

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

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全
審驗技術建立之驗證評估研究
期末總報告

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局
執行單位：國立中央大學
計畫主持人：董家鈞
子項主持人：龔誠山、楊長義、李明旭、林文勝
計畫編號：107FCMA002
報告日期：中華民國 107 年 12 月 10 日

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全 審驗技術建立之驗證評估研究

受委託單位：國立中央大學

研究主持人：董家鈞

協同主持人：龔誠山、楊長義、李明旭、林文勝

研究期程：中華民國 107 年 2 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 4,980,000 元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 107 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)

目 錄

一、 摘要(中、英文)	1
二、 計畫目標.....	2
三、 重要成果.....	2
四、 展望.....	7
五、 附件.....	8
子計畫 1： 「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術驗證評估 研究」期末報告.....	8
子計畫 2： 「低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證評估之研究」 期末報告.....	8
子計畫 3： 「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研 究」期末報告.....	8
子計畫 4： 「低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證評估之研究」 期末報告.....	8
子計畫 5： 「低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估審查技術之 研究」期末報告.....	8

計畫名稱:107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之驗證評估 研究

一、摘要

(一) 中文摘要

本計畫旨在發展低放射性廢棄物地下處置安全評估驗證技術。本研究彙整低放射性廢棄物處置之國際經驗(NUREG-2175)，並提出一些重要的規範。本計畫將透過五個子計畫提出包含(1)水力-力學耦合和特徵化參數、(2)安全分析參數、(3)工程規範、(4)資料品質與資料流以及(5)生物圈安全評估關鍵要項等相關驗證技術，其研究結果將反饋於修改(1)場址特性、(2)工程設計、(3)長期穩定、(4)長期安全以及(5)生物圈劑量評估等領域之安全評估報告審查規範，並透過四年期計畫的研究成果可以加強相關規範的製定。

(一) 英文摘要

This project aims at developing verification technology for safety assessment of nuclear waste disposal underground. The international experience in low-level radioactive waste disposal (NUREG-2175) has been reviewed and some important guidelines were summarized. The verification technologies will be proposed to include (1) hydraulic-mechanical coupling and characterization parameters; (2) safety analysis parameters; (3) engineering specifications; (4) data quality and data flow; and (5) key requirements for biosphere safety assessment. The results of five sub-projects related to (1) site characterization, (2) engineering design, (3) long-term stability, (4) long-term safety assessment, and (5) biosphere dose assessment feedback to the modification of review standard for safety assessment report. The research results of the four-year plan can enhance the establishment of the standard.

二、計畫目標

政府為確保放射性廢棄物處置安全，除了要求安全管制機關必須不斷提升審驗技術，也必須建置適合國內低放處置之規範。為落實本土化之低放處置審查技術，本計畫針對坑道處置概念精進各項審查技術，透過四年期程逐步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各領域進行研究，以使國內處置管制技術能與國際接軌。

本年度計畫為此四年期工作之第三年度，過去已針對場址特性、工程設計、安全評估等主要方向進行國際資訊研析以及驗證方法研究，本年度將根據前兩年之研究成果進一步進行驗證評估，包括(1)坑道處置場址特性審驗技術驗證評估；(2)坑道處置工程設計驗證評估；(3)處置坑道結構穩定驗證評估；(4)坑道處置長期安全驗證評估；(5)生物圈安全評估審查技術等 5 個主題，並分別由 5 個子計畫進行研析。

三、重要成果

(一) 子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術驗證評估研究

- 1、整合規劃共同研讀美國 NUREG-2175 技術報告，基於美國低放射性廢棄物處置發展經驗，作為我國精進之參考。
- 2、隧道開挖導致應力重新分布，可能導致近隧道壁處之縱向水力傳導係數大幅上升。值得注意的是，岩體既有裂隙連接沿著坑道壁處之水力通道，可能進一步導致核種外洩。
- 3、力學模型計算之參數傳遞流動模型，並進一步將求得之孔隙水壓擲回力學模型進行雙向耦合之計算。研究發現，不論是均向、邊界應力異向性或是裂隙位態分布先天異向性，雙向耦合皆會獲得較高(高 50%-70%)之坑道入流量。
- 4、水力內寬對於水力傳導係數而言非常敏感，本研究建議利用高圍壓孔隙率/滲透率量測系統(YOKO2)取得水力內寬及力學內寬，並與現場試驗結果進行比較(圖 1)。

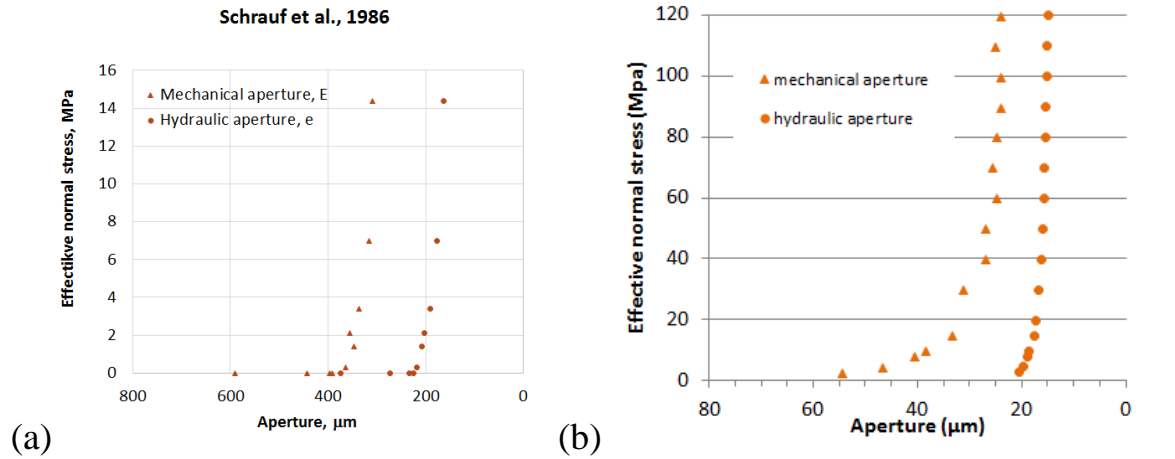


圖 1 (a) Schrauf 等人(1986)的研究中，開口寬與圍壓之關係；(b) 本研究樣本 Aluminum6 之開口寬與圍壓之關係。

5、修訂「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)」，另針對尚未凝聚成實質條文修訂建議，以及條文修改涉及更高層次之「安全分析報告導則」提出修改方向建議。

(二) 子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證評估之研究

- 1、利用前期計畫提出之審驗架構及「隔離」與「圍阻」兩項主要安全功能考量，將所蒐集之處置工程設計案例考量內容轉換至相同的考量架構，以利進行坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯分析，其分析成果如表 1 所列。
- 2、較需注意之審驗技術為對應設計成果之參數選用考量，由於多數參數為利用相關試驗求得。審查時需確認影響參數選用之各項考量因子均已考量且符合試驗條件設定。
- 3、於考量處置設施封閉後經過長時間物理與化學作用後之參數選用時，需注意處置障壁單元間可能之交互影響作用。
- 4、由於部分設計參數同時被應用於不同的設計特徵之中，審查時需特別審視其功能設計與參數間之一致性與合理性，以避免因分項審查而忽略其參數一致性。

表 1 坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性

設計對象	設計目標	工程設計項目	安全分析關鍵參數	相關之主要設計特徵
地面排水設施	排水設施可避免地量需求水體流入坑道	排水設施排水能力	無(若產生影響,將可能影響「通過設施流量」、「遷移路徑長度」、「流出點位置」)	運轉期及封閉期場區之排水功能(主要為運轉期)
坑道設施	坑道力學穩定性	<ul style="list-style-type: none"> 坑道內尺寸與坑道變位 混凝土襯砌與仰拱的混凝土抗壓強度 坑道支撐工法 	因力學或化學作用而使「孔隙率」和「水力傳導係數」產生改變,而影響「通過設施流量」	場址封閉與穩定性
	坑道內滲水量	<ul style="list-style-type: none"> 坑道滲水控制 止水設計(不透水布、灌漿填縫等) 排水設計(坑道外排水隧道) 	「通過設施流量」	降低處置單元水滲透
	確保處置設施長期隔離距離	<ul style="list-style-type: none"> 設計岩覆 處置坑道布置 	<ul style="list-style-type: none"> 「遷移路徑長度」 處置坑道與地面距離 	場址封閉與穩定性
處置窖(鋼筋混凝土)	結構完整性	<ul style="list-style-type: none"> 抗壓強度 鋼筋強度 配筋與鋼筋續接 鋼筋保護層 	「通過設施流量」變化(因力學或化學作用而使「孔隙率」和「水力傳導係數」產生改變)	<ul style="list-style-type: none"> 工程障壁結構完整性 場址封閉與穩定性
	維持擴散遷移特性	<ul style="list-style-type: none"> 有效擴散係數 材料尺寸 裂縫開口面積 礦物組成 	「有效擴散係數」	工程障壁具良好遲滯功能
	吸附放射性核種	<ul style="list-style-type: none"> 材料尺寸 水泥材料填充量 礦物組成 	「吸附分配係數」	工程障壁具良好遲滯功能
回填(混凝土)	形成高水力反差環境	<ul style="list-style-type: none"> 回填材料之孔隙率 水力傳導係數 	「通過設施流量」	降低處置單元水滲透
	吸附放射性核種	<ul style="list-style-type: none"> 材料尺寸 水泥材料填充量 礦物組成 	「吸附分配係數」	工程障壁具良好遲滯功能
	有利的化學環境	<ul style="list-style-type: none"> 使用水泥材料封填 	「孔隙水的化學特性」之pH值(影響金屬腐蝕率)	工程障壁具良好遲滯功能
低透水層(膨潤土)	降低通過低透水層的地下水量(限制平流傳輸)	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含量與礦物組成 密度 水力傳導係數 材料尺寸 	「通過設施流量」(膨潤土之膨脹壓與水力傳導係數關聯性)	<ul style="list-style-type: none"> 降低處置單元水滲透 工程障壁具良好遲滯功能
	回脹壓力不能壓其他障壁單元	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含量與礦物組成 密度 膨潤壓 變形係數 材料尺寸 	膨潤壓與其他處置單元受壓後之變形特性,反應於「通過設施流量」(因力學或化學作用而使「孔隙率」和「水力傳導係數」產生改變)	場址封閉與穩定性

(三) 子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究

- 1、蒐整並研析國際資訊包含「處置結構穩定有關之試驗、檢監測項目」、「國際間與處置坑道結構有關之數值分析與工程案例」、「岩石損傷特性與坑道開挖擾動之研究」與「地震對處置坑道的影響」等四個部分。
- 2、蒐整國內一般隧道之設計方法與施工規範,以及「日本隧道工程標準規範及解說-山岳工法篇」及「日本隧道工程標準規範及解說-潛盾隧道篇」的各種隧道耐震分析法及受震條件之比較,有助於掌握選定適切的分析法。
- 3、整合前項施工規範、設計準則及相關技術文件,及「安全分析報告審查導則」,整理並提出攸關處置坑道結構穩定驗證

評估項目與我國相關規範關聯性。

4、根據台電公司(2017)修訂第二版，綜整達仁與烏坵二處低放處置設施建議候選場址之比較表，詳如表 2。另外，提出可能遭遇之「外力因素」、「環境因素」與「非力學因素」之驗證評估技術要項建議。

表 2 國內低放處置設施建議候選場址之比較

	達仁鄉低放處置設施建議候選場址	烏坵鄉低放處置設施建議候選場址
設施空間配置示意圖		
處置場型式	陸地坑道處置	水下岩床坑道處置
地質條件	硬頁岩，內含許多地質弱面	堅實花崗岩(岩體有偉晶岩脈與基性岩入侵有兩組剪力節理、一組解壓節理)
坑道岩覆深度	A類處置坑道深度 > 62.2 m B、C類處置坑道深度 > 76.4 m	處置坑道上方岩覆為 58.8 m ~ 59.0 m
坑道數與坑道總長度	13 條A類低放射性廢棄物處置坑道，以及 2 條B、C類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,938 m。	34 條A類低放射性廢棄物處置坑道，以及 6 條B、C類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,800 m。
坑道斷面及尺寸	坑道斷面採圓形設計，寬 8.5 m，高 5.9 m	坑道斷面採倒D型(馬蹄形)設計，寬 8.5 m，高 5.9 m
坑道間距	處置設施所需之淨寬度至少 12.1 m	處置設施所需之淨寬度至少 10.7 m

(四) 子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證評估之研究

- 1、資料品質審驗技術之資料品質保證，應建立審驗程序審視(資料提供端)-(資料使用端)-(資料審驗端)在處置作業資料需求之產出流程，且是否有足夠之三方對話溝通過程與資料流通平台。
- 2、資料流審驗技術，應建立評估模擬流程圖，連結模式工具的使用與資料的提供，並提供使用資料來源、方法用途、取得方法等供資料流審驗。
- 3、發展近岸環境坑道處置長期安全驗證之遠場近場多子核種整合數值模擬技術(如圖 2)，未來可做為安全評估平行驗證工具之一，以提昇國人對低放處置場址長期安全驗證評估信心。

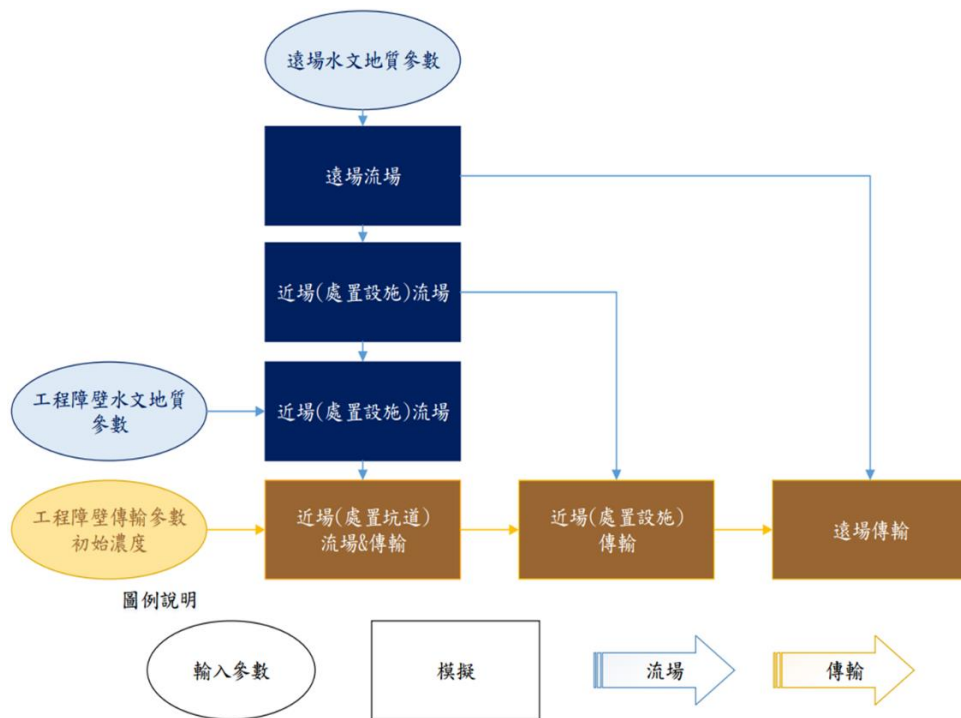


圖 2 多子核種傳輸模擬銜接流程圖

(五) 子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估審查技術之研究

- 1、以 TR-14-06 生物圈安全評估整合分析技術為研析基礎，進行國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項、研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術、國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性探討，並對我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項建議。
- 2、提出：(1)場址描述(2)場址未來條件與系統演變發展(3)模擬地景發展與土地利用(4)模擬地景中的生物圈系統單元演變(5)生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析(6)生物圈核種傳輸模式(7)生物圈評估之參數使用(8)核種釋出後分析(9)生物圈評估不確定性討論。係為低放坑道處置生物圈安全評估關鍵要項。
- 3、建議我國生物圈安全評估應參考 SR-PSU 建模作業(如表 3)，發展生物圈安全評估模擬技術。

表 3 SR-PSU 生物圈建模作業評估模式

安全評估技術	說明	技術參考文獻	評估模式流程之建模作業
核種傳輸模擬	為模擬核種於生物圈環境介質之濃度的核種傳輸模式	SKB R-13-46	•放射性核種傳輸和劑量
劑量計算	由放射性核種傳輸模式的濃度應用於對人類的劑量計算	SKB R-13-46	•放射性核種傳輸和劑量
地景模擬	數值高程模型 (DEM) 描述了當前地景的高程	SKB R-12-03	•地景發展 •生物圈系統單元識別
	表土層深度模型(RDM) 描述場址表土層的地層和深度	SKB	
	從過去和現在表土層水域發展模型 (RLDM) 描述了水域發展的未來演變及表土層深度	SKB R-13-27	
	地景發展模式 (LDM) 識別生物圈系統單元 (即：放射性核種可能進入生物圈的區域), 描述生物圈系統單元的發展, 並為放射性核種傳輸模型提供輸入參數。	SKB TR-14-06	
水文模擬	對於現在和未來的水文現象模擬, 並可以作為放射性核種傳輸模型的地下水流速度輸入參數	SKB R-13-19	• 地表水文 • 良好調查
生態特定參數	分配係數和元素濃度比參數 (Kd 和 CR) 於生物圈的傳輸計算, 為放射性核種傳輸建模提供輸入參數	SKB R-13-01	• 生物圈 Kd/CR
	生物圈參數用於放射性核種傳輸建模和劑量計算。描述生態系統參數的計算, 如初級生產和礦化, 人類特徵 (食物需求) 和劑量係數	SKB R-13-18	• 生態系統參數和劑量係數 • 場址特性定資料 • 輸入參數

四、 展望

本 4 年期低放射性廢棄物處置計畫已完成三年之研究, 各子計畫相關成果也實質反應至審查導則的修訂, 未來也將持續精進我國低放處置技術。子計畫一攸關場址特性的部分, 未來可持續針對我國場址裂隙內寬特徵化技術持續精進, 並對平行驗證技術進行深入研究及修正, 對於我國低放處置安全評估而言將產生正面效益。子計畫二的部分, 建議未來可依我國可能面臨之處置環境, 分析處置設施單元在不同事件與作用下, 對整體處置安全之影響程度及其依時性影響特徵, 藉以更進一步掌握工程設計與安全分析審驗技術之關鍵項目與技術。子計畫三透未來可針對坑道結構耐震分析, 與影響坑道長期穩定性之大地材料依時變形與弱軟化特性等, 能持續更新與掌握國際間相關研究課題, 並掌握相關的分析技術與參數, 作為未來發展平行驗證之依據。子計畫四的部分, 資料品質保證與資料流審驗相關資訊可供審查單位進一步建立相關審查程序, 而多子核種整合模擬工具可供安全評估平行驗證使用, 並持續發展設計情節核種傳輸模擬之審驗技術, 以及規劃進行設計情節核種傳輸模擬結果審驗。子計畫五蒐集有關坑道處置生物圈情節分析安全評估技術及生物圈安全評估整合分析技術資料, 建議我國對於生物圈安全評估有關生物圈安全評估審查重點或注意事項, 需確認是否包含生物圈環境系統調查及地景演變研究。

五、附件

子計畫 1 「低放射性廢棄物坑道處置場址特性審驗技術驗證評估研究」
期末報告

子計畫 2 「低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證評估之研究」期末報
告

子計畫 3 「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究」期
末報告

子計畫 4 「低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證評估之研究」期末報
告

子計畫 5 「低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估審查技術之研究」
期末報告

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

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全

審驗技術建立之驗證評估研究

子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置

場址特性審驗技術驗證評估研究

期末報告

計畫編號：107FCMA002

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 107 年 12 月

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全
審驗技術建立之驗證評估研究
子計畫一：低放射性廢棄物坑道處置
場址特性審驗技術驗證評估研究

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 107 年 2 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 125 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 107 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

本計畫為4年期低放射性廢棄物處置計畫之第3年,前期(4年期計畫第一年)研究完成了國際資訊研析,去年針對坑道水力-力學特徵化不確定性及流場敏感性進一步探討。本年度接續前期研究成果,進一步提出坑道處置場址特性審驗技術所需之驗證評估議題進行研究,本計畫首先針對水力-力學耦合流場分析進行探討,透過研析相關之研究成果得知因隧道開挖造成應力重新分佈,進一步導致隧道周圍之裂隙岩體水力-力學耦合效應。再者,本計畫根據去年度水力力學單向耦合之研究成果,進一步考慮孔隙水壓對於水力傳導係數的影響,透過水力力學雙向耦合研究結果得知,在坑道附近孔隙水壓對於水力傳導係數有顯著影響,應力異向性對於坑道附近水力傳導係數影響大於裂隙之異向性影響。場址特性參數平行驗證方面,本研究介紹 Barton(1985)提出水力內寬與內寬比之經驗公式,並建議可採高圍壓孔隙率/滲透率量測系統(YOKO2)取得水力內寬及力學內寬之數據,以作為現地試驗取得水力內寬之驗證方法。最後,依據前三年研究成果,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」進行修訂。另外,本研究統籌共同研讀 NUREG-2175 技術報告(NRC, 2015),其中,各種不穩定作用造成低放處置設施之潛在破壞,值得做為我國低放射性廢棄物最終處置設施安全管制之參考。

Abstract

This project is a four-year low-level radioactive waste disposal plan. International information review completed in the first year. The project further studied the hydraulic-mechanical coupled flow of the tunnel last year. In this year (the third year), this project tries to propose the site characterization verification technology of tunnel disposal sites. First, hydraulic-mechanical coupling analysis for the ground water flow around a tunnel is reviewed. In addition, based on the one way coupling model proposed previous year, the influence of pore water pressure on the hydraulic conductivity is considered. Therefore, the two way coupling is considered. The results show that the pore water pressure has a significant influence on the flows into the tunnel. The anisotropy of stress state has a significant effect on the hydraulic conductivity near the tunnel wall. In the aspect of verification of the site characterization parameters, we focused on the aperture estimation of the fractures based on the laboratory test via YOKO2 system. Finally, the guidelines Safety Assessment of Low-Level Waste Disposal Repository (0 version draft) are revised based on the study results of the previous three years. In addition, the NUREG-2175 technical report was reviewed and summarized in this report. The experiences on site stability analysis are useful to Taiwan.

目錄

中文摘要.....	1
Abstract.....	2
目錄.....	3
圖目錄.....	5
表目錄.....	10
第一章 前言.....	11
第二章 國際低放處置規範研析：NUREG-2175.....	14
2.1 NUREG-2175 之背景、目的及架構.....	15
2.1.1 背景.....	15
2.1.2 目的.....	15
2.1.3 架構.....	17
2.3 NUREG-2175 對於我國處置之差異與適用性.....	18
第三章 水力-力學耦合流場分析技術蒐整.....	23
3.1 坑道開挖引起岩盤導水能力的變化.....	24
3.2 坑道開挖應力重新分布造成坑道周圍的岩盤擾動區形狀.....	27
3.2.1 UDEC 模型.....	27
3.2.2 模擬結果討論.....	28
3.3 坑道周圍裂隙岩體之水力-力學耦合效應.....	32
第四章 裂隙水力傳導係數及流場平行驗證技術.....	35
4.1 研究方法.....	35
4.2 結果與討論.....	36
第五章 場址特性參數平行驗證方法測試.....	48
5.1 裂隙岩體水力傳導係數特徵化方法-現地試驗.....	48
5.2 裂隙岩體之水力、力學內寬及粗糙度.....	50
5.3 力學內寬及水力內寬-室內試驗.....	52
5.3.1 既有文獻蒐集.....	52

5.3.2 利用孔隙率/滲透率量測系統 YOKO2 量測力學與水力內寬.....	54
5.3.3 水力內寬與力學內寬量測結果.....	57
第六章 「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)」符合坑道處置概念精進建議.....	58
6.1 「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)」修訂建議.....	58
6.2 其他建議.....	84
第七章 結論與建議.....	91
7.1 結論.....	91
7.2 建議.....	95
參考文獻.....	96
附錄 A 際低放處置規範研析：NUREG-2175.....	104
A.1 NUREG-2175 之背景、目的及架構.....	104
A.2 一般技術分析.....	107
A.3 功能評估.....	121
A.4 無意闖入評估.....	128
A.5 場址穩定性分析.....	135
A.6 確實保護期分析.....	157
A.7 處置功能期分析.....	161
A.8 深度防禦分析.....	173
A.9 廢棄物接收.....	178
A.10 功能確認.....	187

圖目錄

圖 3.1 正常爆破技術引致坑道周圍裂隙，虛線表示爆破影響範圍(PUSCH, 1989)	24
圖 3.2 在等向初始(邊界)應力條件下，圓形坑道周圍擾動帶的滲透率變化。 K_{ZR} = 徑向裂隙沿坑道軸向的水力傳導係數; $K_{Z\theta}$ =坑道周圍洋蔥狀裂隙沿坑道軸向 的水力傳導係數; K_R =坑道徑向的水力傳導係數; K_0 =未受干擾的岩石的水 力傳導係數(等向性)。摘自 PUSCH (1989).....	26
圖 3.3 應力引致花崗岩裂隙幾何形態的改變。(A)開挖前;(B)開挖後。注意開挖 後有近水平破裂面產生，並在隧道頂拱與仰拱處造成高傾角的破裂面。摘自 PUSCH (1989)	26
圖 3.4 裂隙透過坑道開挖面周圍水力傳導係數增加通路與導水裂隙流動之原理： 裂隙 D 與處置孔相交並作為地下水流動通路；A 為水主要活動的破碎帶；B 為因開炸和應力集中導致的水力傳導係數增加的區域；C 為廢棄物罐處置孔。 摘自 PUSCH (1989)	27
圖 3.5 節理間距不同(不同岩塊大小)的四個 UDEC 模型 (SHENAND BARTON, 1997)	28
圖 3.6 坑道周圍的破壞區與應力場。3 號和 4 號模型中的一些鬆散塊落入坑道 (SHENAND BARTON, 1997).....	29
圖 3.7 坑道周圍的節理開口寬增加區(SHENAND BARTON, 1997).....	29
圖 3.8 坑道周圍節理受明顯剪切作用的區域 (SHENAND BARTON, 1997)	30
圖 3.9 當施加的應力 $\Sigma_Y=20$ MPA(垂直方向)和 $\Delta\Sigma_X=5$ MPA(水平方向)時，NO.3 模 型的節理開口寬增加區和剪切帶($\sim > 3$ MM)。摘自 SHENAND BARTON (1997)	31
圖 3.10 具有垂直和水平節理組的 NO.6 模型的結果(SHENAND BARTON, 1997) ...	31
圖 3.11 水力力學之(A)雙向耦合;(B)單向耦合之示意圖(LISJAK, ET AL., 2017)....	33
圖 3.12 耦合/非耦合模擬計算所得流入量和最大剪切位移與抗剪摩擦角以及 0° 和 5° 的膨脹角之關係。(A)和(B) $K_N=20$ GPA/M 和 $K_S=12$ GPA/M，(C)和 (D) $K_N=61.5$ GPA/M 和 $K_S=35.5$ GPA/M，(E)和(F) $K_N=360$ GPA/M 和 $K_S=210$ GPA/M。 K_N 和 K_S 分別為節理正向與切向勁度。摘自 IVARS(2006)	34

圖 4.1 本研究有關應力對裂隙水力傳導係數-流場分析-有效應力分析之研究流程图，屬水力-力學雙向耦合	36
圖 4.2 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之隧道壁面入流量，橘色點為未考慮孔隙水壓之流量，藍色點為考慮孔隙水壓後之流量。.....	37
圖 4.3 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之水頭.....	37
圖 4.4 案例一坑道徑向及軸向隨距離隧道壁面漸遠之水力傳導係數圖(K_T (淺藍色)及 K_R (橘色)為單向耦合、不考率孔隙水壓； $K_{T_COUPLED}$ (深藍色)及 $K_{R_COUPLED}$ (綠色)為雙向耦合、考率孔隙水壓).....	38
圖 4.5 案例一之水頭分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算	39
圖 4.6 案例一之水力梯度分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	39
圖 4.7 案例一之流速分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算	39
圖 4.8 案例二($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之隧道壁面入流量，橘色點為未考慮孔隙水壓之流量，藍色點為考慮孔隙水壓後之流量。.....	40
圖 4.9 案例二($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之水頭.....	41
圖 4.10 案例二坑道徑向及軸向隨距離隧道壁面漸遠之水力傳導係數圖(K_T (淺藍色)及 K_R (橘色)為單向耦合、不考率孔隙水壓； $K_{T_COUPLED}$ (深藍色)及 $K_{R_COUPLED}$ (綠色)為雙向耦合、考率孔隙水壓).....	41
圖 4.11 案例二之水頭分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	42
圖 4.12 案例二之水力梯度分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	42

圖 4.13 案例二之流速分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	42
圖 4.14 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)考慮孔隙水壓前後之隧道壁面入流量，橘色點為未考慮孔隙水壓之流量，藍色點為考慮孔隙水壓後之流量.....	44
圖 4.15 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)考慮孔隙水壓前後之水頭.....	44
圖 4.16 案例三坑道徑向及軸向隨距離隧道壁面漸遠之水力傳導係數圖(K_T (淺藍色)及 K_R (橘色)為單向耦合、不考率孔隙水壓； $K_{T_COUPLED}$ (深藍色)及 $K_{R_COUPLED}$ (綠色)為雙向耦合、考率孔隙水壓).....	44
圖 4.17 案例三之水頭分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	45
圖 4.18 案例三之水力梯度分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	45
圖 4.19 案例三之流速分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，紅色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算.....	45
圖 4.20 三個案例之頂拱徑向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_P 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、紅色線與橘色線分別為案例一、二、三.....	46
圖 4.21 三個案例之頂拱切向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_P 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、紅色線與橘色線分別為案例一、二、三.....	46
圖 4.22 三個案例之側壁徑向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_P 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、紅色線與橘色線分別為案例一、二、三.....	47
圖 4.23 三個案例之側壁切向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_P 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、紅色線與橘色線分別為案例一、二、三.....	47

圖 5.1 和社水文地質試驗示意圖(詹，2018).....	50
圖 5.2 真實力學內寬 E 與理論換算之水力內寬 E 之比(BARTON 等人，1985).....	51
圖 5.3 考慮節理粗糙度(JRC)之開口寬的經驗關係(BARTON 等人，1985).....	52
圖 5.4 SCHRAUF 等人(1986)的研究中，開口寬與圍壓之關係.....	53
圖 5.5 ZHAO 等人(2017)的研究中，開口寬與圍壓之關係.....	53
圖 5.6 BARTON 等人(1985)所提出之經驗公式與 SCHRAUF 等人(1986)(深紅)及 ZHAO 等人(2017)(綠)的研究結果套疊圖.....	54
圖 5.7 YOKO2 試驗用之鋁塊 ALUMINUM 6.....	55
圖 5.8 孔隙體積量測系統示意.....	56
圖 5.9 滲透率量測系統示意圖.....	57
圖 5.10 樣本 ALUMINUM6 之開口寬與圍壓之關係.....	57
附圖 A.1 典型的評估程序示意圖.....	107
附圖 A.2 低放處置功能評估之不確定性處理架構圖(NRC, 1993).....	109
附圖 A.3 相關技術分析必須能證明符合 10 CFR PART 61 規範之預防闖入功能目 標，包括了(1)廢棄物分類與隔離、(2)適當的預防闖入障壁設施與(3)無意闖 入評估.....	128
附圖 A.4 10 CFR 61.42 所規範之無異闖入者評估分析流程範例.....	134
附圖 A.5 場址穩定性分析的主要內容.....	135
附圖 A.6 NRC 對於 LLW 處置之各種地貌作用相對重要性事意圖(圖上的時間與 廢棄物危害的持續性相當).....	136
附圖 A.7 氣候變數、環境和岩石風化因素之間的宏觀關係：風化作為氣候函數 的發生(NUREG/CR-2642).....	146
附圖 A.8 WEST VALLEY 場址的位置。(DOE，2010).....	153
附圖 A.9 WEST VALLEY 場址和來源區的佈局將在第 1 階段解決。(DOE，2009)	154
附圖 A.10 WEST VALLEY 場址溪流和巴特米爾克溪(BUTTERMILK CREEK).....	154
附圖 A.11 觀察(左)和「最適合」(右)模型運行地形(DOE, 2010).....	155
附圖 A.12 確實保護期分析之合理抑低架構.....	158
附圖 A.13 平均海平面上升 5 米可能發生洪水地區，位於這些區域附近的建議場 址可能需要補充分析和評估(ESRI, 2008B).....	168

附圖 A.14 目前濕地的分布範圍，位於這些區域附近的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(未來濕地地區可能會發生變化)(USGS, 2011) ..	169
附圖 A.15 潛在洪水發生區域，可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊 (FEMA, 2012; FEMA, 1998; ESRI, 2008A; ESRI, 2008B) ..	169
附圖 A.16 模擬目前地下水面小於 30 米的分布圖。位於這些地區的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(未來的近地表地下水可能會發生變化)(KREAKIE ET AL, 2012).....	170
附圖 A.17 過去可能經常淹水地區(例如，乾涸的湖床、鹽地、海平面以下的地區)。位於這些地區的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(ESRI, 2008A; ESRI, 2008B) ..	170
附圖 A.18 全新世火山分布，位於這些區域附近的建議場址可能需要補充分析和評估(SIEBERT AND SIMKIN, 2002).....	171
附圖 A.19 目前有較高潛在地震危害的地區，位於這些區域附近的建議場址可能需要補充分析和評估(PETERSEN ET AL, 2011) ..	171
附圖 A.20 目前較易遭受水侵蝕的地區，這些地區的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(未來水資源脆弱性高的地區可能會發生變化)(USDA, 1988).....	172
附圖 A.21 第四紀冰期，即 WISCONSIN、ILLINOISAN 和前 ILLINOISAN 冰河時期的最後三個冰期中，冰川覆蓋的大致分布圖。冰川可能會造成非常破壞性的地表地質作用，而位於過去冰川作用的潛在場址可能需要補充分析和仔細的評估 (EHLERS ET AL., EDS., 2011).....	172
附圖 A.22 多層防禦示意圖	175
附圖 A.23 處置場的生命周期及深度防禦所含多層防護之時間架構.....	176
附圖 A.24 廢棄物接受之組成說明.....	178
附圖 A.25 10 CFR PART 61 廢棄物接收標準的組成部分	179
附圖 A.26 廢棄物分類和隔離的廢棄物分類.....	181
附圖 A.27 確定處置廢棄物中放射性核種活度或濃度的各種方法之不確定性來源	183
附圖 A.28 廢棄物特徵描述的數據生命週期框架.....	184

表目錄

表 2.1 NUREG-2175 技術報告研析各章節之分工表	15
表 2.2 技術要求和文獻章節之間的對照表(改自 NUREG-2175).....	17
表 4.1 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)每輪之計算結果	37
表 4.2 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)每輪之計算結果。	40
表 4.3 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)每輪之計算結果	43
附表 A.2 技術要求和文獻章節之間的對照表(改自 NUREG-2175)	106
附表 A.3 各項 FEPS 所需分析項目(10 CFR 61.50)	114
附表 A.4 FEPS 篩選準則矩陣範例	116
附表 A.5 與地下水傳輸路徑有關之作用與參數.....	125
附表 A.6 長期功能評估的侵蝕和塊體崩壞程式，其適用性和局限性(WALTER AND DUBREUILH，2007)	141
附表 A.7 與風化類型和岩石性質有關的耐候性和敏感性.....	147
附表 A.8 廢玻璃和普通礦物的化學耐久性(索氏試驗)比較.....	149
附表 A.9 與處置功能期間評估相關的預期審查耗力等級.....	162
附表 A.10 低放處置功能評估盤存量中可能存在長壽命核種.....	163
附表 A.11 需要處置功能期評估之處置場平均同位素濃度.....	164
附表 A.12 可增強長期隔離的處置場址特徵.....	165
附表 A.13 監管要求支持功能確認.....	188

第一章 前言

低放射性廢棄物處置為世界上許多國家需要面對的議題，我國也不例外，低放射性廢棄物除核能發電廠發電時受輻射污染之設備之外，亦有醫療、農業、工業及學術單位等產生之低放射性廢棄物。因此，我國近年來積極推動低放射性廢棄物處置之工作，並朝向坑道處置之方向進行技術發展。政府除了必須不斷提升審驗技術，也必須建置適合國內處置低放射性廢棄物之規範。本計畫擬透過四年期程，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主要方向，並逐年透過國際資訊研析、驗證方法研究、驗證評估研究、審查規範建立(修正)等四步驟推動，一方面持續彙整國外低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，另一方面希望能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。

本年度計畫為此四年期工作之第三年度，計畫第一年「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」(原能會物管局，2016)進行國際資訊研析，去年度計畫進一步提出「106 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析」(原能會物管局，2017a)進行審驗技術建立，本年度計畫「107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之驗證評估研究」(以下簡稱本計畫)將以前期研究成果為基礎，進行低放射性廢棄物坑道處置驗證評估，並透過場址特性、工程設計、結構穩定性、長期安全以及生物圈安全評估等研究主題進行研究，由五個子計畫針執行上述之研究課題。最後，回饋至「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」(原能會物管局，2012)之修訂。

本計畫首先將彙整國際間水力-力學耦合流場分析相關之技術報告，透過彙整及研析這些相關文獻，可了解水力-力學耦合之關鍵因素。再者，根據本計畫去年度之研究成果，進一步建置適合於國內處置場址之平行驗證技術。另外，透過研讀前人之研究，可了解場址特徵化參數平行驗證之方法，最後提出審查案例

精進之建議。另外，本計畫還將研讀美國低放處置 NUREG-2175 技術報告(NRC，2015)，並提出此技術報告之重點，比較我國低放處置技術之差異。本四年期計畫期能逐步達成以下目標：(1)處置設施場址特性相關量化資訊及關鍵課題釐清；(2)各項與場址特徵化相關處置技術驗證方法之建立；(3)提供適合於國內坑道場址特性相關處置技術與提升審驗能力；(4)回饋於國內「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」(原能會物管局，2012)場址特性相關章節之精進。

本研究於過去幾年針對低放射性廢棄物處置已有相當成果，以下說明與本計畫(子計畫一)相關計畫過去執行成果。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」(原能會物管局，2013) 提供審查導則場址及設施設計相關條文之修訂方向建議，103 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置場址特性審查規範精進之研究」(原能會物管局，2014)，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 年度物管局計畫「低放射性廢棄物處置安全管制技術發展」，持續進行場址之特性描述審查規範精進之研究。自 105 年度開始，針對坑道處置之場址特性進行研究，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)等四步驟逐年推動，105 年度物管局計畫「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」(原能會物管局，2016)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。去年度「106 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析」(原能會物管局，2017a)提出場址特徵化工作需精進之關鍵議題，內容包含場址初始狀態定量化，並針對力學-水力耦合量化資訊之不確定性進行深入探討，評估相關參數對地下水流經處置隧道流量之敏感度，最後提出場址特徵化參數不確定性之評估結果。本年度將進一步提出「107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之驗證評估研究」，透過蒐集並研析國際間坑道處置攸關水力-力學耦合流場分析之相關技術文獻，並進一步建立進場流場分析之平行驗證技術，再者，

場址特徵化參數平行驗證透過蒐整並研讀前人之研究成果，可學習之其驗證方法並針對國內處置場進行測試，最後提出符合「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」之精進建議。另外，本研究還將研讀 NUREG-2175 技術報告(NRC, 2015)，透過五個子計畫進行分工研讀，並由總計畫進行彙整，提出 NUREG-2175 技術報告之重點，以及此報告與國內低放射性廢棄物處置之差異。透過以上之工作，期望可協助管制單位建立坑道處置安全審查及分析驗證之能力，並確保低放處置之安全。

本報告第一章為計畫說明；第二章為美國 NUREG-2175 技術報告(NRC, 2015) 研析，此項工作項目透過五個子計畫進行分工，研析成果彙整提出各章節之重點，並提出與我國低放處置之差異；第三章蒐整並研析國際間坑道處置水力-力學耦合流場分析相關之技術文獻；第四章根據本計畫去年度水力-力學單向耦合之研究成果，進一步提出裂隙岩體周圍流場水力-力學單向耦合模式，預期可作為未來流場分析之平行驗證方法；第五章透過研析前人之研究成果，針對場址特徵化參數(以影響流場最重要參數之一：裂隙開口寬，包括水力內寬與力學內寬)之平行驗證方法進行探討；第六章根據本四年期計畫之前三年研究成果，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」提出實質之修改意見；最後，第七章提出本計畫之結論與建議。

第二章 國際低放處置規範研析：NUREG-2175

美國低放射性廢棄物處置法規 10 CFR 61 係發布於 1982 年，此法規主要針對近地表處置設施進行管制。低放處置經過多年的演變，部分內容已不合時宜。因此，美國核管會從 2009 年起開始進行法制作業與公眾意見徵詢，並且預定 2017 年 1 月完成修法程序。在修法期間，2015 年 3 月於聯邦公報曾發布一份規則草案，同時，亦發布了技術分析導則 NUREG-2175(NRC, 2015)，此技術分析導則主要目的為提供技術分析導引，證明符合 10 CFR 61 法規中「放射性廢棄物地表處置的許可要求」的執行目標。NUREG-2175 技術分析導則主要為補充現有低放射性廢棄物處置技術報告之導引，以及各項技術分析，證明符合功能目標。

我國低放射性廢棄物處置之發展，10 CFR 61 為重要法源參考依據，而上述中 NUREG-2175 技術分析導則(NRC, 2015)亦為重要參考文獻，本研究將針對此技術分析導則進行研析。報告主要分為 11 個章節，主要討論的內容包含一般技術分析、功能評估、無意闖入、場址穩定性分析、確實保護期分析、處置功能期分析、深度防禦分析、廢棄物接收等，本章預計透過整合五個子計畫進行研讀，各子計畫將重點式提出研讀重點，最終反應於我國審查導則之修訂。

本章研析 NUREG-2175 技術報告(NRC, 2015)主要透過 5 個子計畫進行分工研讀，各子計畫分配工作如表 2.1，子計畫一(本計畫)研析第一章「緒論」、第五章「場址穩定性分析」、第十章「功能確認」、附錄 B「災害警示地圖」及附錄 E「場址穩定性評估範例」；子計畫二研讀第二章「一般技術分析」；子計畫三研讀第四章「無意闖入評估」及第八章「深度防禦分析」；子計畫四研讀第三章「功能評估」及第六章「確實保護期分析」；最後，子計畫五負責第七章「處置功能期分析」及第九章「廢棄物接收」。各子計畫研讀成果由主計畫彙整於本章及附錄。NUREG-2175 技術報告之研讀成果將重點摘錄的方式呈現於附錄，本章的 2.1 節將介紹 NUREG-2175 技術報告之背景及架構，2.2 節彙整各子計畫研讀後之心得反饋，提出與我國低放處置之差異及適用性。

表2.1NUREG-2175技術報告研析各章節之分工表

子計畫	研讀章節	章節名稱
子計畫一	第1章	緒論
	第5章	場址穩定性分析
	第10章	功能確認
	附錄B	災害警示地圖
	附錄E	場址穩定性評估範例
子計畫二	第2章	一般技術分析
子計畫三	第4章	無意闖入評估
	第8章	深度防禦分析
子計畫四	第3章	功能評估
	第6章	確實保護期分析
子計畫五	第7章	處置功能期分析
	第9章	廢棄物接收

2.1NUREG-2175 之背景、目的及架構

美國核能管理委員會(NRC)制定一套近地表處置的許可要求、功能目標和技術標準，該標準用於處置商業低放射性廢棄物(LLW)。此技術報告主要目標在支持執行技術分析和廢棄物接收要求，以證明符合 10 CFR Part 61 之功能目標，且此技術報告是補充較早期之技術報告。

2.1.1背景

美國聯邦法規 10CFR Part 61 適用於 1983 年 1 月 27 日後任何近地表之低放射性廢棄物處置設施。10 CFR Part 61 說明處置商業低放射性廢棄物的方法，包括選址、處置設施設計和營運、廢棄物最低處置要求和處置設施封閉。為了取得許可證，NRC(或協議州監管機構)必須保證滿足 C 部分的功能目標。

2.1.2目的

NUREG-2175 技術報告主要在支援實施技術分析和廢棄物接收要求，以證明符合 10 CFR Part 61 之功能目標。以下說明此技術報告與其他 NRC 技術導引之關係，以及此技術報告新增之內容：

1. NUREG-2175 技術報告與其他 NRC 導引的關係

NUREG-2175 主要為補充過去不足的處置技術文獻，相關文獻如下：

- (1) NUREG-1200，修訂版 3，“Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility” (NRC，1994)。
- (2) NUREG-1573，“A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities”(NRC，2000)。
- (3) NUREG-1854，“NRC Staff Guidance for Activities Related to U.S. Department of Energy Waste Determinations”(NRC，2007)。
- (4) “Final Branch Technical Position on Concentration Averaging and Encapsulation, Revision in Part to Waste Classification Technical Position,” dated January 17, 1995 (NRC，1995b)。
- (5) NUREG-1757，“Consolidated NMSS Decommissioning Guidance: Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria”(NRC，2006)。

2. NUREG-2175 技術報告新增之內容

NUREG-2175 技術報告主要新增內容包含：

- (1) 識別和篩選有關發展情節的特徵、事件和作用(FEPs, features, events, and processes)之可接受之方法；
- (2) 保護無意闖入之分析導引；
- (3) 詳細的場址穩定性分析導引和實例；
- (4) 制定廢棄物驗收標準、廢棄物特徵化方法和廢棄物認證；

- (5) 風險分析的三層時間框架:符合要求期(1,000 年)、確實保護期(1,000 至 10,000 年)和處置功能期(超過 10,000 年的長半化期廢棄物)；
- (6)處置設施的深度防禦分析；
- (7)收集安全案例資訊，證明廢棄物處置設施安全性的評估；
- (8) 對技術分析和廢棄物接收標準的功能確認和定期審查。

2.1.3 架構

表 2.2 列出了技術分析、10 CFR Part 61 相關要求，以及對應 NUREG-2175 技術報告各個章節之相關性。NUREG-2175 技術報告 2.0 章說明進行技術分析的一般注意事項。第 2.0 章和 3.0 章說明與功能有關的特定議題。第 4.0 章針對無意闖入者的防護所需分析進行討論。5.0 章針對封閉後處置場穩定性進行說明。第 6.0 章討論了確實保護期分析，第 7.0 章說明與處置長半化期廢棄物有關之處置功能期分析。第 8.0 章討論深度防禦分析。第 9.0 章討論廢棄物接收程序。10.0 章討論進行功能確認以評估和驗證在場址封閉之前用於證明符合性的資訊的準確性。

表2.2技術要求和文獻章節之間的對照表(改自NUREG-2175)

技術要求	法規章節	章節								
		1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
功能評估	61.13(a) 61.41(a)	◎	◎	◎						
無意闖入評估	61.13(b) 61.42(a)	◎	◎		◎					
場址穩定性分析	61.13(d) 61.44	◎	◎			◎				
確實保護期分析	61.41(b) 61.42(b)	◎	◎				◎			
處置功能期分析	61.13(e) 61.41(c) 61.42(c)	◎	◎					◎		
深度防禦分析	61.13(f)	◎							◎	
廢棄物接收	61.58	◎								◎

2.3 NUREG-2175 對於我國處置之差異與適用性

NUREG-2175 技術報告為美國法規(10 CFR) Part 61 提供技術導引，而我國低放射性廢棄物處置之法源主要參考此法規所擬定，因此 NUREG-2175 技術報告對於我國低放處置發展具有重要參考價值。此技術報告中各章節之主題皆對應到相關之法規，對於處置安全而言具有一定程度之意義，因此，我國低放處置發展可參考此技術報告之架構進行低放處置技術之精進。以下重點針對 NUREG-2175 技術報告各章節提供回饋，完整回顧內容詳見附錄 A。

1. 技術分析考量因素

審查技術分析內容時，首先應確認技術分析精度應符合其所涉輻射風險，風險越高則分析精度須更高。審查過程一般需注意數據是否充足，以及選用的技術是否適用於分析欲描述之現象。同時，在判讀分析結果時需考量不確定性之影響。

處置系統與場址特徵的描述，主要涉及場址特徵、自然環境、處置設施、場址與處置設施之交互作用、廢棄物特性、潛在的劣化過程，以及可能被處置設施影響而接受輻射劑量之關鍵群體特性，而後分別建立設計與替代情節，分別描述與分析各種可能發生之情節與其影響。因此，不確定性的考量首先來自於情節建立過程，需評量情節所描述內容本身之合理性或可靠性。其次為模擬過程所產生之不確定性，此部分之不確定性可輔以敏感度分析協助判釋。審查過程中，對於每一個分析步驟均須考量其是否合適，衡量其採用之數據與工具是否充足與洽當，而非僅是審查最終結果。

2. 功能評估

功能評估部分以不少篇幅指出源項模擬須提供之資料，主要由於源項模擬是核種由處置單元外釋之重要依據，其中源項之化學環境為影響工程障壁功能、廢棄物罐壽命、核種遲滯與移棲參數之關鍵。因此要求申照者應提供文件說明如何處理化學環境模擬的時空變異，以及如何處理地球化學參數之

不確定性與變異。化學環境相關資訊的提供與其對處置功能的影響在目前國內之低放射性廢棄物安全分析報告導則與審查導則內，主要出現在第二章「場址之特性描述」之第七項「地球化學」，著重在要求地球化學資料的提供，而非如 NUREG-2175 強調地球化學對功能評估源項模擬的重要。

核種傳輸的部分，強調需確認核種傳輸模擬與源項外釋在空間與時間的適當整合，且與氣候及入滲模擬、生物圈與受體特徵一致。這雖是重要的觀念，但在目前國內之低放射性廢棄物安全分析報告導則與審查導則在第七章「設施安全評估」，缺乏從廢棄物描述到核種傳輸特性的鏈結，基本上 NUREG-2175 更強調功能評估各環節的具體模擬要求，國內文件比較偏重在要求資料的提供。

3.無意闖入評估

有關無意闖入之合理防護作為，與需提出的技術分析項目，包括了廢棄物分類與隔離、適當的預防闖入障壁設施與意外闖入者其曝露之放射性劑量限制值。其中，所述障壁設施的功能與堅固性，是透過風險告知分級法來加以律定的，且根據無意闖入者的曝露影響減輕程度，將障壁設施的重要性區分三個等級。即使認為無意闖入者的可能性低(尤其在運轉期與監管期)，但仍會評估無意闖入的可能性，並根據闖入者可能進行的活動，包括農業、住宅建築與資源開採等進行評估工作。

我國「安全分析審查導則」中，有關闖入者防護是列在第七章「設施安全評估」，所列闖入者防護主要是圍籬與障壁系統。建議可參考 NUREG-2175，將風險觀念納入評估方式，並依障壁系統的重要性區分等級，引導執照持有人按障壁設施的重要性提供相關的設計、功能、工作年限與支援的技術基準。

4.場址穩定性分析

有關場址穩定性分析，如 NUREG-2175 所述，對於申照者而言，首先需將場址特徵化，判斷場址潛在的破壞性作用，並進一步透過適當模式進行

評估，使用不同評估技術評估這些破壞性作用對於處置場址之影響，並將評估結果反映到工程設計，透過工程障壁減輕其危害，最後進行監測。雖然我國低放處置已依此流程進行，然而各階段間之銜接與反饋尚有精進空間。

而對於破壞性的作用，此報告列出許多諸如地貌作用(塊體崩壞、塌陷、坍方、侵蝕、滲穴系統和風化)、構造作用(斷層、地震或火山活動等)或其他破壞性的作用(氣候作用和氣候變化、生物作用和火災)，我國目前傾向以坑道處置方式進行低放射性廢棄物處置，假設處置坑道位於海平面以上，應特別注意地貌作用對於場址的破壞，NUREG-2175 技術報告中也提出一個有關場址穩定性分析的一個範例(West Valley Demonstration Project(WVDP)場址)，WVDP 場址東鄰法蘭克斯河(Franks Creek)，北邊是採石河(Quarry Creek)，而場址整區被艾德曼溪(Erdmann Brook)分成南北兩個區域，因此，此場址的穩定性最關鍵因子就是侵蝕作用。另一方面，我國地處環太平洋地震帶，構造作用對於我國低放處置而言也是需要留意的因素，特別是地震、斷層的活動可能導致處置場址破壞。

再者，NUREG-2175 技術報告提供一個場址穩定性分析的範例，雖此範例不代表申照者可依據此結果使用此場址進行放射性廢棄物處置，但可針對已發展的技術進行實際操作，我國在未選定處置場址之前，可參考此案例針對台灣地區與處置場址相似之地質環境進行實際演練，增加處置技術之經驗，待處置場址確定後，提升各項處置技術操作之效率。另外，我國亦可參考 NUREG-2175 技術報告附錄 B「災害警示圖」，建立台灣地區攸關處置安全之災害警示圖，然而災害警示圖恰當之比例尺尚需進一步研議。

5.確實保護期分析

確實保護期分析以不同劑量門檻分級來敘述合理抑低之概念，採用越高的劑量當門檻，將需要進行更多工作(例如更多替代分析)來說明基本設計是可以接受的。將基本設計與所有替代的未來成本以長期打折之工程經濟折算方式，轉換成可在同一年代進行效益比較，如果任何一個替代分析正規化效

益比值小於設定之衡量尺度因子，這表示基本設計不符合要求。也就是基本設計應該是最佳化設計，如果存在任何一個替代分析效益也可以滿足衡量尺度因子，這代表基本設計尚未最佳化。目前國內在工程經濟效益研究仍待加強。

6.處置功能期分析

對於處置設施和場址特徵之評估，係為限制潛在長半化期核種的衝擊，且需要取得目前科學理解的資料及技術分析。鑑別及描述設計特性和場址特徵論證需要滿足 10 CFR 61.41(c)和 10 CFR 61.42(c)的功能目標。在 10 CFR 61.41 與 10 CFR 61.42 皆規範處置設施封閉後的保護。在 10CFR61.2 定義了三個時期：(1)符合要求期，為處置設施封閉後至封閉後 1,000 年；(2)確實保護期，封閉後 1,000 年至 10,000 年；(3) 處置功能期間，確實保護期後考慮廢棄物與場址特性的場址功能。

申照者應在確實保護期間後計算處置場址剩餘的長壽命廢棄物的預期濃度，以便為長期功能分析提供風險資訊申照者應為功能期分析提供模型支持。在功能期的風險較大時，審查標準應該更高。被許可方應提供模型支持，特別是對於更高危險和更長壽命的廢棄物。為了確定造成的危害，申照者在保守情節下估計入侵者和公眾接受體的劑量，並將這些估計值與其預期情節進行比較。危害可能會或可能不會轉化為風險，但高危害問題應該有相對於低危害問題的更多支持和獨立審查。

7.深度防禦分析

具備深度防禦功能的防護設施，必須具備多層、重複性與獨立性的防護要求，就多層性而言，係指障壁(物理性與化學性障壁)、管制作為與專業人員，其各自在處置場的全生命週期中，各有不同的角色與發揮的時間區段。目前我國的「安全分析審查導則」雖無專章對應至深度防禦相關章節內容，但深度防禦所闡述的障壁、管制與人員，則各自在相關章節闡述，例如第六章「設施之組織規劃、行政管理及人員訓練計畫」、第七章「設施安全評估」、第八章「輻射防護作業及環境輻射監測計畫」、第九章「消防防護計畫」、第

十一章「封閉及監管規劃」與第十二章「設施之保安等」，建議未來能強化上述各章的橫向關聯，及在處置場全生命周期中各自發揮的功能與時間區段，以確保:(i)合適的障壁設施與控管作為，及避免、限制與減緩因危害、相關的接收情節與不確定性造成的輻射曝露；(ii)部分或全部的障壁設施損壞，與管制作為失效所衍生的風險。

8.廢棄物接收

處置設施申照者對於處置設施被許可應提供的資訊，而且審核人員應評估關於廢棄物接收要求。確認廢棄物接收標準包括：

- (1)放射性核種的允許限值；
- (2)可接收的廢棄物和容器規格；
- (3)限制或禁止，以便廢棄物被接收作為低放廢棄物處置。

我國可參考該方式可依據 10 CFRPart61 之廢棄物接收之規定，且要求申照者至少每年審查廢棄物接收標準、特徵化方法和認證計畫的內容和實施情況。廢棄物接收包含以下重點，申照者應提供資訊，審閱者應根據廢棄物接收要求進行評估的資訊。廢棄物接收標準確定廢棄物產生者之以下內容：

- (1)放射性核種的允許限值；
- (2)可接受的廢棄物形式和容器規格；
- (3) 限制或禁止廢棄物被接受作為低放處置。

申照者應提供足夠的資訊，以證明廢棄物驗收標準是充分的。為證明廢棄物符合驗收標準，必須充分提出廢棄物特性描述。申照者需提供關於確定廢棄物特性可接受方法的指導。必須對廢棄物進行認證，以確保廢棄物符合驗收標準，因此適合在陸地處置設施中處置。申照者應在認證計畫包含的資訊，以確保在處置設施中收到的廢棄物可以接受處置。另外還須依據 10 CFR 61.58(f)的規定要求處置設施許可證持有者至少每年審查其廢棄物接收程序的內容和實施情況。

第三章 水力-力學耦合流場分析技術蒐整

水力-力學耦合流場分析之運用，於許多工程領域均發展快速，例如：

- 核廢料處置：地下核廢料處置窖的設計和功能評估；
- 岩盤工程：山崩和邊坡不穩定性、大壩基礎穩定性以及其他地下和地表開挖的穩定性；
- 石油和天然氣的勘探和生產：鑽孔的穩定性、儲油層壓縮、沉陷以及水力破裂問題；
- 地熱：加強型地熱系統(EGS)之水循環；
- 採礦：煤礦坑或露天開採邊坡穩定性；
- 地下流體的儲存：碳封存、天然氣的地質儲存和液體廢棄物處置。

有關放射性物料坑道處置水力-力學耦合分析，重點之一在於鄰近開挖面的岩體水力傳導係數增加的問題，因此 3.1 節首先介紹坑道開挖造成岩盤導水能力改變，接著 3.2 節利用模擬說明不同節理特性對於坑道開挖後節理開口寬變化之影響，最後，3.3 節透過模擬不連續裂隙岩體中的破裂過程，以了解水力-力學耦合之分析技術及過程。本章內容摘錄自以下技術文獻，並進行重點研析彙整：

- Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation (Pusch, 1989).
- The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses (Shenand Barton, 1997)
- A 2D, fully-coupled, hydro-mechanical, FDEM formulation for modelling fracturing processes in discontinuous, porous rock masses(Lisjak, et al., 2017)
- Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study(Ivars, 2006)

3.1 坑道開挖引起岩盤導水能力的變化

岩體中開挖面附近的水力傳導係數增加問題，一直是受關注的研究課題，特別是放射性廢棄物處置場的相關研究。對於豎井和坑道而言，水力傳導係數增加與開炸和應力重新分布形成之擾動區域有關，儘管定量研究較少，但仍有一些數值試驗及大規模現地試驗證明了這種現象。

1. 開炸對水力傳導係數的影響

新的裂縫形成以及舊的裂縫擴展，使岩石裂隙向外延伸至距離坑道外幾公尺範圍，這表示水力傳導係數的增加通常局限於開挖面附近較淺處。採用平滑開炸技術(smooth blasting technique)，擾動區最大延伸為 0.5m，而在 Stripa 地區使用的普通爆破法，岩石擾動區可延伸至 0.5 和 1m 之間，且靠近地面的擾動區延伸範圍較大，這對總水力傳導率至關重要(圖 3.1)。

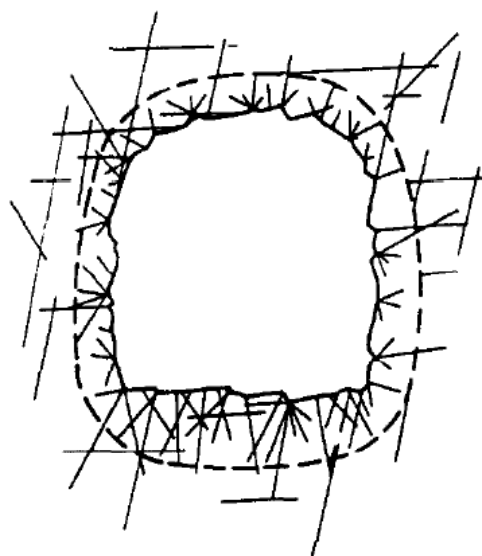


圖3.1正常爆破技術引致坑道周圍裂隙，虛線表示爆破影響範圍(Pusch, 1989)

2. 應力引起的水力傳導係數增加

若地下坑道深度小於 1000 公尺，開挖引起的應力場重新分布，一般而言不太容易造成新的裂隙，若岩性為類似花崗岩的強岩，要因應力重新分布產生新裂縫的開挖深度要更深。然而，坑道開挖引致應力重新分布，對於原

本已存在裂隙的岩盤其導水能力有相當大的影響。假設開挖的坑道為圓形，且於均向初始(邊界)應力條件下，採用以下標準作為彈性應力分析的基礎：

- 開挖前裂隙開口寬和間距為均勻分布；
- 開挖不會改變裂隙間距和連續性；
- 應力變化可透過彈性應力理論計算；
- 單個裂隙的導水能力僅由正向應力決定；
- 立方定律適用的平行光滑板裂隙。

分析所得水力傳導率的變化如圖 3.2，由圖 3.2 可知，「洋蔥狀」裂隙(以隧道軸為同心圓柱之裂隙)的導水能力 K_{z0} 在接近岩壁處增加了約 10 倍，約 1.5 倍的半徑處增加了約 10%，而隧道徑向水力傳導係數略有下降。垂直於開挖軸線的水力傳導係數則影響不大。

普遍存在於 Stripa 地區花崗岩中的實際裂隙分布模式如圖 3.3 所示，因初始應力場並非均向，且最大主應力位於水平面上，因坑道開挖後應力重新分佈產生「洋蔥狀」裂縫，開口寬增加主要發生於與開挖軸線以及和最大主應力方向平行(或近似平行)的裂隙，並導致此一方向導水能力增強。至於開挖入流量，由於高角度的裂縫趨向封閉，預計坑道頂部與底部流入量會略微減少，另外，因低切向應力，兩側牆壁靠近中心的部分流入量略有增加。

值得注意的是，水有可能透過破碎帶(圖 3.4 中的 A 區域)流至坑道壁附近，並沿著坑道軸向具有高水力傳導係數的區域(圖 3.4 中的 B 區域)流動，進一步流入與處置孔相連之裂隙(圖 3.4 中的 D 區域)，最後導致核種透過水外洩，雖此案例為高放射性廢棄物處置的處置設施，但對於低放射性廢棄物處置而言，亦需注意核種可能透過與廢棄物位置相連的裂隙，透過上述之方法進一步外洩至處置坑道之外。

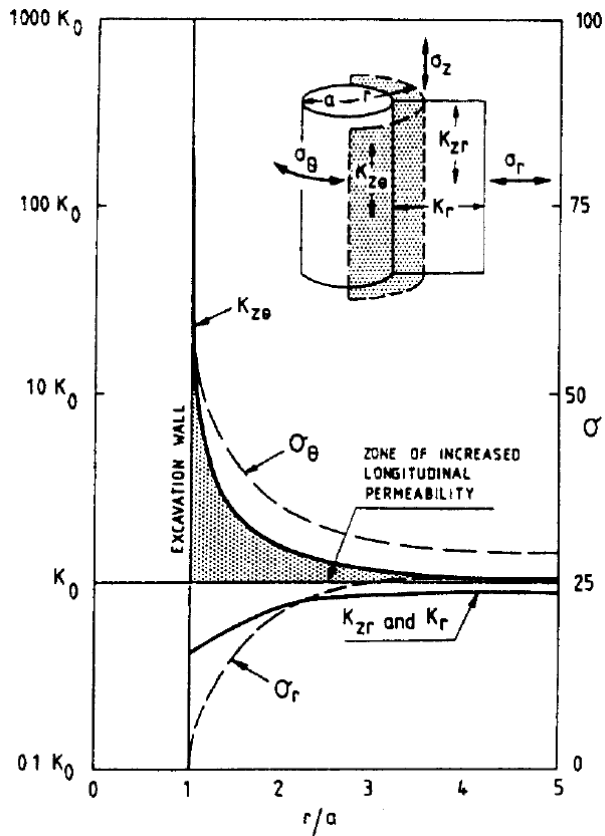


圖3.2 在等向初始(邊界)應力條件下，圓形坑道周圍擾動帶的滲透率變化。 $K_{z\theta}$ = 徑向裂隙沿坑道軸向的水力傳導係數； K_{z0} = 坑道周圍洋蔥狀裂隙沿坑道軸向的水力傳導係數； K = 坑道徑向的水力傳導係數； K_0 = 未受干擾的岩石的水力傳導係數(等向性)。摘自Pusch (1989)

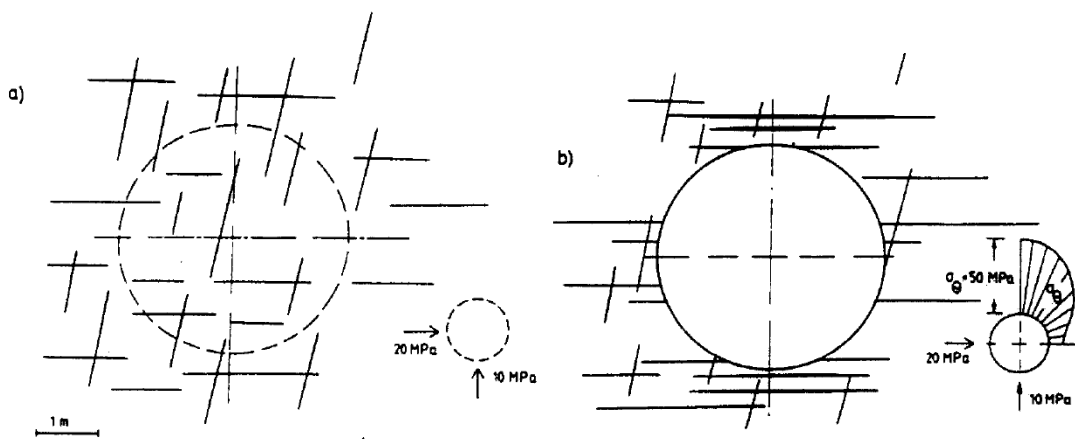


圖3.3 應力引致花崗岩裂隙幾何形態的改變。(a)開挖前；(b)開挖後。注意開挖後有近水平破裂面產生，並在隧道頂拱與仰拱處造成高傾角的破裂面。摘自Pusch (1989)

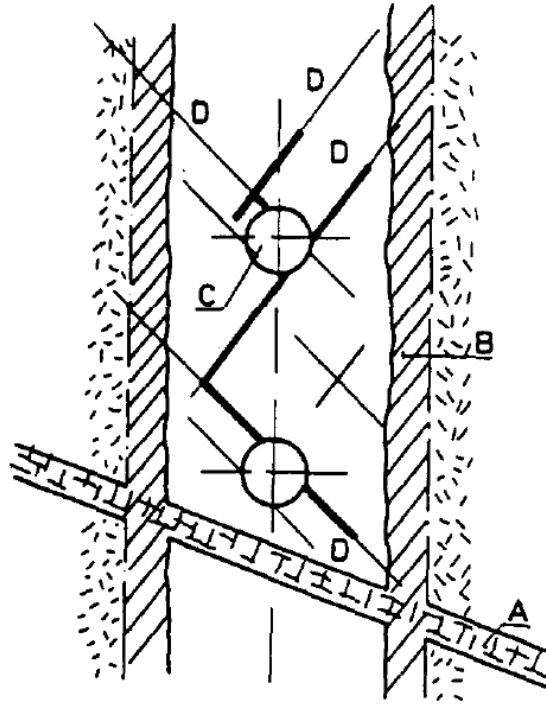


圖3.4 裂隙透過坑道開挖面周圍水力傳導係數增加通路與導水裂隙流動之原理：裂隙D與處置孔相交並作為地下水流動通路；A為水主要活動的破碎帶；B為因開炸和應力集中導致的水力傳導係數增加的區域；C為廢棄物罐處置孔。摘自Pusch (1989)

3.2 坑道開挖應力重新分布造成坑道周圍的岩盤擾動區形狀

對於核廢料處置，坑道周圍的擾動區經常被認為是需要考慮水力-力學耦合的區域。這種情況下的耦合行為比坑道的局部穩定性更令人關注，因為坑道周圍岩盤擾動區改變了水流量，增加放射性物質遷移的可能性。Shen and Barton(1997)根據節理的密度(岩塊大小)、方向、邊界應力條件進行模擬，以探討三種岩盤擾動區(破壞區、開口寬增加區、剪切區)的形狀，相關研究結果說明如下：

3.2.1 UDEC模型

此研究使用 UDEC 模型，模型尺寸為 56 x 56 m，於模型中心挖掘直徑為 20 m 的坑道，節理均傾斜 45° 且彼此垂直。節理間距從 NO.1 至 NO.4 分別為 7.2、3.6、1.8 及 1.2 m (圖 3.5)。模型設定在深度約 700m 深度的重力引起的應力，其

中 $\sigma_y = 20 \text{ MPa}$ (垂直方向)和 $\sigma_x = 5 \text{ MPa}$ (水平方向)，邊界條件採用滾輪邊界(roller boundary)條件。其中，採用 NO.3 之模型計算不同的應力狀態及邊界條件下之結果。

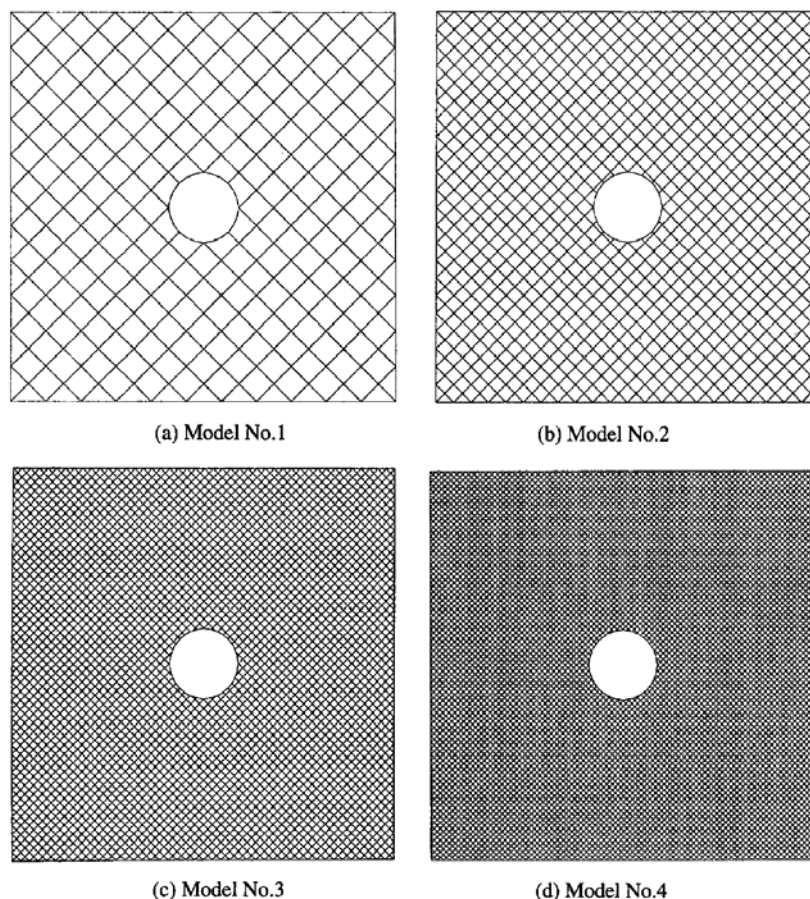


圖 3.5 節理間距不同(不同岩塊大小)的四個 UDEC 模型 (Shenand Barton, 1997)

3.2.2 模擬結果討論

1. 不同岩塊尺寸之擾動區範圍

將模擬結果劃分為三個區域：(1)破壞區：鬆散的岩塊落入坑道；(2)開口寬增加區：節理開口寬增加；(3)剪切區：節理經歷一定的剪切位移。受破壞區是坑道穩定性的直接關注重點之一，而開口寬增加區域和剪切區對水流的影响非常值得關注。

(1)受破壞區(圖 3.6)：當節理間距減小時，局部不穩定明顯增加。如圖 3.7 所示，當節理間距足夠小，坑道壁或頂部產生鬆散(無應力)的楔塊，並且因重力而落入坑道中。節理間距為 1.8 m(NO.3)和 1.2 m(NO.4)的結果顯示這種不穩定性。NO.1 和 NO.2 模型因節理間距較大，因此不會出現破裂的現象。

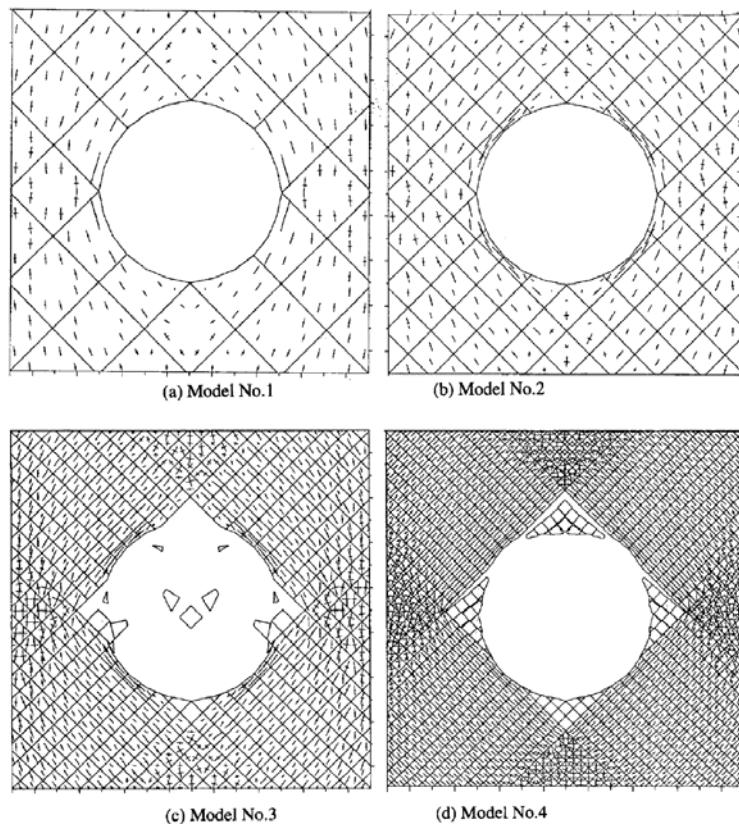


圖 3.6 坑道周圍的破壞區與應力場。3 號和 4 號模型中的一些鬆散塊落入坑道 (Shenand Barton, 1997)

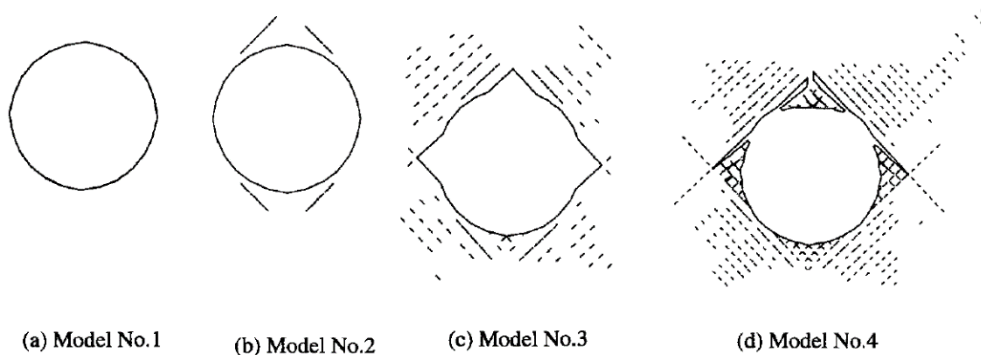


圖 3.7 坑道周圍的節理開口寬增加區(Shenand Barton, 1997)

(2)開口寬增加區(圖 3.7):具有最大節理間距的 NO.1 模型在坑道附近沒有顯示節理開口。當間距從 3.6m(NO.2)減小到 1.8(NO.3)時,節理開口寬增加區域明顯擴大。

(3)剪切區(圖 3.8)。由於坑道開挖,大部分模擬區域的節理經受一定程度的剪切位移。於此只考慮具有節理剪切位移 $\geq 3\text{mm}$ 的區域。如圖 3.8 所示,剪切帶隨著節理間距的減小而擴大。間距為 7.6m 時,剪切區域僅產生於坑道周圍的幾個節理。當間距為 1.2m 時,剪切區域擴展到模型的邊界。剪切帶在坑道周圍形成 X 形,與實驗室雙軸加載試驗條件下脆性岩石的破壞路徑一致。顯然,X 形發生於具最大剪切應力之方向。 45° 傾斜正交節理組是 X 形剪切區的另一個原因。

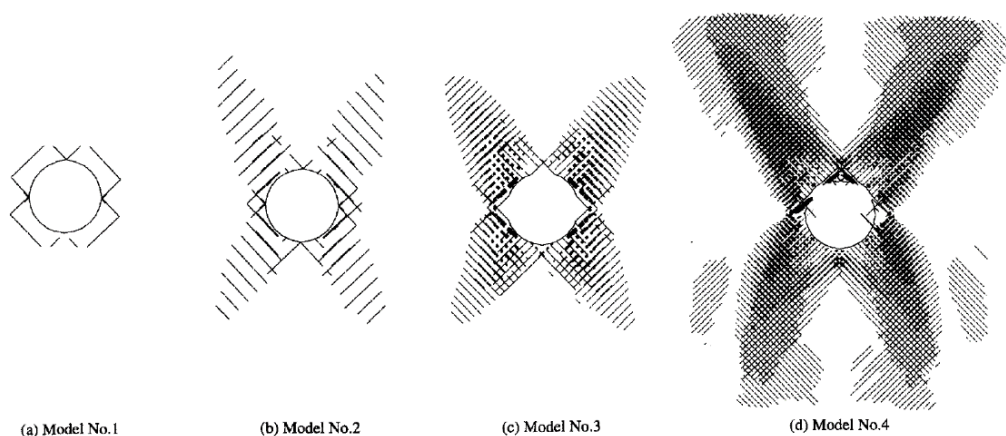


圖 3.8 坑道周圍節理受明顯剪切作用的區域 (Shenand Barton, 1997)

2. 不同應力狀態

NO.3 模型應用不同的現地應力狀態。水平應力為先前使用的兩倍($\sigma_x=10\text{MPa}$)。在這種應力狀態下,那些早先發現鬆散的塊仍然不穩定。然而,節理開口寬增加區幾乎消失,坑道周圍的剪切帶變得比以前小得多(圖 3.9)。與較低水平應力的 X 型剪切帶不同,較高水平應力的剪切帶具有近似等維的形狀。顯然,較高的水平應力使坑道處於更均向的應力場,並阻止剪切帶在特定方向上生長。

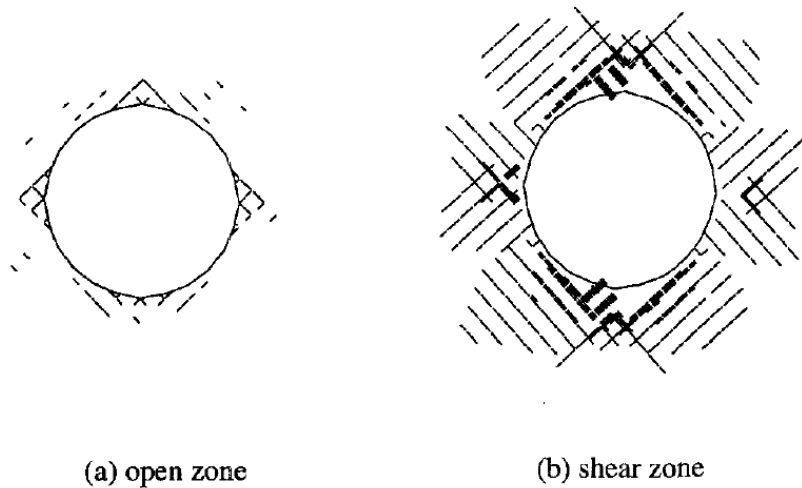


圖3.9 當施加的應力 $\sigma_y = 20 \text{ MPa}$ (垂直方向)和 $\sigma_x = 5 \text{ MPa}$ (水平方向)時，NO.3模型的節理開口寬增加區和剪切帶($\sim > 3 \text{ mm}$)。摘自 Shen and Barton (1997)

3. 不同節理方位

另外，本研究亦改變了節理方位，此模型與 NO.3 模型其他條件相同，但將節理由 45° 變成垂直與水平。此模型的擾動區域似乎與 NO.3 模型不同，主因為節理方向的改變(圖 3.10)。模型中鬆散塊出現在坑道的左上角和右上角，最終的坑道形狀類似於「貓臉」。剪切帶收縮到坑道上方和下方的幾個垂直節理處。

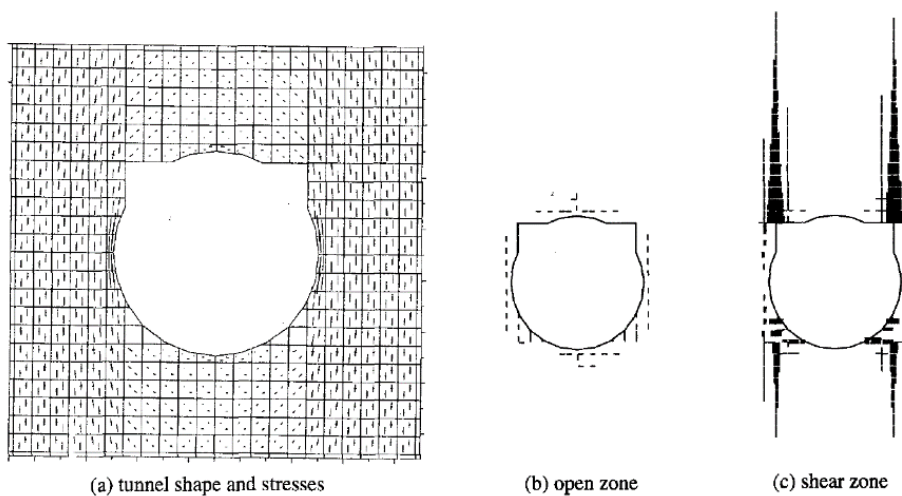


圖3.10具有垂直和水平節理組的NO.6模型的結果(Shen and Barton, 1997)

3.3 坑道周圍裂隙岩體之水力-力學耦合效應

1. 不連續岩體中 HM 耦合原理

地質介質中考慮水力-力學耦合分為直接耦合和間接耦合(Lisjak, et al., 2017)，直接耦合包括：

- (1)應力引起的流體壓力(或質量)變化；
- (2)流體壓力引起的(或流體質量引起的)孔隙體積(或裂隙體積)變化。

多孔隙介質直接耦合的例子，如不排水加載期間中記錄到的孔隙流體壓力增加，以及在孔隙流體抽注期間觀察到沉陷與抬升。傳統上可使用 Biot 的孔彈性理論描述岩體多孔介質的水力-力學耦合行為。該理論描述了孔隙流體與孔隙結構彈性響應之間的耦合相互作用，同時將多孔介質處理為多相(固體和液體)材料。擴展有效應力原理和一維壓密理論，Biot 的公式分別使用彈性理論和達西定律來描述固體行為和孔隙間流體流動行為。

裂隙岩盤之直接耦合例子則如應力造成裂隙開口寬變化而影響流場，進一步影響孔隙壓力而回饋影響裂隙開口寬，假定平行板流動模型的情況下，裂隙岩體可使用立方定律(cubic law)來計算裂隙水力傳導特性(Witherspoon, et al., 1980)，立方定律之適用性一直是重要的研究課題(Zimmerman and Yeo, 2000；Oron and Berkowitz, 1998；Zhang, et al., 2015)，Navier-Stokes 方程式是否可簡化為更簡單的立方定律，取決於雷諾數和破裂面粗糙度。岩體不連續面的水力-力學響應，主要將透過不連續面壁位移(即正向張開/閉合和剪位移)與有效正應力和剪切應力的變化相關聯的組構模型來描述。通常，沿著不連續面的剪切位移會引起膨脹(節理開口寬增加)，這會影響不連續面內寬和水力傳導特性。

間接耦合則是分別考慮力學和水力過程引起的介質水力和力學特性的變化，間接耦合亦可分兩類：(1)力學到水力，應力造成水力特性改變；(2)水力到力學，流體壓力改變造成力學特性改變(Ivars, 2006)。

2. 水力-力學耦合方法

水力-力學完全耦合可基於雙向外顯法耦合以得到力學和水力解之間的交替(隨時間前進)，其中力學的計算受元素間的流體壓力影響，而流體的計算受岩石的變形和破裂產生的元素間的力學內寬變化影響。

水力-力學耦合可再分雙向耦合(圖 3.11(a))與單向耦合(圖 3.11(a))。本研究去年之研究成果(原能會物管局，2017a)，僅考慮應力對節理開口寬之影響，並進一步影響流場，屬單向耦合。今年本研究進一步考慮流場計算產生之孔隙水壓對有效應力之影響，並進一步影響裂隙開口寬，屬雙向耦合。

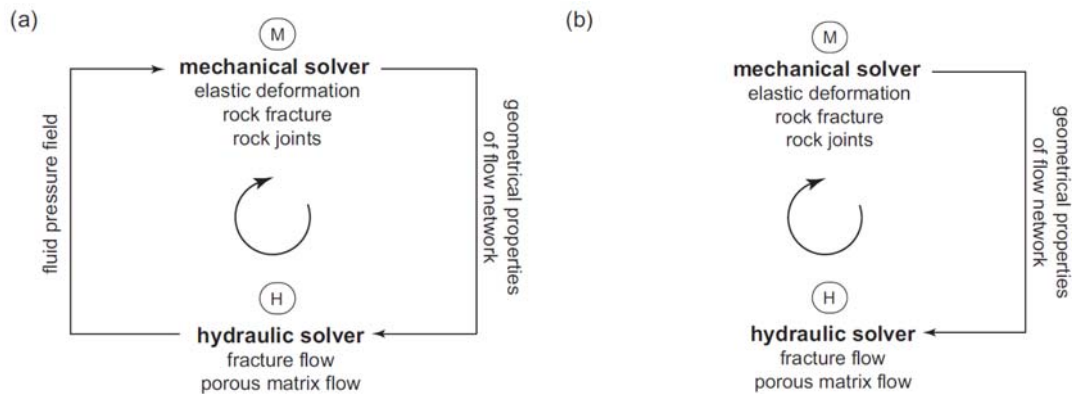


圖 3.11 水力力學之(a)雙向耦合；(b)單向耦合之示意圖(Lisjak, et al., 2017)

3. 坑道開挖面周圍裂隙岩體之水力-力學耦合

當進行地下坑道開挖時，會出現若干水力-力學耦合效應。首先是系統周圍的應力場重新分佈，這會改變局部裂隙開口寬、孔隙壓力和滲透率。此外，開挖坑道壁面的裂隙孔隙壓力降至大氣孔隙壓力，改變壓力梯度。因此，作用於坑道開挖周圍裂隙的有效應力不僅會因孔隙(或裂隙)應力的力學重新分佈而改變，而且孔隙壓力亦將重新調整。有效應力的變化導致裂隙開口寬變化，這亦改變了滲透率，進一步影響到坑道的總流入量。

Ivars(2006)嘗試利用 UDEC 軟體分析具有一近垂直裂隙穿過垂直處置窖的入流量分析，以利用水力-力學耦合解釋過去全尺寸處置窖入流量估計不準確之現象。圖 3.12 顯示了考慮或不考慮水力-力學耦合，對於處置窖地

下水流入量和最大剪切位移的結果。圖 3.12 a, c 和 e 中, 可看出考慮與不考慮水力-力學耦合, 對流入量顯著的影響性。對於耦合模擬而言, 流入量始終低於未耦合模型的流入量, 這是由於耦合情況下開挖周圍裂隙開口寬的減少幅度較大。耦合和非耦合模擬流入量之間的差異範圍為 0.75 至 0.95 l / min, 對於破裂面勁度較低的情況, 差異百分比更顯著(圖 3.12 a 和 c)。

如預期的, 耦合對開挖周圍最大剪切位移的影響可以忽略不計。最大剪切位移將隨剪脹角增加而減少(圖 3.12 b, d 和 f), 此一現象是導因於膨脹角增加剪切勁度會隨之增加, 也就是說, 剪切勁度增加(因為膨脹角增加造成剪脹效應顯著)將導致入流量增加(如圖 3.12a、c 和 e)。

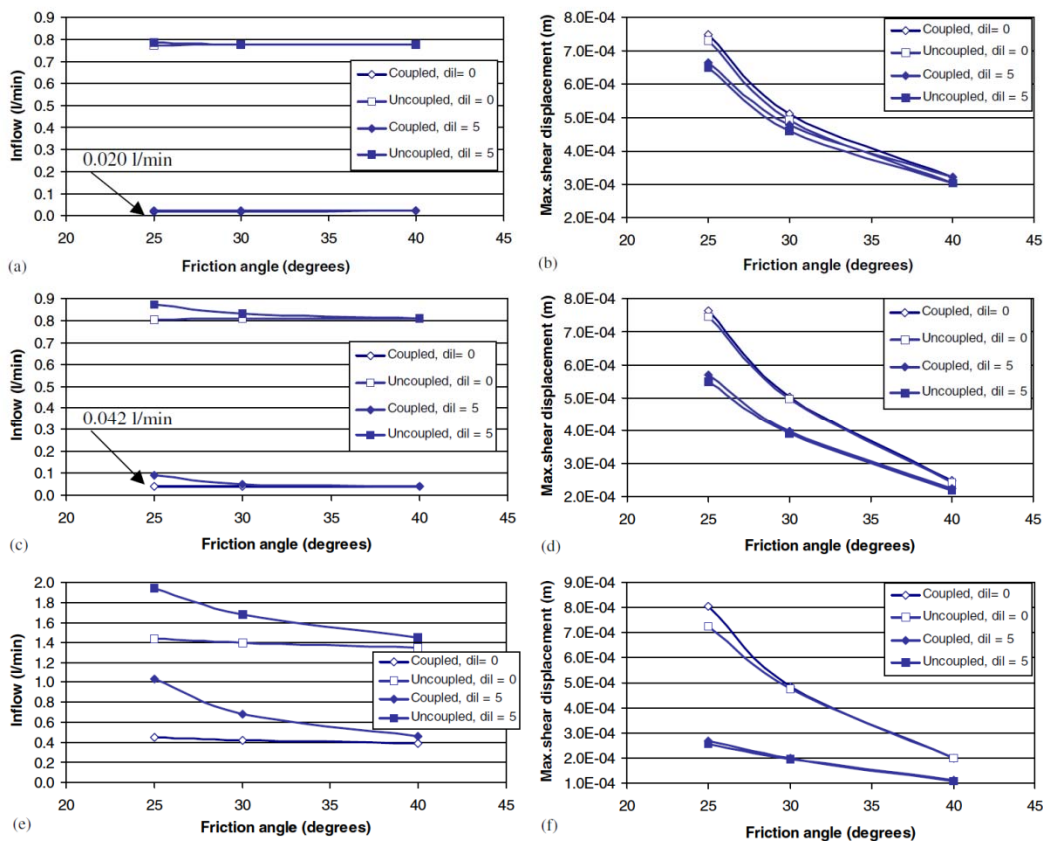


圖 3.12 耦合/非耦合模擬計算所得流入量和最大剪切位移與抗剪摩擦角以及 0° 和 5° 的膨脹角之關係。(a)和(b) $K_n=20$ GPa/m 和 $K_s=12$ GPa/m, (c)和(d) $K_n=61.5$ GPa/m 和 $K_s=35.5$ GPa/m, (e)和(f) $K_n=360$ GPa/m 和 $K_s=210$ GPa/m。 K_n 和 K_s 分別為節理正向與切向勁度。摘自 Ivars(2006)

第四章 裂隙水力傳導係數及流場平行驗證技術

去年度計畫利用 Oda (1986)擬連續體模式，導出破裂岩體滲透率張量，以及利用 Barton and Bandis (1985)提出的 JRC-JCS 模型，計算單一不連續面受到應力作用下開口寬的改變量。並且進一步利用理論模型，評估相關參數對地下水流經處置坑道流量之敏感度，找出影響處置坑道周圍流場之關鍵參數。本章根據去年度之研究成果為基礎，進一步進行雙向耦合，除了考慮應力對節理開口寬之影響外，再進一步考慮孔隙壓力對有效應力之影響，以建置一套足以驗證處置坑道周圍裂隙岩盤水力-力學耦合分析之技術，4.1 節說明研究之方法，4.2 節針對研究成果進行說明。

4.1 研究方法

基於去年之水力-力學單向耦合研究成果(原能會物管局，2017a)，本計畫進一步擴展至雙向耦合，研究方法如圖 4.1，首先利用 kirsch solution 計算隧道開挖後造成的應力重新分佈，得到隧道周圍各點的應力張量，再利用此應力狀態作用於裂隙上，使裂隙產生正向閉合及剪切膨脹等力學行為，進而造成裂隙內寬的變化，再將該內寬配合給定的裂隙長度、體密度等參數帶入 ODA model 中計算破裂張量，並得到水力傳導係數張量。再者，使用 FDM(finite difference method)模擬隧道周圍水頭分布，在忽略位置水頭及速度水頭的情況下，總水頭分布相當於每個節點的壓力水頭，壓力水頭乘上水單位重及得該點孔隙水壓，有效應力張量也隨之計算得到。在獲得新的應力場之後即可開始下一個迴圈計算，直到隧道壁面上的流量趨於穩定(收斂)後停止迴圈計算。

上述之流程中每個階段求得參數之關係，有效應力影響裂隙內寬，裂隙內寬影響裂隙岩體滲透係數，裂隙岩體滲透係數影響流場分布(水頭)，最後，水頭得到孔隙水壓影響有效應力進一步進入下一輪迴圈計算。

另外，本研究針對三個案例進行分析，分別針對不同之邊界應力以及不連續面為均向($D_{33}=0$)或非均向($D_{33}=2$)進行分析比較，其中，垂直應力皆為 10 MPa，案例一之應力比(stress ratio)為 1 和均向裂隙($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)，案例二之應力比(stress ratio)調整為 1.3 和均向裂隙($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)，以及案例三應力比(stress ratio)為 1 和非均向裂隙 $\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$ ，4.2 節將針對以上三個不同案例進行分析比較。 D_{33} 為第三類組構張量分量之一，若 $D_{33}=0$ ，表示裂隙為均向分布，隨 D_{33} 增加，水平裂隙比例增加。

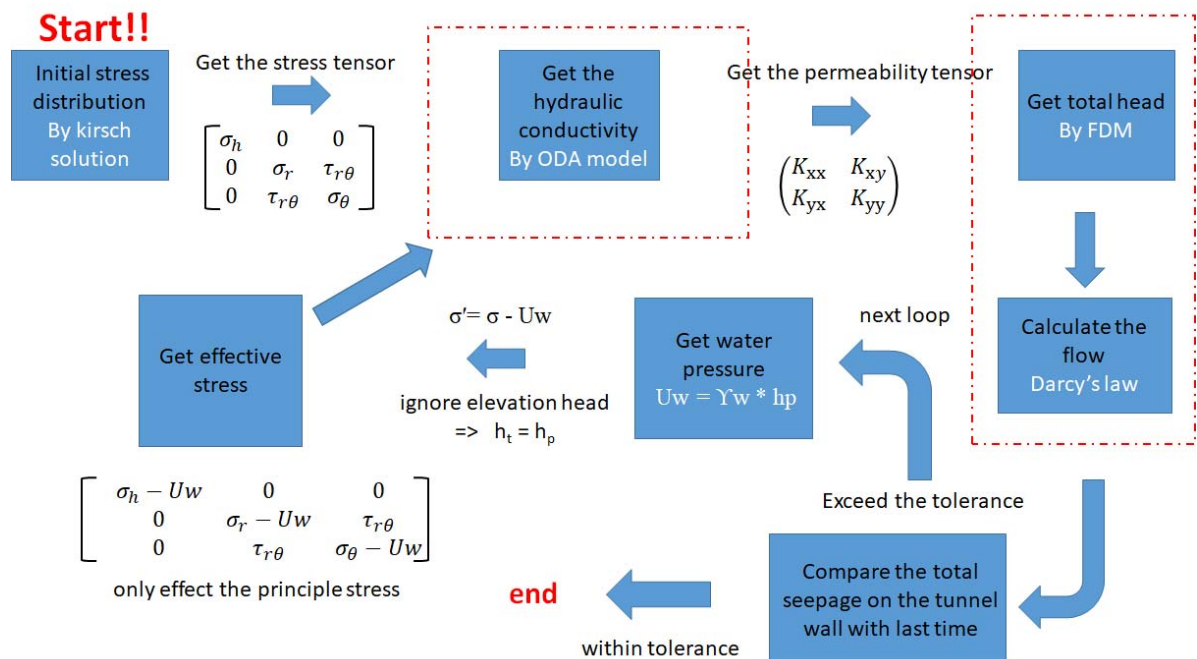


圖 4.1 本研究有關應力對裂隙水力傳導係數-流場分析-有效應力分析之研究流程圖，屬水力-力學雙向耦合

4.2 結果與討論

1. 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)

本節首先針對應力比為 1 且均向裂隙之案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)進行計算，並且考慮孔隙水壓進行分析，計算結果如表 4.1，隧道壁面上流量在迴圈計算 3 輪後接近穩定，完整計算完 5 輪後停止計算。其中，考慮孔隙水壓後隧道壁面上之入流量相較於未考慮孔隙水壓前約增加了 50%(圖

4.2)。在考慮孔隙水壓後發現水頭等值線明顯內縮(圖 4.3)，原因為靠近邊界處之水力傳導係數增加，故造成水頭損失較慢的緣故。

表4.1 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)每輪之計算結果

round	Flow rate(m^3/sec)	Percent(%)
0	1.65E-02	
1	2.36E-02	30.1783%
2	2.53E-02	6.7101%
3	2.55E-02	0.6040%
4	2.55E-02	0.0489%
5	2.55E-02	0.0139%

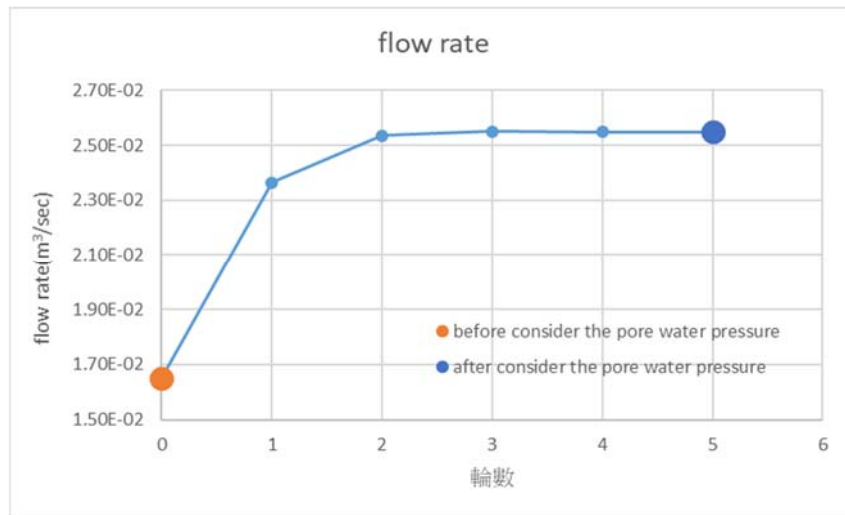


圖4.2 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之隧道壁面入流量，橘色點為未考慮孔隙水壓之流量，藍色點為考慮孔隙水壓後之流量。

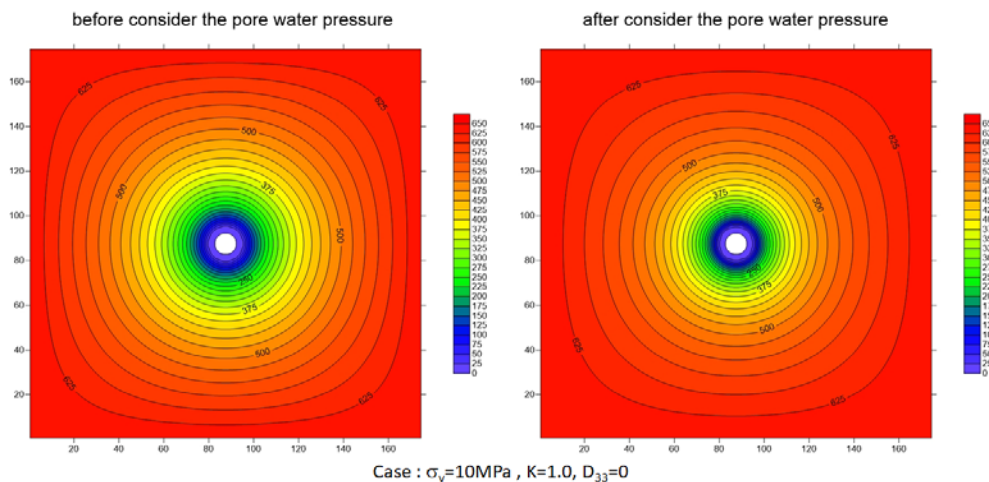


圖4.3 案例一($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之水頭

圖 4.4 為考慮孔隙水壓與未考慮孔隙水壓時，坑道徑向及軸向之水力傳導係數結果，由結果可知，無論是軸向還是徑向，靠近隧道壁面處考慮孔隙水壓之水力傳導係數皆略高於未考慮孔隙水壓時之結果(約增加 1.2 倍)，過 1.6 倍半徑距離後倍率隨著距離上升。

水頭分布(頂拱)之結果如圖 4.5，由圖可知，考慮孔隙水壓前後也有明顯差異，進隧道壁處因為近自由面邊界使得其水頭差異較小，隨著隧道壁面距離增加，水力傳導係數差異漸大，水頭的差異也逐漸顯現，最後靠近模型邊界處($h=650\text{m}$)之水頭會漸漸相同，而考慮孔隙水壓後之水力梯度(頂拱)(圖 4.6)在靠近隧道處較大，靠近模型邊界處漸漸趨緩。

流速分布(頂拱)如圖 4.7，如圖可知越靠近隧道壁面其差異越明顯，雖然水力傳導係數隨隧道中心距離越遠差異越大，但水力梯度卻相反，而 $V = K \cdot i$ ，其中 V 為流速， i 為水力梯度，故可發現遠離隧道壁面，流速差異漸漸縮小。

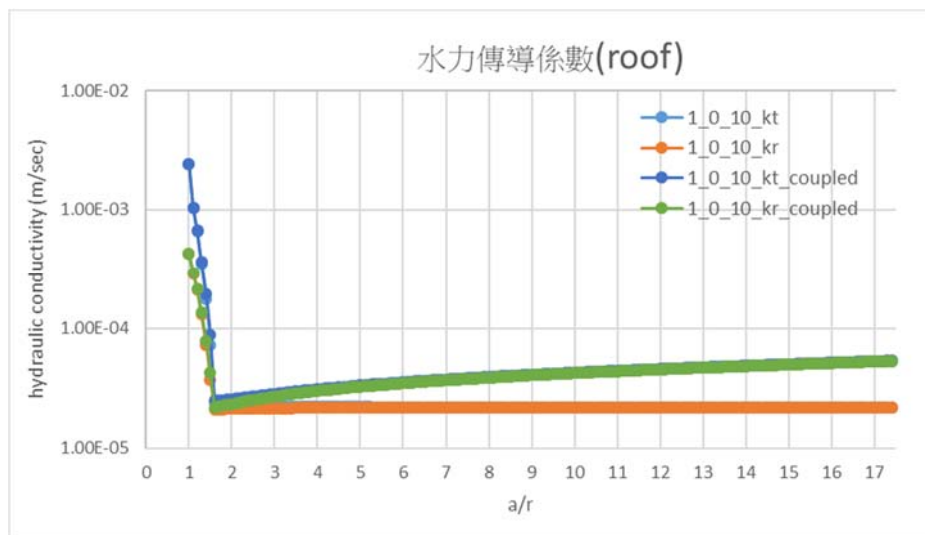


圖 4.4 案例一坑道徑向及軸向隨距離隧道壁面漸遠之水力傳導係數圖(K_t (淺藍色)及 K_r (橘色)為單向耦合、不考率孔隙水壓； $K_{t_coupled}$ (深藍色)及 $K_{r_coupled}$ (綠色)為雙向耦合、考率孔隙水壓)

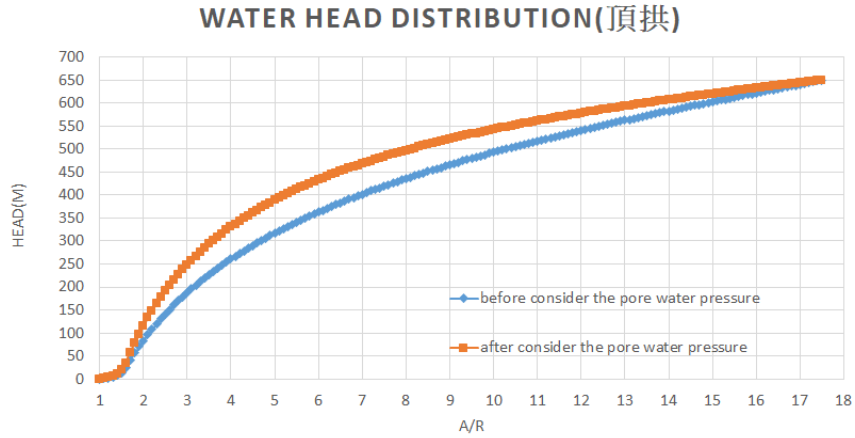


圖 4.5 案例一之水頭分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

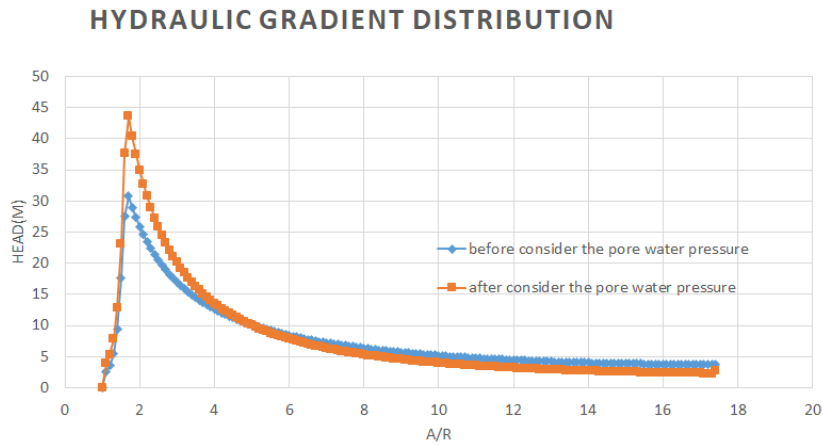


圖 4.6 案例一之水力梯度分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

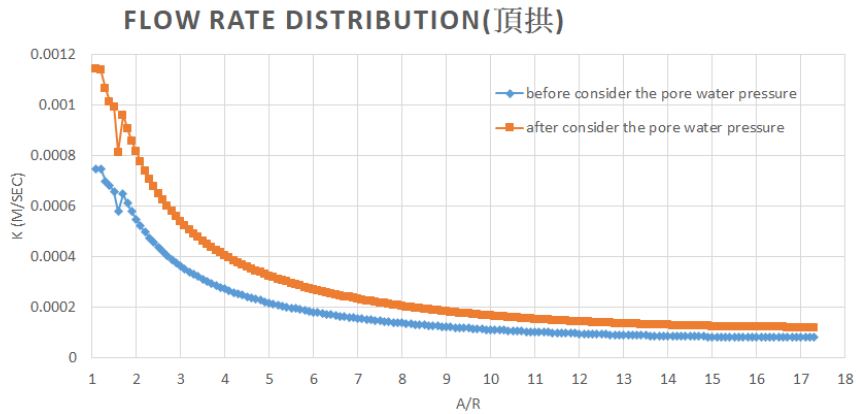


圖 4.7 案例一之流速分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

2. 案例二($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)

案例二之各條件與案例一相同，但應力比調整為 1.3，即水平應力大於垂直應力($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)，考慮孔隙水壓進行計算，計算結果如表 4.2，隧道壁面上流量在迴圈計算與案例一相似，進行到第 3 輪後趨於穩定，並完成 5 輪計算後停止計算。考慮孔隙水壓後隧道壁面上之入流量相較於未考慮孔隙水壓前約增加了 70%(圖 4.8)。水頭等值線與案例一相似有內縮之趨勢(圖 4.9)。

坑道徑向及軸向之水力傳導係數之結果如圖 4.10，靠近隧道壁面處考慮孔隙水壓之水力傳導係數比未考慮孔隙水壓時增加約 1.4 倍左右。水頭分布(頂拱)(圖 4.11)、水力梯度(頂拱)(圖 4.12)及流速分布(頂拱)(圖 4.13)之結果與案例一相似。

表4.2案例二($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)每輪之計算結果。

round	Flow rate(m ³ /sec)	Percent(%)
0	0.014932	
1	2.15E-02	30.59%
2	2.31E-02	6.94%
3	2.33E-02	0.60%
4	2.32E-02	0.05%
5	2.55E-02	0.0139%

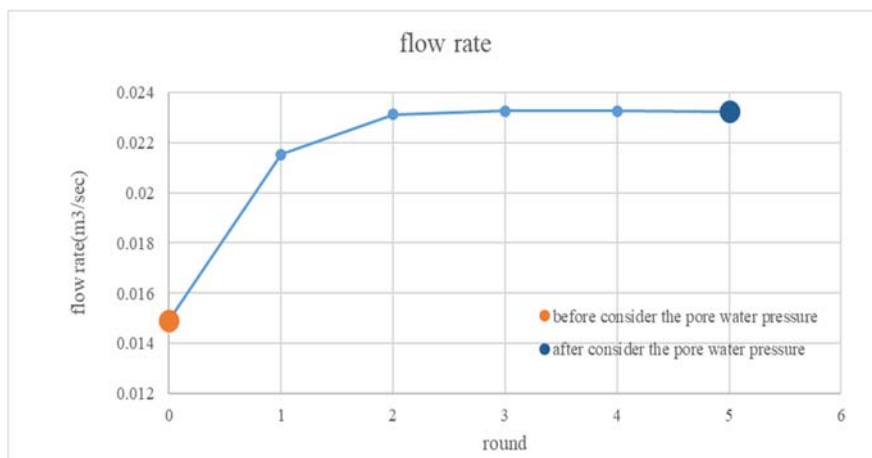


圖4.8案例二($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之隧道壁面入流量，橘色點為未考慮孔隙水壓之流量，藍色點為考慮孔隙水壓後之流量。

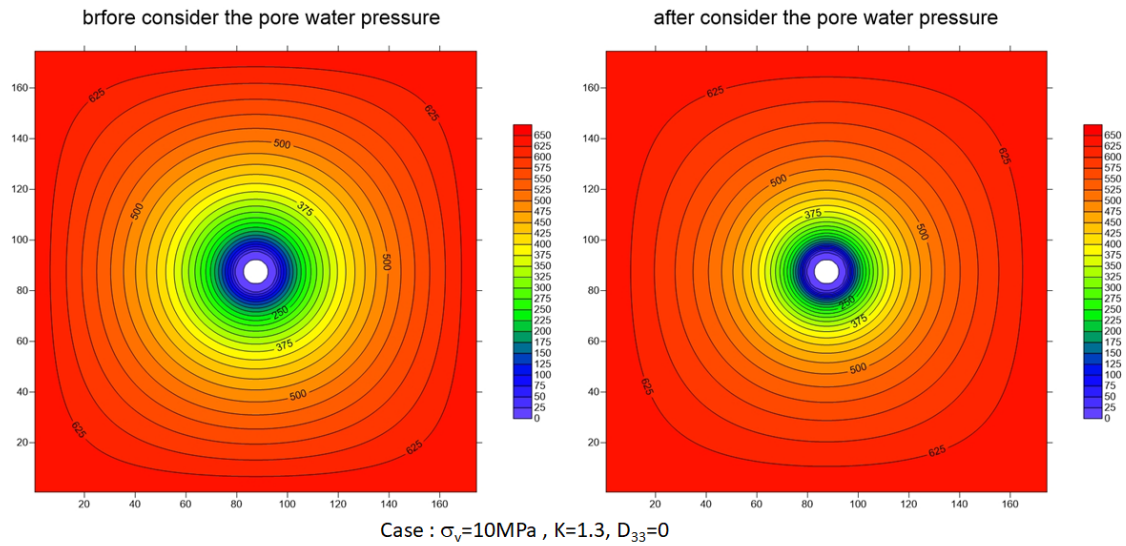


圖4.9 案例二($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.3$ 、 $D_{33}=0$)考慮孔隙水壓前後之水頭

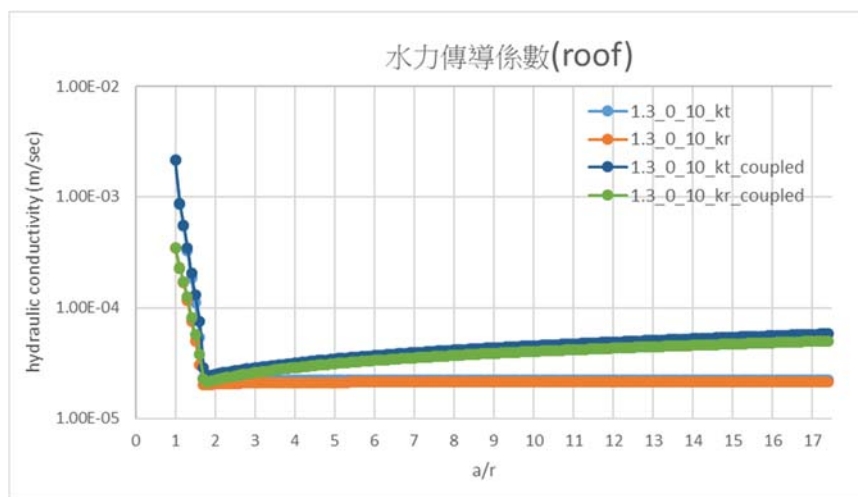


圖4.10 案例二坑道徑向及軸向隨距離隧道壁面漸遠之水力傳導係數圖(K_t (淺藍色)及 K_r (橘色)為單向耦合、不考慮孔隙水壓； $K_{t_coupled}$ (深藍色)及 $K_{r_coupled}$ (綠色)為雙向耦合、考慮孔隙水壓)

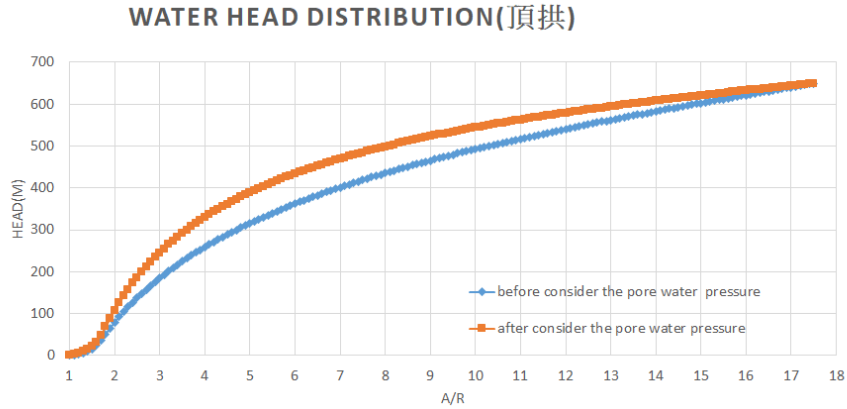


圖4.11 案例二之水頭分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

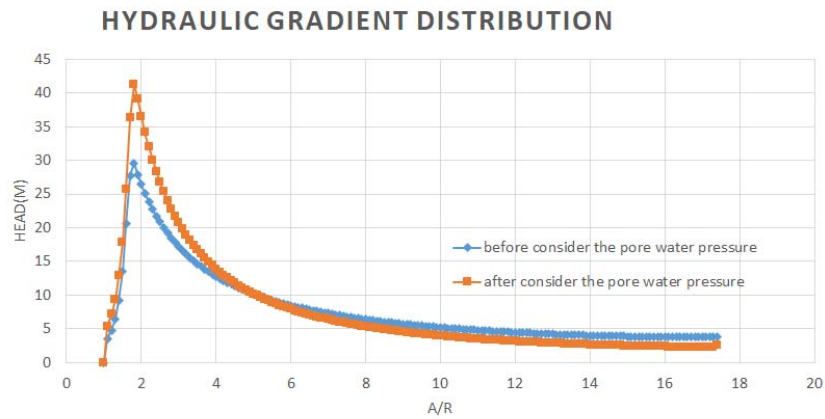


圖4.12 案例二之水力梯度分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

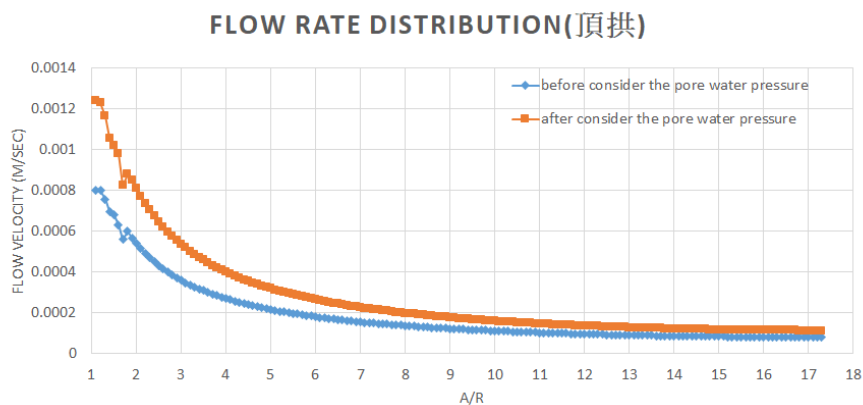


圖4.13 案例二之流速分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

3. 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)

案例三考慮裂隙之非均質性($D_{33}=2$)，其他條件與案例一相同($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)，考慮孔隙水壓進行計算，計算結果如表 4.3，隧道壁面上流量在迴圈計算與案例一相似，進行到第 3 輪後趨於穩定，並且完成 5 輪計算後停止計算。考慮孔隙水壓後隧道壁面上之入流量相較於未考慮孔隙水壓前約增加了 50%(圖 4.14)，且在此案例中孔隙水壓與前兩個案例相比相對較小，水頭方面，與前兩個案例一樣有內縮之趨勢(圖 4.15)，但因異向性之結果導致水頭在水平向呈現橢圓狀分布。

水力傳導係數的部分(圖 4.16)，與前兩個案例相比，考慮孔隙水壓增加不到 1.2 倍，但如圖可發現，軸向及徑向之水力傳導係數於 1.5 倍坑道半徑有明顯之差距(約 4-8 倍)。水頭分布(頂拱)(圖 4.17)及水力梯度(頂拱)(圖 4.18)而言，是否考慮孔隙水壓的結果相近，顯示此案例中，孔隙水壓對於水頭及水力梯度沒有太大的影響，流速分布(頂拱)(圖 4.19)之結果與案例一相似。

表 4.3 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)每輪之計算結果

round	Flow rate(m^3/sec)	Percent(%)
0	1.29E-02	
1	1.88E-02	31.25%
2	1.97E-02	4.69%
3	1.99E-02	0.83%
4	1.99E-02	0.03%
5	1.99E-02	0.02%

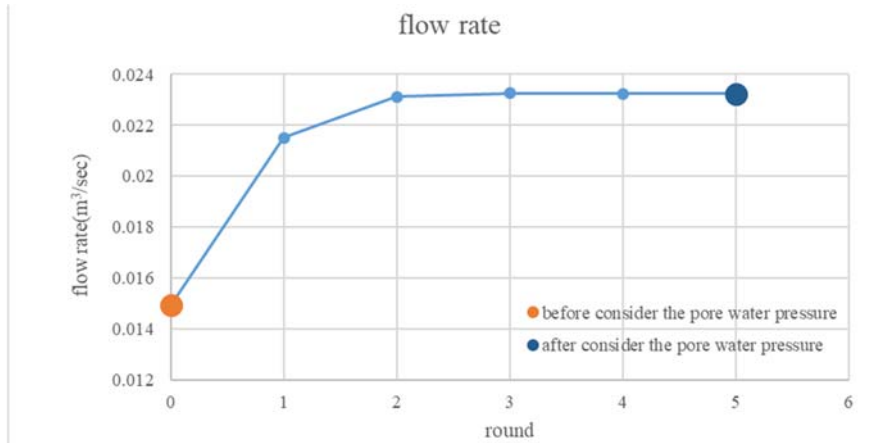


圖4.14 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)考慮孔隙水壓前後之隧道壁面入流量，橘色點為未考慮孔隙水壓之流量，藍色點為考慮孔隙水壓後之流量

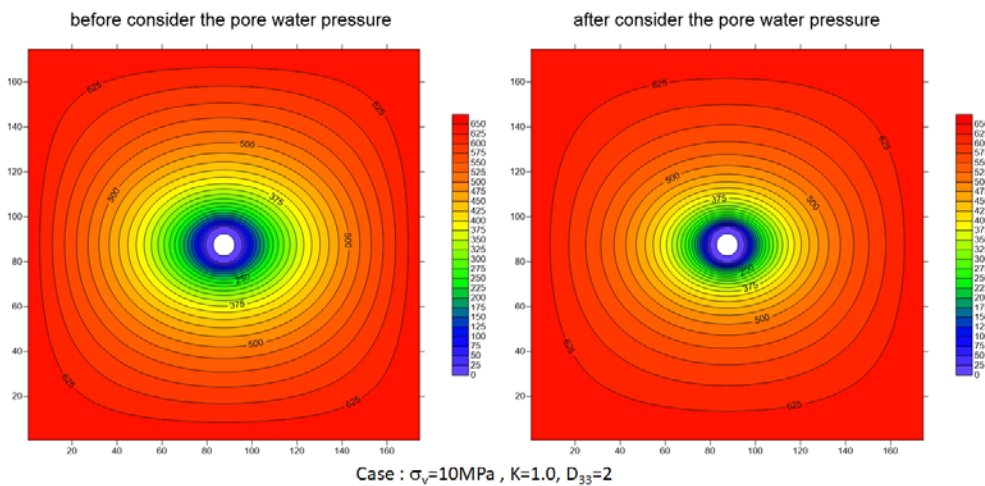


圖4.15 案例三($\sigma_v=10\text{MPa}$ 、 $K=1.0$ 、 $D_{33}=2$)考慮孔隙水壓前後之水頭

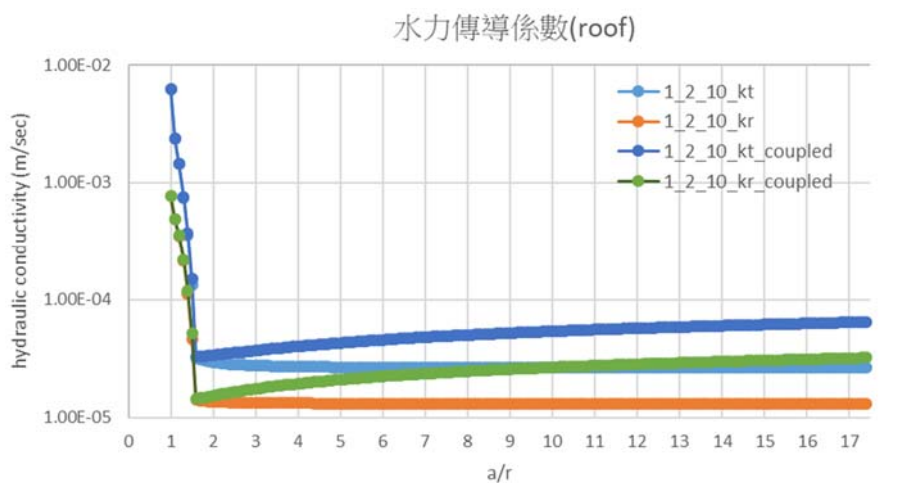


圖4.16 案例三坑道徑向及軸向隨距離隧道壁面漸遠之水力傳導係數圖(K_t (淺藍色)及 K_r (橘色)為單向耦合、不考率孔隙水壓； $K_{t_coupled}$ (深藍色)及 $K_{r_coupled}$ (綠色)為雙向耦合、考率孔隙水壓)

WATER HEAD DISTRIBUTION (頂拱)

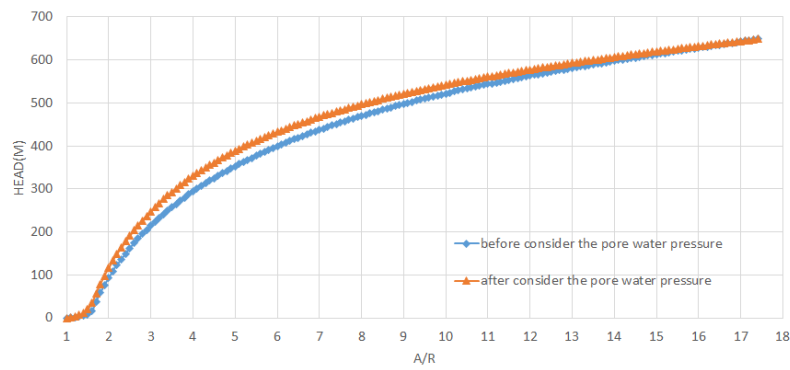


圖4.17 案例三之水頭分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

HYDRAULIC GRADIENT DISTRIBUTION

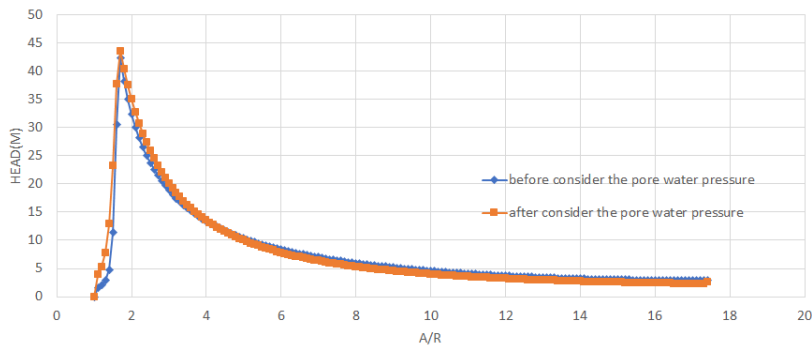


圖4.18 案例三之水力梯度分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

FLOW RATE DISTRIBUTION(頂拱)

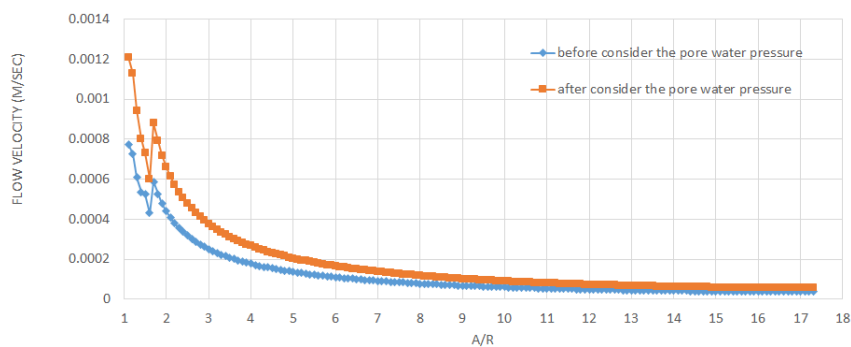


圖4.19 案例三之流速分布圖，藍色線為單向耦合方式計算，開口寬計算未考慮有效應力(直接採總應力計算)，橘色線為雙向耦合，開口寬使用有效應力計算

4.水力傳導係數之綜合比較

將前述三個案例之是否考慮孔隙水壓對於水力傳導係數之影響進行比較(圖 4.20 至圖 4.23)，由圖可以發現，頂拱處為應力異向性(案例二)之結果，無論是徑向或是軸向，於近隧道處變化較明顯。側壁處應力為均向的狀況(案例 1 和案例 3)時，近隧道處變化較明顯。

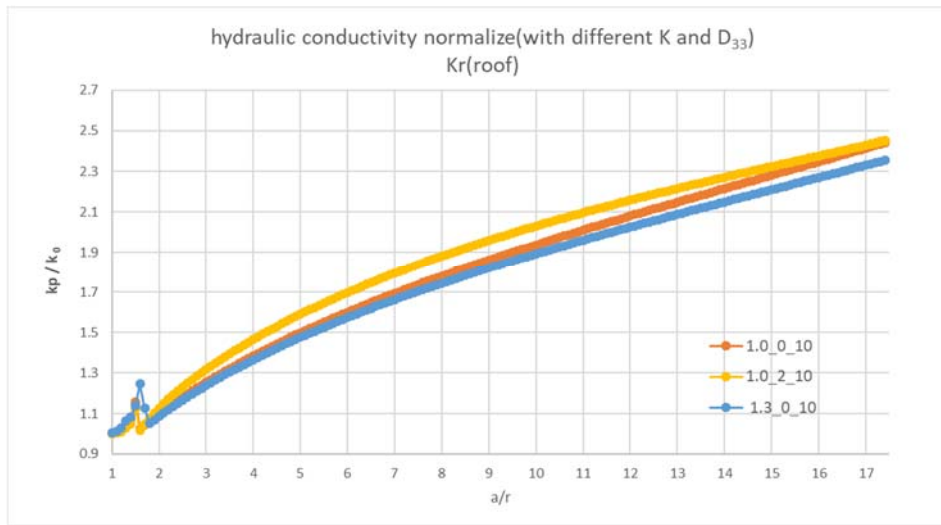


圖4.20 三個案例之頂拱徑向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_p 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、橘色線與黃色線分別為案例一、二、三

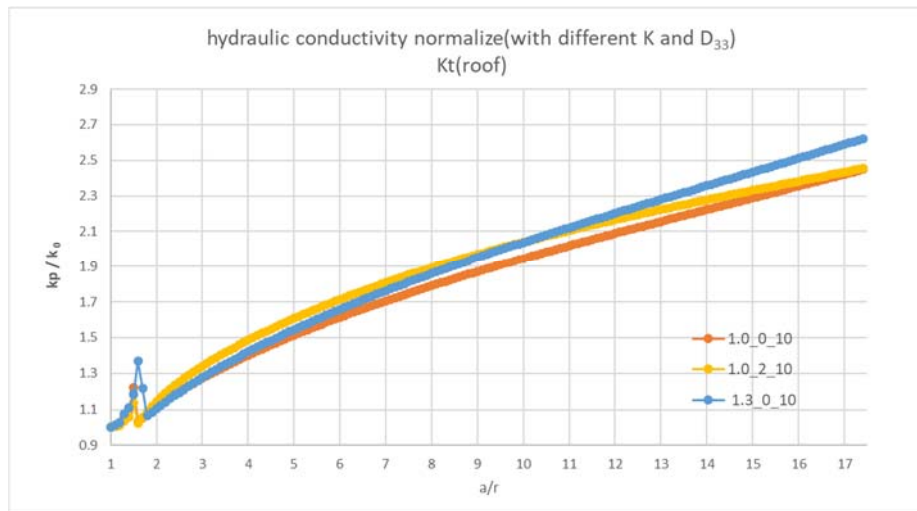


圖4.21 三個案例之頂拱切向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_p 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、橘色線與黃色線分別為案例一、二、三

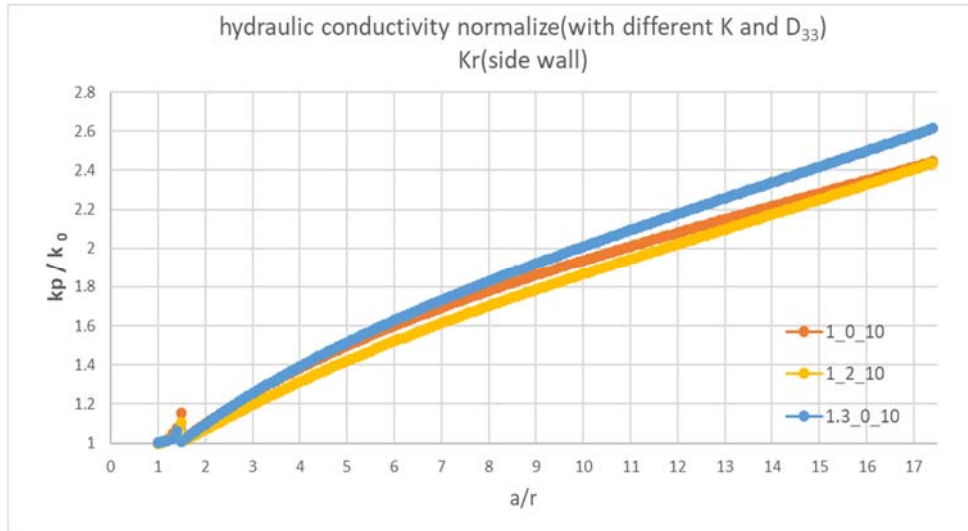


圖4.22 三個案例之側壁徑向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_p 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、橘色線與黃色線分別為案例一、二、三

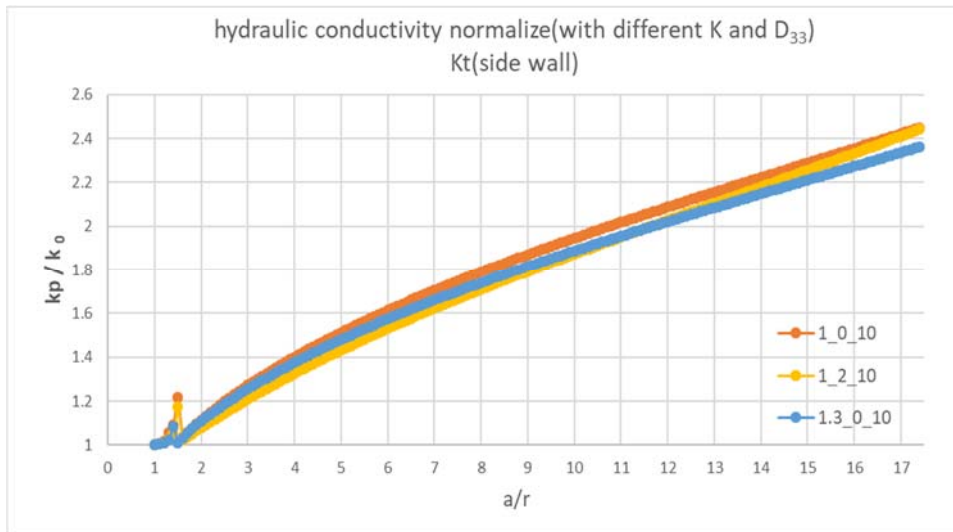


圖4.23 三個案例之側壁切向水力傳導係數比(K_0 為單向耦合、不考率孔隙水壓； K_p 為雙向耦合、考率孔隙水壓)隨距離隧道壁面漸遠之趨勢圖，藍色線、橘色線與黃色線分別為案例一、二、三

第五章 場址特性參數平行驗證方法測試

對於低放射性廢棄物處置安全評估而言，場址特性特徵化為首要工作之一，透過現地試驗或實驗室試驗確定相關參數，這些參數可能需要透過足夠的試驗次數提高參數的可靠性，例如本計畫去年成果(原能會物管局，2017a)中提到，SKB在各階段透過各種試驗(例如：單軸壓縮、雙軸壓縮、拉伸試驗...等)確定之參數表，表中詳細整理出在各階段(可行性研究、初始場址調查、完整場址調查及詳細描述時期)SKB 確定之參數。我國低放處置目前傾向使用坑道處置之方式，水力傳導係數對於坑道處置而言為關鍵參數之一，根據本計畫去年之研究成果(原能會物管局，2017a)，水力內寬對於水力傳導係數而言非常敏感。然而，水力內寬值受到許多因素影響，例如：裂隙岩體所受到之應力、破裂面之粗糙度及位態等。因此，能有效驗證這些參數可大幅降低場址之不確定性因素。本章將介紹裂隙開口寬之現地調查方法，並建議透過室內試驗方法驗證現地試驗獲得之內寬值，以作為未來國內處置場址參數平行驗證之參考。

5.1 裂隙岩體水力傳導係數特徵化方法-現地試驗

詹尚書(2018)的研究中以裂隙岩體為對象，自離散裂隙網絡觀點出發，建立一套裂隙岩體滲透特性調查暨參數特徵化技術，建立岩體滲透特性物理統計模式，透過最直接可獲得岩體水力特性之現地水文地質試驗結果，搭配統計檢定程序及相關裂隙空間分佈及幾何特性參數特徵化方法，可量化具統計意義之優勢裂隙組別導水係數及水力傳導係數。

此研究進一步透過南投和社水文地質試驗井場作為驗證，基於離散裂隙網絡概念佈置鑽井，並進行不連續面調查、現地水文地質試驗等岩體參數特徵化。根據不同尺度之現地水文地質試驗結果顯示，和社場址岩體水力傳導係數標準差/平均值最大為 189%，最大/最小水力傳導係數差距達 6989 倍。利用單孔現地水文地質試驗結果，透過統計複迴歸分析序率式求得的優勢裂隙組別的導水係數，改良式呂琴試驗與單井雙封塞試驗所得量值接近，不同裂隙組別的導水係數序位

亦相同。利用室內節理面試驗獲得優勢裂隙組別對應之隙寬，透過統計複迴歸分析序率式求得優勢裂隙組別的水力傳導係數，單井雙封塞試驗與多孔抽水試驗所得各優勢裂隙組別水力傳導係數量值大小排序相同。

單井雙封塞試驗與多孔抽水試驗示意圖如圖 5.1，單井雙封塞試驗透過封塞 (packer) 封閉住一試驗區段(圖 5.1(a))，以確保試驗過程中監測數據能完全顯現該試驗區段之水力特徵。封塞試驗廣泛地用於獲得裂隙岩體水力特性參數，其作法主要步驟係以一固定壓力下注水至試驗區段，並量測達穩態時該壓力下流量，並根據 Thiem(1906)提出的理論公式(式 2.3-1)，依現地試驗能獲得之參數需求，求解該試驗區段等值水力傳導係數 k^{eq} 。

$$k^{eq} = \frac{Q/l}{2\pi\Delta h} \ln \frac{R}{r_b} \quad (5-1)$$

其中 Q 為單位時間之流量(m^3/s)， l 為試驗區段長度， Δh 為水頭差(m)， R 為影響範圍半徑(m)， r_b 為鑽孔半徑(m)。

多孔抽水試驗方面，其方法與封塞試驗相近，不同之處在於封塞試驗獲得純量值的含水層水力特性參數，多孔抽水試驗(圖 5.1(b))則可針對場址裂隙空間分佈予以佈置試驗區段，以決定裂隙組別滲透特性及連通性。瑞典的 Stripa 礦場即以跨孔試驗以特徵化場址水文地質特性，作為高放射性廢棄物處置前置調查項目，透過近似扇形、長約 200-250 m 之鑽孔佈設，以地球物理及水文地質試驗探究岩體異向性特性(Black 和 Holmes，1985；Black，1987)。

因離散裂隙網絡模式(Discrete Fracture Net-work Model, DFN)通常需要輸入水力內寬，而水力內寬可能受到力學之影響，因此透過實驗室方法取得水力內寬與力學內寬隨應力之變化關係非常重要。本章之 5.2 節介紹既有研究，蒐整過去有關水力-力學內寬之研究成果，5.3 節介紹 YOKO2 以及利用鋁塊進行水力及力學內寬量測，以作為相關試驗之範例。

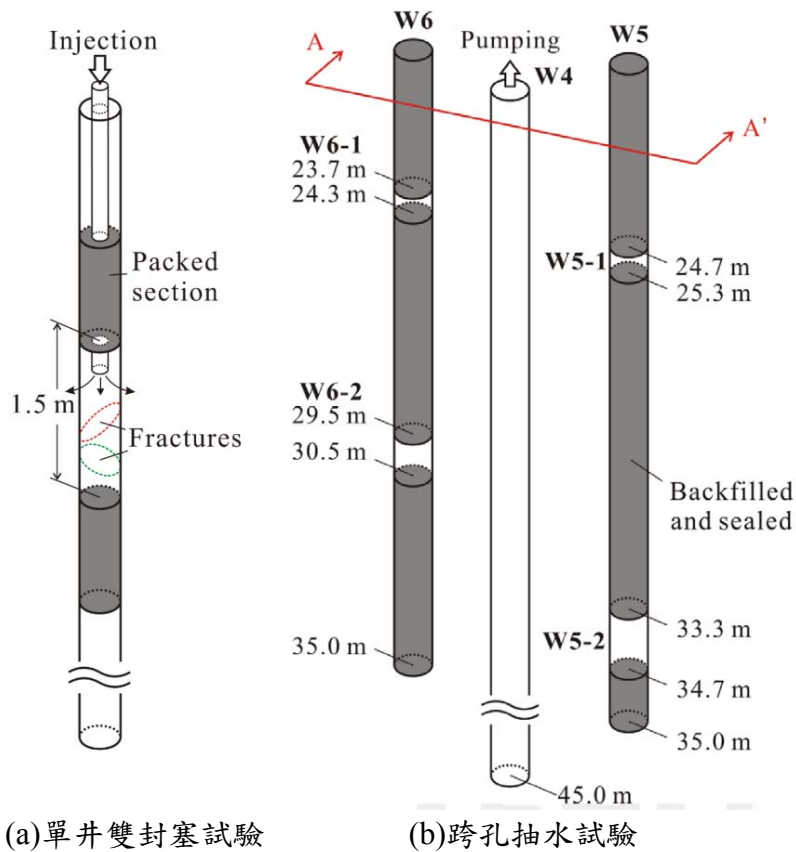


圖 5.1 和社水文地質試驗示意圖(詹，2018)

5.2 裂隙岩體之水力、力學內寬及粗糙度

對於低放射性廢棄物處置安全評估而言，場址特性特徵化為首要工作之一，透過現地試驗或實驗室試驗確定相關參數，這些參數可能需要透過足夠的試驗次數提高參數的可靠性，例如本計畫去年成果(原能會物管局，2017a)中提到，SKB 在各階段透過各種試驗(例如：單軸壓縮、雙軸壓縮、拉伸試驗...等)確定之參數表，表中詳細整理出在各階段(可行性研究、初始場址調查、完整場址調查及詳細描述時期)SKB 確定之參數。我國低放處置目前傾向使用坑道處置之方式，水力傳導係數對於坑道處置而言為一關鍵參數之一，根據本計畫去年之研究成果(原能會物管局，2017a)，水力內寬對於水力傳導係數而言非常敏感。然而，水力內寬常會受到一些因素所影響，例如：裂隙岩體所受到之應力、破裂面之粗糙度及位態等。因此，能有效驗證這些參數可大幅降低場址之不確定性因素，本章將綜整一些測試方法進行相關參數的驗證，供國內處置場址參數平行驗證工作之參考。

對於場址特性參數中之關鍵參數驗證，本研究將重點針對開口寬的量測與驗證進行說明。過去有關力學內寬與水力內寬之研究，Witherspoon 等人(1980)定義平行板在某一應力作用下通過一定流量的當量內寬稱為立方律內寬。立方律內寬與流體於破裂面中之流動性質有關，後續簡化而直接視為平均內寬(mean aperture)。現地試驗由體積流量、水力梯度等水力參數之量測可求得立方律內寬，亦稱為水力內寬(hydraulic aperture)。Barton 等人於 1985 年之研究根據現地節理面水力試驗、大尺度塊體試驗等數據，繪製力學內寬 E 與水力內寬 e 比及根據平行版理論換算水力內寬 e 之關係(圖 5.2)，並提出透過 JRC 估算水力內寬之經驗公式(5-2)，其中，此等式僅適用於 $E \geq e$ 。

$$e = \frac{E^2}{JRC^{2.5}} \quad (5-2)$$

圖 5.3 中，曲線為透過經驗公式(5-1)計算出之內寬比 E/e 與水力內寬 e 之間的預測關係。當 JRC 越接近 0 時，此曲線越接近 $E/e=1$ 。另外，透過此模型的預測，即使在內寬相當大的情況下，粗糙的裂隙表面也會偏離 $E=e$ 。下面章節將進一步根據 Barton 等人提出之預測曲線，並透過不同之試驗結果進一步探討。

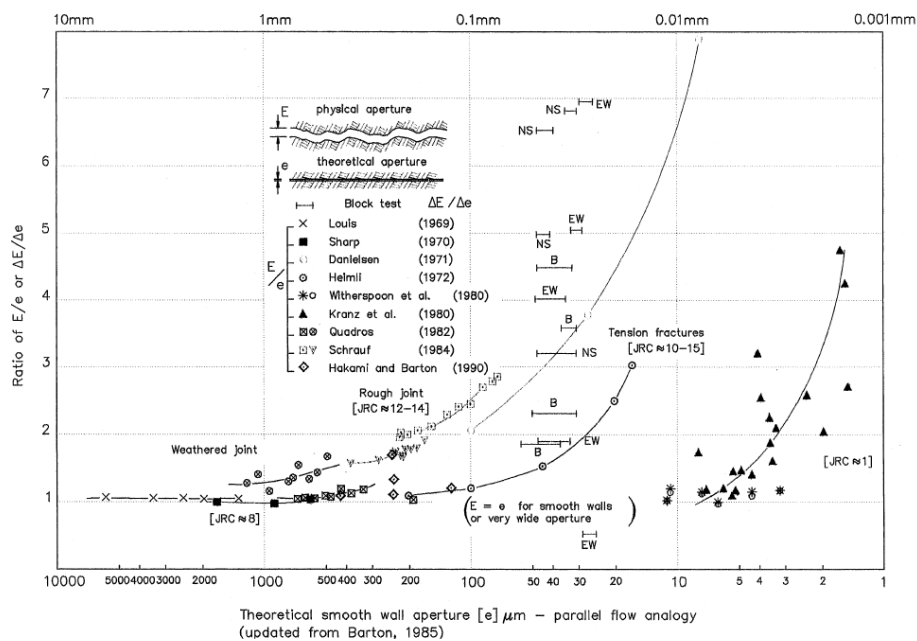


圖 5.2 真實力學內寬 E 與理論換算之水力內寬 e 之比(Barton 等人，1985)

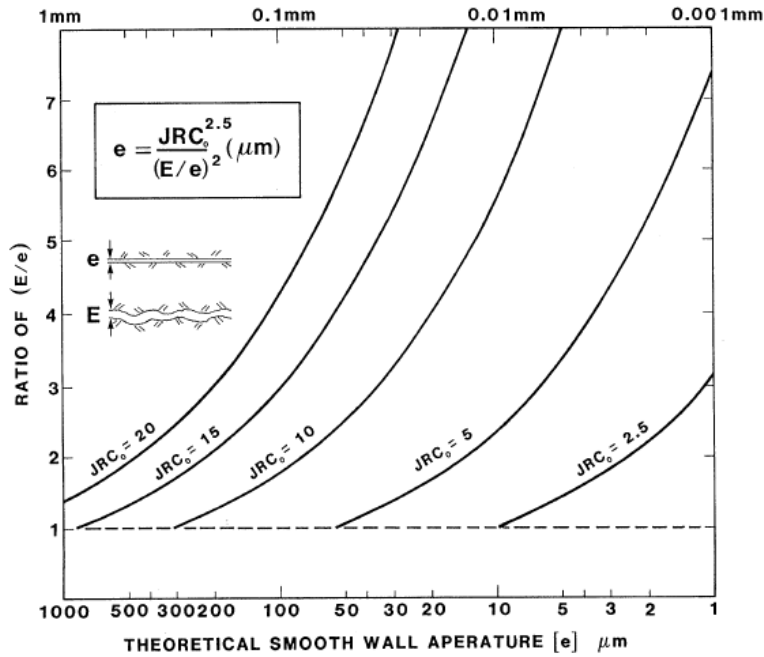


圖 5.3 考慮節理粗糙度(JRC)之開口寬的經驗關係(Barton 等人，1985)

5.3 力學內寬及水力內寬-室內試驗

5.3.1 既有文獻蒐集

Schrauf 等人(1986)的研究透過單一天然裂隙進行氣體流動的實驗研究結果。此研究方法與 Sharp(1970)、Iwai(1976)和 Raven and Gale(1985)先前進行的實驗方法相似。Schrauf 等人(1986)的研究引入了裂隙體積測量，以提供完全獨立的平均裂隙開口寬測量。此外，Schrauf 等人(1986)提出了一種新的裂隙流動模型來描述實驗結果。

另一方面，Zhao 等人(2017)研究中，在不同的圍壓下對單一岩體裂隙進行瞬態脈衝試驗，並提出了一種根據多項式擬合的數據分析方法，研究流速與水力梯度的關係，並利用三維雷射掃描量化瞬態脈衝測試後或在水力-力學耦合效應下，裂隙表面的形態變化。

圖 5.4 及圖 5.5 分別為 Schrauf 等人(1986)以及 Zhao 等人(2017)的研究中，開口寬與圍壓之關係，本研究進一步將 Schrauf 等人(1986)以及 Zhao 等人(2017)的研究結果與 Barton(1985)提出之經驗公式進行套疊(圖 5.6)。由套疊結果(圖 5.6)得知，Schrauf 等人(1986)與 Zhao 等人(2017)之實驗結果與 Barton(1985)提出的經驗公式一致。Schrauf 等人(1986)的研究成果接近於粗糙度(JRC)=12 之結果相近(深紅色)；而 Zhao 等人(2017)的研究成果與 Barton(1985)研究中粗糙度(JRC)=8 之成果相近(綠色)。

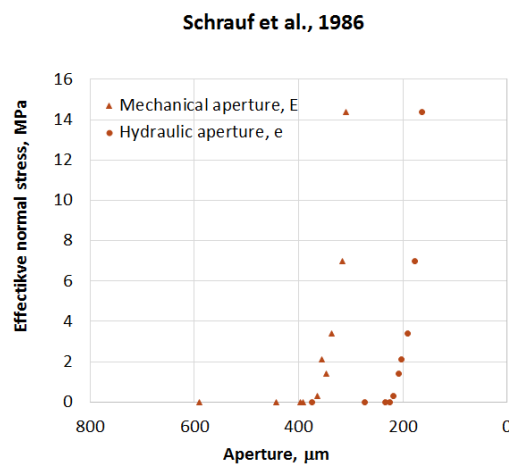


圖5.4 Schrauf等人(1986)的研究中，開口寬與圍壓之關係

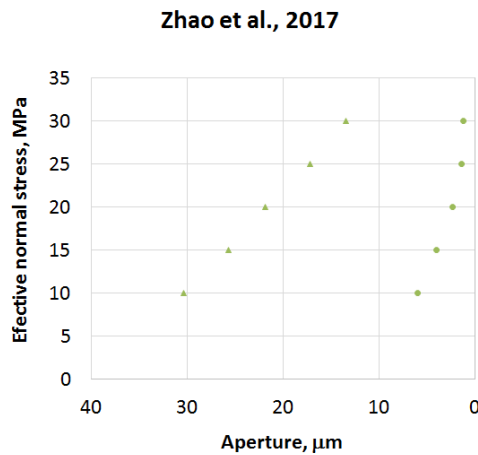


圖5.5 Zhao等人(2017)的研究中，開口寬與圍壓之關係

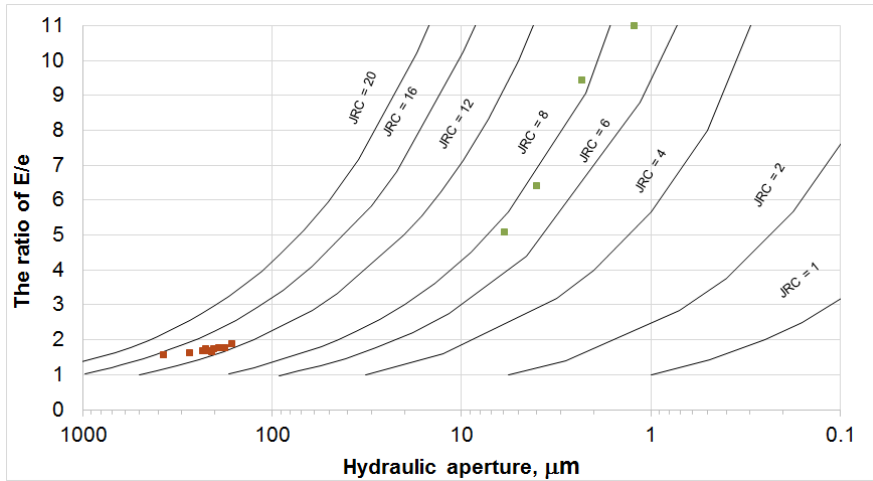


圖5.6 Barton等人(1985)所提出之經驗公式與Schrauf等人(1986)(深紅)及Zhao等人(2017)(綠)的研究結果套疊圖

5.3.2 利用孔隙率/滲透率量測系統YOKO2量測力學與水力內寬

欲驗證透過試驗得到之岩體裂隙之水力內寬與力學內寬，本研究建議可使用高圍壓孔隙率/滲透率量測系統(YOKO2)，同時取得力學內寬與水力內寬，YOKO2 係由日本京都大學嶋本利彥(Toshihiko Shimamoto)教授所設計，以氦氣當作孔隙流體測量岩石之孔隙率及滲透率，此套系統使用油壓方式於室溫下提供均向圍壓，最高圍壓可達 200MPa。其中，測量岩石滲透率之方法採用穩態測量法，孔隙率則利用波以耳定率(Boyle's law)，本研究透過此套系統得到之參數進一步求得力學及水力內寬，以呈現如何透過室內試驗驗證安全評估使用之重要水力參數。

1. 力學內寬

本研究使用 1 組鋁塊樣本 Aluminum 6 (如圖 5.7)進行單一裂隙岩體之試驗作為示範。首先，可透過測量得到鋁塊之間的截面積 A ，並利用 YOKO2 系統之孔隙率試驗，進一步求得孔隙體積 V_P ，透過下面公式(5-3)求得力學內寬 E ：

$$E = \frac{V_P}{A} \quad (5-3)$$

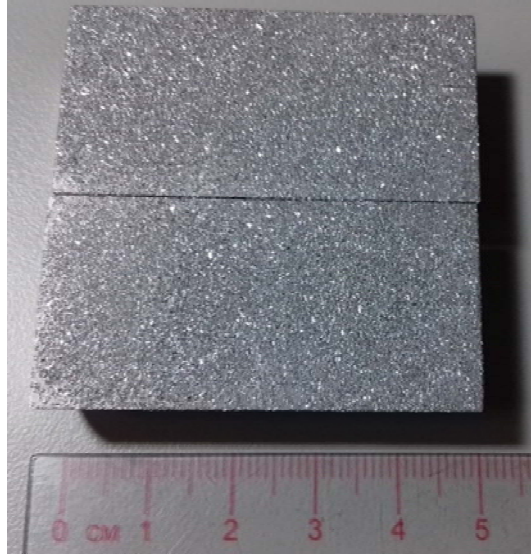


圖5.7 YOKO2試驗用之鋁塊Aluminum 6

YOKO2 試驗求得孔隙體積 V_p 之方法主要利用波以耳定律(Boyle' s law) 之原理。如圖 5.8，將兩獨立密閉空間之初始壓力 P_{i1} 和 P_{i2} (其中 P_{i1} 為一給定已知壓力， P_{i2} 為大氣壓力)，透過連通管之閥門開啟，會測得一平衡壓力 P_f ，再利用波以耳定律之公式計算可得岩石的孔隙體積。兩獨立密閉空間分別為量測系統之管線體積 V_s 和連接量測系統和岩石試體之管線體積 V_l ，岩石的孔隙體積為 V_p 。此兩個氣密空間為獨立且假設使用之氣體是理想氣體，當閥門打開時兩個氣密空間相連結，壓力會趨於一個定值，其關係式如下：

$$P_{i1}V_s + P_{i2}(V_l + V_p) = P_f(V_s + V_l + V_p) \quad (5-4)$$

在孔隙體積量測實驗前先進行體積校正，可以獲得 V_s 和 V_l ，試體的孔隙體積可以由下式計算得到：

$$V_p = \left(\frac{P_{i1} - P_f}{P_f - P_{i2}} \right) V_s - V_l \quad (5-5)$$

得到孔隙體積後，及可透過式(5-3)進一步得到力學內寬 E 。

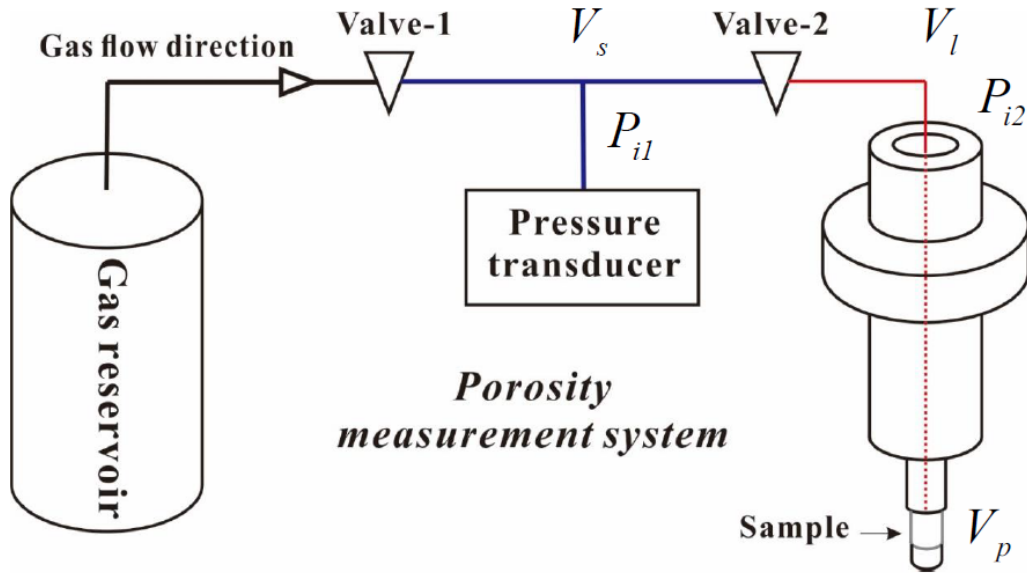


圖5.8 孔隙體積量測系統示意

2.水力內寬

水力內寬 e 利用 YOKO2 之穩態流之方式來決定岩石的滲透率(如圖 5.9)，再透過立方定律(Cubic law)求得水力內寬。當流體為水時，在已知試體長度和截面積下，在一穩定的水力梯度作用下產生定量流速 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ ，藉此透過達西定律可計算滲透率。但是對於可壓縮之氣體而言，在穩定的壓力梯度作用下，岩石內在滲透率可以由式(5-6)決定：

$$K = \frac{2Q\mu L}{A} \frac{P_d}{(P_u^2 - P_d^2)} \quad (5-6)$$

其中 $K (\text{m}^2)$ 為岩石內在之滲透率， $\mu_g(\text{MPa}\cdot\text{s})$ 為氣體的黏滯係數， $L(\text{m})$ 為試體長度， $A_s(\text{m}^2)$ 為試體的截面積， $P_u(\text{MPa})$ 為試體上方的孔隙壓力， $P_d(\text{MPa})$ 為試體下方的孔隙壓力。另外，立方定律(Cubic law)之公式如下：

$$K = \frac{e^3}{12} \quad (5-7)$$

由式(5-6)及式(5-7)即可求得水力內寬 e ：

$$e^3 = \frac{24Q\mu L}{w} \frac{P_d}{(P_u^2 - P_d^2)} \quad (5-8)$$

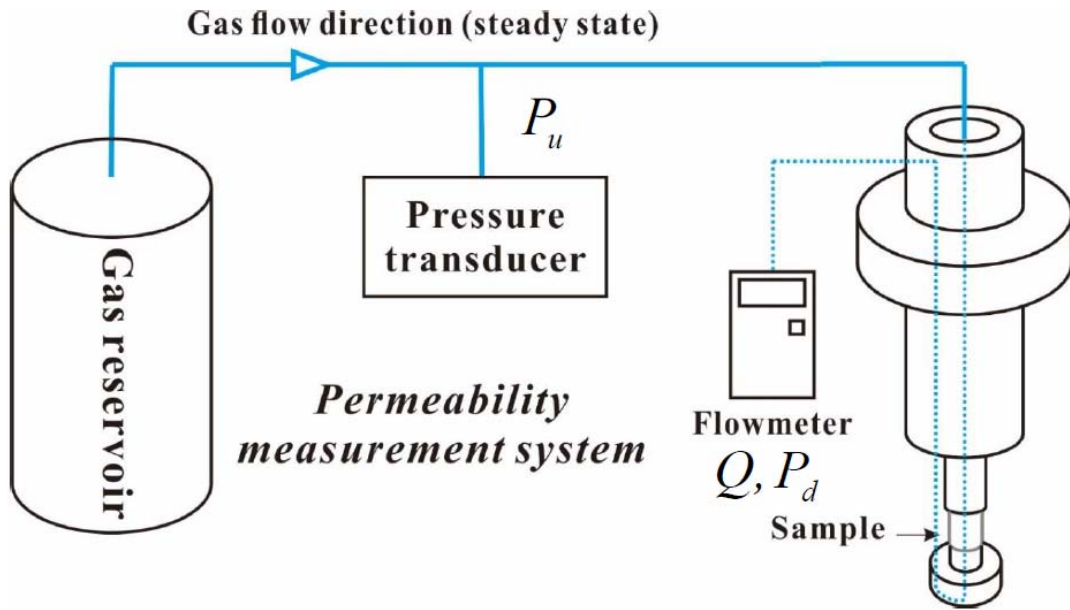


圖5.9滲透率量測系統示意圖

5.3.3 水力內寬與力學內寬量測結果

根據 5.3.2 節所介紹的實驗方法，本研究針對不同圍壓進行試驗，其中，樣本 Aluminum 6 之開口寬(力學內寬、水力內寬)與圍壓之關係如圖 5.10，圖中之三角形為透過孔隙率試驗，並在不同圍壓條件下得到之力學內寬，圓點為透過滲透率試驗得到之水力內寬。此方法值得作為驗證水力、力學開口寬之驗證方法。

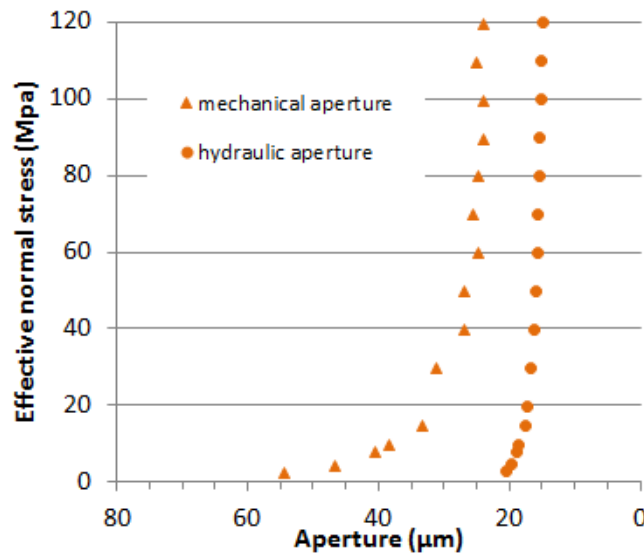


圖5.10樣本Aluminum6之開口寬與圍壓之關係

第六章 「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)」符合坑道處置概念精進建議

本章主要針對 103 年所完成的「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)」提供符合國內坑道處置概念之修改建議。針對此審查導則，106 年度低放處置計畫之子計畫二已提出第三章「設施之設計基準」之相關修訂建議(原能會物管局，2017b)，本年度進一步透過四年期低放處置計畫前三年研究，針對不同領域之研究成果提出相關修訂。另外，本研究亦邀請相關專業領域之專家學者進行導則之修訂。本章主要分為兩個章節，6.1 節針對「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)」提出條文修訂建議，6.2 節則是針對「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)」中，尚未能凝聚成具體實質條文修訂建議，以及條文修改涉及更高層次之「安全分析報告導則」修訂者，進行說明提出相關建議，茲說明如下。

6.1 「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)」修訂建議

本節主要針對「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)」中之內容提出相關修改意見，包含本計畫成員提出修訂建議並提至專家委員會討論同意，以及本計畫邀請之專家委提供修訂建議。修改意見如下(其中，針對各章節編號進行全盤檢視，並依序調整為 1、(1)、a、(a)之編號方式，特此說明)：

修正條文	現行條文	說明
1.3.2 處置方式 2. 審查人員應審查處置方式，是否考量了地質特性的適宜性、廢棄物種類、輻射合理抑低等。	1.3.2 處置方式 2. 審查人員應審查處置方式可保障公眾健康及安全。	內容加強，包含地質特性的適宜性、廢棄物種類、輻射合理抑低。

<p>1.3.3 處置容量</p> <p>2. 審查人員需確認處置設施的處置區具足夠空間處置廢棄物，合理預估核種總活度，合理預估每年各類廢棄物的處置量，並規劃合理的備用處置容量。</p>	<p>1.3.3 處置容量</p> <p>2. 審查人員需確認處置設施的處置區具足夠空間處置廢棄物，合理預估核種總活度，合理預估每年各類廢棄物的處置量。</p>	<p>內容加強，增加合理之被用處置容量。</p>
<p>2.1.1 審查範圍</p> <p>社會與經濟的審查範圍包括：場址半徑 10 公里內之行政區交通設施、公共設施、軍事設施、觀光休閒設施及場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數(含流動人口)及人口結構、土地利用情形與開發計畫。</p>	<p>2.1.1 審查範圍</p> <p>審查人員參考低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則，審查本章的範圍包括社會與經濟：場址及附近地區之行政區交通設施、公共設施、軍事設施、觀光休閒設施、場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數（含流動人口）及人口結構、土地利用情形與開發計畫。</p>	<p>增加對於場址之審查範圍。</p>
<p>2.1.3 審查要點與接受基準</p> <p>1. 應審查交通與公共設施資訊是否涵蓋場址附近半徑 10 公里範圍且完整，足以確保處置安全。其中公共設施須包含重要管線，如：電力管線、電信管線、自來水管線、石化管線、污排水管線、輸油管線等，用以評估可避免於興建與運轉階段發生誤挖事件。</p>	<p>2.1.3 審查要點與接受基準</p> <p>1. 應審查交通與公共設施資訊是否涵蓋場址附近半徑 10 公里範圍且完整，足以確保處置安全。其中公共設施須包含重要管線，如：電力管線、電信管線、自來水管線、石化管線、污排水管線、軍方輸油管等，用以評估可避免於興建與運轉階段發生誤挖事件。</p>	<p>文字修定。</p>
<p>2.2.1 審查範圍</p> <p>地形與地貌的審查範圍包括：場址半徑 10 公里內之地形高度與起伏趨勢、坡度分布、重要地貌特徵(如河川、山脈、湖泊、海岸線等)，及潛在環境災害分布地</p>	<p>2.2.1 審查範圍</p> <p>審查人員參考低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則，審查本章的範圍包括地形與地貌：場址及附近地區之地形高度與起伏趨勢、坡度分布、重要地貌特徵（如</p>	<p>增加對於場址之審查範圍。</p>

<p>區(如崩塌地、沖蝕溝、河川攻擊坡、土石流沖積扇、斷層錯動地形等)。</p>	<p>河川、山脈、湖泊、海岸線等),及潛在環境災害分布地區(如崩塌地、沖蝕溝、河川攻擊坡、土石流沖積扇、斷層錯動地形等)。</p>	
<p>2.2.3 審查要點與接受基準</p> <p>1. 地形與地貌資料須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(如河川、山脈、湖泊、海岸線等)。並提出適當比例尺的場址地形圖,並應詳細評述場址地形。審查委員針對高程與地形起伏、坡度等資料詳加審查,是否不利地表排水及入滲水,並視需要進行現地勘查。</p>	<p>2.2.3 審查要點與接受基準</p> <p>1. 輻射劑量評估須使用正確的地形與地貌資料。其須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(如河川、山脈、湖泊、海岸線等)。並提出適當比例尺的場址地形圖,並應詳細評述場址地形。審查委員針對高程與地形起伏、坡度等資料詳加審查,並視需要進行現地勘查。所列地形與地貌資料是否正確應用於輻射劑量安全評估。</p>	<p>加強論述。</p>
<p>2.3.2 程序審查</p> <p>5. 以第 3 項所列當地氣候參數來評估設施建造、運作和地形的影響。</p>	<p>2.3.2 程序審查</p> <p>5. 以第三項所列當地氣候參數來評估設施建造、運作和地形的影響。</p>	<p>文字修定。</p>
<p>2.4.2 程序審查</p> <p>2. 提出場址之地層特性相關資料,包括岩石特性、斷層之地質特性、塊體崩移(mass wasting)、區域應力狀態(regional stress regime)等。</p>	<p>2.4.2 程序審查</p> <p>2. 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。</p>	<p>文字修定。</p>
<p>2.4.3 審查要點與接受基準</p> <p>1. 審查場址地質特性資訊是否完整;是否均</p>	<p>2.4.3 審查要點與接受基準</p> <p>1. 審查場址地質特性資訊是否完整;是否均能</p>	<p>文字修定。</p>

<p>能進行完整透徹的文獻研究、適當的現地勘查和該地區及場址狀況的檢視；是否足以確保設計正確與處置設施安全。應包含以下資訊：</p> <p>(3) 提出場址之地層特性相關資料，包括岩石特性、斷層之地質特性、塊體崩移(mass wasting)、區域應力狀態(regional stress regime)等。</p> <p>2. 應調查與地震相關之地質構造，並進行地震危害度分析。活動斷層與地震危害度評估，必須足以提供處置設施功能評估所需資訊。應包含以下資訊：</p> <p>(5) 場址效應：為了估算場址的地表震動，必須先了解震源至場址的地震波傳遞特性。此外，岩盤上覆材料對於地震波有放大或衰減的作用，故應該加以描述。這些覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數等資料，及計算使用的方法或數據來源皆須敘明。</p> <p>(6) 設計基準地震：必須描述地表和設施位置所關心之深度，其最大地震所</p>	<p>進行完整透徹的文獻研究、適當的現地勘查和該地區及場址狀況的檢視；是否足以確保設計正確與處置設施安全。應包含以下資訊：</p> <p>(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。</p> <p>2. 應調查與地震相關之地質構造，並進行地震危害度分析。活動斷層與地震危害度評估，必須足以提供處置設施功能評估所需資訊。應包含以下資訊：</p> <p>(5) 場址效應：為了估算場址的地表震動，必須先了解震源至場址的地震波傳遞特性。此外，岩盤上覆材料對於地震波有放大或衰減的作用，故應該加以描述。這些覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數的資料應加以陳述計算使用的方法和皆須敘明。</p> <p>(6) 設計基準地震：必須描述地表和設施位置所關心之深度，其最大地震所造成的震動情形。最大地震造成場址尖峰水平和垂直加速度必須</p>	
---	--	--

<p>造成的震動情形。最大地震造成場址尖峰水平和垂直加速度必須使用適當的衰減式加以計算。地表震動之放大效應潛能必須加以討論。在某些狀況下，場址反應譜應與結構物設計反應譜進行比較。在可能的狀況下，應該進行機率式地震危害度評估，並應記錄這些災害估計的假設狀況與不確定性。根據機率式地震危害度分析結果，應能表明何種地震源將會對場址造成最重要之影響。</p>	<p>使用適當的衰減式加以計算。地表震動之放大效應潛能必須加以討論。在某些狀況下，場址反應譜應與結構物設計反應譜進行比較。在可能的狀況下，應該進行機率式地震危害度評估，並應記錄這些災害估計的假設狀況與不確定性。根據機率式地震危害度分析結果，應能點出哪一個震動源將會對場址造成最重要之影響。</p>	
<p>2.10.3 審查要點與接受基準</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 環境輻射背景偵測結果：環境輻射背景偵測結果，以便與未來運轉時的環境輻射比較，是否有升高的現象，並可及時採取改善措施。採樣與監測至少有一個遠離場址的背景/控制監測位置。環境輻射背景偵測的規劃，可參考「輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則」。 2. 偵測方法：偵測方法涉及環境輻射背景偵測結果的正確性與可靠性，所以要求偵測儀器、校正及分析方 	<p>2.10.3 審查要點與接受基準</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 環境輻射背景偵測結果：環境輻射背景偵測結果，須具有環境趨勢，以便與未來比較；有意義的資料，須能反映其正確性，採樣與監測至少有一個遠離場址的背景/控制監測位置。須包含連續性環境直接輻射監測結果、累積劑量之環境直接輻射監測結果、運轉時放射性核種可能擴散途徑之環境試樣取樣分析結果(包括水樣、食物樣、土樣、草樣、空氣樣)。 (1)採樣/監測/分析的頻率是否適當足以建 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 這是處置場興建前的輻射背景偵測，不應涉及「運轉時放射性核種可能擴散途徑之環境試樣取樣分析結果」，且背景輻射不易涉及「環境趨勢」。 2. 環測通常在相同位置點只置放一個偵檢器，且只允許計測一次，無法得到「常態分佈測試的資料點是否超過十點」；且輻射計測的數目結果，已證實為 Poisson 分布，故只要儀器經過校正，縱時只計測一次，也可以推估其標準差。故刪除(3)、(4)，並修改部分內容。

<p>法，需要符合科學的方法。對於資料的變動性與被刪除的資料，需要加以確認。</p> <p>(1) 直接輻射儀器校正和實驗室分析的設施，須完整說明偵測儀器之名稱、性能、偵測範圍與偵檢靈敏度，以及試樣種類、取樣頻次、取樣地點、取樣方法、試樣保存、分析方法、偵檢靈敏度等偵測方法相關資訊。評估其可適切確保儀器效能、方法的有效性與敏感度。</p> <p>(2) 各種計測結果，應同時標示其標準差。</p> <p>(3) 在運轉前環境監測所使用儀器的分析能力應符合「輻防法規的可接受最小可測量值」。</p>	<p>立環境趨勢。</p> <p>(2) 有意義的資料是否能真實反映測量值或計算資料的正確性。</p> <p>(3) 是否於足夠數量的地點實行採樣與監測、是否至少有一個背景/控制 (background/control) 的監測位置。</p> <p>2. 偵測方法：偵測方法涉及環境輻射背景偵測結果的正確性與可靠性，所以要求偵測儀器、校正及分析方法，需要符合科學的方法。對於資料的變動性與被刪除的資料，需要加以確認。</p> <p>(1) 直接輻射儀器校正和實驗室分析的設施，須完整說明偵測儀器之名稱、性能、偵測範圍與偵檢靈敏度，以及試樣種類、取樣頻次、取樣地點、取樣方法、試樣保存、分析方法、偵檢靈敏度等偵測方法相關資訊。評估其可適切確保儀器效能、方法的有效性與敏感度。</p> <p>(2) 記錄及統計分析程序是否根據標準化技術。進行常態分佈測試的資料點是否超過十點？</p> <p>(3) 資料的整體不確定度是否被陳述，是否至少在 95% 的信心水準以內。</p>	<p>3. 環境輻射背景偵測，未涉及輻射作業，所以沒有紀錄基準值及調查基準值之問題。且紀錄基準值及調查基準值已規定在輻防法規中，故建議將「3. 建立預警措施」刪除。</p>
---	---	--

	<p>(4)資料變動性的來源及被刪除的資料，是否被清楚討論。</p> <p>(5)在運轉前環境監測資料小於可偵測值時，是否以適當的方法加以評估。</p> <p>3. 建立預警措施：環境試樣紀錄基準值及環境試樣調查基準值須大於儀器的最低可測值，才有意義；監測結果超過環境試樣調查基準，可能達到處置設施的約束劑量，所以須採取調查行動與預防措施。</p> <p>(1)依輻射防護之規定，試樣分析結果超過紀錄基準值，則須加以記錄；若超過調查基準值，則應採取調查行動的預警措施。所以在執行運轉前二年以上的環境輻射背景偵測後，應參考其結果，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。</p> <p>(2)環境試樣紀錄基準值及環境試樣調查基準值，是否合理、可行。</p> <p>(3)環境試樣濃度超過環境試樣調查基準值，採取的調查行動與預防措施，是否合理、有效。</p>	
--	---	--

<p>2.10.5 相關法規與技術規範</p> <p>1.低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準</p> <p>2.輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則</p>	<p>2.10.5 相關法規與技術規範</p> <p>1.低放射性廢棄物最終處置設施場址禁置地區之範圍及認定標準</p> <p>2.環境輻射監測規範。</p>	<p>2.環境輻射監測規範。建議用正是法規名稱「2.輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則」。</p>
<p>2.11.2 程序審查</p> <p>2. 工程地質與大地工程調查：</p> <p>(3) 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，其中，應特別注意開挖後應力重新分布導致流場改變。</p> <p>5. 地層與設計參數</p> <p>(4) 大地工程特性描述應包括與生命週期評估有關之資料，包括材料依時性、場址建造、運轉以及封閉期的各項擾動可能造成大地工程特性的變化，例如開挖擾動對坑道圍岩強度、岩體變形特性與導水特性的影響。</p>	<p>2.11.2 程序審查</p> <p>2.工程地質與大地工程調查：</p> <p>(3)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。</p> <p>5. 地層與設計參數</p> <p>(4) 大地工程特性描述應包括與生命週期評估有關之資料，包括依時性、場址建造、運轉以及封閉期的各項擾動可能造成大地工程特性的變化，例如開挖擾動對坑道圍岩強度、導水特性的影響。</p>	<p>增強論述。</p>
<p>2.13.2 程序審查</p> <p>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(包含地震、海底山崩、海底</p>	<p>2.13.2 程序審查</p> <p>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、地層下陷及泥火山等)。</p>	<p>加強論述，可能引發海嘯的事件包含地震、海底山崩、海底火山及其他可能引起海嘯之因素。</p>

<p>火山及其他可能引起海嘯之因素)、地層下陷及泥火山等)。</p>		
<p>3.3.1 設計目標與功能需求</p> <p>最終處置設施設計目標與功能需求，係提供廢棄物的長期隔離、降低處置設施接收與處置放射性廢棄物之輻射劑量、降低封閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護公眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，須提供下列資料供審查：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。 2. 說明工程障壁系統完整性與結構穩定之設計基準、設計要項及設計規格。 3. 說明工程障壁具良好遲滯功能之設計基準、設計要項及設計規格。 4. 說明運轉期降低廢棄物與水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。 5. 說明運轉期及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。 6. 說明地面設施之封閉後保安設計之設計基準、設計要項及設計 	<p>3.3.1 設計目標與功能需求</p> <p>最終處置設施設計目標與功能需求，係提供廢棄物的長期隔離、降低處置設施接收與處置放射性廢棄物之輻射劑量、降低封閉後維護工作量以及改進場址自然環境，以保護公眾的健康與安全。為達成設計目標與功能，須提供下列資料供審查：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 說明降低處置單元水滲透之設計基準、設計要項及設計規格。 2. 說明處置單元工程障壁系統完整性之設計基準、設計要項及設計規格。 3. 說明工程障壁系統各構造物之結構穩定設計基準、設計要項及設計規格。 4. 說明運轉期降低廢棄物與水接觸之設計基準、設計要項及設計規格。 5. 說明運轉期及封閉期場區排水之設計基準、設計要項及設計規格。 6. 說明場址封閉與長期穩定之設計基準、設計要項及設計規格。 7. 減少長期維護需求之 	<p>合併原第 2 項與第 3 項至第 2 項。</p> <p>新增第 3 項：坑道式處置設計須考量遲滯功能。</p> <p>新增第 6 項，處置坑道封閉後，地面設施的保安設計涉及主動監管期與被動監管期之處置安全功能確保。</p> <p>原編號第 6 項調整至第 7 項。</p> <p>原編號第 7 項調整至第 8 項。</p> <p>新增第 9 項，為評估解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能，需評估分類分區管理其對應之障壁是否可確保處置安全。</p> <p>原編號第 8 項調整至第 10 項，並增加說明其重點在於防護功能。</p> <p>原編號第 9 項調整至第 11 項。</p> <p>原編號第 10 項調整至第 12 項，並增加說明其適用範圍為處置場範圍。</p> <p>原編號第 11 項調整至第 13 項。</p>

<p>規格。</p> <p>7. 說明場址封閉與長期穩定之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>8. 減少長期維護需求之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>9. 說明合適的廢棄物管控規劃之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>10. 說明防止無意闖入者障壁防護功能之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>11. 合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>12. 說明合適的處置場監測規劃之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>13. 提供適當監管與補救之緩衝區，其設計基準、設計要項及設計規格。</p>	<p>設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>8. 防止無意闖入障壁之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>9. 合理抑低職業曝露之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>10. 現場監測之設計基準、設計要項及設計規格。</p> <p>11. 提供適當監管與補救之緩衝區，其設計基準、設計要項及設計規格。</p>	
<p>上述供審查作業所提供資料中，各分項審查要點包含如下。</p> <p>1. 降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：</p> <p>(1) 導引場區逕流或坑道滲水離開處置單元。</p> <p>(2) 導引場外逕流流入排水系統及導引地下水或坑道滲水離</p>	<p>上述供審查作業所提供資料中，各分項審查要點包含如下。</p> <p>1. 降低處置單元水滲透之設計，是否清楚說明：</p> <p>(1) 導引場區逕流離開處置單元。</p> <p>(2) 導引場外逕流流入排水系統及導引地下水離開處置單元。</p> <p>導引場區逕流與地下</p>	<p>為避免坑道滲水堆積而增加處置廢棄物與水接觸風險，增加相關說明。</p>

<p>開處置單元。 導引場區逕流、坑道滲水與地下水離開處置單元的主要設計準則，必須說明其排水系統可以控制逕流流速和地下水位。此最低流速與地下水位必須根據：</p> <p>(1) 最大降雨(PMP)所導致的最壞狀況。 (2) 因意外狀況所產生之排水系統堵塞。</p>	<p>水離開處置單元的主要設計準則，必須說明其排水系統可以控制逕流流速和地下水位。此最低流速與地下水位必須根據：</p> <p>(1) 最大降雨(PMP)所導致的最壞狀況。 (2) 因意外狀況所產生之排水系統堵塞。</p>	
<p>2. 工程障壁系統完整性之設計，是否清楚說明，採取的方法可使工程障壁系統：</p> <p>(1) 達成預期使用時間。 (2) 避免連續性維護需求。 (3) 可抵抗場址環境特徵的損害作用，如：大地應力、風化作用等。 (4) 達成結構穩定性要求。</p>	<p>2. 處置單元工程障壁系統完整性之設計，是否清楚說明，採取的方法可使工程障壁系統：</p> <p>(1) 達成預期使用時間。 (2) 避免連續性維護需求。 (3) 可抵抗地質風化與生物活動的損害作用。</p>	<p>坑道處置之工程障壁，可能並非僅止於處置單元，故調整其適用範圍。 (3) 坑道處置設施之環境特徵損害作用，不僅止於風化與生物作用。 (4) 增加達成結構穩定性要求之說明。</p>
<p>工程障壁系統結構完整性的主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1) 廢棄物容器內與容器內填充材料之間預期的空隙容量。 (2) 因運作而產生的空隙效應。 (3) 評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況。</p>	<p>處置單元工程障壁系統完整性的主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1) 評估整體性與差異性沉陷以及預估廢棄物與填充材料的密度增加狀況。 (2) 預估工程障壁材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性。 (3) 相關於最大地震的</p>	<p>依評估內容調整適用範圍 合併結構穩定性考量至(1)、(2)與(5)。 原第 3.(4)項已於第 2.(3)項評估。</p>

<p>(4) 預估工程障壁材料在掩埋廢棄物可能受災時的強度與耐受性。</p> <p>(5) 設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。</p> <p>(6) 相關於最大地震的異常地表震動。</p> <p>若為地表式處置單元工程障壁系統，則侵蝕保護之主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1) 一般運作狀況時的地表水和風速。</p> <p>(2) 異常性地表水與風速以及正常水位。</p>	<p>異常地表震動。</p> <p>若為地表式處置單元工程障壁系統，則侵蝕保護之主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1) 一般運作狀況時的地表水和風速。</p> <p>(2) 異常性地表水與風速以及正常水位。</p> <p>3. 構造物結構穩定之設計，是否清楚說明廢棄物可長期隔離及避免經常維護、並包括長期穩定性以及構造物失穩之影響。確保工程障壁的結構穩定性之主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1) 廢棄物容器內與容器內填充材料之間預知的空隙容量。</p> <p>(2) 因運作而產生的空隙效應。</p> <p>(3) 設計基準異常事件對於結構穩定性的效應。</p> <p>(4) 在廢棄物有害時期，因地質化學環境使填充材、廢棄物形態和廢棄物覆蓋材料的剝蝕。</p>	
<p>3. 工程障壁具良好遲滯功能之設計，是否清楚說明：</p> <p>(1) 工程障壁單元達成遲滯功能之設計特徵，如：高水力反差、吸附能力、化</p>		<p>本項因應低於地下水位之坑道處置系統考量而新增。</p>

