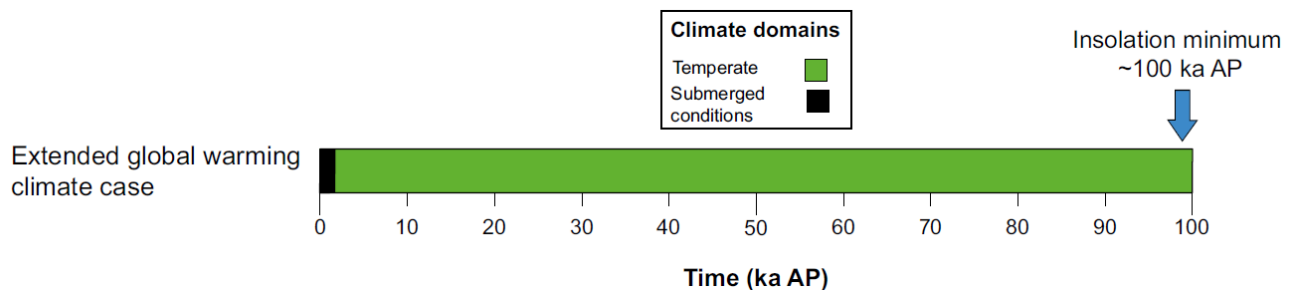


圖 2.6 Forsmark 地區在延伸全球暖化氣候類型相關條件的演化，包含永凍土、凍結深度及海岸高度相對變化，圖中 0 ka AP 為 2,000 AD。

## (2) 海平面高度演化 (Shore-level evolution)

海岸線相對位置隨地殼均衡 (isostasy) 變化 (冰河作用 (glaciation) 及冰消作用 (deglaciation) 使地殼垂直移動) 及海平面升降 (平均海洋體積改變) 而改變，最近一次的冰消作用在公元前 8,000 年，此地區約被 150 m 深的冰湖水淹沒，最靠近的海岸線的地方在 Forsmark 西邊約 100 公里，之後地殼均衡回彈漸漸減少並持續到公元 30,000 年，目前地殼均衡回彈約 8 mm/yr (參閱氣候報告第 2.2.3 節)。在全球暖化氣候類型下，可推測未來海岸線高度不會超過目前海平面，而延伸全球暖化類型在下個一千年總海平面升降作用約為 10 m，海平面升降超過均衡作用，導致初期約 1,200 以上的淹沒期。早期冰緣氣候類型的相對海岸線高度演化與全球暖化氣候類型是一致的。在全球暖化類型及早期冰緣氣候類型下，SFR1 及 SFR3 上方要完全陸化大約要 1,200 年，而處置場上方大部分地區陸化大約 1,000 年。而延伸全球暖化氣候類型，SFR1 及 SFR3 上方要完全陸化要包含初期 1,200 年的淹沒期，因此推測需要 2,200 年的時間。

## 2.2.5 場址封閉後之正常演化

場址封閉後，工程結構會漸漸變成飽和狀態，考慮長時間之安全評估，可假設封閉瞬間達到飽和，預計封閉後 1,000 年的期間 (封閉初期)，氣候條件不變且工程障壁可保持其原有特性。封閉後超過 1,000 年根據不同氣候演化 (溫帶氣候域及冰緣氣候域) 有不同的演化過程，以下分別以不同的主題說明：

### (1) 表面系統的演化

影響 Forsmark 地區表面系統演化的長期控制因素有兩個：1. 氣候變化及 2. 海岸線演化。這兩個控制因素將改變地表作用與生態系統發展，並進一步導致生態系統風險暴露的變化 (放射性核種的運送、暴露、造成的輻射劑量及風險)。

#### 1. 封閉後第一個 1,000 年 (封閉初期)：

海岸線演化可能產生非生物環境的變化，例如海灣隔離產生湖泊，湖泊發展成濕地，且此區目前的湖泊皆小而淺，位於處置場南邊的核電廠冷卻用水渠道將在 2,500

年從海中分離，而位於西邊及西北邊在 1,000 年的後期將分離出較大的湖泊。地貌發展模型顯示（圖 2.7），歷時 3,000 年的海岸線演化僅讓海洋區域出現小島，此區最後一個海灣變成湖泊約需要 9,000 年（公元 11,000 年），海岸水平變化率約 6 mm/yr（即 1,000 年移動 6 公尺），由此可知公元 3,000 年海岸線位置會移動到處置場上方。

以上敘述，關於封閉後第一個 1,000 年演化，導致的陸地抬升及海岸線外新生成陸地的地貌狀況，對於全球暖化及早期冰緣兩種氣候類型均適用。在延伸全球暖化類型的初期，會有海平面上升及海侵的現象，不過在這個歷時結束時，地殼均衡與海平面上升的程度會互相抵消，海岸線位置大致與目前相同。

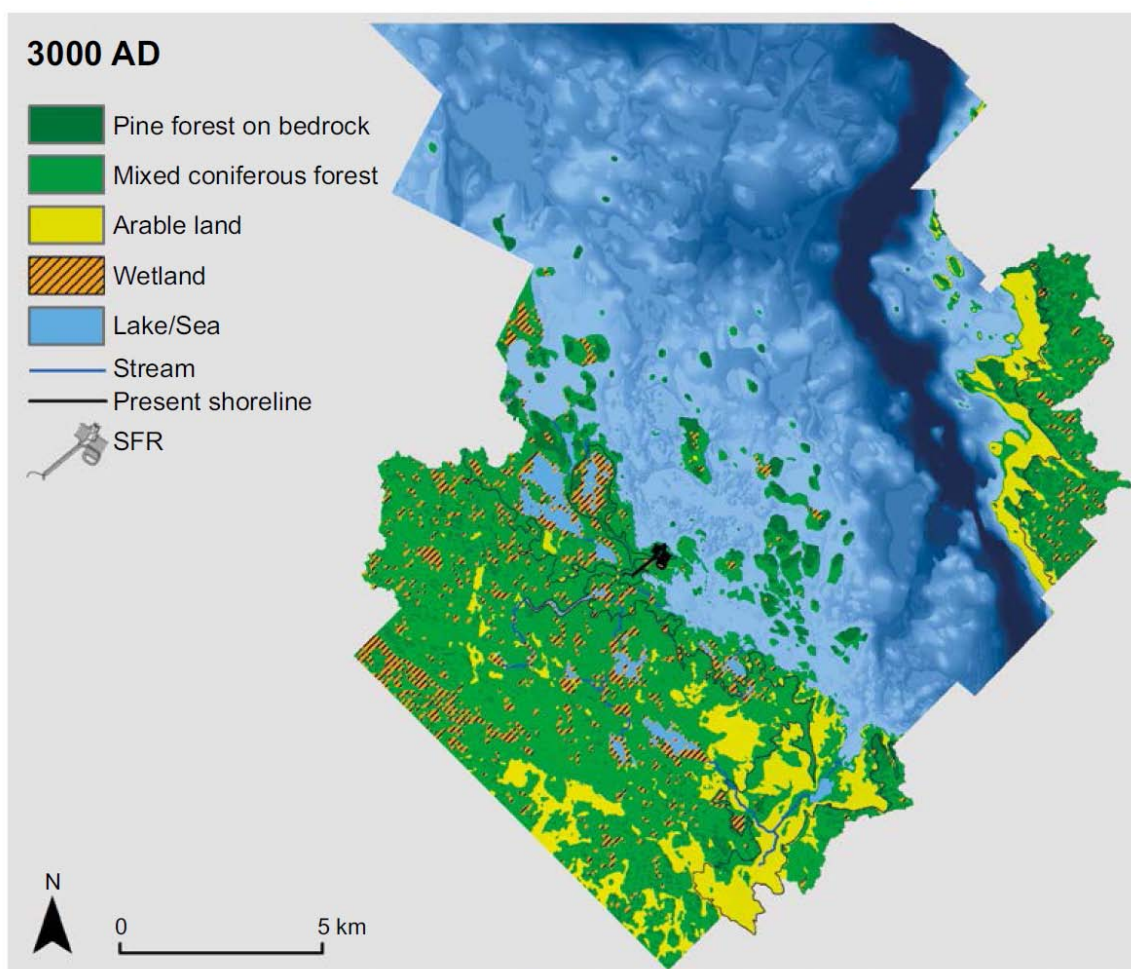


圖 2.7 在全球暖化氣候類型下，公元 3,000 年 Forsmark 地區植被及土地利用之模型分布圖。

## 2. 封閉 1,000 年後之溫帶氣候域：

封閉後超過 1,000 年之表面系統演化的發展可分為兩個時期：

- 公元 3,000 至 12,000 年時期。
- 評估殘餘部分時期。

#### A. 公元3,000至12,000年期間

Öregrundsgrepen 海灣逐漸縮小，沿著 Gräsö 島形成峽灣，至 12,000 年成為一系列的湖泊，此時，大海已經離開模型區域（圖 2.8）。大多數的湖泊在此期間從大海中被孤立出來，多數新生成的湖泊都小而淺，且預計將在 2,000 至 6,000 年間被填充及轉化成沼澤（生物圈綜合報告）。如圖 2.8 所示，此區幾乎所有的湖泊將被填實，只有近 Gräsö 島一些最初相對較大且較深的湖泊在公元 12,000 年仍維持不變。

氣候的變化及海岸線演化是主要影響地貌（landscape）的發展因素，也影響了人類對於地貌的利用。地貌發展模型而言，這些因素的影響經由研究而制訂一套基於不同假設關於氣候、土地利用及相關的流程的地貌發展變量。圖 2.9 顯示兩個公元 5,000 年不同變異之結果，可與圖 2.8 上圖進行比較。

圖 2.9 上圖顯示地貌不受人類影響，與圖 2.7 相比最明顯的不同為缺乏可耕地。圖 2.9 下圖顯示基於擴張全球暖化類型建模的結果。這種氣候類型下表示此氣候因人類活動影響比其他氣候類型更為劇烈，導致地貌發展模型有不同結果。正如圖 2.9 擴張全球暖化類型及圖 2.8 公元 5,000 年全球暖化結果之比較，差異在海岸線演化及未來的植被，特別是在擴展全球暖化類型是延遲 1,000 年的海岸線演化，此結果在公元 5,000 年仍有大片的海洋，且在植被的類型上有些差異，例如橡樹與落葉林分別取代松樹及混合針葉林。

#### B. 評估殘餘部分時期

圖 2.10 顯示公元 40,000 年之地貌模型，為地貌發展模型最終的結果。由圖中可知經過演替已經把湖泊變成了陸地，包含較深的海灣/湖泊鄰近目前的 Gräsö 島。如圖 2.10 可知這些區域大部分被標記為可耕地，圖中顯示之結果具有一定程度的可信度，其中認為是可以培養的所有土地被用作耕地模型變異的結果。

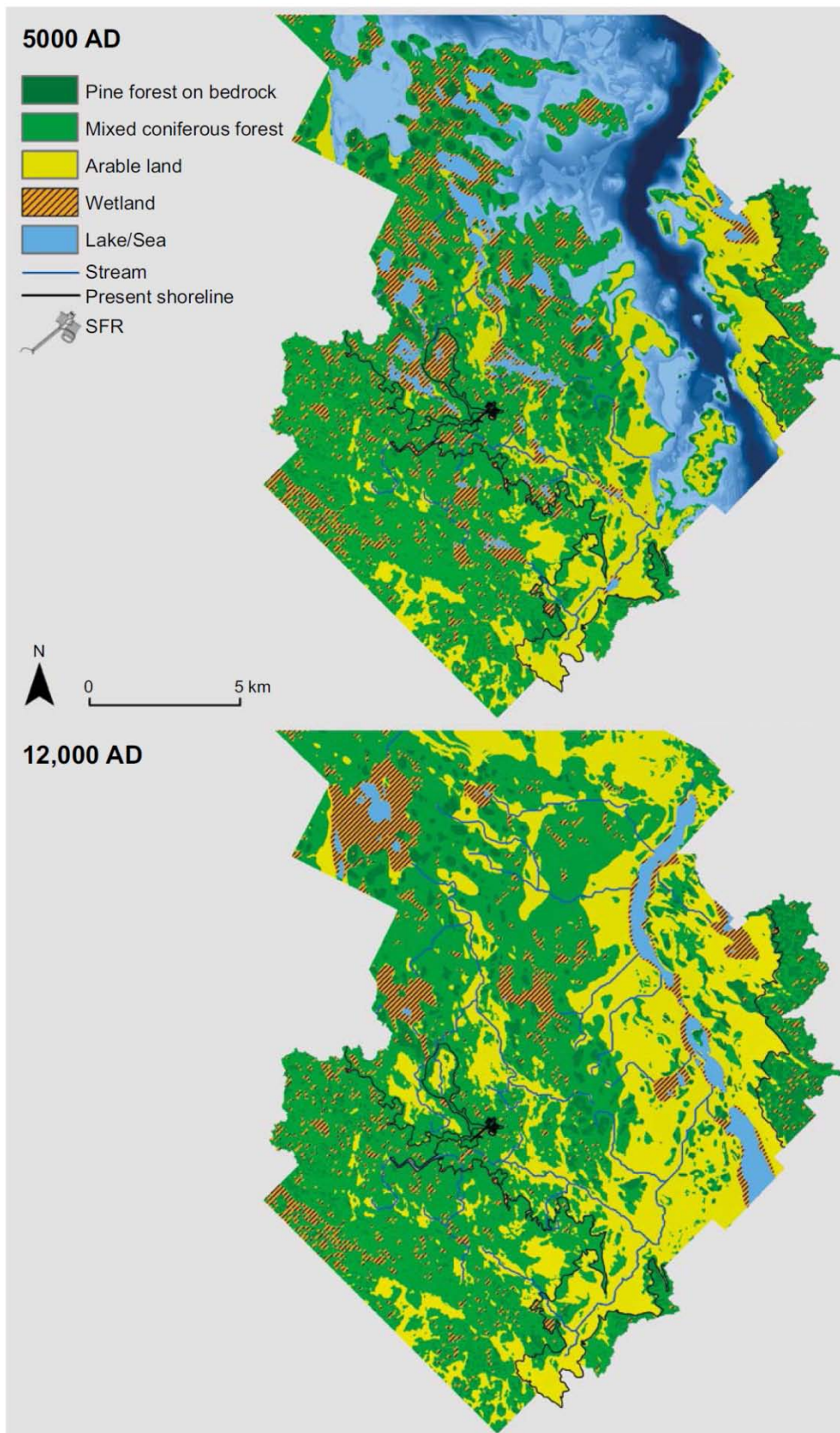


圖 2.8 在全球暖化氣候類型下，公元 5,000 年及公元 12,000 年 Forsmark 地區植被及土地利用之模型分布圖。

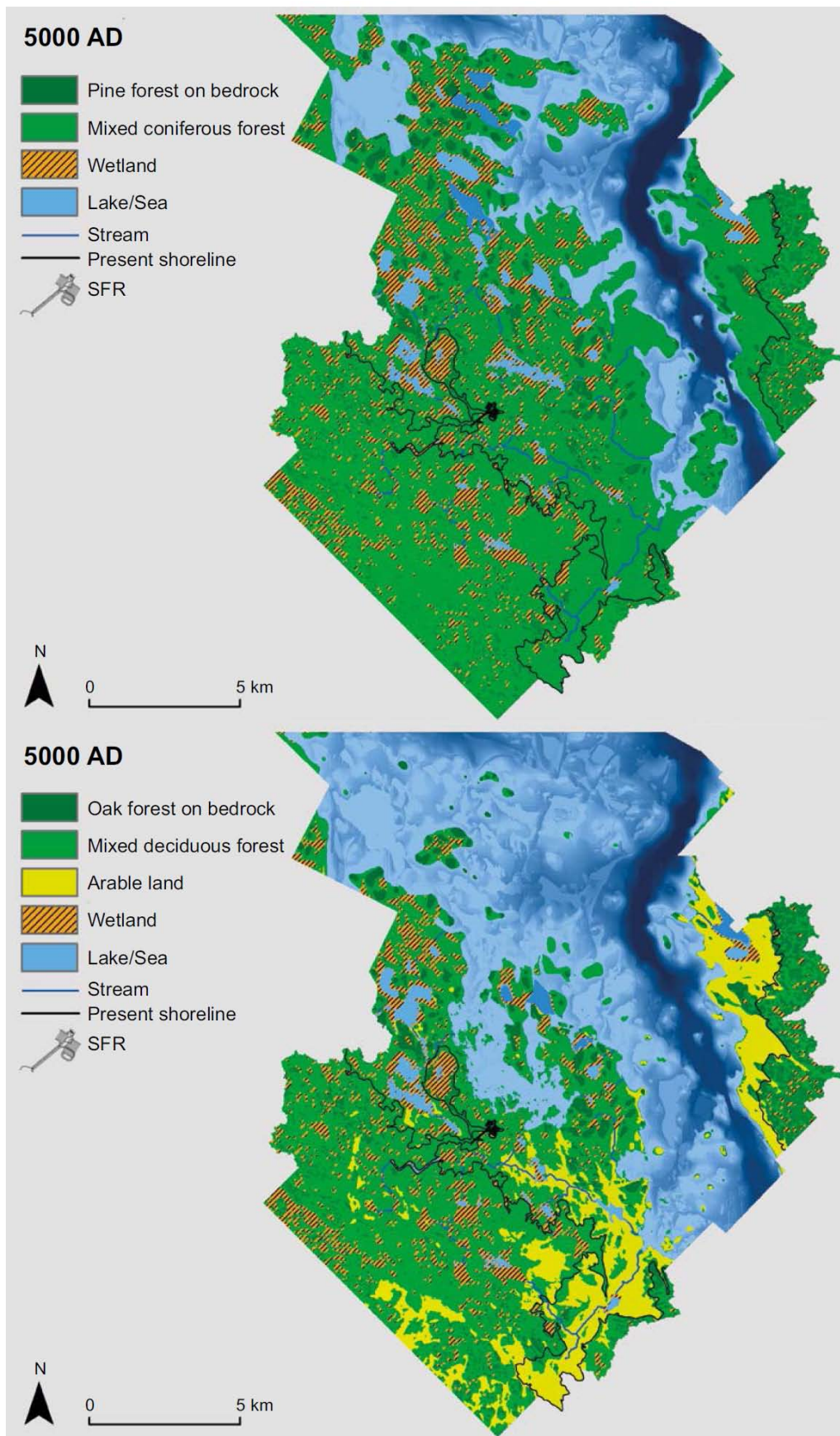


圖 2.9 (上圖) 全球暖化類型下不受人類影響及 (下圖) 延伸全球暖化類型下土地利用類  
似於當今狀況於公元 5,000 年 Forsmark 地區植被及土地利用之模型分布圖。

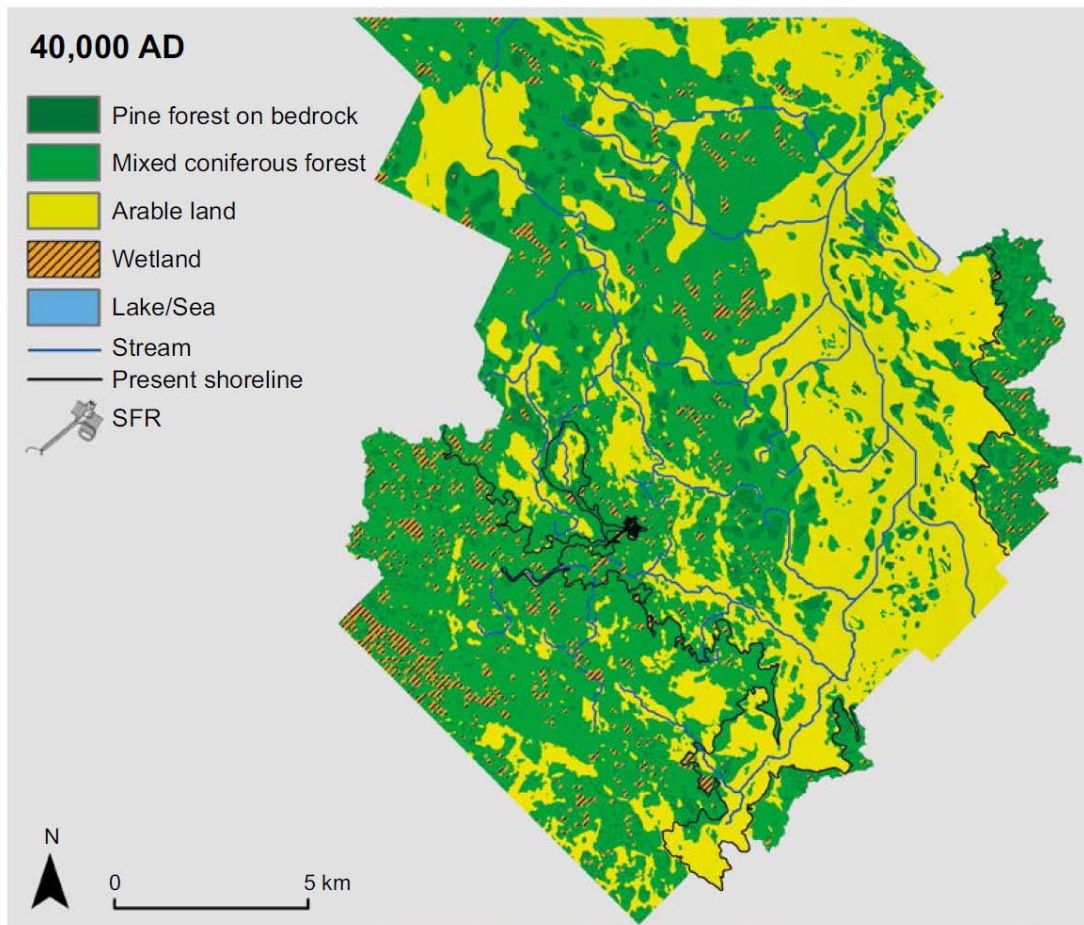


圖 2.10 全球暖化氣候類型下，公元40,000年 Forsmark 地區植被及土地利用之模型分布圖。

### 3. 封閉1,000年後之冰緣氣候域

早期冰緣氣候類型下，約公元 20,000 年左右發展成冰緣氣候，圖 2.11 顯示模擬公元 20,000 年 Forsmark 冰緣地貌的結果，在冰緣域，富含植被的時間很短，陸生植被主要由莎草科、草本植物及灌木組成，大多裸露及乾燥的地區主要植被為地衣，潮濕的地面以苔蘚為主。溫和氣候下降雨（雪）比例會降低，因為水的蒸散傳輸到大氣有限（Kjellström 等人，2009），低蒸散作用表示潮濕的地面普遍分布，因為多餘的水無法滲入地面（Bosson 等人，2010；French，2007）。相較於溫帶氣候這可能導致有更大區域的濕地，另外，泥炭型成的速率很低，部分原因是陸生植物生長率也很低。

不凍層（taliks）是永凍土環境中解凍的地區，永凍土層解凍後形成不凍層，在冰緣地貌是為一潛放射性核種從處置場釋至生物圈的地點。湖泊及溪流的位置經常被人類居住或利用，在冰緣條件期間不凍層可能為人類潛在暴露於放射性核種的位置。

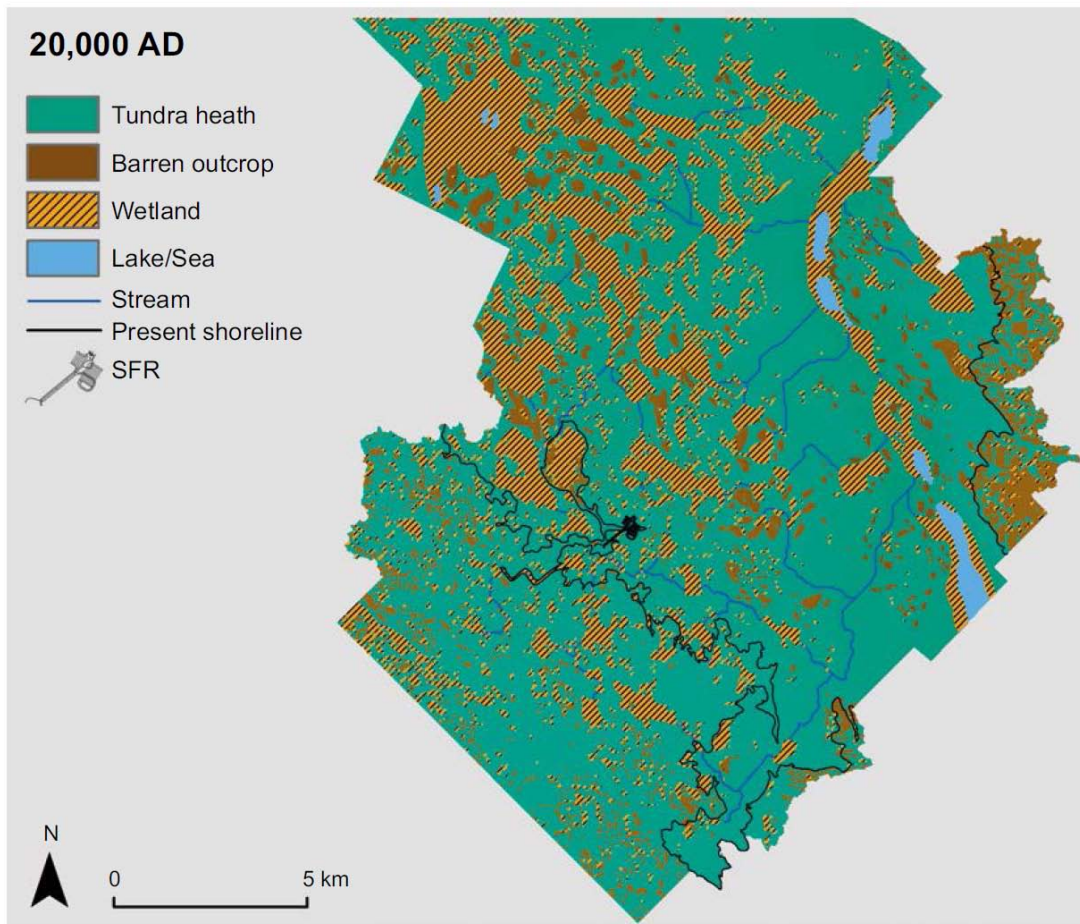


圖 2.11 早期冰緣氣候類型下，公元20,000年Forsmark地區植被及土地利用之模型分布圖。

## (2) 熱流演化

處置場溫度主要受控於周圍母岩與地下水的熱交換作用（受材料熱傳導係數及比熱控制）。處置場不致對溫度產生影響，因為 SFR 沒有明顯產生熱的過程，處置場封閉初期及封閉 1000 年後之溫帶氣候域條件下不致對溫度場產生影響。

冰緣氣候域條件下，溫度可能足夠讓整個處置場凍結。早期冰緣氣候類型在公元 17,500 年至 20,500 年期間，處置場深度的溫度低於  $0^{\circ}\text{C}$ ，可能會發生第一次永凍土。早期冰緣氣候類型及全球暖化類型在公元 52,000 年處置場深度的溫度低於  $-3^{\circ}\text{C}$  或者更低亦可能發生永凍土。

## (3) 力學演化

封閉後 1,000 年（封閉初期）及封閉 1,000 年後之溫帶氣候域，力學演化主要涉及邊界條件改變，諸如冰期循環的地表變化或開挖，SFR 岩體最顯著的力學條件改變就是開挖坑道所造成的應力重新分配。SFR 的設備和結構，會直接及間接與岩壁接觸。若回填材料產生膨脹壓力，將導致岩石或裂隙受到力學演化影響，正常演化之溫帶氣候型態初期，支撐會持續劣化，並造成坑道四周產生局部應力的改變。

BMA 及 BLA 地下處置場長期穩定的數值研究 (Mas 等人, 2014), 其目標有二: 分析(1)假設岩石上方的表土鬆動之風險以及(2)假設處置場有不穩定的支柱之風險。根據數值模擬結果, 坑道周圍岩塊落入坑道中, 坑道將逐漸被填滿而停止坍塌, 岩塊崩落的現象不超過 34 公尺, 因此不會延伸到海床。另外, 處置場坑道間岩柱是穩定的。

坑道內填岩塊墜落, 可能讓膨潤土變薄, 也就是使擴散障壁變薄 (Börgesson 等人, 2014), 然而, 岩塊掉入膨潤土的影響, 也經數值模擬確認, 對穩定性以及障壁功能影響不大。

地震亦影響處置場的穩定性, 目前 Fennoscandian 地盾地震活動非常低, 但以 10 萬年尺度考慮, 不可忽略可能的板塊內部型地震 (例如新馬德里 (美國)、昂加瓦 (加拿大)、澳大利亞西部及其他地區)

封閉 1,000 年後之冰緣氣候域時期預期會形成一個較低的地面溫度及永凍土環境, 溫度的改變及地表水等動的過程將引導力學過程, 包含原始的岩石變型、裂縫張開及新的裂縫形成。全球暖化及早期冰緣氣候類型下冰緣氣候域期間, 近地表的氣溫演化及岩石圈溫度包含 SR-PSU 正常演化詳見氣候報告。

#### (4) 水文地質演化

水文地質模型的邊界選擇以自然水文邊界條件 (未來地下水劃分), 並考慮海岸線演化, 遠場水文地質模型模擬結果將被當成近場模型的邊界條件, 近場模型包含處置場周圍岩體和破碎帶, 以及廢棄物處置場內的各種結構。水文地質長期性演化有兩個主要控制因素, (1) 氣候變化以及 (2) 海岸線演化, 海岸線的改變將改變地下水的邊界條件。處置場封閉前至封閉後經歷了不同環境的演化, 封閉前的 (1) 淹沒環境經過 1,000 年漸漸演化成 (2) 濱海環境, 時間的推移在演化成 (3) 陸域環境, 以下針對這三種演化環境進行說明。

##### 1. 淹沒環境

封閉後 1,000 年, 海岸線演化是地下水流動主要的因素, 當一個淹沒的地區 (海洋或湖泊) 變成乾燥的陸地, 因為水力梯度的增加將改變地下水流, 原來排出區可能變成補注區。假設在這期間瑞典的年降雨量大於年蒸發量, 地下水的起伏大致與地形起伏相同, 則地下水排放區將經過位於海底的廢棄物處置場, 水文地質模擬顯示 (圖 2.12), 海岸線的位移將迫使排放區朝向北北東及西北方向的變形區移動。

海岸線位移改變水的流動狀態, 從初期主要是向上流動到末期改變為水平方向的流動, 排放區位置的追蹤粒子密度 (particles/surface unit) 與變形區有緊密的關係, 公元 2,000~2,500 年期間, SFR1 主要流徑排放到 ZFMNW1209 (變形區, SAR-08 稱為 6 區, 橫向經過 SFR1 的岩石處置窖)。在初期, SFR3 的排放區位置都在 SFR 南邊及北邊兩個碼頭, 由於流動狀態的水平分量陸續成長, 排放區位置被迫向北移動 (ZFMNW0805A)。



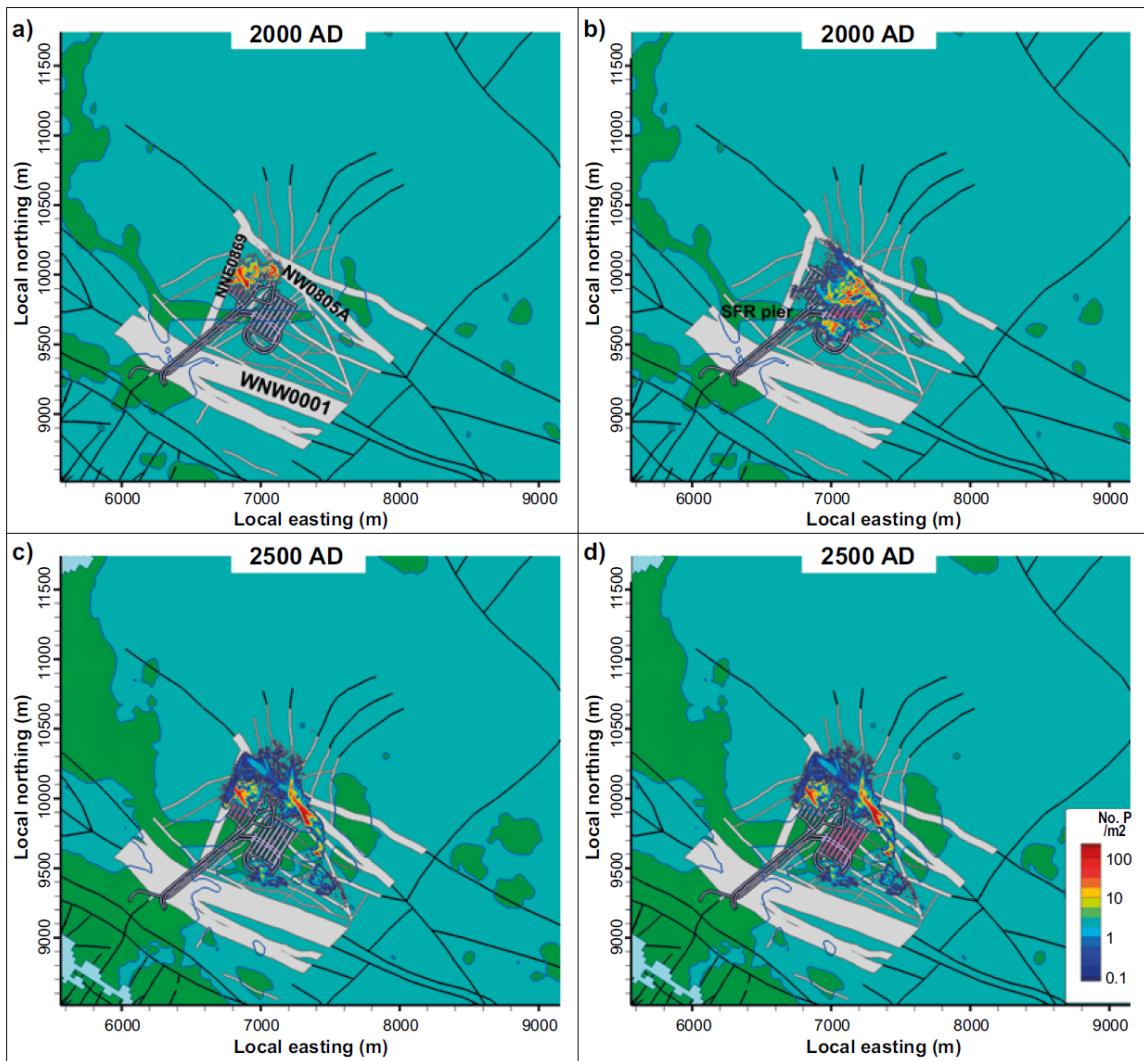


圖 2.12 2000AD (a 與 b) 和 2500AD (c 與 d) 兩個時期在 SFR1 (左圖粉紅區塊, a 與 c) 及 SFR3 (右圖粉紅區塊, b 與 d) 廢棄物處置場釋放粒子 (粒子密度如右下所示) 的排放區位置。黑線為變形區, 白色區域為靠近 SFR 處置場之變形區, 其寬度為在地表上的區域之厚度。

## 2. 海濱環境

封閉後 1,000 年, 處置場上方的區域以海濱環境為主 (圖 2.13), 目前流動狀態幾乎平行於地形坡度 (Odén 等人, 2014), 粒子仍往海底排出且排放區位置的密度與變形區有密切的相關性, SFR1 主要流動路徑的排放區為處置場的北北東及西北方, SFR3 的出口位置在 SFR 碼頭的北方及南方, 但目前多集中在 ZFMNW0805A。

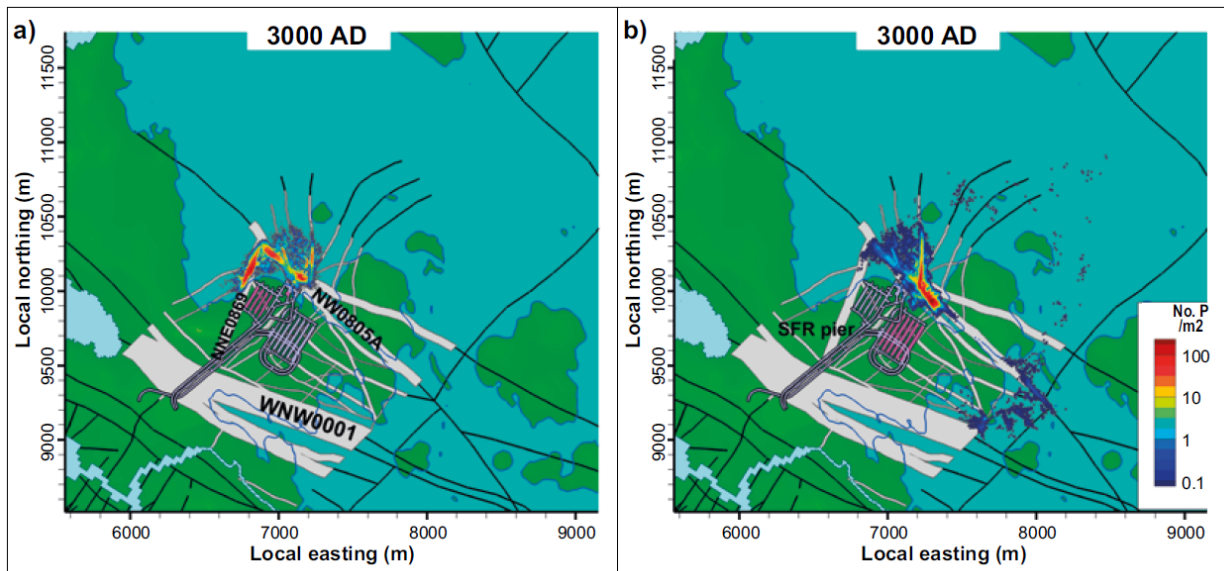


圖 2.13 3,000AD 在 SFR1 (左圖粉紅區塊) 及 SFR3 (右圖粉紅區塊) 廢棄物處置場粒子 (粒子密度如右下所示) 的排放區位置。

### 3. 陸域環境

當海岸線從處置場遠離，海岸線的影響對於地下水流的排放在主要的排放區變的微不足道。約公元 5,000 年幾乎是穩定流動的陸域環境，公元 9,000 年的狀態可以代表在評估期所有未來溫帶氣候域 (Odén 等人, 2014)。幾乎所有來自 SFR1 的粒子的排放都被抑制，於圖 2.14 可發現地形接近 ZFMNNE0869 及 ZFMNW0805A。在早期階段，SFR3 出口位置在 SFR 北及南碼頭。如水平分量流動狀態依次增長，粒子的出口位置均朝北邊同一個凹陷地形的 SFR1 排出。然而，較深的位置，少數量的例子從 SFR3 排出至湖泊及溪流從處置場更進一步遠離，見圖 2.14。

未來人類活動可能影響地下水流系統，水井抽取地下水可能改變水井附近的流場及降低局部地下水位。如果水井鑽至主要的滲透變形區 (permeable deformation zone)，可能影響至一定的距離 (為了能夠盡可能抽取更多的水)。假設處置場位於抽水井的影響區 (考慮到相交的斷裂帶之影響)，然後流經處置場的地下水流可能會受抽水的影響。處置窖、坑道及豎井 (shafts) 容易有類似的情況，但更大的影響為抽取井水而改變地下水流場。

在永凍土期間 (冰緣氣候域)，水力傳導係數減少，地下水無顯著流動。地下水流的範圍主要是地面附近區域，結凍的地面大致上是不透水，且永凍土及季節性凍土層限制了大氣水滲入及補充地下水系統。地面的凍結也將改變補充及排出的位置並驅使地下水流至更深處，附近的解凍區潛在的勢能可能很高。

早期冰緣氣候類型中最早的冰緣期間 (約公元 20,000 年)，永凍層很淺，但不能被排除延伸至處置場深度。部分區域被凍結，凍結區的水力傳導將會減少，地下水無顯著的流動。在連續的永凍土時期，應該不會發生任何放射性核種透過地下水的傳輸從處置場釋放至生物圈。

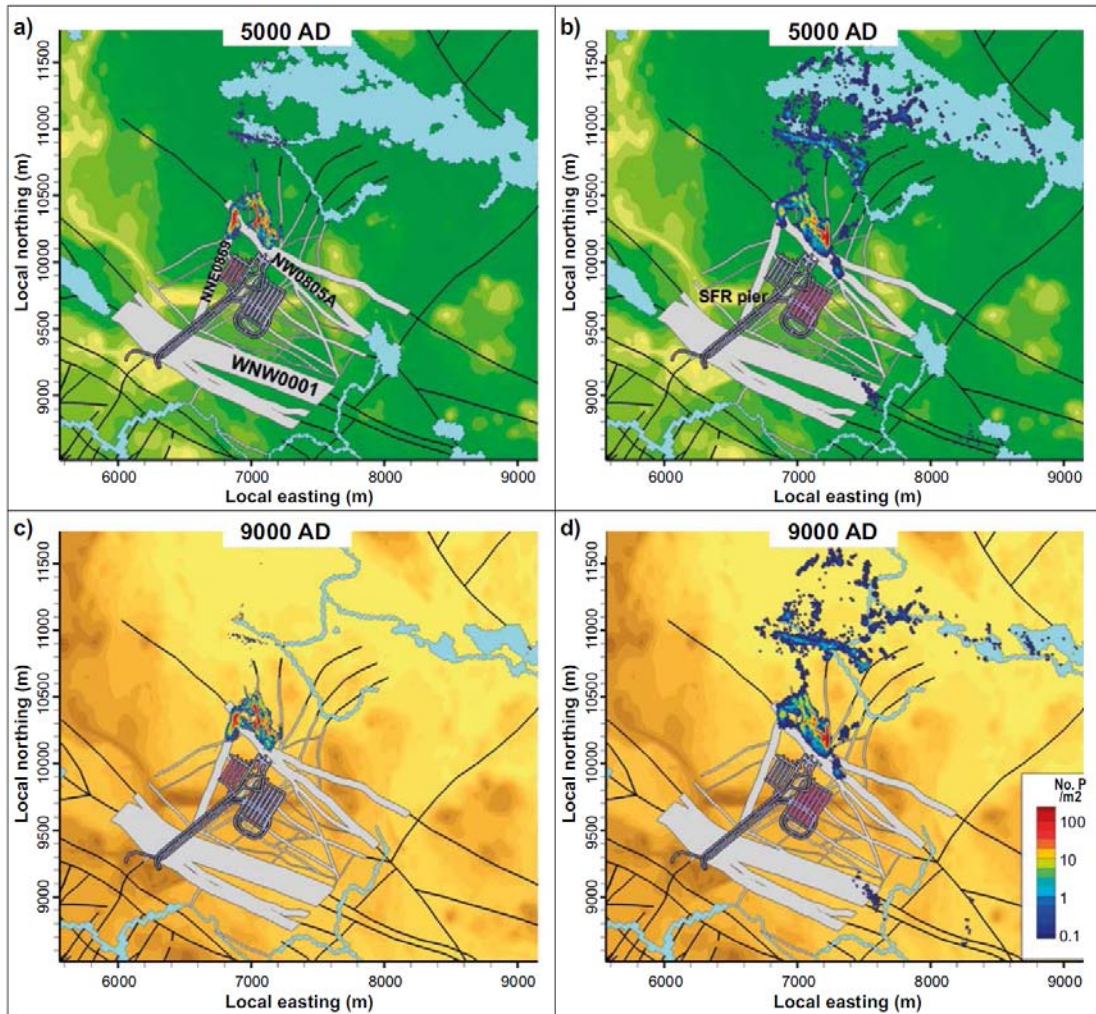


圖 2.14 5,000AD 及 9,000AD 在 SFR1 (左圖粉紅區塊) 及 SFR3 (右圖粉紅區塊) 廢棄物處置場粒子 (粒子密度如右下所示) 的排放區位置。

### (5) 近場水文循環演化

SFR 位於低水力梯度及低滲透率之區域，處置場場址重要功能之一即為確保通過處置場址水流量足夠低。SFR 豎坑流動障壁主要是由膨潤土及混凝土構成，1BMA 及 2BMA 的中放射性廢棄物放置在混凝土隔間中，其中牆、地面及頂蓋的結構限制了通過廢棄物的地下水流動。另外，周圍配置高滲透性的碎石回填土，可使進入處置場的水將優先流經回填土，以減少流經混凝土障壁的地下水。在 1BMA 及 2BMA 中，由混凝土構成流動障壁，高滲透性回填土置於混凝土結構的頂部。BRT 處置場將保存反應器壓力槽，壓力槽被包覆於混凝土內，碎石回填材料同樣限制了地下水流動的路徑。BLA 處置場中低放射性廢棄物 ISO 標準容器周圍，並無設置人工結構去限制水的流動，不過該處置場周圍的岩石將大幅的限制水的流動，另外，連接坑道用膨潤土密封，可進一步限制水的流動。

圖 2.15 顯示海岸線後退，增加水力梯度後，近場的模擬計算通過處置場 SFR1 及 SFR2 的總流量 ( $\text{m}^3/\text{yr}$ )。在封閉後第一個 1,000 年期間，若處置場流量從淹沒環境 (Shoreline position 1) 轉換為濱海環境 (Shoreline position 2)，通過處置場流量大約增

加 2 個數量級。濱海環境演化至陸域環境，處置場上方完全變成陸域環境（Shoreline position 3），流經處置窖增加約 50–100%（見圖 2.15），地下水流假設達到穩定狀態。