<p>學環境控制等。</p> <p>(2) 工程障壁單元可達成之遲滯能力。</p> <p>主要設計準則至少應說明：</p> <p>(1) 障壁材料達成遲滯能力之設計特徵要求，如：膨脹能力、蒙脫石含量、空隙率等。</p> <p>(2) 障壁單元依時性之遲滯能力。</p> <p>(3) 設計基準異常事件對於障壁單元遲滯能力的影響。</p>		
<p>6. 地面設施之封閉後保安設計，是否清楚說明設施封閉後之無意闖入者防護設施或措施，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。</p>		<p>處置坑道封閉後，地面設施的保安設計涉及主動監管期與被動監管期之處置安全功能確保。</p>
<p>7. 場址封閉與長期穩定之設計，是否清楚說明其措施，可達下列需求：</p> <p>(1) 提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。</p> <p>(2) 提供場址封閉與穩定規劃，並可改善場區自然環境特性。</p> <p>場址封閉及長期穩定之主要設計準則應至少說</p>	<p>6. 場址封閉與長期穩定之設計，是否清楚說明其措施，可達下列需求：</p> <p>(1) 提供廢棄物長期隔離的功能與避免經常性維護之需求。</p> <p>(2) 提供場址封閉與穩定規劃，並可改善場區自然環境特性。</p> <p>場址封閉及長期穩定之主要設計準則應至少說明：</p> <p>(1) 設計時應提出場址</p>	<p>調整編號。</p>

<p>明：</p> <p>(1) 設計時應提出場址封閉規劃的相關項目。</p> <p>(2) 封閉與可能主動維護的設計基準。</p>	<p>封閉規劃的相關項目。</p> <p>(2) 封閉與可能主動維護的設計基準。</p>	
<p>8. 減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場封閉後，如何避免長期維護之需求。主要設計準則必須預測：</p> <p>(1) 材料之耐用性。</p> <p>(2) 侵蝕作用。</p> <p>(3) 障壁系統退化的效應。</p> <p>(4) 監控系統的退化。</p>	<p>7. 減少長期維護需求之設計，是否清楚說明處置場封閉後，如何避免長期維護之需求。主要設計準則必須預測：</p> <p>(1) 材料之耐用性。</p> <p>(2) 侵蝕作用。</p> <p>(3) 障壁系統退化的效應。</p> <p>(4) 監控系統的退化。</p>	<p>調整編號。</p>
<p>9. 廢棄物管控規劃之設計，是否清楚說明其廢棄物採分類分區處置，並依工程障壁系統特性管控其處置單元之處置核種種類與活度。主要設計準則必須訂定與預測：</p> <p>(1) 處置單元可處置之核種總活度、長半化期核種種類與活度等。</p> <p>(2) 預測解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能。</p>		<p>為評估解除監管後對於保護無意闖入者之被動安全功能，需評估分類分區管理其對應之障壁是否可確保處置安全。已將原第 8 項之近地表處置防止無意闖入障壁考量納入。</p>
<p>10. 防止無意闖入者障壁防護功能之設計，於坑道式處置是否清楚說明其岩覆厚度考量，並避開可能誘發地下資源開採之資</p>	<p>8. 防止無意闖入障壁之設計，是否清楚說明設立之障壁，以避免個人不經意的侵入處置設施。障壁主要設計準則必須說明標示物、障壁</p>	<p>調整編號，並增加坑道式處置之防止無意闖入者障壁防護功能評估考量。</p>

<p>源。障壁主要設計準則必須說明地質抬升、地表剝蝕與侵蝕對於岩覆厚度之影響範圍。於近地表式處置應說明障壁材料，障壁退化比率的可能範圍。</p>	<p>材料，障壁退化比率的可能範圍。</p>	
<p>11.合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 接收、檢查、管控、貯存、處置和封閉作業之輻射合理抑低措施。 (2) 對已知較高活度廢棄物之屏蔽設計。 (3) 處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。 	<p>9. 合理抑低職業曝露之設計，是否清楚說明如何合理抑抵職業曝露。減少職業曝露之主要設計準則必須說明：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 接收、檢查、管控、貯存、處置和封閉作業之輻射合理抑低措施。 (2) 對已知較高活度廢棄物之屏蔽設計。 (3) 處置非穩定性廢棄物或裝載意外破損廢棄物的預備方案。 	<p>調整編號。</p>
<p>12.現場監測之設計，是否清楚說明處置場運轉中及運轉後的環境監測計畫。現場監測系統之主要設計準則必須說明：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 監測系統設備與組件的已知使用壽命。 (2) 退化的可能速率和監測設備失效的可能事件的處理方法。 	<p>10.現場監測之設計，是否清楚說明處置場運轉中及運轉後的環境監測計畫。現場監測系統之主要設計準則必須說明：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 監測系統設備與組件的已知使用壽命。 (2) 退化的可能速率和監測設備失效的可能事件的處理方法。 	<p>調整編號。</p>
<p>13.緩衝區之設計，是否</p>	<p>11.緩衝區之設計，是否清</p>	<p>調整編號。</p>

<p>清楚說明外圍處置單元與場界間緩衝區之特性。緩衝區之主要設計準則必須說明：</p> <p>(1) 監測所需的空間尺寸。</p> <p>(2) 採取應變措施所需時間。</p>	<p>楚說明外圍處置單元與場界間緩衝區之特性。緩衝區之主要設計準則必須說明：</p> <p>(1) 監測所需的空間尺寸。</p> <p>(2) 採取應變措施所需時間。</p>	
<p>3.3.5 輻射安全設計</p> <p>2. 輻射屏蔽結構與屏蔽分析</p> <p>(4) 說明輻射屏蔽計算程式、設定參數與假設條件，並將上述(1)至(3)之設計條件納入分析，計算各區域之輻射劑量率。</p>	<p>3.3.5 輻射安全設計</p> <p>2. 輻射屏蔽結構與屏蔽分析</p> <p>(4) 說明輻射屏蔽計算程式、設定參數與假設條件，並將上述(一)至(三)之設計條件納入分析，計算各區域之輻射劑量率。</p>	<p>修訂內文編號。</p>
<p>3.5 相關法規與技術規範</p> <p>1. 低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。</p> <p>2. 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。</p> <p>3. 放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法。</p> <p>4. 放射性物質安全運送規則。</p> <p>5. 游離輻射防護法。</p> <p>6. 游離輻射防護法施行細則。</p> <p>7. 游離輻射防護安全標準。</p> <p>8. 建築法。</p> <p>9. 建築技術規則。</p> <p>10. 水土保持法。</p>	<p>3.5 相關法規與技術規範</p> <p>1. 低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則。</p> <p>2. 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。</p> <p>3. 放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法。</p> <p>4. 放射性物質安全運送規則。</p> <p>5. 游離輻射防護法。</p> <p>6. 游離輻射防護法施行細則。</p> <p>7. 游離輻射防護安全標準。</p>	<p>增列第 8~11 項相關法規與技術規範</p>

<p>11. 環境影響評估法。</p>		
<p>4.3.2 施工計畫 5. 施工方法 (3)處置單元建造： d. 品質控制試驗(例如，土壤密度、填土的含水量、級配、塑性及夯實試驗，包括試驗標準及試驗頻率之說明)等之描述是否確實。 8. 監測計畫。</p>	<p>4.3.2 施工計畫 5. 施工方法 (3)處置單元建造： d. 品質控制試驗(例如，工地密度、填土的含水量、級配、塑性及夯實試驗，包括試驗標準及試驗頻率之說明)等之描述是否確實。 8. 監測計畫與回饋設計計畫。</p>	<p>8. 監測計畫應含有訊號回饋，應不必特別強調回饋設計計畫。</p>
<p>4.5 相關法規與技術規範 1. 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。 2. 職業安全衛生法。 3. 職業安全衛生法施行細則。 4. 水土保持法。 5. 環境影響評估法。 6. 放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法。 7. 建築法。 8. 建築技術規則。</p>	<p>4.5 相關法規與技術規範 1. 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。</p>	<p>設施之建造之相關法規與技術規範，不應只有「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則」，因此增列「職業安全衛生法」、「水土保持法」、「環境影響評估法」、「放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法」、「建築法」及「建築技術規則」。</p>
<p>5.2 程序審查 2. 廢棄物處理與暫存 (1) 由接收區將廢棄物運至暫存區或處置區之作業(包括除污、再固化、再包裝、吊卸等)。 d. 不合格廢棄物體與不合格盛裝容器之重新處理方法與程序。</p>	<p>5.2 程序審查 2. 廢棄物處理與暫存 (1) 由接收區將廢棄物運至暫存區或處置區之作業(包括除污、再固化、再包裝、吊卸等)。 d. 再固化、再包裝之執行條件與程序。</p>	<p>文字修訂，再固化、再包裝修改為不合格廢棄物體與不合格盛裝容器。</p>

<p>5.3.1 廢棄物接收</p> <p>6. 申請者須詳實說明廢棄物盛裝容器之表面劑量率偵檢設備、核種分析方式與輻射防護措施。</p> <p>7. 申請者須提出一套完善的廢棄物分類、廢棄物體品質以及包件完整性的檢驗方法與流程，以確認廢棄物包件(包裝容器與廢棄物體)符合相關法規之要求；檢驗的方法與流程應至少包括取樣的比率、檢驗的項目以及檢驗的結果；對於實施固化流程控制計畫(PCP)前所產生的廢棄物體品質，應合理增加取樣檢驗的比率；對於採用破壞性方法的檢驗項目，需額外說明檢驗後的廢棄物之處理方法。</p>	<p>5.3.1 廢棄物接收</p> <p>6. 申請者須詳實說明廢棄物盛裝容器之表面劑量率偵檢設備、核種分析方式與輻射防護措施，使輻射工作人員職業曝露劑量符合「游離輻射防護安全標準」第7條之規定。</p> <p>7. 申請者須提出一套完善的廢棄物分類與穩定性驗證方法與流程，以證實申請者具有能力執行與檢驗廢棄物分類與狀態，以確認廢棄物符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第二章之規範。若申請者規劃破壞性檢測方式，需額外說明後續廢棄物處理方式，確保廢棄物之穩定性。</p>	<p>6. 「游離輻射防護安全標準」第7條，規定輻射工作人員整年的劑量限值，廢棄物的接收、處理與暫存之輻射劑量，很難單獨與「游離輻射防護安全標準」第7條比較。因此將「，使輻射工作人員職業曝露劑量符合「游離輻射防護安全標準」第7條之規定」刪除。</p>
<p>5.3.2 廢棄物處理與暫存</p> <p>4. 申請者須詳實說明廢棄物重新處理與再包裝之執行條件與程序，說明預定採用之處理方式與再包裝之盛裝容器選擇依據，並說明如何確保廢棄物經重新處理與再包裝程序後，可符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第二章之規定。</p> <p>5. 申請者須詳實說明廢棄物從接收區進出暫存區、從接收區進入處置區，以及從暫存區進入處置區之吊卸</p>	<p>5.3.2 廢棄物處理與暫存</p> <p>4. 申請者須詳實說明廢棄物再固化與再包裝之執行條件與程序，說明預定採用之處理方式與在包裝之盛裝容器選擇依據，並說明如何確保廢棄物經再固化與再包裝程序後，可符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第二章之規定。</p> <p>5. 申請者須詳實說明廢棄物從接收區進出暫存區、從接收區進入處置區，以及從暫存區進入處置區之吊卸或運</p>	<p>5. 「游離輻射防護安全標準」第7條，規定輻射工作人員整年的劑量限值，廢棄物的接收、處理與暫存之輻射劑量，很難單獨與「游離輻射防護安全標準」第7條比較。因此將「，使輻射工作人員職業曝露劑量符合「游離輻射防護安全標準」第7條之規定」刪除。</p>

<p>或運送規劃與程序，並說明作業期間之輻射防護規劃。</p>	<p>送規劃與程序，並說明作業期間之輻射防護規劃，使輻射工作人員職業曝露劑量符合「游離輻射防護安全標準」第7條之規定。</p>	
<p>5.3.3 處置作業 2. 廢棄物安置 審查人員將審查廢棄物安置之資料，並特別著重於個別處置單元之安置程序與作業。審查將集中在下列使用方法上： (1) 避免包件損害； (2) 包件間空隙的最小化； (3) 避免工作人員在安置作業時的曝露。</p>	<p>5.3.3 處置作業 2. 廢棄物安置 審查人員將審查廢棄物安置之資料，並特別著重於安置不穩定之 A 類廢棄物與穩定的 A 類、B 類與 C 類廢棄物在個別處置單元之安置程序與作業。審查將集中在下列使用方法上： (1) 避免包件損害； (2) 包件間空隙的最小化； (3) 避免工作人員在安置作業時的曝露。</p>	<p>無不穩定 A 類之法定名詞，且此處應無需強調分類。</p>
<p>5.3.3 處置作業 1. 處置區之分區規劃 (3) 減少廢棄物包件堆置空隙之方法</p>	<p>5.3.3 處置作業 1. 處置區之分區規劃 (3) 減少廢棄物體堆置空隙之方法</p>	<p>「廢棄物體(waste form)」是另一種意思，因此，此處修訂為「廢棄物包件」。</p>
<p>6.3 審查要點與接受基準 2. 人員編制 (1) 應審查人員編制的員額、職稱、權責是否考量各階段需求，確保處置設施安全運轉。 (2) 運轉操作人員應具有原子能委員會認可授證的放射性物質初級操作執照。 (3) 應審查主管人員之權責與資格，是否可掌控工作流程，並具有解決問題與緊急應變之能力。 (4) 輻射防護人員應具</p>	<p>6.3 審查要點與接受基準 2. 人員編制 (1) 應審查人員編制的員額、職稱、權責是否考量各階段需求，確保處置設施安全運轉。 (2) 應審查每一運轉班次的人力配置是否可讓工作順利進行。 (3) 應審查主管人員之權責與資格，是否可掌控工作流程，並具有解決問題與緊急應變之能力。 (4) 應審查處置設施管理、監督及輻射防護</p>	<p>加強文字論述。</p>

<p>有原子能委員會認可授證的輻射防護師或輻射防護員。</p> <p>(5) 應審查職業安全衛生組織及環保、消防人員之權責與資格是否明確，以確保處置設施於各階段之作業安全。</p>	<p>人員之權責與資格是否明確，以確保處置設施於各階段之作業安全。</p> <p>(5) 應審查職業安全衛生組織及環保、消防人員之權責與資格是否明確，以確保處置設施於各階段之作業安全。</p>	
<p>6.5 相關法規與技術規範</p> <p>1. 輻射防護人員管理辦法。</p> <p>2. 放射性廢棄物處理設施運轉人員訓練計畫審查作業要點。</p> <p>3. 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。</p>	<p>6.5 相關法規與技術規範</p> <p>輻射防護人員管理辦法。 放射性廢棄物處理設施運轉人員訓練計畫審查作業要點。 低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告導則。</p>	<p>編號。</p>
<p>7.1.1.1 審查範圍</p> <p>審查人員參考低放處置安全分析報告導則，審查本章節的範圍包括：一、低放射性廢棄物資料；二、廢棄物之處置相關規劃；三、場址封閉時所產生之廢棄物規劃。</p>	<p>7.1.1.1 審查範圍</p> <p>審查人員參考低放處置安全分析報告導則，審查本章節的範圍包括：一、國內低放射性廢棄物資料；二、廢棄物之處置相關規劃；三、場址封閉時所產生之廢棄物規劃。</p>	<p>文字修訂。</p>
<p>7.1.1.2 程序審查</p> <p>1. 擬申請處置的低放射性廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置，含現有與未來預估產生者。</p>	<p>7.1.1.2 程序審查</p> <p>1. 申請處置設施前，國內已產生的低放射性廢棄物種類、數量、特性、活度及貯存位置。</p> <p>2. 國內已存在或可能新增設施，預估可能產生的低放射性廢棄物種類、數量、特性及活度。</p>	<p>第 1、2 點合併。</p>

<p>7.1.1.3 審查要點與接受標準</p> <p>3. 上述第 1 及 2 項所包含廢棄物之物理、化學性質及輻射特性，用以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性。其中至少需包含以下資訊：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 年產生體積。 (2) 廢棄物分類。 (3) 主要組成核種之平均濃度(「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」附表一與附表二)。 (4) 化學及物理型態。 (5) 螯合劑成分。 (6) 包裝特性(如是否存放於高完整性容器)。 (7) 固化劑。 	<p>7.1.1.3 審查要點與接受標準</p> <p>3. 上述第 1 及 2 項所包含廢棄物之物理、化學性質及輻射特性，用以判斷運轉期間預期接收低放射性廢棄物規劃之適當性。其中至少需包含以下資訊：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 年產生體積。 (2) 廢棄物分類。 (3) 主要組成核種之平均濃度(10 CFR 61.55 表列核種)。 (4) 化學及物理型態。 (5) 螯合劑成分。 (6) 包裝特性(如是否存放於高完整性容器)。 (7) 固化劑。 	<p>確實要求主要組成核種之平均濃度須符合「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之內容。</p>
<p>7.1.2.2 程序審查</p> <p>7.場址化學條件改變所可能影響之遲滯吸附參數、工程障壁侵蝕與廢棄物包件侵蝕。</p>		<p>新增第 7 項：<u>場址化學條件改變所可能影響之遲滯吸附參數、工程障壁侵蝕與廢棄物包件侵蝕。</u></p>
<p>7.1.4.2 程序審查</p> <p>2. 異常情節(或稱替代情節)分析，包含：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵、事件及作用(FEPs)通用表(如 IAEA 或國際組織)。 	<p>7.1.4.2 程序審查</p> <p>2. 異常情節(或稱替代情節)分析，包含：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 選用國際常用的低放射性廢棄物處置的特徵事件過程(FEP)通用表(如 IAEA 或國際組織)。 	<p>文字修訂。</p>
<p>7.1.5.2 程序審查</p> <p>審查人員應查核安全分析報告內容是否符合上述審查範圍所規定之基本要求，並決定資料</p>	<p>7.1.5.2 程序審查</p> <p>審查人員應查核安全分析報告內容是否符合上述審查範圍所規定之基本要求，並決定資料的詳細</p>	<p>生物群的分布和食物鏈網相互作用是重要的。此外，生物群可能會影響非生物群中的放射性核種分佈，如擾亂沉積</p>

<p>的詳細程度是否能足以讓審查人員進行細節技術審查。審查人員應確認本章之內容包含地下水、空氣、地表水、固體與其他傳輸機制，以及直接輻射和向天輻射對人類所形成之輻射劑量，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數，確認是否包含生物圈環境系統調查及地景演變研究。</p> <p>3. 地表水：</p> <p>(1) 建立核種遷移的地表水概念模式。</p> <p>(2) 建立具有空間與時間分布的地表水水流與傳輸模式，用於分析場址下游的核種濃度。</p> <p>(3) 地表水水流與傳輸模式之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率與地下水界面之源/匯項，以及因空氣傳輸沉積至地表水傳輸之核種濃度。</p> <p>(4) 經地表水水流與傳輸模式計算所得的核種濃度。</p>	<p>程度是否能足以讓審查人員進行細節技術審查。審查人員應確認本章之內容包含地下水、空氣、地表水、固體與其他傳輸機制，以及直接輻射和向天輻射對人類所形成之輻射劑量，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。</p> <p>3. 地表水：</p> <p>(1) 建立核種遷移的地表水概念模式。</p> <p>(2) 建立具有空間與時間分布的地表水水流與傳輸模式，用於分析場址下游的核種濃度。</p> <p>(3) 地表水水流與傳輸模式之源項輸入參數，須包括地表水釋出速率與地下水界面之源/匯項。</p> <p>(4) 經地表水水流與傳輸模式計算所得的核種濃度。</p>	<p>物或影響水分組成，人類行為對生物圈環境可能亦有影響，例如經由引入生物種群。建議參照瑞典 SKB SR-PSU 生物圈安全評估，針對不同地景，包括陸地(含森林、農田、牧場等)、水域(包含湖泊、河流、沼澤及海洋)等，評估生態系統中食物鏈結構及人類行為對食物鏈之影響，建立陸地、水域(包含海洋)生態系統演變模型及概念模型，以能模擬核種於生態系統中之傳輸及分布，建立生物圈各種物理場(包含水力或是熱力、力學)、化學場之水文地質化學生物等作用之地景演化生物圈模型，以模擬核種於生物圈環境之傳輸，並假設居民生活習慣，分析核種各種傳輸途徑對於人體之劑量，以評估關鍵群體所接受之劑量符合法規限值。</p> <p>增強相關說明。</p>
<p>7.1.5.3 審查要點與接受標準</p> <p>5. 其他傳輸機制：</p> <p>(1) 加馬輻射的傳輸機制中，屏蔽增建因子與其數學模式、</p>	<p>7.1.5.3 審查要點與接受標準</p> <p>5. 其他傳輸機制：</p> <p>(1) 加馬輻射的傳輸機制中，屏蔽增建因子與其數學模式、體外</p>	<p>將生物圈環境演變納入。</p>

<p>體外曝露模式、射源模式等輸入參數是否正確。</p> <p>(2)加馬輻射與生物傳輸之相關假設是否保守。</p> <p>6. 生物圈環境演變：</p> <p>(1) 需有針對不同地景，包括陸地(含森林、農田、牧場等)、水域(包含湖泊、河流、沼澤及海洋)等，評估生態系統中食物鏈結構及人類行為對食物鏈之影響，建立陸地、水域(包含海洋)生態系統演變模型及概念模型，以能模擬核種於生態系統中之傳輸及分布。</p> <p>(2) 建立生物圈各種物理場(包含水力或力學)、化學場之水文地質化學生物等作用之地景演變生物圈模型，以模擬核種於生物圈環境之傳輸。</p> <p>(3) 依據居民生活習慣，分析核種各種傳輸途徑對於人體之劑量，以評估關鍵群體所接受之劑量符合法規限值。</p>	<p>曝露模式、射源模式等輸入參數是否正確。</p> <p>(2)加馬輻射與生物傳輸之相關假設是否保守。</p>	
<p>7.4.2 程序審查</p>	<p>7.4.2 程序審查</p>	<p>「土壤」修改為「大地</p>

<p>1. 靜態穩定性</p> <p>(1) 分析應包括不同的大地材料介質以及作用力之邊界與材料特性。</p> <p>(2) 預期荷重條件下，破壞面對應的最小安全係數。</p> <p>(3) 所引用假設的內在誤差與安全餘裕。</p> <p>2. 動態穩定性</p> <p>動態穩定性需考量地震對大地材料強度與變形特性的影響，如同靜態穩定性，分析時需考量安全餘裕是否足夠。地震所引發之地盤加速度，震波速度等皆為分析重點，各個場址類似的分析皆不盡相同，分析時仍以是否滿足保守條件為原則。</p> <p>3. 液化潛勢</p> <p>若土壤介質是飽和、疏鬆且凝聚力差時，應考量其長期穩定性，詳細的分析其與地震強度之關係。未受擾動的樣品應進行現地或實驗室測試，以分析液化的可能性。</p> <p>4. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址地質特性對於邊坡穩定性的可能影響。</p> <p>(2) 需根據第二章有關場址特性描述內容，整理邊坡靜態</p>	<p>1. 靜態穩定性</p> <p>(1) 分析應包括不同的土壤以及作用力之邊界與材料特性。</p> <p>(2) 預期荷重條件下，破壞面對應的最小安全係數。</p> <p>(3) 所引用假設的內在誤差與安全餘裕。</p> <p>2. 動態穩定性</p> <p>動態穩定性需考量地震對土壤強度的影響，如同靜態穩定度，分析時需考量安全餘裕是否足夠。地震所引發之加速度，震波速度等皆為分析重點，各個場址類似的分析皆不盡相同，分析時仍以是否滿足保守的條件為原則。</p> <p>3. 液化潛勢</p> <p>若土壤介質是飽和、疏鬆且凝聚力差時，應考量其長期穩定性，詳細的分析其與地震強度之關係。未受擾動的樣品應進行現地或實驗室測試，以分析液化的可能性。</p> <p>4. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址地質特性對於邊坡穩定性的可能影響。</p> <p>(2) 需根據第二章有關場址特性描述內容，整理邊坡穩定分析所需之地形資料、工程資料、地質剖面、大地工程材料參數與地下水位等</p>	<p>材料」，以及部分字詞修改，以及增列地震相關考量。</p>
--	--	---------------------------------

<p>穩定分析所需之地形資料、工程資料、地質剖面、大地工程材料參數與地下水位及進行邊坡動態穩定分析所需之設計基準地震等資料。</p> <p>(3) 邊坡穩定分析採取的分析方法、邊界範圍與尺寸，應合理反應可能的邊坡穩定問題，所採用的安全係數亦須符合相關規範。</p> <p>(4) 邊坡穩定性評估說明項目應包含：場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、邊坡穩定性材料與土壤參數、邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、邊坡使用借土材料的特性、夯實工作與夯實後材料的強度、所採用之有關土壤與岩石之參數，及地震力對邊坡穩定性的可能影響。</p>	<p>資料。</p> <p>(3) 邊坡穩定分析採取的分析方法、邊界範圍與尺寸，應合理反應可能的邊坡穩定問題，所採用的安全係數亦須符合相關規範。</p> <p>(4) 邊坡穩定性評估說明項目應包含：場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、邊坡穩定性材料與土壤參數、邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、邊坡使用借土材料的特性、夯實工作與夯實後材料的強度、所採用之有關土壤與岩石之參數。</p>	
<p>7.4.3 審查要點與接受標準</p> <p>4. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：</p>	<p>7.4.3 審查要點與接受標準</p> <p>4. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性：</p>	<p>新增第 g 項：<u>是否充分考慮地震力對邊坡穩定性的影響。</u></p>

<p>a.是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。</p> <p>b.是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖或剖面圖，用以展現邊坡的地層。</p> <p>c.邊坡穩定性材料與土壤參數之測試是否符合相關大地工程專業規範。</p> <p>d.是否充分考慮地下水對邊坡穩定性的影響。</p> <p>e.借土材料穩定性與強度參數是否經過適當的材料樣品測試。</p> <p>f.材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>g.是否充分考慮地震力對邊坡穩定性的影響。</p>	<p>a.是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。</p> <p>b.是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖或剖面圖，用以展現邊坡的地層。</p> <p>c.邊坡穩定性材料與土壤參數之測試是否符合相關大地工程專業規範。</p> <p>d.是否充分考慮地下水對邊坡穩定性的影響。</p> <p>e.借土材料穩定性與強度參數是否經過適當的材料樣品測試。</p> <p>f.材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p>	
<p>7.4.3 審查要點與接受標準</p> <p>5. 坑道穩定性</p>	<p>7.4.3 審查要點與接受標準</p> <p>5. 坑道穩定性</p>	<p>部分字詞修改，並增強相關說明。</p>

<p>(5) 坑道穩定性之靜態分析部分，是否有考慮開挖擾動與時間因素對圍岩和工程材料參數所引致的變異。動態穩定分析部分，洞口段與洞門段(含洞門)之耐震設計是否考量覆土？與側壓之慣性力影響？聯絡隧道與處置坑道之交會段在地震力作用下之結構完整性？</p>	<p>(5) 坑道穩定性分析之靜、動態分析，是否有考慮開挖擾動與時間對圍岩和工程材料參數所引致的變異。</p>	
<p>8.3.1 輻射防護計畫 8. 合理抑低措施 審查人員須確認合理抑低措施符合「游離輻射防護法」第 15 條之規定；「游離輻射防護安全標準」第 1 條說明之合理抑低精神。</p>	<p>8.3.1 輻射防護計畫 8. 合理抑低措施 審查人員須確認合理抑低措施符合「游離輻射防護法」第 15 條之規定；「游離輻射防護安全標準」第 2 條說明之合理抑低精神。</p>	<p>輻射作業必須遵照游離輻射防護法第一條合理抑低的精神。 為防制游離輻射之危害，維護人民健康及安全，特依輻射作業必須合理抑低其輻射劑量之精神制定本法。</p>

6.2 其他建議

本節主要針對「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)」中，尚未能凝聚成具體實質條文修訂建議，以及條文修改涉及更高層次之「安全分析報告導則」修訂，相關建議說明如下：

1.法規符合性明訂為程序審查之重點

有關法規符合性明訂為程序審查之重點，鑒於放射性廢棄物最終處置對於環境輻射安全至關重要，確保處置安全符合法規要求為管制的重點與管制機關的職責，且因廢棄物處置安全與齊全程管理接密切相關，必須妥善的進行全盤規劃，確保各項措施皆符合法規要求，因此應將法規符合性列為程序

審查之重點；也可視情況進行「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」之修訂補強，以有效落實放廢處置安全之確保。然而，本案為「低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則」之修訂，因此，提出此議題僅供主管機關參考。

2. 針對「安全分析報告導則」之修訂意見

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)」中各章開頭「安全分析報告導則」提出修改意見，其中，「廢棄物包件」為正確嚴謹之寫法。本草案中大多只寫「廢棄物」或「廢棄物容器」。再者，這些寫法部分為法規或計畫案之名詞(例如：「2.低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」)、「安全分析報告導則」內之條文(例如：「五、廢棄物來源與特性：(一)說明處置設施接收廢棄物的來源與種類、型態、數量及其分類方式。(二)說明接收廢棄物內所含核種及其最大比活度。(三)說明接收廢棄物包件與其表面污染最大限值及最大劑量率限值。(四)說明接收廢棄物之各項物理、化學特性之限制。(五)說明處置容器之材質與規格。」)以及相對應之處置辦法(例如：1.2 節「程序審查」中第 5.項「5.廢棄物來源與特性：(1)處置設施接收廢棄物的來源與種類、型態、數量及其分類方式。(2)接收廢棄物內所含核種及其最大比活度。(3)接收廢棄物包件與其表面污染最大限值及最大劑量率限值。(4)接收廢棄物之各項物理、化學特性之限制。(5)處置容器之材質與規格。」)，因此，本計畫建議先針對「安全分析報告導則」之內容進行修改建議，如「安全分析報告導則」接受本計畫之修訂建議後再進行修改「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)」之內容較恰當，以下針對「安全分析報告導則」中涉及到相關名詞置換之章節提出修改建議，建議如下(底線及刪除線為修改處之標示)：

第一章綜合概述

- 一、位置：描述場址之地點、面積及場界，並以適當比例尺之地圖說明。
- 二、處置方式：說明廢棄物處置之型式及採用之緣由。
- 三、處置容量：說明處置設施可處置廢棄物包件的總體積量、各核種之總活度、及每年之處置量。
- 四、處置場區之規劃與配置：說明處置場區內各設施及作業之規劃，並以適當之比例尺繪製設施配置圖，圖上標示比例尺、方位、區域名稱及設施名稱，標明輻射管制區域之劃分情形，並附必要之剖面圖或透視圖。
- 五、廢棄物包件來源與特性：
 - (一) 說明處置設施接收廢棄物包件的來源與種類、型態、數量及其分類方式。
 - (二) 說明接收廢棄物包件內所含核種及其最大比活度。
 - (三) 說明接收廢棄物包件與其表面污染最大限值及最大劑量率限值。
 - (四) 說明接收廢棄物包件之各項物理、化學特性之限制。
 - (五) 說明處置容器之材質與規格。

第三章 設施之設計基準

- 一、設計目標與功能需求：說明處置設施之設計基準、設計要項及設計規格等。
- 二、設施設計：說明處置設施主要結構物(含工程障壁設計)、使用需求規劃及其配置。
- 三、結構設計：說明處置設施主要結構物之結構分類、設計荷重及其組合等。
- 四、處置單元設計：說明處置設施主要結構物之工程材質、屏蔽材料之特性與設計標準(包括處置設施及其覆蓋、回填等)、地表防洪及地下排水系統

之設計。

五、輻射安全設計：

- (一) 安全限值：說明設施內外之輻射限值與輻射防護分區規劃。
- (二) 處置設施結構之輻射屏蔽分析：說明處置設施輻射屏蔽結構體構造強度、比重、厚度等有關資料，針對處置廢棄物包件中含有核種之活度、比活度及分布情形，進行輻射屏蔽分析評估。
- (三) 職業曝露合理抑低：說明設施正常運轉期間，合理抑低工作人員輻射劑量所採行之設計或措施，至少包括下列各項：
 - 1. 輻射監測區域規劃、輻射管制區劃分及輻射防護設備之使用等。
 - 2. **廢棄物包件**接收、暫貯、檢整、搬運、處置及控制中心等作業區職業曝露合理抑低之設計。
 - 3. 對較高活度**廢棄物包件**之屏蔽設計。

六、輔助設施或系統之設計：說明廢棄物包件暫貯區、廢棄物包件檢整或處理系統、粉塵與廢水收集排放處理系統、廢棄物包件傳送系統、分析或偵測系統等之設計，並說明各系統失效時之補救措施。

七、公用設施或系統之設計：說明通訊、電力、供水、供氣、照明、一般事業廢棄物處理、通風等系統之設計，並說明各系統失效時之補救措施。

八、設計成果檢附適當比例尺之詳細圖說，設計細部資料得列報告附冊備查。

第五章 設施之運轉

一、**廢棄物包件**接收：描述處置設施接收**廢棄物包件**之相關作業程序，包括下列各項：

- (一) **廢棄物包件**運輸規劃，包括**廢棄物包件**由貯存地點運送至處置設施，以及設施內的運輸規劃。

- (二) 運送文件之查驗。
- (三) 廢棄物包件體品質與盛裝容器之檢驗。
- (四) 運輸設備之污染偵檢與除污。
- (五) 容器表面劑量率及核種之偵檢。
- (六) 廢棄物包件相關文件之管理與保存。

二、廢棄物包件處理與暫存：說明處置設施接收廢棄物包件後，廢棄物包件處理與暫存作業程序，包括下列各項：

- (一) 廢棄物包件處理：由接收區將廢棄物包件轉運至暫存區或處置區之作業（包括除污、再固化、再包裝、吊卸等）。
- (二) 廢棄物包件暫存：暫存區之使用規劃及暫存作業。

三、處置作業：說明處置設施進行廢棄物包件處置之作業程序，包括下列各項：

- (一) 處置區之分區規劃：
 1. 廢棄物包件依其種類、型態、活度及預期進場處置時程分別規劃處置分區及相關處置方式。
 2. 各類廢棄物包件之處置及各該處置分區完成處置配合之可能施工設備、設施、管制、輻射防護與監測。
 3. 減少廢棄物包件體堆置空隙之方法。
- (二) 處置區內處置單元覆蓋、回填：
 1. 覆蓋、回填作業所用結構物、設施與屏蔽材料可能料源、施工設備、施工方法及施工程序。
 2. 處置單元有關設施之運轉、維護與監測評估。
- (三) 處置單元封閉及穩定化
 1. 處置單元之封閉條件、期程及其封閉計畫。
 2. 處置單元封閉後之檢查及監測。

3. 檢查、監測成果之分析評估與處置單元可能需要之改善措施。
- (四) 處置區內非處置單元區域之運轉及其封閉、覆蓋、回填之材料、步驟及設備：說明覆蓋、回填材料種類、特性、實施步驟及使用設備。
- (五) 處置區分區標示：包括標示方法、內容及標示物之材質。
- (六) 其他相關作業之說明。

第七章 設施之安全評估

一、輻射劑量評估：說明廢棄物包件之性質與場區之可能核種傳輸途徑及特性，並分別評估運轉期間（廢棄物包件接收、暫存、吊卸、處理、處置、除污排水）及封閉後正常與異常狀況下對工作人員及民眾輻射劑量之影響，並與現行法規做比較，評估項目包括：

- (一) 廢棄物包件描述
- (二) 核種傳輸特性：評估處置設施工程與天然障壁在設施運轉期間及封閉後，因地下水滲流及核種擴散、延散與遲滯吸附等機制而影響傳輸途徑，以模擬分析地下水滲漏、核種傳輸及處置設施之長期穩定性。
- (三) 正常狀況之輻射劑量：評估處置設施運轉期間及封閉後在正常狀況之輻射劑量，包括傳輸機制說明、情節分析、概念模式說明、評估模式及程式說明、輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果。
- (四) 異常狀況之輻射劑量：評估處置設施運轉期間及封閉後在意外事故或異常狀況下之輻射劑量，包括傳輸機制說明、意外事故或異常狀況之發生頻率、情節分析、概念模式說明、評估模式及程式說明輸入資料、輸出資料、敏感度分析、不確定性分析、評估結果及使用之評估程式。
- (五) 核種外釋到達生物圈之傳輸機制：包括地下水、空氣、地表水、其他傳輸機制，及直接輻射與向天輻射對個人之曝露，並描述各傳輸機

制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。

(六) 述明各種傳輸機制之評估結果，是否符合法規限值。

二、設備操作：依據處置設施之設備特性及操作程序，評估運轉期設備操作之安全性。

三、闖入者防護：描述在處置設施封閉後，防止闖入者接近廢棄物包件所採行之障壁系統，並評估其功能。

四、長期穩定性：評估並分析處置設施於運轉期間及封閉後之長期穩定性與安全性。分析時說明分析方法、輸入參數、假設條件、適用範圍、評估結果及不確定性等。

第八章 輻射防護作業及環境輻射監測計畫

一、輻射防護計畫：依處置設施之作業特性、處置放射性廢棄物之活度與特性，並參考「游離輻射防護法」相關規定撰寫輻射防護計畫。

二、依據「輻射工作場所管理與場所外環境輻射監測作業準則」規定撰寫環境輻射偵測計畫。

第十一章 封閉及監管規劃

一、處置場區穩定規劃：提出場區穩定規劃，以確保處置設施穩定之設計或措施。

二、封閉規劃：說明處置設施之封閉規劃，包括除污規劃、輻防設計、檢查及監測規劃、輔助設施拆除規劃與二次廢棄物之處理方式。

三、監管規劃：說明處置場區封閉後之監管規劃，包括監管期、處置場區管理及環境監測措施。

第七章 結論與建議

本計畫為四年期計畫第三年，第一年已針對國際間低放射性廢棄物處置場址特性進行研析，並蒐整我國潛在场址環境之資訊，去年度計畫主要蒐整瑞典 SKB 相關技術報告，有關低放射性廢棄物處置場址有關初始狀態定量化資訊，並進一步將重點放在處置場址岩石的力學-水力特性的不確定性分析方法以及敏感度分析。本年度計畫依據前期之研究成果，進一步蒐整研析有關水力-力學耦合流場分析之相關資訊，並進一步透過回顧前人之研究，尋求建立平行驗證方法。最後，透過近三年來之相關研究成果，回饋於國內低放處置審驗技術，提供「安全分析報告審查導則」修訂之建議，此導則去年度已由本計畫之子計畫二提出第三章「設施之設計基準」之相關修訂，本年度計畫再進一步進行其他章節之文字修訂。另外，本計畫也共同研讀 NUREG-2175 技術報告，並於本報告中提出研讀重點及其與我國低放處置之差異。本計畫重要成果總結如下：

7.1 結論

1. 本計畫整合規劃各子計畫共同研讀美國 NUREG-2175 技術報告，基於美國低放射性廢棄物處置技術發展經驗，作為我國低放處置技術精進之參考。NUREG-2175 技術報告對於我國低放射性廢棄物處置之相關討論於本報告第二章，研讀重點摘錄於附錄呈現。
2. NUREG-2175 技術報告主要目的提供低放處置之技術分析導引，以證明符合 10 CFR Part61 法規中「放射性廢棄物地表處置的許可要求」的執行目標。此技術報告分別針對一般技術分析、功能評估、無意闖入、場址穩定性分析、防護保證期分析、功能週期分析、深度防禦分析、廢棄物接受等課題進行闡述。

3. 有關 NUREG-2175 技術報告研讀回饋於我國低放射性廢棄物處置之相關結論如下：

- (1) **技術分析：**審查技術分析內容時，首先應確認技術分析精度應符合其所涉輻射風險，風險越高則分析精度須更高。審查過程一般需注意數據是否充足，以及選用的技術是否適用於分析欲描述之現象。同時，在判讀分析結果時需考量不確定性之影響。不確定性的考量首先來自於情節建立過程，需評量情節所描述內容本身之合理性或可靠性。其次為模擬過程所產生之不確定性，此部分之不確定性可輔以敏感度分析協助判釋。
- (2) **功能評估：**源項之化學環境為影響工程障壁功能、廢棄物罐壽命、核種遲滯與移棲參數之關鍵，目前國內之低放射性廢棄物安全分析報告導則與審查導則著重在要求地球化學資料的提供，而非如 NUREG-2175 強調地球化學對功能評估源項模擬的重要。核種傳輸的部分，強調需確認核種傳輸模擬與源項外釋在空間與時間的適當整合，且與氣候及入滲模擬、生物圈與受體特徵一致。目前國內缺乏從廢棄物描述到核種傳輸特性的鏈結，基本上 NUREG-2175 更強調功能評估各環節的具體模擬要求，國內文件比較偏重在要求資料的提供。
- (3) **無意闖入評估：**有關無意闖入之合理防護作為，與需提出的技術分析項目，包括了廢棄物分類與隔離、適當的預防闖入障壁設施與意外闖入者其曝露之放射性劑量限制值。我國「安全分析審查導則」中，所列闖入者防護主要是圍籬與障壁系統。建議可參考 NUREG-2175，將風險觀念納入評估方式，並依障壁系統的重要性區分等級，引導執照持有人按障壁設施的重要性提供相關的設計、功能、工作年限與支援的技術基準。

- (4) **場址穩定性分析**：我國低放處置，已依 NUREG-2175 技術報告提出之場址穩定性評估流程進行，然而各階段間之銜接與反饋尚有精進空間。對於場址之潛在破壞性作用，國內需特別注意此報告中提出之斷層、地震或火山活動等，對於場址之危害。另外，亦可參考此報告中關於場址穩定性評估之案例，再針對國內進行實際操作。最後，亦可參考此報告針對我國建構「災害警示圖」。
- (5) **確實保護期分析**：確實保護期分析以不同劑量門檻分級來敘述合理抑低之概念，採用越高的劑量當門檻，將需要進行更多工作來說明基本設計是可以接受的。基本設計應該是最佳化設計，如果存在任何一個替代分析效益也可以滿足衡量尺度因子，這代表基本設計尚未最佳化。目前國內在工程經濟效益研究仍待加強。
- (6) **處置功能期分析**：10 CFR 61.41 與 10 CFR 61.42 皆規範處置設施封閉後的保護。在 10CFR61.2 定義了三個時期：符合要求期、確實保護期及處置功能期。申照者應在確實保護期間後計算處置場址剩餘的長壽命廢棄物的預期濃度，以便為長期功能分析提供風險資訊。申照者應為功能期分析提供模型支持。在功能期的風險較大時，審查標準應該更高。
- (7) **深度防禦分析**：具備深度防禦功能的防護設施，必須具備多層、重複性與獨立性的防護要求，就多層性而言，係指障壁(物理性與化學性障壁)、管制作為與專業人員，其各自在處置場的全生命週期中，各有不同的角色與發揮的時間區段。目前我國的「安全分析審查導則」雖無專章對應至深度防禦相關章節內容，但深度防禦所闡述的障壁、管制與人員，則各自在相關章節闡述，建議未來能強化上述各章的橫向關聯，及在處置場全生命週期中各自發揮的功能與時間區段。

(8) **廢棄物接收**: 確認廢棄物接收標準包括: a. 放射性核種的允許限值; b. 可接收的廢棄物和容器規格; c. 限制或禁止, 以便廢棄物被接收作為低放廢棄物處置。我國可參考該方式可依據 10 CFR Part61 之廢棄物接收之規定, 且要求申照者至少每年審查廢棄物接收標準、特徵化方法和認證計畫的內容和實施情況。廢棄物接收包含以下重點, 申照者應提供資訊以及審閱者應根據廢棄物接收要求進行評估的信息。

4. 因隧道開挖, 接近隧道附近之應力重新分布, 造成不同方位之裂隙有不同程度之張開或閉合, 可能導致近隧道壁處之縱向水力傳導係數大幅上升, 而沿隧道徑向之水力傳導係數略為下降。另外, 也須注意核種可能透過處置坑內之裂隙連接沿著坑道壁處之水力通道(如上述之坑道軸向)外洩至處置系統外。
5. 坑道周圍岩盤水力-力學耦合, 可基於雙向顯示耦合方法得到力學和水力解之間的交替, 其中力學的計算受元素間的流體壓力影響(有效應力), 流體的計算受岩石節理的力學內寬變化(反映於岩體之水力傳導係數)影響。
6. 裂隙水力傳導係數及流場平行驗證技術建立方面, 本研究去年度透過力學模型計算之參數傳遞流動模型(單向耦合), 本年度之研究進一步將求得之孔隙水壓擲回力學模型進行雙向耦合之計算。根據本研究發現, 不論是均向、邊界應力異向性或是裂隙位態分布先天異向性的測試案例, 雙向耦合皆會獲得較單向耦合更高(高 50%-70%)之坑道入流量。當應力異向性變大時, 靠近隧道壁面處之水力傳導係數也有明顯變大之趨勢; 當裂隙先天異向性較大時, 靠近隧道壁面處之水力傳導係數差異較小。
7. 有關場址特性參數驗證部分, 水力內寬對於水力傳導係數而言非常敏感, 本研究重點針對裂隙岩體之開口寬進行驗證方法建議, 本研究建議利用

高圍壓孔隙率/滲透率量測系統(YOKO2)取得水力內寬及力學內寬，並與現場試驗結果進行比較。

8. 關於「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)」之修訂，本計畫於5月31日及9月3日由總計畫召開審查會議，此導則去年度計畫由子計畫二提出，本年度計畫進一步依據過去三年之研究成果，以及邀請相關專業之審查委員進行修訂意見的提供，相關修訂意見及成果於本報告中第六章呈現。本計畫除針對各章節之內容提出修改建議外，亦針對尚未能凝聚成具體實質條文修訂建議，以及條文修改涉及更高層次之「安全分析報告導則」提出修改意見。

7.2 建議

1. 本年度針對場址特性平行驗證技術已有初步的掌握，包含裂隙岩體水力-力學耦合流場分析技術建置，以及對於場址特徵化參數驗證之案例，未來可持續針對我國場址特徵化所需之參數進行試驗，並且可針對平行驗證技術進行深入研究及修正，透過研究持續精進可降低模型的不確定性、場址特徵化參數的不確定性等，對於我國低放處置而言具有正面之效益。
2. 本4年期低放射性廢棄物處置計畫已完成三年之研究，相關成果於本報告中也實質反應至審查導則的修訂，並提出對審查導則修訂重要建議以及其他建議。未來可依據這些研究成果回饋至近岸與離島場址安全評估之審查，並提出符合我國場址特性之審查導則修訂建議。

參考文獻

1. Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. (1985), "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, " *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 22(3), 121-140.
2. Black, J. H., 1987. Flow and flow mechanisms in crystalline rock, in *Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers*, Geol. Soc., Spl. 34, 185–200.
3. Black, J. H., Holmes, D. C., 1985. Hydraulic testing within the cross-hole investigation programme at Stripa, in *Design and Instrumentation of In-situ Experiments in Underground Laboratories for Radioactive Waste Disposal*. A.A. Balkema, Rotterdam, 116–27.
4. DOE, 2009. U.S. Department of Energy, "Phase 1 Decommissioning Plan for the West Valley 9 Demonstration Project," Revision 2, December 2009.
5. DOE, 2010. U.S. Department of Energy, "Decommissioning and/or Long-Term Stewardship at 12 the West Valley Demonstration Project and Western New York Nuclear Service Center," 13 DOE/EIS-0226, January 2010.
6. Ehlers et al., 2011. Ehlers J., P.L. Gibbard, and P.D. Hughes, eds., "Quaternary Glaciations - Extent and Chronology: A closer look", Vol. 15, 1st Ed., ISBN: 9780444534477. [http://booksite.elsevier.com/9780444534477/DCW_North_America_wgs84_1.php and http://booksite.elsevier.com/9780444534477/DCW_North_America_wgs84_2.php]
7. Eisenberg et al., 1999. Eisenberg, N.A., M.P. Lee, T.J. McCartin, K.I. McConnell, M. Thaggard, and A.C. Campbell, "Development of a Performance Assessment Capability in the Waste Management Programs of the U.S. Nuclear Regulatory Commission," *Risk Analysis*, 19(5): 847–876, October 1999, ADAMS Accession No. ML031750717.

8. ESRI, 2008a. Environmental Systems Research Institute, Inc., “Data & Maps and StreetMap – North America DVD,” U.S. National Atlas Water Feature Areas, ArcGIS 9, ESRI Data & Maps 9.3, April 1, 2008.
9. ESRI, 2008b. Environmental Systems Research Institute, Inc., “Data & Maps 9.3, Elevation and Image Data - World DVD,” U.S. Geological Survey Center for Earth Resource Observation and Science (EROS), ArcGIS 9, ESRI, April 1, 2008.
10. EWG, 2012. WVDP Erosion Working Group (EWG), “Erosion Working Group 28 Recommendations for Phase 1 Studies,” August 22, 2012, ADAMS Accession No. 29 ML13071A284. <http://westvalleyphaseonestudies.org/index.php/public-meeting>.
11. FEMA, 1998. Federal Emergency Management Agency, National Flood Insurance Program Q3 Flood Data, September 1998, Washington D.C.
12. FEMA, 2012. Federal Emergency Management Agency, National Flood Hazard Layer on DVD, Washington D.C.
13. Ivars, D. M., 2006. Water inflow into excavations in fractured rock—a three-dimensional hydro-mechanical numerical study.
14. Iwai, K., 1976. Fundamental studies of fluid flow through a single fracture. Ph. D. thesis, Univ. of California.
15. Kreakie et al., 2012. Kreakie, B.J., Y. Fan, and T.H. Keitt, ”Enhanced Migratory Waterfowl Distribution Modeling by Inclusion of Depth to Water Table Data,” PLoS ONE 7(1): e30142, doi:10.1371/journal.pone.0030142, 2012. [<http://www.plosone.org/article/info:doi/10.1371/journal.pone.0030142>]
16. Lisjak, A., et al., 2017. A 2D, fully-coupled, hydro-mechanical, FDEM formulation for modelling fracturing processes in discontinuous, porous rock masses.

17. NEA, 2002. Nuclear Energy Agency, "Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste: An International Database," OECD, Radioactive Waste Management, 2002.
18. NRC, 1982. U.S. Nuclear Regulatory Commission (Lindsey et al., Jahns, R.H.), "Long-Term Survivability of Riprap for Armoring Uranium Mill Tailings and Covers: A Literature Review," NUREG/CR-2642 (PNL-4225), Washington, DC, 1982, Public Legacy Library Accession No. 8207140120, Microform 13845:347-13846:124.
19. NRC, 1983. U.S. Nuclear Regulatory Commission (Schumm, S.A., and P.J. Chorley), "Geomorphic Controls on the Management of Nuclear Waste," NUREG/CR-3276RW, Public Legacy Library Accession No. 8311080172, Microform 21091:001-21091:151.
20. NRC, 1991. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Standard Format and Content of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility," NUREG-1199, Rev. 2, Washington, DC, January 1991, ADAMS Accession No. ML022550605.
21. NRC, 1993. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Evaluation of a Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities: Evaluation of Modeling Approaches," NUREG/CR-5927, Vol. 1, (SAND91-2802), Washington, DC, August 1993, ADAMS Accession No. ML11126A295.
22. NRC, 1994. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility," NUREG-1200, Rev. 3, Washington, DC, April 1994, ADAMS Accession No. ML061370484.

23. NRC, 1995a. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities: Final Policy Statement," Federal Register, Vol. 60, No. 158, pp. 42622– 42630, August 16, 1995.
24. NRC, 1995b. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Final Branch Technical Position on Concentration Averaging and Encapsulation, Revision in Part to Waste Classification Technical Position," Washington, DC, January 17, 1995, ADAMS Accession No. ML033630732.
25. NRC, 2000. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities: Recommendations of NRC's Performance Assessment Working Group," NUREG-1573, Washington, DC, October 2000, ADAMS Accession No. ML003770778.
26. NRC, 2002. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Design of Erosion Protection for Long-Term Stabilization," NUREG-1623, Washington, DC, September 2002, ADAMS Accession No. ML052720285.
27. NRC, 2003. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Yucca Mountain Review Plan," NUREG-1804, Rev. 2 (Final Report), Washington, DC, July 31, 2003, ADAMS Accession No. ML032030389.
28. NRC, 2006. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Consolidated Decommissioning Guidance: Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria—Final Report," NUREG-1757, Vol. 1 and 2, Washington, DC, September 2006, ADAMS Accession No. ML063000243 and ML063000252.
29. NRC, 2007. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NRC Staff Guidance for Activities Related to U.S. Department of Energy Waste Determinations: Draft Final Report for Interim Use," NUREG-1854, Washington, DC, August 2007, ADAMS Accession No. ML072360184.

30. NRC, 2011. U.S. Nuclear Regulatory Commission (Nicholson, T.J. and H.D. Arlt), "Proceedings of the Workshop on Engineered Barrier Performance Related to Low-Level Radioactive Waste, Decommissioning, and Uranium Mill Tailings Facilities," NUREG/CP-0195, Washington, DC, August 2011, ADAMS Accession No. ML11238A056.
31. NRC, 2012. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "A Proposed Risk Management Regulatory Framework," NUREG-2150, Washington, DC, April 2012.
32. NRC, 2015. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61, Draft Report for Comment," NUREG-2175.
33. Oda, M., 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses. *Geotechnique* 35(4), 483-495.
34. Oda, M., 1986, "An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses, " *Water Resources Research*, 22(13), 1845-1856.
35. Oron, A. P., & Berkowitz, B., 1998. Flow in rock fractures: The local cubic law assumption reexamined. *Water Resources Research*, 34(11), 2811-2825.
36. Petersen et al., 2011. Petersen, M.D., A.D. Frankel, S.C. Harmsen, C.S. Mueller, K.M. Haller, R.L. Wheeler, R.L. Wesson, Yuehua Zeng, O.S. Boyd, D.M. Perkins, Nicolas Luco, E.H. Field, C.J. Wills, and K.S. Rukstales, "Seismic-hazard maps for the conterminous United States," U.S. Geological Survey, 2008 Scientific Investigations Map 3195, 2011. [<http://pubs.usgs.gov/sim/3195/>]
37. Pusch, R., 1989. Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 26, No. 1, pp. 79-83).

38. Raven, K. G., & Gale, J. E., 1985. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 22, No. 4, pp. 251-261). Pergamon.
39. Schrauf, T. W., & Evans, D. D., 1986. Laboratory studies of gas flow through a single natural fracture. *Water Resources Research*, 22(7), 1038-1050.
40. Sharp, J. C., 1970. Fluid flow through fissured media.
41. Shen, B., & Barton, N., 1997. The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(1), 117-126.
42. Siebert and Simkin, 2002. Siebert L. and T. Simkin, "Volcanoes of the World: an Illustrated Catalog of Holocene Volcanoes and Their Eruptions," Smithsonian Institution, Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-3, 2002.
43. SKB, 2006. Svensk Kärnbränslehantering (SKB), "Long-term Safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar – A First Evaluation," Main report of the SR-Can project, SKB TR-06-09, 2006.
44. Syvitski et al., 2011. Syvitski, J.P., et al., "CSDMS — A Modeling System to Aid Sedimentary Research," *The Sedimentary Record*, 9(1): 4-9, 2011.
45. Thiem, G., 1906. *Hydrologische Methoden*. Gebhardt, Leipzig.
46. USDA, 1998. U.S. Department of Agriculture, "Water Erosion Vulnerability Map," Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1998.
47. USGS, 2011. U.S. Geological Survey, Multi-Resolution Land Characteristics Consortium (MRLC), National Land Cover Database (NLCD), National Land Cover Database 2006 (NLCD2006), 20110216, 2011. [http://www.mrlc.gov/nlcd06_data.php]

48. Walter and Dubreuilh, 2007. Walter, G.R., and P. Dubreuilh, "Evaluation of Approaches to Simulate Engineered Cover Performance and Degradation," Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, San Antonio, TX, 2007.
49. Ward et al., 2009. Ward, A.L., et al., "Short- and Long-Term Fire Impacts on Hanford Barrier Performance," WM2009 Conference Proceedings, March 1–9, 2009, Phoenix, AZ, 2009.
50. Witherspoon, P. A., Wang, J. S., Iwai, K., & Gale, J. E., 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. *Water resources research*, 16(6), 1016-1024.
51. Zhang, C., Shu, L., Lu, C., Appiah-Adjei, E. K., & Wang, X., 2015. Experimental determination of fractures and conduits and the applicability of Cubic law in closed fractures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 69, 1-7.
52. Zhao, Y., Zhang, L., Wang, W., Tang, J., Lin, H., & Wan, W., 2017. Transient pulse test and morphological analysis of single rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 91, 139-154.
53. Zimmerman and Yeo, 2000. Fluid Flow in Rock Fractures: From the Navier-Stokes Equations to the Cubic Law. *Dynamics of fluids in fractured rock*, 213-224.
54. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，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)。
55. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，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。
56. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，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。
57. 原行政院原子能委員會放射性物料管理局，2016，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，104FCMA019。

58. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2017a，106 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析，105FCMA011。
59. 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2017b，低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法研究，105FCMA011。
60. 詹尚書，2018，裂隙岩體滲透特性調查暨參數特徵化技術之研究，博士論文。

附錄 A 際低放處置規範研析：NUREG-2175

本報告已於 2.1 節介紹了 NUREG-2175 技術報告的背景、目的、架構以及由本計畫統籌之分工研讀說明，2.2 節則彙整了五個子計畫對於研讀 NUREG-2175 技術報告後，對於我國低放處置發展之看法。為了提供更完整的資訊，本附錄 A 統整了五個子計畫所共同研讀 NUREG-2175 技術報告之重點摘錄，重點摘錄之完整內容詳述如下。

A.1 NUREG-2175 之背景、目的及架構

美國核能管理委員會(NRC)制定一套近地表處置的許可要求、功能目標和技術標準，該標準用於處置商業低放射性廢棄物(LLW)。此技術報告主要目標在支持執行技術分析和廢棄物接收要求，以證明符合 10 CFR Part 61 之功能目標，且此技術報告是補充較早期之技術報告。

A.1.1 背景

美國聯邦法規 10CFR Part 61 適用於 1983 年 1 月 27 日後任何近地表之低放射性廢棄物處置設施。10 CFR Part 61 說明處置商業低放射性廢棄物的方法，包括選址、處置設施設計和營運、廢棄物最低處置要求和處置設施封閉。為了取得許可證，NRC(或協議州監管機構)必須保證滿足 C 部分的功能目標。

A.1.2 目的

NUREG-2175 技術報告主要在支援實施技術分析和廢棄物接收要求，以證明符合 10 CFR Part 61 之功能目標。以下說明此技術報告與其他 NRC 技術導引之關係，以及此技術報告新增之內容：

1. NUREG-2175 技術報告與其他 NRC 導引的關係

NUREG-2175 主要為補充過去不足的處置技術文獻，相關文獻如下：

- (1) NUREG-1200，修訂版 3，“Standard Review Plan for the Review of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility” (NRC，1994)。
- (2) NUREG-1573，“A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities”(NRC，2000)。
- (3) NUREG-1854，“NRC Staff Guidance for Activities Related to U.S. Department of Energy Waste Determinations”(NRC，2007)。
- (4) “Final Branch Technical Position on Concentration Averaging and Encapsulation, Revision in Part to Waste Classification Technical Position,” dated January 17, 1995 (NRC，1995b)。
- (5) NUREG-1757，“Consolidated NMSS Decommissioning Guidance: Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria”(NRC，2016)。

2. NUREG-2175 技術報告新增之內容

NUREG-2175 技術報告主要新增內容包含：

- (1) 識別和篩選有關發展情節的特徵、事件和作用(FEPS, features, events, and processes)之可接受之方法；
- (2) 保護無意闖入之分析導引；
- (3) 詳細的場址穩定性分析導引和實例；
- (4) 制定廢棄物驗收標準、廢棄物特徵化方法和廢棄物認證；
- (5) 風險分析的三層時間框架：符合要求期(1,000 年)、確實保護期(1,000 至 10,000 年)和處置功能期(超過 10,000 年的長半化期廢棄物)；
- (6) 處置設施的深度防禦分析；

(7)收集安全案例資訊，證明廢棄物處置設施安全性的評估；

(8) 對技術分析和廢棄物接收標準的功能確認和定期審查。

A.1.3 架構

附表 A.2 列出了技術分析、10 CFR Part 61 相關要求、NUREG-2175 技術報告各個章節之相關性，以及對應至本附錄各章節。NUREG-2175 技術報告 2.0 章說明進行技術分析的一般注意事項。與功能有關的特定議題於第 2.0 章和 3.0 章中說明。第 4.0 章針對無意闖入者的防護所需分析進行討論。5.0 章針對封閉後處置場穩定性進行說明。第 6.0 章討論了確實保護期分析，第 7.0 章說明與處置長半化期廢棄物有關之處置功能期分析。第 8.0 章討論深度防禦分析。第 9.0 章討論廢棄物接收程序。10.0 章討論進行功能確認以評估和驗證在場址封閉之前用於證明符合性的資訊的準確性。

附表A.1 技術要求和文獻章節之間的對照表(改自NUREG-2175)

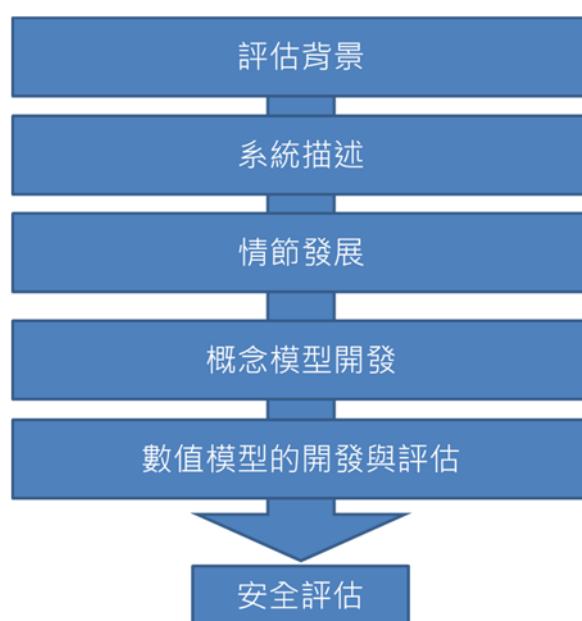
對應本報告附錄之章節	技術要求	法規章節	章節								
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
A.3	功能評估	61.13(a) 61.41(a)	◎	◎	◎						
A.4	無意闖入評估	61.13(b) 61.42(a)	◎	◎		◎					
A.5	場址穩定性分析	61.13(d) 61.44	◎	◎			◎				
A.6	確實保護期分析	61.41(b) 61.42(b)	◎	◎				◎			
A.7	處置功能期分析	61.13(e) 61.41(c) 61.42(c)	◎	◎						◎	
A.8	深度防禦分析	61.13(f)	◎								◎
A.9	廢棄物接收	61.58	◎								◎

A.2 一般技術分析

本節所指「技術分析」包含處置設施功能評估、無意闖入者評估、場址穩定性評估，以及申照者為說明其設計符合 10CFR part 61 功能目標要求之符合度評估，均屬於技術分析範疇。

A.2.1 評估過程

本節內容主要說明技術分析常見的程序與名詞定義，評估技術分析之程序分別為評估內容、描述系統、建立情節、建立概念化模型、數值模型開發與評估等。值得注意的是，由於不同場址因其廢棄物數量與特性、場址特徵、工程障壁設計，以及需考量之作用與事件亦有所不同。因此，技術分析須符合欲分析課題之風險程度選擇合適的分析方法。低放射性廢棄物通常含有長半化期與短半化期核種，雖然短半化期核種活度占處置總活度之占比相當高。依活度分布特性而言，長半化期核種的活度占比較小，可能導致之初期輻射風險亦較低。但進行功能評估時，正常情節下之核種釋出通常在數百年後，其放射性風險將來自於處置設施所含長半化期核種，故其技術分析之解析內容精度應依其對應之輻射風險進行選擇。評估過程如附圖 A.1 所示。



附圖A.1典型的評估程序示意圖

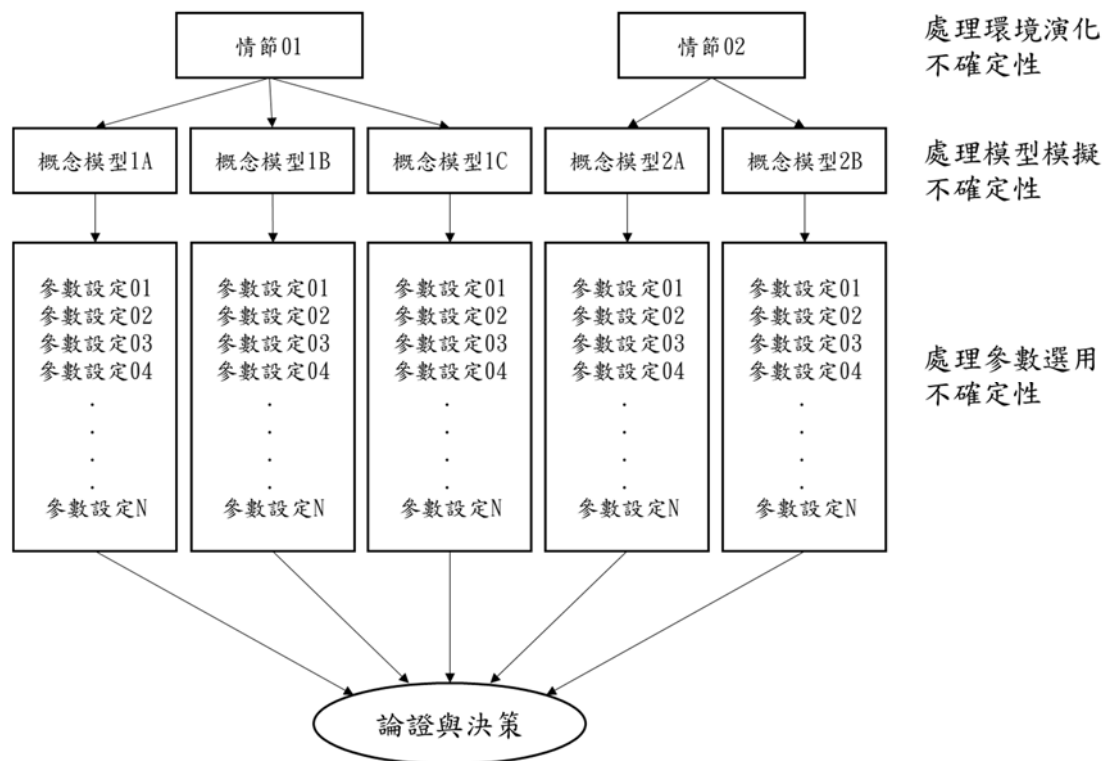
A.2.2 一般審查注意事項

1. 數據充足性

使用適當數據對於申照審查而言至關重要，採用之數據應具備適當之代表性、完整性、品質與客觀立場。數據充足性的考量包含(1)應確定是否提供足夠的數據來支持功能評估模型；(2)應確定這些數據是否得到了適當的使用。由於在功能評估時，為了使參數具備欲模擬範圍之時間和空間尺度上的過程和事件，可能會涉及參數的升尺度分析或外插推估，須注意其是否能保留會影響功能評估結果之參數關鍵特徵。

2. 不確定性

申照者應盡可能降低不確定性對於處置安全功能之影響，透過評估結果的不確定性分析，在一定範圍內可透過使用多種證據或模式分析來降低不確定性之影響。此技術報告說明之不確定性略分為情節不確定、模式不確定(包含概念化、數學化)與參數不確定性。情節的不確定性主要來自場址環境演化預測的不確定，也許會衍生出數個不同的場址環境概念模型。模型的不確定性則來自功能評估中之整體評估模型，以及其所含之分項評估模型。參數的不確定性來自技術分析中，選用代表參數而衍生之不確定性。低放處置不確定性分析架構如附圖 A.2 所示，利用不同的情節設定來處理對環境演化之不確定性、利用不同概念模型來描述不同特徵、再利用不同參數設定進行模擬(類似敏感度分析)。就處置功能評估而言，不確定性分析之目的，在於支持處置系統符合法規要求之論證。



附圖A.2低放處置功能評估之不確定性處理架構圖(NRC, 1993)

3.模型分析技術考量

利用數學模型預測與模擬處置設施功能，為用以證明設施設計可以滿足10CFR Part61 功能要求之重要分析技術。模型分析技術是否可提供充分之論證支持，可由以下考量進行審查：

- (1) 模式是否經過驗證，此部分主要用於確認數學模式其模擬結果，其計算準確度是可以接受的；
- (2) 模式是否經過校正，此部分主要用於確認所建立的模式，確實可以反映出欲分析對象之特徵；
- (3) 可利用天然類比來強化模式分析結果之信心，但天然類比通常無法正確反應模式所考量之各項條件，因此不能驗證模式之正確性；
- (4) 可利用同儕審查來確認模式分析技術之準確性與適用度。

A.2.3 評估內容

1. 功能評估內容

功能評估的第一步為確認評估的對象、評估的目的，以及評估的尺度。評估內容的要點包含評估目的、法規架構、評估終點、評估原理、廢棄物特性、處置系統特性與評估時間。以低放射性廢棄物而言，法規架構可以參照 10 CFR Part 61，其中包含了 C 部分提及的功能目標。功能評估的目的常因審查對象的特性而改變，因此有各種不同的功能評估策略，例如保守型、實際型、簡單型、複雜型、決定型、概率型等。完善的評估內容亦有助於模型的建置，例如確認所需的資料以及模擬技術。此外，評估內容可用於與其他機關的功能評估報告，或是其他相似場址的功能評估報告互相比較。

2. 不同時間尺度下的評估方法

10 CFR Part 61 規定了評估時間架構分別為符合要求期、確實保護期、處置功能期等 3 個時間區段，分述如下：

(1) 符合要求期

分析時間為設施封閉至封閉後 1000 年，應採定量評估方式進行，申照者必須證明處置設施可合理確保實現 10 CFR 61.41(a)，10 CFR 61.42(a)和 10 CFR 61.44 規定之功能目標。

(2) 確實保護期

設施封閉 1000 年後至 10,000 年的期間為確實保護期需分析之時間區段，申照者必須採定量評估方式，證明處置設施可以抑制核種遷移和無意闖入者的風險已降至 5 mSv 以下，或基於技術與經濟考量下，可以降低至合理可實現的水準。

(3) 處置功能期

處置功能期始於封閉後 10,000 年，視其需驗證功能的需求，延長其需分析之時間區段長度，用以證明可符合功能評估要求。申照者須評估處置設施處置長半化期核種之能力，說明處置設施在合理可行的範圍內，可達成釋出核種最小化。雖然定量分析將具有高度的不確定性，但申照者仍須進行定量分析，對於分析結果的說明則可採用定性描述方式。

(4) 場址特性

10 CFR 61.50 中界定了處置場址所需避免以及需要具備的各項場址特性。如 10 CFR 61.7 中所示，申照者在進行場址特性評估時，需要考慮未來時間尺度，以及廢棄物的放射特性，評估的時間長度至少需達五百年，並針對不同類型的廢棄物規劃不同的評估時間尺度。申照者可以在一定的彈性範圍下，以風險告知的形式考量場址特性。為確保 C 部分中長期功能目標的達成性，應參照場址穩定性要求。

A.2.4 系統描述

功能評估的第二步驟為處置系統與場址自然環境的描述，目的為確保具有足夠的資訊以進行功能評估，這些資訊至少應包含：

- 場址；
- 自然環境；
- 處置設施；
- 場址與處置設施的相互作用；
- 廢棄物的放射性、物理與化學特性；
- 潛在破壞作用；

- 潛在受影響族群之特性。

其他應提供的資訊詳見 10 CFR 61.12。系統描述應提供前述各項資訊隨時間的變化性，尤其是包含長半化期廢棄物的處置系統。判斷處置系統描述是否完備的準則為，是否能夠不需詢問文件的作者，即可理解處置系統。

A.2.5 情節發展

功能評估的第三步驟為情節發展，即決定分析的尺度、概念與數值模型。

1. 分析尺度

功能評估需要針對可能會影響處置設施功能的 FEPs 進行分析，由於難以事先判斷 FEPs 的影響程度，故 FEPs 篩選往往為一迭代進行的過程。篩選 FEPs 有各種不同的方法，舉例來說，對於環境單純的場址或是短半化期廢棄物處置，申照者透過內部專家自行決定，即為一非正式的方法。正式的篩選方法則為利用國際間公定的 FEPs 表單(NEA, 2002)，透過獨立技術審查完成篩選，此種方法適用於具有複雜自然環境的處置場址以及長半化期廢棄物處置。不論是正式或非正式的篩選方法，皆需提供以下資訊：

- 對於考量的 FEPs 提供清楚的描述；
- 對於未考量的 FEPs 提供描述，並說明不考量的原因；
- 說明決定 FEPs 重要性的過程，以及針對重要性不足的 FEPs，考量相互現象(事件+作用)。

另外，申照者可以透過 top-down 或是 bottom-up 的方法建造功能評估模型。其中 bottom-up 方法多用於複雜的處置場址，內容包含建立 FEPs 表單與決定哪些 FEPs 將用於建模；top-down 方法則由不同領域的專家決定功能評估模型的 input。兩種方法皆可能為迭代式進行。

2.方法

(1) Bottom-Up 方法

a. FEPs 確認與分類

由於各國針對各種不同的廢棄物型態、處置系統設計與地質環境均發展出不同的 FEPs 表單，且表單內容持續發展與變化，故申照者時應進行廣泛的文獻蒐集，並參照 Appendix C 中 NRC 所提出的通用性低放射性廢棄物處置 FEPs 表單。

(a) 既有 FEPs 確認與分類：既有 FEPs 確認與分類的第一步為回顧評估文件，申照者可以利用既有 FEPs 表單做為參考。

(b) 未來 FEPs 確認與分類：申照者可以透過定性分析來確認未來 FEPs 表單。

b. 系統性篩選 FEPs

申照者應對完成確認的 FEPs 進行系統性的篩選，決定那些子集對處置系統功能有重要影響，並記載每項 FEPs 的入選或剔除之原因。篩選的方法包含依重要性給分(0~10 分)或是使用簡單的入選/剔除系統。對低放射性廢棄物處置而言，並不需過度的針對各項 FEPs 的重要性進行分析，簡單的計算或估算即可。申照者應依據各個場址的特性與篩選準則，一次對一個 FEPs 類別進行評估，在篩選的過程中需考量 FEPs 間的交互作用，若對於入選與否有不確定性，則該項 FEPs 需先予以保留，並在後續各不同階段的篩選過程中進行評估。

(a)法規規範

申照者可以根據 FEPs 是否符合法規規定而進行篩選。10 CFR 61.50 中提及低放射性廢棄物處置場址的各項需求，此項規範為 FEPs 的篩選的重要依據，其中與 FEPs 分析相關之章節為 10 CFR

61.50(a)(2)(i-iv)、10 CFR 61.50(a)(3) 與 10 CFR 61.50(a)(4)(ii-iv)。

附表 A.3 針對 10 CFR 61.50 中各項場址需求，以及 500 年後各項水文特徵是否能夠滿足 10 CFR 61 Subpart C 的功能要求，表列各項需進行的分析。

附表 A.2 各項 FEPs 所需分析項目(10 CFR 61.50)

特徵類型	時間尺度(年)	分析項目
水文	<500	無—若有水文特徵，則場址不適合用於低放射性廢棄物處置
	500~10,000	穩定性分析 功能評估 ¹ 入侵評估 ¹
	>10,000	處置功能期分析
非水文	<10,000	穩定性分析 ² 功能評估 ¹ 入侵評估 ¹
	>10,000	處置功能期分析

註 1：若穩定性分析顯示根據 FEPs 分析後，該場址處於穩定狀態，則在功能評估和入侵評估中則不用再考慮以上 FEPs。

註 2：非水文特徵的 FEPs 可以 10 CFR 61.41 與 10 CFR 61.42 的功能標的是否達成為依據，進行穩定性分析。

(b)發生機率

申照者可依據 FEPs 發生的機率及/或 FEPs 對處置系統功能的影響嚴重性，進行 FEPs 篩選，剔除發生性低與影響不嚴重的 FEPs。

三種依據 FEPs 的量化程度來進行發生機率估算的方法如下：

- 定量方法：所有的 FEPs 皆以數值呈現，在功能評估的過程中清楚地呈現事件的發生機率。
- 定性方法：以定性或半定量的方式描述 FEPs 的發生機率。

- 不考慮機率：進行情節描述時，因為缺乏相關資料且具有相當大的不確定性時，而將 FEPs 納入考量。
- 發生機率之不確定性：若採樣母群體的數量不足或是資料品質不佳，或是根據假設來進行機率估算，則計算結果的不確定性高。當利用發生機率進行 FEPs 篩選時，必須要考量發生機率的不確定性。

(c)嚴重性

發生機率分析時所面臨的特性與困難，在進行處置設施功能影響或嚴重性量化分析時亦會浮現。在利用嚴重性進行 FEPs 篩選時，保守的半量化方法會比量化方法更適合。嚴重性篩選法的面臨的另一問題為分析方法變得更複雜，分析結果也更複雜且難用直覺判斷，使得篩選過程變得困難。Shelf 型和 Cliff 型的回覆，以及區域性的最大值與最小值，可能會使有界限的嚴重性分析或是其他類型的嚴重性評估，在解讀時造成混淆。嚴重性之不確定性方面，若資料不足或是品質不佳、根據假設來進行嚴重性估算，或是專家難以確定掩蔽效應，則計算結果的不確定性較高。如前所述，在依據嚴重性進行 FEPs 篩選時，需要考量 FEPs 間的交互關係，以及不同 FEPs 結合後所造成的影響。

(d)篩選技術

申照者應結合不同的工具來進行篩選，申照者需利用專家判斷以進行系統性的篩選。篩選準則矩陣將現象(事件+作用)依照發生機率與嚴重性進行分類，如附表 A.4 所示。篩選準則矩陣需要先由專家選出其認為重要的 FEPs，此種方法的初始因子包含(1)FEPs 發生機率、(2)FEPs 嚴重性與(3)發生機率與嚴重性的不確定性，此種方法可為篩選過程增加透明度。專家需決定一定性的標準來完成 FEPs 篩選，以附表 A.4 為例，分析員決定若 FEPs 的發生機率為「非

常不可能」時則剔除該 FEPs，而發生機率為「不可能」時則需納入考量，此外，分析員亦需針對嚴重性訂定一定性的標準。

附表 A.3 FEPs 篩選準則矩陣範例

編號	發生機率 是否低於定性篩選標準 例：非常不可能	不確定性 發生機率的 不確定性	嚴重性 是否低於定性篩選標準 例：不顯著	不確定性 嚴重性的 不確定性	篩選結果
1	是	低	是	低	剔除
2	是	高	是	低	剔除
3	是	低	是	高	剔除
4	是	高	是	高	入選 [剔除*]
5	是	低	否	低	剔除
6	是	高	否	低	入選
7	是	低	否	高	剔除
8	是	高	否	高	入選
9	否	低	是	低	剔除
10	否	高	是	低	剔除
11	否	低	是	高	入選
12	否	高	是	高	入選
13	否	低	否	低	入選
14	否	高	否	低	入選
15	否	低	否	高	入選
16	否	高	否	高	入選

*確實保護期的篩選結果

(2) Top-Down 方法

由於近年來在情節發展上的應用，安全功能的概念已經被頻繁使用。Top-Down 方法的優點包括在整體系統功能的脈絡下，著重於重要的障壁，並考量不同特徵的行為。一些人認為 Top-Down 方法是一種較為簡單的情節發展方法，因為安全功能能夠比 FEPs 之間的相互關係更快速地被識別，且情節的發生機率更容易估計。如前所述，Top-Down 方法和 Bottom-up 方法通常以互補的方式同時使用。

a. 安全評估與安全功能

安全評估係指針對場址與設施設計提供安全功能和滿足技術要求的能力，進行系統性的分析。安全功能定性的定義為，處置系統的某組件於安全上扮演的角色。隨著分析時間的不同，安全功能可能會有所不同。例如，低放處置設施的短期安全功能可能須仰賴表面覆蓋物，而長期的安全功能則須仰賴廢棄物本身型態特性。低放射性與高放射性廢棄物處置的 Top-Down 方法相似，但有鑑於低放射性廢棄物處置的時間尺度、核種濃度，以及廢棄物總量，在應用 Top-Down 方法時，其詳細度、全面性、完整性，以及迭代程度皆較高放射性廢棄物處置為低。

b.安全功能與情節發展

一些組織已經透過 Top-Down 方法進行 FEPs 篩選，並建立情節且進行功能評估，一些國家級的計畫則透過特定工具，如 FEPs 圖表 (SKB, 2006)，將 FEPs 與安全功能連接。系統性能的不確定性可能會產生情節，當安全功能表現不如預期時，申照者應找出合理的替代情節。主要安全功能與工程障壁系統及自然障壁有關，在情節發展過程中，申照者可以參考 FEPs 的時間、對安全功能的重要性，以及其他安全功能的狀態，來發展替代演化情節。

3.情節建置

申照者可以對多種情節進行評估以評估情節的不確定性。雖然無法完全消除不確定性，申照者仍可以透過技術評估來限制未來事件及作用的不確定性。情節通常根據其發生的可能性，以及構成該情節的 FEPs 的發生可能性來進行組合與分類。可根據發生的可能性對情節進行分類。相關定義如下：

- 設計情節代表在預期的不確定性範圍內，以及在缺乏干擾的情況下，處置系統的演化。對某些場址而言，設計情節可能是其唯一的情節。設計情節也可被稱為主要情節、正常演化情節、參考情節或是基本情節。

- 替代演化情節，或稱替代情節，代表可能性較低，但仍然合理的處置系統演化，此種情節同時描述了擾動如何影響系統的演化。
- 「假設(what if)」或「殘餘(residual)」情節代表不合理的情節。這些情節用於探討系統的穩健性，例如障壁的完全毀壞，並不探討特定的劣化機制。
- 「程式化(stylized)」情節通常與未來人類行為有關(例如：入侵)，且可能僅有少量的資料可供分析，且在進行情節描述時具有相當大的不確定性。

申照者在進行評估時，應提供描述不同情節的術語，並清楚地解釋分析目的。情節建置後，申照者應針對相關外釋、傳輸與暴露機制建置概念模型。

A.2.6 概念模型開發

申照者應對評估內容、系統描述與情節發展各步驟所提供的資料進行審查，並利用這些資料建置場址概念模型。場址概念模型應定性描述 FEPs 與重要障壁之間的交互關係，以及場址功能如何運作。在建置場址概念模型的過程中，申照者可能需簡化假設並對這些簡化假設進行說明，而監管機關應針對所有的簡化假設進行審查，並決定申照者是否提供足夠的技術基礎。簡化假設通常包含系統的幾何與維度、初始值與邊界條件、時間依賴性，以及相關物理化學作用的性質。為了確認需要更詳細考量的地區並減低模型的不確定性，申照者可依據有限的數據與設施設計資料，建置初始簡化保守概念模型，此概念模型的進一步開發，需著重於重要放射性核種與重要作用。

替代概念模型

當數據不足時，可能有多個概念模型皆能夠代表這些數據，在此情況下，申照者應選擇提供最保守結果的概念模型，或是藉由蒐集額外資料來降低不確定性，並決定哪個概念模型提供了最符合現況的表述。申照者不需要對所

有概念模型進行摘要及評估，但須對所有與現有資料具一致性的模型進行考量。審查者應對模型不確定性進行獨立評估，並考量是否應評估多個概念模型，尤其是在複雜場址環境下。

A.2.7 數值模型的開發和評估

數值模式開發通常採用數學模式程式開發軟體進行，利用數學模型來描述概念模型之主要與其關聯作用之變化過程。數值模型的開發之審查包含：將模型數學化而採取的概念簡化、整合模型，以及模擬結果的判釋。

1. 數值模型

一般而言，申照者將利用數值模型來評估處置設施功能。分析的意圖在於迭代分析的過程，而分析過程的精細度與需投入的工作量，則須視處置場址開發階段的差異，以及對於處置場址特性的相關知識掌握度。申照者在開發數值模型時，首先申照者應該選擇一種數值建模方法，它可以恰當地利用數學模型表示該場址的概念模型。其次，申照者應該確保選擇的數值模型具有適當的質量保證/質量控制。

2. 模式概念化與模型簡化

申照者需先進行模式概念化，再將概念化的成果利用數學方程式進行描述。模式概念化是將真實物理世界的場址轉化為數學模型的過程，利用數學模型的控制方程式來實現物理世界之描述。

模型簡化與模式概念化類似，但與處理數值模型的方法較為相關。將複雜的數值模型進行簡化，用於加速運算且同時須確保模擬結果的有效性。模型簡化過程應證明被簡化的細節是可被合理簡化。此外，簡化模型應與詳細模型比較，說明模型適合簡化。簡化後的模型可能精簡至如查數據表的程度，如核種遷移運算的分配係數(Kd)，即是簡化複雜現象後的模型。模型簡化過程會產生不確定性與誤差，申照應清楚記錄模式概念化與模型簡化過程。

3.模型整合

綜合評估的目的是確認場址、設計、數據、參數不確定性，以及模型與模型不確定性是否被適當的整合。審查者應確認處置系統設計與場址特徵的相關表述，均已納入分析之中，所使用的假設、數據與模型應具有一致性。不同模式串聯使用時，其邊界條與初始條件應具一致性，且依驗證其空間與時間尺度設定是否洽當。

4.分析和評估結果

由於機率分析方式對於評估不確定性對模型的影響較為容易，因此功能評估採用機率分析方式十分常見。然而，使用定量分析模型來證明符合功能目標亦是可接受的。一般而言，採用定量分析模型，其設定通常會較為保守，對於審查者也較容易進行詳細評估。如果使用機率分析方式進行功能評估，審查者需注意是有產生重大風險稀釋的效果存在。

對於具有高度不確定性且無法進行保守設定的模型或參數，利用靈敏度分析評估這些參數或模型對於功能的影響是重要且必要的。審查者應了解敏感分析的目的是為了評估模式中的不確定性與變異性。如果申照者採用了定量評估方式，則審查者應檢查所提供的敏感度分析結果，並確認其敏感度分析所選參數範圍，與參數的變動範圍或不確定性一致，並確認其對功能影響有限。

A.3 功能評估

功能評估是一種風險分析，提出(1)甚麼會發生、(2)會怎樣發生、(3)會產生怎樣的衝擊(Eisenberg et al, 1999)及評估結果與 10 CFR 61.41 的功能目標比較。

A.3.1 功能評估方法

低放射性廢棄物處置場址的功能評估應包含以下基本要件：

- 場址與工程系統的描述；
- 釐清影響處置系統的 FEPs；
- 描述控制低放射性廢棄物核種遷移的過程；
- 公眾群體的劑量計算；
- 不確定性評估。

確定論式與限值分析可以作為簡化評估，但對低放射性廢棄物處置設施之長半化期廢棄物而言，機率式分析可能更合適，長期不確定性也更亦考慮。

1. 功能評估方法步驟

為滿足 10 CFR 61.41 的要求，功能評估方法可以下列 12 個步驟進行：

- (1) 進行初始資料評估以釐清描述低放射性廢棄物處置系統環境所需資訊；
- (2) 描述處置場址的可能演變；
- (3) 描述初始概念模式與參數值或其分布；
- (4) 提出數學模型與選取程式；
- (5) 進行一系列模擬；
- (6) 進行敏感度與不確定性分析；

- (7) 論證深度防禦；
- (8) 評估處置場址合適性；
- (9) 資料與假設之再評估；
- (10) 收集新的資訊與(或)變更設計；
- (11) 更新假設條件；
- (12) 最後決定。

2. 功能評估的角色

功能評估在用以取得執照來接收、擁有與處置低放射性廢棄物，處置設施運轉單位應透過功能評估去證明在合理的保證下，10 CFR 61.41 中保護一般大眾的功能目標可以達成。而且，功能評估的結果可以被用來支持 10 CFR 61.13(f)所要求的深度防禦分析。申照者可以使用功能評估結果來量化障壁能力以及相關的不確定性，以釐清障壁系統對深度防禦安全的貢獻。

在處置設施建造、運轉與封閉後各階段，功能評估可以持續提供論證功能目標可以持續滿足。功能評估對未來的推估提供決策進行的重要依據。

A.3.2 源項

源項模擬的目的在計算從處置單元外釋的核種在時間與空間的演變。申照者可以使用計算的外釋速率做為計算核種傳輸的設施廠外外釋時的輸入條件。源項資訊包含物料存量、物理與化學特徵、及其他與計算廢棄物外釋率有關的性質。廢棄物料存量指的是廢棄物中材質數量與放射性活度量。核種外釋一般透過平流或擴散機制，雖然例如生物入侵與沖蝕造成的直接外釋也是可能的。外釋速率與近場環境條件息息相關。處置設施近場環境的水文與化學條件有可能與自然系統存在極大差異。申照者應該透過 FEPs 分析鑑別核種外釋作用。

申照者需發展源項萃取以提供：

- 包含剝蝕作用對廢棄物型態與工程障壁功能的影響；
- 適當考慮處置單元內與核種在廢棄物與物理相分配有關的物理化學作用；
- 包含與功能有明顯關係的物料存量、剝蝕作用與物理化學作用的時空變化；
- 充分描述對處置系統功能有明顯影響的特徵與作用；
- 系統的演變模擬需足以充分描述處置系統功能。

1. 物料存量

放射物料存量是安全評估的關鍵輸入參數。廢棄物的物理與化學特性將決定核種外釋速率。申照者需提供物料存量描述總活度、濃度、廢棄物之物理與化學形式，以及空間配置。雖然 10 CFR 61.55 的表 1 與 2 列出廢棄物同位素分類，但安全評估的物料存量應更完整，不應受限於此二表。不同廢棄物源流可能存在明顯特性差異，申照者應比較其所推估物料存量與其他地放射性廢棄物處置設施的物料存量差異。

2. 化學環境

源項模式可能需要處置單元的化學環境評估。工程障壁與廢棄物罐的壽命可能影響化學環境。申照者應積極收集場址特性資訊以評估顯著影響核種遲滯與移棲之參數。採用敏感度分析來鑑別重要的地球化學參數。化學環境的萃取應考慮所建立地球化學參數之不確定性與變異。申照者應提供文件說明如何處理化學環境模擬的時空變異。

3. 廢棄物罐

廢棄物罐模擬應考慮劣化作用(例如腐蝕與力學劣化)且應與化學環境演化一致。廢棄物罐的功能也可能影響廢料體的劣化，且在源項模擬中估計核種外釋的重要依據。一般而言，申照者提供的劣化作用分析需包含：

- 相關劣化機制的評估；
- 描述環境條件並包含變異與不確定性；
- 評估潛在未預期功能與可能的未預期功能；
- 提供實驗室、現場或類比觀察的數據來支持預期功能。

4. 廢棄物形式與廢棄物類型

廢棄物形式的功能模擬應考慮各種廢棄物形式的劣化作用並與處置單元的化學環境演化一致。核種外釋涉及許多複雜機制，實驗室試驗可以協助掌握部分重要機制，例如管柱試驗對了解入滲地下水使廢棄物溶解外釋之機制有幫助，但現場實際流速與試驗流速的差異將影響評估結果。

5. 水相外釋

水相外釋可分為(1)淋洗外釋、(2)擴散外釋、(3)溶解外釋、(4)分離外釋。申照者應考模擬與實驗室結果比較。

6. 氣相外釋

C-14, Kr-85, Rn-222, H-3, and I-129 需考慮氣相外釋。又可分為氣體產生與氬氣散發。如果氣相外釋是重要的核種外釋路徑，申照者應進行氣體傳輸模擬。

7. 直接外釋

人為直接外釋在無意闖入者入侵評估需考慮。直接外釋可能來自於植物吸收、生物干擾、自然作用(例如斷層作用)、地形作用(例如侵蝕)。

8. 生物加強外釋

生物加強外釋可以視為間接與直接作用，例如挖掘動物破壞工程障壁早成間接外釋。生物加強外釋通常不是主要外釋路徑。

A.3.3 核種傳輸

本節重點在申照者發展的核種傳輸模型中所使用的假設、資料與模型(包含概念與數學)。需確認核種傳輸模擬與源項外釋在空間與時間的適當整合，且與氣候及入滲模擬、生物圈與受體特徵一致。

1. 地下水傳輸

附表 A.5 為與地下水傳輸路徑有關之參數與作用，審查人員可以利用附表 A.5 去評估申請者的核種傳輸模擬是否完整。地下水的傳輸模擬會因為許多原因改變，使模擬工作變得有挑戰性，例如：

- 與系統有關的複雜水文、地質、物理與化學交互作用；
- 場址特殊的水流與傳輸特性使模擬由處置設施源項初始外釋經未飽和層到地下水系統；
- 使用有限的特定場址資料描述該特殊地下水流系統的 FEPs；
- 數值分析技巧造成人為效應使結果偏差，例如數值延散。

附表 A.4 與地下水傳輸路徑有關之作用與參數

水質地質特性
地層、地質構造(例如斷層) 地下水流邊界、地下水補注區或出流區 土壤與岩石特性(例如孔隙率、結構、礦物) 裂隙與快速通道(例如分散裂隙) 地下水水量與水質
物理作用
平流、延散、擴散 沉積、放射衰變與子核種生成
地球化學作用或特性
地下水組成、地球化學環境(例如 pH、 Eh、有機物含量) 吸脫附、沉澱、錯合 再懸浮、氧化還原反應、膠體
設計特徵
井深度、開篩長度 物理組件(例如工程障壁)

(1) 模擬未飽和層

模擬未飽和層的水流與核種傳輸連結低放射性廢棄物處置設施的核種外釋與飽和層(註：這是由於本報告考慮的是淺地表處置)。申照者必須了解未飽和層水力傳導係數如何因土壤含水量與孔隙水壓而改變。入滲也會因為間歇式的自然降水而隨時間而改變。

面對未飽和層複雜的非線性問題，可以採用階級式的方法，先採用簡單的模擬再逐步增加複雜性。一般而言，申照者要使用複雜的方法模擬前提是該複雜性有足夠支援。然而，在滾動的模擬過程申照者可以逐步增加複雜性來檢驗該複雜性是否顯著。如果是顯著的，便需要去發展支援工具或是採用較保守的方法。

(2) 模擬飽和層

申照者必須有清楚的認知會有多少的核種會由未飽和層進入飽和層。申照者要完成充分的飽和層地下水傳輸評估，需要對地下水流場、飽和層的特定核種外釋率、與影響核種傳輸的現象(例如吸附、平流、擴散、延散與放射衰變)。飽和層的核種濃度最終表示成二種方式：直接攝取的地下水中劑量與透過攝取使用受污染地下水生產的食物。

2. 地表水傳輸

核種進入地表水的機制包含地下水出流、大氣傳輸沉積在地表水體與漫地流(例如透過侵蝕)。如果地表水傳輸是公眾受體的可能曝露路徑，申照者應評估場址水文與化學條件提出簡化的地表水流與傳輸代表。進入地表水體的核種可透過不同過程傳輸，例如水流、泥沙輸送與生物擾動。平流與延散是最重要的二個傳輸機制，特別是溶解核種。

3. 大氣傳輸

除了氣相外釋核種傳輸外(例如 C-14, I-129, Kr-85, Rn-222, H-3)，應考慮顆粒外釋的直接外釋(例如風侵蝕作用)。大氣傳輸模擬的重要考量是大氣作用的運動尺度，例如風向與風速的改變在不同時空尺度會有極大的變化。通常低放處置設施大氣傳輸考慮場外人類受體的空間尺度為不到一公里或數十公里。場外受體的年劑量評估時間尺度為可到 10,000 年。

3. 生物傳輸

生物傳輸不包含已經由處置設施外釋的核種再由植物吸收與生物圈內的傳輸。考慮的是生物造成的核種外釋。例如蘇聯薊(風滾草)有很長的根系，在秋季時植物乾枯且脫離地表，造成處置設施放射性物質垂直與橫向的移動。

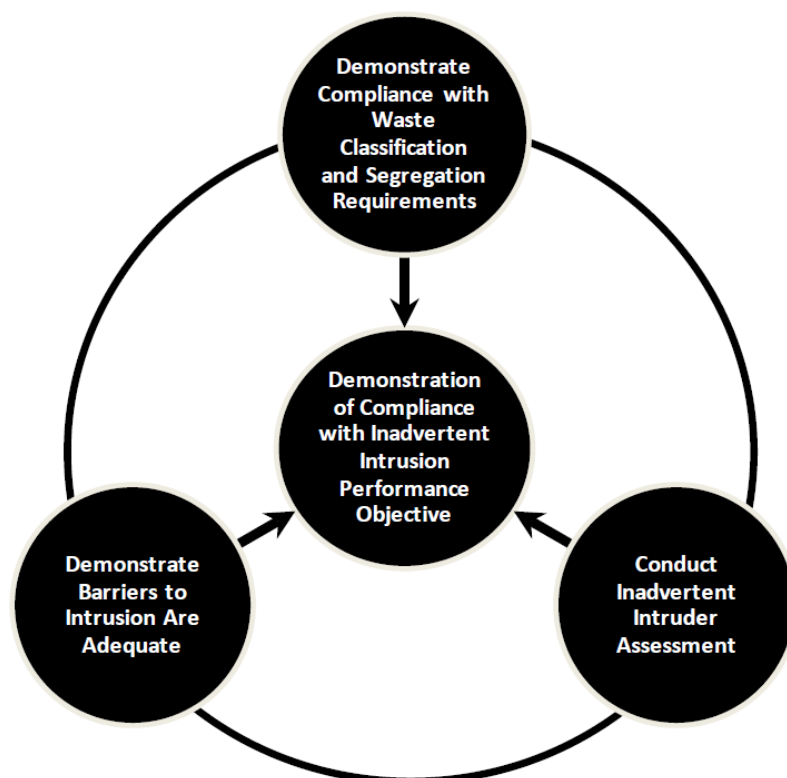
A.3.3 生物圈

在功能評估中，生物圈是受體存在的物理環境。曝露路徑分析與曝露個體劑量測定模擬(即劑量評估)是人類曝露劑量評估最重要的二項工作。申照者需考慮物理環境的未來變遷可能改變受體的行為以及場址物理環境。如果未來氣候有可能顯著改變人類行為，申照者需要考慮在其他目前氣候場址的行為可類比於所評估場址未來預期氣候，因為變化的參數是無法控制的，且未來人類演化是難以預測，申照者只能依據目前已知數據，不需要進行預測。

A.4 無意闖入評估

本節內容在於說明處置場封閉後，針對無意闖入者的相關保護規範，有關無意闖入者的定義可參考 10 CFR 61.2，對於蓄意闖入者的相關保護作為則不予以考慮。所述規範必須闡述無意闖入者的合理防護作為，並符合 10 CFR 61.42 規範之預防闖入功能目標。附圖 A.3 說明了技術分析必須能證明符合 10 CFR 61 規範之預防闖入功能目標，所述技術分析包括了(1)廢棄物分類與隔離(符合 10 CFR 61.58)、(2)適當的預防闖入障壁設施、(3)意外闖入者其曝露之放射性劑量不得超過 10 CFR 61.42 規範劑量之評估。

本節描述申照者須提供的資訊，及審查者須針對無意闖入相關分析技術所進行的評估。A.4.1、A.4.2 與 A.4.3 節分別描述「廢棄物之接受條件」、「無意闖入之障壁設施」與「無意闖入之評估」所需進行的執照申請與審查相關資訊。



附圖A.3 相關技術分析必須能證明符合10 CFR Part 61規範之預防闖入功能目標，包括了(1)廢棄物分類與隔離、(2)適當的預防闖入障壁設施與(3)無意闖入評估

A.4.1廢棄物之接受條件

針對陸上處置之廢棄物接受條件可參考自 10 CFR 61.58，並須確認：(1)廢棄物的接受準則、(2)廢棄物特徵的描述方法、(3)廢棄物進入處置場前的接收確認程序。審查者的審查重點在於廢棄物的接受是否滿足廢棄物的接受準則。依 NUREG-2175 技術報告第 9 章有關廢棄物接受條件相關審查導則，審查內容應包括：(1)需評估廢棄物接受準則是否合宜、(2)需確認申照者已完成廢棄物特徵識別之可行方法，以及適當的廢棄物分類程序，確保符合接受準則的要求。

A.4.2無意闖入之障壁設施

防止闖入之障壁設施是在於禁止所有與廢棄物(例如，C 類廢棄物)之可能接觸，障壁設施必須能確保意外闖入者一旦處於放射性曝露之條件下，其受到污染的劑量仍低於 10 CFR 61.42 所規範的限制值。防止闖入之障壁設施與監管並不相同，但可視為監管深度防禦之一部分。防止闖入之障壁設施其定義為：(1)使廢棄物有足夠的覆蓋深度，避免所有與廢棄物之可能接觸，確保無意闖入者的放射性曝露劑量低於規範值、(2)工程結構能提供無意闖入者足夠的保護。例如 61.52(a)(2)在於說明 C 類放射性廢棄物的處置深度至少要有 5 m 的覆蓋深度，或者其障壁設施的保護功能至少能維持 500 年。

申照者若根據技術分析(例如 10 CFR 61.13 所規範者)的結果發展廢棄物接受準則，仍需要識別廢棄物的滲出可能性，及相對應的障壁設施以確保對無意闖入者的保護。無意闖入者的評估工作必須能驗證障壁設施可維持至少 500 年的放射性曝露限制功能(針對 C 類放射性廢棄物)，或者如 10 CFR 61.42 所規範之放射性曝露限制。所述評估工作應仔細檢查場址所屬之特定條件，並依放射性廢棄物種類，確認適當的障壁設施需求。無論是障壁設施或是監管作為，其目的均是避免廢棄物與外界接觸，但二者的機制並不相同。所謂監管是透過下列方法以避免處置場遭闖入或被使用，包括法律手段，例如土地使用限制，及環境偵測、定期監測、最少保管或其他經由委員會決定之事項。

闖入者障壁屬處置設施與處置場的被動管理作為，其目的在於提供無意闖入者在處置場關閉後，於該處從事各種合理且可預期之活動時的保護。闖入者障壁包括足夠的廢棄物埋置深度或工程結構，針對具移動特性之放射性核種其可能透過地下水傳輸路徑對無意闖入者造成之可能影響，相關的闖入者障壁亦必須加以考量。

為能描述陸上處置設施已包括了無意闖入有關之設計特徵，10 CFR 61.12(b)(2)要求提供具體的技術資訊。申照者必須能清楚識別何謂闖入者障壁，並且能描述其在防止廢棄物與外界接觸所能發揮之功能，並確保放射性曝露情況發生時，仍能符合 10 CFR 61.42 的規範。考量處置設施可能同時處置多種放射性物質，及闖入者障壁須視處置場現地條件予以因地制宜，故闖入者障壁之相關接受規範與導則並不根據廢棄物所含放射性物質種類加以律定；循此，申照者所提供的文件，必須清楚且完整地描述障壁功能與相關支援的技術基準。

1. 闖入者障壁之風險告知評估

鼓勵申照者以風險告知評估法進行意外闖入障壁之選擇與設計，並據以提供特定場址之闖入者障壁防護技術基準。風險告知評估法是基於災害等級與災害發生之可能性來加以定義。針對具有相對較高災害風險之處置設施，其需要較堅實的障壁設施，及額外的障壁功能準則以確保其承受較高災害風險之能力。「風險」一詞之於闖入者障壁防護，意指風險的可能性，相關的分析與諮詢行動均在於確保不會發生真實的高風險事件。美國核管會(NRC)將考量處置設施在那個位置會有潛在的闖入者災害，及何謂高風險的災害潛勢，例如處置設施在監管期間，倘若放射性劑量超過 50 mSv/yr (5,000 mrem/yr) 即視為高風險。申照者必須根據曝露影響的減輕程度，評估每一個闖入者障壁防護的重要性，並將障壁的重要性區分三個等級：

(1) 重要性低：將原本可能曝露的劑量由 5 mSv/yr (500 mrem/yr)降至更低；

(2) 中等重要：將原本可能曝露的劑量由 5 至 50 mSv/yr(500 至 5,000

mrem/yr)降至 5mSv/yr(500mrem/yr)以下，且至少是原劑量的 50%以下。

- (3) 高度重要：將原本可能曝露的劑量由高於 50 mSv/yr (5,000 mrem/yr) 降至 5 mSv/yr (500 mrem/yr)以下。

申照者必須針對闖入者障壁防護的功能與重要性提供相關技術基準，所述技術基準必須評估障壁發揮其功能之工作年限，及在年限內的可能變化。

審查者依上述申照者提供的技術基準進行審查，審查重點在於技術基準是否符合障壁重要性及其欲達到的功能目標，NUREG-2175 第 4.3 節將討論無意闖入者評估之相關導則。

2. 符合闖入者障壁防護功能之技術基準

鑒於闖入者障壁防護的工作年限與長期劣化現象的評估，實具不確定性，故本章節針對闖入者障壁防護功能之技術基準所需提供的資訊，整理以下幾點供申照者參考：

- (1) 闖入者障壁防護之設計、特徵與功能的完整描述；
- (2) 闖入者可能曝露之場址與環境條件的完整描述；
- (3) 潛在劣化機制之完整描述，包括所處環境對障壁設施造成的綜合與協同效應(combined and synergistic effects)；
- (4) 若採數值分析評估障壁設施功能，須完整描述所選數值模式之適用性；
- (5) 障壁設施功能評估與闖入者障壁設計之數值分析，及參數之不確定性評估；
- (6) 參數與組成各部之敏感度分析，以釐清障壁設施的可能劣化情況；
- (7) 提供闖入者障壁防護功能之評估模式(型)，例如相似(模型)、實驗，或是簡單的工程計算以證明結果的合理性。；

(8) 闖入者障壁防護設施之設計、分析與執行等相關工作之品質確保(QA)與品質控制(QC)作為。

此外，申照者應試著提出各種證據以說明障壁設施的功能可維持至少500年，並如 NUREG-2175 章節 2.2.3 所討論者，支援的模式(型)可以是各種不同的形式，包括相似(模型)、室內實驗、現地實驗、正式或非正式的專家鑑定與工程計算等。

在運轉期、封閉觀察與維護或是監管期間，可透過偵測方式掌握闖入者障壁之功能性。所述偵測包括處置設施周圍環境的偵測，與處置設施本身功能的偵測；經由設計與事先埋設的感測器等非破壞性偵測技術，可用在破壞後期行為的監測。上述的偵測技術或是設備，其具備的偵測功能應盡可能單純且易於維護。

審查者必須確認申照者所提供的技術基準必須與其所提的障壁設施重要性是相呼應的，且必須考量到相關的不確定性，並確保以下兩點：(1)所發展的技術基準必須符合闖入者評估結果；(2)技術基準的品質與完成度。

3. 闖入者防護之工程障壁

處置設施採用闖入者防護之工程障壁時，障壁設施其在禁止廢棄物的被接觸與限制放射性的曝露等被動功能必須納入闖入者評估考量，以確保其符合 10 CFR 61.42 的要求。闖入者防護之工程障壁的功能評估，必須考慮障壁設施被破壞的合理性與障壁設施潛在的劣化，尤其是在過了監管期後，已不能依賴偵測與維護手段來追蹤並確保障壁設施的功能。申照者可在下列文獻中尋找相關說明資訊：

(1) NUREG-1757, Revision 1, Volume 2, Section 3.5.4 and Appendix P (NRC, 2006)一般工程障壁的劣化機制與功能；

(2) NUREG-1757, Revision 1, Volume 2, Section 3.5.5 與闖入者工程障壁之應用性有關的文獻與導則；

(3) NUREG/CP-0195 (NRC, 2011)附錄中所列的文獻與電子資訊。

由人類或是自然事件造成的破壞事件必須被考量與評估，例如廢棄物與處置設施可能會遇到廢棄物在堆置過程中，因廢棄物的孔隙率並不全然相同，繼而產生的沉陷問題，或是覆蓋層在長時間條件下之物理特性變化等。無論是廢棄物的沉陷或是覆蓋層的物理特性變化，將可能造成覆蓋層形成小窪地、差異沉陷、應力裂縫或開口，導致覆蓋深度的不足。

一般而言，工程覆蓋層是藉由植被來抵抗侵蝕作用，植被層可能因為乾旱、植物病害而遭致破壞。此外，因為溫度變化與降雨，所導致的火災、暴風雨與生態演進等，均可能影響植被層其抵抗風、水的侵蝕作用。據此，必須根據植被層最小侵蝕率來評估覆蓋層在長期時間下的覆蓋厚度變化，例如 0.5 mm/yr 的植被層侵蝕率條件下，經 1,000 年後，覆蓋層將減少 0.5 m。

A.4.3 無意闖入之評估

10 CFR 61.13 要求提出無意闖入者評估，以說明無意闖入著的曝露劑量不會超過 10 CFR 61.42 所規範者。無意闖入者評估的主要工作，是要評估處置場在脫離監管後，透過定量分析探討闖入者的放射性曝露劑量。闖入者進入處置場所可能從事的活動，包括農業、住宅建築、資源開採等。針對無意闖入評估之執行程序，詳如附圖 A.4，就好比效能評估程序一般，主要是在評估下列問題：(1) 甚麼會發生、(2) 會怎樣發生、(3) 會產生怎樣的衝擊

A.4.4 監管控制

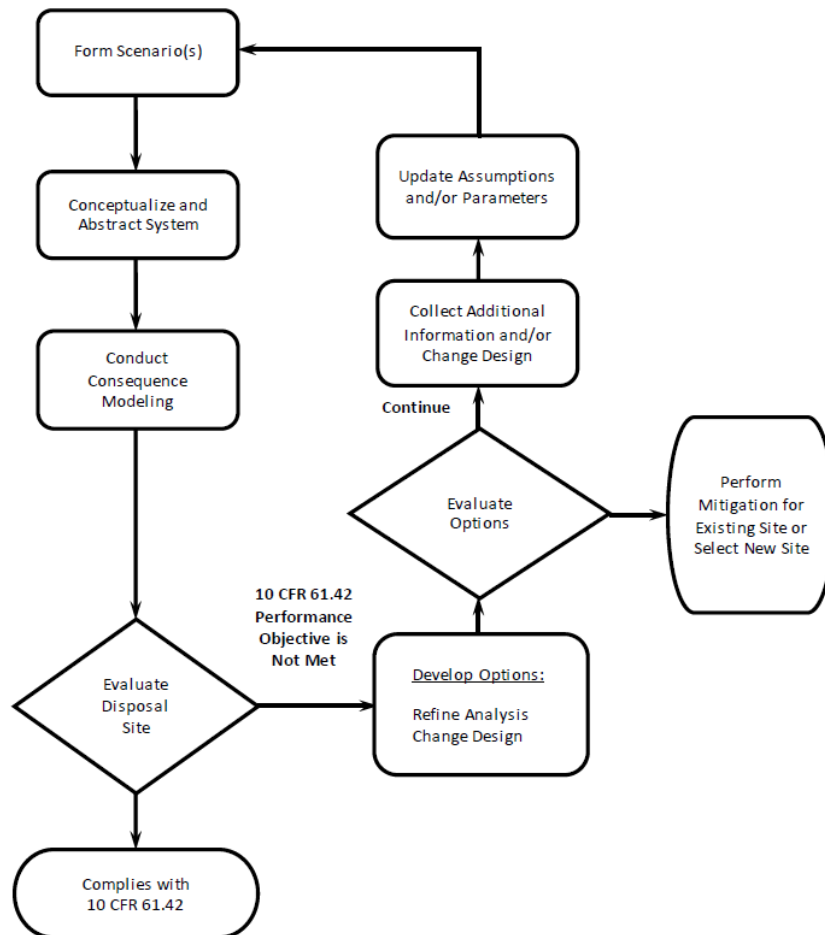
申照者必須根據 10 CFR 61.23(g) 提供合理的保證，以確保監管控制可提供足夠的保護，針對不同的保護目標與對應的規範如下：

1. 一般大眾的保護係根據 10 CFR 61.41。
2. 個別闖入者的保護係根據 10 CFR 61.42。

3. 曝露的輻射量標準值必須符合 10 CFR 61.43。

4. 廢棄物與處置場的長期穩定係根據 10 CFR 61.44。

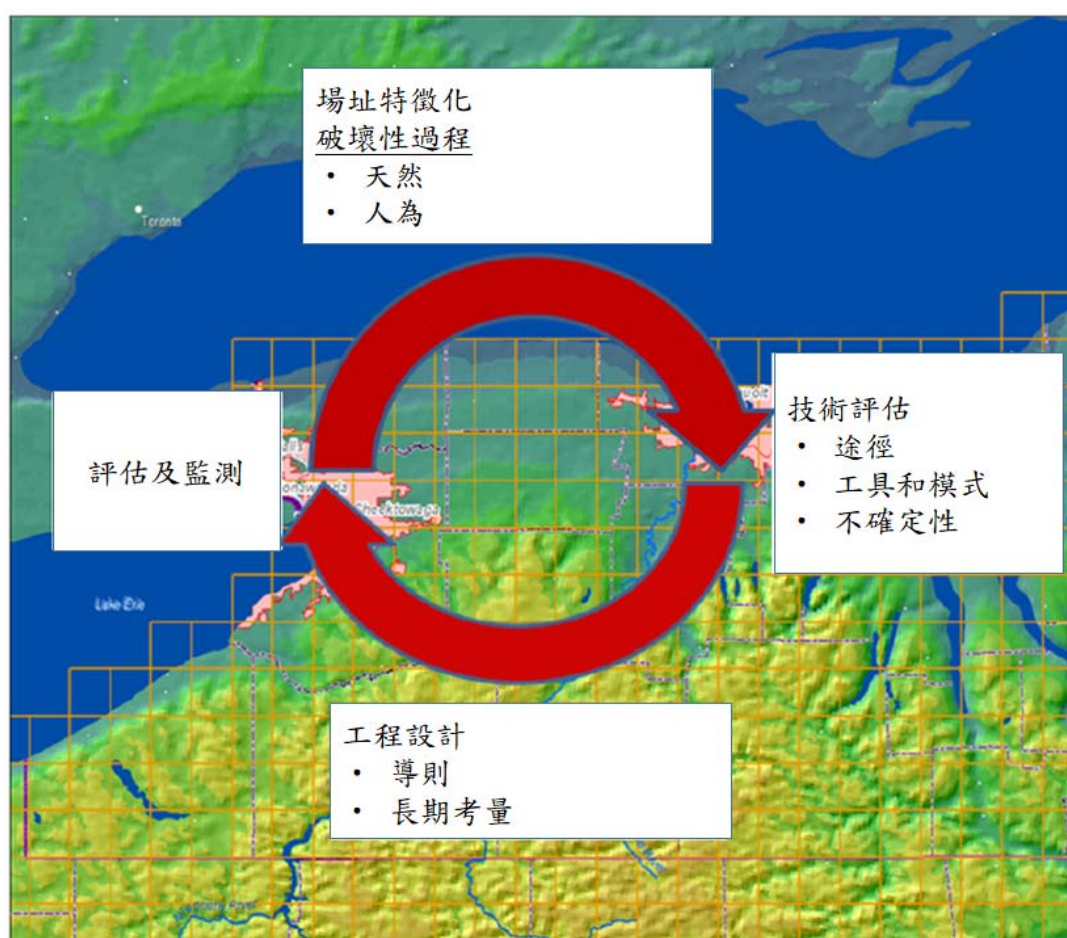
監管控制是用以限制闖入者進入處置場，或是處置場在移轉給業主後的使用方式與期限(依 10 CFR 61.59 的規範，時間不超過 100 年)。監管控制的程序包括法律手段，例如土地使用限制，及環境偵測、定期檢測、最少保管或其他經由委員會決定之事項。監管控制區分主動監管期與被動監管期，主動監管期不超過 100 年，業主可採偵測、監測與保管等措施作為主動監管的管制作為，且申照者必須確保所有的監管控制作為必須是經久耐用，且能防止無意闖入的情況發生。主動監管期結束後，即為被動監管期，此期間的管制作為相對較少，基於被動監管期間可能採法律手段限制土地的使用，故視無意闖入的狀況不太可能發生，但不排除在 100 年後(根據 10 CFR 61.59)仍可能發生無意闖入的狀況。



附圖A.4 10 CFR 61.42 所規範之無異闖入者評估分析流程範例

A.5 場址穩定性分析

本節重點介紹法規要求與穩定性相關的資訊，包括侵蝕、洪水、地震和其他破壞性作用的潛在影響。本節還涉及廢棄物的穩定性以及可能在特定的低放射性廢棄物處置設施中使用的其他工程特徵。申照者識別並描述潛在的破壞性作用後，可使用不同的技術評估方法了解破壞性作用對於處置場功能目標的影響。申照者可使用技術評估是否可以減輕危害。最後，透過工程障壁減輕危害造成的影響。長期評估和場址監測可用於確認是否達到場址穩定。附圖 A.5 概述了場址穩定性分析的主要內容。

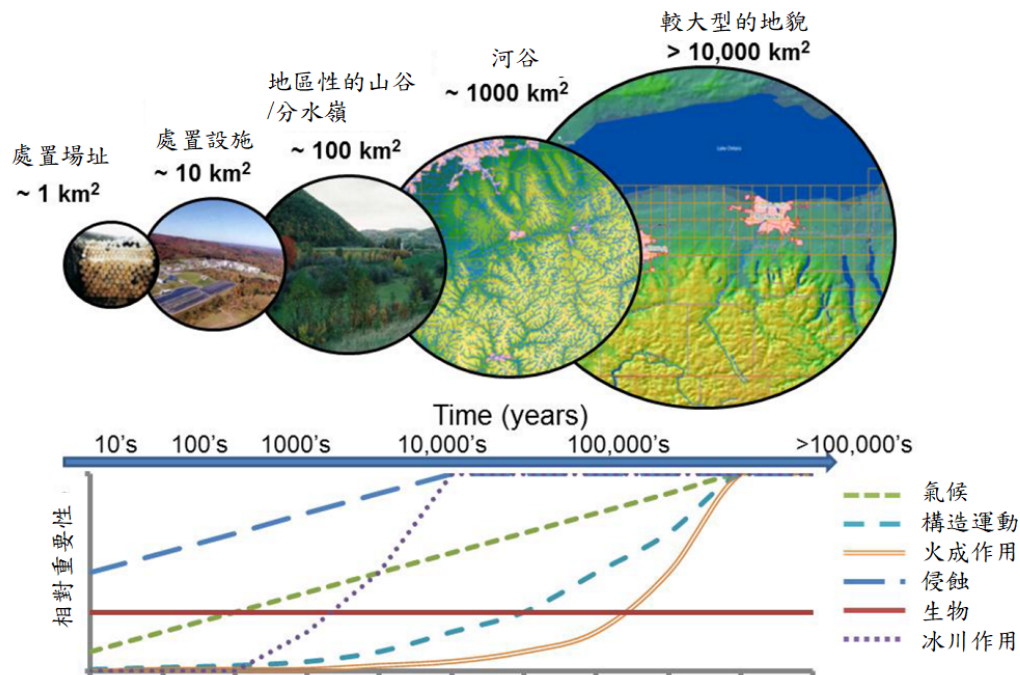


附圖A.5場址穩定性分析的主要內容

場址穩定性分析三個重點：(1) 廢棄物的穩定性、(2) 工程處置設施的穩定性以及(3) 處置場址的地質/地貌穩定性。場址穩定性評估所需的分析範圍將主要

由廢棄物的類型來決定，其次是處置系統。廢棄物類型(即短半化期或長半化期)將決定適合場址穩定性評估的時間範圍，申照者應評估哪些 FEPs 類型。附圖 A.6 為 NRC 工作人員對於場址穩定性之綜合看法，各種作用在時間和空間尺度上對場址穩定性的影響，但可能因場址位置或其他條件而有些許不同：

1. 近期(附圖 A.6 左側)，侵蝕預計影響穩定性的主要作用，其次是生物和氣候。正確選擇場址，火成和構造作用預計影響很小。近期不會發生冰川作用。
2. 中期(附圖 A.6 中間)，侵蝕仍然是最重要的作用，但氣候變化可能影響侵蝕或導致冰川作用。
3. 長遠(附圖 A.6 右側)，預計大多數作用對於穩定性評估都很重要。隨著處置時間拉長，發生大型低頻地震或火山事件的可能性增加。
4. 隨著時間的推移，各種作用對場址穩定性的整體影響也隨之增加，場址的穩定性會受到一個或多個作用影響。



附圖A.6 NRC對於LLW處置之各種地貌作用相對重要性示意圖(圖上的時間與廢棄物危害的持續性相當)

A.5.1 破壞性的作用和事件

具有破壞性的自然和人為作用可能會影響廢棄物處置系統的長期穩定性。申照者應提供相關資訊，審核人員應對識別潛在的破壞性作用進行評估。

1. 自然作用

近地表環境受到各種自然事件的影響而不斷改變，這些事件可以相互影響、組合，此過程亦為最有可能影響處置設施穩定性的因素。本節介紹可能影響處置設施穩定性的類型，包含：地貌、構造、生物或其他可能影響處置設施的穩定性的事件。

(1) 地貌作用

地貌作用諸如塊體崩壞(mass wasting)、塌陷(slumping)、坍方(land sliding)、侵蝕(erosion)、滲穴系統(sinkhole formation)和風化(weathering)等。NRC 工作人員認為所有破壞性作用中，侵蝕作用(河流和風蝕)最可能成為影響大多數處置設施長期穩定性之重要因素。一般用於評估地貌作用的方法包含三個步驟：

- a. 識別過去的地貌作用並根據地層和地貌記錄估算其速率；
- b. 透過歷史記錄和現地觀察(約過去 100 年)，確定當今的地貌作用並估算其速率；
- c. 預測未來的作用和速率，解釋不確定性。

Schumm 和 Chorley(NRC, 1983)確定超過 25 個地貌作用可能對於處置場造成危害。地貌危害評估通常包括場址和場址周邊地區，場址周邊地區的評估可能會提供有關超出場址但最終影響到場址的作用。例如，處置場附近的河道遷徙速度可能說明河道最終遷移到處置場址。因此，申照者應該利用周邊地區的資訊來幫助估計處置場址當今沒有發生的作用之速率和程度。然而，場址亦可能位於沉積環境中。透過長時間覆

蓋層處置設施，自然環境更加有利於長期穩定性，因為自然透過覆蓋層處置設施來增強了對環境的隔離。

(2) 構造作用

斷層、地震或火山活動等構造作用可能影響處置設施的穩定性，但影響程度通常不如地貌作用顯著。申照者應該使用選址和特徵化作用來避免高度構造活動區域。申照者應評估潛在地質作用(例如：斷層或地震)如何影響場址和處置設施，且應回顧地震歷史記錄，包括發震週期、震級和持續時間，以及有助於產生最大地表加速度的因素，例如：場址地質構造、地層和岩性。申照者應評估預測的地震事件對於廢棄物隔離的影響。審核人員應各方面評估地震事件對於廢棄物隔離有關之任何能減輕處置系統潛在影響的設計。NUREG-1804(NRC，2003)提供了關於審查廢棄物處置地地震事件相關資訊的導引。

(3) 其他破壞性作用

其他自然作用可以顯著影響處置設施的穩定性包含(但不限於此)氣候作用和氣候變化、生物作用和火災。氣候和氣候變化影響處置場址穩定性取決於場址的位置，氣候變化可能導致降水大小和持續時間發生變化、凍融循環次數的改變或其他影響。

對於常規之低放射性廢棄物濃度，申照者應避免不必要的嚴重氣候變化猜測(例如冰川作用)。對於這類低放射性廢棄物，500年後剩餘濃度的危害預計相對較低。對於長半化期之低放射性廢棄物濃度，500年後剩餘存量的危害可能較大，申照者可能需要評估氣候變化對處置場址的影響，同時考慮合理保守的情節。

生物作用會影響廢棄物的穩定性和處置系統的穩定性。生物降解會影響廢棄物容器的穩定性並導致廢棄物變質，進一步導致廢棄物處置系統的不穩定。

低放射性廢棄物處置設施通常對火災反應不敏感，但火災可能會改變場址土壤和其他覆蓋層材料的物理性質。然而，美國能源部 Hanford 場址的研究人員發現火災對特定覆蓋層材料的影響很小(Ward et al, 2009)。

2. 人為作用

人類活動可能直接或間接影響場址的穩定性，直接影響的例子是在處置設施上建造住宅，間接影響例如酸雨影響材料的耐久性。另外，無意闖入評估詳見(無意闖入評估章節)。

3. 地陷與差異沉陷

地陷與差異沉陷對於所有廢棄物處置類型的影響都至關重要，10 CFR Part 61 通過之前，差異沉陷是早期處置場功能失效的關鍵模式，這會造成障壁功能產生不利影響(例如，工程覆蓋層開裂、覆蓋層上形成凹陷導致局部積水)。地陷與差異沉陷可能來自於各種不同的作用和事件，例如：

- 廢棄物或回填有過多的空隙；
- 缺乏壓實或不適當的壓縮廢棄物、回填、工程或天然材料；
- 廢棄物、工程障壁和其他結構的劣化；
- 不當安置廢棄物；
- 天然材料的改變(例如，地下區域的崩塌)；
- 處置場址或工程覆蓋層的負載過度或不均勻；
- 處置系統與水的相互作用。

NUREG-1199(NRC, 1991)和 NUREG-1200(NRC, 1994)詳細介紹了地陷與差異沉陷問題，這些報告詳細介紹了相關的場址特點、施工和運營階段數據、實驗和測試數據、建模和補救措施。

A.5.2 技術評估

低放射性廢棄物處置穩定性之技術評估，包含廢棄物容器和其他工程障壁在內的處置設施以及場址進行評估。評估的詳細程度和類型將取決於廢棄物、場址和設施的複雜程度。

1. 可用的工具和程式

許多工具或程式可供申照者用於支持場址穩定性分析，Walter 和 Dubreuilh(2007)針對模擬工程覆蓋層功能和劣化的計算方法進行評估，其評估 21 種程式包含水文、侵蝕和雜項程式。侵蝕程式被進一步分類為廣義侵蝕程式、局部侵蝕程式和塊體崩壞程式，廣義侵蝕程式可以估算經由水或風蝕而造成的平均土壤流失量，局部侵蝕程式模擬特定場址的土壤流失，有些可以模擬地景演變，附表 A.6 彙整侵蝕和塊體崩壞程式 (Walter and Dubreuilh, 2007)。

科羅拉多大學和合作夥伴建立了共同表面動力學建模系統(CSDMS, Community Surface Dynamics Modeling System) (Syvitski 等, 2011)，CSDMS 包含 160 多個模型和工具，該系統包括 66 個程式和 41 個與地面建模相關的工具。

附表A.5長期功能評估的侵蝕和塊體崩壞程式，其適用性和局限性(Walter and Dubreuilh, 2007)

Code	流程描述	覆蓋層損失和地形變化的計算
RUSLE	基於經驗使用測試情節的相關性，需要經驗數據來模擬未來的覆蓋條件	計算平均土壤流失量，計算覆蓋厚度變化所需的獨立計算
EPIC	基於經驗使用測試情節的相關性，需要經驗數據來模擬未來的覆蓋條件，但計算土壤水分平衡比RUSLE更通用	計算平均土壤流失量，計算覆蓋厚度變化所需的獨立計算
WEPP	基於物理的侵蝕方法，允許根據基本屬性表示未來土壤覆蓋條件	計算多個山坡平均土壤流失量，計算覆蓋厚度變化所需的獨立計算量
EUROSEM	基於物理的方法應用二維地形表面，允許表示複雜的地形，包括地形的未來變化	計算具有固定地形的模型域內土壤流失分佈，計算表面高程和覆蓋層厚度變化所需的獨立計算
LISEM-Gullies	基於經驗的方法來處理二維地形表面上的土壤流失和溝渠形成，但僅限於單一風暴事件	計算單一風暴事件期間的地形和相關的地形變化，評估長期功能所需的多個模擬
SIBERIA/CHILD	於物理的方法應用於二維地形表面，允許表示複雜的地形，包括地形的未來變化	根據土壤流失和沈積來計算海拔和地形的變化，包括土壤的潛變和塌陷
WESS	基於經驗的風蝕程式，有關有限的流程文獻	計算區域平均土壤流失量，計算覆蓋層厚度變化所需的獨立計算
WEPS	基於物理的風蝕程式，有關具有代表地形和防風效果的能力	計算區域分佈土壤流失量，計算覆蓋層厚度變化所需的獨立計算量
LISA	簡單且基於物理學的潛在滑動之隨機輸出計算	計算潛在滑動，但不計算地形變化
DLISA	簡單、確定性、基於物理學的潛在滑動計算	計算潛在滑動，但不計算地形變化

2. 評估方法

分析場址穩定性的場址、設施和廢棄物特性所使用的工具和評估技術可能因場址而異，申照者可以使用各種技術評估方法來執行場址穩定性分析。場址穩定性評估應包括以下一般步驟：

- (1)場址描述：提供與穩定性有關之場址、設施和廢棄物特徵的描述。
許可證持有者至少必須提供 10 CFR Part 61Subpart D 所要求的資訊。
- (2)整體初始放射性風險篩選：證明潛在的不穩定性經過保守評估，放射性物質外釋不會導致不必要之風險(滿足 10 CFR 61.41 和 10 CFR 61.42 之功能目標)。
- (3)篩選作用和事件：篩選作用和事件，根據機率、結果或風險的規範進行評估。
- (4)確定評估範圍：應使用無法從場址穩定性分析中篩選出的 FEPs 來確定評估的範圍。
- (5)特徵化資訊：使用場址描述來確定哪些數據可用於評估，並確定重要的不確定性來源。
- (6)進行評估：可採用基於模型的方法(長半化期廢棄物)、基於設計的方法(短半化期或長半化期廢棄物)或兩者的組合來執行評估。大多數評估都將包含以下步驟：
 - a.基於設計：定義設計目標；開發或選擇設計；記錄並提供假設的基礎；特徵化或參數化設計；評估設計的預期功能；為設計提供支持；必要時重複迭代。
 - b.基於模型：定義模型目標；開發或選擇概念模型；記錄並提供假設的基礎；開發數值模型；參數化模型；校準模型；

驗證模型；特徵化不確定性；提供模型支持；必要時重複迭代。

(7)整合：場址穩定性評估可能需要 10 CFR 61.41 要求的功能評估和 10 CFR 61.42 要求的無意闖入評估相結合。

(8)迭代(如有必要)：2 個(或以上)場址穩定性評估可能需要一定量的迭代。

3. 不確定性

不確定性是近地表處置設施的穩定性評估中必然會存在的因素，應在評估中加以說明。機率評估技術通常更易於解釋不確定性，儘管 NRC 的工作人員並未規定特定的技術。場址穩定性評估應考慮 NUREG-2175 第 2.0 章中描述的一般不確定性類型(如數據、模型)。

A.5.3 用於場址穩定的工程障壁

申照者應提供有關工程障壁的資訊，審核人員應評估工程障壁確保場址的穩定性。工程障壁系統包含襯套(liners)、覆蓋層(covers)或帽(caps)、和/或橫向障壁或牆壁。處置系統中，地表工程障壁或覆蓋層是最常用的障壁，通常被認為是最重要的組成之一。

1. 現有導引

障壁通常被設計為抑制水與廢棄物接觸、限制放射性核種的外釋(例如透過地下水、生物侵入或侵蝕)，或者減輕無意闖入者的劑量。NRC 工作人員期望處置系統主要工程障壁類型將是工程覆蓋層。工程覆蓋層可以進一步分為常規(阻力)覆蓋層和水平衡(蒸散)覆蓋層，以下將進一步討論這些類型的覆蓋層。

NUREG-1757 Volume2，第 3.5 節為設計和評估工程障壁的風險知情分級方法提供了導引(NRC，2006)。以下是 NUREG-1757 有關工程障壁技術基

礎的主要步驟，這些步驟適用於用於證明符合 10 CFR 61.41 和 10 CFR 61.42 要求的工程設計障壁以及場址穩定性：

- 描述工程障壁的設計和功能；
- 提供技術基礎，即障壁的功能將允許申照者證明滿足功能目標，並且考慮到劣化機制；
- 描述用於評估障壁功能和障壁設計之參數和模型的不確定性；
- 證明數值模型對工程障壁功能估計的適用性；
- 執行參數或組成之敏感性分析以識別工程障壁的劣化程度會導致不符合規定；
- 為工程障壁功能提供模型支持(例如模擬、實驗、工程計算證明結果的合理性)；
- 為工程障壁的數據收集、設計、構建和分析提供 QA/QC(品質保證/品質管制)。

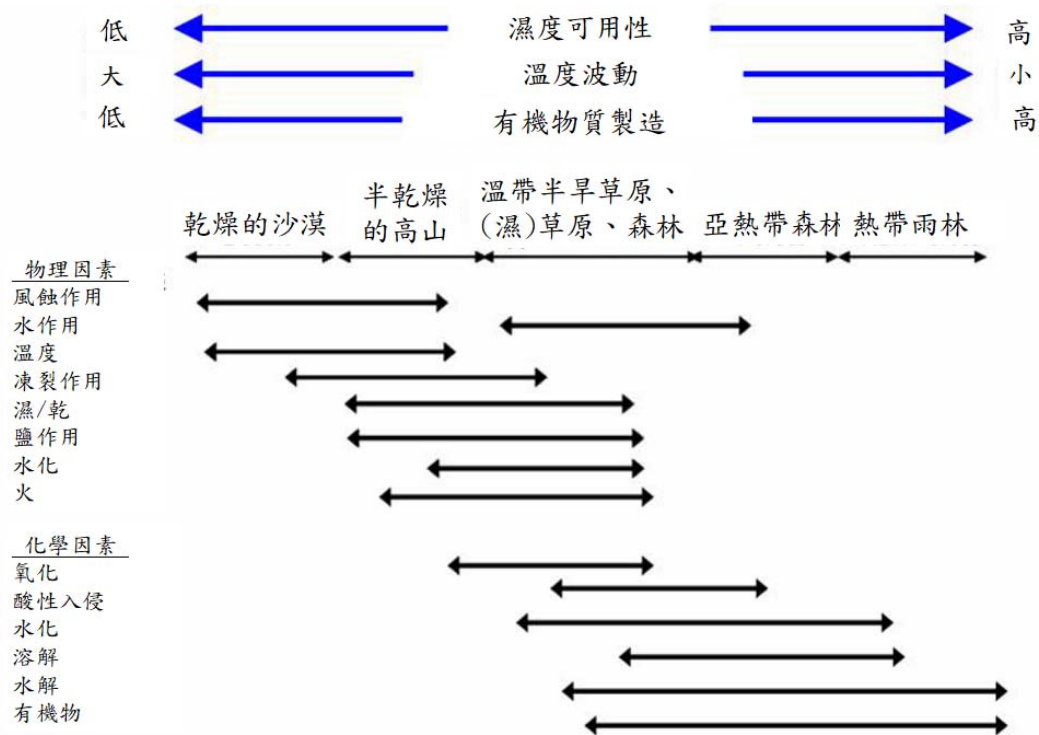
侵蝕防護的保護層是確保處置設施穩定性最常見障壁之一，尤其是對長半化期廢棄物進行近地表處置的障壁。發展廢棄物處置侵蝕防護工程障壁的主要因素如下：

- 選擇適當的降雨和洪水事件；
- 選擇合適的參數來確定洪水流量；
- 使用適當(和/或)保守的方法計算洪水流量；
- 計算與設計洪水流量相關的適當洪水水位和洪水；
- 使用適當的方法來確定抵抗設計排放所需的侵蝕保護；

- 為拋石層(riprap layer)選擇耐用的岩石類型，並能夠在規定的時間範圍內提供所需的侵蝕防護；
- 根據公認的工程作法並按照適當的測試和質量保證控制措施鋪設拋石層。

侵蝕防護設計可以採用許多不同的形式。許多設計使用耐用的岩石覆蓋層；然而，有些結合植被或採用多層不同材料(即複合封蓋)或岩石覆蓋層。使用岩石的侵蝕防護覆蓋層，主要設計主要考慮兩個因素：(1) 適當的岩石尺寸；(2)保證覆蓋層材料的耐久性。NUREG-1623(NRC，2002)提供了確定岩石侵蝕防護保護層的方法(基於 PMP 的設計)。

岩石耐久性為材料承受風化作用力的能力，影響岩石耐久性的因素有(1)與水的化學反應、(2)飽和時間(saturation time)、(3)水溫、(4)沉積物沖刷、(5)風吹沖刷、(6)潤濕和乾燥、以及(7)冷凍和解凍。化學風化和力學風化可能會降低岩石保護層的有效性。化學風化通常是緩慢的，持續的作用通常在有水的環境下發生。力學風化可能會導致岩石變質，最普遍的力學風化作用是(1)冰凍作用(frost action)和凍融作用(freeze-thaw activity)、(2)鹽結晶、遷移和水化，(3)吸水作用(water sorption)、(4)礦物水合(mineral hydration)、(5)潮濕和乾燥循環、(6)風、水磨損，以及(7)溫度誘導膨脹和收縮(NRC，1982)。綜合比較得知，力學風化是主要的劣化作用，而氣候條件強烈影響風化作用和速率。附圖 A.7 提供了氣候變數、環境和岩石風化因素的關係。



附圖A.7 氣候變數、環境和岩石風化因素之間的宏觀關係：風化作為氣候函數的發生(NUREG / CR-2642)

NUREG-1757(NRC, 2016)的附錄 P「侵蝕分級方法的釋例」, 申照者應對岩石的耐久性進行三次評估, 分別為:

- (1) 申照者應進行岩石耐久性測試和評分。NUREG-1623(NRC, 2002)提出了確定岩石源可接受性的程序。
- (2) 沒有不良礦物和異質性是非常重要的。如果存在可能導致岩石快速劣化之物質, 如粘土、橄欖石或方解石水泥, 被應評估其對岩石風化和風化速率的潛在影響。
- (3) 申照者應該提供抗風化的證據, 盡可能使用選定岩石來源之直接證據。附表 A.7 提供了與耐風化有關的岩石的一般特徵(NRC, 1982)。

附表A.6與風化類型和岩石性質有關的耐候性和敏感性

	化學風化		物理風化	
	耐久	非耐久	耐久	非耐久
礦物質組成	<ul style="list-style-type: none"> - 均勻的礦物成分 - 高矽含量 - 低金屬離子含量 (Fe-Mg)、低黑雲母 - 高正長石、鈉長石 - 高鋁離子含量 	<ul style="list-style-type: none"> - 混合/可變礦物比較 - 高CaCO₃含量 - 不穩定的主要火成礦物 - 石英含量低 - 高鈣質斜長石 - 高橄欖石 	<ul style="list-style-type: none"> - 高長石含量 - 鈣斜長石 - 石英含量低 - CaCO₃ - 均質組成 	<ul style="list-style-type: none"> - 高石英含量 - 鈉斜長石 - 不均勻的組成
質地	<ul style="list-style-type: none"> - 細密的密實岩石 - 質地均勻 - 結晶 - 碎石 - 片麻岩 	<ul style="list-style-type: none"> - 粗顆粒火成岩 - 可變的質地特徵 - 片狀 	<ul style="list-style-type: none"> - 細粒(一般) - 質地均勻 - 結晶、緊密碎屑狀 - 片麻岩 - 細粒矽酸鹽 	<ul style="list-style-type: none"> - 粗顆粒 - 可變的質地 - 片狀 - 粗顆粒矽酸鹽
孔隙率	<ul style="list-style-type: none"> - 孔徑大、滲透率低 - 自由穿流 - 內部表面積低 	<ul style="list-style-type: none"> - 小孔徑、高滲透性 - 穿流不良 - 高內部表面積 	<ul style="list-style-type: none"> - 孔隙率低、可自由穿流 - 內部表面積低 - 大孔徑自由穿流 	<ul style="list-style-type: none"> - 高孔隙度、穿流不良 - 高內部表面積 - 小孔徑
整體性質	<ul style="list-style-type: none"> - 低吸附性 - 高壓縮和抗拉強度 - 新鮮的岩石 - 堅硬 	<ul style="list-style-type: none"> - 高吸附性 - 強度低 - 部分風化的岩石 - 柔軟 	<ul style="list-style-type: none"> - 低吸附性 - 強度高、彈性良好 - 新鮮的岩石 - 堅硬 	<ul style="list-style-type: none"> - 高吸附性 - 強度低 - 部分風化的岩石 - 柔軟
結構	<ul style="list-style-type: none"> - 膠結力強、緊密的顆粒堆砌 - 矽質水泥 - 塊狀 	<ul style="list-style-type: none"> - 膠結不良 - 鈣質水泥 - 薄層狀 - 破裂裂紋 - 混合可溶和不可溶礦物質 	<ul style="list-style-type: none"> - 最小葉理 - 碎屑狀 - 塊狀地層 - 厚層沉積物 	<ul style="list-style-type: none"> - 葉片狀構造 - 破裂、碎狀 - 薄層狀 - 混合可溶和不可溶礦物質
代表性岩石	<ul style="list-style-type: none"> - 火成變種(酸性) - 變質岩(大理石除外) - 結晶岩 - 流紋岩、花崗岩、石英、片麻岩 - 花崗質片麻岩 	<ul style="list-style-type: none"> - 鈣質沉積 - 膠結不良砂岩 - 板岩 - 石灰岩、基本的火成岩、粘土碳酸鹽 - 大理石、白雲石 - 碳酸鹽、片岩 	<ul style="list-style-type: none"> - 細粒花崗岩 - 一些石灰石 - 輝綠岩、輝長岩、一些粗粒花崗岩 - 石英岩(變質) - 膠結力強之砂岩 - 板岩、花崗質片麻岩 	<ul style="list-style-type: none"> - 粗粒花崗岩 - 膠結不良砂岩 - 許多玄武岩 - 白雲石、大理石 - 柔軟沉積 - 片岩

2. 長期考慮

處置長半化期廢棄物會增加複雜性和不確定性，處置設施可能會暴露於(1)更極端的條件；(2)處置功能和觀測數據有限而導致更大的不確定性；(3)蒐集相關資訊的難度更大。長半化期廢棄物穩定設計的工程障壁依賴於保守設計，申照者在設計障壁中應使用以下元素：

- 多重、獨立和冗餘的障壁；
- 保守的方法；
- 非常高質量和耐用的材料。

(1)常規(阻力)覆蓋層

申照者可以使用傳統的覆蓋層來設計不同的功能。但就場址穩定性而言，常規覆蓋層最有可能用於侵蝕防護。侵蝕控制系統使用多重障壁可以包含一種或多種類型：

- 覆蓋層頂部斜坡和側坡的拋石層(riprap layer)可以設計成抵抗PMP和PMF；
- 覆蓋層頂部可以設計傾斜讓水完全沿一個方向排出，最大限度減少可能進入溝渠的流量；
- 可針對排水系統進行優化分級，並可建造分流渠道，將徑流輸送至非關鍵位置；
- 下游溝渠可能安置非常大的岩石，以防止進一步溝蝕和裂點(nickpoint)移動；
- 可以在覆蓋層的上游建造導流溝，將水流導離覆蓋層或潛在的關鍵溝道。

申照者選擇和證明侵蝕防護材料的長期耐用性時，應考慮以下幾點：

- 選擇高耐久性的岩石：選擇一種高度耐久性的岩石類型，其中最能抵抗化學風化的礦物，例如石英；
- 選擇均勻的岩石來源：選擇一個能產生均勻且沒有非均質性的拋石塊(riprap pieces)的岩石單元，如層面、薄頁岩層或節理；
- 依靠天然類比和風化速率研究：評估天然類比並獲得適用的風化速率研究(如果有的話)，以證明所選岩石的耐久性。

風化速率研究：相關時間範圍內獲取風化速率研究數據，並儘可能確認研究中任何不確定因素。風化速率數據可以透過實驗室數據進行估算，並可補充野外觀測。天然材料的比較數據可能有助於材料選擇，附表 A.8 顯示不同材料的相對耐久性。

附表 A.7 廢玻璃和普通礦物的化學耐久性(索氏試驗)比較

礦物	Wt%淋溶 ¹
石英晶體(Quartz crystals)	0.41
乳色石英(Milky quartz)	0.50
白雲石(Dolomite)	0.55
HLW玻璃	0.70
石榴子石(Garnet)	0.73
剛玉(Corundum)	0.77
正長石 (Orthoclase)	0.90
花岡岩 (Granite)	1.10
石英岩 (Quartzite)	1.20
密緻長英岩 (Felsite)	2.10
HLW 玻璃(失透玻璃 (devitrified))	2.50
大理石(白雲岩)	2.90
方解石	5.80
玄武岩(Basalt)	6.10

Source: Brookins, 1984

¹代表索氏試驗中的質量損失

天然類比：為了長期穩定，工程系統應盡可能模仿耐用的自然系統。工程系統與自然系統的比較應涉及材料屬性以及材料如何佈設和分佈以實現穩定性。

歷史類比：許多人造遺址的存在證明人造結構和自然特徵的長期穩定性。申照者可以使用這些遺址證明人造建物(如低放廢棄物處置設施)在長時間保持完好的潛力，而無需進行主動維護。例如，巨石陣的風蝕柱可為正石英石提供數據。NUREG /CR-2642 (NRC，1982)的附錄 A 提供關於岩石風化、耐久性以及類比之資訊。

(2) 蒸發散覆蓋層(Evapotranspiration Covers)

蒸發散(ET)覆蓋層，利用蒸發作用(evaporation)和蒸散作用(transpiration)的自然作用去除覆蓋層上的水分。ET 覆蓋層的功能取決於許多因素，特別是當地的氣候、土壤水文、動物群和植物生態。ET 覆蓋層對於乾燥或半乾燥氣候可能效果最好。

申照者應注意物理、生物和化學作用引起覆蓋層的結構、物理和生物特性的變化。在長時間劣化過程包括(但不限於此)氣候變異性、植物演替、地貌作用、成土作用、人為影響、侵蝕、影響障壁材料和導流溝的微生物作用(例如生物污染)，以及地球化學作用。申照者可能使用以減少劣化過程之負面影響的一般策略包括：

- a. 重視施工品質保證(QA)工作；QA 對覆蓋層的成功短期表現特別重要；
- b. 確定對整體系統功能影響最大的特殊現象；
- c. 分析系統環境中的每個組成。

此外，為了增加對場址長期穩定性的信心，申照者應該關注：(1) 使用天然類比來更好地理解 and 評估長期劣化過程；(2) 設計模擬所選天然類比有利屬性的覆蓋層；(3) 評估土壤和生態變化的影響；(4) 評估廢棄物劣化對長期覆蓋層功能的影響；(5) 預測並納入覆蓋層和處置單元設計中的地形變化。其中，ET 覆蓋層可能對降水和其他作用的時空變化特別敏感。

(3) 工程障壁監測

大多數廢棄物圍阻設施需要監測以驗證功能和支持預測建模(NAS/NRC, 2007)。工程覆蓋層的監測通常分兩個層次進行：直接無損功能監測和直接或間接解釋性監測。功能監測包括使用場址設備直接並持續監測主要功能變量(例如通過覆蓋層的水流量)，解釋性監測包括測量與主要功能變量相關的次要變量(例如含水量)。目前解釋性監測幾乎完全採用直接方法進行。然而，間接遠程監測方法未來可能會變得更加重要，特別是對於遠程場址的長期監測(NRC, 2011)。

在監管期間，申照者必須進行環境監測，以確保處置系統功能正發揮常作用，並確保觀察到的功能可能在監管期間之後持續運作。申照者還應該進行物理監測，以在監管期間限制進出場址和次要的保管工作。

申照者在執行他們的系統之前，不應使用監控來替代發展足夠的功能資料庫，而是要考慮到充足的不確定性以支持先前測定。當廢棄物處置系統存在不確定性時，監測可以保持對功能示範的可信度。

A.5.4 場址穩定性評估範例

本節介紹 NRC 工作人員選擇 West Valley Demonstration Project(WVDP)場址作為模型方法的範例(基於模型的方法：West Valley 侵蝕模型)，此例子為使用地形演化建模評估 NRC 監管、審查廢棄物處理或場址退役有關場址穩定性的唯一

例子，雖然 NRC 不贊成此方法，但 NRC 工作人員認為 WVDP 場址的許多研究(模擬、數據收集和模擬開發)皆合理地反應出 LLW 處置設施的預期結果。

1. 背景

West Valley 位於紐約州西部的退役場址，距 Buffalo 以南約 50 公里 (圖 E-1)。紐約州能源研究與開發局(New York State Energy Research and Development Authority, NYSERDA)持有紐約西部 13.5 平方公里核能服務中心(Western New York Nuclear Service Center, WNYNSC)的所有權，為美國第一個也是唯一的商業用過核燃料處置場。1980 年的 WVDP 法案賦予美國能源部(United States Department of Energy, DOE)獨占擁有 WNYNSC 的 200 英畝土地，其中包括舊的再處理設施(reprocessing facility)、地面的處置設施和高放廢棄物處置罐。DOE 與 NYSERDA 於 2008 年發布了一份環境影響聲明草案(DEIS)，評估退役和長期管理的各種辦法。2010 年發布最終環境影響聲明(FEIS) (DOIS, 2010)，選擇階段性決策替代方案，退役將分兩個階段進行。第一階段為近期的退役工作(例如：主廠房拆除和受污染土壤)以及有助於其餘設施和區域的未來決策的研究(見附圖 A.8)。

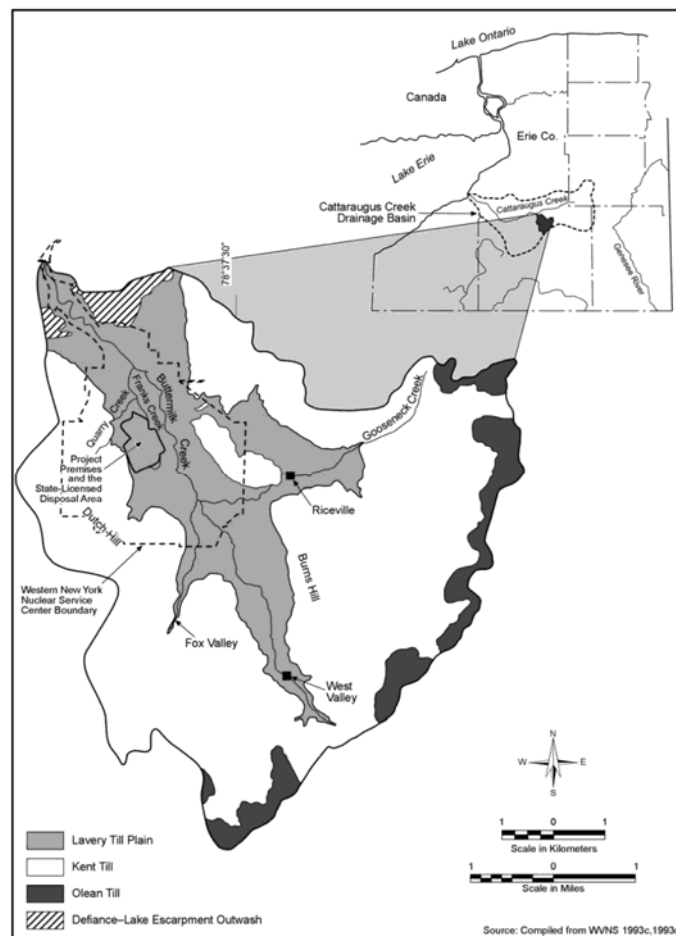
2. 退役場址特徵

WVDP 位於陡峭的冰川沖刷基岩山谷西側，充滿許多冰川沉積物，主要由粘土和淤泥組成。此場址鄰近兩條河流，東邊是法蘭克斯河(Franks Creek)，北邊是採石河(Quarry Creek)。WVDP 被艾德曼溪(Erdmann Brook)分成兩部分，將該地區劃分為北部和南部高原。法蘭克斯河(Franks Creek)是巴特米爾克溪(Buttermilk Creek)的一條支流。附圖 A.9 顯示主要場址區域的設施和特徵，以及第一和第二階段退役中需要解決的源區。附圖 A.10 顯示場址溪流和巴特米爾克溪分水嶺。由於場址運營、WNYNSC 和計畫前提之土壤、地下水和地表水/沉積物受到放射性污染，污染包括北部高原地下水捲流(North Plateau Groundwater Plume)，特徵為相對高濃度和短週期的 Sr-90(附圖 A.9)。第二階段，DOE 和 NYSERDA 必須對封閉後用於儲存高

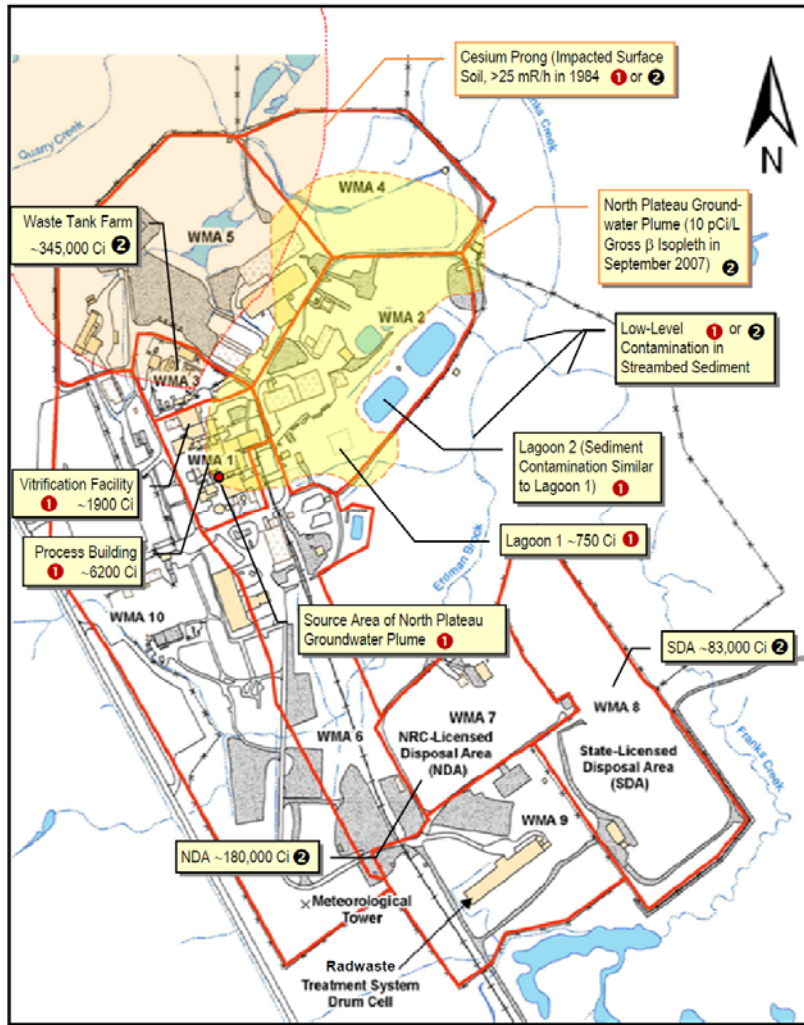
放廢棄物液體的四個儲罐和兩個放射性廢棄物處置設施相關決策作出決定，以及場址清理放射性污染區域的最終決定(附圖 A.9)。

3.場址穩定性關鍵：侵蝕

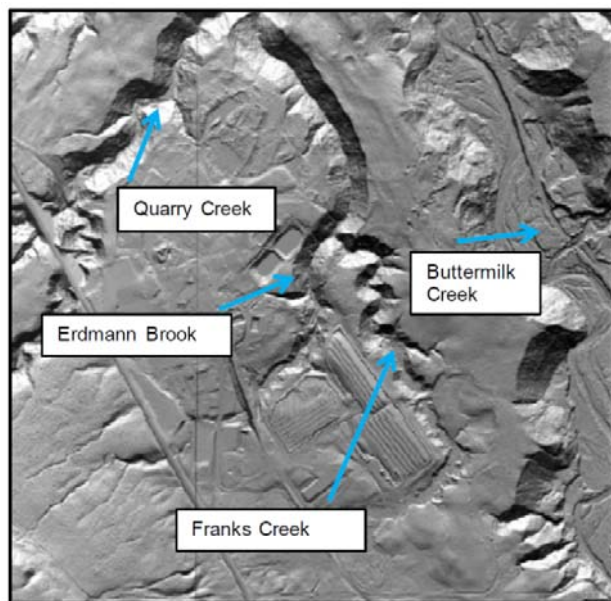
侵蝕是影響 West Valley 地區場址穩定性的關鍵問題，主要侵蝕作用包括河道下切、河谷邊緣擴大、溝壑前進以及擾動區域、河床和溪流侵蝕。巴特米爾克溪(Buttermilk Creek)沿 WNYNSC 向西北方向流動，高度低於 WVDP 所在高原約 60m(附圖 A.8 和 2.10)。法蘭克斯河(Franks Creek)沿著 WVDP 東部邊界流動，並流向巴特米爾克溪。法蘭克斯河下蝕率反應了於法蘭克斯河和巴特米爾克溪匯合處之基準面下降。巴特米爾克溪的下蝕率又受卡特羅格斯溪(Cattaraugus Creek)在巴特米爾克溪和卡特羅格斯溪匯合處的基準降低水平的影響。



附圖A.8 West Valley場址的位置。(DOE，2010)



附圖A.9 West Valley場址和來源區的佈局將在第1階段解決。(DOE, 2009)

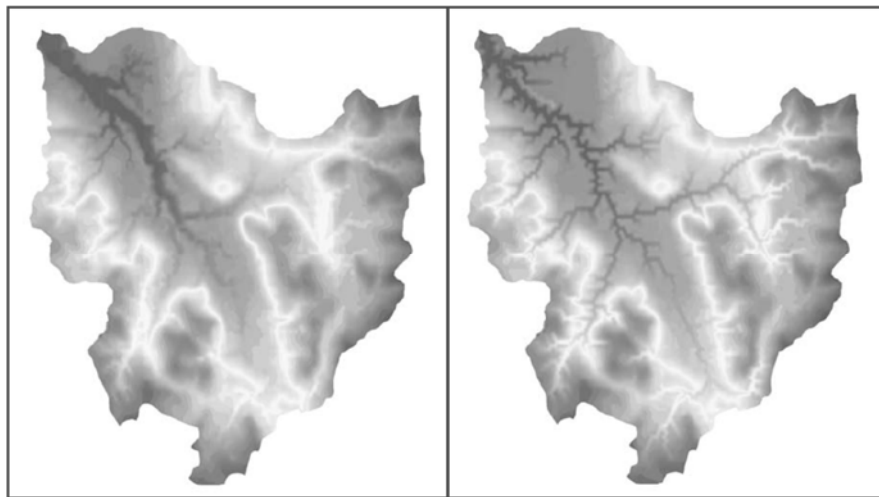


附圖A.10 West Valley場址溪流和巴特米爾克溪(Buttermilk Creek)

4. West Valley CHILD 模型

FEIS CHILD 模型域由巴特米爾克河流域組成(附圖 A.11)。進行預測建模之前，CHILD 模型根據場址數據進行校準。過去約 17,000 年的校準建模模擬開始使用殘餘階地高程和谷坡數據來估計後冰期巴特米爾克河流域表面。選擇三種主要的類型，包括(i)古生代基岩、(ii)厚而未膠結固化的冰川沉積物，以及(iii)淺表面土壤/沉積物。校準過程透過對離散參數分佈進行採樣產生 1000 組參數值，利用上述巴特米爾克河流域模型運算，並根據校準的指標評估 1000 次的模擬結果，建立四個最終校準標準。根據計算結果只有 5 次運算通過標準，最後，使用這 5 組參數值來預測 WVDP 的未來侵蝕。

「觀察」及「最適合」模型運算的地形如附圖 A.11。再者，進行了靈敏度分析，考慮(i)濕潤氣候和滲透性較差的土壤，以及(ii)濕地氣候參數與快速潛變(僅適用於南部高原)。FEIS 提出並討論了 26 個建模結果，並且為評估 WVDP 侵蝕影響提供了合理的方法。然而，DOE 和 NYSERDA 發現建模方法的局限性，且意識到可收集更多資訊改進第 2 階段決策的侵蝕預測。



附圖A.11觀察(左)和「最適合」(右)模型運行地形(DOE, 2010)

5. 潛在補充數據收集工作

DOE 和 NYSERDA 委託一個侵蝕工作小組，制定可在第一階段進行的研究建議，進一步減少侵蝕對場址的不確定性。其目的包含(i)填補數據空缺、

(ii)產生一致的證據、(iii)提高科學防禦能力、(iv)加強對長期侵蝕預測的信心以下是對推薦研究的描述，第 1 階段研究可能包括以下內容(EWG，2012b)：

(1)地形分析

地形分析是以 FEIS 為基礎，建立更好的理解此場址和較大的巴特米爾克河流域冰期後的地貌歷史，這將為數值模型提供校準資訊及約束重要的建模參數，並可更明確定義侵蝕建模的關鍵參數值。

(2)年齡測定和古氣候

年齡測定和古氣候研究的目的是提供補充的年齡數據，以更明確地定義 WVDP、巴特米爾克溪分水嶺，以及排水過程中伴隨河流下蝕和谷緣擴大的速率；並更明確了解冰期後氣候循環及對侵蝕過程的影響。

(3)近期的侵蝕和沈積過程

近期的侵蝕和沈積過程研究的目的是為了更好地量化最近發生在山坡、集中流動區域和設施附近河道的地表和近地表侵蝕以及暫時沉積的速率。先前的研究和測量範圍將擴大，以獲得更有用和完整的資訊支持侵蝕預測。

(4)模型細化、驗證和改進的侵蝕預測

模型細化、驗證和改進侵蝕預測研究的目的是為了(i)透過獨立驗證提高侵蝕建模預測的可信度，(ii)減少 CHILD 概念模型和參數不確定性，以及(iii)改進 CHILD 模型校準。

6. West Valley 侵蝕模擬示例與 10 CFR Part 61 相關性

上述 West Valley 侵蝕模型的實際案例適用於評估退役場址，但這不代表此侵蝕模型案例已被核准用於評估被選定之退役場址，此案例很好地說明了 NUREG-2175 第 5.2.2 節中「基於模型」方法的穩定性評估流程。

A.6 確實保護期分析

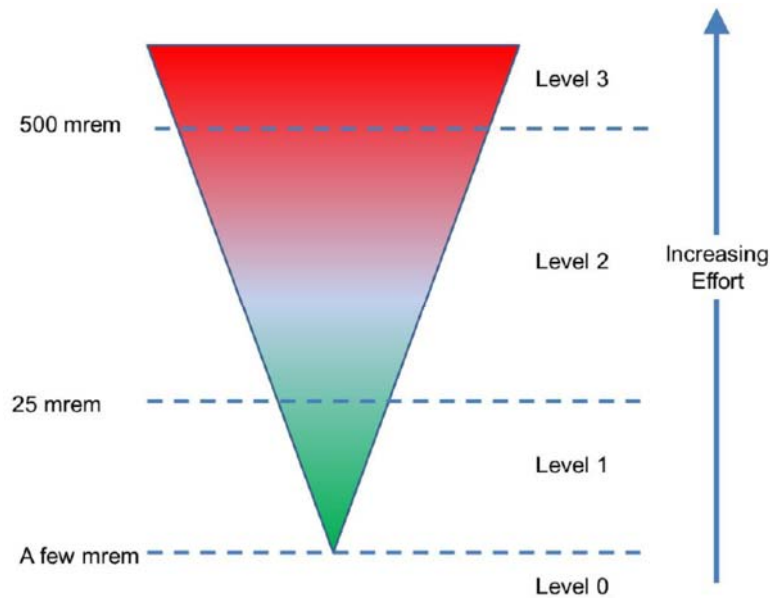
10 CFR 61.41(b)要求在確實保護期應盡量減少放射性物種濃度可能外釋到環境之地下水、地表水、空氣、土壤、植物或動物。年劑量應低於 5 mSv 或是低於一定程度，其標準是基於合理可達成之技術與經濟考量且被審查通過。必須提出符合 10 CFR 61.13(a)要求的分析。10 CFR 61.42(b)要求在確實保護期地表處置設施之設計、運轉與封閉應盡量降低無意闖入者之暴露。年劑量應低於 5 mSv 或是低於一定程度，其標準是基於合理可達成之技術與經濟考量且被審查通過。必須提出符合 10 CFR 61.13(b)要求的分析。10 CFR 61.41(b)與 10 CFR 61.42(b)要求的是劑量的合理抑低且明確提出一個法規標準(即 5 mSv)，然而也接受其它標準，若是基於合理可達成之技術與經濟考量且被審查通過。

A.6.1 確實保護期分析範圍

確實保護期分析是符合要求期分析的延伸，符合要求期分析所使用之假設、資料與模式應足以供確實保護期分析使用，除非因為較長時間的分析所導致的不確定性因素。

A.6.2 確實保護期分析之架構

附圖 A.12 說明不同程度的合理抑低架構與所需投入之努力有關，申請者可以考慮符合 10 CFR 61.41(b)的不同等級的最小劑量。Level 0 通常無法保證，因此替代的分析也不需要；Level 1 建議採用量化的替代分析，也可採用物料存量限值來限制劑量以取代量化的劑量評估；Level 2 建議採用量化的實用評估，應採用物料存量限值以達成未來劑量不超過 5 mSv/yr (500 毫侖目/yr)的限值，且該物料存量限值標準應反映在廢棄物接收標準；Level 3 應進行量化替代分析，並說明為何無法將劑量降低至 5 mSv/yr (500 毫侖目/yr)的限值，申照者與管制者應考慮是否有替代設施可以接收這些廢棄物。



附圖 A.12 確實保護期分析之合理抑低架構

相較於其他 Level 1，Level 3 所使用之替代分析應更完整與全面。分析結果若顯示超過 5 mSv/yr (500 毫侖目/yr) 的限值，則所評估之處置設施並不適合，應另尋合適之處置設施。

符合 10 CFR 61.42(b) 要求的抑低過程與前述 10 CFR 61.41(b) 內容相似，但由於無意闖入者是一種假設結構來反應處置設施封閉後長期安全的不確定性，工程障壁的長期功能對限制闖入者劑量在確實保護期是無法可靠確認的。因此在 10 CFR 61.42(b) 採用較簡易的作法是去限制闖入者劑量不超過 5 mSv/yr (500 毫侖目/yr) 的限值。

1. 分析的類型

申照者保有彈性去使用不同的分析方法，但若不確定性過大則應採用更多不同的替代分析來確保提供深度防禦。

(1) 替代分析

最簡易的分析形式就是採用替代分析，去比較不同替代分析的結果，可以被考慮的替代包含設計(如不同的工程障壁)、處理(例如廢棄物置放與配置)與廢棄物接收(例如廢棄物形式、來源與特性)。功能評估可以是

確定論式或是機率式，但皆需要考慮不確定性。對 Level 0 而言，正式的替代分析通常不需要，除非推估劑量結果是低的，但不確定性過高。對 Level 1，並不需要考慮太多的替代分析，一般而言小於 10 個替代分析就已經足夠。對 Level 2 而言，考慮改變設計、處理或廢棄物接收的替代分析是必要的，應進行較完整數目的替代分析來確認限制劑量外釋的重要特徵與足以提供深度防禦功能，Level 2 與 Level 1 分析的主要差異是採用物料存量限值的不同，以達成推估劑量不超過期待限值。對 Level 3 而言，替代分析是必要的，申照者要考慮改變設計、處理或廢棄物接收。

(2) 最小化分析

最小化廢棄物處置場長期衝擊的挑戰，在於成本的付出是近期，但效益是在長期，且因推估未來土地利用與人口改變的複雜，使得未來可能暴露族群是難以推估且存在高度不確定性。最小化分析考慮長期打折、衡量標準與不確定性。長期打折包含四部分：運轉期替代成本的打折、長期未來可避免劑量不需要打折、評估替代方案根據替代方案的正歸化效益與絕對風險程度、考慮假設的不確定性與敏感性。

長期打折

長期打折考量的是不同方案可能設計發生在不同時間點的成本，如何轉換成可以在同一個時間點上比較的成本。過去 NRC 的評估發現，政府支出在每個統計人口所需要花費金額的變動範圍很大，而且核能相關議題，特別是與核廢料相關通常是需要較高金額範圍。例如國防高階核廢料計畫為 490 百萬美金/每個統計人口。再計算為每人每侖目需多少美金的轉換因子，例如美金 2000/每人每侖目的轉換因子曾用於估計燃料循環設施的管制決定與新的管制需求。替代方案的成本是建議將所推估設施運轉期間成本以年打折率(1~7%)估計成目前淨價值。年打折率與通貨緊縮率對所估計淨價值的敏感度也應考慮。

衡量標準

申照者功能的衡量標準在確實保護期長期外釋評估必須滿足最小的外釋(10 CFR 61.41(b))與對任何無意闖入者的最小暴露。且需論證設施封閉後的穩定。法規中的衡量標準為 5 mSv (500 mrem)或是在技術與經濟考量下可以達到的標準。上述最小化外釋及暴露與 10 CFR Part20 的 ALARA 要求在概念上很相似。這些最小化過程期待可以產生一個設計足以達成任一個人劑量遠比限值還低。

最小化過程

10 CFR 61.41 的最小化評估：

如果 $D_{base} < 25$ 倫目/年， $L_f=0$

如果 $D_{base} \geq 25$ 倫目/年， $L_f=0.13*(D_{base})^{0.333}$

10 CFR 61.42 的最小化評估：

如果 $D_{base-int} < 500$ 倫目/年， $L_f=0$

如果 $D_{base-int} \geq 500$ 倫目/年， $L_f=0.13*(D_{base-int})^{0.333}$

L_f (Level scaling factor) 為標準尺度因子。

A. 計算基本設計的效率

$$Eff_{base} = \frac{D_{natural} - D_{base}}{NPV_{base}}$$

$D_{natural}$ 為自然工程障壁的劑量峰值(無基本設計)

D_{base} 為基本設計下之劑量峰值

NPV_{base} 為基本設計之淨現值

B. 計算保證確實保護期不同替代方案的效率

$$Eff_i = \frac{D_{base} - D_{alt_i}}{NPV_{alt_i}}$$

Dalt_i 為第 i 替代的劑量峰值

NPValt_i 為第 i 替代之淨現值

C. NER 與 LF 比較，NER 為正規化效益比值

$$NER_i = \frac{Dbase}{Dalt_i} > Lf$$

如果所有的 NER_i 大於 Lf，則替代方案不可行，也就是基本設計最小化已達成，換句話說，如果任何一個替代方案小於 Lf，則基本設計的最小化未達成。

(3) 其他決策分析

其他決策分析應視為個案處理，例如成本效益分析，這主要由於在廢棄物處置這樣長時間的評估，年打折率、設施附近人口變化等不確定性皆很高。

(4) 其他考量

如果不確定性難以透過技術分析評估，可以利用物料存量限值來管理不確定性。

A.7 處置功能期分析

評估處置設施和場址特徵如何限制潛在長半化期核種的衝擊，應與可取得資料及目前科學的理解一致。鑑別及描述設計特性和場址特徵足以論證滿足 10 CFR 61.41(c)和 10 CFR 61.42(c)的功能目標。在 10 CFR 61.41 與 10 CFR 61.42 皆規範處置設施封閉後的保護。在 10CFR61.2 定義了三個期間：

符合要求期間：為處置設施封閉後至封閉後 1,000 年。

確實保護期間：為封閉後 1,000 年至 10,000 年。

處置功能期間：為確實保護期間後去考慮廢棄物與場址特性的場址功能。

附表 A.10 為低放處置功能評估盤存量中可能存在長壽命核種。申照者應在確實保護期間後計算處置場址剩餘的長壽命廢棄物的預期濃度，以便為長期功能分析提供風險資訊。附表 A.9 提供了如何進行處置功能期間評估之風險資訊，同時考慮到盤存量的長半化期及其造成危害的持續時間。處置功能期的風險較大時，審查標準應該更高。當風險較低時，應使用較簡單、保守的分析。對於更高危險和更長壽命的廢棄物，應在分析中解決預期情況以及機率極低但合理的破壞情況。申照者應提供模型支持，特別是對於高危險和長壽命的廢棄物。為了確定可能造成的危害，申照者在保守情況下估計入侵者和公眾接受體的劑量，並將這些估計值與其預期情況進行比較。

附表 A.8 與處置功能期間評估相關的預期審查耗力等級

輻射危害和持續	審查耗力等級	例子
短半化期、任何濃度	無	處置功能期間評估是不必要的。
短半化期、長半化期低濃度或濃縮長半化期限制數量	低	處置功能期使用未受干擾的濃度，分析無意闖入者劑量以符合處置功能期間評估之目標(例如，假設沒有稀釋和執行無意闖入者評估)。
長半化期中等濃度或濃縮長半化期中等數量	中等	分析證明處置系統將限制自然外釋的過程和似真實的破壞性事件，並估算證明處置系統功能評估對可能闖入者和公眾群體成員是最小劑量範圍，包括不確定性和變異性分析。應考慮正式同儕審查的分析和結果。
高濃度和長半化期數量	高	分析證明處置系統將限制自然外釋的過程和似真實的破壞性事件，並估算證明處置系統功能評估對可能闖入者和公眾群體成員是最小劑量範圍，包括不確定性和變異性分析。支持衝擊影響範圍應該包括模型支援，例如由長期場址演變之天然類比所推演出。應執行獨立及正式同儕審查之分析、結果和模型支援。

附表 A.9 低放處置功能評估盤存量中可能存在長壽命核種

核種	半化期 (yr)	長壽命		低放處置功能評估 盤存量 ¹	核種	半化期 (yr)	長壽命		低放處置功能評估 盤存量 ¹
		母核種	子核種 ²				母核種	子核種 ²	
Al-26	7.17x10 ⁵	●			U-233	1.59x10 ⁵	●	Th-229	Yes
C-14	5,730	●		是	U-234	2.45x10 ⁵	●	Th-230	是
Cl-36	3.01x10 ⁵	●		是	U-235	7.038x10 ⁸	●	Pa-231	是
K-40	1.3x10 ⁹	●			U-236	2.342x10 ⁶	●	Th-232	是
Ni-59	7.5x10 ⁴	●		是	U-238	4.468x10 ⁹		U-234	是
Se-79	1.1x10 ⁶	●			Np-237	2.14x10 ⁶	●	U-233	是
Zr-93	1.53x10 ⁶	●			Pu-238	87.7		U-234	是
Nb-94	2.0x10 ⁴	●			Pu-239	2.41x10 ⁴	●	U-235	是
Tc-99	2.14x10 ⁵	●		是	Pu-240	6.54x10 ³	●	U-236	是
Pd-107	6.56x10 ⁶	●			Pu-241	14.4		Np-237	是
Sn-126	1x10 ⁵	●			Pu-242	3.76x10 ⁵	●	U-238	是
I-129	1.6x10 ⁷	●		是	Pu-244	8.26x10 ⁷	●	Pu-240	
Cs-135	3x10 ⁶	●			Am-241	432		Np-237	是
Sm-146	1x10 ⁸	●			Am-242m	16hr		U-234	是
Pm-147	2.62		Sm-147		Am-243	7.38x10 ³	●	Pu-239	是
Sm-147	1.06x10 ¹¹	●			Cm-242	0.446		U-234	
Eu-152	13.3		Gd-152		Cm-243	28.5		Am-243	
Gd-152	1.08x10 ¹⁴	●			Cm-244	18.1		Pu-240	
Ra-226	1,600	●		是	Cm-245	8.5x10 ³	●	Np-237	
Th-229	7.3x10 ³	●		是	Cm-247	1.56x10 ⁷	●	Am-243	
Th-230	7.7x10 ⁴	●	Ra-226	是	Cm-248	3.39x10 ⁵	●	Pu-244	
Th-232	1.41x10 ¹⁰	●		是	Cf-249	351		Cm-245	
Pa-231	3.28x10 ⁴	●			Cf-251	898		Am-243	
U-233	1.59x10 ⁵	●	Th-229	是	Cf-252	2.64		Cm-248	

¹: 任何要處置足夠數量的核種應視為低放處置功能評估盤存量的一部分。然而，根據截至本出版物發布日前之過去分析，預期具有「是」的核種更常見於低放處置功能評估盤存量中的重要核種。在技術分析中應考慮所有對放射劑量計算很重要的子核種。例如，Rn-222 是 Ra-226 的重要短半化期子核種。²: 本欄中僅列出了衰變鏈中遇到的第一個長壽命子核種。

A.7.1 處置場址平均的同位素濃度的估算

附表 A.11 列出需要處置功能期間評估之處置場平均同位素濃度(10 CFR 61.13(e)中的表 A 相同)。此表提供申照者必須使用的濃度值，以確定其建議的處置行動是否需要處置功能期分析。對於長壽命的 α 放射非超鈾同位素以外的放射性核種，這些濃度值是 10 CFR 61.55 表 1 中提供的 A 類廢棄物濃度。申照者應估算放射性核種的處置場址平均同位素濃度，以確定是否有必要進行處置功能期分析。處置場址平均濃度可包括廢棄物的體積、用於穩定廢棄物或未減少廢棄物包件內的未污染物質空隙空間、置於處置設施內的未污染物質體積，以及用於構建廢棄物包件的工程或天然材料的體積。

審查員應考慮處置場址放射性核種濃度的變化。變異的重要性需要在特定技術分析的背景下進行解釋。為了確定是否應由申照者執行處置功能期分析，放射性核種在處置場址的濃度變化應轉化為功能指標的顯著變化(例如：劑量、環境濃度、對環境的通量率)。在計算度量標準時，某些度量標準對場址更敏感。

附表 A.10 需要處置功能期評估之處置場平均同位素濃度

核種	濃度(Ci/m ³)
C-14	0.8
C-14 在活性金屬	8
Ni-59 在活性金屬	22
Nb-94 在活性金屬	0.02
Tc-99	0.3
I-129	0.008
長半化期 α 放射核種	*10
Pu-241	*350
Cm-242	*2,000

*單位是 nCi/g

A.7.2 強化長期隔離廢棄物的處置場特徵

本小節重點介紹申照者應完成的長期分析。申照者可以使用任何足以證明符合監管要求的分析(例如：篩選、定量概率)。但在長時間尺度(例如：數萬年)下分析將被受限，且申照者應提出分析結果的可信度。處置場址和近地表處置設施設計具有更多的處置場址特徵化結果(如附表 A.12)，則對於強化長期隔離廢棄物而言，更有可能利用處置場周圍環境實現長期隔離廢棄物。

附表 A.11 可增強長期隔離的處置場址特徵

特性 ¹	描述
簡單、被動的設計	簡單的設計不太可能造成不可預見的失敗機制；被動式設計不依賴主動監控和維護。
仿效自然特徵的設計	穩定的自然特徵可能提供有助於實現長期隔離設計特徵之指示
低沖蝕設計	具有低沖蝕(例如，埋藏)的設計將經歷較低的侵蝕率
與廢棄物低水量接觸	釋出和不穩定性通常與質傳相關。有限的水接觸降低了水相質傳
堅固、低孔隙率廢料體	耐用、低孔隙率廢料體可以長期增強穩定性以限制壓密和沈陷
廢棄物和處置環境的地球化學相容性	廢棄物與處置環境地球化學相容，不太可能造成大量釋出到環境中
穩定的處置環境條件	物理和化學不穩定的環境條件會導致長期不穩定。例如，從廢棄物浸出區域可能是最大的水位擾動區
增長中的環境	隨著時間進展，於處置系統增加質量，有助於廢棄物隔離。對於自然的過程讓其作用，而不是反制該作用
距離地下水位很遠和均質天然材料	對於釋出到含水層，不飽和層可以提供顯著屏障 如果天然材料是相對均勻的，助於吸附性材料功能提供效能信心
有限的自然資源	自然資源有限的處置系統能降低影響處置設施或場址之人為作用或事件的可能性
穩定的氣候	處置系統位於更穩定的氣候中，不太可能受到氣候變異影響
地質和構造的頻率低事件	從長遠來看，處置系統位於地質和構造活動較低的地區，更可能實現廢棄物與環境隔離

¹ 標註特性與 10 CFR 61.50 場址適用性特徵相關

A.7.3 處置功能期之分析

處置功能期分析應提供有關各種預期情節條件的處置系統功能資訊，以及機率極小但可能產生重大影響的情節。申照者應考慮與場址適用性分析(如 NUREG-2175 第 5 章)一致的條件範圍，包括 FEPs 分析(如 NUREG-2175 第 2 章)。由於放射性核種盤存量的差異以及地質環境的差異，各個場址的處置功能期分析可能會有不同的時間框架。因此，基於該特定監管要求的目的，不能定義單個事件頻率。

在處置功能期分析中，將需要定義天然和工程系統的 FEPs 以及關於未來人類行為的假設。處置功能期分析的挑戰是對處置系統的未來發展提供可靠的評估，同時避免開放式推測。如果申照者管理不當，處置高比活度廢棄物會對公眾健康和環境安全造成最大的放射性風險。West Valley Demonstration Project(WVDP)中，相對少量的 Sr-90 意外釋放到含水層中導致地下水污染。處置功能期因廢棄物的高比活度部分已經衰減，與首次處置時的廢棄物相比，處置場址中剩餘核種的比活度要低得多。此外，由於涉及的時間很長，申照者在評估其場址是否滿足 10 CFR 61.50 中場址適用性要求時，可考慮子部分 C 中的功能目標。因此，申照者的處置功能期期間可以使用技術分析來評估場址特徵的重要性。

1. 特徵、事件和作用

處置功能期分析的目標是向決策者提供有關各種情節下處置系統功能的資訊。申照者應評估不確定性，因為評估結果不確定性可能很大。不同的近地表低放處置設施可能有不同的特徵，且可能包含不同的廢棄物。可能導致一個處置場址的 FEPs 可能與其他場址的 FEPs 大不相同。因此，與處置功能期相關的 FEPs 識別將針對特定的場址。

根據場址適用性進行潛在處置系統 FEPs 篩選後，可能發展的情節數量將減少。值得注意，符合要求期或確實保護期內篩選出的未納入考慮的 FEPs，在處置功能期分析時可能納入考慮分析範圍內。例如，估計符合要求期內侵

蝕速率足夠低，因此侵蝕的 FEPs 不在符合要求期分析的範圍。但在處置功能期分析時，侵蝕率可能變劇烈，因此侵蝕 FEPs 應包括在處置功能期分析的範圍。

2.根據 10 CFR 61.50 中的要求篩選特徵、事件和作用

申照者應以風險告知的方式完備處置功能期的 FEPs 篩選和情節發展過程。而處置功能期的一些場址特徵可能已不存在(例如場址 500 年後的水文特徵)，因為這些是長期處置功能劣化的前兆，因此，處置功能期評估期間，所有場址特徵的適用性都需考慮放射性風險。NUREG-2175 附錄 B(本報告中第 A.7.4 節)列出了 NRC 工作人員所建置與 10 CFR 61.50 標準有關之特徵和特殊現象的災害警示圖。災害警示圖提供了與場地適用性要求相關的 FEPs。相對於其他技術分析，根據 10 CFR 61.50 中的要求進行 FEPs 篩選的處置功能期分析不需要大量資源。合格的專家可以使用背景資料和場址地質歷史知識評估處置功能期間 FEPs 潛在處置場址的可能性。

3.未來的人類行為

描述處置功能期有關未來人類行為的 FEPs 時，應符合目前處置系統周圍區域條件所認知。申照者沒有必要預測社會變化、人類生物學的變化，以及人類知識或技術的變化。處置功能期分析中暴露途徑的選擇和公眾接受體情節應限於所考慮條件、作用和事件的自然變異性。

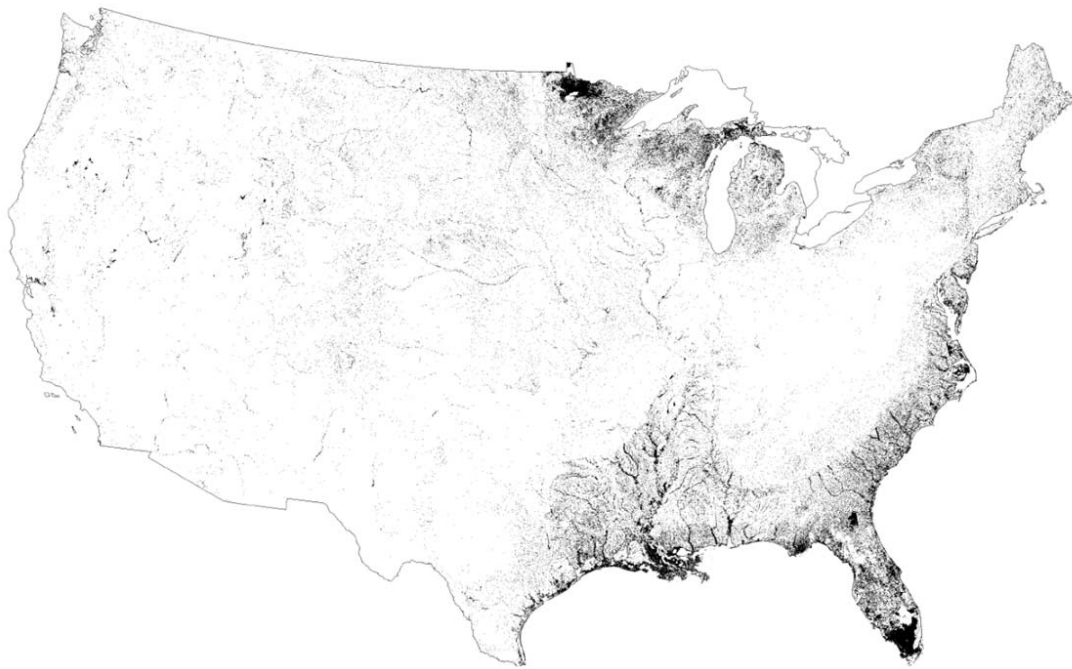
A.7.4 災害警示圖

如前一小節所述，NRC 工作人員建置了符合 10 CFR 61.50 標準有關之特徵和特殊現象的災害警示圖。這些災害警示圖說明了與 10 CFR 61.50 場址適用性標準相關的特徵、事件和作用(FEPs)。監管機關不應使用這些作為禁止處置之標準，因為地圖的精確程度可能不足以進行特定場址的評估，但可做為審查申照者的場址評估之技術基礎。以下將介紹美國危險警示區的範圍 (如附圖 A.13 至附圖 A.21)，包含平均海平面上升 5 米可能發生洪水地區、濕地分布、潛在洪水發

生區、地下水面小於 30 米的分布、可能經常淹水地區、全新世火山分布、較高
潛在地震危害地區、較易受水侵蝕區以及第四紀冰期冰川覆蓋大致分布，位於這
些區域附近之建議候選處置場址可能需要補充分析和評估。



附圖A.13 平均海平面上升5米可能發生洪水地區，位於這些區域附近的建議場址
可能需要補充分析和評估(ESRI, 2008b)



附圖A.14 目前濕地的分布範圍，位於這些區域附近的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(未來濕地地區可能會發生變化)(USGS, 2011)



附圖A.15 潛在洪水發生區域，可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊 (FEMA, 2012; FEMA, 1998; ESRI, 2008a; ESRI, 2008b)



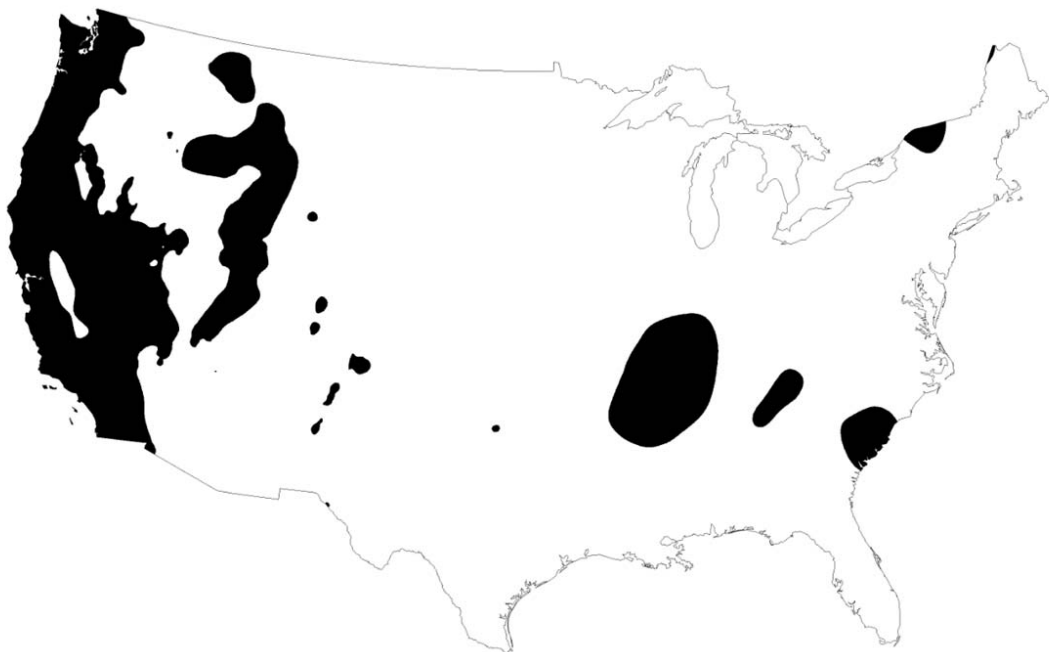
附圖A.16 模擬目前地下水面小於30米的分布圖。位於這些地區的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(未來的近地表地下水可能會發生變化)(Kreakie et al, 2012)



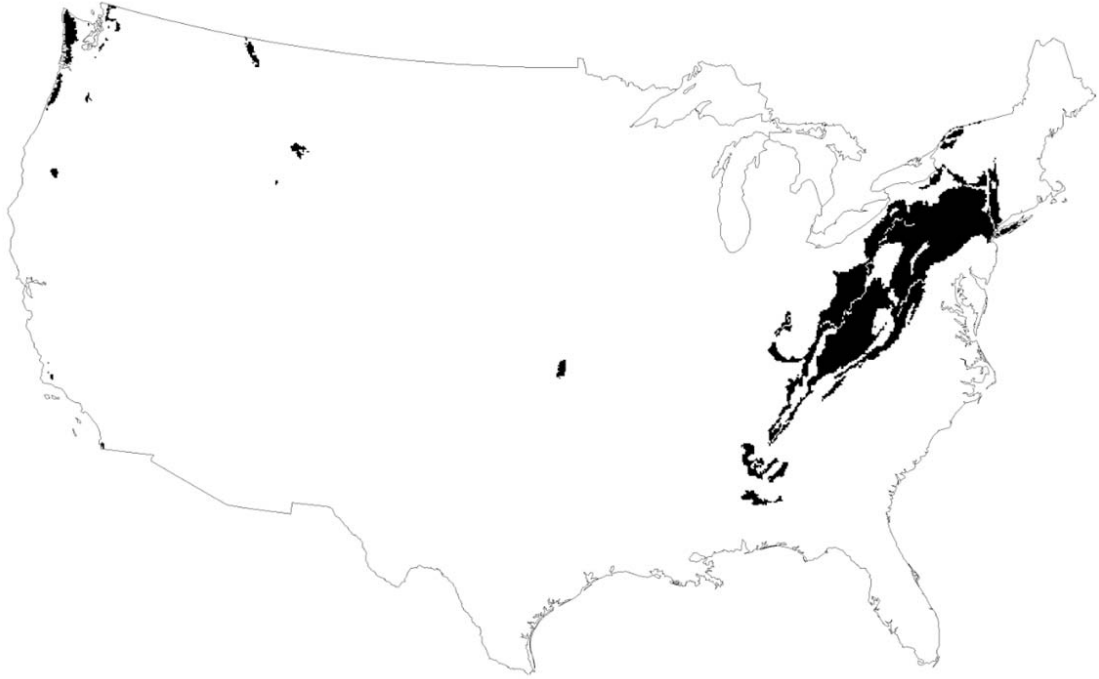
附圖A.17 過去可能經常淹水地區(例如,乾涸的湖床、鹽地、海平面以下的地區)。位於這些地區的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(ESRI, 2008a; ESRI, 2008b)



附圖A.18 全新世火山分布，位於這些區域附近的建議場址可能需要補充分析和評估(Siebert and Simkin, 2002)



附圖A.19 目前有較高潛在地震危害的地區，位於這些區域附近的建議場址可能需要補充分析和評估(Petersen et al, 2011)



附圖A.20 目前較易遭受水侵蝕的地區，這些地區的建議場址可能需要補充場址特徵化和分析相關資訊(未來水資源脆弱性高的地區可能會發生變化)(USDA, 1988)



附圖A.21 第四紀冰期，即Wisconsin、Illinoian和前Illinoian冰河時期的最後三個冰期中，冰川覆蓋的大致分布圖。冰川可能會造成非常破壞性的地表地質作用，而位於過去冰川作用的潛在場址可能需要補充分析和仔細的評估 (Ehlers et al., eds., 2011)

A.8 深度防禦分析

根據 10 CFR 61.2 的定義，深度防禦是指針對安全維護所採用的多層、具重複性且各自獨立的防禦手段，深度防禦的最終目的在於：(1)消弭不確定性對安全的影響、(2)消弭不確定性對確保安全的偵測系統之影響。10 CFR 61.13(f) 對低放射性廢棄物處置場的安全規範要求實與美國核管會(NRC)所要求者一致，其目的在於確保 10 CFR Part 61)所要求的功能目標能被滿足。

經由可能發生的災害、相關場景分析與不確定性分析結果，基於深度防禦考量的防護措施是在於避免、限制與減輕上述分析結果所可能造成的輻射曝露劑量，並控管可能因障壁設施與管制作為的失效所導致的風險。

為能證明符合 10 CFR 61.13(f)規範的要求，申照者必須描述其採用的防護層，並確保風險可以被適當的管理，相關描述必須包括多重防護層的使用、不同防護層的獨立性與重複性，且可以根據 10 CFR 61.13 所規範的技術分析結果，從風險的觀點提出描述，包括功能評估、闖入評估、穩定性分析與處置功能期分析。

A.8.1 深度防禦的背景

將深度防禦應用於核反應器的防護觀念始於 1960 年代，其重點在防止意外的發生、限制放射性的外洩與減緩可能的輻射曝露劑量。根據 1995 年的應用機率性風險評估於原子能監管事項政策聲明(NRC, 1995a)，處置場無論在設計、維護與運轉，都不能只依靠單一安全防護措施，該政策也指出安全設施的重複性對於主動安全防護，與多層障壁對於防止輻射外洩的重要性。最基本的深度防禦即為連續的障壁設施或防禦層。所述的障壁設施與防禦層在美國核管會(NRC)的規範架構中以兩種方式呈現：(1)高階的防禦層，例如預防災害的發生，意外發生序列的快速中止與減緩災害的影響；(2)多重物理障壁設施，主要是指針對特殊設施與材料的使用。

NUREG-2150(NRC, 2012)已將具深度防禦功能的防護視為處置場整體發展的一部分，以確保：(1)合適的障壁設施與控管作為，及避免、限制與減緩因危害、相關的接收情節與不確定性造成的輻射曝露；(2)部分或全部的障壁設施損壞，與管制作為失效所衍生的風險。

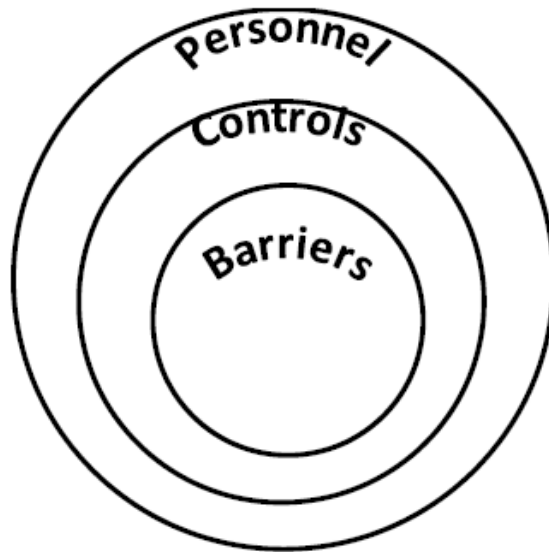
承上述，10 CFR 61.13(f) 要求申照者能明確地描述其所提出的處置場確實具有深度防禦功能的防護，基本的深度防禦功能防護包括多重功能目標，以及場址合適性、場址設計、設施運轉、場址封閉、環境偵測、廢棄物接收、場址所有權歸屬、監管控制與運轉基金的確保。

A.8.2 陸地處置設施之深度防禦概念

深度防禦的防護概念是用來補強不確定性所可能造成的安全威脅，所述不確定性來自處置場的實際狀況、組成各部的可靠度與運轉功能等相關知識的不確定性。處置場作為核燃料使用壽期的最後階段，必須要能夠確保放射性廢棄物在長時間條件下得以受到限制與隔離，但隨著時間軸的延伸，不確定性也將隨之增加，而具深度防禦功能的防護則是用以處理此一不確定性的謹慎方法。

如前述 10 CFR 61.2 的定義，深度防禦是指針對安全所採用的多層、具重複性且各自獨立的防禦手段。多層防護可確保單一防護層失效時，其他層的防護功能仍能確保人員的健康與環境的安全；重複性防護層可確保個別防護層失效時，其他具相同功能的防護層仍能確保其功能效益不受影響；獨立防護層在於確保防護層不會因為單一防護層的失效引至整體防護功能的喪失。

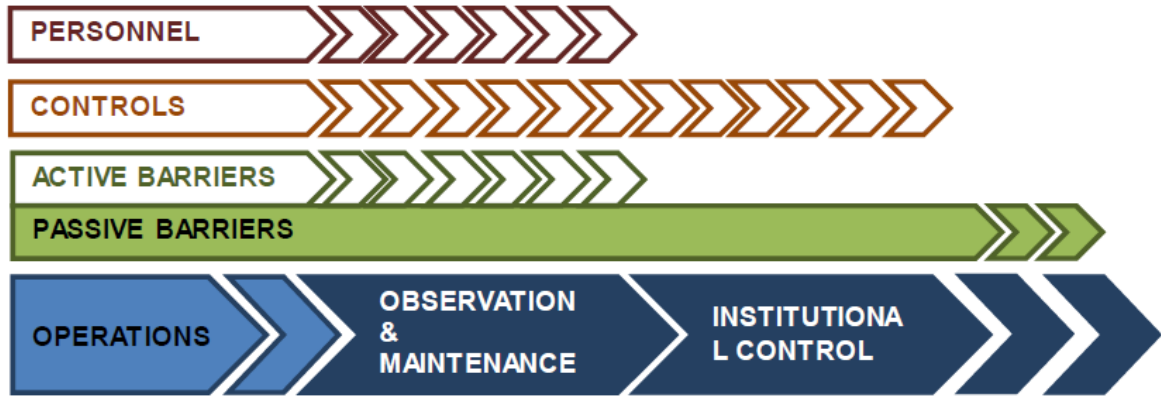
多層防護是由不同屬性的各個防護層所組成，包括了物理性障壁、化學性障壁、適當的管制作為與訓練有素的專業人員，詳如附圖 A.22。



附圖 A.22 多層防禦示意圖

每一個防護層都具有減緩核種外釋與降低放射性曝露對人員傷害的功能，且可區分為被動安全與主動安全功能，或是二者兼備。主動安全功能是指由申照者主動執行的偵測與安全維護措施，例如空氣濾清設備必須仰賴電力供給與持續的維護始能發揮其功能；被動安全功能是指無需採用主動的執行方式，也無須提供額外的能量供給以維持其功能運轉。對低放射性廢棄物處置場而言，在封閉期之後的安全維護以採用被動安全防護較為適合，主動安全防護則是適用於運轉期。

申照者必須能清楚地描述障壁設施、管制作為與專業人員的功能，及其在防護功能與深度防禦防護中所擔負的角色與能力。相關的描述還必須包括達成功能目標的技術基準與可能的不確定性，且視狀況需要須提供時間架構圖，以說明障壁設施、管制作為與專業人員在處置場的生命週期中，各自發揮功能的時間區段，詳如附圖 A.23。



附圖 A.23 處置場的生命周期及深度防禦所含多層防護之時間架構

A.8.3 深度防禦分析

10 CFR 61.13(f) 要求申照者能證明所提出的防護措施確實具備深度防禦的功能，申照者應該從風險告知的觀點來證明防護措施的多層性、重複性與獨立性。

最低限度，申照者必須能確認何謂具備深度防禦之防護，且能描述其安全功能，提供相關的技術基準。此外，必須能夠瞭解及根據相關的準則，證明深度防禦之防護已納入處置場安全評估之一部分，且可根據 NUREG-2175 第 2.4 節的系統描述來加以表示，及根據 10 CFR 61.13(a)至(e)的技術分析進行模擬。綜上，申照者必須依上述內容及相關分析結果，從風險觀點確認深度防禦之防護，而非另外發展各別的證明分析方法。但就某些狀況而言，申照者或許必須另外考量其他事件、作用與替代性情節，作為驗證深度防禦防護之根據(NUREG-2175 第 2.5 節)。

1.深度防禦的識別

申照者必須提出有關陸地處置設施之深度防禦相關識別說明，須根據 10 CFR 61.3 的技術分析，證明所有的保護措施或是防禦層確實符合深度防禦的概念-多重障壁、管制作為與專業工作人員，執照持有者亦必須清楚的指出防護層何時可視為重複性防護層。

審查者必須確認：(1)執照持有人是否已經根據 10 CFR 61.3 的技術分析完成多重防禦層的識別；(2)必須評估最重要的障壁設施、管制作為與專業工作人員是否符合深度防禦的功能目標；(3)審查者必須確認至少有一處重複性防護層與一處獨立的防禦層。

2.安全功能的描述

申照者必須針對深度防禦所採取的所有防護層，以定性或定量的方式說明其安全功能，且相關的說明必須包括達成安全功能所需要的技術基準。陸地處置設施的安全功能，係著重於：(1)限制水及個人與廢棄物的接觸；(2)核種自廢棄物釋出的量要能最小化；(3)核種在場址所處環境中的傳輸量要能最小化。此外，其他的安全功能還包括結構物穩定或限制放射性的曝露。

每一個防護層的安全功能可能是有時間性的，例如工程障壁可能在未來的某個時間點因為材料劣化而終告破壞；然而，也可能因為處置場址本身的特性而能無限期地維持其安全功能。因此，執照持有人必須能夠描述且分辨現有的技術基準所能提供防護層的安全功能時效，倘若所規劃的防護層其安全功能時效已超過現有的技術能力或經驗認知，執照持有者必須提出額外的防護輔助措施，以確保其安全功能與時效符合預期。執照持有者亦必須透過定性與定量的方式，描述每一個防護層在其安全功能與時效上的不確定性。

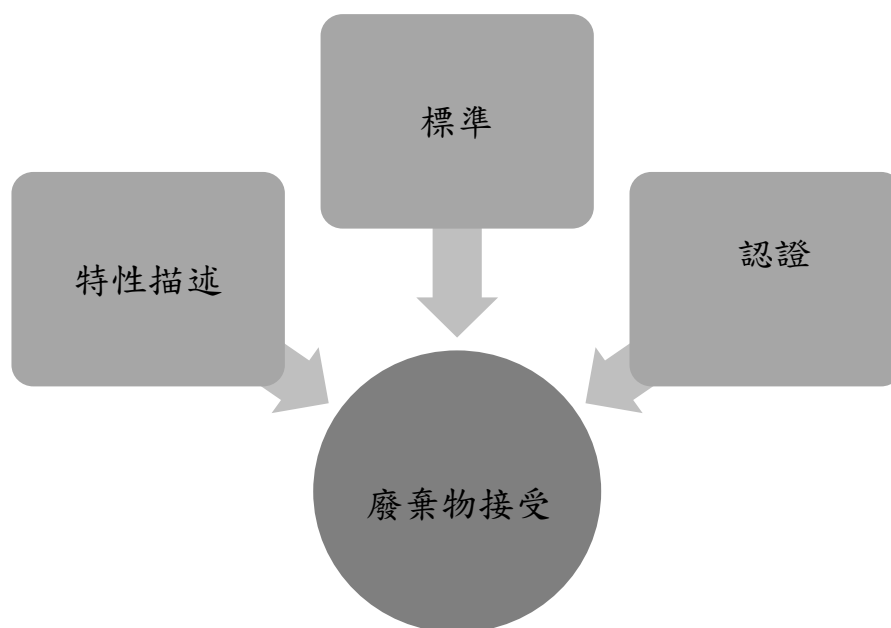
審查者必須確認：(1)每一個防護層的安全功能是否有清楚地描述，及其在深度防禦中的防護功能；(2)必須確認相關的描述是否含括多重防護的安全功能；(3)所述安全功能是由獨立的防護層或是非獨立的防護層所提供；(4)是否有清楚地描述防護層的安全功能時效性；(5)本處所述之防護層安全功能確實能應用在其他的分析。

A.9 廢棄物接收

申照者被許可應提供的資訊，審核人員應評估關於廢棄物接收要求。首先，廢棄物接收標準為廢棄物產生者確認以下內容：(1)放射性核種的允許限值；(2)可接收的廢棄物和容器規格，以及(3)限制或禁止，以便廢棄物被接收作為低放廢棄物處置。附圖 A.24 列出廢棄物接受之組成說明，說明 10 CFR Part 61 廢棄物接收的主要組成部分。該法規還要求申照者至少每年審查廢棄物接收標準、特徵化方法和認證計畫的內容和實施情況。

廢棄物接收包含以下重點，申照者應提供資訊，審閱者應根據廢棄物接收要求進行這些資訊的評估。首先，廢棄物接收標準須確認廢棄物來源的資訊包含：

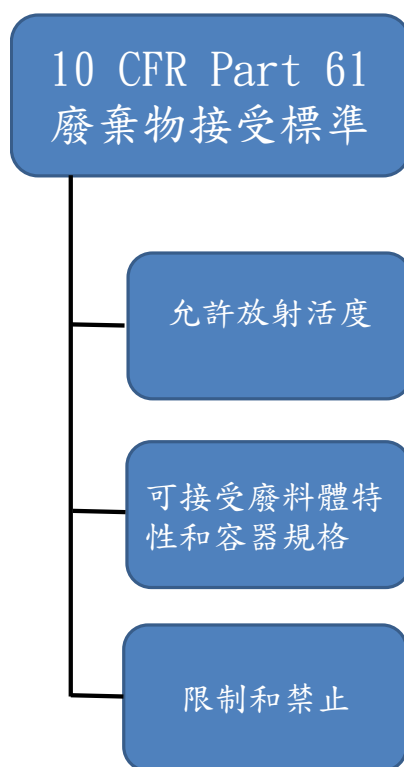
- (1)放射性核種的允許限值；
- (2)可接受的廢棄物形式和容器規格；
- (3) 限制或禁止廢棄物被接受作為低放處置。



附圖 A.24 廢棄物接受之組成說明

A.9.1 廢棄物接收標準

廢棄物接收標準描述申請者應提供的資訊，證明廢棄物接收標準已經符合規定要求。其次，為了證明廢棄物符合接收標準，廢棄物必須充分特徵化。其驗收標準的目的在提供合理的保證滿足 10 CFR Part 61 的功能目標。具體而言，法規要求廢棄物驗收標準至少規定了特定放射性核種可允許活度和濃度、可接受的廢棄物形式特徵和容器規格，以及對廢棄物、材料或容器的限制或禁止。附圖 A.25 描述 10 CFR Part 61 有關廢棄物接收標準的主要項目，申照者可能需要提供超出 10 CFR Part 61 要求的其他標準，滿足其他監管要求。



附圖 A.25 10 CFR Part 61 廢棄物接收標準的組成部分

1. 允許的活度和濃度

10 CFR Part 61 廢棄物接收要求允許申照者選擇根據 10 CFR 61.13 要求的技術分析為任何陸地處置設施制定允許的限制，或選擇根據 10 CFR 61.55 要求的近地表處置設施的分類限制。例如，申照者處置與製定廢棄物分類的限制時，考慮類似蝕屑流(waste streams)的廢棄物可能希望依賴這些限制。

(1)來自技術分析的允許限制

陸地處置設施處置後之放射性可能需要限制，確保(i)保護公眾免受操作期間和操作停止後的釋出；(ii)保護可能無意闖入處置場址之個人；(iii)在操作期間保護個人，以及(iv)封閉後處置場址的穩定性。申照者應在技術基礎上描述允許限制，以便在制定允許限值時如何解釋預期盤存量的可變性和不確定性。透過控制或限制減輕不確定性是一種方法。以下一般準則對於根據 10 CFR 61.58 制定允許限值非常有用：

- 應保守地建立允許限值，以減少未來減輕的需要。
- 製定允許限值的分析應盡可能完整，並包括不確定性。

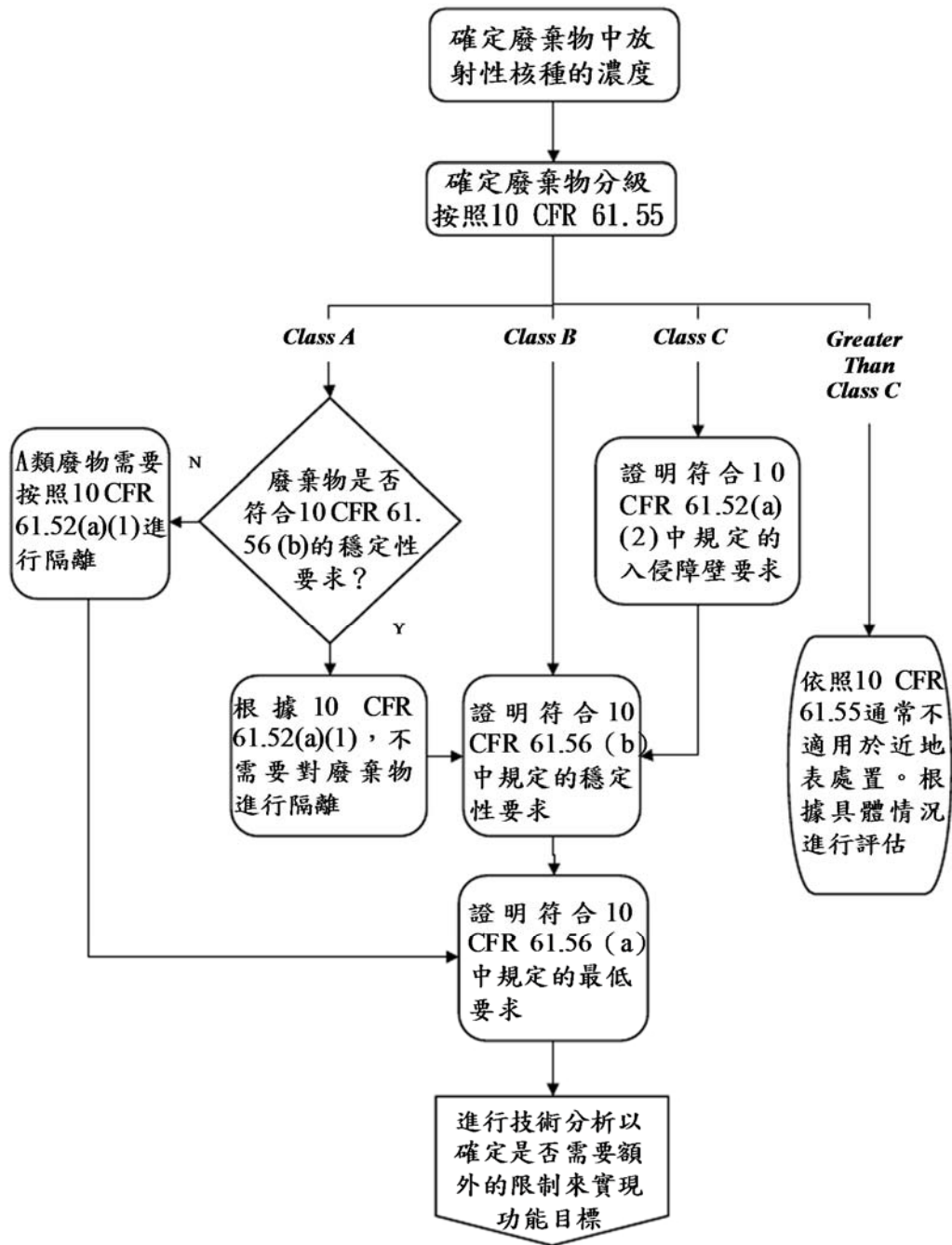
允許的限制將受到處置場址及其環境的複雜性、分析中的保守性以及支持評估的可用資訊量所影響。

(2)廢棄物分類產生的允許限值

申照者選擇制定放射性核種的允許限值根據 10 CFR Part 61 中的廢棄物分類要求，可以簡單地報告 10 CFR 61.55 中報告的濃度限值。10 CFR 61.55 中規定的限值應基於每個包件。根據廢棄物的危害和穩定性，廢棄物分類可確保廢棄物的處置方式可以限制潛在的暴露，包括對無意闖入者的暴露。附圖 A.26 說明了低放處置廢棄物分類和隔離要求。申照者還必須確保可接受的廢棄物形式特徵、設施操作執行標準與相關的要求一致。

(3)不重要的放射性核種

申照者可以選擇不制定放射性核種的限值，這些放射性核種的總預計劑量不超過功能指標規定限值的 10%。也就是說，所有被認為不重要的放射性核種的總和不應超過特定功能目標限值的 10%。申照者證明放射性核種不重要時必須考慮其劑量，以證明其功能目標得到滿足。



附圖 A.26 廢棄物分類和隔離的廢棄物分類

2.可接收的廢棄特性和容器規格

10 CFR Part 61 中第 61.58(a)(2)節要求申照者指定可接受的廢棄物形式特徵和容器規格作為廢棄物接收標準的一部分。可接受的廢棄物形式特徵和容器規格以及其他廢棄物接收標準(例如放射性核種限制)提供了合理的保證，即功能目標將得到滿足。可接受的廢棄物形式特徵和容器規格包括便於

處置廢棄物處置設施的性質，促進廢棄物的穩定性，以最大限度地減少沉陷和水與廢棄物的接觸，最大限度地減少放射性核種從處置場址外釋和遷移，阻止或排除無意闖入廢棄物場址，或限制操作期間的暴露。

3.限制或禁止

10 CFR Part 61 第 61.58(a)(3)節要求申照者規定對可能影響功能目標的廢棄物、材料或容器的限制或禁止。申照者應識別任何特定的放射性核種、化學或危險材料，或限制或禁止在設施內接受的特定容器或容器類型。限制和禁止應充分反映 10 CFR 61.56(a)中規定的最低廢棄物特性之要求。

A.9.2廢棄物特徵方法

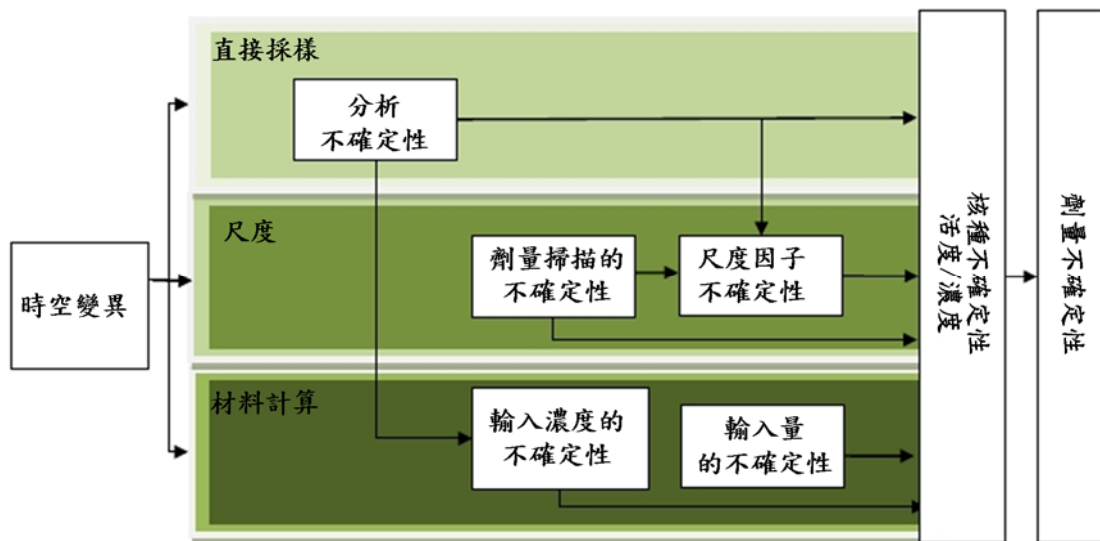
申照者需提供關於確定廢棄物特徵可接收方法的指南。最後，廢棄物必須經過認證，以確保廢棄物符合接收標準，因此適合在地質處置設施中進行處置。根據 10 CFR 61.58(b)申照者必須提供廢棄物特徵接受的方法。法規規定至少必須提供以下資訊，以充分描述廢棄物的接受性：

- 物理和化學特性。
- 體積，包括廢棄物和任何穩定或吸收介質。
- 容器和內容物的重量。
- 放射性核種的識別、活度和濃度。
- 特徵化日期。
- 產生源 (例如：包裝日期、加工廢棄物的位置)。
- 特徵化廢棄物所需的任何其他資訊，以證明符合廢棄物接收標準。

1.可接收的廢棄物特徵化方法

這些廢棄物特徵化方法中，每一種都受到各種不確定性的影響(附圖 A.27)，包括但不限於以下項目：

- 受時間和空間的變化影響，樣本的整體代表性程度；
 - 直接取樣放射性核種的濃度；
 - 用於建立比例因子的樣本；
 - 用於確定過程輸入濃度的樣本。
- 取樣放射性核種的分析不確定性；
- 劑量率掃描的不確定性；
- 未採樣容器的任何縮放因子的不確定性；
- 如果產品中的放射性核種濃度基於輸入並且未獨立測量，則輸入和輸入量中放射性核種濃度的不確定性。

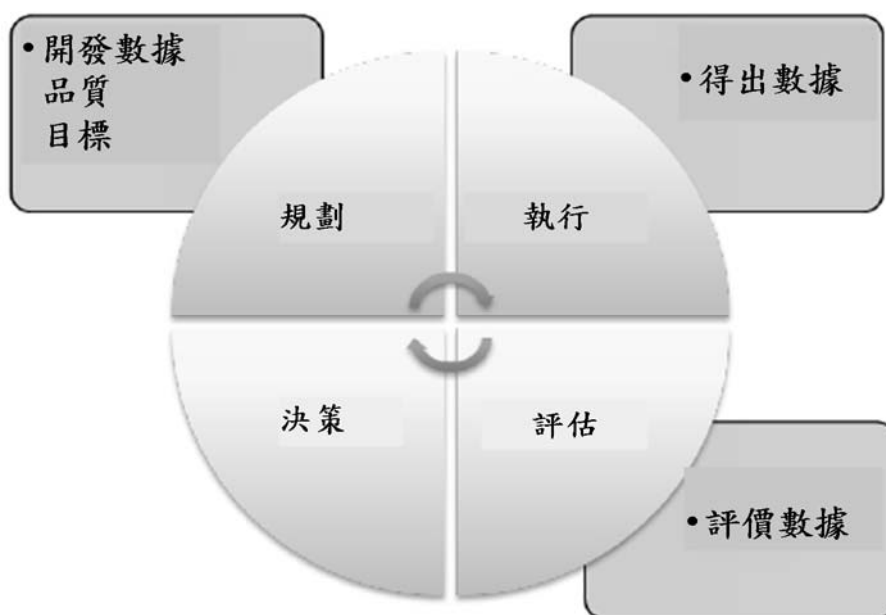


附圖 A.27 確定處置廢棄物中放射性核種活度或濃度的各種方法之不確定性來源

2.數據品質目標過程

透過廢棄物特徵化數據證明廢棄物接受標準得到滿足。附圖 A.28 說明數據生命週期(Data Life Cycle)於每個階段進行廢棄物特徵化相關的主要作業流程。另一方面，數據生命週期(Data Life Cycle)規劃階段是數據品質目標(DQO)流程，DQO 流程用於建立數據品質標準和製定特徵化計畫，包含七個步驟：

- (1)陳述問題；
- (2)確定研究的目標；
- (3)確定決定的輸入；
- (4)定義研究邊界；
- (5)開發分析方法；
- (6)指定功能或驗收標準；
- (7)制定獲取數據的計劃。



附圖 A.28 廢棄物特徵描述的數據生命週期框架

3.文獻

申照者應要求廢棄物產生者(waste generators)提供足夠的廢棄物特徵化描述文獻，以確保廢棄物充分的特徵化，證明符合驗收標準。文獻通常包括以下內容：

- 組織和責任：確認負責廢棄物特性描述的組織和人員；
- 品質保證：根據可接受的品質保證計畫收集廢棄物特徵化數據；
- 程序：程序形式化廢棄物特徵化描述的過程；
- 記錄：廢棄物特性記錄應包含滿足廢棄物認證計畫規定的廢棄物接收標準所需的記錄。

A.9.3廢棄物特徵方法

根據 10 CFR 61.58(c)，申照者必須制定一項計畫證明廢棄物在收到處置設施之前符合驗收標準。廢棄物認證還可確保處置設施在符合 10 CFR Part 61 功能目標中製定的限度內營運。經認證符合處置設施的廢棄物驗收標準後，必須對廢棄物進行管理，以保持其品質至進入處置單元。法規所規定認證計畫必須包含以下：

- 指定處置設施進行認證和接收廢棄物處置的權力；
- 提供證明廢棄物符合廢棄物驗收標準的程序；
- 指定廢棄物特性描述、運輸和認證所需的文獻；
- 確認維護和提供審核標準所需的記錄、報告、測試和檢查；
- 提供管理驗證廢棄物的途徑，使其維持認證狀態。

申照者應提出包含認證程序的資訊，以確保在處置設施接收的廢棄物可以接受處置。

1. 認證程序

申照者應制定一個認證程序，確保廢棄物及其包件符合處置設施廢棄物接收標準。並應提供可追溯和可驗證的證明記錄和基礎。認證程序應解決以下問題：

- 誰負責證明廢棄物可以接受處置以及其要求？
- 廢棄物如何以及何時被認證為可接受處置？
- 提供可追溯和可驗證的證明記錄以及如何審核證明需要哪些文件？
- 如何管理經過認證的廢棄物以維持其品質？

2. 品質維持

必須對已經認證符合陸地處置設施廢棄物驗收標準的廢棄物進行控制，使品質保持有效直至設施處置。否則，廢棄物將需要重新認證。認證機構應制定符合相關要求的廢棄物認證程序。

A.9.4 定期審查

10 CFR 61.58(f)的規定要求處置設施申照者至少每年審查其廢棄物接收計畫的內容和實施情況。申照者還應評估和記錄廢棄物接收標準是否繼續保護公共健康和 safety，如果評估結果表明廢棄物接收標準繼續提供合理的保證，則文獻應包括依賴現有廢棄物接收標準的依據。如果評估發現廢棄物接收標準不再保證滿足功能目標，則應更新標準。申照者應提交修改後的標準和支持性技術分析，以證明修改後之功能目標得到滿足。

A.9.5 減輕

在進行減輕之前，申照者應提供描述他們建議採取的行動資訊。擬議採取的行動可能包括修改處置設施設計或補救措施。設計修改可以包括安置更

高功能的工程覆蓋層或使用可滲透的處置牆、導流溝和板樁等，但應透過技術分析的結果來制訂修改設計。申照者應提供技術基礎來證明 10 CFR 61.43(即在運轉期間對個體的保護)將補救以符合要求，且應制定成本效益分析以選擇適當的補救措施。審核人員應評估申照者提供的資訊，包括提出行為的技術基礎，審核人員應評估備案和所選則補救行動的基礎。如果提出設計修改，審核人員應評估工程障壁功能的技術基礎，確認申照者是否能實現工程障壁的預期功能，且應確認修改設計是否與技術分析結果一致。如果選擇了補救措施，審核人員應評估申照者將要清除多少廢棄物以及申照者如何清除廢棄物之依據，證明符合 10 CFR 61.43 的技術基礎應予以審查。最後，審核人員應評估已製定的成本效益分析，以確保緩解動的合理性。

A.10 功能確認

功能確認是測試、實驗和分析的程序，申照者進行評估和驗證資訊的準確性，以證明在處置場址封閉之前滿足 10 CFR Part 61 的功能目標。功能確認之要素可在營運期間以及在監管期間內完成。功能確認計畫之主要內容如下：

- 驗證在施工過程中遇到的場址條件在授權範圍內；
- 驗證設計的障壁和其他深度防禦按照設計建構，且在授權的範圍內執行；
- 驗證申照者依賴許可證達成符合功能目標的自然障壁功能；
- 監測設施的功能；
- 驗證安全案例。

功能確認與處置系統設計、開發和施工相結合，以確保處置系統按預期執行。功能確認可用於補充滿足 10 CFR 61.28、10 CFR 61.52 和 10 CFR 61.53 要求的資訊。根據 10 CFR 61.28，許可證持有者需要更新技術分析；如果最新的分析證明滿足 10 CFR Part 61 的功能目標，委員會將發布修正案授權封閉。附表 A.13 彙整了 10 CFR 各章節對應之監管要求。

附表A.12監管要求支持功能確認

章節	要求
10 CFR 61.7(c)(3)	封閉後監測和維護
10 CFR 61.12(g)	關於處置場所封閉計畫的說明，包括便於封閉和消除維護需要的那些功能
10 CFR 61.28	封閉申請的內容
10 CFR 61.52	陸地處置設施運營和處置場封閉
10 CFR 61.53(c)	施工和運營期間的環境監測
10 CFR 61.53(d)	環境監測、運作後監督

申照者應確定是否更新廢棄物驗收標準和支持性技術分析的決定依據，更新技術分析可確保識別和執行充足的操作規範，以減少潛在的彌補措施(例如安置新障壁、清除廢棄物)。可能決定更新廢棄物接受標準，並更新技術分析的條件可能包括以下內容：

1. 與預期不同的庫存(例如數量、濃度、形式)；
2. 新的場址資訊(例如，環境條件、特徵化數據)；
3. 有關工程障壁功能或其他深度防禦保護的新資訊；
4. 監測與當前分析的數據不一致；
5. 相關科學認知發生重大變化；
6. 使用更新的劑量測定；

10 CFR 61.53 要求監測環境介質。需要進行監測，放射性核種從處置場址離開場址邊界之前，提供放射性核種外釋的早期預警。例如，監測工程覆蓋層下的土壤濕度可能提供滲透增加的資訊，這可能導致處置設施放射性外釋的增加。

申照者可以使用技術分析來支持功能目標的合規性，可幫助確定哪些類型的資訊對監控最有用，以及何時的資訊是重要的。監測數據通常具有中至大的可變性。如果在功能確認中使用監測數據，NRC 工作人員建議申照者提供監測數據的預期可變性的描述，以防止誤解觀測數據。



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

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術
建立之關鍵課題研析
子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計
驗證評估之研究

計畫編號：107FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：龔誠山

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 107 年 12 月

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術

建立之關鍵課題研析

子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗

證評估之研究

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫二主持人：龔誠山

研究期程：中華民國 107 年 2 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 109 萬元(子計畫二經費)

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 107 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)

摘要

處置設施工程障壁系統須依照其處置環境特徵進行設計。雖然各國之處置安全要求與安全功能考量基本相似，但處置設施設計考量與工程障壁系統設計結果不盡相同。本計畫利用前期計畫提出之「主要設計特徵」、「設計準則」與「設計基準」審驗架構，以及 IAEA 之「隔離」與「圍阻」兩項處置設施之主要安全功能考量。將所蒐集之美國、瑞典與日本之處置工程設計案例，依「主要設計特徵」、「安全功能」、「主要設計目標」、「設計對象」與「主要評估之特徵與作用」等考量，進行處置設施設計與評估考量分析，並嘗試將各國處置設施設計考量轉換至相同的考量架構。

坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性詳如表 3.2-1。具相關性之主要設計特徵分別為：「降低處置單元水滲透」、「工程障壁結構完整性」、「工程障壁具良好遲滯功能」、「運轉期降低廢棄物與水接觸」、「運轉期及封閉期場區之排水功能」、「場址封閉與穩定性」等項目。而相關之參數則包含：「孔隙率」、「水力傳導係數」、「有效擴散係數」、「通過設施流量」、「遷移路徑長度」、「流出點位置」、「孔隙水的化學特性」，以及代表「吸附分配係數」的「吸附特性」等參數。分別依處置設計單元說明其設計對象之主要設計特徵考量、工程設計目標與項目、安全分析參數關聯性，以及安全功能審驗技術考量。較需注意之審驗技術為對應設計成果之參數選用考量，需確認影響參數選用之各項考量因子均已考量且符合參數試驗之條件設定。於考量處置設施封閉後經過長時間物理與化學作用後之參數選用時，需注意處置障壁單元間可能之交互影響作用。此部分之審驗技術詳如 3.3 節所述。

進行前述參數審查作業時，應注意其數據充足性、不確定性與模型分析技術考量是否合適且可接受。另須注意參數設定之一致性，如膨潤土降低水力傳導係數設計與控制膨脹壓力設計，均與有效黏土密度相關，但兩者之功能性考量與有效黏土密度設計關係卻是相反的。同樣的有效黏土密度設計，並無法達成降低水力傳導係數與降低膨潤壓之功能目標，需特別審視其功能設計與參數間之合理性。

Abstract

The design of engineering barrier system of a disposal facility must base on its disposal environment feature. Despite the similarities of the basic consideration for disposal safety requirements and safety functions among countries, their consideration for disposal facility design and the design of engineering barrier system are varied. The analysis conducted in this project utilized the existing inspection framework proposed in the previous project (i.e. principle design features, design criteria, and design basis), as well as the principle safety function consideration of the disposal facility proposed by IAEA (i.e. isolation and containment function). The disposal facility design and assessment consideration of American, Swedish and Japanese disposal engineering designs were analyzed based on the framework of consideration of principle design feature, safety function, principle design goal, design target, as well as features and processes which are assessed as major items. The disposal facility design consideration of each country were also transformed to the same framework of consideration.

The correlations between tunnel disposal engineering design and safety analysis parameters are listed in Table 3.2-1. The related principle design features are: (1) minimizing infiltration of water into disposal units; (2) ensuring the integrity of engineering barrier structure; (3) providing engineering barrier with well contamination function; (4) minimizing contact of waste with standing water during operations; (5) providing adequate drainage during operations and after closure; (6) facilitating site closure and stabilization, etc. The relevant parameters include porosity, hydraulic conductivity, effective diffusion coefficient, flux through facility, migration distance, location of flow-out, chemistry of pore water, and sorption distribution coefficient which representing sorption feature. Each disposal unit were introduced with their principle design features consideration, engineering design goal and item, correlations of safety analysis parameters, as well as the inspection technique consideration for safety function. Among the inspection techniques, care needed to be taken specifically for the consideration of parameter selection which corresponding to the design result, all related consideration factors influencing parameter selection must be considered, and the consideration factors must in conformity with the condition setting of parameter test. When considering the parameter selection of post-closure disposal facility which experienced long-term physical and chemical process, it is noted that there

may be interactions between disposal units. Related inspection techniques were introduced in section 3.3.

When implementing the aforementioned inspections, data adequacy, uncertainty, and considerations applied to the model construction should be appropriate and acceptable. The consistency between parameters should be noticed as well, for instance, the hydraulic conductivity lowering design of bentonite and the swelling pressure control design of bentonite are both related to effective clay density, but (1) the correlation between hydraulic conductivity lowering design and effective clay density, and (2) the correlation between swelling pressure control design and effective clay density are opposite. The same effective clay density design cannot fulfill both function goals of lowering hydraulic conductivity and lowering swelling pressure, there reasonability of the function design and parameter should be inspected discreetly.

目錄

第一章 前言.....	1
1.1 計畫目的.....	1
1.2 工作項目.....	1
第二章 蒐集與研析國際低放處置設施工程設計與安全分析之關聯性考量.....	3
2.1 工程設計與安全分析概述.....	3
2.1.1 安全分析概述.....	3
2.1.2 工程設計概述.....	6
2.2 工程設計與安全分析作業關聯性分析.....	10
2.2.1 低放處置安全功能與處置設計考量回顧與分析.....	10
2.2.2 低放處置安全功能與主要設計特徵考量回顧與分析.....	14
2.3 國際低放處置設施設計之安全功能考量案例.....	16
2.3.1 美國案例分析.....	16
2.3.2 瑞典案例分析.....	19
2.3.3 日本案例分析.....	29
2.4 低放處置設施設計與安全功能之關聯考量綜整.....	32
第三章 研析坑道處置工程設計審驗項目與安全分析參數之關聯性及審驗技術考量.....	37
3.1 安全分析作業之核種遷移分析關聯參數.....	37
3.2 坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性分析.....	39
3.2.1 地面排水設施設計與安全分析參數關聯性分析.....	41
3.2.2 坑道設施設計與安全分析參數關聯性分析.....	42
3.2.3 處置窖設計與安全分析參數關聯性分析.....	45
3.2.4 坑道回填設計與安全分析參數關聯性分析.....	47
3.2.5 低透水層設計與安全分析參數關聯性分析.....	49
3.3 設施設計與安全分析參數關聯性審驗技術考量.....	51
3.3.1 水泥類材料「水力傳導係數」與「有效擴散係數」審驗技術考量.....	51
3.3.2 膨潤土類材料「水力傳導係數」與「有效擴散係數」審驗技術考量.....	54
3.3.3 「吸附特性」參數審驗技術考量.....	57
3.3.4 「通過設施流量」參數審驗技術考量.....	59

3.3.5 影響參數變化之長期作用考量	59
第四章 研析近岸與離島坑道處置工程設計之審驗評估項目與所需 驗證技術	61
4.1 工程設計與安全分析作業參數審驗	61
4.2 參數審查基本考量	62
第五章 研提我國低放坑道處置工程設計審查重點或注意事項建議	63
參考文獻	65

表目錄

表 2.1.2-1 處置設施各階段之設計目標彙整表	7
表 2.2.1-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(物管局， 2017)	10
表 2.2.2-1 國際案例將探討之主要設計特徵與考量	15
表 2.3.1-1 美國案例之處置設施設計與評估考量分析表	17
表 2.3.2-1 安全原則與其對應之安全功能(SKB, 2014)	19
表 2.3.2-2 瑞典案例之處置設施設計與評估考量分析表	28
表 2.3.3-1 日本案例之處置設施設計與評估考量分析表	31
表 3.2-1 坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性	39
表 3.3.5-1 影響參數變化之作用與事件	59

圖目錄

圖 2.1.1-1 安全分析流程示意圖(IAEA, 2004).....	4
圖 2.1.1-2 典型的評估程序示意圖(U.S.NRC, 2015).....	4
圖 2.1.2-1 處置工程設計與安全分析的作業流程關聯性(IAEA, 2001)6	
圖 2.1.2-2 NUREG-1200 之處置設計審查章節架構示意圖(物管局， 2017).....	9
圖 2.2.2-1 處置設計審查考量架構示意圖(物管局，2017).....	14
圖 2.3.1-1 美國近地表低放處置設施設計概念示意圖(U.S.NRC, 1965)	17
圖 2.3.2-1 SFR 處置場(SFR-1，白色部分)與擴建計畫(SFR-3，藍色部 分)配置圖(SKB, 2014).....	20
圖 2.3.2-2 1BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	21
圖 2.3.2-3 2-5BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	22
圖 2.3.2-4 1BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	23
圖 2.3.2-5 2BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	24
圖 2.3.2-6 1BTF 與 2BTF 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	25
圖 2.3.2-7 筒倉處置封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	26
圖 2.3.2-8 BRT 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014).....	27
圖 2.3.3-1 餘裕深度處置設計概念示意圖.....	30
圖 2.7.2-3 餘裕深度處置坑道障壁系統斷面示意圖.....	30
圖 3.1-1 評估地下水情節所需之核種遷移主要參數(日本土木學會， 2008).....	38
圖 3.3.1-1 水泥類材料之「水力傳導係數」與「孔隙率」關聯性(日本 土木學會，2008).....	52
圖 3.3.1-2 裂縫幅度與水力傳導係數之關係(日本土木學會，2008).52	
圖 3.3.1-3 孔隙率與有效擴散係數之關係(日本土木學會，2008).....	53
圖 3.3.1-4 裂縫幅度與有效擴散係數之關係(日本土木學會，2008).54	
圖 3.3.2-1 膨潤土材料的「水力傳導係數」與有效黏土密度之關係(日 本土木學會，2008).....	55
圖 3.3.2-2 壓縮粒狀膨潤土的有效黏土密度與透水係數之關係(日本 土木學會，2009).....	55
圖 3.3.2-3 不同孔隙水化學環境對於膨潤土水力傳導係數之影響(日 本土木學會，2009).....	56

圖 3.3.2-4 膨潤土材料的「有效擴散係數」與有效黏土密度之關係(日 本土木學會，2008).....	56
圖 3.3.2-5 有效黏土密度與膨潤壓之關係(日本土木學會，2009).....	57
圖 3.3.3-1 MX-80 膨潤土於不同溶液中的 Sr 吸附量(V. Garrido, et al., 1998).....	58

1 第一章 前言

1.1 計畫目的

我國與許多國家為使用核能之國家，處理低放射性廢棄物之方法均採用長期隔離於人類生活圈之策略，而我國目前亦積極推動低放射性廢棄物處置作業，其中，台電公司針我國 2 處建議候選場址進行各項處置技術發展建置。安全管制機關為提升低放射性廢棄物處置設施的安全，積極針對國內外處置技術及環境進行研析與探討，以建置合宜審查技術與規範。政府為確保放射性廢棄物處置安全，除了要求安全管制機關必須不斷提升審驗技術，也必須建置適合國內低放處置之規範。為落實本土化之低放處置審查技術，本計畫針對坑道處置概念精進各項審查技術，透過四年期程，包含國際資訊研析、驗證方法研究、驗證評估研究、審查規範建立(修正)等四步驟，逐步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各領域進行研究，以使國內處置管制技術能與國際接軌。

本年度總計畫為此四年期工作之第三年度，過去已針對場址特性、工程設計、安全評估等主要方向進行國際資訊研析以及驗證方法研究，本年度將根據前兩年之研究成果進一步進行驗證評估，含括(1) 坑道處置場址特性審驗技術驗證評估；(2) 坑道處置工程設計驗證評估；(3) 處置坑道結構穩定驗證評估；(4) 坑道處置長期安全驗證評估；(5) 生物圈安全評估審查技術等 5 個主題，並分別由 5 個子計畫進行研析。

本子計畫目標為在工程設計方面蒐集美國、瑞典與日本之處置案例分析其工程設計與安全分析之關聯性與考量方式，以及釐清不同安全功能之審驗技術考量，與其「主要設計特徵」、「設計準則」與「設計基準」之參數關聯性，並依近岸與離島坑道處置設施之特徵，釐清於工程設計審驗項目其所需技術，研擬「審查要點與接受基準」之「設計目標與功能需求」中所述之關鍵議題與其可能之評估方式，最後提出審查重點或注意事項建議。總計畫期盼能逐步達成以下目標：(1)處置設施相關量化資訊及關鍵課題釐清；(2)各項處置技術驗證方法之建立；(3)提供適合於國內坑道處置技術與提升審驗能力；(4)回饋於國內「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」相關章節之精進。

1.2 工作項目

工作項目分別為：

- (1)蒐集與研析國際低放處置設施工程設計與安全分析之關聯性考量。
- (2)研析坑道處置工程設計審驗項目與安全分析參數之關聯性及審驗技術考量。
- (3)完成研析近岸與離島坑道處置工程設計之審驗評估項目與所需驗證技術。
- (4)研提坑道處置設施工程設計審驗之關鍵議題與評估方式。
- (5)提出我國低放坑道處置工程設計審查重點或注意事項建議。

2第二章 蒐集與研析國際低放處置設施工程設計與安全分析 之關聯性考量

安全分析為評估處置設施是否可以達成其確保處置安全之重要評估過程，處置安全評估之時期略可分為：設計、興建、運轉、封閉、監管以及解除監管後之長期安全等階段。處置設施在不同時期其安全功能目標並不一定相同，故相同的處置設施單元有可能需同時滿足不同時期之安全功能目標。本項工作規劃蒐集美國、瑞典與日本之處置案例作為研究對象，並依其處置概念與所在環境差異，分析其工程設計與安全分析之關聯性與考量方式。

2.1 工程設計與安全分析概述

2.1.1 安全分析概述

安全分析之目的是為了確認放射性廢棄物處置設施與其相關作業過程安全性，其討論範圍包括場址特徵與場址適宜性、設施設計、興建、運轉與封閉作業安全性，以及封閉後之長期安全性。特別是針對輻射風險的評估，涉及將處置設施與其作業方式相關之輻射風險與輻射劑量進行量化分析，以便與輻射劑量限值或風險標準進行比較，提供相關利害關係人了解，設施在正常情況與意外事件下可提供確保安全之功能。隨著處置設施的推展，安全分析或其初期評估均會顯示出對於處置設施之安全考量，提供場址選擇、設施設計、運轉作業、封閉規劃等階段之決策參考，逐步強化對於處置設施與運轉作業安全性之信心。

1990 至 1995 年國際原子能委員會(IAEA)「Near-Surface Radioactive Waste Disposal safety Assessment Reliability Study (NSARS)」合作研究計畫，利用不同模式評估特定案例，藉由交叉比對各模式分析成果，建立處置設施安全性之信心。1996 年 IAEA 再度成立合作研究計畫，著重於檢討及加強低放處置場封閉後之安全評估方法，確保以客觀立場驗證處置設施的安全性。於 1997 年提出「Improvement of Safety Assessment Methodologies (ISAM)」做為安全評估之依循。後續，該合作研究計畫於 2004 年發表「近地表處置場之安全評估方法學」報告，所提出之安全評估流程包括：評估內容、描述處置系統、建立及界定情節、建置概念及數學模型、分析結果與建立信心等過程，如圖 2.1-1 所示。美國核管會(U.S. NRC)之 10CFR61 技術

分析考量指引草案(NUREG-2175)所述之技術分析評估流程架構亦與其相似，如圖 2.1-2 所示。

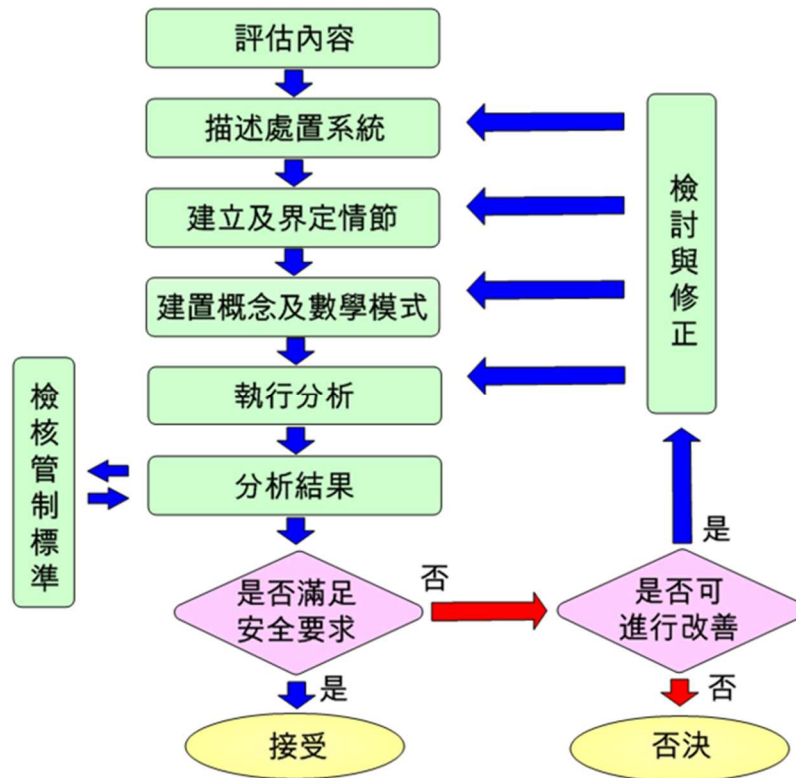


圖 2.1.1-1 安全分析流程示意圖(IAEA, 2004)

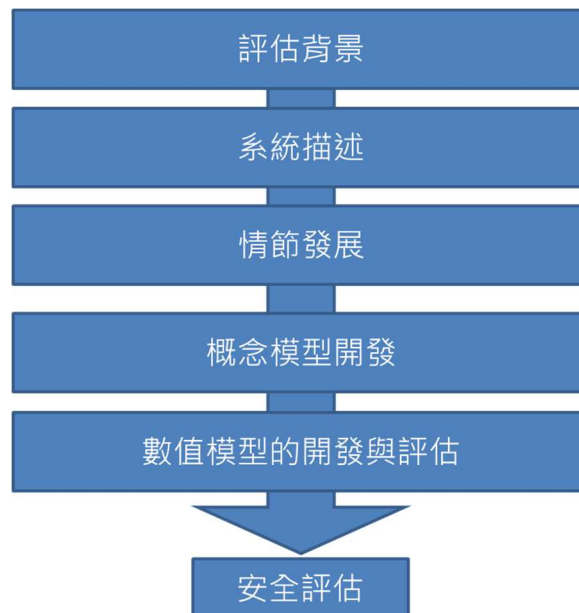


圖 2.1.1-2 典型的評估程序示意圖(U.S.NRC, 2015)

ISAM 建議之安全分析流程是經由評估內容、描述評估系統、建立及界定傳輸情節、建構概念模型與數值模型、進行分析評估、分析反饋與評估成果判定等過程，分述如下：

- (1)具體說明評估內容：說明與界定安全分析目的、初步安全分析採用之原則與安全標準、各階段評估之時間尺度等。
- (2)描述評估系統：針對評估系統各部分進行特性描述，包含廢棄物數量與特性、處置設施位置、工程障壁安全功能與特性、地質圈之地質組成與特性、水文地質特性、生物圈特性等。
- (3)建立及界定傳輸情節：經由篩選適合評估系統各項特徵、事件及作用（簡稱 FEPs），配合處置系統之特性，建立安全評估情節。
- (4)建構概念模型與數值模型：依據情節中各特徵事件過程之性質與關連、評估之空間與時間範圍，選用或發展合適之數值模式並建構概念化模型。
- (5)建立信心：除了證明安全分析結果符合法規要求之外，不確定性對結果之影響，亦須加以瞭解與掌握，藉以建立對於安全分析之信心。

IAEA 認為對處置設施進行安全論證時，必須確認其執行方式與內容符合基本安全原則與安全要求。其基本安全原則為(1)安全責任、(2)政府的角色、(3)對於安全的領導與管理、(4)設施和活動的正當性、(5)防護的最佳化、(6)限制對個人造成的風險、(7)保護當代與後代民眾、(8)防止事故、(9)緊急情況之準備與應變、(10)採取行動減少現有的或未受監管控制的輻射危險。依據 IAEA「放射性廢棄物處置特定安全要求」(NO. SSR-5)所述之安全要求，其與處置工程設計相關之安全要求共計有 26 項要求，依其管理對象類別區分為：處置設施規劃的安全要求、處置設施開發、運轉與封閉的安全要求、安全保證、既存處置設施的安全要求。IAEA 認為欲達成保護人類與環境，避免其受到運轉中或封閉後之放射性廢棄物處置設施可能引起之輻射危害風險。需要針對處置設施不同階段作業如選址、設計、建造、運轉與封閉等作業過程中，設定相關安全標準與要求，用以檢核各階段之處置設施安全性。因此，安全要求的對象包含了(1)管理法規、管理機關與業者等處置事業直接利害關係人的責任。(2)不同階段的安全考量方法。(3)安全的設計概念，如多重障壁、圍阻、遲滯與被動安全功能。(4)興建、運轉與封閉等不同階段的作業安全考量，與循序漸進的安全分析與評量方式。(5)安全保證要求，則是針對處置設施以外的輔助確保安全作為進行要求。

基於 IAEA 對於處置設施之相關安全要求與分析方法學可發現，不同處置作業階段均有其考量處置安全性之方式。隨著作業階段的推展，安全分析作業亦應持續依最新資訊，針對各項安全功能與其相關之特徵、事件與作用，持續更新評估結果，並研判是否需進行功能維護或增補工作。藉此，逐步強化對於處置安全之信心。

2.1.2 工程設計概述

良好的設計是確保處置設施運轉作業與長期安全的關鍵之一。依 IAEA「近地表低放射性廢棄物處置設施設計考量」(Tecdod-1256) 說明處置設施設計目標應包含：(1)隔離廢棄物、(2)控制核種外釋、(3)降低核種外釋之衝擊、(4)設施所需維護降至最低。訂定處置設施工程設計目標時須針對處置安全管理進行全面性的考量，包含：核種種類與活度、廢棄物處理、廢棄物體積與數量、場址特徵、接收作業、暫貯作業、運送作業、工程障壁系統、興建、處置作業、封閉、監測與維管等，用以合理實現處置的安全管理。

(1)工程設計之工作階段考量

處置工程設計除可區分為概念設計、基本設計與細部設計之外。依國際經驗，處置設施工程設計隨著不同處置事業階段的推進，亦將是個迭代設計的過程，隨著現場調查資料的增加，依廢棄物特徵與相關設計進行安全分析，反覆確認或調整設施設計的適宜性。因此，隨著處置事業工作推展，處置工程設計與安全分析的作業流程關聯性如圖 2.1.2-1 所示。

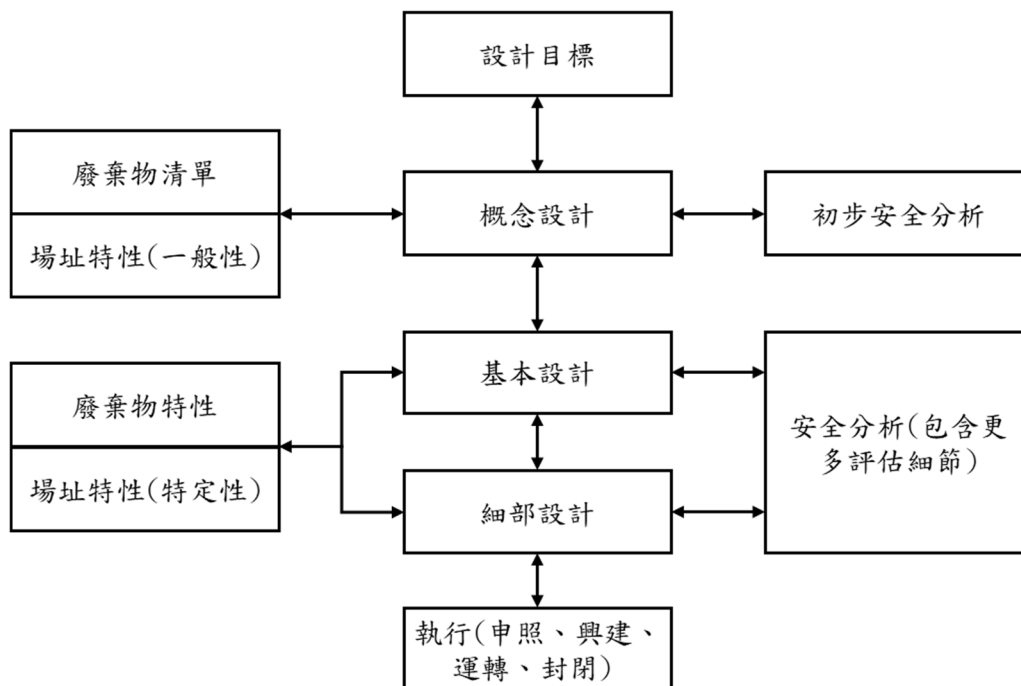


圖 2.1.2-1 處置工程設計與安全分析的作業流程關聯性(IAEA, 2001)

由上述流程可知，處置設施設計流程具階段性與迭代性，且設計檢核過程涉及安全分析作業，其分析資訊將包含廢棄物特性、場址特徵與輻射劑量，並非僅是工程設計常見的結構安定性分析。此作業流程將可協助設計者迭代修改設施設計，以達到所需的安全要求，

且使設施具有良好興建作業、運轉作業與成本可行性。彙整 IAEA「近地表低放射性廢棄物處置設施設計考量」(Tecdoc-1256)所述個設計階段之主要與次要設計目標如表 2.1.2-1 所列。

表 2.1.2-1 處置設施各階段之設計目標彙整表

階段	主要設計目標	其他設計目標
概念設計	處置場址特徵、處置廢棄物對象、處置障壁系統概念等處置場與處置設施概念之選擇與協商	---
基本設計	確認概念設計之處置設施概念可符合法規安全要求與申照要求	<ul style="list-style-type: none"> • 確認設計內容已充分考量場址與環境特徵、廢棄物特性與數量等。 • 更確定整體處置設施之最終定案型式。 • 更進一步確認計畫可行性、運轉與長期安全性、運轉作業可行性與靈活性、確認處置設施運轉與封閉可行性。 • 評估成本與時程 • 更進一步決定各類要求，如：場址資料、廢棄物盛裝容器規格、障壁材料與測試要求。
細部設計	為施工階段以及運轉與封閉接段作準備，確認處置設施可有效執行安全運轉與封閉等作業。	<ul style="list-style-type: none"> • 滿足基本設計進行審查後之新增要求。 • 更詳細的考量場址與環境特徵、廢棄物特性與數量、盛裝容器等。 • 確定整個處置系統和輔助設施的設計細節，並製作相關的圖說。 • 完成設施的建造，設備採購和調試規範。 • 完成設施建設，運營和關閉的成本估算。 • 完成接收規範的具體內容。 • 提供充足的資訊，用以進行安全分析。 • 完成運轉與封閉接段的監測方式。

概念設計階段通常缺乏關於場址或廢物特性的具體信息，故於安全分析通常必須使用估計的廢棄物數量和特徵，以及一般性的場址特徵。概念性的設施功能評估的敏感度研究，有助於確定場址特徵描述所需的項目與資料，以及廢棄物特徵和工程障壁設計與研究所需

的資訊。基本上，應可建議將接收之廢棄物包件、場址與障壁材料須具備之特徵與功能，並提出多重障壁系統之組成，以及各處置單元之預期性能與安全功能。

基本設計階段基本上延續了概念設計的評估內容與成果，並納入了場址選擇時所進行的場址調查資訊。設計內容大致包含：對整個處置系統和處置單元、設施結構、輔助設施和公用服務、接收作業、運轉作業、輻射防護、封閉作業、長期安全要求，以及設施設計的主動與被動控制要求。整個處置系統設計通常包括以下設計細節：處置場位置與基地布置、道路系統、設施布局、排水系統、監測點位置與蒐集系統、處置設施、回填或封閉系統、輻射防護和監測系統、電力等相關輔助系統。主要輔助設施如接收與暫貯設施、港口、行政大樓等。

細部設計將提供更詳細的設計與安全特性描述，以及施工、運轉與封閉的要求。涵蓋了基本設計階段相關的工作程序與項目，對於處置設施及其子系統與單元的描述與要求將更為詳細。處置系統的每個組成單元均藉由工程規範和圖說描述確定尺寸，以便進行施工與檢查。完成詳細的技術分析、成本分析、建築和設備採購規範、施工細節和時間表等。根據法規要求提供申照文件文件，完成處置設施施工、運轉、封閉與長期安全性的評估，確認其確保安全能力。

(2) 工程設計之工作架構考量

如前述，處置設施工程設計須針對處置安全管理進行全面性的考量，包含：核種種類與活度、廢棄物處理、廢棄物體積與數量、場址特徵、接收作業、暫貯作業、運送作業、工程障壁系統、興建、處置作業、封閉、監測與維管等。在物管局「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析，子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法研究」(2017)之研究成果中，已針對工程設計之工作與審查架構進行分析與建議，如圖 2.1.2-2 所示。

該審查架構已定義了工程設計與場址特徵及安全分析之工作架構。場址特徵對於安全功能之影響將定義於設計基準，設施設計對於場址特徵的考量則定義於設計準則之中。設施設計對於法規規範與安全功能要求的考量，定義於主要設計特徵與主要設計準則之中。

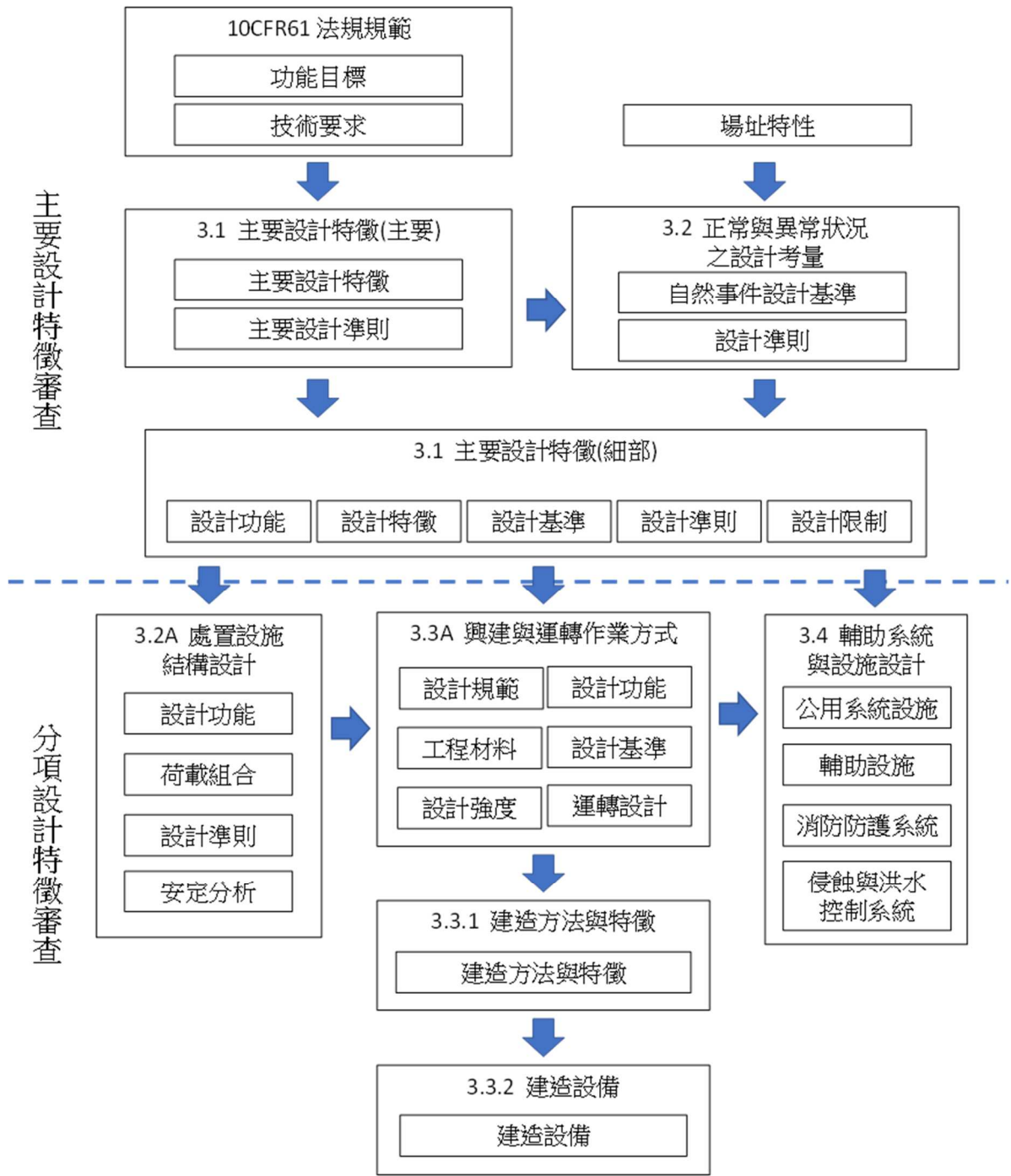


圖 2.1.2-2 NUREG-1200 之處置設計審查章節架構示意圖(物管局，2017)

2.2 工程設計與安全分析作業關聯性分析

2.2.1 低放處置安全功能與處置設計考量回顧與分析

(1) 關聯性研究回顧

於物管局「低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析，子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法研究」(2017)之研究成果，已彙整出低放處置安全功能與處置設計考量關聯性，如表 2.2.1-1 所列。

表 2.2.1-1 低放處置安全功能與處置設計考量關聯分析表(物管局，2017)

安全功能	設計功能要求
多重安全	應選擇合適母岩環境、應設計適當之工程障壁與處置設施運轉方式。
	處置系統整體功能應不可過度依賴某單項障壁單一安全功能。
圍阻	於廢棄物可能導致的危害因衰變而有顯著降低之前，應確保圍阻功能。
隔離	處置設施之選址、設計與運轉，應以將放射性廢棄物隔離於公眾與可接近之生物圈環境為特徵目標。
	此特徵應隔離短半化期核種達幾百年，而對於中高放廢棄物則須隔離至少數千年。應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成影響。
監測與控制	應利用適當程度的監測與管制作為，用以保護與維持被動安全特徵。
安全功能	設計功能目標
多重安全	應由實體障壁系統之多重安全功能實現圍阻與隔離廢棄物功能。
	確保當任一元件無法完整發揮預期功能時，仍保有充足之安全餘裕。
圍阻	避免與降低放射性核種釋出，用以圍阻放射性廢棄物所含核種於工程障壁系統中，自然衰變至其可能導致的危害有顯著降低時。
隔離	透過設計，將放射性廢棄物與其可能導致的危害，隔絕於可接近之生物圈環境以外。
	使可能減損處置設施完整性的影響降至最低。
	透過運轉控制與制度管理來提供隔離功能。
監測與控制	保護與維持被動安全特徵
安全功能	主要設計特徵考量
多重安全	同圍阻、隔離、監測與控制功能

圍阻	可實現圍阻功能之各種物理或化學之特徵與作用，如：防滲性、抗腐蝕性、溶解作用、溶出率與溶解度、核種留存於設施內之數量與活度，以及核種遷移之遲滯特性。
隔離	可實現隔離功能之各種物理或化學之特徵與作用。
	選址之隔離功能考量，如：選址時避免選擇高水力傳導特性區域、提升接近廢棄物的困難度、藉由穩定的地質環境避免處置設施受地質作用侵蝕影響、處置設施遠離已知重要資源降低處置設施被無意影響的機率。
	運轉之隔離功能考量，如：利用保安設施避免無意闖入、監測與控制維持運轉安全、封閉與監管制度確保長期安全。
監測與控制	確保可以實現處置系統安全功能。如：監測實體障壁狀況是否符合要求(檢查劣化狀況)、搭配保留合適的維護能力、限制處置核種總活度與長半化期核種種類與活度等。
安全功能	關鍵作用時期考量
多重安全	同圍阻、隔離、監測與控制功能
圍阻	圍阻功能時間特徵：核種衰變至危害有顯著降低。
	至低放射性廢棄物可能的危害有顯著降低前之主要考量對象：無意入侵者、公眾
	就低放射性廢棄物而言，其大部分短半化期核種衰變至無害之時間約為幾百年內。
隔離	隔離功能時間特徵：將放射性廢棄物與其可能導致的危害，隔離於可接近之生物圈環境以外。
	至低放射性廢棄物無明顯危害前之主要考量對象：公眾、無意入侵者(坑道處置需評量岩覆之設計特性)
	此特徵應隔離短半化期核種達數百年，而對於中與高放廢棄物則須隔離至少數千年。應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成之影響。
監測與控制	運轉與監管階段：確保可以實現處置系統安全功能 解除監管後：保護與維持被動安全特徵。
	至低放射性廢棄物可能的危害有顯著降低前之主要考量對象：工作人員、無意入侵者、公眾

(2)與安全分析作業關聯性分析

由表中可知，處置設施設計之主要安全功能為多重安全、圍阻、隔離、監測與控制。

以下針對各安全功能考量與安全分析作業關聯性進行分析：

1.多重安全功能於安全分析作業考量

多重安全功能主要考量由多重實體障壁系統實現圍阻與隔離廢棄物功能，確保當任一實體障壁元件無法完整發揮預期功能時，仍保有充足之安全餘裕。確保處置系統整體功能應不會過度依賴某單項障壁單一安全功能。類似於確保安全功能的避險考量，其所

含各安全功能的評量，仍就須回到各處置單元或系統設計的評估結果。因此，此多重安全功能考量會影響情節發展的組成，例如：建立某單一障壁單元功能加速劣化或未發揮其安全功能之替代情節，並不會直接影響參數設定。

2. 圍阻安全功能於安全分析作業考量

依設計功能要求內容，於廢棄物可能導致的危害因衰變而有顯著降低之前，應確保圍阻功能。其目的在於避免與降低放射性核種釋出，使核種停留於工程障壁系統中，自然衰變至其可能導致的危害有顯著降低時。就低放射性廢棄物而言，其大部分短半化期核種衰變至無害之時間約為幾百年內。

就處置設施設計觀點而言，實現圍阻功能可透過強化處置障壁單元自身設計強度，以及利用工程設計方式改善處置障壁系統所處環境，避免障壁單元在設計年限或考量的時間尺度內，因自然事件或作用而減損其應有功能。因此，圍阻功能為障壁單元設計之重點，各障壁單元受自然事件影響或因內部作用的劣化影響，或鄰接障壁單元間之交互作用，對於設施設計功能產生之影響為安全分析作業之評估重點。需於安全分析作業中，依設施設計與環境特徵建立模型加以評估，所涉物理或化學之特徵與作用，如：防滲性、抗腐蝕性、溶解作用、溶出率與溶解度、核種留存於設施內之數量與活度，以及核種遷移之遲滯特性。故後續之國際處置案例分析與參數審驗技術，將著重於分析圍阻功能之安全分析與設計考量的關聯性分析。

3. 隔離安全功能於安全分析作業考量

依設計功能要求內容，處置設施之選址、設計與運轉，應以將放射性廢棄物隔離於公眾與可接近之生物圈環境為特徵目標。且此特徵應隔離短半化期核種達幾百年，而對於中高放廢棄物則須隔離至少數千年。應同時考量處置系統受自然演化與事件所造成影響。隔離功能設計的重點，在於避免自然事件與作用對處置設施產生不利影響，故側重於場址選擇與設施空間布置的決定。而避免人類無意闖入之隔離功能，除了選擇人類生活圈範圍之外，不具自然資源誘因區域外，亦透過監測與控制安全功能來確保其解除封閉前之隔離功能。其可能之設計特徵如：避免選擇高水力傳導特性區域、提升接近廢棄物的困難度、藉由穩定的地質環境避免處置設施受地質作用侵蝕影響、處置設施遠離已知重要資源降低處置設施被無意影響的機率等。由於實現隔離功能的設計考量多屬場址特徵選擇考量，故其評量指標亦以場址特徵為主，如：降雨入滲量、風化侵蝕速率、地下水流量特徵等，屬於訂定設計基準之考量範疇。故在安全分析作業的各項評估模式中，

屬將涉及環境特徵與作用之模型建置與相關參數設定。故後續之國際處置案例分析與參數審驗技術，亦將針對隔離功能之安全分析與設計考量的關聯性進行分析。

4. 監測與控制安全功能於安全分析作業考量

監測與控制安全功能應利用適當程度的監測與管制作為，用以保護與維持被動安全特徵。其主要利用直接或間接量測資訊，提供對於工程障壁單元安全功能是否能如預期的發揮其功能之研判資訊，以及利用管制作為來確保工程障壁之安全功能不被破壞。監測作為主要提供研判意外事件發生時，處置場是否能立即發現並啟動對應之應變作為。或是，作為監控控制區輻射劑量，提供人員進出管制時間之管理依據。故其與安全分析作業與相關參數設定無直接關聯性。

至於管制作為，若處置設施於封閉後仍可利用維護行為進行安全功能補強者，如：近地表處置設施頂部覆蓋層，透過覆蓋層坡度變位監測或沉陷量監測，發生其功能可能被減損時，可進場維護其覆蓋層，恢復其原有功能。如此，於安全分析作業之相關工程障壁安全功能劣化起始時間，則可延遲至解除監管做為後才開始。主要影響的安全分析參數為：處置設施障壁單元劣化作用的「起始時間」。此外，監管期限或相關控制設施耐久性，如：警告圍籬、警告標示等，亦將影響人類無意入侵情節的最早「發生時間」。

承上，本計畫蒐集之國際處置案例分析，將著重於圍阻與安全功能與設計的關聯性分析，亦將針對隔離功能之安全分析與設計考量的關聯性進行分析。

2.2.2 低放處置安全功能與主要設計特徵考量回顧與分析

(1) 關聯性研究回顧

前期研究將處置設計審查考量與方式，區分為(1)提出執照申請者之設計內容、(2)設計時須遵循之法規或場址特性限制、(3)審查作業考量，其架構如圖 2.2.2-1 所示。

對處置設施設計者而言，需先敘明處置設施之處置安全概念，以及處置系統如何實現其安全功能，進而達成法規規範對於處置安全之要求。而「主要設計特徵」即為與處置安全功能直接關聯之設計特徵。申請者進行「主要設計特徵」設計時，需基於場址所在環境特性訂定「設計基準」，說明該處置設施在正常情節與異常情節下可能會面臨之環境特徵，並據以訂定處置設施設計對於環境之基本考量，如：最大可能降雨、洪水與地震之規模等。再根據「設計基準」與「主要設計特徵」訂定其「設計準則」並執行其設計工作。並研擬坑道處置工程設計驗證需考量之「主要設計特徵」分別為：1.降低處置單元水滲透、2.工程障壁結構完整性、3.工程障壁具良好遲滯功能、4.運轉期降低廢棄物與水接觸、5.運轉期及封閉期場區之排水功能、6.地面設施之封閉後保安設計、7.坑道處置設施之無意闖入者防護功能、8.場址封閉與穩定性、9.合適的廢棄物管控規劃、10.合適的處置場監測規劃、11.減少長期維護需求、12.提供適當監管與補救之緩衝區、13.合理抑低職業曝露。

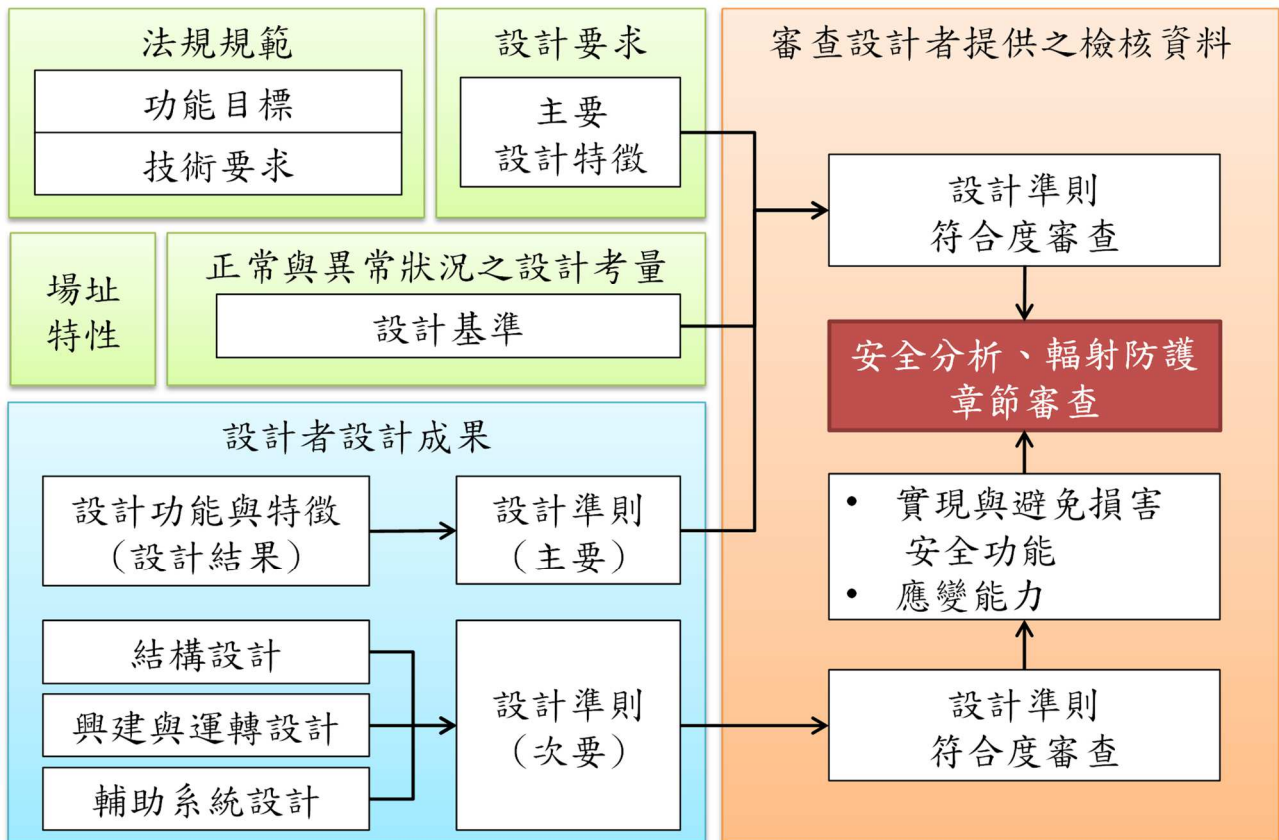


圖 2.2.2-1 處置設計審查考量架構示意圖(物管局，2017)

(2)與安全分析作業關聯性分析

如前節分析，直接影響到處置單元設計與安全分析作業參數設定考量的安全功能為圍阻與隔離。由於本計畫討論之課題為工程設計與安全分析參數關聯性及審驗技術，為釐清兩者關連性，將利用所蒐集之國際案例，針對與圍阻與隔離功能相關之主要設計特徵、設計基準、設計功能進行分析。再依分析成果，於第三章探討其審驗方式。彙整需分析之主要設計特徵如表 2.2.2-1 所列。

表 2.2.2-1 國際案例將探討之主要設計特徵與考量

主要設計特徵	主要安全功能	主要考量時期
降低處置單元水滲透	圍阻	封閉後
工程障壁結構完整性	圍阻	封閉後
工程障壁具良好遲滯功能	圍阻(遲滯)	封閉後
運轉期降低廢棄物與水接觸	圍阻	運轉
運轉期及封閉期場區之排水功能	圍阻	運轉
場址封閉與穩定性	隔離(遲滯)	封閉後

2.3 國際低放處置設施設計之安全功能考量案例

處置設施工程障壁系統須依照其處置環境特徵進行設計。雖然各國之處置安全要求與安全功能考量基本相似，但處置設施設計考量與工程障壁系統設計結果不盡相同。考量處置設計審查考量與方式，將透過安全功能、設計特徵、設計基準與設計準則之項目架構進行審查。故本計畫嘗試將所蒐集之國際案例，以表 2.2.2-1 所列之主要設計特徵與考量方式進行案例分析，藉以將各國處置設施設計考量轉換為相同的考量方式，期能有利於相關分析作業執行。

2.3.1 美國案例分析

(1) 處置之廢棄物類型

美國 10CFR61 法規(Licensing requirements for land disposal of radioactive waste)頒布於 1982 年，為美國低放射性廢棄物處置設施申照之重要法規。10CFR61 依其近地表處置設施概念，納入其 A 類、B 類與 C 類放射性廢棄物之處置管理。至於美國之超 C 類廢棄物處置管理，依其 1985 年頒布之低放射性廢棄物政策法修訂案明定由聯邦政府負責執行超 C 類廢棄物處置工作，其後由聯邦政府指派其能源部 DOE(Department of Energy)負責推動。因此，美國低放射性廢棄物處置設施主要處置之低放射性廢棄物，主要為核電廠營運作業與除役作業期間所產生之各類低放射性廢棄物，但不包含超 C 類廢棄物。

(2) 處置設計介紹

依美國核管會 10CFR61 之低放射性廢棄物處置概念，主要之處置型式將為近地表處置，且主要為沙漠型氣候。其處置設施將構築於地面，處置區用於堆置低放射性廢棄物包件，其下具排水系統，其上則設置覆蓋層，處置區周圍與底部劃設為緩衝區，用於執行監測作業，與採取必要改善措施之作業空間，如圖 2.3.1-1 所示。

美國案例源自於 10CFR61 之規範，故其有較完整之設計要求。其近地表處置設施設計需符合：1.處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求。2.處置場設計必須能確保封閉後的穩定性，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。3.適度改善或提升自然環境特徵，以符合處置功能目標要求(10 CFR61 Subpart C)。4.近地表處置設施之覆蓋層設計須盡可能的降低入滲水量、引導地表水量或滲入水量遠離廢棄物、需可抵抗地表地質劣化過程與生物活動。5.處置場地表特徵必須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護。6.處置設施設計須在可行範圍內，

儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸、處置期間的積水與廢棄物接觸、封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸。

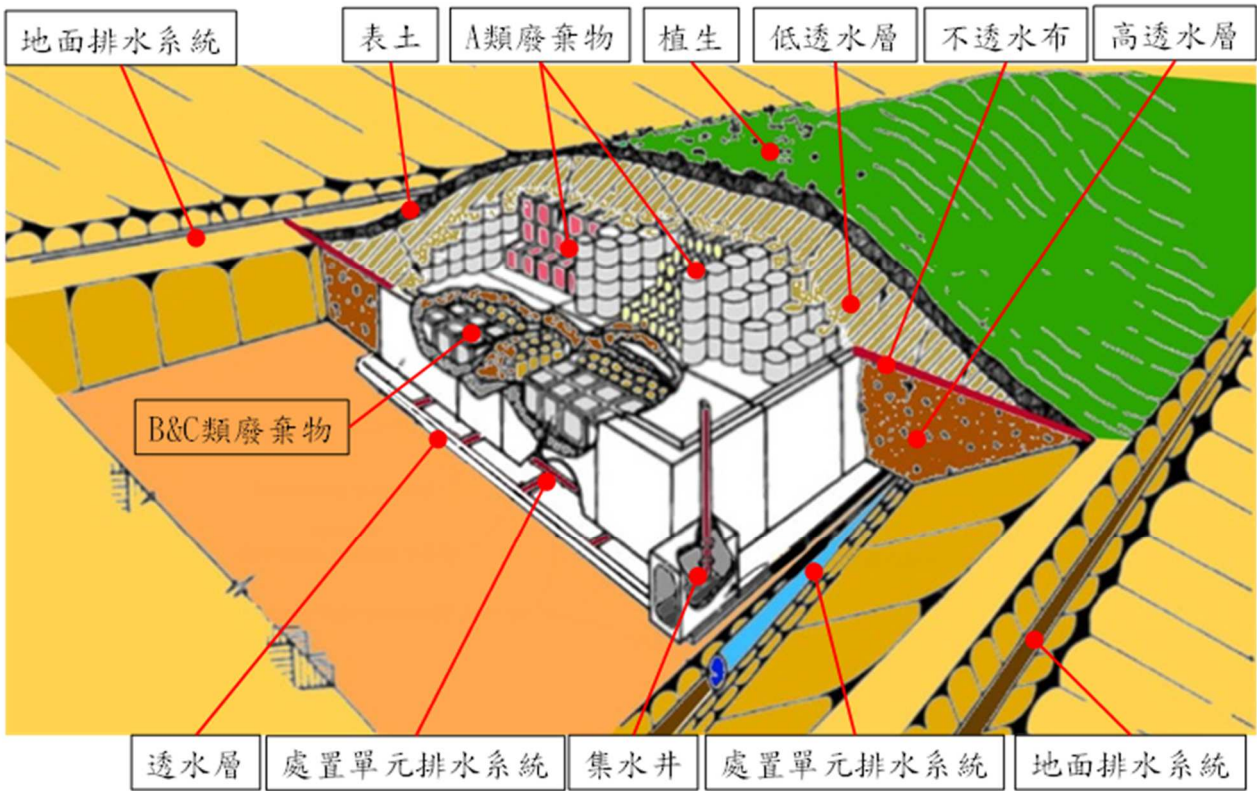


圖 2.3.1-1 美國近地表低放處置設施設計概念示意圖(U.S. NRC, 1965)

(3) 案例分析

依 2.2 節所述之案例分析考量，以圍阻與隔離功能為對象，依表 2.2.2-1 所列主要設計特徵，分析案例工程障壁系統之主要設計目標、設計對象與安全分析作業可能之主要評估特徵與作用。案例分析成果如表 2.3.1-1 所列。

表 2.3.1-1 美國案例之處置設施設計與評估考量分析表

主要設計特徵	安全功能	主要考量時期	主要設計目標	設計對象	主要評估特徵與作用
降低處置單元水滲透	圍阻	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 盡可能的降低入滲水量 須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護之排水系統設計 引導滲入水量遠離廢棄物 	覆蓋層、地面排水系統、地下排水系統	覆蓋層入滲特徵、場區地面排水系統排水能力與處置區淹水潛勢、處置區地下滲流與排水特徵

主要設計特徵	安全功能	主要考量時期	主要設計目標	設計對象	主要評估特徵與作用
工程障壁結構完整性	圍阻	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求 覆蓋層需可抵抗地表地質劣化過程 覆蓋層需可抵抗生物活動 確保沉陷或沉降不會影響覆蓋層完整性 	覆蓋層、回填、廢棄物包件、其他結構物(工程障壁系統)	覆蓋層侵蝕特徵(風化作用、沖蝕作用);工程障壁系統(廢棄物包件、回填、覆蓋層)力學特徵(坡面穩定性、壓密作用、沉陷或沉降)
工程障壁具良好遲滯功能	圍阻(遲滯)	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 美國處置概念之圍阻功能基本上不考慮遲滯功能。 處置設施底部高程須在地下水位面以上，避免使廢棄物位於地下水流動範圍，不需考量遲滯效能。 	無	無
運轉期降低廢棄物與水接觸	圍阻	運轉	<ul style="list-style-type: none"> 在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸 處置期間的積水與廢棄物接觸 封閉後的滲水或積水與廢棄物接觸 	廢棄物貯存、堆置與封閉作業、避免水接觸設施(雨遮、不透水布等)	作業方式與避免水接觸設施之阻水特徵
運轉期及封閉期場區之排水功能	圍阻	運轉	<ul style="list-style-type: none"> 須能直接排除地表水遠離處置單元，且其流速與梯度需確保不會導致未來須持續進行主動維護之排水系統設計 	地面排水系統	場區地面排水系統排水能力與處置區淹水潛勢(與降低處置單元水滲透考量相同)
場址封閉與穩定性	隔離	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求 設計必須能確保封閉後的穩定性 	封閉作業、覆蓋層、回填、廢棄物包件等(封閉階段之工程障壁系統)	封閉後需要進行主動維護之判斷基準、封閉後發生異常事件之影響評估(與工程障壁結構完整性考量相同)

2.3.2 瑞典案例分析

(1)處置之廢棄物類型

瑞典中低放射性廢棄物處置場(SFR)規劃將處置電廠和其他核能設施產生的中低放射性廢棄物。其中，1BLA 處置坑道用以處置低放射性廢棄物，1BTF 和 2BTF 處置坑道用以處置中放射性廢棄物和相對較低放射性的廢棄物，1BMA 處置坑道或筒倉則處置具有高活度的中放射性廢棄物。2~5BLA 處置坑道主要用以處置除役產生之低放射性廢棄物，BRT 處置坑道用以處置沸水式反應爐壓力槽，2BMA 處置坑道則主要處置除役期間產生之中放射性廢棄物。

(2)處置設計案例介紹

瑞典中低放射性廢棄物處置場(SFR)位於 Forsmark 核電廠附近，離岸約 1 公里的波羅的海海床下，如圖 2.3.2-1 所示。SFR-1 位於海床下約 60m 處，以結晶岩體作為天然屏障，設計處置容量為 63,000m³，主要處置電廠和其他核能設施產生的放射性廢棄物。SFR-3 鄰近 SFR-1，位於海床下約 120 公尺處，設計處置容量為 108,000m³。主要處置電廠運轉廢棄物，以及電廠和其他核能設施的除役廢棄物。各處置坑道依其處置廢棄物特性設計有不同功能之障壁系統，如圖 2.3.2-2~圖 2.3.2-所示。

瑞典低放處置設施其確保長期安全之安全原則為：(1)限制處置場內長半化期核種活度，(2)確保多重障壁系統之遲滯核種功能。依此安全原則建立其對應之安全功能要求，如表 2.3.2-1。

表 2.3.2-1 安全原則與其對應之安全功能(SKB, 2014)

安全原則	安全功能
限制長半化期核種的活度	限制處置總活度
確保多重障壁系統之遲滯核種功能	低流量
	良好的遲滯功能
	避免在處置場附近鑿井

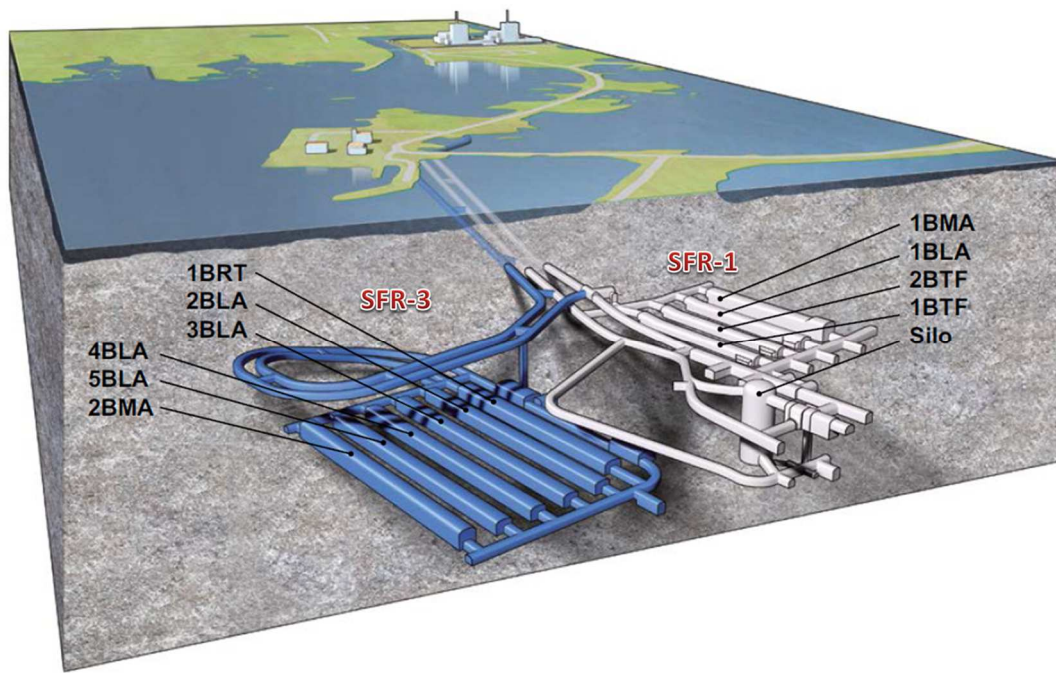
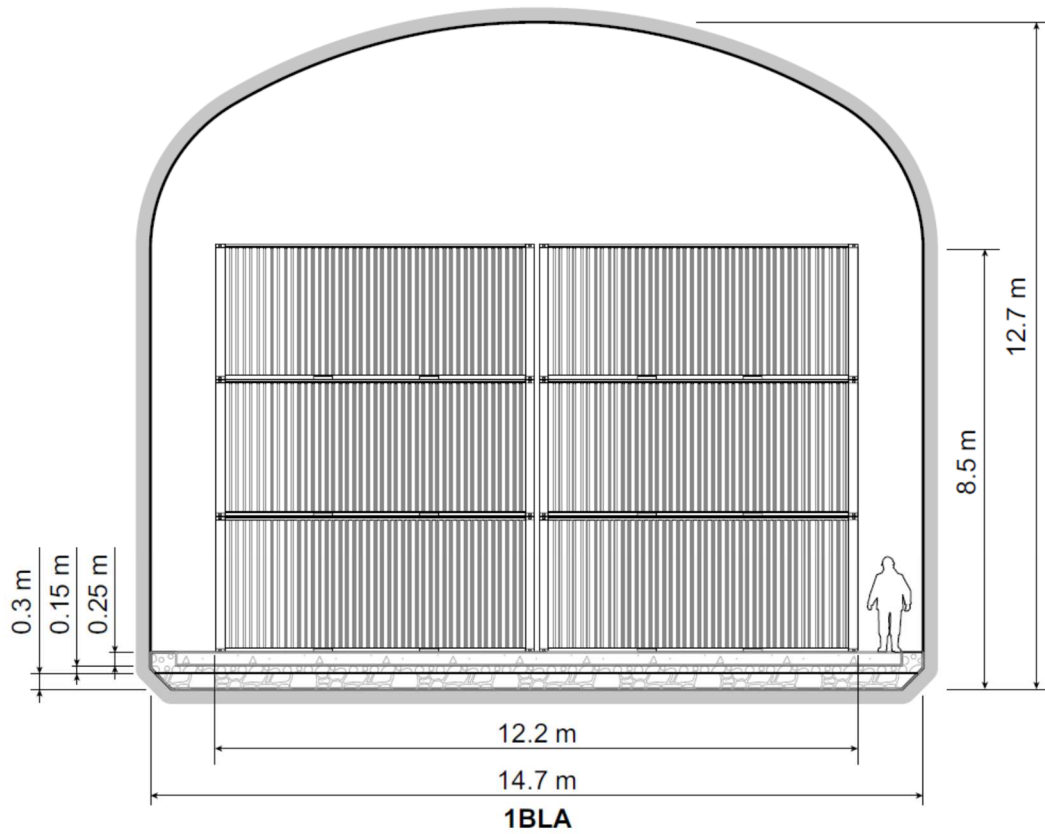
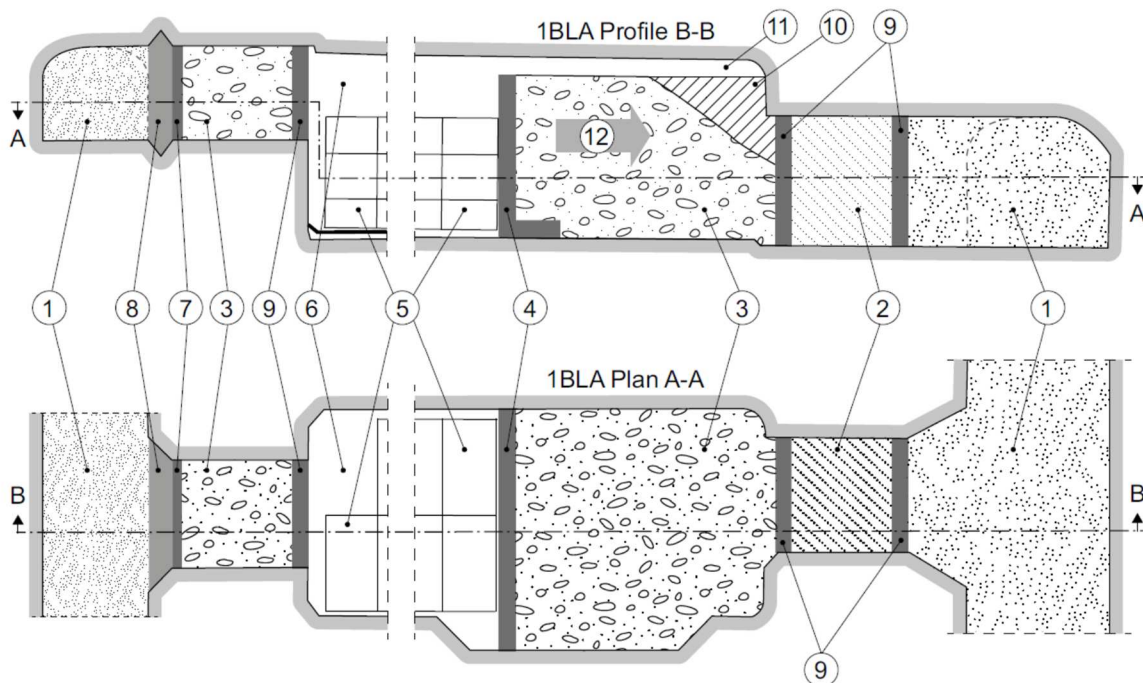


圖 2.3.2-1 SFR 處置場(SFR-1，白色部分)與擴建計畫(SFR-3，藍色部分)配置圖(SKB, 2014)



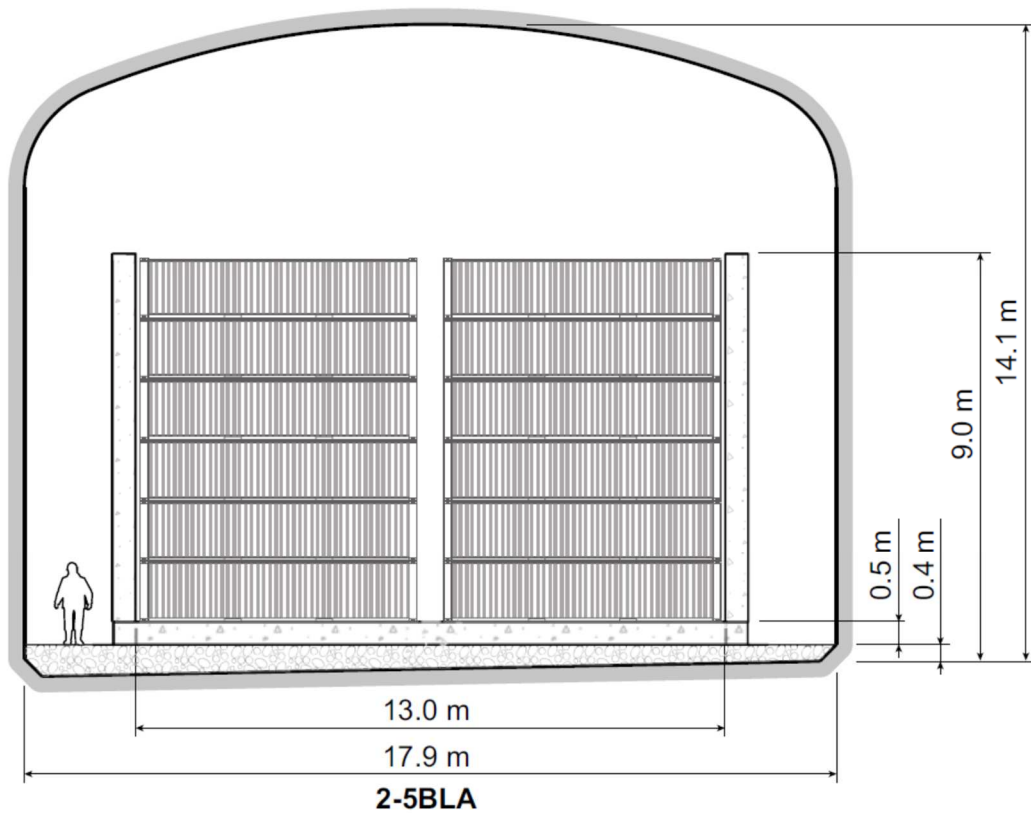
橫剖面



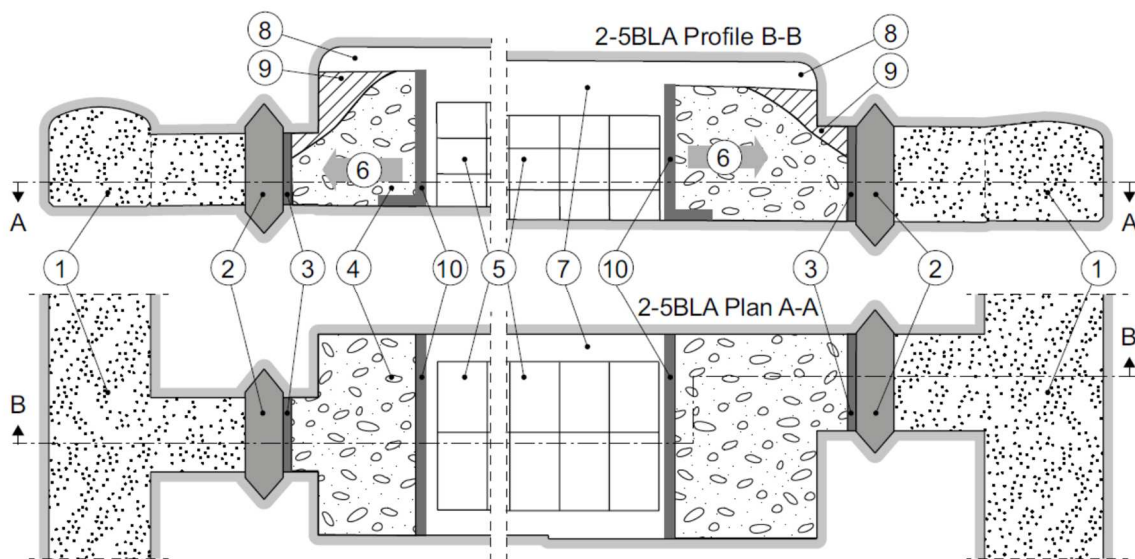
縱剖面

- 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

圖 2.3.2-2 1BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



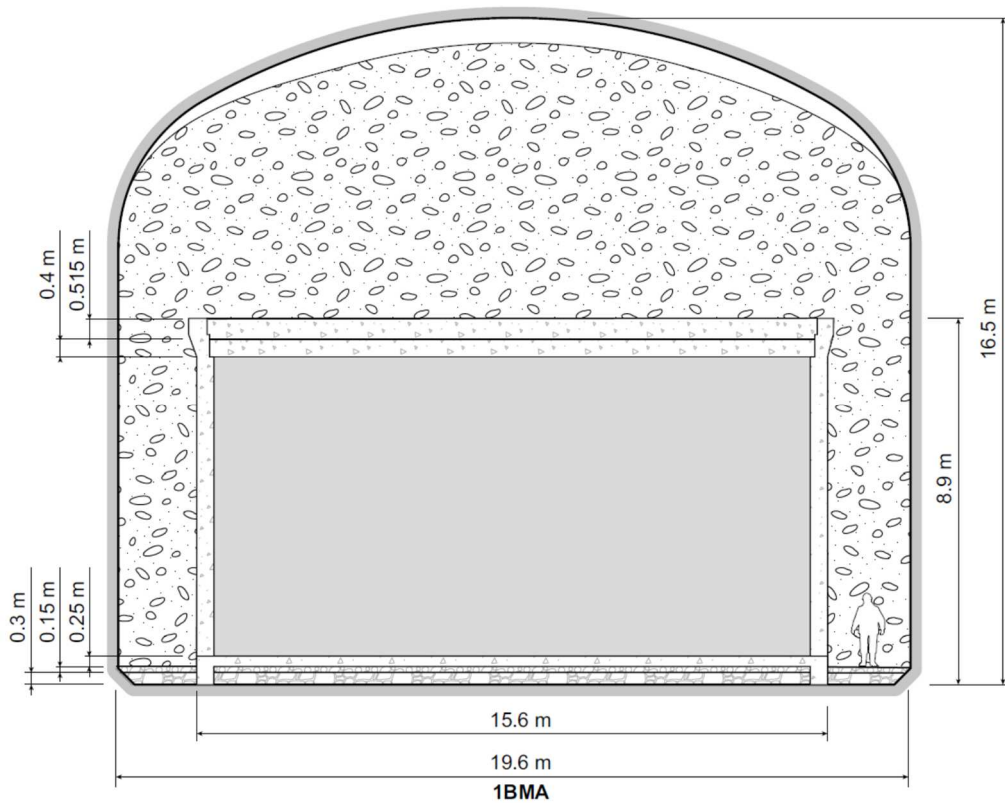
橫剖面



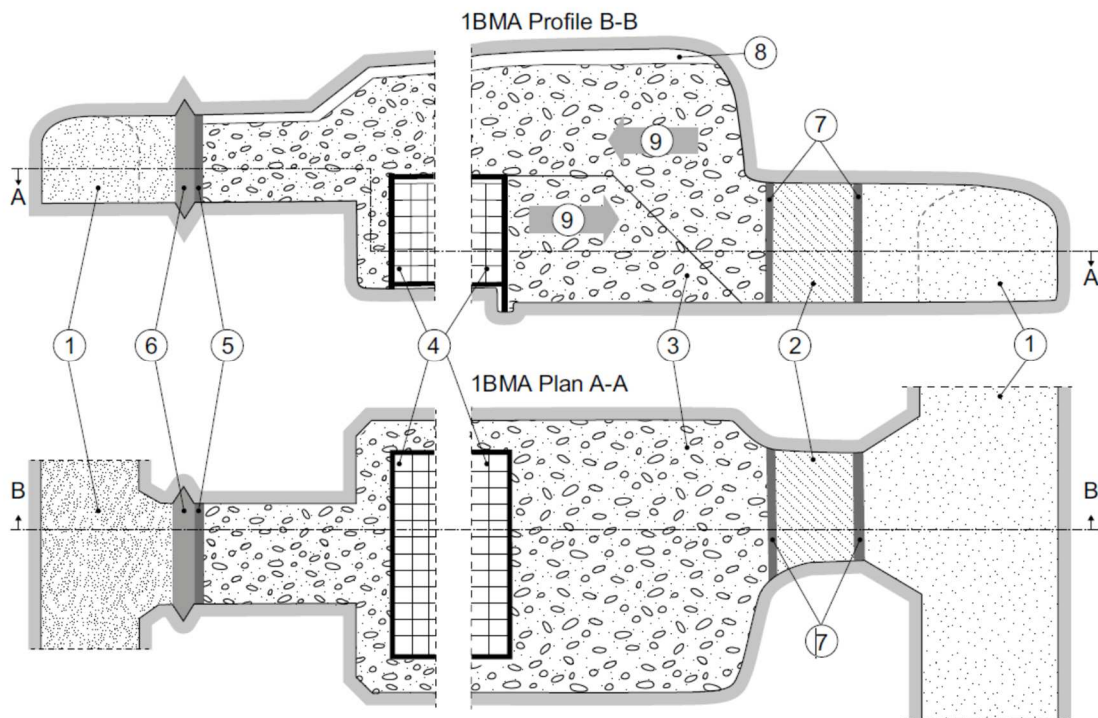
縱剖面

- ①膨潤土 ②混凝土機械封塞 ③混凝土束制牆 ④碎石 ⑤廢棄物包件 ⑥回填工作方向 ⑦處置窖開放空間不予回填 ⑧頂拱間隙 ⑨混凝土 ⑩擋土牆

圖 2.3.2-3 2-5BLA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



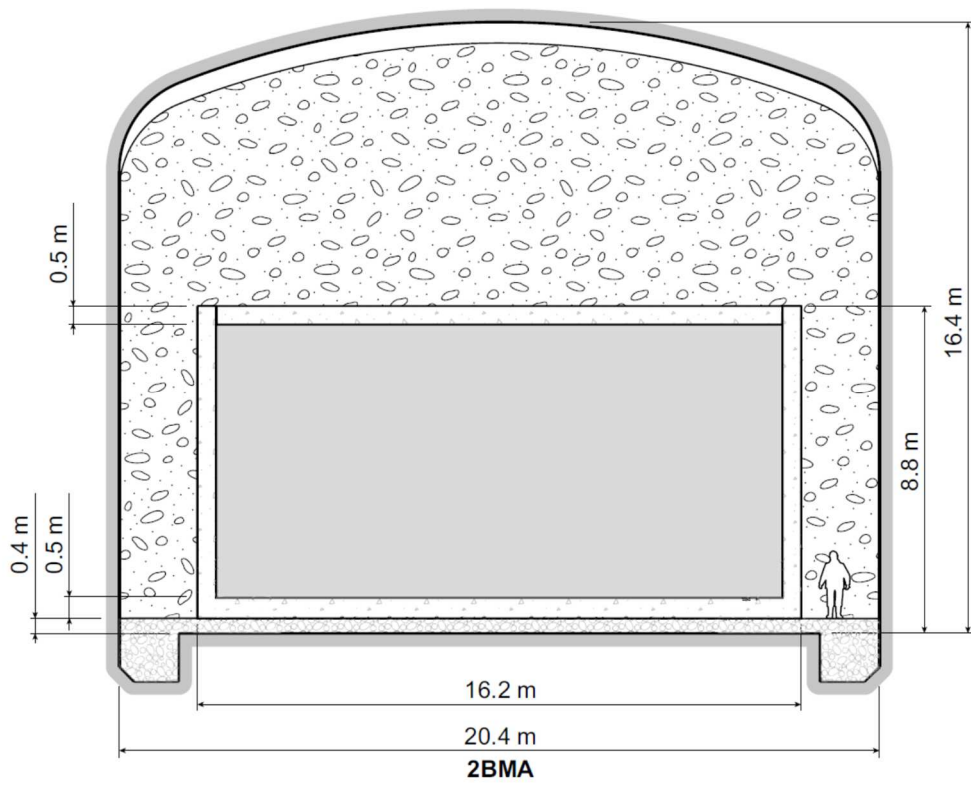
橫剖面



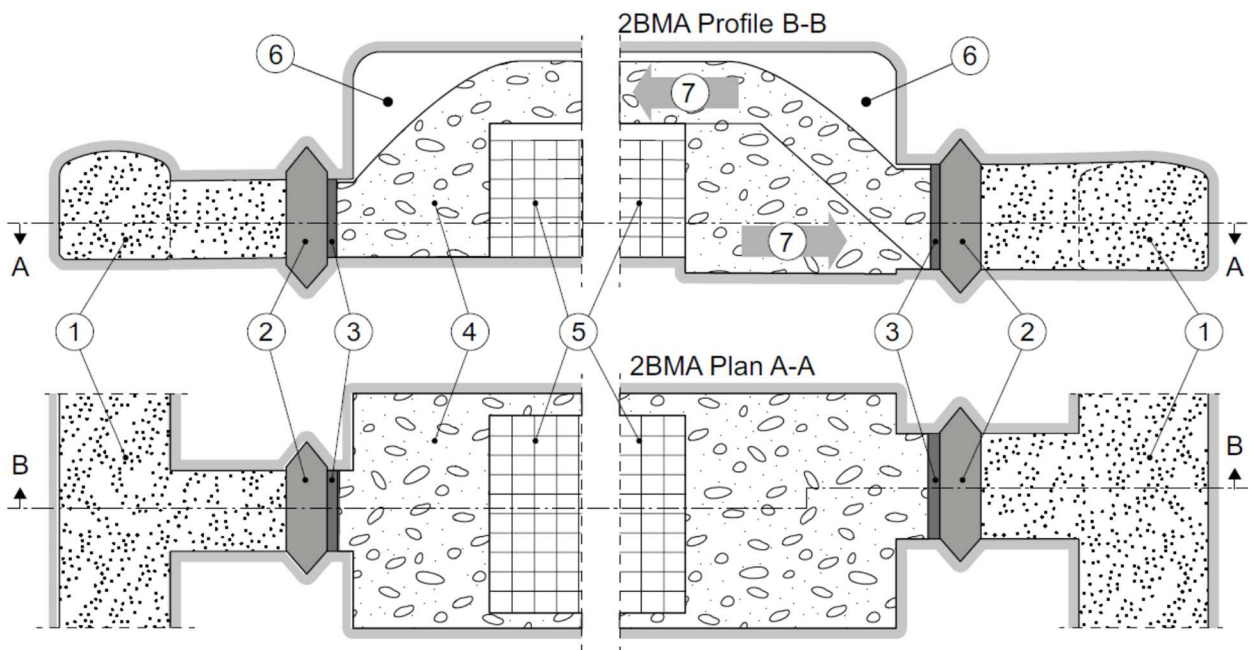
縱剖面

①膨潤土②緩衝材料，例如以 30/70 比例混合的膨潤土與碎岩③碎石④經灌漿固化的廢棄物包件⑤混凝土束制壁⑥混凝土機械封塞⑦為緩衝材料設置的混凝土束制壁⑧介於碎石回填面與處置窖頂部的間隙

圖 2.3.2-4 1BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



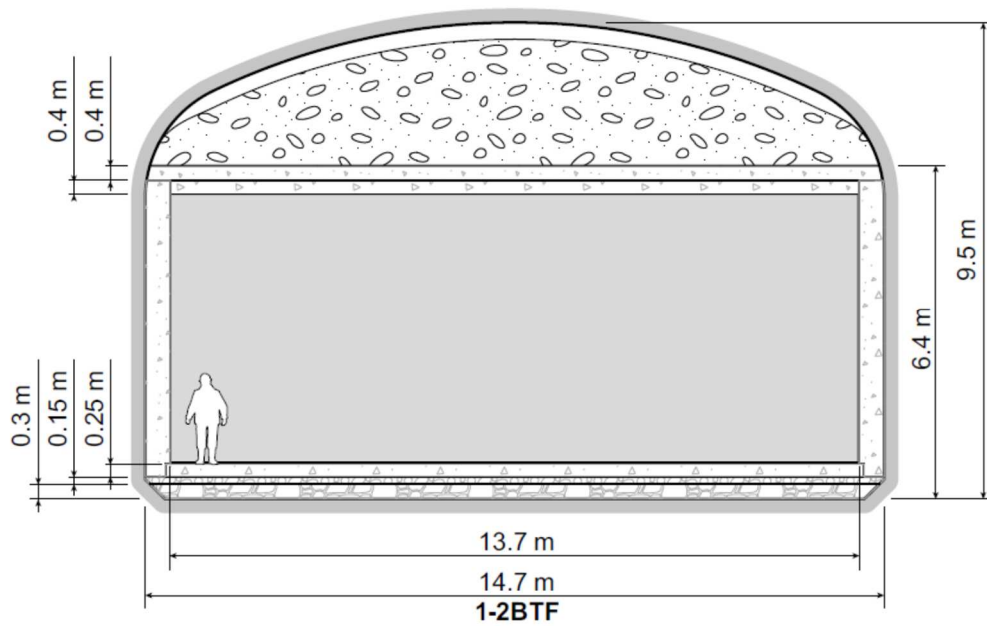
橫剖面



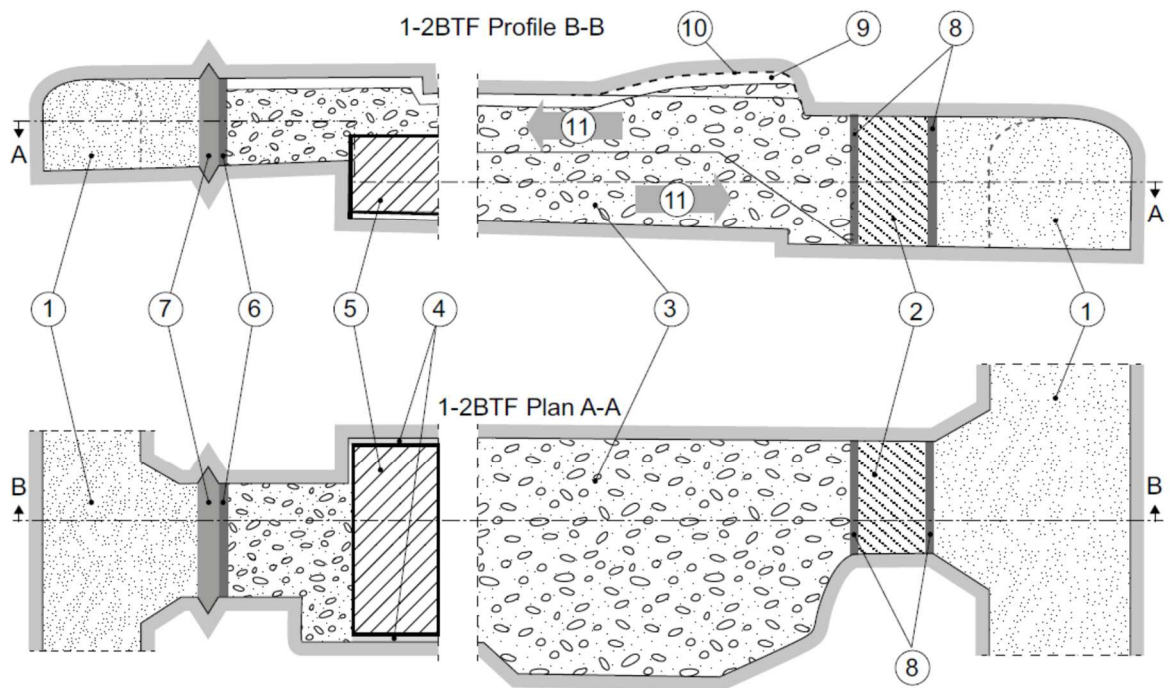
縱剖面

①膨潤土②混凝土封塞③混凝土束制壁④碎石⑤經灌漿固化的廢棄物包件⑥介於碎石回填面與處置窖頂部的間隙

圖 2.3.2-5 2BMA 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)



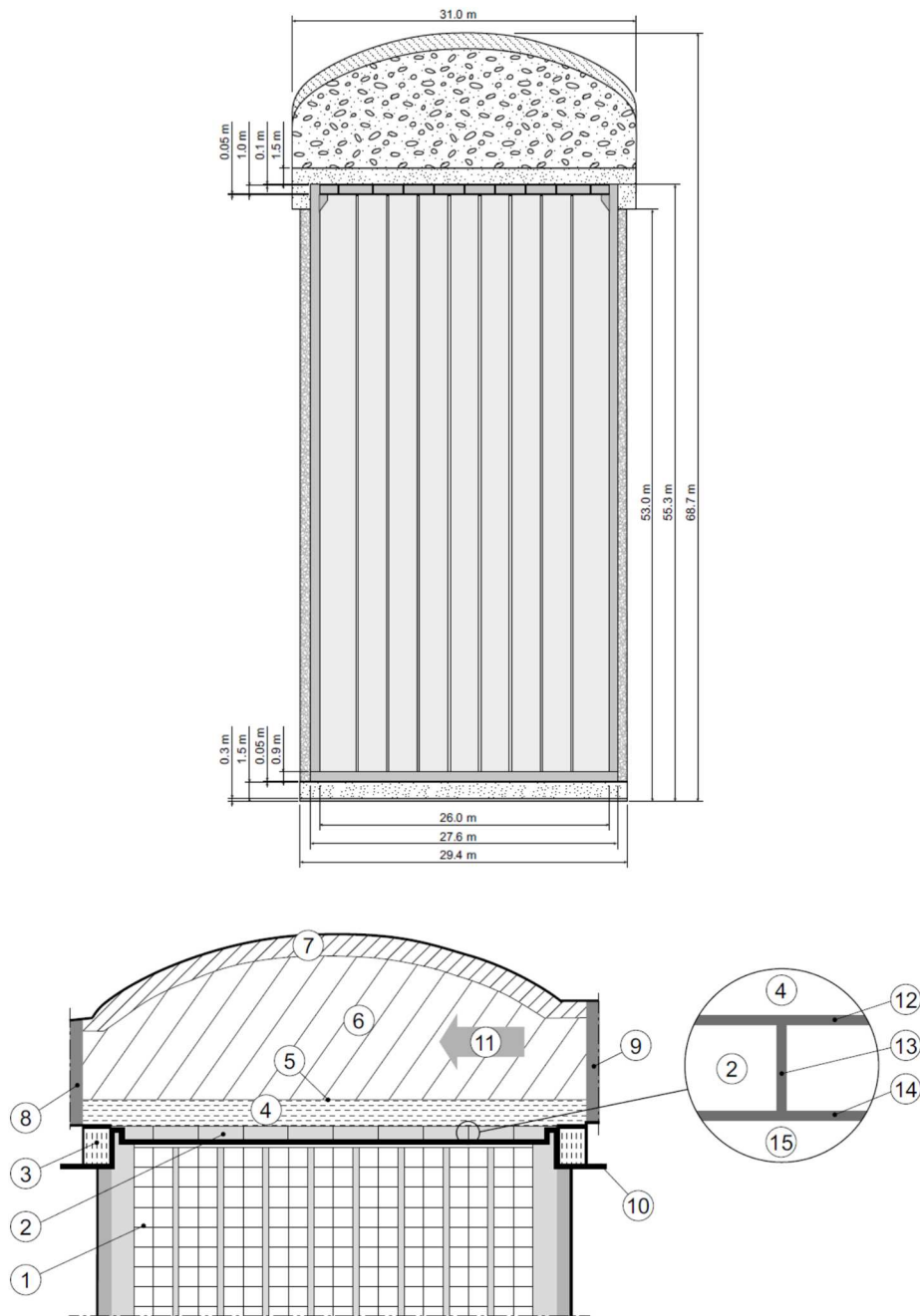
橫剖面



縱剖面

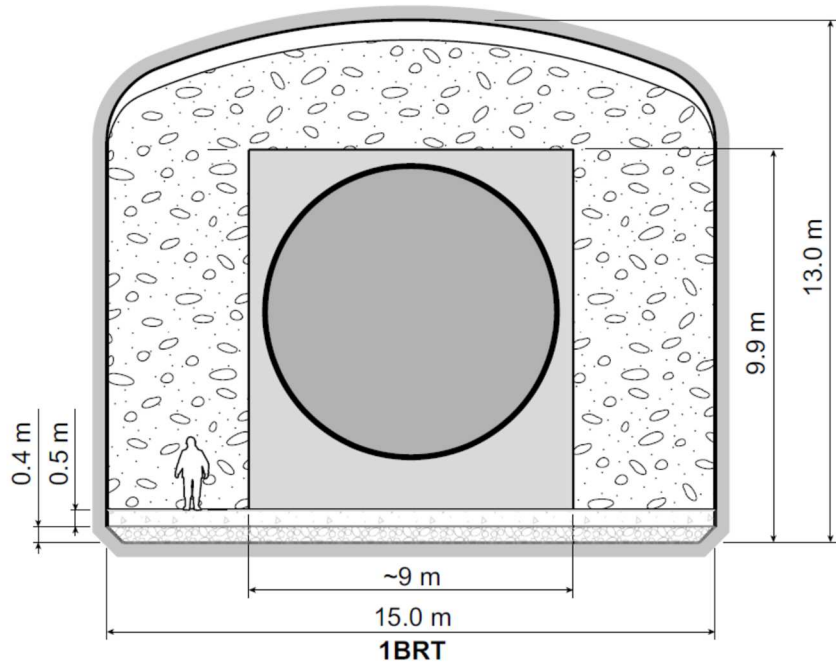
- ① 膨潤土 ② 緩衝材料 ③ 碎石 ④ 介於廢棄物與岩壁的混凝土 ⑤ 經灌漿固化的廢棄物包件 ⑥ 混凝土束制壁 ⑦ 混凝土封塞 ⑧ 為緩衝材料設置的混凝土束制壁 ⑨ 介於碎石回填面與處置室頂部的間隙

圖 2.3.2-6 1BTF 與 2BTF 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)

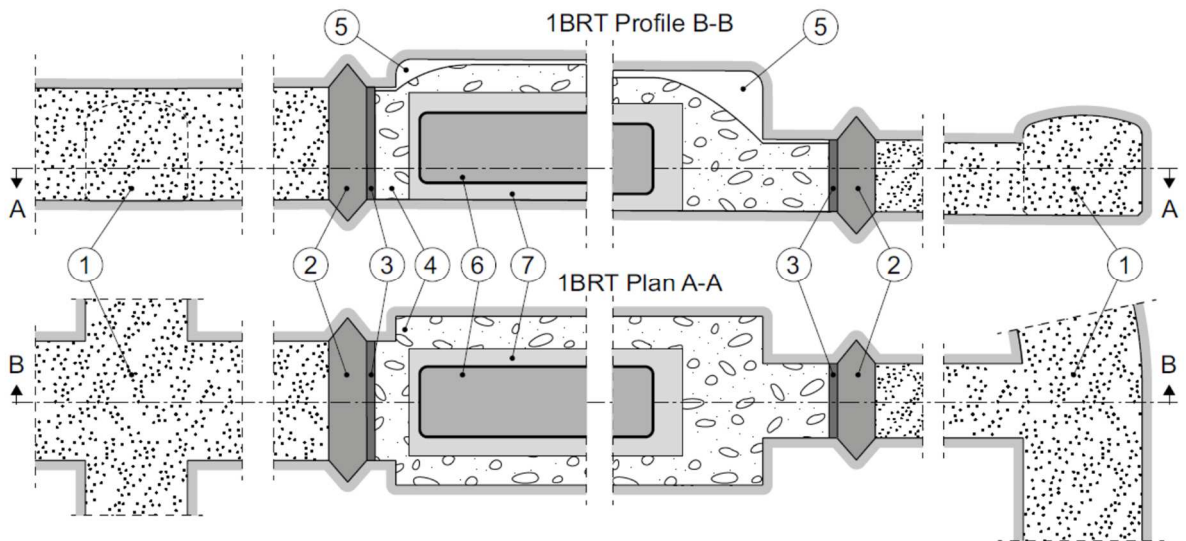


①廢棄物包件②鋼筋混凝土版與排氣管③以 30/70 比例混合的膨潤土與砂土回填夯實④以 10/90 比例混合的膨潤土與砂土回填夯實⑤無鋼筋混凝土版⑥具摩擦特性之回填材料，包括碎岩與碎石⑦具水泥膠結特性的砂土⑧筒倉頂部與聯絡坑道(ISTT)之間所設置的混凝土束制牆⑨筒倉頂部混凝土束制牆⑩水泥灌漿與回填材料之工作介面⑪分別於⑥與⑦所述之回填工作方向⑫100 mm 厚的砂土層⑬直徑 0.1 m 的排氣管⑭ 50 mm 厚的砂土層⑮具滲透性之水泥灌漿

圖 2.3.2-7 筒倉處置封閉設計示意圖(SKB, 2014)



橫剖面



縱剖面

①膨潤土②混凝土機械封塞③混凝土束制牆④碎石⑤頂拱至回填頂部的間隙⑥經混凝土或水泥漿灌漿的RPVs⑦RPVs埋置灌漿

圖 2.3.2-8 BRT 處置坑道封閉設計示意圖(SKB, 2014)

(3) 案例分析

依 2.2 節所述之案例分析考量，以圍阻與隔離功能為對象，依表 2.2.2-1 所列主要設計特徵，分析案例工程障壁系統之主要設計目標、設計對象與安全分析作業可能之主要評估特徵與作用。瑞典案例分析成果如表 2.3.2-2 所列。

表 2.3.2-2 瑞典案例之處置設施設計與評估考量分析表

主要設計特徵	安全功能	主要考量時期	主要設計目標	設計對象	主要評估特徵與作用
降低處置單元水滲透	圍阻	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 工程障壁系統可藉由低水力傳導係數設計要求，使該設施具不易滲水特性，進而達成工程障壁系統內之低流量環境。 利用滲水性設計要求，與周圍母岩或障壁系統形成高滲水率對比，而達到形成低流量環境之安全功能。 	<ul style="list-style-type: none"> BLA 系列坑道:防止坑道滲水或導流設計 BMA 系列坑道:低透水性處置窖與高水力反差 BTF 系列坑道:具低滲水性之廢棄物包件 BRT 坑道:低透水性處置窖與高水力反差 筒倉:利用膨潤土材料阻水。 	坑道滲流特徵、處置坑道內地下水流特徵、膨潤土膨脹阻水性能、混凝土劣化作用對透水性影響
工程障壁結構完整性	圍阻	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求 確保封閉後之障壁系統不會因自然事件與作用而影響障壁結構完整性 	回填、廢棄物包件、處置窖、膨潤土、坑道、封塞等(工程障壁系統)	工程障壁系統(回填、廢棄物包件、處置窖、膨潤土、坑道、封塞)力學特徵(壓密、沉陷、回脹壓等)與穩定性
工程障壁具良好遲滯功能	圍阻(遲滯)	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 限制平流傳輸 長期力學穩定性(降低裂縫產生) 限制溶解度(降低腐蝕率) 吸附能力 有利的化學環境 	<ul style="list-style-type: none"> 回填、廢棄物包件、處置窖、膨潤土、坑道、封塞等。 限制溶解度考量利用有利的化學環境降低金屬腐蝕率 吸附能力主要考量混凝土設計量。 化學環境控制考量 pH、氧化還原電位和錯合劑濃度等 	<ul style="list-style-type: none"> 完全回填之坑道(除 BLA 坑道之外)其評量如降低處置單元水滲透功能評估內容相同 長期力學穩定考量與工程障壁結構完整性評估內容相同 金屬腐蝕率 混凝土表面積與吸附特性 pH、氧化還原電位和錯合劑濃度等

主要設計特徵	安全功能	主要考量時期	主要設計目標	設計對象	主要評估特徵與作用
運轉期降低廢棄物與水接觸	圍阻	運轉	<ul style="list-style-type: none"> 在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸 	廢棄物貯存、堆置與封閉作業、防止坑道滲水或導流設計、避免水接觸設施(雨遮、不透水布等)。	作業方式與避免水接觸設施之阻水特徵
運轉期及封閉期場區之排水功能	圍阻	運轉	<ul style="list-style-type: none"> 須能直接排除坑道滲水遠離處置廢棄物 	坑道排水	坑道滲水量與排水能力。
場址封閉與穩定性	隔離	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求 設計必須能確保封閉後的穩定性 	<ul style="list-style-type: none"> 封閉作業、回填、廢棄物包件、處置窖、膨潤土、坑道、封塞等。 確保長期隔離距離(處置設施與生物圈距離)，避免在處置場附近鑿井 	<ul style="list-style-type: none"> 長期穩定性與工程障壁結構完整性考量相同。 瑞典未規劃進行封閉後監管作業。

2.3.3 日本案例分析

(1)處置之廢棄物類型

依日本第二種廢棄物處置事業有關核原料物質、核燃料物質及原子爐的規範法律(以下稱爐規法)，依其第 51 條之 2 規定將日本之放射性廢棄物處置事業區分為 3 類。其中，適用於採坑道型式之餘裕深度處置設施規劃處置之廢棄物為「第二種廢棄物處置」。其廢棄物包含，核能電廠運轉作業產生之放射性金屬廢棄物、樹脂與除役作業產生之活化金屬與被污染之混凝土等，再處理設施與 MOX 燃料加工設施於運轉與除役產生之金屬廢棄物與廢棄物。

(2)處置設計案例介紹

日本餘裕深度廢棄物處置設施將包含地面與地下設施，設施概念與工程障壁系統概念如圖 2.3.3-1 與圖 2.3.3-2 所示，其處置設施主要設計考量：(1)處置設施圍阻功能需等同於或優於既有低放射性廢棄物處置設施之處置窖機能。(2)處置設施需進行數百年之管理作

業。(3)於處置坑道中設置混凝土處置窖，用以定置廢棄物。(4)為了減少侵入至處置設施的地下水量，混凝土處置窖的周圍運用膨潤土設置低滲透層。(5)混凝土處置窖的內側或外側設置具抑制擴散效果的低擴散層水泥系材料。

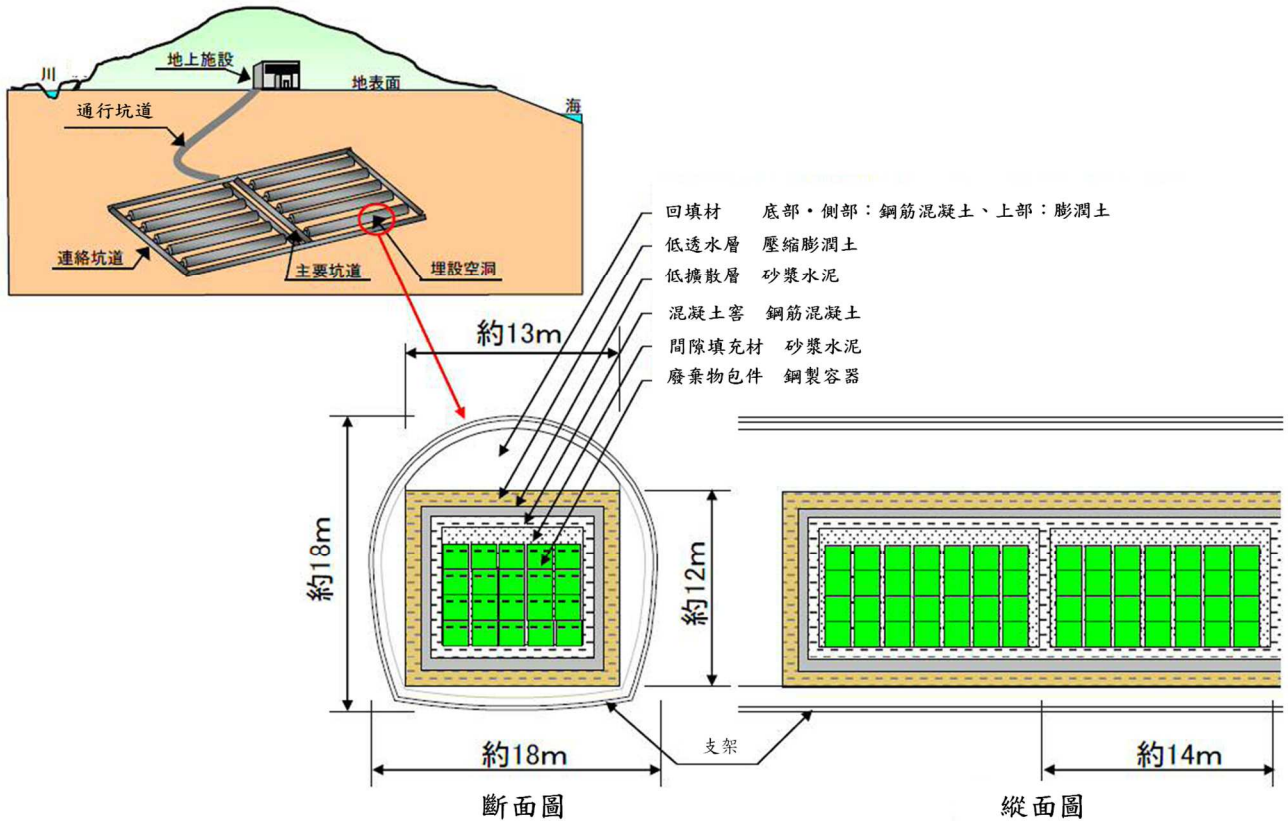


圖 2.3.3-1 餘裕深度處置設計概念示意圖

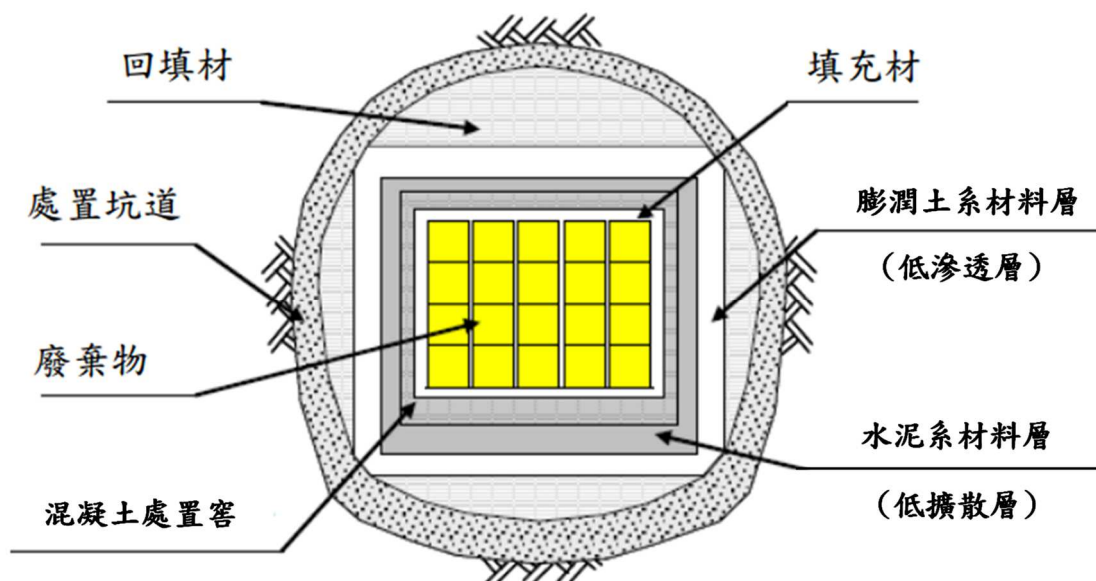


圖 2.7.2-3 餘裕深度處置坑道障壁系統斷面示意圖

(3) 案例分析

依 2.2 節所述之案例分析考量，以圍阻與隔離功能為對象，依表 2.2.2-1 所列主要設計特徵，分析案例工程障壁系統之主要設計目標、設計對象與安全分析作業可能之主要評估特徵與作用。日本案例分析成果如表 2.3.3-1 所列。

表 2.3.3-1 日本案例之處置設施設計與評估考量分析表

主要設計特徵	安全功能	主要考量時期	主要設計目標	設計對象	主要評估特徵與作用
降低處置單元水滲透	圍阻	封閉後	工程障壁系統可藉由低水力傳導係數設計要求，使該設施具不易滲水特性，進而達成工程障壁系統內之低流量環境。	廢棄物包件、填充材、處置窖、低擴散層、低透水層、回填、坑道、封塞等。	坑道滲流特徵、處置坑道內地下水流動特徵、膨潤土膨脹阻水性能、混凝土劣化作用對透水性影響
工程障壁結構完整性	圍阻	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 設計需朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求 確保封閉後之障壁系統不會因自然事件與作用而影響障壁結構完整性 	廢棄物包件、填充材、處置窖、低擴散層、低透水層、回填、坑道、封塞等。	工程障壁系統(回填、廢棄物包件、處置窖、膨潤土、坑道、封塞)力學特徵(壓密、沉陷、回脹壓等)與穩定性
工程障壁具良好遲滯功能	圍阻(遲滯)	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 限制平流傳輸 長期力學穩定性(降低裂縫產生) 抑制擴散 吸附能力 	<ul style="list-style-type: none"> 廢棄物包件、填充材、處置窖、低擴散層、低透水層、回填、坑道、封塞等。 利用緻密的混凝土材料設計低擴散層。 吸附能力主要考量混凝土設計量。 	<ul style="list-style-type: none"> 其評量如降低處置單元水滲透功能評估內容相同 長期力學穩定考量與工程障壁結構完整性評估內容相同 低擴散層抑制擴散能力 混凝土表面積與吸附特性
運轉期降低廢棄物與水接觸	圍阻	運轉	<ul style="list-style-type: none"> 在可行範圍內，儘可能最小化貯存期間的水體與廢棄物接觸 	廢棄物貯存、堆置與封閉作業、防止坑道滲水或導流設計、避免水接觸設施(雨遮、不透水布等)。	作業方式與避免水接觸設施之阻水特徵
運轉期及封閉期場區之排水功能	圍阻	運轉	<ul style="list-style-type: none"> 須能直接排除坑道滲水遠離處置廢棄物 	坑道排水	坑道滲水量與排水能力。

主要設計特徵	安全功能	主要考量時期	主要設計目標	設計對象	主要評估特徵與作用
場址封閉與穩定性	隔離	封閉後	<ul style="list-style-type: none"> 處置場設計須朝向長期隔離與避免封閉後持續維護作業需求 設計必須能確保封閉後的穩定性 	封閉作業、廢棄物包件、填充材、處置窖、低擴散層、低透水層、回填、坑道、封塞等。確保長期隔離距離(處置設施與生物圈距離)	長期穩定性與工程障壁結構完整性考量相同。抬升與侵蝕等作用，對於處置設施與生物圈距離影響。

2.4 低放處置設施設計與安全功能之關聯考量綜整

綜合分析 2.3 節案例分析結果可發現，利用主要設計特徵作為分析架構，確實可將各國不同型態之工程障壁系統進行歸納分析。綜合分析各國案例之處置設施設計與評估考量分析成果，分項討論如下：

(1) 圍阻安全功能-降低處置單元水滲透

降低處置單元水滲透功能為確保廢棄物處置安全圍阻功能最主要之考量，只要能確保低放射性棄物不要接觸到水體，則其所含核種即不會溶解至水中而開始傳輸，在處置工程設計上主要利用排水與阻水設計來達成此功能目標。排水設計功能類似於改善環境特徵，利用工程設計讓水體儘可能在接觸到廢棄物包件前，即把水體導引至其他位置。而阻水設計則是利用工程障壁單元的阻水性或低透水性來降低入滲至廢棄物包件之水量(運轉期)或流量(封閉後)。就此部分而言，其工程設計與安全功能間之考量重點，評量時間主要為運轉階段與封閉後之監管階段，為了後續安全功能分析可能需配合分析所需延長評估時期。其「設計基準」或「自然事件設計基準」主要考量如降雨特徵、坑道滲水量與設計頻率降雨等，設計評量則為廢棄物體之滲水流量。基本上，運轉階段是不允許有廢棄物體有與滲水接觸或發生滲水流動之狀況發生。而封閉後則視環境特徵、障壁系統與安全功能目標，決定降低水滲透之最低要求。

就坑道式處置設施型態而言，運轉階段之「降低處置單元水滲透功能」由具備主動性之「運轉期降低廢棄物與水接觸功能」即應可達成目標，故可將運轉階段之「降低處置單元水滲透功能」視為被動的多重安全功能考量。處置設計可由廢棄物固化體品質、盛裝容器、處置窖、回填設計來降低處置障壁系統之透水性，或搭配如膨潤土材料等具備遇水回脹特性之自然材料，提升處置設施整體之低透水能力。所需評量時期涵蓋運轉、封閉監管

至解除封閉後之安全分析作業所需評估時間。評量對象為處置設施採用之降低透水特性之設計或材料之「設計特徵」，以及經過不同時間之作用後，其「透水特性變化」，安全分析考量關鍵於不同時間其工程障壁系統與廢棄物體內流動之滲水量。可能影響地下水流場特徵之「環境特徵」與「自然事件設計基準」為主要考量對象，如：海平面升降、地表水文特性等。

(2)圍阻安全功能-工程障壁結構完整性

工程障壁結構完整性評量主要是接續降低處置單元水滲透功能考量。降低處置單元水滲透功能評量主要聚焦於工程障壁於水環境特徵下之作用，而工程障壁結構完整性則是評量工程障壁於力學環境特徵下之作用。由於工程障壁系統是實現圍阻功能的主要設施，確認處置設施在需完整實現圍阻功能的時期，不會因環境特徵與自然事件作用而使工程障壁設施失效的評量，為確認處置設施安全功能的重要評估項目，而更長時間的力學作用對處置設施設計特徵的影響，則是評量設施遲滯功能時相關參數設定之重要參考依據。就此部分而言，其工程設計與安全功能間之考量重點，評量時間主要為運轉階段與封閉後之監管階段，為了後續安全功能分析可能需配合分析所需延長評估時期。於「環境特徵演化」、「自然事件設計基準」與設計採用之「設計準則」，偏重於考量工程障壁系統如何確保在考量的時期內，具備抵抗環境力學特徵與自然事件可能對工程障壁造成之影響，確保設計考量時期內均能維持其設計功能。

就坑道式處置設施型態而言，由於廢棄物將被堆置於處置坑道或處置窖內，與部份未設置處置窖之近地表設施，直接於廢棄物上設置覆蓋層之作法有相當差異，後者之覆蓋層與廢棄物堆置均無結構設施支撐，其堆疊與壓密特性將直接影響其處置障壁結構穩定性。為了確保運轉期間坑道內之作業環境安全，坑道設計即已須確保其運轉階段之力學穩定性，而處置窖體亦為混凝土結構物，均可提供足夠之力學強度維持其運轉階段之結構穩定性。惟評量處置設施結構穩定性時，所需評量時期涵蓋運轉、封閉監管至解除封閉後之安全分析作業所需評估時間。考量可能影響處置設施力學環境變化之「環境特徵」與「自然事件設計基準」，例如：廢棄物堆置荷重、地震力、岩壓、大地應力等。以及可能導致處置設施與其材料之力學特性產生變化之作用，如：封閉後遇水的膨潤土膨脹壓、鋼筋鏽蝕產生之膨脹作用等。評量對象為處置設施所選用之材料特性、設施設計強度，以及經過長時

間環境作用後之設施強度特性。評估在不同時期之力學環境作用下，當時之處置設施結構穩定性或破壞程度。

(3)圍阻(遲滯)安全功能-工程障壁具良好遲滯功能

工程障壁具良好遲滯功能之主要考量時期，為封閉後圍阻功能已逐漸無法完整地使廢棄物所含核種停留於處置區域的時期，故遲滯功能開始發揮作用的時間，可能會是在處置設施封閉後百年尺度的時間。遲滯功能主要考量延緩核種傳輸至生物圈的時間，故以抑制核種傳輸機制之平流與擴散速度或增加被介質吸附之總量為設計目標。由於遲滯功能開始發揮作用的時間相對較晚，控制平流與擴散特性之工程障壁設計，在封閉後之百年時間尺度是否仍具有其遲滯功能，須利用前述兩項設計特徵之評量結果作為研判依據，再視劑量評估結果研判遲滯功能是否屬於可接受範圍。就此部分而言，其工程設計與安全功能間之考量重點，評量時間主要為解除封閉監管後之階段。於「環境特徵演化」與「自然事件設計基準」之考量與前述之長期水環境與力學環境考量一致，工程障壁設計則是需考量於場址特徵下經過約百年時間尺度之工程材料與設施設計特性，對於抑制核種遷移之能力，而非一般考量設施在設計年限內之功能表現。

就坑道式處置設施型態而言，由於處置場選址即會選擇一處地下水流速較低之場址，配合前述「降低處置單元水滲透」與「工程障壁結構完整性」功能考量，對於以短半化期核種為主之低放射性廢棄物處置而言，並不一定需要利用回填來使障壁系統內維持擴散主導之傳輸環境。然而，對於含有較多長半化期核種之低放廢棄物而言，利用處置窖、回填設計、混凝土材料吸附特性、緻密材料的低擴散性或利用膨潤土類材料抑制孔隙生成而達到降低處置設施內流量，維持擴散主導傳輸特性之設計目標。故其主要評量時期為封閉後時期，評量對象為核種傳輸特性。但由於評量的時間為封閉後之百年時間尺度，設施設計特徵不能直接以設計值進行分析，場址水環境特徵亦須評估是否與現況不同，故其「環境特徵演化」與「自然事件設計基準」之考量，與前述兩項設計特徵評量之力學與水環境一致。同樣需考量長時期作用下，處置設施與其材料特性產生之變化，對於地下水流場或傳輸特性可能產生之影響。評估之主要考量，在於評估在不同情節下處置設施是否能確保最終傳輸至生物圈之劑量，可符合法規要求，以及期間之核種傳輸特性是否如設計者預期呈現應有之擴散主導特性。

(4)圍阻安全功能-運轉期降低廢棄物與水接觸

運轉期降低廢棄物與水接觸功能，在考量上與處置設施運轉作業及所在環境有相當關連性。處置設施之場址特徵屬降雨量偏低者，其運轉期降低廢棄物與水接觸功能的實現，甚或可以依靠廢棄物包件本身盛裝容器的阻水性來達成。但若屬於可能發生較多水體滴落至堆置廢棄物包件之環境，如：降雨或降雪環境、坑道環境。則需利用臨時雨遮、不透水布，或移動式屋型廢棄物吊運裝置等設計，用以在處置設施工程障壁尚未完全設置完成前之階段，避免廢棄物接觸到水體。此外，堆置區域是否受到淹水事件影響而造成廢棄物與水體接觸之評估，與運轉期及封閉期場區之排水功能評量相同。就此部分而言，其工程設計與安全功能間之考量重點，評量時間主要為運轉階段。「設計基準」或「自然事件設計基準」主要考量如降雨特徵、坑道滲水量與設計頻率降雨等。設計評量則為避免廢棄物接觸水體之設施能力。

就坑道式處置設施型態而言，處置坑道滲水可藉由坑道阻水性設計、圍岩阻水性改善、坑道滲水導引設計或於廢棄物上方設置雨遮等方式達成此主要設計特徵。主要評量時期為運轉階段，評量對象為處置設施採用之避免廢棄物與水接觸設計或設施之「設計特徵」與處置設施運轉作業流程等，安全分析考量關鍵為運轉作業過程中，相關設施是否能避免可能滴落水體接觸到廢棄物之能力，以及低落水體來源考量之「環境特徵」與「自然事件設計基準」。

(5)圍阻安全功能-運轉期及封閉期場區之排水功能

運轉期及封閉期場區之排水功能在考量上，對近地表處置設施是為了改善場區排水特徵用以避免處置區發生淹水事件，對坑道處置設施則是考量坑道排水系統能力。若屬於坑道處置設施，運轉期間須評量避免地表水漫淹入坑道中，以及坑道排水能力。而封閉後是否仍具備坑道排水功能則需視場址特徵而定，並不一定可將封閉後之坑道排水功能納入安全考量中。就此部分而言，其工程設計與安全功能間之考量重點，評量時間主要為運轉階段，是否包含封閉後時期則須視場址特徵與處置設施形式而定。「設計基準」或「自然事件設計基準」主要考量設計頻率降雨與洪水或坑道滲水量。設計評量則為包含坑道與地面排水系統之整體排水能力。

就坑道式處置設施型態而言，常見的場址特徵並不容易維持處置設施封閉後之被動排水功能，因此其主要評量時期為運轉階段，評量對象為處置坑道、聯絡坑道與地面排水設施之「排水設計特徵」，安全分析考量關鍵為影響排水系統功能之「地表水文特徵」、「坑道滲水特徵」與「自然事件設計基準」如：最大可能降雨事件。

(6) 隔離安全功能-場址封閉與穩定性設計特徵

隔離安全功能在設計目標上，主要是為了確保設施封閉後能具有長期的穩定性，盡可能延長工程障壁系統可以發揮功能的時間。為了避免自然事件與作用對處置設施產生不利影響，各國在選址階段均會避免選擇自然環境具不利條件區位，諸如：火山活動、活動斷層、洪水淹沒區等。因此，所選擇之場址長期特徵應已相對穩定，故其評量多為在預期之長期環境特徵與自然事件下，工程障壁系統結構是否穩定。其評量方式與圍阻功能之設施工程障壁完整性評估方式相似，惟兩者所考量之時間尺度不同。場址封閉與穩定性評估之時間尺度較長(約數千年尺度)，而工程障壁結構完整性之時間相對較短(約數百年尺度)。就此部分而言，其工程設計與安全功能間之考量重點，在於妥適的決定「評估的時間」、「環境特徵演化」、「自然事件設計基準」與設計採用之「設計準則」，偏重於考量長期環境特徵與事件對工程障壁穩定性的影響。例如：瑞典案例之長期場址特徵或許需要考慮冰河時期可能對工程障壁產生額外的負載。採用近地表處置設施型態之美國案例主要考量風蝕與沖蝕作用對工程障壁穩定性之影響，而採用坑道處置型式之瑞典與日本案例，則幾乎不需考慮風蝕與沖蝕作用對工程障壁穩定性之影響。

就坑道式處置設施型態而言，由於一般場址之化學環境並不容易演化成對處置設施功能有明顯減損之狀態，因此場址封閉與穩定性設計特徵，其主要評量時期為封閉後，評量對象為工程障壁之「長期力學作用與特徵」，安全分析考量關鍵為影響工程障壁力學負載之「環境特徵演化」與「自然事件設計基準」。

3第三章 研析坑道處置工程設計審驗項目與安全分析參數之 關聯性及審驗技術考量

第二章依 IAEA SSR-5 所述之安全要求，將處置設施主要安全功能區分為多重安全、圍阻、隔離、監測與控制。考量監測與監控安全功能設計主要為確保各項設計，自運轉階段至解除監管前可維持其原設計功能目標，其功能性考量依各項設計目標而訂。而獨立於其他功能考量之外，監測與控制和安全管理最主要之參數關聯為設定無意闖入情節最早發生之時間。當解除監管後，若假設被動監管失效，則即可設訂為無意闖入情節開始之時間。因其關聯性單純，且參數特性屬於管理期程設定，故於第二章後續僅針對圍阻與隔離兩項安全功能與處置設計關聯性進行分析。

本報告分析之坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性，著重於分析工程障壁系統抑制核種遷移之圍阻安全功能，包含長期抑制核種遷移之遲滯能力。故工程設計與安全分析作業參數關聯性分析，將是以核種遷移分析作業所需參數為標的。為此，本章先針對核種遷移分析作業所需參數進行回顧與分析。

由於設計處置設施其功能考量在興建、運轉、封閉監管與解除監管後等不同階段有不同考量。在興建與運轉階段之功能考量，多數是基於實現處置作業需求的土木工程設計與施工方法，而設施封閉回填後所需實現之安全功能，其考量時間尺度已超過一般土木工程設計之使用年限，設計時應先推估處置場址未來可能的環境特徵，考量如何讓處置設施在此環境下，盡可能維持或延長其實現安全功能時間與效能。因此，本章將分別討論處置設施單元設計目標與安全分析參數關聯性，以及長期環境演化下之考量方式。最後再針對參數審查基本考量給予建議。

3.1 安全分析作業之核種遷移分析關聯參數

低放處置設施主要藉由多重障壁系統來遲滯核種遷移，而安全分析即是評估其安全性之主要分析技術。核種自源項傳輸至生物圈的途徑，對於坑道式處置設施而言，以地下水傳輸途徑最具代表性，固態傳輸途徑發生之機率最低。針對地下水傳輸情節之核種傳輸分析，需考量天然障壁受到環境長期演化影響，以及工程障壁受到周邊地下水、地質與岩盤特性影響之長期狀態變化，據以進行安全分析作業，如圖 3.1-1 所示。

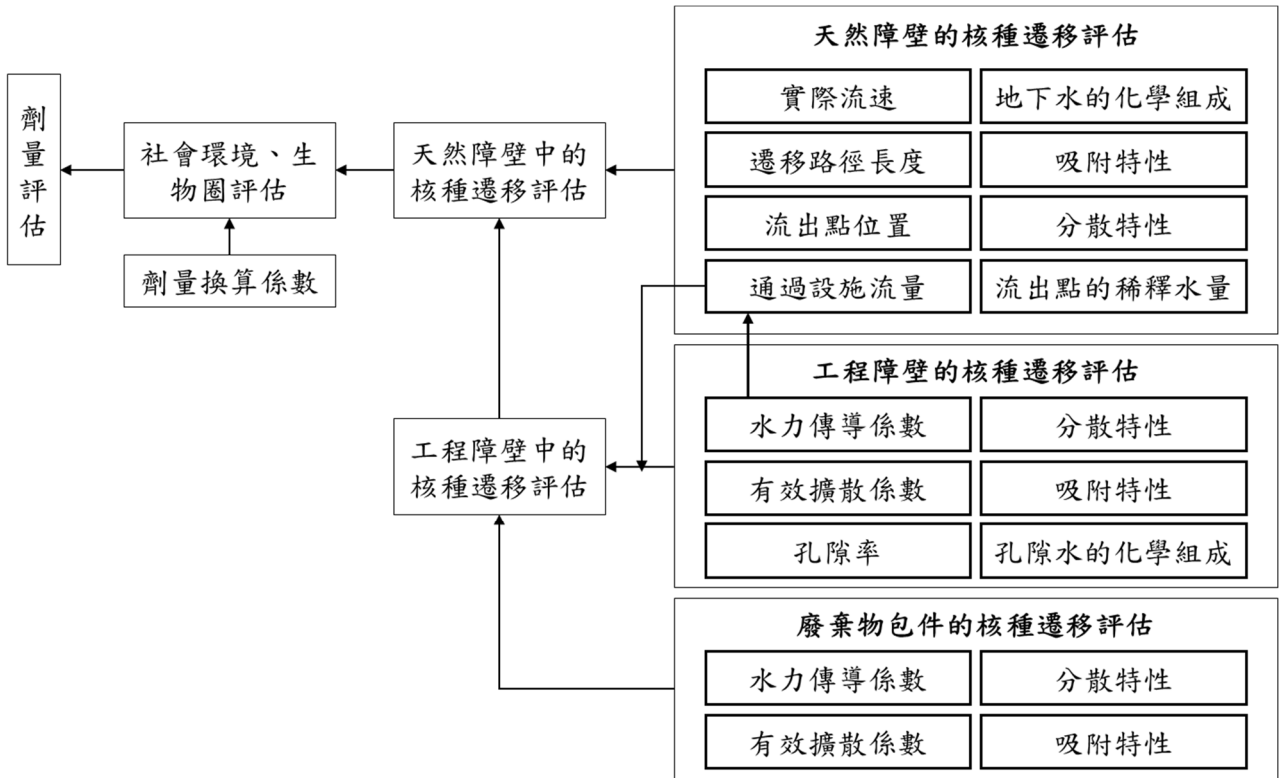


圖 3.1-1 評估地下水情節所需之核種遷移主要參數(日本土木學會，2008)

由圖 3.1-1 可知，工程障壁系統核種遷移分析所需之主要參數分別為：水力傳導係數、有效擴散係數、孔隙率、分散特性、吸附特性與孔隙水的化學組成等。此外，處置母岩之地下水流場特性將會成為分析「通過設施流量」之邊界條件。同時，工程障壁系統之水力傳導係數與處置母岩水力傳導係數之差異性，亦會影響「通過設施流量」之結果。而處置設施分布位置將因其地下水流場特性差異，而間接影響「遷移路徑長度」與「流出點位置」之結果。

核種遷移分析略可分為兩個特徵系統，分別為地下水流場特徵與核種傳輸特徵。地下水流場特徵之主要特徵為地下水流速、流向與流量等流場特性。流場特性則是由環境水力特性主導，其水力邊界可能為河川、海水位、降雨補注、抽水井...等，而影響水力特性於空間中之分布特性則為水文地質特性，其主要參數為「孔隙率」、「水力傳導係數」與前述參數之空間分布特性。

而核種傳輸特徵之主要特徵為平流、擴散、吸/脫附，以及較大尺度之分散特性。平流特性主要由地下水流場特性主導。而核種擴散特性則受水文地質材料特性影響，主要反應於「有效擴散係數」。「吸附特性」同樣受水文地質材料特性影響，同時亦與核種特性、

「孔隙水的化學特性」相關，此特性可依其環境特性差異分別以對應之「吸附分配係數」作為特性表徵。分散特性主要是指核種濃度隨著地下水流路與孔隙特性差異，因水流在岩盤中隨著透水裂隙或孔隙特性流動，而使得核種濃度在傳輸過程中之擴散與混合等過程，可能因流路分歧而使核種濃度降低，亦可能因流路合流而使得核種濃度增加。

承上，本計畫分析之安全分析參數將以「孔隙率」、「水力傳導係數」、「通過設施流量」、「有效擴散係數」、「吸附特性」、「孔隙水的化學特性」、「遷移路徑長度」與「流出點位置」為分析對象，並以工程障壁的核種遷移評估參數為主。

3.2 坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性分析

考量處置設計審查考量與方式將採 2.2.2 節所述之審查架構進行，與第二章分析已將主要設計特徵、安全功能、主要考量時期、主要設計目標與對象，以及主要評估特徵與作用等關聯項目，利用國際案例進行分析。本節將以前述實現安全功能之主要設計特徵為基礎，依據處置設施單元設計對象作為區分，分析其處置功能設計目標與工程設計項目，並分析其與核種遷移之安全分析作業中最为關鍵之參數為何。

依第二章分析之安全功能與主要設計特徵關聯性分別為圍阻安全功能之降低處置單元水滲透、運轉期降低廢棄物與水接觸、運轉期及封閉期場區之排水功能、工程障壁結構完整性、工程障壁具良好遲滯功能等，以及隔離安全功能之場址封閉與穩定性設計特徵。依 2.3.2 節與 2.3.3 節坑道處至國際案例分析內容，彙整坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性分析如表 3.2-1 所列。

表 3.2-1 坑道處置工程設計與安全分析參數之關聯性

設計對象	設計目標	工程設計項目	安全分析關鍵參數	相關之主要設計特徵
地面排水設施	排水設施排水量需可避免地面水流入坑道	排水設施排水能力	無 (若產生影響，將可能影響「通過設施流量」、「遷移路徑長度」、「流出點位置」)	運轉期及封閉期場區之排水功能 (主要為運轉期)
坑道設施	坑道力學穩定性	<ul style="list-style-type: none"> 坑道內尺寸與坑道變位 混凝土襯砌與仰拱的混凝土抗壓強度 坑道支撐工法 	因力學或化學作用而使「孔隙率」和「水力傳導係數」產生改變，而影響「通過設施流量」	場址封閉與穩定性

設計對象	設計目標	工程設計項目	安全分析關鍵參數	相關之主要設計特徵
	坑道內滲水量	<ul style="list-style-type: none"> 坑道滲水控制 阻水設計(不透水布、灌漿填縫等) 排水設計(坑道外排水隧道) 	「通過設施流量」	降低處置單元水滲透
	確保處置設施之長期隔離距離	<ul style="list-style-type: none"> 設計岩覆 處置坑道布置 	<ul style="list-style-type: none"> 「遷移路徑長度」 處置坑道與地面距離 	場址封閉與穩定性
處置窖 (鋼筋混凝土)	結構完整性	<ul style="list-style-type: none"> 抗壓強度 鋼筋強度 配筋與鋼筋續接 鋼筋保護層 	「通過設施流量」變化(因力學或化學作用而使「孔隙率」和「水力傳導係數」產生改變)	<ul style="list-style-type: none"> 工程障壁結構完整性 場址封閉與穩定性
	維持擴散遷移特性	<ul style="list-style-type: none"> 有效擴散係數 材料尺寸 裂縫開口面積 礦物組成 	「有效擴散係數」	工程障壁具良好遲滯功能
	吸附放射性核種	<ul style="list-style-type: none"> 材料尺寸 水泥材料填充量 礦物組成 	「吸附分配係數」	工程障壁具良好遲滯功能
回填 (混凝土)	形成高水力反差環境	<ul style="list-style-type: none"> 回填材料之孔隙率 水力傳導係數 	「通過設施流量」	降低處置單元水滲透
	吸附放射性核種	<ul style="list-style-type: none"> 材料尺寸 水泥材料填充量 礦物組成 	「吸附分配係數」	工程障壁具良好遲滯功能
	有利的化學環境	使用水泥材料封填	「孔隙水的化學特性」之 pH 值(影響金屬腐蝕率)	工程障壁具良好遲滯功能
低透水層 (膨潤土)	降低通過低透水層的地下水量(限制平流傳輸)	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含量與礦物組成 密度 水力傳導係數 材料尺寸 	「通過設施流量」(膨潤土之膨脹壓與水力傳導係數關聯性)	<ul style="list-style-type: none"> 降低處置單元水滲透 工程障壁具良好遲滯功能
	回脹壓力不能損害其他障壁單元	<ul style="list-style-type: none"> 蒙脫石含量與礦物組成 密度 膨潤壓 變形係數 材料尺寸 	膨潤壓與其他處置單元受壓後之變形特性,反應於「通過設施流量」(因力學或化學作用而使「孔隙率」和「水力傳導係數」產生改變)	場址封閉與穩定性

3.2.1 地面排水設施設計與安全分析參數關聯性分析

(1). 設計對象之主要設計特徵考量

地面排水設施設計之主要設計特徵為「運轉期及封閉期場區之排水功能」，此項設計特徵在近地表處置設施之安全功能重要性高於坑道式處置設施，須避免近地表處置設施之處置廢棄物因場區淹水或積水而增加廢棄物與水接觸之風險。而坑道式處置設施之地面排水設施設計主要功能是排除場區降雨所產生之地表逕流，避免水體流入聯絡坑道與處置坑道中。坑道封閉後，地面降雨基本上已無機會藉由坑道設施流入。

(2). 工程設計目標與項目

地面排水設施設計之主要設計目標為排水設施排水量需可避免地面水體流入坑道，設計上以訂定處置場區之設計排水量為主。一般以頻率降雨概念訂定設計基準(例如:百年重現期降雨)進而分析地表逕流量，訂定設施排水量為主要設計項目。排水設施設計則包含排水系統布置、設施尺寸、排水坡降、集水能力、排水系統外水條件等內容。

(3). 安全分析參數關聯性

此項目於安全功能評估審查時，應確認其設計基準是否合理，以及是否會導致地面水體流入坑道中，其安全性判斷之參數為淹水深度、淹水範圍與淹水時間等。以坑道式處置設施而言，採用較保守之設計排水功要求將可避免場區發生淹水與地面水體流入坑道之情事，故於核種傳輸相關安全分析作業中不應具參數關聯性。

(4). 安全功能審驗技術考量

地面排水設施設計之審驗技術主要為淹水分析，審查時需確認排水設計可以排除其設計排水量，並審視相關設計基準設定是否合理。淹水分析可依參考水理分析相關技術規範做為審查依據。

3.2.2 坑道設施設計與安全分析參數關聯性分析

(1). 設計對象之主要設計特徵考量

處置坑道於運轉期間須具備營運作業安全性，基本上必須先確保坑道設施之環境外力載重與處置作業載重條件下之力學安定性並維持坑道形狀，並避免坑道內發生湧水或大量滲水現象，以維持作業安全。處置安全功能考量方面，處置坑道設計之主要設計特徵為「場址封閉與穩定性」，主要在於實現與確保隔離安全功能，關鍵考量為須確保處置坑道與地面之隔離距離。此外，處置坑道的滲水狀況將影響坑道內部各障壁單元之滲透水量，故亦具備圍阻安全功能之遲滯核種功能考量，其主要設計特徵亦包含「降低處置單元水滲透」。坑道阻水功能考量，除營運階段維持坑道內作業環境需求外，於封閉階段可能搭配在坑道外側灌注阻水皂土材料用以降低封閉後之坑道滲水量。

(2). 工程設計目標與項目

坑道設計目標包含：坑道力學穩定性、坑道內滲流控制水量，以及確保處置設施之長期隔離距離等功能，分述如下。

1. 坑道力學穩定性

坑道力學穩定性設計需考量坑道型式、周圍岩層特性、施工載重、營運載重、地震力等力學因子，針對處置坑道的坑道變位、混凝土襯砌、仰拱等構造進行設計。其中，混凝土襯砌、仰拱的設計項目，以其坑道設計與支撐設計形式可能包含：混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接、鋼筋保護層、支保工、岩栓等。此外，為滿足處置作業所需空間需求，必須確保處置坑道內有足夠的建設與運轉空間。故設計項目包含：坑道內尺寸與坑道變位、混凝土襯砌與仰拱的混凝土抗壓強度、坑道支撐工法等。

2. 坑道內滲水量

坑道設施之防水工程與排水工程設計，於一般山岳隧道排水設計需確保隧道周邊地下水不會滯留在襯砌背面，且結構不會因過大的地下水壓使襯砌內面產生漏水。此項考量亦適用坑道式處置之相關坑道設施，為確保襯砌內面不會漏水，除可利用防水膜等防水工程，作為防止湧水對策。亦可針對排水工程選擇適當之內部排水材料，確保坑道湧水不會滯留。此外，若進行防水作業後，仍然在施工縫等處發生漏水到襯砌內面時，則須進行止水、導水等漏水處理對策。

坑道周邊岩盤受開挖影響，將使其透水性產生變化。坑道設施興建後，可針對坑道周圍岩盤是否因開挖坑道而使其透水性過度增大進行監測，並於封閉作業時利用皂土系

材料進行填縫作業，用以降低透水性。若仍無法達到阻水設計目標，於安全分析作業需評估開挖損傷或擾動區域的透水性，納入核種遷移評估之中。

3. 確保處置設施之長期隔離距離

對於坑道式處置設施而言，確保處置設施之長期隔離距離主要反應於到設計岩覆厚度，以及坑道布置位置應儘量有利於使核種傳輸至生物圈之路徑更長，或更慢到達生物圈。因此，實現隔離安全功能主要是在封閉至解除監管之後，故於設計時須同時考量處置設施所在環境之長期演化趨勢，如抬升、侵蝕等作用對於岩覆厚度之影響。

(3). 安全分析參數關聯性

1. 坑道力學穩定性

坑道設計在力學穩定性之考量，主要為確保運轉期間坑道可維持其力學穩定狀況，確保坑道變形量不會影響處置作業所需之空間需求。依照隧道設計規範內容，支撐設計主要目的是整合隧道挖掘後及周邊地層的狀況，使其達到早期安定化之效果。支撐作業的材料有噴漿混凝土、岩栓、鋼支撐架等，屬於一次襯砌。仰拱與支撐設計均以確保地層的安定為目的。而二次襯砌設計時需檢討地層與載重等條件，其力學特性，一般選擇在地層變形收斂後進行施工，故基本上不考慮載重作用。但若地層變形尚未收斂即進行襯砌施工時，則須考慮因襯砌施工造成之水壓或垂直載重等外力。因此，坑道力學穩定性檢核是以設計基準之載重與岩體負載等載重組合，以及坑道形狀與支撐設計等設計成果分析其坑道穩定性。封閉後，處置坑道仍會持續受到外力載重影響，考量坑道採用回填設計，故其力學穩定性應較運轉階段之處置坑道更佳。由前述分析可知，力學穩定性考量並不會直接與核種遷移分析參數產生直接連結。

雖然襯砌與仰拱於力學設計時並不會要求坑道回填後的功能，但若使用水泥系材料進行設計時，可參考低擴散層或處置窖之設計考量，則可強化其遲滯核種功能。如此，則可能與「通過設施流量」特性產生連結，主要反應於二次襯砌之水泥系材料「水力傳導係數」與「有效擴散係數」特性，以及水泥材料隨時間增長而產生之力學與化學劣化特性。

2. 坑道內滲水量

為維持坑道內之作業環境安全，坑道設計會利用防水與排水設計來控制與降低流入坑道內之滲流量。一般而言，隧道設計需確保隧道周邊地下水不會滯留在襯砌背面，且結構不會因過大的地下水壓使襯砌內面產生漏水。通常利用防水膜等防水工程作為適當

的湧水對策，亦可針對排水設計選擇適當之內部排水材料，以確保隧道湧水不會滯留。此外，在營運接段若仍然在施工縫等處發生漏水到襯砌內面時，則須進行止水、導水等漏水處理對策。

因此，坑道內滲水量控制設計與安全分析作業之「通過設施流量」有一致性的考量。此外，坑道周邊岩盤會因為開挖作業而產生損傷或擾動影響區域，若其透水性變化在安全評估上無法忽略時，則需評估開挖影響區域的透水性。

3. 確保處置設施之長期隔離距離

在處置安全功能考量上，處置坑道設計之主要功能為「隔離」，用以確保處置廢棄物與生物圈之距離可達成隔離功能需求。故其與安全分析考量之關聯性在於確保距離，包含核種傳輸距離之「遷移路徑長度」，以及避免人類無意闖入與降低固體傳輸情節發生時間之「處置坑道與地面距離」。前者在處置坑道設計時，須注意將處置坑道布置於地下水流場流置地表長度較長與時間較久之區域。後者須考量岩層抬升與地表侵蝕等地質作用，對於岩覆削減之作用，並合理考量設定足夠之岩覆厚度，用以降低發生人類無意闖入事件之機率。

(4). 安全功能審驗技術考量

1. 坑道力學穩定性

坑道力學穩定性其評估重點，在於確定坑道設計可以抵抗場址環境與作業所產生之外力負載，故須確認其負載設計基準之合理性，以及力學分析結果符合安定條件。若二次襯砌於設計時有考量遲滯核種功能，主要反應於核種遷移分析之「通過設施流量」、「水力傳導係數」與「有效擴散係數」參數，其選用考量詳見 3.3.1 節說明。

2. 坑道內滲水量

基於維持坑道內作業安全考量，處置坑道會採用防水與排水設計儘可能降低入滲至坑道內之滲水量。營運階段若發生漏水現象亦會進行止水、導水等漏水處理對策。由於處置坑道應會採用不排水隧道設計方式，儘可能讓岩盤中的水流在岩盤中流動，原則上依設計結果是不應產生坑道內滲水量。但實際施工時，仍可能會有偶發之漏水現象，故在其安全評量是以防水、排水與漏水處理對策之有效性進行審查。而預估之可能漏水量則是反應於「通過設施流量」參數。此外，坑道周邊岩盤會因為開挖作業而產生損傷或擾動影響區域，若其無法藉由封閉作業之皂土封堵其透水性，則須將開挖擾動與損傷區域之「水力傳導係數」與「有效擴散係數」數值與空間分布特性納入安全分析之中。

3. 確保處置設施之長期隔離

確保坑道式處置設施之長期隔離主要審查項目，為作為無意闖入障壁之設計岩覆，以及為確保較長「遷移路徑長度」而設定之處置坑道布置區流場特性。故其審查技術與評估地下水流場特性之審查技術相同。此外，審查時須注意可能影響處置設施與生物圈距離之各項地質作用，如：抬升、侵蝕等。

3.2.3 處置窖設計與安全分析參數關聯性分析

(1). 設計對象之主要設計特徵考量

以坑道式處置設施型態而言，廢棄物依其所含核種活度與長半化期核種特性，活度與半化期均很低之廢棄物，依其安全考量可能僅需堆置於處置坑道之中，利用坑道設施之力學穩定性與阻水功能，即可達成確保安全功能。但對於活度較高與含有較長半化期核種之廢棄物而言，由於其盛裝容器不一定具備足夠之圍阻功能(例如各國常用之 55 加侖桶)，則需要設置其他工程障壁系統來達成確保圍阻功能之安全目標。由於處置窖設施屬於鋼筋混凝土結構物可提供較佳之力學穩定性，混凝土材料具有不錯之吸附核種特性，且利於建置與維持擴散主導核種遷移之環境。因此，處置窖設計之主要設計特徵通常包含力學考量之「工程障壁結構完整性」與「場址封閉與穩定性」，以及利用混凝土材料特性之「工程障壁具良好遲滯功能」。