冰緣氣候域中，針對永凍土對於通過設施流量之影響進行數值模擬，相較於基本情況，流經處置設施之流量平均減少約 80%。此數值與平均岩石滲透率因凍結而減少有關，假如永凍土發展至廢棄物處置窖及其構造，則將可有效阻擋流經廢棄物之流量。

### 1. 混凝土劣化對近場水文演化之影響

封閉初期，混凝土劣化將影響混凝土結構和材料的水文特性，但對於通過處置場的地下水流量沒有太大影響。

封閉超過 1,000 年：混凝土劣化對於流經處置設施流量的影響，可採用增加處置窖混凝土材料水力傳導係數之方式進行評估（Abarca 等人，2013）。混凝土劣化不會影響流經 BLA 處置窖之流量，因為它們不具有這樣的障壁。豎坑顯示對於所有降解狀態之混凝土，流經廢棄物之流量大同小異。由於其內部結構即使為混凝土所製成，豎坑仍然受外部的膨潤土流動屏障所防護。

混凝土劣化的發展，流經部分處置窖內廢棄物的流量增加。在 1BTF 和 2BTF 處置窖，混凝土從初始狀態至不再限制水流動的狀態，流經廢棄物之流量大約增加一個數量級。降解也影響流經處置窖中的縱向分佈。在混凝土初始狀態，局部流經廢棄物及岩石變形區有一個明顯的相關性（Abarca 等人，2013）。

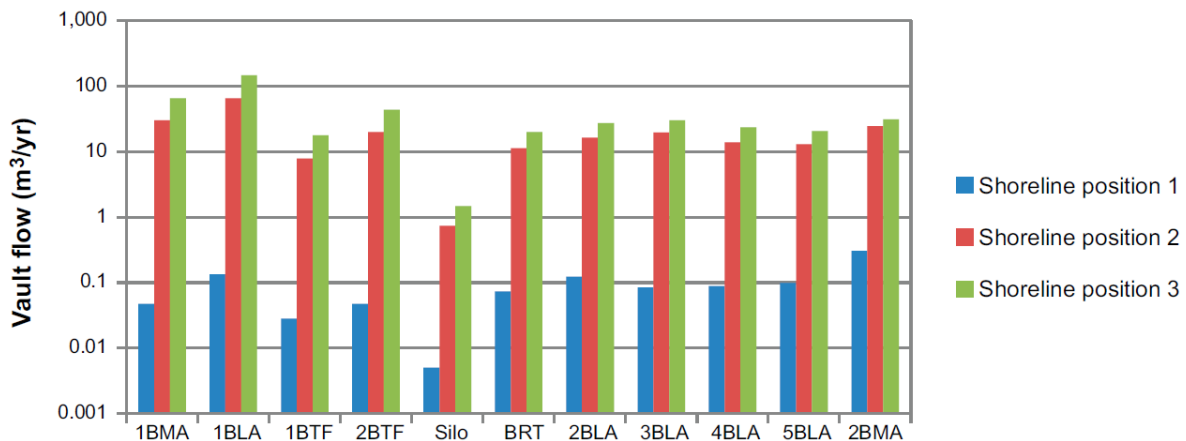


圖2.15 處置場相對於海岸線之條件下，SFR1及SFR3的流量變化 (m³/yr)。

### 2. 膨潤土劣化對近場水文演化之影響

在封閉後 1,000 年期間，預期處置場中膨潤土障壁的水文特性不會改變。

為了限制水流流入廢棄物處置窖，連接處置窖及坑道之間用膨潤土進行密封，這些部分利用力學封塞支撐。膨潤土的水力特性可能因各種流程降解（進一步描述於障壁處置報告）。用於支撐的力學封塞之降解准許部分膨潤土的膨脹，降低內部膨脹的壓力和增加水力傳導性。化學過程可進一步引起蒙脫石改變，從而降低了膨

潤土的膨脹潛力。

水流經處置場時，部分的膨潤土降解影響水力的密封已被研究，膨潤土的初始狀態及完全降解狀態作為此參數的調查範圍（Abarca 等人，2013），在完全降解狀態假設膨潤土不再構成流動障壁，計算流經 SFR1 處置窖呈現於圖 2.16。

當封塞均完好無損，水到達 SFR1 處置窖主要經過岩石變型區，這些區域也連接處置窖及分配它們之間的流動。由於膨潤土降解，水流被重新分配及優先沿著連接坑道及高度滲透回填土處置窖。同時，減少相交於處置窖的岩石構造的流動。

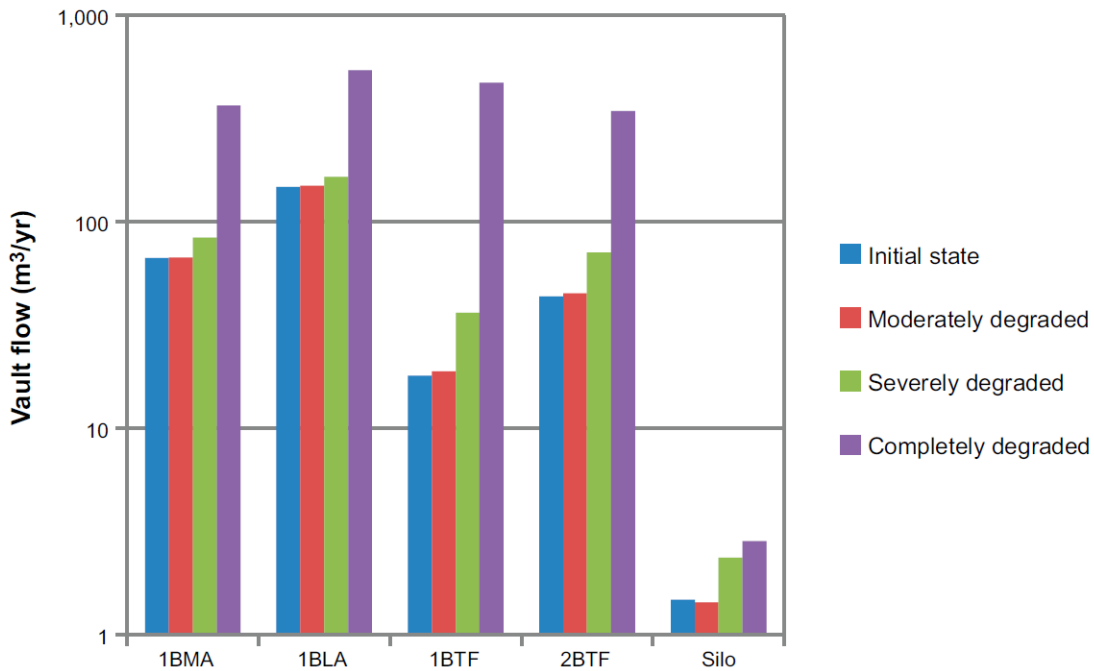


圖2.16 膨潤土功能的降解造成通過SFR 1中處置場的流量（ $m^3/yr$ ）變化。

計算流經 SFR3 處置窖如圖 2.17。通過處置窖的水流影響是適度的，即使部分膨潤土完全降解。一般情況下，比觀察 SFR1 的情況影響更小。處置窖內的流動於完全降解和完整的部分膨潤土(初始狀態)之間的差值減少連接斜坡(access ramp)距離。BRT 處置窖中最接近連接斜坡 (access ramp) 顯示了處置窖部分完全降解的膨潤土情況與初始狀態相比增加三倍流量。

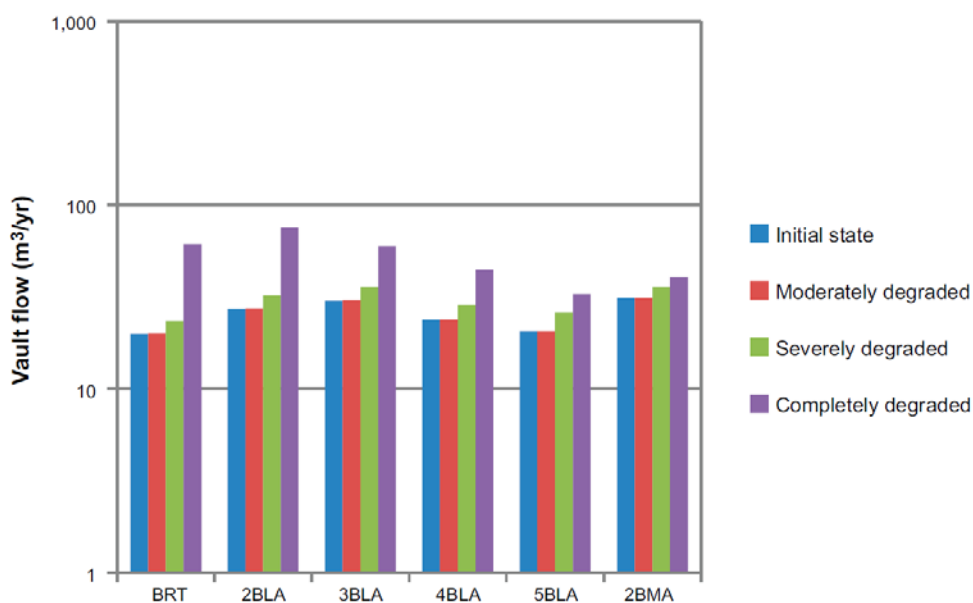


圖2.17 膨潤土功能的降解造成通過SFR 3中處置場的流量 ( $\text{m}^3/\text{yr}$ ) 變化。

## (6) 地球化學演化

地球化學的演化與氣候、海岸線及水文地質之演化有密切的關聯，其中水與岩石相互作用及地下水流動是最主要的因素，地殼均衡作用造成地下水流的變化，也將透過水的流速、接觸時間和接觸岩體的表面面積改變而影響地球化學的演化。

過去的岩石地球化學演化會影響目前及未來地下水的組成，最後一次冰川消退的融水入侵之前，含鹽地下水沒有被海水入侵，但在溫帶及寒冷氣候的事件中，以古大氣水的方式存在，這種水由於地層中的高靜止水壓，混合了 Weichselian 冰期期間的冰川融水，可能是大量的裂縫增加了透水性，也解釋過去的冰川融水如何向下傳輸。

期後的 Littorina 海階段，具高密度的海水進入變形區與融水一起滲入裂縫，並與地下水混合或替換，而其他裂縫系統可能由於壓力變化而封閉。因此，半鹹水(非海相)且含有明顯冰河成分的地下水滯留於少許基岩的裂縫中，而 SFR 的地下水相對的鹽度範圍相對不高 (1500~5500 mg/L 氯化物) (圖 2.18)。

水文地球化學的觀測與古氣候的環境條件將地下水分成四個類型，每個類型在基岩中有不同的停留時間，分別為 (1) 區域性的波羅的海、(2) Littorina 類型海水帶有冰期成分、(3) 半鹽冰期水類型、(4) 混合含鹽水型 (過渡類型)。

在最初 1,000 年溫帶氣候領域的滲透含鹽地下水的預期成分於表 2.2 介紹。

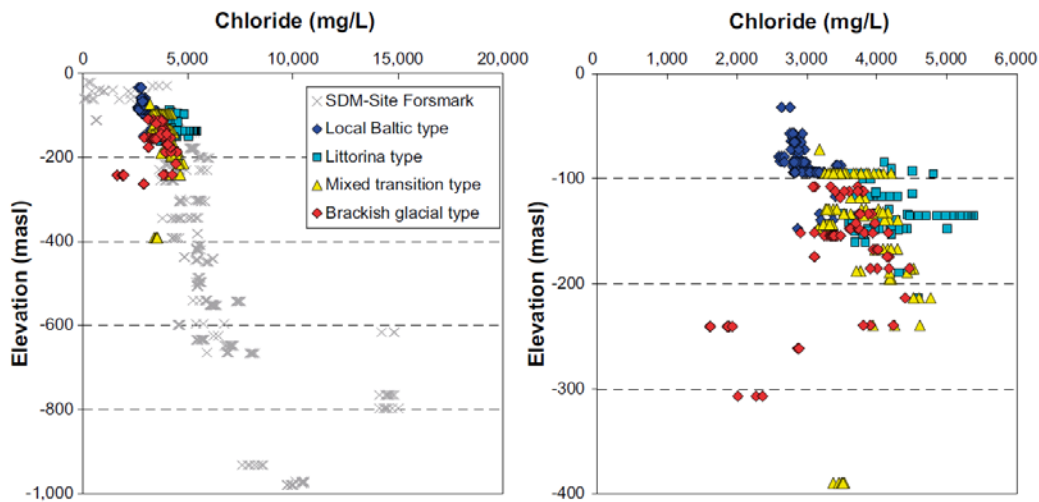


圖 2.18 SFR 地區及 SDM-site Forsmark 區域（左圖）與只有 SFR 地區（右圖）之氯離子隨深度的分佈，圖中不同顏色代表不同類型的地下水。

表 2.2 溫帶氣候域下，封閉後 1,000 年期間，滲透之含鹽地下水預期成分

	Composition	Range
pH	7.3	6.6–8.0
Eh (mV)	-225	-100 to -350
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	3,500	2,590–5,380
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	350	74–557.2
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	90	40–157
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1,500	850–1,920
K <sup>+</sup> (mg/L)	20	3.8–60
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	600	87–1,220
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	150	79–290
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	11	2.6–17.2

不同類型地下水的分佈顯示，主要的變形區，長期以來都是地下水流動的主要路徑，單一裂隙的地下水則常是較老的且不流動的地下水。因為 SFR 的開挖施工，導致混合含鹽地下水類型增加，推測與高角度的構造有關。目前含鹽地下水稀釋的程度有限，岩石中殘餘的含鹽地下水隨時間產生混合會擴散。最淡的含鹽地下水（區域性 Baltic 海類型）在淺層 100 公尺發現。當 SFR 上的地表位於海平面之上，人類活動（例如鑽井）亦會影響地下水組成。

處置場封閉超過 1,000 年，SFR 周圍基岩的含鹽地下水可能會開始改變，隨著時間越來越淡，因為海岸線進一步東移。在此期間地下水組成將受基岩最上部引進大氣水的影響，助於溶出例如黃鐵礦（pyrite）及 Fe (oxy) 之氫氧化物沉澱。

溫帶氣候領域時期，礦物裂縫的溶解/沉澱將影響地下水組成及並作為緩衝抵抗酸化及改變氧化還原條件。地下水（最初類似於目前微鹹的海向地下水）將先後越來越淡，尤其是在延長超過 4 萬的溫帶氣候時期年如表 2.3。

水流和溶質傳輸在冰緣環境期間大幅度下降（除了不凍層）。平流溶質傳輸在此期

間流量受到限制。如果裂縫中的水被凍結，可預期經由擴散的裂縫及基岩中的水將沒有交換。

表 2.3 溫帶和冰緣氣候時期期間，處置場未被海覆蓋之 SFR 區域淺層地下水的預期成分

	Reference composition	Range	Range
	For the period until approximately 40,000 years		For the period extending beyond 40,000 years
pH	7.4	6.6–8.3	6.6–8.3
Eh (mV)	–210	–135 to –300	–135 to –300
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	190	16–503	5–357
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	50	25–163	17–110
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	300	300–500	120–324
Na <sup>+</sup> (mg/L)	180	65–400	38–250
K <sup>+</sup> (mg/L)	5	5–15	2–5.3
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	50	24–105	7–48
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	12	7–24	2–13
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	12	2–21	12–31

### (7) 廢棄物的化學演化

SFR 的廢棄物是封裝於鋼或混凝土的包裝中，正常情況下，廢棄物被水泥或瀝青混入混凝土內固化。處置窖中氧化還原勢的變化於處置場封閉後從氧化環境(初始氧含量)在 5 年內至還原環境，且鋼質材料的腐蝕過程在評估期將不斷在還原環境下進行。金屬的腐蝕和微生物過程會產生氣體，不能排除受汙染的水因氣體壓力增加而從處置場排出。混凝土包件及水泥基質在第一個 1,000 年，水泥成分不會有明顯的淋溶狀況發生，但鋼筋的鏽蝕可能導致混凝土破裂 (Höglund, 2001; Gaucher 等人, 2005; Cronstrand, 2007; Cronstrand, 2014)，但不能排除包件的表面發生局部礦物改變。但不能排除水泥基質的一些破裂將發生金屬腐蝕的結果在通過腐蝕產物廢棄物及引起的體積膨脹。所有的廢棄物域中水泥浸出 pH 值將預計維持在 13 以上，其中吸附作用很重要。初始錯合劑的水溶液濃度將被初期廢棄物錯合劑沉積所控制，但量因搬離將減少。由於纖維素的鹼性降解產生纖維素降解產物 (ISA)，隨著時間濃度會增加，將會使某些放射性核種的吸附受到影響。NTA( 氮三乙酸)計算數量超過吸收影響的層級(在 1BMA 和豎坑)(Keith-Roach 等人, 2014)。

離子交換樹脂用於各種程序水的淨化，因此在處置場中廣泛應用，但有可能經化學、輻射及微生物等方式分解，對 SFR 處置場產生影響。廢棄物包件中瀝青與離子交換樹脂及蒸發器濃縮液混合，瀝青基質的性能可隨時間變化。此流程可導致這些變化如輻射分解、化學降解、生物降解、水的吸收、腫脹和老化。處置窖中工程障壁的膠體量可以忽略，因為混凝土障壁及混凝土包中的鈣離子可以抑制膠體的形成。

封閉 1,000 年後溫帶氣候域的化學條件也與封閉初期相似。除了 1BLA 之外，地下水可是為乾淨的、環緣條件主導了處置場及廢棄物域 pH 值大約在 12.5，1BLA 中由於缺乏混凝土結構使 pH 值將逐漸減小。假設 2-5BLA 之 pH 值演化遵循 1BLA，BLA 廢



棄物處置窖不能被排除了大量的微生物的活動使地下水之 pH 值下降，此時所有纖維素預計被降解。

在冰緣的時期條件下，在處置場中的水被凍結，所有的化學過程（包括核種傳輸）將非常緩慢地進行，假設連續永凍土無不凍層（taliks）。在這期間，當水再次變成液體期間，化學過程將繼續。如果地面溫度在處置場深度降到低於-3°C，混凝土可能會凍結，影響了處置場的結構完整性。但水和混凝土之間的吸附分配係數（Kd 值）不受永凍土後發生的混凝土結構變化影響。因此，放射性核種的吸附仍然佔永凍土期。

## （8）工程障壁的演化

### 1. 膨潤土障壁

膨潤土主要成分是蒙脫石，為高塑性粘土礦物，具高離子交換能力；最重要的特性為高膨脹潛能、低水力傳導係數。

在水力作用下水路傳輸於通道或管路的過程中，其孔隙水壓等於或超過周圍膨潤土的膨脹壓力即發生管湧現象，而流速與水力梯度和通道半徑有關。當豎坑周圍岩石的終止排水且豎坑關閉時，水壓將增至豎坑該深度下之靜水壓，直到水滲入膨潤土障壁之位置處。但由於豎坑內的膨潤土障壁的膨脹壓力不足以承受豎坑深度之水壓，此時膨潤土很有可能會產生管湧現象並伴隨著侵蝕作用的發生。這兩個作用都導致膨潤土的局部損失，以及形成開放性通道或空隙。根據 Börgesson 等人(2014) 研究，判斷管湧和侵蝕不大可能將對膨潤土障壁的性能的顯著影響。

封閉後，處置場內充滿水且粘土吸收水並開始膨脹，且充滿水飽和之後預期約 100 kPa 膨脹壓力。隨著時間，鈉和 Ca<sup>2+</sup>之間的陽離子交換將改變原有的鈉基膨潤土轉變為鈣基膨潤土，可能導致膨脹壓力變成原來值的 1/5(Börgesson 等人,2014)，這個過程可能導致膨潤土下陷。

膨潤土在一般或特定氣體中有相對較高的耐遷移性。除了排氣管道，SFR 中的豎坑計劃將完全嵌入膨潤土及砂/膨潤土的混合物，如果抽氣管道仍保持其功能性，豎坑內沒有任何顯著氣體壓力將形成。其中氣體壓力超過膨潤土壓力，無法避免發生氣體相和膨潤土之間的力學相互作用（Karnland 和 Birgersson，2014）。

經過 10,000 年，總量三分之一的蒙脫石從膨潤土中溶解，100,000 年後只剩下一小部分。鈣矽酸鹽礦物、沸石和新粘土將形成在混凝土豎坑和岩石壁和頂部噴漿介面的膨潤土。與原來的蒙脫石相比，這些礦物具有略微不同的性質，如較差溶脹性和較高的摩爾體積（Gaucher 等人，2005）。膨潤土障壁在此期間失去其膨脹能力，這可能導致更高的風險產生裂隙和水力傳導率。

冰緣氣候域的環境下，不能被排除膨潤土將發生凍脹變形（Birgersson 和 Andersson，2014）。這僅會發生在處置場深度有永凍土存在的時期。如果凍土經過的處置場中，可能會出現的情況為處置場各個部分（豎坑，坑道封塞和回填）的

膨潤土組件之所有排水通道被岩石中裂隙的冰填充而阻止。如果在這種情況下溫度繼續下降，更多的水將在膨潤土轉變成冰。然後可能會發生寒凍風化作用壓力峰值。對於這樣的峰的最大值的估計，基於簡單的彈性力學推理，已經取得進展。

## 2. 混凝土障壁

混凝土包括水化水泥熟料礦物混合各種填充和聚合材料如砂及碎石，大部分的混凝土結構中也含有鋼筋，在一些棒狀結構嵌入在混凝土中已被建築使用。放射性核種的傳輸主要發生在水相並經由裂縫和混凝土孔結構。混凝土障壁中新生成的裂縫網的形成因體積及濕度變化、處置場封閉後運作中的溫度及水的飽和度影響。鋼筋腐蝕使體積增加可能會導致在混凝土最靠近鋼筋產生小裂縫，且將其逐漸擴大。

金屬腐蝕產生的氣體可能在障壁中產生壓力。混凝土結構中，一些小的裂縫足以排出所有產生的氣體。混凝土和地下水之間的相互作用導致主要以高可溶性鹼金屬氫氧化物的浸出，其次是氫氧化鈣。氫氧化鈣耗盡的區域可能沿裂隙發生，但並不認為在最初的 1000 年引起任何障壁液壓特性的顯著變化。

鈣礬石會在混凝土障壁近的含有硫酸鹽廢棄物的薄層來形成。鈣礬石的形成在局部造成破裂及混凝土的力學劣化（Höglund，2014）。

冰緣氣候域的環境下，如果在處置場深度溫度低於 $-3^{\circ}\text{C}$ ，混凝土可能會凍結（Thorsell，2013）。在混凝土孔隙中的水凍結可能導致更多的裂隙產生，使混凝土劣化，使完整的混凝土嚴重的結構降解。擴散屏障功能喪失，但它仍然為吸附阻擋層，並在有限程度上仍具有障壁功能。

## 2.3 設施設計

### 2.3.1 處置設施簡介

#### (1) 規劃處置之放射性廢棄物

雖然核能電廠與相關核能設施之運轉與除役廢棄物包含數種型態，但在瑞典並無法規規範放射性廢棄物之分類，故 SKB 研擬其放射性廢棄物分類原則如下：

1. 高放射性廢棄物需具含高活度，且營運與處置作業須同時考慮屏蔽與冷卻功能。
2. 中放射性廢棄物於營運與處置作業時僅需考慮屏蔽功能，不須考慮冷卻功能。
3. 低放射性廢棄物於營運時不需特別的障壁考量。

其中，中放射性廢棄物可再區分為短半化期與長半化期兩類。具長半化期之放射性廢棄物其活度將由長半化期核種主導（例如具有高於 311 年以上半化期之核種），而所

包含之短半化期核種將僅具有有限的總量。由於瑞典的相關法規與導則並未定義何謂“有限的總量”。同時，瑞典法規亦未認定哪類放射性廢棄物為短半化期或長半化期核種。因此，處置放射性廢棄物或規劃處置設施分區之限值，需視所申請執照對於預期之風險與環境衝擊而訂定。

核能電廠之運轉廢棄物大部分為低放射性廢棄物或中放射性廢棄物，其主要廢棄物類型為：用於淨化反應爐水之用過離子交換樹脂（spent ion-exchangeresins），電廠歲修時之廢棄金屬元件，與被污染防護服裝與設備等耗材。污染來源可分為 1.自燃料滲漏之核種或 2.受中子照射而活化之反應爐結構組件與懸浮於反應爐水中之顆粒。低或中放射性廢棄物之來源另包含瑞典其他核能設施除役之反應爐與研究用反應爐，以及來自醫院、研究與工業用途之放射性廢棄物。SFR 所使用之廢棄物盛裝容器包含：ISO 標準貨櫃、混凝土容器、鋼桶、混凝土或鋼製模組等。處置於 BMA 或豎坑之放射性廢棄物（用過離子交換樹脂、濃縮廢液與污泥）需進行水泥或瀝青固化，或利用混凝土固定之廢棄金屬等固體廢棄物，並可經過減容處理。除役廢棄物主要為被污染或活化之反應爐組件、廢棄金屬、混凝土與其他建材。而沸水式反應爐則於除去內部零件後，整個放入 SFR 中進行處置，不另外進行切割。所有處置於 SFR 之放射性廢棄物均須符合接收標準。依目前估算，除役廢棄物總體積將大於運轉廢棄物總體積，如圖 2.19 所示。

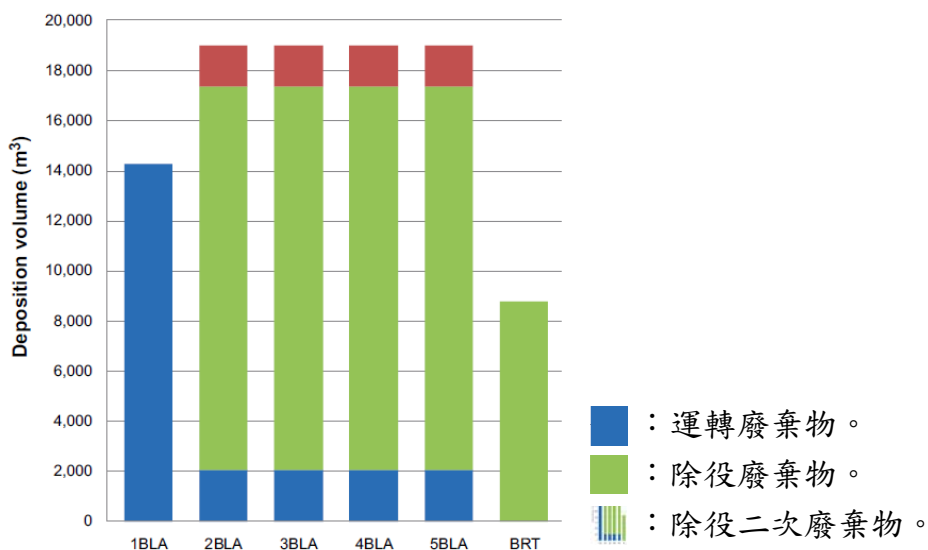


圖 2.19 各處置坑道之預估放射性廢棄物處置總量。

## (2) 放射性廢棄物活度

SFR 規劃處置之放射性廢棄物，其核種活度由短半化期核種占大多數。這也意味著，於 SFR 處置設施營運階段即有大部分之核種活度將大幅衰減，例如放射性廢棄盛裝容器表面劑量率之主要來源核種 Fe-55 與 Co-60。處置設施封閉至 10 萬年後之核種活度衰變歷線如圖 2.20 所示。如圖中所示，總活度在封閉後 100 年即已衰變至初始值之一半以上，當經過 1000 年後僅餘約初始值之 2%。剛封閉後之階段，主要活度來自於 Ni-63，但經過 1000 年後，主要活度來源核種轉換為 Ni-59 與 C-14。此外，由於有機 C-14 與無機 C-14 具有不同之傳輸特性，故於圖中分開繪製。

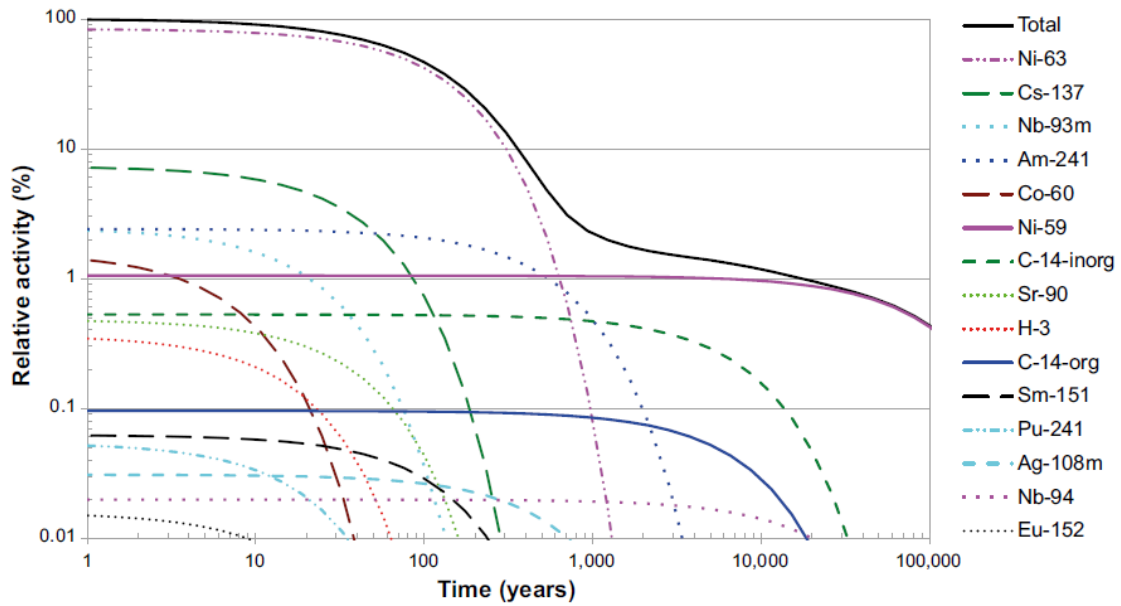


圖 2.20 核種活度占比歷線。

由於放射毒性是由核種之衰變類型與能量有關，具有高活度之核種並非必然具有較高之放射毒性。例如 I-129 所釋出之輻射能量遠高於 Ni-59，也因此具有較高之放射毒性。放射毒性可透過攝入放射性核種之有效劑量計算估算。考量相關法規規範均以放射毒性 (radiotoxicity) 作為安全評估之研判標準，將核種活度換算為放射毒性並繪製如圖 2.21。由圖 2.21 中可知，封閉後 3,000 年，放射毒性將降至初始值之 1%，而至 30,000 年後降至 0.1%

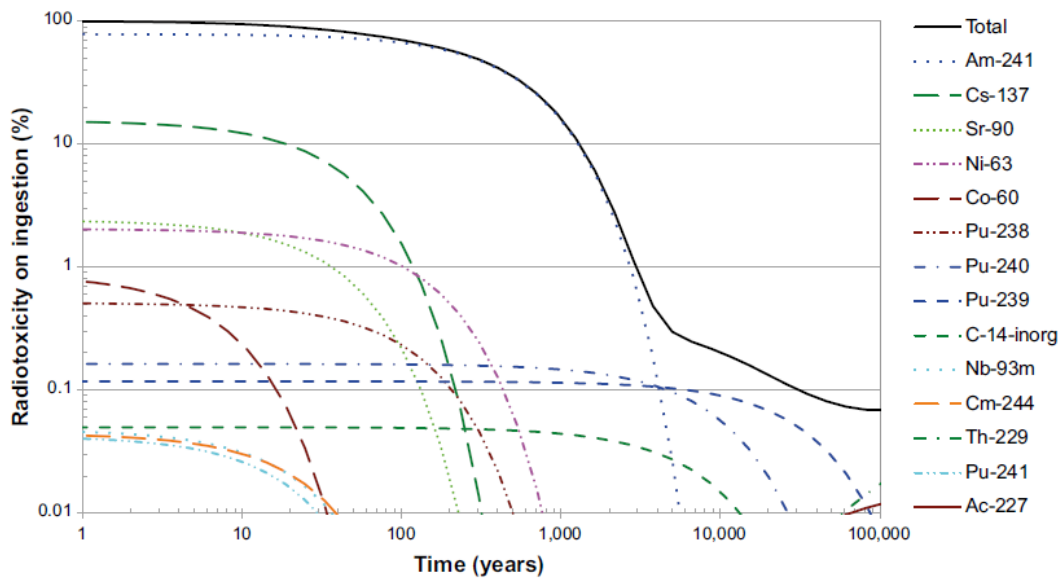


圖 2.21 放射毒性占比歷線。

### 2.3.2 封閉後的處置場描述 (Description of repository after closure)

封閉工作包括了回填材料的設置，並在選定的位置進行封塞 (plug)。其主要目的在於降低水滲入廢棄物，並阻止人類的闖入。封塞主要設置在聯絡坑道 (access tunnels) 與

聯絡井 (connecting shafts)，且所有的坑道將以碎石 (macadam) 回填。聯絡坑道上部以石塊填滿，並以混凝土封塞 (concrete plug) 予以封閉。最後，地表面將恢復並融入周遭景觀。此外，所有在SFR的鑽孔都將密封以確保周遭母岩的地下水不受影響。

本節針對每一個處置窖的封閉與封塞作法作一概要性的描述，已規劃的封閉措施 (closure measure) 則於SFR封閉規劃中詳述。圖2.22為處置場封閉後的整體圖，以蒙脫土經液壓密封後形成封塞斷面 (hydraulically tight section)，係以力學束制方式 (mechanical constraint) 予以適當的固定，並視坑道斷面的幾何形狀及母岩特性，採混凝土封塞 (concrete plug) 作為械束制方式。然而，此種方式並不適當，後來改以填土與緩衝材料 (transition material) 組成的力學束制方式代替，緩衝材料的目的是在於防止蒙脫土自封塞斷面流失，同時承受蒙脫土的膨脹壓力。回填材料是由碎石 (macadam) 與緩衝材料所組成，緩衝材料則由蒙脫土及碎裂的岩石 (crushed rock) 以30/70的比例混合而成。由回填土與緩衝材料所構成的力學束制配合蒙脫土的密封斷面統稱土壩封塞 (earth dam plug)。

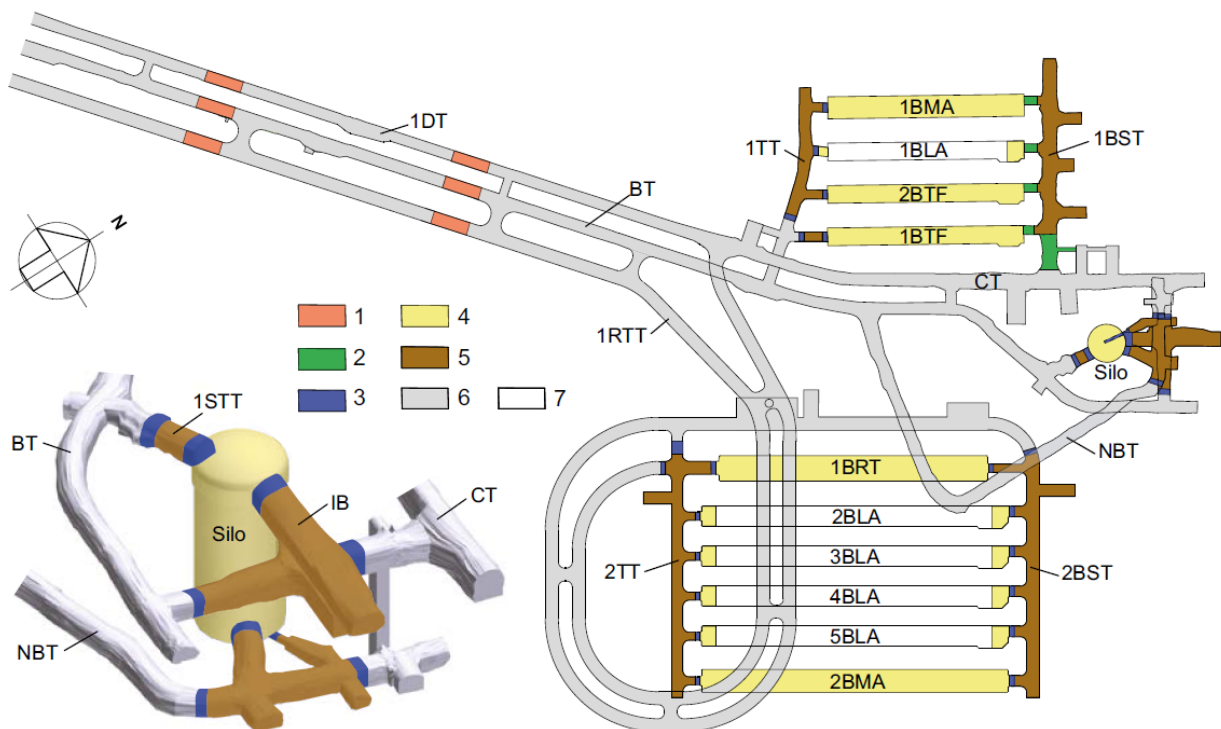


圖 2.22 SFR1 與 SFR3 的封閉規劃示意圖及豎坑的細部概觀。(1) 橘色為聯絡坑道的封塞；(2) 綠色為緩衝材料；(3) 藍色為混凝土封塞；(4) 黃色為碎石材料回填；(5) 棕色為蒙脫土液壓密封斷面；(7) 白色為無回填區。本規劃示意圖是根據配置版本 2.0 所繪製，配置版本 1.5 則是用於 SR-PSU 之模型模擬，就本圖而言，此二版本唯一的差別在於 2.0 版的 BRT 長度相對較長。

### (1) 1BLA 低放處置窖 (1BLA, vault for low-level waste)

#### 1. 設計

1BLA 是用來存放標準貨櫃的低放處置窖，處置窖寬 15 m，高 13 m，長 160 m，使用起重機將貨櫃逐一堆疊儲存，貨櫃以兩排平行存放，依貨櫃的尺寸 (視貨櫃為

full-height 或 half-height) 每排堆疊 3 至 6 層，如圖 2.23 所示，處置窖地面澆置混凝土，岩壁及屋頂則是施作噴凝土。

## 2. 處置窖封閉後之描述 (Description of the vault after closure) :

SFR 處置場自 1988 年開始運轉用以存放短半化期之低階與中階核廢料，為中低放處置場，安全分析時間尺度要求為 100,000 年，SFR 為海床下處置，位於波羅地海海床下，海床母岩為花崗岩，如圖 2.1 所示，SFR1 為現有設施，位於海床下約 60 公尺，SFR3 為新增設施，位於海床下約 120 公尺，TR-14-01 技術報告為因應新增之 SFR3 處置設施，SFR3 將存放核電廠除役廢棄物與處置設施運轉廢棄物，也將存放 9 個沸水式反應爐之壓力容器 (pressure vessels)。

關於此報告中安全分析之時間尺度摘述如下，瑞典對安全評估時間尺度之管制規定為，除了用過核子燃料與長半化期核種外，處置設施之安全評估應至最大風險與環境衝擊出現，但不超過封閉後之 100,000 年，且封閉後之 1000 年內應有較詳細之評估。因此在 TR-14-01 報告中安全分析之時間尺度採用 100,000 年。

SFR1 區域 1BLA 處置窖已處置低放射性廢棄物，主要以 ISO 標準容器封裝後再處置。處置坑道設計可貯存 11,500 立方公尺的廢棄物，總開挖岩石體積約 17,000 立方公尺。處置坑道長約 160 公尺、寬約 14.7 公尺、高約 12.7 公尺，坑道岩壁上有 5~10 公分厚的噴漿混凝土。廢棄物堆置在 0.3 公尺厚的混凝土底板上，每一排放置兩個容器，並可堆疊三層。堆置完成後僅以封塞填住坑道口，坑道內並沒有設置其他工程障壁或回填材料。圖 2.23 與圖 2.24 為 1BLA 封閉後的示意圖。

SFR3 區域建置 4 個 2-5BLA 的處置窖將處置低放射性廢棄物，約 18 公尺寬，14 公尺高及 275 公尺長。以 ISO 標準容器封裝後再處置。壁體的首要功能是確認容器的穩定性，並容許容器上方推疊，見圖 2.25。處置窖內混泥土地面為基礎，和岩壁和坑道頂部都是用以噴凝土作為內襯。2-5BLA 處置坑道之概念如圖 2.25 及圖 2.26 所示。

有關 1BLA 處置窖在封閉後的量測可詳見 SFR 封閉計畫 (SKBdoc1358612)，在處置窖末端靠近橫向聯絡坑道 (1TT) 處將建立一道混凝土牆，於回填長度約 4 m 的碎石後，於現場澆置混凝土封塞。在處置窖另一端往處置坑道 (1BST) 方向，則是採用以回填材料構成的力學束制以確保緩衝材料能及時的保存在土壩封塞 (earth dam plug) 內部，如圖 2.22 示，所述的回填材料係以 10 m 碎石回填於擋土牆後方，再以混凝土做最後的回填，混凝土澆置的高度必須高於碎石回填高程及聯絡坑道高程，如圖 2.27 所示。廢棄物貨櫃周遭不回填的原因之一是回填會造成貨櫃的損壞；其次，坑道的回填目的在保護混凝土結構不會受到岩層崩坍的影響。另外，再回填作業進行過程中，標準貨櫃也可能因而受損。



圖 2.23 BLA 低放射性處置坑道於 SFR 1 區域之 1BLA 示意圖。

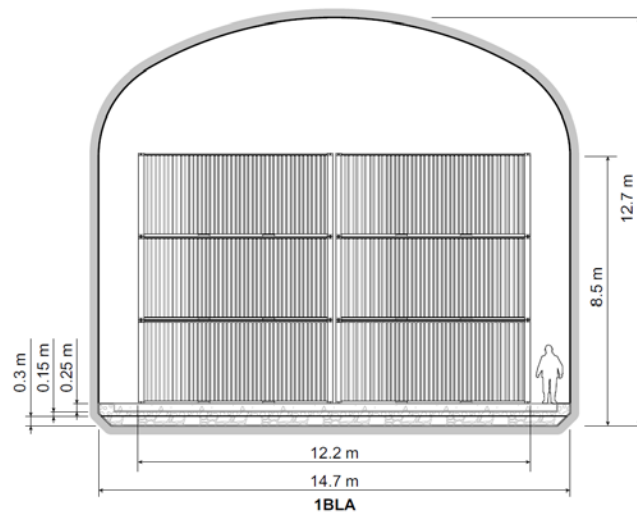


圖 2.24 封閉後之 1BLA 處置窖斷面圖。

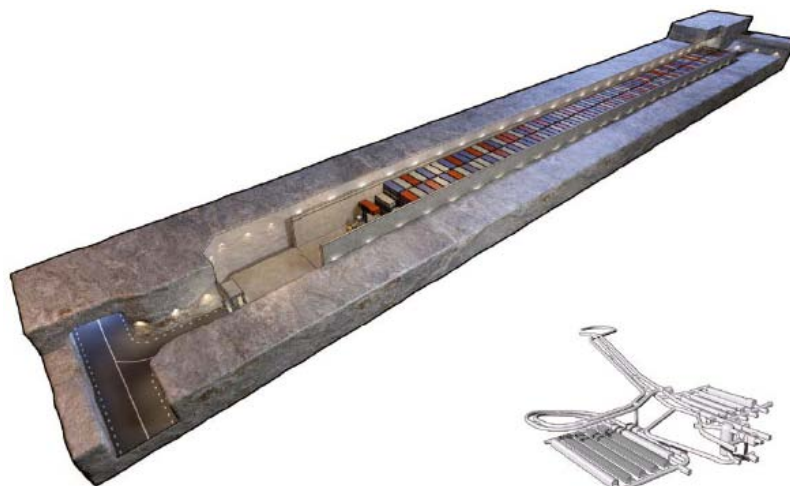


圖 2.25 2-5BLA 低放射性處置坑道於 SFR 3 區域之 2-5BLA 示意圖。

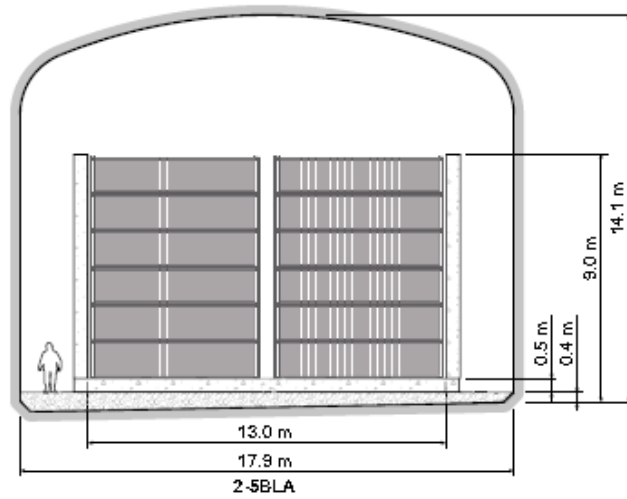


圖 2.26 2-5BLA 坑道寬度及高度之概念示意圖。

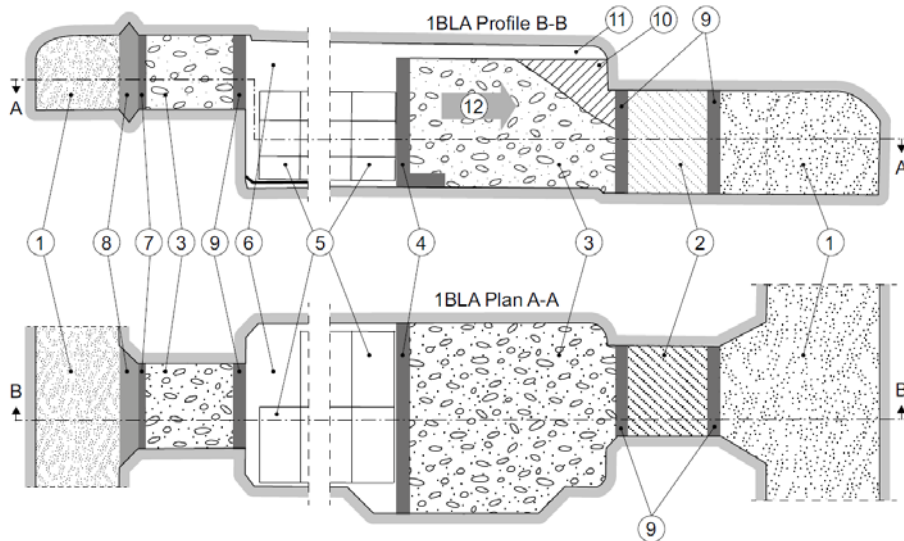


圖 2.27 1BLA 在封閉後的斷面示意圖：①膨潤土②緩衝材料③碎石④擋土牆⑤廢棄物包件⑥處置窖⑦混凝土束制牆⑧混凝土封塞⑨緊鄰緩衝材料之混凝土擋土牆⑩混凝土⑪頂拱間隙⑫回填工作方向。