(2). 工程設計目標與項目

處置窖設計目標包含：結構完整性、維持擴散遷移特性，以及吸附放射性核種等功能，分述如下。

1. 結構完整性

處置窖屬混凝土構造物適用土木領域使用的結構設計與耐久性設計方法。處置窖於營運階段需提供堆置廢置物、窖內填充以及處置窖封頂作業時所需之力學穩定性，因此會使用鋼筋來減少處置窖因堆置廢棄物等各項載重影響而產生裂縫。由於進入封閉階段之後，處置窖除需維持其結構完整性，另需提供必要遲滯功能。在考量鋼筋長時間浸沒於地下水中將會產生腐蝕膨脹現象，而使得混凝土產生裂縫，故在設計上需考量減少鋼筋的使用量，或延後開始發生鋼筋腐蝕膨脹之時間點。與力學特性相關的設計項目為混凝土抗壓強度、鋼筋強度、配筋、鋼筋續接及鋼筋保護層等。

2. 維持擴散遷移特性

為遲滯核種遷移至人類生活環境之時間，以及確保其活度已降至對人類無明顯危害之程度，處置窖亦需提供有利於遲滯核種遷移之功能。處置窖之遲滯核種功能來自於水泥類材料，利用其材料礦物組成、有效擴散係數、抗壓強度與厚度設計，達成需維持以擴散主導傳輸機制之階段性設計目標。此功能在進入封閉階段之後，將會隨著鋼筋腐蝕膨脹等外力作用產生裂縫、以及水泥本身的水化物的溶出等現象而使功能下降。此功能目標之主要設計考量為長期之有效擴散係數與控制裂縫延後生成之考量，設計項目包含：抗壓強度、鋼筋強度、配筋與鋼筋續接、鋼筋保護層、有效擴散係數、材料尺寸、裂縫開口面積、礦物組成等項目。

3. 吸附放射性核種

吸附能力將限制溶解於孔隙水中的核種濃度，溶解在孔隙水中的核種濃度較低，將有助於降低核種從廢棄物中釋出至環境的速度，而吸附能力取決於固體材料特性和孔隙水的化學特性。吸附現象主要發生於固體表面。由於水泥的孔隙率相對較大，而水泥組成中有許多固相為非晶質故其比表面積大，此特性皆有利於吸附。由於吸附分配係數受到水泥系材料的礦物組成與液相的化學組成所影響，且依核種的種類不同而有所不同。故吸附分配係數隨著水泥的材料種類、組合、品質等不同而有所變動。設計項目主要包含：材料尺寸、水泥材料填充量、礦物組成。

(3). 安全分析參數關聯性

1. 結構完整性與維持擴散遷移特性

處置窖之結構完整性與維持擴散遷移特性設計目標與安全分析作業參數之關聯性，主要關聯在於其處置窖結構物之孔隙結構、孔隙率、裂隙等之長期特徵演變過程。結構完整性主要將考量外力作用與內部鋼筋腐蝕膨脹導致之破壞，若處置窖外部並未規劃進行回填作業封填其與坑道間之空隙。若處置窖缺乏外部回填材料提供之束制力，於發生完整之鋼筋腐蝕膨脹，應判釋處置窖已失去其結構完整性。對於安全分析作業之核種遷移分析參數而言，因孔隙結構結構改變將連帶改變「水力傳導係數」與「有效擴散係數」以及「通過設施流量」。

2. 吸附放射性核種

工程障壁隙單元之核種吸附特性，目前國際低放處置安全分析案例多是以「吸附分配係數」評估其吸附性能。因此，推估工程障壁單元之核種遷移量時，處置窖材料、可吸附面積、孔隙水化學特性等參數，將會影響「吸附分配係數」參數之設定。

(4). 安全功能審驗技術考量

1. 結構完整性與維持擴散遷移特性

處置窖結構完整性之審驗考量可分為確認力學穩定性，以及確認可維持結構完整性時間之評量。力學穩定性分析在於確定處置窖設計可抵抗場址環境與作業所產生之外力負載，故須確認其負載設計基準之合理性，以及力學分析結果符合安定條件。而可維持結構完整性之時間，則以評估處置環境對於處置窖功能劣化之影響程度與時間。影響結構完整性可維持時間之主要作用應為鋼筋腐蝕膨脹，故需特別針對其鋼筋保護層厚度設計與腐蝕評估合理性進行審驗。由於此兩項設計目標考量，主要反應於核種遷移分析之「通過設施流量」、「水力傳導係數」與「有效擴散係數」參數，其審驗技術考量詳見 3.3.1 節與 3.3.4 節說明。

2. 吸附放射性核種

審驗處置窖吸附核種功能之正確性，主要需確認其吸附模式、可吸附面積、吸附分配係數選用合理性。吸附特性參數審驗技術考量詳見 3.3.3 節所述。

3.2.4 坑道回填設計與安全分析參數關聯性分析

(1). 設計對象之主要設計特徵考量

回填設計主要對象為處置坑道與處置窖間之空間設計。為增加整體工程障壁系統之遲滯功能，可利用水泥材料做為回填設計材料，除能增加可吸附核種之總面積之外，水泥材料會使孔隙水的化學特性偏鹼性，此特性亦有利於減緩金屬腐蝕速率，對於減緩高活度之活化金屬類廢棄物核種釋出，或維持盛裝容器圍阻功能亦有所助益。此外，完全封填之回填設計，有利於維持坑道處置設施於封閉後之長期力學穩定性。在回填設計僅需考量力學特性與規劃設計高水力反差環境時，回填設計亦可考量採用碎石類材料，相對較為經濟但核種吸附能力較差。依國際案例經驗可知，坑道式低放處置設施於設施封閉時，當坑道設施力學穩定性滿足處置需求時，並不一定會採用完全回填設計。例如瑞典案例即有部分處置坑道採用不回填或部分回填設計，搭配形成高水力反差環境，藉以在其需實現圍阻功能

之期間，降低流經處置廢棄物之流量。因此，回填設計之主要設計特徵將可能為「降低處置單元水滲透」與「工程障壁具良好遲滯功能」。

(2). 工程設計目標與項目

設計目標包含：形成高水力反差環境、吸附放射性核種，以及有利的化學環境等功能，分述如下。

1. 形成高水力反差環境

搭配處置窖設施之水力傳導係數設計結果，於處置窖與坑道二次襯砌間之回填充間利用碎石回填，形成回填區與處置窖材料間有較高之水力傳導係數差，如：兩個級數以上的水力傳導係數差異。將可使水流集中於碎石區流動，進而控制流入處置窖之水量。由於高水力反差屬於地下水流場環境控制設計，若環境特徵改變即會影響其功能，如：環境水壓增加導致坑道入滲量增加等。此類設計較適用於低活度與長半化期核種較少之廢棄物類型。其設計項目主要包含：回填材料之孔隙率、水力傳導係數。

2. 吸附放射性核種與有利的化學環境

處置坑道內之化學環境特徵，將會影響核種吸附與金屬腐蝕速率等與核種遲滯有關之特徵。一般而言，使用水泥類材料將使孔隙水具有較高 pH 值，可確保對重要的陽離子具有良好的吸附效果。此外，較高 pH 值之孔隙水特性搭配處置坑道回填後之低氧化還原環境，亦有利於抑制金屬腐蝕速率增加，對於遲滯核種外釋具正向功能。其設計項目主要包含：材料尺寸、水泥材料填充量、礦物組成。

(3). 安全分析參數關聯性

1. 形成高水力反差環境

高水力反差環境設計其最主要之設計項目即為水力傳導係數，亦為其安全分析作業之主要參數。

2. 吸附放射性核種與有利的化學環境

工程障壁隙單元之核種吸附特性，目前國際低放處置安全分析案例多是以「吸附分配係數」評估其吸附性能。因此，推估工程障壁單元之核種遷移量時，回填材料、可吸附面積、孔隙水化學特性等參數，將會影響「吸附分配係數」參數之設定。

(4). 安全功能審驗技術考量

1. 形成高水力反差環境

高水力反差屬於地下水流場環境控制設計，在其功能審查時並非僅止於比較其水力傳導係數差值，必須審驗其地下水流場評估內容，包含：水力邊界條件考量、高水力反差環境之3維空間設計、初始條件與相關參數設定。其中，需特別注意可能成為邊界條件之坑道入滲量推估，以及是否須採用非飽和狀態水流與非穩態模擬方能合理模擬之評估技術適宜性。

2. 吸附放射性核種與有利的化學環境

審驗水泥材料吸附核種功能之正確性，主要需確認其吸附模式、可吸附面積、吸附分配係數，以及水泥材料對於孔隙水化學特性影響分析合理性。吸附特性參數審驗技術考量詳見3.3.3節所述。

3.2.5 低透水層設計與安全分析參數關聯性分析

(1). 設計對象之主要設計特徵考量

依國際案例經驗，低透水層設計主要應用處置具高活度與具長半化期核種之廢棄物。選用膨潤土材料進行設計，主要是利用其遇水膨脹之特性，有助於處置設施封閉且地下水入滲至處置系統時，藉由其膨脹特性封堵孔隙並降低可通過設施之水量，同時提供維持以擴散傳輸主導之核種遷移環境。由於膨潤土於膨脹時將會產生膨脹壓力，因此在設計時需考量其鄰近障壁系統單元之抗壓能力，以及控制膨潤土之膨脹壓設計，使其可同時達成控制水量與力學穩定之設計目標。因此，低透水層之主要設計特徵為「降低處置單元水滲透」、「工程障壁具良好遲滯功能」與「場址封閉與穩定性」。

(2). 工程設計目標與項目

設計目標包含：降低通過低透水層的地下水量以及回脹壓力不能損害其他障壁單元等功能，分述如下。

1. 降低通過低透水層的地下水量

膨潤土是以蒙脫石為主成分的黏土岩，蒙脫石有片狀結晶構造，結晶層間可吸收水分，使層間距離增加，產生膨脹特性。壓縮狀態下的高密度膨潤土，具有非常低的透水性且對力學變形也有可塑性，故施工上產生的空隙或是受力造成的受損，膨潤土可發揮

自我修復功能。此外，因膨潤土為天然材料，對於地下環境來說，有化學安定性的優點，故可作為需長期維持功能之工程障壁之極佳材料。為降低通過低透水層的地下水量，需儘可能增加有效蒙脫石密度，故低透水層採用高密度或蒙脫石含量多的材料，為有效降低透水性之設計方法。其設計項目主要包含：蒙脫石含量與礦物組成、密度、水力傳導係數、材料尺寸。

2. 回脹壓力不能損害其他障壁單元

利用膨潤土的膨潤性質封閉低透水層內部的孔隙，此功能為低透水層實現長期將核種圍阻於處置窖中與減緩核種外釋之重要功能，故控制膨潤壓設計亦相當重要。膨脹壓力主要與有效蒙脫石密度有關，密度越高則其膨脹壓力越大，但過大的膨潤壓可能會造成周圍處置障壁單元的損傷，故在設計時需考量鄰近構造的力學影響。其設計項目主要包含：蒙脫石含量與礦物組成、密度、膨潤壓、變形係數、材料尺寸。

(3). 安全分析參數關聯性

1. 降低通過低透水層的地下水量

低透水層主要是利用膨潤土本身遇水膨脹之特性，維持長期之低水力傳導係數特性，此項功能關聯之安全分析參數主要為「通過設施流量」，分析考量因素分別為「孔隙率」、「水力傳導係數」與「有效擴散係數」。

2. 回脹壓力不能損害其他障壁單元

與前述各項力學穩定性考量相同，若膨脹壓力大於周圍處置障壁單元之抗壓能力，則會因力學作用而產生變形，進而改變孔隙結構，影響「孔隙率」、「水力傳導係數」、「有效擴散係數」與「通過設施流量」等參數。

(4). 安全功能審驗技術考量

1. 降低通過低透水層的地下水量

採用膨潤土材料設計之低透水層，其主要功能在於維持長期之低透水性，降低可能通過低透水層而接觸廢棄物之水量。審驗其技術考量除了需評估初始設計之「水力傳導係數」是否可以滿足功能需求，同時需評量處置環境特徵演化對於膨潤土材料各項特性之影響，評估在狀態劣化後，仍可滿足其功能需求設定。膨潤土相關參數選用之審驗技術考量詳見 3.3.2 節所述。

2. 回脹壓力不能損害其他障壁單元

回脹壓力不能損害其他障壁單元之考量，屬於力學穩定性分析評量範疇，主要分析外力負載與抗壓能力間之力學穩定狀態。須注意膨潤土因蒙脫石含量差異以及孔隙水化學特性差異，遇水後之產生之膨脹壓力亦不同，審驗時應注意相關設定是否符合其考量之環境狀態與設計結果。膨潤土相關參數選用之審驗技術考量詳見 3.3.2 節所述。

3.3 設施設計與安全分析參數關聯性審驗技術考量

考量設施設計與安全分析參數直接具關聯性之參數，主要包含「孔隙率」、「水力傳導係數」、「有效擴散係數」與「吸附特性」參數，其餘安全分析參數如「通過設施流量」、「孔隙水的化學特性」、「遷移路徑長度」與「流出點位置」等，主要為量測資料、邊界條件或以前述參數經流場分析後之結果。考量「孔隙率」、「水力傳導係數」與「有效擴散係數」具有相互關連性，當處置設施因物理或化學作用產生劣化現象，產生裂隙或變形導致孔隙率產生變化，進而水力傳導係數與有效擴散係數亦會隨著改變。因此，本節將依材料特性區分討論「水力傳導係數」與「有效擴散係數」參數審驗技術考量。另針對「吸附特性」參數審驗技術考量進行說明。

3.3.1 水泥類材料「水力傳導係數」與「有效擴散係數」審驗技術考量

水泥類材料在澆置過程中會因水化熱與自生收縮而產生裂縫，與設施營運階段則會因為廢棄物堆疊、地震力、回填材料等外力負載，而增加產生裂縫的可能性。在營運過程中，水泥類材料之裂縫仍有補強的可能性，但與設施回填封閉後所產生裂縫則無法透過補強方式恢復其應有功能。例如：封閉後因鋼筋腐蝕產生膨脹壓力致使混凝土產生裂縫，雖然可透過鋼筋防蝕設計或增加保護層厚度來延緩其發生時間，但難以避免此腐蝕劣化作用之發生。當混凝土窖體產生貫穿性裂縫時，對於處置窖之水力傳導係數將產生顯著影響。但若處置窖外側設置之膨潤土層可發揮其預期功能時，則處置設施整體的透水特性即「通過處置設施流量」，並不會因為處置窖之水力傳導係數改變而有明顯變化。

(1). 水泥類材料之「水力傳導係數」參數審驗技術考量

水泥類材料的水力傳導係數會受到孔隙率、孔隙徑分布、孔隙連結度及孔隙彎曲度等孔隙構造影響。由於水泥製品之孔隙率會隨著水灰比等水泥配比而改變，故可透過不同水泥配比製作試體，進行孔隙率與水力傳導係數之量測，其結果如圖 3.3.1-1 所示。如圖所示，

趨勢上水力傳導係數曾隨著孔隙率增大而增加，但波特蘭水泥試體與飛灰混合水泥試體等不同水泥配比之間，其孔隙率與水力傳導係數關聯性仍有所差異，反應孔係構造特性亦會影響水力傳導係數之特性。

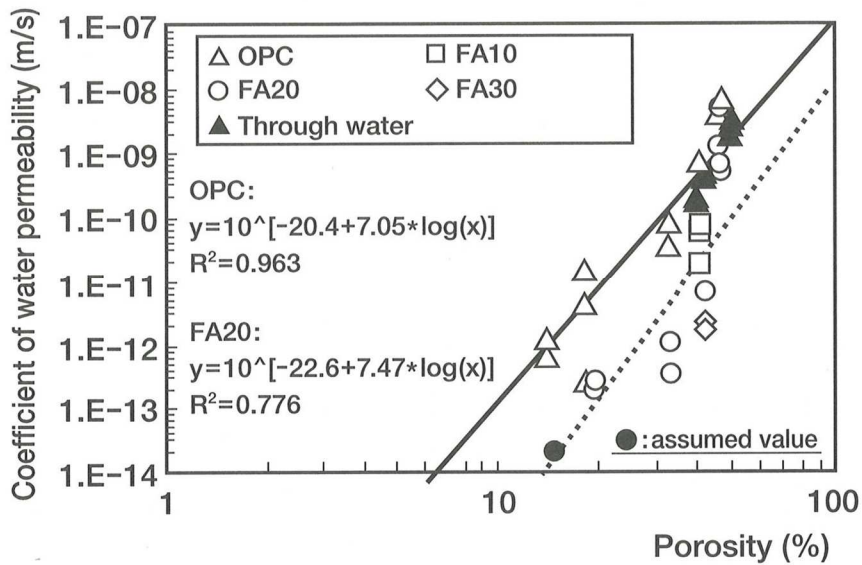


圖 3.3.1-1 水泥類材料之「水力傳導係數」與「孔隙率」關聯性(日本土木學會，2008)

因裂縫造成的透水量與壁面內外的水力梯度或裂縫幅度成正比，日本土木學會於「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」報告中，曾利用經驗公式搭配達西公式推求裂縫與水力傳導係數關聯性如圖 3.3.1-2 所示。

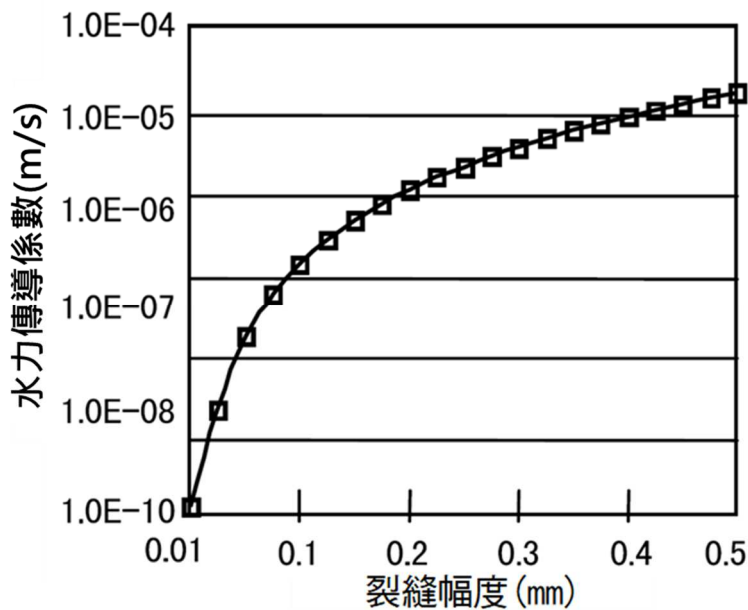


圖 3.3.1-2 裂縫幅度與水力傳導係數之關係(日本土木學會，2008)

(2). 水泥類材料之「有效擴散係數」參數審驗技術考量

水泥類材料的有效擴散係數一樣會受到孔隙率、孔隙徑分布、孔隙連結度及孔隙彎曲度等空隙構造影響。日本土木學會於「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」報告中，將以不同水灰比之試體投入氙水中，量測氙水的有效擴散係數，如圖 3.3.1-3 所示。並利用直徑 50mm、高 6mm 的普通波特蘭水泥、W/C=0.4、S/C=1.5 砂漿試體，在 1m² 的表面積上割出一條裂縫，投入氙水並量測其有效擴散係數。嘗試試驗裂縫數量或裂縫幅度對有效擴散係數之影響，如圖 3.3.1-4 所示。當裂縫數量增加或幅度擴大，有效擴散係數也會隨之增加，但裂縫幅度對有效擴散係數的變化幅度影響不大。

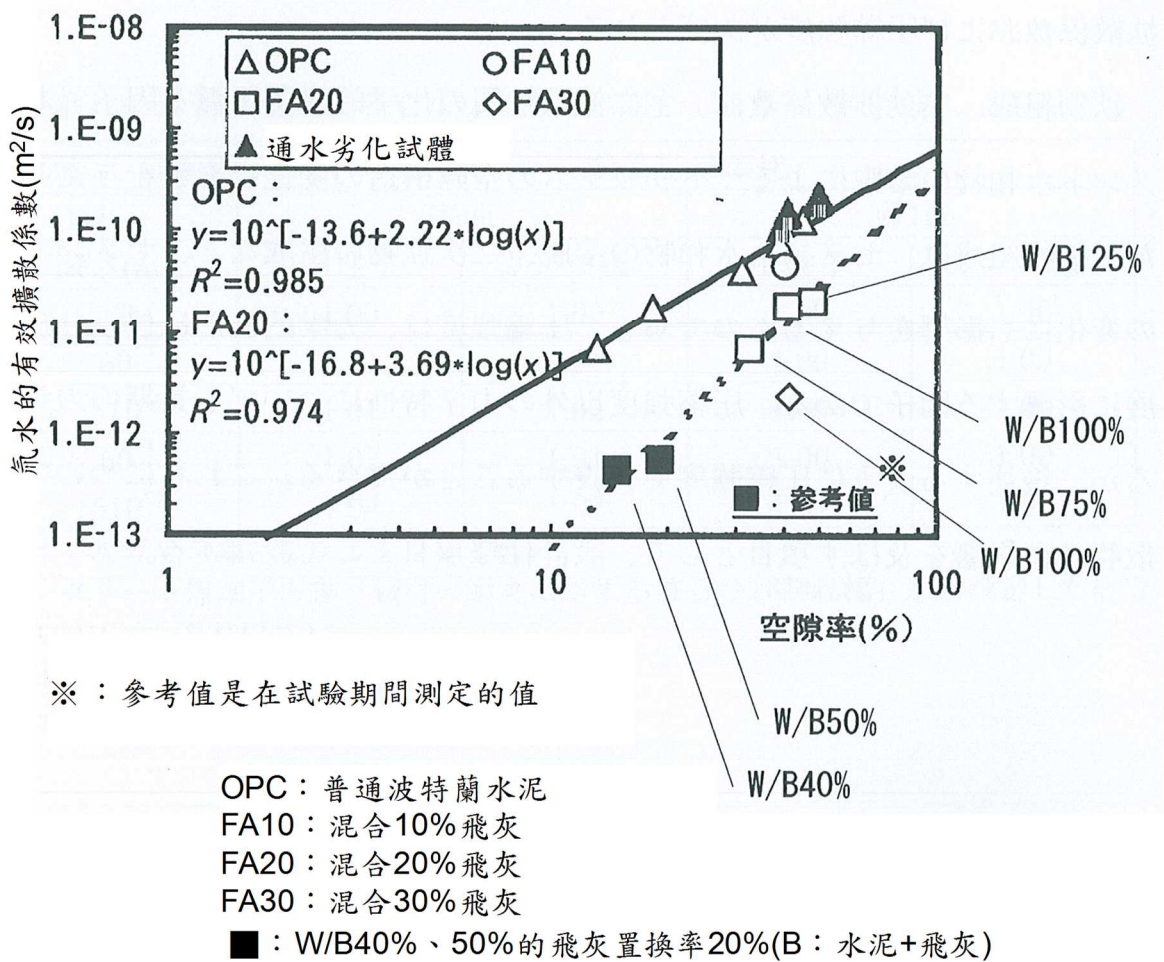


圖 3.3.1-3 孔隙率與有效擴散係數之關係(日本土木學會，2008)

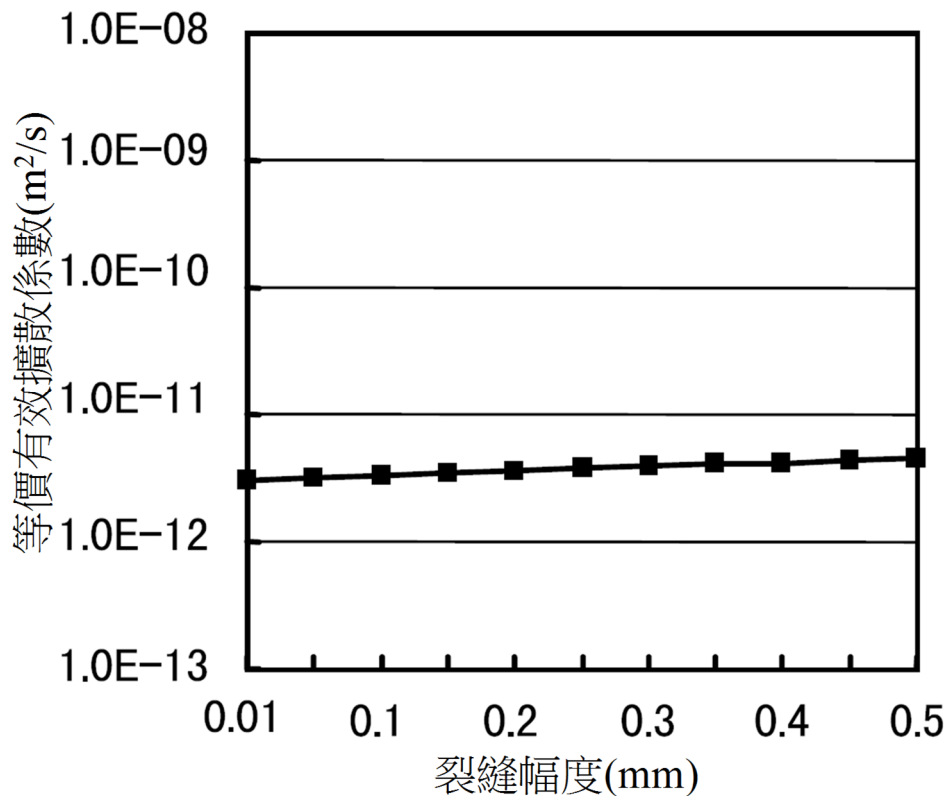


圖 3.3.1-4 裂縫幅度與有效擴散係數之關係(日本土木學會，2008)

3.3.2 膨潤土類材料「水力傳導係數」與「有效擴散係數」審驗技術考量

由膨潤土所製成之低透水層，可能採用預先將膨潤土壓製成膨潤土磚，或與現場直接滾壓製作之方式，其製作設計是以壓密程度與膨潤土乾密度作為管理對象。而影響膨潤土材料之「水力傳導係數」與「有效擴散係數」參數之關鍵考量單位體積之蒙脫石含量。營運過程與膨潤土材料增加之載重、封閉後地下水滲入至膨潤土材料，均會改變其膨潤土密度特性。與設施封閉後經過一段長時間的演化，周圍水泥材料之溶出物將可能導致膨潤土鈣型化，或產生蒙脫石溶解等化學變化。

(1). 膨潤土類材料之「水力傳導係數」參數審驗技術考量

相同來源製成之膨潤土，其「水力傳導係數」特性與其蒙脫石含量(有效黏土密度)有高度之關聯性，如圖 3.3.2-1 所示。由圖可知，當有效黏土密度相同時，Ca 型膨潤土的水力傳導係數會大於 Na 型膨潤土的水力傳導係數，但隨著有效黏土密度增加，兩者差異會縮小。

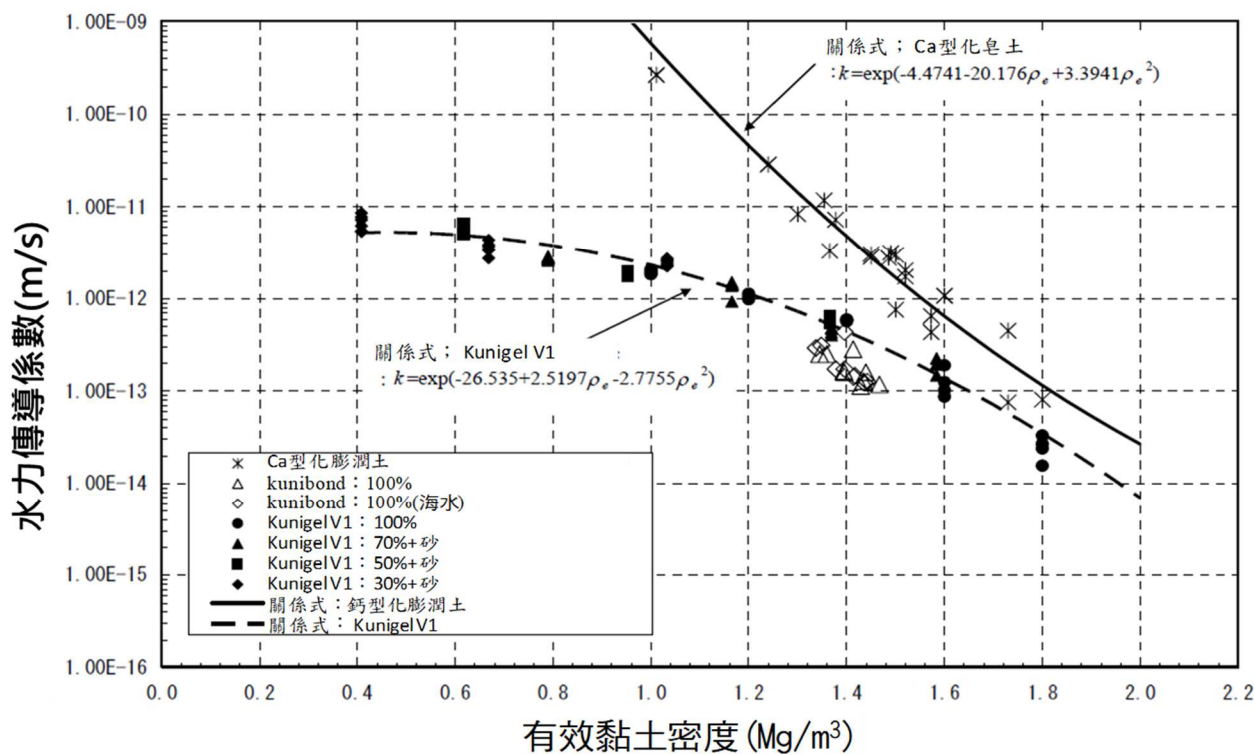


圖 3.3.2-1 膨潤土材料的「水力傳導係數」與有效黏土密度之關係(日本土木學會，2008)

膨潤土壓縮後可提高單位體積所含之蒙脫石含量，同樣呈現有效黏土密度越高其水力傳導係數越低之特性，如圖 3.3.2-2 所示。

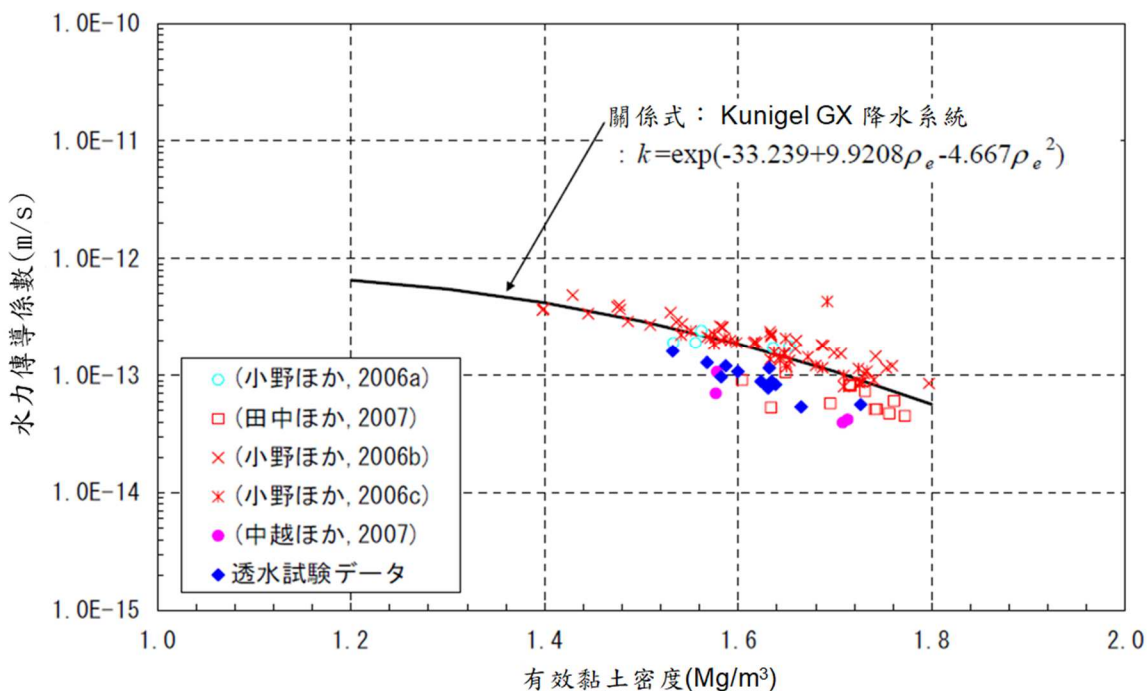


圖 3.3.2-2 壓縮粒狀膨潤土的有效黏土密度與透水係數之關係(日本土木學會，2009)

膨潤土於不同孔隙水化學特性下，因膨脹特性受其化學特性影響，在相同有效黏土密度的條件下，膨潤土於淡水環境之水力傳導係數低於海水環境之水力傳導係數，如圖 3.3.2-3 所示。

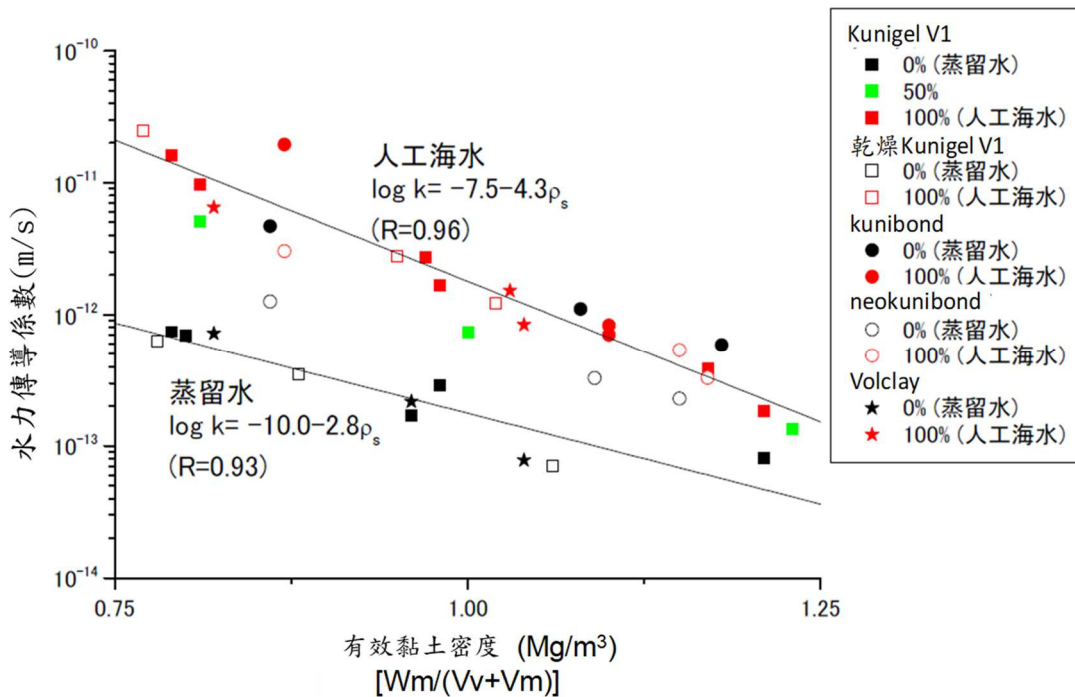


圖 3.3.2-3 不同孔隙水化學環境對於膨潤土水力傳導係數之影響(日本土木學會，2009)

(2). 膨潤土材料之「有效擴散係數」審驗技術考量

由圖 3.3.2-4 的膨潤土有效擴散係數分布圖可知，膨潤土的有效黏土密度與有效擴散係數成反比關係，當有效黏土密度越高則有效擴散係數越低，越有利於遲滯核種遷移。雖然，Ca 型膨潤土的水力傳導係數會大於 Na 型膨潤土的水力傳導係數。但是，對於有效擴散數而言，Ca 型膨潤土與 Na 型膨潤土對於有效擴散係數的影響並不明顯。

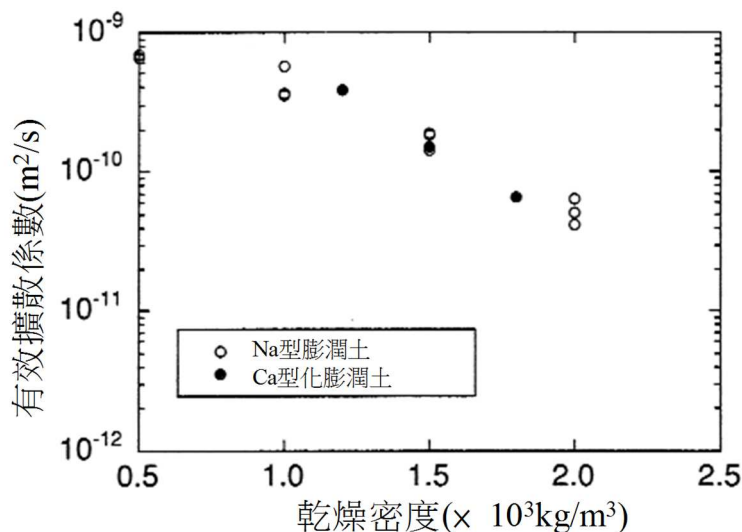


圖 3.3.2-4 膨潤土材料的「有效擴散係數」與有效黏土密度之關係(日本土木學會，2008)

由日本土木學會之有效黏土密度與膨潤壓的關係可知，如圖 3.3.2-5 所示。有效蒙脫石密度越高之膨潤土其膨潤壓越大。但過大的膨潤壓會造成低擴散層的損傷，故在設計時需考量鄰近構造的力學影響。

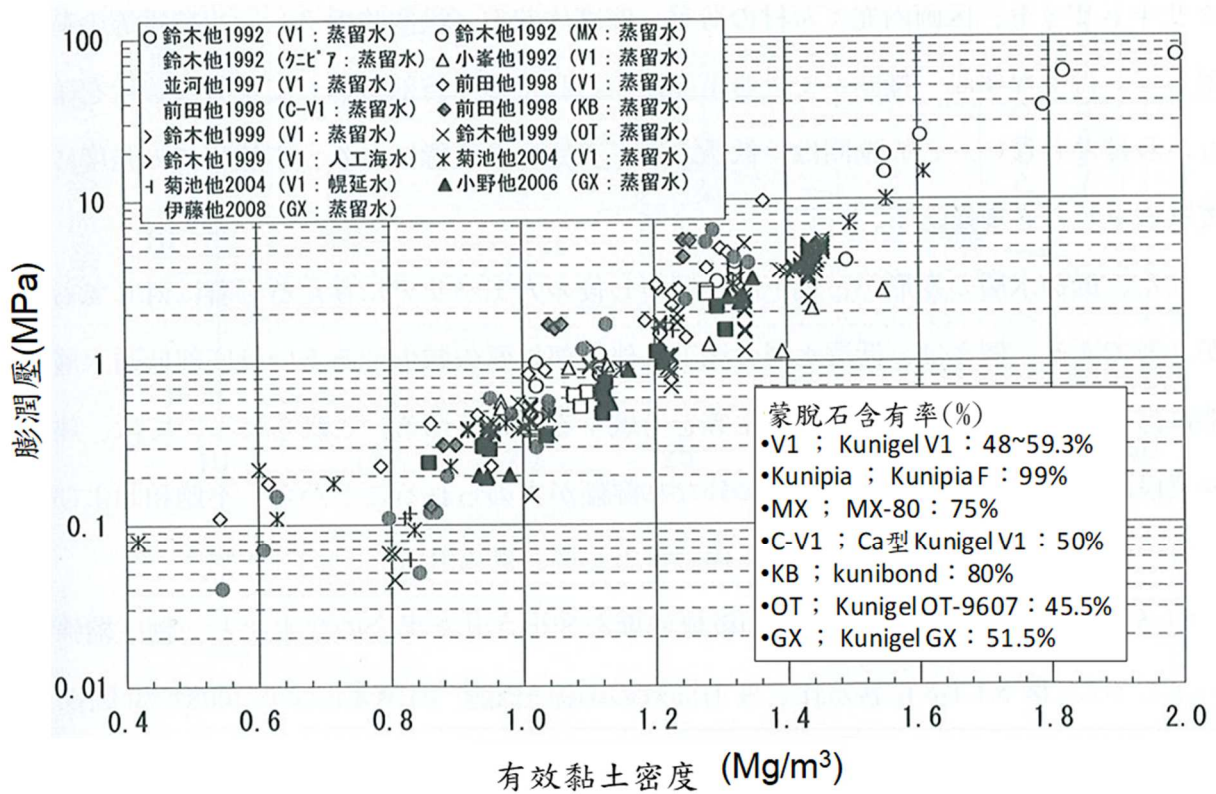


圖 3.3.2-5 有效黏土密度與膨潤壓之關係(日本土木學會，2009)

3.3.3 「吸附特性」參數審驗技術考量

吸附分配係數受水泥系材料之礦物組成影響，故吸附分配係數會依砂漿的材料種類、組合、品質的不同有所變動。此外，不同核種亦有不同之吸附分配係數。安全評估模式大多採用核種吸附分配概念設定分配係數值(Kd)，進而評估處置母岩、混凝土材料與膨潤土材料對於外釋核種之吸附能力。雖然吸附能力已被簡化為採分配係數做代表，用於描述核種在材料表面與其殘留於溶液中之分配比例。但 Kd 值易受許多環境變數影響而改變，例如環境溫度、溶液酸鹼度與氧化還原電位等。

(1)酸鹼值

由於膨潤土礦物鋁氫氧八面體中的 Al-OH 鍵是兩性的，因此溶液的酸鹼值會影響膨潤土表面電荷特性和化學特性，進而影響吸附效果，在酸性環境中，氫氧根易電離，使膨潤土表面帶正電荷，有利於吸附陰離子；在鹼性環境中，氫離子易電離，進而使膨潤土表面帶負電荷，有利於陽離子的吸附。

(2)溫度

吸附過程通常是一種放熱反應，因此低溫有利於吸附，高溫則有利於脫附，同時溫度也會影響吸附物質在材料中的擴散速率，進而影響 Kd 值，溫度過高容易造成吸附物質脫附，而溫度過低則會降低吸附物質在材料中的擴散速率，使 Kd 值下降。

(3)氧化還原電位

氧化還原電位可反映水溶液中所有物質的宏觀氧化還原性，氧化還原電位越高，氧化性越強，電位越低則氧化性越弱，並且電位為正表示溶液顯示出一定的氧化性，為負則說明溶液顯示出還原性。氧化還原電位同時也受溶液溫度、pH 及化學反應可逆性等因素影響，氧化還原電位的下降將導致 pH 值降低，使陰離子有利吸附於膨潤土表面；而氧化還原電位的上升將使 pH 值升高，有利於陽離子的吸附。

V. Garrido, et al. (1998)研究 MX-80 膨潤土於不同 pH 值與氯化鈉濃度環境下，對 Sr 的吸附特性影響，其試驗結果如圖 3.3.3-1 所示。研究結果顯示，MX-80 於 pH 值較高的環境中能吸附較多的 Sr，另外溶液中的氯化鈉濃度也會影響膨潤土吸附 Sr 的能力，當溶液中氯化鈉濃度較低時，膨潤土能吸附較多的 Sr。

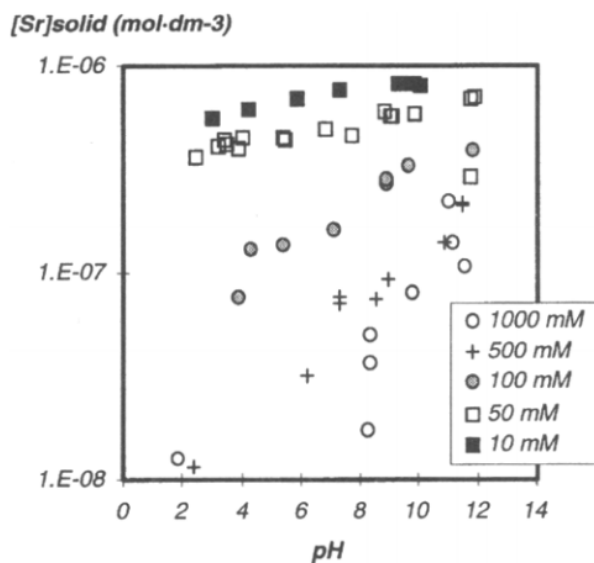


圖 3.3.3-1 MX-80 膨潤土於不同溶液中的 Sr 吸附量(V. Garrido, et al., 1998)

3.3.4 「通過設施流量」參數審驗技術考量

核種遷移評估參數中，工程障壁系統與天然障壁系統的實際流速、「遷移路徑長度」、「流出點位置」、「通過設施流量」等地下水流動參數，可利用地下水流場模擬取得相關參數值。選用地下水流場模擬模式時，須依分析特性進行選用合適模式。需要考量複雜地形與地質構造效應時需進行3維模擬，需討論地下水自由水位面問題時，需選用可同時模擬飽和與非飽和狀態下流場特性之程式。

將前述材料之「水力傳導係數」與「有效擴散係數」參數考量納入模型，依所處環境流場特徵設定邊界條件，進行模擬分析。此部分之審查考量與地下水模擬驗證技術考量相同，需注意網格劃分、邊界條件、初始條件與相關參數設定之合理性。

3.3.5 影響參數變化之長期作用考量

工程障壁在設施封閉回填後之長期狀態變化，受到地球化學環境、處置設施設計、組成材料等影響。如 3.3.1 節~3.3.2 節所述，可將工程障壁依其組成材料之不同區分為水泥類材料與膨潤土類材料兩大類，分別依其設施設計成果，評估與選用合適之初始狀態參數。

當處置設施封閉後隨著時間演化，水泥類材料受到膨潤土的膨脹壓、膨潤土沉陷、鋼筋腐蝕、金屬容器腐蝕、岩盤潛變、地震、鹼骨材反應、水泥水化物溶出等物理或化學作用影響，將造成裂縫擴張、裂縫生成或孔隙率改變。而膨潤土類材料則會因交換性陽離子變化、地下水鹽化、膨潤土沉陷、岩盤潛變、地震等作用等，導致膨潤土特性改變，進而影響其「水力傳導係數」與「有效擴散數」等參數變化。影響參數變化之作用與事件詳如表 3.3.5-1 所列。

表 3.3.5-1 影響參數變化之作用與事件

影響主因(作用、事件)		影響的結果(特徵)	
水泥類材料	物理影響	膨潤土的膨脹壓	膨脹壓(包括膨脹過程的側壓)使處置窖及低擴散層產生裂縫
		膨潤土沉陷	低透水層底部不均勻沉陷造成水泥類材料位移，使處置窖及低擴散層產生裂縫
		鋼筋腐蝕	鋼筋腐蝕膨脹使處置窖及低擴散層產生裂縫
		金屬容器腐蝕	金屬容器腐蝕膨脹使處置窖及低擴散層產生裂縫

影響主因(作用、事件)		影響的結果(特徵)	
		岩盤潛變	岩盤潛變使處置窖及低擴散層產生裂縫
		地震	地震力使處置窖及低擴散層產生裂縫
	化學影響	周邊高硫酸離子濃度的地下水	地下水含有高濃度硫酸離子時，膨脹性的鈣礬石促使裂縫產生
		廢棄物中的可溶性鹽類	廢棄物內含有硫酸鹽時，膨脹性的鈣礬石促使裂縫產生
		鹼骨材反應	鹼骨材反應使處置窖及低擴散層產生裂縫
		裂縫部分產生次生礦物	地下水與水泥溶出成份反應生成次生礦物，阻塞裂縫
水泥水化物溶出、產生次生礦物	地下水使水泥水化物溶出，溶出之成分與地下水反應生成次生礦物，造成孔隙改變		
膨潤土類材料	物理影響	廢棄物金屬容器腐蝕	廢棄物金屬容器腐蝕膨脹壓縮到低透水層，使密度增加，或廢棄物金屬容器腐蝕塌陷使低透水層的膨脹密度降低
		膨潤土沉陷	低透水層底部壓縮變形使低透水層上部的密度降低
		岩盤潛變	岩盤潛變使低透水層厚度變小、密度增加
		地震	地震力造成低透水層沉陷，使密度產生變化
		膨潤土流失至鄰近構造空隙	膨潤土流失到鄰近混凝土構造之裂縫間隙，造成密度降低
	化學影響	交換性陽離子變化(鈣型化)	水泥類材料的孔隙水中具有高濃度的鈣離子，促使鈣型化發生
		周邊地下水鹽水化	鹽分累積與孔隙特性(孔隙率、孔隙構造)改變，使膨脹性能降低
		廢棄物中的硝酸鹽、硫酸鹽等可溶性鹽類	鹽分累積與孔隙特性(孔隙率、孔隙構造)改變，使膨脹性能降低
		蒙脫石溶解、副成分礦物溶解、次生礦物產生	水泥類材料的高鹼性孔隙水使構成膨潤土的成分溶解，造成密度降低。溶解出的成分與地下水反應生成次生礦物沉澱。

4第四章 研析近岸與離島坑道處置工程設計之審驗評估項目 與所需驗證技術

4.1 工程設計與安全分析作業參數審驗

本報告探討之工程設計與安全分析作業參數關聯性審驗技術，於安全分析報告中分別屬於第三章設施設計「設計目標與功能需求」評估內容，以及對應於第七章設施安全評估之「正常狀況之輻射劑量」與「異常狀況之輻射劑量」相關核種傳書評估作業之參數選用。於審查作業進行時主要是依「設計目標與功能需求」中，審驗坑道處置工程設計於安全功能相關之「主要設計特徵」，是否能合理達成其設定功能目標，以及設施設計時所採用之設計基準與設計成果是否合理。

與安全分析作業參數關聯之部分，與隔離及圍阻安全功能相關之「主要設計特徵」包含：降低處置單元水滲透、工程障壁結構完整性、工程障壁具良好遲滯功能、運轉期降低廢棄物與水接觸、運轉期及封閉期場區之排水功能、場址封閉與穩定性等項目。其審驗技術考量方式，可參考 2.4 節所歸納之國際案例分析成果。於進行安全分析報告審查時，就實現安全功能之工程設計策略與考量，審查其合適性與實現之設計方法。可參考 3.1 節與 3.2 節之關聯分析審視申照者，是否於工程設計章節中妥適說明影響參數選用之設計項目，其相關設計目標與設計內容。後於第七章審視其參數選用，是否依據其設計成果而得。由表 3.2-1 可知，主要關聯之安全分析參數均與「通過設施流量」具有關聯性。

依 3.3 節分析成果，與材料設計直接相關參數為「孔隙率」、「水力傳導係數」、「有效擴散係數」其參數驗證技術多利用試驗方式進行，審查時須注意其試驗條件設定與處置環境與設施之合適性。其次，多屬於與地下水流場特性相關之參數，包含「通過設施流量」、「遷移路徑長度」與「流出點位置」等，此部分參數則需一併審視其地下水流動特性分析之合理性，方能確定其參數設定是否合適。由於低放處置安全分析考量之時間尺度較高放處置來得短，國際上亦常以實驗所得之吸附分配係數代表「吸附特性」，審查時須注意其參數選用之試驗條件，並同時審視其處置設施「孔隙水的化學特性」是否與其考量條件相符。

由於處置設施封閉後之長期功能演化影響，亦屬於安全評估範疇。因此，長期演化過程中的各項可能對於參數產生影響之作用與事件，亦需納入審查考量。如 3.3.5 節分析成果，影響相關參數變動之作用，主要為處置設施材料之物理與化學劣化，以及不同處置單元材料間之交互影響。對於坑道式處置設施而言，可導致處置設施特徵改變之環境作用或

事件，主要為岩盤潛變與地震。其考量之環境作用與事件未若近地表處置設施來得多，是因處置母岩提供處置設施可避免受到風蝕、降雨及洪水沖刷等自然作用與事件之影響。

4.2 參數審查基本考量

由於各項參數審驗技術評量多會涉及定量評估結果審查，說明參數審查基本考量如下：

(1)數據充足性

使用適當數據對於申照審查很重要，故採用之數據應具備適當之代表性、完整性、品質與客觀立場。在數據充足性的考量包含了：

- 1.應確定是否提供足夠的數據來支持功能評估模型。
- 2.應確定這些數據是否得到了適當的使用。

由於在功能評估時，為了使參數具備欲模擬範圍之時間和空間尺度上的過程和事件，可能會涉及參數的升尺度分析或外插推估，須注意其是否能保留會影響功能評估結果之參數關鍵特徵。

(2)不確定性

申照者應儘可能降低不確定性對於處置安全功能之影響，透過評估結果的不確定性分析，在一定範圍內可透過使用多種證據或模式分析來降低不確定性之影響。本報告說明之不確定性定略分為情境不確定、模式不確定(包含概念化、數學化)與參數不確定性。

(3)模型分析技術考量

利用數學模型預測與模擬處置設施功能，為用以證明設施設計可以滿足 10CFR61 功能要求之重要分析技術。模型分析技術是否可提供充分之論證支持，可由以下考量進行審查。

- 1.模式是否經過驗證，並確認數學模式模擬結果，其計算準確度是可接受的。
- 2.模式是否經過校正，並確認所建立的模式，確實可以反映出欲分析對象之特徵。
- 3.可以利用天然類比來強化對於模式分析結果之信心，但由於天然類比通常是無法正確反應出模式所考量之各項條件，因此並不能用於驗證模式之正確性。
- 4.可利用第三方平行驗證來確認模式分析技術之準確性與適用度。

5第五章 研提我國低放坑道處置工程設計審查重點或注意事項建議

本計畫以「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)」第三章設施之設計基準作為審查設計目標與功能之「主要設計特徵」為依據，分析處置設計與安全分析作業核種傳輸分析參數間之關聯性與審查技術。

經工程設計與安全分析作業關聯性分析，處置設施設計同時與圍阻安全功能、隔離安全功能以及核種遷移分析參數具相關性之主要設計特徵分別為：降低處置單元水滲透、工程障壁結構完整性、工程障壁具良好遲滯功能、運轉期降低廢棄物與水接觸、運轉期及封閉期場區之排水功能、場址封閉與穩定性等項目。而相關之參數則包含：「孔隙率」、「水力傳導係數」、「有效擴散係數」、「通過設施流量」、「遷移路徑長度」、「流出點位置」、「孔隙水的化學特性」，以及代表「吸附分配係數」的「吸附特性」等參數。

依第三章坑道處置工程設計審驗項目與安全分析參數之關聯性及審驗技術考量分析結果可發現，其審查技述主要涉及力學穩定性分析、地下水流場分析、工程材料經物理或化學作用後之變化評估，以及處置單元間之交互作用影響。力學穩定性評估與地下水流場評估屬於土木工程領域常用之分析技術，在審查時主要需注意申照者是否依其場址特徵、設計基準與設計結果，妥適的設定相關分析條件，並檢視其分析結果是否符合所訂定之功能目標。處置單元間之交互作用影響，主要評估亦是反應於力學穩定與流場分析為主，其審查考量與前述相同，惟須注意其屬於長期演化的部分審查需另外評量。工程材料經物理或化學作用後之變化評估，較屬於處置工程設計審查技術特有之考量，主要的原因來自於安全功能分析時間尺度達到千年與萬年尺度。此外，就封閉後之確保圍阻與隔離功能實現之時間尺度亦可達數百年尺度，均已超過一般土木工程設計時考量之設計年限。

審查工程設計與安全分析參數間需特別注意之事項，多源自於此類長期作用與交互影響之參數考量(如 3.3.5 節)，或是屬於利用混凝土與膨潤土材料進行滲流環境控制之技術考量(如 3.3.1 節至 3.3.3 節)。

由於參數選用多是依據試驗結果，需特別注意於參數選用時期參考資料之試驗條件是否與處置環境相同，例如：膨潤土特性同時與有效黏土密度、Ca 型膨潤土或 Na 型膨潤土、孔隙水的化學性質屬海水或淡水等因子相關。選用混凝土相關參數時，則需注意其設計採用之配比與添加物之差異，將會影響其選用之參數數值。

另外，採用膨潤土作為材料之低透水層設計，其功能性考量具有互相抵觸之特性，於審查時亦須注意其關聯性。其功能目標在降低通過設施流量設計上，採用有效黏土密度越高之設計，其降低水力傳導係數之效果越好。但因有效黏土密度越高，低透水層產生之膨脹壓力亦越高，需檢視其是否會造成周圍處置障壁單元產生力學破壞。亦需檢視低透水層設計在實現兩種功能目標時，其水力傳導係數與膨脹壓力設計值，需採用相同之有效黏土密度設計。

6 參考文獻

1. 日本原子力委員會，「超過現行政令劑量上限值的低放射性廢棄物處置基本考量方法」。
2. IAEA, 2001, Technical considerations in the design of near surface disposal facilities for radioactive waste, TECDOC-1256.
3. IAEA, 2004, Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities.
4. IAEA, 2011, DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE, SPECIFIC SAFETY REQUIREMENTS, No. SSR-5.
5. SKB. 2014, Safety analysis for SFR Long-term safety. SKB TR-14-01.
6. U.S. NRC, 1965 Version 4, Alternative Methods for Disposal of Low-Level Radioactive Wastes, NUREG/CR-3774.
7. U.S. NRC, 1982 (2105 Version), Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste, 10CFR61.
8. U.S. NRC, 2015, Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61 (Draft Report for Comment), NUREG 2175.
9. 行政院原子能委員會物料管理局，2017，低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析，子計畫二：低放射性廢棄物坑道處置工程設計驗證方法研究。
10. 日本社團法人土木學會能源委員會，低放射性廢棄物餘裕深度處置相關研究小委員會，余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方，2008。
11. 日本社團法人土木學會能源委員會，低放射性廢棄物餘裕深度處置相關研究小委員會，余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方，2009。



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

驗證評估研究

子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗

證評估技術之研究

期末報告

計畫編號：107FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 107 年 12 月 1 日

低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之
驗證評估研究

子計畫三：低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗
證評估技術之研究

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫三主持人：楊長義、李宏輝

研究期程：中華民國 107 年 1 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 79.7 萬元(子計畫三經費)

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(期末報告)

中華民國 107 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)

摘要

處置坑道建置於地表下，其結構穩定性與所處圍岩岩性及地質條件有關，必須透過充分的地質調查與大地材料試驗，始能獲得足夠的參數並進行坑道結構設計與穩定性分析。當處置坑道進入建造與運轉階段，亦需針對坑道結構進行持續性的監測與檢測，以驗證及評估坑道結構的穩定性。為能建立符合我國地質條件之處置坑道結構穩定驗證評估技術，本計畫透過國際資訊研析，及國內一般隧道設計方法與施工規範之蒐整後，進一步探討了處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關工程規範的關聯性，並提出處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項與審查重點建議。

在國際資訊研析部分，蒐整了Äspö 硬岩實驗室有關開挖方式對圍岩擾動的研究、日本六所村低放射性廢棄物處置場址穩定性調查與瑞浪地下實驗室有關深度與地震引致之加速度反應紀錄；在一般隧道設計方法與施工規範部分，除國內既有的技術文獻外，亦蒐整了日本隧道工程標準規範與解說，及國際間有關隧道震損的報導與分析，據以提出置坑道結構穩定之驗證評估技術要項與審驗重點建議。

關鍵詞：處置坑道、驗證評估技術、坑道結構穩定

Abstract

The disposal tunnel is built under the surface, and its structural stability is related to the surrounding host rock and geological conditions. Sufficient geological surveys and geomaterial tests are necessary to explore the parameters for the design and stability analysis of the tunnel structure. In the phases of construction and operation of the disposal tunnel, continuous monitoring and inspection are required to verify and evaluate the stability of the tunnel structure. In order to establish a verification and evaluation technology for the stability of the disposal tunnel structure in line with the geological conditions of Taiwan, the international information about the disposal tunnel and the design methods and construction specifications of domestic tunnel are collected in this study.

The collection of the international information includes the research of the Äspö hard rock laboratory on the surrounding rock disturbances induced by various excavation method, the stability investigation of the low-level radioactive waste disposal site in Rokkasho, Japan, and a series of acceleration records induced by earthquake in Ruilang underground laboratory.

In the design method and the construction specification of general tunnel, in addition to the domestic technical reports, the Japanese tunnel engineering standard specifications and explanations, the lectures about the analysis of tunnel damage induced by earthquake are collected as well. Finally, the suggestions of the verification and evaluation technology of the stability of the tunnel structure are proposed.

Keywords: disposal tunnel, verification and evaluation technology, stability of tunnel structure

目錄

摘要	I
Abstract.....	II
目錄	III
表目錄	V
圖目錄	VI
第一章、前言	1
1.1 計畫背景	1
1.2 計畫目的與重要性	2
1.3 計畫工作項目與期程規劃	2
1.4 報告內容	3
第二章、國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術	5
2.1 處置結構穩定有關之試驗、檢監測項目	5
2.2 國際間與處置坑道結構有關之數值分析與工程案例	7
2.3 岩石損傷特性與坑道開挖擾動之研究	24
2.4 地震對處置坑道的影響	31
第三章、國內一般隧道設計方法與施工規範	44
3.1 一般隧道設計方法	44
3.2 一般隧道施工規範	46
3.3 隧道設計準則與相關技術文件	47
3.4 隧道耐震設計相關規範與分析方法	49
第四章、處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性	68
4.1 外力因素	68
4.2 環境因素	75
4.3 非力學因素	84
4.4 國內一般隧道設計規範與安全分析報告審查導則相關章節之關聯性	88
第五章、處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議	92

5.1 我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式	92
5.2 處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議	96
第六章、我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議	99
第七章、結論	102
參考文獻	104
附錄 A	110

表目錄

表 1.3-1 計畫工作項目與期程規劃	2
表 2.1-1 監測參數與對應的量測方法(IAEA, 2001)	6
表 2.2-2 開挖面應力分析所需參數	12
表 2.2-3 日本低放射性廢棄物處置場地層層序分布	15
表 2.1-4 調查項目表	17
表 2.4-1 瑞浪地下實驗室所處地層之岩石力學特性	32
表 2.4-2 2008 至 2011 年間之 MIU 之測儀紀錄	34
表 3.1-1 國內一般隧道設計方法表	45
表 3.2-1 國內一般隧道施工規範	46
表 3.3-1 國內一般隧道設計準則與相關技術文件	47
表 3.4-1 考慮隧道受震之設計規範	53
表 3.4-2 不同地震波所引致之隧道曲率與應變	59
表 3.4-3 各種隧道耐震分析法之比較	65
表 3.4-1 山岳與土層隧道受震條件比較	66
表 4.1-1 隧道進洞方向與地形的關係注意事項	69
表 4.1-2 洞口邊坡穩定措施	71
表 4.1-3 台階開挖工法之開挖方法適用條件特徵及注意事項表	73
表 4.3-1 混凝土劣化原因說明	85
表 4.3-2 與結構混凝土耐久性有關之試驗法	88
表 4.4-1 國內一般隧道設計規範與安全分析報告審查導則相關章節之關聯性	89
表 5.1-1 國內低放處置設施候選場址之比較	96
表 6.1-1 審查導則編修要點建議	99

圖目錄

圖 2.2-1 ÄSPÖ 硬岩實驗室之 TASA 試驗坑道位置.....	7
圖 2.2-2 ÄSPÖ TASA 試驗坑道之鬆動岩塊肇因與百分比).....	8
圖 2.2-3 鑽掘與爆破開挖方式之隧道剖面.....	9
圖 2.2-4 TASS 坑道之設計剖面與鑽孔 RQD 資料.....	9
圖 2.2-5 TASS 試驗坑道之斷面里程(M)與裂隙數量.....	10
圖 2.2-6 TASS 開挖面應力分析數值模型.....	11
圖 2.2-7 TASS 開挖面應力分析—最大主應力分佈圖.....	13
圖 2.2-8 TASS 開挖面應力分析—最大主應力於頂拱處之分佈圖.....	13
圖 2.2-9 TASS 開挖面應力分析—最小主應力於頂拱處之分佈圖.....	13
圖 2.2-10 日本青森縣六所村(ROKKASHO-MURA)位置圖.....	14
圖 2.2-11 日本低放射性廢棄物處置場區域地質分布圖.....	15
圖 2.2-12 日本低放射性廢棄物處置場調查項目及裝置示意圖(1).....	18
圖 2.2-13 日本低放射性廢棄物處置場調查項目及裝置示意圖(2).....	19
圖 2.2-14 支保應力測定裝置示意圖.....	20
圖 2.2-15 日本低放射性廢棄物處置場區域地質調查平面圖.....	21
圖 2.2-16 L1 低放射性廢棄物最終處置試驗坑道配置.....	22
圖 2.2-17 試驗空洞實際照片.....	22
圖 2.2-18 試驗空洞開挖過程及計測坑之變位記錄.....	23
圖 2.2-19 試驗空洞支保應力測定結果.....	23
圖 2.3-1 硬岩的應力—應變曲線.....	24
圖 2.3-2 瑞典 FORSMARK 花崗岩強度分佈.....	25
圖 2.3-3 岩石強度破壞包絡線，及各個不同應力態之岩石損傷或破壞型態.....	26
圖 2.3-4 不同的應力條件與母岩岩石力學特性條件下之開挖引致損傷機制.....	27
圖 2.3-5 於高應力作用之硬岩區進行坑道開挖引致之母岩損傷.....	29
圖 2.3-6 坑道剝落損傷評估.....	30
圖 2.4-1 瑞浪地下實驗室坑道配置圖.....	31
圖 2.4-2 瑞浪地下實驗室分別於(A)地面及(B)地下設置地震儀.....	33

圖 2.4-3 日本瑞浪地下實驗室之加速度紀錄與深度關係).....	35
圖 2.4-4 日本瑞浪地下實驗室所記錄的地震事件其震源距離與深度關係圖	35
圖 2.4-5 加州、阿拉斯加和日本 71 個隧道震損案例.....	36
圖 2.4-6 尖峰地表加速度與不同之隧道破壞類型統計數	37
圖 2.4-7 不同的岩覆深度及其對應的隧道震損數量	39
圖 2.4-8 圍岩種類及其對應的隧道震損數量	40
圖 2.4-9 支撐種類及其對應的隧道震損數量	41
圖 2.4-10 地震規模及其對應的隧道震損數量	42
圖 2.4-11 震央距離及其對應的隧道震損數量	43
圖 2.4-12 地表加速度 PGA 其對應的隧道震損數量	43
圖 3.4-1 震波作用下之隧道變形行為	55
圖 3.4-2 土壤動態主動推力之相關符號說明	56
圖 3.4-3 動態地震土壓力法之分析概念示意圖	57
圖 3.4-4 強制變形法主要分析概念	57
圖 3.4-5 簡諧振動下所造成隧道之變形特性	58
圖 3.4-6 地震波水平入射至隧道軸向所導致之斷面受力	60
圖 3.4-7 地震波垂直入射至隧道軸向所導致之斷面受力	60
圖 3.4-8 修正強制變形法示意圖	61
圖 3.4-9 動態有限元素、有限差分法示意圖	61
圖 4.1-1 各種隧道進度方向與地形的關係	70
圖 4.1-2 台階開挖工法	74
圖 4.1-3 側導坑工法	74
圖 4.2-1 依時變形速率增加後 M 值與應變率關係.....	76
圖 4.2-2 水災前後之收斂應變速率與岩層特性之關係	77
圖 4.2-3 圍岩潛變體積應力與剪應力門檻	78
圖 4.2-4 圍岩潛變體積應力與剪應力門檻	78
圖 4.2-5 圍岩潛變體積應力與剪應力門檻	79
圖 4.2-6 孔隙率、GAR 指標與砂岩單壓強度之分類.....	80
圖 4.2-7 孔隙率與 GAR 對砂岩單壓強度的影響.....	81

圖 4.2-8 石灰岩中方解石與石灰岩比例對MI值的影響.....	81
圖 4.2-9 水璉礫岩歷經不同乾濕循環次數下消散耐久指數變化.....	82
圖 4.2-10 水璉礫岩歷經不同乾濕循環次數下點荷重指數變化.....	82
圖 4.2-11 碎屑沉積岩岩石材料風化循環實驗結果.....	82
圖 4.2-12 大理岩風化循環實驗結果.....	83
圖 4.2-13 未循環(左)與循環 180 次(右)之大理岩薄片影像.....	84
圖 4.3-1 混凝土物理性劣化因素.....	86
圖 4.3-2 混凝土化學性劣化因素.....	87
圖 5.1-1 台東縣達仁鄉低放處置設施候選場址.....	93
圖 5.1-2 金門縣烏坵鄉低放處置設施候選場址.....	95

第一章、前言

1.1 計畫背景

處置坑道建置於地表下，其結構穩定性與所處圍岩岩性及地質條件有關，必須在建造初期透過充分的地質調查與大地材料相關試驗，獲得足夠的參數以進行坑道結構設計與穩定性分析。根據國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)在對地質處置場址的安全要求要項(Safety Requirements on Geological Disposal)中提出的處置設施監測工作內容，也已闡述了監測工作在處置坑道建造前、運轉中與封閉後的重要性：

“在地質處置設施建造之前與建造過程中，須針對監測計畫提出具體的定義與執行相關工作。透過監測計畫所蒐集與更新的資料在於確認處置場址與設施，在運轉期間，相關工作者與所處環境居民的安全與確保其對環境的影響，以及在處置場址封存後，任何可能影響其安全性的條件。”

在建造階段與運轉期間，針對處置坑道所處圍岩之工程行為與坑道結構進行的監測及檢測工作，實為驗證與評估坑道結構穩定性之重要依據，尤其在國內地質條件不若國外處置技術先進國家之優勢前提下，除須持續蒐集與研析國際相關處置與工程經驗，更須將我國處置母岩之地質與岩石力學特性，及一般坑道在建造與運轉期間所遭遇的問題納入考量。

本子計畫於106年執行之「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究」(楊長義與李宏輝，2017)，提出坑道處置結構穩定性分析流程，其內容包括包含「資料蒐集與分析」、「坑道結構穩定分析」與「檢測與監測」等。針對「坑道結構穩定分析」部份，根據本子計畫先期研究-「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)，蒐整自國內一般隧道實際現況與相關研究文獻(李佳翰，2013)，歸納出處置坑道結構長期穩定影響項目，包括外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、環境因素(風化作用引致岩石強度弱軟化、依時變形特性)與非力學因素(混凝土中性化、鋼筋保護層不足、鹼質粒料反應、混凝土澆置中斷、襯砌背後空洞或厚度不足等)。

為能持續發展與精進低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術，除須掌握國際間與處置坑道結構穩定分析有關之審驗評估項目與驗證技術外，亦必須瞭解我國一般隧道設計方法與施工規範，並就處置坑道結構長期穩定影響項目進行研析，以提升及具體落實我國低放處置審查技術之本土化。

1.2 計畫目的與重要性

本子計畫除持續蒐整與坑道結構穩定分析有關之試驗、檢監測項目、數值分析與工程案例等相關之國際經驗與成果外，地震作用與開挖擾動等外力作用下之坑道結構穩定分析經驗，則為本期計畫之蒐整研析重點。此外，針對影響處置坑道結構長期穩定之影響項目，包括外力因素(地震作用、邊坡運動與開挖擾動)、環境因素(風化作用引致岩石強度弱軟化、依時變形特性)與非力學因素(混凝土中性化、鋼筋保護層不足、鹼值粒料反應、冷縫與襯砌背後空洞)，將綜整國內隧道工程與土木工程有關之規範，及研究文獻與技術報告，作為後續發展處置坑道結構穩定性審驗技術之依據。

1.3 計畫工作項目與期程規劃

本計畫之工作項目與期程規劃，彙整如表1.3-1。

表1.3-1 計畫工作項目與期程規劃

工作內容	107 年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
子項計畫三-低放射性廢棄物坑道處置結構穩定驗證評估技術之研究			※			※			※			※
國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術蒐集與研析												
蒐整國內一般隧道設計方法與施工規範												
處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性探討												
提出處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議												
提出我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議												
成果報告撰寫												
工作進度估計百分比(累積數)	0%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%

1.4 報告內容

本研究之工作項目細分為「國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術蒐集與研析」、「蒐整國內一般隧道設計方法與施工規範」、「處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性探討」、「提出處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議」及「提出我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議」等五項，各分項工作進度如表1.3-1所示，除本章前言外，依計畫擬定之工作項目內容提列各章標題，其內容分別如下列所述：

第二章 國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術蒐集與研析

擬自國際間放射性廢棄物處置技術先進國家發表之技術報告、隧道工程與岩石力學等相關學術期刊，蒐整與坑道結構穩定分析有關之試驗、檢監測項目、數值分析與工程案例等相關經驗與成果，尤其是地震作用與開挖擾動等外力作用下之坑道結構穩定分析經驗，為本項研析工作之重點。

第三章 國內一般隧道設計方法與施工規範

考量本土地質條件與國外放射性廢棄物處置場所處母岩之力學特性迥異，本項工作將針對國內一般隧道之設計方法與施工規範進行蒐整，並就「邊坡運動」與「開挖擾動」等外力因素可能造成處置坑道結構穩定性之影響，及所需之處置坑道結構穩定性審驗重點進行討論。

第四章 處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性

本子計畫於106年執行之「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究」(楊長義與李宏輝，2017)，提出坑道結構穩定性影響項目、肇因與審驗重點，已分別就外力因素、環境因素與非力學因素等影響處置坑道結構穩定性之肇因，提出對應的審驗重點，本項工作將進一步針對其與國內相關規範內容之關聯性進行探討。

第五章 提出處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議

根據前三項工作成果，依我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式，分別就可能遭遇之「外力因素」、「環境因素」與「非力學因素」整理出處置坑道結構穩定所需之驗證評估技術。

第六章 我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議

總結前述各項工作成果，提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定審查重點與注意事項，並依「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)」與本研究有關之章節進行研析與討論，提出低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議。

第七章 結論

綜整本研究成果並提出結論，供未來相關研究與應用之參考。

第二章、國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術

本章區分「處置結構穩定有關之試驗、檢監測項目」、「國際間與處置坑道結構有關之數值分析與工程案例」、「岩石損傷特性與坑道開挖擾動之研究」與「地震對處置坑道的影響」等四個部分進行國際資訊蒐整與研析。其中，在「處置結構穩定有關之試驗、檢監測項目」部分，則是參考前期計畫「處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究」(楊長義與李宏輝，2014)中，摘錄與本研究有關之部分。

2.1 處置結構穩定有關之試驗、檢監測項目

目前在蒐整的國際技術報告與相關文獻資訊中，以高放射性廢棄物的地質處置場監測(Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste)之介紹較為完整且深入，故本計畫摘錄自前期研究中與處置設施結構穩定有關之監測參數與對應之量測方法，以供參考與比較，惟須注意高放射性廢棄物處置場在岩石溫度、弱面與裂隙開分佈、岩體的力學-熱力-水力-化學等之個別性質與耦合作用等，均較低放射性廢棄物處置場要求的項目多且嚴謹。依國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)例舉之影響處置設施結構穩定的相關監測參數(IAEA, 2001)，如表2.1-1所示，包含：岩石溫度、弱面與裂隙等開口結構的變形、岩石應力的變化、水滲透速率、岩體支撐條件、處置設施的溫濕度、回填材料與密封材料的再飽和等，而其對應的監測方法則包括了鑽井調查、以及在處置設施埋設相關儀器設備。

此外，由典SFR-1、芬蘭Olkiluoto VLJ與Loviisa VLJ三個中、低放處置設施之監測項目、監測目的、監測儀器與位置等相關資訊，如附錄表A-1，三處坑道處置案例之比較如后(楊長義與李宏輝，2014)：

- (1) 三個國外處置設施均屬坑道處置，其中瑞典SFR-1屬於離岸海床下之岩盤坑道處置，芬蘭 Olkiluoto VLJ 與 Loviisa VLJ 同屬近岸陸地下之岩盤坑道處置。
- (2) 三處案例針對岩盤穩定性之監測，係考量處置坑道或聯絡坑道鄰近地質破裂帶處，或是單一潛在滑動之岩塊(如 Olkiluoto VLJ)對坑道結構及內部工作人員安全的影響，而造成岩盤穩定性疑慮之原因，來自地質破裂帶、過應力區(overstressed zone)、及岩體潛變(creep)特性(而岩體潛變變形大多來自弱面之潛變行為)的影響。

- (3) 針對水文地質的監測項目，主要有地下水入滲量及水頭差二項，且視需要於場址進行開挖作業前即已進行數年的監測工作(以 Olkiluoto VLJ 為例)；另外，為掌握地下水挹注來源，降雨、海平面位置須一併納入監測項目。
- (4) 根據監測項目的屬性決定監測頻率，屬於對岩盤穩定性項目多採連續自動量測(每天記錄一次)，坑道斷面收斂量監測則多採半年施測一次。水文地質項目部分，地下水湧出體積、水頭高差、降雨及海平面位置屬連續量測，流堰監測、地下水水位面與鹽水介面，則採每月施測或每季施測一次。

表2.1-1 監測參數與對應的量測方法(IAEA, 2001)

分類/監測目的	代表性參數	具代表性的量測方法	資料存取方法
<p>處置設施的結構劣化 (Degradation of repository structures)</p> <p>處置設施結構監測/開口的結構穩定</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 岩石溫度 2. 弱面與裂隙等開口結構的變形(包括方位與裂縫延伸速率) 3. 近處置設施之岩石應力場變化 4. 地下水滲透速率 5. 岩體支撐條件 6. 處置設施的溫濕度 7. 回填材料與密封材料的再飽和 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 熱電偶 2. 位移計 3. 應變或荷重感應器 4. 體積變化量測 5. 應變或荷重感應器 6. 各類量測技術 7. 壓力感應、濕度量測、地球物理量測(如震測法等) 	<ul style="list-style-type: none"> • 處置設施內部量測,包括鑽探測量 • 可於現地理設置量測設備,透過無線傳輸或埋線等方式傳遞量測資料 • 回填材料開口處的現地或遠端量測
<p>廢棄物包件與緩衝材料的行為 (Behaviors of waste packages and buffer materials)</p> <p>置放廢棄物功能狀況的監測/功能狀況的監測</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 應變與腐蝕電流 2. 包件溫度與濕度 3. 滲透水的放射性活度 4. 廢棄物衍生氣體含量 5. 緩衝材料再飽和與回脹壓力 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 應變計、電流計 2. 其他可茲利用之量測技術 3. 加馬(gamma)值量測 4. 氣體分析 5. 壓力感應與濕度量測 	<ul style="list-style-type: none"> • 廢棄物包件之現地或遠端監測 • 廢棄物包件鄰近區域之現地或遠端監測 • 處置場排放水之放射性活性監測 • 處置場附近空氣之放射性活性監測

2.2 國際間與處置坑道結構有關之數值分析與工程案例

本節蒐整 Äspö 硬岩實驗室有關開挖方法對開挖面的影響，及應用數值分析結果評估開挖面岩石損傷，亦蒐整日本六所村試驗坑之研究經驗，期能瞭解試驗配置、項目及實際的結果。

2.2.1 Äspö 硬岩實驗室 TASS 坑道分析經驗

SKB 於 1986 年決定建設一地下硬岩實驗室(Hard Rock Laboratory, HRL)，藉著與深地質處置場相同的環境進行一系列實驗。HRL 位於瑞典的 Oskarshamn 核能電廠附近，且深入地下約 500 公尺，SKB 另外在 2007 年底至 2008 年底於 HRL 開挖了 TASS 坑道，其深度位於地下 450 公尺處。其中，T 代表坑道，AS 代表 Äspö，S 為編號，其位置詳圖 2.2-1，其目的是要探討不同的開挖方式所形成的開挖面(或稱坑道輪廓 tunnel contour)，及其可能引致之岩石損傷與鬆動岩塊。

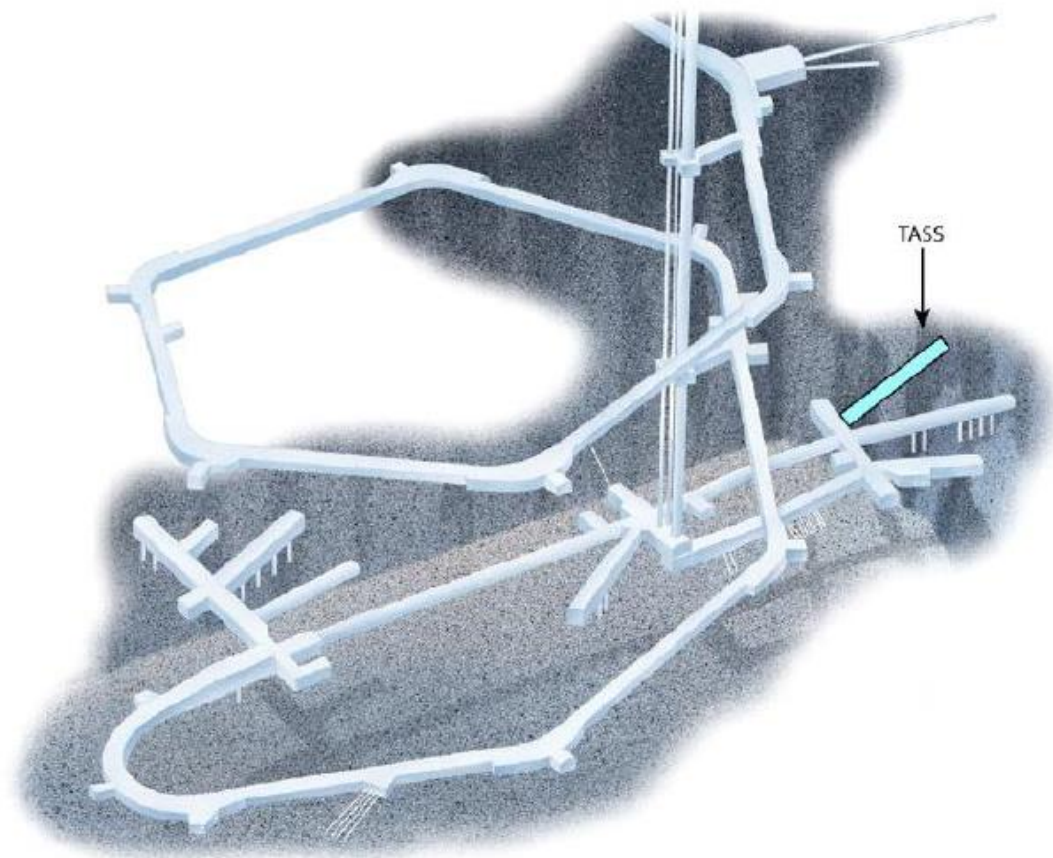


圖 2.2-1 Äspö 硬岩實驗室之 TASS 試驗坑道位置 (Andersson and Malmatorp 2009)

根據 Äspö HRL 的研究經驗，若坑道採取爆破(blasting)方式開挖，其可能導致的頂拱(tunnel roof)鬆動岩塊(loose blocks)有 44% 來自孔底裝藥(bottom charge of blast round)、23% 來自岩體裂隙的切割(multiple fractures)、20% 來自水平裂隙(horizontal fracture)、10% 來自地質條件與爆破所引致之裂隙共同作用(multiple fractures)，另4%屬未知原因(unknown)，詳圖2.2-2。

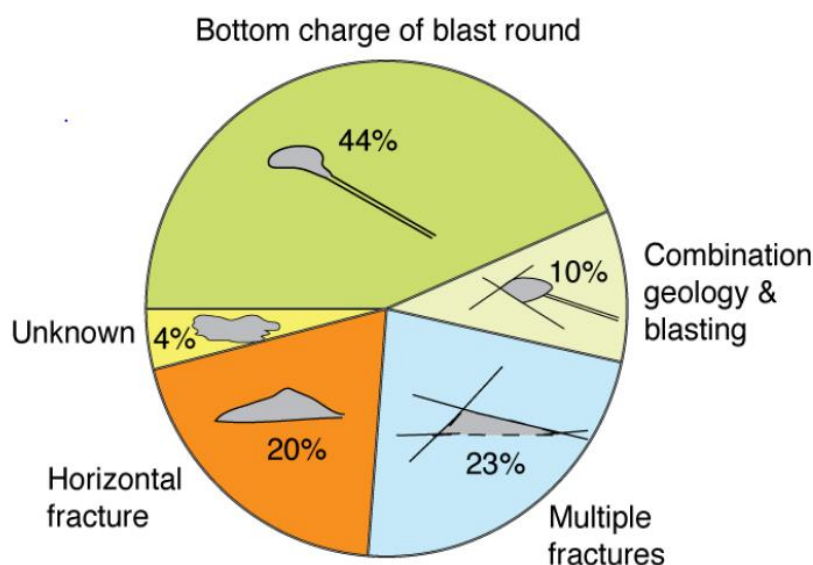


圖2.2-2 Äspö TASA試驗坑道之鬆動岩塊肇因與百分比 (Henrik Ittner, 2011)

此外，頂拱鬆動岩塊亦與開挖方式及鑽孔作業的的觀察角(look-out angle)有關；實際開挖後的輪廓會與設計的坑道輪廓存在誤差(deviation)，詳圖2.2-3，若採取較高炸藥量的爆破，可能造成較大的坑道輪廓誤差，並增加鬆動岩塊掉落的風險。

為能掌握處置坑道經開挖後的幾何形狀、斷面輪廓與開挖損傷區(excavation damage zone, EDZ)，SKB 在進行 TASS 試驗坑道的開挖過程中，亦要求下列幾點：

- 開挖後的坑道輪廓，不得小於設計輪廓，坑道之設計剖面詳如圖2.2-4(a)。
- 每一爆破輪進的超挖量(overbreak)不得超過 30%。
- 坑道設計輪廓線內不得有殘留的岩石。
- 頂拱處的坑道輪廓誤差為 20 cm。
- 底拱處的坑道輪廓誤差為 25 cm。

此外，在每一個開挖輪進施作前，進行兩個水平鑽探(編號 K10016B01 與 K10014B01)，其 RQD(Rock Quality Designation, 岩石品質指標) 值詳如圖2.2-4(b)，顯示約在坑道斷面 35 至 40 m 處的 RQD 較小，岩石破碎可能性高。

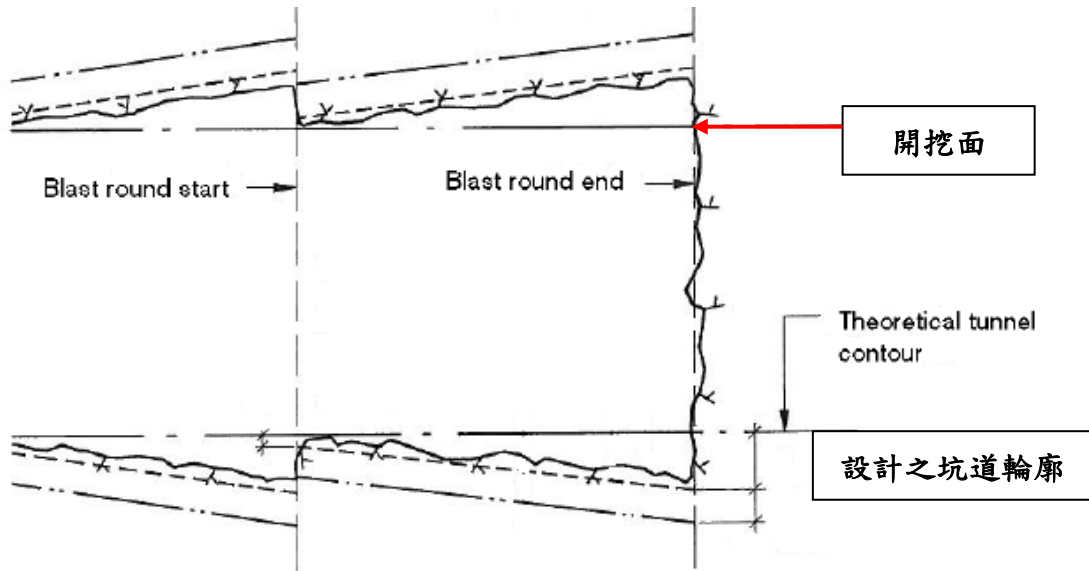


圖2.2-3 鑽掘與爆破開挖方式之隧道剖面(Henrik Ittner, 2011)

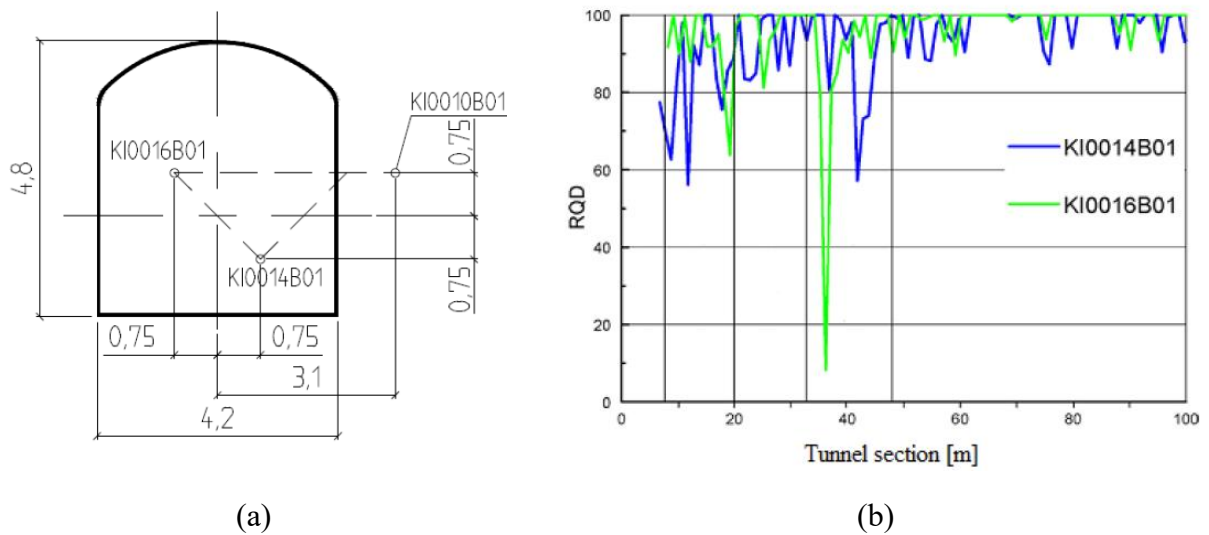


圖2.2-4 TASS坑道之設計剖面與鑽孔RQD資料(Andersson and Malmtorp 2009)

在 TASS 試驗坑道的開挖過程中，透過三維雷射掃描(3D laser scanning)，以 2 m 長為基線，記錄延伸長度高過 1 m 的裂隙數量，詳如圖 2.2-5，並進行了隧道地質條件的繪製與下列項目的記錄：

- 岩石種類
- 不同地質條件之邊界與接觸狀況
- 地質條件的變化
- 裂隙分佈
- 變形帶
- 地下水的出現與滲出
- 岩體評分(RMR)

根據圖2.2-5，顯示在坑道斷面 28.8 至 37.3 m 之間的裂隙數量較多，此點與圖 2.2-4(b)的 RQD 結果一致。

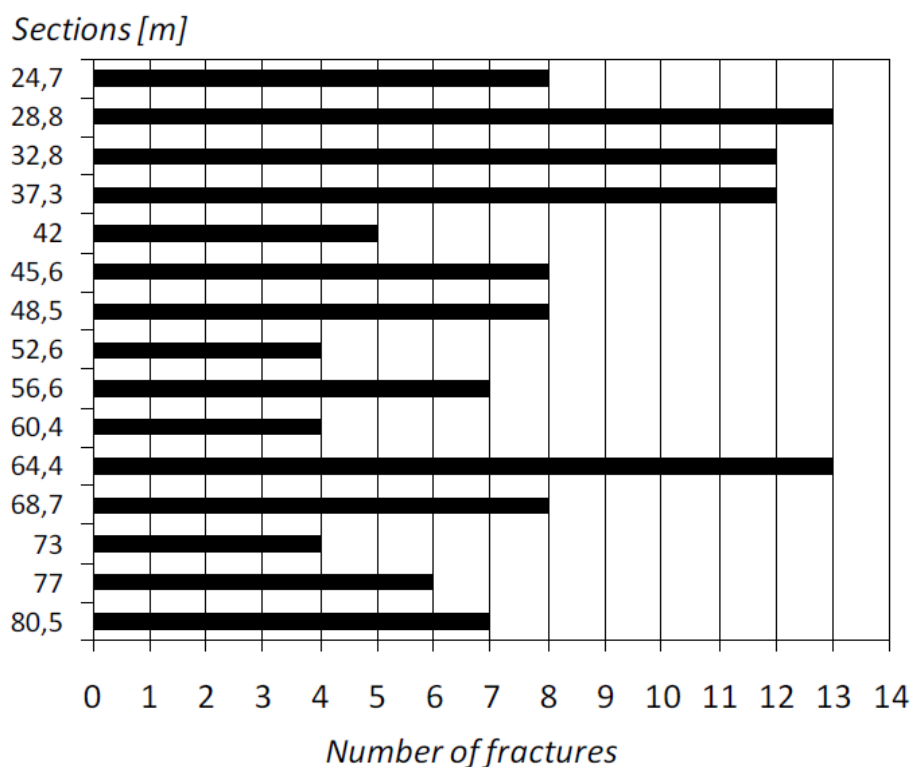


圖2.2-5 TASS 試驗坑道之斷面里程(m)與裂隙數量(Henrik Ittner, 2011)

為探討設計之坑道輪廓與實際輪廓在現地應力條件下之開挖面應力分佈，Henrik Ittner(2011)以有限元素法分析軟體 Phase 進行開挖面應力分析，其採用之現地應力與岩石力學參數詳如表2.2-2(a)(b)；此外，為能進一步分析開挖面損傷與剝落(spalling)現象，亦蒐集了岩石損傷應力，包括初始裂縫應力(crack initiation stress)、裂縫損傷應力(crack damage stress)與剝落破壞強度(spalling strength)等，詳如表2.2-2(b)(c)，二維開挖面應力分析數值模型詳如圖2.2-6，並選取 15 個最可能發生岩塊掉落(block falls)的坑道斷面進行分析。在實際坑道輪廓部份，則採用三維雷射掃描結果進行數值模型建模。相關分析結果詳圖2.2-7至圖2.2-8，並摘述如下：

- 根據圖2.2-7，最大主應力值(σ_1)，以(1)頂拱處及(2)仰拱與側壁交界處有較大值；相較之下，實際開挖面所分析的最大主應力值高於設計開挖面所分析者。
- 根據圖2.2-8之開挖面應力分析—最大主應力於頂拱處之分佈圖，設計開挖面所分析的最大主應力值(σ_1)，低於初始裂縫應力(=96.1±12 MPa)與剝落破壞強度(=122 MPa)，但根據實際開挖面的分析結果，頂拱處的最大主應力已有達到初始裂縫應力，甚至達剝落破壞強度者。
- 根據圖2.2-9之開挖面應力分析—最小主應力於頂拱處之分佈圖，無論是設計開挖面或是設計開挖面的分析結果，其最小主應力均低於裂縫應力。

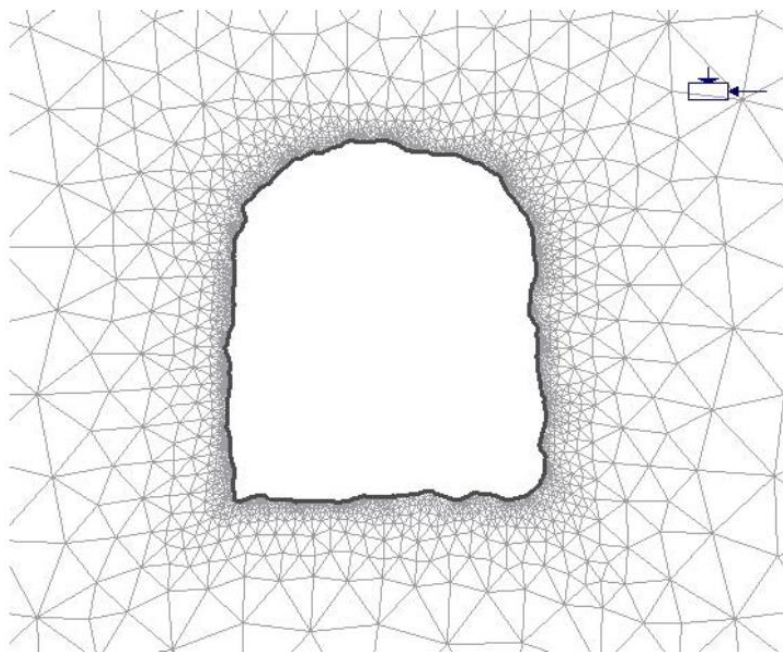


圖2.2-6 TASS 開挖面應力分析數值模型(Henrik Ittner, 2011)

表2.2-2 開挖面應力分析所需參數：(a)現地應力、(b)岩石力學參數、(c)損傷應力與(d)剝落強度(Henrik Ittner, 2011)

(a)

	σ_{h1}	σ_{h2}	σ_v
In situ stress [MPa]	30	13	13

(b)

Rock type	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Cohesion [MPa]	Friction angle [°]	Tensile strength [MPa]
Diorite	55	0,26	16,4 ± 3	41,4 ± 4	14,8

(c)

Method	Strain curves	Acoustic Emission (AE)
Crack initiation stress [MPa]	96,1 ± 12	121 ± 31,3
Crack damage stress [MPa]	201,8 ± 30,4	204 ± 15,6

(d)

	Mean value	Standard deviation
Spalling strength [MPa]	122	9

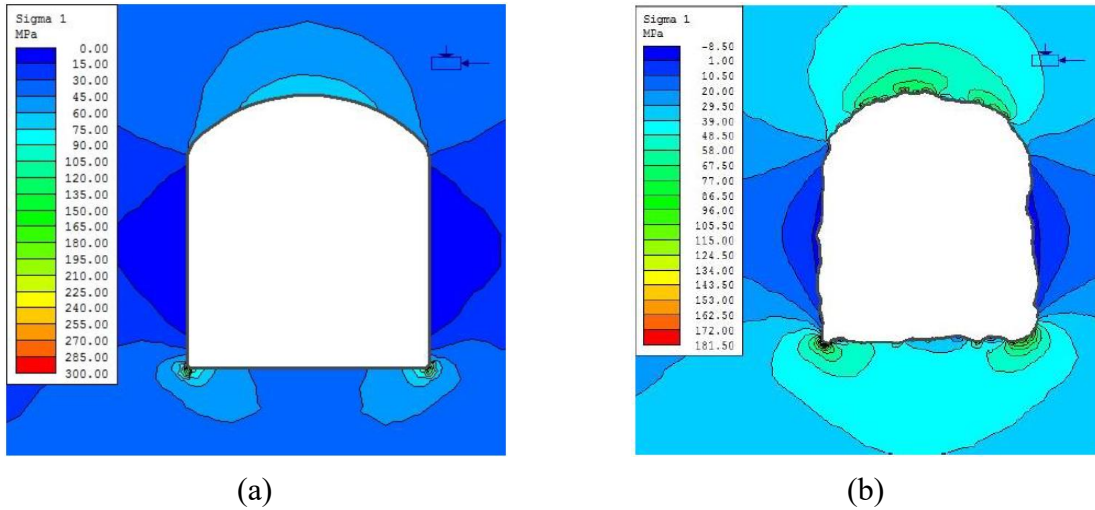


圖2.2-7 TASS 開挖面應力分析—最大主應力分佈圖：(a)設計之開挖面與(b)實際之開挖面(斷面里程 24.7 m)(Henrik Ittner, 2011)

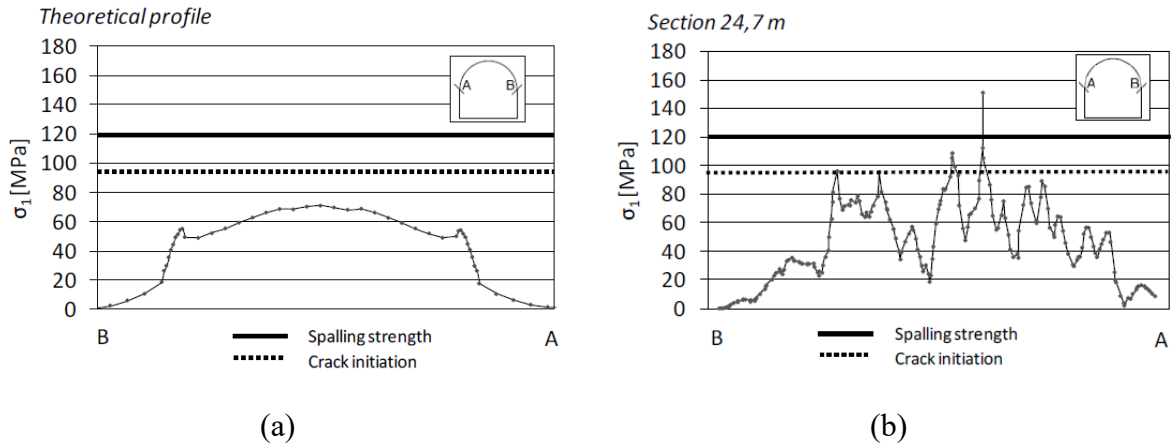


圖2.2-8 TASS 開挖面應力分析—最大主應力於頂拱處之分佈圖：(a)設計之開挖面與(b)實際之開挖面(斷面里程 24.7 m)(Henrik Ittner, 2011) (Henrik Ittner, 2011)

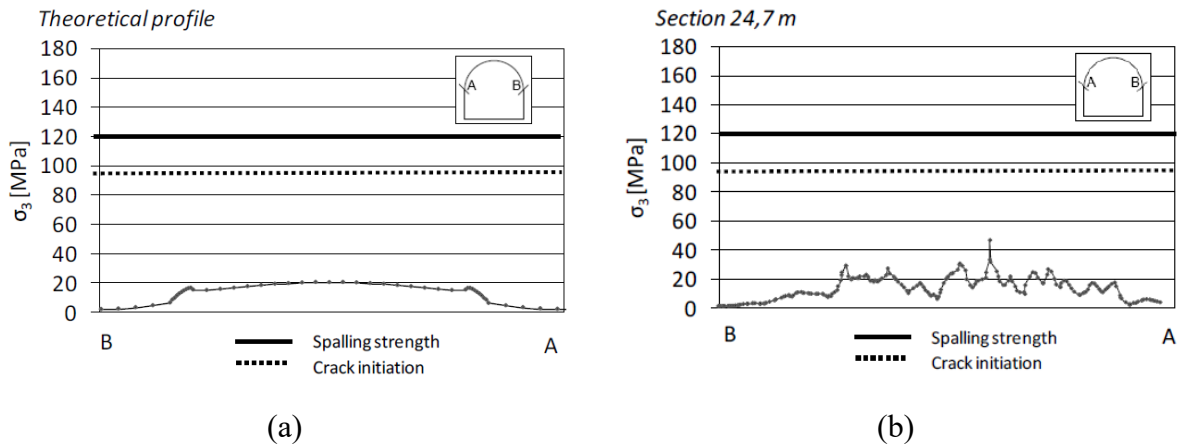


圖2.2-9 TASS 開挖面應力分析—最小主應力於頂拱處之分佈圖：(a)設計之開挖面與(b)實際之開挖面(斷面里程 24.7 m)(Henrik Ittner, 2011) (Henrik Ittner, 2011)

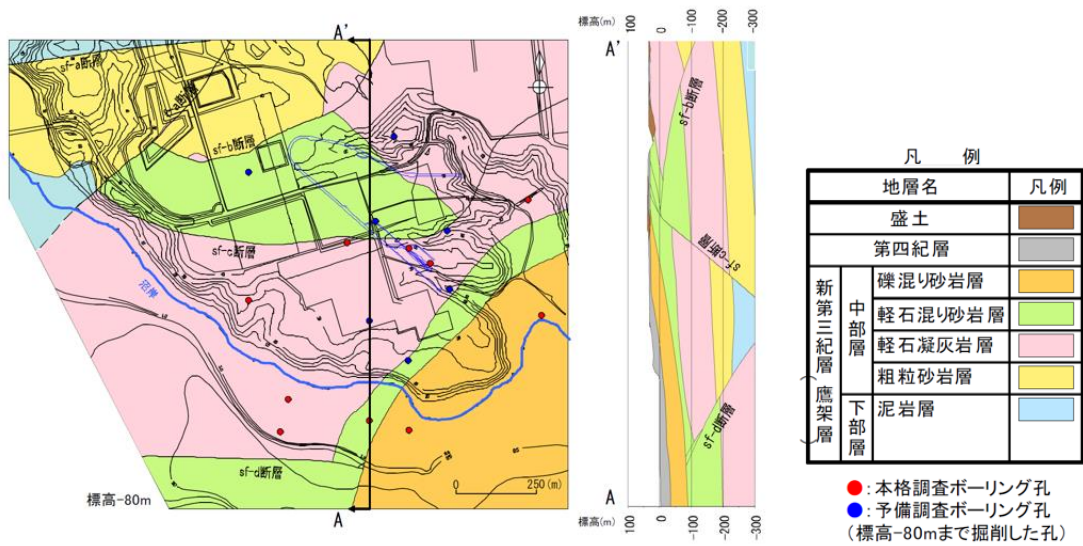


圖2.2-11 日本低放射性廢棄物處置場區域地質分布圖

表2.2-3 日本低放射性廢棄物處置場地層層序分布(日本原燃株式會社，2006)

地質時代			地層区分	
			地層名	主な層相
新 生 代	第 四 紀	完 新 世	崖錐堆積層	礫、砂、粘土
			沖積低地堆積層	礫、砂、粘土、腐植土
	更 新 世	火山灰層	粘土質火山灰	
		段丘堆積層	砂、礫、シルト	
		古期低地堆積層	シルト、砂、礫	
	新 第 三 紀	中 新 世	鷹 架 層	中部層
礫混り砂岩層				礫混り砂岩
輕石混り砂岩層				砂岩泥岩互層、砂質輕石凝灰岩、 輕石混り砂岩
輕石凝灰岩層				輕石凝灰岩、砂質輕石凝灰岩、 輕石質砂岩
粗粒砂岩層				砂岩
		下部層	泥岩層	泥岩

~~~~~ は不整合※關係を示す

※不整合：下位層が形成された後、上位層が堆積した場合に生じる時間的に不連続な地層の關係。

根據表2.2-4所列調查項目表，主調查項目區分地質調查、地下水調查與地盤調查，亦詳如圖2.2-12至圖2.2-14所示。

(1) 地質調查

- 標準貫入試驗與岩心取樣觀察
- 調查坑、試驗空洞地質觀察
- 音波探測

(2) 地下水調查

- 透水試驗
- 地下水位觀測、地下水壓測定
- 水質調查
- 地電阻探測(比抵抗探查)
- 流速測定

(3) 地盤調查

- 物理試驗  
離地面深度 50 ~ 100 m 處，主要的地質材料為輕石混合砂岩、輕石凝灰岩、砂質泥灰岩，濕密度為 1.6 ~ 2.0 g/cm<sup>3</sup>，含水量為 20.7 ~ 58.1%。
- 三軸壓縮試驗  
取深度 50 ~ 100 m 處之鷹架層輕石凝灰岩進行三軸試驗，考量的圍壓條件為 4 MPa。
- 岩盤變位測定  
在試驗孔洞經過不同階段的掘削過程，同步量測鄰近孔洞的岩盤變位變化。
- 支保應力測定  
同樣在試驗孔洞經不同階段的掘削過程，同步量測鄰近孔洞的支保變化。



表2.1-4 調查項目表(日本原燃株式会社，2006)

|        | 內 容                   | 調查項目                                              |
|--------|-----------------------|---------------------------------------------------|
| ①地質調查  | 地層境界、斷層および割目の有無等の確認   | コア觀察<br>地質觀察<br>音波探查                              |
| ②地下水調査 | 地下水の流れる速さ、流れる方向、水質の確認 | 透水試験<br>地下水位観測<br>地下水圧測定<br>水質試験<br>比抵抗探查<br>流速測定 |
| ③地盤調査  | 空洞安定性の確認              | 物理試験<br>三軸圧縮試験<br>岩盤変位測定<br>支保工応力測定               |

註：コア觀察 (岩心觀察)

前述之岩盤變位測定與支保應力測定係於實驗坑道進行。JNFL 選定於六所村L2低放處置場東南邊約 1 公里處做為實驗坑道預定地，詳圖2.2-15。實驗坑道深度約 90 公尺，共有三種坑道，分別為調查坑、計測坑與試驗空洞，詳圖2.2-16與圖2.2-17，茲就各坑道設立之目的與調查項目分述如后：

- (1) 調查坑用於場址特性調查，包含地下水量測取樣、岩層裂隙分析、岩體取樣等作業，用以完備該區域的天然障壁特性參數，進一步強化安全評估結果。
- (2) 計測坑在於配合試驗空洞之開挖試驗，須同步量測鄰近孔洞之變位等所設立。
- (3) 試驗空洞則是根據實際的處置坑尺寸進行開挖，藉以了解開挖過程導致鄰近岩盤反應，及坑道支撐之受力反應等，詳圖2.2-18與圖2.2-19。

綜整地盤調查結果如下列幾點：(i)試驗空洞(寬18米，高16米)進行開挖，其引致的岩盤變位不超過 10 cm；(ii)支保應力測定部分，在不同的開挖階段，支保應力亦無超出材料降伏應力之情況，顯示試驗空洞在開挖期間之穩定性；(iii)隨著開挖過程量測的地下水湧水量約為 30 cm<sup>3</sup>/min，此一結果與試驗孔洞所處岩層(浮石凝灰岩層)的滲透性係數一致。

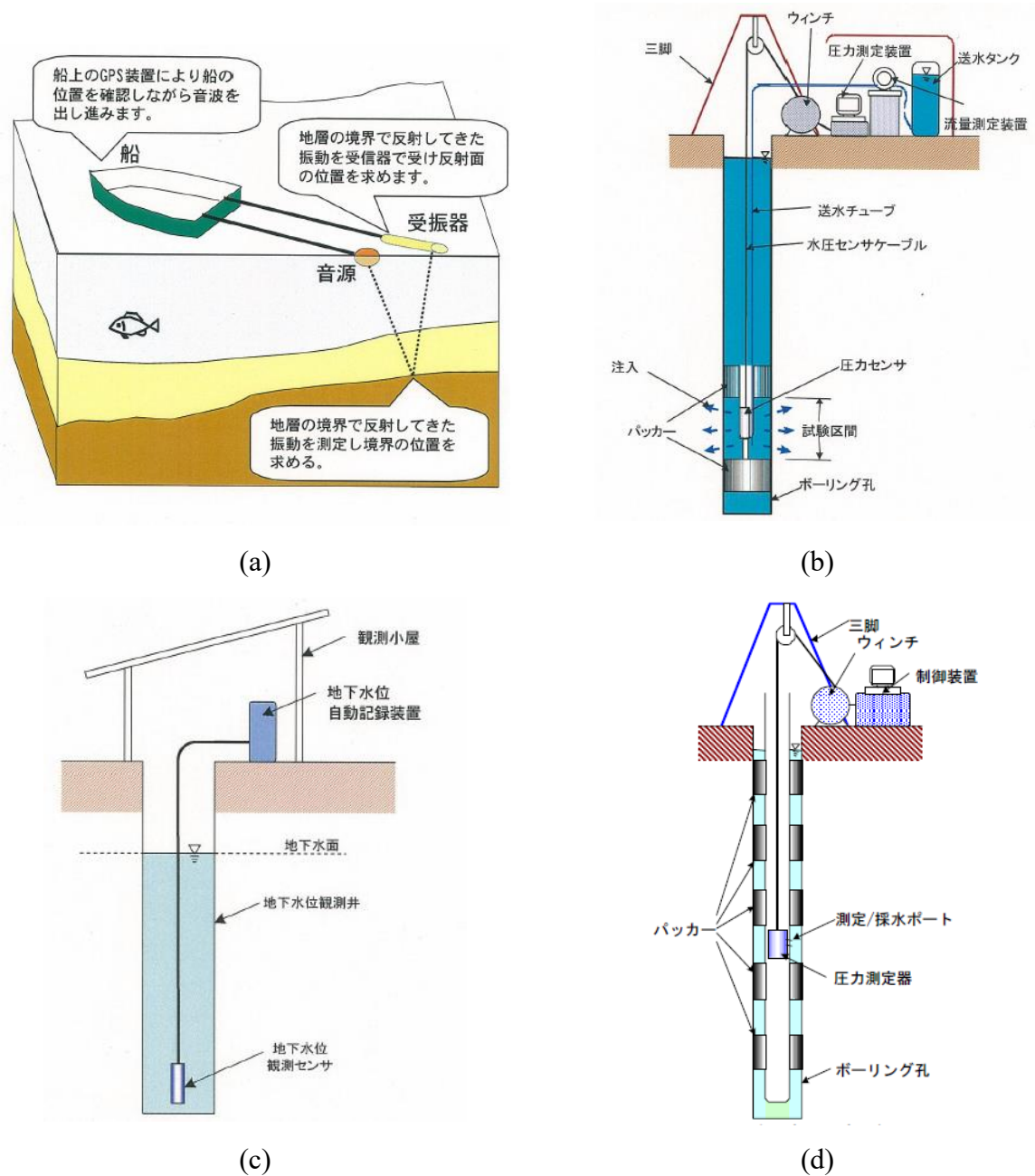


圖2.2-12 日本低放射性廢棄物處置場調查項目及裝置示意圖(1)：(a)音波調査、(b)透水試驗裝置、(c)地下水水位観測孔、(d)地下水壓測定裝置(日本原燃株式会社，2006)

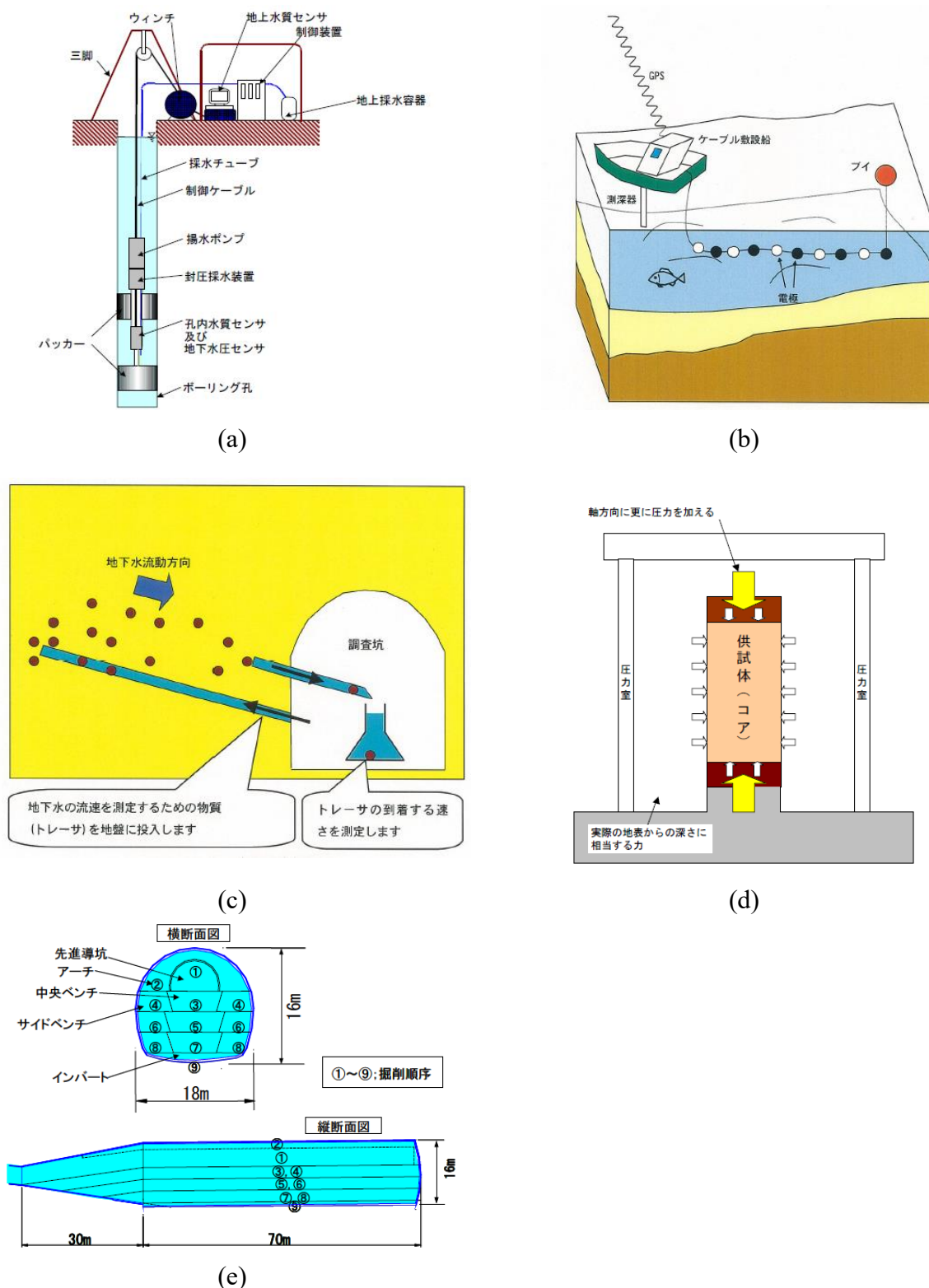


圖2.2-13 日本低放射性廢棄物處置場調查項目及裝置示意圖(2): (a) 採水裝置、(b)地電阻試驗、(c)流速測定、(d)三軸壓縮試驗裝置、(e)試驗孔洞掘削方法(日本原燃株式会社, 2006)



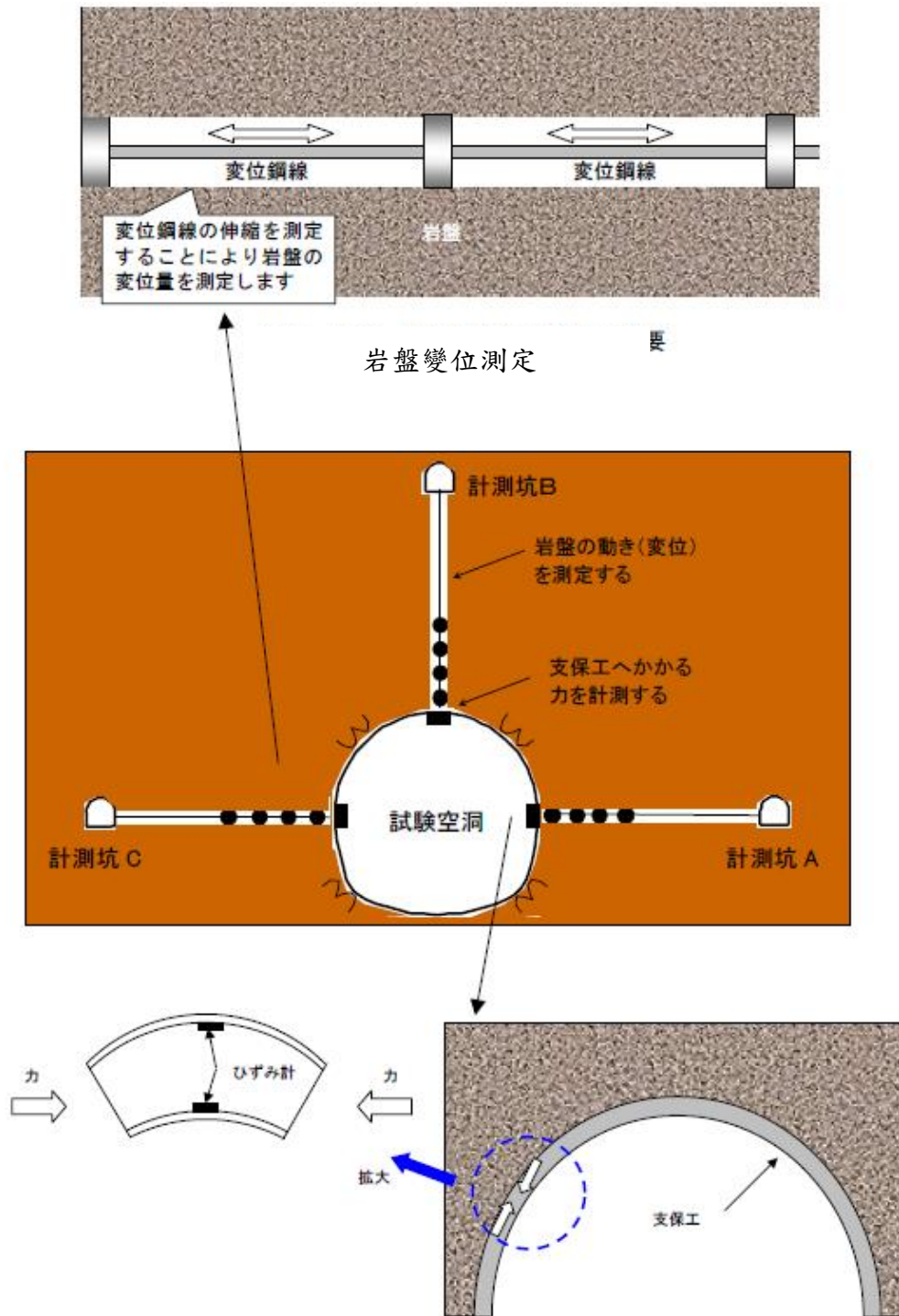


圖2.2-14 支保應力測定裝置示意圖(日本原燃株式会社，2006)

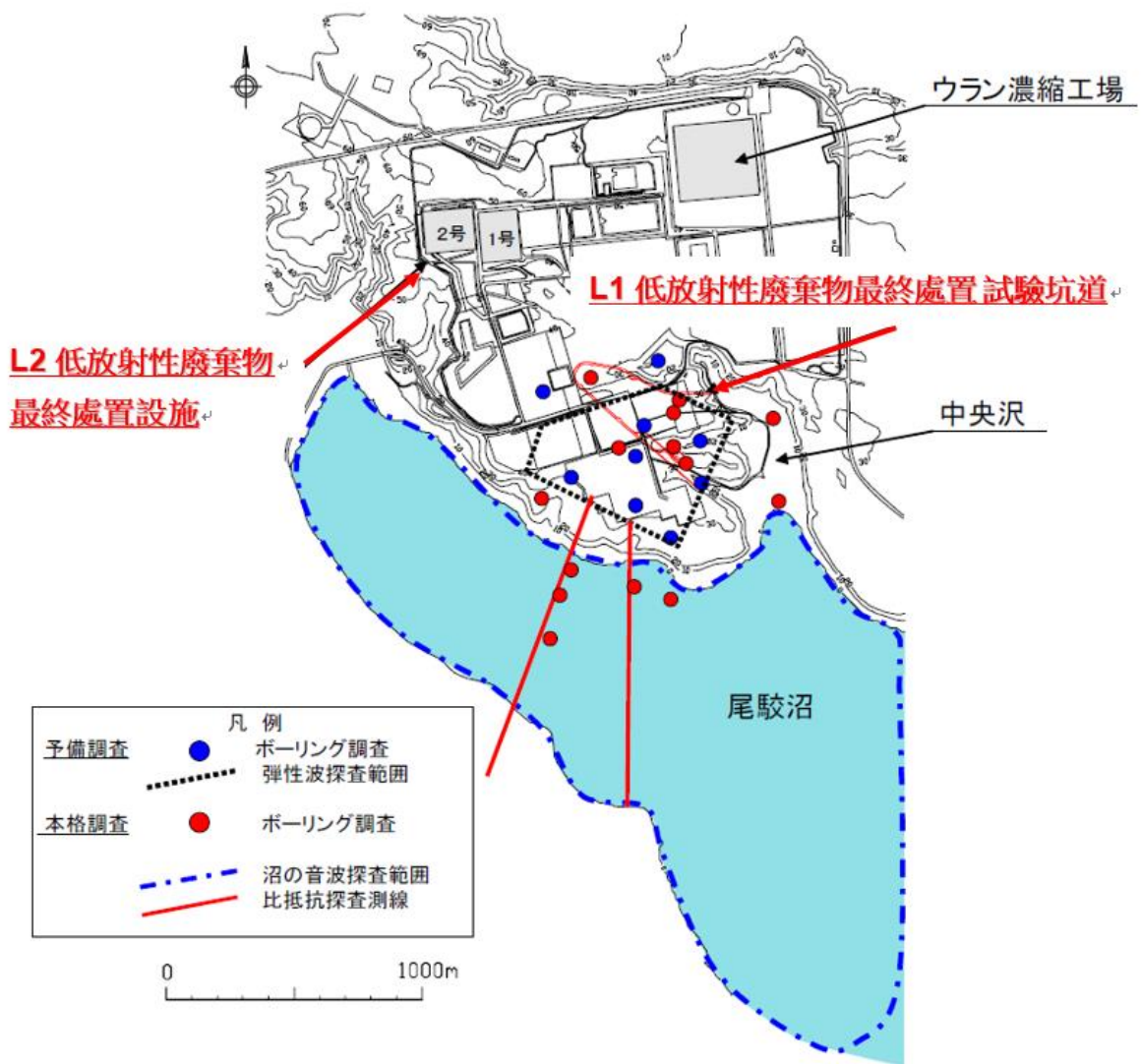


圖2.2-15 日本低放射性廢棄物處置場區域地質調查平面圖(日本原燃株式会社，2006)

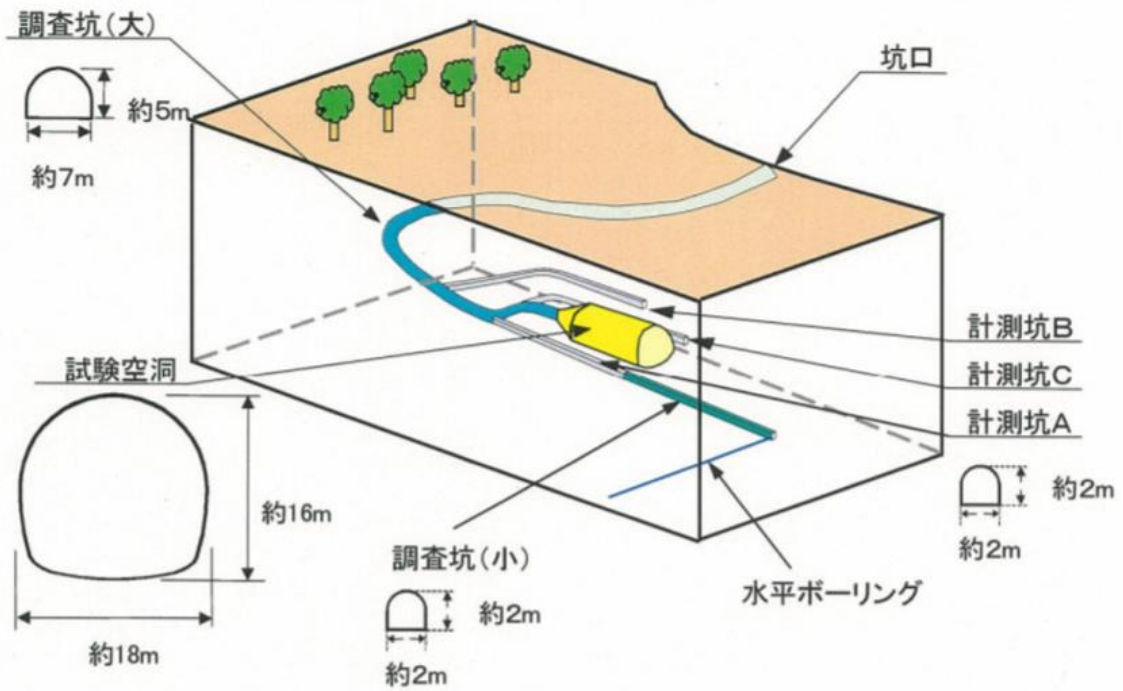


圖2.2-16 L1低放射性廢棄物最終處置試驗坑道配置(日本原燃株式会社，2006)



圖2.2-17 試驗空洞實際照片(寬約 18 m，高約 16 m)(日本原燃株式会社，2006)



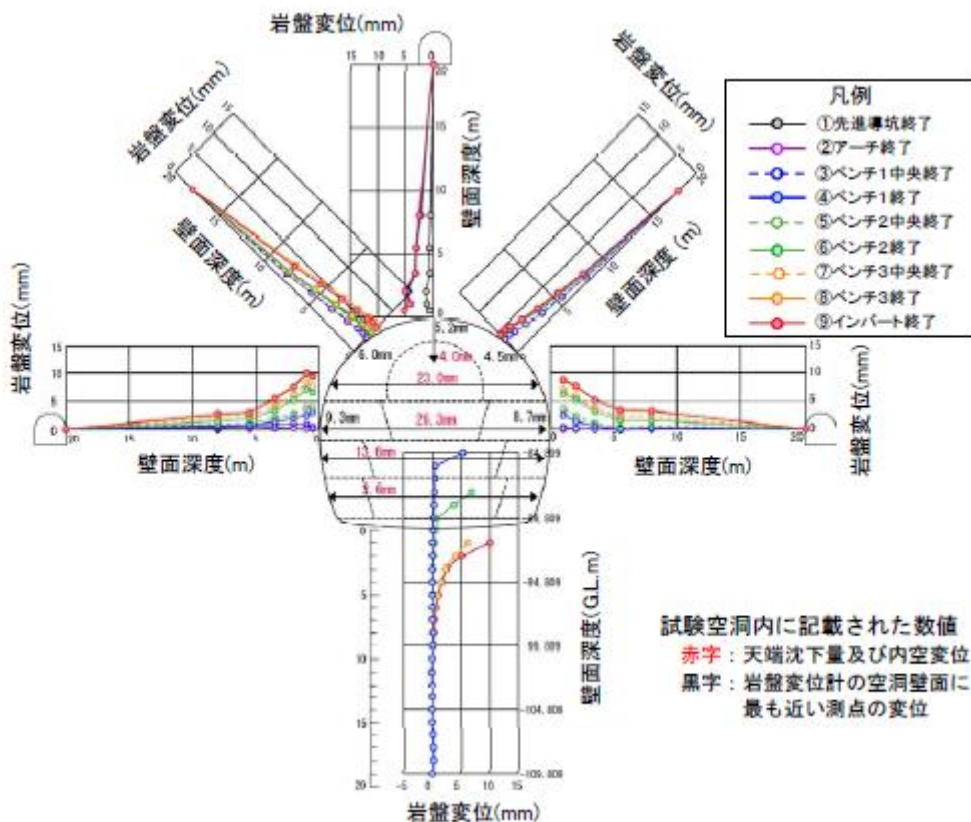


圖2.2-18 試驗空洞開挖過程及計測坑之變位記錄(日本原燃株式会社，2006)

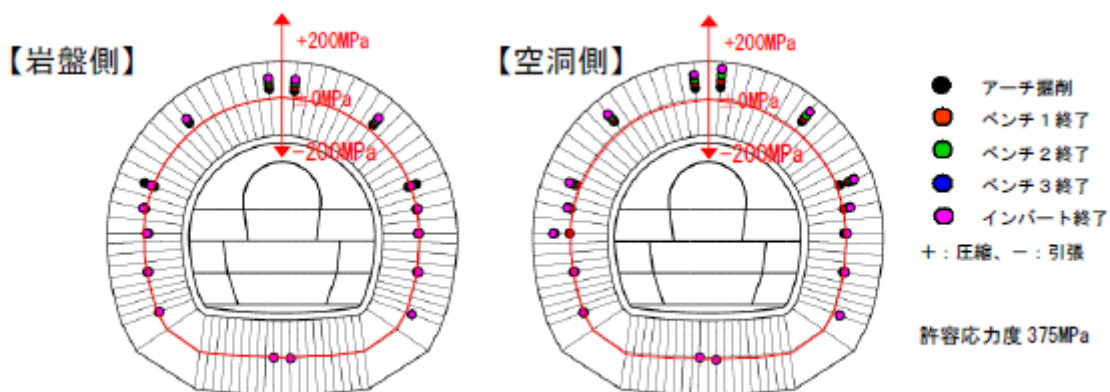


圖2.2-19 試驗空洞支保應力測定結果(日本原燃株式会社，2006)

## 2.3 岩石損傷特性與坑道開挖擾動之研究

### 2.3.1 單軸應力條件下之岩石損傷應力

Posiva自深度 400 ~ 450 m 及 550 ~ 600 m 處偉晶花崗岩及雲母片岩試體(直徑62mm)進行單軸壓縮試驗，獲得如圖2.3-1之完整應力應變曲線。期間須透過體積應變曲線，定義出：(1)破裂損傷應力(crack damage stress) $\sigma_{cd}$ ，為體積應變由壓縮轉為膨脹處之應力，其值一般約為 0.7~0.9UCS；(2) 初始破裂應力(crack initiation stress) $\sigma_{ci}$ ，為裂隙經初始壓縮後，因持續的應力作用導致新的裂隙產生所對應的應力，亦可由開始產生AE訊號之應力值定義之，其值約為 0.3~0.5UCS。此外，瑞典Forsmark地區的花崗岩單軸壓縮強度試驗，獲得之岩石損傷應力詳圖2.3-2(Ghazvinian等人，2013)。其中，岩石材料的長期強度最多僅到破裂損傷應力 $\sigma_{cd}$ ，不同於一般岩石工程取尖峰強度UCS作為分析與設計參數。

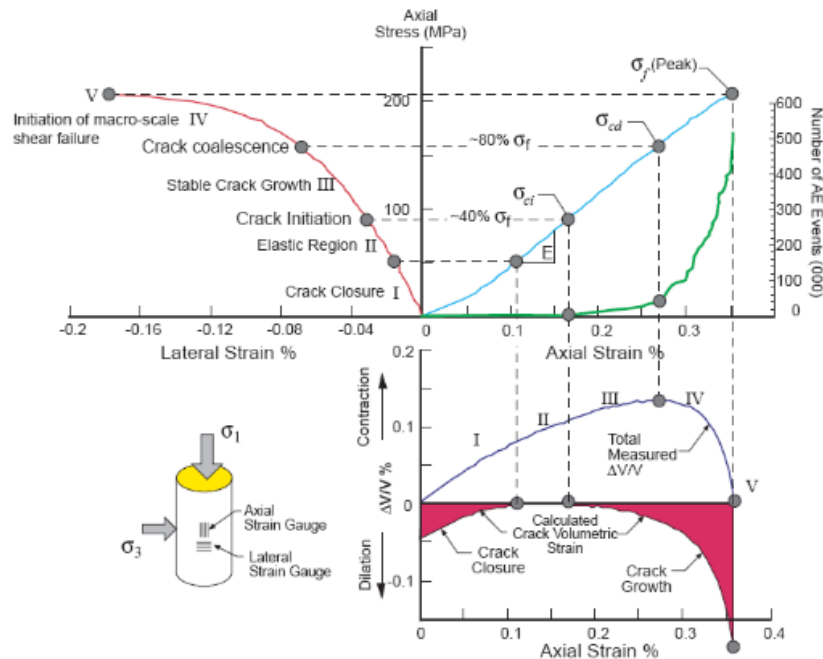


圖2.3-1 硬岩的應力—應變曲線。並透過AE訊號及體積應變進一步定義各種損傷應力，包括初始破裂應力(crack initiation stress)  $\sigma_{ci}$ 、破裂損傷應力(crack damage stress)  $\sigma_{cd}$ 與破壞應力( $\sigma_f$ )(在單軸壓所試驗，即為UCS) (Martin and Chandler, 1994)

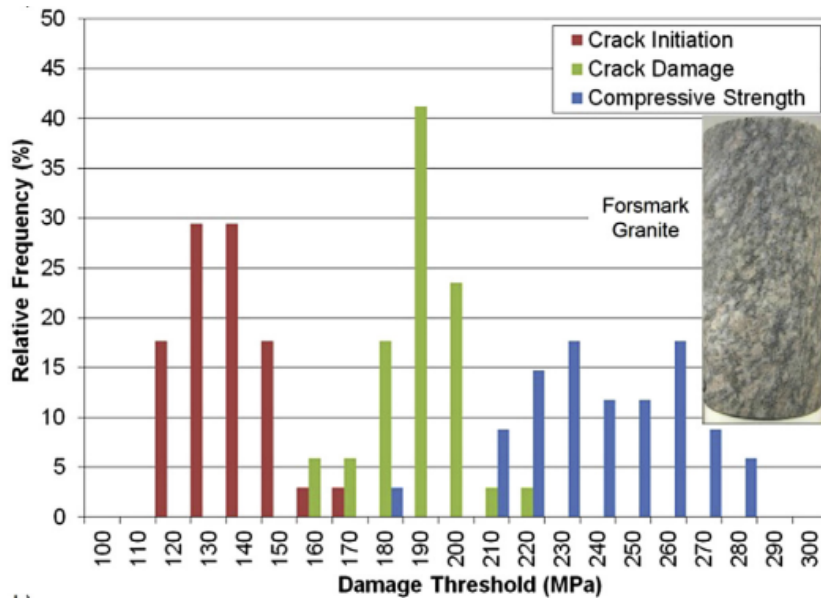


圖2.3-2 瑞典Forsmark花崗岩強度分佈。包括初始破裂應力( $\sigma_{ci}$ )、破裂損傷應力( $\sigma_{cd}$ )與單壓強度(UCS)之數據分佈，UCS平均值約244 MPa， $\sigma_{ci}$ 為135 MPa (約為0.55UCS)， $\sigma_{cd}$ 為190 MPa(約為0.78UCS) (Ghazvinian等人，2013)

### 2.3.2 三維應力條件下之岩石損傷行為

岩石強度破壞包絡線可用來判斷岩石在所處應力環境下，是否已達材料破壞條件，可透過一系列的張力試驗、單軸壓縮試驗與三軸試驗獲得的破壞應力( $\sigma_f$ ) (或稱尖峰應力值 $\sigma_p$ )予以定義。若根據圖2.3-1的概念，分別以初始破裂應力( $\sigma_{ci}$ )與破裂損傷應力( $\sigma_{cd}$ )定義破壞包絡線，即岩石是否產生初始破裂損傷之下限包絡線(CI)與破裂損傷之上限包絡線(CD)，如圖2.3-23所示。在低圍壓條件下，CI與CD包絡線有明顯區隔，當應力條件超過CI包絡線，礦物顆粒的接觸邊界將開始產生微小裂隙(micro cracks)，隨著應力持續增加，裂隙持續發展與連接，當超過CD包絡線時，所有已連通的裂隙合併成為破裂面，此時在單軸壓縮試驗即成為平行主應力方向之垂直劈裂破壞，若是圓型孔洞開挖，則形成剝落破壞。但在高圍壓條件下，CI與CD包絡線將趨於一致，此時形成的破裂型態屬剪力破壞。

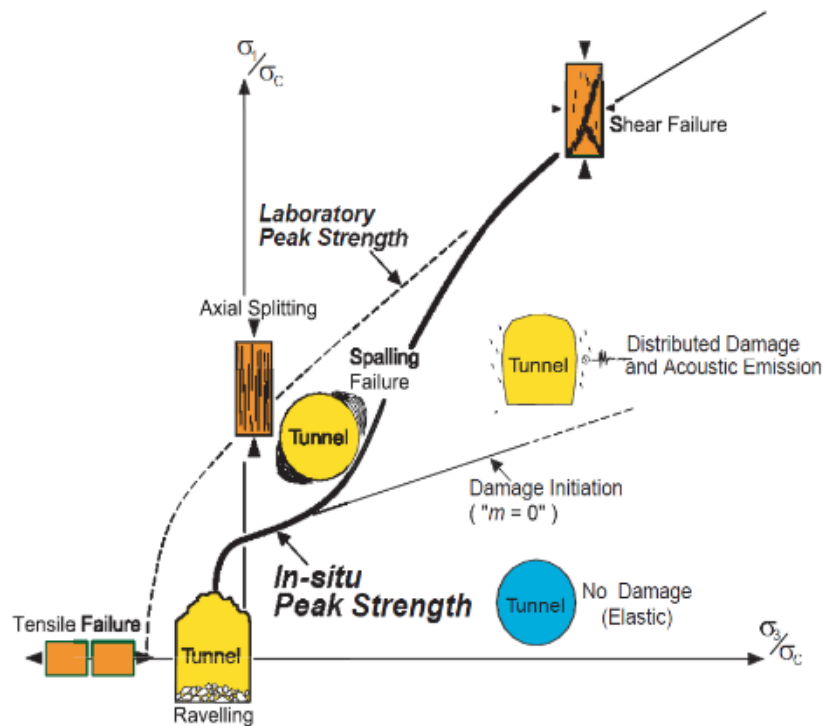


圖2.3-3 岩石強度破壞包絡線，及各個不同應力態之岩石損傷或破壞型態(Diederichs and Martin, 2010)

### 2.3.3 現地岩石開挖損傷機制

芬蘭 Posiva 公司根據其在 Olkiluoto 地區進行的 POSE 試驗，依應力作用條件與母岩岩石力學特性，歸納了六種開挖引致損傷機制，如圖 2.3-4 所示：

**Ia**：V 型缺口(V-shaped notch)破壞，即剝落破壞，其形成方向同最小主應力方向，屬岩石的脆性破壞，一般可採  $UCS/\sigma_t$  (單軸壓縮強度/張力強度)或  $\sigma_{max}/UCS$  (坑道壁最大主應力與單軸壓縮強度)作為評估指標，對於具節理特性之岩體，此種破壞較不容易發生(Diederichs, 2010)。

**Ib**：塊狀剪力破壞(block shear failure)，一般發生在低  $UCS/\sigma_t$  之岩石種類。

**Ic**：由構造主控之破壞型態(structurally controlled failure)，根據 ONKALO 的經驗，具葉理(foliated)構造的異向性岩體其破壞機制大多由構造主控，且破壞面多位於不同岩性的交界。此種破壞型態一旦發生，將造成應力的釋放與重新調整，並限制破壞面往弱面位置發展。

**IIa**：坑道壁四周均勻分佈破壞區，一般發生在高應力區，或岩體強度相較於平均應力(mean stresses)較小者(Detournay and St. John, 1988)。

**IIb**：分區破壞型態(zonal disintegration failure)，發生在高應力區且岩體強度較高者(Adams



and Jager, 1980; Shemyakin et al., 1986; Shemyakin et al., 1987; Tan et al., 2012; Zhou and Shou, 2013; Cloete and Jager 1972-1973)。

**III**：蝴蝶狀的剪力破壞(butterfly-shaped shear failure zone)，發生在最大/最小主應力比( $\sigma_1/\sigma_3$ )較高時，且張力強度( $\sigma_t$ )較低或具節理之岩盤條件(Shen and Barton, 1997)；另外，在加拿大原子能組織(AECL)地底實驗室進行的 MBE 實驗(Mined-by experiment)，觀察到側壁形成蝴蝶狀的張力破壞區是在應力比( $\sigma_1/\sigma_3$ )為 6:1 時(Read, 2004)，顯示岩石損傷型態除需考慮現地應力條件外，仍需視現地母岩特性而定。

|                                                                                                                                            |                                                                                                                                  |                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Ia: V型缺口破壞 (V-shaped notch)</p>                       | <p>即剝落破壞，其形成方向同最小主應力方向。屬岩石的脆性破壞，一般可採 <math>UCS/\sigma_t</math> 或 <math>\sigma_{max}/UCS</math> 作為評估指標；對於具節理特性之岩體，此種破壞較不容易發生。</p> |  <p>IIa: 坑道壁四周均勻分佈破壞區</p>                                     | <p>一般發生在高應力區，或岩體強度相較於平均應力 (mean stresses) 較小者。</p>                                                                                                                                                                            |
|  <p>Ib: 塊狀剪力破壞 (block shear failure)</p>                 | <p>一般發生在低 <math>UCS/\sigma_t</math> 條件。</p>                                                                                      |  <p>IIb: 分區破壞型態 (zonal disintegration failure)</p>           | <p>發生在高應力區且岩體強度較高者。</p>                                                                                                                                                                                                       |
|  <p>Ic: 構造主控之破壞型態 (structurally controlled failure)</p> | <p>根據 ONKALO 的經驗，具葉理 (foliated) 構造的異向性岩體其破壞機制大多由構造主控，且破壞面多位於不同岩性的交界。此種破壞型態一旦發生，將造成應力的釋放與重新調整，並限制破壞面往薄弱位置發展。</p>                  |  <p>III: 蝴蝶狀的剪力破壞 (butterfly-shaped shear failure zone)</p> | <p>發生在最大/最小主應力比(<math>\sigma_1/\sigma_3</math>)較高時，且張力強度(<math>\sigma_t</math>)較低或具節理之岩盤條件；另外在加拿大原子能組織(AECL)地底實驗室進行的 MBE 實驗，觀察到側壁形成蝴蝶狀的張力破壞區是在應力比(<math>\sigma_1/\sigma_3</math>)為 6:1 時，顯示岩石損傷型態除需考慮現地應力條件外，仍需視現地母岩特性而定。</p> |

圖 2.3-4 不同的應力條件與母岩岩石力學特性條件下之開挖引致損傷機制 (Detournay and St.John, 1988; Diederichs, 2010)

### 2.3.4 坑道剝落損傷評估

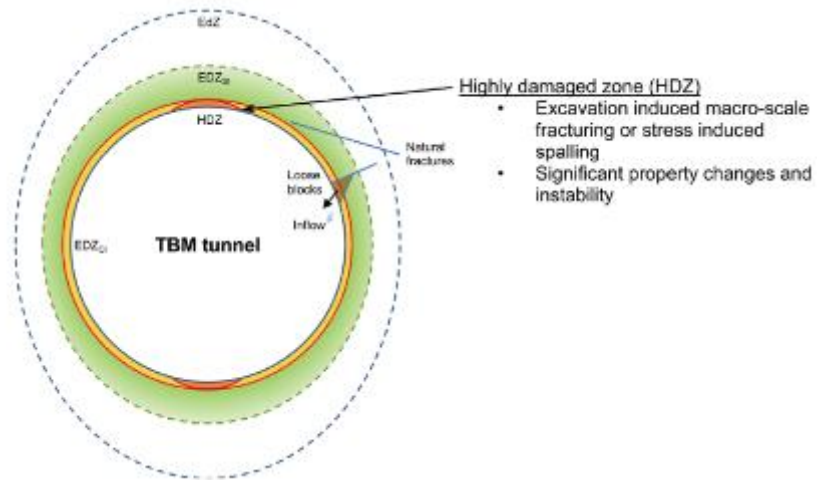
岩石經開挖後，坑道壁周圍的應力調整與應力集中造成的圍岩損傷現象，就圓形開挖斷面而言主要是岩石剝落，另外，一般採取鑽炸開挖之馬蹄形坑道斷面，同樣會在開挖面四週引致相當影響範圍的損傷區，如圖 2.3-5。就剝落損傷而言，屬脆性岩石的伸張劈裂或破裂(extensional splitting or cracking)，與一般發生在軟岩的剪力破壞並不相同(Fairhurst and Cook, 1966)。岩石剝落屬處置場安全評估與設計之重要議題：(1)在安全



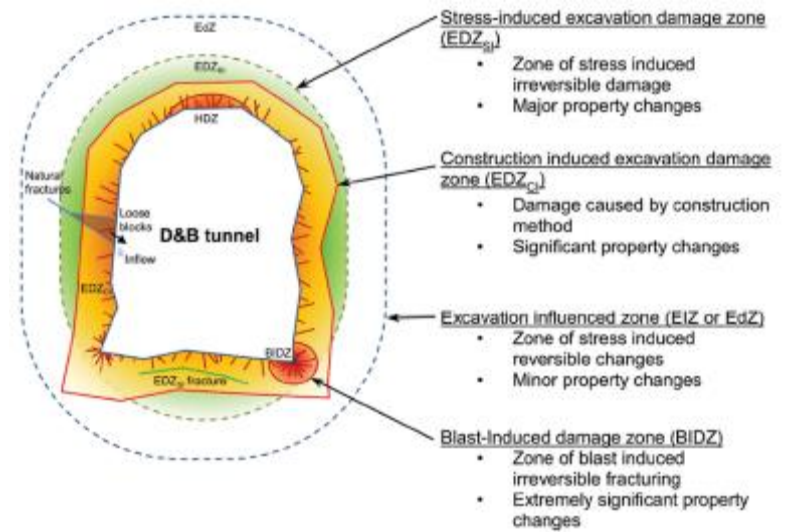
---

評估上，須了解岩石剝落損傷是否有形成連續性水流途徑使核種外釋；(2)在設計上，須避免不必要的岩石破壞而可確保緩衝材或回填材有足夠的回脹壓力。(Diederichs, 2003; Jacobsson et al., 2015)

為進一步量化岩石剝落潛勢，可採用 UCS 及  $UCS/\sigma_t$  作為判定的依據(Diederichs, 2007)，依 Olkiluoto 地區的 POSE 經驗(Siren et al., 2011)，混合片麻岩(migmatite gneiss)具較低的剝落潛勢，偉晶花崗岩(pegmatite granite)則具低至中等剝落潛勢，如圖 2.3-6(a)。此外，可根據應力比  $\sigma_{max}/UCS$  或  $\sigma_{max}/\sigma_{ci}$  進行剝落潛勢與剝落深度( $r$ )判斷，如圖 2.3-6(b)。

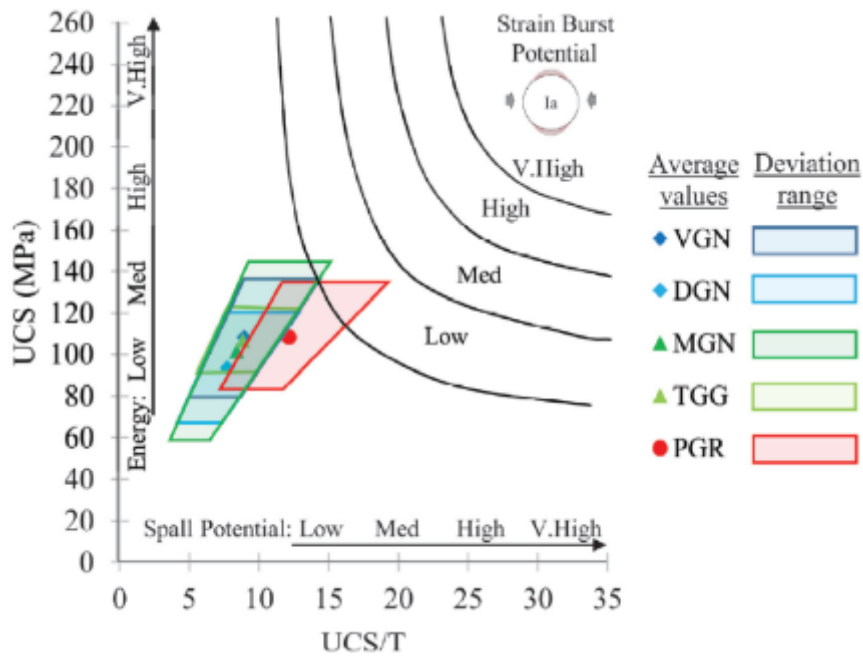


(a)

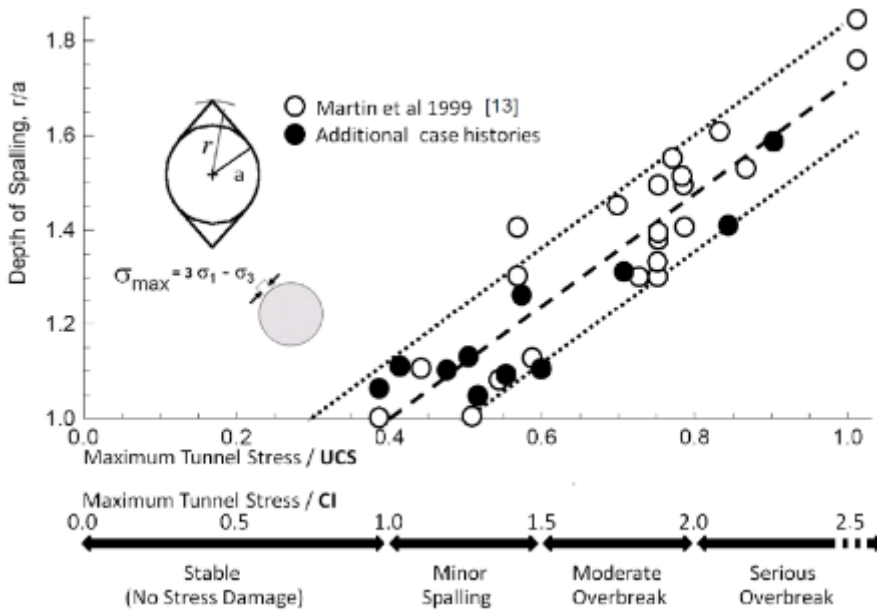


(b)

圖2.3-5 於高應力作用之硬岩區進行坑道開挖引致之母岩損傷：(a) AECL在URL進行的MBE試驗，圓形坑道斷面開挖後產生剝落現象、(b)採礦工程採用馬蹄型坑道斷面，除了頂拱外，易在底拱與側壁轉角處觀察應力集中與岩體損傷(SKB, 2001; Siren, 2015)



(a)



(b)

圖2.3-6 坑道剝落損傷評估：(a)利用UCS與 $UCS/\sigma_t$ 為主要評估參數(VGN：脈片麻岩、DGN：片麻岩、MGN：雲母片麻岩、TGG：花崗片麻岩、PGR：偉晶花崗岩)、(b)採 $\sigma_{max}/UCS$ 或 $\sigma_{max}/\sigma_{ci}$ 為剝落潛勢評估指標(Siren, 2015; Diederichs et al., 2010)

## 2.4 地震對處置坑道的影響

由於處置坑道位處地下深處，其受震反應迥異於地上結構物，為瞭解地震對處置坑道的影響，本研究蒐整日本瑞浪地下實驗室有關地震引致之加速度歷時反應紀錄，及國際間有關地震引致一般隧道之破壞等研究文獻，作為後續有關課題之研析參考。

### 2.4.1 深層岩盤之受震反應

日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, 簡稱 JAEA)於岐阜縣東南部瑞浪市設置的瑞浪地下實驗室(Mizunami Underground Research Laboratory), 簡稱MIU, 為一花崗岩地下實驗室, 由東濃超深地層研究中心執行相關的研究計畫。其坑道配置詳如圖2.4-1, 計有主豎井與通風豎井各一座, 坑道斷面形狀採圓形, 主坑道內徑為 6.5 m, 換氣坑道為 4.5 m, 主豎井與通風豎井的間距為 40 m, 最深處達地下 500 m。

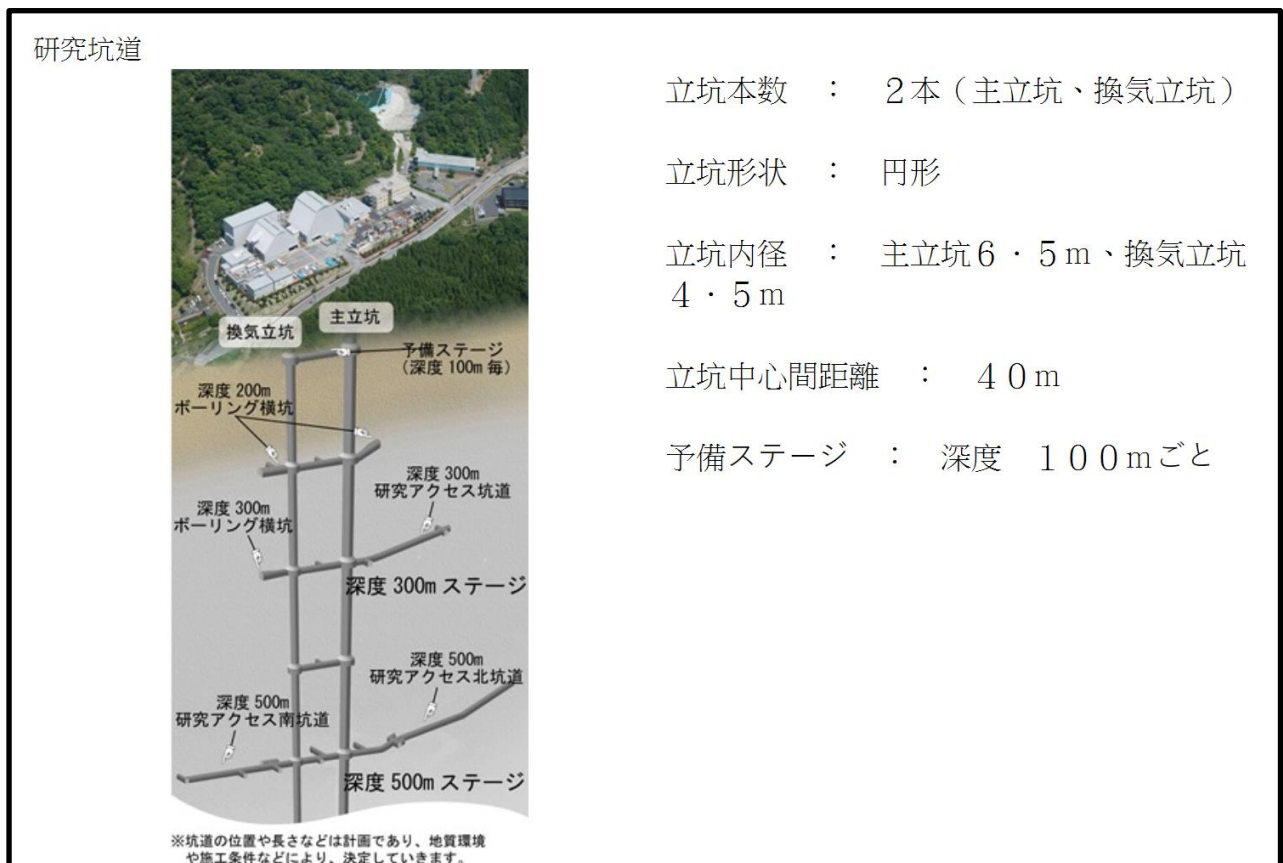


圖2.4-1 瑞浪地下實驗室坑道配置圖(<https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/mium.html>)

瑞浪地下室實驗室之推動區分為三個階段：

**第一階段-地表調查階段 (1996 年至 2004 年)：**

主要工作為蒐集深層地質環境基本資料，包括地球物理探測與鑽孔調查之資料，並對實驗室建造後所造成之環境影響進行評估，以及針對地下實驗室之佈置及時程進行最佳化設計。

**第二階段-建造階段 (2004 年至 2013 年)**

主要工作為開挖豎井及坑道，並進行豎井及坑道周邊的地質環境評估，另就第一階段的調查結果進行技術可行性驗證，並針對地下實驗室開挖期間之地質環境影響進行研究，最後為確認開挖技術之可行性。

**第三階段-運轉階段 (2010 年迄今)為**

JAEA已擬訂諸多關鍵議題規劃於未來 5 年進行，包括(1)坑道回填技術之發展：進行坑道封閉技術之測試及坑道環境之長期監測；(2)發展物質傳輸之模擬技術：進行多相裂隙網路模擬、溶質傳輸實驗、長期地質演化的情節分析及深層鑽探調查；(3)適用於深層地質環境之相關技術發展：進行坑道封閉前及封閉後之灌漿實驗。

MIU位於結晶花崗岩盤，花崗岩體上方覆蓋了約200 m 的 Neogene沉積岩，相關的岩石力學性質詳如表2.4-1 所示，其中單壓強度較高者為花崗岩，其值為 116.4 MPa，最低者位於沉積岩，其值為 1.30 MPa。

表2.4-1 瑞浪地下實驗室所處地層之岩石力學特性(Matsui et.al, 2010)

| <i>Rock Class</i> | <i>Unit Weight</i><br>[kN/m <sup>3</sup> ] | <i>Uniaxial Compressive strength</i><br>[MPa] | <i>Young's Modulus</i><br>[GPa] | <i>Poisson's Ratio</i> | <i>Cohesion</i><br>[MPa] | <i>Internal Friction Angle</i><br>[degree] |
|-------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|
| A                 | -                                          | -                                             | -                               | -                      | -                        | -                                          |
| B                 | 26.5                                       | 116.40                                        | 35.6                            | 0.35                   | 18.9                     | 53.9                                       |
| C <sub>H</sub>    | 26.5                                       | 89.70                                         | 30.1                            | 0.35                   | 14.6                     | 53.9                                       |
| C <sub>M</sub>    | 26.5                                       | 63.10                                         | 24.5                            | 0.35                   | 10.3                     | 53.9                                       |
| C <sub>L</sub>    | 18.8                                       | 6.40                                          | 2.10                            | 0.31                   | 2.10                     | 23.5                                       |
| D                 | 18.8                                       | 1.30                                          | 0.63                            | 0.38                   | 0.45                     | 21.5                                       |

Rock class of granite: A, B, C<sub>H</sub>, C<sub>M</sub>.

Rock class of sedimentary rock: C<sub>L</sub>, D



由於日本地震發生次數亦屬頻繁，為瞭解地震對地下研究室的影響，遂於地面及於通風豎井(ventilation shaft)離地面深度 100 m 與 300 m 處設置地震儀，詳如圖2.4-2。所採用的地震儀可記錄東西向(EW)、南北向(SN)與垂直向的加速度歷時，其啟動紀錄之觸發門檻值為 1 Gal；此外，為掌握混凝土襯砌的穩定性，於相同的地下深度亦設置了動態應變計。

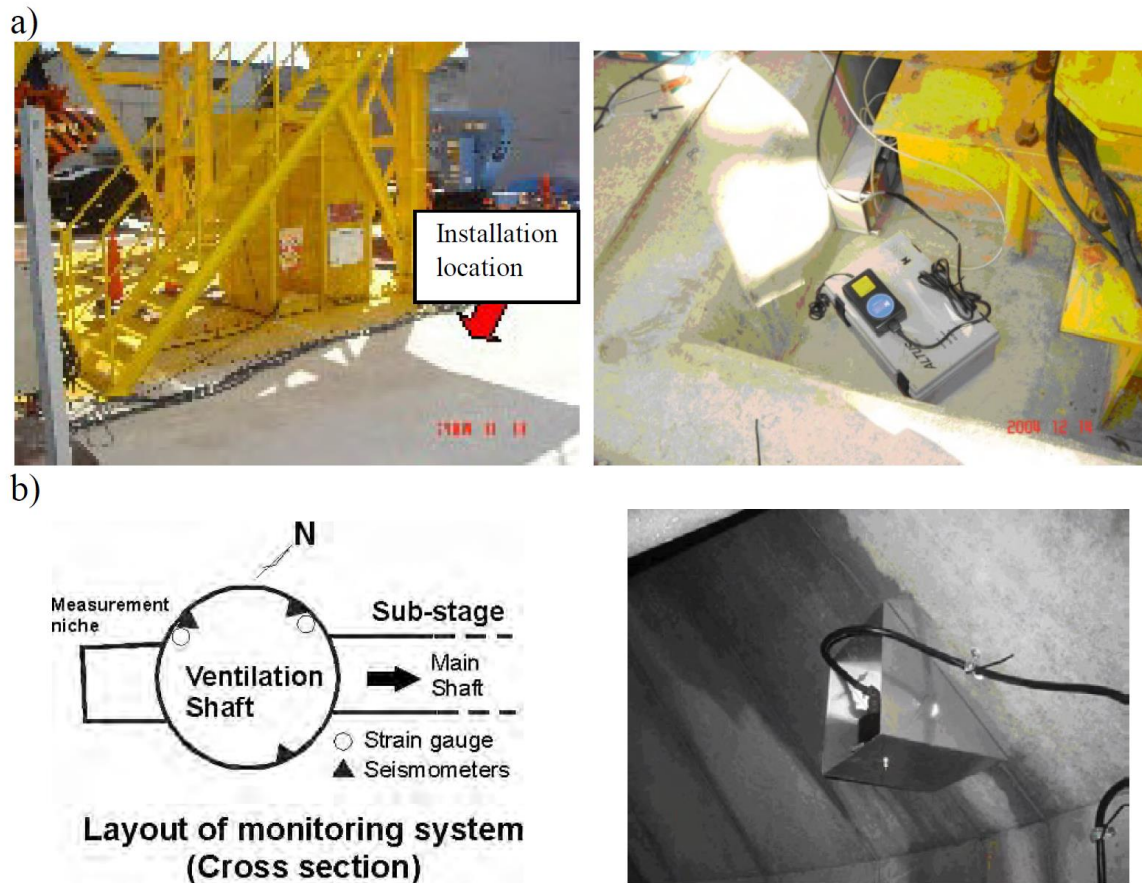


圖2.4-2 瑞浪地下實驗室分別於(a)地面及(b)地下設置地震儀(Niimi 等人，2012)

表 2.4-2 為瑞浪地下實驗室於 2008 至 2011 年期間所紀錄的六筆地震事件及相對應的地表最大加速度，所紀錄之地震事件其震源與 MIU 之水平距離與深度關係詳如圖 2.4-3。另外，亦將各地震事件所記錄的最大加速度與深度關係整理如圖 2.4-4，其中，因紀錄編號 1 之 2008 年 岐阜縣美濃東部(East Mlino)地震缺少深度 300 m 之地震儀紀錄，故未納入比較。

經比對分析後，顯示最大加速度隨深度而有明顯的遞減趨勢，以編號 5 之規模 6.5 駿河灣(Suruga Bay)地震為例，其在瑞浪地底實驗室地面量測的最大加速度為 30.8 Gal，在地下深度 100 m 與 300 m 處的最大加速度分別為 14.7 Gal 與 6.7 Gal，各為地面最大加速度值的 0.48 與 0.22。此外，由圖 2.4-3 可看出，對於震央距 MIU 廠址 100 km 以內的地震事件，所測得的最大加速度及其隨深度而遞減的趨勢相對較不顯著，其原因值得探討。

表2.4-2 2008至2011年間之MIU之測儀紀錄(Niimi 等人, 2012)

| Data No. | Date                    | Hypocenter                           | Seismic Intensity<br>(at Mizunami) | Max. Acceleration of each direction [Gal] |               |              |
|----------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|---------------|--------------|
|          |                         |                                      |                                    | Ground surface                            | GL-100m       | GL-300m      |
| 1        | Nov 24, 2008<br>6:15    | East Mino<br>Depth 11km<br>M:3.9     | 1                                  | 12.0<br>[E-W]                             | 7.1<br>[E-W]  | -            |
| 2        | May 25, 2009<br>20:26   | West Shizuoka<br>Depth 26km<br>M4.7  | 2                                  | 5.6<br>[E-W]                              | 3.1<br>[E-W]  | 1.8<br>[N-S] |
| 3        | July 14, 2009<br>3:57   | East Mino<br>Depth 50km<br>M:3.5     | 2                                  | 6.5<br>[E-W]                              | 3.1<br>[E-W]  | 2.0<br>[N-S] |
| 4        | July 27, 2009<br>9:44   | West Aichi<br>Depth 41km<br>M:4.0    | 2                                  | 8.2<br>[N-S]                              | 3.0<br>[N-S]  | 1.9<br>[E-W] |
| 5        | Aug 11, 2009<br>5:07    | Suruga Bay<br>Depth 23km<br>M:6.5    | 3                                  | 30.8<br>[E-W]                             | 14.7<br>[N-S] | 6.7<br>[E-W] |
| 6        | March 11, 2011<br>14:46 | Sanriku coast<br>Depth 24km<br>M:9.0 | 3                                  | 10.4<br>[N-S]                             | 7.7<br>[N-S]  | 5.7<br>[U-D] |

\*U-D:Up and Down

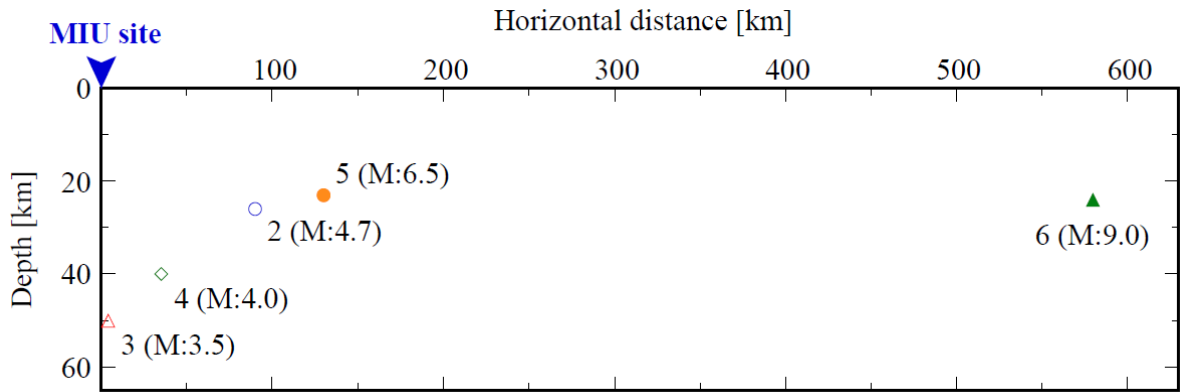


圖2.4-3 日本瑞浪地下實驗室所記錄的地震事件其震源距離與深度關係圖 (Niimi 等人，2012)

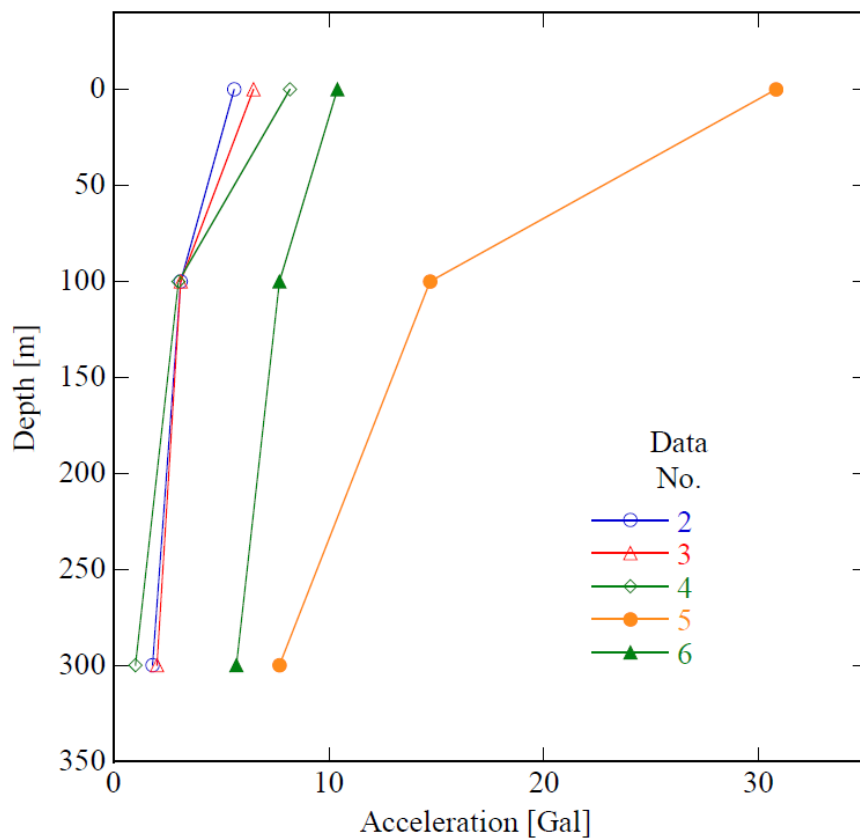


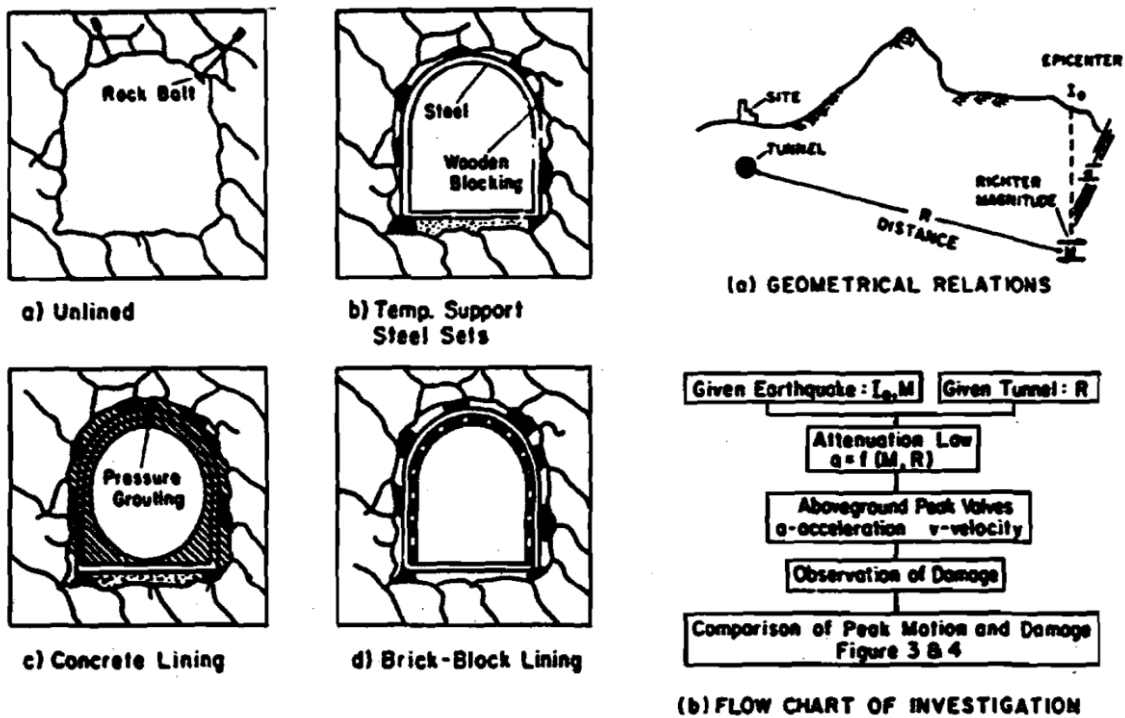
圖2.4-4 日本瑞浪地下實驗室之加速度紀錄與深度關係(Niimi 等人，2012)



## 2.4.2 地震引致隧道破壞之國外文獻

### (1) Dowding and Rozen (1978)

蒐集了加州、阿拉斯加和日本 71 個直徑 3~6 公尺之隧道案例(多數為岩石隧道)，包含13 個地震事件(地震規模 5.8~8.3)，統計震後共有 42 個隧道發生破壞，其所調查的隧道依支撐類型區分：無襯砌隧道、鋼支保支撐、混凝土襯砌與砌石襯砌隧道四種，如圖2.4-5(a)所示，分析流程詳如圖2.4-5(b)，主要考慮了震源與隧道所在位置支距離(R)，地震規模(M)與地表加速度(a)。其中，地表加速度係根據 McGuire 於1974年提出的衰減公式予以修正。此外，其將隧道受震破壞區分三類，分別為(i)無損傷(no damage)，即無新生成之裂縫與塊體掉落、(ii)中度損傷(minor damage)，即有新生成之裂縫產生或是石塊體掉落、(iii)損傷(damage)，即有較嚴重的新生裂隙與岩塊掉落。



(a)

(b)

圖2.4-5 加州、阿拉斯加和日本71 個隧道震損案例:(a)隧道襯砌類型與(b)分析流程  
 (Dowding and Rozen, 1978)

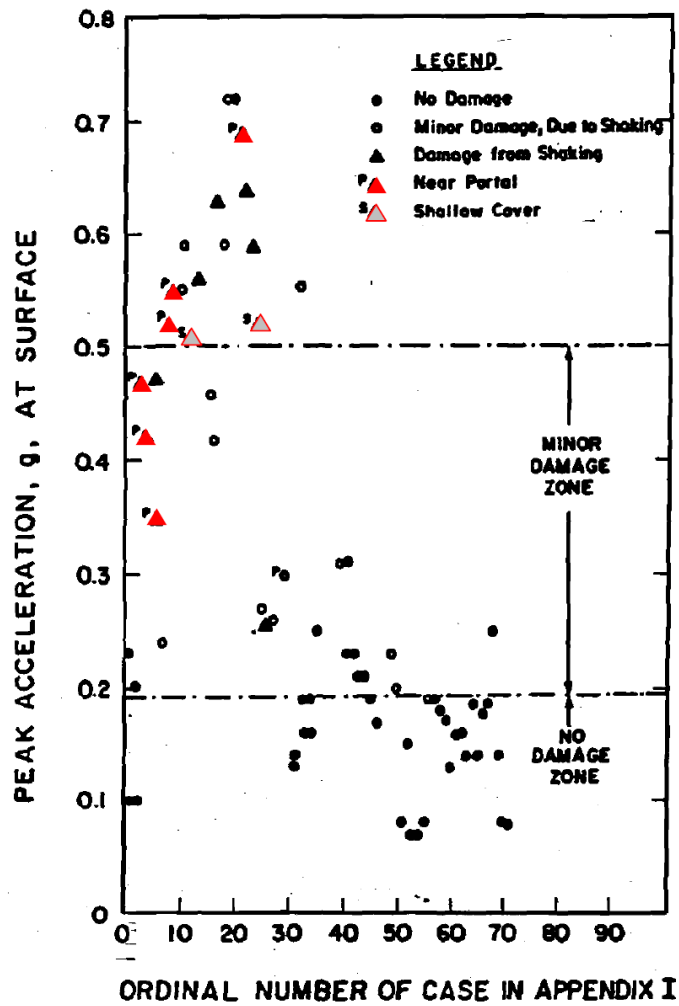


圖2.4-6 尖峰地表加速度與不同之隧道破壞類型統計數(Dowding and Rozen, 1978)

根據Dowding and Rozen (1978)的研析成果，整理了尖峰地表加速度與不同之隧道破壞類型統計數，詳如圖2.4-6，並進一步將隧道的受震破壞型態、肇因與因應對策整理如下幾點：

**A. 近洞口段的損壞(Damage near portals)**

根據蒐整的隧道震損案例，可發現洞口段的損傷肇因為(i)邊坡不穩定引致的洞口段破壞；(ii)地表加速度超過 0.25g 時，洞口段有顯著的損傷；(iii)大部分的洞口段損傷案例(佔蒐整案例數 70%)發生在地表加速度超過 0.4g；(iv)鄰近邊坡的洞口段設計必須要能承受地震引致的側向載重。

**B. 位於軟弱地盤的隧道損傷(Damage in poor ground condition)**

位於軟弱地盤的隧道，若襯砌與岩壁之間存在空洞，則岩盤可能因受震而有鬆動岩

塊掉落致襯砌損傷。此部分可透過地盤改良，或是襯砌與岩盤間之空洞實施背填灌漿，藉以確保坑道結構與岩盤有良好的接觸；若採用厚度薄、勁度高的襯砌，但未針對軟弱地盤進行強化或改良，受震時襯砌結構仍會承受額外的載重。

**C. 淺覆蓋及不對稱載重的隧道損傷(Damage associated with shallow cover and unsymmetric loads)**

淺覆蓋隧道相較於深層隧道，其耐震損能力較差(案例編號 12 與 24 之覆蓋深度分別為 1.5 ~ 6 m 及 20 m)，可藉由強化襯砌與岩盤之間的接觸關係，或是透過岩盤穩定工法使隧道處於對稱載重條件下，如此可增加淺覆蓋隧道的安全性與穩定性。

**D. 共振行為與動態載重(Resonant behavior and dynamic loading)**

針對短波長的地震波(波長 $\leq$ 隧道半徑)，其造成的共振行為與增加的動態載重可能造成的隧道破壞。

**E. 地盤運動引起的動態應力集中 (Dynamic stress concentration of the ground motions)**

地震波於岩盤中傳遞時，對隧道造成的應力集中現象，其值約為靜態載重的 10%~20%。

**(2) Sharma and Judd (1991)**

Sharma and Judd (1991) 蒐整了世界各國有關地震引致隧道破壞的案例數計 192 筆，含括了 85 個地震事件，指出地震力作用下，引致隧道損傷的影響因子包括：(i) 覆蓋深度、(ii) 隧道圍岩種類、(iii) 支撐型式、(iv) 尖峰地表加速度、(v) 地震規模與(vi) 距震央距離等六項。此外，將隧道的破壞分以下六種：

- 隧道斷面的變形；
- 鬆動岩塊自頂拱墜落；
- 頂拱或側牆的崩坍；
- 沿著斷層錯動方向的位移；
- 沿著開挖面的剝落(slabbing or spalling) ；
- 支撐構件或是襯砌的變形。

在Sharma and Judd (1991)發表的文件中另外指出，在其蒐整的隧道受震案例及技術報告中，多有提及洞口段(access portal)的破壞，惟其認為洞口段應較屬地上結構的設計

範疇，故未將洞口段的破壞納入上述分類。以下，針對Sharma and Judd (1991)所整理的六項影響因子摘錄相關重點如后：

### A. 岩覆深度的影響

取 192 筆研究案例中的 132 筆隧道受震案例數進行分析，詳如圖2.4-7，岩覆深度對隧道震損的影響如下：

- 60%的隧道震損發生在覆土深度 100 m內。
- 隨著覆土深度增加，隧道震損案例數愈低。
- 當覆土深度  $\geq 50$  m，隧道震損案例數明顯較低。
- 當覆土深度  $> 300$  m，嚴重損傷(heavy damage)之案例數降為零

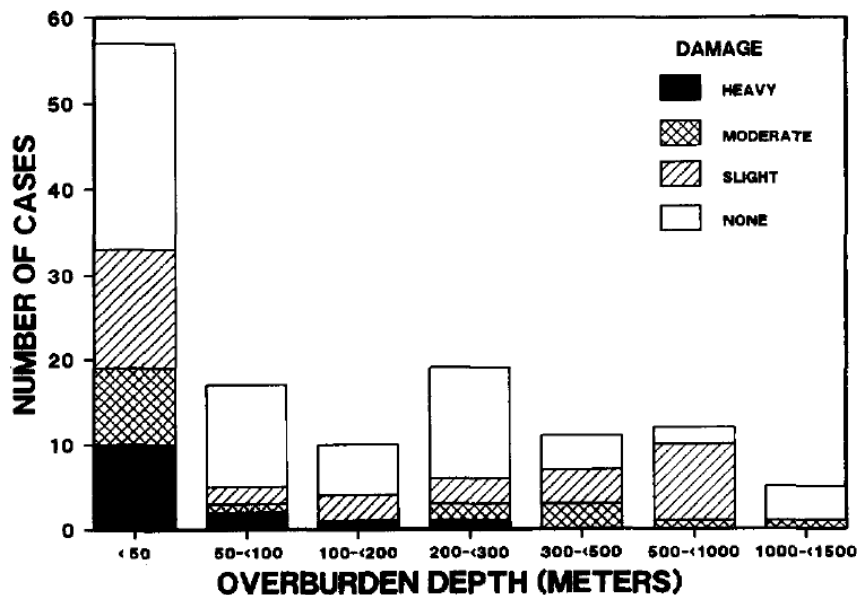


圖2.4-7 不同的岩覆深度及其對應的隧道震損數量(Sharma and Judd, 1991)

### B. 圍岩種類的影響

取 192 筆研究案例中的 149 筆隧道受震案例數進行分析，結果詳如圖2.4-8，圍岩種類對隧道震損的影響如下：

- 位於沉積岩之隧道案例數計 40 筆，其震損案例數為 29 筆 (73%)。
- 位於花崗岩之隧道案例數計 36 筆，其震損案例數為 15 筆 (42%)。
- 位於變質岩之隧道案例數計 9 筆，其震損案例數為 1 筆(11%)。
- 位於崩積層之隧道案例數計 14 筆，其震損案例數為 11 筆 (79%)。
- 非沉積岩與崩積層之隧道震損比例相對較少。

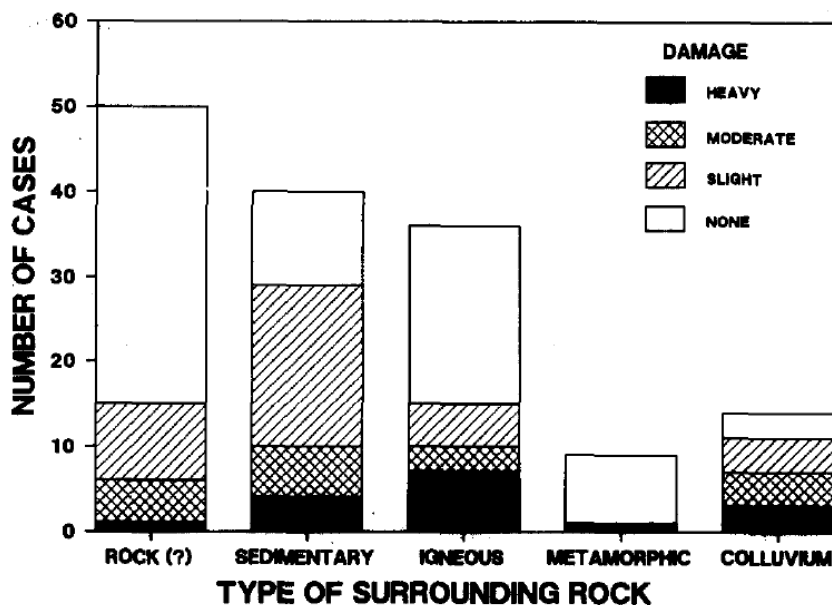


圖2.4-8 圍岩種類及其對應的隧道震損數量(Sharma and Judd, 1991)

C. 隧道支撐種類的影響

取 192 筆研究案例中的 159 筆隧道受震案例數進行分析，結果詳如圖2.4-9，依隧道支撐種類區分為無襯砌、木構件、石塊/磚砌、混凝土與鋼筋混凝土，並將隧道震損案例數與襯砌種類之關係整理如下：

- 無襯砌隧道計 106 筆，震損案例數為 40 筆 (38%)。
- 木構件隧道計 3 筆，震損案例數為 3 筆 (100%)。
- 石塊/磚砌隧道計 17 筆，震損案例數為 13 筆 (76%)。
- 混凝土隧道計 24 筆，震損案例數為 18 筆(75%)。
- 鋼筋混凝土隧道計 9 筆，震損案例數為 8 筆(89%)。

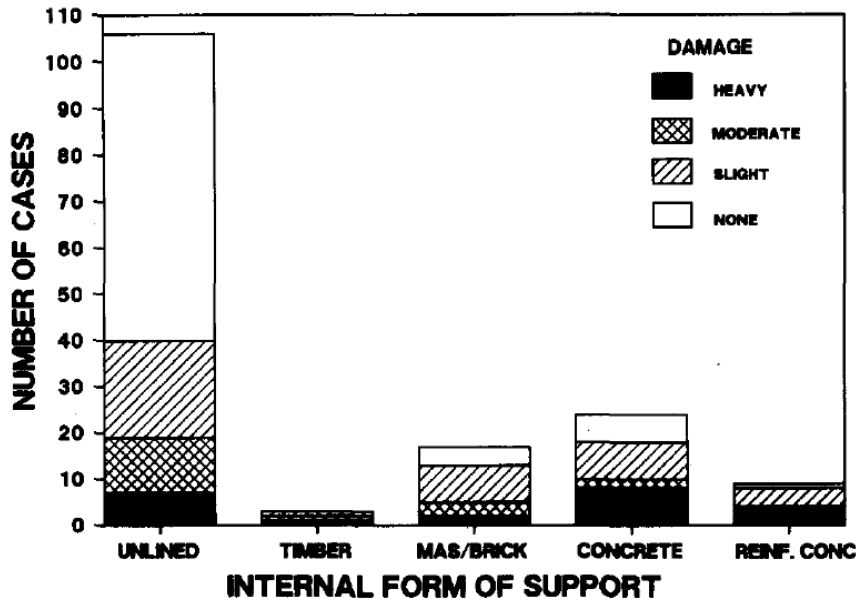


圖2.4-9 支撐種類及其對應的隧道震損數量(Sharma and Judd, 1991)

#### D. 地震規模的影響

取 192 筆研究案例中的 183 筆隧道受震案例數進行分析，結果詳如圖2.4-10，其中，地震規模(M)大於 6 以上的資料數為 148 筆，地震規模對隧道震損之影響如下：

- $M < 4$  之案例數計 7 筆，震損案例數為 4 筆 (57%)。
- $4 \leq M < 5$  之案例數計 11 筆，震損案例數為 3 筆 (27%)。
- $5 \leq M < 6$  之案例數計 17 筆，震損案例數為 5 筆 (29%)。
- $6 \leq M < 7$  之案例數計 59 筆，震損案例數為 26 筆 (44%)。
- $7 \leq M < 8$  之案例數計 44 筆，震損案例數為 27 筆 (61%)。
- $M \geq 8$  之案例數計 45 筆，震損案例數為 23 筆 (51%)。
- 地震規模愈大，震損案例數愈多。

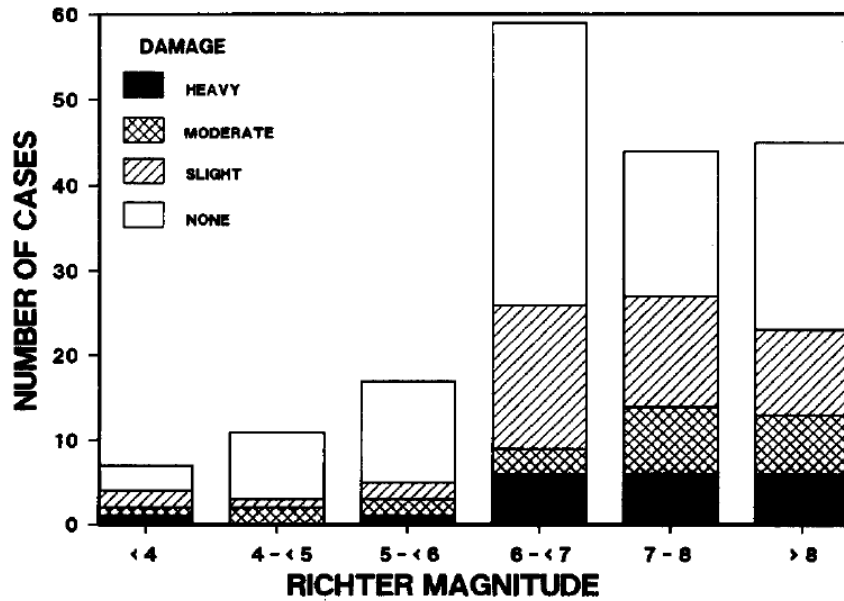


圖2.4-10 地震規模及其對應的隧道震損數量(Sharma and Judd, 1991)

#### E. 震央距離的影響

取 192 筆研究案例中的 174 筆隧道受震案例數進行分析，結果詳如圖2.4-11，並歸納出震央距離(D)的影響如下列幾點：

- $D < 25\text{kM}$ 計 70 筆，震損案例數為 50筆 (71%)。
- $25\text{kM} \leq D < 50 \text{kM}$ 計 42 筆，震損案例數為 17筆 (40%)。
- $50\text{kM} \leq D < 100 \text{kM}$ 計 39 筆，震損案例數為 13筆 (33%)。
- $100\text{kM} \leq D < 150 \text{kM}$ 計 13 筆，震損案例數為 4 筆(31%)。
- $150\text{kM} \leq D < 200 \text{kM}$ 計 7 筆，震損案例數為 1 筆(14%)。
- $200\text{kM} \leq D < 300\text{kM}$ 計3筆，震損案例數為0筆(0%)。
- 離震央距離愈遠，震損案例數愈少。



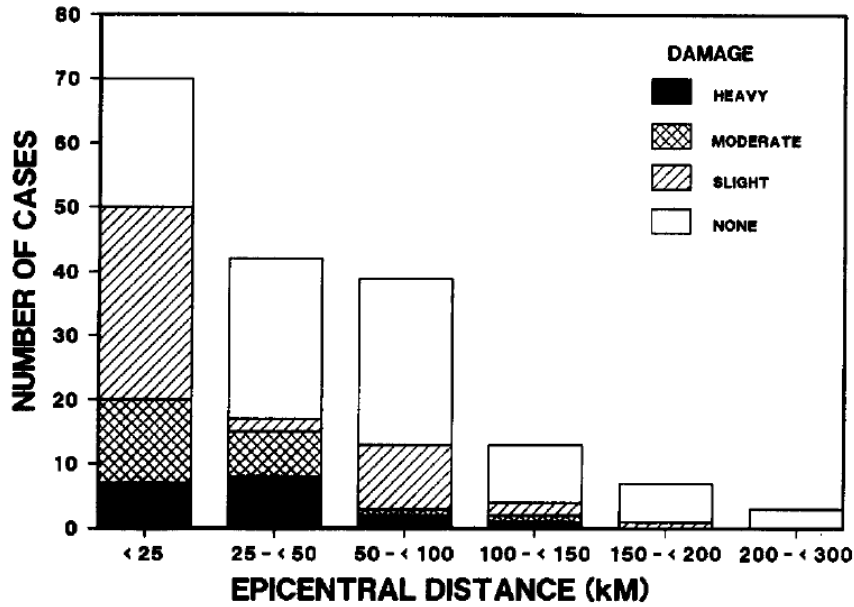


圖2.4-11 震央距離及其對應的隧道震損數量(Sharma and Judd, 1991)

F. 尖峰地盤加速度的影響

取 192 筆研究案例中的 174 筆隧道受震案例數進行分析，結果詳如圖2.4-12，並歸納尖峰地盤加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)的影響如下列幾點：

- $PGA(\%g) < 15$ 之案例數計 80 筆，震損案例數為 20 筆 (25%)。
- $15 \leq PGA(\%g) < 65$ 之案例數計 94 筆，震損案例數為 65 筆 (69%)。

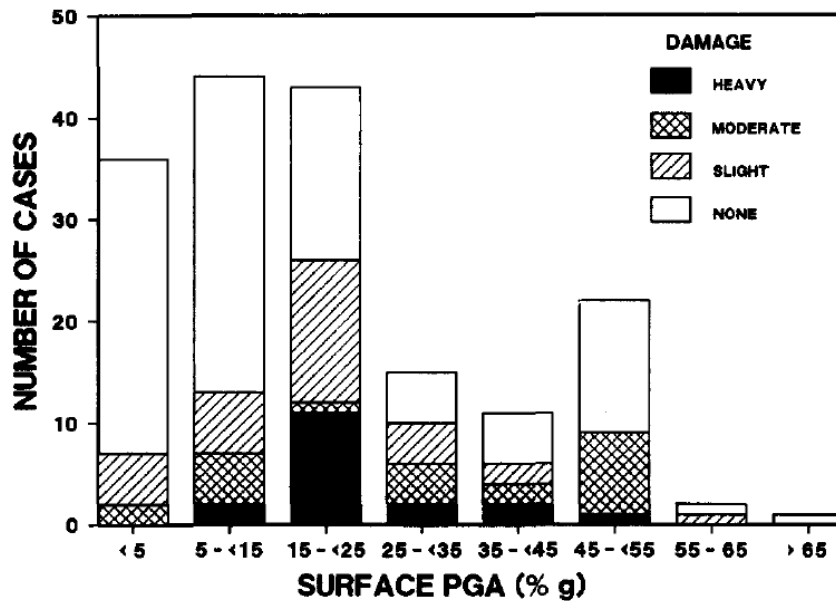


圖2.4-12 地表加速度 PGA 其對應的隧道震損數量(Sharma and Judd, 1991)



## 第三章、國內一般隧道設計方法與施工規範

考量本土地質條件與國外放射性廢棄物處置場所處母岩之力學特性迥異，本項工作將針對國內一般隧道之設計方法與施工規範進行蒐整；此外，因國內目前尚無隧道耐震設計相關規範，僅在既有的一般規範或技術報告中述及在隧道耐震設計需考量的注意事項。鑑此，本研究蒐整「日本隧道工程標準規範及解說-山岳工法篇」及「日本隧道工程標準規範及解說-潛盾隧道篇」，及一般隧道在考量地震力作用下之分析方法，作為後續之參考。有關「邊坡運動」與「開挖擾動」等外力因素可能造成處置坑道結構穩定性之影響，及所需之處置坑道結構穩定性審驗重點進行討論，則納入第四章之外力因素影響項目中一併討論。

### 3.1 一般隧道設計方法

隧道工程之主體設計主要包含二大部分，其一為隧道開挖之初期支撐；其二則為二次支撐(混凝土襯砌)。目前，初期支撐通常以噴凝土及岩栓為之，岩栓若有防蝕保護，可避免腐蝕現象的發生，此時可視為永久性支撐，二次支撐則用在若干特殊情況，作為初期支撐之防水或防火層，或改善其外觀、改進空氣或水之流通性。

根據中國土木水利工程學會於 1999 年出版之「隧道工程設計準則與解說」，將初期支撐概分為：(1)經驗設計法；(2)觀察設計法；(3)分析設計法，詳表3.1-1，並建議應依據地質特性、支撐架設時間、開挖方法、支撐系統之勁度與使用經驗及熟悉度等條件，評估所採支撐設計之適用性。

所述經驗設計法係套用以往工程經驗，依地盤條件與隧道功能，綜合分析隧道斷面形狀、尺寸、覆蓋深淺、大地應力、開挖方法等因素的影響，據以作為支撐系統之設計依據。目前隧道工程所採用的經驗設計法，主要係指經由統計分析，歸納出經驗法則的各種岩體分類系統，例如 Terzaghi 的 Rock Load Classification，Bieniawski 的 Geomechanics Classification System，Barton 等人提出來的 Q System 等。

觀察設計法係指施工進行期間，依實際觀察的地盤特性與監測結果，確認、補強或修正原本設計之開挖方法與支撐系統，為現代隧道支撐設計經常採用的設計方法，主要是根據以往的工程經驗與岩石力學觀念，於施工前訂定支撐構件與前進程序，再藉由施工過程中的各類監測結果做必要的修正，以確保支撐設計之安全性。觀察設計法較常採用者包括收斂變形控制法及新奧工法(NATM)。

分析設計法係利用數學解析、數值分析或物理模型等方式，分析隧道經開挖後其開挖面周圍之應力與變形，以作為隧道支撐之設計依據。其中，解析解法又稱為公式解法，例如岩盤-支盤互制曲線法，此法一般適用於軸對稱、均質材料、圓形隧道之情況。在數值分析部分，係採用商用軟體分析之，包括連續體分析之有限元素法(FEM)、邊界元素法(BEM)與有線差分法(FDM)，及離散體分析之分離元素法(DEM)、樺塊理論法(block theory)與DDA(discontinuous deformation analysis)。

在二次支撐部分，係以提供隧道內部安全設施之裝設及長期安全使用為目的，此外，二次支撐應依據長期之可能載重，決定其厚度。在洞口段、斷面幾何形狀變化段、交叉段、裝設通風與機電設施等處，應視襯砌應力大小，檢討增加襯砌厚度、材料強度或配筋之需要性。一般而言，二次襯砌係指混凝土襯砌，其設計原則區分二類

(1) 裝飾性襯砌

視初期支撐為永久支撐，其能力足夠支撐岩盤長期載重，無須再以二次襯砌補強之。此時的二次襯砌係以裝飾及改善通風性能為目的，且為無筋混凝土。

(2) 結構性襯砌

若遇擠壓或膨脹性岩盤、長期潛變之岩盤、斷層帶、破碎帶、有高地下水壓或內壓之隧道等，其二次襯砌須承受各種不同之載重，通常為鋼筋混凝土。

表3.1-1 國內一般隧道設計方法表(整理自王泰典等人，2012)

| 設計方法  | 內容                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 經驗設計法 | 經驗設計法為將以往工程經驗經由統計分析，歸納出經驗法則，並據以進行支撐設計之方法。經驗設計法之骨幹是各種岩體分類系統：<br>1. Terzaghi 之 Rock Load Classification<br>2. Bieniawski 之 Geomechanics Classification System (RMR)<br>3. Barton 等人之 Q System                        |
| 觀察設計法 | 觀察設計法為現代隧道支撐設計經常採用之設計方法，主要是根據以往之工程經驗及岩石力學理念，對每種岩石型態，於施工前訂定支撐構件及前進程序，並藉施工中之各類監測結果，做必要之修正，以確保支撐設計之安全性。觀察設計法強調修正設計之必要性，因此，監測資料之回饋分析誠屬必要，且應視為設計之一部分。觀察設計法較常採用者包括收斂變形控制法(convergence confinement method)及俗稱之新奧工法(NATM)。 |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 分析<br>設計法 | <p>當預料有不正常岩壓造成變形量超過預期值之特殊岩盤條件，及挖掘斷面為特殊形狀等理由，選用標準支撐型式不宜時，就需選用分析設計法，並依分析計算結果設計支撐型式。分析設計法可概分為理論分析法及數值分析法二類。</p> <p>1. 理論分析法<br/>                 當隧道斷面為圓形或簡化為相當之圓形等簡單形狀可依彈塑性理論以理論分析法分析圍岩應力狀態。</p> <p>2. 數值分析法<br/>                 有限元素法及邊界元素法等能分析岩盤及構造物之應力狀態，此等數值分析法可分析比較不同斷面形狀及開挖方法等。</p> |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 3.2 一般隧道施工規範

有關國內一般隧道工程所參考的施工規範，主要有隧道施工技術規範(交通部，2003)與公路工程施工規範(交通部，2013)，詳表3.2-1。在「隧道施工技術規範」部分，交通部以國道新建工程局委託中國土木水利工程學會於民國 88 年所編的「隧道工程設計準則與解說」為藍本，編訂「隧道施工技術規範」，並於 92 年由交通部頒布實施。

在「公路工程施工規範」部分，該規範的建立與頒布，旨在建立可供公路工程一般施工之共同遵循準繩。此外，因工程技術不斷精進及生態環保觀念漸被重視，為使公路工程之施工能與時俱進，交通部分別於民國 90 年及民國 93 年進行兩次修訂。

在「公路工程施工規範」第五篇隧道工程部分，分別就隧道施工管理、隧道施工通則、岩體分類與開挖支撐類型、洞口開挖及邊坡保護、隧道鑽炸及非全斷面機械開挖法、先進支撐、鋼支保、隧道用岩栓、隧道噴凝土、隧道襯砌、隧道鑽孔及灌漿、隧道計測及儀器及隧道防水層等加以說明。

表3.2-1 國內一般隧道施工規範(整理自王泰典等人，2012)

| 規範                     | 內容                                                                                                                                                                               |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 隧道施工技術規範<br>(交通部，2003) | 02401 隧道施工管理\02402 隧道施工通則\02403 岩體分類與開挖支撐類型\02411 洞口開挖及邊坡保護\02412 隧道鑽炸法及非全斷面機械開挖\02421 先進支撐\02422 鋼支保\02423 隧道用岩栓\02424 隧道噴凝土\02425 隧道襯砌\02432 隧道鑽孔及灌漿\02447 隧道計測及儀器\02448 隧道防水層 |
| 公路工程施工規範<br>(交通部，2013) | 第一篇 總則\第二篇 路基工程\第三篇 路面工程\第四篇 橋梁工程\第五篇 隧道工程\第六篇 混凝土工程\第七篇 排水工程\                                                                                                                   |

|  |                                                   |
|--|---------------------------------------------------|
|  | 第八篇 邊坡工程\第九篇 交通設施及其他工程\第十篇 工程安全環境衛生措施\第十一篇 環境保護措施 |
|--|---------------------------------------------------|

### 3.3 隧道設計準則與相關技術文件

除前述章節的設計方法及施工規範外，國內尚有其他有關隧道之設計準則與技術報告等文件可供未來發展低放處置坑道審驗技術之引用與參考，本研究根據王泰典等人(2012)執行之「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究」成果，彙整國內一般隧道設計準則與相關技術文件，詳如表3.3-1。

表3.3-1 國內一般隧道設計準則與相關技術文件(整理自王泰典等人，2012)

| 準則                                       | 內容                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 公路隧道安全設施準則研訂(交通部台灣區國道新建工程局，1998)         | 本準則之主要目的，在結合機電、交控、緊急與安全逃生及營運管理等先進技術，並參酌世界各國之經驗，針對公路隧道運轉所需之安全設施，研訂一套適合國內使用之設置準則。並將隧道安全設施準則劃分為機電設施、交通監控設施、緊急及安全逃生設施以及營運管理措施四大類。                                            |
| 隧道工程設計準則與解說(中國土木工程學會，1999)               | 本設計準則分成三部分：<br>第一部分為總則，說明設計準則涵蓋的範圍及適用性；<br>第二部分為調查與試驗，針對隧道工程之特性，就工址調查的範圍、項目、進行方法及成果判釋等詳細說明；<br>第三部分為隧道設計，就設計項目、設計理念及注意事項等加以闡述說明。                                         |
| 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，1999)             | 包括與隧道工程相關之概述、地質調查、隧道定線、隧道洞口、隧道設計、特殊地質段設計、災變對策、隧道開挖、隧道監測與回饋及結語。                                                                                                           |
| 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會，2003) | 行政院公共工程委員會有鑑於台灣地區沿用之岩體分類法係因襲國外系統，常無法反映國內特殊之地質條件，且隧道工程相關資料至今仍散佈於各單位中，相關經驗無法有效傳承與保存，因此，彙整國內隧道工程資料，並透過國際隧道工程技術交流方式，參酌國外現行岩體分類系統以及著名隧道工程案例加以研究，以建立台灣地區之岩體分類與支撐系統，供爾後之隧道工程使用。 |
| 軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊(                         | 本手冊涵蓋了與軟土潛盾隧道工程相關的工址調查、隧道規劃、設計、施工及展望；潛盾機選擇和評選模式、應用及設計；                                                                                                                   |



|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>中華民國隧道協會，2004)</p>                       | <p>潛盾隧道環片襯砌、工作井、施工輔助工法、施工監測及建物保護等。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>潛盾隧道設計及施工準則與解說(中華民國隧道協會，2009)</p>        | <p>本準則使用原則為(1)條文可做為政府、事業單位要求施工設計單位之基本事項；(2)解說內容提供設計及施工數據與資訊，供相關單位參考；(3)提供政府、事業單位、設計與施工單位共同之依循與標準；(4)從事潛盾隧道工程人員之參考書籍。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <p>公路隧道消防安全設備設施設置規範(交通部台灣區國道新建工程局，2010)</p> | <p>本規範編訂原則如下：<br/>                 目的係為保障公路隧道內用路人之生命安全。<br/>                 適用於公路隧道消防安全設備設計之用。惟各項作業細節與設計標準之詳細特定要求。應由需求單位視個案需要另為訂定。提供基本通盤性設計規定。國內各公路隧道工程主辦機關在規劃設計時，得依據本規範及最新技術或設計，再訂定其適合之規範。<br/>                 參考日本道路公團、美國國家防火保護協會NFPA502、世界道路協會PIARC、歐洲UNECE、國內建築技術規則與各類場所消防安全設備設置標準及其他國家相關規定等訂定之。<br/>                 其章節內容區分：第一章：總則\第二章：消防設計\第三章：消防安全設備\第四章：消防搶救上之必要設備\第五章：其他。</p> |
| <p>公路隧道設計規範(交通部，2017)</p>                   | <p>交通部考量隧道設計規範確有及早訂定之必要，遂於民國92年3月委由中華民國隧道協會，以國道新建工程局委託中國土木工程學會所編「隧道工程設計準則與解說(民國88年)」為藍本進行複審，並編訂本規範。複審期間聘請18位產官學界之專家擔任審查委員負責審查，於民國92年11月始定案，並由交通部頒布實施。<br/>                 其章節內容區分：第一章：總則\第二章：地質調查\第三章：設計考量\第四章：支撐設計方法\第五章：支撐構件\第六章：洞口設計\第七章：特殊考量\第八章：排水與防水設計\第九章：監測系統。</p>                                                                                                               |

### 3.4 隧道耐震設計相關規範與分析方法

#### (1) 日本耐震設計規範

##### A. 「日本隧道工程標準規範及解說-山岳工法篇」

第33條述及地震對山岳隧道的影響及相關解說，茲整理如后：

##### <條文>

##### 第 33 條 地震之影響

地震之影響應視隧道之覆蓋、地盤條件、現場條件及週邊環境等之需要而加以考慮而設計之。

##### <解說>

- 隧道結構整體受地盤所環繞，由於地震時隧道結構物之行為係受週邊地盤之行為所支配，故比之於地表之結構物，一般而言，地震對隧道的影響較小，即使受害，亦較輕微。
- 山岳隧道過去所發生的地震災害，大多為隧道洞門或隧道洞口附近襯砌的型態改變、崩坍。其肇因為隧道洞口附近覆蓋小，且屬於土砂的地盤，故幾乎為隧道主體受週邊地盤慣性力的影響，或因地震而發生隧道洞口附近的滑坡，因崖錐的崩坍而產生的側壓，襯砌或隧道洞門之支撐地盤的承载力不足等。
- 隧道洞口應盡可能避免大量挖入地盤，或視情況將隧道洞口往前移出，並應參考地形、地質及過去災害歷史，必要時尚應探討滑坡抑止樁、落石防護、加固混凝土、鋼筋混凝土之襯砌及仰拱等對策。
- 深度且地盤良好的隧道，除了斷面特大，或結構物的重要性特高者之外，一般不需考慮地震的影響。但若是在斷層破碎帶等之地盤條件不佳地區以及鄰近處施工時，為極力防止地震時，有可能發生襯砌的剝落或被擠出，必須探討鋼筋或鋼纖維等之襯砌補強或仰拱混凝土等之補強。
- 山岳隧道與潛盾隧道，在與明挖回填隧道及豎井等結構物之接續處，因地震時會有應力集中之虞，故須就採用可撓接頭或補強等加以探討。

## B. 「日本隧道工程標準規範及解說-潛盾隧道篇」

第33條述及地震對潛盾隧道的影響及相關解說，茲整理如后：

### <條文>

#### 第 33 條 地震之影響

有可能受地震的影響時，則應依據隧道的使用目的及其重要性，考慮建址條件、地盤的條件、地震動的規模、隧道的結構與形狀以及其他的必要條件後進行檢討。

### <解說>

在覆蓋厚度大，且均質良好地盤內的隧道，一般對地震的影響探討可以予以省略。

但在下列情況下，可認為隧道會受地震的影響，必須審慎檢討：

- 地下銜接段、分歧段及工作井引路段等。其襯砌結構出現急遽變化者(包括環片種類的變化、及有無二次襯砌等)。
- 在軟弱地盤中者。
- 地質、覆蓋厚度及基礎深度等地盤條件出現急遽變化者。
- 有急轉彎曲線段者。
- 在鬆軟飽和砂地盤，且有液化可能性者。

## (2) 國內規範述及耐震設計或注意事項

國內目前在隧道或相關地下結構之耐震設計，尚未訂定相關規範，

### A. 公路隧道設計規範(交通部，2017)

#### C3.1 一般說明

(1) 本章針對隧道設計所需考量之基本因素，包括地盤特性、斷面形狀、地震、特殊荷重、施工方法與順序、地下水與地表水之影響等因素加以說明，至於洞口設計、特殊地質處理（斷層、湧水與有害性氣體等）、近接隧道與交叉段等特殊狀況所需考量之因素，則另列第六章及第七章。

#### C3.3 設計考量因素

##### (3) 地震

針對一般山岳隧道而言，因岩體變形模數較一般土壤為高，而地震波於岩盤之體波波長一般以百至千公尺級計，其值遠大於隧道橫斷面尺寸，故地震波對岩盤隧道之影響原則上可以不予考慮。然而，針對洞門段、淺覆蓋段、斷層破碎帶等之一般岩盤隧道襯砌設計，得於必要時視地形、地質及隧道覆蓋深度等條件考量地震之影響。由國內外之地震災害報告顯示，岩盤隧道雖屬耐震性較佳之結構物，惟若隧道通過第一類活動斷層（依經濟部中央地質調查所公布為準）之影響範圍內，可能發生襯

**砌受斷層錯動之影響而破壞。**有鑑於此，山岳隧道設計應以避開活動斷層為原則，如確實無法避開時，應視需要考量斷層錯動及長期蠕動之因應對策。

#### 6.4 洞門段

(3) 隧道洞門結構係為防止洞口段發生邊坡滑動、落石及滲水等現象，故其本身結構應具有力學上之安定性，不容有坍塌及下陷等現象。隧道洞門應配合不同之型式，考慮相關之靜載重、土壓力、超載荷重、**地震力**、落石載重、車輛載重、水壓力、溫度變化及混凝土收縮之影響等。

#### 7.4 淺覆蓋段

淺覆蓋段之設計應考量開挖面穩定性、地表沉陷及對鄰近構造物或環境之影響等，必要時得採用輔助工法因應之，並加強監測。淺覆蓋段隧道內襯砌得視需要考慮**地震力**之影響。

### B. 台北捷運系統工程土木工程設計手冊(1998)

#### 第二章 第一節 地下段結構工程

##### 1.1.2.1 明挖覆蓋結構

(1)...所採用的材料強度及載重組合，係依據「土木工程設計手冊」之規定，以強度設計法設計，並考慮對各構件造成不利影響之載重組合。地下結構設計載重型式計有 12 種，包括 3 種垂直載重、5 種側向載重及 **4 種地震載重**。

(2)依據「土木工程設計手冊」地下結構地震力分析所採用之**強制變位**，施加於結構分析模式最外側，與其他載重組合後，進行結構設計。

##### 1.1.3 設計考量

##### 1.1.3.1 明挖覆蓋結構

(1)...

##### D.地震力之影響

側向勁度愈小之地下結構，如厚版薄牆之地下結構，其承受之地震力愈小。此種地下結構，雖可使車站結構寬度較小，但其所需開挖深度較深。結構寬度較小，可節省工程用地；但開挖深度較深，則需較多之開挖量及較大之連結壁深度。由於地下段結構受用地取得因素之限制，因此採用版較牆厚之版牆結構。

##### 1.1.3.2 潛盾隧道

(1)載重條件

##### J. 地震載重

地震作用在隧道橫斷面時，環片將隨地盤位移而產生相同之位移，因此在橫斷面上，襯砌環片及開孔週邊產生之 racking strain 即為環片之應變。



(2)隧道襯砌環片應變之檢核

A.隧道環片應變之檢核

B.地震引致之應變 (縱向)

地震引致隧道縱向暫時的降伏應變。

C.地震引致之扭曲應變

地震時剪力波作用在襯砌上的扭力造成襯砌垂直隧道軸向之平面的扭曲變形所造成之應變。

D.開挖及地震扭曲引致之應變

隧道開挖荷重與地震引致之扭曲所造成之聯合應變。

E.土層鬆動及地震扭曲引致之應變

隧道上方土壤鬆弛地區所造成之荷重與地震引致之扭曲所造成之聯合應變。

F.隧道非正圓之容許應變及地震引致之扭曲應變

隧道因環片安裝失圓與地震引致扭曲造成之聯合應變。

此外，根據陳正勳(2008)整理之隧道受震之設計規範，涵蓋了我國捷運系統土木工程手冊、高鐵設計規範及美國、日本與中國大陸等相關規範，約略指出各規範的適用條件，詳如表3.4-1亦可納入參考。

表3.4-1 考慮隧道受震之設計規範(整理自陳正勳等人, 2008)

| 規 範                             | 適用條件                                                                               |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 台北捷運系統工程土木工程設計手冊(1998)          | 主要使用於土層                                                                            |
| 高雄捷運系統紅橘線路網建設案土建及車站工程設計規範(2002) | 主要使用於土層                                                                            |
| 美國南加州捷運地下結構耐震設計準則(1984)         | 主要使用於土層                                                                            |
| 台灣高鐵設計規範                        | 覆蓋深度 $\leq 15\text{m}$                                                             |
| 日本隧道工程標準規範及解說(山岳工程篇)(1996)      | 1、覆蓋深、地盤良好等不考慮。<br>2、施工中發生崩塌、膨脹壓、湧水斷層破碎帶、都市隧道或淺覆蓋土砂層隧道、交叉段、矢板工法施工之隧道(襯砌背面有空洞或地盤劣化) |
| 日本鐵道構造物等設計標準·同解說(1997)          | 斷面極端變化、地質變化極大處、覆蓋變化極大處、線形曲率變化極大處、軟弱地盤、液化(土層)                                       |
| 山岳隧道工程技術準則及解說(工程會,2003)         | 洞門                                                                                 |
| 公路隧道設計規範(交通部,2003)              | 一般岩盤不考量，惟必要時得視地形、地質及覆蓋深度等條件考量                                                      |
| 大陸川藏公路隧道抗震設計(2002)              | 洞門、淺覆蓋及偏壓段、活動斷層                                                                    |
| 大陸鐵路工程設計技術手冊—隧道(1995)           | 洞門、洞口、淺覆蓋及偏壓段(設計震度7(0.1g)、8(0.2g)、9(0.4g)時考量)                                      |

### (3) 震波作用下之隧道變形行為

對地上結構物而言，在地震力作用下，將形成不利於結構物的慣性作用力；相較之下，因地下結構物位處地層且受到周圍大地材料的束制，使得地下結構物的慣性效應較不顯著；然而，造成地下結構物受力與變形主要是來自震時地層的擠壓與變形。隨著應力波傳方向與隧道長軸方向之相對關係，隧道的受力與變形也會有所不同。Owen and Scholl (1981)將隧道的受力與變形特性在地震波不同入射角度的可能情況整理如圖3.4-1。圖3.4-1(a)為壓力波(P波)行進方向平行於隧道長軸方向，此時，隧道軸向會反覆出現壓縮與拉張兩種受力反應；圖3.4-1(b)為壓力波(P波)行進方向與隧道軸向垂直情況下的隧道變形與受力行為，在這種情況下，隧道的橫向斷面會受到地震波的作用而往一方壓縮變形；圖3.4-1(c)為沿著隧道軸向作用的剪力波(S波)所造成的隧道變形與受力，此時隧道軸向彎曲變形的關係，隧道橫向斷面會有一側受壓、另一側受拉的特性；圖3.4-1(d)為地震波作用在隧道斜交方向下的隧道變形與受力；圖3.4-1(e)(f)則分別為剪力波(S波)垂直入射於圓形或方形隧道軸向時，隧道的變形行為。

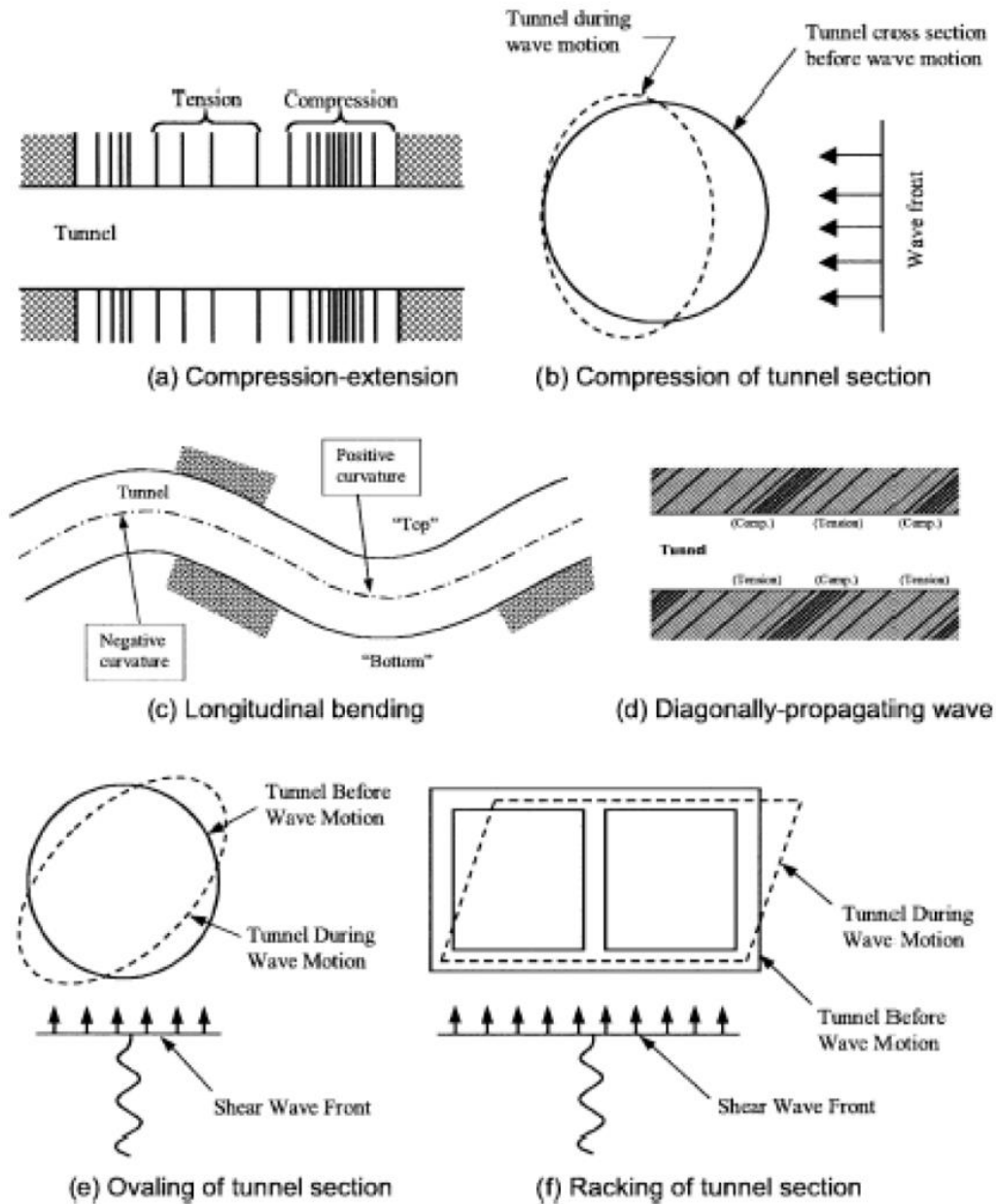


圖3.4-1 震波作用下之隧道變形行為(a)縱向變形(b)斷面壓縮變形(c)軸向彎矩變形(d)斜波傳播下的變形(e) 橢圓狀變形(f)Ranking角度之變形(Owen and Scholl, 1981)

#### (4) 既有地下結構物的受震反應分析

目前地下結構物的受震反應分析法，根據盧志杰(2009)的歸納整理，大致區分為動態地震土壓力法(Dynamic earthquake pressure method)、擬靜態強制變形法、以及動態歷時分析法三種，本報告依其研究結果摘述整理如后。

##### A. 動態地震土壓力法

係以力法(force method)為基礎發展出來的隧道受震分析法。此法源自於

Mononobe (1924)針對擋土牆所提出之動態主動土壓力理論，詳圖3.4-2，是假設在地震作用時，擋土牆後方的滑動土楔在地震慣性力的作用下，產生主動土楔破壞的情況。據此，可推導出滑動土楔作用在擋土牆上的主動推力( $P_{AE}$ )。

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_{AE} (1 - k_v)$$

$k_v$ ：垂直地震加速度係數

$K_{AE}$ ：動態主動土壓係數

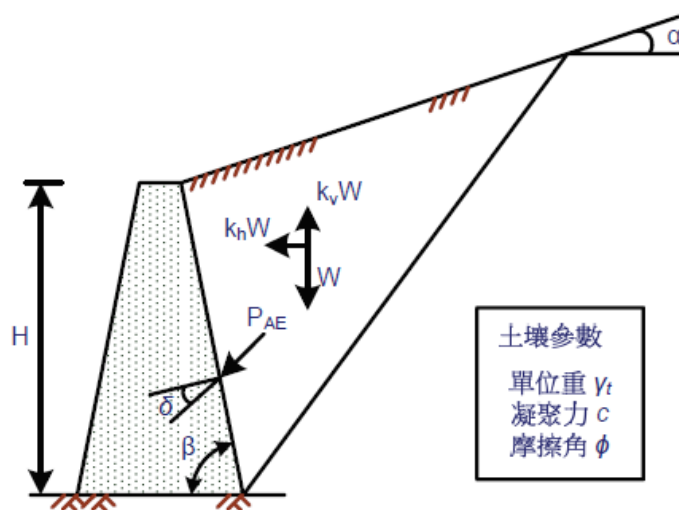


圖3.4-2 土壤動態主動推力之相關符號說明(盧志杰，2009)

當動態地震土壓力法應用於地下結構物受震安全分析時，其概念如圖3.4-3所示。以矩形隧道受震分析為例，其所承受的側向土壓力係依照Mononobe所推導之動態土壓力理論計算，垂直向的受力則是由隧道承受的覆土應力乘以 $(1 \pm k_v)$ 而得。

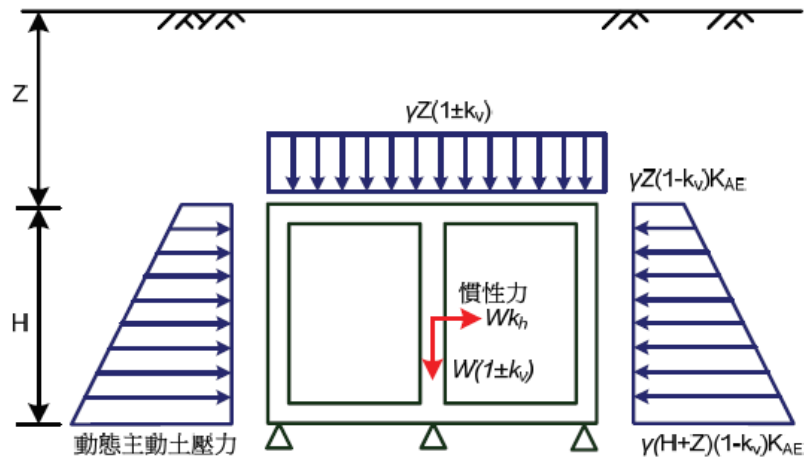


圖3.4-3 動態地震土壓力法之分析概念示意圖(盧志杰，2009)

### B. 強制變形法 (Cross section racking deformation method, CSRD)

地震過程中，結構物與其周圍土壤的相對運動將影響地下結構物的受力行為，當地下結構和其周圍土層同步運動時，並不會造成結構物額外的受力；當運動不同步時，結構物與土層之間將產生相對位移，並造成結構物額外受力。

強制變形法的主要概念如圖3.4-4所示，此法係假設地下結構與自由場土層的變形一致，忽略地下結構物自身的勁度並簡化了土壤-結構互制作用，此方法只著重在地震時自由場土層的變形行為。求得地盤變位後，設計工程師即直接將地盤變位輸入於結構物，進行結構分析以檢核地下結構物的安全性。

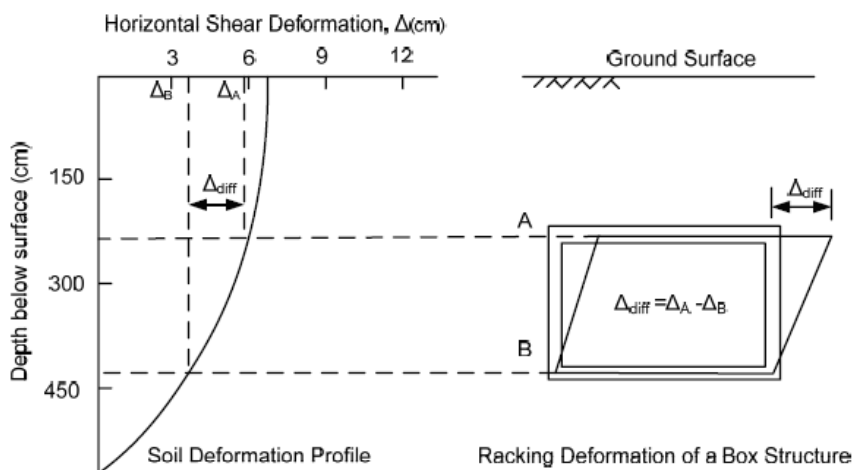


圖3.4-4 強制變形法主要分析概念(盧志杰(2009)轉繪自 St. John and Zahrah, 1987)

在地盤變位的解析解部分，Newmark (1968)和Kuesel (1969)基於彈性波傳理論，及考量均質、等向且彈性的自由場土層前提下，推導出隧道在簡諧振動下的軸向應變與曲率，再將波傳方向的變形投射到隧道方向即可求得隧道沿線的變形特性，詳如圖3.4-5。此外，當震波入射角與隧道軸向在交角 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 與 $90^\circ$ 條件下會出現臨界狀態。

St. John and Zahrah (1987)以Newmark (1968)進一步求出自由場土層在體波(P-wave、S-wave)以及表面波(Rayleigh wave)作用下，及均質、等向且彈性的介質條件，各個方向的應變與曲率，若將波傳方向的變形投射到隧道方向，即可求得隧道沿線的變形特性，包括軸向應變、正向應變、剪應變與曲率等，詳如表3.4-2。

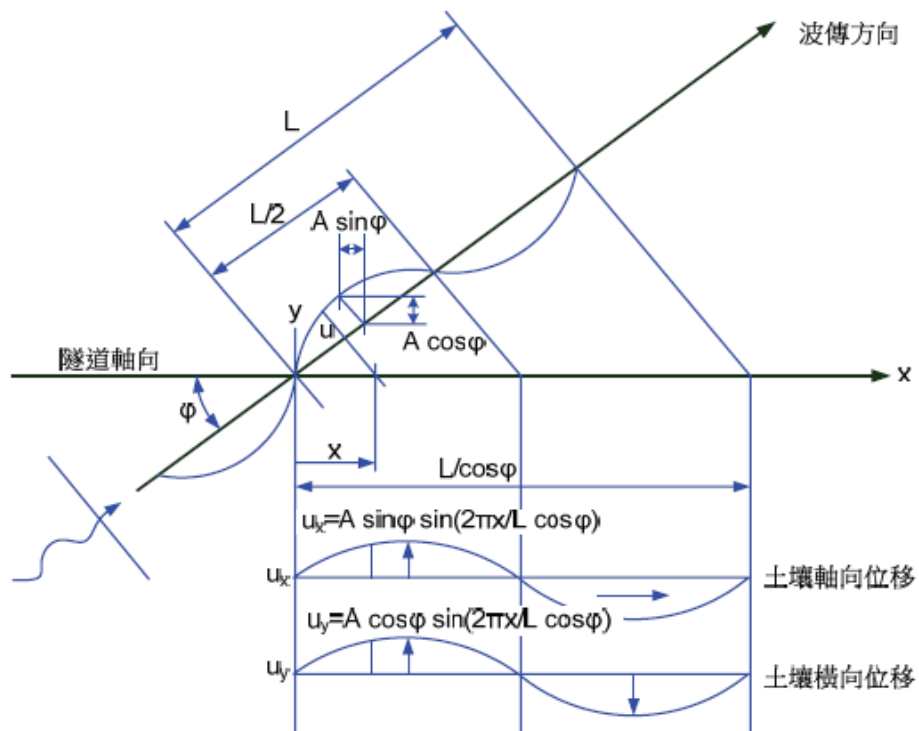


圖3.4-5 簡諧振動下所造成隧道之變形特性(盧志杰(2009)修改自Wang, 1993)



表3.4-2 不同地震波所引致之隧道曲率與應變 (盧志杰(2009)修改自 St. John and Zahrah, 1987)

| 地震波                     | 軸向應變                                                            | 正向應變                                                             | 剪應變                                                       | 曲率                                                                           |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| P波                      | $\varepsilon_l = \frac{V_P}{C_P} \cos^2 \varphi$                | $\varepsilon_n = \frac{V_P}{C_P} \sin^2 \varphi$                 | $\gamma = \frac{V_P}{C_P} \sin \varphi \cos \varphi$      | $\frac{1}{\rho} = \frac{a_P}{C_P^2} \sin \varphi \cos^2 \varphi$             |
|                         | $\varepsilon_{lm} = \frac{V_P}{C_P}$ for $\varphi = 0^\circ$    | $\varepsilon_{nm} = \frac{V_P}{C_P}$ for $\varphi = 90^\circ$    | $\gamma_m = \frac{V_P}{2C_P}$ for $\varphi = 45^\circ$    | $\frac{1}{\rho_m} = 0.385 \frac{a_P}{C_P^2}$ for $\varphi = 35^\circ 16'$    |
| S波                      | $\varepsilon_l = \frac{V_S}{C_S} \sin \varphi \cos \varphi$     | $\varepsilon_n = \frac{V_S}{C_S} \sin \varphi \cos \varphi$      | $\gamma = \frac{V_S}{C_S} \cos^2 \varphi$                 | $\frac{1}{\rho} = \frac{a_S}{C_S^2} \cos^3 \varphi$                          |
|                         | $\varepsilon_{lm} = \frac{V_S}{2C_S}$ for $\varphi = 45^\circ$  | $\varepsilon_{nm} = \frac{V_S}{2C_S}$ for $\varphi = 45^\circ$   | $\gamma_m = \frac{V_S}{C_S}$ for $\varphi = 0^\circ$      | $\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_S}{C_S^2}$ for $\varphi = 0^\circ$               |
| Rayleigh波               |                                                                 |                                                                  |                                                           |                                                                              |
| Compressional component | $\varepsilon_l = \frac{V_{RP}}{C_R} \cos^2 \varphi$             | $\varepsilon_n = \frac{V_{RP}}{C_R} \sin^2 \varphi$              | $\gamma = \frac{V_{RP}}{C_R} \sin \varphi \cos \varphi$   | $\frac{1}{\rho} = \frac{a_{RP}}{C_R^2} \sin \varphi \cos^2 \varphi$          |
|                         | $\varepsilon_{lm} = \frac{V_{RP}}{C_R}$ for $\varphi = 0^\circ$ | $\varepsilon_{nm} = \frac{V_{RP}}{C_R}$ for $\varphi = 90^\circ$ | $\gamma_m = \frac{V_{RP}}{2C_R}$ for $\varphi = 45^\circ$ | $\frac{1}{\rho_m} = 0.385 \frac{a_{RP}}{C_R^2}$ for $\varphi = 35^\circ 16'$ |
| Shear component         |                                                                 | $\varepsilon_n = \frac{V_{RS}}{C_R} \sin \varphi$                | $\gamma = \frac{V_{RS}}{C_R} \cos \varphi$                | $\frac{1}{\rho} = \frac{a_{RS}}{C_R^2} \cos^2 \varphi$                       |
|                         |                                                                 | $\varepsilon_{nm} = \frac{V_{RS}}{C_R}$ for $\varphi = 90^\circ$ | $\gamma_m = \frac{V_{RS}}{C_R}$ for $\varphi = 0^\circ$   | $\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_{RS}}{C_R^2}$ for $\varphi = 0^\circ$            |



### C. 簡化構架分析模式 (Simplified frame analysis model)

為改善強制變形法對土壤-結構互制作用的過於簡化，遂有簡化構架分析模式的提出。由於隧道是個長條狀的地下結構物，故隧道的變形與受力通常被分成軸向與橫向分開討論。隧道軸向受力情況如圖3.4-6，而橫向受力則如圖3.4-7所示。

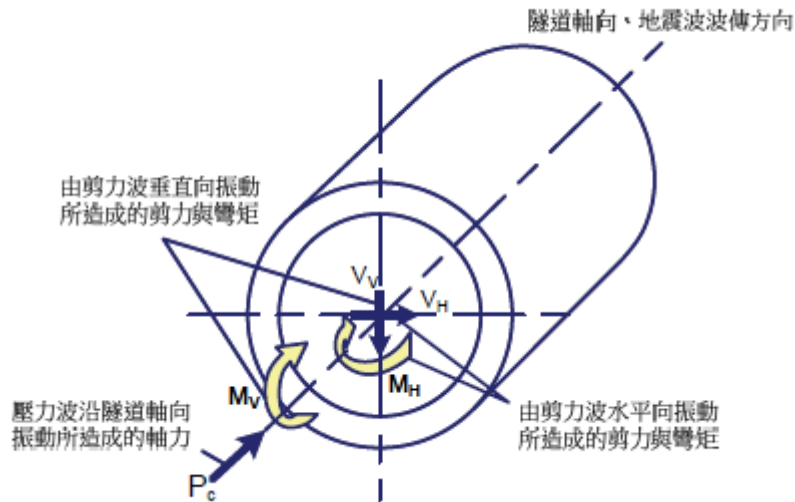


圖3.4-6 地震波水平入射至隧道軸向所導致之斷面受力(盧志杰(2009)修改自 Hashash et al., 2001)

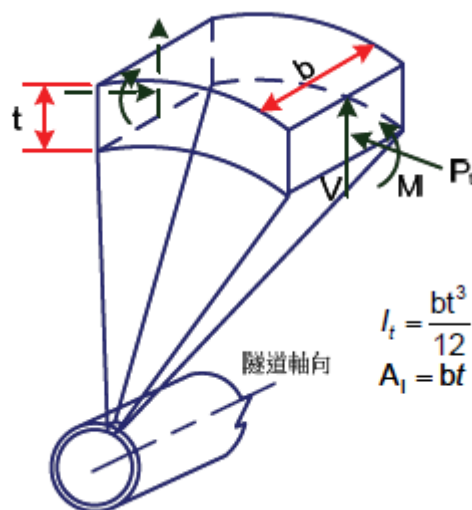


圖3.4-7 地震波垂直入射至隧道軸向所導致之斷面受力(盧志杰(2009)修改自 Hashash et al., 2001)

#### D. 修正強制變形法 (Modified cross section racking deformation method, MCSRD)

考量地震作用下之隧道與周圍土層/岩盤的互制作用是相當複雜的，影響的因素包括地盤震動的強度、隧道本身的幾何形狀、支撐結構的勁度、地盤的非均質與非線性行為，致推導隧道受震的解析解實具相當的難度，也限制了強制變形法與簡化構架分析模式的應用性。然而，隨著計算機運算能力的提升與數值分析軟體的發展愈趨成熟，實可透過計算機進行修正強制變形分析法的分析計算，其概念詳如圖3.4-8。圖中直接於數值網格邊界施加設計地震動是這個方法最大的特色。地震動由邊界輸入後，再經由隧道周圍土壤介質的數值網格，逐漸傳遞至整個數值模型，包括位於網格中央的隧道。這樣的處理方式簡單、直接改善了強制變形法不合理地將自由場土壤變形強加於地下結構物的做法。

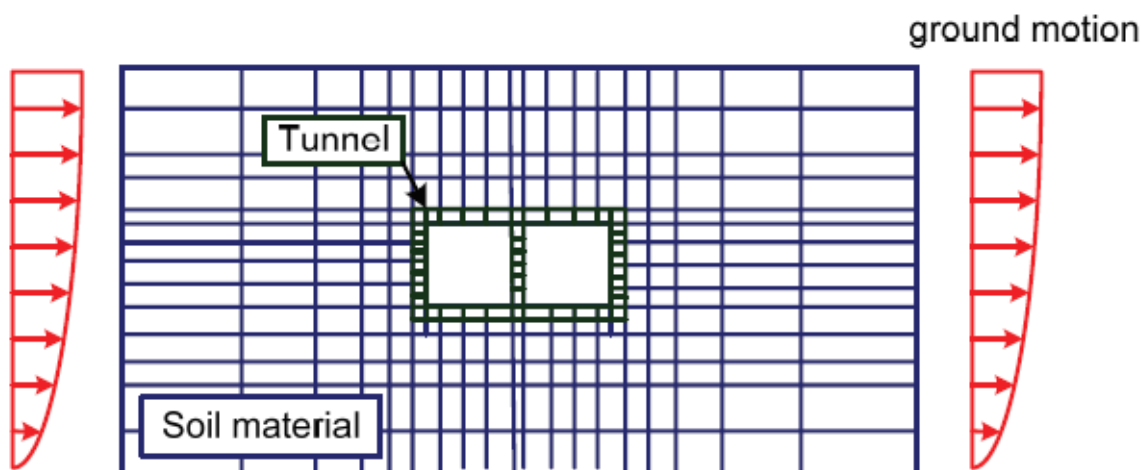


圖 3-13 修正強制變形法示意圖

圖3.4-8 修正強制變形法示意圖(盧志杰，2009)

根據(盧志杰，2009)的整理與研析，提出了修正強制變形法在隧道受震反應分析上仍具有下列缺點：

- 修正強制變形法是一種擬靜態(pseudo-static)分析法，意即未能將隧道與其周圍土壤的慣性作用力納入考慮。雖然在大多數的情況下，慣性力不是控制隧道安全性的主要因素(Okamoto et al., 1973)，因此包括其他擬靜態分析

法如強制變形法與簡化斷面變形分析法等，均不會因為沒有考慮慣性作用力而嚴重影響到分析結果。但是當隧道接近表土層且鄰近土壤又較為軟弱時，周圍土壤對於隧道的圍束效果相當有限，此時地下結構物的力學行為將接近地表結構，此種情況慣性作用力將有可能主導隧道的耐震安全性，換句話說，在這種情況下，所有的擬靜態分析法的分析結果將會有高估隧道的耐震能力的疑慮(因為沒有妥善考量到地震時的慣性作用力)。

- 擬靜態分析法也無法處理地震過程中發生土壤液化的現象。因為這種情況會瞬間使土壤的應力-應變行為變成高度的非線性，造成土壤-結構互制作用在地震過程中隨著時間不斷地改變，使整個隧道受震反應無法脫離「時間」因素的考量。因此對於位於高液化潛能地層的隧道，仍建議採用動態歷時分析法對隧道的耐震性能作全面性地探討。

#### E. 動態歷時分析法

動態歷時分析法是對整個數值模型內各個離散點的動力平衡方程式做時間域直接積分的工作，能夠考慮整個數值模型隨時間變化的地震反應，因此最能完善模擬隧道在地震作用下實際反應。動態歷時分析法可分成(i)動態總應力歷時分析與(ii)動態有效應力歷時分析兩類：

- 動態總應力歷時分析

分析模型示意圖如圖3.4-9，在數值模型的左、右邊界設定吸能邊界，地震歷時記錄自模型底部輸入，所形成的地震波經過土壤或岩體介質由下往上傳遞，而埋置於地中的隧道與其周圍地層之互制行為則由數值程式自動考慮。此分析模式可完整考慮地震過程之荷載歷時、土壤或岩體之遲滯阻尼現象與非線性行為、地層與結構在地震過程的慣性作用以及互制行為。

- 動態有效應力歷時分析

若隧道位於土壤地層，地震過程將造成土壤內孔隙水壓的激發與消散，透過有效應力分析則可以模擬飽和土壤在地震過程中水壓的變化。這樣的考量對於位在地震帶上沖積土層中的隧道尤其重要，因為其震時超額孔隙水壓的激發行為非常明顯，容易造成土壤液化現象，使整個土壤-結構互制作用瞬間發生劇烈的改變。

目前進行隧道耐震性能評估時，需要考慮動態歷時分析的情況大體可以歸納為兩類，第一為遇到擬靜態分析無法處理的情況，第二為驗證擬靜態分析的正確性(盧志杰，2009)。針對前者，當隧道位於淺覆蓋且周圍土壤較為鬆軟的情況下，隧道的耐震性能可能由震時慣性作用力主導，因此有必要進行動態歷時分析。若隧道周圍土壤無液化之虞，則只需要進行動態總應力歷時分析，即可掌握隧道承受地震動反覆荷載的影響；但若隧道周圍土壤可能在地震過程中發生液化現象，則需進行較為複雜的動態有效應力歷時分析，以考慮地震作用下土壤與隧道結構物的慣性作用力，並反應液化土壤應力-應變關係在受震過程劇烈改變的行為。擬靜態分析法因為方便快捷，可以在短時間內計算出的隧道受震反應，因此在工程實務的運用上相當普遍。但是擬靜態分析法將動態問題以靜力分析方法模擬假設，若與實際差異過大時，將出現分析結果是否合理的疑慮，此時有必要執行動態歷時分析以驗證擬靜態分析結果的正確性(盧志杰，2009)。

此外，進行隧道動態歷時分析時，除須考量計算機運算效能外，尚須考量地震歷時資料的選取、材料組成模式、隧道襯砌的模擬、數值模型是否適切(包括邊界距離、邊界條件、網格尺寸與初始應力等)等。

表3.4-3為前述各種隧道受震分析法之比較，據此整理如下列幾點，作為後續有關處置坑道考量地震力作用之結構穩定性分析之參考：

- 除動態土壓力法是以土壓力作為隧道受力之考量外，其餘的分析方法係以變位法為出發點進行隧道受震分析。
- 強制變位法與簡化架構分析模式，是考量材料在等向性、均質與彈性條件下所發展的，僅適用在中、小地震條件且地層位移相對較小之條件；當隧道所處地層之材料組成複雜，甚至是需要考量節理與斷層的影響，及較大的地震力作用條件下，地層與隧道結構的力學行為可能進入非線性狀態，則強制變位法與簡化架構分析模式將不適用。
- 修正強制變形法與動態歷時分析法，主要是藉由數值工具進行隧道受震分析，惟修正強制變形法屬擬靜態分析法，並未考慮慣性力的影響。相較之下，動態歷時分析法考慮了地震過程所有因素的影響，但此點也造成整個分析過程需要耗費相當大的運算資源與時間，對於隧道受震分析必須考量土壤液化問題，或

洞口段或是淺覆蓋段須考量慣性力的影響時，採動態歷時分析法仍有其必要性。

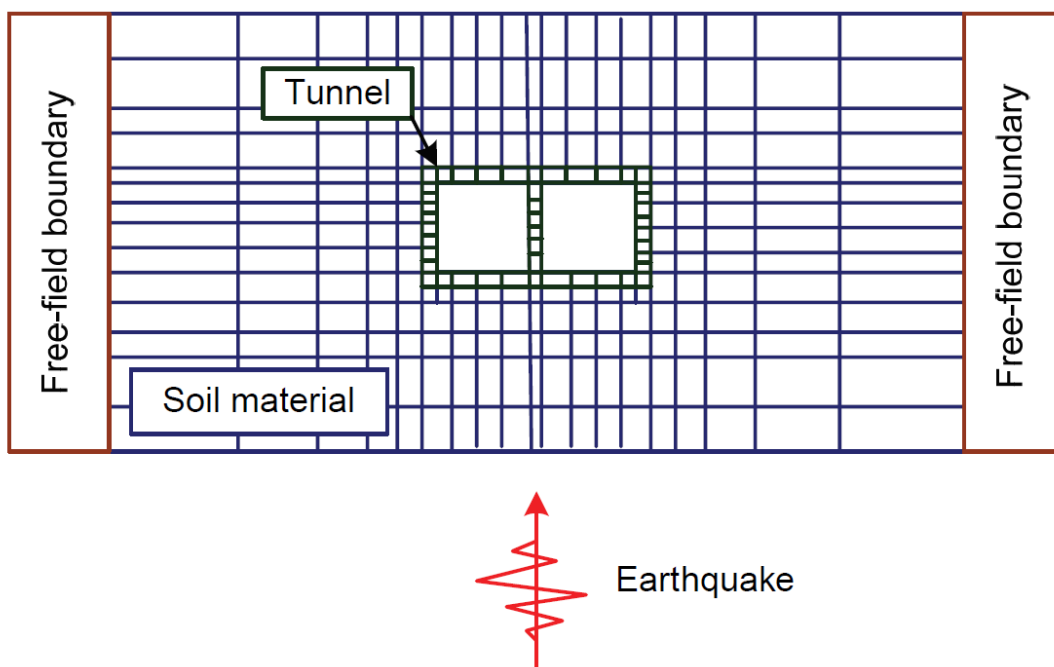


圖 3.4-9 動態有限元素、有限差分法示意圖(盧志杰，2009)

表3.4-3 各種隧道耐震分析法之比較 (盧志杰，2009)

| 項目               | 方法                |                   |                     |                 |                   |
|------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
|                  | 動態地震土壓力法          | 強制變形法             | 簡化構架分析模式            | 修正強制變形法         | 動態歷時分析法           |
| 理論背景             | 庫侖主動土壓理論          | 彈性力學              | 彈性力學                | 波傳理論與靜力學        | 動力學               |
| 分析工具             | 土壓力公式計算           | 解析解公式計算           | 解析解公式計算與經驗圖表        | 有限元素、有限差分數值程式   | 有限元素、有限差分數值程式     |
| 土壤材料特性           | 彈塑性材料             | 彈性、均質、等向          | 彈性、均質、等向            | 可考慮各種材料特性       | 可考慮各種材料特性         |
| 慣性力              | 簡單考慮              | 沒有考慮              | 沒有考慮                | 沒有考慮            | 有考慮               |
| 土壤結構互制           | 沒有考慮              | 沒有考慮              | 簡單考慮                | 有考慮             | 有考慮               |
| 優點               | 公式簡單              | 公式簡單              | 公式相對簡單且可適度考慮 SSI    | 可大致反應隧道受震行為     | 可完整考慮地震過程之隧道反應    |
| 缺點               | 基本假設與真實情況差異很大     | 基本假設與真實情況差異很大     | 基本假設與真實情況有所差異       | 需執行數值分析程式       | 數值計算時間過長且理論背景複雜   |
| 特色               | 以動態庫侖主動土壓力理論估算地震力 | 隧道與自由場土層變形一致      | 改良強制變形法無法考量 SSI 之問題 | 施加自由場剪變形於數值網格邊界 | 完全考慮各項影響隧道受震反應之因素 |
| 適用性 <sup>a</sup> | 適用於淺埋矩形隧道         | 適用於土壤與結構勁度相近且均質土層 | 適用於均質土層             | 適用於大多數情況        | 適用於所有情況           |

<sup>a</sup> 所有擬靜態分析法均無法考慮震時土壤發生破壞如土壤液化，或耐震性能由慣性力控制之情況



表3.4-1 山岳與土層隧道受震條件比較(整理自陳正勳等人, 2008)

| 項目         | 土層(潛盾)隧道                                                 | 山岳隧道                                                          |
|------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 受震深度       | 較淺                                                       | 除洞口與淺覆蓋段外，一般較深                                                |
| 隧道位置承受之加速度 | 較大                                                       | 較小(深層隧道而言)                                                    |
| 震波作用種類     | 依耐震設計規範，橫斷面以S波垂直上傳作用為主，可能受 Rayleigh波作用                   | 較深層隧道且距震源較近者，除S波外，亦可能受P波作用<br>淺覆蓋隧道受S波或受 Rayleigh波作用          |
| 地質條件       | 土壤                                                       | 岩層，可能含節理                                                      |
| 地盤震波波速     | 相對較低                                                     | 一般較高，惟破碎帶者與土層相近                                               |
| 地質弱帶影響     | 無                                                        | 有                                                             |
| 地盤與隧道互制    | 土壤勁度較襯砌小，需考量地盤與隧道互制行為                                    | 岩層勁度較襯砌大時，襯砌行為與自由域分析法所得者相接近                                   |
| 放大效應       | 有                                                        | 不明顯                                                           |
| 地形效應       | 一般地形平緩，無此效益                                              | 可能有                                                           |
| 隧道斷面形狀     | 圓形斷面(潛盾隧道)為主                                             | 多圓心型、馬蹄形(新奧工法)、圓形(TBM)                                        |
| 隧道尺寸       | 潛盾隧道直徑約為 6 m，地下管道隧道約為 2~4 m                              | 一般單軌或單孔隧道約為 6 m以下，雙軌或雙孔隧道約為 8~12 m，地下管道隧道約為 2~4 m             |
| 支撐         | 環片(有配筋)，一般潛盾隧道環片厚 = 0.25 m                               | 噴凝土+鋼線網+鋼支保+岩栓(依岩體類別選擇尺寸)+混凝土襯砌(一般約 0.3~0.4 m)                |
| 輔助工法       | 背填灌漿                                                     | 灌漿改良、遠排近灌                                                     |
| 襯砌勁度或撓度    | 混凝土( $f_c' = 420$ 或 $450$ kg/cm <sup>2</sup> ) + 配筋，勁度較高 | 混凝土( $f_c' = 245$ 或 $280$ kg/cm <sup>2</sup> ) + 配筋(視需要)，勁度較低 |
| 受震破壞案例     | 如日本阪神地震時鳴尾御影汙水隧道                                         | 日本、美國、土耳其、台灣等曾發生多起案例                                          |

|      |             |                                                                    |
|------|-------------|--------------------------------------------------------------------|
| 耐震範圍 | 有(如台北與高雄捷運) | 國內山岳隧道耐震規範甚少，且多為定性描述                                               |
| 特殊考量 | 液化          | 1.特殊地質路段(如斷層破碎帶、發生湧水、發生膨脹等)；2.襯砌背後空洞；3.地質變化極大處；4.覆蓋變化極大處；5.斷面變化極大處 |



## 第四章、處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性

本子計畫於106年執行之「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究」(楊長義與李宏輝, 2017), 提出坑道結構穩定性之影響因素區分外力因素、環境因素與非力學因素。在外力因素部分, 包括地震作用、邊坡作用與開挖擾動作用, 其中, 地震作用已整理於2.4節, 針對邊坡作用與開挖擾動作用部分, 則整理於本章4.1節。此外, 根據前述第三章之「國內一般隧道設計方法與施工規範」整理之施工規範、設計準則及相關技術文件, 及「安全分析報告審查導則」各章節與上述之施工規範等文獻資料有關者, 列表整理其間關聯, 以供發展處置坑道審驗技術之參考。

### 4.1 外力因素

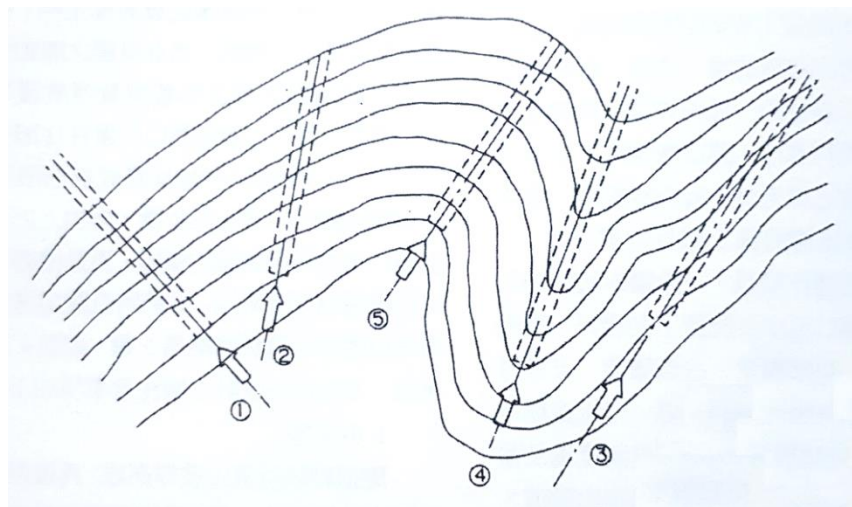
#### 4.1.1 邊坡作用

隧道緊靠山坡面者, 應評估邊坡災害之可能性, 及偏壓之影響。對一般隧道而言, 大多是在洞口段容易受到邊坡作用之影響。洞口是坑道的起點與終點, 為利隧道主體工程順利進行, 必須確保洞口邊坡穩定。為達此目的, 隧道協會出版之「山岳隧道工程設計與實例手冊」(1999)指出, 需妥善進行洞口佈置、進洞位置選擇及洞口邊坡處理等工作。在洞口佈置方面須能提供:(1)足夠的施工機具放置空間;(2)提供流暢的運作動線。機具與材料的配置應符合最佳動線為原則, 尤其是使用頻率高且會左右洞內作業進度的機具, 應配置於最優先位置。

隧道進洞位置的選擇原則, 應充分掌握洞口附近地形、地質、地下(表)水及日出日落等自然條件, 以及周邊環境之社會條件, 檢討洞口完成後之坡面穩定性、引發自然災害之可能性、周邊景觀之調和性、鄰近結構物之相互影響與營運維護管理之需要。由於隧道洞口位置往往因受到前後銜接路線的平面及縱坡線形限制, 而無法避開不適宜的位置, 因此隧道進洞方向與地形的關係在設計上應注意限制條件, 如表4.1-1與圖4.1-1所示。

表4.1-1 隧道進洞方向與地形的關係注意事項(整理自山岳隧道工程設計及實例手冊, 1999)

| 項次 | 進洞方式與地形關係 | 注意事項                                                                                |
|----|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 直交型       | 隧道軸線垂直山坡等高線，為最理想的洞口地形條件，洞口段通常施工長度較短。若洞口位在陡峭山坡腹部，應防範落石；若洞口落在半山腰施工時，應考慮施工道路與銜接路線的關聯性。 |
| 2  | 斜交型       | 隧道軸線與邊坡等高線斜交切入山坡，洞口附近橫斷面地形為傾斜狀，若地層傾向與坡面在同一方向，預期可能會有偏壓發生。                            |
| 3  | 平行型       | 隧道以小角度斜交切入山坡，並大約與山坡等高線平行，洞口段的長度最長，需要注意偏壓問題及邊坡的安定性，此種型態的問題最多，須儘量避免採用。                |
| 4  | 山脊部進入型    | 此種山脊地形可分成兩種，一種是風化層及崖錐堆積厚度很薄者，洞口開挖可很快進入岩盤。另一種為堆積層很厚，整個地形呈凸形狀，此種狀態開挖不能太大，否則地層不安定。     |
| 5  | 谷部進入型     | 此地形地質大都是未固結的崖錐或崩積層，堆積層且地下水豐富，洞口坡面安定度低，須充分檢討地下湧水及進洞方法。此種型態的洞口附近容易發生土石流等自然災害。         |



- ① 直交型
- ② 斜交型
- ③ 平行型
- ④ 山脊部進入型
- ⑤ 谷部進入型

---

圖4.1-1 各種隧道進洞方向與地形的關係(整理自山岳隧道工程設計及實例手冊,1999)

在洞口邊坡處理方面，考量該處邊坡已被風化層或崖錐堆積層所覆蓋，而隧道欲開挖至可形成自立岩拱之前，以傳統工法而言，須將這些覆蓋層予以挖除，但可能會引發邊坡穩定問題，因此應先加強坡面之穩定措施，配合開挖後立即支撐，避免引起崩塌。

於自然坡面進行洞口開挖時，應考慮地盤特性及隧道軸線與地形成何種角度進入地盤內，同時應將隧道洞口段開挖方式一併納入邊坡穩定分析之架構內，再根據分析所需穩定力量選用符合施工性、經濟性與安全性的穩定措施，如表4.1-2所示。

表4.1-2 洞口邊坡穩定措施(整理自山岳隧道工程設計及實例手冊,1999)

| 項次 | 穩定措施              | 說明                                                                                                                                         |
|----|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 台階坡面混凝土           | 坡面在挖掘之後於其上噴佈噴凝土可有效防止地表鬆動，保持坡面安定的效果。                                                                                                        |
| 2  | 台階坡面岩栓            | 坡面岩栓大多與噴凝土並用於節理多或風化的地盤。岩栓大多採用隧道常用的型式。                                                                                                      |
| 3  | 側抱式擋土牆            | 當隧道軸線與地形等高線成斜交的洞口段大多採用側抱式擋土牆，其對直接支持隧道以及與回填土方混合作用，以抵抗因地形差異所發生的偏土壓。                                                                          |
| 4  | 預力鋼腱岩錨或地錨         | 可將岩(土)體弱(界)面貫穿，並施加主動正向力，增加弱(界)面之抗剪強度。                                                                                                      |
| 5  | 預鑄鋼筋混凝土格樑<br>植生護坡 | 對於礫石層、砂土層及泥岩層坡面，若無邊坡穩定問題時，可於坡面上施作預鑄鋼筋混凝土格樑植生護坡。其施工方便快捷，除可於開挖後立即施作以維持坡面穩定，亦可以植生草帶鋪植達成綠化景觀目的。                                                |
| 6  | 擋土排樁              | 對於未固結且不安定之地盤，其邊坡可能發生持續蠕動現象，若隧道軸線對地形等高線呈非常小的角度斜交時，洞口段常因偏土壓的作用而使得隧道的支保工變形，甚至引發隧道頂拱下陷。為避免上述問題，可於開挖前，在山側裝設一系列鑽掘排樁，透過被動土壓力與回填土的重力壓坡效應，防止邊坡滑動破壞。 |

#### 4.1.2 開挖擾動

王泰典等人(2013)於「坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術服務」研究計畫報告中指出，坑道開挖引致開挖擾動帶，將局部改變坑道周圍場址特性，並列舉國外學者Zangerl等人(2008)提出的瑞士Gotthard公路隧道案例，探討坑道開挖引致坑道周圍圍岩應力重新分布，進而影響周圍裂隙岩體滲流行為及對環境的影響；而Strozzi等人(2011)藉合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)獲得大範圍地形變化，探討坑道施工引致地表沉陷的因子與機制。研究結果顯示，當坑道於變質岩類開始施工時，鄰近水壓井出現水壓大幅洩降的現象，此大幅洩降的位置與地表沉陷量最大處相近，推論坑道施工引致的開挖擾動，會影響坑道周圍圍岩力學及水力學的特性，進而造成區域地表下陷，對坑道設施的長期穩定性具一定程度的影響。

我國隧道協會出版之「山岳隧道工程設計與實例手冊」(1999)，曾就我國現行隧道開挖方式、可能遭遇問題與注意事項等作一系列的敘述，可作為審驗重點參考應用。隧道傳統開挖方法可分為鑽炸法、旋頭掘掘機法及隧道鑽掘機法。自民國70年代以後，以新奧工法(NATM, New Austrian Tunneling Method)為主流，其開挖工法分為3大類：(1)全斷面開挖工法(含TBM工法)；(2)台階開挖工法；(3)側壁導坑工法。NATM的基本原則中提到「隧道開挖會影響應力再分配，以全斷面開挖最為有利；若採斷面分割開挖，就會一直重演應力再分配，損害岩盤，對開挖面較不利」，因此隧道是否採分割開挖之因素有三：(1)開挖面之自立性；(2)隧道覆蓋層厚度；(3)隧道上部之荷重狀態，應就上述因素詳加檢討後再作分割開挖之決定。

全斷面開挖一般適用於小斷面及岩盤比較安定之中斷面隧道，或岩盤極安定之大斷面隧道，其選擇之機械設備要考慮也能轉用台階工法。全斷面開挖可以採用鑽炸法及TBM進行，而TBM應用上又較優於傳統鑽炸法，具有開挖速度快、襯砌裝設容易且需求小、勞工人力少、環境衝擊輕及開挖品質易控制等優點，惟應注意TBM初期投資成本高、機具自採購起迄組裝時間長、易受惡劣地質影響工期與成本、隧道走向與斷面尺寸變更彈性小等問題。

在台階式開挖方面，其施作前對平台長度需考慮2項因素：

- (1) 依設計要求一次襯砌斷面其環狀閉合時間之規定來訂定平台長度。
- (2) 依上半斷面開挖作業方便而定。



台階開挖就經濟性觀點而言，在岩盤良好時，以上半斷面開挖作業較方便因素來決定平台長度；岩盤軟弱時，則依設計規定之環狀閉合時間與上半斷面開挖作業較方便等兩項因素合併來判斷以決定平台長度。台階開挖工法之選用條件與特徵及注意事項如表4.1-3及圖4.1-2所示。

表4.1-3 台階開挖工法之開挖方法適用條件特徵及注意事項表(整理自山岳隧道工程設計及實例手冊,1999)

| 名稱       | 平台長度   | 適用條件                                                                          | 特徵及注意事項                                                        |
|----------|--------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| a.長台階開挖  | 50m 以上 | 若岩盤狀況為採用全斷面開挖工法時，其開挖面岩盤不能自立，但拱部岩盤堅硬不必施噴噴凝土時，適合採用本方法。                          | 1.上、下半斷面各 100~150 公尺交替開挖。<br>2.上、下半斷面同時開挖。<br>(可縮短工期但須增加機械設備)。 |
| b.短台階開挖  | 20~50m | 土砂地層、膨脹性地層或軟岩開挖面等普遍適合採本方法。                                                    | 較容易應付開挖面之變化，但一般均採上、下半斷面交互作業，作業區域接近，容易互相干擾。                     |
| c.極短台階開挖 | 3~5m   | 膨脹性地層、土砂地層開挖面需早日作環狀閉合、都市隧道有沉陷狀況需適時控制、大斷面開挖面需維持開挖穩定或以全斷面工法為主，但因地質變化需使用較小斷面開挖時。 | 開挖面安定，一般的中小斷面隧道適合採用。                                           |
| d.多台階開挖  | 任意     | 短台階開挖但上半斷面較大，開挖面不能自立時採用。                                                      | 使用輔助工法將上半斷面分割為二，開挖面仍不能自立時採用。此工法因斷面閉合時間長，採用時應慎重檢討。              |
| e.臨時仰拱工法 | 任意     | 都市隧道有沉陷狀況需適時控制或短台階開挖沉陷擴大時。                                                    | 為防止地面及坑內沉陷變位，平台仰拱以噴凝土施噴成臨時仰拱，致工期延長，又臨時仰拱往後必需敲除，工程費用增加。         |

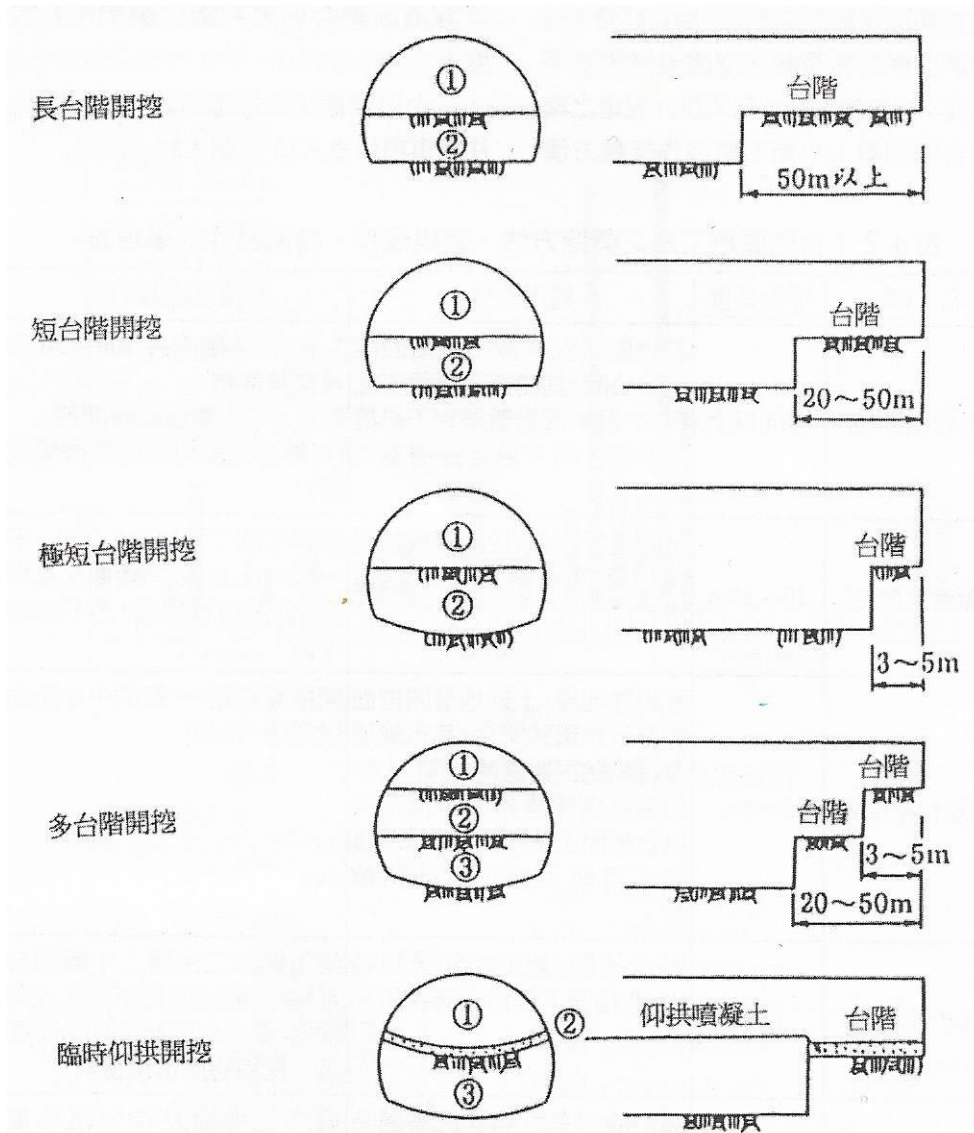


圖4.1-2 台階開挖工法(整理自山岳隧道工程設計及實例手冊,1999)

側導坑開挖應用於斷面積大於 $100\text{m}^2$ 之巨型隧道，該種隧道除地質特別優良者外，甚難採用台階開挖工法，且該隧道開挖後因頂拱跨徑過大，一旦支撐量不足或未即時支撐，極易造成頂拱崩塌，故需採用側導坑工法進行開挖，如圖4.1-3所示。

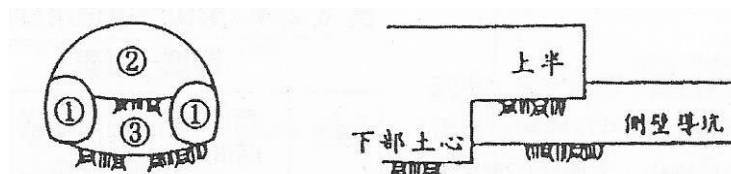


圖4.1-3 側導坑工法(整理自山岳隧道工程設計及實例手冊,1999)

## 4.2 環境因素

### 4.2.1 大地材料依時變形

岩石材料在持續相同應力狀態下，隨時間產生之變形行為稱之為潛變(creep)，即為岩石材料依時性變形行為。常見的依時變形模式主要可分為(1)黏彈模式(Visco-elastic model)、(2)黏彈塑模式(Visco-elasto-plastic model)、與(3)黏塑模式(Visco-plastic model)，其中以黏彈模式中柏格模式(Burgers model)為岩石力學相關試驗廣泛使用，係以彈簧及阻尼基本元件組合模擬材料在受力狀態下應變隨時間變化之行為，其描述式為：

$$c(t) = \left[ \frac{1}{G_1} \left( 1 - e^{-\frac{G_1 t}{\eta_1}} \right) \right] + \left( \frac{1}{G_2} + \frac{t}{\eta_2} \right) \quad (\text{式4.2-1})$$

其中  $G_1$ 、 $G_2$  為彈簧(岩石材料)勁度模數， $\eta_1$ 、 $\eta_2$  為阻尼(依時性變形)的黏滯係數。

Sulem 等人(1987a、1987b)將隧道開挖後圍岩變形區分為：(1)與空間有關之前進面效應；(2)與時間有關之潛變效應等兩個影響因素。建議隧道淨空變形經驗公式為：

$$C(x, t) = C_1(x)[1 + mC_2(t)] \quad (\text{式4.2-2})$$

$$C_1(x) = C_{\infty x} \left[ 1 - \left( \frac{x}{x+X} \right)^2 \right] \quad (\text{式4.2-3})$$

式中  $C(x, t)$  為開挖後  $t$  時間，距開挖面距離為  $x$  時，隧道的淨空間收斂變形量， $X$  為與空間效應有關之特定參數，而  $m$  代表時間效應與空間效應對於淨空間變形的影響比例係數。

詹尚書等人(2012)利用隧道變形經驗公式，迴歸淨空變形歷時、歷距曲線，據岩體變形行為特性的分類，佐以最小二乘法(generalized least squares)以得到最佳迴歸曲線，探討依時性變形特性參數與場址特性之關聯。表4.2-1整理最佳迴歸結果獲得的變形特性參數，及水災前後變形速率 $\eta$ 。研究結果顯示岩體材料變形模數、強度、岩層組成比例影響岩體依時變形特性相當顯著，而環境因素，如瞬時水位變化亦會造成岩體材料依時性變形。岩石材料的破碎程度、材料變形模數與強度將影響岩石依時性變形中的空間與時間效應比例係數，即彈塑性變形與依時性變形之比例。瞬時水位變化對岩石材料的依時變形特性上，反應速度取決於岩層組成比例及透水性的差異；應變率則端視岩石材料



組成比例間的關係，包含本身的依時變形與岩層間界面滑動引致的依時性變形特性(圖4.2-1、圖4.2-2)。

表4.2-1 國內某發生依時變形隧道Sulem參數迴歸統計分析結果(詹尚書等人，2012)

| 監測區段    | 變形類別 | 岩性    | 變形特性參數 |      |     |      |       |                 |                       |
|---------|------|-------|--------|------|-----|------|-------|-----------------|-----------------------|
|         |      |       | $C_x$  | X    | m   | n    | T     | $\eta_1/\eta_2$ | $\eta_{w1}/\eta_{w2}$ |
| SWA-011 | I    | SH-SS | -168.4 | 7.3  | 0.1 | 0.9  | 25.9  | -0.008/-        | -0.02/-               |
| SWA-012 | I    | SH-SS | -47.9  | 10.3 | 0.1 | 1.8  | 113.5 | -0.002/-        | -0.0003/-             |
| SWA-004 | II   | FZ    | -19.9  | 2.1  | 1.2 | 1.2  | 5.1   | -0.004/-0.07    | -0.05/-               |
| SWA-010 | II   | SH-SS | -57.3  | 12.3 | 0.4 | 1.1  | 18.4  | -0.01/-         | -0.05/-0.12           |
| SWA-037 | II   | SS/SH | -78.3  | 9.3  | 3.8 | 1.8  | 9.9   | -0.03/-         | -0.35/-               |
| SWA-038 | II   | SS/SH | -140.3 | 7.3  | 0.8 | 17.9 | 917.3 | -0.05/-         | -0.16/-0.16           |
| SWA-039 | II   | SS/SH | -285.2 | 8.5  | 0.2 | 2.6  | 11.0  | -0.04/-         | -0.16/-               |
| SWA-041 | II   | SS/SH | -120.2 | 13.5 | 0.4 | 3.2  | 87.6  | -0.05/-         | -0.09/-               |
| SWA-005 | III  | SS/SH | -112.8 | 10.6 | 0.6 | 1.7  | 401.5 | -0.04/-0.03     | -0.02/-               |
| SWA-006 | III  | SS/SH | -120.1 | 1.3  | 0.5 | 3.9  | 99.6  | -0.06/-         | -0.08/-               |
| MWA-002 | IV   | SS-SH | -115.7 | 6.6  | 0.2 | 0.8  | 7.5   | -0.05/-         | -0.15/-               |
| SWA-007 | IV   | SS/SH | -83.9  | 5.1  | 1.1 | 0.9  | 282.6 | -0.06/-         | -0.07/-0.03           |
| SWA-008 | IV   | SH-SS | -82.9  | 8.3  | 0.9 | 1.1  | 136.4 | -0.07/-         | -0.07/-               |
| SWA-009 | IV   | SH-SS | -120.8 | 10.6 | 0.8 | 1.1  | 371.9 | -0.06/-         | -0.06/-               |
| SWA-040 | IV   | SS/SH | -62.2  | 10.5 | 0.9 | 0.6  | 10.6  | -0.06/-         | -0.13/-               |

註：FZ：斷層帶 SS-SH：砂岩夾頁岩 SS/SH：砂頁岩互層 SH-SS：頁岩夾砂岩

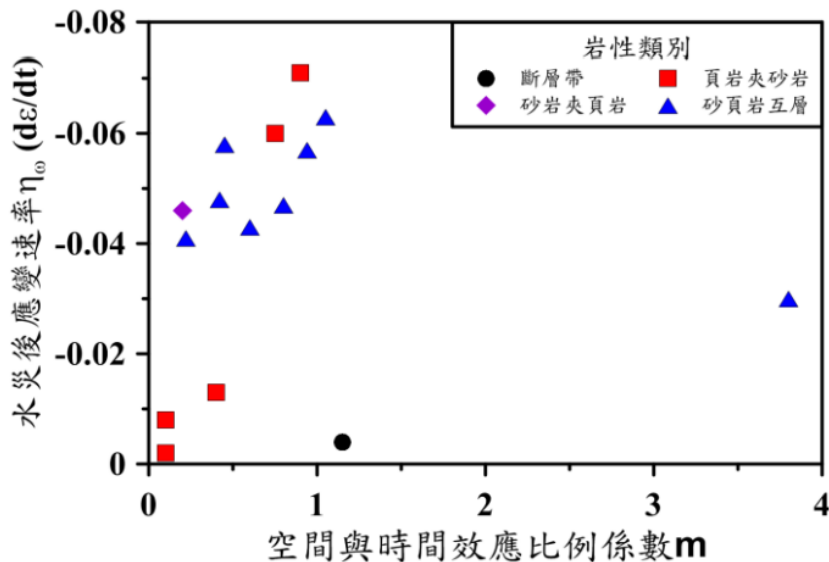


圖4.2-1 依時變形速率增加後m值與應變率關係(詹尚書等人，2012)

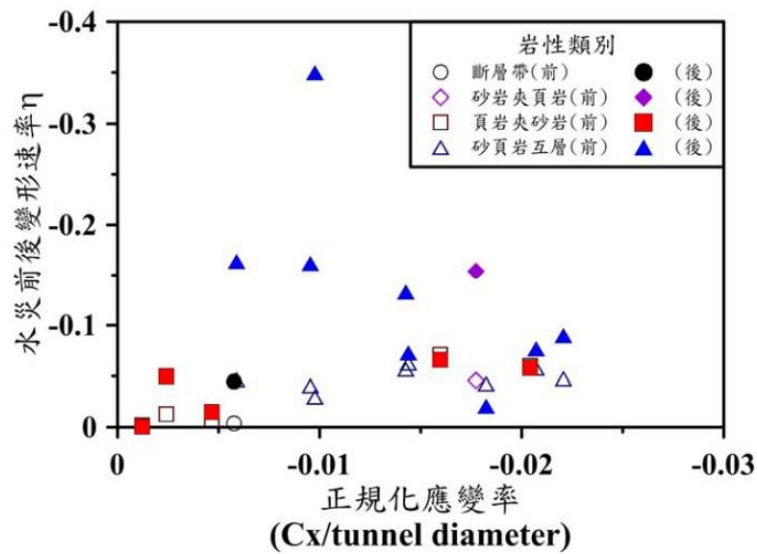


圖4.2-2 水災前後之收斂應變速率與岩層特性之關係(詹尚書等人, 2012)

李紫彤(2015)以某隧道工程通水後依時變形監測實例為對象，透過隧道變形經驗公式迴歸最佳收斂變形曲線，運用PFC<sup>3D</sup>模擬分析岩體依時變形特性之影響因素，並考慮潛變應力門檻對岩體依時變形之影響，最後將現地變位計測結果與數值模擬結果進行比對，研討圍岩變形特性，進行一系列關於岩體依時變形特性參數與隧道圍岩變形特性之探討。研究結果指出，當岩性比例為砂頁岩互層時，因兩種岩性強度與透水性的差異，洪水造成隧道氾濫後水流至裂隙使其弱化以及易從節理造成滑動導致變形。故通水前後變形速率變動倍率於砂頁岩互層最顯著，其次為含剪裂泥之岩性因剪裂泥遇水具膨脹性。從應力門檻模擬結果得知，在隧道周壁的圍岩皆未有依時變形的現象。當剪應力門檻較小時，則依時變形範圍明顯擴大，且總剪應變及依時變形作用時間也明顯增加。體積應力門檻較大時，依時變形的範圍僅於仰拱處，體積應力門檻較小時，依時變形範圍並無向外擴大，總剪應變與依時變形時間隨門檻降低有增加的趨勢，如圖4.2-3至圖4.2-5所示。

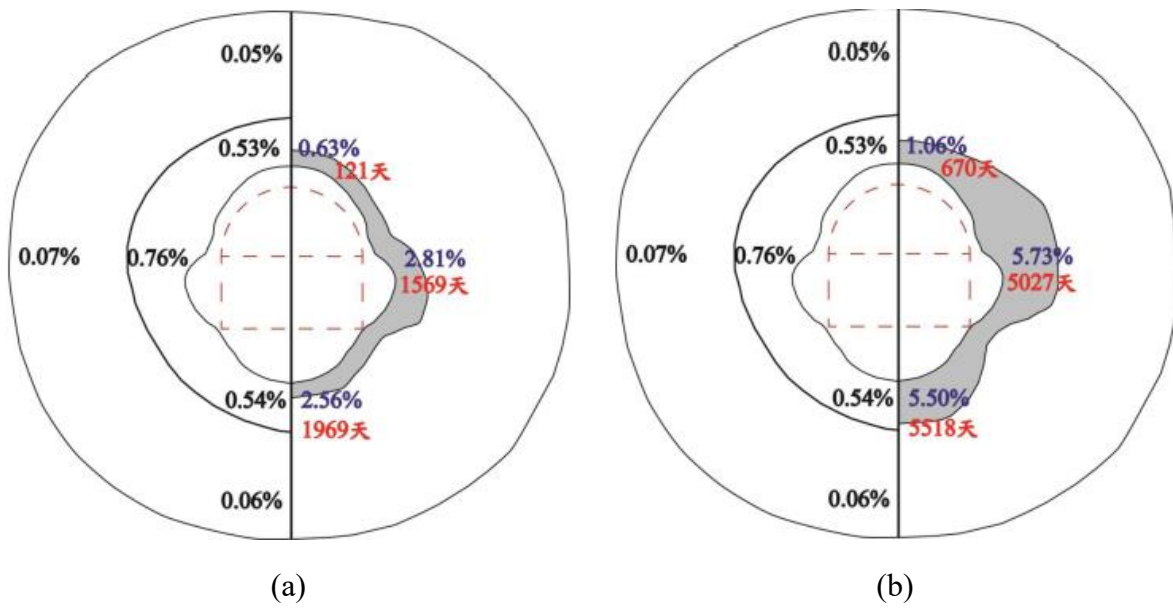


圖4.2-3 圍岩潛變體積應力與剪應力門檻分別為(a)1.0MPa及2.5MPa與(b)0.6MPa及2.5MPa條件下，隧道開挖引致的圍岩依時變形影響範圍(李紫彤, 2015)

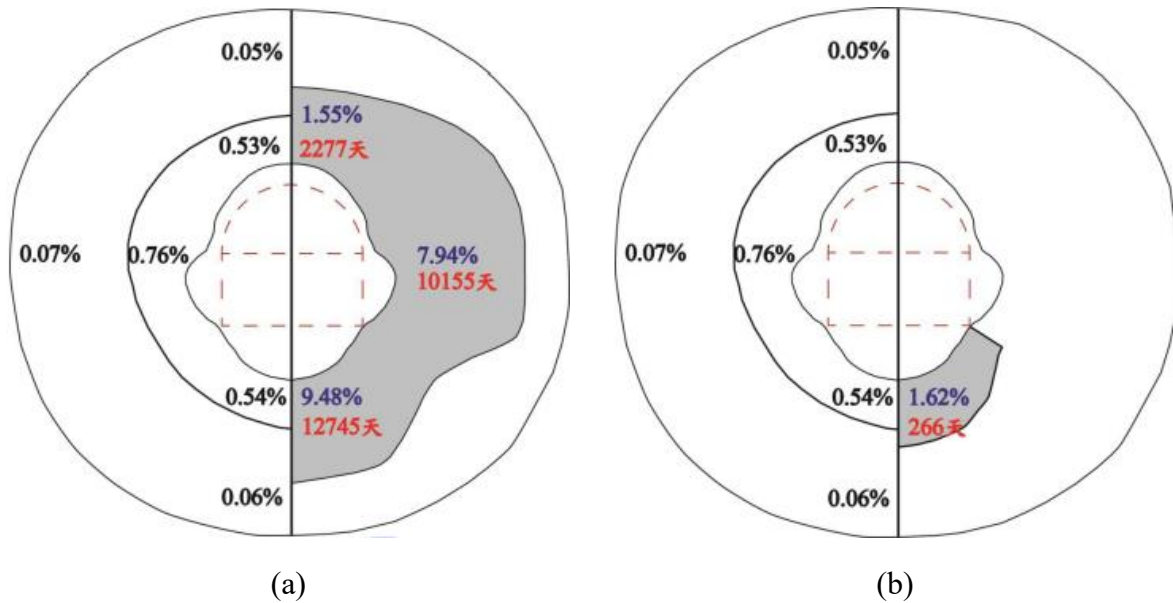


圖4.2-4 圍岩潛變體積應力與剪應力門檻分別為(a)0.3MPa及2.5MPa與(b)0.4MPa及3.2MPa條件下，隧道開挖引致的圍岩依時變形影響範圍(李紫彤, 2015)

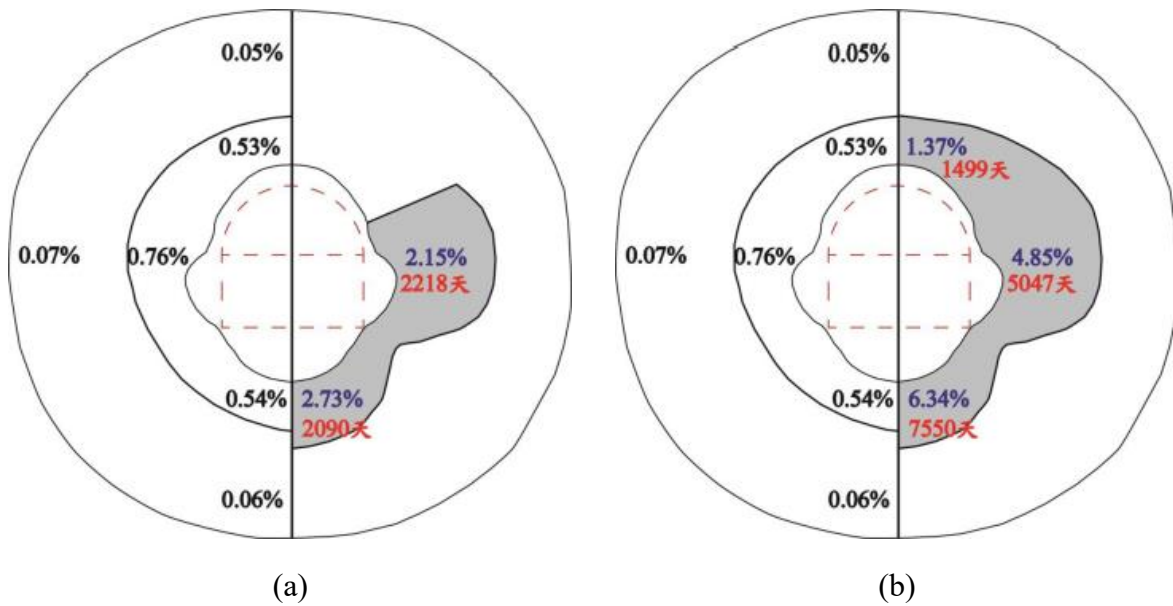


圖4.2-5 圍岩潛變體積應力與剪應力門檻分別為(a)0.4MPa及3.0MPa與(b) 0.4MPa及2.8MPa條件下，隧道開挖引致的圍岩依時變形影響範圍(李紫彤,2015)

#### 4.2.2 大地材料弱軟化

大地材料常受風化作用影響，而產生材料弱軟化現象，對於岩體工程設計、穩定性及安全性影響甚鉅，在考量坑道設施長期穩定條件下，了解大地材料弱軟化特性，為設施穩定性與安全性評估之關鍵項目。

Hoek 與 Brown 於 1980 年提出岩體非線性破壞準則，經不斷地修正後，已可同時描述完整岩石與裂隙岩體因應力造成降伏的情況，在國內外岩體工程特性評估的應用上，已成為最常見的破壞準則，其主要描述式係透過岩性參數  $m$ 、完整岩石單軸壓縮強度  $\sigma_{ci}$  (或 Uniaxial Compressive Strength, UCS)、岩體破碎(完整)程度參數  $s$ ，可獲得完整岩石或裂隙岩體的強度包絡線，必要時亦可透過  $a$  值修正包絡線的曲度，如式4.2-4所示。

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{式4.2-4})$$

其中  $\sigma'_1$  和  $\sigma'_3$  分別為發生破壞時的最大和最小主應力(有效應力)，岩性參數  $m$  和  $s$  通常需要以三軸試驗求取。然岩性參數  $m$  因與岩石的組成材料、種類、及成岩環境等因素相關，十分難以求得。而岩石因不同成岩環境而有其不同的微觀組構，並衍生不

同的岩石性質，除可用以描述的岩性參數  $m$  值外，尚包括物理特性、力學特性等。Bell 等(1998)提出影響岩石物理及力學特性的微觀組構因子包括石英含量(quartz content)、黏土含量(clay size content)、堆疊密度(packing density)、以及顆粒尺寸分佈(particle size distribution)。Jeng 等(2004)以台灣的砂岩為例，探討影響砂岩力學特性之物理特性與微觀組構因子，包括乾密度(dry density)、視比重(specific weight)、孔隙率(porosity)、顆粒面積比例(grain area ratio, GAR)、堆疊密度與礦物含量，研究結果顯示孔隙率與顆粒面積比例影響砂岩單壓強度顯著，並進一步提出以孔隙率與 GAR 兩因子作為砂岩力學特性的分類指標(圖4.2-6)。Weng 等(2012)利用個別元素法數值分析工具，探討孔隙率與 GAR 對砂岩力學特性的影響，研究結果指出此二因子對砂岩凝聚力影響顯著，而 GAR 影響砂岩的摩擦角顯著，隨著孔隙率降低與 GAR 增加，砂岩的剪力模數與體積模數增加(圖4.2-7)。Sabatakakis 等(2008)探討影響沉積岩類包括泥灰岩、砂岩與石灰岩的力學特性之微組構因子，研究結果顯示石英含量、方解石與石灰岩比例(sparite/micrite)影響力學特性顯著，其中方解石與石灰岩比例越高，岩性參數  $m$  值將會降低(圖4.2-8)。

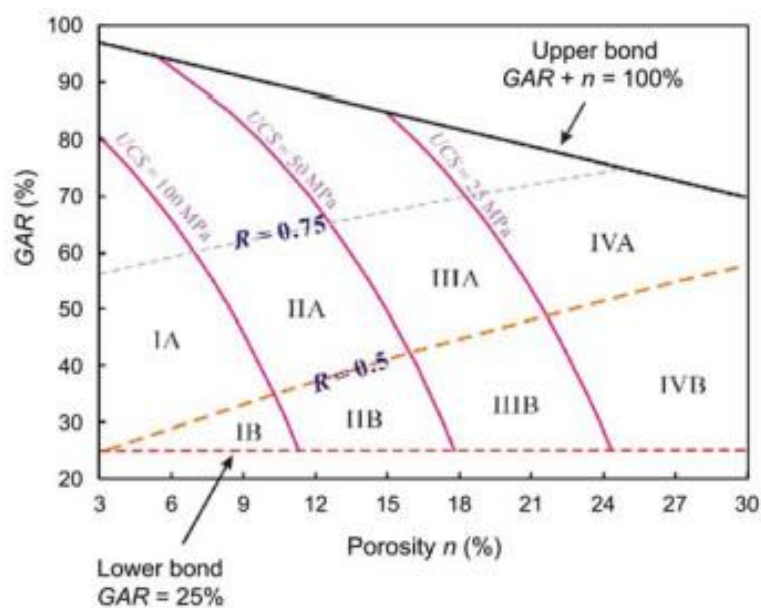


圖4.2-6 孔隙率、GAR指標與砂岩單壓強度之分類(Jeng等人, 2004)

闕禮琳等人(2009)以水璉礫岩為對象，透過不同次數的乾濕循環人工風化作用，探求不同風化程度消散耐久指數、單軸壓縮強度、點荷重強度以及視摩擦角的變化，研究成果顯示，水璉礫岩風化後，抗風化能力下降、強度降低、變形性增加，且強度降低主



要受到風化弱軟化礫岩的基質成份較顯著，導致礫岩的視凝聚力下降，視摩擦角在人工風化過程的變化較不明顯(圖4.2-9、圖4.2-10)。Tan 等(2011)以花崗岩為對象，探討凍融作用對花崗岩力學特性的影響，以及循環次數與力學參數的相互關係，研究成果顯示單壓強度、變形特性以及彈性模數隨著循環次數增加而下降，這些關係可用一些指數方程式來進行描述。

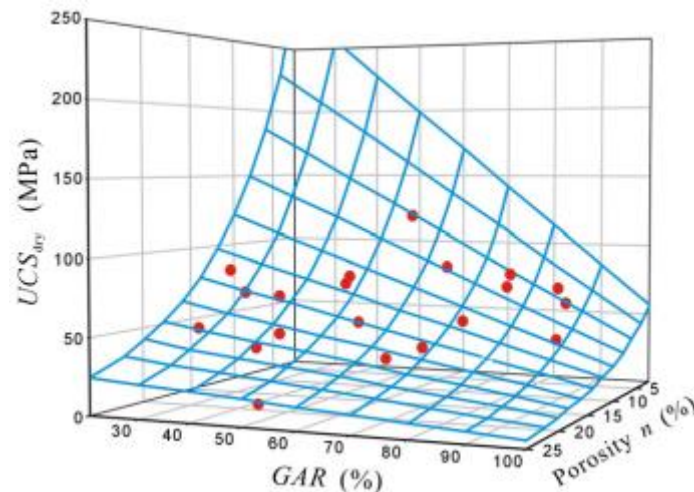


圖4.2-7 孔隙率與GAR對砂岩單壓強度的影響(Weng等人, 2012)

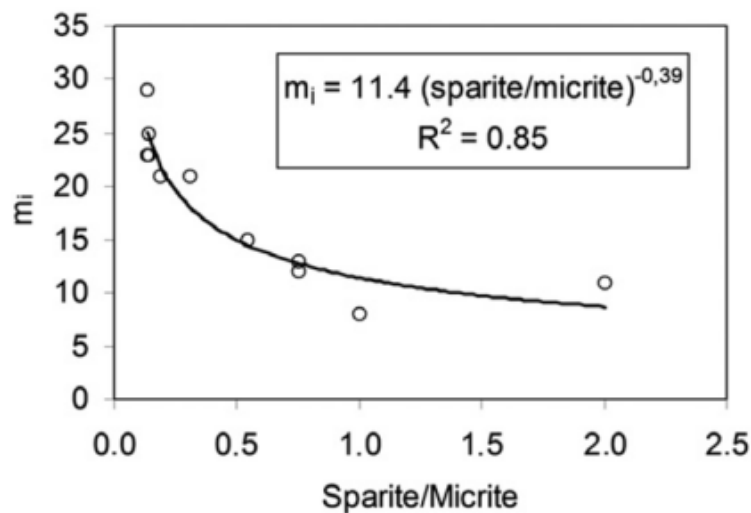


圖4.2-8 石灰岩中方解石與石灰岩比例對 $m_i$ 值的影響(Sabatokakis等人, 2012)

詹佩臻(2011)利用統計學多變量迴歸分析(multiple regression analysis)方法，探討碎屑沉積岩力學特性的影響因子，以及其遇水弱化、軟化程度的關鍵物理性質指標與微觀

組構特性，研究結果顯示碎屑沉積岩岩石材料風化循環過程中，其岩石孔隙率  $n$  與顆粒面積比 GAR 影響岩石力學特性最顯著，詳圖4.2-11。

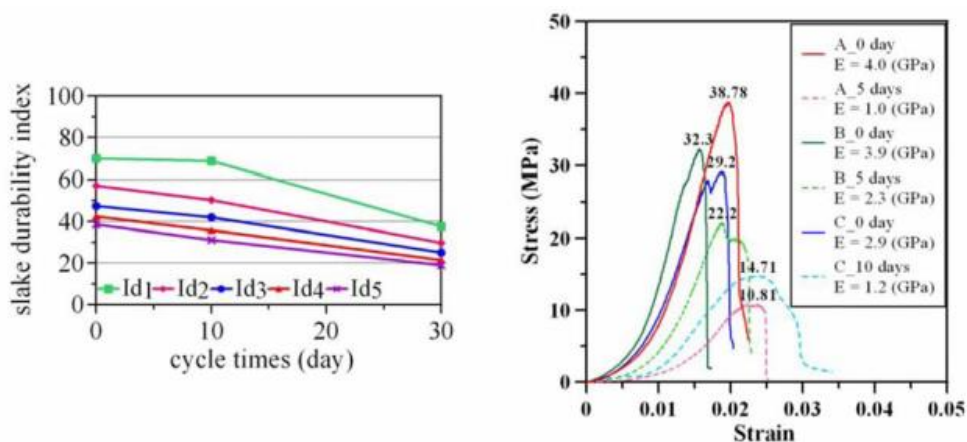


圖4.2-9 水璉礫岩歷經不同乾濕循環次數下消散耐久指數變化(左)與單軸壓縮應力-應變曲線(右)(闕禮琳等人, 2009)

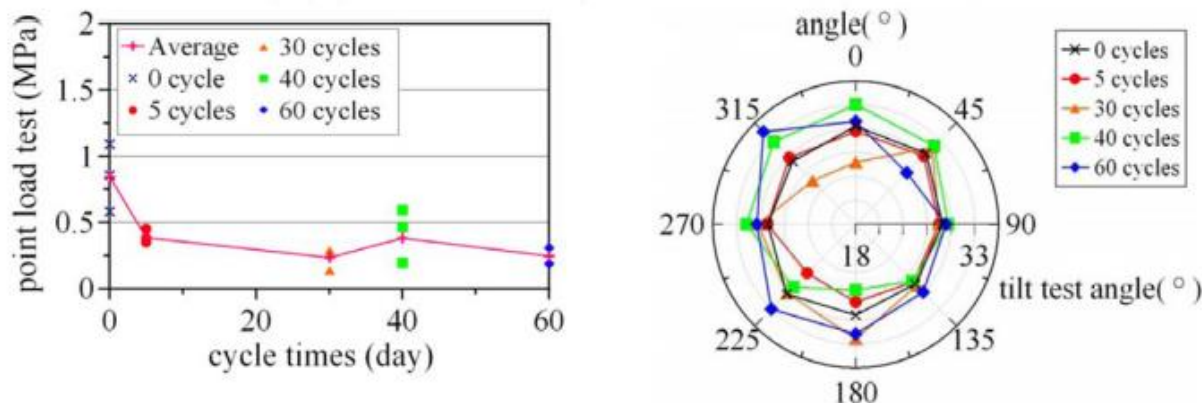


圖4.2-10 水璉礫岩歷經不同乾濕循環次數下點荷重指數變化(左)與不同方向視摩擦角極圖(右)(闕禮琳等人, 2009)

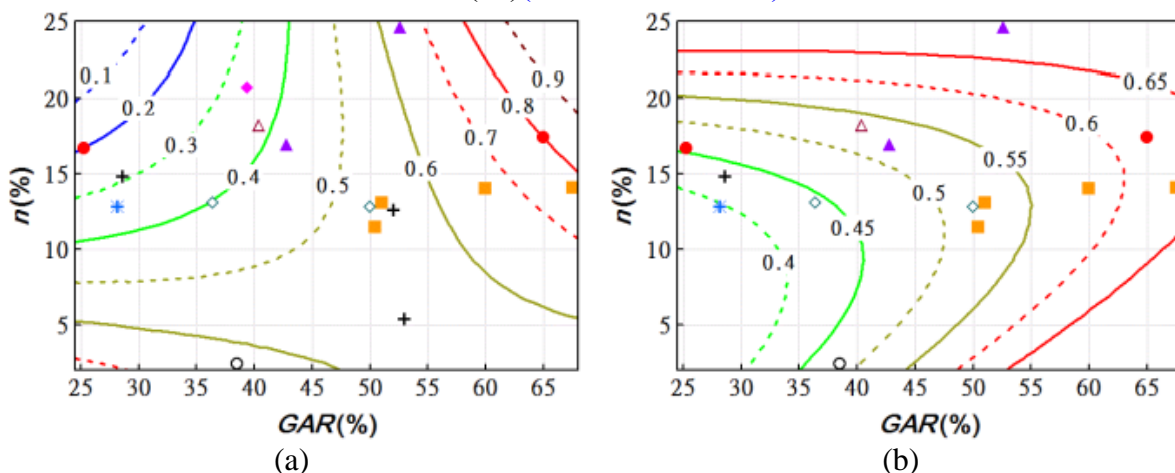


圖4.2-11 碎屑沉積岩岩石材料風化循環實驗結果：(a)乾濕強度比 $R_{UCS}$ 與岩石孔隙率及顆粒面積比趨勢圖；(b) 乾濕變形比 $R_E$ 與岩石孔隙率及顆粒面積比趨勢圖(詹佩臻等人, 2011)

郭雅雯(2012)以大理岩為對象進行風化試驗，針對一般指數與微觀組構進行分析討論，探討風化過程中岩體弱軟化特性及影響因素，研究結果顯示，岩石單壓強度隨乾濕循環次數增加有逐漸下降的趨勢，破壞應變則隨乾濕循環次數增加有逐漸上升的趨勢，詳圖4.2-12(a)，而岩石楊氏模數隨乾濕循環次數增加亦有逐漸下降的趨勢，詳圖4.2-12(b)。在岩石強度特性參數方面，凝聚力隨乾濕循環次數增加有逐漸下降的趨勢，詳圖4.2-12(c)，摩擦角則隨乾濕循環次數增加有逐漸上升的趨勢，詳圖4.2-12(d)。利用岩石薄片影像以了解乾溼循環的微觀組構變化，探討乾濕循環對岩石力學特性之影響，研究結果顯示，隨乾溼循環次數增加，岩石孔隙逐漸增大並降低其抗風化能力，風化過程中大理岩之白雲石發生去白雲石化作用(dedolomitization)，方解石相對比例上升，而白雲石呈下降趨勢，詳圖4.2-13。

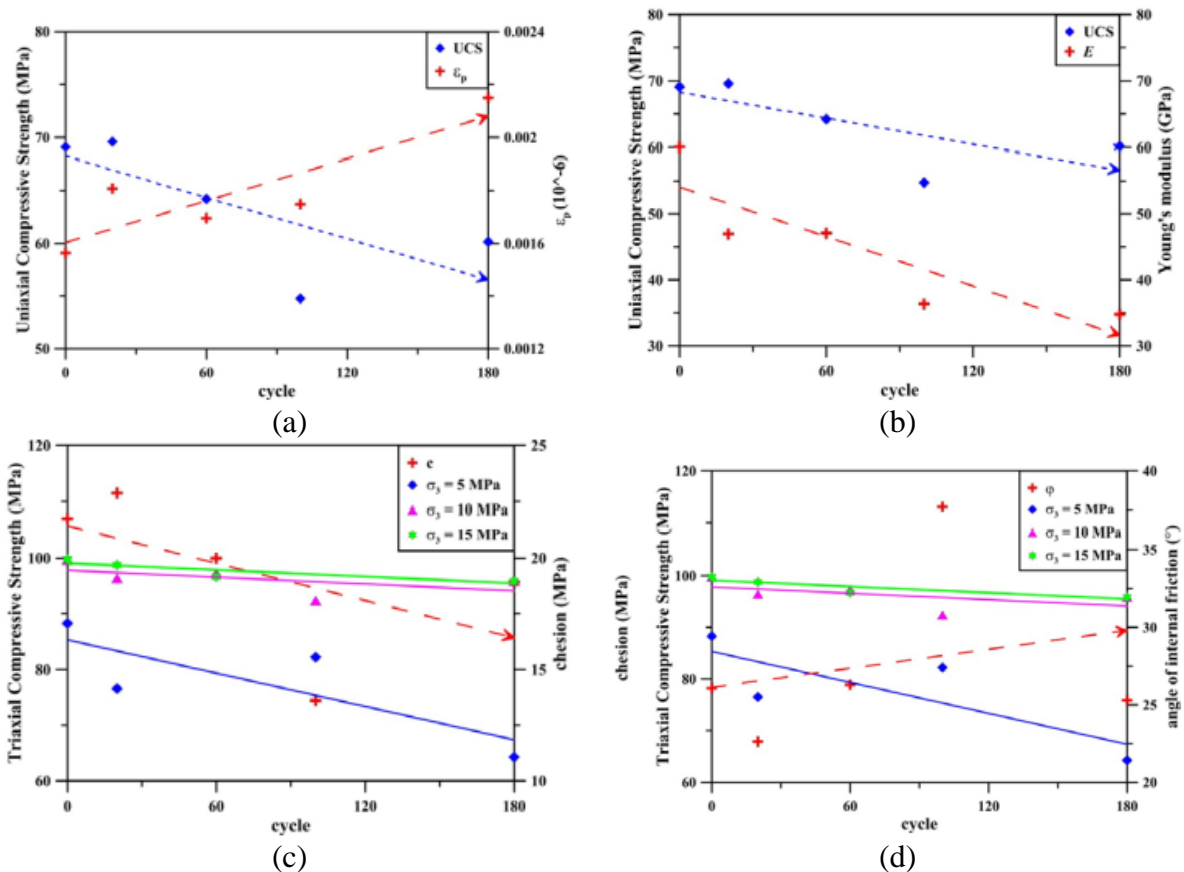


圖4.2-12 大理岩風化循環實驗結果：(a)破壞應變受乾濕循環次數之影響；(b) 楊氏模數受乾濕循環次數之影響；(c) 視凝聚力受乾濕循環次數之影響；(d) 視摩擦角受乾濕循環次數之影響(郭雅雯, 2012)



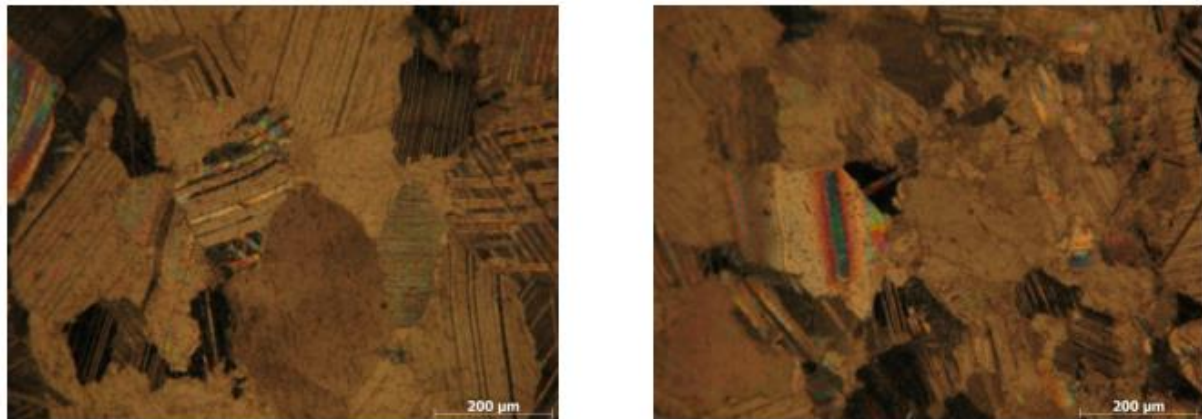


圖4.2-13 未循環(左)與循環180次(右)之大理岩薄片影像(郭雅雯, 2012)

我國地處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊斜向聚合帶以及北半球亞熱帶氣候區，持續的板塊推擠在高溫多雨的環境下演化了多變的地形，常見崇山峻嶺與湍急河川，旺盛的地質活動更造成了複雜的地層與地質構造，尤多軟弱、破碎岩石。基於上述特殊的環境條件相互作用下，岩盤風化速率更較國外處置技術先進國家來得迅速。爰此，了解國內岩石的風化特性，並於「場址特性調查」階段進行相關試驗與調查外，亦於「場址特性描述與參數評估項目」部分，考量加入岩性、岩象等受風化影響具顯著變異的評估因子，以增進坑道長期穩定性之安全評估。

#### 4.3 非力學因素

隧道為維持穩定，開挖後常施以混凝土襯砌或鋼支保作為支撐，若因設計不佳或施工不當而產生材料劣化，將無法提供充足的結構能力，長期衍生隧道安全顧慮。因此，隧道材料的良窳是隧道結構穩定的重要關鍵因素之一。

混凝土構造物材料的劣化成因，可區分為物理性與化學性等二種因素。楊定良等人(2008)針對水利構造物混凝土劣化所產生之損壞，研究歸納有混凝土配比不當、結構缺失、外力所造成的損壞、混凝土的內部鹼骨材反應、收縮(Restrained Shrinkage)及潛變(Creep)、其他施工不良所造成的缺陷、因結構受力位移引起的損壞、化學侵蝕、鋼筋鏽蝕等原因，鍾東志(2013)整理如表4.3-1所示。

表4.3-1 混凝土劣化原因說明(摘錄自鍾東志,2013)

| 項次 | 劣化原因                                       | 說明                                                                                                      |
|----|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 混凝土配比不當                                    | 混凝土配比不良、澆置及養護不當，使混凝土品質不良，易於損壞                                                                           |
| 2  | 結構缺失                                       | 設計或施工不良，或不當使用結構，導致結構受損，這種損壞通常發生於高應力區，同時可發現垂直於主筋方向的裂縫。                                                   |
| 3  | 外力所造成的損壞                                   | 對水流、卵塊石及漂流木沖蝕所產生的損壞。                                                                                    |
| 4  | 鹼骨材反應                                      | 混凝土中的鹼骨材反應，是指混凝土中的鹼與骨材中活性組成發生的化學反應，引起混凝土的膨脹、開裂、甚至破壞。                                                    |
| 5  | 收縮<br>(Restrained Shrinkage)<br>及潛變(Creep) | 當所澆置的混凝土凝固時，混凝土會發生些微收縮，隨著混凝土的逐漸乾燥，混凝土會繼續收縮，如果收縮受到束制，混凝土就會發生開裂。因不良的設計使得部份構件發生潛變，潛變屬於長期效果，因此要經一段時間才會出現徵兆。 |
| 6  | 其他施工不良所造成的缺陷                               | 施工不良所造成的缺陷例如混凝土保護層厚度不足、蜂窩等現象，也會導致混凝土發生劣化。                                                               |
| 7  | 因結構移動引起的損壞                                 | 因為結構體乾縮、潛變、基礎沉陷及冷熱膨脹收縮引起的損壞。                                                                            |
| 8  | 化學侵蝕                                       | 油類及化學物質特別是鹽類，可導致混凝土或鋼筋的嚴重損壞。嚴重時會使混凝土強度降低，以至破壞。                                                          |
| 9  | 鋼筋鏽蝕                                       | 埋設於混凝土中的鋼筋通常不致於生鏽，但如果保護層不足、混凝土搗實不佳、或混凝土中含有氯離子，則會導致鋼筋發生鏽蝕，由於鋼筋鏽蝕時體積會膨脹，故會將其外側的混凝土撐裂保護層會逐漸崩落。             |

李佳翰(2012)對山岳隧道襯砌異狀肇因之研究中，指出混凝土中性化、鋼筋保護層厚度不足、混凝土鹼質粒料反應(鹼骨材反應)、混凝土澆置中斷(冷縫)、襯砌背後空洞或襯砌厚度不足等，為襯砌異狀肇因之「非力學因素」，大部分的成因如同表4.3-1所述，就隧道工程實務而言，襯砌背後空洞的可能原因如后：

(1)場鑄襯砌(現場澆置混凝土)頂拱背面的混凝土較易出現填充不完全造成的空洞現象，特別是以特密管方式所施工的隧道，其頂拱背面幾乎都留有孔隙存在。

(2)有些超挖過多的隧道，為了節省混凝土量，有時會在壁面使用內模具，而使得襯砌背面產生空隙。

(3)早期採用美國鋼支保工法並搭配木矢板施作之隧道，由於木矢板受到隧道圍岩地下水腐蝕而形成空洞。

依內政部訂定之「結構混凝土施工規範」(2002)，其3.1.1規定「混凝土配比應使混凝土達到設計圖說之要求及施工需要之品質」，材料配比應能滿足3.1.2規定對混凝土之抗壓強度、工作性及耐久性要求。而我國許多混凝土工程的配比設計常僅考慮強度與工作性，而忽略耐久性之要求，以致造成台灣地區的混凝土工程容易遭遇海域鹽分及工業污染環境之侵蝕，對混凝土結構之使用壽命有不利影響。

在規範3.1.1規定中提到「耐久性應依據構造物用途、使用年限、維修成本及環境條件決定之。」，依其解說，設計圖說所指出的設計強度通常以構造物安全性為基準；而耐久性之需求則依構造物用途、使用年限、維修成本及環境條件等而定，再以較為保守的方式提出最低抗壓強度及最大水膠比要求。故混凝土 配比設計必須同時滿足安全性及耐久性之規定。環境條件中之物理性與化學性因素會使混凝土劣化如圖4.3-1及4.3-2。

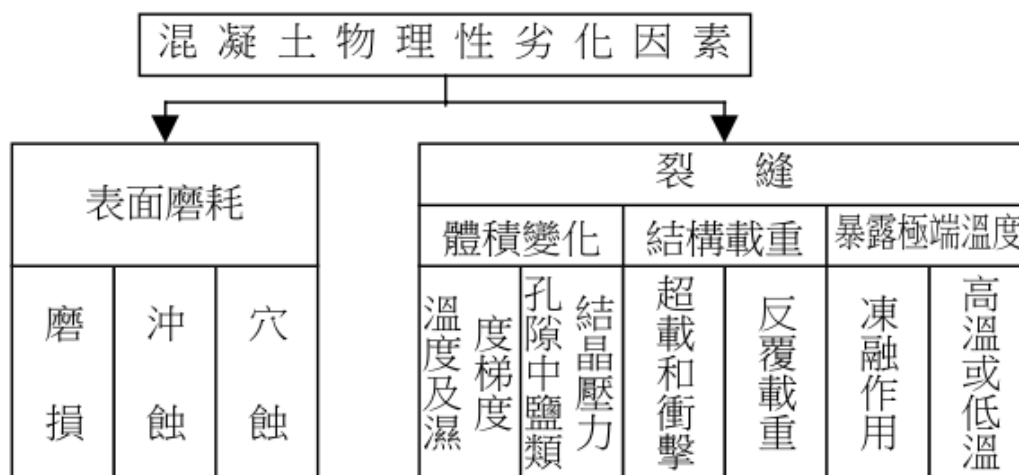


圖4.3-1 混凝土物理性劣化因素(整理自結構混凝土施工規範, 2002)

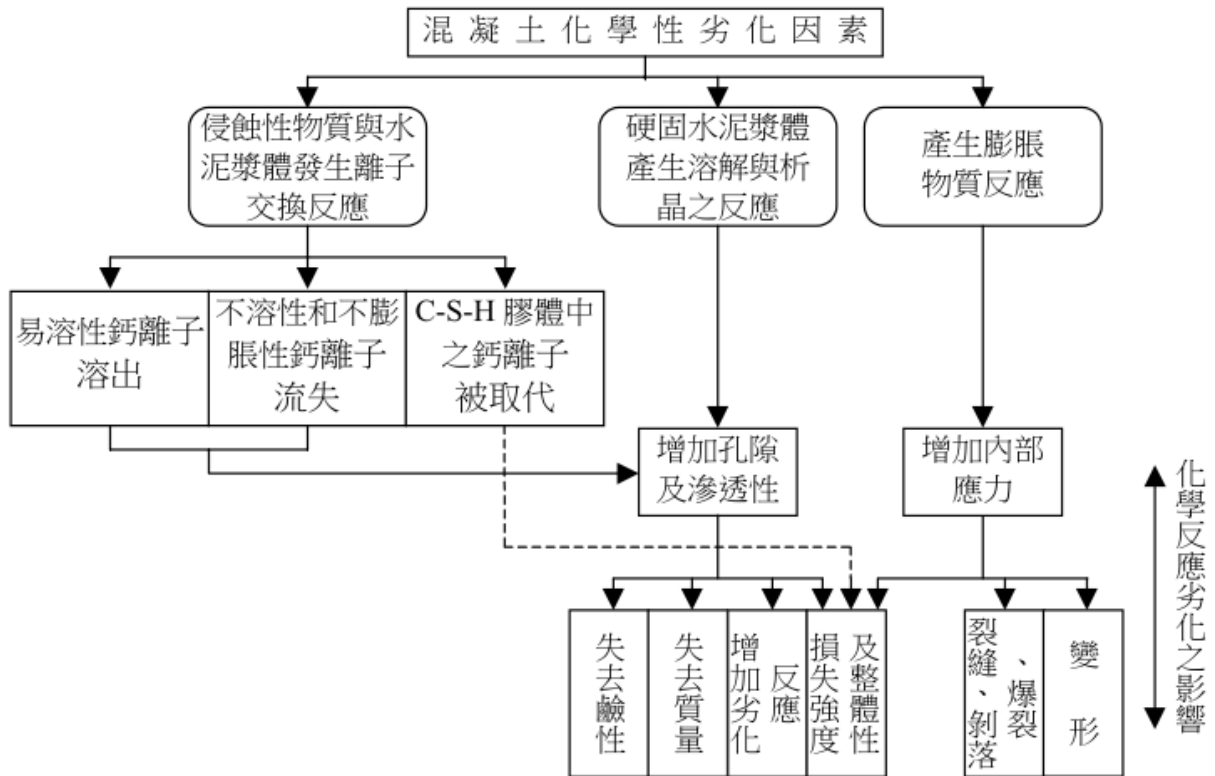


圖4.3-2 混凝土化學性劣化因素(整理自結構混凝土施工規範,2002)

臺灣四面環海，位處具強風、高鹽份及潮濕高溫之環境，尤應重視混凝土受鹽害程度之影響。因此在工程規劃設計階段，應詳實調查工址附近現況，調查與混凝土接觸之地下水內是否含有害鹽類，如硫酸鹽、氯化物之含量及濃度等資料，以利於設計圖說中規定有關混凝土配比應注意事項，並要求依相關規範進行結構混凝土耐久性有關之試驗法，如表4.3-2所示。

表4.3-2 與結構混凝土耐久性有關之試驗法(摘錄自結構混凝土施工規範,2002)

| 測定項目          | 試驗標準                                        |
|---------------|---------------------------------------------|
| 凍融抵抗          | CNS 1168,1169,1170<br>(ASTM C666,C671,C682) |
| 解冰鹽抵抗         | ASTM C672                                   |
| 鋼筋腐蝕          | ASTM C876                                   |
| 鹼骨材反應         | CNS 13618,13619<br>(ASTM C227,C289)         |
| 礦物摻料抑制鹼矽反應之效能 | ASTM C287,C342,C441                         |
| 鹼、碳酸鹽反應       | CNS 13620(ASTM C586)                        |
| 硫酸鹽侵蝕         | ASTM C452,C1012                             |
| 抗磨耗           | ASTM C1138,C415,C779,C944                   |
| 透水係數          | DIN 1048                                    |
| 氯離子滲透快速檢測法    | AASHTO T277(ASTM C1202)                     |
| 氯離子滲透係數       | AASHTO T259                                 |
| 混凝土電阻         | AASHTO T259,T277                            |

而鋼筋在混凝土良好的握裹條件下，提供襯砌結構充足之抗拉強度。當鋼筋防護不佳時，產生腐蝕作用可能導致結構物強度下降，其測定試驗可採用ASTM C876。混凝土中的氯離子含量，會促進鋼筋之腐蝕作用，造成膨脹、剝落，危及構造物安全性，因此「結構混凝土施工規範」明確規定鋼筋混凝土中最大水溶性氯離子含量為  $0.3 \text{ kg/m}^3$ 。規範中所指混凝土氯離子含量，係為混凝土材料中所含水溶性氯離子之總量，並不包括來自外界環境者。故未受外來氯離子污染之硬固混凝土，因水泥之水合作用及物理吸附，其水溶性氯離子含量會隨時間增加較新拌時降低，其試驗頻率應依內政部營建署「[施工中建築物氯離子含量檢測實施要點](#)」之規定辦理。

#### 4.4 國內一般隧道設計規範與安全分析報告審查導則相關章節之關聯性

綜整第三章蒐整的國內一般隧道設計規範，依屬性區分(i)調查與試驗、(ii)隧道設計、(iii)隧道開挖與支撐設計、(iv)隧道監測與回饋、(v)災變對策、(vi) 消防、(vii) 排水與防水設施、(viii) 設施管理等八類，就其內容與安全分析報告審查導則有關聯之章節整理於表4.4-1。



表4.4-1 國內一般隧道設計規範與安全分析報告審查導則相關章節之關聯性

| 項目    | 國內一般隧道設計規範(包括準則與解說等技術文件)     |                                                    | 安全分析報告審查導則<br>相關章節                                         |
|-------|------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|       | 名稱                           | 章節                                                 |                                                            |
| 調查與試驗 | 公路隧道設計規範(交通部，2017)           | 第二章 地質調查                                           | 第二章 場址之特性描述<br>2.11 大地工程特性                                 |
|       | 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999) | 貳、調查與試驗                                            |                                                            |
|       | 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，1999) | 第二章 地質調查                                           |                                                            |
| 隧道設計  | 公路隧道設計規範(交通部，2017)           | 第一章 總則<br>第三章 設計考量<br>第六章 洞口設計<br>第七章 特殊考量         | 第三章 設施之設計基準<br>3.3.1 設計目標與功能需求<br>3.3.2 設施設計<br>3.3.3 結構設計 |
|       | 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999) | 參、設計<br>第一章 通則<br>第二章 設計考量<br>第五章 洞口設計<br>第六章 特殊狀況 |                                                            |
|       | 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會，1999) | 第三章 隧道定線<br>第四章 隧道洞口<br>第五章 隧道設計<br>第六章 特殊地質段設計    |                                                            |
|       | 公路隧道設計規範(交通部，2017)           | C3.1 一般說明<br>C3.3 設計考量因素<br>6.4 洞門段                |                                                            |

第四章 處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性探討

|           |                                           |                                       |                                       |
|-----------|-------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|           | 台北捷運系統工程土木工程設計手冊(1998)                    | 第二章 第一節 地下段結構工程                       |                                       |
|           | 日本隧道工程標準規範及解說-山岳工法篇 <sup>註</sup>          | 第 33 條                                |                                       |
|           | 日本隧道工程標準規範及解說-潛盾隧道篇 <sup>註</sup>          | 第 33 條                                |                                       |
| 隧道開挖與支撐設計 | 公路隧道設計規範(交通部, 2017)                       | 第四章 支撐設計                              | 第四章 設施之建造                             |
|           | 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會, 1999)             | 參、設計<br>第三章 支撐設計方法<br>第四章 支撐構件        |                                       |
|           | 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會, 1999)             | 第八章 隧道開挖                              |                                       |
|           | 台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立(行政院公共工程委員會, 2003) |                                       |                                       |
| 隧道監測與回饋   | 公路隧道設計規範(交通部, 2017)                       | 第九章 監測系統                              | 第四章 設施之建造<br>第七章 設施之安全評估<br>7.4 長期穩定性 |
|           | 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會, 1999)             | 參、設計<br>第八章 監測系統                      |                                       |
|           | 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會, 1999)             | 第九章 隧道監測與回饋                           |                                       |
| 災變對策      | 山岳隧道工程設計與實例手冊(中華民國隧道協會, 1999)             | 第七章 災變對策                              | 第四章 設施之建造                             |
| 消防        | 公路隧道消防安全設備設施設置規範(交通部台灣區國道新建工程局, 2010)     | 第二章 消防設計<br>第三章 消防安全設備<br>第四章 消防搶救上之必 | 第十章 消防防護計畫                            |

第四章 處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性探討

|         |                                  | 要設施                              |                                 |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 排水與防水設施 | 公路隧道設計規範(交通部，2017)               | 第八章 排水與防水設施                      | 第三章 設施之設計基準                     |
|         | 隧道工程設計準則與解說(中國土木水利工程學會，1999)     | 參、設計<br>第七章 排水與防水設施              | 3.3.1 設計目標與功能需求<br>3.3.2 設施設計   |
| 設施管理    | 公路隧道安全設施準則研訂(交通部台灣區國道新建工程局，1998) | 機電設施、交通監控設施、緊急及安全逃生設施以及營運管理措施四大類 | 第三章 設施之設計基準<br>3.3.7 公共設施或系統之設計 |

註：日本設計規範



## 第五章、處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議

本章根據台電公司(2017)修訂第二版之「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」第四章處置設施概念設計與作業規劃，整理我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式；此外，根據本研究內容，分別就可能遭遇之「外力因素」、「環境因素」與「非力學因素」整理出處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議。

### 5.1 我國低放射性廢棄物可能場址與處置坑道型式

我國於 101 年 7 月依「低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例」公告台東縣達仁鄉與金門縣烏坵鄉二處建議候選場址，雖在政治、社會、環境及輿情等因素之綜合考量，尚未進一步推動選址作業，但為能就我國低放射性廢棄物可能場址條件與坑道型式能有所了解，藉以提出後續有關之坑道結構穩定審查重點，故仍以此二處候選場址進行分析與比較。

#### (1) 台東縣達仁鄉建議候選場址

台東縣達仁鄉建議候選場址之處置設施的空間配置參見圖 5.1-1(a)。處置坑道位於高程 EL 30 m~EL 31.2 m 之間，計 13 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 2 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,938 m。A 類低放射性廢棄物處置坑道岩覆深度大於 62.2 m；B、C 類低放射性廢棄物處置坑道岩覆深度大於 76.4 m。

達仁鄉建議候選場址輔助區，規劃於進出通行隧道之出入口處，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積。有關之山坡開挖、回填、擋土、護坡、排水及設置滯洪沉砂池等設施，除需符合水文、降雨強度及道路標準等相關規定外，亦須符合水土保持技術規範之規定。

在工程障壁部分，考量台東縣達仁鄉建議候選場址為硬頁岩，內含許多地質弱面，為提升坑道與圍岩之安定，整體輪廓將以近似圓形設計。坑道內空斷面則考量到工程障壁之尺寸，以及運轉期間之維護、裝載設備、排水設施所需預留之空間，處置設施所需之淨寬度至少 12.1 m。另依照「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，分別針對 A 類低放射性廢棄物和 B、C 類低放射性廢棄物，設計對應之「多重障壁」系統，如圖 5.1-1(b)(c)所示。

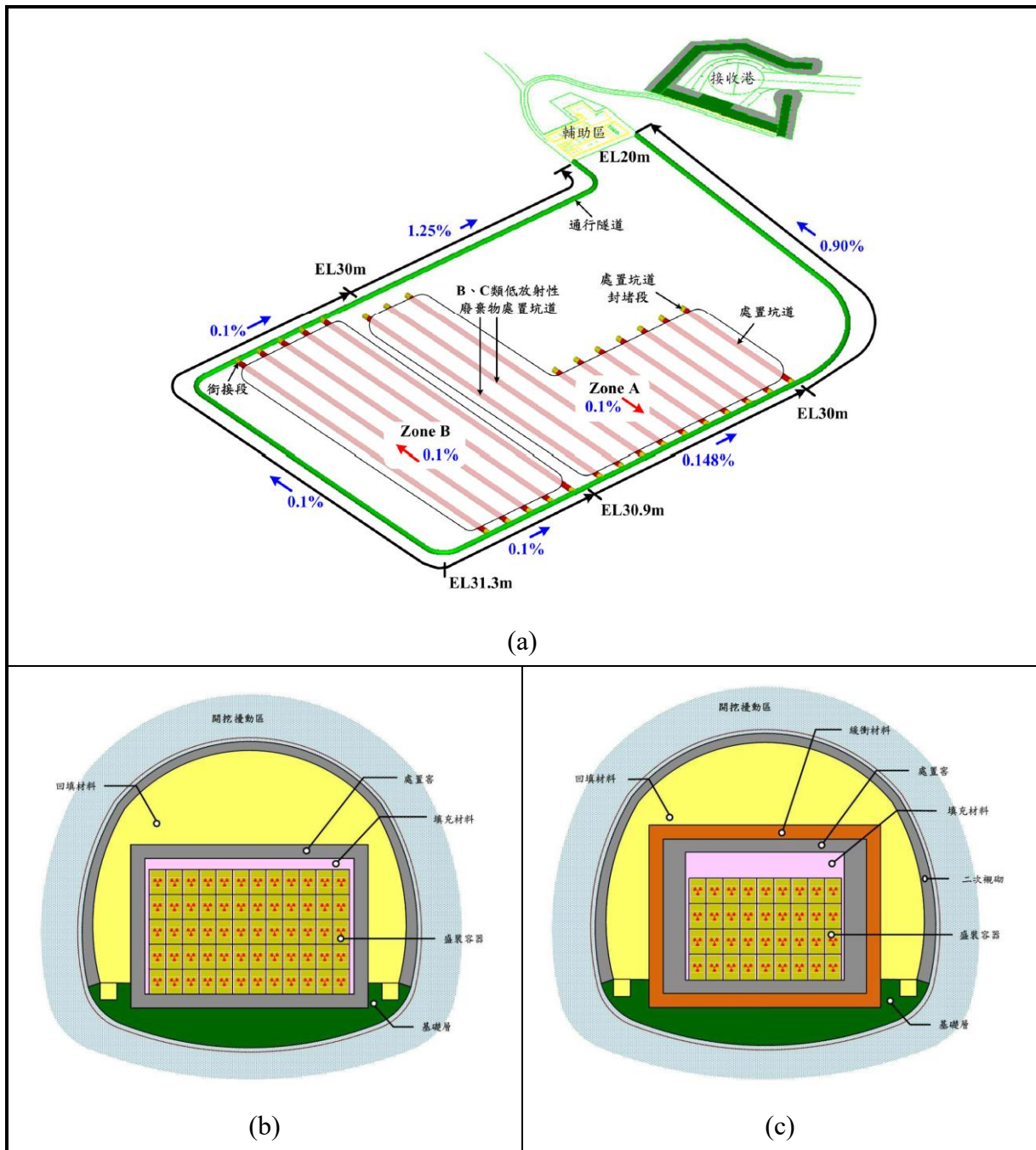


圖5.1-1 台東縣達仁鄉低放處置設施建議候選場址：(a)設施空間配置與重力排水規劃示意圖、(b) A 類低放射性廢棄物、(c) B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計(台電公司，2017)

## (2) 金門縣烏坵鄉建議候選場址

金門縣烏坵鄉建議候選場址之處置設施的空間配置參見圖5.1-2(a)。處置坑道位於高程 EL - 99.7 m 至 EL - 100 m 之間，共有 34 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 6 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,800 m。處置坑道上方岩覆為 58.8 m ~ 59.0 m。烏坵鄉建議候選場址輔助區規劃於進出通行隧道之出入口附近，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積。有關之回填、擋土、護坡、排水及設置滯洪沉砂池等設施，除需符合水文、降雨強度及道路標準等相關規定外，亦須符合水土保持技術規範之規定。

烏坵鄉建議候選場址母岩屬岩性堅實之花崗岩，故坑道斷面採倒 D 型(馬蹄形)設計。坑道內空斷面則考量到工程障壁之尺寸，以及運轉期間之維護、裝載設備、排水設施所需預留之空間，處置設施所需之淨寬度至少 10.7 m。此外，針對 A 類低放射性廢棄物和 B、C 類低放射性廢棄物，設計對應之「多重障壁」系統，如圖5.1-2(b)(c)。其中，針對 B、C 類低放射性廢棄物，因其廢棄物活度較高，故加厚處置窖之厚度，並另外配置緩衝材料，以確保處置設施內，核種傳輸特性可長期維持擴散主導，降低核種藉由平流傳輸而快速釋出之可能性。

依前述整理之處置場型式、地質條件、坑道岩覆深度、坑道數與坑道總長度、坑道斷面及尺寸、坑道間距等資料，綜整達仁與烏坵二處低放處置設施建議候選場址之比較表，詳如表5.1-1所示。

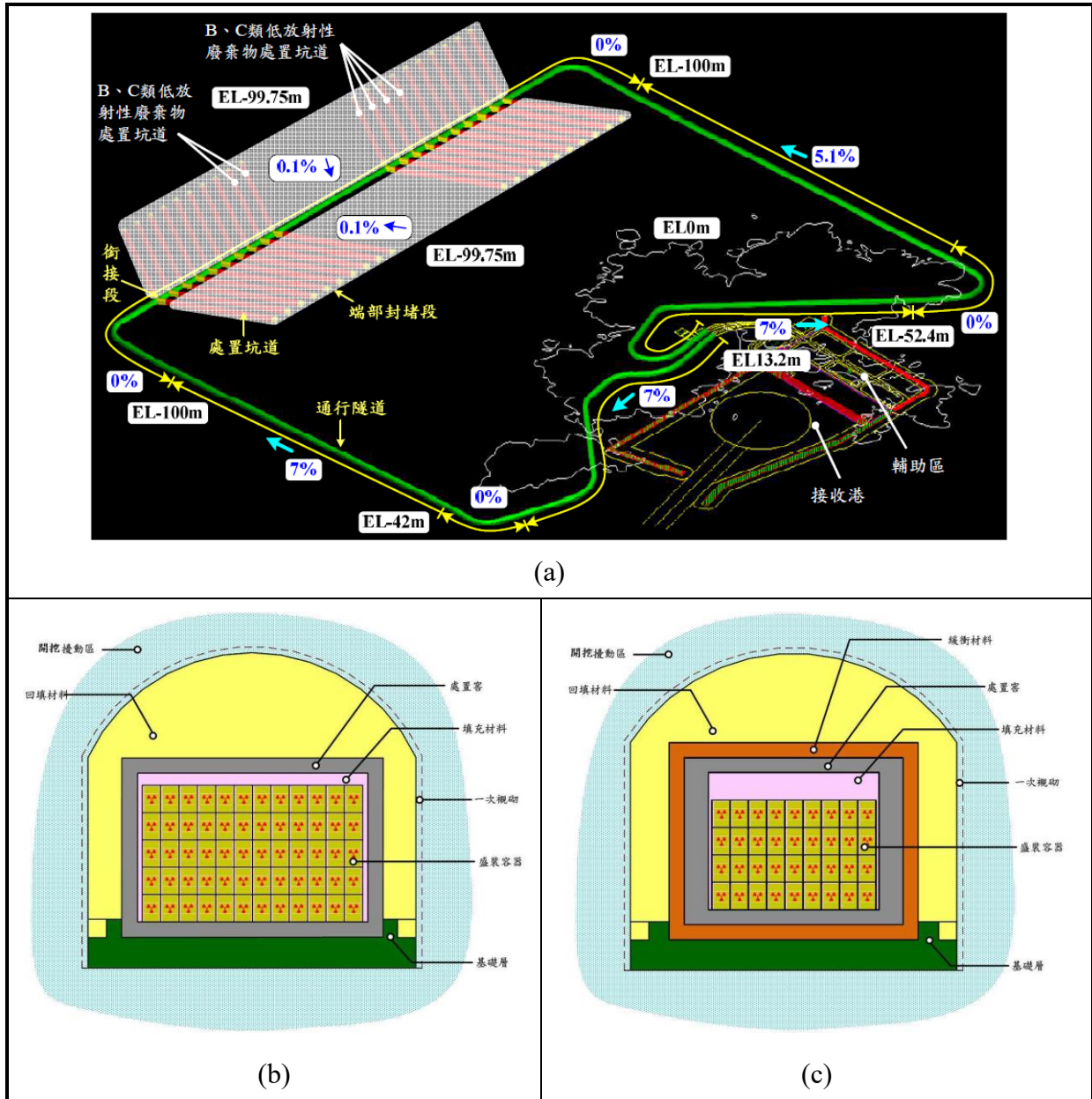


圖5.1-2 金門縣烏坵鄉低放處置設施建議候選場址：(a)設施空間配置與重力排水規劃示意圖、(b) A 類低放射性廢棄物、(c) B、C 類低放射性廢棄物處置坑道工程障壁設計(台電公司，2017)



表5.1-1 國內低放處置設施建議候選場址之比較

|           | 達仁鄉低放處置設施建議候選場址                                               | 烏坵鄉低放處置設施建議候選場址                                               |
|-----------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 設施空間配置示意圖 |                                                               |                                                               |
| 處置場型式     | 陸地坑道處置                                                        | 水下岩床坑道處置                                                      |
| 地質條件      | 硬頁岩，內含許多地質弱面                                                  | 堅實花崗岩(岩體有偉晶岩脈與基性岩入侵有兩組剪力節理、一組解壓節理)                            |
| 坑道岩覆深度    | A類處置坑道深度 > 62.2 m<br>B、C類處置坑道深度 > 76.4 m                      | 處置坑道上方岩覆為 58.8 m~59.0 m                                       |
| 坑道數與坑道總長度 | 13 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 2 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,938 m。 | 34 條 A 類低放射性廢棄物處置坑道，以及 6 條 B、C 類低放射性廢棄物處置坑道，處置坑道總長度為 8,800 m。 |
| 坑道斷面及尺寸   | 坑道斷面採圓形設計，寬 8.5 m，高 5.9 m                                     | 坑道斷面採倒 D 型(馬蹄形)設計，寬 8.5 m，高 5.9 m                             |
| 坑道間距      | 處置設施所需之淨寬度至少 12.1 m                                           | 處置設施所需之淨寬度至少 10.7 m                                           |

## 5.2 處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議

綜整前述各章節蒐整之資料，分別依外力因素、環境因素與非力學因素三部分，針對其與處置坑道結構穩定有關之驗證評估技術提出下列幾點建議：

### (1) 外力因素

#### A. 地震作用的影響

- 必須根據場址特性及歷史地震紀錄的蒐整，提出合理的設計基準地震。
- 大地材料在考量地震力條件下的力學參數及其相關試驗項目。
- 進行處置坑道結構耐震分析時，必須根據坑道所處深度是否需考量慣性效應及鄰近變形帶的影響，選擇適當的分析方法(擬靜態分析法或動態歷時分析法)，惟針對不同覆蓋深度條件下之加速度反應，國內尚欠缺相關的紀錄與分析。

- 洞口段與洞門段(含洞門)之耐震設計必須考量覆土與側壓之慣性力影響。
- 需確認通行隧道與處置坑道之銜接段在地震力作用下之結構完整性。
- 需確認洞口段邊坡在地震力作用下是否仍保持穩定。

#### B. 邊坡作用

- 處置場通行隧道之出入口及周邊設施，需藉由開挖、回填及整地等以達到需求之面積，參酌一般隧道洞口段經驗，若隧道緊鄰山坡，必須評估邊坡災害可能性及偏壓對隧道結構安全的影響，此部分可於設計規劃階段，參考[山岳隧道工程設計及實例手冊\(1999\)](#)整理之隧道進洞方向與地形的關係注意事項，以避開邊坡災害潛勢高及可能存在偏壓條件之影響。
- 通行隧道之出入口位置的選擇原則，應充分掌握其鄰近地形、地質及地下(表)水等自然條件，並檢覈洞口完成後之坡面穩定性、引發自然災害之可能性、鄰近結構物之相互影響與營運維護管理之需要。
- 自然坡面進行洞口開挖時，應考慮地盤特性及隧道軸線與地形成何種角度進入地盤內，同時應將隧道洞口段開挖方式一併納入邊坡穩定分析之架構內，再根據分析所需穩定力量選用符合施工性、經濟性與安全性的穩定措施。
- 進行邊坡穩定分析時，除考量邊坡穩定問題外，應將坑道洞口段可能受到邊坡運動之影響一併納入。

#### C. 開挖擾動

- 不同的開挖方法對隧道周圍岩盤的擾動程度不一，就擾動程度而言，以鑽炸法的擾動程度最高，機械法最小。採鑽炸法時，可能形成的鬆動破碎區將造成支撐系統額外的載重，機械法開挖可降低此部分的影響。
- 根據[2.2.1節](#)整理之 Äspö 硬岩實驗室 TASS 坑道分析經驗，可知坑道採取爆破(blasting)方式開挖，有 44% 的頂拱鬆動岩塊是來自孔底裝藥(bottom charge of blast round)，23% 來自岩體裂隙的切割(multiple fractures)，20% 來自水平裂隙(horizontal fracture)的影響，據此，應審慎考量圍岩力學特性、裝藥量及裂隙位態對開挖擾動可能的影響。

## (2) 環境因素

- 岩石材料在持續相同應力狀態下，隨時間產生之變形行為稱之為潛變 (creep)，即為岩石材料依時性變形行為。常見的依時變形模式以黏彈模式中的柏格模式(Burgers model)為岩石力學相關試驗所採用。此外，岩體材料變形模數、強度與岩層組成比例對岩體依時變形特性具顯著影響(詹尚書, 2012)。
- 「低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究」成果報告(楊長義等人, 2017)以翟山坑道為假想案例進行環境因素之影響探討，發現除側壁與頂拱有局部的楔型岩塊破壞外，坑道斷面形狀維持良好。惟部分侵入花崗岩體之基性岩脈因地下水入滲已呈現風化現象，及洞口附近圍岩亦因地表水作用而呈現高度風化至完全風化狀態。此外，在台鐵南迴線安朔隧道假想案例探討部分，其所處地質條件屬第III至V類之岩體分類，根據其在施工階段所遭遇的工程地質問題與後續檢測之結果，建議應審慎評估其大地材料依時變形與弱軟化特性。
- 綜上，應審慎考量採用之分析方法、材料組成模式與材料力學參數(變形模數與強度)，以反映坑道圍岩依時變形特性之影響。此外，考量國內岩石的風化特性，除於「場址特性調查」階段進行相關大地材料之試驗與調查外，亦於「場址特性描述與參數評估項目」部分，加入岩性、岩相等受風化影響具顯著變異的評估因子，以增進坑道長期穩定性之安全評估。

## (3) 非力學因素

- 隧道為維持穩定，開挖後常施以混凝土襯砌或鋼支保作為支撐，若因設計不佳或施工不當而產生材料劣化，將無法提供充足的結構能力，長期衍生隧道安全顧慮。應審慎考量混凝土中性化、鋼筋保護層厚度、鹼值粒料反應、冷縫及襯砌背後空洞或厚度不足等非力學因素對襯砌結構的影響
- 可應用各種檢測技術包括光學檢測、導電與電子檢測、物理波動檢測等技術，掌握坑道斷面的穩定性、襯砌是否有可疑裂縫的產生與持續發展、混凝土品質劣化與鋼筋銹蝕等狀況。

## 第六章、我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議

總結前述各項工作成果，提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定審查重點與注意事項，並依「[低放射性廢棄物最終處置設施安全分析報告審查導則\(第0版\)](#)」與本研究有關之章節進行研析與討論，提出低放處置審查導則(第0版)相關條文修訂建議，詳表6.1-1。

表6.1-1 審查導則編修要點建議

|                | 原條文內容                                                                                                                                                                                     | 建議修訂內容                                                                                                                                                                         |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 第二章<br>場址之特性描述 | <p><b>2.4 地質與地震</b></p> <p><b>2.4.3 審查要點與接受基準</b></p> <p>(5) 場址效應：為了估算場址的地表震動，必須先了解震源至場址的地震波傳遞特性。此外，岩盤上覆材料對於地震波有放大或衰減的作用，故應該加以描述。這些覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數的資料應加以陳述，計算使用的方法和皆須敘明。</p> | <p>(5) 場址效應：為了估算場址的地表震動，必須先了解震源至場址的地震波傳遞特性。此外，岩盤上覆材料對於地震波有放大或衰減的作用，故應該加以描述。這些覆蓋材料及岩盤的壓力波速或剪力波速、統體密度以及剪力模數<del>的等</del>資料<del>應加以陳述</del>，<u>及</u>計算使用的方法和<u>或數據來源</u>皆須敘明。</p> |