### 3. 1BLA 處置窖的系統組件 (system component)

存放的放射性廢棄物其周圍組成包括：

- 廢棄物包件 (ISO 標準貨櫃)
- 混凝土地板
- 力學封塞

1BLA 的廢棄物包件為鋼製貨櫃，鋼製的廢棄物包件可能在運轉期間將產生材料的腐蝕 (corrode) 問題，其他在處置窖封閉前置入的相關組件，大多預期其狀態並無太大改變。



### 2.3.3 安全原則

#### (1) 封閉階段之安全原則

為了確保 SFR 處置設施系統之封閉後處置安全，訂定以下 2 項安全原則：

1. 為了確保封閉後之處置系統安全，限制處置之長半化期核種活度為先決條件。因此將會確定處置設施可以接收之廢棄物種類，各處置設施之工程障壁系統亦可依據其所處置總活度進行設計。
2. 處置設施藉由其工程設施與周圍環境之障壁功能來達到遲滯核種目標。放射性廢棄物特性、盛裝容器以及處置窖等工程障壁系統特性與功能，將共同使處置區域達到維持較低的地下水流量與合適之化學環境，用以降低核種遷移。而周圍之母岩將提供穩定的化學與物理環境，以及有利的低流量地下水環境。

安全原則之相關重點功能隨著封閉後時間的推進有所不同，如圖 2.28 所示。剛封閉時，基於處置設計對於設施遲滯功能考量，完工後將會維持設計目標之較佳功能性。但經過一段時間後，處置設施結構物將會逐漸劣化。也因此，最初對於長半化期核種處置總量之限制將成為確保安全的關鍵。所以，遲滯功能與處置設施設計有關，而限制長半化期核種活度則於廢棄物管理有關。

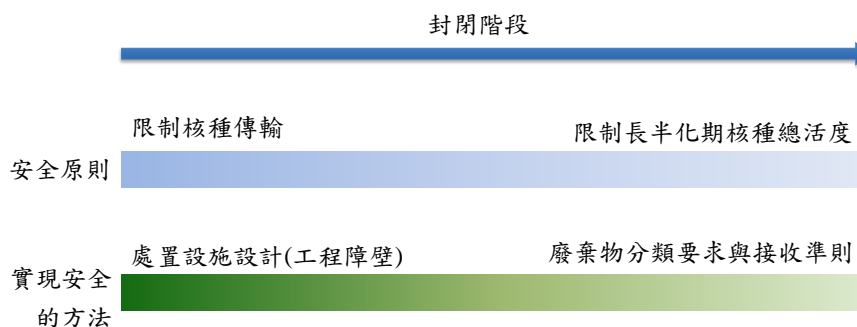


圖 2.28 安全原則與時間的關聯性。

#### (2) 處置設施設計

處置設施包含數個不同的障壁單元組成之障壁系統，障壁系統之設計目標在於利用多重障壁系統直接或間接的達到圍阻核種，並且避免或遲滯含有核種溶液自處置設施釋出之功能。SFR 目前位於波羅的海之海床下，等到西元 3000 陸地才可能抬升至海平面以上，在此之前 SFR 上方之海水將可以形成阻礙未來人類入侵之障壁。SFR 各處置坑道（如圖 2.17）均依其規劃處置之廢棄物調整其設計。

1. 處置豎坑主要為混凝土構造物，並以膨潤土填充於周圍，用以限制地下水流入處置廢棄物之流量。而處置豎坑內之廢棄物將以砂漿、膨潤土或混凝土進行固定。處置豎坑內之廢棄物包件在營運階段中持續進行灌漿。而在封閉時，豎坑頂端將採用碎石回填以避免岩石掉落。

2. 1BMA 與 2BMA 均為混凝土構造物，1BMA 處置廢棄物將於封閉作業階段前才進行填充，而 2BMA 處置廢棄則是在營運階段中即會進行回填。處置坑道將設置於碎石基礎上，於封閉時利用碎石進行回填。
3. 1BTF 將處置鋼桶與混凝土箱，兩混凝土廢棄物間之空隙將進行灌漿回填。2BTF 主要也是處置混凝土箱與鋼桶，鋼桶處置將於營運階段進行回填，混凝土箱處置則在營運階段結束後才會進行回填。廢棄物盛裝容器與混凝土牆間之空隙將會回填混凝土，並在其上設置封蓋。設施底部為碎石基礎，並採用碎石回填。
4. BRT 規劃處置反應器壓力槽 (RPVs)，在封閉作業前，將先將反應器壓力槽內填充砂漿，之後將其澆置成為混凝土塊體，再進行碎石回填。

處置坑道與通行隧道將會設置由低水力傳導性材料組成之封塞。由於 1-5BLA 處置坑道之活度較低，僅設置水力封塞。總之，處置設施初始狀態最重要的安全功能分別為：

1. 各處置坑道之處置核種總活度。
2. 工程障壁之主要功能在於限制通過處置設施之地下水流量，以及藉由吸附功能來遲滯核種傳輸至生物圈。
3. 由於處置設施位於波羅的海之海床下，除了構成防止未來人類入侵之障壁外，亦在第一個一千年中提供較小的地下水水力梯度環境，可使大部分的核種於處置設施中衰變。

### (3) 安全分析執行十步驟簡介

SR-PSU 利用十個步驟之方法來進行處置設施的長期安全評估，如圖 2.29 所示。分別為：

1. 特徵事件作用篩選：藉由特徵事件作用表篩選出安全分析所需考量的特徵事件作用。
2. 場址與設施初始狀態描述：針對選定之場址與設施設計，描述其初始狀態。
3. 描述外部狀態：描述處置系統以外環境可能發生之演化與事件。
4. 描述內部作用：描述處置系統內部作用隨時間之演化過程。
5. 界定安全功能：界定處置系統安全功能與安全功能指標。
6. 輸入資料彙編：確認數據的品質與品保，評估使用的數據。
7. 分析參考演化：分析並建立場址未來最可能之演化，做為參考演化。
8. 選定情節：分別選定主要情節、低可能情節與剩餘情節。
9. 分析選定的情節：針對選定的情節進行核種傳輸、劑量與風險評估。

## 10. 結論。

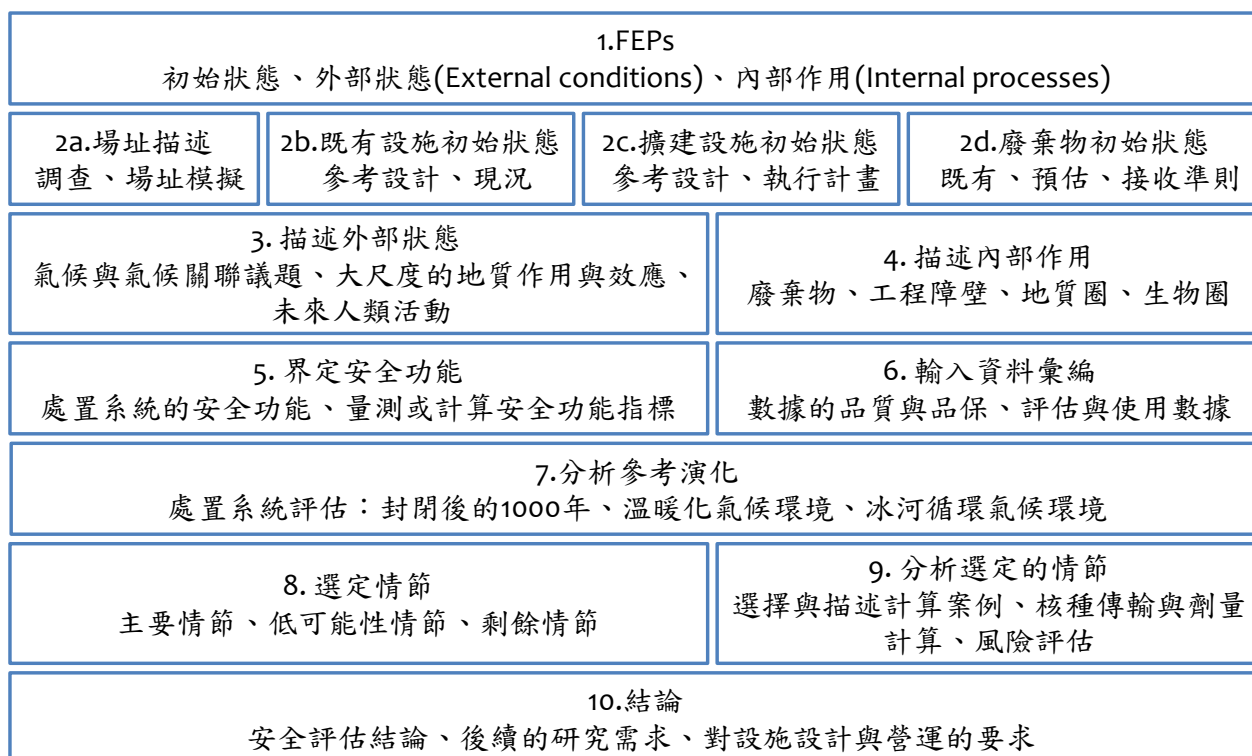


圖 2.29 SR-PSU 之安全分析十步驟示意圖。

### 2.3.4 特徵事件作用

為了解確保處置安全之障壁系統，於不同時期可能產生之功能演化。在進行安全分析工作之前，需先對於可能會影響安全功能之潛在因子進行界定，而SKB主要透過特徵事件作用之篩選工作來進行。SKB對於特徵事件作用的工作流程如圖2.30所示。

首先，SKB利用過去已針對用過核子燃料處置開發過之FEPs資料庫，並參考國際FEPs資料庫內容，將其應用於SR-PSU進行FEPs之篩選工作。SKB之FEPs資料庫將其分為三個類別，分別為初始狀態FEPs、內部作用FEPs與外部狀態FEPs。進行初始狀態FEPs類別篩選工作，針對資料庫內所含之各類FEPs依序說明該項FEPs是否要進行考量，若不需考量則須註明排除此項FEPs之原因。各項FEPs的篩選工作均須有對應之報告紀錄，做為訂定情節之依據。

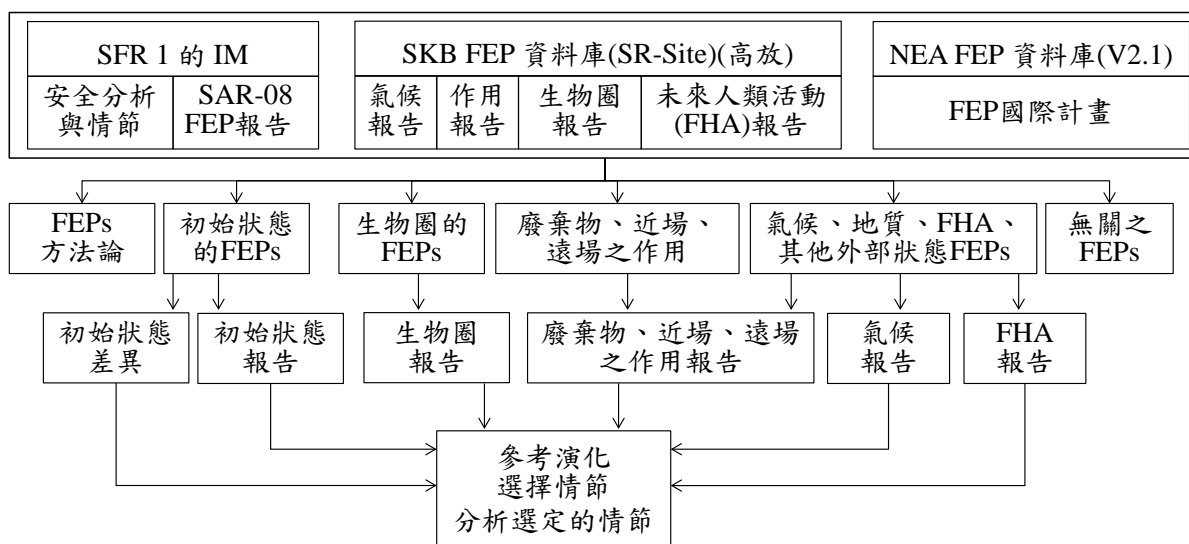


圖 2.30 SR-PSU 之特徵事件作用工作流程示意圖。

### (1) 初始狀態 FEPs

SR-PSU 對於初始狀態 FEPs 之執行方式如表 2.4 所示，其 FEPs 處理考量是基於初始狀態與設計，或與前述項目之差異，而決定其處理方式。因考量事故發生機率低，且 SSM 亦會要求於事故發生時執行緊急應變作為，故在營運階段不考慮如火災、爆炸、破壞與嚴重洪災等 FEP。此外，如 1BLA 將會比其餘坑道更早完成封閉作業，但在分析時並不將此視為與初始狀態有所差異，而是以整個處置設施之營運階段與封閉階段進行考量。

表 2.4 初始狀態 FEPs 與其處理考量

初始狀態 FEPs	SR-PS 處理方式
重大事故/意外/破壞	排除。此類事件發生機率低，且如果事件發生，在封閉階段前必然發現曾有事件發生，所以減緩措施與對長期安全之影響評估，將可以基於其真實事件進行。
營運階段之影響	排除於明確考量之外。因為其可能產生之影響已包含於初始狀態的定義中。
未完全封閉	於情節選擇時進行考慮，詳見情節選擇章節。
監測活動	排除。可能會影響設施安全功能之監測活動將不會被採用。
設計偏差引起之事故	透過數據選用之不確定性範圍進行處理。

### (2) 內部作用

深入了解與處理處置設施於一段時間內發生之作用為安全評估之基礎，其主要資訊來自於 SKB 與相關組織的研究成果。為安全分析的目的，與處置設施、地質圈、生物圈等內部作用之相關知識，紀錄於作用報告與生物圈報告。對於每一個作用，均已說明於安全分析中應如何處理。本節僅就 SR-PRU 報告對此課題之處理流程與報告出處進行原則說明，以及安全分析之原則與是否納入不確定性考量。作用報告的目的在於紀錄可

適當處理相關作用所需要的科學知識，提供 SR-PSU 進行安全分析時使用。其紀錄內容概述如下：

1. 概述：所需知識之一般性概述。
2. 作用與變數之關聯性：說明作用與變數間之交互影響並記錄於影響表中，表 2.5 為廢棄物型式之溶質擴散傳輸作用影響表。
3. 邊界條件：說明各作用之邊界條件，如不同單元介面與單元內部邊界條件等。
4. 模型/試驗研究：紀錄模型研究或試驗研究之結論。
5. 天然類比：如果有關聯，將類似的天然過程紀錄於此。
6. 時間關聯性：定義作用發生的時間表。
7. SR-PSU 之安全分析處理方式：說明 SR-PSU 之安全分析處理方式，大致上為 a. 基於現狀資訊予以忽略、b. 因某特定條件而忽略、c. 以簡化的方式描述、d. 以模型方式描述等。
8. SR-PSU 之不確定性處理方式：基於所選擇之處理方式，總結不同類型之不確定性分析之結果，如：理論的不確性、簡化的不確定性、資料與參數確定性等。
9. 文獻來源。

表 2.5 廢棄物型式之溶質擴散傳輸作用影響表

變數	變數影響作用		作用影響變數	
	直接影響功能表現	處理方式	直接影響功能表現	處理方式
幾何	會，擴散與廢棄物型式幾何尺寸成正比，且非均質性與孔隙幾何特性影響顯著。	納入傳輸模型中評估	不影響	無關聯性
輻射強度	不影響	無關聯性	不影響	無關聯性
溫度	會，在溫度梯度較高的狀況下可能會引起熱擴散。	不考慮，基於 SFR 並不會有劇烈溫升的現象。	不影響	無關聯性
水文	會，水的相態會直接影響擴散行為。	因水結凍而對擴散產生之影響將被納入傳輸模型中。	不影響	無關聯性
應力	不影響，屬間接性質。應力可能影響孔隙幾何與孔隙率，而間接影響擴散。	不影響	無關聯性	無關聯性

核種清單	不影響，屬間接性質。溶解濃度將會直接影響放射性核種擴散特性	不影響	不影響，屬間接性質。溶解後的核種擴散後，將進一步促使核種再溶出。	無關聯性
材料組成	不影響，屬間接性質。在穩定的廢棄物型式下，材料組合將決定其孔隙率與孔隙幾何。	不影響	無關聯性	無關聯性
水質組成	會，為控制廢棄物擴散行為之主要變數。	納入傳輸模型中評估	會，透過溶解的化學物質、膠體、顆粒等影響水質。	納入傳輸模型中評估
氣體變數	不影響，屬間接性質。擴散直接受溶解濃度影響，而廢棄物體中的氣體影響了溶解度。	不影響	不影響，屬間接性質。溶解氣體的擴散將會影響水中濃度，而影響氣體組成。	無關聯性

### (3) 外部作用

在安全分析考量之時間範圍內，處置設施外部狀態有相當程度之變化。描述外部狀態隨時間的改變，主要是利用外部 FEPs 來進行，其包含氣候議題、大尺度地質作用與效應、未來人類活動。

1. 氣候議題：影響氣候系統的主要外部因素為太陽、火山爆發、人為排放之氣體與氣膠，以及其他人類造成之衝擊。受限於對於氣候系統元件間之交互影響機制的知識上不充足，未來的氣候演化並無法準確的預測，但為了處理未來 10 萬年間氣候演化之不確定性，SR-PSU 已對於未來氣候演化定義出 4 種不同的氣候演化情況。影響處置設施功能與長期安全之氣候相關作用包含：凍土演化、海岸線位移、陸域冰被、地表剝蝕、受全球暖化與降水影響下之地下水長期補注變化等。SR-PSU 對於氣候相關之 FEPs 處理方式整理於表 2.6。
2. 大尺度地質作用與效應：外部 FEPs 已包含之大尺度地質作用為力學演化與地震，如構造活動引起的隆起（垂直變形）、地殼變動（水平變形）等。誘發力學演化的原因有很多種類，如板塊運動、小尺度的快速運動（如落石）。發生於母岩之岩石力學作用，主要是因應力負載或材料特性改變所致，其作用主要的結果則為位移或破裂等。

表 2.6 SR-PSU 與氣候相關之 FEPs 與處理方式

FEP 編號	名稱	情節處理方式
Cli02	氣候強迫	所有情節均納入考量
Cli03	氣候演化	所有情節均納入考量
Cli05	永凍土演化	加速混凝土劣化
Cli06	冰被移動與水文	冰川作用與冰期後的狀況
Cli08	冰河地殼均衡調整	所有情節均納入考量
Cli09	海岸線變化	鑽井、處置設施下游鑽井
Cli10	剝蝕作用	所有情節均納入考量

3. 未來人類活動：預測可能影響處置設施狀態之未來人類活動是相當不準確的，基本上人類與社會發展的演化是幾乎無法預測的。安全分析僅包含對於處置系統功能具潛在衝擊之人類活動，且其活動並非蓄意破壞處置設施。舉例來說，未來人類活動可直接影響處置系統功能的一種行為，是於處置設施場址直接鑽井至處置深度。未來人類活動可間接影響處置系統功能的一種行為，是因鑽井行為導致處置設施所在之地下水流場特性或邊界條件產生改變。未來人類活動之 FEPs 並僅包含會對水文或水文地質造成影響之活動與習慣，例如：耕種行為在生物圈的曝露途徑中具有相當的影響力，但由於此行為對於處置設施系統功能並會造成影響，故其並不會列入未來人類活動 FEPs。

### 2.3.5 情節選定

#### (1) 情節選定之法規要求

1. SSMFS 2008:21 規定，情節是用於描述處置設施未來潛在之演化過程，其中應有一個主情節用於考量處置設施及其環境最可能發生之演化。
2. SSMFS 2008:37 對於情節之定義：用於描述處置設施在給定的初始狀態與特定環境下，其潛在演化狀況。
3. SSMFS 2008:21 對於安全分析所考量之情節說明：在給定之外在與內部狀況組合下，描述如何影響處置設施功能。
4. SSMFS 2008:37 對於情節選擇之說明：對於處置設施與其對環境影響的評估，應基于一組情節共同說明處置設施開發、設施周圍環境與生物圈之重要過程。考量到未來氣候演化設定與風險分析解讀之高度不確定性，應簡化為幾個可能的氣候演化進行風險分析。生物圈應基於其氣候演化狀況進行設定。不同氣候演化應依以下原則進行選擇，選擇最重要與最合理的未來氣候演化，以及說明其對於處置設施功能與對環境之影響。
5. SSMFS 2008:21 規定須有三種型態的情節：主要情節、低可能性情節、剩餘情節。

6. SSMFS 2008:21 對於主要情節之規定：主要情節應基於外部情況的可能演化、實際狀況、合理判斷，以及對於內部情況之保守假設而形成。應包含未來之外部事件其具有顯著的發生可能率、或無法說明其在安全分析考量期間之發生率為低者。此外，必須盡可能基於可信的內部情況假設。
7. SSMFS 2008:21 對於低可能性情節之規定：低可能性情節應基於評估情節的不確定性。應基於主要情節之替代事件發生序列變化、或考量未來人類活動影響障壁功能。低可能性情節分析應包含主要情節未包含之不確定性評估。
8. SSMFS 2008:21 對於剩餘情節之規定：剩餘情節應考量事件與條件組合其獨自發生之可能性，此外亦須說明對各障壁單元與功能之意義。應說明一個未封閉且無監管的處置設施，若發生人類無意入侵情節所造成之傷害。
9. SSMFS 2008:37：應包含人類無意闖入對於直接影響處置系統功能之情節，應評估透過鑽井直接侵入處置設施。亦須包含間接影響處置系統功能之情節，例如地下水化學狀態改變、設施周圍地下水流場改變等。人類入侵情節的選擇需基於目前的生活習慣與科技水準，並考量處置設施之特性。
10. SSMFS 2008:37 另外提到特殊情節：為了清楚了解不同障壁單元對於確保處置安全功能的能力，可分析在封閉後的第一個一千年，針對一個或多個重要的障壁功能，分別進行其風險分析。

## (2) 主要情節

主要情節是依據全球暖化與早期冰緣氣候之參考演化進行設定，相關詳見 2.2.3 節。

受氣候演化、海平面升降與設施劣化等影響下，其母岩核種傳輸特性變化分別如圖 2.31 所示，通過處置設施之流量變化特性如圖 2.32 所示，圖中所示均為平均流量分析成果，上下影線則為高流量與低流量。暴露途徑考量則如圖 2.33 所示。



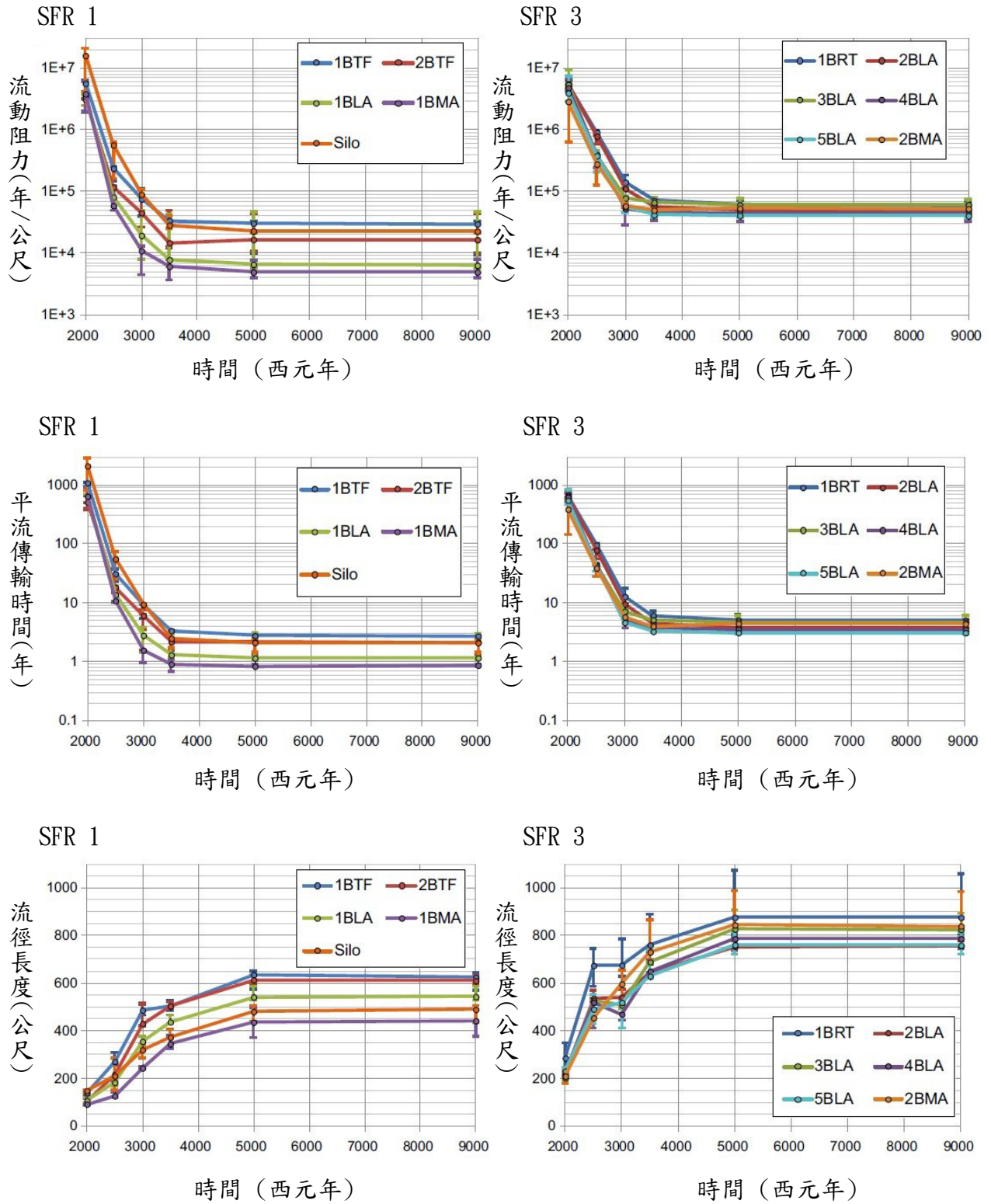


圖 2.31 母岩核種傳輸特性變化示意圖。

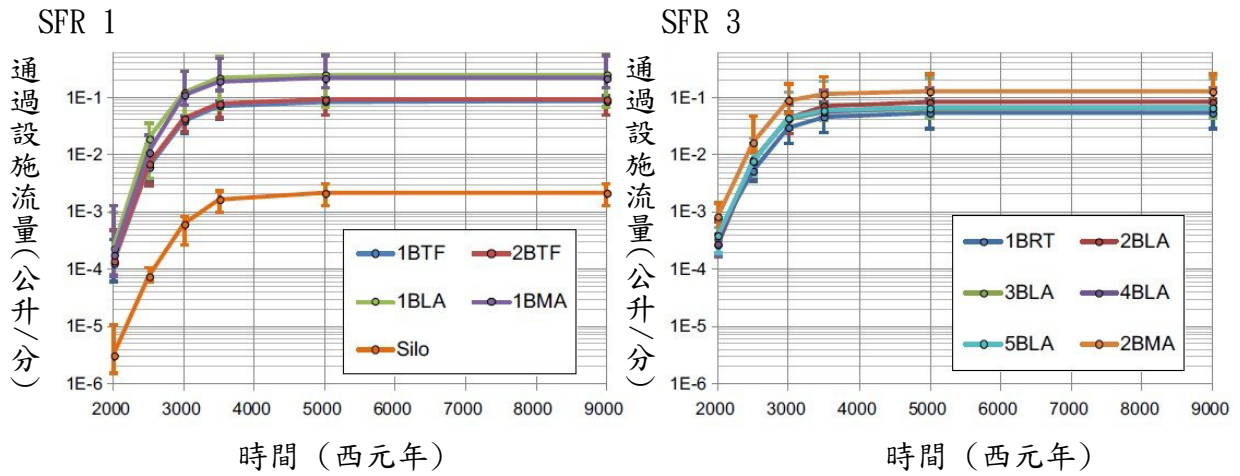


圖 2.32 通過處置設施之流量變化示意圖。

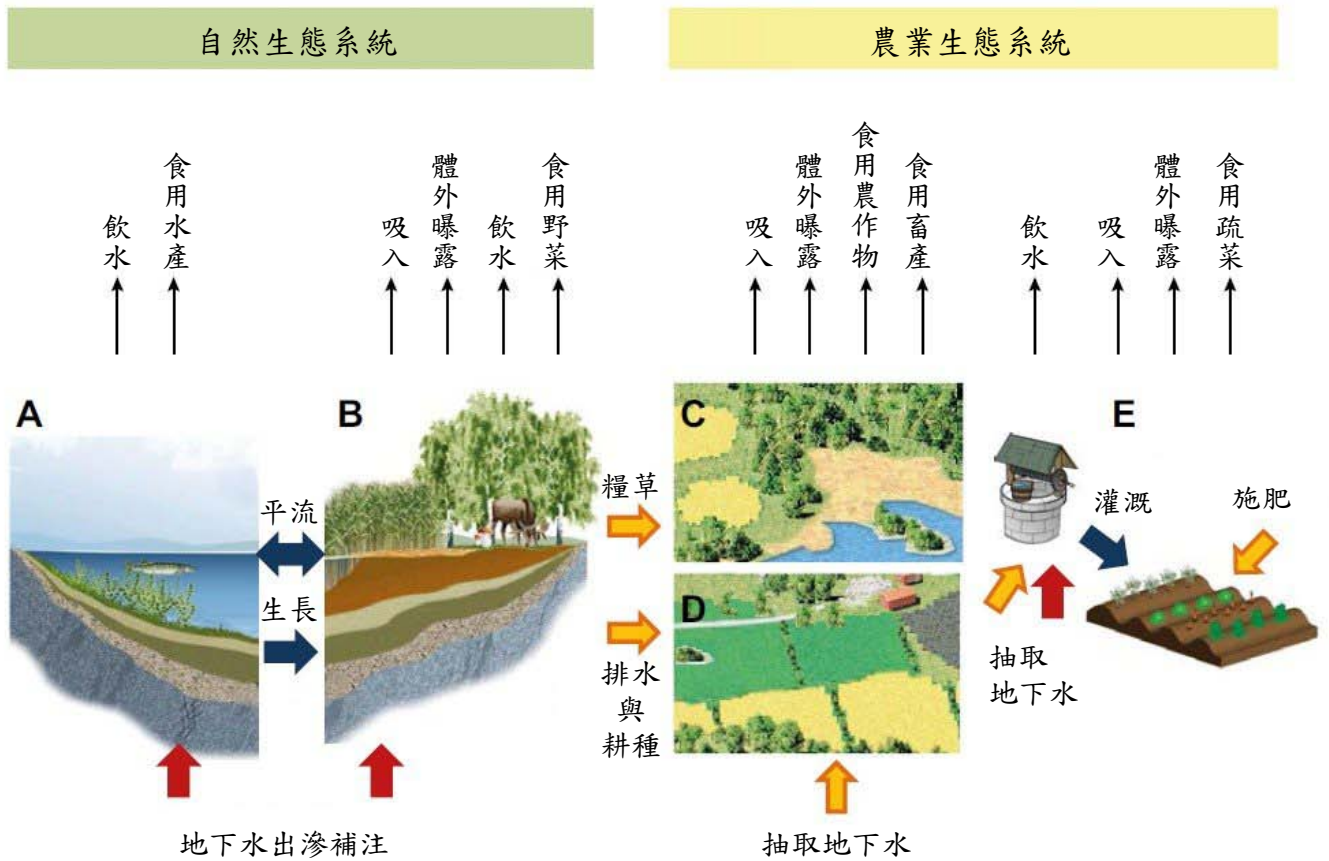


圖 2.33 暴露途徑示意圖。

主要情節各項安全功能考量說明如表 2.7 所列。

表 2.7 主要情節安全功能與說明

安全功能與項目	說明
總活度限制	在主要情節中，廢棄物總活度維持與初始設定相同。
母岩低流量環境	
1.水力傳導係數	預期在安全評估之時期內，母岩之物理與化學狀態並無明顯改變，水力傳導係數於評估期間維持一致設定。
2.水力坡降	受到海岸線移動的影響，在封閉後的前 3,000 年，水力梯度將會明顯增加。當處置設施上方出露為陸地時，將假設其地下水流向與水力梯度，於後續之評估期間內均維持穩定。
處置窖低流量環境	
1.水力反差	1-2BMA 與 1-2BTF 利用混凝土結構來維持混凝土結構與回填區之間的水力反差。因此，當混凝土孔隙率發生變化時，則會改變其水力特性。在 BMA 類型坑道中，中度劣化之混凝土構造物能可維持較大之水力反差。但因 BTF 與 BRT 處置型式並不完全盛裝於混凝土結構物中，其水力反差小於 BMA 型式，隨著可預期的設施劣化，將會減少其水力反差程度。由於預期在封閉後 1,000 年內僅會有些微劣化產生，因而預測水力反差在 1,000 年內並不會有明顯改變。於冰緣氣候下，在西元 52,000 年之前混凝土結構將處於結凍狀態。
2.水力傳導係數	豎坑底部之水力傳導係數可維持於 9E-12m/s，豎坑頂部之水力傳導係數可維持於 9E-11m/s，澎潤土封塞之水力傳導係數可維持於 1E-12m/s。
3.氣體壓力	此安全功能指標僅適用於豎坑，預期在整個安全評估期間，氣體壓力將不會產生明顯的變化。
良好的吸附性	
1.pH 值	pH 值在初始階段被控制於 12.5 以上，於西元 22,000 至 58,000 年之間將約為 10，其中 1BLA 坑道將會在 19,000 年後降至一般地下水的水準。
2.氧化還原	當鐵發生腐蝕後將會提供還原環境，但預估廢棄物會處於還原環境之能力在 10 萬年後才可能耗盡。在凍土時期，鐵的腐蝕與鐵腐蝕產物生成將會停止。
3.錯合劑濃度	在凍土時期將不會發生纖維素降解為 ISA，以及核種因 ISA 複合物而發生遷移。
4.吸附功能	混凝土材料可提供大量之比表面積用於吸附核種，但劣化程度將會影響其可吸附面積。在凍土時期其可吸附面積並不會變，當水溶化後受到混凝土發生裂縫的影響其面積將會改變。
5.腐蝕速率	在 BRT 坑道，RPV 將視為障壁單元，其核種釋出率取決於金屬腐蝕速率，其主要受 pH 值與氧化還原條件影響。當地下水凍結時，核種傳輸將停止。 腐蝕速率於西元 22,000 年前為 0.05 μm/yr，其後為 2.8μm/yr。
避免處置設施受鑽井直接影響	依主要情節內容，農業用地均距離處置設施一定距離，並不會於處置設施設置水井取水。海水覆蓋將會避免發生鑽井事件，假設當地面高於海水面 1 公尺後才可能發生鑽井事件。此外，研判處置設施上方與其下游區域應不適合做為農業使用。

### (3) 低可能性情節

低可能性情節是透過檢視所有違反安全功能可能性而篩選出來，意即透過檢查初始狀態、內部過程、外部條件等，逐步檢視檢查可能導致安全功能下降之可能性。該報告檢視之項目包含：違反安全功能之總活度限制檢視、違反安全功能之母岩低流量環境檢視、違反安全功能之處置窖低流量環境檢視、違反安全功能之良好遲滯性檢視、違反安全功能之避免在處置設施附近設有水井的檢視。分別檢視初始狀態、內部作用與外部條件是否會違反安全功能。例如在違反安全功能之總活度限制檢視中，會導致違反此安全功能之因素僅有初始狀態的核種清單總活度高於預期，才會導致違反此安全功能的狀況發生，故其低可能性情節即為處置量高於預期情節。各低可能性情節與其安全功能檢視彙整如表 2.8 所列。

表 2.8 低可能性情節與其安全功能檢視

安全功能					情節
總活度限制	母岩低流量環境	處置窖低流量環境	良好遲滯性	避免處置設施受鑽井直接影響	
X					處置量高於預期
	X				母岩流量高於預期
		X			混凝土加速劣化
		X			膨潤土劣化
	X	X			地震
			X		高濃度錯合劑
				X	處置設施下游鑽井
				X	鑽井無意侵入

### (4) 剩餘情節

剩餘情節的分析並不考量其情節可能發生之機率，可用於研究障壁單元之功能。例如：考量處置設施不會吸附核種，用以分析處置設施失去吸附功能之情節。另外亦有母岩失去吸附功能情節、處置設施流量高於預期情節、改變 SFR1 處置設施之氧化還原狀態情節、擴展全球暖化情節、處置設施未封閉情節、未來人類活動情節。其中未來人類活動情節分為：鑽井破壞處置設施情節、水資源管理情節、地下結構物建設情節、處置設施附近之道路與鐵路建設情節、處置設施附近之採礦情節，以及冰期與冰期後情節。

### (5) 組合情節

除了低可能性情節之外，可組合不同之低可能性情節形成組合情節。表 2.9 說明了低可能性情節合併為組合情節之考量與可能性。基於各獨立情節發生之機率，3 個或 3 個以上情節所形成的組合情節其發生機率是非常低的，故合併 2 個情節被判定為是較合適的。以組合情節 1 為例，其主要基於水文地質模型之數據選用不確定性，增加考量母岩流量高出預期之情況，再考量水流加速後也加速了混凝土劣化的速度。

表 2.9 低可能性情節合併為組合情節

情節	情節基礎	組合情節	
		組合 1	組合 2
處置量高於預期	初始清單估算不確定性 (初始狀態)		
母岩流量高於預期	場址特性參數選用與地下水模擬不確定性 (初始狀態)	x	x
混凝土加速劣化	混凝土劣化速度不確定性 (內部作用)	x	
膨潤土劣化	冰緣條件影響之不確定性 (外部條件) 與膨潤土密封功能特性不確定性 (內部作用)		
地震	場址未來演化不確定性 (外部條件)		
高濃度錯合劑	錯合劑與纖維素總量估算不確定性(初始狀態)		x
處置設施下游鑽井	未來人活動之不確定性 (外部條件) a.		
鑽井無意侵入	未來人活動之不確定性 (外部條件) b.		