|                | <p><b>2.11 大地材料</b></p> <p><b>2.11.2 程序審查</b></p> <p>5. 地層與設計參數</p> <p>(4) 大地工程特性描述應包括與生命週期評估有關之資料，包括依時性、場址建造、運轉以及封閉期的各項擾動可能造成大地工程特性的變化，例如開挖擾動對坑道圍岩強度、導水特性的影響。</p>                        | <p>5. 地層與設計參數</p> <p>(4) 大地工程特性描述應包括與生命週期評估有關之資料，包括<u>材料</u>依時性、場址建造、運轉以及封閉期的各項擾動可能造成大地工程特性的變化，例如開挖擾動對坑道圍岩強度、<u>岩體變形特性與</u>導水特性的影響。</p>                                        |



|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>第七章<br/>                 設施之安全評估</p> | <p><b>7.4 長期穩定</b><br/> <b>7.4.2 程序審查</b><br/>                 1. 靜態穩定性<br/>                 (1) 分析應包括不同的土壤介質以及作用力之邊界與材料特性。<br/>                 2. 動態穩定性<br/>                 動態穩定性需考量地震對土壤強度的影響，如同靜態穩定度，分析時需考量安全餘裕是否足夠。地震所引發之加速度，震波速度等皆為分析重點，各個場址類似的分析皆不盡相同，分析時仍以是否滿足保守的條件為原則。</p>                             | <p>1. 靜態穩定性<br/>                 (1) 分析應包括不同的<u>土壤大地材料介質</u>以及作用力之邊界與材料特性。<br/>                 2. 動態穩定性<br/>                 動態穩定性需考量地震對<u>土壤大地材料強度與變形特性</u>的影響，如同靜態穩定<u>度性</u>，分析時需考量安全餘裕是否足夠。地震所引發之<u>地盤</u>加速度，震波速度等皆為分析重點，各個場址類似的分析皆不盡相同，分析時仍以是否滿足保守的條件為原則。</p>                               |
|                                         | <p><b>7.4 長期穩定</b><br/> <b>7.4.2 程序審查</b><br/>                 4. 邊坡穩定性<br/>                 (2) 需根據第二章有關場址特性描述內容，整理邊坡穩定分析所需之地形資料、工程資料、地質剖面、大地工程材料參數與地下水位等資料。<br/>                 (4) 邊坡穩定性評估說明項目應包含：場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、邊坡穩定性材料與土壤參數、邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、邊坡使用借土材料的特性、夯實工作與夯實後材料的強度、所採用之有關土壤與</p> | <p>4. 邊坡穩定性<br/>                 (2)需根據第二章有關場址特性描述內容，整理邊坡<u>靜態</u>穩定分析所需之地形資料、工程資料、地質剖面、大地工程材料參數與地下水位<u>等資料</u>，及進行<u>邊坡動態穩定分析所需之設計基準地震等資料</u>。<br/>                 (4)邊坡穩定性評估說明項目應包含：場址地質對於穩定性可能的影響、場址調查所使用之大地工程與地球物理技術、邊坡穩定性材料與土壤參數、邊坡區域的地下水位面位置以及變動範圍、邊坡使用借土材料的特性、夯實工作與夯實後材料的強度、所採用之有關土壤與岩</p> |

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                         | <p>岩石之參數</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>石之參數，<u>及地震力對邊坡穩定性的可能影響。</u></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>第七章<br/>                 設施之安全評估</p> | <p>7.4.3 審查要點與接受標準</p> <p>4. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性</p> <p>a. 是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。</p> <p>b. 是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖或剖面圖，用以展現邊坡的地層。</p> <p>c. 邊坡穩定性材料與土壤參數之測試是否符合相關大地工程專業規範。</p> <p>d. 是否充分考慮地下水對邊坡穩定性的影響。</p> <p>e. 借土材料穩定性與強度參數是否經過適當的材料樣品測試。</p> <p>f. 材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> | <p>4. 邊坡穩定性</p> <p>(1) 場址/邊坡區域特性</p> <p>a. 是否有充足的地質相關工作足以描述場區的地質特性。</p> <p>b. 是否有場址附近的調查位置(鑽孔、探針、試坑、槽溝、震測線、水壓觀測井)、地質剖面、穩定性調查的邊坡位置等，應有清楚的描述並繪製成圖或剖面圖，用以展現邊坡的地層。</p> <p>c. 邊坡穩定性材料與土壤參數之測試是否符合相關大地工程專業規範。</p> <p>d. 是否充分考慮地下水對邊坡穩定性的影響。</p> <p>e. 借土材料穩定性與強度參數是否經過適當的材料樣品測試。</p> <p>f. 材料選擇、夯實準則、溼度、級配、品保測試頻率等是否均有詳細施工規範。</p> <p>g. <u>是否充分考慮地震力對邊坡穩定性的影響。(建議新增)</u></p> |

## 第七章、結論

本計畫透過蒐集並研析(1)國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術，與(2)國內一般隧道設計方法與施工規範，繼而探討(3)處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性、提出(4)處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議與(5)我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議。本計畫依約所完成之各項工作成果，綜整如下：

### (1) 國際間有關處置坑道結構穩定分析之審驗評估項目與所需驗證技術

本項工作區分「處置結構穩定有關之試驗、檢監測項目」、「國際間與處置坑道結構有關之數值分析與工程案例」、「岩石損傷特性與坑道開挖擾動之研究」與「地震對處置坑道的影響」等四個部分進行國際資訊蒐整與研析。其中，在「地震對處置坑道的影響」部分，所蒐整之日本瑞浪地下實驗室之地震引致加速度歷時反應紀錄，及國際間有關地震造成之一般隧道破壞案例與影響因子探討，有助於瞭解處置坑道在地震力作用下的行為、不同岩覆深度下的加速度反應及隧道可能的破壞型態。

### (2) 國內一般隧道設計方法與施工規範

本項工作蒐整了國內一般隧道之設計方法與施工規範，另因考量國內尚無隧道耐震設計相關規範，僅在既有的一般規範或技術報告中述及在隧道耐震設計需考量的注意事項，故一併蒐集了「日本隧道工程標準規範及解說-山岳工法篇」及「日本隧道工程標準規範及解說-潛盾隧道篇」。所整理的各種隧道耐震分析法之比較，詳表3.4-3，與山岳與土層隧道受震條件比較，詳表3.4-4，有助於掌握如何選定適切的隧道耐震分析法。

### (3) 處置坑道結構穩定驗證評估項目與我國相關規範關聯性

循前期研究將坑道結構穩定性之影響因素區分外力因素、環境因素與非力學因素。在外力因素部分，包括地震作用、邊坡作用與開挖擾動作用。地震作用整理於2.4節，針對邊坡作用與開挖擾動作用部分，則整理於本報告4.1節。此外，根據前述第三章之「國內一般隧道設計方法與施工規範」整理之施工規範、設計準則及相關技術文件，及「安全分析報告審查導則」各章節與上述之施工規範等文獻資料有關者，列表整理其間關聯，詳如4.4節之表4.4-1，以供發展處置坑道審驗技術之參考。

---

#### (4) 處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議

本章根據台電公司(2017)修訂第二版之「低放射性廢棄物最終處置技術評估報告」第四章處置設施概念設計與作業規劃，依處置場型式、地質條件、坑道岩覆深度、坑道數與坑道總長度、坑道斷面及尺寸、坑道間距等資料，綜整達仁與烏坵二處低放處置設施建議候選場址之比較表，詳如表5.1-1。此外，根據本研究內容，分別就可能遭遇之「外力因素」、「環境因素」與「非力學因素」整理出處置坑道結構穩定之驗證評估技術要項建議，詳如5.2節。

#### (5) 我國低放坑道處置結構穩定審查重點或注意事項建議

總結前述各項工作成果，本章提出符合我國地質與環境條件之低放處置坑道結構穩定性模式審驗重點，詳如表6.1-1。

---

## 參考文獻

- [1] 王泰典、李宏輝、李佳翰，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術研究，行政院原子能委員會核能研究所，2012。
- [2] 王泰典、李宏輝、李佳翰，坑道處置設施設計及其穩定性評估之審查技術服務，行政院原子能委員會核能研究所委託研究計畫，2013。
- [3] 李佳翰(2012)：山岳隧道襯砌異狀肇因診斷技術研究，國立臺北科技大學工程科技研究所博士論文。
- [4] 李紫彤(2015)：岩石隧道依時變形案例與黏彈塑模式應力門檻之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。
- [5] 陳正勳、侯嘉松、黃燦輝，山岳隧道受震行為及分析模式探討，中華技術，vol. 77，2008。
- [6] 郭雅雯(2012)：岩石風化之力學特性與微觀組構變化暨吸附二氧化碳能力之研究，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。
- [7] 詹尚書、劉曉樺、王泰典、秦德、蕭富元(2012)：岩體依時變形特性之隧道變位計測結果案例探討，第十一屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會論文集，11月1-2日，台灣溪頭，A10-1~9。
- [8] 詹佩臻(2009)：海岸山脈邊坡穩定特性之探討－以水璉礫岩邊坡為例，國立臺北科技大學資源工程研究所碩士論文。
- [9] 楊長義、李宏輝，低放射性廢棄物坑道處置結構穩定性驗證方法研究，行政院原子能委員會核能研究所，2017。
- [10] 楊長義、李宏輝，處置坑道結構長期穩定強化及監測方法之研究，行政院原子能委員會核能研究所，2014。
- [11] 楊定良、王起平、黃隆茂(2008)：「混凝土修補－材料性質選擇要點(一)」，現代營建月刊 347 期，25-38。
- [12] 鍾東志(2013)：混凝土堤防鋪面劣化安全評估方法之探討，國立屏東科技大學土木工程所碩士論文。
- [13] 闕禮琳、詹佩臻、王泰典、羅偉、翁祖炘(2009)：風化弱軟化岩石引致邊坡失穩案例探討－以水璉礫岩邊坡為例，礦冶，53(4)，67-76。

- 
- [14] 盧志杰(2009)：隧道受震反應分析之研究，國立中央大學土木工程學系博士論文。
- [15] 台灣電力公司，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告，2017。
- [16] 內政部，結構混凝土施工規範，2002。
- [17] 中國土木水利工程學會，隧道工程設計準則與解說，1999。
- [18] 中華民國隧道協會，山岳隧道工程設計與實例手冊，1999。
- [19] 中華民國隧道協會，軟土潛盾隧道工程設計與實例手冊，2004。
- [20] 中華民國隧道協會，潛盾隧道設計及施工準則與解說，2009。
- [21] 臺北市政府捷運工程局，台北捷運土木工程設計手冊，1998
- [22] 交通部，隧道施工技術規範，2003。
- [23] 交通部，公路工程施工規範，2013
- [24] 交通部，公路隧道設計規範，2017。
- [25] 交通部，公路隧道安全設施準則研訂，1998。
- [26] 交通部台灣區國道新建工程局，公路隧道消防安全設備設施設置規範，2010。
- [27] 行政院公共工程委員會，台灣地區隧道岩體分類系統暨隧道工程資料庫之建立，2003。
- [28] 日本原燃株式会社，低レベル放射性廢棄物の次期埋設に関する，2006。
- [29] Andersson C. Malmatorp J. (2009): Berguttag i TASS tunneler. Delresultat t o m September 2008. Svensk kärnbränslehantering AB, Report R-08-122, Stockholm, Sweden, 133 pp.
- [30] Adams, G. and Jager, A. (1980). Petroscopic Observations of Rock Fracturing Ahead of Stope Faces in Deep-Level Gold Mines. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 80 (6), pp. 204-209.
- [31] Bell, F. G., M.G. Culshaw (1998) : Petrographic and engineering properties of sandstones from the Sneinton Formation, Nottinghamshire, England, Quarterly Journal of Engineering Geology, 31(1), 5-19. Owen, G. N. and Scholl R. E. 1981. Earthquake Engineering of Large Underground Structures. FHWA/RD-80/195. Prepared for Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation Washington, DC.

- 
- [32] Cloete, D. R. and Jager, A.J. (1972-1973). The Nature of the Fracture Zone in Gold Mines as Revealed by Diamond Core Drilling. Johannesburg, South Africa: Association of Mine Managers.
- [33] Dowding, C.H., and Rozen, A. 1978. Damage to Rock Tunnels for Earthquake Shaking. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 104, No. GT2, pp. 175-191.
- [34] Detournay, E., and St. John, C.M. 1988. Design charts for a deep circular tunnel under non-uniform loading. Rock Mechanics and Rock Engineering, 21(2): 119–137
- [35] Diederichs MS. 2003. Rock fracture and collapse under low confinement conditions. Vol. 36(5). Rock Mechanics and Rock Engineering 36: 339-381 Crossref, ISI, Google Scholar.
- [36] Diederichs M.S. (2007) **The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling.** Volume 44, Issue 9, September 2007, Pages 1082-1116
- [37] Diederichs, M. (2010). Brittle Spalling – Practical Limits. BEFO2010, Swedish National Rock Mechanics Conference. Stockholm, Sweden.
- [38] Fairhurst, C., and N.G.W. Cook. 1966. The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface. In Proceedings of the First Congress on the International Society of Rock Mechanics, (Lisbon, Portugal, Sept. 25-Oct 1, 1966). Lisbon, Portugal: Nat. Lab. of Civil Eng., V. 1, pp. 687-692.
- [39] Ghazvinian, Ehsan., Perras, Matthew A., Langford, J.C., Diederichs, M.S., Labrie, D. (2013) A comprehensive investigation of crack damage anisotropy in Cobourg limestone and its effect on the failure envelope. 66th Canadian Geotechnical Conference
- [40] Henrik Ittner (2011) : A case study of the TASS tunnel in Äspö Hard Rock Laboratory, Master of Science Thesis in the Master's Programme Geo and Water Engineering
- [41] Jeng., F. S., Weng., M. C., Lin., M. L. and Huang., T. H. (2004) "Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of tertiary sandstones from Taiwan", Engineering Geology 73, 71-91.
-

- 
- [42] Kuesel, T. R. (1969). Earthquake Design Criteria for Subways. *Journal of the Structural Divisions, ASCE*, 95:ST6: 1213-1231.
- [43] MARTIN, C. D., CHANDLER, N. A. (1994): The Progressive Fracture of Lac du Bonnet Granite
- [44] Newmark, N. M. (1968). Problems in Wave Propagation in Soil and Rock. *International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of earth Materials, ASCE*, 7-26.
- [45] Owen G N, and Scholl, RE (1981) "Earthquake Engineering of Large Underground Structures", prepared for the Federal Highway Administration, FHWAIRD-801195
- [46] Read, R.S. (2004). 20 Years of Excavation Response Studies at AECL's Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41 (8), pp. 1251-1275.
- [47] Sabatakakis N., Koukis G., Tsiambaos G., Papanakli S. (2008) Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology* 97:80–90.
- [48] Strozzi, T., Delaloye, R., Poffet, D., Hansmann, J. and Loew, S. (2011): Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 115, 1353-1360.
- [49] Sulem, J., M. Panet and A. Guenot (1987a): Closure analysis in deep tunnels. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24(3), 145-154.
- [50] Sulem, J., M. Panet and A. Guenot (1987b): An analytical solution for time-dependent displacement in a circular tunnel. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24(3), 155-164.
- [51] Shemyakin, E.I., Fisenko, G.L., Kurlenya, M.V., Oparin, V.N., Reva, V.N., Glushikhin, F.P., Rozenbaum, M.A., Tropp, É.A., and Kuznetsov, Y.S. (1986). Zonal Disintegration of Rocks Around Underground Workings, Part 1: Data of in Situ Observations. *Soviet Mining* 22 (3), pp. 157-168.
-

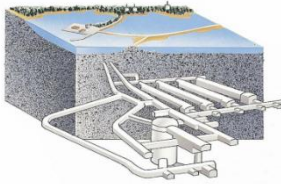
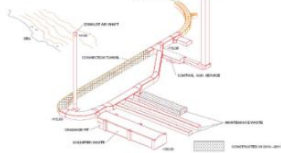


- 
- [52] Shemyakin, E.I., Fisenko, G.L., Kurlenya, M.V., Oparin, V.N., Reva, V.N., Glushikhin, F.P., Rozenbaum, M.A., Tropp, É.A., and Kuznetsov, Y.D. (1987). Zonal Disintegration of Rocks Around Underground Mines, Part III: Theoretical Concepts. *Soviet Mining* 23 (1), pp. 1-6.
- [53] Shen, B. and Barton, N. (1997). The Disturbed Zone Around Tunnels in Jointed Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34 (1), pp. 117-125.
- [54] Siren, T., Kantia,P., Rinne,M.(2015) Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 73 (2015) 165–174
- [55] Svensk Kärnbränslehantering AB Technical Report TR-01-38, Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository,2001
- [56] Sharma, S. and Judd, W.R., 1991. Underground opening damage from earthquakes. *Eng. Geol.*, 30:263-276.
- [57] Strozzi, T., Delaloye, R., Poffet, D., Hansmann, J. and Loew, S. (2011): Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry, *Remote Sensing of Environment*, 115, 1353-1360.
- [58] St. John, C. M: & Zahrah, T. F. (1987). Aseismic design of Underground Structures. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2: 247-293.
- [59] Tan X., Chen W., Yang J., Cao J. (2011) Laboratory investigations on the mechanical properties degradation of granite under freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology* 68: 130–138.
- [60] Tan, Y.L., Ning, J.G., and Li, H.T. (2012). In Situ Explorations on Zonal Disintegration of Roof Strata in Deep Coalmines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 49, pp. 113-124
- [61] Weng, M. C. and Li., H. H., (2012) “Relationship between the deformation characteristics and microscopic properties of sandstone explored by the bonded-particle
-

- 
- model”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science* 56, 34-43. Zangerl, C., Evans, K.F., Eberhardt, E. and Loew, S. (2008): Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 1—Investigations above the Gotthard highway tunnel, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 1195-1210.
- [62] Zhou, X. and Shou, Y. (2013). Excavation-Induced Zonal Disintegration of the Surrounding Rock Around a Deep Circular Tunnel Considering Unloading Effect. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 64 (0), pp. 246-257.
- [63] Zangerl, C., Evans, K.F., Eberhardt, E. and Loew, S. (2008): Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 1—Investigations above the Gotthard highway tunnel, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 45, 1195-1210.
- [64] 瑞浪地下實驗 <https://www.jaea.go.jp/04/tono/miu/mium.html>.

## 附錄A

表附錄 A-1 國外處置坑道監測項目、儀器與位置彙整(楊長義與李宏輝，2014)

|                                                                               | 處置型式                                                                                                 | 監測項目與目的                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 監測儀器/位置                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>瑞典 SFR-1</b></p> <p>建造: 1983<br/>                     運轉: 1988</p>      | <p>離岸海床之坑道處置</p>    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石力學<br/>                             聯絡坑道與處置坑道的岩盤穩定性</li> <li>2. 水文地質<br/>                             (1)岩體導水特性<br/>                             (2)地下水入滲</li> </ol>                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 伸張計/固定在岩壁上，或架設在頂拱與垂直側壁上部邊緣以量測岩體的依時變形</li> <li>● 雙封填塞(straddle-packer tests)導水試驗/鄰近地質破裂帶之坑道</li> </ul>                                                                          |
| <p><b>Olkiluoto VLJ</b></p> <p>建造: 1988<br/>                     運轉: 1992</p> | <p>近岸陸地之坑道處置</p>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石力學<br/>                             (1)坑道之岩盤穩定性<br/>                             (2)單一潛在滑動岩塊<br/>                             (3)坑道斷面收斂</li> <li>2. 溫度</li> <li>3. 水文地質<br/>                             (1)地下水入滲<br/>                             (2)水力高差</li> </ol> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 伸張計、荷重計/坑道結構襯砌</li> <li>● 裂縫計/滑動岩塊界面兩側</li> <li>● 伸張計、捲尺收斂計/大廳(hall)與處置窖</li> <li>● 溫度計</li> <li>● 抽水站/處置窖上、下二側</li> <li>● 鑽孔與多液位式水壓計(multilevel piezometer)/鑽設監測孔位</li> </ul> |
| <p><b>Loviisa VLJ</b></p> <p>建造: 1993<br/>                     運轉: 1997</p>   | <p>近岸陸地之坑道處置</p>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 岩石力學<br/>                             岩石坑道的長期穩定性</li> <li>2. 水文地質<br/>                             地下水入滲</li> </ol>                                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 伸張計、荷重規、熱感應貼片與裂縫位移計/維修廢棄物坑道與低放射性固化廢棄物處置坑道的交叉斷面</li> <li>● 地下水水頭量測、多液位式水壓計、新鮮/鹽水地下水介面</li> </ul>                                                                                |





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

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全  
審驗技術建立之驗證評估研究  
子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置長期  
安全驗證評估之研究  
期末報告

計畫編號：107FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：李明旭

受委託機關(構)：國立中央大學

報告日期：中華民國 107 年 12 月



# 107 年低放射性廢棄物坑道處置安全

## 審驗技術建立之關鍵課題研析

### 子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置長期 安全驗證評估之研究

受委託單位：國立中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫四主持人：李明旭

研究期程：中華民國 107 年 2 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 99.6 萬元(子計畫四經費)

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 107 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)





## 摘要

安全評估為放射性廢棄物最終處置計畫之重要工作項目之一，評估處置設施之長期安全需仰賴許多輸入資料的正確提供，因此安全評估所需之關鍵資料需建立嚴謹之資料審驗標準程序，確保所使用資料可以掌握場址特徵、工程設計參數與地質圈特性，且其資料品質與適用性足以涵蓋安全評估所需考慮之長期評估時間。本年度研析瑞典 SKB SR-PSU 場址技術報告 TR-14-10 為與資料品質保證審驗技術有關，資料品質的審驗須由資料使用者、資料提供者、SR-PSU 團隊三方共同參與，資料使用者可依過去使用經驗提出需求，資料提供者應提出佐證資料，如資料蒐集與處理過程、資料來源與品保文件、資料適用條件、資料不確定性、空間及時間變異等，再由 SR-PSU 團隊專業領域專家進行審核並提出需資料提供者與資料使用者回覆的問題，也就是由三方共同建議合格資料，確保資料取得、應用至篩選與評估具有可追溯性，因此安全評估資料品質保證可透過建立(資料提供端)-(資料使用端)-(資料審驗端)的三方對話溝通平台機制或架構來達成。安全評估模式與輸入資料涵蓋眾多學科領域，瑞典 SKB 技術報告 TR-14-12，根據輸入資料與模擬活動的關聯性提出評估模擬流程圖(AMF)，將資料依照學科領域或應用方法等進行分類，以導覽簡介的方式提供資料使用者查詢特定資料流，提供資料特性說明，如資料來源、方法用途、資料取得方法等便於進行資料流審驗。

除前述工作外，本年度整合前二年度所發展之近岸環境坑道處置之遠場傳輸數值模擬技術與近場核種傳輸數值模擬技術，並參考台電 LLWD2016 報告建立新的遠場數值模擬網格，使用 HYDROGEOCHEM 系列模式進行多子核種流場與傳輸整合數值模擬，包含近場處置坑道、近場處置設施與遠場等三種不同解析度網格模擬，模擬結果顯示遠場流場趨勢與地形有關，主要由西向東流入海域，遠場地下水流速約大於近場處置設施與場處置坑道地下水流速三個數量級，而近場處置坑道內部流場因工程障壁材質差異，於處置坑道頂部及底面流速較快，且 A 類廢棄物處置坑道流速略高於 B、C 類廢棄物處置坑道，多子核種傳輸模擬結果，近場處置坑道核種外釋方式以擴散為主， $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  為主要外釋核種，遠場核種傳輸以  $^{14}\text{C}$  及  $^{99}\text{Tc}$  濃度佔比較高，本研究所建立之多子核種傳輸整合模擬技術未來可提供做為安全評估平行驗證所需工具之一。

# Abstract

Safety assessment is one of the most important tasks in radioactive waste final disposal projects. Assessing long-term safety of final disposal requires numerous and accurate input data. It is necessary to establish quality assurance procedures to ensure key data used in safety assessments reasonable to represent site characteristics, engineering design parameters, and geosphere features and reliable to cover the need of long-term evaluations. Data report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-10, of the SKB provides systematic qualification procedures to acquiring qualified data and their verifications, including data related to safety functions at the SR-PSU site. Data quality assurance is responsibilities of data providers, data users, and SR-PSU internal reviewers. Data users provide the need of data list based on past assessment experiences Source of data, how data collected, data quality report, data limitations, data uncertainties, spatial and temporal variations of data should be provided by the data providers to assure data quality. The SR-PSU internal reviewers may ask data users and data providers for questions or supporting documents. Successful data quality assurance relies on communications among data users, data providers, and SR-PSU internal reviewers. Safety assessments and input data often involve numerous expert knowledge from different disciplinary. Input data report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-12, is a very helpful example for building a compilation of input data and references to input data involved in many different simulation activities developed for the post-closure safety assessment. The report uses the Assessment Model Flowchart (AMF) to map the data flows between each assessment activity. By building the AMF and data report, any data involved in the safety assessment activities can be easily traced for source, definition, values, ranges, data storage, and to be used in what assessment activities.

In addition to above tasks, simulation techniques developed in the past two years studies were integrated to simulate multi-species transport with radionuclide decay chains by the HYDROGEOCHEM models. Far-field simulation grids were modified with domain simulated in the LLWD2016 report of the Taiwan Power Company. Simulation grids were built including near-field disposal tunnels, near-field disposal facilities, far-field geosphere with different spatial resolutions. Simulated results of far-field flow fields were mainly influenced by terrain topography from east to west into the costal sea. Far-field groundwater velocities were three-order larger than those

observed in both near-field tunnels and facilities. Groundwater velocities in near-field tunnels for Type A wastes were a little bit higher than those for Types B/C wastes. Diffusion is the dominate mechanism for the release of radionuclides from near-field tunnels mainly contributed by  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{14}\text{C}$ , and  $^{99}\text{Tc}$ . However,  $^{14}\text{C}$  and  $^{99}\text{Tc}$  were major released radionuclides observed in far-field transport. Simulation techniques developed in this study can be used to one of tools to conduct cross verification for safety assessment of waste final disposal.



# 目錄

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 摘要.....                              | i   |
| Abstract.....                        | ii  |
| 圖目錄.....                             | vii |
| 表目錄.....                             | ix  |
| 第一章 前言.....                          | 1   |
| 第二章 國際坑道處置場址安全評估之關鍵資料品質保證審驗技術.....   | 4   |
| 2.1 SKB SFR 坑道處置概念.....              | 4   |
| 2.1.1 安全功能.....                      | 6   |
| 2.1.2 SR-PSU 模式架構.....               | 9   |
| 2.2 資料品質審驗架構.....                    | 12  |
| 2.2.1 使用者定義資料需求.....                 | 14  |
| 2.2.2 提供者確認需求並提供符合規範之資料.....         | 15  |
| 2.2.3 SR-PSU 團隊審核所提供並推薦適用資料.....     | 19  |
| 2.2.4 依據 SKB 標準程序進行審查.....           | 20  |
| 2.3 安全評估—金屬腐蝕.....                   | 21  |
| 2.3.1 SR-PSU 模擬所需的數據.....            | 22  |
| 2.3.2 過去的安全評估經驗.....                 | 22  |
| 2.3.3 提供者說明資料在 SR-PSU 及過去安全評估使用..... | 23  |
| 2.3.4 資料的來源資訊與品保文件.....              | 24  |
| 2.3.5 不同資料的適用條件.....                 | 25  |
| 2.3.6 概念不確定性.....                    | 25  |
| 2.3.7 精確度、偏差、代表性所導致的資料不確定性.....      | 25  |
| 2.3.8 空間及時間變異.....                   | 26  |
| 2.3.9 相關性.....                       | 26  |
| 2.3.10 所提供資料之品保審查結果.....             | 26  |
| 2.3.11 SR-PSU 團隊的審核.....             | 27  |
| 2.3.12 推薦用於 SR-PSU 模擬的數據.....        | 27  |
| 第三章 國際坑道處置場址安全評估之資料流審驗技術.....        | 28  |
| 3.1 評估模擬流程圖.....                     | 28  |

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 模板 .....                                                   | 29 |
| 3.3 範例_AMF Number 87.....                                      | 30 |
| 3.3.1 適用於所有體積岩石的吸附分配係數.....                                    | 30 |
| 3.4 範例_AMF Number 50.....                                      | 31 |
| 3.4.1 處置窖劣化混凝土水流量和流動方向 (x, y, z) 隨時間之變化                        | 31 |
| 3.5 範例_AMF Number 188.....                                     | 32 |
| 3.5.1 處置場設置區域等溫線最大深度.....                                      | 33 |
| 第四章 坑道處置多子核種傳輸驗證技術建立：發展坑道處置多子核種長期安全<br>驗證技術之遠場與近場整合數值模擬技術..... | 34 |
| 4.1 遠場與近場網格及水文地質環境介紹.....                                      | 34 |
| 4.1.1 遠場(地質圈).....                                             | 35 |
| 4.1.2 近場(處置設施).....                                            | 36 |
| 4.1.3 近場(處置坑道).....                                            | 38 |
| 4.2 多子核種傳輸數值模擬.....                                            | 41 |
| 4.2.1 流場模擬銜接方法.....                                            | 41 |
| 4.2.2 傳輸模擬銜接方法.....                                            | 44 |
| 4.2.3 多子核種衰變鏈及參數.....                                          | 46 |
| 4.3 多子核種傳輸數值模擬結果.....                                          | 51 |
| 4.3.1 流場模擬結果.....                                              | 51 |
| 4.3.2 傳輸模擬結果.....                                              | 54 |
| 第五章 我國低放坑道處置長期安全評估之資料品質保證審查重點或注意事項建<br>議.....                  | 63 |
| 第六章 結論與建議.....                                                 | 65 |
| 參考文獻.....                                                      | 67 |

## 圖目錄

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 圖 2.1 SFR 處置場示意圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3) (來源:Fig.S-1 in TR-14-01) ..... | 5  |
| 圖 2.2 SFR 處置場封閉詳細示意圖(來源：Fig.4-4 in TR-14-01) .....                     | 5  |
| 圖 2.3 SR-PSU 安全評估資料與模式架構(來源：Fig.8-2 in TR-14-01).....                  | 9  |
| 圖 2.4 核種傳輸與水文模式的耦合(來源：Fig.9-1 in TR-14-09) .....                       | 10 |
| 圖 2.5 近場三維水文模擬處置坑道幾何架構示意圖(來源：Fig.8-3 in TR-14-01) .....                | 10 |
| 圖 2.6 水文模擬處置窖區塊分區(左)、廢棄物包件控制體積(右)(來源:Fig.8-4 in TR-14-01) .....        | 11 |
| 圖 2.7 1BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖(來源：Fig.8-13 in TR-14-01) .....               | 11 |
| 圖 2.8 遠場水文地質模型示意圖(來源：Fig.9-20 in TR-14-09) .....                       | 12 |
| 圖 2.9 遠場核種傳輸概念模型(來源：Fig.9-21 in TR-14-09) .....                        | 12 |
| 圖 2.10 資料集中呈現差異的圖例(來源：Fig.2-2 in TR-14-10) .....                       | 20 |
| 圖 2.11 推薦資料表示圖例，取自 SR-Can Data 報告(來源：SKB，2006).....                    | 21 |
| 圖 3.1 TR-14-12 報告結構.....                                               | 28 |
| 圖 3.2 評估模擬流程圖(AMF) (來源：Appendix B in TR-14-12) .....                   | 29 |
| 圖 3.3 評估模擬流程_AMF Number 87 (來源：Appendix B in TR-14-12).....            | 30 |
| 圖 3.4 評估模擬流程_AMF Number 50 (來源：Appendix B in TR-14-12).....            | 31 |
| 圖 3.5 評估模擬流程_AMF Number 188 (來源：Appendix B in TR-14-12).....           | 32 |
| 圖 4.1 台東達仁溪流域高程.....                                                   | 35 |
| 圖 4.2 遠場網格正視圖.....                                                     | 35 |
| 圖 4.3 遠場網格剖面圖.....                                                     | 36 |
| 圖 4.4 近岸坑道處置設施俯視圖(來源：台灣電力公司，2016).....                                 | 37 |
| 圖 4.5 近場處置設施網格配置圖.....                                                 | 37 |
| 圖 4.6 A 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016) .....                              | 39 |
| 圖 4.7 B、C 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016).....                             | 39 |
| 圖 4.8 二維近場處置坑道網格圖.....                                                 | 40 |
| 圖 4.9 流場模擬及傳輸模擬銜接流程圖.....                                              | 41 |
| 圖 4.10 遠場流場邊界條件.....                                                   | 42 |

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 圖 4.11 近場處置設施流場邊界條件.....                                                                                                                                                      | 43 |
| 圖 4.12 近場處置坑道流場邊界條件.....                                                                                                                                                      | 43 |
| 圖 4.13 近場處置坑道傳輸邊界條件.....                                                                                                                                                      | 44 |
| 圖 4.14 近場處置設施傳輸邊界條件.....                                                                                                                                                      | 45 |
| 圖 4.15 遠場傳輸邊界條件.....                                                                                                                                                          | 45 |
| 圖 4.16 遠場總水頭與流場分佈圖.....                                                                                                                                                       | 52 |
| 圖 4.17 遠場地下水位線分佈圖.....                                                                                                                                                        | 52 |
| 圖 4.18 近場處置設施總水頭與流場分佈圖.....                                                                                                                                                   | 53 |
| 圖 4.19 近場處置設施壓力水頭分佈圖.....                                                                                                                                                     | 53 |
| 圖 4.20 近場處置坑道總水頭與流場分佈圖.....                                                                                                                                                   | 54 |
| 圖 4.21 近場處置坑道壓力水頭分佈圖.....                                                                                                                                                     | 54 |
| 圖 4.22 近場處置坑道觀測點位示意圖.....                                                                                                                                                     | 55 |
| 圖 4.23 A 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋濃度圖.....                                                                                                                                               | 56 |
| 圖 4.24 B、C 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋濃度圖.....                                                                                                                                             | 56 |
| 圖 4.25 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 不同坑道外釋濃度圖..... | 57 |
| 圖 4.26 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^3\text{H}$ 不同坑道外釋濃度圖.....                                               | 58 |
| 圖 4.27 遠場觀測點位示意圖.....                                                                                                                                                         | 59 |
| 圖 4.28 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 不同遠場觀測點外釋濃度圖.....                                   | 60 |
| 圖 4.29 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^3\text{H}$ 不同遠場觀測點外釋濃度圖.....                                            | 61 |



## 表目錄

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 表 2.1 長期安全評估處置設施各元件安全功能之潛在議題(來源：Table 5-2 in TR-14-01).....           | 7  |
| 表 2.2 選址工作相關之安全功能與安全指標(來源：Table 5-4 in TR-14-01).....                 | 8  |
| 表 2.3 安全功能與安全指標(來源：Table 5-3 in TR-14-01).....                        | 8  |
| 表 2.4 自 SR-PSU 安全功能中選用之重要項目(來源：Table 1.2 in TR-14-10).....            | 13 |
| 表 2.5 撰寫和審查資料報告的各階段(來源：Fig.2-1 in TR-14-10) .....                     | 14 |
| 表 2.6 合格資料主要來源(來源：Table 5.1 in TR-14-12) .....                        | 24 |
| 表 2.7 合格資料與輔助資料來源(來源：Table 5.2 in TR-14-12) .....                     | 24 |
| 表 2.8 碳鋼的腐蝕速率(來源：Table 5.3 in TR-14-12) .....                         | 26 |
| 表 2.9 不鏽鋼的腐蝕速率(來源：Table 5.4 in TR-14-12) .....                        | 27 |
| 表 2.10 鋅和鋁的腐蝕速率(來源：Table 5.5 in TR-14-12) .....                       | 27 |
| 表 3.1 關聯性表格(來源：1.4.2 in TR-14-12) .....                               | 30 |
| 表 3.2 關聯性表格_AMF Number 87 (來源：4.18 AMF Number 87 in TR-14-12) .....   | 30 |
| 表 3.3 關聯性表格_AMF Number 50 (來源：3.11 AMF Number 50 in TR-14-12) .....   | 31 |
| 表 3.4 關聯性表格_AMF Number 188 (來源：5.14 AMF Number 188 in TR-14-12) ..... | 32 |
| 表 4.1 台東達仁鄉水文地質參數(來源：台灣電力公司，2016).....                                | 36 |
| 表 4.2 近場處置設施模擬參數(來源：台灣電力公司，2016).....                                 | 38 |
| 表 4.3 近場(處置坑道)8 種障壁材質之水文與傳輸參數(來源：台灣電力公司，2016) .....                   | 40 |
| 表 4.4 第 1 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013).....                         | 47 |
| 表 4.5 第 2 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013).....                         | 47 |
| 表 4.6 第 3 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013).....                         | 48 |
| 表 4.7 第 4-10 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013).....                      | 48 |
| 表 4.8 第 11 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013) .....                       | 49 |
| 表 4.9 單一長半化期核種濃度值.....                                                | 50 |
| 表 4.10 單一短半化期核種濃度值.....                                               | 50 |
| 表 4.11 A 類及 B、C 類廢棄物核種濃度總量.....                                       | 51 |
| 表 4.12 關鍵核種在遠場所佔總濃度比例.....                                            | 62 |



# 第一章 前言

放射性廢棄物處置長期安全評估過程需仰賴許多輸入資料的提供，例如處置設施工程設計參數、近場尺度之場址特徵參數與遠場地質圈參數等等，因此安全評估所需之關鍵資料需建立嚴謹之安全評估資料審驗標準程序，確保所使用之資料足以代表處置設施之安全功能，且資料品質之可信賴度足以涵蓋安全評估所考慮之長期評估時間。因此國際先進國家透過建立相關資料報告以確保安全評估使用資料之品質，為支持處置場址申照審驗之重要技術報告之一。瑞典 SKB 對於 SR-PSU site 安全評估建立一系列技術報告，也包含與坑道處置場址安全評估之關鍵資料品質保證與資料流審驗技術有關之技術報告，本年度參考瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-10 (Data report for the safety assessment SR-PSU) 所採用之資料品質審驗技術及 TR-14-12 (Input data report for the safety assessment SR-PSU) 所採用之安全評估輸入資料審驗技術為本年度之安全審驗技術研析要項，目的在充分釐清安全評估之資料來源及品質審驗作業，以進一步提出國內未來低放坑道處置長期安全評估之資料品質保證審查重點或注意事項。

經濟部於 99 年 9 月 10 日公告 2 處低放射性廢棄物最終處置設施潛在場址，分別為「台東縣達仁鄉」及「金門縣烏坵鄉」，並於 101 年 7 月 3 日正式核定公告為建議候選場址。目前二處建議候選場址之最終處置設施主要處置方式皆為坑道處置，「台東縣達仁鄉」屬近岸坑道處置，「金門縣烏坵鄉」屬海床下坑道處置，兩處之安全評估亦因場址特性而產生差異。核種遷移與傳輸途徑為安全性評估重要一環，近場安全評估為確認坑道處置之工程障壁材質特性、規劃方式是否具有圍阻及遲滯之功效，遠場主要評估處置場址之水文地質環境所具備之遲滯功能是否足夠。二場址中「台東縣達仁鄉」應考慮海岸地區與近岸海域之遠場安全分析，而「金門縣烏坵鄉」之遠場安全分析則與海床下之海洋外釋有關。本計畫也延續前兩年度核種傳輸數值模擬技術建置要項持續以 HYDROGEOCHEM 系列模式發展坑道處置多子核種長期安全驗證技術之遠場與近場整合數值模擬技術。因此

本年度仍以「台東縣達仁鄉」之近岸坑道處置場址為研究案例，整合過去兩年度技術建置成果，包含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（李明旭與陳瑞昇，2016）及低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證技術研究（李明旭，2017），將遠場水文地質環境之傳輸數值模擬技術與近場處置設施之核種傳輸數值模擬技術銜接，建立坑道處置多子核種長期安全驗證技術之遠場與近場數值模擬網格整合並提供案例進行模擬測試，使用 HYDROGEOCHEM 系列模式進行近岸環境核種傳輸模擬，銜接由遠場到近場之流場模擬及近場到遠場之多子核種傳輸模擬，以提升國內核種傳輸安全評估管制技術並持續精進管制規範。

國內現有低放射性廢棄物最終處置相關之安全分析報告審查導則，在物管局歷經資料蒐集與彙整專家意見下已逐漸完善，而國內處置技術之發展多年來已涵蓋地球科學、水文、地質、工程等領域，包含低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式之審查技術（董家鈞、陳瑞昇，2005）、隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例（董家鈞、陳瑞昇，2006）、低放射性廢棄物最終處置設施安全審查規範（李境和，2007）、坑道式最終處置設施安全評估審查要項研究（李境和，2010）、安全評估模式審查規範（任春平，2008）、低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項（吳禮浩，2009）、坑道處置安全評估關鍵議題（張福麟，2011）、安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術（李明旭、董家鈞，2012）、低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究（李明旭、蔡世欽，2013；2014。李明旭、陳瑞昇，2015）、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（李明旭、陳瑞昇，2016）、低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證技術研究（李明旭，2017）。而為增進安全分析審查技術之精進，本年度研析瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-10 及 TR-14-12 取得國際間資料品質之審驗技術。TR-14-10 之資料品質驗證技術研析有助於提供國際之系統化資料品質審驗架構供國內發展相關審驗技術參考，提升國內輸入資料之品質審驗技術，減少因輸入資料不確定性所導致之風險評估誤差，以提升安全評估模擬之正確性，亦可檢視現有資料品質與管理是否有所缺失，提出國內資料品質審驗重點及注意事項。TR-14-

12 之資料流審驗技術研析有助於安全評估模式與輸入資料進行系統化釐清，該報告針對輸入資料與參考資料數據間之關聯性，提出整合性流程圖，可綜觀模式資料流，增加資料使用之便利性，並要求說明資料使用情形及原始資料來源，有助於安全評估模式輸入資料及參考資料之品質辨別。並把瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-10 及 TR-14-12 研析成果，包含資料品質驗證方法、模式輸入資料應用及資料流審驗技術，提出我國適合之低放射性廢棄物坑道處置場址長期安全評估輸入資料之品質審查重點及注意事項。

放射性廢棄物最終處置場址之安全評估為處置作業中重要的一環，安全評估的完整性與正確性直接影響民眾對最終處置計畫信心，為確保國內處置場址安全評估之品質與效益，能裨益於未來處置場址安全評估符合國際水平，應積極精進技術與國際接軌。本計畫近程目標除彙整國外放射性廢棄物處置設施安全評估審查之資料品保技術，亦不斷發展驗證評估所需之關鍵模擬技術，期待能協助解決國內於安全評估審查技術發展所面臨問題並規劃精進對策。而長程目標則希望透過先進模式工具整合發展協助管制單位於處置安全評估建立獨立審查及分析之技術能力。

## 第二章 國際坑道處置場址安全評估之關鍵資料品質保證審驗技術

放射性廢棄物安全性評估過程需仰賴大量輸入資料，且所跨資訊涵蓋各學科領域，為避免輸入資料的不確定性（資料不確定性、自然變異等）影響風險評估，本章主要研析瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-10 之安全評估關鍵資料品質保證審驗技術，以了解國際先進國家在資料品質保證審查程序。此技術報告利用品質保證方法（Quality Assurance）建立系統性審查程序以圖獲得適用於坑道處置場址安全性評估之高品質資料。評估方式著重於輸入資料之彙整、編輯及評估資料連接的安全性，並針對安全功能提出各種評估項目。

### 2.1 SKB SFR 坑道處置概念

瑞典 SFR 處置場位於 Forsmark，為波羅的海海床下處置，海床母岩為花崗岩。SFR 自 1988 年開始運轉用於短半化期之中、低階放射性廢棄物最終處置，SFR1 為現有設施，位於海床底下約 60 公尺，由 4 座處置窖與 1 座直立式混凝土貯存倉（Silo）組成，總處置容量大約為 63,000m<sup>3</sup>，放置核電廠產生之無需經過冷卻的放射性廢棄物，及輻射相關醫療、工業與研究機構產生之放射性廢棄物。SFR3 為新增設施包含 6 個處置窖，總處置容量約有 108,000m<sup>3</sup>，位於海床下約 120 公尺，將存放核電廠除役廢棄物與處置設施運轉廢棄物及 9 個沸水式反應爐之壓力容器。設施配置如圖 2.1，Silo 與 BMA 處置窖存放中階廢棄物、BTF 處置窖存放混凝土槽、BLA 處置窖存放低階廢棄物、BRT 處置窖存放反應爐壓力容器。

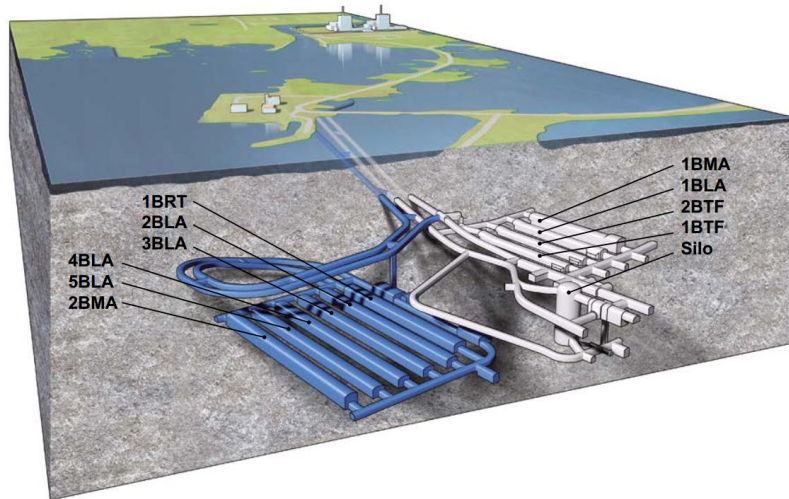


圖 2.1 SFR 處置場示意圖(灰色為現存 SFR1，藍色為新增 SFR3)(來源:Fig.S-1 in TR-14-01)

SFR 處置場封閉方式為 6 種材料類型交錯使用如圖 2.2，封閉材料種類圖例說明如下：

1. 阻絕元件（封閉進出通道）
2. 漸變材料（30/70 比例的膨潤土/粉碎岩塊混合而成）
3. 混凝土（力學阻隔）
4. 碎石回填
5. 膨潤土（水力密合）
6. 回填材料（封閉進出隧道及主要隧道）
7. 未回填開放區

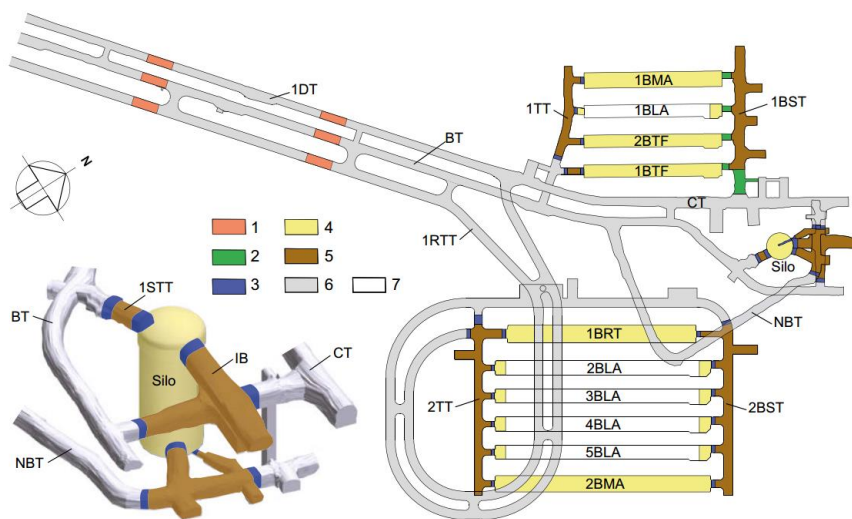


圖 2.2 SFR 處置場封閉詳細示意圖(來源：Fig.4-4 in TR-14-01)

處置坑道內部空隙以碎石進行回填，並安置混凝土於出口處做為力學阻隔，混凝土阻絕元件的安裝以隧道幾何尺寸、岩石性質為判斷，若因地型限制無法安置混凝土，利用回填碎石及漸變材料替代，力學阻隔自碎石回填到混凝土(回填、漸變材料)的部分稱為土壩阻絕元件 (earth dam plug)，外部以膨潤土進行水力密合阻攔流體維持內部位置固定，隧道封閉方法以回填材料填充所有隧道，並於進出隧道口安置阻絕元件，最後於進出隧道上部回填岩塊，以混凝土隔絕密封，將地表景觀回復與周遭一致，此外，所有 SFR 鑽井將會密封使周遭岩體不受水流影響。低放射性廢棄物處置場選址、運轉至利用回填材料、阻絕元件進行封閉，主要目的為減少水流經廢棄物並阻止人類闖入處置設施。

### 2.1.1 安全功能

安全原則、安全功能、安全指標為連貫之安全評估層級，主要目的皆為有效的將放射性核種隔絕，避免生物無意闖入，並將可能外放劑量控制在容許安全標準內。安全原則為限制長半化期核種的活度及遲滯核種，而安全功能具有限制活度量、好的遲滯、降低處置窖水流量、降低母岩水流量、避免有水井鄰近處置設施等五項，被視為處置設施內各元件長期評估之依據，且 SR-PSU 安全評估方法核心定義表示，處置場系統在一定時間範圍內須滿足一組安全功能，確定評估項目所對應之安全功能後將對所考慮之議題細項進行設定，即為安全指標，如表 2.1 以長期安全評估處置設施各元件安全功能之潛在議題為例，詳列各元件對應之議題，而表 2.2、2.3 整理出安全功能所對應之安全指標。

SFR 處置場之安全評估原則與 KBS-3 用過核子燃料處置場有所不同，因 KBS-3 處置場安全評估原則採取完全阻隔之方式，而 SFR 處置場以控制放射性廢棄物活度量、利用工程障壁與地質圈遲滯核種外釋作為主要目的，其中安全功能指標亦因應各處置窖內容物而有所變化，如表 2.3。此章節所研析之 TR-14-10 關鍵資料品質保證審驗技術範例項目與上述之安全功能相互對應，如核種衰變、核種盤存的不確定性與限制活度相關；金屬腐蝕及膨潤土、混凝土、母岩和礫石



之吸附資料屬於好的遲滯判斷範圍；母岩與礫石之吸附、混凝土之擴散與安全功能中降低處置窖水流相輔；混凝土擴散資料、SFR 水壓力場資料為降低母岩水流必備資料；海平面演變與避免水井鄰近處置設施相關聯。TR-14-10 關鍵資料品質審驗技術可對各項安全指標資料合格性進行審查，提供安全評估高品質資料。

表 2.1 長期安全評估處置設施各元件安全功能之潛在議題(來源：Table 5-2 in TR-14-01)

| 元件       | 議題                                     |
|----------|----------------------------------------|
| 廢棄物形式    | 活度<br>限制移流傳輸<br>力學穩定性<br>吸附<br>有利的化學條件 |
| 廢棄物包件    | 限制移流傳輸<br>力學穩定性<br>吸附<br>有利的化學條件       |
| 灌漿廢棄物包件  | 限制移流傳輸<br>力學穩定性<br>吸附<br>有利的化學條件       |
| 混凝土結構    | 限制移流傳輸<br>力學穩定性<br>吸附<br>有利的化學條件       |
| 灌漿       | 力學穩定性(運轉階段)<br>吸附<br>有利的化學條件           |
| 膨潤土與砂    | 力學穩定性<br>限制移流傳輸<br>吸附                  |
| 回填處置窖    | 力學穩定<br>吸附                             |
| 封閉元件與監測井 | 處置設施的吸附功能下限制移流傳輸                       |

表 2.2 選址工作相關之安全功能與安全指標(來源：Table 5-4 in TR-14-01)

| 安全功能        | 安全指標                                 |
|-------------|--------------------------------------|
| 降低處置窖水流量    | 低地震活動<br>低永凍土風險                      |
| 降低母岩內水流量    | 低地震活動與低的區域變形<br>低水力梯度母岩<br>低水力傳導係數母岩 |
| 避免有水井鄰近處置設施 | 低鑿井風險<br>低採礦風險                       |

表 2.3 安全功能與安全指標(來源：Table 5-3 in TR-14-01)

| 安全功能             | 安全指標                          | 元件                                                       |
|------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 安全原則：限制長半化期核種的活度 |                               |                                                          |
| 限制活度量            | 各處置窖之各核種活度                    | 1BMA, 2BMA, 1BTF, 2BTF, BRT, 1BLA, 2-5BLA 處置窖及筒倉內之放射性廢棄物 |
| 安全原則：遲滯核種        |                               |                                                          |
| 降低處置窖水流量         | 水力反差                          | 1-2BMA, 1-2BTF                                           |
|                  | 水力傳導係數                        | 筒倉及封閉元件中之膨潤土                                             |
|                  | 氣體壓力                          | 筒倉                                                       |
| 降低母岩水流量          | 水力梯度                          | 地質圈                                                      |
|                  | 水力傳導係數                        | 地質圈                                                      |
| 好的遲滯             | pH                            | 廢棄物包件中的摻料                                                |
|                  |                               | 1-2BMA, 1-2BTF, BRT 及筒倉之混凝土障壁                            |
|                  | 氧化潛能                          | 廢棄物包件中的摻料                                                |
|                  |                               | 1-2BMA, 1-2BTF, BRT 及筒倉之混凝土障壁                            |
|                  | 錯合劑濃度                         | 地質圈                                                      |
|                  |                               | 廢棄物包件中的摻料                                                |
| 可吸附面積            | 1-2BMA, 1-2BTF 及筒倉之混凝土障壁      |                                                          |
|                  | 廢棄物包件中的摻料                     |                                                          |
| 腐蝕速率             | 1-2BMA, 1-2BTF, BRT 及筒倉之混凝土障壁 |                                                          |
|                  | BRT 處置窖中之反應爐壓力容器              |                                                          |
| 避免有水井鄰近處置設施      | 入侵井                           | 地表環境                                                     |
|                  | 處置場下游水井                       | 地表環境                                                     |

## 2.1.2 SR-PSU 模式架構

SR-PSU 安全評估資料與模式架構如圖 2.3 所示，為簡化之模式串連及資料流相關聯結示意圖，模式架構由近場（處置場:廢棄物及工程障壁）、遠場（地質圈:地質障壁）、生物圈（地表系統）三者串連而成，並考慮障壁劣化、氣候變遷、海岸線移動等各項參數，模擬時間尺度為 100,000 年。架構中流場模擬與傳輸模擬分開進行，銜接方式以水文地質資料模擬穩態遠場流場，提供近場流場參數並以此為遠場傳輸模擬基底，而近場所接收之核種盤存量、處置場幾何概念、反應爐壓力容器的腐蝕等資料將進行核種傳輸模擬，提供遠場核種傳輸模擬所需之核種外釋資料，以遠場核種外釋資料銜接生物圈劑量評估模式計算劑量。

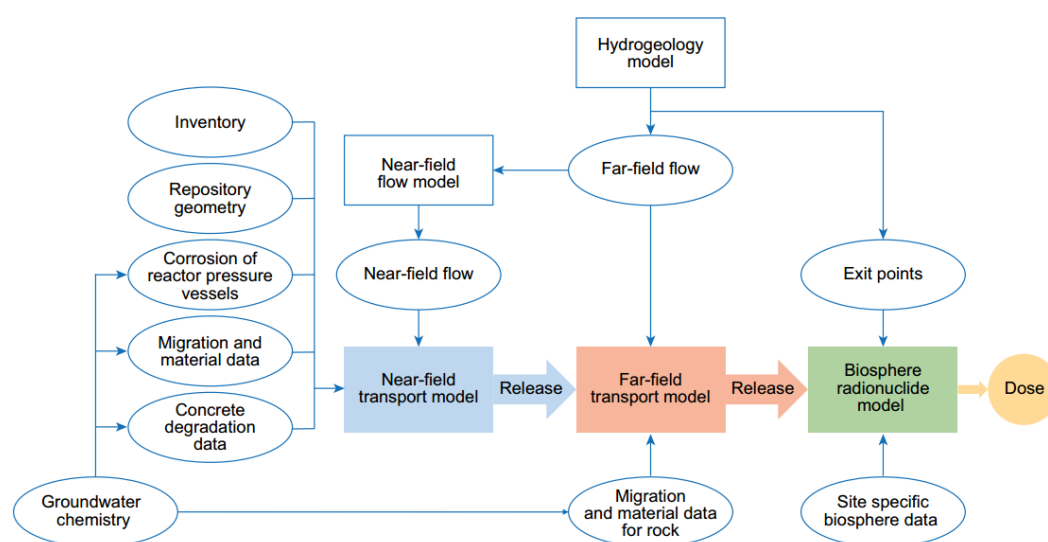


圖 2.3 SR-PSU 安全評估資料與模式架構(來源：Fig.8-2 in TR-14-01)

SR-PSU 水文模式利用多項軟體耦合各場域間之水文資料如圖 2.4 所示，首先進行流場模擬，再以此支持傳輸模擬。生物圈地表水文模擬使用 Mike-SHE 軟體、遠場流場模擬使用 DarcyTools 軟體、近場流場模擬為 Comsol-Multiphysics 軟體，以 3 維模擬幾何架構詳細描述處置設施空間分佈，如圖 2.5 所示，而近場、遠場、生物圈傳輸模擬及劑量評估以區塊模式概念進行簡化，使用 Ecolego 區塊模式軟體，在質量平衡的準則上進行各控制體積區塊的計算。

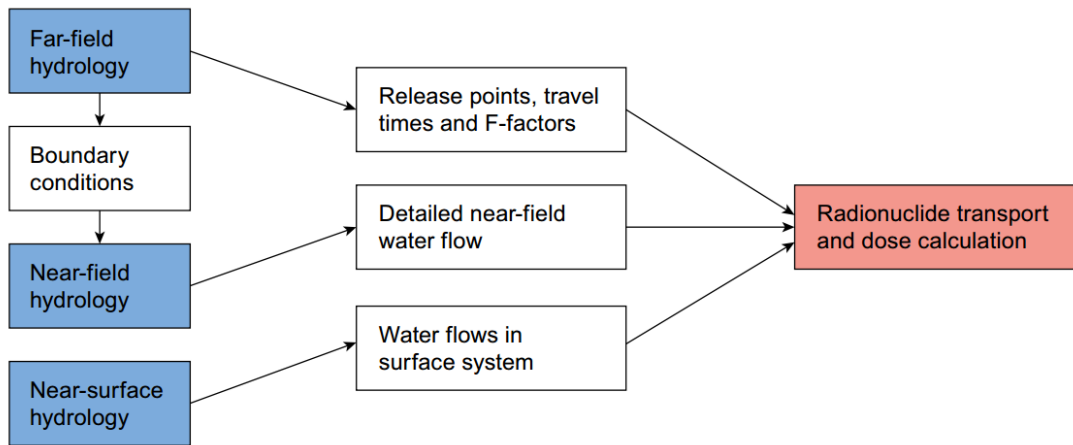


圖 2.4 核種傳輸與水文模式的耦合(來源：Fig.9-1 in TR-14-09)

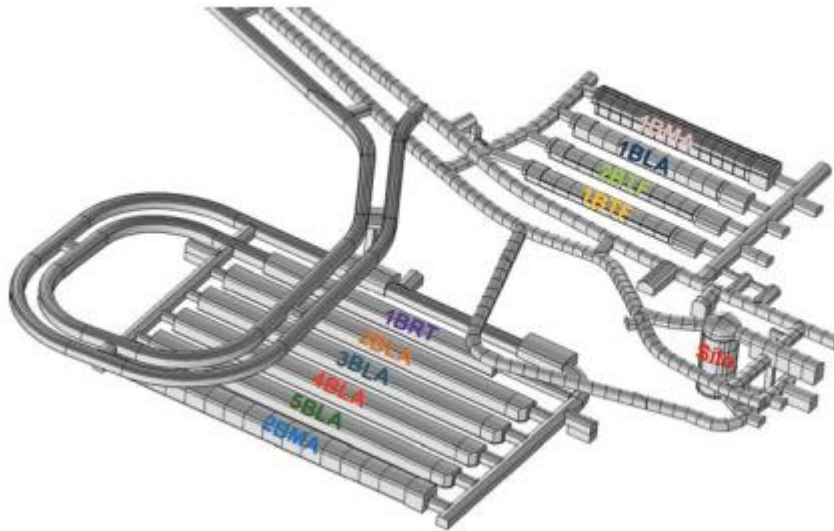


圖 2.5 近場三維水文模擬處置坑道幾何架構示意圖(來源：Fig.8-3 in TR-14-01)

SR-PSU 近場安全評估中廢棄物包件整體可視為一區塊控制體積，如圖 2.6 所示，以 1BLA 模型為例，左圖為低階放射性廢棄物處置窖之區塊模擬，選取 10 個區塊用為描述 1BLA 的廢棄物，右圖為 1BLA 中控制體積之剖面示意圖。1BLA 處置窖近場傳輸模擬示意圖如圖 2.7 所示，此模型作用要素可分為核種衰變與衰變鏈、流場參數(平流、擴散、延散)、吸附、化學物種分佈、腐蝕，並參照支援案例之溶解限制進行參考。模型涵蓋岩體及混凝土等基本要素，但並無考慮個別廢棄物包件。

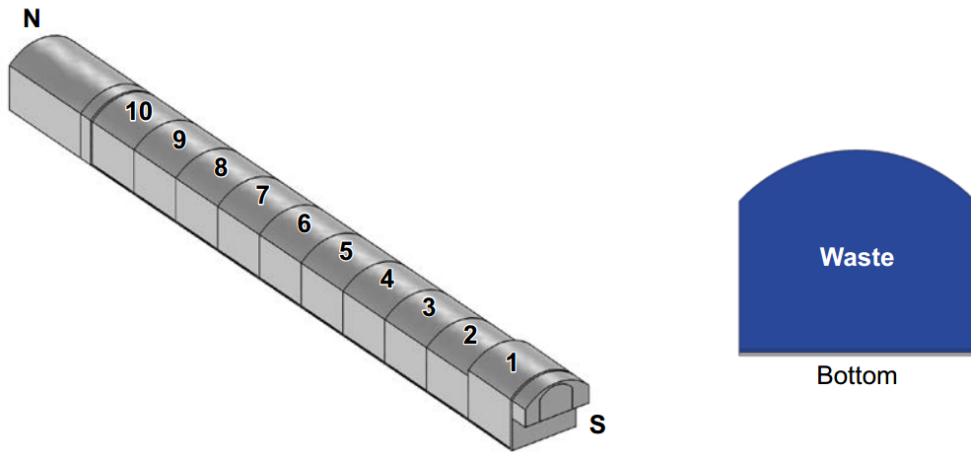


圖 2.6 水文模擬處置窖區塊分區(左)、廢棄物包件控制體積(右)(來源:Fig.8-4 in TR-14-01)

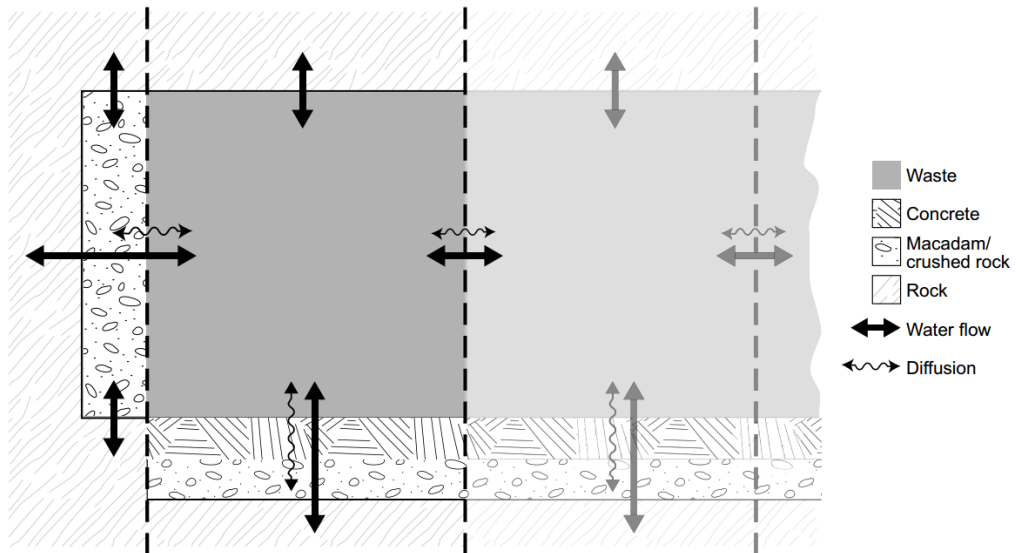


圖 2.7 1BLA 處置窖近場傳輸區塊模擬示意圖(來源：Fig.8-13 in TR-14-01)

SR-PSU 遠場安全評估模式水文地質模型示意圖如圖 2.8，模擬整體範圍垂直約 1.1km、水平約 1.5km，將地質圈之幾何形狀涵蓋在內，並使用 DarcyTools 軟體進行模擬。核種傳輸模擬則利用區塊模式連結遠場流場與核種傳輸，套用自處置窖至生物圈之流場模擬結果，取得平流傳輸之時間與距離。核種傳輸概念模型如圖 2.9 所示，共分為 240 個區塊，藍色區塊代表裂隙水體將可利用平流通過，白色方塊為母岩擴散，箭號由實線藍色、虛線藍色、黃色，分別代表平流、延散、擴散，核種傳輸所考慮之主要作用涵蓋核種衰變與衰變鏈、平流、延散、母岩擴

散、吸附，核種的遲滯並未直接納入其中，透過核種經由裂隙網絡擴散作用進入母岩內部孔細網絡及吸附作用兩機制處理。

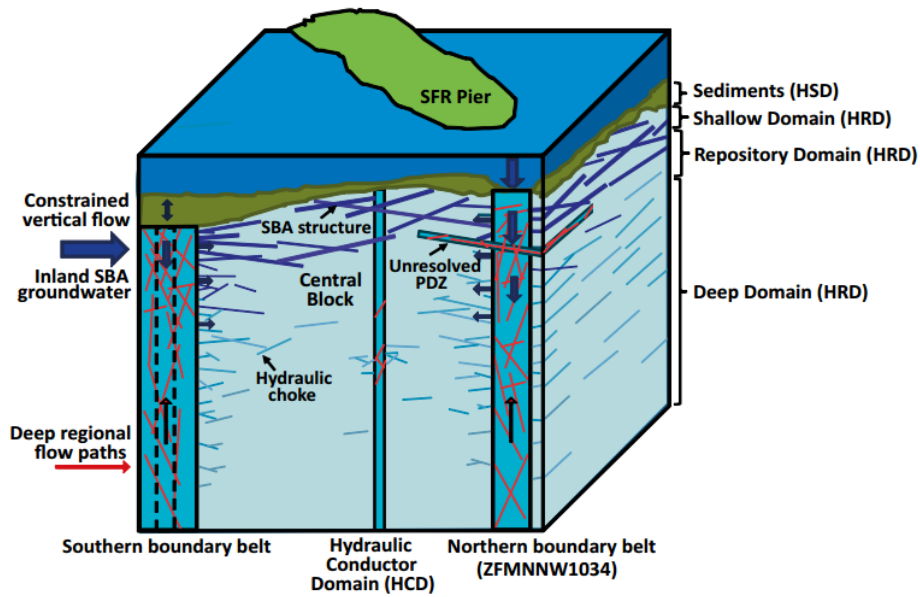


圖 2.8 遠場水文地質模型示意圖(來源：Fig.9-20 in TR-14-09)

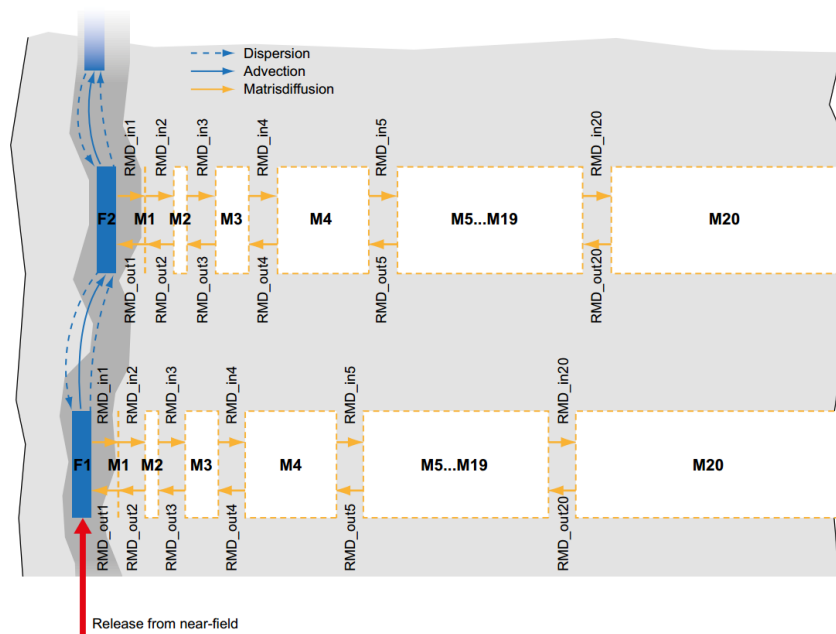


圖 2.9 遠場核種傳輸概念模型(來源：Fig.9-21 in TR-14-09)

## 2.2 資料品質審驗架構

SR-PSU 場址模擬及設施長期演化安全性評估之關鍵資料皆須採納實驗、現

場測量亦或前人研究資料，因此資料來源及應用應有合理系統性審查評估，且合格資料之認證需討論概念的不確定性、資料不確定性、自然變異的不確定性等。

資料評估程序依照四大步驟，分別為：

1. 使用者定義資料的需求、
2. 提供者確認需求並提供符合規範之資料、
3. SR-PSU 團隊審核所提供並推薦適用資料、
4. 根據 SKB 的標準程序對報告進行審查，為三方共同確認並提出合格資料。

SR-PSU 場址技術報告 TR-14-10 未採用所有安全評估資料，著重於安全功能重要項目提出評估，如核種衰變、核種盤存的不確定性、金屬腐蝕、瀝青膨脹壓力、膨潤土、混凝土/水泥之吸附資料等列出於表 2.4。系統性資料品質保證方法涵蓋安全評估模擬小組、場址調查與工程設計小組及專業領域專家，將審查項目依類別進行區分交予個別所長，經層層篩選以提供適用於 TR-14-10 場址之資料，整體架構關係如表 2.5 所示，說明如以下小節。

表 2.4 自 SR-PSU 安全功能中選用之重要項目(來源：Table1.2 in TR-14-10)

| 編號 | 評估項目            | 安全功能            |
|----|-----------------|-----------------|
| 1  | 核種衰變            | 限制活度數量          |
| 2  | 核種盤存的不確定性       | 限制活度數量          |
| 3  | 金屬腐蝕            | 保存良好            |
| 4  | 瀝青膨脹壓力          | 廢棄物拱頂低流量        |
| 5  | 膨潤土、混凝土/水泥之吸附資料 | 保存良好            |
| 6  | 母岩和礫石之吸附資料      | 保存良好            |
| 7  | 混凝土/水泥之擴散資料     | 保存良好、廢棄物拱頂低流量   |
| 8  | 混凝土/水泥之水力資料     | 廢棄物拱頂低水流量       |
| 9  | SFR 地區之水壓力場資料   | 基岩水流量低、廢棄物拱頂低流量 |
| 10 | 海平面演變           | 避免井位於處置場附近      |

表 2.5 撰寫和審查資料報告的各階段(來源：Fig.2-1 in TR-14-10)

|                                                |                             |
|------------------------------------------------|-----------------------------|
| 第一階段:<br>使用者定義資料需求                             | 1.SR-PSU 模擬所需的資料            |
|                                                | 2.過去的安全評估經驗                 |
| 第二階段:<br>提供者確認需求並提供符合規範之資料                     | 3.提供者說明資料在 SR-PSU 及過去安全評估使用 |
|                                                | 4.資料來源資訊與品保文件               |
|                                                | 5.不同資料的適用條件                 |
|                                                | 6.概念不確定性                    |
|                                                | 7.精確度、偏差、代表性所導致的資料不確定性      |
|                                                | 8.空間及時間變異                   |
|                                                | 9.相關性                       |
|                                                | 10.所提供資料之品保審查結果             |
| 第三階段:<br>SR-PSU 團隊審核所提供並推薦適用資料                 | 11.SR-PSU 團隊的審核             |
|                                                | 12.推薦用於 SR-PSU 模擬的資料        |
| 第四階段:<br>完成 TR-14-10 資料品質審驗程序後按照 SKB 標準程序進行審查。 |                             |

### 2.2.1 使用者定義資料需求

#### 1. SR-PSU 模擬所需的資料:

- (1) 對所提供的資料進行定義:使用者對所需參數進行項目列表，並提供參數符號及單位，如有特殊範圍或條件需求應予以說明。
- (2) SR-PSU 模擬工作將使用哪些資料:說明資料如何運用於不同模擬過程中，應強調與過去所使用之數據資料差異。

#### 2. 過去的安全評估經驗:

- (1) 過去的安全評估:描述過去使用哪些資料於哪些模擬。
- (2) 過去安全評估中所使用資料的適用條件:資料使用的適用條件，如分配係數受鹽度範圍控制，可於固定範圍中使用。不同學科領域資料可能受



不同條件的影響，可概述過往安全評估模擬之邊界條件、初始狀態、工程環境等。

- (3) 過去安全評估結果的敏感度:此分析為優先篩選出對模式有潛在重要性的資料及條件進行不確定性評估，考慮風險及可能影響的條件。可概述說明以下幾項問題:

I、 哪些數據的範圍對過去安全評估的影響是顯著的?如敏感度分析顯示只有少部分對處置場安全性產生影響，即可減少量化超出此範圍的參數值。

II、 資料間相互影響是單方面的?(資料與資料間特性關係為單方面影響?是否存在最佳數據?是否受其他輸入資料影響?)

III、 數據變化程度超出何範圍將對安全評估結果產生影響?(因應不同範圍將有不同影響。)

IV、 結果是否對所有評估環境適用?

- (4) 過去安全評估使用的替代模式:不考慮替代模式的適用性，總結曾使用此資料之替代模式對安全評估的影響。

I、 存在哪些替代模式，對安全評估影響為何?

II、 過去的安全評估中是否存在與模擬相關的概念不確定性，概念不確定性的存在對評估結果影響為何?

- (5) 過去安全評估模擬所使用資料的關聯性:說明機率式輸入資料之識別及量化，應概述過去安全評估各相連學科領域資料的相關性。

- (6) 確定過去安全評估模擬使用資料的限制:過去安全評估使用資料的限制或不足，可能缺乏特定地點的數據，亦有可能是缺乏代表處置場條件的數據。

## 2.2.2 提供者確認需求並提供符合規範之資料

1. 提供者說明資料在 SR-PSU 及過去安全評估使用:

資料提供者對過去的安全評估發表評論，主要目的為幫助 SR-PSU 團隊選擇合適資料及建模方式，且避免過去的錯誤資訊繼續傳播。提供者可於此對使用者的要求進行討論。

## 2. 資料的來源資訊與品保文件:

說明資料來源並根據資料的可追溯性和透明度進行分類。

(1) 資料來源:提供者列出資料來源的參考文獻，參考文獻應盡量滿足下列要求。

I、 引用資料的全文。

II、 若資料來源訊息量龐大，應盡量提供詳細的資料索引方便找尋，例如章節、圖表、表格等。

III、 為確保 SR-PSU 安全評估項目的可追溯性，給出在 SKB 內部資料庫引用的位置。

IV、 引用最先進的模式，因模式的編碼與時俱進，使用過時模式可能影響資料的合格性。

(2) 將資料分類為合格資料或輔助資料:合格資料為符合 SKB 品保架構產生之資料，輔助資料為外部架構產生之資料。合格資料應判斷資料獲取及精細化與相關文件是否符合實施的資料資格框架，輔助資料表示為 SKB 資格框架之外或由其他組織製定。

(3) 合格資料:大部分觀測資料的應用皆經過修改及解釋，資料提供者應判斷資料獲取、精細化、相關文件是否符合資料合格框架，下列為判斷的依據。

I、 資料獲取的注意事項

· 採集資料的取得是否符合合格的質量管理系統?(如 ISO 9000 系列或同等標準。)

· 採集資料的質量保證相關文件是否可追溯?(如方法描述、現場注意事項。)

- 是否能於文獻報告資料中取得資料品質、變異性、代表性等相關資訊。
- 取得資料與實際觀測、量測資料不一致時，是否描述原因？
- 資料獲取是否涵蓋資料不確定性、自然變異性？

## II、 資料精細化的注意事項

- 輔助資料中的疑慮是否影響到資料的精細化？
- 精細化資料的過程中使用多少複合性模式？模式執行皆依照紀錄的方法？
- 若為可能影響資料合格的複合式模式，應描述模擬細節，並說明模式由質量保證系統開發，或使用其他方式檢測其質量。
- 是否進行過比較/替代模式？評估模式中的人為產生物及資料解釋的合理性。

## III、 輔助資料:將資料分類為輔助資料之前應對下列問題進行考慮。

- 資料獲取的方式，描述輔助資料獲取方法的資訊透明度越高，資料越有價值。
- 說明篩選及解釋數據的方法，於輔助資料中，資料的解釋、篩選方法越透明完善，資料越有價值。
- 是否能對資料的取得及篩選過程進行識別及評估認證。

## IV、 排除之前認為重要的數據:過於大量的數據對安全評估意義不大，但若是為過去安全評估的基礎並對資料的選擇具有顯著影響者，或與目前使用數據不一致則應說明理由。

3. 不同資料的適用條件:不同學科領域資料可能受到不同條件影響，條件泛指初始條件、邊界條件、控制條件(障壁狀態)和其他可能影響資料估計的情況。將資料獲得的條件與安全評估關注議題相比較。於此討論資料獲得的條件、適當性及應用於 SR-PSU 模擬的合理性，資料應用條件應進行說明如單一數值(溫度)、範圍(鹽度範圍)、梯度(水力梯度)等。

4. 概念不確定性:
  - (1) 物理抽象化程度的概念不確定性:資料、模式及資料在模式中的使用，因概念化物理現象導致的不確定性，應加以描述。
  - (2) 資料的取得、說明、精細化的概念不確定性:資料可能是由逆向模擬或相關性分析獲得，其中可能因概念假設而導致不確定性。
5. 精確度、偏差、代表性所導致的資料不確定性:
  - (1) 精確度:原始資料的取得方式或資料解讀方式而產生不確定性。這有可能來自設備、方法、採樣程序與樣品製備有關，而資料解讀的不確定性與採用之資料解讀程序有關。
  - (2) 偏差:受限於前述的資料精確度影響，應說明資料的偏差，與資料取得方式、檢定方式、樣品準備、取樣程序與樣本大小等相關。
  - (3) 代表性:應討論所提供資料的代表性，包含資料的取得、解釋與細緻化，例如實驗室數據與現場數據的差異，圖 2.10。
6. 空間及時間變異:提供者應描述已知的空間變化、時間變化，並說明下列討論是否對安全評估產生影響。
  - (1) 空間變異:
    - I、 資料是否有空間變化?(是否影響安全評估?)
    - II、 空間變異是否有尺度效應?(建議提供適當的升尺度方法以供安全評估使用。)
    - III、 是否有空間變異尺度的相關資訊(提供如變異函數。)
    - IV、 空間變異是否可利用統計方法得出符合的平均值?(提供方法。)
    - V、 使否有其他空間變異不確定性的相關資訊?
  - (2) 時間變異:
    - I、 資料是否具有時間變異?(是否影響安全評估?)
    - II、 哪些過程影響資料時間變異?(資料時間變異與這些過程的關聯?)

- III、 資料時間變異是否有跡可循?(例如具有循環模式。)
  - IV、 時間變異是否可利用統計方法得出符合的平均值?(提供方法。)
  - V、 使否有其他時間變異不確定性的相關資訊?
7. 相關性:模式中獲取資料、解讀資料、資料細緻化可透過參數之間相關性或功能依賴性取得，因此相關性對機率式安全評估模擬具有影響力，資料提供者應回答下列問題:
- (1) 對輸入資料之間任何相關性及功能依賴性進行識別及量化。
  - (2) 不同學科領域的資料是否存在相關性或功能依賴性?
  - (3) 若已使用相關性獲取、說明、篩選資料，請說明過程。資料是單純的相關性或整合量測與相關性所得?
  - (4) 若資料具空間及時間變異性，資料提供者是否知道任何自相關結構?
  - (5) 除了相關性與功能依賴性，是否有其他被視為參數之間的相關性。
8. 所提供資料之品保審查結果:
- (1) 提供具代表性數據做為 SR-PSU 的輸入參數基礎，應提供使用者所要求資料中每個項目符號清單所要求之參數資訊。將不同資料集精簡、解釋並評估，最終提出交予 SR-PSU 團隊的資料。
  - (2) 資料的提供可採用單點值、概率分佈、具有標準差、百分位數、範圍或平均值如圖 2.11。
  - (3) 若資料具有變異性或不確定性，資料的分佈可描述為一個範圍，但應說明此範圍是所有可能數值範圍？還是實務上使用範圍？也可提供超出一個以上的範圍代表不同的機率。

### 2.2.3 SR-PSU 團隊審核所提供並推薦適用資料

#### 1. SR-PSU 團隊的審核:

審查提供者所提交之資料，並對資料是否合格進行判斷，應列出提供者討論的所有部分進行評論。若資料使用者認為資料具不確定、可疑、可能

具有錯誤應對提供者提出問題，盡可能於此解決與討論。應對下列議題評論：

- (1) 資料來源與資料品保文件。
- (2) 所提供資料的條件。
- (3) 概念不確定性。
- (4) 精確度、偏差、代表性所導致的資料不確定性。
- (5) 空間與時間變異。
- (6) 相關性。
- (7) 所提供資料的品保結果。

## 2. 推薦用於 SR-PSU 模擬的資料:

給予所推薦的資料，如因資料使用需求應提出資料簡要使用指南。

### 2.2.4 依據 SKB 標準程序進行審查

本階段並非資料品質保證審驗程序之一，為 SKB 對資料品質保證最終報告的技術審核。

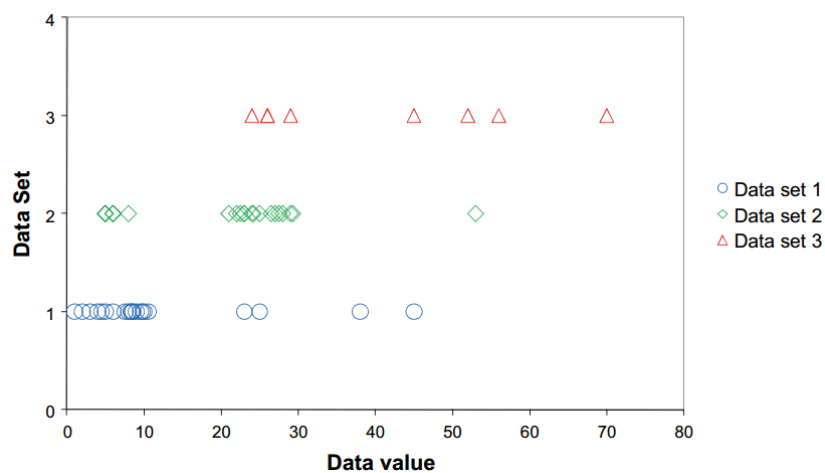
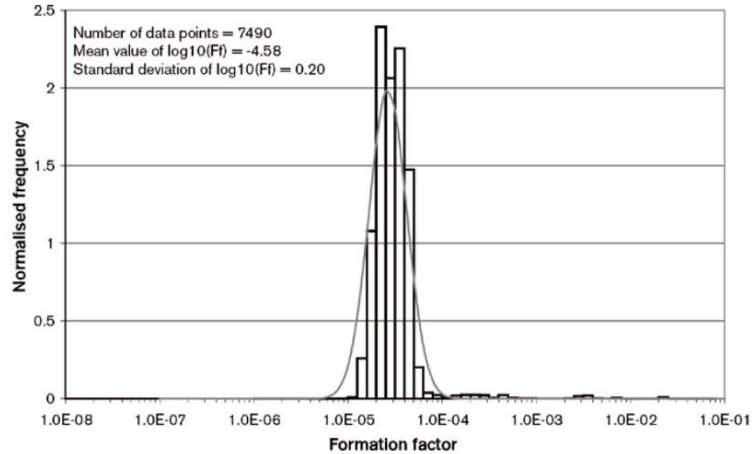


圖 2.10 資料集中呈現差異的圖例(來源：Fig.2-2 in TR-14-10)



| Nuclide/redox state |                           | Non-saline $K_d$ ( $m^3/kg$ )           |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| Ni(II) <sup>1</sup> | best estimate             | $1.2 \cdot 10^{-1}$                     |
|                     | $K_{d,25\%} - K_{d,75\%}$ | $5.5 \cdot 10^{-2} - 3.0 \cdot 10^{-1}$ |
|                     | $K_{d,low} - K_{d,high}$  | $1.8 \cdot 10^{-2} - 5.4 \cdot 10^{-1}$ |
| Sr(II) <sup>1</sup> | best estimate             | $1.3 \cdot 10^{-2}$                     |
|                     | $K_{d,25\%} - K_{d,75\%}$ | $6.5 \cdot 10^{-3} - 4.1 \cdot 10^{-2}$ |
|                     | $K_{d,low} - K_{d,high}$  | $1.0 \cdot 10^{-3} - 6.1 \cdot 10^{-1}$ |

| Limiting specie |                          | Reaction                                 |
|-----------------|--------------------------|------------------------------------------|
| Ag(0)           | Ag(s)                    | $Ag(s) + H^+ + 0.25O_2 = Ag^+ + 0.5H_2O$ |
| Ag(I)           | AgCl(cr)                 | $AgCl(cr) = Ag^+ + Cl^-$                 |
| Am(III)         | Am(OH) <sub>3</sub> (am) | $Am(OH)_3(am) + 3H^+ = Am^{+3} + 3H_2O$  |

圖 2.11 推薦資料表示圖例，取自 SR-Can Data 報告(來源：SKB，2006)

### 2.3 安全評估—金屬腐蝕

本節以金屬腐蝕相關資料為例說明前述審驗流程。此資料評估涵蓋 SR-PSU 模擬中使用的腐蝕率資料，SFR 處置場使用大量的金屬元素，如碳鋼、不鏽鋼、鋁、鋅等。碳鋼和不鏽鋼源自於各種金屬廢棄物、廢棄物容器、混凝土包裝及混凝土建築中的鋼筋。

冶金及環境因素會影響腐蝕速率，因此模擬中腐蝕速率的使用須符合其條件。處置場封閉初期為好氧腐蝕，當氧氣消耗完畢即發生厭氧腐蝕，根據處置場中可用金屬及初始含氧量假設處置場封閉后氧氣迅速消耗完畢。

處置場的金屬腐蝕會導致金屬包件、鋼筋、金屬廢棄物之特性變化（無論是

否有固化處理)。水中的厭氧性腐蝕會產生氫氣，伴隨壓力增加、體積膨脹可能導致裂隙產生及廢棄物流體特性發生變化。金屬腐蝕產生氧化物及氫氧化物，由於氫氧化物吸附能力較高，可能對放射性核種的遲滯產生影響。以上影響皆須加入處置場安全評估考慮。

金屬廢棄物的腐蝕亦可能誘發放射性核種釋出，如 BRT 處置場中的 BWR 壓力容器。腐蝕過程的描述參考金屬腐蝕章節的廢棄物處理報告。

### 2.3.1 SR-PSU 模擬所需的數據

此部分為使用者對所需參數進行項目列表，並說明數據在哪些 SR-PSU 模擬中使用。所需參數：

1. 鋁和鋅的腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{year}$ )
2. 碳鋼的腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{year}$ )
3. 不鏽鋼的腐蝕速率( $\mu\text{m}/\text{year}$ )

腐蝕速率應適用於 SFR 處置場封閉前(後)的含氧(缺氧)的條件。

SR-PSU 模擬所使用的數據，由於氧化鐵(II)會導致還原能力降低，因此碳鋼及不鏽鋼的腐蝕速率將用於氧化還原模擬。此外，可利用腐蝕速率量化 SFR 處置場中理論氣體產生量，並評估對放射性核種外釋的影響。腐蝕速率可決定放射性核種自具有誘導活度的金屬廢棄物中釋出(如自 BWR 壓力容器中釋出)。

### 2.3.2 過去的安全評估經驗

簡要總結過去安全評估經驗，特別是 SAFE 和 SAR-08 安全評估，可能直接影響資料的適用性。

1. 過去的安全評估：

SAFE 和 SAR-08 安全評估中腐蝕速率僅用於計算氣體含量。

2. 過去安全評估中所使用資料的適用條件：

SAR-08 著重於氣體的產生過程，因此使用下列假設進行模擬：

- (1) 處置場封閉後含有金屬的廢棄物體位於飽和水中。



- (2) 有足夠的水供給金屬進行厭氧腐蝕。
  - (3) 假設腐蝕速率是恆量定值，不隨時間改變。
  - (4) 不考慮溫度影響。
  - (5) 假定碳鋼和不鏽鋼為均勻材質，腐蝕速率相同。
  - (6) 假定鋅和鋁腐蝕速率相同。
  - (7) 假設處置場整體於超鹼性狀態。
  - (8) 假設無孔腐蝕(局部腐蝕)。
3. 過去安全評估結果的敏感度：在 SAFE 及 SAR-08 安全評估中並沒有進行敏感度研究。
  4. 過去安全評估使用的替代模式：在 SAFE 及 SAR-08 安全評估中並沒有關於替代模式的報告。
  5. 過去安全評估模擬所使用資料的關聯性：在過去的安全評估模式中，腐蝕速率用於計算氣體生成量及討論因金屬腐蝕造成的氧氣消耗促使處置場達到還原條件。
  6. 確認過去安全評估模擬使用資料的限制：腐蝕速率變化的不確定性在廢棄物處理報告(Waste process report)中金屬腐蝕章節討論，腐蝕速率資料的變化範圍可能超過四個數量級，變化量取決於研究材料的類型、外部條件及量測金屬腐蝕速率的方法。金屬腐蝕速率利用測量氫氣產生率、測量金屬損失、測量腐蝕電流等取得，以上幾種方法皆因為假設化學計量而有所限制，而非化學計量化合物會在金屬及水的交界面形成表面膜，非化學計量化合物除消耗水的氧化外亦有其他氧化過程。Kursten 等人(2003)的報告中提供其他關於腐蝕速率的量測技術。

### 2.3.3 提供者說明資料在 SR-PSU 及過去安全評估使用

自過去文獻的長期實驗中取得腐蝕速率資料。鋁和鋅的腐蝕速率建議使用

1,000  $\mu\text{m}/\text{year}$  (Moreno 等人, 2001)。將鋼材分類為不鏽鋼及碳鋼, 因不鏽鋼比碳鋼更不易腐蝕。腐蝕速率亦會受到處置場環境變化(富含氧氣到缺乏氧氣)影響。

### 2.3.4 資料的來源資訊與品保文件

1. 資料來源：使用的資料來源為 Smart 和 Hoch (2010)的報告, 見表 2.6。輔助資料來源詳列於表 2.7。
2. 將資料分類為合格資料或輔助資料: 如資料來源所述, 主要資料集來自 Smart 和 Hoch (2010)的報告, 此報告對輔助資料(表 2.7)進行彙整。
3. 排除之前認為重要的資料：為具體化提供模擬使用, 將碳鋼、不鏽鋼包括鋼的腐蝕速率資料進行精簡。因此 Moreno 等人(2001)報告中 0.1–10  $\mu\text{m}/\text{year}$  的鋼腐蝕速率被排除, 此資料過去使用於 SAR-08。

表 2.6 合格資料主要來源(來源：Table 5.1 in TR-14-12)

---

**Sources of information**

---

**Smart N R, Hoch A R, 2010.** A survey of steel and zircaloy corrosion data for use in the SMOGG gas generation model. Report to the NDA RWMD. SA/ENV-0841, Issue 3, Serco, UK.

---

表 2.7 合格資料與輔助資料來源(來源：Table 5.2 in TR-14-12)

| Qualified data sets | Supporting data sets                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Smart and Hoch 2010 | Blackwood et al. 2002<br>Smart et al. 2004<br>Kuron et al. 1985<br>Simpson and Weber 1988<br>Schenk 1988<br>Simpson et al. 1985<br>Treadaway et al. 1989<br>Mihara et al. 2002<br>Kritsky et al. 1987<br>Naish et al. 2001<br>Moreno et al. 2001 |

### 2.3.5 不同資料的適用條件

鋁和鋅在不同階段的處置場狀態(含氧/缺氧)皆提供相同的腐蝕速率。不鏽鋼和碳鋼的腐蝕速率皆取決於 pH 值、含氧量、氯化物濃度。

### 2.3.6 概念不確定性

腐蝕速率的測定方法可分為瞬時及整合兩種類別(Smart 和 Hoch, 2010)。瞬時方法可取得瞬時腐蝕速率資料，方法涵蓋電化學，例如線性極化電阻(linear polarisation resistance, LPR)、極化曲線外推法、無源電流量測。整合方法以整體變化推導腐蝕速率，判斷方式涵蓋尺寸變化，如重量變化、氫氣釋出。提供資料僅選取均勻/整體腐蝕速率資料，因局部腐蝕(點腐蝕和晶間腐蝕)對金屬減少或氣體生成影響甚微。經由研究來自 Fenno-Skan 電纜的地面電流討論 SFR 處置場中金屬腐蝕的潛在影響，結論說明在 SFR 處置場中由地面電流引起鋼的金屬腐蝕比一般腐蝕慢。

### 2.3.7 精確度、偏差、代表性所導致的資料不確定性

主要選取適用於處置場之代表性資料，例如排除 pH 值小於 4 的環境中所測定之腐蝕速率資料。缺氧環境中 pH 值於 6.4-13 範圍內進行調整，對不鏽鋼腐蝕速率變化影響不大(Blackwood 等人, 2002)。處置場環境溫度為 20-30°C，因此排除過高溫環境所測定的腐蝕速率。

長期研究顯示，鹼性厭氧環境下，氯化物濃度對腐蝕速率影響不顯著(Smart 等人, 2004)。中性含氧環境中，氯化物濃度影響不顯著。於實驗中(Kuron 等人, 1985)表明，氯化物濃度並不會影響金屬腐蝕速率。表 2.8 和表 2.9 顯示金屬腐蝕速率的不確定性，其位於含有氧氣且 pH 值為非鹼性接近中性的環境中。上述所提出的腐蝕速率已排除局部腐蝕。

### 2.3.8 空間及時間變異

1. 空間變異：pH 值單一參數於不同 SFR 處置窖呈現不同變化。在貯存倉、BMA 和 BTF 處置場中會發現高 pH 值(趨近超鹼性)，於 BLA 處置場假定 pH 值與流入地下水的 pH 值相同(接近中性)。
2. 時間變異：氧化膜的形成導致腐蝕速率隨暴露時間增加而降低。由 Smart 等人的實驗(2004)觀察到，於實驗剛開始的幾百小時內的持續高腐蝕速率，後來呈現穩定水平線，此現象說明 SFR 處置場於封閉前出現氧化情形，並且於封閉後一段時間內氧氣消耗加劇，沒有氧氣的輸入導致腐蝕速率趨於平穩。初始處置窖環境中 pH 值的降低可能影響腐蝕速率由高 pH 值約 13.4 降至 12.5，pH 下降是因為 KOH、NaOH 的溶解跟洗滌。pH 值下降並不影響不鏽鋼的腐蝕速率，因此忽略 (Blackwood 等人，2002)。

### 2.3.9 相關性

此資料提供的腐蝕速率將用於計算氣體生成量、耗氧量、鋼筋腐蝕程度，以及廢棄物本體及廢棄物包裝材料的還原能力和 BWR 放射性核種傳輸模擬。

### 2.3.10 所提供資料之品保審查結果

鋁和鋅的腐蝕速率建議與 SAR-08 中描述相同。鋼的腐蝕速率資料較過去低，因將其分化為碳鋼及不鏽鋼，適用條件亦有所差別。碳鋼的腐蝕速率見表 2.8，不鏽鋼的腐蝕速率見表 2.9，鋁和鋅的腐蝕速率見表 2.10。

表 2.8 碳鋼的腐蝕速率(來源：Table 5.3 in TR-14-12)

| Conditions within the repository      | Corrosion rate ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ) | Reference                                                   |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Alkaline oxic conditions              | 0.1                                          | Blackwood et al. 2002                                       |
| Alkaline anoxic conditions            | 0.05                                         | Smart et al. 2004                                           |
| Non-alkaline, near neutral pH, oxic   | 60                                           | Kuron et al. 1985                                           |
| Non-alkaline, near neutral pH, anoxic | 2.8                                          | Simpson and Weber 1988,<br>Schenk 1988, Simpson et al. 1985 |

表 2.9 不鏽鋼的腐蝕速率(來源：Table 5.4 in TR-14-12)

| Conditions within the repository      | Corrosion rate ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ) | Reference             |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| Alkaline oxic conditions              | 0.02                                         | Treadaway et al. 1989 |
| Alkaline anoxic conditions            | 0.01                                         | Mihara et al. 2002    |
| Non-alkaline, near neutral pH, oxic   | 0.3                                          | Kritsky et al. 1987   |
| Non-alkaline, near neutral pH, anoxic | 0.2                                          | Naish et al. 2001     |

表 2.10 鋅和鋁的腐蝕速率(來源：Table 5.5 in TR-14-12)

| Conditions within the repository | Corrosion rate ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ) | Reference          |
|----------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|
| Alkaline anoxic conditions       | 1,000                                        | Moreno et al. 2001 |

### 2.3.11 SR-PSU 團隊的審核

1. 資料來源:SR-PSU 團隊認為第 2.3.4 節中提供的參考資料適用於 SR-PSU 評估。
2. 提供資料的條件:SR-PSU 團隊認為第 2.3.5 節給出的條件已對 SFR 處置場進行完整描述。
3. 概念不確定性:SR-PSU 團隊同意第 2.3.6 節給出的不確定性。
4. 精確度、偏差、代表性所導致的資料不確定性:SR-PSU 團隊同意第 2.3.7 節給出的不確定性。
5. 空間與時間變異:SR-PSU 團隊認為第 2.3.8 節給出的變異性已足夠並具有效用。
6. 相關性:SR-PSU 團隊同意第 2.3.9 節中提出的相關性，並補充所提供之數據將應用於管理 BRT 處置場中 BWR 壓力容器的放射性核種釋出。
7. 所提供資料的品保結果:SR-PSU 團隊同意第 2.3.10 節所提供的數據。

### 2.3.12 推薦用於 SR-PSU 模擬的數據

推薦的數據如表 2.8，表 2.9，表 2.10 所示。

### 第三章 國際坑道處置場址安全評估之資料流審驗技術

鑒於安全性評估之模擬所需輸入資料涉及各學科領域，且關聯性尚未經統整不甚明確，特以此章節研析瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-12 之安全評估資料流審驗技術，以茲了解國外模擬資料架構的整合及審驗方式，該報告探討 SR-PSU 場址安全評估模擬之輸入資料，以評估模擬流程圖(Assessment Model Flowchart)建立資料之關聯性，將其依資料類別進行分類，且對輸入參數進行簡易說明，並提供其資料連結。報告結構如圖 3.1 所示，其資料識別方式及流程圖架構，將詳細介紹於第 3.1、3.2 節，並提供完整範例。

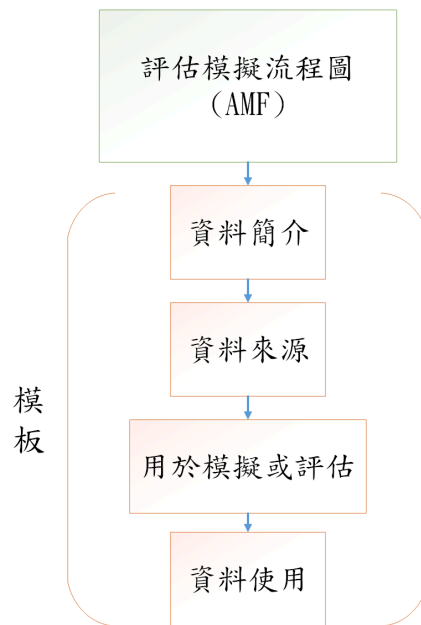


圖 3.1 TR-14-12 報告結構

#### 3.1 評估模擬流程圖

評估模擬流程圖(AMF)主要目的為識別各資料流間之關聯性，將其設計為簡易閱讀指南，使查詢特定資料流訊息者易於理解，整體架構如圖 3.2 所示。詳細介紹如下所示：

1. AMF 編號：依照升序方式排列，代表輸入/輸出資料。
2. 外框：橢圓形外框(初始狀況、SDM、參考數據)，長方形實線外框(模擬或評估作業)，長方形虛線外框(複製模擬或評估作業)。

3. 顏色類別：廢棄物(黃色)、不包括廢棄物之近場(藍色)、地質圈(紅色)、氣候(灰色)、生物圈(綠色)。

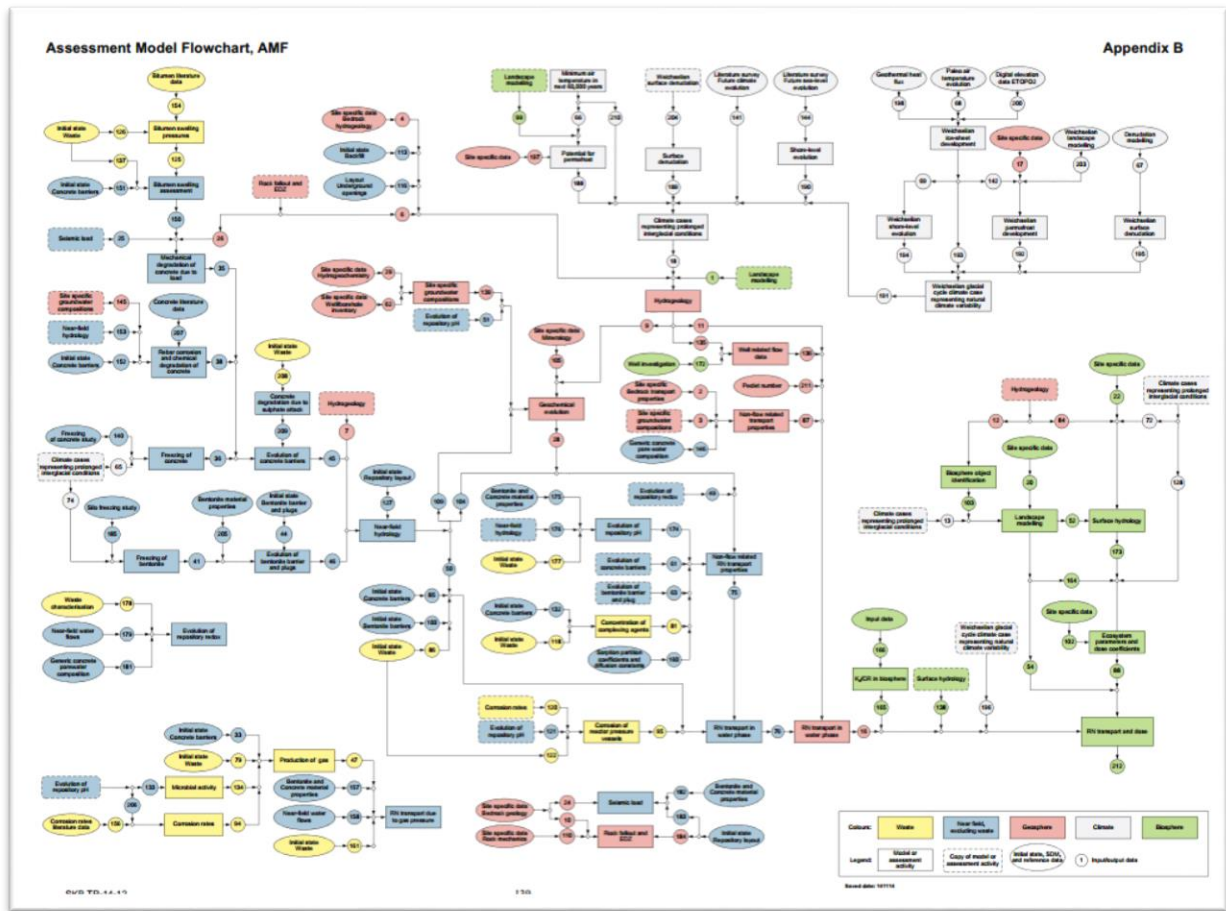


圖 3.2 評估模擬流程圖(AMF) (來源：Appendix B in TR-14-12)

### 3.2 模板

每個資料皆遵循相同模板，並於標題處提示資料於 AMF 所在位置，且建立表格顯示關連性，如表 3.1。

1. 資料簡介：簡短描述資料集，將重點擺放於資料本身而非與其他資料相關聯的訊息。
2. 資料來源：介紹資料生成方式(如模擬、評估、實驗、現場調查、文獻調查)，應簡短描述。
3. 用於模擬或評估：資料集的使用方式及用途。
4. 資料使用：完整資料集的鏈結或引用。



表 3.1 關聯性表格(來源：1.4.2 in TR-14-12)

| Output from AMF activity | Input to AMF activity                |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Originating AMF Activity | AMF Activity where data will be used |
| <b>Dataset</b>           |                                      |
| Dataset 1 name           |                                      |
| Dataset 2 name           |                                      |

### 3.3 範例\_AMF Number 87

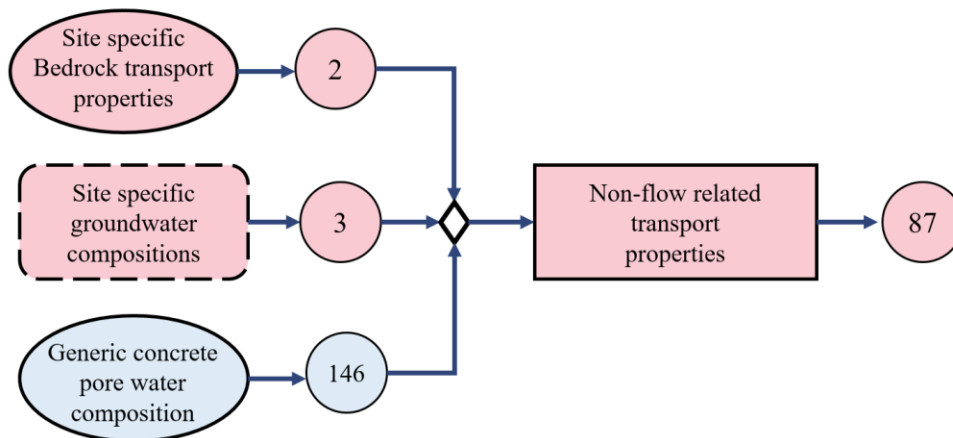


圖 3.3 評估模擬流程\_AMF Number 87 (來源：Appendix B in TR-14-12)

表 3.2 關聯性表格\_AMF Number 87 (來源：4.18 AMF Number 87 in TR-14-12)

| Output from AMF activity                                              | Input to AMF activity       |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Non-flow related migration properties                                 | RN transport in water phase |
| <b>Dataset</b>                                                        |                             |
| Sorption partitioning coefficients, applicable for entire rock volume |                             |
| Effective diffusivity, applicable for entire rock volume              |                             |
| Rock matrix porosity, applicable for entire rock volume               |                             |

#### 3.3.1 適用於所有體積岩石的吸附分配係數

1. 資料簡介：該資料集包含處置設施周圍結晶母岩的吸附分配係數，此資料集適用於所有流體路徑、深度及岩石體積，亦可應用於地下水化學。
2. 資料來源：SR-Site 對分配係數的評估於克羅福進行，由 AMF 編號 2 (4.1.1 節)提供。資料集亦可用於第八章之碎石及礫石。



3. 用於模擬或評估活動：資料用於計算放射性核種傳輸時間，範圍由處置設施起始直到離開地質圈，詳情參考放射性核種傳輸報告。
4. 資料使用：所使用的數據儲存在文件中：  
[svn.skb.se/trac/projekt/browser/SFR/SR-PSU-Data/Geosphere/Indata/Ecolego/FarfieldKd\(AMF87\).xlsx](http://svn.skb.se/trac/projekt/browser/SFR/SR-PSU-Data/Geosphere/Indata/Ecolego/FarfieldKd(AMF87).xlsx)

### 3.4 範例\_AMF Number 50

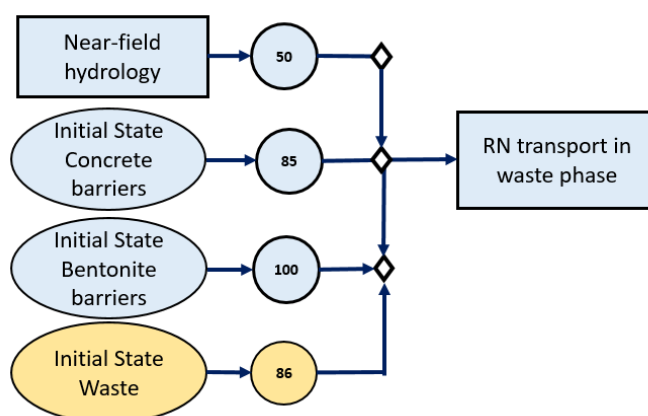


圖 3.4 評估模擬流程\_AMF Number 50 (來源：Appendix B in TR-14-12)

表 3.3 關聯性表格\_AMF Number 50 (來源：3.11 AMF Number 50 in TR-14-12)

| Output from AMF activity                                                                                            | Input to AMF activity       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Near-field hydrology                                                                                                | RN transport in water phase |
| <b>Dataset</b>                                                                                                      |                             |
| Water flows and flow directions (x, y, z) for each vault and concrete degradation state during relevant time steps. |                             |

#### 3.4.1 處置窖劣化混凝土水流量和流動方向 (x, y, z) 隨時間之變化

1. 資料簡介：水文資料集包含水流通量，水經過處置窖控制體積的表面。進階的資料訊息置放於放射性核種傳輸報告及 Abarca 等人的報告 (2013, 第 3.3 節)。
2. 資料來源：資料來自 Abarca 等人的近場水文計算 (2013)。
3. 用於模擬或評估活動：這些資料用於近場的放射性核種傳輸計算。
4. 資料使用：水文計算產生的原始資料及供放射性核種傳輸計算的預處理資料

都儲存在 SKB 的備份系統。

(1) 混凝土劣化狀態和處置窖水文資料儲存於下列文件中：

svn://svn.skb.se/kalkyl/SFR/SR-

PSU/Indata/Release2Biosphere/[CC]/[MODEL].ear

svn://svn.skb.se/projekt/SFR/SR-PSU-Data/Near-field/Indata/Ecolego/[MODEL]

/Waterfluxes(AMF50)/[MODEL]\_WaterFluxes\_[DEG\_STATE].xlsx

(2) 說明：

[DEG\_STATE]：混凝土劣化的狀態（Abarca et al .2013）。

[MODEL]：每個處置場的模式名稱，即 BLA1，BLA2，BLA3，BLA4，BLA5，BMA1，BMA2，BRT，BTF1，BTF2，Silo（除了儲存在同一目錄中 2-5BLA 的資料例外）。

### 3.5 範例\_AMF Number 188

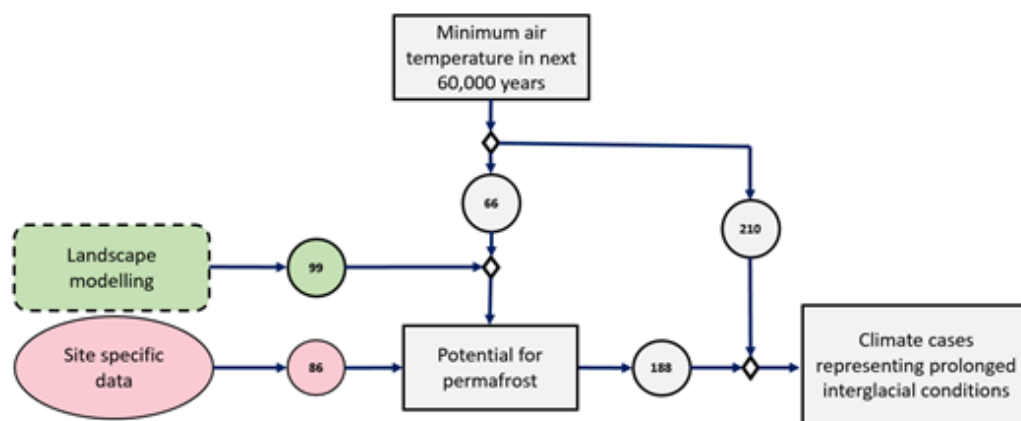


圖 3.5 評估模擬流程\_AMF Number 188 (來源：Appendix B in TR-14-12)

表 3.4 關聯性表格\_AMF Number 188 (來源：5.14 AMF Number 188 in TR-14-12)

| Output from AMF activity                          | Input to AMF activity                                        |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Potential for permafrost                          | Climate cases representing prolonged interglacial conditions |
| <b>Dataset</b>                                    |                                                              |
| Maximum depth of isotherms at repository location |                                                              |

### 3.5.1 處置場設置區域等溫線最大深度

1. 資料簡介：該資料集包含處置場設置區域 0°C, -1°C, -2°C, -3°C, -4°C, -5°C 等溫線的最大深度，當作處置場設置區域兩米高度的年平均氣溫。
2. 資料來源：Brandefelt 等人（2013）將氣候模擬和永久凍土模擬相互結合，調查未來 6 萬年處置場設置區域（Forsmark）的永久凍土潛能。該研究主要集中在北半球高緯度地區，挑選擁有最短夏季的時段（西元 19,000 年到西元 56,000 年）。進行複合性地球系統模式（Earth System Model of Intermediate Complexity, EMIC）及地球系統模式（Earth System model, ESM），得知大氣中二氧化碳濃度在未來 6 萬年有廣泛的變化範圍。該研究為 Brandefelt 等人的報告（2013 年）並放置於氣候報告（第 2.1.4 和 4.2.4 節）。
3. 用於模擬或評估活動：永凍土仿真模擬和氣候模式模擬的結果於氣候報告刊登（第 3.3.1 節和 4.1.4 節）得知西元 19,000 至 54,000 年間，未來大氣二氧化碳濃度的估計值，被用於代表長期冰期的永久凍土氣候設定，見氣候報告（第 4.2.4 節）。
4. 資料使用：處置場設置區域 0°C, -1°C, -2°C, -3°C, -4°C, -5°C 等溫線的最大深度見氣候報告（氣候報告、圖 2-11）以作為 2 米高的處置場設置區域（Forsmark）的年平均氣溫函數。所使用的數值資料在 SKB.doc 1433270。

## 第四章 坑道處置多子核種傳輸驗證技術建立：發展坑道處置多子核種長期安全驗證技術之遠場與近場整合數值模擬技術

本項工作針對近岸環境發展長期安全驗證之數值傳輸模擬技術，將前兩年度所完成之近岸環境坑道處置模擬、遠場傳輸模擬技術及近場核種傳輸模擬技術，以遠場（地質圈）、近場（處置設施）、近場（處置坑道）三種不同空間尺度的模擬網格進行銜接，利用 HYDROGEOCHEM 系列模式發展坑道處置多子核種長期安全驗證技術之遠場與近場整合數值模擬技術，整合模擬構想主要參考瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-09，將模擬分化為流場模擬及核種傳輸模擬，建立遠場至近場之流場整合模擬及近場到遠場之多子核種傳輸。4.1 節將概要介紹遠場、近場之水文地質資料及網格設置，4.2 節將說明多子核種傳輸數值模擬銜接方法流程及參數設置，4.3 節為多子核種傳輸數值模擬結果。

### 4.1 遠場與近場網格及水文地質環境介紹

國內建議候選場址之台東縣達仁鄉為近岸環境，地勢方向由西方山區向東入海，最高高程為 493.25m，平均高程為 100m~200m，達仁溪集水區範圍及數值地形高程如圖 4.1 所示。處置設施預定建置於其近岸環境區域，因此所設置之遠場網格將涵蓋海岸及完整集水區範圍。近場處置設施之功能為利用工程障壁的圍阻及吸附功能對放射性核種保留、遲滯，因此近場著重於考慮處置設施及周圍之多重工程障壁、開挖擾動區。為細部模擬工程障壁，將其拆分為近場（處置設施）、近場（處置坑道），處置設施規劃參照過去研究成果（經濟部，2011）。

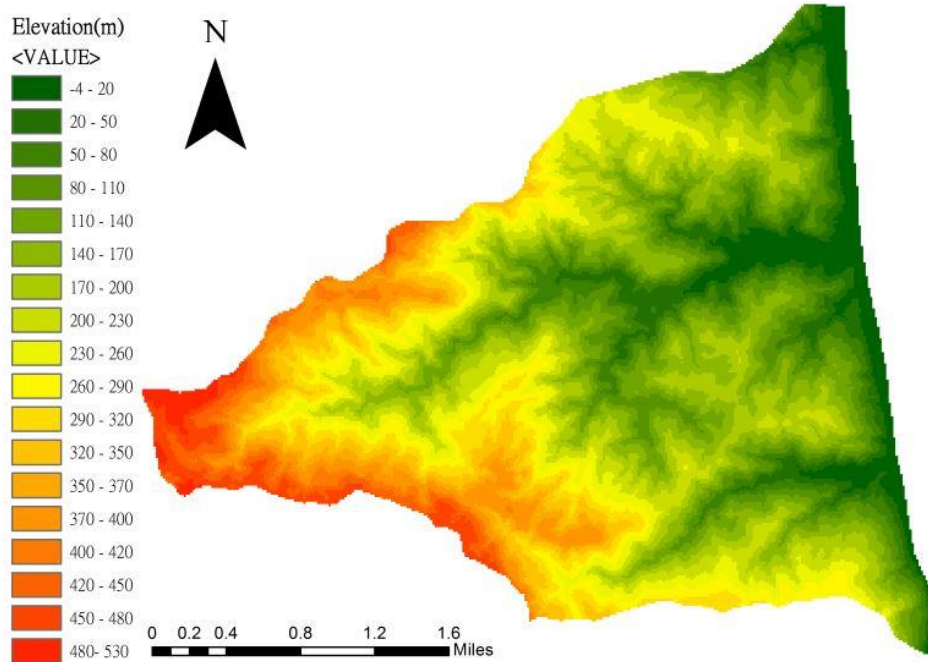


圖 4.1 台東達仁溪流域高程

#### 4.1.1 遠場(地質圈)

遠場模擬因涵蓋近岸海域，網格總長度 8400m、總寬度 5400m、深度至海平面下 400m，如圖 4.2、4.3 所示，其元素設置詳列於表 4.1。台東達仁溪流域降雨量採用水利署壽卡雨量站資料，年降雨量為 3396mm，因地形起伏較大考慮徑流影響，降水入滲率為 0.0003(m/day)，而遠場之水文地質參數設定參照過去研究成果(台灣電力公司，2016)，詳列於表 4.1。

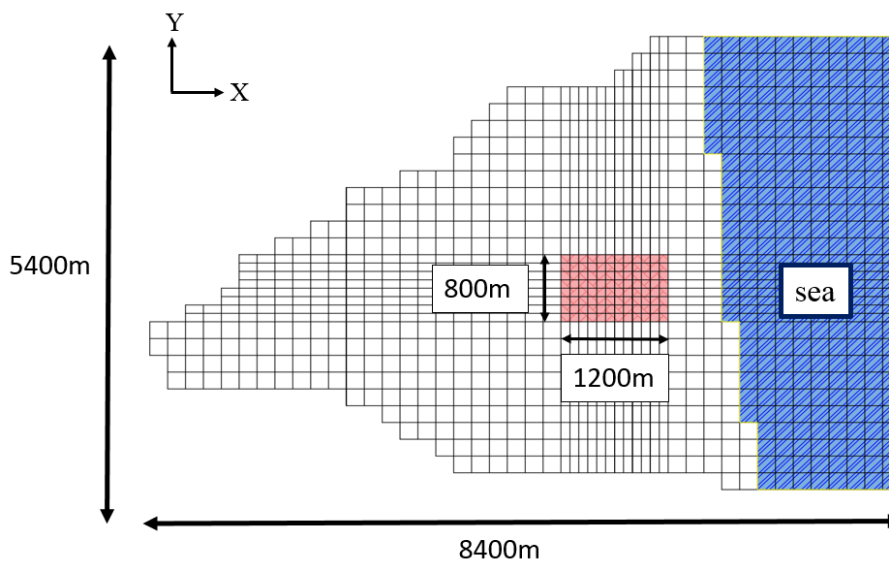


圖 4.2 遠場網格正視圖

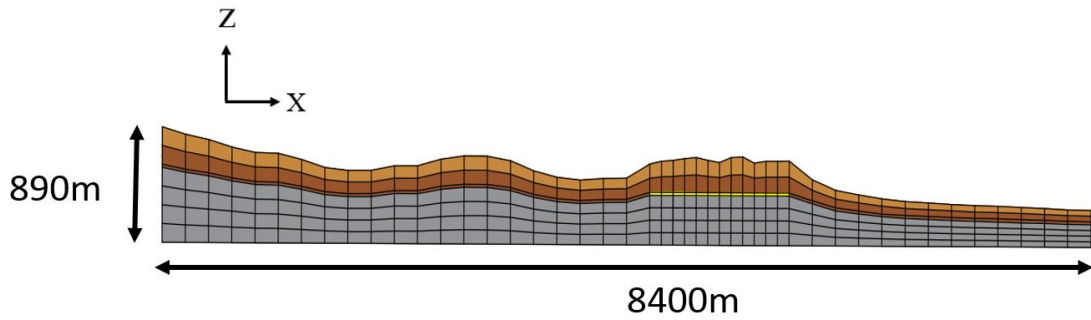


圖 4.3 遠場網格剖面圖

表 4.1 台東達仁鄉水文地質參數(來源：台灣電力公司，2016)

| 模擬設置 |           |                                  |                                |                           |
|------|-----------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 垂直分層 | 7         | 高度                               | 20~90(m)                       |                           |
| 水平網格 | 1189      | 長*寬                              | 200(m)*200(m)<br>100(m)*100(m) |                           |
| 總節點數 | 9512      |                                  |                                |                           |
| 總元素數 | 7763      |                                  |                                |                           |
| 流場參數 |           | Layer1                           | Layer2                         | Layer3                    |
|      | $k_x=k_y$ | $3*10^{-2}(\text{m/day})$        | $3*10^{-2}(\text{m/day})$      | $3*10^{-5}(\text{m/day})$ |
|      | $k_z$     | $8.9*10^{-2}(\text{m/day})$      | $8.9*10^{-3}(\text{m/day})$    | $3*10^{-5}(\text{m/day})$ |
|      | 孔隙率       | 0.08                             |                                |                           |
|      | 入滲率       | 0.0003(m/day)                    |                                |                           |
| 傳輸參數 | 縱向延散係數    | 800(m)                           |                                |                           |
|      | 橫向延散係數    | 200(m)                           |                                |                           |
|      | 擴散係數      | $10^{-4}(\text{m}^2/\text{day})$ |                                |                           |

#### 4.1.2 近場(處置設施)

近場處置設施俯瞰圖如圖 4.4，處置設施內共有 15 條處置坑道，其中 13 條標示為黃色是 A 類廢棄物處置坑道，而 2 條橘色為 BC 類廢棄物處置坑道，整體設施長寬高為 1225 公尺、852 公尺、20 公尺，其網格設置與水文地質參數詳列於表 4.2，近場處置設施網格配置如圖 4.5 所示。

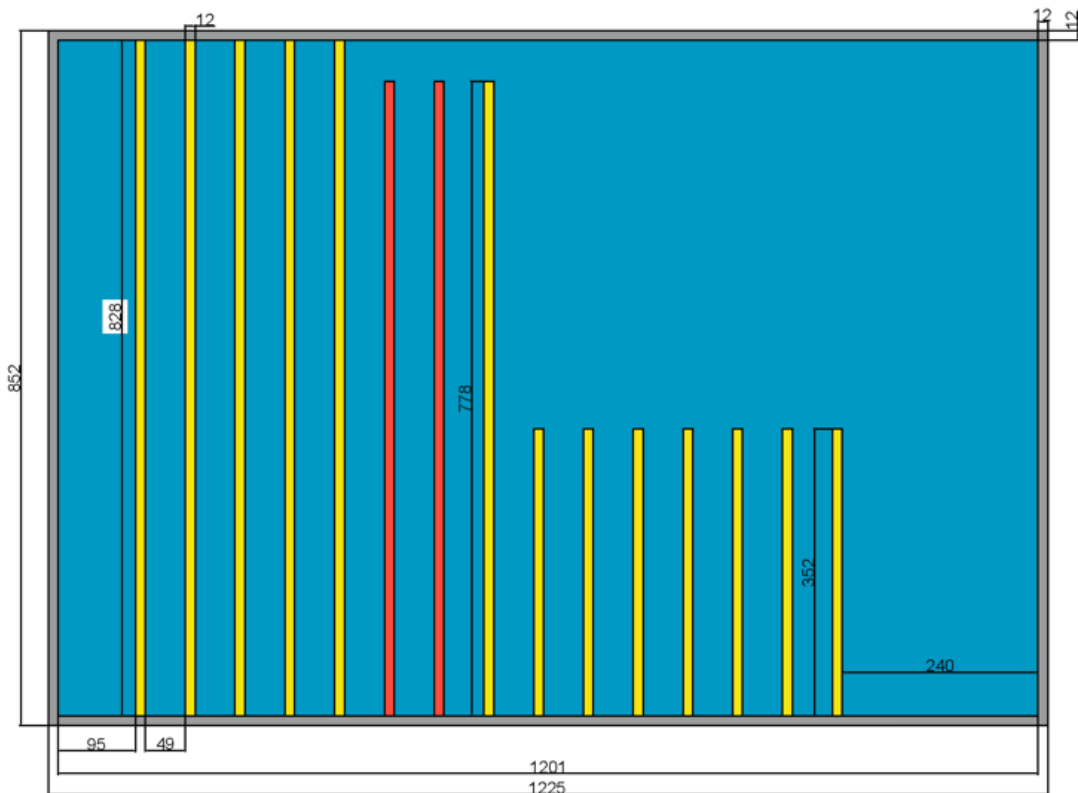


圖 4.4 近岸坑道處置設施俯視圖(來源：台灣電力公司，2016)

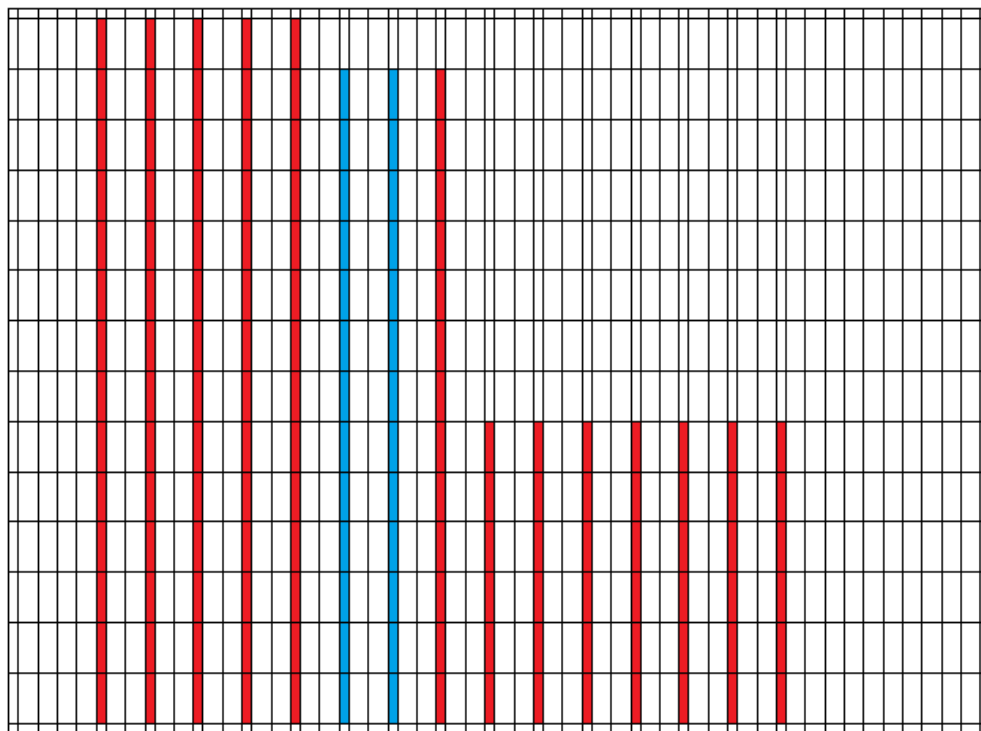


圖 4.5 近場處置設施網格配置圖

表 4.2 近場處置設施模擬參數(來源：台灣電力公司，2016)

| 模擬設置 |               |                                         |                                         |                                         |
|------|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 垂直分層 | 5             | 高度                                      | 20~90(m)                                |                                         |
| 水平網格 | 1020          | 長*寬                                     | 12(m)~60(m)*12(m)~24(m)                 |                                         |
| 總節點數 | 6120          |                                         |                                         |                                         |
| 總元素數 | 4720          |                                         |                                         |                                         |
| 流場參數 |               | Rock                                    | Type A                                  | Type BC                                 |
|      | $k_x=k_y=k_z$ | $8.64*10^{-5}$<br>(m/day)               | $6.94*10^{-5}$<br>(m/day)               | $5.16*10^{-5}$<br>(m/day)               |
|      | 孔隙率           | 0.08                                    |                                         |                                         |
| 傳輸參數 | 縱向延散係數        | 800(m)                                  |                                         |                                         |
|      | 橫向延散係數        | 200(m)                                  |                                         |                                         |
|      | 擴散係數          | $1.73*10^{-4}$<br>(m <sup>2</sup> /day) | $5.39*10^{-5}$<br>(m <sup>2</sup> /day) | $4.89*10^{-5}$<br>(m <sup>2</sup> /day) |

### 4.1.3 近場(處置坑道)

A 類、B/C 類放射性廢棄物處置坑道剖面圖如圖 4.6、4.7 所示 (台灣電力公司，2016)，A 類廢棄物處置坑道剖面由內而外分別為廢棄物體、填充材料、處置窖、回填材料、二次襯砌、基礎層、擾動區等七種材質，B、C 類廢棄物處置坑道剖面由內而外分別為廢棄物體、填充材料、處置窖、緩衝材料、回填材料、二次襯砌、基礎層、擾動區等八種材質，各材質之水文及傳輸參數如表 4.3 所示，處置坑道寬高分別為 12 公尺、11 公尺，而黃色區域為置放 55 加侖桶盛裝容器區域，進行近場 (處置坑道) 核種傳輸數值模擬時為源項區塊，2D 近場處置坑道網格配置如圖 4.8 所示，長寬分別為 60 公尺、20 公尺。



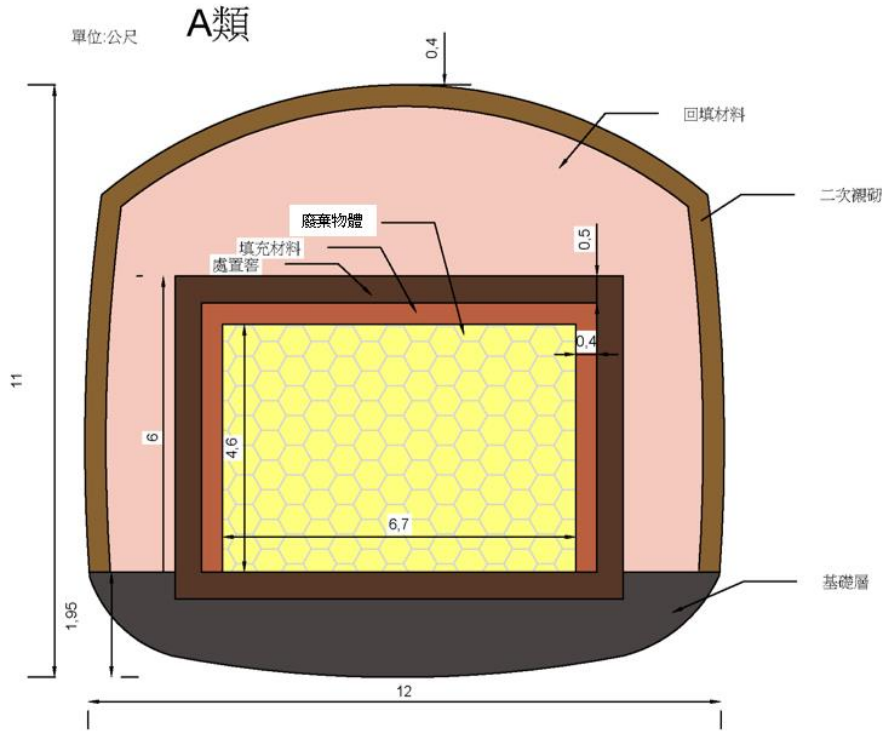


圖 4.6 A 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016)

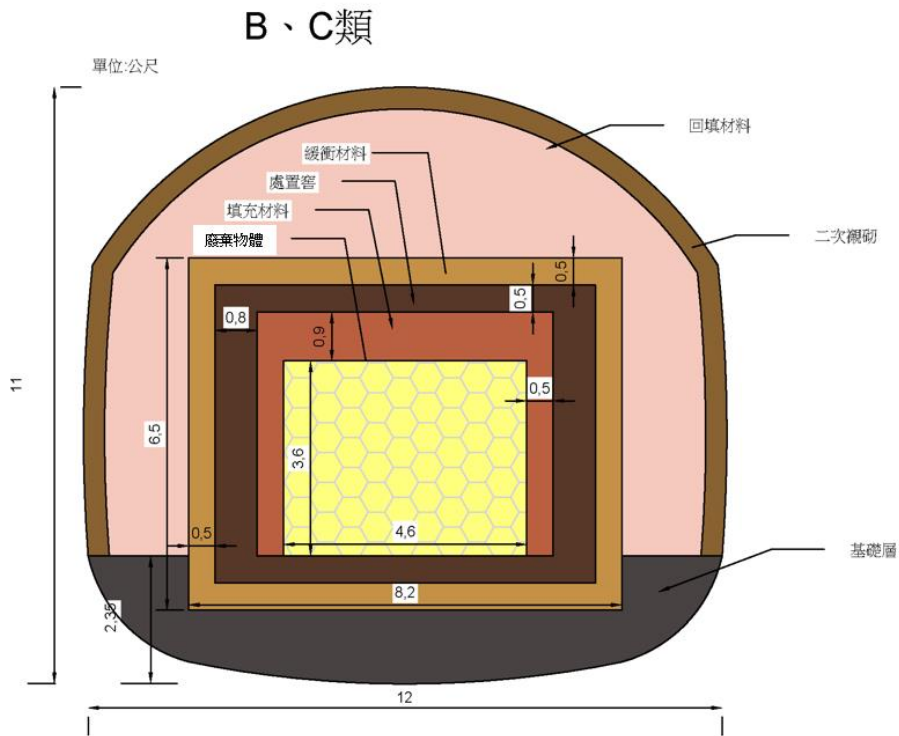


圖 4.7 B、C 類廢棄物處置坑道剖面圖(來源：台灣電力公司，2016)

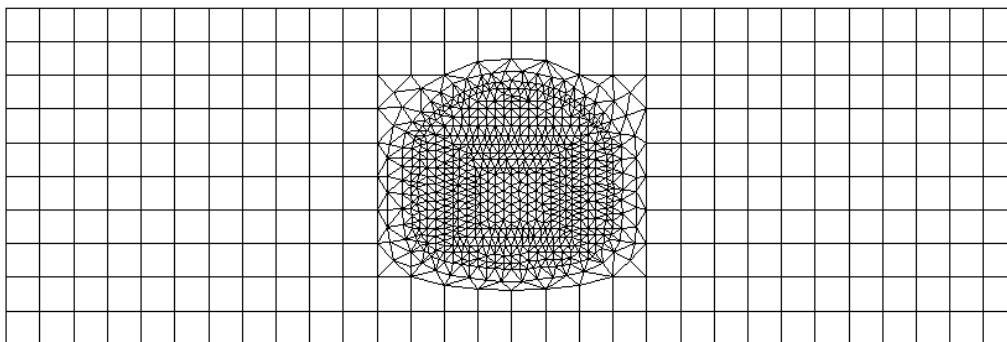


圖 4.8 二維近場處置坑道網格圖

表 4.3 近場(處置坑道)8 種障壁材質之水文與傳輸參數(來源：台灣電力公司，2016)

| 組件   | 孔隙率<br>(-) | $k_x$ 、 $k_z$<br>(m/day) | 擴散係數<br>( $m^2/day$ ) | 縱向延散<br>(m) | 側向延散<br>(m) |
|------|------------|--------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| 擾動區  | 0.25       | $8.64 \times 10^{-5}$    | $1.73 \times 10^{-4}$ | 8           | 2           |
| 二次襯砌 | 0.25       | $8.64 \times 10^{-5}$    | $1.73 \times 10^{-4}$ | 8           | 2           |
| 基礎層  | 0.2        | $8.64 \times 10^{-6}$    | $8.64 \times 10^{-8}$ | 8           | 2           |
| 緩衝材料 | 0.4        | $8.64 \times 10^{-8}$    | $1.73 \times 10^{-5}$ | 8           | 2           |
| 回填材料 | 0.3        | $1.73 \times 10^{-5}$    | $8.64 \times 10^{-6}$ | 8           | 2           |
| 處置窖  | 0.2        | $8.64 \times 10^{-6}$    | $8.64 \times 10^{-8}$ | 8           | 2           |
| 填充材料 | 0.3        | $8.64 \times 10^{-5}$    | $3.46 \times 10^{-5}$ | 8           | 2           |
| 廢棄物體 | 0.35       | $1.73 \times 10^{-4}$    | $6.05 \times 10^{-5}$ | 8           | 2           |

## 4.2 多子核種傳輸數值模擬

多子核種傳輸數值模擬採用 11 條衰變鏈，其中涵蓋台灣電力公司關鍵核種篩選報告(台灣電力公司，2017)所認定之 12 個關鍵核種( $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ )，延續本計畫 106 年度之近場多子核種傳輸驗證技術，將 A、B、C 類低放射性廢棄物之核種初始濃度(台灣電力公司，2016)置於近場處置窖中進行傳輸模擬。此模擬從流場至傳輸分為五階段銜接，一完整循環共進行六次模擬，銜接流程如圖 4.9，以下將介紹完整模式銜接方法。

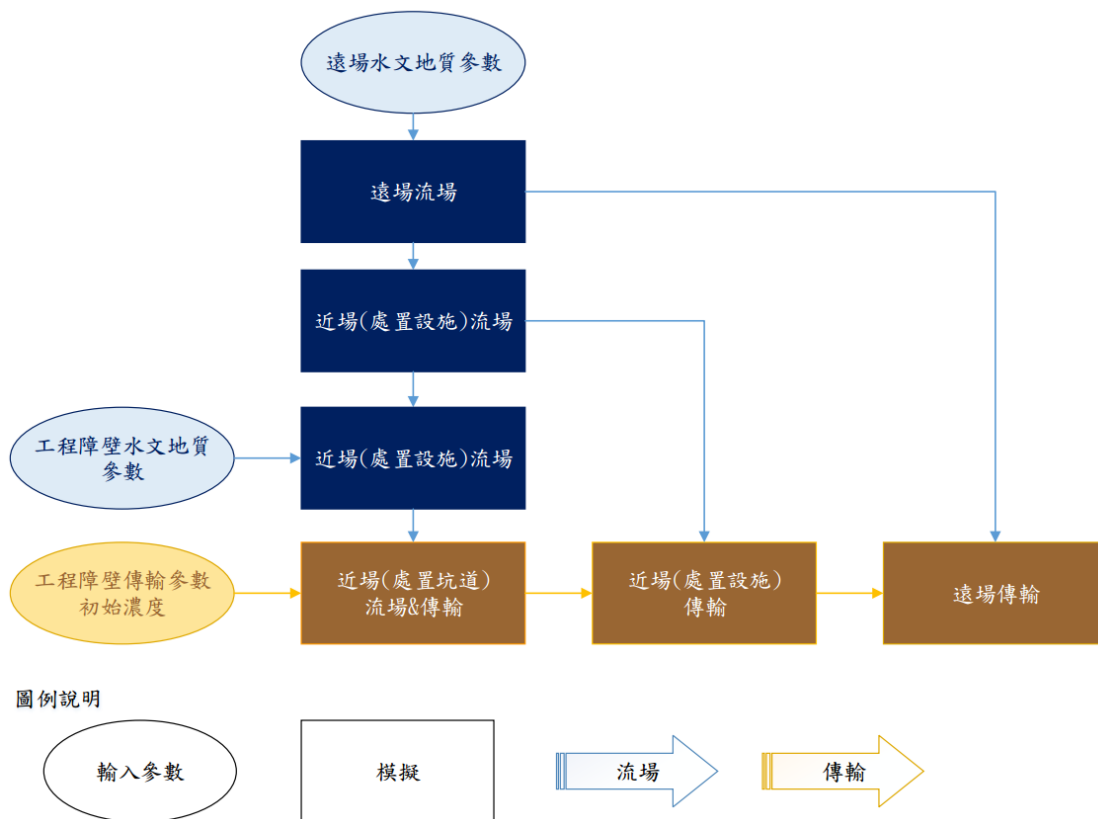


圖 4.9 流場模擬及傳輸模擬銜接流程圖

### 4.2.1 流場模擬銜接方法

流場模擬順序為遠場-近場(處置設施)-近場(處置坑道)，如圖 4.9 所示。遠場流場模擬邊界條件設定將海域與陸域分隔，海域部分上方及側邊給予定水頭邊界

假設海平面高度固定，陸域則以柯西邊界通量方式設定降水入滲率為 0.0003(m/day)，如圖 4.10 所示，並輸入水文地質參數，進行遠場穩態流場模擬。

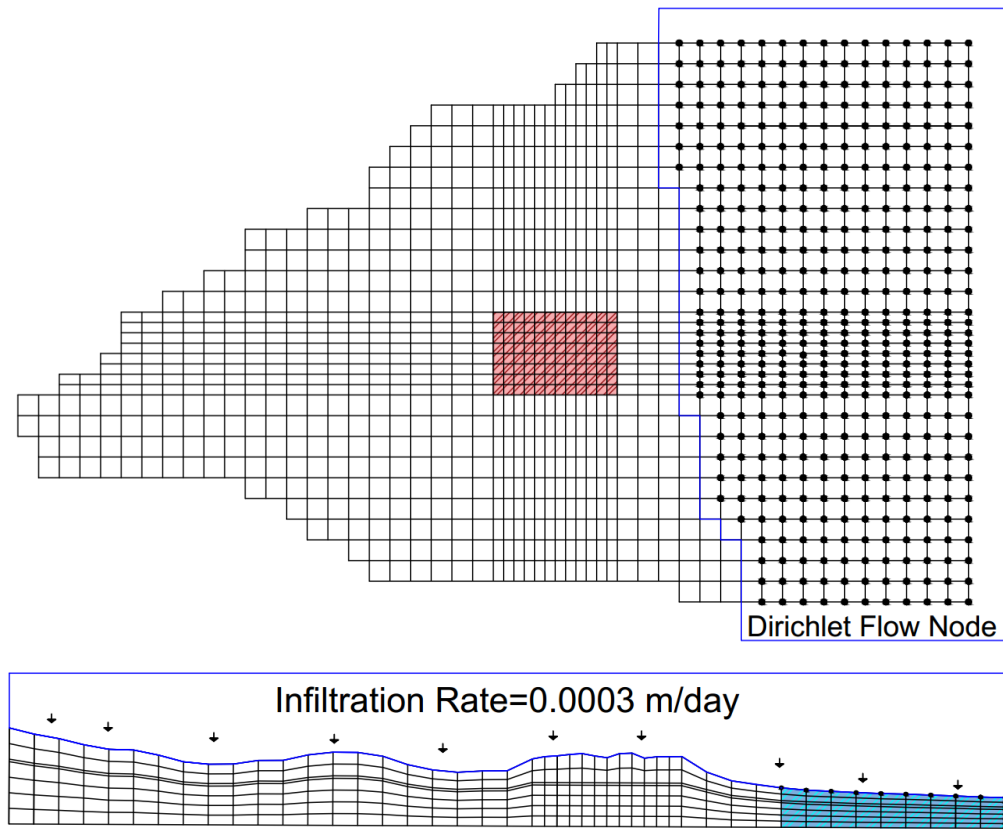


圖 4.10 遠場流場邊界條件

近場(處置設施)流場模擬需仰賴遠場流場模擬結果提供邊界條件，將遠場處置設施位置(圖 4.10 粉色區塊)四周點位之總水頭梯度加以計算，得知 X、Y 軸方向上的總水頭梯度大於 Z 軸方向 10 倍以上，圖中 X 軸方向(為流域上游自西向東流入海域之方向)為主要流場方向，因此將近場處置設施頂部及底部皆設為零流量邊界，而四周之流場邊界則取遠場處置設施位置總水頭以有限元素法網格形狀函數(shape function)內插計算近場處置設施邊界網格總水頭數值，如圖 4.11 四周邊界上標註有圓點符號位置為邊界網格點。

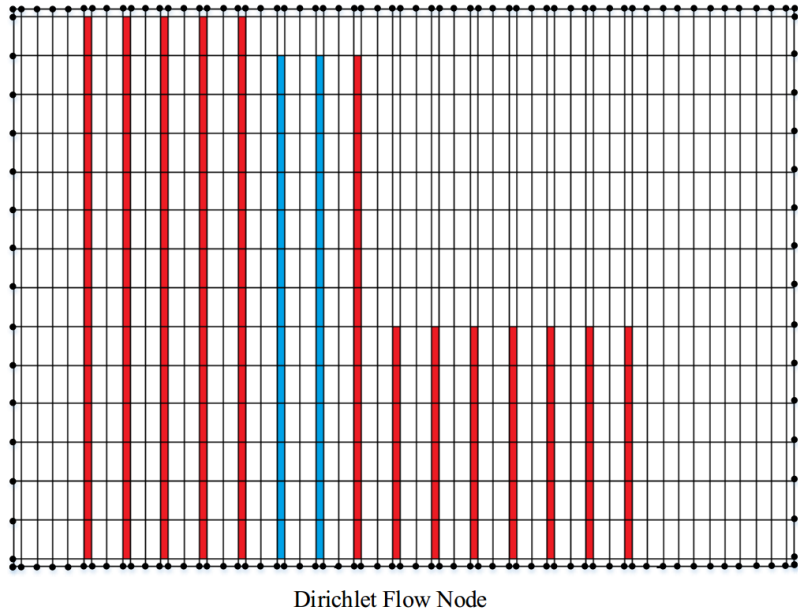


圖 4.11 近場處置設施流場邊界條件

近場處置坑道包含 A 類廢棄物坑道 13 條(圖 4.11 紅色區域)與 B/C 類廢棄物坑道 2 條(圖 4.11 藍色區域)，近場處置坑道流場模擬之邊界條件需仰賴近場處質設施流場模擬結果，簡化方式為將各坑道之平均總水頭梯度計算後，依類別選取最接近平均總水頭梯度的坑道，選為代表坑道，取其總水頭值做為近場處置坑道定水頭邊界，而頂部及底部則設置為零流量邊界，進行近場處置坑道穩態流場模擬，銜接之邊界網格點如圖 4.12 中圓點符號標示。

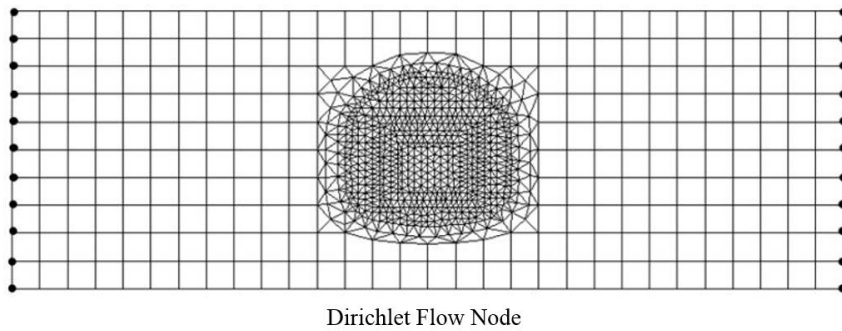


圖 4.12 近場處置坑道流場邊界條件

## 4.2.2 傳輸模擬銜接方法

不同於流場模擬銜接由遠場網格提供近場網格模擬所需資訊，傳輸模擬順序為近場(處置坑道)-近場(處置設施)-遠場，如圖 4.9 所示。換句話說，也就是流場模擬為降尺度模擬，傳輸模擬為升尺度模擬。近場處置坑道傳輸模擬為解析處置坑道細緻之工程障壁空間設計，受限於模擬資源採用二維模擬網格，其中心處置窖區域設置初始濃度作為源項，假設外部無濃度流入，外圍邊界以可變動邊界做為傳輸邊界條件，流場由外部流入模擬區域時可變動邊界條件將自動設定為通量邊界，以外部濃度乘以入流量做為邊界條件，以此模擬為例，外部濃度值為零，因此濃度通量為零，而右方流場方向由模擬內部向外流出，可變動邊界採用零濃度梯度邊界，模擬內部之濃度將隨流場釋出，如圖 4.13。

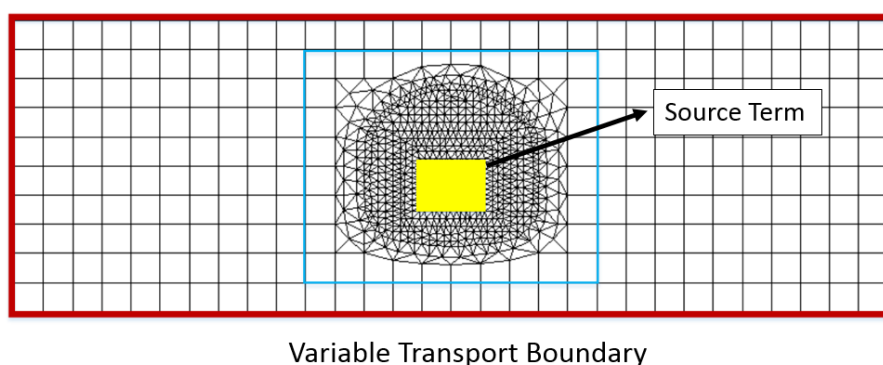


圖 4.13 近場處置坑道傳輸邊界條件

近場處置設施傳輸模擬取得近場處置坑道外釋之濃度量做為近場處置設施中坑道位置濃度值。傳輸模擬升尺度之濃度銜接方式以柯西邊界逐時濃度通量方式給予，將近場處置坑道圖 4.13 中藍色框框邊界濃度視為從處置坑道內部外釋的濃度量，計算 A 類、BC 類廢棄物處置坑道通過藍色框框時的逐時濃度通量，以柯西邊界條件方式做為近場處置設施傳輸模擬中內部坑道濃度源項通量。因應近場處置設施外部並無濃度，四周傳輸邊界以可變動邊界條件設置並賦予零值。

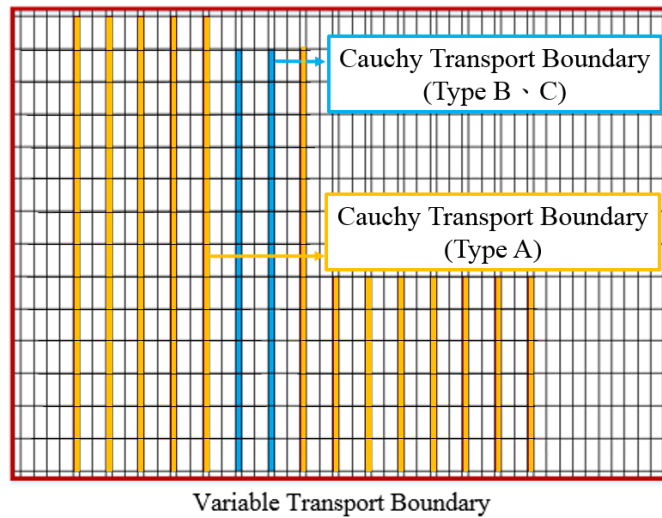


圖 4.14 近場處置設施傳輸邊界條件

遠場傳輸模擬在處置設施位置設為濃度源項，由近場處置設施傳輸模擬結果升尺度計算，將近場處置設施圖 4.14 紅色框框邊界視為從處置設施外釋之濃度量，計算近場處置設施四周邊界處的逐時濃度通量，以質量守恆計算升尺度後之濃度，遠場傳輸模擬使用柯西邊界條件做為處置設施位置外釋濃度通量，遠場陸域及海域之邊界採用變動邊界條件，且外部濃度為零值，如圖 4.15。

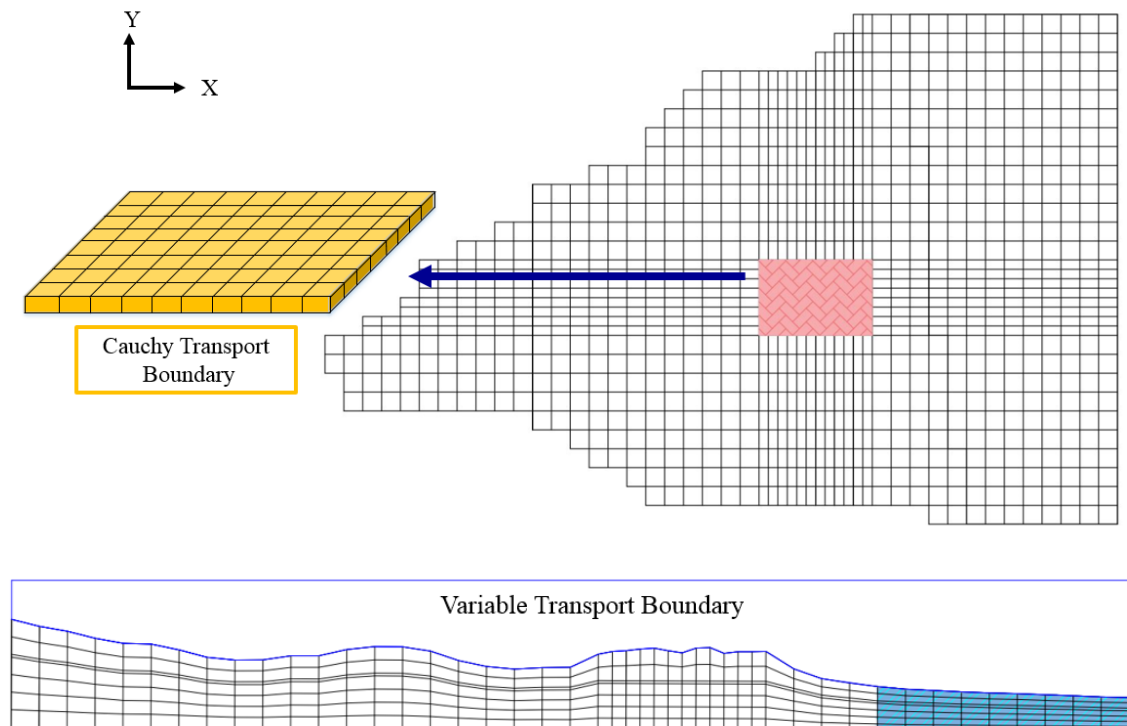


圖 4.15 遠場傳輸邊界條件

### 4.2.3 多子核種衰變鏈及參數

模擬選用之多子核種衰變鏈包含低放射性核廢料中的 12 種關鍵核種，其核種之半衰期、衰變形式等相關參數設置如下所示(台灣電力公司，2016)。而核種於水泥類材料、膨潤土材料、岩盤等分配係數來源係參考前人研究成果(JAEA，2013)，因分配係數於氧化態及還原態將呈現不同數值，本模擬之時間軸起始於處置設施封閉後，故氧化態之分配係數將不予採計，且因部分核種材質之分配係數有所欠缺，將假設個別核種於此材質不存在吸附現象，訂定數值為零，如表 4.4、4.5、4.6、4.7、4.8 所示

1.  $^{242}\text{Cm} \xrightarrow{\alpha(4.70 \times 10^{-1} \text{ y})} ^{238}\text{Pu} \xrightarrow{\alpha(8.78 \times 10^1 \text{ y})} ^{234}\text{U} \xrightarrow{\alpha(2.46 \times 10^5 \text{ y})} ^{230}\text{Th}$   
 $\xrightarrow{\alpha(7.54 \times 10^4 \text{ y})} ^{226}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha(1.59 \times 10^3 \text{ y})} ^{222}\text{Rn} \xrightarrow{\alpha(1.05 \times 10^{-2} \text{ y})} ^{218}\text{Po}$   