(6) 小結

各選定的情節用以評估處置系統演化之不確定性，圖 2.34 顯示個情節評估之不確定性分析類型，表 2.10 為各情節發生機率之總結。

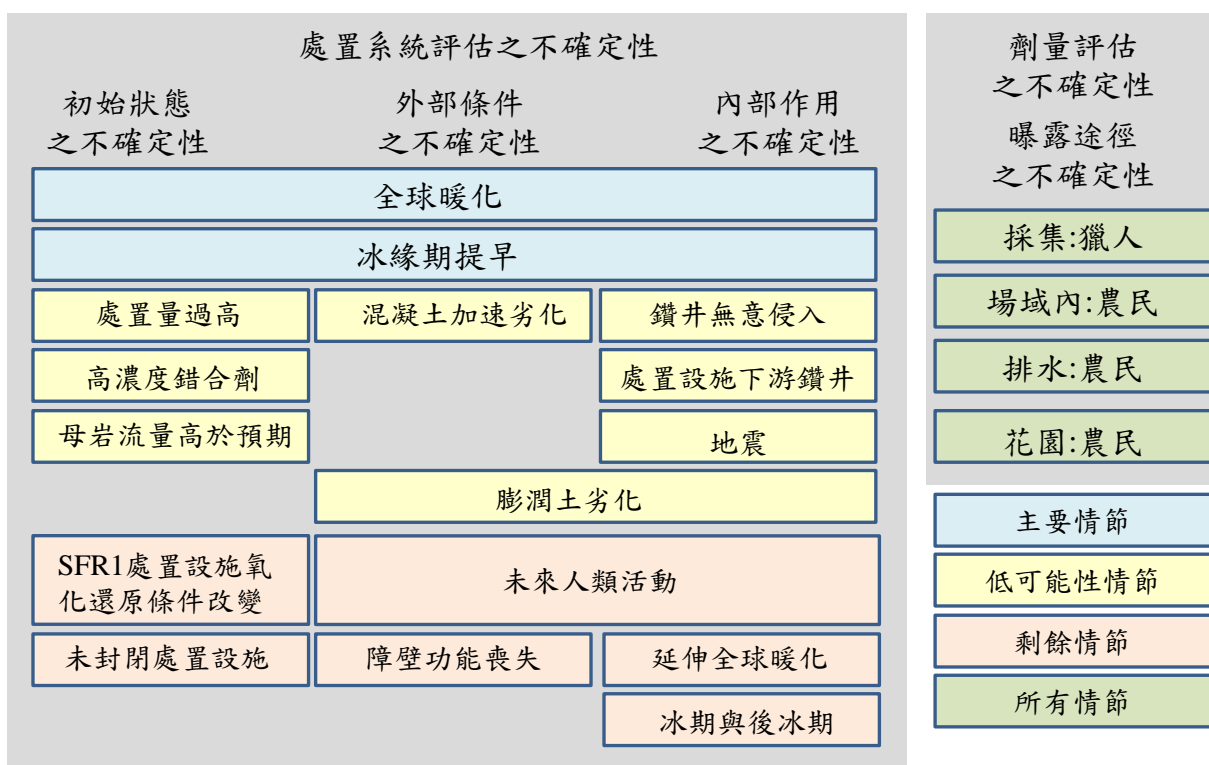


圖 2.34 各情節處理不確定性類型示意圖。

表 2.10 各情節發生機率

情節	機率	情節類別
溫暖化氣候環境 冰緣氣候環境	1 1	主要情節
處置量高於預期情節 母岩流量高於預期情節 混凝土加速劣化情節 膨潤土劣化情節 地震情節 高濃度錯合劑情節 處置設施下游鑽井情節 鑽井無意侵入情節 豎坑 SFR1 SFR3	<0.05 <0.1 <0.1 <0.1 1*E-6/yr <0.1 0.13  2*E-4 8*E-4 3*E-4	低可能性情節
障壁功能喪失情節-處置設施無吸附功能 障壁功能喪失情節-圍岩無吸附功能 障壁功能喪失情節-高地下水流量 SFR1 處置設施氧化還原條件改變 延伸全球暖化情節 未封閉處置設施情節 未來人類活動情節 冰期與冰期後情境		剩餘情節
情節組合 1 情節組合 2	<0.1 0.1 <0.1 0.1	情節組合

## 2.4 安全評估

### 2.4.1 瑞典Forsmark低放射性廢棄物處置場安全評估概念

#### (1) 安全原則 (Safety Principles)

該報告所指之安全原則為處置場封閉後應有之安全原則有二點：

1. 限制長半化期核種的活度 (limitation of the activity of long-lived radionuclides)：僅接受特定種類廢棄物以達成，且工程障壁的設計將影響各處置窖可接受之總活度。
2. 遲滯核種 (retention of radionuclides)：藉由工程障壁功能與處置場址環境以達成，處置窖內之廢棄物特性、處置罐材質與工程障壁特性整合提供低水流量與合適之

化學環境以支持安全，母岩則提供穩定之化學與物理狀態以及有利的低地下水流條件。

## (2) 安全功能 (Safety Functions)

處置設施安全功能的界定為安全評估方法的重要論述，安全功能用以描述處置設施內各元件的長期功能也是協助情節設定的重要依據，也進一步設定安全功能指標，對應於前小節二個安全原則之安全功能摘述如下。

1. 對應於限制長半化期核種的活度之安全功能為限制活度量 (limited quantity of activity)。
2. 對應於遲滯核種之安全功能為處置窖內具低流量 (low flow in waste vaults)、母岩內具低流量 (low flow in bedrock)、良好的遲滯 (good retention)、避免處置場周邊有水井 (avoid wells in the direct vicinity of the repository)。

## (3) 安全功能指標 (Safety Function Indicators)

安全功能確認後便可進一步設定安全功能指標，長期安全評估所需考慮之處置設施主要元件的潛在議題如表 2.11 所示。

表 2.11 長期安全評估與處置設施各元件安全功能之潛在議題

元件	議題
廢棄物形式 (Waste form)	活度、限制移流傳輸、力學穩定性 吸附性、有利的化學條件
廢棄物包件 (Waste packaging)	限制移流傳輸、力學穩定性、吸附性、有利的化學條件
廢棄物包件之周圍灌漿 (Grouting surrounding waste packages)	限制移流傳輸、力學穩定性、吸附性、有利的化學條件
混凝土結構 (Concrete structures)	限制移流傳輸、力學穩定性、吸附性、有利的化學條件
噴凝土 (Shotcrete)	力學穩定性(運轉階段)、吸附性、有利的化學條件
膨潤土與砂/膨潤土混合材 (Bentonite and sand/bentonite)	力學穩定性、限制移流傳輸、吸附性
回填處置窖 (Backfill in waste vaults (crushed rock/macadam))	力學穩定性、吸附性
封塞元件與其他封閉元件 (探查孔) (Plugs and other closure components (investigation boreholes))	處置設施的吸附功能下限制移流傳輸

進一步將安全功能與安全指標列表整理如表 2.12 所示。

表 2.12 SR-PSU 之安全功能與安全指標

安全功能	安全指標
1. 限制活度量	各處置窖之各核種活度
2.1 處置窖內具低流量	水力反差 (hydraulic contrast) 水力傳導係數 氣體壓力
2.2 母岩內具低流量	水力梯度 水力傳導係數
2.3 好的遲滯	pH 值 氧化潛能 (redox potential) 錯合劑濃度 (concentration of complexing agents) 可吸附面積 (available sorption surface area) 腐蝕速率 (corrosion rate)
2.4 避免處置場周邊有水井	入侵井 處置場下游水井

此外安全功能與安全指標也可協助選址工作，與選址工作相關之安全功能與安全指標列表整理如表 2.13 所示。

表 2.13 選址工作相關之安全功能與安全指標

安全功能	安全指標
處置窖內具低流量	低地震活動 低永凍土風險
母岩內具低流量	低地震活動與低區域變形 低水力梯度母岩 低水力傳導係數母岩
避免處置場周邊有水井	低鑿井風險 低採礦風險

## 2.4.2 近場安全評估

SR-PSU的安全評估資料與模式架構如圖2.35所示，由水文地質概念模型提供遠場流場模擬，再提供遠場傳輸模擬所需與導引近場流場模擬，近場傳輸模擬後將提供遠場傳輸模擬，再銜接生物圈劑量模式最後得到劑量評估，從模式架構而言，最外圈是區域流場模擬，也就是遠場含整個處置場之流場模擬。所採用之模式為區塊模式 (compartment model)。



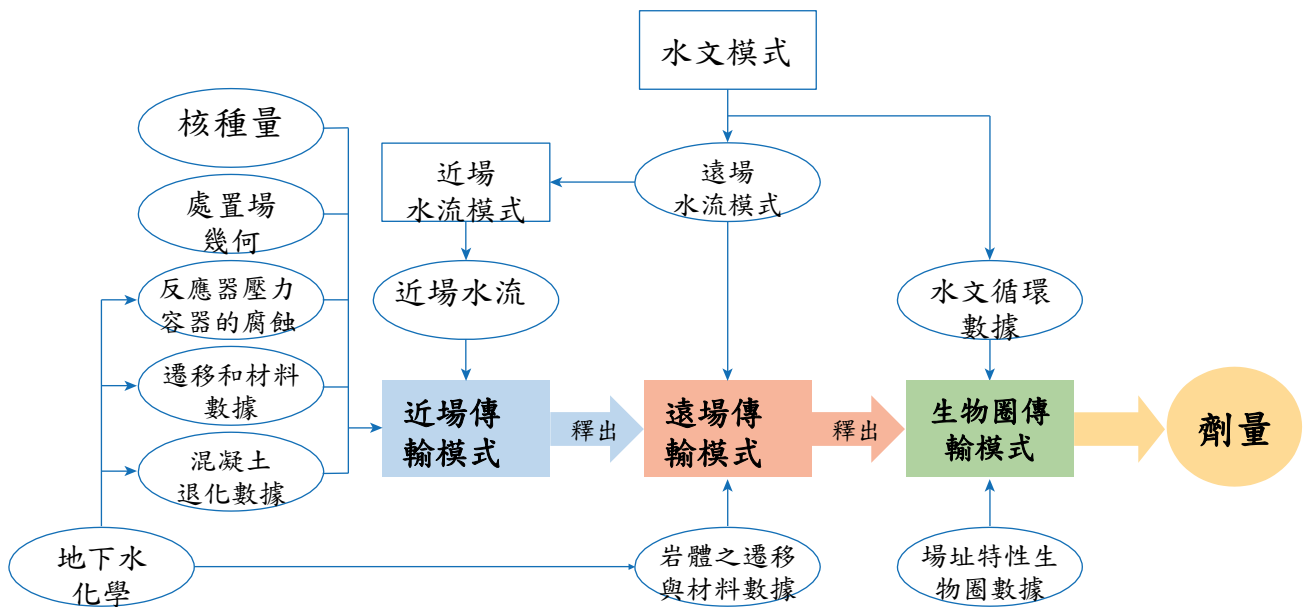


圖 2.35 SR-PSU 的安全評估資料與模式架構。

在SR-PSU的安全分析中流場模擬與傳輸模擬是分別進行的，以近場安全分析為例，先進行近場水文模擬，採用3維模擬詳細描述處置設施空間分布，再提供近場傳輸模擬所需。1BLA處置窖區塊模式的概念為計算各控制體積區塊之質量平衡，而區塊交界面之通量為以不同參數化方式進行估算，且假設控制體積內為均勻流場，因此廢棄物包件會統整成一個區塊控制體積，如圖2.36所示，左圖為1BLA處置窖之區塊模擬分區，右圖為1BLA內某一控制體積剖面示意圖。1BLA處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖如圖2.37所示，2-5BLA處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖如圖2.38所示，處置窖內貯存低放廢棄物，最內圈不同顏色之方塊或圓圈分別代表不同形式之廢棄物包件，直線代表流場，曲線代表擴散機制。

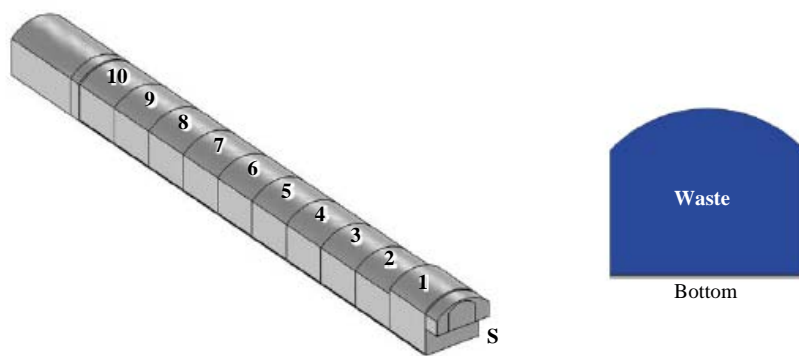


圖 2.36 1BLA 水文模擬處置窖區塊分區（左）與廢棄物包件控制體積（右）示意圖。

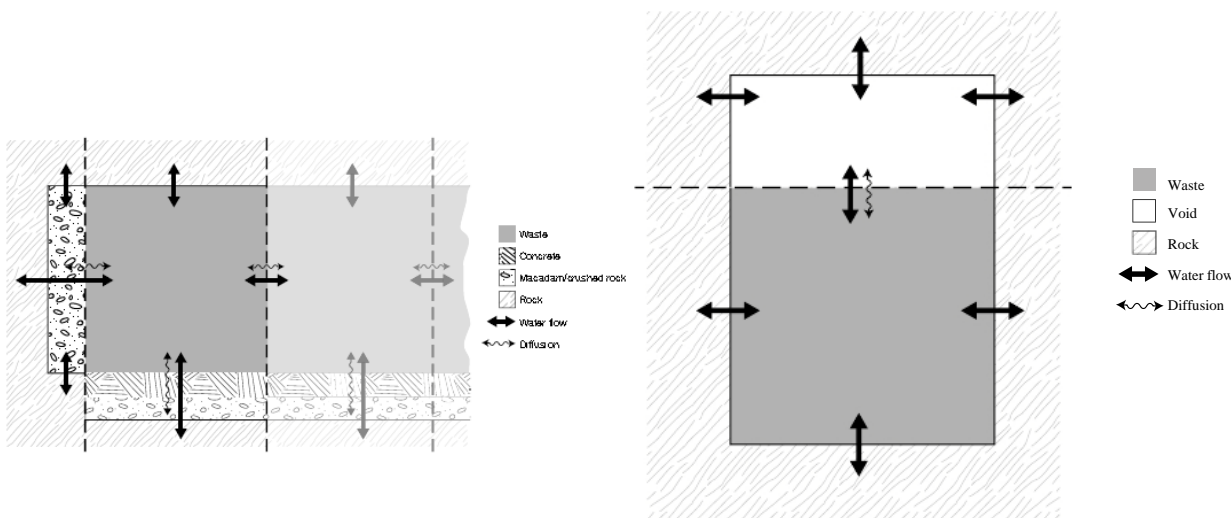


圖 2.37 SR-PSU 之 1BLA 處置窖近場傳輸區塊 圖 2.38 SR-PSU 之 2-5BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖。

### (1) 近場工程障壁關鍵議題

近場工程障壁之安全功能可分為水力障壁功能與化學障壁功能。水力障壁功能在有效低移流傳輸經過廢棄物；而化學障壁功能最主要在核種遲滯，此外也包含提供高 pH、還原環境、低錯合劑濃度、有利的吸附面積等有利於遲滯核種之化學環境。此外，雖然溫度來自外在環境變化，但冰期的低溫將可能衝擊混凝土與膨潤土之水力特性進而降低工程障壁功能，因此也是近場安全評估之關鍵議題。對於近場坑道處置安全評估關鍵議題，針對與工程障壁之安全功能相關部分可以整理如表 2.14 所示 (SKB, 2014b)。

表 2.14 近場安全評估與工程障壁相關之關鍵議題

關鍵議題	內容
幾何形貌	障壁之體積、尺寸 障壁之孔隙率與孔隙特徵
溫度	氣候演化之溫度變化
水文	流場方向、大小、分布 飽和度 壓力水頭 型態 (冰或水)
力學	障壁之應力與應變
組成成分	障壁組成成分、數量與表面特徵 化學物種種類與總濃度 微生物可利用之有機化學物種與總量 微生物與細菌種類與數量
水成分	水的組成、核種所含的水組成 氧化還原、pH 值、離子強度、溶解物種濃度、膠體與顆粒、溶解氣體 密度與黏滯性 水中之微生物、細菌與生物量之種類與數量
氣體	氣體的組成、核種所含的氣體組成 體積、壓力與飽和度 氣體流動之大小、方向與分布

## (2) 工程障壁演化

### 1. 膨潤土演化

所考慮的工程障壁演化如膨潤土障壁層在接觸到水會逐漸演化高 pH 值環境，如約 10,000 年後膨潤土中的主要成分蒙脫石 (montmorillonite) 約有 1/3 的量會溶解 (dissolved)、100,000 年後大部分蒙脫石都將溶解，而矽酸鈣礦物 (calcium silicate minerals)、沸石 (zeolites) 及黏土會在這些過程演化中產生，這些新生成的礦物和原先的膨潤土有不同的孔隙率與較弱的膨脹能力。

### 2. 水泥演化

水泥化學狀態的改變會逐漸造成礦物之溶解/沉澱，pH 下降所造成之礦物組成改變與孔隙率上升的演化過程。另外一種可能為由局部的溶解演化成水穿透水泥塊體之裂隙，裂隙內之傳輸機制以移流傳輸為主，廢料區為已知濃度，右側回填區濃度為零。

## 2.4.3 地質圈作用關鍵議題

TR-14-05 (SKB, 2014c) 技術報告為說明 SR-PSU 安全評估所涉及之地質圈作用，也就是遠場安全分析所應考慮之要項，主要包含熱傳作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用。並且以 13 個變數來描述地質圈作用之特性與狀態，摘述說明如表 2.15。

表 2.15 SR-PSU 地質圈作用變數與定義

變數	定義
母岩溫度	母岩溫度為時間與空間函數
地下水流	地質圈裂隙之地下水流為時間與空間函數
地下水壓力	地質圈裂隙之地下水壓力為時間與空間函數
氣相流體	地質圈裂隙之氣相流體為時間與空間函數
處置場幾何形貌	處置場內如坑道、豎井等任何開挖之幾何尺寸
裂隙與孔隙幾何形貌	母岩裂隙與微孔隙之幾何尺寸
母岩應力	母岩之應力為時間與空間函數
母岩礦物	母岩礦物化學組成為時間與空間函數
裂隙礦物	裂隙構成之礦物化學組成為時間與空間函數，也應包含裂隙內物質組成
地下水組成	地下水化學組成為時間與空間函數，包含氧化還原、pH、離子強度、溶解物種濃度、膠體與顆粒、溶解氣體，以及密度與黏滯性
氣體組成	封閉時存在於地質圈之所有氣體之化學組成
結構與零星物質	灌漿與其他結構或零星物質之化學組成
飽和度	地質圈之水飽和度

該報告中進一步分析地質圈之熱傳作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用等與這 13 個變數之相互關係，例如在地質圈水力作用主要為安全分析之遠場地下水模

擬，說明如下：

- (1) 地下水流受母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、處置場幾何形貌、裂隙與孔隙幾何形貌、地下水組成、結構與零星物質、飽和度等之直接影響。母岩之應力與裂隙礦物會透過裂隙與孔隙幾何形貌間接影響力下水流。
- (2) 地下水流會直接影響母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、地下水組成、飽和度。透過地下水組成與地下水壓力間接影響裂隙與孔隙幾何形貌、透過地下水壓力間接影響母岩應力、透過地下水組成間接影響母岩礦物與裂隙礦物。

#### 2.4.4 生物圈核種傳輸

在SR-PSU的生物圈核種傳輸模擬同樣採用區塊模式，主要考慮2種生態系統，水域（如海洋、湖泊與河川）與陸域（如泥沼與農業生態系）接收與累積核種之外釋，其概念架構如圖2.39所示，圖中方塊代表不同物理區塊之核種存量，線條箭號方向代表核種傳輸方向，核種在區塊間之傳輸透過（1）氣體（淺藍色）、（2）水體（深藍色）、（3）固體物質（黑色）、（4）有機與無機型態之核種轉換（綠色）、（5）孔隙水擴散（橘色）、（6）濕地植物生長累積（灰色），大氣為核種的源/匯。圖中各區塊名稱之說明如表2.16所示。

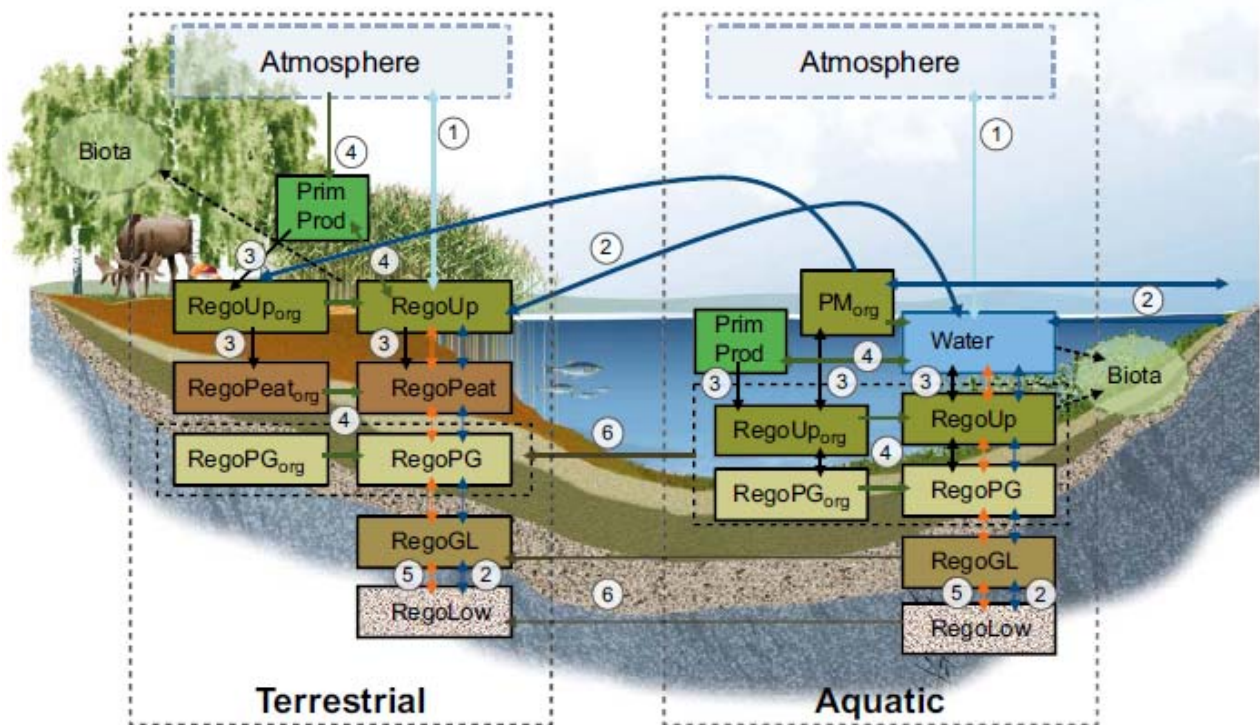


圖 2.39 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖。

表 2.16 生物圈核種傳輸區塊名稱與說明

區塊模型說明

水域 Aquatic

Water	於開放水域（海洋、湖泊、河川）之放射性核種，包含核種溶解於水中與吸附在有機物質
PM <sub>org</sub>	於水中懸浮液內被有機顆粒物質吸附之放射性核種
Prim Prod	貯留在水域之初級生產者內之放射性核種，包括在海洋的核種、海底微觀和宏觀的初級生產者
RegoUp	在水體沉積物之上部好氧生物活性層之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoUp <sub>org</sub>	在水體沉積物的上部好氧生物活性層被有機顆粒物質吸附之放射性核種。
RegoPG	生物活性層以下於後冰期水體沉積物（粘土腐殖土）之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoPG <sub>org</sub>	生物活性層以下於後冰期水體沉積物（粘土腐殖土）內被有機顆粒物質吸附之放射性核種。
RegoGL	在冰期粘土內之放射性核種（通常由後冰期沉積物所覆蓋），包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoLow	在冰積土內之放射性核種（通常由冰期粘土所覆蓋），包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

陸地（沼澤） Terrestrial (mire)

PrimProd	貯留在沼澤植被生物量的放射性核種，包括地面上方和下方之苔蘚植物，維管束植物，矮灌木和樹木的生物量
RegoUp	在濕地泥炭（acrotelm（活性層）泥炭）上部好氧生物活性層之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在泥炭的放射性核種
RegoUp <sub>org</sub>	於泥炭（acrotelm（活性層）泥炭）上部好氧生物活性層內被有機顆粒物質吸附之放射性核種
RegoPeat	在深部、永久厭氧、濕地泥炭（acrotelm（活性層）泥炭）之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在泥炭的放射性核種。
RegoPeat <sub>org</sub>	在深部、永久厭氧濕地泥炭（acrotelm（活性層）泥炭）內被有機顆粒物質吸附之放射性核種
RegoPG	於後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物（粘土腐殖土）內之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoPG <sub>org</sub>	於後冰期被濕地泥炭覆蓋沉積物（粘土腐殖土）內被有機顆粒物質吸附之放射性核種。
RegoGL	被濕地泥炭埋在下面的冰期粘土內之放射性核種，包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoLow	在冰積土內之放射性核種，被濕地泥炭埋在下面，通常由冰期粘土所覆蓋。包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種

陸地（農業） Terrestrial (agriculture)

RegoUp	在農業土壤（或頂部土）上層之放射性核種，該土壤受到犁地和生物擾動的影響，本層係農作物主要攝取養分和微量元素之土壤。這一層是排水良好並具有高土壤生物活性。包括孔隙水內與吸附在沉積物顆粒的放射性核種
RegoUp <sub>org</sub>	在農業土壤上層被有機顆粒物質吸附之放射性核種

2.4.5 生物圈核種劑量評估

SR-PSU安全評估計畫考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由各種評估模式分析廢料體、近場、遠場之核種傳輸，然後模擬得到進入生物圈的核種濃度，再利用核種劑量係數（Dose coefficient）與食物攝取率等參數計算對於人體輻射劑量。暴露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部暴露和吸入等四部分：

$$Dose_{total} = Dose_{ing, water} + Dose_{ing, food} + Dose_{ext} + Dose_{inh} \quad (4-1)$$

其中：

$Dose_{ing, water}$ ：攝取水途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

$Dose_{ing, food}$ ：攝取食物途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

$Dose_{ext}$ ：外部暴露途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

$Dose_{inh}$  : 吸入途徑的核種劑量[Sv y<sup>-1</sup>]

SR-PSU安全評估計畫劑量係數依據ICRP（1996年）建議值，由廢料體、近場、遠場各種評估模式分析核種洩漏出近場後於遠場傳輸，當得到核種進入生物圈核種濃度後，再利用核種劑量係數（Dose coefficient）與食物攝取率等參數利用方程式（4-1）計算對於人體暴露於環境中的放射性核種的總劑量包括攝取水、攝取食物、外部暴露和吸入等四部分輻射劑量。

## 2.5 結論

依據TR-14-01之技術報告之研讀，回饋於國內之潛在場址之審查，並針對SFR處置坑道進行綜合整理，主要內容包含初始狀態與場址特性演化、設施設計及安全評估，綜合整理如下：

### 2.5.1 初始狀態與場址特性演化

- (1) SFR處置場目前分成兩個部分，SFR1處置場屬營運階段，規劃階段的SFR3處置場為計畫中的擴建部分，並預計於2075年封存。
- (2) 廢棄物來源：廢棄物主要來源為營運廢棄物（核電廠的運轉、工業活動或醫療等）及除役廢棄物。營運廢棄物來源有水淨化系統廢棄物（括珠狀樹脂、粉狀樹脂、力學助濾劑和沉澱污泥）、廢金屬（碳鋼和不銹鋼）及最大量的可燃固體廢棄物（纖維素（紙，棉和木頭）和塑料（包括聚氯乙稀PVC、聚苯乙烯、聚乙烯和聚丙烯））；除役廢棄物主要包含金屬和混凝土。
- (3) 廢棄物包件：SFR處置場的所有廢棄物幾乎都是一定的形式的廢棄物包件儲存，SFR處置場所使用之廢棄物包件為標準貨櫃(ISO container)、四方廢棄物箱(Tetramould)、鋼材廢棄物箱(Steel mould)、鋼桶，托盤(Steel drum, drum tray)、混凝土槽(Concrete tank)及混凝土箱(Concrete mould)。
- (4) 處置場外在條件之演化依人為CO<sub>2</sub>排放量之多寡假設未來的三個氣候類型分別為早期冰緣氣候、全球暖化氣候及延伸全球暖化氣候類型，其可能在處置場場址造成三種不同的氣候演化為溫帶氣候域、冰緣氣候域及冰河氣候域等。
- (5) 場址封閉後之演化可分為幾項討論：
  1. 表面系統演化：控制因素主要為氣候變化及海岸線演化。封閉後 1,000 年在早期冰緣類型及全球暖化類型氣候會有新生成的陸地，公元 5,000 年海岸線將從 SFR 處置場撤離約 5 公里。公元 12,000 年一系列的湖泊產生，大海已經離開模型區域。擴張全球暖化類型則比前面述之結果晚 1,000 年。
  2. 熱流演化：SFR 處置場沒有明顯發熱過程，因此可忽略。冰緣氣候條件下，處置

場深度不排除發生永凍土，使處置場凍結。

3. 力學演化：影響處置場之力學演化主要是 SFR3 之開挖工程。處置窖可能會有岩塊掉落，但之後會趨於穩定，而處置場的岩柱也處於穩定狀態。豎坑內之膨潤土將不致因為岩塊掉落而影響障壁功能，膨潤土的膨脹壓力將使坑壁更穩定。100,000 年尺度之板塊內地震之因素必須考慮。冰緣氣候域時期溫度改變及地表水冷凍將引導力學過程，使岩石變型、裂縫張開及新的裂縫形成。
4. 水文地質演化：封閉後 1,000 年，海岸線演化是地下水流動主要的因素，處置場由淹沒環境演化成濱海環境，海岸線的位移迫使排放區朝向北北東及西北方向的變形區遠離。陸域環境下，海岸線遠離使海岸線的影響變的微不足道，從約公元 5,000 年幾乎是穩定流動的陸域環境。冰緣氣候環境下，水力傳導減少，地下水無顯著流動，但不可忽略不凍層使流量小幅增加。
5. 近場水文循環演化：處置場主要設計成低水流量之環境，避免水流經處置場造成輻射洩漏的問題，經模擬計算結果，封閉後 1,000 年處置場從淹沒環境演化至濱海環境導致總流量增加了約 100 倍。濱海環境演化成陸域環境總流量變化不大。
6. 地球化學演化：地下水因不同時期滲入裂縫中，導致在此區之地下水所含之成分亦有不同，大致可分為四個類型（區域性的波羅的海類型、Littorina 類型海水帶有冰期成分、半鹽冰期水類型及混合含鹽水型（過渡類型））。冰緣氣候裂縫中的水被凍結，可預期裂縫及基岩中的水將無法交換。
7. 廢棄物化學演化：處置場封閉後從氧化環境（初始氧含量）在 5 年內至還原環境，鋼質材料的腐蝕將在還原環境下進行。金屬腐蝕和微生物過程產生氣體，因氣體壓力增加而從處置場排出。鋁迅速腐蝕，可能在最初幾年內使受污染的水排出。吸附作用可抑制污染物外洩。在冰緣的時期條件下，在處置場中的水被凍結，所有的化學過程（包括核種傳輸）將非常緩慢地進行。
8. 工程障壁演化：A. 膨潤土障壁於封閉後，鈉和  $\text{Ca}^{2+}$  之間的粘土離子交換可能導致膨脹壓力的減少達至五倍。經過 10,000 年，總量三分之一的蒙脫石從膨潤土中溶解。膨潤土障壁失去溶脹能力可能產生裂隙和水力傳導率。冰緣氣候域的環境下，膨潤土可能發生凍脹變形。B. 混凝土障壁中鋼筋腐蝕的體積增加，可能會導致混凝土產生裂縫。含有硫酸鹽廢棄物可能導致局部破裂及混凝土的力學劣化。冰緣氣候域的環境下，混凝土孔隙中的水凍結使更多的裂隙產生，導致擴散屏障功能喪失，但它仍然具有吸附功能。

## 2.5.2 設施設計

- (1) 處置設施位於波羅的海之海床下，設施上方約有 60 公尺之花崗岩層。SFR1 包含 4 條處置坑道以及 1 座 70 公尺高的混凝土豎坑。SFR3 預計擴建新增 6 條處置坑道，其規劃之

岩覆約為120公尺，規劃處置之廢棄物為核電廠運轉與除役之廢棄物。當處置場封存後成為可被保留的被動的系統，無需進一步的量測與維護。而規劃處置之廢棄物主要廢棄物為核電廠運轉（離子交換樹脂）及除役（汰換之廢棄金屬元件、防護服及設備等耗材）之中低放射性廢棄物、除役之反應爐，以及來自醫院、研究與工業用途之放射性廢棄物。

- (2) 處置場封閉工作包括了回填材料的設置，並在選定的位置進行封塞（plug），降低水滲入廢棄物，並阻止人類的闖入。封塞主要設置在聯絡坑道（access tunnels）與聯絡井（connecting shafts），且所有的坑道將予以碎石（macadam）回填。聯絡坑道上部係以石塊填滿，並以混凝土封塞（concrete plug）予以封閉。最後，地表面將予恢復並融入周遭景觀。此外，所有在SFR的鑽孔都將密封以確保周遭母岩的地下水不受影響。
- (3) 為了確保SFR處置設施系統之封閉後處置安全，訂定以下2項安全原則：1.限制處置之長半化期核種活度為先決條件，各處置設施之工程障壁系統可依據其所處置總活度進行設計；2. 處置設施藉由其工程設施與周圍環境之障壁功能來達到遲滯核種目標。
- (4) SR-PSU利用十個步驟之方法來進行處置設施的長期安全評估，分別為：特徵事件作用篩選、場址與設施初始狀態描述、描述外部狀態、描述內部作用、界定安全功能、輸入資料彙編、分析參考演化、選定情節、分析選定的情節及結論。

### 2.5.3 安全評估

- (1) 處置設施安全功能的界定為安全評估方法的重要論述，其安全功能包含：1.對應於限制長半化期核種的活度之安全功能為限制活度量；2.對應於遲滯核種之安全功能為處置窖內具低流量（low flow in waste vaults）、母岩內具低流量（low flow in bedrock）、好的遲滯（good retention）、避免處置場周邊有水井（avoid wells in the direct vicinity of the repository）。
- (2) 近場工程障壁之安全功能可分為水力障壁功能與化學障壁功能。水力障壁功能在有效低移流傳輸經過廢棄物；而化學障壁功能最主要在核種遲滯，此外也包含提供高pH、還原環境、低錯合劑濃度、有利的吸附面積等有利於遲滯核種之化學環境。
- (3) 地質圈作用SKB TR-14-05技術報告為說明SR-PSU安全評估所涉及之，包含熱傳作用、水力作用、力學作用、化學作用、核種傳輸作用。其說明為：
  1. 地下水流受母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、處置場幾何形貌、裂隙與孔隙幾何形貌、地下水組成、結構與零星物質、飽和度等之直接影響。母岩之應力與裂隙礦物會透過裂隙與孔隙幾何形貌間接影響地下水流。
  2. 地下水流會直接影響母岩溫度、地下水壓力、氣相流體、地下水組成、飽和度。



透過地下水組成與地下水壓力間接影響裂隙與孔隙幾何形貌、透過地下水壓力間接影響母岩應力、透過地下水組成間接影響母岩礦物與裂隙礦物。

- (4) 生物圈核種劑量評估考慮空氣，土壤和水傳輸途徑，藉由各種評估模式分析廢料體、近場、遠場之核種傳輸，然後模擬得到進入生物圈的核種濃度，再利用核種劑量係數（Dose coefficient）與食物攝取率等參數計算對於人體輻射劑量。

### 第三章 國內潛在場址之場址特性調查成果蒐集

總統於 95 年 5 月 24 日公布「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」，並明定經濟部為選址主辦機關，成立處置設施場址選擇小組（選址小組），使最終處置選址工作得以順利推動，以徹底解決我國低放射性廢棄物處置課題，維護國家永續發展兼顧民眾安全健康與環境保護。

低放射性廢棄物最終處置設施場址遴選工作，經濟部於民國 98 年 3 月 17 日公告「低放射性廢棄物最終處置設施建議候選場址遴選報告」以「台東縣達仁鄉」及「澎湖縣望安鄉」等 2 處作為建議候選場址。行政院農業委員會 98 年 9 月 23 日核備澎湖縣政府公告東邵嶼為「澎湖南海玄武岩自然保留區」，「澎湖縣望安鄉」之建議候選場址因多數地區已被納入保留區而依法不得開發，經重新票選後，經濟部於 101 年 7 月 3 日核定公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」等兩處低放射性廢棄物最終處置設施潛在場址。選址小組後續針對兩處公告之潛在場址，依據選址作業者提出之初步評量成果，進行遴選工作，完成「建議候選場址遴選報告」。

#### 3.1 台東縣達仁鄉

有關台東縣達仁鄉潛在場址之調查，台灣電力公司於 98 年 6 月提出「低放射性廢棄物處置設施功能模擬評估（A版）」，此報告屬初步安全評估工作第一階段—建立評估方法，其內容主要依據可取得之場址特性資料進行處置設施初步設計，藉由分析場址所在地區之氣候、地形、地質、水文地質與處置設施設計功能等特性，評析處置場多重障壁系統可能遭遇之狀況與其對應之安全防護功能，據以建立初步安全分析需進行評估之模擬「情節」。依適合場址特性與處置設施功能之模擬情節，發展處置設施功能評估概念化模型，並依概念模型特性評估其所需之數值模式，以此成果作為第二階段評估建議候選場址各種設計情節與替代情節之技術基礎，評估檢討多重障壁設計之安全性。而後續陸續提出更進一步的報告，「低放射性廢棄物處置設施功能模擬評估（D版）」為目前最新的報告，其中有關場址特性大致依審查導則要求之項目撰寫。

另外，台灣電力公司近期完成之階段性報告「址特性參數評估報告」（台灣電力公司，104a），針對達仁鄉建議候選場址蒐集過去相關參數資料，並依據放射性物料管理局「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則（第0版）」中之「場址之特性描述」共 13 個主要項目，總計 173 個參數細項逐一討論。參數主要來源係蒐集台電前期報告以及相關國內外文獻，本場址過去曾由台灣電力公司委外進行部分的場址調查，調查項目包含地理、水文、地表地質等。其中尚未完善之參數，如核種於達仁處置環境中之化學型態與性質、場址所在位置之地工材料特性等；或隨時間演進需重新調查之項目，如氣象參數、社會經濟參數等，仍待後續的場址調查計畫協助予以特徵化。

## 3.2 金門縣烏坵鄉

本場址於民國99年重新公告遴選場址後，才成為潛在候選場址，台灣電力公司之報告「低放射性廢棄物處置設施功能模擬評估」在前幾版之報告，有關場址之調查主要以「澎湖縣望安鄉」及「台東縣達仁鄉」之潛在場址為主要調查對象，「低放處置設施功能模擬評估報告（D版）」（103年）於附錄之方式簡要的概述呈現。

台灣電力公司對於此場址之相關調查，近期有「址特性參數評估報告」（台灣電力公司，104b），此報告亦屬於階段性報告，其針對金門縣烏坵鄉之潛在場址蒐集過去相關參數資料，並依據放射性物料管理局「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」及「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則（第0版）」中之「場址之特性描述」共13個主要項目，總計173個參數細項逐一討論，參數主要來源係蒐集台電前期報告以及相關國內外文獻。另外，本場址曾於2000年由台灣電力公司委託工研院能資所進行詳細的場址調查，調查項目內容包括烏坵地區地震評估(第一階段研究)報告(工研院能資所，1999)；小坵優先調查候選場址-場址調查報告(工研院能資所，2000a)；烏坵地區海域地球物理探測(工研院能資所，2000b)；小坵地質圖(1/1000)說明書(工研院能資所，2000c)；小坵地區場址地質鑽探報告(工研院能資所，2000d)；小坵地表地球物理探測地電阻影響剖面調查工作報告(工研院能資所，2000e)；小坵地表地球物理探測折射震測工作報告(工研院能資所，2000f)；小坵地表地球物理探測重力測勘工作報告(工研院能資所，2000g)；小坵孔內地球物理探測孔內攝影工作報告(工研院能資所，2000h)；烏坵地區地震評估(第二階段研究)報告(工研院能資所，2000i)；烏坵地區地震評估報告(包含第一階段及第二階段成果)(工研院能資所，2000j)；地表水文調查工作報告(工研院能資所，2000k)；單井水力試驗工作報告(工研院能資所，2000l)；單井追蹤稀釋擴散試驗工作報告(工研院能資所，2000m)；小坵既有水井現況調查工作報告(工研院能資所，2000n)；地化調查土壤及岩石採樣分析報告(工研院能資所，2000o)；地工調查分項工作報告(工研院能資所，2000p)；小坵地下水位監測報告(工研院能資所，2000q)。其中尚未完善之參數，如核種於小坵處置環境中之化學型態與性質、疑似斷層之存在性與活動性等；或隨時間演進需重新調查之項目，如氣象參數、社會經濟參數等，仍待後續的場址調查計畫協助予以特徵化。

## 第四章 台灣近岸與離島坑道處置場址特性調查審查假想案例建置

本章盤點兩處候選場址「場址特性參數評估報告」（階段性報告，尚未定稿）（台灣電力公司，104a; 104b）之特性參數，如前章所述，特性參數共計十三大項（社會與經濟；地形與地貌；氣象；地質與地震；地表水；地下水；地球化學；天然資源；生態；輻射背景偵測；大地工程特性；交通狀況；其他）、173個參數。為與國外場址調查成果比較，本章依據TR14-01報告場址特性描述方式，分別說明兩處候選場址（達仁鄉與烏坵鄉）之場址初始狀態與正常演化。其中，初始狀態場址特性描述則是改依照TR14-01報告提供之順序（2.2.3節）依序出現。

### 4.1 台東縣達仁鄉

#### 4.1.1 初始狀態

##### （1）氣候

盛行風向受季節性變化影響，冬季盛行北至北北東風，夏季盛行南至西北風。夏天易遭颱風侵襲帶來大量雨量，冬天則因東北季風南下，細雨綿綿，溫度較低。

##### 1. 溫度及降水

本區域夏天易遭颱風侵襲帶來大量雨量，而冬季則幾乎無雨，豐枯十分明顯，一般而言雨季多在5月至10月，以場址區域附近之壽卡站雨量記錄為例，平均年雨量約為3,420.7 mm。長年各月平均雨量分布見圖4.1所示。年平均溫度約在24.9°C左右，平均相對濕度約為74.8%，年平均最高氣溫為28.7°C，年平均最低氣溫為21.8°C。

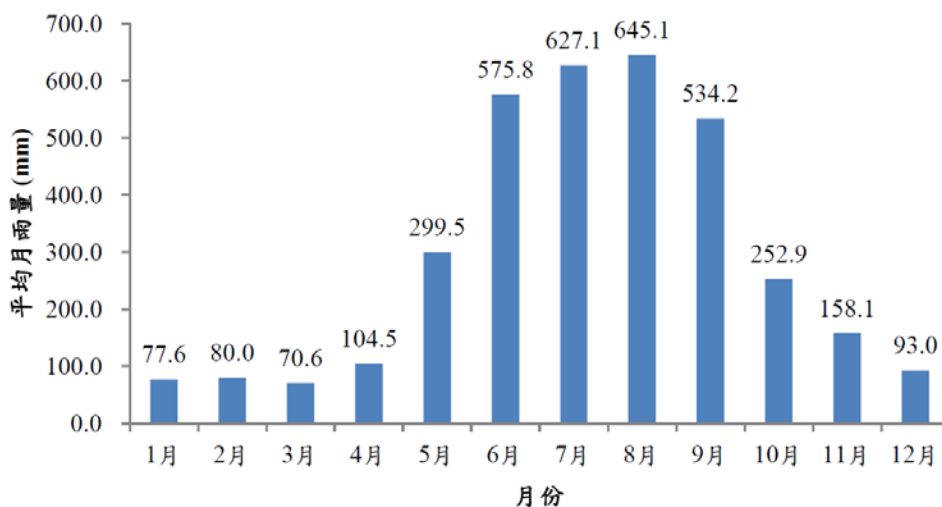


圖 4.1 達仁鄉建議候選場址鄰近區域之歷年平均月雨量分布圖。

## 2. 歷史氣象資料

依中央氣象局發布之颱風資料，統計 1897 年~2014 年間之颱風侵襲資料，侵台颱風路徑大致可區分為 7 類，場址受颱風直接侵襲之機率約為 31%。鄰近之水文測站實測一日最大降雨量為壽卡測站之 1,142 mm。依海象資料顯示，場址接收港外海波高達 1.5 m 以上之天數約為 102 天，風速高於每秒 10 m 以上之天數約為 37 天。依據中央氣象局颱風資料，統計 1965-2014 年間侵襲東經 120.0 度至 121.6 度、北緯 21.8 度至 23.4 度範圍內的颱風數量，50 年間總計 66 個颱風經過該區域範圍，因此颱風的發生頻率為 1.32/年。

歷史降水量資料以水利署壽卡雨量站為來源，本測站經緯度為 120°49'39.50" E、22°14'49.35" N，標高 420 m，屬楓港溪流域。表 4.1 蒐集 1980 年至 2013 年的降雨資料，記錄期間最大單月降雨量為 2,171 mm，發生於 2009 年 8 月。而單日最大降雨量係 1,142 mm，發生於 2009 年 8 月 8 日。

歷史最高溫、最低溫、最大平均風速(蒲福風級)以中央氣象局大武站為來源，本測站經緯度為 120°53' 44" E、22°21' 27" N，表 4.2 整理了 1999 年至 2014 年的歷史資料。由蒐集的資料可知，本時間區間內，最高氣溫為 39.2 度，發生於 2003 年 5 月及 2010 年 7 月；最低氣溫為 11.3 度，發生於 2004 年 1 月；最大平均風速為 10 級(量測風速為 25.2 m/s)，發生於 2012 年 8 月 24 日。

表 4.1 歷年降水量統計資料

歷年統計資料 (自 1980 年至 2013 年)						
	一月	二月	三月	四月	五月	六月
平均月雨量	77.6	80.0	70.6	104.5	299.5	575.8
最大月雨量	165.8 (1989)	218.0 (2012)	173.2 (1983)	268.0 (1998)	709.0 (2001)	1,339.0 (2012)
最小月雨量	16.2 (2000)	0.0 (1999)	1.0 (1999)	22.0 (1995)	42.0 (2003)	71.0 (1992)
	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
平均月雨量	627.1	645.1	534.2	252.9	158.1	93.0
最大月雨量	2,045.0 (2005)	2,171.0 (2009)	1,789.0 (1991)	1,076.0 (1998)	500.0 (2003)	381.0 (2001)
最小月雨量	38.0 (2007)	27.0 (1999)	76.3 (1984)	12.0 (2004)	8.0 (2004)	0.0 (1999)
	平均年雨量		最大年雨量		最小年雨量	
	3,420.7		5,551.0		1,215.0	

表 4.2 1999 年~2014 年最高溫、最低溫、最大平均風速 (蒲福風級)

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
歷史最高溫	32.4	33.7	36	38.6	39.2	38	39.2	37.8	36.3	34.3	34.5	30.5
歷史最低溫	11.3	13.3	11.8	16.9	18.2	19.5	22.5	22.8	21.5	18	13.6	11.7
最大平均風速	5	5	5	5	5	6	6	10	7	6	6	5

## (2) 地表系統

### 1. 地形

台東縣達仁鄉潛在場址地區屬於中央山脈南段延伸，東臨太平洋，北、西、南緣以河流或山脈稜線為界，場址地區地形南北兩側主要以達仁溪與塔瓦溪為界，東西側則以太平洋與山脈稜線為界，地勢由東往西逐漸升高，高程可爬升至 200 m。主要水系為一無名溪，平常時無流量，另有些許山溝分布，其上游河床以巨石散佈為主，至中下游則為礫石河床，具東部河川坡陡、湍急之特性。場址區域之空拍照片如圖 4.2 所示。



圖 4.2 達仁鄉建議候選場址空拍照片。

### 2. 地表水文系統及水化學

台東縣達仁鄉地形主要分別受北側之達仁溪及其支流與計畫區南側之塔瓦溪及其支流兩條河流及其支流所切割，均屬急流河川，河床分布大小礫徑之礫石，具東部河川坡陡、湍急之特性，並無天然湖泊，場址鄰近流域概況如圖 4.3 所示。

區域內並無環保署設立之水質監測站，鄰近相關之測站有楓港河流域巴士墨段橋測站以及四重河流域石門村過四重溪水泥橋兩站，楓港溪及四重溪雖然往西流注入巴士海峽，然而源頭均與達仁溪以及塔瓦河流域接近，因此目前水質特性均參考兩站成果，表 4.3 為兩站 2014 年 11 月監測成果。

而達仁場址在受到極端氣候影響下，本場址推估最大可能降雨(PMP)為 1,908 mm，達仁溪最大可能洪水(PMF)為 526 cms，場址預定洞口處之野溪最大可能洪水為 127 cms，造成之影響主要在於短時間內地表水逕流大幅度增加，而造成淹水等影響。對於地下水影響程度較小，目前並無現場入滲曲線資料，因此未來待現地試驗完成後，將重新評估在極端氣候下地下水文可能產生之變異程度。水化學方

面，雨水水質資料如所表 4.4。現有水井水質資料如表 4.5。

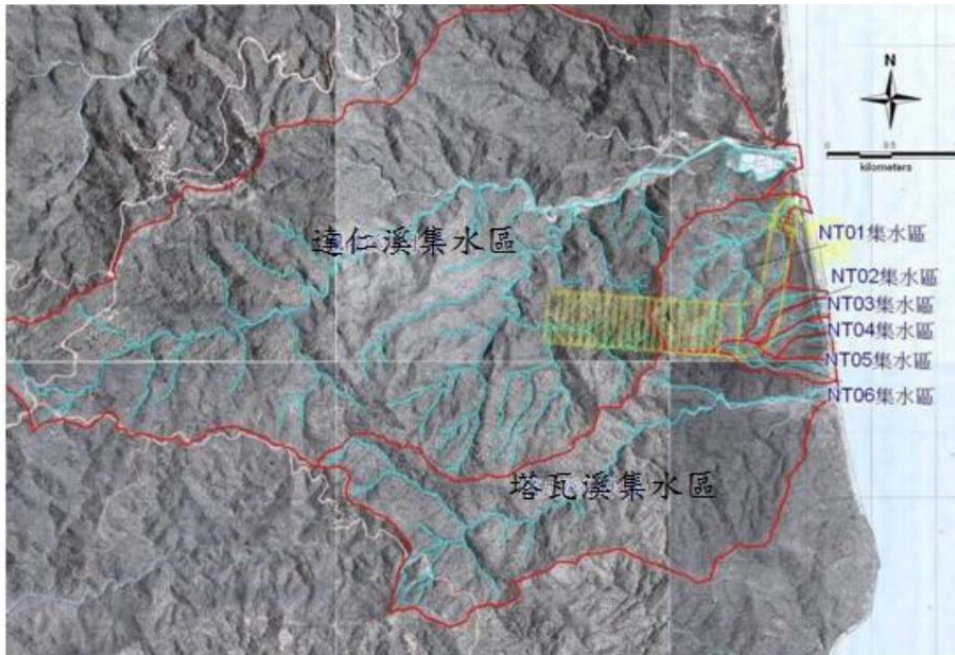


圖 4.3 台東縣達仁鄉建議候選場址流域概況圖。

表 4.3 計畫區域鄰近水質監測站水質成果表

河流	測站	河川污染指數	溶氧 (電極法)	生化 需氧量	化學 需氧量	懸浮 固體	大腸 桿菌群	氨氮
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	CFU/100ml	mg/L
楓港溪	巴士墨段橋	1.0	8.3	<1.0	<4.0	3.0	40	0.02
四重溪	石門村過四重溪水 泥橋	1.0	9.2	<1.0	<4.0	2.5	220	0.01

表 4.4 台東地區雨水水質資料

離子/項目	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	pH
濃度/數值	1.58E-4	2.98E-5	8.48E-5	6.45E-5	9.50E-6	1.27E-5	5.2

資料來源：台灣酸雨資訊網

表 4.5 現有水井水質檢驗成果表

日期	時間	場址	樣品說明	測試結果				
				水溫 °C	pH	導電度 μS/cm	容氧 mg/L	ORP mv
93/09/08	16:00	台東縣達仁鄉	南田村魚塢旁地下水井(貯水塔) #1	26.7	6.7	190	4.4	169
			南田村魚塢旁地下水井(Fresh pumping) #1	26.7	6.3	189	3.1	220

### 3. 海洋生態系統

場址鄰近區域之生態地圖如圖 4.4 所示。目前僅有於民國 93 年 8 月下旬所進行之陸域及水域生態調查結果，調查範圍為開發預定地及其周圍外推 500 m，目前暫無海洋生態系統資料。

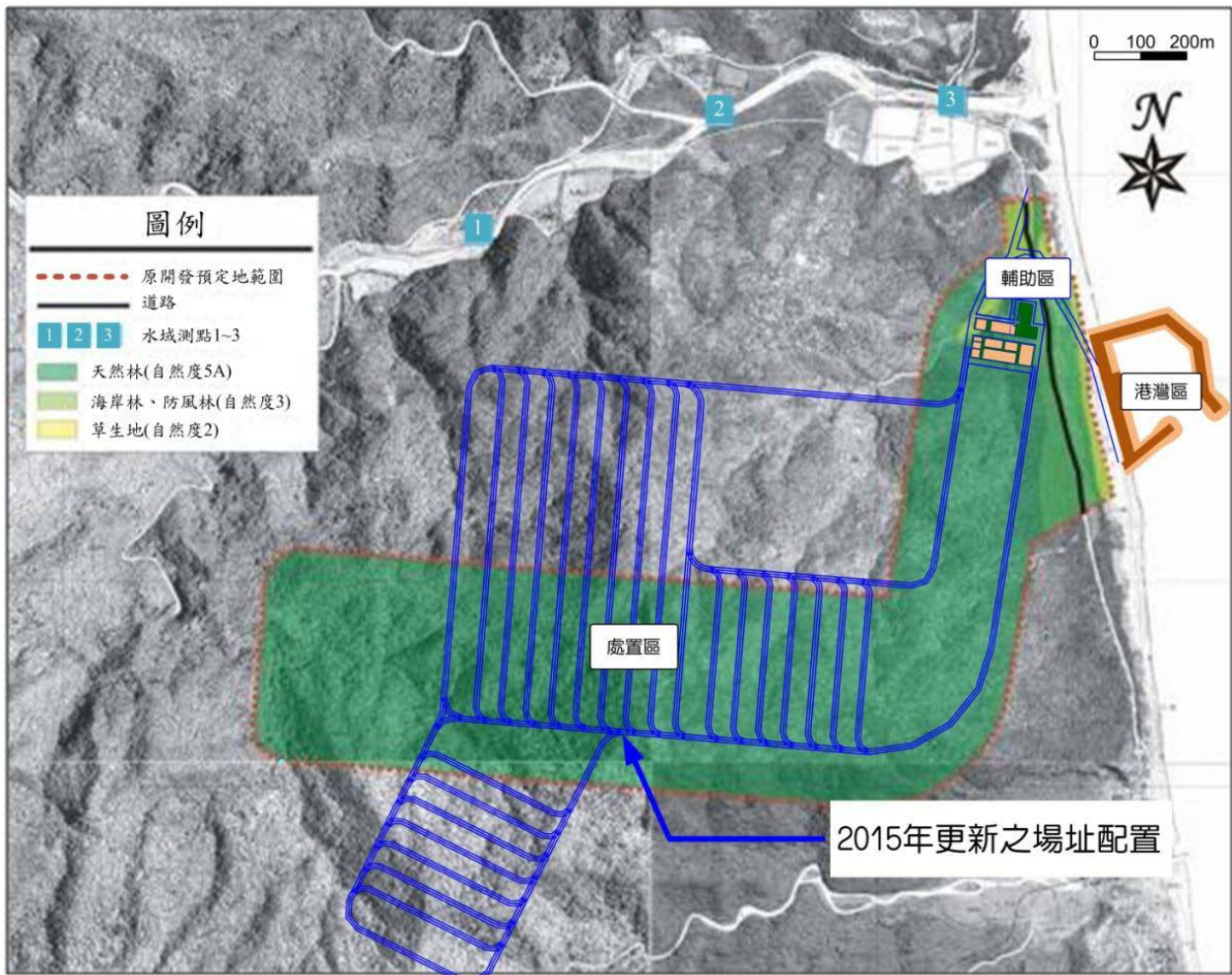


圖 4.4 台東縣達仁鄉建議候選場址自然生態調查範圍圖。

### 4. 淡水生態系統

場址北側達仁溪中選擇三測站進行魚類調查（測點如圖 4.4 之分佈），共發現 3 目 7 科 11 種 855 隻次。所發現魚種以日本禿頭、湯鯉為較優勢物種。

底棲無脊椎生物調查共發現 7 科 16 種 229 隻次底棲無脊椎生物，均為節肢動物門（arthopoda）、甲殼綱（crustaceae）之無脊椎生物，其中海蟑螂屬於等足目，其餘物種均為十足目。所發現物種均為台灣東部河川下游至出海口常見物種，其中台灣絨螯蟹為台灣特有物種並具有洄游性。

水生昆蟲方面，調查結果共發現 6 目 12 科 13 種水生昆蟲，於 3 測站中，每平方公尺採集得 6~81 隻次，均為普遍常見物種。本流域整體物種組成以溪流演替先



驅物種（如搖蚊科、四節蜉蝣科等）為主，亞極相物種（如網石蛾科）次之，極相物種（如長角泥蟲科、幽蟪科）較少，顯示目前本流域生態環境處於較不穩定期，此與季節性河川流量的變化多寡可能有關。

浮游性植物及附著藻類調查共記錄一般藻類 5 屬 6 種，矽藻類 4 屬 5 種，各測站均以綠藻類之布朗葡萄藻最為優勢，矽藻類的肘狀針杆藻及谷皮菱形藻數量次之。由於達仁溪之水量尚稱豐沛，水質清澈，所以出現的藻類也以喜歡生長於較清淨水域的矽藻類與綠藻類最多；雖有喜歡生長於汙濁水域的藍藻類出現，但數量較少。各測點之藻類總數在每公升 4,540~5,300 之間，尚未形成藻華現象，屬一般溪流正常範圍。

浮游動物共記錄到浮游動物 4 門 7 種，其中以輪蟲動物門最為豐富。所發現物種均為河川中下游普遍常見物種。

## 5. 陸域生態系統

### A. 陸域動物生態

哺乳類調查結果一共記錄到 7 目 9 科 10 種 55 隻次。本場址調查僅發現 2 種珍貴稀有（二級）保育類哺乳動物台灣獼猴、山羌；本區域優勢之地棲哺乳類動物為赤腹松鼠、台灣獼猴、臭鼩等，翼手目以東亞家蝠最多，為平地至低海拔山區普遍常見之物種。

鳥類調查結果共發現 10 目 29 科 47 種 328 隻次。場址內共發現珍貴稀有（二級）保育類鳥種 3 種，分別為大冠鷲、翠翼鳩、畫眉；應予（三級）保育鳥類則發現 2 種，分別為烏頭翁、紅尾伯勞；至於一級保育鳥類則沒有發現紀錄；所發現的 47 種鳥類中，共發現 2 種夏候鳥（黃頭鷲、家燕），以及 7 種冬候鳥（東方環頸鴿、金斑鴿、磯鶇、灰鶇、紅尾伯勞、藍磯鶇、黑臉鶇）具有遷徙屬性，其餘則均為留鳥（包含 2 種籠中逸出鳥家鴿、家八哥），區域內的優勢種群依序為麻雀、洋燕、綠繡眼、小雨燕、斑頸鳩。本地區的鳥類相十分豐富，大致以平地至低海拔之山鳥為主要組成。多樣化的棲地如樹林、灌叢及開闊地均吸引了適應不同生態棲位之鳥類棲息，但多為普遍常見之種類。由於本區缺乏水域環境，因此本區以陸生性鳥種為主。

兩生類與爬行動物類方面，本場址兩生類調查結果發現 5 科 9 種 141 隻次，爬行動物類則有 5 科 9 種 48 隻次。其中發現 4 種珍貴稀有之二級保育類兩棲爬行動物，分別為黑蒙西氏小雨蛙、虎皮蛙、褐樹蛙、眼鏡蛇；兩棲類中以澤蛙、小雨蛙、日本樹蛙及黑蒙西氏小雨蛙數量較多；爬蟲類則以蠍虎、股鱗蜥及斯文豪氏攀蜥之數量較多，多出現於天然林環境邊緣及產業道路附近。

本場址蝶類調查共記錄 5 科 13 亞科 77 種 721 隻次。其中有 3 種台灣特有種蝶類，分別為長尾麝鳳蝶（台灣麝香鳳蝶）、台灣玄灰蝶（台灣黑燕小灰蝶），

保育類蝶種則無發現紀錄；長翅弄蝶（淡綠弄蝶）、玉帶鳳蝶、亮色黃蝶（台灣黃蝶）、紅珠鳳蝶（紅紋鳳蝶）、藍灰蝶（沖繩小灰蝶）為此處的優勢物種。

## B. 陸域植物生態

本區植物屬於亞熱帶雨林之榕楠林帶及楠儲林帶交界，本調查區域包含海岸林帶及山區森林，加上人為干擾低，物種多樣且豐富。於調查範圍內一共發現 106 科 490 種物種，其中蕨類植物 23 科 44 屬 77 種；裸子植物 2 科 2 屬 2 種；雙子葉植物 65 科 234 屬 339 種；單子葉植物 16 科 52 屬 72 種。調查期間並無發現屬「文化資產保存法」公告之珍貴稀有植物，惟依據環保署所公告之植物生態評估技術規範，本區發現 1 種稀有物種：鵝鑾鼻鐵線蓮，屬於第一級，本物種主要分布在恆春半島沿海地區。

## 6. 井及水資源管理

針對計畫區域進行實地的初步勘查，並未發現本區域有大量抽取地下水的情形，根據與當地居民訪談的結果，本區域主要水源係當地居民直接引取山泉水，地下水開發的行為並不多，沿著台 26 線公路以及達仁溪出海口，有養殖魚塭分布，經訪查主要的養殖種類為蝦，養殖水源來自海水，另外加少許的淡水，淡水主要則來自地下水。

本區域在場址北側達仁溪下游南岸有魚塭，主要養殖為蝦，魚塭初步查訪有兩口水井，水井位於達仁溪的河道，井深約為 4m，井徑為 4 英吋，每口井的出水能力約為 400CMD，由於水井的深度相當淺，因此可以判定地下水的補注水源主要來自水井北側河道的滲漏，初步的地下水水質檢測資料表 4.5。

## 7. 人口及土地利用

本場址位達仁鄉南田村，本鄉北接台東縣大武鄉；西鄰屏東縣獅子鄉；南與屏東縣牡丹鄉旭海村相毗，相關鄉鎮行政區域圖如圖 4.5 所示。因此本節將對場址所在鄉鎮台東縣達仁鄉，以及周邊鄉鎮台東縣大武鄉、屏東縣牡丹鄉及獅子鄉進行人口資料之評估。

根據民國 70 年至 103 年人口統計資料顯示，台東縣達仁鄉及台東縣大武鄉之總人口數呈緩慢減少的趨勢。依據 103 年戶政統計資料顯示，台東縣達仁鄉平均人口密度約為每 12 人/km<sup>2</sup>，共計有 1,463 戶，共 3,721 人。台東縣大武鄉計有 2,526 戶，共 6,565 人。本鄉 103 年平均人口密度約為每 95 人/km<sup>2</sup>。綜合資訊研判台東縣達仁鄉及台東縣大武鄉人口未來發展趨勢應為輕微減少。

根據民國 70 年至 103 年人口統計資料顯示，屏東縣牡丹鄉及屏東縣獅子鄉之總人口數呈緩慢減少的趨勢。依據 103 年戶政統計資料顯示，屏東縣牡丹鄉計有 1,863 戶，共 4,864 人，平均人口密度約為每 27 人/km<sup>2</sup>。屏東縣獅子鄉計有 1,507 戶，共 4,882 人，平均人口密度約為每 16 人/km<sup>2</sup>。綜合資訊研判屏東縣牡丹鄉及

屏東縣獅子鄉人口未來發展趨勢應為輕微減少。



圖 4.5 達仁鄉周邊鄉鎮行政區域圖。

人口分布:根據社會經濟統計地理資訊網之資料繪製達仁鄉周遭人口分布圖，並依半徑 5 km 及半徑 10 km 同心圓扇形切割人口分布，其結果請見圖 4.6。

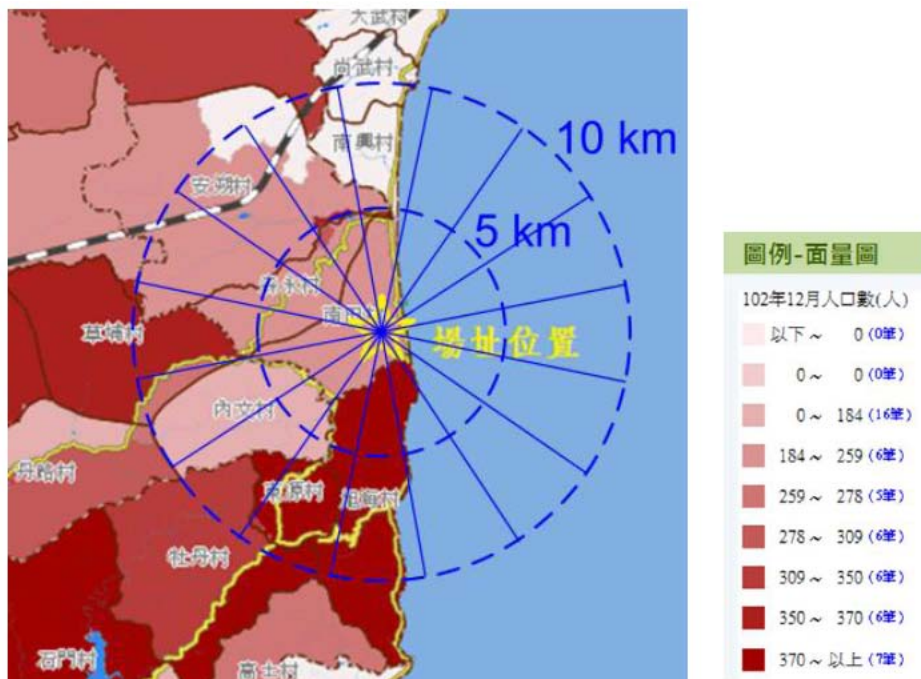


圖 4.6 場址鄰近區域人口分布圖。

土地利用情形方面，依民國 103 年達仁鄉之已登錄土地面積統計（表 4.6），達仁鄉已登錄土地有 30,911.6904 公頃，其中公有土地占 86.25%，私有地占 13.36%、公私共有佔 0.39%。目前編定土地以林業用地占大宗（85.75%），其次為農牧用地（9.04%），建築用地占已登錄土地僅 0.1%，顯示人口集居相當稀少。達仁鄉之人口有 90% 以上屬於原住民，為保障原住民生計、推行原住民行政所保留之土地即劃編為原住民保留地，達仁鄉建議候選場址周遭原住民保留地位置如圖 4.7 所示。場址所需取得之用地以林班地及公有地為主，另有國有設定他項權利與私有土地數筆，其土地均為原住民保留地，依法須取得原住民族同意。

表 4.6 民國 103 年達仁鄉已登錄土地面積概況表

編訂用地名	合計	公有	私有	公司共有
甲種建築用地	0	0	0	0
乙種建築用地	27.0870	2.5339	24.3603	0.1928
丙種建築用地	3.3152	0.3919	2.9232	0
丁種建築用地	0	0	0	0
農牧用地	2,794.5912	976.2841	1,767.3442	50.9628
林業用地	26,508.1879	24,108.7260	2,329.6474	69.8145
養殖用地	0	0	0	0
鹽業用地	0	0	0	0
礦業用地	0	0	0	0
窯業用地	0	0	0	0
交通用地	171.1221	170.8425	0.2795	0
水力用地	104.3405	104.3405	0	0
遊憩用地	0	0	0	0
古蹟保存用地	0	0	0	0
生態保護用地	0	0	0	0
國土保安用地	1,027.3028	1,027.3028	0	0
墳墓用地	6.5300	6.5300	0	0
特定目的事業用地	11.9814	10.9915	0.9769	0.0129
暫未編定用地	257.2325	253.1135	4.1190	0
其他用地	0	0	0	0
都市土地	0	0	0	0
總計	30,911.6904	26,611.0567	4,129.6507	120.9830

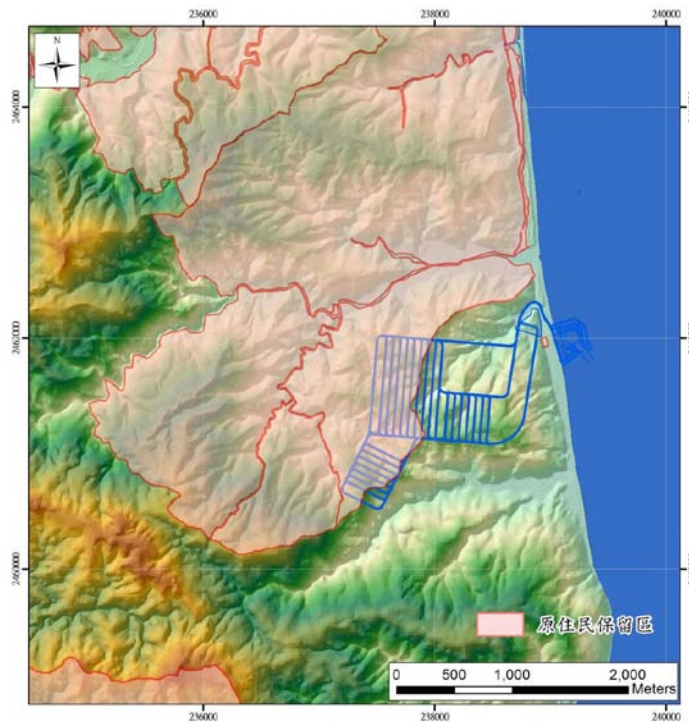


圖 4.7 原住民保留地資訊

### (3) 基岩

#### 1. 岩石種類及岩石域

依據低放射性廢棄物最終處置地質材料對核種遷移之參數研究(原子能委員會, 2010)對場址地區硬頁岩所進行的化學試驗, 可以得到礦物成分、元素組成、離子交換能力、分配係數等地化參數, 整理如下。

礦物成分主要由石英、雲母、高嶺石、綠泥石、長石、與葉臘石組成。主要與微量元素地化組成如表 4.7 所示, 由試驗結果可知主要元素為矽及鋁。陽離子交換容量為  $6.33 \pm 0.17 \times 10^{-5} \text{ eq/g}$ 。分配係數依據禁置標準, 明訂地質介質對鈷及銫之分配係數小於每公克 3 毫升之地區謂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。由於相同元素的同位素具有相同的化學特性, 為使試驗順利進行採用穩定同位素鈷-59 及銫-133。其對鈷與銫的分配係數如表 4.8 所列。

表 4.7 硬頁岩表面化學組成

Elements	Outcropped wt%	std wt%	Embedded wt%	std wt%
Na	2.4	1.81	3.4	0.5
Mg	2.88	1.38	2.51	0.8
Al	18.05	3.47	19.52	4.72
Si	33.6	5.61	35.78	3.33
K	2.56	1.21	3.52	1.69
Fe	1.72	0.64	1.89	0.88
Total	61.22		66.62	

表 4.8 地質介質對鈷及鈾之分配係數彙整表

縣市	鄉鎮	試驗時間	水體來原 岩石樣本	鈷之分配係數 色之分配係數 (每公克毫升)	是否符合 設置規定 (大於每公克 3 毫升)
台東縣	達仁鄉	2007/11	山壁內地下水體 硬頁岩	260.1±29.3 185.9±1.0	符合

## 2. 岩石力學條件

本場址尚未進行詳細鑽探，無法取得岩心及土壤試體以進行試驗，故相關參數尚待未來場址調查完成後，始能取得。因此本場址目前參考附近台 9 線南迴公路安朔至草埔段所進行的隧道地質調查工作（交通部公路總局，2011），其硬頁岩的單位重約在 2.69 至 2.78 t/m<sup>3</sup>之間；岩心單壓強度試驗值在 48.4 至 461.3 kg/cm<sup>2</sup>之間。岩石三軸試驗結果顯示，凝聚力約在 16 至 64 kg/cm<sup>2</sup>之間，摩擦角在 34.8 至 57.9 度之間。靜彈性係數介於 93400 至 628600 kg/cm<sup>2</sup>之間，柏松比介於 0.18 至 0.34。由岩石消散耐久試驗，硬頁岩皆屬中等高耐久性至非常高耐久性。以上參數雖然並非取自場址所在位置之岩心，但仍屬同一區域之相同岩種，應具有初步評估價值。

## (4) 水文地質

### 1. 岩石的水力傳導

由於場址所在地之地質鑽探尚未完成且亦無歷史相關記錄，現地地質條件與可能含水層分層狀況無可供參考之試驗資料，故本計畫參考鄰近區域鑽探成果進行類比推估，參考資料為民國 100 年 11 月交通部公路總局，台 9 線南迴公路拓寬改善後續計畫（安朔至草埔段）新闢四車道工程委託設計（含測量及地質探查）委外地質探查工作成果（交通部公路總局，2011），鑽探地下水位成果顯示地下水位約在表土下方 1.25 m 至 32 m 之間，鑽探成果也顯示在靠近地表下 20 m 大多屬於崩積層，在崩積層以下為硬頁岩、砂岩或砂頁岩互層，因此初步假設場址區域地層可分為兩層，一為靠近表土之崩積層厚度假設 20 m，且為非飽和層，以下為砂頁岩互層為飽和層，未來將待相關現地鑽探及試驗完成後再進行修正。初步參考 Freeze 與 Cherry (1979)，假設各地層之水力傳導係數如表 4.9 所示。

表 4.9 水力傳導係數表

地層	層厚	水力傳導係數 (m/day)
崩積層	20	0.027
砂頁岩互層	-	0.003

## (5) 地下水化學

### 1. 現有地下水組成及來源

達仁溪及塔瓦溪流域並無設置氣象水文站，因此參考場址附近位於屏東縣牡丹鄉的壽卡雨量站雨量資料，參考低放處置設施功能模擬評估報告（D 版）報告成果

(台灣電力公司, 2007), 紀錄資料顯示該區域平均年降雨量為 3,276 mm, 初步假設其年入滲量為年降雨量之 10%。地層內地下水之 pH 值如所表 4.10 列。

表 4.10 達仁場址之地下水體氫離子濃度指數 (pH 值) 調查成果

採樣地點	水樣來源	地下水體氫離子濃度指數 (pH 值)
台東縣達仁鄉	山壁內地下水體	6.82
	山壁內地下水體	6.90
	山壁內地下水體	7.13

## 2. 水組成之初始狀態

現有達仁場址的水化學調查結果, 分為降雨水質、現有水井水質及地層內地下水質; 雨水水質資料如所表 4.4。現有水井水質資料如表 4.5。地層內地下水之 pH 值如所表 4.10 列。

## 4.1.2 正常演化

### (1) 地表系統演化

因本場址鄰近海岸線, 海平面之變化遂成一重要課題。海平面變化 (sea level change) 是一種相對的概念, 指海水面與陸地兩者之間相對的升降變化趨勢、程度與速度。故要探討海平面變化的原因, 應同時由海水面本身的升降及陸地本身的升降兩方面探究。探討海平面及陸地變動時, 又可依觀測時間尺度之長短做不同探討。以下將分別討論場址鄰近區域之海平面升降與陸地升降趨勢。

#### 1. 長期海水面變化

全球海水面在過去 15 萬年的變化趨勢與氣溫變化十分相似, 上次間冰期 (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)。而距今約 2 萬年前的末次冰期, 當時全球海水面較現今低約 120 m, 之後氣候變暖, 海水面一直持續上升至今。初期約從 2 萬年至 1.4 萬年前期間, 平均每千年約 6 m。之後 1.4 萬年到 6,000 年前之間, 海水面上升的速度約每千年 10 m。6,000 年前至今, 海水面的變動則趨於穩定, 沒有太多的變化, 其變動幅度大約在 0.3~0.5 m 之間 (Church 等人, 2001)。陳于高 (1993) 的研究成果顯示, 自 1 萬年前至 4,000 年前之間, 海水面呈現快速上升的趨勢, 上升速率約在每百年 65 公分左右 (即每千年 6.5 m), 大約符合上述的海水面變動速率。謝孟龍 (2005) 運用地質調查所西南部平原岩心資料, 建立台灣 2 萬年至今的絕對海水面曲線, 距今 1.1 萬至 1 萬年前, 海水面上升的速度大約每千年 13 m, 距今 1 萬到 6,500 年前, 海水面上升速度約每千年 8~9 m, 但自 6,500 年前以來, 海水面變動甚微。綜合以上所述, 全球最近 2 萬年至 6,500 年來的海水面變化為每千年 13 m 至 6 m。而最近 6,500 年來海水面相對穩定, 變化幅度不大。

#### 2. 百年內海水面變化

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 於 1990 年發佈的近百年全球海平面上漲曲線圖 (IPCC, 1990) (圖 4.8), 顯示 1880 到 1986 年全球平均海水面大約上漲了 140 mm。依據 IPCC 在 2001 年公佈的「第三次氣候評估報告」(Houghton et al., 2001), 有關海平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, 全球海平面上升速率約 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平面上升速率約為 1.5 mm/yr。劉啟清 (2000) 應用中央氣象局觀測資料分析海水面變化, 台灣地區海平面變動趨勢為東岸下降, 西岸及宜蘭平原上升; 楊任徵 (2002) 排除全球海平面上升趨勢 (1.5 mm/yr) 之後, 依此進一步推估出基隆、台中、高雄、蟬廣嘴、富岡等五特定地點之海水面變遷速率 (表 4.11)。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, 中國國家海洋局分析其結果顯示, 中國沿海各區海水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。因此, 若金馬等離島海平面上升速率以 2.0 mm/yr 計, 排除全球海平面上升趨勢 (1.5 mm/yr) 之後, 地區性海水面變遷推估為 0.5 mm/yr。綜合以上, 在 20 世紀以來的百年間, 全球海平面上升速率約 1.0~2.0 mm/yr。台灣區域約為 1.5 mm/yr。若以驗潮站的資訊推估台灣東部海水面 (台東富岡) 之變化, 則海水面以 5.6 mm/yr 之速率下降。

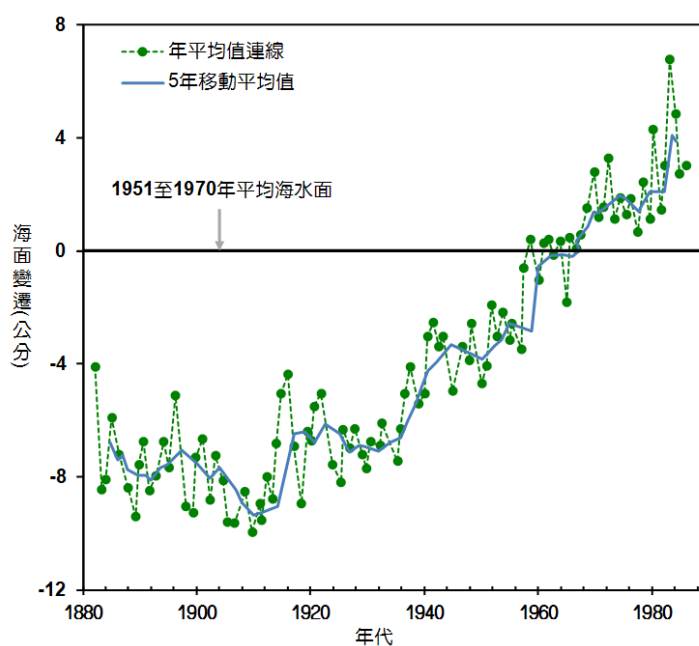


圖 4.8 1880-1990 年全球平均海水面變化曲線。

表 4.11 台灣地區性海平面變遷推估速率

地區	基隆	台中	高雄	蟬廣嘴	富岡	澎湖	金馬
排除全球海平面上升趨勢 (1.5mm/yr) 之後的海平面變遷推估速率 (mm/yr)	-1.1	-0.3	0.7	1.2	-7.1	0	0.5



### 3. 未來海水面變化

IPCC (2013) 對未來百年全球暖化導致氣候變遷所作之預測，2100 年全球海水面可能較目前上升約 1 m。台灣的海水面變化除了受到全球暖化導致的氣候變遷影響外，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) 推估台灣地區的特定地點 2200 年的海水面變化（累積發生機率 99%），2200 年時台東富岡之海水面可能上升 2.5 m。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（表 4.12），結果顯示，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。

表 4.12 未來 15 萬年的全球氣候情境

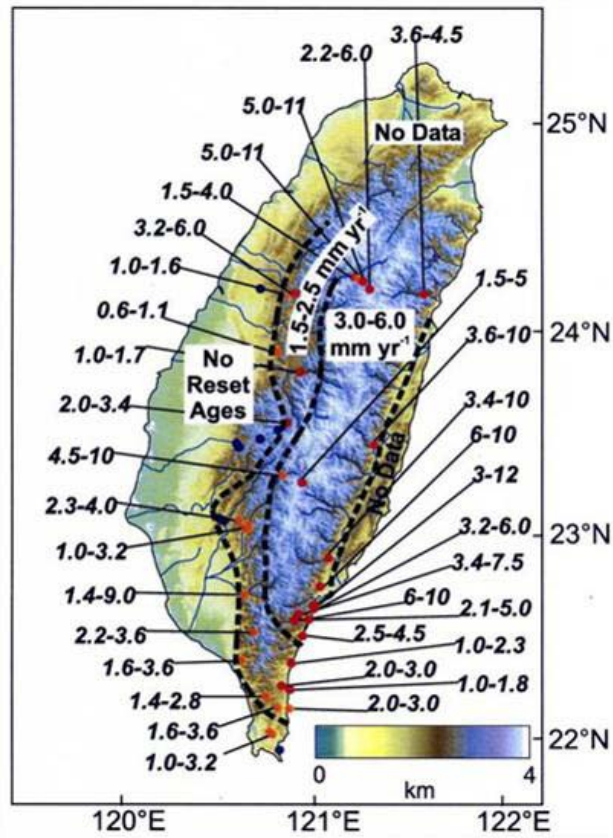
期間 (千年)	氣候特徵
0~5	和目前相近。
5~30	逐漸步入冷期，全球平均氣溫約較目前低約8°C，於未來20~30 千年期間達冰河最大量。 北半球高緯高山冰層開始擴張範圍，最遠延伸至目前波羅的海。 凍原擴及波羅的海南岸及部份Smaland 高地。 期初北半球高緯地區海岸線呈下降趨勢；後期北半球高緯地區地殼承受冰層壓力而呈逐漸下陷趨勢，目前波羅的海沿岸浸入水中。 陸地蓄積冰層使得全球海水面逐漸下降，冰層及凍原擴散範圍僅及於中高緯地區，台灣地區海水面隨全球趨勢，逐漸下降。
30~40	暖期，氣溫快速回昇，但仍較目前為冷，氣溫較目前低約1°C。 北半球高緯地區凍原範圍向北退卻。 冰層融化。 北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。
40~70	進入新的冷期，未來60kyr 氣溫約比目前低約10°C，其後冷期達於最高點，冰層蔓延北半球高緯地區。 北半球高緯地區冰層及凍原範圍向東南擴張；未來60~70千年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。
70~80	暖期，逐漸回暖但仍較目前低約5°C。 冰層及凍原迅速退卻，並小於未來20~30千年期間所覆蓋的範圍。 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100千年氣溫約比目前低約12°C，之後冰河達於最大。 北半球高緯冰層和凍原向南延伸；未來100~110千年期間冰層覆蓋整個斯

	堪地那維亞半島，經俄羅斯蔓延至波蘭和德國北部。 北半球高緯海岸線下降。 台灣地區海水面隨全球趨勢下降。
110~130	間冰期，全球氣溫迅速回暖。 北半球高緯地區冰層和凍原退回至目前範圍。 北半球高緯地區海岸線仍略高於目前位置。 最暖期出現於未來120千年，很可能略高於目前氣溫。 台灣地區海水面回升，但較目前為低。
130~150	開始新的冰期循環。 高緯冰層和凍原開始向中緯地區延伸。 期末可能和未來60~70 千年期間蔓延範圍相近。 台灣地區海水面下降至最低點。

#### 4. 陸地侵蝕速率

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( $\leq 5\text{Myr}$ )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 $3\sim 6\text{mm/yr}$ ，如圖 4.9 所示 (Dadson, 2003)。本場址所在位置，其侵蝕速率約為 $2\sim 3\text{mm/yr}$ 。

短時間尺度之台灣全島陸地物理性侵蝕速率 (圖 4.10) 虛線左側地區年侵蝕速度較低，大部分在 $3\text{mm/yr}$ 以下；虛線右側 (山地部份) 的侵蝕速度平均 $5.5\text{mm/yr}$  (詹新甫, 1985)，與 Dadson (2003) 針對台灣山區標高大於 $500\text{m}$ 之山區平均侵蝕速率為 $6\text{mm/yr}$ 吻合。場址所在山區高程約 $200\text{m}$ ，侵蝕速率應小於較高山區的速率，以長期侵蝕速率 $2\sim 3\text{mm}$ 估算應屬合理。



註：虛線為剝露率等值線；單位：mm/yr

圖 4.9 台灣現代造山運動 ( $\leq 5\text{Myr}$ ) 時期之剝露率。



圖 4.10 台灣侵蝕速率圖。

## 5. 陸地隆升沉降趨勢

台灣位於歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊的縫合線上，菲律賓海板塊與歐亞大陸於上新世中期碰撞，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的沉積物隆起。菲律賓海板塊迄今仍以每年約7cm的速度向西北方向移動，但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，推測最少數千年以來應是處於緩慢隆升甚至沉降的狀況。綜合台灣相關之地殼上升與沉降特性研究，彙整地殼上升與沉降之定量資料說明如下：

### A. 短時間尺度（1,000年以下）

陳惠芬（1984）利用1914-1979年間台灣各三角點的高程變化，描繪出台灣地區地盤相對於海水面的升降情況，本場址係屬於地盤相對抬升區，平均抬升速率約在每年0~0mm間。經濟部中央地質調查所地變動分析報告（2010）整理200年至2008年的精密水準測量資料及GPS測量站資料，場址所在位置隆升率約在-3.97~+0.96mm/yr。

### B. 長時間尺度（1,000年以上）

詹新甫（1985）依據台灣西部地層與中央山脈地層之高差推論，若中央山脈上有中新世至上新世地層沉積，則可推定台灣在更新世造山運動時期的隆升速率在5 mm/yr以上。劉聰桂（1982）推算中央山脈在更新世造山運動時期（0.58~0.128 Myr前）之平均隆升速率達每年 $10.7 \pm 2.2$  mm；而最近60萬年的平均隆升速率為每年約 $8.9 \pm 1.9$  mm。彭宗宏等（1977）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 $5.0 \pm 0.7$  mm。陳于高（1993）估算出恆春半島於近7000年來平均之地殼抬升速率約在每年0~7.7mm，其中恆春斷層上盤（中央山脈區域）之抬升速率在每年0.6~5.9mm之間。Ching等人（2011）統計台灣各區域之短期陸地隆升率（由精密水準測量與連續GPS測站）與長期陸地隆升率（由放射性定年法與核飛跡定年法），建立各區域短期與長期陸地隆升率的關聯性。

## 6. 綜合討論

地形變動對設施位置的影響可就以下三個項目，分別以長時間尺度（1,000年以上）與短時間尺度（1,000年以下）討論：

A. 岩覆厚度：地形隆升與侵蝕後，岩覆厚度僅與該處之陸地侵蝕量有關。場址位置之侵蝕速率如前述，不論時間尺度長短皆以2至3mm/yr計算。因此300年後，設施之岩覆厚度將減少0.9 m；而長時間尺度下，每千年將減少3 m的岩覆厚度。

B. 設施之垂直變動量：在地形變動後，設施之垂直變動量可能影響其與地下水

位面的相互位置。此變動量等於陸地隆升沉降量。短時間尺度之陸地隆升沉降速率為 $-3.97\sim+0.96$  mm/yr，因此300年後，設施之垂直變動量為 $-1.191\sim+0.288$  m；長時間尺度下，由本場址所在區域之短期隆升率 $-3.97\sim+0.96$  mm/yr，Ching等人（2011）推估長期的陸地隆升率約為 $0.0\sim 5.2$  mm/yr，其平均值約為2.6 mm/yr，因此每千年設施垂直變動量為2.6 m。

- C. 設施與海水面相對高程：形與海水面變動後，設施與海水面的相對高程，等於原始高程加上陸地隆升量並減去海水面上升量，即相對高程之變化率等於陸地隆升率減去海水上升率。依據Ching等人（2011）之結果推估300年內之陸地不發生隆升沉降，而根據IPCC（2013）及楊任徵（2002）推估海水面可能上升3 m，因此設施與海水面相對高程將減少3 m；長時間尺度（如1萬年後），陸地平均每千年隆升2.6 m，而海水面於此預測期內可能為冰期，在冰期海水面以每千年6 m之速率下降，故設施與海水面相對高程變化率為每千年8.6 m。

## （2）其他演化

TR-14-01 報告針對 Forsmark 場址之場址特性演化進行了熱流演化、力學演化、水文地質演化、近場水文循環演化及地球化學演化描述。台電目前關於台東縣達仁鄉之場址特性研究僅包括地表系統演化，其他演化尚待後續調查研究予以特徵化。

## 4.2 金門縣烏坵鄉

### 4.2.1 初始狀態

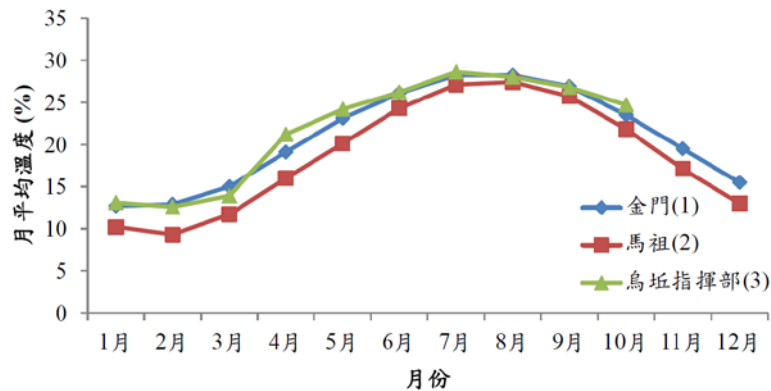
#### （1）氣候

台灣海峽風場存在著明顯的週年變化，一般而言為冬季盛行東北風，夏季盛行南或偏南風。烏坵地區位處台灣海峽，四面環海，氣候受海洋調節，且因其位置臨近大陸湄洲灣外，因此受到大陸及海洋性氣候雙重影響，氣候形態上偏向副熱帶大陸性及海洋性轉換型氣候，季風符合台灣海峽風場的特性（台灣電力公司，2002）。

#### 1. 溫度及降水

本場址依據金門縣農業試驗所 1954 年至 1994 年、馬祖南竿空軍氣象聯隊 1952 年~1991 年與烏坵指揮部 1998 年 1 月至 1998 年 10 月溫度之資料（圖 4.11），月平均最高溫出現於 7、8 月，約  $27.8^{\circ}\text{C}$ ，冬季以 1、2 月份溫度最低，約  $11.1^{\circ}\text{C}$ 。烏坵嶼觀測站 1999 年 5 月至 2000 年 5 月之溫度變化觀測資料，其平均溫度以 2 月最低，為  $9.46^{\circ}\text{C}$ ，7 月最高，為  $26.89^{\circ}\text{C}$ 。此外參考福建氣象報告（海峽西岸城市群協調發展規劃，2006）統計福建區域 1971 年至 2000 年的年平均溫度及四季平均溫度，其統計結果與上述金門、馬祖與烏坵地區的統計結果相近，即年平均溫度約

19°C至21°C間，夏季（7月）溫度約27°C至28°C間，冬季（1月）溫度約11°C至12°C間。

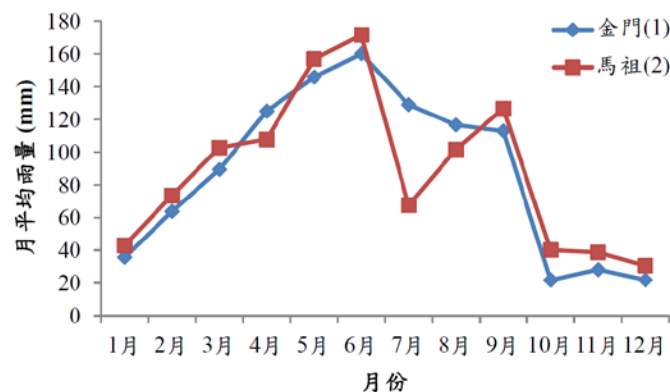


資料來源：

- (1) 金門縣農業試驗所，1954~1994。台灣漁業技術顧問社，復國墩漁港興建規劃報告，1997。
- (2) 南竿空軍氣象聯隊，1968~1977。台灣漁業技術顧問社，馬祖西莒青帆碼頭規劃報告，1995。
- (3) 烏坵指揮部氣象站觀測資料，1998.1~1998.10。

圖 4.11 烏坵附近地區溫度記錄。

降雨方面，依據金門縣農業試驗所 1954 年至 1994 年、馬祖南竿空軍氣象聯隊雨量站 1954 年至 1990 年降雨量之資料（圖 4.12），烏坵附近地區年平均降雨量約為 1,000 公厘左右，屬寡雨區域，降雨集中於每年的 4 至 8 月，其間所降的雨量佔全年降雨量的一半以上，主要的降雨源為夏季的雷雨及夏秋季的颱風；一年中的 10 月至翌年的 2 月降雨不多，為此區域的旱季。此外參考福建氣象報告（海峽西岸城市群協調發展規劃，2006）統計福建區域結果與上述金門、馬祖與烏坵地區的統計結果相近，即年平均降雨量約 1,000 公厘，且降雨集中於春、夏季。



資料來源：

- (1) 金門縣農業試驗所，1954~1994。台灣漁業技術顧問社，復國墩漁港興建規劃報告，1997。
- (2) 南竿空軍氣象聯隊，1954~1990。台灣漁業技術顧問社，馬祖西莒青帆碼頭規劃報告，1995。

圖 4.12 烏坵附近地區月平均雨量紀錄。

## 2. 歷史氣象資料

烏坵地區四面環海，氣候易受海洋調節，但位置靠近中國大陸，無法四季皆領受海風的溼潤空氣，故在氣候型態上偏向副熱帶大陸性及海洋性轉換型氣候。依中央氣象局發布之颱風資料，統計 1897 年至 2007 年間之颱風侵襲資料，侵台颱風路徑大致可區分為 9 類，其統計與路徑詳圖 4.13 所示。金門縣烏坵鄉建議候選場址位於第 2 類、第 7 類與部份第 9 類之颱風路徑上，合計機率約為 24.8%。

由於小坵並無完整之雨量、氣溫及風速紀錄，參考鄰近地區大陸崇武氣象觀測站資料，最大日降雨量為 244.5mm (1990 年 6 月 24 日)；最高溫度、最低溫度及最大風速係參考 1999 年 5 月至 2000 年 5 月之記錄資料，最高氣溫為 32 度，發生於 1999 年 7 月 21 日；最低氣溫為 3.8 度，發生於 1999 年 12 月 22 日。最大風速為 27.3 m/s，發生於 1999 年 6 月 6 日。