 $\xrightarrow{\alpha(5.48 \times 10^{-6} \text{ m})} ^{214}\text{Pb} \xrightarrow{\beta(5.48 \times 10^{-5} \text{ y})} ^{214}\text{Bi} \xrightarrow{\beta(3.84 \times 10^{-5} \text{ y})} ^{214}\text{Po}$   
 $\xrightarrow{\alpha(5.21 \times 10^{-12} \text{ y})} ^{210}\text{Pb} \xrightarrow{\alpha(2.22 \times 10^1 \text{ y})} ^{210}\text{Bi} \xrightarrow{\beta(1.37 \times 10^{-2} \text{ y})} ^{210}\text{Po}$   
 $\xrightarrow{\alpha(3.79 \times 10^{-1} \text{ y})} ^{206}\text{Pb} \rightarrow \text{Stable}$
2.  $^{241}\text{Pu} \xrightarrow{\beta(1.44 \times 10^1 \text{ y})} ^{241}\text{Am} \xrightarrow{\alpha(4.33 \times 10^2 \text{ y})} ^{237}\text{Np} \xrightarrow{\alpha(2.15 \times 10^6 \text{ y})} ^{233}\text{Pa}$   
 $\xrightarrow{\beta(7.39 \times 10^{-2} \text{ y})} ^{233}\text{U} \xrightarrow{\alpha(1.59 \times 10^5 \text{ y})} ^{229}\text{Th} \xrightarrow{\alpha(7.36 \times 10^3 \text{ y})} ^{225}\text{Ra}$   
 $\xrightarrow{\beta(4.09 \times 10^{-2} \text{ y})} ^{225}\text{Ac} \xrightarrow{\alpha(2.73 \times 10^{-2} \text{ y})} ^{221}\text{Fr} \xrightarrow{\alpha(8.22 \times 10^{-6} \text{ y})} ^{217}\text{At}$   
 $\xrightarrow{\alpha(1.01 \times 10^{-9} \text{ y})} ^{213}\text{Bi} \xrightarrow{\beta(8.77 \times 10^{-5} \text{ y})} ^{213}\text{Po} \xrightarrow{\alpha(1.34 \times 10^{-13} \text{ y})} ^{209}\text{Pb}$   
 $\xrightarrow{\beta(3.84 \times 10^{-4} \text{ y})} ^{209}\text{Bi} \rightarrow \text{stable}$
3.  $^{99}\text{Tc} \xrightarrow{\beta(2.10 \times 10^5 \text{ y})} ^{99}\text{Ru} \rightarrow \text{stable}$
4.  $^{60}\text{Co} \xrightarrow{\beta(5.27 \times 10^0 \text{ y})} ^{60}\text{Ni} \rightarrow \text{stable}$
5.  $^{129}\text{I} \xrightarrow{\beta(1.57 \times 10^7 \text{ y})} ^{129}\text{Xe} \rightarrow \text{stable}$



6.  $^{137}\text{Cs} \xrightarrow{\beta(3.02 \times 10^1 \text{y})} ^{137}\text{Ba} \rightarrow \text{stable}$
7.  $^{59}\text{Ni} \xrightarrow{\beta(1.00 \times 10^5 \text{y})} ^{59}\text{Co} \rightarrow \text{stable}$
8.  $^{14}\text{C} \xrightarrow{\beta(5.71 \times 10^3 \text{y})} ^{14}\text{N} \rightarrow \text{stable}$
9.  $^{90}\text{Sr} \xrightarrow{\beta(2.88 \times 10^1 \text{y})} ^{90}\text{Y} \xrightarrow{\beta(7.29 \times 10^{-3} \text{y})} ^{90}\text{Zr} \rightarrow \text{stable}$
10.  $^{63}\text{Ni} \xrightarrow{\beta(1.00 \times 10^2 \text{y})} ^{63}\text{Cu} \rightarrow \text{stable}$
11.  $^3\text{H} \xrightarrow{\beta(1.23 \times 10^1 \text{y})} ^3\text{He} \rightarrow \text{stable}$

表 4.4 第 1 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013)

| 第 1 條             | 分配係數 Kd (ml/g) |       |      |
|-------------------|----------------|-------|------|
|                   | 水泥類材料          | 膨潤土材料 | 岩盤   |
| $^{242}\text{Cm}$ | 250            | 1000  | 5000 |
| $^{238}\text{Pu}$ | 250            | 5000  | 50   |
| $^{234}\text{U}$  | 250            | 5     | 5    |
| $^{230}\text{Th}$ | 250            | 1000  | 1000 |
| $^{226}\text{Ra}$ | 1.25           | 1     | 500  |
| $^{222}\text{Rn}$ | 0              | 0     | 0    |
| $^{218}\text{Po}$ | 0              | 0     | 0    |
| $^{214}\text{Pb}$ | 12.5           | 50    | 100  |
| $^{214}\text{Bi}$ | 0              | 0     | 0    |
| $^{214}\text{Po}$ | 0              | 0     | 0    |
| $^{210}\text{Pb}$ | 12.5           | 50    | 100  |
| $^{210}\text{Bi}$ | 0              | 0     | 0    |
| $^{210}\text{Po}$ | 0              | 0     | 0    |
| $^{206}\text{Pb}$ | 12.5           | 50    | 100  |

表 4.5 第 2 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013)

| 第 2 條             | 分配係數 Kd (ml/g) |       |      |
|-------------------|----------------|-------|------|
|                   | 水泥類材料          | 膨潤土材料 | 岩盤   |
| $^{241}\text{Pu}$ | 250            | 5000  | 50   |
| $^{241}\text{Am}$ | 250            | 1000  | 5000 |

|                   |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|
| <sup>237</sup> Np | 250  | 5    | 5    |
| <sup>233</sup> Pa | 250  | 1000 | 5    |
| <sup>233</sup> U  | 250  | 5    | 5    |
| <sup>229</sup> Th | 250  | 1000 | 1000 |
| <sup>225</sup> Ra | 1.25 | 1    | 500  |
| <sup>225</sup> Ac | 250  | 1000 | 5000 |
| <sup>221</sup> Fr | 0    | 0    | 0    |
| <sup>217</sup> At | 0    | 0    | 0    |
| <sup>213</sup> Bi | 0    | 0    | 0    |
| <sup>213</sup> Po | 0    | 0    | 0    |
| <sup>209</sup> Pb | 12.5 | 50   | 100  |
| <sup>209</sup> Bi | 0    | 0    | 0    |

表 4.6 第 3 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013)

| 第 3 條            | 分配係數 Kd (ml/g) |       |    |
|------------------|----------------|-------|----|
|                  | 水泥類材料          | 膨潤土材料 | 岩盤 |
| <sup>99</sup> Tc | 0.3            | 0     | 0  |
| <sup>99</sup> Ru | 0              | 0     | 0  |

表 4.7 第 4-10 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013)

| 第 4 條             | 分配係數 Kd (ml/g) |       |     |
|-------------------|----------------|-------|-----|
|                   | 水泥類材料          | 膨潤土材料 | 岩盤  |
| <sup>60</sup> Co  | 12.5           | 50    | 10  |
| <sup>60</sup> Ni  | 12.5           | 50    | 10  |
| 第 5 條             |                |       |     |
| <sup>129</sup> I  | 1.25           | 0     | 0.1 |
| <sup>129</sup> Xe | 0              | 0     | 0   |
| 第 6 條             |                |       |     |
| <sup>137</sup> Cs | 2              | 50    | 50  |
| <sup>137</sup> Ba | 1              | 1     | 200 |
| 第 7 條             |                |       |     |
| <sup>59</sup> Ni  | 12.5           | 50    | 10  |
| <sup>59</sup> Co  | 12.5           | 50    | 10  |
| 第 8 條             |                |       |     |
| <sup>14</sup> C   | 1              | 1     | 0.1 |
| <sup>14</sup> N   | 0              | 0     | 0   |

|                  |      |      |     |
|------------------|------|------|-----|
| 第 9 條            |      |      |     |
| <sup>90</sup> Sr | 1    | 1    | 200 |
| <sup>90</sup> Y  | 0    | 0    | 0   |
| <sup>90</sup> Zr | 2500 | 1000 | 100 |
| 第 10 條           |      |      |     |
| <sup>63</sup> Ni | 12.5 | 50   | 10  |
| <sup>63</sup> Cu | 0    | 0    | 0   |

表 4.8 第 11 條衰變鏈各核種於各材質之分配係數(來源：JAEA，2013)

| 第 11 條          | 分配係數 Kd (ml/g) |       |    |
|-----------------|----------------|-------|----|
|                 | 水泥類材料          | 膨潤土材料 | 岩盤 |
| <sup>3</sup> H  | 0              | 0     | 0  |
| <sup>3</sup> He | 0              | 0     | 0  |

廢棄物分類方法依原能會發布之「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」，將核種濃度分 A 類、B 類、C 類及超 C 類，其中超 C 類非經原能會核准不得於低階放射性廢棄物處置設施進行處置，因此不予討論。處置坑道依類別區分為 A 類及 B、C 類兩種，其廢棄物分類活度計算採用分類標準之法規限值作為依據，如表 4.9、4.10 所示。

低階放射性廢棄物處置容量來源參考台灣電力公司安全評估技術支援報告中達仁鄉建議候選場址之低放射性廢棄物最大處置容量(台灣電力公司，2016)，採用之低階放射性廢棄物皆以桶高 0.884 公尺、體積 0.227 立方公尺之 55 加侖桶進行盛裝，每個 55 加侖桶內填充的廢棄物體積為 0.2 立方公尺(台灣電力公司，2016)，放置於孔隙率 0.35 之處置窖，其中 A 類廢棄物處置坑道處置窖區域面積為 33.912 平方公尺，總坑道長度為 7382 公尺共預計貯放 702000 桶，而 B、C 類廢棄物處置坑道處置窖面積為 20.16 平方公尺，總坑道長度 1556 公尺共預計貯放 88200 桶，保守估計 55 加侖桶內之核種濃度為法規濃度值上限，以此基準計算近場處置坑道之源項總濃度量，計算方式以 A 類廢棄物 <sup>129</sup>I 為例，A 類廢棄物法規上限濃度為 0.0003 TBq/m<sup>3</sup>，乘上總廢棄物體積再均攤給總坑道貯放區體積

(總坑道長×處置窖面積×孔隙率)，得到  $^{129}\text{I}$  濃度總量為  $4.81 \times 10^{-4} \text{ TBq/m}^3$ ，其餘核種源項濃度值如表 4.11 所示。

表 4.9 單一長半化期核種濃度值

| 核種                              | 濃度值                      |
|---------------------------------|--------------------------|
| $^{14}\text{C}$                 | $0.30 \text{ TBq/m}^3$   |
| $^{14}\text{C}$ (活化金屬內)         | $3.0 \text{ TBq/m}^3$    |
| $^{59}\text{Ni}$ (活化金屬內)        | $8.1 \text{ TBq/m}^3$    |
| $^{94}\text{Nb}$ (活化金屬內)        | $0.0074 \text{ TBq/m}^3$ |
| $^{99}\text{Tc}$                | $0.11 \text{ TBq/m}^3$   |
| $^{129}\text{I}$                | $0.0030 \text{ TBq/m}^3$ |
| TRU(半化期大於 5 年之超鈾 $\alpha$ 放射核種) | $3.7 \text{ kBq/m}^3$    |
| $^{241}\text{Pu}$               | $130 \text{ kBq/m}^3$    |
| $^{242}\text{Cm}$               | $740 \text{ kBq/m}^3$    |

表 4.10 單一短半化期核種濃度值

| 核種                       | 濃度值( $\text{TBq/m}^3$ )                                          |     |     |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------|-----|-----|
|                          | 第一行                                                              | 第二行 | 第三行 |
| 1 半化期小於 5 年之所有核種<br>總和   | 26                                                               | 註一  | 註一  |
| $^3\text{H}$             | 1.5                                                              | 註一  | 註一  |
| $^{60}\text{Co}$         | 26                                                               | 註一  | 註一  |
| $^{63}\text{Ni}$         | 0.13                                                             | 2.6 | 26  |
| $^{63}\text{Ni}$ (活化金屬內) | 1.3                                                              | 26  | 260 |
| $^{90}\text{Sr}$         | 0.0015                                                           | 5.6 | 260 |
| $^{137}\text{Cs}$        | 0.037                                                            | 1.6 | 170 |
| 註一:                      | B 類廢棄物及 C 類廢棄物並無此核種濃度值之限制。除非由本表內其他核種決定廢棄物歸於 C 類廢棄物，否則應歸於 B 類廢棄物。 |     |     |

表 4.11 A 類及 B、C 類廢棄物核種濃度總量

| 核種                | 濃度值(TBq)              |                       |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
|                   | A 類廢棄物                | B、C 類廢棄物              |
| <sup>242</sup> Cm | $2.25 \times 10^{-1}$ | $2.26 \times 10^0$    |
| <sup>241</sup> Pu | $3.94 \times 10^{-2}$ | $3.97 \times 10^{-1}$ |
| <sup>238</sup> Pu | $1.13 \times 10^{-3}$ | $1.13 \times 10^{-2}$ |
| <sup>137</sup> Cs | $5.93 \times 10^{-2}$ | $2.73 \times 10^{+2}$ |
| <sup>129</sup> I  | $4.81 \times 10^{-4}$ | $4.82 \times 10^{-3}$ |
| <sup>99</sup> Tc  | $1.76 \times 10^{-2}$ | $1.77 \times 10^{-1}$ |
| <sup>90</sup> Sr  | $2.40 \times 10^{-3}$ | $4.18 \times 10^{+2}$ |
| <sup>63</sup> Ni  | $2.29 \times 10^0$    | $4.60 \times 10^{+2}$ |
| <sup>60</sup> Co  | $4.17 \times 10^{+1}$ | $4.34 \times 10^{+2}$ |
| <sup>59</sup> Ni  | $1.30 \times 10^0$    | $1.30 \times 10^{+1}$ |
| <sup>14</sup> C   | $5.29 \times 10^{-1}$ | $5.30 \times 10^0$    |
| <sup>3</sup> H    | $2.40 \times 10^0$    | $1.59 \times 10^{+1}$ |

### 4.3 多子核種傳輸數值模擬結果

多子核種傳輸數值模擬結果為綜整上述之參數條件設置，並進行完整模擬循環後所呈現之結果。分為兩部分說明，第一部分為流場模擬結果，說明優勢流場走向及水文環境樣貌，有助於後續推估核種遷移路徑，而第二部分為傳輸模擬結果，呈現由近場-遠場(地質圈)關鍵核種外釋之模擬結果。

#### 4.3.1 流場模擬結果

遠場流場之設置涵蓋降雨入滲因素、地形影響、地質參數變化等，其模擬結果呈現之優勢流場受地形影響為主如圖 4.16 所示，由西方高處向東部海岸流動(即為圖中之 X 軸方向)，地下水流速約為  $1.4\text{E}-03 \sim 2.4\text{E}-03(\text{m}/\text{day})$ ，地下水位分佈如圖 4.17 所示。

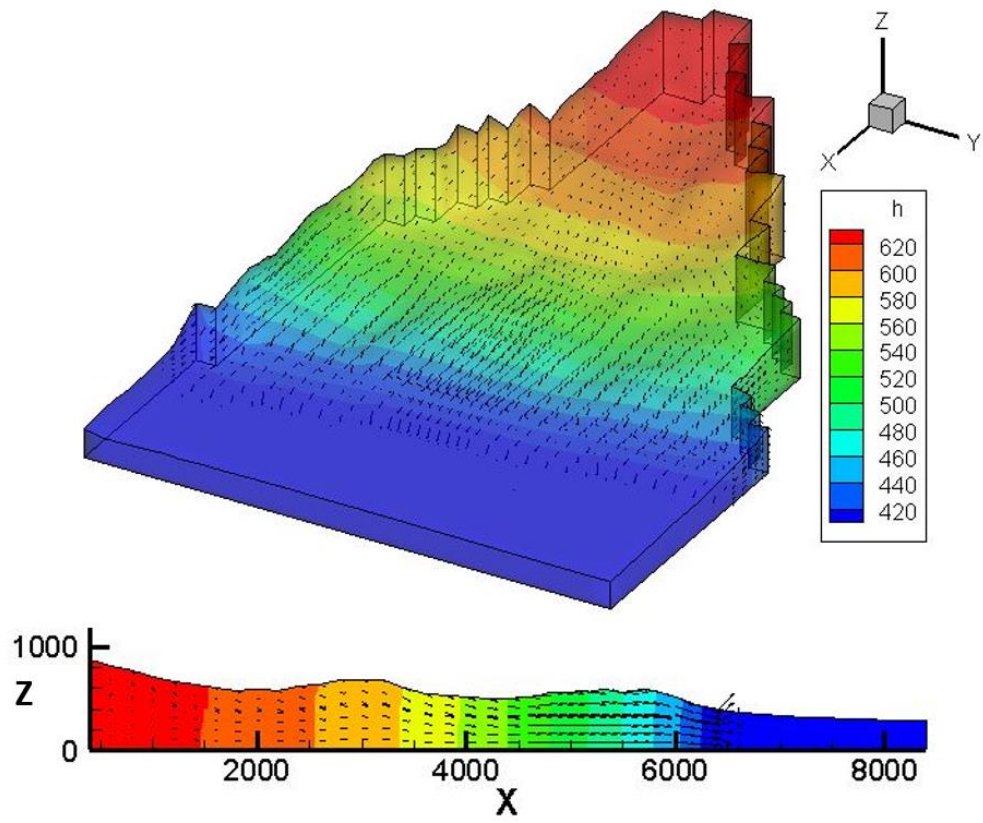


圖 4.16 遠場總水頭與流場分佈圖

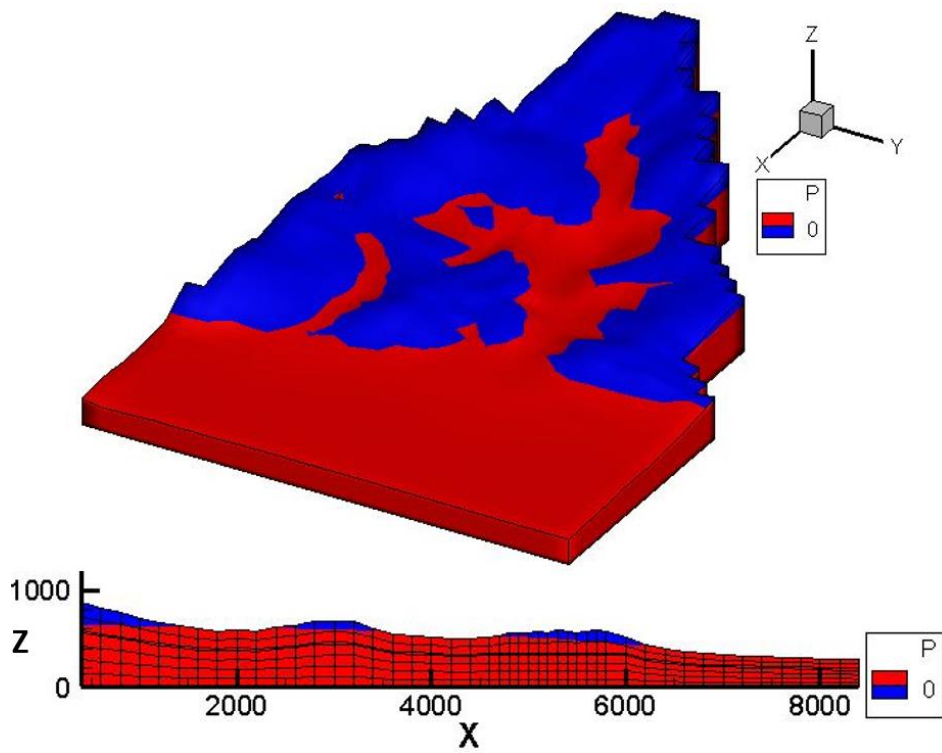


圖 4.17 遠場地下水位線分佈圖

近場處置設施之流場以遠場流場為基底，將遠場處置設施位置之總水頭置於邊界，模擬結果所呈現之總水頭與流場方向如圖 4.18 所示，其優勢流場方向與遠場相似，由上游集水區向東部海岸流動(即為圖中之 X 軸方向)，處置設施之地下水流速約為  $5.9 \text{ E-}06 \sim 2.4 \text{ E-}06 \text{ (m/day)}$ ，圖 4.19 為近場處置設施壓力水頭分佈圖。

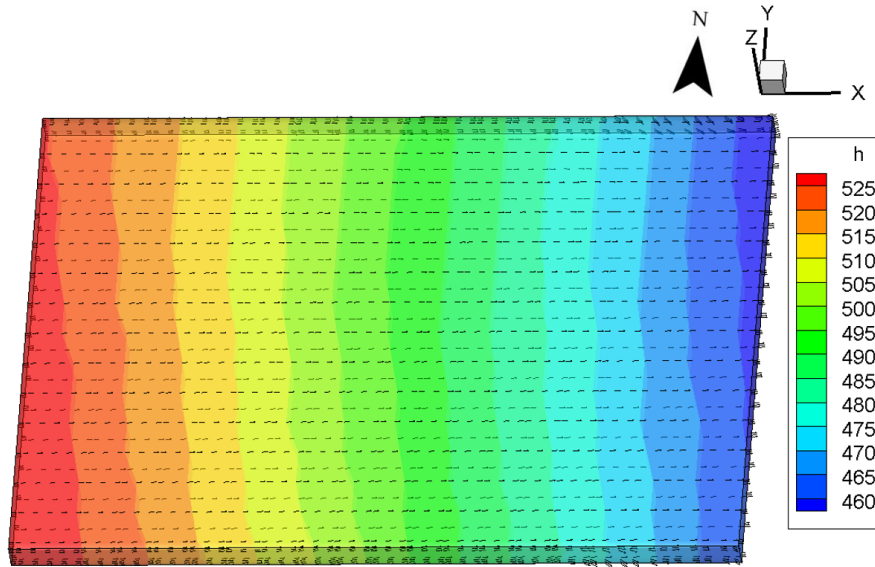


圖 4.18 近場處置設施總水頭與流場分佈圖

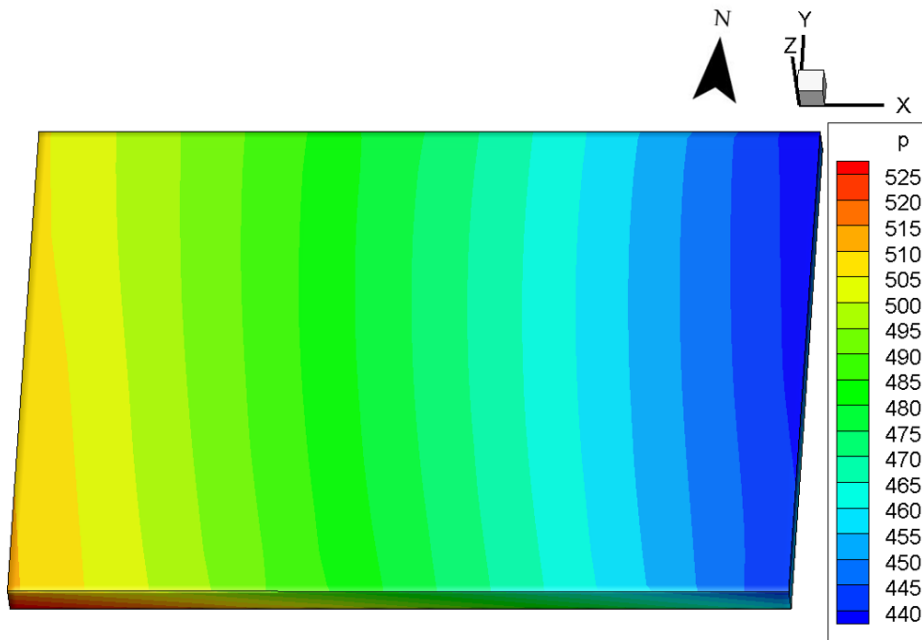


圖 4.19 近場處置設施壓力水頭分佈圖

近場處置坑道承近場處置設施坑道區域兩側之總水頭梯度，其流場優勢方向亦為由西向東如圖 4.20 所示，近場(處置坑道)地下水流速約為  $6.8 \text{ E-}06 \sim 1.5 \text{ E-}$

06(m/day)，且因應坑道工程材質水文參數有所差異，呈現頂部及底面流速較快，中間區域流速減緩之樣貌，圖 4.21 為近場處置坑道之壓力水頭分佈圖。

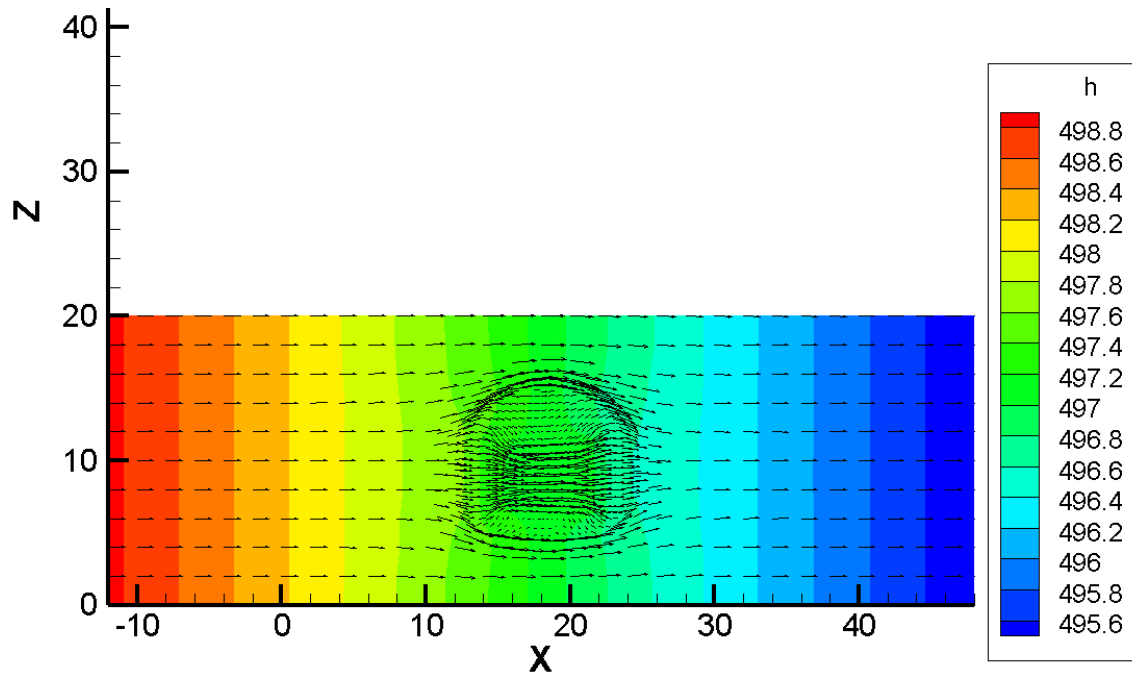


圖 4.20 近場處置坑道總水頭與流場分佈圖

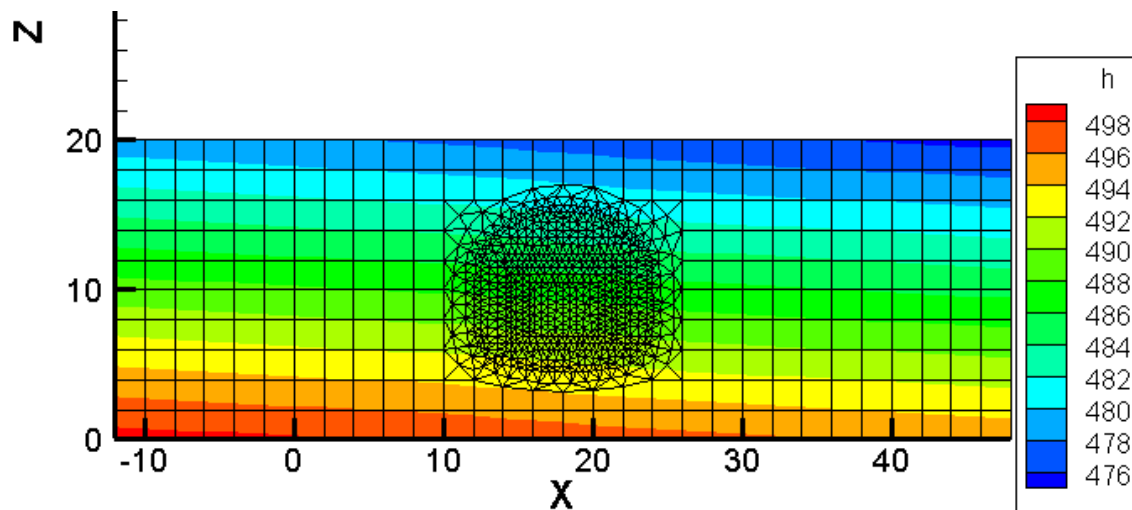


圖 4.21 近場處置坑道壓力水頭分佈圖

### 4.3.2 傳輸模擬結果

近場處置坑道傳輸結果分為 A 類及 B、C 類兩種處置坑道說明，圖 4.23、圖 4.24 以 12 種關鍵核種為例，將兩類型處置坑道之模擬結果以相同位置之觀測點



位(圖 4.22) 比較核種外釋濃度。關鍵核種於 A 類及 B、C 類處置坑道外釋濃度隨時間之變化具有相同趨勢，且皆於一萬年後脫離峰值呈現下降傾向，其中又以  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  擁有較高之外釋濃度，長半衰期導致  $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  濃度峰值高於其餘核種，而  $^{14}\text{C}$  呈現較高之外釋濃度值並非長半衰期之因素，工程障壁材質對  $^{14}\text{C}$  之吸附性功能較差為其主因。工程障壁之圍阻功能可經由圖 4.25、圖 4.26 進行比較， $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{60}\text{Co}$  於 A 類廢棄物處置坑道擁有較高之外釋濃度，反映出 B、C 類廢棄物處置坑道因增加一層緩衝材料而有較好圍阻功能， $^3\text{H}$  雖於兩類型之廢棄物坑道有相似結果，但因 B、C 類廢棄物處置坑道初始濃度高於 A 類廢棄物處置坑道，所以 B、C 類處置坑道障壁有發揮功效，其餘核種如  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{63}\text{Ni}$  可由 1 至 10 年間 A 類濃度高於 B、C 類濃度判斷其圍阻功能發揮良好，後續升高為 B、C 類處置坑道中初始濃度較 A 類處置坑道高出 10 到 100 倍導致，而  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$  同樣因初始濃度值相差 10,000 到 100,000 倍所造成。

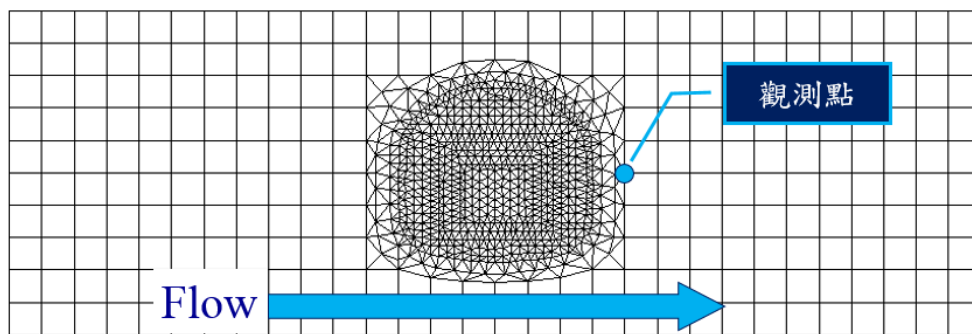


圖 4.22 近場處置坑道觀測點位示意圖

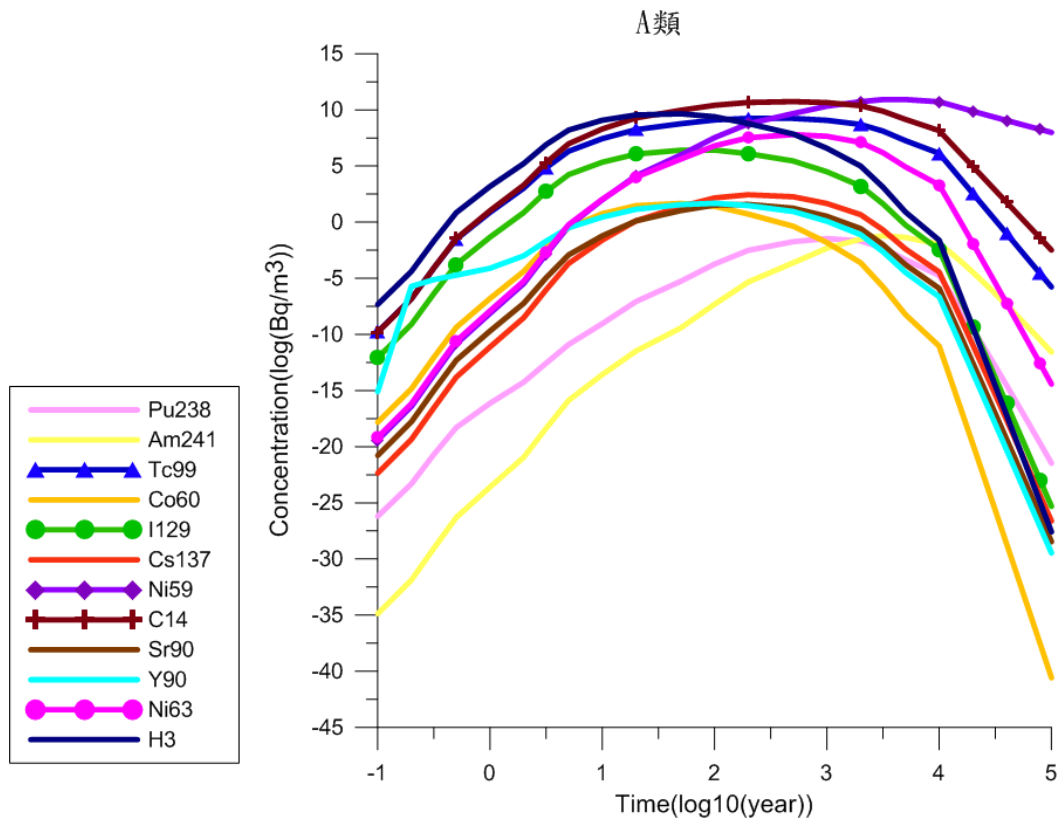


圖 4.23 A 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋濃度圖

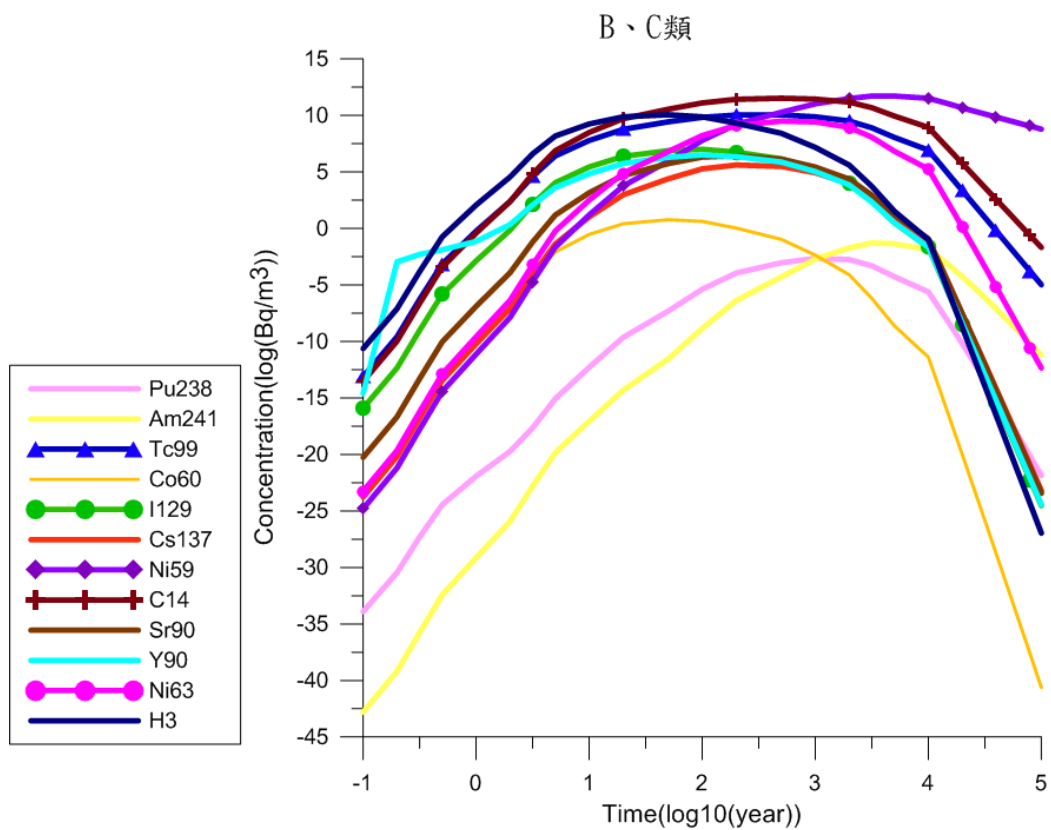


圖 4.24 B、C 類廢棄物處置坑道關鍵核種外釋濃度圖

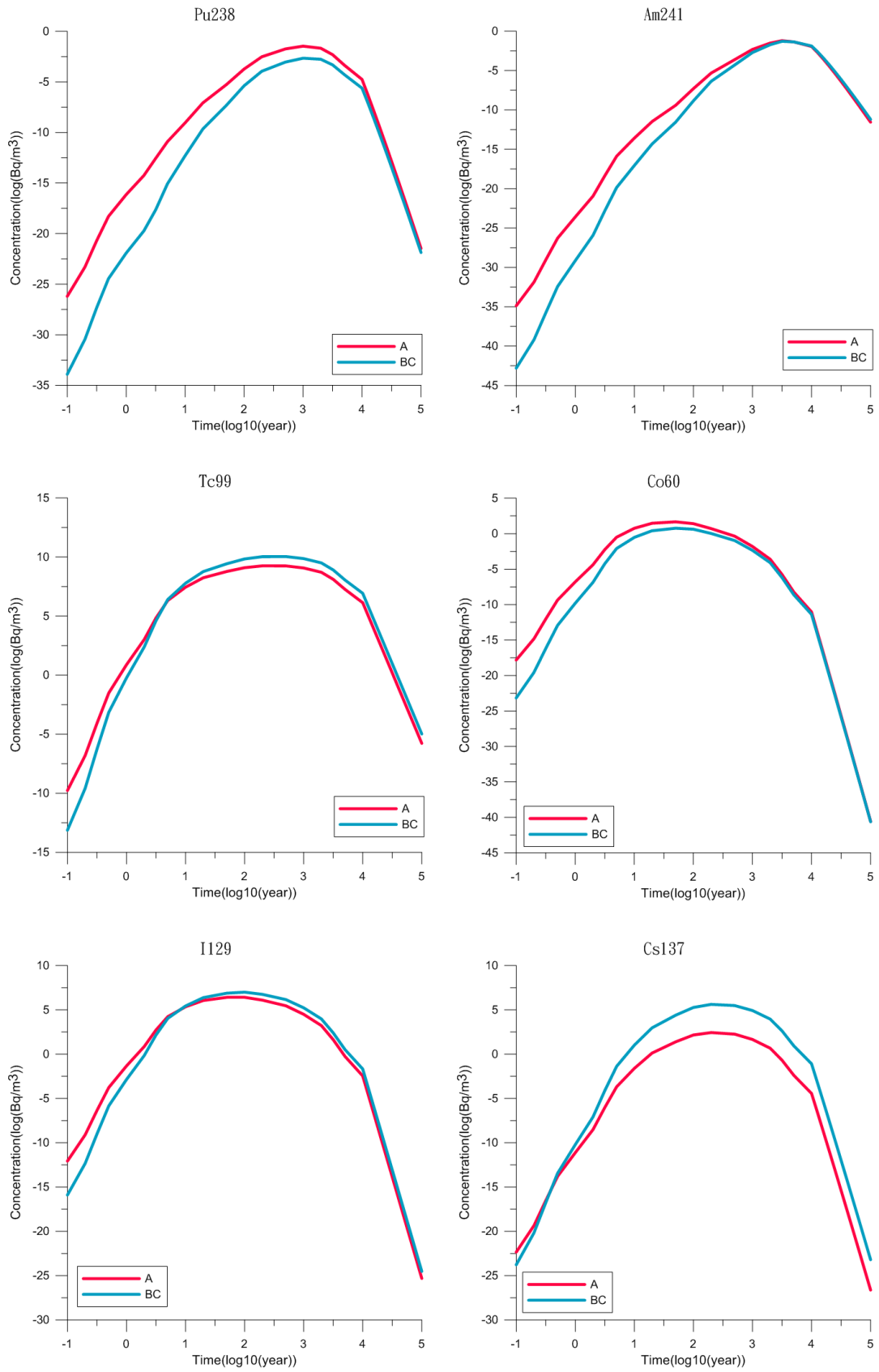


圖 4.25  $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$  不同坑道外釋濃度圖

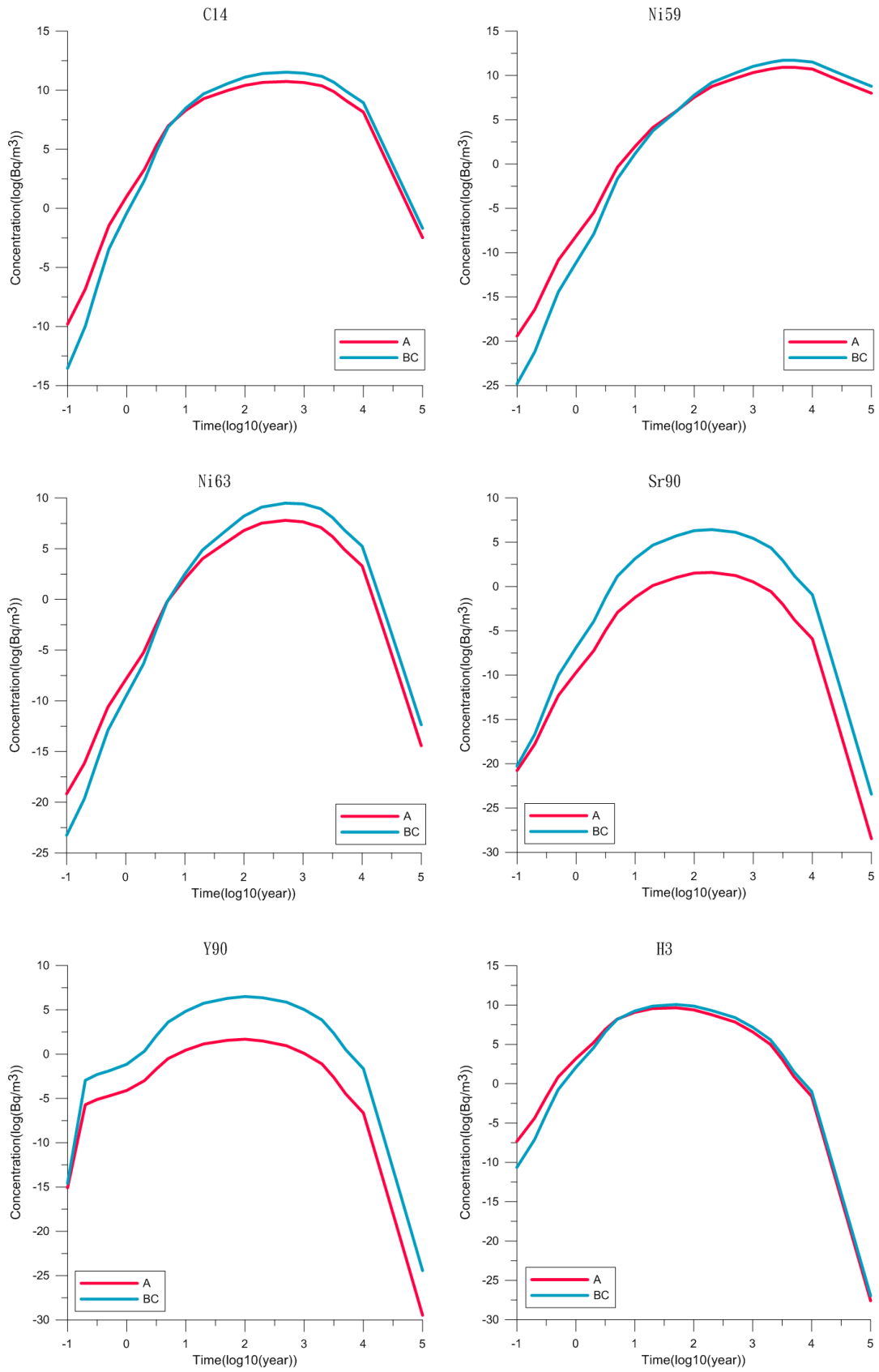


圖 4.26 <sup>59</sup>Ni、<sup>14</sup>C、<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y、<sup>63</sup>Ni、<sup>3</sup>H 不同坑道外釋濃度圖

遠場數值傳輸模擬結果以遠離處置設施 400 公尺處之核種外釋濃度比較，包含處置設施上、下游及兩側河岸設立觀測點位做為代表，圖 4.27 為處置設施四周觀測點位之示意圖。圖 4.28、圖 4.29 可發現關鍵核種最大濃度出現於 D 觀測點，將各觀測點之濃度曲線與岩盤中的吸附功能相互對應，分配係數較高之核種上下游濃度維持數個量級的差異，如  $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ ，而分配係數趨近於零之核種  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^3\text{H}$  隨時間增加上下游濃度差異逐漸縮小，且多數關鍵核種濃度峰值出現於 100~1000 年間，如  $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^3\text{H}$ ，少數半衰期較長且岩層吸附功能較差之核種  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{59}\text{Ni}$  濃度峰值約於 50,000 至 100,000 年。分析模擬成果，遠場在 100 年尺度之後  $^{14}\text{C}$  及  $^{99}\text{Tc}$  為主要貢獻核種，在距處置設施 400 公尺之各觀察點，約於 1 萬年達到濃度峰值，但由於  $^{14}\text{C}$  及  $^{99}\text{Tc}$  在遠場之分配係數分別為 0.1(表 4.7)與 0(表 4.6)，因此濃度下降緩慢，未來可以增加模擬時間尺度釐清。

表 4.12 將取濃度最高之 D 觀測點呈現處置設施封閉後不同時間各關鍵核種所占總濃度比例。整體而言，10 年至 10,000 年間以  $^{14}\text{C}$  濃度最高，10,000 年後則以  $^{99}\text{Tc}$  所占比例最高  $^{14}\text{C}$  濃度次之。

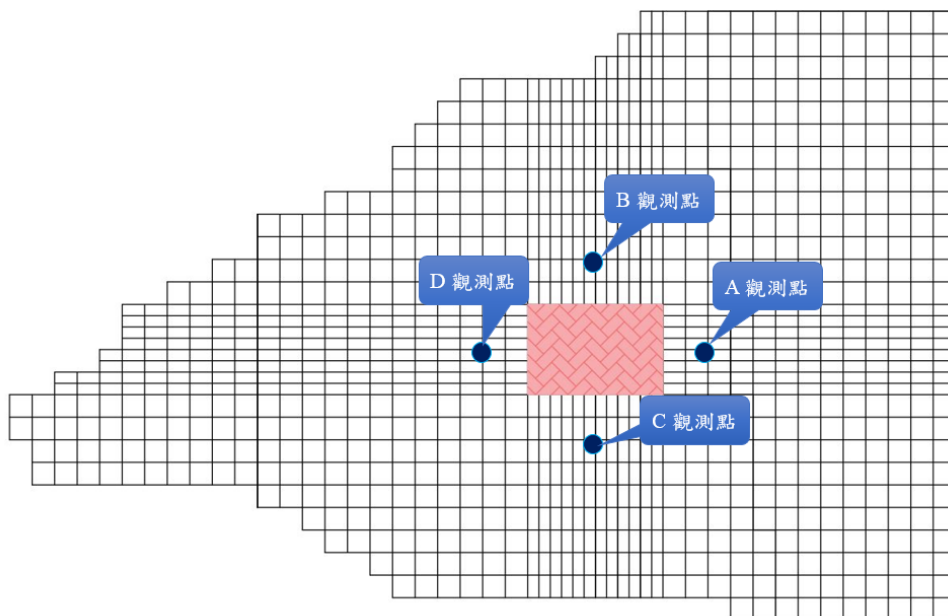


圖 4.27 遠場觀測點位示意圖

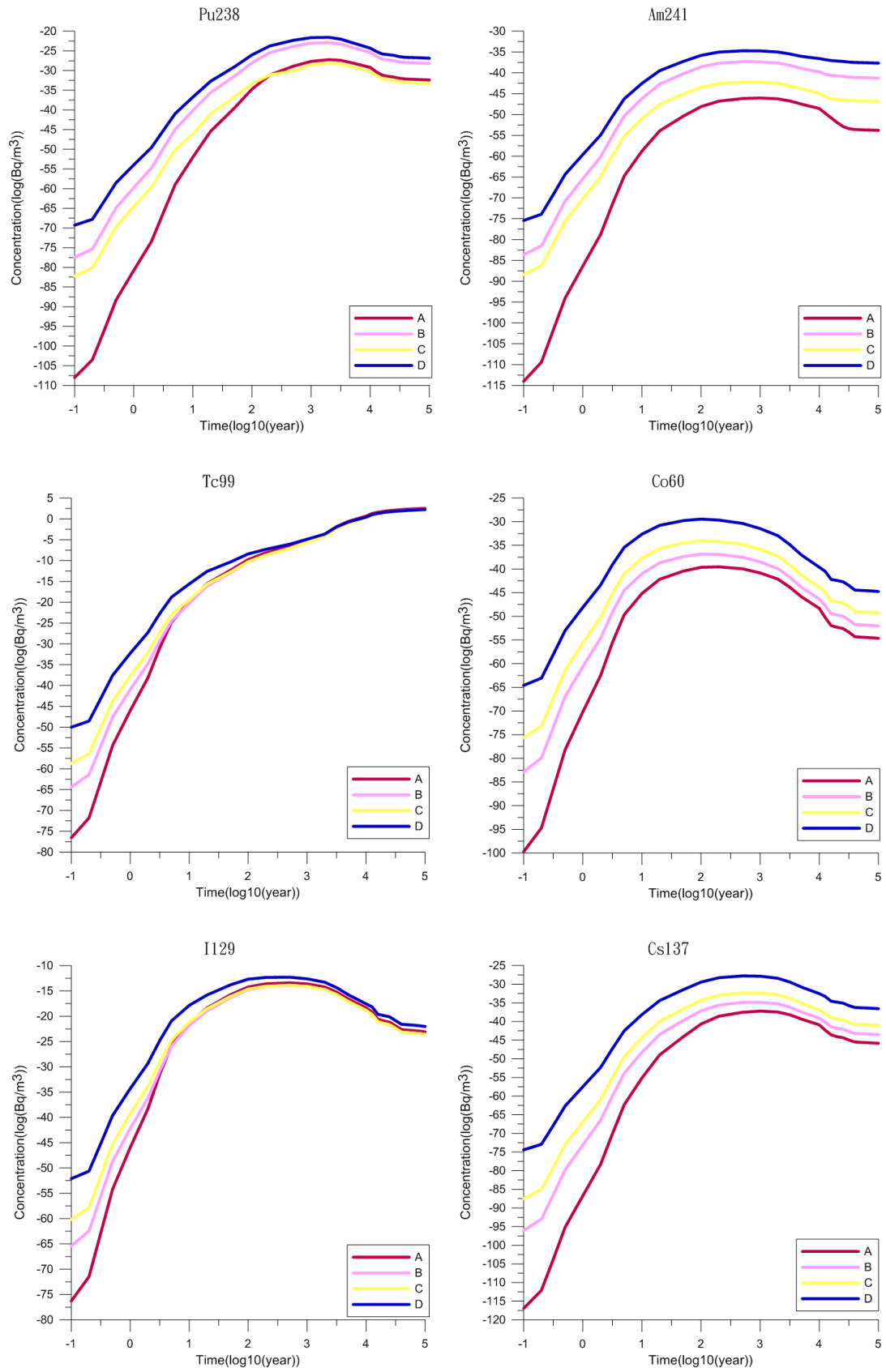


圖 4.28 <sup>238</sup>Pu、<sup>241</sup>Am、<sup>99</sup>Tc、<sup>60</sup>Co、<sup>129</sup>I、<sup>137</sup>Cs 不同遠場觀測點外釋濃度圖

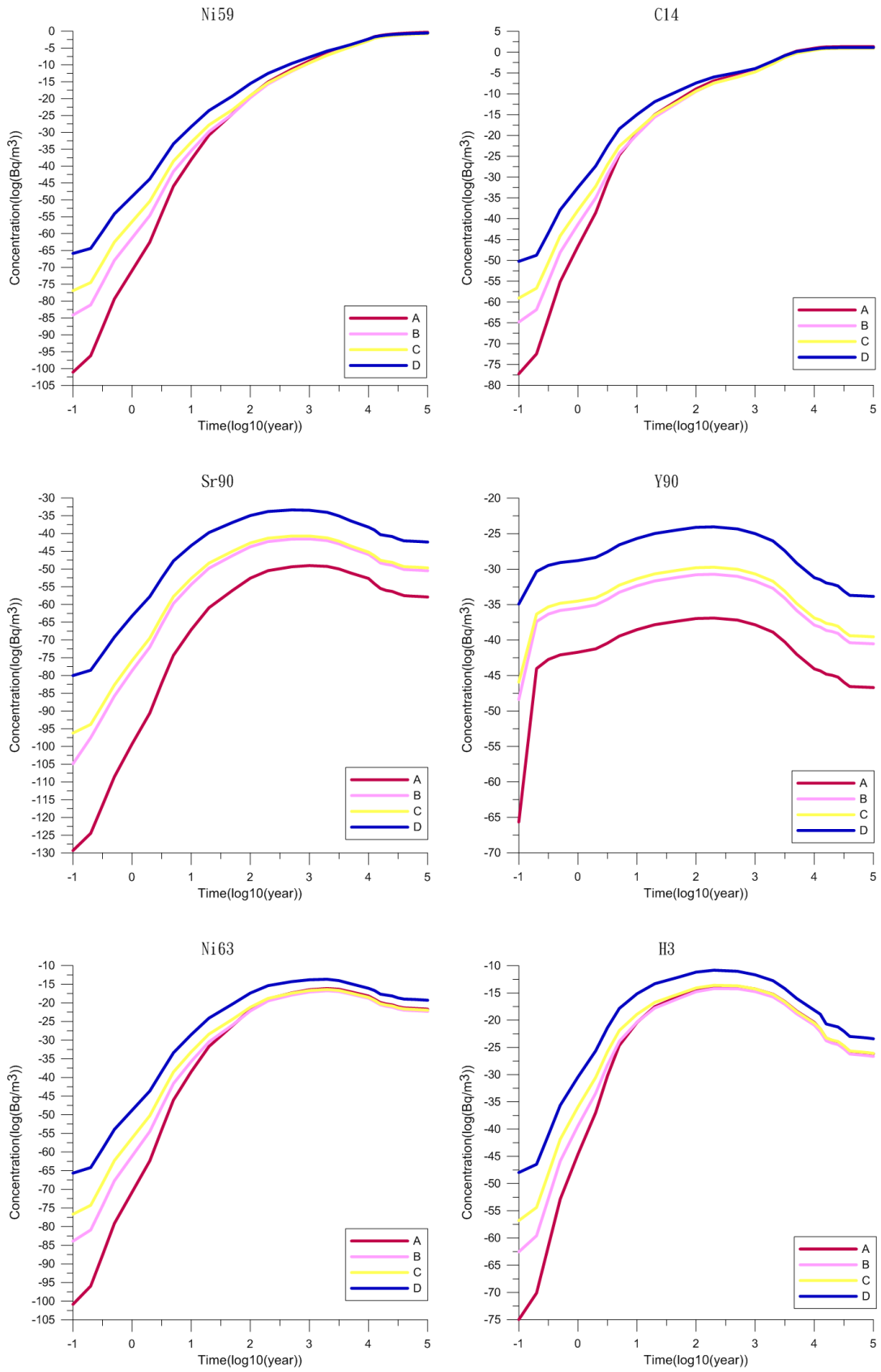


圖 4.29 <sup>59</sup>Ni、<sup>14</sup>C、<sup>90</sup>Sr、<sup>90</sup>Y、<sup>63</sup>Ni、<sup>3</sup>H 不同遠場觀測點外釋濃度圖

表 4.12 關鍵核種在遠場所佔總濃度比例

| 核種                | 10 年   | 100 年  | 1000 年 | 10,000 年 | 100,000 年 |
|-------------------|--------|--------|--------|----------|-----------|
| $^{238}\text{Pu}$ | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{241}\text{Am}$ | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{99}\text{Tc}$  | 12.17% | 8.83%  | 10.36% | 31.91%   | 92.91%    |
| $^{60}\text{Co}$  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{129}\text{I}$  | 0.07%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{137}\text{Cs}$ | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{59}\text{Ni}$  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.05%    | 0.15%     |
| $^{90}\text{Sr}$  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{14}\text{C}$   | 52.58% | 91.15% | 89.63% | 68.03%   | 6.94%     |
| $^{90}\text{Sr}$  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{90}\text{Y}$   | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^{63}\text{Ni}$  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |
| $^3\text{H}$      | 35.18% | 0.02%  | 0.00%  | 0.00%    | 0.00%     |



## 第五章 我國低放坑道處置長期安全評估之資料品質保證 審查重點或注意事項建議

本項工作整合所研析之瑞典 SR-PSU 技術報告 TR14-10 與 TR-14-12，整理報告中資料品質及模型輸入資料審驗技術，提出我國低放坑道處置長期安全評估之資料品質保證審查重點或注意事項建議。

廢棄物處置之資料品質保證可透過建立(資料提供端)-(資料使用端)-(資料審驗端)的三方對話溝通平台機制或架構來提升，透過使用者回饋體系增加其完善度，回饋體系架構主要以資料提供者、資料審查員、資料使用者三者相輔相成，由資料提供者為出發端進行說明，倘若資料提供者能給予資料來源、資料獲取方式等生產履歷，對其進行簡易說明並附註資料使用注意事項及參數適用壽命等，資料使用者將可根據資料產生履歷有效減免概念不確定性及避免不合理應用，且資料提供後應由審查端進行覆核，因應資料履歷完整性進行分類並劃分等級，而資料使用者在可進行選擇的情況下，應優先選用較高級別之資料。最終資料審查端將與資料提供者、資料使用者反覆論述提出三方皆推薦之合格資料。

資料提供者所提供之資料履歷應概括幾項重要項目:資料來源與品保文件、資料適用條件、空間及時間尺度、資料相關性、資料不確定性等，並確認資料具備可追溯性，各項目應注意事項如下：

1. 資料來源與品保文件：資料來源以具有品質保證相關文件為佳，品質保證相關文件與資料獲取、精細化等過程相關，資料獲取以採集資料為例，應注意其是否依照合格的質量管理系統操作，可否追溯蒐集方法過程，而精細化方面以複合式模式為例，須證明模式由品質保證系統開發，或可利用其他方式檢測證明其品質。各項資料之參考文獻應具備可追溯性，並給予簡易索引方便查詢確認。
2. 資料適用條件：資料適用條件應具有明確範圍或特定數值，並評估其應用合乎條件要求。以膨潤土、水泥/混凝土等材質吸附數據為例，螯合劑

的形成為主要降低分配係數的因素，因此地質環境及水化學的組成成分決定吸附數據是否適用。

3. 空間及時間尺度：資料是否有空間或時間變異，其變異尺度是否有跡可循，其升/降尺度方法是否具有其合理性。且應判別資料所應用之時間尺度是否超出其適用時段。
4. 資料相關性：應說明資料參數與各學科領域之資料是否存在相關性及功能依賴性。以放射性廢棄物核種濃度總量為例，最大的概念不確定性存在於利用相關性作為估計方法的放射性廢棄物核種。
5. 資料不確定性：不確定性受精確度、偏差、代表性、概念化程度等影響，應以圖、表、值等方式量化，盡可能提供其偏差之範圍。如金屬廢棄物包件金屬腐蝕速率受 pH 值影響，不同檢測方法所產生的不確定性應進行說明。

上述如利用 DIKW(data-information-knowledge-wisdom)的概念進行說明，將以資料提供者做為出發點，提供者經由採集、實驗等所取得的資料屬於 DATA 階段，而提供者為提出相對應之品保文件、資料產生履歷所進行的分析行為使其達到 Information(資訊)的層級，資料審查員將進一步評估資料提供者所給予之資料內容令其成為可取用之 Knowledge(知識)，而資料使用者成為最後 Wisdom(智慧)一環，整合應用所需資料使其達到足以提供決策應用並解決問題。

我國低放射性廢棄物坑道處置長期安全評估涉及各學科領域之資料、技術、模式等，其涵蓋之資料庫系統相當龐大，為確保資料庫數據資料來源、用途等透明化且具有可追溯性，除可依照輸入資料之相互關聯性建立評估模擬流程圖外，資料庫亦應建立管理系統進行統整作為日後查尋回溯所用，可依照學科類別賦予標題以便資料使用者依其所需於對應之學科進行取用，其次將數據資料依其來源分類為文獻資料、現場資料、實驗資料、數位資料等進行細項分類以利得知所取資料產生方式，每份資料應備有簡介說明資料來源、方法用途、資料取得方法及其與他項資料的相關性，並於末尾附註資料履歷及品質保證等文件連結。

## 第六章 結論與建議

1. 研析瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-10 之安全評估關鍵資料品質保證審驗技術，釐清資料品質審驗技術要項。資料之獲取、應用、篩選之評估與資料使用者(安全評估模擬小組)、資料提供者(場址調查與工程設計小組)及 SR-PSU 團隊(資料使用者、提供者與專業領域專家)息息相關。資料使用者根據過去之經驗提出所需資料，資料提供者提出資料來源並為資料品質保證進行一系列論證，將資料集之資料不確定性、概念不確定性等詳細說明，並提供符合使用者需求之代表性資料，表達方式以單點值、概率分佈、百分位數等易讀取訊息為主。SR-PSU 團隊審查提供者所提供之資料，將資料提供者所列之評估要項逐一評論，並給與資料提供者、使用者辯證回覆之討論機會，若此階段評估安全通過，將提出合格資料。此評估方式藉由三方共同參與、回饋問題，合力提出推薦之合格資料。
2. 研析瑞典 SR-PSU 場址技術報告 TR-14-12 之資料流審驗技術，釐清瑞典 SR-PSU 場址模擬應對大量輸入資料之方法及審驗技術。瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-12 將輸入資料之關聯性彙集為評估模擬流程圖(AMF)，且依照各學科領域、應用方法使之有所區別，形成簡易導覽供與資料使用者查詢。而輸入資料之審驗著重於資料來源、方法用途，方便使用者取得輸入資料得知其相關性及影響範圍。
3. 瑞典 SR-PSU 場址技術報告之資料品保與資料流審驗技術，可以供國內在放射性廢棄物最終處置工作所涉及之資料品質管理技術建置借鏡。資料品保審驗方面，所提出之三方參與人員討論之方式可有效避免所提供之資料並非使用者所需要的，而針對資料提供者所訂立之規範有資料來源、資料適用性、資料不確定性、概念不確定性、空間及時間變異、相關性等，皆具相當之完整性，使資料取用者得以因應各模擬環境進行取捨。而資料流審驗技術則建議應與資料品質保證互有連結，以便查詢使用條件及不確定性等，而非只是

提供資料庫查詢連結。

4. 流場模擬結果顯示，本研究近岸環境優勢流場受地勢影響由西方上游向東流入海，遠場(地質圈)地下水流速約為  $1.4\text{E}-03\sim 2.4\text{E}-03(\text{m}/\text{day})$ ，近場(處置設施)地下水流速約為  $5.9\text{E}-06\sim 2.4\text{E}-06(\text{m}/\text{day})$ ，近場(處置坑道)地下水流速約為  $6.8\text{E}-06\sim 1.5\text{E}-06(\text{m}/\text{day})$ ，其中近場處置坑道流場因工程障壁材質水力傳導係數及孔隙率等差異，處置坑道頂部及底面流速較快，整體而言遠場地下水流速約高於近場地下水流速 3 個數量級。
5. 近場處置坑道濃度外釋以擴散為主要方式，且因工程障壁材質差異，A 類廢棄物處置坑道內部流速較 B、C 類處置坑道高。核種於近場處置坑道之外釋濃度， $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  為主要外釋核種， $^{59}\text{Ni}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  擁有長半衰期因此導致濃度下降趨勢較緩， $^{14}\text{C}$  則為工程障壁材質對其吸附性較差之因素所導致，而 B、C 類廢棄物坑道相較於 A 類廢棄物坑道擁有較好之圍阻功能。
6. 遠場傳輸模擬濃度因處置坑道設置方式集中於上游區域，Kd 值為影響濃度是否傳輸至下游區域之重要因子，除半衰期較長且工程障壁、岩層吸附功能較差之核種外，多數關鍵核種如  $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{129}\text{I}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^3\text{H}$  濃度峰值出現於 100~1000 年間。
7. 12 種關鍵核種所占之總濃度比於 10 年至 10,000 年間以  $^{14}\text{C}$  濃度最高，10,000 年後則以  $^{99}\text{Tc}$  所占比例最高  $^{14}\text{C}$  濃度次之。
8. 國際上低放射性廢棄物處置設施安全評估之模擬時間尺度為至 10 萬年或至濃度峰值出現，遠場模擬成果顯示  $^{14}\text{C}$  及  $^{99}\text{Tc}$  為主要貢獻核種，約於 1 萬年達到濃度峰值，但由於  $^{14}\text{C}$  及  $^{99}\text{Tc}$  在遠場之分配係數甚低，因此濃度下降緩慢，建議增加模擬時間尺度釐清。
9. 多子核種衰變鏈中並非所有核種皆有可信賴資料來源之分配係數，建議針對處置設施工程障壁及周圍岩層材質進行相關試驗研究。

## 參考文獻

1. 經濟部，2011，低放射性廢棄物最終處置設施場址選擇小組-建議候選場址遴選報告。
2. 董家鈞、陳瑞昇，2005，低放射性廢棄物隧道處置水文地質概念模式審查技術之建立，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，942005FCMA002。
3. 董家鈞、陳瑞昇，2006，低放射性廢棄物隧道處置水文地質模擬技術發展現況與國內隧道工程水文地質模擬案例研究，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，952006FCMA002。
4. 任春平，2008，低放射性廢棄物最終處置功能安全評估模式審查技術之建立，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，97FCMA006。
5. 吳禮浩，2009，低放射性廢棄物坑道處置技術審查要項研究，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，98FCMA001。
6. 李境和，2007，低放射性廢棄物最終處置設施安全審查規劃研究，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，96FCMA001。
7. 李境和，2010，坑道式最終處置設施安全評估審查要項研究，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，99FCMA003。
8. 張福麟，2011，低放射性廢棄物坑道處置安全評估關鍵議題初步探討，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，100FCMA007。
9. 李明旭、董家鈞，2012，放射性廢棄物處置安全分析模式驗證及場址特性調查審查技術之研究，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，101FCMA008。
10. 李明旭、蔡世欽，2013，低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，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，

102FCMA008。

11. 李明旭、蔡世欽，2014，低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫三：低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，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，103FCMA002。
12. 李明旭、陳瑞昇，2015，低放射性廢棄物處置安全管制技術發展子計畫三：低放射性廢棄物處置設施安全評估審查規範精進之研究，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，104FCMA002。
13. 李明旭、陳瑞昇，2016，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，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，104FCMA019。
14. 李明旭，2017，低放射性廢棄物坑道處置安全審驗技術建立之關鍵課題研析子計畫四：低放射性廢棄物坑道處置長期安全驗證技術研究，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，105FCMA011。
15. 台灣電力公司，2016，低放射性廢棄物最終處置技術評估報告(LLWD2016)。
16. 台灣電力公司，2017，關鍵核種篩選報告(106年版)。
17. JAEA, 2013, Development of the Assessment Tool for Groundwater Scenario concerning Sub-surface Disposal.
18. SKB, 2014g. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
19. SKB, 2014a, Engineered Barrier Process Report for the Safety Assessment SR-PSU, TR-14-04.
20. SKB, 2014b, Geosphere process report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-05.
21. SKB, 2014c, Radionuclide transport and dose calculations for the safety

assessment SR-PSU, TR-14-09.

22. SKB, 2014d, Data report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-10.
23. SKB, 2014e, Input data report for the safety assessment SR-PSU, TR-14-12.
24. Yeh, G. T., J. T. Sun, P. M. Jardine, W. D. Burger, Y. L. Fang, M. H. Li, and M. D. Siegel, 2009. HYDROGEOCHEM 5.5: A Three Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Variably Saturated Conditions Version 5.5. Dept. of Civil and Environ. Engineering, University of Central Florida, 4000 Central Florid Blvd, Orlando, FL 32816.



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

107 年低放射性廢棄物坑道處置安全  
審驗技術建立之驗證評估研究  
子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈  
安全評估審查技術之研究  
期末報告

計畫編號：107FCMA002

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

受委託機關(構)：中央大學

報告日期：中華民國 107 年 12 月



# 107 年低放射性廢棄物坑道處置安全

## 審驗技術建立之驗證評估研究

### 子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈

#### 安全評估審查技術之研究

受委託單位：中央大學

計畫主持人：董家鈞

子計畫五主持人：林文勝

研究期程：中華民國 107 年 2 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 847,000 元(子計畫五經費)

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 107 年 11 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)

# 目錄

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 摘要 .....                                                | X  |
| ABSTRACT .....                                          | XI |
| 第 1 章 前言 .....                                          | 1  |
| 第 2 章 研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項 .....                 | 10 |
| 2.1. 評估背景 .....                                         | 10 |
| 2.1.1. 評估目的 .....                                       | 10 |
| 2.1.2. 安全評估的初始條件 .....                                  | 11 |
| 2.1.3. 場區封閉後之法規要求 .....                                 | 13 |
| 2.1.4. 評估過程於國際經驗之關聯性 .....                              | 16 |
| 2.1.5. 生物圈安全的實施和理念 .....                                | 20 |
| 2.2. 生物圈安全評估技術要項 .....                                  | 23 |
| 2.2.1. 場址描述 .....                                       | 23 |
| 2.2.2. 場址未來條件與系統演變發展 .....                              | 31 |
| 2.2.3. 模擬地景發展與土地利用 .....                                | 43 |
| 2.2.4. 模擬地景中的生物圈系統單元演變 .....                            | 46 |
| 2.2.5. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析 .....                          | 56 |
| 2.2.6. 生物圈核種模式 .....                                    | 60 |
| 2.2.7. 生物圈評估之參數使用 .....                                 | 64 |
| 2.2.8. 核種釋出後之分析 .....                                   | 65 |
| 2.2.9. 生物圈評估不確定性討論 .....                                | 74 |
| 2.2.9.1. 系統的不確定性 .....                                  | 74 |
| 2.2.9.2. 概念不確定性 .....                                   | 76 |
| 2.2.9.3. 參數不確定性和敏感度分析 .....                             | 77 |
| 2.3. 本章小結 .....                                         | 78 |
| 第 3 章 研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術 .....                         | 79 |
| 3.1. 安全評估背景及目的 .....                                    | 79 |
| 3.2. 安全評估技術 .....                                       | 80 |
| 3.2.1. 場址現況調查與未來演變發展技術 .....                            | 82 |
| 3.2.2. 地景發展與土地利用模擬技術 .....                              | 85 |
| 3.2.3. 地景生物圈系統單元演變模擬技術 .....                            | 85 |
| 3.2.4. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術 .....                        | 85 |
| 3.2.5. 生物圈核種傳輸模式模擬技術 .....                              | 86 |
| 3.2.6. 生物圈評估參數建立技術 .....                                | 86 |
| 3.2.7. 核種外釋後分析技術 .....                                  | 86 |
| 3.2.8. 不確定性分析技術 .....                                   | 87 |
| 3.2.9. 國際經驗技術引入 .....                                   | 87 |
| 3.3. 我國兩處低放建議候選場址與瑞典低放坑道處置有關生物圈安全<br>評估技術相關性探討 .....    | 87 |
| 3.4. 本章小結 .....                                         | 93 |
| 第 4 章 國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈<br>安全評估之關聯性探討 ..... | 97 |
| 4.1 「場址目前的條件與描述」驗證項目關聯性及適用性探討 .....                     | 97 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 4.2 「場址條件與系統演變發展」驗證項目關聯性及適用性探討 .....         | 98  |
| 4.3 「模擬地景發展與土地利用」驗證項目關聯性及適用性探討 .....         | 98  |
| 4.4 「模擬地景中的生物圈系統單元演變」驗證項目關聯性及適用性探討 .....     | 99  |
| 4.5 「生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析」驗證項目關聯性及適用性探討 .....   | 99  |
| 4.6 「生物圈核種傳輸模式」驗證項目關聯性及適用性探討 .....           | 100 |
| 4.7 「生物圈評估之參數使用」驗證項目關聯性及適用性探討 .....          | 101 |
| 4.8 「核種釋出後之分析」驗證項目關聯性及適用性探討 .....            | 101 |
| 4.9 「不確定性討論」驗證項目關聯性及適用性探討 .....              | 101 |
| 第 5 章 我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項建議 .....       | 103 |
| 5.1 低放處置技術建置計畫有關生物圈安全評估技術 .....              | 103 |
| 1. 「特徵、事件及作用(FEPs)資料庫」建置 .....               | 103 |
| 2. 參考演化研究 .....                              | 103 |
| 3. 生物圈情節分析與案例計算 .....                        | 104 |
| 4. 安全評估之不確定性 .....                           | 104 |
| 5. 安全評估之參數使用 .....                           | 104 |
| 5.2 低放處置安全分析報告審查導則有關生物圈安全評估審查重點或注意事項建議 ..... | 105 |
| 第 6 章 結論與建議 .....                            | 109 |
| 參考文獻 .....                                   | 111 |

## 圖目錄

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 圖 1 瑞典福斯馬克中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013).....                     | 3  |
| 圖 2 福斯馬克之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013).....                          | 3  |
| 圖 3 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3） (SKB, 2014A) ..... | 4  |
| 圖 4 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖 .....                        | 6  |
| 圖 5 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖 .....                         | 7  |
| 圖 6 福斯馬克沿海地區之低海拔、淺海灣、小湖泊和濕地示意圖 .....                             | 12 |
| 圖 7 東南方向福斯馬克區域鳥瞰圖 .....                                          | 24 |
| 圖 8 DEM（數值高程模型）圖 .....                                           | 24 |
| 圖 9 地表分佈（在 0.5 公尺深度）的表土分佈和地表曝露的基岩區域.....                         | 25 |
| 圖 10 模擬的總風化層深度.....                                              | 25 |
| 圖 11 地表分佈（在 0.5 公尺深度）的表土分佈和地表曝露的基岩區域 .....                       | 26 |
| 圖 12 模擬的總風化層深度.....                                              | 26 |
| 圖 13 福斯馬克河流及夏天時乾枯狀態.....                                         | 26 |
| 圖 14 至 2010 年 12 月 31 日於表土風化層層和裂隙岩體內之平均地下水水位線                    | 26 |
| 圖 15 MIKE SHE 流量模擬結果湖海平均水深與地下水位 .....                            | 27 |
| 圖 16 福斯馬克外的沿海盆地（根據 DEM 劃分） .....                                 | 27 |
| 圖 17 福斯馬克海域生態的紅色海藻和墨角藻.....                                      | 28 |
| 圖 18 功能群體和重要通量影響水域（即湖泊和海域）生態系統元素傳輸和累積<br>概念模型.....               | 29 |
| 圖 19 福斯馬克地區濕地中蘆葦為優勢物種.....                                       | 30 |
| 圖 20 在濕地生態系統和沼澤區排水耕地之重要通量影響元素傳輸和累積的概念<br>模型.....                 | 30 |
| 圖 21 福斯馬克地區與全球未來年平均近地表氣溫比較圖.....                                 | 32 |
| 圖 22 福斯馬克的氣候條件描述(全球暖化氣候條件下).....                                 | 33 |
| 圖 23 福斯馬克的氣候條件描述(早期的冰緣氣候條件下).....                                | 33 |
| 圖 24 福斯馬克的氣候條件描述(擴展全球暖化氣候條件下).....                               | 34 |
| 圖 25 從現在到未來之海平面演變：(A)現在到 100,000 年後；(B)現在到 10,000 年              |    |

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 後.....                                                                                 | 34 |
| 圖 26 西元 3000 年之未來地面風化表土層分布蝕岩的表面分佈 .....                                                | 35 |
| 圖 27 西元 11000 年之未來地面風化表土層分布蝕岩的表面分佈 .....                                               | 36 |
| 圖 28 MIKE SHE 計算西元 5000 年的風化表土層年平均垂直水頭差 .....                                          | 38 |
| 圖 29 通過永久凍土區域的活動層和不同類型的層間不凍層(TALIKS)的示意圖 .....                                         | 39 |
| 圖 30 於某些階段的主要生態系統示意圖.....                                                              | 41 |
| 圖 31 隔絕的海灣形成沼澤地層之不同演替階段示意圖.....                                                        | 42 |
| 圖 32 福斯馬克生態系統的分佈.....                                                                  | 44 |
| 圖 33 耦合的表土風化層-湖泊（生物相）之發展模型（RLDM）的概念流程圖... ..                                           | 44 |
| 圖 34 全球暖化變異後之地景發展示意圖（變異條件 2） .....                                                     | 45 |
| 圖 35 西元前 1500 年至西元 40,000 年間變異條件 2 之不同生態系統變化 .....                                     | 45 |
| 圖 36 全球暖化為特徵變異條件之地景發展示意圖（變異條件 1） .....                                                 | 45 |
| 圖 37 全球暖化為特徵變異條件之地景發展示意圖（變異條件 3） .....                                                 | 45 |
| 圖 38 以冰緣期為特徵變異條件於西元 20,000 年之地景圖（變異條件 4） .....                                         | 45 |
| 圖 39 擴展全球暖化氣候為特徵之地景發展示意圖（變異條件 5） .....                                                 | 45 |
| 圖 40 於氣候變異條件 1、2 和 3(V1, V2, V3)之生態系統於西元 2000、3000 年、<br>5000 年及西元 20,000 年之變化.....    | 46 |
| 圖 41 於西元 2000 年之地景發展模擬狀態：(A)假設土地利用與目前相同(變異條<br>件 1)；(B)福斯馬克的現有地圖顯示了五種不同生態系統的分佈情況 ..... | 46 |
| 圖 42 以粒子密度（每平方公尺粒子數）表示的流出位置(西元 2000 年至 3000 年)<br>.....                                | 48 |
| 圖 43 以粒子密度（每平方公尺粒子數）表示的流出位置(西元 3500 年至 9000 年)<br>.....                                | 49 |
| 圖 44 模擬冰緣氣候淺層凍土(低至-60 公尺高程)和西元 20,000 年湖泊和溪流中之<br>凍土層間不凍層的流出位置(紅色區域) .....             | 50 |
| 圖 45 海域-湖泊-陸域類型生物圈系統單元的概念圖 .....                                                       | 50 |
| 圖 46 具有盆地、子集水區和陸域的海陸域型物體和陸域物體區域的概念圖.....                                               | 51 |
| 圖 47 用於識別和描述生物圈系統單元的方法.....                                                            | 51 |
| 圖 48 生物圈系統單元（藍色或黃色）及其相關的原始海域盆地（灰色）示意圖<br>.....                                         | 52 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 圖 49 利用地景發展模擬西元 9000 年在生物圈系統單元之間的連接和流動方向圖<br>.....                                                           | 53 |
| 圖 50 利用地景發展模擬從西元 2000、3500、5000 到 9000 年之生物圈系統單元<br>演替和生態系統發展 (使用變異條件 2) .....                               | 54 |
| 圖 51 模擬西元 3000 年 SFR 之流出位置.....                                                                              | 55 |
| 圖 52 模擬西元 9000 年 SFR 之流出位置 .....                                                                             | 55 |
| 圖 53 模擬西元 3000 年 SFR 之流出量密度 (每平方公尺顆粒數) .....                                                                 | 55 |
| 圖 54 用模擬西元 9000 年 SFR 之流出量密度 (每平方公尺顆粒數) .....                                                                | 55 |
| 圖 55 模擬西元 9000 年 SFR 之流出位置至盆地和編號 157_2 陸域生物圈系統單元<br>.....                                                    | 55 |
| 圖 56 位於 SFR 處置場北部所劃定的井相互作用區域.....                                                                            | 55 |
| 圖 57 生物圈對象 157_2 的替代描述 .....                                                                                 | 56 |
| 圖 58 生物圈系統單元 157_2 的表土風化層和水文通量特性以及替代描述 .....                                                                 | 56 |
| 圖 59 人類潛在的曝露途徑.....                                                                                          | 57 |
| 圖 60 自然生態和農業生態曝露途徑示意圖.....                                                                                   | 58 |
| 圖 61 SFR 各種處置系統釋出到達生物圈系統單元 157_2 之釋出量比率 (%) 隨<br>時間之變化.....                                                  | 58 |
| 圖 62 在淹沒期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模<br>型.....                                                              | 59 |
| 圖 63 在陸域期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模<br>型.....                                                              | 60 |
| 圖 64 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖.....                                                                                  | 63 |
| 圖 65 農業生態系核種傳輸區塊示意圖.....                                                                                     | 64 |
| 圖 66 比較 SR-PSU 與之前 SAR-08 (紅色方塊) 和 SR-SITE (藍色方塊) 放射性核種<br>模式安全評估之最大地景劑量轉換因子(LDF)值 (每 Bq Y-1 之 Sv Y-1) ..... | 69 |
| 圖 67 C-14 在生態系統區塊隨時間之分布情況.....                                                                               | 69 |
| 圖 68 C-14 在風化表土層於單位放射性核種釋出到兩個生物圈系統單元之活度濃<br>度 (Bq kg DW-1 / Bq Y-1) .....                                    | 69 |
| 圖 69 C-14 於單位釋出到 7 個地表水生物圈系統單元之活度濃度 .....                                                                    | 70 |
| 圖 70 C-14 在冠層大氣中於單位放射性核種釋出到兩個生物圈系統單元之活度濃                                                                     |    |

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 度 ( $\text{Bq m}^{-3}/\text{Bq y}^{-1}$ ) 的活性濃度。 .....                                                  | 70 |
| 圖 71 C-14 於單位放射性核種釋出到人類生活居住地區，從生物圈系統單元使用<br>自然資源獲得之劑量。 .....                                            | 71 |
| 圖 72 C-14 於單位放射性核種釋出到非人類生物棲息在未來福斯馬克地景之劑量<br>率 .....                                                     | 71 |
| 圖 73 單位放射性核種釋出到淡水生態系統中生物圈系統單元 157_2 之生物體的<br>總劑量率 .....                                                 | 72 |
| 圖 74 與不同的氣候條件有關生物圈計算案例各種生物圈系統單元之人類最大地<br>景劑量轉換因子 LDF (每 $\text{Bq y}^{-1}$ 的 $\text{Sv y}^{-1}$ ) ..... | 72 |
| 圖 75 與不同的氣候條件有關生物圈計算案例各種之非人類生物群之最大劑量率<br>.....                                                          | 73 |
| 圖 76 計算每個放射性核種的地景劑量轉換因子 LDF 之間的比率作為 MONTE-CARLO<br>模擬的平均值和從計算從參數值中最佳估計之值。 .....                         | 74 |
| 圖 77 三階段技術研究發展流程圖 .....                                                                                 | 88 |
| 圖 78 準備階段處置工作流程示意圖 .....                                                                                | 92 |
| 圖 79 SR-PSU 安全評估計畫廢棄物、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模<br>式流程圖(AMF).....                                             | 96 |

## 表目錄

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 表 1 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單.....                  | 5  |
| 表 2 生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型名稱與說明.....               | 61 |
| 表 3 放射性核種通量傳輸模式及作用過程之整體概念表.....               | 62 |
| 表 4 陸域環境的環境介質及其相關的環境類型.....                   | 66 |
| 表 5 水環境的環境介質及其相關的環境類型.....                    | 66 |
| 表 6 SR-PSU 生物圈建模作業評估模式.....                   | 81 |
| 表 7 我國建議候選場址涉及生物圈安全評估技術所需建立有關之參數類型.....       | 89 |
| 表 8 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式..... | 95 |



## 摘要

本計畫分析瑞典福斯馬克擴建 SFR 中低放處置場已完成 SR-PSU 之安全評估計畫，蒐集有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈情節分析安全評估技術報告，以 TR-14-06 之生物圈安全評估整合分析技術為研析基礎，進行國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項、研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術、國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性探討，並對我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項建議。研究結果發現：1.場址描述，2.場址未來條件與系統演變發展，3.模擬地景發展與土地利用，4.模擬地景中的生物圈系統單元演變，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，6.生物圈核種模式，7.生物圈評估之參數使用，8.核種釋出後之分析，9.生物圈評估不確定性討論，係為低放坑道處置生物圈安全評估關鍵要項。本報告提出我國低放坑道處置技術建置，涉及生物圈安全評估技術建立有關參數與技術發展，所對應 SR-PSU 技術之內容，建議我國技術建置不足之處，及未來需要加強之技術方向。另再提出我國低放坑道處置生物圈安全評估應加強建置之驗證項目及技術適用性，最後則對於低放處置安全分析報告審查導則有關生物圈安全評估，提出修正建議。本報告將可提供物管局低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之參考。

## ABSTRACT

Reviews of radiological dose assessment are crucial steps for the approval of long-term radiological safety requirements of LLW disposal facility. However, how much concentration of radionuclides released from the near-field to biosphere and what radiation exposure levels to an individual can influence on the satisfactory performance of the LLW disposal facility and safety disposal environment. Therefore, all low-level radioactive waste must be managed and disposed to minimize risk to people and the environment. The dose limit of 0.25 mSv/year to the individual expected to receive the greatest exposure to residual radioactivity is the requirement. This project investigated the safe analysis for SFR long-term safety assessment, and gathered the reports of biosphere safety analysis and dose assessment of biosphere in SR-PSU which are priority in the technical reports of TR14-06 focused on the biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. Mover, the study also focused on review context of biosphere safety assessment in tunnel disposal technical report of international status, technology of biosphere safety assessment in LLW disposal of Taiwan, relevance discussion of verification item in biosphere safety assessment between international status and Taiwan development process for the tunnel disposal. Finally, we proposed the review suggestions and notes of biosphere safety assessment for LLW disposal in Taiwan. The results of key technology in biosphere safety assessment of LLW are as follows: site description; site future conditions and systems evolution development; modeling landscape development and land use; modeling biosphere objects in the landscape; FEP handling, exposure pathway analysis, and calculation cases for the biosphere; radionuclide model for the biosphere; data used in biosphere assessment; analysis of radionuclide release; discussion of uncertainties in biosphere assessment. It is a key requirement for the safety assessment of biospheres in low-level tunnel disposal. This report proposes the construction of low-level tunnel disposal technology, involves the development of relevant parameters and technology development of biosphere safety assessment technology, the content of SR-PSU technology corresponding to technology development status in Taiwan, suggesting the inadequacy of technical construction, and the technical direction that needs to be strengthened in the future. In addition, it is suggested that the verification items and technical applicability of biosphere safety assessment for low-level tunnel disposal in Taiwan should be strengthened. Finally, some suggestions for revision of biosphere safety assessment in the Review Guidelines of Safety Analysis Report for Low-level Tunnel Disposal are put forward. This report can provide an application for the safety review of the radiation dose assessment for the disposal of low-level radioactive waste.

# 第1章 前言

## 1.1. 研究背景與目的

低放射性廢棄物最終處置場，係選擇適當地質條件且社會大眾能接受的地區進行掩埋處置，以工程與天然地層母岩(Rock matrix)之材質所形成的多重障壁，來圍阻與遲滯核種的外釋與遷移，將低放射性廢棄物與人類生活環境之生物圈隔離起來，確保在足夠時間內使放射性核種的強度衰變減弱至對人類無害之劑量，防止重返及污染人類之生活環境。低放射性廢棄物最終處置場之多重障壁，係從廢棄物的固化桶開始，經由封裝的容器、固化桶包封模組、低滲透性高吸附性填充物、混凝土、回填材料等處置設施達到穩定阻滯核種的目的。經濟部已於 101 年 7 月 3 日核定公告「台東縣達仁鄉」南田村及「金門縣烏坵鄉」小坵村為建議候選場址，後續將進行地方溝通宣導、公投取得地方同意、地質探勘調查與辦理環境影響評估等作業。因此低放射性廢棄物處置場址輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。

為增進放射性廢棄物最終處置安全，近年來重要技術發展方向，依安全管制需求，須逐步建立相關安全管制規範及管制技術，使設施設計、安全評估及施工營運，能確保安全無虞。基此，在低放射性廢棄物最終處置安全管制技術規範的編訂方面，原能會物管局於 100 年度初步完成「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」。為提升管制技術及持續精進管制規範，已於 102 年度起就低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究(物管局，2013)，透過蒐集、研析國際重要文獻及技術研發重點彙整，開始逐步建立 RESRAD 程式輻射劑量評估審查技術，再於 103 年度完成 RESRAD 程式參數需求研析、低放處置輻射劑量與風險評估技術文獻資訊研析、潛在處置場址輻射劑量與風險評估關鍵審查技術與方法研析、輻射劑量與風險評估整合管制技術研議(物管局，2014)。104 年度針對近岸與離島環境低放射性廢棄物處置之釋出核種濃度與輻射劑量轉換技術研析、低放射性廢棄物處置之輻射劑量與風險評估轉換技術之斜率因子研析、研擬低放射性廢棄物坑道處置之生物圈輻射劑量結合近場及遠場全系統安全評估架構，相關成果回饋於「低放射性廢棄物處置設施安全分析報告審查導則(第 0 版)」安全評估章節之精進建議(物管局，2012)。105 年度以瑞典 SR-PSU 安全評估計畫報告為基礎，針對國外放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估技術蒐集及彙整、研析國

際坑道處置技術報告關於生物圈劑量評估要項、研析國際坑道處置技術報告關於生物圈參數使用於核種傳輸與劑量評估要項、提出低放射性廢棄物坑道處置生物圈劑量評估要項建議(物管局，2016)。106 年度蒐集瑞典 SR-PSU 有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈情節分析安全評估技術報告，以 R13-18 及 R14-02 報告，針對放射性核種於生物圈之特徵、事件與作用(FEPs)及生物圈情節分析審查技術進行研析(物管局，2017)。進行研析國際坑道處置生物圈之特徵、作用與交互作用、研析國際坑道處置技術報告生物圈情節分析與劑量評估審驗技術、研析國際坑道處置生物圈之特徵、事件及作用(FEPs)與模式發展建議。本(107)年度，以瑞典 SR-PSU 技術報告 TR-14-06 所採用之生物圈安全評估整合分析技術為研析基礎，研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項，研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術，國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性探討，並對於我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項提出建議。以提供物管局低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查之參考，適時提升該項管制技術議題之技能與規範的精進。

## 1.2. 瑞典 SFR 處置場擴建之 SR-PSU 安全評估計畫

瑞典已於首都斯德哥爾摩北部約 139km 的 Östhammar(福斯馬克)市的核電廠內建置中低放射性核棄物最終處置場 SFR1，位於波羅的海離岸約 1 公里處的海床下，約 60 公尺深的位置，自 1988 年開始營運，由 4 個岩窖(rock vault)及 1 個貯存倉(silo)所組成。目前正在規劃開發 SFR 擴建工程(SFR3)，由 5 個岩窖所組成，以容納未來電廠除役後的低放射性廢棄物。對於福斯馬克位置圖如圖 1 所示，位於福斯馬克港口與旁邊福斯馬克核電廠之 SFR 設施地表部分示意如圖 2，及 SFR 設施概念示意如圖 3，其中：1 個貯存倉存放中放射性廢棄物、1-2BMA 岩窖處置坑道為處置中放射性廢棄物、1-2BTF 岩窖是處置混凝土箱盛裝的中放射性廢棄物、1-5BLA 岩窖是處置低放廢棄物、1BRT 岩窖是處置除役後之反應爐壓力容器。

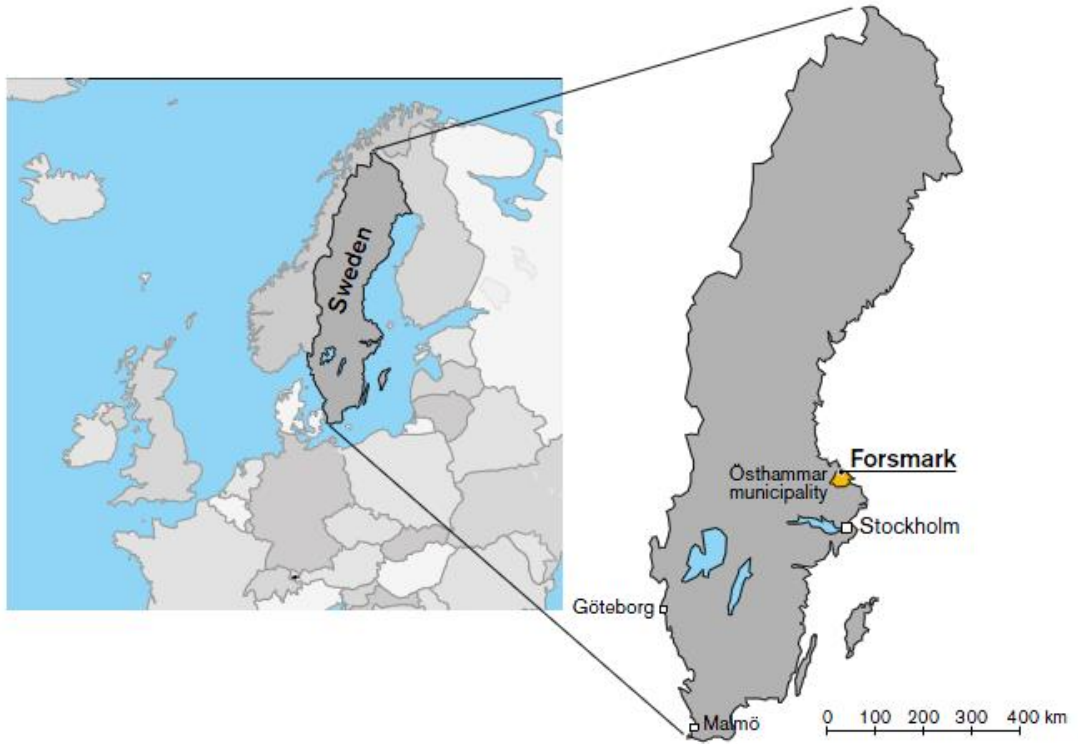


圖 1 瑞典福斯馬克中低放射性廢棄物最終處置場位置示意圖(SKB, 2013)



圖 2 福斯馬克之 SFR 設施地表部分示意圖(SKB, 2013)

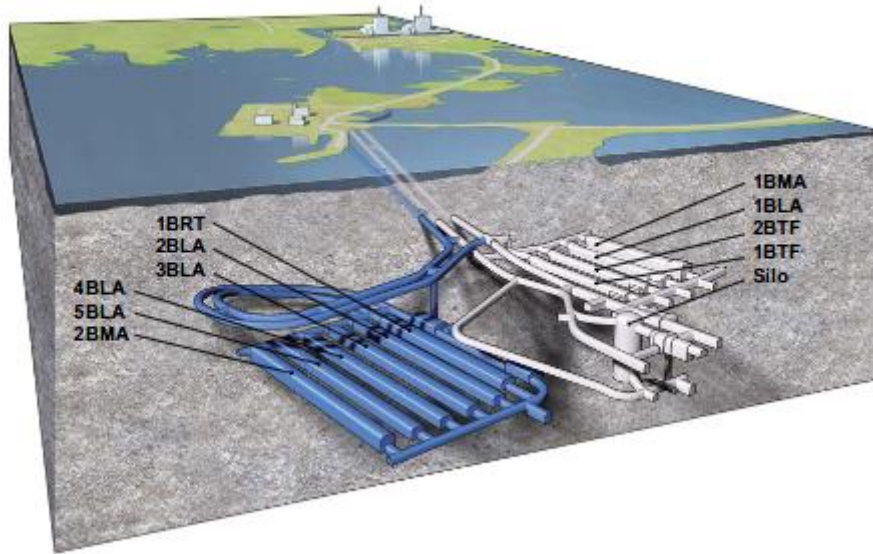


圖 3 SFR 設施概念示意圖（灰色是目前已營運中的 SFR1，藍色是規劃中的 SFR3）  
(SKB, 2014a)

為能於 SFR 最終處置場同時貯存和處置核電廠除役後放射性廢棄物，SKB 擴建 SFR 最終處置場，稱為 SFR3 計畫。另曾提出擴建 SFR 之 SFR2 計畫，係規劃作為處置反應爐核心部件和內部零件，但 SKB 已計畫在福斯馬克電廠附近的岩層中，非 SFR 最終處置場區域位置，深度比 SFR 設施更深的深地質處置場址（SFL）進行。

SKB 已經完成 SR-PSU 計畫以作為 SFR 的擴建的使用執照申請文件。SR-PSU 的目的是評估 SFR 最終處置場未來的長期安全評估，即現有的 SFR1 和規劃中的 SFR3。SR-PSU 已完成一系列的安全評估報告，包括一本 SR-PSU 主報告 (SKB, 2014g)，和主要參考報告，包括：氣候報告 (SKB, 2014b)、放射性核種傳輸報告 (SKB, 2014f)、FEP 事件報告 (SKB, 2014c)，未來人類活動之 FHA 報告 (Future human actions) (SKB, 2014d) 與生物圈綜合報告 (SKB, 2014a)，如表 1 所示，列出 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，包括近場、遠場及生物圈安全評估報告；特徵、事件、作用之 FEP 報告；未來人類活動之 FHA 報告與核種傳輸與劑量安全評估報告。

表 1 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單

| 報告編號     | 名稱摘要                          | 報告名稱                      |
|----------|-------------------------------|---------------------------|
| TR-14-01 | SR-PSU Main report            | SFR長期安全分析 (SR-PSU安全評估主報告) |
| TR-14-02 | Initial state report          | SR-PSU初始狀態安全評估報告          |
| TR-14-03 | Waste process report          | SR-PSU廢棄物固化體和組裝過程安全評估報告   |
| TR-14-04 | Barrier process report        | SR-PSU工程障壁安全評估報告          |
| TR-14-05 | Geosphere process report      | SR-PSU地質圈安全評估報告           |
| TR-14-06 | Biosphere synthesis report    | SR-PSU生物圈安全評估報告           |
| TR-14-07 | FEP report                    | SR-PSU FEP特徵事件作用安全評估報告    |
| TR-14-08 | FHA report                    | SR-PSU未來人類活動安全評估報告        |
| TR-14-09 | Radionuclide transport report | SR-PSU 核種傳輸與劑量計算安全評估報告    |
| TR-14-10 | Data report                   | SR-PSU安全評估資料報告            |
| TR-14-11 | Model summary report          | SR-PSU安全評估模式摘要報告          |
| TR-14-12 | Input data report             | SR-PSU安全評估報告之輸入資料         |
| TR-13-05 | Climate report                | SR-PSU安全評估有關之氣候與氣候相關議題    |

註：FEP 代表 特徵、事件、作用 (Features, events and processes)；FHA 代表未來人類活動 (Future human actions)

SR-PSU 安全評估計畫報告，共計十二章，合計約五百多頁，另有主要參考報告十二冊，合計超過三千餘頁。SR-PSU 計畫報告的內容如圖 4 所示。SR-PSU 安全評估之目的係為擴建 SFR 最終處置場長期安全評估結果能符合監管標準，其主要結論有三大重點：

1. 為了證明福斯馬克擴建的 SFR 最終處置場於未來長期安全評估能符合瑞典適用法規。封閉後每年的輻射風險限值為  $10^{-6}$ ，大約等於自然存在之背景輻射的 1 % (SSMFS 2008:37 法規限值)。有效劑量與風險的轉換因子為 0.073 /Sv，因此前述風險現值約等於  $1.4 \times 10^{-5}$  Sv/yr 的有限劑量。依照 SSM's General Guidance，其風險發生機率須於 10 萬年內不能超過法規限值。
2. 要確定處置場工程設計、興建、營運期間之安全評估結果必須滿足法規要求，且安全評估報告之結果必須是正確的。
3. 提供處置場設計研發、SKB 研發部門規劃、場址詳細調查和未來的安全評估，提供完

整的報告資料回饋。

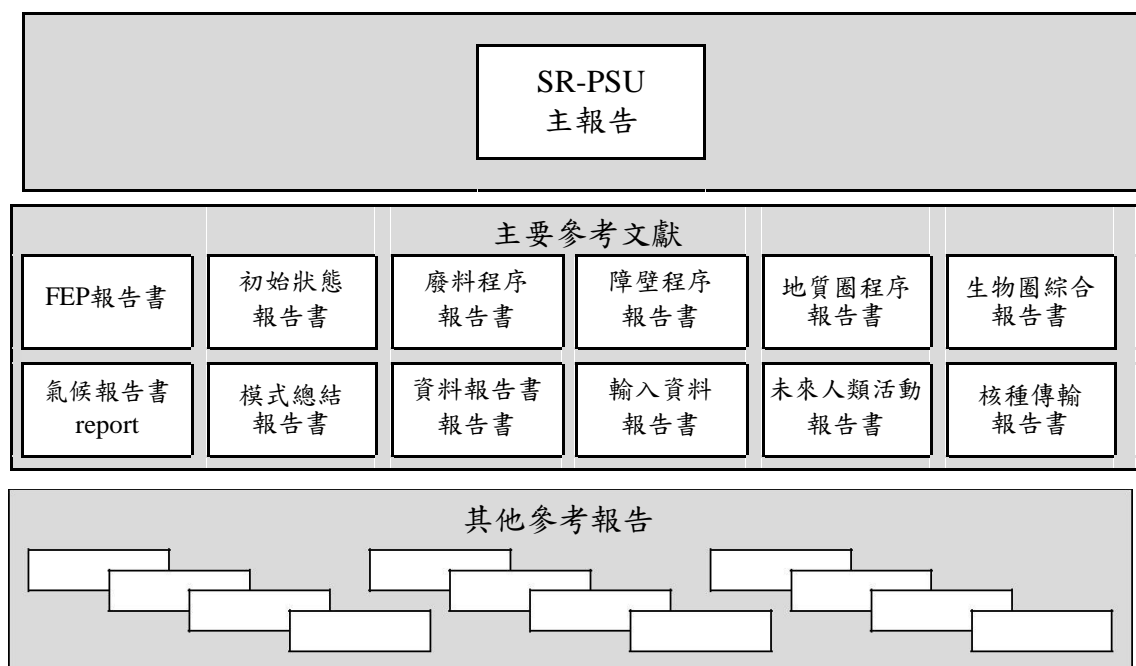


圖 4 SR-PSU 計畫主報告、主要參考文獻與其他參考報告階層示意圖

除了這些主要參考文獻中，安全評估報告還包括 SKB 很多背景調查報告和其他參考文獻。對於表 1 所列 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估報告，依據 SR-PSU 整理結果列於圖 5，本計畫歷年來研究已蒐集如表 1 與圖 5 之生物圈及輻射劑量安全評估相關報告(如 R13-18、R13-43、R13-46、R14-02、TR14-01、TR14-06、TR14-09)，本年度計畫以 TR-14-06 之生物圈安全評估整合分析技術為研析要項。

TR-14-06 這份報告係 SR-PSU 針對生物圈安全評估有關之項目，包括生物圈評估要項、場址地表水文與地下水文地質及化學特性、場址未來因為氣候條件變化及地表地下水文條件之演變、模擬地景發展與土地利用、模擬地景中的生物圈系統單元演變、生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析、生物圈核種傳輸模式、生物圈評估之參數使用、核種釋出後之分析、不確定性討論等。其係為 SR-PSU 對於生物圈及輻射劑量安全評估相關報告之整合報告(如 R13-18 生物圈參數報告、R13-01 分配係數與核種於不同介質的吸附比參數報告、R13-43 生物圈作用定義報告、R13-46 生物圈核種模式報告、R14-02 生物圈特徵事件作用處理報告，R12-03、R13-22 及 R13-27 地景報告書，與 R13-19 地面水文報告書)。



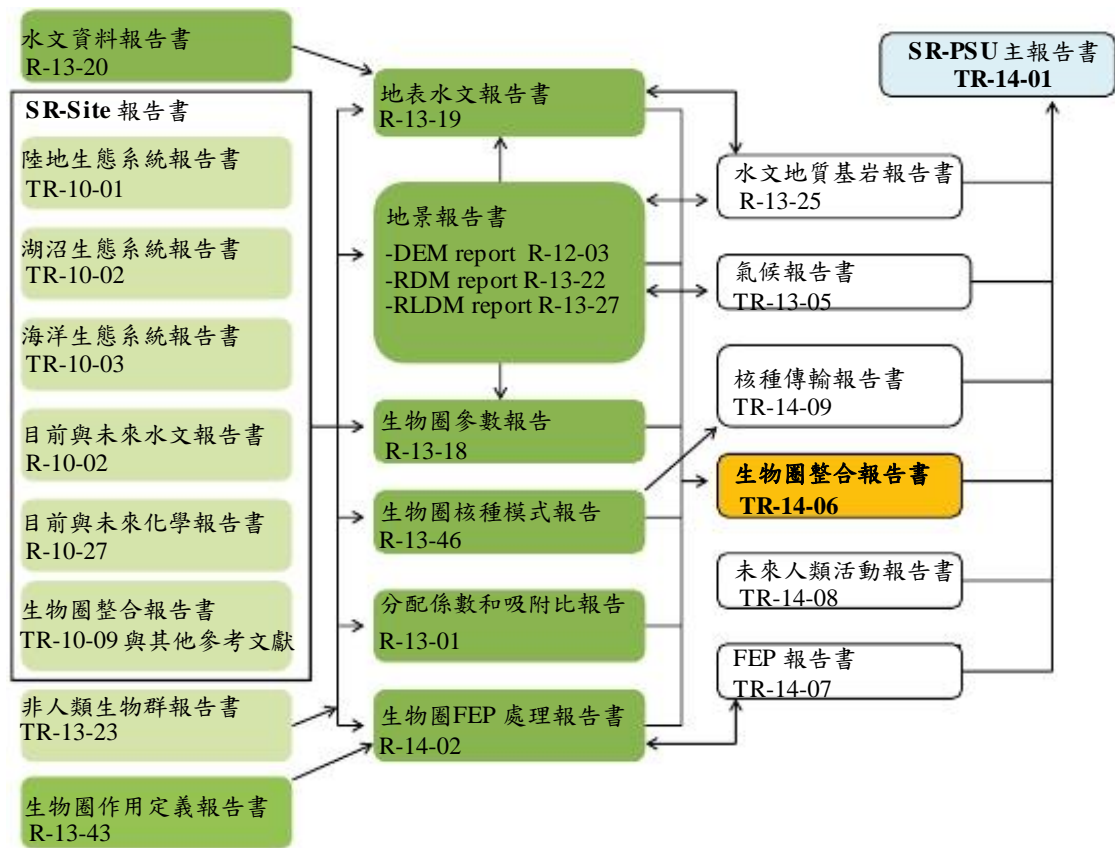


圖 5 SR-PSU 有關核種傳輸與生物圈輻射劑量評估相關報告關聯圖

其中：深綠色方框為生物圈報告、橘色方框為生物圈參數報告，淺綠色方框為 SR-Site 生物圈有關報告可作為 SR-PSU 生物圈補充報告，其他報告為 SR-PSU 有關報告與主報告

依據前述說明，子項計畫五將採用下列方法與工作項目推動本年度工作：

1. 研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項

本項工作以SR-PSU之TR-14-06報告提出之評估背景：1.評估目的，2.安全評估的先前條件(處置場系統、場址背景、源項和釋出情節)，3.場區封閉後之法規要求(時間尺度、保護人體健康的風險標準、最大曝露群體、對環境的影響、情節)，4.評估過程於國際經驗之關聯性，5.生物圈安全的實施和理念(傳輸模擬、最大曝露群體和計算案例、非人類生物群、時間尺度、生物圈計算案例、劑量與危害度估算)。並依據SR-PSU之TR-14-06報告提出之評估技術：1.場址目前的條件與描述(地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統、井和水資源管理、人口和土地使用)，2.場址條件與系統演變發展(驅動場址演變發展的主要作用、氣候變化和氣候有關作用、地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統)，3.模擬地景發展與土

地利用(福斯馬克地景、生態系統和現狀地景、目前的土地使用情況、歷史地景、未來地景、未來耕地分配、未來的濕地和土地利用、氣候變化、地景發展模式模擬、評估未來地景的不確定性), 4. 模擬地景中的生物圈系統單元演變(水文輸入數據、地下水流模擬、生物圈系統單元的幾何特徵及識別、生物圈系統單元的時間發展、產生的盆地和生物圈系統單元、替代系統單元劃定), 5. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析(鑑定對於核種傳輸及生物圈中核種的累積和曝露重要的作用和特徵、掌握潛在與安全有關的生物圈 FEPs、曝露途徑分析、識別非人類生物群的途徑終點、生物圈計算情節案例), 6. 生物圈核種傳輸模式(傳輸模式的概述、區塊模式、水域生態系統模式、陸域生態系統模式、水文和平流傳輸、計算未來的曝露量), 7. 生物圈評估之參數使用(參數化和參數概述、選擇參數值和概率密度函數的方法、參數說明等), 8. 核種釋出後之分析(人類曝露、非人類生物群曝露、與以前的安全評估比較、生物圈中的傳輸和曝露分析、氣候計算案例比較、參數不確定性的影響、其他曝露途徑分析), 9. 不確定性討論(SR-PSU生物圈建模、處理和評估不確定性), 研析該TR-14-06報告關於生物圈安全評估技術提出相關審查要項。

## 2. 研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術

本項工作參考SR-PSU之評估背景及評估技術, 研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術, 包括: 1. 場址條件描述技術, 2. 場址條件與系統演變發展技術, 3. 地景發展與土地利用模擬技術, 4. 地景生物圈系統單元演變模擬技術, 5. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術, 6. 生物圈核種傳輸模式模擬技術, 7. 生物圈評估參數建立技術, 8. 核種外釋後分析技術, 9. 不確定性分析技術, 10. 國際經驗技術引入。根據前述TR-14-06之SR-PSU生物圈安全評估技術發展提出我國低放坑道處置生物圈安全評估技術建議。

## 3. 國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性探討

本計畫根據前述TR-14-06之SR-PSU生物圈安全評估: 1. 評估目的, 2. 安全評估的初始條件(處置場系統、場址背景、源項和釋出情節), 3. 場區封閉後之法規要求(時間尺度、保護人體健康的風險標準、最大曝露群體、對環境的影響、情節), 4. 國際經驗技術引入, 5. 生物圈安全評估技術(場址條件描述技術、場址條件與系統演變發展技術、地景發展與土地利用模擬技術、地景生物圈系統單元演變模擬技術、生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術、生物圈核種傳輸模式模擬技術、生物圈評估參數建立技術、核種釋出後

分析技術、不確定性分析技術。與研析之我國低放坑道處置生物圈安全評估技術，包括：  
1.場址條件描述技術，2.場址條件與系統演變發展技術，3.地景發展與土地利用模擬技術，  
4.地景生物圈系統單元演變模擬技術，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術，6.  
生物圈核種傳輸模式模擬技術，7.生物圈評估參數建立技術，8.核種外釋後分析技術，9.  
不確定性分析技術，10.國際經驗技術引入。討論驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安  
全評估之關聯性進行分析，並提出我國目前尚缺乏之驗證技術項目。

#### 4. 我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項建議

本計畫針對SR-PSU有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估技術報告，研析  
國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項、研析我國低放坑道處置生物  
圈安全評估技術、國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安  
全評估之關聯性探討，提出國內低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項，俾  
利藉由生物圈安全評估是否合乎監管要求，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安  
全標準，提出我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項。

## 第2章 研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項

本章介紹 SR-PSU 生物圈評估背景，包括：1.評估目的，2.安全評估的初始條件(處置場系統、場址背景、源項和釋出情節)，3.場區封閉後之法規要求(時間尺度、保護人體健康的風險標準、最大曝露群體、對環境的影響、情節)，4.評估過程於國際經驗之關聯性，5.生物圈安全的實施和理念(傳輸模擬、最大曝露群體和計算案例、非人類生物群、時間尺度、生物圈計算案例、劑量與危害度估算)。

依據 SR-PSU 之 TR-14-06 報告提出之評估技術，包括：1.場址目前的條件與描述(地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統、井和水資源管理、人口和土地使用)，2.場址條件與系統演變發展(驅動場址演變發展的主要作用、氣候變化和氣候有關作用、地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統)，3.模擬地景發展與土地利用(福斯馬克地景、生態系統和現狀地景、目前的土地使用情況、歷史地景、未來地景、未來耕地分配、未來的濕地和土地利用、氣候變化、地景發展模式模擬、評估未來地景的不確定性)，4.模擬地景中的生物圈系統單元演變(水文輸入數據、地下水流模擬、生物圈系統單元的幾何特徵及識別、生物圈系統單元的時間發展、產生的盆地和生物圈系統單元、替代系統單元劃定)，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析(鑑定對於核種傳輸及生物圈中核種的累積和曝露重要的作用和特徵、掌握潛在與安全有關的生物圈 FEPs、曝露途徑分析、識別非人類生物群的途徑終點、生物圈計算情節案例)，6.生物圈核種傳輸模式(傳輸模式的概述、區塊模式、水域生態系統模式、陸域生態系統模式、水文和平流傳輸、計算未來的曝露量)，7.生物圈評估之參數使用(參數化和參數概述、選擇參數值和概率密度函數的方法、參數說明等)，8.核種釋出後之分析(人類曝露、非人類生物群曝露、與以前的安全評估比較、生物圈中的傳輸和曝露分析、氣候計算案例比較、參數不確定性的影響、其他曝露途徑分析)，9.不確定性討論(SR-PSU 生物圈建模、處理和評估不確定性)，研析該 TR-14-06 報告關於生物圈安全評估技術作為安全評估技術相關審查要項。

### 2.1. 評估背景

#### 2.1.1. 評估目的

SR-PSU 安全評估的主要目的是：

- 評估 SFR 處置場長期之輻射安全性，包括現有的 SFR 1 和計劃擴展 SFR 3（參見 SR-PSU 主要報告 TR-14-01，(SKB, 2014g)）。
- 對設計開發、SKB 研發計畫提供反饋建議，以進一步進行現場調查以及未來的安全評估項目。

對於生物圈評估，係為確定於 SFR 1 和 SFR 3 處置場外釋放射性核種到地表環境中之輻射劑量危害的可能性，並作為管制單位對於放射性廢棄物處置之監管要求。

### 2.1.2. 安全評估的初始條件

有關安全評估的初始條件，包括：處置場系統、場址背景、源項和釋出情節。

#### 1. 處置場系統

SFR 1 建造是為了接收中低放射性廢棄物之最終處置。SFR 1 建於 1983 年至 1988 年之間，從 1988 年處置場開始運轉。SFR 1 中的中低放廢棄物包括：包括瑞典核電廠運轉廢棄物、用過核子燃料中期貯存設施 Clab 以及來自其他工業、研究機構和醫療機構之放射性廢物。

處理窖位於海床下約 60 公尺花崗岩岩體，岩體上方有幾公尺厚水下風化層土和 6-10 公尺深的海水。處置場內包含不同類型和數量的廢棄物（進一步可參見初始狀態報告）。地下部分設施經由兩條隧道進入，其入口靠近地面設施位置（如圖 3）。計畫擴展 SFR 3 將以與現有處置場相同方式運轉，處置窖位於約 120 公尺深度。除了與 SFR 1 類似的廢棄物，瑞典沸水核能電廠之反應爐容器也計畫於 SFR 進行處置。因此，附加的隧道入口必須興建夠大，以能運輸和儲存較大的反應器容器。

#### 2. 場址背景

福斯馬克位於波羅的海沿岸（Bothnian Sea）Östhammar 市之烏普薩拉（Uppsala）縣內，瑞典斯德哥爾摩以北約 120 公里（圖 1）。現有和 SFR 的計劃擴建位於福斯馬克核電站附近。周圍環境顯示小於 20 公尺的小範圍地形變化（圖 6）。



圖 6 福斯馬克沿海地區之低海拔、淺海灣、小湖泊和濕地示意圖

冰川後期隆起與平坦地形相結合意味著快速的海岸線位移。由於退潮的海岸線而不斷形成，形成年輕的陸域系統，其中包含一些最近孤立的湖泊和湖泊濕地和新湖泊。海岸線由隱蔽的淺海灣和小島組成。沿海海岸線 600 公里長連至東北方向，這造成了快速的水流量和長時間的隨著海浪波動。因此，沿海地區的海底以侵蝕為主及異質沉積物，主要由砂和礫石且含有冰川粘土所組成。

大部分地區地景都覆蓋著一層薄薄的風化表土層，以冰磧土為主。福斯馬克地區平均風化的厚度，於陸域地區為 4 公尺、海域地區為 8 公尺。SFR 處置場海床上的岩層風化層厚度為 1-4 公尺。

潛在的基岩由結晶岩體構成，於 18.5 至 18.9 億年前在 Svecokarelian 造山期間形成，它受到了韌性和脆性的影響變形。韌性變形導致了大範圍的韌性高應變區域和脆性變形引起了大規模的斷裂帶。構造透鏡體被包圍在韌性高應變區，其中基岩受延展變形的影響相當小。

目前福斯馬克沒有永久居民，周圍人口稀少。核電廠和 SFR 周圍的土地利用以休閒狩



獵和釣魚為主。然而，福斯馬克周圍居民的主要食物供應，來自外地交易過來，這意味著食物來自遙遠的農場所生產的。從歷史上看，這一地區的土地利用主要是林業，特別是在福斯馬克地區供應鐵製品於木炭、小規模農業和漁業時。

### 3.源項與釋出情節

SFR 兩個主要安全原則是：1) 限制廢棄物中的放射量，2) 遲滯。處置場最終將失去其圍阻功能。限制廢棄量和長時間遲滯核種釋出以對人類和環境風險降低。目前已確認許多情境並評估預測 SFR 處置場核種釋出（詳細見 SR-PSU 主要報告）。

該報告分別針對盤存量與核種遷移模擬分析結果指出：SR-PSU 預期核種盤存量，有大量（98%）的活度在最初的一千年內衰退。其分析放射性廢棄物中的活度，在最初的 600 年中係由 Ni-63 主導，之後由 Ni-59 和 C-14 主導。另該報告又提出放射性核種潛在的放射危害性主要受輻射類型、輻射強度大小以及移動性所影響。所以根據 SR-PSU 主報告中的核種遷移模擬結果顯示，放射毒性最初由 Am-241 主導，該毒性於運轉後處置場封閉 5000 年後時，已經降低至 1%。

在 SR-PSU 中，通過一系列模型計算從處置場到生物圈之放射性核種的傳輸和劑量評估。近場模型描述來自處置場廢棄物包件的放射性核種釋出。遠場模型用於描述地質圈中核種於水相中的傳輸情節。生物圈的放射性核種模型用於描述在生物圈內傳輸和累積並評估曝露情況（詳見 SR-PSU 放射性核種傳輸報告 TR-14-09，(SKB, 2014f)）。

從地質圈到生物圈之放射性核種釋出的潛在區域，可藉由水文地質分析從處置場釋出至深層地下水層，利用地景發展研究模擬核種於何時何處傳輸至生物圈。因此，釋出的維度分析包括空間和時間維度，這些釋出模擬主要係為確認地表生態系統中的潛在劑量區域，以計算人類和非人類生物群之輻射劑量。全系統之近場、遠場和生物圈之放射性核種傳輸評估模型，模擬分析不同釋出途徑和情節，對於人類和環境危害輻射劑量。

#### 2.1.3. 場區封閉後之法規要求

有關場區營運封閉後之法規要求，包括：時間尺度、保護人體健康的風險標準、最大曝露群體、對環境的影響、情節。安全評估的形式和內容以及判斷處置場安全性的標準係由瑞典輻射安全局 SSM 所發布之法規中定義。最重要的法規是核能作業法和輻射防護法。

關於輻射防護事宜的指導由國際機構提供，瑞典國家立法通常與情節分析案例一樣受國際規則和建議所影響。有兩個更詳細的規定有關於放射性廢棄物處置場長期安全特別相關的準則，如下：

- 瑞典輻射安全管理局有關保護人體健康和環境的規定與用過核子燃料或核燃料廢棄物的最終管理有關（SSMFS 2008：37）
- 瑞典輻射安全管理局有關核廢料最終處置安全的規定（SSMFS 2008：21）

根據瑞典法規規定，應該保護人類健康和環境免受於處置場輻射劑量之有害影響。保護人類健康和環境的風險和劑量標準以及對生物圈需要特別注意要求事項，如下面概述：

### 1.時間尺度

SSM 法規要求對處置場在關閉後的第一個千年需進行詳細的定量安全評估。但時間較長，應對處置場特性的發展、環境和生物圈各種可能情境進行處置場的安全評估。在 SSM 法規的一般建議中，對於 SFR 處置場於較長時間安全評估時，雖然最大時間期間長達十萬年，但應該至少分析到風險和環境影響之預期最大值，且需進一步說明所選取之限制風險分析。

### 2.保護人體健康的風險標準

SSM 法規規定「用過核子燃料或核廢料處置場需設計於封閉後對於代表性個體之有害影響風險不能超過  $10^{-6}$ 」。這些建議是來自於國際輻射防護協會（ICRP）於 1991 年第 60 號出版物於計算輻射劑量之有害影響。根據該 60 號出版物之規定，有效劑量轉換為風險的因子是每西佛 7.3%。

### 3.最大曝露群體

最大曝露群體無法以明確方式描述。SSM 指出「曝露群體(exposed group)的界定為任何個體會接收最高風險至 1/10 最高風險，若存大量曝露個體，可以用算術平均計算平均風險」。將放射性物質釋出至作為飲用水的來源和可釣魚大湖泊內，這個例子屬於這種曝露情況。

SSM（2008a）還指出，如果曝露群體只包含少數個體，如果計算最高個人風險每年不



超過  $10^{-5}$ ，則個人風險法規標準能被認為是符合。這種情況的例子可能是來自鑽井飲用水為主要曝露途徑，在這樣的計算中，例如選擇具有最高風險負荷的個體應該經由相關資訊來證明其合理性假定的生活習慣和居住地點所計算出的個人風險。

#### 4. 對環境的影響

環境保護在瑞典立法中沒有風險標準。然而，SSM (2008a) 在第 6 節和第 7 節中指出：用過核子燃料或核廢料的最終管理應當實施以保護生物多樣性和生物資源的可持續利用並防止輻射劑量的有害影響。輻射劑量在生物棲息地的生物效應應描述有關的生態系統。報告應以現有知識為基礎說明有關的生態系統，並應特別考慮到基因獨特性的存在，諸如孤立種群、特有物種和瀕臨絕種物種等種群和任何需要值得保護的生物。

從處置場釋出之放射性物質對選定生物體之輻射劑量影響評估，可以由國際輻射防護協會委員會 (ICRP) 2003 年 91 出版物得到一般的指導基礎。該知識和數據庫的適用性，可用於放射性物質於生態系統中之延散和遷移分析，並可分析不同生物體輻射劑量影響，應該進行評估並完成報告分析。

#### 5. 情節

法規之規定給定應該包含在放射性廢棄物處置場安全評估情節分析之資訊。SSMFS 2008:37 的第 10 段和 SSMFS 2008:21 第 9 節的一般建議，特別注重在生物圈計算情節案例：

SSMFS 2008:37§10 「在申請建造處置場許可申請時，應包括基於生物圈假設之情節描述，於提交內容不會改變對於普遍存在的情節。在評估保護能力時，於描述時對於不確定性的假設應納入考慮。」

SSMFS 2008:37，一般建議「考慮到巨大不確定性與遙遠未來氣候演變的假設有關係，一些可能的氣候演變應納入風險計算並簡化風險分析。一個真實的生物圈條件應與每個氣候演變相關聯。」

SSMFS 2008:21 的一般建議，第 9 節「根據分析不同類型情節在不同時期的發生機率，對處置場功能有顯著影響的情節可以分為三個不同類別：主要情節、較不可能的情節、其他情節或剩餘情節。」

- 主要情節：應根據外部情況可能的演變，以及真實或合理保守假設的內部情況擬定。應包含未來有顯著發生機率的外部事件，或在安全分析的計算時期內無法顯示有低發生機率者。此外，應儘可能根據內部情況的可靠假設，包含初始製造缺陷，據以分析處置場的障壁功能。主要情節應做為分析不確定性的起點，亦即主要情節的分析應包含許多相關的計算個案。
- 較不可能的情節：此係用於評估情節的不確定性。應以一系列替代的事件與發生時期進行主要情節的變化。包含考慮未來人類活動對障壁功能造成損壞的影響。較不可能的情節的分析應包含在主要情節未加以評估的不確定性。
- 剩餘情節：應包含選擇一系列的事件與情況，進行獨立性的機率研究，以瞭解個別障壁與功能的重要性。殘餘情節亦應包含人類侵入的破壞，以及處置場未封閉與未監測的後果。

監管指引指出，至少應有一個情節計算案例以目前生物圈條件描述未來，及利用現實的假設作為生物圈的描述。

#### 2.1.4. 評估過程於國際經驗之關聯性

瑞典對於用過核子燃料的處置與儲存方案，和國際組織間的合作已有完整歷史，已和其他國家機構合作進行放射性廢棄物管理。這種國際合作方式能透過國際經驗給予實際的評估結果回饋建議，並能給開發者對於安全評估工作之修正回饋。以下針對瑞典生物圈評估國際合作的背景、目前國際合作計畫和相關研究、SR-PSU 應用 BIOMASS 方法進行說明。

##### 1. 生物圈評估國際合作的背景

瑞典從 1984 年開始就針對其安全評估方法的各種觀點進行同儕評審，包括：國際原子能總署 IAEA、NEA-OECD、AECL 技術諮詢委員會（加拿大）、法國核安全及保護研究所，國家輻射防護原子能研究機構（英國），國家放射防護委員會（英國），美國國家科學院和英國地質調查局。審查項目特別涵蓋生物圈考慮項目。在同儕評審過程不久之後，瑞典輻射防護研究所（SSI，後來成為瑞典輻射安全局 SSM）成立 BIOMOVs 的國際合作計畫，其主要目標是：

- 測試選定污染物和曝露情節之環境評估模型預測的準確性。
- 解釋由於模型架構缺陷、無效假設和/或所選輸入數據的差異而產生的模型預測差異。
- 建議未來研究的重點，以提高模型預測的準確性。

該方案除其他情況外還考慮由於處置場放射性廢棄物之核種釋出到環境中之長期安全評估。該工作側重於科學問題和數據的最佳使用，允許專家進行探索和發展與長期情況相關的評估方法。

參與者包括來自 14 個國家的 22 個組織之專家。其中 BIOPATH 模型工具應用於模型測試練習，該生物圈模型工具於 1983 年對於 KBS-3 研究及對 SFR 的第一次安全評估，該評估於 1984 年（瑞典工業部 1984 年）進行審查。後續合作計畫從 1985 年至 1990 年，針對各種曝露情況進行評估並於 1993 年發表 BIOMOVS 技術報告並開始第二階段之 BIOMOVS II。

BIOMOVS II 的計畫範圍與之前相似，也有眾多國際參與者。考慮關鍵特徵、事件和作用（FEP）的識別，以及對應的相關模型特徵和數據要求。定量分析模型的結果相互比較，以確定哪些作用在哪些過程中可能是重要的曝露的情節，以及替代方案可能會產生什麼影響作用。SKB 當時使用的 BIOPATH 模型，測試十個模型並進行比較，結果於 1996 年發表 BIOMOVS II 技術報告。

此外，BIOMOVS II 還考慮參考生物圈的發展。最初想法是為確定一些關鍵的生物圈情況（參考生物圈）和評估在這些情況下釋出放射性之影響，並將結果用作基準或參考值，用來比較替代的功能處置系統。然而，有限的條件或參考生物圈並無法解決所有不同的國家所出現不同評估背景範圍。除了地理位置以及不同地點的其他物理條件，專家們認為處置場作業的發展階段，決定後續生物圈安全評估所有必要和適當的細節水平。並認為對於特定的處置場址，應該在國際制定共同方法，找出能證明長期環境條件和人類行為的適當假設。發展摘要大綱方法論後，並一起提供相對應之 FEP 清單和精進方法建議。

為解決 BIOMOVS II 建議，國際原子能總署在 BIOMASS 國際合作研究計畫成立「參考生物圈」計畫，並於 2003 年完成 BIOMASS 技術報告。該計畫工作共有六個任務分組，在 1996 年至 2001 年期間完成及建立在 SKB 進行之建模和評估結果，以及國際輻射防護

協會放射性廢棄物處置演變之建議。

## 2. 目前國際合作計畫和相關研究

目前已經有為數眾多已完成或正在進行中的國際研究計畫致力於放射性廢棄物處置功能評估之生物圈安全評估作業。該研究計畫有共同特點係為針對特定場址評估，該特性反應處置場發展之進展，有特定場址的開發進展。

BIOPROTA 計畫是最重要的國際合作項目之一。該計畫開始於 2002 年，目前仍持續進行中，涉及廣泛的營運開發者，包括北美、歐洲和亞洲的監管機構、技術支持組織和研究機構。其目的在支持解決生物圈方面的關鍵問題評估與管理放射性廢棄物有關的污染物排放之長期影響。

SKB 關注科學評估，並參與該項目的科學和現場調查工作，環境安全情節及相關安全評估工作。例如，SKB 參與地質圈及生物圈相互作用有關的項目（GBIZ 計畫），和在環境和非人類生物群體評估 C-14 的行為。SKB 還參加國際原子能總署有關輻射安全環境模擬 EMRAS II 計畫，貢獻其研發能量在環境劑量對環境影響之研究。並繼續參加在輻射影響評估之模擬和數據處理之 MODARIA 計畫，特別在第 6 工作組內進行放射性廢棄物處置長期安全評估之環境變化，特別關注於氣候變化及其影響後果。

## 3. SR-PSU 應用 BIOMASS 方法

國際原子能總署之 BIOMASS 方法為評估生物圈開發之標準作業程序。評估生物圈的定義是：

一組假設和假定是必要的，以提供處置場放射性核種釋出進入生物圈之長期輻射影響計算。該方法是基於分段的方法，每個階段引入更多生物圈系統描述和相對應的概念、建立數學和數值模型。步驟如下：

- 定義評估內容
- 確定並證明待評估的生物圈系統
- 生物圈系統描述
- 考慮潛在的曝露群體

- 模式發展
- 計算
- 迭代

以下介紹前四步驟在 SR-PSU 內進行的程序內容。

#### (1) 定義評估內容

SR-PSU 生物圈的評估背景及總體目標：

- 列出要評估的內容以及為什麼要評估
- 列出要提供評估內容的邊界條件之初始假定
- 定義評估內容，例如目的、評估終點和社會行為假設
- 提供每個計算目的之完整記錄。

#### (2) 確定並證明待評估的生物圈系統

確定生物圈系統隨時間而變化之關鍵問題。SKB 非常重視這個關鍵問題，因為擬定的場址受到環境變化影響，這些變化已得到監管部門明確認可。該環境變化主要由氣候變化和海平面變化所引起。這些變化資訊對於評估生物圈終點之問題具有實質性影響關聯，且影響各種生物圈重要性作用和潛在相關曝露途徑，及鑑定水流流出區域與隨時間之演變，和模式假設及考慮到以前評估經驗等。

#### (3) 生物圈系統描述

國際原子能總署於 2003 年提供有關構建生物圈系統描述之建議，SKB 已經制定福斯馬克地區之場址以及因環境變化之預期演變發展。針對生物圈系統描述，SKB 完整收集場址有關之資料，深入了解生態系統。

#### (4) 考慮潛在的曝露群體

到目前為止，無法可靠地預測未來的人類行為以論證安全。國際原子能總署於 2003 年提出以下方法：

- 審查感興趣的生態系統內之曝露模式和相關途徑
- 一致地確定和描述這些生態系統內的人類活動，

- 將人類活動和曝露模式結合起來，找出最有可能導致事件之最高劑量。

SKB 已採用這種方法，曝光途徑分析已經完成，且已納入對於曝露群體之潛在重要的曝露途徑，並將幾個曝露區域當作生物圈邊界情節案例，以確保能計算最大曝露群體之劑量。

## (5) 模式發展

國際原子能總署在 2003 年建議在模式發展採取以下步驟：

- 識別概念模型對象，不同環境介質潛在影響可能曝露群體之輻射劑量。
- 藉由所考慮概念模型對象之間的交互作用來構建概念模型。
- 省略沒有潛在影響之重要特徵、事件和作用（FEP）的概念模型。
- 識別數據來源，定義可用數據來源和獲得科學理解之數學模型，並根據實驗調查和假設之數據指導計畫得到相關參數值。
- 合併曝露群組資料。

SKB 採取了相同的步驟，已完成可能的核種釋出至生物圈位置及生物圈系統單元，完成生物圈之特徵事件作用之交互作用矩陣，以瞭解存在生態系統需要關注的情節分析，並利用系統方法檢查潛在的 FEP 是否需要包含或合理排除。對於模式發展模型利用兩個階段，第一，進行地景模擬，以確認福斯馬克潛在的地下水流出區域；第二，模擬放射性核種在不斷演變之生物圈系統內遷移。目前 SR-PSU 中使用的放射性核種模型是以 SR-Site 放射性核種模型為基礎進行建構。而 SR-PSU 生物圈評估之計算步驟包括對於數學模式之適當數據選擇和應用，並已完成數據選擇和數據品質保證之論述，前述方法類似於國際原子能總署 2003 年出版之參數選擇規則。

### 2.1.5. 生物圈安全的實施和理念

有關生物圈安全的實施和理念，包括：傳輸建模、最大曝露群體和計算案例、非人類生物群、時間尺度、生物圈計算案例、劑量與風險估算。

生物圈評估的主要目的是為人類和環境評估放射性風險，作為生物圈完整的描述和可信的不確定性分析結果。因此，建立自然生態系統之傳輸模型需符合現場實境，包括模式

架構、主要傳輸途徑、地景發展和相關參數。然而，該地區未來人類居民特徵之不確定性高，因此，輻射劑量曝露係以潛在曝露途徑的分析，而不是嘗試預測福斯馬克地區的世代居住條件和習慣。按照此方法，人類生態系統比自然生態系統更簡化，受到輻射曝露之群體為確定曝露途徑之情節分析邊界。

### 1. 傳輸建模

在 SR-PSU 之自然生態系統放射性核種傳輸模型之架構係依據 SR-Site 所建立。也就是說，生物圈核種傳輸之起點是指放射性核種由地質圈排放進入連通之地景發展生態系統。在 SR-PSU 中，該模型已結合 C-14 循環之特點，現地生態系統的特徵以支持特徵、事件、作用之 FEP 分析。放射性核種通量與自然過程（例如水、固體或氣體通量，擴散和植物吸收）交互作用，可從現場量測或建模的條件推導出參數。

使用實地實際量測數據可使假設之模型和參數值能清楚建立場址描述。使用代表性數據集，其中需要量測參數係同時於現地進行採樣，得到同時一致性數據。因此評估結果具有科學相關之基礎性和連貫性。

評估需瞭解福斯馬克地區現有當前條件之地景狀態及全新世史。目前自然生態系統演替繼承性之假設和參數描述不確定性相對較低。但不確定性在生物圈未來演變，會隨著時間增加而逐漸增加，因此必須引入必要的假設來處理這些不確定性分析。

### 2. 最大曝露群體和計算案例

瑞典法規並沒有規定關於未來人類行為和土地利用的假設。由於未來人類居民具高度不確定性，SKB 認為指定人類生活特徵和習慣以提供人類在未來的可能實際特徵和習慣之估計是無法操作的。相反地，遵循國際輻射防護協會之建議，藉由已經完成曝露途徑分析以確定所有相關的曝露途徑，建構輻射曝露群體為確定曝露途徑之情節分析邊界。一個確定曝露群體代表自然生態系統之生活空間及食物攝食和供水。使用不同的區塊系統代表核種於不同介質系統傳輸，於水域與陸域生態系統經由耕作土壤中傳輸和累積及食物鏈過程。

### 3. 非人類生物群

在 SSM (2008) (2008 年 SSMFS : 37, 一般建議) 對於非人類之生物群有更具體的發展。其定義更詳細的曝露途徑：放射性物質從場址遷移至人類居住地方，或由環境保護法

規所涵蓋的生物體存在的地方。這過程作用，包括在地質障壁的延散作用，流動傳輸與氣體傳輸與生態系統內的遷移作用，與人類或非人類生物於環境中的攝取作用。但對於非人類之生物群並沒有風險標準，在當前評估係利用 ERICA 評估方法提出在生態系統的篩選劑量率為  $10 \mu\text{Gy/h}$ ，這已經得到歐盟保護計畫的進一步認可。篩選劑量率代表一個閾值，超過這個閾值可能會對非人類生物群體產生負面影響。如果評估過程劑量率超過篩選劑量率，那需要更詳細的曝露參數和不確定性調查，和/或應執行特定生物體的放射敏感性調查。

這個篩選劑量率遠遠低於其他一些例如美國能源部(US DOE 2002)，另見 IAEA(1992) 和 UNSCEAR (1996) 所選用之篩選劑量率。美國能源部建議使用  $400 \mu\text{Gy/h}$  作為本地水域動物的篩選劑量率，陸域植物和陸域動物的篩選的劑量率分別是  $400$  和  $40 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ ，作為衡量對環境影響的可接受程度的基準。

#### 4.時間尺度

SR-PSU 的生物圈評估不再細分為不同的時間範圍。相反地，係為連續時間的模型，但依不同目的以三個主要時間分段。封閉後的第 1000 年、封閉後 1000 年至 10,000 年、10,000 至 100,000 年的時間。第一個 1000 年是依據法規對於詳細分析的要求特別重要。封閉後 1,000 至 10,000 年之間(即至西元 12,000)，生物圈分析中考慮核種進入陸域區域(濕地、森林或農地)，水文分析之生物圈建模研究時間段和水流通量於放射性核種傳輸和劑量計算，這也是海退離開模型區域的時間，並表示海岸線位移和氣候變化影響之地景發展過渡到 10000 年和 10 萬年間，該時間段之生物圈發展為主要為氣候變化。

#### 5.生物圈計算案例

生物圈傳輸模式應建立符合實際狀況之假設條件，但 SKB 認為地表系統之作用影響地表生物圈發展，且無法確定唯一可能之生物圈發展。但是，監管準則指出至少應有一種以目前生物圈條件計算未來生物圈之情節分析。

其他的氣候條件和生物圈發展則在另外計算案例進行情節分析。例如，對於預期的氣候條件有單獨的計算情況，包括：未來之全球暖化加劇、永久凍土條件下的冰雹以及內陸冰蓋的退縮。生物圈計算案例之不確定性，包括放射性核種從地質圈釋出到生物圈，以及核種於地質圈之地下水層或處置場造成曝露作用。在安全評估中，需評估不同



氣候演變下之處置場安全性並說明處置場功能的情節，並包括風險分析。

## 6. 劑量和風險評估

在 SR-PSU 中對人類之風險和對非人類生物群之劑量，是由全系統傳輸模式模擬之核種濃度所估算。傳輸模式鏈包括從處置場、地質圈到生物圈。在這個模型鏈中，放射性核種濃度量係為通過處置場、地質圈至生物圈系統隨著傳輸時間變化的函數。

然而，由於整個模型鏈的結果在評估的最後階段才可獲得，SR-PSU 提出一種方法，利用核種之單位釋出率（1Bq/year）檢驗放射性核種在生物圈模式的傳輸和累積，已經使用了一組放射性核種來證明不同的性質（如吸附、生物累積和揮發）影響關鍵放射性核種的傳輸和宿命。利用單位釋出的劑量和劑量率對應之地景劑量轉換因子（LDF）已於先前之生物圈評估進行過研究（例如 SAR-08 和 SR-Site）。將所有曝露群體和隨時間變化之最大 LDF 值與以前的評估結果進行比較，並可比較不同假設情況之生物圈計算案例情節結果。此外，單位釋出率的方法可用於評估生物圈系統劃分的影響，並可先篩選出一些對於未來人類居民可能輻射劑量較小的曝露途徑。SR-PSU 所使用之恆定的釋出率 LDF 計算之定率模擬方法，是對於最大曝露群體之最佳估計。定率式模擬需要結合作用過程、場址描述和土地使用及人類習慣之假設。此外，參數不確定性和模型敏感性的影響已藉由概率模擬解決輸入參數值的變化。

### 2.2. 生物圈安全評估技術要項

本項工作將針對：1.場址描述，2.場址未來條件與系統演變發展，3.模擬地景發展與土地利用，4.模擬地景中的生物圈系統單元演變，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，6.生物圈核種模式，7.生物圈評估之參數使用，8.核種釋出後之分析，9.生物圈評估不確定性討論。根據前述 TR-14-06 之 SR-PSU 生物圈安全評估結果作為作為我國低放坑道處置生物圈安全評估技術，以下分述各項技術。

#### 2.2.1. 場址描述

場址描述係根據地形情況簡要介紹福斯馬克當前的情況、水文和化學、海域、林地和陸域生態系統、水井和水資源管理、人口和土地利用。大多數數據和模型用於描述 PSU 計畫之地表系統現場描述模型。

# 1. 地形和表土層

福斯馬克區域特徵為低海拔高度、小區域的地形，位於最後冰期之最高海岸線之下。大部分地表景觀是由薄風化層形成，係於冰期的最後階段覆蓋形成。福斯馬克區域之陸域平均風化層深度是 4m，在海濱地區為 8m。在福斯馬克區域的海底北部可被發現冰積土和冰期粘土，具有高碳酸鈣 (CaCO<sub>3</sub>) 成分，其源自古生石灰石。區域地形及表土層必須有如圖 7 至圖 10 之區域鳥瞰圖、數值高程模型圖、表土分佈和地表曝露的基岩區域圖、總風化層深度圖表示，並已清楚描述處置場區域之地形及表土層狀態。



圖 7 東南方向福斯馬克區域鳥瞰圖  
說明：前景區域是 Storskäret 可耕地區域，福斯馬克核電站在圖上方白色區域，沿著海岸線黃色地帶是蘆葦帶區域。

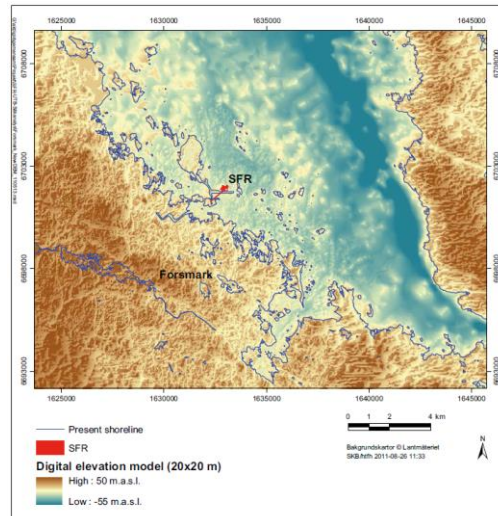


圖 8 DEM (數值高程模型) 圖  
說明：包括湖泊的海底測深和大海。DEM 的水平分辨率為 20 公尺。地圖顯示目前的海岸線和現有 SFR 設施的位置。

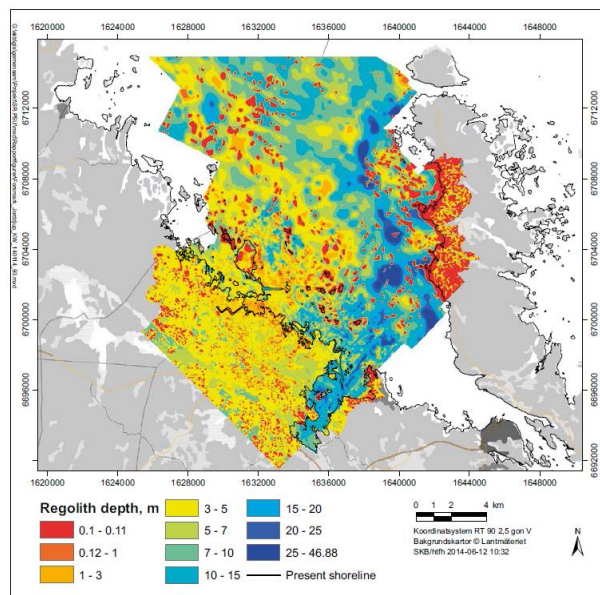
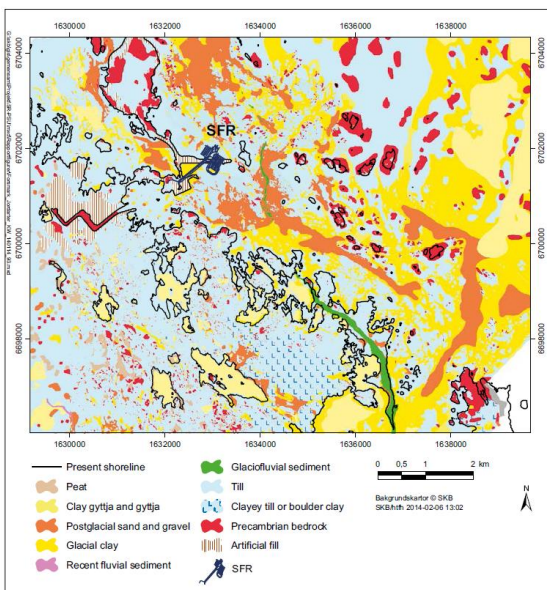


圖 9 地表分佈（在 0.5 公尺深度）的表土分佈和地表曝露的基岩區域

圖 10 模擬的總風化層深度

說明：基岩露頭是顯示為具有 0.1-0.11 公尺的風化層深度的區域

## 2. 水文和化學

瑞典氣象和水文研究所 Örskär 站，位於福斯馬克東北部 17 公里，1961 - 1990 年期間年平均氣溫為 $+5.5^{\circ}\text{C}$ ，為當前溫度參考背景值，而福斯馬克的年平均氣溫為在 2004 - 2010 年期間約為 $+7^{\circ}\text{C}$ ，略微升高。植被期（平均氣溫高於 $+5^{\circ}\text{C}$ ）大約在 5 月至 9 月期間，主要風向來自西南方。在 2004 年 1 月至 2010 年 12 月，本地測量（已對風損等進行校正）年降水量為 589 毫米，略高於 1961-1990 年的平均值 559 毫米。計算出的 2004-2010 年平均年潛在蒸散量為 509 毫米。年降水量 25-30% 以雪的形式下降，而冬季的積雪期（1-4 月）有很大的變化。基於氣象和水文監測計劃，福斯馬克地區的長期水文平衡可以估計每年之降水量 560 毫米、年實際蒸散量 400-410 毫米、年徑流量 150-160 毫米。在福斯馬克之地表水和淺層地下水都是呈弱鹼性（pH 為 7-8），並有高濃度溶解鹽類成分。福斯馬克已劃分為 25 個湖泊流域和分集水區。這些流域內，地下水位在 1m 之內，於於風化層以下形成地下水流動系統，圖 11 說明地表分佈（在 0.5 公尺深度）的表土分佈和地表曝露的基岩區域，圖 12 為模擬的總風化層深度。圖 13 指出福斯馬克最大的河流及夏天時乾枯狀態，可看出福斯馬克最大的河流，屬於涓涓細流，於夏天則為乾枯狀態，且於福斯馬克地區為常見景觀，圖 14 表示至 2010 年 12 月 31 日於表土風化層和裂隙岩體內之平均地下水水位線，圖 15 顯示 MIKE SHE 流量模擬湖海平均水深與地下水位結果，可清楚看出區域地下水位和湖海於底部以上之水深，圖 16 顯示福斯馬克沿海盆地。

福斯馬克地表系統的水文地球化學（地表水、地下水、表土風化層土壤和沈積物的化學）各種現場調查和建模作業，包括研究海水和海域系統的水化學；陸域系統的化學性質，包括表土風化層土壤和沈積物地球化學和有關地表系統化學的綜合報告。已福斯馬克沼澤區碳溶解的研究，與持續長期水化學現場監測，包括地表水和來自表土風化層和裂隙岩體的地下水。



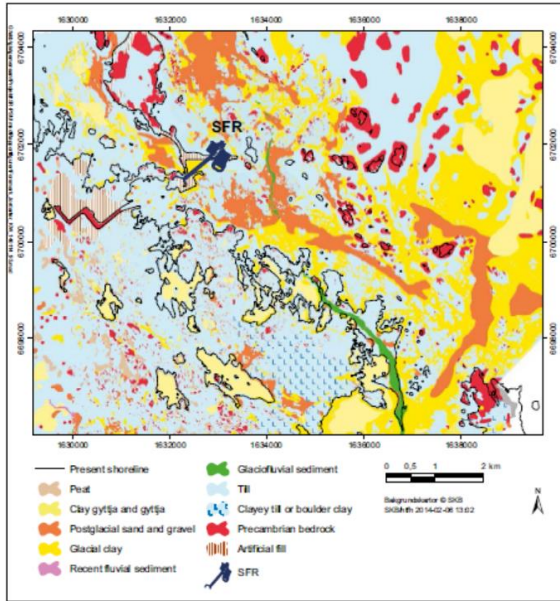


圖 11 地表分佈 (在 0.5 公尺深度) 的表土分佈和地表曝露的基岩區域

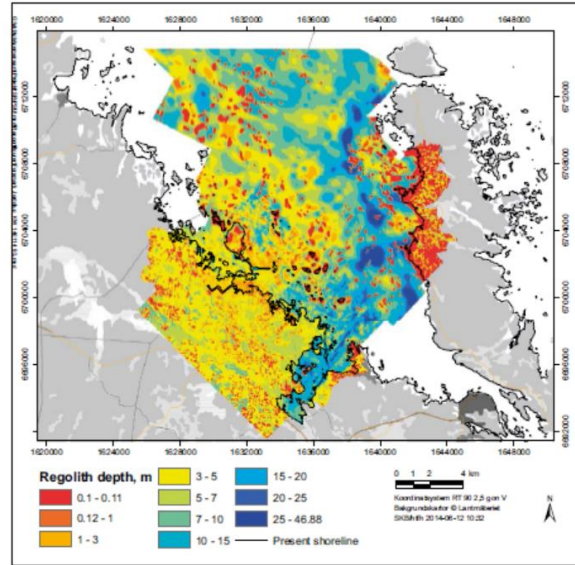


圖 12 模擬的總風化層深度  
說明：基岩露頭是顯示為具有 0.1-0.11 公尺的風化層深度的區域。



圖 13 福斯馬克河流及夏天時乾枯狀態  
說明：左圖顯示福斯馬克最大的河流，靠近 Bolundsfjärden 湖入口處，右圖為夏天乾枯期的溪流部分，這是福斯馬克地區的常見景觀。

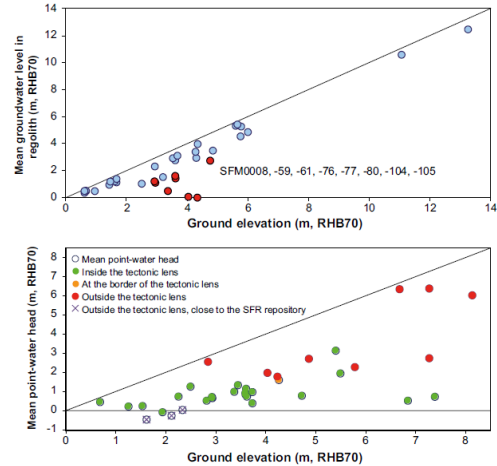


圖 14 至 2010 年 12 月 31 日於表土風化層層和裂隙岩體內之平均地下水水位線  
說明：上圖，紅點代表離群值，下圖為裂隙岩體。

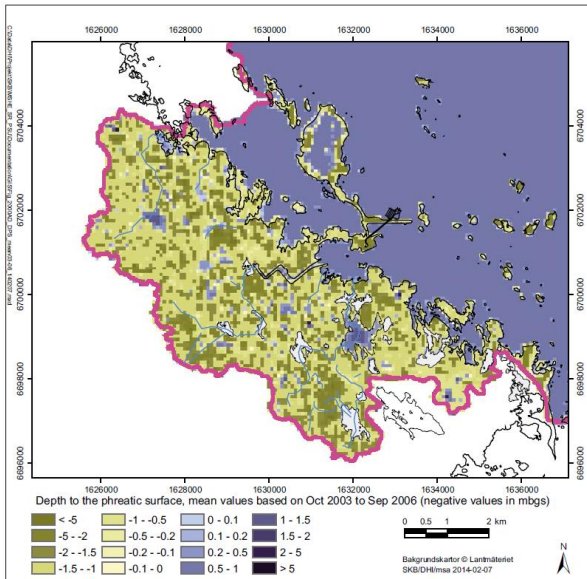


圖 15 MIKE SHE 流量模擬結果湖海平均水深與地下水位  
說明：地下水位負值表示低於地面，正值表示湖海於底部以上之水深。

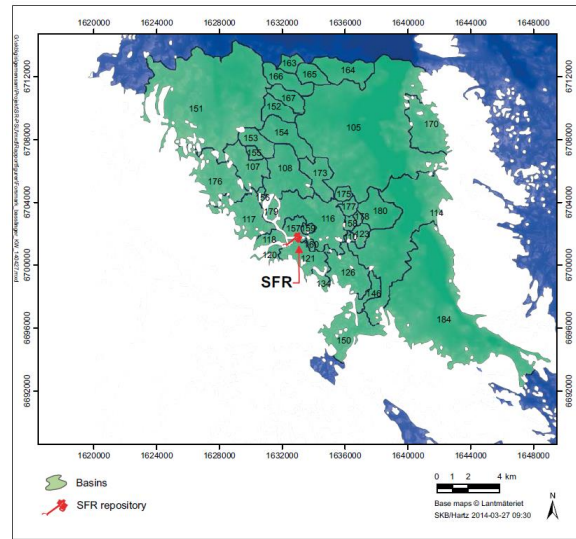


圖 16 福斯馬克外的沿海盆地(根據 DEM 劃分)  
說明：福斯馬克核電廠冷卻水流道的入口在盆地 120。

表土風化層中高含量碳酸鈣，影響地表水和淺層地下水的化學性質。具體來說，地表水和福斯馬克州的淺層地下水一般呈弱鹼性 (pH 7-8)，並且濃度很高的主要成分，是由海域和最近的冰川期間之冰川殘餘物沉積所造成的。碳酸鈣對場區陸域和湖泊生態系統的發展產生強烈的影響。例如，碳酸鈣沉澱和磷酸鹽共沉澱有助於福斯馬克地區之營養貧乏硬水湖泊之演變特徵的 (安德森 2010)。鈣的豐富供應也影響土壤形成和陸域生態系統結構發展。

### 3. 海域生態系統

福斯馬克沿岸海域生態系統為苦鹹水的條件、淺水、水深偏淡、阻礙光線的穿透和湧升。由於來自陸域的大量淡水流入海域，來自北海海域鹽度有限，致使海水的鹽度很低，動物種類多樣性是比較低的，因為很少生物體適於微鹹水的條件，這使得近岸區具有豐富的初級生產者。初級生產者主要由底棲生物如微藻類，維管植物和底棲藻類。動物群在硬質底層 (如圖 17 福斯馬克海域生態的紅色海藻和墨角藻) 和軟基質底層以碎屑食物 (如蝸牛和貽貝以死有機物質為食) 占主導地位。魚種在深海區由海域物種鯡魚 (*Clupea harengus membras*) 為主，而在近海海灣地區，無性系物種 (特別是歐亞鱸魚, *Perca fluviatilis*) 為主。

比較海菜採樣與用 GIS 模型模擬海域盆地生物量之結果表明，GIS 模型預測總生物量



良好，比實地調查的生物量高 1.4 倍。福斯馬克地區淺海灣蘆葦地圖繪製數據已被用於理解海域盆地轉變為湖泊和濕地生態系統之認知。至於淡水湖泊生態系統，非生物和生物作用都會影響海域生態系統中元素的傳輸和累積（圖 18）。然而，於碳收支模擬表明，在海域生態系統中，元素的傳輸和累積係由平流通量所主導（特別是在開放水域和更多的海域盆地）。相較而言，生物通量（例如海域盆地內的初級生產）不那麼重要。

劃定的海域盆地建模顯示，整個海域的淨生態系統生產（NEP）平均值為正值，即初級生產量高於分解。特別於海岸線附近的淺海區域具有正 NEP 值，而其他的海域則為負值 NEP，主要是由於在淺海地區有大量的底棲藻類。



圖 17 福斯馬克海域生態的紅色海藻和墨角藻

#### 4. 湖泊生態系統

福斯馬克區域湖泊小而淺（平均深度通常小於 1m），它們的特徵是具有高濃度的鈣和低濃度的營養鹽，為貧營養硬水湖泊。湖底海藻茂密，初級生產者主導生物量，所有湖泊都被蘆葦帶所包圍。在福斯馬克河川都很小，夏季很多流呈乾枯狀態。初級生產者於許多湖泊大量繁殖，對於一些較大的湖泊，其初級生產者之碳通量比周邊集水區大。非生物和生物作用都會影響湖泊生態系統中元素的運輸和積累（如圖 18）。

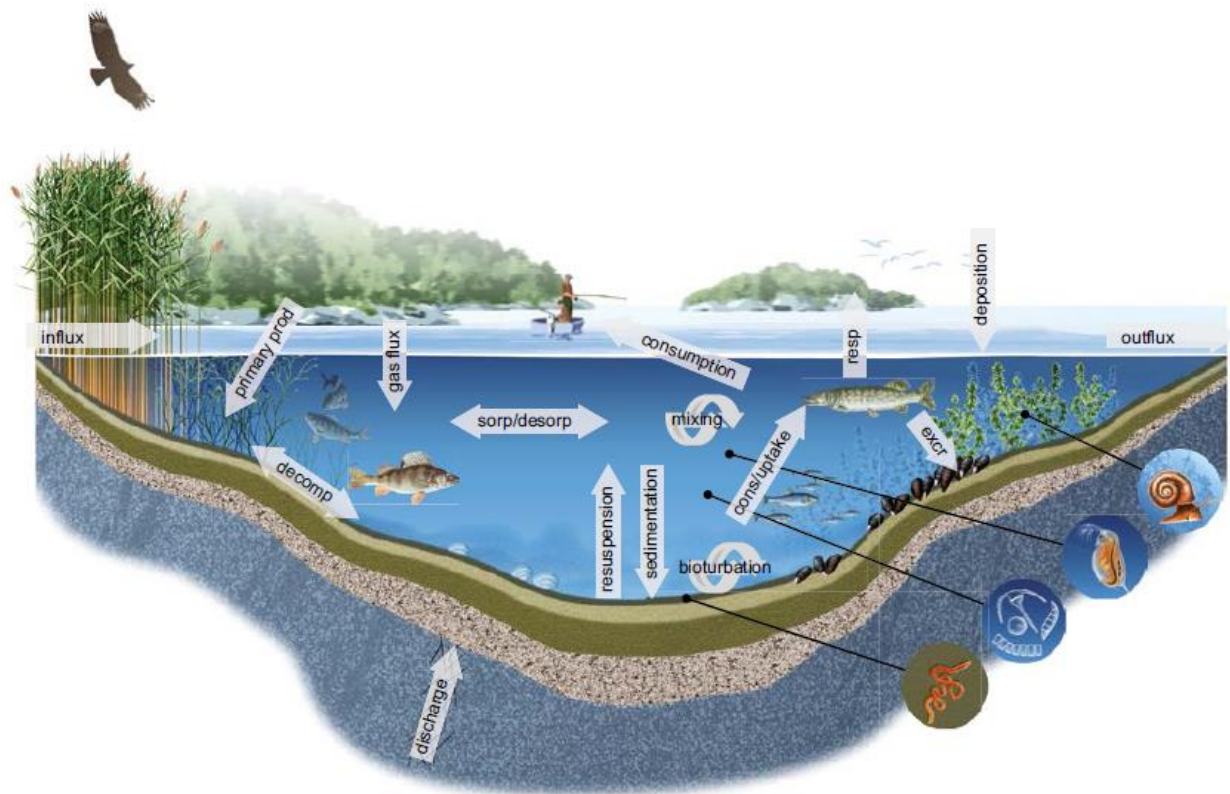


圖 18 功能群體和重要通量影響水域（即湖泊和海域）生態系統元素傳輸和累積概念模型  
 說明：Influx 流入和 Outflux 流出代表通量，從/到鄰近的海域或陸域系統（用於湖泊系統）  
 和相鄰的海域盆地（用於海域系統）。右邊的符號是水域生態系統中的動植物圖例。

## 5. 陸域生態系統

陸域植被受地形，地貌特徵和人類土地利用所影響，福斯馬克大約四分之三的土地面積被森林覆蓋，以蘇格蘭松樹為主（樟子鬆）和挪威雲杉（*Picea abies*）。由於鈣質的表土風化層，現地土層的特點是草本植物、闊葉草和許多蘭花物種。石灰質的影響是烏普蘭（Uppland）東北部典型特色，並導致了豐富的沼澤地。濕地覆蓋較大流域面積的 10-20%，在一些地方集水區高達 25-35%。濕地的主要組成部分是針葉林沼澤和開放沼澤的混合（如圖 19），林地是由針葉林為主。陸域生態系統中最大的碳通量是由初級生產者吸收攝取；在所有調查地區，植被被作為碳固定的匯點。林業在該地區擁有悠久的歷史且砍伐頻繁。耕地和牧場地點接近早期人們的定居處。牧場曾經非常興盛，但目前是屬於廢棄的農田一部分。目前唯一的農業活動位於 Storskäret，其活動主要是肉製品生產和植物生長期間，牛在戶外吃草。冰期後的隆起作用與地勢平坦地區的結合，導致在該地區海岸線迅速位移。其結果是，當代土地生態系統是年輕的，海底新領土不斷湧現，

形成新的湖泊和濕地。圖 20 表示在濕地生態系統和沼澤區排水耕地之重要通量影響元素傳輸和累積的概念模型。



圖 19 福斯馬克地區濕地中蘆葦為優勢物種

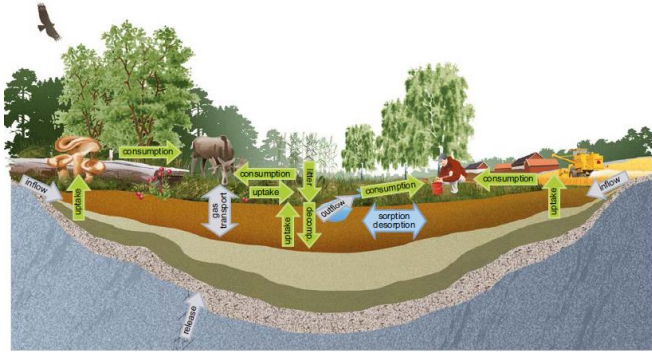


圖 20 在濕地生態系統和沼澤區排水耕地之重要通量影響元素傳輸和累積的概念模型

## 6. 井和水資源管理

Östhammar 市的所有公共供水都仰賴地下水，最鄰近的公共供水位於 SFR 東南部幾公里的 EskerBörstilåsen，根據市政綜合規劃，未來不再提供公共用水。目前 Östhammar 居民中 30% 從私人水井獲得飲用水。福斯馬克核電場的所有者曾鑽過多個鑽孔基岩可能會有水源，但這些井口現在已被棄置。目前在沿海地區的私井（在淺層含水層中挖掘或在基岩中鑽探）。井水分析顯示水質多變化，有些井可作為飲用水，但有些則否。因此，無法作為飲用水供應的水井，用於其他目的，例如田園灌溉。

根據井密度（挖井和鑽井）的區域分析，當前區域井密度有所不同。取決於分析區域的大小和位置，每平方公里介於 0.2 至 2 口井。以不同範圍不同分區區別，在北部接近 SFR 地區（面積 400 平方公里），目前的井密度為 0.2-0.9 井/平方公里，烏普蘭（面積 3300 平方公里）為每平方公里 0.5-2 井。

根據瑞典地質調查局更新數據的分析，在烏普蘭北部的基岩鑽井，有 5000 多口私人井，一般的井深為 60 公尺。依據 SFR 設施處附近之水文地質試驗，在 0-100 公尺深度區間之中值水力傳導係數為  $1.5 \cdot 10^{-7}$  m/s。對於 60 公尺的基岩深度，等效最大水量是 1,900 L/h（超過 46,000 L/d）。福斯馬克發電廠當前的供應水，包括來自 SFR 的地下水分流、從大海到福斯馬克核電廠的冷卻水運河，使用 Bruksdammen 湖（西南方向約 4 公里），作為發電廠的供水系統，還有一座地下水排水系統（Werner et al. 2013a）。目前沒有土地改良



或排水工程記載在公共記錄內，除了森林中淺溝排水（溝渠是為排水目的而建造）及為了降低 Eckarfjärden 湖水位之排水。該地區已觀察有一些小型的天然泉水，例如，Nilsson 和 Borgiel。這些泉水都沒有登記在公共記錄中，而且沒有被使用。

## 7. 人口和土地使用

SFR 附近有 20 平方公里的地區有假日住宅但沒有永久居民。以前，土地利用主要由林業，木材開採是該地區人類行為造成生物質之質傳外流的方式。唯一的農業活動目前位於 Storskäret，主要是肉類生產和在有牧草期間之放牧。

福斯馬克核電廠是大型工業活動，屬於不受干擾區。由於當地人口少及離主要城市地區之區域和距離相對不便，該地區主要的休閒活動是狩獵，只是偶爾用於休閒。

### 2.2.2. 場址未來條件與系統演變發展

場址條件與系統演變發展係說明驅動場址演變發展的主要作用、氣候變化和氣候有關作用、地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統。本部分有很大內容是基於 SR-Site 安全評估之相關分析，以下說明之：

#### 1. 驅動場址演變發展的主要作用

福斯馬克地區的長期發展取決於兩個主要的和部分相互依賴的地區因素：氣候變化和海岸線位移。這兩個因素結合在一起，強烈影響一系列過程，從而決定了生態系統的發展、未來放射性核種傳輸、輻射曝露以及產生的劑量和風險之重要條件。這種作用之例子是侵蝕和沈積、地下水補注和排放、土壤形成、初級生產和有機物質的分解。

#### 2. 氣候變化和氣候有關作用

福斯馬克地區過去和未來預計的氣候變化詳細見 SKB TR-13-05 安全評估之氣候和氣候有關議題之報告（SKB 2014b）。4 種未來氣候條件描述定義（見下文）。前兩個分別用於 SR-PSU 安全評估報告之主要情節分析。

- 全球暖化氣候條件下
- 早期的冰緣氣候條件下
- 擴展全球暖化氣候條件下
- 在 Weichselian 冰期循環氣候條件下

前三種情況被定義為跨越有關未來氣候的演變：低（早期冰緣氣候條件）、中（全球暖化氣候條件下）和高（擴展全球暖化氣候條件下）人類碳排放量的範圍內。然而，應該指出的是即使在低的人類碳排放，早期冰緣氣候條件不太可能發生，並且它已被列入，以確保這種可能性是不被忽視。該 Weichselian 冰期循環氣候條件下，表示為重建末次冰期循環條件。圖 21 顯示推估的未來全球年平均近地表氣溫，圖 22 福斯馬克的氣候條件描述(全球暖化氣候條件下)，圖 23 福斯馬克的氣候條件描述(早期的冰緣氣候條件下)，圖 24 福斯馬克的氣候條件描述(擴展全球暖化氣候條件下)、圖 25 從現在到未來（100,000 年後及 10,000 年後）之海平面演變。

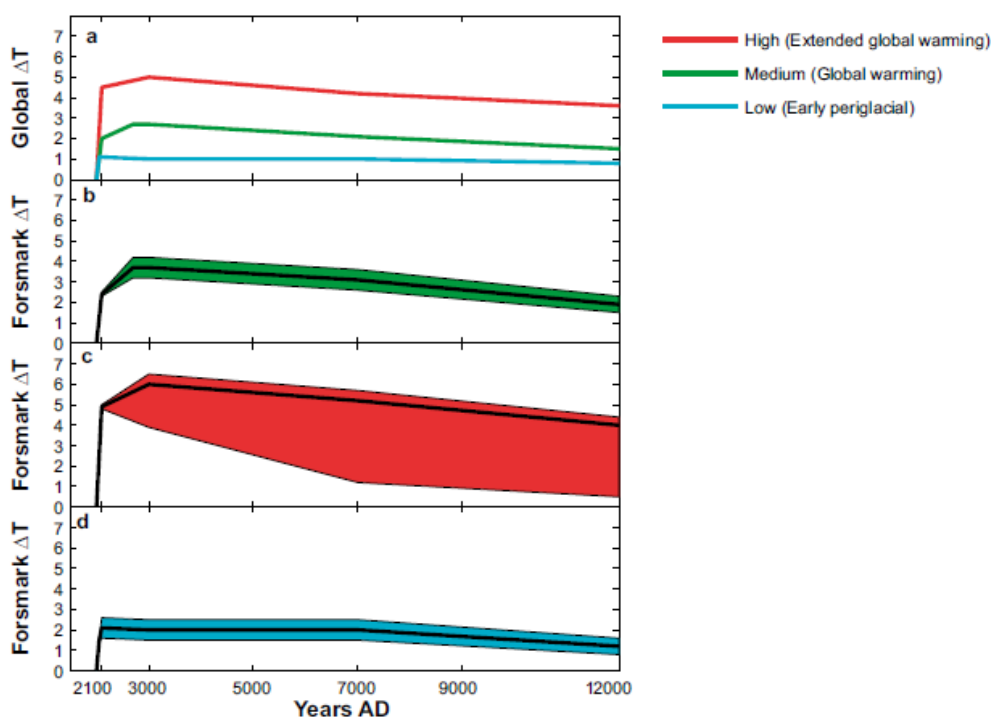


圖 21 福斯馬克地區與全球未來年平均近地表氣溫比較圖

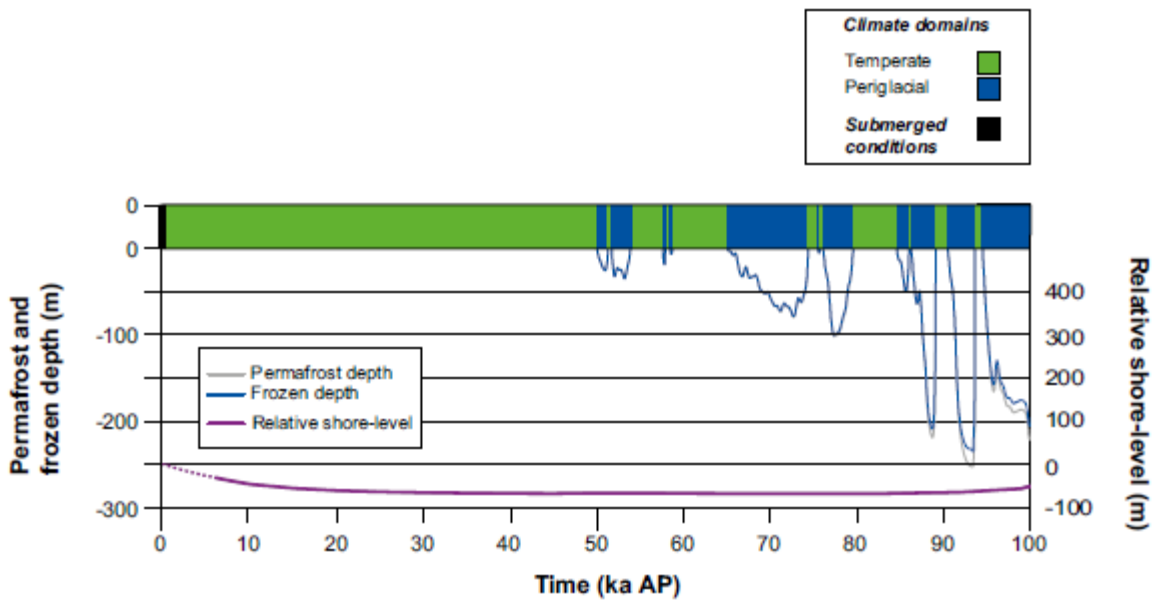


圖 22 福斯馬克的氣候條件描述(全球暖化氣候條件下)  
 說明：全球暖化氣候條件下，作為氣候域和淹沒時期之時間序列

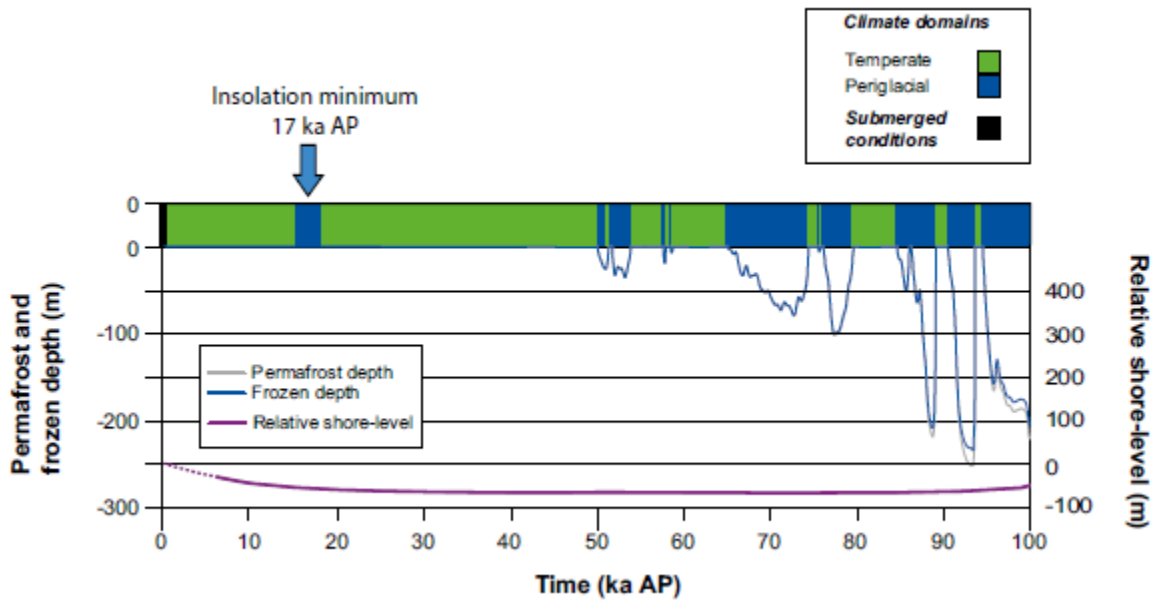


圖 23 福斯馬克的氣候條件描述(早期的冰緣氣候條件下)  
 說明：早期的冰緣氣候條件下，作為氣候域和淹沒時期之時間序列

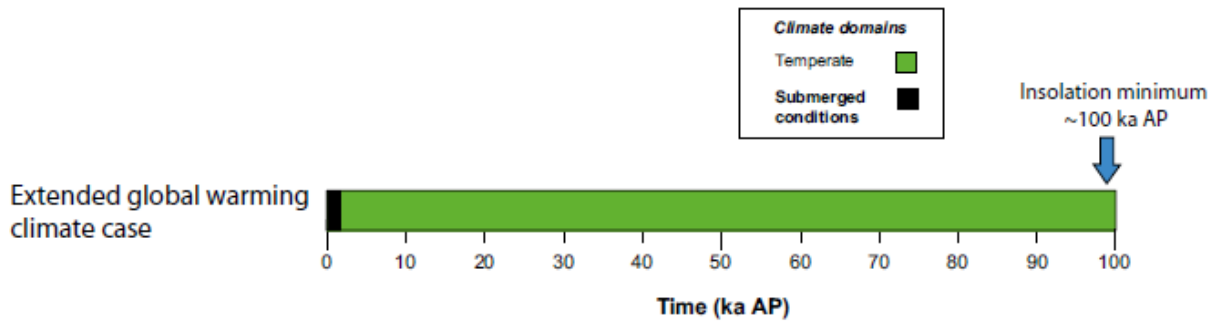


圖 24 福斯馬克的氣候條件描述(擴展全球暖化氣候條件下)  
 說明：擴展全球暖化氣候條件下，作為氣候域和淹沒時期之時間序列

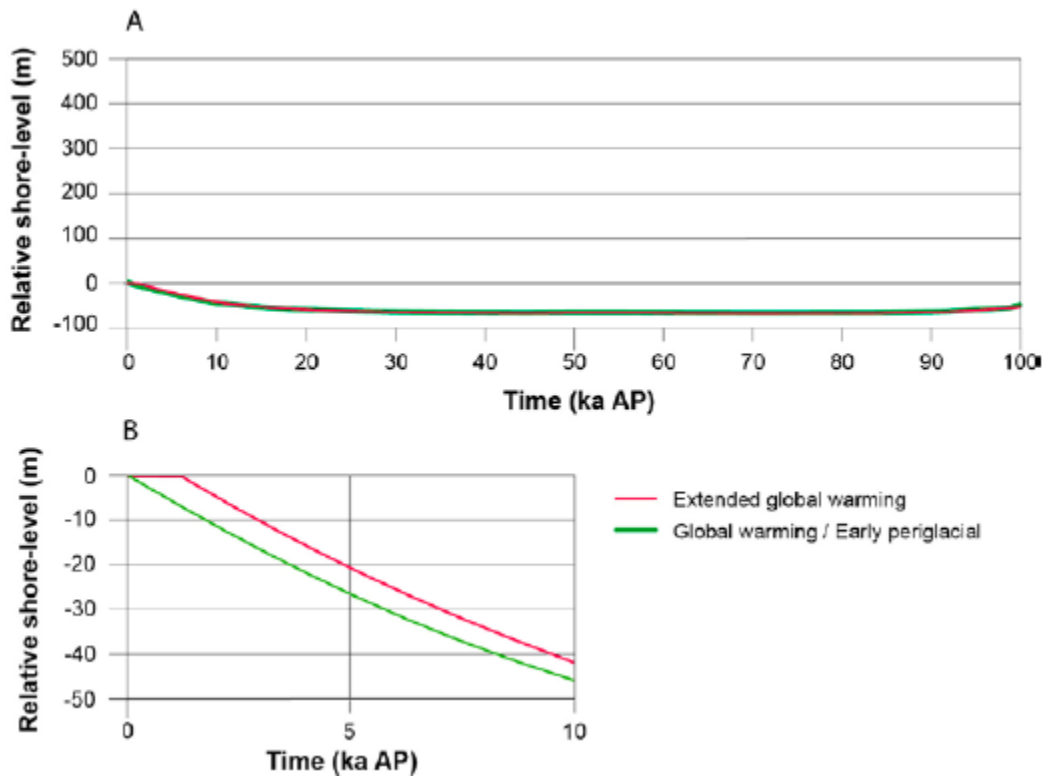


圖 25 從現在到未來之海平面演變：(A)現在到 100,000 年後；(B)現在到 10,000 年後

### 3. 地形和表土層

在 SR-PSU 之地景幾何形狀的連續變化是由風化層湖泊發展模式 (RLDM) 模擬得到。RLDM 分為海域模塊和湖泊模塊。海域模塊開始於當區域已經開始融冰作用，初始條件由風化層深度和地層模型中產生的。隨後，於後冰期沉積物積聚，或再懸浮，這取決於當地環境隨時間的改變。湖泊模塊開始於海盆被隔離，由粘土-腐殖黑泥的累積和沼澤植被的擴大進入湖泊（和隨後累積）所描述。從海域和湖泊模塊隨時間變化的輸出的組合，產生表

面地質的三維空間結果。由這些預測結果及圖面顯示，例如水深、海岸線存在和湖泊流域的位置，可以生成表土風化層和植被類型存在的厚度。

在目前的陸域地區，泥炭覆蓋面積的比例將大幅增加淺湖被填滿，低窪濕地被一層泥炭覆蓋，新的湖泊將會當現在的海底抬起時形成，這些湖泊將充滿腐質黑泥和泥炭，未來作為農業用地的比例將大幅增加。圖 26 為西元 11000 年之未來地面風化表土層分布蝕岩的表面分佈，圖 27 為西元 3000 年之未來地面風化表土層分布蝕岩的表面分佈。比較兩張圖清楚地表明，由於上述過程而發生了相對較大的變化，可能最明顯的發展是泥炭覆蓋地區的增加，主要出現在目前海岸線以外的新陸域地區。

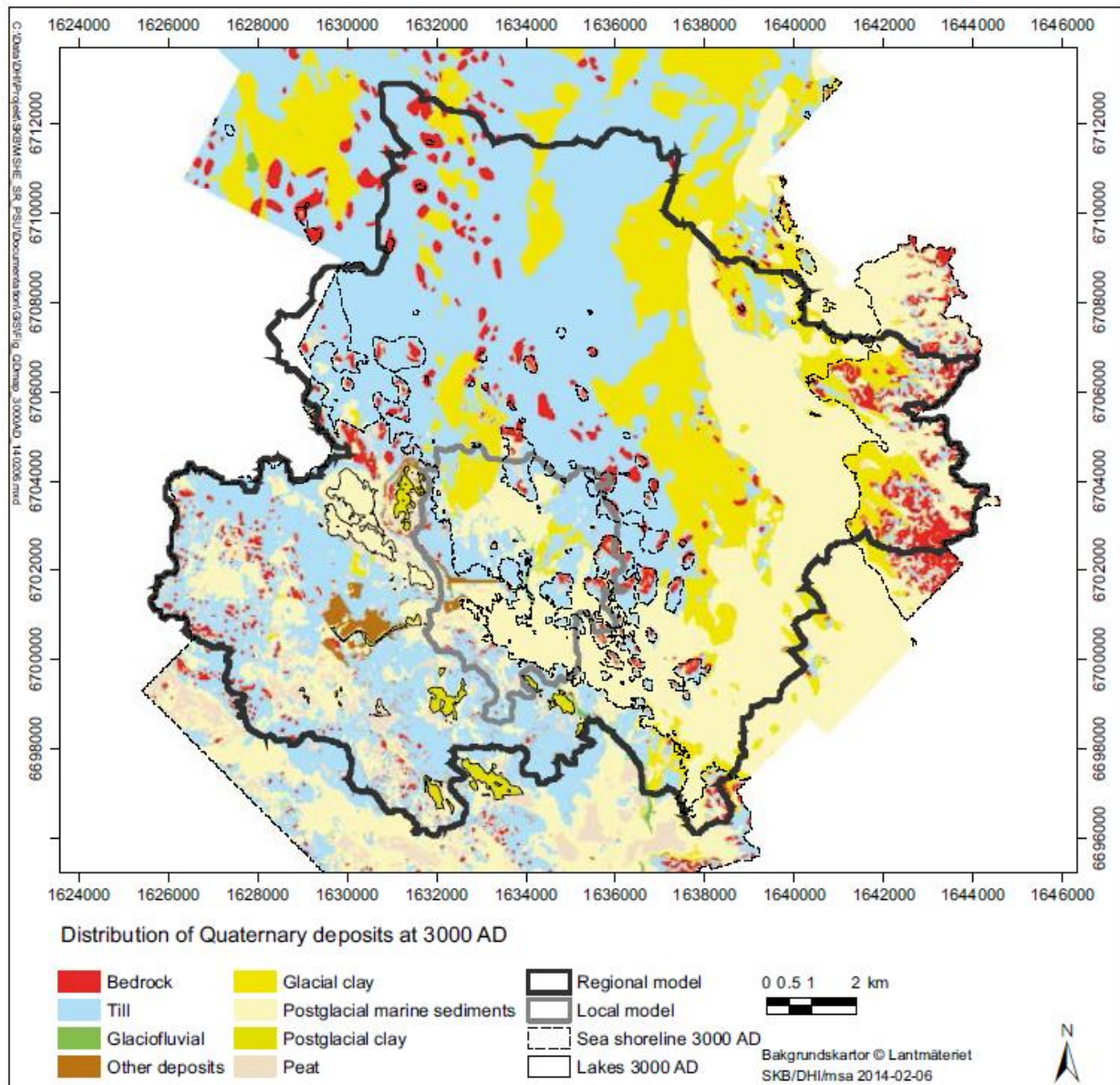


圖 26 西元 3000 年之未來地面風化表土層分布蝕岩的表面分佈



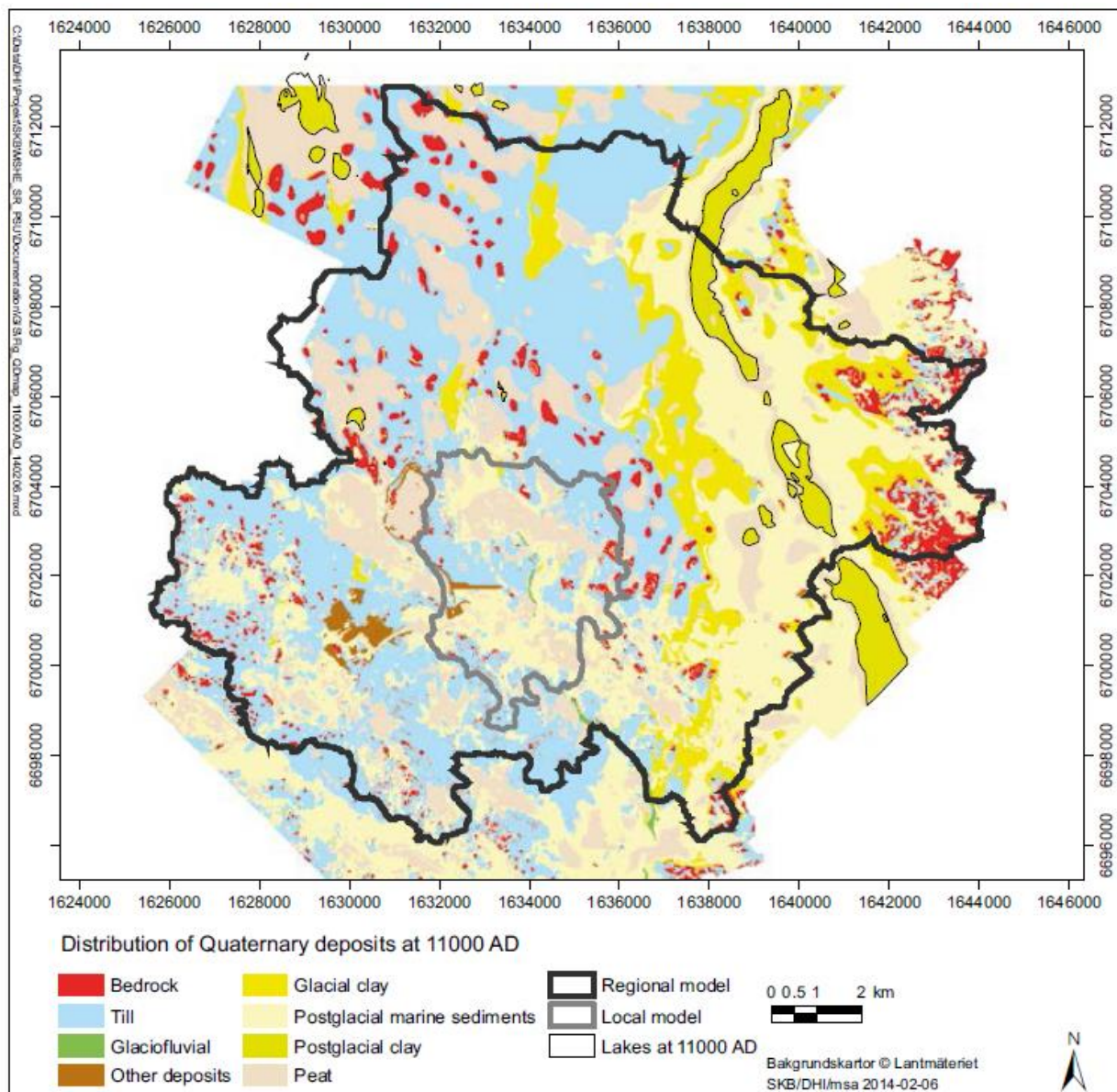


圖 27 西元 11000 年之未來地面風化表土層分布蝕岩的表面分佈

#### 4. 水文和化學

目前和未來的水文和近地表水文也將受地景發展和氣候變化所影響。例如，海盆地之間的水交換將隨著土地上升和海峽變窄。對於給定的區域，湖泊充填淤積將影響蒸發量（減少）和逕流（增加）。由海域變陸域過渡期間之海岸線變化將影響著岩石的上部水力梯度及地下水位。然而，氣候變化對地表水文影響更大，潮濕和溫暖的氣候，或是寒冷的氣候冰緣，預計將有水文通量變化會比其他地景規模進程有更大改變作用。上述結果是從水流模型得出的海域盆地和陸域區域，分別由 MIKE 3 FM 和 MIKE SHE 模式模擬得到西元 2000 年、西元 3000、西元 5000 和西元 11000 年之特定的區域的水流模型，使用氣象數據對於

場址點、風化層深度和地層進行描述。圖 28 為 MIKE SHE 計算西元 5000 年的風化表土層年平均垂直水頭差，它表明地下水流向上或向下)，圖 29 所示為通過永久凍土區域的活動層和不同類型的層間不凍層(taliks)的示意圖，冰緣環境的冰凍的地面水文情況受冰、雪影響，特別是凍土形式是冰緣的典型特徵系統控制水在地形上的分佈和流向。

目前在福斯馬克地區觀察到的化學條件是過去地景發展、過去和現在的土地利用以及人為投入的結果。正在進行的海岸線往內陸方向，製造海岸的空間梯度，代表了時間軸地景發展。在福斯馬克的模擬區域中發現的現有化學條件，代表自上次間冰期以來約 10,000 年的時間跨度，這意味著今天的空間梯度可以外推並轉化為一系列的未來地景發展。有幾個因素會影響化學環境的未來發展，包括：外部非生物因素如土地隆起、氣候和大氣沉降物，而內部因素如初級生產和土地使用，可能通過反饋機制產生深遠的影響。

方解石溶出對地表水、沈積物化學和在農業土壤上的定量影響很難預測。然而，通過對比水和土壤化學與缺乏方解石（即 Laxemar）影響的類似沿海地區可以估計方解石外洗效果的估算。這樣比較可表明湖水 pH 值可能會減少不超過一個單位。同樣的，泥炭沼澤、耕作粘土和有機土壤 pH 值可能會減少不超過 1.3 個單位。從長遠來看，這會對共沉澱和初級生產在湖泊和沼澤生態系統等作用產生影響。溶解的鈣和磷，以及 pH 值和鹼度會下降。福斯馬克地區的地表水質將趨近於棕褐色湖泊和內陸小溪狀態。這可能意味著濃度更高總有機碳（TOC）以及總磷的濃度增加。如未來矽酸鹽岩中的方解石耗竭時，矽酸鹽會增加。也釋放來自這些類型礦物風化的其他主要成分，例如鋁和鈉，鎂，鈣在未來的化學環境中被認為是濃度增加的，以及微量元素的釋放摻入大量礦物質中，例如 U，Th，Zr 和稀土元素。

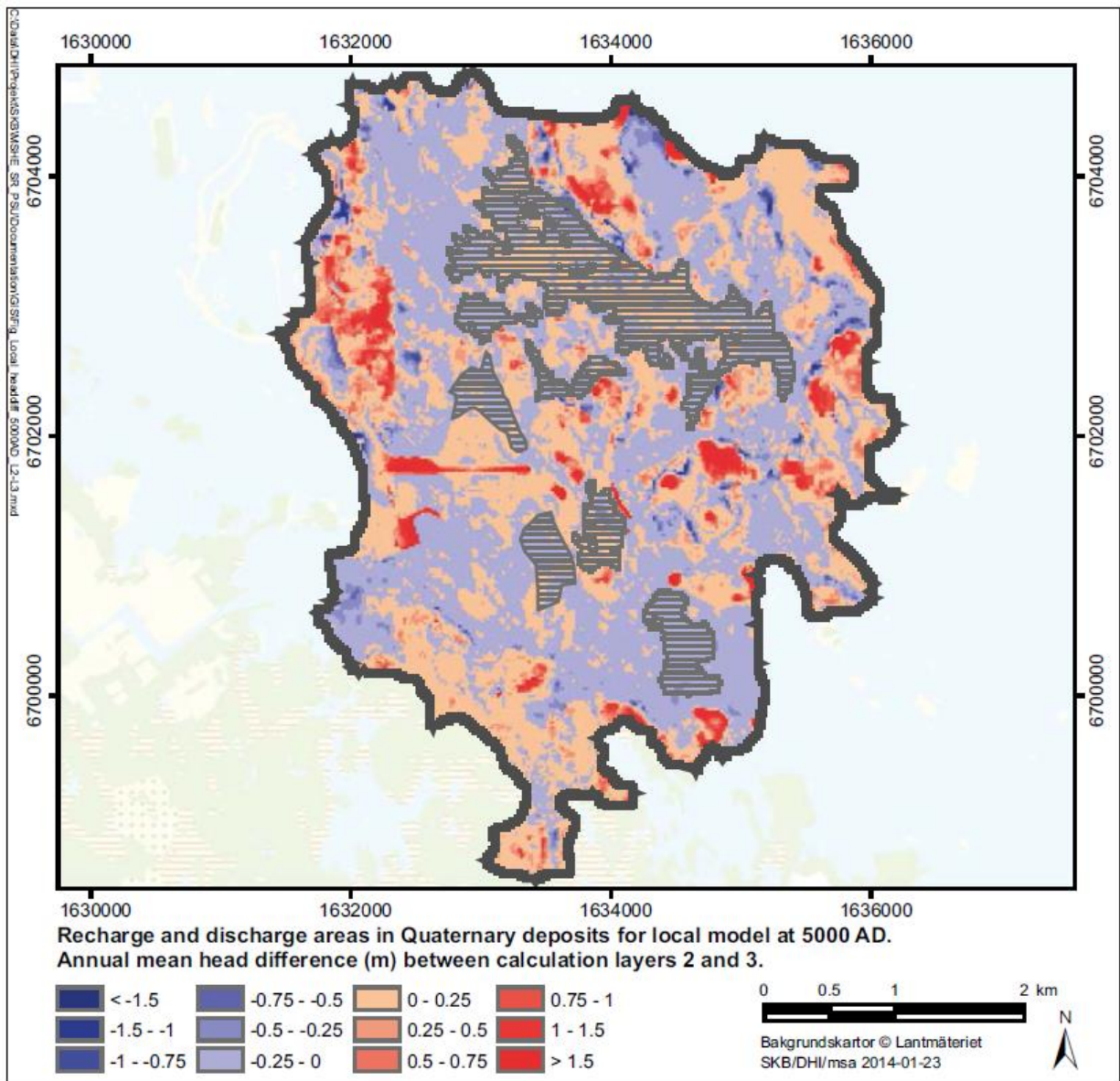


圖 28 MIKE SHE 計算西元 5000 年的風化表土層年平均垂直水頭差



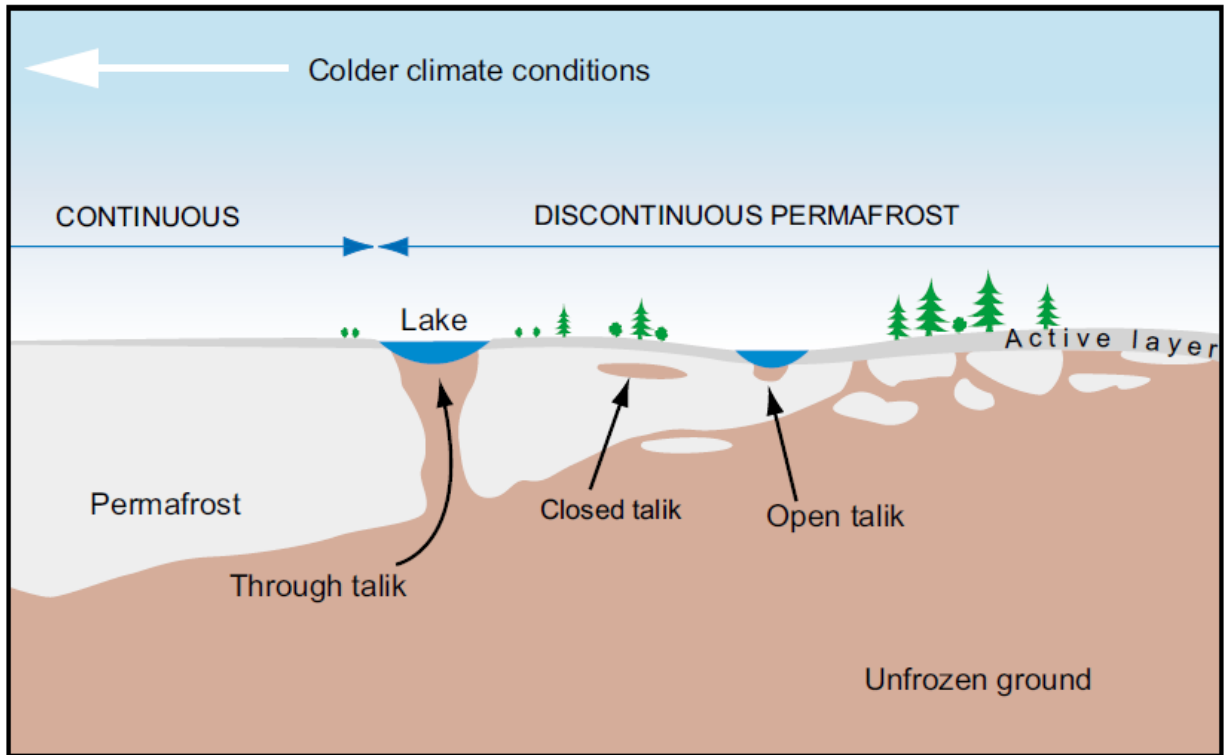


圖 29 通過永久凍土區域的活動層和不同類型的層間不凍層(taliks)的示意圖

## 5. 海域生態系統

### (1) 在溫和條件下發展

假設未來的溫帶海域生態系統與目前的類似。然而，預測的非生物變化將改變官能團的大小以及生態系統內通量的大小。主要的變化將是當一個生態系統，在更深的近海區域，從被遠洋初級生產者支配轉變為底棲生物主要生產者，以及海底的提升。然而，在主要產生這些變化的棲息地很可能仍然與目前現有的較淺的沿海地區相似。目前，福斯馬克的整個海域都是淨自養的，在長期的未來，海域生態系統將繼續是自淨的。

根據建模，福斯馬克的海域幾乎是從公元 11000 年的模型區域完全消失，其餘盆地的鹽度將完全消失降至 2 至 3 ppm，波羅的海之海灣與現狀一致。西元 25,000 左右波羅的海將與波羅的海海灣隔離，成為一個大型的淡水湖泊。

### (2) 全球暖化的影響

在全球暖化的條件下，降水量增加，溫度升高可能會影響與徑流有關之海域地區營養物和顆粒物的負荷。減少海冰持續時間和範圍，增加水溫，增加淡水投入，風應力的變化會通過影響垂直方向影響營養供應的速率混合和上湧。垂直混合和上湧的變化將影響浮游

植物的種類組成，這將反過來影響浮游動物群落和魚的生產力。

在夏季，大多數沿海地區的溫躍層可能會建立在更深的水深。因此，溫水物種會以犧牲冷水物種為代價擴大棲息地。淡水物種的類似傳播也是以犧牲具有較高鹽度的物種為代價。海域物種的範圍和生物量可能會減少，同時淡水物種的範圍和生物量將會增加。在海域的情況下哺乳動物，在冬季冰蓋覆蓋程度的減少將導致生殖能力下降。

### (3)冰緣氣候

在未來的冰緣氣候下，由於營養條件的影響，初級生產可能是更高，更低或類似於現狀。隨著環境變得越來越冷，目前有一些溫帶物種它們的耐冷性可能會受到限制，並且在該地區會變得更稀少或不存在，而極地（北極）物種可能擴展到該地區，目前的極地物種變得更加豐富和新物種進入現場。但是，對於海域地區，預計在福斯馬克會出現相同類型的高等生物，雖然物種豐富度和成分可能會改變。例如，海域哺乳動物已經存在於波羅的海，但生長季節將會縮短，並且冰會提供海域哺乳動物繁殖的棲息地增加，因此其數量可能會增加。在最近的間冰期，波羅的海的鳥類動物種群一直非常穩定，未來可能會類似。海上動植物可能會占主導地位，並表現出更高程度的物種能夠適應寒冷的氣候。

## 6. 湖泊生態系統

### (1)在溫和條件下發展

海灣可以在早期與海隔離，然後逐漸變成湖（圖 30），或者可能仍然是海灣，直到海岸線位移將其變成濕地。從海中隔離後，湖泊生態系統逐漸成熟，包括隨後的發育過程自周邊集水區或物質在湖內產生沉積和沈積源。因此，大多數湖泊的長期終極命運是不可避免的填補轉化為濕地。

### (2)全球暖化的影響

由於全球暖化情景下的冬季氣溫將在 0 到 6°C 之間有所變化，最多可能冰蓋會有短時間水期。這也對湖泊中的其他非生物和生物參數有影響，例如混合、光照條件、生物質和生產。徑流模擬增加，這會影響通過改變投入來改變養分濃度，但也會改變湖泊中的停留時間。在湖中，如混合和缺氧，可能會影響未來的營養物質濃度。在大多數湖泊中，由於全球暖化溶解有機碳（DOC）有望增加。

### (3)冰緣氣候

隨著環境變得更冷，一些溫帶物種可能會受到限制，並且在該地點會變得更稀少或不  
存在，而極地（北極）物種可能在該地區增加，目前極地物種變得更加豐富，新物種進入  
場區。未來冰緣氣候，於周圍的湖泊將沒有蘆葦。湖泊可能被包圍由苔蘚植物或其他維管  
植物而不是蘆葦。

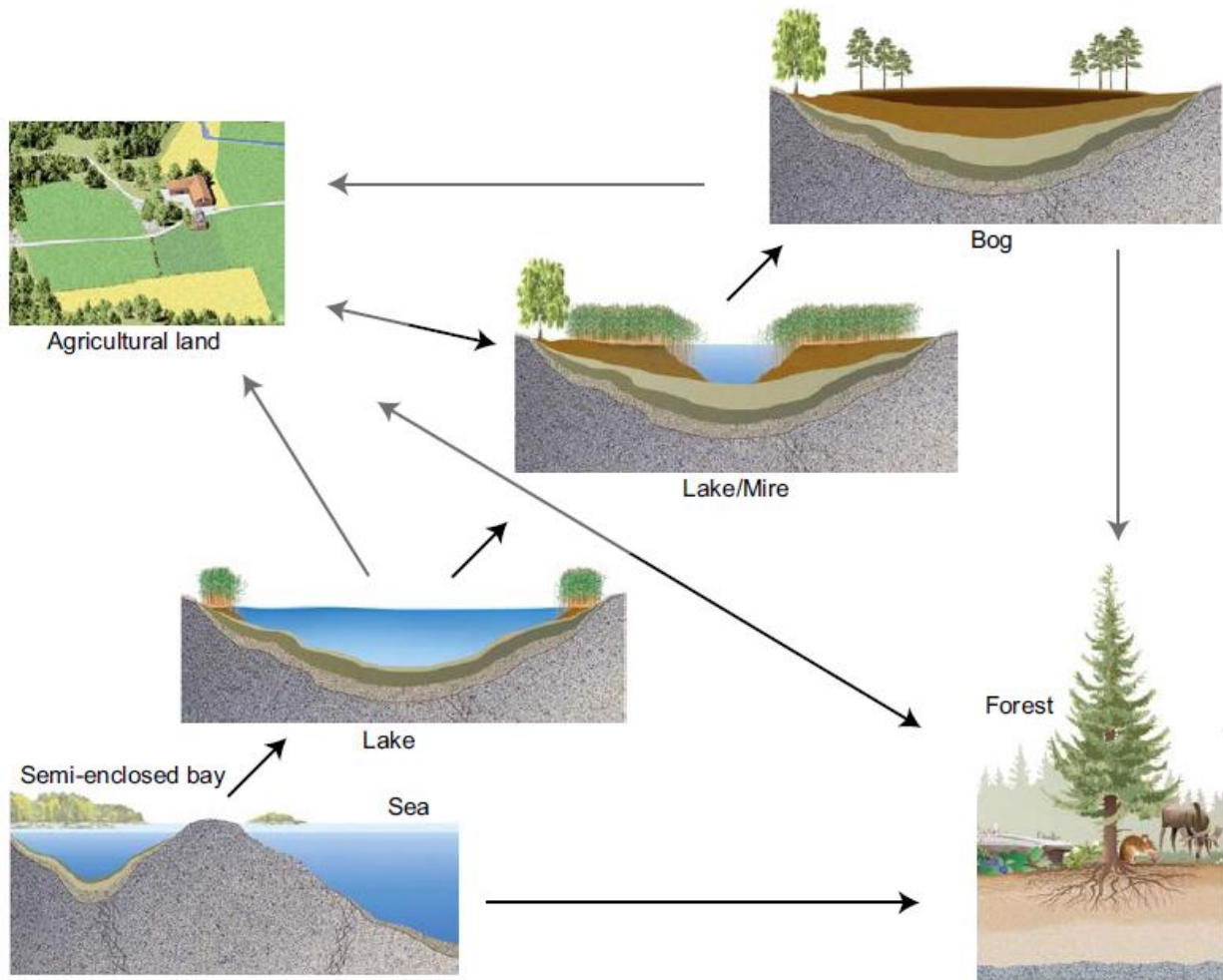


圖 30 於某些階段的主要生態系統示意圖

## 7. 陸域生態系統

### (1)在溫和條件下發展

福斯馬克地區有不同的陸域生態系統類型，其性質不同如主要的功能群、生物量、淨  
初級生產（NPP）和地下水可用性。基於水文模型，沼澤已經被確定為最有可能因為地下水  
流入帶入放射性核種，由於陸域生態系統類型其位於低窪地區。

沼澤基本上通過三種不同的過程形成：陸域化、沼澤化、初級沼澤形成。陸域化是通過沉積填補淺水湖泊並建立植被。沼澤化是泥炭土或低透水土壤在沼澤形成，經由改變水文條件或擴大沼澤。初級沼澤形成是泥炭發展在去除水或冰後所出現之新土壤上。所有這三個過程都可能發生在福斯馬克地區，但陸域化可能代表目前所調查之泥炭地發展的最大面積區域。

這種形成，蘆葦是主宰這種模式，蘆葦是地球化過程中占主導地位的先驅，也見於沼澤內陸化的沼澤區。福斯馬克地區的典型沼澤地其特點是 pH 值高，並且在轉變成時會經歷自然的長期酸化並轉化為更多類沼澤地（圖 31）。

### (2)全球暖化的影響

暖化的氣候通常意味著在短期內潛在的生物量和淨初級生產者增加，以及碳減少儲存，這些情況取決於氣候變化的大小。LPJ-GUESS 動態植被模型模擬全球暖化氣候下的植被條件。建模結果表明福斯馬克將被闊葉樹支配，將具有較大的生物量，但與今天的淨初級生產者相似。其他建模方法，例如提出了森林生產力的氣候響應和生物量的增加，他們還強調在濕地之碳動態的不確定性。溫度升高，蒸發散量增加，可能會降低地下水位和增加異營呼吸。

### (3)冰緣氣候

目前在該地的溫帶物種可能受其耐冷性限制，並且將變得更加罕見或者不存在，而極地（北極）物種可能從現有極地物種的地區擴展，和新物種進入處置場區。

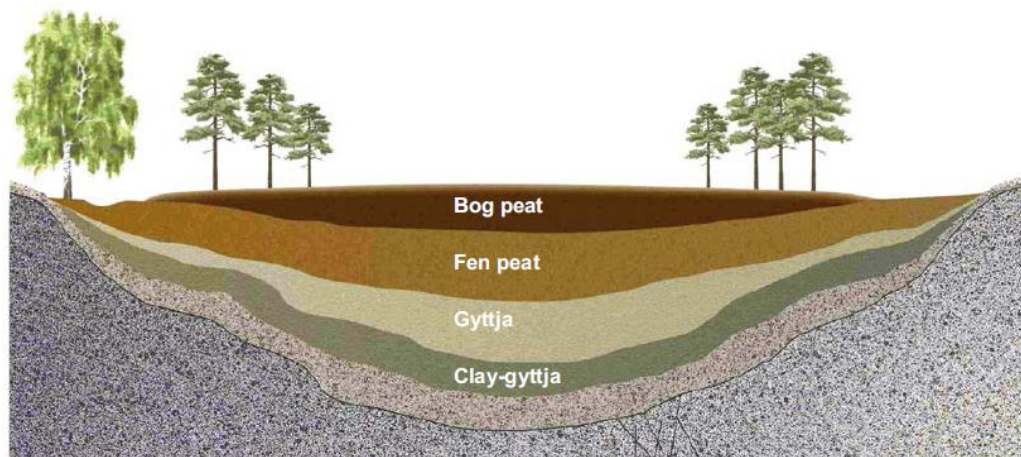


圖 31 隔絕的海灣形成沼澤地層之不同演替階段示意圖

### 2.2.3. 模擬地景發展與土地利用

安全評估的時間跨度很大，有必要對地景特性調查之已知重要潛在影響因素。首先是現在簡要描述地景及其成分。隨後，描述地景配置重要的不同因素，例如地景的人類利用、海岸線位移和氣候。然後利用未來地景發展模式（LDM）詳細闡述其潛在的配置。未來地景配置是基於當前地景的知識、歷史土地利用、歷史數據、海岸線位移的地質證據和氣候模擬。

在 SR-PSU 中，評估時間範圍為 10 萬年，但地景最大的變化是發生在西元 20,000 年前。在此期間，沿海地區變成了內陸域區，大部分湖泊已經發展成為沼澤。因此，建模的時間框架 LDM 從今天到西元 20,000 年。這個時期是用不同的假設來建模，以全球暖化氣候為例說明土地利用對地景的潛在影響，意味著相對於當前氣候的適度變化。此外，在 SR-PSU 氣候中案例，還有另外兩個案例，用 LDM 作為一種冰川氣候來說明發生在西元前 17500 年左右，盛行於 3000 年，並延伸到全球氣候變暖可能達到西元 3000 年左右的最高溫度（氣候報告）。因此，LDM 被用來說明五個變異條件的地景發展：1) 土地利用類似於現在，2) 密集的土地利用，3) 沒有土地利用，4) 沒有土地利用的冰緣氣候，5) 全球暖化加劇，土地用途與目前相似。