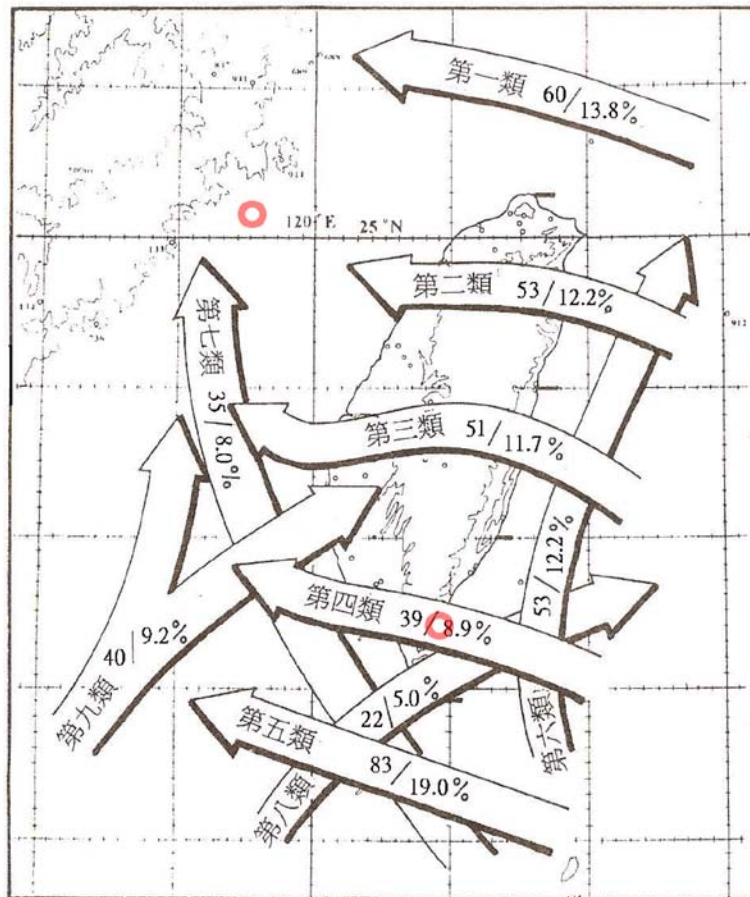


圖 4.13 1897-2007 年間侵台颱風路徑分類統計圖。

### (2) 地表系統

#### 1. 地形

陸地地形：場址周遭區域之地形圖如圖 4.14 所示。小坵陸地之地形，大致可分成三部分，包括面積最大的主島、位於主島南側由多處礁石所組成的南礁，以及主島西側之新郎房無人島。本島之地形特徵，以丘陵緩起伏地貌為主，大部份地區

高度在海拔 5 至 15 m 之間，多處出露侵蝕殘餘之獨立小山；主島東側一線天處為侵蝕崖形成之峽谷地形，南側之礁石群，由高低起伏之巨塊岩石及砂礫灘所構成，漲潮時則僅餘塊岩露出海面。西側之無人島為一獨立小丘，向四面地勢漸低，其脊部略呈西北—東南向延伸。此外，島上有三處地表水體，均在地形低處或海岸峽灣處以人工圍砌而成。

主島形狀略呈三角形，東西方向長約 960 m，南北方向長約 500 m，面積約為 0.27 km<sup>2</sup>。主島地勢以東南側之圓丘型高地為最高，其東南側為海岬礁岩，周圍為陡峭之海蝕崖。西側海岸為較低緩之海蝕崖，南、北兩側地勢較平緩，北側臨海一帶有多處海蝕平台，島中央大部份面積為平緩且呈台地狀之地形。

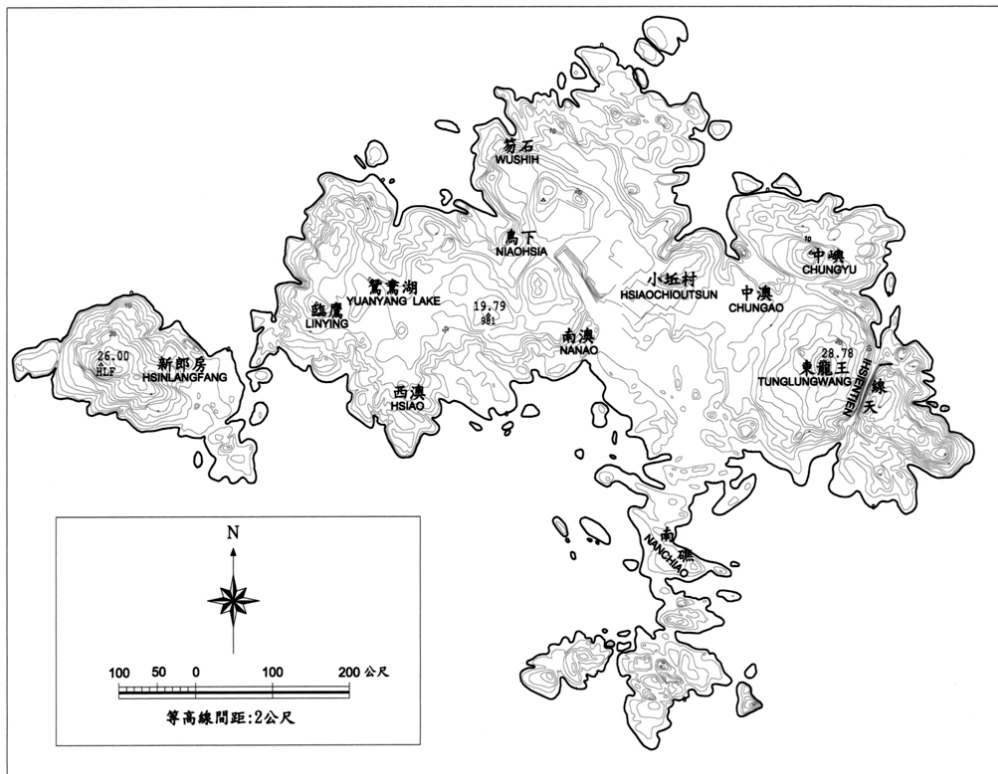


圖 4.14 烏坵場址地形圖。

海底地形：小坵及大坵嶼周邊大部分的海床（圖 4.15），靠近島嶼的部分海底地形較為複雜且陡峭，有些地區是獨立岩礁或為近岸之陡直岩壁，坡度大多超過 1/15；當海床水深到達 25 至 30 m 後，海底地形則漸趨平坦鮮少劇烈之地形起伏，而其坡度大約在 1/60 以下。亦或是構造運動直接造成陸地本身的下陷或抬昇。

場址區域的海床，靠近大、小坵的近岸區海底地形，其地勢起伏變化較為複雜，而距海岸較遠處之大範圍海域則呈現平坦的海底地形，僅在大、小坵的西北側及東南側較為特別，幾乎都是當水深降至 40 m 以下才呈現較為平坦之地勢。除了前述在接近大、小坵的邊緣出現許多水中凸起的獨立岩礁外，在大、小坵間的水道，由小坵附近海域之三維立體海底地形圖上（圖 4.16）亦可明顯看出，有一系列的水中凸起獨立岩礁，沿著小坵向西延伸發展，呈現較為複雜的地形變化。



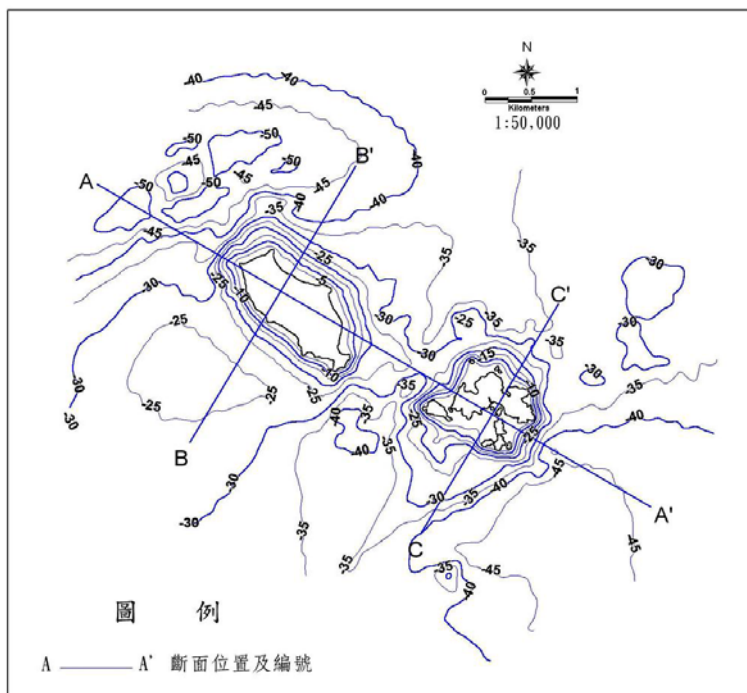
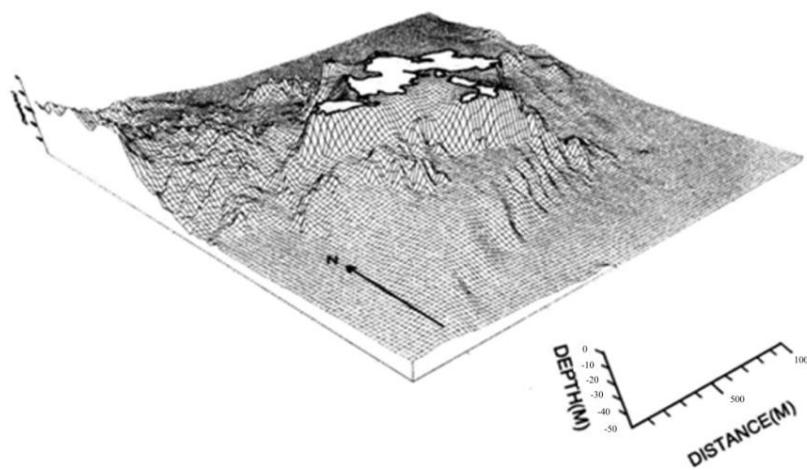


圖 4.15 小坵附近海域海底地形圖。

A. 視角方向為東北



B. 視角方向為西南

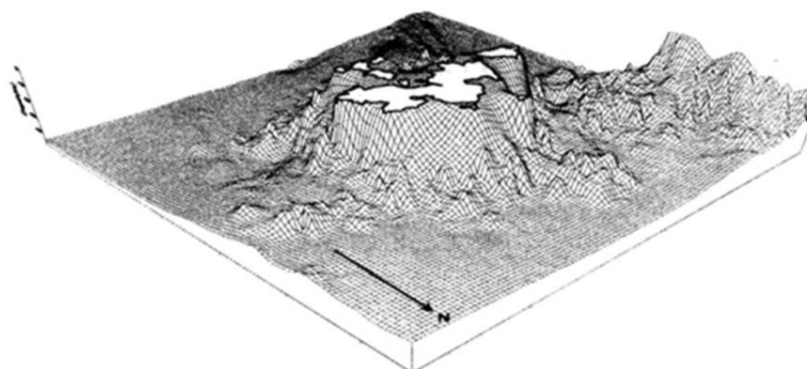


圖 4.16 小坵附近海域三維立體海底地形圖。

## 2. 地表水文系統及水化學

小坵並無河川、湖泊等自然水體，僅有小型人工池塘(工研院能資所，2000k)。陸域表面有接近 65%裸露土地及 29%植生地，地面植生以短小根莖花朵及雜草為主，並無大型樹木叢林，推測地表涵水容量有限。另根據調查得知島上排水渠道依用途不同可區分為三種：A.污水渠道，排放家庭生活污水；B.雨水收集渠道，集水區內收集雨水；C.雨水排放渠道，降雨時排放至大海；排水渠道型式以矩形混凝土結構為主。

根據現場調查結果與相關歷史紀錄(工研院能資所，2000k)，進行地表水文分析，其地表水文特性分析、降雨特性分析、逕流分析等，分述如下：

### A. 地表水文特性分析：

依據小坵地形圖(圖 4.14)與現地踏勘紀錄進行集水區圖繪製(圖 4.17)及分析，進而推求出此地四個主要集水區之逕流係數、地文參數與集流時間等。地表水文特性分析，由於此四個集水區大致均為植生地，其土壤為風化後土壤(粘性土壤)，坡度平均為 7%以上，經查美國水污染防治同盟及美國土木工程學會聯合委員會之設計規範表，採用  $C=0.35$  作為集水區之逕流係數。而在非集水區部份，其地表大致為花崗岩盤，逕流係數較大，平均可達 0.7 以上。

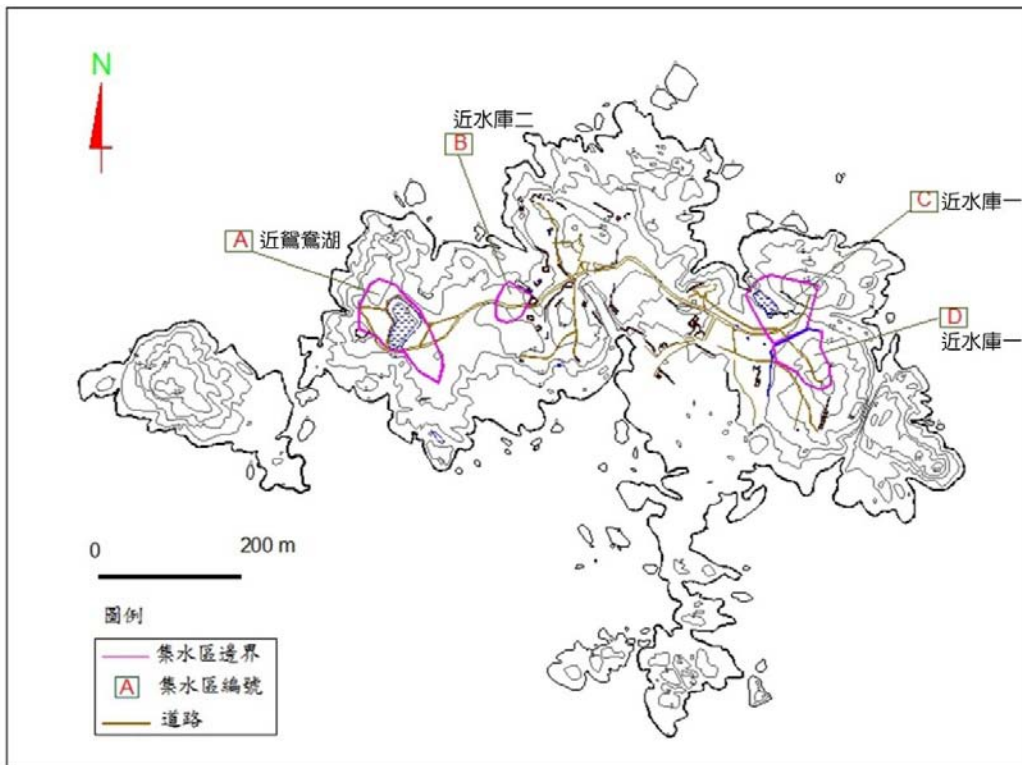


圖 4.17 小坵主要集水區分布圖。

### B. 降雨特性分析：

根據金門、馬祖兩地之降雨強度-延時-頻率曲線(I-D-F)與降雨深度-延

時-頻率曲線 (D-D-F) (工研院能資所, 2000k), 求得小坵之降雨延時強度值。以頻率年 25 年為例 (表 4.13), 小坵在降雨延時為 1 小時之強度為 62.79 mm/hr, 2 小時之強度為 39.925 mm/hr, 3 小時之強度為 32.96 mm/hr, 6 小時之強度為 26.54 mm/hr, 12 小時之強度為 17.92 mm/hr, 24 小時之強度為 10.415 mm/hr。

表 4.13 小坵於頻率年 25 年時之不同延時降雨強度

延時	1 小時	2 小時	3 小時	6 小時	12 小時	24 小時
降雨強度 (mm/hr)	62.79	39.925	32.96	26.54	17.92	10.415

C. 逕流分析:

集水區之逕流量, 經推估結果 (工研院能資所, 2000k), 得到鴛鴦湖及二號水庫較易蓄滿, 一號水庫則因集水區較小及蓄水體積較大, 因此較不易蓄滿。至於非集水區部份, 根據小坵地形圖及實地踏勘, 進行地表面漫地流分析, 並繪製出非集水區之漫地流流向圖 (圖 4.18)。

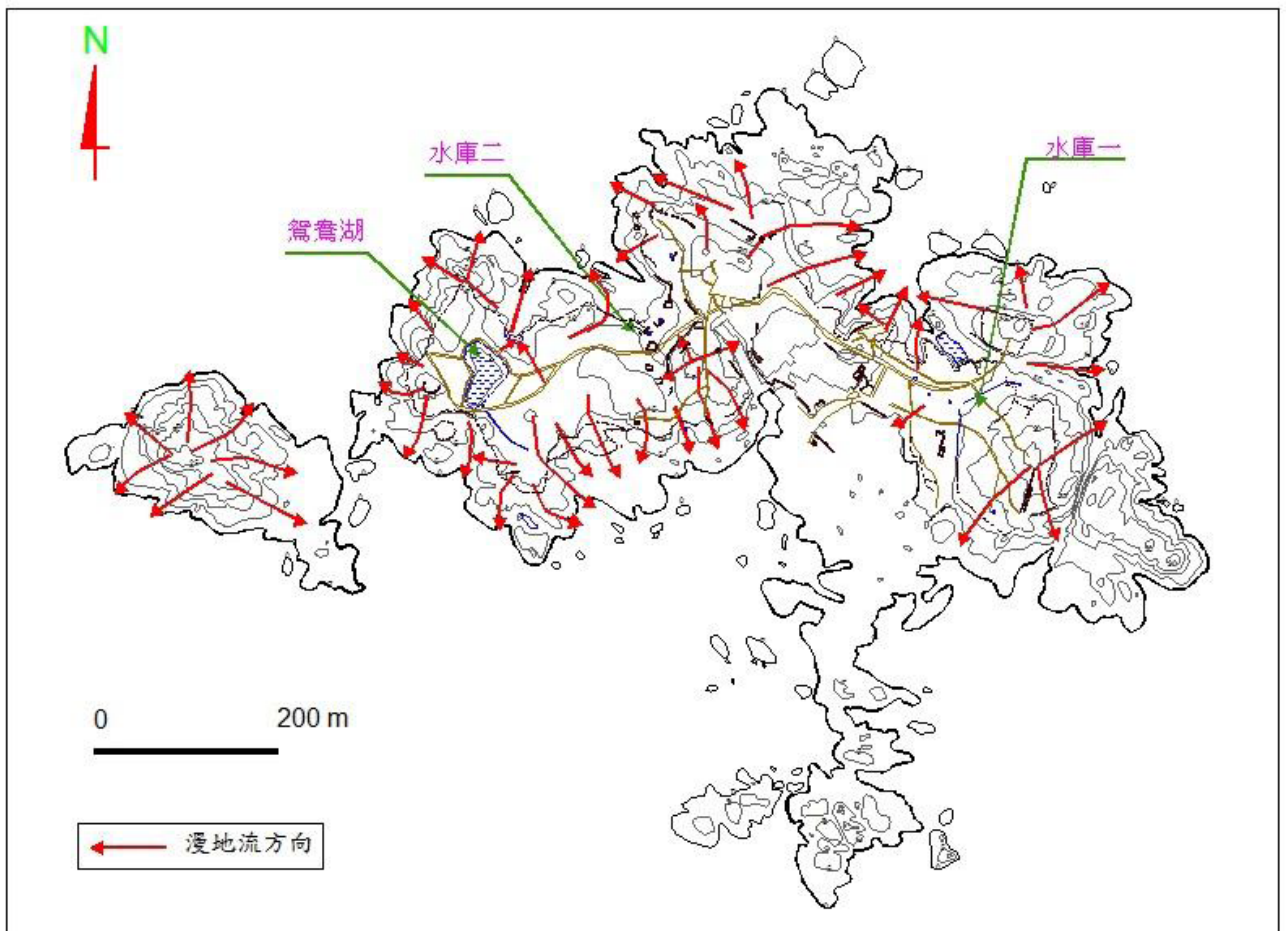


圖 4.18 小坵非集水區漫地流流向圖。

根據鴛鴦湖水樣試驗之結果, 其地表水質特性如表 4.14 所列。

表 4.14 地表水質分析

取樣地點	水溫 °C	酸鹼值	氧化還原電位 mV	比電導度 mS/cm	溶氧量 mg/L	濁度 NTU	透視度 cm	碳酸氫鹽 mg/L
鴛鴦湖	29.5	8.9	484.5	3.07	5.15	10.05	11.8	106.21

### 3. 海洋生態系統

目前僅有於民國 88 年 6 月至 89 年 5 月之陸域及水域生態調查結果，因此未來仍需進一步調查。

魚類方面，發現大鼻孔叫姑魚、黑尾小沙、日本沙、狼牙虎、白帶魚、花身雞魚、臭都魚等 7 種，數量極少。

底棲生物以春秋兩季較多。其中以玉黍螺最為普遍，其次為漁舟蜒螺、海蟑螂、寄居蟹及鱗笠藤壺等。

珊瑚種類組成主要以柳珊瑚和軟珊瑚為主，石珊瑚則僅發現不含共生藻的非造礁珊瑚，珊瑚種類總數共計 10 科 14 屬 18 種。小坵西北和東北方海域的珊瑚族群最佳，其種類最多，同時包含所有調查地點所記錄的珊瑚種類，並且珊瑚密度高，覆蓋率可達 50%，且有一些高度可達 0.4 至 0.7 m 的較大型群體。其次為大坵東南和南方。另小坵東南方海域的珊瑚群聚之覆蓋率則不到 3%。而小坵南方海地較多細泥淤積，未發現活珊瑚，僅見到 2 株死去的柳珊瑚殘骸。

矽藻之細胞密度總量介於 25.28~99.86% 之間。藍綠藻與矽藻互為消長，只於秋冬兩季出現，密度總量介於 38.47~74.55% 之間。金黃藻與甲藻之數量不高，密度總量皆低於 1%。各季之細胞總和介於  $1.62 \times 10^5$ ~ $9.60 \times 10^5$  cells/L 之間。各季所發現之主要優勢藻依序圍角刺藻屬、束毛藻和海鏈藻屬。而次要優勢藻於各季所發現之藻類不盡相同，依序有海鏈藻屬、具槽直鏈藻、角刺藻屬等藻類。各季所發現之細胞種數介於 31~45 種之間。

動物性浮游生物之平均個體量在秋季最高，達  $8.17 \times 10^4$  ind/1000m<sup>3</sup>；其次為夏季之  $5.41 \times 10^4$  ind/1000m<sup>3</sup>、冬季之  $3.25 \times 10^4$  ind/1000m<sup>3</sup>，而以春季最低為  $1.87 \times 10^4$  ind/1000m<sup>3</sup>。平均生體量與個體量相似，亦以秋季最高達 74 g/1000m<sup>3</sup>；依序為夏季之 43 g/1000m<sup>3</sup>、冬季之 41 g/1000m<sup>3</sup>，而以春季最低為 15 g/1000m<sup>3</sup>。由個體量分配情形，皆以橈腳類為優勢種，於春季更高達 86.82%，其他依序為秋季 81.46%、夏季 77.93%、冬季 76.19%。次優勢種大致以水螅水母、箭蟲類及對蝦類為主。

### 4. 淡水與陸域生態系統

目前僅有於民國 88 年 6 月至 89 年 5 月之陸域及水域生態調查結果，因此未來仍需進一步調查。

哺乳類共發現 3 科 4 種 111 隻次。小坵的哺乳類多樣性維持在一定程度，變異

較小，介於 2~4 種之間。所見哺乳類中，除家蝠在空中飛翔之外，其他大致分布於耕作區、草生區、建物區及溝渠。鬼鼠偶見於建物區，家鼠常見於草生地及建物區，臭鼬則廣泛分布各種環境中。

鳥類方面，小坵島發現的 63 種鳥類中，以麻雀為最優勢鳥種，數量最多；依次為黑尾鷗、紅尾伯勞、黑脊鷗、玄燕鷗、藍磯鷗、洋燕、樹雞、黃鶺鴒及家燕。這 10 種鳥類約佔總數的 84.66%，其他 53 種佔 15.34%，這些優勢種類大多由候鳥所構成。所見 63 種鳥類中，無一特有種。特有亞種則有 1 種，即棕背伯勞。施工區域位於小坵，所發現的鳥類中，主要棲息於耕作區、草生地、建物區、池塘、海洋、海岸及空中。依照各種棲地類型來看，分布於耕作區的鳥種共計 7 種，常見的有麻雀及雀科的鳥種；草生地出現的鳥種共有 30 種，常見的鳥類有鶺鴒科、伯勞科、文鳥科及雀科等鳥種；建物區出現鳥種共計 5 種，以藍磯鷗、紅尾伯勞及麻雀最常見；池塘出現鳥種有 6 種，以鶺鴒科的鳥種最具代表性；在海洋出現鳥種共計 7 種，以鷗科及鷗科的鳥種最具代表性；在海岸附近、岩石出現鳥種共 21 種，以鷗科、鷗科、隼科、燕科及文鳥科部分鳥種最具代表性。

兩棲類本調查區共發現 1 科 2 種 66 隻次，兩棲類組成的相似度相當高，顯示本區兩棲類在種類變遷尚無重大變化。爬蟲類共發現 1 科 1 種 32 隻次。兩棲類主要發現於水域環境中之沼澤區、池塘、溝渠及濕潤草生地，偶見於耕作區。黑眶蟾蜍遍佈各種環境中；盤古蟾蜍僅在草生地出現。唯一發現的爬蟲類為蝎虎，經常出沒於建物區。

蝶蛾類調查共發現 6 科 10 種 609 隻次。蝶類族群動態常受植物生長周期之變化而變動。每至植物的開花期，蝶類亦活動頻繁，且數量甚鉅。10 種蝶蛾類出沒，生境以耕作區、草生地、建物區及路邊雜草為主。就棲地利用分析：發現的 10 種蝶蛾類中，出沒於耕作區的種類計有 5 種，分布於草生地之種類有 9 種，出現於建築物區的僅有 2 種，在路邊雜草出沒的種類計有 7 種。

現地植物物種資料，大坵、小坵全區維管束植物共 58 科 147 屬 180 種，其中包含了原生植物 121 種，栽培植物 31 種及歸化植物 28 種。其中以草本植物所佔的比例最高，約佔全區植物名錄的 68.89%（即 124/180）。草本植物中大多為原生種（85 種）或歸化種（23 種），屬自然生長的種類。木本植物除了魯花樹、銀合歡等灌木外，其餘多為人工栽植喬木，如小葉南洋杉、蘭嶼羅漢松、相思樹、水黃皮、九芎、黃槿、榕、凹葉柃木、山黃麻、龍柏、側柏、琉球松、木瓜、木麻黃、耳莢相思樹、珊瑚刺桐、白雞油等，而且木本植物以大坵南方數量較多，在大坵北方及小坵全區則罕有木本植物，即使有些人為栽植的種類，生長亦不良。鳥坵所調查到之植物種類多和台灣本島相似。

## 5. 井及水資源管理

小坵水源主要為雨水及海水，在當地並無自來水供應，多以自行取水方式取得

用水，供應軍民生活用水及灌溉用水。考慮當地居民外移及軍方人員精實案影響，總用水人口逐年減少，因此未來生活用水量應不會增加。目前民間已不再使用水井做為飲用水水源，但軍方仍抽用其中編號 WW2、WW6 及 WW7 三口水井作為廁所沖洗、廚房餐具沖洗、盥洗用水及戰備等用途。至於飲用水源方面，當地百姓主要來自雨水貯留，軍方則飲用礦泉水或海水淡化機所生產之淡水。

在地表水使用現況方面，依水資源供給結構來說，除少量海水淡化、軍方運補水及海水直接進行供給外，小坵上水資源主要來自降雨，降雨量扣除渠道逕流入海量、蒸發量及地下水入滲量，即為地表水可供水量。小坵重要供水來源為雨水，軍方多使用蓄水庫及蓄水井收集雨水，當地居民則在屋頂建置雨水貯留收集系統，收集之雨水，軍方可作為一般生活用水及灌溉用水，而居民則是飲用雨水，另軍方以台灣運補瓶裝礦泉水之方式提供飲用水。小坵島嶼目前尚無大型之雨水貯集利用設施。海水來源雖不虞匱乏，但用途有限，僅供軍方沖洗廁所使用，若欲將其用為生活用水，則需經過海水淡化過程，經調查海水淡化機造水量約  $0.378 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，每日造水量有限，僅能供給軍方伙房用水。灌溉用水方面，由於土地貧脊，地形陡峭，可供農作土地不多，目前僅小規模之蔬菜耕種及零星飼養畜牧家禽，未來用水量成長亦不大。

## 6. 人口及土地利用

根據民國 70 年至 103 年人口統計資料，自民國 87 年小坵被選為優先候選場址後，人口數據增，人口趨勢也轉為逐年增加。依據 103 年戶政統計資料顯示，烏坵鄉計有 134 戶，共 672 人。平均人口密度約為每  $560 \text{ 人}/\text{km}^2$ 。本鄉計有 2 個村里，即大坵村與小坵村。截至民國 103 年底人口分布為大坵村 310 人，小坵村 362 人。目前烏坵鄉的固定居住人口稀少，設籍於此的居民大多一年返鄉一次。除駐守之國軍外，未來該鄉實際居住人口應會持續減少。

土地利用情形方面，金門縣未列出烏坵鄉之土地利用資料。根據小坵之地籍謄本資料，小坵村內約 98% 之土地屬國有土地，國有土地所屬單位及比重如後：烏坵鄉公所（0.04%）、財政部國有財產局（2.64%）、國防部軍備局（95.69%）。金門縣烏坵鄉場址屬軍事管制區域，故目前仍無任何開發計畫。

## (3) 基岩

### 1. 岩石種類及岩石域

小坵地表未固結沉積層以下未風化之新鮮岩層，以酸性的花崗岩類、中性的閃長岩類，以及基性的粗粒玄武岩為主，各岩性單位之特性分述如下：

#### A. 花崗岩

小坵之基盤以花崗岩為主體， $\text{SiO}_2$  的含量在 70.72% 至 74.75% 之間，其組成礦物為鉀長石、石英、斜長石以及黑雲母，偶含少量的白雲母、石榴子石及

角閃石等，鉀長石常呈肉紅色自型，粒狀石英及大部分之斜長石多為白色至半透明，而黑色黑雲母礦物則穿插其間。礦物之顆粒大，多為中粒（1~5 mm）至粗粒（5~10 mm），部分片狀黑雲母與細粒石英成不規則狀或脈狀分布，應為岩漿後期形成的。因岩漿分異作用之差異，各區域岩體之礦物組成及含量略有不同，故可再細分為花崗岩、鹼長花崗岩、英石岩及富石英花崗岩等。

#### B. 閃長岩

閃長岩在小坵的基盤花崗岩侵入體中，出露多道高傾角的閃長岩侵入岩脈，這類中性火成岩脈，主要呈西北—東南向至西北西—東南東向，以垂直或接近垂直之傾角侵入於花崗岩岩體中，僅少數如東龍王東側，其岩脈呈東北—西南向延展。

閃長岩之 SiO<sub>2</sub> 的含量在 51.88% 至 58.58% 之間，組成礦物以斜長石、角閃石、石英及黑雲母為主，依其不同礦物含量，可再細分為閃長岩、英雲閃長岩及石英閃長岩等。一般而言，這些閃長岩多具有斜長石之斑晶，且大都曾遭受程度不一之熱變質作用，而生成細粒之次生石英、黑雲母及角閃石，岩石之組成礦物顆粒一般均較小，斑晶大多不超過 2 mm，且因含較多之鐵鎂礦物，故多呈灰黑色。

#### C. 粗粒玄武岩

小坵出露之岩脈，除中性之閃長岩外，亦出露多道高傾角之粗粒玄武岩之侵入岩脈，僅分布於小坵主島之北側。粗粒玄武岩脈都呈西北—東南向，以垂直或接近垂直傾入於圍岩中。粗粒玄武岩之組成礦物以斜長石、斜輝石及角閃石為主，局部含少量石英及次生之綠泥石。其大都具有斑狀及似粗面組織，斑晶為角閃石與斜長石，組成礦物顆粒小，大都不超過 1 mm。斑晶周邊之斜長石多有定向之流動組織，此特徵與岩脈之產狀吻合。新鮮之粗粒玄武岩多呈黑色至黑灰色，地表出露之岩石則常因風化作用，部分鐵鎂礦物會轉變成綠泥石而使岩脈呈深綠色。在小坵出露之粗粒玄武岩，以岩脈之型態侵入於花崗岩岩體，或循前期侵入之閃長岩岩脈的裂隙侵入閃長岩脈中，使得熱所造成之部分熔融現象更形複雜，各脈岩中之礦物種類及含量亦更多樣。

#### D. 風化層

影響本島表土風化程度高低差異之因素，除氣候外，主要為母岩及地形。一般而言，花崗岩抗風化能力較岩脈強，而岩脈中又以基性岩脈較不耐風化，此與其所含之礦物有關，此外，地形較平緩處，原岩能夠風化的深度亦較深。小坵地表部分土壤的分析結果，其礦物組成仍以石英為最多，應為風化殘餘之原生礦物，其次為高嶺土及未風化之長石類礦物，其他次要礦物包括有伊來石（illite）或雲母類礦物、水鈣沸石、綠泥石等。粒徑分析的結果顯示小坵之土壤屬壤質砂土至砂質壤土。

## 2. 岩石力學條件

小丘現地所進行之套鑽法量測結果，其主應力軸方向並無明顯趨勢(圖 4.19)，且主應力值及其差值亦甚小，顯示小丘之地表淺部並無明顯的應力集中現象。

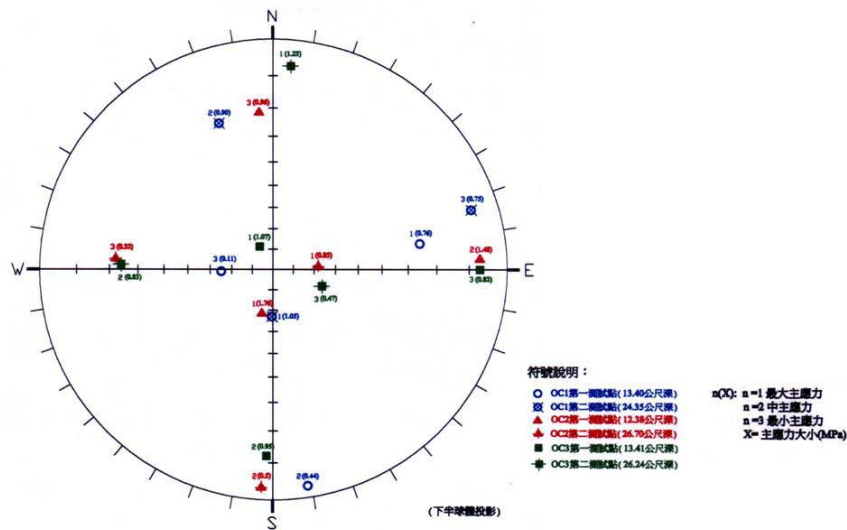


圖 4.19 小丘地表淺部大地應力分布圖。

針對小丘地區之地質鑽探岩心樣品進行下列各項岩石力學試驗，各項試驗成果則說明如下：

- A. 基本物性：歸納試驗數據則可得到閃長岩類與花崗岩類之各項區間值如表 4.15。閃長岩樣品之孔隙率平均值與吸水率比花崗岩樣品皆小，而顆粒密度平均值、乾密度、飽和密度則比花崗岩樣品為高，因而推論閃長岩之顆粒結構比花崗岩更為緻密。

表 4.15 小丘岩石物性一覽表

岩石分類	顆粒密度		孔隙率		乾密度		吸水率		飽和密度	
	g/cm <sup>3</sup>		%		g/cm <sup>3</sup>		%		g/cm <sup>3</sup>	
	分部區域	平均	分部區域	平均	分部區域	平均	分部區域	平均	分部區域	平均
閃長岩	2.7~2.94	2.82	0.14~0.53	0.3	2.69~2.93	2.82	0.05~0.91	0.11	2.69~2.94	2.82
花崗岩	2.63~2.73	2.65	0.39~0.98	0.67	2.62~2.71	2.63	0.15~0.37	0.25	2.63~2.72	2.64

- B. 單軸抗壓強度：閃長岩類之單壓強度介於 42.1~364.4 MPa 之間，其間之差異性頗大，因為其中少數岩樣特別偏低，而一般則介於 160 MPa~360 MPa 之間，其總平均值則為 209.7 MPa。花崗岩類則介於 67.7~250.4 MPa 之間，其中少數岩樣比較偏低之外，一般則介於 100 MPa~250 MPa 之間，其總平均值則為 161.4 MPa。本成果亦顯示出閃長岩之單壓強度總平均值明顯地



較花崗岩高出近 30%，也可能顆粒結構較為緻密之故。

- C. 抗張強度：閃長岩類之抗張強度介於 7.6~17.0 MPa 之間，其中少數閃長岩類岩樣之抗張強度較為偏低，一般之抗張強度則介於 13.0 MPa~17.0 MPa 之間，其總平均值則為 14.2 MPa。而花崗岩類之抗張強度介於 6.1~12.5 MPa 之間，其中僅有少數接近或超過 10 MPa，大部分則在 6.0~10.0 MPa 之間，其總平均值則為 8.9 MPa。顯示閃長岩類遠比花崗岩類之抗張強度總平均值為高，應該與閃長岩具較緻密之顆粒結構有直接之關係。
- D. 凝聚力  $c$  與內摩擦角  $\varphi$ ：閃長岩類之凝聚力  $c$  介於 9.7~43.5 MPa 之間，凝聚力  $c$  之差異性頗大，可能因閃長岩之脆性高，所以較具細微裂隙之故，凝聚力之平均值為 26.7 MPa。摩擦角  $\varphi$  介於  $53^\circ$ ~ $61^\circ$  之間，其總平均值為  $57^\circ$ 。而花崗岩類之凝聚力  $c$  介於 29.6~41.6 MPa 之間，凝聚力之平均值為 33.7 MPa。摩擦角  $\varphi$  則介於  $55^\circ$ ~ $58^\circ$ ，其平均值與閃長岩相同也是  $57^\circ$ ，數據顯示兩種數據  $\varphi$  與  $c$  之差異性明顯較低，可能是因花崗岩之細微裂隙較少之故。
- E. 動態彈性性質：閃長岩類之  $E_d$  介於 62.7~96.6 GPa，總平均值為 76.7 GPa，而  $\nu_d$  則介於 0.27~0.31，總平均值為 0.29。而花崗岩類之  $E_d$  介於 39.8~63.0 GPa，總平均值為 49.9 GPa，而  $\nu_d$  則介於 0.21~0.31，總平均值為 0.26。本結果顯示閃長岩類之動態彈性係數比花崗岩類之動態彈性係數  $E_d$  為高，所以在承受相同壓力之條件下變形量會比較小，亦即閃長岩類之物理結構較為緻密，與在岩石物理性質試驗上所得之結論相同。

#### (4) 水文地質

##### 1. 岩石的水力傳導

水力傳導係數之量測試驗工作是針對小坵之 BH-2、BH-3、BH-4、BH-5 及 BH-6 等五孔新設垂直觀測井 (vertical Borehole)，利用雙封塞設備 (double packers)，進行主要裂隙面 (fractures) 注水試驗 (injection test)，以獲得各裂隙面之水力傳導係數值 (hydraulic conductivity,  $K$ ) (工研院能資所, 2000)。

前述觀測井中 17 處裂隙面水力傳導係數值範圍介於  $8 \times 10^{-7}$ ~ $6 \times 10^{-5}$  m/sec 之間，其算術平均值約為  $8 \times 10^{-6}$  m/sec；幾何平均值約為  $5 \times 10^{-6}$  m/sec。其中 BH-6 裂隙面高程在 -13.84~-14.84 m 及 -20.84~-21.24 m 兩處水力傳導係數值較其他裂隙面高，分別為  $6 \times 10^{-5}$  及  $10^{-5}$  m/sec。

小坵之主要岩體為花崗岩，依據實驗室分析結果，花崗岩平均飽和單位重為  $2.63 \text{ ton/m}^3$ ，平均乾單位重  $2.62 \text{ ton/m}^3$ ，平均顆粒密度  $2.65 \text{ ton/m}^3$ ，平均孔隙率為 0.67%，吸水率為 0.26% (台灣電力公司, 2002)。

除了對花崗岩地層進行試驗外，另外針對小坵之 BH-2、BH-3、BH-4、BH-5 及

BH-6 等五孔新設垂直觀測井獲得各裂隙面之水力傳導係數值 (hydraulic conductivity, K) (工研院能資所, 20001)。

#### (5) 地下水化學

由小坵平均水質之 Stiff 圖 (圖 4.20) 可知：

1. 主要陰陽離子的濃度，隨著深度的增加而增加，但在平均海水面下 30 至 50m 區間的平均地下水水質，仍然和平均海水的水質，差距甚大。小坵附近海域的平均海水溫度約 25.8°C，鹽度約為 26.5‰，故其比重約為 1.024；因此平均海淡水界面之深度，約為平均地下水面至平均海水面間距離的 41.6 倍。若以地質鑽井 BH-3、BH-4、BH-5 及 BH-6 的平均地下水位 (約高出平均海水面 6.3 m)，為小坵地下水的平均水位，則可推估小坵的平均海淡水界面約位於平均海水面下 262 m。
2. 水質的離子分布形態，在平均海水面下 30 m 之上均很類似；但在平均海水面至以下 10 m 區間的平均水質，有較低的離子濃度。造成上述現象的原因，有可能是其水源的化學環境雖然類似，但在平均海水面至以下 10 m 區間範圍中，因土壤層的吸附作用，而使其雖具備相同的離子分布形態，但濃度稍低。
3. 水質的離子分布形態，在平均海水面以下 30 至 50 m 區間的平均地下水中，鈣及鎂離子的比例有極大的變化。造成上述現象的原因，有可能是因其 pH 值較低，故使得周遭母岩中的長石類 (如 anorthite 及 diopside) 中的鈣離子，較易溶於水中，並形成如水鈣沸石 (gismondine) 等的次生礦物。

### 平均水質之 Stiff 圖

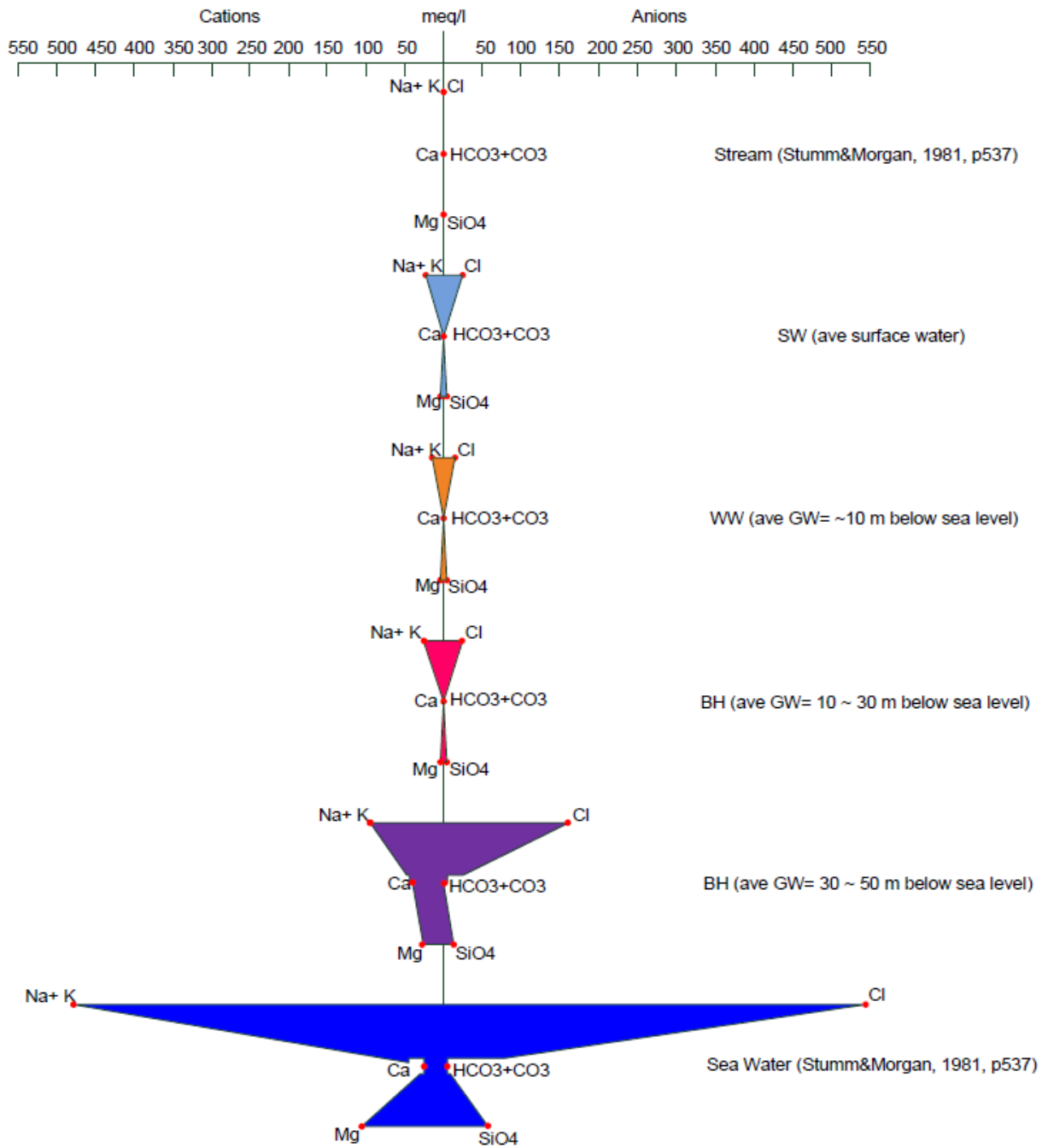


圖 4.20 小坵平均水質之 Stiff 圖。

## 4.2.2 正常演化

### (1) 地表系統演化

海水面變化：金門與馬祖地區由於缺乏長期監測資料，無法評估海水面變動趨勢，而由中國大陸國家海洋局分析其沿海 48 站之紀錄顯示，在中國大陸沿海各區海水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，略高於全球海面上升速率。

IPCC (2013) 對未來百年全球暖化導致氣候變遷所作之預測，至 2100 年全球海水面可能較目前上升約 1 m。台灣的海水面變化除了受到全球暖化導致的氣候變遷影響外，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)推估台灣地區的特定地點，至 2200 年的海水面變化(累積發生機率 99%)，結果顯示在 2200 年時，金門之海水面可能上升 4.0 m。

設施營運、監管及封存期間的海水面變化，可概分為短時間尺度（1,000 年以下）與長時間尺度（如 1 萬年後），短時間尺度依據 IPCC (2013) 及楊任徵 (2002) 推估，2200 年時海水面可能上升 4.0 m；而長時間尺度（如 1 萬年後），預期可能為冰期，冰期海水面每千年 6.0 m 之速率下降。

地形變化趨勢：受到颱風的影響，海岸侵蝕及風蝕為烏坵地區最重要的地表地質作用，根據區域地質調查結果（台灣電力公司, 2002），初步估計島上岩體侵蝕速率約為每年 0.075 mm，較台灣中央山脈之平均侵蝕速率每年 5.5 mm 為低。

### (2) 其他演化

台灣電力公司對於國內兩處潛在場址之報告主要基於「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」（第 0 版）所需之參數進行研究撰寫，因此金門縣烏坵鄉有關熱流演化、力學演化、水文地質演化、近場水文演化及地球化學演化等資訊目前仍缺乏，建議未來可參考瑞典 SFR 處置場之技術報告，增加所需場址特性演化描述。

## 第五章 台灣近岸與離島可能之特殊地質與其因應之調查要項

本章節針對國內潛在場址台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉之特殊環境進行研析。主要介紹位於台東縣達仁鄉附近的某隧道工程，挖掘豎井時發生湧水事件，以及橫坑開挖過程發生抽坍事件；同時也介紹台東縣達仁鄉潛在場址外海海底山崩調查成果，以及海底山崩可能造成局部性的海嘯影響。另外，1604年泉州發生了規模7.5之地震，對於金門縣烏坵鄉之潛在場址可能造成影響，亦一併於本章蒐集介紹。

### 5.1 台東縣達仁鄉

#### 5.1.1 隧道工程湧水事件

坑道工程施工與區域地質構造有關，如遇構造複雜、岩體軟弱或地層破碎，常使得開挖過程中產生規模不等之災害，因此在坑道開挖前掌握周遭地質情況，並瞭解地盤力學特性對隧道施工之影響，是非常重要的課題。本節將針對位於台東縣達仁鄉潛在場址西北側某隧道豎井開挖遭遇湧水及橫坑開挖發生抽坍之過程及處理工法進行研析，有助於日後台東縣達仁鄉處置場開挖之重要依據。本案例依據南迴公路硬頁岩隧道地質模式分析以豎井工區為例（林衍丞等人，2015），詳細說明如下：

##### (1) 地形概況

本案例位屬中央山脈西側，座落於一楓港溪支流與楓港溪交會處之河床堆積地上，整體地勢北高南低，周圍海拔高程自豎井東北側小山脊之500公尺，降至坡趾處豎井之345m，再提升至楓港溪南岸小山脊之450公尺。楓港溪支流上游集水區面積約23.2平方公里，屬終年有水之長流溪，顯示區域地下水蘊藏量較豐富。本區域水系受岩性或節理影響呈格子狀，楓港溪支流於豎井北側有一明顯之轉折，河道更往上游則呈直線段，溪流沿線發育有許多小野溪及明顯之蝕溝地形。

##### (2) 地質概況

本案例所在出露地層屬中央山脈南端之潮州層，沉積環境可能位於大陸坡邊緣，屬一巨厚之深海沖積扇序列，沉積物以泥質材料為主，故無煤層及石灰岩，因此遭遇瓦斯或石灰岩洞穴之可能性不大。豎井工區周圍岩性以硬頁岩為主偶夾薄層石英砂岩或粉砂岩，地表硬頁岩風化解壓及崩解現象（slaking）較劇烈易形成鉛筆狀構造，隧道內硬頁岩開挖遇水後仍有風化崩解情形但程度較輕，砂岩質地堅硬呈脆性常發育有節理組。

區域性主要構造為菩安山背斜，係由數個背、向斜摺皺組成之一大倒轉背斜構造，東翼岩層大多以小角度向東傾斜，西翼岩層則多以高角度倒轉位態向東傾斜，整體背斜構造有向南傾沒之現象，劈理面則有向軸部漸漸發達之趨勢。此區位於該複背斜之東翼，局部有小褶皺構造發育，一般隧道通過背斜軸部時可能局部會遭遇破碎岩體，而在向斜軸部時則可能會遭遇地下水之問題。

### (3) 豎井湧水

豎井於開挖過程中共發生四次湧水事件，各次湧水位置詳圖 5.1。工區地下水水位約位於地表下 5.0 m，第一次湧水為開挖至 GL. -26 m 突然有大量地下水從壁面湧出 (800~1000 L/min)。第二次湧水為開挖至 GL. -41.5 m，最大湧水量達 2356 L/min，。另為瞭解後續豎井開挖之湧水潛能區段，故辦理補充地質鑽探調查 (BH-1~4 孔，各 120 m) 及進行一系列水文地質現地試驗。開挖至 GL. -63.5 m 時，大量地下水自岩縫湧出造成第三次湧水事件，最大湧水量達 1460 L/min，持續湧水量約為 800~1000 L/min。開挖至 GL. -69.5 m 發生第四次湧水事件，最大湧水量達 1000 L/min，後續掘進岩盤未再有明顯湧水情形，配合井內馬達抽水得以順利進行豎井開挖作業。

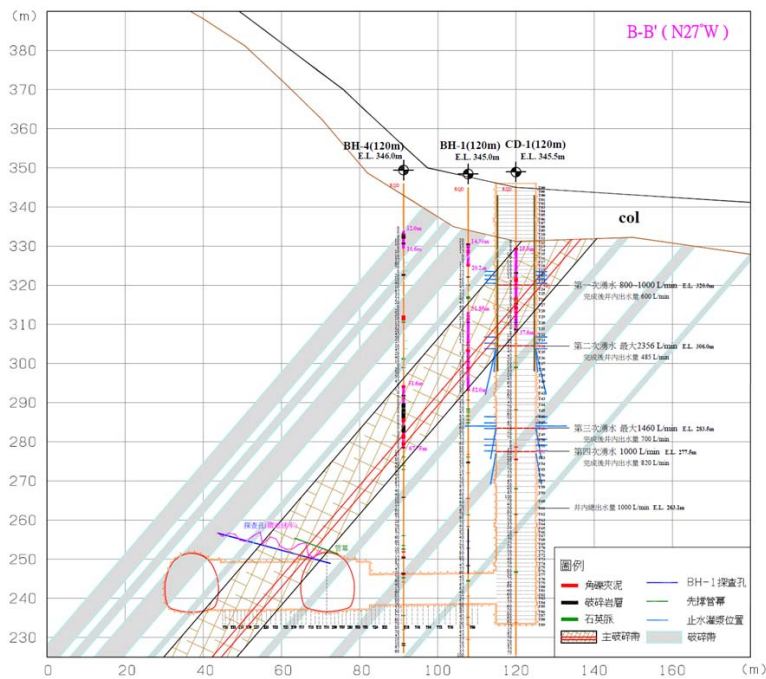


圖 5.1 豎井橫坑開挖地質剖面圖 (摘自林衍丞等人，2015)。

### (4) 橫坑抽坍

豎井開挖完成後則進行橫坑開挖工作，橫坑開挖面岩盤自立性尚佳，僅局部區段之右側較為破碎，及有少量滲水或潮溼現象。6 號人行連絡道則發生兩次抽坍事件，各次抽坍位置詳圖 5.2。第一次抽坍始於 T01 輪 (里程 0k+33.4 m) 開挖面右側漸露破碎岩盤且有出水情形 (約 300 L/min)，湧出之地下水夾有泥沙呈混濁狀，1 天後橫坑 T19~T25 輪間噴凝土面之頂拱和右側壁即有裂縫產生，且支保局部擠壓變形，3 天後於開挖 T02 輪 (里程 0k+34.4 m) 時則發生抽坍 (18 m<sup>3</sup>)。第二次抽坍為於 T11 輪 (里程 0k+42.4 m) 施作先撐鋼管過程中，於開挖面 1 點~3 點鐘方向發生約 40 m<sup>3</sup>之抽坍且仍不斷有碎石掉落，至次日坍落塊石體積達約 220 m<sup>3</sup>。

本區域岩盤為葉理發達之硬頁岩，開挖面有流水情形地下水處於流動狀態，且抽坍事件可能造成圍岩有鬆動或孔洞情形，故先以鑽孔探查瞭解抽坍及鬆動岩盤範圍，俾研擬後續處理方案。

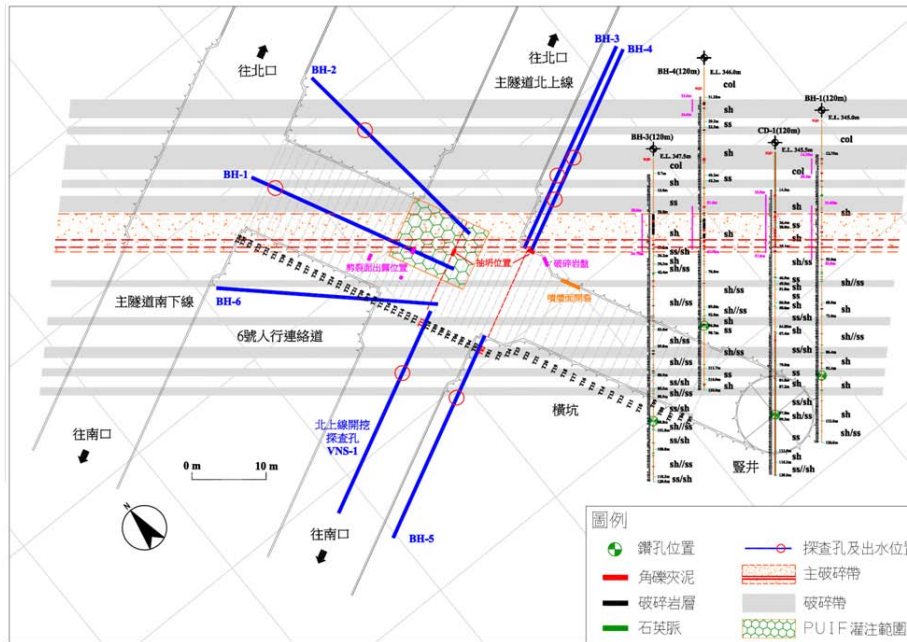


圖 5.2 豎井橫坑開挖地質平面圖 (摘自林衍丞等人, 2015)。

#### (5) 補充地質調查及分析與研判

豎井工區經發生湧水及抽坍事件後，為瞭解事件發生之原因，地質師即利用 6 孔鑽孔資料進行岩心判釋與分析對比，除參考規設階段之地質圖外，並針對豎井周圍進行較細部之地表地質調查以建構工區地質模式，最後配合隧道輪進地質開挖面進行驗證，以綜合研判豎井工區之地質情況，相關調查、分析、驗證及研判結果說明下：

##### 1. 鑽孔岩心判釋結果

本區域鑽孔計有設計階段之 AD-60(140 m)，施工前豎井中心 CD-1(120 m)，補充地質鑽探 BH-1~BH-4(各 120 m)，各鑽孔位置經測量放樣標示如圖 5.3 所示。各鑽孔岩心判釋結果顯示，整體岩性均為硬頁岩為主偶夾薄層砂岩，其間有一段明顯之破碎夾泥帶存在，破碎帶產狀為破碎角礫夾黏土，剪裂面傾角呈  $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。

藉由對岩性進行細部區分及配合層面傾角可瞭解工區地質構造概況，本區岩心岩性可分為硬頁岩 (sh)、砂岩 (ss)、硬頁岩為主偶夾薄層砂岩 (sh/ss)、硬頁岩為主偶夾薄紋層砂岩 (sh/ss)、砂岩為主偶夾薄層頁岩 (ss/sh)、砂頁岩薄互層 (ss/sh) 等，並據以分析比對以繪製地質剖面。

另依破碎帶寬度、破碎程度、周圍岩性、石英脈分佈或其他地質特徵等資料，作為判釋主破碎帶範圍之依據，各鑽孔破碎帶範圍判釋如下：

- A. CD-1 孔主破碎帶分佈於 GL. -15.9 ~ -37.6 m，BH-1 孔主破碎帶分佈於 GL. -31.85 ~ -52.0 m，BH-2 孔無該破碎帶出露僅 GL. -71.8 ~ -76.35 m 較破碎。
- B. BH-3 孔主破碎帶分佈於 GL. -20.6 ~ -34.75 m，BH-4 孔主破碎帶分佈於 GL. -51.6 ~ -67.75 m。

C. AD-60 孔無該破碎帶出露，其中 GL.-62.2 ~ -64.65m、GL.-92.0 ~ -94.15 m 及 GL.-132.2 ~ -134.4 m 較破碎。

整體來看破碎帶有往東北方向漸深之趨勢，各孔主破碎帶岩心照片如圖 5.4 所示。

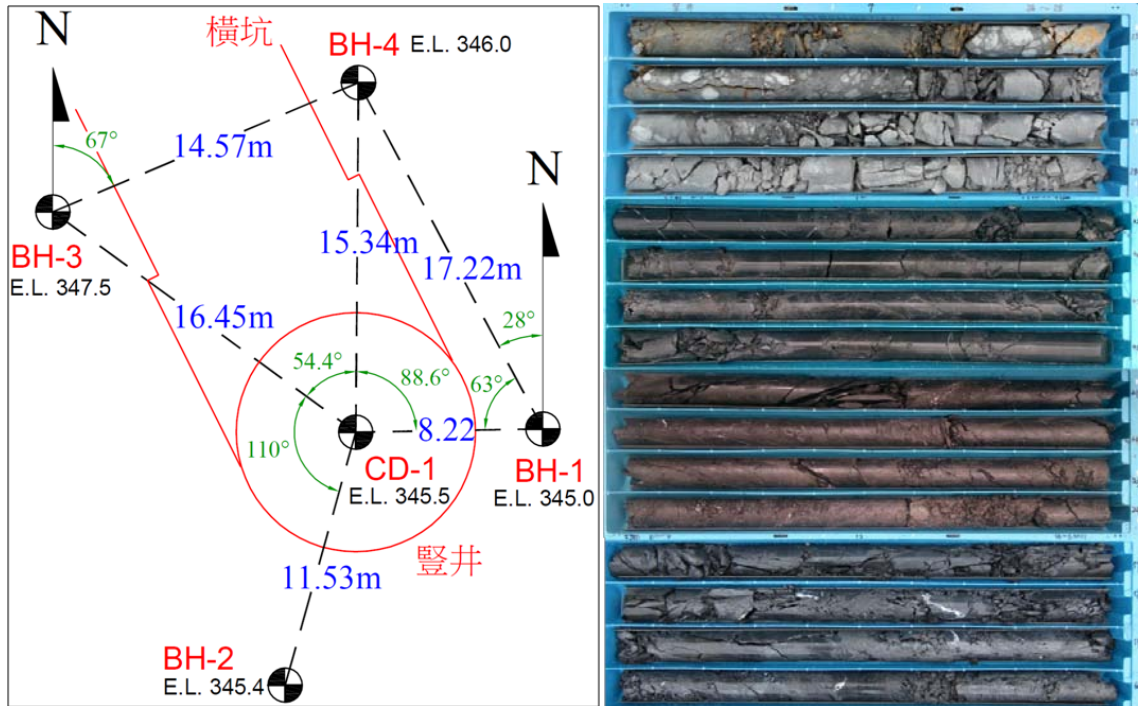


圖 5.3 豎井周圍鑽孔位置圖 (摘自林衍丞等人, 2015)。

圖 5.4 各鑽孔岩心主破碎帶照片 (摘自林衍丞等人, 2015)。

## 2. 地表地質調查結果

地質調查結果顯示工區周圍岩性以厚層粉砂質硬頁岩為主，偶夾灰色細粒薄紋層石英砂岩或粉砂岩，岩層葉理發育密集，豎井周圍之層理位態與葉理位態一致，約為  $N20^{\circ}\sim 50^{\circ}W/60^{\circ}\sim 80^{\circ}NE$ ，周圍地表偶可見局部拖曳褶皺構造，且常有沿葉理面發育之剪裂面存在，研判區域性之弱帶位態應在此範圍附近。

豎井東北側出露一厚層泥質細粒砂岩，質地堅硬，砂岩層呈透鏡狀常有尖滅現象，於豎井旁其露頭位態為  $N50^{\circ}W/22^{\circ}N$ 。此工區位屬一南北向向斜之西翼，東側區域為緩傾角 ( $N40^{\circ}W/14^{\circ}N$ )，往西則為漸變為高傾角向東傾斜 ( $N0^{\circ}\sim 10^{\circ}W/82^{\circ}\sim 86^{\circ}E$ )。控制本地區地質構造主要為近東西方向之主應力，形成南北軸向之緊密摺皺及剪裂帶，惟區域上應先後發生有不同方向之構造運動，構造應力疊加作用之結果使地質構造較為複雜，在地表露頭有限且岩性單調之情況下，欲完全瞭解所有岩層層序、構造型態、破碎帶延伸、斷層類別等，均待進一步地質調查釐清。



### 3. 隧道內地質觀察

進入橫坑後隧道內岩性以硬頁岩為主偶夾粉砂岩，不連續面有葉理、層理及節理等，隧道內葉理位態主要為  $N20^{\circ}\sim 52^{\circ}W/50^{\circ}\sim 70^{\circ}N$  及  $N0^{\circ}\sim 10^{\circ}W/70^{\circ}\sim 80^{\circ}N$ ，因其常密集發育且多有夾泥情況，為控制岩體強度之主要弱面。地下水於本隧道工區內分佈似呈區段狀，常僅於某區段有出水情形，雖位於地下水位面下但並非所有岩體均飽含地下水，完整岩體或緻密硬頁岩中呈乾燥或潮濕狀，破碎夾泥岩盤區段則出水較明顯。

於 6 號人行連絡道 T01 輪附近開挖面可觀察到一葉理極密集帶(鱗片狀葉理，scaly foliation) 漸漸由右側出露，且隨著開挖輪進有向頂拱中央移動之趨勢，該葉理密集帶弱面間距  $< 6\text{cm}$  常張裂夾泥，且偶有薄層之破碎角礫夾泥間夾其中，該層開挖初期自持力尚可，惟經開挖解壓、風化且有水之情況下，隨時間增長強度急劇下降，由地質錘即可輕易將其刮蝕。

### 4. 地質資料整合與驗證

整合相關地質資料以建構豎井工區之地質模式，並據以繪製基地地質圖 (圖 5.5)、地質剖面圖 (圖 5.6)、豎井橫坑開挖地質剖面圖 (圖 5.1) 及豎井橫坑開挖地質平面圖 (圖 5.2)。

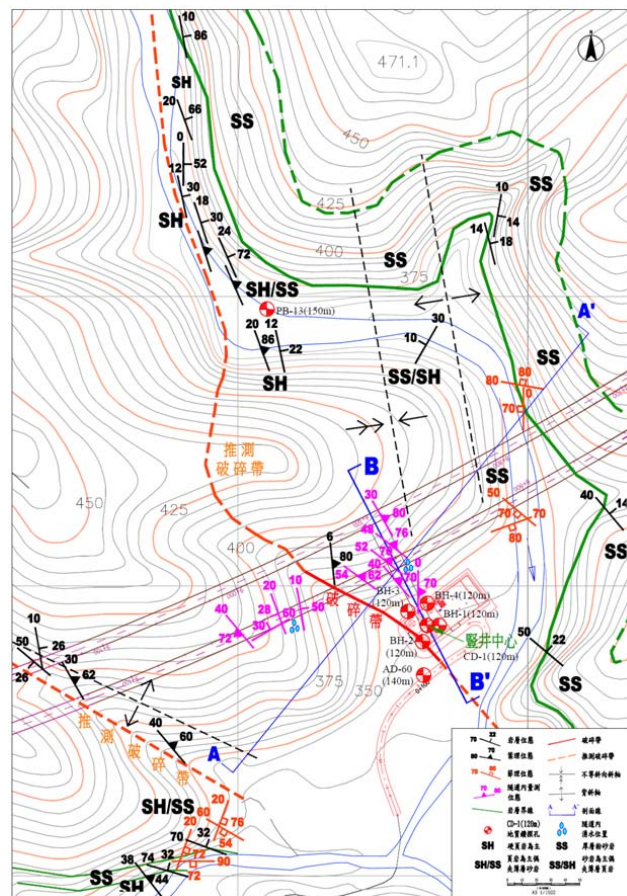


圖 5.5 基地地質圖 (摘自林衍丞等人, 2015)。

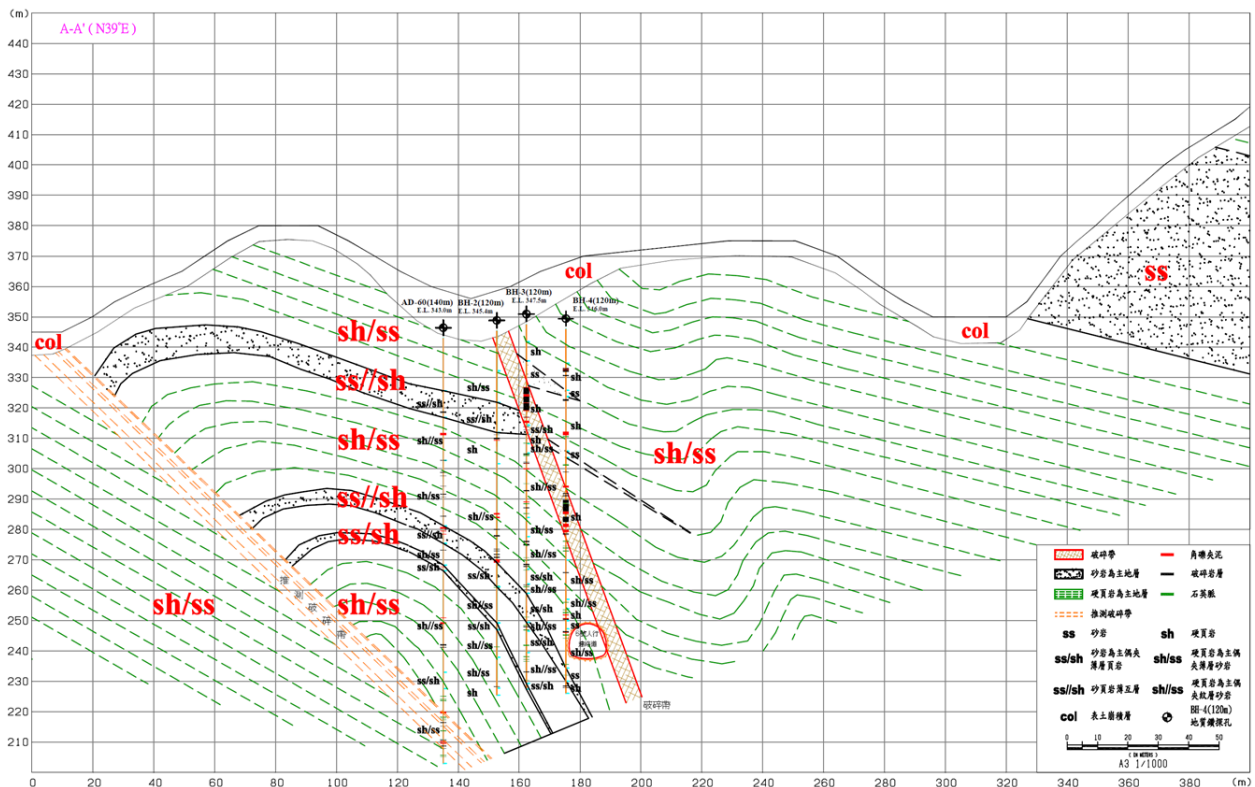


圖 5.6 地質剖面圖 (摘自林衍丞等人, 2015)。

由基地地質圖 (圖 5.5) 可見本區域影響隧道工程主要之構造為剪裂破碎帶、向斜、背斜及拖曳摺皺構造，區域之向斜構造有利於聚集地下水，而於複雜摺皺系統中，背斜軸之張力裂隙可能易使地表水向下入滲流通，而向斜軸部則可能遭遇湧水問題，層間剪裂帶或斷層帶可能因穿透含水層或連通地表，易將地下水引入其周圍之裂隙岩體中，且破碎岩體孔隙率較高有利儲水及地下水流通，剪裂泥則為不透水層有拘限地下水之作用，因而形成局部蓄水構造，加上豎井位屬地形相對低處，區域地下水位較高 (GL. -5.0 m)，且附近有長流溪存在，顯示本工區應具湧水潛能。

地質剖面圖 (圖 5.6) 顯示橫坑有一寬約 4~6 m 之破碎帶通過，另由地表岩層位態推測豎井破碎帶之東側可能有一易蓄水之局部向斜構造，破碎帶西側為一拖曳背斜及其伴生之破碎帶，通過摺皺軸附近時應注意層間剪裂帶或構造節理等，所衍生之抽坍或湧水問題對隧道施工之影響。

依據三點定向法所推算之破碎帶位態繪製豎井橫坑開挖地質剖面圖，由剖面圖 (圖 5.1) 顯示破碎帶通過位置與湧水及抽坍位置相當吻合。以各鑽井岩心判釋結果及推算之破碎帶位態，建立工區弱帶分佈地質模式，考量破碎岩層出露於頂拱位置較為不利，故於隧道頂拱高程 (E.L. 250 m) 切一平面作為豎井橫坑開挖地質平面圖 (圖 5.2)。由隧道內地質紀錄亦可驗證鑽井資料推估之破碎帶走勢 (圖 5.2)，與實際開挖遭遇位置相當吻合。由此可知造成 6 號人行連絡道 T11 輪抽坍，及豎井開挖第 34 輪湧水事件應為遭遇同一破碎帶所致，該破碎岩體飽含地下水被拘限於剪裂泥或完整岩盤間，當隧道開挖挖破阻水層時則會造成突發湧水，滲流水若將

岩縫間細粒料帶出，使岩盤鬆動岩體強度減低，將可能導致抽坍事件發生。

抽坍事件後於6號人行連絡道T16輪（里程0k+48.4m）開挖面觀察到該葉理密集帶具一剪裂面，剪裂面下盤呈現拖曳摺皺構造且有石英脈富集，剪裂面周圍尚有一段破碎擾動帶，整體剪裂帶寬約4~6m其中嚴重破碎夾泥部分寬約1m，該葉理密集帶成因可能為（1）原岩即屬較軟弱之細粒料泥質岩（頁岩或黏土岩），（2）受構造應力作用下，岩體應力集中部分易形成葉理密集帶，沿葉理剪滑現象普遍致形成岩體之弱帶。

綜合以上案例資料，顯示達仁場址場址特徵化應強化破碎帶（剪裂帶）調查，安全評估所需之水文地質概念模式建立，應基於詳細、由廣而精之構造地質調查與解釋，因此，分階段、分精度之調查規劃非常重要。

### 5.1.2 海底山崩

離岸因地震造成的突發海嘯災害對於場址工程設施之衝擊不容忽略。2004年蘇門答臘發生MW9.2之強震，發生連續性之海嘯並襲擊鄰近地區，造成將近25萬人傷亡；2011年日本東北外海發生MW9.0之東北岐地震（Tohoku-Oki earthquake），同樣引起海嘯並造成日本東北沿岸地區毀滅性之災害，更嚴重影響日本福島縣核電廠之運作。然而，除強震引發之海嘯，海底山崩誘發之海嘯（submarine landslide-triggered tsunami）亦相當值得注意和關心，往往造成局部地區之傷害程度不下前者（Li et al., 2015）。於台灣的歷史紀錄中，記載上個世紀發生近20次MW $\geq$ 7.0之強震，值得一提的是1771年琉球島弧南段發生強震而造成明和大海嘯（Meiwa tsunami），使得台灣北部地區遭受波及；而1781至1782年期間位於台灣西南沿岸亦有發生大規模海嘯之紀載。

有鑑於板塊構造活動地區易發生天然災害，所以預測超事件（super-events）的發生顯出其重要性（如海嘯災害）。Lallemant et al. (2015) 利用沉積學方法及碳定年，並透過流體動力學模型與向岸觀測探討3000年前發生之超事件，其岩心樣本採自台灣海岸山脈東側20公里，海深1200m之深海岩心編號KR03。圖5.7顯示KR03採樣位置及各處海底山崩之位置（S1-S8）；圖5.8為利用台灣海底地形圖定位出圖5.7大概之區域，並比較海底山崩與達仁場址之相對位置，其中較靠近達仁場址之海底山崩位置為S1和S2。

為探討岩心頂部覆蓋的異常物質之成因，模擬三種假設景況：海底山崩之影響、海嘯之影響及颱風之影響，之後透過流體動力模型（包括海嘯生成、演進及後續波高之計算）模擬研究區域海流之表面流速及波浪高度，結論為可能是不同時間點的海底山崩受到地震誘發，爾後巨大颱風或海嘯發生以後造成沉積物之堆疊，並指明互補性之推測是最佳辨認超事件之來源的方式。

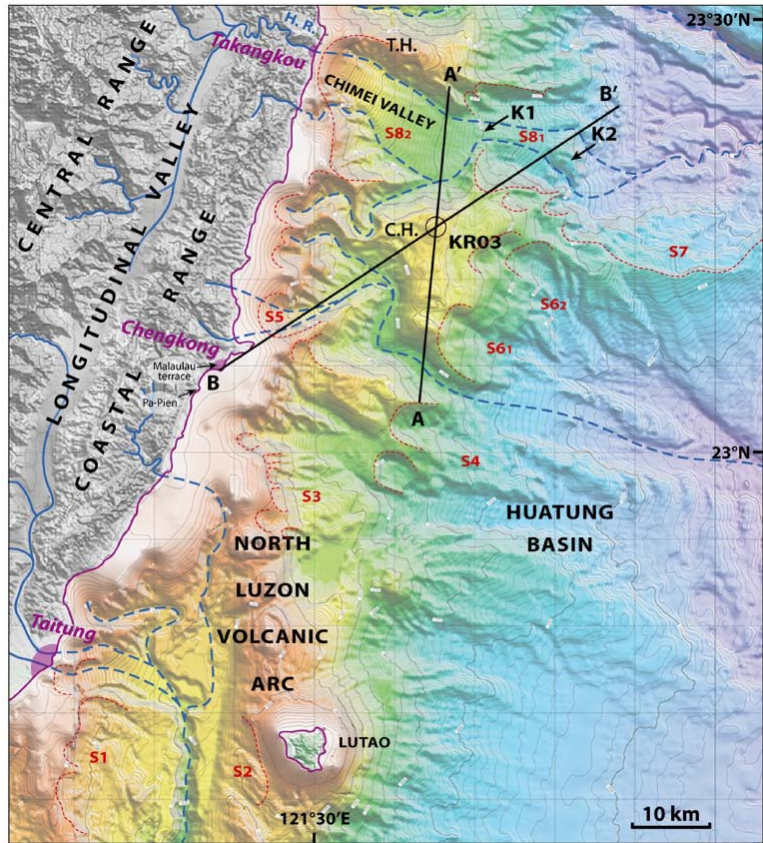


圖 5.7 Lallemand et al. (2015) 研究區域之海底地形圖，KR03 為岩心採樣位置，S1-S8 為海底山崩位置。

★ 達仁場址 ● 綠島

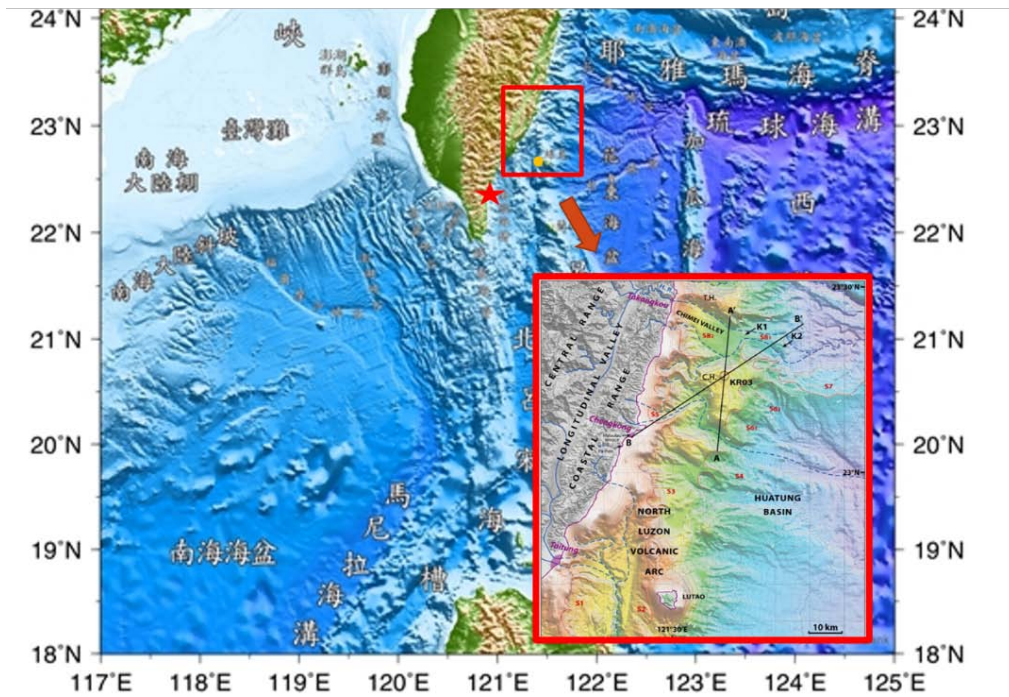


圖 5.8 搭配台灣海底地形圖（科技部海洋學門資料庫，2013）比對並圈繪圖 5.7 之大致位置。紅色星號為達仁場址，黃色圓點為綠島。

Li et al. (2015) 模擬1781至1782年襲擊台灣西南沿岸之海嘯，探討發生海嘯之原因。地震模擬結果顯示，中國東南和台灣西南沿岸之波高隨震矩規模增高而上升，而前者波高隨震矩規模上升之幅度大於後者。除模擬因地震產生之海嘯外，更進一步模擬海底塊體破壞 (Submarine Mass Failures, SMF) 造成之海嘯，雖然影響範圍小但造成局部地區之破壞力高於地震產生之海嘯。為推估SMF是否能產生類似1781/1782年之海嘯事件，所以挑選三個案例並定量的證明海嘯產生之可能性，其三個SMF (LS1、LS2和LS3，LS1和LS2位於西南海域，而LS3位於東南海域 (圖5.9a-d)) 為經Wu (2008) 利用數值模擬鑑別之個案。

利用LS1、LS2和LS3進行模擬SMF產生之海嘯對於台灣西南和東南沿岸造成的影響，結果顯示因LS1與LS3靠近台灣西南海岸之關係，雖造成東港-高雄沿岸地區之海嘯高度超過5m海浪，但對於位在台灣東南部之達仁場址影響不大 (海嘯高度約為1-3m，圖5.9b和圖5.9c)；對於達仁場址影響最大之海底山崩為LS3，對達仁場址能造成非常大之局部海嘯 (大於10m，圖5.9d)。然而，透過此篇研究更加以確定位在達仁場址附近之海底山崩不容忽視，雖不至於直接影響處置場，然其影響仍應加以量化評估。

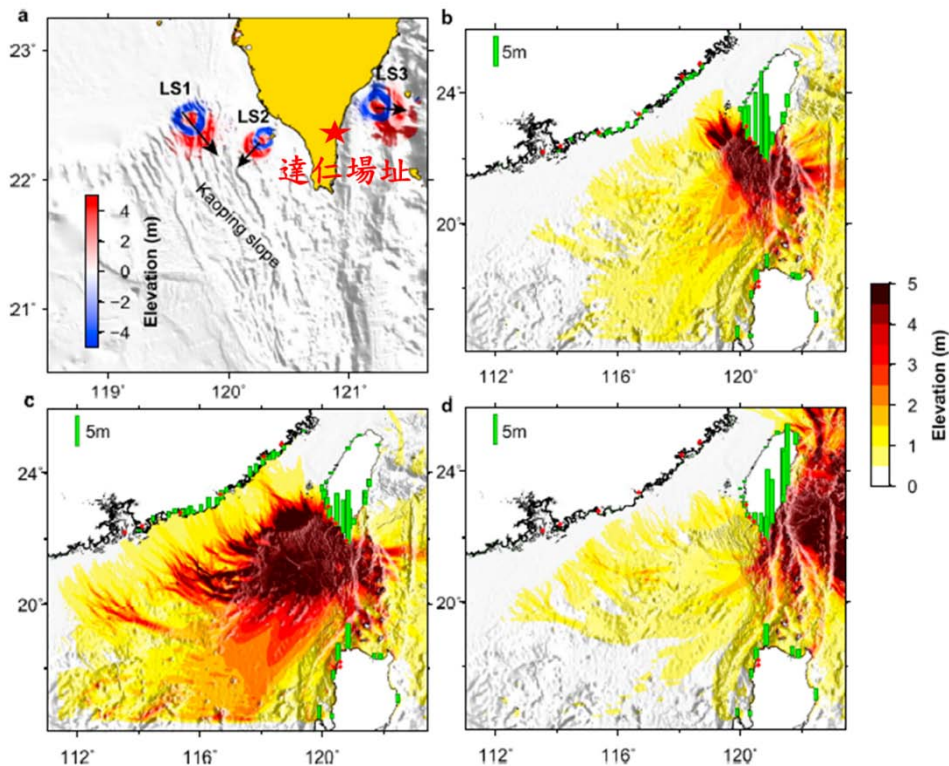


圖 5.9 (a) 三個海底山崩位置 (LS1、LS2 與 LS3) 及 (b) ~ (d) 產生最大之海嘯高度，黑箭為滑動方向；(b) LS1；(c) LS2；(d) LS3 造成之海嘯高度。

## 5.2 烏坵場址附近 1604 年泉州地震介紹

1604年12月29日福建泉州東方海域發生台灣海峽有史以來最大的災害地震，中國10個省124個縣均有記載，影響範圍半徑超過1,000公里。福建漳浦、江西廣信府、建昌府及浙江建德、上虞等地記載了不同程度的震害。而我國金門縣烏坵鄉潛在場址位於此次地震重災區附近，因此對於此潛在場址之安全性評估非常重要。

### (1) 歷史文獻

此次地震的時間在明萬曆年間，但有關此次地震的史料不多，其中被稱為明代的根本史料之一的「明實錄」中沒有記載，「萬曆起居注」也無記載，因「明實錄」中無記載有關此次地震之資訊，因此明史也無記載。但在許多地方誌中有記載此次地震之概況，並且較詳細之地震情況於 10 省的地方誌中都有記載，表 5.1 為有關此次地震之官方及個人記載史料（吳祚任，2015）。

表 5.1 1604 年泉州地震之史料（重點摘錄自吳祚任，2015）

《晉江縣誌》	「萬曆三十二年十一月初九日（1604年12月29日）夜，自東北向西南。是夜連震十餘次，山石海水皆動，地裂數處，郡城尤甚。開元寺東鎮國塔第一層尖石墜，第二層、第三層扶欄並碎。城內外廬舍傾圮，覆舟甚多」。
姜志禮《重修洛陽橋記》碑	剝，胥就頹。橋圮尤甚。而橋北石橋塌低於南四尺奇，潮至輒沒，人不能行，淵趾剝落，十僅存三、四耳。”
《泉州府誌》卷七十三《祥異》	“萬曆三十五年（1607）正月，泉州地震。”、“（萬曆）三十二年十一月初八日泉州地震。初九夜連震十餘次，山石海水皆動，地裂數處，郡城尤甚。開元鎮國塔尖石墜，損扶欄。城內外廬舍傾圮，覆舟甚多”。

### (2) 各地震度

本次地震主要災害地區分部在福建中、南部沿海一帶，根據 1604 年泉州海外 8 級地震研究（許振棟，2006），其中地震災害及等震線如圖 5.11 所示，泉州（IX）震度最大，樓房店鋪傾圮殆盡；開元寺東塔毀壞；洛陽橋圮；地裂數處（清源山地裂湧出砂水，氣若硫磺）。安海（晉江）、南安、莆田、同安地區（VIII）城堞盡圮，民舍毀壞甚多，城崩數處，地裂數處，湧出沙水、氣若硫磺。安溪（VII）地區牆屋搖動、山川崩裂，漳浦（VII）地區民舍多傾倒，興教寺金剛像損壞，南門外田中陷一穴，水湧出中有黑沙泥。

### (3) 地質構造背景

根據 1604 年泉州海外大震的發震構造（雷土成與呂浩江，1985），泉州地震發生在泉州-汕頭地震帶上。此地震帶附近自中生代以來，斷裂、斷塊構造運動頻繁，強烈的

燕山運動，地殼普遍發生斷裂，並伴隨大規模的火山噴發。晚第三紀以來的新構造運動，使地殼呈現抬昇之趨勢。到中新世末或上新世初，發生台灣海峽塌陷，並在第三紀末至第四紀初，沿著漳浦-龍海-金門-澎湖發生多次玄武岩噴發。此地區地質構造已斷裂為主，斷裂方向主要走向為北東-北北東、北西即及東西向（圖 5.10），其中北東-北北東走向之長樂-南澳斷裂帶縱貫全區。

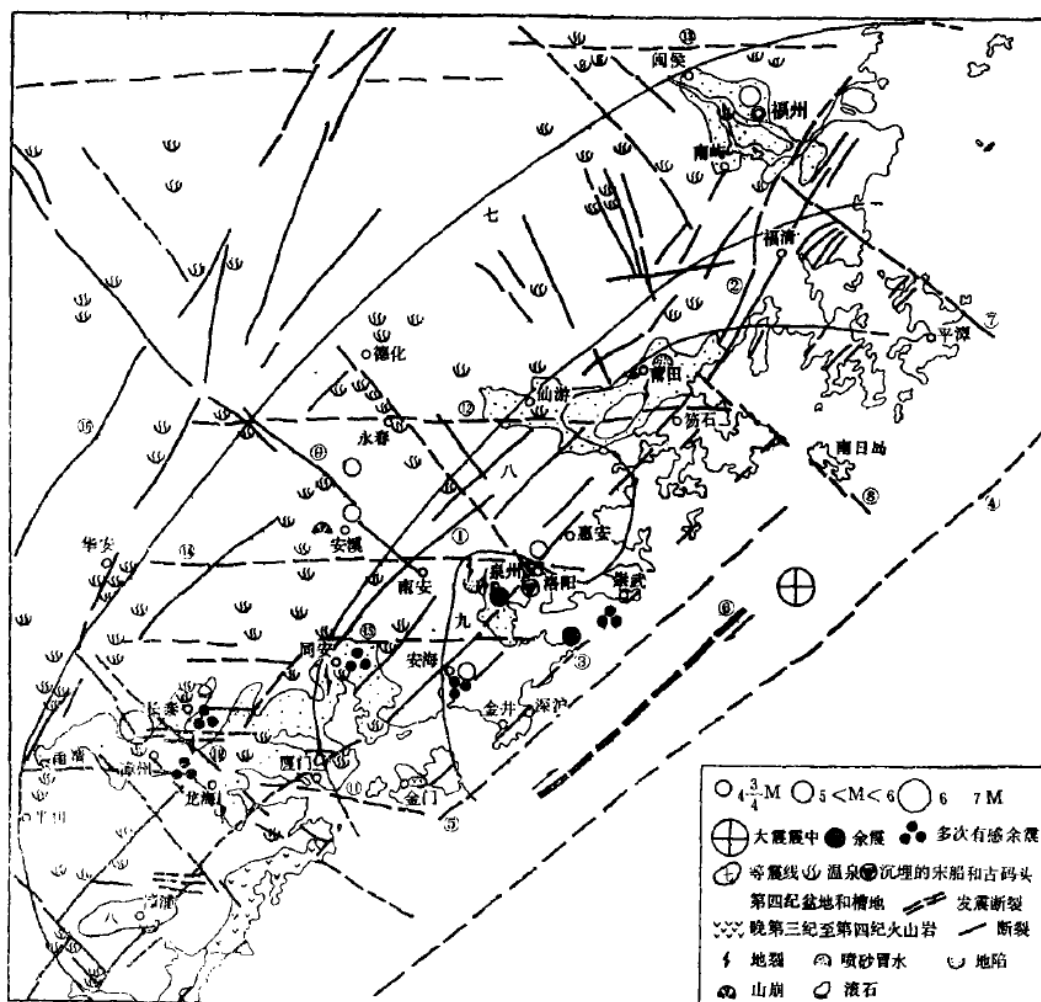


圖 5.10 泉州海外大震地震地質略圖。(雷土成與呂浩江，1985)