模擬地景發展與土地利用，包括：福斯馬克地景、生態系統和現狀地景（如圖 32）、目前的土地使用情況、歷史地景、未來地景、未來耕地分配、未來的濕地和土地利用、氣候變化、地景發展模式模擬（如圖 33 之耦合的表土風化層-湖泊(-生物相)之發展模型(RLDM)的概念流程圖、圖 34 至圖 41 之全球暖化變異後之地景發展示意圖）、評估未來地景的不確定性，以 10 項論點分別描述模擬地景發展與土地利用狀況。詳細可參考 SKB TR-14-06 之生物圈整合報告書。



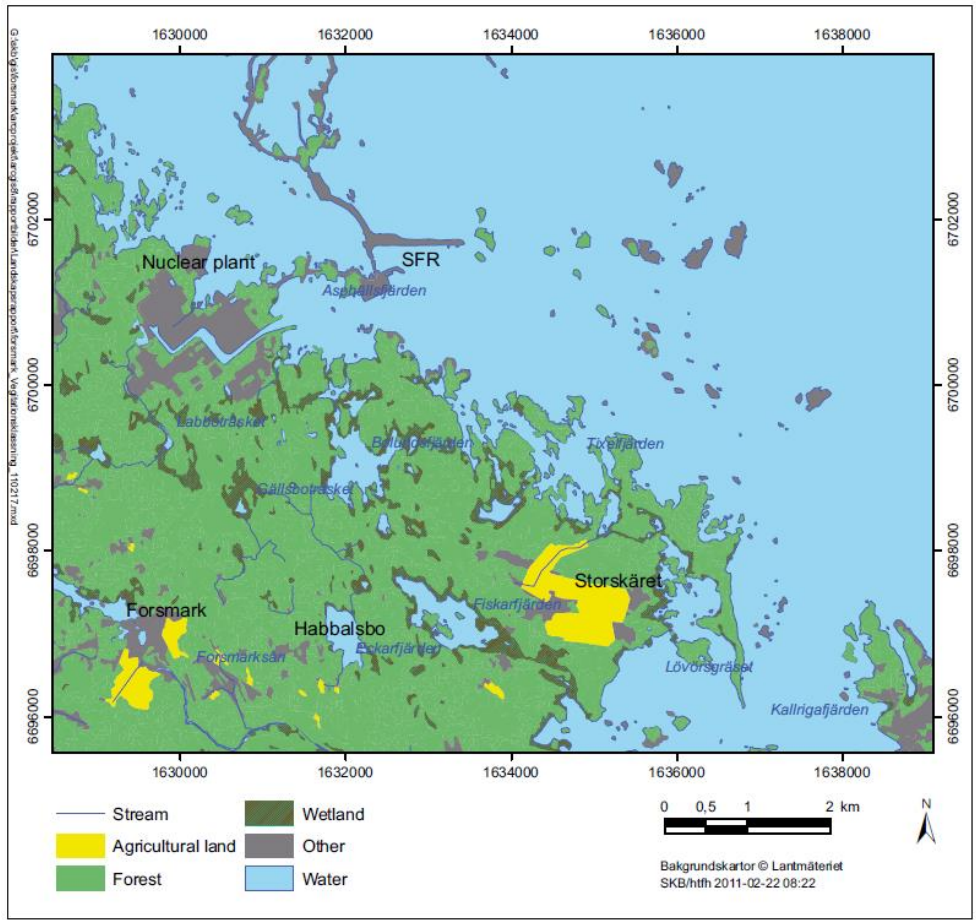


圖 32 福斯馬克生態系統的分佈

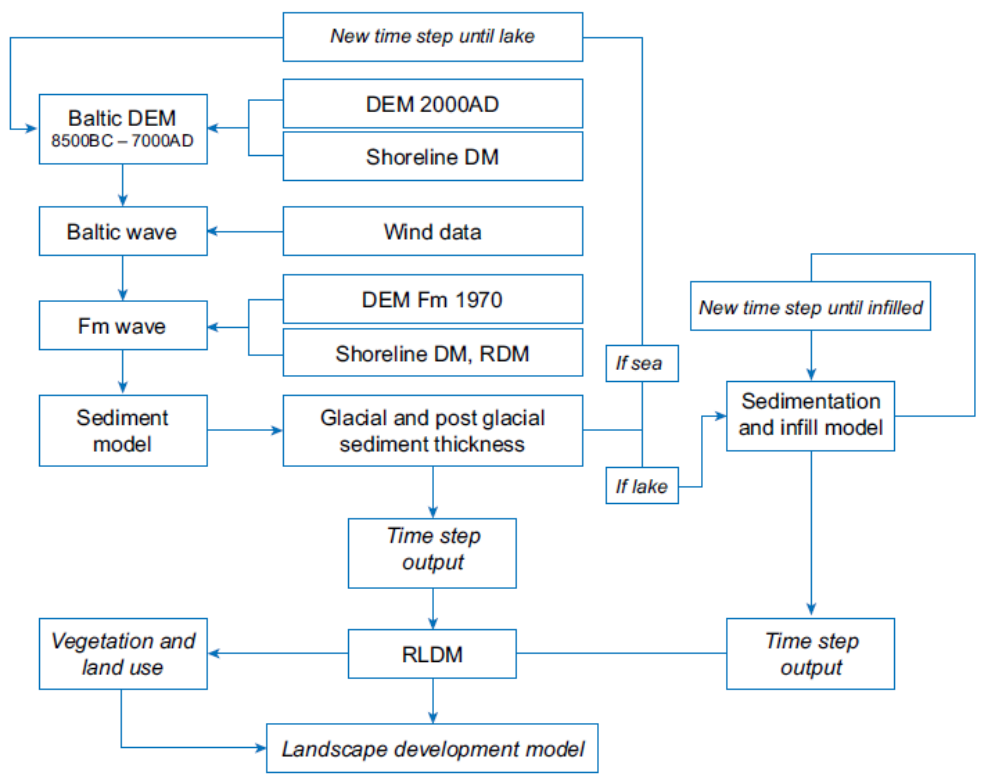


圖 33 耦合的表土風化層-湖泊（生物相）之發展模型（RLDM）的概念流程圖

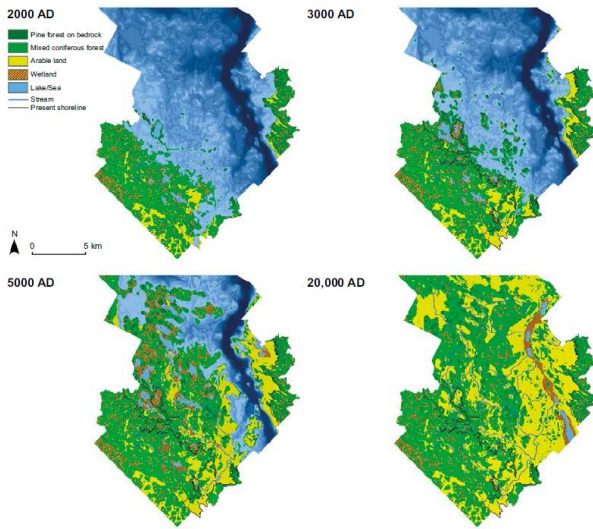


圖 34 全球暖化變異後之地景發展示意圖 (變異條件 2)

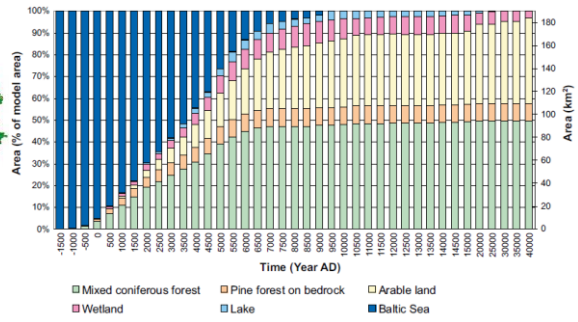


圖 35 西元前 1500 年至西元 40,000 年間變異條件 2 之不同生態系統變化

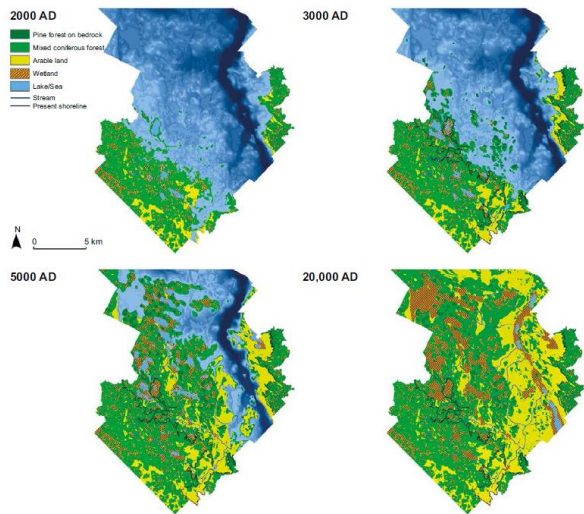


圖 36 全球暖化為特徵變異條件之地景發展示意圖 (變異條件 1)

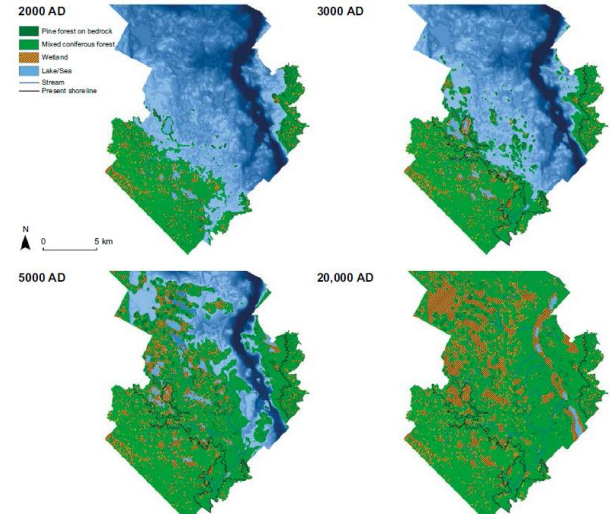


圖 37 全球暖化為特徵變異條件之地景發展示意圖 (變異條件 3)

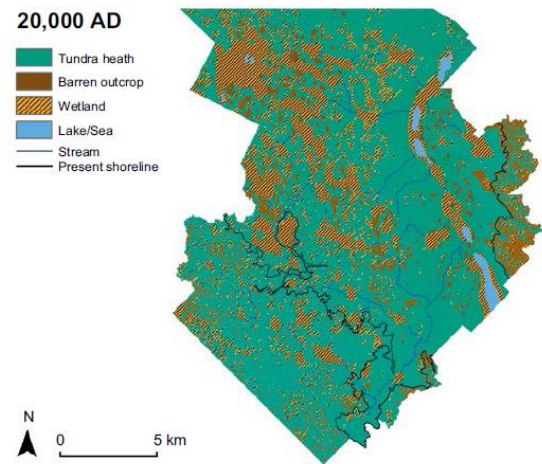


圖 38 以冰緣期為特徵變異條件於西元 20,000 年之地景圖 (變異條件 4) (且無人類土地使用)

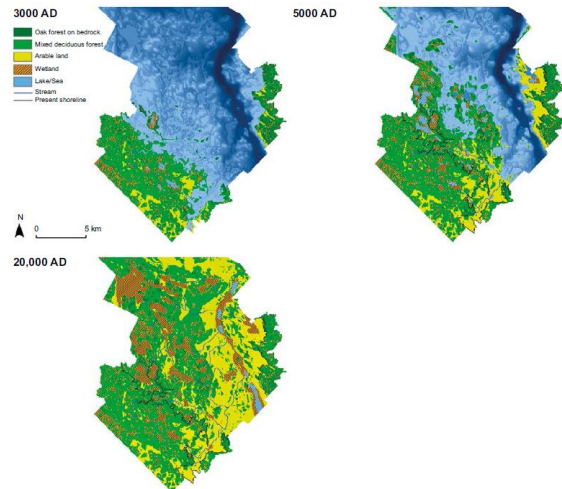


圖 39 擴展全球暖化氣候為特徵之地景發展示意圖 (變異條件 5) (類似於現在的土地使用)



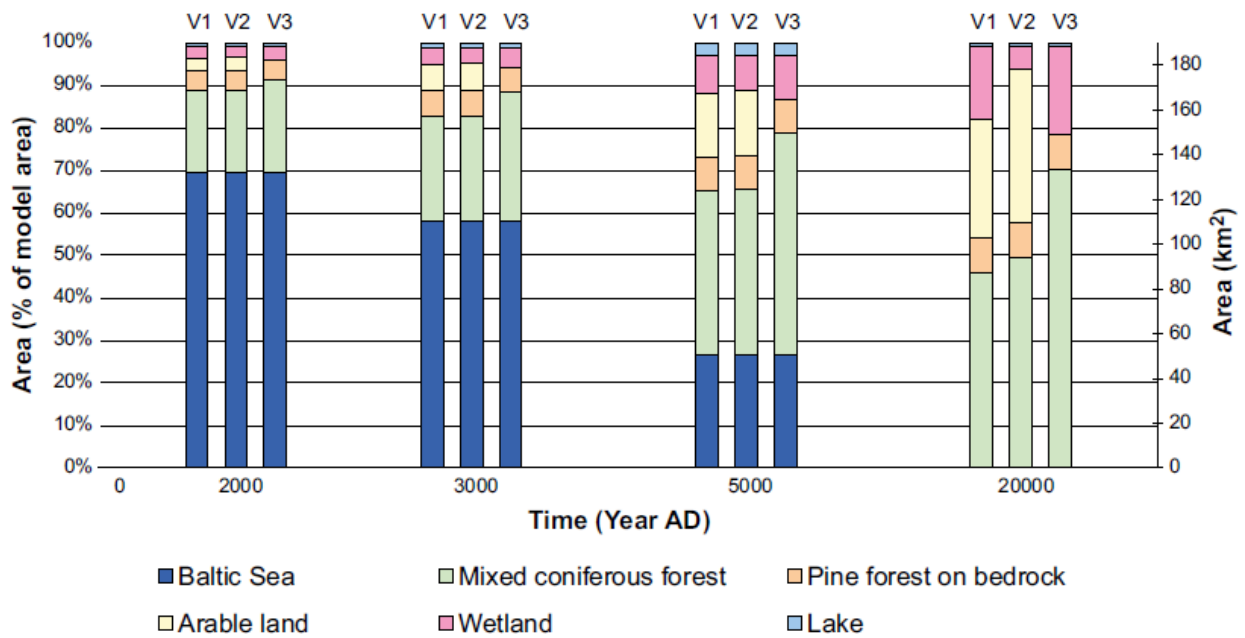


圖 40 於氣候變異條件 1、2 和 3(V1, V2, V3)之生態系統於西元 2000、3000 年、5000 年及西元 20,000 年之變化

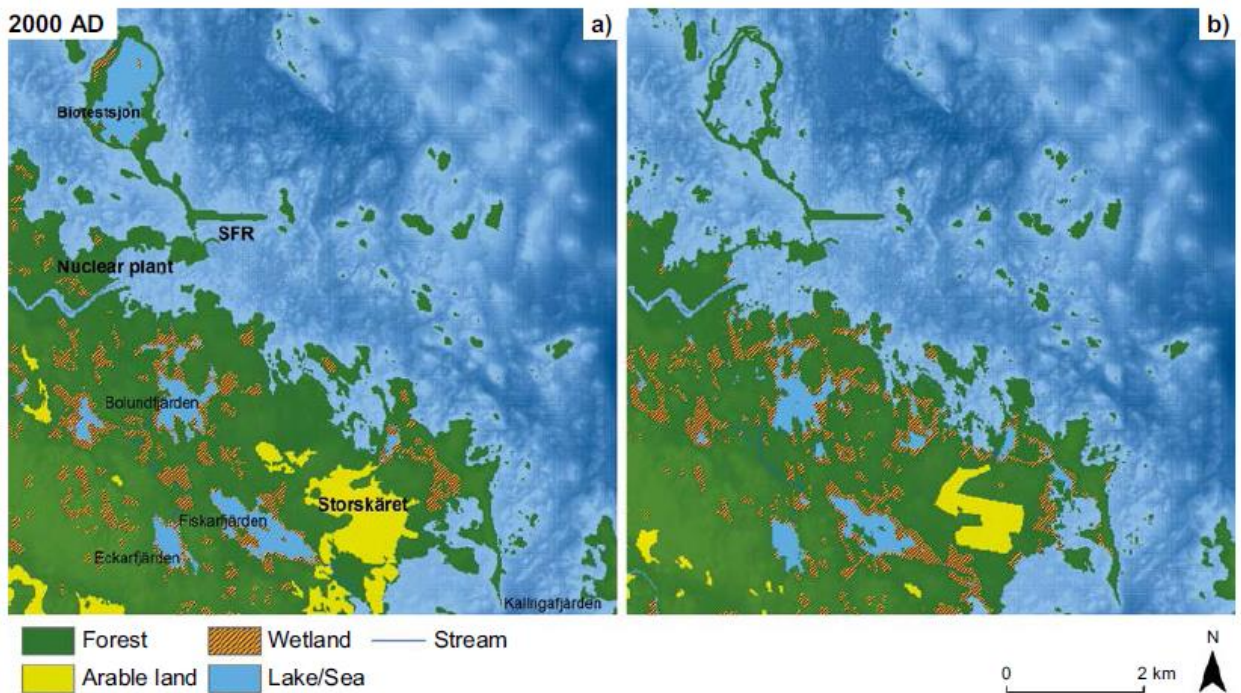


圖 41 於西元 2000 年之地景發展模擬狀態：(a)假設土地利用與目前相同(變異條件 1)；(b)福斯馬克的現有地圖顯示了五種不同生態系統的分佈情況

#### 2.2.4. 模擬地景中的生物圈系統單元演變

從處置場址之地下水流出可藉由水文建模方式模擬。這些流出區域的地景可能是放射



性核種從處置場址釋出後達到生物圈的部分，這些在放射性核種傳輸和劑量評估的地區目前被稱為生物圈系統單元。放射性核種隨著地下水流入與流出生物圈系統單元，可以被持留住，但也可以與相鄰的生物圈系統單元經由地表和地下水傳送過程產生核種積聚和/或再傳輸。

目前總共八個生物圈系統單元包含在 SR-PSU 核種傳輸模式中。其有 1 種僅在冰緣氣候條件期間出現，於溫帶期間為 7 個生物圈系統單元。然而，溫帶條件下放射性核種經地下水流動可傳輸到生物圈系統單元 157\_2。

模擬地景中的生物圈系統單元演變，包括：水文輸入數據（如圖 42 及圖 43 各種時間以粒子密度（每平方公尺粒子數）表示的流出位置）、地下水流模擬（如圖 44 之模擬冰緣氣候淺層凍土和湖泊和溪流中之凍土層間不凍層的流出位置）、生物圈系統單元的幾何特徵及識別（如圖 45 海域-湖泊-陸域類型生物圈系統單元的概念圖、圖 46 具有盆地、子集水區和陸域的海陸域型物體和陸域物體區域的概念圖、圖 47 用於識別和描述生物圈系統單元的方法）、生物圈系統單元的時間發展、產生的盆地和生物圈系統單元、替代系統單元劃定，以 6 項論點分別描述模擬地景中的生物圈系統單元演變。詳細可參考 SKB TR-14-06 之生物圈整合報告書。

針對「生物圈系統單元的時間發展」，福斯馬克處置場址在海域期間共確定七個生物圈系統單元，如圖 48 所示，生物圈系統單元（藍色或黃色）及其相關的原始海域盆地（灰色），於所有確定的生物圈系統單元，在海域盆地時期開始，最終於為陸域區域。在陸域形成期間，大部分物體是從複雜的湖泊-沼澤到沼澤階段。從海域階段變成湖泊/沼澤階段的過渡時間大約持續 500 年。於湖泊到沼澤階段，由於沉積物和濕地植被增生，並取決於每個湖泊盆地物體的大小和深度。圖 49 表示利用地景發展模擬公元 9000 年在生物圈系統單元之間的連接和流動方向圖，圖 50 顯示利用地景發展模擬從公元 2000、3500、5000 到 9000 年之生物圈系統單元演替和生態系統發展（使用變異條件 2），圖 51 至圖 56 顯示模擬各種時間於 SFR 之流出量密度。

針對「替代系統單元劃定」，圖 57 列出生物圈對象 157\_2 的替代描述，圖 58 顯示生物圈系統單元 157\_2 的表土風化層和水文通量特性以及替代描述。

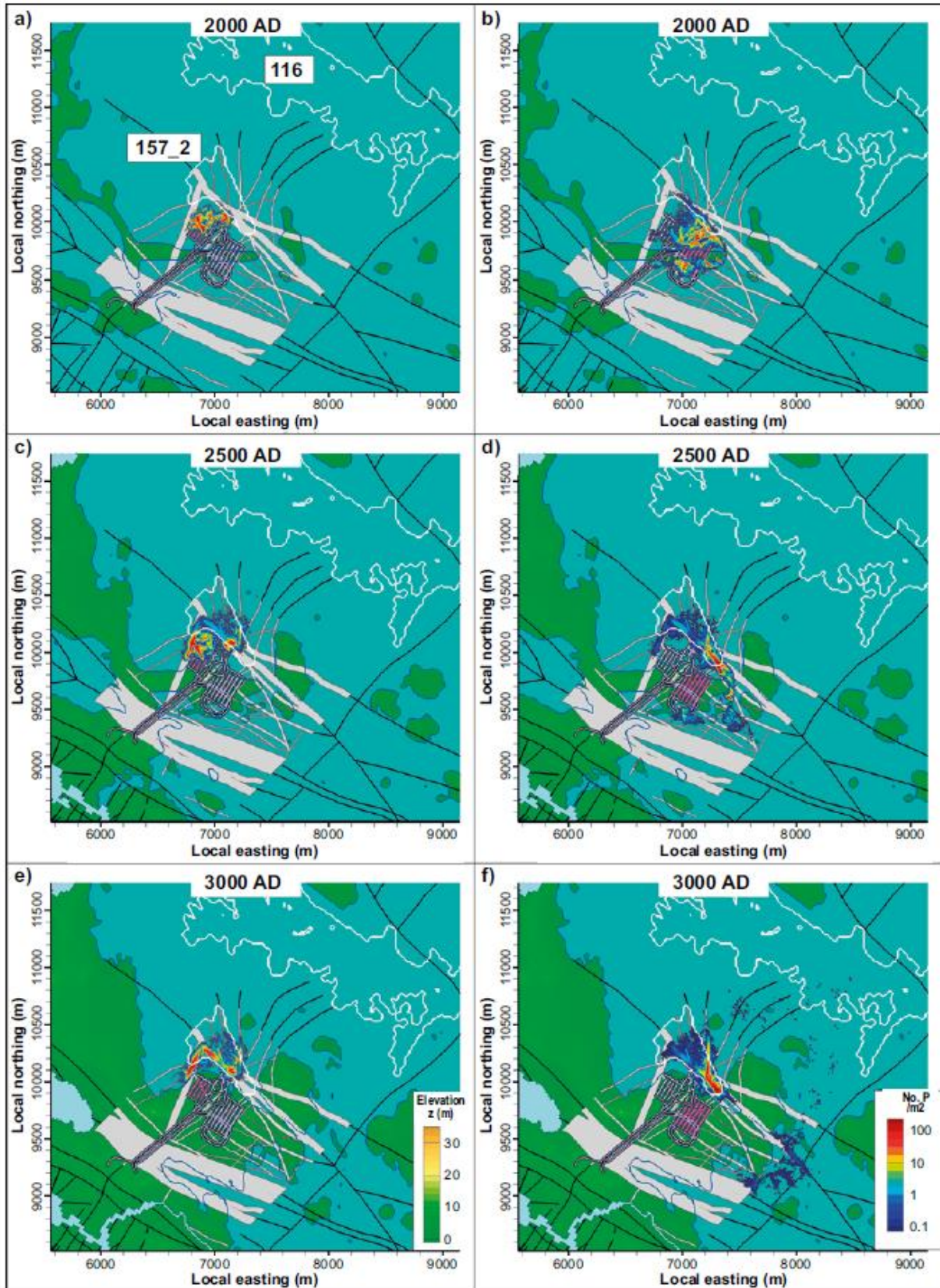


圖 42 以粒子密度（每平方公尺粒子數）表示的流出位置(西元 2000 年至 3000 年)  
 說明：左圖為 SFR1 處置場，右圖，SFR3 處置場，圖中包括“116”和“157\_2”兩個  
 SR-PSU 生物圈系統單元。



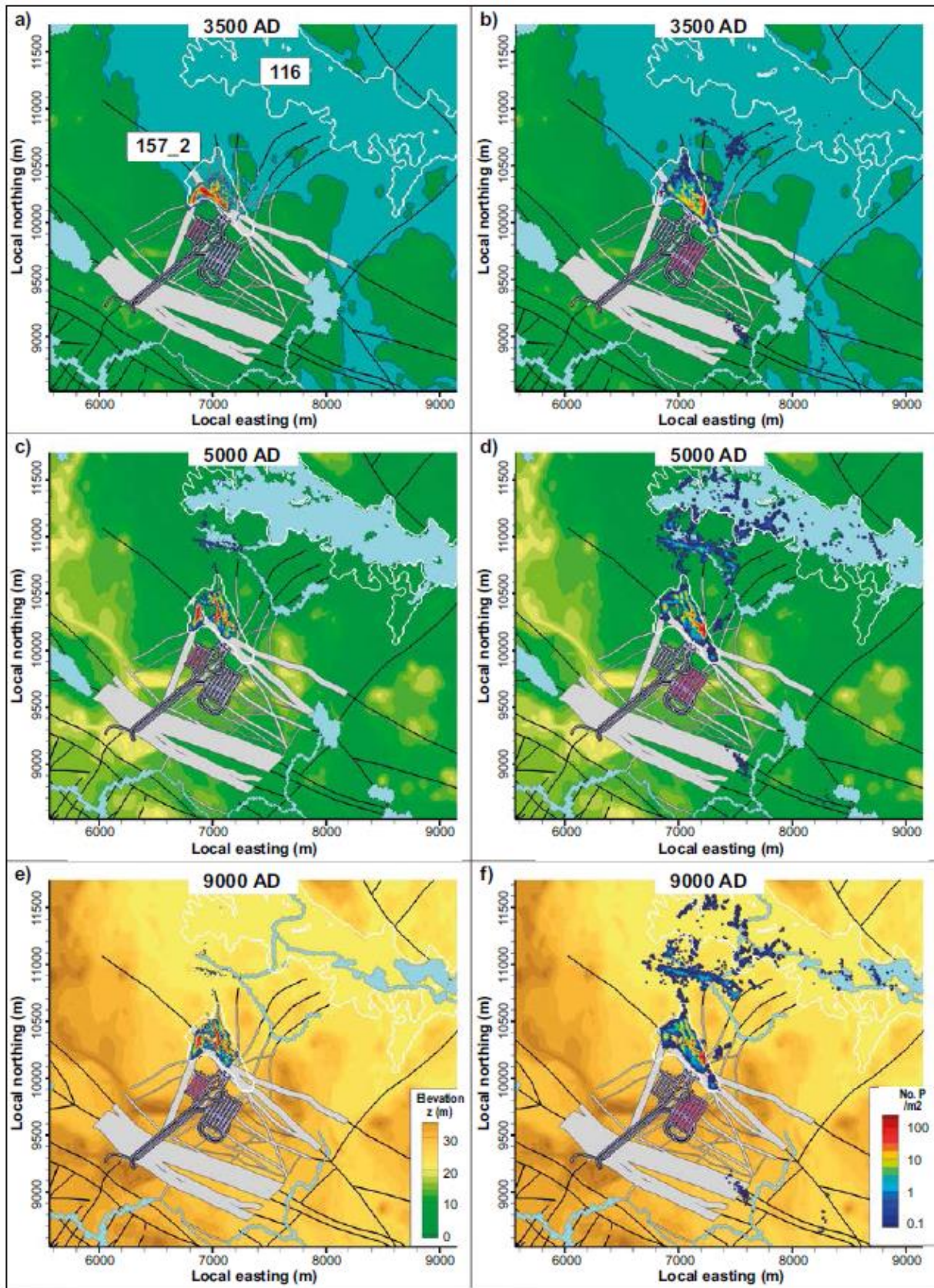


圖 43 以粒子密度（每平方公尺粒子數）表示的流出位置(西元 3500 年至 9000 年)  
 說明：左圖為 SFR1 處置場，右圖，SFR3 處置場，圖中包括“116”和“157\_2”兩個  
 SR-PSU 生物圈系統單元。

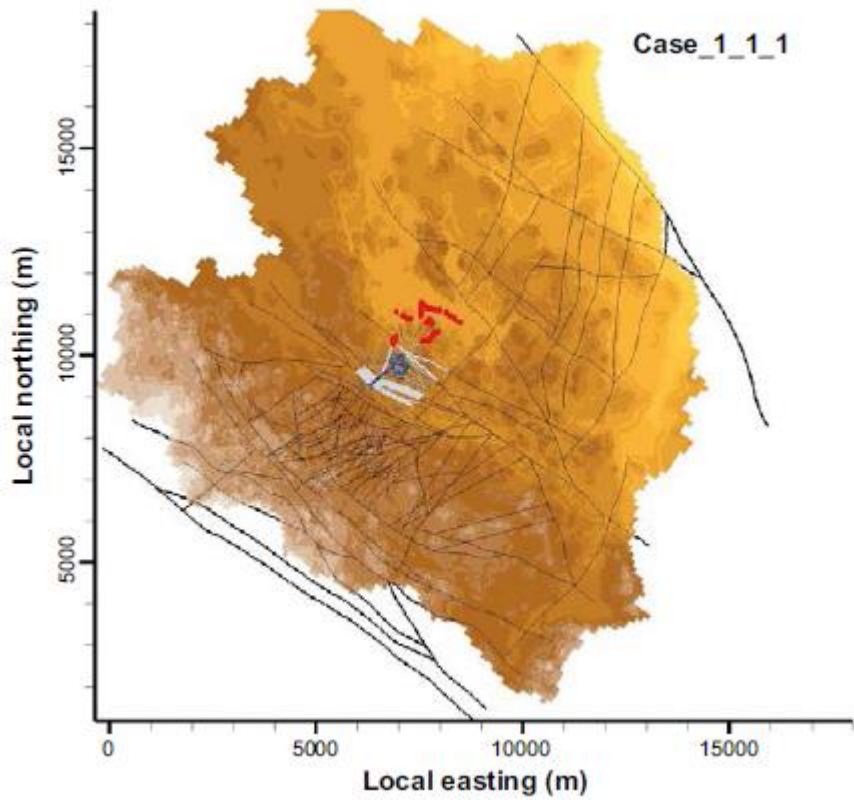


圖 44 模擬冰緣氣候淺層凍土(低至-60 公尺高程)和西元 20,000 年湖泊和溪流中之凍土層間不凍層的流出位置(紅色區域)

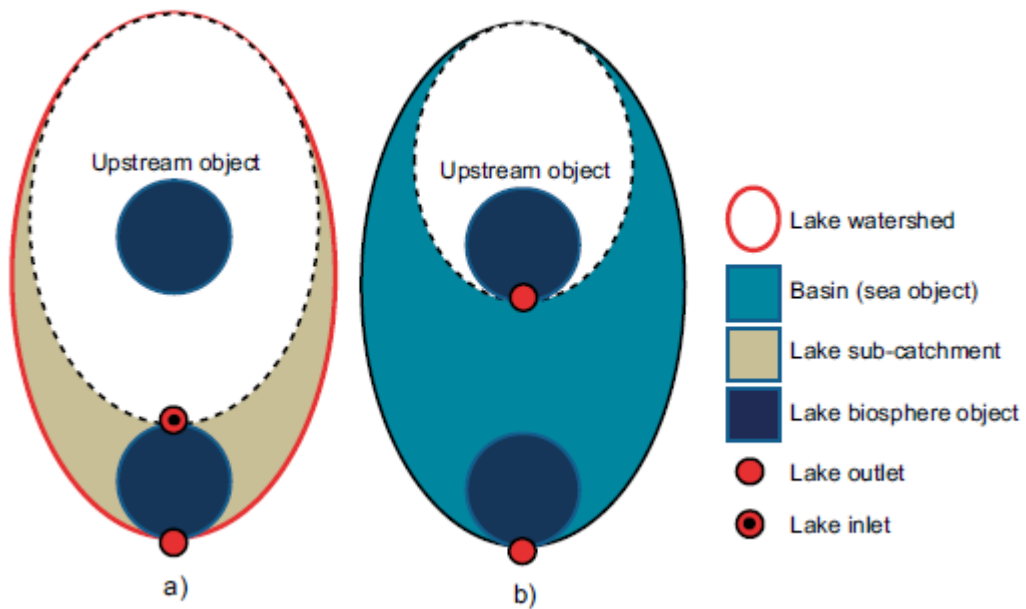


圖 45 海域-湖泊-陸域類型生物圈系統單元的概念圖  
 說明：(a)集水區中的兩個湖泊物體，其中底部湖泊物體有一子集水區，定義為流出集水區面積減去流入集水區區域，且湖泊流域區域等於總湖泊集水區和上游物體。(b)盆地是由湖水流出集水區減去任何上游物體集水區所確定的區域。

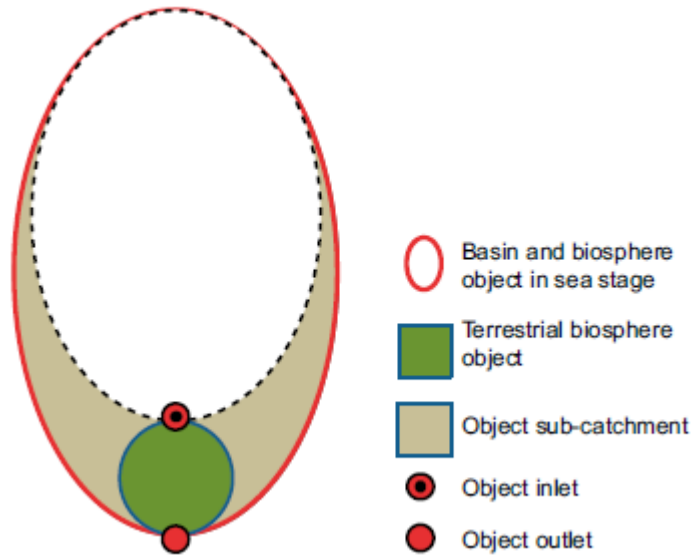


圖 46 具有盆地、子集水區和陸域的海陸域型物體和陸域物體區域的概念圖

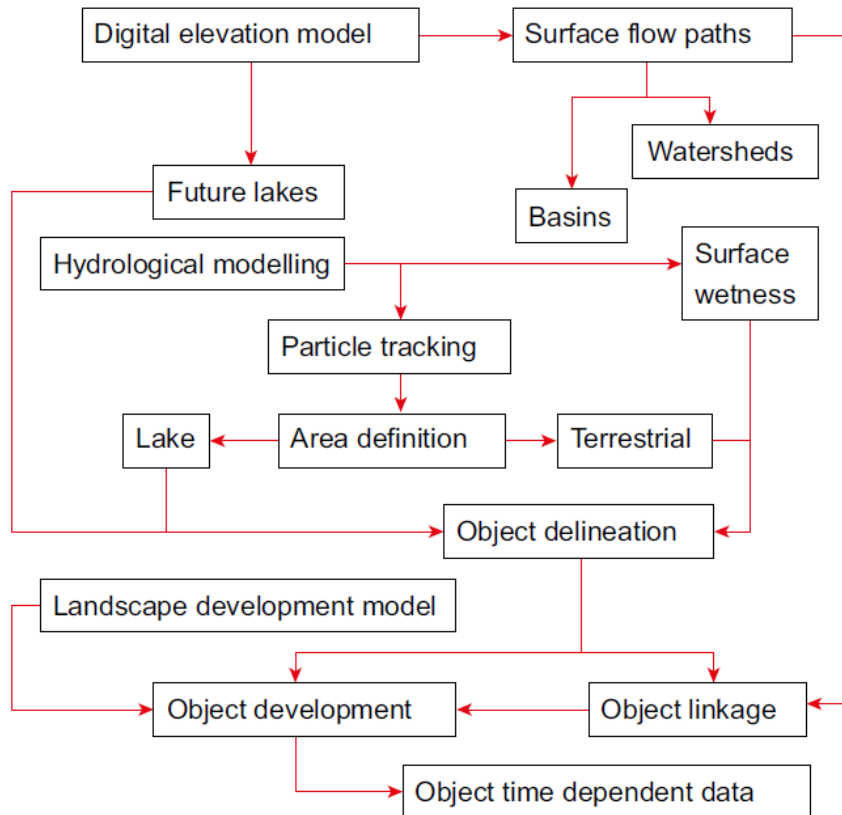


圖 47 用於識別和描述生物圈系統單元的方法



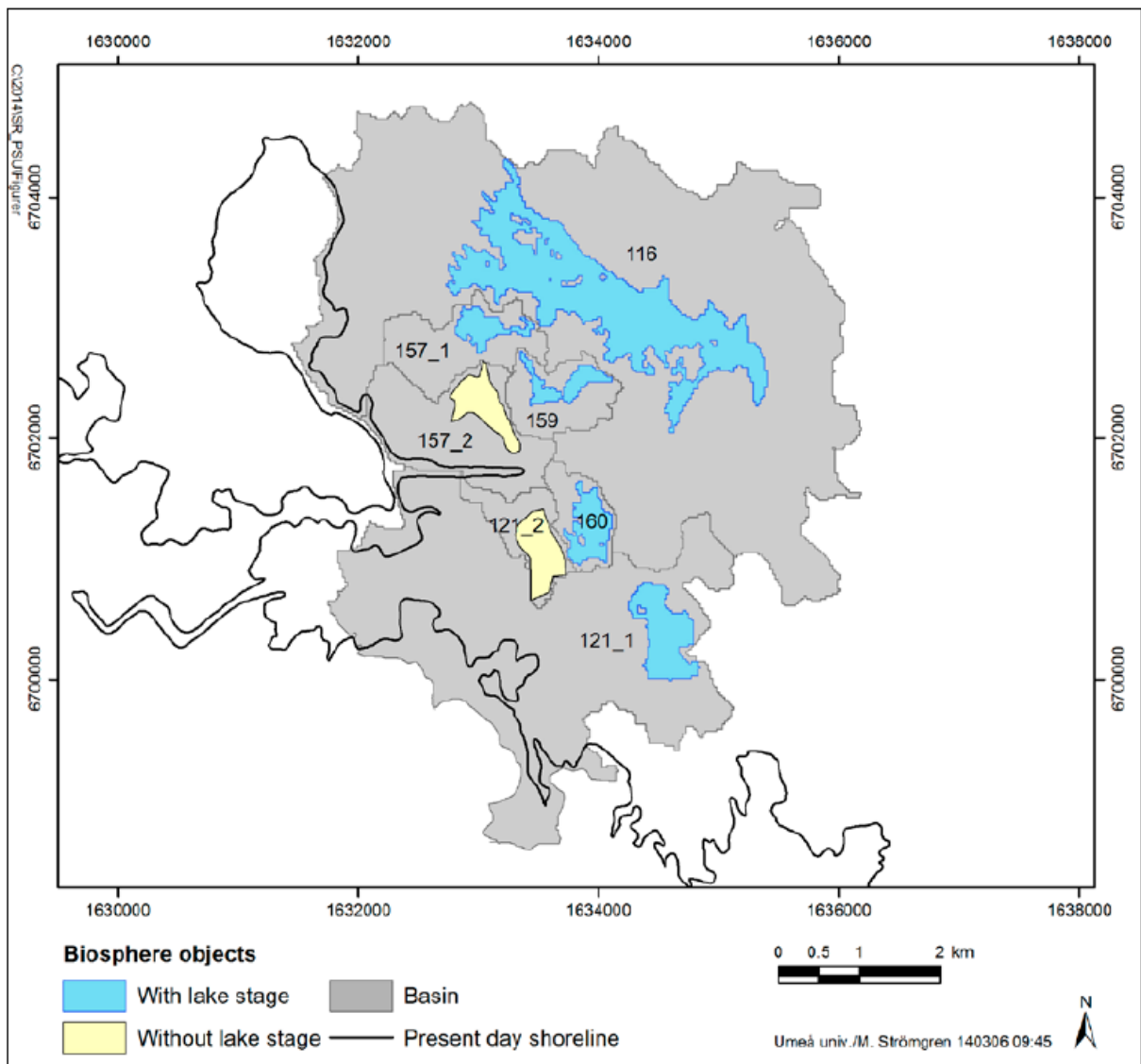


圖 48 生物圈系統單元（藍色或黃色）及其相關的原始海域盆地（灰色）示意圖  
 說明：在海域期間，盆地設置有限制的生物圈系統單元，初始的湖泊（藍色）或濕地（黃色）為土地形成期之生物圈系統單元概述。

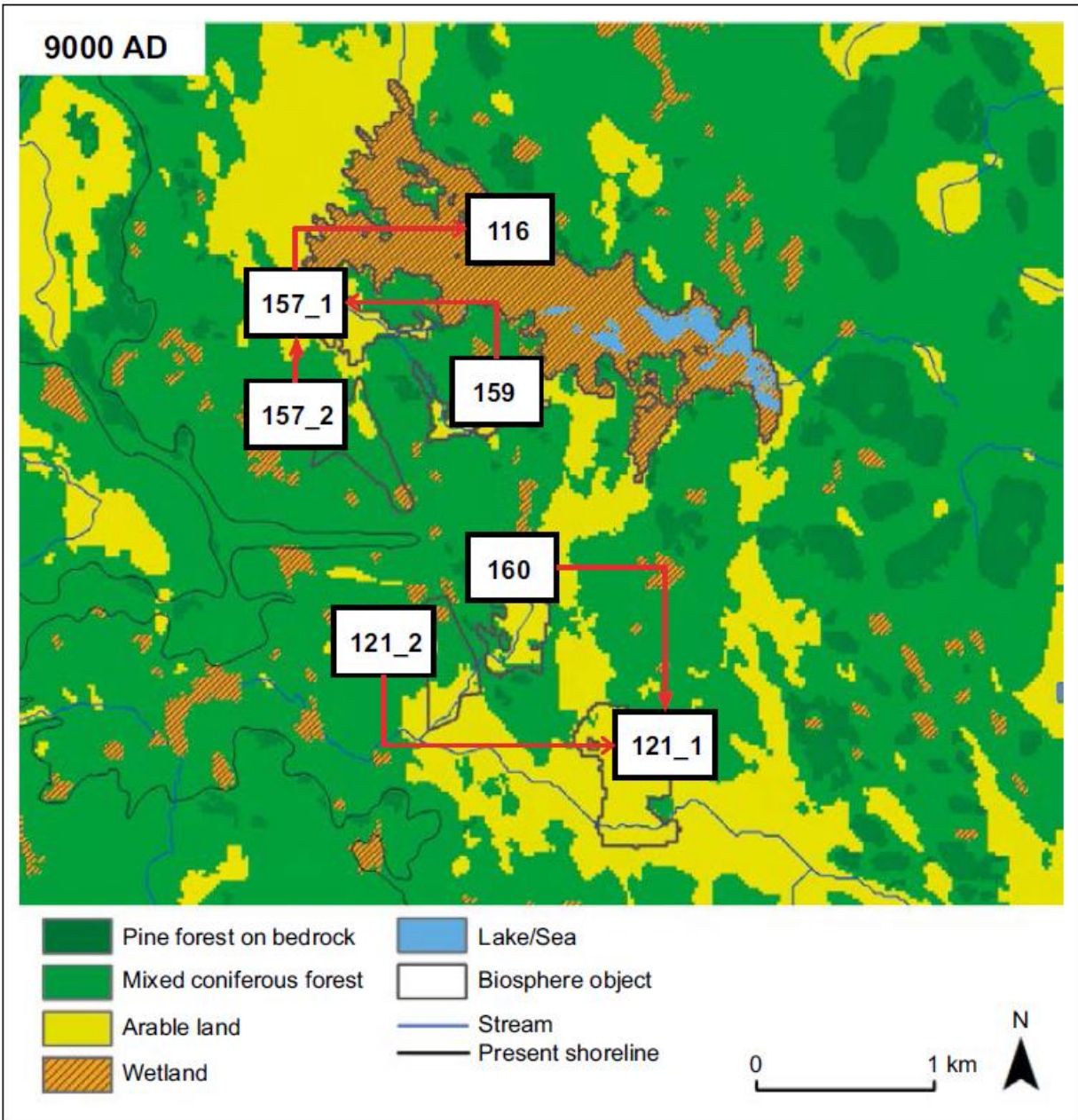


圖 49 利用地景發展模擬西元 9000 年在生物圈系統單元之間的連接和流動方向圖



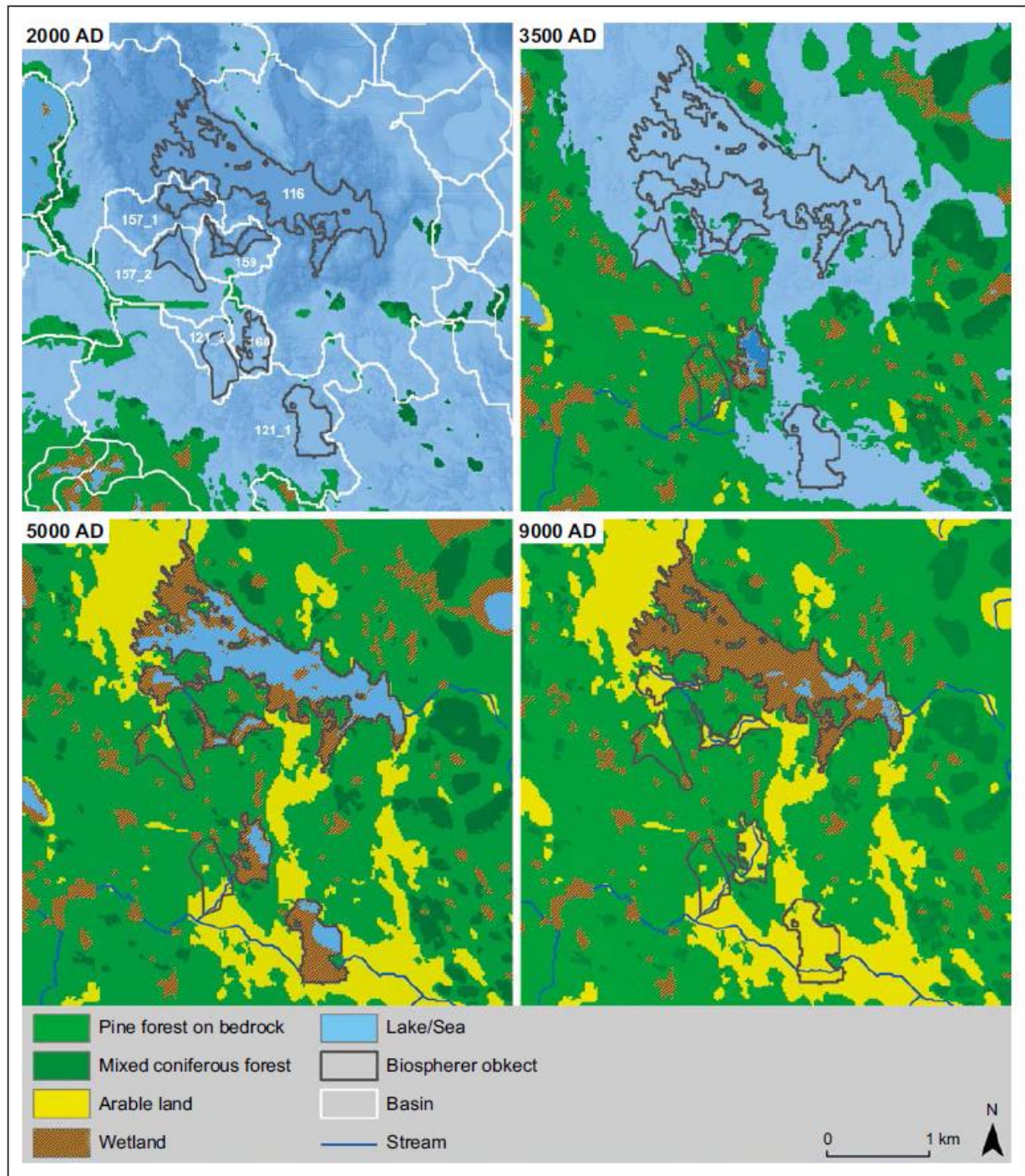


圖 50 利用地景發展模擬從西元 2000、3500、5000 到 9000 年之生物圈系統單元演替和生態系統發展（使用變異條件 2）



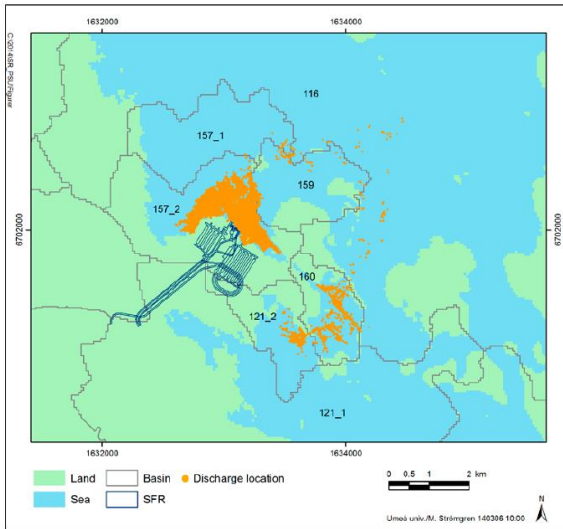


圖 51 模擬西元 3000 年 SFR 之流出位置

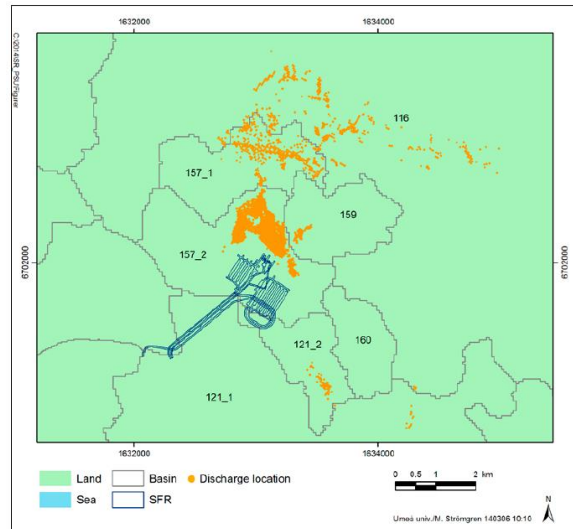


圖 52 模擬西元 9000 年 SFR 之流出位置

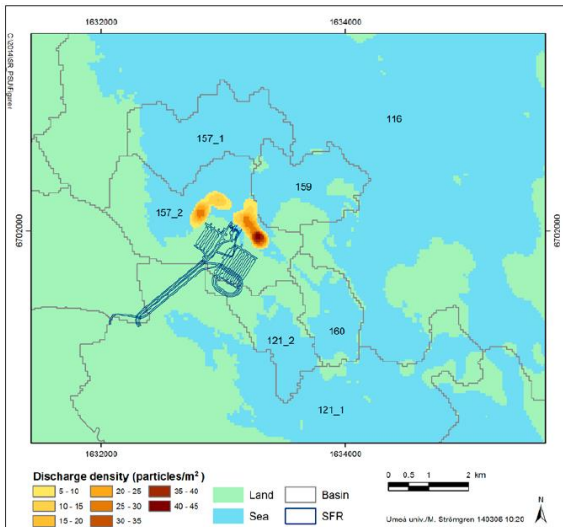


圖 53 模擬西元 3000 年 SFR 之流出量密度 (每平方公尺顆粒數)

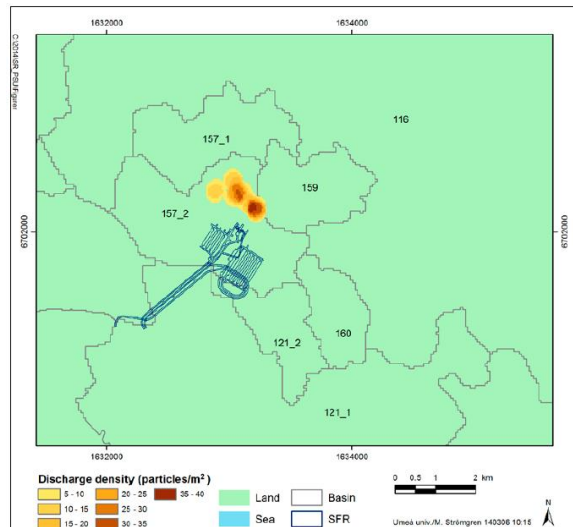


圖 54 用模擬西元 9000 年 SFR 之流出量密度 (每平方公尺顆粒數)

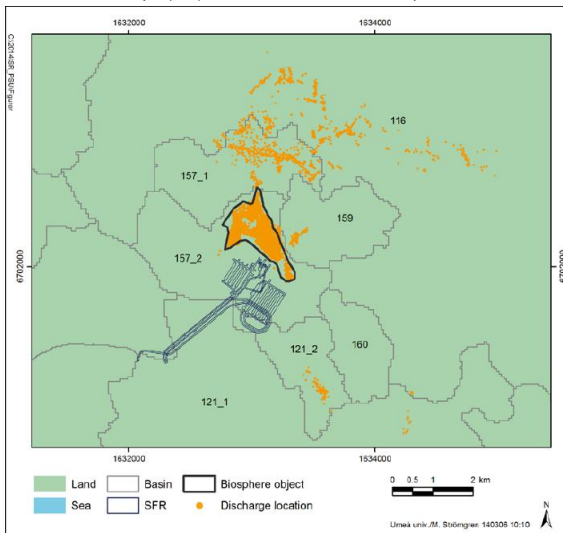


圖 55 模擬西元 9000 年 SFR 之流出位置至盆地和編號 157\_2 陸域生物圈系統單元

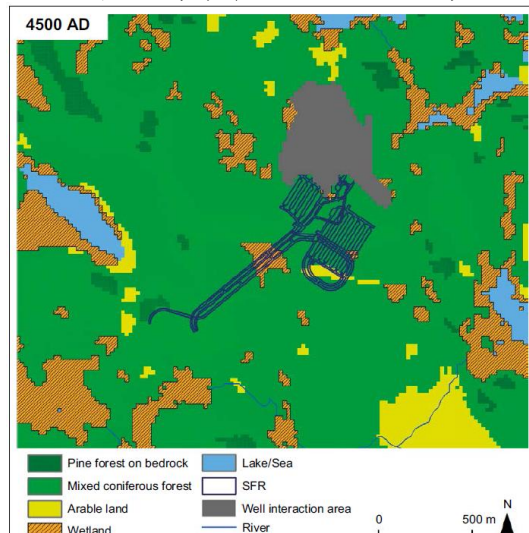


圖 56 位於 SFR 處置場北部所劃定的井相互作用區域

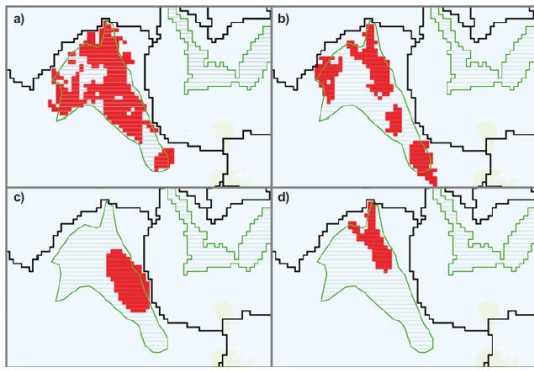


圖 57 生物圈對象 157\_2 的替代描述說明：綠線表示原始對象，紅色區域表示是生物圈系統單元的替代輪廓。(a)具有向上水力梯度的區域(從基岩到地表)。(b)濕地區域(水面以上或不低於地表以下 0.25 公尺)。(c)在基岩-風化層界面存在高密度的流出排放點。(d)施肥、沼澤排水後的潛在區域

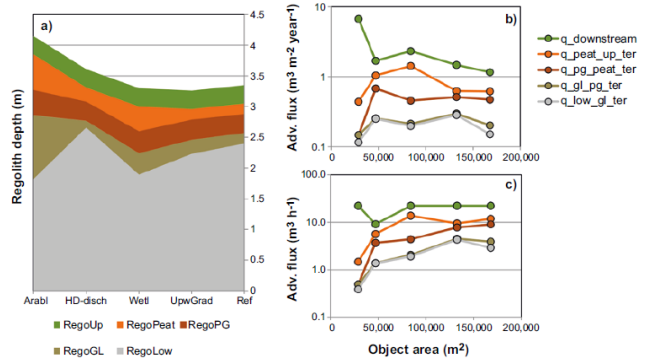


圖 58 生物圈系統單元 157\_2 的表土風化層和水文通量特性以及替代描述說明：(a)表土風化層深度，從最小 (Agri) 到最大 (排放) 區域。(b)地下水的面積比流量作為物體表面積的函數。灰色、淺棕色、棕色和黃色橙色表示分別表示冰磧土 (RegoLow)、冰川粘土 (RegoGL)，冰後粘土 (RegoPG) 和深泥炭 (RegoPeat)。綠色表示地表水從地表泥炭中流出的水平通量物體。(c)總體地下水通量總計在物體的面積上。

## 2.2.5. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析

生物圈的特徵、事件與作用，係探討核種在環境中遷移及累積，進而評估環境中人類的健康及安全。受到核種污染的地下水流入生態系統後，在某些區塊 (compartments) 會造成核種累積。若建立系統方法，瞭解核種遷移、累積及進入或利用生態系統的生物及對人類造成曝露的各種作用有其必要。

生物圈評估需建構作用矩陣(Interaction Matrix,IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。在生物圈作用矩陣中，包括：10 物理組件、6 個變量和 50 個作用歷程。

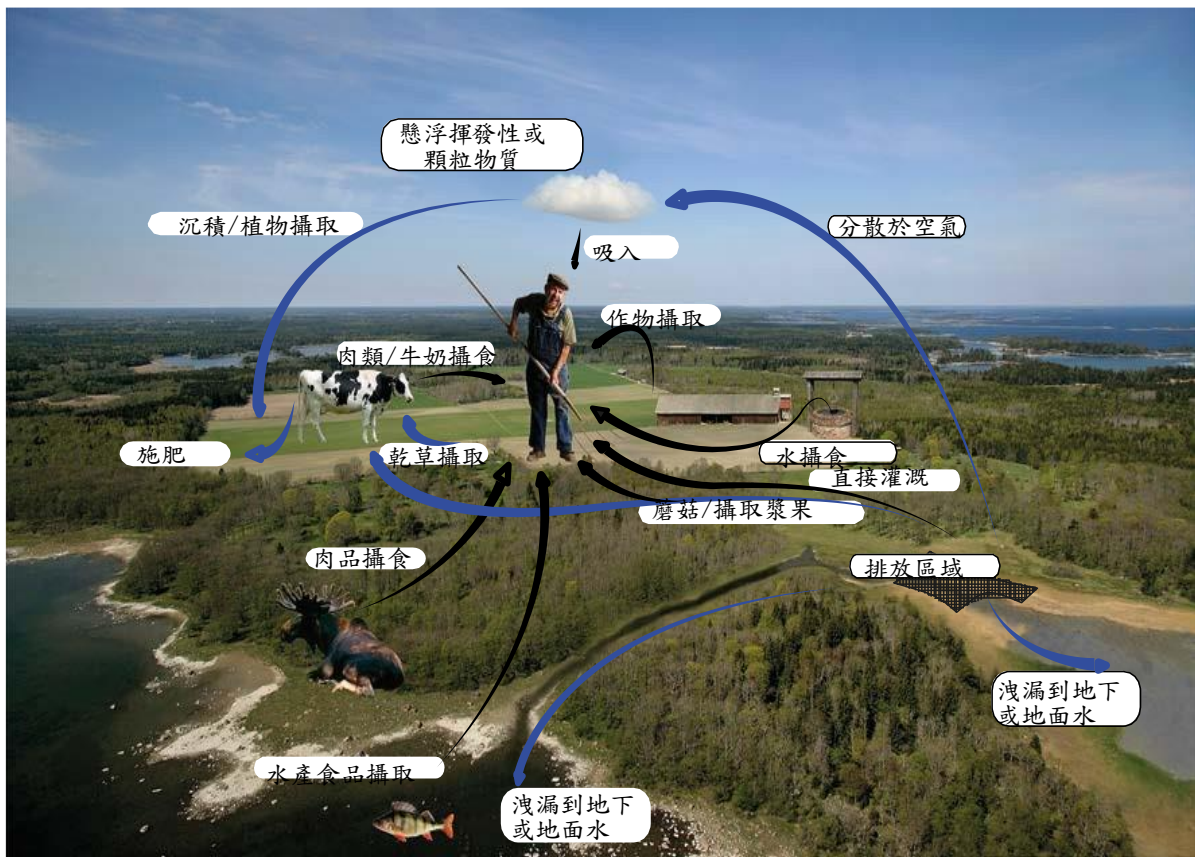
曝露途徑的過程係指放射性核種從場址釋出至地質圈，經由地表生態系統到造成輻射曝露的生物群 (人類和非人類生物)。SR-PSU 的曝露途徑的要素，包括：(1) 放射性核種源或釋出 (2) 核種在地表系統環境之遷移結果 (3) 曝露區域 (4) 輻射進入生物體的曝露途徑或方式，即無論是外部曝露於環境介質中的放射性核種或由生物體吸收放射性核種造

成的內部曝露（5）潛在可能曝露的種群。

模擬生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，包括：鑑定對於核種傳輸及生物圈中核種的累積和曝露重要的作用和特徵、掌握潛在與安全有關的生物圈 FEPs、曝露途徑分析、識別非人類生物群的途徑終點、生物圈計算情境案例，以 5 項論點分別描述生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析。詳細可參考 SKB TR-14-06 之生物圈整合報告書。

針對「曝露途徑分析」，圖 59 顯示人類潛在的曝露途徑示意圖，圖 60 顯示自然生態和農業生態曝露途徑示意圖。

針對「生物圈計算情節案例」，圖 61 顯示 SFR 各種處置系統釋出到達生物圈系統單元 157\_2 之釋放量比率（%）隨時間之變化、圖 62 顯示在淹沒期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型、圖 63 顯示在陸域期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型。





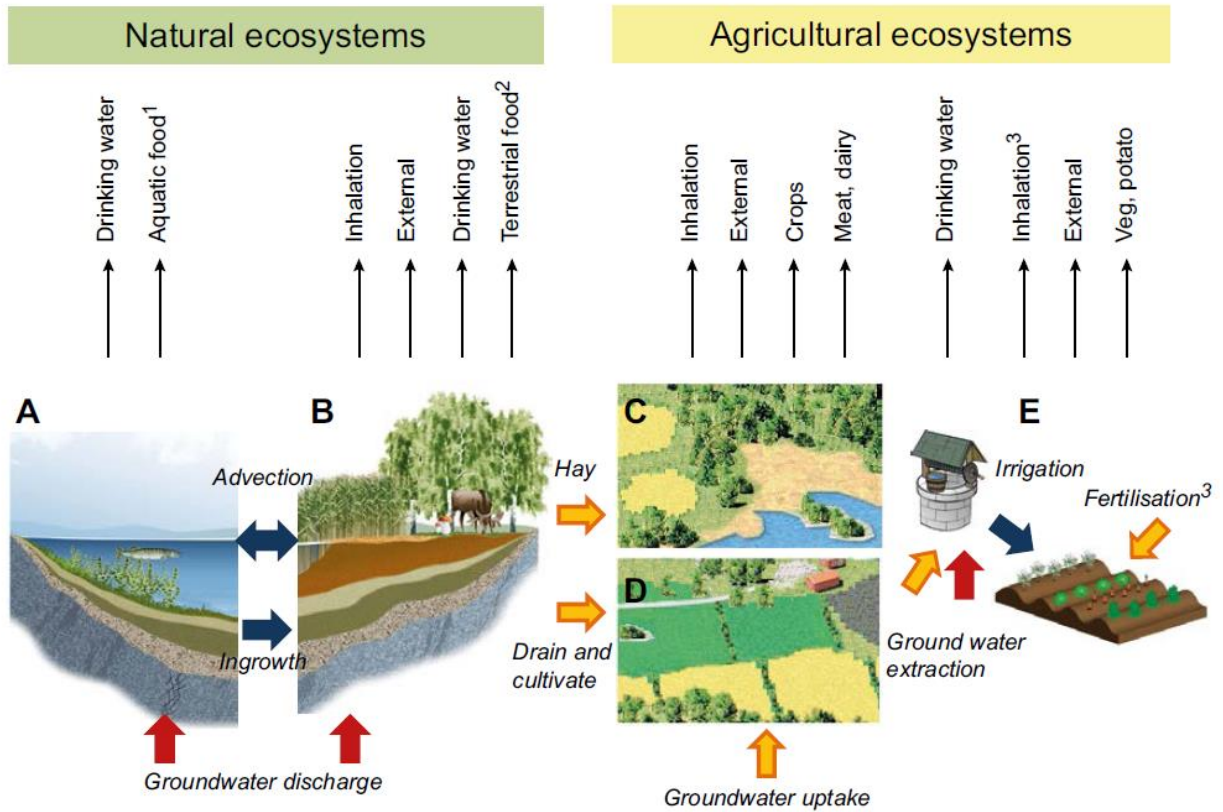


圖 60 自然生態和農業生態曝露途徑示意圖

說明：(A) 狩獵採集者使用自然生態水域生態系統、(B) 沼澤生態系統，而其他三個曝露的人群代表不同的耕地用途，即：(C) 內部-外地農業、(D) 排水和湖泊-沼澤變化 (E) 小規模園藝在菜園田地。粗箭頭表示來自基岩（紅色），來自天然的放射性核種的輸入生態系統或深層片岩沉積物（橙色）或放射性核種的水結合轉移，球體（藍色）。細箭頭（頂部）表示曝露途徑。1 = 魚和小龍蝦，2 = 獵物，漿果和蘑菇，3 = 吸入和施肥包括來自生物燃料燃燒的放射性核種。

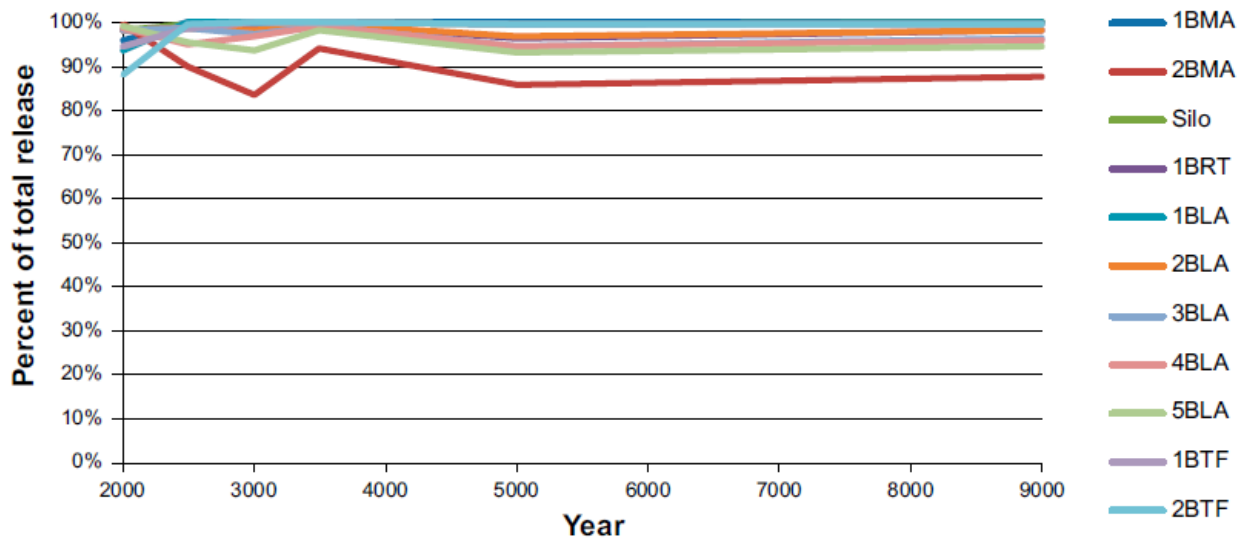


圖 61 SFR 各種處置系統釋出到達生物圈系統單元 157\_2 之釋放量比率 (%) 隨時間之變化

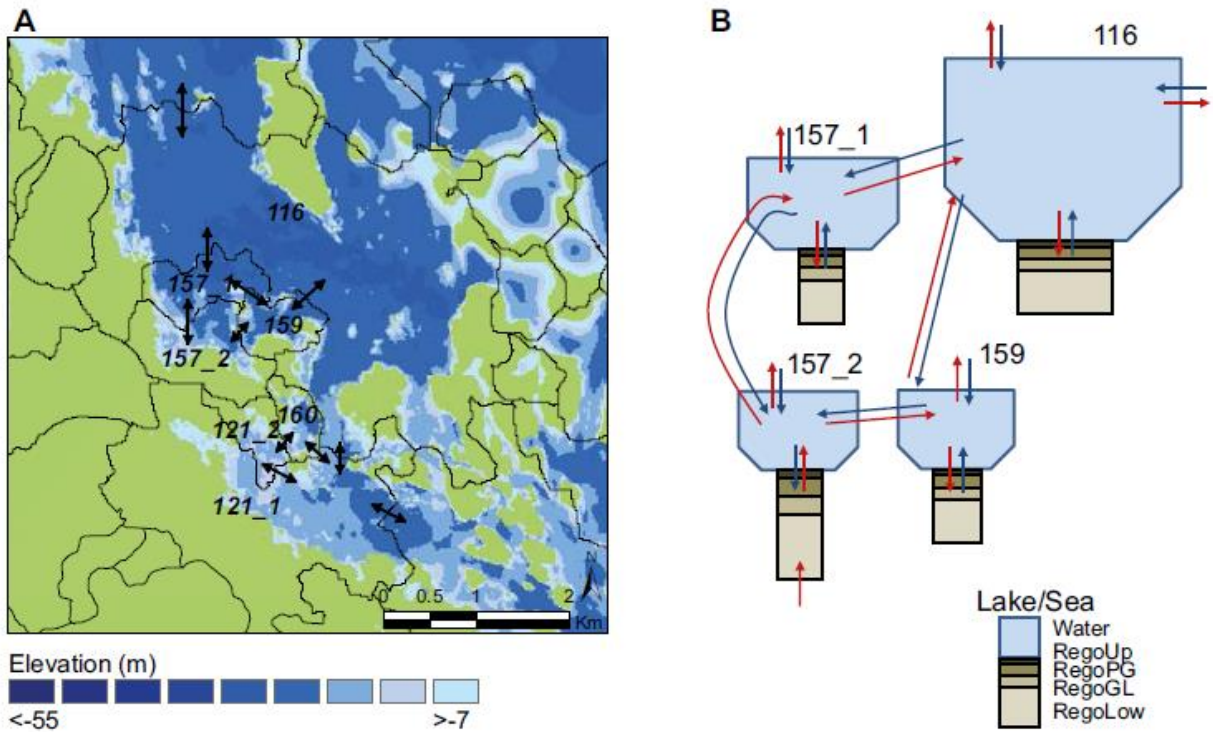


圖 62 在淹沒期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型  
 說明：(A) 福斯馬克地景於西元 3000 年之水深：生物圈系統單元 157\_2 (157\_2 黑色輪廓線) 接收直接流出量，而在海域期間，生物圈系統單元 157\_2 下游處接收經由地表水流 (黑色箭頭) 的放射性核種。色階表示水體深度，白色代表土地。(B) 於風化層與地表水間、介於生物圈系統單元橫斷面之間和之內的放射性核種傳輸示意圖。紅色箭頭代表水流動攜帶放射性核種的運輸，而藍色箭頭表示只有水無放射性核種的初始傳輸，(注意：本圖並非所有的盆地和水流之示意)。

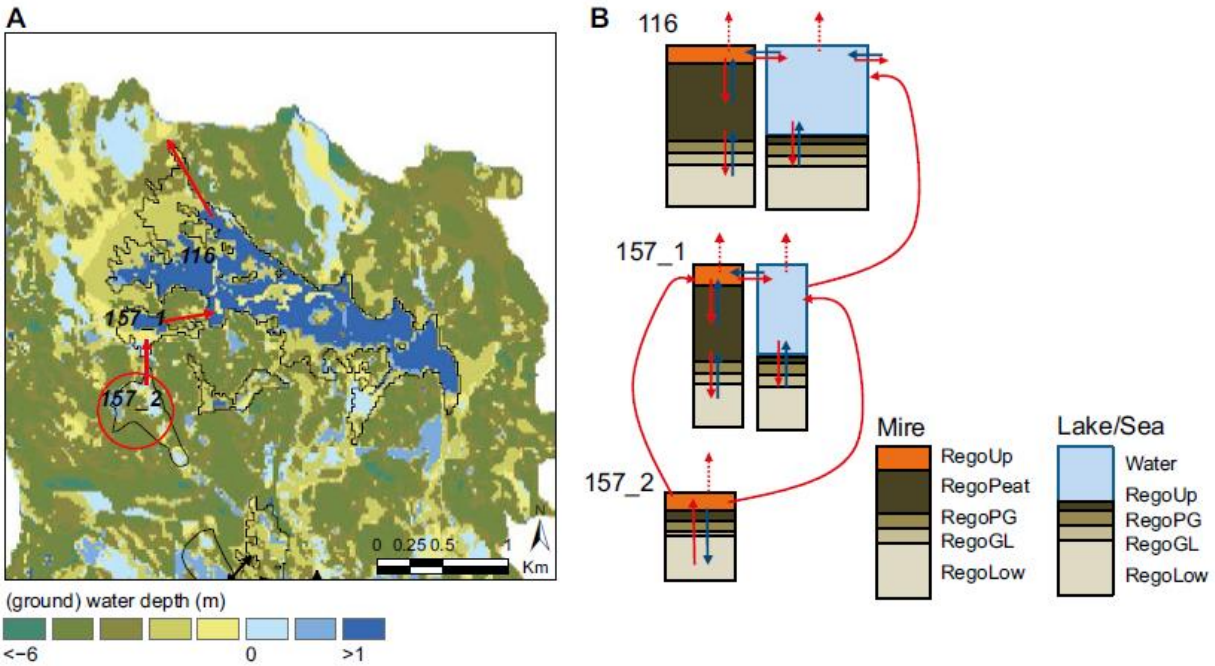


圖 63 在陸域期間地下水從岩石圈到達生物圈之流出及放射性核種傳輸之概念模型

說明：(A) 於西元 5000 年之陸域區域地面到地下水位和水深：生物圈系統單元 157\_2

(紅色橢圓形) 接收直接流出量，而在海域期間，生物圈系統單元 157\_1 和 116 下游處接收經由地表水流的放射性核種。(B) 於風化層與地表水間、介於生物圈系統單元橫斷面之間和之內的放射性核種傳輸示意圖。紅色箭頭代表水流動攜帶放射性核種的傳輸，而藍色箭頭表示只有水無放射性核種的初始傳輸。

## 2.2.6. 生物圈核種模式

地面生態系統是由生物圈放射性核種模型來表示。包括放射性核種傳輸子模型的（天然）地面生態系統，和計算對人類和非人類生物之核種輻射劑量模型。SR-PSU 生物圈的放射性核種的傳輸模型是以 SR-Site 評估模型為基礎使用相對應的生物圈模型，包括：1. 生物圈系統單元隨著海岸線位移和生態系統演替而連續性變化發展，2. 放射性核種隨著時間變化於地質圈系統藉由地下水流動而釋出，且核種分佈在非均質地景，3. 核種之傳輸、累積和放射性核種的衰變具有不同的生物地球化學性質，4. 放射性核種與水在不同部分地景之間傳輸係由於陸域環境形成的結果，5. 在地景區域之未來居民曝露和劑量計算。

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（如海域、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，各區塊名稱之說明如所示

最終處置場放射性核種釋出之主要傳輸作用，係經由地下水傳輸到地表生態系統，水

流帶動放射性核種遷移於生態系統之間和生態系統之內。核種傳輸到生物圈的四個主要途徑以進行水文和海域模擬，包括：(1) 基岩水文地質和地表水文模擬組合，以確定地下水流從 SFR 處置場之流出量及流到生物圈系統單元概略流場 (2) 藉由水文模擬得到生物圈系統單元內部區塊模型之縱向和橫向水流通量 (3) 海域模式模擬以確定浸沒期間淡水海域盆地之間的水交換量 (4) 藉由地表水文模擬確定生物圈系統單元間之水文連接網絡在土地形成期間。

對於在水域、沼澤和農業子模型區塊之間動態通量，可由下列 21 個作用過程進行：1. 生物擾動、2. 植物吸收、3. 落葉呼吸/釋放、4. 落葉產生、5. 風化層礦化、6. 植被內生、7. 平流水平傳輸、8. 平流垂直傳輸、9. 滲漏、10. 水分吸收、11. 擴散（垂直）、12. 固-液相分離、13. 沉降、14. 再懸浮、15. 埋藏、16. 脫氣、17. 氣體吸收、18. 排水/耕種、19. 施肥、20. 灌溉、21. 核種衰變/增加，依據該作用過程進行列如表 3，其說明自然生態系統之間水域、沼澤和農業與生物圈系統單元之內的放射性核種的轉移概念說明，與放射性核種通量傳輸模式及作用過程整體概念表。其中，依驅動力分類質量通量：固體通量 (MS)，水通量 (MW) 或氣體通量 (MG)。有機物由於光合作用之產生或釋放 (PP) 和礦化 (Min)。Y 表示在水域、沼澤和農業子模型之動態通量 (區塊之間)。對於「\*」符號係假設該作用過程為穩態。

表 2 生物圈放射性核種傳輸模式之區塊模型名稱與說明

| 區塊模型                             | 說明                                                        |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>水域 Aquatic</b>                |                                                           |
| Water                            | 於開放水域(海域、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> <sup>1</sup>   | 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，包括在海域的核種、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。            |
| <b>陸域（沼澤） Terrestrial (mire)</b> |                                                           |
| 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。    |

### 陸域 (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。                                                                              |

<sup>1</sup> 區塊也可表示為 Water<sub>org</sub> (SKB, 2013c).

表 3 放射性核種通量傳輸模式及作用過程之整體概念表

| 作用             | 型式  | 核種通量 |    |                | SKB 生物圈 FEP (作用)         |
|----------------|-----|------|----|----------------|--------------------------|
|                |     | 水域   | 沼澤 | 農業             |                          |
| 生物作用           |     |      |    |                |                          |
| 生物擾動           | MS  | Y    |    | Y              | 1) 生物擾動                  |
| 植物(根部)吸收       | PP  | Y    | Y  | *              | 15) 吸收<br>13) 初級生產者      |
| 落葉呼吸/釋放        | Min | Y    | Y  |                | 2) 消耗, 3) 死亡<br>4) 分解    |
| 落葉產生           | PP  | Y    | Y  | Y <sup>1</sup> | 3) 死亡 5) 排洩, 12) 粒徑事出與捕捉 |
| 風化層礦化          | Min | Y    | Y  | Y              | 4) 分解                    |
| 植被內生 BTW       | MS  | Y    | Y  |                | 13) 初級生產者<br>33) 覆蓋      |
| 水作用            |     |      |    |                |                          |
| 平流水平傳輸 BTW     | MW  | Y    | Y  |                | 32) 平流                   |
| 平流垂直傳輸         | MW  | Y    | Y  | Y <sup>2</sup> | 32) 平流                   |
| 擴散 (垂直)        |     | Y    | Y  |                | 32) 平流                   |
| 水分吸收           | MW  |      |    | Y              | 36) 輸入                   |
| 固 - 液相分離       |     | *    | *  | *              | 26) 反應 27) 吸附/脫附         |
| 沉降作用           |     |      |    |                |                          |
| 沉降             | MS  | Y    |    |                | 34) 沉降                   |
| 再懸浮            | MS  | Y    |    |                | 39) 再懸浮                  |
| 埋藏             | MS  | Y    | Y  |                | 34) 沉降                   |
| 氣體傳輸           |     |      |    |                |                          |
| 脫氣             | MG  | Y    | Y  | Y              | 24) 相轉換, 32) 平流          |
| 氣體吸收           | MG  | Y    | Y  |                | 24) 相轉換                  |
| 人類行為           |     |      |    |                |                          |
| 排水/耕種 BTW,INIT |     |      |    | Y              |                          |
| 施肥 BTW         | MS  |      |    | Y              | 16) 人為釋出 38) 重新配置        |
| 灌溉             | MW  |      |    | Y              | 16) 人為釋出                 |
| 放射性作用          |     |      |    |                |                          |
| 核種衰變/增加        |     | Y    | Y  | Y              | 41) 衰變                   |

備註說明：



BTW = 介於生態和生物圈系統單元間之通量;  
 INIT = 影響初始量(以及通量);  
 1 = 於內部-外地農業 (IO) 在沼澤內供作為源項產生之通量;  
 2 = 作用亦稱為滲漏

模擬生物圈核種傳輸模式，包括：傳輸模式的概述、區塊模式、水域生態系統模式、陸域生態系統模式、水文和平流傳輸、計算未來的曝露量，以 6 項論點分別描述生物圈核種傳輸模式。詳細可參考 SKB TR-14-06 之生物圈整合報告書。

針對「區塊模式」，圖 64 顯示水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖。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)有機與無機型態核種之轉換(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 所示。

針對「陸域生態系統模式」，圖 65 顯示農業生態系核種傳輸區塊示意圖，核種傳輸透過氣體(淺藍色)、水體(深藍色)、固體物質(黑色)、礦化作用(綠色)，核種來源有(1)灌溉、(2)施肥、(3)湖泊/泥沼的排水與開墾、(4)取用地下水，作物的活度濃度計算是假設平衡於土壤內與植被層大氣之核種，灌溉水內核種由植被截留，且不同土地利用會有不同之核種來源組成，圖中各區塊名稱之說明如表 2 所示。

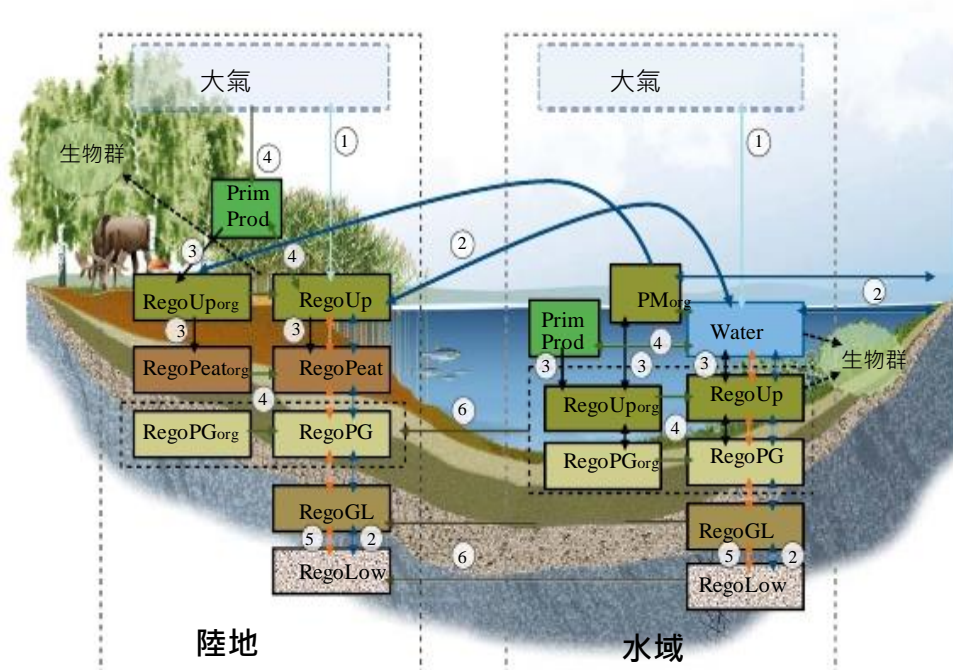


圖 64 水域與陸域生態系核種傳輸區塊示意圖

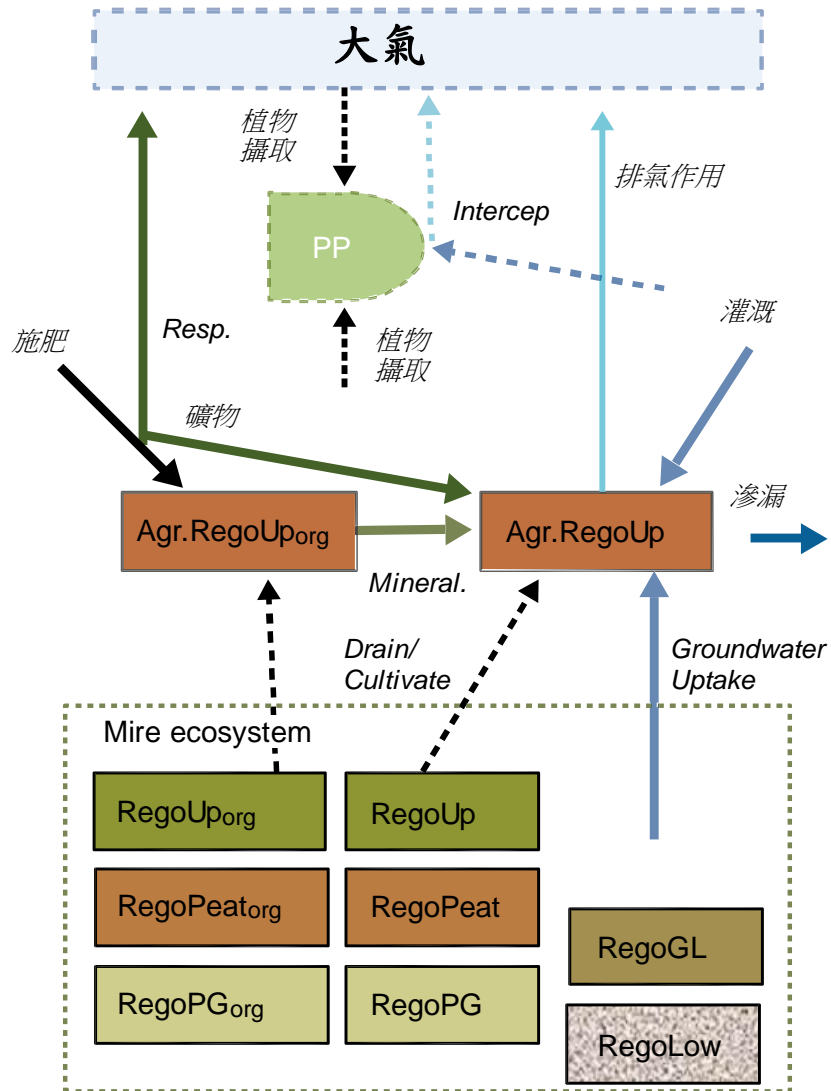


圖 65 農業生態系核種傳輸區塊示意圖

### 2.2.7. 生物圈評估之參數使用

核種傳輸與劑量評估需要甚多參數，生物圈放射性核種遷移模擬所需使用的所有參數：包括「放射性核種參數」、「景觀幾何形狀」、「土壤特性」、「水文參數」、「元素比參數」、「水域生態參數」、「陸域生態系統參數」、「人類居住特性參數」、「非人類生物群的參數」、「參數在替代計算案例使用」等。詳細可參閱 SKB R13-18 報告，該參數可配合生物圈放射性核種傳輸與劑量評估模式數學模型，瞭解「區塊模式於模擬核種通量傳輸和在生態系統的放射性核種累積」、「生態系統和生物圈系統單元之間垂直和水平傳輸過程的水文連通性」、「水域生態系統描述：海、湖泊和河流生態系統子模型」、「沼澤濕地生態系統描述：濕地生態系統子模型」、「農業生態系統：農業生態系統的子模型」、「地表計算大氣子模型，其中氣

態放射性核種使植物吸收或大氣層發生交換作用造成人類吸入之曝露」、「人類居住區劑量計算」、「非人類生物群劑量計算」各種變化及計算情境。

模擬生物圈評估之參數使用，包括：參數化和參數概述、選擇參數值和概率密度函數的方法、參數說明，以3項論點分別描述生物圈評估之參數使用。詳細可參考 SKB TR-14-06 之生物圈整合報告書。

### 2.2.8. 核種釋出後之分析

處置放射性廢棄物需考慮其長期安全性，未來居民的特點和習慣以及污染地區特性，只能基於若干假設（參見 ICRP 1998）。該假設之習慣應該反映所有相關的曝露途徑，且需確定在考慮區域及人體生理方面必須是合理和可持續的要求（ICRP 2006）。藉由識別環境介質無阻礙地和高潛在的核種累積，並且考慮人類的行為因為利用這種受污染的自然資源而導致最大的輻射劑量曝露，概念框架可以做為識別最大曝露的個體的發展應用。安全評估使用交互作用矩陣的系統方法用於識別放射性核種的傳輸和累積，以及人類和非人類生物群的曝露。

曝露途徑評估的目標是確定可能的位點特異性及曝露情況，並回答下列問題：某個場所的任何人是否會遭受環境污染？這種曝露在什麼條件下？為了分析，方便劃分曝露途徑分為五個要素，如下：

1. 污染源或釋出。來源可能包括廢棄物包裝、廢棄物桶、處置場和許多其他可能將放射性核種釋出到環境中的其他物質。
2. 環境傳輸和宿命。一旦釋放到環境中，放射性核種就會移動通過和跨越不同的介質，也可能會轉變固體狀態和不同的化學形式。
3. 曝露點或區域。這是人類或非人類生物群的具體位置，可能與受污染的介質接觸。
4. 曝露途徑。途徑為人類物理接觸到放射性核種的曝露點（例如經由吸入或攝食）。
5. 潛在曝露的人群，即人群可能會或可能已經曝露於輻射。

識別潛在曝露點或區域以及潛在的污染介質是曝露途徑分析注意的起點。水文地質模式模擬證明，目前（SFR1）和計畫（SFR3）處置場的污染地下水很可能會被排放到某些生態系統的深層次層，即海盆、湖泊和濕地（SKB 2014a）。然後，放射性核種將被傳輸到地表水和沈積物、泥炭和接收生態系統的大氣，並經由如地表和地下水通量傳播到

其他地區。此外，人類居民可能會流失培育湖泊和泥沙沉積物，用污染的植被作為農田的飼料和肥料，並用污染的水灌溉花園。為了分析目的，曝露區域的類型分為：

- 陸域環境。子類型包括：沼澤、農地，花園。
- 水域環境。分類：湖，河，溪流和大海。

相關的曝露點可由處置場衍生放射性核種污染的不同類型的环境介質表示。需要考慮的环境介質是大氣、表土層、水和非人類生物群（初級生產者和消費者）。為了更好地符合以上確定的環境分類，環境介質需進一步的區分。環境介質及其相關環境類型見表 4 有關陸域環境的环境介質及其相關的环境類型，表 5 有關水生環境的环境介質及其相關的环境類型。

表 4 陸域環境的环境介質及其相關的环境類型

| 環境介質      | 環境類型 |    |     |
|-----------|------|----|-----|
|           | 耕地   | 沼澤 | 花園地 |
| 大氣 - 戶外   | X    | X  | X   |
| 大氣 - 室內   | X    | X  | X   |
| 表土層 - 土壤  | X    |    | X   |
| 表土層 - 泥炭土 | X    | X  | X   |
| 井水        | X    |    | X   |
| 主要生產者     | X    | X  | X   |
| 消費者       | X    | X  |     |

表 5 水環境的环境介質及其相關的环境類型

| 環境介質      | 環境類型 |   |    |   |
|-----------|------|---|----|---|
|           | 湖    | 河 | 溪流 | 海 |
| 大氣 - 戶外   | X    | X | X  | X |
| 地表水       | X    | X | X  | X |
| 表土層 - 沉積物 | X    | X | X  | X |
| 主要生產者     | X    | X | X  | X |
| 消費者       | X    | X | X  | X |

建立人體曝露途徑分析，需要選擇有哪些作用會發生輻射曝露。在不同類型的活動中，個體可能曝露於污染環境介質中的放射性核種作用可分為以下幾種：

- 經由呼吸道（吸入）。
- 經由消化道（攝食）。
- 外部輻射曝露。
- 經由皮膚（皮膚吸收）。
- 直接引入身體（經由創傷性或開放傷口異物進入）。

福斯馬克地質處置設施劑量評估預測，上述五種作用中之前三個作用被認為是相關的，這符合國際建議，例如國際原子能總署指出，與輻射曝露評估相關的主要曝露方式是攝食、吸入和外部輻射曝露；與皮膚和頭髮有關的曝露模式（經過皮膚轉移，對皮膚和毛髮的粘附）被認為是可忽略的（IAEA 2003，SSI 1996）。此外，與經由攝食的環境介質曝露相比，由於放射性核種直接進入身體而導致的曝露風險被認為是可忽略的，例如：飲用水。

有三種相關的接觸方式（攝食、吸入和外部輻射曝露）與環境介質結合在污染物潛在釋放的確定點或區域。將福斯馬克的地質處置設施相關的各種環境介質與曝露途徑之組合。即為“曝露途徑情節分析案例”。SR-PSU 提出 29 個陸域環境曝露途徑，與 15 個水域環境曝露途徑。此集合包括一些間接曝露途徑情況，其中放射性核種從一種環境介質轉移到另一種環境介質。所有情節相比較後，共有 16 個陸域和 6 個水域情節被認為是有關的，需在安全評估中進一步分析，而前述需要進一步分析以外的其餘情節，被認為是可能性小或是沒有風險。

模擬核種釋出後分析，包括：人類曝露、非人類生物群曝露、與以前的安全評估比較、生物圈中的傳輸和曝露分析、氣候計算案例比較、參數不確定性的影響、其他曝露途徑分析，以 7 項論點分別描述核種釋出後分析。詳細可參考 SKB TR-14-06 生物圈整合報告書。

針對「與以前的安全評估比較」，圖 66 顯示比較 SR-PSU 與之前 SAR-08（紅色方塊）和 SR-Site（藍色方塊）放射性核種模式安全評估之最大地景劑量轉換因子(LDF)值。

針對「生物圈中的傳輸和曝露分析」，圖 67 顯示 C-14 在生態系統區塊隨時間之分布情況，圖 68 為 C-14 在風化表土層於單位放射性核種釋出到兩個生物圈系統單元之活度濃度，圖 69 顯示 C-14 於單位釋出到 7 個地表水生物圈系統單元之活度濃度，圖 70 顯示 C-14 在冠層大氣中於單位放射性核種釋出到兩個生物圈系統單元之活度濃度，圖 71 顯示 C-14 於單位放射性核種釋出到人類生活居住地區，從生物圈系統單元使用自然資源獲得之劑量，

圖 72 顯示 C-14 於單位放射性核種釋出到非人類生物棲息在未來福斯馬克地景之劑量率，圖 73 顯示單位放射性核種釋出到淡水生態系統中生物圈系統單元 157\_2 之生物體的總劑量率。

針對「氣候計算案例比較」，圖 74 顯示與不同的氣候條件有關生物圈計算案例各種生物圈系統單元之人類最大地景劑量轉換因子 LDF，圖 75 顯示與不同的氣候條件有關生物圈計算案例各種之非人類生物群之最大劑量率。

針對「參數不確定性的影響」，圖 76 顯示計算每個放射性核種的地景劑量轉換因子 LDF 之間的比率作為 Monte-Carlo 模擬的平均值和從計算從參數值中最佳估計之值。

針對「其他曝露途徑分析」，評估殘餘曝露途徑的劑量。這些途徑得到確認在曝露途徑分析中，但未包含在土地中使用變因來計算最大曝露人群的劑量。來自單位核種釋出到生物圈（從 2000 年到 20,000 年）用於比較來自 55 個放射性核種的殘留途徑和來自地景劑量轉換因子 LDF 之曝露途徑。剩餘的曝露途徑是：

- 無意中攝食無機和有機土壤。
- 植被外部曝露。
- 水域沉積物的外部曝露。

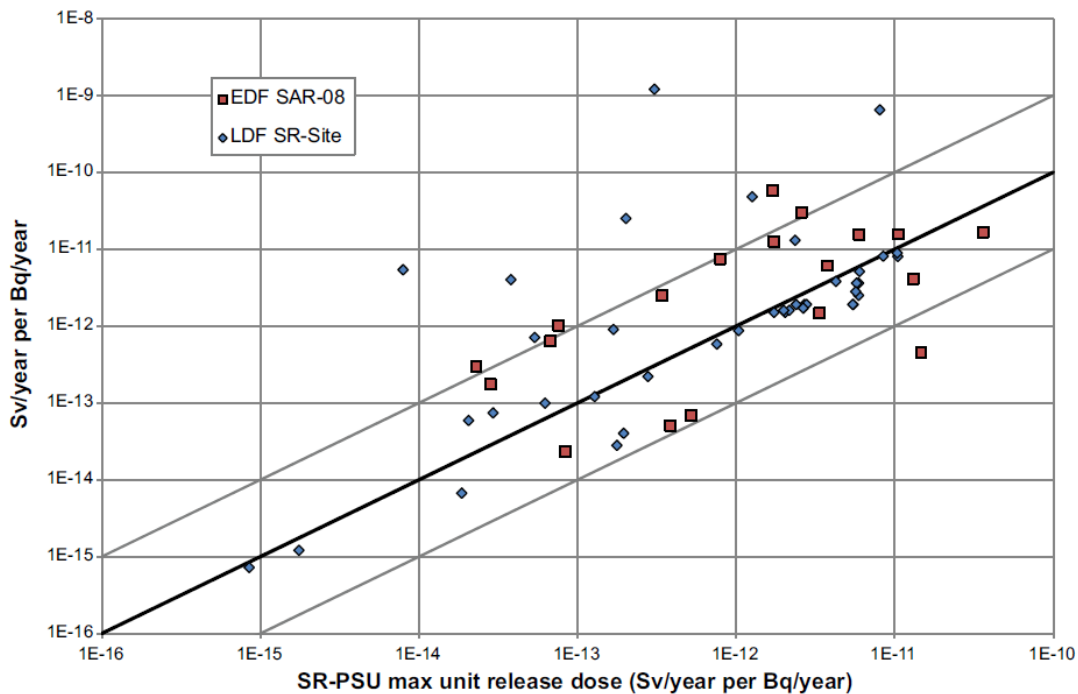


圖 66 比較 SR-PSU 與之前 SAR-08 (紅色方塊) 和 SR-Site (藍色方塊) 放射性核種模式安全評估之最大地景劑量轉換因子(LDF)值 (每 Bq y-1 之 Sv y-1)

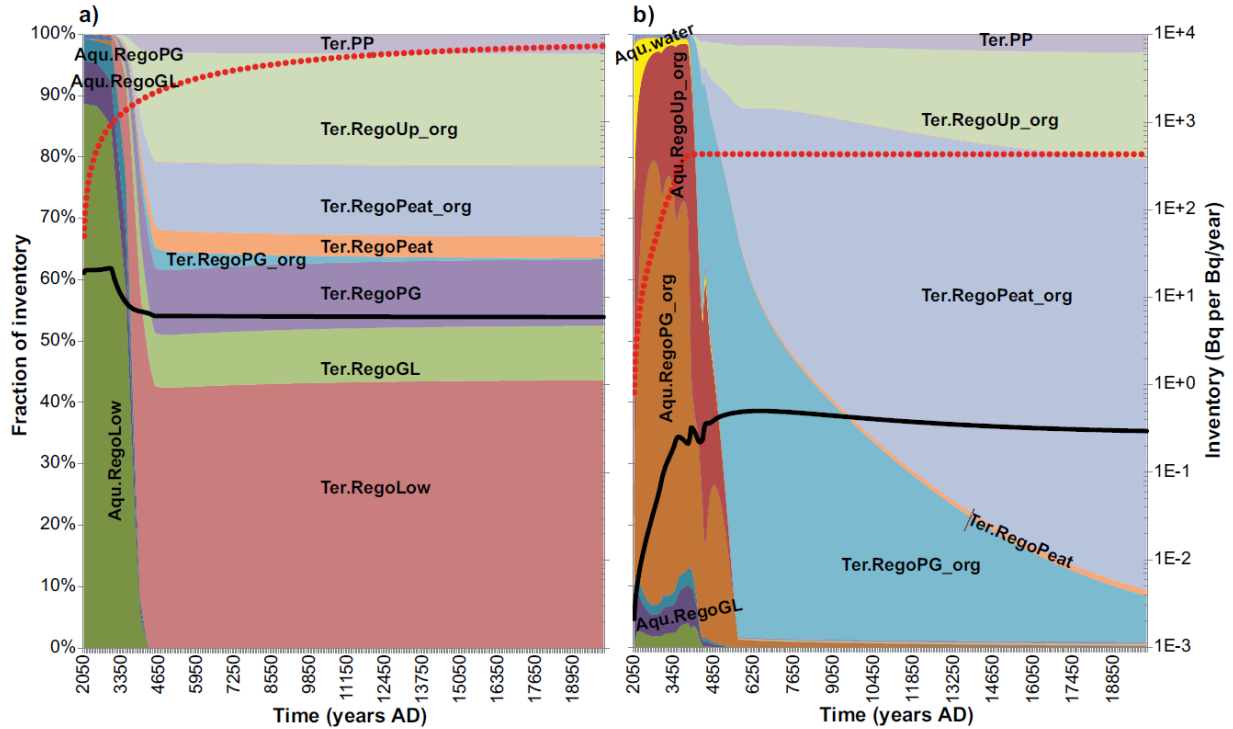


圖 67 C-14 在生態系統區塊隨時間之分布情況

說明：(a)單位放射性核種釋出量 (1 Bq y-1) 經由基岩中地下水流入到生物圈系統單元 157\_2；(b)放射性核種由生物圈系統單元 157\_2 經由地表水流入到下游生物圈系統單元 157\_1。黑色線條代表 C-14 在生物圈系統單元之總量，紅色虛線代表累積活度釋出到生物圈系統單元。

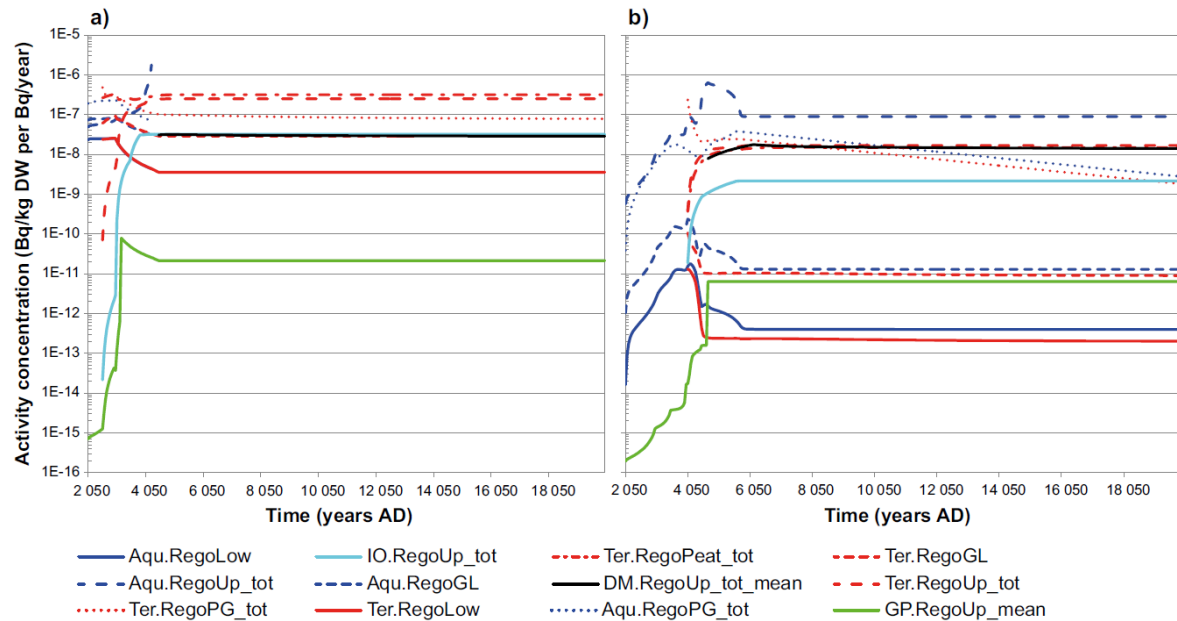


圖 68 C-14 在風化表土層於單位放射性核種釋出到兩個生物圈系統單元之活度濃度 (Bq kgDW-1 / Bq y-1)

說明：(a)單位放射性核種釋出量 (1 Bq y-1) 經由基岩中地下水流入到生物圈系統單元



157\_2；(b)放射性核種由生物圈系統單元 157\_2 經由地表水流入到下游生物圈系統單元 157\_1。深藍線表示模型水域部分風化層中的濃度。

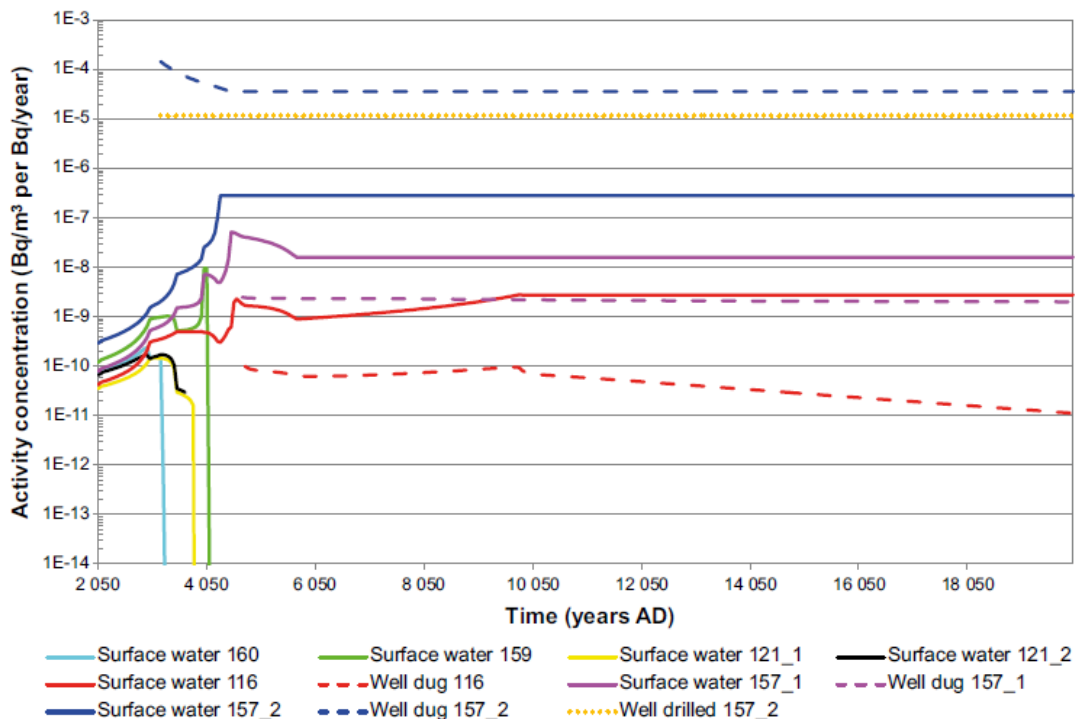


圖 69 C-14 於單位釋出到 7 個地表水生物圈系統單元之活度濃度

說明：實線代表在淹沒期海盆中的濃度，和地表水在陸域期間之陸域（湖泊，溪流或其他地表水）中的濃度。生物圈系統單元 157\_2 收到單位放射性核種釋出量（1 Bq y<sup>-1</sup>）經由基岩中地下水流到生物圈系統單元 157\_2。在陸域時期，物體 157\_1 和 116 位於 157\_2 的下游。請注意生物圈系統單元（121\_1、121\_2、159 和 160）在陸域期間沒有其他放射性核種的外部來源。

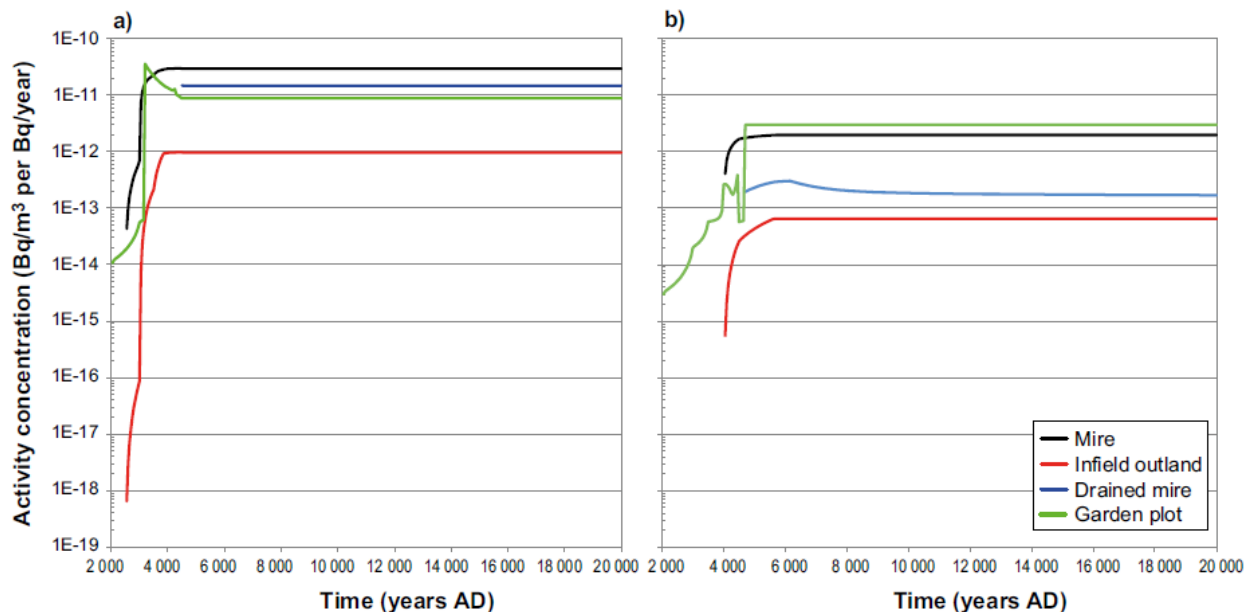


圖 70 C-14 在冠層大氣中於單位放射性核種釋出到兩個生物圈系統單元之活度濃度（Bq m<sup>-3</sup> / Bq y<sup>-1</sup>）的活性濃度。

說明：(a)單位放射性核種釋出量（1 Bq y<sup>-1</sup>）經由基岩中地下水流入到生物圈系統單元



157\_2；(b)放射性核種由生物圈系統單元 157\_2 經由地表水流入到下游生物圈系統單元 157\_1。

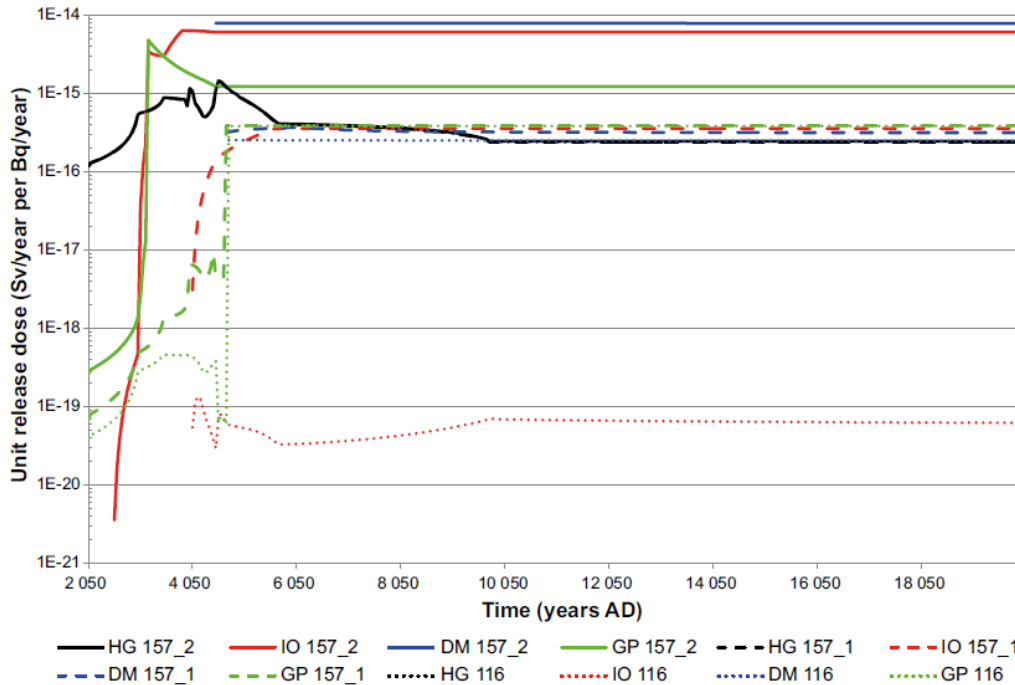


圖 71 C-14 於單位放射性核種釋出到人類生活居住地區，從生物圈系統單元使用自然資源獲得之劑量。

說明：實線代表來自生物圈系統單元 157\_2 的曝露劑量，虛線表示來自下游物體 157\_1 和 116 中的曝露劑量。顏色表示不同的土地使用變量：狩獵採集者 (HG)，排水和沼澤培育 (DM)，內部-外地農民 (IO) 和住家菜園區 (GP)。

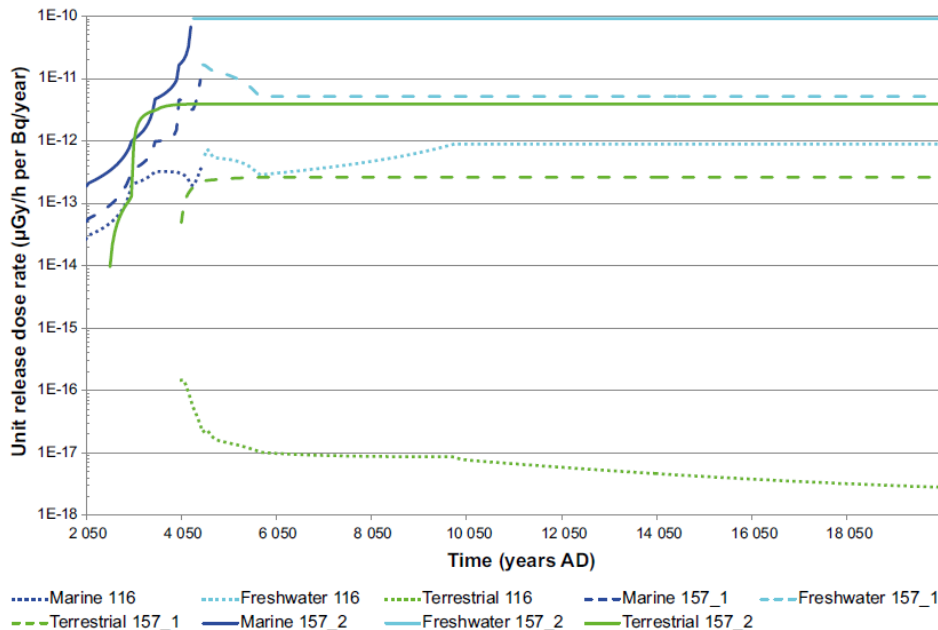


圖 72 C-14 於單位放射性核種釋出到非人類生物棲息在未來福斯馬克地景之劑量率

說明：這些線代表每個生態系統和生物圈對象所有被檢查的生物群體內於單位釋放下之最大劑量率。實線表示在生物圈系統單元 157\_2 中曝露而產生的劑量率；虛線表示

由下游物體 157\_1 和 116 中曝露而產生的劑量率。顏色表示海域、淡水（湖泊和溪流）和陸域（沼澤）生態系統。

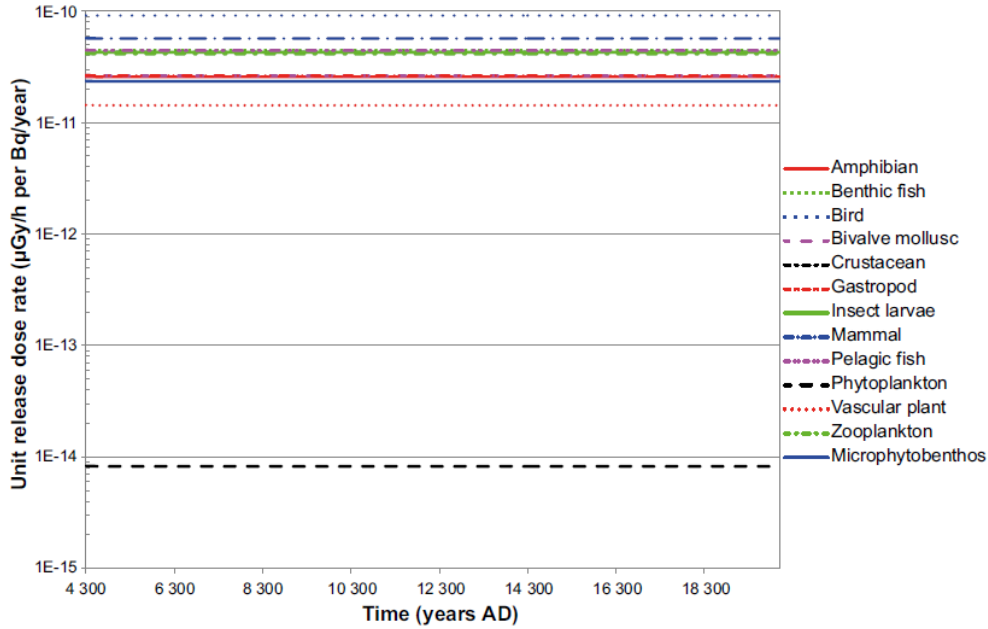


圖 73 單位放射性核種釋出到淡水生態系統中生物圈系統單元 157\_2 之生物體的總劑量率

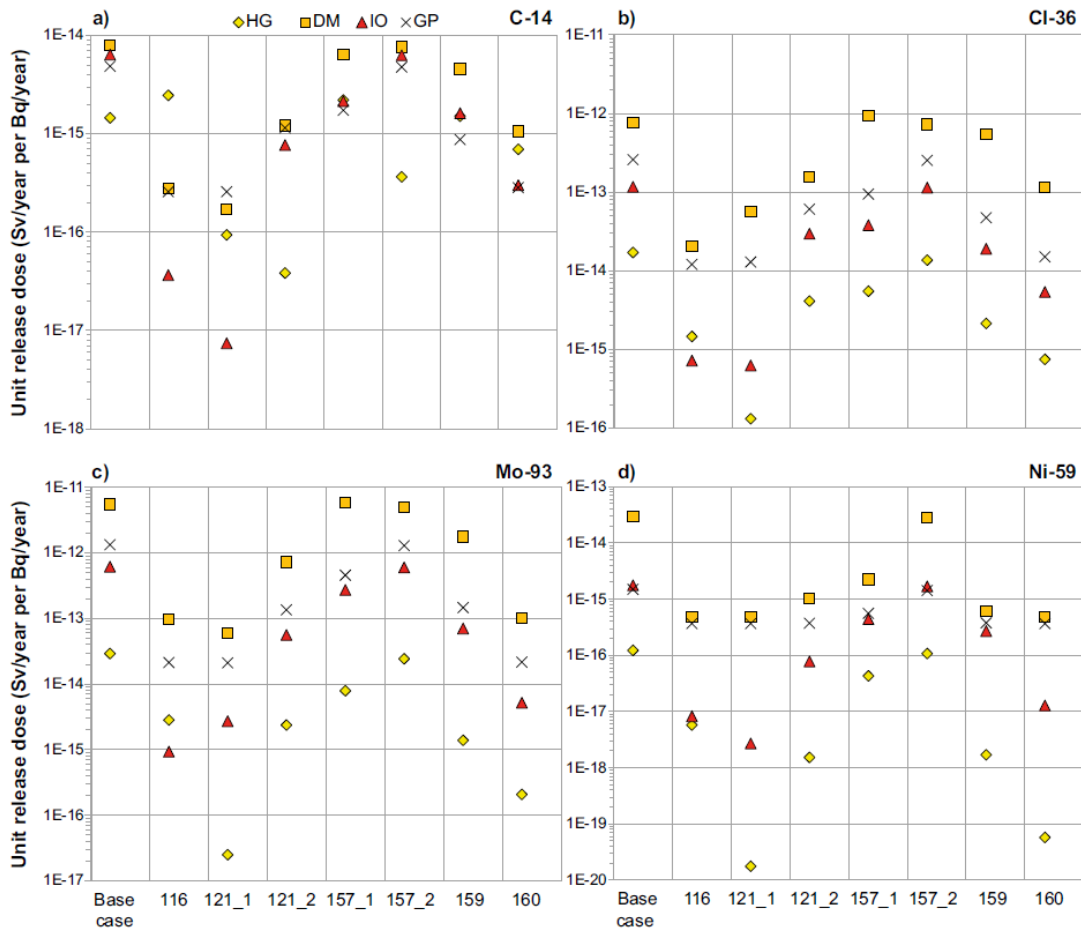


圖 74 與不同的氣候條件有關生物圈計算案例各種生物圈系統單元之人類最大地景劑量轉換因子 LDF (每 Bq y-1 的 Sv y-1)

說明：a) C-14, b) Cl-36, c) Mo-93, d) Ni-59。不同的土地使用變量：狩獵採集者 (HG)，排水和沼澤培育 (DM)，內部-外地農民 (IO) 和住家菜園區 (GP)。

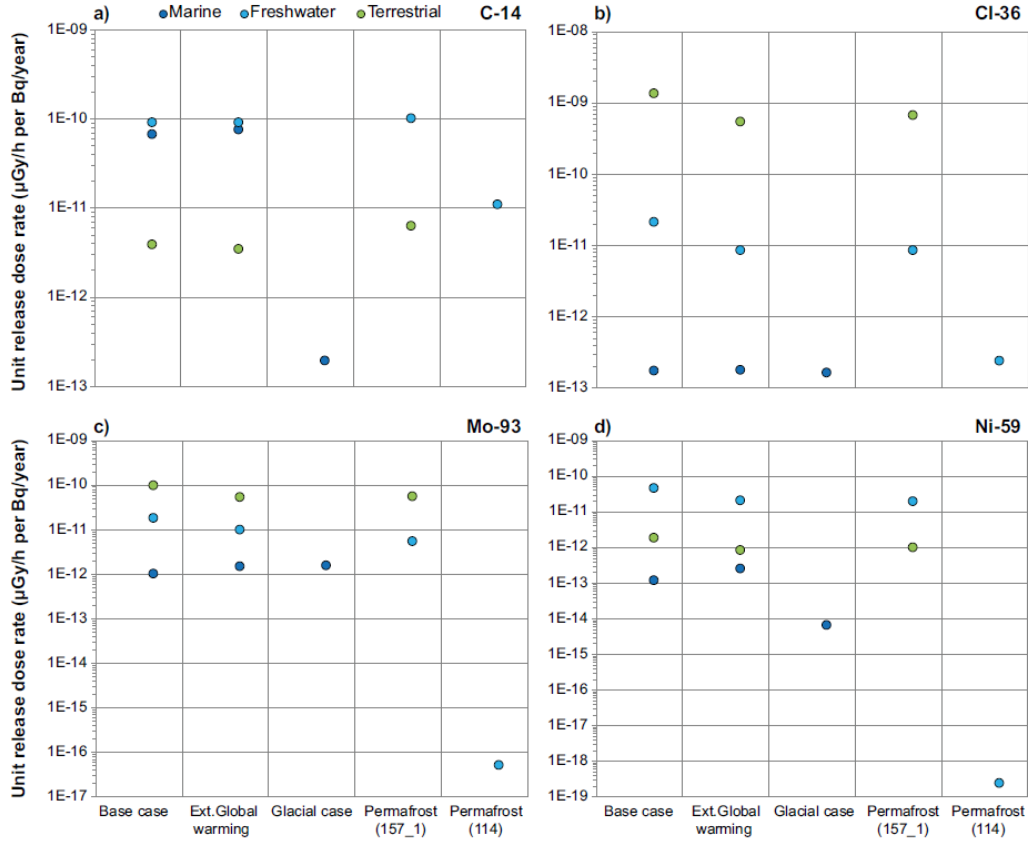


圖 75 與不同的氣候條件有關生物圈計算案例各種之非人類生物群之最大劑量率  
說明：a) C-14, b) Cl-36, c) Mo-93, d) Ni-59。海域/淡水/陸域是指非人類生物群的生態系統類型。

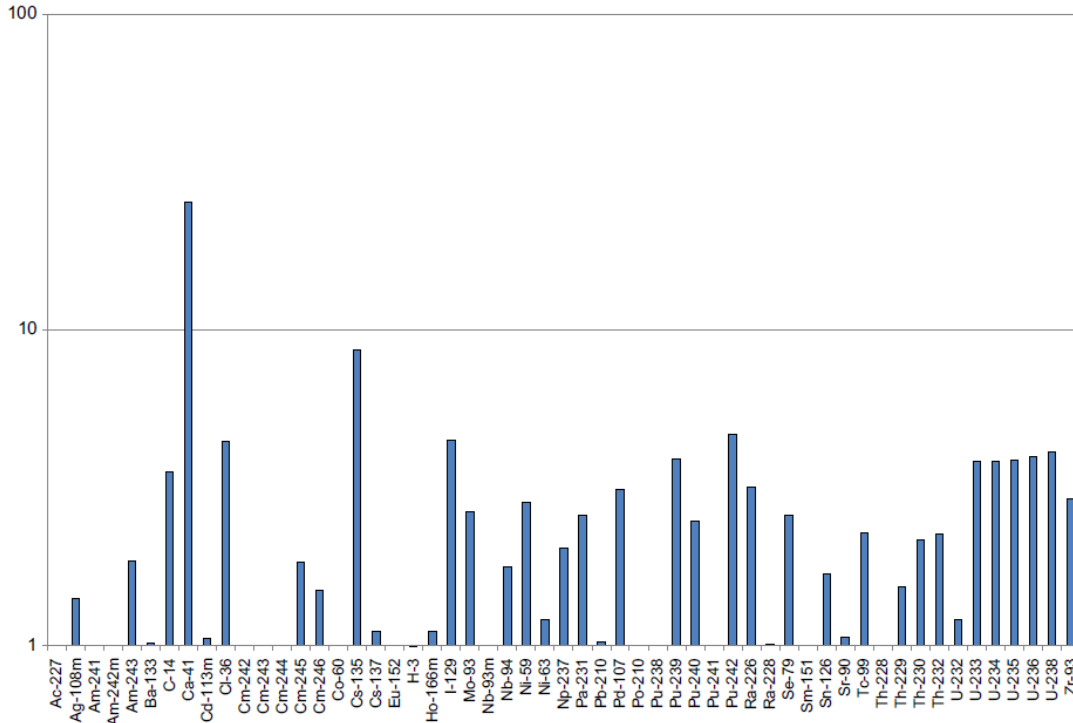


圖 76 計算每個放射性核種的地景劑量轉換因子 LDF 之間的比率作為 Monte-Carlo 模擬的平均值和從計算從參數值中最佳估計之值。

### 2.2.9. 生物圈評估不確定性討論

SR-PSU 為瞭解 Forsmark 生物圈中元素的遷移和累積，進行了全面的現場調查。這種理解是概念和數值模型的基礎。此外，利用 Forsmark 場區模型的數據對生物圈的放射性核種模型進行了參數化，以進行數據收集、解釋、概念模型製定和數學模型所有方面不確定性分析。SR-PSU 對於生物圈不確定性可分為三類：系統不確定性、模型不確定性和參數不確定性，並討論四種(C-14、Cl-36、Mo-93、Ni-59)長半化期放射性核種在生物圈安全評估之不確定性分析。

#### 2.2.9.1. 系統的不確定性

在生物圈分析中，系統不確定性是指與地質圈-生物圈關連系統、生物圈的發展和未來人類對自然資源利用有關的不確定性。底下描述和討論生物圈分析中這些不確定來源的處理。

##### 1. 釋出的位置

水文地質模擬指出，由 SFR1 及 (SFR3) 處置場系統潛在釋出大部分的核種到生物圈系統單元之物體標號 157\_2 中。這種簡化（給定單位釋放量）的結果在單獨的計算案例（BCC6）中被量化。分佈式釋出案例設定釋出到幾個生物圈系統單元不同區域，並作為潛在影響的上限。SR-PSU 對於從釋出位置分析得到，對於處理與釋出位置和時間有關的不確定性（即地球圈-生物圈關聯）對估計每年對人類的有效劑量和對非人類生物群的吸收劑量率沒有顯著影響。

##### 2. 氣候條件

在 SR-PSU 評估中，未來氣候的不確定性經使用三種不同(全球暖化氣候、早期的冰緣、擴展全球暖化氣候條件)的生物圈計算案例來處理，全球暖化計算案例被視為所有生物圈計算的起點和參考點，它與參考演變（SR-PSU 主要報告）相對應，描述了地表生態系統合理發展。在另外兩個氣候之生物圈計算案例中，系統地改變了受氣候影響的參數。單位釋放量模擬的結果證明，模型響應與釋出面積、海平面、地表水文和生態系統屬性變化的概念性理解和期望一致。因此，得出的結論是，對生物圈模擬中未來氣候條件的不確定性的

處理是充分和合理的。

### 3. 化學演變

Forsmark 地區上部風化層中大部分是容易風化的方解石，且將隨時間而溶解流失。這意味著富含鈣的沉積物對淡水和陸地生態系統的影響將會減少。因此，預計該地區未來的化學環境將接近瑞典更常見的低方解石條件，這意味著當 Forsmark 的數據與方解石的低地區相比時，淡水和濕地/農業土壤的 pH 值會下降 1 到 1.5 個單位。

藉由允許 pH 敏感參數的概率密度函數跨越對 pH 降低的預期響應，來處理方解石流出的潛在影響的不確定性。在天然濕地和淡水生態系統中，pH 敏感參數包括描述碳酸鹽系統的那些和濕地植被參數（例如生物量和淨初級生產力 P）。因此，方解石損失的潛在影響包含在概率 Monte-Carlo 模擬的結果中，這種不確定性包含在完整模型鏈的風險計算中。

### 4. 未來人類居民對自然資源的使用

根據瑞典法規和國際標準和指南，處理了未來人類將在生物圈單元系統中居住和/或利用自然資源的程度的不確定性。由四個不同的曝露人群，包括：

- (1) 狩獵和採集 (HG) - 地貌景觀自然生態系統區域代表的生存空間和食物區域。主要曝露途徑是從覓食地貌景觀（釣魚，打獵，收集漿果和蘑菇）和地表飲用水（河流或湖泊）。
- (2) 內部-外地農場 (IO) - 耕地作物種植和畜牧之自給農業（內部），及作為飼料和有機肥（農家肥）的濕地芻草（外地）。主要曝露途徑是經由牧草、作物、與畜牧業肉類和奶製品之食用，和在生物圈物體的挖掘水井或地表水之飲用。
- (3) 排水和沼澤培育 (DM) - 濕地排水和農業運用（包括作物和飼料生產）之自給農業。主要曝露途徑是放射性核種長時間累積於之生長作物內，和在生物圈物體的水井或地表水之飲用。
- (4) 住家菜園區 (GP) - 住家自給生產小規模的園藝蔬菜和根莖作物。主要曝露途徑是施肥和作物生長的菜園，和挖掘水井或地表水之飲用。

前述四個不同的曝露人群，四種曝露途徑進行評估分析，包括：攝入、吸入和直接曝露或使用自然資源造成曝露。各種曝露人群使用自然和農業生態系統，以及攝入含有地表

水和井水的放射性核種。此外，灌溉、燃燒生物質燃料（包括：泥炭或木材）以及使用灰土或海藻施肥所產生潛在風險，亦包括在住家菜園區的範圍內。土壤長期灌溉可持續數千年，但未納入評估範圍，因為之前已評估顯示放射性核種的累積量遠遠低於濕地的積累量。藉由評估四種不同曝露種群（土地利用變異）的曝露程度，判斷人類使用不同自然資源影響所存在的不確定性。

### 2.2.9.2.概念不確定性

模型不確定性是指由於對生態系統的不完整知識或缺乏了解而產生的不確定性，模型可分析核種於現地傳輸和累積，並以簡化模型的表示。例如，在放射性核種模型中，複雜的生態系統由被認為是內部同質區塊。使用模型方法須考慮的空間和時間尺度，因此，以下討論與生物圈系統單元有關之尺寸和深層風化層離散化相關的不確定性。

#### 1. 生物圈系統單元大小

生物圈系統單元係指可能處置場深層地下水排放影響的區域。生物圈系統單元的若干特徵影響放射性核種的傳輸和累積。其中一些與系統的大小有關，為了研究放射性核種模型有多大程度上取決於生物圈系統單元的大小，SR-PSU 建立生物圈系統單元(編號 157\_2) 替代系統單元的計算案例。討論兩個替代系統單元描繪（具有向上水力梯度和開放濕地區域），原始生物圈系統單元 157\_2 的表面區域和兩個替代系統單元差異兩倍，泥炭和冰川粘土層的深度，以及來自下部風化層的地下水向上流動也變化了兩倍。此外，通量率和風化層深度在生物圈系統單元尺度上沒有很強的關聯，其他系統單元特定參數的變化程度較小。總之，生物圈系統單元 157\_2 的區域影響核種傳輸和累積計算，較小的區域導致較大的環境濃度。多數情況下，環境濃度的變化可能與水文通量變化或風化深度呈現一階線性關係。

#### 2. 風化層大小

所有的風化層都由放射性核種模型的每個水域(如果存在)和陸域系統中區塊所組成。在核種主要釋出區域(物體 157\_2)的最低風化層，垂直接流速相對於該層的厚度是相當小。因此，垂直水流流動時間超過一年。由於人類和非人類生物群的曝露主要是由於地表風化層中放射性核種的積累，因此若低估深層風化層的延遲，即高估向地表層的傳輸。另外，垂直離散對最低風化層孔隙水長半化期放射性核種穩態濃度幾乎沒有影響，因此，居民在

從挖井中提取水時會曝露於其中。

### 3. 過渡階段的平流傳輸

在陸域條件下，來自下部風化層的地下水向上通量比在淹沒條件下高 6 倍。這可能導致從海洋到陸地條件的過渡期間放射性核素瞬時釋放到上層。因此，如果地質圈地下水濃度沒有變化，則預計在該地層中長半化期核種的穩態濃度不會因海岸線的通過而發生太大變化。

#### 2.2.9.3. 參數不確定性和敏感度分析

SR-PSU 利用場址特定參數數據、通用數據和專家判斷用於確定最佳估計值，並用概率密度函數表示參數估計的不確定性。對於每個放射性核種，還進行了蒙地卡羅(Monte-Carlo)模擬以結合與輸入參數相關的不確定性。蒙地卡羅模擬的結果也用於敏感性分析，以確定生物圈參數對人類之年有效劑量的不確定性和非人類生物群的吸收劑量率。

##### 1. 不確定性分析

在給定單位釋放率的情況下，進行不確定性分析以對比估計人類年劑量和非人類生物群的劑量率，使用來自 1,000 次模擬的端點的算術平均值作為蒙特卡羅模擬的預期值，這也是用於完整計算鏈中的風險計算的方法。

由於年劑量和劑量率的正偏態分佈，概率模擬的算術平均值始終高於對應於最佳參數估計值。差異通常在三分之一，但對於少數核種，差異大到 9 (Cs-135) 或甚至 25 (Ca-41)。對於短半化期的放射性核種，其中井水是主要的曝露途徑。由於參數不確定性包括在傳輸計算中使用概率模擬，所以利用算術平均值和最佳估計值之間的差異，用以減少生物圈參數的不確定性以降低計算風險。

##### 2. 敏感度分析

上述蒙地卡羅模擬也用於四種長半化期放射性核種的敏感度分析，即 C-14、Cl-36、Ni-59 和 Mo-93。該分析方法係為確定對評估結果具有強烈影響的參數。通常，描述吸附和生物體攝取的參數，對人類劑量和劑量率及對非人生物群的變化貢獻最大。

經由 SR-PSU 不確定分析之技術及方法，整經理不確定性管理應包含 3 種主要不確定

性來源與管理，如下說明：

1. 系統不確定性：透過 FEPs 的管理以提供足夠之初始條件組合、足夠之內部與耦合作用組合、足夠之外部影響因子組合。此外情節的選擇也可以視為系統不確性的來源之一，可以透過如系統性的情節篩選、安全指標來篩選安全相關情節、採用上限值計算（類似極端值概念）、品質保證措施來確保 FEPs 處理、外部審查。
2. 概念不確地性：包含(1)內部作用，利用作用報告(process report)來詳細界定各作用之不確定性，內部作用間的相互影響有時也可以看成是系統不確定性之一，外部審查也是不確定性管理的手段之一；(2)外部作用不確定性的管理比較像是程式化的管理，可以透過先進的模式來量化外部作用的不確定性，此外也可以採用上限值計算的概念，來量化最極端的現象。
3. 資料不確定性：資料不確定性的管理可以藉由各領域專家的外部審查來管理安全評估所使用資料的不確定性。安全評估數學模式使用資料來估算處置設施演變的劑量與風險，因此應有完整的模式文件資料與如何避免人為輸入錯誤的機制。

### 2.3. 本章小結

SR-PSU 提供完整之生物圈評估及情節分析途徑分析和曝露途徑劑量傳輸至受影響最大的人類群體及非人類生物群之劑量評估。SR-PSU 安全評估計畫係依據 IAEA(2007)定義曝露途徑，指輻射或放射性核種可以達到生物圈導致人類曝露。SSM(2008)(2008年SSMFS: 37, 一般建議)定義更詳細的曝露途徑：放射性物質從場址遷移至人類居住地方，或由環境保護法規所涵蓋的生物體存在的地方。這過程作用，包括在地質障壁的延散作用，流動傳輸與氣體傳輸與生態系統內的遷移作用，與人類或非人類生物於環境中的攝取作用。由於 SR-PSU 生物圈安全評估成果完整，建議低放坑道處置生物圈安全評估技術可參考 SR-PSU 生物圈安全評估技術發展方式，包括：1.場址描述，2.場址未來條件與系統演變發展，3.模擬地景發展與土地利用，4.模擬地景中的生物圈系統單元演變，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，6.生物圈核種模式，7.生物圈評估之參數使用，8.核種釋出後之分析，9.生物圈評估不確定性討論，作為低放坑道處置生物圈安全評估技術要項。



### 第3章 研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術

#### 3.1. 安全評估背景及目的

本章參考 SR-PSU 之評估背景及評估技術，研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術，包括：1.場址條件描述技術，2.場址條件與系統演變發展技術，3.地景發展與土地利用模擬技術，4.地景生物圈系統單元演變模擬技術，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術，6.生物圈核種傳輸模式模擬技術，7.生物圈評估參數建立技術，8.核種外釋後分析技術，9.不確定性分析技術，10.國際經驗技術引入。

對於生物圈安全評估，係為確定低放處置場外釋放射性核種到地表環境中之輻射劑量危害的可能性，場區封閉後安全分析結果需符合法規安全限值之要求，分析結果需提出，包括：時間尺度、保護人體健康的風險標準、最大曝露群體、對環境的影響、情節等。並作為監管單位對於放射性廢棄物處置之監管要求。

我國低放坑道處置生物圈安全評估之前必須對於對於先掌握安全評估初始條件，包括：處置場系統、場址背景、源項和釋出情節。

##### 1.處置場系統

處置場系統接收低放射性廢棄物進行處置。目前有達仁鄉和烏坵鄉兩處建議候選場址，需有低放處置場之位置、處置方式、處置容量、處置場區之規劃與配置、廢棄物來源與特性完整之初始條件資料。

- (1) 處置方式：說明廢棄物處置之型式及採用之緣由。
- (2) 處置容量：說明處置設施可處置廢棄物的總體積量、各核種之總活度、及每年之處置量。
- (3) 處置場區之規劃與配置：說明處置場區內各設施及作業之規劃，並以適當之比例尺繪製設施配置圖，圖上標示比例尺、方位、區域名稱及設施名稱，標明輻射管制區域之劃分情形，並附必要之剖面圖或透視圖。
  - A. 廢棄物來源與特性。
  - B. 說明處置設施接收廢棄物的來源與種類、型態、數量及其分類方式。
  - C. 說明接收廢棄物內所含核種及其最大比活度。
  - D. 說明接收廢棄物包件與其表面污染最大限值及最大劑量率限值。

E. 說明接收廢棄物之各項物理、化學特性之限制。

F. 說明處置容器之材質與規格。

## 2. 場址背景

達仁鄉和烏坵鄉兩處建議候選場址，需針對場址之位置（描述場址之地點、面積及場界），並以適當比例尺之地圖說明，並針對地形地貌、區域地質、水文地質、居住人口、土地利用等背景資料作說明。

## 3. 源項與釋出情節

低放處置之安全原則是：限制廢棄量的放射量和長時間遲滯核種釋出以對人類和環境風險降低。核種盤存量列於初始狀態報告中。依據 SR-PSU 評估結果，其處置場相當數量（98%）活度會在 1 千年內衰變消失，需對低放廢棄物中的活度在前 600 年是由哪些核種佔主要（SR-PSU 是由 Ni-63 佔主要）？600 年之後又是由哪些核種佔主要？（SR-PSU 是由 Ni-59 和 C-14 佔主要）。放射性核種潛在的放射危害性主要受輻射類型、輻射強度大小以及移動性所影響，需重點說明模式模擬遷移結果顯示放射性強度最初是以哪些核種為主（SR-PSU 是由 Am-241 為主），且在運轉後之 5000 年，這種輻射危害性已經降低到約多少百分比（SR-PSU 是由 Am-241 為主，5000 年已降低到約 1%）。

需於安全評估初始條件中說明安全評估外釋情節分析的重要性，可以經由模式模擬從處置場到生物圈之放射性核種的傳輸和劑量評估。生物圈的放射性核種模式可用於描述在生物圈內核種傳輸和累積並評估曝露情況。

### 3.2. 安全評估技術

建議我國生物圈安全評估應參考 SR-PSU 建模作業(如表 6)，發展該模擬技術，包括：

#### 1. 放射性核種傳輸模擬(Radionuclide transport modelling)：

建立計算放射性核種於生物圈環境系統之環境介質內遷移，於環境中隨著時間傳輸和濃度累積。這技術包括利用 Kd 值之核種傳輸方程式及核種反應化學傳輸模式之發展。

#### 2. 劑量計算(Dose calculations)：

發展能模擬放射性核種傳輸濃度，經由傳輸途徑到達生物圈環境後，計算核種於人類之劑量率。劑量計算參數來自於場址地表地景輸入參數及劑量轉換參數。

### 3.地景模擬(Landscape modelling)：

建立地面地景係隨著時間而演變之模擬技術方法，我國處置系統有離島島嶼及本島陸域，包括：前一次冰期循環以來的海岸線演變以及陸域水域生態系統的演變，地景模擬可提供地景幾何隨時間演變的資訊。其中海岸線演變及陸域生態系統演變屬於離島島嶼應建立之分析技術，本島島嶼應該較注重陸域生態系統演變。

### 4.水文模擬(Hydrological modelling)

建立生物圈水文循環模擬，分析地面及地下水流帶動放射性核種傳輸之基本水流狀態。水文模擬提供場址於不同時間點（即地景於海域、水域和陸域階段）水流資訊。

### 5. 生態系統特定參數(Ecosystem-specific parameters)

生態系統特定的參數包括支持放射性核種傳輸模擬和劑量計算所提供的參數。生態系統特定參數涵蓋生態系統中的化學和生物各種參數以及與人類特徵相關的參數。生態系統特定參數是生態系統內的初級生產和礦化、分配係數和元素濃度比參數(Kd 和 CR)和劑量係數。場址特定資料係來自場址調查，並盡可能使用於描述參數和特定參數值。無法預測未來動態變化的生態系統詳細參數值，而係利用目前場址和附近生態系統的數據被作為未來的生態系統天然類比的參數。這是基於假設物種之間所有相關之相互作用和生物與非生物環境之間包含在這些類比生態系統中。

表 6 SR-PSU 生物圈建模作業評估模式

| 安全評估技術 | 說明                                        | 技術參考文獻       | 評估模式流程之建模作業         |
|--------|-------------------------------------------|--------------|---------------------|
| 核種傳輸模擬 | 為模擬核種於生物圈環境介質之濃度的核種傳輸模式                   | SKB R-13-46  | •放射性核種傳輸和劑量         |
| 劑量計算   | 由放射性核種傳輸模式的濃度應用於對人類的劑量計算                  | SKB R-13-46  | •放射性核種傳輸和劑量         |
| 地景模擬   | 數值高程模型 (DEM) 描述了當前地景的高程                   | SKB R-12-03  | •地景發展<br>•生物圈系統單元識別 |
|        | 表土層深度模型(RDM) 描述場址表土層的地層和深度                | SKB TR-13-20 |                     |
|        | 從過去和現在表土層水域發展模型 (RLDM) 描述了水域發展的未來演變及表土層深度 | SKB R-13-27  |                     |

| 安全評估技術 | 說明                                                                            | 技術參考文獻       | 評估模式流程之建模作業                                                                                        |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | 地景發展模式 (LDM) 識別生物圈系統單元 (即: 放射性核種可能進入生物圈的區域), 描述生物圈系統單元的發展, 並為放射性核種傳輸模型提供輸入參數。 | SKB TR-14-06 |                                                                                                    |
| 水文模擬   | 對於現在和未來的水文現象模擬, 並可以作為放射性核種傳輸模型的地下水流速度輸入參數                                     | SKB R-13-19  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 地表水文</li> <li>• 良好調查</li> </ul>                           |
| 生態特定參數 | 分配係數和元素濃度比參數 (Kd 和 CR) 於生物圈的傳輸計算, 為放射性核種傳輸建模提供輸入參數                            | SKB R-13-01  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 生物圈 Kd/CR</li> </ul>                                      |
|        | 生物圈參數用於放射性核種傳輸建模和劑量計算。描述生態系統參數的計算, 如初級生產和礦化, 人類特徵 (食物需求) 和劑量係數                | SKB R-13-18  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 生態系統參數和劑量係數</li> <li>• 場址特性定資料</li> <li>• 輸入參數</li> </ul> |

### 3.2.1. 場址現況調查與未來演變發展技術

建議我國對於場址現況調查與未來演變發展, 應具備該類項目之調查技術。

#### 1. 場址現況調查

調查場址當前的情況、水文和化學、海域、林地和陸域生態系統、水井和水資源管理、人口和土地利用等。

##### (1) 地形、地質與地震

需具備調查場址特徵技術, 描述場址及附近地區地形與地貌, 包括地形高度與起伏趨勢、坡度分布、重要地貌特徵 (如河川、山脈、水域、海岸線等), 及潛在環境災害分布地區 (如崩塌地、沖蝕溝、河川攻擊坡、土石流沖積扇、斷層錯動地形等)。針對地質與地震, 需說明場址及附近地區之地層、地體構造、活斷層、歷史地震等之調查成果等, 並說明斷層與地震危害度之調查與評估方法。並能繪製區域地形圖、區域鳥瞰圖、數值高程模型圖、表土分佈和地表基岩區域圖、區域地下水文地質圖等。其中地震特性: (a) 必須評估所有可得之歷史數據, 並詳列場址範圍 300 公里以內地震規模大於或等於 3 的所有地震參數; (b) 提出標示震央的地圖以顯示這些地震的分佈, 以大比例尺的地圖, 標出場址 100 公里以內

發生的地震，以及地震發生率高的區域；(c)必須列出地震發生的時間、震源深度、震央座標、最大震度、規模和與場址的距離、資料的來源；(d)其它與山崩、地表斷裂和液化等相關之資料。

## (2) 水文和化學

需調查區域氣象資料(包括提供場址附近之氣象資料，包括降水量、降水日數、氣溫、相對濕度、風向、風速、颱風、蒸發量、氣壓、日照時間、日射量等，並提供有紀錄以來之年平均值及極端值等)。地表系統的水文地球化學(地表水、地下水、土壤和沈積物的化學)各種現場調查和建模作業，包括研究海水和海域系統的水化學；陸域系統的化學性質，包括表土風化層土壤和沈積物地球化學和有關地表系統化學的綜合分析技術。

說明可能影響場址安全及核種遷移之水化學，土壤與岩石之分類組成及地球化學特性，以及相關之地化模擬資料。地球化學調查因子涵蓋場址及附近地區之無機質成分、有機質含量、氧化還原電位、酸鹼值、分配係數、遲滯因子、離子交換能力、放射性核種之溶解度與化學型態、價數與性質等。

## (3) 海域生態系統

需處置場址沿岸海域生態系統調查技術，海域生態食物鏈關係，非生物和生物作用於場址沿岸海域生態系統中元素的傳輸和累積。

## (4) 湖泊水域生態系統

需處置場址沿岸附近湖泊水域生態系統調查技術，湖泊水域生態系統食物鏈關係，非生物和生物作用於場址沿湖泊水域生態系統中元素的傳輸和累積。

## (5) 陸域生態系統

陸域植被受地形，地貌特徵和人類土地利用所影響，需處置場址陸域生態系統調查技術，陸域生態系統食物鏈關係，非生物和生物作用於場址對陸域生態系統中元素的傳輸和累積。林業、農業、畜牧業及養殖業等需進行調查。

## (6) 井和水資源管理

需調查區域用水條件，水井分布情況，井水水質分析。對於地表水及地下水說明如下：

地表水：說明場址及附近地區之地面水體水文、水質特性、水資源使用狀況及其調查方法。

地下水：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。

#### (7)人口和土地使用

社會與經濟：描述場址及附近地區之行政區交通設施、公共設施、軍事設施、觀光休閒設施、場址所在鄉鎮及週邊鄉鎮之人口數（含流動人口）及人口結構、土地利用情形與開發計畫。

### 2. 未來演變發展技術

場址條件與系統演變發展係說明驅動場址演變發展的主要作用、需針對氣候變化和氣候有關作用、地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、水域生態系統、陸域生態系統之演變發展進行分析技術。

#### (1) 驅動場址演變發展的主要作用

場址長期演變若是類比 SR-PSU 取決於兩個主要地區因素：氣候變化和海岸線位移。這兩個因素結合在一起，強烈影響一系列過程，從而決定了生態系統的發展、未來放射性核種傳輸、輻射曝露以及產生的劑量和風險之重要條件。這種作用之例子是侵蝕和沈積、地下水補注和抽水、土壤形成、初級生產和有機物質的分解。所以需具備本項分析場址演變發展技術。

#### (2) 氣候變化和氣候有關作用

4 種未來氣候條件（全球暖化氣候條件下、早期的冰緣氣候條件下、擴展全球暖化氣候條件下、在 Weichselian 冰期循環氣候條件下）。需能提出安全評估報告之主要情節分析。前三種情況被定義為跨越有關未來氣候的演變：低（早期冰緣氣候條件）、中（全球暖化氣候條件下）和高（擴展全球暖化氣候條件下）人類碳排放量的範圍內。Weichselian 冰期循環氣候條件下，表示為重建末次冰期循環條件。

為符合台灣氣候條件，對於氣候變化和氣候有關作用，4 種未來氣候條件（全球暖化氣候條件下、早期的冰緣氣候條件下、擴展全球暖化氣候條件下、在 Weichselian 冰期循環氣候條件下），其中之早期的冰緣氣候條件可能較不需要考慮，其中三種未來氣候條件分析技術，建議我國應考慮未來氣候演變發展對處置場系統之影響。

### (3) 地形和表土層

需能提出地形和表土層之地景幾何形狀的連續變化技術。

### (4) 水文和化學

目前和未來的水文和近地表水文也將受地景發展和氣候變化所影響。氣候變化對地表水文影響很大，潮濕和溫暖的氣候，或是寒冷的氣候冰緣，將對水文通量重要變化。

需場址地區觀察到的化學條件演變的技術。

### (5) 海域生態系統

需溫和條件下發展全球暖化的影響分析場址沿岸海域生態系統之技術。

### (6) 水域生態系統

需溫和條件下發展全球暖化的影響分析場址水域生態系統之技術。

### (7) 陸域生態系統

需溫和條件下發展全球暖化的影響分析場址陸域生態系統之技術。

## 3.2.2. 地景發展與土地利用模擬技術

建議我國應具備地景發展與土地利用模擬技術，由於安全評估涉及之時間尺度很長，需具有地景發展與土地利用模擬技術，先蒐集調查已知之地景特性，並搭配地景配置重要不同因素，包括人類使用的地景、海岸線位移和氣候。然後利用搭配地景發展模式(LDM)詳細闡述其潛在的配置，未來地景配置是依據目前對於地景的知識、過去土地利用資料、海岸線位移地質證據和氣候模擬而得。

## 3.2.3. 地景生物圈系統單元演變模擬技術

建議我國應具備地景生物圈系統單元演變模擬技術，定義放射性核種傳輸和劑量評估的地區為生物圈系統單元。利用地表地下水模擬水流。並利用地化傳輸模式模擬放射性核種隨著地下水流入與流出生物圈系統單元，或相鄰生物圈系統單元經由地表和地下水傳輸過程產生核種累積和/或再傳輸。

## 3.2.4. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術

建議我國應具備生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術，以建立生物圈的特徵、

事件與作用分析方法，探討核種在環境中遷移及累積，進而評估環境中人類的健康及安全。生物圈評估需建構作用矩陣(Interaction Matrix,IM)，確認可能影響核種累積及曝露的各種成分及途徑。

建立曝露途徑分析，包括：(1)放射性核種源或釋出(2)核種在地表系統環境之遷移結果(3)曝露區域(4)輻射進入生物體的曝露途徑或方式，即無論是外部曝露於環境介質中的放射性核種或由生物體吸收放射性核種造成的內部曝露(5)潛在可能曝露的種群。

建立模擬生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，包括：鑑定對於核種傳輸及生物圈中核種的累積和曝露重要的作用和特徵、掌握潛在與安全有關的生物圈 FEPs、曝露途徑分析、識別人類生物群的途徑終點、生物圈計算情境案例。

### 3.2.5. 生物圈核種傳輸模式模擬技術

建議我國應具備生物圈核種傳輸模式模擬技術，包括：放射性核種傳輸模式，和計算對人類和非人類生物之核種輻射劑量模式。需建立生物圈的放射性核種的傳輸模型，包括：1.生物圈系統單元隨著海岸線位移和生態系統演替而連續性變化發展，2.放射性核種於地質圈系統隨著時間變化藉由地下水流動而外釋，且核種分佈在非均質地景區域，3.核種之傳輸、累積和放射性核種的衰變具有不同的生物地球化學性質，4.放射性核種與水在不同部分地景之間傳輸係由於陸域環境形成的結果，5.在地景區域之未來居民曝露和劑量計算。

### 3.2.6. 生物圈評估參數建立技術

建議我國應建議核種傳輸與劑量評估之參數建立調查技術，由於生物圈安全評估需要甚多參數，需配合模式需求提供生物圈放射性核種遷移模擬所需使用的所有參數，包括：「放射性核種參數」、「景觀幾何形狀」、「土壤特性」、「水文參數」、「元素比參數」、「水域生態參數」、「陸域生態系統參數」、「人類居住特性參數」、「參數在替代計算案例使用」等。

我國需建立模擬生物圈評估參數使用技術，包括：參數化和參數概述、選擇參數值和概率密度函數的方法、參數完整說明，描述生物圈評估之參數使用。

### 3.2.7. 核種外釋後分析技術

我國需建立五種曝露途徑分析技術：

1.污染源或釋出：來源可能包括廢棄物包裝、廢棄物桶、處置場和許多其他可能將放射性



核種釋出到環境中的其他物質。

- 2.環境傳輸和宿命：一旦釋放到環境中，放射性核種就會移動通過和跨越不同的介質，也可能會轉變固體狀態和不同的化學形式。
- 3.曝露點或區域：為人類居住的具體位置，可能與受污染的介質接觸。
- 4.曝露途徑：途徑為人類物理接觸到放射性核種的曝露點（例如經由吸入或攝食）。
- 5.潛在曝露的人群：即人群可能會或可能已經曝露於輻射。

建立人體曝露途徑分析技術，包括：

- 經由呼吸道（吸入）。
- 經由消化道（攝食）。
- 外部輻射曝露。
- 經由皮膚（皮膚吸收）。
- 直接引入身體（經由創傷性或開放傷口異物進入）。

經由以上說明，必須建立模擬核種釋出後之分析技術，包括：人類曝露、與以前的安全評估比較、生物圈中的傳輸和曝露分析、氣候計算案例比較、參數不確定性的影響、其他曝露途徑分析，以7項論點分別描述核種釋出後之分析。

### 3.2.8. 不確定性分析技術

我國應建立系統不確定性、概念不確地性及資料不確定性之分析技術。

### 3.2.9. 國際經驗技術引入

目前已經有為數眾多已完成或正在進行中的國際研究計畫致力於放射性廢棄物處置功能評估之生物圈安全評估作業。該研究計畫有共同特點係為針對特定場址評估，該特性反應處置場發展之進展，有特定場址的開發進展。BIOPROTA計畫是目前最重要的國際合作項目之一。

建議我國需將國際經驗技術引入，並參與國際合作計畫之科學和現場調查工作，與生物圈環境安全之情節分析及相關安全評估工作，完成之低放處置安全評估成果應送國際同儕辦理審查。

## 3.3. 我國兩處低放建議候選場址與瑞典低放坑道處置有關生物圈安全評估技

## 術相關性探討

我國兩處建議候選場址目前正進行準備、調查與申照階段技術發展，其主要目標在確認「場址調查」、「工程設計」與「安全分析」領域所採用之分析技術或調查技術適宜性，並掌握各項參數之不確定性。我國規劃此三階段之技術發展流程如圖 77，前述各領域之安全考量與工作流程規劃，將場址特性調查、工程設計與安全分析三個技術領域之技術應用流程規劃如圖 78，其中涉及生物圈安全評估技術建立有關參數與技術發展，及對應 SR-PSU 技術，如表 7。

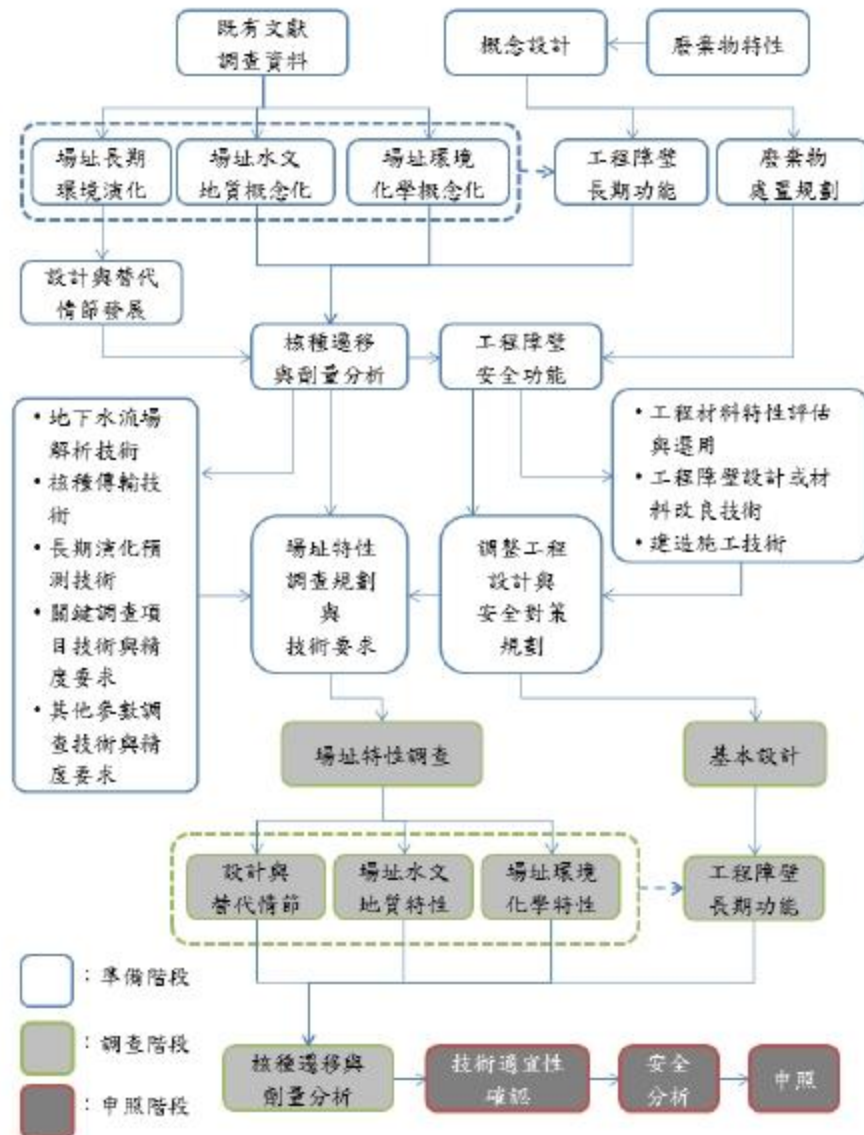


圖 77 三階段技術研究發展流程圖

表 7 我國建議候選場址涉及生物圈安全評估技術所需建立有關之參數類型

| 項目                                            | 資料來源<br>(現況) | 產出參<br>數編號 | 主要參數類型                                        | 後續執行工作                                        | 備註                                                                                 | 對應<br>SR-PSU<br>技術                             |
|-----------------------------------------------|--------------|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 地形<br>高程                                      | 文獻研判         | SI7        | 適當比例尺之地形圖                                     | 現地測量                                          | 場址特性參數技<br>術建置報告<br>3.3.1 節與<br>3.3.2 節                                            | 1. 場址<br>條件描<br>述技術                            |
|                                               |              |            | 地形高度                                          |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 坡度分布                                          |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 重要地貌特徵                                        |                                               |                                                                                    |                                                |
| 地表地<br>形演化                                    | SI5、SI7      | SI9        | 地形抬升沉降趨勢                                      | 需進行地表高程<br>測量監測                               | 區域地質歷史、<br>核飛跡定年法與<br>GPS 量測之既有<br>文獻研判                                            | 2. 場址<br>條件與<br>系統演<br>變發展<br>技術               |
|                                               |              |            | 地表侵蝕沉積趨勢                                      |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 地形高程                                          |                                               |                                                                                    |                                                |
| 入出滲<br>特性                                     | SI 27        | SI16       | 入出滲邊界                                         | 搭配調查階段地<br>下水位監測資料<br>與現地踏勘調整<br>水文地質概念模<br>型 | 用於建構水文地<br>質概念模型                                                                   | 2. 場址<br>條件與<br>系統演<br>變發展<br>技術               |
|                                               |              |            | 入滲量                                           |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 環境特徵部分參數                                      |                                               |                                                                                    |                                                |
| 地表<br>水文                                      | SI9、SI27     | SI17       | 地表水體水文                                        | 依調查資料更新<br>分析結果                               | 場址特性參數技<br>術建置報告<br>6.3.1~4 節                                                      | 3. 地<br>景發<br>展與<br>土地<br>利用<br>模擬<br>技術       |
|                                               |              |            | 地表水質特性變化                                      |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 洪氾與侵蝕分析                                       |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 極端氣候狀態下水<br>文受擾動狀態                            | 依調查資料更新<br>分析結果                               | 場址特性參數<br>技術建置報告<br>6.3.1~4 節                                                      |                                                |
|                                               |              |            | 場址/設施水文介面<br>之評估與描述                           |                                               |                                                                                    |                                                |
| 地表生<br>物環境                                    | SI27         | SI20       | 環境演化後地表生<br>物棲息環境類型                           | 調整生物環境概<br>念模型                                | 用於建構生物環<br>境概念模型                                                                   | 4. 地<br>景生<br>物圈<br>系統<br>單元<br>演變<br>模擬<br>技術 |
|                                               |              |            | 鄰址半徑 10km 內<br>之交通及公共設施                       | 依最新調查資料<br>更新                                 | 場址特性參數技<br>術建置報告<br>2.3.1~6 節、<br>6.3.1 節、<br>7.3.1 節、<br>9.3.1~3 節與<br>10.3.1~7 節 | 1. 場址<br>條件描<br>述技術                            |
| 鄰址半徑 10km 內<br>之軍事設施及管制<br>措施                 |              |            |                                               |                                               |                                                                                    |                                                |
| 鄰址半徑 10km 內之<br>觀光休閒設施                        |              |            |                                               |                                               |                                                                                    |                                                |
| 場址所在鄉鎮與周遭<br>鄉鎮之人口資料                          |              |            |                                               |                                               |                                                                                    |                                                |
| 鄰址半徑 5 及 10km<br>同心圓內 16 個扇形<br>區之人口及土地資<br>料 |              |            |                                               |                                               |                                                                                    |                                                |
| 社會經<br>濟及生<br>態                               | 文獻研判         | SI21       | 鄰址半徑 10km 內<br>之交通及公共設施                       | 依最新調查資料<br>更新                                 | 場址特性參數技<br>術建置報告<br>2.3.1~6 節、<br>6.3.1 節、<br>7.3.1 節、<br>9.3.1~3 節與<br>10.3.1~7 節 | 1. 場址<br>條件描<br>述技術                            |
|                                               |              |            | 鄰址半徑 10km 內<br>之軍事設施及管制<br>措施                 |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 鄰址半徑 10km 內之<br>觀光休閒設施                        |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 場址所在鄉鎮與周遭<br>鄉鎮之人口資料                          |                                               |                                                                                    |                                                |
|                                               |              |            | 鄰址半徑 5 及 10km<br>同心圓內 16 個扇形<br>區之人口及土地資<br>料 |                                               |                                                                                    |                                                |

| 項目         | 資料來源<br>(現況)           | 產出參<br>數編號          | 主要參數類型                            | 後續執行工作                                 | 備註                               | 對應<br>SR-PSU<br>技術                                                     |
|------------|------------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|            |                        |                     | 鄰址半徑 50km 內人<br>口數 1 萬以上的城鎮<br>資料 |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        |                     | 地質與礦產資源資訊                         |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        |                     | 水資源與使用狀況                          |                                        |                                  |                                                                        |
| 交通運<br>輸路線 | 文獻研判                   | SI22                | 場址及鄰近區域的<br>交通系統說明                | 依最新調查資<br>料更新                          | 場址特性參數<br>技術建置報告<br>13. 3. 1~3 節 | 1. 場址<br>條件描<br>述技術                                                    |
|            |                        | 運輸能力、運送工具<br>與流量    |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 運送路徑半徑 5km<br>內之資訊  |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
| 氣象資<br>料統計 | 文獻研判                   | SI23                | 氣團種類                              | 依調查資料更<br>新分析結果                        | 場址特性參數<br>技術建置報告<br>4. 3. 1~3 節  | 2. 場址<br>條件與<br>系統演<br>變發展<br>技術                                       |
|            |                        | 天氣特徵                |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 一般氣流型態              |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 氣溫                  |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 濕度                  |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 降雨量                 |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 降雨強度                |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 大尺度之大氣過程            |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 局部氣象條件關係            |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 空氣品質                |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 場址地區季節性與<br>年極端氣候現象 |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 歷史最大降水量             |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 歷史最高及<br>最低溫度       |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 歷史最大風速              |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
| 全球暖<br>化現象 | 文獻研判                   | SI24                | 氣溫特性                              | 依 IPCC 與<br>TAICCAT 最新<br>報告更新分析<br>結果 | 用於建構地質<br>環境模型                   | 4. 地<br>景<br>生物<br>圈<br>系<br>統<br>單<br>元<br>演<br>變<br>模<br>擬<br>技<br>術 |
|            |                        | 降雨特性                |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
|            |                        | 海水面變化               |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
| 冰河氣<br>候循環 | 文獻研判                   | SI25                | 古氣候演化                             | 建議進行本土<br>化研究後更新                       | 用於建構地質<br>環境概念模型                 | 4. 地<br>景<br>生物<br>圈<br>系<br>統<br>單<br>元<br>演<br>變<br>模<br>擬<br>技<br>術 |
|            |                        | 冰河週期                |                                   |                                        |                                  |                                                                        |
| 海水面<br>變化  | SI23、<br>SI24、<br>SI25 | SI26                | 海水面變化                             | 建議進行本土<br>化研究後更新                       | 用於建構地質<br>環境概念模型                 | 4. 地<br>景<br>生物<br>圈<br>系<br>統<br>單<br>元<br>演<br>變<br>模<br>擬<br>技<br>術 |
|            |                        |                     | 全球暖化現象、冰河<br>氣候循環參數               |                                        |                                  |                                                                        |

| 項目               | 資料來源<br>(現況)           | 產出參<br>數編號 | 主要參數類型                | 後續執行工作          | 備註                                          | 對應<br>SR-PSU<br>技術                             |
|------------------|------------------------|------------|-----------------------|-----------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 環境<br>特徵         | SI9、SI26               | SI27       | 現況與未來氣候特<br>徵、海水面變化參數 | 依環境特徵選<br>用參數   | 綜合現況與未<br>來環境演變分<br>析，依FEP訂定<br>設計與替代情<br>節 | 4. 地景<br>生物圈<br>系統單<br>元演變<br>模擬技<br>術         |
| 生物圈<br>核種<br>濃度  | SI17、<br>SI18、<br>SA11 | SA12       | 含水層中核種濃度              | 依相關設定進<br>行分析   | 依遠場核種傳<br>輸模擬與水文<br>地質模型進行<br>計算            | 6. 生物<br>圈核種<br>傳輸模<br>式模擬<br>技術               |
|                  |                        |            | 河川中核種濃度               | 依相關設定進<br>行分析   | 依遠場核種傳<br>輸模擬與地表<br>水文特性進行<br>計算            |                                                |
| 關鍵群<br>體生活<br>環境 | SI20、SI<br>21、SI 22    | SA13       | 嚥入與吸入的曝露<br>途徑        | 依相關設定進<br>行分析   | 依不同情節設<br>定曝露途徑                             | 5. 生物<br>圈之特<br>徵事件<br>作用與<br>曝露途<br>徑分析<br>技術 |
| 遷移<br>因子         | 文獻研判                   | SA14       | 遷移因子                  | 依相關研究成<br>果選用參數 | 依生物圈曝露途<br>徑與文獻資料進<br>行參數選擇                 | 7. 生物<br>圈評估<br>參數建<br>立技術                     |
| 劑量轉<br>換因子       | 文獻研判                   | SA15       | 劑量轉換因子                | 依相關研究成<br>果選用參數 | 依生物圈曝露途<br>徑與文獻資料進<br>行參數選擇                 | 7. 生物<br>圈評估<br>參數建<br>立技術                     |
| 生物圈<br>核種傳<br>輸  | SA12、<br>SA13、<br>SA14 | SA16       | 核種濃度                  | 依相關設定進<br>行分析   | 以 GoldSim 模式<br>計算曝露途徑各<br>受體之核種濃度          | 8. 核種<br>外釋後<br>分析技<br>術                       |
| 關鍵群<br>體有效<br>劑量 | SA15、<br>SA16          | SA17       | 有效劑量                  | 依相關設定進<br>行分析   | 以 GoldSim 模<br>式計算關鍵群<br>體有效劑量              | 8. 核種<br>外釋後<br>分析技<br>術                       |

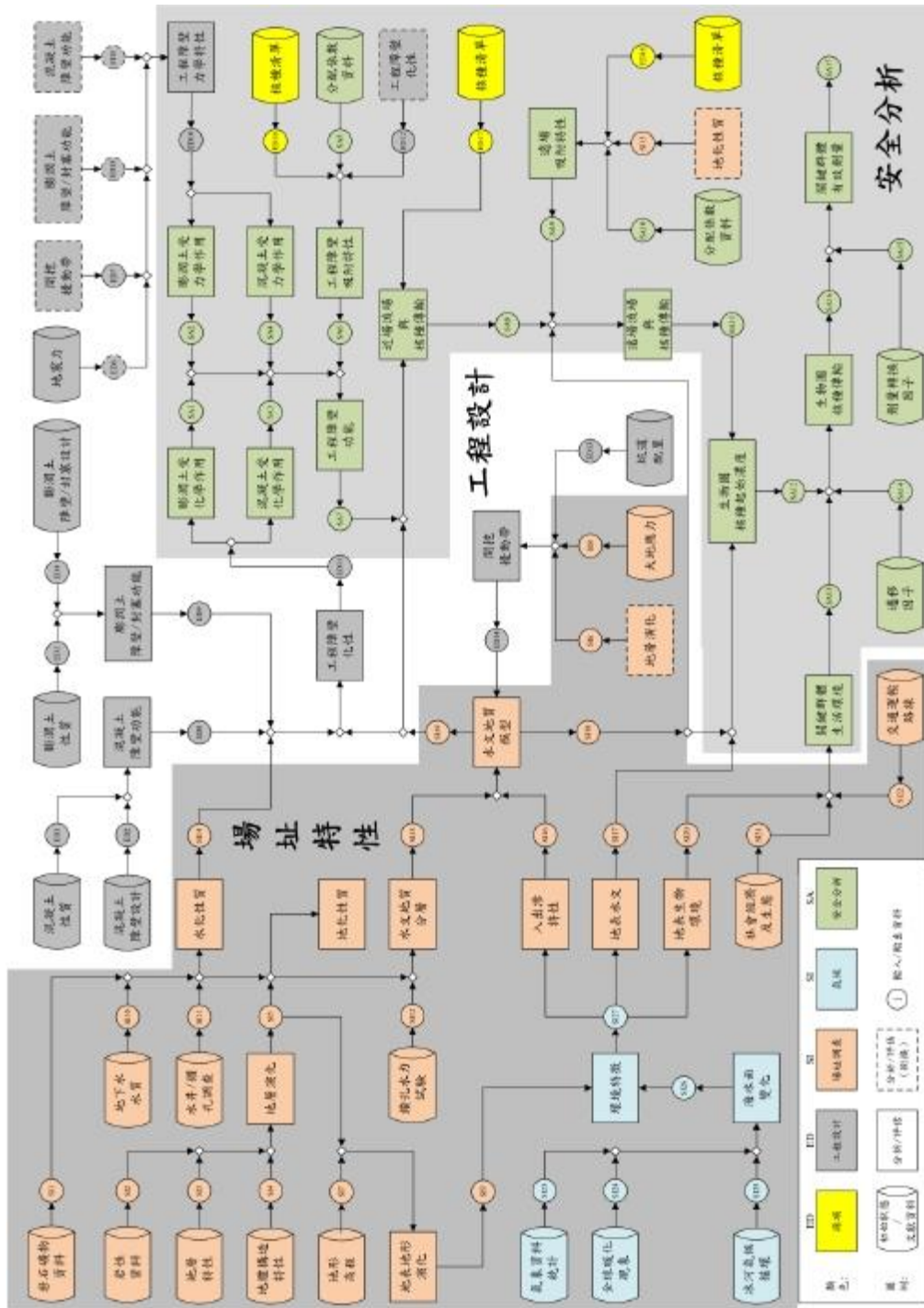


圖78 準備階段處置工作流程示意圖

依據瑞典低放坑道處置有關生物圈安全評估共十項技術，包括：1. 場址條件描述技術，2. 場址條件與系統演變發展技術，3. 地景發展與土地利用模擬技術，4. 地景生物圈系統單元演變模擬技術，5. 生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術，6. 生物圈核種傳輸模式模擬技術，7. 生物圈評估參數建立技術，8. 核種外釋後分析技術，9. 不確定性分析技術，

10. 國際經驗技術。前面說明已針對我國兩處低放建議候選場址與該 8 項有關生物圈安全評估技術對應相關性探討。

針對第 9 點之不確性分析技術，目前我國低放建議候選場址有關安全分析所涉及不確定性，僅說明未來將針對相關參數不確定性納入安全分析考量。包括：安全分析相關設定、作用過程與分析結果進行敏感度與不確定分析。生物圈參數選用不確性、特徵化概念不確定性及數學模型設定不確定性進行分析。但並未提出將發展何種技術或利用何種技術，對於系統不確定性、概念不確地性及資料不確定性進行分析。瑞典低放坑道處置生物圈安全評估皆提出不確性分析技術方法及結果，這是目前與瑞典低放坑道處置有關第 9 點之不確性分析技術之差異。

對於第 10 點之國際經驗技術引入，目前我國低放建議候選場址，並未提出能參與國際合作計畫之科學和現場調查工作，與生物圈環境安全之情節分析及安全評估國際合作計畫工作，目前未來提出的國際經驗技術引入，這是目前與瑞典低放坑道處置有關第 10 點之國際經驗技術引入之差異。

### 3.4. 本章小結

本章說明依據 SR-PSU 之評估背景及評估技術，研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術，包括：1.場址條件描述技術，2.場址條件與系統演變發展技術，3.地景發展與土地利用模擬技術，4.地景生物圈系統單元演變模擬技術，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析技術，6.生物圈核種傳輸模式模擬技術，7.生物圈評估參數建立技術，8.核種外釋後分析技術，9.不確定性分析技術，10.國際經驗技術引入。

SFR 處置場址的環境條件與世界其他國家（如美國 Yucca Mountain）不同，SR-PSU 安全評估計畫安全報告中所用的模式，係採用符合瑞典國內處置系統地質狀況的模式，並以自主開發方式發展，部分模式採用美國曾應用過之模式，如 PHREEQC、PHAST。由於 Forsmark 處置場址位於波羅的海海岸，非美國沙漠大陸型氣候特性，而是屬於海域性氣候條件，並考慮未來冰川運動和海水入侵對處置場系統的影響，有些模式雖非自主發展，但應用前皆經過驗證程序。表 8 列出 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式，包含廢棄物、近場、遠場及生物圈，很多模式都是自主開發，模式測試與

應用，並沒有使用美國 Yucca Mountain 計畫曾經使用過之 Goldsim 商用軟體，由於 GoldSim 模式之輻射劑量評估之應用，必須由使用者定義及輸入，才能進行傳輸途徑及輻射劑量評估模擬，且 Goldsim 模式並無劑量轉換因子之資料庫及風險評估斜率因子([mrem pCi<sup>-1</sup>] 或 [risk pCi<sup>-1</sup>])資料庫，必須利用人為給定該參數。且其各種傳輸途徑必須使用者自行設定，而有效劑量之算式亦需人為給定。基於各種因素，SR-PSU 採用符合瑞典國內處置系統地質狀況以自主開發方式發展，部分模式採用美國曾應用過之模式。

美國 NRC 提出低放射性廢棄物最終處置輻射劑量評估安全審查模式主要為：GOLDSIM、RESRAD(Onsite) 6.5 and RESRAD-OFFSITE、FRAMES and GENII 及 AMBER 模式。經蒐集 GOLDSIM、RESRAD(Onsite) 6.5 and RESRAD-OFFSITE、FRAMES and GENII 及 AMBER 模式之輻射劑量與風險評估安全相關資料，該類模式各有其優缺點、設定及假設條件，於各類模式之適用條件下，國內處置場址特性及處置方式相近之場址所採用。

本章研析之低放坑道處置生物圈安全評估技術，需要利用表 8 各種模式模擬或前述輻射劑量評估安全審查模式方能完成。未來可依國際經驗技術引入方式參考國外技術方法建立我國生物圈安全評估分析技術。



表 8 SR-PSU 安全評估計畫安全報告 SFR 處置場址安全評估所應用的模式

| 模式功能與使用方式                    | 模式名稱                                                        | 評估模式流程圖(圖 79)編號         | 詳細報告名稱                                                                                                  |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>廢棄物</b>                   |                                                             |                         |                                                                                                         |
| 反應器壓力容器的腐蝕                   | Ecolego                                                     | 95                      | <b>Radionuclide transport report</b><br>(SKB, 2014f)                                                    |
| <b>近場</b>                    |                                                             |                         |                                                                                                         |
| 瀝青膨脹評估                       | Comsol Multiphysics                                         | 150                     | von Shenck and Bultmark 2014                                                                            |
| 處置場 pH 演化                    | PHREEQC                                                     | 51, 133, 174, 206       | Cronstrand 2014                                                                                         |
| 處置場氧化還原演化                    | PHREEQC                                                     | 49                      | Duro et al. 2012                                                                                        |
| 近場水文                         | Comsol Multiphysics                                         | 50, 104, 109, 153, 176  | Abarca et al. 2014                                                                                      |
| 鋼筋鏽蝕和混凝土化學退化                 | PHAST                                                       | 38                      | Höglund 2014                                                                                            |
| 液相核種傳輸                       | Ecolego                                                     | 76                      | <b>Radionuclide transport report</b><br>(SKB, 2014f)                                                    |
| 地震加載                         | ADINA                                                       | 25                      | Georgiev 2013                                                                                           |
| <b>地質圈</b>                   |                                                             |                         |                                                                                                         |
| 水文地質                         | Darcy Tools                                                 | 7, 9, 11, 12, 84, 135   | Odén et al. 2014                                                                                        |
| 液相核種傳輸                       | Ecolego                                                     | 16                      | <b>Radionuclide transport report</b><br>(SKB, 2014f)                                                    |
| 岩塊沉降與開挖擾動帶                   | 3DEC                                                        | 6, 26                   | Mas Ivars et al. 2013                                                                                   |
| <b>氣候</b>                    |                                                             |                         |                                                                                                         |
| 較長期的間冰期條件下氣候條件               | CCSM4, LOVE-CLIM, Numerical GIA model, Numerical permafrost | 13, 18, 65, 72, 74, 128 | Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010, <b>Climate report</b> (SKB, 2014b), Hartikainen et al. 2010 |
| 最低氣溫在下個 60,000 年             | CCSM4, LOVE-CLIM                                            | 66, 210                 | Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010                                                              |
| 潛在的永凍土                       | CCSM4, LOVE-CLIM, Numerical permafrost model                | 188                     | Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010, Hartikainen et al. 2010                                     |
| 海岸線演化                        | Numerical GIA model                                         | 190                     | <b>Climate report</b> (SKB, 2014b)                                                                      |
| Weichselian 冰河氣候週期的情況下代表自然變化 | Numerical GIA model, Numerical permafrost model             | 191, 196                | <b>Climate report</b> (SKB, 2014b), Hartikainen et al. 2010                                             |
| Weichselian 冰蓋發展             | Numerical ice sheet model (UMISM)                           | 69, 142, 193            | <b>Climate report</b> (SKB, 2014b)                                                                      |
| Weichselian 多年凍土發展           | CCSM4, LOVE-CLIM                                            | 192                     | Brandefelt et al. 2013, Goosse et al. 2010                                                              |
| Weichselian 海岸線演化            | Numerical GIA model                                         | 194                     | <b>Climate report</b>                                                                                   |
| <b>生物圈</b>                   |                                                             |                         |                                                                                                         |
| 生物圈單元系統的識別                   | ArcGIS                                                      | 103                     | <b>Biosphere synthesis report</b> , Brydsten and Strömgren 2013                                         |
| 景觀模型                         | ArcGIS                                                      | 1, 52, 54, 99, 164      | <b>Biosphere synthesis report</b> , Strömgren and Brydsten 2013, Sohlenius et al. 2013                  |
| 核種傳輸與劑量                      | Ecolego                                                     | 212                     | <b>Radionuclide transport report</b>                                                                    |
| 地面水文                         | MIKE SHE                                                    | 138, 173                | <b>Biosphere synthesis report</b> , Werner et al. 2013a                                                 |

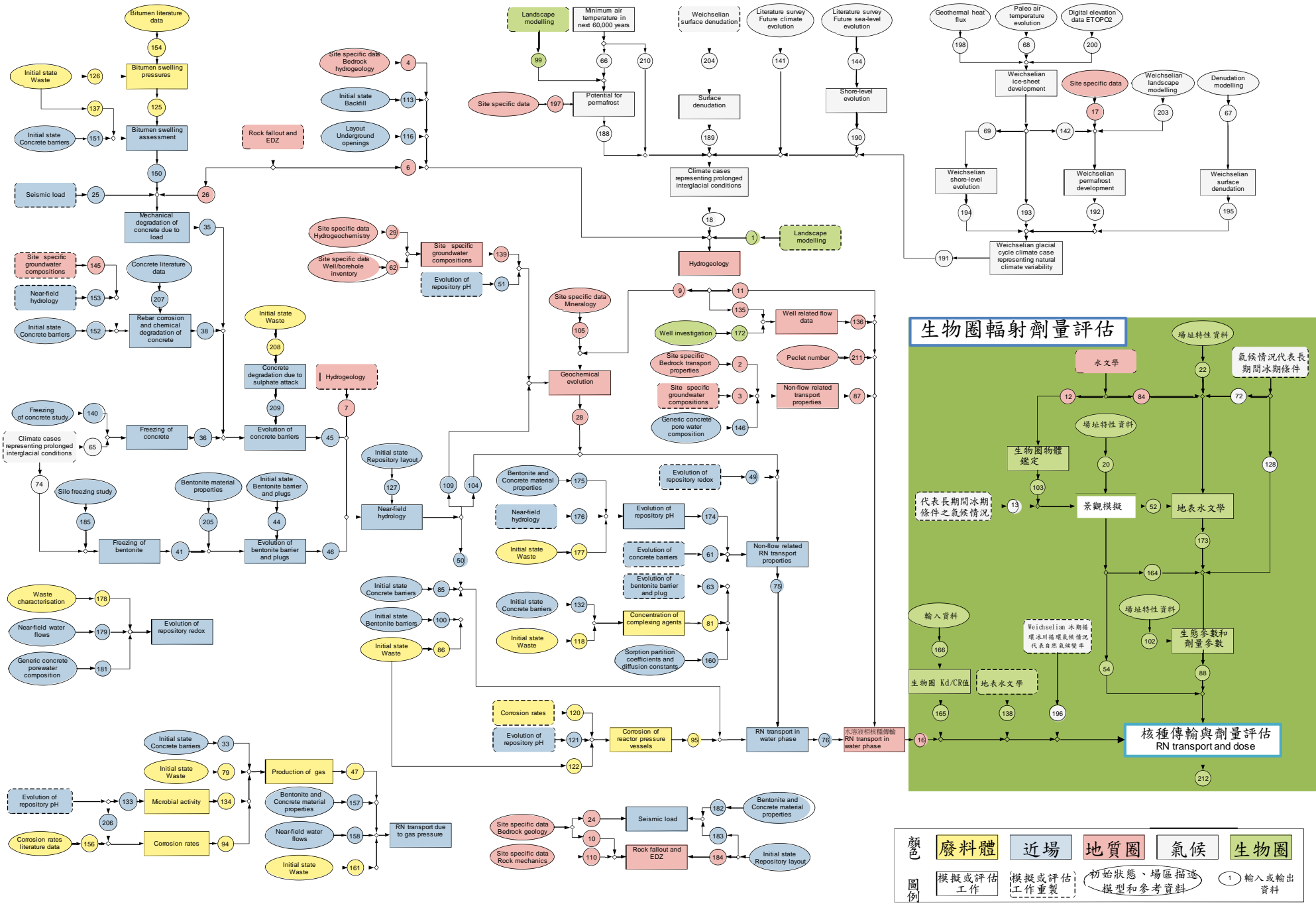


圖 79 SR-PSU 安全評估計畫廢棄物、近場、遠場地質圈、生物圈與氣候之評估模式流程圖(AMF)

## 第4章國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性探討

本項工作針對：1.場址目前的條件與描述 2.場址條件與系統演變發展 3.模擬地景發展與土地利用 4.模擬地景中的生物圈系統單元演變 5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析 6.生物圈核種傳輸模式 7.生物圈評估之參數使用 8.核種釋出後之分析 9.不確定性討論。本計畫將根據前述 TR-14-06 之 SR-PSU 生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性進行探討，並研析我國應加強建置之驗證項目，並針對生物圈安全評估技術需要驗證項目提出建議。

### 4.1 「場址目前的條件與描述」驗證項目關聯性及適用性探討

#### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：場址之地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、水域生態系統、陸域生態系統、井和水資源管理、人口和土地使用。

#### 2. 我國應加強建置之驗證項目

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估之生態著重在提供場址及附近地區之生態調查資料，包括場址半徑五公里範圍之主要生物種類、數量、分布、組成、棲息地，及可能影響處置場安全之生物活動與人為活動等。以場址半徑五公里範圍為考慮範圍。

SR-PSU 生物圈系統之冰期後的隆起作用與地勢平坦地區的結合，導致在該地區海岸線迅速位移。其結果是，當代土地生態系統是年輕的，海底新領土不斷湧現，形成新的水域和濕地。其分析超過場址半徑五公里範圍之海域生態系統(依據圖 46 至圖 55 之示意，其海域生態系統生物圈系統最遠處，約位於場址外不超過 10 公里範圍)、水域生態系統、陸域生態系統之生物種類、數量、分布、組成、棲息地，及可能影響處置場安全之生物活動與人為活動。該超過場址半徑五公里範圍之生物圈系統係屬於核種於遠場遷移傳輸及生物圈曝露途徑的範圍。

#### 3. 驗證項目之適用性

SR-PSU 生物圈系統超過場址半徑五公里範圍之海域生態系統、水域生態系統、陸域生態系統我國尚缺乏完整說明。建議若屬核種於遠場遷移傳輸至生物圈之曝露途徑範圍，

應納入。

#### 4.2 「場址條件與系統演變發展」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：驅動場址演變發展的主要作用、氣候變化和氣候有關作用、地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、水域生態系統、陸域生態系統。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估尚無對於「場址條件與系統演變發展」提出驗證。建議場址條件與系統演變發展建議考慮 SR-PSU 生物圈安全評估技術納入。地景調查項目以水域環境、陸域生態系統及地形地貌調查，對於生物圈系統受到氣候變化和氣候有關作用造成之演變影響，建議應建立其驗證項目。

##### 3. 適用性之驗證項目

目前我國對於長期氣候演化資訊的論證與技術建置，特別是長期氣候演化對處置設施的長期安全功能影響較為欠缺。建議我國應以水域環境、陸域生態系統及地形地貌之地景調查為主，並研究氣候變化和氣候有關作用對於生物圈系統演變之影響。

#### 4.3 「模擬地景發展與土地利用」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：地景、生態系統和現狀地景、目前的土地使用情況、歷史地景、未來地景、未來耕地分配、未來的濕地和土地利用、氣候變化、地景發展模式模擬、評估未來地景的不確定性。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估尚無對於「模擬地景發展與土地利用」提出驗證。建議我國應發展地表地形地貌、水域環境演變與環境變遷，以能掌握生物圈環境之變化。

##### 3. 適用性之驗證項目

SR-PSU 之地景幾何形狀的連續變化是由風化層湖泊發展模式 (RLDM) 模擬及海域和湖泊水域模塊隨時間變化的輸出的組合，產生表面地質的三維空間，由這些預測結果及圖面顯示，例如水深、海岸線存在和湖泊流域的位置，可以生成表土土壤和地表植被。我國低放處置最終處置位置，建議應發展地表地形地貌、陸域及水域環境演變與環境變遷模

擬技術，若於離島環境更需要考慮海域生態地景演變發展，並參考 SR-PSU 生物圈安全評估有關地景發展與土地利用演變分析技術。

#### 4.4 「模擬地景中的生物圈系統單元演變」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：水文輸入數據、地下水流模擬、生物圈系統單元的幾何特徵及識別、生物圈系統單元的時間發展、產生的盆地和生物圈系統單元、替代系統單元劃定。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

從處置場址之地下水流出可藉由水文建模方式模擬。這些流出區域的地景可能是放射性核種從處置場址釋出後達到生物圈的部分，這些在放射性核種傳輸和劑量評估的地區目前被稱為生物圈系統單元。放射性核種隨著地下水流入與流出生物圈系統單元，可以被持留住，但也可以與相鄰的生物圈系統單元經由地表和地下水傳送過程產生核種積聚和/或再傳輸。SR-PSU 已建立生物圈系統單元配置和相關集水區劃定。

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估尚缺乏核種遷移傳輸至生物圈系統之生物圈地景演變模擬。

##### 3. 適用性之驗證項目

我國低放建議候選場址涉及生物圈安全評估技術已建立環境特徵，已依綜合現況與未來環境演變分析，依 FEP 訂定設計與替代情節，並建立現況與未來氣候特徵、海水面變化參數。我國已考慮地景中的生物圈系統單元演變，對於模擬地景中的生物圈系統單元演變建議考慮 SR-PSU 生物圈安全評估技術納入。

#### 4.5 「生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：鑑定對於核種傳輸及生物圈中核種的累積和曝露重要的作用和特徵、掌握潛在與安全有關的生物圈 FEPs、曝露途徑分析、生物圈計算情節案例。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

曝露途徑的過程係指放射性核種從場址釋出至地質圈，經由地表生態系統到造成輻射曝露的生物群（人類和非人類生物）。SR-PSU 的曝露途徑的要素，包括：（1）放射性核種源或釋出（2）核種在地表系統環境之遷移結果（3）曝露區域（4）輻射進入生物體的曝露途徑或方式，即無論是外部曝露於環境介質中的放射性核種或由生物體吸收放射性核種造

成的內部曝露（5）潛在可能曝露的種群。

放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件與作用(FEPs)與模式發展建議，提供生物圈評估之途徑路線圖、曝露途徑分析和傳輸至受影響最大人類群體之劑量分析。

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估尚缺乏針對放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件與作用(FEPs)分析。

### 3. 適用性之驗證項目

我國低放建議候選場址涉及生物圈安全評估技術已建立關鍵群體生活環境，已依不同情節設定曝露途徑，如嚥入與吸入的曝露途徑。我國已考慮放射性核種傳輸至生物圈模型的之生物圈特徵、事件與作用(FEPs)，但對於 FEPs 與所選取之曝露途徑之相關性，哪些 FEPs 重要與不重要，與生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，建議考慮 SR-PSU 生物圈安全評估技術納入。

## 4.6 「生物圈核種傳輸模式」驗證項目關聯性及適用性探討

### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：傳輸模式的概述、區塊模式、水域生態系統模式、陸域生態系統模式、水文和平流傳輸、計算未來的曝露量。

### 2. 我國應加強建置之驗證項目

SR-PSU 生物圈的放射性核種的傳輸模型是以 SR-Site 評估模型為基礎使用相對應的生物圈模型，包括：1.生物圈系統單元隨著海岸線位移和生態系統演替而連續性變化發展，2.放射性核種隨著時間變化於地質圈系統藉由地下水流動而釋出，且核種分佈在非均質地景，3.核種之傳輸、累積和放射性核種的衰變具有不同的生物地球化學性質，4.放射性核種與水在不同部分地景之間傳輸係由於陸域環境形成的結果，5.在地景區域之未來居民曝露和劑量計算。

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(如海域、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。

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估對於生物圈核種傳輸模式之項目未臻完整。

### 3. 適用性之驗證項目

我國低放建議候選場址涉及生物圈安全評估技術已建立生物圈核種濃度，已依遠場核

種傳輸模擬與水文地質模型進行計算，但並未考慮隨著海岸線位移和生態系統演變，建議考慮 SR-PSU 生物圈安全評估技術納入。

#### 4.7 「生物圈評估之參數使用」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：參數化和參數概述、選擇參數值和概率密度函數的方法、參數說明等。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估對於生物圈評估之參數使用未臻完整。

##### 3. 適用性之驗證項目

我國低放建議候選場址涉及生物圈安全評估技術已建立有關參數類型，依生物圈曝露途徑與文獻資料進行參數選擇，如：遷移因子、劑量轉換因子等，該參數係為 SR-PSU 生物圈安全評估參數之一部分，建議考慮 SR-PSU 生物圈安全評估之參數使用技術納入，以考慮更完整的參數使用。

#### 4.8 「核種釋出後之分析」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：人類曝露、與以前的安全評估比較、生物圈中的傳輸和曝露分析、氣候計算案例比較、參數不確定性的影響、其他曝露途徑分析。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估尚缺乏與以前的安全評估比較、氣候計算案例比較等項目。

##### 3. 適用性之驗證項目

對於氣候計算案例對於核種釋出後之分析未臻完整，建議考慮 SR-PSU 生物圈安全評估技術納入。

#### 4.9 「不確定性討論」驗證項目關聯性及適用性探討

##### 1. SR-PSU 生物圈安全評估技術

本技術需提出：SR-PSU 生物圈建模、處理和評估不確定性。

##### 2. 我國應加強建置之驗證項目

經綜合比較其關連性，我國低放坑道處置生物圈安全評估尚缺乏系統不確定性、概念

不確地性及資料不確定性，其中長期氣候演化屬於系統不確定性，對於生物圈安全之不確定性評估是我國應加強建置之驗證項目。

### 3. 適用性之驗證項目

情節的選擇也可以視為系統不確性的來源之一，可以透過如系統性的情節篩選、安全指標來篩選安全相關情節、採用上限值計算(類似極端值概念)、品質保證措施來確保 FEPs 處裡、外部審查等，進行系統不確定性分析。內部作用，利用作用報告(process report)來詳細界定各作用之不確定性，內部作用間的相互影響有時也可以看成是系統不確定性之一，外部審查也是不確定性管理的手段之一；外部作用不確定性的管理比較像是程式化的管理，可以透過先進的模式來量化外部作用的不確定性，以進行概念不確地性不確定分析。藉由各領域專家的外部審查來管理安全評估所使用資料的不確定性，安全評估數學模式使用資料來估算處置設施演變的劑量與風險，因此應有完整的模式文件資料與如何避免人為輸入錯誤的機制，以進行資料不確定性分析。



## 第5章 我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項建議

### 5.1 低放處置技術建置計畫有關生物圈安全評估技術

針對低放射性廢棄物處置場址安全輻射劑量評估安全審查，係為審照作業重要之程序過程。藉由評估瞭解有多少的核種濃度可由近場釋出遷移至生物圈，與釋出的核種濃度有多少的輻射劑量對於人體有影響，將可決定低放處置設施功能及安全處置環境之是否能滿足處置要求。因此所有的低放處置設施必須被管理及處置到對人體及環境為最低危害劑量，0.25 mSv/year 是目前的所規定劑量限值，並應合理抑低。本計畫針對 SR-PSU 有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估技術報告，研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項、研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術、國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性及適用性探討，提出國內低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項，俾利藉由生物圈安全評估是否合乎監管要求，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安全標準，提出我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項。

國內於場址選定前積極逐項建置處置技術，俾利場址特性調查、處置設施設計及安全評估之遂行，建議我國應提出低放射性廢棄物最終處置技術發展處置技術建置計畫，建議該計畫之內容，應明確提出研究發展目標與架構，低放處置安全技術、技術開發目標與所需技術，場址特性調查與特徵化技術、處置設施工程設計技術與安全分析技術等，且須說明準備階段與調查階段所需技術項目以及關鍵技術建置路徑、工作規劃、關鍵技術建置現況等。對於低放射性廢棄物最終處置技術發展處置技術建置計畫有關生物圈安全評估技術議題，審查重點與注意事項建議如下：

#### 1. 「特徵、事件及作用(FEPs)資料庫」建置

FEPs 資料庫的建置需與後續安全評估分析案例有所關聯。應針對 FEPs 資料庫逐項逐個說明是否已有模式模擬分析，FEPs 資料庫內有那些可以組合出安全評估分析案例，忽略之 FEPs，建議應有分析結果證明是可忽略的因素。

#### 2. 參考演化研究

由於目前尚未公投通過之確認場址位置，未能對於場址外之生物圈環境系統進行調查及地景演變研究。但放射性核種曝露的途徑是經由攝食水和食物，因此，生物群的分布和

食物鏈網相互作用是重要的。此外，生物群可能會影響非生物群中的放射性核種分佈，如擾亂沉積物或影響水分組成，人類行為對生物圈環境可能亦有影響，例如經由引入生物種群。建議參照瑞典 SKB SR-PSU 生物圈安全評估，針對不同地景，包括陸域(含森林、農田、牧場等)、水域(包含湖泊、河流、沼澤及海域)等，評估生態系統中食物鏈結構及人類行為對食物鏈之影響，建立陸域、水域(包含海域)生態系統演變模型及概念模型，以能模擬核種於生態系統中之傳輸及分布，建立生物圈各種物理場(包含水力或是熱力、力學)、化學場之水文地質化學生物等作用之地景演化生物圈模型，以模擬核種於生物圈環境之傳輸，並假設居民生活習慣，分析核種各種傳輸途徑對於人體之劑量，以評估關鍵群體所接受之劑量符合法規限值。

### 3. 生物圈情節分析與案例計算

對於核種自處置設施外釋流經地質圈後，將流至區域含水層，再依據不同的曝露途徑，計算關鍵群體的輻射曝露劑量。劑量評估所需參數值包括劑量轉換因子、遷移因子、濃縮係數、飲水量、呼吸量、畜產品的年攝取量、水產品的年攝取量、禽畜的年攝取量、農作物的年攝取量等，建議模擬參數及模擬條件以台灣之地形地貌及地景條件演變之狀態進行模擬，且建議未來可將自行進行試驗建立參數納入未來研發需求。

### 4. 安全評估之不確定性

低放處置長期安全性係透過安全分析作業進行確認。然因所涉及之評估時間尺度達千年以上，使得相關參數有其不確定性，因此審查安全分析時須將參數不確定性納入考量。利用更廣泛的觀點，針對安全分析之相關設定、作用過程與分析結果進行敏感度與不確定分析為必要之分析技術。

需對於源項、近場、遠場及生物圈，各分析域所含之各分析參數，以及其對應之不確定性來源探討、安全評估設定及與目前處理不確定性分析之方式，是否合理，進行審查確認。審查相關參數與模型特徵化之建置之不確定性，包括：參數選用不確性、特徵化概念不確定性。並審查不確定性可能產生之誤差之來源，如來自數學模型設定。

### 5. 安全評估之參數使用

審查低放射性廢棄物最終處置安全評估之參數使用，包括廢棄物(A類、B類和C類廢棄物之源項)、工程障壁(處置窖內堆放廢棄物之分析單元、劣化評估、吸附功能、地下

水流場)、地質圈(地下水流場、吸附功能 )及生物圈(參數值包括劑量轉換因子、遷移因子、濃縮係數、飲水量、呼吸量、畜產品的年攝取量、水產品的年攝取量、禽畜的年攝取量、農作物的年攝取量等)等。須注意安全評估所需之技術項目及該技術所需之參數，並作為試驗調查依據，以利未來使用與場址特性有關之本土數據。

## 5.2 低放處置安全分析報告審查導則有關生物圈安全評估審查重點或注意事項建議

本計畫對於低放處置安全分析報告審查導則有關生物圈安全評估，提出以下修正建議，並提出現行條文及修正說明，如下。

| 修正條文                                                                                                                                                                                                         | 現行條文                                                                                                                                                                           | 說明                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>7.1.5.2 程序審查</p> <p>審查人員應查核安全分析報告內容是否符合上述審查範圍所規定之基本要求，並決定資料的詳細程度是否足以讓審查人員進行細節技術審查。審查人員應確認本章之內容包含地下水、空氣、地表水、固體與其他傳輸機制，以及直接輻射和向天輻射對人類所形成之輻射劑量，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。<b>確認是否包含生物圈環境系統調查及地景演變研究。</b></p> | <p>7.1.5.2 程序審查</p> <p>審查人員應查核安全分析報告內容是否符合上述審查範圍所規定之基本要求，並決定資料的詳細程度是否足以讓審查人員進行細節技術審查。審查人員應確認本章之內容包含地下水、空氣、地表水、固體與其他傳輸機制，以及直接輻射和向天輻射對人類所形成之輻射劑量，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數。</p> | <p>生物群的分布和食物鏈網相互作用是重要的。此外，生物群可能會影響非生物群中的放射性核種分佈，如擾亂沉積物或影響水分組成，人類行為對生物圈環境可能亦有影響，例如經由引入生物種群。建議參照瑞典 SKB SR-PSU 生物圈安全評估，針對不同地景，包括陸域(含森林、農田、牧場等)、水域(包含湖泊、河流、沼澤及海域)等，評估生態系統中食物鏈結構及人類行為對食物鏈之影響，建立陸域、水域(包含海域)生態系統演變模型及概念模型，以能模擬核種於生態系統中之傳輸及分布，建立生物圈各種物理場(包含水力或是熱力、力學)、化學場之水文地質化學生物等作用之地景演化生物圈模型，以模擬核種於生物圈環境之傳輸，並假設居民生活習慣，分析核種各種傳輸途</p> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             | 徑對於人體之劑量，以評估關鍵群體所接受之劑量符合法規限值。 |
| <p>7.1.5.3 審查要點與接受標準</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>5. 其他傳輸機制：</p> <p>(1)加馬輻射的傳輸機制中，屏蔽增建因子與其數學模式、體外曝露模式、射源模式等輸入參數是否正確。</p> <p>(2)加馬輻射與生物傳輸之相關假設是否保守。</p> <p><b>6. 生物圈環境演變：</b></p> <p>(1)需有針對不同地景，包括陸域(含森林、農田、牧場等)、水域(包含湖泊、河流、沼澤及海域)等，評估生態系統中食物鏈結構及人類行為對食物鏈之影響，建立陸域、水域(包含海域)生態系統演變模型及概念模型，以能模擬核種於生態系統中之傳輸及分布。</p> <p>(2)建立生物圈各種物理場(包含水力或是熱力、力學)、化學場之水文地質化學生物等作用之地景演變生物圈模型，以模擬核種於生物圈環境之傳輸。</p> <p>(3)假設居民生活習慣，分析核種各種傳輸途徑對於人體之劑量，以評估關鍵群體所接受之劑量符合法規限值。</p> | <p>7.1.5.3 審查要點與接受標準</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>.</p> <p>5. 其他傳輸機制：</p> <p>(1)加馬輻射的傳輸機制中，屏蔽增建因子與其數學模式、體外曝露模式、射源模式等輸入參數是否正確。</p> <p>(2)加馬輻射與生物傳輸之相關假設是否保守。</p> | 將生物圈環境演變納入                    |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  |  |  |
|--|--|--|

本計畫提出前述修正建議內容，經於 107 年 9 月 3 日第三次工作會議討論，對於安全分析報告審查導則有關前述提出修正建議內容，經會議討論決議如下：

#### **7.1.5.2 程序審查**

審查人員應查核安全分析報告內容是否符合上述審查範圍所規定之基本要求，並決定資料的詳細程度是否能足以讓審查人員進行細節技術審查。審查人員應確認本章之內容包含地下水、空氣、地表水、固體與其他傳輸機制，以及直接輻射和向天輻射對人類所形成之輻射劑量，並描述各傳輸機制之概念模式、數學模式及分析所需之參數，**確認是否包含生物圈環境系統調查及地景演變研究。**

5.其他傳輸機制，包括直接輻射、向天輻射與**生物傳輸**：

.  
.

**(5)生物傳輸機制的分析，包含由處置設施遷移至其他區域的受污染生物，成為食物鏈的一環。**

#### **7.1.5.3 審查要點與接受標準**

.  
.

**6.生物圈環境演變：**

**(1)需有針對不同地景，包括陸域(含森林、農田、牧場等)、水域(包含湖泊、河流、沼澤及海域)等，評估生態系統中食物鏈結構及人類行為對食物鏈之影響，建立陸域、水域(包含海域)生態系統演變模型及概念模型，以能模擬核種於生態系統中之傳輸及分布。**

**(2)建立生物圈各種物理場(包含水力或力學)、化學場之水文地質化學生物等**

作用之地景演變生物圈模型，以模擬核種於生物圈環境之傳輸。

(3)依據居民生活習慣，分析核種各種傳輸途徑對於人體之劑量，以評估關鍵群體所接受之劑量符合法規限值。

## 第6章 結論與建議

本報告分析瑞典福斯馬克擴建 SFR 中低放處置場之 SR-PSU 安全評估計畫。本計畫蒐集 SR-PSU 主報告和主要參考報告清單，以 TR-14-06 之生物圈安全評估整合分析技術為研析要項，包括生物圈評估要項、場址地表水文與地下水文地質及化學特性、場址未來因為氣候條件變化及地表地下水文條件之演變、模擬地景發展與土地利用、模擬地景中的生物圈系統單元演變、生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析、生物圈核種傳輸模式、生物圈評估之參數使用、核種釋出後之分析、不確定性討論等。本計畫報告完成下列工作：

### 1. 完成研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項

本項工作針對：1.場址目前的條件與描述(地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統、井和水資源管理、人口和土地使用)，2.場址條件與系統演變發展(驅動場址演變發展的主要作用、氣候變化和氣候有關作用、地形和表土層、水文和化學、海域生態系統、湖泊生態系統、陸域生態系統)，3.模擬地景發展與土地利用(福斯馬克地景、生態系統和現狀地景、目前的土地使用情況、歷史地景、未來地景、未來耕地分配、未來的濕地和土地利用、氣候變化、地景發展模式模擬、評估未來地景的不確定性)，4.模擬地景中的生物圈系統單元演變(水文輸入數據、地下水流模擬、生物圈系統單元的幾何特徵及識別、生物圈系統單元的時間發展、產生的盆地和生物圈系統單元、替代系統單元劃定)，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析(鑑定對於核種傳輸及生物圈中核種的累積和曝露重要的作用和特徵、掌握潛在與安全有關的生物圈FEPs、曝露途徑分析、識別非人類生物群的途徑終點、生物圈計算情節案例)，6.生物圈核種傳輸模式(傳輸模式的概述、區塊模式、水域生態系統模式、陸域生態系統模式、水文和平流傳輸、計算未來的曝露量)，7.生物圈評估之參數使用(參數化和參數概述、選擇參數值和概率密度函數的方法、參數說明等)，8.核種釋出後之分析(人類曝露、非人類生物群曝露、與以前的安全評估比較、生物圈中的傳輸和曝露分析、氣候計算案例比較、參數不確定性的影響、其他曝露途徑分析)，9.不確定性討論(SR-PSU生物圈建模、處理和評估不確定性)，研析該TR-14-06報告關於生物圈安全評估技術提出相關審查要項。

### 2. 完成研析我國低放坑道處置生物圈安全評估技術

本項工作針對：1.場址條件描述技術，2.場址條件與系統演變發展技術，3.地景發展與土地利用模擬技術，4.地景生物圈系統單元演變模擬技術，5.生物圈之特徵事件作用與曝

露途徑分析技術，6.生物圈核種傳輸模式模擬技術，7.生物圈評估參數建立技術，8.核種外釋後分析技術，9.不確定性分析技術，10.國際經驗技術引入。根據前述TR-14-06之SR-PSU生物圈安全評估技術發展提出我國低放坑道處置生物圈安全評估技術。

### 3. 進行國際坑道處置生物圈安全評估驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性及適用性探討

本計畫根據前述TR-14-06之SR-PSU生物圈安全評估：1.場址描述，2.場址未來條件與系統演變發展，3.模擬地景發展與土地利用，4.模擬地景中的生物圈系統單元演變，5.生物圈之特徵事件作用與曝露途徑分析，6.生物圈核種模式，7.生物圈評估之參數使用，8.核種釋出後之分析，9.生物圈評估不確定性討論驗證項目與我國低放坑道處置生物圈安全評估之關聯性進行探討，並研析我國應加強建置之驗證項目。

### 4. 進行我國低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項建議

本計畫根據瑞典SR-PSU有關低放射性廢棄物坑道處置生物圈安全評估技術報告，研析國際坑道處置技術報告關於生物圈安全評估技術審查要項，提出國內低放坑道處置生物圈安全評估審查重點或注意事項，俾利藉由生物圈安全評估是否滿足管制要求，藉此了解處置場系統的安全功能是否合乎安全標準。



## 參考文獻

- 行政院原子能委員會放射性物料管理局，2011，參加美國德州安德魯低放射性廢棄物處置場審照研討會報告，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，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)，中華民國101年2月，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，2013，「低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」研究報告，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，2014，「103年度低放射性廢棄物處置安全管制技術發展 - 子計畫四：低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」研究報告，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，2015，「104年度低放射性廢棄物處置安全管制技術發展 - 子計畫四：低放射性廢棄物處置輻射劑量評估安全審查模式之研究」研究報告，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，2016，「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」研究報告，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，2017，「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 - 子計畫五：低放射性廢棄物坑道處置生物圈情節分析審查技術研究」研究報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局。
- 台灣電力公司，2017，LLWD1-SC-2016-02-V04-低放射性廢棄物最終處置技術評估報告。
- Altmann, S., 2008. 'Geo'chemical research: A key building block for nuclear waste disposal safety cases, *Journal of Contaminant Hydrology* 102, p174-179.
- Chang, Y.-S., et al., 1998, Evaluation of the Area Factor Used in the RESRAD Code for the Estimation of Airborne Contaminant Concentrations of Finite Area Sources, ANL/EAD/TM-82, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., July.
- Eckerman, K.F., and J.C. Ryman, 1993, External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil, Exposure to Dose Coefficients for General Application, Based on the 1987 Federal Radiation Protection Guidance, EPA 402-R-93-076, Federal Guidance Report No. 12, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation and Indoor Air, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1988, Limiting Values of Radionuclide Intake and Air Concentration and Dose Conversion Factors for Inhalation, Submersion, and Ingestion, EPA-520/1-88-020, Federal Guidance Report No. 11, prepared by Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- Eckerman, K.F., et al., 1999, Cancer Risk Coefficients for Environmental Exposure to Radionuclides, EPA-402-R-99-001, Federal Guidance Report No. 13, prepared by Oak

- Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., for U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2001, "Risk Assessment, Radionuclide Table Slope Factors Download Area," April 16. Available at <http://www.epa.gov/radiation/heat/download.htm>.
- Hull, L.C., Schafer A.L., 2008. Accelerated transport of <sup>90</sup>Sr following a release of high ionic strength solution in vadose zone sediments, *Journal of Contaminant Hydrology* 97, p135–157.
- ICRP(International Commission on Radiological Protection), 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 26; Annals of the ICRP 1)
- ICRP, 1979–1982, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30, Part 1 (and Supplement), Part 2 (and Supplement), Part 3 (and Supplements A and B), and Index, a report by Committee 2 of the International Commission on Radiological Protection, adopted by the Commission in July 1978, *Annals of the ICRP*, Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 1983, Radionuclide Transformations: Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38, *Annals of the ICRP*, Vols. 11–13, Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 60; Annals of the ICRP 21)
- ICRP, 1996, Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 – Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication 72, *Annals of the ICRP*, Vol. 26(1), Pergamon Press, New York, N.Y.
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Elsevier. (ICRP Publication 103; Annals of the ICRP 37(2-4)).
- SKB, 2013a. Biosphere parameters used in radionuclide transport modelling and dose calculations in SR-PSU. SKB R-13-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013b. Components, features, processes and interactions in the biosphere. SKB R-13-43, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2013c. The biosphere model for radionuclide transport and dose assessment in SR-PSU. SKB R-13-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014a. Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014b. Climate and climate related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- SKB, 2014c. FEP report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014d. Handling of future human actions in the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014e. Handling of biosphere FEPs and recommendations for model development in SR-PSU, SKB R-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014f. Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2014g. Safety analysis for SFR. Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Werner K, Sassner M, Johansson E, 2014. Hydrology and near-surface hydrogeology at 福斯馬克 – synthesis for the SR-PSU project. SR-PSU Biosphere. SKB R-13-19, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SSMFS 2008:1. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in nuclear facilities. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).
- SSMFS 2008:21. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten (Swedish Radiation Safety Authority).
- SSMFS 2008:37. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning 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).