#### (4) 歷史地震震源參數推估

有關泉州地震參數之研究，鄭世楠，(2011) 詳細整理過去學者對該地震之分析與討論結果，其中李善邦 (1960) 整理的中國地震目錄中，震央為  $25.0^{\circ}\text{N}$ 、 $119.0^{\circ}\text{E}$ ，地震規模  $M=8$ ；中央地震工作小組辦公室 (1971) 整理的中國地震目錄中，震央位於  $25.0^{\circ}\text{N}$ 、 $119.5^{\circ}\text{E}$ ，地震規模  $M=8$ ；Lee et al. (1978) 整理的地震目錄中，震央  $25.0^{\circ}\text{N}$ 、 $119.5^{\circ}\text{E}$ ，表面波地震規模  $M_S=8$ ；吳維燦 (1980) 整理之震央在  $24.8^{\circ}\text{N}$ 、 $118.9^{\circ}\text{E}$ ，地震規模  $M=7.5$ ；郭增建、馬宗晉 (1988) 評估斷層面為走向： $38$ 、傾角： $\text{SE}54$  及走向： $133$ 、傾角： $\text{SW}85$ ；鄭世楠、葉永田 (1989) 整理台灣地區地震目錄中登錄震央： $25.0^{\circ}\text{N}$ 、 $119.5^{\circ}\text{E}$ ， $M_L=8.0$ ；謝毓壽 (1991) 認為地震規模  $M=7.5$ ；1994 年昆明歷史地震研討會地震規模定為  $M=7.5$

並總結最可能之地震參數。研究指出目前普遍接受之地震參數為：震央 25.0°N、119.5°E、震源深度 25 公里、 $M=7.5$ ，同時伴隨閩粵濱海斷裂帶之錯動。另外，近代文獻推估其規模大約介於 $M_w7.7$  至 $M_w8.0$  之間，且伴隨閩粵濱海斷裂帶之錯動。該事件雖然震央位置位於沿海，但由於對地表之擾動位於陸岸，因此並沒有嚴重之海嘯災情。

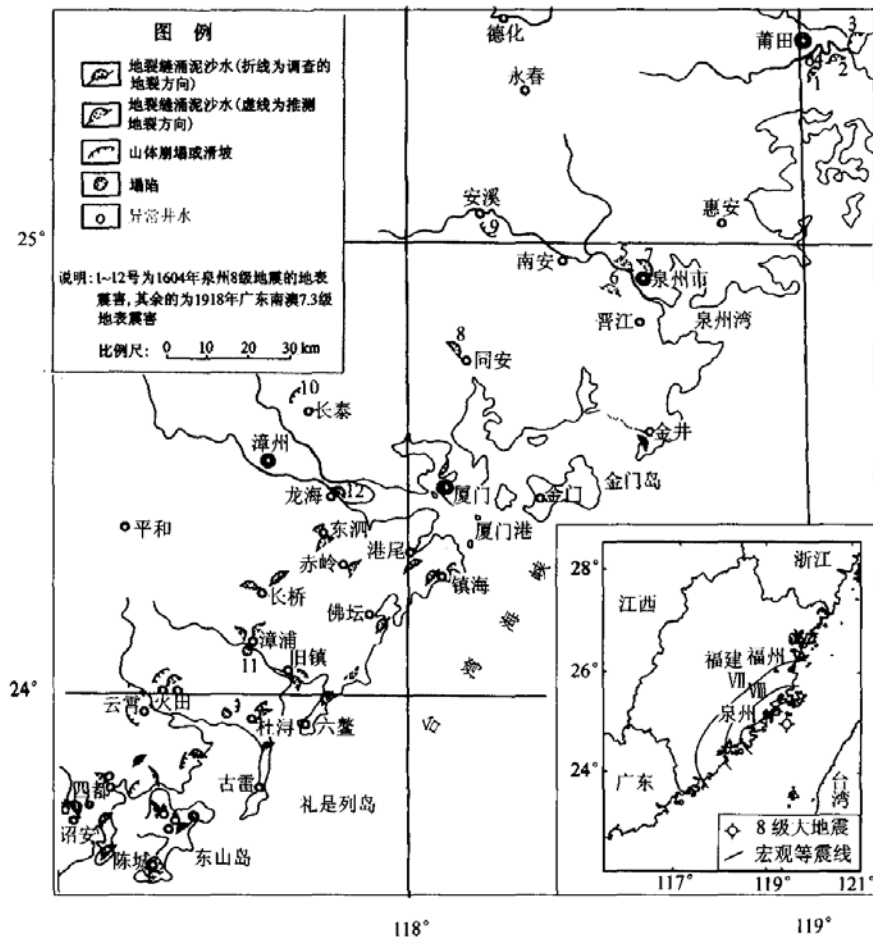


圖 5.11 1604 年福建泉州海外 8 級地震災害及等震線分布圖。



## 第六章 綜合研析場址特性調查評估要項

本章首先介紹低放射性處置「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)，敘述審查導則中有關場址特性特徵化之要求，其次介紹低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究(原委會物料管理局，2014)中所提到安全評估所需之參數，並根據假想案例評述達成現況，同時亦審視審查導則所要求之規範是否已足夠。接著參考瑞典 Forsmark 坑道處置技術報告 TR-14-01 (SKB, 2014j)，以國外經驗，回饋我國場址特徵化評估要項；最後根據國內潛在場址之地質、地形特殊性，提出場址特性評估要項。

### 6.1 審查導則之要求

本節根據低放射性廢棄物處置場址特性審查規範精進之研究(原委會物料管理局，2015)中「審查導則之場址特性修訂草案」，針對「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(第0版)精進之內容所描述，審查導則要求之精簡內容如下：

- (1) 社會與經濟：低放射性廢棄物處置設施經營者應建立場址相關之社會與經濟資訊，確保公眾健康及設施運轉與長期安全，故須提出下列資料供審查。
  1. 場址附近地區之行政區及半徑 10 公里範圍內交通設施與公共設施。
  2. 場址附近半徑 10 公里範圍內軍事設施與管制設施。
  3. 場址附近半徑 10 公里範圍內觀光休閒設施。
  4. 場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數、人口結構及目前人口分布與未來發展。
  5. 場址附近半徑 5 公里及 10 公里之同心圓劃分 16 個扇形區內之人口分布與土地利用情形，以及開發計畫。
  6. 半徑 50 公里範圍內人口超過 1 萬人的城鎮位置與人口統計。
- (2) 地形與地貌：地形與地貌的準確性對「安全分析報告」中輻射外洩及意外發生的情節假設相當重要，故須提出下資料供審查。
  1. 以正確的經緯度座標或 TWD97 二度分帶座標，描述場址及附近地區至少半徑 10 公里範圍內地形與地貌，包括地形高度與起伏趨勢、坡度分布、重要地貌特徵。並提出適當比例尺的場址地形圖，並應詳細評述場址地形。
  2. 以正確的經緯度座標或 TWD97 二度分帶座標，描述場址及附近地區至少半徑 10 公里範圍內具有潛在環境災害之地形特徵地區。
- (3) 氣象：提供場址地區氣候的一般資料、季節性與全年劇烈天氣現象發生的頻率、有紀錄的極端氣候資料及用於設計作業及功能評估之當地氣候資料。

1. 場址地區氣候的一般資料：氣團種類、天氣特徵、一般氣流型態、氣溫和濕度、降水量、最大降水強度以及綜觀尺度大氣過程與局部氣象條件的關係等。
  2. 描述場址地區季節性與年極端氣候現象的發生頻率：暴雨、颱風，並提供有紀錄以來之最大降水量、最高及最低溫度、最大風速。
  3. 影響設計作業及功能評估之當地氣候狀況：
    - A. 輻射安全評估的氣象參數，包括盛行的風向與最大風速、平均與最大風持續時間等。
    - B. 會使場址劣化的天氣參數，包括降水強度、暴雨、風向與風速、氣溫與氣壓梯度等。
  4. 描述場址當地氣候，大氣穩定度及空氣品質等。
  5. 處置設施申請者應於場址設置氣象站，取得當地至少連續 1 年的氣象紀錄，並彙整半徑 20 公里範圍內各氣象站進行區域性氣象與氣候分析。
  6. 當地氣候參數來評估設施建造、運作和地形的影響。
- (4) 地質與地震：區域性地震以及場址附近可能被誘發活動的地質構造，將影響處置安全，故須提出下列資料供審查。
1. 場址及附近地區之區域性地質構造、地體構造、區域性應力和歷史地震等相關資料，及其調查範圍與內容、調查架構、調查與評估方法、調查成果。
  2. 若場址及附近地區有符合地質法定義之活動斷層，應提出斷層的相關資料，並說明活動斷層與地震危害度之調查與評估方法。
  3. 提出場址之地層特性相關資料，包括岩石特性、斷層材料特性、塊體崩移 (mass wasting)、區域應力狀態 (regional stress regime) 等。
  4. 應進行下列調查並提出調查結果：地震特性、場址與區域地體構造特性、地震活動與地質構造或地體分區間的相互關係、可能最大地震、場址效應及設計基準地震。
- (5) 地表水：水會影響處置設施的設計、運轉、封閉與功能，故應說明場址及附近地區之地表水水體水文、水理、水質特性、水資源使用狀況及洪氾，而影響放射性核種外釋，故須提出下列資料供審查。
1. 場址及附近地區至少半徑 10 公里範圍內之地表水體水文、水理、水質特性、水資源使用狀況之描述及其調查方法。
  2. 提出該場址洪氾、侵蝕與水庫潰壩之分析結果。
  3. 提出受到暴雨影響，場址及附近地區水文、水理特性變化之分析。
  4. 場址/設施水文、水理特性介面之評估和描述。

(6) 地下水：地下水區域通常分為未飽和區與飽和區，水為放射性核種外釋的主要媒介，故應說明場址及附近地區之地下水體水文、水質特性及其使用狀況、水文地質架構與水文地質參數等資料及其調查方法，須提出下列資料供審查。

1. 飽和層與未飽和層特性調查資料：

- A. 水文地質架構與水文地質參數等之調查架構、調查與評估之方法以及調查之成果等。
- B. 測量、採樣、採樣地點與採樣頻率決定之邏輯、測量使用的儀器以及監測井的建造等之規格文件。
- C. 現地和實驗室數據分析的步驟。
- D. 地層層次分佈、含水層系統、與水文地質參數。
- E. 地下水飽和層概念模式包括補注區和流出區、主要含水系統之側向與含水層間的互動關係。
- F. 地下水體水文、水質特性與鄰近地表水體之關係及其使用狀況。
- G. 若為未飽和層，需描述土壤含水量變化、水分特性曲線、入滲速率以及流體於不飽和層中整體之移動特性。

2. 提供輸入水文地質模式的資料，包括現地與實驗室測量與分析資料、使用地質統計或其他數據產生或簡化技術的資料、外界來源資料和現地的任何修正資料等。

(7) 地球化學：場址地球化學特性，影響廢棄物體中放射性核種遷移，也涉及處置場的設計，影響場址的安全，須提出下列資料供審查。

- 1. 地球化學之調查架構、調查因子、調查與評估之方法，以及調查之成果等。
- 2. 水化學背景資料。
- 3. 土壤與岩石之分類組成及地球化學特性資料。
- 4. 地球化學模擬。
- 5. 天氣與雨水對土壤與岩石具有風化和溶解濾出之影響。

(8) 天然資源：場址及附近地區之重要天然資源，未來可能被開發，影響處置場之功能目標，故須調查場址附近地區已知存在的地質與礦產資源、水資源、防範無意闖入的方法、開發的影響。須提出下列資料供審查。

1. 地質與礦產資源：

- A. 說明已知存在的地質與礦產資源以及場址附近過去與目前鑽探與採礦的紀錄。
- B. 防範無意闖入的方法。

2. 水資源：

A. 水資源的描述：包含：(a) 場址及附近地區地下水目前與可能的使用情形描述、  
(b) 地表水目前與可能使用情形之描述。

B. 開發的影響描述：開發所造成水資源流域改變的分析結果，包括地下水流動時間、  
流速和方向等。

3. 說明可能闖入情節。

(9) 生態：場址及附近地區之陸生與水生的物種與其棲息地可能對設施的功能造成影響，也  
可能涉及食物鏈，須提出下列資料供審查。

1. 場址及附近地區之生態調查資料。

2. 場址及鄰近地區的生態地圖。

3. 現地植物物種的資料、孕育該物種之主要農作層及主要農耕型態。

4. 可能影響處置場安全之自然作用、生物活動與人為活動及其未來演化的概述。

5. 已知對設施功能有重大影響的脊椎動物物種、保育類野生動物與植物清單。

6. 當地有重要影響的病媒或害蟲之非脊椎動物物種清單。

7. 重要的畜牧業、養殖業及漁業動物清單與估算。

(10) 輻射背景偵測：若有處置場運轉前的輻射背景偵測結果，未來可與運轉中、封閉後的  
輻射偵測結果相比較，可顯示處置場之影響。所以申請者須提出下列資料供審查。

1. 運轉前二年以上環境輻射背景偵測結果。

2. 偵測方法：A. 環境直接輻射；B. 環境試樣；C. 建立運轉後環境試樣紀錄基準及環  
境試樣調查基準之預警措施。

(11) 大地工程特性：場址之大地工程特性影響處置設施之設計與處置功能與安全，故須提  
出下列資料供審查。

1. 地質、水文地質、大地工程與現地應力特性之調查與評估之方法，以及調查成果等。

2. 工程地質與大地工程調查：

A. 可清楚陳述場址地質狀況之地質圖、地質剖面、地質構造、地質歷史與工程地質  
資料，及其測量方法。

B. 場址地區土壤與岩盤的物理及力學特性。

C. 若採坑道處置，需另提供坑道開挖所引致圍岩擾動範圍與圍岩大地工程特性變化  
之評估，及岩體評分之建議。

- D. 處置設施設計基準地震事件的資料，必須包括地震的規模、地震之深度與位置、尖峰水平與垂直加速度、最大地表加速度、地震的延時和場址土壤條件對地表震動放大效應之潛勢。
- E. 平面圖中應清楚顯示低放處置設施的輪廓和所有鑽孔、調查點、處置坑、處置壕溝、地球物理測線、水壓計、觀測井和地質剖面的位置。
- F. 足夠數量的場址剖面圖，以清楚顯示土壤與岩石分層，及處置設施與地表下材料之相關性。
- G. 地球物理探勘。

3. 現地與實驗室試驗及工程特性：

- A. 場址及借土區之土壤及岩石現地與實驗室試驗。
- B. 說明現地與實驗室試驗試體的作業程序準備工作。
- C. 若場址地下與回填材料之變形或差異沉陷、液化潛能，以及地表下土壤液化對覆蓋材料穩定度的影響等，須對該地區進行土壤液化與沉陷潛能評估。
- D. 處置設施設計與建造之地工參數已使用合理且保守的參數值，必須能解釋這些參數如何用於設計、確實屬於保守。

4. 借土材料

- A. 回填用之借土材料範圍、整地和邊坡之相關計畫及材料形態及數量與棄置區。
- B. 根據實驗室的試驗結果決定之借土材料工程特性。

5. 地層與設計參數

- A. 適量處置場之平面與剖面圖。
- B. 說明土壤與岩石分層。
- C. 設計參數：根據該場址土壤與岩石分層以及土壤與岩石材料的試驗結果。
- D. 大地工程特性描述應包括與生命週期評估有關之資料。

(12) 交通狀況：為使處置設施興建、運轉與未來封閉作業順利，必須說明場址與附近地區交通狀況，故須提出下列資料供審查。

- 1. 場址與附近地區交通運輸系統的說明，包括鐵路、公路、或水運等。
- 2. 各種交通運輸系統的運輸能力及各種運送工具與流量。
- 3. 放射性廢棄物運送路徑沿線的居民人口數及利用此道路的時間。

(13) 其他

1. 說明其他足以影響處置設施設計及建造之場址特性因素（如火山活動、海嘯、地層下陷與泥火山等）。
2. 場址特性調查範圍應以學理上完整之地理區域為準，調查週期與精度應符合一般工程技術規範要求，成果應足以充分說明場址特性。
3. 調查成果應以適當比例尺之地圖加以說明，歷史資料應加以統計分析並以適當圖表呈現以利審查。原始調查數據得列為報告附冊備查。
4. 視場址之地域差異性，申請者得提供其他足以影響處置設施設計與建造之場址特性因素補充說明。

## 6.2 安全評估之需要參數

有關場址之安全評估所需之參數，本節參考低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究（原委會物料管理局，2014），予以重點摘錄如後：

安全評估從源項、近場遠到生物圈涉及許多不同模式之整合應用，處置場址特性與工程障壁參數將影響安全評估過模式之需求，應先釐清不同安全分析模式所需之關鍵參數。其中源項包含廢棄物汙染特性（放射性核種）相關參數為主；近場主要需考量工程障壁功能參數；遠場及生物圈則主要為場址特性參數為主，最終由輻射劑量的計算來評估不同外釋情節可能造成的輻射衝擊。

### （1）源項模式

源項模式主要描述放射性核種自廢棄物外釋至周圍汙染土壤中，再經由各項途徑傳播至大氣、地表逕流下水等生物環境中。源項模式與場址環境相關參數包括：

1. 覆蓋土壤侵蝕率。近地表處置設施上方的覆蓋土壤提供設施封閉後直接輻射的屏蔽，以及防止人員闖入作業的防護，經過長期侵蝕作用覆蓋厚度減少後將影響其屏蔽功能。
2. 人類擾動因素。人員闖入是處置設施封閉階段後需要防範或降低的情節。人員闖入進行構築、農耕等活動會導致覆蓋厚度重新分布，對於放射性核種釋出至鄰近土壤造成影響。

### （2）近場模式

近場所涵蓋的範疇為開挖場址，包含廢料包件、回填與封閉材料、與受開挖擾動之地質圈，近場模式與場址特性相關參數參數如下：

1. 水文地質參數
  - A. 水文地質模型、地下水位面

- B. 水相主要物種、土壤主要礦物組成
- C. 孔隙率、水力傳導係數、未飽層水力特性參數
- D. 延散係數、擴散係數
- E. 異質性、非等向性
- F. 與鄰近地表水體之關係

## 2. 水文氣象參數

- A. 降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量

## 3. 生地化反應參數

- A. 主要物種反應方程式
- B. 動態反應速率、平衡常數
- C. 吸脫附模型與參數、離子交換部位
- D. 遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數

### (3) 遠場模式

遠場模式涵蓋從處置場址鄰近之未擾動地質圈以外之區域至核種移棲路徑所可能影響之人類生活圈，例如鄰近之飲用水井或地表水體。而近年來隨著數值模式的進展與功能日益增強，遠場模式所需的功能是某些近場模式可以同時達成的，以 HYDROGEOCHEM (Yeh et al., 2004a, 2004bm 2009) 為例，是可以同時作為近場模式與遠場模式使用，在空間數值離散由於採用有限元素法，因此非常適合用於近場與遠場整合模擬，遠場模式與場址特性相關參數如下：

## 1. 水文地質參數

- A. 水文地質模型、地下水位面
- B. 水相主要物種、土壤主要礦物組成
- C. 孔隙率、水力傳導係數、未飽層水力特性參數
- D. 延散係數、擴散係數
- E. 異質性、非等向性
- F. 與鄰近地表水體之關係

## 2. 水文氣象參數

- A. 降水、蒸發散、風速、相對溼度、淨輻射量

3. 生地化反應參數
  - A. 主要物種反應方程式
  - B. 動態反應速率、平衡常數
  - C. 吸脫附模型與參數、離子交換部位
  - D. 遲滯係數或適用之等溫吸附模型與參數
4. 生物圈相關參數
  - A. 鄰近地表水體位置
  - B. 鄰近飲用水井位置、抽取率

本報告分別探討源項、近場及遠場與場址有關之參數，並與「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」（第0版）比較，與場址相關之參數是否都滿足導則之需求。

審查導則中關於源項模式之參數，覆蓋土壤侵蝕率方面於「地表水」章節規範須提供侵蝕之分析結果，人類擾動因素規範於「生態」章節，源項模式關於場址之參數整體上都滿足審查導則之要求。而台電之調查結果顯示，覆蓋土壤侵蝕率有關之描述在台電公司「場址特性參數評估報告」中針對「地形與地貌」章節描述，人類擾動因素在報告中並無太多著墨。

近場模式如上述所說可與遠場模式整合模擬，水文地質參數方面，於地下水章節規範須提供調查架構、調查、評估方法及調查結果，但詳細調查項目可能落在其它章節或並未明確規範，例如土壤主要礦物組成被歸類於「地球化學」章節，另外，延散係數、擴散係數等於導則中並未規範。水文氣象參數方面，「氣象」章節有明確規範，但蒸發散及淨輻射量並未規範。生地化反應參數方面，導則中主要於「地球化學」章節中規範。生物圈相關參數方面兩項所需之參數分別於審查導則中「地表水」及「天然資源」有所規範。台電公司目前調查進度方面，除了需要等待場址確定後實際鑽探調查之參數還未有結果，或是參考鄰近地區之鑽探結果外，大致上的調查結果都滿足審查導則要求。

整體而言，「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」中，對於參數之需求各方面的內容充足，但對於參數之要求多為文字敘述，因此建議審查導則中對於參數的要求可以更明確，使導則中之參數能滿足後續模擬之要求。另外，台電公司在「場址特性參數評估報告」中依據審查導則各項調查要項之要求整理出需要之參數，可作為後續精進審查導則之依據，使調查結果能滿足模擬之要求及未來場址特性評估結果能更完整，使民眾更放心。

### 6.3 根據國外經驗回饋國內場址特徵化需求

瑞典SFR處置場技術報告TR-14-01（SKB，2014j）有關場址之描述，首先說明場址的初始狀態，包含處置場及其週邊環境，處置場部分涉及廢棄物及處置設施，本報告不討論。場址週邊環境之初始狀態調查項目包含氣候、地表系統、基岩、水文地質及地下水化學。目前國內之審查導則整體上都涵蓋了以上調查要項，而台電公司調查的結果在初始狀態方面內容主要依據審查導則撰寫，部分調查要項（例如：基岩）未完成或是參考鄰近地區之參數，主



要乃因國內兩處潛在場址還尚未正式成為處置場場址，所必須等到場址確定後，實際進行調查才能得到較完整的結果。

TR-14-01報告接著論述處置場評估期間內之演化，包含地表系統、力學、水文地質、近場水文、地球化學、廢棄物化學以及特設安全裝置障壁等演化過程進行評估，目前國內兩處場址關於各項演化過程，僅描述了地表系統演化，可能尚需要對處置場區域場址特徵演化進一步調查與研究，尤其台東縣達仁鄉潛在場址位於海平面之上，對於覆蓋層之侵蝕評估值得注意。關於場址力學演化，我國兩場址仍需特別注意裂隙系統因地震造成局部錯動之影響。水文方面，台東縣達仁鄉潛在場址位於地形起伏大且屬複褶皺之區域，根據附近安朔-草埔隧道工程之案例，此區可能有局部之破碎帶，可能導致湧水之現象，對於處置場設計施工與安全評估而言，均非常重要，有必要審慎評估。地球化學方面，國內兩處潛在場址針對場址周圍之土壤及岩石之化學特性已有初步成果，未來可以朝向其演化過程進行研究。

綜言之，國內目前之審查導則對於初始狀態之要求完整，而台電公司對於審查導則所要求項目之調查，除了需要現地調查之項目之外，內容算是充足，但對於後續正常狀態下之演化審查導則內並沒有充分要求，因此台電公司對於這部分調查成果內容也不夠充足，這可能需要進一步的研究。

## 6.4 國內場址特性地質特殊性

綜合國內對於低放射性廢棄物處置之審查導則，以及國外處置場之技術報告，國內目前所使用「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則（第0版）」所缺乏對於場址後續演化之結果，國外技術（TR-14-01）對於國內場址而言，因為此報告之場址位於相對較穩定之地盾區域，地質構造相對單純，因此比較缺乏的是對於地震的調查，而審查導則對於地質地震有明確的規範。然而，國內兩處潛在場址地理環境不相同，除了審查導則之要求外，還需要注意這兩處場址之特殊環境。

### (1) 台東縣達仁鄉：

相對於瑞典 Forsmark 地區之處置場址，台東縣達仁鄉潛在處置場場址範圍內地形起伏複雜，多褶皺，且位於海平面之上，外在因素（降雨、風力）造成地表侵蝕可能危及處置場之安全，可能造成處置場設施出露於地表。場址範圍內因造山運動可能造成褶皺或產生破碎帶，前面章節有提到位於場址附近之安朔-草埔隧道工程因開挖至破碎帶造成大湧水事件，然而，處置場場址內地層內破碎帶未知，如果地層含有地下水在處置設施開挖時可能會遭遇湧水現象，處置場經過地下水層可能會導致放射性核種透過地下水傳輸而外洩。再者，我國位於板塊邊界，與瑞典 SFR 處置場之場址案例不同，處置場周圍有幾個區域是地震密地帶，可能會造成處置場大小不等的震度，斷層錯動可能造成處置場周圍產生應力的改變，進一步會造成處置場之破壞，必須審慎評估。此場址臨近海域之海底構造是否有發生海底山崩的可能，進而造成局部性的海嘯，潛在場址可能造成之影響，建議選址作業亦應適時進行評估分析。

## (2) 金門縣烏坵鄉：

金門縣烏坵鄉處置場之設計與瑞典 SFR 處置場類似，預計將設在海平面下，但處置場環境有所差別，SFR 處置場之岩覆厚度約 60 m，Forsmark 地區的地質條件屬於海灣，估計處置場周圍未來是由淹沒環境（處置場上方為海洋）漸漸演化成陸地環境，而金門縣烏坵鄉之潛在場址屬於島嶼類型，場址周圍環境之演化可能與 SFR 處置場不同，必須加以評估。而金門縣烏坵鄉之潛在場址位於閩粵沿海地區，此處過去曾發生過規模大於 7 以上之地震（例如 1604 年在場址附近發生規模 7.5 之強震（泉州地震）），可能影響處置場設施之安全，諸如斷層分佈、震央位置、對於處置場產生最大地表加速度，與海底地震可能造成之海嘯對於處置場地表設施影響，建議選址作業者應適時進行評估分析。另本建議候選場址位於小坵嶼，四面環海，可能需要研究場址之地下水分佈以及其化學性質可能對於核種傳輸性質，與開挖後是否會造成淡水及海相之鹽水混合，選址作業者亦應評估分析對於處置設施安全功能之影響。

整體而言，我國目前兩處潛在場址之場址特性不同，審查導則並未針對場址之特殊性進行規範及研究，未來這個議題可以進行討論。但相對的，我國位於板塊交界，地質狀態不穩定，對於地震之調查，審查導則就有完整的規範，台電公司也對於地震的調查也有豐碩的成果。

## 第七章 結論與建議

場址特性調查結果為低放射性廢棄物處置之重要依據，本計畫進行放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立之資訊研析，首先研析國外文獻 TR-14-01：Safety analysis for SFR Long-term safety Main report for the safety assessment SR-PSU (SKB, 2014)，根據不同主題進行各個子計畫分工，最後由本計畫進行彙整呈現於本報告中。接著介紹國內潛在場址調查之進程，說明場址特性調查之成果，並綜合研析台灣近岸與離島可能之特殊地質、氣候與其因應之調查要項，審慎評估調查項目之充足性，並據以建立審查假想案例，與國外文獻比較調查項目之差異。由於台灣具有特殊地形地質環境，國內之場址特性調查要項即應具備地域性，故需透過研析台灣潛在場址之特殊條件，訂定因應之調查要項。綜合而言，藉由本計畫，希望基於國外場址經驗，考量我國特殊條件，研擬我國潛在場址坑道處置調查要項，並作為擬訂適合國內之場址特徵化平行審驗技術之參考，最後回饋導則與技術規範之精進。本計畫重要成果總結如下：

### 7.1 結論

- (1) 本計畫彙整共同研讀國外坑道處置文獻 TR-14-01 (SKB, 2014j)，針對瑞典 Forsmark 地區之場址安全評估報告進行審閱與評析，以作為我國候選場址未來調查、設計與安全評估之參考。而有關場址之敘述，說明了處置場設施及場址周圍環境之初始狀態，並且針對不同的角度評估在正常狀況下，處置場週遭之演化。
- (2) 我國於於95年5月24日公布「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」，並成立處置設施場址選擇小組，使最終處置選址工作得以推動，經濟部於101年7月3日核定公告「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」兩處潛在場址，完成「建議候選場址遴選報告」。而近期台電公司對於兩處潛在場址之場址特性調查相較於前期之報告有重大的進展。
- (3) 本計畫蒐集與彙整台電公司「場址特性參數評估報告(0.1版)(修訂一版)台東縣達仁鄉」及「場址特性參數評估報告(0.1版)(修訂一版)金門縣烏坵鄉」台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉兩處候選場址，針對審查導則之要求，分別說明了13大項，173個參數進行說明。
- (4) 對於國內潛在場址特殊地質環境之研析結果發現，台東縣達仁鄉未來處置隧道開挖時，應留意岩層破碎帶導致湧水及抽坍，達仁鄉潛在場址未來安全評估亦應特別注意破碎帶之影響；另外，台東外海海底山崩造成局部地區海嘯之可能性以及其對處置場之影響，應審慎評估。中國閩粵地區之地震(例如：1604年泉州地震)對金門縣烏坵鄉之潛在場址影響，選址作業者在安全評估時亦應加以考慮。
- (5) 彙整「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則(第0版)」有關場址之描

述，與場址之安全評估所需之參數比較，比較結果發現安全評估之參數已包含審查導則之要求，本報告也透過研讀國外文獻與國內審查導則之差異，發現審查導則所要求之項目，多為場址之初始狀態，對於後續正常狀態下的演化評估並未充分的要求。最後，針對我國場址之特殊性是否需要依照個別的場址於導則內規範可進一步探討。

## 7.2 建議

- (1) 目前我國所使用的審查導則「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則（第0版）」是參考美國低放處置技術而編撰，美國原考慮處置場址屬沙漠地區，且處置概念以地表處置為主。而我國可能選擇近岸或離島火成岩與變質岩（板岩）場址，且以坑道處置為主，因此，瑞典SFR處置場之技術發展經驗非常值得我國參考。
- (2) 目前審查導則對於場址特性所要求之項目主要以場址之初始狀態，也就是場址特性現況為主，考慮到長期安全評估要求，防止放射性核種外洩到人類生活圈，建議未來導則應對於後續演化過程適度加以規範。
- (3) 除了審查導則要求之項目，亦需考慮場址地區性可能造成處置場危害之因素，例如台東縣達仁鄉場址之破碎帶及場址鄰近海域發生海底山崩造成區域性海嘯之影響；金門縣烏坵鄉則需注意閩粵地區地震帶之影響，因此，本計畫台灣近岸與離島可能之特殊地質與其因應之調查要項建議納入後續計畫追蹤、探討之參考，以最後回饋至導則與規範。
- (4) 我國目前兩處潛在場址仍處於公投階段，因此台電公司對於場址現地成果方面比較不足，一些資料參考鄰近地區之調查結果，待場址確定後方能補充現地調查成果，雖有場址未確定之限制條件，建議台電仍能持續發展場址調查與場址特徵化技術。

## 參考文獻

1. Abarca, E., Idiart, A., de Vries, L.M., Silva, O., Molinero, J., von Schenck, H., 2013. Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
2. Birgersson, M., Andersson, L., 2014. Freezing of bentonite components in SFR – modeling and laboratory testing. SKB R-14-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.
3. Birgersson, M., Karnland, O., 2014. Flow and pressure response in compacted bentonite due to external fluid pressure (in preparation). SKB TR-14-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.
4. Börgesson, L., Åkesson, M., Kristensson, O., Malmberg, D., Birgersson, M., Hernelind, J., 2014. Modelling of critical H-M processes in the engineered barriers of SFR. SKB TR-14-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.
5. Bosson, E., Sassner, M., Sabel, U., Gustafsson, L., 2010. Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. SKB R-10-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
6. Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., and Yang, M., 2011. Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, pp. 1-16.
7. 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.
8. Cronstrand, P., 2007. Modelling the long-time stability of the engineered barriers of SFR with respect to climate changes. SKB R-07-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.
9. Cronstrand, P., 2014. Evolution of pH in SFR 1. SKB R-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
10. 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.
11. Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979, *Ground Water*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
12. French, H.M., 2007. *The periglacial environment*. 3rd ed. Chichester: Wiley.
13. Gaucher, E., Tournassat, C., Nowak, C., 2005. Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. Final report. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.
14. Höglund, L.O., 2001. Project SAFE. Modelling of long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository. SKB R-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
15. Höglund, L.O., 2014. The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
16. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguera, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K.,

- Johnson, C.A., 2001. Climate change 2001: the scientific basis.
17. IAEA, 2011a, Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, SSG-14.
  18. IAEA, 2011b, Disposal of Radioactive Waste, SSR-5.
  19. IPCC, 1990. In: Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (Eds.), Scientific Assessment of Climate change—Report of Working Group I. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 365pp.
  20. IPCC, 2013, Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
  21. Keith-Roach, M., Lindgren, M., Källström, K., 2014. Assessment of complexing agent concentrations in SFR. SKB R-14-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  22. Kjellström, E., Strandberg, G., Brandefelt, J., Näslund, J.O., Smith, B., Wohlfarth, B., 2009. Climate conditions in Sweden in a 100,000-year time perspective. SKB TR-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  23. Lallemand, S., Lehu, R., Rétif, F., Hsu, H.K., Babonneau, N., Ratzov, G., Bassetti, M.A., Dezileau, L., Hsieh, M.L., Dominguez, S., 2015. A ~3000 years-old sequence of extreme events revealed by marine and shore deposits east of Taiwan. Tectonophysics. (In Press)
  24. Lee, W. H. K., F. T. Wu and S. C. Wang, 1978: A catalog of instrumentally determined earthquakes in China (magnitude>6) compiled from various source, Bull. Seism. Soc. Am., 68, 383-398.
  25. Li, L., Switzer, A.D., Wang, Y., Weiss, R., Qiu, Q., Chan, C.H., and Tapponnier, P., 2015. What caused the mysterious eighteenth century tsunami that struck the southwest Taiwan coast?, Geophys. Res. Lett., Vol. 42, pp. 8498-8506.
  26. Mas Ivars, D., Ríos, M.V., Shiu, W., Johansson, F., Fredriksson, A., 2014. Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. SKB R-13-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  27. 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.
  28. NDA, 2015. Geological Disposal: Waste Package Specification for 6 cubic metre concrete box waste package, WPS/360/03.
  29. NRC, 1981. Draft Environmental Impact Statement on 10 CFR Part 61 Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, NUREG-0782, Vol. 4.
  30. NRC, 1989. A guide to The Nuclear Regulatory Commission's 10 CFR Part 61, NUREG/BR-0121.
  31. NUMO, 2011, 地層 処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性, TR-10-03, 日本原子力発電環境整備機構。
  32. Odén, M., Follin, S., Öhman, J., Vidstrand, P., 2014. SR-PSU Bedrock hydrogeology. Groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-13-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.
  33. 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.
34. SKB, 2013. Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase, SDM-PSU Forsmark, TR-11-04.
  35. SKB, 2013b. Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU. SKB R-13-18.
  36. SKB, 2014a. Initial state report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-02.
  37. SKB, 2014b. Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-04.
  38. SKB, 2014c. Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-05.
  39. SKB, 2014d. Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06.
  40. SKB, 2014e. Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05.
  41. SKB, 2014f. FEP report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-07.
  42. SKB, 2014g. Handling of future human actions in the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-08.
  43. SKB, 2014h. Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU, SKB R-14-02.
  44. SKB, 2014i. Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-09.
  45. SKB, 2014j. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-01.
  46. SSM, 2015. Safe and responsible management of spent nuclear fuel and radioactive waste in Sweden, 2015:32.
  47. SSMFS, 2008:21. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (Regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste) . Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority) . (In Swedish)
  48. SSMFS, 2008:37. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall (Regulations on the protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste) . Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority) . (In Swedish)
  49. Thorsell, P.E., 2013. Studier av frysningsegenskaper hos betong från 1 BMA. SKB P-13-07, Svensk Kärnbränslehantering AB. (In Swedish)
  50. Yeh, G.T., Sun, J.T., Jardine, P.M., Burger, W.D., Fang, Y.L., Li, M.H., and Siegel, M.D., 2004a. HYDROGEOCHEM 4.0: HYDROGEOCHEM 4.0: A Coupled Model of Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Saturated-Unsaturated Media: Version 4.0. ORNL/TM-2004/103, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN

37831.

51. 工研院能資所，1999，烏坵地區地震評估(第一階段研究)報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4200。
52. 工研院能資所，2000h，小坵孔內地球物理探測孔內攝影工作報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4601。
53. 工研院能資所，2000i，烏坵地區地震評估(第二階段研究)報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4801。
54. 工研院能資所，2000j，烏坵地區地震評估報告(包含第一階段及第二階段成果)，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RS-4803。
55. 工研院能資所，2000k，地表水文調查工作報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RS-5000。
56. 工研院能資所，2000l，單井水力試驗工作報告。財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-5502。
57. 工研院能資所，2000m，單井追蹤稀釋擴散試驗工作報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-5506。
58. 工研院能資所，2000n，小坵既有水井現況調查工作報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-5503。
59. 工研院能資所，2000o，地化調查土壤及岩石採樣分析報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-6012。
60. 工研院能資所，2000p，地工調查分項工作報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-3504。
61. 工研院能資所，2000q，小坵地下水位監測報告，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-5508。
62. 工研院能資所，小坵地表地球物理探測折射震測工作報告，2000f，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4100。
63. 工研院能資所，小坵地表地球物理探測地電阻影響剖面調查工作報告，2000e，財團法人



- 工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4700。
64. 工研院能資所，小坵地表地球物理探測重力測勘工作報告，2000g，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4300。
  65. 工研院能資所，小坵地區場址地質鑽探報告，2000d，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RS-3000。
  66. 工研院能資所，小坵地質圖(1/1000)說明書，2000c，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-2101。
  67. 工研院能資所，小坵優先調查候選場址-場址調查報告，2000a，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RS-2100-R.1。
  68. 工研院能資所，烏坵地區海域地球物理探測，2000b，財團法人工業技術研究院能源與資源研究所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，4ML1100-RG-4015-R.1。
  69. 中央地震工作小組辦公室，1971，中國地震目錄，北京：科學出版社。
  70. 台灣電力公司，104a，場址特性參數評估報告-台東縣達仁鄉。
  71. 台灣電力公司，104b，場址特性參數評估報告-金門縣烏坵鄉。
  72. 台灣電力公司，2002，可能替代場址基本資料及概念評估報告。
  73. 台灣電力公司，2009，低放射性廢棄物處置設施功能模擬評估（A版）。
  74. 台灣電力公司，2013，低放射性廢棄物處置設施功能模擬評估（D版）。
  75. 交通部公路總局，2011，台9線南迴公路拓寬改善後續計畫-安朔至草埔段新闢四車道工程委託設計委外地質探查工作-隧道段地質鑽探工程報告。
  76. 原委會物料管理局，2010，低放射性廢棄物最終處置地質材料對核種遷移之參數研究，992001INER014。
  77. 原委會物料管理局，2012，低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則（第0版）。
  78. 原委會物料管理局，2013，低放射性廢棄物處置場址特性與設施設計審查規範精進之研究，102FCMA009。
  79. 原委會物料管理局，2014，低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，103FCMA002。
  80. 原委會物料管理局，2015，低放射性廢棄物處置場址特性審查規範精進之研究，104FCMA002。
  81. 吳佳瑜，2008，台灣南部海域海底崩移之分佈與特徵，國立台灣大學海洋研究所，碩士論文。
  82. 吳祚任，2015，1604泉州地震於海嘯生成之敏感性分析及其對台灣西部沿海之影響，中央氣象局地震技術報告彙編，MOTC-CWB-104-E-19。
  83. 李善邦，1960，中國地震目錄，北京：科學出版社。

84. 林衍丞、蘇兆輝、周允文、賴明煌，2015，南迴公路硬頁岩隧道地質模式分析以豎井工區為例。
85. 許振棟，2006，1604年泉州海外8級地震研究，大地測量與地球動力學, v.26, p.78-83。
86. 郭增建與馬宗晉，1988，中國特大地震研究，北京：地震出版社。
87. 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，國立台灣大學地質科學研究所，博士論文。
88. 陳惠芬，1984，從三角點檢測成果見到的台灣地盤升降，經濟部中央地質調查所特刊，第3號，第127-140頁。
89. 彭宗宏、李遠輝、吳大銘，1977，全新世以來臺灣島的上升率，中國地質學會專刊，第2號，第57-70頁。
90. 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，工業技術研究院，SNFD-ERL-90-167。
91. 經濟部，2011，100年經濟部建議候選場址遴選報告。
92. 經濟部中央地質調查所，2010，地震地質與地變動潛勢分析—地變動監測分析（4/4）。
93. 經濟部低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組，2009，建議候選場址遴選報告。
94. 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，大地工程學術研究討論會論文專集，第19-23頁。
95. 雷土成與呂浩江，1985，1604年泉州海外大震的發震構造，台灣海峽4.2(1985):171-178。
96. 福建省政府、中華人民共和國建設部聯合編製，2006，海峽西岸城市群協調發展規劃。
97. 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。
98. 劉聰桂，1982，台灣磷灰石、鋁石、矽石之核飛跡研究與其在大地構造上之意義，國立台灣大學地質科學研究所，博士論文。
99. 鄭世楠，2011，臺灣地區歷史地震資料的建置，中央氣象局地震技術報告彙編，MOTC-CWB-100-E-14。
100. 鄭世楠與葉永田，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，IES-R-661，255頁。
101. 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。
102. 謝毓壽，1991，閩粵海外的歷史地震活動，地震學報，Vol.13（4）：505-516。

行政院原子能委員會放射性物料管理局

「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之國際資訊研析」委  
託研究計畫期末報告審查意見

子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術建立之資訊  
研析

編號	頁碼	審查意見	回復說明
1	-	報告內容符合契約要求。	感謝審查委員意見。
2	-	請於成果報告光碟中檢附參考文獻電子檔。	遵照辦理。
3	111	有關「而 1781 至 1782 年期間位於台灣西南沿岸發生數次具毀滅性之海嘯，造成超過 4 萬人傷亡 (Lallemant et al., 2015)。」，因上述海嘯事件文獻紀載不多，且說法各異，建議修正為「 <u>而 1781 至 1782 年期間位於台灣西南沿岸亦有發生大規模海嘯之紀載</u> 」。	依建議內容修改為「 <u>而 1781 至 1782 年期間位於台灣西南沿岸亦有發生大規模海嘯之紀載</u> 」。
4	125	有關達仁鄉地質特殊性說明「..另外，此場址臨近海域之海底構造有發生海底山崩的可能，並且造成局部性的海嘯（大於 10 m），對於潛在場址可能造成之影響應該需要考慮。」，建議修正為「 <u>.. 此場址臨近海域之海底構造是否有發生海底山崩的可能，進而造成局部性的海嘯，潛在場址可能造成之影響，建議選址作業者亦應適時進行評估分析。</u> 」	依建議內容修改為「 <u>.. 此場址臨近海域之海底構造是否有發生海底山崩的可能，進而造成局部性的海嘯，潛在場址可能造成之影響，建議選址作業者亦應適時進行評估分析。</u> 」。
5	126	有關烏坵鄉地質特殊性說明「..可能危及處置場設施之安全，諸如斷層分佈、震央位置、對於處置場產生最大地表加	依建議內容修改為「 <u>可能影響處置場設施之安全，諸如斷層分佈、震央位</u>

		<p>速度，且對於海底地震可能造成海嘯，必須評估海嘯對於處置場之地表設施之影響。本處置場位於小坵嶼，四面環海，可能需要研究本島之地下水分佈及其化學性質可能對於核種傳輸性質，在開挖後是否會造成淡水及海相之鹽水混合。」，建議修正為「<u>可能影響處置場設施之安全，諸如斷層分佈、震央位置、對於處置場產生最大地表加速度，與海底地震可能造成之海嘯對於處置場地表設施影響，建議選址作業者應適時進行評估分析。另本建議候選場址位於小坵嶼，四面環海，可能需要研究場址之地下水分佈及其化學性質可能對於核種傳輸性質，與開挖後是否會造成淡水及海相之鹽水混合，選址作業者亦應評估分析對於處置設施安全功能之影響。</u>」。</p>	<p><u>置、對於處置場產生最大地表加速度，與海底地震可能造成之海嘯對於處置場地表設施影響，建議選址作業者應適時進行評估分析。另本建議候選場址位於小坵嶼，四面環海，可能需要研究場址之地下水分佈及其化學性質可能對於核種傳輸性質，與開挖後是否會造成淡水及海相之鹽水混合，選址作業者亦應評估分析對於處置設施安全功能之影響。</u>」。</p>
6	127	<p>結論(4)有關「……中國閩粵地區之地震（例如：1604年泉州地震）對金門縣烏坵鄉之潛在場址影響，安全評估亦應加以考慮。」，建議修正為「……<u>中國閩粵地區之地震（例如：1604年泉州地震）對金門縣烏坵鄉之潛在場址影響，選址作業者在安全評估時亦應加以考慮。</u>」</p>	<p>依建議內容修改為「……<u>中國閩粵地區之地震（例如：1604年泉州地震）對金門縣烏坵鄉之潛在場址影響，選址作業者在安全評估時亦應加以考慮。</u>」。</p>